

차세대 초전도 핵융합 연구장치 개발사업

Korea Superconducting Tokamak Advanced Research Project

가열장치 개발 · 제작

Development of Heating System

연구기관

한국원자력연구소

과 학 기 술 부

제 출 문

과학기술부 장관 귀하

본 보고서를 “차세대 초전도 핵융합 연구장치 개발” 사업중 “가열장치 개발·제작” 과제의 제 2단계 최종 보고서로 제출합니다.

2002년 7월

주관연구기관명 : 한국원자력연구소

주관연구책임자 : 홍 봉 근

연 구 원 : 곽종구, 김계령, 김성규, 배영덕, 송우섭
오병훈, 윤병주, 윤재성, 이광원, 인상렬
정기석, 정승호, 조용섭, 주명희, 최병호
한장민, 황철규, 고인수, 조무현, 황정연
오종석, 황운하, 강홍식, 박성주, 장성덕
손윤규, 최용준, 김승환, 박용정, 김귀년
박인호, 서윤호, 김근호

외 부 연 구 원 : 서성현, 장두희, 남선우, 서창석, 박미영
조용기, 장대식, 권종혁, 조찬길, 왕선정
이규동, 정성운, 유현종, 양동유, 구삼희
서우철, 이정균, 양종열, 이종열, 김창연
유승현, 권오영, 강동권, 박종남, 강현모
이영숙, 김국희, 김임경, 최유리, 배영순
Neeraj Nepal, 김창범, 이용환, 백채현
최은미, 이한구, 변칠구, 이운학, 이종혁
민충기, 최창호, 이재학, 이용운, 강덕중
박성태, 김광석, 박재안, 송인호, 신현석

공동연구기관명 : 포항공과대학교

공동연구책임자 : 남궁 원

보고서 초록

과제관리번호	17 - 3 - 1	해당단계 연구기간	1998. 9. 8 - 2002. 6. 7		단계 구분	(2 단계) / (2 단계)	
연구사업명	중 사업명	선도기술개발사업					
	세부사업명	차세대 초전도 핵융합 연구장치 개발 사업					
연구과제명	중 과제명	차세대 초전도 토카막 부대장치 개발					
	세부(단위)과제명	가열장치 개발·제작					
연구책임자	홍봉근	해당단계 참여연구원수	총 : 95 명 내부 : 40 명 외부 : 55 명	해당단계 연구비	정부: 16,414,000 천원 기업: 2,113,200 천원 계: 18,527,200 천원		
연구기관명 및 소속부서명	한국원자력연구소 /핵물리공학팀		참여기업명		(주)포스콘, (주)원신코퍼레이션, (주)한국전자진흥		
국제공동연구	상대국명 : 미 국	상대국연구기관명 : Princeton Plasma Physics Laboratory					
위탁연구	연구기관명 :		연구책임자 :				
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)					보고서 면수	835p	
<p>KSTAR 토카막에서 사용될 NBI, RF, LHCD, ECH 가열장치의 상세설계, 주요 부품들의 제작 및 특성시험을 수행하였다.</p> <p>NBI 가열장치의 경우, 300초 운전 가능한 65A, 120 kV급 대전류 이온원을 개발하였고, Calorimeter, Neutralizer, Bending Magnet, Ion Dump 등의 빔라인 부품들을 개발하였으며, 초고속 전류 스위치를 포함한 120 kV, 70 A, 300 초 운전의 고정밀 가속전원 등 이온원 전원들을 모두 국내 기술에 의해 설계하고 개발하였다. 또한, Cryosorption Pump를 개발하였으며, 이온원, 빔라인 부품 및 가속전원들의 성능검증을 위해 냉각수 설비 등을 포함한 NBI장치 Test Stand를 한국원자력연구소에 완성하여 빔인출 시험을 수행하였다.</p> <p>RF가열장치는 상세설계를 수행하고, 주요 Subsystem의 제작이 진행중이다. 300초 이상 운전이 가능한, 초 고출력밀도(10 MW/m²)와 운전중 가열 및 전류구동효율 조절능력을 갖는 고주파 안테나를 개발하였고, MW급 고출력 고주파 부품도 세계적으로 처음으로 300초 이상의 장 펄스 운전이 가능하도록 개발하였다. 고출력 RF파 발생장치의 기술개발에 있어서, 100 kW 송출계는 고주파 부품 시험에 활용, 출력 최적화를 통해 설계, 제작 및 운영 능력을 확보하였고, 300 kW 송출계의 제작을 완료하였다.</p> <p>500 kW ECH 장치 시스템 상세 설계는 완료하였으며, 본체의 핵심 부분을 확보하였다. ECH 장치의 84 GHz, 500 kW 마이크로파 발생장치인 Gyrotron tube는 미국 CPI사에서 제작되어 현재 참여 기업인 (주)포스콘에서 short pulse (20μs pulse, 60 Hz) 성능시험 중에 있다. Gyrotron tube의 short pulse 성능시험을 위해 Pulse modulator 와 Low ripple Acceleration power supply (주)포스콘에서 개발하였다. Gyrotron tube의 long pulse (2.0 sec) 테스트를 위한 85 kV, 30 A DC power supply 또한 (주)포스콘에서 개발되어 현재 성능시험 중에 있다. ECH 장치의 전송선 부품 일부는 확보하였고 잔여분은 현재 미국 General Atomics로부터 발주예정에 있다.</p> <p>2.0 MW LHCD 장치의 RF 주파수는 5.0 GHz로 결정하였고, 현재 LHCD 장치의 상세 설계는 Pro/Engineer 프로그램을 이용하여 수행 중에 있다. 5.0 GHz LHCD Launcher의 기본 설계는 HFSS와 ANSYS 프로그램을 이용하여 완성되었고, 미국 PPPL 연구소와 공동으로 공학설계에 착수하였다. 5.0 GHz RF source인 클라이스트론(klystron)은 일본 TOSHIBA사에서 개발될 예정이다.</p>							
색인어 (각 5개 이상)	한 글	핵융합, 가열, 전류구동, 중성입자빔, 고주파					
	영 어	fusion, heating, current-drive, neutral beam, radio frequency					

요 약 문

I. 제목

가열장치 개발.제작

II. 연구개발의 목적 및 중요성

본 연구에서는 차세대 초전도핵융합연구장치, KSTAR에 부착하여 국제수준급의 핵융합 실험연구를 가능케하는 장 펄스형 가열 및 전류구동장치들의 개발을 최종목표로 하고 있다. 국제수준급의 핵융합연구를 위해서는, 플라즈마를 충분히 가열하여 고온의 플라즈마를 만들고, 또한 비유도성 전류구동(non-inductive current drive)을 통해 플라즈마 전류의 연속적 유지가 가능토록 하는 준연속 운전용 중성입자빔 입사(NBI) 장치, 고주파(ICRF) 장치, 마이크로파(LHCD) 장치, mm-파 장치(ECH)의 개발이 필요하다. 또한, 핵융합로의 운전시나리오로 대두되는 차세대 토카막 플라즈마 연구를 위해, 국부적인 플라즈마 압력 및 전류의 제어, 변형이 요구되고 이를 위하여 각기 장점과 단점이 있는 메가와트급의 중성입자빔, RF파 및 마이크로파 가열 및 전류구동장치가 반드시 필요하며, 그 사용목적 및 물리변수에 따라 조합하여 사용하게된다.

KSTAR 토카막의 가열 및 전류구동 장치, NBI 장치는 주 가열장치로서의 역할과 전류구동, 밀도 및 전류밀도분포 제어, 연료공급의 역할을 하게되고, RF 장치는 이온/전자의 가열(ICRH; Ion Cyclotron Resonance Heating)과 전류구동(FWCD; Fast Wave Current Drive) 효율의 조절을 통한 전류밀도분포의 효과적인 제어에 사용된다. 또한 LHCD 장치는 정상상태(steady state)유지와 플라즈마 국부가열 및 전체가열을 통한 MHD 안정성을 최적화시키는데 사용되고, ECH 장치는 토카막 플라즈마의 발생초기에 중성기체의 이온화를 통하여 방전을 쉽게 유도함으로써 volt·sec를 절약하여 다양한 토카막 운전모드 설정에 기여할 수 있도록 하는데 필요하다.

본 장치들의 중요한 특성으로는 KSTAR가 목표로 하는 준연속 운전이 가능하도록 운전시간이 300초대 수준이 되어야 한다는 것이다. 이를 실현하기 위하여 세계적으로 확립되어 있는 10초 이하의 단 펄스 장치기술을 습득하고, 그 토대 위에서 장 펄스운전이 가능한 장치를 개발하여야하므로, 이를 위한 연구개발이 필요하다. 본 연구를 통해 개발될 가열 및 전류구동장치들 성공적인 운영을 통해 선진국 수준의 핵융합 기술을 확보하여, 핵융합 에너지 개발을 위한 대형 국제공동연구에 동등한 자격으로 참여할 수 있는 연구기반을 확보할 수 있고, 핵융합 발전기술의 상용화 시기까지 기술선진국으로서의 위치를 확립할 수 있다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구는 제 2 단계(1998. 9. 8 - 2002. 6. 7) 기간동안 각 가열장치의 상세설계, 부품제작 및 특성시험 위주로 진행되었다. 각 장치별로 수행된 연구내용들은 다음과 같다.

○ 최종 목표

차세대 초전도 핵융합 연구장치, KSTAR 토카막 플라즈마를 가열하거나 비유도성 전류를 인가시키기 위한 가열 및 전류 구동 장치의 개발

○ 제 2 단계 목표 ('98~2001)

- 중성입자빔 입사장치 (NBI) 상세설계 및 제작·특성시험
- 고출력 RF파 가열 및 전류구동장치 (ICRH/FWCD) 상세설계 및 주요 Sub-system 제작·특성시험
- 마이크로파 전류구동장치 (LHCD) 상세설계 및 주요 Subsystem 제작·특성시험
- 전자가열(ECRH)에 의한 플라즈마 발생장치 상세 설계 및 제작·특성시험

1. NBI 장치

(1) 장치 상세설계

- 장치 상세설계 보완

(2) 빔라인 제작 및 특성시험

- 이온원 개발 및 시험
- 빔라인 부품 개발
- 전원 개발
- 보조설비 개발
- 장치제어 및 DAS 계
- 중성빔 진단

(3) R&D

- 중성입자 수송해석 및 빔라인
- Cryo pumping system 개발

2. RF 장치

(1) 장치 상세설계

- 장치 상세설계 보완
- 저출력 계통 제작.시험

(2) 고출력 RF파 발생장치 기술 개발

- 100 kW 고주파 송출기 출력 최적화

- 300 kW 고주파 송출기 제작

(3) Subsystem 제작 및 특성시험

- 고출력, 고주파 안테나 제작 및 특성시험
- 고출력, 고주파 전송부품 제작 및 특성시험
- 고출력, 고주파 부품 Test Stand

3. LHCD/ECH 장치

(1) 계통설계

- ECH장치 상세설계
- LHCD 장치 기본설계

(2) Subsystem 제작 및 특성시험

- Gyrotron tube 제작
- Gyrotron 고전압 전원장치 개발

IV. 연구개발 결과

본 연구를 통하여, KSTAR 토카막에서 사용될 NBI, RF, LHCD, ECH 가열장치의 건조를 위한 장치 설계, 제작 및 특성시험과 관련한 장치설계도, 시작품, 장치 부품, 특성시험장치, 특성시험결과 등이 결과로 축적되었다. 가열장치에는 첨단 기술에 의해서만 가능한 부품들이 많기 때문에 국내의 기업들을 2단계 초기부터 장치개발 및 제작에 참여시켜 관련 부품제작 기술들을 공동으로 연구, 개발하고 기술이 이전되도록 하였다. 연구에 참여한 인력들이 각 분야에서 습득한 기술들을 활용함으로써 효과적인 기술 파급효과를 얻을 수 있고 더 나아가 이 분야의 해외 시장 진출도 가능할 것이다.

NBI 장치의 경우 65A, 120 kV급 대전류 이온원을 설계·제작하고 성능 시험을 통해 300초 운전 가능한 이온원으로 개발하고 있다. 대전류 이온원의 국내 개발에 있어서 가장 어려운 부분이었던 가속부 냉각회로 개발을 자체 설계 및 기술에 의해 완료하여 최종적인 시작품을 제작하였다. Calorimeter, Neutralizer, Bending Magnet, Ion Dump 등 중성빔 발생 및 수송을 위한 빔라인 부품들을 개발하였고, 안정된 빔인출을 위해 초고속 전류 스위치를 포함한 120 kV, 70 A, 300 초 운전의 고정밀 가속전원 등 이온원 전원들을 모두 국내 기술에 의해 설계하고 개발하였다. 특히 이번에 제작된 가속전원은 국외에서도 제작된 바가 없는 고성능의 출력특성을 요하는 전원으로 비용을 획기적으로 절감시킬 수 있는 방법을 사용하여 제작되었기 때문에 성능 검증이 완료되면 세계적으로도 경쟁력을 갖는 전원이 될 것으로 기대된다. 또한, KSTAR NBI 가열장치 가동시 요구되는 대용량 배기속도를 얻기 위해 극저온 냉각펌프(cryopump)의 하나인 Cryosorption Pump를 개발하였다. 현재 이온원, 빔라인 부품 및 가속전원들의 성능검증을 위해

냉각수 설비 등을 포함한 NBI장치 Test Stand를 한국원자력연구소에 완성하여 빔인출 시험을 통하여 개발된 이온원, 빔라인 부품, 전원들의 성능시험을 수행중에 있다. TFTR 이온원을 국내기술 수준에 맞게 개조하여 자체 제작한 이온원의 경우 현재까지 30 kV, 15 A, 1 초의 수소 빔인출 결과를 얻고 있으며 전원 특성의 결과에 따라 계속적으로 빔인출 조건을 높혀가고 있다. 그 이외에 제어 및 DAS를 위한 EPICS-VME-W/S을 기본으로 하는 제어시스템의 일부를 구성하였고, 빔의 질을 측정할 OMA 시스템을 완성하였으며, 빔 모니터링을 위한 IR 카메라를 설치하였으며 또한 빔라인 부품들의 설계 보완 및 장치 Upgrade를 위해 KSTAR NBI 중성빔 수송코드(2-D Code)를 개발하였다. 이에 따라 차기부터는 KSTAR 장치의 최종 목표인 장펄스 운전과 Full Power 에서의 특성시험들이 가능하게 되었다.

RF가열장치는 차세대 토카막 모우드를 지원할 수 있도록, 300초 운전, 가열 및 전류구동을 조절할 수 있도록 설계되어 주요 Subsystem의 제작이 진행중이다. 세계적으로 처음 시도하는 300초 이상의 장 펄스 운전을 위해 새로운 설계개념과 신기술들을 적용하여 초 고출력밀도(10 MW/m^2)와 운전중 가열 및 전류구동효율 조절능력을 갖는 고주파 안테나를 제작하고 특성시험을 수행하였다. 국내 기술이 취약함을 고려하여, 안테나의 제작을 국내업체에서 선정하여 관련 기술이 축적되도록 하였고, 성능시험을 바탕으로 한 Prototype 안테나의 설계 개선과 upgrade 과정에도 참여하여, 습득한 기술을 바탕으로 본 제품의 개발.제작을 국내 산업체에서 충분히 수행할 수 있도록 하였다. MW급 고출력 고주파 부품도 세계적으로 처음으로 300초 이상의 장 펄스 운전이 가능하도록 개발되었다. MW급 고출력 고주파 전송을 위한, Vacuum feedthrough, 임피던스 정합장치, 수냉식 전송선 등은 국내 기술로 제작하고 특성시험을 수행하였다. 특히, 신뢰성있는 MW급의 고출력 고주파 전송을 위해, 기존방식(기계적인 접점 방식)과는 다른, 유체를 조절하여 전자파의 위상을 조절하는 위상가변기와 단락 전송선 동조기를 개발한 바 있고, 새로운 냉각방식을 적용한 위상가변기를 고안하여 특허 출원중에 있다. 고출력 RF 파 발생장치의 기술개발에 있어서는, 2 MW 송출계의 개발.운전을 대비하여, 자체 개발.운영 능력을 확보하고자 하였고, 국내산업이 부분적으로 참여 가능하도록 하였다. 100 kW 송출계는 고주파 부품 시험에 활용, 출력 최적화를 통해 설계, 제작 및 운영 능력을 확보하였고, 300 kW 송출계의 제작에 있어서 전원을 국내 업체에서 제작하여, 관련 기술이 축적되도록 하였다.

500 kW ECH 장치 시스템 상세 설계는 완료하였으며, 본체의 핵심 부분을 확보하였다. ECH 장치의 84 GHz, 500 kW 마이크로파 발생장치인 Gyrotron tube는 미국 CPI사에서 제작되어 현재 참여 기업인 (주)포스콘에서 short pulse ($20 \mu\text{s}$ pulse, 60 Hz) 성능시험 중에 있다. Gyrotron tube의 short pulse 성능시험을 위해 Pulse modulator (100 kV, 30 A, $20 \mu\text{s}$ pulse, 60 Hz)와 Low ripple Acceleration power supply (100 kV, 100 mA)를 (주)포스콘에서 개발하였다. Gyrotron tube의 long pulse (2.0 sec) 테스트를 위한 85 kV, 30 A

DC power supply 또한 (주)포스콘에서 개발되어 현재 성능시험 중에 있다. ECH 장치의 전송선 부품 일부는 확보하였고 잔여분은 현재 미국 General Atomics로부터 발주예정에 있다.

2.0 MW LHCD 장치의 RF 주파수는 5.0 GHz로 결정하였고, 현재 LHCD 장치의 상세 설계는 Pro/Engineer 프로그램을 이용하여 수행 중에 있다. 5.0 GHz LHCD Launcher의 기본 설계는 HFSS와 ANSYS 프로그램을 이용하여 완성되었고, 미국 PPPL 연구소와 공동으로 공학설계에 착수하였다. 5.0 GHz RF source인 클라이스트론 (klystron)은 일본 TOSHIBA사에서 개발될 예정이다.

V. 연구개발결과의 활용계획

이 장치들이 계획대로 제작될 때, 현재 사용되고 있는 가열장치들의 동작시간이 10초 미만임을 고려하면 세계에서 유일하게 300초 이상으로 동작하는 최초의 장치가 될 것이며, 이는 세계적으로 핵융합 발전로를 향한 진일보된 기술의 개발이라 볼 수 있다.

가열장치의 개발과 관련 핵심기술의 연구·개발 결과들은 KSTAR의 가열장치로 직접 사용될 것이고, 3단계 사업에서는 이 결과들을 바탕으로 지속적인 연구·개발을 통해 중성입자빔 가열장치, RF 가열장치, LHCD/ECH 장치의 제작을 계속하여, 가열장치 건조사업의 최종 목표를 차질없이 수행할 것이다. 이 장 펄스형 가열장치들은 ITER 등에서도 사용될 것이고 향후 핵융합발전로의 주요 요소 기기들로서 활용될 것임이 분명하여, KSTAR 가열장치의 제작·운영 기술의 확보로 세계적으로 기술적 우위의 선점과 함께 수출시장 개척에도 일조할 수 있을 것이다. 확보된 이들 장치기술은 핵융합분야 이외에도 다음의 여러 가지 산업분야에서도 광범위한 활용이 예상된다.

- 이온원; 입자 가속기, 이온빔 응용 장치 (반도체, 금속/세라믹, 폴리머 분야 등)
- 대용량 Cryo 펌프; 대용량 진공기기, 대용량 플라즈마 장치, 우주 모사시험장치
- 초대형 진공함; 대형 빔장치, 우주관련 산업
- 고주파 플라즈마 기술; 우주선 추진, 의료용 장비, 반도체 가공, 금속표면 가공
- 고주파 전송설비 분야; 방송 업체, 관련 방산업체
- 고정밀 고전압 전원장치 기술; 산업용 대용량 직류 고전압 발생장치, 가속기 고전압 전원

SUMMARY

I. Title

The Development of the KSTAR Heating Systems

II. Objectives and Importances of the Project

The major objective of this project is to develop the heating and current drive systems for KSTAR(Korean Superconducting Tokamak Advanced Research) tokamak. In order to support the main mission of KSTAR project, such as developing a steady-state-capable advanced superconducting tokamak to establish the scientific and technological bases for an attractive fusion reactor, the steady-state-capable and effective heating and current drive systems are necessary. Also the plasma current density and the pressure gradient should be controlled efficiently by this system in order to study on the plasma of the advanced tokamak.

Neutral beams are required to provide ion heating, current drive, current and pressure profile control, and core fueling; to sustain plasma rotation; and to support diagnostics requirements. The Ion Cyclotron(IC) system is required to provide heating for the plasmas, centrally-peaked current drive, and off-axis current drive using mode-conversion for given plasma operating scenarios. Preferential ion or electron heating should be obtainable through the adjustment of operating conditions. The Lower Hybrid(LH) system is required to investigate the physics issues related to the steady-state operation. It provides off-axis current-profile control, efficient bulk current drive at low plasma temperatures, and electron heating. And the Electron Cyclotron Heating (ECH) system could be used at the day one operation of tokamak to aid plasma breakdown, thereby lowering the loop voltage (and the integrated volt-sec) required to initiate plasma.

III. Contents and Scope of R&D

The detailed designs and development of components have been mainly done during the second phase of the project(Aug. 8 1998 - June 7. 2002). The followings are the main works which have been performed.

1. Neutral Beam Injection (NBI) System

(1) Design of the System

- Final Design of the Components

- (2) Fabrication and Test of the Beam Line
 - Fabrication and Test of the Ion Source
 - Fabrication of the Beam Line Components
 - Fabrication of the Power Supplies
 - Fabrication of the Ancillary System
 - Development of the System Control and DAS System
 - Neutral Beam Diagnostics System
- (3) R&D
 - Transportation of Neutral Beam
 - Development of the Cryo pumping system

2. Radio Frequency (RF) System

- (1) Detailed design of the system
 - Detailed design of the system
 - Development of low power control system
- (2) Development of RF transmitter and related R & D
 - Optimization of 100 kW RF transmitter
 - Fabrication of 300 kW RF Transmitter
- (3) Development of subsystem
 - Development of antenna
 - Development of transmission components
 - RF test stand

3. Electron Cyclotron Heating (ECH) System and Lower Hybrid Current Drive(LHCD) System

- (1) System design
 - Detailed design of ECH system
 - Basic design of LHCD system
- (2) Development of Subsystem
 - Gyrotron system

IV. Results of R&D

The detailed designs and development of components of NBI, RF, ECH, and LHCD heating and current drive system have been performed.

The prototype ion source for the KSTAR NBI system has been designed and fabricated for the 120 kV (65 A) beam extraction, and now upgraded for the long pulse operation during 20 seconds. The new method realized with

pure domestic technologies had been tried in completing the cooling circuit of the acceleration grids, and it was proven that new grids are applicable to the prototype ion source. It will be upgraded for the 300-second operation until the upgrade phase of KSTAR. Also beam line components such as calorimeter, neutralizer, bending magnet, and ion dump had been developed with pure domestic technologies and now in testing. The power supplies for the stable beam of 120 kV and 65 A including acceleration power supply, deceleration power supply, arc power supply, and filament power supply have been developed. Especially the developed acceleration power supply has the highest ratings with the highest quality among the power supplies ever developed in Korea. In addition the cost is lower than other power supplies developed in another countries. If the performance is verified sooner or later, the power supply could have enough competition with those of the developed countries in the world wide market. Another new try in the NBI system is the development of the cryosorption Pumping system. If the development is finished, it has the highest pumping speed with unit panel around the world. Finally a KSATR NB test facility, which was constructed on the bases of the main KSTAR neutral beam system, has been completed at KAERI to test and upgrade the ion source and the beam line components. Not only the ion source and the beam line components but also the beam diagnostic system, the machine control system, and the vacuum control system will be tested and upgraded in this facility. The beam extraction results of the ion source is reached to 35 kV, 20 A, and 10 sec until now, and the test will be continued in parallel with the progress of the power supply and others. EPICS (Experimental Physics Instruments Control System)-VME-W/S(workstation) based DAS and control system, and neutral beam diagnostics system such as OMA(Optical multichannel analysis system) and IR camera system are being developed. The full power test and upgrade of the ion source and beam line components will be executed during the next step in the test stand.

The RF system has been designed to provide heating and current drive for advanced tokamak operation and its subsystem is under development. Antenna has been fabricated and tested, which has a high power density (10 MW/m^2) and has a capability of changing the phasing between current straps during operation to provide the control of the current-drive efficiency. Transmission components for transmitting MW level of power have been developed. Vacuum feedthrough, impedance matching and water-cooled transmission line are fabricated and tested for their high voltage and long pulse operation

characteristics. For transmitter, we optimized performance of 100 kW transmitter and completed the fabrication of 300 kW transmitter. We will use transmitters in the test of the antenna and transmission components and based on operational experiences, we will finalize the procurement specification of 2 MW transmitter system in the third phase.

The detailed design of a 500 kW, 84 GHz ECH system has been completed. The microwave source is a gyrotron tube whose RF frequency and RF power are 84 GHz and 500 kW with the pulse length up to 2.0 sec. The gyrotron has been fabricated and successfully tested at Communications and Power Industries (CPI), USA. It is delivered to POSTECH, and under short pulse conditioning test with a pulse modulator operated at 20 μ s with 60 Hz repetition rate and a acceleration power supply (APS). The pulse modulator and the APS are constructed by POSCON. The long pulse tests (2.0 sec, 500 kW, 0.02 % duty) will be carried out using a 85 kV, 30 A DC power supply which is under test at POSCON. The ECH transmission line components are being purchased from General Atomics (GA), USA.

The LH frequency of the 2.0 MW LHCD system is chosen to 5.0 GHz for extending the density limit condition. The LHCD system is under design process. The basic design of the 5.0 GHz LHCD launcher (coupler) has been finished using the HFSS and ANSYS programs. The fabrication drawing and the test of the launcher are set to work in collaboration with the Princeton Plasma Physics Laboratory (PPPL), USA. The 5.0 GHz microwave sources are four klystrons that will be developed at TOSHIBA, Japan.

IV. Application Plan of R&D

The heating and current drive systems will operate for a pulse length up to 300 seconds and they will provide a technical basis for fusion reactor. The results of R&D will be utilized continuously in the third phase for fabricating the heating and current drive systems. Spin off technologies will be utilized in the following area.

- Ion source; ion accelerator, beam application devices
- High capacity cryo pumping system; large vacuum system, plasma source
- Large vacuum chamber; large beam system, space research
- High quality, high power control technique; high quality DC power supply,
- RF plasma application; plasma propulsion, environment, defense

CONTENTS

1. Introduction	21
2. Status of the World-wide Research Activities	25
2.1 NBI System	26
2.2 RF System	27
2.3 ECH/LHCD System	28
2.4 Estimation of Research Activities	30
3. The Result of the R&D Activities	33
3.1 NBI System	33
3.1.1 Introduction	33
3.1.2 Scope of R&D	35
3.1.3 Results of R&D	38
3.1.3.1 Development and Test of the Ion Source	38
(1) Fabrication of the Prototype ion source	38
(2) Discharge Test	71
(3) Beam Extraction Test	94
(4) Upgrade and Future works	102
3.1.3.2 Development of the Beam Line Components	103
(1) Vacuum Analysis	103
(2) Vacuum Chamber	113
(3) Calorimeter	118
(4) Cryosorption Pump	128
(5) Neutralizer	135
(6) Bending Magnet	141
(7) Ion Dump	146
(8) Chamber-source Interface	159
(9) Test Stand	163
3.1.3.3 Development of the Power Supplies	165
(1) Filament P/S	167
(2) Arc P/S	168
(3) G-G resistor bank	185
(4) Deceleration P/S	189
(5) Acceleration P/S	195

(6) Surge blocker	223
(7) Arc Detection Circuit	234
3.1.3.4 Development of the Ancillary Ssystem	238
(1) Vacuum system and Its Controller	238
(2) Auxiliary Vacuum Pumping System	242
(3) Cooling water System	244
(4) Gas Feeding System	253
3.1.3.5 System Control and Data Acquisition System	257
(1) Data Estimation	257
(2) Total Control System	270
(3) Timing Generator	278
(4) DAS System with EPICS-VME Combination	286
3.1.3.6 Neutral Beam Diagnostics	309
(1) OMA System and Test	309
(2) Beam Profile Measurements	313
3.1.3.7 R & D	316
(1) Heat load calculation of the beam line	316
(2) BTR code development	357
(3) Cryo pumping system	380
3.2 RF System	414
3.2.1 Introduction	414
3.2.2 Scope of R&D	415
3.2.3 Results of R&D	416
3.2.3.1 Detailed Design of ICRF System	416
(1) Modification of the System Design	416
(2) Development of Low Power ICRF System	430
3.2.3.2 High Power RF Transmitter R&D	445
(1) Optimization of 100 kW Transmitter	445
(2) Development of 300 kW Transmitter	464
3.2.3.3. Development of Subsystem	480
(1) Development of High Power ICRF Antenna	480
(A) Engineering of the Prototype Antenna	480
(B) Fabrication of the Prototype Antenna	494
(C) Test of the Prototype Antenna	495
(2) Development of High Power Transmission Components	555

(A) Development of Vacuum Feedthrough	555
(B) Development of Liquid Stub and Phase Shifter	574
(C) Development of Water-cooled Transmission Line	600
(D) Test of Insulator	613
(2) Development of RF Test Stand	617
(A) Antenna Test Stand	617
(B) Transmission Components Test Stand	630
3.3 ECH and LHCD System	643
3.3.1 Introduction	643
3.3.2 Scope of R&D	644
3.3.3 Results of R&D	646
3.3.4 ECH System	646
3.3.4.1 Completion of ECH system detail design	646
3.3.4.2 Gyrotron system	649
(1) Gyrotron tube	649
(2) L-box	655
(3) Waveguide adapter	657
(4) Dummy load	657
(5) Water cooling conditions	659
3.3.4.3 Gyrotron power supplies	659
(1) Pulse modulator (test module)	660
(2) 85 kV/30 A DC power supply, 100 kV/100 mA Acceleration Power Supply	664
(3) Test wire investigation	666
(4) Crowbar switch test	672
3.3.4.4 Gyrotron tube test	676
(1) Factory Acceptance Test	676
(2) Final Acceptance Test	682
3.3.4.5 ECH transmission components	709
(1) Specifications of the ECH transmission components	709
(2) Progress of the procurement	710
(3) Pumping test	711
(4) High power transmission components (GA products)	715
3.3.4.6 ECH Local I&C	719
3.3.4.7 ECH antenna	720
3.3.4.8 Radiation pattern of 84 GHz	722

3.3.4.9 Simulation of ECH-preionization	725
(1) Introduction	725
(2) Simulation results	725
(3) Summary	752
3.3.5 LHCD system	754
3.3.5.1 5.0 GHz LHCD system design	754
3.3.5.2 Basic design of LHCD launcher (coupler)	754
(1) Design of the front launcher structure	757
(2) Design of the septum	757
(3) Design of the water load	761
3.3.5.3 Simulation of lower-hybrid current drive	765
(1) The trajectory of the LH-wave in tokamak plasmas	766
(2) RF-driven current density profiles and the efficiency	769
(3) Reversed magnetic shear q-profile	772
(4) Summary	774
4. Milestones and Contribution to Related Fields	775
4.1 NBI System	777
4.2 RF System	778
4.3 ECH/LHCD System	779
5. Application Plan on R&D Results	781
5.1 NBI System	781
5.2 RF System	783
5.3 ECH/LHCD System	783
6. Overseas Information Collected by Heating R&D Project	785
7. References	787
Application Plan of R&D Results	797

목차

제 1 장 서론	21
제 2 장 국내외 기술개발 현황	25
제 1절 NBI 장치	26
제 2절 RF 장치	27
제 3절 LHCD/ECH 장치	28
제 4절 기술개발 현황에 대한 평가	30
제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과	33
제 1절 중성빔 입사장치 (NBI System)	33
1. 서론	33
2. 연구내용	35
3. 연구개발 결과	38
가. 이온원 개발 및 시험	38
(1) Prototype ion source 제작	38
(2) 방전시험	71
(3) 빔인출 시험	94
(4) 이온원 Upgrade 및 Future works	102
나. 빔라인 부품 개발	103
(1) 진공배기계 해석	103
(2) 진공챔버	113
(3) 열량계	118
(4) 저온흡착펌프	128
(5) 중성화 장치	135
(6) Bending magnet	141
(7) 이온덤프	146
(8) Chamber-source interface	159
(9) Test stand 완성	163
다. 전원 개발	165
(1) Filament 전원	167
(2) Arc 전원	168
(3) G-G resistor bank	185
(4) 감속전원	189
(5) 가속전원	195

(6) Surge blocker	223
(7) Arc 검출회로	234
라. 보조설비 개발	238
(1) Vacuum system 및 제어계	238
(2) 보조 진공배기 system	242
(3) Cooling water system	244
(4) Gas feeding system	253
마. 장치제어 및 DAS 계	257
(1) Data estimation	257
(2) 전체 system	270
(3) Timing generator	278
(4) EPICS-VME에 의한 DAS system 구성	286
바. 중성빔 진단	309
(1) OMA system 구성 및 시험	309
(2) Beam profile 측정	313
사. R & D	316
(1) Heat load calculation of the beam line	316
(2) BTR code development	357
(3) Cryo pumping system	380
제 2절 RF 장치개발	414
1. 서 론	414
2. 연구내용	415
3. 연구개발 결과	416
가. ICRF 장치 상세설계	416
(1) 장치 계통설계 보완	416
(2) 저출력 계통 제작. 시험	430
나. 고출력 RF파 발생장치 기술개발	445
(1) 100kW 고주파 송출기 출력 최적화	445
(2) 300kW 고주파 송출기 제작	464
다. Subsystem 제작 및 특성시험	480
(1) 고출력, 고주파 안테나 제작 및 특성시험	480
(가) Prototype 안테나 공학설계	480
(나) Prototype 안테나 제작	494
(다) Prototype 안테나 시험	495
(2) 고출력, 고주파 전송부품 제작 및 특성시험	555

(가) Vacuum feedthrough 제작 및 특성시험	555
(나) 유체를 이용한 전송부품 제작 및 특성시험	574
(다) 수냉각관 제작 및 특성시험	600
(라) 고주파 절연체 시험	613
(3) 고풍력, 고주파 부품 Test Stand	617
(가) 안테나 Test Stand	617
(나) 고풍력, 고주파 전송부품 Test Stand	630
제 3절 마이크로파 가열 (ECH) 및 전류구동계통 (LHCD) 장치	643
1. 서론	643
2. 연구내용	644
3. 연구개발 결과	646
가. ECH 장치	646
(1) ECH 장치 상세 설계	646
(2) Gyrotron system	649
(가) Gyrotron tube	649
(나) L-box	655
(다) Waveguide adapter	657
(라) Dummy load	657
(마) Water cooling conditions	659
(3) Gyrotron 고전압 전원장치	659
(가) Pulse modulator (test module)	660
(나) 85 kV/30 A DC power supply, 100 kV/100 mA Acceleration Power Supply	664
(다) Test wire 조사실험	666
(라) Crowbar switch test	672
(4) Gyrotron tube 성능시험	676
(가) 현장 검수 내용	676
(나) Final Acceptance Test	682
(5) ECH 장치 전송선	709
(가) 전송선 구성품 개요 및 특성	709
(나) 전송선 구성품 구매 현황	710
(다) 전송선 조립 및 pumping test	711
(라) High power transmission components (GA products)	715
(6) ECH Local I&C	719
(7) ECH antenna	720
(8) Radiation pattern of 84 GHz	722

(9) Preionization 전산모사	725
(가) 서론 (연구동기)	725
(나) ECH 초기이온화 (pre-ionization) 전산모사 결과	725
(다) 결론	752
나. LHCD 장치	754
(1) 5.0 GHz LHCD 장치 설계	754
(2) LHCD launcher (coupler) 기본 설계	754
(가) Design of the front launcher structure	757
(나) Design of the septum	757
(다) Design of the water load	761
(3) 전류구동 전산모사	765
(가) LH 파의 궤적 (LH-ray trajectory)	766
(나) 비유도성 전류 밀도 분포와 전류 구동 효율	769
(다) Reversed magnetic shear q-profile	772
(라) 결론	774
제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도	775
제 1절 NBI 장치	777
제 2절 RF 장치	778
제 3절 LHCD/ECH 장치	779
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	781
제 1절 NBI장치 및 장치기술의 활용	781
제 2절 RF 장치 및 장치기술의 활용	783
제 3절 LHCD/ECH 장치 및 장치기술의 활용	783
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	785
제 7 장 참고문헌	787
연구결과 활용계획서	797

여 백

제 1 장 서론

KSTAR (Korean Superconducting Tokamak Advanced Research) 토카막[1,2]은 ITER등 국제 수준급의 핵융합연구에 동참하기 위해 운전시간 300초의 준 연속운전 (Quasi Steady State)을 실현할 수 있는 초전도 토카막의 개발을 목표로 하고 있다. 초전도 토카막과 같이 준 연속운전 능력을 갖는 토카막에서는 긴펄스로 전류를 구동할 수 있는 가열 및 전류구동장치가 반드시 필요하다. KSTAR(Korea Superconducting Tokamak Advanced Research, 국가핵융합연구장치)^{[1][2]}는 차세대 초전도 토카막으로서, 주반경 $R=1.8\text{m}$, 부반경 $a=0.5\text{m}$, 연신율(elongation) $\kappa=2$, 삼각도(triangularity) $\delta=0.8$, 토로이달 자장 $B_T=3.5\text{T}$, 플라즈마 전류 $I_p=2\text{MA}$ 이다. KSTAR 토카막의 플라즈마 지속시간은 300초에 이르며, 정상상태에서의 차세대 토카막 플라즈마를 연구할 수 있도록 설계되었다.

본 연구에서는 차세대 초전도핵융합연구장치, KSTAR에 부착하여 국제수준급의 핵융합 실험연구를 가능케하는 장 펄스형 가열 및 전류구동장치들의 개발을 최종목표로 하고 있다. 국제수준급의 핵융합연구를 위해서는, 플라즈마를 충분히 가열하여 고온의 플라즈마를 만들고, 또한 비유도성 전류구동(non-inductive current drive)을 통해 플라즈마 전류의 연속적 유지가 가능토록 하는 준연속 운전용 중성입자빔 입사(NBI) 장치, 고주파(ICRF) 장치, 마이크로파(LHCD) 장치, mm-파 장치(ECH)의 개발이 필요하다. 또한, 핵융합로의 운전시나리오로 대두되는 차세대 토카막 플라즈마 연구를 위해, 국부적인 플라즈마 압력 및 전류의 제어, 변형이 요구되고 이를 위하여 각기 장점과 단점이 있는 메가와트급의 중성입자빔, RF파 및 마이크로파 가열 및 전류구동장치가 반드시 필요하며, 그 사용목적 및 물리변수에 따라 조합하여 사용하게 된다.

KSTAR 토카막의 가열 및 전류구동 장치, NBI 장치는 주 가열장치로서의 역할과 전류구동, 밀도 및 전류밀도분포 제어, 연료공급의 역할을 하게되고, RF 장치는 이온 또는 전자의 선택적 가열과 플라즈마 중심부 또는 외곽의 전류를 구동하고 조절하여 전류밀도분포의 효과적인 제어에 사용된다. 또한 LHCD 장치는 정상상태(steady state)유지와 플라즈마 국부가열 및 전체가열을 통한 MHD 안정성을 최적화시키는데 사용되고, ECH 장치는 토카막 플라즈마의 발생초기에 중성기체의 이온화를 통하여 방전을 쉽게 유도함으로써 volt·sec를 절약하여 다양한 토카막 운전 모드 설정에 기여할 수 있도록 하는데 필요하다.

KSTAR 장치가 주어진 임무 및 목표를 달성하기 위하여 표에 정리한 것과 같은 규격의 각 가열장치가 필수적으로 요구된다. 각 장치들은 KSTAR 장치가 목표로 하는 준연속 운전이 가능하도록 운전시간이 300초대 수준이 되도록 개발되어야 한다. 이를 실현하기 위하여 세계적으로 확립되어 있는 10초 이하의 단 펄스 장치 기술을 습득하고, 그 토대 위에서 장 펄스운전이 가능한 장치를 개발하여야하므로, 이를 위한 연구개발이 필요하다. 장치설계에 있어서는 300초 이상의 장 펄스 운전

을 위해 새로운 설계개념과 신기술들을 도입.적용하여, 이 장치들이 설계대로 제작된다면, 현재 사용되고 있는 가열장치들의 동작시간이 10초 미만임을 고려할 때, 세계에서 유일하게 300초 이상으로 동작하는 최초의 장치가 될 것이며, 이는 세계적으로 핵융합발전로를 향한 진일보된 기술의 개발이라 볼 수 있다.

장 치 명	기 본* ¹⁾	증 설* ²⁾	비 고
NBI	빔 출력: 8 MW(Type A) 빔 에너지: 120 keV 가동시간: 300 초	빔 출력: 12 MW(Type B) 빔 에너지: 120 keV 가동시간: 300 초	
RF	출력: 6 MW 주파수: 25 - 60 MHz 가동시간: 300 초	출력: 6 MW 주파수: 25 - 60 MHz 가동시간: 300 초	“
LHCD	출력: 1.5 MW 주파수: 5.0 GHz 가동시간: 300 초	출력: 3 MW 주파수: 5.0 GHz 가동시간: 300 초	“
ECH	출력: 0.5 MW 주파수: 84 GHz 가동시간: 1 초	없음	“

*¹⁾기본 : KSTAR 장치의 최소한의 가동 및 목표달성을 위하여 필요함.

*²⁾증설 : KSTAR 장치의 국제 수준급의 특성을 실현하기 위하여 기본장치에 덧붙여 출력 증강이 필요함.

가열장치 관련 핵심기술의 R&D 결과들은, 향후 KSTAR 가열장치를 제작하고 운용하는데 직접 사용될 것이고. 이 장펄스형 장치들은 ITER 등에서도 사용될 것이며 향후 핵융합발전로의 주요 요소기기들로서 활용될 것임이 분명하여, KSTAR 가열장치의 제작.운용 기술의 확보로 세계적으로 기술적 우위의 선점과 함께 관련 개발 제품의 수출시장 개척에도 일조할 수 있다. 또한, 가열장치들의 개발에 필요한 기술들은 대부분이 최첨단 기술이기 때문에 핵융합연구 이외에도, 여타 다른 분야에도 광범위한 활용이 예상된다.

- 이온원; 입자 가속기, 이온빔 장치 (반도체, 금속/세라믹, 폴리머 분야 등)
- 대용량 Cryo 펌프; 대용량 진공기기, 대용량 플라즈마 장치, 우주 모사시험장치
- Hypervapotron; 대용량 진공관, 대용량 이온원 덤프
- 고주파 플라즈마 기술분야; 반도체 가공, 금속표면 가공,
- 고주파 전송설비 분야; 방송 업체, 관련 방산업체
- 고정밀 고전압 전원장치 기술; 산업용 대용량 직류 고전압 발생장치
- 저출력 위상조절기 및 위상측정기 설계 및 제작 기술; 위성통신시스템에 사용되는 고주파 위상 측정장치

본 연구를 통해 개발될 가열 및 전류구동장치들 성공적인 운영을 통해 선진국 수준의 핵융합 기술을 확보하여, 핵융합 에너지 개발을 위한 대형 국제공동연구에 동등한 자격으로 참여할 수 있는 연구기반을 확보할 수 있고, 핵융합 발전기술의 상용화 시기까지 기술선진국으로서의 위치를 확립할 수 있을 것이다.

여 백

제 2 장 국내외 기술개발 현황

핵융합 선진국들에서는 핵융합로 플라즈마의 연구를 위하여 NBI 장치, RF 장치, LHCD 장치와 ECH 장치들의 개발을 완료하여 수 내지 수십 MW 단위의 가열실험들을 성공적으로 수행해오고 있다 (JET, TFTR, JT-60, Tore Supra 등). 중성입자빔을 이용한 가열방식은 미국의 TFTR, DIII-D 토카막에서, 각기 20 MW 이상, 유럽 연방의 JET 토카막의 경우 40 MW 이상, 일본의 JT-60U의 경우 40 MW 이상의 출력으로 고온의 플라즈마를 만들거나 전류를 구동하는데에 사용하고 있고, 국제핵융합로 실험장치인 ITER의 경우에는 75 MW를 사용하는 것을 목표로 공학적 설계가 진행중이다. 그 외에도 작은 규모의 토카막, 자기거울, Stellarator 등에서 광범위하게 연구가 진행되고 있다. RF과와 마이크로파를 이용한 플라즈마 가열과 전류구동 방식은 핵융합 플라즈마 연구의 초기단계부터 꾸준히 발전되어온 분야이며 JET, TFTR, JT-60U 등의 대형토카막에서는 10 MW급의 출력을 사용하고, 그 외의 소형 토카막에서도 수백 kW급의 가열장치가 다수 사용되고 있다. 최근에는 플라즈마 안정성, 수송장벽(transport barrier) 형성으로 이상 수송현상의 해결 등에 좋은 영향을 주는 실험결과가 많이 보고되고 있다.

전류구동 실험에 있어서는 NBCD (Neutral Beam Current Drive)와 마이크로파 LHCD 분야에서는 기술이 어느정도 확립되어 있으나, 고주파 FWCD 및 mm-파 ECCD(Electron Cycrotron Current Drive) 분야는 현재까지도 실험자료들이 절대적으로 부족해서 아직도 연구개발의 여지가 많다. 이렇게 아직까지도 확립되지 않은 기술임에도 불구하고 ITER 등에서뿐만 아니라 향후 발전로에서도 FWCD와 ECCD는 NBI와 더불어 주요한 가열 및 전류구동 수단이 될 것으로 보여지며, LHCD의 경우는 높은 주파수의 source가 개발됨에 따라 밀도한계의 문제를 어느 정도 극복할 수 있을 것으로 판단되고 있다. 최근에는 ECCD를 이용한 MHD 안정성을 개선하는 연구결과가 많이 보고된 바 있다. (DIII-D, ASDEX-U)

현재 아직까지도 기술적으로 연구개발이 진행되고 있는 분야들로는 전류구동 효율을 높이기 위한 고전압 음이온빔(n-NBI)의 개발, 110 GHz Gyrotron 개발(4 Tesla급), 140 GHz 이상(5 Tesla급 이상) 대역을 위한 자유전자레이저(FEL) 개발, 안테나 설계, 운영기술, 안테나-plasma작용 및 내열-저sputtering재료/표면처리기술 개발 등이 있으며, ITER 등 본격적으로 핵융합을 목표로 하는 토카막의 준 연속운전을 위하여 장시간 운전에 대한 연구들도 중요한 연구과제가 되고 있다.

국내에서는 서울대학교의 SNUT-79, 원자력연구소의 KT-1, 한국과학기술원의 KAIST 토카막 등의 본체 제작, 운영 경험은 다소 축적되어 있으나, 가열은 대부분 Ohmic Heating에 의존하고 있다. 국가핵융합사업의 1, 2단계 사업을 통해 KSTAR 토카막의 각 가열장치들의 건조계획이 수립되어 설계와 제작이 진행 중이고, 2007년 이후 연차적으로 실험에 투입될 예정이다. (단, ECH 장치는 장치 조립후 First plasma시 투입)

제 1 절 NBI 장치

국가 주도로 핵융합연구를 위해 전략적으로 만들어진 선진국들의 모든 토카막 장치에는 거의 모두 NBI 장치가 제작, 설치되어 있다. NBI 장치는 핵융합실험장치에서 높은 장치의 높은 밀도를 갖는 플라즈마의 온도를 수십 KeV로 올리기 위한 플라즈마가열 및 플라즈마 구속에 요구되는 토로이달(Toroidal)방향의 전류구동(Current Drive)에 적용되고 있다. 유럽연방의 JET(Joint European Torus) 과 미국의 TFTR(Tokamak Fusion Test Reactor)토카막 핵융합실험장치에서는 수십 메가와트급의 중성입자빔을 사용하여 중수소와 삼중수소의 연료를 주입하여 10MW에 달하는 핵융합에너지 발생에 성공한 바 있다. 국제연구공동체체로서 추진되고 있는 ITER에서는 음이온원(Negative Ion Source)에 대한 연구개발이 진행되고 있고, 음이온원에 대한 연구는 일본 원자력연구소와 국립핵융합과학연구소에서 자체적으로 10년간의 연구를 통해서 개발한 바 있다. NBI 장치들은 토카막 본체와 버금가는 규모를 갖고 있기 때문에 대부분의 경우 어느 한 연구소가 주도하고 부품별로 여러 연구소와 회사등이 공동으로 참여하여 전체 시스템을 완성하고 있다. 특히 NBI 장치 중 몇 가지 핵심 부품들의 개발은 critical path에 큰 영향을 미치는데, 이러한 부품들의 개발은 경우에 따라 자체적으로 수행하기도 하고, 다른 기업체 또는 연구소와 공동으로 개발했던 사례들이 많다.

국내에 있는 토카막들에서는 NBI 장치가 개발되어 사용된 사례는 없다. 핵융합용 중성입자빔 입사장치에 대한 직접적인 연구개발은, 국가핵융합사업의 1, 2단계 사업을 통해 장치의 공학설계, 장치의 부품제작 및 시험 등이 수행되었다. 낮은 출력의 빔용용 장치들은 원자력연구소를 중심으로 개발되어 성공적으로 이용되어 왔고, 이러한 빔관련 장치제작 경험과 기술들은 NBI 장치의 개발에도 직접적으로 이용되고 있다. 각 부품별 개발현황 및 앞으로의 추진방향 등은 아래와 같다.

1. 대전류 이온원 제작기술

가. 외국의 경우 미국, 일본, 영국, 독일, 프랑스등 몇 개의 연구기관들이 자체적으로 설계하고, 제작하는 기술들을 보유하고 있으며, 일의 성격상 현재도 자신들의 토카막에 사용될 더 나은 성능의 이온원을 제작하기 위해 R&D가 자체적으로 계속 진행되고 있는 실정이다.

나. KSTAR NBI를 위해 계획된 이온원은 120kV, 65A, 300초의 운전을 목표로 제작되고 있다. 전압과 전류 측면에서 보면 국외에서는 이미 개발이 완료된 상태이나, 운전시간 측면에서 보면 외국에서도 아직까지 개발된 적이 없다. 외국에서 지금까지 120kV, 65A 정격으로 실증된 최장운전시간은 20초이다. 한편 국내에서는 한국원자력연구소에서 120kV, 65A 정격으로 최장운전시간이 300초인 이온원을 개발중이다.

2. 빔라인 부품 개발

가. 300초 운전을 위한 빔라인에서 가장 중요한 점은 열부하가 짧은 펄스운전에 비해 급격히 증가하기 때문에 모든 냉각라인에 강제 냉각방식이 적용되어야 한다는 점이다. 이를 위해 1, 2 단계 연구기간동안 $1\text{kW}/\text{cm}^2$ 의 열부하에 견딜 수 있는 Hypervaportron을 국내에서 개발하였다.

나. NBI 장치의 진공펌프 능력은 $8 \times 10^5 \text{l/s}$ 이상의 대용량이 확보되어야 한다. 현재 TFTR, JET, JAERI의 토카막들에서는 Cryocondensation Pump가 채택되고 있고, JIPP T-IIU, LHD 등에서는 Cryosorption Pump가 사용되고 있다. Cryocondensation Pump는 신뢰도에서 Cryosorption Pump를 앞지르지만 액체 He를 사용해야한다는 단점이 있다. 1, 2단계 연구기간 중에 Cryosorption Pump에 대한 연구가 진행되어 국내에서 제작을 수행한 바 있다.

다. 휘용전자석, 이온덤프, calorimeter 등은 2단계에서 국내제작 경험이 있기 때문에 문제가 없을 것이다.

3. 빔라인 전원 개발

가. 대전류 이온원에 소요되는 여러전원중 규모면에서나 기술면에서 핵심요소는 가속전원이다. KSTAR NBI에 필요한 가속전원의 주요규격은 120kV, 65A의 300초 연속출력과 고속제어 및 스위칭기술이다.

나. 2단계에서는 상기 규격에 해당하는 전원을 국내기술로 제작한 바 있다.

제 2 절 RF 장치

선진국에서는 DIII-D(4MW), JET(4MW), JT-60(4MW), TORE SUPRA(4MW) 등의 여러 대형 핵융합 연구장치에 제작, 설치되어 수십 년간 연구가 진행이 되어 왔으며 기술적인 면과 물리적인 면에서 많은 경험을 축적하고 있고 Fast Wave를 이용한 이온가열, 전류구동 등의 실험이 활발하게 이루어지고 있다. 핵융합 발전로에서의 운전시나리오로 제안된 차세대 토카막 운전시나리오(Advance Tokamak)에서 플라즈마 중심부분의 전류모양을 제어할 수 있는 장치로 대두되고 있고 최근에는 모우드 변환된 Ion Bernstein파를 이용하여 플라즈마 외곽 부분의 전류구동 실험도 성공적으로 수행하고 있다.

국내에서는 국내에서는 핵융합용 고출력의 RF 시스템에 대한 실험 경험이 초보수준이고, 소수의 국내 과학자들이 외국에서 이에 대한 연구를 수행한 경험을 가지고 있다. 국내에서는 RF파를 이용한 플라즈마 가열은 대부분 공정용 플라즈마에 사용되는 13.56MHz, 2kW 미만의 소출력에 경험이 대부분이었고, 국가핵융합사업에 의해 100kW급의 transmitter를 자체 제작 설치하여 고주파 부품 시험, 소형토카막 가열시험 등을 수행한 경험이 있다. 또한 한빛장치에서는 주된 플라즈마 가열장치로서 당초 계획에 따라 현재 주파수 3-12MHz영역의 100ms 펄스폭을 갖는 500kW(pulse)급의 RF파 가열장치를 개발하여 실험을 수행중이다. 국외 대형 핵융합장치의 경우 거의 대부분의 장치에 각각의 특성에 맞는 고출력 RF 가열장치가

설치, 운영되고 있으며, 안테나를 제외한 거의 모든 부품들은 상용화되어 있다. 국내에서 운용되고 있는 대부분의 장치는 외국으로부터 도입된 것으로서, 국내에서도 고출력 RF가열장치의 자체 개발이 필수적이다. 이에 본 연구를 통해 수 MW급의 고출력 RF가열장치를 개발하고자 하며, 현재까지 축적된 기술과 경험으로 보아 가능하리라 사료된다.

세부기술사항의 현황은 아래와 같다.

- 가. 안테나 설계 기술 : 외국의 경우 ORNL(Oakridge National Lab.)등 여러 연구기관이 자체적으로 설계 능력을 보유하고 있으며, 국내의 경우 본 연구의 1, 2 단계 연구를 통해 설계능력을 보유하게 되었음.
- 나. 고출력 안테나 제작 기술 : 국내 제작 사례는 없으나, 국내의 경우 본 연구의 2단계에서 Prototype 안테나를 국내기술로 제작하였고 시험한 바 있음. CNC 정밀가공기술, 대형 크기의 brazing 기술, plasma spray 기술 등 제작에 필요한 기술은 국내에 충분하며 이 기술을 응용하여 적용 가능하다..
- 다. 전송선 및 정합계통 기술 : 외국의 경우 거의 모든 부품이 상용화 되어 있으며, 전송선 등 기본적인 부품의 몇가지는 국내 생산되고 있다. 전송선로의 설계, 제작, 운전을 위한 고전압, 고전류 기술은 국내 기술이 충분하다. 최근 핵융합장치의 대형화에 따라 보다 높은 전압과 MW급의 power에서도 동작 가능한 vacuum feedthrough, phase shifter 등에 대한 연구,개발을 2단계에서 수행하였다.
- 라. 고출력 장시간 rf transmitter 기술 : 외국의 경우 1.5 MW로 5000초까지 동작 가능한 transmitter를 개발하였으며, 현재, 2 MW 이상의 높은 출력으로 장시간 운전이 가능한 transmitter를 개발 중이다. 국내에서는 본 연구소와 기초과학지원연구소에서 100kW급의 rf transmitter를 제작한 사례가 있다.

제 3 절 LHCD/ECH 장치

플라즈마 가열 및 비유도성 전류구동을 하려면 중성입자빔과 전자파를 사용하여야 한다. 전자파를 사용할 경우 주파수가 수십 MHz에서 수백 GHz까지 광범위한 범위에서 세 종류가 가능하다. 즉, Fast Wave (10 - 100 MHz), Lower Hybrid Wave (2.0 - 8.0 GHz), 그리고 Electron Cyclotron Wave (80 GHz 이상) 이다. 편의상 주파수가 500 MHz 이하를 RF파로 500 MHz 이상을 마이크로파로 구분한다. 주파수가 증가하면 플라즈마 용기 내로 전자파 주입이 용이하고, 가열 메카니즘이 비교적 단순한 반면 가격이 상승하며, 특히 수십 GHz에서는 적정용량의 전자파원(源)의 개발이 요구되고, 요소기술도 많은 차이를 보인다. 그러므로, 마이크로파를 사용한 가열 및 전류구동은 초전도 핵융합 연구장치 개발의 핵심 기술이다.

러시아의 토카막 개발이 서방세계에 알려진 '60년대말 이후 미국도 '70년 초에는

프린스톤의 PPPL에서 "ATC"를, 그리고 오크릿지 연구소는 "ORMAK"을 건설하였다. ATC에서는 전자파 가열 (ICRH와 Lower Hybrid wave)을, 그리고 ORMAK에서는 중성입자빔 가열을 수행하여 플라즈마 온도를 높이는 데 기여하였다. 반면에 러시아는 TM-3에서 ECRH의 총체(Bulk) 가열에 성공한 바 있다.

전자파의 가열은 총체적 가열과 국부(Local) 가열을 통한 플라즈마 안정성의 최적화에 적절한 수단인 것은 잘 인식되어 있지만 비유도성 전류구동 가능성은 1978년 미국 프린스톤의 Fisch에 의하여 제안되었다. '80년대 여러 토카막에 의해서 이것이 실증되었고, 이로써 토카막의 정상상태 운전가능성이 입증되었다.

세계 4대 토카막인 JET, JT-60U, TFTR, T-15과 DIII-D (미국 GA), Tore-Supra (프랑스 CEA) 등에서 본격적인 가열 및 전류구동을 실시하여 최근에는 그 결과를 학계에 발표한 바 있다. LHCD는 Tore-Supra, JT-60U, JET 등에서 보는 바와 같이 6 - 10 MW를 사용하고 있으며, ECRH와 ECCD는 T-10, T-15, DIII-D, JT-60U 에서 1 - 2 MW로 운영하고 있다. 특히, T-15(러시아)는 24대의 고성능 자이로트론을 사용한 12 MW ECCD를 기획하고 있다.

국외에서는 프린스톤과 MIT 등에서 1980년대에 대용량 클라이스트론을 이용하여 LHCD 실험확증을 얻고 JET (EU), Tore-Supra (불), ASDEX-U (독), JT-60U (일) 등에서 본격적인 실험에 성공하였다. 한편, 미국, 러시아, 일본 등이 토카막에서 ECRH 실험에 성공한 바 있으며, DIII-D (GA, USA)에서는 2 MW를 사용하여 ECCD와 Preionization을 성공하였다. T-10에서 ECCD를 입증한 러시아는 T-15에서 24대의 자이로트론으로 12 MW를 기획하고 있다. 특히, 미국, 러시아, 일본은 150-168 GHz 대용량 자이로트론을 경쟁적으로 개발하고 있다.

국내에서는 반도체 산업 및 표면처리 분야에서 ECRH를 이용한 경험이 있으나, Magnetron을 사용한 2.45 GHz 영역에서 kW급에 불과하여 핵융합용 ECRH인 84 GHz의 자이로트론을 운용한 경험은 아직 없다. 한편 포항가속기연구소에서는 LHCD의 주파수영역에 속하는 2.85 GHz의 대용량 클라이스트론을 사용하여 전자빔을 25억 전자볼트까지 가속하는데 성공하였다.

초고주파의 대용량 확보는 여러가지 첨단기반기술의 개발을 통하여 가능한데, 대표적인 경우는 150 GHz 이상의 자이로트론을 MW 급으로 개발하기 위해 노력중인 일본 Toshiba와 러시아 Gycom이다. 대용량 마이크로파 시스템의 운영경험을 보유한 기관은 포항공대의 가속기연구소가 유일하다고 사료된다. 전자빔을 20억 전자볼트로 가속하기 위하여 전장 150 m에 이르는 선형가속기는 지상 2층과 지하 1층으로 구성된 세계 제 3위에 해당하는 설비이며, 총 960 MW의 마이크로파 공급 능력을 갖추었고 평균 720 MW로 24시간 가동하고 있다. 특히 여기에서 사용하는 E-3712 펄스 클라이스트론 (일본 Toshiba 제품)은 세계 최대용량인 80 MW급이며 포항가속기에서 최초로 사용하고 있으며, 여기에 사용되는 200 MW 펄스전원공급원 (모듈레이터)은 포항공대의 설계로 POSCON(주)이 제작한 제품으로 최대용량과 최소부피를 갖춘 장치이다.

포항공대가 보유한 마이크로파 기술은 클라이스트론 제작을 제외한 모든 분야에서 세계 일류 수준으로써, 이를 토카막에 활용하기 위한 기반기술은 이미 확보한 상태라고 할 수 있다.

제 4 절 기술개발 현황에 대한 평가

본 연구의 1, 2단계를 통해 관련 기술을 많이 획득하여, 국내의 각 요소별 기술 수준은 충분하다고 평가되며, 파악된 문제점들도 3단계에서 충분히 극복 가능한 수준이다. 현재까지 국내에서 토카막 가열을 위해 각 요소 기술을 종합하여 가열장치 전체를 구성해 본 경험은 없으나 1, 2단계 연구를 통한 각 장치의 설계, 제작, 시험 결과들은, 3단계에서 KSTAR의 일정에 맞추어 가열장치 설치에 차질이 없도록 이루어 질 수 있을 것으로 판단된다. 계획된 가열장치들은 가능한 많은 부분들을 국내에서 제작할 것이고, 외국에서 도입하는 것과 비교하여 다소 위험성은 있지만 가격면에서 40% 이상 절감할 수 있을 것으로 예상된다. 또한, 본 과제에서 개발중인 입자빔장치, Klystron 및 Gyrotron 등 대출력 마이크로파/mm파 발진관 및 고주파 증폭관 장치기술은, 핵융합 연구 이외에도 기술이 반도체산업, 환경산업, 방위산업 등의 핵심요소기술이나, 아직 국내에 미 보유기술이므로 이들 기술의 국내개발시 그 파급효과가 산업전반에 크게 영향을 미칠 것으로 생각된다.

- NBI 장치기술

	국 외	국 내	비고
이온원 기술	120kV, 65A, 20sec	150kV, 50mA, CW 120kV, 65A, 300sec	개발중 (risk 존재)
빔라인 부품기술	Hypervaportron Bending Magnet Cryopannel	제작경험 있음 제작경험 있음 제작경험 있음	국내개발필요 (기술확보)
빔라인 전원 기술	120kV, 65A, 20sec (high frequency modulation)	120kV, 65A, 300 sec	국내개발중 (risk 존재)
NBI 제어 및 운전기술	PLC Control System VME DAS system 구성	PLC Control System VME DAS system	국내기술충분

- RF 장치기술

	국 외	국 내	비고
안테나 설계 기술	충분함	연구, 개발단계	개발중 (risk 존재)
고출력 안테나 제작 기술	CNC 정밀가공기술, Brazing 기술, B ₄ C 코팅기술 등 충분함.	관련기술 확보	국내기술충분
전송선 및 정합계통 기술	상용화 단계	개발단계	국내개발중 (risk 존재)
고출력 장시간 rf transmitter 기술	상용화 단계	미흡함 저출력(~100kW) 경험	국내기술 불충분

- LHCD/ECH 장치기술

	국 외	국 내	비고
안테나 설계 및 제작 기술	충분함. 성능향상 단계	관련기술 도입단계	공동개발중
마이크로파 발생 장치 설계 및 제작 기술	충분함. 상용화 단계	구입단계	국내 기술 불충분
전송선 부품 제작 기술	상용화 단계	구입단계	국내 기술 불충분

여 백

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

제 1 절 중성빔 입사장치(NBI System)

1. 서론

중성빔 입사장치는 현재 토카막에서 사용되고 있는 가열장치 중 가장 신뢰성 있는 주가열 장치로 플라즈마 밀폐를 중점적으로 연구하는 중형 이상의 토카막에서는 기본적으로 갖추어야 할 장비중의 하나이다. 저항가열에 의해 어느 정도 뜨거운 플라즈마에 중성빔의 형태로 추가 에너지를 외부에서 가해줌으로서, 핵융합 반응에 의한 점화조건과 가까운 상태의 플라즈마를 만들어 이에 대한 연구를 수행할 수 있다. 이 외에도 중성빔 입사에 의해 전류구동, 플라즈마 밀도 및 전류의 분포 제어 등의 효과가 얻어지고, 플라즈마에 입사된 후 나오는 입자들을 측정하여 플라즈마의 온도, 밀도 분포 등에 대한 정보도 알아낼 수 있다. 중성빔 장치에 있어서 가장 중요한 점은 중성빔이 플라즈마의 중심까지 도달할 수 있는 충분한 에너지를 가져야 할 뿐만 아니라, 가열 및 밀도 증가 효과도 기대할 수 있는 수준의 입자밀도를 가져야 한다는 것이다. 토카막의 규모가 커지면서 플라즈마의 크기와 밀도가 증가하고, 전류구동에 대한 요구가 증대하면서 사용되는 빔 에너지의 크기는 점점 증가하고 있는 실정이다. KSTAR에서는 플라즈마 가열장치로서 뿐만 아니라, 전류구동 및 다양한 전류밀도 분포의 실험을 위해 3 개의 중성빔 입사장치를 계획하고 있다.

본 과제의 2 단계 목표는 1 단계동안 완성된 이온원, 빔라인, 전원 제어시스템 등에 대한 공학설계를 기준으로 한 개의 이온원에 해당하는 빔라인 부품들과 전원들을 제작하여 Test Stand를 구성하고, 이를 통하여 제작된 이온원 및 빔라인 부품들의 성능을 시험하고 Upgrade 할 수 있는 기반을 마련하는 것이다.

이온원은 미국 TFTR 장치에서 사용되었던 LPIS(Long Pulse Ion Source)를 기본으로하여 국내에서 개발을 수행하였는데 개발과정에서 가장 먼저 문제점에 도달한 것은 버킷과 이온원 그리드의 냉각회로를 구성하는 데서 나타났다. 이것들을 국내 기술에 의해 제작이 가능하도록 설계를 수정하면서 최종적으로 TFTR과 동일한 성능의 냉각회로를 갖는 이온원을 완성할 수 있었다. 개발된 이온원을 시험하기 위해 플라즈마 방전시험과 빔인출 시험을 수행하였다. 플라즈마 방전은 방전시간, 플라즈마 밀도의 균일도, 안정도 등에서 정격운전이 가능한 결과를 얻을 수 있었고, 빔인출 시험은 임시가속전원의 성능 문제로 제한적인 범위에서 수행되었는데 안정된 빔인출 시나리오에 의해 15 kV, 10 A, 0.1 s 의 빔을 얻을 수 있었다.

KSTAR NB장치의 성능을 검증하기 위한 진공함, 칼로리메타, Cryosorption Pumping System, 중성화장치, 이온덱트, 전자석들을 차례로 제작하였다. NB 진공함은 3mx4mx5m 크기의 초대형 진공함으로 여러 가지 시험이 가능하도록 상하, 좌

우에 가능한 많은 포트들을 만들었으며, 최종적으로 모든 빔라인 부품들의 성능검증이 완료되는 대로 주장치에서도 사용이 가능할 수 있도록 제작하였다. 칼로리메타, 중성화장치들은 JET에서 개발한 Hypervapotron을 이용하여 만들었고, 이온 덤프는 Swirl Tube를 이용하여 제작하였다. Hypervapotron 과 Swirl Tube 의 성능검증을 자체적으로 수행하여 최종적으로 어떤 방법으로 대용량의 열부하를 제거할 것인가를 최종적으로 결정할 예정이다. 연속운전을 위한 빔라인 부품의 냉각방식은 현재 ITER NB 장치의 설계에도 검증이 필요한 부분인데 실험의 결과는 세계적으로도 인정을 받을 수 있는 부분이다. 전자석은 자체적으로 개발한 BETA code를 이용하여 이온 덤프의 열부하가 1 kW/cm^2 이하가 되도록 설계하여 제작하였고, 액체 He의 공급이 불가능한 동안의 빔인출 실험을 진행시키기 위해서 500000 torr l/sec 배기속도의 Cryosorption Pump를 제작하여 냉각시험을 진행시키고 있다.

이온원을 시험하기 위한 필라멘트전원, 아크전원, 감속전원, 가속전원 등을 제작하였다. 가속전원은 NBI 장치 전체의 가격을 좌우하므로 장치 전체의 비용을 절감하기 위하여 기능보다 성능을 위주로 가격을 절감할 수 있는 방법으로 제작하였다. 전원 및 장치 전체의 제어계는 현재 VME Bus를 기반으로 하여 EPICS를 이용하여 개발하고 있으며, 중성빔의 진단을 위하여 OMA 장치, IR 카메라 장치 등을 구성하였고, 칼로리 메타를 이용한 빔 프로파일을 측정할 수 있는 시스템도 구성중이다.

NB 장치 R&D의 일환으로 재전리를 고려하여 빔의 궤적을 계산할 수 있는 BTR code를 개발하여 빔라인 부품들의 설계에 적용하였는데 이 코드는 앞으로 빔라인 부품들의 Upgrade와 두 번째 빔라인 Type B를 개발하는 데도 적용할 것이다. 또한 KSTAR 본장치에 들어갈 NB 시스템의 진공펌프를 개발하기 위한 준비작업으로 Cryo-condensation panel의 소형 prototype를 제작하여 냉각특성을 파악하였다.

2 단계가 KSTAR NB 장치의 구성을 위한 이온원 및 빔라인 부품들의 제작에 있었다면, 3 단계는 개발한 부품들의 300 초 운전에 대비한 시험 및 Upgrade에 있다. 이를 위하여 개발된 빔라인 부품들로 원자력연구소에 Test stand를 구성하였다. 한 개의 이온원에 의해 3 MW까지 연속 시험을 할 수 있는 냉각장치와 관련 전원들이 설치되어 있기 때문에 KSTAR NB 장치를 위한 Full Power Test가 가능하게 되었다. 다음 단계에서 수행할 일들은 이온원의 성능을 원하는 정격으로 끌어올리고, 모든 빔라인 부품들의 성능을 300 초 운전이 가능하도록 성능을 보장하여 최종적으로 KSTAR에 장착될 NB 장치들의 부품들을 제작하는 것이다.

2. 연구내용

가. 1차년도 ('98.9.8- '99.9.7)

- (1) NBI 장치 공학설계 검토 상세설계
 - 토카막 3차원 자장 data 확보
 - 열부하 해석 code 개발
 - 3차원 해석 code 확보 및 수정
 - 진공 배기계 설계 완료
- (2) 이온원 저출력 시험 및 1차 upgrade
 - 수소 및 중수소 빔인출 조건 계산
 - 1200 A, 5 sec 방전 전류 도달
 - 플라즈마 밀도 $10^{12}/\text{cm}^3$, 밀도 공간적 불균일도 20% 이내
 - Bucket 수정 및 보완
 - Grid 구조 수정 및 보완
- (3) 빔라인 진공용기 및 빔라인 부품 설계 및 제작
 - NBI chamber 설계, 제작(3m×4m×5m)
 - Cryosorption Panel 제작 및 시험
 - Cryosorption Panel 크기 최적화
- (4) 빔라인용 가속전원 상세 설계
 - 제어계 및 전력도입계통(20 MVA)
 - 감속전원(5 kV, 20 A) 제작
- (5) 빔라인 제어 및 DAS 계통 상세설계
 - 운전제어 및 DAS Parameter 도출
 - 운전제어계 Time Sequence 구성
 - VME 기본 Unit 구성

나. 2차년도 ('99.9.8- '00.9.7)

- (1) 상세설계 검토 및 보완
 - PDP(Power Deposition Profile) code 원형 인출구 이온원 version 완성
 - 빔수송 해석code KSTAR version 소련 Kurchatov NBI group 으로부터 도입 추진
- (2) 이온원 중출력 시험 및 2차 upgrade
 - Ion source 및 Bucket Upgrade 제작
 - Circular grid 상세설계 완료 및 시험모듈 제작
 - 이온원 방전 실험
 - * H₂ 및 D₂ 방전 특성 비교
 - * 빔 인출 방전 조건 도출(100 V, 1200 A, $1.2 \times 10^{12} /\text{cm}^2$)
 - slit grid 빔인출 시험
 - * 10 kV, 1 A, 1 sec
 - * 30 kV, 20 mA, 1 sec
 - MFTF-B short pulse ion source(80 kV, 85 A, 0.5 sec) 이전추진 중

- (3) 빔라인 부품 상세설계 및 제작 계속
 - Test Stand 용 Calorimeter 설계완료 및 제작
 - * 3 MW, 20 sec beam power
 - * hypervaportron cooling
 - 이온원-NBI chamber interface 설계완료 및 제작
 - NBI 진공배기 펌프계 설계
 - * test stand(KAERI) ; cryosorption pump(GM cooler, 5×10^5 l/sec)
 - * main chamber(KBSI) ; cryo panel(3.7 K LHe, 1.5×10^6 l/sec)
 - Test Stand 용 Cryosorption Pump 상세설계
 - 임시 Test Target 및 Faraday Cup 제작
- (4) 빔라인 전원 제작 계속
 - 120 kV, 70 A 가속전원 설계완료 및 제작 착수
 - 80 kV, 120 A 급 임시 빔 인출시험 전원 설비 제작
 - Gradient Grid Resistor Bank 설계
- (5) VME 및 control system 기초구성
 - VME 기본 시스템 구성
 - VX Works 및 EPICS 이용환경 구성
- (6) 중성빔 진단기술 개발
 - OMA system 설계 및 구성완료
 - test stand 용 냉각수 설비 설계(2MW)
 - 빔 인출 시험용 target 제작(30 kW급)

다. 3차년도 ('00.9.8- '01.9.7)

- (1) 이온원 시험 및 Upgrade
 - 원형인출구 이온원 그리드 제작
 - 원형인출구 이온원 그리드 가속 절연부 제작
 - MFTF-B short pulse ion source(80 kV, 85 A, 0.5 sec) 빔인출 시험
 - 원형인출구 이온원 빔인출 시험(30 kV, 20 A, 5 sec)
- (2) 빔라인 부품 상세설계 및 시험
 - Test Stand 용 Calorimeter 설치 및 시험 완료
 - 3 MW, 20 sec beam power
 - Hypervaportron cooling
 - 이온원-NBI chamber interface 설치 및 시험완료
 - Cryosorption Pump 제작완료
 - GM cooler, 5×10^5 l/sec Pumping Speed
 - 전자석 상세 설계 완료
 - Ion Dump 설계 완료
 - Test Stand 냉각수설비 제작

- (3) 가속전원 제작 및 시험
 - 80 kV, 120 A 급 임시 빔 인출시험 전원 설치완료
 - 120 kV, 70 A 가속전원 주요 부품 제작
 - Gradient Grid Resistor Bank 제작
 - Surge Blocker 설계 완료 및 일부부품 구입
- (4) 장치제어 및 자료수집계 구성
 - VX Works HP W/S을 이용한 EPICS 이용환경 구성
 - VME ADC에 의한 DAS Channel 확장
 - NBI System Timing Module 제작
- (5) OMA System 시험
 - OMA system 제작 완료
 - 2 MW test stand 용 냉각수 설비 설계
 - Ion Source Gas Flow Control System 제작
- (6) Beam Transport Simulation
 - Beam Transport with Re-ionization(BTR) Code 개발

라. 4차년도 ('01.9.8- '02.6.7)

- (1) 고전압 빔인출시험 및 Upgrade
 - 원형인출구 이온원 그리드 냉각회로 시험 및 수정
 - 원형인출구 이온원 그리드 Upgrade 제작
 - 이온원 빔인출 시험
 - * 현재 35 kV, 20 A, 10 sec 이온빔 인출
 - 이온원 빔인출 최적 Scenario 도출
- (2) 전자석 제작
 - 전자석 간극 : 18cm
 - 코일 turn수 : 64turn/coil X 2 coil
 - Maximum operating field : 2.096 KG
 - 전원 : 25V/350A
- (3) Neutralizer 제작
 - Aperture Size : 16.5 x 50 cm²
 - Length : 125 cm
 - Cooling : Hypervapotron
 - Gas Feeding Rate : > 10 torr.l/sec
- (4) Ion Dump 제작
 - H₂, D₂ operation
 - E, E/2, E/3 Beam Target
 - Swirl Tube
- (5) 가속전원 제작 완료
 - 120 kV, 70 A, 300 sec 시험 중

- 120kV, 75A, 10msec 시험완료
- Fast Switch : 25 μ sec ON/OFF time
- Chopper회로 보강
- (6) Arc 검출 회로 및 Timing 시스템 시험
- (7) 운전 및 감시 System 개발
 - Sun W/S에서 EPICS 환경 Setup
 - 온도감시 및 열량분포 계산 Programming
 - 100 Channel Signal Analysing System완성
- (8) OMA에 의한 중성빔 진단
 - OMA System 시험
 - Beam Divergence 계산 프로그램 개발
 - Beam Ion Species 분포 측정
 - Neutralizer Gas Control System 구성
 - IR Camera System 구성
- (9) NBI 장치 R&D
 - Rotated Beam 포함한 빔 수송 코드 KSTAR Version 확보
 - Calorimeter 열량분포 계산 System(84개 TC 장착) 구성

3. 연구개발 결과

가. 이온원 개발 및 시험

중성빔 입사장치는 이온원에서 만들어진 빔을 강한 자장으로 둘러싸인 플라즈마 중심까지 효과적으로 수송하기 위하여 여러 가지 부품들로 구성되는데 장치 전체의 성능이 이온원의 성능에 크게 좌우된다. KSTAR 중성빔 입사장치에서 필요로 하는 이온원은 빔에너지가 120 kV, 빔전류가 65 A, 운전시간이 300 초인 초대형 이온원으로 현재까지 국내에서 개발 경험이 없고, 이온원의 개발에 필요한 충분한 연구 기간이 주어지지 않는다는 점을 고려하여 미국의 TFTR 토카막에서 사용되었던 양이온원(positive ion source ; 120 kV, 65 A, 10 초 운전 기록)을 모델로 하여 제작하고 필요한 부분을 개선하는 방향으로 개발이 진행되고 있다.

(1) Prototype 이온원 제작

미국의 TFTR 토카막에서 사용되었던 양이온원을 모델로 하여 국내실정에 맞게 설계하여 KSTAR Prototype 이온원을 1차년도에 순수 국내기술로 제작한 바 있다. 그러나 국내 기술의 한계로 인하여 연속운전을 위해 가장 중요한 냉각회로 구성에 많은 시행착오를 경험하였다. 플라즈마를 효과적으로 가두어둘 수 있는 Bucket은 벽 주변이 강한 Cusp 자장으로 둘러 쌓여 있는 데, 이러한 Cusp 자장을 만들기 위해 영구자석들이 일정한 간격으로 장착되게 된다. 자석들을 열로부터 보

호하기 위해 자석 사이사이로 냉각회로들이 구성되어 있는 데, 냉각회로를 구성하기 위해 TFTR은 브레이징 방법을 사용하였다. 동일한 방법으로 수차례 제작을 시도하였으나 국내 브레이징 기술로는 성공률이 매우 낮고 비용도 높아, 국내 기술로 접근이 가능하고 가격이 상대적으로 낮은 방법을 개발하여 국내 제작에 성공하였다. 또한 TFTR 이온원의 가속 전극은 냉각과 대전류 빔 인출을 위해 특수한 단면 형상을 갖는 molybdenum 관들이 평행으로 배열된 slit 구조로 되어있어서 이를 국내에서 그대로 제작하는데 비용적, 기술적인 측면에서 많은 어려움이 따를 뿐 만 아니라, 폴리브덴의 산화에 의한 부식을 막기 위해 운전을 하는 데도 초순수를 사용해야하기 때문에 운영비용도 많이 들게 된다. 이를 극복하기 위해 국내기술 및 적정한 비용으로 제작할 수 있는 원형 인출구를 갖는 가속전극, 최종적으로는 이온원의 가속부를 설계하고 제작하여, 성공적으로 냉각회로를 구성하였다. 이러한 과정을 거치면서 이제 국내기술로도 연속운전을 위한 이온원을 제작할 수 있게 되었다.

(가) 이온원 구조

KSTAR Prototype 이온원은 크게 플라즈마 발생부와 빔인출부로 나눌 수 있다. 플라즈마 발생부는 Bucket, Electron Dump, Filament Electrode, Filament 와 고정척, Gasket, Cooling circuit, Langmuir Probe Plate, Cusp 발생 자석 등 많은 부품으로 이루어져 있는 데, 빔전류 65 A를 만들기에 충분한 전류밀도를 확보하기 위해 벽 주위에 Cusp 자장을 만들고 벽과 필라멘트 사이에서 1200 A 수준의 아크 전류를 만들어 낼 수 있는데, 연속 운전이 가능할 수 있도록 모든 부품들은 Active Cooling이 가능한 냉각수회로를 가지고 있다. 또한 연속 운전시 빔인출 그리드들의 열부하 집중에 의한 손상을 방지하기 위해 플라즈마 밀도분포를 감시할 수 있는 Langmuir Probe들을 장착할 수 있는 Probe Plate도 있다.

빔인출부는 플라즈마의 이온들을 빔광학에 의해 가속시키고 집속시켜 필요한 빔을 만들어내는 역할을 한다. 빔인출부는 빔광학 특성에 맞게 설계된 4 개의 그리드와 그리드들을 고정시키고 냉각, 진공 및 전기적 특성을 유지할 수 있도록 해주는 가속전극 및 절연부로 구성된다. 최종적으로 국내에서 제작한 이온원의 구조를 그림 3.1.3.가(1)-1 에 보였다.

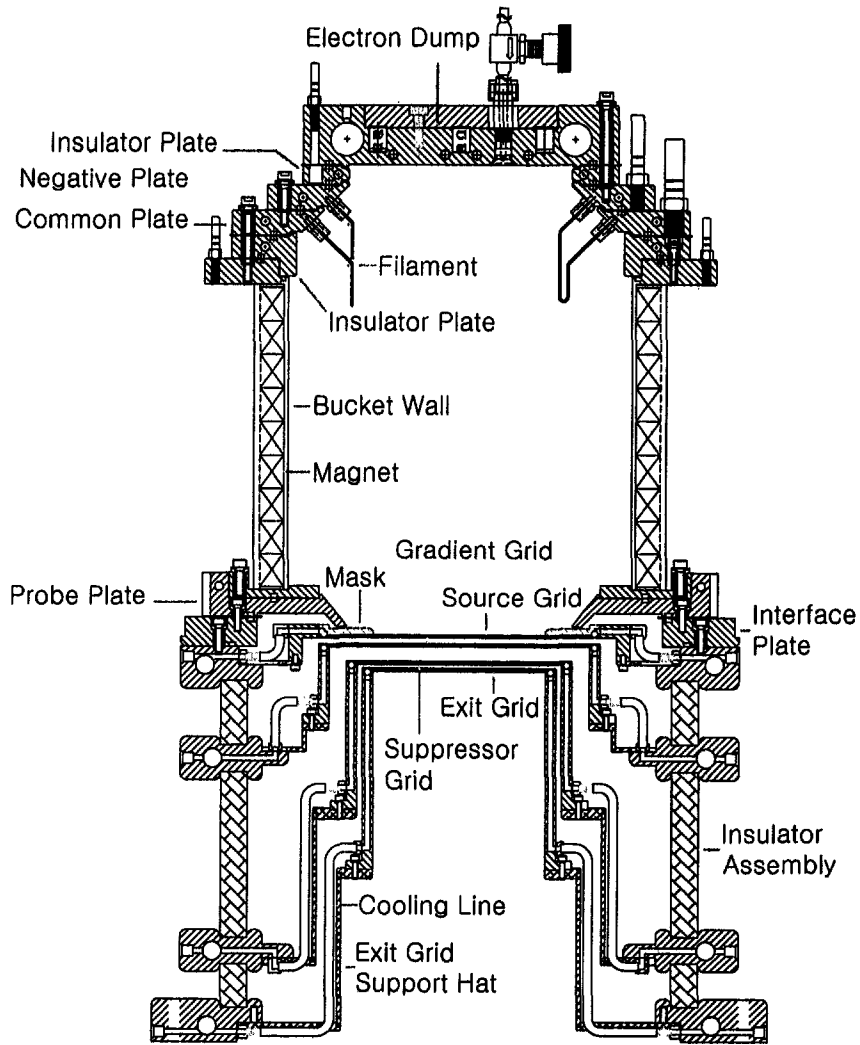


그림 3-1-1 최종 설계된 KSTAR Prototype 이온원 구조

LPIS 이온원의 플라즈마 용기는 260 mm×640 mm의 단면적과 320 mm의 깊이를 가지며, “magnetic multi-pole bucket” 애노드(anode)로 구성되어 있다. 냉각 채널 사이에 영구자석들의 축 대칭 배열 공간은 챔버 내부 벽 주위에 커스프(cusp)필드를 만들기 위하여 정렬되어 있다. 이 영구자석들은 열전자의 평균자유행로를 길게 하여 방전가스의 전리 효율을 좋게 한다. 또한 챔버 내부에는 열전자를 방출하여 방전용기에 들어온 가스들을 이온화시키기 위한 캐소드로써 텅스텐 필라멘트가 사용되는데 32개가 배열되어 있다. 이들 필라멘트는 필라멘트의 고장에 의해 이온원을 다시 청소해줘야 하므로 필라멘트의 고장을 최소화 할 수 있도록 관례적인 방법에 따라 설계되어졌다. 방전용기 내에서 균일한 플라즈마를 얻기 위하여 필라멘트는

두 가지 모양으로 만들었다. 필라멘트는 고온의 열을 발생하므로 냉각되는 필라멘트 어셈블리에 고정된다. 필라멘트 어셈블리는 어셈블리와 백 플레이트(back plate) 사이 양측에 0.3mm 마일라로 절연된 30 mm의 두꺼운 구리 스페이서 판이 있다. 일렉트론 덤프(Electron dump)라 불리는 냉각효율이 좋은 구리 백 플레이트는 역류하는 전자들을 수집하거나 애노드 전극의 기능을 한다. 영구자석은 일렉트론 덤프의 냉각 채널 뒤에 적당하게 배열되어 있다. NBI 장치가 작동하는 동안 플라즈마의 정보를 수집하는 6개의 냉각 탐침이 있다. 이 탐침들은 방전용기 내부의 120×480 그리드 주위에 그리드 판 가까이에 위치한다. 탐침들은 그리드를 가리지 않고, 가속에 의한 역류 전자들로부터 보호하기 위하여 표면에 설치해야 한다.

이온원의 가속기는 4개의 전극구조를 갖는 선형 가속기으로써, 열적 변형을 최소화하기 위하여 그리드 판 4개가 하나의 전극을 형성한다. 각 그리드 사이의 간격은 120 kV에서 운전할 수 있도록 디자인했고, 중수소 빔 65A를 인출해야 한다. 빔 사이즈는 13 cm × 45 cm 이며, $\phi 4$ mm 또는 $\phi 4.4$ mm인 1552개의 원형인출구로 이루어졌다. 무산소동 전극들과 절연체 G10을 예폭시로 접합하여 만들어진 가속부의 진공구조물에 그리드들이 정확한 간격들을 유지하면서 고정되고, 그리드들이 장시간 동안 일정한 빔 인출 특성을 유지할 수 있도록 냉각회로들이 외부로부터 각 인출판을 통해 빔 인출구 사이로 이루어질 수 있도록 구성되었다(그림 3-1-1 KSTAR Prototype Ion Source) .

(나) 플라즈마 발생부 제작

(나)-1. Bucket

플라즈마 방전용기의 열원은 필라멘트, 아크전류 뿐만 아니라 역류전자 등에 의해서 발생한다. 필라멘트나 아크전류에 의한 열은 20 W/cm^2 이하로 방전용기 전체에 대하여 어느 정도 균일하게 기여한다. 그러나 방전용기 벽의 쿨링 채널을 통해 흐르는 냉각효율은 300초 연속운전시 허용된 방전용기 벽의 온도이내에서 효과적으로 냉각시킬 수 있다. 그림 3-1-2에 Bucket Wall의 구조를 보였다.

방전용기의 제작은 무산소동을 사용하여 몸통을 4등분으로 나누어 가공한 후 E-beam Welding하였고, 상하의 플랜지는 방전용기에 브레이징방법으로 접합하였다. 이때 냉각채널은 건드릴을 사용하여 방전용기 자체에 형성하여 브레이징 접합으로 인한 불량률을 최소화하였다.

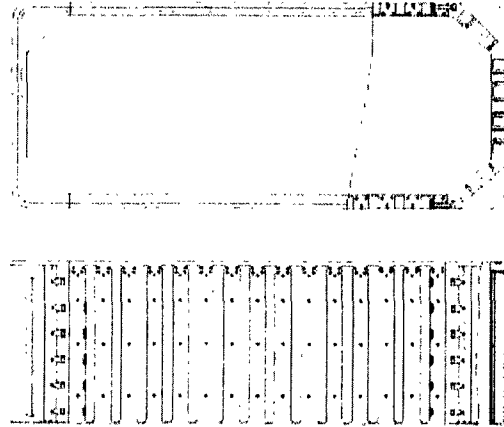


그림 3-1-2 Ion Source Bucket Wall

(나)-2. Electron Dump

일렉트론 덤프는 방전용기의 Anode 전극의 역할을 하면서 역류전자의 에너지를 흡수하는 기능을 한다. 일렉트론 덤프 열원의 주 요인은 역류전자들이다. 역류전자들로부터 발생된 열원은 전체 가속 파워의 0.7%이며, 부하의 50%는 일렉트론 덤프에 흡수된다. 이온원에서 영구자석을 사용하기 때문에 일렉트론 덤프에서 역류전자들의 75% 이상은 일렉트론 덤프의 중심에서 약 5 mm × 365 mm 넓이로 집중될 것으로 예상된다. 일렉트론 덤프에서 소실되는 최대 입사파워는 1.2 kW/cm²이다. 이온원을 300초 동안 운전하기 위하여, 특히 일렉트론 덤프의 중심 커스프(cusp) 영역에서 열 소산 능력을 증진시킬 수 있도록 설계하는 것이 필요하다. 현재 제작되어 실험하고 있는 일렉트론 덤프는 ~10초 이내에서 이온원을 운전하고 있으므로 플레이트로 제작하였다. 차후 일렉트론 덤프를 제작할 때는 2.0 kW/cm²의 냉각효율을 갖도록 냉각채널을 형성하고, 300초 운전이 가능하도록 설계·제작할 계획이다.

(나)-3. Filament Electrode

필라멘트의 전극은 두 개의 플랜지로 이루어 졌는데, 하나는 캐소드 전극의 역할을 하고 하나는 애노드 전극과 공통단자의 역할을 한다. 두 플랜지 사이는 두께 0.3 mm 마일라에 의하여 전기적으로 절연되었다. 필라멘트는 방전용기 내부에서 균일한 플라즈마를 얻기 위하여 두 가지 형태로 만들고 32개를 설치했다. 필라멘트의 고정척은 열적 변형에 강한 몰리브덴 재질로 만들었다. 그림 3-1-3에 제작되어 Filament 들이 고정되어 있는 사진을 보였다.

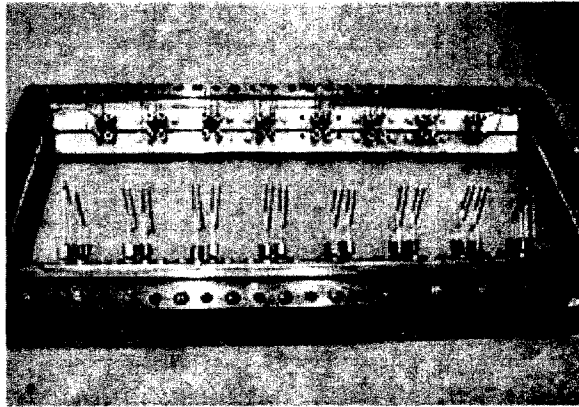


그림 3-1-3 Filament Electrodes and Filaments Assembly

(나)-4. Cooling circuit

이온원의 냉각라인은 고전압부와 그라운드부로 나누어 생각할 수 있다. 고전압부는 버켓과 가속부의 Source Grid와 Gradient Grid에 냉각수를 공급하는 것이고, 그라운드부는 가속부의 Suppressor Grid와 Exit Grid에 냉각수를 공급하는 것을 말한다. 고전압부에 냉각수를 공급하기 위해서는 그라운드에 있는 냉각수 공급 시스템으로부터 전기적인 절연을 해야한다. KSTAR에 이온원을 장착할 경우는 SF₆ 가스를 채운 Transmission Line를 통해 냉각수를 전기적으로 절연하지만, KAERI에서는 등전위구조물을 설치하여 전기적으로 절연하고 있다. 이온원에 공급할 냉각수의 규격은 표 3-1-1.과 같다.

표 3-1-1. 이온원에 공급될 냉각수의 규격

Item			Operation Time(s)		Pulse Load (MW)		Flow Rate (lps)		Water Temp. (°C)			Pressure (kg/cm ²)		Water Quality	
			Base	Up	Base	Up	Base	Up	In	Out		In (B/U)	Out	Base MΩ-cm	O ₂
										Base	Up				
NBI I O N S O U R C E	Ion HV	P. I안	20	300	0.80	1.60	14.7~ 23.4	46.8	35	43.2	48	10/13	3.0	>5.0	<8ppm
		선정	20	300	0.80	1.60	23.4	46.8	35	43.2	43.2	13	3.0	>5.0	<8ppm
	Ion LV	P. I안	20	300	0.40	0.80	8.0~ 11.0	22.0	35	43	43	10/13	3.0	>5.0	<8ppm
		선정	20	300	0.40	0.80	11.0	22.0	35	43.7	43.7	13	3.0	>5.0	<8ppm
	Total	P. I안			1.20	2.40	34.4	68.8							
		선정			1.20	2.40	34.4	68.8							

(나)-5. Langmuir Probe Plate

Langmuir Probe Plate는 버켓과 가속부 사이에 위치하며, 버켓에서 발생된 플라즈마의 밀도분포를 측정하며, 이온원 운전시 밀도분포가 균일하지 않을 경우 이온원 그리드의 보호를 위하여 이온원 운전이 중단될 수 있도록 하는 조치가 필요하다. 버켓 내의 밀도분포를 측정하기 위해 8개의 프로브를 장착할 수 있도록 그림 3-1-4와 같이 되어 있다. Langmuir Probe가 연속적으로 또는 장펄스에서 사용되기 위해서는 탐침에 대한 생각이 이루어져야하지만 현재 생각되지 않는 탐침을 제작하여 사용하고 있다. 탐침의 생각채널이 매우 협소하기 때문에 설계·제작에 주의를 해야 하나, 누수문제를 극복하기 위하여 TPX의 개념적인 디자인이 제안되었다. 이 방법은 플라즈마에 부도체 표면을 드러내지 않고, 탐침에 대한 손상과 작은 누수 문제까지 상당히 줄이는 효과가 있다는 실험결과가 있다. 이 방법을 보완·수정하여 300초 연속 운전이 가능한 Langmuir Probe를 제작할 계획이다. 현재는 10초 이내에서 사용하기 때문에 일반적인 Langmuir Probe를 사용하고 있다.

(다) 그리드 고정 전극 및 절연부 구조

(다)-1. Electrode

이온원의 가속부는 4개의 전극구조를 갖기 때문에 4개의 전극으로 이루어졌다. 4개의 전극은 Source Electrode, Gradient Electrode, Suppressor Electrode, 그리고 Exit Electrode이다. 전극의 재료는 냉간가공으로 가공된 무산소동으로서 가공변형이 발생하지 않도록 제작 전에 잔류응력을 제거하는 적절한 열처리가 선행된 제품을 사용해야 한다. 특히 전극들은 이온빔을 인출하고 그리드 전극을 고정하기 때문에 정밀가공이 되어야 한다. 그리고 전극에는 그리드에 냉각수를 공급하기 위한 냉각라인이 형성되었다.

(다)-2. 절연체 G-10

가속부의 절연체는 전극과 전극사이에 위치하며, 전극에 인가된 고전압에 대하여 전기적인 절연을 해야한다. 그리고 가속부를 고진공이 유지될 수 있도록 진공특성이 좋은 재료를 선정해야하며 진공구조물이므로 견고해야한다. 이런 요구에 부합되는 재질로 G-10을 선정하였다(표 3-1-2).

가속부의 전극은 4개로 이루어졌으므로 전극사이에 3개의 절연체가 필요하다. 이 절연체 각각의 규격은 두께 20 mm, ① 360 mm × 746.5 mm × 125 mm ② 360 mm × 746.5 mm × 48 mm ③ 360 mm × 746.5 mm × 33 mm로 전극의 연결 부분에 맞게 가공하여 전극과 절연체를 에폭시로 접합하였다. 그림 3-1-5에 설계된 구조물을 그림 그림 3-1-6에 제작된 구저물의 사진을 나타내었다. 그림 3-1-7에 절연체로 사용된 G-10의 개스방출률을 나타내었다.

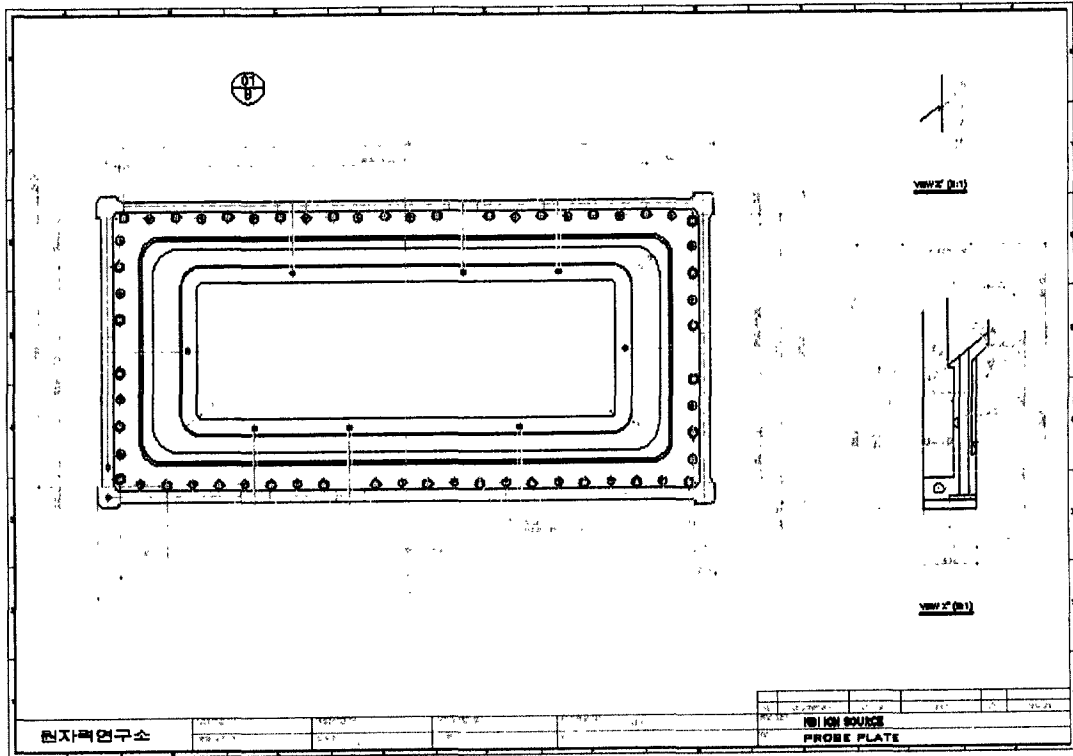


그림 3-1-4 Langmuir Probe Plate

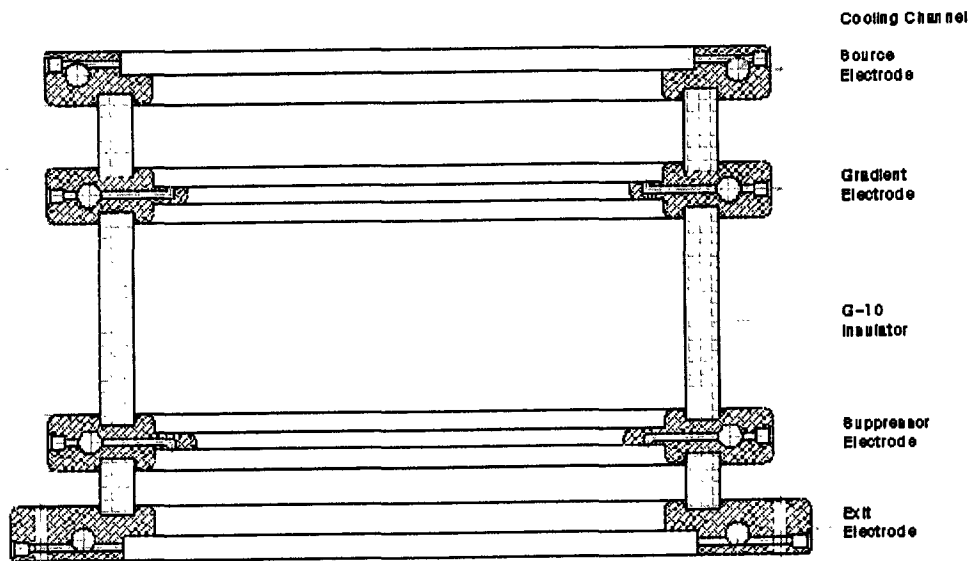


그림 3-1-5 그리드 고정 및 절연체 구조물

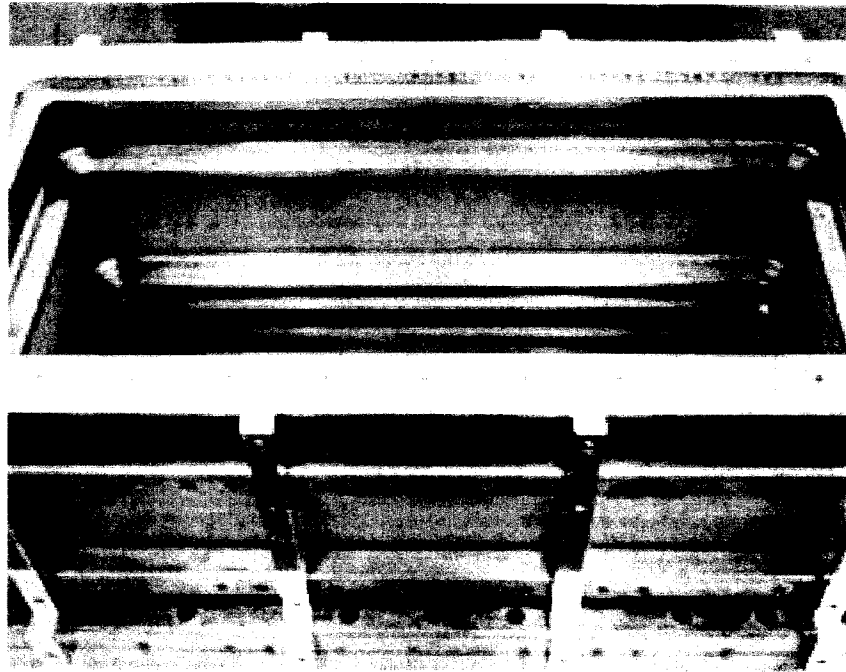


그림 3-1-6 제작된 그리드 고정 및 절연체 구조물

표 3-1-2. G-10의 물성 및 주요 자료

(제공 : HANKUK CARBON CO., LTD.)

PROPERTIES	REQUIREMENT
INSULATION RESISTANCE (Ω)	min. 5×10^{12}
SURFACE RESISTANCE (Ω)	min. 1×10^{12}
VOLUME RESISTANCE ($\Omega \cdot \text{cm}$)	min. 1×10^{13}
MOISTURE CONTENT (%)	max. 0.1
RESIN CONTENT (%)	42 ± 2
GLASS TRANSITION TEMP. ($^{\circ}\text{C}$)	min. 120
VOLTAGE RESISTANCE(kV/mm)	min. 15
TENSILE STRENGTH (kg/mm^2)	min. 30
FLEXURAL STRENGTH (kg/mm^2)	min. 42
COMPRESSIVE STRENGTH (kg/mm^2)	min. 35
FLAMMABILITY	UL 94 HB
COATING RESIN	EPOXY
COLOR	YELLOW GREEN or YELLOW BROWN

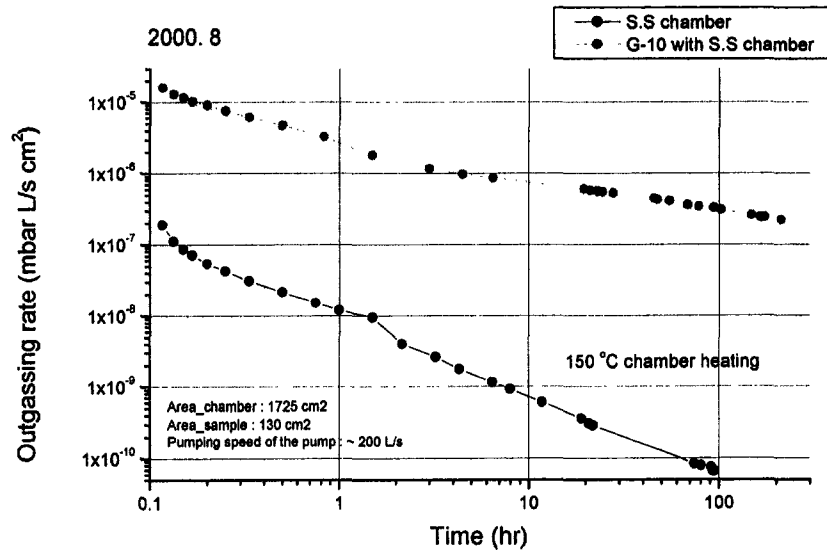


그림 3-1-7 G-10의 Outgassing Rate

(다)-3. 전극과 G-10의 에폭시 접합

전극과 G-10의 에폭시 접합은 접합용 전용지그를 만들어 가속부 높이를 정밀하게 검사하면서 작업해야한다. 전용지그는 1000 mm × 600 mm × t60 mm의 SUS판 두 개와 상하 두 개의 판을 조일 수 있는 가이드 바 6개로 이루어 졌다. 특히 상판의 경우는 140mm × 430 mm로 홈을 만들어 가속부 내부와 외부가 거의 같은 온도를 유지할 수 있도록 해준다.

전극과 G-10접합용 에폭시 선정의 기준은 ① 이온원의 하중을 견딜 수 있는 기계적 강도 필요하고, ② 10^{-7} Torr 이상의 고진공 특성이 있고, ③ 정밀치수를 유지할 수 있는 제품이며, ④ 작업성이 용이한 제품이다. 몇 가지 제품을 선정하여 테스트 과정을 거쳤는데, Aremco-bond 631이 요구조건에 만족하여 선정하였다.

접합면의 표면처리는 G-10보다 구리인 전극의 표면처리에 중점을 두었다. 전극의 표면처리는 널링과 스크래치 등 기계적 표면처리보다 화학적 표면처리방법을 선택하였다. 화학적 표면처리는 접합면에 대하여 탈지, 산처리 그리고 활성화 처리과정을 거쳐 접합하였다. 이때 에폭시 접합시 접합면의 접착력을 좋게 하기 위해 ~ 100 °C 정도로 온도를 유지할 필요가 있다. 이것은 300 W의 핫 밴드와 온도제어시스템으로 일정한 온도를 유지하면서 에폭시 접합을 수행하였다.

(라) 가속 그리드 설계

(라)-1. 이온원 전극 설계를 위한 기본 parameter 결정[1]

이온원의 빔 인출을 위한 가속부는 50 kV 이하의 경우 3단 가속(플라즈마 전극, 감속 전극, ground 전극)으로 충분하지만, 전압이 이 보다 높아지면 중간에

gradient 전극을 더 넣어서 플라즈마 전극과 감속 전극사이의 전위분포를 따로 제어해주는 것이 훨씬 효과적이다. gradient 전극으로 중간의 전위 분포를 적절히 제어함으로써 3 단 가속에 비해 좋은 렌즈 효과를 얻을 수 있고, V_{PG}/V_{GG} (V_{PG} : Applied Voltage between Plasma Grid and Ground Grid, V_{GG} : Applied Voltage between Gradient Grid and Ground Grid) 비의 조절에 의해 플라즈마 조건 맞는 운전 조건을 만들어 줄 수 있는 범위를 넓혀주고, 대전류 및 준 운전 조건에 중요한 열부하 분산 역할을 해 줄 수 있다. 대전류 빔인출을 위한 4 단 가속부의 설계에 필요한 중요한 변수들을 그림 3-1-8에 정리하여 표시하였고, 이 변수들을 결정하는 방법 등에 관하여 논의한다.

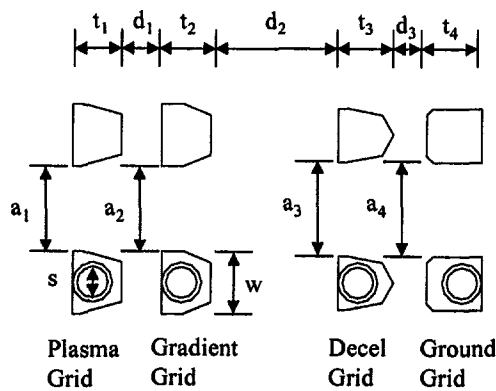


그림 3-1-8 4 단 가속 대전류 빔 인출 가속 전극 설계에 필요한 변수들

(라)-1.1. 전극두께의 결정

전극의 최소 두께(t_1, t_2, t_3, t_4)는 인출구 형상 가공과 필요한 냉각 채널확보를 위해 필요한 최소한의 판의 두께에 의해 결정이 되고, 최대두께는 냉각효과를 극대화하고 전극의 수명 및 경제성 등을 고려하여 결정하게 된다. 보통 양이온원의 경우 전극의 두께는 무산소동으로 제작할 때 1.5 mm에서 3.5 mm 이내의 두께로 제작되는 것이 일반적인데, 장시간 운전에 필요한 냉각수 채널을 확보하면서 대전류 빔인출을 위한 충분한 투과도(transparency)의 확보를 위해 최소 내경 1.2 mm의 냉각관이 전극의 내부를 통과할 수 있도록 전극의 두께를 플라즈마 전극과 gradient 전극의 두께는 2.2 mm 로, 감속전극과 ground 전극은 2.5 mm 로 JAERI에서 제작한 양이온원[2]과 동일한 값으로 결정하였다. 냉각능력에 대한 검토는 이에 대한 검토는 4장에서 수행하였다.

(라)-1.2. 전극 구경의 결정

전극의 구경은 빔의 투과도를 결정하는 데 중요한 역할을 하기 때문에 동일한 면적의 전극에서 가능한 한 많은 전류의 빔을 얻기 위해서는 크게 하는 것이 좋겠지만 빔 광학적 측면에서 전극구경이 전극 두께에 비해 너무 크면 인출구의 가공 효과가 없어지면서 빔의 수송효율이 떨어지게 되고, 반대로 전극 구경이 전극 두께에 비해 너무 작으면 인출구 주위에 만들어지는 수차에 의한 손실이 커져서 빔 휘도가 나빠지게 된다. 표 3-1-3에 인출구경에 따라 13 cm x 45 cm 면적의 빔으로부터 얻을 수 있는 투과도와 전류밀도에 따른 예상 인출 전류를 계산한 결과를 보였다. 또한 플라즈마 전극의 구경은 다음절에서 논의하는 바와 같이 전극과의 거리도 고려하여 결정해 주어야하는 값으로 보통 전극 두께의 1.5 - 3 배 내에서 결정을 하게되는 데, 다음절에서 결정할 전극간의 거리(4.5 mm)를 고려하여 플라즈마 전극과 gradient 전극의 인출구의 직경은 4 mm로 하고, 감속전극과 접지전극의 인출구 직경은 플라즈마 전극의 경우보다 조금 큰 4.4 mm로 결정하였다. 표 3-1-1에서 보였듯이 플라즈마 전극의 인출구를 4 mm로 할 경우 이온원의 투과도는 35 %이지만, 직경을 5.4 mm로 하면 빔 투과도를 40% 이상 올릴 수 있으나 전극간의 거리보다 인출구의 직경이 커짐으로서 생기는 빔의 질의 저하를 우려하여 4 mm로 최종적으로 결정하였다.

표 3-1-3. 인출구경에 따른 빔 투과도 및 인출 전류의 변화

hole dia.(mm)	5.4	4.5	4
cooling channel width(mm)	2.8	2.8	2.8
bare channel width(mm)	1.2	1.2	1.2
emission length(S)(mm)	450	450	450
emission length(L)(mm)	130	130	130
beam current density(A/cm ²)	0.3	0.3	0.3
transparency	0.42	0.38	0.36
beam current(A)	74.27	67.08	62.37
beam current per a hole(A)	0.07	0.05	0.04
hole number	1081	1406	1654

(라)-1.3. 전극간 거리의 결정

전극간의 거리를 결정하는 데 고려해야할 parameter들로는 빔의 광학적 렌즈 효과를 극대화 시켜주기 위해 전극간의 거리가 인출구의 반경보다 크게 유지시켜주어야 한다는 조건 외에, 두 전극 사이에 걸리는 고전압을 견딜 수 있도록 충분한 거리를 유지시켜야한다는 조건과 빔인출 전류($I \propto a^2/d^2$)가 전극간의 거리의 제곱에 반비례하기 때문에 가능한 한 많은 전류를 뽑아내기 위해서는 전극간의 거리를 좁혀야한다는 조건을 절충시켜 최대의 전류를 안전하게 뽑아낼 수 있도록 설계되어야 한다는 것이다. 실험적으로 이온원 운전 가능 전압이 11 kV/mm 정도임을 감

안하고 다음 장에서 보인 beam optics 계산 결과들을 근거로 다양한 플라즈마 및 운전 조건의 변화에 대응하기 위해 V_{PG}/V_{GG} 비를 0.9에서 0.65까지 운전이 가능한 최소한의 전극간의 거리를 결정하였다. 120 kV의 빔을 인출할 경우 운전조건에서 V_{PG}/V_{GG} 비를 0.9에서 0.65로 변화시킨다는 것은 플라즈마 전극과 gradient 전극간의 최대 45 kV가 걸리고 gradient 전극과 감속전극간에 최대 110 kV가 걸린다는 것을 의미한다. 진공 중에서 전극의 간격에 의해 유지할 수 있는 전압이 거리에 비례하지는 않지만 대부분의 이온원 설계에서는 비례법칙을 적용하여 설계하고 있기 때문에 본 연구에서도 mm당 전될 수 있는 전압을 10 kv로 적용하여 플라즈마 전극과 gradient 전극간의 거리(d1)는 4.5 mm, gradient 전극과 감속전극간의 거리(d2)는 11 mm, 감속전극과 접지 전극 간의 거리(d3)는 2.5 mm로 결정하였다.

(라)-1.4 가속전극 절연부 길이의 결정

이온원 가속전극 사이에서 전극들을 고정하고 전극 외부를 통한 방전을 방지하게 하기 위한 절연부는 진공특성, 재료의 가공특성 및 조립 후 기계적 강도를 고려하여 세라믹 또는 에폭시 그라스를 적층한 것을 가공하여 만들 수 있다. 절연부의 길이를 결정하는 데 고려해야 할 parameter 들로는 공기의 절연파괴 전계가 30 kV/cm 임을 고려하여 일시적으로 두 전극간에 arcing 이 발생해서 나머지 두 전극간에 모든 전압이 집중되더라도 절연체를 통해서는 방전이 발생하지 않도록 충분한 간격을 유지해 주어야 한다는 것이다. 그렇지 않을 경우 반복되는 방전피로에 의해 절연부의 절연강도가 점점 약해지게 되어 최종적으로 절연부로서의 역할을 못하게 되어 최악의 경우 가속부를 전체적으로 교체해야 하는 결과를 초래할 수 있다. 절연체의 길이는 각 전극에 걸릴 전압(전극간격)에 비례하면서 기존의 가속부 전극구조(TFTR 이온원)를 가능한 그대로 이용할 수 있도록 플라즈마 전극과 gradient 전극간의 절연체 길이는 55 mm, gradient 전극과 감속전극간의 절연체 길이는 125 mm, 감속전극과 접지 전극 간의 절연체 길이는 30 mm로 결정하였다. 절연체 길이는 전극구조가 평판형인 경우 문제가 되지 않지만 전극과 절연부의 구조가 부분적으로 전계를 강하게 만들어 공기 절연파괴 전계인 30 kV/cm를 부분적으로 넘게 만들어 방전 파괴를 일으킬 수 있기 때문에 전극과 절연체의 구조를 설계하는 데도 고려되어야 할 부분이다. 실제로 이온원을 120 kV로 운전할 때는 SF₆ gas를 이온원 외부에 채워준 상태에서 하기 때문에 더 안전한 운전이 될 것으로 기대된다.

(라)-2. 최적 빔 인출구 형상의 결정

이온원 설계에 있어서 빔인출구의 형상은 빔의 발산각(divergence), 수차(aberration) 및 열부하 등을 결정하는 중요한 요소 중의 하나로 플라즈마 전극의 형상은 최초의 빔 발산각이 최소화할 수 있는 구조로, gradient 전극은 플라즈마 전극 인출구멍의 주변을 지나온 이온들의 렌즈 수차를 작게 해주는 구조로, 감속전극의 모양은 전극표면에서 방출된 2차 전자들이 상위의 인출 전극들에 열부하를 주지 않도록 하는 구조를 갖도록 만들어주어야 한다. 인출구 형상의 결정은 빔인출 시

플레이션을 수행할 수 있는 코드를 사용하여 빔 인출조건에 적합한 최적의 형상을 결정해 낼 수 있는데, 이온빔의 최초 방출각을 결정하는 플라즈마 전극의 형상은 Larry Grisham[3] 등이 수행한 Pierce 형의 인출구를 기준으로 최초의 형상을 결정하고, 나머지 인출구의 형태는 JAERI ion source를 기준으로 작업을 시작하였다. 그림 3-1-9은 플라즈마 전극의 모양만을 변경시키고 빔인출 시뮬레이션을 수행한 결과를 발산각과 에미턴스를 비교하여 인출구의 효율성을 판단할 수 있도록 정리한 그림이다. 플라즈마 전극의 모양이 Larry Grisham 등에 의한 형상과 형상가공을 하지 않은 직사각형 단면 형상과의 중간 모양을 가질 경우가 더 빔의 인출 특성이 좋아짐을 알 수 있었다. 이는 Larry Grisham 등이 수행한 전극의 경우 빔에너지가 40 kV 이내로 3단 가속에 의한 빔인출일 경우에서 도출된 결과이기 때문에, 이온원의 인출 전류와 인출 에너지가 증가하게되면 당연히 요구되는 변화이다. 같은 방법으로 gradient 전극, 감속 전극 및 접지 전극의 형상을 변화시키면서 형상 변화에 의한 빔의 영향을 관찰한 결과를 그림 3-1-10 및 그림 3-1-11에 정리하였는데, 이온원 전극 한 개를 구성하는 빔 인출구의 수가 1000개 이상이나 되기 때문에 인출구의 형상 가공에 들어가는 노력이 만만치 않아서 인출구의 형상을 단순화시킬 수 있는 가능성도 동시에 판단하였다. 시뮬레이션 결과 그림에서 보여주는 것처럼 플라즈마 전극 외의 전극들은 형상 가공을 굳이 하지 않아도 빔인출 특성에 크게 영향을 미치지 않았기 때문에 인출구들의 최종 형상을 플라즈마 전극만 가공하고 나머지 전극들은 그대로 두는 형태를 취하도록 설계하였다.

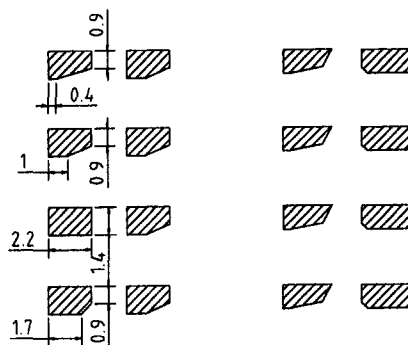


그림 3-1-9 플라즈마 전극의 인출구 형상에 따른 인출 빔의 특성

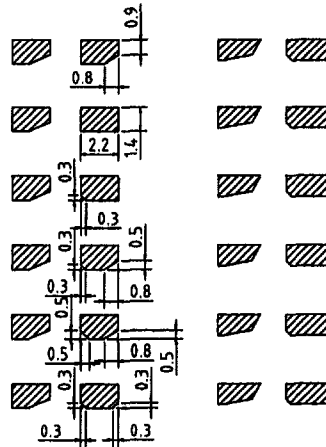


그림 3-1-10 gradient 전극의 인출구 형상에 따른 인출 빔의 특성

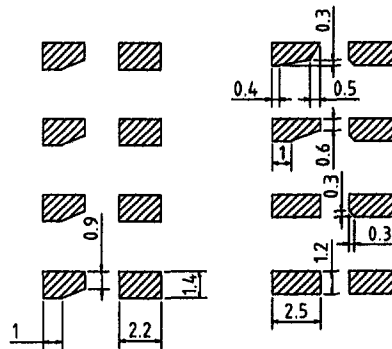


그림 3-1-11 감속 전극 및 플라즈마 전극의 인출구 형상에 따른 인출 빔의 특성

(라)-3. 전극 냉각구조 설계 및 열 해석결과

이온원이 장시간 운전되기 위해서는 인출구 주변에 냉각관들이 적절히 설치되어 이온 빔 또는 역류되는 전자들에 의해 발생하는 열부하를 충분히 제거해 줄 수 있어야 한다. 설계된 전극의 두께가 2.2 mm와 2.5 mm인 것을 감안하여 내경 1.2 mm의 냉각관이 전극 인출구들 사이에 놓여지게 된다. 전극구간의 거리는 오차를 포함한 인출구 형상 및 냉각관 가공 공간과 필요한 transparency 확보를 위해 최적의 값이 선택되어야 하는데 설계된 이온원의 경우 냉각관과 평행한 방향의 거리는 플라즈마 전극의 경우 1.2 mm, 다른 전극의 경우 0.8 mm이고, 냉각관과 수직인 방향으로 인출구 사이의 거리는 플라즈마 전극의 경우 2.8 mm, 다른 전극의 경

우는 2.4 mm 이다.

이온원 전극의 열부하는 이온원 자체의 특성상 골고루 나누어져서 가해지는 것이 아니기 때문에 최악의 경우를 아래와 같이 상정하여 ANSYS 프로그램[3]을 사용하여 열부하가 가장 많은 플라즈마 전극에서 수행한 열해석 결과를 그림 3-1-12에 나타내었다.

플라즈마 전극 : 상판 : 153 W/cm^2 (arc & filament power)

밀판 : 183 W/cm^2 (1.5 % total power)

그 외 전극 : 밀판 : 183 W/cm^2 (1.5 % total power)

냉각관 물의 유속이 6 m/sec 가 되기 위해서는 한 set 의 전극 당 약 0.5 liter/sec 의 물을 공급해 주어야하는데, 최대 온도점은 역류 전자에 의해 집중적으로 열을 받는 밀판에서 형성되고 최대온도가 186° C 로 무산소동의 용융점이 1084.5° C , 재질 변성점 약 500° C 임을 고려하면 설계된 냉각 설비가 충분함을 알 수 있다. 이 때 냉각수의 온도 상승은 49.53° C 로 허용 온도 상승치 50° C 이하를 만족하는데, 냉각관 속을 흐르는 물의 유속을 9 m/sec로 만들어주었을 때 물의 온도상승을 40° C 이하로 낮출 수 있고, 다른 전극의 경우도 열부하가 집중적으로 일어나더라도 최대 온도 형성점이 200° C 내외에서 만들어짐을 확인하였다. 실제 전극들의 열부하는 계산에서 입력으로 준 값들보다 충분히 낮을 것이기 때문에 설계된 전극들의 냉각능력은 열부하에 건전하다는 것을 알 수 있다. 열해석에서 사용한 열전달계수 [4]는 구리 관에서 일반 조도($\sim 3\text{s}$)를 적용하여 냉각수의 레이놀드 수(Re)와 플란틀 수(Pr)를 구하여 누셀트 수(Nu)를 실험식 $Nu = 5.8 + 0.02(\text{Re Pr})^{0.8}$ 으로 구하였는데 냉각수 유속이 6 m/sec인 경우 $34490 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 이고, 9m/sec 일 때 $47705 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 이었다. 냉각관은 구경이 작지만 관길이가 20 cm 내외이기 때문에 관의 입출구 압력 차는 거의 무시할 수 있는 수준이다.

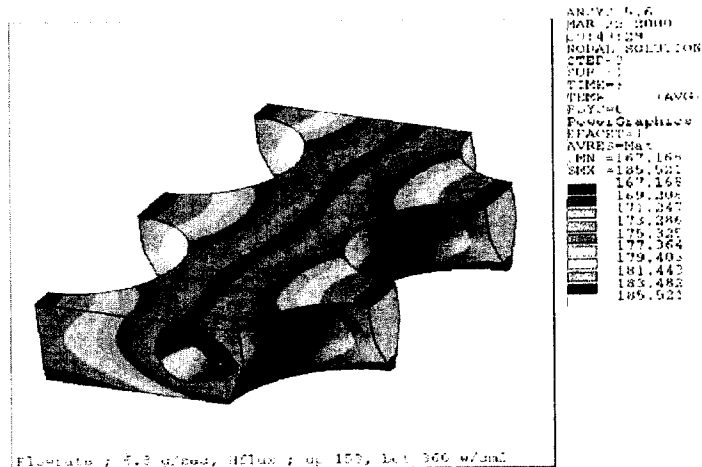


그림 3-1-12 플라즈마 전극의 열해석 결과
(냉각관 물의 유속이 6 m/sec 인 경우)

(라)-4. 운전 및 오차에 의한 영향평가

가속전극들이 완성되어 실제 빔을 인출하는 단계에 이르게 되면 설계하는데 사용한 조건과는 달라질 수 있는 변수들이 운전에 영향을 미칠 뿐만 아니라 목표한 이온원의 성능을 제대로 못 내게 할 가능성도 무시할 수 없다. 본 장에서는 운전에 영향을 줄 수 있는 변수들의 변화에 따른 인출 빔의 특성을 파악하여 가능한 변화에 충분히 대응할 수 있는가에 대한 검토작업을 수행한 결과에 대해 논의한다.

(라)-4.1. 운전 전압에 따른 빔 인출 특성

이온원의 가속전극은 인출하는 빔의 종류, 에너지 및 전류에 적합하도록 인출구의 구경과 형태, 전극간의 간격 등이 결정된다. 빔을 인출하는 전압이 달라지면 운전 조건도 달라져야하는데, 본 연구에서의 인출 전극의 설계가 120 kV, 65 A($V_{PG}/V_{GG} = 0.75$)의 중수소 빔을 기준으로 설계되었기 때문에 인출 전압이 변화하였을 때도 정상적인 빔을 어떤 조건에서 얻을 수 있는가를 판단하기 위해 인출전압에 따른 빔 인출 시뮬레이션을 수행하였다. 인출전압이 100 kV, 80 kV, 30 kV 일 때 정상적인 빔을 얻어낸 결과를 그림 3-1-13에 나타내었다. 그림에서 보듯이 120 kV에서 설계된 전극이지만 운전조건 중 V_{PG}/V_{GG} 비와 플라즈마 밀도를 적절히 조절해 줌으로서 전압에 대응하는 양질의 이온빔을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

(라)-4.2. 플라즈마 이온 밀도에 따른 빔 인출 특성

이온원의 빔 인출 조건은 플라즈마 밀도에 따라 크게 달라질 수 있다. 플라즈마 이온 밀도가 필요한 값보다 많거나 작으면 운전조건을 바꿔주지 않는 한 정상상태의 빔을 얻을 수 없다. 그림 3-1-14는 동일한 운전조건에서 인출 빔이 전류밀도에 어떤 영향을 받는가를 보기 위해 전류밀도의 변화에 따른 빔인출 결과를 정리한 그림이다. 전류밀도가 증가하면 이온들의 공간전하에 의한 반발효과가 빔을 벌어지게 만들고, 전류밀도가 감소하면 반대로 과집속 상태가 되어 빔 수송이 불안정해짐을 볼 수 있다. 밀도의 변화에 대응하여 V_{PG}/V_{GG} 값을 적절히 조절해 줌으로서 그림 3-1-15과 같이 양질의 빔을 인출 할 수 있다.

(라)-4.3. 운전조건 V_{PG}/V_{GG} 에 따른 빔 인출 특성

플라즈마 상태에 따라 바뀔 수 있는 빔인출 특성의 변화는 운전 조건을 제어함으로써 인출 빔의 모양을 최적으로 만들어 갈 수가 있다. 이온원 운전시 제어가 가능한 운전 조건 중 가장 효과적인 것이 V_{PG}/V_{GG} 의 제어이다. 그림 3-1-16는 120 kV의 빔을 인출할 때 V_{PG}/V_{GG} 에 따른 빔의 특성을 보여주고 있는데, V_{PG}/V_{GG} 값을 작게 해줄수록 빔을 집속시켜 주는 효과가 있음을 볼 수 있다.

UP=80010.6, TE=3.0 eV, UI=3.0 eV, MASS=2.0, TI=0 eV, USPUT=0 U
 2.83E-2 A, 0.250 A/cm**2, 9.20E11/cm**3, DEBYE=0.134 UNITS, HOLD OF DENS



(a) $V_{acc} = 100 \text{ kV}$ $V_{PG}/V_{GG} = 0.7$ $\sigma = 0.275 \text{ A/cm}^2$ (σ ; 인출전류밀도)

UP=30010.6, TE=3.0 eV, UI=3.0 eV, MASS=2.0, TI=0 eV, USPUT=0 U
 6.34E-3 A, 6.00E-2 A/cm**2, 2.21E11/cm**3, DEBYE=0.273 UNITS, HOLD OF DENS



(b) $V_{acc} = 80 \text{ kV}$ $V_{PG}/V_{GG} = 0.7$ $\sigma = 0.25 \text{ A/cm}^2$

UP=100010.6, TE=3.0 eV, UI=3.0 eV, MASS=2.0, TI=0 eV, USPUT=0 U
 2.98E-2 A, 0.275 A/cm**2, 1.01E12/cm**3, DEBYE=0.128 UNITS, HOLD OF DENS



(c) $V_{acc} = 30 \text{ kV}$ $V_{PG}/V_{GG} = 0.67$ $\sigma = 0.06 \text{ A/cm}^2$

그림 3-1-13 인출전압에 따른 빔 인출 조건의 변화

UP=120010.6, TE=3.0 eV, UI=3.0 eV, MASS=2.0, TI=0 eV, USPUT=0 V
 3.80E-2 A, 0.350 A/cm**2, 1.29E12/cm**3, DEBYE=0.113 UNITS, HOLD OF DENS

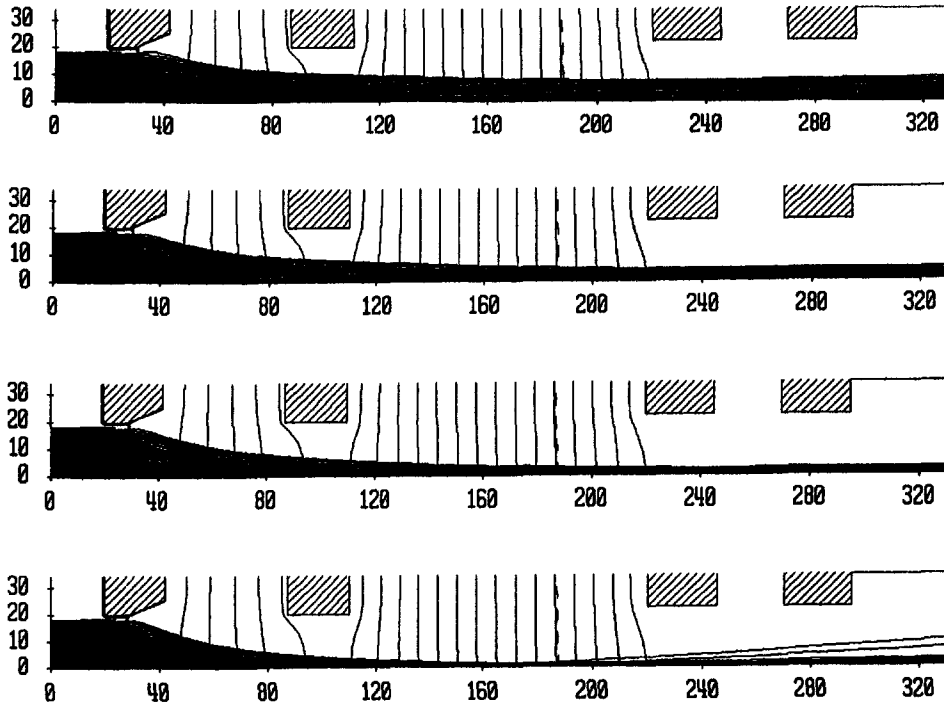


그림 3-1-14 전류밀도의 변화에 따른 빔인출 결과(120 kV, $V_{PG}/V_{GG} = 0.75$)
 (위로부터 $\sigma = 0.35 \text{ A/cm}^2$ $\sigma = 0.3 \text{ A/cm}^2$ $\sigma = 0.25 \text{ A/cm}^2$ $\sigma = 0.2 \text{ A/cm}^2$)

UP=120010.6, TE=3.0 eV, UI=3.0 eV, MASS=2.0, TI=0 eV, USPUT=0 V
 2.17E-2 A, 0.200 A/cm**2, 7.36E11/cm**3, DEBYE=0.150 UNITS, HOLD OF DENS



그림 3-1-15 밀도의 변화에 대응한 이온원의 운전 결과
 (120 kV, $\sigma = 0.2 \text{ A/cm}^2$, $V_{PG}/V_{GG} = 0.85$)

UP=120010.6, TE=3.0 eV, UI=3.0 eV, MASS=2.0, TI=0 eV, USPUT=0 V
 3.26E-2 A, 0.300 A/cm**2, 1.10E12/cm**3, DEBYE=0.122 UNITS, HOLD OF DENS

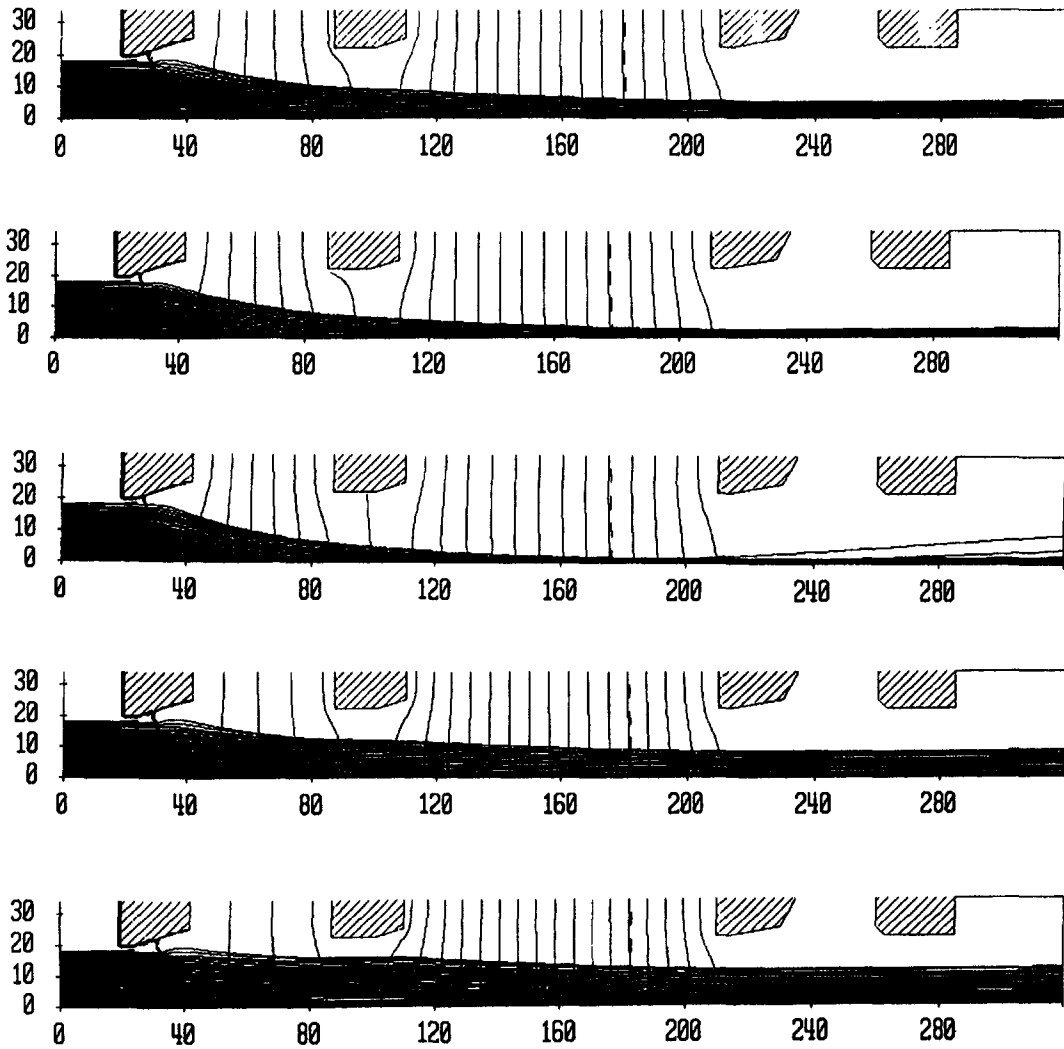


그림 3-1-16 120 kV 빔의 인출 시 V_{PG}/V_{GG} 에 따른 인출 빔의 특성
 (위로부터 $V_{PG}/V_{GG} = 0.75$ $V_{PG}/V_{GG} = 0.71$ $V_{PG}/V_{GG} = 0.67$ $V_{PG}/V_{GG} = 0.79$ $V_{PG}/V_{GG} = 0.83$)

(라)-4.4. 가속전압의 리플에 따른 빔 인출 특성

지금까지의 결과에서 예측할 수 있듯이 가속전원의 전압이 변하면 그에 따른 빔 인출 특성도 달라지기 때문에 전원 자체의 전압 리플 크기가 빔의 질을 결정하는 요인이 될 수도 있다. 그림 3-1-17은 120 kV 가속 전극의 전압 리플이 1%인 경우와 5%인 경우 인출 빔의 특성을 자세히 보기 위해 인출 빔의 수를 더 늘이고

인출영역을 빔 인출구 끝까지 확대하여 시뮬레이션 한 결과를 보여주고 있다. 리플이 1 % 인 경우 인출특성이 크게 변하지 않으나 리플이 5 %가 되면 심각한 결과를 초래함을 알 수 있는데, 실제 KSTAR 중성빔 입사장치의 이온원의 경우 gradient 전극의 전압은 독립적인 전원으로 이루어지는 것이 아니고, 가속전원에서 저항들을 이용하여 분압시킨 전압을 공급하게 되기 때문에 가속전극의 리플은 gradient 전극의 리플의 파형과 정확하게 일치하게 된다. 그림 3-1-18은 가속전극과 gradient 전극 모두에 5 %의 리플이 동시에 주어졌을 때 빔 인출 결과를 보인 그림이다. 그림에서 보여주듯이 인출 빔의 특성이 독립적인 전원을 쓸 때보다 매우 개선됨을 알 수 있는데, 저항분압 방식으로 gradient 전극의 전압을 공급하게 되면 2 % 이내의 리플은 크게 빔 특성에 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

(라)-4.5. 인출구 가공 오차 및 감속전압에 따른 빔의 특성

1000 개가 넘는 인출구를 하나씩 가공할 때 가공오차가 생길 수 있고 또한 가공 후에 전극들을 고정하는 과정에서 정렬오차도 생길 수 있다. 이러한 경우 오차를 얼마로 해야 할 것인지에 대한 평가를 내리기 위해서는 오차에 따른 인출빔의 특성이 정확하게 파악되어야 한다. 그림 3-1-19(a)는 플라즈마 전극의 인출구 구경의 크기를 변화시킬 때 그에 따른 인출빔의 변화를 추적한 그래프이고, 그림 3-1-19(b)는 gradient 전극의 구경을 변화시켰을 때의 결과들을 그래프로 나타낸 것이다. 그림에서 플라즈마 그리드의 가공이 매우 정확하게 이루어져야 함을 알 수 있는데, 1 % 이내의 오차 내에서 가공이 이루어지면 발산각이 0.1° 이내에서 제어될 수 있음을 알았다. 전극들의 정렬오차에 대한 평가는 IGUN 프로그램[5]이 원형 좌표계에서 축방향으로 비대칭인 경우에는 계산이 불가능하여 정확한 결과를 평가할 수 없었으나 인출구의 가공오차 데이터들로부터 비슷한 결과를 얻을 수 있음을 추정할 수 있다. 그림 3-1-20은 가속전극의 전압을 변화시킬 때 인출빔의 특성변화를 본 그래프인데, 감속전극의 전압은 120 kV 빔 인출의 경우 -5kV 까지 거의 영향이 없음을 알 수 있었다. 단 전자들의 궤적에는 영향을 미칠 수 있기 때문에 이에 대한 평가가 이론적으로 또는 실험적으로 필요하다.

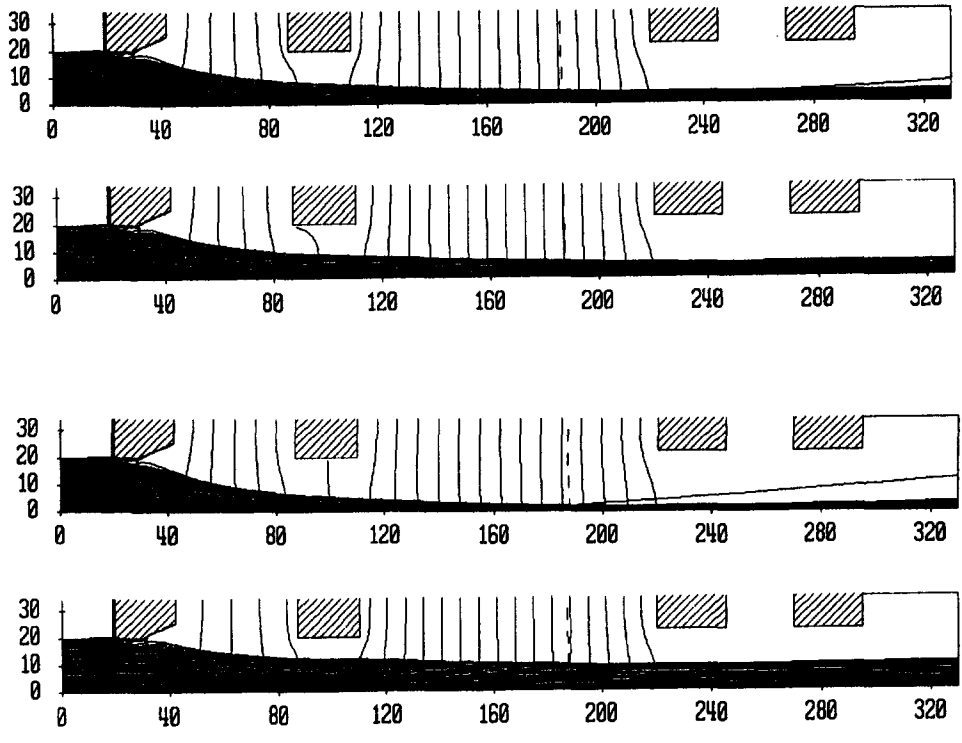
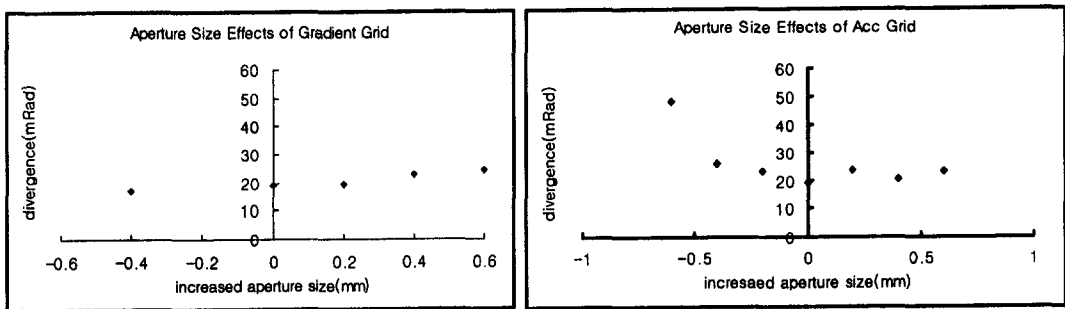


그림 3-1-17 가속 전극의 전압 리플에 따른 인출 빔의 특성
(위로부터 ripple +1%, -1%, +5%, -5%)

그림 3-1-18 가속전극과 gradient 전극에 동시에 5%의 리플이 주어졌을 때 빔 인출 특성



(a) 플라즈마 전극

(b) 그리드 전극

그림 3-1-19 전극 구경의 가공오차에 따른 인출빔의 특성

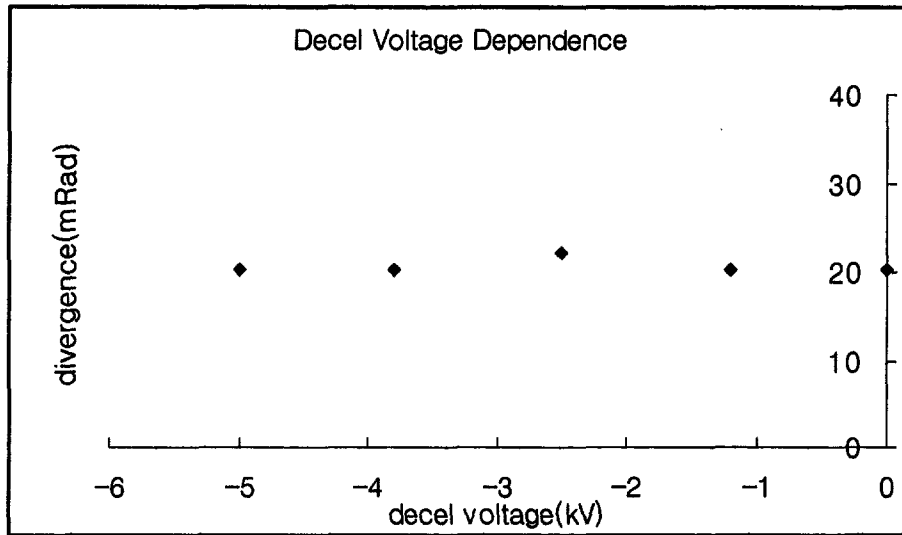


그림 3-1-20 감속전압의 변화에 따른 인출 빔의 특성

(라)-5. 결과 및 논의

이온원의 설계에 필요한 parameter 들을 일정한 규칙에 의하여 결정하고 그 결과들을 검증하는 작업을 수행하였는데, 설계 parameter들의 검증은 IGUN 프로그램을 사용하였다. 전반적으로 IGUN에 의한 빔인출 시뮬레이션 결과가 실제 실험결과와 정확하게 일치할 것이라는 보장은 없지만 몇 가지 parameter들의 변화에 따라 그 결과가 전체적으로 어떤 경향을 띄는가를 유추할 수 있는 수단으로 설계에 이용될 수 있었다. 인출구의 형상은 가공비용과 그 효과를 검토한 결과 플라즈마 전극만 정확하게 형상가공을 수행하고 나머지 전극들은 드릴로 전극 판에 구멍을 가공하는 것만으로도 거의 비슷한 성능의 빔을 인출할 수 있는 것으로 나타났기 때문에 단순화한 설계를 최종안으로 확정하였다. 단 감속전극의 경우 전자들의 궤적이 어떻게 형성되는가가 전극 설계에 영향을 주기 때문에 전극 형태에 따른 전자 궤적들을 검토해야 할 필요성이 있다. 전극의 열해석은 열부하를 최악의 상태로 가정하고 수행한 결과 비정상적으로 열부하가 집중되는 현상이 발생하지 않는 한 정상적으로 장시간 운전하는 데 무리가 없는 것으로 계산되었다. 열해석 결과가 더 진행되어 전극의 변형에 의한 빔인출 특성이 파악될 수 있으면 좋은 설계자료가 될 수 있을 것이지만, 인출구경의 가공오차에 의한 빔의 특성 결과로부터 유추하면 0.2 mm 이내의 변형은 큰 문제를 일으키지 않을 것으로 판단된다.

설계에 필요한 기본 parameter들을 결정한 후 이보다 더 중요한 것은 이것들에 의해 실제 전극을 어떻게 제작하고 시험에 의해 검증을 수행하느냐하는 것이다. 다음은 전극들을 가공하고, 최종적으로 가공된 전극들로 가속부 전체를 제작하는 작업을 다음과 같은 기본 원칙 하에서 수행한다.

- a. 기존의 brazing 작업에 의해 냉각관을 배치시키는 작업대신 냉각관(내경 1.2

mm)을 super drill에 의해 전극 판에 직접 가공한다. 이러한 가공 방법에 의해 어려운 brazing을 피함으로써 제작비용이 절감되고 표면 상태가 개선되어 high-voltage holding property가 개선된다. 냉각 관들은 전극 양옆 면에 가공된 manifolder 들과 연결되어 전체 냉각수 회로를 이루는 데 manifolder들의 최종 마무리는 무산소동의 연결화가 일어나지 않는 450 °C 이하의 온도에서 brazing으로 마무리한다.

b. 현재 제작된 slit 그리드의 냉각 관 구조는 slit 내를 일일이 통과하는 냉각관 구조를 만들기 위해서 전극 전체를 지지하는 지지구조물에도 각 slit들과 연결될 냉각 채널을 만들어주어야 하는 복잡한 작업이 필요하나, 새로 제작하는 원형 전극의 냉각구조는 전극판 주변에 냉각수 manifolder를 배치시켜 지지구조물까지 냉각관 관로들을 만들어야하는 복잡함을 없애고 단순화시킨다. slit 전극 구조에서는 열팽창에 유동적이기 위해지지 구조에까지 독립적인 냉각관로가 필요하였지만 원형 인출구 전극인 경우 일체형으로 제작되기 때문에 단순화시킬 수 있다.

c. 냉각관로의 가공이 까다롭기 때문에 가공 실패 시 발생될 비용을 절감시키고, 유지 보수비용을 고려하여 13 x 45 cm²의 전극판을 4 쪽으로 나누어서 제작하는 데, 전극을 4쪽으로 나누어지는 구조로 제작함으로써 얻어지는 추가 장점은 온도에 의한 길이 방향 팽창 흡수 효과가 발생하고, 단점으로는 연결부에 의한 transparency가 감소된다는 점이다.

d. 그 외 가속부의 제작 시 전극과 insulator를 epoxy에 의해 접착시키는 데 접착면적을 늘여 접착력을 강화시키기 위해 절연 문제가 발생하지 않는 범위 내에서 접착표면을 요철구조를 가지도록 하는 방안과 bolting에 의한 체결 가능성을 검토 중에 있고, 전극간 코로나 방전을 막기 위한 전극의 배열 및 구조를 구성한다.

(마) 가속 그리드 제작 및 시험

설계한 이온원의 냉각회로에 의해 제작된 Prototype 그리드를 적외선 카메라를 이용하여 성능을 시험하였다. 제작에서 가장 어려운 부분은 빔 인출시 발생하는 열을 제거하기 위해 빔 인출구 주변의 최소한의 공간에 강제냉각이 가능하도록 냉각관을 정확하게 배치해야 하는 일이다. 이 때 이온원의 빔 투과율은 냉각회로를 확보하기 위한 공간에 의해 제약을 받게 되는 데, 빔 광학적 특성을 고려하면서 투과율은 가능한 크게 해 주기 위한 고려가 있어야한다. 장시간 운전 시 가열된 전극의 팽창 등에 의해 발생할 수 있는 빔의 질 저하를 방지하기 위해 냉각효율을 높이고 대칭성을 유지하기 위해 냉각관들을 빔인출구 사이마다 평행으로 배치해주는 것이 일반적인 방법이다. 냉각관들의 배관은 전극에 적절한 홈을 가공하고 그 홈을 따라 냉각관을 Soldering 접합에 의해 배치하거나, 특수 접합 방법을 사용하여 냉각관을 만들어내고 있으나, 이는 많은 Knowhow를 포함한 Soldering 관련 기술들을 요구하는 작업이어서 본 연구에서는 정밀가공으로 해결할 수 있는 Super Drill을 사용한 냉각관 가공법으로 제작을 시도하였다.

새로운 방법으로 제작한 냉각회로의 유용성을 검증하기 위해 냉각 관들을 길게 가공하여 제작할 때 야기될 수 있는 문제점들과 냉각관 회로 및 내부저항 때문에 생길 수 있는 냉각수 흐름의 이상 여부를 확인할 수 있도록 냉각능력을 측정하여 계산결과와 비교하고, 또한 전극 표면온도의 시간변화를 추적하여 냉각회로의 진전성 여부를 판단할 수 있는 실험들을 수행하였다. 열전도에 의한 표면 온도분포의 변화는 매우 빠르게 진행되어 기존의 Thermocouple 등에 의해 온도분포를 측정할 수 없기 때문에 본 연구에서는 적외선 카메라 화상 시스템을 이용하여 전극 표면 온도분포의 시간변화를 추적하고자 하였다. 특히 낮은 온도에 있는 부분에서의 적외선 카메라 화상의 해상도를 높이기 위해 전극의 가열 및 냉각 온도범위를 최소화함으로써 카메라의 화상 결과를 분석하여 냉각 효과에 의한 온도 분포의 변화가 추적될 수 있도록 하는 가열 및 냉각수 순환시스템을 따로 구성하였다.

(마)-1. 대전류 이온원 인출전극의 냉각회로 제작

전극 설계에서 판의 최소 두께는 인출구 형상 가공과 필요한 냉각 채널 확보를 위해 필요한 최소한의 판의 두께에 의해 결정이 되고, 최대 두께는 냉각 효과를 극대화하고 전극의 수명 및 경제성 등을 고려하여 결정하게 되는데, 장시간 운전에 필요한 냉각수 채널을 확보하면서 대전류 빔인출을 위한 충분한 투과율의 확보를 위해 최소 내경 1.2 mm 의 냉각관이 전극의 내부를 통과할 수 있도록 전극의 두께를 플라즈마 전극과 Gradient 전극의 두께는 2.2 mm 로, 감속전극과 Ground 전극은 2.5 mm 로 하였다. 전극의 구경은 빔의 투과도를 결정하는 데 중요한 역할을 하기 때문에 동일한 면적의 전극에서 가능한 한 많은 전류의 빔을 얻기 위해서는 크게 하는 것이 좋겠지만 빔 광학적 측면에서 전극구경이 전극 두께에 비해 너무 크면 인출구의 가공 효과가 없어지면서 빔의 수송효율이 떨어지게 되고, 반대로 전극 구경이 전극 두께에 비해 너무 작으면 인출구 주위에 만들어지는 수차에 의한 손실이 커져서 빔 휘도가 나빠지게 된다. 플라즈마 전극과 Gradient 전극간의 거리 (4.5 mm)를 고려하여 플라즈마 전극과 Gradient 전극의 인출구의 직경은 4 mm로 하고, 감속전극과 접지전극의 인출구 직경은 플라즈마 전극의 경우보다 조금 큰 4.4 mm로 하였다. 그림 3-1-21과 그림 3-1-22에 설계된 이온원의 상세 도면을 보였다.

대전류 이온원의 전극 제작에서 가장 중요한 점은 300초 운전목표를 달성하기 위해 냉각채널을 정확히 구현하는 것과 인출된 이온빔의 질을 높이기 위해 가공의 정밀도가 매우 높아야한다는 것이다. 특히 기존의 대전력 이온원들과 같이 냉각 Pipe들을 Brazing에 의해 구성하는 것이 아니라 가공에 의해 가늘고 긴 냉각 Channel을 구현하는 것이기 때문에 정밀가공은 필수적이다. 제작하려는 이온원 가속부는 정밀하게 가공된 4 set의 빔 인출판들과 이것들을 정확한 위치에 고정하기 위한 지지구조물, 그리고 전극들 사이의 고전압을 유지하고 또한 전원공급 및 진공

유지를 위한 절연부들로 구성되는 데 인출판들은 무산소동으로 인출판 지지구조는 Stainless Steel로 절연부는 무산소동 전극과 G10으로 제작된다. 양질의 빔을 얻기 위해서는 인출구의 위치 및 크기 뿐 만 아니라 각 전극 사이의 간격들이 정확하게 배열되어 있어야 하기 때문에 각 주요부분 가공 및 제작 정밀도를 빔인출 Simulation에 의해 허용 오차를 평가한 결과를 토대로 아래와 같이 규격오차가 1% 이내에서 유지될 수 있도록 하였다.

- 인출 전극의 가공 정밀도 : 가공오차 0.02 mm 이내
- 인출구 가공 및 조립 정밀도 : 인출구 직경 가공오차 0.02 mm 이내
 인출구간 거리 가공오차 0.02 mm 이내
 인출구 shaping 작업간 공차 0.02 mm 이내
- 냉각수 Channel의 직진성 : 가공오차 0.1 mm 이내

빔 인출판과 Supporter의 Brazing 공정은 무산소동 재질의 연화가 일어나지 않도록 400 ℃ 에서 수행하였고, 고전압에서의 내압 특성을 개선하기 위해 가공 후 처리로 빔 인출판의 표면 거칠기가 0.4S 이하가 되도록 하였으며, 또한 모든 모서리들은 정밀 가공에 의해 정해진 곡율을 정확히 유지하도록 하였다. 가공 외에 고정 을 위해 사용하는 모든 볼트는 비 자성체인 Stainless Steel로 하였고, 냉각관 연결 을 위한 파이프들도 Stainless Steel 재질로 만들었다. 냉각관 선로가 가늘고 긴 특 성을 가지고 있기 때문에 냉각회로가 최대 15 기압을 견딜 수 있도록 정해진 규격 의 Bellows 등의 부품을 구입하여 사용하였다.

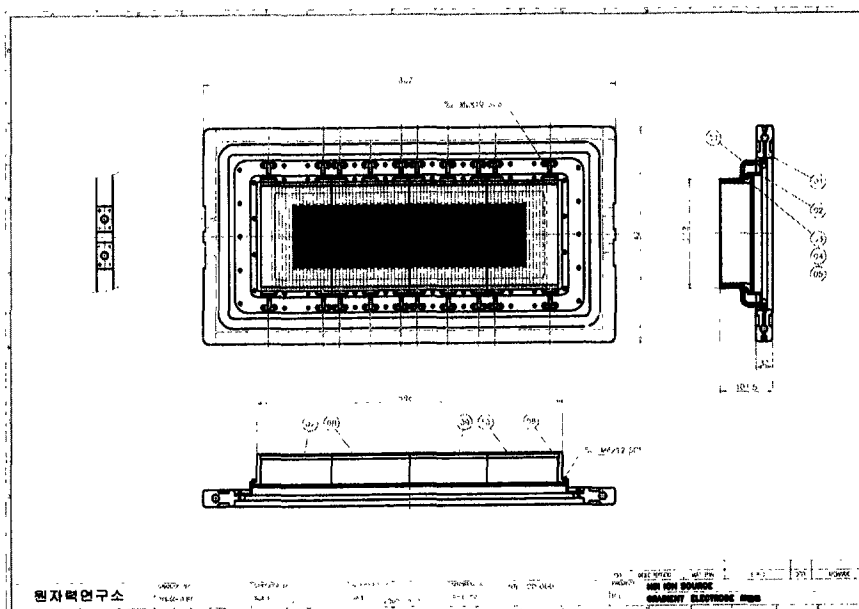


그림 3-1-21 이온원 전극 구조

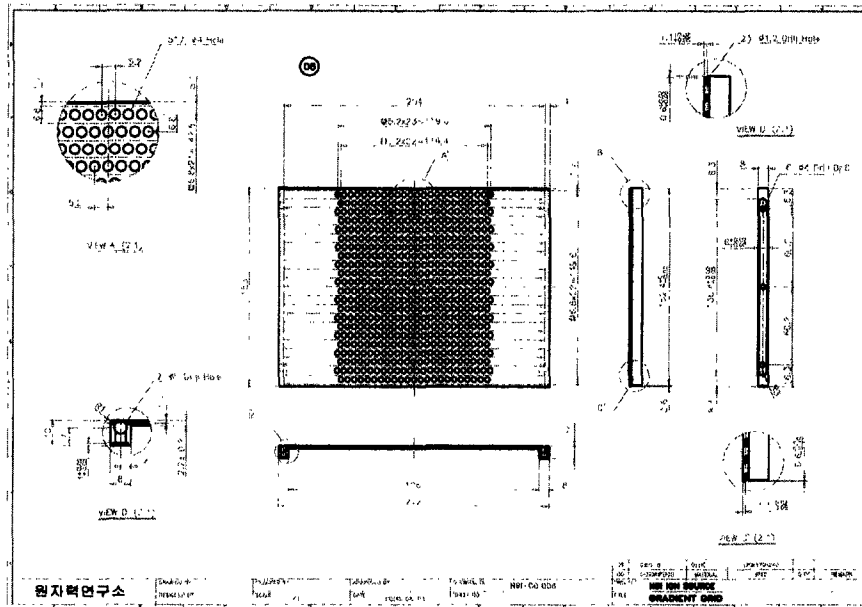


그림 3-1-22 이온원 전극의 냉각회로 구성도

(마)-2. 냉각 성능의 시험 및 결과

새로운 방법에 의해 제작한 이온원 전극의 냉각회로 성능을 확인하기 위해 냉각관의 길이가 가장 긴 Gradient Grid 전극을 시험모듈로 사진 3-1-1과 같이 제작하였다. 제작된 시험모듈을 이용하여 냉각성능을 검토하고, 병렬로 연결된 가늘고 긴 냉각관들에 의해 이루어진 회로가 건전하게 구성되어 수명 또는 유량분포 등에 문제가 없는 설계인 지 다음과 같은 방법에 의해 시험하였다.

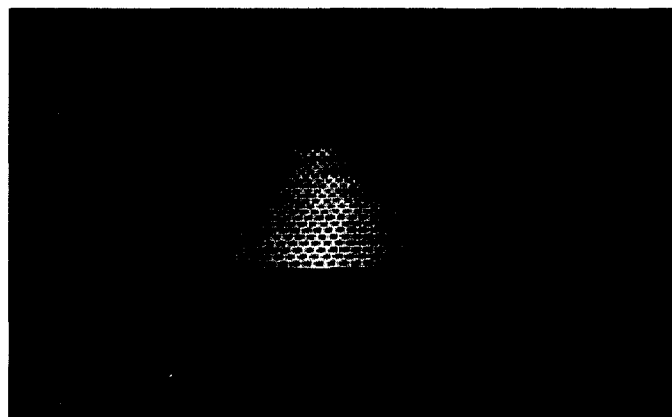


사진 3-1-23 이온원 전극 냉각회로 시험 모듈

(마)-2.1. 시험 방법

제작된 이온원의 냉각회로의 건전성을 시험하기 위해 우선 냉각능력이 설계에서 수행한 계산 결과와 일치하는 지를 확인하여야 한다. 또한 Super Drill과 지뿐만 아니라, Super Drill로 얇은 판의 양쪽에서 가공을 하면서 판의 중심에서 두 판이 관통하도록 하는 방법으로 정밀하게 가공된 가는 냉각판들 중에 불량한 부분이 없는 지 등을 확인할 수 있어야 한다.

냉각능력의 측정을 위해 전극에 열부하를 효과적으로 전달해 줄 수 있는 고온 가열로를 제작하였는데, 23 kW 까지 발열이 가능한 고온 세라믹 히터 7 개를 병렬로 연결하고 13 cm x 15 cm 방열판을 통해 열이 전극판에 전달되도록 하였다. 열부하를 변화시키면서 가열에너지와 냉각수 유량에 따른 냉각수 입출구 온도, 방열판 및 전극판 온도 등 해석에 필요한 값들을 측정하였다. 또한 냉각수 회로의 건전성을 시험하기 위해서 온도분포를 1/30 초 간격으로 512 x 512 Pixel 해상도로 구해낼 수 있는 적외선 카메라 화상처리 시스템(Mitsubishi, IR-M500)과 전극을 가열하고 냉각하기 위한 물 강제 순환장치를 사용하여 냉각 시 전극 표면온도 분포의 변화를 추적할 수 있는 장치를 만들었다. 적외선 카메라에 들어오는 부분의 온도편차를 100 °C 이내로 제한시킴으로써 해석 데이터의 화면 선명도를 효과적으로 제어할 수 있었는데, 실험에 사용된 순환수의 온도는 가열 시 95 °C, 냉각 시 4 °C로 물펌프를 사용하여 냉각관에 흐르는 유속이 5 m/sec 이상이 될 수 있도록 하였다. 가열과 냉각을 수행하는 동안 촬영한 영상을 편집하여 적외선 카메라 시스템의 시간 해상도인 1/30 초 간격의 프레임으로 나누어 각 시간마다의 전극 판의 온도분포를 구하여 해석함으로써 냉각회로의 건전성 등을 판단할 수 있다. 사진 3-1-2에 적외선 카메라 및 냉각수 순환 실험장치의 현장모습을, 그림 3-1-24에 IR 카메라에 의한 전극 시험 개념도를 보였다.

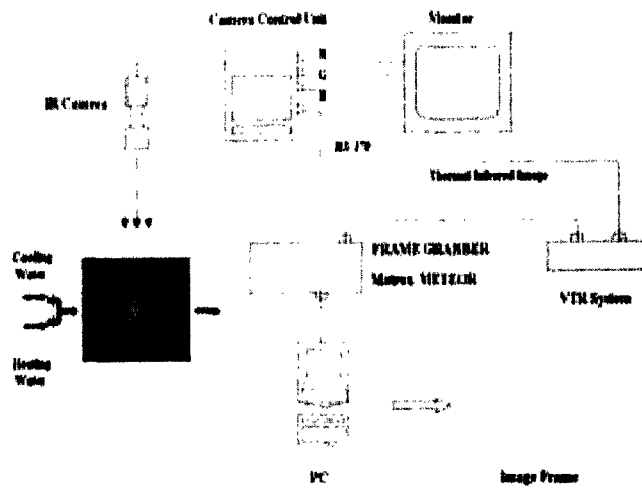


그림 3-1-24 IR 카메라에 의한 전극 냉각회로 검사 장치 개념도

(마)-2.2. 시험 결과 및 논의

KSTAR 용 이온원 플라즈마 전극은 아래쪽에서 360 W/cm^2 , 위쪽에서 153 W/cm^2 의 균일 열부하와 Arcing 현상 등으로 발생할 수 있는 국부적인 열부하 1 kW/cm^2 에도 충분히 견딜 수 있도록 제작되어야 한다. 전극의 냉각 시험을 위한 열부하원으로 23 kW , 방열 면적 195 cm^2 의 전열기를 제작하여 사용하였는데 이 전열기로 가능한 최대 열부하는 118 W/cm^2 로 실제 필요 부하의 약 23% 수준이 되지만 실제 전극으로 전달되는 열은 열손실 때문에 이보다 작을 것이다. 표 3-1-4에 전극판에 가한 열부하와 냉각수의 유속에 따른 냉각수 온도 및 전극 표면의 온도변화를 나타내었다. 최대 열부하에 의해 냉각수 유량이 5.5 liter/min (냉각관 내의 유속 4 m/sec) 일 경우 냉각수의 입구측과 출구측의 온도변화는 $9 \text{ }^\circ\text{C}$, 전극의 입구측과 출구측의 온도변화는 $21 \text{ }^\circ\text{C}$ 이고, 열 평형 상태에서 전극 판 내의 온도 분포는 정상적인 경향을 보이고 있었다. 계산 결과가 총 열부하 513 W/cm^2 , 냉각수 유속 6 m/sec 인 경우 냉각수 온도변화가 약 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 임을 고려하면 실험에 의해 측정된 전극판의 냉각능력은 실험장치의 열손실을 고려하였을 때 큰 오차 없이 일치함을 알 수 있다.

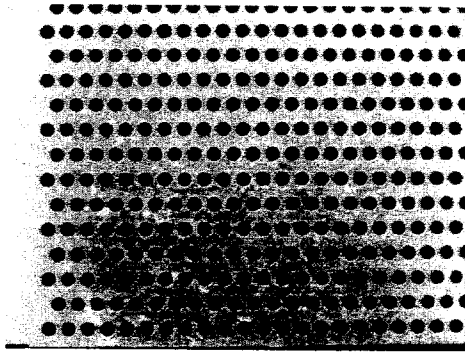
냉각회로의 시험을 위해 그림 3-1-3과 같이 적외선 카메라와 냉온수 순환 장치를 사용하여 $95 \text{ }^\circ\text{C}$ 의 온수로 냉각판을 충분히 가열한 후, 4 m/sec 의 빠른 속도로 냉수를 흘려주면서 냉각판의 온도분포 변화를 촬영한 영상에 의해 편집한 사진들을 그림 3-1-3에 보였다. 실험에서 외부 열원에 의한 반사 등 열원 차폐를 위해 검은 천을 사용하여 암실을 만든 후 관련 영상들을 얻었다. 그림 3-1-25(a)는 $95 \text{ }^\circ\text{C}$ 온수에 의해 가열되어 열평형을 이루었을 때의 사진이고, 그림 3-1-25(b), (c), (d), (e), (f)는 냉수가 공급된 후 2 초 동안의 온도분포를 400 msec의 간격으로 보여준 사진이다. 자체의 방사(Radiation Emission)열이 Noise로 작용하여 전극이 냉각되어 가는 모습을 자세히 구별해 볼 수는 없으나 전체적으로 균일하게 식어 가는 모습을 볼 수 있다. 냉수 공급 후 2 초가 되면 전극의 냉각은 완료되어 $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 의 온도 근처에서 열평형을 이룬다.

그림 3-1-26은 구리판 자체 방사에 의한 Noise를 없애기 위해 전극표면을 흑화 처리하여 자체 복사열을 최소로 한 후 냉각과정을 100 msec 간격으로 해석한 사진이다. 흑화 처리에 의해 Noise는 현격히 감소되어 인출구 사이사이에서의 온도 분포 뿐만 아니라, 전체적으로 전극이 어떻게 냉각되는 지를 뚜렷하게 볼 수 있다. 냉각수가 공급되면 전극판은 냉각수 공급구가 있는 위쪽 부분부터 냉각이 진행되지만 순식간에 골고루 냉각이 진행되고 있음을 알 수 있으며, 이는 전극의 냉각수 회로가 건전하게 구성되어 있음을 보여주는 것이다. 냉각수가 흐르지 않는 인출구 주변의 냉각은 제일 늦게 이루어지고 있으며 냉각수 공급 후 2 초 후에 전극은 완전히 열평형에 도달한다. 그림 3-1-26 (j)에서 인출구들의 형상이 희미하게 남아있는

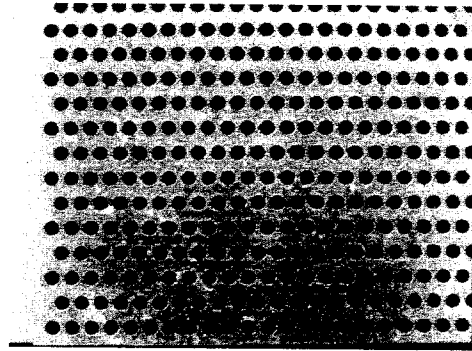
이유는 이들 사이에 있는 공기가 이 때까지도 열평형에 충분히 도달하지 못하여 전극판보다 온도가 높은 상태로 남아있기 때문에 생기는 현상으로 시간이 충분히 지나면 이 것들은 사라진다. 이 방법에서 문제가 되는 것은 흑화 처리에 의한 전극의 오염인데 흑화 처리된 얇은 테이프를 사용하는 방법 등이 고려되고 있다.

표 3-1-4. 유속 및 열부하에 따른 냉각 결과

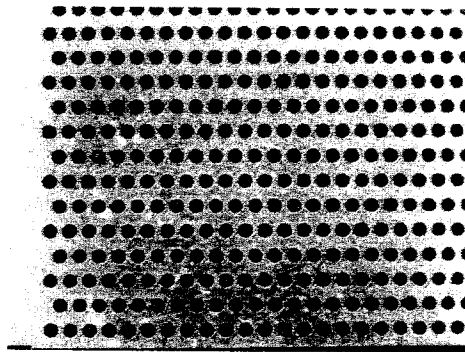
열부하 \ 유량		1 liter/min	3 liter/min	5.5 liter/min
116 W/cm ²	입구측 냉각수 온도	7.2	7.2	7.2
	출구측 냉각수 온도	59	25.0	16.0
	전극표면온도 변화	68	54	21
58 W/cm ²	입구측 냉각수 온도	-	-	7.2
	출구측 냉각수 온도	-	-	9.64
	전극표면온도 변화	-	-	1



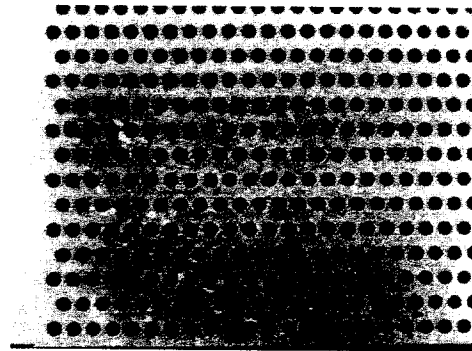
(a) 온수(95° C)로 가열된 상태



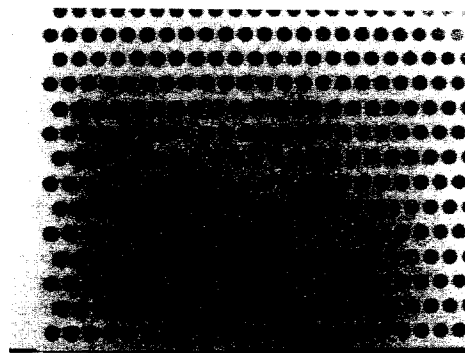
(b) 냉수(4° C) 공급 후 400 msec 경과



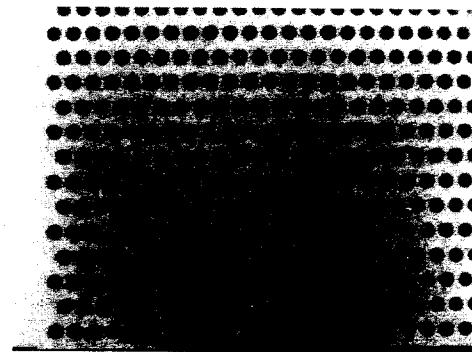
(c) 냉수 공급 후 800 msec 경과



(d) 냉수 공급 후 1200 msec 경과

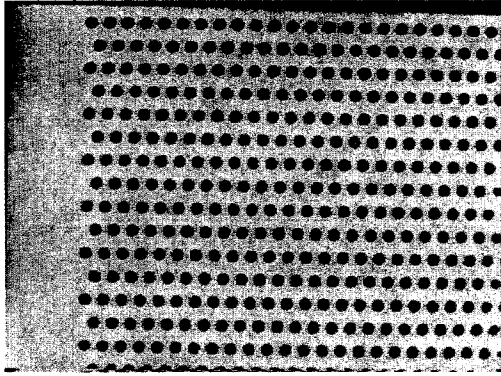


(e) 냉수 공급 후 1600 msec 경과

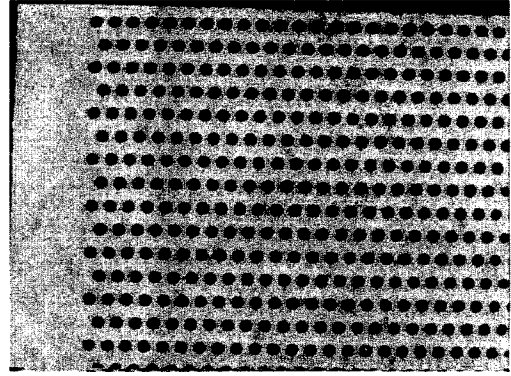


(f) 냉수 공급 후 2000 msec 경과

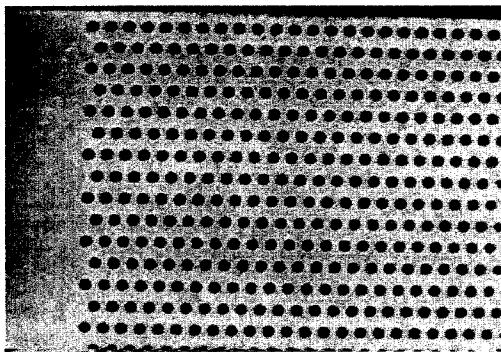
그림 3-1-25 95 °C 물로 전극을 충분히 가열한 후 4 °C 냉각수(유속 5.5 m/sec)로 냉각할 때 전극의 온도분포 변화를 보여주는 사진



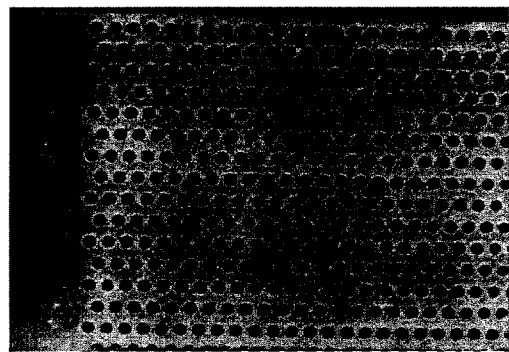
(a) 온수(95° C)로 가열된 상태



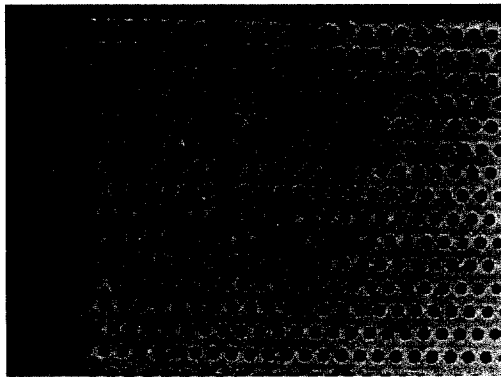
(b) 냉수(4° C) 공급 후 200 msec 경과



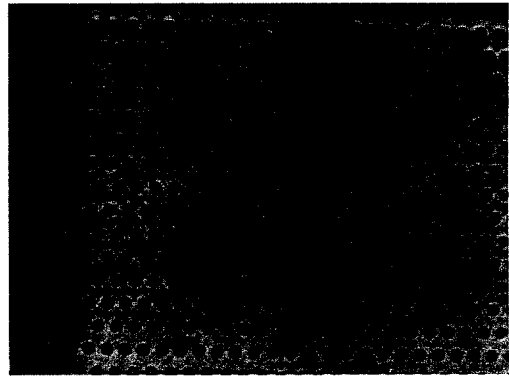
(c) 냉수 공급 후 400 msec 경과



(d) 냉수 공급 후 600 msec 경과

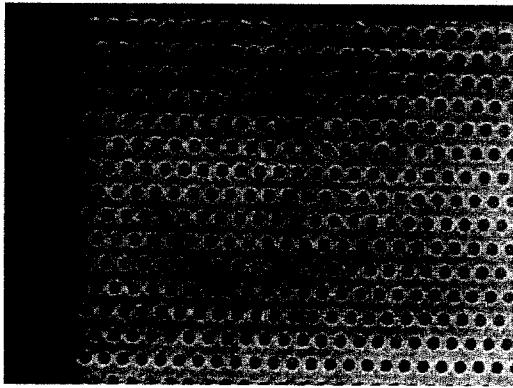


(e) 냉수 공급 후 800 msec 경과

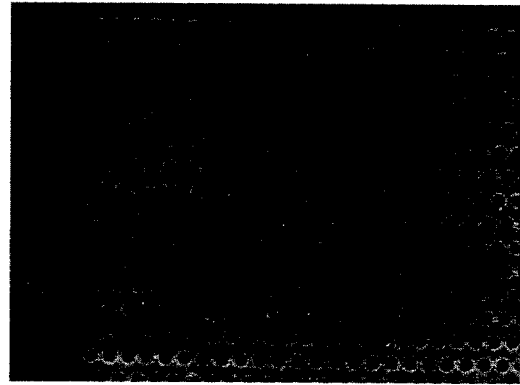


(f) 냉수 공급 후 1000 msec 경과

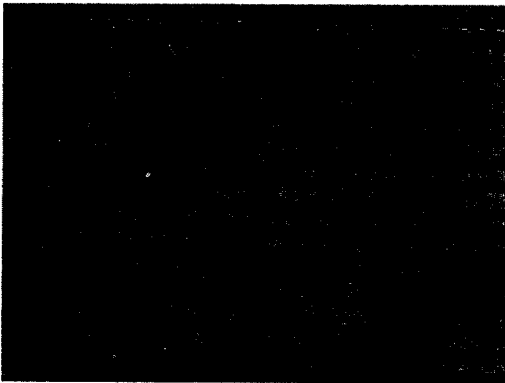
그림 3-1-26 95 °C 물로 전극을 충분히 가열한 후 4 °C 냉각수(유속 5.5 m/sec)로 냉각할 때 흑화 처리된 전극의 온도분포 변화를 보여주는 사진(계속)



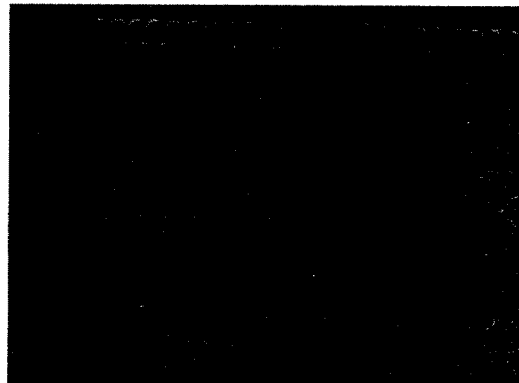
(g) 냉수 공급 후 1200 msec 경과



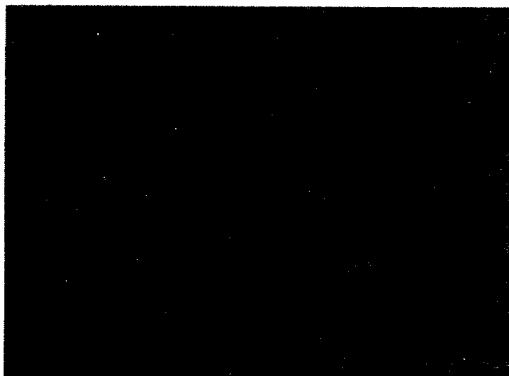
(h) 냉수 공급 후 1400 msec 경과



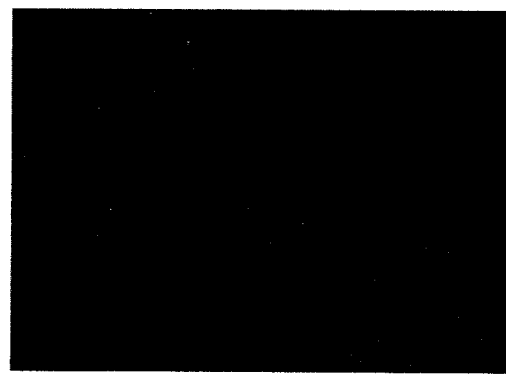
(i) 냉수 공급 후 1600 msec 경과



(j) 냉수 공급 후 1800 msec 경과



(k) 냉수 공급 후 2000 msec 경과



(l) 냉수 공급 후 2200 msec 경과

그림 3-1-26 95 °C 물로 전극을 충분히 가열한 후 4 °C 냉각수(유속 5.5 m/sec)로 냉각할 때 흑화 처리된 전극의 온도분포 변화를 보여주는 사진

(2) 방전시험

이온원의 특성은 크게 방전특성과 빔인출 특성으로 나누어 생각할 수 있다. 방전 특성을 조사하고 최적의 방전조건을 얻는 것은 이후의 빔인출 실험에 있어서도 매우 중요한 일이라 할 수 있다. 따라서, Prototype 이온원이 제작된 후 단계적으로 각각 다른 3종류의 기체를 이용하여 방전특성을 조사하였다. 초기의 방전 실험에는 헬륨 기체가 이용되었으며, 이후 수소를 이용하여 방전 실험을 수행하고 각각의 특성을 비교하였다.

가. Slit형 Proto-type 이온원

이온원은 당초 설계 및 prototype 제작 단계에서는 미국의 TFTR과 TPX design에 따라 slit형으로 제작하였으나, 다음 절인 이온원 upgrade에서 설명된 바와 같이 원형인출구로 변경되었다. 방전실험은 주로 이온원의 플라즈마 방전실 (Bucket)과 관계된 주된 특성으로서 slit grid 이온원을 이용하여 실험하였다. 1998년 6월에 제작 완료된 prototype slit형 이온원의 규격은 다음과 같다.

표 3-1-5. Prototype NBI 이온원 규격

- Beam Energy : 120keV (90keV)
- Beam Current : 65A (45A)
- Beam Species : D⁺, H⁺
- Pulse Length : 300sec (20sec)
- Grid Type : Slit
- Grid Material : Moly
- D⁺ Ratio : >80%
- Beam Uniformity : <10%
- Cusp Magnet : Nd-Fe
- Insulator : Molded Epoxy
- Filaments : Hairpin Type (28개, 1mm ϕ W-wire)

이온원은 그림 3-1-27의 개략도에서 보는 바와 같이 플라즈마 방전실(bucket) 내부는 단면적이 26 cm \times 64 cm 이고 높이가 32 cm이며 병렬로 연결된 32개의 필라멘트들과 4.65 kG의 Nd-Fe 영구자석에 의한 강한 cusp 자장으로 둘러싸여 있다.

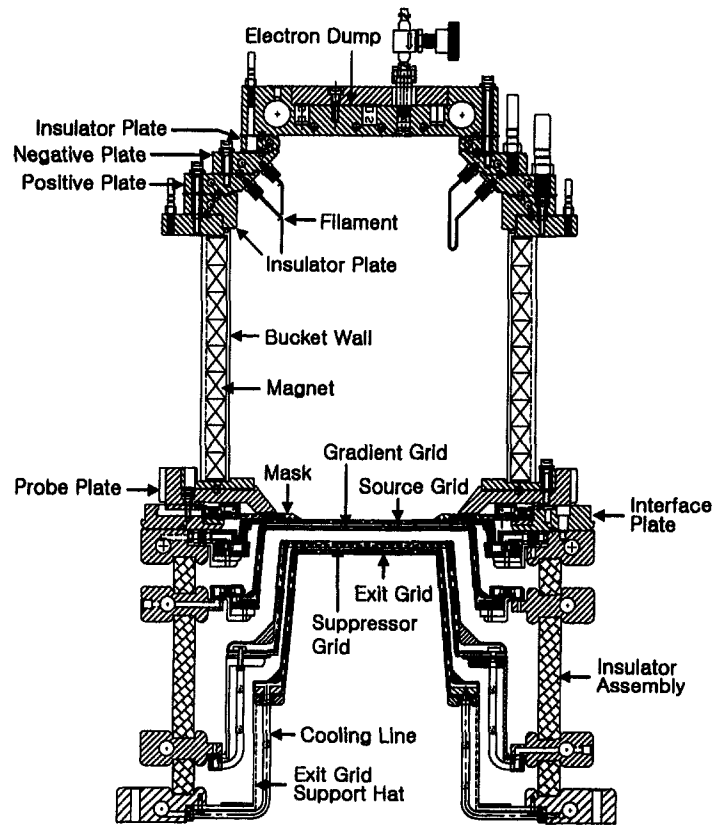


그림 3-1-27 Prototype 이온원 개략도.

나. 이온원 전원

이온원 운전을 위한 필라멘트와 아크전원의 사양은 표 3.1.3.가(2)-2에 나타낸 바와 같으며, 두 전원은 정전류와 정전압 모드 운전이 가능하도록 제작되었다. 필라멘트 전원은 방전 전 필라멘트의 예열과 pre-ionization을 위하여 최대 5500A로 5초간 운전이 가능하며, 방전 중에는 최대 3200A 연속운전이 가능하다. 아크전원의 최대 전류 1200A 이다.

방전실험을 위한 전원연결도는 아래 그림 3-1-28와 같다. 그림에서와 같이 각 전극간에는 역전압 및 과전압이 인가되는 것을 방지하기 위한 snubber 회로를 연결하였다.

표 3-1-6. 필라멘트 및 아크전원 전기적 사양

	필라멘트 전원	아크 전원
최대 전압 [V]	15	160
최대 전류 [A]	3200 CW 5500 for 6sec	1200 CW
전류 Ripple	<2%	<2%
펄스 폭	350 sec	320 sec
전류상승시간	<30ms	<30ms at start <1ms during operation
전류하강시간	<30ms	<0.1ms
DC 가변방식	고주파 inverter 방식	Chopper 방식

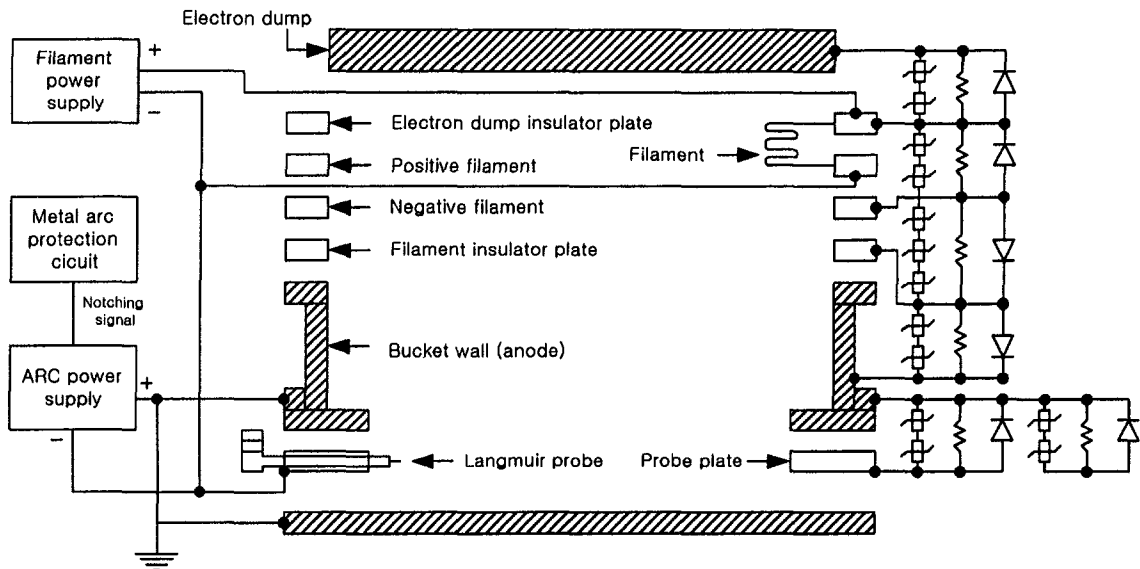


그림 3-1-28 이온원 방전실험을 위한 전원 연결도.

다. 필라멘트 가열 특성

NBI 장치에서 이온원의 가장 중요한 특성은 120keV, 65A 이온빔 인출이라고 할 수 있다. 이를 위해서는 이온원의 방전 시 플라즈마 내의 이온의 밀도가 10^{12} cm^{-3} 이상이 되어야만 한다. 따라서, 최대 방전전류 및 이온밀도가 본 연구에서 목표로 하는 이온원 특성을 좌우하게 된다. 방전개시전압은 일반적으로 기체 압력과 필라멘트로부터 공급되는 열전자의 방출량에 따라 달라지게 되는데, 본 이온원에서는 충분한 열전자의 공급을 위하여 필라멘트를 방전 개시 전 충분히 예열하여 실험하였다. 아래의 그림 3-1-29은 필라멘트의 시간에 따른 heat-up 특성을 나타내는 것이다. 연속적으로 필라멘트를 가열한 경우 아래 그림에서처럼 필라멘트 전류가 커질수록 더 빠른 시간 내에 평형상태에 도달하는 것을 확인할 수 있었다. 이 결과로

부터 방전 전 플라즈마 예열을 위한 시간을 10초 이상으로 정하였으며, 안정된 실험을 위하여 필라멘트 전류는 최대전류인 3200A로 하였다.

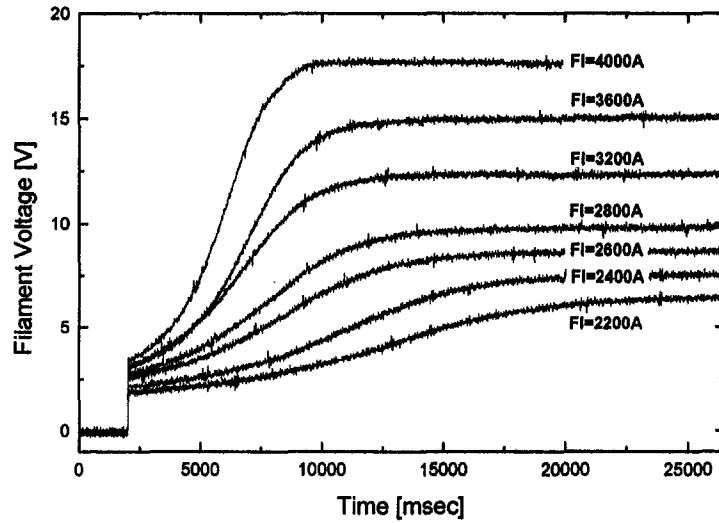


그림 3-1-29 필라멘트 전류값에 따른 가열 특성.

필라멘트 가열 시 전류와 전압의 관계를 살펴보면, 평형상태에서 필라멘트의 저항은 약 0.006Ω 정도인 것을 알 수 있었다. 필라멘트에 인가되는 최대 power는 4000A 기준으로 약 71kW이다.

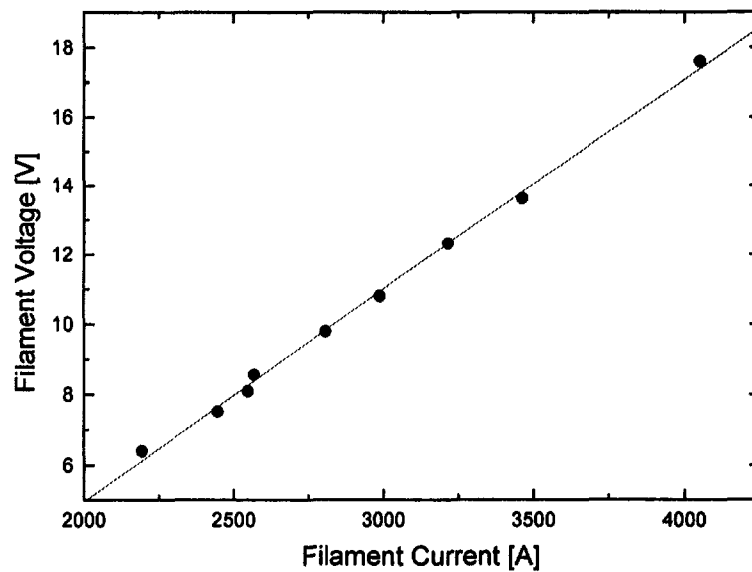


그림 3-1-30 필라멘트 가열에 따른 전류와 전압 특성.

라. 실험장치

이온원의 방전특성을 조사하기 위하여, 제작된 이온원을 1,600 L/min 의 배기용량을 가지는 Rotary Vane Pump를 이용하여 최저압력 1×10^{-3} mbar 까지 배기시킨 후 헬륨기체를 미세 유량조절밸브(needle valve)를 이용하여 $2.4 \times 10^{-3} \sim 3.4 \times 10^{-1}$ mbar 범위 내에서 가변하면서 방전실험을 수행하였다. 그림 3.1.3.가(2)-7에는 Langmuir probe를 이용한 플라즈마 이온밀도 측정을 위한 전원 및 데이터 획득 장치의 연결도이다.

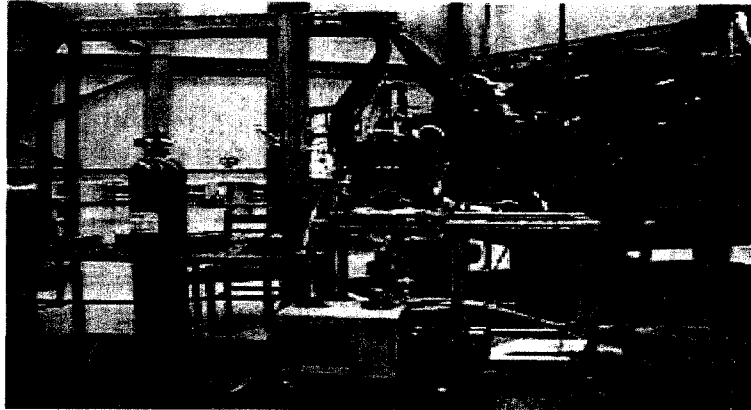


그림 3-1-31 헬륨 및 수소 방전 특성 시험장치.

마. Langmuir Probe

이온원의 하부에는 그림 3-1-32에서와 같이 bucket 하부에 최대 10개의 Langmuir Probe의 설치가 가능한 probe plate가 설치되었으며, 본 실험에서는 위치별로 6개의 probe를 설치하여 빔인출면에서의 플라즈마 이온밀도를 측정하였다. 그림 3-1-33은 제작된 Langmuir probe의 사진이다.

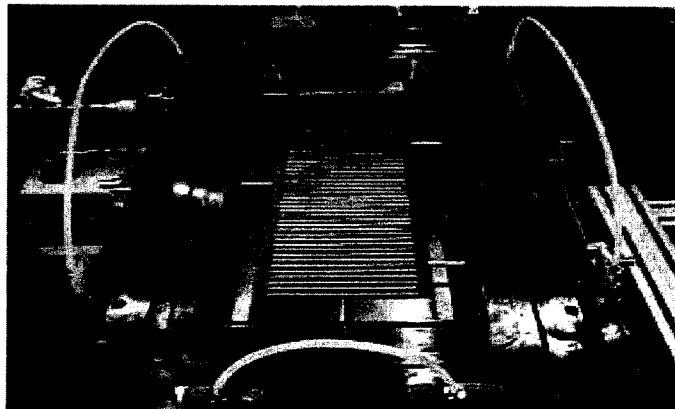


그림 3-1-32 Probe plate에 설치된 6개의 Langmuir probe.

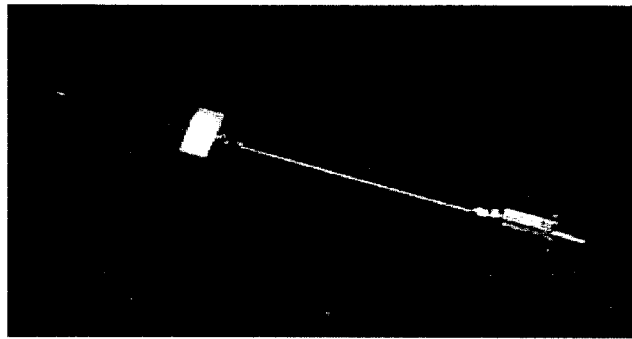


그림 3-1-33 제작된 Langmuir probe.

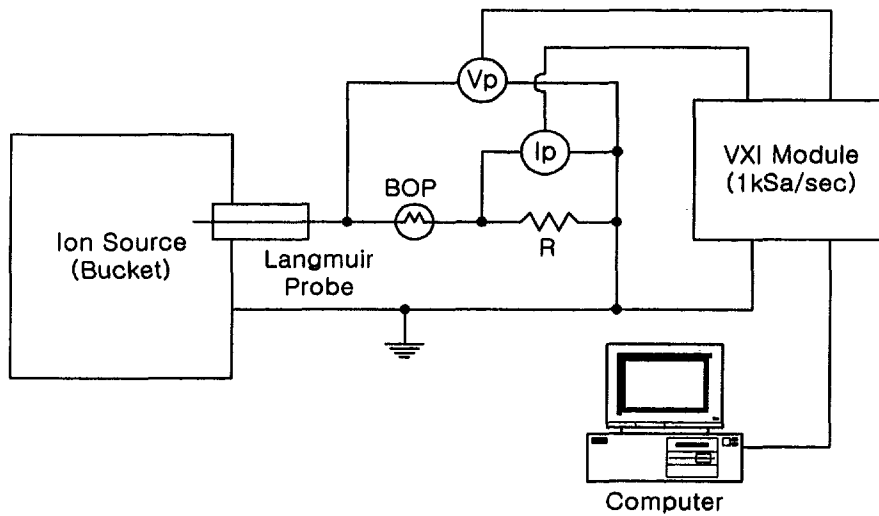


그림 3-1-34 Langmuir Probe 회로도.

실험에 사용된 Langmuir probe의 규격은 아래 표 3-1-28에 나타낸 바와 같으며, 6개의 고정형 probe와 직선방향으로 이동이 가능한 이동형 probe를 각각 제작하여 사용하였으며, 이동형의 경우, Wilson Seal을 사용하여 이동시에도 이온원의 진공에 leak가 발생하지 않도록 하였다.

표 3-1-6. Langmuir probe 특성

- Probe Type : Cylindrical
- Probe Tip Length/Diameter : 3.0mm/0.8mm ϕ
- Material : Tungsten
- Insulator : Ceramic

Langmuir probe에 의한 전자온도(T_e) 는

$$kT_e/e = dV/d[\ln(I+I_i)]$$

여기서, k 는 Boltzmann constant, e 는 Elementary charge, V 는 probe voltage, I 는 probe current 이며, I_i 는 ion current 이다.

이온밀도 n_i 는

$$I_{is} = 0.4 n_i e A_p (2kT_e/m_i)^{1/2}$$

로 주어지며, 여기서, I_{is} 는 ion saturation current , A_p 는 probe area , m_i 는 ion mass 을 나타낸다.

바. 헬륨 및 수소 기체 방전 특성

아래 그림 3-1-35는 헬륨기체 압력 6.6×10^{-2} mbar의 압력 하에서의 방전특성을 나타낸 것으로 아크방전시간은 1초였으며, 아크전원은 정전류(constant current) 모드에서 운전되었으며, 아크 전류는 최대치인 1200A였다.

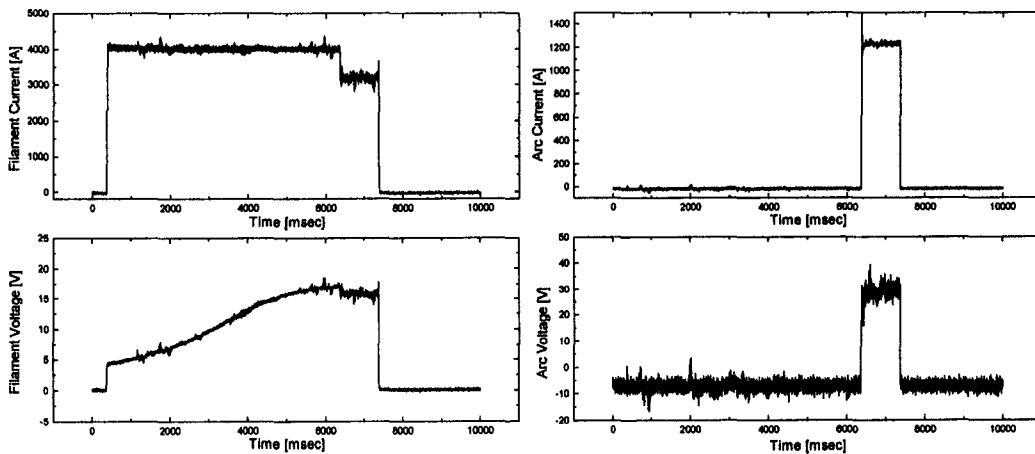


그림 3-1-35 헬륨 기체를 이용한 아크방전 실험 결과.

그림 3-1-36에는 이온원 내 헬륨 기체와 수소기체의 압력에 따른 방전 개시전압을 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 보여지는 바와 같이 수소의 경우 7×10^{-3} mbar의 압력하에서, 0.1mbar의 압력 하에서 각각 33V와 24V의 최저 방전전압을 얻을 수 있었다.

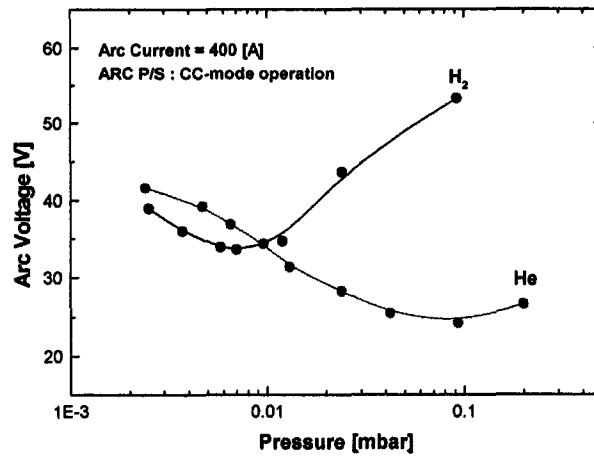


그림 3-1-36 기체 압력에 따른 방전개시전압.

수소기체의 압력이 4.8×10^{-3} mbar 이고 헬륨기체 압력이 6.6×10^{-2} mbar 일 때, 아크 전류를 200~1200 A 까지 변화시키면서 플라즈마 이온밀도를 측정 한 결과를 그림 3-1-37에 나타내었다. 그림에서와 같이 아크 전류가 증가함에 따라 이온밀도는 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 헬륨의 경우, 아크 전류가 200 A 에서 1200 A 로 증가함에 따라 이온밀도는 $1.8 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 에서 $6.7 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 로 증가 하였으며, 수소의 경우, 아크전류가 1000A 일 때, $1.2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 의 이온밀도를 나타내었다.

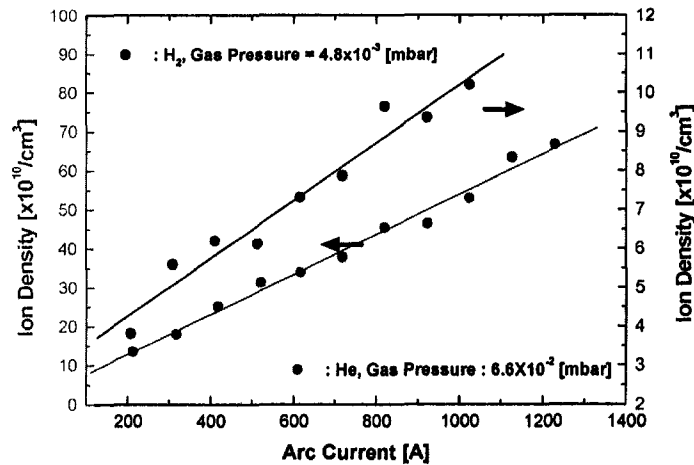


그림 3-1-37 아크전류에 따른 이온밀도.

그림 3-1-38에는 아크방전 전류가 400 A 일 때, 헬륨과 수소기체의 압력에 따른 전자온도의 변화를 나타내었다. 전자온도는 압력의 증가에 따라 감소하는 경향을 보였으며, 2.0×10^{-2} mbar를 기준으로 그 이하의 압력에서는 동일한 압력 하에서 수소 플라즈마의 전자밀도가 헬륨에 비해 더 높게 나타났으며, 그 이상의 압력에서는 반대의 경향을 보였다. 헬륨 압력이 4.7×10^{-3} mbar 일 때 전자의 온도는 7.6 eV 이

였으며, 수소 압력이 3.7×10^{-3} mbar 일 때, 전자의 온도는 4.71 eV 로 헬륨 플라즈마의 전자온도가 수소의 경우에 비해 더 크게 나타남을 알 수 있었다.

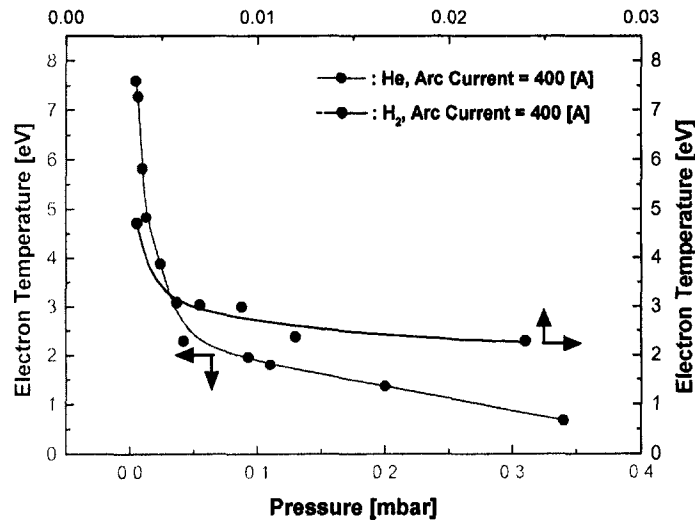


그림 3-1-38 압력에 따른 전자온도.

그림 3-1-39에는 기체의 압력 변화에 따른 이온밀도의 변화를 나타내었으며, 아크전류가 400A이고 헬륨 기체 압력이 $4.7 \times 10^{-3} \sim 4.2 \times 10^{-1}$ mbar 로 변화할 때, 이온밀도는 $2.58 \sim 3.7 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 으로 증가하였으며, 수소의 경우, 압력이 $3.7 \times 10^{-3} \sim 2.4 \times 10^{-2}$ mbar 로 변화함에 따라 $6.72 \times 10^{10} \sim 7.79 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ 으로 감소함을 볼 수 있었다.

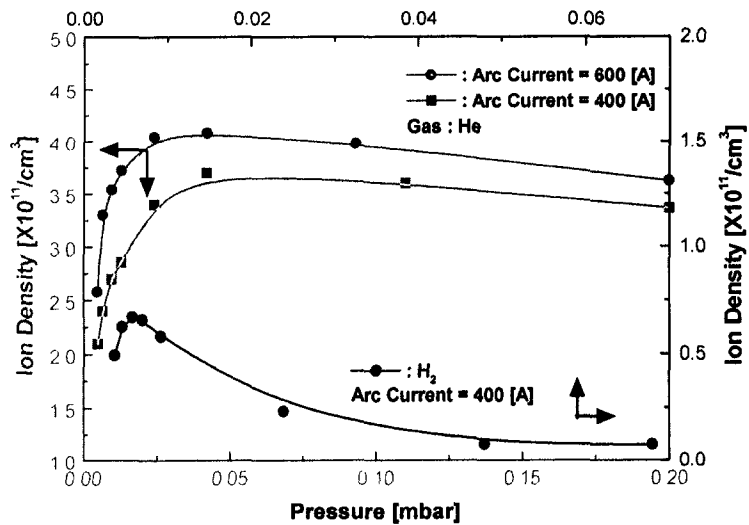


그림 3-1-39 압력에 따른 이온밀도.

사. 플라즈마 이온밀도 분포

그림 3-1-40에는 수소 방전 시 이온원의 Bucket 하부 빔인출면에서의 플라즈마 이온밀도 분포를 측정한 결과이다. 그림에서와 같이 빔 인출면에 해당되는 가로 43 cm 이내의 영역에서 이온밀도는 일정한 값을 보이는 것을 볼 수 있었다. 45cm 이상의 영역에서는 급격히 이온밀도가 감소하는 것을 볼 수 있었다. 그림 3-1-41는 빔인출면에서의 위치에 따른 이온밀도의 균일성을 측정한 결과이다.

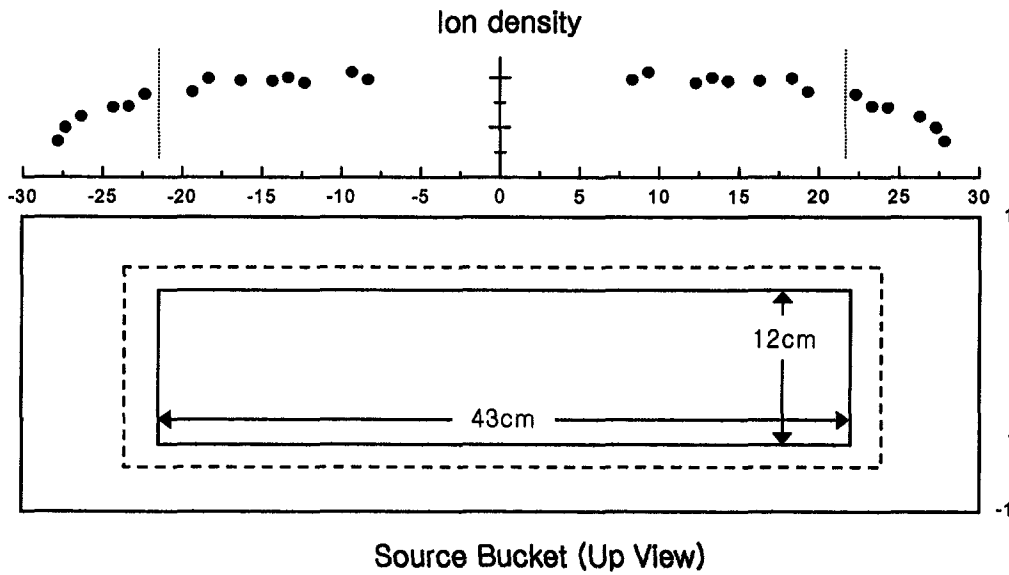


그림 3-1-40 수소 방전에 의한 빔인출면에서의 이온밀도 분포.

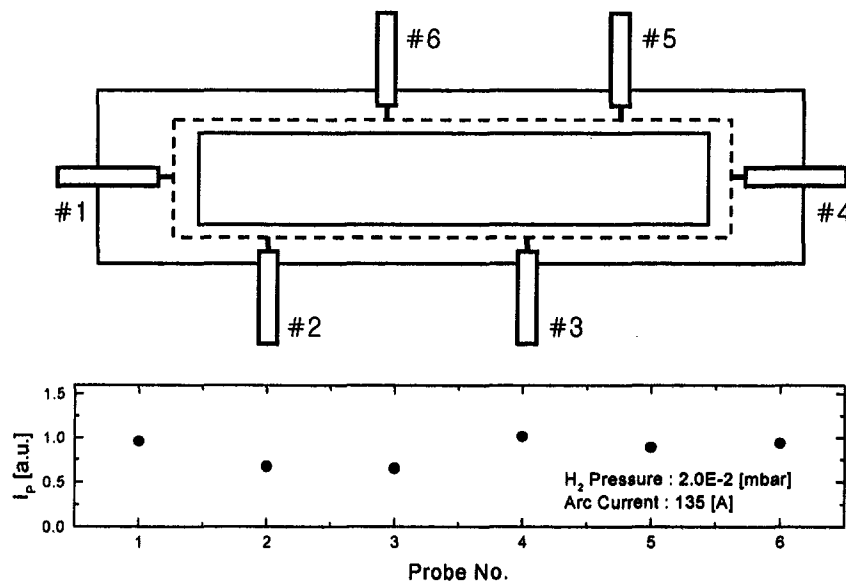


그림 3-1-41 이온원의 빔인출면에서의 이온밀도의 균일성.

빔인출면(12cm×43cm)에서의 이온밀도의 분포를 조사한 결과 방전조건에 따라 다소의 차이가 있겠지만, 크기는 30% 이상의 불균일성을 보이는 것으로 나타났다. 이의 원인을 파악하기 위하여 Bucket 내 깊이에 따라 각각 다른 3 개의 위치면에서 자장 분포를 측정된 결과 방향에 따라 큰 차이를 보이며 불균일한 자장분포를 보이는 것을 확인할 수 있었다.

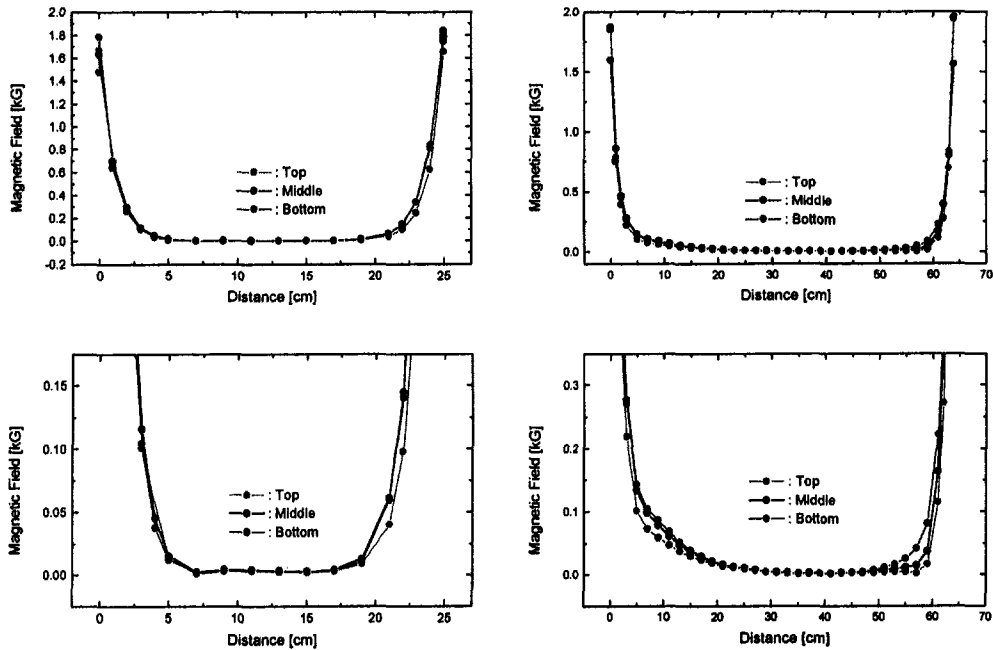


그림 3-1-42 Gaussmeter로 측정된 Bucket 내부 자장 분포.

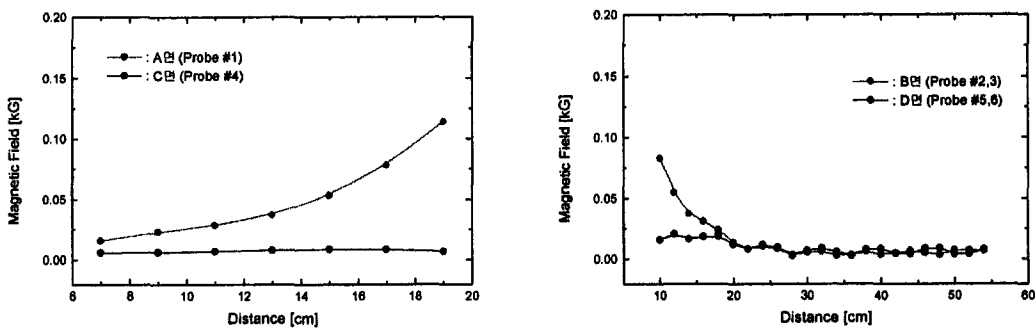
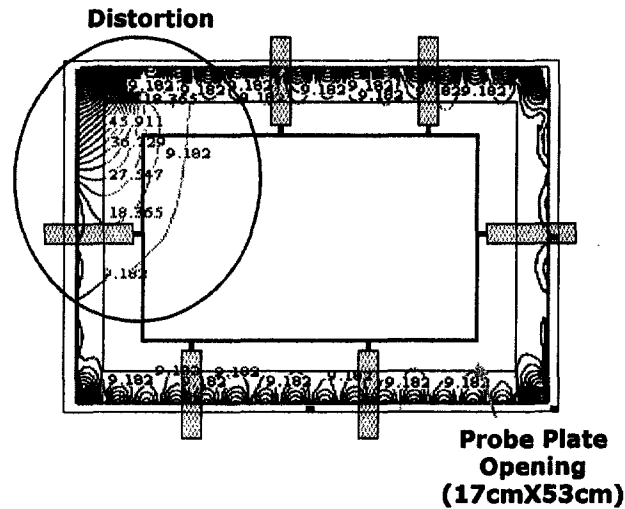


그림 3-1-43 Bucket 내부의 자장 분포.

이러한 불균일한 이온밀도 분포의 원인이 될 수 있는 요건으로는

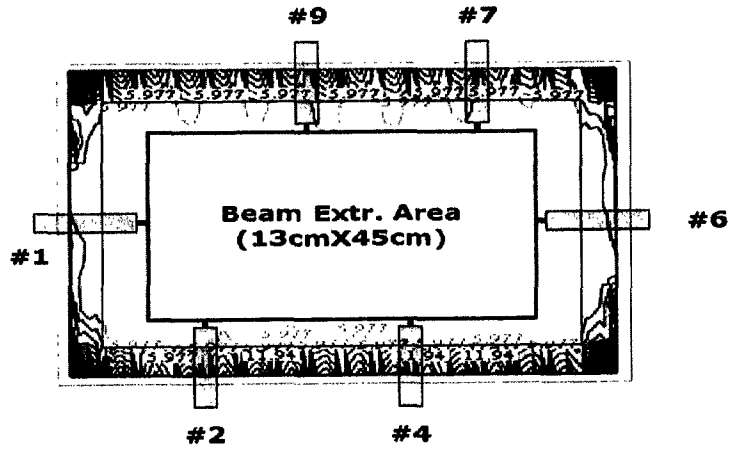
- ① Filament의 불균일한 분포 또는 가열
- ② 외부로부터의 기체 주입 방법에 따른 bucket 내부 기체 분포의 불균일
- ③ Bucket wall 자장의 불균일성

등이 원인이 될 수 있다. 따라서, Filament의 건전성을 확인하고, Gas 주입구를 각각 다른 조건 하에서 동작시키며, 플라즈마 이온밀도 분포를 관찰하였지만, 균일성은 크게 향상되지 않았다. 최종적으로 빔인출구 단면에서의 자장값을 측정한 결과 그림 3-1-44과 같은 자장분포를 얻을 수 있었다. 그림에서처럼 Bucket 하부의 한쪽 모서리에서 자장의 왜곡이 크게 나타남을 알 수 있었다. 이러한 원인은 Bucket wall에 설치된 영구자석 중 한 개가 반대로 장착되어 있음을 확인할 수 있었다. Bucket wall의 영구자석 배열을 조정 한 후, 플라즈마 이온밀도의 분포의 균일성은 15% 이내로 향상됨을 확인할 수 있었다.



(a) 배열 조정 전

그림 3-1-44 자석 배열 조정 전후 Bucket 내부의 자장 분포의 변화.



(b) 배열 조정 후

그림 3-1-44 자석 배열 조정 전후 Bucket 내부의 자장 분포의 변화.

아. 정전압 모드에서의 방전 특성

지금까지는 아크전원을 정전류 모드로 운전한 경우의 실험결과들에 대해서만 언급하였다. 그러나, 보다 안정된 이온원 운전을 위해서 아크전원은 정전압 모드로 운전되는 것이 바람직한 것으로 알려져 있다. 이를 위해서, 정전류 모드와 정전압 모드에서의 이온원 운전 결과를 비교하여 보았다. 그림 3-1-45에는 여러 가지 압력 조건하에서의 정전압 모드로 운전에 의한 방전 결과를 나타내었다. 수소 압력이 3.1×10^{-3} , 4.7×10^{-3} , 6.0×10^{-3} , 7.0×10^{-3} , 1.0×10^{-2} mbar 일 때, 아크전압에 따른 아크전류의 변화를 측정된 결과, 기체 압력이 증가함에 따라 아크전압에 따른 아크전류의 상승폭은 더 크게 나타남을 알 수 있었다. 수소기체 압력이 7.0×10^{-3} mbar 일 때, 아크전압이 86 V이면, 아크전류가 44 A로 나타나 3.78 kW의 가장 큰 아크 power를 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 아크전원을 CV mode로 운전하면서 방전을 한 경우에는 $3.0 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-2}$ mbar에서 100V의 아크 전압을 인가하여도 전류는 60A 이상 증가하지 않았다. 이러한 이유는 필라멘트 가열조건 최적화되어 있지 않은 때문인 것으로 판단된다.

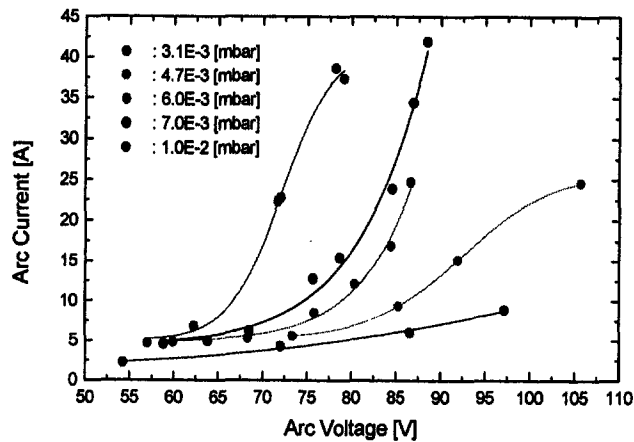


그림 3-1-45 Arc 전원의 CV(Constant-Voltage) mode 운전 시의 방전 특성 곡선.

자. 필라멘트 가열조건에 따른 방전 특성

NBI 이온원의 필라멘트 전원은 초기 6초 동안 운전 중 최대 전류인 3200A에 비해 훨씬 높은 전류치인 5500A로 운전할 수 있도록 제작되었다. 이는 초기에 필라멘트를 충분히 가열해 방전시간동안 플라즈마에 안정된 열전자가 공급될 수 있도록 하기 위한 것이며, 필라멘트로부터 방출되는 열전자에 의한 pre-ionization을 통해 방전개시가 용이하도록 하기 위함이다. 이러한 필라멘트의 가열조건에 따른 효과를 조사하기 위하여 아크전원을 정전압(CV; Constant Voltage) 모드로 운전하면서 필라멘트 가열을 각각 달리하면서 수소 기체의 아크방전특성을 조사하였다.

필라멘트는 가열 조건에 따라 열전자방출량이 달라지게 되고 이는 방전을 위한 pre-ionization 상태와 아크방전 후 플라즈마 상태 유지에 중요한 파라미터로 작용하게 된다. 수 mtorr의 수소기체 압력 하에서 아크 전압과 필라멘트 가열조건을 변화시키면서 이온원의 방전특성을 조사하여 최적의 필라멘트 가열조건을 결정하였다. 특히 이전의 수백 msec의 단펄스 운전과는 달리 수 초간의 비교적 긴 시간 동안의 균일한 아크 방전 플라즈마를 얻을 수 있는 운전 범위를 결정하였다.

KSTAR NBI 이온원의 필라멘트 전원은 방전 전 필라멘트의 예열과 pre-ionization을 위하여 최대 5500 A까지 5초간 운전이 가능하며, 방전 중에는 최대 3200 A로 운전이 가능하다.

필라멘트 가열조건에 따른 아크방전특성을 조사하기 위하여 아크전원을 정전압 모드로 운전하면서 그림 3-1-46에 제시된 바와 같이 방전개시 전후에 필라멘트에 가해지는 FIC(Filament Initial Current)와 FCR(Filament Current during Arc) 등의 필라멘트 가열조건을 변화시키면서 아크방전전류와 Langmuir Probe의 이온포화전류를 측정하였다. 이 때 수소기체의 압력은 vacuum gauge measurement and control system (MKS type 146A)에 연결된 최대유량이 100 sccm 인 MFC를 이용

하여 각각 40, 50, 60 sccm으로 일정하게 유지하였으며, 이온원 내부의 압력은 $10^{-1} \sim 10^{-5}$ torr 측정이 가능한 Baratron gauge를 이용하여 측정하였다. 그리고 아크방전전압은 50 V 에서 80 V 까지 10 V 단위로 변화시키면서 실험하였다.

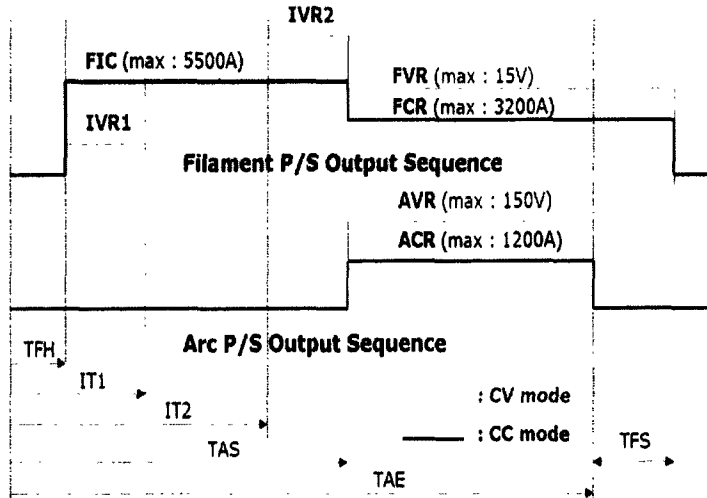


그림 3-1-46 필라멘트 및 아크전원 운전 sequence.

그림 3-1-47은 수소유량이 40 sccm이고 아크방전전압이 60 V, FIC가 3400 A 일 때, FCR을 1초 동안 각각 2900, 3000, 3100 A로 변화시켰을 때, 방전개시 후 아크방전전류의 시간에 따른 변화를 보여주고 있다. 이 때 이온원 내부 압력은 1.8 mtorr였다. 그림에서 보여지는 것처럼 FCR에 관계없이 방전개시전류는 일정하였으며, 방전개시 후 아크방전전류는 시간이 지남에 따라 FCR값에 따라 서로 다른 기울기로 변화하였다. FCR값이 3100 A보다 크거나 작은 경우에 아크방전전류는 증가하거나 감소하는 경향을 보였으며, Langmuir probe의 이온포화전류도 시간이 지남에 따라 동일한 기울기로 변화하는 경향을 보였다. 아크방전이 시작된 후의 이러한 현상은 방전개시 후 필라멘트의 가열 조건에 따라 공급되는 열전자가 과잉되거나 결핍되면서 나타나게 된다. 따라서, 수 초 동안의 일정한 방전전류를 유지하기 위해서는 FIC값에 적합한 최적의 FCR값을 정해야만 한다.

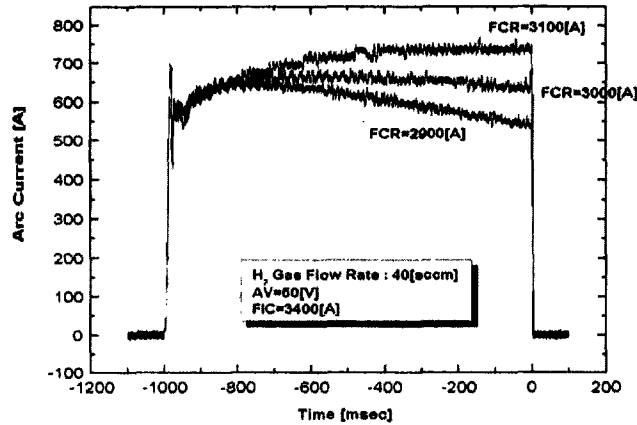


그림 3-1-47 필라멘트의 FCR에 따른 방전 특성의 변화.

그림 3-1-48은 그림 3-1-47과 같은 조건 하에서 아크방전전압을 40 V에서 80 V 까지 10 V씩 변화시키면서 안정된 플라즈마를 얻을 수 있는 필라멘트 가열조건을 구하여 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 일정 범위의 FIC값에 대해서만 안정된 플라즈마를 얻을 수 있고, 각각의 FIC값에 해당하는 최적의 FCR값이 존재함을 알 수 있다. 또한 아크방전전압에 따라 안정된 플라즈마를 얻을 수 있는 필라멘트 가열조건 영역이 별도로 존재함도 알 수 있다. 그림에서 보여지는 곡선의 하부영역에서는 방전개시 후 플라즈마가 유지되지 못하고 아크방전전류가 감소하는 경향을 보였으며, 상부 영역에서는 열전자의 과잉공급으로 인해 아크방전전류가 증가하는 경향을 보였다. 또한 아크전압이 증가할수록 안정된 플라즈마를 얻을 수 있는 FIC값은 커짐을 알 수 있다.

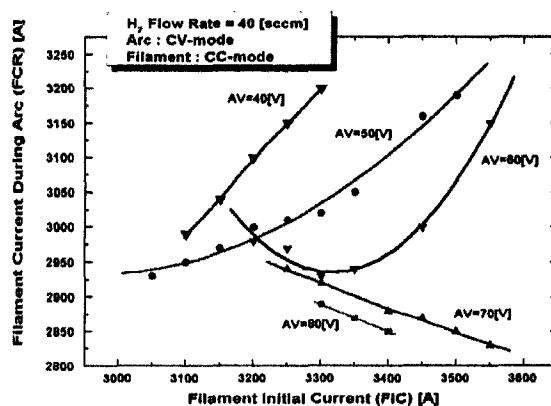


그림 3-1-48 아크전압에 따른 필라멘트 가열 조건의 변화.

그림 3-1-49은 아크전압이 50 V일 때, 기체 유량을 각각 40, 50 60 sccm으로 일정하게 유지하면서, 안정된 플라즈마를 얻을 수 있는 필라멘트 가열조건을 구하여 나타낸 것이다. FIC 증가에 따라 FCR 값도 함께 증가하는 것을 볼 수 있었다.

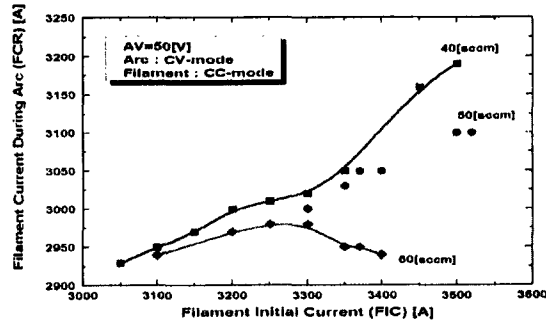


그림 3-1-49 수소 기체 유량에 따른 필라멘트 가열 조건의 변화.

필라멘트와 같은 hot cathode를 이용한 아크방전은 필라멘트로부터 방출된 열 전자에 의한 방전 메커니즘에 따라 emission limited 와 space charge limited의 두 가지 모드로 나누어 생각할 수 있다. 그림 3-1-50에는 일정한 아크방전전압 하에서 FIC값에 따른 아크방전전류를 나타낸 것이다. 그림에서 보면 FIC값이 3400 A 이하인 경우에는 아크방전전압이 변하여도 아크방전전류는 크게 증가하지 않는 emission limited 모드로 동작함을 알 수 있다. 그러나 FIC 값이 3400 A 이상이 되면 아크전압이 증가함에 따라 아크방전전류가 급격히 증가하는 space-charge limited 모드로 동작함을 알 수 있다. 또한 FIC값이 커질수록 아크전압의 증가에 따른 아크방전전류의 증가폭은 더 커짐을 알 수 있다.

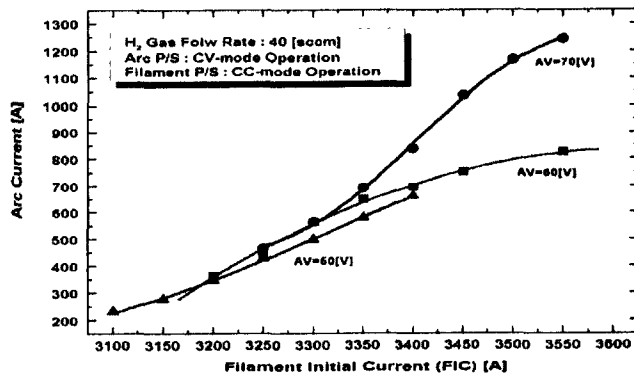


그림 3-1-50 필라멘트 가열 조건에 따른 아크전류.

그림 3-1-51에는 안정된 플라즈마를 얻을 수 있는 필라멘트 가열 조건 하에서의 FIC 값이 3250A, 3300A일 때, 아크방전전압과 아크방전전류의 관계를 나타내었다. 그림에서와 같이 아크전압에 따라 아크전류가 크게 변화하는 space charge limited mode와 아크전압이 증가해도 아크전류가 크게 증가하지 않는 emission-limited mode가 존재함을 확인할 수 있었다.

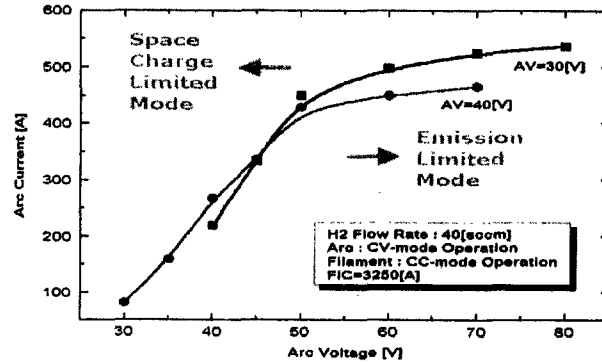


그림 3-1-51 아크전압에 따른 아크전류의 변화.

그림 3-1-52는 FIC값이 3250, 3300, 3350, 3400, 3450 A일 때 아크전압에 따른 아크전류의 변화를 보여주고 있다. 아크전압이 증가함에 따라 아크방전전류는 증가하였으며, FIC값이 커질수록 증가하는 기울기는 더 커짐을 볼 수 있었다.

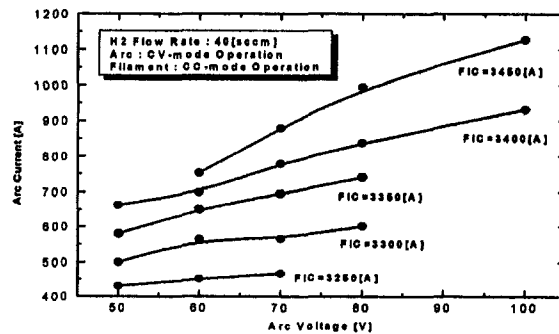


그림 3-1-52 방전전압에 따른 방전전류의 변화.

그림 3-1-53은 아크전압이 50 V 이고, 수소기체 유량이 각각 40, 50, 60 sccm 일 때, 아크방전전류에 따른 Langmuir probe의 이온포화전류를 나타내었다. Langmuir probe는 직경이 0.8 mm이고 길이는 2 mm 인 텅스텐으로 만들어졌으며, probe에는 90 V의 직류전압을 인가하였다. 이온포화전류는 아크전류가 증가함에 따라 증가하였으며, 동일한 아크전류 하에서 기체 유량이 클수록 이온포화전류

는 더 크게 나타남을 알 수 있었다. 따라서, 방전전압이 일정하고 아크전류가 증가하면 플라즈마 내의 이온의 밀도도 함께 증가함을 알 수 있었다.

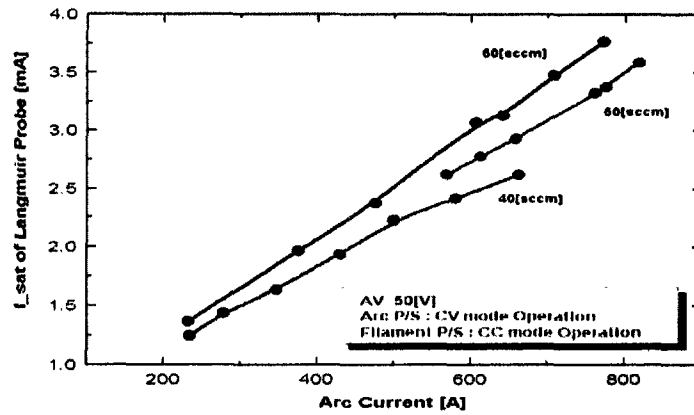


그림 3-1-53 필라멘트 가열 조건에 따른 아크전류 및 Langmuir probe의 이온포화전류.

그림 3-1-54에는 수소기체 유량이 40 sccm이고 아크전압이 40 V에서 80V까지 10V 단위로 변화할 때, 아크방전전류에 따른 Langmuir probe의 이온포화전류를 나타내었다. 아크전류가 동일한 경우 방전전압이 클수록 플라즈마 내의 이온밀도가 더 커짐을 알 수 있다.

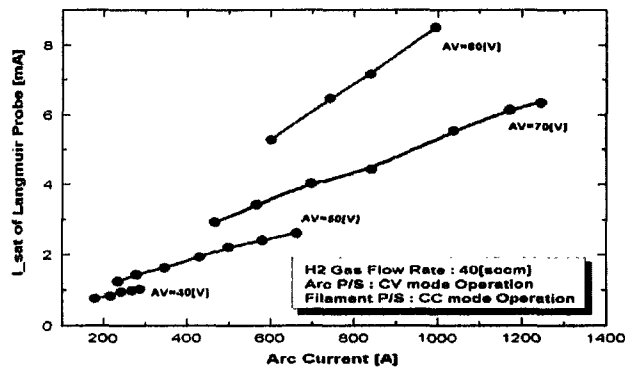


그림 3-1-54 아크전압의 변화에 따른 아크전류와 Langmuir probe의 이온포화전류.

이상의 결과를 바탕으로, 아크 power에 따른 이온포화전류의 변화를 살펴본 결과는 그림 3-1-55와 같다. 그림에서 나타나 있는 것처럼 Langmuir probe의 이온포화전류는 아크 power가 커짐에 따라 함께 증가함을 즉, 아크 power가 커질수록 플라즈마 내의 이온밀도가 커짐을 알 수 있었다. 이 결과로부터 KSTAR NBI 장치

를 20초 동안 안전되게 운전하기 위해서는 현재의 아크전원에 CP(Constant Power) 모드를 추가해 다른 운전모드 결과와 비교하여 최적의 운전모드를 선택함이 바람직 할 것으로 판단된다.

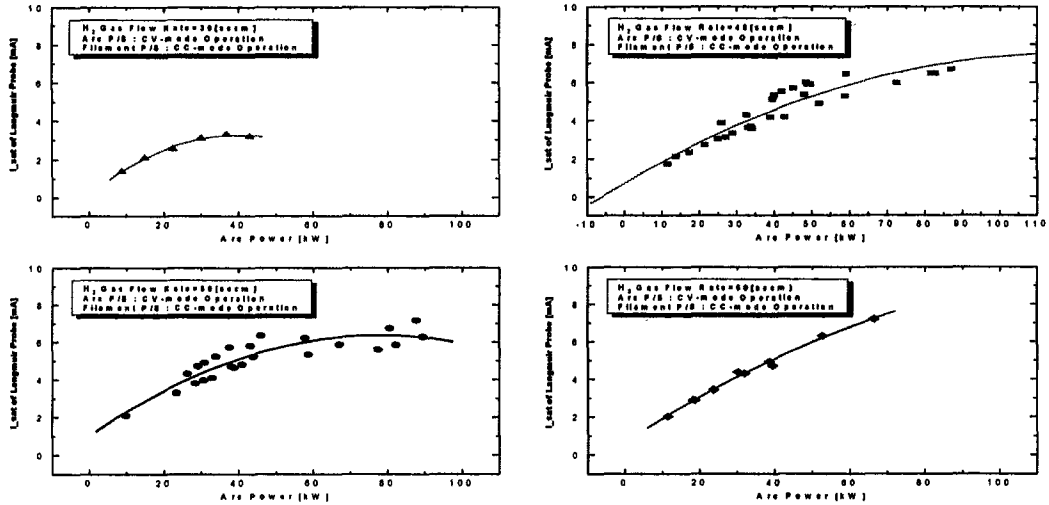


그림 3-1-55 아크 power 에 따른 Langmuir probe의 이온포화전류.

아래의 그림 3-1-56에는 안정된 플라즈마를 2초 이상 얻을 수 있었던 필라멘트 가열조건 하에서 아크전류에 따른 필라멘트 전류 FIC와 FCR의 차이를 나타내었다. 안정된 플라즈마를 얻기 위해서는 아크방전 중의 필라멘트 전류 FCR은 FIC에 비해 아크전류의 40~60% 정도의 범위에서 감소된 값으로 인가되어 함을 알 수 있었다. 이는 아크전류의 약 40~60%에 해당하는 전류가 필라멘트를 통해 흘러감을 의미한다고 할 수 있으며, 필라멘트를 통해 흘러가는 아크전류의 양은 이온원의 운전 조건에 따라 다소 달라지게 된다. 유량과 아크전압이 커질수록 그 양은 증가함을 알 수 있었다.

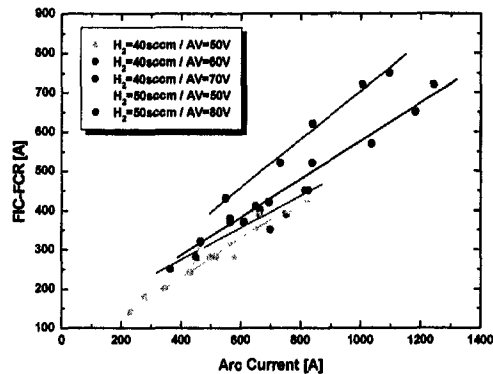


그림 3-1-56 아크 전류에 따른 필라멘트의 FIC-FCR.

차. 필라멘트와 아크전원의 운전 모드별 방전 특성

이온원의 필라멘트와 아크전원은 각각 정전류(CC) 와 정전압(CV) 모드 운전이 가능하다. 현재와 같이 방전 전과 후의 필라멘트의 전류를 달리하여 운전하는 경우 아크방전이 시작될 때, 전원의 운전 모드에 따라 각기 다른 현상들을 보이게 되는데, 그림 3-1-57,58,59,60에는 두 전원의 운전 모드에 따른 방전 특성을 나타낸 것이다. 그림 3.1.3.가(2)-31은 두 전원을 모두 정전압 모드로 운전한 경우의 방전곡선을 나타낸 것으로 이 때, 필라멘트의 전압은 각각 12.5 V, 11.5 V이고, 아크전압은 80 V였다. 그림에서 보여지는 것처럼 방전 초기에 아크전압이 설정치보다 약 20 % 정도 상승하였다.

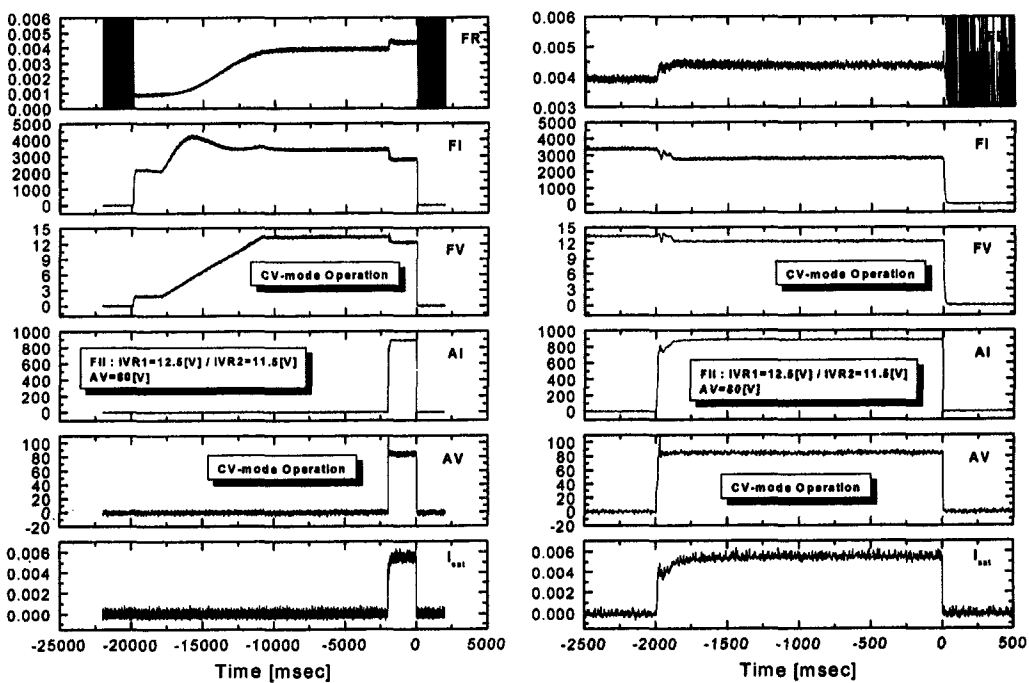


그림 3-1-57 정전압모드 필라멘트 가열시 정전압 모드 아크방전 곡선.

그림 3-1-58은 필라멘트 전원은 정전압 모드로 운전하고 아크전원은 정전류 모드로 운전할 때 방전곡선을 나타낸 것이다. 이 때, 아크전류 설정치는 890 A였다. 그림에서 보여지는 것처럼 아크방전 초기에는 플라즈마 내의 이온밀도가 낮아 플라즈마의 저항은 매우 큰 값을 가지게 되고 이에 따라 설정치인 890 A까지 상승시키기 위해서는 정전압 모드 운전에 비해 훨씬 더 큰 아크전압을 필요로 함을 알 수 있다.

그림 3-1-59는 필라멘트 전원과 아크전원을 모두 정전류 모드로 운전한 경우이며, 이 때에도 방전초기에 낮은 플라즈마 저항으로 인한 아크전압의 일시적인 상승을 볼 수 있었다.

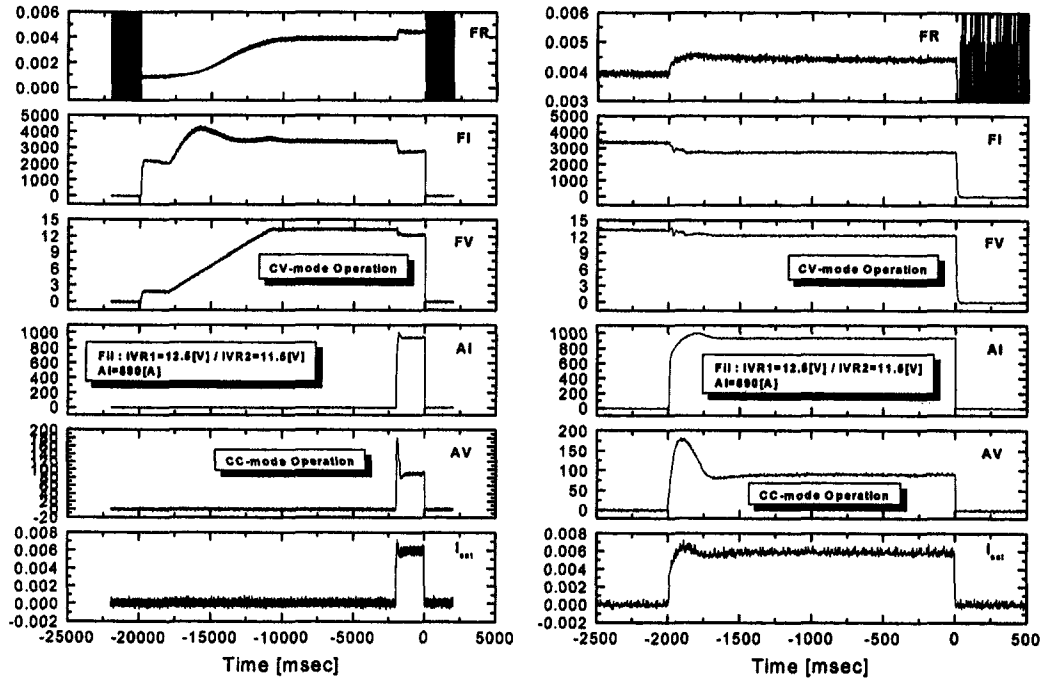


그림 3-1-58 정전압모드 필라멘트 가열시 정전류 모드 아크방전 곡선.

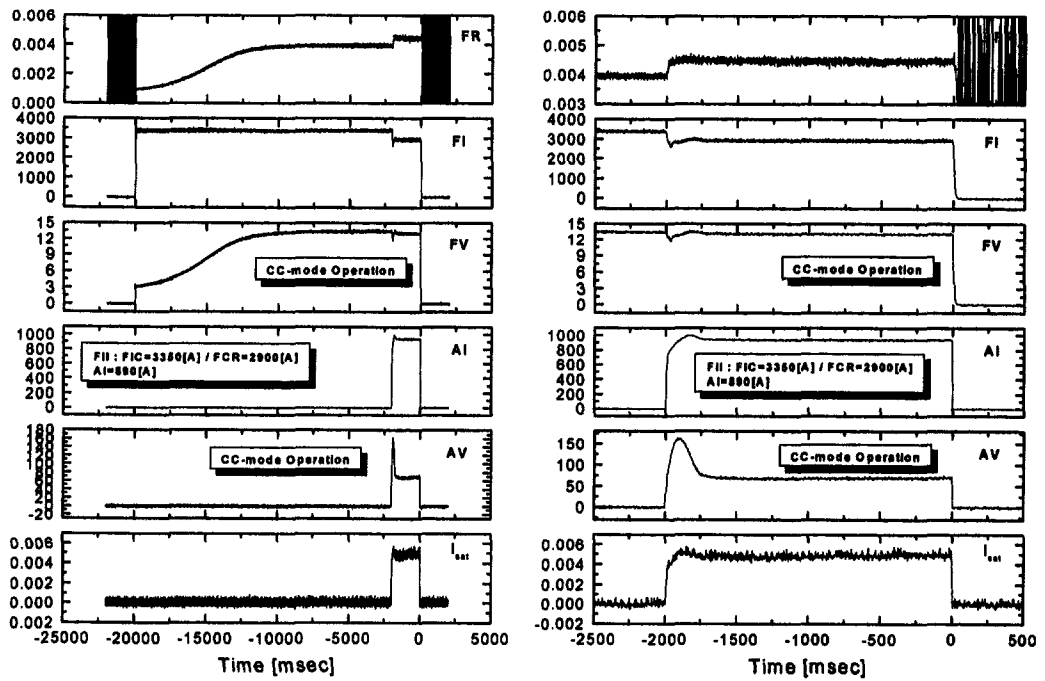


그림 3-1-59 정전류모드 필라멘트 가열시 정전류 모드 아크방전 곡선.

그림 3-1-60은 필라멘트를 정전류 모드로 운전하고 아크전원을 정전압 모드로 운전한 경우의 방전 특성을 나타낸 것이다. 이상의 4 개의 그림을 비교해보면, 필라멘트와 아크 전원의 운전 모드가 달라도 Langmuir probe의 이온포화전류 즉, 플라즈마의 이온밀도는 차이가 없음을 알 수 있다. 또한, 필라멘트와 아크전원 모두를 정전압 모드로 운전하는 것이 전류나 전압의 급격한 상승 없이 전원에 큰 무리를 주지 않으면서 원하는 방전 특성을 얻을 수 있는 방법이라고 판단된다.

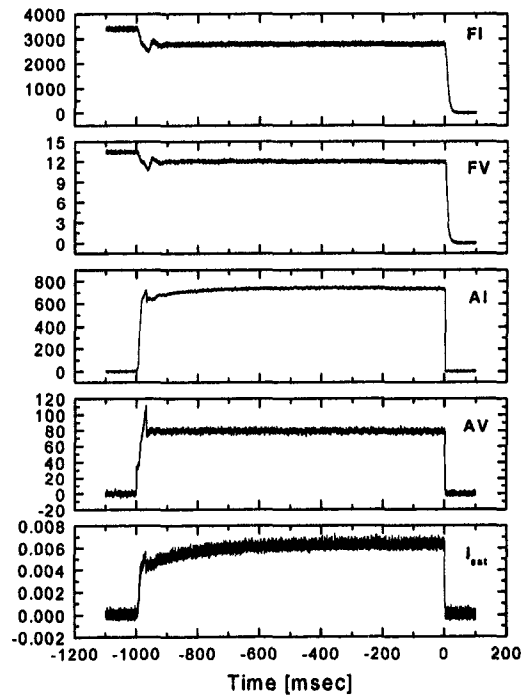


그림 3-1-60 정전류모드 필라멘트 가열시 정전압 모드 아크방전 곡선.

이상의 결과로부터 아크전원과 필라멘트 전원 모두를 정전압 모드로 운전하는 경우가 가장 안정된 방전특성을 나타냄을 확인할 수 있었다. 따라서, 이후의 이온원 실험에서는 필라멘트 전원은 정전압 모드로 운전함이 바람직할 것으로 판단된다.

(3) 빔인출 시험

개선된 KSTAR NBI 이온원을 사용하여 빔인출 실험을 수행하기에 앞서, 우선적으로 빔인출 실험에 대한 전반적인 경험을 습득하고, 제작된 가속전원의 특성 및 성능시험을 위하여 미국의 LLNL(Lowrence Livermore National Laboratory)로부터 무상양도를 받은 MFTF-B(A Tandem Mirror Fusion Test Facility) 장치의 NBI가열용 단펄스(0.5 초) 이온원을 이용하여 초기 저전압(<15 kV) 빔인출 실험을 수행하였다. 단펄스 이온원의 방전과 빔 인출을 위해서는 이미 제작이 완료된 아크 및 필라멘트 전원과 감속전원, 그리고 임시 가속전원(80 kV, 120 A)을 사용하였다.

(가) 단펄스 이온원 방전 특성

MFTF-B 단펄스 이온원을 이용한 빔인출 실험에 앞서, 먼저 방전특성을 조사하기 위한 실험을 수행하였다. 이 이온원은 현재 한국원자력연구소에서 대전류 이온원 개발을 위한 시험용 이온원으로 사용하고 있으며, 이 대전류, 단펄스 이온원의 방전특성을 조사하였다. 이온원은 빔인출 단면적이 $10 \times 45 \text{ cm}^2$ 이고, 4개의 slit-형 인출구의 가속단으로 구성되어 있으며, 중수소 기체를 이용하여 0.5초 동안 80 kV, 80 A의 이온빔을 인출할 수 있도록 설계되었다. 플라즈마는 아크 용기벽에 병렬로 배열된 226개의 텅스텐 필라멘트(hairpin-형, 지름-0.5 mm)로 구성된 음극(-)과 자장이 없는 용기의 벽으로 구성된 양극(+) 사이에서 만들어지며, 이온원의 필라멘트 운전영역은 9.5~11.5 V, 5.5 kA이고, 아크 운전영역은 21~60 V, 4 kA 이다. 방전특성을 조사하기 위하여 수소와 중수소의 유량에 따른 방전전압과 전류와의 상관관계, 최적의 방전을 위한 운전압력 및 필라멘트 전류와 아크 전류와의 상관관계를 함께 구하였다. 플라즈마 밀도를 측정하기 위하여 이온원 내의 빔인출 상부에 2개의 원통형 정전탐침(길이-4 mm, 지름-0.65 mm)이 장착되어 있으며, 방전실험에는 KSTAR 이온원을 위해 제작된 아크(160 V, 1.2 kA CW) 및 필라멘트(15 V, 5.5 kA 10초/3.2 kA CW) 전원이 사용되었다. 그림 3-1-61은 단펄스 이온원의 단면도이다. 단펄스 이온원의 주요 설계변수는 다음과 같다: (i) 빔 전압/전류: 80 kV/80 A, (ii) 빔 종류(species): D^+ (Transparency=0.6, Perveance=3.5 μpervs), (iii) 펄스 길이: 0.5 초, (iv) Duty cycle: 1.0%, (v) 그리드 형태: slit-형, 물리브데늄 형상가공된 봉, (vi) 빔 사이즈: $10 \times 45 \text{ cm}^2$, (vii) 원자 비율: 67%(D^+), 20%(D_2^+), 13%(D_3^+), (viii) 아크챔버 형태: 비 자기장 챔버, (ix) 분산도(수직 및 수평): 1.5° , 0.5° , (x) 전극 절연체: 물딩된 세라믹 리드 및 판, (xi) 필라멘트: 226개의 머리핀 형태(D=0.5 mm, ~20 A/개), (xii) 필라멘트 운전영역: 9.5~11.5 V, 5.5 kA (펄스 폭:3.5 초), (xiii) 아크 운전영역: 21~60 V, 4 kA(35~130 kW), 기체주입= 10^{-3} ~ 10^{-2} torr(20~40 t·l/sec). 방전실험을 수행하기 전에 4개의 가속단에 대한 고전압 시험을 수행한 결과는 다음과 같은 절연전압을 확인하였다: (i) G1-G2: 20 kV 절연, (ii) G2-G3: 80 kV 절연, (iii) G3-G4:8kV 절연. 단펄스 이온원의 필라멘트 가열과 아크 방전 결

과의 한 예를 그림 3-1-62에서 보여주고 있다. 보다 높은 전자방출을 얻기 위하여 필라멘트전원은 CC-모드(constant current mode)로 운전하였으며, 안정된 아크방전을 위하여 아크전원도 CC-모드로 운전하였다. 그림 3-1-63은 수소와 중수소에 대한 운전압력에 따른 아크방전 전압의 변화를 나타내며, 필라멘트전류와 아크전류의 상관관계를 나타낸다. 그림 3-1-64는 랑뮤(Langmuir) 전기탐침으로 얻은 전형적인 결과의 한 데이터를 보여주며, 2개의 전자온도가 존재함을 보여주고 있다. 이는 충분히 이온화된 아크방전이 일어나고 있지 않기 때문으로 판단된다. 그림 3-1-65는 아크전압에 따른 전자온도이다. 여기서, T_{ed} 은 낮은 전자온도이고, T_{eh} 는 높은 전자온도이다. T_{ed} 는 유추된 전자온도이며, $V_p - V_f = (3.34 + 0.5 \ln \mu) T_{ed} / e$ 로 표현된다. V_p 는 플라즈마 전위(plasma potential)이고, V_f 는 부유전위(floating potential)이다. 그림 3-1-66은 아크전류에 따른 플라즈마밀도를 나타내고 있다. $\mu (=m_i/m_p)$ 는 양성자 질량(m_p)에 대한 이온 질량비이다. 실제로는, 서로 다른 위치에 있는 전기탐침으로부터 동시에 얻은 이온포화전류의 값이 다소 큰(약 2배 정도) 차이를 나타내는데, 이는 탐침표면의 불순물에 의한 코팅이 발생하거나 탐침을 감싸는 절연체인 세라믹에 손상이 발생하여 탐침의 유효 표면적이 변하여 나타나는 결과로 판단된다. 이 현상은 앞으로의 실험에서도 항상 고려되어야 할 사항이며, 이를 피하기 위한 대책들이 선행되어야 한다.

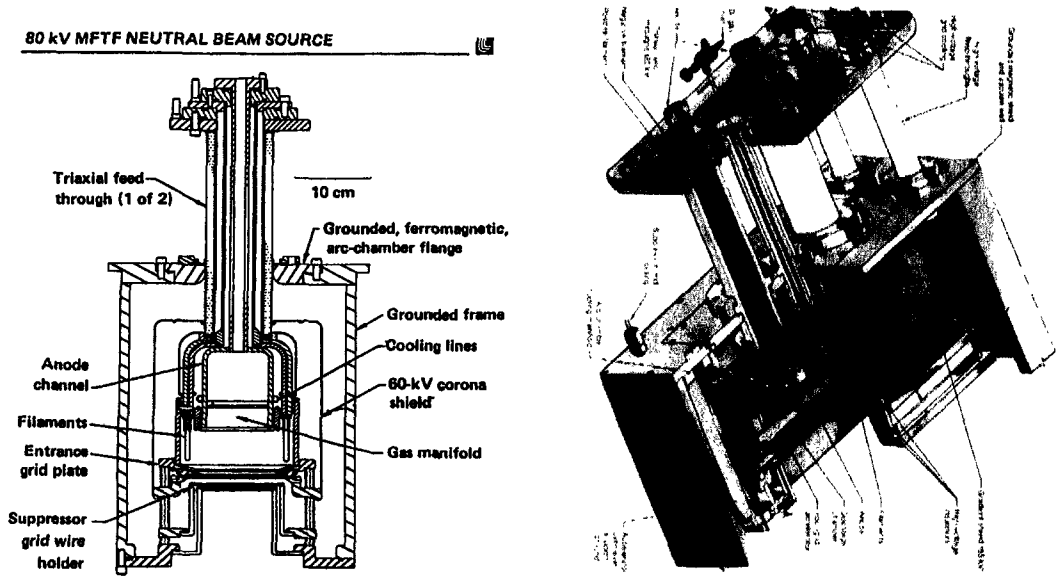


그림 3-1-61 MFTF-B 단펄스 이온원의 단면도

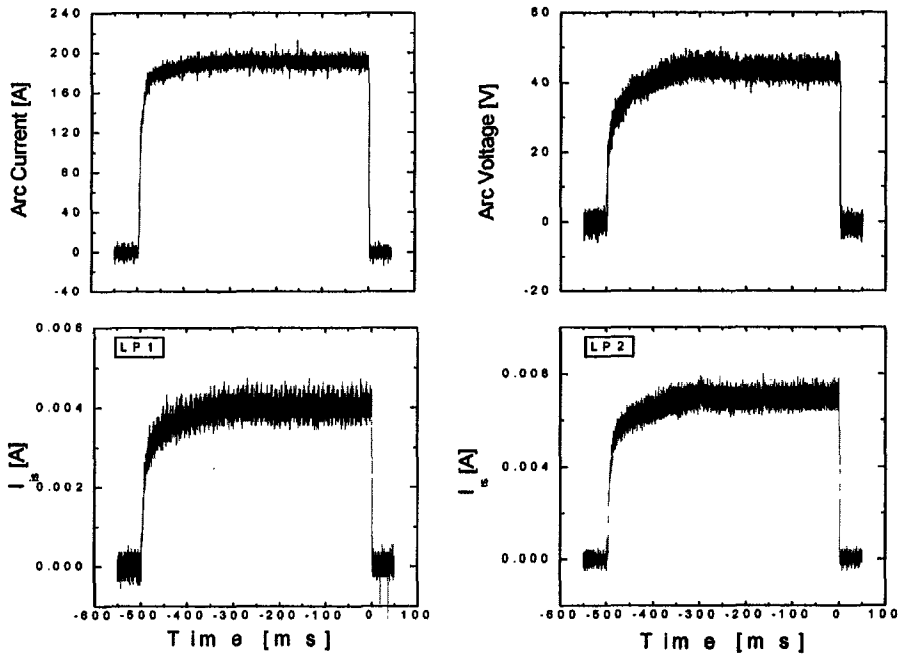
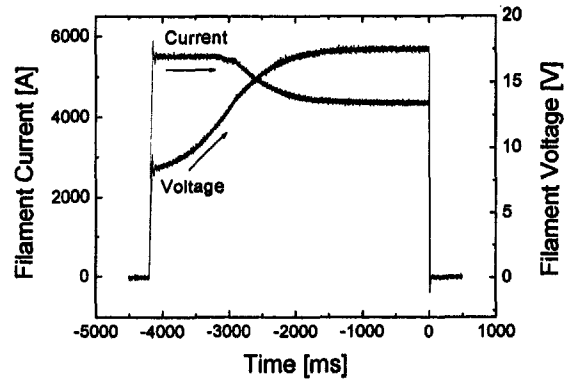


그림 3-1-62 단펄스 이온원의 필라멘트 가열과 아크 방전 결과의 한 예이며 I_{is} 는 2개의 전기탐침으로부터 구한 이온포화전류이다.

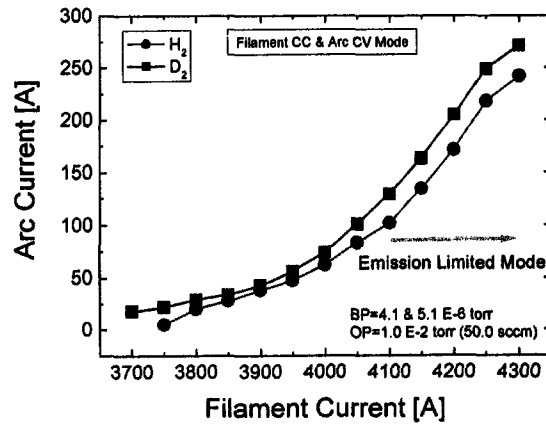
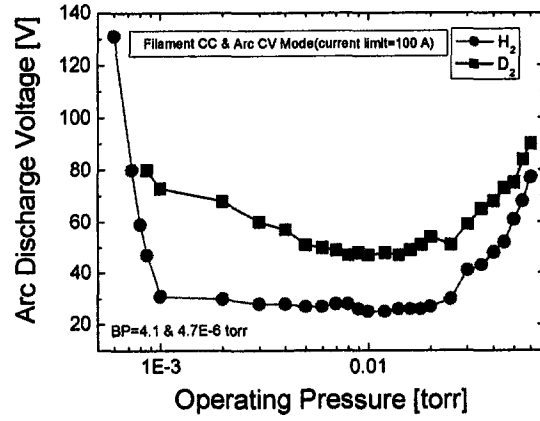


그림 3-1-63 운전압력에 따른 아크방전 전압 및 필라멘트전류와 아크전류의 상관관계

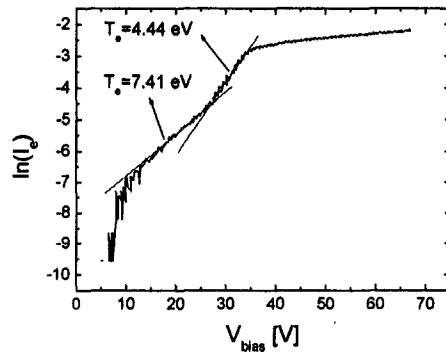
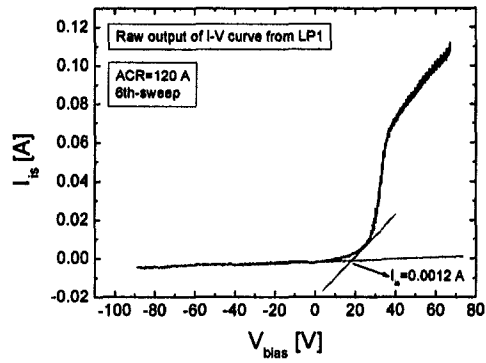


그림 3-1-64 랑뮤전기탐침으로 얻은 전형적인 결과

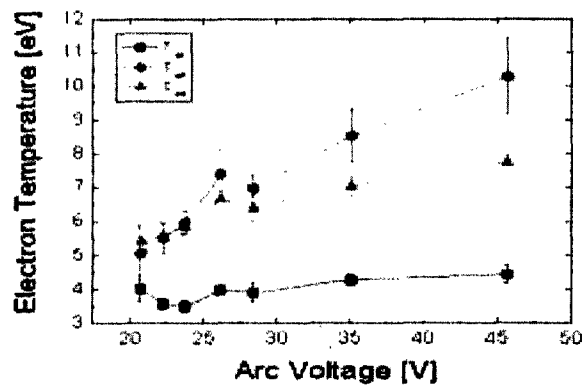


그림3-1-65 아크전압에 따른 전자온도

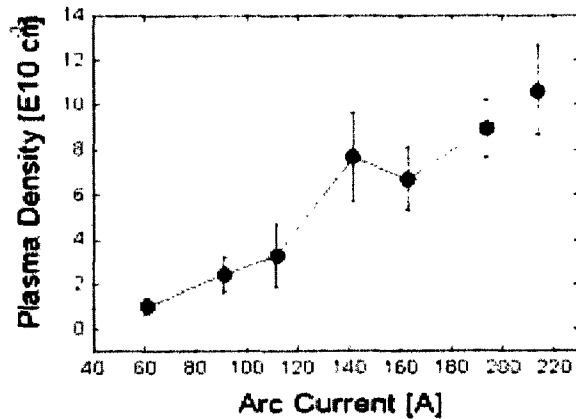


그림 3-1-66 아크전류에 따른 플라즈마 밀도

(나) 저전압 빔인출 특성

초기의 낮은 빔인출 가속전압(<15 kV)을 인가하여, 단시간(<0.5 초) 동안에 인출되는 빔의 특성을 확인하였다. 이온원의 방전에는 KSTAR NBI용 아크 및 필라멘트 전원을 사용하였으며, 수소기체를 펄스형태(1~2 초)로 주입하였다. 감속전원의 전압은 -1.0 kV로 고정을 시켰다. 빔인출을 확인하기 위하여 Faraday cup(면적=19.62 cm²)과 OMA 시스템을 이용하였으며, 빔인출 가속전원으로는 임시 가속전원(80 kV, 120 A)을 이용하였다. 빔인출 실험 동안에 얻어지는 각종 전원으로 부터의 모니터링 데이터와 진단으로부터 구해지는 데이터들은 여러 채널의 VXI(VMEbus eXtensions for Instrumentation) digitizer(maximum 20Ms/sec)를 사용하여 측정하였다. 그림 3-1-67은 전형적인 빔인출 실험결과를 나타내고 있다. 그림 3-1-68은 빔인출 실험 결과를 요약·정리하여 보여주고 있다. 빔 인출시의 가속전류는 가속전압에 비례하여 증가하는 것으로 나타나고 있지만, Faraday-cup 출력 신호도 이와 일치하는 것은 아니었다. 빔 인출시에 Gradient Grid(G2)의 전류는 50~100 mA가 유지됨을 확인할 수 있다. 이 Gradient Grad에 흐르는 전류를 측정하기 위하여, Gradient Grid에 인가되는 고전압전원(가속전원)의 출력단과 Grid 사이에 광섬유를 이용한 데이터 전송시스템을 설치하였다. 이 전류측정 광전송 시스템에 대한 개략도는 그림 3-1-69에서 보여주고 있다.

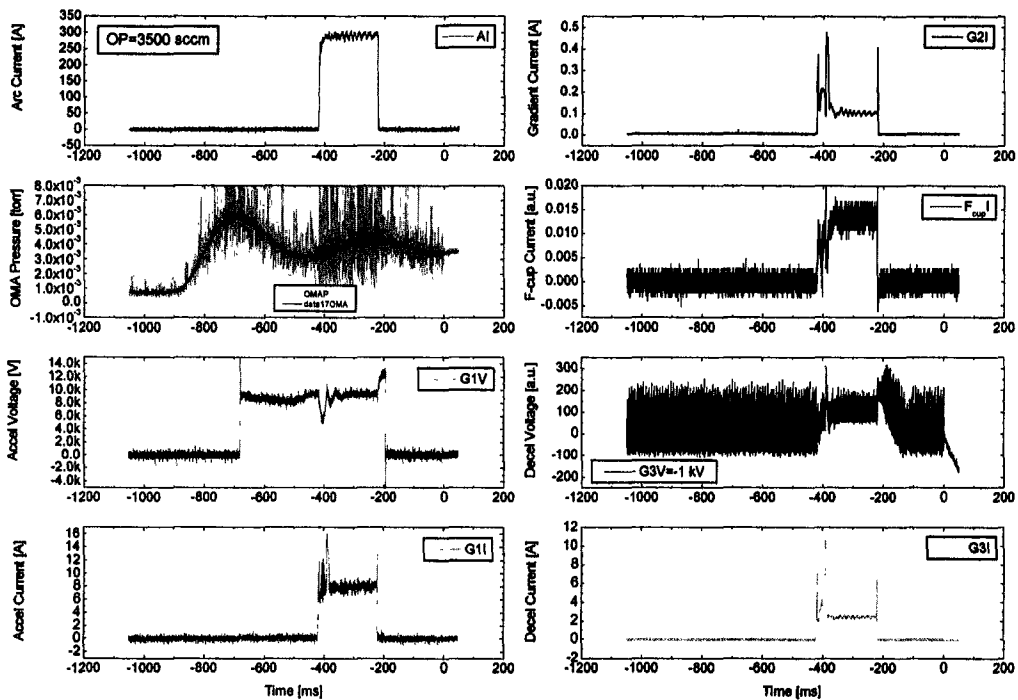


그림 3-1-67 전형적인 빔인출 실험 결과

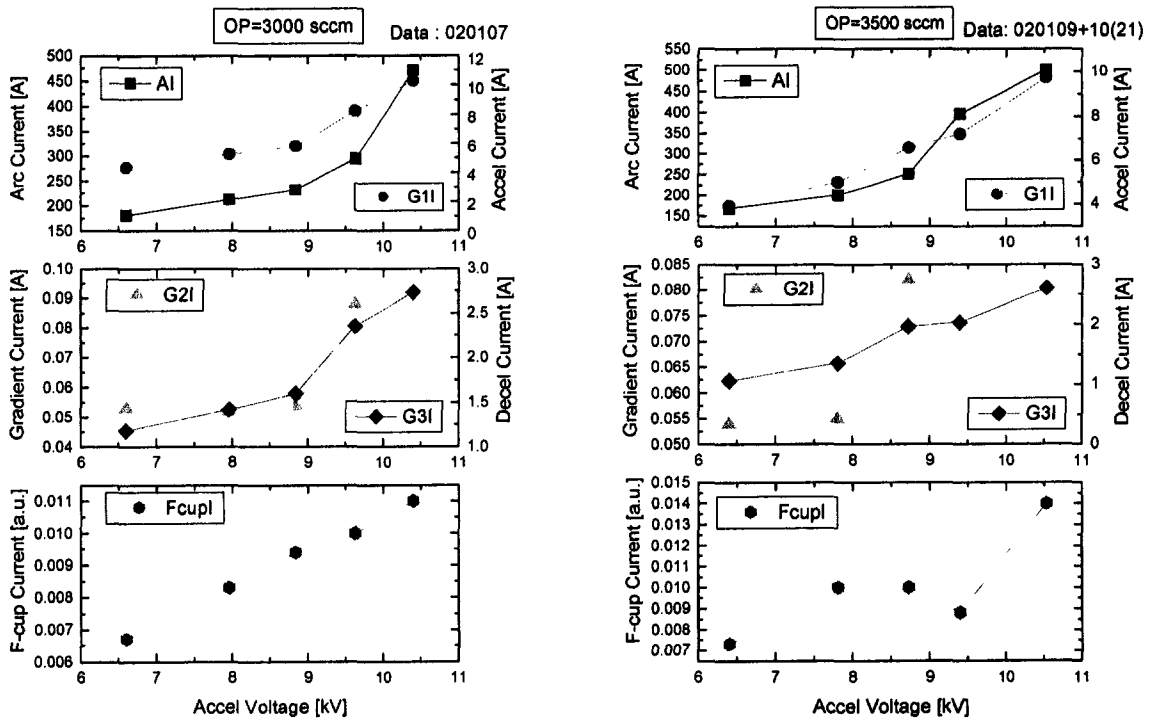


그림 3-1-68 빔인출 실험 결과 요약

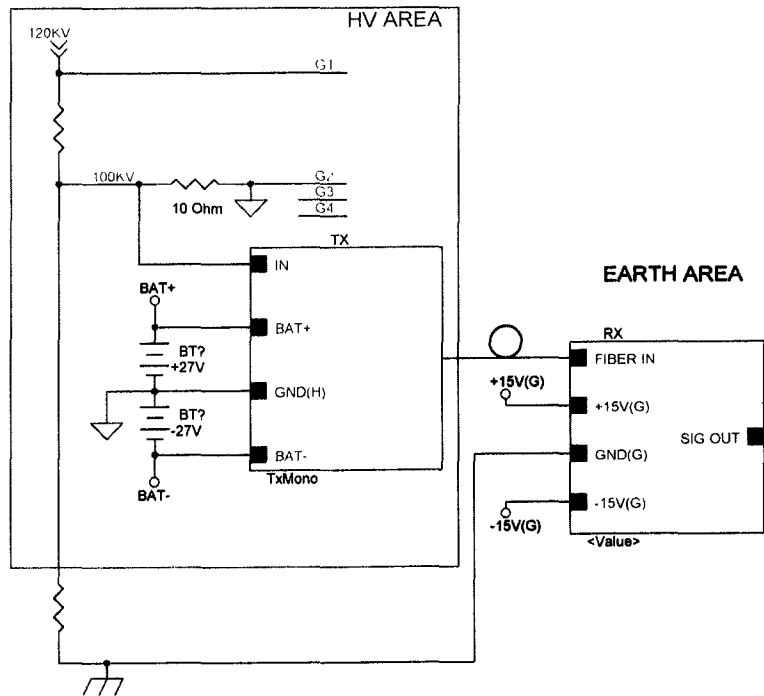


그림 3-1-69 Gradient Grid 전류측정 광전송 시스템 개략도

(4) 이온원 Upgrade 및 Future Works

2 단계 기간 동안 이온원의 Upgrade는 Bucket의 냉각회로를 실패 없이 만들어내기 위한 방법을 찾기 위해 Bucket 제작을 3 회에 걸쳐 수정하며 제작하였고, 이온원 그리드는 Slit형 빔인출 전극에서 Circular Aperture형 빔인출 전극으로 수정한 후에 냉각수 회로를 수정하기 위해 2 회에 걸쳐서 새로운 방법을 시도하였다. 여러 번의 수정과정을 거치면서 최종적으로 결정된 Bucket 및 그리드 제작공정은 다음과 같이 요약되고 실제 제작도면들은 (1)절에서 Prototype 이온원 제작은 (나) 절에서 찾아 볼 수 있다.

(가) Bucket

- 몸체는 4 조각으로 가공 후 Bolt 체결 후 Brazing
- 냉각수 회로를 위한 Gun drill 작업
- 냉각수 회로의 완성은 아래 Flange를 Brazing 하면서 이루어짐
- Brazing은 2회에 걸쳐서 상하 Frange를 따로 수행
- Brazing에 적절한 홈 가공 필수적
- 원래 TFTR Bucket 보다 내부 플라즈마 Chamber 길이가 4 mm 길어짐
- 냉각수 회로의 물공급을 위한 Flange는 가공 후 Bolting(O-ring Seal)

(나) Grids

- 그리드 한 개를 4 조각으로 구성
- Super Drill 과 Wire Cutting으로 인출구간 냉각수 Channel 작업
- Wire Cutting 에 의한 냉각수회로 Munu folder 작업
- E-beam Welding에 의한 그리드 판 냉각수 회로 마무리
- Soldering에 의한 그리드 판과 전극고정부 연결작업
- Milling에 의한 인출구 가공
- 최종 정밀 가공은 냉각수 회로 완성 후 시행
- 공정 간 Cleaning 필수

지금까지의 Upgrade는 냉각수 회로를 성공적으로 구성하기 위한 방법을 찾기 위한 방향으로 진행되었으나, 앞으로의 이온원 Upgrade는 빔인출 시험과 병행하면서 다음과 같은 목표를 달성하기 위한 방향으로 진행될 것이며, 이를 위해 이온원 그리드 뿐만 아니라 모든 부품들이 Upgrade의 대상이 될 것이다.

- 최대 에너지 및 최대 전류의 빔
- 연속운전
- 양질의 빔(Divergence 1 ° 이하)

나. 빔 라인 부품 개발

(1) 진공 배기계 해석

중성빔 입사장치의 설계에서 가장 중요한 것 중 하나는 빔 수송중의 재전리 손실을 최소화 할 수 있는 진공 배기계를 구성하는 것이다. 최근의 핵융합 연구가 대형 장치 위주가 되면서 요구되는 중성빔의 에너지 및 전류가 증가하고, 이에 따른 개스의 도입유량이 증가함에 따라 대용량 고속 배기계가 중성빔 입사장치에서는 필수적인 것으로 여겨지고 있다. 본 연구에서는 KSTAR의 중성빔 입사장치 진공배기계의 설계를 위해 필요한 운전조건 및 진공펌프들의 용량 등을 입자평형방정식을 이용하여 계산하고, 단펄스 운전의 경우 보조 배기계만을 이용하여 실험을 수행할 수 있는 운전 시나리오를 동특성 해석에 의해 결정하였다.

(가) NBI 빔라인 진공계의 구성

KSTAR에서는 플라즈마 가열장치로서 뿐만 아니라, 전류구동 및 다양한 전류 밀도 분포의 실험을 위해 그림 3-1-70과 같은 중성빔 입사장치 3 개 라인을 계획하고 있다. 계획된 장치는 한 개의 빔라인 당 8 MW의 중성빔을 플라즈마 내부에 공급할 수 있도록 하는 것으로 120 kV, 65 A (중수소의 경우)의 빔을 뽑아낼 수 있는 이온원 3 개가 그림과 같이 한 개의 빔라인에 장착된다. 빔라인은 이온원에서 인출된 빔이 토카막의 자장에 영향을 받지 않도록 하기 위해 빔을 중성화시키는 중성화실, 중성화가 되지 않은 이온들을 제거시키기 위한 휘용 전자석 및 이온빔 덤프를 포함하여, 중성빔의 총에너지 및 분포를 측정하기 위한 칼로리메타 등으로 구성되는데, 그림 3-1-71에 중성빔 입사장치의 기본 구성도를 보였다.

KSTAR 중성빔 장치의 진공계는 중성화장치에서의 중성화 효율을 높이면서 중성빔 수송중 입자와의 충돌에 의한 재전리 손실을 최소화하기 위해 차동배기에 의해 방마다 서로 다른 진공도가 유지될 수 있도록 3개의 방으로 나누어 콘덕턴스를 조정할 수 있도록 설계되었다. 직육면체로 된 NBI 진공용기 안에는 모든 빔라인 부품들이 설치되기 때문에 그 크기가 3mx4mx5m 에 이르는 대형 구조물이고, 이온원 및 중성화 장치의 운전을 위해 개스 도입유량이 커서 배기속도가 큰 내장형 크라이오 펌프가 사용될 것이다.

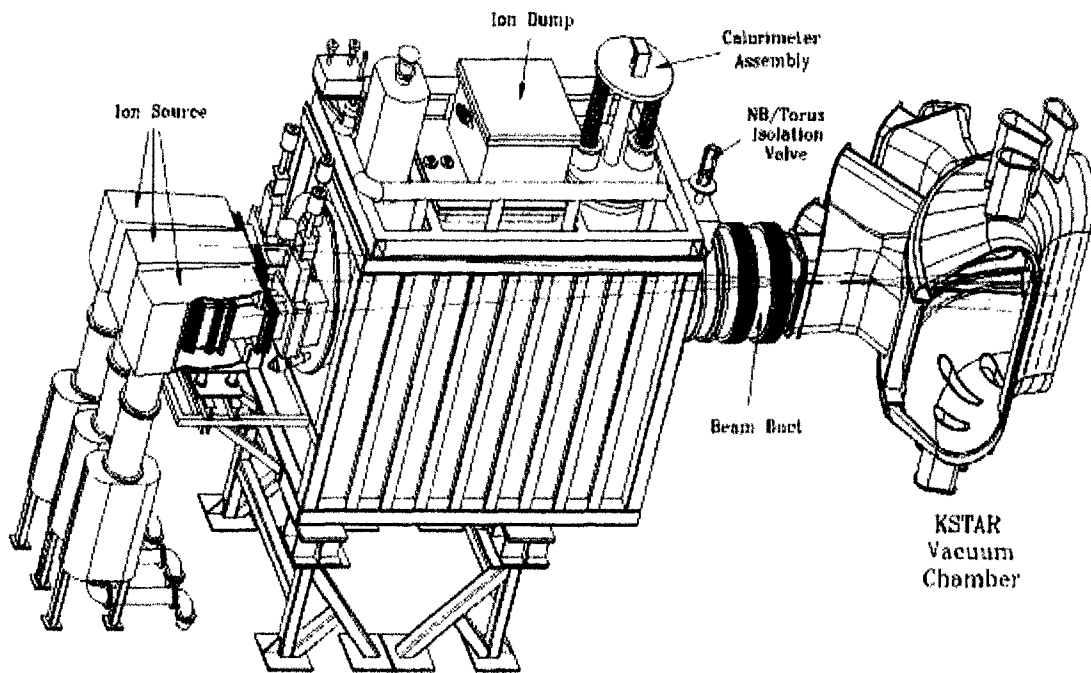


그림 3-1-70. KSTAR 중성빔 입사장치의 구성도

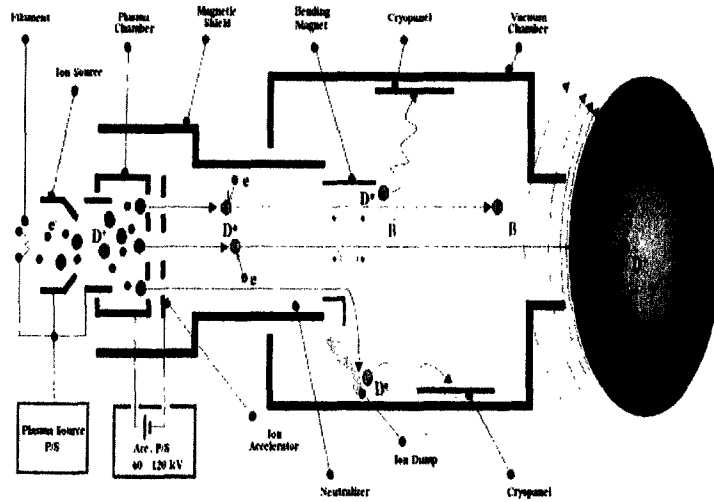


그림 3-1-71. 중성빔 입사장치의 원리

(나) 입자 평형방정식에 의한 배기계통 해석

정상 운전 상태에서 NBI 장치의 배기계통 관련 운전 조건들은 입자 평형식[14]을 사용하여 계산해 낼 수 있다. 그림 3-1-72은 입자평형방정식을 적용하기 위해 KSTAR NBI 장치에서 기체의 흐름과 압력(P), 개스 도입유량(Q), 콘덕턴스(C), 빔 손실율(L), 및 배기속도(S)들과의 관계를 도식적으로 표현한 것이다. 이온원 및 중성화장치들과 3 개의 독립적인 방들이 직렬로 연결되어 있는데 각 부분의 압력분포를 자유롭게 조정하기 위해서 중성빔을 차단하지 않는 범위 내에서 가능하면 작은 콘덕턴스를 갖는 도관들로 연결되어 있다. 이온원에서 빔으로 인출된 입자들은 배기계의 기체 부하로 작용하지 않지만, 이온빔 중에서 스크레이퍼(scraper) 등에 의해 빔으로부터 제거되는 입자들은 모두 배기계의 부하로 작용하게 된다. 따라서 이온원에서 인출된 빔의 이동경로를 따라 빔 손실율들은 다음과 같이 계산할 수 있다.

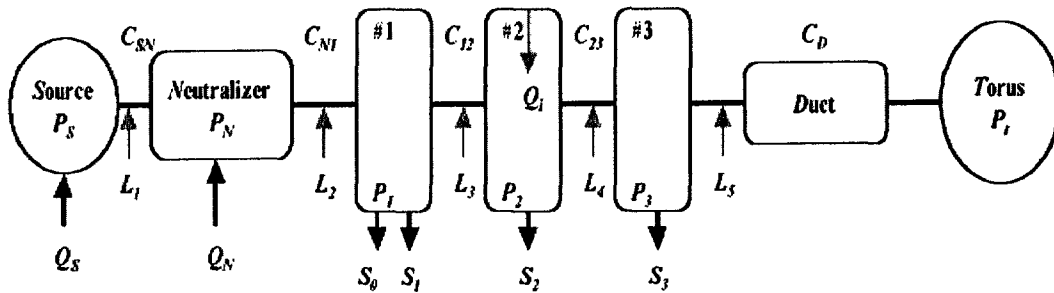


그림 3-1-72. KSTAR 중성빔 입사장치 배기계의 해석을 위한 모델 구성도

(나)-1. 빔손실을 계산

NBI 장치에서 빔손실은 대부분이 빔 스크레이퍼에서 이루어 진다. 빔라인 부품들을 빔으로부터 보호하기 위해 빔라인 부품들의 입구에 스크레이퍼들이 설치되는데, 이들에 의해 빔의 크기가 제한되어져서 부품들이 빔에 의해 손상되는 일을 방지하고 있다. 본 연구에서는 이온원으로부터 인출된 입자들의 속도 분포에 의해 각 스크레이퍼에 충돌하는 입자들의 수를 계산하여 빔손실율을 구하였다.

KSTAR 중성빔 장치에서 사용될 이온원은 빔 단면의 크기가 43 cm x 12 cm 로 4 세트의 그리드들에 의해 빔이 인출되도록 되어 있다. 인출된 빔은 이온원 그리드의 방향에 수평인 방향으로 1.2°, 수직 방향으로 0.5° 의 발산각을 갖게 되는데, 여기서의 발산각은 그림 3-1-73에서 정의된 대로 가우시안 분포에서 분포의 최대값의 1/e의 분포 값을 갖는 각으로 정의된다. 빔 손실의 계산에는 발산각을 중심으로 주분포(main)와 테일(tail) 분포로 나누어서 각 경우마다 입자들의 위치와 각도

들을 배정하고, 그 입자들을 따라가면서 손실이 일어나는 위치와 크기를 결정하였다. 표 3-1-7은 빔 스크레이퍼들의 위치 및 크기와 그 곳에서의 전체 빔 입자들에 대한 손실되는 입자들의 비율을 계산한 결과를 요약하였다. 주 분포의 경우 빔 입자의 각도 분포를 동일하게 주었으며, 테일에서의 분포는 가우시안 형태와 동일한 분포 두 경우를 모두 적용하여 계산하였다. 전자석을 통과한 중성빔은 중성 입자들과 충돌하면 재전리되면서 누설자장 등의 영향에 의해 빔라인 부품들과 충돌하므로서 기체 부하로 작용하게 되는데, 본 연구에서는 재전리된 입자들은 모두 재전리가 이루어진 곳에서 부하로 작용하는 것으로 계산하였다. 그림 3.1.3.나(1)-5는 계산된 빔손실을 이용하여 KSTAR 중성빔 장치의 에너지 흐름도를 구성해 본 것이다. NBI 장치에서 중성빔은 단일 에너지를 가지므로 빔출력의 손실율은 곧 입자손실 또는 기체부하와 대응되는데, KSTAR NBI 장치의 경우 환산단위는 $1 \text{ MW} \equiv 1.48 \text{ torr l/sec}$ 이다. 23 MW의 에너지를 입력했을 때 토카막 플라즈마 가열에 쓰이는 에너지는 약 8 MW 이고 나머지 15 MW 는 입자 손실에 의한 기체부하 및 열부하로 작용하게 된다.

표 3-1-7. 빔손실율((각 부품에서의 에너지 손실량)/(이온원에 공급된 총에너지))
계산결과

	Main-square Tail-Gaussian	Main-square Tail-square	Reionization	Leakage Field Effects	Total(A)	Total(B)
Ion Source Exit Scraper	0.0376	0.0437			0.0376	0.0437
OMA Scraper	0.0019	0.0043			0.0019	0.0043
Neutralizer	0.0106	0.022		0.05	0.0606	0.072
Bending Magnet Scraper	0.0005	0.0018		0.01	0.0105	0.0118
Ion Dump	0.5336	0.5209			0.5336	0.5209
Pre-Calorimeter Scraper	0.005	0.0151	0.013		0.018	0.0281
Pre-Duct Scraper	0.0	0.001	0.0024		0.0024	0.0034
				total	0.6646	0.6842

(나)-2. 입자 평형 방정식

그림 3.1.3.나(1)-3에서 서로 이웃하는 방들 사이의 입자 평형식을 세우면 아래와 같은 5 개의 연립방정식이 얻어질 수 있다.

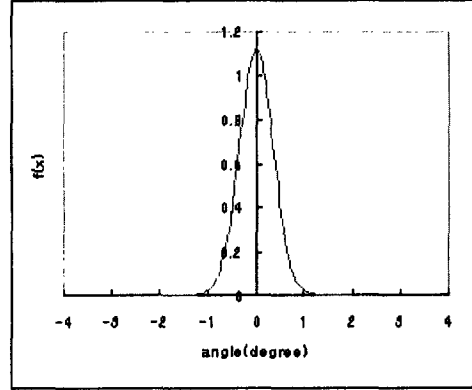
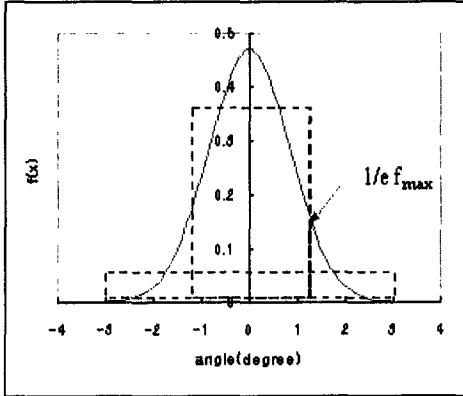
$$(1-a)Q_S + C_{SN}P_N + \frac{L_1}{2} - P_S C_{SN} = 0 \quad (1)$$

$$Q_N + P_S C_{SN} + P_1 C_M + \frac{L_1}{2} + \frac{L_2}{2} - P_N C_{SN} - P_N C_M = 0 \quad (2)$$

$$P_N C_M + P_2 C_{12} + \frac{L_2}{2} + \frac{L_3}{3} - P_1 C_M - P_1 C_{12} - P_1 S_1 = 0 \quad (3)$$

$$P_1 C_{12} + P_3 C_{23} + Q_i + \frac{L_3}{2} + \frac{L_4}{2} - P_2 C_{12} - P_2 C_{23} - P_2 S_2 = 0 \quad (4)$$

$$P_2 C_{23} + P_i C_D + \frac{L_4}{2} + \frac{L_5}{2} - P_3 C_{23} - P_3 C_D - P_3 S_3 = 0 \quad (5)$$



(a) Horizontal angle distribution

(b) Vertical angle distribution

그림 3-1-73. 이온원 초기 발산각 분포

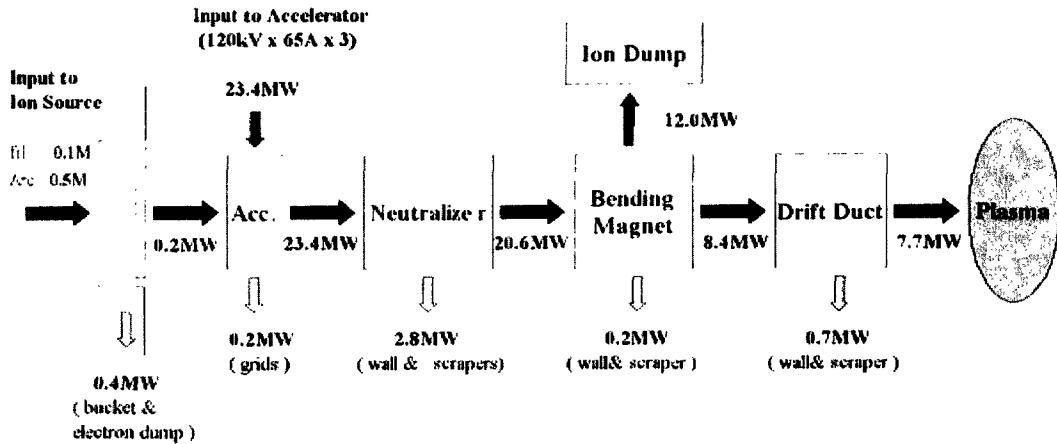


그림 3-1-74. KSTAR NBI 장치의 에너지 흐름도

이때 α 는 이온원에서의 전리율을 나타내는데, $(1-\alpha)Q_s$ 는 플라즈마로 되지 않고 도입된 기체상태 그대로 이온원 밖으로 배출되는 기체의 양을 나타내게 되며, 나머

지 기호들에 대한 설명은 표 3-1-8에 요약하였다. 위의 연립방정식들의 해석에 의해 필요한 운전 조건등을 계산하기 위해서는 배기계의 부하가 되는 입자 손실율(L) 값들 외에 이온원 및 중성화실의 가스공급유량(Q), 각 도관들의 콘덕턴스(C), 최적의 운전을 위해 유지 되어야할 압력 값 등이 주어져야만 한다. 표 3-1-8에 입자 평형식을 위해 주어지는 입력 값들이 정리되어 있다. 이온원으로부터 65 A의 빔을 인출하기 위해 이온원에 공급해주어야 할 가스 공급량 Q_s 는 α 값에 따라 변하는데, 초기 계산에서 이 값은 0.5로 하였다. 중성화실은 중성화 효율을 위해 비교적 높은 압력을 유지해 주어야 하는 곳으로 기준 값을 2×10^{-3} torr로 하였다. 방과 방을 연결하는 각 도관들의 콘덕턴스는 이온원의 경우는 구조가 복잡하기 때문에 Monte Carlo 방법을 사용하여 계산하였고, 그 이외의 값들은 기하학적 구조를 고려하여 계산할 수 있다. 또한 빔 손실에 의한 입자 부하는 두 개의 연결된 방에서 반씩 부담하는 것으로 하여 계산을 수행하였다. 각 방에서 유지되어야할 진공도는 빔의 재전리 손실과 배기계의 크기등을 고려하여 반복 계산에 의해 최종 값들을 결정할 수 있다. 또한 빔라인을 한 개의 이온원으로 운전할 때와 세 개의 이온원으로 운전할 때를 구별하여 계산을 수행하였는데, α 값에 따른 P_s, Q_N, S_1, S_2, S_3 들을 운전 조건으로 구한 결과를 표 3-1-9에 정리하였다.

표 3-1-8. 배기계 상수의 정의 및 KSTAR NBI 장치의 실제 값

기호	의미	계산 값	기호	의미	계산 값
C_{SN}	이온원과 중성화장치 사이 도관의 콘덕턴스	2100(x3) l/sec	Q_s	이온원 가스 공급량	23 torr l/sec
C_{N1}	중성화장치와 방 1 사이 콘덕턴스	6700(x3) l/sec	α	이온원에서 전리율	0.5
C_{12}	방 1과 2 사이의 콘덕턴스	30000(x3) l/sec	L_1	1에서의 입자 손실량	$0.048 \alpha Q_s$ torr l/sec
C_{23}	방 2와 3 사이의 콘덕턴스	100000 l/sec	L_2	2에서의 입자 손실량	$0.048 \alpha Q_s$ torr l/sec
C_D	토러스와 연결되는 빔덕트의 콘덕턴스	13500 l/sec	L_3	3에서의 입자 손실량	$0.048 \alpha Q_s$ torr l/sec
P_N	중성화실 압력	3×10^{-3} torr	L_4	4에서의 입자 손실량	$0.048 \alpha Q_s$ torr l/sec
P_1	방 1의 압력	9×10^{-5} torr	L_5	5에서의 입자 손실량	$0.048 \alpha Q_s$ torr l/sec
P_2	방 2의 압력	2×10^{-5} torr	Q_i	이온빔 덤프의 입자손실량	$0.048 \alpha Q_s$ torr l/sec
P_3	방 3의 압력	3×10^{-6} torr	S_0	보조펌프 배기용량	5000 l/sec
P_t	토러스 압력	$10^{-6} \sim 10^{-8}$ torr			

표 3-1-9. 배기계 해석에 의한 결정된 정상 운전조건

ion source 수	α	Q_s (torr · l/sec)	P_s (torr)	Q_N (torr · l/sec)	S_1 (l/sec)	S_2 (l/sec)	S_3 (l/sec)
1	0.4	28.8	1.14×10^{-2}	1.1	2.0×10^9	3.9×10^9	2.4×10^9
1	0.5	23.1	8.7×10^{-3}	6.9	2.0×10^9	3.9×10^9	2.4×10^9
1	0.6	19.2	6.9×10^{-3}	10.7	2.0×10^9	3.9×10^9	2.4×10^9
3	0.4	28.8	5.8×10^{-3}	4.0	5.9×10^9	5.4×10^9	6.2×10^9
3	0.5	23.1	4.9×10^{-3}	4.6	5.9×10^9	5.4×10^9	6.2×10^9
3	0.6	19.2	4.3×10^{-3}	5.0	5.9×10^9	5.4×10^9	6.2×10^9

(나)-3. 배기계 해석 결과 및 논의

계산 결과에 의하면 3개의 이온원이 동시에 운전될 때 필요한 배기량은 중수소의 경우 총 1.8×10^6 liter/sec 이다. 이를 위해 온도 4.3 K 로 액체 헬륨에 의해 냉각되는 크라이오 패널들이 진공용기의 양쪽 벽에 설치되는데, 일반적으로 크라이오 패널에 의한 단위면적 당 가능한 중수소 배기량이 5.0 K ~ 4.2 K 사이에서 적어도 7 liter/sec-cm² 이고, KSTAR NBI 진공용기에 패널의 설치가 가능한 면적이 30 m² (2x4mx5mx0.75)이므로, 진공함내에 설치 가능한 배기량은 2.1×10^6 l/sec 로 필요한 배기량을 충분히 만족시키고 있다. 수소의 경우도 패널 표면적이 4.3 K 로 계속 유지될 수 있다면 중수소의 경우와 거의 동일한 배기속도를 얻을 수 있으나, 수소의 포화증기압이 4.5 K 이상에서는 10^{-6} torr 보다 크게 되기 때문에 운전 시나리오에 따른 패널설계 및 패널 재생주기에 대한 고려에 의해 패널 표면적의 온도가 4.5 K 이하에서 운전될 수 있도록 하여야한다. 반면 중수소의 경우에는 패널 표면의 온도가 6.0 K가 될 때까지 진공도를 10^{-6} torr를 유지할 수 있으므로 수소운전에 대한 대책이 마련된다면 따로 고려할 필요가 없다.

이온원에서의 전리율에 따라 빔전류 65 A를 만들기 위한 필요한 가스 공급량이 달라지고, 동시에 중성화실을 압력 3×10^{-3} torr로 유지하기 위해 필요한 가스 공급량도 달라지게 된다. 중성화실의 효율을 위하여 이 곳을 일정한 압력으로 적절한 양의 가스를 공급하면서 제어하는 경우 이온원의 전리율은 빔라인의 진공도에 영향을 미치지 않기 때문에 빔의 수송에도 아무런 영향도 미치지 않지만, 가스 유량을 일정하게 제어하게 되면 이온원의 전리율에 따라 중성화실 압력이 달라지고 따라서 빔수송과 관련된 진공도도 변화하게 된다. 따라서 중성화실의 압력을 제어하는 편이 가스의 유량을 제어하는 것보다 더 안정된 빔장치가 될 수 있을 것으로 판단된다.

(다) 동특성 해석에 의한 보조 배기계 설계

KSTAR 중성빔 장치의 배기계는 3장에서 계산된 결과처럼 대형 배기계를 구성해야만 한다. 이를 위해서 제공되어야 하는 크라이오 펌프는 고가의 액체 헬륨을 냉매로 사용하여야하기 때문에 장치 개발과정에서 반드시 요구되는 잦은 대기개방 및 재가동 등에 의해 부담해야하는 크라이오 펌프의 운전비용을 무시할 수 없다. 따라서 장비의 개발과정에서 단 펄스 빔에 의한 실험이 가능한 범위에서는 고가의 비용이 드는 크라이오 시스템의 도움없이 보조 배기계로만 수행할 수 있는 운전 시나리오를 개발하게되면 운전비용 면에서 큰 부담이 없이 기초 실험들을 진행할 수 있을 것이다. 본 장에서는 진공계의 동특성을 계산하여 0.5초 이내의 빔은 보조 펌프인 터보 펌프만으로 만들어 낼 수 있는 가능성 등에 대해 논의한다.

(다)-1. 배기계의 동특성 해석 모델

배기계의 동특성은 용기내 압력의 시간 의존성을 말하는 것으로 등가회로 해석법[15]에 의해 간단히 계산해 낼 수 있다. 용기 내에서의 기체의 흐름을 전기회로에서의 전류와 같이 생각하면 진공 시스템의 요소들을 표 3-1-10 에서와 같이 전기회로의 요소들로 대치시킬 수 있다.

표 3-1-10 진공시스템과 전기회로의 요소별 비교

진공시스템		전기회로		진공 시스템	전기회로
압력(P)	[Pa]	전압(V)	[V]	$P=Q/S$	$V=IR$
유량(Q)	[Pa.m ³ /s]	전류(I)	[A]		
콘덕턴스(C)	[m ³ /s]	1/저항(1/R)	[moh]	$Q=C\Delta P$	$I=\Delta V/R$
배기속도(S)	[m ³ /s]	"	[moh]	$dP/dt=Q/V$	$dV/dt=I/C$
부피(V)	[m ³]	축전용량(C)	[F]	$\tau =V/S$	$\tau =RC$
도달압력(P _v)	[Pa]	기준전위(V _s)	[V]		

표에서는 전기회로와의 단위를 맞추기 위해 MKS 단위를 사용하고 있지만 실제 계산에서는 Pa 과 m³ 대신 torr와 litter를 사용하였다. KSTAR 중성빔 장치 배기계의 동특성을 해석하기 위해 등가회로로 나타내면 그림 3-1-75과 같이 나타낼 수 있는데, 여기서 R은 방과 방을 연결하는 각 도관들의 콘덕턴스를 나타내고, V는 정해진 위치에서의 압력을, C는 각 방들의 부피에 대응한다. 또한 I 는 각 방에서의 배기 부하를 나타내고, V1은 기저 압력(base pressure)를 나타낸다. 보조 펌프는 R6 이고, 침자 수자들은 이온원(7), 이온원 스크레이퍼(1), 중성화실(2), 진공함의 방 3개 (3, 4, 5) 및 토카막 진공용기(6)를 각각 나타내는데, R5 값을 매우 큰 값으로 놓으면 중성빔 장치와 토카막과의 통로가 끊겨져 있는 상태를 재현할 수 있다. 그림

3-1-75의 등가회로에 의해 만들어지는 미분 방정식들은 상용 회로 해석 프로그램 등을 통하여 간단히 풀어낼 수 있다.

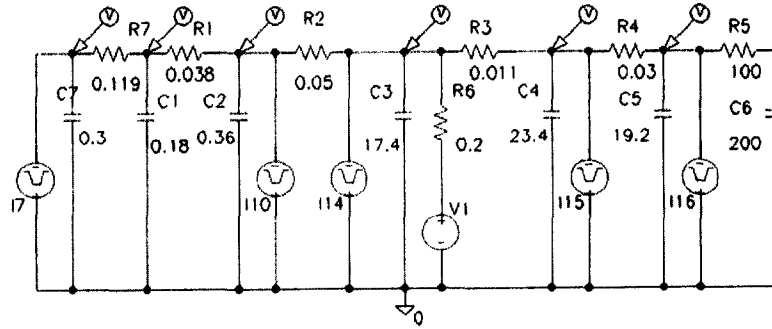
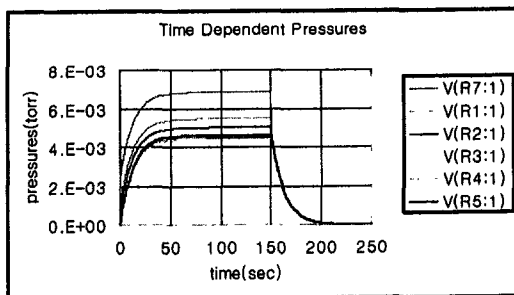


그림 3-1-75. KSTAR NBI 진공계의 등가회로

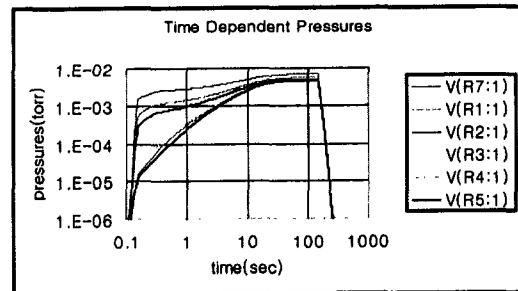
(다)-2. 동특성 계산결과 및 논의

이온원에 유량 23 torr.litter/sec의 속도로 150 초동안 흘려줄 때 배기속도 5000 litter/sec 의 보조펌프에 의해 계산된 시간에 따른 압력 분포를 그림 7에 보였다. 보조 펌프만에 의해 100 초 이내에 충분히 기저 압력까지 도달하고, 개스가 공급되는 상태에서 평형에 도달하는데 약 50초가 소요되며 그때 압력은 방의 위치에 따라 큰 차이 없이 10^{-3} torr 정도를 유지하게 된다.

단펄스 운전을 위해 이온빔 인출이 수행되어야 하는 시간은 중성화 효율을 위해 중성화실의 압력이 10^{-3} torr 정도를 유지하면서 재전리 손실을 최소화하기 위해 진공도가 10^{-5} torr 이하로 유지될 수 있는 구간이어야 한다. 또한 이온빔 밀도분포를 균일하게 유지해 주기 위해 이온원의 압력이 급격히 변화하지 않는 범위라야 할 것이다. 그림 3-1-76의 (b)를 참조할 때 이온원에 개스를 공급 개시한 후 0.3초에서 0.8초 사이에 빔을 인출하는 것이 보조 배기계에 의해서 0.5초의 단펄스 빔을 얻기 위한 최적의 시나리오가 된다. 단 진공도가 시간에 따라 악화되면서 만들어지는 재전리 입자들에 대한 대책은 반드시 마련되어야 할 것으로 판단된다.



(a)



(b)

그림 3-1-76. KSTAR NBI 진공계의 동특성 해석 결과

(라) 결론

정상상태의 운전에서 KSTAR 중성빔 입사장치의 중성화효율을 극대화하고 재전리 손실을 최소화하기 위한 운전 조건들을 입자 평형식을 이용하여 구하였다. 이온원과 중성화실의 가스 주입량은 이온원의 전리율이 0.5 일 때 각각 23 torr litter/sec 와 7 torr litter/sec이고 필요한 펌프의 배기속도는 이온원이 하나일 때 각각 2×10^5 litter/sec, 4×10^5 litter/sec, 2.4×10^5 litter/sec 이고, 이온원이 세 개일 때 각각 5.8×10^5 litter/sec, 5.4×10^5 litter/sec, 6.2×10^5 litter/sec 이다. 이온원의 운전 압력은 이온원의 전리율에 따라 5×10^{-3} torr에서 1×10^{-2} torr 사이로 계산되었다. 이는 중수소 운전의 경우 4.3K 로 유지되는 KSTAR NBI 크라이오 패널 30 m^2 의 면적에 의해 충분히 배기가 가능한 양이다.

동특성 해석에 의해 보조 펌프만에 의한 단펄스 이온빔 인출의 가능성을 검토한 결과 이온원에 가스를 공급한 후 0.3 초에서 0.8 초 사이가 가장 효과적으로 빔을 인출할 수 있는 시간임을 알 수 있었다. 이 동안 빔의 표적이 있는 칼로리메타에서의 진공도는 1×10^{-5} torr 에서 9×10^{-5} torr까지 올라가기 때문에 진공도가 시간에 따라 악화되면서 만들어지는 재전리 입자들이 각 빔라인 부품들에 줄 열부하에 대한 평가가 필요하다.

(2) 진공챔버

(가) 서론

NBI 진공 챔버는 빔 라인 구성 요소들을 여러 진공 챔버에 독립적으로 넣고 각 챔버를 덕트로 연결하는 경우와 하나의 대형 챔버에 빔 라인 구성 요소를 전부 넣는 두 가지 경우가 있다. 전자의 경우 빔 라인 부품의 시험 등이 용이한 장점이 있는 반면, 후자의 경우 장치가 매우 간결해지는 장점을 지니고 있다. 본 NBI 장치의 진공 챔버는 제한된 공간에 설치될 예정이므로, 후자를 택하였다.

3개의 이온원을 부착하고 중성화 장치, 휨 자석, 이온 덤프, 열량계, 진공 배기 펌프를 한 개의 진공 챔버에 모두 넣고 작업이 가능한 충분한 공간을 확보하기 위하여 진공 챔버의 형태는 직육면체, 크기는 3 x 4 x 5m로 결정하였다.

(나) 설계

진공 챔버의 설계는 다음과 같은 기준으로 수행하였다.

- 형태 및 크기 : 직육면체 3 x 4 x 5 m (60m³)
- 기체 배출량 : 1 x 10⁻³ torr l/s
- 재질 : STS304
- 사용온도 : 40℃ 이하
- 진공 포트 : 80개소 이상
- 바닥 평면도 : ± 1mm 이하

전기체 배출량은 1M l/s 이상의 주진공 펌프가 설치되었을 때 진공 챔버 배출 기체에 의한 분압이 $\sim 1 \times 10^{-9}$ torr 이하가 되어 핵융합 장치로의 불순물 인입을 최소화하기 위해 설정된 조건이며, 비자성체를 사용하여야 하므로 재질은 스테인레스로 하였다. 사용 온도 40℃ 이하인 조건으로부터 진공 씬은 바이톤 오링으로 하였다. 진공 포트는 빔라인 부품을 위한 포트 이외에 향후 수요를 대비하여 충분한 여유를 두었다. 바닥 평면도는 설치 시 바닥을 기준으로 빔라인 부품을 설치하기 위해 설정된 값이다.

압력에 의한 변형이 1mm 이하가 되기 위한 보강재는 T형 및 Box형으로 하였으며, 설계 검증에는 ANSYS 코드를 이용하였다. 진공 특성을 나타내는 기체 배출량은 다음 표 3.1.3.나(2)-1과 같이 추정하였다.

표 3-1-11. 진공 챔버에서의 추정 기체 배출량

기체 부하 종류	조건 (Ref. 'Vacuum Technology', A. Roth)	기체 부하 (torr-//s)
SUS304 기체 방출	기체 방출율 : 1×10^{-9} torr-//s/cm ² 표면적 : 100 m ²	1×10^{-3}
O-ring 기체 방출	기체 방출율 : 1×10^{-7} torr-//s/cm ² 총 O-ring 길이 : 100 m 평균 O-ring 높이 : 0.5 cm	5×10^{-4}
O-ring Seal 기체 누설	기체 누설율 : 1×10^{-8} torr-//s/cm 총 O-ring 길이 : 100 m	2×10^{-4}
O-ring 기체 투과	기체 투과율 : 1×10^{-8} torr-//s · mm/cm 총 O-ring 길이 : 100 m 평균 O-ring 높이 / 폭 : 0.5 cm / 10 mm	5×10^{-6}
용접 기체 누설	기체 누설율 : 1×10^{-10} torr-//s/cm 총 용접 길이 : 100 m	1×10^{-6}
합계		1.7×10^{-3}

(다) 제작

진공 용기 재료로는 20mm 두께의 STS304 스테인레스 스틸 판재를 사용하였다. 절단 가공에 의한 변형을 최소화하기 위해 Water-jet으로 소재를 절단하였다. 보강재도 동일한 재료를 사용하여 제작하였다. 진공 챔버의 용접은 진공 용접에 용접에 의한 응력을 가급적 줄이기 위해 주로 챔버 외부에서 시행되는 기계 용접과 챔버 내부에서 시행되는 진공 용접을 분리하여, 먼재 소재를 기계 용접을 통해 챔버의 조립을 완료한 후 진공 용접을 하였다. 진공 포트는 바이톤 오링 및 볼트 조립으로 하였으나, 상판은 자중 및 진공 흡인력을 이용하여 별도의 체결을 하지 않고 스스로 진공 쉘이 되도록 하였다.

가공을 완료한 후 진공 챔버 내부는 배출 기체 감소를 위해 Buffing 처리를 하였다. 그림 3-1-77은 제작 완료 후 운송중인 진공 챔버이다.

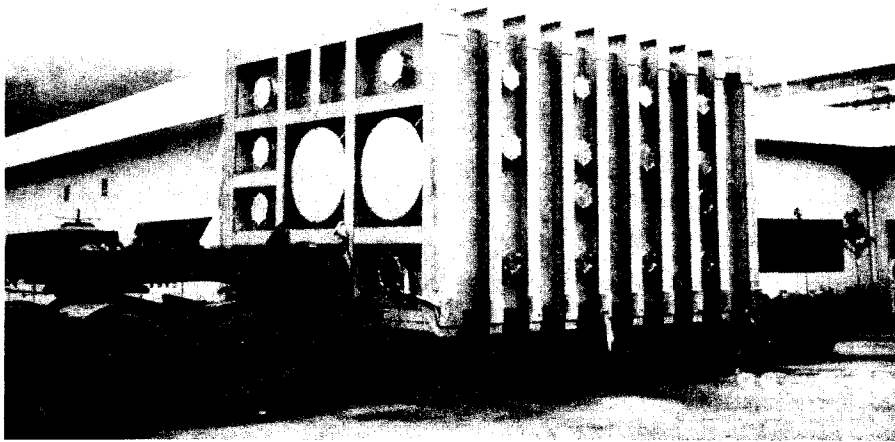


그림 3-1-77 제작후 운송중인 진공 챔버

(라) 시험

진공 챔버는 배출 기체를 줄이기 위해 다음과 같은 순서로 진공 세정을 실시하였다.

- 산세 (용접선)
- 수세
- 알카리 세척
- 고압 수세
- 중성세제 세척
- 고압 수세
- 중성세제 세척
- 수세
- 유기용매 (석유에테르) 세척

진공 세정된 챔버를 2800 l/s 터보 분자 펌프로 배기한 결과 그림 3-1-78과 같은 배기 곡선을 얻을 수 있었다. 얻어진 최저 기저 진공도는 9×10^{-7} torr로 1M l/s 이상의 주 배기 펌프가 설치될 경우 진공 챔버의 배출 기체에 의한 진공 분압은 $\sim 1 \times 10^{-9}$ torr 정도로 사용하기에 충분한 값이었다. 그림 3-1-78과 그림 3-1-79는 이 때의 잔류 기체 분석 신호로 주된 배출 기체가 챔버 표면에서 방출되는 물분자임을 알 수 있다.

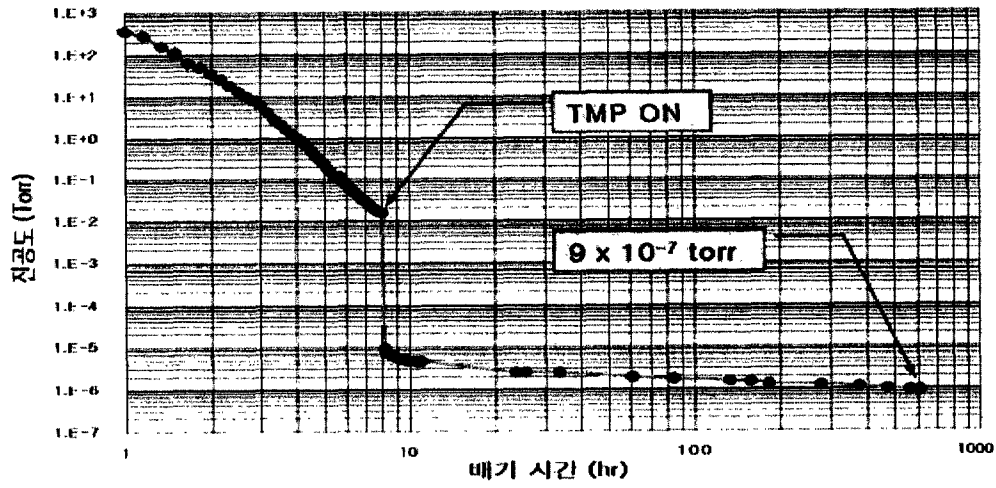


그림 3-1-78. 진공 챔버의 배기곡선

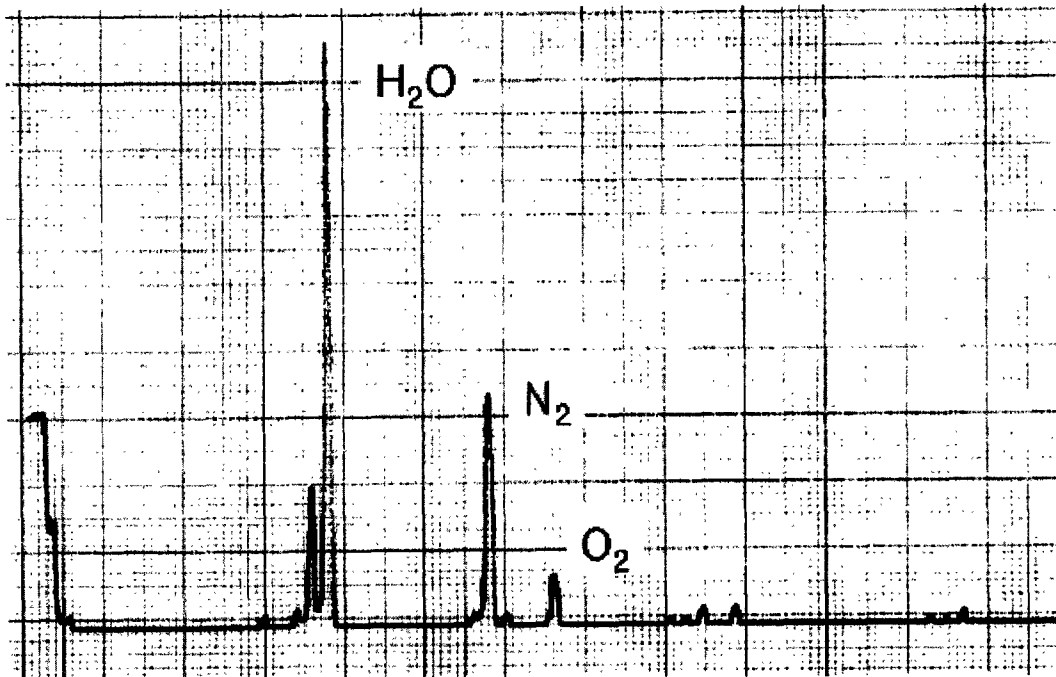


그림3-1-79. 진공 챔버의 잔류 기체 분석

(마) 결론

그림 3-1-80과 같이 빔라인 부품을 모두 넣기 위한 3 x 4 x 5m 크기의 직육면체 STS304 스테인레스 스틸 진공 챔버를 제작하였다. 제작된 챔버의 배출 기체는 10^{-3} torr l/s 로 나타났으며, 이 값은 본 진공 챔버의 규격을 만족하는 값이다. 기계적/진공적 특성은 당초 설계를 모두 만족하는 것으로 기계/진공 설계의 타당성 및 제작/세척 공정의 적합성을 보여준다.

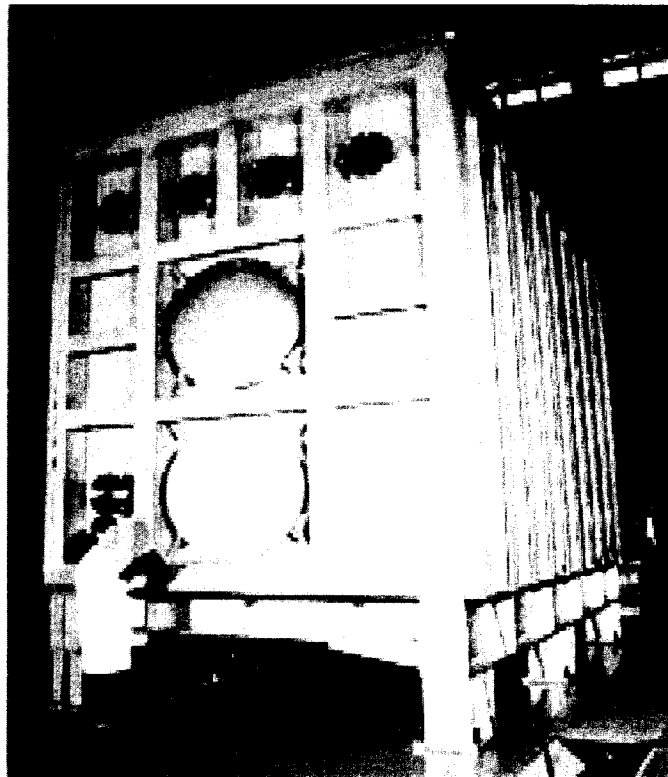


그림 3-1-80. 설치된 진공 챔버

(3) 3MW Test Stand용 열량계(Calorimeter)

(가) KSTAR NBI 열량계의 개념 설계

열량계는 최종적으로 그림 3-1-81에서와 같이 3개의 이온원으로부터 최대 중성 입자빔 power, 8MW를 최대 운전시간, 300초 동안 흡수할 수 있도록 3개의 채널을 가진 형태로 제작되어야 한다.

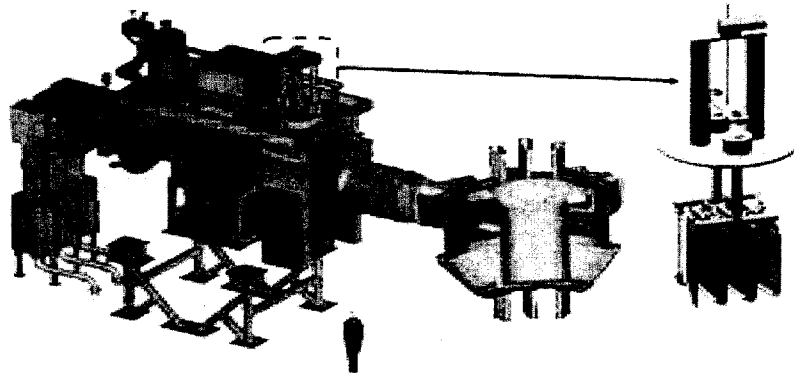


그림 3-1-81. NBI 장치와 열량계의 개념도.

금번에 제작된 열량계는 본 연구소에 설치되어 있는 Test Stand에서의 NBI 장치 개발 및 특성조사 실험과정에서 빔 덤프로 활용할 목적으로 제작되었으며, 빔 power 뿐만 아니라 빔 profile monitoring 에도 이용될 수 있도록 설계·제작되었다. 설계·제작되었다. 그림 3-1-82는 현재 설치, 운영 중인 NBI Test Stand를 포함한 NBI 장치 사진이다.

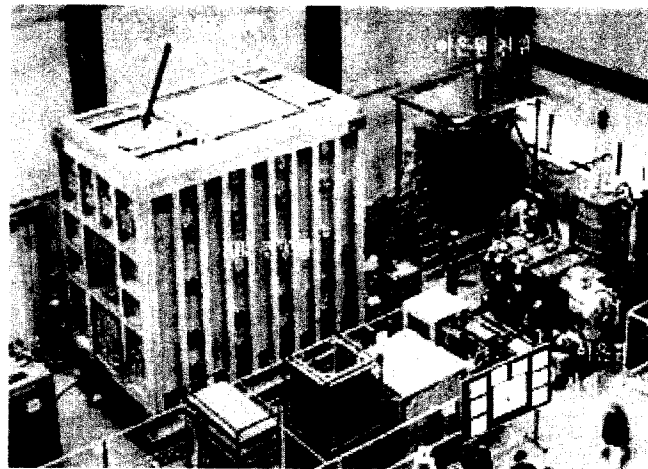


그림 3-1-82. NBI Test Stand 사진.

(나) 열량계 설계

NBI 장치의 이온원은 TPX design을 참조하여 당초에는 slit형 grid 형태에서 원형인출구 형태로 design이 변경됨에 따라, 열량계의 설계에서는 upgrade가 진행 중인 원형인출구 이온원의 변수들을 고려하여 설계변수를 결정하였다. 고려된 원형인출구 이온원의 빔 인출 단면의 크기가 13cm×45cm이며, 빔 발산각은 1.0° 이다. 이온원 1개가 운전되는 Test Stand에서의 실험에서 열량계에 인가될 열부하는 정상 빔 출력 조건 하에서 최대 3MW이며, 과도 빔 출력 조건하에서 9MW이다. 열량계는 정상 빔 출력 조건하에서 300초 과도 빔 출력 조건 하에서 0.2초 동안 견딜 수 있도록 설계되었다. 이러한 열량계의 설계변수를 정리해 보면 다음과 같다.

- ① 이온원 수량 : 1 개
- ② 정상 빔출력 : 최대 3MW / 300초
- ③ 과도 빔출력 : 최대 9MW / 0.2초
- ④ 이온원 출구 빔크기 : 13 cm × 45 cm
- ⑤ 기준 빔 발산각 : 1.0°
- ⑥ 열흡수체 : Hypervapotron
- ⑦ 설계 최대 표면 열밀도 : 0.9kW/cm²
- ⑧ 위치 : 이온원 출구 기준 5.9m
- ⑨ 설치 : KSTAR NBI 진공함 (3m×4m×5m) 열량계 Port

(다) Hypervapotron 설계 및 시작품 제작

열량계의 가장 중요한 구성품이라고 할 수 있는 열 흡수체로는 JET^{1,2)}에서 이미 이온덱프나 열량계로 사용되어 그 성능이 입증된 Hypervapotron을 채택하였으며, Hypervapotron의 국내 제작 가능성을 검토하기 위하여 시작품을 제작하였다. 제작된 시작품의 사진은 그림 3-1-83과 같다. 사진에서와 같이 제작된 시작품의 최대 길이는 70cm이고 폭은 JET에서 제작된 것과 동일하게 112mm로 하였다. 재질은 동 합금체인 CuCrZr이며, 전자빔 용접과 brazing 등의 제작기술을 이용하여 시작품 제작에 성공하였다.

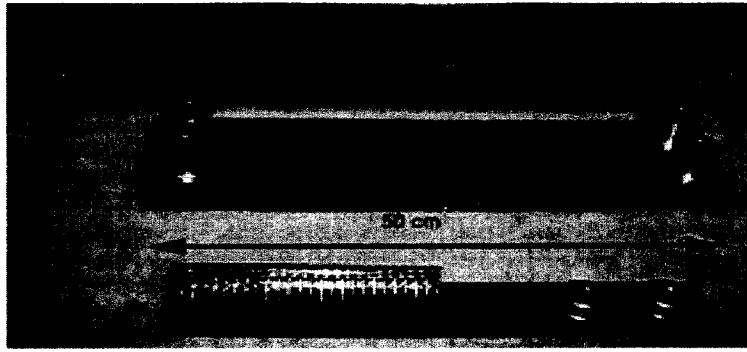


그림 3-1-83. 제작된 Hypervapotron 시작품.

(라) 열량계의 열부하 계산

열량계 설계에서 가장 중요한 설계변수는 열량계의 열흡수체 표면에 가해지는 열부하이다. Hypervapotron의 경우 허용되는 최대 표면 열밀도가 $1.0\text{kW}/\text{cm}^2$ 이며, 본 장치에서는 설계 최대 표면 열밀도가 $0.9\text{kW}/\text{cm}^2$ 이하가 되도록 열량계를 설계하였다. 열량계 입구에서의 열부하 분포를 Monte-Carlo 방법을 이용하여 계산한 결과는 아래 그림 3-1-84와 같다. 이온원의 발산각을 1.2° 로 계산한 결과를 참고하여 열량계 입구의 크기를 $0.5\text{m} \times 1.0\text{m}$ 로 결정하였으며, 발산각을 0.8° 로 하여 계산한 결과를 기준으로 최대 표면 열밀도가 열흡수체의 설계 상한을 넘지 않도록 열흡수체 배열각도를 결정하였다.

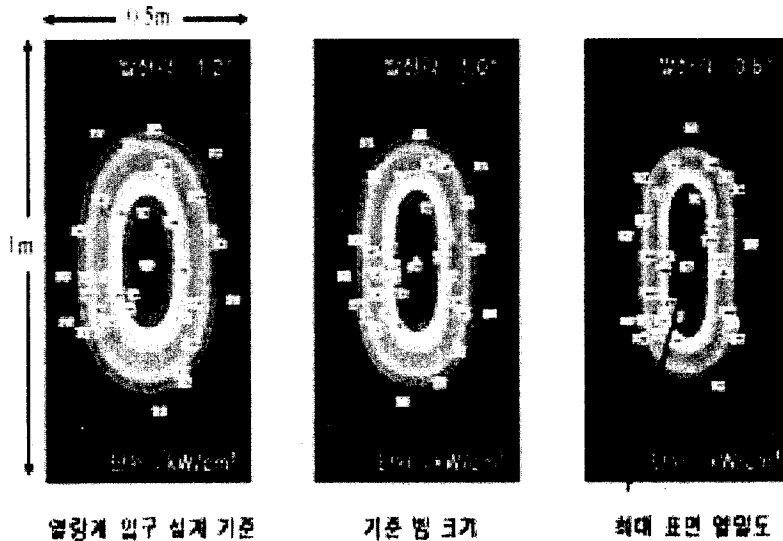


그림 3-1-84. 열량계 입구에서의 빔출력 분포.

위의 계산 결과에서 보면, 열량계 입구에서의 최대 열부하는 이온원의 발산각이 0.8° 인 경우의 빔 중심에서의 열밀도로 3.72 kW/cm^2 에 이른다. 이를 고려하여 그림 3.1.3.나(3)-5에 설명된 바와 같이 열흡수체 배열각도, 즉 열량계 V-각도를 다음과 같이 결정하였다.

- 열흡수체의 최대 허용 표면 열밀도 : 0.9 kW/cm^2
- 열량계의 V-각도가 θ° 인 경우 표면 최대 열밀도
 $= \text{최대 빔출력 밀도 } 3.73 \text{ kW/cm}^2 \times \sin \theta / 2 \leq 0.9 \text{ kW/cm}^2$
- 열량계의 V-각도 $\geq 28^\circ$

따라서, 열량계의 V-각도를 28° 로 결정하였다.

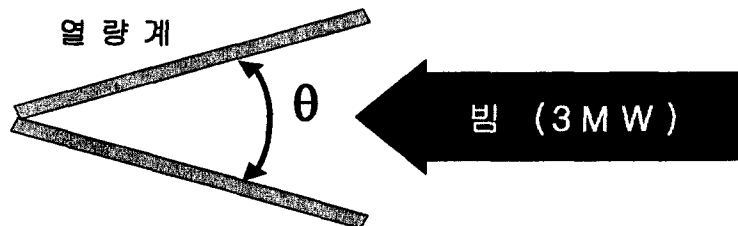


그림 3-1-85. 열량계의 V-각도 결정 방법.

(마) Hypervapotron의 설계

시작품 제작을 통해 국내 가능성을 확인하고 그림 3-1-86에서와 같이 Hypervapotron을 설계하였다. Hypervapotron의 폭은 112mm이며, 개당 2개의 냉각수 채널을 가지도록 설계되었다. 각각의 냉각수 채널의 단면적은 $6\text{mm} \times 48\text{mm}$ 이며, 채널 사이에 보재의 열팽창 등을 고려한 2mm의 홈이 길이 방향으로 파이도록 설계되었다.

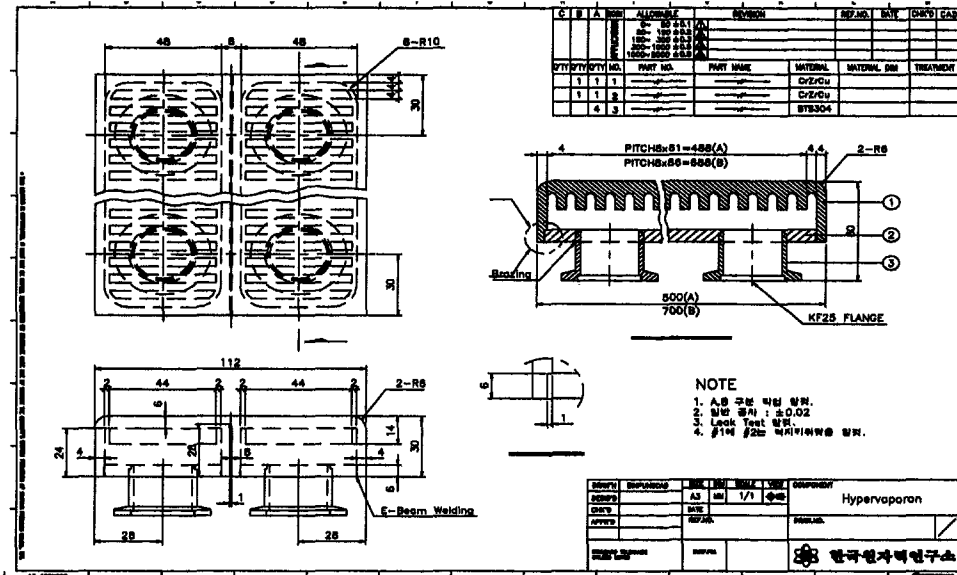


그림 3-1-86. Hypervapotron 설계 도면.

열량계의 설계시 고려되었던 빔 출력 분포와 Hypervapotron 설계치를 고려하여 Hypervapotron별 흡수 열량을 계산한 결과는 그림 3-1-87과 같다. 이온원 발산각이 1.0° 인 기준빔에 대해 적용해 보면, 최대 빔 출력이 3MW일 때 한 개의 Hypervapotron에서 감당해야할 최대 흡수열량은 393kW가 된다. 이 때, 냉각수의 흐름 및 이에 따른 냉각수 온도 상승을 계산한 결과는 다음과 같다. 최대의 열량을 흡수해야 하는 열량계 가운데에 위치한 Hypervapotron에 25℃의 냉각수가 주입되면 출구에서의 냉각수의 온도는 최대 65.7℃에 이르게 됨을 알 수 있다.

- 채널 단면적 : 6 mm × 48 mm × 2채널 / Hypervapotron
- 채널 유속 : 4 m/s
- Hypervapotron 유량 : 2.3 L/s
- 총 유량 : 41.5 L/s (Hypervapotron 18개)
- 최대 온도 상승 (중심 Hypervapotron) : 40.7 °C
- 평균 온도 상승 : 17.2 °C

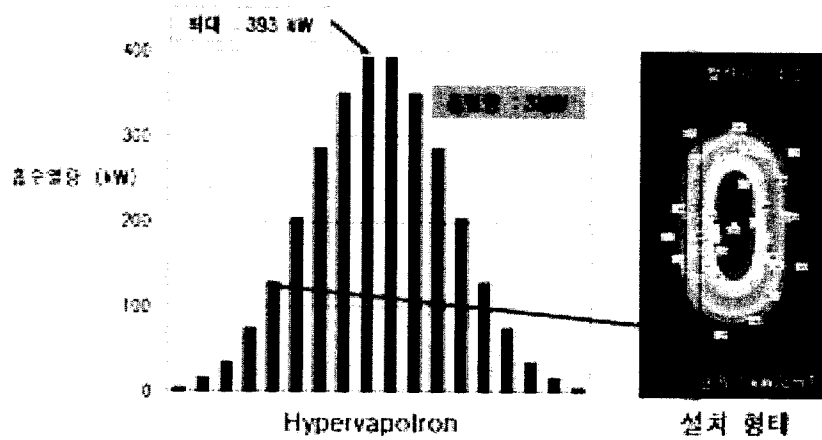


그림 3-1-87. Hypervapotron 흡수 열량.

최대 표면 온도를 계산하기 위하여 열량계 설계 시 고려되었던 과도 빔 인출 조건 하에서의 표면 열밀도에 의한 표면 온도 상승을 계산해 보았다. 계산 결과, 0.2초 후 최대 표면 온도는 435°C에 이르며, 이는 모재인 CuCrZr의 녹는점 600°C에 비해 매우 낮아 문제가 없음을 확인하였다.

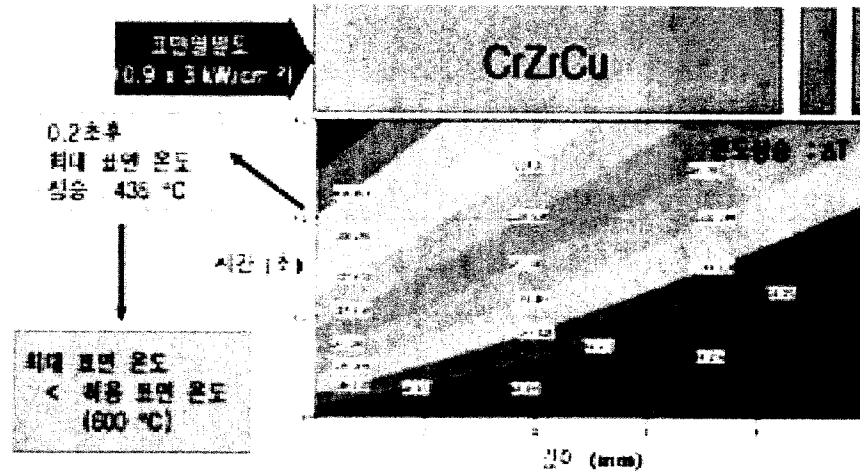


그림 3-1-88. Hypervapotron 표면의 과도 온도 상승.

(바) 열량계 제작 및 설치

열량계 제작을 위한 도면은 그림 3-1-89와 같다. 냉각수 배관 플랜지는 conflat type으로 하였으며, 배관의 크기는 100mmφ로 하였다. 최대 허용 냉각수 압력은 10atm으로 하고, 최대 허용 진공 누설은 1×10^{-8} torr·l/s (He)으로 하였다. 장치의 조립 및 설치 시 정밀도는 2mm 이내가 되도록 하였으며, 열량계의 입구에 위와 아

래에 고에너지의 중성입자빔이나 이온빔에 의한 sputtering에 의한 Cu를 차폐하기 위하여 덮개를 설치하였다. 열량계의 유효 입구 크기는 430 mm × 1001 mm 이며, 열량계의 Aperture 각도는 28°, 깊이는 900 mm이다. 빔 profile 측정을 위한 온도 측정 위치의 수는 총 60개이다.

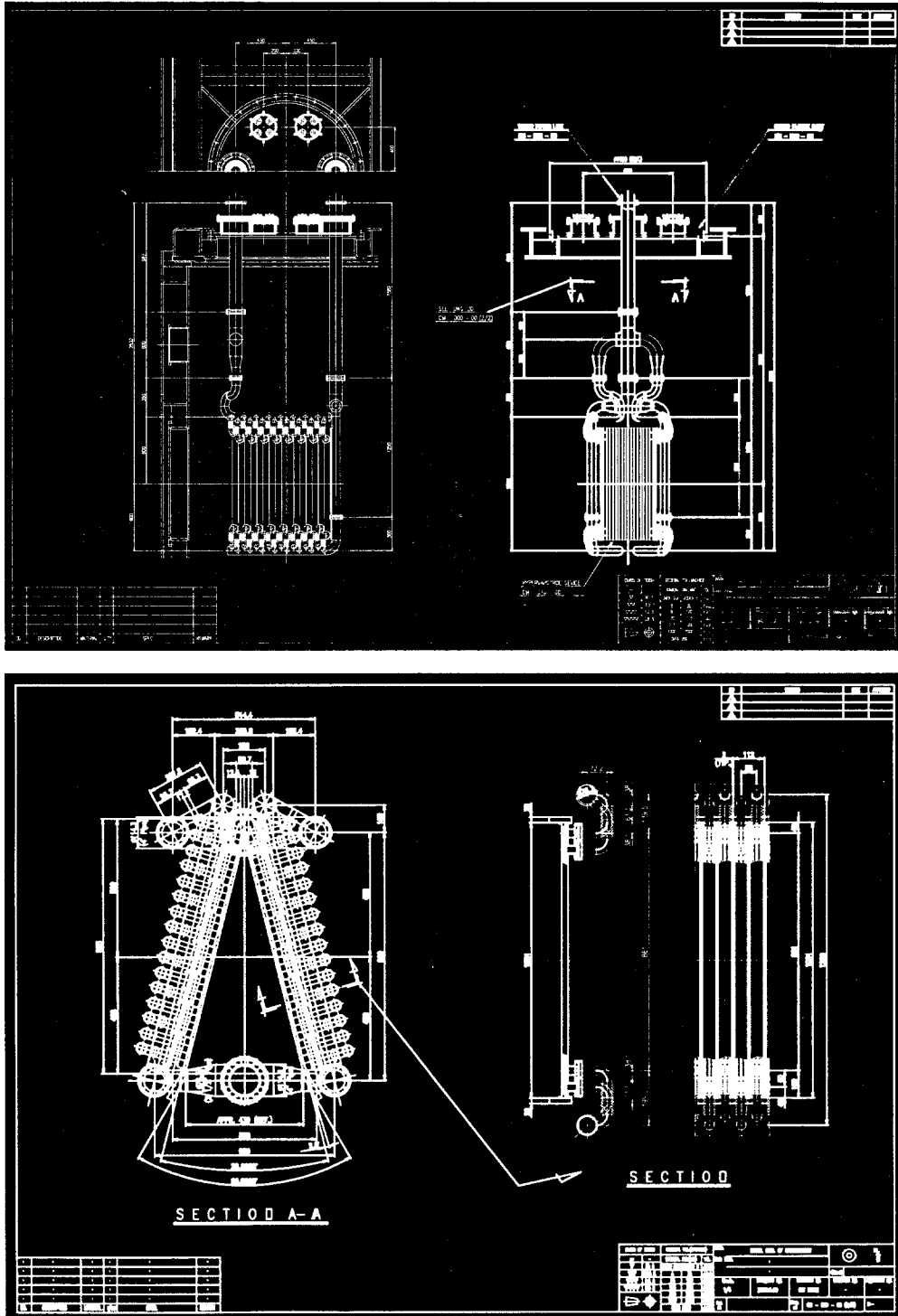


그림 3-1-89. 열량계 제작 도면.

제작된 3MW Test Stand용 열량계의 사진은 아래의 그림 3-1-90과 같다. 제작된 열량계에 대해서는 진공시험과 내압시험을 실시하였으며, 현재 연구소에서 보유하고 있는 5기압의 냉각수 공급 시스템을 이용하여 최대 5기압의 냉각수 압력에 대해서도 내압시험을 실시하였다. 빔인출 실험이 본격화되어 최대 열부하에 근접하는 열부하를 Hypervapotron에 가할 수 있게 되면, Hypervapotron의 냉각특성을 비롯한 주된 열량계 특성들을 조사할 계획이다.

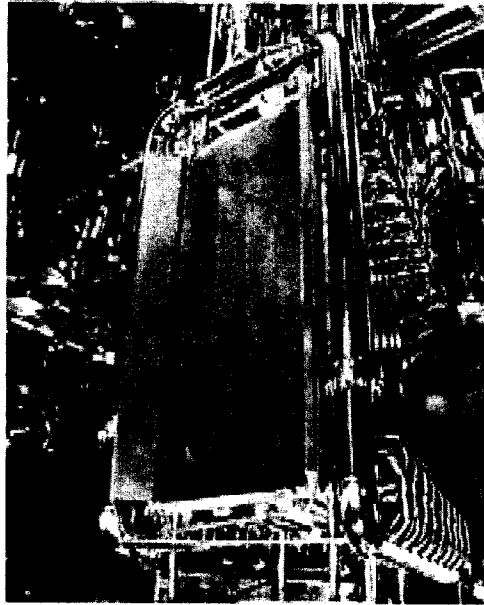


그림 3-1-90. 제작된 3MW Test Stand용 열량계.

(사) 중성빔 진단

(사)-1. 열전대에 의한 중단면 측정

열량계의 Vee의 뒷면에 설치될 열전대는 K-type Ungrounded 시즈 열전대로서 노출형에 비해 반응속도는 차이가 있으나 실험에 사용하게될 온도범위에서는 반응속도의 차이가 경미하다. 그리고 점점의 노출에 의한 손상과 패널로부터의 절연을 과 진공 중에 노출되었을 때 잔류 가스 방출이 적은 시즈 열전대를 사용하였다. 열전대의 크기는 0.063~(1mm)의 두께로 시즈부분이 3.5M이고 보상도선은 1M로 하여 제작하였다. 시즈 열전대의 절연물질은 산화마그네슘을 사용하였으며 보상도선이 연결되는 부분은 에폭시(epoxy)로 처리하여 잔류가스 방출을 줄였다. 시즈 열전대의 굽힘 반경이 3/16~로 작아서 열전대의 굽힘 정도가 자유로웠다. 열전대는 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 이하의 정밀도를 갖고 있으며 정상적으로 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 이하의 정밀도를 나타내었다.

열전대용 feedthrough를 이용하여 측정된 값을 외부장치로 전송하는데, 세라믹

과 크로멜과 알루미나로 구성된 41개의 핀으로 연결되어 진공내부와 외부에 플러그를 통해 장치로 연결된다. 그림 3-1-91은 41개 핀으로 구성된 feedthrough의 그림이다. 시즈열전대는 hypervapotron 뒷단에 마련된 1.5 mm 지름에 길이가 22 mm인 홀에 삽입된다. 열전대와 빔을 맞는 표면과의 거리는 1mm이며 두 개의 패널이 접합된 부분의 한쪽 패널에 만들어져 있다. 이 홀에 열전대를 삽입하여 빔의 종단면 에너지를 측정하게 된다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 패널사이에 열전 홀을 설치하여 열전대를 꽂게 되어 있다. 열전대 Vee에 설치된 홀은 112개로 구성되어 있으며 현재 KAERI에서는 60개의 홀에 열전대를 설치하여 운용하고 있다. 그림 3.1.3.나(3)-12에 열전대 설치 그림을 나타내었다. 열전대에 측정된 온도와 시간에 따른 파형을 얻을 수 있으며, 이러한 온도 파형을 통해 우리는 열량계에 입사되는 중성빔의 열부하에 의한 온도변화를 관측할 수 있다. 이렇게 관측된 파형은 중성빔의 에너지 종단면을 나타내고, 열량계 입출력단에 설치된 전대를 통해 열부하에 의한 중성빔의 파워를 계산 할 수 있다.

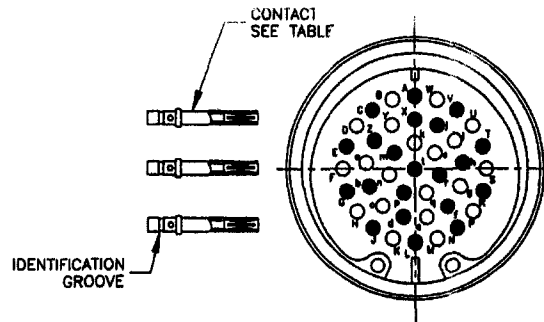


그림 3-1-91. 열전대용 feedthrough (●/Chromel, ○/Alumel)

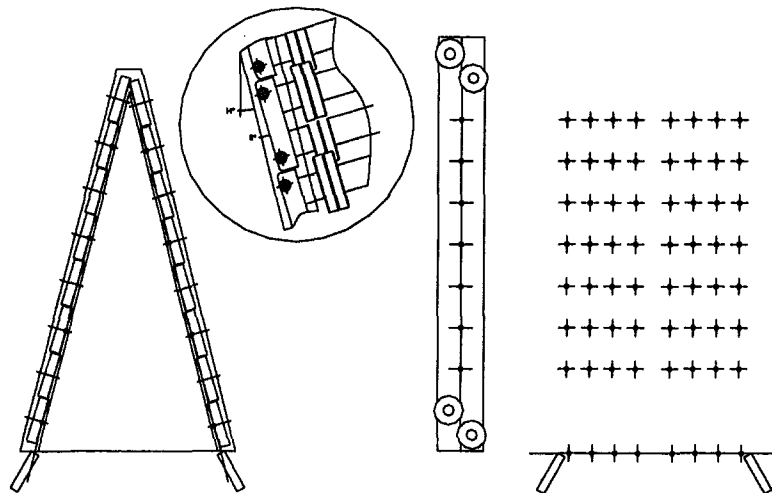


그림 3-1-92. 현재 열량계에 설치된 열전대의 위치

(사)-2 빔 파워 측정

인출된 빔은 중성화되고 휨자석을 거치면서 열량계에 흡수되어진다. 중성 빔은 열량계 Vee의 14도 기울어진 hypervapotron 표면에서 내부를 흐르는 냉각수를 가열하게 된다. 냉각수의 유량을 Vortex 유량계를 통하여 측정하고, 가열된 냉각수의 온도편차를 측정함으로써 중성빔의 파워를 계산 할 수 있다. 유량계, K-type 시스 열전대, 압력계로 이루어진 빔 파워 측정계를 통해 입출단에서 측정된다. 설치된 열전대는 ± 0.1 의 정밀도를 갖고 있으며, 입출력단의 온도편차를 측정하기 위해 양단에 모도 설치 되어 편차를 구하게 된다. 3" vortex 유량계에 의해 유량이 측정되며, 유량계는 $-30^{\circ}\text{C} - 300^{\circ}\text{C}$ 까지 측정이 가능하고, 전단에 유속을 일정하게 하기 위한 세관으로 구성된 straitener와 후단의 down stream장치를 설치하여 측정의 정밀도를 높였다. Vortex 유량계는 일정한 유속에 대해서 측정장치를 거치면서 형성된 와류에 의한 압력변화를 측정하여 유량을 측정하게 된다. 이러한 유량계와 온도편차를 측정하여 중성빔의 파워를 측정하게 된다. 그림 3-1-93은 냉각수에 의한 빔 파워측정의 개략도이다. 입출력단의 열전대의 온도편차를 구하고 유량계에 의해서 유량을 측정하면 열원에 의한 열부하의 계산은

$$Q = \dot{m} c_p \Delta T$$

Q : heat load [W]

\dot{m} : Mass flow rate [kg/sec]

c_p : 비열 [kJ/kg · K]

ΔT : 입출구 온도차이 [K]

로 열원의 에너지를 계산할 수 있다. 펄스형의 중성빔에 의한 열부하는 펄스형 빔이 입사되어 급격한 온도변화를 보이다 시간에 따라서 지수함수적으로 감소하는 온도변화의 파형을 얻을 수 있으며 이 같은 에너지 'tail'을 관측할 수 있다. 온도편차에 의한 ΔT 와 시간 간의이 에너지 파형에서 나타나는 에너지 tail은

$$\int_0^{\infty} A \exp(-t/t_e) dt = A t_e$$

로 표현할 수 있다. 에너지 tail 값의 계산에 의해 펄스형 중성빔이 입사되었을 때 열량계에 남아있는 열부하 상태를 나타내는 지표로 활용된다. tail 값이 크면 아직 많은 양의 에너지가 열량계에 남아있다는 것을 의미하며, 펄스방전 후 재 시작하는 펄스 빔의 입사시간을 조절할 수 있다.

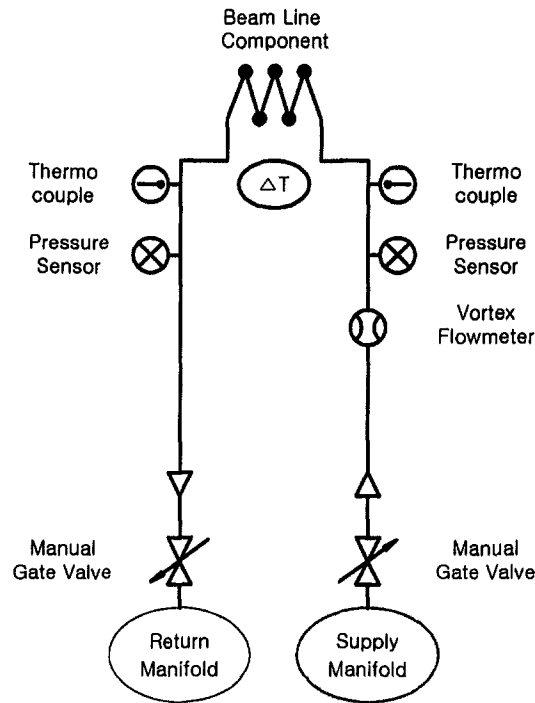


그림 3-1-93. 중성자 빔 파워 측정에 대한 개략도

(4) 저온흡착펌프

(가) 서론

NBI에서 요구되는 진공 펌프의 수소 및 중수소 배기 용량은 1×10^6 l/s 이상이며, 이러한 배기 용량을 얻을 수 있는 가장 적합한 펌프는 액체 헬륨을 이용한 저온 응축 펌프이다. 그러나, KAERI test stand에는 현재 저온 응축 펌프에 사용할 수 있는 액체 헬륨 시설이 없기 때문에 그에 대한 대안으로 저온 흡착 펌프를 연구하였다. 저온 흡착 펌프는 아래와 같은 개념으로 설계되었다.

- 제작된 진공 챔버는 3 x 4 x 5 m로 충분한 표면적을 가지고 있다. 따라서, 가능한 두께를 최소화하여 챔버 공간을 다른 목적에 사용할 수 있도록 한다.
- 비용 절감 측면에서 가급적 하나의 냉동기로 큰 배기 속도를 얻도록 한다.
- 제작이 용이하도록 한다.

저온 흡착 펌프의 개념도는 그림 3-1-94와 같다. 저온 흡착판은 사각의 무산소 동판에 활성탄을 부착하여 제작된다. G-M (Gifford-MacMachon) 냉동기는 이 흡착판의 중앙에서 열적으로 접촉한다. 이러한 형태는 G-M 냉동기로의 열 저항을

줄여, 흡착판의 냉각을 용이하게 하고 온도 분포를 균일하게 하기 위해서이다. 상온으로부터 열 방사 차폐에는 펌프의 두께를 줄일 수 있고, 제작이 용이한 Chevron 배플을 사용하였다.

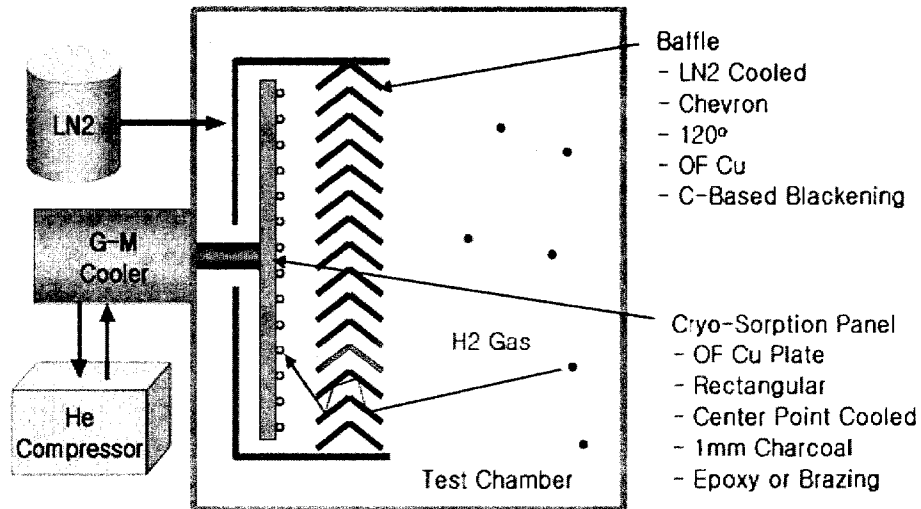


그림 3-1-94 저온 흡착 진공 펌프의 원리도

(나) 원리 실증 모델 저온 흡착 펌프

설계 및 제작 기술 확보를 위해 수소 배기 속도 $30\text{m}^3/\text{s}$ 의 원리 실증 모델 저온 흡착 펌프를 제작하고 시험하였다. 제작/설치된 펌프는 그림 3-1-95와 같다. 그림 3-1-96은 시험 구성도이다. 저온 흡착 펌프의 열설계를 시험하기 위해 chevron 배플을 흑화하지 않고 냉각 시험을 수행하였다. 이 시험 결과로 얻어진 도달 온도 27K (그림 3-1-97참조)는 계산 결과인 28K과 잘 일치하며, 열 설계의 타당성을 보여 준다.

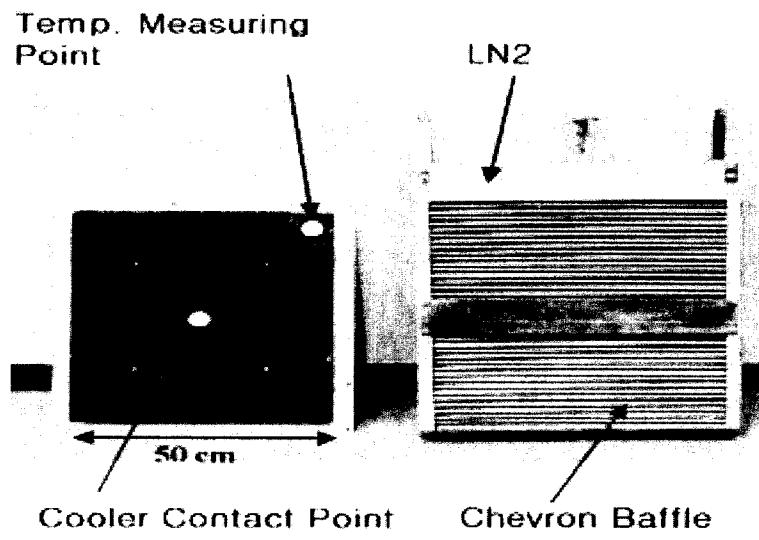


그림 3-1-95 제작된 원리 실증 모델 저온 흡착 펌프

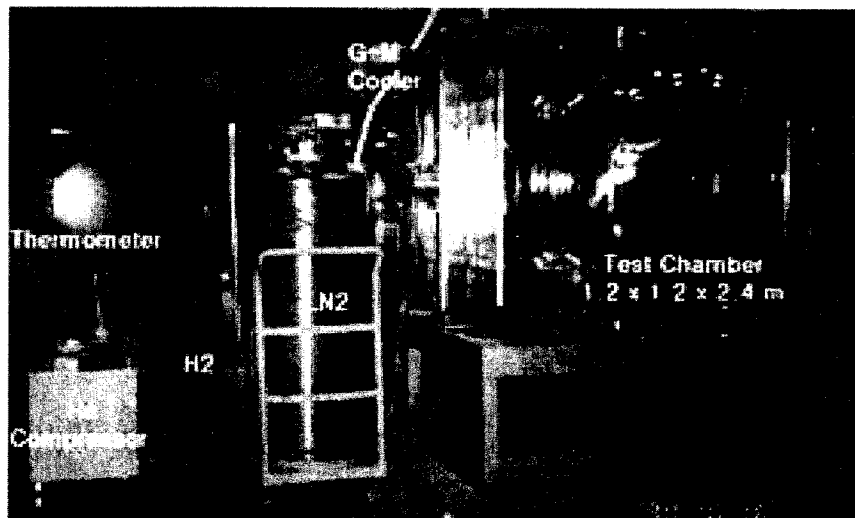


그림 3-1-96 저온 흡착 펌프 실험 구성

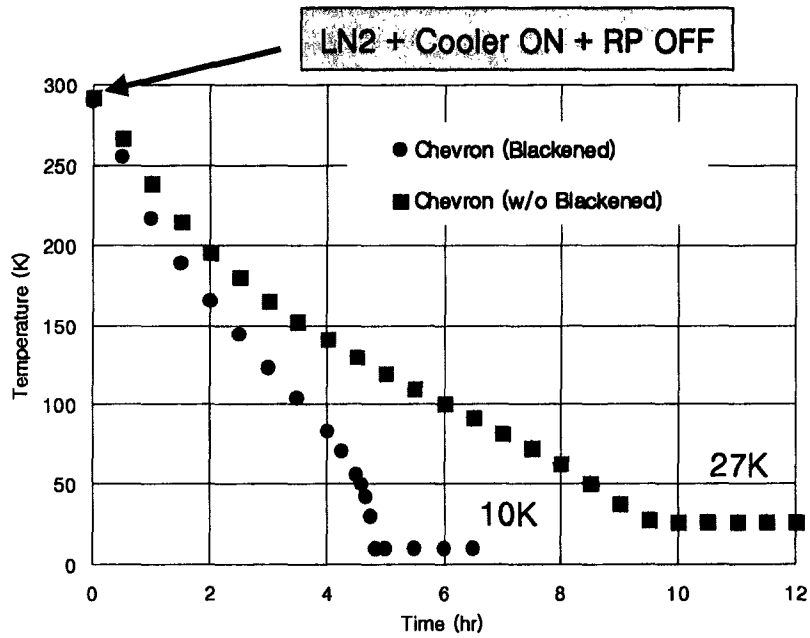


그림 3-1-97 원리 실증 모델 저온 흡착 펌프의 냉각 곡선

Chevron 베플을 흑화한 후 다시 냉각 시험을 수행한 결과 수소 배기가 가능한 10K의 흡착판 온도를 얻을 수 있었다. 이때 얻어진 기저 진공도는 3×10^{-6} Pa이며, 정유량법으로 측정된 수소 배기 속도는 기체 부하 $1 \sim 10 \times 10^{-3}$ Pa m³/s, 운전 진공도 $\sim 1 \times 10^{-4}$ Pa에서 30m³이었다. 이러한 배기 속도는 당초 설계치와 잘 일치하는 값이다. 원리 실증 모델 저온 흡착판은 활성탄을 에폭시 접착제를 이용하여 부착한 결과, 설치시에 많은 양의 활성탄이 떨어져 나오는 등 오염이 문제가 되어, 다음 단계 공학 모델 제작시에는 활성탄의 부착을 Brazing 법으로 하기로 결정하였다.

(다) 공학 모델 저온 흡착 펌프 제작

원리 실증 모델 저온 흡착 펌프 제작 및 시험에서 얻어진 데이터를 바탕으로 KAERI test stand 저온 흡착 펌프의 모듈이 될 공학 모델 저온 흡착 펌프를 제작하였다. 가장 기본적인 설계 개념은 15K에서 8W를 얻을 수 있는 G-M 냉동기 (Leybold사)로 얻을 수 있는 최대의 배기 속도를 갖도록 하고, 장펄스 운전에서 요구되는 재생이 용이하도록 최소의 열용량을 갖도록 하는 것이다. 이 모델은 15K 활성탄 저온 흡착판, 80K 액체 질소 냉각 Chevron 베플, 80K 열방사 차폐로 구성된다. 흡착판은 1.2m x 0.8m로 결정되었으며, 1mm 크기의 코코넛 활성탄을 Brazing하여 무산소 동판에 부착하였다. 흡착판은 80K 냉각면에 유리에폭시판을 이용하여 매달리는 구조로 제작하여, 냉각시 수축에 의한 움직임을 흡수할 수 있도록

록 하였다. 열부한 5.3K에서 중심과 주변의 온도차가 1K 이하가 되는 무산소 동판의 두께를 결정하였다.

제작된 공학 모델 저온 흡착 펌프는 그림 3-1-98과 같으며, 로터리 펌프로 1×10^{-1} Pa 이하로 배기하였다. 온도는 실리콘 다이오드 온도계 (Leybold사)를 사용하여 흡착판 주변의 가장 온도가 높은 점을 측정하였다.

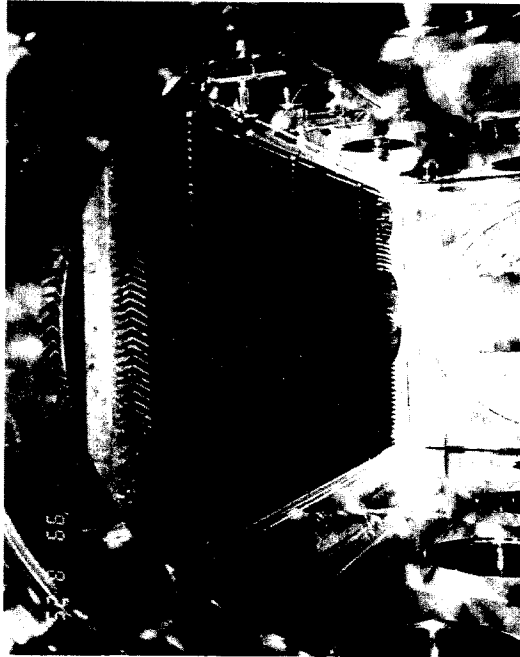


그림 3-1-98 제작/설치된 공학 모델 저온 흡착 펌프

(라) 공학 모델 저온 흡착 펌프 시험

로터리 펌프 배기를 중단하고, Chevron 베플에 액체 질소를 부으면서 냉각 시험을 시행하였다. 이때 얻어진 냉각 곡선이 그림 3-1-99와 같다. 달성된 온도는 12K로 수소 배기에 충분한 온도이며, 이에 소요된 시간은 13시간이다. 달성된 기저 진공도는 8×10^{-7} Pa로서 원리 실증 모델 펌프에 비해 향상되었으며, 이는 활성탄을 Brazing하여 떨어진 활성탄에 의한 오염을 억제하고, 유기 점적제의 사용을 피하였기 때문으로 판단된다. 그림 3-1-100은 온도에 따른 진공도로 Step 함수 형태를 띠고 있어, 흡착판 온도에 따라 특정 기체가 배기됨을 보여 준다. 이 곡선을 이용하면 특정 기체에 대한 흡착판의 재생 온도를 결정할 수 있음을 알 수 있다. 그림 3-1-101이 모델의 측정된 배기 속도는 $84 \text{ m}^3/\text{s}$ 이다. 진공 챔버의 폭발 한계로 인해 배기 용량은 측정할 수 없었다.

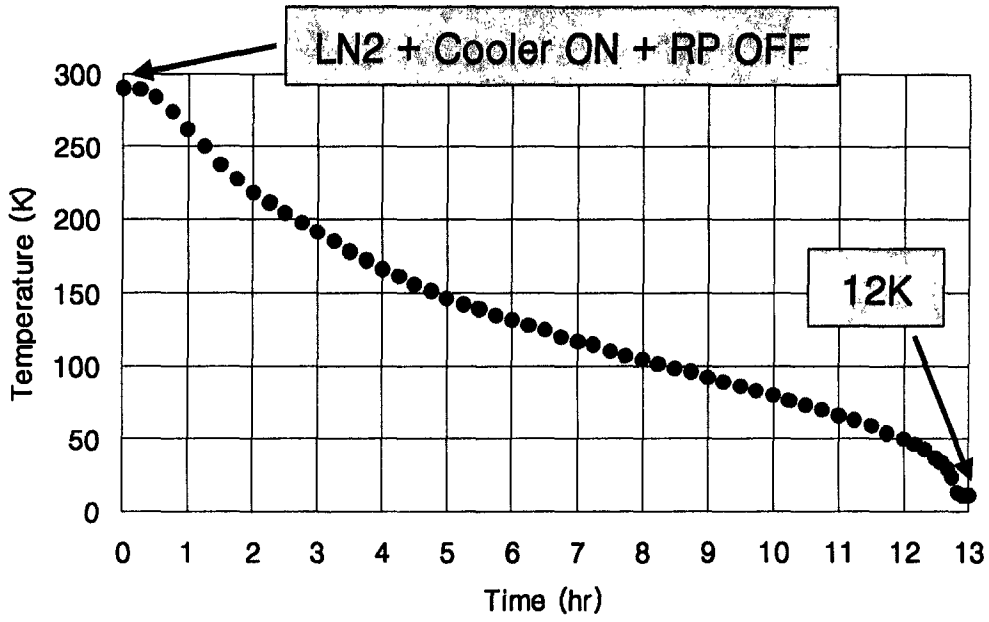


그림 3-1-99 공학 모델 저온 흡착 펌프의 냉각 곡선

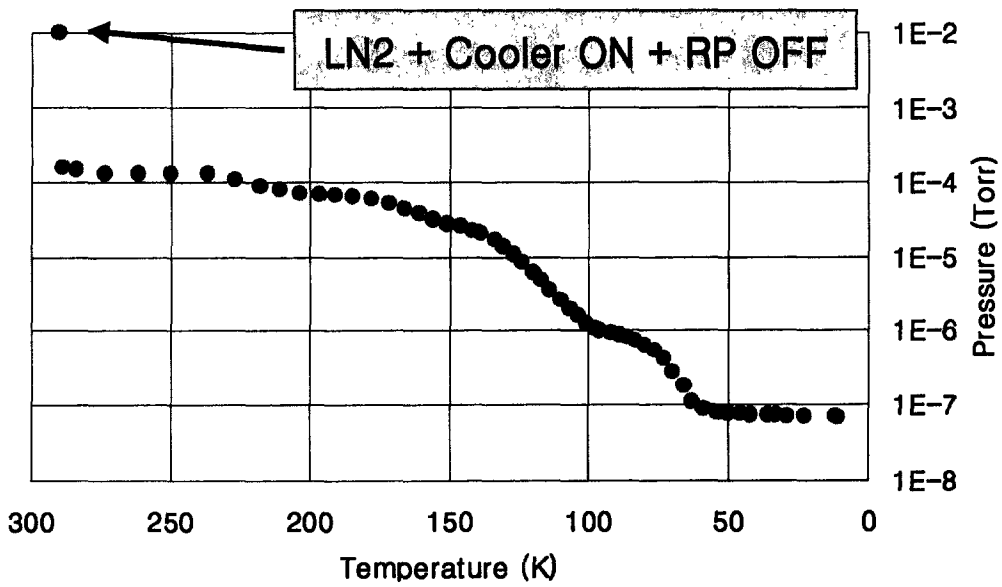


그림 3-1-100 온도에 따른 공학 모델 저온 흡착 펌프의 진공도

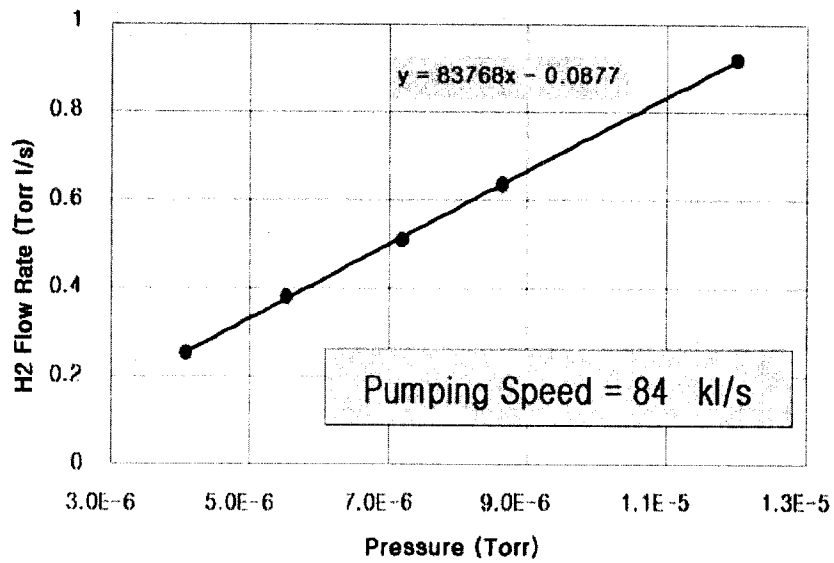


그림 3-1-101 공학 모델 저온 흡착 펌프의 배기 속도 측정

(마) 결론

KAERI NBI test stand에 사용할 수 있는 저온 흡착 펌프의 한 모듈인 공학 모델을 제작 시험하였다. 시험 결과 제작된 공학 모델은 당초 예상한 진공 배기 속도 및 진공 특성을 보이고 있어, 충분히 사용이 가능한 것으로 판단된다. 그러나, KSTAR NBI 진공 배기에 사용될 펌프는 제작 단가, 액체 헬륨 가용성, 프로젝트 일정에 따라 저온 흡착 또는 저온 응축 중에서 선택하여야 할 것이다.

(5) 중성화장치(Neutralizer)

(가) 중성화장치(Neutralizer)

이온원(ion source)으로부터 나오는 이온들은 중성기체에 대한 이온의 비율이 거의 평형(equilibrium)에 도달하기에 충분하도록 과밀(dense)한 기체표적(gas target)에 의하여 중성화된다. 각각의 이온원들은 직사각형의 단면구조를 나타내는 중성화장치를 갖추고 있다. 중성화장치의 기체표적은 이온원과 동일한 기체를 사용한다. 중성화장치는 이온원 출구 스크레이퍼(source exit scraper), 광 진단 챔버(optical diagnostic chamber), 이온원 밸브(ion source valve)와 중성화장치 수송관(neutralizer duct)으로 구성된다. 중성화장치의 길이는 이온원으로부터 이온화되지 않은 기체의 유동(flow)에 대한 임피던스(impedance)를 기준으로 결정된다. 또한, 중성화장치의 길이는 낮은 과도기체(low excess gas)의 조건하에서 높은 퍼센트(보통 95%)의 평형 중성화(equilibrium neutralization)를 요구함으로써 결정된다. 중수소 기체를 통과하는 중수소 이온의 중성화 비율은 다음과 같이 결정이 된다[14].

$$\frac{D^0(l)}{D^+(0)} = \frac{\sigma_{10}}{\sigma_{10} + \sigma_{01}} [1 - e^{-(\sigma_{10} + \sigma_{01})} \int n(l) dl].$$

여기서, $D^0(l)$ = 중성 전류,

$D^+(0)$ = 총 전류,

σ_{10} = 중성화를 위한 주변 기체분자당 단면적(cm^2),

σ_{01} = 이온화를 위한 단면적(cm^2),

$n(l)$ = 주변기체의 분자 밀도(cm^{-3})이다.

120 kV의 중수소에 대하여, $\sigma_{10} \approx 1.3 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$, $\sigma_{01} \approx 1.7 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ 이므로, 평형 중성비(equilibrium neutral fraction)를 구할 수 있다(TFTR은 ~43% 정도). 그리고, 중성화 비율(fraction of neutralization)은 다음과 같이 나타낸다.

$$f = 1 - e^{-9.72} \int P(l) (\text{torr}) dl (\text{cm}).$$

KSTAR NBI 시스템에서 이온원으로부터 주입된 중성기체는 직사각형의 중성화장치로 들어가기 이전에 단면적이 $14.68 \times 46.22 \text{ cm}^2$ 이고, 총 길이가 96 cm인 이온원 출구 스크레이퍼와 OMA 스크레이퍼 및 길이가 20.15cm인 이온원 밸브단을 통과하여 흐른다. 중성화장치 하류 끝단에서의 압력은 cryopump의 펌핑 속력과 기체유동(gas flow)으로부터 계산될 수 있으며, 그 유동은 천이지역으로 해석할 수 있다. $P(l)$ 을 계산하기 위하여, 다음과 같은 Knudsen 방정식을 이용할 수 있다. 길이가 a 와 b 인 직사각형에 대한 천이유동(transition flow)에 의한 기체전도도(gas conductivity, C)는 다음과 같다[15].

$$C = C_v + C_F \frac{1 + 2 \frac{aP_{av}}{\eta} \left(\frac{m}{kT}\right)^{1/2}}{1 + 2.47 \frac{aP_{av}}{\eta} \left(\frac{m}{kT}\right)^{1/2}} \quad (\text{in MKS}).$$

여기서, $C_v = \frac{a^2 b^2 P_{av}}{12\eta L}$ Y는 점성유동 전도도(viscous flow conductivity),

$Y \approx \frac{1}{\delta + \delta^{-1} + 0.371}$ 는 누센수(Knudsen number, $\delta = b/a$)로 b/a 에 의존하며,

$C_F = 97.01K \frac{a^2 b^2}{(a+b)L} \sqrt{\frac{T}{M}}$ 는 분자유동 전도도(molecular flow conductivity),

$K = 1.151$ for $b/a = 2$,

$= 1.198$ for $b/a = 3$, 는 누센수(Knudsen number, $\delta = b/a$)로 b/a 에 의존하

$= 1.279$ for $b/a = 5$

며, P_{av} = 중성화장치 셀(neutralizer cell)내의 평균압력(average pressure),

L = 길이 (m), m = 분자 질량 (molecular mass, kg),

η = 점성도 (viscosity, 정상상태의 수소에 대하여 $8.35E-6 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$),

a = 수송관 단면적의 짧은 길이, b = 수송관 단면적의 긴 길이,

$v_{av} = \left(\frac{8kT}{\pi m}\right)^{1/2} = 145.51 \left(\frac{T}{M}\right)^{1/2}$ 는 기체입자의 평균속도(average velocity),

M = 분자량 (molecular weight, g/mol)이다.

위의 방정식을 이용하여 높은 퍼센트(보통 95%)의 평형 중성화(equilibrium neutralization)를 얻을 수 있도록 중성화장치의 길이를 결정하게 된다. 중성화장치의 임피던스는 이온원 기체 유동이 $10 \text{ torr} \cdot \text{l}/\text{sec}$ 일 때, 표적기체의 선밀도(line density)가 90% 이상의 중성기체 평형비에 도달하도록 한다. $10 \text{ torr} \cdot \text{l}/\text{sec}$ 유동은 이온원이 운전될 수 있는 최저의 기체유동이다. $30 \text{ torr} \cdot \text{l}/\text{sec}$ 에서는 거의 100%의 평형비가 달성된다. 계산된 중성화장치 압력곡선은 그림 3.1.3나(5)-1과 같다. 기체 주입계통은 최대의 중성화(Neutralization)를 유지하도록 운전의 유연성을 제공하기 위하여 이온원, 광 진단 챔버 및 중성화장치에 설치되며, 각각의 주입계통에 대한 상호 중성화율의 비교를 통하여 최적의 기체주입계통을 확인하고자 한다.

중성화장치의 모든 내부면은 분산되는 빔 전력(power)을 흡수할 수 있는 하이퍼 베이퍼트론(Hypervapotron) 성분으로 제작된다. 하이퍼 베이퍼트론 성분사이의 간격은 높은 기체누출을 막기 위하여 완전하게 봉입(seal)이 된다. 이온원 출구 스크레이퍼는 이온원의 출구에서 이온빔의 경계를 차단하면서 처음으로 빔을 규정하는 구경(aperture)이다. 이것은 0.5° 이온원 배열오차와 $0.9 \text{ kW}/\text{cm}$ 침투 열속(heat flux)과 함께 8.4 MW 빔 출력의 5%를 차단시킬 것이다.

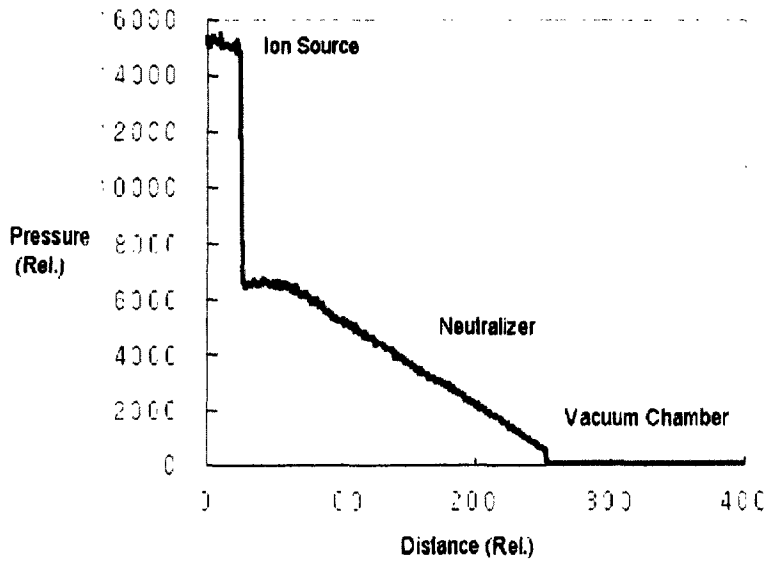


그림 3-1-102. 중성빔 라인의 압력 분포

광 진단 챔버는 광 다채널 분석기(OMA)에 의하여 인출되는 빔의 진단정보를 얻기 위하여 이온원 출구에 위치한다. 광 진단 챔버의 입구 포트(port)는 이온원 설치시의 0.5° 배열오차를 감안하여 벨로우즈(bellows)를 포함하게 될 것이다. 두 시창구(x와 y 평면)는 각각 적색과 청색 변위를 일으키는 도플러 변위를 위하여 빔 중심축과 60°의 각도를 이룬다. 상대 빛 세기(relative intensity)는 이온 종류의 혼합에 대한 자료를 제공하며, 첨두의 퍼짐(broadening)은 이온원의 발산각을 보여준다. 진공 밸브, 이온원 펌핑을 위한 펌핑 포트, 수정 창(window), 분광계 인출구를 포함할 것이다. 시창구는 밸브의 외부에 놓여지는데, 이 밸브는 스퍼터링으로부터 수정 창의 코팅을 최소화하기 위하여 닫을 수 있고, 시스템의 나머지 부분을 대기중에 놓이지 않도록 하면서 수정(quartz) 창을 세정하거나 교체하도록 하게 한다. 광 진단 챔버는 하이퍼베이퍼트론으로 구성된다. 스크레이퍼상의 첨두 빔 전력밀도는 0.5° 이온원 배열오차와 함께 0.6 kW/cm²이 될 것이고, 총 전력은 60 kW가 될 것이다. 이온원은 시스템의 나머지 부분들을 대기중에 노출시키지 않고 완전한 이온원 어셈블리의 교체를 위하여 NB 진공계와 분리시킨다. 이온원 분리밸브(isolation valve)는 바이톤(viton) 오-링 봉입을 가지는 630-mm 지름의 단통로형(single gate type)으로 이루어진다. 밸브의 모든 재료는 1.05 이하의 상대투자율(relative permeability)을 가진다. 중성화장치 수송관(neutralizer duct)의 구경은 선행품(prototype)의 경우 16.5×50.0 cm²이고, 길이는 125 cm이다. 중성화장치 수송관에 인가되는 첨두전력은 출구에서 0.3 kW/cm²이고, 흡수되는 총 전력은 0.84 MW이다. 한 예로써, 15.32×50.32 cm²에 대하여 계산된 중성화장치내의 빔전력 분포는 0.2° 이온원 배열오차를 가지고 그림 3-1-103과 같이 나타난다.

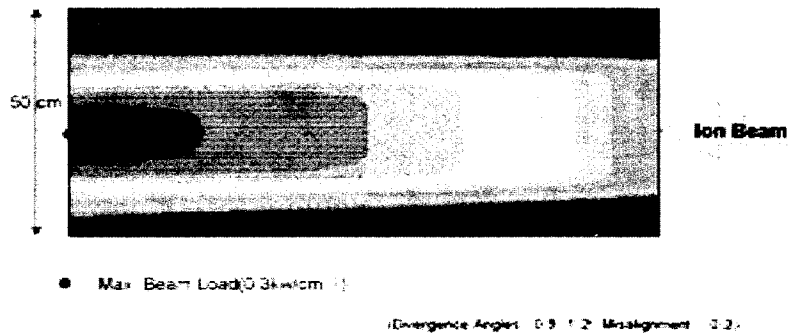


그림 3-1-103. 계산된 중성화장치 빔전력 분포

(나) Prototype 중성화 장치

Prototype의 중성화장치는 두 종류(직선형과 곡선형)의 냉각구조를 갖는 하이퍼 베이퍼트론(Cu-Cr-Zr alloy, Cu:Cr:Zr=Rem%:0.5~1.0%:0.02~0.2% 함유)으로 구성이 되며, 내부기체의 외부누출을 막기 위하여 스테인레스판(두께: 5 mm)으로 완전 밀봉을 하는 구조를 갖는다. 하이퍼베이퍼트론 하단부에는 세 곳에서 기체를 주입할 수 있도록 설계되어 있으며, 상단부에서는 장치내부의 압력을 확인할 수 있도록 제작되었다. 장치의 주요 설계변수는 다음과 같다; (i) Aperture size : $16.5 \times 50.0 \text{ cm}^2$, (ii) Length : 125 cm, (iii) Cooling type : Hypervapotron, (iv) Maximum heat removal : 1 kW/cm^2 . 그림 3-1-104는 중성화장치가 주 진공함내에 장착된 상태를 보여주고 있다.

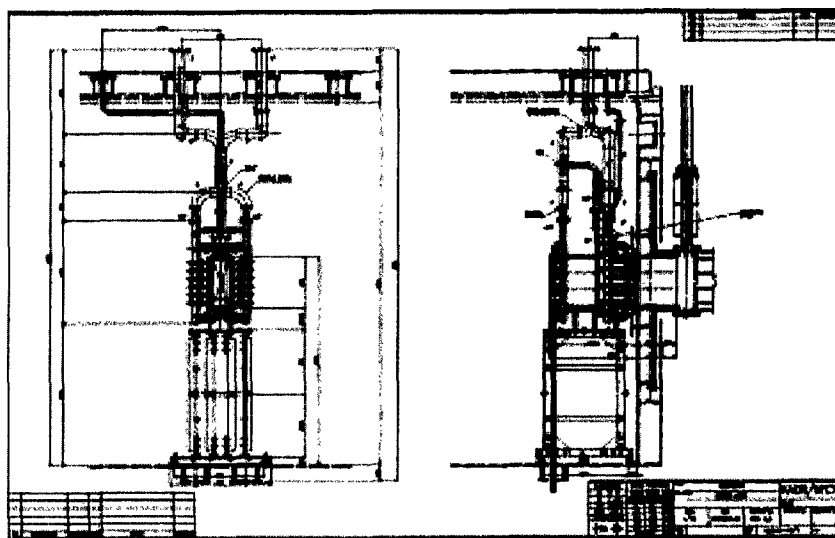


그림 3-1-104. 주 진공함과 중성화 장치

중성화장치에 공급되는 냉각수 공급계통의 설계변수는 다음과 같다; (i) Norminal flow rate (LPM) : 283.9, (ii) Nominal pressure drop (kPa) : 413.4, (iii) Maximum flow rate (LPM) : 379.8, (iv) Maximum pressure drop (kPa) : 695.9. 그림 3-1-105는 중성화장치의 완성된 조립도를 나타내며, 그림 3-1-106에서는 각각 두 종류의 하이퍼베이퍼트론 구조를 보여주고 있다.

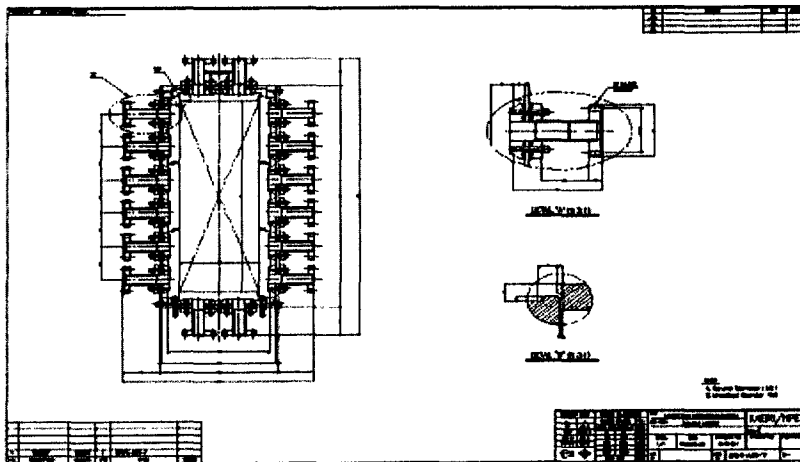
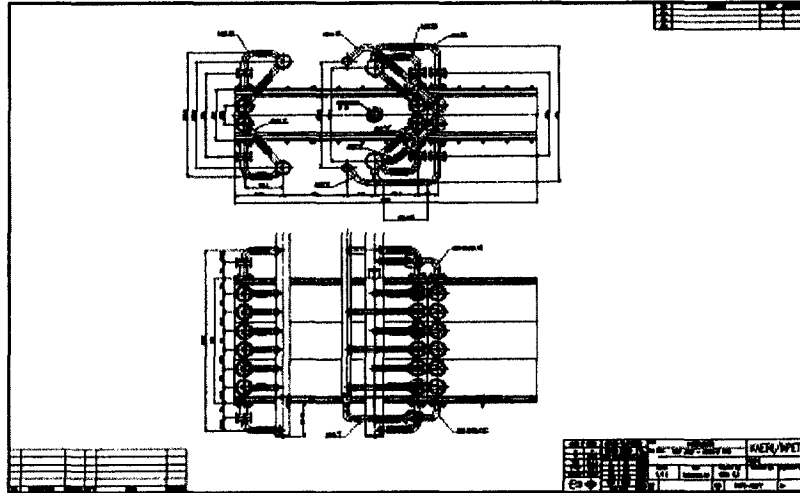
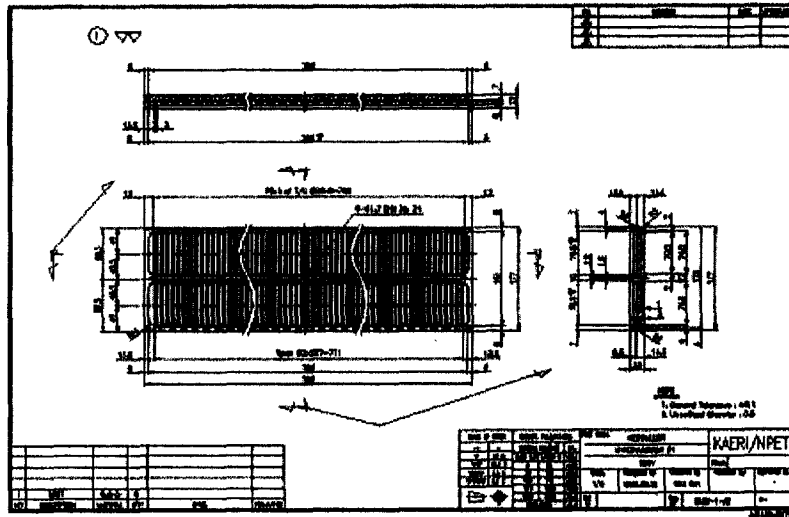
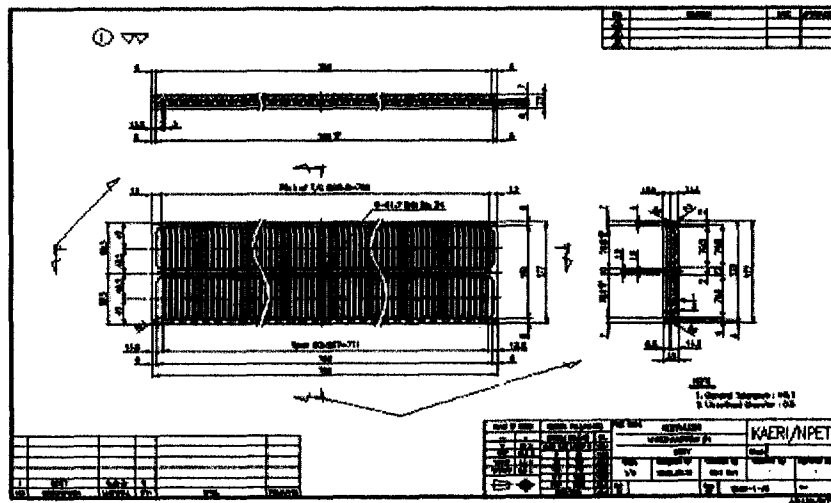


그림 3-1-105. 중성화장치 수송관(duct)의 완성된 조립도



(a) 직선 냉각구조형 하이퍼베이퍼트론



(b) 곡선 냉각구조형 하이퍼베이퍼트론

그림3-1-106. 두 종류(a: 직선형, b: 곡선형)의 하이퍼베이퍼트론

(6) Bending Magnet

(가) 전자석 설계

NBI 장치는 2단계 1차년도까지 TFTR의 Slit형 이온원(12cm×43cm)을 기준으로 설계되었으며, 이 때, 전자석은 그림 3-1-107에서 처럼 3개의 빔경로를 가지고 120 keV D^+ 이온을 70° 각도로 휘어지게 할 수 있도록 설계되었다. 그러나 제2단계 중반에 이온원이 원형인출구를 가지는 형태로 변경되어 빔인출구의 크기가 13cm×45cm로 변경되고 발산각도 1.0° 로 변경됨 따라 설계 변경이 필요하게 되었다. 이러한 전자석의 재설계를 위하여 전자석 제작을 위해 별도로 개발된 Beta Code(3.1.3.사(2) 참조)를 활용하여 전자석 내의 2차원 자장분포로부터 이온의 궤적을 계산하고 이온덤프에의 열부하를 계산하여 최종적으로 NBI Test Stand에서의 실험에 활용할 전자석의 설계를 완료하고 제작구매 작업을 진행 중에 있다.

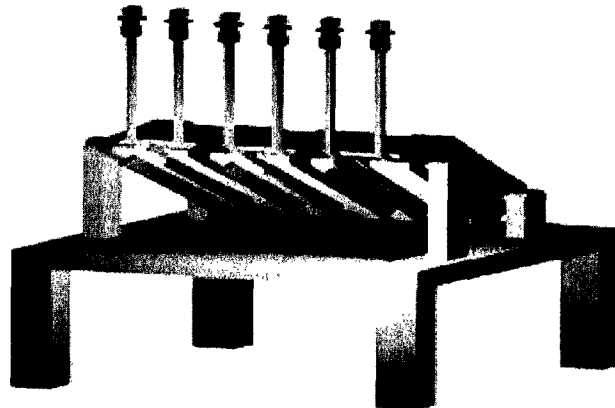


그림 3-1-107. NBI 전자석의 개념도.

그림 3-1-108에는 설계된 전자석의 자장분포를 POISSON code를 이용하여 2차원적으로 계산한 결과를 나타내었다. 그림에서 보여지는 것처럼 전자석의 간극은 18 cm이며 입구와 출구측에 약 5 cm 폭으로 field clamp를 설치하여 인접한 빔경로와의 간섭을 피하고 fringing field를 최소화하도록 하였다. Coil의 폭은 10cm로 하였으며, Coil 전류가 16800A일 때, 중심자장값이 약 2.1 kG 가 되도록 설계하였다.

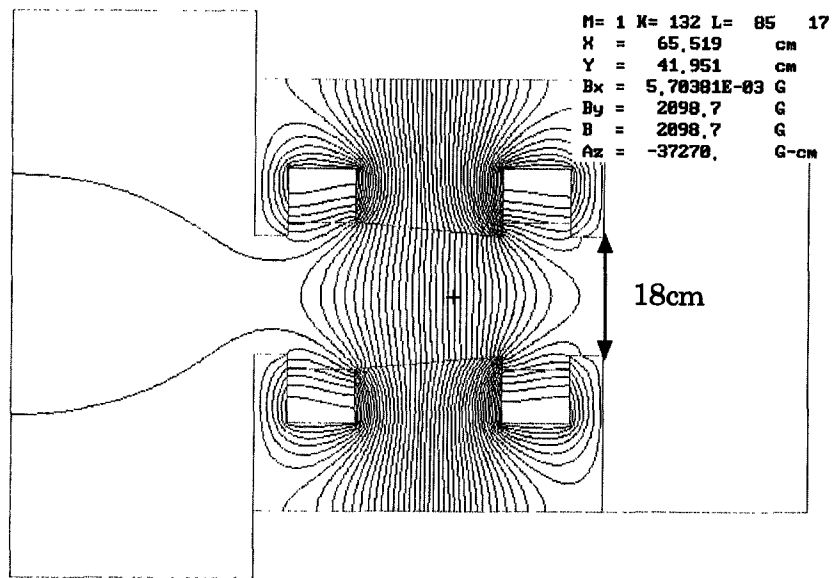


그림 3-1-108. POISSON Code 계산 결과.

그림 3-1-109는 이온덤프와 전자석의 개략적인 구성도로서 그림에서처럼, 전자석은 Neutralizer의 출구로부터 전자석 중심까지 1.08m 떨어진 위치에 빔축을 기준으로 45°의 각도를 가지도록 설치될 것이다.

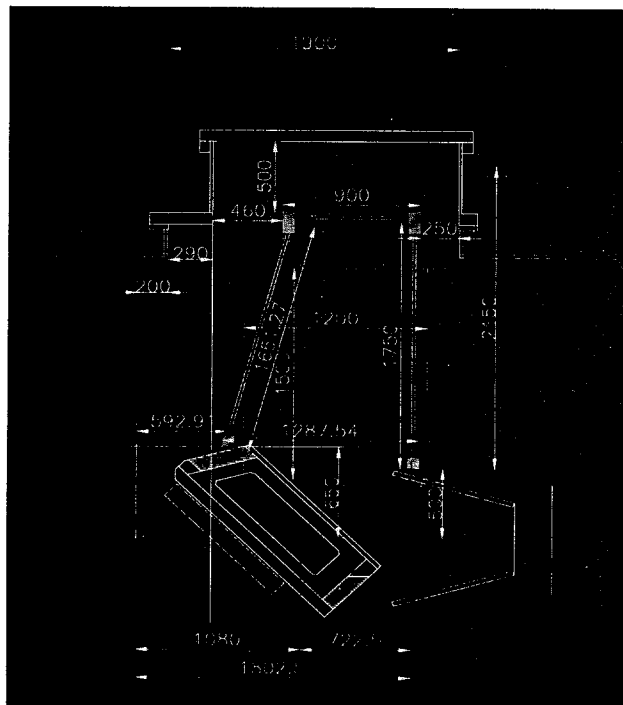


그림 3-1-109. 이온덤프와 전자석의 개략도.

그림 3-1-110에는 설계된 전자석 구조에 대해 Beta code를 이용하여 prototype 이온덤프에의 열부하를 계산한 결과를 나타낸 것이다. 이는 80 keV, 40 A의 수소이온빔을 기준으로 계산한 결과로서 전체 이온빔이 덤프를 향한 경우에 대해 계산한 결과이다. 그러나, 실제로는 neutralizer 내에서의 중성화 효율에 따라 이온빔 전류는 크게 달라지게 되며, 이온빔 전류값에 따른 이온덤프에서의 열부하는 그림 3-1-111에 나타내었다.

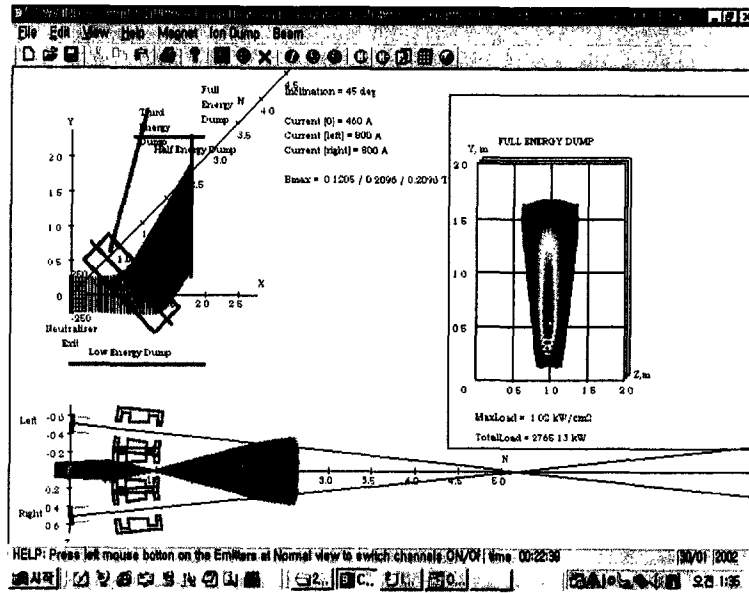


그림 3-1-110. Beta Code 계산 결과 (H^+ 이온, 80keV, 40A 기준).

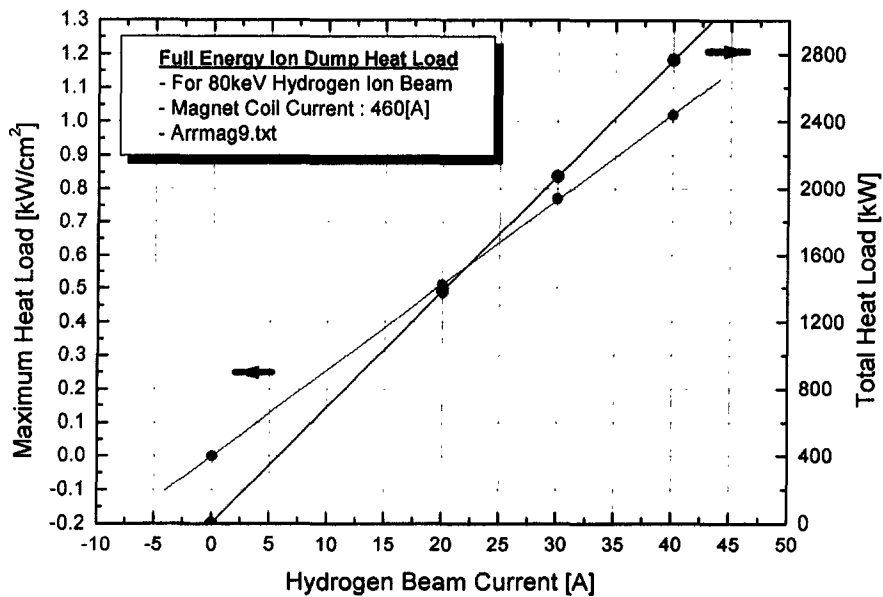


그림 3-1-111. 80keV 수소이온 빔 전류에 따른 이온덤프에의 열부하.

Pole, yoke 등은 저탄소강으로 제작될 것이며, 진공 중에 설치될 것을 고려하여 25 μ m의 두께로 니켈 도금하여 산화되거나 out-gassing으로 인해 진공에 영향을 주는 일이 없도록 한다. Coil은 hollow형 무산소동 coil을 사용하며 최대 20000A을 흘려 2.5 kG의 최대 중심자장값을 얻을 수 있도록 한다. Coil은 진공에의 영향을 최소화하기 위하여 에폭시로 molding 한 후 SUS can 안에 넣어 밀봉 처리한다.

NBI Test Stand용 전자석은 그림 3-1-112,113,114에서 처럼 전자석 본체 외에도 pole protection plate, electron dump, pre-magnet scraper, supporter 등으로 구성된다. 각각은 계산된 열부하를 감당할 수 있도록 냉각을 고려하여 제작될 것이다.

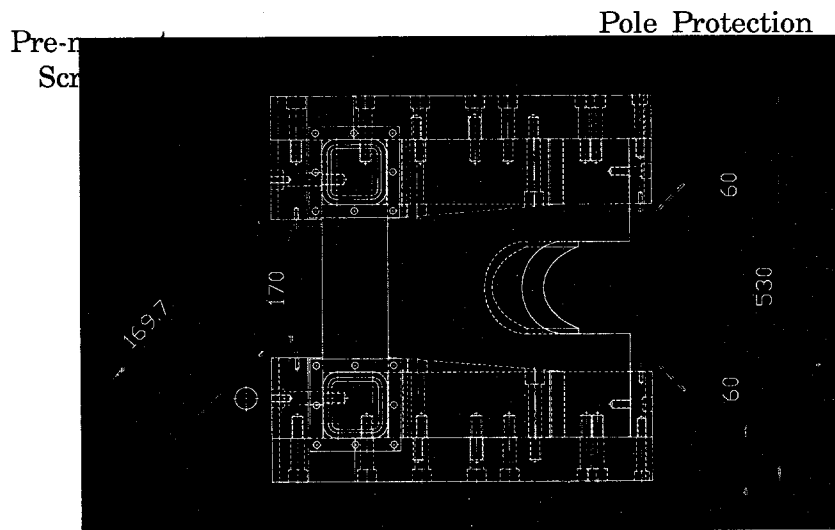


그림 3-1-112. 전자석 도면 (Top-View).

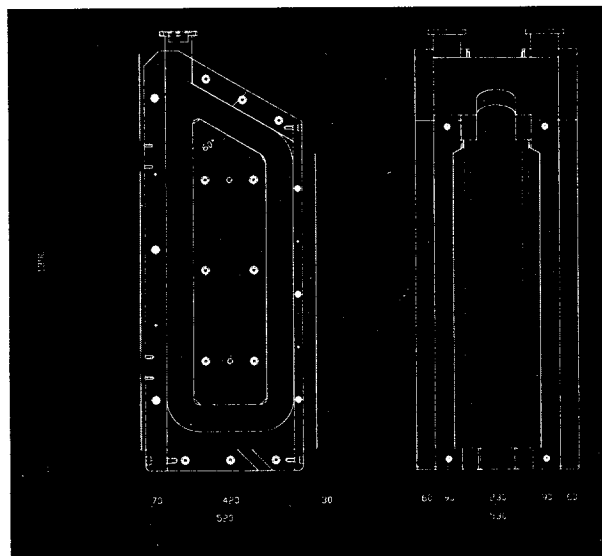


그림 3-1-113. 전자석 도면 (Side-View).

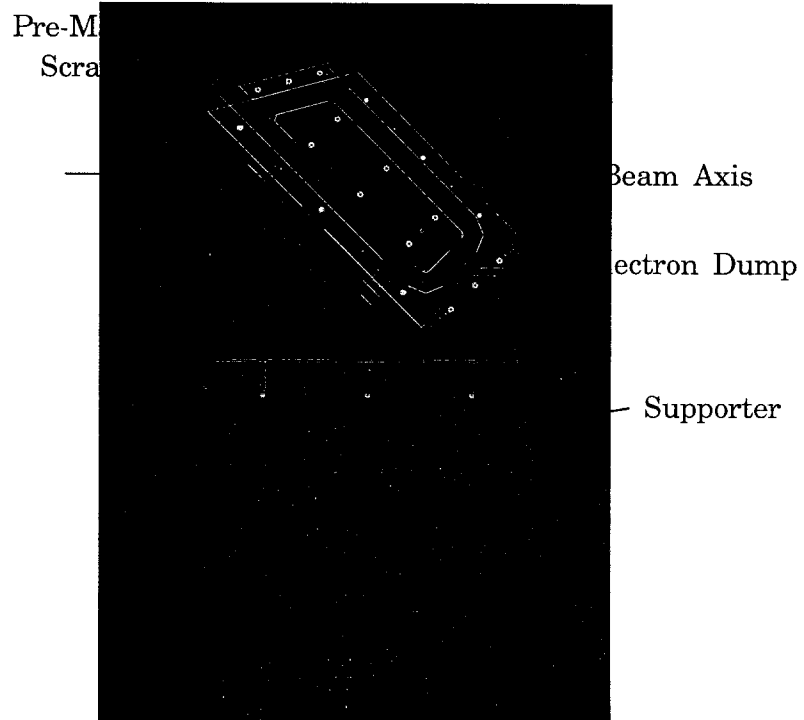


그림 3-1-114. 전자석과 지지대.

(7) 이온덤프(Ion Dump)

(가) 개요

KSTAR NBI 1기는 세 개의 이온원으로부터 약 23 MW의 고속이온을 생산하고 중성화 과정을 거쳐 최종적으로 8 MW의 중성빔을 토카막에 공급한다. 이때 중성화되지 않은 채 중성화실을 빠져나오는 15 MW에 해당하는 이온들은 대부분 휨자석을 거치면서 중성빔과 분리되어 이온덤프에 부딪혀 소멸된다(그림 3-1-115). 따라서 이온 에너지가 모두 소모되는 이온덤프는 고온으로 온도가 올라가며, 스퍼터링이 활발히 일어나고 다량의 기체 및 고속중성화입자가 발생할 수 있다.

이온원에서는 수소원자(H_1), 수소분자(H_2) 및 삼수소분자(H_3)의 이온들이 발생하지만 이들은 중성화과정 중에서 해리되어 대부분 수소 단체의 이온들만 남는 것으로 알려져 있다. 각 이온종들의 에너지는 동일하므로 해리되었을 때 각 이온들의 에너지는 해리되기 전 수소 단체의 수에 반비례하고 같은 자장에서 휨반경은 수소 단체 수의 제곱근에 반비례한다. 이온덤프에는 휨반경이 큰 120 keV 이온들(H_1^+)은 원래 진행방향 쪽으로, 60 keV 이온들($H_{1/2}^+$)은 수직방향으로, 휨반경이 가장 짧은 40 keV 이온들($H_{1/3}^+$)은 역방향으로 들어오므로 이온덤프에는 기본적으로 세 개의 냉각패널이 필요하다.

이온원에서 발생하는 이온종의 비는 이온원 아크방전 플라즈마 조건에 따라 변한다. KSTAR NBI의 이온원에서는 $H^+ : H_2^+ : H_3^+$ 가 60 : 20 : 20이고 이온덤프에 들어오는 이온들의 에너지별 비율 $H_1^+ : H_{1/2}^+ : H_{1/3}^+$ 는 80 : 10 : 10이고 총열부하는 10 : 3 : 2 MW이며 최대열부하밀도는 각각 20, 10, 5 MW/m²이다.

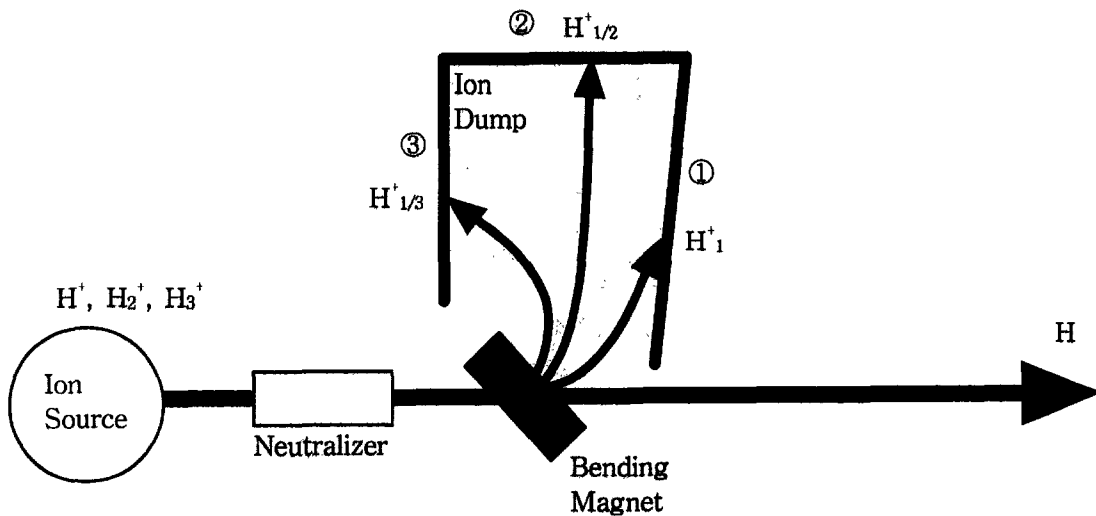


그림 3-1-115 NBI 장치에서 이온의 흐름.

(나) 이온덤프 설계요건

열부하밀도가 5 MW/m^2 이하일 때는 통상적인 냉각방법으로 큰 문제가 없지만 그 이상이 되면 냉각효율을 높이기 위해 hypervaportron이나 swirl tube 등 특별한 방법들을 사용해야 한다. 두 방법은 구조적으로는 매우 다르지만 성능 면에서는 큰 차이가 나지 않는 것으로 알려져 있다. calorimeter 등 NBI 용기 내의 여타 열차단 부품들은 hypervaportron으로 되어 있어서 이 것과 제작성 및 성능을 비교한다는 목적으로 오래 전부터 사용해 왔으며 가공도 비교적 간단한 swirl tube 방식을 이온덤프의 냉각방식으로 채택했다. 이온덤프의 제작 및 설계요건은 다음과 같다.

- 1) 설계 열부하는 10 MW/m^2 이다.
- 2) 냉각판의 냉매는 물을 사용한다.
- 3) 냉각수관 표면온도는 재료의 연화점 이하가 되어야 한다.
- 4) 냉각수가 비등을 일으키지 않도록 온도 및 압력조건을 맞춘다. 냉각수의 압력은 10 기압, 입구온도는 30 도, 유속은 10 m/s를 기준으로 한다.
- 5) 냉각수관의 두께는 표면온도를 낮추기 위해 얇아져야 하는 반면 장치 운전수명 동안 스퍼터링을 견뎌야 한다. KSTAR는 20초 가동은 하루에 50 회, 300초 가동은 하루에 20 회의 풀로 운전하여 장치수명 동안 10^6 초의 실운전시간을 예상하고 있다.
- 6) 온도분포를 균일화하고 이에 따른 열응력을 최소화하는 노력이 필요하다.

최종 이온덤프의 규격은 이온원 세 개를 완전 가동할 때를 기준으로 하게 되겠지만 현재 원연에서 시험가능한 이온원이 하나인 만큼 설계치를 설정할 때 이 점도 고려했다.

(다) 구조

(다)-1. 기본구조

이온덤프는 기본적으로 앞판, 윗판, 뒷판의 세 냉각판(그림 3-1-115 및 3-1-116에서 각각 판 ①, ②, ③) 및 냉각수 배관과 지지구조로 이루어진다. 각 냉각판은 별도의 냉각수 입구와 출구를 가지고 입출구 양쪽에 달린 밸브를 통해 외부 냉각수 공급장치에 연결되며 서로 독립적인 지지대에 의해 용기에 장착된다. 각 냉각수 판에는 입출구에 온도계와 압력계가 달리고 출구에 유량계가 달린다. 냉각수의 유량 조절과 냉각판 내 압력을 독립적으로 조절하기 위해서 입출구 양쪽에 모두 밸브를 다는 것이 필수적이다.

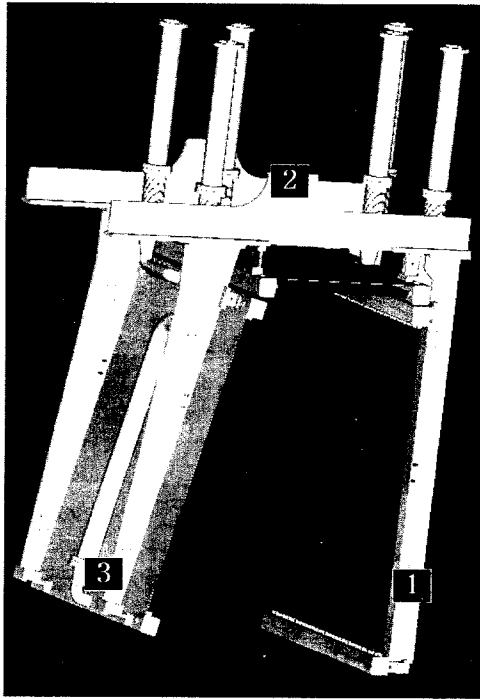


그림 3-1-116. 이온덤프 기본구조 및 냉각관의 배치도.

(다)-2. 냉각관 및 냉각성능

(다)-2.1. 냉각관

냉각관은 두께 2 mm, 내경 16 mm의 원형관이다. 재료는 은이 0.2% 함유된 무산소동(산소 5 ppm 이하)으로 기본 소관은 국내 호리카 금속에서 제조한 것이다. OFC-0.2Ag의 기본적 물성은 표 3-1-12와 같다. 온도가 300℃를 넘으면 내력이 급격히 감소하므로 냉각관의 표면온도가 이를 넘지 않도록 냉각조건을 맞출 필요가 있다.

냉각관 내부에는 두께 1 mm의 스테인리스 강 스트립이 2:1(마디 간격이 폭의 두배)로 꼬아진 swirl tape이 삽입된 것이다 (그림 3-1-117참조). 냉각관은 일차 적절한 치수로 인발한 소관에 swirl tape를 삽입하고 재차 인발하여 최종치수를 맞춘다. swirl tape를 축방향으로 끌고 가는 힘이 약 600 N/m이므로 swirl tape가 동관 내부를 파고드는 깊이는 그렇게 깊을 필요가 없고 0.1 mm 이내로 충분하다. 또 양 끝에 턱이 구성되어 있으므로 떨지 않을 정도로 붙잡으면 된다. 냉각관 양끝은 제작의 편리를 위해 스테인리스관을 30 mm 길이로 가공하여 동관에 전자빔 용접한 후 스테인리스관을 분기관에 TIG 용접하는 방법으로 이중금속간 접합의 신뢰성을 높였다.

표 3-1-12 OFC-0.2Ag의 물성

물성	값
인장강도	35 kg/mm ² (20% 압연)
내력(200℃)	30 kg/mm ² (25% 압연)
허용응력(S _m , 200℃)	10 kg/mm ²
경도(Hv)	120
영율	12500 kg/mm ²
열팽창계수	1.68×10 ⁻⁵ /℃

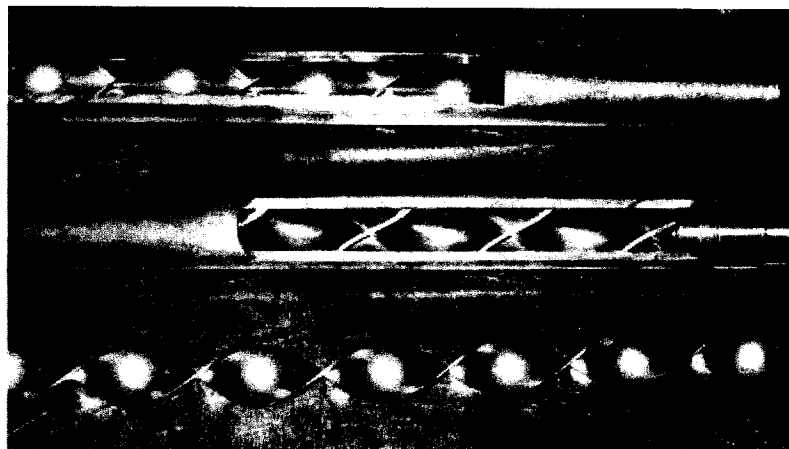


그림 3-1-117. Swirl tube의 소관, swirl tape 및 조립도.

이온덱프의 냉각관을 구성하는 냉각관에는 필연적으로 고속이온들의 조사에 의해 스퍼터링이 일어난다. 100 keV 내외에서 구리에 대한 수소이온의 스퍼터링 수율이 약 0.01이고 설계 열부하(10 MW/m²)에서 120 keV 이온조사량이 5.2×10¹⁷ /s.m² 이므로 구리의 소모량은 2 g/hr.m² 또는 1.9 mm/yr에 이른다. KSTAR의 수명기간 동안 총 가동시간이 0.03년 정도이므로 두께 감소에 의한 기계적 영향은 무시할 수 있다.

(다)-2.2. 예상 냉각성능

냉각관의 냉각성능을 좌우하는 가장 큰 변수는 열전도가 일어나는 관과 냉각수와의 계면에서의 열전달계수라고 할 수 있다. swirl tube에 대한 열전달계수는 다음 식으로 표현된다.

$$h_c = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} k_f / d_e \times 2.18 y^{-0.09}$$

이 식은 평활한 냉각관에 관한 Dittus-Boelter식에 Gambil의 swirl tape에 의한 증배계수를 곱한 것이다. 여기에서 d_e 는 냉각관의 유효내경으로 $(\pi d^2 - 4td) / (\pi d + 2d - 2t)$ 으로 계산된다(d 는 기하학적 내경, t 는 swirl tape의 두께). Re 는 레이놀드수로 $\rho Vd / \mu$ (V 는 유속, ρ 는 냉각수의 밀도, μ 는 냉각수의 점도이다)로 계산되고, Pr 은 프란틀수로 $\mu C_p / k_f$ (C_p 는 정압비열, k_f 는 냉각수의 열전도도이다)이다. 또 y 는 swirl tape의 트위스트비로 180° 회전당 진행거리가 직경의 몇 배가 되는가를 나타낸다. 비가 작을수록 촘촘하게 꼬인 것이다. 그림 3-1-118은 물의 물리적 특성을 온도의 함수로 요약한 것이다.

비등이 일어나지 않는 범위에서 냉각관 벽의 온도를 T_w , 냉각수의 온도를 T_b , 냉각관 표면온도를 T_s 라고 하면 다음 식이 성립한다.

$$q = \frac{k(T_s - T_w)}{t} = h_c(T_w - T_b)$$

이때 k 는 구리의 열전도도이고 t 는 냉각관의 두께다. q 가 10 MW/m²인 영역이 1 m라고 가정하면 유속이 10 m/s일 때 냉각수의 온도증가는 20.6도이고 $h_c = 75000$ W/m.°C 및 $T_w - T_b = 106$ 도가 된다. 냉각관 표면의 온도는 최대 213°C에 이른다.

한편 냉각관의 압손(drop)은 다음 식으로 표현된다.

$$\Delta P = \lambda \frac{\rho L V^2}{2D_e}, \quad \lambda = 0.512 Re^{-0.2} y^{-0.406}$$

유속이 10 m/s일 때 압손은 0.19 MPa(~2 기압)/m로 계산된다. 임계열유속(CHF)은 모델에 따라 다르지만 swirl 증배항을 추가한 Tong의 상관식에 의하면 약 58 MW/m²로 구해진다. 그림 3-1-119는 유속에 따른 냉각성능 지표들의 변화를 그린 것이다.

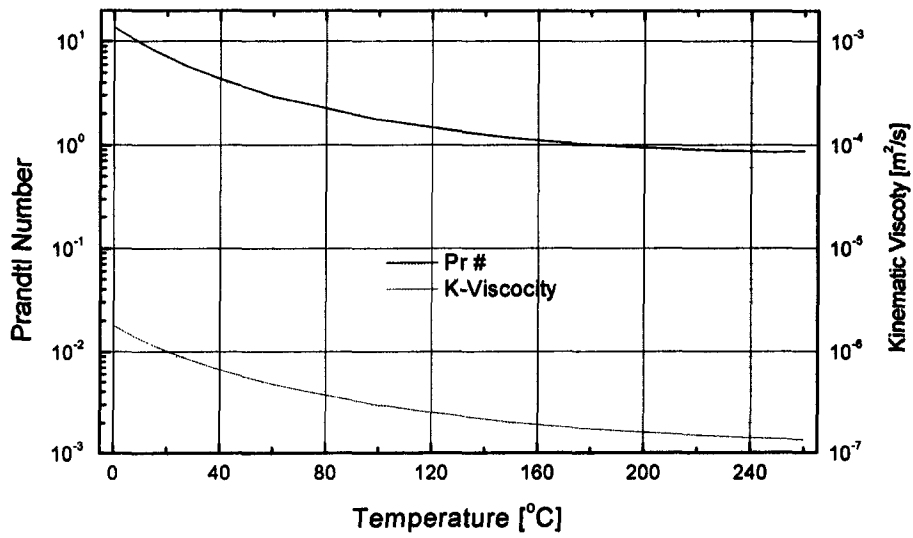
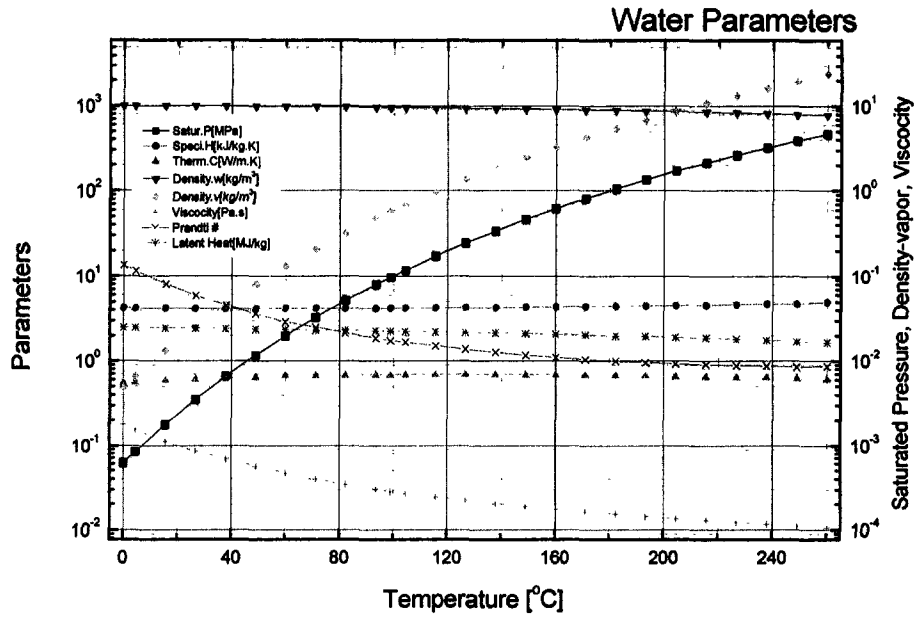


그림 3-1-118. 물의 각종 열적 물성의 변화.

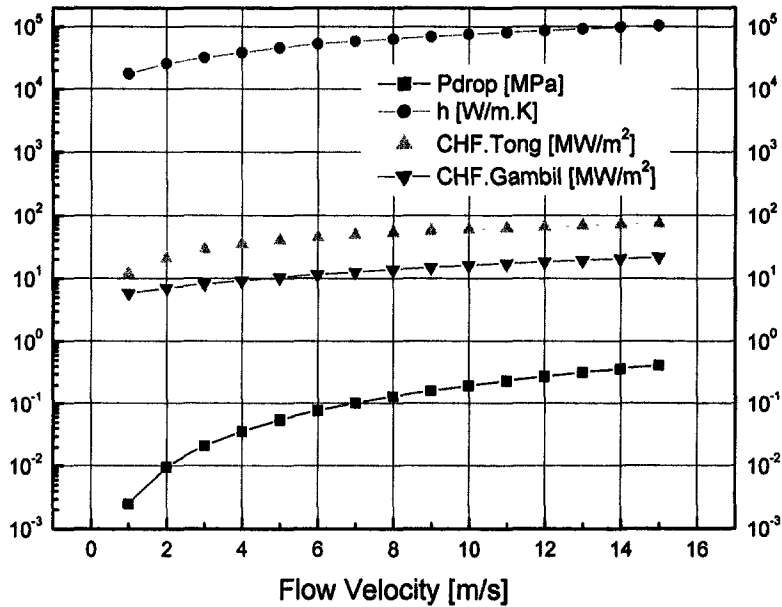


그림 3-1-119. Swirl 관의 압손, 열전달계수, 임계열유속의 변화.

(다)-2.3. 냉각판

냉각판은 swirl tube들을 이온들의 공간분포에 맞추어 적절한 위치에 일정한 면적을 덮을 수 있도록 필요한 길이의 냉각판들을 관의 축과 이온들의 주 분산방향이 일치하도록 여러 개 늘어놓는 단순한 형태를 취하고 있다. 냉각판은 이온빔이 관 사이로 빠져나가지 않도록 두열로 배치되는데 서로 2 mm씩 겹치고 관 사이의 최소간격은 1 mm 내외가 되도록 한다(그림 3-1-120 참조). 냉각판의 양끝에는 내부 단면 70 mm×70 mm 크기의 분기관이 붙고 분기관의 중앙에서 100 mm×100 mm 관에 연결된다(그림 3-1-121). 세 개의 판은 크기가 각각 다를 뿐 기본적 구조는 동일하다. 각 판의 크기는 표 3-1-13과 같다.

냉각판이 병렬로 연결된 여러개의 냉각판들로 구성되어 있으므로 각 냉각판의 온도에 따른 열팽창이 다르면 큰 열응력이 발생할 수 있다. 열부하가 가장 높은 1번 냉각판의 경우 온도분포를 가능하면 균일화하기 위해 양 가장자리쪽 350 mm씩은 오리피스를 관에 부착하여 유량을 줄이도록 설계했다. 또 주배관을 분기관의 중앙에만 연결하여 가장자리로 가는 유량이 자연스럽게 감소하도록 했다. 따라서 중앙부 냉각판에서 유속이 10 m/s가 되더라도 주배판에서는 비교적 낮은 유속을 가져도 될 것으로 예상된다.

뒷면 전체는 열절연을 위해 1 mm 두께의 Al 판으로 덮는다. 또 Ion dump의 양옆 방향에는 냉각판을 설치하지 않는 대신 덤프로부터 발생한 기체를 원활하게 배기하기 위해 알루미늄 합금으로 만든 루버(louver)형 배플을 단다. 배플의 안쪽은 흑화처리 한다.

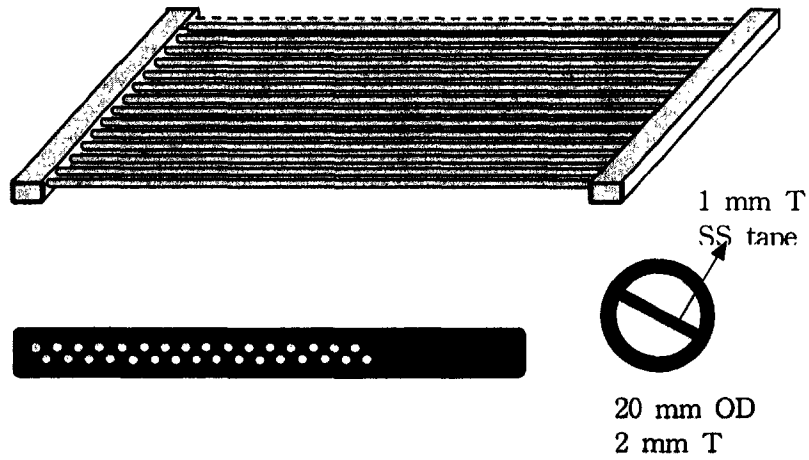


그림 3-1-120 냉각판의 구조.

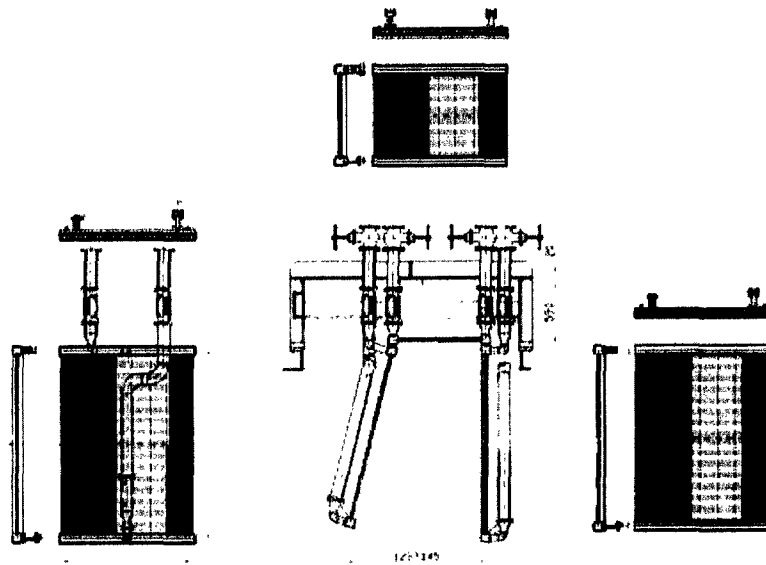


그림 3-1-121. 이온덤프 냉각판의 상세구조.

표 3-1-13. 냉각판의 크기[mm].

번호	크기
①	1200W × 1750L
②	1200W × 1650L
③	1200W × 900L

(다)-2.4. 지지구조 및 열응력해석

(다)-2.4.1. 지지구조

냉각판은 그 자체만으로도 하나의 구조물로서 생각할 수 있지만 열변형이 일어났을 때 큰 열응력을 피하고 상온이 되었을 때 원래의 형상과 위치로 복원되기 위해서는 지지대를 독립적으로 설치하고 냉각판을 이 지지대에 부착할 때 열팽창을 충분히 수용하면서 복원력을 발휘할 수 있도록 장치를 마련하는 것이 필요하다. 따라서 냉각판 분기관의 한 쪽은 지지대에 길이조절이 가능한 레버와 회전이 가능한 피봇을 통해 고정하고 나머지 한 쪽은 판스프링을 통해 고정한다 (그림 3-1-122 참조). 얇은 판들을 적층하여 만들어진 판스프링은 이차원적인 움직임을 잘 수용하여 추가적인 열변형이 일어나는 것을 방지하고 피봇은 설치시 위치조절을 편리하게 하고 열변형시 냉각판이 휘어지면서 발생하는 냉각판의 회전운동을 수용해준다.

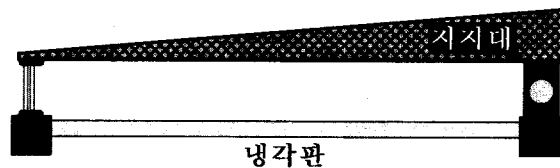


그림 3-1-122. 이온덱프 냉각판의 지지구조.

(다)-2.4.2. 열응력해석

열응력에 미치는 지지대 구속조건 영향 및 불균일한 온도분포의 영향을 알아보기 위해 먼저 길이가 2 m인 냉각판 하나를 가지고 중간 1 m 구간에 10 MW/m^2 의 열부하가 가해질 때 온도분포 및 열응력을 구해보고, 다음에 1번 냉각판과 길이는 같고 대칭성을 고려하여 폭은 1/2인 계산모델에 대해 최대값이 10 MW/m^2 이고 코사인형으로 감쇄하는 열부하에 대해 온도분포 및 열응력을 계산했다. 이때 한쪽은 완전히 고정하고 반대쪽은 평면상에서 평행이동이 가능한 조건 및 양쪽이 모두 고정된 경우와 비교했다. 모든 계산에서 유속은 10 m/s, 입구 냉각수 온도는 30°C 로 놓았다.

그림 3-1-123,124,125는 단일 냉각판에 대한 열응력 해석 결과들을 보여주고 있다. 먼저 그림 3-1-123에서 온도는 중간부(중앙에서 약간 하류 쪽에) 표면에서 218°C 이고 가운데($L=1 \text{ m}$) 단면에서 보면 이온이 부딪히는 쪽의 온도는 207°C 인데 반하여 반대편의 온도는 41°C 에 불과하여 열응력의 발생원인이 될 수 있다. 그림 3-1-124에서 냉각판 한쪽이 자유상태일 때 중앙부에서 최대응력이 91 MPa로 나오

는데 이는 주로 단면상의 온도차이 때문에 생긴다. 이때 변위는 190 mm에 이르는 데 만일 이를 움직이지 못하도록 구속하면 추가로 응력이 발생할 것이다. 양단을 모두 구속하면 응력은 최대 232 MPa이르는 반면 한쪽을 축방향으로 슬라이딩이 가능하도록 하면 그림 3-1-125처럼 응력이 167 MPa로 줄어든다. 두 경우 변위는 15-20 mm 정도가 된다.

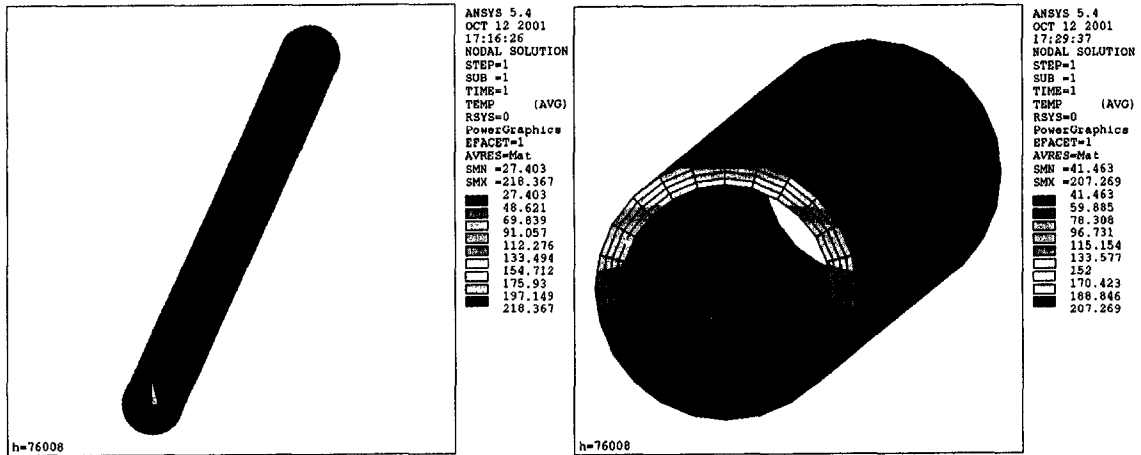


그림 3-1-123. 단일 동관에서 중앙 1 m 폭에 열부하가 10 MW/m²로 가해질 때 온도분포.

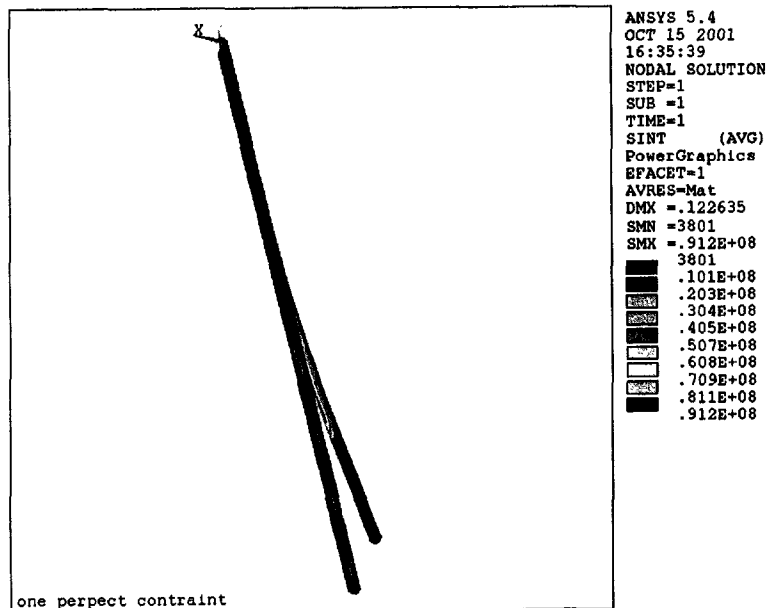


그림 3-1-124. 동관의 한 쪽을 구속하고 반대쪽은 완전히 자유스러운 경우 발생하는 열응력.

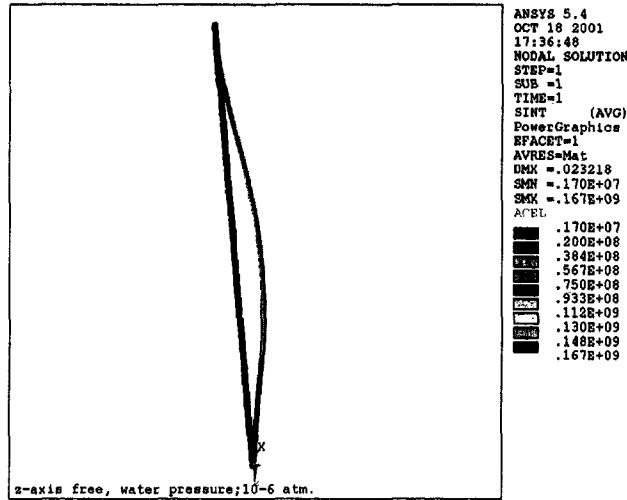


그림 3-1-125. 동관의 한쪽을 구속하고 반대쪽은 슬라이딩이 가능하도록 했을 때 발생하는 열응력.

이런 동관들을 모아서 냉각관을 구성하면 온도가 균일하지 않을 때 서로 제한요소로서 작용할 수 있으므로 열응력이 추가로 발생할 수 있다. 그림 3-1-126은 한쪽은 구속이 되고 한 쪽은 슬라이딩이 가능한 모델에 대한 계산이다. 그림 3-1-126의 오른쪽은 냉각관의 온도분포로 중앙부위에서 최대 160℃까지 온도가 올라간다. 실제로는 중심에서 약간 하류쪽에 고온부가 나타난다. 그림 3-1-126의 왼쪽에서 최대 응력은 가운데 부분의 완전히 구속되어 있는 분기관과 냉각관이 연결되는 부위 근처에서 발생하는데 그 값은 137 MPa이다. 이때 냉각관이 늘어나 휘어지면서 발생하는 최대변위는 12 mm로 계산되었다.

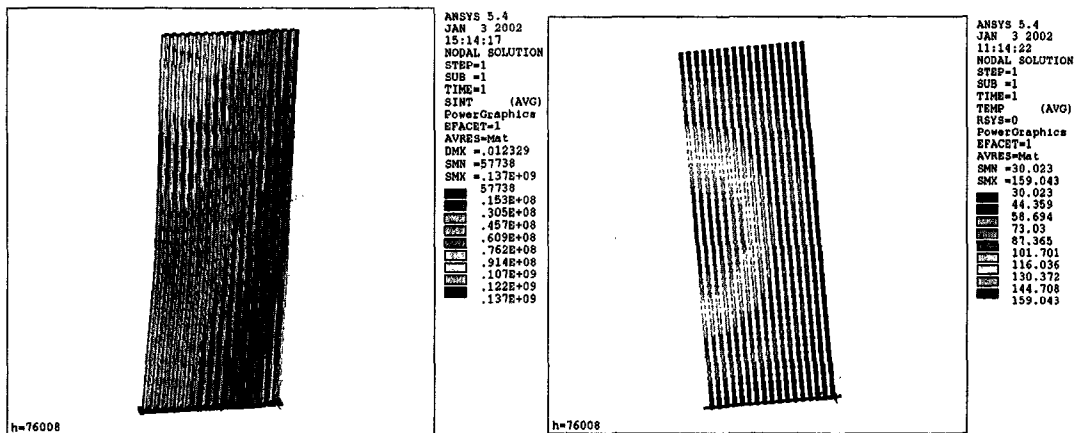


그림 3-1-126. 분기관 한쪽만 구속하고 반대쪽은 슬라이딩이 가능하도록 했을 때 발생하는 열응력. 온도분포도 함께 보였다.

만일 양쪽 분기관을 모두 완전히 구속한다면 그림 3-1-127에서 처럼 최대응력은

191 MPa로 커지며 양쪽 분기관 근처에서 모두 나타난다. 이때 최대변위는 15 mm 이었다.

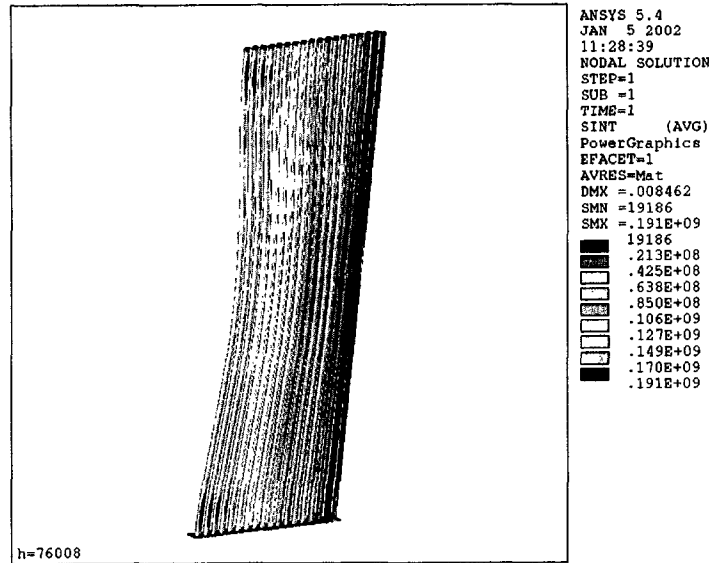


그림 3-1-127. 분기관 양쪽을 모두 구속했을 때 발생하는 열응력.

(다)-2.5. 냉각수 배관

이온덱프에 냉각수를 공급하는 냉각수공급장치의 주배관에는 세 개의 냉각판으로부터 입출구 한 개씩 각각 두 개의 냉각수관이 독립적으로 연결된다. 냉각수관은 내경 100 mm로 통일하면서 입출구 모두에 신축관을 삽입하고 연결 플랜지는 ConFlat 방식을 택했다. 이온덱프의 냉각수관 연결은 그림 3-1-128과 같다. 각 배관에는 압력조절의 범위를 높이기 위해 입출구 모두에 밸브를 달았다. 배관의 재료는 SS 316L을 사용했다.

이온덱프의 각 냉각판을 조립한 후 NBI 용기에 장착하기 전 전체 이온덱프 구조물의 헬륨 누설이 10^{-9} mbar.L/s 이하가 되는지 배관을 배기하면서 후드법으로 기체누설률을 측정하며 20기압에서 건전성을 확인한다.

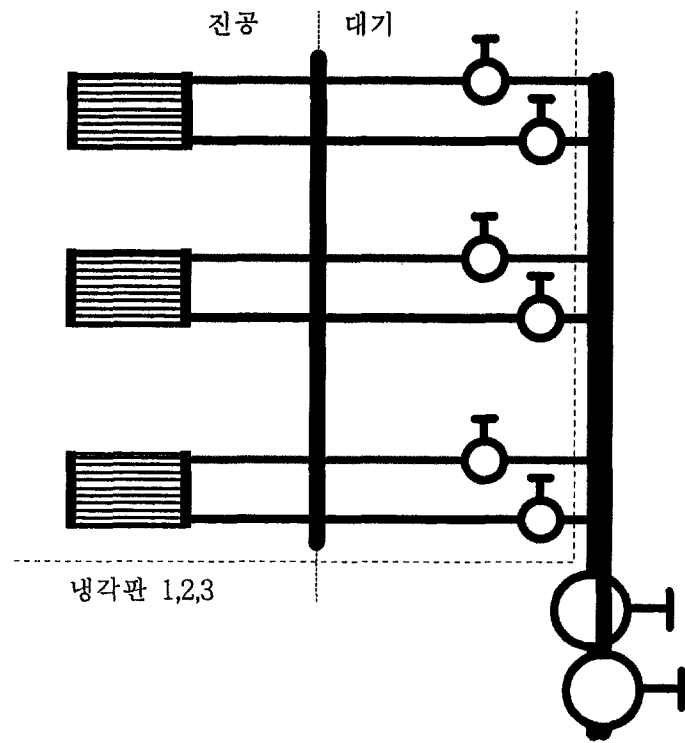


그림 3-1-128. 이온덱프 냉각판의 냉각수 배관

(8) Chamber-Source Interface Components

Chamber-Source interface components는 이온원과 NBI 주진공함 사이에 설치되는 장치로서 크게 interface flange, gate valve, OMA chamber, source exit chamber 등의 4가지 부분으로 나누어 구성된다. 이들 장치는 NBI chamber에서의 빔인출 실험을 위해 필수적인 장치로서 최대 120 keV, 65 A의 중수소이온빔 인출시 빔 divergence 등에 의해 발생하는 최대 1 MW의 heat load를 감당할 수 있도록 설계되어야 한다. Chamber-Source interface components의 설계 도면은 그림 3-1-129,130과 같다.

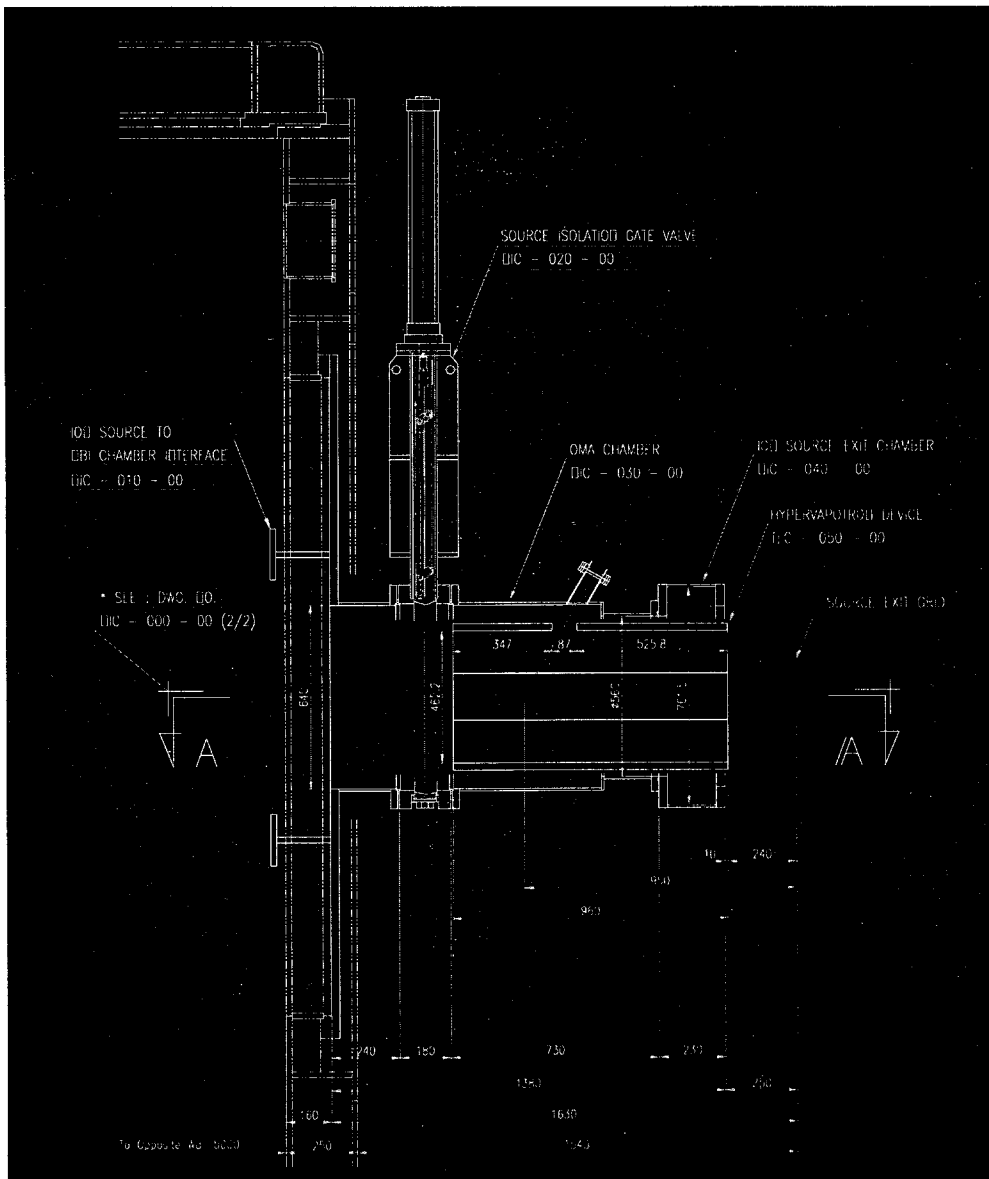


그림 3-1-129. Chamber-Source Interface Components 설계도(Side-view).

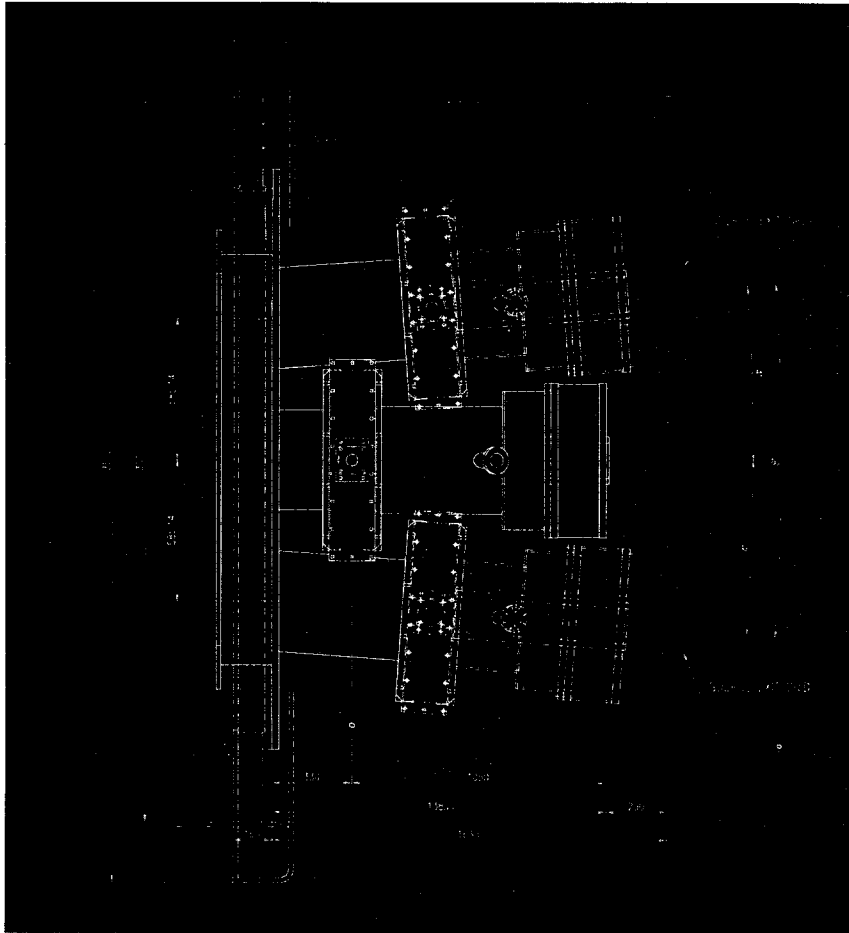


그림 3-1-130. Chamber-Source Interface Components 설계도(Top-view).

NBI chamber interface components 들 각각은 NBI chamber로부터 이온원에 이르기까지 같은 빔라인 중심을 가지도록 연결된다. OMA chamber와 Source exit chamber의 내부에는 산란된 이온빔들을 흡수할 수 있도록 scraper가 설치되며, 이들은 hypervapotron으로 구성된다. Gate valve는 상용의 제품을 사용할 경우 필요한 빔이송 단면적을 확보할 수 없거나 3개의 이온원간의 공간적인 간섭을 피할 수 없는 문제점이 있어 이를 해결하기 위하여 국내의 업체를 통해 별도 제작하도록 하였다. 그림 3-1-131은 제작된 Chamber-source interface components의 사진이다.

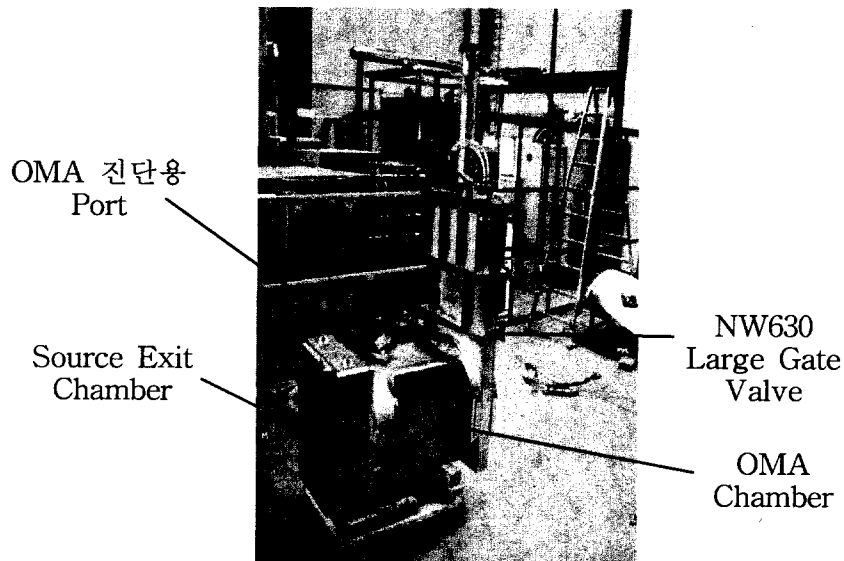


그림 3-1-131. Chamber-source interface components.

Hypervapotron은 CuCrZr 합금을 모재로 하여 몸체와 덮개의 두 부분으로 나누어 제작한 후 전자빔 용접에 의해 결합시켜 냉각라인이 구성되도록 한다. 한 개의 Hypervapotron에는 두 개의 독립된 냉각라인이 구성되며, 각각의 양 끝, 냉각수 입구와 출구 측에는 CF flange로 연결된 냉각수 fitting을 brazing 공정을 통해 몸체에 부착시킨다. 또한 이온빔의 divergence 등으로 인한 scraper에의 열부하 등의 영향을 조사하기 위하여 TC를 각각 10개씩 brazing 하여 부착시킨다. 이 때 TC의 설치깊이는 표면으로부터 1 mm 이하가 되도록 한다. Hypervapotron의 폭은 142.8mm, 161.0mm 길이는 설치되는 위치에 따라 각각 236mm, 281mm, 347mm, 716mm 등의 4종류로 구성되어 총 수량 18개를 제작하였다.

Interface flange의 경우 직경이 2400 mm인 대형 flange로서 빔라인을 중심으로 각각 4°의 각도를 가지고 이온원이 설치될 수 있도록 직사각형의 port 3개를 가지며, port의 끝단 flange는 ISO 630으로 gate valve와 연결될 수 있도록 제작되었다. Flange의 두께는 30 mm로 하고 재질은 SUS304로 하였다.

Gate valve는 NBI chamber와 이온원의 진공분리를 위한 것으로서 3개의 이온원을 4°의 각도를 가지고 설치할 경우, 상용의 gate valve를 사용하면 서로 간섭하여 빔수송을 위한 필요 단면적을 확보할 수 없다. 따라서, 주어진 공간 내에서 최대의 작업 공간과 빔 수송단면을 확보할 수 있도록 하기 위하여 gate valve의 폭이 750 mm 이내가 되도록 별도로 제작하였다. 제작시 규격은 VAT사의 series 19 (ISO-F DN 630) 대형 gate valve를 참조하였다. 재료로는 본체는 SUS304를 사용하였으며, Gate는 무게를 고려하여 Al6061을 사용하였다. 구동방식은 solenoid 밸브

를 이용한 공압구동방식으로 밸브의 열림과 닫힘 상태를 확인할 수 있는 위치센서를 부착한 double acting type으로 제작하였다. 제작된 gate valve는 그림 3-1-132와 같다.

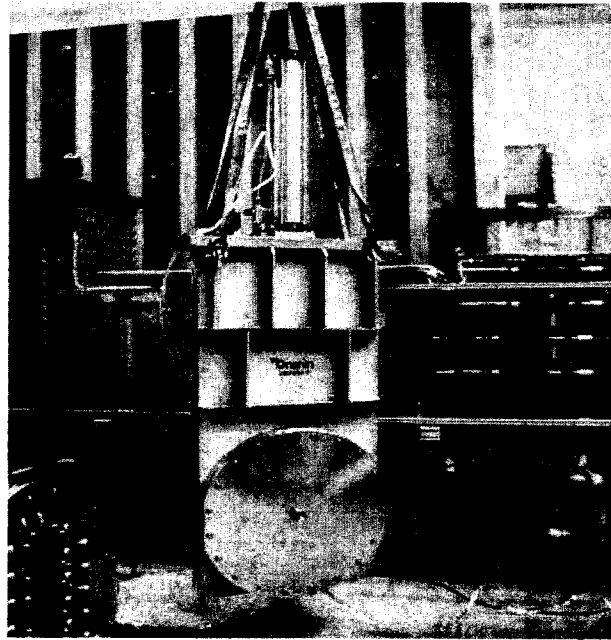


그림 3-1-132. Large Gate Valve (NW630).

OMA chamber는 인출 이온빔의 divergence와 빔 species를 측정하기 위한 진단장치인 OMA를 설치하기 위한 chamber로서 OMA port가 beam 라인과 60° 의 각도를 가지도록 제작되었으며, 이 때 진공도 측정을 위한 별도의 CF 16 flange port가 OMA port에 설치되었다. OMA port는 사각형의 진공함과 원형의 진공함이 결합된 형태로서 내부에는 산란되는 이온빔들의 흡수를 위한 scraper가 Hypervapotron 형태로 제작되었고 chamber의 외벽에는 냉각수 주입을 위한 port와 Hypervapotron에 설치된 TC로부터의 신호처리를 위한 feedthrough 2개의 설치를 위한 port가 추가되었다. 그리고, scraper에 의해 결정되는 빔 통과 단면적은 이온원으로부터 인출되는 이온빔의 divergence, 1.0° 를 고려하여 $146.8\text{ mm} \times 462.8\text{ mm}$ 로 결정하였다. 그림 3-1-133은 제작된 OMA Chamber의 사진이다.

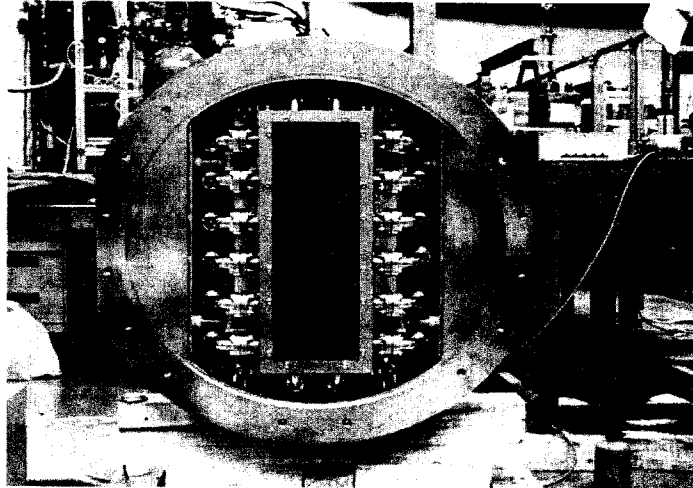


그림 3-1-133. OMA chamber with scraper.

Source exit chamber는 OMA chamber와 이온원 사이를 연결해주는 chamber로서 OMA chamber와 동일한 빔수송단면적을 가지도록 hypervapotron을 scraper로 이용하여 구성한다. 이 진공함의 한쪽 끝은 이온원의 exit plate와 결합될 수 있는 사각의 flange로 설계하고, 다른 끝은 OMA chamber와 연결될 수 있는 원형의 flange로 설계한다. 이 때 scraper의 냉각라인 배관 및 조립에 필요한 충분한 공간을 확보할 수 있도록 그 폭과 내부공간을 고려하여야 한다. 이들 장치들은 NBI 주진공함에 설치되어 진공 및 냉각수 시험을 완료하였다.

(9) Test stand 완성

이온원을 개발하여 그 성능을 시험하고, 또한 연속운전을 위한 빔라인 부품들을 개발하여 시험하기 위해서 Test Stand는 반드시 필요하다. 본 과제의 2 단계 목표는 1 단계동안 완성된 이온원, 빔라인, 전원 제어계통 등에 대한 공학설계를 기준으로 한 개의 이온원에 해당하는 빔라인 부품들과 전원들을 제작하여 Test Stand를 구성하고, 이를 통하여 제작된 이온원 및 빔라인 부품 등의 성능을 시험하고 Upgrade 할 수 있는 기반을 마련하는 것이라 해도 과언이 아니다.

2단계 과제기간 동안 이온원을 포함하여 진공함, 칼로리메타, Cryosorption Pumping System, 중성화장치, 이온덱트, 전자석들을 차례로 제작하였다. NB 진공함은 3m x 4m x 5m 크기의 초대형 진공함으로 여러 가지 시험이 가능하도록 상하, 좌우에 가능한 많은 포트들을 만들었으며, 최종적으로 모든 빔라인 부품들의 성

능검증이 완료되는 대로 주장치에서도 사용이 가능할 수 있도록 제작하였다. 칼로리메타, 중성화장치들은 JET에서 개발한 Hypervapotron을 이용하여 만들었고, 이온 덤프는 Swirl Tube를 이용하여 제작하였다. Hypervapotron 과 Swirl Tube 의 성능 검증을 자체적으로 수행하여 최종적으로 어떤 방법으로 대용량의 열부하를 제거할 것인가를 최종적으로 결정할 예정이다. 연속운전을 위한 빔라인 부품의 냉각방식은 현재 ITER NB 장치의 설계에도 검증이 필요한 부분인데 실험의 결과는 세계적으로도 인정을 받을 수 있는 부분이다. 전자석은 자체적으로 개발한 BETA code를 이용하여 이온 덤프의 열부하가 1 kW/cm^2 이하가 되도록 설계하여 제작하였고, 액체 He의 공급이 불가능한 원자력연구소에서 Test Stand 의 역할을 수행하기 위해 500000 torr l/sec 배기속도의 Cryosorption Pump를 제작하여 냉각시험을 진행하고 있다.

그 외에 이온원 전원으로 필라멘트전원, 아크전원, 감속전원, 가속전원 등이 제작되어 Test Stand에서 사용되고 있다. 가속전원은 NBI 장치 전체의 가격을 좌우하므로 장치 전체의 비용을 절감하기 위하여 기능보다 성능을 위주로 가격을 절감할 수 있는 방법으로 제작하여 현재 성능을 검증 중에 있다. 전원 및 장치 전체의 제어계는 현재 VME Bus를 기반으로 하여 EPICS를 이용하여 개발하고 있으며, 중성빔의 진단을 위하여 OMA 장치, IR 카메라 장치 등을 구성하였고, 칼로리 메타를 이용한 빔 프로파일을 측정할 수 있는 시스템도 구성중이다. 그 외에 3 MW 연속운전이 가능한 냉각수 순환 시스템과 가속전원의 예비로 80 kV, 120 A를 공급할 수 있는 예비전원을 마련하여 새로 제작하는 가속전원에 문제가 발생하였을 때 사용할 수 있도록 하였다.

2 단계가 KSTAR NB 장치의 구성을 위한 이온원 및 빔라인 부품들의 제작에 있었다면, 3 단계는 개발한 부품들의 300 초 운전에 대비한 시험 및 Upgrade에 있다. 다음 단계에서에서는 Test Stand 에서의 시험 결과를 바탕으로 이온원의 성능을 원하는 정격으로 끌어올리고, 모든 빔라인 부품들의 성능을 300 초 운전이 가능하도록 성능을 보강하여 최종적으로 KSTAR에 장착될 NB 장치들의 부품들을 제작할 것이다.

다. 전원 개발

NBI 1기에는 3개의 이온원이 부착되며 KSTAR 토카막의 중성입자입사 가열에 관한 장기 프로그램에 따르면 전부 3기의 NBI 전조를 계획하고 있다. 각 NBI는 다시 3개의 이온원이 부착된다. NBI 이온원에는 이온빔을 인출하고 필요한 에너지로 가속하기 위하여 4개 그리드 전극으로 구성되는 가속구조가 포함되어 있다. 각각의 해당 전원이 이온원 가속구조(그리드)에 배선되는 관계는 그림3-1-134와 같다. 도면에서 보여지듯이 이온원에 필요한 전원으로는 이온빔 전원계통 외에, 이온생산에 필요한 플라즈마를 발생/유지하기 위하여 아크전원과 필라멘트전원이 있다. 이 두 전원은 스누버(Snubber) 전원과 함께 대지에 대하여 가속전위로 절연/유지되는 고전압 수납대(HV Deck)에 수납된다.

이상의 NBI Power Supply(NBIPS) 시스템에 요구되는 전원장치의 주요한 공통기능으로는 첫째, NBI 시스템에 여러 가지 레벨의 DC 전압을 안정적으로 공급(최소 1% 이하의 안정도)해야 하며 둘째, 출력전압의 조절과 고속 제어가 가능(빠른 turn on/off 시간과 re-trigger 시간의 조정)해야 하며 셋째, Breakdown이 일어났을 때 부하와 전원자체를 동시에 보호해야 하며 넷째, 전원부로부터 이온원까지 낮은 정전용량으로 높은 전압의 전송이 가능해야 하며 다섯째, 고압의 전송선로에 저장되어 있는 정전 에너지의 빠른 방전이 요구된다. 한편, NBIPS 시스템을 구성하고 있는 여러 종류의 전원은 기능적으로는 크게 고전압전원과 대전류전원으로 나누어 볼 수 있는데, 전자로는 가속구조의 그리드에 인가되는 이온빔계통의 전원이고 후자는 이온원 플라즈마 전원이다.

필요한 NBI 이온원에서 발생된 이온들은 10kV/mm 정도의 높은 전계를 갖는 가속구조에 의해서 이온원으로부터 인출/집속/가속된다. 그리드 전극에서의 동작 전계강도가 breakdown 값 근처이도록 하는 것이 효율적인 설계이기 때문에, 빔의 인출 동안에 그리드 전극간에 발생하는 일정 횟수 이내의 breakdown은 NBI의 정상적인 동작으로 간주된다. 단, Breakdown이 일어나는 경우에는 그리드로 인가/누적되는 에너지와 최대 breakdown 전류가 grid에 손상을 주지 않도록 제한되어야 한다. 이를 위해, NBI 주 전원장치로부터 그리드에 인가되고 있는 전류를 고속으로 차단하는 등의 엄격한 보호회로를 갖추어야 하는 일방, 전원과 이온원사이의 전력 전송선을 포함하는 회로상의 전기저장에너지 또한 40J 이내로 엄격히 제한되어야 한다. 즉, 전원장치들을 25 μ s 이내에 turn-off 할 수 있어야 함과 동시에 이로 인한 중성입자빔의 출력 중지가 찰나적이어서 토카막 플라즈마에 미치는 가열 중단효과가 무시될 정도여야 하므로 수 ms 정도의 지정한 휴지시간 후에 역시 25 μ s 이내의 입상시간으로 전원장치들이 재 turn-on 되어야 한다. 이상에서 언급된 한계규격의 수치들은 KSTAR NBI 이온원의 특성과 규격으로부터 주어지는 고유의 값들이다. 이외에도, 보호회로는 빔 전류가 일정의 설정 값 이상을 넘어서도 기능이 작동된다.

참고로, KSTAR 토카막 NBI 가속구조의 4개 그리드 전극의 기능을 아래에 설

명한다. 저항을 통하여 arc chamber와 연결이 되어있는 가속전극 그리드:G1 에는 120kV, 70A의 가속전원에 의하여 전력이 공급되며 수소 또는 중수소 이온들의 인출 및 가속을 담당한다. Beam optics를 조절하는데 도움을 주는 경사전계전극 그리드:G2 전원(Gradient grid:G2 power supply)은 G1의 전위에 비례하여 출력전압이 조절되도록 G1 power supply와 접속되어 있으며 이상적인 정상 운전상태에서는 전류가 흐르지 않으나 기본적으로 양방향 전류가 가능해야 한다. 접지 전위에 대하여 음(-)의 전압을 갖는 감속전극 그리드:G3는 neutralizer 영역에서 생성된 전자들이 이온원쪽으로 역류(back-streaming)하는 것을 억제하는 전압장벽을 제공한다. 마지막으로 출구전극 그리드(Exit grid):G4 는 전기적으로 neutralizer에 연결되어 있으며, 접지 전위에서 이온을 dump 한다.

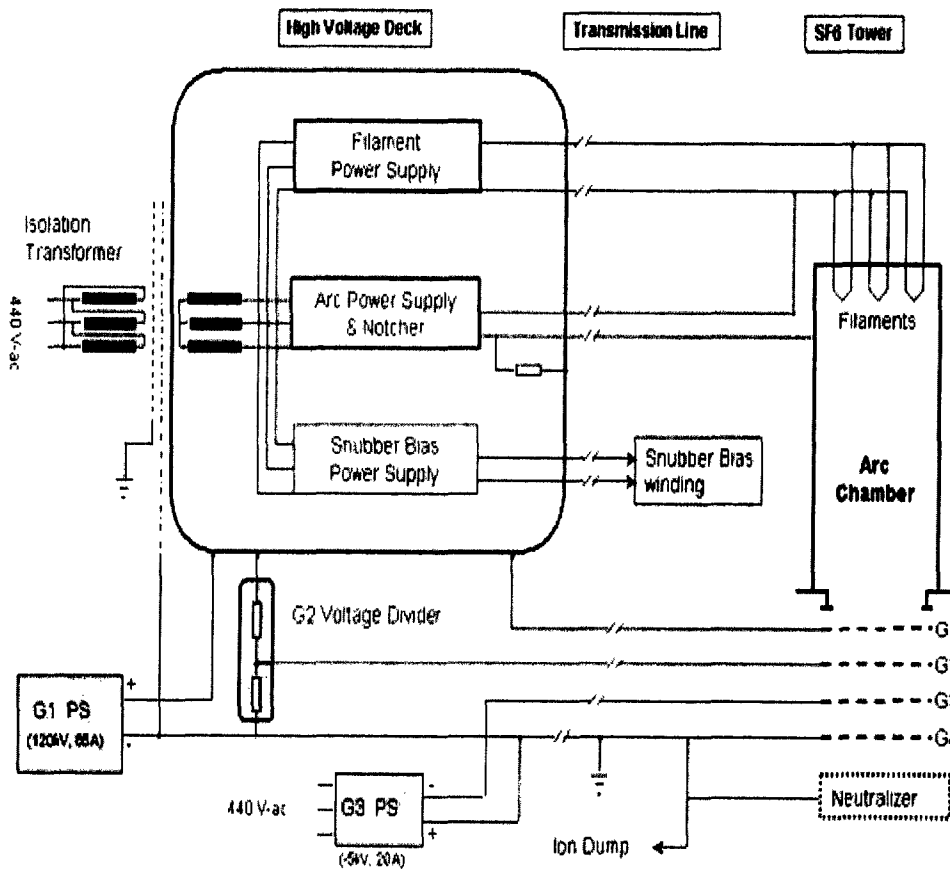


그림3-1-134 Interconnection diagram for NBI power supplies.

(1) Filament 전원

(가) 시스템 개요

Arc Chamber의 Filament에 전원을 공급하는 장치로서, 직류 15V, 5500A를 출력 할 수 있다. 고주파 인버터 방식을 채택함으로써, 제품의 크기를 최소화함과 동시에 입력/출력간에 전기적으로 절연되기 때문에 시스템의 안정성을 개선할 수 있다. 15Vdc/1000A를 출력할 수 있는 고주파 인버터 모듈을 기본으로하여 6개 모듈의 병렬로 구성 한다. 출력 전압은 0~15Vdc의 범위에서 연속 가변되며, 출력 전류는 연속 정격 3200A와 5500A/6sec 펄스 정격을 갖는다. 설치, 시운전 및 유지 보수를 위하여, Panel내에는 입력 전압을 투입하는 입력 NFB스위치가 있다. 윗면에는 삼상 입력 전원용 Busbar가, 좌측면에는 DC 출력용 Busbar가 설치되어 있으며, 시스템의 방열을 위하여 상단에 Fan이 설치되어 있다.

(나) 시스템 사양

- 입력 사양

상 수	3상
입력 주파수	40~120Hz
정격 입력 전압	AC 200V
전압 변동률	±20%

- 출력 사양

정격 출력	48 KW
출력 전압	0~15Vdc 가변
출력 전류	3200A CW 5500A for 6sec
Voltage Regulation	5% 이하
Current Ripple	2% 이하
Pulse Width	350Sec/30min
Current Rise to 5500A	30ms 이하
Current fall from 3200A	30ms 이하

- 보호 기능 사양

Controller Power fault
Filament P/S Thermal fault
MC fault
Filament P/S FUSE fault

Notch Overflow fault
Filament P/S DC Voltage low
GDU fault
PARAMETER is not Valid

(다) Filament Power Supply의 동작

NBI를 위한 Arc Chamber의 Filament Power Supply, POSFPS-3200의 전면부 및 후면부는 도면에 따른다. Arc Chamber의 Filament에 전원을 공급하여 운전하기 위하여는 다음의 사용법에 따른다.

- 1) 장치의 상단에 설치되어 있는 AC Input Terminal에 AC 200V 60Hz 전원을 연결한다.
- 2) 장치의 좌측면에 설치되어 있는 DC Output Busbar에 Filament 부하를 연결한다.
- 3) 입력 전원 NFB를 On 한다.
- 4) Control 전원 NFB를 On 한다.
- 4) LCP Controller Unit에서 조정한다.
- 5) 입력전원 NFB를 OFF 한다.

(2) Arc 전원

(가) 시스템 개요

ARC Power Supply +출력 단자는 긴 Cable를 통하여 ARC Chamber의 몸체에 결선되고, -출력 단자는 Arc Chamber의 Filament에 결선되어 사용된다. 안정된 Beam 전류를 위하여 ARC Power Supply의 전류가 정밀하게 제어되고, 안정하게 유지된다.

NBIS가 오동작을 하면, Discharge Current는 Arc Power Supply 양단을 통하여 급격히 흡수될 수 있도록 하였다.

구성은 크게 정류부, Chopper부, Nocher 부, Crowbar부, Surge Absorber부 및 제어부등 크게 6개 블럭으로 구분되며 일반적인 Power Supply와는 다르게 fast control을 위하여 IGBT를 이용한 Chopper와 Fast Discharge를 위한 Nocher의 동작이 매우 중요성을 갖는다.

설치, 시운전 및 유지 보수를 위하여, 전면 Panel에는 입력 전압을 투입하는 입력 NFB스위치가 있다. 출력 전류 및 전압값은 Monitoring을 위하여 BNC Jack이

장착되어 있으며 각각 5V/2000A, 5V/500V DC의 비율로 Analog값이 출력된다. 이 출력은 Isolation Amp를 통하여 절연되어 있으므로 Oscilloscope로 측정하기에 편리하도록 되어 있다.

윗면에는 삼상 입력 전원용 Busbar가, 측면에는 DC 출력용 Busbar가 설치되어 있으며, 시스템의 방열을 위하여 Fan이 설치되어 있다.

(나) 시스템 사양

- 입력 사양

상 수	3상
입력 주파수	40~120Hz
정격 입력 전압	AC 200V
전압 변동률	±20%

- 출력 사양

정격 출력	192 KW
출력 전압	80~160Vdc 가변
출력 전류	1200Adc CW
Current Ripple	1% 이하
Pulse Width	320Sec/30min
Current Rise t0 1200A	30ms 이하 at start 1ms 이하 during operation
Current fall from 1200A	0.1ms 이하
End of discharge	0.1~10ms 가변

- 보호 기능 사양

- Controlier Power fault
- ARC P/S Thermal fault
- MC fault
- ARC P/S FUSE fault
- Notch Overfiow fault
- ARC P/S DC Voltage low
- GDU fault or Over Current fault
- PARAMETER is not Valid

(다) ARC Power Supply의 구성 동작

(다)-1. 구성

(다)-1.1. 입력 및 정류부

입력 및 정류부는 3상 220V를 인입받아 NFB와 Surge Suppressor를 거쳐 삼상 전파 브리지 정류를 하여 직류 전원을 얻는다. 입력 및 정류부는 초기 기동시의 돌입 전류를 억제하고 DC Link의 이상 과전압을 방지하기 위하여 Pre-Charge 회로를 갖는다. 또한, DC Link Reactor와 DC Capacitor에 의해 고조파를 제거하여 안정된 직류 전원을 갖는다.

(다)-1.2. Chopper 부

Chopper부는 정류부에 의해 얻어진 직류 전원을 Arc Chamber의 운전에 적합한 전압/전류를 얻을 수 있도록 Arc Power Supply의 출력 전압을 가변한다. Chopper부는 기본적으로 대용량 IGBT와 Chopping Reactor로 구성된다. 그리고, Arc Power Supply의 기본적인 운전은 DC Chopper부에 의해 이루어진다.

(다)-1.3. Notcher

Nocher는 NBIS가 이상 동작시 Arc Chamber를 매우 빠르게 Discharge 시키기 위한 것이다. 즉, Discharge 전류 Path를 신속히 형성 시켜줌으로써 NBIS를 보호하고, 다시 정상 운전으로 신속히 회복시킬 수 있도록 한다. 이 Nocher는 IGBT를 기본으로 하여, Gate Driver, Snubber로 구성된다.

(다)-1.4. Crowbar

Crowbar는 NBIS가 이상 동작을 하거나, Arc Power Supply의 출력 단자에 이상 과전압이 인가되어 시스템을 정지하고자 하는 경우에 Crowbar를 동작시켜 Arc Chamber를 빠르게 Discharge 시키고, 시스템을 신속하게 정지하도록 한다. 이 Crowbar는 Thyristor를 기본으로 하여, Gate Driver로 구성된다.

(다)-1.5. Surge Absorber

Surge Absorber는 Chamber로 부터의 Surge 유입을 흡수하고, Nocher의 동작시 발생하는 surge를 흡수하여 시스템을 보호한다.

(다)-2. 각 조작부 작동요령

NBI를 위한 Arc Power Supply, POSAPS-1200의 전면부 및 후면부는 도면에 따른다. Arc Chamber의 Filament에 전원을 공급하여 운전하기 위하여는 다음의 사용법에 따른다.

가) 설치

- 1) 장치의 상단에 설치되어 있는 AC Input Terminal에 AC 200V 60Hz 전원을 연결한다.

- 2) 장치의 우측면에 설치되어 있는 DC Output Busbar에 Filament 부하를 연결 한다.
- 3) 입력 전원 NFB를 On 시킨다.
- 4) Control 전원 NFB를 On 시킨다.
- 5) LCP Controller Unit에서 조정한다.
- 6) 입력 전원 NFB를 Off 한다.

(라) Local Controller Panel - LCP

(라)-1. 개요

그림 3-1-135는 ARC P/S, Filament P/S, ACB Panel, High Voltage Isolation TR, Local Control Panel(LCP) 및 제어/ Monitoring용 IBM PC의 전체 연결 도이다. ARC P/S와 Filament P/S 시스템의 Controller는 주장치와 110KV절연되어 저압측 전위에 있으며 LCP(Local Controller Panel)에 수납되어 있다. LCP는 또한 주장치의 전원을 개폐하고 절연 Transformer의 입력 전압/ 전류를 모니터링할 수 있는 ACB Control Panel과 각종 제어 및 Monitoring 신호를 입출력하는 BNC Panel도 포함하고 있다. Filament P/S Controller와 ARC P/S Controller는 Host Computer와 RS232C Serial Port로써 연결되어 있어 조작자는 IBM PC상에서 제어 기내의 각종 제어변수의 확인 및 변경, 동작 상태 및 각 부 전류 및 전압 등의 Monitoring을 할 수 있다. Filament P/S Controller와 ARC P/S Controller는 IBM PC와 연결되어 있지 않으면 동작하지 않으며 운전 중 통신이 정상적으로 이루어지지 않으면 3초 이내에 운전이 자동 정지된다.

(라)-2. Filament P/S Controller 외함

그림 3-1-137은 Filament P/S Controller의 외함을 보여준다.

- (1)은 라벨 명이 "VOLTAGE PV"로서 Filament P/S의 현재 출력 전압을 표시한다.
- (2)는 라벨 명이 "VOLTAGE SV"로서 Filament P/S의 출력 전압 설정치를 표시한다.
- (3)는 라벨 명이 "CURRENT PV"로서 Filament P/S의 현재 출력 전류를 표시한다.
- (4)는 라벨 명이 "CURRENT SV"로서 Filament P/S의 출력 전류 설정치를 표시한다.
- (5)는 라벨 명이 "VOLTAGE"로서 Filament P/S의 전압에 의한 과전압 비교 기준 설정치를 표시한다. 또한, 시스템이 운전 중 동작 불가상태로 정지하였을 때 Fault Code를 표시한다. 각 코드별 운전 불가 원인은 다음과 같다.

- | | |
|---------|----------------------------|
| EF-10 : | Controller Power fault |
| EF-11 : | Filament P/S Thermal fault |

- EF-12 : MC fault
- EF-13 : Filament P/S FUSE fault
- EF-14 : Notch Overflow fault
- EF-15 : Filament P/S DC Voltage low
- EF-16 : GDU fault
- EF -17: PARAMETER is not Valid

(6)는 라벨 명이 "CURRENT"로서 Filament P/S의 과전류 비교 기준 설정치를 표시한다.

(7)은 라벨 명이 "RUN"으로서 동작상태임을 표시하는 램프이다.

(8)은 라벨 명이 "STOP"으로서 정지상태임을 표시하는 램프이다.

(9)는 라벨 명이 "FAULT"로서 시스템이 운전 중 동작 불가상태로 정지하였음을 표시하는 램프이다.

(10)은 제어전원이 인가된 상태임을 표시하는 램프이다.

(11)은 제어전원 스위치이다.

(12)는 라벨 명이 "RUN"으로서 동작 개시를 명하는 스위치이다.

(13)는 라벨 명이 "STOP"로서 동작 정지를 명하는 스위치이다.

(14)는 라벨 명이 "RESET"으로서 시스템이 동작 불가상태로 정지하였을 때 이를 해제하는 스위치이다.

(15)는 RS232C Serial Port로서 (19)와 공통으로 연결되어 있다.

(16)은 라벨 명이 "REMO/ LOC"로서 전류 및 전압 명령을 IBM PC로부터 받을 것인지 혹은 BNC입력으로부터 받을 것인지를 선택하는 스위치이다.

(17)은 라벨 명이 "VOLT/ CURR"로서 전압/ 전류모드 전환 스위치이다.

(18)은 라벨 명이 "ARC TEST/ NORMAL"로서 "ARC TEST"로 전환 되어 있을 때는 ARC P/S 단독으로 동작하여 ARC P/S만을 시험할 때 사용되며, "NORMAL"로 전환 되어 있을 때는 Filament P/S와 ARC P/S 모두 동작한다.

(20)과 (21)은 광커넥터 연결부이며 (21)은 함을 열고 내부에서 연결하여야 하고 (20)은 외부에서 연결한다.

//주의// 광케이블은 광신호가 정상적으로 전달되게 하기 위하여 반경이 30mm 이상으로 유지될 수 있도록 해야한다.

(22)는 라벨 명이 "ARC RUN"이며 Filament P/S Controller로부터 ARC P/S controller로 보내는 ARC P/S의 동작 혹은 정지를 명하는 신호이며 TTL 레벨 신호이다.

(23)은 라벨 명이 "ACC"이며 Filament P/S Controller로부터 ARC P/S Controller로 보내는 Filament P/S의 전류 보상신호이며 전류원 형태의 Analog 신호이다.

(24)는 Filament P/S Controller의 220V 단상 전원이다.

(25)는 BNC Panel과 연결되는 BNC 인출구이다.

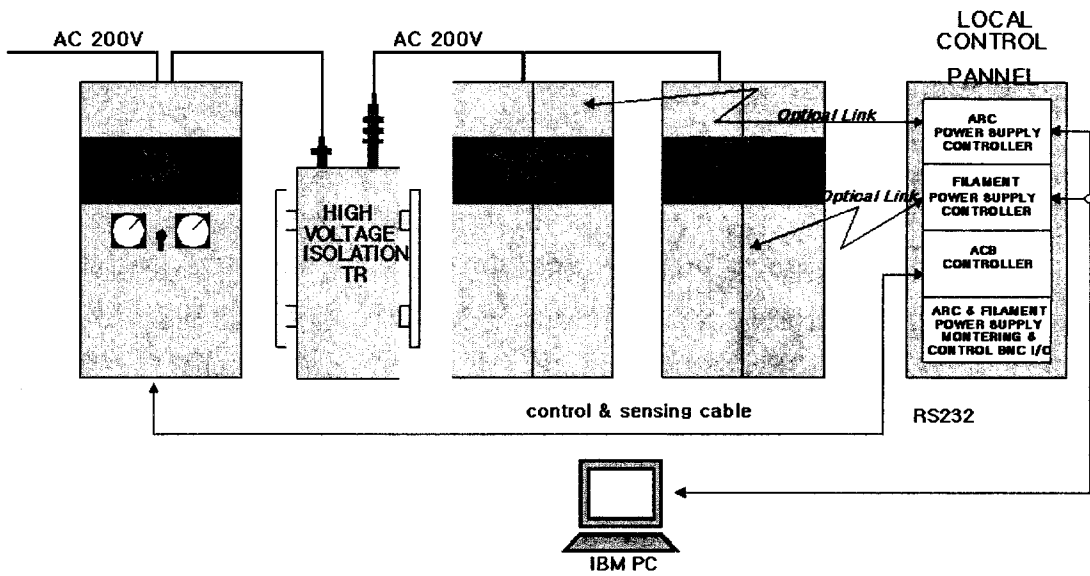


그림 3-1-135 Filament P/S and ARC system connection diagram.

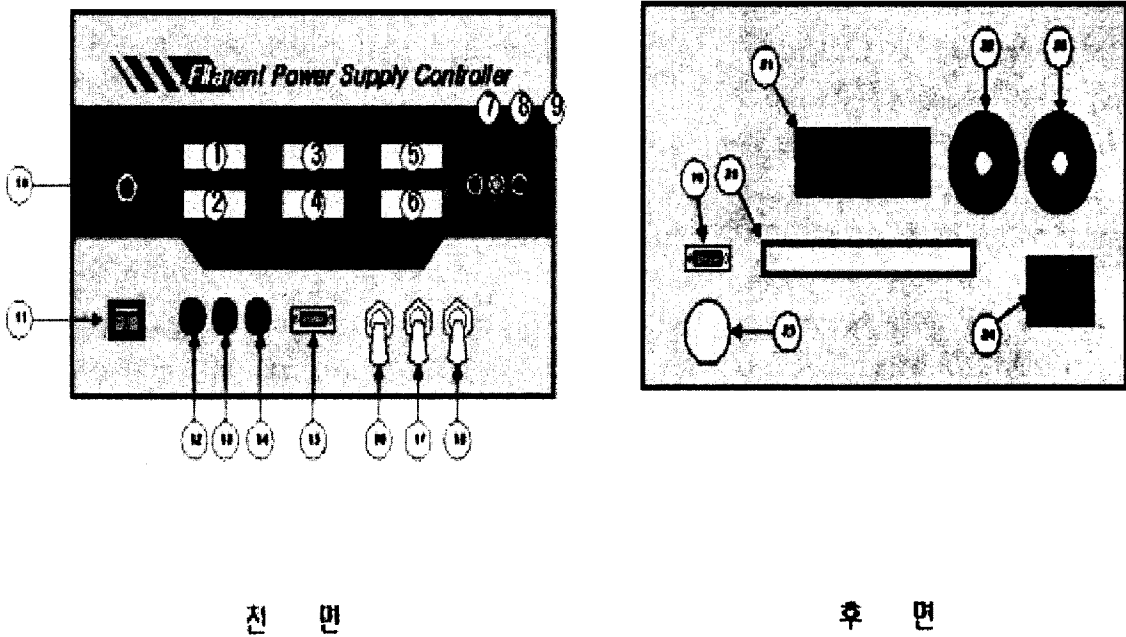


그림 3-1-136 Filament Power Supply Controller 외함

(라)-3. ARC P/S Controller 외함

그림 3-1-137은 ARC P/S Controller의 외함을 보여준다.

- (1)은 라벨 명이 "VOLTAGE PV"로서 ARC P/S의 현재 출력 전압을 표시한다.
- (2)는 라벨 명이 "VOLTAGE SV"로서 ARC P/S의 출력 전압 설정치를 표시한다.
- (3)는 라벨 명이 "CURRENT PV"로서 ARC P/S의 현재 출력 전류를 표시한다.
- (4)는 라벨 명이 "CURRENT SV"로서 ARC P/S의 출력 전류 설정치를 표시한다.
- (5)는 라벨 명이 "CURRENT"로서 ARC P/S의 전압에 의한 Notch판단 비교 전압 기준 설정치를 표시한다. 또한, 시스템이 운전 중 동작 불가상태로 정지하였을 때 Fault Code를 표시한다. 각 코드별 운전 불가 원인은 다음과 같다.

EF-10 :	Controller Power fault
EF-11 :	ARC P/S Thermal fault
EF-12 :	MC fault
EF-13 :	ARC P/S FUSE fault
EF-14 :	Notch Overflow fault
EF-15 :	ARC P/S DC Voltage low
EF-16 :	GDU fault or Over Current fault
EF-17 :	PARAMETER is not Valid

- (6)는 라벨 명이 "CURRENT SV"로서 Filament P/S의 전류에 의한 Notch판단 비교 전류기준 설정치를 표시한다.
- (7)은 라벨 명이 "RUN"으로서 동작상태임을 표시하는 램프이다.
- (8)은 라벨 명이 "STOP"으로서 정지상태임을 표시하는 램프이다.
- (9)는 라벨 명이 "FAULT"로서 시스템이 운전 중 동작 불가상태로 정지하였음을 표시하는 램프이다.
- (10)은 라벨 명이 "NOTCH"로서 Notching 동작중일 때 켜진다. Notcher는 운전 중 Notching동작 시에 켜질 뿐만 아니라 정상적으로 시스템이 정지하고있을때에도 켜져 있다.
- (11)은 라벨 명이 "CROW"로서 Crowbar가 동작하고 있을 때 켜진다.
- (12)는 제어전원이 인가된 상태임을 표시하는 램프이다.
- (13)은 제어전원 스위치이다.
- (14)는 라벨 명이 "NOTCH TEST"로서 누르고있으면 1초에 한번씩 Notching 동작을 하게 하는 스위치이다. Notcher를 시험할 때 사용된다.
- (15)는 라벨 명이 "RESET"으로서 시스템이 동작 불가상태로 정지하였을 때 이를 해제하는 스위치이다.
- (16)은 RS232C Serial Port로서 (19)와 공통으로 연결되어 있다.
- (17)은 라벨 명이 "REMO/ LOC"로서 전류 및 전압 명령을 IBM PC로부터 받을

것인지 혹은 BNC입력으로부터 받을 것인지 선택하는 스위치이다.

(18)은 라벨 명이 “VOLT/ CURR”로서 전압/ 전류모드 절환 스위치이다.

(20)과 (21)은 광커넥터 연결부이며 (21)은 함을 열고 내부에서 연결하여야 하고 (20)은 외부에서 연결한다.

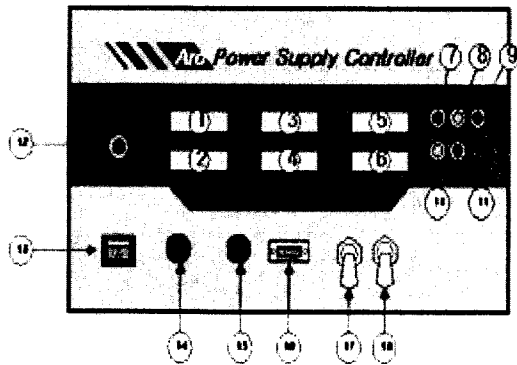
//주의// 광케이블은 광신호가 정상적으로 전달되게 하기 위하여 반경이 30mm 이상으로 유지될 수 있도록 해야한다.

(22)는 라벨 명이 “ARC RUN”이며 Filament P/S Controller로부터 ARC P/S controller로 보내는 ARC P/S의 동작 혹은 정지를 명하는 신호이며 TTL 레벨 신호이다.

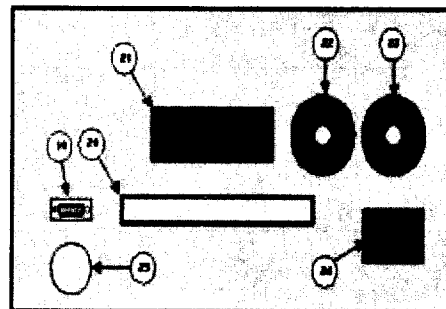
(23)은 라벨 명이 “ACC”이며 Filament P/S Controller로부터 ARC P/S Controller로 보내는 Filament P/S의 전류 보상신호이며 전류원 형태의 Analog 신호이다.

(24)는 ARC P/S Controller의 220V 단상 전원이다.

(25)는 BNC Panel과 연결되는 BNC 인출구이다.



전 면



후 면

그림 3-1-137 ARC Power Supply Controller 외함

(라)-4. Filament P/S 전류 및 전압 변환비

신호명	AD Channel	실제값	검출값	CPU 내부 계산치
DC Link Voltage(DCPT1)	AIN0	500V	5V	5000
ARC Current Compensation	AIN1	2000A	5V	2000
Output Current(DCCT1)	AIN2	1000A	5V	1000
Output Voltage(DCPT2)	AIN3	50V	5V	500
External Current Command BNC Input(FIc)	AIN4	1000A	5V	1000
External Current Command BNC Input(FVc)	AIN5	50V	5V	500

(라)-5. ARC P/S 전류 및 전압 변환비

신호명	AD Channel	실제값	검출값	CPU 내부 계산치
DC Link Voltage(DCPT1)	AIN0	500V	5V	5000
Output Current(DCCT1)	AIN1	2000A	5V	2000
Output Current (DCCT2)	AIN2	2000A	5V	2000
Output Voltage(DCPT2)	AIN3	500V	5V	500
External Current Command BNC Input(AIc)	AIN4	2000A	5V	2000
External Current Command BNC Input(AVc)	AIN5	500V	5V	500

(라)-6. LCP의 BNC 단자함

그림 3-1-138은 LCP내의 BNC 단자함의 전면 외형도 이다.

- ARC P/S - Monitoring Output

AI : Arc current(DCCT2)

AIr : Arc current reference

AIo : DCCT1

AV : Arc voltage
 AVr : Arc voltage reference
 AM1 : spare
 ARC P/S - Control Input
 AIc : External Arc current reference signal input
 AVc : External Arc voltage reference signal input
 NTc1 - 3 : 3channel TTL in (short to ground active)
 Trip : Arc P/S Trip input (short to ground active)
 ARC P/S - Control Output
 NTI : TTL output showing Notch Event caused by current limit
 , High(5V) Active
 NTV : TTL output showing Notch Event caused by voltage limit
 High (5V) Active
 ATT : TTL output showing Arc P/S Trip
 NTT : TTL output that the number of notch event is over the setting
 during the shot
 Filament Monitoring Output
 FI : Filament current(DCCT1)
 FIr : Filament current reference
 FV : Filament voltage
 FVr : Filament voltage reference
 FM1 -2 : spare
 Filament P/S - Control Input
 FIc : External Filament current reference signal input
 FVc : External Filament voltage reference signal input
 Trip : Filament P/S Trip input (short to ground active)
 Filament P/S - Control Output
 NTI : TTL output showing Notch Event caused by current limit,
 High(5V) Active
 NTV : TTL output showing Notch Event caused by voltage limit,
 High(5V) Active
 ATT : TTL output showing Arc P/S Trip
 NTT : TTL output showing that the number of notch event is over
 the setting during the shot
 TRG : Filament P/S start trigger output TTL output.

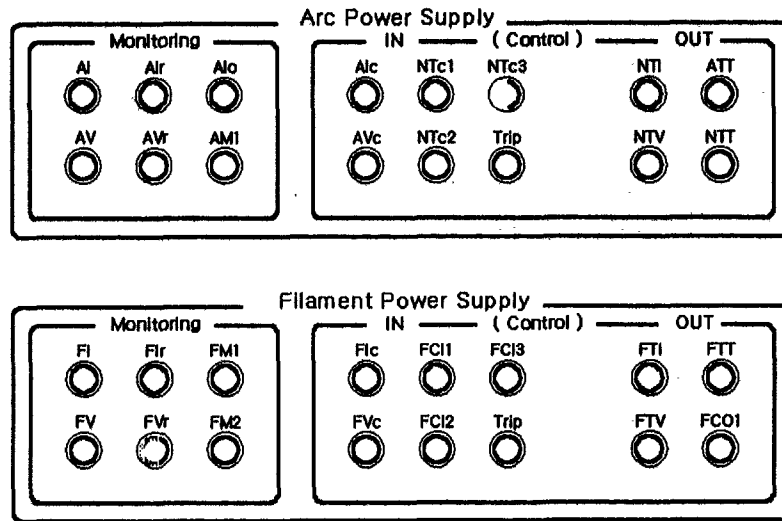


그림 3-1-138 BNC Panel 의함

(라)-7. IBM PC측의 제어 및 Monitoring 변수

먼저 Serial Port의 사용이 가능한 IBM PC와 제공된 RS232C Serial Port로 그림3-1-139 와 같이 연결한다.

Serial Port의 종단은 PC, FIL, ARC라는 라벨이 각 각 붙어있다. PC라벨의 커넥터는 IBM PC측에, FIL라벨의 커넥터는 Filament P/S Controller에, ARC라벨의 커넥터는 ARC P/S Controller에 각 각 연결한다. 한편 Filament P/S Controller와 ARC P/S Controller의 통신 포트는 전면과 후면에 각 각 있으며 전면 혹은 후면의 포트중 어느 것을 사용해도 좋다. 그림 3-1-140은 RS232 Serial Port Cable 연결도 이다.

IBM PC상의 프로그램은 NBLEXE이며 DOS Version으로 작성되어 있다. 이 파일을 운용하고자 하는 Directory내에 복사하는 것으로 간단히 설치된다.

Filament P/S Controller와 ARC P/S Controller의 후면 좌측에는 각 각 ARC RUN과 ACC라는 라벨이 붙은 BNC 커넥터가 있는데 제공된 BNC 케이블을 사용하여 연결한다. 또한 광케이블은 라벨된 대로 도면을 참조하여 연결하되 일부 광 커넥터는 Controller의 내부에서 연결해야한다. 광케이블은 반경 30mm이하로 꺾여지면 광의 전송이 원활하지않게되어 시스템이 오동작 할 수 있으므로 주의해서 설치해야한다. 전원은 역시 제공된 전원 케이블을 사용하여 AC 220V 단상에 연결한 후 전면의 전원 스위치를 켜는다.

주전원은 설치도면을 참조하여 연결하고 전원조작 패널의 주전원을 스위치를 켜 후 LCP 패널의 전원 제어스위치를 켜서 주장치에 전원이 공급되게 한다.

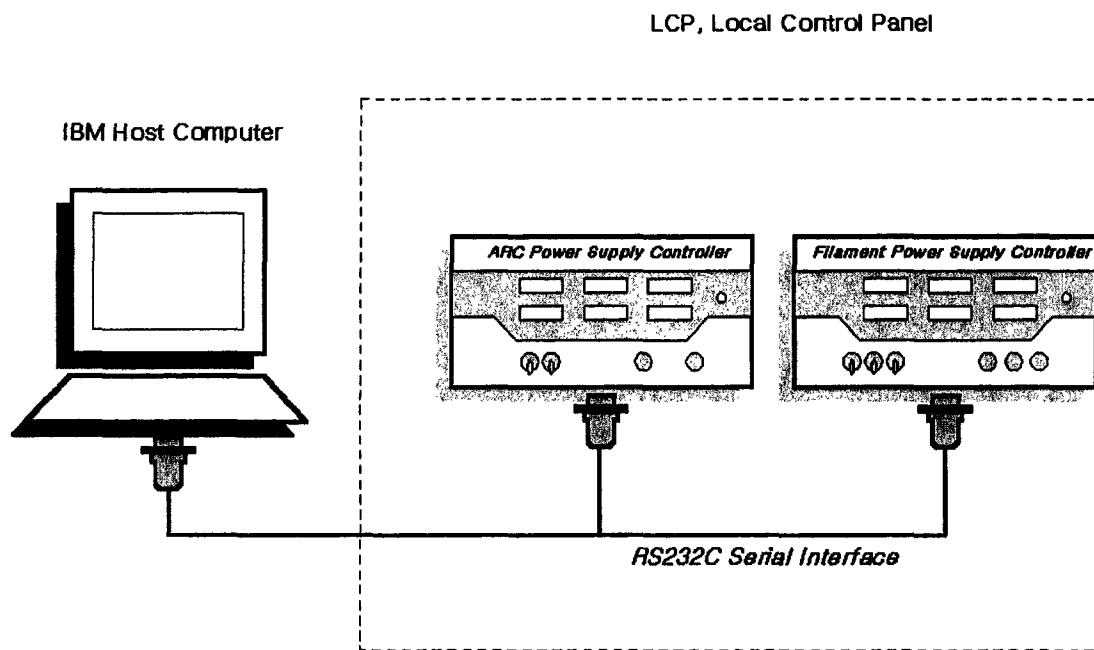


그림 3-1-139 ARC P/S, Filament P/S 및 IBM PC의 연결도

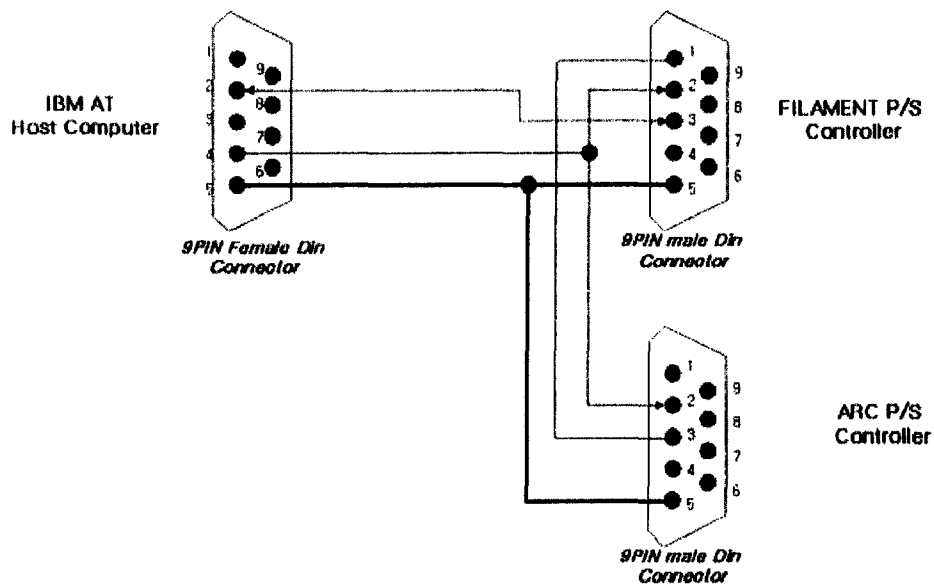


그림 3-1-140 RS232C 통신 케이블 연결도

[NBLEXE의 사용법]

IBM PC상의 NBLEXE를 실행시키면 그림 3-1-141과 같이 화면에 나타난다. 여기서 INTEGRATED라는 상자아래는 Filament P/S와 ARC P/S를 통합 제어하는데 필요한 변수들이며, ARC P/S와 FILAMENT P/S 상자의 아래는 각각 ARC P/S와 Filament P/S의 동작에 필요한 변수들이다.

블록①은 제어변수와 모니터링 변수들로 함께 구성되며 이들 중 청색 상자는 변경이 불가능한 모니터링 변수들이고 녹색 상자는 원격/ 로컬제어 혹은 전류/ 전압모드 여부를 나타내 주며 Controller의 전면에 위치한 “REMO/ LOC” 스위치와 “VOLT/ CURR” 스위치를 절환하면 그에 따라 변한다. 나머지 상자의 변수들은 키보드에 의하여 변경 가능한 변수들이다. 블록①은 키보드상의 상하/ 좌우 커서에 의하여 선택을 이동시킬 수가 있으며, 이에 의해 선택된 변수는 숫자부분이 블록④와같이 적색으로 변한다.

또한 이렇게 선택된 변수의 설명, 변수의 범위 및 값의 변경 방법이 블록⑦에 표시된다. 블록⑦의 하단에는 선택된 변수의 변경방법이 표시된다. 아무표시가 없으면 변경 불가능한 변수이고, “[CTRL-ENT]:Change, [ESC]:No Change” 라고 표시되어 있으면 수치를 증감할 수 있는 변수이며, “[CTRL-ENT]:Reset, [ESC]:No Change” 라고 표시되면 0으로 초기화 할 수 있는 변수이다.

숫자의 변경이 가능한 변수는 다음과 같은 순서로 변경한다. 우선 커서를 사용하여 상하/ 좌우로 선택을 옮겨 변경하고자 하는 변수의 상자의 숫자가 적색이 되게 한다. “CTRL - Enter” 키(CTRL키를 누른 상태에서 Enter키를 누름)를 누르면 숫자가 깜빡인다. 이 상태에서 “↑” 키나 “↓” 키를 누르면 숫자부분의 최하위 자리 숫자가 증감되며, CTRL키와 동시에 “↑” 키나 “↓” 키를 누르면 숫자부분의 최하위에서 두 번째 자리 숫자가 증감되고, CTRL키와 동시에 “→” 키나 “←” 키를 누르면 숫자부분의 최하위에서 세 번째 자리 숫자가 증감된다. 변경도중 변경을 확정하려면 “CTRL - Enter” 키를, 취소하려면 ESC키를 누르면 된다.

0으로 초기화만이 가능한 변수의 변경은 다음과 같이 한다. CTRL키를 누른 상태에서 Enter키를 누르면 변수의 숫자가 0이 되면서 깜빡인다. 이를 확정하려면 CTRL - Enter키를, 취소하려면 ESC키를 누르면 된다.

블록⑨는 현재의 날짜 및 시간을 표시한다.

블(4)는 라벨 명이 “CURRENT SV”로서 Filament P/S의 출력 전류 설정치를 표시한다.

(5)는 라벨 명이 “VOLTAGE”로서 Filament P/S의 전압에 의한 과전압 비교 기준 설정치를 표시한다. 측에 위치한 누름 스위치에 의하여도 가능하다.

ARC & FILAMENT POWER SUPPLY for NBI ION SOURCE _by // P O S C O N //

①	TIME 0.0[S]		AVL 0[V]		IVR1 0.0[V]
②	TFH 0.0[S]		AVR 0[V]		IVR2 0.0[V]
③	IT1 0.0[S]	ASD 0	ACL 0[A]	FSD 0	FVR 0.0[V]
③	IT2 0.0[S]	ADC 0[V]	ACR 0[A]	FDC 0[V]	FCL 0[A]
④	TAS [S]	AV 0[V]	NT10.00[mS]	FV 0[V]	FIC 0[A]
④	TAE 0.0[S]	A 0.0[A]	WNN 0	F 0.0[A]	FCR 0[A]
	TFS0.0[mS]	ADD 0.0[S]	NNE 0	FOT 0[Hr]	
⑤		AOT 0[Hr]	Gdel 0.0	FRT 0[Hr]	
	IAT 0[Hr]		Garc 0.0	FVL 0.0[V]	
⑥				10/17/1998 10:32:59	⑨
⑦	Timing of ARC Start			0.0 ~ 999.9[S]	
	[CTRL-ENT]: Change, [ESC]: No Change				
⑧	ALT-F1 START ALT-F2 STOP ALT-F3 RESET ALT-F10 COM1 ALT-X EXIT				

그림 3-1-141 IBM PC상의 감지 및 제어프로그램, NBLEXE 화면

[ARC Power Supply 제어 및 Monitoring 변수]

RO : Read only

RE : Resettable

AS : Arbitrarily Settable

PS : Settable by Panel Switch

ACMD(RO, PS): command 입력 선택, REMOTE(PC) / LOCAL(BNC)

AMOD(RO, PS): command 입력 모드, VOLTAGE / CURRENT

ASD(RO) : 동작 상태

0 : Standby

1 : Running

10 : Controller Power fault

11 : ARC P/S Thermal fault

12 : MC fault

13 : ARC P/S FUSE fault

14 : Notch Overflow fault

15 : ARC P/S DC Voltage low

16 : GDU fault or Over Current fault

17 : PARAMETER is not Valid

ADC(RO) : 인버터 직류전압

AV(RO) : 현재 출력 전압

AI(RO) : 현재 출력 전류

ADD(RO) : ARC Discharge Duration

AOT(RO) : ARC Operation Time

IAT(RE) : Ion Source ARC Time

AVL(AS) : Notch 전압 설정 레벨

AVR(AS) : 전압 command

ACL(AS) : Notch 전류 설정 레벨

ACR(AS) : 전류 command

NTI(AS) : Notch Time Interval

WNN(AS) : Warning Number of Notch Event

NNE(RE) : Number of Notch Event

Gdel(AS) : ARC 전류 보상 이득 (그림3-1-142 참조)

Garc(AS) : ARC 전류 보상 이득 (그림3-1-142 참조)

[Filament Power Supply 제어 및 Monitoring 변수]

RO : Read only

RE : Resettable

AS : Arbitrarily Settable

PS : Settable by Panel Switch 및 제어변수

FCMD(RO, PS): command 입력 선택, REMOTE(PC) / LOCAL(BNC)

FMOD(RO, PS): command 입력 모드, VOLTAGE / CURRENT

FSD(RO) : 동작 상태
0 : Standby
1 : Running
10 : Controller Power fault
11 : Filament P/S Thermal fault
12 : MC fault
13 : Filament P/S FUSE fault
14 : Notch Overflow fault
15 : Filament P/S DC Voltage low
16 : GDU fault
17 : PARAMETER is not Valid

FDC(RO) : 인버터 직류전압

FV(RO) : 현재 출력 전압

FI(RO) : 현재 출력 전류

FOT(RO) : Filament Operation Time

FRT(RE) : Filament Running Time

FVL(AS) : 과전압 검출 설정 레벨

IVR1(AS) : 초기 Filament 가열시 인가전압#1

IV2R(AS) : 초기 Filament 가열시 인가전압#2

FVR(AS) : Arcing시 전압 지령

FCL(AS) : 과전류 검출 설정 레벨

FIC(AS) : 초기 Filament 가열시 인가전류

FCR(AS) : Arcing시 인가전류

[통신에러가 계속될 경우 조치사항]

1. 통신포트 COM1 혹은 COM2가 적절히 선택되었는지 확인하고 ALT-F10키를 사용하여 다시 설정한다.
2. 사용중인 PC의 통신 포트가 고장일 수 있으므로 COM2로 바꾸어 연결하고 ALT-F10키를 사용하여 다시 설정한다.

3. PC의 전원을 껐다가 다시 부팅 시키고 동작시켜본다.
4. PC의 통신포트가 정상인지 다음과 같이 확인한다.

포트의 2번과 3번 핀을 전선으로 연결하고 ALPS.EXE를 실행시키고 키를 눌러 누른 키가 화면에 표시되는지 확인한다. 만일 화면에 표시가 안되면 ALT-F10키를 사용하여 포트를 바꾸고 다시 위와 같이 확인한다. 그래도 화면에 아무 표시가 안 나타나면 포트의 일시 기능 정지된 상태이거나 고장난 경우이다. 전원을 끈 후 약 10초 후에 다시 켜서 위의 시험을 다시 하고 그래도 정상이 아니면 포트가 고장난 것이다.

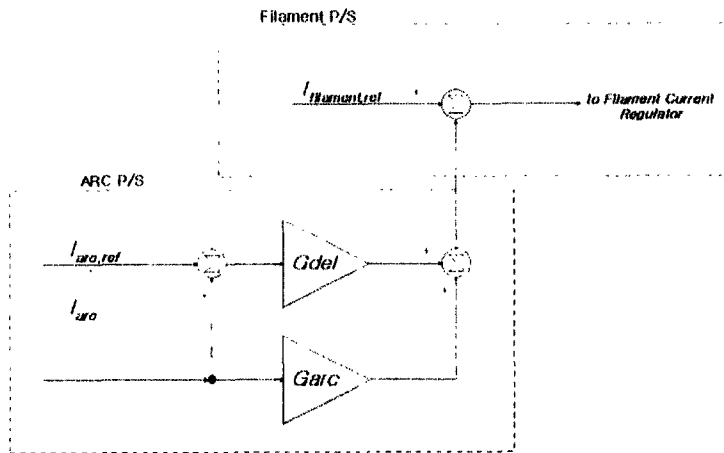


그림 3-1-142 Filament P/S 전류의 ARC 전류 보상

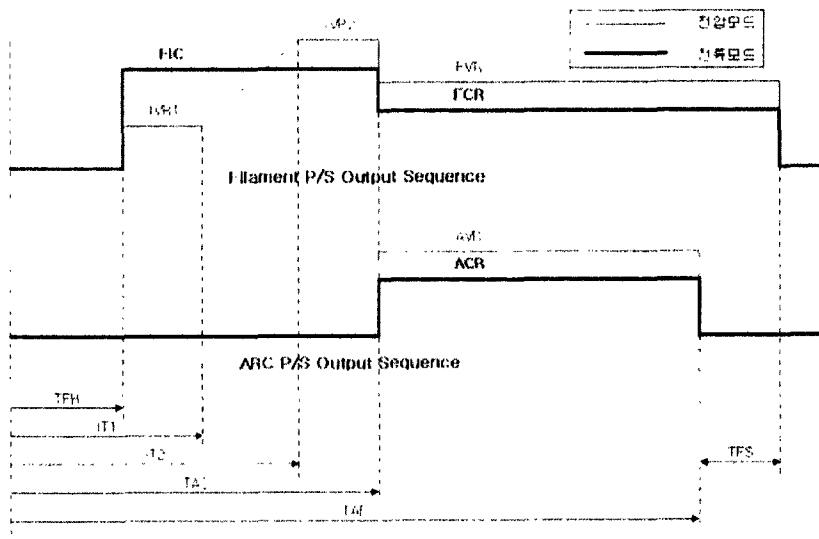


그림 3.1.30.(2)-9. Filament 및 ARC P/S의 동작 시퀀스

그림 3-1-143 Filament 및 ARC P/S의 동작 시퀀스

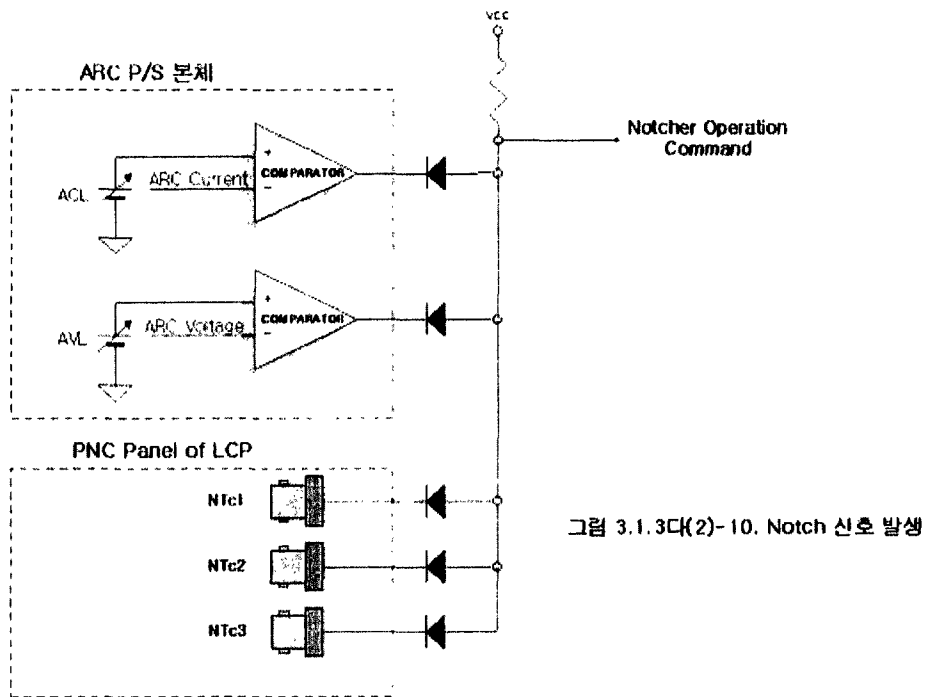


그림 3.1.3다(2)-10. Notch 신호 발생

그림 3-1-144 Filament 및 ARC P/S의 동작 시퀀스

(3) Gradient Grid Resistor Bank

Gradient Grid (G2)에 인가하는 전압을 조정하여, 인출되는 빔의 집속(focusing)을 조절할 수 있다. Gradient Grid에 인가되는 고전압은 가속전압(accelerating voltage, G1=120 kV)의 출력단에 저항 전압분배기(resistive voltage divider)를 설치하여 이로부터 나오는 출력전압을 사용하며, 가속전압의 약 75~90%의 전압을 가변하면서 사용할 수 있도록 제작하였다. 저항은 함(bank)의 내부와 외부에 직·병렬로 배열하여 사용할 수 있도록 제작하였으며, 전압이 인가되는 동안에 저항에서 발생하는 열은 냉각팬을 사용하여 제거하도록 한다. 선행품(prototype)으로 제작된 저항함(resistor bank)은 그림 3-1-146에서 보여주고 있으며, 저항들은 함의 내부에 유도성분이 최소화되도록 배열하였다. 또한, 사용된 저항들은 기성품이 아니라 주문 제작을 하였으며, 이 Gradient Grid 저항 전압분배기의 주요 사양은 다음과 같다.

(i) 저항(Resistor)

- 500Ω (error ≤ ±3.0%), 500W, and Non-inductive resistor
- serial connection of 100 resistors : $R_{total}=50k\Omega$

- resistor connector : electric-line tap
- (ii) 절연체(Insulator)
 - 8 ceramic insulator lag-stands (up to 30kV) for separation between AC- and DC-grounds
 - G10(t=10 mm) epoxy glass-fiber plate for supporting of resistor array and cooling fan
- (iii) 공냉식 냉각팬
 - Dimension: 150×170 mm², total 18 fans (100W/fan) (both up- and down-sides)
- (iv) 고전압 코로나 차폐(Corona shield)
 - OD=50 mm (for DC-grounding) and 100 mm (for 120kV), SUS-tube type.

저항함의 선형품을 제작하기 위하여, 몇 종류의 저항에 대한 전류와 표면온도 측정 시험을 수행하고 특성을 확인하였으며, 그 결과는 표 3-1-14에 정리되어 있다. 100 개의 저항들을 저항함에 직렬로 배치시킨 후에 각 탭마다 측정한 저항값이 표 3-1-15에 나타나 있다.

표 3-1-14. 몇 종류의 저항에 대한 전류와 표면온도 측정시험 결과

Check Value Resistor (전원 value)	Start Temperature & Current [0 sec]	End Temperature & Current [20 sec]	Note
1 kΩ, 1 kW (1.5 kV, 1.5 A, 2.25 kW)	14 [°C] 1.45 [A]	109 [°C] 1.43 [A]	
500 Ω, 1 kW (1 kV, 2 A, 2 kW)	15 [°C] 1.96 [A]	199 [°C] 1.96 [A]	1.97 [A] for 10 sec
1 kΩ, 500 W (1.5 kV, 1.5 A, 2.25 kW)	18 [°C] 1.49 [A]	228 [°C] 1.45 [A]	1.45 [A] for 10 sec, 연기 발생
500 Ω, 500 W (1 kV, 2 A, 2 kW)	15 [°C] 1.96 [A]	139 [°C] 1.98 [A]	1.97 [A] for 10 sec

표 3-1-15. 저항들을 저항함에 배치시킨 후에 각 탭마다 측정한 저항값

Resistor No.	Resistance (kΩ)	Resistor No.	Resistance (kΩ)
1	0.494	1 ~ 26	12.94
1 ~ 2	0.993	1 ~ 27	13.45
1 ~ 3	1.494	1 ~ 28	13.95
1 ~ 4	1.995	1 ~ 29	14.44
1 ~ 5	2.49	1 ~ 30	14.93
1 ~ 6	2.989	1 ~ 31	15.43
1 ~ 7	3.482	1 ~ 32	15.92
1 ~ 8	3.974	1 ~ 33	16.43
1 ~ 9	4.49	1 ~ 34	16.93
1 ~ 10	4.97	1 ~ 35	17.44
1 ~ 11	5.47	1 ~ 36	17.93
1 ~ 12	5.97	1 ~ 37	18.43
1 ~ 13	6.48	1 ~ 38	18.92
1 ~ 14	6.98	1 ~ 39	19.42
1 ~ 15	7.49	1 ~ 40	19.9
1 ~ 16	7.98	1 ~ 41	20.4
1 ~ 17	8.47	1 ~ 42	20.9
1 ~ 18	8.97	1 ~ 43	21.39
1 ~ 19	9.48	1 ~ 44	21.89
1 ~ 20	9.97	1 ~ 45	22.38
1 ~ 21	10.47	1 ~ 46	22.88
1 ~ 22	10.96	1 ~ 47	23.37
1 ~ 23	11.45	1 ~ 48	23.87
1 ~ 24	11.95	1 ~ 49	24.37
1 ~ 25	12.45	1 ~ 50	24.86

표 3-1-15. 저항들을 저항함에 배치시킨 후에 각 탭마다 측정한 저항값

Resistor No.	Resistance (k Ω)	Resistor No.	Resistance (k Ω)
1 ~ 51	25.37	1 ~ 76	37.77
1 ~ 52	25.86	1 ~ 77	38.27
1 ~ 53	26.35	1 ~ 78	38.78
1 ~ 54	26.84	1 ~ 79	39.28
1 ~ 55	27.33	1 ~ 80	39.77
1 ~ 56	27.83	1 ~ 81	40.27
1 ~ 57	28.33	1 ~ 82	40.77
1 ~ 58	28.83	1 ~ 83	41.2
1 ~ 59	29.33	1 ~ 84	41.7
1 ~ 60	29.83	1 ~ 85	42.1
1 ~ 61	30.32	1 ~ 86	42.6
1 ~ 62	30.81	1 ~ 87	43.1
1 ~ 63	31.31	1 ~ 88	43.6
1 ~ 64	31.82	1 ~ 89	44.1
1 ~ 65	32.31	1 ~ 90	44.6
1 ~ 66	32.8	1 ~ 91	45.1
1 ~ 67	33.3	1 ~ 92	45.6
1 ~ 68	33.79	1 ~ 93	46.1
1 ~ 69	34.29	1 ~ 94	46.6
1 ~ 70	34.78	1 ~ 95	47.1
1 ~ 71	35.27	1 ~ 96	47.6
1 ~ 72	35.76	1 ~ 97	48.1
1 ~ 73	36.27	1 ~ 98	48.6
1 ~ 74	36.76	1 ~ 99	49.1
1 ~ 75	37.26	1 ~ 100	49.6

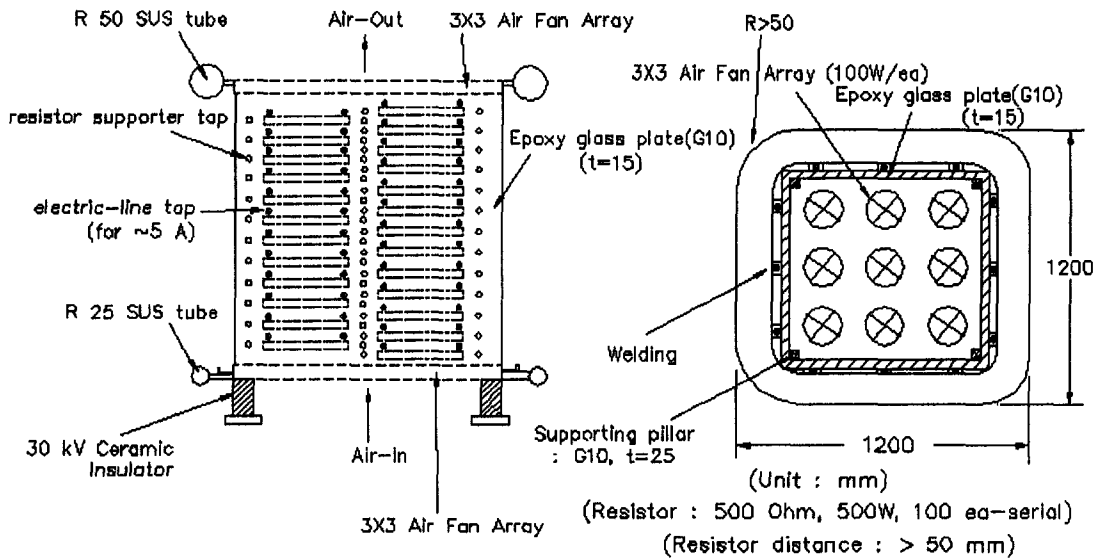


그림 3-1-145 제작된 공냉식 Gradient Grid 저항함(resistor bank)

(4) 감속전원

감속전원은 3종류의 전원(G1, G2, G3 PS)으로 구성된 가속전원계통의 하나이다. NBI 이온원에는 이온빔을 인출하고 필요한 에너지로 가속하기 위하여 4개의 그리드 전극으로 구성되는 가속구조를 포함하고 있다. NBI 이온원에서 발생된 이온들은 10kV/mm 정도의 높은 전계를 갖는 가속구조에 의해서 이온원으로부터 인출/가속된다. 동작 전압이 breakdown 값 근처이도록 하는 것이 효율적인 설계이며, 빔의 인출 동안에 발생하는 breakdown은 injector의 정상적인 동작으로 간주된다. Breakdown이 일어나는 경우에 grid에 축적되어 있는 에너지와 최대치 전류, breakdown 전류는 grid에 손상을 주지 않도록 최대치가 제한되어야 한다. 따라서 NBI 주 전원장치는 엄격한 보호회로를 갖추어야 한다. 또한 빔 전류가 설정값 이상을 넘어서도 보호기능이 작동되어야 한다. 이를 위해, 전원장치들을 25us 이내에 turn-off 할 수 있어야 하며, 시스템의 전체적인 down time을 줄이기 위해서 25us 이내에 전원장치들이 재 turn-on 되어야 한다.

가속구조의 4개의 그리드의 기능은 다음과 같다. 저항을 통하여 arc chamber와 연결이 되어 있는 가속전극 그리드(G1)에는 120kV, 65A의 extraction grid power supply에 의하여 전원이 공급되며 중수소 이온들의 인출 및 가속을 담당한다. Beam optics를 조절하는데 도움을 주는 gradient grid(G2) power supply는 G1의 전위에 비례하여 출력전압이 조절되도록 G1 power supply에 연결되어 있으며 이상

적인 정상운전 상태에서는 전류가 흐르지 않으나 기본적으로 양방향 전류가 가능해야 한다. Ground 전위에 대하여 negative의 전압을 갖는 감속전극 그리드(G3)는 neutralizer 영역에서 생성된 전자들의 back-streaming을 제거하는 전압장벽을 제공한다. Exit 그리드(G4)는 전기적으로 neutralizer에 연결되어 있으며, 접지전위에서 이온을 dump한다.

Deceleration Grid Power Supply, POSHPS-5000의 -출력 단자는 Cable을 통하여 Grid Structure의 Deceleration Grid에 결선 되고, +출력 단자는 Extraction Grid Power Supply의 -출력 단자에 결선 되어 사용된다. 싸이리스터를 이용한 AC/AC 컨버터 방식을 채택하고 고압 변압기를 사용함으로써, 제품의 크기를 최소화함과 동시에 신뢰성 및 안정성을 높였다. POSHPS-5000는 크게 싸이리스터 AC/AC 컨버터부, 고압 정류부, 필터부, 고압 펄스부 등 크게 4개 블럭으로 구분된다. POSHPS-5000의 설치, 시운전 및 유지 보수를 위하여, 전면 Panel에는 입력 전압을 투입하는 입력 스위치, 출력 전압 및 전류 값을 원하는 값으로 설정해 주고 출력 전류와 출력 전압을 지시하는 Digital Keypad가 있다. 출력 전류 및 전압 값은 Monitoring을 위하여 BNC Jack이 장착되어 있으며 각각 10V/20A, 10V/5kV DC의 비율로 Analog값이 출력된다. 이 출력은 Isolation Amp를 통하여 절연되어 있으므로 Oscilloscope로 측정하기에 편리하도록 되어 있다.

출력 값의 제어는 Keypad 상의 Start Switch의 누름에 의해서 시작되며, Stop Switch를 누르면 시스템의 동작이 정지된다. 또한 보호 기능의 동작 상태를 표시하는 Over Voltage Lamp, Over Current Lamp 및 Over Temperature Lamp가 있으며, 보호 기능이 동작되면 각각 해당하는 Lamp가 점등되며 시스템이 동작을 멈춘다. 이때, 다시 시스템의 동작을 재개하려면 Local Mode에서는 Keypad 상의 Reset Button을 누른 후 Start Button을 누르면 시스템이 Restart되고, Remote Mode에서는 Reset Signal을 인가하면 시스템이 Reset 된다.

삼상 입력 전원용 Line은 Panel 밑면에, DC 출력용 Busbar는 Panel 상단에 설치되어 있으며, 시스템의 방열을 위하여 Fan이 설치되어 있다.

입력 사양

상수	3상
주파수	60Hz
입력 전압	440VAC
전압 변동률	+/- 10%

출력 사양

정격 출력	100KW
출력 전압	0 ~ 5kV 가변
출력 전류	20ADC CW

REGULATION	+/- 1% 이하
RIPPLE	P/P 2% 이하
PULSE WIDTH/ INTERVAL	320SEC/ 30MIN
RISING TIME TO 5A	25US 이하
CUTOFF TIME	25US 이하
VOLTAGE OVERSHOOT	4% 이하
INTERRUPTION TIME	1 ~ 100MS(1MS STEP)
MAX. ENERGY STORED IN P.S.	30J 이하

3상 440VAC 입력전원은 TR#1, TR#2, TR#3에 의하여 각각 절연된 3상 전원의 형태로 MULTIPHASE CHOPPER로 인가된다.

MULTIPHASE CHOPPER는 9개의 CHOPPER가 모두 직렬로 연결된 형태를 갖으며 출력 측 리플을 최소화하기 위하여 각 CHOPPER는 360/9도의 전기각 만큼 각각 위상차를 두고 운전된다.

MULTIPHASE CHOPPER로부터 출력되는 전압은 HVFL과 HVFC로 구성된 저역 통과 필터에 의하여 직류에 가까운 전압으로 변형된다.

IGBT SW는 최종출력단자에 전압을 공급 혹은 차단하는 역할을 하며 출력측 전압 및 전류가 미리 설정된 과전압 및 과전류 설정치 보다 커지면 역시 미리 설정된 INTERRUPTION TIME INTERVAL만큼 소호 후 재 점호되는 동작을 한다.

FD는 IGBT SW가 출력에 전류가 흐르는 상태에서 소호될 경우 출력 배선의 기생 인덕턴스에 유기되어 있는 전류의 경로를 제공한다.

DCCT1은 제어용 전류 검출기이며 DCCT2는 과전류 검출 및 출력전류 모니터 용 전류 검출기이다.

DCPT1은 제어용 전압류 검출기이며 DCPT2는 과전압 검출 및 출력전압 모니터 용 전압 검출기이다.

출력단자의 +측은 외함에 연결되어 있으며 외함의 접지와 함께 접지되며 -측 단자에서는 0 ~ 5kV의 가변 직류전압이 출력된다.

(가) 조작 패널

- (1)은 라벨 명이 "VOLTAGE"로서 출력 전압의 크기를 표시한다.
- (2)는 라벨 명이 "CURRENT"로서 출력 전류의 크기를 표시한다.
- (3)은 라벨 명이 "OVR"로서 과전압 설정치를 표시한다.
- (4)는 라벨 명이 "OCR"로서 과전류 설정치를 표시한다.
- (5)는 라벨 명이 "VCMD/ INT TIME"로서 출력전압 목표치("V" LAMP 점등 시) 및 INTERRUPTION TIME INTERVAL("I" LAMP 점등 시)을 표시한다.

- (6)은 라벨 명이 "FAULT/ OP TIME"로서 Fault의 종류("F" LAMP 점등 시) 및 OPERATION TIME("O" LAMP 점등 시)을 시간 단위로 표시한다.
- (7)은 라벨 명이 "STOP"이며 전원장치가 작동을 완전히 멈춘 상태임을 표시한다.
- (8)은 라벨 명이 "STANDBY"이며 전원장치가 동작하여 전원장치 내에 직류 고전압이 준비되어 있으나 IGBT SW를 소호한 상태로서 최종 출력으로는 출력되지 않고 있는 상태임을 표시한다.
- (9)는 라벨 명이 "RUN"이며 최종출력에 직류전압이 출력되고 있는 상태임을 표시한다.
- (10)은 라벨 명이 "TRIP"이며 전원장치가 비정상적으로 운전을 종료한 상태임을 표시한다.
- (11)은 라벨 명이 "OV"이며 출력 과전압에 의하여 출력이 차단되고 있음을 표시한다.
- (12)는 라벨 명이 "OC"이며 출력 과전류에 의하여 출력이 차단되고 있음을 표시한다.
- (13)은 전원장치의 동작을, "STOP"은 전원장치의 동작 정지, "STBY"는 IGBT SW를 소호한 상태로 내부에 출력전압을 출력할 준비한 상태, "RUN"은 IGBT SW를 점호하여 최종출력으로 직류전압을 출력하는 상태로, 각각 명하는 절환 스위치이다.
- (14)는 전원장치의 동작명령을 조작 패널에서 할 것인지("LOCA") 원격조정에 의하여 할 것인지("REMO")를 선택하는 절환 스위치이다.
- (15)는 라벨 명이 "SET"이며 운전정수를 변경할 때 운전정수를 선택하기 위한 누름 스위치이다.
- (16)은 라벨 명이 "ADJUST"이며 "SET" 스위치에 의하여 선택된 운전정수의 값을 변경하기 위한 회전식 노브이다.
- (17)은 전원장치의 프로그램 변경 및 진단을 위한 RS-232C통신 포트이다.

(나) 조작 패널 사용법

- (13)의 운전 선택스위치를 STOP에 위치시킨다.
- (15)를 누르면 (3)"OVR", (4)"OCR", (5)"VCMD", (5)"INT TIME"의 FND DISPLAY가 순차적으로 점멸한다. 이 때 점멸하고 있는 FND의 값은 (16)의 "ADJUST" 노브를 돌려 변경한다.
- (13)의 운전 선택스위치를 "STBY"에 위치시키면 전원장치가 동작을 개시하여 고압 직류전압을 준비하나 IGBT SW를 소호한 상태이므로 최종 출력으로 출력되지는 않는다.
- (13)의 운전 선택스위치를 "RUN"에 위치시키면 IGBT SW를 점호하여 준비하고 있던 직류전압을 최종 출력단자에 출력한다.

운전 중 출력전압이 "OVR"을 초과하거나 출력전류가 "OCR"을 초과하면 "INT TIME"동안 IGBT SW를 소호하여 출력 대기상태에 들어간 후 IGBT SW를 재 점호하여 출력전압을 다시 출력한다. 이 때 과전압이면 (11)의 "OV" 램프가 과전류이면 (12)"OC" 램프가 점등되며 (8)의 "STANDBY" 램프와 (9)의 "RUN"램프가 동시에 점등된다.

운전 중 전원장치에 이상이 생기면 (11)의 "TRIP" 램프, (7)의 "STOP" 램프가 점등되며 (6)에 TRIP 원인을 CODE로 표시하며 동작을 멈춘다. "TRIP"의 해제는 "LOCA" 운전 시는 (13)의 운전 선택스위치를 "STOP"에 위치시키면 되고 "REMO" 운전 시는 "RUN"과 "STANDBY" 입력을 해제하면 된다.

(13)과 (14)의 운전 선택스위치는 (7)의 "STOP" 램프가 점등된 상태에서만 인식한다. 또한 (3)"OVR"과 (4)"OCR" 역시 (7)의 "STOP" 램프가 점등된 상태에서만 변경이 가능하다.

전원 인가 시 (13)이 "STBY" 혹은 "RUN"의 위치에 있으면 "STOP", "STBY", "STOP"램프가 동시에 점멸한다. 이때 (13)을 일단 "STOP"위치로 선택한 후 "STBY" -> "RUN"의 위치를 선택하면 운전이 가능하다.

(다) MULTIPHASE CHOPPER의 동작원리

MULTIPHASE CHOPPER는 본 전원 장치에서 출력전압의 크기를 조절하여 출력전압을 지령치로 추종토록 하는 역할을 한다. MULTIPHASE CHOPPER는 N개의 단일 CHOPPER가 360/N도의 전기각씩 위상차를 두고 운전된다. 이의 동작을 이해하기 위해서는 단일 CHOPPER의 동작을 우선 이해하여야 한다.

(라) 단일 CHOPPER의 동작원리

단일 CHOPPER는 스위칭소자인 IGBT와 DIODE로 구성된 단일 CHOPPER를 보여주며 VDC는 CHOPPER로의 입력 직류전원이며, Vo는 CHOPPER의 출력 전압이다. IGBT가 켜지면 부하 R에는 입력전압 VDC가 인가되며, IGBT가 꺼지면 0의 전압이 인가된다. DIODE D는 부하가 유도성일 때 IGBT가 꺼진 후 부하전류가 흐르는 경로를 제공한다. DIODE가 도통할 때에도 부하에는 0의 전압이 인가된다. 스위칭 한 주기 T에 대한 IGBT의 점호시간 TON을 Duty라 하며 식으로는 아래와 같다.

$$Duty = \frac{T_{ON}}{T}$$

Duty가 각각 0.3, 0.5, 0.7일 때의 부하전압을 보여준다.

한편 Duty와 출력측 DC성분 전압 즉, 평균전압과의 관계는 아래와 같다.

$$V_O = Duty * V_{DC}$$

따라서 Duty를 변경함으로써 출력전압의 DC성분 전압 즉, 평균전압을 변경하는 것이 가능하다.

(마) MULTIPHASE CHOPPER의 동작원리

MULTIPHASE CHOPPER는 N개의 단일 CHOPPER를 $360/N$ 의 위상차를 두어 운전되는 단일 CHOPPER를 직렬 혹은 병렬로 연결하여 운전하는 것으로서 출력측 고조파를 현격하게 줄일 수 있다. 본 전원장치는 단일 CHOPPER 9개를 직렬로 연결하여 구성되었으며 단일 CHOPPER는 5Khz의 스위칭 주파수로 운전되며 따라서 전체 MULTIPHASE CHOPPER는 45Khz의 등가 스위칭 주파수로 운전된다. 단일 CHOPPER는 IGBT의 점호/소호에 따라 VDC/0V의 전압만큼 천이가 발생하나 MULTIPHASE CHOPPER의 직류단 전압의 총 합의 $1/N$ 에 해당하는 전압만큼 천이 함으로서 직류에 더 가까운 출력전압 파형을 출력한다. 또한 고조파가 45Khz로서 적은 값의 L-C 필터로 직류 화하는 것이 가능하다.

(바) 원격제어 및 감시

본 전원장치는 조작패널의 "REMO/LOCA" 스위치를 "REMO"에 선택함으로써 원격 제어가 가능하다. 원격제어신호는 다음과 같다.

- 1)STANDBY - 전원 장치 내에 출력전압을 준비하고 있으며 IGBT SW를 꺼서 최종 출력으로는 출력되지 않는 상태로 동작을 명하는 입력신호
- 2)RUN - IGBT SW를 켜고, 최종 출력으로 전압을 출력상태로 동작을 명하는 입력신호
- 3)TRIP - 전원장치의 이상으로 동작을 멈추고 있음을 알리는 신호
- 4)RXD - 직렬통신 중 입력신호
- 5)TXD - 직렬통신 중 출력신호

입출력신호는 +15V/-15V의 전압 값을 갖는 신호이고 외란에 강한 신호전달을 위하여 50Ω COAXIAL CABLE을 통하여 전달되며 50m거리까지 전송이 가능하다. 출력신호는 등가 직렬저항이 50Ω이며 입력신호도 등가 직렬저항이 50Ω이면 이하야 한다.

(사) LOCAL 패널의 감시신호

- 1) VOLTAGE - 최종 출력단자의 전압에 비례하는 ANALOG 신호이며 5V/5kV의 비로 출력된다. 내부저항은 100Ω이다.
- 2) CURRENT - 최종 출력단자의 전압에 비례하는 ANALOG 신호이며 10V/20A의 비로 출력된다. 내부저항은 50Ω이다.
- 3) OVR - 과전압 설정 치의 ANALOG 출력신호이며 10V/5kV의 비로 출력된다. 내부저항은 50Ω이다.
- 4) OCR - 과전류 설정 치의 ANALOG 출력신호이며 10V/20A의 비로 출력된다. 내부저항은 50Ω이다.
- 5) VCMD - 출력전압 설정 치의 ANALOG 출력 신호이며 5V/5kV의 비로 출력된다. 내부저항은 100Ω이다.
- 6) OV - 과전압임을 알리는 DIGITAL 출력 신호이며 정상 시 0V, 과전압 시 15V를 출력한다. 등가 내부저항은 500Ω이다
- 7) OC - 과전류임을 알리는 DIGITAL 출력 신호이며 정상 시 0V, 과전류 시 15V를 출력한다. 등가 내부저항은 500Ω이다.
- 8) TRIP - 전원장치의 이상으로 동작을 멈추고 있음을 알리는 DIGITAL 출력 신호이며 정상 시 0V, TRIP시 15V를 출력한다. 등가 내부저항은 500Ω이다.

(5) 가속전원

(가) 시스템 개요

KSTAR 토카막의 가열장치 중 중성빔 입사(NBI) 장치의 개발에 필요한 주전원장치를 제작한다. NBI 보조전원장치 및 이온원에서 발생된 이온들은 10kV/mm 정도의 높은 전계를 갖는 accelerating structure에 의하여 이온원으로부터 extraction된다. 동작 전압이 breakdown 값 근처이도록 하는 것이 효율적인 설계이며, 빔의 extraction 동안에 발생하는 breakdown은 injector의 정상적인 동작으로 여겨진다. Breakdown이 일어나는 경우에 grid에 축적되어 있는 에너지와 최대치 전류, breakdown 전류는 grid에 손상을 주지 않도록 최대치가 제한되어야 한다. 따라서 NBI 주 전원장치는 복잡한 보호회로를 갖추어야 한다. Extracted 전류가 설정값 이상을 넘어서면 주 전원장치들을 25us 이내에 turn-off 할 수 있어야 하며, 시스템의 전체적인 down time을 줄이기 위해서 25us 이내에 전원장치들이 재 turn-on 되어야 한다. Acceleration structure는 다음과 같이 4개의 grid로 구성되어 있다. 저항을 통하여 arc chamber와 연결되어 있으며, 정상 운전상태에서는 전류가 흐르지 않

는 extraction grid(G1)는 120kV, 70A의 extraction grid power supply에 의하여 전원이 공급되며 중수소 이온들의 extraction을 담당한다. Beam optics를 조절하는데 도움을 주는 gradient grid(G2) power supply는 G1의 전위에 비례하여서 출력전압을 조절하며 G1 power supply에 연결되어 있다. Ground 전위에 대하여 negative의 전압을 갖는 deceleration grid(G3)는 neutralizer 영역에서 생성된 전자들의 back-streaming을 제거하는 전압장벽을 제공한다. 본 NBI 주 전원장치들은 모두 대용량의 고압 출력을 내는 전원장치와 120kV 이상의 절연 정격을 갖는 전원장치들로서 전력회로 설계와 고압 절연설계 및 고압 변압기, 고압 정류회로 설계에 대한 기술과 이에 대한 품질보증이 반드시 요구된다. 이에 당사는 NBI 보조 전원장치인 Arc power supply와 Filament power supply, G3 power supply 및 120kV 절연 변압기의 설계 및 제작을 통하여 위의 기술에 대한 가능성을 확인한 바 있으며, 이들의 시험 등을 통해서 습득한 경험들을 바탕으로 다음과 같이 증성빔 입사장치의 주 전원장치, G1 power supply 및 제어부와 입력 전원부를 국내에서 제작하고자 한다. 이러한 대용량의 고압 전원장치를 개발함으로써, 변조 가능한 수백kV 이상의 고압을 요구하는 환경분야 및 이온도금 등 여러 연구분야와 많은 산업분야에 걸쳐 파급효과가 클 것으로 예상된다.

Extraction grid power supply는 빔의 가속을 위한 장치로써 여러 가지 DC 전압 레벨을 가지며 good beam optics를 얻기 위해서는 전압 ripple과 전압 drop을 일정 수준 이하로 낮추어야 한다. NBI를 위한 extraction grid에 전원을 공급하는 extraction grid power supply는, 직류 120kVdc, 70Adc를 출력 할 수 있다. Extraction grid power supply는 고압 직류 정류회로와 Chopper방식을 결합, 채택함으로써, 신뢰성 및 안정성을 높였다. 즉, 100kVdc 출력할 수 있는 직류 정류회로와 전압 Regulation을 위한 30kVdc의 Chopper모듈의 직렬구성을 기본으로 한다. 출력 전압은 0~120kVdc의 범위에서 연속 가변 되며, 출력 전류는 연속 정격 70Adc 정격을 갖는다. Extraction Grid 전원장치는 부하변동에 대하여 빠른 전압 응답을 가져야 하며, 고속의 전류 차단이 가능하여야 하며, 안정된 전압을 유지하여야 한다. Breakdown 발생 시에 Grid내에 저장되어 있는 에너지가 Grid를 손상시키지 않도록 저장 에너지가 제한되어야 하며 최대 전류를 제한해 주어야 한다. 그 값은 각각 10J과 3kA를 넘지 않도록 하여야 한다. 또한 빠른 turn-off time(<0.5us)을 가져야 하며, 이를 위한 여러 가지 보호 장치들이 요구된다. NBI 시스템의 overall down time을 줄이기 위하여 0.5us 이내의 상승 시간을 가지면서 40ms 이내의 조절 가능한 시간 내에 재 turn-on이 또한 가능하여야 한다. 위에서 언급한 기능들을 만족시키기 위하여 extraction grid power supply와 extraction grid 사이에 직렬로 스위치 및 Chopper방식의 전력변환 장치를 구성하여 regulation의 기능을 담당하도록 한다. 기존의 시스템은 직렬 스위치로써 tetrode와 같은 tube들을 사용하였으나 KSTAR NBI 시스템과 같이 320초 이상의 운전 시간을 갖는 시스템에는 적용하기 힘들며 수명이 제한적이어서 운전 횟수에 따라 교체가 요구된다. 이러한 문제를 해

결하기 위한 방안으로 전원장치를 고주파화 함으로써 필터의 용량을 작게 하고, turn-off 시간을 줄여서 직렬 스위치를 사용하지 않는 방법이 있으나 전압의 상승 시간을 부하의 조건 및 라인의 구성에 따라 다르지만, 20ms 이내로 하기가 힘들어 현재 KSTAR NBI extraction grid 전원장치의 사양을 만족시키지 못하므로 다른 방법인 전력용 반도체 소자를 이용한 직렬 스위치를 사용한다. FET를 직렬 연결함으로써 빠른 turn-on/off time을 갖도록 하며, 반영구적인 동작 수명을 갖도록 한다. 그러나 FET의 직렬 연결 사용을 위해서는 수십 0.5us 이내에 동시 turn-on/off가 가능하며, 또한 백개의 직렬 반도체 스위칭 소자로 구성되는데 신호 전달 지연의 편차 없이 도통 신호를 전달하며, 신호 전달 송수신 사이에는 200kVdc의 절연이 이루어진다. 현재의 설계는 전압상승 0.5us 이내를 맞추며, 직렬 스위치를 사용한다.

(나) 시스템 구성

고압 파워 서플라이는 입력 수전부인 VCB PNL, Pre-charge부인 6대의 가스절연부하개폐기(GS), 5대의 고압 다이오드 정류부인 TR & Rectifier TANK, 4대의 LVTR Tank, 40개의 Chopper 직렬로 이루어진 4대의 Chopper PNL, 출력을 320sec 동안 On/Off하는 HVS Tank, Crowbar PNL로 이루어져 있다. 각각의 구성을 살펴보면 다음과 같다.

1) VCB PNL

3상 22.9kV 주 차단기와 각 서브 시스템으로 공급되는 전원을 On/Off 제어하는 Remote contactor로 구성되어 있다.

2) 가스절연 부하개폐기(GS)

HVTR & Rectifier Tank 및 LVTR & Chopper의 직류 Capacitor를 초기 충전시키기 위한 회로 정격을 산정 한다.

3) HVTR & Rectifier TANK

110kV의 고압 직류 전원을 만들기 위해 6상 변압기, 다이오드 정류회로 5대 직렬 연결하였다. 110kV 정도의 직류 전원을 만든다.

4) LVTR TANK

4대의 Chopper PANEL에 전원을 공급해주는 변압기로 22.9kV/ 560V×10채널로 구성된 4대의 TR Tank로 구성한다.

5) Chopper PANEL

40개의 Chopper로 30kV 직류 전원을 공급하는 전원을 만든다. 750V씩 대수 제어하여 출력전압의 Ripple 만족한다.

6) HVS Tank

HVTR & Rectifier Tank 및 LVTR & Chopper에서 출력된 고전압(120KVdc)을

FET 직렬 스위치를 사용하여 출력전압을 On/Off하는 기능을 수행한다.

7) Crowbar PANEL

HVS가 Off되지 않을때 부하의 보호를 위해 동작한다.

(다) 시스템 사양

본 고전압 장치는 Extraction Grid Power Supply for KSTAR NBI System(이하 "G1"라 함), G1은 특고압, 대전력 Pulse 전원 장치로서 Extraction Grid를 구동하기 위하여 사용된다. G1은 120KV의 Pulse 전압을 발생시키는 전원 장치로서 0-320sec 동안 Pulse폭을 가변할 수 있으며, Interval이 30min을 갖는 전력을 최대 8.4MW까지 Pulse 출력을 할 수 있는 장치이다.

● 일반 사항

1) 고전압 Pulse 전원장치인 G1은 특고압 대전력 Pulse 전원 장치로서 Extraction Grid 구동용 가변 전압, 가변 Pulse폭 전원 장치이다.

2) G1은 0에서 120KVdc까지의 연속적인 가변 전압을 설정할 수 있으며, 0에서 320sec동안 Pulse폭과 Pulse 전압을 가변하여 출력시킬 수 있도록 초고압(120KV) Power Semiconductor Switch가 내장되어야 한다.

3) G1은 출력회로가 단락 혹은 HVS가 Off가 안되었을 경우 시험하에 있는 Extraction Grid의 손상을 막아주는 Crowbar Switch를 포함하고 있다.

4) G1의 고전압 발생부는 HVTR & Rectifier와 Chopper 방식으로 구성하여 대수 제어 방식으로 출력전압의 Ripple을 만족시키며 본 시스템으로 인한 타 설비의 고조파 장애를 없게하며 전체 시스템의 크기가 최적이 되도록 한다.

5) 주요한 운전 파라메타는 Digital Display로 표시되며, Interlock에 의한 안전 장치가 구성되어 있으며, 운전 상태가 상태 Lamp에 정확하게 Monitoring 되고 Display 된다. Digital Display는 입력 전압/전류, Chopper 전압/전류, 출력 전압/전류를 표시한다.

6) 제어 전원은 별도의 전원을 배전받아 적용 한다.

(라) 입력부

(라)-1. 시스템 개요

G1은 주전원 공급 계통과 보조 전원 공급 계통으로 분류된다. 주 전원은 3상, 22.9KV/18KV, 60-90Hz이며 보조전원은 단상 220V이다. 입력측에는 VCB를 설치하여 시스템을 과전류로 부터 보호할 수 있다. VCB는 Close Coil과 Open Coil이 각각 존재하여 전원이 투입될 때 ON 또는 OFF된다. 보조전원은 보조전원용 Breaker와 보조전원용 변압기를 통하여 공급된다. 이 보조전원은 제어전원, Sequence 전원등으로 사용된다. 주 공급 계통으로 입력된 전원은 6대의 MS로 입력되어 Pre_charge 회로를 구성하여 TR & Rectifier와 Rectifier & Chopper를 초

기 충전하는 기능을 갖는다.

HVTR & Rectifier 초기충전은 Stnby 신호가 입력되면 CHS1-5를 ON시켜 CHR1-5 를 통해 DCFC1-10을 초기충전 시킨다. DCFC1-10 전압이 600V 이상 상승하면 1초후 MS1-5를 ON 시키고 CHS1-5를 OFF시킨다. 충전시간은 시정수 = RC 로 계산하면 5초이내이다.

$$\text{시정수} = RC = 30k\Omega \times 52\mu F \times 2 = 3.1 \text{ sec}$$

Rectifier & Chopper 초기충전은 Snby 신호가 입력되면 CHS6을 ON시켜 CHR6 을 통해 DCS1-40을 초기충전 시킨다. DSC1-40 전압이 450V 이상 상승하면 1초후 MS6을 ON 시키고 CHS1-5를 OFF시킨다. 충전시간은 시정수= RC로 계산하면 5초 이내이다.

$$\text{시정수} = RC = 30k\Omega \times (2267\mu F/40) \times 2 = 3.4 \text{ sec}$$

(라)-2. 시스템 사양

Phase	Three Phase
Input Frequency	60Hz-90Hz
Voltage Rating	AC 22.9KV/18KV_Tap
Current Rating	235.5A
Voltage Regulation	±10%(제어전원 : ±5%)
Capacity	9.34MW
Insulation Voltage	50KVac/1min

(마) 특고압부

(마)-1. 시스템 개요

1) HVTR & Rectifier Tank

HVTR & Rectifier Tank 5대의 HVTR 변압기, 5조의 특고압 정류기로 구성 된다. HVTR 변압기는 Pre-charge 회로에서 입력받아 6상으로 강압시킨다. HVTR 변압기는 절연내압이 200KVdc이상이 되도록 충분한 이격을 두어야 한다. 절연 내압을 위한 큰 이격은 변압기의 결합계수를 저하시킬수 있으므로 설계, 제작시 큰 내압과 큰 이격을 보장하면서도 결합계수를 높일 수 있도록 하여야 한다. 만일 HVTR 변압기의 결합계수가 낮으면 출력에 대한 전압강하가 커져 사양의 출력을 만족시킬 수 없으며 제어성능도 저하되어 출력의 품질이 저하된다.

HVTR 변압기는 권선과 Core 또는 Frame간에 절연 내전압을 고려한 설계, 제작외에 동일 권선에서도 권선절연 및 층간 내절연이 200KVdc 이상을 유지하도록 하여야 한다. 이러한 내전압을 보증하기 위하여 HVTR 변압기는 유도 내전압 시험

을 하여야 한다. 특고압 정류 Module은 각각 200KVdc의 절연내압을 갖도록 설계, 제작한다. 특고압 정류 Module의 입력 교류전압은 HVTR 변압기에 의하여 공급되며 12상 정류를 한다. 특고압 정류 Module은 각 Diode간 분압이 균형있게 이루어지도록 설계, 제작하여 Reverse Voltage Breakdown으로 인한 Diode String의 연쇄파손을 방지 하도록 한다. 각 특고전압 정류 Module은 직렬결선하여 110KV 직류 특고전압을 얻을 수 있도록 한다.

2) LVTR & CHOPPER 부

LVTR & Chopper부는 4대의 LVTR 변압기, 4조 40대의 Chopper Stack으로 구성된다. LVTR 변압기는 Pre-charge 회로에서 입력받아 Δ/Y 10채널로 강압시킨다.

LVTR 변압기는 절연내압이 60KVdc이상이 되도록 충분한 이격을 두어야 한다. 절연 내압을 위한 큰 이격은 변압기의 결합계수를 저하시킬수 있으므로 설계, 제작시 큰 내압과 큰 이격을 보장하면서도 결합계수를 높일 수 있도록 하여야 한다. 만일 LVTR 변압기의 결합계수가 낮으면 출력에 대한 전압강하가 커져 사양의 출력을 만족시킬 수 없으며 제어성능도 저하되어 출력의 품질이 저하된다.

LVTR 변압기는 권선과 Core 또는 Frame간에 절연 내전압을 고려한 설계, 제작 외에 동일 권선에서도 권선절연 및 층간 내절연이 60KVdc 이상을 유지하도록 하여야 한다. 이러한 내전압을 보증하기 위하여 LVTR 변압기는 유도 내전압 시험을 하여야 한다.

특고압 정류 Module은 각각 60KVdc의 절연내압을 갖도록 설계, 제작한다. 특고압 정류 Module의 입력 교류전압은 LVTR 변압기에 의하여 공급되며 Δ/Y 10채널을 정류한다.

특고압 정류 Module은 각 Diode간 분압이 균형있게 이루어지도록 설계, 제작하여 Reverse Voltage Breakdown으로 인한 Diode String의 연쇄파손을 방지 하도록 한다. 정류된 전압은 Chopper에 연결되며 각각 Chopper 후단에서 직렬 결선하여 30KV 직류 특고전압을 얻을 수 있도록 한다. Chopper는 750V씩 40대로 대수 제어하며 출력의 Ripple 및 E_folding time을 만족한다.

Capacitor는 Rectifier와 Chopper사이의 DC Link에 연결되며 Capacitor 개개의 정격 Working Voltage를 초과하지 않도록 Working Voltage 및 Insulation Voltage의 안전도를 고려한 절연구조물을 설계, 제작하여야 한다.

절연구조물 위에는 Conductive Shield Column을 충분히 설치하여 구조물내의 전기 회로 특정부위에 Corona Discharge 나 Arc Discharge가 발생하지 않도록 한다. 절연구조물은 절연애자 및 절연 Bushing 절연기둥등을 기본으로 하여 구성되며 절연구조물의 하단은 도전성 Plate로 제작하여 접지시킨다.

특고압 Chopper 양단에는 특고압 Voltage Sensor를 두어 전압제어를 위한 Feedback Signal로 이용할 수 있도록 한다. Voltage Sensor의 Band Width가 좁

으면 Pulse 출력시 전압오차가 커지고 Overshoot가 크게 발생할 수 있으므로 Voltage Sensor는 Wide Band Width(High Frequency Band Side)를 갖도록 하여야 한다.

(마)-2. 시스템 사양

1) LVTR Tank 사양

1차 전압	AC22.9KV/18KV
정류부 용량	53KW
TR 용량	530KVA
상수	3상
TR 예상 %IZ	7.5%-10%
TR 2차 전압	560V
TR 2차 전류	54.6A
절연 내전압	60KVdc 1mA 1min
EMI 및 Surge 차폐(1-2차간 shield 차폐) 접지	

2) Chopper 사양

정격 출력 용량	53KVA
정격 직류 전류	70A
평균 Diode 전류	23.4A
과부하율 150% 고려	35A
전류 여유율 250% 고려	58.5A
전압 여유율 150% 고려	1200V

(바) HVS Tank부

(바)-1. 시스템 개요

TR & Rectifier 및 Chopper에서 출력된 직류 고전압은 Pulse 발생부인 HVS에 전달된다. Pulse 발생부의 전원 안정 및 Filter Capacitor 값은 고전압 전원 장치의 Regulation에 의해 최소의 Pulse Drop 또는 Ripple 및 Overshoot를 갖도록 선정한다. Pulse가 Off되어 있는 동안에 HVS는 Bias Supply에 의해 Cutoff 상태에 있게된다.

HVS는 Gate Driver에 의해 구동된다. 주어진 사양내에서 임의 Setting된 주기와 Pulse 폭을 갖는 Pulse 신호를 Grid Amp를 통해 증폭되어 Gate Drive를 통해 HVS를 On/Off하여 원하는 Pulse를 발생시킨다.

HVS가 On 되었을 때 부하량에 따른 부하 전류에 의해 Pulse Capacitor(Cp) 방전된다. 그러나 Pulse Capacitor 전압은 고전압 전원 장치의 Regulation 과정에 의해 최대 부하량에서 주어진 사양내의 Ripple, Overshoot 및 Drop이 보장 되도록

한다. 비정상적으로 HVS가 Off 되지 않아 Pulse폭이 Setting 치보다 증가되거나, 직류 고전압 전원이 과충전되면 설비 Shut Down 및 Crowbar Switch가 동작되어 출력을 차단시킨다. 또한, Grid의 이상 발생시 Crowbar를 동작시켜 Tube를 보호한다. Pulse 발생부는 200KV 이상의 절연 구조물로 구성하여야 한다. 절연 구조물은 반드시 Ceramic 절연 애자 및 Ceramic 절연 Bushing, Ceramic 절연 기둥 등을 기본으로 구성하여야 하며, 절연 구조물의 하단은 도전성 Plate로 제작하여 접지 시키며, 그 외의 주변으로는 Shield Column을 설치하여, 특고압으로 인한 부분적인 Breakdown(절연파괴)가 되지 않도록 한다.

(바)-2. 시스템 사양

출력 전압	0 ~ 120KV Continuously Variable
펄스 출력 전압	0 ~ 120KV Continuously Variable
펄스 출력 전류	70A
펄스폭/Interval	320sec/30min
상승 시간	25.0 μ S 이하
하강 시간	25.0 μ S 이하
리플 전압	2% 이하(0~120KV)
펄스 Top Ripple	2% 이하
Overshoot	4% 이하
소자 내전압	200KV

(사) Dummy Resister 및 Crowbar부

HVS가 Off되지 않았을 시 Crowbar Switch가 동작하여 부하를 보호한다.

Crowbar Switch System Specification:

Operating voltage range	35 ~ 150KV
Operating current	20KA
Electric strength recovery time	50us
Delay time	1.1us
Trigger voltage	75KV
Trigger current, not less than	2A
Trigger current duration, not less than	2A
Working temperature range	15 ~ 35

(아) Control System 및 Monitoring

(아)-1. 제어기의 구성

Extraction grid power supply의 제어기는 VME Rack으로 구성되며, 외부로부터 지령을 받아 전체 운전을 주관하는 DSP2000 Board와, ODSO Board, ODSI Board,

ODPO Board, ODPI Board, OAI Board, OAO Board 및 각종 센서에 필요한 전원을 공급하는 제어전원부, Local 운전을 위한 각종 스위치와 램프로 이루어진 조작판넬부인 LCP PNL, ASS Control PNL 등으로 구성된다.

1) DSP2000 보드

우선, DSP2000 보드는 상위의 지령, 조작 판넬의 각종 Digital 신호, Interlock 및 Fault 신호를 입력받아 운전조건을 판단하고 각종 개폐기, 스위칭 반도체 소자, 표시램프 등에 Digital 신호를 출력함으로써 전체 운전 Sequence를 담당한다. 이때 상위와의 Data 교환은 RS422 통신으로 이루어지며 개폐기 및 표시램프의 Data는 접점 또는 전압 신호로 주고받는다.

DSP2000 Board는 High Voltage ON 지령을 받으면 입력되는 각종 Analog 신호를 연산하여 IGBT Chopper의 대수 제어에 의하여 출력전압을 설정된 값으로 조정하며 과전압 및 과전류에 대해서는 보호동작을 행하고 Pulse ON 신호에 의해 HVS를 ON/OFF 시킴으로 설정된 Pulse를 출력한다. 또한, 펄스전류 및 펄스폭이 기준치를 초과하면 HVS를 Off시켜 전체 시스템을 보호한다. 보수유지의 편의를 위해 DSP2000 Board는 주요 Parameter를 저장했다가 Trace Data 요구가 있으면 Data를 상위로 넘겨 줄 수 있다.

본 제어기의 운전은 Local 모드와 Remote 모드로 나눌 수 있고 특별히 입력에 저전압을 인가하여 시험할 수 있도록 Test모드 운전도 가능하다.

2) 제어전원부

단상 220V를 입력받아 제어장치에 필요한 +5V, ±15V와 각종 센서에 맞는 전압을 출력한다. SMPS와 IGBT의 Gate Driver 전원으로 사용된다.

3) ODSO(Optic Digital Serial Output) Board

각종 개폐기 및 Power에 필요한 장치를 Digital Output 신호를 광신호로 전송하는 기능을 담당한다.

4) ODSI(Optic Digital Serial Input) Board

각종 개폐기 및 Power에 필요한 장치의 접점신호인 Digital Input 신호를 광신호로 전송하는 기능을 담당한다.

5) ODPO(Optic Digital Perelled Output) Board

Chopper & HVS 및 Crowbar의 동작 신호를 광신호로 전송하는 기능을 담당.

6) ODPI(Optic Digital Perelled Input) Board

Chopper & HVS 및 Crowbar의 Fault 신호를 광신호로 전송하는 기능을 담당.

7) OAI(Optic Analog Input) Board

각종 아날로그 신호를 DSP 및 상위에 신호를 광신호로 전송하는 기능을 담당.

8) OAO(Optic Analog Output) Board

아날로그 신호를 DSP에서 상위에 신호를 광신호로 전송하는 기능을 담당.

9) 조작판넬부

LCP PNL Door 전면에 위치하며 Local 모드 운전을 위해 필요한 부분이다. 누름 버튼 스위치, 선택스위치, 부저, 디지털 볼륨, BNC단자, RS232포터, FND 표시장치, 표시램프 등으로 이루어져 있다. Local모드 운전시 모든 운전은 이 패널부를 통해서 제어될 수 있다.

(아)-2. 제어 Logic

1) 제어전원은 별도의 단상 220V를 공급받는다. 이때 전압인가 여부를 나타내는 표시 Lamp가 켜진다. 표시 Lamp가 점등되지 않으면 계측기를 사용하여 전원상태를 점검한다.

2) 전원투입 표시 Lamp가 정상임을 확인한 후 "System ON" Push Button 스위치를 누르면 Relay에 의해 제어전원 투입용 전자 접촉기가 ON 되고 AC220V가 제어 Line에 투입되며 System은 초기화된다. 이때 DSP2000 보드는 현재 입력되고 있는 신호들을 판단하여 정상인지를 확인하고 만약 고장신호 및 Interlock 신호가 검출되면 즉시 해당 고장 및 Interlock Code를 VFD Board에 상태를 표시하고 경고음을 울린다. 이상이 없거나 고장 및 Interlock에 대한 적절한 조치가 취해지면 출력 전압 및 펄스폭, 각종 운전 파라메타 설정을 위해 대기한다.

3) 운전 파라메타 설정은 출력 전압, 출력 펄스폭, INTERRUPTION, OVR, OCR 4가지에 대해 실시한다. 초기상태의 파라메타 값은 가장 최근 운전시의 설정되었던 값으로 기억되어 있다. 우선 Set Button을 눌러 변경하고자 하는 파라메타를 선택한다. Set Button은 한 번씩 누를 때마다 4가지 파라메타가 번갈아 가며 선택된다. 이때 선택된 파라메타의 값이 4-digit FND Board에 점멸하며 표시된다. 그 상태에서 디지털 볼륨을 이용하여 원하는 값으로 설정후 Set Button을 눌러 원하는 값으로 설정한다. 값이 설정되면 FND Board는 점멸을 멈추고 설정된 값을 표시한다.

출력 전압은 0 ~ 120KV까지 1000V 단위로 가변 가능하다. 출력 전압, 출력 펄스폭, INTERRUPTION, OVR, OCR은 본 장치에서 설정된 값에 따라 펄스폭이 결정되는데 출력 펄스폭은 0 ~ 320sec까지 가변 가능 1sec 단위로 가변 가능하다. INTERRUPTION은 1ms ~ 100ms 까지는 1ms 단위로 가변 가능하고 OVR/OCR 기능을 설정할 수 있다.

Local Mode에서 설정하는 파라메타를 통신으로 설정할 수 있으며 외부에서 인가하는 펄스를 출력 할 수 있다. Remote Mode 운전시는 외부에서 인가되는 펄스를 DSP Board에서 입력받아 Duty를 계산하고 10% 이상이 되면 OverDuty Fault를 발생 시킨다.

4) STNBY ON 스위치 신호가 입력되고 고장신호가 없으면 DSP2000 Board는 VCB를 ON 시켜 주전원 투입을 하여 대기한다.

5) HV ON 스위치가 입력되면 CHS를 ON시켜 초기 충전을 하며 TR & Rectifier 및 Chopper의 DC Link 전압이 각각 6KV/450V를 초과하고 1초가 지나면 MS를 ON시킨다. 1초후 CHS를 OFF 시킨다.

- 6) HV OFF 스위치 신호가 입력되면 DSP2000 Board는 정지명령으로 판단하고 MS를 OFF 시키고 DC Link 캐패시터에 충전되어 있는 에너지는 저항을 통하여 30 초 이내에 방전시킨다.
- 7) HV ON 스위치 신호가 입력되고 고장신호가 없으면 DSP2000 Board는 Chopper에 Gate 신호를 인가하여 고압 출력단에 설정된 전압을 출력한다. 이 때 Gate 신호는 Softstart를 한다.
- 8) HV OFF 스위치 신호가 입력되면 DSP2000 Board는 Chopper의 Gate 신호를 OFF시키고 MS를 Off시킨다.
- 9) Pulse ON 스위치 신호가 입력되면 미리 설정된 파라미터에 따라 HVS를 ON하여 Pulse를 출력하며 자동으로 HVS를 OFF한다.
- 10) STNBY ON/OFF, HV ON/OFF와 Pulse ON/OFF Sequence는 순서가 있어 선행 Sequence가 수행되어야만 다음 Sequence가 실행된다. 즉 HV ON된 상태에서만이 Pulse ON을 할 수 있고 Pulse OFF된 상태에서만 HV OFF를 할 수 있다.
- 11) 운전중 고장신호가 입력되면 즉시 정지 Sequence를 수행하여 Pulse 스위치 OFF, HV OFF, MS OFF, VCB OFF, Mechanical Switch ON 신호를 동시에 출력하여 시스템을 정지시키고 해당 고장 Code를 FND 표시장치에 표시하며 VFD Board에 상태를 표시한다.
- 12) 고장이 발생하여 정지된 경우 Reset 신호가 입력될 때까지 Buzzer가 울리며 Reset 신호가 한번 입력되면 Buzzer가 정지되며 다시 한번 Reset 신호가 입력되면 DSP Board는 시스템을 초기화한다. Reset 스위치는 고장이 아닐 경우 조작되지 않는다.
- 13) 운전이 끝난 후 또는 비상사태 발생 시에는 System OFF 스위치를 눌러 제어 전원을 차단한다.

(아)-3. 제어신호

각종 제어 및 감시 신호는 제어보드에서 집중 관리된다. 제어보드에서 입.출력되는 신호를 아래에 정리하였다. 이 표는 제어부의 유지 보수는 물론 NBI 실험 조건에 따라 전원의 운전모드를 다양하게 변경할 수 있게 하는데 필요하다. 가속전원의 운전은 아크 전원, 필라멘트 전원, 감속전원 등과 유기적으로 통합운전 되어야 한다. 따라서 이들 각 전원의 제어부는 상위의 제어부에 의해 통합제어된다.

1. DSP2000 보드의 입력 신호

No	신호	약어	유형	설명
1	CHS1 ON	CHS1ON	Digital	초기 충전용 ASS ON
2	CHS1 OFF	CHS1OFF	Digital	초기 충전용 ASS OFF
3	CHS2 ON	CHS2ON	Digital	초기 충전용 ASS ON
4	CHS2 OFF	CHS2OFF	Digital	초기 충전용 ASS OFF
5	CHS3 ON	CHS3ON	Digital	초기 충전용 ASS ON
6	CHS3 OFF	CHS3OFF	Digital	초기 충전용 ASS OFF
7	CHS4 ON	CHS4ON	Digital	초기 충전용 ASS ON
8	CHS4 OFF	CHS4OFF	Digital	초기 충전용 ASS OFF
9	CHS5 ON	CHS5ON	Digital	초기 충전용 ASS ON
10	CHS5 OFF	CHS5OFF	Digital	초기 충전용 ASS OFF
11	CHS6 ON	CHS6ON	Digital	초기 충전용 ASS ON
12	CHS6 OFF	CHS6OFF	Digital	초기 충전용 ASS OFF
13	MS1 Close	MS1ON	Digital	주 ASS ON
14	MS1 Open	MS1OFF	Digital	주 ASS OFF
15	MS2 Close	MS2ON	Digital	주 ASS ON
16	MS2 Open	MS2OFF	Digital	주 ASS OFF
17	MS3 Close	MS3ON	Digital	주 ASS ON
18	MS3 Open	MS3OFF	Digital	주 ASS OFF
19	MS4 Close	MS4ON	Digital	주 ASS ON
20	MS4 Open	MS4OFF	Digital	주 ASS OFF
21	MS5 Close	MS5ON	Digital	주 ASS ON
22	MS5 Open	MS5OFF	Digital	주 ASS OFF
23	MS6 Close	MS6ON	Digital	주 ASS ON
24	MS6 Open	MS6OFF	Digital	주 ASS OFF
25	VCB Open	VCBON	Digital	VCB ON
26	VCB Close	VCBOFF	Digital	VCB OFF
27	MCS Open	MCSON	Digital	Mechanical Crowbar Switch ON
28	MCS Close	MCSOFF	Digital	Mechanical Crowbar Switch OFF
29	Chopper Gate Signal	GAT1	Digital	Pulse 신호
30	Chopper Gate Signal	GAT2	Digital	Pulse 신호
31	Chopper Gate Signal	GAT3	Digital	Pulse 신호
32	Chopper Gate Signal	GAT4	Digital	Pulse 신호
33	Chopper Gate Signal	GAT5	Digital	Pulse 신호
34	Chopper Gate Signal	GAT6	Digital	Pulse 신호
35	Chopper Gate Signal	GAT7	Digital	Pulse 신호
36	Chopper Gate Signal	GAT8	Digital	Pulse 신호
37	Chopper Gate Signal	GAT9	Digital	Pulse 신호
38	Chopper Gate Signal	GAT10	Digital	Pulse 신호
39	Chopper Gate Signal	GAT11	Digital	Pulse 신호
40	Chopper Gate Signal	GAT12	Digital	Pulse 신호
41	Chopper Gate Signal	GAT13	Digital	Pulse 신호
42	Chopper Gate Signal	GAT14	Digital	Pulse 신호
43	Chopper Gate Signal	GAT15	Digital	Pulse 신호
44	Chopper Gate Signal	GAT16	Digital	Pulse 신호
45	Chopper Gate Signal	GAT17	Digital	Pulse 신호
46	Chopper Gate Signal	GAT18	Digital	Pulse 신호
47	Chopper Gate Signal	GAT19	Digital	Pulse 신호
48	Chopper Gate Signal	GAT20	Digital	Pulse 신호
49	Chopper Gate Signal	GAT21	Digital	Pulse 신호
50	Chopper Gate Signal	GAT22	Digital	Pulse 신호
51	Chopper Gate Signal	GAT23	Digital	Pulse 신호
52	Chopper Gate Signal	GAT24	Digital	Pulse 신호
53	Chopper Gate Signal	GAT25	Digital	Pulse 신호
54	Chopper Gate Signal	GAT26	Digital	Pulse 신호
55	Chopper Gate Signal	GAT27	Digital	Pulse 신호
56	Chopper Gate Signal	GAT28	Digital	Pulse 신호
57	Chopper Gate Signal	GAT29	Digital	Pulse 신호
58	Chopper Gate Signal	GAT30	Digital	Pulse 신호
59	Chopper Gate Signal	GAT31	Digital	Pulse 신호
60	Chopper Gate Signal	GAT32	Digital	Pulse 신호
61	Chopper Gate Signal	GAT33	Digital	Pulse 신호
62	Chopper Gate Signal	GAT34	Digital	Pulse 신호
63	Chopper Gate Signal	GAT35	Digital	Pulse 신호
64	Chopper Gate Signal	GAT36	Digital	Pulse 신호
65	Chopper Gate Signal	GAT37	Digital	Pulse 신호
66	Chopper Gate Signal	GAT38	Digital	Pulse 신호
67	Chopper Gate Signal	GAT39	Digital	Pulse 신호
68	Chopper Gate Signal	GAT40	Digital	Pulse 신호
69	HVS On Signal	HVS	Digital	Pulse 신호
70	Crowbar Switch On Signal	CRAW	Digital	Pulse 신호
71	Over Voltage	OVMON	Analog	출력 과전압 Monitorina(BNC)
72	Over Current	OCMON	Analog	출력 과전류 Monitorina(BNC)
73	Over Temperature	OTMON	Analog	과온도 Monitorina(BNC)
74	SP1	SP1MON	Analog	Spare Monitorina(BNC)
75	Voltage Command	VCMDMON	Analog	출력전압 명령치 신호 Monitorina(BNC)
76	Over Current Reference	OCBMON	Analog	Over Current Reference Monitorina(BNC)
77	RS232 TXD0	TXD0	Digital	END보드 P/S 제어기의 통신
78	RS422 TXD1	TXD1	Digital	상위 PLC와의 통신
79	System Off	SYSOFF	Digital	제어전원 OFF
80	Buzzer(경고음)	BUZZ	Digital	경고음
81	Interlock Lamp	INTLOCK	Digital	Interlock 표시램프 On/Off
82	Fault Lamp	FAULT	Digital	고장신호 표시램프 On/Off
83	System Switch Lamp	LSYSTEM	Digital	System Switch 표시램프 On/Off
84	Stnby Switch Lamp	LSTNBY	Digital	Stnby Switch 표시램프 On/Off
85	HV Switch Lamp	LHV	Digital	HV Switch 표시램프 On/Off
86	Pulse Switch Lamp	LPULSE	Digital	Pulse Switch 표시램프 On/Off

2. DSP2000 보드의 출력 신호

No.	신 호	약어	분류	설 명
1	GND Bar Position	GB	Digital	접지봉 위치 확인
2	Mechanical Crowbar	MCS	Digital	Mechanical Crowbar 동작
3	Crowbar Panel Door Open	CPDR	Digital	Panel Door Open
4	STNBY ON/OFF	STNBY	Digital	VCB ON/OFF 명령 신호
5	HV ON/OFF	HV	Digital	고전압 발생 명령 신호
6	Pulse ON/OFF	PULSE	Digital	펄스 출력 ON/OFF
7	Reset	RST	Digital	Fault시 Reset 신호
8	Local Mode	LOC	Digital	내부 선택 스위치 신호
9	Test	TEST	Digital	저전압 시험
10	Remote	REM	Digital	외부 선택 스위치 신호
11	Set	SET	Digital	파라메타 설정
12	Encode	ENC	Digital	디지털 볼륨 신호
13	RS422	RXD0	Digital	상위와의 통신
14	RS232	RXD1	Digital	FND와의 통신
15	VCB ON	VCB	Digital	VCB ON/OFF 상태 확인 신호
16	CHS1 ON	CHS1	Digital	CHS1 ON/OFF 상태 확인 신호
17	CHS2 ON	CHS2	Digital	CHS2 ON/OFF 상태 확인 신호
18	CHS3 ON	CHS3	Digital	CHS3 ON/OFF 상태 확인 신호
19	CHS4 ON	CHS4	Digital	CHS4 ON/OFF 상태 확인 신호
20	CHS5 ON	CHS5	Digital	CHS5 ON/OFF 상태 확인 신호
21	CHS6 ON	CHS6	Digital	CHS6 ON/OFF 상태 확인 신호
22	MS1 ON	MS1	Digital	MS1 ON/OFF 상태 확인 신호
23	MS2 ON	MS2	Digital	MS2 ON/OFF 상태 확인 신호
24	MS3 ON	MS3	Digital	MS3 ON/OFF 상태 확인 신호
25	MS4 ON	MS4	Digital	MS4 ON/OFF 상태 확인 신호
26	MS5 ON	MS5	Digital	MS5 ON/OFF 상태 확인 신호
27	MS6 ON	MS6	Digital	MS6 ON/OFF 상태 확인 신호
28	HVS Fault	HVSF	Digital	HVS Fault 상태 확인 신호
29	HVS ON	HVS_ON_ACK	Digital	HVS ON 상태 확인 신호
30	Chopper Stack1 Fault	GDF_CHOP1	Digital	Chopper Stack1 Fault 상태 확인 신호
31	Crowbar Switch ON	CRAW_ON_ACK	Digital	Crowbar Switch ON 상태 확인 신호
32	Crowbar Switch Fault	CRAWF	Digital	Crowbar Switch Fault 상태 확인 신호
33	Chopper Stack1 Fault	GDF_CHOP1	Digital	Chopper Stack1 Fault 상태 확인 신호
34	Chopper Stack2 Fault	GDF_CHOP2	Digital	Chopper Stack2 Fault 상태 확인 신호
35	Chopper Stack3 Fault	GDF_CHOP3	Digital	Chopper Stack3 Fault 상태 확인 신호
36	Chopper Stack4 Fault	GDF_CHOP4	Digital	Chopper Stack4 Fault 상태 확인 신호
37	Chopper DC Link Voltage	VCHOP	Analog	Chopper DC Link 전압
38	Chopper 출력전압	HVCHOP	Analog	Chopper 출력전압
39	Chopper Current	ICHOP	Analog	Chopper 출력 전류
40	Output Voltage	HVDC	Analog	출력 전압
41	Pulse Voltage	HVOUT	Analog	출력 펄스 전압
42	Pulse Current1	IOUT	Analog	출력 펄스 전류1
43	Pulse Current2	IOUT_PROT	Analog	출력 펄스 전류2(PCT)
44	전원	EP5		+5V
45	전원	GND		Ground
46	전원	EP15		+15V
47	전원	EN15		-15V
48	HVTR1 Over Temperature	HVTR1_TMP	Digital	HVTR TANK1 과열
49	HVTR1 Over Pressure	HVTR1_PSR	Digital	HVTR TANK1 과압
50	HVTR2 Over Temperature	HVTR2_TMP	Digital	HVTR TANK2 과열
51	HVTR2 Over Pressure	HVTR2_PSR	Digital	HVTR TANK2 과압
52	HVTR3 Over Temperature	HVTR3_TMP	Digital	HVTR TANK3 과열
53	HVTR3 Over Pressure	HVTR3_PSR	Digital	HVTR TANK3 과압
54	HVTR4 Over Temperature	HVTR4_TMP	Digital	HVTR TANK4 과열
55	HVTR4 Over Pressure	HVTR4_PSR	Digital	HVTR TANK4 과압
56	HVTR5 Over Temperature	HVTR5_TMP	Digital	HVTR TANK5 과열
57	HVTR5 Over Pressure	HVTR5_PSR	Digital	HVTR TANK5 과압
58	LVTR1 Over Temperature	LVTR1_TMP	Digital	LVTR TANK1 과열
59	LVTR1 Over Pressure	LVTR1_PSR	Digital	LVTR TANK1 과압
60	LVTR2 Over Temperature	LVTR2_TMP	Digital	LVTR TANK2 과열
61	LVTR2 Over Pressure	LVTR2_PSR	Digital	LVTR TANK2 과압
62	LVTR3 Over Temperature	LVTR3_TMP	Digital	LVTR TANK3 과열
63	LVTR3 Over Pressure	LVTR3_PSR	Digital	LVTR TANK3 과압
64	LVTR4 Over Temperature	LVTR4_TMP	Digital	LVTR TANK4 과열
65	LVTR4 Over Pressure	LVTR4_PSR	Digital	LVTR TANK4 과압

(아)-4. Monitoring

1) Monitoring

Monitoring은 두가지로 분류하여 행한다. 첫 번째는 Meter에 의한 Monitoring이고 두번째는 아날로그 신호 및 디지털 신호를 BNC잭을 통해 인출해 놓음으로써 User가 필요시 계측기를 통해 Monitoring할 수 있도록 한다. Monitoring 항목은 다음과 같다.

No.	항목	방법	Full Scale	비고
1	출력 전압	Meter		FND 보드 Display
2	출력 전류	Meter		FND 보드 Display
3	출력 펄스 전압	Meter		FND 보드 Display
4	출력 펄스 전류	Meter		FND 보드 Display 평균 전류 Monitor
5	출력 펄스 전압	BNC	10,000:1	15V Analog Output
6	출력 펄스 전류	BNC	1V/10A	10V Analog Output
7	Fault	Meter		FND 보드 Display
8	Interlock Lamp	Lamp		Lamp
9	Fault Lamp	Lamp		Lamp
10	Over Current Reference	Meter/BNC	1V/10A	10V Analog Output & FND 보드 Display
11	Over Current	Meter/BNC	15V TTL	15V Digital Output & FND 보드 Display
12	Over Voltage	Meter/BNC	15V TTL	15V Digital Output & FND 보드 Display
13	Over Temperature	BNC	15V TTL	15V Digital Output & FND 보드 Display
14	Spare	BNC	15V TTL	15V Digital Output & FND 보드 Display

2) Fault 및 Interlock Monitoring

Interlock 및 Fault는 조작 판넬의 Lamp와 Buzzer로써 사용자에게 알리며 Interlock 및 Fault의 종류를 알기 위해 각 Interlock 및 Fault 마다 고유의 Code를 부여하고 해당 Code를 VFD 보드에 표시한다.

3) 운전 상태 Monitoring

인버터 판넬 문 전면에 위치하여 Local 운전시 System의 운전 상태를 Monitoring 할 수 있게 함으로써 운전을 용이하게 한다.

No.	항목	방법	비고
1	System ON/OFF	Button Lamp	조광형 누름 버튼 램프임
3	Stnby ON/OFF	Button Lamp	조광형 누름 버튼 램프임
4	HV ON/OFF	Button Lamp	조광형 누름 버튼 램프임
5	Pulse ON/OFF	Button Lamp	조광형 누름 버튼 램프임
6	출력전압 설정치	4-digit FND	
7	펄스폭 설정치	4-digit FND	
8	Interruption 설정치	4-digit FND	
9	OVR/OCR 설정치	4-digit FND	
10	운전시간	4-digit FND	System ON을 기준으로 시간을 카운터 함

(아)-5. Interlock / Fault

1) 정의

- ▶ Interlock : 운전조건과 관련된 것으로 주로 사용자의 안전과 관련된 신호임.
- ▶ Fault : 과전압 과전류를 비롯한 System의 안전과 관련된 신호임.

Interlock과 Fault는 부논리로 동작한다. 즉, 신호가 인가되고 있으면 정상으로 간주하고 신호가 들어오지 않으면 Interlock 및 Fault로 간주한다. 따라서 Spare의 처리는 점퍼선을 이용하여 신호를 강제로 인가하여 주도록 한다.

2) Interlock 항목

No.	항목	동작	Code	비고
1	Door Open 1	정지	10	문개방 1
2	Door Open 2	정지	11	문개방 2
3	Door Open 3	정지	12	문개방 3
4	Door Open 4	정지	13	문개방 4
5	GND Bar Position 1	정지	14	접지봉 정위치 1
6	GND Bar Position 2	정지	15	접지봉 정위치 2
7	MCS	정지	16	Mechanical Crowbar Switch 정위치

※ 정지 : Chopper OFF, MS/CHS OFF, HVS OFF, VCB OFF

3) Fault 항목

No	항목	기준치	Level	동작	Code	비고
1	CHOC	80A±10%	I	정지	20	Chopper 출력 과전류
2	OV	140KV±10%	I	정지	21	출력 과전압
3	OC	80±10%	I	정지	22	출력 과전류
4	HVSF		II	정지, Crowbar	23	HVS Fault 및 OFF 불능
5	MS1F		I	정지	24	MS1 ON/OFF 불능
6	MS2F		I	정지	25	MS2 ON/OFF 불능
7	MS3F		I	정지	26	MS3 ON/OFF 불능
8	MS4F		I	정지	27	MS4 ON/OFF 불능
9	MS5F		I	정지	28	MS5 ON/OFF 불능
10	MS6F		I	정지	29	MS6 ON/OFF 불능
11	CHS1F		I	정지	30	CHS1 ON/OFF 불능
12	CHS2F		I	정지	31	CHS2 ON/OFF 불능
13	CHS3F		I	정지	32	CHS3 ON/OFF 불능
14	CHS4F		I	정지	33	CHS4 ON/OFF 불능
15	CHS5F		I	정지	34	CHS5 ON/OFF 불능
16	CHS6F		I	정지	35	CHS6 ON/OFF 불능
17	VCBF		I	정지	36	VCBF ON/OFF 불능
18	HVTR1_TMP		I	정지	37	HVTR TANK1 과열
19	HVTR2_TMP		I	정지	38	HVTR TANK2 과열
20	HVTR3_TMP		I	정지	39	HVTR TANK3 과열
21	HVTR4_TMP		I	정지	40	HVTR TANK4 과열
22	HVTR5_TMP		I	정지	41	HVTR TANK5 과열
23	HVTR1_PSR		I	정지	42	HVTR TANK1 압력초과

No	항목	기준치	Level	동작	Code	비고
24	HVTR2_PSR		I	정지	43	HVTR TANK2 압력초과
25	HVTR3_PSR		I	정지	44	HVTR TANK3 압력초과
26	HVTR4_PSR		I	정지	45	HVTR TANK4 압력초과
27	HVTR5_PSR		I	정지	46	HVTR TANK5 압력초과
28	LVTR1_TMP		I	정지	47	LVTR TANK1 과열
29	LVTR2_TMP		I	정지	48	LVTR TANK2 과열
30	LVTR3_TMP		I	정지	49	LVTR TANK3 과열
31	LVTR4_TMP		I	정지	50	LVTR TANK4 과열
32	LVTR1_PSR		I	정지	51	LVTR TANK1 압력초과
33	LVTR2_PSR		I	정지	52	LVTR TANK2 압력초과
34	LVTR3_PSR		I	정지	53	LVTR TANK3 압력초과
35	LVTR4_PSR		I	정지	54	LVTR TANK4 압력초과
36	GDF_CHOP1		I	정지	55	Chopper Stack1 Gate Fault
37	GDF_CHOP2		I	정지	56	Chopper Stack2 Gate Fault
38	GDF_CHOP3		I	정지	57	Chopper Stack3 Gate Fault
39	GDF_CHOP4		I	정지	58	Chopper Stack4 Gate Fault
40	CRAWF		II	정지	59	Crowbar Switch On실패

※정지 : 초퍼 OFF, MS/CHS OFF, VCB OFF

(아)-6. DSP 보드 하드웨어 사양

No.	항목	규격	비고
1	Analog Input	20개	
2	Analog Output	20개	
3	Digital Input	60개	
4	Digital Output	60개	
5	Gate Signal Output	16개	
6	통신 포트	RS232 × 2개	
8	DSP	TMS320C32, 33MHz	
9	ROM	68256 × 2개	32kbyte
10	RAM	6161002 × 1개	64kbyte, 16bit
11	EPLD	EPM7192	ALTERA
12	A/D Converter	AD7891	
13	D/A Converter	AD7226	
14	전원	5V, ±15V	
15	Size	228.6mm × 166.4mm × 1.6t	

(자) 설계계산서

(자)-1. 시스템 분석

1) 목적

단품들의 설계계산을 위한 전체 시스템의 용량 및 전압, 전류들을 검토한다.

2) 시스템 구성

- 1) 입력부(VCB 1대, GS 12대)
- 2) 특고압부(TR & RECTIFIER TANK 5면, LVTR TANK 4면, CHOPPER 4면)
- 3) Pulse Output Switch 부(HVS TANK 1면, CROWBAR PANEL 1면)



3) 기자재 구매 사양

- 1) 입력 : 3상 22.9KV/18KV 60Hz,
- 2) 출력 : 120KVdc, 70A 8.4MW

4) 검토 내용

- 1) 정격 출력 용량 : $P_{out} = V \times I = 120KV \times 70A = 8.4MW$
- 2) 정격 입력 용량 : $P = \frac{P_{out}}{\eta} = \frac{8.4MW}{90\%} = 9.3MW$
- 3) 정격 입력 전류 : $I = \frac{P}{\sqrt{3} \times V} = \frac{9.3MW}{\sqrt{3} \times 22.9KV} = 234A$ (입력 22.9KV일 때)
 $I = \frac{P}{\sqrt{3} \times V} = \frac{9.3MW}{\sqrt{3} \times 18KV} = 298A$ (입력 18KV일 때)
- 4) 출력전압 : 120KVdc
- 5) 출력 전류 : 70A
- 6) 출력 펄스폭 : 320sec

(자)-2. Vacuum Circuit Breaker(VCB)

1) 목적

출력단에 과전류가 흐를 때 Controller에서 트립 시킨다.

2) 용량 계산

$$\text{정격 전류 용량 : } I = \frac{P}{\sqrt{3} \times V} = \frac{9.3MW}{\sqrt{3} \times 22.9KV} = 234A (\text{입력 } 22.9KV \text{ 일 때})$$

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \times V} = \frac{9.3MW}{\sqrt{3} \times 18KV} = 298A (\text{입력 } 18KV \text{ 일 때})$$

$$\text{VCB 내전류 용량 : } I \times 1.5 = 298 \times 1.5 = 447A$$

3) 사양 선정

VCB 정격용량을 확인하여 25.8KV 600A 12.5KA로 선정한다.

(자)-3. Gas Insulated Load Break Switch(MS1-6)

1) 목적

입력과 출력 및 부하단 간의 개폐에 주목적을 둔다.

2) 용량 계산

MS1-5의 부하단의 정격 용량 : 1500KVA

$$\text{MS1-5의 1대의 정격 전류 용량 : } I = \frac{P}{\sqrt{3} \times V} = \frac{1500KVA}{\sqrt{3} \times 18KV} = 48A$$

MS6의 부하단의 정격 용량 : 2100KVA

$$\text{MS6의 정격 전류 용량 : } I = \frac{P}{\sqrt{3} \times V} = \frac{2100KVA}{\sqrt{3} \times 18KV} = 67A$$

MS1-5의 LBS 내전류 용량 : $I \times 1.5 = 48 \times 1.5 = 72A$

MS6의 LBS 내전류 용량 : $I \times 1.5 = 67 \times 1.5 = 101A$

3) 사양 선정

GS의 정격용량을 확인하여 MS1-6까지 25.8KV 200A로 선정한다.

(주) Gas Insulated Load Break Switch의 이해

SF6 가스절연 부하개폐기로서 수용가의 인입구에 설치하며, 개폐허용회

수는 무부하시 5000회 정도이다.

(자)-4. HVTR & Rectifier Tank

1) 목적

입력 전원을 200KV 절연하고 교류 입력을 DC 고전압으로 출력한다.

2) 사양

1) 출력전압 : 110KVdc

2) 출력전류 : 70A

3) 기본개요

110KVdc/10의 전압을 갖는 상용주파수 정류기 10대를 직렬로 연결한다.

전압 : 110KVdc/10 = 11KVdc

전류 : 70A

용량 : 11KVdc × 70 = 770KW 로 정류기 10대를 직렬하며, 입력 TR은 5대로 Δ/Δ -Y로 구성되고 필요 전압에 따라 대수 제어를 한다.

4) 용량 계산

- HVTR : 5대

① 1차 전압 : AC22.9KV/18KV

② 정류부 용량 : 770KW

③ TR 용량 : 순부하 2 × 770KW = 1500KVA

④ 상수 : 3상

⑤ TR 예상 %IZ = 7.5%

⑥ TR 2차 전압 : 직류 11KV를 얻기 위한 입력전압은

$$V_{ac} = \frac{11KV}{1.4142 \times 0.95} = 8.1KV$$

⑦ TR 2차 전류 : $\frac{1500KVA}{2 \times 1.7321 \times 8.1KV} = 54A$

⑧ 등가 인덕턴스 : $(8.1KV/1.7321 \times 0.075)/54/377 = 18.5mH$

⑨ 입력은 Δ 이고 출력은 Δ 및 Y이다. Δ 에는 홀수번호 정류기를, Y에는 짝수번호 정류기를 연결한다.(6상 12펄스 정류)

⑩ 절연 내전압 : 1차와 2차간의 내전압은 200KVdc 1mA 1min이며 2차간은 2차전압의 2배의 내전압을 갖는다.

⑪ EMI 및 Surge 차폐(1-2차간 shield 차폐) 접지

고압 정류기 : 5대

① 입력단 전압 : 삼상 AC8.1KV

② 구성회로 : 6상 12Pulse 전파정류 회로

③ 용량 계산

정격 출력 전압 11KV * 2Series

정격 직류 전류 70A

평균 Diode 전류 23A

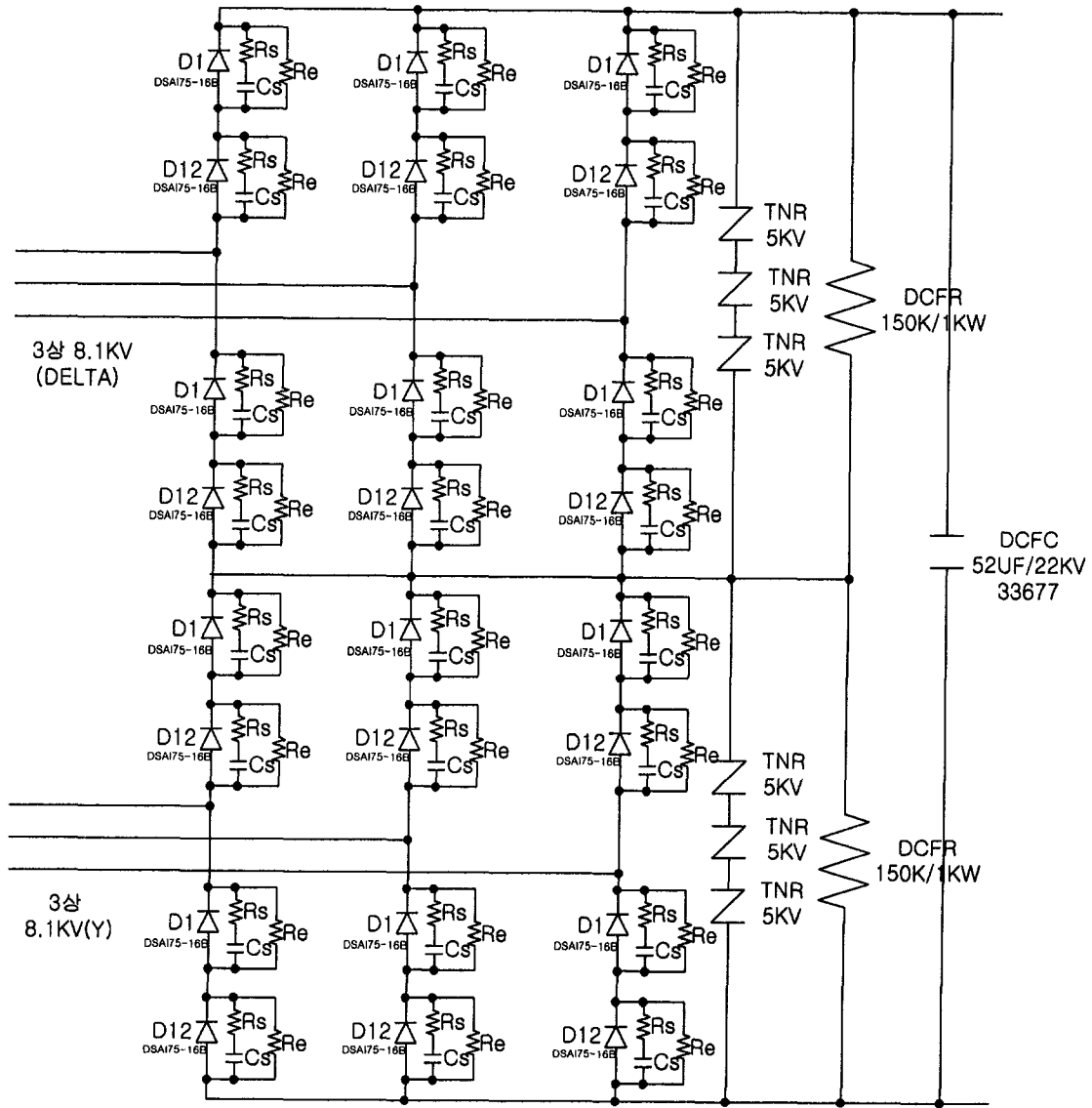
④ 사양 선정

정류용 Diode

정격 전압 1600V

평균 전류 70A

⑤ Diode 소자의 선정



IXYS사의 1600V, 100A의 DSA75-16B와 DSAI75-16B 소자를 선정하고 12개를 직렬 연결하여 사용한다.

$$1600V \times 12EA = 19200V$$

- TNR

① 목적

본 계산은 고압 정류기 후단에 설치되는 TNR의 용량계산을 하는데 그 목적이 있다.

② 유입 Impulse Surge 량 : 현재로서는 Surge 발생량을 정량적으로 알 수

없으나 입력단의 전원 ON-OFF시 발생하는 Surge를 충분히 억제할 수 있어야 함.

- ③ Surge Protector 소자의 선택 : 현재까지 개발되어 실용화된 Surge Protector 소자 중 가장 많이 사용되고 있으며, 이상적인 Surge 억제특성을 가진 것으로 알려진 ZnO Varistor Type을 채택함.
- ④ 동작전압의 설정 : ZnO Varistor를 교류 전압전원에 적용할 경우 전압변동 및 환경, 수명등을 고려하여 동작전압의 150%정도의 전압으로 설정하여 15KV TNR을 설치한다.
- ⑤ Impulse Surge 억제능력 : Impulse Surge 억제능력은 크면 클수록 좋으나 적용환경을 충분히 고려하여 최대 20KA/2회의 Surge 흡수능력을 갖는 소자 직경 Φ 32mm 급을 채택함.
- ⑥ 사용소자
 - Z1, Z2, Z3 : CCNR32D502K
 - 동작전압 : 5KVdc/1mA
 - Surge 내량 : 25KA/1회, 20KA/2회
 - 수량 : 3개 직렬

(자)-5. LVTR Tank(LVTR1-4)

1) 목적

입력 전원을 60KVdc 절연하여 보호하고 40대의 Chopper에 전원을 공급하기 위하여 LVTR을 설치한다.

2) Chopper 사양

- 1) 출력전압 : 30KVdc
- 2) 출력전류 : 70A

3) 기본개요

30KVdc/40대의 전압 750Vdc를 1대의 Chopper가 출력할 수 있도록 상용주파수 TR을 설계한다.

전압 : 30KVdc/40대 = 750Vdc

전류 : 70A

용량 : $750Vdc \times 70 = 53KW$ 로 정류기 및 Chopper 10대를 직렬연결하며
입력 TR은 Δ/Y 로 10CH을 구성하여 4대의 LVTR Tank을 설계한다.

4) 용량 계산

- LVTR : 1대

- ① 1차 전압 : AC22.9KV/18KV
- ② 정류부 용량 : $750Vdc \times 70 = 53KW$
- ③ TR 용량 : 순부하 $10 \times 53KW = 530KVA$
- ④ 상수 : 3상
- ⑤ TR 예상 %IZ = 7.5%-10%
- ⑥ TR 2차 전압 : 직류 750Vdc를 얻기 위한 입력전압은

$$Vac = \frac{750V}{1.4142 \times 0.95} = 560V$$

- ⑦ TR 2차 전류 : $\frac{530KVA}{10 \times 1.7321 \times 560V} = 54.6A$
- ⑧ 입력은 Δ 이고 출력은 Δ 및 Y 10CH이다. Δ 는 홀수번호 Chopper에, Y는 짝수 번호 Chopper에 연결한다.(12상 정류)
- ⑨ 절연 내전압 : 1차와 2차간의 내전압은 60KVdc 1mA 1min이며, 2차간의 내전압은 2차전압의 2배 전압으로 한다.
- ⑩ EMI 및 Surge 차폐(1-2차간 shield 차폐) 접지
- ⑪ LVTR 2차에 150uH의 Common-mode Choke(Noise Filter)를 설치하고 철심은 입력측의 한 단자에 고정한다.

(자)-6. LVTR & Chopper Panel

1) 목적

본 계산은 Rectifier 및 Chopper의 용량계산을 하는데 그 목적이 있다.

2) 적용환경

- 사양

- ① 출력전압 : +30KV
- ② 출력전류 : 70A
- ③ E-fold Time : 0.1msec이하
- ④ Over Shoot/Under Shoot : 4%이하
- ⑤ 리플전압 : 2%이하

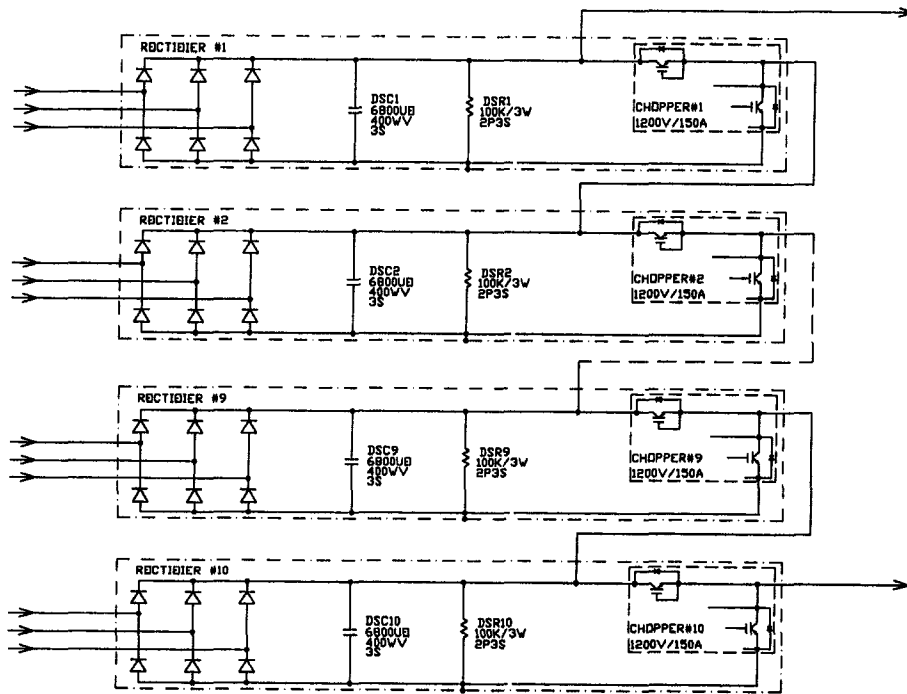
- 구성회로 : Rectifier & Chopper Module의 40대가 직렬 연결한다.

3) 용량 계산(Rectifier & Chopper Module 1set 설계)

정격 출력 용량	53KVA
정격 직류 전류	70A
정격 직류 전압	750Vdc
평균 Diode 전류	23A

4) 소자 선정

- ① 정류용 Diode : 1200V/70A를 고려하여 IXYS사의 VUO110-14N07(1400V/127A)로 선정한다.
- ② CHOPPER용 IGBT : 1200V/70A를 고려하여 SEMIKRON사의 SKM145GB124D(1200V/145A)로 선정한다.
- ③ 직류단 Capacitor : 6800uF * 3series = 2267uF으로 선정한다.
- ④ 방전저항은 150kΩ 18W로 선정한다.



(자)-7. Pre-charge 회로

1) 목적

TR & Rectifier 및 Rectifier & Chopper의 직류 Capacitor를 초기 충전시키기 위한 회로 정격을 산정 한다.

2) 용량 계산

초기 충전 시간 < 5 Sec

최대 충전 초기 전류 < 10A

초기 충전 전압 = 정격 전압의 약 80%

3) 회로 구성 및 동작

① TR & Rectifier 초기충전 : Stnby 신호가 입력되면 CHS1을 ON시켜 CHR1을 통해 DCFC1을 초기충전 시킨다. DCFC1 전압이 17KV(80%) 이상 상승하도록 충분한 시간이 경과한 후 MS1을 ON시키고 CHS1을 OFF시킨다. 충전시간은 시정수 = RC로 계산하면 5초이내이다.

$$\text{시정수} = RC = 30k\Omega \times 52\mu F \times 2\tau(86\%) = 3.1 \text{ sec}$$

② Rectifier & Chopper 초기충전 : Snby 신호가 입력되면 CHS를 ON시켜 CHR을 통해 DCS을 초기충전 시킨다. DSC 전압이 600V(80%) 이상 상승하도록 충분한 시간이 경과한 후 MS을 ON시키고 CHS를 OFF시킨다. 충전시간은 시정수 = RC로 계산하면 5초이내이다.

$$\text{시정수} = RC = 30k\Omega \times (2267\mu F/40) \times 2\tau(86\%) = 3.4 \text{ sec}$$

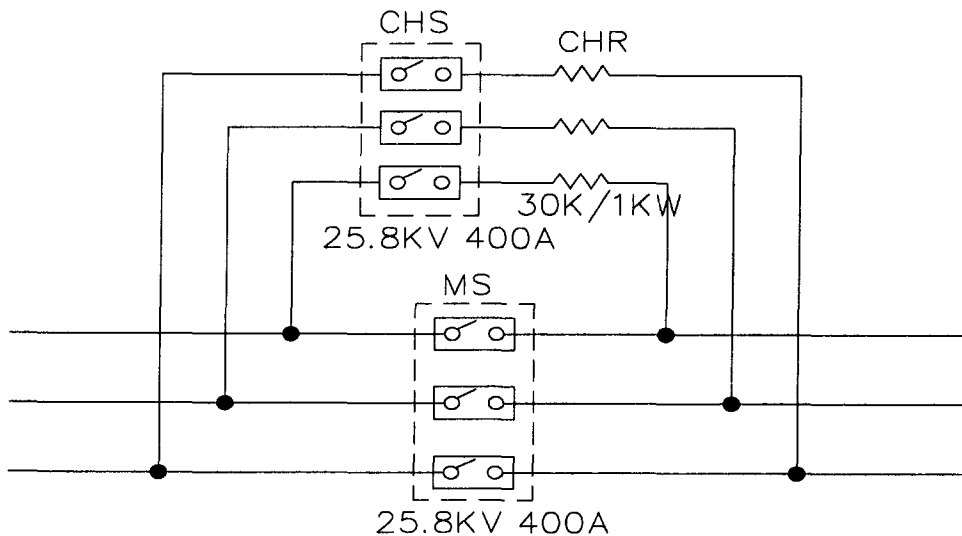
4) 사양선정

충전 저항(CHR1-5)

30kΩ 1KW

충전 저항(CHR6)

30kΩ 1KW



(자)-8. High Voltage Switch Tank(HVS)

1) 목 적

고전압을 Pulse로 발생시킬 수 있는 스위치로서 HVS 용량을 계산하는데 목적이 있다.

2) 용량계산

정격 전압	120KVdc
정격 전류	70A
펄스폭/Interval	320sec/30min
상승 시간	25.0 μ S 이하
하강 시간	25.0 μ S 이하

3) 사양 선정

운전시간(320sec)과 펄스 출력전류에 의하여 HVS 소자는 1700V 75A 3병렬로 사용하며 내전압은 200KV로 160%의 여유로 선정하며, 최대 차단 전류는 2KA이다.

4) 소자선정

사양선정에 의거하여 IXYS사의 IXBH42N170(1700V/75A)로 선정하며 140개를 직렬 연결하여 사용한다.

(자)-9. Crowbar Panel

1) 목 적

고전압을 Pulse Off시에 HVS가 파괴 및 Off가 안될 때에 Crowbar Switch가 동작하여 부하를 보호한다.

2) 사양

Operating voltage range	35 ~ 150KV
Operating current	20KA
Electric strength recovery time	50us
Delay time	1.1us
Trigger voltage	75KV
Trigger current, not less than	2A
Trigger current duration, not less than	2A
Working temperature range	15 ~ 35

3) 소자 선정

사양에 근거하여 러시아산 RGU-2(150KV 스위치)로 선정한다.

(자)-10. 출력 고전압 Reactor

1) 목적

HVS의 과전류 후 차단시간은 2usec이며 200A이하에서 Off하기로 용량을 선정한다.

2) 용량 계산

$$L = \frac{120KV}{(200-70) \times 2us} = 1.8mH \text{ 이상}$$

3) 사양 선정

인덕턴스	6mH
전류	70A
절연내전압	200KVdc 1분

(자)-11. 출력 CLR

200A에 차단시 CLR에 걸리는 전압을 정격 전압의 10%로 한다.
CLR < (120KV*10%)/200A = 60Ω이므로 50Ω/200W를 선정한다.

(자)-12. High Voltage Switch Tank(HVS) 방열 계산

1) 입력자료

- 오일의 비중 : $G = 0.90[\text{Ton}/\text{m}^3] = 900[\text{kg}/\text{m}^3]$
- 오일의 비열 : $C = 0.52[\text{kCal}/\text{kg}/^\circ\text{C}] = 2.18[\text{kJ}/\text{kg}/^\circ\text{C}]$
- 오일 탱크 용적 : $V = 1.09[\text{m}] * 1.29[\text{m}] * 1.40[\text{m}] = 1.97[\text{m}^3]$
- 오일의 무게 : $M = G * V = 900[\text{kg}/\text{m}^3] * 1.97[\text{m}^3] = 1.77e3[\text{kg}]$
- 발열량
IGBT SWITCH, $P_{sw} = 3.00V * 100EA * 70.0A = 21.0[\text{kW}]$
더미 저항, $P_{dr} = 8.40[\text{kW}]$
 $P_{soc} = P_{sw} + P_{dr} = 21.0[\text{kW}] + 8.40[\text{kW}] = 29.4[\text{kW}]$
- 최대 운전시간: $t_{oper} = 320[\text{sec}]$
- 운전 인터벌 : $30[\text{min}] = 1.8e3[\text{sec}]$

2) 운전시 온도상승, dToper

방열기의 방열량은 발열량을 무시하면

$$\begin{aligned}
 dT_{oper} &= P_{soc} / M / C * t_{oper} \\
 &= 29.4[kW] / 1.77e3[kg] / 2.18[kJ/kg/°C] * 320[sec] \\
 &= 2.94[°C]
 \end{aligned}$$

3) 필요한 방열기 용량

운전시 온도 상승은 2.94[°C]이며 운전 Duty를 고려하면

$$29.4KW \times Duty \frac{5min}{30min} = 4.90KW \text{ 이므로 } 5KW \text{ 로 설계한다.}$$

(자)-13. TR & REC TANK 소자용 발열 및 방열 설계

1) Diode소자 기중 방열 계산

- DIODE 소자 발열량 계산식

$$\begin{aligned}
 P_m &= P_{m1} \times \text{수량} \\
 &= 2 \{ (V_{to} \times I_{av}) + (R_t \times I_{av} \times (120/360)) \} \\
 &\quad V_{to} : \text{ON상태일때의 전압(V)} \\
 &\quad I_{av} : \text{장비의 실제 정격전류(A)} \\
 &\quad R_t : \text{SLOPE저항}
 \end{aligned}$$

- DIODE 사양 : 1200V 75A (IXYS)

$$I_o = 35A$$

그러므로 각 소자당 발열량은 211(W)이다.

$$\begin{aligned}
 P_m &= P_{m1} \times \text{수량} \\
 &= 2 \{ (V_{to} \times I_{av}) + (R_t \times I_{av} \times (120/360)) \} \\
 &= 2 \{ (0.75 \times 35) + (2 \times 35 \times (120/360)) \} \\
 &= 2 \{ (26.25) + (70 \times (0.33)) \} \\
 &= 98.7(W)
 \end{aligned}$$

카다로그 상에서 정션 온도저항이 30도일 때

Power Loss는 35A 일 때 55W 이다.

- 방열판 선정기준 :

방열판 자연냉각 방식에 의한 열저항값을 구하여 방열판과 주위온도와의 온도차를 알아내어 소자의 발열에 알맞는 방열판의 방열을 검증한다.

- 열저항 계산식

$$1) \quad \Delta t = R + h(f-a) \times W (\text{°C/W})$$

$$1-1) \quad R + h(f-a) = \frac{1}{h \times A}$$

$$1-2) \quad A = (PI \times L) + (SA \times 2)$$

Δt = Heatsink와 주위온도와의 온도차(°C)

W = 발열량
 $R + h(f-a)$ = 열저항계수($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
 A = Heatsink의 표면적(m^2)
 h = 대류 열전달 계수($\text{w}/\text{m}^2\text{k}$) :
 자연냉각시 통상 $5\text{w}/\text{m}^2\text{k}$ 정도로 선정한다.
 PI = Heatsink의 둘레
 SA = Heatsink의 단면적(m^2)
 L = Heatsink의 길이(m)
 H = Heatsink의 길이(m)

- 방열 계산

1. 조건 : 소자 1개당 55W
2. Heatsink : DHM-2093(대흥기업)
 - ① 길이 L : 100mm
 - ② 둘레 PI : 1767.4mm
 - ③ 단면적 AS : 3021.3 mm^2

1-1)에서 $R + h(f-a) = \frac{1}{h \times A} = \frac{1}{5 \times 0.1827826} = \frac{1}{0.91} = 1.1(\text{k}/\text{W})$

1-2)에서 $A = (PI \times L) + (SA \times 2)$
 $= (1.7674\text{m} \times 0.1\text{m}) + (0.0030213\text{m}^2 \times 2)$
 $= 0.17674\text{m}^2 + 0.0060426\text{m}^2 = 0.1827826\text{m}^2$

1)에서 $\Delta t = R + h(f-a) \times W(^{\circ}\text{C}/\text{W})$
 $= 1.1(\text{k}/\text{W}) \times 55\text{W}$
 $\approx 60.5\text{K} = 60.5^{\circ}\text{C}$

(6) Surge blocker

(가) 중성빔 입사장치 전원에서의 Surge 억제

이온원의 가속전극을 아크로부터 보호하는 1차적인 수단은 고속 고전압스위치(HVSW)이지만 이 스위치가 아무리 고속으로 아크를 전원으로부터 차단할지라도 차단과정에서 스위치와 이온원 사이의 회로에 잠복하고 있는 에너지원에 의해 불가피하게 surge가 유입된다. 이온원 가속부에 surge가 유입되면 surge의 크기에 비례하여 전극에 손상도 심해진다. 손상의 정도가 점점 커질수록 이온원 가속전극의 내전압 성능이 저하되는 정도가 빨라지고, 드디어는 방전파괴가 연속적으로 일어나 목표로 하는 빔의 가속이 곤란해진다. 이 외에 전원기기의 제어전자회로와

같은 저전압부로 전파하여 오동작을 일으키는 원인이 되는 등 주변기기에까지 영향을 미치기도 한다. 따라서 surge를 가능한 최소화 하는 수단이 요구되는데 이를 위해 이온원에 인가되는 모든 전력 전송선이 가능한 이온원에 근접되게 위치시킨 surge blocker를 통과하게 하여야 한다. surge를 일으키는 근원은 고전압 절연변압기(HV isolation transformer), HV-deck, 고속 고전압스위치, 전력전송선 등의 대지부유용량에 축적되어 있는 에너지($CV^2/2$)이다. 기본적으로 이들 요소들의 부유용량을 최소화 하는 노력이 선행되어야 하고 다음에 surge blocker가 surge 유입을 막도록 하는 것이 순서이다.

Surge blocker는 고리모양의 페라이트 코어, 바이어스 전원회로, 저항회로가 접속된 2차 회로로 구성되어 있다. 이온원의 전극간에 방전파괴가 일어나 부유용량으로부터의 surge에 의한 방전전류가 흐르면 변압기의 원리로 코어의 2차 회로에 유기기전력이 생기고 저항에서 그 에너지를 소비시킴으로써 이온원으로 유입되는 에너지를 줄이는 것이 그 원리이다. 바이어스 전원은 코어에 빔 전류와 역방향의 직류 쇄교 전류를 흘림으로써 코어를 B-H 곡선의 음의 쪽으로 바이어스한다. 즉, 빔 전류(가속전원 출력전류)에 의한 코어의 직류여자(magnetization)화를 방지하므로써 코어의 전압시간적($V \cdot sec$)을 유효하게 사용하기 위한 것이다. 구체적으로는 그림 3-1-146 과 같은 원리적인 구성을 갖는다.

Surge blocker로 유효한 surge 억제 대책을 얻기 위하여, 우선 회로정수의 실측에 기초를 둔 전원의 등가회로를 작성하고 과도현상 해석 프로그램을 사용하여 시뮬레이션 하였다. 이는 나중에 surge blocker를 도입한 실제 시스템에서 측정된 값과 비교하여 검증할 필요가 있다. 그럼으로써 surge 억제가 불충분하다고 판단될 경우에는 개선 방향이나 수정된 설계치를 제시할 수 있다.

고전위 출력 케이블 전체에 흐르는 전류를 측정하기는 설계단계에서 현실적으로 불가능하므로 모든 전원(high voltage deck위의 전원은 제외)의 마이너스 단자를 한곳으로 하는 점을 만들고 이 점에서 Rogowski 코일을 사용하여 surge 전류를 측정한다. 여기서 전류 측정에 Rogowski 코일을 사용하는 이유는 첫째, 회로로부터 절연된 상태에서 전류측정이 가능하며 둘째, 노이즈 등에 의한 신호의 왜란이 작고 셋째, 선로를 절단할 필요가 없다는 이점이 있기 때문이다.

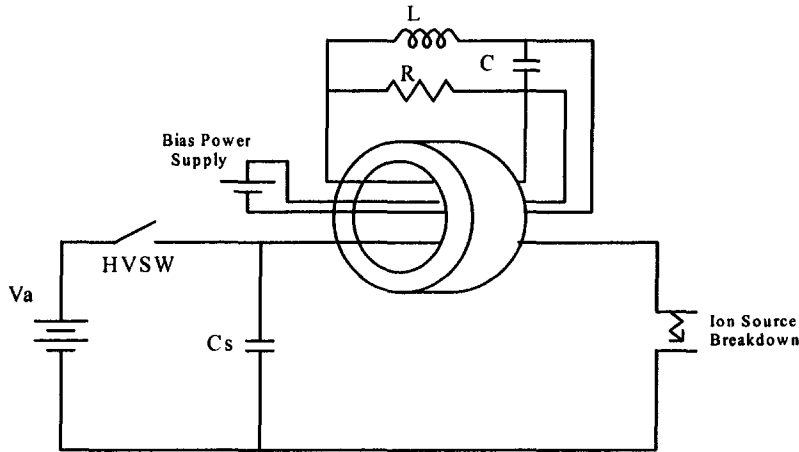


그림 3-1-146 Surge blocker 구성도

(나) 중성빔 입사 전원장치 모델링 및 시뮬레이션

기본적으로 JT-60의 중성빔 입사 전원장치의 모델링 파라메타를 기본으로 하여 시뮬레이션을 수행하였다. surge blocker 시스템이 있는 경우와 없는 경우를 시뮬레이션 하였으며, 각각의 결과를 제시하였다. 이 결과는 surge blocker 시스템의 성능 및 효과를 확인하는데 유효하다. 모든 전원장치가 NBI에 장착이 완료된 다음에는 시스템의 회로요소를 정확히 측정할 수 있으므로 이와 동일한 방법

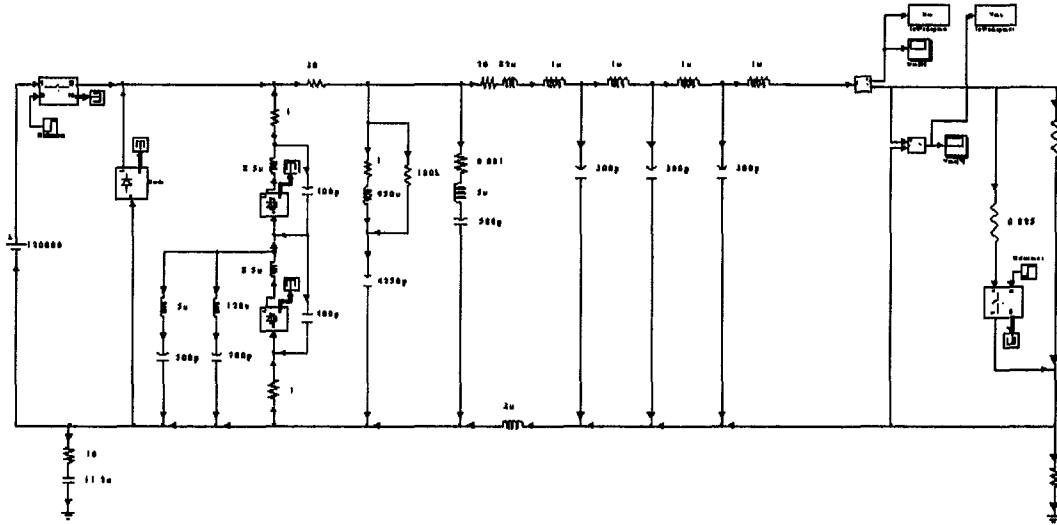


그림 3-1-147 Surge Blocker가 없는 NBI 전원장치 모델링 회로도

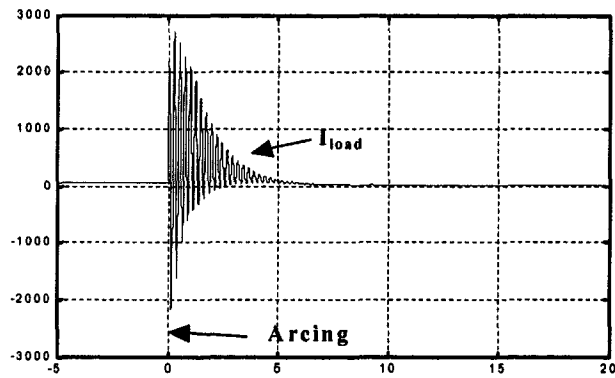


그림 3-1-148 Surge Blocker가 없는 경우의 아크 전류 파형

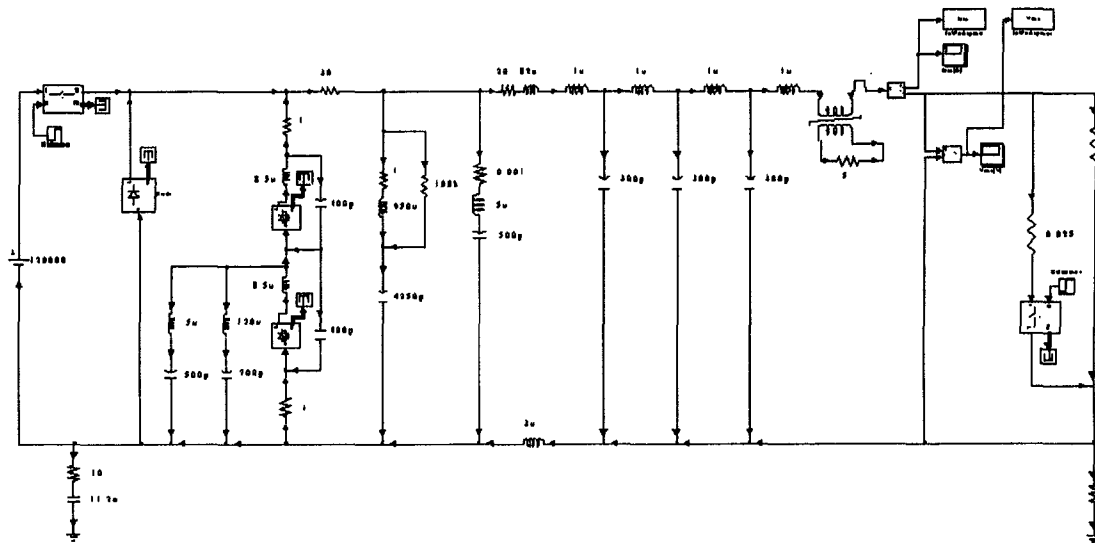


그림 3-1-149 Surge Blocker가 있는 NBI 전원장치 모델링 회로도

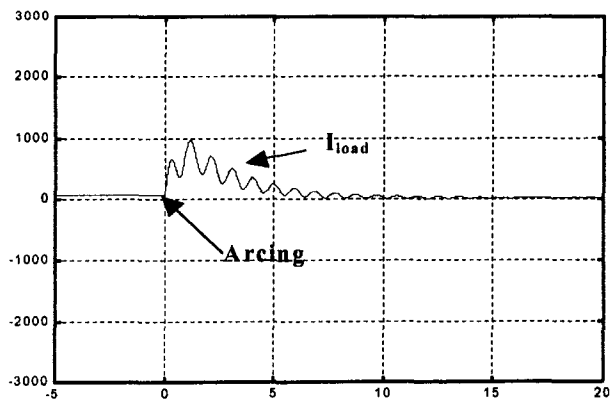


그림 3-1-150 Surge Blocker가 있는 경우의 아크 전류 파형

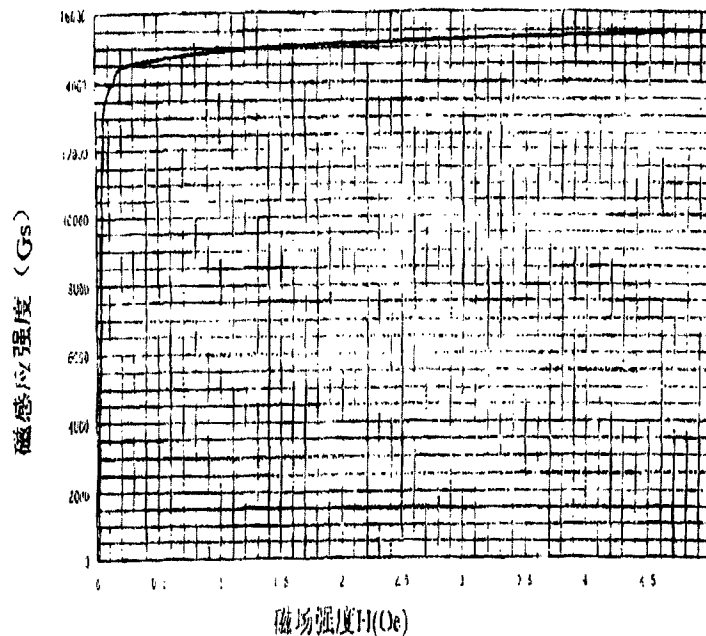
(다) Surge Blocker 설계

(다)-1. 코아 사양

- 코아 재질 amorphous
- Inner diameter 300mm 이상
- Outer diameter 500mm 이상
- Thick 50mm
- 최대자속밀도 1.5T

이라는 기준을 가지고 코아를 선정한다. 코아 재질을 아몰퍼스(아몰퍼스)로 하는 이유는 페라이트에 비하여 최대자속밀도가 3배 가량 크기 때문에 surge blocker를 설계하는데 있어서 큰 문제중의 하나인 크기를 작게 하는 데에 있어서 장점을 갖게 된다. 내부지름의 경우 기존 고전위 테이블(HV-deck)에서 이온원으로 가는 전력전송선관의 크기보다 커야 하므로 최소 300mm 이상의 내부지름을 가져야 한다. 아몰퍼스 코아의 경우 가질 수 있는 최대 두께가 50mm 정도이다.

$B \cdot A = V \cdot \text{sec}$ 이므로, $B=1.5$, $V \cdot \text{sec}=0.03$ 이다. 따라서 $A=0.02\text{m}^2$. 코아 1개당 단면적은 0.005m^2 이므로 필요한 코아의 개수는 4개이다. 그러나 서지블록커 제작시의 최대자속 이용 감소 등을 고려하여 8개로 한다. 실제 제작 할 때의 실험 note를 보면 제작 방식에 따라서 최대자속밀도 값의 차이가 심하게 난다고 보고되고 있다.



铁基非晶带材磁化曲线 (50Hz 下)

그림 3-1-151 아몰퍼스 코아의 B-H 곡선

(다)-2. 시뮬레이션 파라메타

- 부유커패시턴스 7300pF (실험을 통하여 정확히 결정)
- 부유인덕턴스 13.8uH (실험을 통하여 정확히 결정)
- (Isolation Tr.에서 부하까지 : 8.3uH, 절연 인덕턴스 : 5.5uH)
- 파동 임피던스 43.5
- 전압 120kV
- 방전전류 피크 2.8kA
- 진동주기 2.0us

위의 값들을 가지고 시뮬레이션을 통해서 $V \cdot sec$ 를 계산한다. 0.012라는 값을 얻었으나, 여유분을 고려하여 0.03으로 한다.

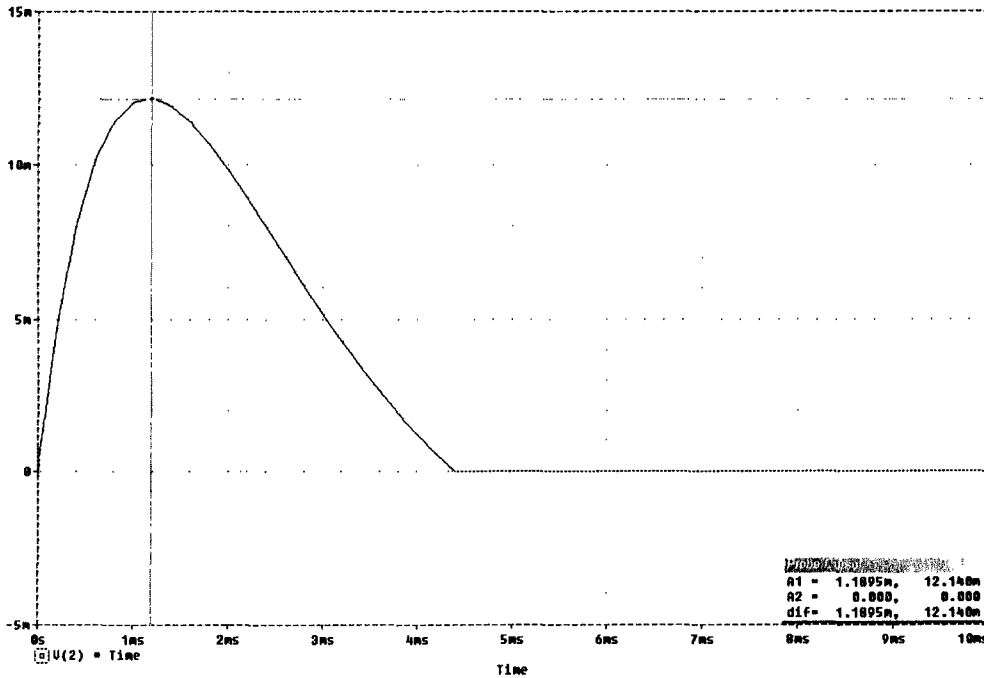


그림 3-1-152 아몰퍼스 코아의 Volt · sec 시뮬레이션 결과.

(다)-3. Surge Blocker 설계

Surge blocker가 장착된 가속전원의 등가회로는 그림 3-1-153과 같이 된다. 여기서 $V \cdot sec = R_B \cdot I_{peak} \cdot T$ 이므로 $R_B = 5.4$ 이다. 코아의 인덕턴스는 서지전류가 저항 R_B 를 흐르기에 충분히 크게 하지 않으면 안 된다. 코아의 인덕턴스와

저항의 비 $\omega L/R_B$ 를 통상 10배정도로 설정하지만 이번에는 30배 정도로 하여, 충분한 인덕턴스를 갖도록 한다. 즉, $L_B = 30R_B/\omega = 51\mu\text{H}$ 이다.

7000 Gauss를 유지하기 위한 자계의 세기는 4A/m이므로 이에 해당하는 전류 용량의 전원으로 충분하다. 또한 시뮬레이션을 통하여 요구되는 L과 C의 값은 시뮬레이션으로 최적의 값을 정할 수 있다.

중성빔 입사장치의 전원은 단순한 고전압 대출력 전원이 아니라 부하인 이온원에 적합한 것이 아니면 안 된다. 특히 부하단락 현상인 이온원에서 방전파괴는 불가피적으로 일어나 surge 노이즈가 발생하거나 이온원에 손상을 준다. 빔을 안정하게 출력하기 위해서는 방전파괴 때에도 전원시스템의 제어가 노이즈에 의한 오동작 없이 안정되게 동작하고 전원에서부터 surge에너지의 유입에 의해 야기되는 이온원의 손상을 억제할 필요가 있다. 이를 목적으로 Surge blocker 및 surge 억제용 리액터를 첨가하여 전원에 존재하는 큰 부유용량으로부터의 surge를 직접적으로 억제하도록 한다. Surge 억제용 리액터를 사용하는 경우 방전의 전하량은 원래의 상태보다 2배 증가하지만, 전류의 파고치를 낮춤으로써 방전파괴에 의한 손상은 경감되어 빔을 반복적으로 안정하게 얻을 수 있도록 한다. 전극의 전기적 손상이 방전의 에너지보다도 방전의 전류에 크게 의존하는 것은 방전 전류치가 큰 경우에 전극간 아크의 전극표면에서 전력밀도가 높고 전극표면이 방전에 의해 거칠어져 내전압 성능이 저하되기 때문이다. Surge blocker 설계 시에 Volt·sec를 크게 할수록 아크전류의 피크값을 줄일 수 있으나 이는 사용가능한 시스템의 공간적 제약을 고려하여 결정되어야 한다. 앞으로 시스템 모델링의 정교화 작업과 함께 이온원의 목표 수명기간동안 안정적인 빔 출력에 필요한 아크전류의 피크값과 그 누적양의 상한 값이 실험을 통하여 데이터화 되면 설계 마진을 줄일 수 있을 것이다.

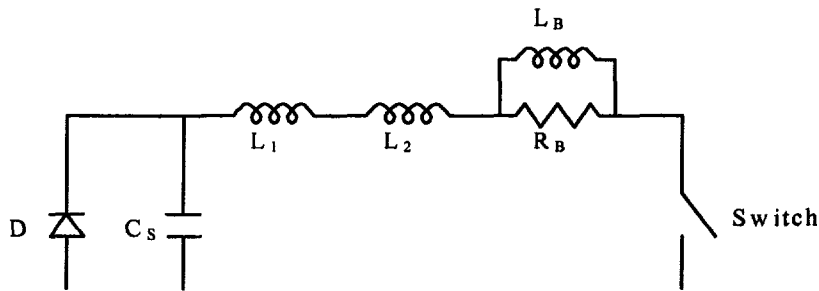


그림 3-1-153 가속전원-surge blocker 등가회로

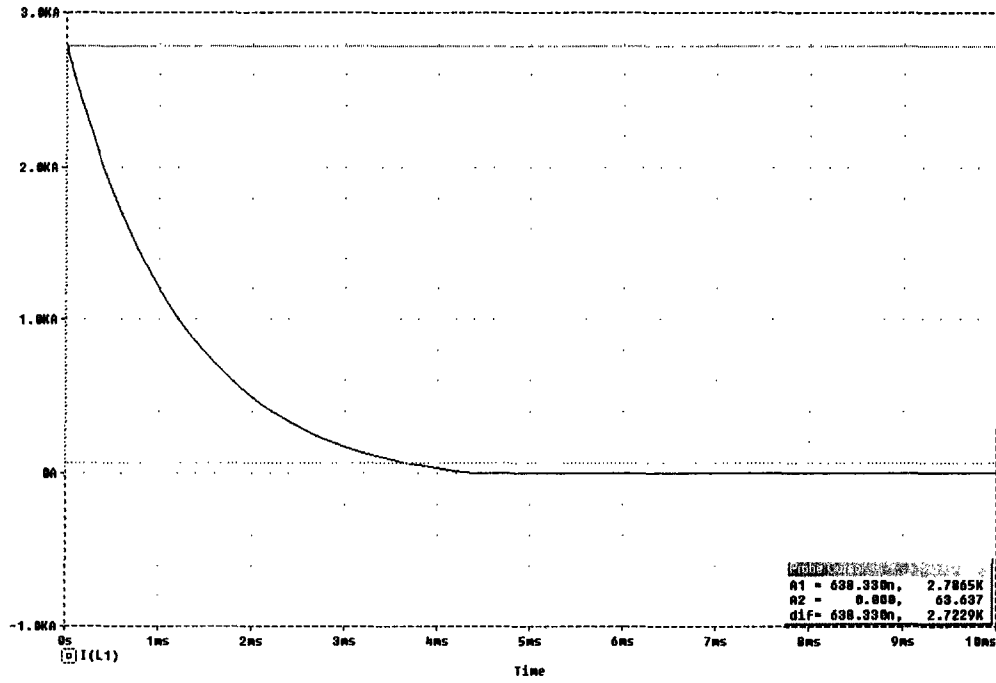


그림 3-1-154 Arc current simulation without surge blocker.
 (peak arc current = 2.7865kA, duration = 4.3ms)

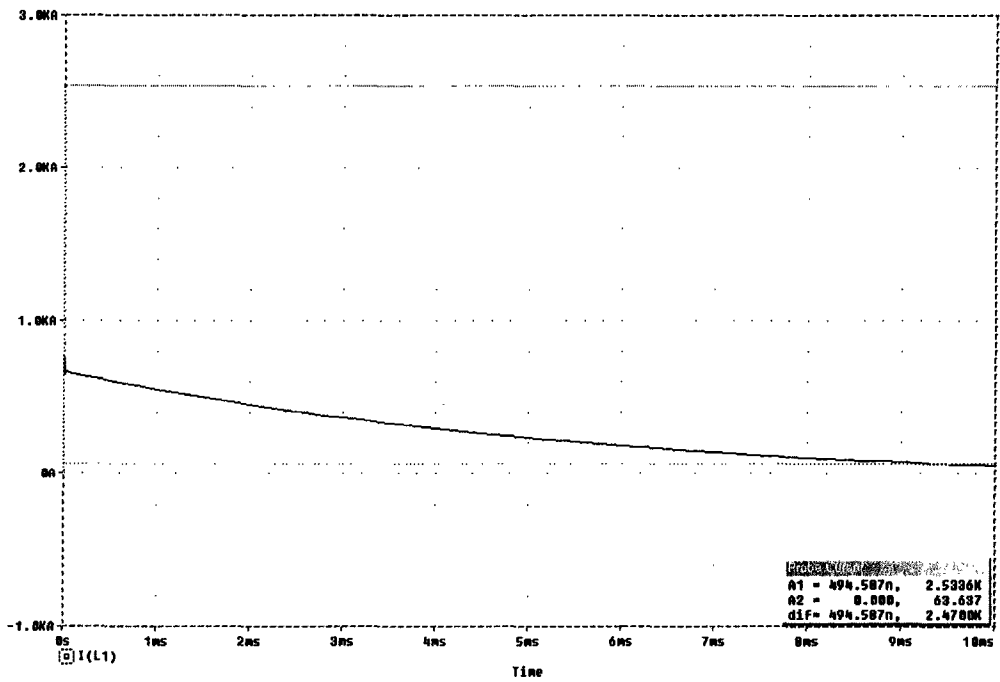


그림 3-1-155 Arc current simulation with surge blocker
 (peak arc current = 650A, duration = 12ms)

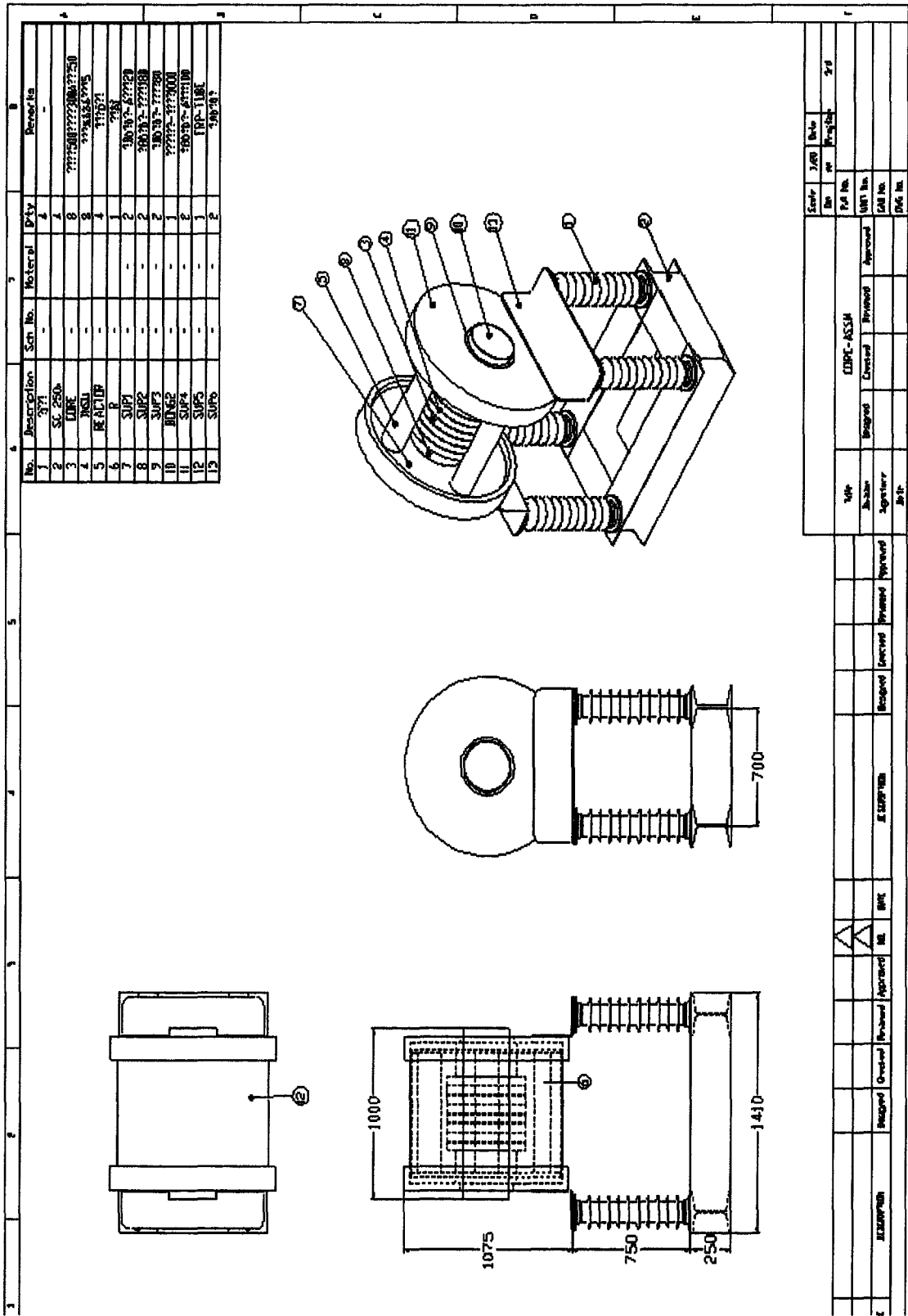


그림 3-1-156 Drawing of surge blocker

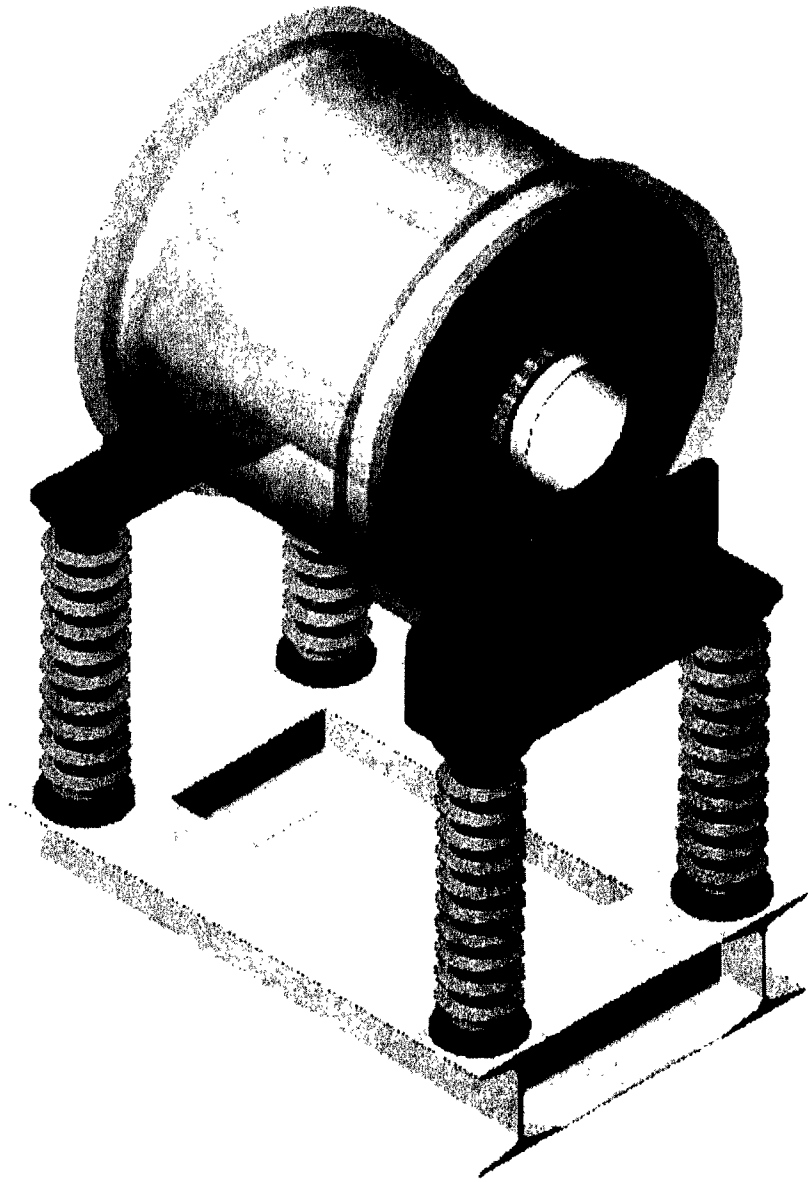


그림 3-1-157 3-D view of surge blocker

(7) 아크 검출회로

(가) 이상신호검출 로직

이온원의 가동에 있어서, 발생할 수 있는 이상상태는 다음의 세 가지 경우로 구분된다.

1. 아크전압(AV)의 이상
2. 아크전류(AI)의 이상
3. Langmuir 탐침에서의 이상신호(LP) 검출

이상의 어느 하나의 경우라도 검출되면 아크 상태의 이상으로 판정하여 검출 즉시 이상 아크를 억제하도록 하는 트리거 신호(Notch Signal)을 발생하도록 회로를 구성하였다. 먼저, 아크전압의 이상은 정상인 상태의 경우보다 전압의 크기가 작아지는 경우이며, 다음 그림 3-1-158과 같이 나타낼 수 있다.

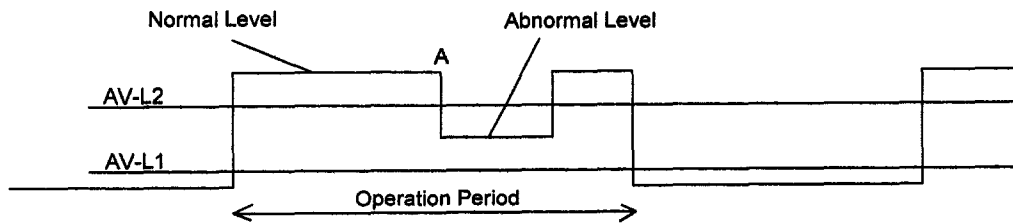


그림 3-1-158 이온원 작동중 아크전압(AV)의 변화 모형도

위의 그림에서 아크 전압은 정상의 상태에서 Normal Level 에 있다가 비정상 의 시점인 A에서 Abnormal Level 로 떨어진다. 따라서 아크전압의 이상신호는 그림에 표시한 레벨, AV-L2를 설정하여 아크 전압이 이보다 낮을 때를 검출하는 것이다. 레벨 AV-L1은 전체 검출 회로가 작동하는 기간을 설정하기 위한 것이다. 즉, 이 기간내에 아크가 발생한다고 보고 이 기간내에 일어나는 모든 이상상태를 검출하는 것이다.

아크전류의 경우 정상상태에서의 전류크기를 Normal Level 이라고 하면 비정상 일 때 Normal Level 보다 더 큰 전류(Abnormal Level) 가 흐른다고 가정한다. 따라서 아크전류(AC)의 파형을 아래 그림 3-1-159와 같이 나타낼 수 있다. 아울러 비정상상태(C)의 검출은 Normal Level 보다 약간 큰 신호를 잡는 경우로 보면 된다.

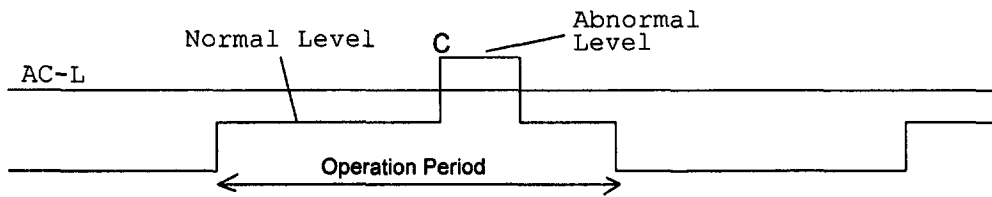


그림 3-1-159 이온원 작동중 아크전류(AI)의 변화 모형도

Langmuir Probe 신호의 경우, 정상상태 신호 및 이상상태 신호는 아래 그림 3-1-160과 같이 나타낼 수 있다.

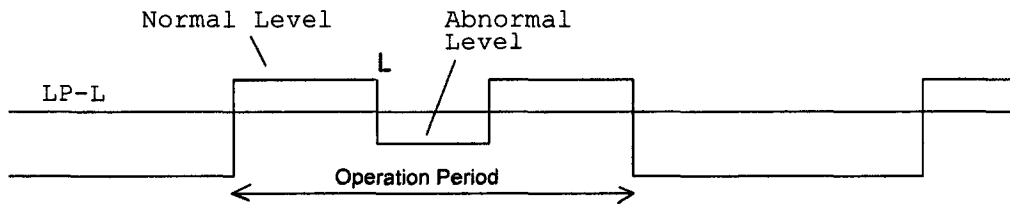


그림 3-1-160 이온원 작동중 Langmuir Probe로부터의 신호 모형도.

이 경우는 앞의 아크전압(AV)인 경우와 파형이 유사하다. 즉, 비정상상태에서 신호레벨은 정상상태인 경우보다 낮으며, 따라서 정상상태보다 낮고 비정상상태보다 높은 임의의 크기를 잡아 이를 기준점으로 하면 된다.

(나) 전체 로직 구성

전체적으로, 아크전압, 아크전류 및 Langmuir Probe 신호중 어느 것이라도 이상 신호가 검출되면 해당되는 Notch 신호가 발생하도록 회로를 구성하였다. 따라서 세 경우의 이상신호를 OR 회로로 연결하였다. 전체 로직은 아래 그림 3-1-161과 같이 나타낼 수 있다.

Logic for Arc Detection

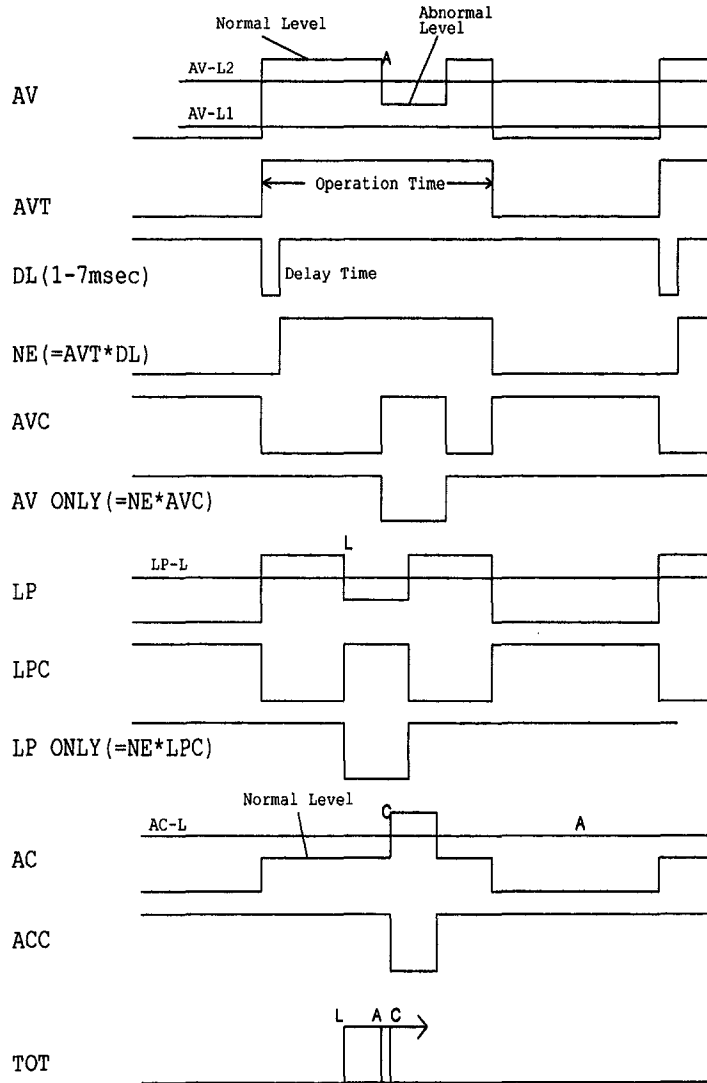


그림 3-1-161 아크전압, 아크전류, 및 Langmuir Probe 신호로부터 이상신호를 검출하는 로직

그림 3-1-161에서, AV 는 아크 전류의 파형 모형이다. 이 파형에서 영보다 약간 높은 레벨(AV-L1)을 기준으로 하여 그보다 높은 신호가 얻어지는 기간이 이온원 가동기간으로 설정하였다. 그림에서 AVT 로 나타낸 부분이 이온원 가동기간을 나타낸다. 이온 가동 초기의 불안정한 상승에 의한 영향을 제거하기 위하여 이온원 가동기간의 초기에 약간의 지연(Delay)를 주었으며, Operation Time 과 Delay Time으로부터 Notch 신호 발생 허가 기간, NE(Notch Enable)을 설정하였다. 이 NE기간 내에 들어오는 AV 이상신호, AC 이상신호, 및 Langmuir Probe 이상신호를 잡아 이들의 어느 하나라도 검출되면 Notch 신호가 발생되도록 하였다.

아울러 정상적 아크전압과 이상 아크전압을 구분하기 위한 레벨, AV-L2를 설정하여 비교기를 써서 이상 아크전류 신호인 AVC를 얻었다. 이 AVC에는 가동 정지 기간도 같이 포함되어 있으므로 가동중인 기간인 NE 기간과 NAND 조합하여 AV ONLY를 얻었다.

LP ONLY 도 AV와 유사한 파형이므로 역시 정상상태와 이상상태를 구분하는 레벨, LP-L을 설정하고 비교기에 의하여 비교결과인 LPC를 얻고 다시 LPC에 로직에 의하여 공존하는 비가동기간을 Notch Enable 신호와 NAND 조합하여 LP ONLY 신호를 구하였다. 아크 전류의 경우는 이상신호가 정상신호보다 더 큰 경우이므로 비교기를 통과한 신호를 바로 Notch 발생신호로 이용하면 된다.

이상에서 얻어진 세 개의 이상신호(AV ONLY, LP ONLY, ACC)의 어느 경우라도 발생하면 Notch Signal을 발생하면 된다. 이들은 신호가 Low 인 경우이므로 이들을 NAND처리하고 다시 Monostable 로직에 의하여 임의의 단펄스를 내도록 하였다. 이들 로직을 실제의 회로로 구현한 회로도들 그림3-1-162 에 나타내었다.

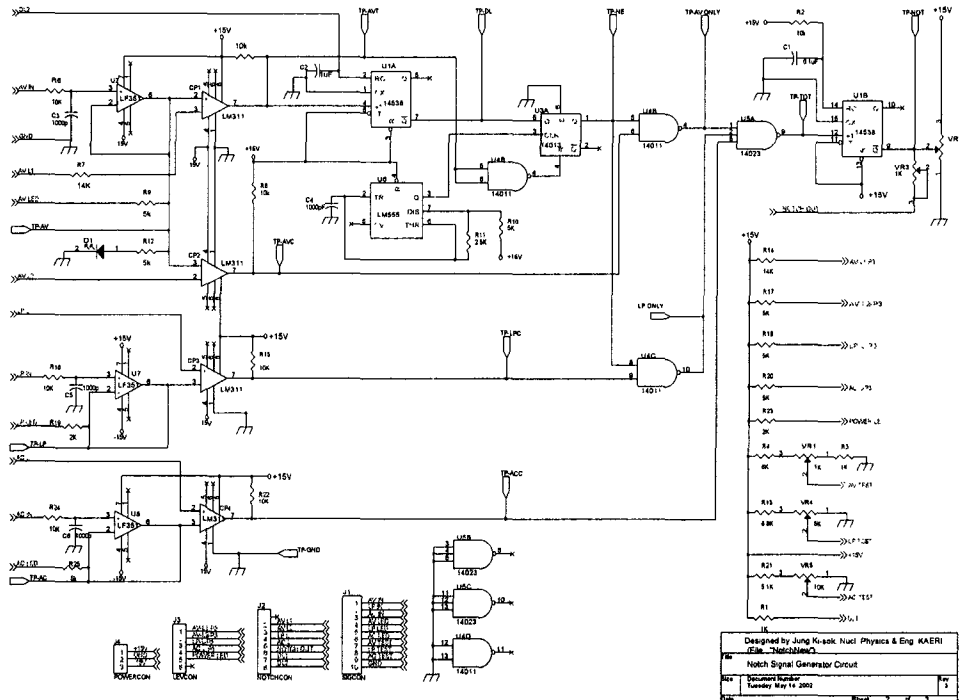


그림 3-1-162 이상 아크발생을 검출하기 위한 회로도

라. 보조설비 개발

(1) Vacuum System 및 제어계

(가). 진공컨트롤회로 설계 및 제작

(가)-1 설계 조건

NBI 시스템의 진공 계통을 컨트롤하기 위한 구성요소는 그림 3-1-163 에 나타낸 바와 같다. 그림 3-1-163 에 나타낸 바와 같이 컨트롤해야 하는 NBI진공 계통은 크게 NBI 챔버와 OMA 챔버, 그리고 그 사이를 나누는 Main 게이트밸브로 구성되어 있다.

NBI 챔버에는 직결된 로타리 펌프 두 대와 TMP 및 TMP에 딸린 로타리 펌프가 있고 다시 보조 펌프로서 루츠 펌프와 그에 딸린 로타리 펌프 및 루츠 펌프를 NBI 챔버에 직결하기 위한 게이트 밸브를 추가하였다. 이들 각각의 펌프들과 게이트밸브들을 작동하기 위한 스위치들은 모두 집중화하여 하나의 조종반에서 작동할 수 있도록 하였다.

아울러 NBI 챔버에는 피라니게이지(PI), 펜닝게이지(PE) 및 잔류가스 분석계(RGA)가 부착되었다.

여기에서 NBI 챔버의 기압 값이 미리 정해진 값을 초과하는 상황이 발생하면 이 신호를 Main 게이트밸브의 폐쇄에 이용하도록 하였다. 또한 TMP를 보호하기 위하여 이상기압시 TMP 게이트밸브를 폐쇄할 수 있도록 하였다. 이 경우 챔버 기압의 이상(CI) 또는 로타리 펌프의 이상(RI) 중 어느 한가지라도 발생하면 TMP 게이트밸브가 작동하도록 하였다.

OMA 챔버의 경우 피라니게이지(PI)와 펜닝게이지를 부착하였으며, 피라니게이지에서 얻어지는 기압이 일정값 이상이면 OMA 게이트밸브가 폐쇄되도록 하였다.

이들 세가지 인터록 상황에 대하여 게이트밸브를 폐쇄하도록 하였지만 시험 가동 중에는 인터록 상황이더라도 게이트밸브의 폐쇄 대신 경보음만 울리도록 선택할 수 있는 스위치 회로(Alarm Select)를 부착하였다.

(가)-1.1. 인터록 조건

언급한 바와 같이, NBI 시스템의 인터록 조건은 세 가지 경우를 준비하였다. 이 중 NBI 챔버 인터록인 CI의 경우, CI의 발생에 의하여 Main 게이트밸브가 닫히도록 하였다.

CI는 NBI 챔버의 기압이 갑자기 상승하는 경우에 해당한다. TMP를 보호하기 위한 인터록 조건인 RI는 발생시 TMP 게이트밸브를 폐쇄하도록 하였다. OMA

챔버의 인터록 상황인 OI는 OMA 챔버의 기압 상승을 대비하여 마련하였으며, OI의 발생으로 OMA 게이트밸브를 폐쇄하도록 하였다.

실제의 컨트롤 회로는 Type TPG 256 Maxi Gauge로부터 세 개의 Interlock 신호를 받도록 결선했다. 즉, Chamber Interlock(CI), Rotary Interlock(RI), 및 OMA Interlock(OI) 신호이다. 이들은 Maxi Gauge의 Relay 신호 A, B, C에 연결되어 있다.

이 때 인터록의 작동조건은 다음과 같다.

첫째, CI용 릴레이가 작동하면 Main Gate Valve(MGV)용 Solenoid Valve(SMGVO)의 작동이 불가능하게 되어 MGV가 열리지 못하며, 열려 있었다라도 닫힌다. 아울러 TMP용 게이트밸브(STGVO)도 열리지 않는다.

둘째, RI용 릴레이의 작동에 의하여 TMP Gate Valve가 작동금지된다. 따라서 TMP Gate Valve는 CI 또는 RI 어느 한 쪽의 작동에 의하여 작동이 중지된다.

셋째, OI의 작동에 의하여 OMA Gate Valve가 작동 중지한다.

(가)-1.2. 알람(경보음) 조건

경보음의 발생은 컨트롤 회로의 시험가동중 불필요하게 게이트밸브들이 작동하는 것을 막기 위하여 선택 조건으로 회로에 부가한 것이다.

이 경우 설계한 경보음의 발생 조건은 다음과 같다.

첫째, Interlock S/W를 "Alarm" 위치에 놓으면 Main GV 및 TMP GV가 작동하지 못하고, Maxi Gauge로부터의 Interlock 신호에 의하여 "알람"소리만 울린다.(OMA G/V는 Interlock 선택 S/W의 영향을 받지 않는다.)

둘째, Interlock S/W를 "GV CLOSE"에 놓으면 Main GV와 TMP GV는 정상작동하며, Interlock신호에 의하여 닫힌다.

셋째, 경보음은 컨트롤 모듈 뒷면에 있는 "ALARM STOP" 스위치에 의하여 중지될 수 있다. 물론 Maxi Gauge로부터 인터록 신호가 중지되어도 경보음은 중지된다.

(가)-2. 컨트롤 회로 구성

NBI 진공컨트롤회로를 설계 및 제작하기 위하여 주어진 진공계 구성요소는 표 3-1-16 과 같다.

표 3-1-16 NBI 진공계 구성 요소

구성요소	구분	수량
펌프류	독립적 로타리펌프	2 대
	TMP 및 부속 로타리펌프	각 1 대
	루츠펌프 및 부속 로타리펌프	각 1 대
게이트밸브류	Main G/V	1
	TMP G/V	1
	OMA G/V	1
게이지 류	NBI 챔버에 피라니 게이지, 펜닝게이지 및 잔류가스분석계	각 1 대
	OMA 챔버에 피라니게이지 및 펜닝게이지	각 1 대

이상의 구성요소들을 앞에서 제시한 인터록조건과 알람 조건에 따라 구성한 컨트롤 패널과 해당 시퀀스회로는 다음 그림 3-1-163 및 그림 3-1-164 와 같다. 그림 3-1-164 의 시퀀스도에 나타난 바와 같이, 진공 컨트롤회로는 먼저 Main 스위치에 의하여 컨트롤 회로의 전원이 공급된다. 이 스위치는 작업자 또는 제3자의 스위치 오작동으로 인한 전체 컨트롤 회로의 작동중단을 방지하기 위하여 Main 스위치의 수작업에 의한 OFF기능을 제거하였다. 이런 회로구성으로 인하여, 진공계통을 작동하지 않아도 계통 전체의 상황이 파악될 수 있다.

그림 3-1-164에 나타난 진공컨트롤 회로는 먼저 여러 로타리 펌프들을 구동할 수 있는 스위치들(RT, R1, R2)과 TMP 전원공급 스위치(TMP Power) 및 경보음 선택 스위치(Alarm Select), 및 게이트밸브 스위치회로들(Main Gate Valve, TMP Gate Valve, 및 OMA Gate Valve) 들이 있다. 이들 게이트밸브 스위치회로들은 모두 각각에 CI, RI, OI 인 인터록 접점들이 포함되어 인터록 상황발생시 해당 게이트밸브들이 폐쇄되도록 하였다.

또한 독립적으로 루츠펌프 및 부속 로타리 펌프와 게이트 밸브를 ON/OFF하기 위한 스위치들을 추가하였다.

1. PANEL DESIGN

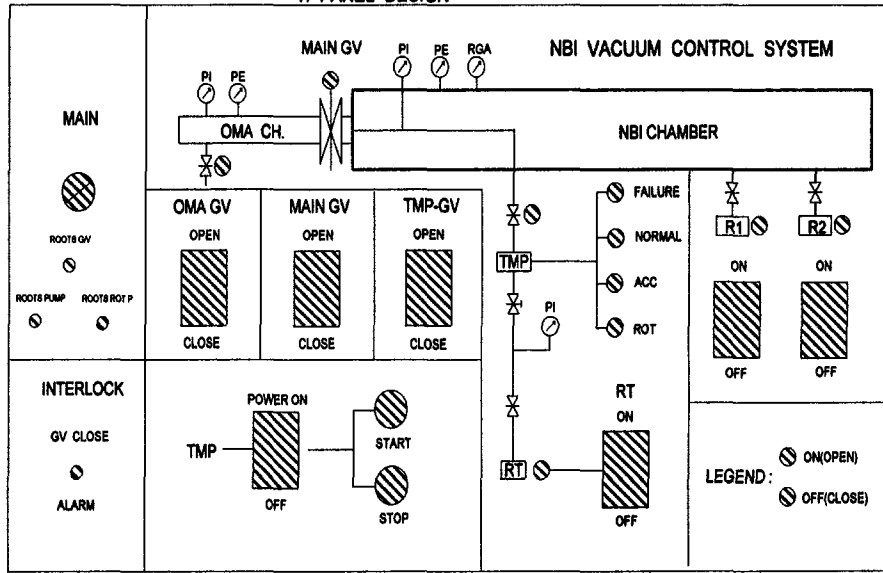


그림 3-1-163 NBI 진공용기의 진공컨트롤패널 구성도

2. NBI VACUUM CONTROL SEQUENTIAL DIAGRAM

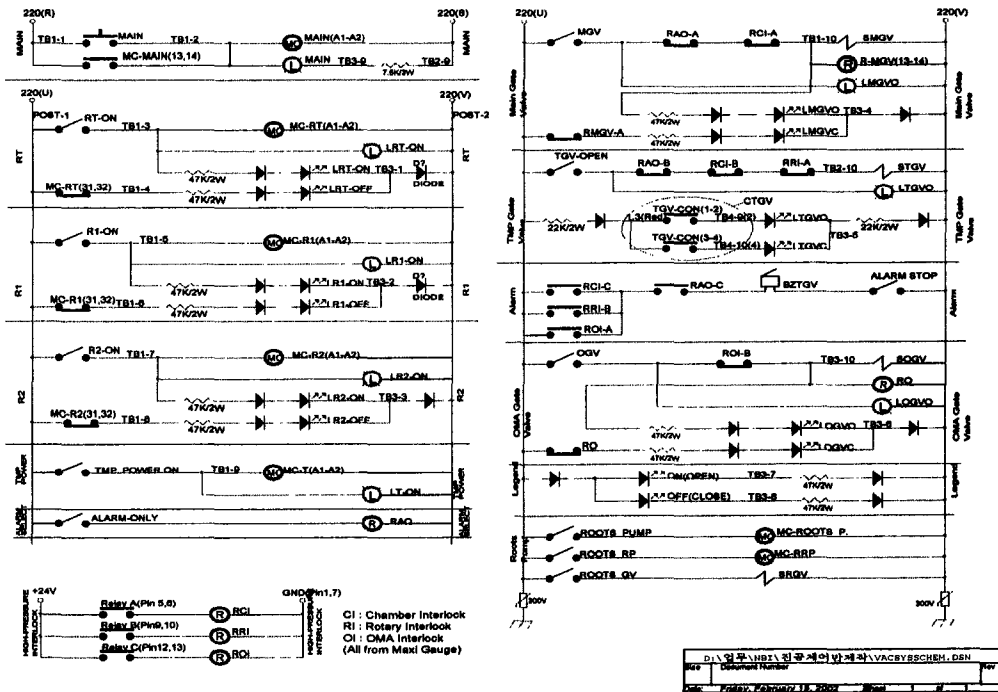


그림 3-1-164 NBI 진공용기의 진공 컨트롤회로 시퀀스圖

(2) 보조 진공배기 System

NBI 장치의 KSTAR site 설치 및 운전 시에 진공배기시스템은 주장치의 진공 배기 시스템과는 분리시켜 독립적으로 운영하는 것을 원칙으로 한다. 이를 위하여 현재 기본적인 배기시스템의 설계를 완료하고 주요 진공펌프들의 구매를 완료하였거나 일부 진행 중에 있다. NBI 장치의 진공배기시스템 구성도는 그림 3-1-165와 같다.

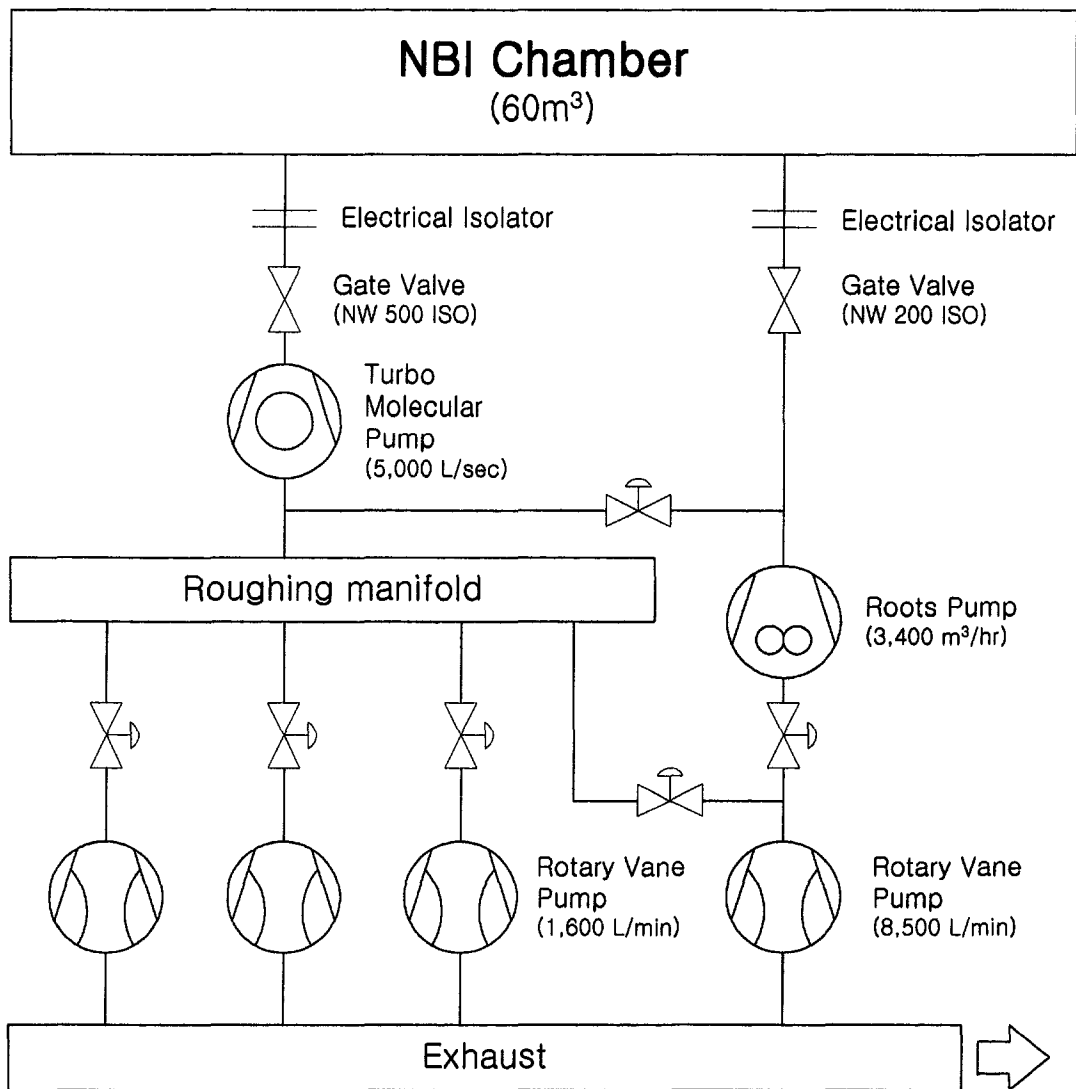


그림 3-1-165 NBI 장치 Vacuum System.

그림에 나타나 있는 것처럼 NBI 주진공함으로부터 터보분자펌프와 루츠펌프를 통하여 배기가 이루어지도록 하였다. 루츠펌프는 내부에 압력차이에 의해 구동되는 bypass valve를 내장하고 있어 대기압에서부터 구동이 가능한 모델을 선정하였으며, 주진공함의 내부용적 60m^3 과 Test Stand에서의 진공배기시스템 하에서의 배기 곡선으로부터 예측되는 gas load를 구하고 이를 이용하여 최대 2시간 내에 터보분자펌프의 정상운전압력인 1×10^{-2} torr의 진공압력대에 이를 수 있도록 설계 구성하였다. 루츠펌프 후단에는 대용량 R/P를 별도로 설치하여 장치 개발 완료 후 KSTAR site에서의 진공배기시에도 활용이 가능하도록 하였다. 아래 그림 3-1-166와 167은 NBI Test Stand에서의 진공배기 시스템 구성도와 배기특성 곡선을 나타낸 것이다.

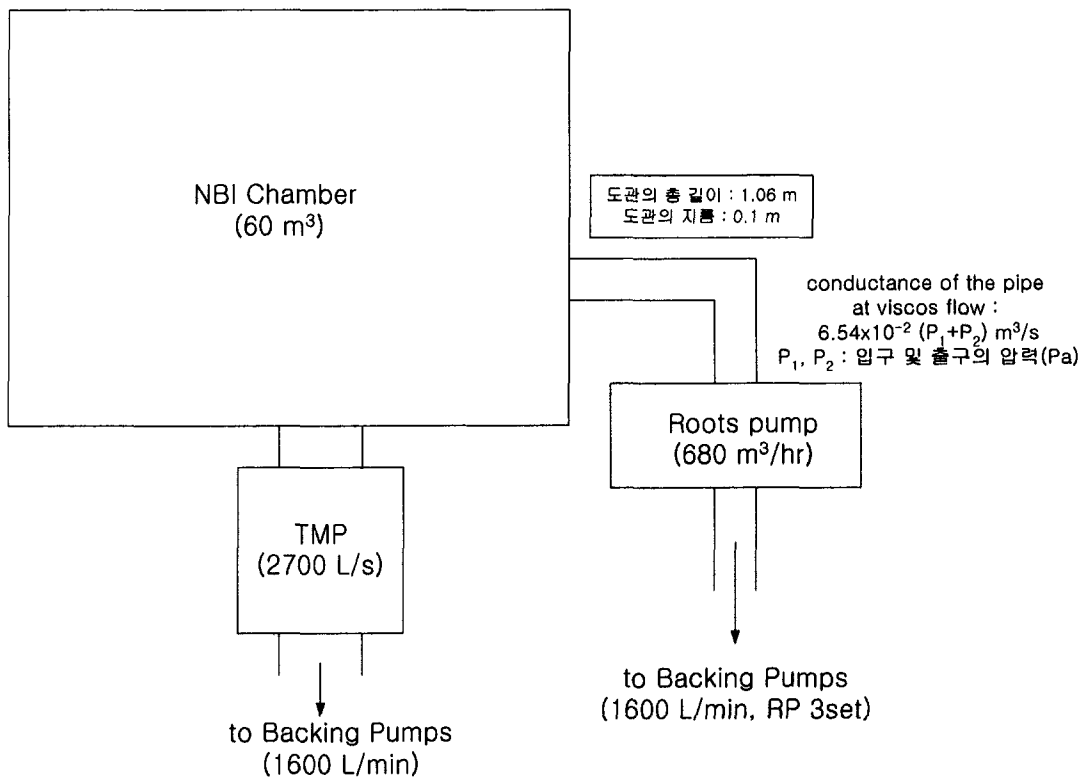


그림 3-1-166 NBI Test Stand의 Vacuum System.

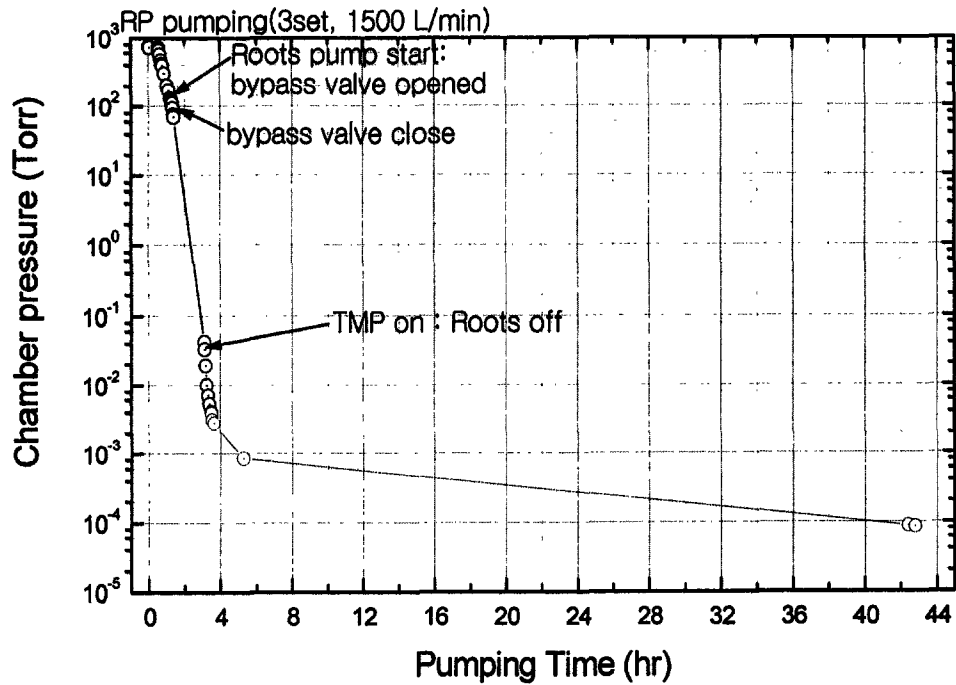


그림 3-1-167 NBI Test Stand의 진공 배기 특성 곡선.

(3) Cooling Water Supply System(CWSS)

(가) Cooling Water Supply System(CWSS)

(가)-1. 개요

본 시설은 핵융합 장치에서 발생하는 열을 제거하기 위한 냉각장치의 구성이며, 1차 배관계통, 2차 배관계통 및 실험실내 배관계통으로 구분하였으며 본 설비의 운전을 위한 자동제어로 구성되어있다. 그림 3-1-168에 나타내었다.

1) 1차 배관계통

기계실에서 각 실험실에 분기되기 전까지의 배관

2) 2차 배관계통

기계실의 열 교환기에서 냉각 탑까지의 배관

3) 실험실내 배관계통

1차 계통분기 헛다에서 실험실내 배관 즉 NBI 까지의 배관

4) 자동제어

기계실 및 옥외에 설치된 기기들의 운전 및 상태확인

(가)-2. 기기사양

1) 펌프(1차계통)

- 유량 : 6,000 CMH
- 양정 : 50m
- 동력 : 95Kw × 440V × Ø3
- 재질 : STS304
- 수량 : 2set

2) 펌프(2차계통)

- 유량 : 3,000 CMH
- 양정 : 30m
- 동력 : 22Kw × 440V × Ø3
- 재질 : C/S
- 수량 : 2set

3) 열 교환기

- Type : Plate type
- Heat Load : 1,800,000 Kcal/h
- Flow Rate
Cold Side : 180CMH
Hot Side : 360CMH
- Material : STS304
- 수량 : 1set

4) Micro Filter

- Flow Rate : 360 CMH
- Filter Accuracy : 5 micron
- No. of Element : 85 ea
- Filter Element Size : Ø65 × 750L
- 수량 : 1 set
- Filter 교체시기 : 입/출구의 압력 차가 0.9 kg/cm² 이상일 때

5) Mixed-Bed Polisher

- Flow Rate : 3 CMH
- Treated for Regeneration : 2,400m³/cycle
- Treated Water Quality : more than 1 MΩ-cm
- Resin Model No. : SM210

- Resin Quantity : 100L
- Material : STS304
- 수량 : 1set
- Resin 교환시기 : 출구의 수질을 분석하여 1 M.Ω-cm 이하일 때

6) D/W Tank

- 용량 : 10 ton
- 규격 : Ø2,300×3,460H
- 재질 : STS304
- 수량 : 1 set

7) Cooling Tower

- Type: Cross Flow Type
- Cooling Capacity : 1,800,000 Kcal/h
- Flow Rate : 180 CMH
- Size : 4,040×4,040×2,325 H
- Fan : 7.5 HP × 2set
- 수량 : 1 set

8) Expansion Tank

- 규격 : 1000L
- Setting pressure : 2.5 kg/cm²g

(가)-3. 운전방법

(가)-3.1. 운전 전에 준비되어야 할 사항

- 1차 계통배관에 팽창탱크를 이용하여 D/W를 채워야 한다. 이때 D/W 탱크에는 최상부까지 충수를 하고, 질소탱크를 이용하여 D/W 탱크의 상부에 질소를 채우면서 D/W 탱크의 배수를 서서히 열어 수위를 조절한다.
- 2차 계통배관에 설치된 냉각 탑의 수조에 급수를 채워야 한다.
- 1차 및 2차 계통배관에 유체를 공급할 때 배관내의 공기가 공기 벤트를 통하여 완전히 배출되도록 한다.

(가)-3.2. 운전순서

- 1차 및 2차 계통에 설치된 펌프 2대 중 1대는 예비용이므로 펌프에 설치된 밸브는 모두 close 한다.
- 펌프 운전은 실험실에 설치된 제어반 또는 기계실에 설치된 MCC 패널에서 운

전할 수 있다.

· 밸브 상태를 표 3-1-17 과 표 3-1-18 에 나타내었다.

표 3-1-17 1차 계통 밸브 상태

기기명	밸브번호	밸브상태		비고
		펌프 1	펌프 2	
펌프	①	O	C	
	②	C	O	
	③	O	C	
	④	C	O	
열 교환기	⑤	O	O	
	⑥	O	O	
Micro Filter	⑦	O	O	
	⑧	O	O	
Header	⑨	O	O	
	⑩	O	O	

표 3-1-18 2차계통 밸브상태

기기명	밸브번호	밸브상태		비고
		펌프 1	펌프 2	
펌프	A	O	C	
	B	C	O	
	C	O	C	
	D	C	O	
열 교환기	E	O	O	
	F	O	O	

(가)-1.3. 정지 시 조치사항

장기적으로 실험을 중단할 경우 1차 계통의 D/W의 수질을 확인하여 기준 수질 이하가 되지 않도록 mixed-bed polisher를 운전하여야 한다.

이때 유량이 많으므로 header에 설치되어 있는 차압밸브의 by-pass를 열어 관내의 압력손실부하를 줄인다.

(가)-1.4. 동절기의 운전 중지

동절기에는 옥외에 설치된 2차 계통의 냉각수의 동결로 원칙적으로 운전을 하여서는 안 된다.

옥외에 설치된 배관 및 냉각 탑의 수조에 배수밸브를 열어 완전히 배수시켜 동결되지 않도록 한다.

1차 계통의 배관에 있는 D/W는 header에 설치된 배수밸브를 열고, 기계실에 설치된 열 교환기, 탱크, mixed bed polisher, expansion tank 및 pump는 자체에 설치된 배수밸브를 열어 완전히 배수시켜 동결되지 않도록 한다.

D/W tank에 공급하는 D/W 배관 및 옥외 냉각 탑에 공급하는 급수는 공동 구에 설치되어 있는 주밸브를 닫고, 배관의 최종밸브를 열어 완전히 배수시켜 동 결을 방지한다.

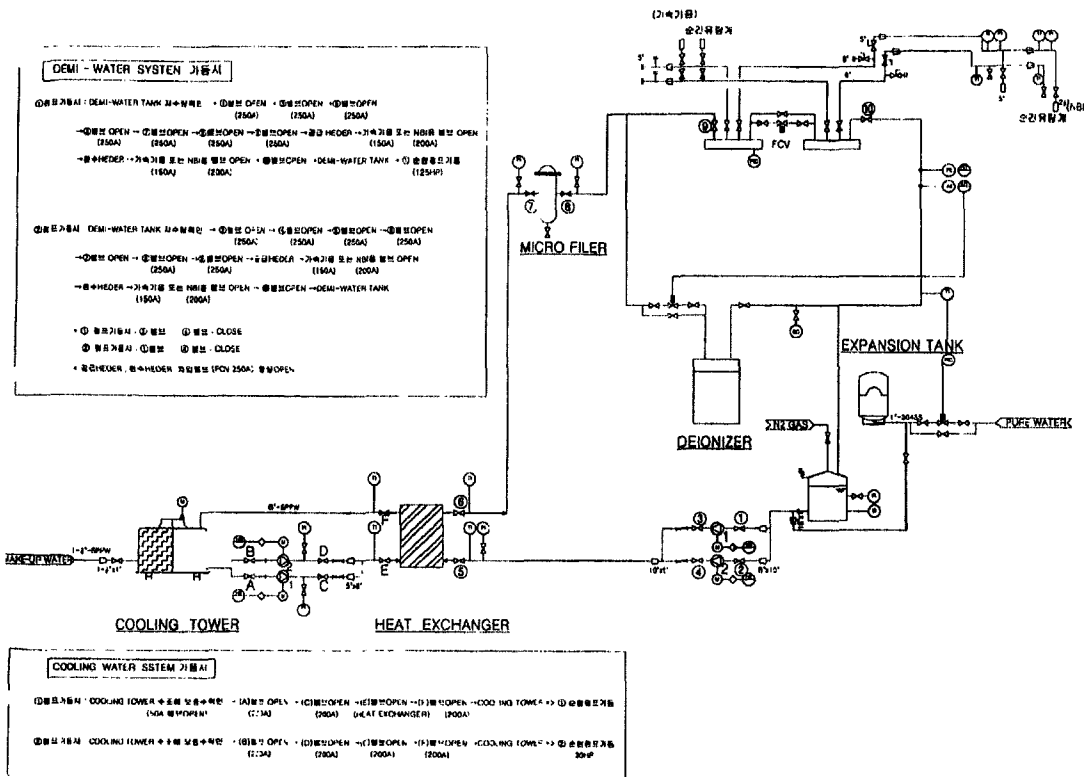


그림 3-1-168 CWSS의 구성

(나) NB Cooling Water System(NBCWS)

(나)-1. 개요

NB Cooling Water System(NBCWS)은 CWSS에 의해 냉각수의 공급 및 환급이 이루어져 NBI test stand에 하단에 연결되며, 각각의 장치에 냉각수가 공급되어야 함으로 냉각수 분배기를 제작하여 필요한 장치에 공급하게 된다. 그리고 flexible metal hose 및 SUS 배관에 의해 각 장치에 연결되어 일정한 유량과 수압을 갖는 냉각수가 공급되어진다.

(나)-2. NBCWS의 구성

NBCWS는 3 beam line 기준으로 설계되어 beam line 부분과 ion source부분으로 나누며, 각 장치마다 요구되는 유량을 나타냈다. KAERI에서는 NBCWS를 1 beam line을 기준으로 하여 구성하였으며, 현재 구성되어 있는 NBCWS는 ion source 부분과 beam line 부분으로 나누었고 냉각수의 수질을 표 3-1-19에 나타내었다.

표 3-1-19 냉각수의 항목별 요구사항

항 목	요 구 사 항
수질(전도율)	$\leq 5 \text{ M}\Omega\text{-cm}$
입·출구온도차이(ΔT)	최대 10 °C
입구 압력 / ΔP	$5 \text{ kgf/cm}^2 / < 1 \text{ kgf/cm}^2$
유량	100 l/sec (2.4 MW)

각 장치에 분배될 유량은 그림 3-1-169로 나타내었고 현재 설치되어 있는 배관과 장치는 그림 3-1-170에 나타내었다. 장치의 입출력단에 유량, 압력, 온도 측정을 위한 센서들이 설치되어있다. 먼저, 유량측정을 위해서 Turbine Flowmeter (1.5", 2", 3")와 Vortex Flowmeter(3")를 설치하였으며, 압력측정은 16 Bar까지 측정이 가능한 PMP 1400(Druck) 기종으로 선정하여 설치하였다. 그리고 온도 측정을 위해 0.1°C의 측정단위를 갖는 K-type 열전대를 설치하여 냉각수의 온도를 측정하고 있다.

표 3-1-20 NBCWS의 구성

Ion source	Beam line
1. Ion sources HV 2. Ion sources LV	1. Source exit scrapers and OMA scrapers 2. Neutralizers 3. Bending magnets 4. Ion dumps 5. Calorimeters 6. Spare 1 7. Spare 2

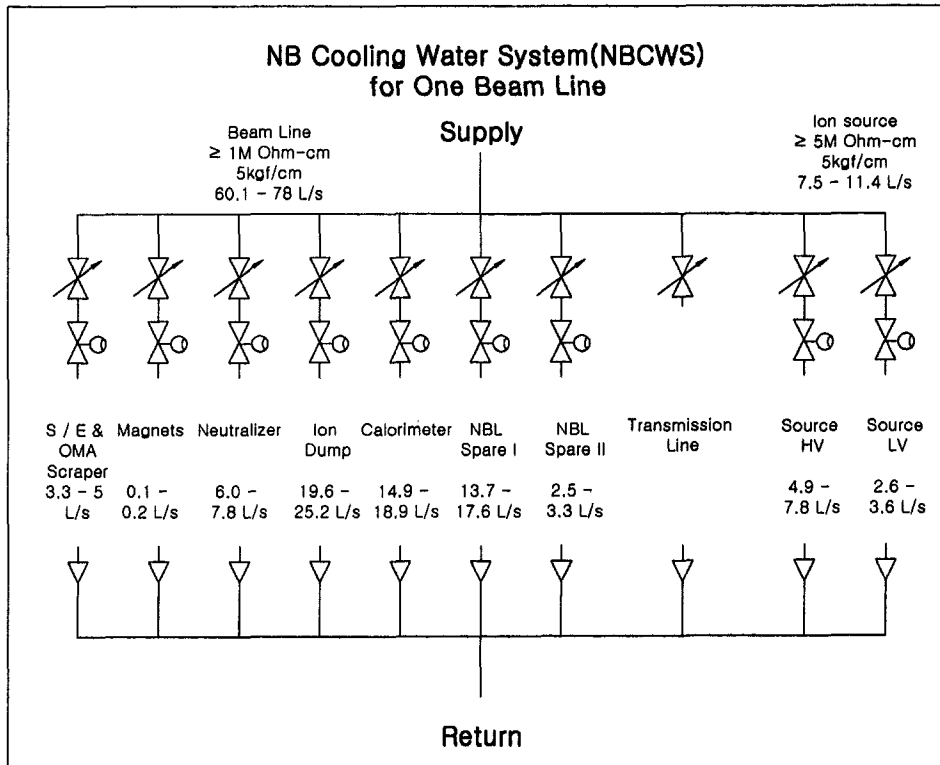


그림 3-1-169 NBCWS 구성

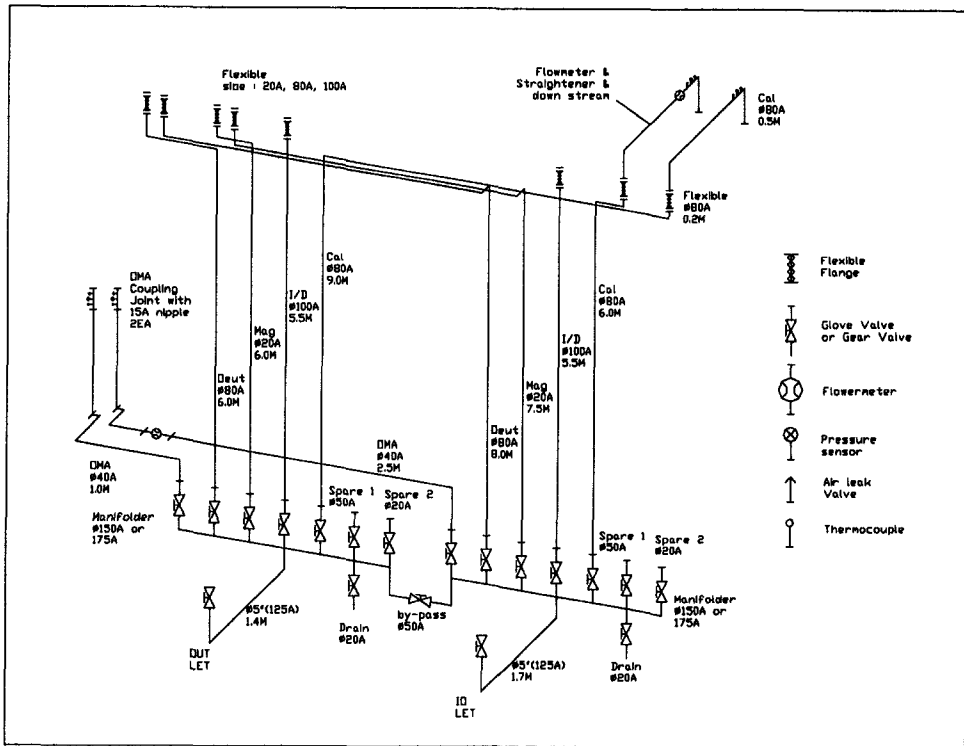


그림 3-1-170 현재 구성된 NBCWS

(나)-3. NBCWS의 운전

(나)-3.1. 구성

Ion source 부분은 2-1/2 인치 배관으로 HV 및 LV로 각각 1인치 배관을 선정 하였으며, 각 여분의 실험을 위해 1인치의 여유 라인을 설치하여 총 3개의 분배기로 만들었다. beam line의 경우 5 인치 '배관으로 분기되어 7개의 라인으로 나뉘며, 이중 Calorimeter와 OMA Scrapper에 유량, 압력, 온도의 측정이 가능하도록 설치하였다.

(나)-3.2. 운전

NBL의 5" main 밸브의 inlet 및 outlet을 OPEN 하고, I/S의 out 및 inlet 밸브를 OPEN한다.

사용하고자 하는 장치들의 in/out 밸브를 OPEN 하는데 가급적, outlet 밸브를 먼저 OPEN 한다.

Monitor panel의 전원을 ON 한 뒤 Flow Rate, Temp., pressure를 확인한다.

실험이 끝난 후 냉각수를 정지 할 때는 역순으로 행한다.

(나)-3.3. 결과

NBCWS 의 압력을 4 Bar로 하여 냉각수를 열원이 없는 상태에서 calorimeter 와 ion source에 유입해 본 결과 입력 압력이 calorimeter의 경우 입력 단에 수압이 약 3.6 Bar이고 출력 단이 약 3.2 Bar를 나타내고 있다. 이는 calorimeter의 압력강하는 크게 나타나지 않음을 나타내고 있으나 주 배관에서부터 입력 단까지의 압력강하가 매우 크게 나타나고 있다. 그리고 CWSS 장치의 압력을 4 Bar 이상으로 작동할 경우 냉각수의 압력 및 유량이 매우 유동적인 것을 확인할 수 있으며, 압력을 상승 시 매우 천천히 단계적으로 상승해야 한다.

측정된 유량은 calorimeter의 경우 약 850L/min를 유지하고 있으며, ion source에는 약 100L/min의 유량이 측정되었다. 온도의 경우 열원이 존재하지 않는 관계로 해서 효과 없는 측정을 하였다.

측정한 유량, 압력, 온도를 4-20mA로 전송 출력할 수 있는 장치로 구성되어있으며, NBI DAS에 전송되어 interlock 및 측정값을 계산 및 저장하게 된다.

현재는 입력압력이 5 Bar로 되어 있으나 열원이 정상적으로 작동되어지면 장치의 열 부하가 많아지게 되고 여기에 따른 수압의 증대로 인한 유량을 조절해야 한다. 차후 NBCWS의 별도의 냉각수 가압장치를 만들어서 작동해야한다.

CWSS는 2MW의 열부하를 기준으로 설계되어 있으며, 열원의 열부하가 상승함에 따라 단계적으로 증축하여야 한다.

(4) Gas feeding system

(가) 요구조건 및 기체 도입 방식

이온원에 공급해주어야 할 기체 공급량은 이온원에서의 전리율, NBI 챔버에서의 입자 손실율, 이온원 및 중성화실에서 요구되는 압력 및 각 도관들의 콘덕턴스 등에 의해 결정된다.

표 3-1-21 배기계 해석에 의해 결정된 이온원의 기체공급량 및 배기속도

이온원 수	이온원의 전리율	이온원의 압력 (mbar)	이온원 기체공급량 (mbar L/sec)	중성화실 기체공급량 (mbar L/sec)	배기속도 (L/sec)
1	0.4	1.14×10^{-2}	28.8	1.25	1.2×10^0
	0.5	8.6×10^{-3}	23.1	7	1.2×10^0
	0.6	6.8×10^{-3}	19.2	10.8	1.2×10^0
3	0.4	5.8×10^{-3}	28.8	40.0	1.75×10^0
	0.5	4.9×10^{-3}	23.1	46	1.75×10^0
	0.6	4.3×10^{-3}	19.2	50	1.75×10^0

* 1 mbar L/sec = 59.2 sccm

i) pulse mode : 안정된 short pulse(~ 0.5 sec)의 빔인출을 위하여 0.1 ~ 1 sec 동안 이온원에 충분한 기체를 주입하기 위한 gas puffing system이 요구된다. 0.5 sec 동안의 방전이 있을 때는 보조펌프인 2,700 L/sec 용량의 TMP의 배기만으로 챔버의 압력이 $\sim 10^3$ mbar 영역으로 크라이오 펌프를 가동하지 않고 충분한 배기가 이루어질 것으로 예상된다.

ii) steady state : 빔인출 시간 약 300 sec 동안 대량의 수소 기체를 일정한 유량 및 압력으로 이온원에 공급하기 위하여 질량유량 조절기(mass flow controller ; MFC)로 기체를 도입. 이온원 방전 실험시 낮은 압력 및 유량에서 시험해볼 때를 위하여 100 sccm의 저용량 MFC와 3개의 이온원 작동시 필요한 유량을 공급하기 위하여 5000 sccm 용량의 MFC 두 개를 병렬로 연결하여 사용.

(나) 실험 장치 구성

구분	부품	규격 및 내용
Valve	V1	수동 밸브
	V2	Metering valve : - Max. flow rate ; 주입구 압력이 1 atm일 때 약 15,000 sccm
	V3	Solenoid operation air admittance valve : - Response time : 30 ms - Venting rate : 0.8 L/sec
	V4	수동 밸브
	V5	Gas feeding line의 flushing을 위한 수동 밸브
MFC	MFC(I)	F. S range : 100 sccm - Control range : 2% to 100% of F. S - Max. inlet pressure : 100 psi
	MFC(II)	F. S range : 5,000 sccm - Warm up time(to within 0.2% of F. S of steady state performance) : < 2min

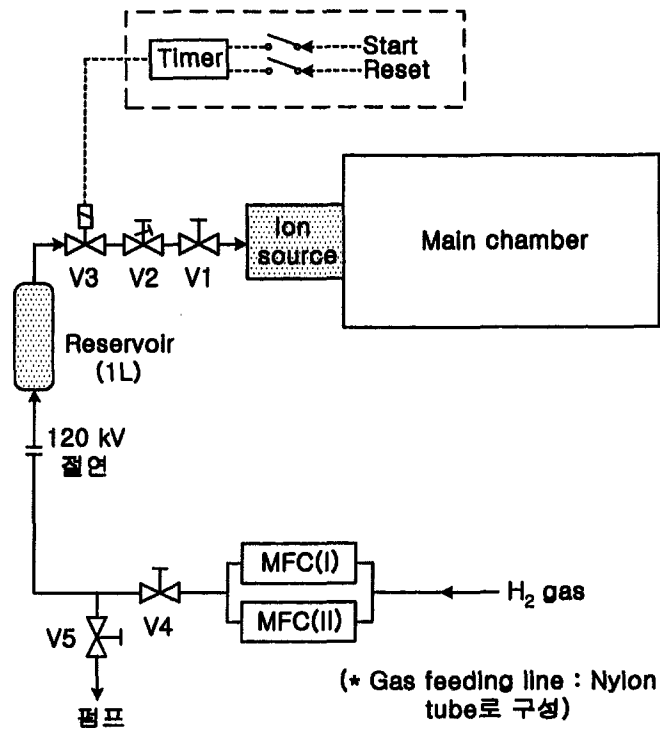


그림 3-1-171 NBI Gas feeding system

(다) Feeding system 특성 및 실험 결과

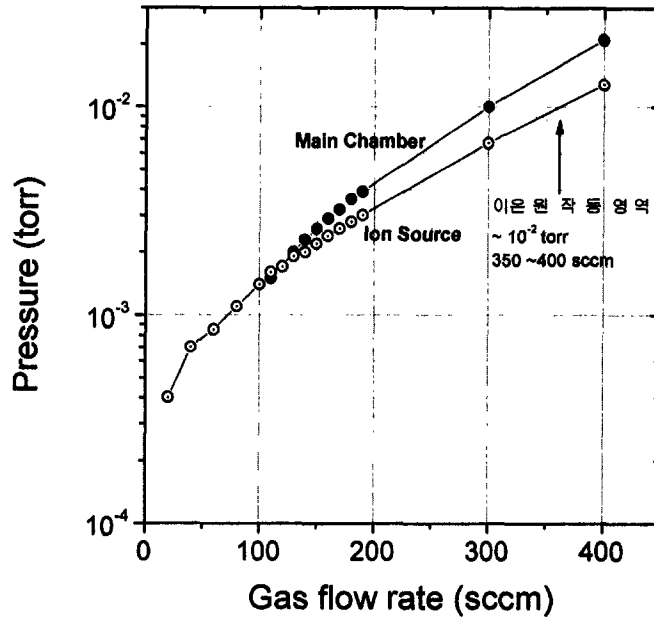


그림 3-1-172 주입된 기체 유량에 따른 이온원 및 챔버의 압력 곡선(for steady state)

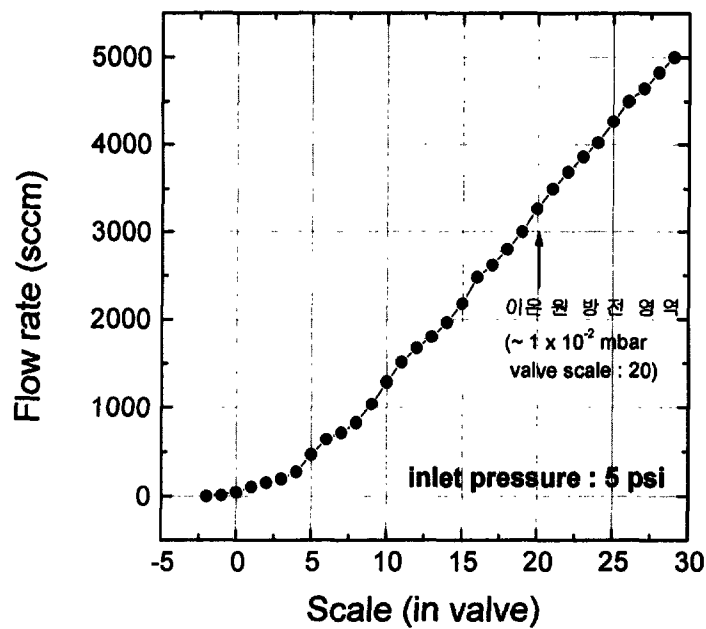


그림 3-1-173 Metering valve의 scale 대 기체 유량과의 교정 곡선

* 이온원 방전시 시스템의 배기 특성(크라이오 펌프가 가동하지 않을 때)

- 실험조건

gas puffing : 3,250 sccm, 1 sec

가속전압 : 6 kV

아크 전원에 의한 빔인출 : 30V, 70A

0.2 sec 빔

- 이온원, OMA 챔버 및 NBI 챔버의 압력분포

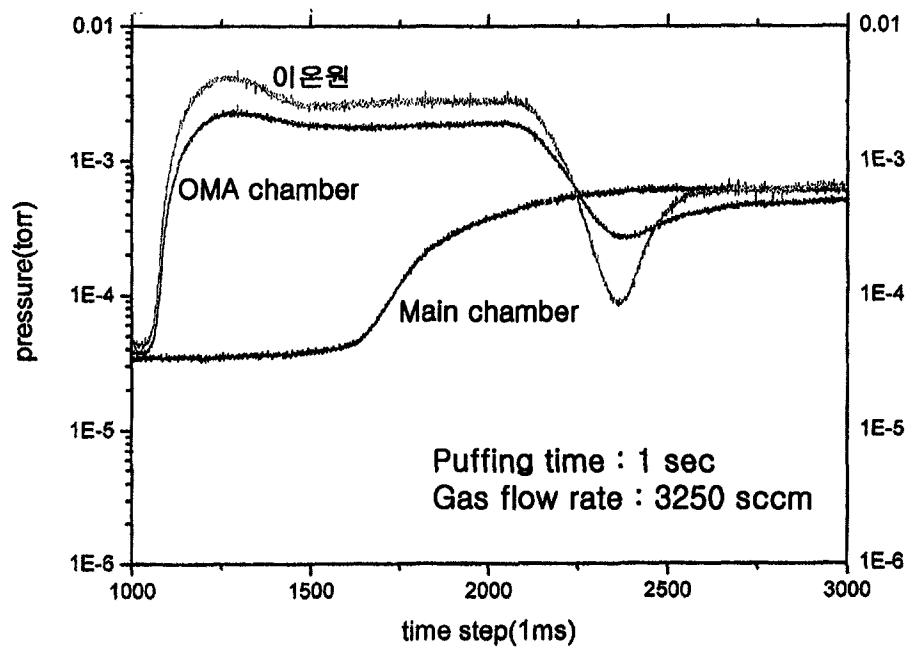


그림 3-1-174 Gas puffing에 의한 이온원 방전 시 NBI 시스템
각 지점에서의 압력분포

마. 장치제어 및 DAS 계

(1) Data Estimation

장치 제어계 및 DAS 시스템을 구성하기 위해 가장 먼저 수행해야 할 일이 Data와 제어를 위한 신호 Load를 추정하는 일이다. 처리해야하는 신호의 Load에 따라 전체 시스템의 구성 방식이 달라질 수 있기 때문이다. Data와 제어를 위한 신호를 추정하기 위해 NB 장치 관련된 장비들이 설치될 위치를 기준으로 하여 필요한 Data 및 제어 선들을 그림 3-1-175 처럼 각 공간별로 연결시키고 최종적으로 KSTAR NB 장치의 운전을 위해 필요한 공간들 간의 신호선들의 수를 종합하여 그림 3-1-176 과 같은 결과를 얻었다.

또한 KSTAR NB 장치를 운전하기 위한 신호들을 기능별로 분리하면 신호선과 신호처리 시스템이 가져야할 속도 등을 추정할 수 있다. 표 3-1-22 부터 표 3-1-37 까지 필요한 신호선들을 기능별로 분리하여 정리하였다.

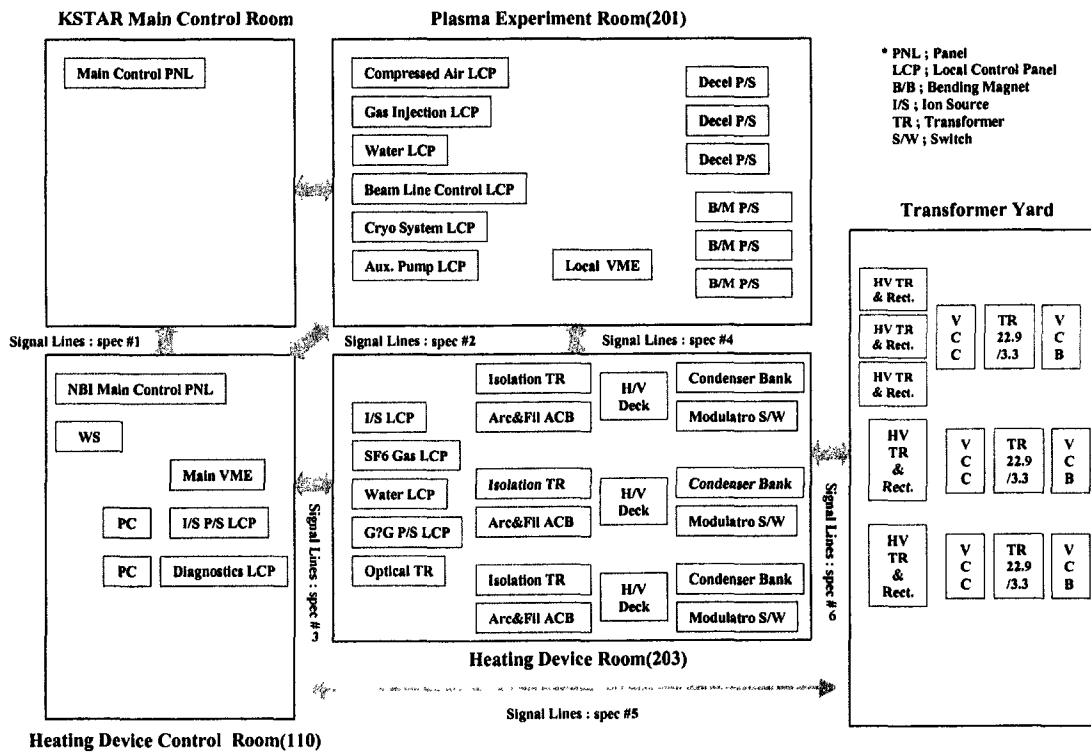


그림 3-1-175 KSTAR NB 장치 공간별 배치도

Signal Lines : spec #1	20	coaxial
Signal Lines : spec #2	200, 100	coaxial, optical
Signal Lines : spec #3	50, 250	coaxial, optical
Signal Lines : spec #4	60	coaxial
Signal Lines : spec #5	40, 20	coaxial, optical
Signal Lines : spec #6	60	coaxial
Total	430, 370	coaxial, optical

그림 3-1-176 KSTAR NB 장치 운전을 위한 신호선의 수

표 3-1-22 Main Computer의 Software에서 Setting 할 항목 - 제어실

이름	갯수	setting 위치	비고
운전방식 선택(CPU 운전/수동운전)	1		
사용 gas 종류(H/D)	1		
운전 mode 선택(반정지, 크라이오재생, 실험입사등 6가지)	1		
neutralizer cell gas injection 여부(Y/N)	1		
주배기방법 선택(TMP/CRYO)	1		
이온원 운전 timing sequence setup parameters	25		
가속전원 전압	1		
grid 전압	1		
감속전압	1		
arc 전류	2		
filament 전류	1		
휘용전자석 전류	1		
snubber coil 전류	1		
이온원 gas 도입계 유량	1		
neutralizer gas 도입계 유량	1		
notching 발생 회수 허용 limit	1		
가속전원 arcing 발생 회수 허용 limit	1		

* 제어실 : KSTAR 운전실에 위치함

* 장치실 : tokamak hall 에 위치함

표 3-1-23 빔 입사 완료 후 운전원에게 알려주어야 할 정보 list

빔 에너지, 전류 및 입사 시간(graph)
플라즈마 전류(graph)
arc 전원 notching 발생회수
가속전원 arcing 발생회수
각 전원의 현재 전압
주요 부분의 현재 온도 및 냉각수 량
장치 감시 후 이상이 발생된 부분 list
운전 중단명령이 있었으면 장치의 중간 정지 원인 list

표 3-1-24 제어실에서 수동으로 제어할 대상 항목

수배전 설비 breaker	2
가속전원 MCB	1
gradient grid 전류 MCB	1
감속전원 MCB	1
arc & filament 전원 MCB	1
경보 정지	1

표 3-1-25 운전 방식을 선택할 수 있는 항목

이름	조작위치	선택항목	비고
calorimeter	제어실 장치실	연동/단독(자동인 경우) 자동/수동 수동조작	
이온원 gas 종 선택	제어실 장치실	자동/수동 수동조작	
이온원 gas 유량제어	제어실 장치실	연동/단독(자동인 경우) 자동/수동 수동조작	
neutralizer gas 제어	제어실 장치실	연동/단독(자동인 경우) 자동/수동 수동조작	
gate valve	제어실 장치실	연동/단독(자동인 경우) 자동/수동 수동조작	
빔라인 냉각계	장치실	자동/수동 수동조작	
주배기 방법 선택	W/S	자동/수동 수동조작	interlock 선택
TMP 배기계통 운전	장치실	자동/수동 수동조작	
액체질소 순환계 및 compressor 운전	장치실	자동/수동 수동조작	

표 3-1-26 각종 제어계의 입력 pulse로 사용될 Digital pulse 출력 - 제어실

이름	선택항목	비고
운전 mode 명령 - 반정지 cryopump 재생 준비운전 calorimeter 입사 단펄스 입사 실험입사 실험 gas 종류 선택 경보 정지 flushing 시작 flushing 정지 flushing 중지 방전 중지 전체 명령계통 이상 timing sequence 시작 timing sequence 중지 timing sequence 비상정지 WS/VME system 이상 실험입사중 열부하 측정선택 실험입사 선택 중 spare 8		

표 3-1-27 저장 data (빠른 주기 sampling ; 10 msec) - 제어실

이름	갯수	sampling 위치	비고
플라즈마 전류			
가속전압	1		
가속전류	1		
Break down signal I	1		
Break down signal II	1	전원계 제어반	
gradient grid 전압	1		
gradient grid 전류	1		
감속전압	1		
감속전류	1		입력
filament 전류	1		max 10V
filament 전압	1		8 bit
arc 전류	1		
arc 전압	1		
arc notching signal I	1		
arc notching signal II	1		
Langmuir Probe I signal	1		
Langmuir Probe II signal	1		
Langmuir Probe III signal	1		
Langmuir Probe IV signal	1		
beam monitor I signal	1		
beam monitor II signal	1		
휨용 전자석코일 전압	1		
휨용 전자석코일 전류	1		
휨용 전자석 자장	1		
누설 자장	1		
spare	1		

표 3-1-28 저장 data (느린 주기 sampling ; 200 msec)

이름	갯수	sampling 위치	비고
수배전설비 입력전압	1	제어실	
가속전원 converter 전압	1		
이온원 진공도	1		
neutralizer 진공도	1		
beam duct 진공도	1		
이온원 gas 유량	1		
neutralizer gas 유량	1		
spares	5		
ion source exit scraper T/C(thermocouple)	4	장치실	
OMA scraper T/C	4		
bending magnet scraper T/C	6		
neutralizer T/C	4		
port box 보호판 T/C	4		
이온 dump T/C	44		
calorimeter T/C	78		
이온원 entrance 냉각수 유속	1		
이온원 entrance 냉각수 온도	1		
이온원 grid I 통과 유속	1		
이온원 grid II 통과 유속	1		
이온원 grid III 통과 유속	1		
이온원 grid IV 통과 유속	1		
이온원 grid V 통과 유속	1		
이온원 grid VI 통과 유속	1		
이온원 grid VII 통과 유속	1		
이온원 grid VIII 통과 유속	1		

표 3-1-29 저장 data (느린 주기 sampling ; 200 msec)(계속)

이름	갯수	sampling 위치	비고
이온원 grid I 출구 온도	1		
이온원 grid II 출구 온도	1		
이온원 grid III 출구 온도	1		
이온원 grid IV 출구 온도	1		
이온원 grid V 출구 온도	1		
이온원 grid VI 출구 온도	1		
이온원 grid VII 출구 온도	1		
이온원 grid VIII 출구 온도	1		
NBI 냉각계 유속	1		
냉각계 입력 온도	1		
냉각계 출력 온도	1		
ion source exit scraper 냉각수 출구 온도	1		
ion source exit scraper 냉각수 유속	1		
OMA scraper 냉각수 출구 온도	1		
OMA scraper 냉각수 유속	1		
bending magnet scraper 냉각수 출구 온도	1		
bending magnet scraper 냉각수 유속	1		
neutralizer 냉각수 출구 온도	1		
neutralizer 냉각수 유속	1		
port box 보호판 냉각수 출구 온도	1		
port box 보호판 냉각수 유속	1		
이온 dump 유속(932 gal/min)	1		
이온 dump 출구 온도	1		
calorimeter 물 유속(700 gal/min)	1		
calorimeter 출구 물 온도	1		
가속전원 냉각수 출구 온도	1		
gradient grid 용 분압저항 온도	3		
gradient grid 용 분압 저항 냉각수 온도	2		
OMA data	4		

표 3-1-30 빠른 주기 감시대상 항목 - digital input(10 msec period) - 제어실

이름	갯수	sampling 위치	비고
데이터 수집 개시 고속 데이터수집 종료 Ip 발생 sequence 개시 빔 입사 허가중 빔 입사중 입사준비 명령 입사개시 입사중단 nbi 장치 운전 정지 플라즈마 disruption 플라즈마 ignition 실패 플라즈마 발생 1분전			

표 3-1-31 느린 주기 감시대상 항목 - digital input (200 msec period) (1) 전원계 이상 감시- 제어실

<p>가속전원</p> <ul style="list-style-type: none"> - 교류측 이상 - 직류측 이상 - controller 이상 - 정상 상태 - snubber 회로 이상 <p>gradient grid 전원</p> <ul style="list-style-type: none"> - 전압 이상 - 저항온도 이상 - 정상상태 <p>감속전원</p> <ul style="list-style-type: none"> - 교류측 이상 - 직류측 이상 - controller 이상 - 정상 상태 <p>arc 및 filament 전원</p> <ul style="list-style-type: none"> - 교류측 이상 - 직류측 이상 - controller 이상 - 정상 상태 	<p>제어전원이상</p> <p>이온원 gas pressure 이상</p> <p>이온원 gas pressure 높음</p> <p>neutralizer gas pressure 이상</p> <p>빔용전자석 전원 정상</p> <p>빔용전자석 자장 이상</p> <p>수배전 설비 이상</p> <p>high voltage terminal 이상</p> <p>현장반 접지봉 사용중</p> <p>전원실 접지봉 사용중</p> <p>time sequencne 이상 정지</p> <p>전원계 비상정지</p> <p>선택조작 이상</p> <p>전체 제어계 명령 이상</p> <p>제어계 정상상태</p>
---	--

표 3-1-32 느린 주기 감시대상 항목 - digital input (200 msec period) (계속)
 (2) 전원계 상태 감시 - 제어실

<p>NBI 주 breaker ON 가속전원 AC 입력 breaker ON 감속전원 AC 입력 breaker ON arc 및 filament AC 입력 breaker ON 가속전원 준비완료 gradient grid resistor 준비완료 감속전원 준비완료 snubber 회로 준비완료 휨용 전자석 전원 준비완료</p> <p>이온원 gas 도입계 연속운전 가능 이온원 gas 도입 중</p> <p>neutralizer gas 도입계 연속운전 가능 neutralizer gas 도입 중</p> <p>운전 gas 종류 선택 불일치</p> <p>timer 선택 I timer 선택 II</p>	<p>운전 mode 반정지</p> <p>cryopump 재생 준비 운전 calorimeter 입사 운전 단펄스 운전 실험입사 운전</p> <p>운전 mode 조건 상실</p> <p>sequence start sequence stop timer 동작 중 flushing 대기중 flushing 운전 중</p> <p>가속 breakdown count-up arc chamber channeling count-up</p> <p>배기펌프 선택 spares실험입사 중 실험입사 운전</p>
---	---

표 3-1-33 느린 주기 감시대상 항목 - digital input (200 msec period) (계속)
 (3) 빔라인계 고장 - 제어실

calorimeter 고장 gate valve 이상 수분검출기 동작 cryo 재생 요구 빔라인계 정상 이온 dump 방사 온도계 I 온도 이상 이온 dump 방사 온도계 II 온도 이상 calorimeter 온도상승률 이상 armor 적외선 camera 온도 이상 neutralizer gas도입계 gas leak
--

표 3-1-34 느린 주기 감시대상 항목 - digital input (200 msec period) (계속)
 (4) 빔라인계 상태 - 제어실

이온원 각도조정 장치 lock 중 calorimeter 연동 calorimeter 준비 완료 calorimeter 투입 중 calorimeter 인출 중 gate valve open 이온원 냉각계 valve open 이온 dump 냉각계 valve open penning gage 진공도 정상 drift 부 IG 정상 냉각계 정상 운전 중 보조 배기계 정상 운전 중 cryo 정상 운전 중	compressor I 동작 정상 compressor II 동작 정상 compressor III 동작 정상 compressor IV 동작 정상 compressor V 동작 정상 compressor VI 동작 정상 compressor VII 동작 정상 compressor VIII 동작 정상 calorimeter 입사 운전 준비 완 료 단펄스 빔 입사 준비완료 cryo 배기 운전 선택 가능 TMP 배기 운전 선택 가능 spare
---	--

표 3-1-35 느린 주기 감시대상 항목 - digital input (200 msec period) (계속)
 (5) 수열부 온도 경보 - 장치설

ion source exit scraper 온도 이상	4
OMA scraper 온도 이상	4
neutralizer 온도이상	4
pre-bending magnet scraper 온도 이상	6
pre-calorimeter scraper 온도 이상	4
pre-duct scraper 온도 이상	4
ion dump 온도 이상	22
calorimeter 온도 이상	39
calorimeter 온도상승률 과대	4
port box liner 온도 이상	12
armor 온도 monitor 온도 이상	1
armor 온도 monitor 온도 상승률 이상	1
수열부 온도 감시반 전원 이상	1

표 3-1-36 느린 주기 감시대상 항목 - digital input (200 msec period) (계속)
 (6) 기타 이상 감시 신호 - 장치설

이온원 냉각수 유량 이상	OMA scraper 냉각수유량 이상
이온원 grid I 통과 유량 이상	neutralizer 냉각수유량 이상
이온원 grid II 통과 유량 이상	bending magnet 냉각수 유량이상
이온원 grid III 통과 유량 이상	pre-calorimer scraper 냉각수 유량이상
이온원 grid IV 통과 유량 이상	pre-duct 냉각수 유량이상
이온원 grid V 통과 유량 이상	ion dump 냉각수 유량이상
이온원 grid VI 통과 유량 이상	calorimeter 냉각수 유량 이상
이온원 grid VII 통과 유량 이상	bellows liner 냉각수 유량 이상
이온원 grid VIII 통과 유량 이상	port 절연부 냉각수 유량 이상
ion surce exit scraper 냉각수유량 이상	본체실 보조 장치 전원 이상
	spare

표 3-1-37 느린 주기 감시대상 항목 - digital input (200 msec period) (계속)

(7) 보조배기계 및 냉매순환계 상태 감시 - 장치실

TMP 배기측 valve A	open	배기 gate valve A	open
TMP 배기측 valve B	open	배기 gate valve B	open
TMP A	ON	보조 펌프와 연결 valve	open
TMP B	ON		
TMP A	이상	액체질소 순환계 정상	
TMP B	이상	cryo 예비 냉각 중	
TMP A 회전수	이상	cryo 정상 운전 중	
TMP B 회전수	이상	cryo 재생 운전 중	

(2) 전체 System

장치 운전 및 제어를 위해 필요한 신호선의 수와 속도 등의 자료를 기반으로 NB 장치의 제어 및 DAS 시스템의 기본 구조를 설계하였다. 설계에서 기본적으로 다음과 같은 원칙들을 적용하였다.

- NBI 제어계의 역할
 - 이온원, 빔라인계 운전 및 제어
 - 계측 데이터 수집/처리
 - NBI 장치 전체의 운전상태 감시
 - 장치 및 인명보호를 위한 Interlock
 - KSTAR 전체 제어계와의 교신
- 토카막 시스템과는 Loose-coupling
 - 토카막 System 과는 가능한 한 독립적으로 운전
- 확장성(flexibility) 확보
 - 이온원 및 빔라인의 순차적 증설에 대비
 - 제어, 감시, DAS 처리 System의 모듈화
 - EPICS를 이용한 System software 개발
 - 표준 버스로서 VME bus 채용

토카막 장치 운전시 NB 장치와 주장치와의 관계는 가능한 서로 독립적인 관계를 유지할 수 있어야 하는 데 그림 3-1-177 에 두 장치의 관계를 그림으로 나타내었다. 그림 3-1-178 과 그림 3-1-179 는 NB 장치의 제어를 위해 구성될 Hardware 들과의 연관관계를 나타낸 그림이다. NB 장치를 구성하는 Hardware와 마찬가지로 NB 장치를 감시하고 운전하기 위한 제어계도 주장치실, 가열장치 전원실, 가열장치 제어실, 및 가열장치 전원 설비 Yard들에 나누어져 있다. 이렇게 나누어져 있는 제어 및 감시계들은 중앙에서 통합 제어되는 데, 그림 3-1-180 에서 그림 3-1-182 까지 각 위치에서의 제어계 구성을 나타내고 있다. 그림 3-1-183 은 EPICS에 의해 제어되는 시스템의 기본 구성을 보여주고 있다. EPICS에 의한 제어 시스템은 (5)장에서 자세히 다룬다.

빔 인출을 토카막에서 원하는 시간에 정확히 제공해주기 위해서는 정확한 Timing에 의한 전원, gas 등의 제어가 필요하다. 그림 3-1-184 에 NB 장치 운전을 위한 Timing을 정리하였다. NB 장치 운전 시작은 KSTAR의 주제어계에서 NB장치 입사 시간과 플라즈마 발생 1분전(가정)이란 신호를 받음으로서 시작된다. 이 신호에 의해 정확한 시간에 빔을 입사시켜주기 위한 운전을 미리 입력된 운전 순서대로 모든 전원과 빔라인 부품들이 정확하게 동작해야 된다. 그림 3-1-185 는 이온원의 운전 중 이상이 발생하더라도 치면적이지 않는 한 계속적인 빔을 제공하기 위한

Timing이다. 장치운전에 필요한 관련 신호들을 표 3-1-38 에, 운전 모드들을 표 3-1-39 에 정리하였다.

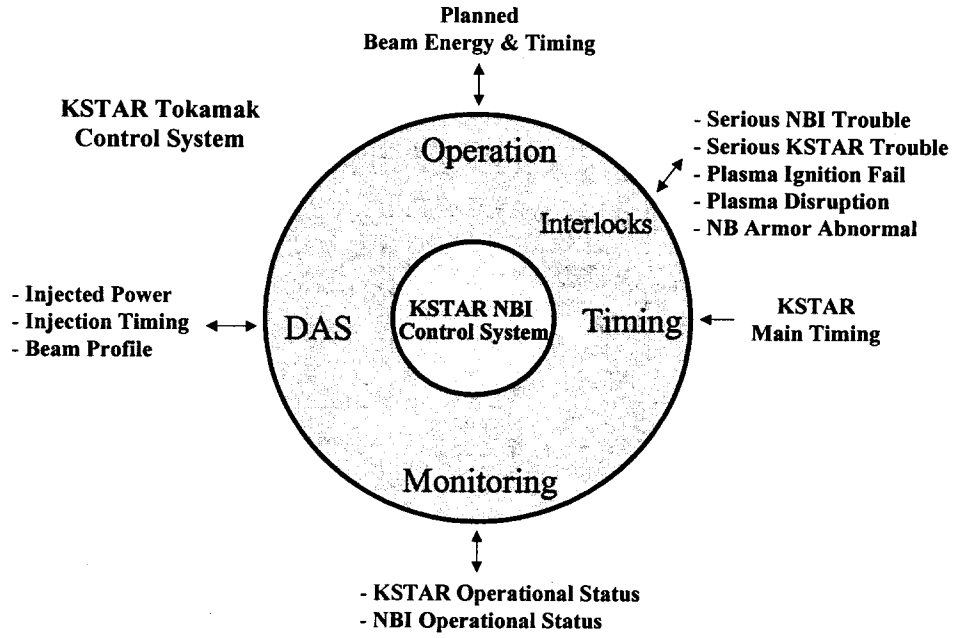


그림 3-1-177 토카막 운전제어계와 NB 장치 운전제어계의 관계 개념도

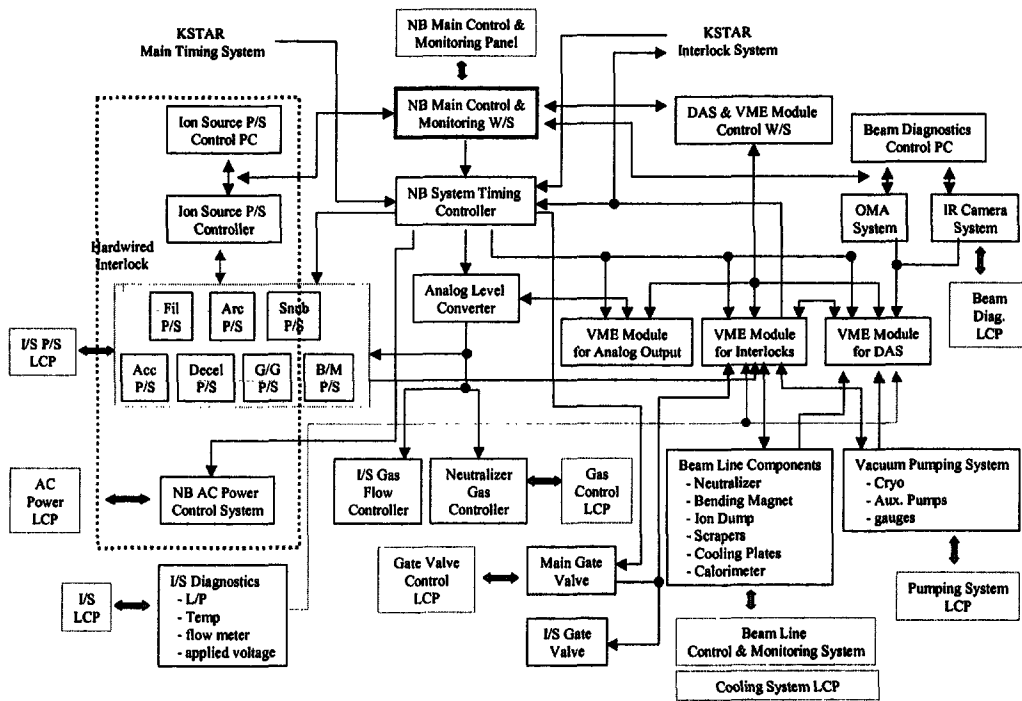


그림 3-1-178 NB 장치의 운전 제어계 구성도

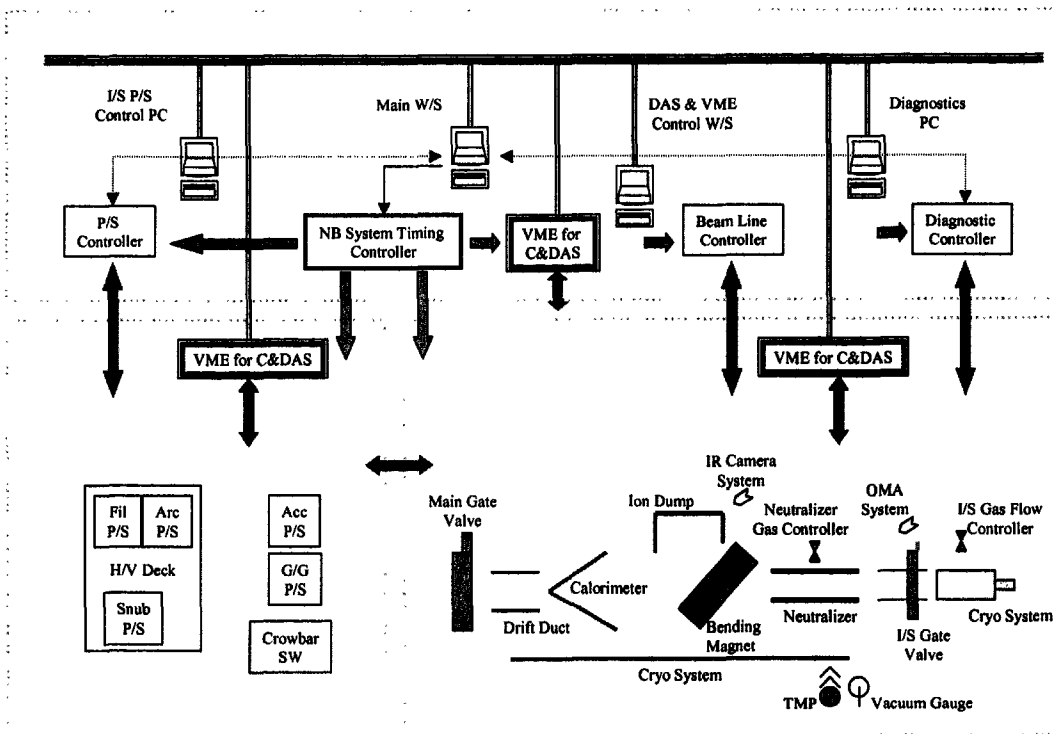


그림 3-1-179 NB 장치 운전 제어계 연결도

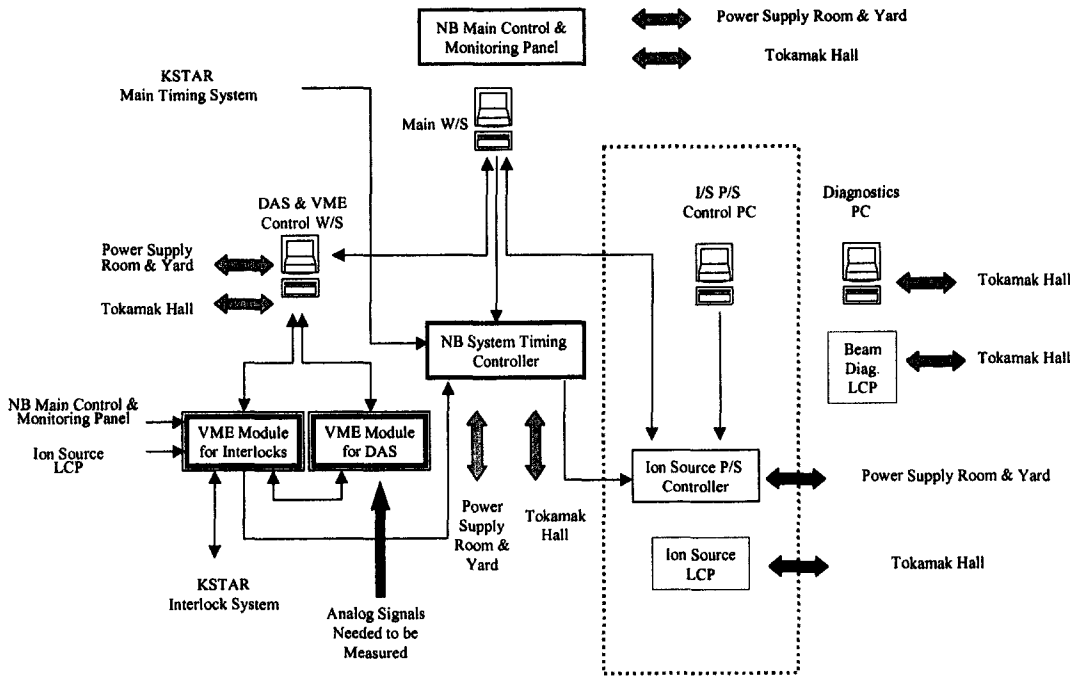


그림 3-1-180 NBI Control System in Control Room

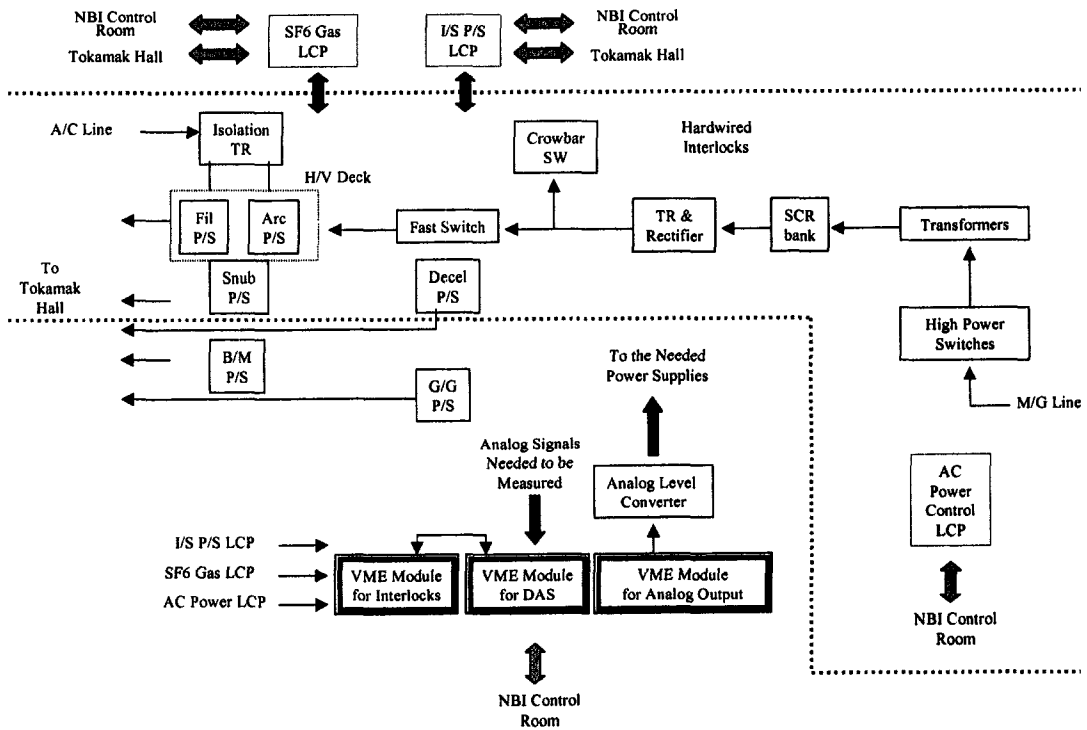


그림 3-1-181 NBI Control System in Power Supply Room

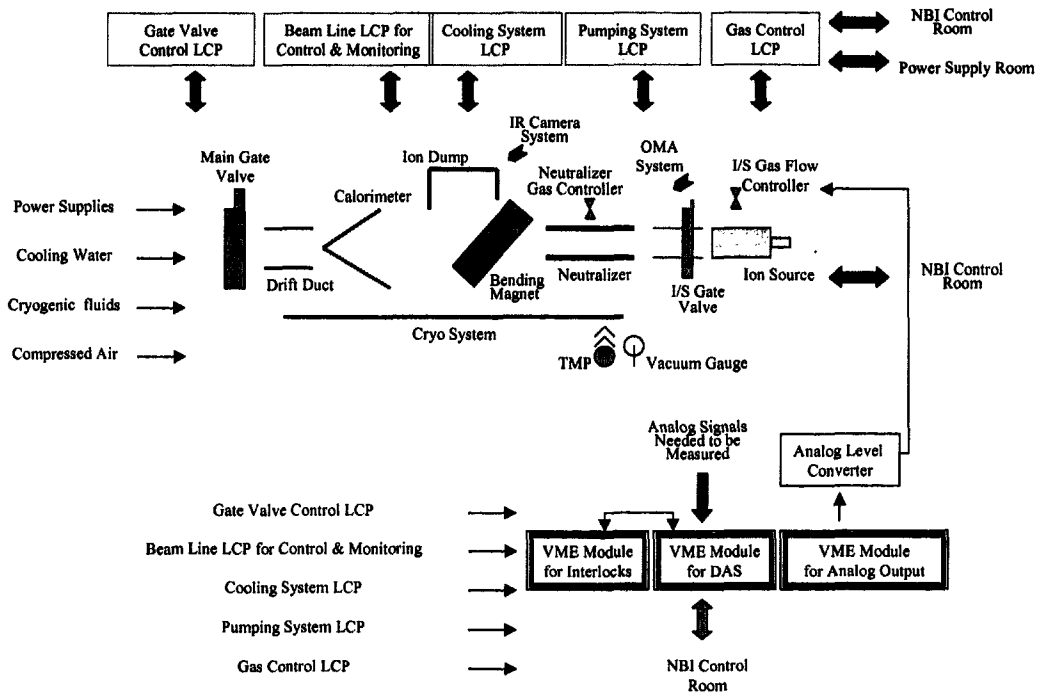


그림 3-1-182 NBI Control System in Tokamak Hall

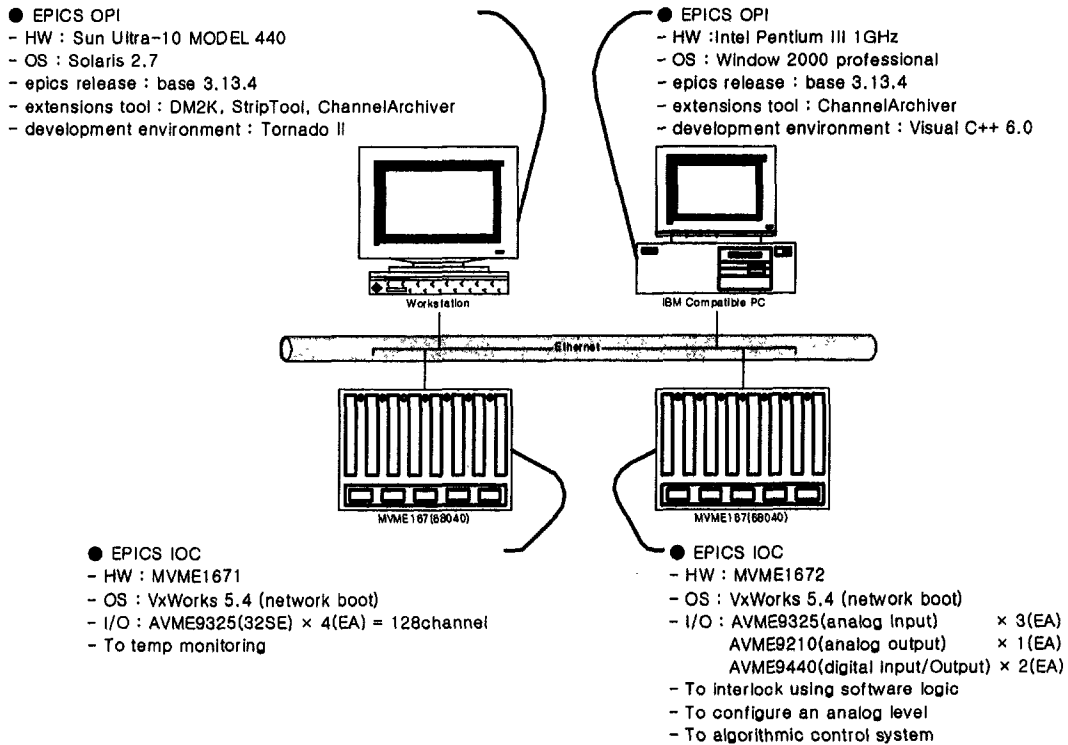


그림 3-1-183 EPICS Based Control System

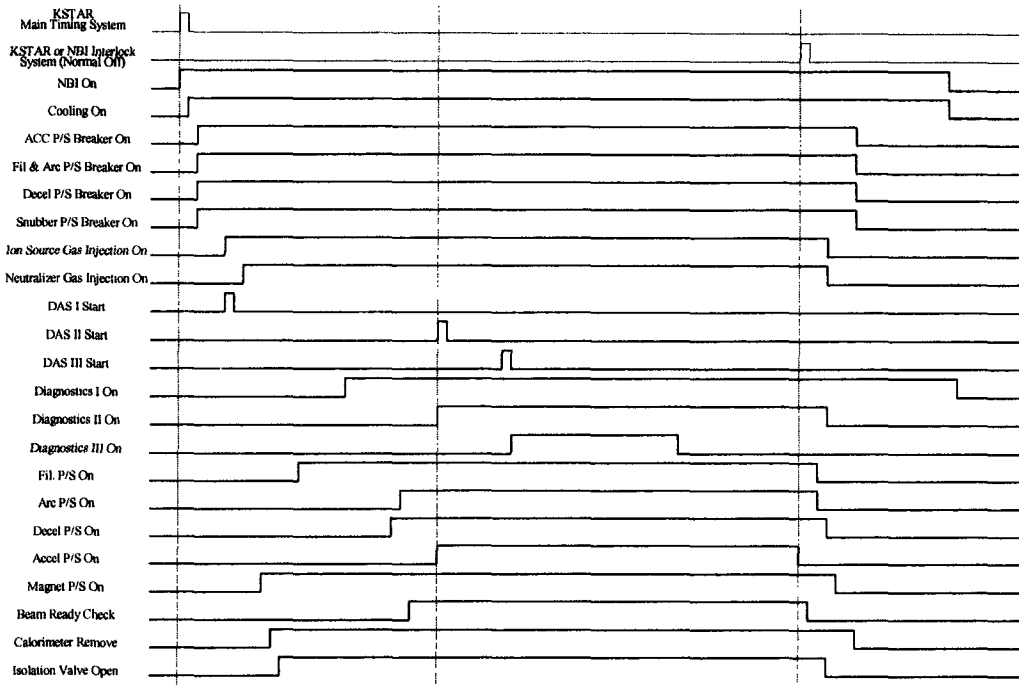


그림 3-1-184 Timing Diagram of NBI Control System (Normal)

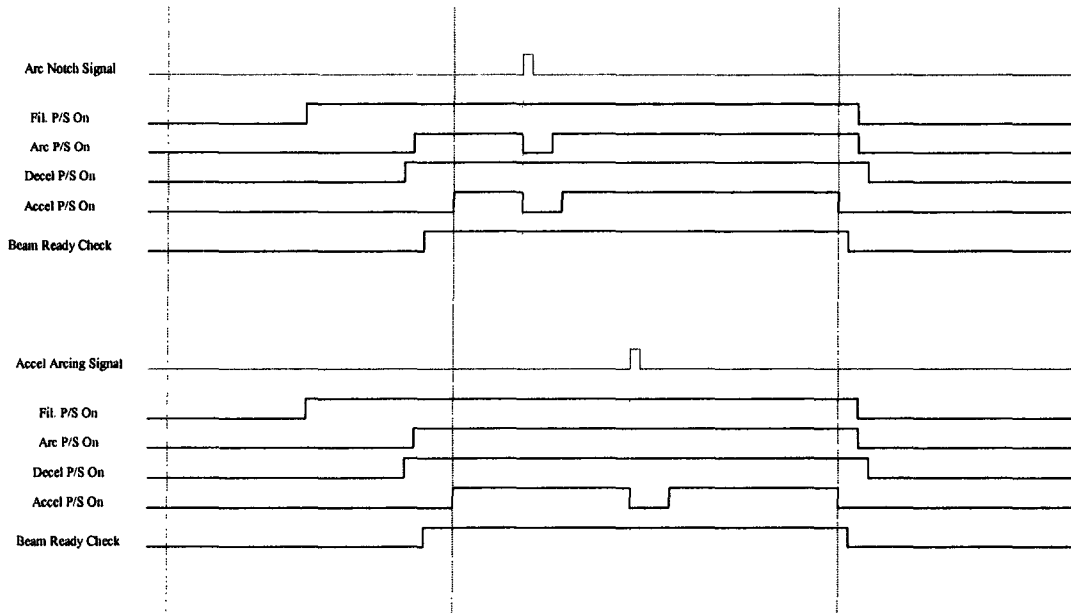


그림 3-1-185 Timing Diagram of NBI Control System (Special Sequence)

표 3-1-38 특정 신호 발생을 위한 조건 Listing

For the Beam Ready Signal	Hardwired Interlocks Between Power Supplies	For the Crowbar Trigger Signal
<ol style="list-style-type: none"> 1. Bending magnet activate 2. Calorimeter removed 3. Gate valve opened 4. Neutralizer filled with proper gas 5. Cooling system OK 6. Pumping system OK 7. KSTAR still wants NB 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Before Acc. P/S On <ul style="list-style-type: none"> - Certify all other power supplies in normal On states - Certify safety interlocks OK - Certify Beam Ready 2. Safety Interlocks 3. And Others 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Fast Switch Turn-Off Trouble During Operation 2. For the Safety 3. And Others Reasons for the Instruments Safety

☒ 3-1-39 Operation Methods for the Power Supplies

1. During Independent Test

Set up in PC to Local Controller

- CC, CV, LC, LV
- Notching Number Limit(Arc P/S)
- Arcing Number Limit(Acc. P/S)
- Timing

Internal or External Trigger

2. During NB System Operation

Setup in WS to Local Controller

- CC, CV, LC, LV
- Notching Number Limit(Arc P/S)
- Arcing Number Limit(Acc. P/S)

External Timing Programming

External Trigger

3. Other Possibility I

Set up in WS to Local Controller

- CC, CV, LC, LV
- Notching Number Limit(Arc P/S)
- Arcing Number Limit(Acc. P/S)
- Timing

External Trigger

4. Other Possibility II

Set up in WS to Local Controller

- Notching Number Limit(Arc P/S)
- Arcing Number Limit(Acc. P/S)

External CC, CV, LC, LV

External Timing Programming

Internal or External Trigger

(3) Timing Generator

(가) 제작 목적

KSTAR NBI 장치는 운전 제어의 관점에서 보면 이온원 전원을 포함한 각종 전원, 빔라인 부품, 진단장비, Gas 주입 계통과 기타 장치들이 중성 빔 발생 메커니즘에 따라 동작하여 중성 빔을 발생시키는 장치이다.

즉, 위에 열거된 장치들이 정확한 타이밍으로 동작하여 중성 빔을 발생할 수 있는 방법이 고려되어야 하고 이 방법은 실험을 통한 최적의 타이밍을 얻기 위해 가변하여 타이밍을 설정할 수 있는 방안을 포함하고 있어야 한다.

타이밍 발생기는 NBI 구성 장치들이 동기된 상태에서 운전제어하기 위해서 필요하며 전체 운전 시나리오의 통합 관리를 목적으로 한다.

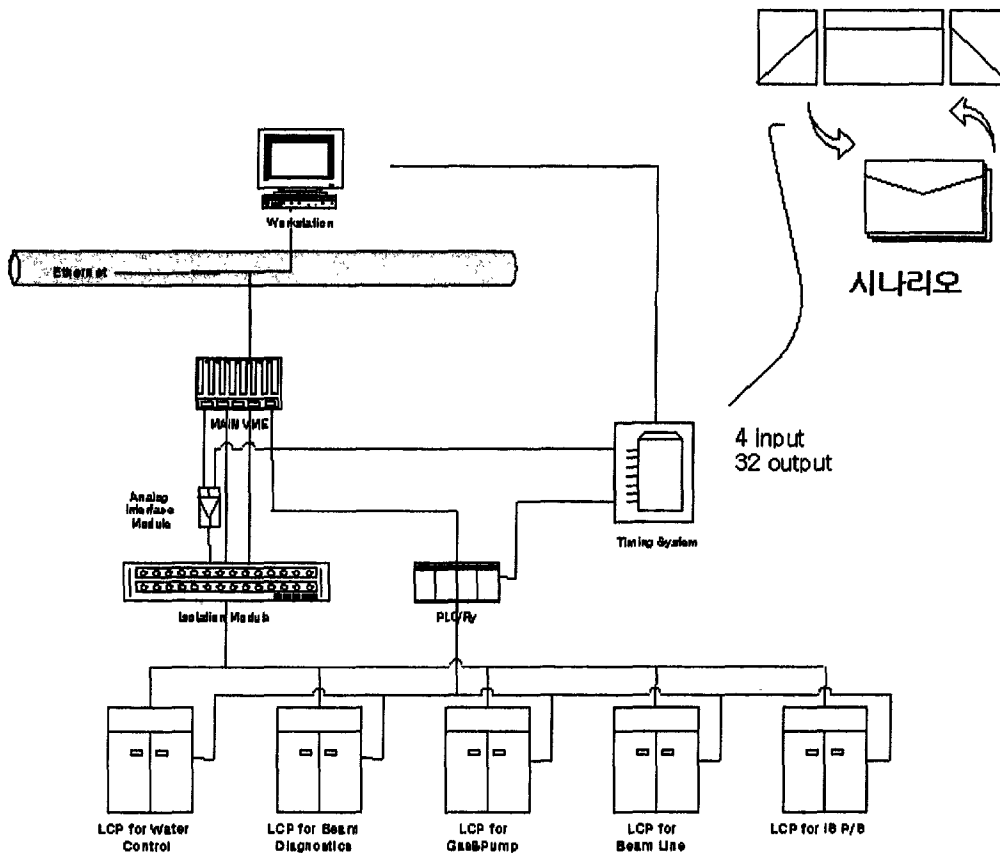


그림 3-1-186 타이밍 발생기의 역할

NBI 장치 단독 운전 시와 본 장치인 토카막 장치와의 연계 운전 시를 구분하여 NBI 타이밍 발생기가 수행해야 할 기능을 정리하여 보면 다음과 같다.

㉞ NBI 장치 단독 운전 시 타이밍 발생기의 기능

① 각종 전원장치와 같이 메인 트리거가 필요한 장치에 트리거 신호를 공급한다.

② 단순하게 On/Off 제어가 필요한 장치에 On/Off 신호를 공급한다.

③ 운전 데이터 계측을 목적으로 하는 장치에 데이터 계측 시작 트리거 신호를 공급한다.

㉟ 토카막 장치와 연계 운전 시 타이밍 발생기가 필요한 추가 기능

① 토카막 플라즈마가 원하는 시간에 빔을 정확하게 공급해주기 위한 토카막 장치와의 동기 방법이 필요하다.

② 토카막 장치의 갑작스런 운전 중지 상황에 대비한 운전 시나리오 관리 방법이 필요하다.

(나) 설계 기준

제작 목적에 맞고 NBI 장치 운전에 필요한 기능을 가진 타이밍 발생기 설계에 있어서 다음의 사항을 기준으로 설계를 하였다.

㉞ 타이밍을 쉽게 가변 설정할 수 있어야 한다.

NBI 장치는 토카막 플라즈마를 가열하기 위한 빔 인출 장치이지만 이에 앞서 다양한 실험을 통하여 최적의 빔 인출 조건을 찾아야 한다. 따라서 운전자가 다양한 운전 타이밍을 보다 쉽게 설정할 수 있는 방법이 필요하며 일괄하여 전체 타이밍을 관리할 수 있는 방법이 필요하다. 제시된 해결책으로는 window 기반에서 흔히 제공되는 GUI(Graphic User Interface)방식을 사용하는 것으로 우선, MS-window를 기반으로 마우스를 이용한 셀 단위의 설정방법을 선택하였으며 Xwindow 기반으로 이식할 경우에도 같은 방식을 채용할 것이다.

㉟ 설정된 타이밍은 신뢰성과 재연성을 가져야 한다.

중성 빔 발생에 관여하는 모든 장치들이 신뢰성과 재연성을 각각 확보하고 있다고 가정할 경우, 전체를 관리해 주는 역할을 하는 타이밍 발생기의 역할은 중요하다. 시제작된 타이밍 발생기는 다양한 개념 적용과 개발 시간 단축에 주안점을 두어 이 부분을 확신할 수 있는 방안을 가지고 있지 못하지만 다음에 제작되는 타이밍 발생기의 경우, 다양한 fault detection과 fault safety 방안을 고려하여 제작할 것이다. 이 방안에는 보다 신뢰성이 확인된 프로세서를 사용함을 포함하여 소프트웨어 또는 하드웨어적으로 오류 처리 방안을 생각할 수 있다.

㊱ 앞으로 늘어 날수 있는 타이밍 입력 포인터에 대하여 쉽게 확장될 수 있는 방법을 가져야 한다. 타이밍 발생기의 각 출력 채널은 제각각 모듈 단위로 구성하였

다. 따라서 사용 채널의 확장이 필요한 경우 모듈 추가가 가능하고 문제가 있는 모듈의 경우 다른 모듈로의 대체가 가능하도록 구성하였다.

㉔ 토카막 장치와의 연계 운전 시에 필요한 추가 기능을 가져야 한다.

소프트웨어 트리거 및 External 트리거를 이용하여 NBI 단독 운전을 수행할 수 있으며 KSTAR 본 장치와의 연계 운전 시 External 트리거를 동기 운전을 방안으로 이용할 수 있다. 또한 3개의 예비 트리거 입력을 두어 KSTAR 본 장치가 보내주는 예비의 3가지 운전 중지 상황에 맞는 예비의 3가지 운전 시나리오를 선택할 수 있도록 하였다.

㉕ Unix 기반의 workstation으로 타이밍 설정 프로그램을 이식할 경우를 대비해야 한다. 타이밍을 운용하는 별도의 OPI(Operartor Interface)를 두지 않기 위해서 현재 EPICS가 설치 활용되고 있는 Sun workstation으로의 이식이 가능해야 한다. 이를 위해 각 모듈 단위의 출력 채널에 로딩되는 타이밍 설정치는 ASCII값으로 저장되는 인터페이스 방식을 사용하였다. 즉 현재 GUI를 이용해 셀 단위로 값을 설정하면 이 값은 일련의 ASCII 코드로 저장되고 타이밍 발생기의 각 채널에 해당하는 모듈은 이 ASCII 코드 값을 받아 동작한다. 따라서 OPI가 PC가 되던 workstation이 되던 관계없이 ASCII 코드로만 타이밍 데이터를 작성하면 타이밍 발생기에 대한 수정 작업이 필요치 않다.

㉖ 세부 사양

300초 운전에 맞추어 타이밍 발생기는 300초의 시간 설정이 가능해야 한다. 또한 최소 설정 가능 시간은 1ms로 On/Off가 가능해야 한다. 또한 채널간 동기 범위를 100 μ s 이내가 되도록 설계하였다.

표 3-1-40 타이밍 발생기 세부 설계 내용

· 전체 설정 가능 시간	300s
· 설정 가능 최소 시간	1ms
· 출력 채널	32ea (TTL level 호환)
· 트리거 입력 채널	4ea
· 사용자 인터페이스 하드웨어	PC
· 통신 방식	RS232
· 제어용 소프트웨어 제작 툴	Visual Basic
· 채널간 동기 범위	100 μ s 이내

(다) 장치 구현

타이밍 발생장치를 구현하는데 있어서 300초 운전을 만족해야 하며 유지보수의 편의성과 출력 채널의 확장 등을 고려하여 각 채널을 별도의 마이크로프로세서에 의해 동작하도록 모듈 단위로 설계하였다. 또한 개발 시간 단축을 위하여 On Chip in-system programming과 debugging이 가능한 SX28AC 프로세서를 채택하였다.

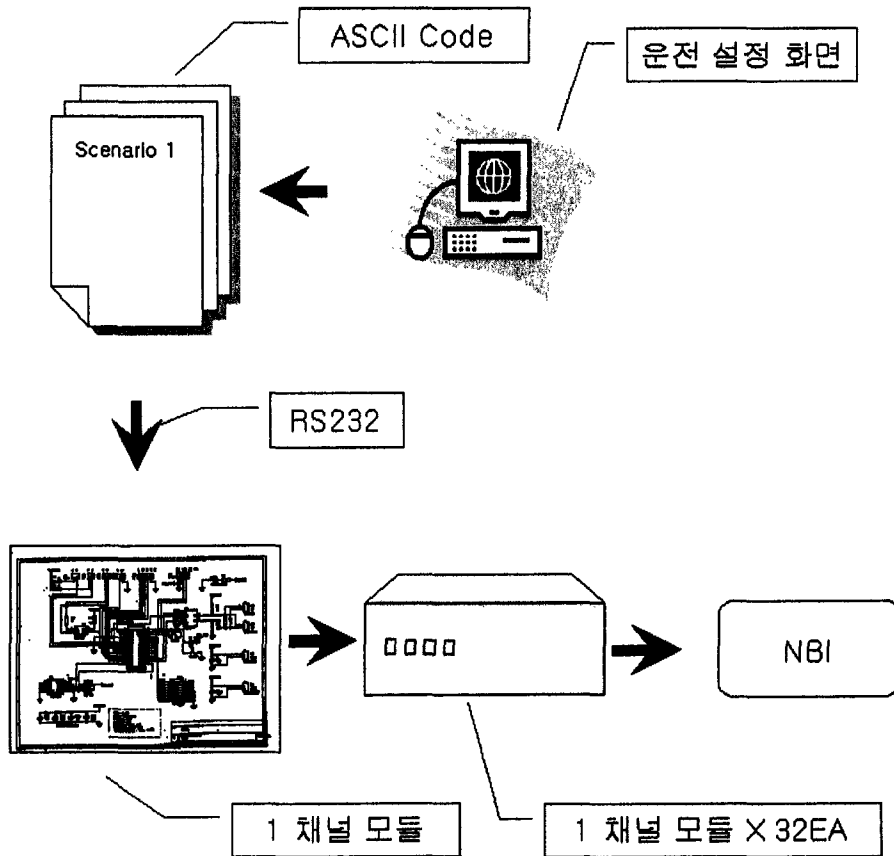


그림 3-1-187 타이밍 발생기의 구현 방법

(다)-1. 운전 설정 화면

㉞ 작성된 사용자 프로그램은 Visual Basic을 사용하여 작성하였으며 홍색과 청색의 농도로 타이밍을 1ms, 10ms, 100ms, 1s, 그리고 10s의 5단계로 표시할 수 있도록 하였다. 홍색은 온 타이밍을 설정하고 청색은 오프 타이밍을 설정한다.

㉟ scenario 선택 box를 사용하여 4개의 입력 선택 신호에 의해 선택될 수 있는 운전 설정 화면이 나타나며 각각에 대하여 시나리오를 설정할 수 있다. 이렇게 작성된 시나리오는 메인 운전 시나리오가 동작하는 동안 해당 트리거 입력 신호가 입력될 시에 바로 적용된다.

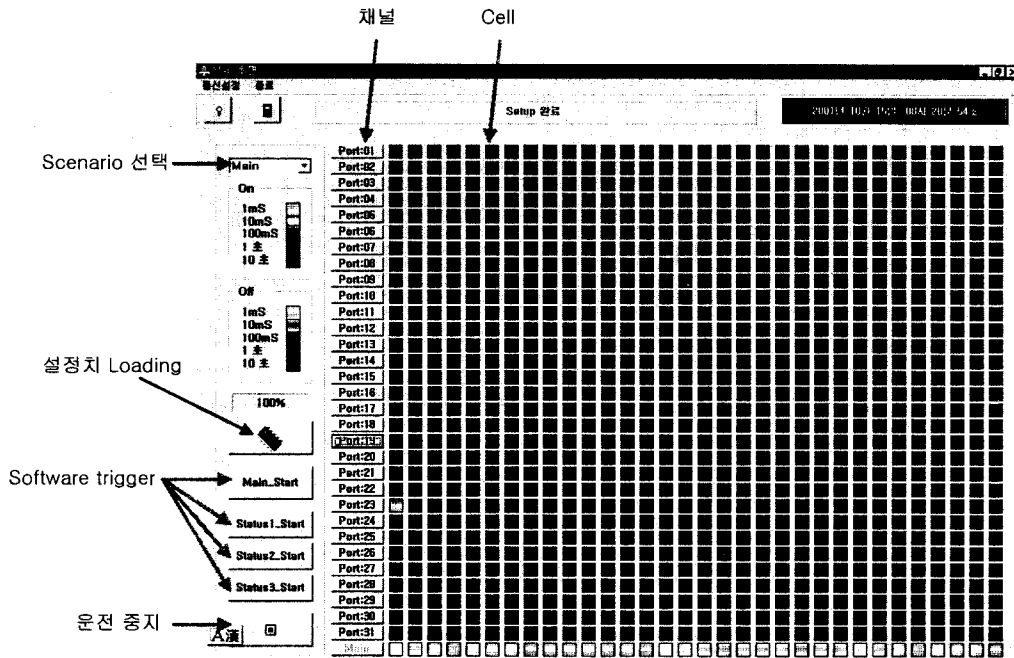


그림 3-1-188 사용자 프로그램 실행 화면

㉔ 설정치 로딩 버튼을 사용할 경우 전체 32채널에 해당하는 타이밍이 각 채널 모듈에 저장되며 각 채널 버튼을 사용할 경우 해당 채널에 타이밍 항목만이 로딩된다.

㉕ 외부 입력 트리거 신호가 없더라도 해당 소프트웨어 트리거를 사용하여 해당 신호 입력시의 출력을 확인할 수 있다.

㉖ 사용자 인터페이스 방식은 모두 마우스로 처리될 수 있다.

㉗ 아래 그림 3-1-189 와 같이 NBI 운전 설정용 프로그램이 설치된 디렉토리에 Set 항목으로 네 개의 시나리오를 저장한다. Comm.Set은 PC Com 포트에 대한 설정 내용이며, Main.set은 소프트웨어 트리거 또는 외부 트리거 입력 신호에 의해서 수행되어야 할 데이터의 내용을 담고 있다.

또한 Status1.set, Status2.set, Status3.set은 3개의 예비 트리거 입력 신호에 대한 운전 시나리오 데이터를 저장하고 있다. main, status1, status2, 그리고 status3는 타이밍 장치에 로딩 된다.

㉘ Set으로 저장된 파일은 그림에서와 같이 아스키 데이터로 각 문자가 해당 타이밍 시간을 나타낸다. PC와 타이밍 모듈 사이의 통신 데이터의 내용으로 이러한 방식을 채용할 경우 workstation으로 사용자 프로그램을 이식하기가 용이하다. 즉, 데이터의 내용만을 전송하면 되므로 Visual Basic으로 작성된 PC 사용자 프로그램 대신에 Motif등으로 UNIX 기반의 사용자 프로그램을 작성할 수 있다.

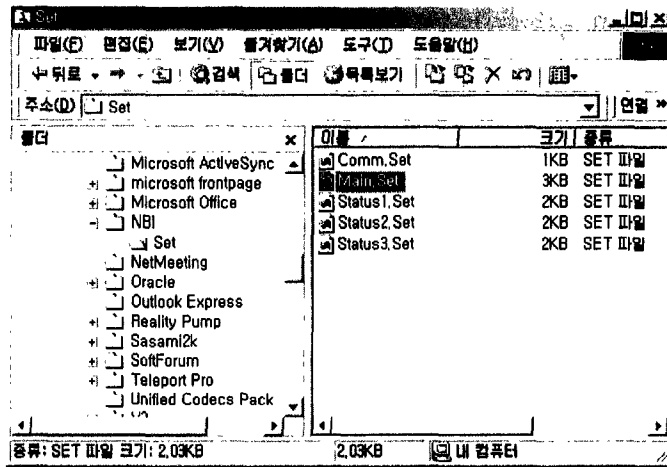


그림 3-1-189 네 개의 시나리오

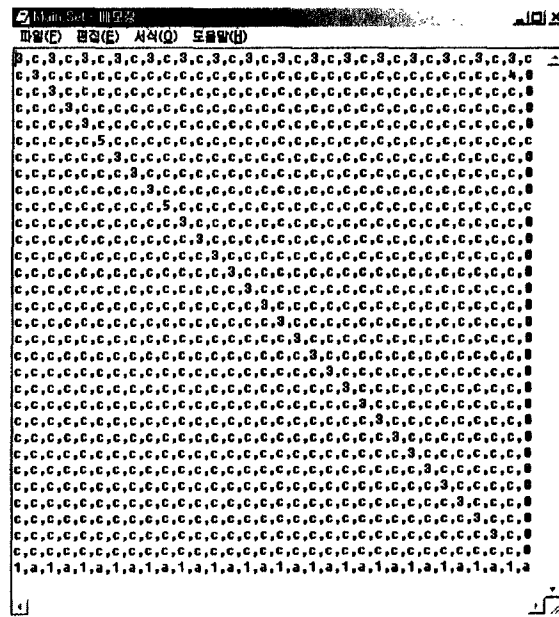


그림 3-1-190 ASCII 형태의 타이밍 데이터

(다)-2. 회로 구성

⑦ SX device는 multi-pin I/O ports와 internal oscillator, Watchdog timer, Real-Time Clock/Counter, analog comparator, power-on and brownout Reset 기능을 내장하고 있기 때문에 모듈 단위로 구성하더라도 전체 회로의 규모를 작게 할 수 있다.

㉔ multi-pin I/O ports는 RA, RB, RC를 가지고 있으며 각각 데이터 입출력 방향, 입력 전압 범위, 풀업 사용 여부, 슈미트 트리거 기능사용 여부(Port A 제외), 그리고 외부 입력에 대한 인터럽트 동작과 아날로그 비교기 동작 가능(Port B의 경우)을 설정할 수 있다.

㉕ 3-cycle 내부 인터럽트 응답범위(50MHz로 동작할 경우 < 60ns)를 가지고 있어 빠른 인터럽트 처리 성능을 가지고 있다.

㉖ 2048개의 12 bits wide words 프로그램 메모리와 136bytes의 데이터 메모리를 SX device 내부에 가지고 있다.

㉗ RC0-RC7는 8bit 스위치를 달아 각 채널에 해당하는 고유의 어드레스를 지정할 수 있도록 설정(256개까지 출력 채널을 확장 가능)하여 사용하였다.

㉘ RB0-RB3는 외부 입력에 대한 인터럽트 동작 모드로 설정하여 트리거 입력 채널로 사용하였다.

㉙ RB4-RB5는 외부 메모리인 24LC128 Serial EEPROM과의 통신용으로 설정되었고 RB6-RB7은 외부에서 설정된 타이밍 데이터를 처리하기 위한 통신용으로 설정되었다.

㉚ PC의 RS-232로 설정된 COM 포트를 사용하여 전달된 신호는 기본적으로 point-to-point 방식으로 다수의 채널과 통신하는 데 문제가 있다. 따라서 multi drop 방식의 RS422 로 변환하는 컨버터를 사용하여 각 채널을 관리하는 SX device에 연결되어 있는 SN75176 와 통신한다.

㉛ PC측에서 설정된 데이터를 전송할 때는 poling 방식을 이용하여 각 채널 모듈과 통신 후 어드레스가 일치하는 모듈에 해당 데이터를 전송한다.

㉜ 24LC128 Serial EEPROM에 cell 단위로 설정된 ASCII 데이터가 저장된다.

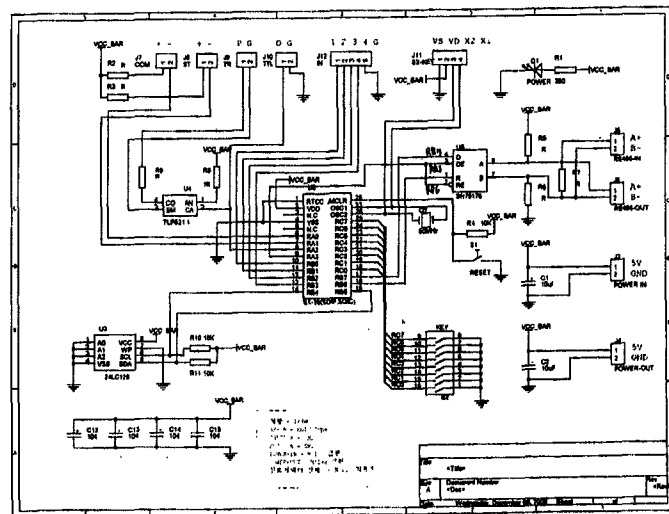


그림 3-1-191 타이밍 모듈의 회로도

(라) 제작 결과

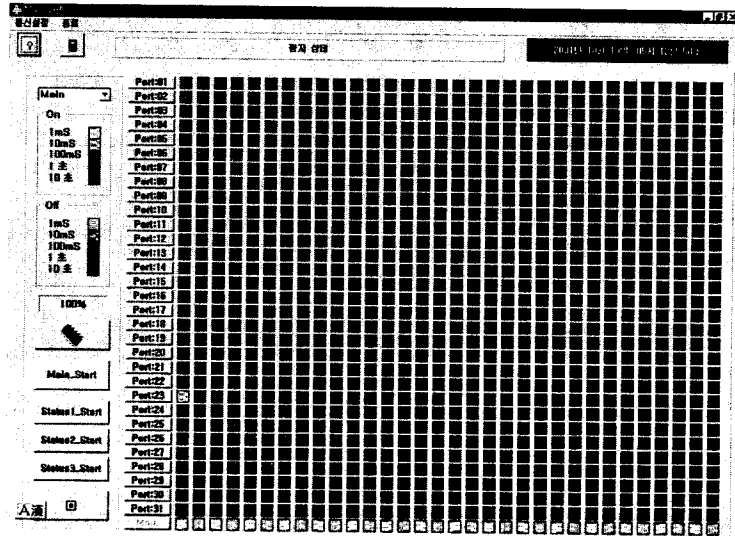


그림 3-1-192 타이밍 데이터의 입력 예

그림 3-1-192 와 같이 타이밍 데이터를 PC측에서 NBI 프로그램을 사용하여 설정한 후 실행시키면 그림 3-1-193 과 같은 타이밍 데이터를 얻을 수 있다. 그림 3-1-194 는 실 제작된 타이밍 발생기이다.

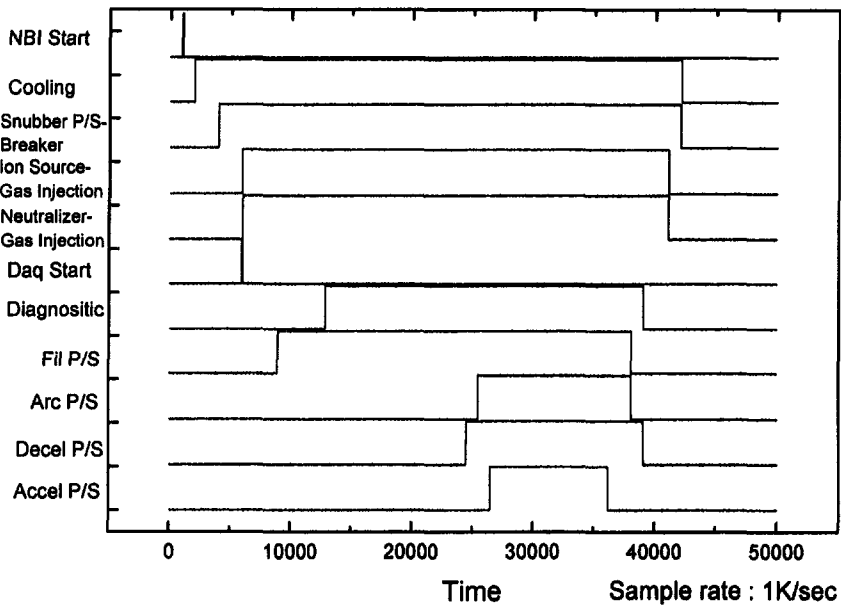


그림 3-1-193 출력된 타이밍 데이터

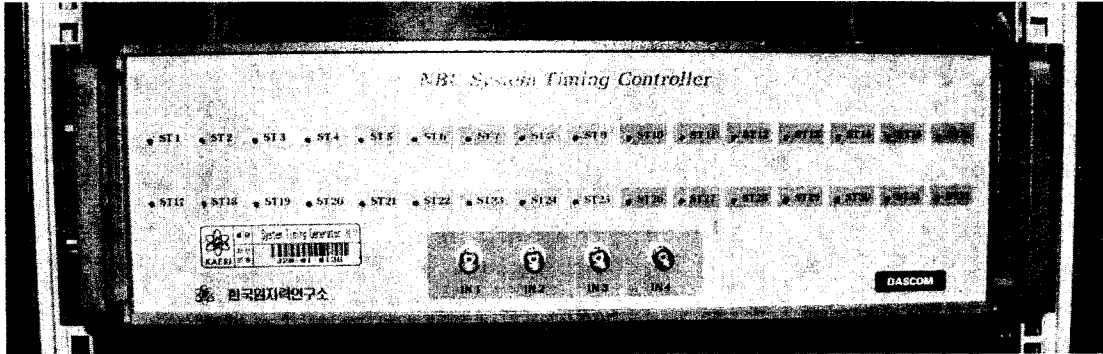


그림 3-1-194 제작된 타이밍 발생기

(4) EPICS-VME에 의한 DAS System 구성

(가) EPICS

(가)-1. EPICS 소개

Experimental Physics and Industrial Control System(EPICS)은 Los Alamos National Laboratory(LANL)의 Accelerator Technology 그룹과 Argonne National Laboratory(ANL)의 Advanced Photon Source(APS)의 공동연구로 탄생하였고 현재는 전 세계적으로 광범위하게 사용되고 있다.

EPICS는 입자 가속기, 대형 실험장치 그리고 대형 망원경과 같은 장치 운전의 목적으로 분산 제어 시스템 구성에 사용되는 소프트웨어 툴들과 관련 문서 그리고 사용자가 작성한 각종 코드들을 모두 통칭하는 용어이며, 이를 발전시키기 위하여 큰 규모의 과학 연구소나 산업시설이 수행하는 공동 연구체제를 뜻하기도 한다.

이 분산 제어 시스템은 일반적으로 수 백대의 컴퓨터가 네트워크를 통하여 서로 통신을 수행하고 중앙 제어실에서 다양한 장치들로 제어와 피드백 신호를 제공할 수 있으며 인터넷을 통한 원격 제어까지 가능하다.

EPICS는 Client/Server 그리고 Publish/Subscribe 기술을 사용하는데 현장에 설치되어 Server역할을 수행하는 Input Output Controller(I/O Controller)가 로컬 제어를 수행하고 Channel Access(CA) 네트워크 프로토콜을 사용하여 Client에게 그 항목에 관계된 정보를 공고(Publish)한다. Client는 이 정보 중에 구독(Subscribe)하고자 하는 정보를 CA를 통하여 Server에서 읽어 온다. CA는 특별히 제작된 광 대역 soft real time 네트워크 어플리케이션으로 EPICS를 수 백대의 컴퓨터가 포함한 제어 시스템 제작에 사용할 수 있는 주된 이유이기도 하다.

EPICS는 하드웨어적으로 크게 세 부분으로 나눌 수 있다. 제어할 장비들이 연결되어 있는 IOC와 오퍼레이터가 사용할 OPerator Interface(OPI), 그리고 오퍼레이터가 OPI를 통하여 원거리의 IOC와 통신하기 위한 LAN으로 구성된다.

(가)-2. EPICS의 특징

EPICS는 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

Tool Based Software

EPICS는 control system 제작과 운전을 위한 많은 소프트웨어 툴을 제공한다. 사용자는 이 툴을 사용하여 control system을 제작하기 때문에 코딩작업 최소화과 사용자 인터페이스 방식의 단일화를 달성할 수 있다.

Distributed Control System

다수의 IOC와 OPI를 지원할 수 있다. 하나의 IOC가 포화되면, 관련된 기능이 인접한 IOC에 의해서 대신 수행된다.

Event Driven

데이터 전달이 필요한 Server와 Client 사이에서만 데이터 전송이 이루어짐으로써 네트워크 부하와 메시지 지연은 Server에 의해 Client로 보내지는 데이터를 조정함으로써 동시에 최소화될 수 있다.

Customization

사용자는 간단한 ASCII table을 수정하여 사용자 어플리케이션에 새로운 component를 쉽게 추가할 수 있다.

Scalable

사용자는 간단한 ASCII table을 수정하여 필요에 따라 channel 수를 조절하여 사용할 수 있다.

Modular

계층적으로 설계된 IOC의 소프트웨어 구조로 인해서 Client와 Server 사이에 그리고 상이한 version의 EPICS 툴 사이에 decoupling을 구성할 수 있어 사용자가 보다 쉽게 다양한 하드웨어 모듈이 포함된 IOC를 사용할 수 있다.

Platforms

Client와 Server사이의 Channel Access(CA)를 가능하게 해주는 EPICS core 소프트웨어의 경우 대부분의 UNIX workstation과 Window기반의 PC에 설치 활용할 수

있다.

(가)-3. IOC 소프트웨어 Components

그림 3-1-195 는 VME가 부팅을 완료한 후에 VxWorks OS의 application으로 동작하는 EPICS의 논리적인 구조를 도시한 것이다. 회색 라인은 EPICS IOC 소프트웨어 component 사이에 형성되는 decoupling을 나타낸 것이다. 즉, 전체 IOC 소프트웨어의 작성 규칙과 동작 방법을 알지 못해도 회색 라인 사이에 있는 component의 내용은 사용자가 바꾸어 설정할 수 있다.

IOC Database

EPICS의 database는 컴퓨터 자료구조에서 말하는 그것과는 다른 개념으로 database라는 용어는 EPICS가 가지는 고유 개념이다. 컴퓨터 자료구조에서의 database는 자료의 집합이라고 할 수 있지만 EPICS에서의 database는 자료를 해석하는 방법이라고 할 수 있다.

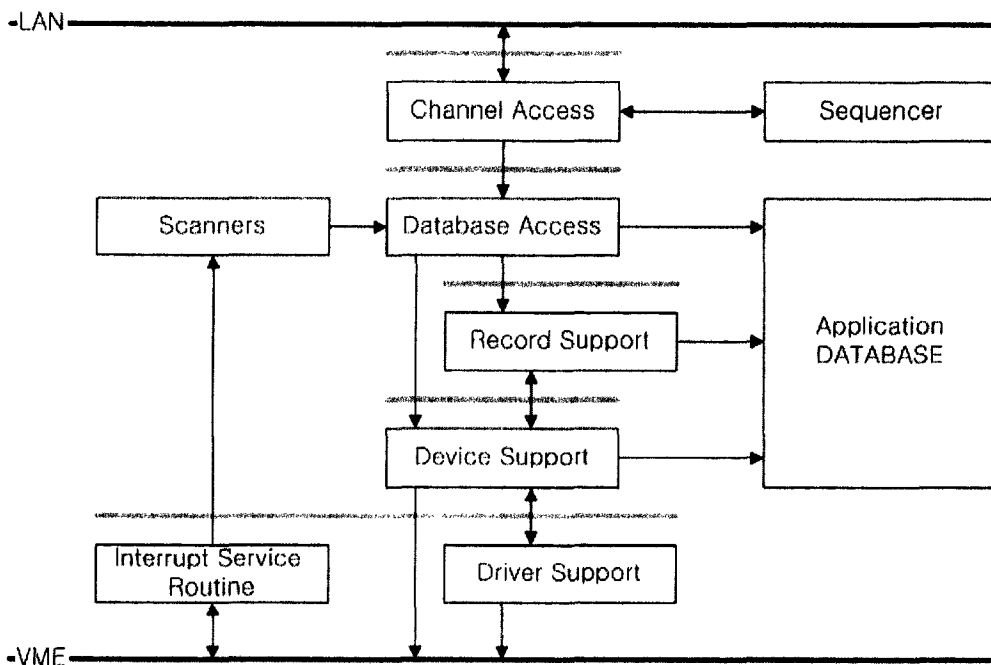


그림 3-1-195 EPICS IOC의 논리적인 동작 구조

IOC Database는 EPICS core의 record support 부분이 EPICS가 초기화 될 때 host computer에서 text로 작성된 database configuration 파일(.db, .dbd)를 참고하여 IOC내에 만들어지게 되며 메모리에 상주하게 된다. IOC Database는 여러 개의 record로 구성되어 있고, 이 record는 여러 개의 field들로 구성되어 있다.

각 record는 그림 3-1-196 에서와 같이 record type을 가지고 있으며 이 record type은 IOC와 OPI간의 약속된 데이터 형식이다. record type으로는 ai(Analog

Input), ao(Analog Output), bi(Binary Input), bo(Binary Output) 등과 같이 물리적인 하드웨어를 구현한 I/O record와 PID(Pid record), Compress(Compress record) 와 같이 하드웨어와 상관이 없는 데이터의 처리만을 목적으로 하는 Algorithm record로 구분 지을 수 있다.

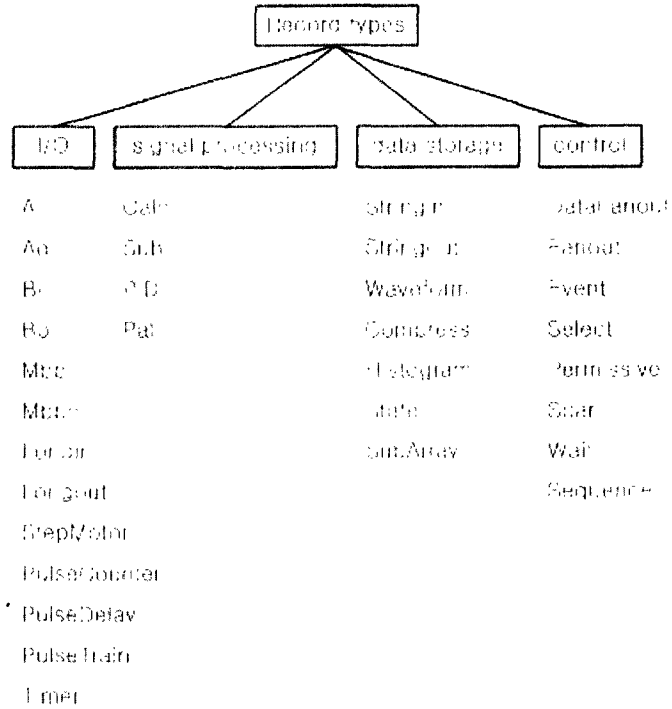


그림 3-1-196 record types

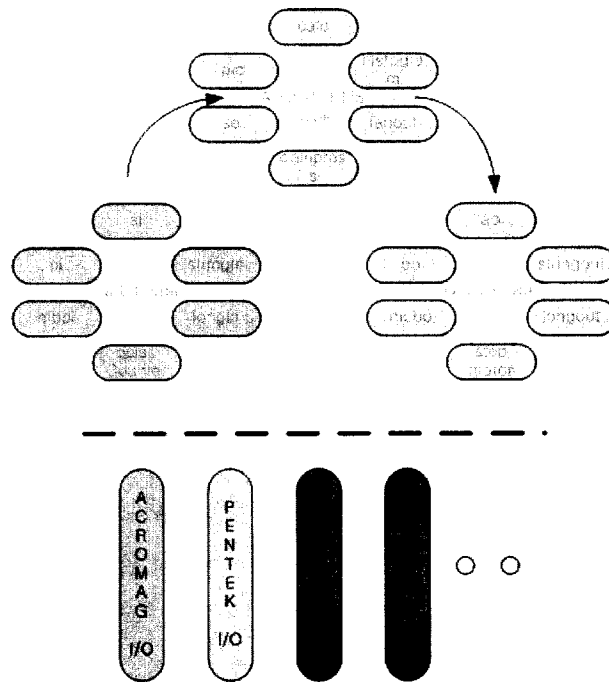


그림 3-1-197 record와 하드웨어와의 관계

그림 3-1-197 은 record와 하드웨어와의 관계를 도시한 것으로 제조업체에 관계 없이 아날로그 입력 신호 처리를 목적으로 하는 입력 보드의 경우 일반적인 신호처리를 수행할 것이다. 즉, A/D 변환 칩, 샘플주기 회로, 내부 저장 메모리의 사용여부 등에 의해 만들어지는 약간의 차이만 있을 뿐 공통되는 기능이 있다. 이를 record로 기술하여 사용하면 하드웨어에 대한 지식 없이도 적절한 record의 호출과 사용을 통하여 사용자가 프로그램을 작성할 수 있고 하드웨어를 제어 할 수 있다.

Record Support

각각의 record instance에 의해서 수행되는 것으로 record type에 의해서 동작이 결정된다. PID record에 의해서 수행되어야 할 처리내용은 기타 다른 record와 구분될 수 있다. I/O record의 경우 반드시 그림 3-1-195 의 record support의 하위 layer인 device support를 호출하게 된다. record support는 device support의 기능만을 호출할 뿐이지 하드웨어와 관계된 직접적인 내용은 관여하지 않는다. 이렇게 함으로써 record support와 device support 사이의 decoupling 개념이 구현된다.

일반적으로 record support는 아래 기능을 수행할 수 있으며 포함되는 기능은 사용자 정의에 의해서 결정된다. 또한 .db 파일 작성시 각 기능에 해당하는 field를 설정하여 줌으로써 해당 기능을 사용할 수 있다.

- 만일 I/O record라면, Device Support를 경유하여 하드웨어의 데이터를 읽고 하드웨어에 데이터를 쓰는 기능이 포함된다.

- conversion이 필요한 record의 경우 conversion을 수행한다. 이 conversion에는 smoothing, scaling, masking, shifting 등이 포함된다.

- alarm이 필요한 record의 경우 관계된 데이터를 검사하도록 하여 설정치를 초과(high alarm)하거나 미달(low alarm)할 경우 alarm에 관계된 기능을 호출하도록 한다.

- 데이터 변화를 모두 감시하지 않고 변화의 범위가 설정치 이상일 경우 모니터링할 수 있도록 하는 기능이 포함된다.

- 해당 record 뿐만 아니라 관계된 record가 연계되어 동작하도록 링크 기능을 포함한다.

Device and Driver Support

하드웨어 제어에 대한 이해를 필요로 하며 하드웨어에 직접 관계된 처리를 수행한다. 만일 제어할 하드웨어가 복잡하다면 Device Support와 Driver Support로 구분하고 low-level I/O에 관계된 제어를 Driver Support에 의해 수행토록 한다. 이렇게 하면 하드웨어 제어에 있어서 복잡성을 어느 정도 줄일 수 있다. 하드웨어 제어가 복잡하지 않다면 Device Support만으로 구성하여도 상관없으며 이 같은 결정의

application designer에 선택된다.

Interrupt Service Routine(ISR)도 Driver Support의 일부분이다.

Database Access

Database Access는 Database상에 원하는 record의 값을 읽거나 수정할 수 있는 함수를 제공한다.

모든 종류의 EPICS component들은 Database Access를 경유해야만 record에 대한 access를 수행할 수 있다. 만일 네트워크를 통하여 연결된 인접한 IOC에서 실행 중인 record를 확인하고 처리하는 경우 Channel Access 그리고 Database Access를 경유하여야만 record에 접근할 수 있다.

동일한 IOC에서 실행 중인 record를 확인하고 처리하는 경우 Database Access만을 경유만으로도 가능하나 선택적으로 Channel Access와 Database Access 모두를 경유하여 record에 접근할 수 있다.

Scanners

Database상에 원하는 record가 언제 그리고 어떻게 처리될 것인가를 관리해주는 것이 scanner의 기능이다. record를 처리하는 세 가지 방법이 있다. 일정 주기간격으로 처리하는 방법, 소프트웨어 또는 하드웨어에 의해 발생하는 event에 의해 처리하는 방법 그리고 관련된 record의 호출에 의해서 수동적으로 처리되는 방법이 있다. 부가적으로 scan에 관계된 field들이 있어 더욱 세분화할 수 있다.

Channel Access

Channel Access는 네트워크를 통한 IOC Database의 접근을 가능하게 하는 EPICS 특유의 프로토콜로써 Client/Server 모델에 기초하여 제공한다. 모든 IOC에는 CA server가 작동하고 CA client들로부터의 접속을 허용한다. CA client가 되는 IOC와 OPI들은 모든 CA server들과 통신할 수 있으며 수행할 수 있는 기능은 다음과 같다.

- 네트워크를 통하여 특정한 channel을 찾고 연결시킨다.
- channel에 새로운 설정 값을 써넣을 수도 있고 갱신된 값을 읽어 올 수도 있다.
- channel을 모니터 한다. 즉, 변화 범위가 설정치를 초과할 때만 확인할 수 있다.
- channel과 설정된 연결을 종료한다.

여기서 channel 이란 IOC Database를 구성하고 있는 record의 특정 field를 의미한다.

Sequencer

제어 시스템을 상태 천이의 개념으로 처리할 수 있는 방법을 제공해 준다. 상태 천이를 쉽게 기술할 수 있는 State Notation Language(SNL)로 기술된 내용은 EPICS State Notation Compiler(SNC)를 사용하여 C code로 변환시킬 수 있다.

(가)-4. OPI Tools

The Display Manager 2000 (DM2K)

DM2K는 쉽게 디스플레이를 작성하고 수정하게 하며 디스플레이를 실제 하드웨어에 연결하여 해당 하드웨어의 값을 확인할 수 있게 해주는 프로그램이다. 이 프로그램을 이용하여 디스플레이를 작성하고 편집하면 관계된 명령어들을 사용하는데 있어서 다른 프로그램의 사용경험이 필요 없을 만큼 쉽게 구성할 수 있다.

The Channel Archiver

Channel Archiver는 기존의 Archiver를 대신하는 틀로써 실시간으로 데이터를 획득하여 디스크에 파일의 형태로 저장한다. 또한 몇 가지의 데이터 복원 방법이 있는데 상황에 따라 적당한 방법을 선택하면 된다.

그림 3-1-198 은 Channel Archiver의 틀 모음을 나타낸 것으로 사용자는 필요한 것만을 사용하면 된다.

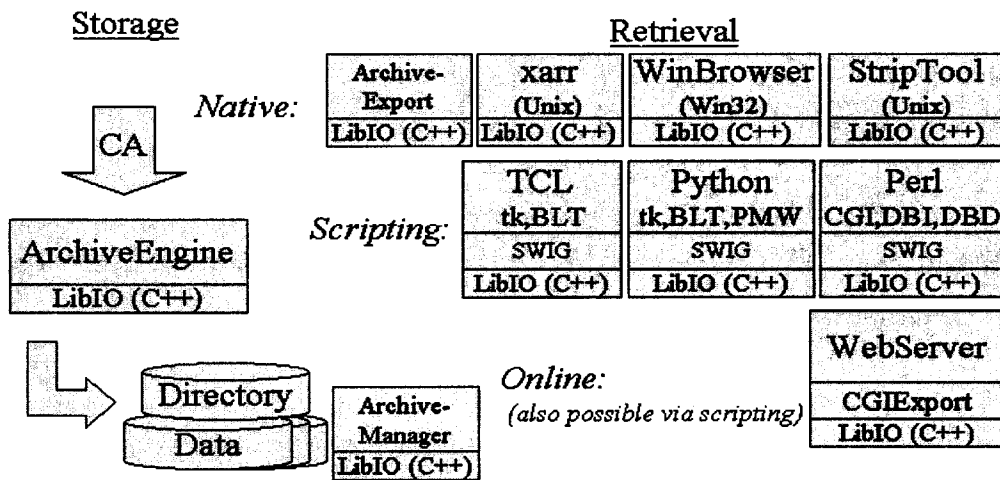


그림 3-1-198 Channel Archiver 틀 관계도

ArchiverEngine은 IOC server가 공고(publish)한 channel중에 저장이 필요한 것만을 선택할 수 있는 OPI 틀이다. 이 틀은 Channel Access를 통하여 구도(subscribe)하고 있는 데이터를 binary 형태로 저장할 수 있다. 그림 3-1-199 는 ArchiverEngine의 실행화면을 나타낸 것이다.

```
(nbi34@epics) ~/epics-3.13.4/proj/nbi/archive_dir/archive_thermo [174] ArchiveEngine thermo.cfg
01/03/2002 22:31:46.055757000 Starting Engine with configuration file thermo.cfg
Launched EngineServer on port 4812
CA registers fd 7
Adjusted receive buffer to 262144
WriteThread started
```

```
-----
Engine Running.
Stop via web browser at http://localhost:4812/stop
-----
```

```
CA registers fd 6
Adjusted receive buffer to 64240
01/03/2002 22:31:46.148160000, nbi34:calcNbiThermo3: Connected
01/03/2002 22:31:46.148523000, nbi34:calcNbiThermo2: Connected
01/03/2002 22:31:46.148850000, nbi34:calcNbiThermo1: Connected
01/03/2002 22:31:46.149209000, nbi34:aiNbi9325Se_Chan3: Connected
01/03/2002 22:31:46.149538000, nbi34:aiNbi9325Se_Chan2: Connected
01/03/2002 22:31:46.149912000, nbi34:aiNbi9325Se_Chan1: Connected
```

그림 3-1-199 ArchiveEngine 실행 화면

Database Configuration Tool(DCT)

DCT는 IOC 메모리에 상주하는 IOC Database를 원하는 형태로 디자인하게 해주는 텍스트 기반의 프로그램이다.

각 record에 해당하는 field들을 사용자가 설정치 않으면 기본 값이 설정된다.

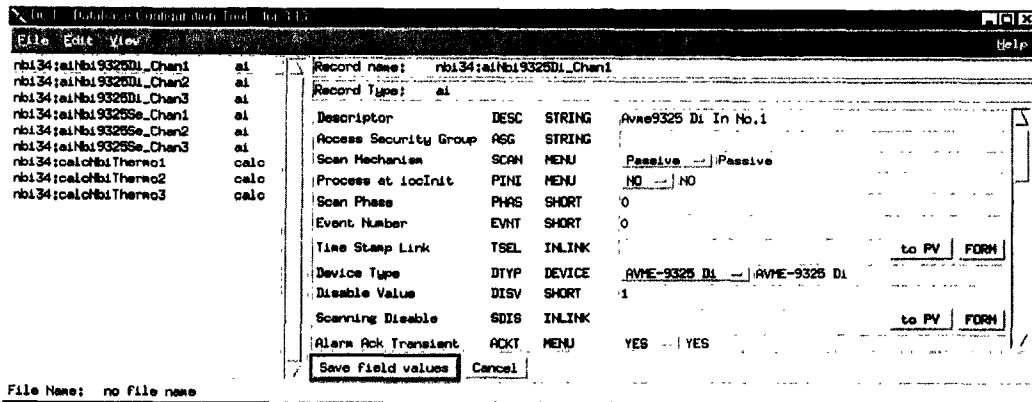


그림 3-1-200 DCT 실행 화면

그외, 위에서 언급한 응용프로그램 이외에 The Alarm Handler(ALH), The Backup and Restore Tool(BURT), Graphical Database Configuration Tool(GDCT), The Knob Manager(KM)등이 있으며, GNUplot등과 같은 프로그램 등을 연계하여 사용할 수 있다.

(나) EPICS 설치 과정

EPICS를 설치하기 위해서는 미리 선행해서 설치해야 하는 것들이 있다. vxWork는 RSOS로써 WRS사의 통합개발 환경인 tornado에 포함되어 있다. 따라서 tornado의 설치가 우선 되어야 하고 RTOS인 vxWorks를 IOC의 target board의 메모리에 다운로드 하기 위해서 target board의 세팅이 필요하다. 또한 vpath를 지원할 수 있는 GNUmake와 같은 기타 툴들을 설치해야 하고 그 다음에 EPICS를 사용하기 위해서 EPICS base와 OPI 툴 소프트웨어에 해당하는 EPICS extensions를 컴파일 하여 설치한다. 컴파일러는 상용으로 공급되는 프로그램을 사용할 수도 있고 GNU C를 설치 활용할 수도 있다.

EPICS-VME에 의한 DAS system 구성을 위해서 Sun microsystems사의 Ultra SPARC 10에 Solaris7을 OS로 사용하였고, Pentium-III PC의 Window 2000 환경에도 EPICS base 그리고 extensions 중에 Channel Archiver를 설치하였다. 컴파일러는 Workstation에는 workshop 6.0을 이용하였고, PC측은 Visual C 6.0을 이용하였다. Visual C를 설치할 경우 디렉토리 이름에 공백문자를 사용하지 말아야 하는데 후에 설치할 GNUmake가 인식하지 못하기 때문이다. Workstation에 설치된 EPICS는 vxWorks의 네트워크 부트 환경 등을 제공하여 주고 PC에서는 단지 Archiving 만을 목적으로 한다.

(나)-1. tornado 설치

EPICS 3.13.4를 사용하기로 결정하였다. Tornado 2.0과 포함된 RTOS의 버전은 vxWorks 5.4 이다. 구 버전과 같이 라이선스를 별도로 받는 과정이 없어 설치가 용이하였다. 설치 위치는 /usr/local/tornado2.0으로 하였다.

(나)-2. GNU make 설치

GNU make는 인터넷을 통하여 소스를 다운 받을 수 있고 설치한 버전은 make-3.78.1을 설치하였다.

다음은 Sun Ultra 10의 경우 설치 방법이다.

```
㉠ # cd /usr/local
㉡ # gzip -d < /home/download/source/gnu/make/make-3.78.1.tar.gz
㉢ # cd /usr/local/make-3.78.1
㉣ # ./configure
㉤ # make
㉥ # make check
㉦ # make install
```

이렇게 수행을 하면 /usr/local/bin에 make가 만들어지게 된다. 하지만 다른 make

시스템이 잘못 호출되지 않도록 다른 이름으로 링크를 시켜두는 것이 좋다.

- ㉠ ln -s make gmake
- ㉡ ln -s make gnumake

다음은 PC에 설치하는 경우이다. 앞서 언급했듯이 Visual C 설치 경로에 공백문자가 포함되어 있으면 컴파일을 수행할 수 없다.

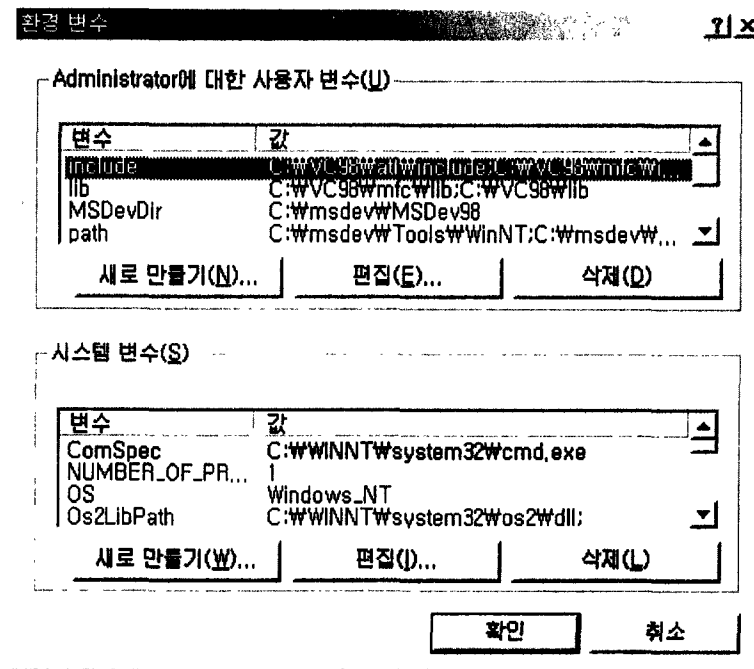


그림 3-1-201 환경변수 설정 화면

- ㉢ 환경변수 path에 c:\...\msdev\bin을 포함시킨다.
- ㉣ 환경변수 include에 c:\...\msdev\include를 포함시킨다.
- ㉤ 환경변수 lib에 c:\...\msdev\lib를 포함시킨다.
- ㉥ nmake /f NMakefile

nmake를 실행하면 실행화일이 만들어지게 되고 다음과 같이 설치된다.

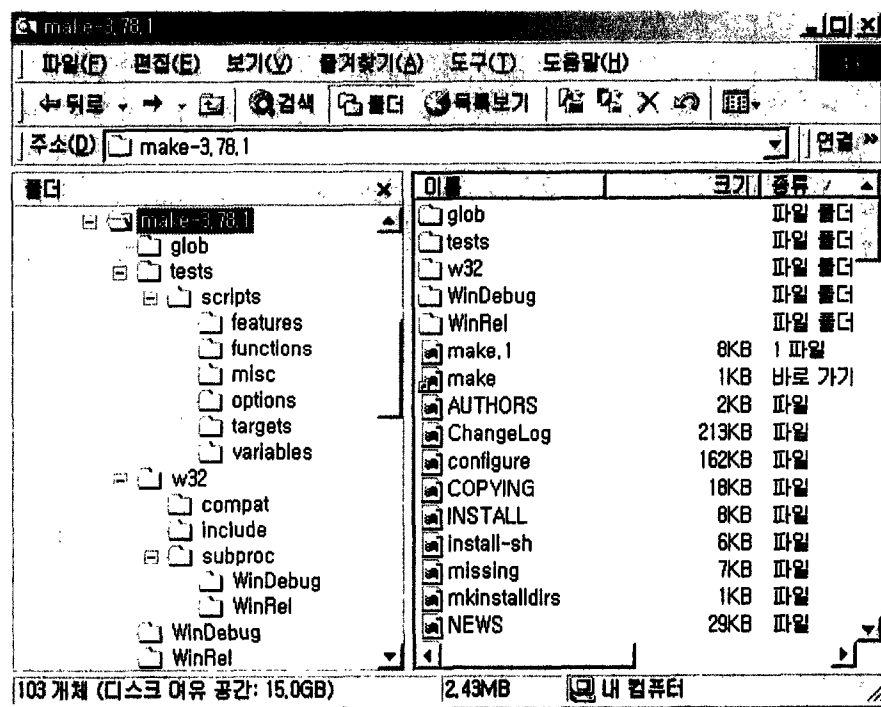


그림 3-1-202 PC에 설치된 GNU make

(나)-3. perl과 기타 설치 해야할 프로그램.

EPICS에서 사용한 script language인 perl, tcl, tk, tclx, blt2_4u, itcl, ace, gnuplot 등을 설치할 수 있다. 해당 항목을 설치할 경우에는 압축을 푼 후, README, INSTALL등에 기술된 설치 방법에 따라 설치하면 된다.

PC에 경우 perl만 설치하여도 epics base를 설치할 수 있다.

(나)-4. epics 설치

(나)-4.1 환경 변수 설정

EPICS는 base와 extensions으로 구분되는데 기능적으로 EPICS base는 CA 프로토콜 동작 환경과 IOC Database에 사용자 application이 동작할 수 있도록 해주는 EPICS의 핵심적인 역할을 수행한다.

EPICS를 설치하기 위해서 미리 환경변수를 설정하여야 하는데 C shell의 경우는 다음과 같다.

```
setenv HOST_ARCH          solaris
setenv EPICS_BASE         /user/nbi35/epics-3.13.4/base
setenv EPICS_EXTENSIONS  /user/nbi35/epics-3.13.4/extensions
```

EPICS_BASE, EPICS_EXTENSIONS는 각각 base와 extensions이 설치될 디렉토리를 나타내는 환경 변수이다. nbi35의 홈 디렉토리에 .env-epics를 만들어 위 내용을 저장한다.

또한, tornado를 사용하기 위한 환경 변수도 설정이 필요한데 C shell의 경우 다음과 같다.

```
setenv WIND_HOST_TYPE sun4-solaris2
setenv WIND_BASE /usr/local/tornado2.0
setenv WIND_REGISTRY epics
setenv PATH$WIND_BASE /host/$WIND_HOST_TYPE/bin:$PATH
setenv LD_LIBRARY_PATH /usr/dt/lib:/usr/openwind/lib:$LD_LIBRARY_PATH
```

마찬가지로 nbi35 홈 디렉토리에 .env-torando를 만들어 위 내용을 저장하며 .env-epics와 함께 .cshrc 파일에 마지막에 다음의 내용을 넣는다.

```
source ~/.env-tornado
source ~/.env-epics
```

```
@echo off
rem
rem Root of Perl files.
set Perldir=C:\PERL-5.6.0

rem
rem Root of GNUmake files.
rem
set GmakeDir=C:\WMAKE-3.78.1

rem
rem Root of Epics files.
rem
set EpicsDir=C:\WEPICS

set PATH=%Perldir%;%Perldir%\WIN32\BIN;%GmakeDir%\WINREL;%EpicsDir%\WBASE\BIN\WIN32;%PATH%

rem
rem Root of Epics files.
rem
set HOST_ARCH=WIN32

rem
rem Root of Epics files.
rem
set TMP=C:\WTEMP
```

그림 3-1-203 environment.bat의 내용

또한 PC에 설치할 경우 c:\epics\enviroment.bat 라는 파일에 그림 3-1-203 과 같은 내용을 써넣고 epics 관련 사항을 컴파일 하기 앞서 반드시 먼저 실행시켜야 한다.

(나)-4.2 EPICS base 설치

㉞ 사용자의 home 디렉토리로 이동하여 설치 디렉토리를 만든다.

```
% cd $HOME
```

```
% mkdir epics-3.13.4
```

㉟ 새로 만든 디렉토리에 압축된 EPICS base 파일을 푼다

```
% cd epics-3.13.4
```

```
% gzip -d < /home/download/source/epics/BaseSource/baseR3.13.4.tar.gz | tar  
xvf -
```

㊱ EPICS base는 target board와 host computer 모두에게 필요한 프로그램으로 target board와 host computer의 하드웨어와 관계된 정보가 소스 파일이 컴파일 되기 전에 미리 맞추어져 있어야 한다. base/CONFIG_SITE는 이러한 역할, 즉 cross compiler시에 필요한 정보를 담고 있는 파일로써 파일에 해당 부분을 다음과 같이 수정한다.

```
CROSS_COMPILER_TARGET_ARCHS=mv167
```

```
CROSS_COMPILER_HOST_ARCHS = solaris
```

```
TORNADO=yes
```

```
VX_DIR_YES=/usr/local/tornado2.0
```

CROSS_COMPILER_TARGET_ARCHS는 target board의 architecture를 구분하는 환경 변수로써 MVME167 보드의 경우는 mv167이 된다.

CROSS_COMPILER_HOST_ARCHS는 host computer의 OS를 나타내는 변수로써 solaris 7인 경우에는 solaris가 된다. TORNADO는 host computer에 tornado도의 설치 여부를 알려주는 변수이며 VX_DIR_YES는 tornado가 설치되어 있을 경우 vxWorks를 포함하는 Tornado가 설치되어 있는 디렉토리를 나타낸다.

PC의 경우 그림 3-1-203 의 environment.bat를 실행시키고 다음만 확인하면 설치 가능하다.

```
CROSS_COMPILER_TARGET_ARCHS=
```

```
#CROSS_COMPILER_HOST_ARCHS=sun4
```

```
TORNADO=NO
```

NBI의 경우 SUN ULTRA10이 cross compile 환경을 제공하여 주고 PC에는 CA 프로토콜이 동작할 수 있도록 관계된 실행 파일 그리고 OPI 툴 작성시에 필요한 library와 include 파일의 설치만을 해 주면 된다.

즉, cross compile 할 필요가 없으므로 CROSS_COMPILER_TARGET_ARCHS를 설정치 않았고 CROSS_COMPILER_HOST_ARCHS도 #표시하여 기능을 사용하지 않았는데 이는 environment.bat에 HOST_ARC=WIN32가 대신할 수 있기 때문이다. 또한 TORNADO는 설치되지 않았다.

㉔ ㉔까지 수행한 후 컴파일 하면 EPICS base 설치가 완료될 수 있다. 하지만 NBI에 사용하기 위해서 구매한 하드웨어에 대한 정보를 iocCore 파일이 작성되기 전에 미리 설정해야 한다.

그림 3-1-204 는 module_types.h에서 아날로그 입력 모듈에 대한 정보를 나타낸 화면이다. module_types.h는 /user/nbi35/epics-3.13.4/base/include 에 존재하며 컴파일시에 iocCore를 작성하는데 사용된다. iocCore는 VME가 부팅될 때 로딩되어 ioc가 초기화되는 동안 device/driver support에 의해서 호출된다.

```
#define AVME9325SE      15
#define AVME9325DI      16
```

Acromag 아날로그 입력 보드인 AVME9325는 single-ended 모드 또는 differential 모드로 점퍼를 설정할 수 있다. AVME9325SE는 single-ended로 점핑된 보드를 의미하며 AVME9325DI는 differential로 점핑된 보드를 의미한다. 마지막 열의 숫자는 MODULE_TYPES_INIT 구조체에서 각 모듈의 위치를 나타내는 값이다.

따라서 그림 3-1-204 의 내용은 single-ended와 differential로 점핑된 모듈이 각각 2개와 3개가 설치되어있고 모두 인터럽트를 사용하지 않으며 MVME167 시스템 메모리의 0x80000H, 0xC0000H, 0x140000H, 0x180000H, 0x1C0000H 번지에 5개의 모듈이 각각 맵핑되어 있음을 나타내는 것이다.

또한 AVME9325는 128KB의 dual port RAM을 가지고 있다. 이를 이용 일정시간 동안 데이터를 저장했다가 한번에 처리하는 방법이 쓰일 수 있는데 이는 계측기에 waveform analyzer에 해당하는 기능이다.

그림 3-1-205 와 같이 module_types.h에 waveforms에는 waveform analyzer로 사용할 수 있는 모듈이 나열되어 있다.

```

term
/* analog inputs */
#define AB1771IL 0 /* %% Allen-Bradley low level analog input */
#define AB1771IFE 1 /* %% Allen-Bradley low level analog input */
#define AB1771IXE 2 /* %% Allen-Bradley millivolt input */
#define XY566SE 3 /* % Xycom 12-bit Single Ended Scanned */
#define XY566DI 4 /* %% Xycom 12-bit Differential Scanned */
#define XY566DIL 5 /* %% Xycom 12-bit Differential Latched */
#define VXI_AT5_AI 6 /* % AT-5 VXI module's Analog Inputs */
#define AB1771IFE_SE 7 /* % A-B IFE in 16 single-ended input mode */
#define AB1771IFE_4to20MA 8 /* % A-B IFE in 8 double-ended 4to20MA */
#define DVX2502 9 /* %% DVX_2502 128 chan 16 bit differential */
#define AB1771IFE_0to5V 10 /* % A-B IFE in 8 double-ended 4to20MA */
#define KSCV215 11 /* % KSC V215 VXI 16 bit differential */
#define AB1771IrPlatinum 12 /* % A-B RTD Platinum */
#define AB1771IrCopper 13 /* % A-B RTD Copper */
#define VMC3122DI 14 /* % VniVme3122 16-bit Differential Scanned */
#define AVME9325SE 15 /* Acromag scanning ADC single ended input */
#define AVME9325DI 16 /* Acromag scanning ADC differential input */
#define L1176 17 /* !! LeCroy 1176 Time to Digital Converter */
#define VSAH 18 /* !! SLAC VSAH */
#define CV260 19 /* !! Caen V260 16 chan 24 bit scaler */
#define MAX_AI_TYPES CV260

MODULE_TYPES_DEF(short ai_num_cards[MAX_AI_TYPES+1])
#ifdef MODULE_TYPES_INIT
=(12,12,12, 4, 4, 6,32,12,12, 1, 12, 32, 12,12, 2, 3,2,2,16,8);
#endif
MODULE_TYPES_DEF(short ai_num_channels[MAX_AI_TYPES+1])
#ifdef MODULE_TYPES_INIT
=( 8, 8, 8,32,16,16, 8,16, 8, 127,8,32,6,6,16, 32,16,16,32,16);
#endif
MODULE_TYPES_DEF(short ai_interruptable[MAX_AI_TYPES+1])
#ifdef MODULE_TYPES_INIT
=(0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 0,0,0,0,0, 0,0,0,0,0);
#endif
MODULE_TYPES_DEF(short ai_bus[MAX_AI_TYPES+1])
#ifdef MODULE_TYPES_INIT
=( 4, 4, 4, 2, 2, 2, 2, 4, 4, 2, 4, 2,4,4,2, 2,2,2,2,2);
#endif
MODULE_TYPES_DEF(unsigned short ai_addrs[MAX_AI_TYPES+1])
#ifdef MODULE_TYPES_INIT
=( 0,0,0,0x6000,0x7000,0xe000, 0xc014,0,0, 0xff00, 0, 0,0,0,0, 0
,0,0, 0);
#endif
MODULE_TYPES_DEF(long ai_memaddrs[MAX_AI_TYPES+1])
#ifdef MODULE_TYPES_INIT
=(0,0,0,0x000000,0x040000,0x0c0000, 0,0,0, 0x100000, 0, 0,0,0,0,0x
f00000, 0x80000,0x140000, 0xe00000, 0x400000, 0xe00000);
#endif
#endif

```

그림 3-1-204 module_types.h 편집 화면

```

term
/* waveforms */
#define XY566WF 0 /* % Xycom 566 as a waveform */
#define CAMAC_THING 1 /* !! CAMAC waveform digitizer */
#define JGVTR1 2 /* % Joerger transient recorder */
#define COMET 3 /* !! COMET transient recorder */
#define AVME9325WF 4 /* Acromag scanning ADC waveform */
#define AVME9325WF1 5 /* Acromag scanning ADC wave form w/IRQ */
#define MAX_WF_TYPES AVME9325WF1

```

그림 3-1-205 epics에서 사용할 수 있는 waveform analyzer 목록

마찬가지로 AVME9210 아날로그 출력 보드와 AVME9440 디지털 입/출력 보드를 설정하였다. 반드시 module_types.h에 설정된 값과 각 보드의 점퍼 설정치는 동일하도록 확인해야 한다.

㉞ gnumake를 실행하면 모든 작업이 끝나게 된다.

(나)-4.3. EPICS extensions 설치

EPICS base가 CA 통신 환경 설정과 사용자 프로그램 개발환경 제공에 관계된 내용이라면 EPICS extensions는 EPICS를 보다 효율적으로 사용하기 위한 응용프로그램의 모음이라고 할 수 있다. EPICS extensions는 base에 비하여 사용자 환경에 의존적인 내용이 많으므로 모든 것을 일괄하여 설치하는데 많은 노력과 시간이 필요하다. 따라서 NBI에서는 DAS 구성을 위해서 필요한 툴들을 중심으로 선택적으로 설치하였다. 임시 디렉토리에 extensions의 압축된 내용을 푼 후에 필요한 내용을 복사하여 설치하는 방식을 선택하였다.

㉞ 설치할 director를 만든다.

```
% cd ~/epics-3.13.4
% mkdir extensions
% cd ~/epics-3.13.4/extensions
```

㉟ extensions의 내용 중에 config 디렉토리의 내용을 복사하여 사용자 환경에 맞게 수정한다. 다음은 NBI epics 시스템에 맞추어 설정한 내용이다.

```
% cp -R /home/download/source/ExtSource/DistSoft/epics/extensions/config .
% cp /home/download/source/ExtSource/DistSoft/epics/extensions/Makefile .
% cd ~/epics-3.13.4/extensions/config
% vi CONFIG_SITE.Host.solaris
```

```
line 10      X11_LIB = /usr/local/lib
line 11      X11_INC = /usr/local/include

line 26      INTERVIEWS_BIN = /usr/local/bin
line 27      INTERVIEWS_LIB = /usr/local/bin
line 28      IV_INC = /usr/local/include
line 29      IV-2_6_INC = /usr/local/include/IV-2_6
line 30      IV_BIN = /usr/local/bin
line 31      IV_LIB = /usr/local/bin

line 33      WINGZ_INC = /usr/local/Wingz2/include
line 34      WINGZ_LIB = /usr/local/Wingz2/lib

line 38      XRTGRAPH_EXTENSIONS = NO
```

```

line 39      #XRTGRAPH = /opt/local/xrtgraph

line 42      TK_LIB = /usr/local/lib
line 43      TK_INC = /usr/local/include
line 44      TCL_LIB = /usr/local/lib
line 45      TCL_INC = /usr/local/include
line 46      DP_LIB = /usr/local/lib
line 47      DP_INC = /usr/local/include
line 48      BLT_LIB = /usr/local/lib
line 49      BLT_INC = /usr/local/include

```

Ⓣ 설치할 소프트웨어들을 ~/epics-3.13.4/extensions/src 밑에 복사하며 필요할 경우 CONFIG_EXTENSIONS의 내용을 수정한다. 현재 NBI epics 시스템에 설치된 소프트웨어 툴들은 dm2k, ChannelArchiver, StripTool 등이 있다.

CONFIG_EXTENSIONS의 내용은 extensions에 포함된 툴들의 항목과 또 설치하기 위해서 선행하여 해결해야할 소프트웨어 의존성 관계를 나타낸 것이다. 또한 dm2k의 경우 표시되어 있지 않았기 때문에 다음과 같이 수정해야 한다.

```

line 140     gdct313 caTCL sddsIDL dm2k)

```

Ⓣ gnumake를 수행하여 실행파일을 작성한다.

Ⓣ ChannelArchiver의 경우 편의상 별도의 작업을 수행하였으며 다음의 내용을 수정해 주었다.

```

% cd ~/epics-3.13.4/extensions/src/ChannelArchiver
% vi ArchiveConfig.h

```

```

line 87      #define GNUPLOT_PROGRAM "/usr/local/bin/gnuplot"
line 88      #define GNUPLOT_PIPE      "/usr/local/bin/gnuplot"

line 107     #define GNUPLOT_PROGRAM "/usr/local/bin/gnuplot"
line 108     #define GNUPLOT_PIPE      "/usr/local/bin/gnuplot"

```

```

% cd ../Tools
% vi ToolsConfig.h

```

```
line 106      //typedef int socklen_t;
```

```
% cd ~/epics-3.13.4/extensions/src/ChannelArchiver
```

```
% gnumake
```

㉔ dm2k에 환경을 맞추어 주기 위해서 .env-epics를 수정하였다.

```
% vi .env-epics
```

```
line 6      xset +fp ~/epics-3.13.4/extensions/src/dm2k/font.alias
```

```
% source .cshrc
```

(다) DAS System 구성

(다)-1. 다 채널 DAS 시스템의 구성

AVME9325-5는 12비트 아날로그 입력 보드로써 데이터 저장을 목적으로 온 보드 RAM을 가지고 있다. 이 보드는 single-ended로 32개의 다 채널을 사용할 수 있으며 이 보드에 대한 epics device/driver support는 다음의 사이트에서 구할 수 있다.

http://www.slac.stanford.edu/grp/cd/soft/epics/site/acromag_index.html

AVME9325는 두 가지 record type으로 사용할 수 있는데, 일반적인 아날로그 입력처리 방법에 의한 ai record와 온 보드 RAM을 이용한 waveform record가 그것이다. 후자의 경우 VME의 전체 시스템 부하에 커다란 영향을 미치지 않고 고속으로 데이터를 처리하는 방식이며 빠른 샘플링 타임이 필요한 경우에 적합한 것이다.

구축하고자 하는 사용자 application의 사용목적은 calorimeter의 빔 프로파일 연구를 위한 온도분포 측정용으로 200 채널에 가까운 다 채널이 필요하며 샘플링 타임은 상대적으로 낮은 성능을 요구한다. 따라서 AVME9325를 32 single-ended의 ai record로 사용하였다.

그림 3-1-206 은 Calorimeter의 온도 분포를 측정하기 위한 DAS 구성 방법을 도시한 것으로 OPI 툴로는 ChannelArchiver, StripTool, 그리고 dm2k를 사용하며 인터페이스 플랫폼으로는 PC, workstation 모두를 사용하였다.

ai Record는 메모리에 각 하드웨어의 입력 채널과 같은 개수의 instance를 만든

다. 즉 32 채널의 경우 32개의 ai record instance를 생성하게 되며 OPI 틀은 필요한 record instance의 VAL 필드 값을 CA 프로토콜을 이용하여 읽고 저장하게 된다.

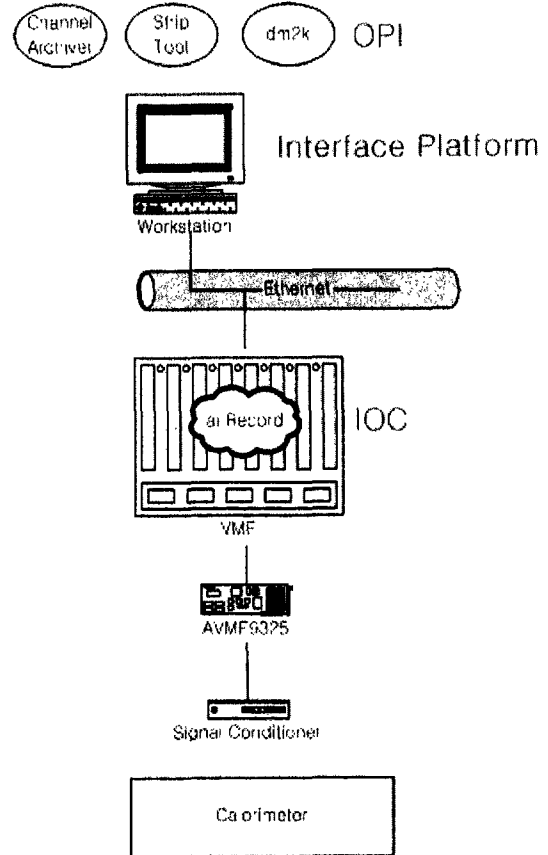


그림 3-1-206 다 채널 데이터 계측 시스템 구성도

(다)-2. Analog Conversion

conversions이란 하드웨어가 읽은 값(raw 데이터)을 의미 있는 값(engineering value)으로 변환함을 의미한다.

아날로그 conversion의 목적은 raw 데이터를 OPI의 사용자 프로그램 레벨에서 처리하지 않고 driver/device 레벨에서 압력, 온도, 속도 등 의미 있는 단위로 변환하는 것을 의미한다. 또한 다음 중에 하나로 선택될 수 있으며 필요할 경우 사용자가 새로운 conversion 방법을 만들어 사용할 수도 있다.

- LINEAR
- NO CONVERSION
- typeKdegF

typeKdegC
 typeJdegF
 typeJdegC

그림 3-1-206 은 AVME9325를 LINAER로 선택하여 사용할 경우 사용되는 공식과 signal conditioner의 출력값이 0~5V일 경우 ai Record의 해당 필드의 값이 어떻게 설정되어야 하는가를 나타낸 것이다.

0~5V의 경우, signal conditioner에 의해서 0℃일 경우 0V로 500℃일 경우 5V의 출력이 나오도록 설정되어 있다. AVME9325는 점퍼로 설정할 수 있는 입력범위 중에 0~5V를 처리할 수 있는 0~10V를 선택하였다. 따라서 ai.EGUF(engineering unit full)를 1000로 설정하고 ai.EGUL(engineering unit low)를 0로 설정하여 사용하고 이 값들이 온도를 나타내는 것을 표시하기 위해서 ai.EGU(engineering unit)을 Temp라 하였다.

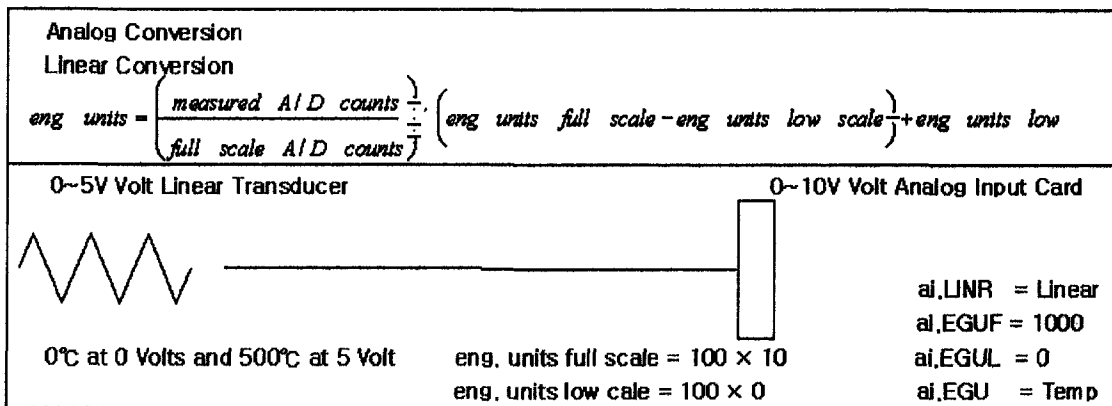


그림 3-1-207 Linear conversions 사용 방법.

(다)-3. application 작성

EPICS를 사용하기 위해서 IOC application을 만들어야 한다. IOC application은 디렉토리별로 각각 관리되고 EPICS에서 제공하는 템플릿을 복사한 다음 필요한 내용들을 추가하는 방법으로 진행된다.

㉞ 작성하고자 하는 application의 디렉토리를 만든다

```
% cd ~/epics-3.13.4
% mkdir -p proj/nbi
% cd ~/epics-3.13.4/proj/nbi
```

㉔ IOC application 디렉토리에 예제 템플릿을 복사한다.

```
% ~/epics-3.13.4/base/bin/solaris/makeBaseApp.pl -t example nbi
% ~/epics-3.13.4/base/bin/solaris/makeBaseApp.pl -i -t example target
```

㉕ nbi/ 디렉토리 아래의 xxxApp/ 디렉토리가 프로그램 소스코드와 database 파일들이 담겨 있는 곳이다. nbi/ 디렉토리 아래의 nbiApp 디렉토리를 참고하여 필요한 소스코드를 추가해 넣는다.

㉖ 그림 3-1-207 과 같이 makefile을 수정한다.

```

# Makefile.Vx
TOP = ../../..
include $(TOP)/config/CONFIG_APP
-----
# ADD MACRO DEFINITIONS AFTER THIS LINE

BPTS += bptTypeKdegC.dbd

SRCS.c += ../drvAvme9325.c
SRCS.c += ../devWfAvme9325I.c
SRCS.c += ../devAvme9325Se.c

LIBOBJS += drvAvme9325.o
LIBOBJS += devWfAvme9325I.o
LIBOBJS += devAvme9325Se.o

include ../baseLIBOBJS

LIBNAME = NbiLib
INSTALLS += iocCore seq

#Note that the command line that builds the
#library $(LIBNAME) may be HUGE (>3kB)
#
include $(TOP)/config/RULES.Vx
-----
# ADD RULES AFTER THIS LINE

# Makefile.Host
TOP = ../../..
include $(TOP)/config/CONFIG_APP
-----
# ADD MACRO DEFINITIONS AFTER THIS LINE

#USR_CFLAGS +=
PROD_LIBS += ca
PROD_LIBS += Db
PROD_LIBS += Com
ca_DIR = $(EPICS_BASE_LIB)
Db_DIR = $(EPICS_BASE_LIB)
Com_DIR = $(EPICS_BASE_LIB)

PROD += caExample

include $(TOP)/config/RULES.Host
-----
# ADD RULES AFTER THIS LINE
~
~
~
~
~
~
~
~
~
~
"Makefile.Host" 19 lines, 421 characters
  
```

그림 3-1-208 수정된 makefile의 내용

㉗ ioc 초기화와 IOC Database를 메모리에 로딩하기 위해서 필요한 .db와 .dbd 파일은 그림 3-1-208 과 같은 과정을 거치게 된다.

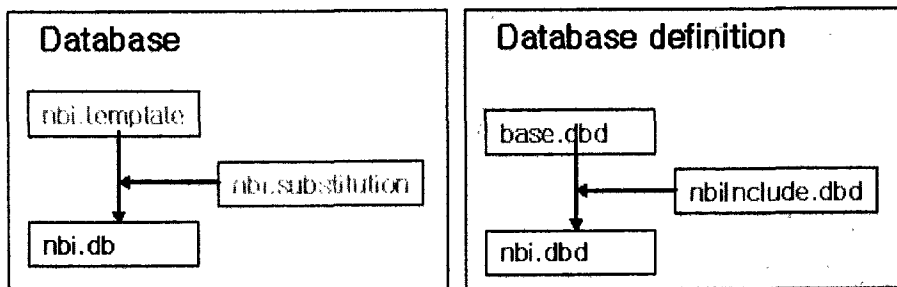


그림 3-1-209 Database와 Database definition의 작성 과정

```

xterm
record(ai,"Thermo_Ch${NO}") {
  field(DESC,"Thermo Avme9325 Se Ch${NO}")
  field(SCAN,"1 second")
  field(DTYP,"AVME-9325 Se")
  field(INP,"#CO S${NO} B")
  field(PREC,"4")
  field(LINR,"typeKdegC")
}

```

그림 3-1-210 nbi.template의 내용

nbi.template의 내용은 사용자가 필요한 field를 설정하는 것이다. 그림 3-1-209에 예제로 설정된 내용은 conversion type이 typeKdegC로 K type thermo couple을 이용하여 이것의 출력을 섭씨로 변환하는 table을 사용하며 1초에 한번씩 sampling하도록 설정한 것이다. 또한 다 채널의 경우 동일한 내용을 반복하여 작업하지 않기 위해서 "NO"라는 변수를 설정하고 아래 그림3-1-210 과 같이 nbi.substitution를 사용하면 사용자가 보다 용이하게 다 채널의 application을 작성할 수 있다.

```

xterm
file Nbi.template {
{ NO="0" }
{ NO="1" }
{ NO="2" }
{ NO="3" }
{ NO="4" }
{ NO="5" }
{ NO="6" }
{ NO="7" }
{ NO="8" }
{ NO="9" }
{ NO="10" }
{ NO="11" }
{ NO="12" }
{ NO="13" }
{ NO="14" }
{ NO="15" }
{ NO="16" }
{ NO="17" }
{ NO="18" }
}

```

그림 3-1-211 nbi.substitution의 내용

nbiInclude.dbd는 ioc 초기화 과정 중에 어떤 하드웨어들이 초기화되어야 할 것인지를 나타내고 있고 그림 3-1-211 에서 NBI는 현재 AVME9325, AVME9210, AVME9440, RS232가 초기화 되도록 driver/device가 잡혀있다

또한, 설정한 내용들이 정확하게 운전되고 있는지를 확인하기 위해서는 EPICS의 IOC Test Facilities 중에 그림 3-1-212 와 같이 dbi 과 dbior을 사용하면 된다.

FILE NAME : nbiInclude.dbd

```
include "base.dbd"
driver(drvAvme9325)
driver(drvAvme9210)
driver(drvSerial)
driver(drvAsciiSio)

device(ai,VME_IO,devAiAvme9325Se,"AVME-9325 Se")
device(ai,VME_IO,devAiAvme9325Di,"AVME-9325 Di")
device(waveform,VME_IO,devWfAvme9325,"AVME-9325 Wf")
device(waveform,VME_IO,devWfAvme9325I,"AVME-9325 WfI")
device(ao,VME_IO,devAoAvme9210,"AVME-9210")
device(ai,INST_IO,devAiAscii,"Ascii SIO")
device(ao,INST_IO,devAoAscii,"Ascii SIO")
device(di,INST_IO,devDiAscii,"Ascii SIO")
device(bo,INST_IO,devBoAscii,"Ascii SIO")
device(longin,INST_IO,devLiAscii,"Ascii SIO")
device(longout,INST_IO,devLoAscii,"Ascii SIO")
device(mbbi,INST_IO,devMbbiAscii,"Ascii SIO")
device(mbbiDirect,INST_IO,devMbbiDirectAscii,"Ascii SIO")
device(mbbiDirect,INST_IO,devMbbiDirectAscii,"Ascii SIO")
device(stringin,INST_IO,devSiAscii,"Ascii SIO")
device(stringout,INST_IO,devSoAscii,"Ascii SIO")
device(waveform,INST_IO,devWfIAscii,"Ascii SIO")
```

그림 3-1-212 NbiInclude.dbd의 내용

- database list
 - -> dbi
 - nbi34:aiNbi9325Di_Chan1
 - nbi34:aiNbi9325Di_Chan2
 - nbi34:aiNbi9325Di_Chan3
 - nbi34:aiNbi9325Se_Chan1
 - nbi34:aiNbi9325Se_Chan2
 - nbi34:aiNbi9325Se_Chan3
 - nbi34:aiNbi9325Di_Chan1
 - nbi34:aiNbi9325Di_Chan2
 - nbi34:aiNbi9325Di_Chan3
 - value = 0 = 0x0
- driver/device io resource list
 - -> dbior
 - Driver: drvAvme9325
 - Driver: drvAvme9210
 - Driver: drvSerial
 - Driver: drvAsciiSio
 - Device Support: devBoAvme9410
 - Link 00 at 0x2800, IRQ 0x78, input 0x0000, output 0x0000
 - value = 0 = 0x0
- -> dbior "drvAvme9325",2
 - Driver: drvAvme9325
 - Avme9325SE: card 0, addr=0xf0080000
 - CSR: 0xf43
 - BdCtl: 0xff00
 - CtrCtl: 0xffff
 - TmrPrscl: 0xffff
 - cvTmr: 0xffff
 - cvCnt: 0xffff
 - Avme9325DI: card 0, addr=0xf00c0000
 - CSR: 0xf43
 - BdCtl: 0xff00
 - CtrCtl: 0xffff
 - TmrPrscl: 0xffff
 - cvTmr: 0xffff
 - cvCnt: 0xffff
 - Avme9325WF: card 0, addr=0xf0100000
 - CSR: 0xf43
 - BdCtl: 0xff08
 - CtrCtl: 0xffff
 - TmrPrscl: 0xffff
 - cvTmr: 0xffff
 - cvCnt: 0xffff
 - Avme9325WFI: card 0, addr=0xf0140000
 - CSR: 0xf4b
 - BdCtl: 0xff08
 - CtrCtl: 0xffff
 - TmrPrscl: 0xffff
 - cvTmr: 0xffff
 - cvCnt: 0xffff
 - value = 0 = 0x0

그림 3-1-213 IOC Test Facilities 사용 결과

바. 중성빔 진단

(1) OMA system

중성빔 진단은 ion source 가속부의 beam optics 성능을 평가하고, ion의 H^+ 비율을 최대한으로 하는 ion source 운전 최적화를 위한 기초 data를 제공을 위해 ion source와 neutralizer 사이에 위치한 OMA chamber에서 광학적인 방법으로 중성빔의 도플러 확산 및 편이를 측정하여 beam divergence 및 ion species ratio를 평가한다.

(1) OMA system 구성 및 시험

(가) 측정원리

정지상태에서 입자가 방출하는 파장을 λ_0 , 광속을 c , 입자속도를 v , 그리고 θ 를 빔축과 line of sight가 이루는 각이라 할 때 운동하는 입자로부터 방출되는 스펙트럼선의 Doppler shift는 아래 식으로 표현된다.

$$\delta\lambda_0 = \lambda_0 \frac{v}{c} \cos \theta$$

이를 수평방향 속도성분(v_H)과 수직방향 속도성분(v_V)으로 나타내면 도플러 편이된 선폭은

$$\Delta\lambda = \delta\lambda_0 \left(\frac{\delta v_H}{v} + \frac{\delta v_V}{v} \tan \theta \right)$$

이다. 만약 beam divergence가 매우 작아서, 실제로 중성입사장치에서 beam divergence는 1-2도 정도이다, $\delta v_H/v \ll 1$ 인 경우, beam divergence으로 인한 *the 1/e angular half width of Gaussian angular* 분포는

$$\Theta_{1/e} = \frac{\Delta\lambda_{1/e}}{\delta\lambda_0} \frac{1}{\tan \theta}$$

로 나타낼 수 있다. 실제 실험에서 1/e 측정선폭을 $\Delta\lambda_M$, 장치선폭을 $\Delta\lambda_I$ 라 할 때, $\Delta\lambda_{1/e}$ 는

$$\Delta\lambda_{1/e} = (\Delta\lambda_M^2 - \Delta\lambda_I^2)^{1/2}$$

로 주어지며 따라서 1/e 측정선폭과 장치선폭을 알면 중성빔의 divergence 즉 $\Theta_{1/e}$ 를 알 수 있고 이로써 ion source 가속부의 beam optics 를 평가할 수 있다.

한편 OMA chamber에서 Gas target 두께 π 를 $\int n_e dz$ 라 정의하고 Gas target 두께에 따른 $H\alpha$ 선의 여기상태의 비율은 아래 방정식의 해와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{dF_{l,k}^*}{d\pi} = - \left(\frac{1}{n_g v_k \tau_l} + \sigma_{DI,k} \right) F_{l,k}^* + \sum_i F_{i,k} \sigma_{i,k}$$

이 때 위식에서의 각각의 parameters는 아래와 같이 정의된다.

- $F_{l,k}^*$: l -state에 있는 중성원자의 비율
- $F_{i,k}$: charge state i 입자의 비율
- n_g : OMA chamber내의 잔류기체밀도
- v_k : 원자속도
- τ_l : 여기상태 3s, 3p, 3d 에서의 lifetime
- $\sigma_{DI,k}$: collisional destruction 단면적
- $\sigma_{i,l}$: collisional excitation 단면적

Beam path의 단위 부피당 측정된 총 $H\alpha$ 선의 세기는

$$I_{\alpha,k} = K n_k \sum_l F_{l,k}^* A_l$$

이며, K 는 상수, A_l 은 spontaneous radiative transition rate coefficient, n_k 는 $\pi=0$ 에서 각각의 이온들이 가지는 밀도를 나타낸다.

Beam species 비율은

$$\frac{n_{H2}^+}{n_H^+} = C_{21} \frac{I_{\alpha,E/2}}{I_{\alpha,E}}, \quad \frac{n_{H3}^+}{n_H^+} = C_{31} \frac{I_{\alpha,E/3}}{I_{\alpha,E}}$$

으로 표현되며, E/2, E/3 에너지를 갖는 입자들에 대한 correction factor는,

$$C_{21} = \frac{\sum_l F_{l,k}^* A_l}{\sum_l F_{l,E/2}^* A_l}, \quad C_{31} = \frac{\sum_l F_{l,k}^* A_l}{\sum_l F_{l,E/3}^* A_l}$$

이다. 결국 각 에너지에 해당하는 도플러 편이를 갖는 파장들의 세기를 측정하고 atomic database로부터 correction factor를 계산함으로써 beam species 비율은 얻을 수 있다.

(나) 장치구성

① Doppler shift 및 broadening 예측

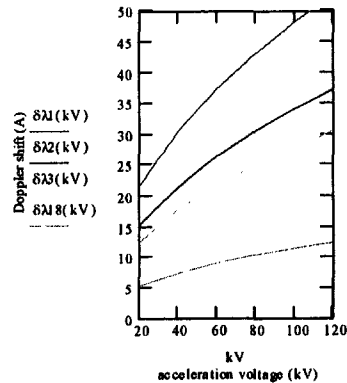
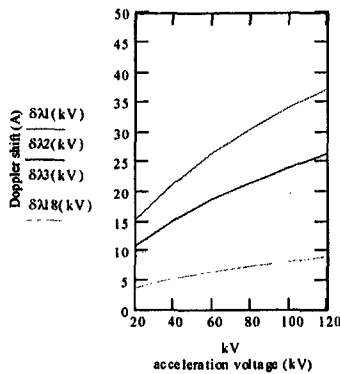
정지상태의 수소원자로부터 방출되는 $H\alpha$ 선의 파장은 전자들의 천이상태에 따라 다르며

$3s \rightarrow 2p$, $3p \rightarrow 2s$, $3d \rightarrow 2p$ 에 대해 각각 6562.86 Å, 6562.74 Å, 6562.81 Å 값을 갖는다. 한편 이

온원 가스를 중수소를 사용할 경우 방출되는 스펙트럼은 수소에 비해 약 1.786 Å 만큼 짧아

지게 된다. 따라서 장치의 사양을 결정하기 위해 계산된 Doppler shift 및 broadening 계산에서 λ_0 값으로 수소의 경우 6563 Å을 그리고 중수소의 경우 6561 Å을 사용하였다. 그리

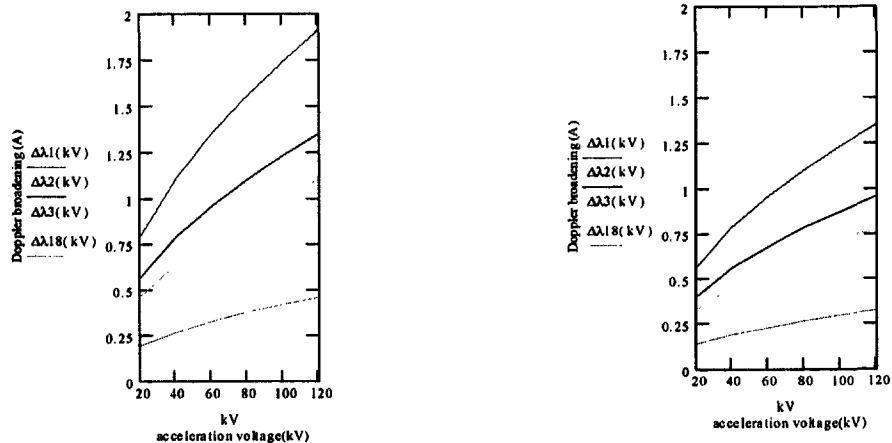
고 beam axis와 line of sight가 이루는 각은 60도로 하였다. 아래 그래프는 가속전압에 대한 수소와 중수소에 대한 Doppler shift를 계산한 결과이다.



KSTAR NBI 장치에서 수소와 중수소에 대한 가속전압은 각각 80kV, 120kV이며, 이때 Doppler shift(Å)는 H^+ , H_3^+ , H_2^+O 에 대해 각각 42.8, 24.7, 10.1(수소) 그리고 37.1, 21.4, 8.7(중수소) 정도이다. OMA에 사용할 spectrometer의 스펙트럼 영역은 50 Å 정도 또는 그 이상이어야 한다.

한편, beam divergence와 관련된 Doppler broadening을 계산하였다. Doppler shift와 같은 경우에 대해서 broadening(Å)은 1.554, 0.897, 0.366(수소의 경우) 그리고 1.345, 0.777, 0.317(중수소의 경우)이다. 따라서 H_3^+ 의 beam divergence를 측정하기 위해서는 적어도 0.3 Å의 선폭을 측정할 수 있는 분해능이 요구된다.

아래 그림은 수소와 중수소에 대한 beam divergence를 1.2도라 했을 때 측정될 Doppler broadening을 예측한 결과이다.



② OMA 측정장치

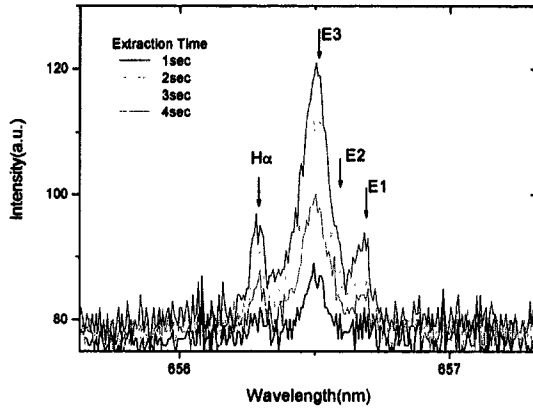
OMA system은 초점거리 750mm인 monochromator와 CCD detector, 그리고 optical fiber로 구성하였다. Monochromator의 분해능은 2400g/mm 회절격자를 사용할 경우 0.0115nm이며, dispersion은 0.55nm/mm이다. CCD는 1024×256 pixel을 가지며 pixel의 크기는 24 μm×24 μm이고, chip size는 24.58mm×6.14mm이다. 따라서 구성된 OMA 장치의 스펙트럼 영역은 약 13.5nm이며, pixel 한 개당 dispersion은 0.013nm로 위 ①항의 요구조건을 만족할 수 있다. 아래 표와 사진은 구성한 OMA 장치의 spec. 및 사진이다.



(2) Beam profile 측정

먼저 NBI test chamber에서 구성된 OMA 장치의 성능을 시험하였다. NBI test 장치의 beam 전류는 약 1A이며, 가속전압은 700V이다. line of sight가 beam axis와 60도 되게 관측창을 만들고 직경 6mm의 렌즈로 optical fiber에 접속하여 50m 떨어진 OMA 장치에 연결하였다.

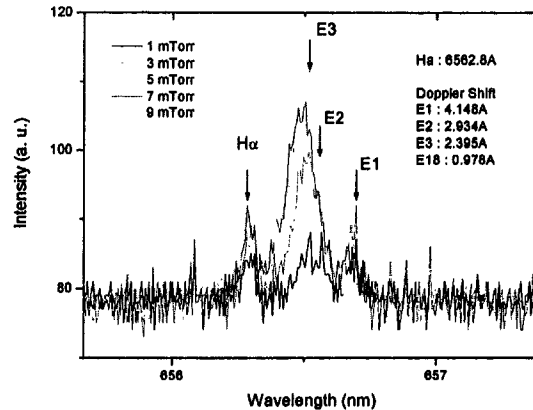
Monochromator	CCD detector
<ul style="list-style-type: none"> • Focal length :750mm • Aperture ratio : f/9.7 • Optical design : Czerny-Turner • Scan range : 1 to 1400nm • Operating range : 185nm to FIR • Resolution : 0.023nm at 435.8nm, 10 μm slit, 1200g/mm • Dispersion : 1.1nm/mm • Accuracy : ±0.1nm • Repeatability : ±0.05nm • Drive step size : 0.0025nm • Focal plane size : 25mm×14mm 	<ul style="list-style-type: none"> • Format : 1024×256 pixels • Chip size : 24.58mm×6.14mm • Full well capacity : 550,000e- • Dynamic range : 16bit • Dark signal @-35°C : <5e-/pixel/sec. • Read out noise : <10e-@100kHz • Max.scan rate <ul style="list-style-type: none"> -full bin @ 100kHz : 85spectra/sec. -full bin @ 1MHz : 430spectra/sec • Data resolution : <ul style="list-style-type: none"> -16bit ADC @ 100kHz -12bit ADC @ 1MHz



위 그림은 beam 인출시간(CCD 노출시간)을 증가시킬 때 스펙트럼의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 신호의 최대치가 120

으로 배경잡음(background noise) 80에 비해 매우 약함을 알 수 있다. 이는 NBI test chamber에서 발생시킨 beam이 매우 미약하여 충분한 광량을 얻을 수 없었던 결과로 해석할 수 있다. 가속전원이 완성되어 beam으로부터 충분한 광량이 확보되면 충분한 S/N 비를 얻을 수 있을 것이다.

위 결과에서 노출시간이 길어질수록 peak의 크기와 모양이 뚜렷해짐을 보인다. 이 역시 S/N 비가 충분하지 못함을 나타낸다. 또한 E3 peak과 E2 peak이 구별되지 않는 것은 장치의 분해능 문제가 아니라 실험한 가속전압이 너무 낮아 가속부의 beam optics가 제대로 맞지 않아 beam divergence 즉 peak들의 선평이 너무 확장되었기 때문이다.

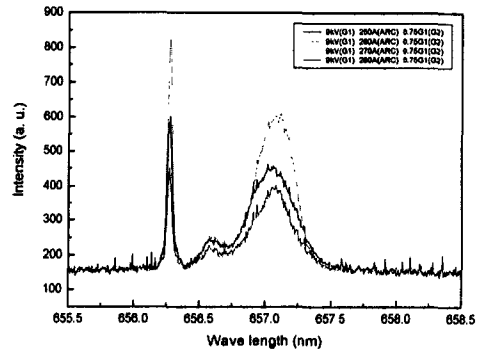
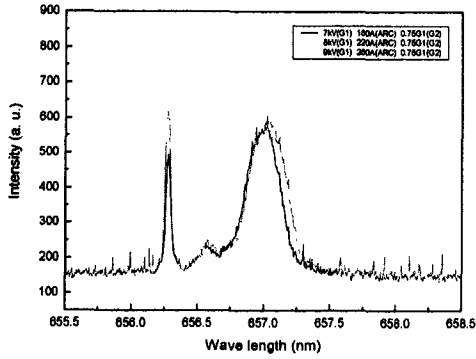


위 그림은 이온원의 운전압력을 바꿔가며 실험한 결과이다. 위 실험에서 압력의 변화에 따라 각 peak들의 상대적 크기가 변화됨을 보인다. 이러한 실험들을 통해 이온원 운전의 최적조건을 찾아내는데 OMA 장치가 매우 유용할 것으로 생각된다.

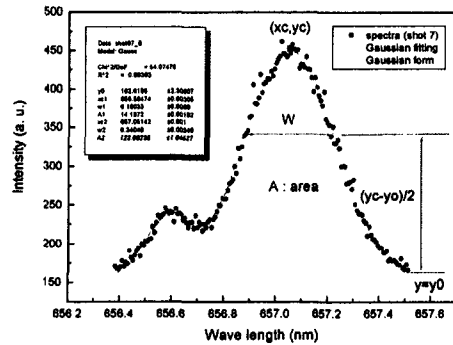
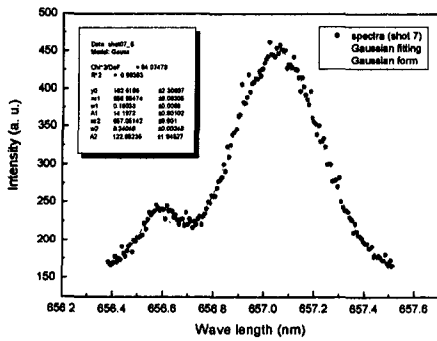
실제 실험에서 LLNL ion source를 이용해 빔 인출실험시 spectrum 을 측정하였다. 빔 인출 조건은 G1 가속전압이 9kV, 아크전류가 250A 이며 G2 전압은 G1전압의 약 75%이었다.

이때 스펙트럼 신호는 배경잡음과 확실히 구별되고 6563Å에서 뚜렷한 H α 신호를 보인다.

그리고 G1 가속전압이 7, 8, 9kV로 증가할수록 도플러 편이가 커짐을 보인다.



아크전류가 증가하면 신호의 세기도 커지는데 이는 아크전류가 증가함에 따라 빔 전류 역시 증가하기 때문이다. 도플러편이와 도플러 확산치를 측정하기 위해 신호를 Gaussian 으로 fitting 하였다. Doppler shifted된 $H\alpha$ line의 스펙트럼 $H(E)$, $H(E/2)$, $H(E/3)$ 중 $H(E/3)$ 과 H_2O 에 해당하는 peak만 관찰되었으며 $H(E/3)$ 로부터 계산된 beam divergence는 대략 10도 정도로 매우 크게 나타났다. 이는 앞서도 논의한대로 가속전압이 정격에 도달하지 못해 beam optics가 잘 맞지 않았음을 나타낸다. 한편 $H(E)$, $H(E/2)$ peak이 나타나지 않은 문제는 앞으로 더 많은 실험을 통해서 밝혀야할 문제로 남았다.



사. NB 장치 R & D

(1) Heat Load Calculation of the Beam line

(가) PDP-Code 개발

NBI 장치는 3개의 이온원에서 최대 출력인 120 keV 65 A의 중수소 이온빔이 인출될 때 이온원당 최대 7.8 MW, 전체적으로 23.4 MW의 빔을 인출하게 된다. 이 이온빔은 Neutralizer를 통과하면서 기체와의 전하교환을 통해 중성입자빔과 이온빔으로 나누어지게 되며, 전자석에서 분리된 후 토카막과 NBI 장치 사이의 duct를 통과해 최종적으로 토카막에 8 MW의 중성입자빔을 입사하게 된다. 이러한 과정 중에서 각각의 빔라인 장치들은 토카막에 입사되지 못하는 15 MW 이상의 빔파워에 의해 열적 부하를 받게 되며, 빔라인 장치들은 이러한 열적 부하를 견딜 수 있도록 설계·제작되어야 한다. NBI 빔라인 장치의 열흡수체로 주로 Hypervapotron 의 경우, 감당할 수 있는 표면최대 열부하는 $1\text{kW}/\text{cm}^2$ 이다.

빔수송에 의한 빔라인 장치에의 열부하를 계산하기 위해 러시아의 Kurchatov 연구소의 Panasenkov 박사에 의해 개발된 PDP code를 활용하였다. PDP code는 원래 slit형 이온원의 빔 optics 계산 및 빔라인 장치들의 열부하 계산을 위해 개발되었으며, 이를 수정하여 원형인출구 이온원에 적합하도록 upgrade하였다. Code에 사용된 언어는 Fortran으로 source program은 첨부 3.1.3.사(1)-1과 같으며, input file은 첨부 3.1.3.사(1)-2와 같다.

PDP code 계산에 이용되는 변수들은 표 3-1-41과 같다. 첨부 3.1.3.사(1)-2에 보여지는 바와 같이 빔에너지는 120 keV, 빔전류는 65 A를 기준으로 계산하였으며, 이온빔의 발산각은 1.0° 로 하였다. 또한 이온원의 가속전극의 기하학적인 구조와 관련된 변수들은 아래 그림 3-1-214과 같은 원형인출구 이온원의 가속전극에 따라 적용하였다.

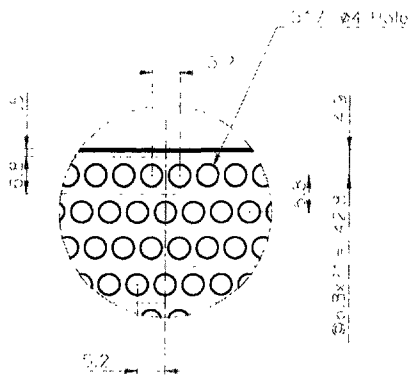


그림 3-1-214. 원형인출구 이온원 전극 구조.

표 3-1-41. PDP Code 계산에 이용되는 변수들

Parameter	Definition
Eo	Beam energy [keV]
Ro	Aperture radius [cm]
Qi	Emission ion current density [A/cm ²]
Ao	Beamlet divergence angle [mrad]
dYa	Horiz.step between aperture columns [cm]
dZa	Vertic.step between aperture rows [cm]
Lgc	Number of beam Groups Columns (max.=5)
Kgr	Number of beam Groups Rows (max.=2)
Nac	Number of aperture columns in a Group (max.=30)
Mar	Number of aperture rows in a Group (max.=70)
Idm	Number of diaphragms along the NBI (max.=12) (Idm=0-without channels)
Idc	Number of diaphragms in a multichannel part
Idn	No of neutraliser exit diaphragm
ZSo(k)	Vertic.coord.of beam group row axis at Xo [cm]
Xo(l)	Axial coord.of source GG [m]
YSo(l)	Horiz. coord.of beam group column axis at Xo [cm]
Xdc(id) and Xds(id)	Distance to an "id"-diaphragm of central/side channel [m]
Wd(id)	Horiz.width of diaphragms [cm]
Hd(id)	Vert.hight of diaphragms [cm]
DPLY(id)	Horiz.displacement of diaphragms axes (misalignment)
DPLZ(id)	Vertic.displacement of diaphragms axes (misalignment)
AYmis	Horiz.beam angular misalignment [mrad]
AZmis	Vertical beam angular misalignment [mrad]
Fbh	Distance to Beamlets Horiz.aiming point [m]
Fbv	Distance to Beamlets Vertic.aiming point [m]
Fgh	Distance to Groups Horiz.aiming point [m]
Fgv	Distance to Groups Vertic.aiming point [m]
FR	Neutralisation efficiency (power)
Reion	Reionization [%]

※ id=1,2 - source exit scrap.

id=3,4 - OMA scrap.

id=5,6 - neutralizer entrance/exit

id=7,8 - pre-magnet 1st/2nd scrap.

id=9 - exit of pre-calorimeter scrap.

id=10 - exit of pre-duct scrap.

id=11 - NBI entrance port

NBI 빔라인 배열에 대한 변수들은 아래 표 3.1.3.사(1)-2와 같다. 빔라인은 Source Exit Scraper, OMA Scraper, Neutralizer, Pre-Magnet Scraper, Pre-Calorimeter Scraper, Pre-Duct Scraper, Duct 등으로 구성된다. 1개의 빔라인은 3개의 이온원이 설치되어 3개의 빔경로로 구성되며, 빔경로는 서로 4°의 각도를 가진다.

표 3-1-42. NBI 빔라인 장치 관련 변수

Id No.	NBL Components	Xdc(i)	Xds(i)	Wd(i)	Hd(i)
1	Source Exit Scraper Entrance	0.24	0.16	14.68	46.22
2	Source Exit Scraper Exit	0.48	0.4	14.68	46.22
3	OMA Scraper Entrance	0.48	0.4	14.68	46.22
4	OMA Scraper Exit	1.2	0.87	14.68	46.22
5	Neutralizer Entrance	1.4	1.07	15.0	52.0
6	Neutralizer Exit	2.74	2.76	15.0	52.0
7	1 st Pre-Magnet Scraper	3.24	3.13	16.0	62.7
8	2 nd Pre-Magnet Scraper	3.67	3.67	16.0	62.7
9	Exit of Pre-Calorimeter Scraper	5.22	5.22	28.8	50.0
10	Exit of Pre-Duct Scraper	6.74	6.74	70.0	58.0
11	NBI Entrance Port	9.2	9.2	42.0	72.0

빔라인 장치의 설계·제작뿐만 아니라, 설치시 발생될 수 있는 misalignment를 최소화하는 것도 빔라인 장치 개발 연구에서는 매우 중요한 과제라 할 수 있다. 이온원 설치 과정 중의 misalignment에 의한 영향을 조사하기 위하여 가로, 세로 방향으로 각각 4.4, 8.7, 13.1, 17.45 mrad의 misalignment가 발생한 경우에 빔라인 장치에 가해지는 열부하의 변화를 계산해 보았으며, 그 결과는 표 3.1.3.사(1)-3에 나타내었다. 표에서 보여지는 것처럼 배열의 misalign 정도가 커질수록 토카막에 인가되는 중성입자빔 파워는 급격히 감소함을 알 수 있다. Beam Angular Misalignment와 토카막에 입사되는 중성입자빔 파워의 관계를 그래프로 그려보면 그림 3.1.3.사(1)-2와 같다. 그림에서처럼 토카막에 입사되는 중성입자빔 파워가 8MW 이상이 되도록 하려면 최소한 0.25° 이내의 정확도를 가지고 이온원이 설치되어야 한다. 만약 설치시 misalignment가 0.4° 이상이 되면 토카막에 전달되는 중성입자빔 파워는 7.5MW 이하로 감소하게 된다.

표 3-1-43 이온원의 misalignment에 의한 영향

Horiz. beam angular misalign., AY _{mis} [mrad]	0.0	4.4	8.7	13.1	17.45
Vertic. beam angular misalign., AZ _{mis} [mrad]	0.0	4.4	8.7	13.1	17.45
Extracted ion beam power, P _{ex} [MW]	23.65	23.65	23.65	23.65	23.65
Averaged extracted power density, P _{av} [kW/cm ²]	14.07	14.07	14.07	14.07	14.07
Geometrical beam transmission, GBTR [%]	74.78	72.34	65.46	55.34	43.67
Power to the source exit scraper, P _{ses} [MW]	0.052	0.069	0.122	0.222	0.379
Power to the OMA scraper, P _{oms} [MW]	0.656	0.747	1.099	1.418	1.933
Power to the neutralizer walls, P _{nw} [MW]	2.769	3.014	3.721	4.808	6.157
Power to the 1 st pre-magnet scraper, P _{ms1} [MW]	0.172	0.201	0.288	0.428	0.610
Power to the 2 nd pre-magnet scraper, P _{ms2} [MW]	0.749	0.812	0.991	1.521	1.539
Neutral beam power exiting magnet, P _{oexm} [MW]	9.62	9.4	8.76	7.76	6.51
Ion beams power to the ion dump, P _{id} [MW]	9.62	9.4	8.76	7.76	6.51
Power to pre-calorimeter scraper, P _{pccs} [MW]	0.621	0.672	0.82	1.044	1.315
Power to the pre-duct scraper, P _{pds} [MW]	0.181	0.207	0.28	0.388	0.510
Neutral power to the duct walls, P _{odw} [MW]	0.127	0.146	0.201	0.287	0.393
Reionized power to the duct, P _{dri} [MW]	0.309	0.298	0.268	0.221	0.164
Total power to the duct walls, P _{dwt} [MW]	0.436	0.444	0.469	0.509	0.557
Injected neutral beam power, P _{pI} [MW]	8.39	8.08	7.19	5.82	4.13
Neutralization efficiency, FR	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
Reionization, Reion [%]	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50

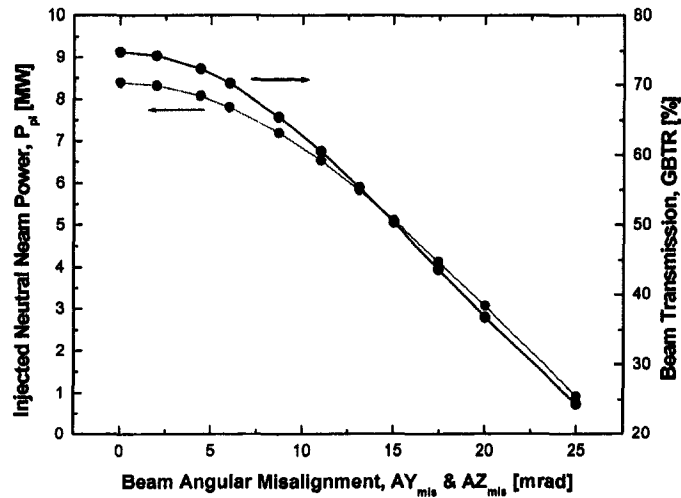


그림 3-1-215. Beam Angular Misalignment에 따른 입사중성입자빔 파워.

토카막에 전달되는 중성입자빔 파워를 좌우하는 또 다른 변수는 중성화효율이다. 주어진 빔라인 구조 및 배열 하에서 중성화효율의 감소는 중성입자빔 파워의 직접적인 감소를 의미한다. 계산결과는 그림 3-1-216에 나타내었다. 이 때, angular misalignment는 0.0°, 재전리 확률은 3.5%, 빔발산각은 1.0°로 하였다.

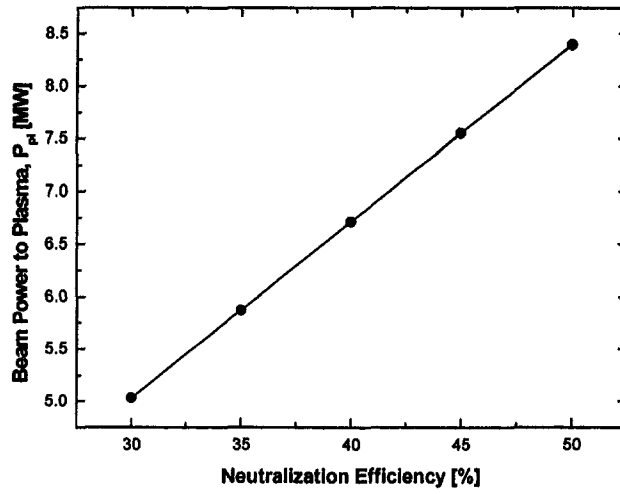


그림 3-1-216. 중성화효율에 따른 입사중성입자빔 파워.

그림 3.1.3.사(1)-4에는 빔라인 상에서 이온원으로부터의 일정 거리 떨어진 위치에서의 빔파워 분포를 나타내었으며, 그림 3.1.3.사(1)-5에는 토카막 플라즈마 입구에서의 중성입자빔을 나타낸 것으로 이온원으로부터의 거리는 9.2m이며, 총 빔파워는 8.39 MW이다.

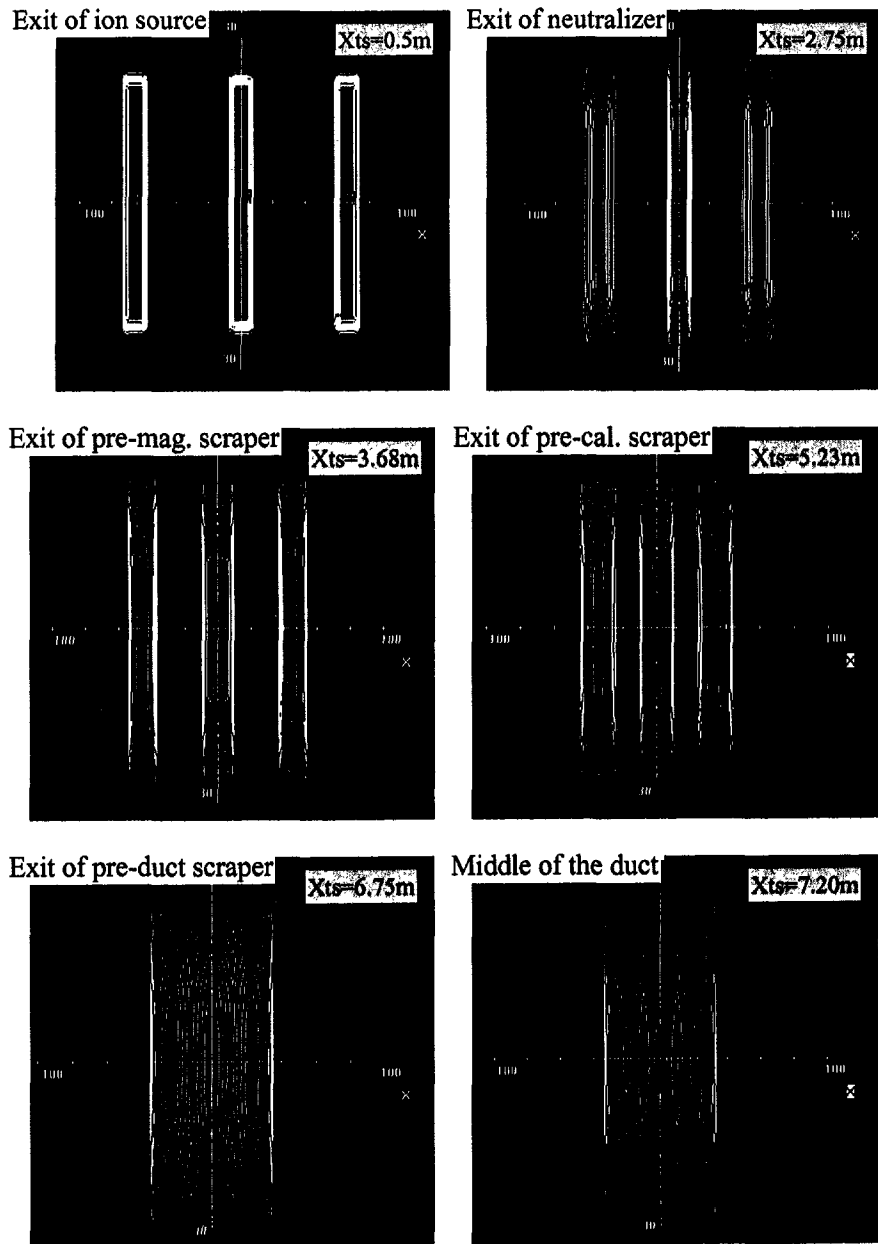


그림 3-1-217. 이온원으로부터의 거리에 따른 빔모양의 변화.

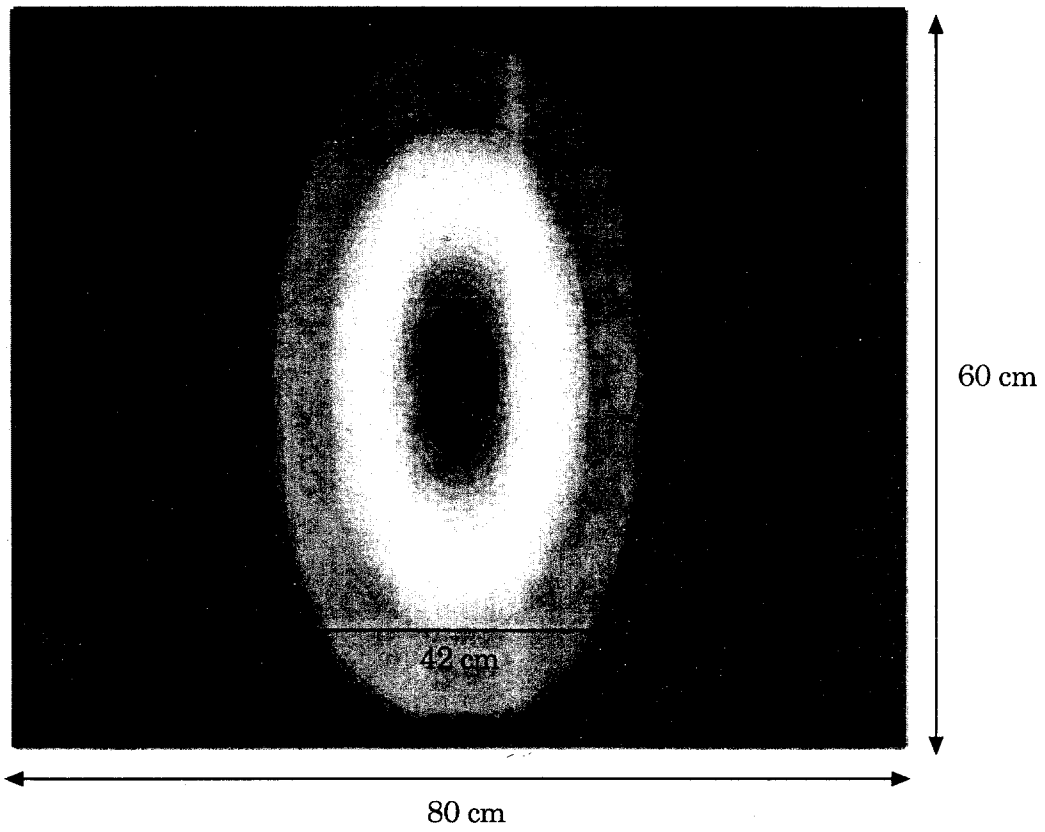


그림 3-1-218. 토카막 입사 전의 중성입자빔 ($X_{ts}=9.2m$).

이상의 시뮬레이션 결과를 바탕으로 최종적으로 결정된 NBI 빔라인의 개략도는 그림 3-1-219과 같다.

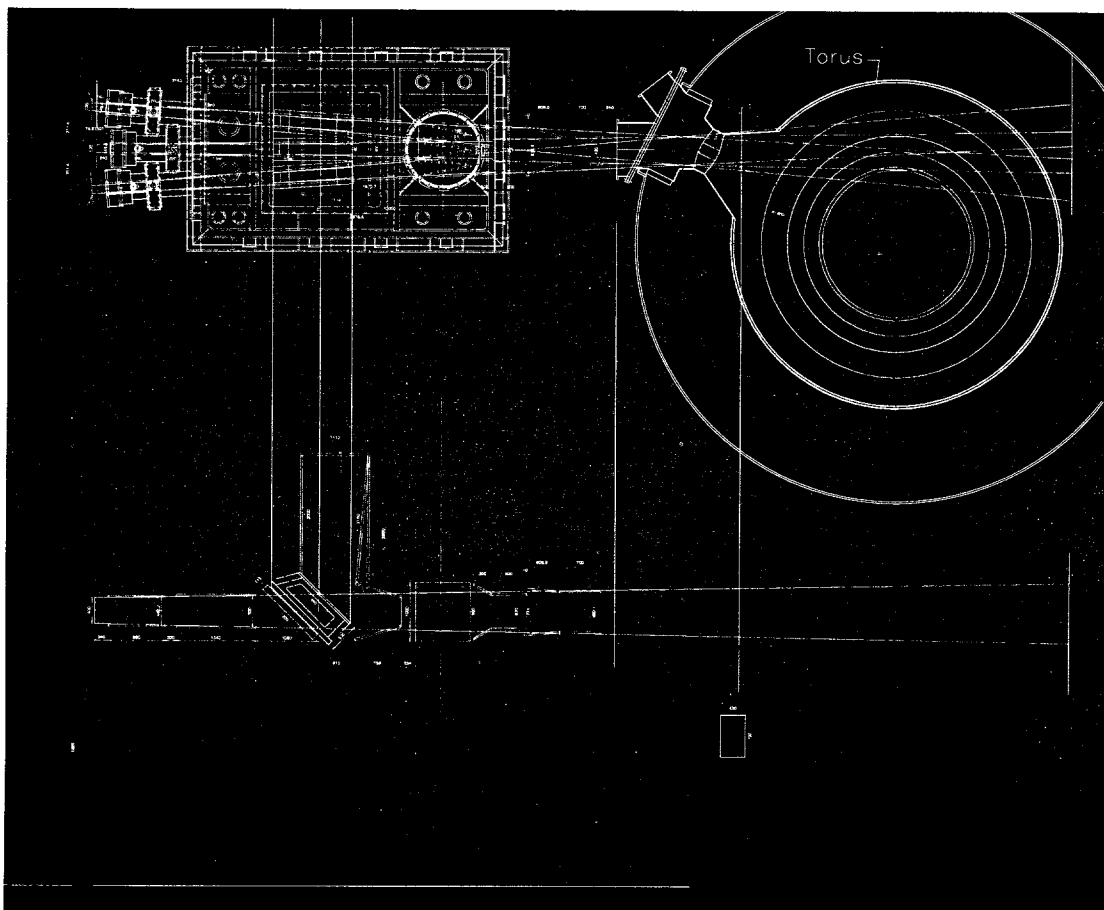


그림 3-1-219. NBI 빔라인.

첨부 3.1.3.사(1)-1 PDP-Code Source Program

```
C          PROGRAM BEAM_PDP
C          BEAM POWER FLOW AND DEPOSITION CODE
c          MODIFICATION FOR KAERI NBI
c
C          COORDINATES: X - axial; Y - horizontal; Z - vertical
c Ion source with multi-aperture extractor. Parameters:
c          Eo=Beam energy, keV,
c          Ro=Aperture radius, cm,
c          dYa=Horiz.step between aperture columns, cm
c          dZa=Vertic.step between aperture rows, cm
c          Qi=Emission ion current density, A/cm2,
c beamlet current distribution is gaussian:
C (1./(pi*Ao*Ao))*exp(-(A/Ao)**2)
c          Ao=Beamlet divergence angle, mrad,
c
c          Lgc - number of beam Group (Source unit) Columns
c          Kgr - number of beam Group Rows
c          Nac= number of aperture columns in a Group
c          Mar= number of aperture rows in a Group
c
c ZSo(k), cm -vertic.coord.of beam group row axis at X=0
c Xo(l), m - axial coord.of source GG
c YSo(l), cm -horiz. coord.of beam group column axis at Xo
c          Fbh=Distance to Beamlets Horiz.aiming point, m
c          Fbv=Distance to Beamlets Vertic.aiming point, m
c          Fgh=Distance to Groups Horiz.aiming point, m
c          Fgv=Distance to Groups Vertic.aiming point, m
c
c          AYmis=Horiz.beam angular misalignment, mrad
c          AZmis=Vertical beam angular misalignment, mrad
c
c Beamline geometry:
c          Idm = max.number of diaphragms along the NBL axis
c          Idch=Number of diaphragms in multichannel part
c          Idn=No of neutraliser exit diaphragm
c          Xdc(id), Xds(id), m -position of an "id"-diaphragm
c                      of central or side channel
c          Wd(id), cm -horiz.width of diaphragms
c          Hd(id), cm -vert.hight of diaphragms
```

```

c DPLY(id), cm -horiz.displacement of diaphragms axes
c DPLZ(id), cm -vertic.displacement of diaphragms axes
c
c     FR=neutralisation efficiency (power)
c     Reion=Reionization, %
C***** Specifications *****
C
CHARACTER*1 OTV
DIMENSION Xd(12),Wd(12),Hd(12),DPLY(12),DPLZ(12),Yd(5,12)
DIMENSION YSo(5),Yao(5,30),Yaso(30),ZSo(2),Zao(2,70),Zaso(70)
DIMENSION Zd(2,12),YdL(5,12),YdR(5,12),ZdB(2,12),ZdT(2,12)
DIMENSION ScYL(12,5,30),ScYR(12,5,30)
DIMENSION ScYLr(12,5,30),ScYRr(12,5,30),DirBLY(12)
DIMENSION ScZB(12,2,70),ScZT(12,2,70)
DIMENSION ScZBr(12,2,70),ScZTr(12,2,70),DirBLZ(12)
DIMENSION P(12), Xo(5),Xdc(12),Xds(12)
real PD1[ALLOCATABLE](:,:)
real PD2[ALLOCATABLE](:,:)
c *****
OPEN (12,FILE='NBL_DAT.DAT')
OPEN (16, FILE='ainput.DAT')
C*****Input data*****
5     FORMAT(A1)
10    FORMAT(12F9.4)
11    FORMAT(15F7.2)
12    FORMAT(5X,12(5X,I3))
13    FORMAT(2I8)
14    FORMAT(I3,12F7.2)
15    FORMAT(10F8.3)
16    FORMAT(51F8.2)
READ(16,*,err=81) Eo , Ro , Qi , Ao , dYa , dZa
51    FORMAT(' Beam energy, keV,                               Eo=',F5.1)
WRITE (*,51) Eo
WRITE (12,51) Eo
52    FORMAT(' Aperture radius, cm                               Ro=',F5.2)
WRITE (*,52) Ro
WRITE (12,52) Ro
53    FORMAT(' Emission ion current density, A/cm2           Qi=',F5.2)
WRITE (*,53) Qi
54    FORMAT(' Beamlet divergence angle, mrad                 Ao=',F5.2)
WRITE (*,54) Ao

```

```

WRITE (12,54) Ao
57 FORMAT(' Horiz.step between aperture columns,cm dYa=',F5.2)
WRITE (*,57) dYa
WRITE (12,57) dYa
58 FORMAT(' Vertic.step between aperture rows, cm dZa=',F5.2)
WRITE (*,58) dZa
WRITE (12,58) dZa

c
WRITE(*,'(A)') ' Press ENTER to continue'
READ (*,*)

c
READ(16,*) Lgc,Kgr,Nac,Mar,Idm,Idch,Idn
59 FORMAT(' Lgc=',I2,' - number of groups columns')
WRITE(*,59) Lgc
WRITE(12,59) Lgc
60 FORMAT(' Kgr=',I2,' - number of groups rows')
WRITE(*,60) Kgr
WRITE(12,60) Kgr
61 FORMAT(' Nac=',I2,' - number of aperture columns in a Group')
WRITE(*,61) Nac
WRITE(12,61) Nac
62 FORMAT(' Mar=',I2,' - number of aperture rows in a Group')
WRITE(*,62) Mar
WRITE(12,62) Mar
63 FORMAT(' Idm=',I2,' - max.number of diaphragms along NBL axis')
WRITE(*,63) Idm
WRITE(12,63) Idm
WRITE(*,'(A)') ' Press ENTER to continue'
READ (*,*)

c
64 FORMAT(' Vertic.coord.of group row axis',
* ' at Xo, ZSo(k), cm')
READ(16,*,err=81) (ZSo(k),k=1,Kgr)
WRITE(*,64)
WRITE(12,64)
WRITE(*,11) (ZSo(k),k=1,Kgr)
WRITE(12,11) (ZSo(k),k=1,Kgr)

c
77 FORMAT('/' Axial coord.of source GG, Xo(l), m')
READ(16,*,err=81) (Xo(l),l=1,Lgc)
WRITE(*,77)

```

```

WRITE(12,77)
WRITE(*,11) (Xo(l),l=1,Lgc)
WRITE(12,11) (Xo(l),l=1,Lgc)
c
67  FORMAT(/' Horiz.coord.of group column axis',
* ' at Xo, YSo(l), cm')
READ(16*,err=81) (YSo(l),l=1,Lgc)
WRITE(*,67)
WRITE(12,67)
WRITE(*,11) (YSo(l),l=1,Lgc)
WRITE(12,11) (YSo(l),l=1,Lgc)
c
c
WRITE(*,'(A)') ' Press ENTER to continue'
READ (*,*)
70  FORMAT(' Position of central channel diaphragms, Xdc(id), m')
READ(16*,err=81) (Xdc(id),id=1,Idm)
WRITE(*,70)
WRITE(12,70)
WRITE(*,11) (Xdc(id),id=1,Idm)
WRITE(12,11) (Xdc(id),id=1,Idm)
c
78  FORMAT(' Position of side channel diaphragms, Xds(id), m')
READ(16*,err=81) (Xds(id),id=1,Idm)
WRITE(*,78)
WRITE(12,78)
WRITE(*,11) (Xds(id),id=1,Idm)
WRITE(12,11) (Xds(id),id=1,Idm)
c
71  FORMAT(' Horiz.width of channel diaphragm, Wd(id), cm ')
READ(16*,err=81) (Wd(id),id=1,Idm)
WRITE(*,71)
WRITE(12,71)
WRITE(*,11) (Wd(id),id=1,Idm)
WRITE(12,11) (Wd(id),id=1,Idm)
c
72  FORMAT(' Vertic.hight of channel diaphragm, Hd(id), cm ')
READ(16*,err=81) (Hd(id),id=1,Idm)
WRITE(*,72)
WRITE(12,72)
WRITE(*,11) (Hd(id),id=1,Idm)

```



```

WRITE(12,11) (Hd(id),id=1,Idm)
c
73  FORMAT(' Horiz.displacement of diaphragms axes, DPLY(id), cm')
    READ(16,*,err=81) (DPLY(id),id=1,Idm)
    WRITE(*,73)
    WRITE(12,73)
    WRITE(*,11) (DPLY(id),id=1,Idm)
    WRITE(12,11) (DPLY(id),id=1,Idm)

c
74  FORMAT(' Vertic.displacement of diaphragms axes, DPLZ(id), cm')
    READ(16,*,err=81) (DPLZ(id),id=1,Idm)
    WRITE(*,74)
    WRITE(12,74)
    WRITE(*,11) (DPLZ(id),id=1,Idm)
    WRITE(12,11) (DPLZ(id),id=1,Idm)

c
    READ(16,*,err=81) AYmis,AZmis,Fbh,Fbv,Fgh,Fgv,FR,Reion
65  FORMAT(' Beamlets horiz. focal point,m,          Fbh=',F5.1)
    WRITE(*,65) Fbh
    WRITE(12,65) Fbh

c
68  FORMAT(' Groups horiz. focal point,m          Fgh=',F5.1)
    WRITE(*,68) Fgh
    WRITE(12,68) Fgh

c
66  FORMAT(' Groups vertic.focal point,m,          Fgv=',F5.1)
    WRITE(*,66) Fgv
    WRITE(12,66) Fgv

c
81  PAUSE 1
    CLOSE(16)

c*****
    pi=3.141593
    S1a=pi*Ro*Ro          ! One aperture area
    Wi=Qi*Eo              ! Ion power density kW/cm2
    Cb=Qi*S1a            ! One beamlet ion current, A
    Wb=Cb*Eo             ! One beamlet power, kW
    Sem=S1a*Nac*Mar*Lgc*Kgr ! Total emission surface, cm2
    Cex=Qi*Sem           ! Total extracted ion current, A
    Cpow=Sem*Eo/1000.
    Pex=Cpow*Qi          ! Total extracted ion beam power, MW

```

```

75     FORMAT(' Extracted ion beam power, MW,           Pex=',F5.2)
c *****
      WRITE (*,76)
76     FORMAT(/10X,' CALCULATIONS  ')
      Wsa=dYa*(Nac-1)  !Group width (between side apertures axes)
      Hsa=dZa*(Mar-1)  !Group height
      Sbgr=(Hsa+dZa)*(Wsa+dYa) ! Beam group surface area
C     판준쟁   ·誓 'à ㄴ . 黍mm .  쟁형첩→
      DO 91 l= 1,Lgc
C     룡獸→ ·誓 'à beamlets ㄴ . 黍mm 쟁" ㄱ group₩
      DO n= 1,Nac
      Yaso(n)=-Wsa/2.+dYa*(n-1)      ! in group
      Yao(l,n)=YSo(l)+Yaso(n)      ! distance from NBL axis
      END DO
      IF(Idm.eq.0) GOTO 91
      DO id=1,Idch
      IF(l.eq.1) Xd(id)=Xds(id)
      IF(l.eq.2) Xd(id)=Xdc(id)
      IF(l.eq.3) Xd(id)=Xds(id)
      Yd(l,id)=YSo(l)*(1.-(Xd(id)-Xo(l))/(Fgh-Xo(l)))
      END DO
      DO id=1,Idm
      IF(id.gt.Idch) Yd(l,id)=0.
      YdL(l,id)=Yd(l,id)+DPLY(id)-Wd(id)/2. !Coord.of diaphr.left side, mm
      YdR(l,id)=Yd(l,id)+DPLY(id)+Wd(id)/2. !Coord.of diaphr.right side, mm
      END DO
91    CONTINUE
c      DO id=1,Idch
c      WRITE(12,11) Xds(id),Yd(1,id)
c      END DO
      DO 92 k= 1,Kgr
      DO m= 1,Mar
      Zaso(m)=-Hsa/2.+dZa*(m-1)      !in group
      Zao(k,m)=ZSo(k)+Zaso(m)
      END DO
      IF(Idm.eq.0) GOTO 92
      DO id=1,Idch
      IF(l.eq.1) Xd(id)=Xds(id)
      IF(l.eq.2) Xd(id)=Xdc(id)
      IF(l.eq.3) Xd(id)=Xds(id)
      Zd(k,id)=ZSo(k)*(1.-(Xd(id)-Xo(l))/(Fgv-Xo(l)))

```

```

                END DO
c
                DO id=1,Idm
                IF(id.gt.Idch) Zd(k,id)=0.
                ZdB(k,id)=Zd(k,id)+DPLZ(id)-Hd(id)/2. !Coord.of diaphragm bottom
                ZdT(k,id)=Zd(k,id)+DPLZ(id)+Hd(id)/2. !Coord.of diaphragm top
                END DO
92 CONTINUE
c      IF(Idm.eq.0) GOTO 1010
      WRITE(*,69)
      WRITE(12,69)
69  FORMAT(' Horiz.coord.of l=1 channel axis and positions of ',
* ' diaphr. edges at different Xds, cm')
      WRITE(*,'(A)') ' id, Xds, Ydax, YdL, YdR, ZdB, ZdT '
      WRITE(12,'(A)') ' id, Xds, Ydax, YdL, YdR, ZdB, ZdT '
      DO id=1,Idm
      l=1
      k=1
      WRITE(*,14) id,Xds(id),Yd(1,id),YdL(1,id),YdR(1,id),ZdB(k,id),
* ZdT(k,id)
      WRITE(12,14) id,Xds(id),Yd(1,id),YdL(1,id),YdR(1,id),ZdB(k,id),
* ZdT(k,id)
      END DO
c*****Beam losses*****
c      WRITE(*,100)
100  FORMAT('/'  Are you interesting in Beam Losses ? (y/ )')
c      READ(*,5) OTV
c      IF(Idm.eq.0) WRITE(*,'(A)') '  ERROR : Idm=0'
      OPEN (11,FILE='BEAMLOSS.DAT')
      WRITE (*,75) Pex
      WRITE(*,101)
      WRITE(11,101)
101  FORMAT(/10X,
* ' GEOMETRICAL BEAM LOSSES / BEAM TRANSMISSION ')
c*****Horizontal losses*****
      AYmis0=AYmis
      WRITE (*,102) AYmis
102  FORMAT('/' Horiz.beam angular misalign., mrad, AYmis=',F4.1,' ')
      READ(*,10) AYmis
      IF(AYmis.EQ.0) AYmis=AYmis0
      WRITE (11,102) AYmis

```

```

C *****Each beamlet*****
      DO 151 l= 1,Lgc
      DO 152 n= 1,Nac
      IF(Idm.eq.0) GOTO 152
      DO 153 id=1,Idm
      YScL=YdL(l,id)
      YScR=YdR(l,id)
      IF(l.eq.1) Xd(id)=Xds(id)
      IF(l.eq.2) Xd(id)=Xdc(id)
      IF(l.eq.3) Xd(id)=Xds(id)
      RXh=0.1*(Xd(id)-Xo(l))*Ao      ! cm
C      Y-coord. of beamlet axis at Xt
      Yba=YSO(l)*(1.-(Xd(id)-Xo(l))/(Fgh-Xo(l)))+
*      Yaso(n)*(1.-(Xd(id)-Xo(l))/(Fbh-Xo(l)))+
*      0.1*(Xd(id)-Xo(l))*AYmis      ! cm
      ULh=(Yba-YScL)/RXh
      IF(ULh.ge.0.) ERLh=ERF(ULh)
      IF(ULh.lt.0.) ERLh=-ERF(-ULh)
      URh=-(Yba-YScR)/RXh
      IF(URh.ge.0.) ERRh=ERF(URh)
      IF(URh.lt.0.) ERRh=-ERF(-URh)
      dBLYL=50.*(1.-ERLh)      ! % for beamlet
      dBLYR=50.*(1.-ERRh)      ! % for beamlet
      ScYL(id,l,n)=dBLYL
      ScYR(id,l,n)=dBLYR
      ScYLr(id,l,n)=dBLYL
      ScYRr(id,l,n)=dBLYR
153      CONTINUE
152      CONTINUE
151      CONTINUE
c*****Summarized*****
107      FORMAT (1X,2I4,3F9.5)
108      FORMAT (1X,I4,31X,2F10.5)
109      FORMAT (/ Total Geometric.Beam Y-Losses, %,      GBLY=' ,F6.2/)
c*****
      WRITE(11,110)
110      FORMAT(1X,/
* ' BLYL,BLYR - sum % of losses for n columns of beamlets',
* ' to Left or',/
* ' Right "id"-diaphragm side (relatively to group power)',/
* ' BLY - % of losses for each "l"-group (relatively to',/

```

```

* '      group power)'/
* ' YLoss(id) - % of losses to "id"-set of diaphragms'./
* '      (relatively to total power)')
  WRITE(11,112)
  WRITE(11,111)
111  FORMAT(/IX,
* ' id  l  BLYL   BLYR   BLY   YLossid  '/')
112  FORMAT(/IX,' Without accounting of losses on previous diaphr.')
```

```

113  FORMAT(/IX,' With accounting of losses on previous diaphr.')
```

```

c*****
      DO 155 id=1,Idm
        Yloss=0.
          DO 156 l=1,Lgc
            BLYL=0
            BLYR=0
              DO n=1,Nac
                BLYL=BLYL+ScYL(id,l,n)/Nac ! % for group
                BLYR=BLYR+ScYR(id,l,n)/Nac ! % for group
              END DO
            BLY=BLYL+BLYR ! % for group
            WRITE(11,107) id,l,BLYL,BLYR,BLY
            Yloss=Yloss+BLY/Lgc ! % for total beam
156  CONTINUE
        WRITE(*,*) id,Yloss
        WRITE(11,108) id,Yloss
155  CONTINUE
c*****With accounting of losses on previous diaphr.****
      DO 157 l=1,Lgc
        DO 158 n=1,Nac
          DO 159 id=2,Idm
            DO jd=1,id-1
              DelL=ScYL(id,l,n)-ScYL(jd,l,n)
              DelR=ScYR(id,l,n)-ScYR(jd,l,n)
              IF(DelL.lt.ScYLr(id,l,n)) ScYLr(id,l,n)=DelL
              IF(DelR.lt.ScYRr(id,l,n)) ScYRr(id,l,n)=DelR
              IF(ScYLr(id,l,n).lt.0.0) ScYLr(id,l,n)=0. !φ 收☒
              IF(ScYRr(id,l,n).lt.0.0) ScYRr(id,l,n)=0. !φ 收☒
            END DO
159  CONTINUE
158  CONTINUE
157  CONTINUE
```

```

c*****Summarized*****
WRITE(11,113)
WRITE(11,111)
GBLY=0
      DO 161 id=1,Idm
Yloss=0.
      DO 162 l=1,Lgc
BLYL=0
BLYR=0
      DO n=1,Nac
BLYL=BLYL+ScYlr(id,l,n)/Nac ! % for group
BLYR=BLYR+ScYrr(id,l,n)/Nac ! % for group
      END DO
BLY=BLYL+BLYR ! % for group
WRITE(11,107) id,l,BLYL,BLYR,BLY
Yloss=Yloss+BLY/Lgc ! % for total beam
162 CONTINUE
DirBLY(id)=Yloss/100. !Direct Beam Losses to "id" set (horiz.)
WRITE(*,*) id,Yloss
WRITE(11,108) id,Yloss
GBLY=GBLY+Yloss
161 CONTINUE
WRITE(*,109) GBLY
WRITE(11,109) GBLY
YGBTr=1.-GBLY/100. ! Beam Y-Transmission
c
c*****Vertical losses*****
AZmis0=AZmis
WRITE (*,121) AZmis
121 FORMAT(' Vertic.beam angular misalign., mrad, AZmis=',F4.1,' ')
READ(*,10) AZmis
IF(AZmis.EQ.0) AZmis=AZmis0
WRITE (11,121) AZmis
C *****Each beamlet*****
      DO 171 k= 1,Kgr
      DO 172 m= 1,Mar
IF(Idm.eq.0) GOTO 171
      DO 173 id=1,Idm
RXv=0.1*(Xd(id)-Xo(1))*Ao
C Z-coord. of beamlet axis at Xt
Zba=ZSo(k)*(1.-(Xd(id)-Xo(1))/(Fgv-Xo(1)))+

```

```

* Zaso(m)*(1.-(Xd(id)-Xo(1))/(Fbv-Xo(1)))+
* 0.1*(Xd(id)-Xo(1))*AZmis      ! cm
UBv=(Zba-ZdB(k,id))/RXv
UTv=-(Zba-ZdT(k,id))/RXv
      IF(UBv.ge.0.) ERBv=ERF(UBv)
      IF(UBv.lt.0.) ERBv=-ERF(-UBv)
      IF(UTv.ge.0.) ERTv=ERF(UTv)
      IF(UTv.lt.0.) ERTv=-ERF(-UTv)
dBLZB=50.*(1.-ERBv)      ! % for beamlet
dBLZT=50.*(1.-ERTv)      ! % for beamlet
ScZB(id,k,m)=dBLZB
ScZT(id,k,m)=dBLZT
ScZBr(id,k,m)=dBLZB
ScZTr(id,k,m)=dBLZT
173  CONTINUE
172  CONTINUE
171  CONTINUE
c***** Summarized *****
      WRITE(11,126)
126  FORMAT(1X,/
* ' BLZB,BLZT - sum % of losses for m rows of beamlets',
* ' to Bottom or',/
* '      Top "id"-diaphragm side (relatively to group power)',/
* ' BLZ - % of losses for each "k"-group (relatively to',/
* '      group power)',/
* ' ZLoss(id) - % of losses to "id"-set of diaphragms',/
* '      (relatively to total power)')
      WRITE(11,112)
      WRITE(11,127)
127  FORMAT(1X,
* ' id k BLZB BLZT BLZ ZLossid '/')
c*****
      DO 175 id=1,Idm
      Zloss=0.
      DO 176 k=1,Kgr
      BLZB=0
      BLZT=0
      DO m=1,Mar
      BLZB=BLZB+ScZB(id,k,m)/Mar ! % for group
      BLZT=BLZT+ScZT(id,k,m)/Mar ! % for group
      END DO

```

```

        BLZ=BLZB+BLZT ! % for group
        WRITE(11,107) id,k,BLZB,BLZT,BLZ
        Zloss=Zloss+BLZ/Kgr ! % for total beam
176    CONTINUE
        WRITE(*,*) id,Zloss
        WRITE(11,108) id,Zloss
175    CONTINUE
c*****With accounting of losses on previous diaphr.****
        DO 177 k=1,Kgr
        DO 178 m=1,Mar
        DO 179 id=2,Idm
                DO jd=1,id-1
                DelB=ScZB(id,k,m)-ScZB(jd,k,m)
                DelT=ScZT(id,k,m)-ScZT(jd,k,m)
                IF(DelB.lt.ScZBr(id,k,m)) ScZBr(id,k,m)=DelB
                IF(DelT.lt.ScZTr(id,k,m)) ScZTr(id,k,m)=DelT
                IF(ScZBr(id,k,m).lt.0.0) ScZBr(id,k,m)=0. !¢ 收☒
                IF(ScZTr(id,k,m).lt.0.0) ScZTr(id,k,m)=0. !¢ 收☒
                END DO
179    CONTINUE
178    CONTINUE
177    CONTINUE
c*****
128    FORMAT (/ ' Total Geometric.Beam Z-Losses, %,      GBLZ=' ,F6.2/)
c*****
        WRITE(11,113)
        WRITE(11,127)
        GBLZ=0
                DO 181 id=1,Idm
                Zloss=0.
                DO 182 k=1,Kgr
                BLZB=0
                BLZT=0
                DO m=1,Mar
                BLZB=BLZB+ScZBr(id,k,m)/Mar ! % for group
                BLZT=BLZT+ScZTr(id,k,m)/Mar ! % for group
                END DO
                BLZ=BLZB+BLZT ! % for group
                WRITE(11,107) id,k,BLZB,BLZT,BLZ
                Zloss=Zloss+BLZ/Kgr ! % for total beam
182    CONTINUE

```



```

DirBLZ(id)=Zloss/100. !Direct Beam Losses to "id" set (vertic.)
WRITE(*,*) id,Zloss
WRITE(11,108) id,Zloss
GBLZ=GBLZ+Zloss
181 CONTINUE
WRITE(*,128) GBLZ
WRITE(11,128) GBLZ
ZGBTr=1.-GBLZ/100. ! Beam Z-Transmission
c*****End of Z-losses*****
CLOSE (11)
GBTr=YGBTr*ZGBTr*100.

c
130 FORMAT(' Geometrical Beam Transmission, % GBTr=',F5.2)
131 FORMAT(' Reionization, % Reion=',F5.2)
132 FORMAT(' Neutralisation (power) efficiency FR=',F5.2,' ')
c133 FORMAT(' Introduce neutraliz. efficiency FR=',F5.2,' ')
WRITE (*,130) GBTr
WRITE (*,131) Reion
FR0=FR
WRITE (*,132) FR
READ (*,10) FR
IF(FR.EQ.0) FR=FR0

c
191 CONTINUE
DO id=1,Idm
P(id)=Pex*(DirBLY(id)+DirBLZ(id)-DirBLY(id)*DirBLZ(id))
ENDDO
134 FORMAT(' Power to the source exit scraper, MW Pses=',F5.3)
Pses=P(1)+P(2)
135 FORMAT(' Power to the OMA scraper, MW Poms=',F5.3)
Poms=P(3)+P(4)
136 FORMAT(' Power to the neutralizer walls, MW, Pnw=',F5.3)
Pnw=P(5)+P(6)
137 FORMAT(' Power to the 1-st pre-magn.scrap, MW, Pms1=',F5.3)
Pms1=P(7)
138 FORMAT(' Power to the 2-nd pre-magn.scrap, MW, Pms2=',F5.3)
Pms2=P(8)
139 FORMAT(' Neutr.beam power, exiting magnet,MW, Poexm=',F5.2)
Poexm=FR*(Pex-Pses-Poms-Pnw-Pms1-Pms2)
140 FORMAT(' Ion beams power to the Ion Dump, MW, Pid=',F5.2)
Pid=(1.-FR)*(Pex-Pses-Poms-Pnw-Pms1-Pms2)

```

```

141  FORMAT(' Power to pre-calorimeter scraper, MW  Ppcs=',F5.3)
      Ppcs=P(9)*FR
142  FORMAT(' Power to the pre-duct scraper, MW      Ppds=',F5.3)
      Ppds=P(10)*FR
143  FORMAT(' Neutral power to the duct walls, MW,  Podw=',F5.3)
      Podw=P(11)*FR*(1.-Reion/100.)
144  FORMAT(' Reionized power to the duct, MW,      Pdri=',F5.3)
      Pdri=(Poexm-Ppcs-Ppds)*Reion/100.
145  FORMAT(' Total power to the duct walls, MW,    Pdwt=',F5.3)
      Pdwt=Podw+Pdri
146  FORMAT(' Injected neutr.beam power, MW,       Ppl=',F5.2)
      Ppl=Poexm-Ppcs-Ppds-Pdwt
c
      Ceff=Ppl/Pex
      WRITE(*,146) Ppl
      WRITE(*,190)
190  FORMAT('/ Do you want to change injected NB power? (y/ )')
      READ(*,5) OTV
      IF(OTV.NE.'y') GOTO 195
      Ppl0=Ppl
      WRITE (*,150)
150  FORMAT('/ Introduce the value of NB power, MW  ')
      READ (*,10) Ppl
      IF(Ppl.EQ.0) Ppl=Ppl0
      Pex=Ppl/Ceff
      WRITE (*,75) Pex
      Qi=Pex/Cpow           ! Cpow in MV*cm2
      Wi=Qi*Eo
      GOTO 191
195  CONTINUE
154  FORMAT(' Average extracted power density,kW/cm2 Pav=',F5.2,' ')
      Pav=1000.*Pex/(Sbgr*Lgc*Kgr)   ! Pex in MW
      WRITE (*,154) Pav
      WRITE (*,102) AYmis
      WRITE (12,102) AYmis
      WRITE (*,121) AZmis
      WRITE (12,121) AZmis
      WRITE (12,53) Qi
      WRITE(12,75) Pex
      WRITE(12,154) Pav
      WRITE(12,130) GBTr

```

```

WRITE(12,132) FR
WRITE(12,131) Reion
WRITE(12,134) Pses
WRITE(12,135) Poms
WRITE(12,136) Pnw
WRITE(12,137) Pms1
WRITE(12,138) Pms2
WRITE(12,139) Poexm
WRITE(12,140) Pid
WRITE(12,141) Ppcs
WRITE(12,142) Ppds
WRITE(12,143) Podw
WRITE(12,144) Pdri
WRITE(12,145) Pdwt
WRITE(12,146) Ppl
197  CONTINUE
c1010  CONTINUE
        CLOSE (12)
c***** PDP on channel component side wall *****
        WRITE(*,400)
400  FORMAT(/' Are you interesting in PDP on channel component',
* ' side wall ? (y/ ) ')
        READ(*,5) OTV
        IF(OTV.NE.'y') GOTO 1010
        l=3
        Znws=0.
        dZnw=2.  ! cm
        dXnw=0.2  ! m
        Nxm=0
        Nzm=0
406  CONTINUE
        l0=1
        Znws0=Znws
        dZnw0=dZnw
        dXnw0=dXnw
        Nxm0=Nxm
        Nzm0=Nzm
c
        WRITE (*,580) l
        READ (*,'(I4)') l
        IF(l.EQ.0) l=10

```

```

        DO id=1,Idch
        IF(1.EQ.1) Xd(id)=Xds(id)
        IF(1.EQ.2) Xd(id)=Xdc(id)
        IF(1.EQ.3) Xd(id)=Xds(id)
        END DO
c
    id=1
    id0=id
    WRITE (*,581) id
    READ (*,'(I4)') id
    IF(id.EQ.0) id=id0
    Xnws=Xd(id)
    Xnwex=Xd(id+1)
c
    WRITE (*,583) Znws
    READ (*,10) Znws
    IF(Znws.EQ.0) Znws=Znws0
c
    WRITE (*,582) dXnw, dZnw
    READ (*,10) dXnw, dZnw
    IF(dXnw.EQ.0) dXnw=dXnw0
    IF(dZnw.EQ.0) dZnw=dZnw0
c
    WRITE (*,601) Nxm
    READ (*,'(I4)') Nxm
    IF(Nxm.EQ.0) Nxm=Nxm0
c
    WRITE (*,602) Nzm
    READ (*,'(I4)') Nzm
    IF(Nzm.EQ.0) Nzm=Nzm0
c
580  FORMAT(' Beam channel No           l=' ,I4,' ')
581  FORMAT(' Component entrance diaphragm No       id=' ,I4,' ')
583  FORMAT(' Lower vertical coordinate, cm,       Znws=' ,F6.2,' ')
582  FORMAT(' Distances between divisions on the component '/
      * ' wall plane, m/cm,   dXnw=' ,F6.3,'   dZnw=' ,F6.3,' ')
601  FORMAT(' Number of axial dXnw divisions,       Nxm=' ,I4,' ')
602  FORMAT(' Number of vert. dZnw divisions,       Nzm=' ,I4,' ')
c*****
    OPEN (14,FILE='CWL_PDP.DAT')
    OPEN (15,FILE='CWR_PDP.DAT')

```

```

OPEN (20,FILE='CWL_tab.TXT')
OPEN (21,FILE='CWR_tab.TXT')
WRITE(14,'(A)') ' X, m Z, cm PD, W/cm2'
WRITE(15,'(A)') ' X, m Z, cm PD, W/cm2'
WRITE(*,'(A)') ' POWER DENSITY ON COMPONENT SIDE WALL,
W/cm2'
ALFL=10.*(YdL(l,id+1)-YdL(l,id))/(Xd(id+1)-Xd(id)) ! Left wall inclination
angle, mrad
ALFR=10.*(YdR(l,id+1)-YdR(l,id))/(Xd(id+1)-Xd(id)) ! Right wall inclination
angle, mrad
c WRITE(*,*) id,id+1,ALFL,ALFR,Xnws,Xnwex
c Pause 10
c*****
ALLOCATE(PD1(0:Nxm,0:Nzm))
ALLOCATE(PD2(0:Nxm,0:Nzm))
c
PDm1=0.
PDm2=0.
PDs=0.
DO 1001 nx=0,Nxm
Xnw=Xnws+nx*dXnw
IF(Xnw.gt.Xnwex) GOTO 1011
YnwL=YdL(l,id)+0.1*(Xnw-Xd(id))*ALFL ! Left wall coordinate at Xnw, cm
YnwR=YdR(l,id)+0.1*(Xnw-Xd(id))*ALFR ! Right wall
RXv=0.1*(Xnw-Xo(l))*Ao ! cm
RXh=0.1*(Xnw-Xo(l))*Ao ! cm
ETv=RXv/Ro
ETh=RXh/Ro
WXvh=Wi/(ETv*ETh) ! kW/cm2
DO 1002 nz=0,Nzm
Znw=Znws+nz*dZnw ! cm
PDL=0.
PDR=0.
DO 1003 n= 1,Nac
FIL=10.*(YnwL-Yao(l,n))/(Xnw-Xo(l)) ! Angle from "n"-beamlet to the point
on left wall, mrad
FIR=10.*(YnwR-Yao(l,n))/(Xnw-Xo(l)) ! ***** on right wall, mrad
PSIL=FIL-ALFL ! <0, when no scraper
PSIR=FIR-ALFR ! >0
c*****Horiz.coord. of beamlet axis at Xnw*****
Yba=YSo(l)*(1.-(Xnw-Xo(l))/(Fgh-Xo(l)))+

```

```

* Yaso(n)*(1.-(Xnw-Xo(l))/(Fbh-Xo(l)))+0.1*(Xnw-Xo(l))*AYmis ! cm
      DO 1004 k= 1,Kgr
      DO 1005 m= 1,Mar
c      IF(Idm.eq.0) goto 1997
          DO id=1,Idm
              IF(Xd(id).gt.Xnw) goto 1997
              ZBgr=Zao(k,m)+(ZdB(k,id)-Zao(k,m))*(Xnw-Xo(l))/(Xd(id)-Xo(l))
              ZTgr=Zao(k,m)+(ZdT(k,id)-Zao(k,m))*(Xnw-Xo(l))/(Xd(id)-Xo(l))
              IF(Znw.lt.ZBgr) goto 1005
              IF(Znw.gt.ZTgr) goto 1005
          END DO
1997  CONTINUE
C*****Vertic.coord. of beamlxis at Xnw*****
      Zba=ZSo(k)*(1.-(Xnw-Xo(l))/(Fgv-Xo(l)))+
*      Zaso(m)*(1.-(Xnw-Xo(l))/(Fbv-Xo(l)))+0.1*(Xnw-Xo(l))*AZmis ! cm
C***** Distance from the beamlet axis to the point on the wall*****
      RhL=SQRT((Yba-YnwL)**2) ! cm
      RhR=SQRT((Yba-YnwR)**2) ! cm
      Rv=SQRT((Zba-Znw)**2)
      IF(Rv/RXv.gt.3.) goto 1006
      IF(RhL/RXh.gt.3.) goto 1006
      dWL=WXvh*exp(-(Rv/RXv)**2)*exp(-(RhL/RXh)**2) !kW/cm2
      dWnwL=dWL*(-PSIL) ! W/cm2, because [PSIL]=mrad
      IF(PSIL.gt.0.) dWnwL=0.
      PDL=PDL+dWnwL
1006  CONTINUE
      IF(RhR/RXh.gt.3.) goto 1005
      dWR=WXvh*exp(-(Rv/RXv)**2)*exp(-(RhR/RXh)**2) !kW/cm2
      dWnwR=dWR*PSIR ! W/cm2
      IF(PSIR.lt.0.) dWnwR=0.
      PDR=PDR+dWnwR
1005  CONTINUE
1004  CONTINUE
1003  CONTINUE
      WRITE(14,15) Xnw,Znw,PDL
      WRITE(15,15) Xnw,Znw,PDR
      WRITE(*,*) Xnw,Znw,PDR
      IF(PDL.gt.PDm1) PDm1=PDL
      IF(PDR.gt.PDm2) PDm2=PDR
      PD1(nx,nz)=PDL
      PD2(nx,nz)=PDR

```

```

1002 CONTINUE
      Nxmm=nx
1001 CONTINUE
1011 CONTINUE
C*****
      WRITE(20,13) Nxmm,Nzm
      WRITE(20,15) Xnws,dXnw
      WRITE(20,15) Znws,dZnw
      WRITE(20,15) PDs,PDm1
      WRITE(20,16) ((PD1(nx,nz),nx=0,Nxmm),nz=0,Nzm)
      WRITE(21,13) Nxmm,Nzm
      WRITE(21,15) Xnws,dXnw
      WRITE(21,15) Znws,dZnw
      WRITE(21,15) PDs,PDm2
      WRITE(21,16) ((PD2(nx,nz),nx=0,Nxmm),nz=0,Nzm)
CLOSE (14)
CLOSE (15)
      CLOSE (20)
      CLOSE (21)
DEALLOCATE(PD1)
DEALLOCATE(PD2)
C*****
      WRITE(*,407)
407  FORMAT('/ Do you want to repeat calcul. of wall PDP ? (y/ )')
      READ(*,5) OTV
      IF(OTV.EQ.'y') GOTO 406
1010 CONTINUE
C***** PDP at target plate *****
      WRITE(*,401)
401  FORMAT('/ Are you interesting in PDP at target plate ? (y/ )')
      READ(*,5) OTV
      IF(OTV.NE.'y') GOTO 1012
      Xts=7.2
      Fi=90.
      Yts=0.
      Zts=0.
      dZt=2.
      dYt=.5
      Imax=0
      Jmax=0
      PDm=1.0

```

```

408   Continue
      Xts0=Xts
      Fi0=Fi
      Yts0=Yts
      Zts0=Zts
      dYt0=dYt
      dZt0=dZt
      Imax0=Imax
      Jmax0=Jmax
      FR0=FR

c*****
530   FORMAT(' Dist.to target starting point, m,      Xts=',F5.2,' ')
531   FORMAT(' Coordinates of target starting point '/
      * '          left lower corner, cm, Yts=',F5.1,'   Zts=',F5.1,' ')
532   FORMAT(' Distances between divisions at the target '/
      * '          plane, cm,          dYt=',F5.2,'   dZt=',F5.2,' ')
533   FORMAT(' Number of vertical dZt divisions,      Jmax=',I4,' ')
535   FORMAT(' Number of horiz. dYt divisions,      Imax=',I4,' ')
537   FORMAT(' Angle between NB axis and target,deg,  Fi=',F6.2,' ')

c *****
      OPEN (17,FILE='TARG_PDP.DAT')
      OPEN (21,FILE='TARG_tab.TXT')
      WRITE (*,530) Xts
      READ (*,10) Xts
      IF(Xts.EQ.0) Xts=Xts0
      WRITE (17,530) Xts

c
      WRITE (*,537) Fi
      READ (*,10) Fi
      IF(Fi.EQ.0) Fi=Fi0
      WRITE (17,537) Fi

c
      WRITE (*,531) Yts, Zts
      READ (*,10) Yts, Zts
      IF(Yts.EQ.0) Yts=Yts0
      IF(Zts.EQ.0) Zts=Zts0

c
      WRITE (*,532) dYt, dZt
      READ (*,10) dYt, dZt
      IF(dYt.EQ.0) dYt=dYt0
      IF(dZt.EQ.0) dZt=dZt0

```



```

c
WRITE (*,535) Imax
READ (*,'(I4)') Imax
IF(Imax.EQ.0) Imax=Imax0

c
WRITE (*,533) Jmax
READ (*,'(I4)') Jmax
IF(Jmax.EQ.0) Jmax=Jmax0

c
WRITE (*,132) FR
READ (*,10) FR
IF(FR.EQ.0) FR=FR0

c
WRITE(17,411)
411 FORMAT(/'  Xt,m   Yt,cm  Zt,cm  St,cm  PD,kW/cm2')
c *****
FIR=FI*PI/180.
TF=tan(FIR)
SF=sin(FIR)
IF(SF.lt.0.) SF=-SF
C *****
      ALLOCATE(PD1(0:Imax,0:Jmax))
      PDm=0.
      PDs=0.
      DO 922 i=0,Imax
      Yt=Yts+i*dYt
      Sts=Yts/SF
      dSt=dYt/SF
      St=i*dSt
      Xt=Xts+.01*i*dYt/TF
      DO 923 j=0,Jmax
      Zt=Zts+j*dZt
      PDcw=0
      DO 924 l= 1,Lgc
      RXv=0.1*(Xt-Xo(l))*Ao
      RXh=0.1*(Xt-Xo(l))*Ao
      ETv=RXv/Ro
      ETh=RXh/Ro
      WXvh=Wi/(ETv*ETh)
      DO 925 n= 1,Nac
      IF(Idm.eq.0) goto 991

```

```

        DO id=1,Idm
        IF(l.eq.1) Xd(id)=Xds(id)
        IF(l.eq.2) Xd(id)=Xdc(id)
        IF(l.eq.3) Xd(id)=Xds(id)
        IF(Xd(id).gt.Xt) goto 991
        YLgr=Yao(l,n)+(YdL(l,id)-Yao(l,n))*(Xt-Xo(l))/(Xd(id)-Xo(l))
        YRgr=Yao(l,n)+(YdR(l,id)-Yao(l,n))*(Xt-Xo(l))/(Xd(id)-Xo(l))
        IF(Yt.lt.YLgr) goto 925
        IF(Yt.gt.YRgr) goto 925
        END DO
991  CONTINUE
C    Y-coord. of beamlet axis at Xt
    Yba=YSO(l)*(1.-(Xt-Xo(l))/(Fgh-Xo(l)))+
*   Yaso(n)*(1.-(Xt-Xo(l))/(Fbh-Xo(l)))+0.1*(Xt-Xo(l))*AYmis    ! cm
    Rth=(Yba-Yt)
    IF(Rth/RXh.gt.3) goto 928
        DO 926 k= 1,Kgr
        DO 927 m= 1,Mar
        IF(Idm.eq.0) goto 1993
        DO id=1,Idm
        IF(l.eq.1) Xd(id)=Xds(id)
        IF(l.eq.2) Xd(id)=Xdc(id)
        IF(l.eq.3) Xd(id)=Xds(id)
        IF(Xd(id).gt.Xt) goto 1993
        ZBgr=Zao(k,m)+(ZdB(k,id)-Zao(k,m))*(Xt-Xo(l))/(Xd(id)-Xo(l))
        ZTgr=Zao(k,m)+(ZdT(k,id)-Zao(k,m))*(Xt-Xo(l))/(Xd(id)-Xo(l))
        IF(Zt.lt.ZBgr) goto 927
        IF(Zt.gt.ZTgr) goto 927
        END DO
1993  CONTINUE
C    Z-coord. of beamlet axis at Xt
    Zba=ZSO(k)*(1.-(Xt-Xo(l))/(Fgv-Xo(l)))+
*   Zaso(m)*(1.-(Xt-Xo(l))/(Fbv-Xo(l)))+0.1*(Xt-Xo(l))*AZmis    ! cm
    Rtv=(Zba-Zt)
    IF(Rtv/RXv.gt.3) goto 927
    dW=WXvh*exp(-(Rtv/RXv)**2)*exp(-(Rth/RXh)**2)
    dWF=dW*SF*FR
    PDcw=PDcw+dWF
927  CONTINUE
926  CONTINUE
928  CONTINUE

```

```

925 CONTINUE
924 CONTINUE
WRITE(17,15) Xt,Yt,Zt,St,PDcw
WRITE(*,15) Xt,Yt,Zt,St,PDcw
PD1(i,j)=PDcw
IF(PDcw.gt.PDm) PDm=PDcw
923 CONTINUE
922 CONTINUE
C*****
WRITE(21,13) Imax,Jmax
WRITE(21,15) Sts,dSt
WRITE(21,15) Zts,dZt
WRITE(21,15) PDs,PDm
WRITE(21,16) ((PD1(i,j),i=0,Imax),j=0,Jmax)
CLOSE (21)
DEALLOCATE(PD1)

c
WRITE(*,409)
409 FORMAT('/ Do you want to repeat calcul. of target PDP ? (y/ )')
READ(*,5) OTV
IF(OTV.EQ.'y') GOTO 408
CLOSE (17)

1012 CONTINUE
C***** PDP on duct walls *****
WRITE(*,1401)
1401 FORMAT('/ Are you interesting in PDP on duct right wall? (y/ )')
READ(*,5) OTV
IF(OTV.NE.'y') GOTO 2112
id=10
Zdws=0.
dZdw=2. ! cm
dXdw=.5 ! m
Nxm=0
Nzm=0
1408 Continue
id0=id
WRITE (*,1530) id
READ (*,'(I4)') id
IF(id.EQ.0) id=id0
Xdws=Xd(id)
Xdwex=Xd(id+1)

```

```

      Xdws0=Xdws
      Zdws0=Zdws
      dXdw0=dXdw
      dZdw0=dZdw
      Nxm0=Nxm
      Nzm0=Nzm
C*****
1530  FORMAT(' Duct entrance diaphragm No          id=',I4,' ')
1534  FORMAT(' Dist.to duct starting point, m,  Xdws=',F5.2,' ')
1531  FORMAT(' Lower vertical coordinate, cm    Zdws=',F5.2,' ')
1532  FORMAT(' Distances between divisions at the duct '/
      * ' wall, m/cm          dXdw=',F5.2,'    dZdw=',F5.2,' ')
1533  FORMAT(' Number of vert. dZdw divisions,  Nzm=',I4,' ')
1535  FORMAT(' Number of axial dXdw divisions,  Nxm=',I4,' ')
C *****
      WRITE (*,1534) Xdws
      READ (*,10) Xdws
      IF(Xdws.EQ.0) Xdws=Xdws0
C
      WRITE (*,1531) Zdws
      READ (*,10) Zdws
      IF(Zdws.EQ.0) Zdws=Zdws0
C
      WRITE (*,1532) dXdw, dZdw
      READ (*,10) dXdw, dZdw
      IF(dXdw.EQ.0) dXdw=dXdw0
      IF(dZdw.EQ.0) dZdw=dZdw0
C
      WRITE (*,1535) Nxm
      READ (*,'(I4)') Nxm
      IF(Nxm.EQ.0) Nxm=Nxm0
C
      WRITE (*,1533) Nzm
      READ (*,'(I4)') Nzm
      IF(Nzm.EQ.0) Nzm=Nzm0
C *****
      OPEN (18,FILE='DWR_tab.TXT')
      OPEN (19,FILE='DWR_PDP.DAT')
      WRITE(19,'(A)') ' X, m    Z, cm    PD, W/cm2'
C*****
      WRITE(*,'(A)') ' POWER DENSITY ON DUCT RIGHT SIDE WALL, W/cm2

```

```

      ALFR=10.*(YdR(1,id+1)-YdR(1,id))/(Xd(id+1)-Xd(id)) ! Right wall inclination
angle, mrad
      ALFB=10.*(ZdB(1,id+1)-ZdB(1,id))/(Xd(id+1)-Xd(id)) ! Bottom wall inclination
angle, mrad
      ALFT=10.*(ZdT(1,id+1)-ZdT(1,id))/(Xd(id+1)-Xd(id)) ! Bottom wall inclination
angle, mrad
c      WRITE(*,*) id,id+1,ALFR,ALFB,ALFT,Xdws,Xdwex
c      Pause 11
c*****
      ALLOCATE(PD1(0:Nxm,0:Nzm))
      PDm=0.
      PDs=0.
      DO 1922 nx=0,Nxm
      Xdw=Xdws+nx*dXdw
      IF(Xdw.gt.Xdwex) GOTO 1928
      Ydwr=YdR(1,id)+0.1*(Xdw-Xd(id))*ALFR ! Right wall coord. at Xdw, cm
      Zdwb=ZdB(1,id)+0.1*(Xdw-Xd(id))*ALFB ! Bottom wall coord. at Xdw, cm
      ZdwT=ZdT(1,id)+0.1*(Xdw-Xd(id))*ALFT ! Top wall coord. at Xdw, cm
      WRITE(*,*) id,YdL(1,id),YdR(1,id),ZdB(1,id),ZdT(1,id)
      WRITE(*,15) Xdw,Ydwr,Zdwb,ZdwT
c      Pause 12
      DO 1923 nz=0,Nzm
      Zdw=Zdws+nz*dZdw ! cm
      PDR=0
      IF(Zdw.lt.Zdwb) goto 1929
      IF(Zdw.gt.ZdwT) goto 1929
      DO 1924 l= 1,Lgc
      RXv=0.1*(Xdw-Xo(l))*Ao ! cm
      RXh=0.1*(Xdw-Xo(l))*Ao ! cm
      ETv=RXv/Ro
      ETh=RXh/Ro
      WXvh=Wi/(ETv*ETh) ! kW/cm2
      DO 1925 n= 1,Nac
c      IF(Idm.eq.0) goto 1991
      DO iw=1,Idm
      IF(Xd(iw).gt.Xdw) goto 1991
      YLgr=Yao(l,n)+(YdL(l,iw)-Yao(l,n))*(Xdw-Xo(l))/(Xd(iw)-Xo(l))
      YRgr=Yao(l,n)+(YdR(l,iw)-Yao(l,n))*(Xdw-Xo(l))/(Xd(iw)-Xo(l))
      IF(Ydwr.lt.YLgr) goto 1925
      IF(Ydwr.gt.YRgr) goto 1925
      END DO

```

1991 CONTINUE

```
c ***** Horiz.coord. of beamlet axis at Xdw *****
      Yba=YSo(l)*(1.-(Xdw-Xo(l))/(Fgh-Xo(l)))+
      * Yaso(n)*(1.-(Xdw-Xo(l))/(Fbh-Xo(l)))+0.1*(Xdw-Xo(l))*AYmis ! cm
      FidwR=10.*(YdwR-Yao(1,n))/(Xdw-Xo(l)) ! mrad
```

```
c *****
```

```
      DO 1926 k= 1,Kgr
      DO 1927 m= 1,Mar
      DO iw=1,Idm
      IF(Xd(iw).gt.Xdw) goto 1995
      ZBgr=Zao(k,m)+(ZdB(k,iw)-Zao(k,m))*(Xdw-Xo(l))/(Xd(iw)-Xo(l))
      ZTgr=Zao(k,m)+(ZdT(k,iw)-Zao(k,m))*(Xdw-Xo(l))/(Xd(iw)-Xo(l))
      IF(Zdw.le.ZBgr) goto 1927
      IF(Zdw.ge.ZTgr) goto 1927
      END DO
```

1995 CONTINUE

```
c ***** Vertic.coord. of beamlet axis at Xdw *****
      Zba=ZSo(k)*(1.-(Xdw-Xo(l))/(Fgv-Xo(l)))+
      * Zaso(m)*(1.-(Xdw-Xo(l))/(Fbv-Xo(l)))+0.1*(Xdw-Xo(l))*AZmis ! cm
```

```
C***** Distance from the beamlet axis to the point on the wall *****
```

```
      RhR=SQRT((Yba-YdwR)**2) ! cm
      Rv=SQRT((Zba-Zdw)**2)
      IF(Rv/RXv.gt.3.) goto 1927
      IF(RhR/RXh.gt.3.) goto 1927
      dWR=WXvh*exp(-(Rv/RXv)**2)*exp(-(RhR/RXh)**2) !kW/cm2
      PSI=FidwR-ALFR
      dWF=dWR*Fr*PSI ! W/cm2
      PDR=PDR+dWF
```

1927 CONTINUE

1926 CONTINUE

1925 CONTINUE

1924 CONTINUE

1929 CONTINUE

```
      PD1(nx,nz)=PDR
      WRITE(*,15) Xdw,Zdw,PDR ! m, cm, W/cm2
      WRITE(19,15) Xdw,Zdw,PDR
      IF(PDR.gt.PDm) PDm=PDR
```

1923 CONTINUE

```
      Nxmm=nx
```

1922 CONTINUE

1928 CONTINUE

```

C*****
      WRITE(18,13) Nxmm,Nzm
      WRITE(18,15) Xdws,dXdw
      WRITE(18,15) Zdws,dZdw
      WRITE(18,15) PDs,PDm
      WRITE(18,16) ((PD1(nx,nz),nx=0,Nxmm),nz=0,Nzm)
      CLOSE (18)
      CLOSE (19)
      DEALLOCATE(PD1)
c*****
      WRITE(*,1409)
1409  FORMAT(/' Do you want to repeat calcul. of wall PDP ? (y/ )')
      READ(*,5) OTV
      IF(OTV.EQ.'y') GOTO 1408
2112  CONTINUE
c*****
      WRITE(*,3401)
3401  FORMAT(/' Are you interesting in duct bottom wall PDP ?(y/ )')
      READ(*,5) OTV
      IF(OTV.NE.'y') GOTO 3112
      id=10
      Ydws=0.
      dYdw=1.      ! cm
      dXdw=.5      ! m
      Nxm=50
      Nym=0
3408  Continue
      id0=id
      WRITE (*,3530) id
      READ (*,'(I4)') id
      IF(id.EQ.0) id=id0
      Xdws=Xd(id)
      Xdwex=Xd(id+1)
      Xdws0=Xdws
      Ydws0=Ydws
      dXdw0=dXdw
      dYdw0=dYdw
      Nxm0=Nxm
      Nym0=Nym
c*****
3530  FORMAT(' Duct entrance diaphragm No          id=',I4,' ')

```

```

3534  FORMAT(' Dist.to duct starting point, m,  Xdws=',F5.2,' ')
3531  FORMAT(' Left horizont. coordinate, cm,  Ydws=',F6.1,' ')
3532  FORMAT(' Distances between divisions at the duct '/
      * '      wall, m/cm,          dXdw=',F5.2,'  dYdw=',F5.1,' ')
3533  FORMAT(' Number of horiz.dYdw divisions,  Nym=',I4,' ')
3535  FORMAT(' Number of axial dXdw divisions,  Nxm=',I4,' ')
c *****
      WRITE (*,3534) Xdws
      READ (*,10) Xdws
      IF(Xdws.EQ.0) Xdws=Xdws0
c
      WRITE (*,3531) Ydws
      READ (*,10) Ydws
      IF(Ydws.EQ.0) Ydws=Ydws0
c
      WRITE (*,3532) dXdw, dYdw
      READ (*,10) dXdw, dYdw
      IF(dXdw.EQ.0) dXdw=dXdw0
      IF(dYdw.EQ.0) dYdw=dYdw0
c
      WRITE (*,3535) Nxm
      READ (*,'(I4)') Nxm
      IF(Nxm.EQ.0) Nxm=Nxm0
c
      WRITE (*,3533) Nym
      READ (*,'(I4)') Nym
      IF(Nym.EQ.0) Nym=Nym0
c *****
      OPEN (25,FILE='DWB_tab.TXT')
      OPEN (26,FILE='DWB_PDP.DAT')
      WRITE(26,'(A)') '  X, m    Y, cm    PD, W/cm2'
c*****
      WRITE(*,'(A)') ' POWER DENSITY ON DUCT BOTTOM WALL, W/cm2'
      ALFL=10.*(YdL(1,id+1)-YdL(1,id))/(Xd(id+1)-Xd(id))  ! Left wall inclination
angle, mrad
      ALFR=10.*(YdR(1,id+1)-YdR(1,id))/(Xd(id+1)-Xd(id))  ! Right wall inclination
angle, mrad
      ALFB=10.*(ZdB(1,id+1)-ZdB(1,id))/(Xd(id+1)-Xd(id))  ! Bottom wall inclination
angle, mrad
      WRITE(*,*) id,id+1,ALFL,ALFR,ALFB,Xdws,Xdwex
      Pause 11

```



```

c*****
  ALLOCATE(PD1(0:Nxm,0:Nzm))
  PDm=0.
  PDs=0.
    DO 3922 nx=0,Nxm
  Xdw=Xdws+nx*dXdw
  IF(Xdw.gt.Xdwex) GOTO 3928
  YdwL=YdL(1,id)+0.1*(Xdw-Xd(id))*ALFL ! Right wall coord. at Xdw, cm
  YdwR=YdR(1,id)+0.1*(Xdw-Xd(id))*ALFR ! Right wall coord. at Xdw, cm
  ZdwB=ZdB(1,id)+0.1*(Xdw-Xd(id))*ALFB ! Bottom wall coord. at Xdw, cm
c  WRITE(*,*) id,YdL(1,id),YdR(1,id),ZdB(1,id),ZdT(1,id)
c  WRITE(*,15) Xdw,YdwL,YdwR,ZdwB
c  Pause 12
    DO 3923 ny=0,Nym
  Ydw=Ydws+ny*dYdw ! cm
  PDB=0
  IF(Ydw.lt.YdwL) GOTO 3929
  IF(Ydw.gt.YdwR) GOTO 3929
    DO 3924 l= 1,Lgc
  RXv=0.1*(Xdw-Xo(l))*Ao ! cm
  RXh=0.1*(Xdw-Xo(l))*Ao ! cm
  ETv=RXv/Ro
  ETh=RXh/Ro
  WXvh=Wi/(ETv*ETh) ! kW/cm2
    DO 3925 n= 1,Nac
c  IF(Idm.eq.0) goto 3991
    DO iw=1,Idm
  IF(Xd(iw).gt.Xdw) goto 3991
  YLgr=Yao(1,n)+(YdL(1,iw)-Yao(1,n))*(Xdw-Xo(1))/(Xd(iw)-Xo(1))
  YRgr=Yao(1,n)+(YdR(1,iw)-Yao(1,n))*(Xdw-Xo(1))/(Xd(iw)-Xo(1))
c  IF(Ydw.lt.YLgr) goto 3925
  IF(Ydw.gt.YRgr) goto 3925
    END DO
3991  CONTINUE
c ***** Horiz.coord. of beamlet axis at Xdw *****
  Yba=YSo(1)*(1.-(Xdw-Xo(1))/(Fgh-Xo(1)))+
  * Yaso(n)*(1.-(Xdw-Xo(1))/(Fbh-Xo(1)))+0.1*(Xdw-Xo(1))*AYmis ! cm
c *****
    DO 3926 k= 1,Kgr
    DO 3927 m= 1,Mar
      DO iw=1,Idm

```

```

      IF(Xd(iw).gt.Xdw) goto 3995
      ZBgr=Zao(k,m)+(ZdB(k,iw)-Zao(k,m))*(Xdw-Xo(l))/(Xd(iw)-Xo(l))
      ZTgr=Zao(k,m)+(ZdT(k,iw)-Zao(k,m))*(Xdw-Xo(l))/(Xd(iw)-Xo(l))
      IF(ZdwB.le.ZBgr) goto 3927
      IF(ZdwB.ge.ZTgr) goto 3927
      END DO
3995  CONTINUE
c ***** Vetic.coord. of beamlet axis at Xdw *****
      Zba=ZSo(k)*(1.-(Xdw-Xo(l))/(Fgv-Xo(l)))+
      * Zaso(m)*(1.-(Xdw-Xo(l))/(Fbv-Xo(l)))+0.1*(Xdw-Xo(l))*AZmis ! cm
C***** Distance from the beamlet axis to the point on the wall *****
      Rh=SQRT((Yba-Ydw)**2) ! cm
      Rv=SQRT((Zba-ZdwB)**2)
      IF(Rv/RXv.gt.3.) goto 3927
      IF(Rh/RXh.gt.3.) goto 3927
      dWB=WXvh*exp(-(Rv/RXv)**2)*exp(-(Rh/RXh)**2) !kW/cm2
      FidwB=10.*(ZdwB-Zao(k,m))/(Xdw-Xo(l)) ! mrad
      PSIB=FidwB-ALFB
      dWF=dWB*Fr*(-PSIB) ! W/cm2
      PDB=PDB+dWF
3927  CONTINUE
3926  CONTINUE
3925  CONTINUE
3924  CONTINUE
3929  CONTINUE
      PD1(nx,ny)=PDB
      WRITE(*,15) Xdw,Ydw,PDB ! m, cm, W/cm2
      WRITE(26,15) Xdw,Ydw,PDB
      IF(PDB.gt.PDm) PDm=PDB
3923  CONTINUE
      Nxmm=nx
3922  CONTINUE
3928  CONTINUE
C*****
      WRITE(25,13) Nxmm,Nym
      WRITE(25,15) Xdws,dXdw
      WRITE(25,15) Ydws,dYdw
      WRITE(25,15) PDs,PDm
      WRITE(25,16) ((PD1(nx,nz),nx=0,Nxmm),nz=0,Nzm)
      CLOSE (25)
      CLOSE (26)

```

```

DEALLOCATE(PD1)
C*****
WRITE(*,3409)
3409  FORMAT(/' Do you want to repeat calcul. of wall PDP ? (y/ )')
      READ(*,5) OTV
      IF(OTV.EQ.'y') GOTO 3408
3112  CONTINUE
      END

      FUNCTION ERF(v)
      DATA Ct/.3275911/,C1/.2548296/,C2/.2844967/,C3/1.421414/,
* C4/1.453152/,C5/1.061405/
      ERF=1.-(C1/(1.+Ct*v)-C2/(1.+Ct*v)**2+C3/(1.+Ct*v)**3-
* C4/(1.+Ct*v)**4+C5/(1.+Ct*v)**5)*EXP(-v**2)
      RETURN
      END

```

첨부 3.1.3.사(1)-2 PDP-Code Input File

```

120.  0.2   0.34  17.45  0.52  0.68
3     1     24    66     11    9     6
0.0
-0.075 0.0   -0.075
-71.14 0.0   71.14
0.24  0.48  0.48  1.2   1.4   2.74  3.24  3.67  5.22  6.74  9.2
0.16  0.40  0.40  0.87  1.07  2.76  3.13  3.67  5.22  6.74  9.2
14.68 14.68 14.68 14.68 15.0  15.0  16.0  16.0  28.8  70.  42.0
46.22 46.22 46.22 46.22 52.0  52.0  62.7  62.7  50.0  58.0  72.0
0.    0.    0.    0.    0.    0.    0.    0.    0.    0.    0.0
0.    0.    0.    0.    0.    0.    0.    0.    0.    0.    0.0
0 .    0 .    9 9 9 .    9 9 9 .    1 0 . 0    9 9 9    0 . 5    3 . 5

```

line 1: Eo , Ro , Qi , Ao , dYa , dZa

Eo=Beam energy, keV,
Ro=Aperture radius, cm,
Qi=Emission ion current density, A/cm²,
Ao=Beamlet divergence angle, mrad,
dYa=Horiz.step between aperture columns, cm
dZa=Vertic.step between aperture rows, cm

line 2: Lgc,Kgr,Nac,Mar,Idm,Idc,Idn

Lgc - number of beam Groups Columns (max.=5)
Kgr - number of beam Groups Rows (max.=2)
Nac= number of aperture columns in a Group (max.=30)
Mar= number of aperture rows in a Group (max.=70)
Idm = number of diaphragms along the NBI (max.=12)
(Idm=0-without channels)
Idch=Number of diaphragms in a multichannel part
Idn=No of neutraliser exit diaphragm

line 3: ZSo(k), cm - vertic.coord.of beam group row axis at Xo

line 4: Xo(l), m - axial coord.of source GG

line 5: YSo(l), cm - horiz. coord.of beam group column axis at Xo

line 6 and 7: Xdc(id) and Xds(id), m - distance to an "id"-diaphragm
of central/side channel:

(id=1,2 - source exit scrap., id=3,4 - OMA scrap.;
id=5,6 - neutralizer entrance/exit; id=7,8 - pre-magnet

1st/2nd scrap.: id=9 - exit of pre-calorimeter scrap.;
id=10 - exit of pre-duct scrap.; id=11 - NBI entrance port)
line 8: Wd(id), cm -horiz.width of diaphragms
line 9: Hd(id), cm -vert.hight of diaphragms
line 10: DPLY(id), cm -horiz.displacement of diaphragms axes (misalignement)
line 11: DPLZ(id), cm -vertic.displacement of diaphragms axes (misalignement)

line 12: AYmis , AZmis ,Fbh,Fbv, Fgh, Fgv, FR, Reion
AYmis=Horiz.beam angular misalignment, mrad
AZmis=Vertical beam angular misalignment, mrad
Fbh=Distance to Beamlets Horiz.aiming point, m
Fbv=Distance to Beamlets Vertic.aiming point, m
Fgh=Distance to Groups Horiz.aiming point, m
Fgv=Distance to Groups Vertic.aiming point, m
FR=neutralisation efficiency (power)
Reion=Reionization, %

(2) BTR code development

(가) 목표

- NBL(Neutral Beam Line)내의 중성 빔 생성(production)과 전달(transmission) 설명
- 빔 수송을 동반하는 과정 모사
- NBL 성분(component)에의 전력 증착(power deposition) 결정
- 자기장, 주변기체(background gas) 등의 존재하에서 시스템의 실제 운전조건 재현

(나) 기능

- 중성빔 발생지역내 잔류 자기장의 수용 가능한 준위(level) 결정
- 빔라인에 따른 빔손실(직접 또는 재전리에 의한) 계산
- 선택된 단면에서의 빔 자취(footprints) 획득
- 휨자석(bending magnet)에 의한 이온 굴절
- 재전리 속 경향(flux trends)에 대한 토카막 이탈 자기장(stray field)의 영향 연구
- 선택된 NBL 표면에서의 전력 증착 계산

(다) BTR 모델

(다)-1. 빔 구조 (Beam Structure)

빔은 빔렛(beamlets, 즉 이온원 출구 그리드에서 인출되는 기본 빔)의 2D 세트(set)로 표현된다; 빔렛의 양은 사용자에게 의하여 행(N_{rows})과 열($N_{columns}$)의 양으로 규정된다. 한 빔렛의 전류(그리고 전력)는 다음과 같이 계산된다;

$$I_b = I_{source} / (N_{columns} \cdot N_{rows})$$

빔렛의 시작점은 이온원 출구 그리드 규격(dimension)에 따라서 BTR에 의하여 자동적으로 계산된다. 이온원 출구 그리드내의 실제 원형구 위치는 고려되지 않지만, 이 영향은 빔렛 혼합(빔 자취는 실제의 것과 다를 수 있다) 이전의 영역에서만 관측이 될 수 있을 것 같다. 이온원에 대한 빔렛의 양을 선택할 때에는 빔에 대한 빔렛의 혼합이 $X_{mix} \sim d/\Delta$ 에서 일어나는 것으로 여긴다. 여기서, d 는 이온원 출구 그리드에서 빔렛 시작점들 사이의 단계(step)이며, Δ 는 빔 분산이다(다음을 참조).

(다)-2. 빔 분산 (Beam Divergence)

극좌표에 의한 하나의 빔렛(대칭적인 가우스, 구형 좌표계 내에서)내의 전류밀도는 다음과 같이 표현할 수 있다:

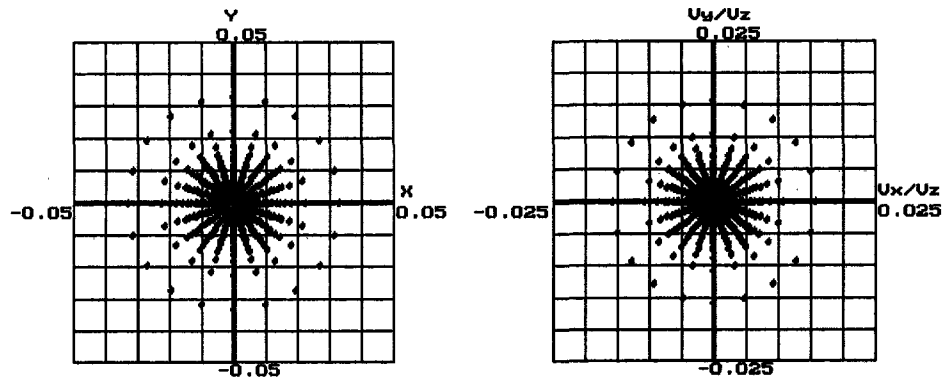
$$j(\theta) = I_b(\pi\Delta^2) \cdot \exp(-\theta^2/\Delta^2), \quad [A/rad^2].$$

여기서, $I_b[A]$ 는 빔렛 전류(총 전류), $\theta[rad]$ 는 빔렛의 축으로부터 계산되는 극각도, $\Delta[rad]$ 는 가우스 분포의 변수(분산)이다. 그러므로, 고정된 θ_0 내의 전류는

$$I(\theta_0) = 1 - \exp(-\theta^2/\Delta^2) \quad [A]$$

이다. 방위각 방향(azimuth direction)에 따른 전류밀도는 고정된 θ_0 에 대하여는 일정하다. BTR에서 각각의 빔렛은 대표 입자들(representative particles, "대 입자(big particle)" 모델)의 유한 갯수(사용자에 의하여 주어지는)로 구성된다; 각각의 "대 입자"는 전류(전력) $I_b = j(\theta)(\partial\theta \times \partial\phi)$ 를 운반한다. 여기서, $\partial\theta$ 는 극좌표계에 따른 집단 분할의 단계(step of groups division)이고, $\partial\phi$ 는 방위각에 따라 동일한 것을 나타낸다. 비대칭 가우스의 경우에는, 두 분산 성분에 의하여 정의되는 유사한 원리가 이용된다. 즉, 집단은 수평과 수직의 방향으로 뻗어나간다. BTR은 사용자에게 두 가지 가능한 형태의 집단분할을 선택할 수 있게 한다:

- a) 동일한 전류($\partial\theta$ 는 일정하지 않다)를 운반하는 극 집단(polar group),
 - b) 일정한 단계의 $\partial\theta$ (전류는 가변이다)를 가지는 극 집단.
- 선택 (a)의 설명이 아래의 그림 1에서 보여주고 있다.



Footprint of D-beamlet (mm)

Angles of D-beamlet (mrad)

그림 3-1-220 하나의 빔렛(B=0)에 대한 중성화장치(neutralizer)

입구에서의 자취

Beamlet: Div=5 mrad; 15% halo with div=15 mrad

Group("big particles"): 240 (polar-12, azimuth-20).

(다)-3. 입자 투사 (Particles Tracing)

- 중성 입자 - 일정한 시간간격을 가지고 직선운동, 사용자에게 의하여 주어짐;
- 이온 - 운동방정식에 의하여

$$\partial^2 \mathbf{r} / \partial t^2 = q/m \cdot (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}).$$

x, y, z 성분들은 경로를 따라서 적분(1-계 적분)된다.

(다)-4. 중성화 (Neutralization)

경로 L에 따른 이온전류 감소는 다음과 같이 정의된다:

$$I_p(L) = I_p^0 \cdot \exp(- \int N \sigma dL).$$

여기서, $I_p^0 [A]$ 는 초기값(중성화 이전), $N [m^{-3}]$ 는 기체 밀도, $\sigma [m^2]$ 는 단면적이다. 한 "대 이온(big ion)"의 전류손실은 다음의 공식에 따라서 단계적으로 모사될 수 있다:

$$\partial I_p = I_p N(L) \langle \sigma \rangle \partial L.$$

여기서, dL은 입자 투사의 단계, $\langle \sigma \rangle$ 는 평균 단면적이다. "손실된(lost)" 전류는 새로운 중성입자에 더해지고, "모(parent) 이온"으로서 동일한 속도벡터를 가지는 동일한 점에서 다시 고려된다. BTR은 중성화 모델의 선택을 가능하게 한다:

- a) "얇은(thin)" 모델-빔 중성화가 중성화 효율 N_{eff} 에 따라서 중성화장치 출구에서 갑자기 발생할 때;
- b) "두터운(thick)" 모델-빔 경로에 따라서, $N_{eff} = 1 - I_p/I_p^0$ 에 의한 전체적인 효율 세트와 기체 분포형태 세트를 가지고 단계적으로 중성화.

(다)-5. 재전리 (Re-ionization)

주변 기체에 대한 분해(stripping)로 인한 중성입자의 전류감소는 중성화와 유사하게 서술될 수 있다. BTR은 재전리를 계산하기 위하여 두 가지의 방법을 제시한다:

- a) 총 퍼센트($\langle \sigma \rangle$ 가 계산된다)를 제시;
- b) 평균 단면적(유효 전류손실이 계산된다)을 제시.

(다)-6. 자기장

다음과 같은 형태의 자기장이 BTR에 의하여 처리된다:

- a) 휨 자적(bending magnet, BM) 자기장;
- b) 토카막으로부터의 이탈(잔류) 자기장(stray field);
- c) 자기장 차폐지역에서의 시험 자기장. 여기서, 받아들여지는 수준의 자기장이 미리 알려지지 않으며, 사용자에게 의하여 추가적으로 결정된다.

BM 자기장은 입력파일로부터 읽어드리고, Beta 코드와 동일한 방법으로 처리된다. BM 자기장의 계산은 ANSYS 5.5 코드로부터 제공된다. 이탈(잔류) 자기장은 사용자가 제공하는 텍스트 파일(text file)로부터 읽어들이는다. 데이터는 표 3.1.1.사(2)-1의 형태로 배열되어야 한다.

모든 방향에 따른 단계들은 규칙적이어야 한다. 이들 입력 데이터는 토카막 좌표계

이다. BTR은 이것들을 NBI 좌표계로 변환시킨다. 정해진 지점(tab points) 사이의 자기장 성분들은 선형적으로 보간법(interpolation)이 적용된다. 차폐된 지역의 시험 자기장은 빔수송에 대한 영향을 확인하기 위하여 선택적으로 첨가된다. 수직성분 B_z 만이 빔 전달에 결정적이다. 시험 자기장 영역은 제한된 지점들에 의하여 정의된다. 여기서, B_z 의 값은 일정하다. 다행히도 세 개의 인접한 지역들은 다른 길이와 B_z 값으로 규정할 수 있다.

표 3-1-44 텍스트 파일로 작성된 이탈(잔류) 자기장 입력 형식

R [m]	X [m]	Y [m]	Z [m]	Bx [G]	By [G]	Bz [G]	|B| [G]
0.1	0.0	0.1	0.0	0.00402	-0.00238	-67763.0	67763.0
0.2	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
0.3	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
.....

(다)-7. 기체 밀도 분포

빔라인에 따른 기체 밀도는 사용자에게 의하여 텍스트 파일 형태로 주어져야 하고, 다음과 같은 표의 형태로 배열된다. 데이터는 NBI 좌표계(X)에 있어야 한다. 단계는 규칙적이지 않을 수 있다. 정해진 지점사이의 기체 밀도는 선형적으로 보간법이 적용된다.

표 3-1-45 텍스트 파일로 작성된 빔라인에 따른 기체밀도 입력 형식

X [m]	Pressure [Torr (Pa, atm)]	Density [cm ⁻³]
0	5.00E-3	1.61E+14
0.4	3.00E-3	9.65E+13
2.74	2.00E-3	6.44E+11
5.23	3.00E-6	9.65E+10
6.77	1.00E-6	3.22E+10

(다)-8. 전력 흡착 (Power Deposition) 및 자취 (Footprints)

각각의 NBI 성분(표면)은 부하(load) 계산을 위하여 선택될 수 있다(단순히 마우스로 선택함으로써). 각각의 플레이트들(평면들)은 각자의 지역적인(local) 좌표계를 가지고 있다. 선택된 플레이트는 자동적인 단계에 의하여 단위 셀(net cells)에 의하여 “덮어 씌어진다(covered)”. 셀 단계는 정확도를 확인하기 위하여 사용자에게 의하여 선택적으로 변화시킬 수 있다. 입자 궤적(trajjectory)이 선택된 플레이트를 교차하고 있을 때에는 하강지점(falling point)은 지역적인 좌표계로 전환되고, 플레이트

에 연결이 되며, 인가되는 단위 셀 위치가 결정된다. 그리고, 입자의 전력은 결국 셀의 모서리-점(corner-points) 사이에 분포된다. NBL을 따라서 선택된 단면적내 빔렛의 전력 자취는 마찬가지로 계산이 된다. 단지 차이는 입자들이 이 플레이트들에 하강(falling)한 후에 멈추지 않으며, 그들의 진로를 계속한다는 것이다.

(다)-9. 해석상의 선택사항

BTR은 사용자가 다음과 같은 빔 투사(tracing)의 선택기능을 사용하도록 한다:

- Neutralization Thin/Thick; 이 선택기능은 중성화 모델 사이에서의 선택을 가능하게 한다(“중성화” 참조).
- stop/trace charged particles after neutralization; 만약, “stop”이 선택되면, 잔여의 이온원내의 이온들은 더 이상 진행하지 않을 것이지만(시간이 절약되지만), 반면에 중성입자는 진행을 계속할 것이다; 만약, “trace”를 선택하면, 잔여 이온들은 휨 자석에 의하여 굴절이 될 것이다.
- account of re-ionization ON/OFF; 만약, “ON”이 선택되면, 위에서 설명한 바와 같이 중성빔은 단계적으로 전류를 상실할 것이며, 만약, “OFF”가 선택되면, 이온화 영향이 고려되지 않을 것이다.
- stop/trace re-ionized particles; 이 선택기능은 “account of re-ionization”이 “ON” 상태일 때에만 기능을 한다; 만약, “stop”이 선택되면, 재전리하는 입자는 움직이지 않을 것이다; 만약, “trace”가 선택이 되면, 이온들은 중성빔에 의하여 손실되는 전류를 수반하면서 계속해서 진행을 하게 될 것이다(더 많은 시간이 소요된다).
- stray field ON/OFF; 이 선택기능은 이탈 자기장 ON/OFF를 선택하게 한다(“자기장”을 참조); 다른 존재하는 자기장은 (만약 있다고 하여도) 고려되지 않을 것이다.
- Calorimeter Open/Close; 이 선택기능은 열량계를 상/하로 움직이게 한다.

(라) BTR 단축 설명서 (Short Manual)

실행전에 필요한 모든 입력화일이 BTR과 동일한 폴더내에 위치하고 있는지를 확인하여야 한다. 이 파일들은 다음과 같다:

- a) Arrmag.txt - 휨자석의 자기장,
- b) GasKstar.txt - NBL에 따른 기체 밀도 분포,
- c) MFstar - 토카막 주위의 이탈 자기장 분포.

BTR.exe를 실행할 때에는 그림 3.1-221과 같은 화면이 나타나야 한다.

- a) 상단 좌측-“MainView”로 불리는 내부 윈도우,
- b) 하단 좌측-“DataView”,
- c) 상단 우측-“LoadView”,
- d) 하단 우측-“GraphView”이다.

MainView 상에는 NBL의 Plan view와 Side view가 있다. 반면에, 프로그램이 시작된 후에는 기체밀도와 이탈 자기장 분포(만약, BTR이 읽어들이며, 유지하고 있다면)를 나타낼 것이다.

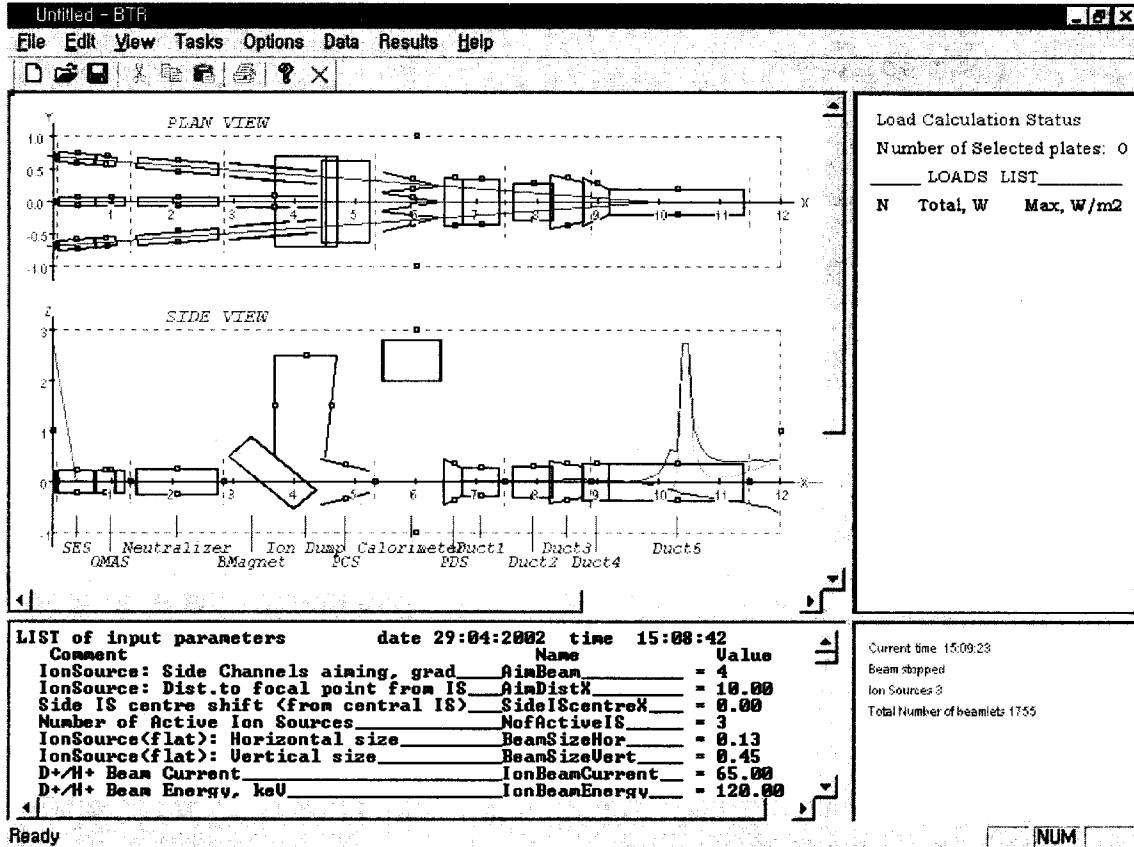


그림 3-1-221 BTR 프로그램의 실행 초기 화면

(라)-1. 가장 일반적인 실행 순서

BTR에 어느 정도 익숙해지면, 다음의 지시를 따르도록 한다(MB는 마우스 단추).

- 적절한 Task를 선택하고, 해석을 위한 Options(Toolbar)을 지정한다. - 그렇지 않으면 미지정(default)을 받아들인다.
- Configuration Data (DataView)를 보면서, 바꾸고 Update시킨다. - 그렇지 않으면 미지정(default)을 받아들인다.
- 빔을 Emit 한다(오른쪽 MB).
- 빔이 진행되는 동안을 기다리거나, 아니면 도중에 손으로 Stop을 누른다 (Toolbar 또는 오른쪽 MB).
- Load results를 통하여 결과를 확인한다(이전에 선택한 플레이트들이 실제로 전력을 받아들였는지 여부). - 왼쪽 MB로 플레이트를 선택하고, 오른쪽 MB로 "Properties" 또는 "Load"를 선택.

- 첫 번째 단계로 Return 하고, 다시 실행을 수행하거나, 프로그램을 종료(Exit)시킨다.

(라)-2. 프로그램의 시작

- MainView 영역에서 오른쪽 마우스 단추를 누른다. - Pop-up 메뉴가 나타나면, 메뉴로부터 "Emit"를 선택한다(아래 그림 참조).
- BTR이 ".....Continue anyway?"라고 질문을 할 것이다. - "YES"를 누른다.
- 계산은 미지정 변수들과 선택기능들을 가지고 시작을 할 것이다; 실행을 멈추게 하기 위해서는 Toolbar위에서 왼쪽 마우스 단추를 누르거나, Pop-up 메뉴를 보기 위해 오른쪽 마우스 단추를 누른 후, "STOP"을 선택한다.

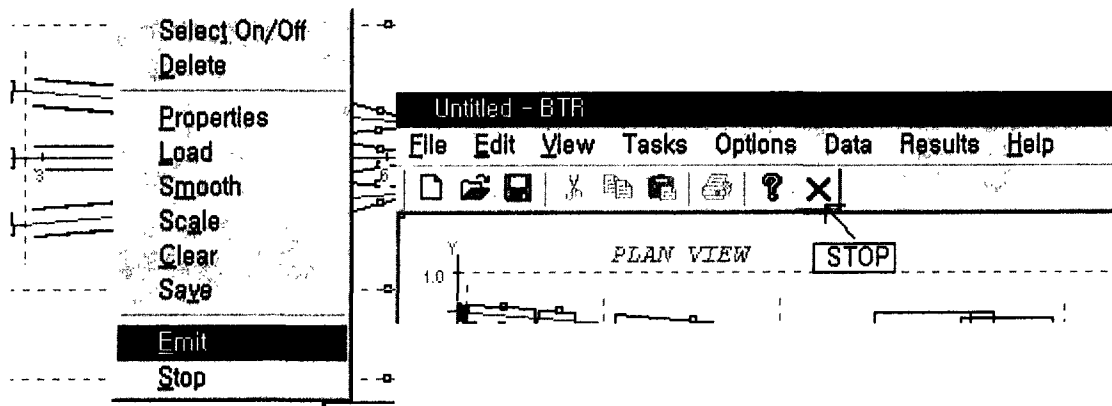


그림 3-1-222 BTR 프로그램의 시작과 정지 선택 화면

다음으로는, 주 메뉴(Toolbar 상단)로부터 "Option"을 선택한다. 이것들은 선택이 가능하며, 빔 투사를 다시 시작할 수 있다. 빔에 대한 몇 번의 시도 이후에는 전력인가 계산을 위하여 몇 개의 플레이트(적어도 한 개 이상)를 선택하고자 할 것이다. 이를 수행하기 위해서는:

- MainView상의 각각의 플레이트들은 선택을 위하여 작은 사각형을 가지고 있음에 주의한다. - 주요 점들(hot-points)임;
- MainView를 따라서 마우스를 이동하며, 이들 주요 점들내에서 커서가 십자형으로 바뀌는 것에 주의한다;
- 선택하고자 하는 주요 점에서 이동을 멈추고 외쪽 마우스 단추를 누른다. - 플레이트는 적색으로 바뀐다(지정됨); (만약, 반응이 없으면 재시도를 할 수 있다);
- 플레이트가 지정이 되면, 아무데서나(MainView 상에서) 오른쪽 마우스 단추를 누른 후 "Select"를 선택한다; 이후에, 플레이트는 전력을 받아들일 준

비가 된 것이다;

- 만약, 플레이트의 선택을 취소하고자 한다면, 동일한 동작을 반복한다.

전력인가를 받아들이고자 하는 만큼의 플레이트를 선택할 수 있다. 단지 하나의 플레이트가 동작중(적색)이면 나머지의 모든 전력인가 플레이트들은 보라색이 됨에 주의한다. 이는 만약 오른쪽 마우스 단추를 다시 누르면 다음의 메뉴들을 선택할 수 있음을 의미한다: Select, Delete, Properties, Load, Smooth, Scale, Clear, Save.

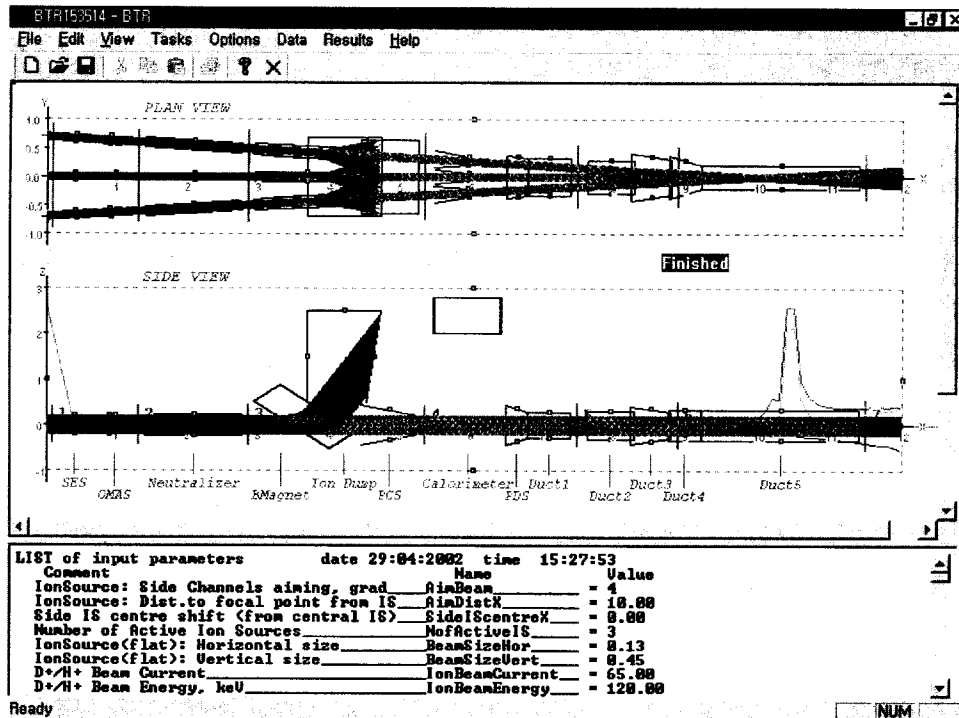


그림 3-1-223 BTR 프로그램의 수행이 완료된 화면

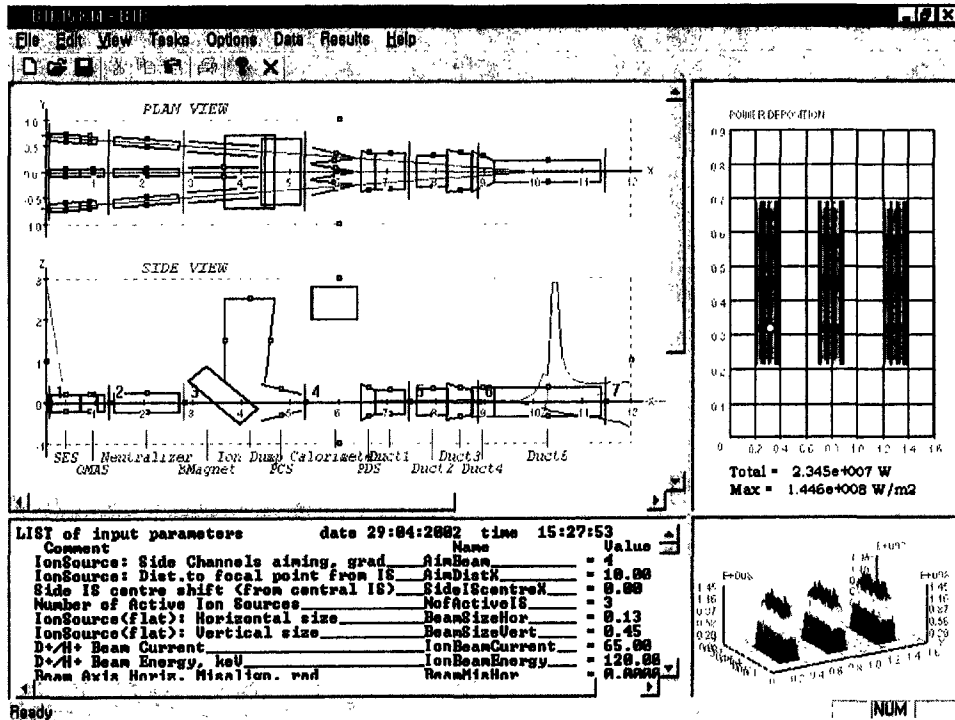


그림 3-1-224 BTR 프로그램의 결과 출력 화면(우측의 상·하 화면)

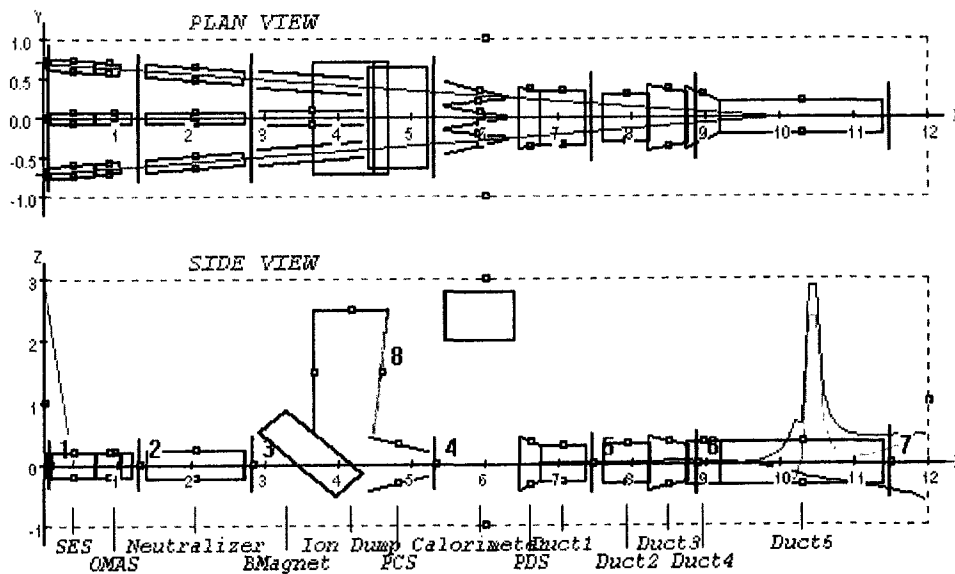


그림 3-1-225 플레이트를 선택한 상태의 화면

그리고, 동작중인 플레이트에 대한 결과를 확인한다. DataView는 Configuration data를 포함하고 있다. 이들의 모든 것은 가변이다. names는 바꾸지 말아야 하며,

등호(=)는 유지해야 한다. 그렇지 않으면 수정한 것이 인식되지 않는다(단지, 에러 라인이 된다). 그 리스트의 형태는 다음과 같으며, 모든 단위는 특별한 언급이 없으면 MKS이다. 데이터를 수정한 후에 바뀐 데이터의 효과를 얻기 위해서는 반드시 주 메뉴로부터 "Data/Update"를 선택하여야만 한다. Update 절차 이후에는 모든 플레이트들이 인가 계산을 위하여 선택이 해제된다. 선택을 위해서는 선택절차를 반복해야 한다. 선택을 쉽고 빠르게 하기 위하여 왼쪽 마우스 단추를 두 번 누른다. - 모든 주요 점들이 붉게 변하며, 주요-점 위에서 왼쪽 마우스 단추를 누른다; 이것은 인가 계산을 위하여 플레이트를 선택하는 또 다른 방법이다. 선택된 플레이트들은 미지정 단계인 LoadStepX, LoadStepY(Configuration Data 참조)를 가지고 단위 셀을 담당하게 된다. 만약, 몇몇의 플레이트들에 대하여 이 단계들을 변화시키고자 한다면:

- 선택을 하고(왼쪽 마우스로);
- Pop-up 메뉴를 위하여 오른쪽 마우스를 누르고;
- "Scale"을 선택하며;
- dialog가 나타나면서 단계에 대한 가변을 요구할 것이다.

이 과정은 선택된 플레이트상의 모든 인가 데이터를 지울 것이다(비록, 이미 어떠한 인가된 전력이 존재하더라도). 일부의 데이터를 바꾸고(새로이 지정하고) 플레이트를 선택했으면, 빔을 다시 방출하도록 한다. 계산이 완료된 후에(소리가 난다)나 사용자에게 의하여 멈추어진 경우에 인가된 전력은 각각의 선택된 플레이트상에서 관찰될 수 있다; 반드시 동작중에 있어야 하며, Pop-up 메뉴에서 "Load"를 선택하여야 한다 - 그림을 보기 위하여 또는 "Properties" - 인가 정보를 보기 위하여. 다음의 그림은 인가 계산의 한 예를 보여준다(변경된 변수들이 나타난다).

Untitled - BTR

File Edit View Tasks Options Data Results Help

LIST of input parameters date 29:04:2002 time 16:11:48

Comment	Name	Value
IonSource: Side Channels aiming, grad	AimBeam	= 4
IonSource: Dist.to focal point from IS	AimDistX	= 10.00
Side IS centre shift (from central IS)	SideIScentreX	= 0.00
Number of Active Ion Sources	NofActiveIS	= 3
IonSource(flat): Horizontal size	BeamSizeHor	= 0.13
IonSource(flat): Vertical size	BeamSizeVert	= 0.45
D+/H+ Beam Current	IonBeamCurrent	= 65.00
D+/H+ Beam Energy, keV	IonBeamEnergy	= 120.00
Beam Axis Horiz. Misalign, rad	BeamMisHor	= 0.0000e+000
Beam Axis Vert. Misalign, rad	BeamMisVert	= 0.0000e+000
IonSource(flat): Ny of beamlets	NofBeamletsY	= 13
IonSource(flat): Nz of beamlets	NofBeamletsZ	= 45
IonSource structure: 0-flat, 1-real	ISourceType	= 0
IonSource(real): tilting angle, deg	TiltAngle	= 1.00
Ion Source Particles: 1 - H+, 2 - D+	IonSortType	= 2
Neutralised part of H+/D+ current	NeutrPart	= 0.50
TimeStep for H+/D+	IStepPos	= 1.0000e-008
TimeStep for neutrals	IStepNeu	= 3.0000e-008
Reionisation Start	ReionXmin	= 3.00
Reionisation End	ReionXmax	= 11.40
Stray Field Region Start	BstrayXmin	= 5.00
Stray Field Region End	BstrayXmax	= 12.00
Magnet Centre position	MagnetX	= 3.82
Magnet Coil Current	MagnetCurr	= 900
Beamlet: N of Polar groups	PolarNumber	= 0
Beamlet: N of Azimuth groups	AzimNumber	= 0
Beamlet: Groups Type (0-curr 1-angle)	DecilType	= 1
Beamlet: Horizontal Divergence	BeamDivergHor	= 1.7000e-002
Beamlet: Vertical Divergence	BeamDivergVert	= 1.7000e-002
Load Calc. Default StepX	LoadStepX	= 0.02
Load Calc. Default StepY	LoadStepY	= 0.02
SEScrapper Entry coord	SESXmin	= 0.10
SEScrapper Exit coord	SESXmax	= 0.70
SEScrapper HalfWidth	SESHor	= 0.07
SEScrapper HalfHeight	SESVert	= 0.23
SideCh SEScrapper Entry coord	SESXmin	= 0.10
SideCh SEScrapper Exit coord	SESXmax	= 0.70
SideCh SEScrapper HalfWidth	SESHor	= 0.07
OMA Scrapper Entry coord	OMASXmin	= 0.72
OMA Scrapper Exit coord	OMASXmax	= 1.20

Ready

NUM

Stray Field Region Start	BstrayXmin	= 5.00
Stray Field Region End	BstrayXmax	= 12.00
Magnet Centre position	MagnetX	= 3.82
Magnet Coil Current	MagnetCurr	= 900
Beamlet: N of Polar groups	PolarNumber	= 0
Beamlet: N of Azimuth groups	AzimNumber	= 0
Beamlet: Groups Type (0-curr 1-angle)	DecilType	= 1
Beamlet: Horizontal Divergence	BeamDivergHor	= 1.7000e-002
Beamlet: Vertical Divergence	BeamDivergVert	= 1.7000e-002
Load Calc. Default StepX	LoadStepX	= 0.02
Load Calc. Default StepY	LoadStepY	= 0.02

그림 3-1-226 Configuration Data 화면

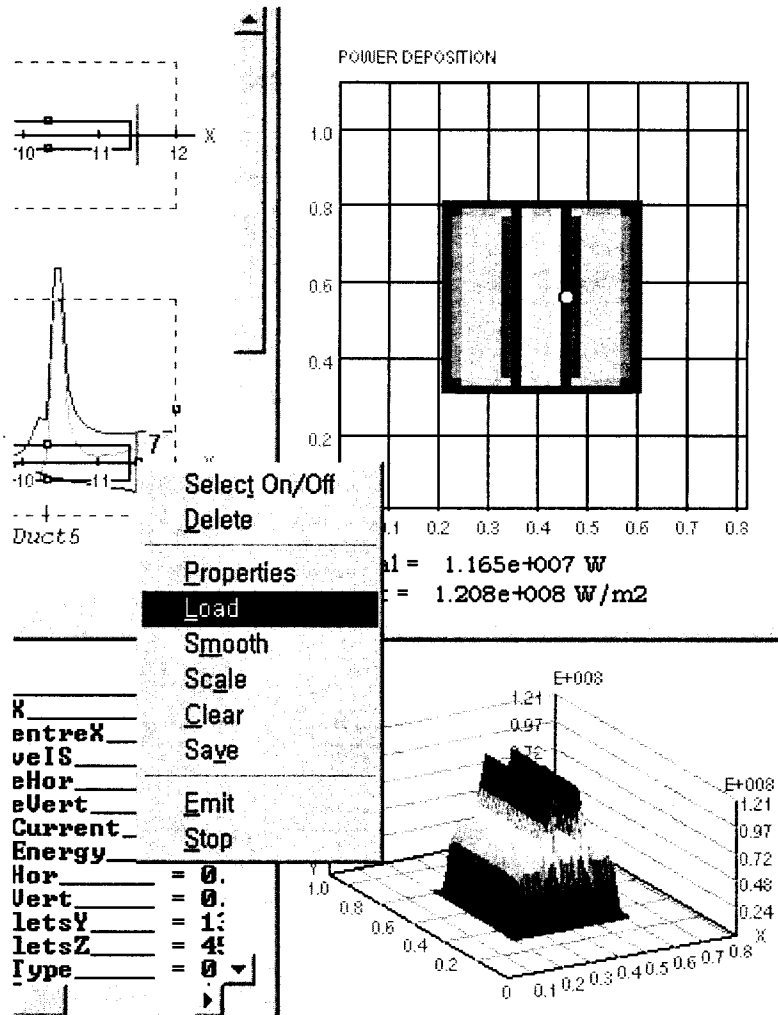


그림 3-1-227 인가 계산의 한 예(변경된 변수들이 포함됨)

(마) 부록 (Appendix)

- 계산을 위한 BTR 시스템 - MKS 단위계(특별히 언급하는 경우에는 입력데이터에 CGS 단위를 지정할 수 있다)
- BTR 좌표계는 NBL과 연결이 되어 있다.
 - a) X - NBL 길이에 따르는;
 - b) Y - 수평 축, 이온원 후면에서 볼 때의 좌측으로 향하는;
 - c) Z - 수직 축, 위로 향하는;
 - d) 중앙의 이온원 출구 그리드 중심점에서 $X=Y=Z=0$ 이다.

(바) NBL 해석에 대한 견본 결과(sample results)

(바)-1. 중성 빔 전달 (Transmission)

(바)-1.1. 목적

- 주어진 NBL(기본 구조)에 대한 중성빔의 기하학적(geometrical) 전달 규정
- 빔 수송에 대한 잔여(remnant) 자기장의 영향 평가
- NBL 성분들에 대한 직접적인 열 부하와 최대치 확인
- NB 자취 결과(NBL 출구 윈도우에서) 획득

(바)-1.2. 입력 및 선택 기능

- 기본 구조 (미지정 데이터 세트)
- Real ion source (4 segments, tilting-1 deg)
- D+ ion beam, E=120 keV, div=1 grad(in both direction)
- "Thin" neutralization model
- Stop ion species after neutralization
- No re-ionization
- Stray magnetic field switched OFF
- Calorimeter in Open position

(바)-1.3. 결과 및 결론

중성빔의 기하학적인 전달은 주입되는 중성 전력과 중성화된 빔전력 사이의 비로써 정의되며,

$$GBTr = NP_{inj} / (IP_{accel} * N_{eff}).$$

여기서, NP_{inj} [W]는 NBL 출구에서의 중성빔 전력, IP_{accel} [W]는 이온원 빔 전력, N_{eff} 는 중성화 효율(각각의 이온 종류의 양을 고려하여 평균화시킨)이다. 계산의 첫 번째 세트는 어떠한 자기장도 존재하지 않는($B=0$) NBL과 일치한다. 두 번째 세트는 이온원으로부터 중성화장치 출구까지의 지역에 적용하며, 수직자장 $B_z=2$ G(잔여 자기장)에 대하여 수행된다. 보다 명확히 하기 위하여, 계산은 각각의 채널을 분리하여, 그리고 전체 시스템에 대하여 수행한다. 잔여 자기장의 영향은 이와 동일한 방법으로 조사한다. 그 결과는 다음의 표에서 보여주고 있다. 측면 채널에 대한 빔 전달을 개선하기 위하여 기본 구조는 최적화되어야 함을 확인 할 수 있다. 중성빔 수송에 대한 잔여 수직자장의 영향은 각각의 채널에 대하여 다르게 나타난다. 중수소 이온빔의 경우에, $B_z=2$ G에 의한 GBTr의 유효 감소는 5.5%이다. 수소빔의 경우에는, 영향이 보다 악화되며, 중앙채널에 대한 GBTr의 감소는 15.5%(80keV 일 때)이다. 보통(즉, ITER의 경우에), 이온원의 배열오차의 영향(빔 축의 비이상적인 집속)이 고려되어야 한다. 이 영향은 또한 부호에 민감하며, 이들 두 영향의 조합은

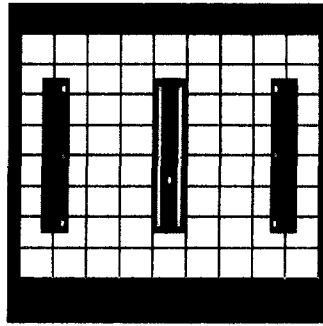
필수적으로 전달을 감소시키게 된다. 직접적인 중성빔 부하의 분포는 아래의 표에서 보여준다.

표 3-1-46 기하학적인 중성빔 전달, %(GBTr)

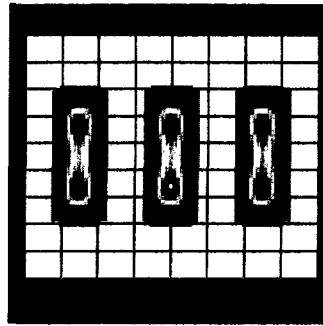
NBL Component	Total Load [W]	Peak Density [W/m ²]
Pre-Calorimeter Scraper	1.64E+5	1.7E+6
Pre-Duct Scraper	1.6E+5	1.3E+6
Duct 1	4.84E+3	2.4E+4
Duct 2	5.42E+4	8.7E+5
Duct 3	1.31E+4	3.0E+5
Duct 5	1.38E+6	2.4E+6

표 3-1-47 몇몇의 성분들에 대한 전력 부하와 침투 밀도(B=0, 3 channels, Ion source power=7.8 MW).

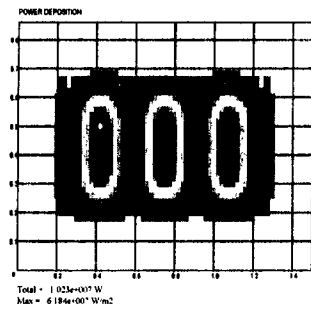
Channel	B=0	Bz = 2 G
Left (Y>0)	67.5	54
Central	82.5	77
Right (Y<0)	67.5	69
3 Channels	72.5	67



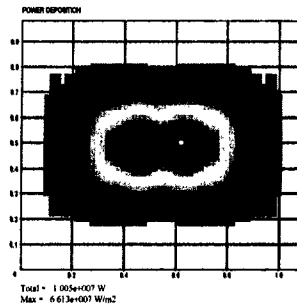
X=0.09 m



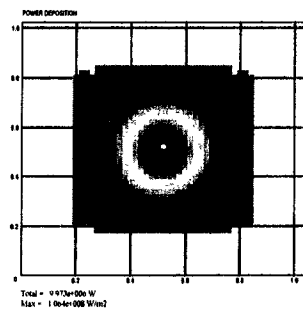
X=2.84 m



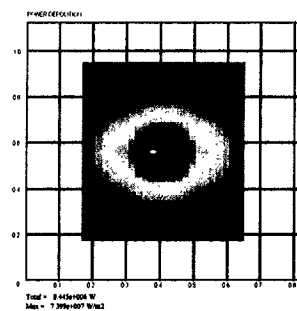
X=5.3 m



X=7.47 m



X=8.9 m



X=11.51 m(duct exit)

그림 3-1-228 NBL에 따른 다른 위치에서의 빔 부하 자취

(바)-2. 열량계 열 부하(Calorimeter Heat Load)

(바)-2.1. 목적

- 차단된 지역(NBL 기본구조)내의 열량계에 의하여 흡수되는 중성전력밀도 정의

(바)-2.2. 입력 및 선택 기능

- 기본 구조 (미지정 데이터 세트)
- Real ion source (4 segments, tilting-1 deg)
- D+ ion beam, E=120 keV, div=1 grad(in both direction)
- "Thin" neutralization model
- Stop ion species after neutralization
- No re-ionization
- Stray magnetic field switched OFF
- Calorimeter in Closed position

(바)-2.3. 결과 및 결론

중성 전력 흡착은 모든 열량계 플레이트(대칭적인 구조, B=0)에 대하여 유사하다. 그 부하의 도시는 다음과 같다. 침투 전력 밀도는 $\text{Max} < 1 \text{ kW/cm}^2$ 이다.

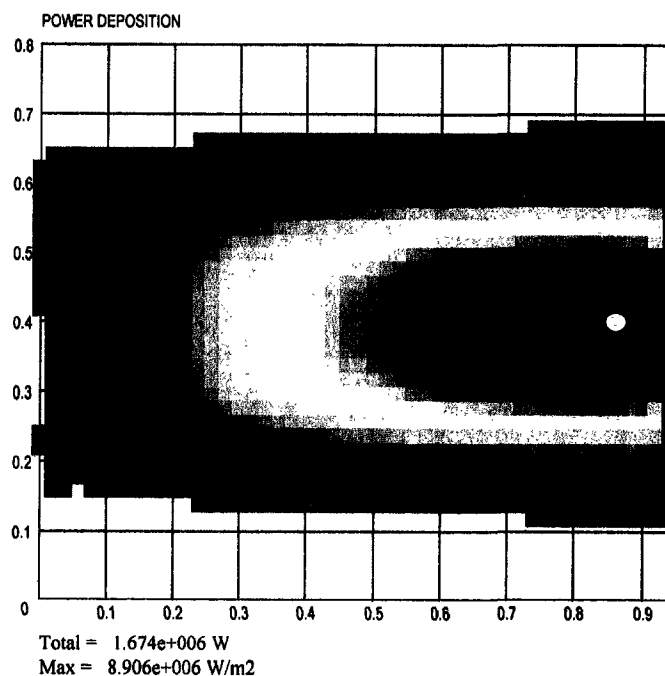


그림 3-1-229 열량계 전력 흡착 결과

(바)-3. 휨자석(2-D)에 의한 이온 굴절 (Deflection)

(바)-3.1. 목적

- 전 에너지 이온 덤프(full energy ion dump)에 인가되는 이온 전력 흡착 정의

(바)-3.2. 입력 및 선택 기능

- 기본 구조 (미지정 데이터 세트)
- Real ion source (4 segments, tilting-1 deg)
- D+ ion beam, E=120 keV, div=1 grad(in both direction)
- Ion source current 65 A
- "Thin" neutralization model; Neff=0.5
- Trace ions after neutralization
- Current in BM coils 900 A (each coil has 21 turns)
- No re-ionization
- Stray magnetic field switched OFF
- Calorimeter in Closed position

(바)-3.3. 결과 및 결론

전 에너지 이온 덤프에 인가되는 전력 흡착은 아래의 그림과 같다. 부하 분포 그림은 Beta 코드로 얻은 결과와는 약간 다르며, 이는 Real ion source tilting (Beta 코드에서는 고려되지 않음) 때문이다. 전 에너지 이온들이 이 계산에서 예상되는 것보다도 적은 전력(~80%)을 운반하므로, 구한 침투 밀도(0.99 kW/cm²)는 기대하는 실제 값보다 높다.

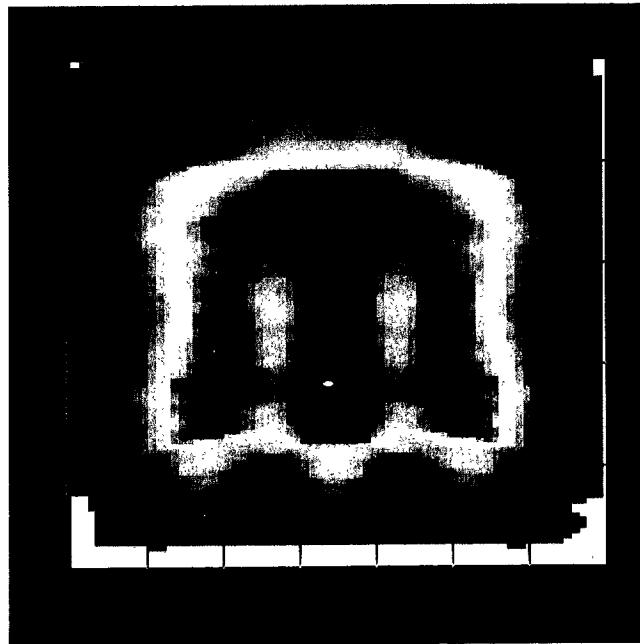


그림 3-1-230 전 에너지 이온 덤프의 전력 흡착 결과

(바)-4. 중성빔 재전리 (Re-ionization)

(바)-4.1. 목적

- NBL(기본 구조)에서 재전리에 의한 중성빔 전력손실 정의
- NBI 성분들에 의해 받아들여지는 재전리된 전력 부하 획득

(바)-4.2. 입력 및 선택 기능

- 기본 구조 (미지정 데이터 세트)
- Gas density and stray MF along the NBL
- Real ion source (4 segments, tilting-1 deg)
- D+ ion beam, E=120 keV
- "Thin" neutralization model
- Stop ion species after neutralization
- Current in BM coils 900 A (each coil has 21 turns)
- Re-ionized particles tracing
- Re-ionization average cross-section $1.0E-16 \text{ cm}^2$
- Stray magnetic field switched ON
- Calorimeter in Open position

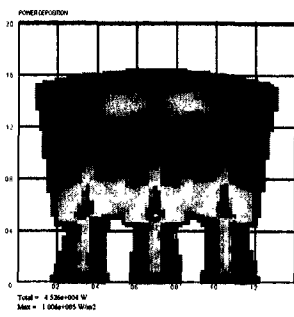
(바)-4.3. 결과 및 결론

주어진 기체 분포와 단면적에 대하여 재전리 손실은 약 1%이다. 만약, 실제의 단면적 값이 $1.0E-16 \text{ cm}^2$ 과 다르면, 손실 수준과 다른 결과들은 이에 대한 비례관계에 의하여 얻어지게 된다.

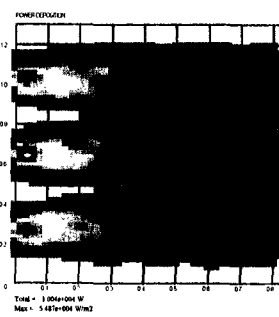
표 3-1-48 NBL 성분들에 대한 재전리 전력 부하와 침투 밀도(3 channels, Ion source power=7.8 MW).

NBL Component	Total Load [W]	Peak Density [W/m^2]
Full Energy Ion Dump	4.5E+4	1.0E+5
Pre-Calorimeter Scraper	1.0E+4	7.4E+4
Pre-Duct Scraper	1.6E+4	4.6E+5
Duct 1	6.4E+3	6.9E+4
Duct 2	3.3E+3	2.8E+4
Duct 3	2.3E+3	2.9E+4
Duct 4	2.2E+3	3.2E+4
Duct 5	8.6E+3	2.2E+5

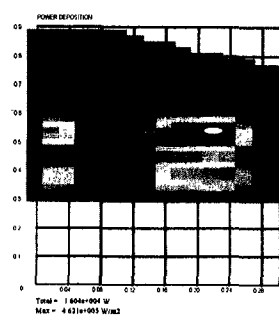
또, 다른(총 값) 표면들에 대하여 재전리된 부하 그림들은 다음과 같다.



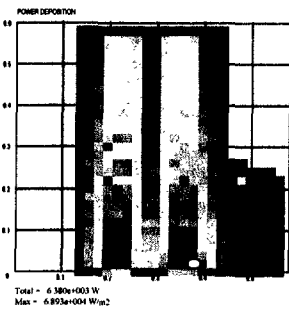
Full Energy Ion Dump
 Re-ionized power
 Directions of axes:
 Horizontal-along -Y
 Vertical-along +Z



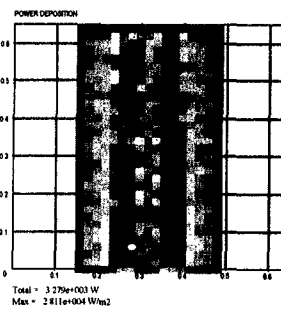
Pre-Calorimeter Scraper
 Top Plate
 Directions of axes:
 Horizontal-along beam
 Vertical-along +Y



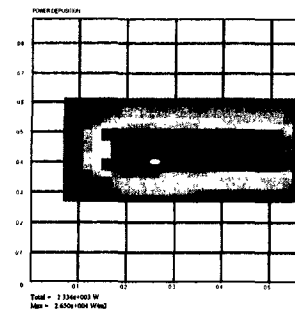
Pre-Duct Scraper
 Right Plate
 Directions of axes:
 Horizontal-along beam
 Vertical-along +Z



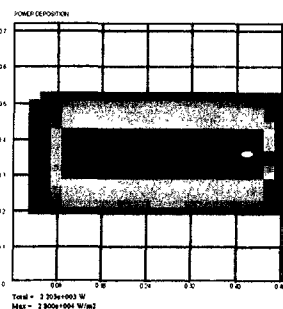
Duct 1
 Right Plate
 Directions of axes:
 Horizontal-along +Z
 Vertical-along beam



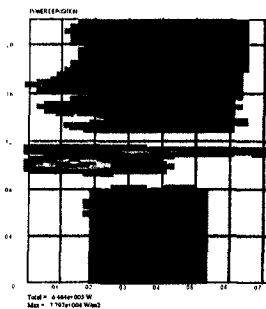
Duct 2
 Right Plate
 Directions of axes:
 Horizontal-along +Z
 Vertical-along beam



Duct 3
 Right Plate
 Directions of axes:
 Horizontal-along beam
 Vertical-along +Z



Duct 4
 Right Plate
 Directions of axes:
 Horizontal-along beam
 Vertical-along +Z



Duct 5
 Right Plate
 Directions of axes:
 Horizontal-along +Z
 Vertical-along beam

그림 3-1-231 NBL 성분들의 재전리가 고려된 전력 흡착 결과

(사) Beta-code development for Bending Magnet Design

(사)-1. 기능

- 빔(균일한 전력 분포)의 각 분산(angular divergence)
- 3 이온원 채널 포함
- 추가 플레이트(plate) 보충(저 에너지 덤프)
- 자석 데이터는 2-D 구조(무한대의 높이)를 유지하지만, 휨자석 사이(gap)의 서로 다른 자기장 값 부여 가능
- 휨 자석의 형상에 따른 자기장 분포가 입력 데이터로 사용 (주로, 현재 일반적으로 사용되고 있는 ANSYS 코드를 이용)

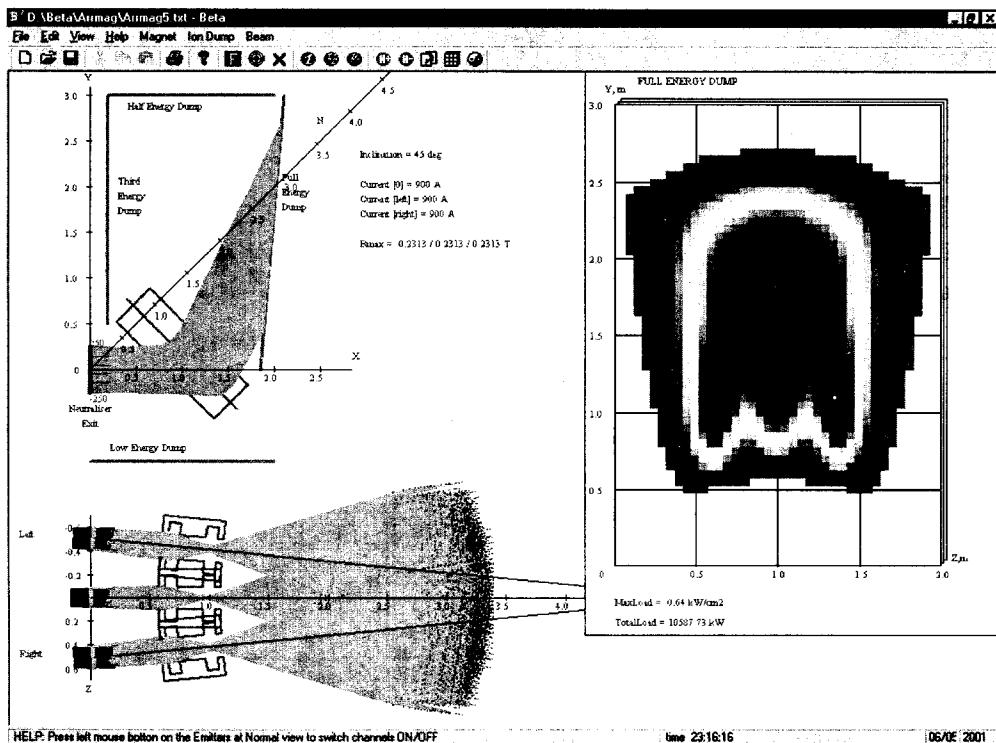


그림 3-1-232 Beta code 프로그램의 사용 예

(사)-2. ANSYS 코드에 의한 휨자석 자기장 계산

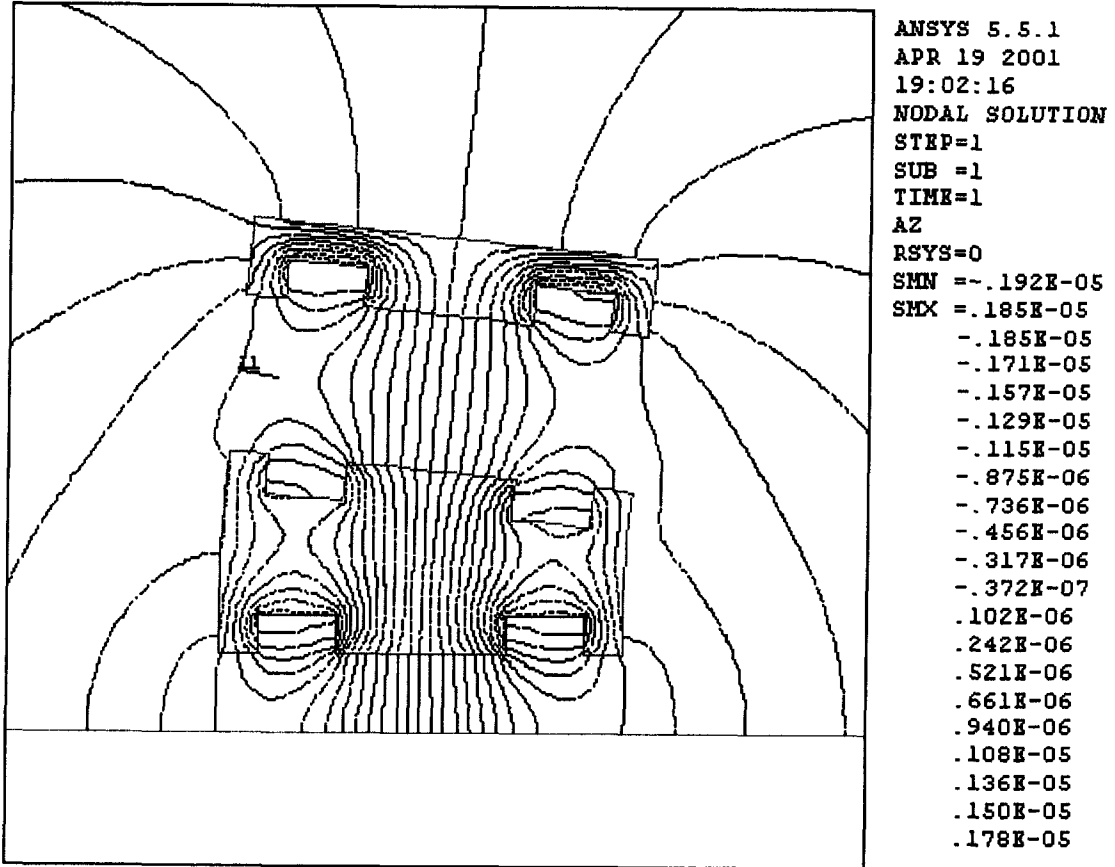


그림 3-1-233 ANSYS Code에 의한 등자력선 배열

```

ANSYS 5.5.1
APR 19 2001
19:06:34
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
BSUM      (AVG)
RSYS=0
PowerGraphics
EFACET=1
AVRES=Mat
SMN =.224E-07
SMX =.495E-04

```

□	.224E-07
□	.552E-05
□	.110E-04
□	.165E-04
□	.220E-04
□	.275E-04
□	.330E-04
□	.385E-04
□	.440E-04
□	.495E-04

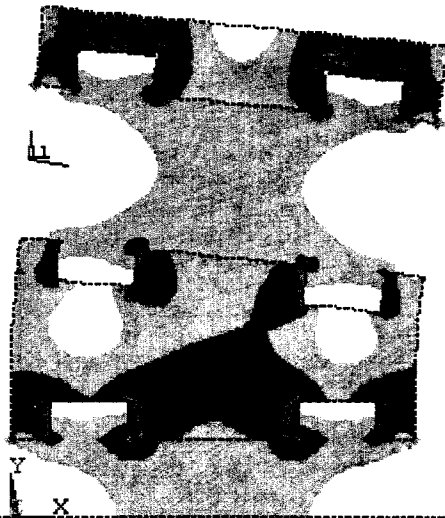


그림 3-1-234 ANSYS Code에 의한 자력선 색상 분포

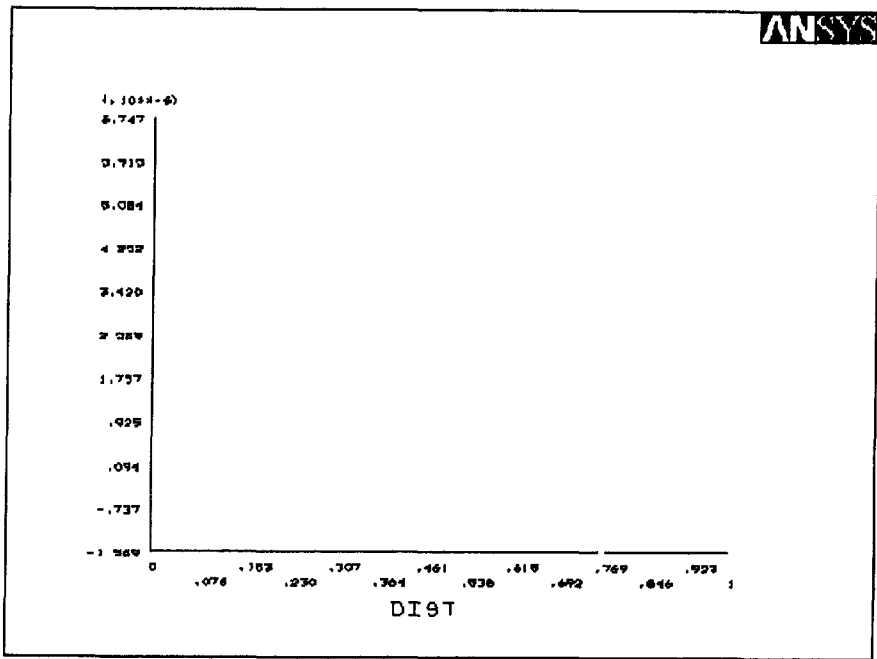
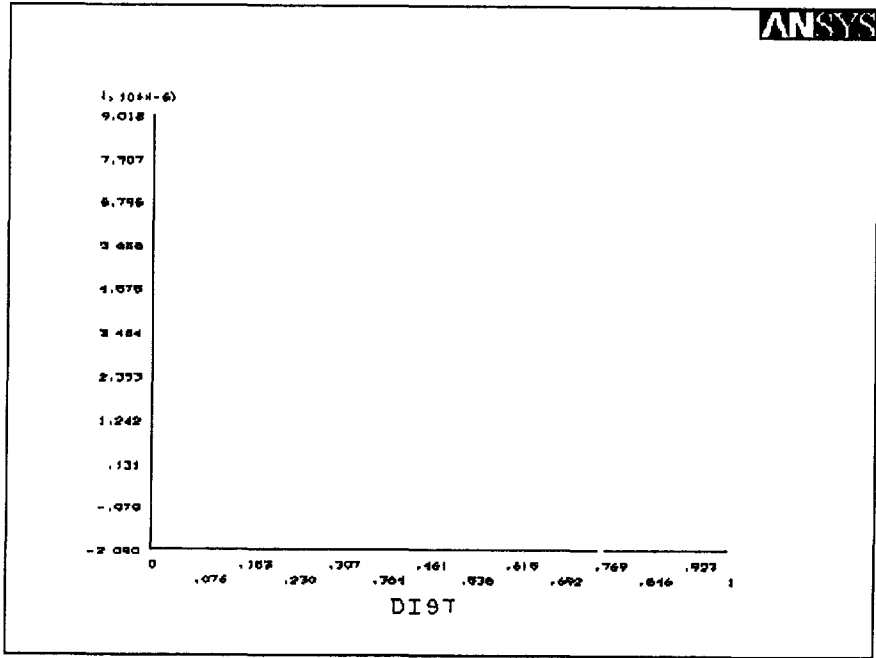


그림 3-1-235 ANSYS Code에 의한 자기장 분포 곡선

(3) KSTAR NB 장치의 크라이오 펌프 시스템

(가) 개요

KSTAR NBI의 한 빔라인은 세 개의 이온원에 의해 8 MW의 중성입자빔이 공급된다. 처음에 기체(수소 또는 중수소)가 주입되고 방전이 일어나면 일부(약 50%)는 전리되어 이온화하지만 나머지는 기체상태로 이온원을 빠져나가 시스템으로 유입된다. 만들어진 이온 중에 중성화실을 거치면서 중성빔으로 만들어진 것을 제외한 나머지는 이온덱스에 부딪혀 중성기체화 하는데 이들은 모두 압력을 상승시켜 고속 중성입자빔을 산란시킬 수 있으므로 시스템으로부터 가능한 한 빠른 시간 내에 제거하지 않으면 안 된다.

이온원에서 필요로 하는 기체유량이 매우 큰 만큼 제거되어야 할 양도 매우 커서 약 75 mbar · l/s에 이르고 10⁻⁵ mbar 대의 진공을 유지하기 위해서는 약 150만 l/s 정도의 배기속도를 가진 펌프가 필요하다. 이런 크기의 펌프는 외장형으로는 거의 불가능하고 내장형으로 특별 제작하지 않으면 안 된다. 이런 용량의 펌프후보로는 크라이오 펌프를 비롯하여, 티타늄 승화펌프(TSP)와 비증발형 흡착재(NEG) 펌프가 있지만 (참조 표 3-1-49) 진공성능, 유지보수의 편리성, 제작비용 등을 고려할 때 크라이오 펌프가 가장 유리하다.

크라이오 펌프는 극저온으로 냉각시킨 물체의 표면에 기체분자를 물리적으로 흡착하여 배기하는 펌프로 수소를 배기하는 극저온 냉각패널 부분과 이를 300 K 복사열로부터 보호하기 위해 패널을 덮고 있으면서 물 등 증기성 기체를 배기하는 열차폐로 이루어진다. 크라이오 펌프에는 크게 두 가지 종류가 있다. 하나는 4 K 액체헬륨을 사용하여 금속표면에 수소기체를 응축시키는 방식이고 또 하나는 냉동기를 사용하여 15 K까지 냉각시킨 활성탄에 수소를 흡착시키는 것이다. 표 3-1-49에는 두 방식의 장단점도 비교하고 있다.

표 3-1-49 크라이오 펌프, NEG 펌프, TSP 등의 비교.

	Pumping Speed	Pumping Capacity	Cryo Panel	Endurance	Cost	Maintenance
4K LHe	○	○	Mass transfer	○	\$1M/300W	Y
4K Cooler	○	△	conduction	○	¥13M/9W ×4	Y
15K Sorption [¶]	○	○	conduction	△	\$0.03M/14W ×20	Y [§]
NEG	△	○	-	◎	\$1K/500L/s ×4000	N
TSP	○	○	-	○	\$500/2000L/s ×1000	Y

§ Expander seal/10000hr, Oil separator/30000hr

¶ 1st stage is supplied with GHe from the KSTAR LHe plant

KSTAR가 건설될 기초과학지원연구원(KBSI)에는 10 kW급 액체헬륨 제조 및 회수장치가 설치될 예정이므로, 최종적인 배기펌프 방식은 4 K 응축방식을 생각하고 있지만, NBI의 개발 및 제작을 맡고 있는 원자력연구소에는 현재 액체헬륨 시설이 없으므로, 장치 시험 중 임시로 사용할 15 K 흡착방식의 펌프를 만들어 성능을 조사하고 있다.

(나) 배기수요

KSTAR NBI가 120 keV 중성입자빔을 8 MW만큼 공급하기 위해서는 이온원에 공급되는 수소기체를 75 mbar · ℓ/s 정도로 계속 주입해야 한다. 크라이오 펌프의 설계에는 목표 기체배출량을 90 mbar · ℓ/s로 잡았다. 플라즈마 운전시간을 최대 300초라고 할 때 필요한 크라이오펌프의 용량을 정리하면 표 3.1.3.사(3)-2와 같다.

표 3-1-50 NBI 배기펌프의 설계규격.

Pumping Speed	$1.5 \times 10^6 \ell / s$
Operating Pressure	$10^{-5} \sim 10^{-6} \text{ mbar}$
Normal Throughput	$\sim 75 \text{ mbar} \cdot \ell / s$
Design Throughput	$90 \text{ mbar} \cdot \ell / s$
Pumping Area	24 m^2
Min. Pumping Capacity	$90 \text{ mbar} \cdot \ell / s \times 300 \text{ s} = 27000 \text{ mbar} \cdot \ell$
Unit Pumping Speed	$62500 \ell / s \cdot \text{m}^2$
Min. Throught	$3750 \text{ mbar} \cdot \text{cc} / s \cdot \text{m}^2$
Min. Unit Capacity	$1125000 \text{ mbar} \cdot \text{cc} / \text{m}^2$

(다) 열부하 및 냉매 소모량

(다)-1. 4 K 방식

4 K 응축 방식의 펌프는 60 K 기체헬륨 또는 77 K 액체질소로 냉각시킨 70~100 K 열차폐체 안에 3.7 K 액체헬륨으로 냉각시킨 극저온 냉각패널이 위치한다. 어떤 배기방식을 사용하든 NBI 용기의 빔수송로 양쪽 벽을 다 사용해야 필요한 배기면적을 확보할 수 있다. 제작의 편리를 위해 그림 3.1.3.사(3)-1처럼 한 쪽 벽당 크라이오 펌프 두 개를 설치하고, 각각의 폭과 길이를 2 m × 3 m라고 할 때의 열부하를 계산하기로 한다. 펌프의 재료는 알루미늄 및 합금을 사용하는 것으로 가정했다.

크라이오 펌프의 치수를 표 3.1.3.사(3)-3에 정리했으며 표 3.1.3.사(3)-4와 5는 열부하 계산시 필요한 자료로 알루미늄 합금과 헬륨의 열적 물성을 요약한 것이다. 열부하는 크라이오 펌프 한 대당 값으로 구했다.

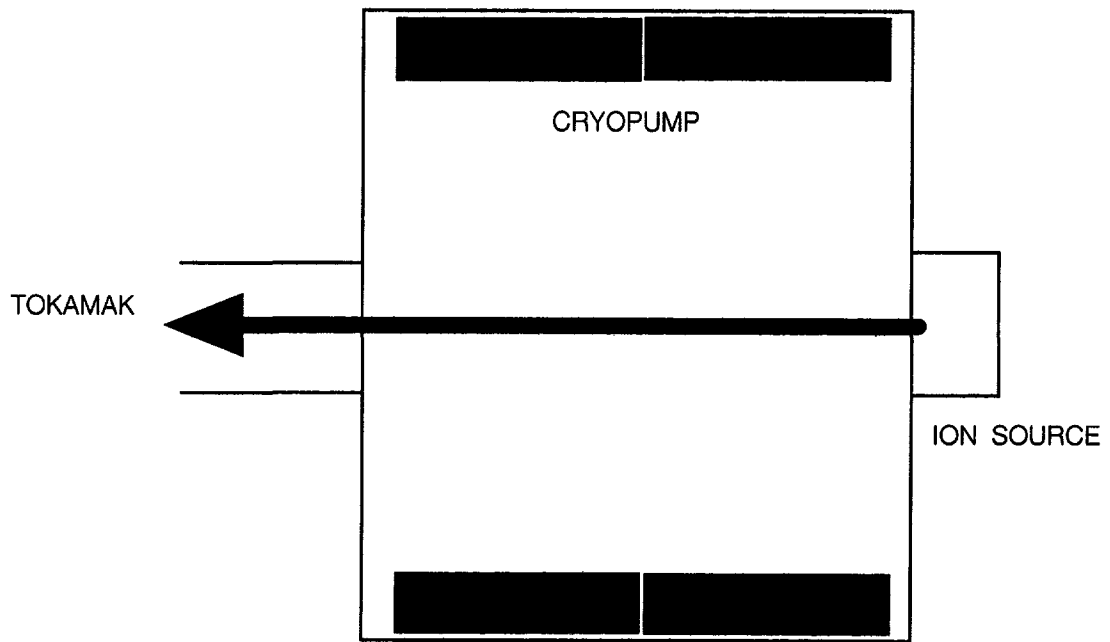


그림 3-1-236 Schematic diagram of KSTAR NBI system

☒ 3-1-51 Dimensional parameters of cryopump

for 1 pump		Area [m ²]	Weight [kg]	Emissivity	Temp. [K]
Thermal Shield	Blind	2 × 3 + 2 × [(2+3) × 0.15] = 7.5	190	0.1	70
	Baffle	2 × 3 = 6	170	0.9	70
	Total	13.5	360		
Cryo Panel		2 × (1.8 × 2.8) = 10	30	0.1	4
Wall		150		0.2	300/500

☒ 3-1-52 Thermodynamic properties of Aluminum

	300K-70K	70K-4K
ρ Electrical Resistivity [10 ⁻⁸ Ω · m]	2.8-0.2 (1.5)	0.2-0.105 (0.15)
k Thermal Conductivity [W/m · K]	230-300 (265)	300-60 (180)
C _p Specific Heat [J/g · K]	0.9-0.28	0.28-0.002
$\int C_p dT$ Integrated Specific Heat [J/g]	163	7.2

(###) means average.

표 3-1-53 Thermodynamic properties of Helium

	20 bar 100K-60K	1 bar 13.7K-4.22K	saturated 4.22K-3.7K (1 atm-0.59 atm)	saturated 3.8K-3.7K (0.659 atm)-(0.59 atm)
C_{pHe} Specific Heat [J/g · K]	5.2-5.3 (5.25)	5.3-4.98 (4.76)	liquid: 4.98-3.47 (4.2) gas: 9.78-7.66 (8.72)	liquid: 3.68-3.47 (3.575) gas: 7.94-7.66 (7.8)
λ Vaporization Heat [J/g]			20.8-22.95 (21.85)	22.7-22.95 (22.8)

(###) means average.

(다)-1.1. 70K 열차폐

(다)-1.1.1. 열부하

1) 벽으로부터의 300 K 복사열

벽(내부 부품들의 표면적 포함)의 면적이 열차폐체의 면적보다 매우 클 때, 즉 $A_{wall} \gg A_{shield}$ 일 때, 벽으로부터 배플을 포함해서 열차폐체로의 열유속은 다음처럼 주어진다.

$$q = 5.67 \times 10^{-8} \epsilon_{shield} A_{shield} (T_{wall}^4 - T_{shield}^4).$$

표 1에서 적절한 값을 이 식에 대입하면 보통 열차폐체에는 344 W, 흑화처리 되어 있는 배플에는 2480 W의 복사열이 가해지는 것으로 계산된다.

2) 고온부품으로부터의 500 K 복사열

NBI 부품 중에는 이온 또는 중성빔과의 충돌에 의해 온도가 많이 올라가는 것들이 있다. 물론 필요한 부분에는 냉각을 해 주지만 표면온도가 200 °C 이상 오르는 것을 피할 수는 없다. 그러나 이런 고온부분은 결국 빔라인에 근접한 부분이고 또 빔축을 바라보는 방향으로 위치하므로 크라이오 펌프로 직접 복사열이 전달되는 힘들다. 이를 정량적으로 정확하게 추산하기는 힘들지만 500 K 복사열의 1/100 이 열차폐체에 닿는다고 가정하면 190 W에 이른다.

3) 플라즈마 방사에너지

NBI 용기는 중성입자빔을 토카막 용기 안으로 쏘아 넣기 위해 빔 덕트로 연결되어 있다. 토카막 용기 내의 플라즈마는 온도에 따라 약 20~40% 정도의 에너지를 radiation으로 방출하는데 이 중 일부는 빔 덕트를 통해 NBI 용기 내로 들어와 크

라이오 펌프에 도달할 수 있다.

KSTAR의 총 플라즈마 출력 20 MW 중 방사율과 기하학적인 분산을 고려하면 약 1/270 정도가 NBI 빔 덕트에 들어오고 이 중 약 1/10이 용기 내로 들어오며 벽과 열차폐체가 면적비 만큼 나눠 가진다면 열차폐체에 들어오는 복사열은 650 W로 계산된다.

4) 기체분자에 의한 열전도

기체분자들을 매개체로 한 열전도에 의한 열유속은 다음과 같이 표현된다.

$$q = 100 \Lambda P (T_{wall} - T_{shield}) A_{shield}$$

$$\Lambda = 18.189 \alpha_{eff} \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \frac{1}{\sqrt{MT}}$$

$$T = \alpha_{eff} \sqrt{\left\{ T_1 T_2 + \left(\frac{T_1}{\alpha_2} + \frac{T_2}{\alpha_1} \right) \left[\left(\frac{T_1}{\alpha_2} + \frac{T_2}{\alpha_1} \right) - (T_1 + T_2) \right] \right\}}$$

이때 $\alpha_{eff} = \alpha_1 \alpha_2 / (\alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_1 \alpha_2)$ 로 열전달 유효적용계수다. 보통 $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.8$, $\alpha_{eff} = 0.67$. 이 식에 수소기체를 가정하여 $P = 10^5$ mbar, $T_{wall} = 300$ K, $T_{shield} = 70$ K, $T = 169$ K, $M = 2$, $\gamma = 1.4$ 를 대입하면 열손실은 14.8 W로 계산된다..

5) 고속 중성 반사입자

이온덤프 등에 부딪힌 고속이온은 대부분은 재료의 온도와 평형을 이루는 상태에서 중성기체화 하여 공간으로 방출되지만 일부는 마치 중성화실에서 생성되는 중성빔이 기체분자와 충돌하는 과정에서 일어나는 것과 마찬가지로 금속과의 충돌과정에서 고속 이온의 에너지는 그대로 갖고 단지 전하만 얻어 고속중성기체로 바뀌어 방출되는 경우도 있다. 구리의 경우 120 keV 이온에 대해 고속 중성기체 분자로 방출되는 에너지 수율은 약 5×10^{-4} (입사각도의 함수, 그림 3.1.3.사(3)-2 참조)이고 반사되는 입자의 평균에너지는 입사 에너지의 약 30%로 알려져 있다. 따라서 총 방출에너지는 이온빔 부하 15 MW 중 7.5 kW에 이른다. 이온덤프에 배플을 달아 기체분자들이 직접 크라이오 펌프로 날아올 수 없도록 하면 대부분의 고속입자들을 차단할 수 있으리라고 예상된다. 배플을 투과하는 확률을 0.01이라고 하면 열유속은 75 W로 계산된다.

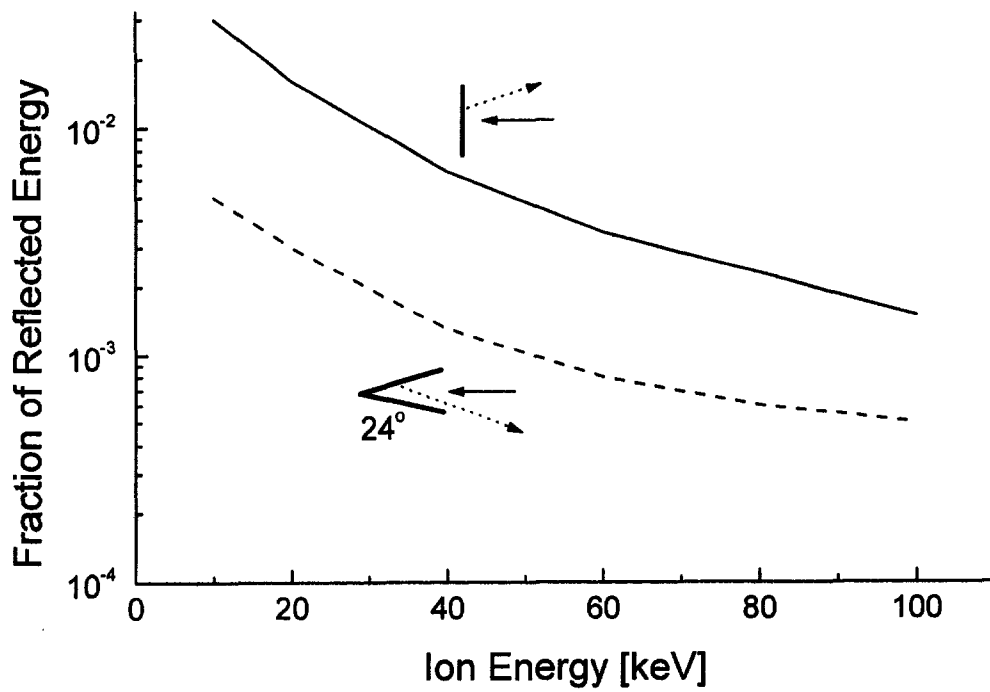


그림 3-1-237 Fraction of reflected energy through recoil particles on the Cu target

6) 유도전류

토카막 운전 중 플라즈마 붕괴가 빈번히 일어나는데 이때 주변 구조물에는 와전류가 유기되기 마련이다. 크라이오 펌프의 구조물에도 다소간 전류가 유기되는데 플라즈마로부터의 거리와 놓여 있는 방향에 따라 그 값이 결정된다. 열차폐체의 상하판을 제외하면 자장의 방향과 거의 평행하기 때문에 유기전류를 무시할 수 있다.

플라즈마 붕괴 조건은 2 MA의 플라즈마 전류가 0.1초 동안에 사라지는 것으로 가정했다. 원형 코일로부터 멀리 떨어진(직경의 몇 배) 곳에서의 자장은 다음과 같이 구해진다.

$$B_z = \frac{\mu_0 I A}{4\pi r^3}$$

만일, $A = \pi 1.8^2 \text{ m}^2$, $r = 9 \text{ m}$ 이라면 B_z 는 28 gauss로 계산된다. 이 유기전류에 의한 열의 발생은

$$q = \frac{1}{12} \frac{L d}{\rho} W^2 \dot{B}_z^2$$

로 표현된다. 이 식에 $L = 2 \text{ m}$, $d = 2.5 \text{ cm}$, $W = 15 \text{ cm}$, $\rho = 0.2 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$, $\dot{B}_z = 0.028 \text{ T/s}$ 를 대입하면 열의 발생은 상하판 합쳐 11 W가 된다.

7) 지지대를 통한 열전도

단면적이 A , 길이가 L 인 지지대를 통해 흐르는 열량은 다음과 같이 계산된다.

$$q = Ak \frac{T_1 - T_2}{L}$$

만일 $A = 78.5 \text{ cm}^2$ ($10 \text{ mm } \phi$), $L = 30 \text{ cm}$ 이면 티타늄 합금제(Ti-6Al-4V, $k = 7-3.2$ (ave. 5.1) $\text{W/m} \cdot \text{K}$) 봉 두 개로 펌프를 지탱하고 있을 때 열손실은 61.4 W가 된다. 현재까지 언급한 모든 열손실 항목을 정리하면 표 3.1.3.사(3)-6과 같다.

표 3-1-54 Summary of heat loads to the thermal shield.

	Source	Power
1	300K rad.	2824 W
2	500K rad.	190 W
3	plasma radiation	650 W
4	conduction through gas (10^{-5} mbar)	14.8 W
5	high temp. recoil neutrals	75 W
6	eddy current during plasma disruption	11 W
7	conduction through supports	61.4 W
	total	3826W

(다)-1.1.2. 70 K 열차폐체 냉각에 필요한 GHe 소모량

1) 냉각시

알루미늄 합금제 열차폐체가 300 K에서 70 K까지 변하는 동안 총 열량은 다음과 같다.

$$Q = M_{Al} \int_{70}^{300} C_p dT = 163 M_{Al} = 58.7 \text{ MJ}$$

만일 60 K 헬륨의 입출구 온도차가 40 K 라면 열차폐체를 70 K까지 냉각시키기 위해 소요되는 GHe의 양은 다음처럼 280 kg으로 구해진다.

$$M_{GHe} = \frac{Q}{C_{pGHe} \Delta T} = 58.7 \times 10^6 \div 5.25 \div 40 = 280000 \text{ [g]}$$

냉매의 유량 1 g/s 당 냉각시간은 78 시간이 걸린다.

2) 배기중

일단 70 K로 냉각된 열차폐체를 그 온도에서 유지하기 위해서는 열손실에 해당되는 양만큼을 계속 공급해 주지 않으면 안 된다.

$$\dot{M}_{He} = \frac{P}{C_{pGHe} \Delta T}$$

만일 이 단계에서 GHe의 입출구 온도상승을 10 K 이하로 유지하려고 한다면 다음과 같은 비례식을 얻을 수 있다. "GHe 유량 ~ 0.0188P g/s". 앞에서 구한 열부하 값 P=3826 W을 사용하면 GHe 유량은 72 g/s으로 계산된다.

(다)-1.2. 4K cryo-panel

(다)-1.2.1. 열부하

1) 70 K 벽으로부터의 복사열

극저온 패널에 가해지는 열부하는 다음처럼 구해진다.

$$q = 5.67 \times 10^{-8} \epsilon_{eff} A_{panel} (T_{shield/baffle}^4 - T_{panel}^4)$$

이때 $A_{panel} \sim A_{shield}$, $\epsilon_{eff} = \epsilon_{shield/baffle} \epsilon_{panel} / (\epsilon_{shield/baffle} + \epsilon_{panel} - \epsilon_{shield/baffle} \epsilon_{panel}) = 0.053$ (패널과 열차폐 사이) 또는 0.1(배플과 패널 사이)이 성립한다. 알려진 치수를 대입하면 극저온 패널이 열차폐로 받는 열부하는 0.36 W이고 배플로부터는 0.68 W의 열부하를 받는다.

2) 용기 벽으로부터의 300 K 복사열

광흡수율이 0.9인 chevrons(chevron)형 배플을 통과하는 300 K 적외선의 비율은 0.003이므로 (그림 3.1.3.사(3)-11 참조) 열부하는 $2500 \times 0.003 \times 0.1 = 0.75 \text{ W}$ 로 계산된다.

3) 500 K 복사열

300 K radiation과 같은 투과율 0.003을 적용하면 500 K 에 의한 열부하는 $190 \times 0.003 \times 0.1 = 0.06$ W로 계산된다.

4) 플라즈마 방사 에너지

역시 300 K radiation의 투과율과 같은 값으로 0.003을 적용하면 플라즈마 radiation에 의한 열부하는 $650 \times 0.003 \times 0.1 = 0.2$ W로 계산된다.

5) 기체분자에 의한 열전도

기체분자들을 통한 열전달은 다음처럼 표현된다.

$$q = 100 \Lambda P (T_{shield} - T_{panel}) A_{panel}$$

$$\Lambda = 18.189 \alpha_{eff} \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \frac{1}{\sqrt{MT}}$$

$$T = \alpha_{eff} \sqrt{\left[T_1 T_2 + \left(\frac{T_1}{\alpha_2} + \frac{T_2}{\alpha_1} \right) \left[\left(\frac{T_1}{\alpha_2} + \frac{T_2}{\alpha_1} \right) - (T_1 + T_2) \right] \right]}$$

이 식에 $A_{panel} = 5 \times 2 \text{ m}^2$, $P = 10^{-5} \text{ mbar}$, $T_{shield} = 70\text{K}$, $T_{panel} = 4\text{K}$, $T = 30\text{K}$, $\alpha_{eff} = 0.67$, $M = 2$, $\gamma = 1.4$ 를 대입하면 열부하가 6.2 W로 계산된다..

6) 응축열

기체분자가 응축하면 응축열이 발생한다. 수소의 응축열은 0.09 J/mbar.L이다. 극저온 패널에 응축되는 기체분자량은 $10^5 \text{ L/s.m}^2 \times 5 \text{ m}^2 \times 10^{-5} \text{ mbar} = 5 \text{ mbar.L/s}$ 이다. 수소의 배기로 인한 열부하는 $0.09 \times 5 = 0.45$ W으로 계산된다.

7) 고속 중성 반사입자

배플을 고속중성입자가 통과할 확률은 25% 전후이지만 투과한 입자가 가지는 에너지는 매우 낮아서 10^{-5} 대에 불과하다(그림 3-1-238참조), 따라서 고속 중성입자에 의한 열부하는 무시할 수 있다.

8) 유도전류

극저온 패널은 열차폐체에 의해 안전하게 둘러 쌓여져 있으므로 유기되는 전류의 양은 무시할 수 있다.

9) 지지대를 통한 열전도

단면적 A, 길이 L인 지지대를 통한 열손실은 $q = Ak \frac{T_{shield} - T_{panel}}{L}$ 로 주어진 다. 만일 $A = 78.5 \text{ cm}^2$, $L = 10 \text{ cm}$ 이고 지지대가 4 개의 GFRP($k = 0.35 - 0.11$ (ave. 0.23) W/m.K)로 이루어져 있다면 열부하가 4.8 W로 계산된다. 이상의 모든 열부하를 종합하여 정리하면 표 3.1.3.사(3)-4와 같다.

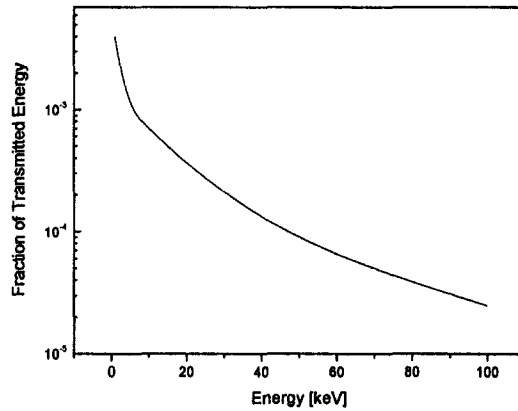


그림 3-1-238 Fraction of transmitted energy of recoil particles through 120 deg. chevron baffle

표 3-1-55 Summary of heat loads to the cryo-panel.

	Source	Power
1	70K rad.	1.04 W
2	300K rad.	0.75 W
3	500K rad.	0.06 W
4	plasma radiation	0.2 W
5	conduction through gas (10^{-5} mbar)	6.2 W
6	condensation heat	0.45 W
7	high energy neutrals	0 W
8	eddy current during plasma disruption	0 W
9	conduction through supports	4.8 W
	total	13.5 W

(다)-1.2.2. 4 K 패널 냉각을 위한 LHe 소모량

1) 냉각시

알루미늄 합금제 극저온 패널이 70 K에서 4K까지 냉각되는데 필요한 냉각용량은 다음처럼 계산된다. 사실 300 K에서 70 K까지 극저온 패널의 냉각에 필요한 열량 4.9 MJ은 60 K GHe에 의해 공급되어야 한다.

$$Q = M_{Al} \int_4^{70} C_p dT = 7.2 M_{Al} J = 216 \text{ kJ}$$

만일 LHe의 입출구 온도차가 10 K라면 극저온 패널을 70 k에서 4 k로 냉각하는데 필요한 LHe 량은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}
 Q &= \dot{M}_{He}(1-\alpha) \times C_{pLHe} \Delta T_1 + \dot{M}_{He} \alpha \times C_{pGHe} \Delta T_1 + \dot{M}_{He} \lambda_{LHe \rightarrow GHe} + \dot{M}_{He} C_{pGHe} \Delta T_2 \\
 &= 4.2 \dot{M}_{He} (4.22 - 3.7) \times 0.5 + 8.72 \dot{M}_{He} (4.22 - 3.7) \times 0.5 + 21.85 \dot{M}_{He} \\
 &\quad + 4.76 \dot{M}_{He} (13.7 - 4.22) \\
 &= 70.3 \dot{M}_{He} \text{ J}
 \end{aligned}$$

이 때, LHe의 비등에 의한 GHe 방울의 비율을 0.5로 놓았다. ΔT_1 은 LHe 공급온도와 비등점 간의 차이이다. 따라서 냉각단계에서 LHe의 소모량 \dot{M}_{He} 은 3070 g/s로 계산된다. LHe 유량 1 g/s 당 냉각에 걸리는 시간은 0.85 시간이다.

2) 배기 중

배기 중 LHe은 열손실 만큼을 보충해 주어야 한다. 열손실을 P 라고 하면 LHe의 공급량과 다음과 같은 관계식 성립한다.

$$\begin{aligned}
 P &= \dot{M}_{He} (1-\alpha) \times C_{pLHe} \Delta T + \dot{M}_{He} \alpha \times C_{pGHe} \Delta T + \dot{M}_{He} \alpha \lambda_{LHe \rightarrow GHe} \\
 &= [0.85 \times 3.575 \times 0.1 + 0.15 \times (7.8 \times 0.1 + 22.8)] \dot{M}_{He} = 3.84 \dot{M}_{He} \text{ W}
 \end{aligned}$$

이 단계에서 LHe의 입출구 온도상승을 0.1 K로 가정했으며 GHe 방울의 비율을 0.15로 가정했다. 결국 "LHe 유량 ~ 0.26P g/s"라는 식을 얻는다. $P=13.5$ W를 대입하면 배기 중 필요한 LHe 유량은 3.5 g/s로 계산된다. 이상의 결과를 다시 요약하면 다음과 같다.

per BL (4 cryopumps)	Temperature [K]	Pressure [atm]	Cooling Stage [kg]	Pumping Stage [g/s]/[L/s]
GHe	60⇒70	20	1120	288/18.5
LHe	3.7⇒3.8	~0.6	12.3	14/0.105

(다)-2. 15 K 방식

표 3-1-56 Thermodynamic properties of Copper

	300K-80K	80K-15K
ρ Electrical Resistivity [$10^{-8} \Omega \cdot m$]	1.7-0.15	0.15-0.006
k Thermal Conductivity [W/m.K]	380-500	500-1200-800
C_p Specific Heat [J/g.K]	0.38-0.2	0.2-0.0075
$\int C_p dT$ Integrated Specific Heat [J/g]	74 (161)	6 (9.3)

(###) are values for Al.

15 K 방식의 크라이오 펌프는 열차폐체는 기본적으로 4 K 방식과 같지만 극저온 패널의 재료와 구성이 바뀌어진다. 이때 극저온 패널은 구리로 만들어지고 한면에 활성탄이 붙어있어서 광흡수율이 높다. 또 열차폐체의 냉매로는 LN₂를 사용한다. 표 3-1-56와 57에 무산소동과 LN₂에 대한 열적 성질을 요약했다.

표 3-1-57 Thermodynamic properties of LN₂

	at 1 bar
ρ Density [kg/m ³]	808.9
C_{pHe} Specific Heat [J/g.K]	2
λ Vaporization Heat [J/g]	200 (77.3 K)

(다)-2.1. 80 K 열차폐체

(다)-2.1.1. 열부하

기하학적 구조를 같다고 가정하면 4 K 방식의 70 K 열차폐체에 열부하와 동일하다 (표 3-1-51 참조).

(다)-2.1.2. 냉매의 소모량

1) 냉각시

알루미늄 합금제 열차폐체가 300 K에서 70 K까지 변하는 동안 총 열량은 다음과 같다.

$$Q = M_{Al} \int_{80}^{300} C_p dT = 161 M_{Al} = 58 \text{ MJ}$$

LN₂로 얻을 수 있는 냉각용량은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} Q &= M_{LN_2} (1 - \alpha) \times C_{pLN_2} \Delta T_1 + M_{LN_2} \alpha \times C_{pN_2} \Delta T_1 + M_{LN_2} \lambda_{LN_2 \rightarrow N_2} + M_{LN_2} C_{pN_2} \Delta T_2 \\ &= 204 M_{LN_2} + 1.04 M_{LN_2} \times 10 = 214.4 M_{LN_2} \text{ J} \end{aligned}$$

이때 실제계산에서 LN₂ 자체의 온도상승은 ($\Delta T_1=0$) 없는 것으로 간주했다. 따라서 냉각단계에서 LN₂의 소모량 M_{LN_2} 은 270 kg으로 계산된다. LN₂ 유량 1 g/s 당 냉각에 걸리는 시간은 75 시간이다.

2) 배기 중

배기 중 LN₂는 열손실이 일어나는 것만큼을 보충해 주어야 한다. 열손실율을 P 라고 하면 LN₂의 공급량과 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$P = \dot{M}_{LN_2} (1 - \alpha) \times C_{pLHe} \Delta T + \dot{M}_{LN_2} \alpha \times C_{pGHe} \Delta T + \dot{M}_{LN_2} \alpha \lambda_{LN_2 \rightarrow N_2} = 204 \dot{M}_{LN_2} \text{ W}$$

이 계산에서 온도상승은 무시하고 모든 LN₂가 기화하는 것으로 가정했다 ($\alpha=1$). 결국 "LN₂ 유량 ~ 0.0049P g/s"라는 식을 얻는다. $P=3826 \text{ W}$ 를 대입하면 배기 중 필요한 LN₂ 유량은 18.7 g/s로 계산된다.

(다)-2.2. 15 K 극저온 패널

(다)-2.2.1. 열부하

1) 80 K 복사열

극저온 패널에 가해지는 열부하는 다음처럼 구해진다.

$$q = 5.67 \times 10^{-8} \epsilon_{eff} A_{panel} (T_{shield/baffle}^4 - T_{panel}^4)$$

이때 $A_{panel} \sim A_{shield}$, $\epsilon_{eff} = \epsilon_{shield/baffle} \epsilon_{panel} / (\epsilon_{shield/baffle} + \epsilon_{panel} - \epsilon_{shield/baffle} \epsilon_{panel}) (=0.053)$

(패널과 열차폐 사이) 또는 0.82(배플과 패널 사이)) 라는 관계가 성립한다. 배플과 활성탄 면이 서로 마주보고 있으며 광흡수율이 0.9인 것으로 가정했다. 알려진 치수를 대입하면 극저온 패널이 열차폐로 받는 열부하는 0.62 W이고 배플로부터는 9.5 W의 열부하를 받는다.

2) 300 K 복사열

광흡수율이 0.9인 chevron형 배플을 통과하는 300 K radiation의 비율은 0.003이므로 열부하는 $2500 \times 0.003 \times 0.9 = 6.75$ W로 계산된다.

3) 500 K 복사열

300 K radiation과 같은 투과율 0.003을 적용하면 500 K 에 의한 열부하는 $190 \times 0.003 \times 0.9 = 0.5$ W로 계산된다.

4) 플라즈마 방사 에너지

역시 300 K radiation의 투과율과 같은 값으로 0.003을 적용하면 플라즈마 radiation에 의한 열부하는 $650 \times 0.003 \times 0.9 = 1.8$ W로 계산된다.

5) 기체분자에 의한 열전도

기체분자들을 통한 열전달은 다음처럼 표현된다.

$$q = 100 \Lambda P (T_{shield} - T_{panel}) A_{panel}$$

$$\Lambda = 18.189 \alpha_{eff} \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \frac{1}{\sqrt{MT}}$$

$$T = \alpha_{eff} \sqrt{\left\{ T_1 T_2 + \left(\frac{T_1}{\alpha_2} + \frac{T_2}{\alpha_1} \right) \left[\left(\frac{T_1}{\alpha_2} + \frac{T_2}{\alpha_1} \right) - (T_1 + T_2) \right] \right\}}$$

이 식에 $A_{panel} = 5 \times 2 \text{ m}^2$, $P = 10^{-5} \text{ mbar}$, $T_{shield} = 80\text{K}$, $T_{panel} = 15\text{K}$, $T = 42.5\text{K}$, $\alpha_{eff} = 0.67$, $M = 2$, $\gamma = 1.4$ 를 대입하면 열부하가 5.2 W로 계산된다..

6) 흡착열

기체분자가 흡착하면 흡착열이 발생한다. 수소의 흡착열은 0.35 J/mbar.L이다. 극저온 패널에 흡착하는 기체분자량은 $10^5 \text{ L/s.m}^2 \times 5 \text{ m}^2 \times 10^{-5} \text{ mbar} = 5 \text{ mbar.L/s}$ 이다. 수소의 배기로 인한 열부하는 $0.35 \times 5 = 1.75$ W으로 계산된다.

7) 고속 중성 반사입자

배플을 고속중성입자가 통과할 확률은 25% 전후이지만 투과한 입자가 가지는 에너지는 매우 낮아서 10^{-5} 대에 불과하다(그림 3-1-240 참조), 따라서 고속 중성입자에 의한 열부하는 무시할 수 있다.

8) 유도전류

극저온 패널은 열차폐체에 의해 안전하게 둘러 쌓여져 있으므로 유기되는 전류의 양은 무시할 수 있다.

9) 지지대를 통한 열전도

단면적 A, 길이 L인 지지대를 통한 열손실은

$$q = Ak \frac{T_{shield} - T_{panel}}{L}$$

로 주어진다. 만일 $A=78.5 \text{ cm}^2$, $L=10 \text{ cm}$ 이고 지지대가 4 개의 GFRP($k=0.35-0.11(\text{ave. } 0.23) \text{ W/m.K}$)로 이루어져 있다면 열부하가 4.8 W로 계산된다. 이상의 모든 열부하를 종합하여 정리하면 표 3-1-58과 같다.

표 3-1-58 Summary of heat loads to the cryo-panel

	Source	Power
1	70K rad.	9.5 W
2	300K rad.	6.75 W
3	500K rad.	0.5 W
4	plasma radiation	1.8 W
5	conduction through gas (10^{-5} mbar)	5.2 W
6	condensation heat	1.75 W
7	high energy neutrals	0 W
8	eddy current during plasma disruption	0 W
9	conduction through supports	4.8 W
	total	30.3 W

(라) 크라이오 펌프

(라)-1. 기본구조

NBI 용기에 장착하려고 하는 내장형 크라이오 펌프의 기본적 구조는 그림 3-1-239와 같다. 이 것은 그림 3.1.3.사(3)-5에 있는 상용 크라이오 펌프와는 다소 구조가 다르다.

상용 크라이오 펌프는 대개 2 단형 G-M 냉동기의 1 단에 열차폐체를 달고 2 단에 활성탄이 부착된 패널을 달아 헬륨을 포함한 대부분의 기체를 배기한다. 물(융점 273 K), 이산화탄소(승화점 194 K) 등은 열차폐체 또는 배플에 달라 붙고 질소(융점 63 K), 산소(융점 55 K), 알곤(융점 84 K), 일산화탄소(융점 68 K), 메탄(융점 90 K) 등은 주로 냉각패널의 바깥쪽 금속면에 부착된다. 수소(융점 14 K)는 대부분 활성탄이 붙어 있는 냉각패널 안쪽면에 흡착된다.

내장형 크라이오 펌프는 여러 변형이 있을 수 있지만 활성탄 면이 배플 쪽을 향하는 구조로 되어 있는데 이때는 질소, 알곤, 산소, 일산화탄소, 메탄 등이 활성탄면에 붙는 단점이 있다. 수소가 주된 잔류기체인 시스템이라면 최대의 배기성능을 나타낼 수 있지만 만일 진공도가 극히 나쁜 시스템이라면 차단효과 때문에 기대하는 배기속도보다 매우 낮아진다.

(라)-2. 예상 배기성능

(라)-2.1. 4 K 방식

물리적 흡착(응축을 포함)의 특징은 흡착량과 표면온도에 따라 흡착되어 있는 기체분자의 평형압력 즉 증기압이 변하면서 실질적인 배기속도가 변한다는 것이다. 증기압이 높아지면 흡착되었던 분자들이 떨어져 나가는 율이 높아지는 것이므로 결국 배기속도가 감소하는 효과가 나타나는 것이다. 크라이오 펌프의 배플 입구에서 느끼는 유효배기속도를 S 라고 하면 다음과 같이 표현된다.

$$S = S_{\max} \left[1 - \frac{P_s}{P} \left(\frac{T}{T_s} \right)^{1/2} \right] = sACP_t \left[1 - \frac{P_s}{P} \left(\frac{T}{T_s} \right)^{1/2} \right]$$

여기에서 s 는 극저온 표면의 부착계수, A 는 배플의 입구면적, C 는 단위면적 당 오리피스 컨덕턴스($=v/4$, v 는 평균속도), P_t 는 배플의 통과확률, P 및 T 는 용기의 압력 및 온도, P_s 및 T_s 는 극저온에서 흡착분자의 증기압 및 표면온도이다.

이 식에는 상온과 큰 온도차이가 나는 부분이 있을 때 일어나는 열천이 효과도 포함되어 있다. 용기의 압력이 내려가 증기압에 가까워지면 유효배기속도는 0에 가까워진다. 수소의 증기압 곡선을 사용하여 (그림 3-1-241 참조) 이식을 그래프로 그리면 그림 3-1-242과 같다. 만일 용기의 압력을 10^{-5} mbar 이하에서 유지하기를 원

한다면 패널의 온도는 3.8 K 이하가 되어야 함을 알 수 있다.

4 K 냉각판에 수소분자가 흡착하기 시작하면 금속표면과 직접 작용하여 큰 흡착에너지를 갖지만 분자층이 어느 정도 늘어나면 수소분자끼리의 작용에 의한 흡착 즉 응축이 주를 이루게 되고 특정온도에서 일정한 증기압을 나타내게 된다.

수소분자 흡착층이 수 cm에 이르도록 응축에 큰 문제는 없지만 (등온흡착곡선을 나타내는 그림 3-1-243 참조) 펌프 재생시 사고로 공기와 섞일 때 일어날 수 있는 수소폭발의 위험을 방지하기 위해서는 수소흡착 시간을 제한할 필요가 있다(그림 3-1-244 참조)수소폭발은 수소농도가 공기 중 약 4%가 될 때 일어나므로 보통 안전선을 1.7%로 잡고 있다. 그림 3-1-244를 보면 현재의 설계조건에서 수천시간 동안 수소를 계속 배기해도 재생시 수소폭발 사고가 일어날 가능성은 없는 것으로 나타나고 있다.

(라)-2.2. 15 K 방식

극저온 활성화탄에서 수소의 등온흡착선은 그림 3-1-243에서 위쪽 그래프와 같다. 이 경우는 수소폭발에 의한 한계가 존재할 뿐만 아니라 평형압력이 지속적으로 상승하므로 유지하려는 용기압력에 따라 흡착량이 제한될 수밖에 없다. 현재의 설계 사용조건에서 이를 그래프로 나타내면 그림 3-1-245과 같다. 그림에서 보면 활성화탄 면의 온도가 20 K일 때는 수소폭발 한계선보다 평형압력에 의한 한계가 먼저 오지만 온도가 15 K일 때는 훨씬 뒤에 오는 것을 알 수 있다. 어느 경우나 펌프로 수소를 계속 배기해도 제한시간이 충분히 길기 때문에 사용중 이를 크게 의식할 필요가 없다.

(마) NBI 배기시스템의 예

참고로 세계적으로 운용되고 있는 대형 토카막의 NBI 시스템의 규격과 이를 위한 배기장치의 종류 및 성능을 표 3-1-59에서 비교했다. 크라이오 흡착펌프를 (ULVAC제) 사용하고 있는 일본 NIFS의 LHD(토카막은 아니고 스텔러레이터임)를 제외하면 모두 액체헬륨을 쓰는 크라이오 응축펌프를 설치하고 있다. 패널에서 요구하는 냉각능력에 비해 수송중 열손실이 매우 크기 때문에 KSTAR NBI의 경우도 LHe 플랜트 기준 300 W 정도의 수요가 있을 것으로 예상된다.

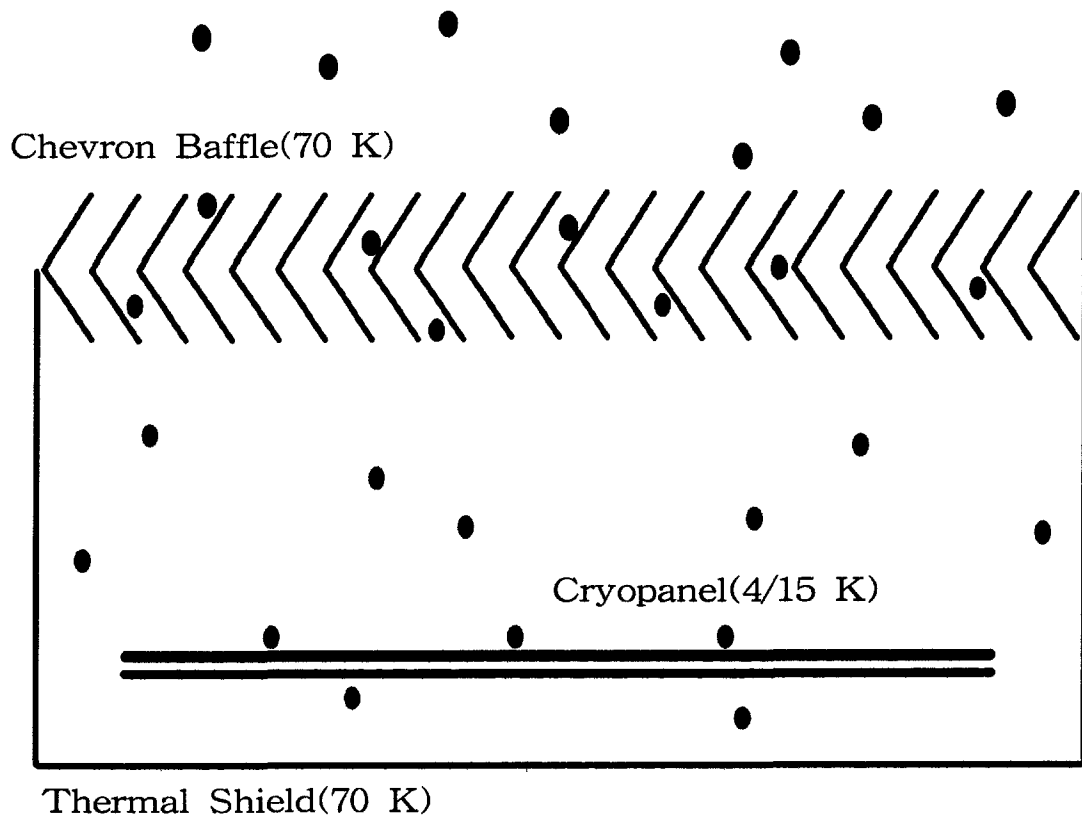


그림 3-1-239 Structure of in-vessel cryopump

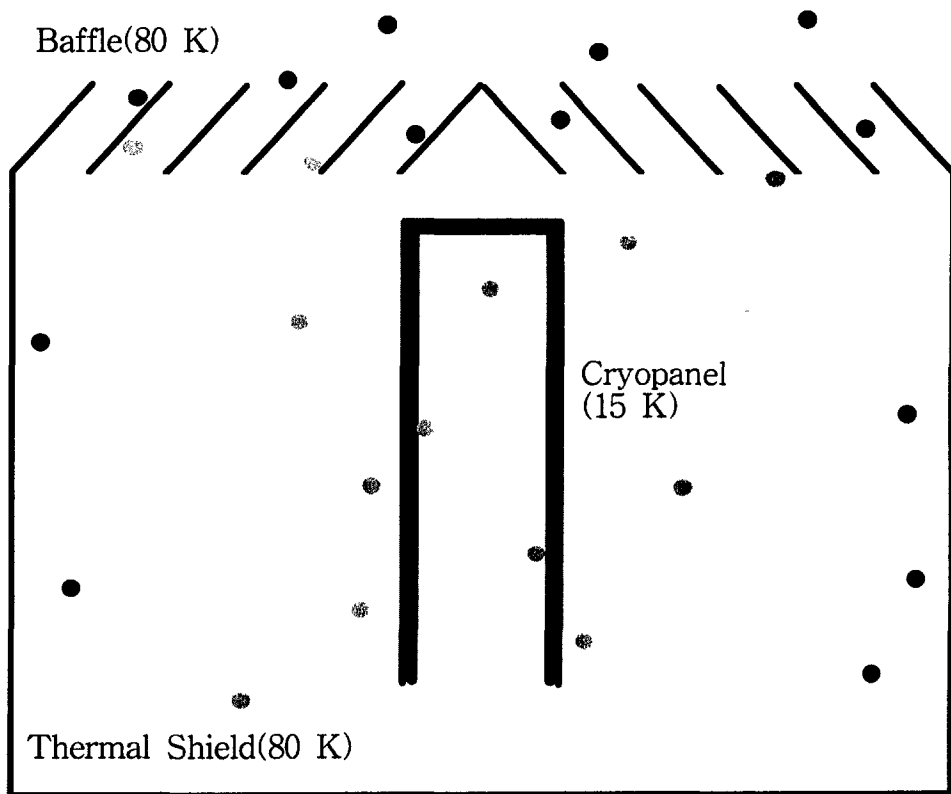


그림 3-1-240 Structure of comercial cryopump

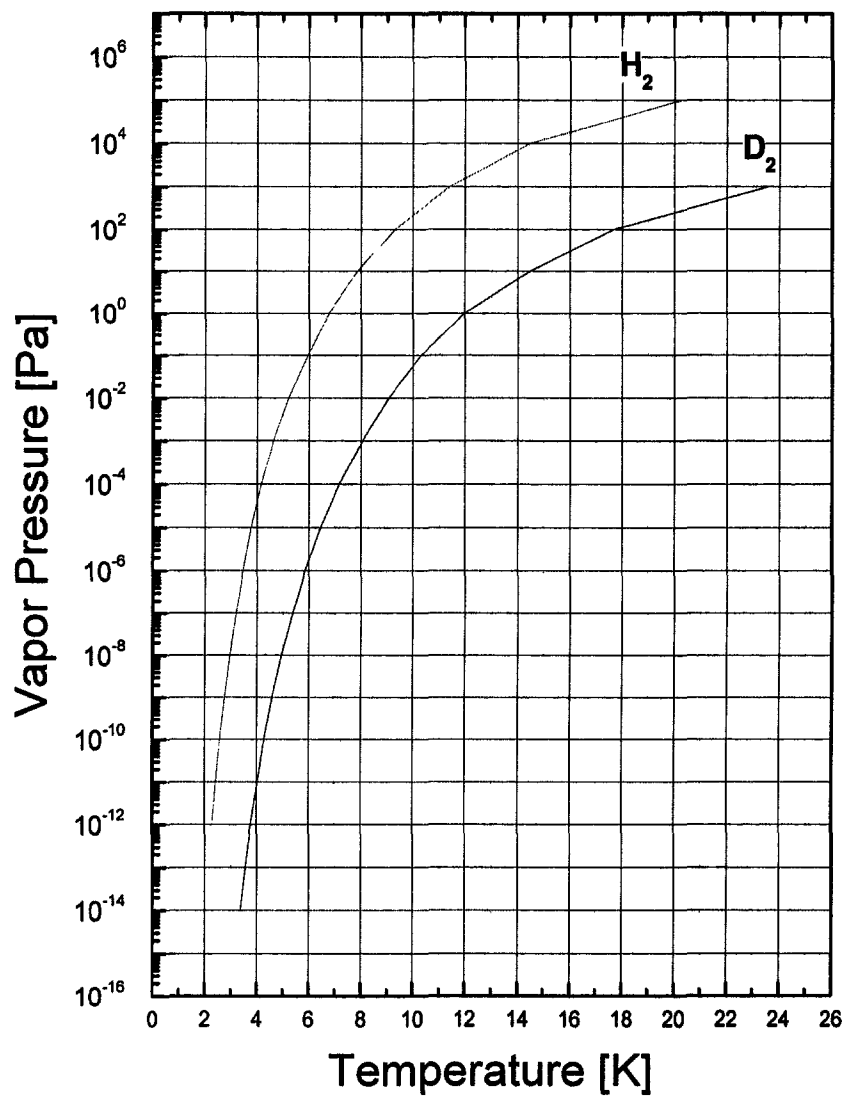


그림 3-1-241 Vapor pressure of H₂ and D₂

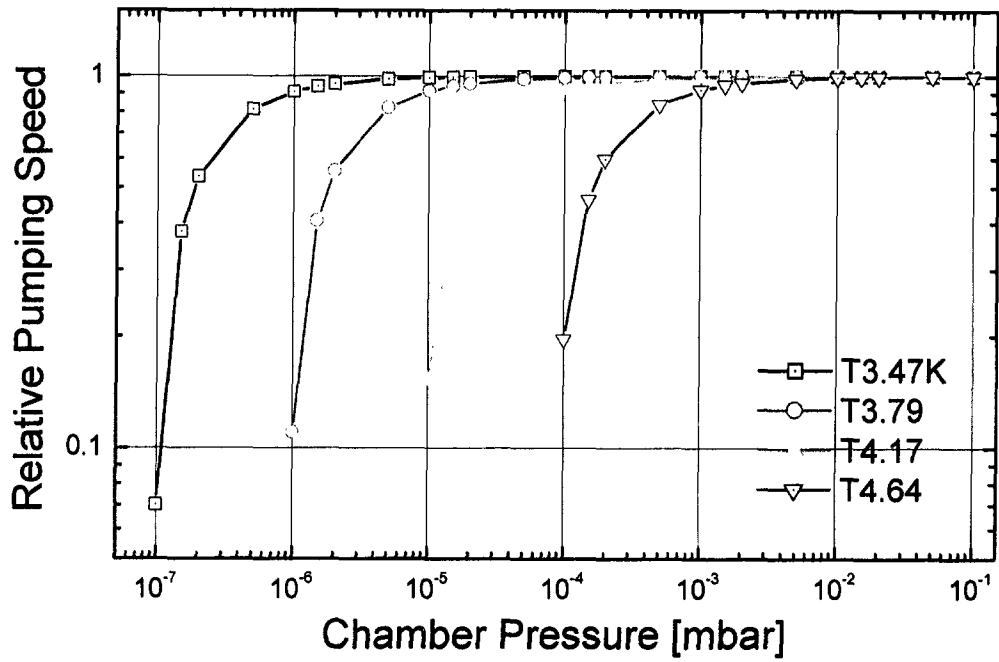


그림 3-1-242 Relative pumping speed of cryopump as a function chamber pressure

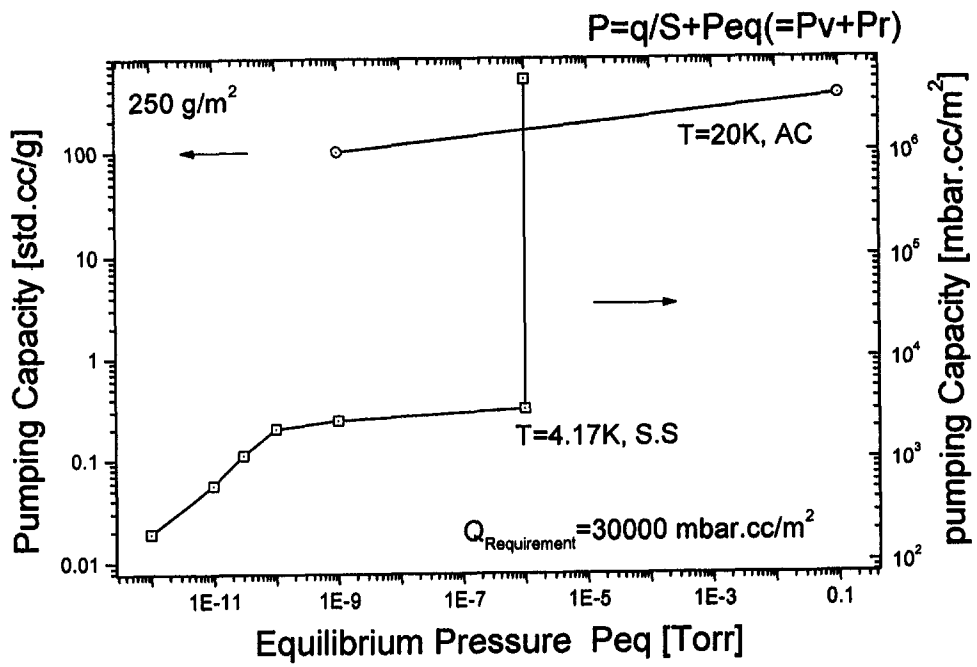


그림 3-1-243 Isotherm of H₂ on the activated carbon and 4 K panel

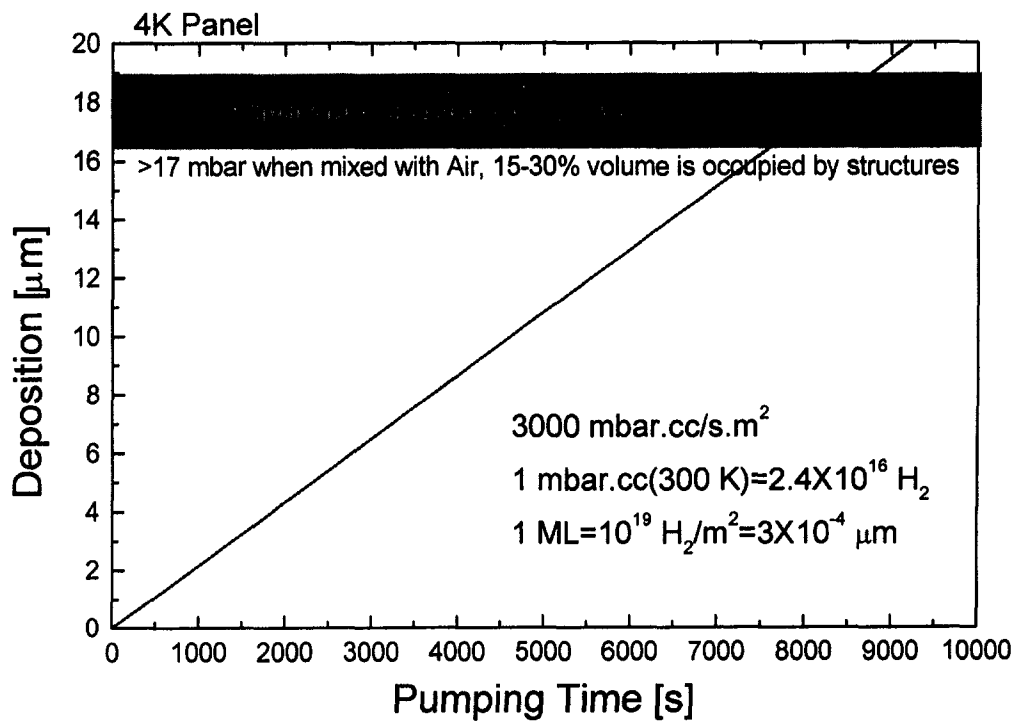


그림 3-1-244 Deposition rate of H₂ on 4 K panel.

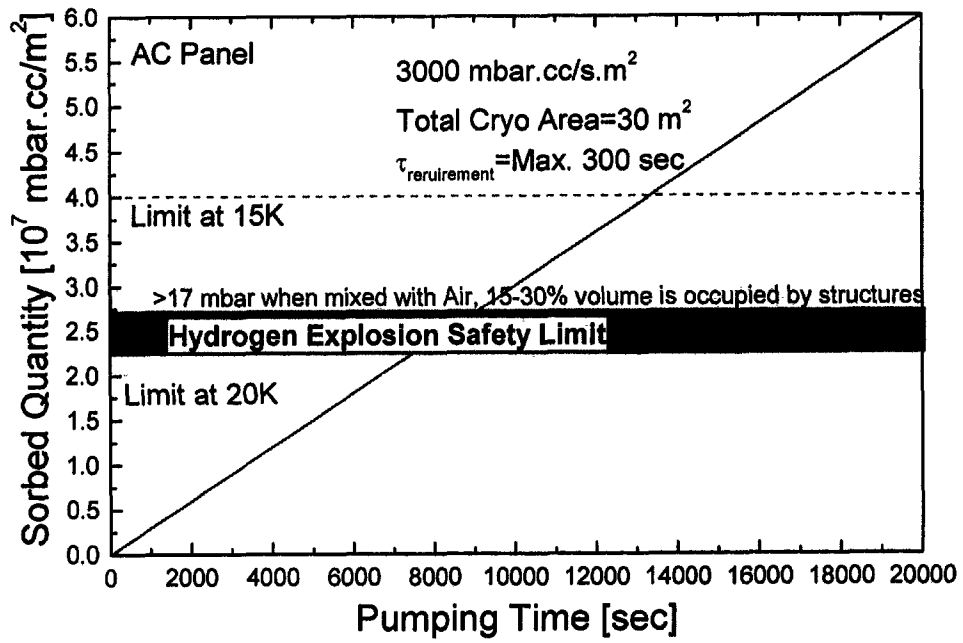


그림 3-1-243 Deposition rate of H₂ on activated carbon.

Æ 3-1-59 Pumping system of NBI device of several fusion experiment facilities

	JET	DIII	JT-60	LHD	TFTR	KSTAR
Source Power × # (MW)	80keV,60A (NB) ×8 38	80keV,80A (NB) ×2 13	100 keV,80A (1.4 NB)	180keV,40A ×2 14.4 (7.5 NB)	7.8×3	120keV,65A ×3 23.4 (8 NB)
# of BL	1	2	14	2	4	2?
Pressure (Torr)	5×10^{-9}	5×10^{-9}	10^{-9}		10^{-9}	$<10^{-9}$
Gas load (Torr.L/s)	250 mbar.L/s	80	>30	200 mbar.L/s	>90	23×3
Pumping speed (10^6 L/s)	8	1.5	1.4	1.9	2.5	1.5
4 K Cryopanel (m ²)	40	6+8	15	15 K ~10?	30	~30
LHe loss (W)	35-80	11+12 3+3 g/s	51		45	20~40
LHe transfer loss (W)	0.15 W/m		1100 W /500 m	2nd stage 15 K, 15 W	300 W /500 ft	?
LN2 (kW)	7-12	60 g/s×2 480 L/hr			4.7 415 L/hr	GHe 4 kW, 288 g/s
Material	Ag coated Al (extrusion)	Cu plate + SS tube+ Al baffle	SS plate (Al coated)+ Al baffle		SS plate+ Cu baffle	Al
LHe Plant	330 W, 3.6 K 150 g/s,15 bar (LN ₂ 65 kW, 78 K, 1500 L/s)	300 W, 3.8 K, 100 L/hr	2.4 kW, 3.7 K	46 GMs	1 kW, 3.7 K	300 W, 3.7 K, 5 g/s
Flow	Gravity	Forced	Gravity		Gravity	Forced

(바) 연구개발

(바)-1. 크라이오 흡착펌프 제작 및 실험

(바)-1.1. 배플설계 및 제작

배플은 빛은 차단하되 기체분자의 통과는 최대한 자유로워야 한다. 배플의 웨브론 형 날개 각도 및 광흡수율에 따른 입자 및 광의 통과확률은 그림 3-1-246과 같다. 배플의 날개들은 빛의 투과를 억제하기 위해 다소간 겹치도록 되어있는데 그 효과는 그림 3-1-247와 같다.

배플의 광흡수율을 높이기 위해 표면을 흑화처리하는 방법으로 양극산화 방식을 채택했다. 연질, 경질, 색소침투, 또는 이들의 조합 등을 통해 다양한 질감과 색깔을 얻었는데 적외선 흡수효과는 전반으로 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 흑색 페인트를 칠한 경우와도 큰 차이가 없었는데 결국 경질 양극산화와 색소침투를 병행하는 방법을 택했다. 상온에서 광흡수율은 0.95 이상인 것으로 나왔다.

(바)-1.2. 활성탄 패널 제작

활성탄은 국내 동양탄소(주)의 제품을 사용했다. 활성탄을 구리판에 붙이는 접착제로는 독일 제품인 Thermoguss 2000을 사용했는데 무기질 접착제로 상온 또는 70℃ 정도로 가열하여 굳히면 세라믹과 같은 질감을 나타내고 열수축과 팽창에 잘 견딘다.

(바)-1.3. 전체구조

크라이오 흡착펌프의 패널면적은 $3 \text{ m}^2(1.75 \times 1.75)$ 이고 두께는 2 mm이다. 열차폐체는 전체 펌프의 프레임으로써도 기능하며 20 mm 두께의 알루미늄합금과 5 mm 두께의 알루미늄판 및 배플로 이루어져 있다. 전체 구조물은 열전달 손실을 줄이기 위해 적도면 양쪽에 지지봉을 달아 나일론 절연체를 통해 용기 벽에 고정된다(그림 3-1-248 참조).

(바)-1.4. 성능

전체 크라이오 흡착펌프의 예상 배기속도는 그림 3-1-249와 같다. 흡착계수가 0.8 이면 1 m^2 당 10^5 L/s 이상의 배기속도를 얻을 수 있다.

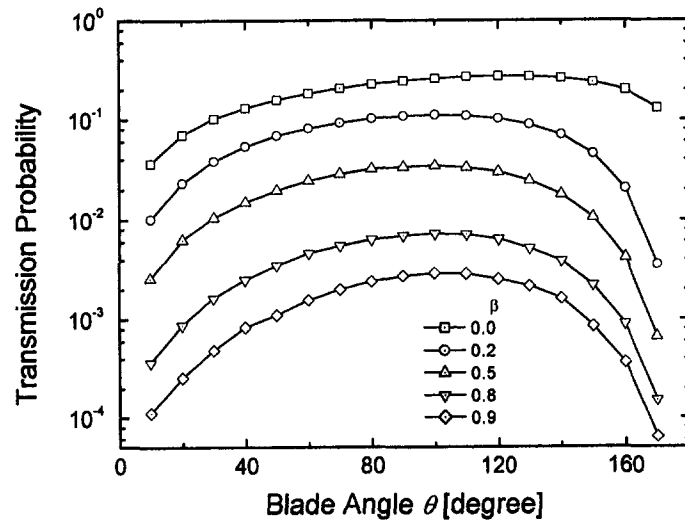


그림 3-1-246 Transmission probability of particles through chevron baffle

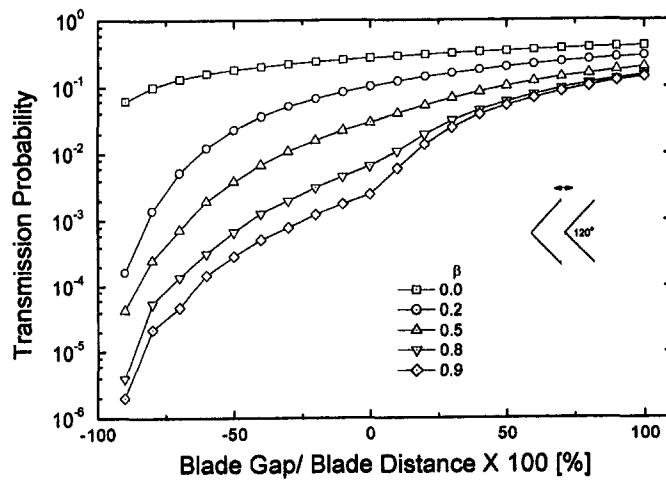


그림 3-1-247 Effect of overlap or gap on the transmission probability.

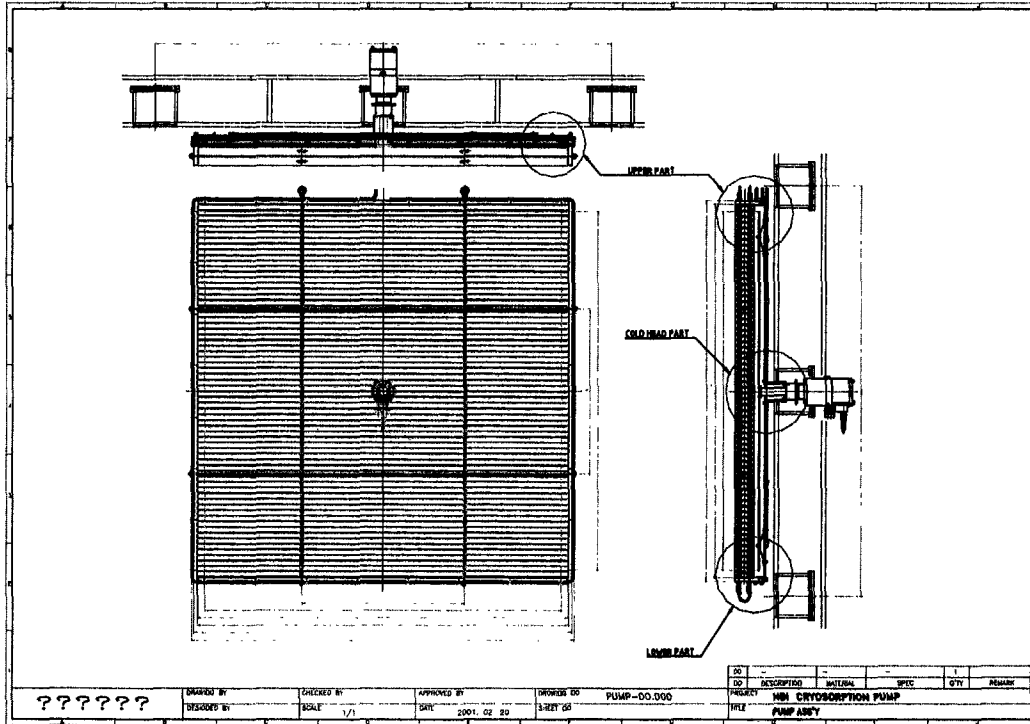


그림 3-1-248 Structure of cryosorption pump

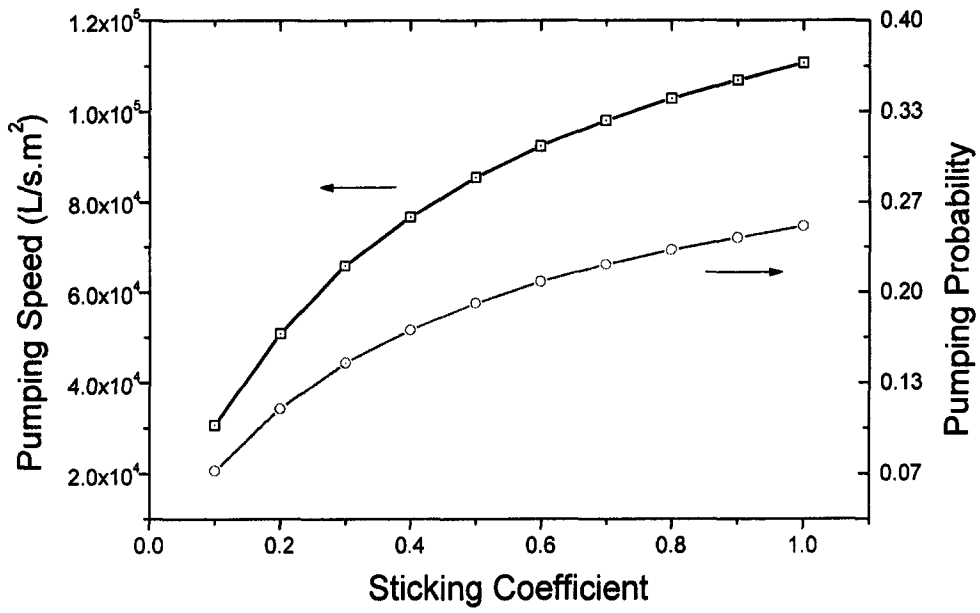


그림 3-1-249 Expected pumping speed as a function of sticking coefficient

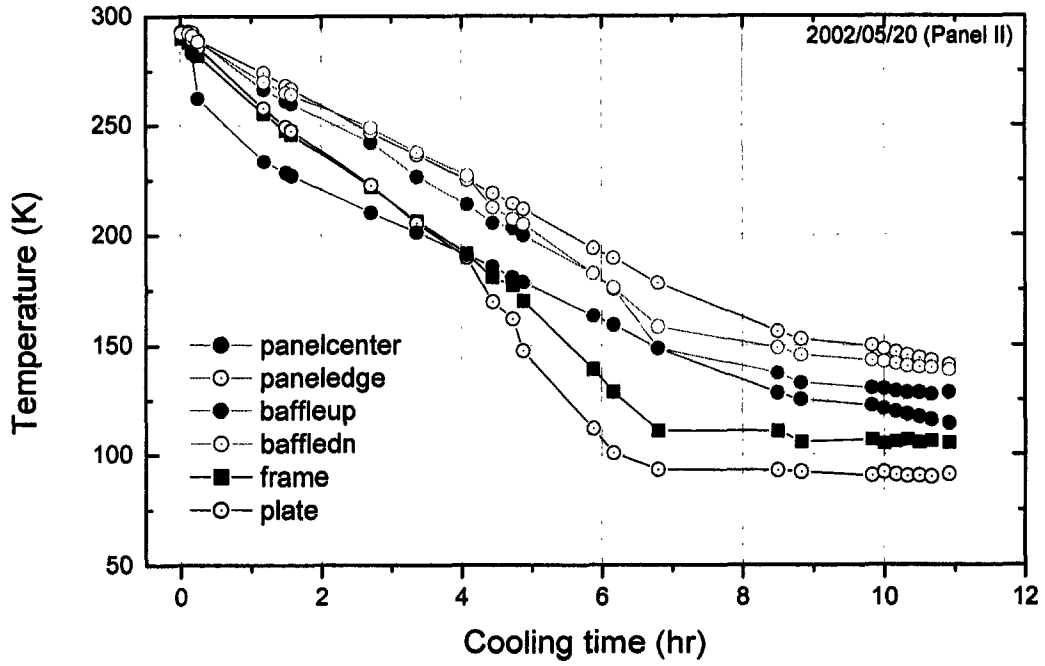


그림 3-1-250 cooling curve of the cryosorption pump system.

현재는 전체 시스템을 용기 속에 설치하고 10^{-6} mbar 대의 진공 중에서 냉각실험중인데 액체질소를 약 450 ℓ 사용하면서 얻은 냉각곡선은 그림 3-1-250과 같다.

(바)-2. 크라이오 응축펌프의 패널 제작

크라이오 응축펌프의 패널은 두 판을 겹쳐 울룩불룩하게 성형한 형태로 만드는 것이 보통이다. 이런 누비 판을 만드는 과정과 조건을 조사하기 위해 먼저 2 mm 두께의 스테인리스강판을 일정한 격자형태의 패턴으로 전자빔용접을 하고 그 사이에 수압을 가해 간격을 벌리는 방법으로 성형하는 과정을 실험했다. 일부는 곡면으로 성형하기도 했는데 일정한 틀에 붙잡은 상태로 수압을 가하는 방식이 곡률을 유지하는 데 필요했다.

그림 3-1-251은 용접 주기에 따라 간격을 6 mm로 늘리기 위해 가해야 할 수압을 나타낸다. 실제로 용접 패턴은 패널 내부에 홀리는 냉매의 압력에 대해 변형이 일어나지 않도록 충분한 수압을 가해 성형해야 한다는 것을 고려하여 정할 수 있다.

그림 3-1-252는 실제 만들어진 누비판에 액체질소를 흘리기 위해 연결한 모습이다. 실제 냉각패널은 알루미늄합금으로 만들 예정이다. 평상시 액체헬륨의 압력은 1 기압내외이지만 온도상승시 큰 압력이 발생할 수 있으므로 낮은 수압에서 성형하기 보다 스테인리스강의 경우와 같은 정도로 수압을 가할 수 있도록 용접패턴을 촘촘히 할 필요가 있다.

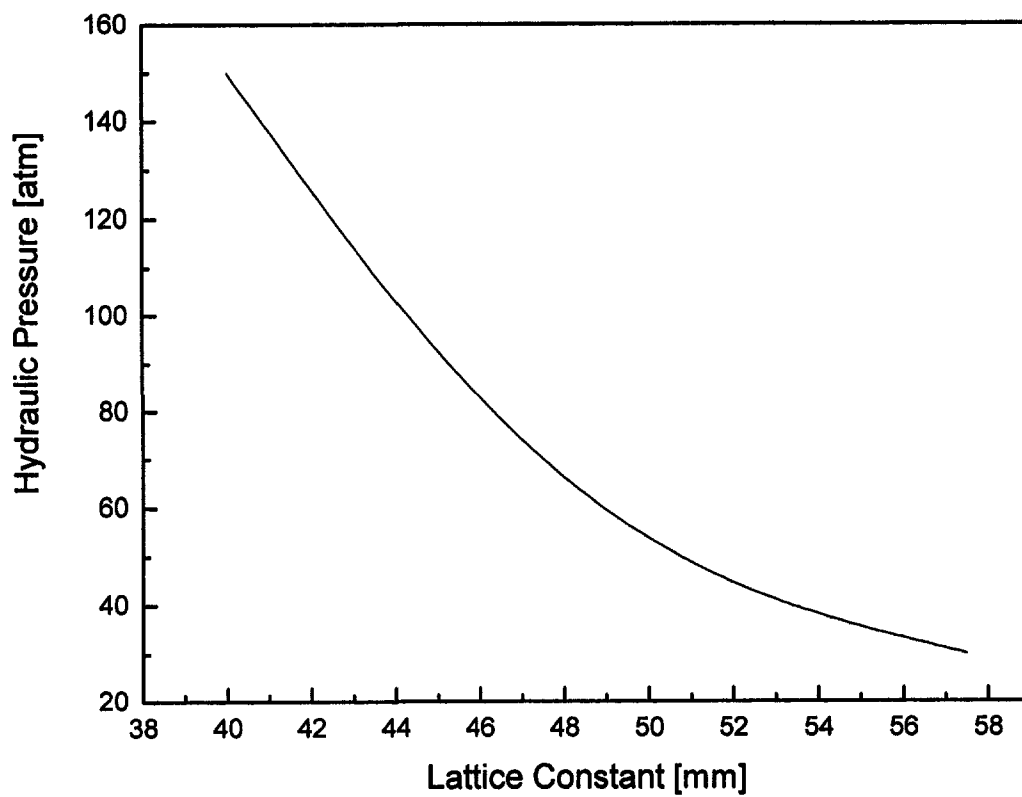


그림 3-1-251 Required hydraulic pressure to form embossed plate

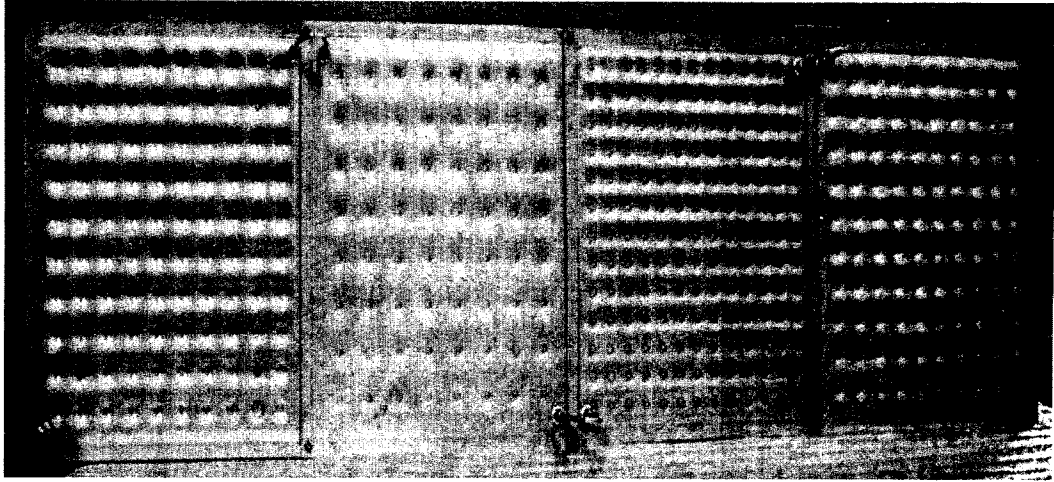


그림 3-1-252 Picture of quilted plates for LN₂ experiment

제 2 절 RF 장치개발

1. 서론

KSTAR 토카막 가열장치의 일환으로 이온공명주파수대역(ICRF)의 가열장치의 개발이 진행중이다. RF 가열장치는 KSTAR 토카막이 지향하고 있는 장 펄스 운전, 높은 플라즈마 β 값 등 차세대 토카막 플라즈마 운전에 필수적인 장치중 하나이다. RF 가열장치는 여러 운전시나리오에 따라, 이온이나 전자의 선택적 가열, 플라즈마 중심부의 전류구동, Ion Bernstein 모우드로의 변환을 통한 플라즈마 외곽부의 전류구동 등의 역할을 담당한다. 초기에는 6 MW의 RF 출력을 수평 포트를 통해 플라즈마에 공급하고 궁극적으로 1 세트를 추가하여 12 MW의 RF 출력을 공급하도록 할 예정이다. RF 가열장치는 300 초 동안의 장시간 동작이 가능하고, 25 - 60 MHz 주파수영역의 어떤 주파수에서도 동작할 수 있으며, 전류구동 효율을 조절하기 위해 운전중 안테나 전류피의 위상차를 조절할 수 있도록 설계하였다. 세계적으로 처음으로 300초 이상의 장 펄스 운전이 가능한 장치를 개발하기 위해서 고출력, 고주파 부품들을 개발하는데 노력을 집중하여야 한다.

1 단계 사업을 통해 6 MW급 RF 가열장치의 사양을 결정하고 기본설계를 완성하였고, 고출력(100 kW) RF파 발생장치 및 주변장치의 연구.개발을 통하여 장치 설계, 제작, 운영 등의 기반기술을 확보하였다. 2 단계 사업에서의 연구목표는 장치의 상세설계, 고주파 발생장치 개발, 주요 Subsystem 제작 등이었고, 연구 기간동안 저출력 전송계통 구성을 통한 전송.제어계통의 성능평가를 통해 장치의 상세설계 및 보안을 하였고, 안테나 시작품을 제작하고 기계적, 전기적 특성시험을 수행하였으며, 100 kW 송출기의 출력을 최적화하고, 300 kW 송출기를 제작하여 안테나 성능, 고출력 고주파 부품들의 성능을 검증하였다.

세계적으로 처음 시도하는 300초 이상의 장 펄스 운전을 위해 새로운 설계개념과 신기술들을 적용하여 초 고출력밀도(10 MW/m^2)와 운전중 가열 및 전류구동효율 조절능력을 갖는 고주파 안테나를 제작하고, 조립.해체 공정시험, 냉각시험, 구동시험, 진공시험 등의 기계적 성능 검증시험과 RF 고전압시험을 통한 전기적 성능 검증시험을 수행하였다. 안테나 개발에 필수적인 Faraday shield tube의 B_4C 코팅 시험도 별도의 Inconel 625 시편을 제작하여 수행하였다. 국내 기술이 취약함을 고려하여, 안테나의 제작을 국내업체에서 선정하여 관련 기술이 축적되도록 하였고, 성능시험을 바탕으로 한 Prototype 안테나의 설계 개선과 upgrade 과정에도 참여하여, 습득한 기술을 바탕으로 본 제품의 개발.제작을 국내 산업체에서 충분히 수행할 수 있도록 하였다.

MW급 고출력 고주파 부품도 세계적으로 처음으로 300초 이상의 장 펄스 운전이 가능하도록 개발되었다. MW급 고출력 고주파 전송을 위한, Vacuum feedthrough, 임피던스 정합장치, 수냉식 전송선 등은 국내 기술로 제작하고 특성시

험을 수행하였다. 특히, 신뢰성있는 MW급의 고출력 고주파 전송을 위해, 기존방식(기계적인 접점 방식)과는 다른, 유체를 조절하여 전자파의 위상을 조절하는 위상가변기와 단락 전송선 동조기를 개발하였다.

고출력 RF파 발생장치의 기술개발에 있어서는, 2 MW 송출계의 개발.운영을 대비하여, 자체 개발.운영 능력을 확보하고자 하였고, 국내산업이 부분적으로 참여 가능하도록 하였다. 100 kW 송출계는 출력 최적화를 통하여 고주파 부품 시험에 활용하고, 운영 능력을 확보하였고, 300 kW 송출계는 국내기술이 전무한 Final cavity는 국외 업체에서 조달하고, 전원들은 국내 업체에서 제작하여, 관련 기술이 축적되도록 하였다. 3단계 사업에서는 2 MW급 4기로 구성된 송출계의 조달을 효율적으로 추진할 계획이다.

2. 연구내용

가. 1차년도 ('98.9.8- '99.9.7)

- ICRH/FWCD 장치 상세설계
 - 안테나 설계
 - 전송계통 설계
 - 저출력 전송계통 설계, 제작
- 안테나 제작 및 특성시험
 - Prototype 안테나 제작.
 - Vacuum feedthrough 설계·제작
 - RF Test chamber 설계·제작
- 고출력 RF파 발생장치 기술개발
 - 100 kW 송출계 출력 최적화

나. 2차년도 ('99.9.8- '00.9.7)

- ICRH/FWCD 장치 상세설계
 - 저출력 전송계통 제작·시험
- 고출력 RF파 발생장치 기술개발
 - 100 kW 송출계 출력 최적화
 - 300 kW 송출계 제작
- Subsystem 제작 및 특성시험
 - Prototype 안테나 제작·시험
 - Vacuum Feedthrough 시험
 - 고출력 고주파 부품 개발
 - 고출력 고주파부품, 시험설비 설계·제작

다. 3차년도 ('00.9.8- '01.9.7)

- ICRH/FWCD 장치 상세설계
 - 상세설계 보완
 - 저출력 전송계통 시험
- 고주파 RF파 발생장치 기술개발
 - 300 kW transmitter 제작
- System 제작 및 특성시험
 - Prototype antenna 시험·Upgrade
 - Vacuum feedthrough 시험·Upgrade
 - B₄C coating 시험
 - 고출력 전송부품 제작·시험

라. 4차년도 ('01.9.8- '02.6.7)

- ICRH/FWCD 장치 상세설계
 - 각 계통의 상세설계 보완 및 수정
- 고주파 RF파 발생장치 기술개발
 - 300 kW transmitter 제작완료
- System 제작 및 특성시험
 - Prototype antenna 특성시험 및 Upgrade
 - Vacuum feedthrough 개발
 - 고출력 고주파 부품 제작 및 시험
 - 고출력 고주파부품 시험장치 Upgrade

3. 연구개발 결과

가. 장치 상세설계

(1) 장치 상세설계 보완

(가) 설계특성

- ① 주파수 영역 25~60 MHz에서 KSTAR 진공용기의 주 수평포트 1개를 통

해 6 MW의 RF 출력을 300 초동안 플라즈마에 전달할 수 있어야 한다. Upgrade시 동일한 계통을 추가함으로써 12 MW를 공급한다. RF 출력은 10 msec 이내에 100 % 조절 가능해야 한다. 전류띠간의 위상은 $-180^\circ \sim +180^\circ$ 까지 변화시킬 수 있어야 한다.

- ② 운전중 Faraday shield의 전면부는 플라즈마의 기준 평형시, +2 cm 자속면에 위치하며, 그 위치의 정확도는 ± 2 mm 이내이어야 한다.
- ③ 안테나의 반경 방향 위치를 진공을 유지한 상태에서 10 cm 이동시킬 수 있어야 한다.
- ④ 안테나 계통을 구성하는 모든 부품의 재질은 진공, 불순물, 투자율, 중성자에 의한 방사화 등을 고려한 요구 조건을 만족해야 한다. 투자율은 1.02 이하이다.
- ⑤ 안테나 계통은 고순도 물에 의해 냉각된다.
- ⑥ 안테나는 가열 전력이 300 초동안 40.5 MW가 인가될 때 플라즈마 등으로 부터의 받게되는 열부하를 견딜 수 있어야 한다. 여기에는 24 MW의 중성 입자 가열시의 ripple trapped 입자에 의한 열부하도 포함된다.
- ⑦ 안테나 계통은 350 °C로 baking할 수 있어야 한다.
- ⑧ 안테나를 포함한 전송계통의 어떤 지점에서든 최대 전압이 35 kV를 넘지 않아야 한다.
- ⑨ 예상되는 disruption이 발생할 경우에도 기계적, 열적으로 문제가 없어야 한다.

(나) 장치 개관 및 성능

RF 장치는 그림 3-2-1에서와 같이 여러 부속 시스템으로 구성되어 있다: 중간이 접지되고, 입력부가 양쪽 끝인 4 개의 전류띠를 갖는 안테나, 진공전송선, 진공 feedthrough, 위상천이기와 가압 전송선으로 구성된 공명 루프(resonant loop), 4 세트의 RF원의 출력을 동일하게 유지시켜 주는 3 세트의 decoupler, 위상천이기와 stub 튜너로 구성된 정합회로, 2 MW 출력을 갖는 4 세트의 RF원, 상태감시 및 원격제어를 위한 제어시스템 등으로 구성된다. 전체적인 장치의 모습은 그림 3-2-2에 KSTAR 토카막과 함께 나타내었다.

① 안테나

ICH/FWCD 안테나는 KSTAR 진공용기의 표준 RF 포트에 설치되고, 중앙이 접지되고 양 끝단에서 동축선에 의해 전류가 공급되는 구조의 4개의 전류띠, Faraday

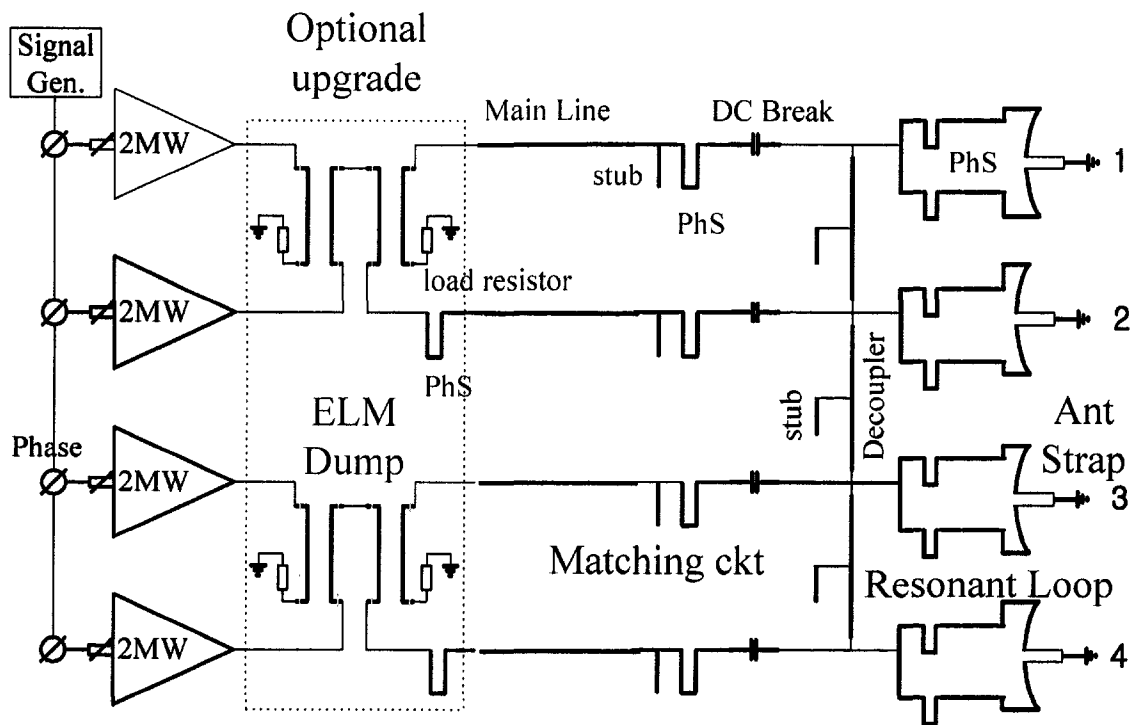


그림 3-2-1 RF system schematic.

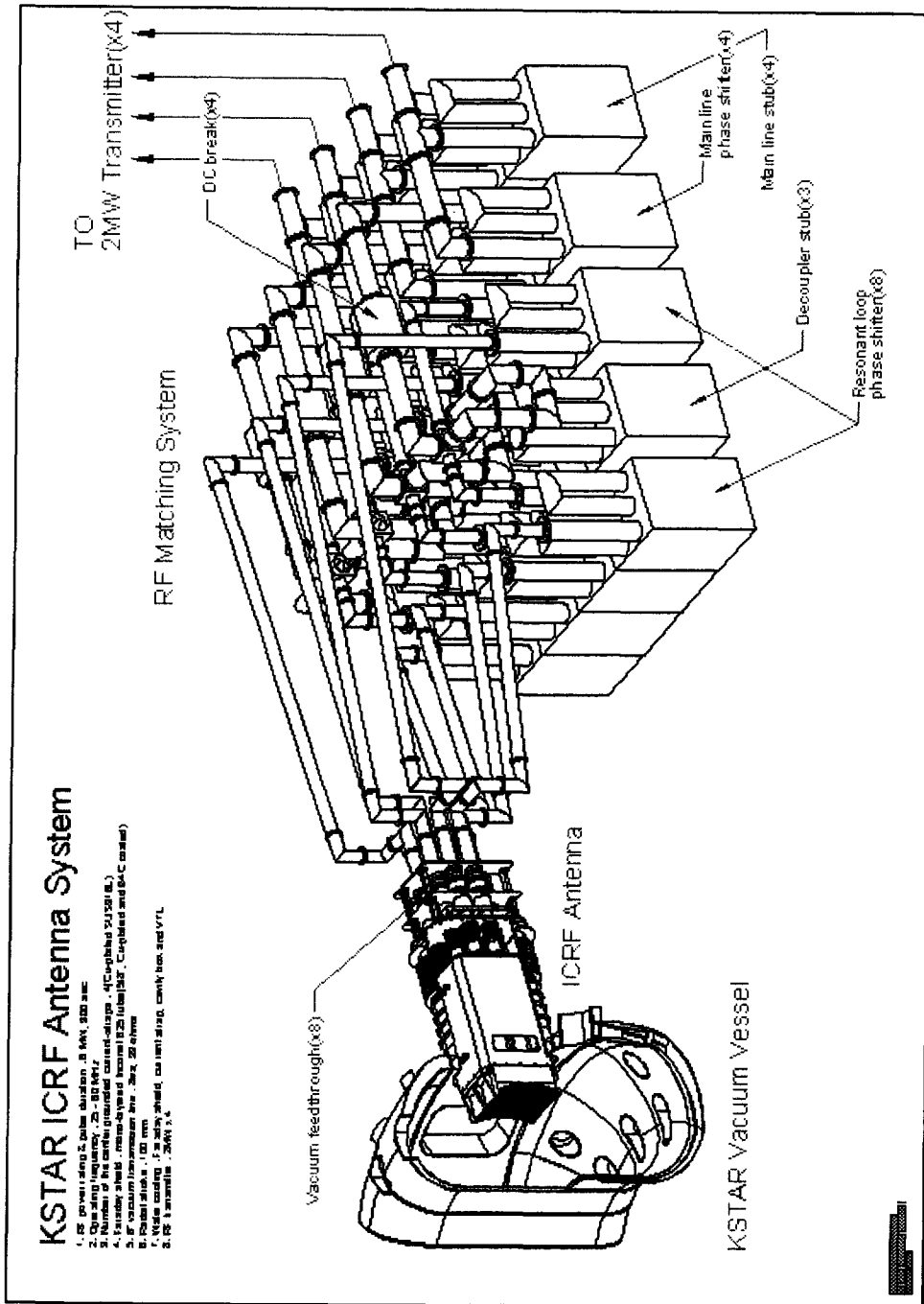


그림 3-2-2 RF 장치 전체 모습

shield, cavity, 전송선 등으로 구성되어 있다. 그림 3-2-3은 ICH/FWCD 안테나의 전체를 나타낸다. 안테나는 높이 830 mm, 넓이 730 mm의 크기로 RF 포트에 삽입하는 구조로 되어있고, 플라즈마에 대한 안테나 위치를 조정하여 플라즈마에 전달되는 전력을 최적화할 수 있도록 진공하에서 토러스의 반경방향으로 10 cm 까지 움직일 수 있도록 설계되었다. 또한, 전류구동 효율을 조절하기 위해 운전중 안테나 전류띠의 위상차를 조절할 수 있도록 설계되었다. 안테나 구조물은 300초 운전이 가능하도록 냉각수에 의해 냉각되도록 하였다.

안테나의 열 및 구조해석 결과, 정상운전상태에서, Faraday shield tube의 최대 응력은 160 MPa, 전류띠의 최대 응력은 53 MPa로 계산되어, Faraday shield tube 와 전류띠의 재료인 Inconel 625와 304 stainless steel의 허용 응력(3Sm), 756 MPa 과 414 MPa 보다 현저히 낮은 것으로 판명되었다. 플라즈마 붕괴시, Faraday shield tube에 유도되는 기전력에 의한 응력까지 고려하여도 175 Mpa로 계산되어 허용 응력보다 현저히 낮았다. 이 해석 결과로 설계한 안테나의 정상, 비정상 상태에서 기계적 건전성을 확인하였다.

② 공명 루프

공명루프는 그림 3-2-1과 같이, 전류띠, 진공전송선, 진공 feedthrough, 압력전송선, 위상천이기로 구성되어 있다. 25 - 60 MHz 주파수영역의 어떤 주파수에서도 동작할 수 있기 위해 위와 아래에 각각 1 개의 위상천이기가 있고, 이들의 길이를 조절하여 주어진 주파수에 공명될 수 있도록 루프의 전체길이를 결정하게 된다. 9 inch 전송선이 공명루프와 연결되는 지점은 위쪽과 아래쪽 루프의 길이가 반파장의 차이가 되는 곳이고 이는 전류띠의 위쪽과 아래쪽의 전류의 크기와 방향이 같도록 한다.

KSTAR ICRF장치의 최대 전압은 35 kV 이내로 유지되도록 정하였다. 현재 실험중인 토카막들에서 이 값은 자주 달성되는 것으로 신뢰성 있는 운전을 보장할 것이다. 가열과 전류구동에 해당하는 주파수 27 MHz, 38 MHz, 50 MHz에 대하여, lossy-transmission-line 모델을 이용하여, 공명루프내에서의 전압과 전류분포를 계산하여 그림 3-2-4에 그 결과를 나타내었다. 각 주파수에 해당하는 플라즈마 부하는 RANT3D 코드를 사용하여 계산하였다. 그림 3-2-4의 결과는 각 주파수에서 플라즈마 부하가 유지되는 한, 6 MW의 전력을 플라즈마로 전달할 수 있음을 나타내고, 루프내의 전압은 35 kV 이내로 유지됨을 알 수 있다.

③ 정합회로

전류띠간의 유도성 결합특성으로 그림 3-2-5와 같이 전류구동시 4개의 전류띠에 같은 전류를 흘리기 위한 전력은 같지 않게 된다. 3 세트의 decoupler는 전류띠

간의 전력의 차이를 조절하여 4 세트 RF원의 출력을 동일하게 유지시켜 준다. 각 decoupler는 루프간을 잇는 전송선과 조절이 가능한 stub로 구성되어 있고, stub의 길이를 조절함으로써 각 루프로 전달되는 RF 전력을 동일하게 만든다. 정합회로는 통상적으로 사용되는 위상천이기와 stub 튜너로 구성되어 있고 각 부품들은 기계적으로 움직이게 되어 있다.

3 세트의 decoupler는 전류띠간의 위상을 능동적으로 제어하기 위해서도 필요하다. 그림 3-2-6은 반사계수를 위상의 함수로 나타낸 것이다. 운전중 위상조절가능성을 보기 위하여 정합장치들은 $\pi/2$ 위상일 때(주파수 38 MHz인 전류구동시에 해당) 반사계수가 0이 되도록 맞추었다. 위상이 $\pi/2$ 에서 변할 때 반사계수는 0이 아닌 값을 가지게 되나, 가장 나쁜 경우라도 0.08(1%의 전력이 송출기로 반사됨을 의미함)을 초과하지 않는다. 위상에 따른 플라즈마 부하의 변화(즉 위상이 0-180도일 때, 플라즈마 부하는 8-5 Ω 임)를 고려하더라도 VSWR은 1.5 이내로 유지된다. 따라서 운전중 위상을 조절하여 전류구동 효율을 조절할 수 있다.

플라즈마의 형상의 변화에 따른, 전류띠의 self-inductance의 변화는 주파수를 조절하여 보상을 할 수 있다. 10%의 self-inductance의 변화에 대하여 주파수는 38 MHz에서 37.91 MHz로의 조절, 즉 0.24%의 조절로 보상을 할 수 있다. 플라즈마의 부하가 크게 변하는 경우에는 frequency shift matching (FSM) 방법으로 정합을 시켜야 한다. KSTAR ICRF 장치에서는 계통설계에서 2가지를 바꾸어 주어야 한다. Stub를 추가하여야 하고, 주 전송선의 길이가 60 m 정도로 길어져야 한다. 그림 3-2-7에는 해석에 사용한 회로를 나타내었고, 사용한 장치의 값들은 $f = 38$ MHz, $h = 0.75$ m, $Z_s = 47 \Omega$, $b = 0.61$, $Z_{line} = 30 \Omega$, $Z_{mtl} = 50 \Omega$, $x_1 = 16.89$ m, $x_2 = 20.837$ m 등 이다. 플라즈마 부하는 5 Ω/m 에서 20 Ω/m 까지 변화한다고 가정했고, x_1 과 x_2 의 길이는 플라즈마 부하가 6 Ω/m 일 때 루프가 공명이 되도록 정하였다.

그림 3-2-8에는 반사계수, $|\rho|$ 를 플라즈마 부하, R과 주파수 변화(38 MHz로부터)에 대한 함수로 나타내었다. 그림에서 보듯이 반사계수 $|\rho|$ 가 최소가 되는 주파수가 플라즈마 부하에 따라 존재함을 알 수 있다. 그림 3-2-9 (a)에는 플라즈마 부하에 따른 최적의 주파수 변화량을 표시했는데 플라즈마 부하가 5 Ω/m 일 때 0.01 MHz, 플라즈마 부하가 16 Ω/m 일 때 -0.2 MHz가 됨을 알 수 있다. 이 정도 범위의 주파수 변화는 많은 고출력 RF 송출기에서 감당할 수 있는 것이다. 그림 3-2-9 (b)에서 알 수 있듯이, FSM 방법을 사용할 경우, 플라즈마 부하가 20 Ω/m 까지 변할 때에도 반사계수는 0.15 이내로 유지할 수 있어 매우 효과적임을 알 수 있다.

그림 3-2-1은 2쌍의 3 dB hybrid splitter가 결합기/분배기의 조합형태로 나타나 있다. 결합기 부분에서는 두개의 송출기의 전력을 하나로 결합하고, 분배기 부분에서는 전력을 다시 두 개로 나누게 된다.(위상차 $\pi/2$ 유지) 이 때 4개의 주 전송선 길이는 모두 같다. 이 회로의 장점은 L-H transitions이나 ELM 상황같이 부하가 급격하게 변하는 경우, 반사되는 전력이 이 회로의 저항쪽으로 모두 가게되어 송출기를 보호할 수 있다는 것이다. 반면, 이러한 상황동안 플라즈마로 전력을 전달할

수 없고, 위상조절이 불가능하다는 것이 단점이다. KSTAR ICRF 장치에서는 향후 선택적 옵션의 하나로 고려하고 있다.

④ RF Power Source

2 MW 송출계의 RF원으로는 25 - 60 MHz의 주파수 영역을 담당할 수 있도록 cavity tuning 방법을 사용한다. 300 초 동안 동작이 가능한 RF 튜브는 Varian사의 Eimac 4CM2500KG 튜브나 Thales사의 TH628A 튜브를 사용할 계획이다. Varian사의 Eimac 4CM2500KG 튜브는 일본의 국립핵융합과학연구소에서 LHD장치의 ICRF 장치에 사용하고 있고, 현재까지 30분간, 1.6 MW, 10초간 1.9 MW의 출력 특성을 나타내고 있다. TH628A 튜브는 diacrode는 Thales사가 전통적으로 사용해 온 tetrode 튜브의 출력제한을 극복하기 위해 개발한 것이고, 실험에 사용해 검증된 사례는 아직 없다.

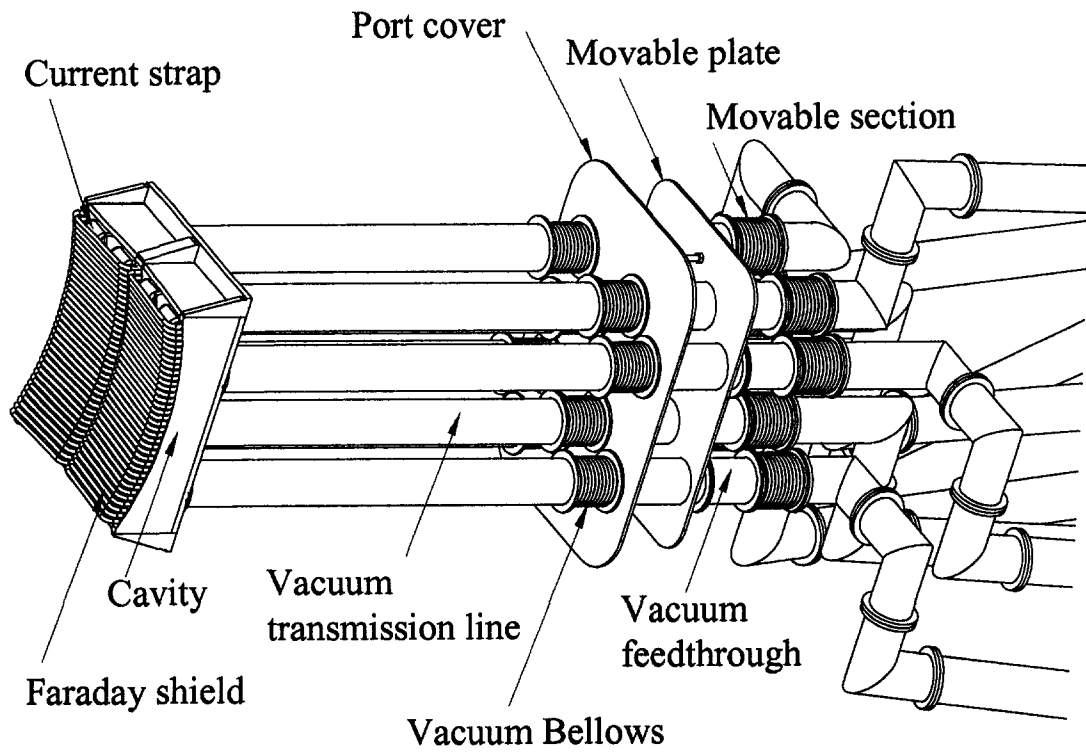


그림 3-2-3. ICH/FWCD 안테나 설계도

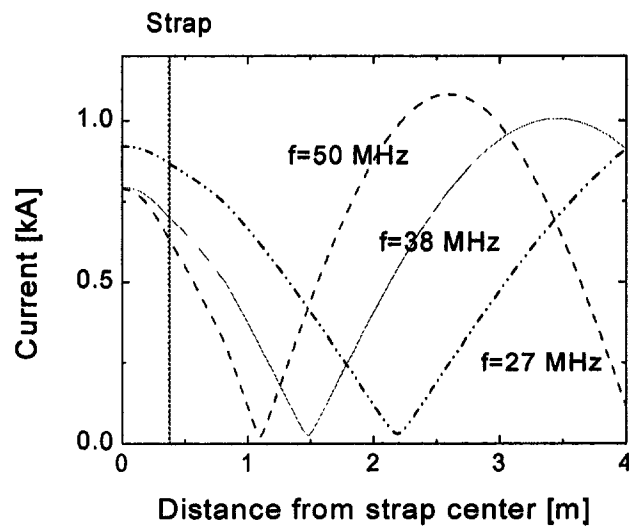
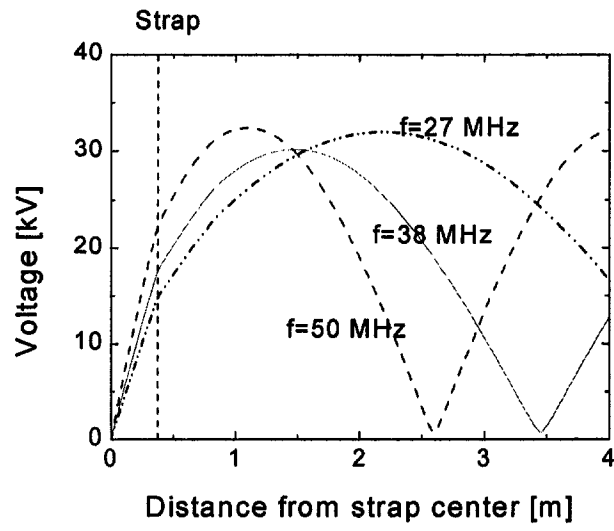


그림 3-2-4. 공명루프상의 전압(a)과 전류(b)의 분포

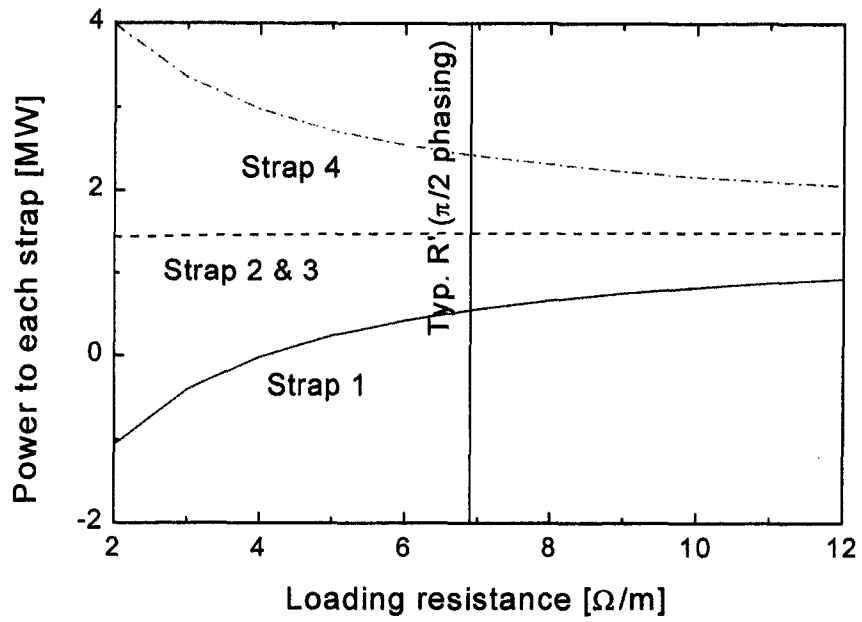


그림 3-2-5. Power needed to drive each current strap vs. loading resistance

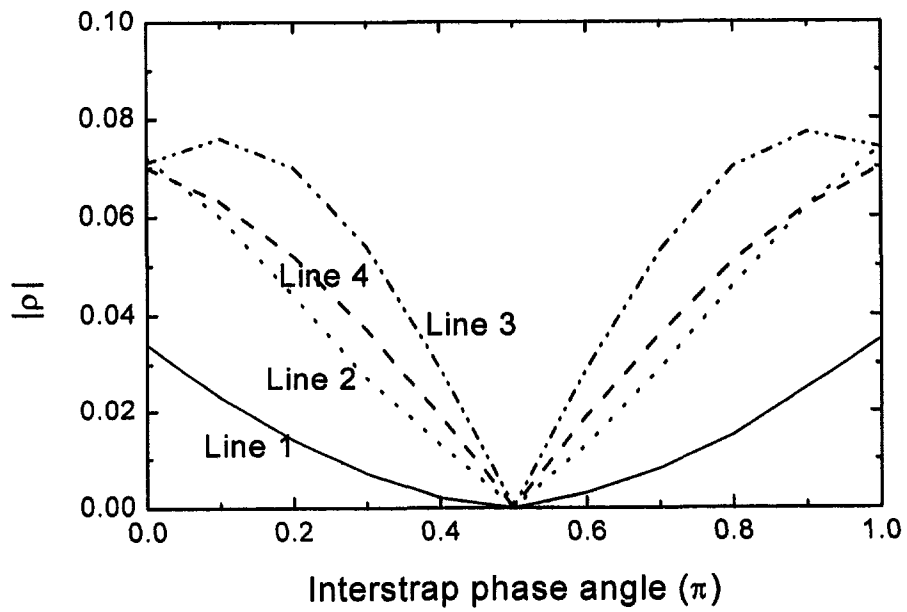


그림 3-2-6. Absolute value of reflection coefficient vs. interstrap phase angle at $f=38$ MHz with fixed tuning and matching system component settings

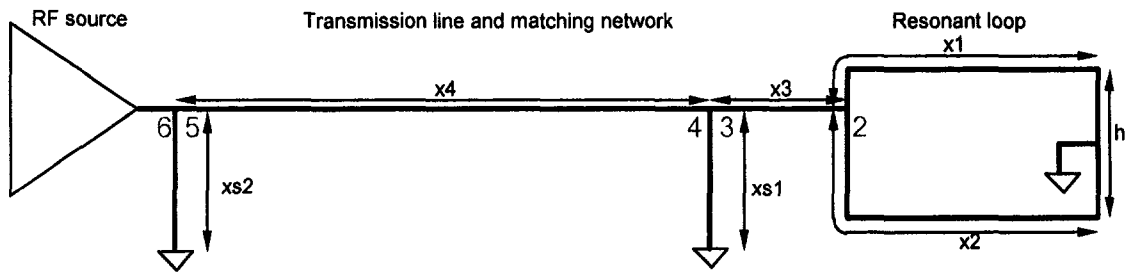


그림 3-2-7. Schematic of the circuit analyzed

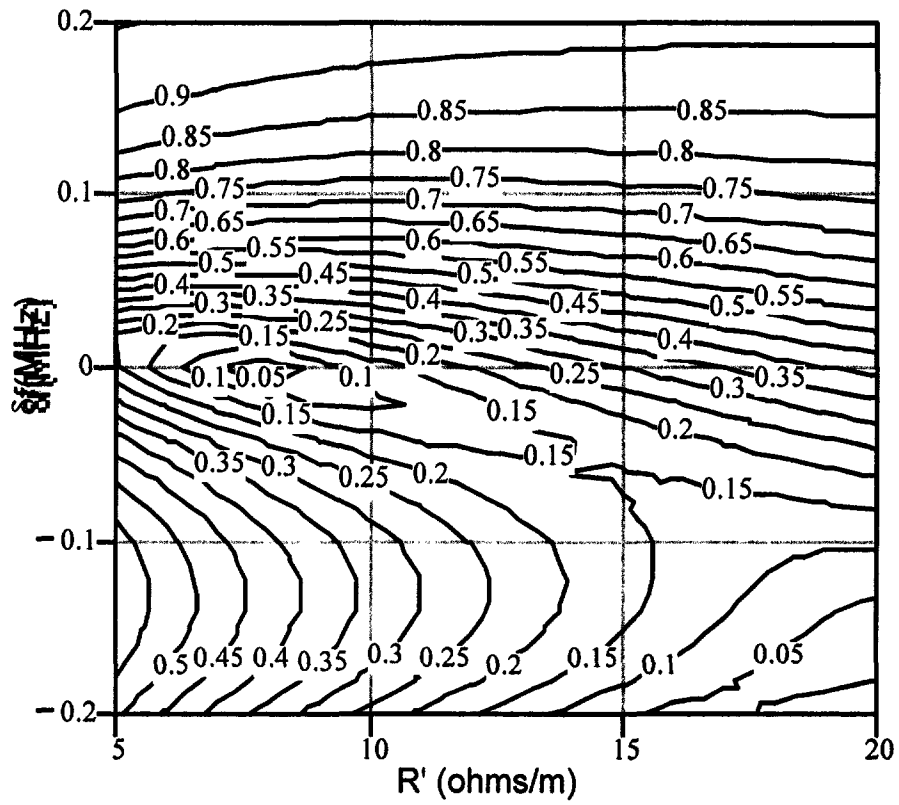


그림 3-2-8. Contour plot of $|\rho|$ at the transmitter as a function of plasma load R and frequency deviation from 38 MHz.

$f = 38$
 $x_1 = 16.89$
 $x_2 = 20.837$
 $x_3 = 1.9$
 $x_4 = 59.63$
 $xs_1 = 0.29$
 $xs_2 = 3.415$

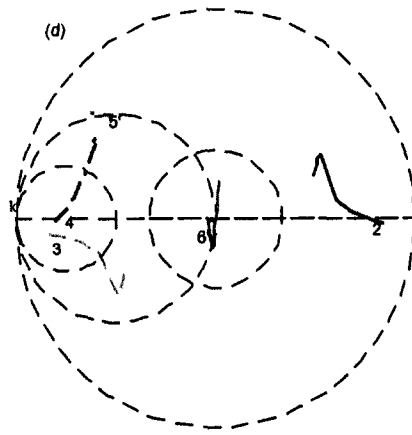
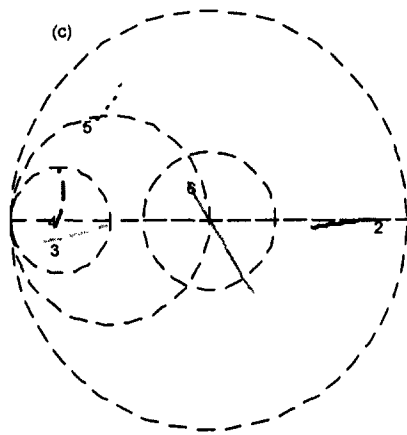
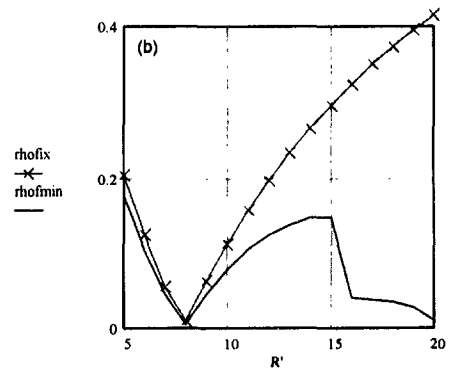
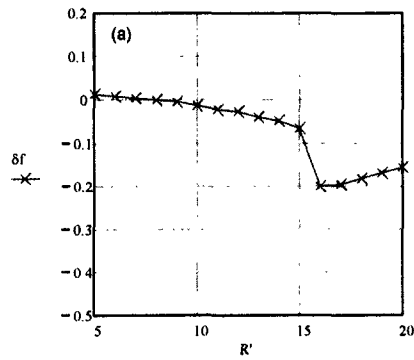


그림 3-2-9. Results of the frequency-shift optimization (a) Optimum frequency shift vs. R (b) $|\rho|$ vs. R for optimum freq. shift and no freq. shift

(다) 장치 상세설계의 검증 및 보완

RF 장치의 상세설계 자료의 기계적, 전기적 성능과, KSTAR 토카막과의 적합성 및 타당성을 PPPL (Princeton Plasma Physics Laboratory), ORNL (Oak Ridge National Laboratory), GA (General Atomic) 등 미국측 전문가들, JAERI (Japan Atomic Energy Research Institute), NIFS (National Institute of Fusion Science) 등의 일본측 전문가들, EU Workshop을 통한 유럽측의 관련 전문가들에 의해 검증을 받았고, 검토의견을 설계 보완에 반영하였다. (부록 1 ICRF 장치 계통설계 보고서)

(2) 저출력 계통 제작. 시험

(가) 설비의 개요

본 시스템(KSTAR 이온공명가열 시스템)의 운전 및 제어 시에 필요한 사항과 야기될 수 있는 문제점들을 파악하기 위해, 상용 회로분석기 출력수준의 저출력 계통시험 설비를 제작하였다. 이 설비는 기 설계된 KSTAR 이온공명가열 시스템(3.가. (1)항 참조)과 전기회로 상의 기능에서는 동일하도록 하는 것을 원칙으로 하였다. 설비는 그림 3-2-10과 같이 크게 안테나, 공진 루프, 정합회로, 그리고 회로분석기로 구성되어 있다.

그림 3-2-10에서 보는 것처럼 안테나는 4개의 전류 띠(current strap)로 구성되어 있으며 각 도전대의 양단을 구동하도록 되어 있고 전류 띠 중앙이 안테나 상자에 접지 되어 있다. 상하 두개의 구동포트를 동축 선으로 연결하여 하나의 공명루프를 형성시키고 있으며 이 루프의 한 지점에 T자형 접속구를 설치하고 해당 임피던스 정합회로의 출력 단에 연결되어 있다. 그림 3-2-10의 신호발생기는 실제 회로분석기가 담당하고 있으며 필요한 총 4개의 고주파 입력으로 회로분석기의 출력포트에서 나오는 신호를 파워 분할기를 사용하여 4개로 분할 한 후 공급하고 있다. 이번 시험에서는 공명루프와 임피던스 정합회로 사이에 오는 decoupler 회로는 취급하지 않았다. 따라서 그림 3-2-10의 1 watt 짜리 파워 증폭기 및 감쇄기는 사용안하고 파워 분할기 출력을 바로 정합회로에 연결하고 있다.

안테나는 하나의 실물대모형으로 전기적인 면에서는 KSTAR 이온공명가열 시스템으로 제안된 안테나와 동일하도록 하였으며 실물에서와는 다르게 용접을 사용하지 않고 볼트 조임을 채택하여 분해, 조립 및 부품의 교체가 용이하도록 하였다. 다만 페러디 차폐용 봉만은 편이 상 알루미늄을 사용하였다.

공명루프를 위한 동축 전선으로는 가능한 한 실제와 가깝도록 손실이 적은 반경식 선(semi rigid cable)을 이용하였다. 임피던스 정합회로에도 함께 채용한 위상조절기는 상용으로 구입 가능한 것을 이용하다보니 본 장치의 동작주파수대에서는

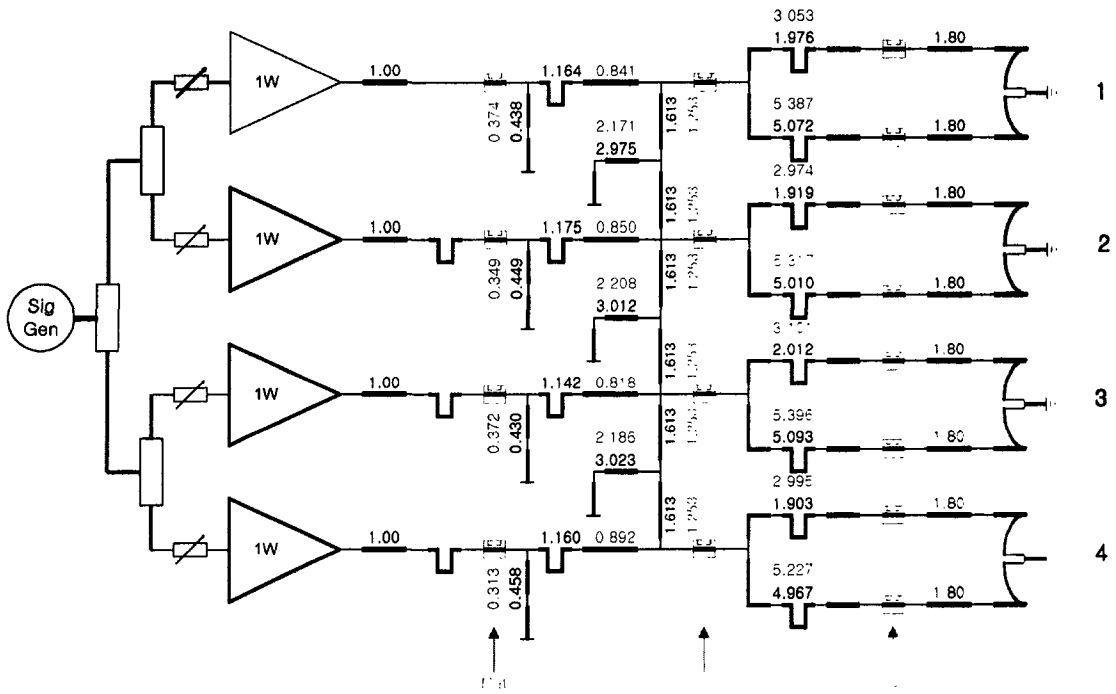


그림 3-2-10. KSTAR ICRH system의 low power test set

그 위상조정 폭이 충분하지 않아 미세 조정용으로만 사용하고 있다. 따라서 동작주파수대를 바꿀 때는 공명루프나 정합회로를 구성하는 동축 선들의 대부분을 새로운 길이의 것들로 교체해 주어야 한다. 임피던스 정합회로는 일반 동축 선을 사용하여 구성하였다.

파워 분할기는 3개의 2분 분할기의 조합으로 구성하였는데 가령 0, 90, 180, 270도 위상을 갖는 신호를 만들기 위해서는 180도 짜리 2분 분할기 하나와 90도 짜리 2분 분할기 두 개를 연결하는 식으로 원하는 위상분배에 따라 수동으로 조작하도록 하였다.

그림 3-2-10에서 볼 수 있는 것처럼 위상조절기가 모두 16개(stub 4개까지 포함해서)가 있으며 신호를 얻기 위한 방향성 결합기가 또한 16군데에 설치되어 있다. 위상조절기는 모두 모터가 설치되어 각각을 원격 구동하도록 하였고, 방향성결합기에서 나오는 신호들은 모두 하나의 선택스위치 상자에 연결되어 그들 중 어느 하나를 선택할 수 있도록 하였다. 선택스위치 상자는 GPIB 회로를 설치하여 컴퓨터가 구동할 수 있도록 하였으며 선택된 신호 즉 선택스위치 상자의 출력은 회로 분석기의 (입력)측정포트와 연결되어 있다.

(나) 회로조정(tuning) 시험

공명루프의 주요 기능 중 하나는 안테나 전류 띠 상에 상하대칭의 균일한 전류 분포를 형성하도록 하는 것이다. 전류 띠 상의 전류분포에 대한 가장 직접적인 측정은 이 전류에 의한 자기장 분포를 측정하는 것이나 실제 ICRH 설비에서 이러한 측정은 불가능하므로 전류 띠의 상하 단에 가장 가까운 그러면서 등거리 지점에 둔 방향성결합기에서 나오는 입사전압으로 판단하도록 하고 있다. 후에 실제 자기장분포를 측정한 시험에서 이 간접측정의 신빙성을 확인하였다. 전류분포의 대칭성을 겨냥한 회로조정 시험결과 이 조정은 비교적 쉬운 과정이라는 것을 알았다. 그 이유는 전류 띠 중간 지점에 설치된 접지 구조가 강력하게 작용하기 때문인 것으로 보인다(안테나 자체에 대한 S 파라미터 측정 결과를 보면 전류 띠 상하 부분간의 결합에 해당하는 파라미터가 0.3에 육박하지만). 회로 조정으로 얻을 수 있는 최적의 상태는 공명 루프와 안테나가 전류 띠 중앙에 대하여 손실성 비대칭을 얼마나 갖고 있는가가 결정하는 것으로 보인다 - 손실성 비대칭은 공명루프의 상하 길이 조정으로 바로 잡을 수가 없다. 손실성 비대칭은 주로 공명루프의 상하부분의 길이차(최소한 파장)에서 오는데 시험결과 문제가 될 정도는 아닌 것으로 본다.

공명루프에서 길이조정의 두 번째 목표는 루프의 T자 접속구에서 본 반사계수가 양의 실수 값이 되도록 하는 것이다. 즉 이 지점에서 본 임피던스가 최고의 실수 값을 갖게되고 전압의 최고치가 오게되는데 이 지점 이후의 정합회로에서 선로 전압의 최고치를 최저로 해주도록 하는 것이다. 시험 결과 이 조정은 상당히 민감하여 공명루프에 있는 위상조절기에 의한 미세 조정이 필요하였다.

다음에 임피던스 정합회로의 조절은 정합 회로의 입력 단에서 본 반사계수를 영으로 하는 것이다. 시험 결과 공명루프와 비교하여 훨씬 어려운 작업임이 확인되었다. 그 원인은 정합기의 부하에 해당하는 공명루프를 통한 안테나의 전력소모가 매우 적다는 점과 안테나의 이웃하는 전류 띠 사이에 결합이 있어 4개중 하나의 정합 회로에 대한 조절의 영향이 이웃 정합회로에도 나타나기 때문이었다. 따라서 정합 회로의 조절은 이를 위한 프로그램을 작성하여 컴퓨터가 스스로 할 수 있도록 하여야만 하였다. 컴퓨터가 4개의 정합회로에 들어있는 8개의 방향성결합기의 값을 읽고 각각의 위상조절기가 이동해야 할 값을 계산하여 해당 모터를 구동하도록 하는 일련의 과정을 반복시키는 프로그램을 작성하였다. 단 이동해야 할 값을 계산할 때 4개의 회로간 결합은 고려하지 않았는데 반복적인 조절이므로 무시하였다. 실행결과 10회 미만의 반복으로 4개의 반사계수가 모두 -30dB 이하로 떨어질 정도여서 정합회로 조절에 상기 방식이 효과적인 것으로 판단하였다. 표 3-2-1은 회로조절이 완료된 후의 주요회로 상수들의 일례를 보여주고 있다. 표 3-2-1에서 $V_{f,bot}$ ($V_{f,top}$)은 공명루프의 상(하)선분에 있는 방향성결합기의 입사 측 전압의 크기와 위상 각을 말하며 G_{tee} (G_{mat})는 T자 접속구(정합회로 입력 단)에서의 반사계수를 말한다. 또한 표의 전압 치는 회로분석기의 출력 측 파워 분할기의 입력을 기준으로 한 값이다. 따라서 방향성결합기의 결합계수 -20dB와 파워 분할에 의한 -6dB감소를 감안하면 $V_{f,top}$ 의 이상적인 값은 -26dB이다.

표 3-2-1에서 $V_{f,top}$ 의 각도들에서 볼 수 있는 것처럼 이 실험 결과는 파워분할기의 출력이 0, 90, 180, 270도의 위상으로 배열된 경우이다. 두 번째 항인 상하전압의 비를 보면 크기와 각도에서 이상적인 값 0dB, 180도에서 크게 벗어나지 않았음을 볼 수 있다. 다만 4번째 것은 하부가 상부보다 35%(2.6dB) 정도나 더 커 그 대칭성에서 약간 불만이다. 그에 대한 확실한 이유는 아직 찾지 못했다. 세 번째 항은 공명루프의 T자 접속지점에서 본 반사계수로 이상적인 값은 그 각도가 0도이다. loop4의 반사계수는 그 크기가 loop1에 비하여 3dB정도 작다. 안테나 전류 띠 사이의 결합이 원인으로 보고 있다. 즉 결합으로 인하여 loop4 쪽에서 loop1쪽으로 순파위의 이동이 있어 loop1의 반사계수가 더 높게 나타나는 것이다. 마지막 항은 임피던스 정합회로를 거친 후의 반사계수로 모두 만족할만한 값을 보이고 있다(이들의 위상 각은 무의미하여 생략했다).

표 3-2-1. Circuit parameters after tuning (Unit: dB, degree)

	$V_{f,top}$	$V_{f,bot}/V_{f,top}$	G_{tee}	G_{mat}
loop 1	-30, -98	0.37, 177	-1.6, -3.9	-43, -
loop 2	-31, -9.0	0.19, 178	-3.6, -7.3	-42, -
loop 3	-30, 81	-1.1, -180	-2.6, -3.7	-32, -
loop 4	-33, 171	2.6, -176	-4.8, -4.9	-51, -

(다) 안테나 전자기장 분포 측정 설비

안테나의 페러디 차폐 체 앞에서 일정간격을 두고 전장 및 자장 프로브를 이동해가면서 전자기장을 측정하였다.(그림 3-2-11) 프로브를 이동시키는 설비는 안테나 치수보다 충분히 큰 X-Y테이블과 프로브를 지지해주는 지지막대로 구성되어 있다.

안테나의 최 전면인 페러디 차폐 면이 플라즈마 표면에 맞도록 설계되어 있으므로 두 개의 곡률 반경(플라즈마 주 반경과 부 반경)을 갖는 곡면으로 되어 있다. 이 곡면을 따라 프로브를 이동시키고 또한 이동 중에 프로브가 현 위치의 곡면에 대하여 일정한 각도를 갖도록 하기 위해서는 X-Y테이블 외에 별도의 기능이 필요했는데 여기서는 관절이 있는 지지막대를 이용하여 해결하였다.

지지막대는 두 개의 관절과 상하 두 토막의 막대로 되어 있는데 관절 하나는 두 토막을 서로 연결하고 있고 나머지 하나는 위에 오는 막대 끝을 X-Y테이블의 지지구조에 고정하고 있다. 프로브는 아래 오는 막대의 끝에 고정된다. 막대의 총 길이는 플라즈마 주반경과 같게 하고 아래 오는 토막의 길이를 부 반경과 같게 하였다. 다음에 X-Y 테이블의 이동 점이 아래 토막을 구동하는데 두 관절의 회전운동에 의해서만 따라 다닐 수 있도록 하여 막대 끝 즉 프로브가 항상 두 개의 반경을 갖는 곡면 위를 수직으로 이동하도록 하였다. 이를 위해 X-Y 테이블의 이동점과 아래 토막사이에 오는 제3의 관절은 구면 베어링으로 하였으며 베어링의 축수에서 막대가 자유롭게 미끄러지는 구조이다. 막대의 두 관절은 보통의 원통형 베어링인데 회전축의 방향이 서로 직각이 되도록 설치하였다.

안테나의 전자기장 측정은 (나)항에서 설명한 회로조절 절차를 끝낸 후 그 상태에서 이어서 실시한다. 다만 방향성결합기의 신호를 받던 회로분석기의 입력포트가 이번에는 프로브 상자에 연결된다. 프로브 상자는 프로브의 신호를 전처리 해주는 간단한 회로가 들어 있는데 프로브 바로 다음에 교차스위치가 오고 그 다음에 2분 파워 분할기 마지막으로 고주파 증폭기(약 20dB)가 있어 증폭기의 출력이 신호케이블을 통하여 회로분석기에 연결된다. 증폭기는 긴 신호케이블에 결합되어 들어오는 고주파 신호 성분의 영향을 줄이기 위해 사용했으며 파워 분할기와 교차스위치는 프로브 두 단자의 차 신호만을 얻기 위하여 두었다. 프로브를 통하여 들어오는 신호는 두 단자 사이의 차 신호와 합(공통) 신호로 나누어 볼 수 있는데 후자의 공통신호는 측정하려는 자기장 또는 전기장 값에 포함되어서는 안 되는 신호이다. 특히 전기장의 경우 공통신호의 영향이 큰데 이에 대해서는 전기장 측정 항에서 더 자세히 설명하도록 하겠다. 교차스위치는 프로브의 두 단자와 파워 분할기의 두 단자와의 연결을 뒤집을 수 있도록 한다. 한 지점의 측정에서 교차스위치로 두 경우 신호를 얻으면 그 두 값은 동일 크기에 180도 위상 차를 보여야 할 것이므로 그들의 차를 계산하면 공통신호 분을 상쇄 할 수 있게 되어 특히 원하는 신호가 약한 곳에서 이러한 조작이 유용하게 된다.

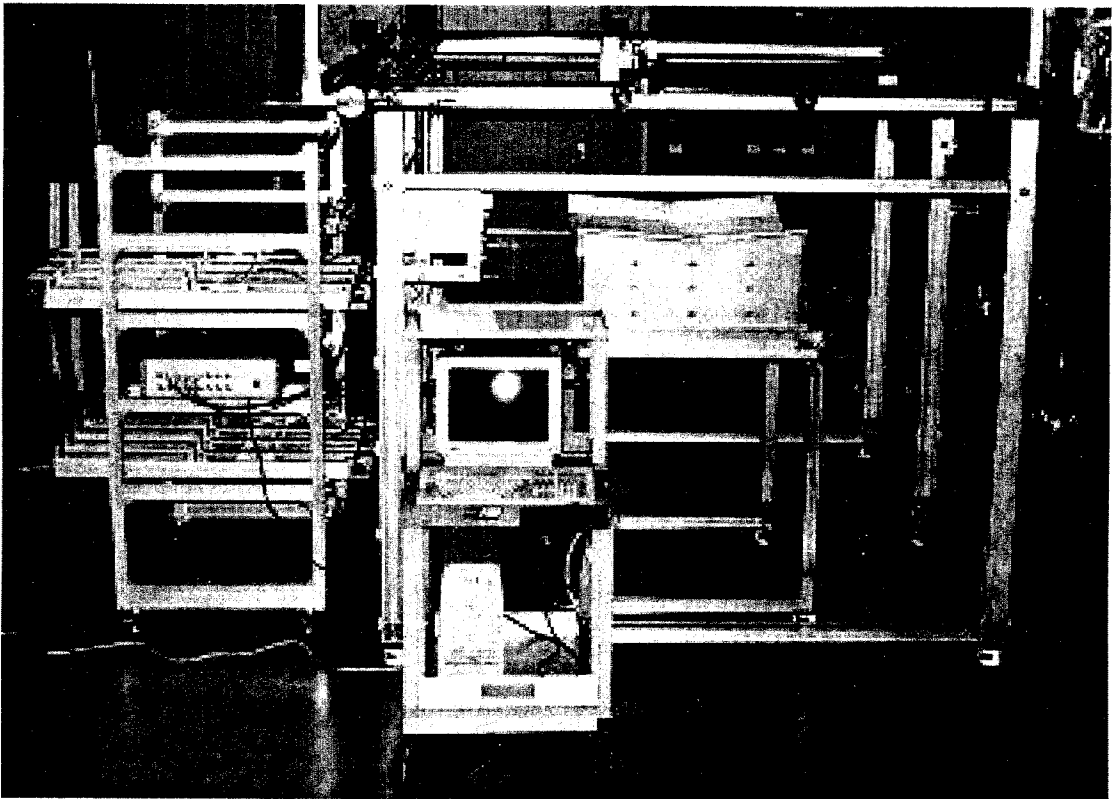


그림 3-2-11. 구성된 저출력시험 장치와 안테나 전자기장 분포 측정 설비

(라) 자기장 측정

자기장을 측정하기 위한 프로브는 면적 2 평방 센티 정도의 단일권선루프(single-turn loop)의 도선으로 하였다. 그림 3-2-12에 토로이달 성분의 자기장분포 측정 결과를 보였다. 토로이달 방향은 안테나 전류 띠에 수직하는 방향으로 이 방향의 자기장분포는 전류띠를 따라 가는 방향(폴로이달 방향)의 전류 분포를 반영한다. 이 전류는 안테나 차폐 창의 영향을 무시하면 쉽게 결정되는 분포를 갖고 있는데 측정 결과를 보면 예상하는 바와 같이 그 영향이 거의 없음을 알 수 있다. 차폐 창의 도체(알루미늄) 봉이 전류 띠와 수직으로 배열되어 있으므로 이들이 전류 띠 방향의 전류는 형성할 수 없기 때문일 것이다. 다만 차폐 창이 전류 띠를 따라 진행하는 진행파의 파장에는 영향을 주었겠지만 측정한 토로이달 자기장의 진행파 방향(전류 띠 방향) 분포로는 가장자리 효과 때문에 그 정도를 알아보기 어렵다.

(나)항의 회로 조절에서 공명루프의 길이 조절의 첫 번째 목표가 전류 띠에서 전류분포의 대칭성을 맞추는 것이었고 이를 간접적으로 공명루프에 설치한 방향성 결합기에서 입사전압 만을 보고 조절하였었다. 그림 3-2-13에 4개의 전류 띠에 대한 자기장의 폴로이달 분포를 보였으며 토로이달 좌표는 각각의 최고 값을 보이는 위치로 고정한 것들이다.

그림 3-2-13에서 자기장분포의 좌우대칭성이 양호함을 볼 수 있다. 좌측이 표 3-2-1에서 하부(bottom)를 우측이 상부(top)에 해당한다. 표에서 loop4의 경우는 상하부 입사전압의 비가 2.6dB에 4도의 위상 차가 있는 경우이지만 전류 띠에서 전류분포의 비대칭성은 그 정도로 심각하지 않은 것을 볼 수 있다.

한편 4개의 띠 사이의 전류크기는 눈에 띄는 차이가 있어 4번은 제일 큰 1번의 70%정도이다. 띠에서의 전류 크기와 공명루프의 회로 상수간의 상관관계는 더 많은 경우를 실험해보아야 확신할 수 있으나 공명루프에서의 전류 값이 결정한다고 볼 때 현재 측정하고 있는 입사 전압만이 아니라 반사전압도 함께 측정해야 할 것 같다. 그러나 반사전압은 입사전압 측정 지점에서 반사계수가 결정하고 그 크기는 공명루프의 T자 접속 지점에서의 것과 큰 차가 없다고 본다면 그 입사계수와 함께 표의 3번 항 G_{tee} 를 비교하여도 될 것이다. 그렇게 보고 표 3-2-1의 값으로 전류 $\propto V_{f,top}(1+G_{tee})$ 와 같이 추산하여 비교하면 전류 비가 번호순으로 1 : 0.81 : 0.96 : 0.61 이 되어 그림 3-2-13의 1 : 0.76 : 1 : 0.68 과 추세는 비슷하지만 정확하다고는 볼 수 없어 좀더 조사해 보아야 할 사항이다. 전류 띠 사이에 이러한 차이가 나는 것은 띠들 사이에 전자기적 결합현상 때문인 것으로 보고 있다.

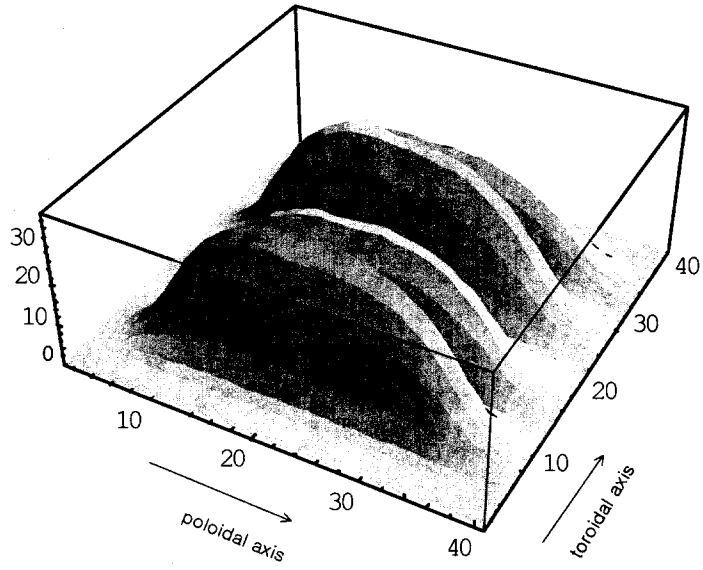
안테나에 대한 산란계수(scattering parameter)들을 측정한 결과를 보면 1번과 2번 그리고 3번과 4번 사이의 결합에 해당하는 값이 0.08에 -23도이고 2번과 3번 사이는 0.06에 -20도이다. 이들 각도의 부호가 음인 것은 결합에 의한 파워가 위상이 늦은 쪽에서 앞서가는 쪽으로 흘러가는 것을 이야기하고 있다. 따라서 실험에서 선택한 0, 90, 180, 270도 위상 배열에서는 순 파워가 4번 쪽에서 1번 쪽으로 흘러가

는 것으로 판단된다. 즉 4번의 반사계수는 대체로 평균보다 작아지고 1번은 커지는 것이다. 그렇게 보면 3번에서 2번으로 가는 파워는 4번에서 3번으로 오는 것 보다 그 크기와 각도 면에서 열세이므로 3번도 큰 값을 갖는 것으로 보이나 실제 전류 띠의 정확한 전류 값은 좀더 자세한 해석이 필요한 것으로 판단한다.

그림 3-2-14는 폴로이달 방향 자기장 분포를 측정한 결과이다. 이 방향의 자기장은 전류 띠에 수직인 방향으로 흐르는 전류 즉 토로이달 전류가 만들 것이다. 이 방향의 전류에 대하여 가능한 길 중에 하나는 차폐 창의 도체 봉을 따라 흐르는 길이다. 안테나 상자 벽에 접지 되어 있는 도체 봉과 전류 띠 사이에는 고주파 전압이 걸리게 된다. 이 전압에 의하여 도체 봉 표면에 전하가 유기 되고 이를 위한 전류가 도체 봉 표면을 따라 흐르게 될 것이다. 또 하나의 원인은 전류 띠에 의한 토로이달 자속이 도체 봉 사이를 빠져나가면서 스쳐 지나가게 되는 도체 표면을 흐르게 되는 전류 때문이다. 이 전류의 방향이 자속의 방향과 수직이므로 결국 폴로이달 성분의 전류를 형성하게 된다. 후자의 자장에 의하여 유도되는 전류가 전자의 전압에 의해 유도되는 전류와 다른 점은 자장에 의한 전류는 도체 봉의 양면을 서로 반대방향으로 흘러 하나의 도체 봉에 대해서는 순 전류가 영이라는 점이다. 따라서 자장에 의해 유도되는 전류가 만드는 것은 도체 봉 근처에 국부적으로만 존재 할 것이므로 실험에서 측정된 폴로이달 자기장은 주로 전압에 의해 유도된 전류가 만드는 것으로 볼 수 있다. 그림 3-2-14에서 보듯이 전류 띠 방향 폴로이달 자기장 분포가 전류분포가 아니고 거의 전압분포 쪽을 따라가고 있다는 것이 이러한 사실을 뒤 받침 한다. 뿐만 아니라 폴로이달 자기장의 위상분포도 전류 즉 토로이달 자기장과는 다르게 전압처럼 전류 띠 중앙부근에서 반전하고 있다.

토로이달 전류가 흐를 수 있는 또 다른 길은 안테나 상자의 상하 벽 표면이다. 안테나 띠에 흐르는 전류의 이미지가 안테나 상자의 내 면을 흐를 것인데 전류 띠가 상하 벽을 떠나 양측 벽(한 쪽은 격벽(septum))과 나란해지는 부근에서는 이미 지 전류가 상하 벽에서 좌우 벽으로 길을 바꿔 잡아야 할 것이고 그 과정에서 토로이달 성분을 가져야 될 것이기 때문이다. 이 전류는 안테나 상하 단에서 토로이달 분포에 영향을 줄 것으로 예상되는데 측정결과에서 그 상관관계를 찾아내기는 어려워 보인다. 그림 3-2-14에서 보듯이 이 자기장의 토로이달 방향의 분포는 전류 띠들 사이에서 정점들을 보이고 있으며 특히 2번과 3번 사이에서 최고봉을 가지고 있는데 아직 적절한 해석을 찾지 못했다.

(a)



(b)

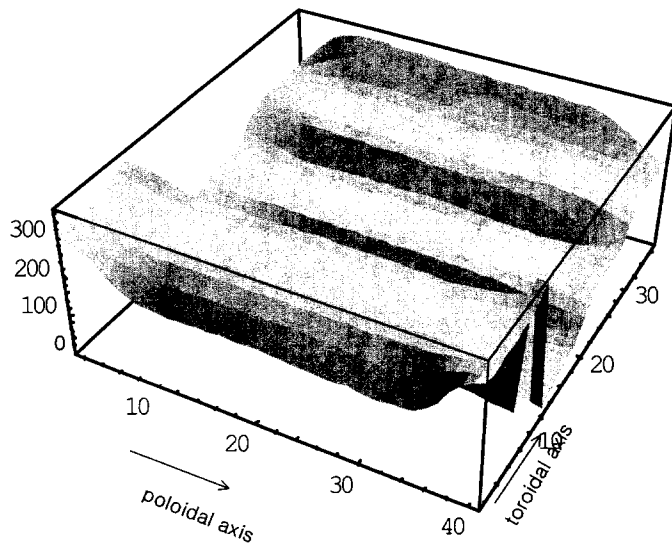


그림 3-2-12. 토로이달 자기장의 분포 : (a) 자기장의 세기와
(b) 자기장의 위상

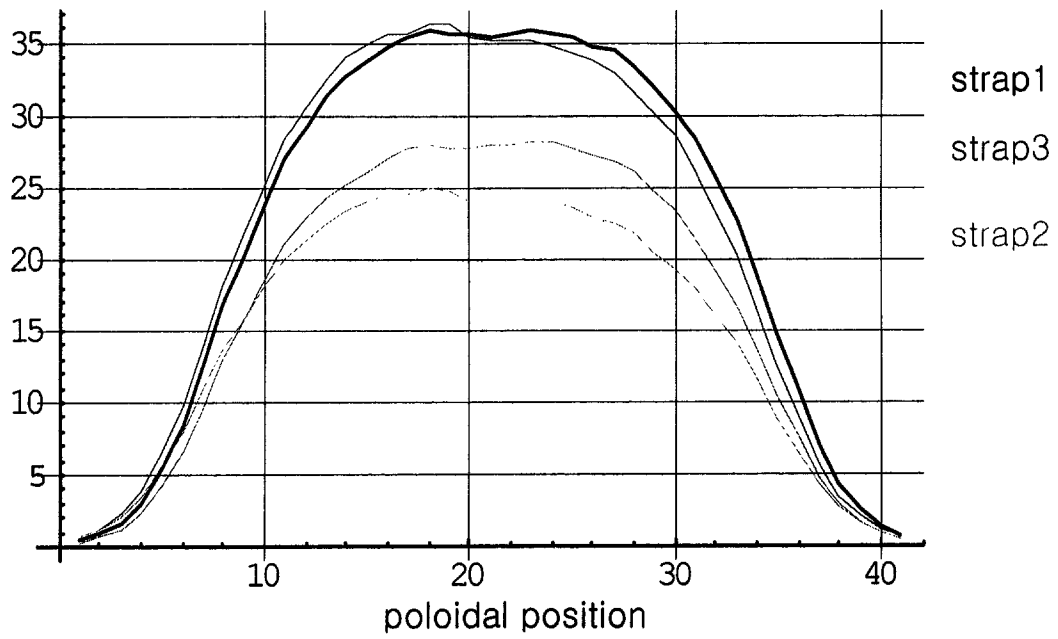
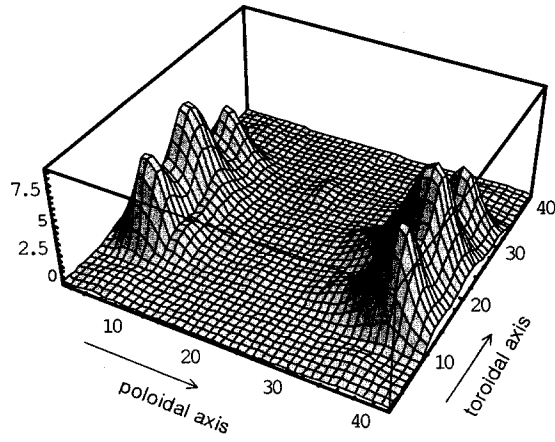


그림 3-2-13. 토로이달 자장의 폴로이달 분포

(a)



(b)

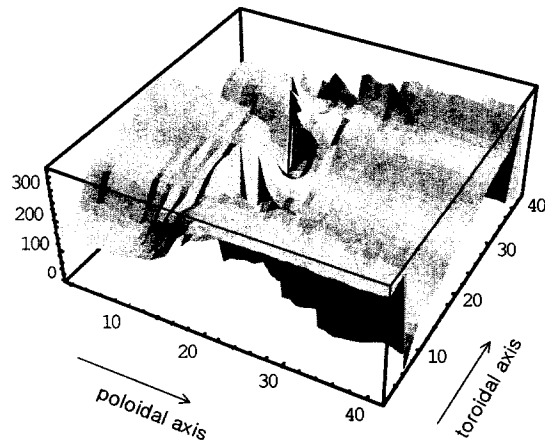


그림 3-2-14. 폴로이달 자기장 분포: (a) 자기장의 세기와
(b) 자기장의 위상

(마)전기장 측정

전기장 측정을 위한 프로브는 두 장의 평행 도체 판 형태로, 판의 면적이 2.5평방 센티 정도이며 간격은 1mm 정도로 얇은 회로기판을 절단하여 만들었다. 그림 3-2-15는 전기장의 측정 결과로 안테나 면에 수직인 성분 즉 프로브의 평행 판을 안테나 면과 나란하게 하고 측정한 것이다. 전기장 측정에서 두 개의 도체를 사용하여 측정할 때 일반적으로 두 가지 신호가 동시에 잡히게 되는데 그 중 하나는 두 도체 사이의 전위 차에 비례하는 신호로 측정하려는 전기장을 나타낸다고 볼 수 있는 신호이고 다른 하나는 두 도체의 평균 전위 즉 측정 지점의 전위에 비례하는 신호로 전기장 분포의 측정을 방해하는 신호이다. 프로브의 접지 면에 대한 대칭성을 완벽하게 하면 평균 전위의 영향을 차단할 수 있으나 접지 면에 수직인 전기장의 경우는 원하는 전기장의 신호도 함께 차단되어 버린다. 이상적으로는 프로브를 완전 절연 상태 또는 높은 임피던스를 갖도록 하는 것인데 현실적으로 한계가 있다. 사용한 프로브에 대하여 이 두 가지 신호의 비율이 얼마나 되는지를 아직 확인하지 못했다.

그림 3-2-15의 전기장 측정 결과를 보면 폴로이달 방향의 분포는 예상되는 전류 띠의 전압 분포와 그 크기나 위상에서 벗어나지 않음을 알 수 있다. 그러나 토로이달 분포는 예상되는 전압 분포와 크게 다르다. 실제 안테나의 차폐 봉을 일부 제거하고 전기장 분포를 측정하면 정상적인 전파선(transmission line)의 전기장 분포가 나타난다. 차폐 봉이 있을 때와 없을 때의 가장 두드러진 차이는 동일 지점에서 두 경우 측정값 위상이 거의 180도의 차가 난다는 것이다. 즉 전류 띠와 부호가 반대인 전하에 의한 전기장이 나타나는 것으로 (라) 항에서 설명했던 전류 띠 전압에 의하여 차폐 봉에 유도되는 전하가 참여하는 것으로 본다. 따라서 차폐 봉이 있을 때의 전기장은 전류 띠의 전하와 이와 반대 부호인 차폐 봉 전하에 의해서 만들어지는 두 전기장의 합으로 볼 수 있을 것이다. 차폐 봉들의 간격을 정상적인 치수보다 더 넓혀 가면 전기장이 줄어드는 것을 볼 수 있는데 이는 차폐 봉에 유도된 전하의 전기장에 비하여 전류 띠에 의한 전기장의 영향이 점점 더 커지면서 나타나는 현상일 것이다. 결국 차폐 봉들의 간격을 조절하면 안테나 면에 수직인 전기장의 경우 완전히 차단할 수 있을 것으로 본다. 물론 이 때의 전기장은 현재 측정값이 그러한 것처럼 공간적으로 평균적인 값을 이야기하고 있으며 국부적인 전기장은 항상 존재할 것으로 본다.

그림 3-2-15와 같이 폴로이달 분포가 4개가 아니고 두 개의 정점만을 보이고 있는 것은 다음과 같이 설명할 수 있다. 실험에 사용한 안테나의 차폐 봉은 안테나 상자의 양쪽 벽 그리고 중간 벽 3 곳에 접속되어 있는 구조로 차폐 봉 하나가 전류 띠 두 개씩을 가로지르고 있다. 따라서 전류 띠 두 개가 차폐 봉 하나를, 전하 유도라는 면에서, 공유하고 있는 구조이다(물론 이러한 분류 또는 공유 개념은 물리적인 것이라기보다는 문제를 쉽게 보기 위한 하나의 논리적 개념에 더 가까운 것

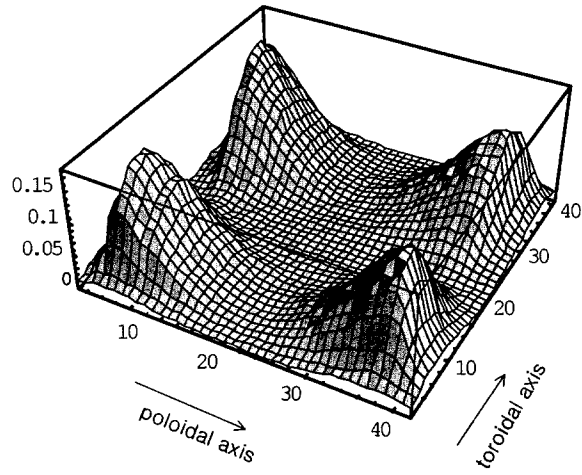
이다). 그림 3-2-16은 안테나 구조의 전류 띠 방향에 대한 단면도이다. 차폐 봉은 직경이 10mm 이고 정상적인 배열에서 봉 사이의 간격은 5mm 정도이다. 차폐 봉과 전류 띠 사이의 틈은 평균 15mm 정도이다.

지금 전류 띠 두 개의 위상 차가 0도인 경우와 180도인 경우를 생각해 보도록 하자. 임의의 위상 차에 대해서는 그 두 경우를 적절히 중첩하여 주면 될 것이다. 전류 띠 두 개의 위상 차가 180도인 경우는 하나의 차폐 봉에 두 가지 극성의 전하가 유도되는 경우이다. 유도되는 전하의 양은 전류 띠의 전압뿐만 아니라 차폐 봉과의 상대적인 위치가 결정할 것이다. 따라서 두 전류 띠의 위상 차가 180도인 경우 순 전하가 정확하게 영이 된다고는 말할 수 없으나 그림 3-2-15에서 두 띠의 차폐 봉에 대한 상대적 위치를 비교하여 볼 때 순 전하가, 위상 차 0도인 경우에 비하면, 무시할 정도라고 할 수 있다. 반면에 0도인 경우는 전류 띠 두 개가 같은 극성의 전하를 차폐 봉에 유도하는 경우이다.

다음에 전류 띠 하나 당 유도하는 전하량을 좀더 정량적으로 비교해 보기 위하여 전하가 모이는 중심점에서 접지 부분까지에 작용하는 인덕턴스를 비교해 보자. 결국 이 경우에 모이는 전하량은 그 인덕턴스에 의한 임피던스에 비례할 것이기 때문이다. 0도의 경우는 그 대칭성에서 차폐 봉의 접지 부분에서 전하가 모이는 부분 즉 전류 띠의 중심 위치까지의 길이에 해당하는 부분의 인덕턴스가 작용할 것이나, 180도의 경우는 이 인덕턴스에 병렬로 두 전류 띠 사이의 길이의 반에 해당하는 차폐 봉이 갖는 인덕턴스가 함께 작용할 것이다. 따라서 접지 점과 전류 띠 사이 그리고 띠 와 띠 사이의 인덕턴스가 같다고 보면 180도의 경우 작용하는 임피던스는 0도 경우의 1/3 정도가 되어 유도되는 전류 띠 하나 당 전하량도 1/3 정도 일 것이다. 180도의 경우는 쌍극자의 전기장이며 0도의 경우는 단극자(mono pole)의 전기장이라는 점을 함께 고려하여 측정위치인 차폐 봉에서 1.5cm 정도 떨어진 곳에서 두 경우의 전기장을 비교해서 생각해 보면 180도의 경우는 그 세기가 0도의 경우에 크게 못 미칠 것임을 알 수 있다.

실제 두 경우의 전기장을 측정해보면, 정상적인 차폐 봉 간격에서, 180도인 경우는 그 정점이 차폐 봉 양쪽으로 두 개가 생기고 그 크기는 0도인 경우 정점 값의 1/10 정도이다. 0도 인 경우의 정점은 차폐 봉 중앙에 하나 온다. 따라서 그림 3-2-15에 보인 위상 차 90도의 경우는 1 : 1 크기의 0도 성분과 180도 성분에 대한 각각의 전기장을 중첩한 경우일 것이므로 이 때의 전기장은 0도 짜리 전기장과 그 분포에서는 거의 다를 바가 없을 것이다.

(a)



(b)

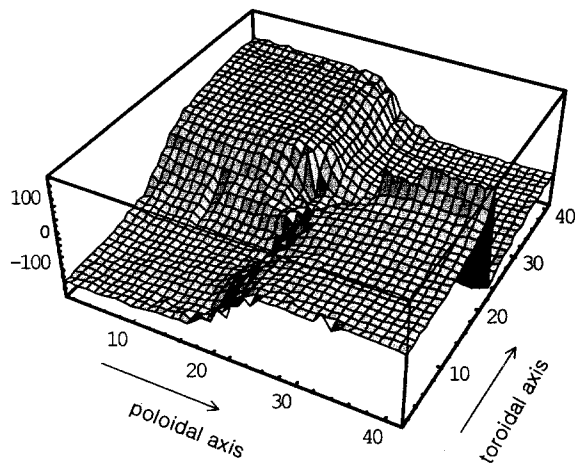


그림 3-2-15. 라디알 전기장의 분포: (a)전기장의 세기와
(b) 전기장의 위상

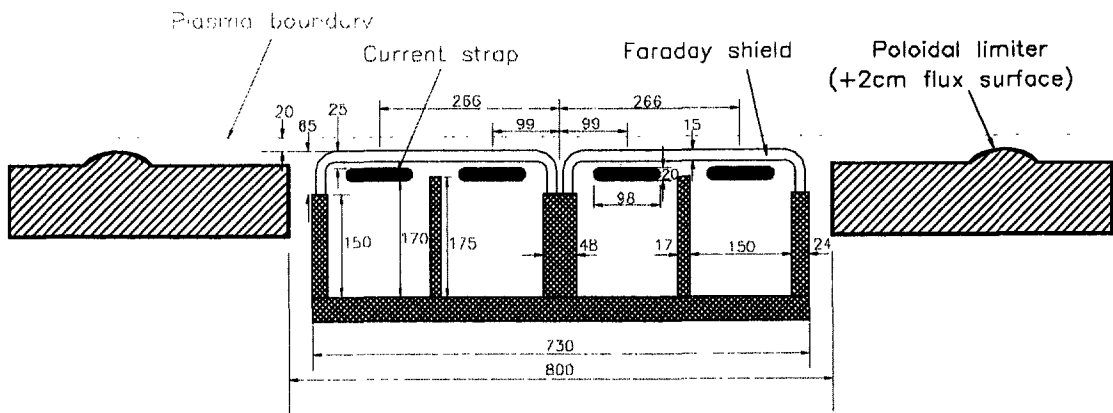


그림 3-2-16. 안테나 단면도

나. 고풍력 RF파 발생장치 기술개발

(1) 100kW 고주파 송출기 출력 최적화

(가) 서론

KSTAR의 ICH(Ion cyclotron heating)를 이용한 고온 플라즈마 가열에는 8 MW 출력과 25-60 MHz 주파수 영역을 갖는 고주파 전원을 사용하여 토카막 내부의 이온과 전자를 선택적으로 가열하고 플라즈마 전류를 구동하도록 설계되어 있다. 이를 위하여 원자력연구소에서는 ICH안테나 및 고주파 전송 부품의 제작을 수행하고 있는데 이들의 고전압/고전류 시험을 위하여 1998년도에 100 kW 고주파 송출기 시스템을 제작하였다.(KAERI/TR-1138/98) 기제작된 100 kW 고주파 송출기를 연속 운전상태에서 안정적으로 동작하도록 성능 개선을 수행하였다. 송출기의 주요 개선 사항으로는 입력회로의 Q값을 낮게 유지하여 시간변화에 따른 출력의 안정화를 달성하였다. 안정된 연속 운전을 위하여 공진기내부의 출력 인덕터를 수냉이 가능하도록 하였고, 콘덴서, Anode choke를 고용량 부품으로 교체하였다. 부대설비로서 30 kW급의 chiller를 설치하여 진공관의 Anode와 dummy 부하에서 발생하는 열을 2차 열교환기를 통하여 배출하였다. 또한 필라멘트 전원의 운전 및 송출기의 운전 조건 측정을 위하여 VXI를 사용하였다. (그림 3-2-17)

(나). 송출기의 시스템 변경 사항

① 입력 및 출력 회로 수정

입력회로단을 L형 정합회로에서 pi 형 정합회로로 교체하였다. 그림 3-2-18에서 10 nF의 dc blocking capacitor를 입력단 바로 앞에 두고, 2개의 1000 pF 용량의 vacuum variable capacitor 및 inductor로 pi 형 정합회로를 구성하였다. 출력회로에서는 기존의 반원 모양의 inductor를 그림 3-2-19와 같이 가변이 가능한 모양으로 제작, 교체하였으며, 연속운전을 위해 water cooling line을 설치하였다.

연속운전을 위해 30MHz에서 40 μ H의 값을 갖는 anode choke를 지름이 6mm인 구리 관으로 제작하였다. feedback에 의한 기생발진을 제거하기 위해 사극과의 anode와 입력정합단 사이에 설치한 중화회로를 주파수에 따른 입출력 단의 coupling을 최소화하기에 용이하도록 가변이 가능한 모양으로 변경하였다.(그림 3-2-20) 2개의 25 pF ceramic capacitor와 5개의 50 pF ceramic capacitor 및 30 pF의 vacuum variable capacitor로 구성하였으며 30 MHz에서의 입출력단의 coupling을 최소화하기 위해 Anode 임피던스를 420 ohm으로 설정한 후 30 pF의 진공가변콘덴서를 조정하여 -34.4dB의 coupling 값을 얻었다.(그림 3-2-21) 이 값은 송출기의 power gain보다도 훨씬 작으므로 중화회로가 기생발진을 제거하기에

충분하다. 입력단의 Q가 높아서 송출기의 출력이 입력 임피던스 정합의 상태에 민감하게 반응하므로 영향을 최소화하기 위하여 입력 정합장치에 10ohm 저항을 cathode 단에 병렬로 설치하여 출력을 안정화하였다. 그림 3-2-21은 개조된 출력단 cavity의 사진이다.

② 플레이트 전원

송출기 운전시(전기부하가 최대일 때) anode 전원의 전압강하를 최소화하기 위해 최대 setting 전압에서 anode 전원의 전압조정 SCR이 다이오드와 같이 동작하도록 구성하였다. 4극 진공관내부의 아크발생시 전류를 제한하여 사극관을 보호하기 위해 설치한 4개의 120 ohm(1 kW) 병렬저항은 전류가 최대로 흐를때 발생하는 과열을 방지하기 위해 150 ohm(1kW) 저항을 병렬로 하나 더 연결하였고 팬을 사용하여 냉각하였다.

③ 수냉 계통

연속운전시 100 kW의 열출력(dummy load+ tube)의 적절한 냉각을 위하여 2극 물펌프 (동해펌프, DHS-3-40-MVSA, 용량 : 0.15m³/m, power : 2.2kW)를 사용하여 수압을 2기압 이상으로 상승시켜 유량을 증가시켰다. 또한, 수압증가에 따라 기존의 폴리 계통의 flexible cooling line을 모두 SUS rigid line으로 교체하였으며, 그 결과 분당 77리터의 tube 유량을 유지할 때, dummy load에 흐르는 유량은 분당 60리터까지 증가시킬 수 있었다. 또한 연속운전 중 냉각수의 온도 상승을 억제하기 위해 열교환기에 2차 냉각시스템으로 공랭식 30 kW chiller를 설치하여 가동하였다. 동절기 가동 시에는 냉각수관의 동파방지를 위해 부동액을 사용하였다. 부동액은 인체에 무해한 PG 부동액(SUPER-A GREEN)을 사용하였고 chiller의 냉각수 탱크용량이 400리터이므로, 60리터의 부동액을 혼합하여 -5 C까지도 운전이 가능하도록 하였다. 그림 3-2-23에 수냉계통의 개념도를 나타내었다.

④ 시스템 monitoring 및 control

시스템 control은 대부분 수동으로 조절되나, 필라멘트 전원 조종과 data-acquisition은 VXI를 통해서 이루어진다. 자세한 프로그램에 관련된 사항은 4장에 기술하였다. 송출기 운전 중 cavity내에서 고전압, 고전류에 의한 절연파괴 및 방전이 일어나면 capacitor 및 4극 진공관에 치명적인 손상을 주기 때문에, 이를 감시하기 위해 아크 발생시에 생성되는 UV선을 감지하도록 cavity 벽의 작은 구멍에 arc detector (LEHMANN electronic, UE-01)를 설치하였다. 연속운전 중 control-grid 와 screen-grid의 전류 및 전압 변동을 monitoring 하기 위해 전류계와 전압계를 설치하였다. 특히, control grid의 역전류 측정을 위해서 ABB사의 전류센서를 사용하였다. 4극 진공관의 냉각수 온도를 monitoring 하기 위해 inlet 및 outlet cooling line에 설치되었던 온도센서를 K-type thermocouple로 교체, 설치함

과 동시에 100kW dummy load 출구에도 설치하였고, 온도를 monitoring 하기 위해 디지털 온도표시기를 설치하였다.

⑤ Timing/interlock 시스템

송출기의 운전은 펄스로 제어하고 있기 때문에, 1초 이상의 연속운전을 위해 충분히 큰 펄스 길이를 발생시킬 수 있는 펄스 발생장치를 제작, 설치하였다. 이 장치는 펄스 길이 뿐만 아니라, 펄스의 크기 및 rising time의 시간도 100ms까지 조정이 가능하다. 특히 일정전압 이상의 전압이 입력되면 자동으로 off되는 데, 송출기 운전 시 일정 전압 이상의 반사파가 들어오면 송출기로의 입력을 자동으로 차단해주는 역할을 하고 있다. 그림 3-2-24는 counting dial의 turn수에 따른 펄스크기 (output), 차단전압(Vref), rising time의 변화를 선형적으로 보여주고 있다.

(다) 100kW 송출기의 동작 특성

주파수를 변화하면서 입력 임피던스를 정합시킨 결과, 주파수에 따른 입력 정합 장치의 정전용량 변화중 특히 cathode 단에 위치한 C2의 정전용량이 주파수 변화에 민감하게 반응하므로 C2의 제어에 각별한 주의가 요구된다. 네트워크 분석기를 이용하여 30 MHz에서 입력 정합 장치의 입력 임피던스를 50 ohm에 정합시킨 결과는 그림 3-2-25와 같다. 이때의 C1, C2의 정전용량은 각각 797 pF과 769 pF이다

그림 3-2-26은 30 MHz에서의 송출기 운전시 주파수 변화에 따른 출력변화를 측정된 결과이다. 2 kW 드라이버단을 포함한 경우로서 100 kHz 정도의 3dB 대역폭을 가지고 있다. 그림 3-2-27은 드라이버 입력 power에 따른 최종증폭기의 출력을 나타낸 결과로서 연속 운전시 60 kW의 출력에서 15 dB이상의 이득특성을 보이고 있다.

(라) VXI 제어계

① Monitoring/control

VXI crater와 PC간에는 GPIB interface를 사용하며 NI사의 Lab windows를 사용하여 프로그램 하였다. Data acquisition은 초당 2 Sampling Rate로서 +/- 10V 이내의 신호를 획득한다.

- Forward Power
- Reflected Power
- Plate Current
- Control Grid Current
- Screen Grid Current
- Water Outlet Temperature

- Motor Driven Stubs 4ch
- Coax Auxiliary 1ch
- Auxiliary 4ch

+10V 아날로그 TTL I/O 및 임의파형발생기를 사용하여 다음의 장치를 조정한다.

- DC out for pulse modulation
- Filament Power Supply
- Motor Driven Stubs

이를 위하여 ADC(VXI Technology사, VM2716A), arbitrary function generator(VXI Technology사, VM3608A), TTL I/O(VXI Technology사, VM1548)를 사용하였다. (그림 3-2-28)

② 프로그램

프로그램을 실행하면 통합 window가 표시되고 1. data acquisition, 2. power supply control, 3. stub tuner control, 4. pulse width control을 각각 독립적으로 실행할 수 있는 스위치가 표시된다. 윈도우가 표시되는 동안 VXI 모듈들은 초기화된다. 4개의 software sub-module중 어느 하나라도 실행 중이면 통합 윈도우는 종료되지 않으며 모든 sub-module를 종료하고 통합 윈도우를 종료하면 VXI 모듈들은 reset된다.

Data acquisition sub-module은 최대속도로 VM2716A ADC의 16채널 전체를 access한다. vtm2716.ini 라는 file이 제공되면 파일로부터 각 채널의 label과 multiplying factor, offset를 읽어서 raw data에 적용하여 최종 data로 간주한다. Label은 window상에서 직접 변경할 수 있으며 sub-module 종료시 vtm2716.ini에 저장된다. 각각의 채널은 디스플레이 되지 않도록 할 수 있으나 모든 채널은 memory에 저장된다. autoscale 버튼을 누르면 디스플레이 되는 모든 채널에 대해 autoscale이 적용되며 수동 scale은 되지 않는다. Start 버튼을 누르면 acquisition이 시작되며 pause버튼을 누를 때 까지 계속된다. acquisition이 계속되는 동안에는 clear 명령과 save 명령이 적용되지 않는다. pause 버튼을 누르면 clear 또는 save 버튼을 누를 수 있으며 clear 버튼을 누르면 모든 data가 memory로부터 제거된다. 윈도우 왼쪽 아래 슬라이드 인디케이터는 채널 1번부터 7번 까지를 표시하며 중앙 플롯과 동일한 스케일이다. 오른쪽 아래 두개의 작은 막대 그래프중 왼쪽 그래프는 채널 13번부터 16번 까지를 표시한다. 오른쪽 작은 막대 그래프는 채널 10번부터 16번까지를 표시하며 추후 사용을 위해 만들어진 것이다. Save 버튼을 누르면 파일 선택 대화창이 표시된다. 파일을 선택하면 날짜, 시간, 각 data column의 label을 파일에 쓰고 memory에 저장된 data를 파일에 쓰게 된다. 날짜, 시간과 label 이 파일의 첫 부분 3 raw에 쓰여지며 data points 만큼의 raw가 추가된다. column은 시간축까지 포함해서 17 column이다. 주의할 것은 save 명령이 내려지기 전까지는

모든 data가 휘발성 memory에만 저장되며 하드 디스크에는 저장되지 않는다는 점이다. 따라서 컴퓨터가 정지하면 data를 되살릴 수 있는 방법은 없다. 또한 메모리 사용에 제한이 없기 때문에 한정된 memory를 초과하는 data acquisition이 이루어지면 프로그램은 더 이상 작동하지 못할 것이다.

Power supply control sub-module은 필라멘트 전원을 컨트롤한다. PSC sub-module 윈도우의 power 스위치를 on하면 전원을 전압 조절 모드로 변경하고 stand-by 상태로 설정한다. 이대 전류는 전체 전류의 1/2로 설정한다. Pre-volt-set을 원하는 전압으로 설정하고 set 버튼을 누르면 약 1초당 0.1V의 속도로 전압을 상승 시킨다. 전압을 올리는 동안의 조절 전압(전원 출력 전압과 다소 차이가 있음)은 오른쪽 슬라이드 인디케이터에 표시되며 power 스위치와 set 버튼은 비활성 상태가 된다. 이때 전압 상승을 정지 시키려면 E.STOP 버튼을 누른다. 전압은 E.STOP 버튼을 누른 시점에서 멈추며 pre-volt-set을 다시 조정하고 set 버튼을 누를 수 있다. 목표 전압 설정이 pre-volt-set 다이얼에 없다면 다이얼을 free에 설정하고 다이얼 아래의 숫자 입력부에 목표 전압을 설정할 수 있다.

Scanning voltmeter VM2716A의 콘넥터는 44pin DSUB female이며 16채널에 대해 differential input 신호를 받을 수 있도록 되어있다. Controller 신호는 모두 single ended 신호이므로 VM2716A에 연결하는 male 콘넥터 내부에서 negative input을 모두 접지 처리했다. 필라멘트 전원의 remote 조종을 위하여 isolation amplifier를 그림 3-2-29, 3-2-30과 같이 제작하였다.

(마) 결론 및 앞으로의 과제

30 MHz 영역에서 100 kW 출력으로 연속 운전시 안정적으로 동작하는 고주파 송출기를 제작하였다. 제작한 송출기는 현재 KSTAR 장치의 ICH 안테나 및 구성 부품의 고전압/고전류 시험에 사용중이다. 최종출력단의 Cavity는 ground cathode 방식이며 전체이득은 15 dB 이상이고, 100 kHz 의 bandwidth 를 갖는다. 드라이버 출력을 5 kW 이상으로 증가시킨다면 100 kW 이상의 출력도 안정적으로 발생할 수 있다. 앞으로 과제로는 현재의 ground cathode cavity 방식으로는 60 MHz 이상에서는 동작이 어려우므로 ground grid type의 cavity를 구성하여 30-60 MHz 영역에서 50 kW 이상의 고출력을 발생하는 광역 고주파 송출기를 제작할 예정이다.

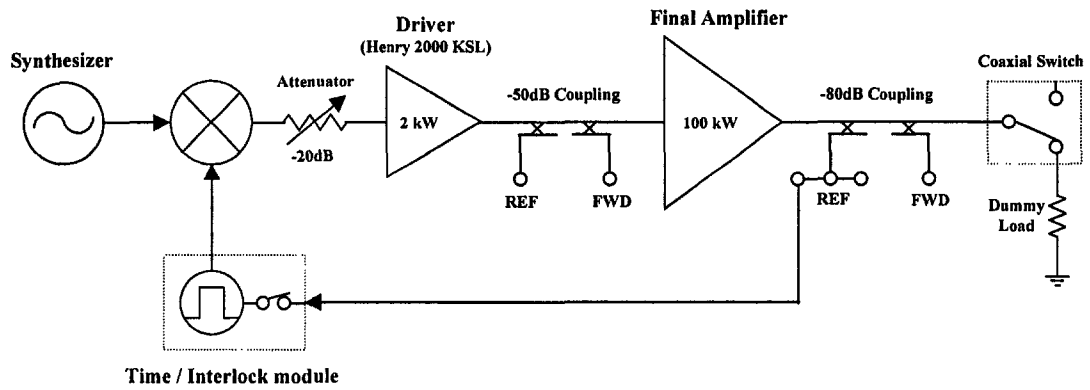


Fig. 3-2-17. Schematic of 100 kW transmitter system

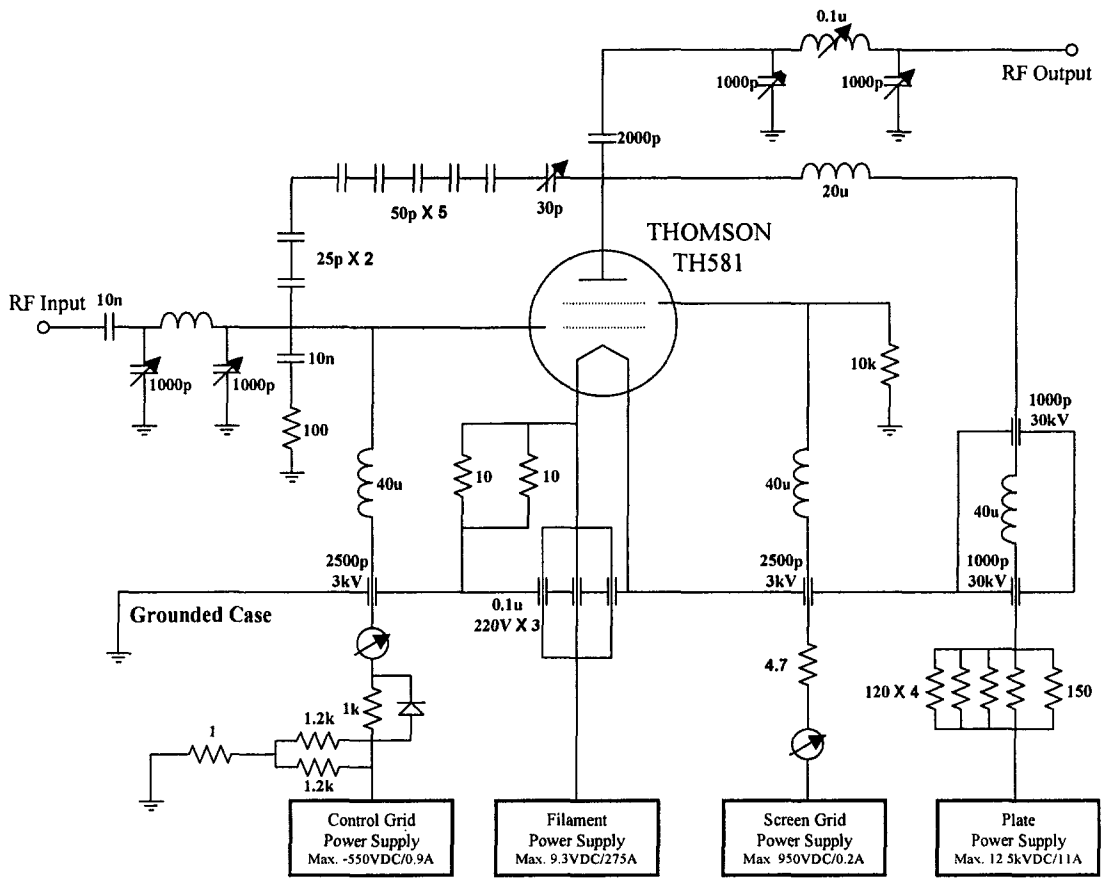


그림 3-2-18. Circuit diagram of 100 kW final amplifier

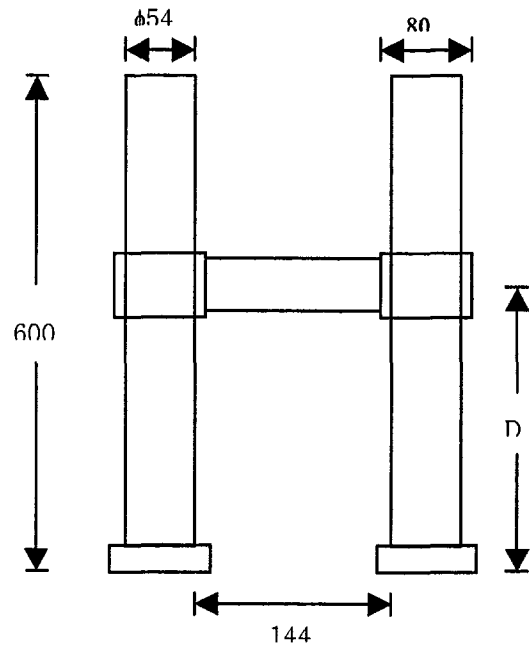


그림 3-2-19. Variable inductor with short bar

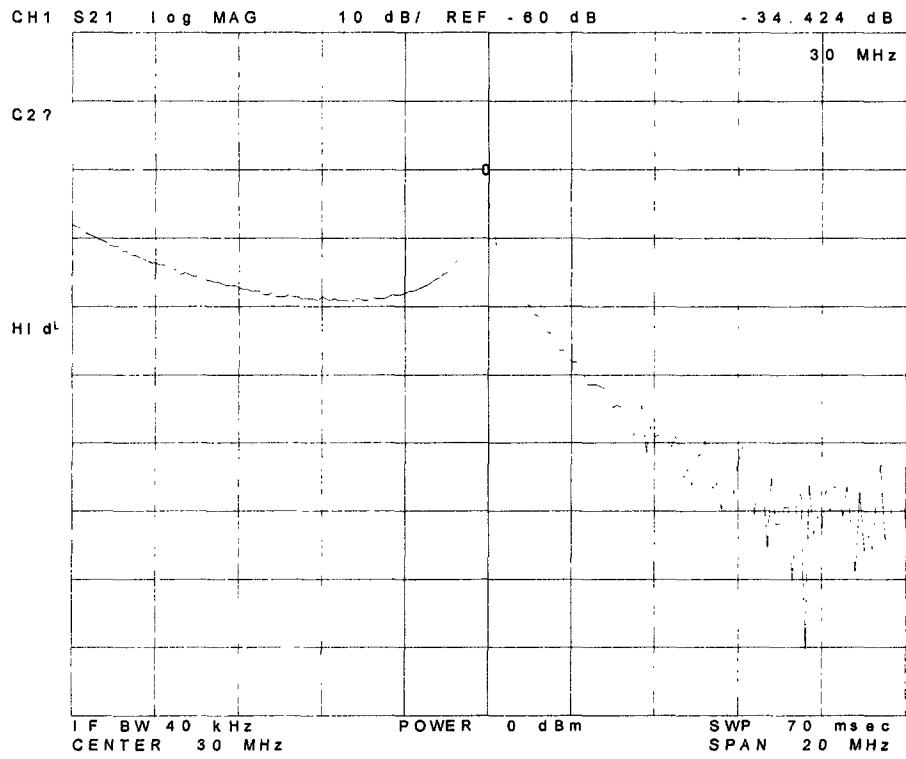


그림 3-2-20. Coupling between input and output tuned circuit

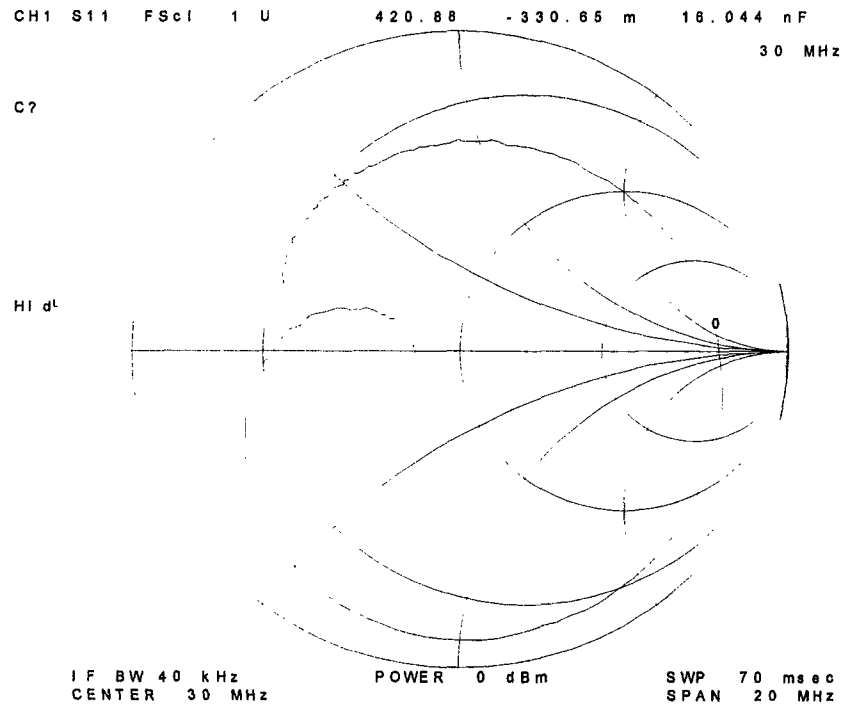


그림 3-2-21. Output impedance of plate(nominal : 420 ohm)

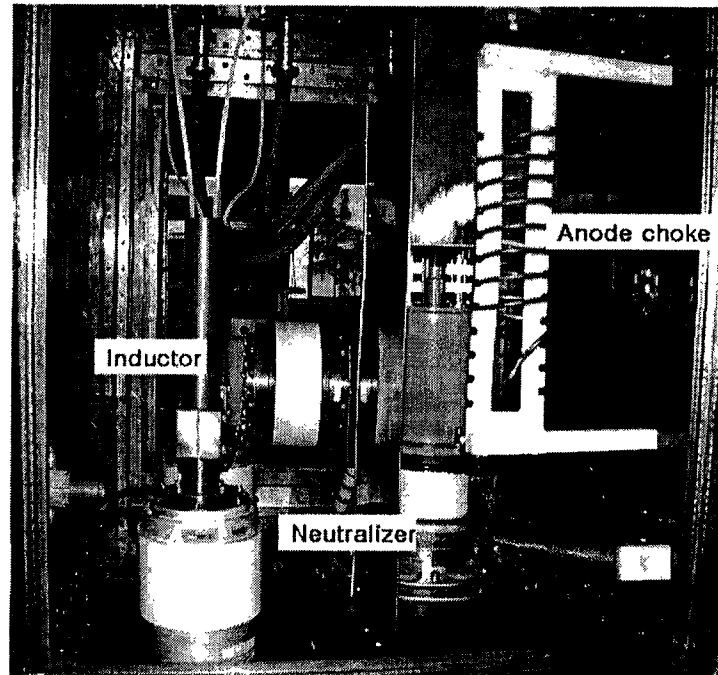


그림 3-2-22. Photograph of output cavity of 100 kW amplifier

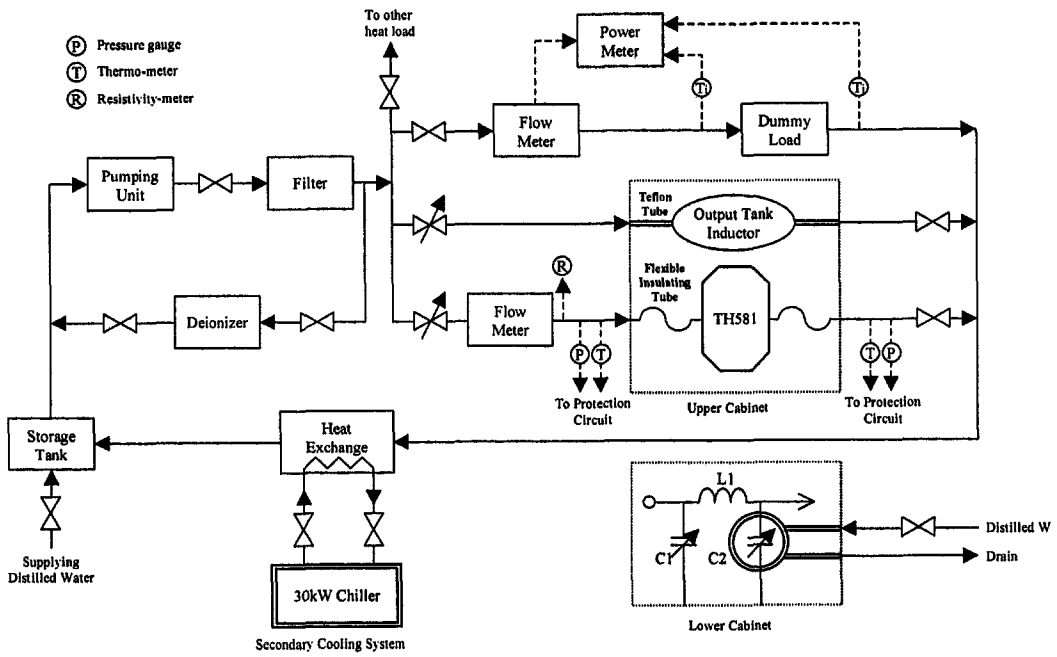


그림 3-2-23. Schematic of water cooling system for 100 kW transmitter

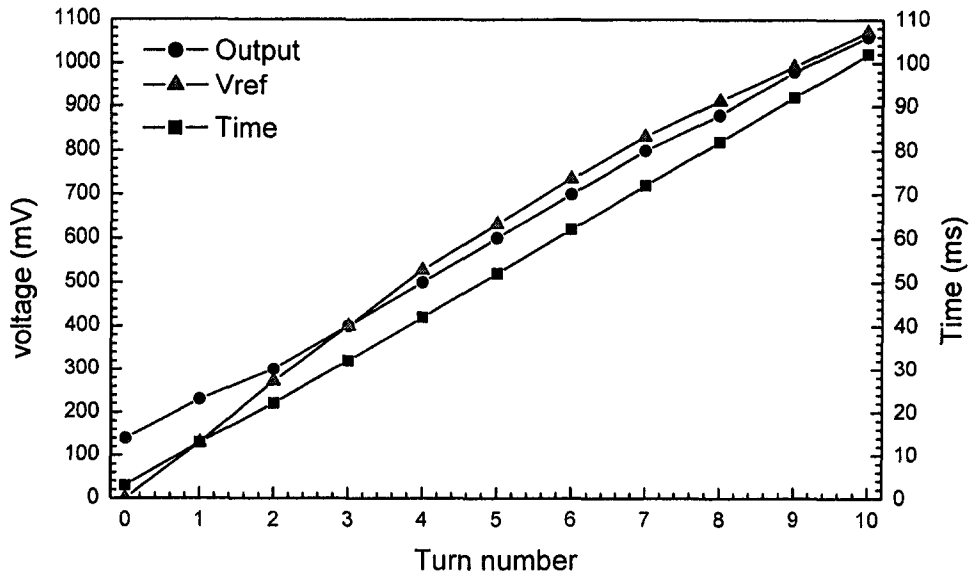


그림 3-2-24. Characteristic of time and interlock control

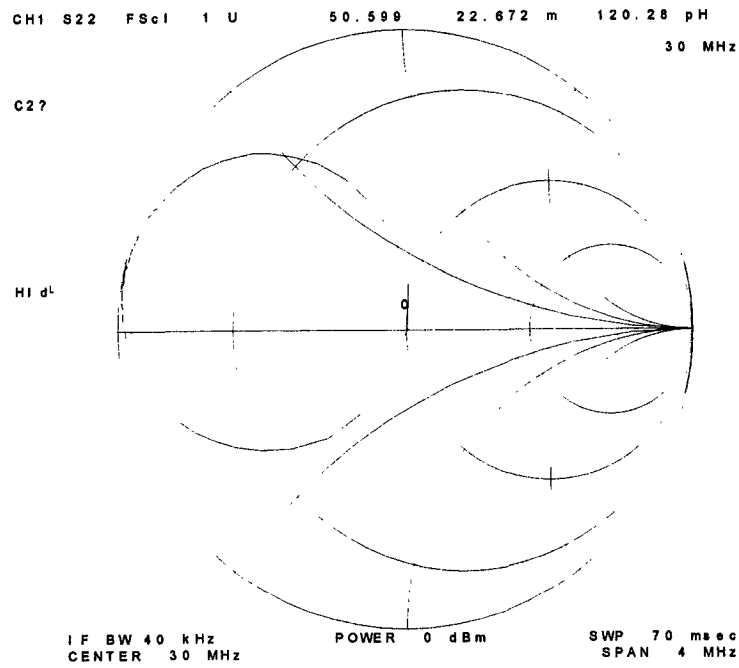


그림 3-2-25. Impedance matching of input tuned circuit at 30 MHz

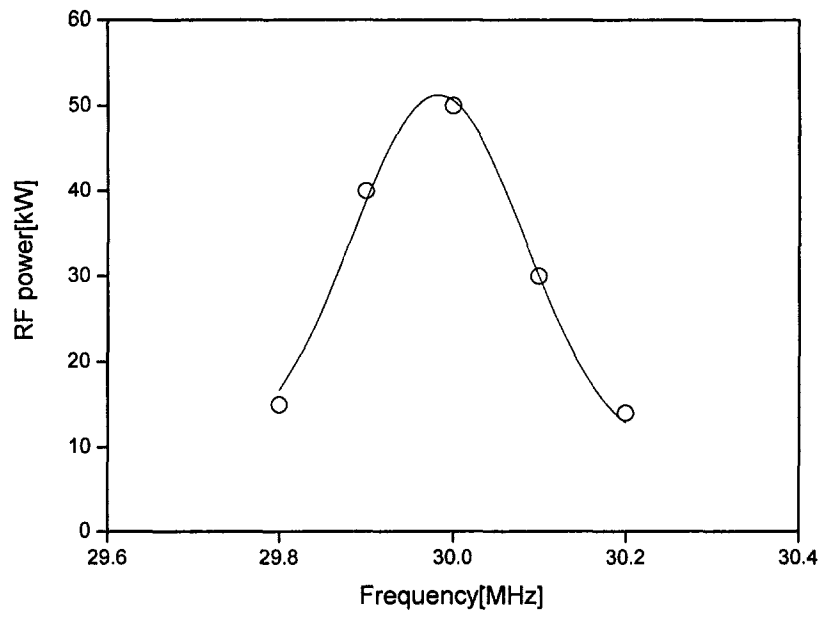


그림 3-2-26. Bandwidth of 100 kW amplifier at 30 MHz

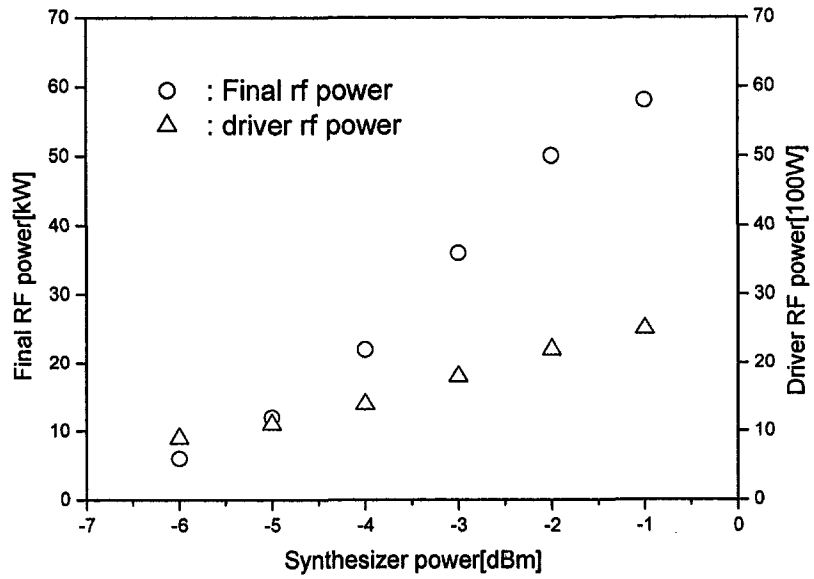


그림 3-2-27. Output power of final and driver amplifier vs. input power at 30 MHz

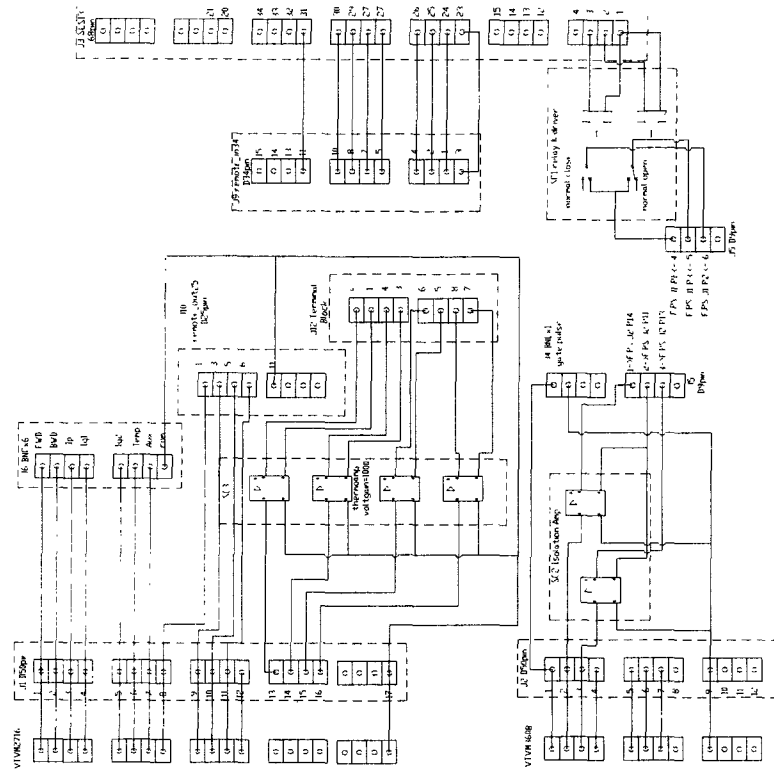


그림 3-2-28. circuit diagram of Controller interface

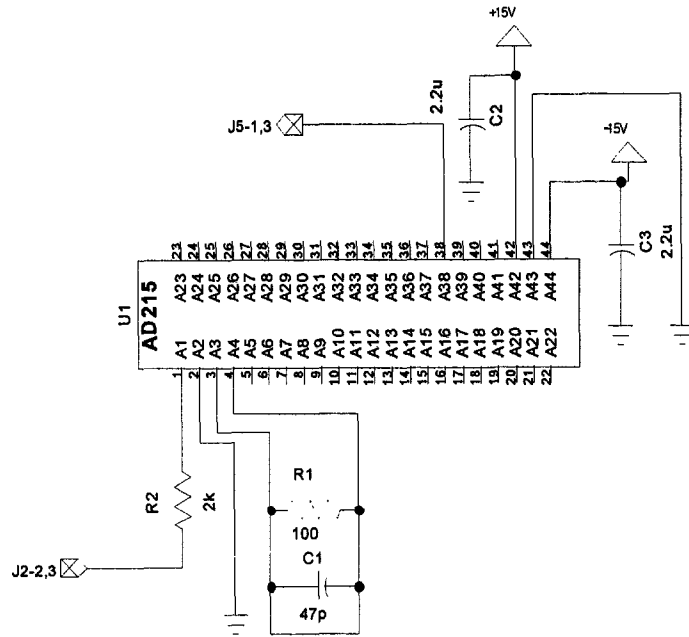


그림 3-2-29. Isolation amplifier of remote ref. V/I for filament power supply

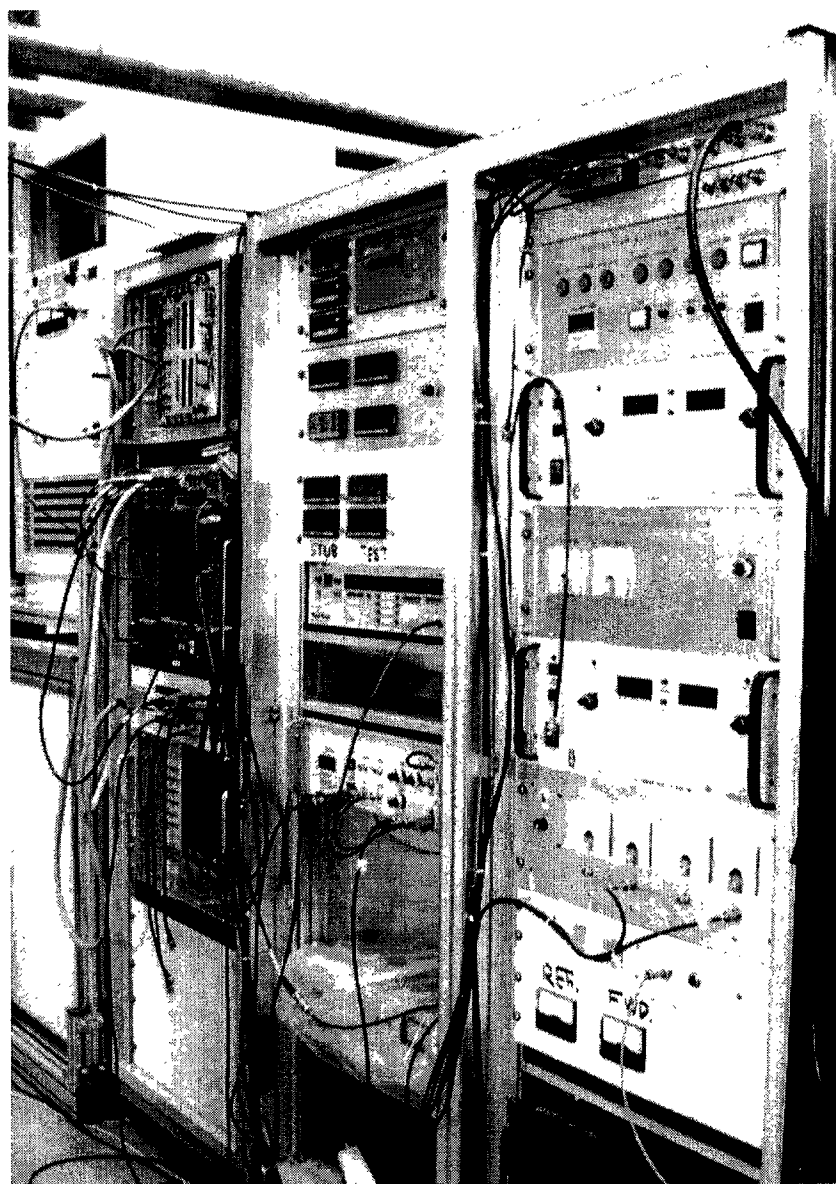


그림 3-2-30. Layout of control panel

(2) 300kW 고주파 송출기 제작

(가) 서론

국가핵융합장치인 KSTAR의 보조가열장치인 ICH/NBI/ECH/LHR에서 ICH(Ion Cyclotron range Heating) 시스템은 6 MW의 고주파 출력을 8MW/m^2 의 출력밀도로서 4개의 스트랩으로 구성된 안테나를 통해서 토카막 플라즈마를 300초이상 가열하도록 설계되었다. ICH 장치는 KSTAR가 완공되는 2005년부터 설치를 시작하여 2008년부터 KSTAR의 가열에 사용하도록 계획 되어있다.

플라즈마 부하저항이 5 ohm/m이상인 경우에 안테나에 6 MW를 공급하기 위해서는 안테나 전송선로 및 고주파 전송선로에는 최대전압과 전류는 35kV/1kA 이상이 인가된다. 이때 고주파 주파수가 25 MHz에서 60 MHz까지 가변이므로 안테나 및 resonant loop에 인가되는 최대전압과 최대전류가 위치하는 지점은 주파수에 따라 변한다. 따라서 토카막에 설치하기 이전에 전체 안테나 시스템을 전 주파수 영역에 대해서 고전압/고전류 시험을 하여야한다. 안테나 시험설비와 같이 플라즈마 부하저항이 없을 때에는 35 kV/ 1 kA를 인가하기 위해서는 안테나 한 개의 스트랩당 대략 60 kW의 rf power가 필요하므로 전체를 시험하기 위해서는 전송선로 손실을 고려하면 250 kW 이상의 고주파 출력이 필요하다.

한국원자력연구소에는 안테나의 고전압/고전류 시험을 위해서 연속운전모드로 27-55 MHz 주파수영역에서 동작하는 300 kW 고주파 송출기를 설계하였다. 300kW 고주파 송출시스템은 Pre-driver, driver, main power amplifier 및 부대장치로 구성되어 있다. 각 구성품은 표 3-2-2와 같이 한국원자력연구소가 주관이 되어 프랑스의 Thales, 선진전자(주), 한국전자진흥(주), 원컨덕터등이 참여하여 2000년8월부터 설계 및 제작에 착수하여 현재 각각의 부품을 제작중에 있으며 2002년 9월에 완공예정이다.

(나) 송출기의 구성

300kW 고주파 송출장치는 그림 3-2-31에서와 같이 1 kW pre-driver, 20 kW driver, 300kW main amplifier로 구성되어 있다. 부대장치로는 고주파전송 스위치 및 dummy load, 제어 및 DAS시스템이 있고, tube 및 dummy load를 냉각하기 위한 냉각장치로 이루어진다.

고주파 출력은 주파수합성기로부터 나온 0 dBm의 소신호를 power modulator 회로를 거치고 1 kW pre-driver, 2kW driver, 300 kW main amplifier를 통하여 최대 300 kW로 증폭된다. 20 kW와 300 kW 송출기 후단부에는 방향성 결합기, 4-way 스위치, dummy load를 설치하여 독립적으로 송출기의 출력을 시험할수 있으며, 특히 20 kW 드라이버 후단부에도 스위치를 설치하여 20 kW 송출기를 300

kW 증폭기의 입력 드라이버 역할뿐만 아니라 20 kW의 고주파출력을 독립적으로 시험설비에 공급하게 되어 있다.

① pre-driver

1 kW의 출력을 발생하는 pre-driver는 250W 트랜지스터를 기본 module로 사용하여 제작하였다. 1 kW driver는 그림 3-2-32(a)와 같이 250W TR module을 기본단위로 하여 power splitter(Bonn Electronik, BPC 2011-4/600)를 통하여 4개로 분리한후 각각 4개의 module에 공급되며 다시 4개 250W module 출력을 power combiner를(Bonn Electronik, BPC 2011-4/1500) 통해서 합성하여 출력을 발생한다. 출력단 후단부에는 차단주파수가 60MHz low pass filter를 설치하여 고주파 발생을 억제하였다. 그림 3-2-32(b)는 250W module의 회로도이며 주파수 범위는 power combiner의 특성에 의하여 20-100MHz이다.

② 20 kW Driver

20 kW 드라이버는 사극 진공관을 사용하여 ground grid type으로 cavity를 구성하였으며 50 MHz 이상에서의 기생발진을 제거하기 위해 coaxial cavity의 구조를 갖는다. 그림 3-2-33(a)는 회로도이며 (b)는 3차원 도면이다. 전체 높이는 지지대를 포함하여 4m 정도이다. 입력과 출력단의 정합회로는 모두 가변콘덴서와 tuning stub로 구성하였다. 이득은 13 dB 이상이며 30 MHz에서 60 MHz까지 동작한다. 사극관은 Thales의(구 Thomson) TH581을 사용하였다. 입력단의 tuning stub, TS1는 1.2m까지 가변가능하며 내부전송선은 직경이 250mm인 구리관을 사용하였고, 외부전송선은 직경이 400mm인 알루미늄관을 사용하여 전송선의 특성임피던스는 28.2 ohm이다. 상하운동을 위한 스크루는 길이를 단축하기 위해 직경이 15mm인 절연체재질의 폴리에틸렌을 사용하였다. 출력단의 tuning stub TS2는 내부/외부 전송선을 입력단과 같은 재질을 사용하여 특성임피던스는 28.2 ohm이고, 이송거리는 120cm 이다. 스크루는 입력단과 달리 유전손실에 의해 절연 스크루가 과열되는 것을 막기 위해 금속 재질을 사용하였고 cavity 바깥에 위치한다.

단락판(shorting plate)을 blocking capacitor로부터 30cm에서 150cm까지 길이를 변화시킬수 있다. TS2의 단락판에는 multi-contact을 사용하였다. 입력과 출력단의 가변 capacitor, VS1과 VS2는 최대 정전용량이 각각 1000 pF과 100 pF까지이며 VVC를 9" EIA 전송선과 6" EIA Tee에 설치하였다.

Blocking capacitor는 직류 anode전압 12kV와 교류전압 12kV를 포함하여 24kV 이상을 견디도록 두께 6mm의 테프론을 사용하여 그림 3-2-33(b)과 같이 제작하였다. 테프론의 직경은 250 mm이며 길이는 270mm로서 capacitance값은 600 pF이다.

TH581이 cathode drive로 동작하는 경우 입력과 출력 임피던스는 대략 30ohm/700 ohm이 되도록 설계하였다. 입력단의 경우 TS1과 VS1이 정합된 상태

에서 입력임피던스를 50 ohm으로보고 TH581 입력임피던스를 25-50 ohm으로 보는 경우 필요한 가변콘덴서의 capacitance 값과 TS1의 길이를 그림 3-2-34(a)에 나타내었다. 주파수에 따라 크게 변화없이 capacitance값은 30-90 pF, stub의 길이는 50-80cm이내에 있다. 그림 3-2-34(b)는 출력임피던스를 50 ohm, TH581의 anode 출력임피던스를 300-500ohm로 가정한 경우 tuning stub와 가변콘덴서의 값을 나타낸 것이다. 30 MHz인 경우 tuning stub의 길이 및 가변 capacitor의 capacitance 값은 각각 30cm 와 40pF이고, 60 MHz인 경우는 100cm와 20 pF이다. 따라서 30 MHz에서 60 MHz까지 광역으로 동작하기 위해서는 tuning에 필요한 stub의 길이는 1m 이상이며 VS2는 20 pF에서 40 pF의 변화폭을 가져야한다. 60MHz에서 20kW로 동작시에 VS2에는 10A 전류가 흐른다.

③ 300 kW main amplifier cavity

현재 프랑스의 Thales사(구 Thomson)에서 제작한 최종 증폭단은 다음의 사양으로 초기에 설계 발주하였다. (그림 3-2-35)

- frequency range : 27-55 MHz
- output power : 250 kW
- max. VSWR : 1.7:1 any phase
- bandwidth : ± 1 MHz at -1 dB(min.)
- input/output impedance : 50 ohm

50 MHz 이상의 영역에서 고주파 cavity가 기생발진없이 안정적으로 동작하도록 ground grid type이며 동작은 class B로 동작한다. VSWR=1과 1.7에서 250 kW 고주파출력을 발생하는 전형적인 동작조건은 표 3-2-3과 같다. 기생발진을 제거하기 위해 input, output, neutralization tuning이 모두 사극관을 중심으로 coaxial 형태의 구조로 이루어져 있다. Coaxial 구조의 transformer인 TI1과 stub TS1으로 이루어진 input circuit는 input impedance 50 ohm을 filament 입력임피던스 20-30 ohm으로 정합하는 역할을 한다. Output tuning circuit는 TS2와 TL2로 구성되어 있으며 사극관의 출력임피던스 80-120 ohm을 증폭기의 50ohm 출력임피던스로 정합하는 역할을 한다. 스크린그리드와 control 그리드사이에는 중화작용을 위한 neutralizer가 설치되어 있다. Neutralizer는 50 MHz 전파후에서 고정된 setting값을 갖는다. VSWR이 1.7에서 250 kW 이상의 고주파 출력을 발생하므로 VSWR이 1인 정상상태에서는 300 kW 이상 고주파 출력을 발생할 수 있다. 필라멘트 전원, control 그리드, 스크린 그리드, 플레이트 직류 전원의 사양은 표 3-2-4와 같다.

Low power test에서는 10kV/10A를 anode에 인가하면서 회로분석기를 이용하여 기생발진이 없는 상황을 확인한후 각각 tuner들의 tuning point를 결정한후 S11과 S12를 측정하였으며 그림 3-2-36은 주파수 27 MHz와 55 MHz에서 network

analyzer를 이용하여 S11과 S12를 측정된 결과이다. 27 MHz에서 1dB bandwidth가 1MHz이상임을 알 수 있다. 2002년 7월초 탈레스 공장에서 이루어진 High power test는 한국원자력연구소에서 제공한 27-33MHz, 2.5kW 송출기와 탈레스가 보유한 35-55MHz, 30 kW 송출기를 드라이버로 사용하여 정격출력시험, 증폭기선형성, bandwidth 확인의 순서로 실시하였다. 표 3-2-5은 여러 시험주파수 조건에서 최종증폭단 직류전원의 동작조건과 드라이버출력, 증폭기의 최종출력을 나타낸다. dummy load는 소다수 dummy load이며, 증폭기의 출력은 directional coupler를 사용하여 측정하였다. dummy load로 흐르는 소다수의 유량과 온도차이를 측정하여 열량을 계산하여 비교한 결과 출력값이 5% 이내로 일치하였다. 그림 3-2-37(a)에서 보는바와 같이 스크린전압을 1000V에서 1500V로 변화시킴에 따라 출력을 200 kW에서 250 kW까지 변화시킬 수 있고, 그림 3-2-36(b)는 드라이버출력에 따른 증폭기의 출력을 나타낸 것으로 출력이 선형적임을 알 수 있다. 정격출력 시험중 주파수 30MHz 이하에서는 input tuner TS1부근에서 누설 전자파가 $10 \mu\text{V}/\text{cm}^2$ 정도 검출되었는데 이에 대한 대비로 mesh screen을 튜너 주위에 설치하였고, 50MHz 이상에서 중화회로 조절기 부근에서 발생한 누설 전자파는 flange 부근에 finger-stock을 설치하여 줄일 수 있었다.

300 kW 송출기에 필요한 냉각수 및 송풍기 용량은 표 3-2-6과 같고 냉각수는 열용량이 2 MW인 chiller로부터 공급되는 증류수를 사용한다.

④ 플레이트 직류 전원

일반적으로 방송송신용 고전력 송출기 제작업체인 Thomcast 및 Continental사가 전송기에 사용되는 pulse step modulation(PSM) 방법을 사용하여 그림 3-2-37과 같이 12kV/60A 용량의 anode 전원을 구성하였다.

출력전압이 1kV로 고정된 1kV/60A의 step modulator 11개와 0에서 1kV까지 출력전압이 가변되는 전원 1개로 구성하여 출력전압을 0에서 12kV까지 변화시킬 수 있다. 또한 고속스위칭 소자인 IGBT를 통하여 사극관내부에서 아크 발생시 사극관 보호를 위한 interlock 기능이 가능하다.

한국원자력연구소 공학동 외부에 위치한 변전실로부터 3.3kV의 송전선을 통하여 공학동내의 가열장치용 VCB에 1 MVA의 전력이 공급된다. VCB를 통과한 3300V 교류전력은 VCS를 통과한 후 감압변압기(1차 3.3kV, 2차 750V)에 의해서 750V로 감압된 후 3상 정류장치를 거쳐서 1kV의 직류전압을 만들어낸다. 1기의 감압변압기에서 2kV의 직류전압을 발생하므로 전체 6기의 감압변압기가 설치되어 있다. 이때 VCS와 변압기 사이에는 변압기의 단락 및 지락 방지를 위한 과전류 및 과전압 차단장치가 설치되어 있다. 직류 1kV 후단에 위치한 IGBT를 통하여 1kV의 전압을 공급하며 같은 방식으로 11개의 1kV stack을 직렬로 연결하고 0에서 1kV로 가변되는 전원을 추가하여 전체 12개의 stack을 통하여 최대 12kV의 전원을 공급하고 전압을 0에서 12kV까지 가변할 수 있다. 이때 사용된 변압기는 Stack이 더해짐에 따

라 2차측에 전압이 상승하므로 1차와 2차간 절연전압을 20 kV이상이 되도록 제작하였다.

플레이트 전원은 오동작시 20msec이내에 차단이 되어야하고, rf driving 전압을 100 μ sec이내에 차단하는 기능을 제공해야한다. interlock 차단기능을 시험하기 위해 0.3mm 직경의 구리선을 2 cm/kV의 길이로 설치하여 단락시에 12개의 IGBT가 동시에 차단되고 구리선이 녹지않는지를 확인하는 wire test를 수행하였다.

다음과 같은 경우에는 플레이트 전원을 차단하는 기능을 갖도록 anode 전원을 제작하였다.

- anode 냉각수의 유실
- filament전원 및 control grid 전원상실
- anode, control grid, screen grid의 overcurrent
- 과도한 VSWR

⑤ control system

그림 3-2-38과 같이 NI의 PXI시스템(MXI2)을 통하여 PC와 PXI crater간에 통신이 이루어지며, Lab windows를 사용하여 프로그램하였다. TTL/IO와 Multi function I/O(NI 6040E)를 통해서 스크린 그리드, 플레이트 전원을 제어하고, GPIB interface를 통하여 필라멘트 전원 및 control grid 전원을 제어한다. 입력 및 출력 tuner들은 5상 stepping motor를 motion controller(NI 7344)를 통하여 제어하도록 되어 있다.

⑥ 냉각장치

냉각장치는 핵물리공학팀 냉각수 공급장치에서(2MW chiller) 공급되는 증류수를 사용하여 종합ENG에서 NBI냉각장치와 일차적으로 150A 냉각관으로 분배된후 300 kW cavity가 위치한 고주파실험실에 분배장치를 설치하였다. 300 kW cavity, 300 kW dummy load, 20 kW cavity, 30kW dummy load, 300 kW screen 그리드에 공급하고 여분의 2개 분배기를 가지고 있다. 각각의 유량 및 전체압력과 유량을 조절하기 위하여 bypass를 설치하였다.

표 3-2-2. Schedule diagram of 300 kW transmitter system

		Spec.	Design	Maker	Etc.	Date
Pre-driver	Transmitter	1 kW	KAERI	한국전자진흥	All solid state	2002.5.
Driver	Cavity	20kW	KAERI	KAERI	coaxial	2002.6.
	P/S	100kVA	KAERI	KAERI		
Final amplifier	Final cavity	300kW	Thales	Thales	27-55MHz	2002.9.
	Anode P/S	750kVA (12kV/60A)	KAERI	선진전자	PSM	2002.4.
	Screen	7.5kVA		Glassmann	Linear	2002.4.
	Control /filament P/S	10kVA		Sorensen	SMPS	2002.4.
	Control	PXI	KAERI	KAERI	P/S, Motor	2002.5.
	Interlock		KAERI	선진전자	Crowbar	2002.5.
AUX.	Cooling	700l/min	KAERI	KAERI		2002.4.
	Coax-line	6"/9"	KAERI	한국전자진흥		
	Dummy	300kW		Altronics	water	2001.4.

표 3-2-3. Operation conditions of final amplifier using TH519

	VSWR=1	VSWR=1.7
RF power(kW)	250	250
Tube impedance(ohms)	85	114
Input RF power(kW)	19.28	12.69
Gain(dB)	11.13	12.95
Anode voltage(kV)	8.51	10.5
Anode current(A)	48.83	37.45
Anode dissipation(kW)	166	143
Screen voltage(V)	1500	1500
Screen current(A)	1.29	1.14
Control grid voltage(V)	-400	-400
Control grid current(A)	1.3	0.65
Filament voltage(V)	15	
Filament current(A)	500	

표 3-2-4. Specifications of DC power supply for final amplifier

P/S	Voltage	Current	특기사항	제작사
Plate	11 kV	70A	IGBT를 이용한 Interlock 필요	선진전자
Screen	1500 V	4A	Plate 전원과 연동한 interlock	Glassman
Control	-400 V	4A	역전류방지회로 필요	Sorensen
Filament	15V	500A	power modulation 필요	Sorensen

ㄧ 3-2-5. Operating conditions of final amplifier

Spec. Freq.	Filament		control grid		screen grid		Anode		P _{diss} (kW)	P _{driver} (kW)	P _{out} (kW)
	V(V)	I(A)	V(V)	I(A)	V(V)	I(A)	V(kV)	I(A)			
55	13.5	455	-363	0.69	1450	1.58	8.5	49	185	15.2	253
50	13.5	456	-364	0.68	1450	1.56	8.5	48	175	17.5	250
45	13.5	455	-363	0.6	1440	1.62	8.5	47.8	175	16.7	255
40	13.5	455	-364	0.47	1440	1.88	8.5	47.8	185	16.2	250
35	13.5	454	-366	0.38	1448	1.8	8.5	47.5	175	15.4	251
33	13.5	453	-360		14.9	0.06	8.5	14.8	102.8	2	23
30	13.5	454	-360		14.9	0.06	8.5	17	122.5	2.5	22
27	13.5	453	-360		14.95	0.07	8.5	15.9	107.6	2.5	27.5

ㄧ 3-2-6. Specifications of coolant capacity for final amplifier

	Fluid	Pressure drop (bars)	Minimum flow (m ³ /h)
Anode	Water	2.5	9
Screen-grid terminal	Water	1.5	0.25
Input RF circuit	air	0.03	120
Output RF circuit	air	0.005	250

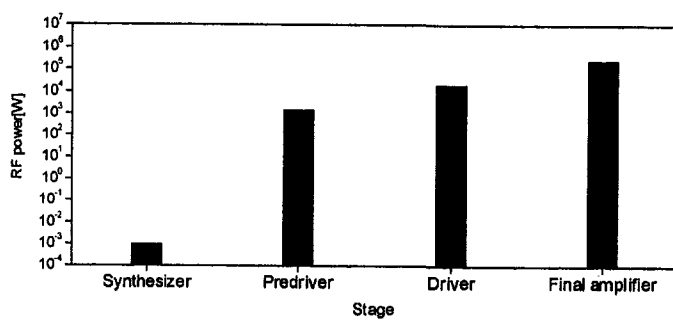
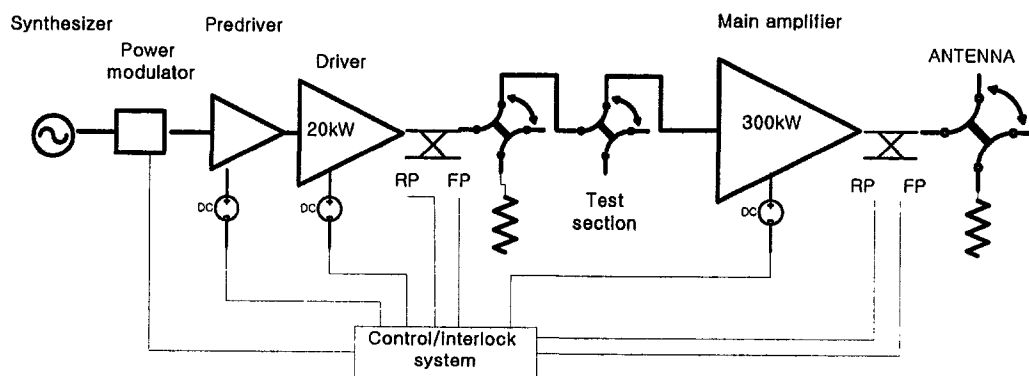


그림 3-2-31. Schematic diagram of 300 kW transmitter system

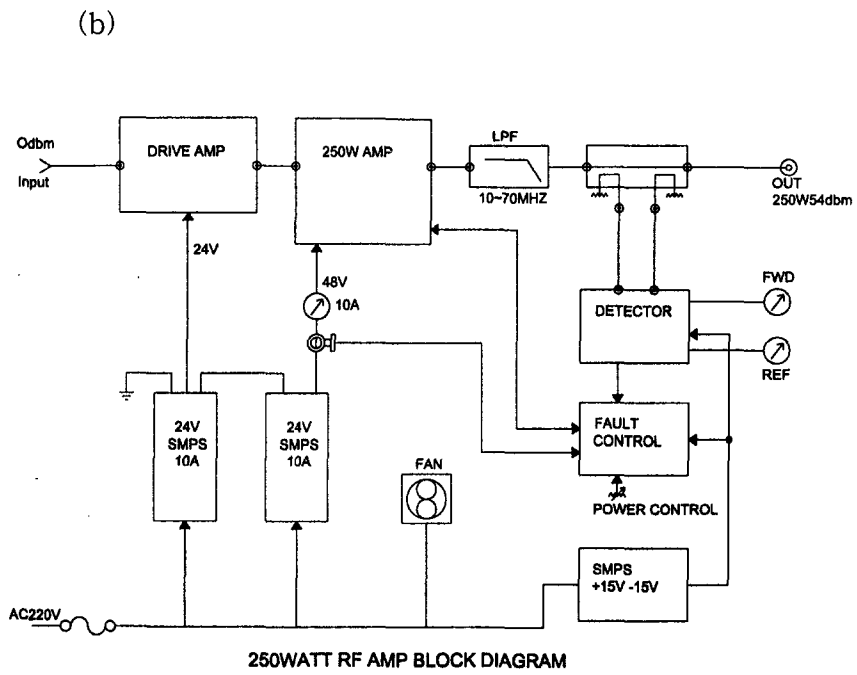
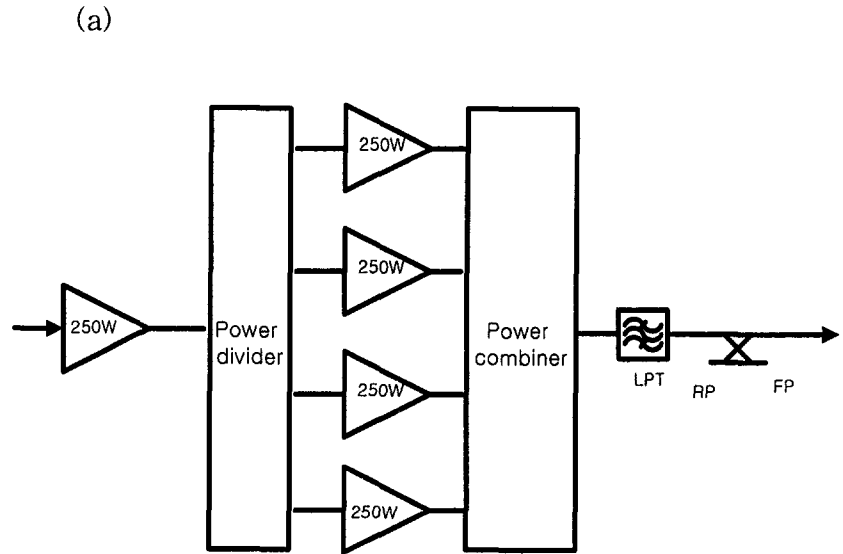
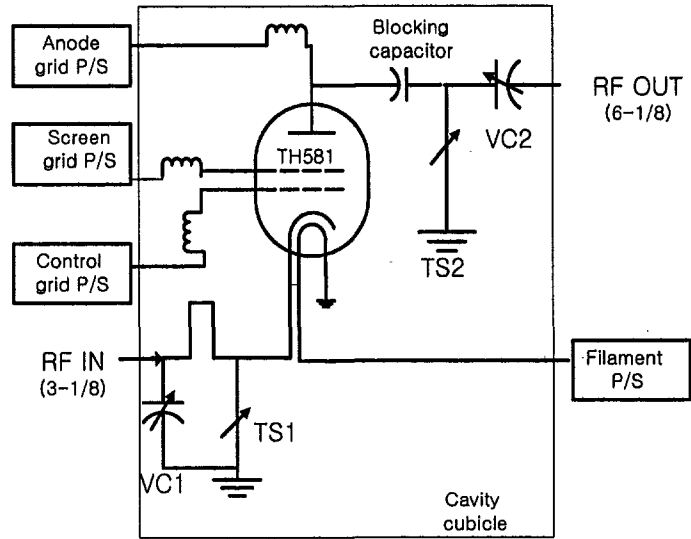


그림 3-2-32. Schematic diagrams of 1 kW pre-driver(a) and 250 W module(b)

(a)



(b)

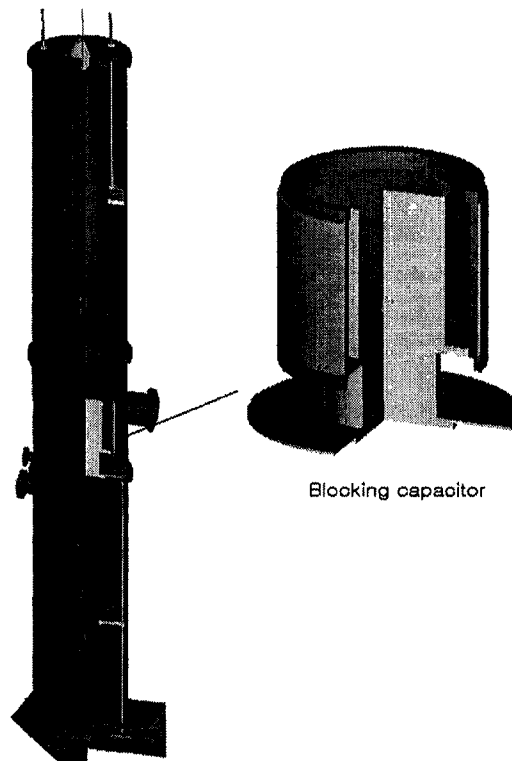
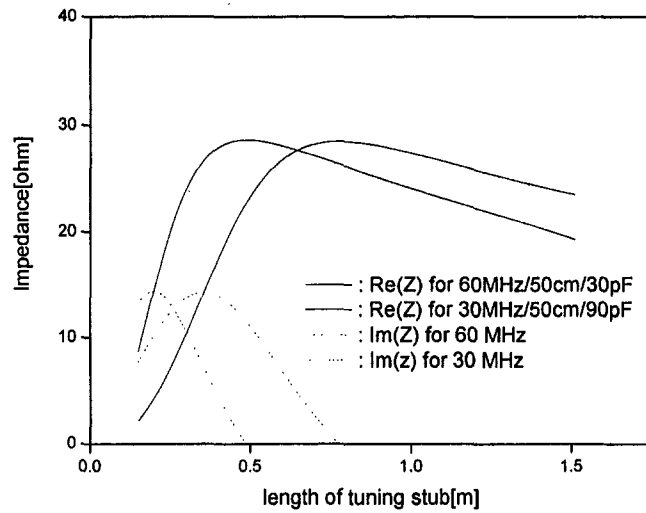
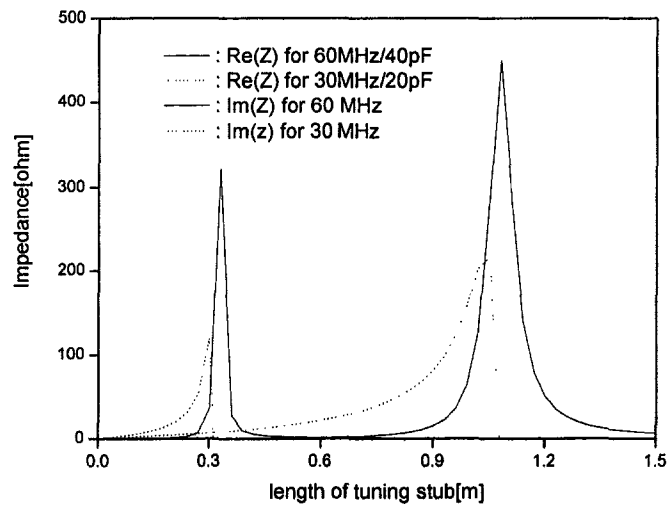


그림 3-2-33. Schematic diagram(a) and 3-D view(b) of 20 kW driver

(a)

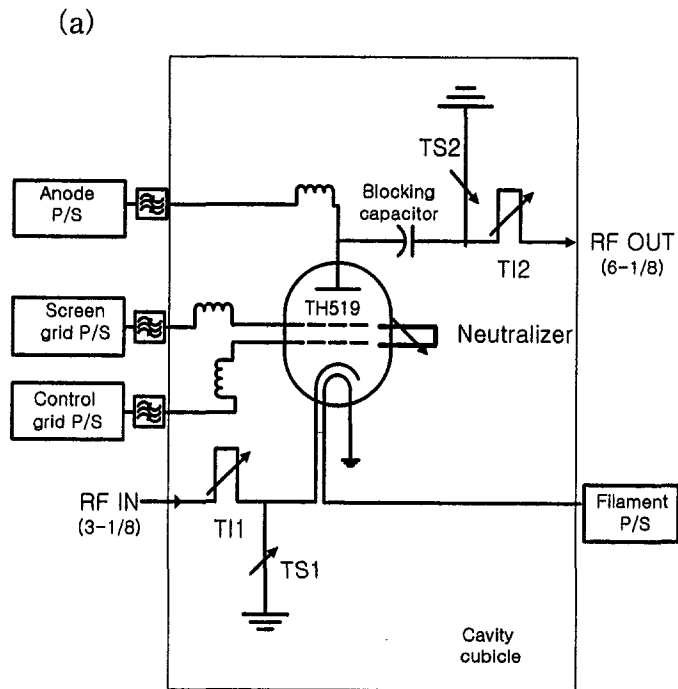


(b)



(b)

그림 3-2-34. Impedance vs. length of tuner for input circuit(a) and output circuit(b)



(b)

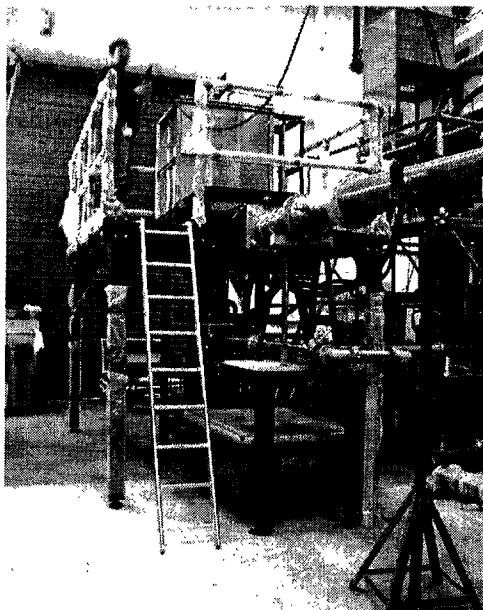


그림 3-2-35. Schematic diagram(a) and photograph(b) of 300 kW final amplifier

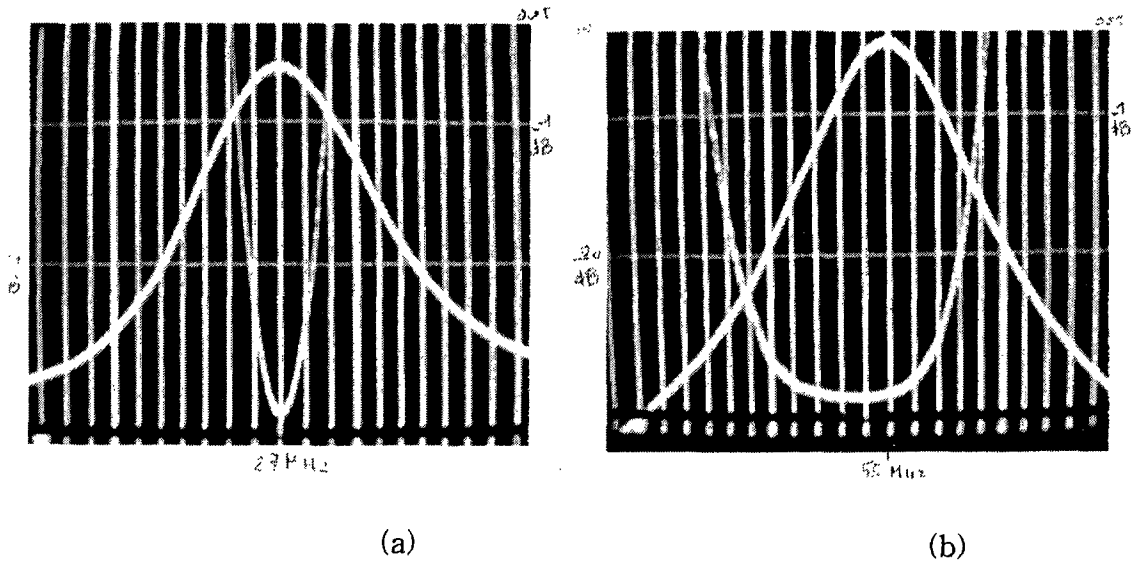


그림 3-2-36. S11 and S12 of final amplifier for (a) 27 MHz and (b) 55 MHz.

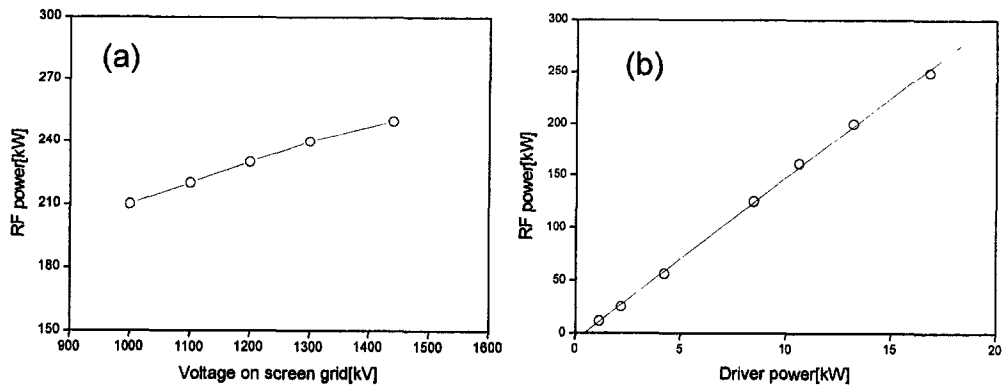


그림 27

그림 3-2-37. RF power vs. screen voltage(a) and driver power(b)

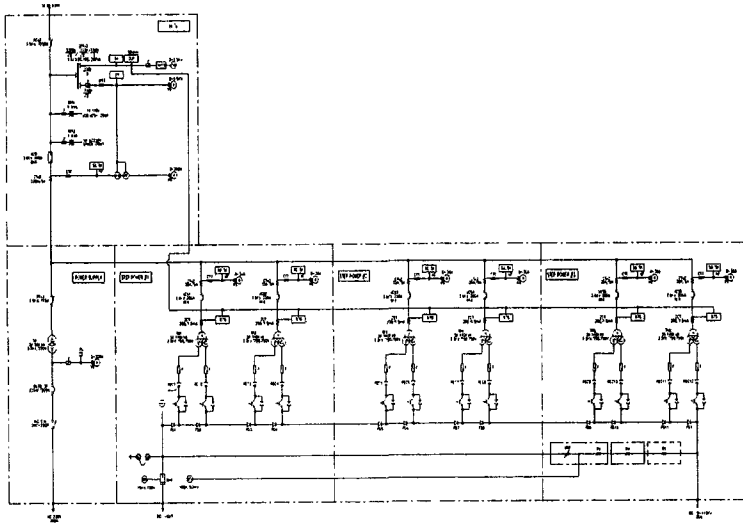


그림 3-2-38. Schematic diagram of 12kV/60A anode power supply

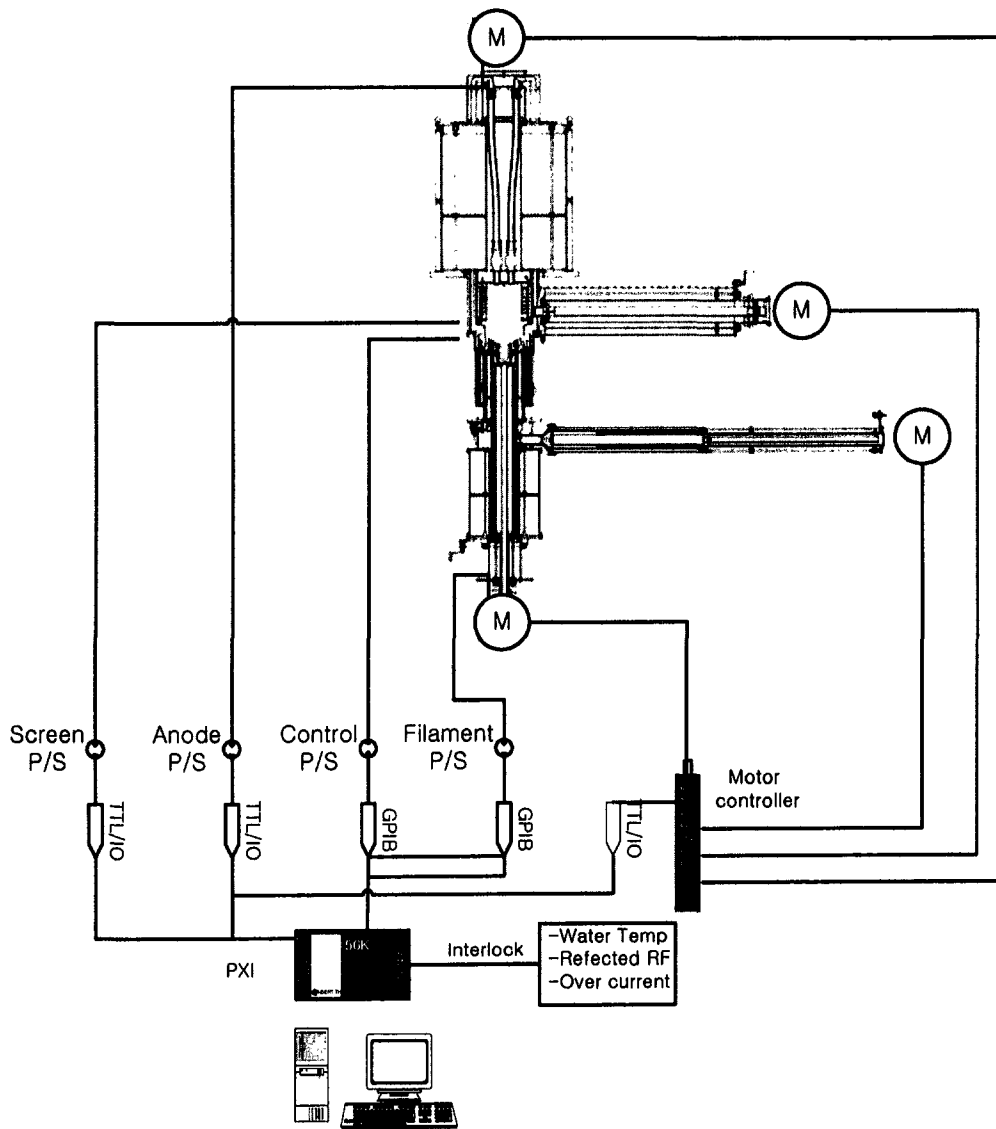


그림 3-2-39. Schematic diagram of PXI control system of final amplifier

다. Subsystem 제작 및 특성시험

(1) 고출력, 고주파 안테나 제작 및 특성시험

(가) Prototype 안테나 공학설계

① ICRF 안테나 설계

RF 가열장치의 역할은 토카막 플라즈마내의 이온 가열, 중심축에서의 전류 구동 및 모드 변환을 통한 중심축 바깥에서의 전류 구동이다. RF 가열장치는 KSTAR 토카막의 가열장치 중의 하나로서, 플라즈마에 6 MW의 고주파 전력을 공급하게 되며, 안테나는 KSTAR 진공용기의 주 수평포트에 설치된다(upgrade시 인접한 2개의 포트를 통해 12 MW 공급). 공급되는 고주파 전력의 주파수 영역은 25~60 MHz로서 토로이달 자장이나 목적에 따라 가변할 수 있어야 하며, 운전중에 전류구동의 효율을 변화시키기 위해 전류띠간의 위상차이도 변화시킬 수 있어야 한다. 이러한 요구 조건을 고려하여 KSTAR의 플라즈마 특성, 진공용기의 구조, 내벽 구조물의 형상 등을 고려하여 고주파 안테나를 설계하였으며, Prototype 안테나를 국내 제작하였다. 제작된 안테나는 9.9 MW/m^2 의 높은 전력 밀도와 300 sec의 장시간 운전이 가능하도록 하기 위해 모든 구성 요소를 강제 냉각할 수 있도록 하였다. Proto-type 안테나는 본제품에서 적용할 파라데이 차폐체의 재료 및 지지구조에 대한 설계를 제외한 나머지 모든 사양은 본제품과 동일하며, 설계, 제작된 안테나는 그림 3-2-39와 같다.

안테나의 주요 구성은, 양쪽 끝에 진공전송선이 연결된 중심 접지형 4개의 전류띠(current strap), 단일층 파라데이 차폐관(mon-layered Faraday shield tube), 4분할 공동(4-section cavity)으로 이루어져 있으며, KSTAR 진공용기의 주수평포트에 삽입되는 구조이다. 진공용기내에서 파라데이 차폐체의 전방 표면은 표준 플라즈마 표면으로부터 +2 cm에 위치하며, 진공 상태에서 그 위치를 10 cm 바깥쪽으로 이동할 수 있다. Proto-type 안테나에서의 이동 가능 구조는 안테나가 포트 위에 단순히 올려져 있는 구조이며, 플라즈마 disruption시 받는 힘을 고려한 지지구조에 대한 연구를 진행 중에 있다. 300초 운전을 위해 전류띠, 파라데이 차폐체, 공동벽 및 진공전송선에 냉각관로를 내장하였으며, 순수에 의한 강제냉각을 통해 고주파 및 플라즈마로부터의 최대 0.5 MW/m^2 열부하를 제거할 수 있도록 하였다. Proto-type 안테나의 파라데이 차폐체는 Cu 도금한 SUS316L 관을 사용하였으며, 본제품에서는 Cu 도금한 Inconel 625 관에 B_4C 를 코팅하여 사용할 예정이다. Inconel 625관에

B₄C를 코팅하는 연구는 시험 시편을 제작하여 독립적으로 수행하고 있다. 안테나의 주요 특성은 표 3-2-6과 같다.

㉞ 안테나의 전기적 특성

설계된 안테나에 대해 그림 3-2-40과 같이 2-D로 단순화하여, Laplace 방정식을 통해 전기적 특성을 계산하였다.

전기적 특성 계산

안테나 전류띠의 인덕턴스와 상호유도계수는 4개의 전류띠가 그림 3-2-40에서 보는 바와 같이 각각 2개씩 좌우 대칭이므로, Dirichlet 경계 조건 또는 Neumann 경계 조건을 사용하여 2개의 전류띠에 대해서만 자장 분포를 계산하여 단위 길이당 인덕턴스 L을 결정하였다. 이 때의 경계 조건으로서 공동과 플라즈마쪽 경계면에 대해서는 완전도체면으로 가정하여 vector potential A=0으로 놓았다. 4개의 전류띠에 대한 vector potential A의 4가지 경우에 대해 Laplace 방정식을 이용하여 자기장 분포를 계산하고, 그 결과로부터 각각의 전류띠 둘레를

$$I = 1/\mu_0 \oint B \cdot dl \quad (1)$$

와 같이 선적분하여, 각 경계 조건에 대한 각각의 전류띠에 흐르는 전류 I를 구하였다. 이로부터 vector potential과 전류의 상호 관계식인 A=LI를 이용하여 인덕턴스 행렬 L(4×4)을 구하였다. 인덕턴스 행렬로부터 자체 자기유도계수는

$$L_{outer} = L_1 = L_{1,1} = L_{4,4} \text{ [H/m]} \quad (2)$$

$$L_{inner} = L_2 = L_{2,2} = L_{3,3} \text{ [H/m]} \quad (3)$$

와 같으며, 상호 유도계수는

$$k_{outer} = k_1 = k_{12} = k_{34} = \frac{L_{1,2}}{\sqrt{L_{1,1} \cdot L_{2,2}}} \quad (4)$$

$$k_{inner} = k_2 = k_{23} = \frac{L_{2,3}}{\sqrt{L_{2,2} \cdot L_{3,3}}} \quad (5)$$

$$k_{13} = k_{24} = \frac{L_{1,3}}{\sqrt{L_{1,1} \cdot L_{3,3}}} \quad (6)$$

$$k_{14} = \frac{L_{1,4}}{\sqrt{L_{1,1} \cdot L_{4,4}}} \quad (7)$$

와 같이 구하였다.

1, 2번 전류띠와 3, 4번 전류띠가 독립적으로 파라데이 차폐체에 의해 싸여 있으므로, 한쪽에 대해서만 전장 분포를 계산하여 단위 길이당 전기용량을 결정하였다. 이때 계산의 경계 조건으로서, 공동과 파라데이 차폐체를 완전도체면으로서 접지되어 있다고 가정하여 전위 $V=0$ 으로 가정하였다. 이러한 경계 조건에 대해 전류띠에 단위 전압이 인가되었을 때의 전위 분포를 계산하였으며, 이로부터 공동내에 저장된 총에너지 W 를 계산하여 전기용량을 $C = 2W/V^2$ 와 같이 결정하였다. 또한 파라데이 차폐체의 기하학적 효과인 capacitive factor를 고려하였다.

이렇게 구한 자기유도계수와 유효 전기용량으로부터 전류띠의 특성 임피던스 Z_0 와 상대위상속도 β 를

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \text{ } [\Omega] \quad (8)$$

$$\beta = \frac{v_p}{c} = \frac{1}{c \cdot \sqrt{LC_{eff}}} \quad (9)$$

와 같이 계산하였으며, 안테나의 전기적 특성을 표 3-2-7에 정리하였다. 전류띠 주위영역에 대한 전장 분포 계산으로부터 전장값을 구한 결과, 반경방향으로의 최대 전장은 전류띠에 인가되는 단위 전압당 $E_{\perp}=119 \text{ V/m}$ 였으며, 절연과피에 결정적인 영향을 미치는 토로이달 방향으로의 최대 전장은 $E_{\parallel}=79.7 \text{ V/m}$ 였다.

전류띠의 한쪽 끝에 연결된 진공전송선로 및 위상가변기는 또 다른 한쪽의 동일한 연결을 거쳐 서로 접속되어 폐회로를 이룬후 하나의 고주파 송출계로 연결된다. 이렇게 전류띠가 포함된 폐회로에 대해, 플라즈마로 전달되는 전력에 해당하는 저항값을 전류띠의 저항 성분 $R[\Omega/m]$ 으로 보고, 전류띠를 위에서 구한 특성 임피던스를 가진 전송선로로 볼 수 있다. 이 저항 값은 플라즈마의 온도, 밀도분포, 주파수 등에 의해 결정되며, KSTAR 플라즈마의 경우, 이 값을 RANT3D code로 계산하면 플라즈마 조건에 따라 $R=2\sim 10 \text{ } \Omega/m$ 이다. 전류띠가 포함된 폐회로에 대해, 세 가지 주파수 $f=27 \text{ MHz}(B_T=2.5 \text{ T}$ 에서의 전류구동의 경우), $f=38 \text{ MHz}(B_T=3.5 \text{ T}$ 에서의 전류구동), $f=50 \text{ MHz}(B_T=3.5 \text{ T}$ 에서의 가열의 경우)에 대해 전류띠의 중앙 지점에서 $1kA$ 의 전류가 흐를 때 전류띠와 전송선로에서의 전압 및 전류 분포를 구하여 최대 전압 V_{max} 을 결정하였다. 이로부터 플라즈마로 전달되는 전력을

$$P_{total} = \frac{1}{2} R h F_1 \left(\frac{V_{per}}{V_{max}} \right)^2 \quad (10)$$

와 같이 구하였다. 여기서 V_{per} 는 전류띠를 포함한 모든 전송선로 상에서 절연파괴를 방지하기 위해 허용되는 최대 전압이다. 이 값은 전송선로의 크기와 절연기체의 종류 등에 의해 결정되며, KSTAR의 경우에는 최대허용전압을 $V_{per}=35$ kV로 설정하였다. F_1 은 RANT3D code에 의한 플라즈마 부하저항 계산시 실제 전류띠의 끝부분에서 왜곡되는 자장의 효과를 고려하는 계수이다. 상기 세 가지 주파수에 대해 플라즈마로 전달되는 전력을 계산하면 그림 3-2-41과 같다. 그림으로부터, 플라즈마로 6 MW 이상의 전력이 전달되기 위해서는 플라즈마의 부하저항이 $f=27, 38, 50$ MHz에 대해 각각 4.1, 5.1, 6.3 Ω/m 이상이어야 함을 알 수 있다. RANT3D의 계산 결과에 의하면, KSTAR 플라즈마의 표준 조건시에 부하저항이 $f=27, 38, 50$ MHz에 대해 각각 4.9, 6.9, 7.4 Ω/m 이므로, 최대허용전압 이하에서 플라즈마로 6 MW의 전력을 공급할 수 있음을 알 수 있다. 또한 이 때 전류띠 주위에서 토로이달 방향의 최대 전기장을 구해 보면, 전류띠 끝단에서의 전압으로부터 각각 $E_{||}=11.8, 14.0, 17.8$ kV/cm로서, 기존의 여러 ICRF 안테나에서 검증된 토로이달 방향 전기장의 상한선인 20 kV/cm 보다 낮기 때문에 절연파괴를 방지할 수 있음을 알 수 있다.

상호유도 효과

4개의 전류띠간의 상호 유도 효과를 계산하였다. 표 3-2-7의 상호유도 계수를 이용하여 4개의 전류띠에 대해

$$\frac{dV_i}{dx} = RI_i + j\omega(LI_i + \sum_{j \neq i} M_{ij}I_j) \quad (11)$$

$$\frac{dI_i}{dx} = j\omega CV_i \quad (12)$$

와 같은 coupled equation로부터 전류, 전압을 계산해야 한다. 여기서 R, L, C는 각각 단위 길이당 부하저항, 인덕턴스, 전기용량이며, M_{ij} 는 i 번째와 j 번째 전류띠간의 상호 인덕턴스이다. 또, 4개의 전류띠가 모두 거의 같은 R, L, C 값을 가지므로 (11), (12)식을 조합하면

$$\frac{d^2I_i}{dx^2} = \gamma_0^2[\sum_j K_{ij}I_j - j\delta I_j] \quad (13)$$

와 같은 식을 얻는다. 여기서 $\gamma_0^2(=-\omega^2LC)$ 은 단일 전류띠에 대한 전파상수이며, δ

$=R/\omega L$ 이다. 전류의 형태를 $I \sim e^{\gamma x}$ 으로 가정하면 (2-13)식은 4개의 homogeneous equation을 얻는다. 이로부터 각 전류띠에 흐르는 전류를 구할 수 있다. 이 때, 인접하지 않은 전류띠간의 상호 유도효과는 매우 작으므로 K 행렬의 $k_{13}=k_{31}=0$, $k_{14}=k_{41}=0$ 로 둘 수 있다. 전류구동의 한 경우인 38 MHz 근처의 한 공명 조건에 대해 전류띠간의 위상차가 $\pi/2$ 일 때, 상호유도 효과에 의해 루프저항이 현저히 차이가 나게 되며. 이러한 경우 각 전류띠를 구동하기 위해 공급되어야 하는 전력을 계산하면 그림 3-2-42와 같다. 이로부터 알 수 있듯이 안쪽에 있는 2, 3번 전류띠는 상호유도 효과의 영향을 받지 않으나, 1번과 4번 전류띠의 전력은 현저한 차이가 있다. 이것은 두 상호유도계수 k_1, k_2 의 값이 서로 비슷하기 때문이며, 그 값의 차이가 클 경우 4개의 전류띠에 공급되어야 하는 전력이 모두 다르게 된다. 따라서 본 안테나의 경우 1, 4번 루프 사이에 하나의 hybrid decoupler를 연결함으로써 전력을 서로 보상해 줄 수 있으며, 상호유도계수 값이 다를 경우, 3개의 decoupler가 필요하게 된다.

㉞ ICRF Mock-up 안테나의 전기적 특성 측정

Mock-up 안테나의 측정

KSTAR ICRF 안테나의 전기적 특성을 측정하고, 실제 안테나의 제작과정에서 나타날 수 있는 문제점을 검토하여 본제품의 공학설계에 반영하기 위해 기본 설계를 바탕으로 mock-up 안테나를 제작하였다. 제작된 mock-up 안테나는 그림 3-2-43과 같다. Mock-up 안테나는 설계된 ICRF 안테나의 소신호 전기적 특성을 그대로 반영할 수 있도록 제작되었다. 따라서 고주파 입출력을 BNC 콘넥터를 통해서 할 수 있도록 하였고, 진공 조건을 무시하였다. 구리로 제작된 전류띠를 제외한 대부분은 가공성을 고려하여 알루미늄으로 제작하였다.

ICRF 안테나의 기하학적 파라미터의 변화에 의한 성능을 평가하기 위하여 파라데이 차폐봉의 직경, septum 높이 그리고 전류띠의 부반경 방향으로의 나머지 구조물에 대한 상대적 위치를 변화시킬 수 있도록 하였다. 4개의 전류띠 또는 8개의 입출력 포트의 상호 결합특성과 각 전류띠의 공진 주파수를 측정하였으며, 측정 주파수 대역은 KSTAR ICRF 운전 주파수 영역을 포함하는 20~70 MHz로 하였다.

Scattering 파라미터의 측정

그림 3-2-44와 같이 번호가 부여된 8개의 고주파 인입구에 대해서 scattering parameter $s_{ij}(i,j=1,2,3...8)$ 를 측정하였으며, 측정 과정에서 $s_{ij}=s_{ji}$ 인 대칭성이 확인되

었다. 측정 대상인 mock-up 안테나의 여러 가지 변화 가능한 기하학적 구조에 대해 다음과 같이 분류 번호를 부여하였다.

F12G0S57	a. 문자 F 바로 뒤의 숫자는 파라데이 차폐체의 직경 (mm)을 의미한다.
F18G0S57	
F15G0S52	b. 문자 S 뒤의 숫자는 septum 높이에 대한 상대적 표시로써, S57이 중앙부에서 175 mm이다. 따라서 ± 5 mm의 변화가 가능하다.
F15G0S57	
F15G0S62	c. 문자 G 뒤의 숫자는 전류띠의 부반경 방향으로의 나머지 구조물에 대한 상대적 위치를 변화시키기 위하여, 공동의 뒤판과 공동의 벽과의 사이에 삽입한 spacer의 두께(mm)이다. 따라서 '0'가 전류띠와 파라데이 차폐체와의 간극이 10 mm임을 나타낸다.
F15G5S57	
F15G10S57	
F15G20S57	

그림 3-2-45는 F15G0S57에 대하여 $|s_{12}|$, $|s_{23}|$, $|s_{13}|$ 를 나타낸 것이며, 그림 3-2-46은 $|s_{23}|$ 과 $|s_{13}|$ 을 $|s_{12}|$ 로 규격화한 것이다. 규격화를 통해 inner wall을 사이에 둔 두 전류띠의 트랜스미션 $|s_{23}|$ 와 septum plate를 사이에 둔 두 전류띠의 트랜스미션 $|s_{12}|$ 를 비교하면 $|s_{23}|$ 는 $|s_{12}|$ 의 약 70 %이다. 충분히 작으리라고 예상되는 $|s_{13}|$ 는 $|s_{12}|$ 의 약 20 %이다. 표 3-2-7에서 상호유도계수를 살펴보면 k_{12} 와 k_{23} 가 거의 동일함을 알 수 있는데 k_{12} 와 k_{23} 이 같도록 septum 높이가 조절되었기 때문이다. 계산된 값이 측정된 값과는 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 한편 k_{13} 는 k_{12} 의 20 %로서 측정치를 크게 벗어나지 않는다.

그림 3-2-47과 그림 3-2-48 및 그림 3-2-49는 $|s_{12}|$ 와 $|s_{23}|$ 을 septum 높이를 변화시키면서 측정한 것이다. 이 측정 결과에 대해 $|s_{23}|$ 를 $|s_{12}|$ 로 규격화하여 나타내면 그림 3-2-50와 같다. Septum 높이를 증가시킴에 따라 $|s_{23}|/|s_{12}|$ 는 1에 접근하기는 하나 1이 되기 위해서는 septum 높이를 한참 더 높여야 함을 볼 수 있다. 그림 3-2-51은 설계된 k_{23}/k_{12} 와 측정된 $|s_{23}|/|s_{12}|$ 를 septum 높이의 변화에 대하여 비교한 것이다. Septum 높이의 변화에 대한 그래프의 경향은 크게 다르지 않지만 값에는 큰 차이가 나는데, 이는 그림 3-2-40과 같은 2차원 모델링 과정에서의 septum 높이에 대한 유효값 설정 및 3차원 효과에 기인한 것으로 판단된다. 즉, 플로이달 방향으로 볼 때 전류띠 및 septum의 길이가 유한하며, 그 형상도 곡선 형태인데 2차원 모델링에서 그 효과를 고려할 수 없기 때문인 것으로 사료된다. 또한 전류띠와 공동벽 사이에 존재하는 전류띠의 feeding 부분도 차이를 유발한 요인으로 사료된다.

전류띠 공명

동작 주파수내에서 전류띠 간의 공명 현상이 발생하면 실제의 운전에서 어려움이 존재할 수 있다. 특히 임피던스 정합과 위상 조절을 위한 회로의 주파수 변화에 대한 경향성을 예측하는 것이 어려워지며, 또한 radiation 부하가 아닌 기생 부하로 고주파 전력이 소모될 수 있다. 측정에 의하면 mock-up 안테나는 50~60 MHz에서 공명 주파수를 갖고 있으며, 인근 포트를 open할 경우 $|S_{11}| \sim -2$ dB의 반사를 나타낸다. 이는 VSWR~8.7에 해당한다. 이러한 공명을 운전 주파수 영역에서 제거하기 위하여 앞 절에서와 동일하게 기하학적 구조를 변화시키면서, 인근 포트를 open하고 S_{11} 과 S_{22} 를 측정하였다. S_{11} 를 측정하되 포트 2를 open한 경우 $S_{11,2o}$ 라 표기한다. 그림 3-2-52, 53, 54는 파라데이 차폐봉의 직경, 전류띠의 위치, septum 높이를 변화시키면서 $|S_{11,2o}|$ 를 측정한 것이다.

결과들로부터 알 수 있는 것은 전류띠를 공동내로 집어넣을 때 공명 주파수의 높은 주파수로의 이동이 가장 현격하며 아울러 반사도 현격하게 적어진다는 것이다. 그러나 전류띠는 가능하면 플라즈마와 가깝게 위치하여야만 하므로 이러한 구조 변경은 제한적이다. 파라데이 차폐체의 직경을 늘리면 공명 주파수는 높은 주파수로 이동하나 커플링이 커지게 된다. Septum 높이의 변경은 상호유도효과를 크게 변화시키나 공명 주파수를 변화시키지는 못하는 것을 알 수 있다.

㊦ ICRF 안테나의 공학 설계

전류띠(Current strap)

안테나의 전류띠는 전류구동을 위해 그림 3-2-55와 같이 4개로 이루어져 있으며, 폴로이달 방향으로 167 mm 또는 198 mm 간격으로 배치되어 있다. 최대로 전력을 전달하기 위해 전류띠의 중간 부분이 접지 되어 있고, 양쪽 끝에는 특성 임피던스가 40 Ω인 6" 진공전송선의 중심도체와 연결된다. 전류띠의 중간 접지 기둥은 공동(cavity box)의 뒷판에 고정되며, 전류띠 전체를 기계적으로 지지하는 역할을 한다. 전류띠와 벽 사이의 거리는 절연파괴를 방지하기 위해 26 mm로 하였다. 따라서 전류띠의 폭은 98 mm가 되며, 높이는 passive plate의 구조를 고려하여 752 mm로 하였다. 전류띠의 폴로이달 방향으로의 구조는 KSTAR 플라즈마의 표면과 일정한 간격으로 인접하게 하기 위해 플라즈마쪽 표면의 곡률 반경이 1100 mm로 설계되었으며, 토로이달 방향으로는 좌우 2개씩 대칭으로 171° 각도로 배치된다. 전류띠의 재료는 SUS316LN이며, 고주파에 의한 저항 손실을 줄이기 위해 표면은 20 μm 두께로 Cu 도금을 하였다.

전류띠에 가해지는 열부하는 플라즈마로부터 28 kW/m²와 고주파 전류에 의한 저

항열부하 40 kW/m^2 가 있다. 이러한 열부하에 대해 전류띠를 냉각시키기 위해 그림 3-2-56과 같이 전류띠의 양쪽 모서리를 따라 직경 12 mm의 냉각수 통로를 조성하였으며, 접지 기둥을 통해 냉각수가 공급되도록 하였다. 유속을 1.125 m/s로 하여 열 해석을 수행한 결과, 플라즈마쪽 면에서의 최고 온도가 $130 \text{ }^\circ\text{C}$ 였으며, 냉각수의 최고 온도는 $54 \text{ }^\circ\text{C}$ 였다. 열응력은 냉각수로 근처에서 최대였으며, 그 값은 53 MPa이다. SUS316LN의 항복응력(yield stress)은 252 MPa이며, 허용 열응력은 항복응력의 3배이므로 재료의 강도는 충분하다.

파라데이 차폐체(Faraday shield)

파라데이 차폐체는, 안테나가 플라즈마에 직접적으로 노출되는 것을 막아 안테나를 보호하고, 안테나로부터 방출되는 전자기파의 전장 성분 중에서 토로이달 방향에 평행인 전장성분을 차폐하는 역할을 한다. 파라데이 차폐체는 고주파 자체와 플라즈마로부터 가해지는 최대 0.2 MW/m^2 의 열부하를 300초 동안 견딜 수 있어야 하며, 온도 상승 및 차이로 인한 열응력을 지탱할 수 있어야 한다. 이러한 열부하 조건을 고려하여 파라데이 차폐체로는 내경 13.4 mm, 외경 15.9 mm(5/8")의 Inconel 625 관을 선택하였으며, 내부로 냉각수가 흐르게 하였다. 설계된 파라데이 차폐관에 대한 열해석 결과, 주어진 열부하에 대해 최대 표면 온도는 $149 \text{ }^\circ\text{C}$, 최대 응력은 160 MPa였다. Inconel 625의 항복응력(yield stress)이 252 MPa이므로 허용 열응력은 756 MPa이다 따라서 재료의 강도는 충분하다. 또한 플라즈마 disruption 시의 응력을 계산해보면 최대 40 MPa로서 충분히 견딜 수 있음을 알 수 있다. 파라데이 차폐관은 그림 3-2-57과 같이 내부에 냉각수 통로가 있는 공동벽에 설치되며, 그 설치 간격은 전력 투과율과 flux compression factor를 비교하여 23 mm로 하였고, 두 sections으로 나누어져 있는 전체 파라데이 차폐관의 수는 66개이다. 이 경우 광학적 투과율(optical transparency)은 $(23-15.9)/23=31\%$ 가 되며, capacitance factor는 88.7 %이다. 파라데이 차폐체의 토로이달 자장과의 설치 각도가 미치는 영향에 대해서는 세계의 여러 토카막을 이용한 다수의 연구와 논의가 있었으나 결론에는 도달하지 못하고 있다. 본 안테나에서는 제작의 용이성을 고려하여 자장의 각도를 고려하지 않고 수평으로 설치하였다. 공동의 좌우 sections에는 각각 33개씩의 파라데이 차폐관이 설치되어 있는데, 토로이달 방향으로 보아 두 sections은 171° 각도를 이룬다. 공동의 한 section에 대해 폴로이달 방향으로의 차폐관 설치 구조는 차폐관의 플라즈마 쪽 표면이 $R=1100 \text{ mm}$ 원주 상에 위치하도록 하였다. 이는 표준 조건하에서 KSTAR 플라즈마 표면의 형상을 원으로 근사하여 fitting했을 때, flux surface로부터 +2 cm 지점에 해당된다. 이러한 설치 구조는 ICRF 계통의 위치

를 고정하였을 때, 4개의 전류띠와 플라즈마와의 거리를 최소화하여 플라즈마 부하 저항을 최대화함으로써 고주파 전력 전달을 극대화하기 위함이다. 모든 안테나 계통을 조립 완료하였을 때, 파라데이 차폐관들이 이루는 플라즈마쪽 표면의 정확도는 ± 1 mm이다.

파라데이 차폐관의 표면은 저항 손실을 줄이기 위해 Cu로 도금하며, 플라즈마를 향한 표면은 높은 원자번호 물질에 의한 불순물 영향을 줄이기 위해 Cu 도금 위에 0.1 mm 두께의 B₄C를 진공 플라즈마 용사법에 의해 증착하게 된다. B₄C를 증착하는 기술이 국내에서는 아직 시도된 바 없고, 본제품에서 사용하고자 하는 Inconel 625 판이 상당한 고가이므로, proto-type 안테나 제작에서는 파라데이 차폐관 재료로서 SUS316LN을 사용하였으며, 20 μ m 두께로 Cu 도금하였다. Inconel 625 판에 B₄C를 증착하는 방법에 대한 연구는 Inconel 625 판으로 시험 시편을 제작하여 수행하고 있으며, 접합강도 및 열부하 시험을 계획하고 있다.

공동(Cavity Box)

안테나의 공동 벽은 SUS316판으로 제작되고, 그림 3-2-58과 같이 4개의 전류띠를 감싸고 있으며, 파라데이 차폐관의 지지구조체가 된다. 또한 파라데이 차폐관의 냉각수 통로의 역할을 하며, 전류띠간의 상호유도 효과를 줄이기 위해 중간에 septum을 설치하였다. 좌, 우 공동 벽의 두께는 파라데이 차폐관의 크기를 고려하여 24 mm로 하였으며, 중앙 벽의 두께는 48 mm이다. Septum plate의 두께와 높이는 II-1절에서 언급한 상호유도 효과를 고려하여 결정하였다. 중앙에서 septum의 높이는 178.5 mm이며, 두께는 17 mm이다. 공동의 좌, 우 및 중앙 판은 파라데이 차폐관의 냉각수 통로 역할을 하는 동시에 자체적으로도 냉각이 되게 된다. 반면 2개의 septum plate와 아래, 위의 판은 그림 3-2-57과 같이 플라즈마를 향하는 가장 자리를 따라 내부에 직경 12 mm의 냉각 통로를 가지고 있다. 공동의 뒷판은 안쪽으로는 전류띠의 중간 접지 기둥이 고정되며, 뒷면에는 8개의 진공전송선의 외부도체관이 접속되게 하였다. 진공전송선과의 접속부 플랜지는 냉각관로 배관을 위한 공간 확보를 위해 135 mm 높이로 하였으며, 연결부에 테프론으로 제작한 전송선 중심도체 지지 구조물을 삽입하도록 하였다. 진공전송선 접속부의 설치 각도는 뒤에 연결될 진공전송선의 수평, 수직을 결정하게 되므로 ± 5 mrad 이내의 정확도를 요구하고 있다. 공동의 뒷판에는 2개의 냉각수 인입/분배기도 뒷면에 고정된다. 공동의 좌, 우, 상, 하 및 septum plate는 용접을 하며, 전류띠가 설치되는 뒷판은 볼트에 의해 분해, 조립이 가능하도록 하였다. 공동의 좌, 우 판과 뒷판의 아래, 위에 있는 brackets를 통해 지지구조체와 접속된다. 전류띠와 공동 벽과의 거리는 절연과

피를 방지하기 위한 충분한 거리를 유지하게 하였으며, 최대 전기장 값을 줄이기 위해 모서리 부분은 모두 둥글게 처리하였다. 또한 공동의 내면은 고주파 전류에 의한 손실을 줄이기 위해 Cu로 도금하였다.

파라데이 차폐관 설치

파라데이 차폐관은 그림 3-2-57과 같이 냉각통로를 유지하면서 공동의 좌, 우 및 중앙 벽에 설치된다. 그 설치 위치는 앞에서 언급한 바와 같으며, 요구되는 정확도를 만족시키기 위해 적절한 지그를 사용함은 필수적이다. 차폐관의 내부에는 냉각수가 흐르며 외부에는 진공 상태이므로 누설없이 설치해야 함은 물론이다. 66개의 파라데이 차폐관을 공동 벽에 설치하는 방법으로서 변형이 적은 brazing 방법을 고려하였으나, 관들의 설치 간격이 너무 좁고 누설의 위험이 있어 그림 3-2-59와 같이 용접하는 방법을 택하였다. 우선 공동의 벽은 두 쪽으로 나누었는데, 위의 것은 파라데이 차폐관이 삽입되는 부분이며, 아래의 것은 냉각수 jacket이 있는 부분이다. 파라데이 차폐관은 끝부분에서 용접하였으며, 적절한 지그를 사용하여 위치를 정확히 고정하였다. 차폐관의 용접후 공동 벽의 두 쪽을 용접하여 냉각통로가 형성되도록 하였다. 이 때 변형을 최소화하도록 보강재로 고정하였다. 이와 같은 방법으로 파라데이 차폐관을 끝에서 용접하였으므로, 차폐관의 삽입된 부분과 벽사이의 좁은 틈새는 진공에 악영향을 주게 된다.

진공전송선(Vacuum Transmission Line, VTL)

전류띠의 양쪽 끝에 연결된 진공 전송선은 KSTAR 진공용기의 외부까지 연장되어 있고, vacuum feedthrough와 movable section을 통해 가압 전송선과 연결된다. 상, 하의 가압 전송선은 각각 한 개씩의 위상가변기(phase shifter)를 거쳐 공명 회로를 이루며, T형 연결부를 통해 2 MW급 고주파 전력 공급원으로 연결된다. 전류띠의 중간이 접지되어 있기 때문에 고주파 전압의 최대 지점이 본 ICRF 계통의 모든 사용 주파수에 대해 진공전송선로 상에 있게 된다. 따라서 진공전송선 설계에 있어서 절연 파괴 문제가 가장 큰 고려의 대상이다. 진공전송선로상에서의 최대 전압은 진공전송선의 특성 임피던스에 의해 좌우되며, 특성 임피던스는

$$Z_0 = 60 \ln \left[\frac{r_o}{r_i} \right] \quad (14)$$

와 같이 전송선의 외부도체관의 내경 r_o 와 내부도체관의 외경 r_i 에 의해 결정된다. 절연 파괴를 결정하게 되는 전장의 세기도 도체관의 크기에 의해

$$E_{\max} = \frac{V_{\max}}{r_i \cdot \ln\left[\frac{r_o}{r_i}\right]} \quad (15)$$

와 같이 결정된다. 본 ICRF 계통에서 진공전송선의 외부 도체의 크기는 KSTAR 진공용기와 안테나의 공동 크기에 의해 외경 150 mm, 내경 146 mm의 상용 SUS304 tube로 하였다. 이 경우에 대해 사용 주파수가 $f=50$ MHz일 때 내부도체의 외경에 따른 특성 임피던스와 접지점에서 $I=1$ kA일 때의 최대전압, 최대 전장을 그림 3-2-60에 보이고 있다. 그림으로부터 알 수 있듯이 내부 도체의 직경이 증가하면 특성 임피던스가 작아져서 진공전송선로상의 최대 전압이 감소하게 되지만 최대 전장의 세기는 $r_i=32$ mm 이상에서는 외부 도체와의 거리가 가까워짐에 따라 다시 증가하게 된다. 전장의 세기는 $r_i=24\sim 40$ mm 영역에서는 거의 같은 값으로 낮게 유지되고 있다. 따라서 내부도체는 상용 3" SUS304 tube로 결정하였으며, 이 경우 특성 임피던스는 $Z_0=39$ Ω 이 된다.

진공전송선의 재료로서 SUS304를 선택한 이유는 기계적 특성이 Cu에 비해 우수하기 때문이며, 전기전도도를 향상시키기 위해 고주파 전류가 흐르는 표면은 Cu로 도금하였다. 진공전송선에서의 온도 상승은

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -k\nabla^2 q + h/C_p \quad (16)$$

와 같은 lumped heat conduction equation으로부터 구할 수 있다. 보수적으로 고려하기 위해 열전도에 의한 열 이동을 무시하고 냉각을 하지 않는 경우, 온도 상승 ΔT 는

$$\Delta T = \frac{h}{C_p} \cdot \Delta t \quad (17)$$

가 된다. 이 식에서 열의 발생부분은 표면에 도금한 Cu 부분이며, 이 열은 도체 물질인 SUS304의 온도를 상승시킨다. 따라서 C_p 는 SUS304의 열용량으로서 477 $J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$ 이며, 중심도체의 해당되는 무게는 $M=2\pi r_i \cdot t \cdot L \cdot \rho=2\pi \times 3.81 \times 0.165 \times 227.5 \times 7.93=7.13 \times 10^3$ g이다. h 는 단위 시간당, 단위 질량당 발생열이다. h 는 skin effect를 고려한 동축 전송선의 저항 R 로부터

$$P_{\text{loss}} = \frac{R}{R + Z_0} P_{\text{RF}} \quad (18)$$

와 같다. 여기서 저항 R은 단위 길이당 저항 R'에 길이를 곱하여 구할 수 있으며, 본 진공전송선의 특성 임피던스는 $Z_0=39 \Omega$ 이며, $P_{\text{RF}}=1 \text{ MW}$ 이다. 동축 전송선의 경우 단위 길이당 저항 R'은

$$R' = \frac{R_s}{2\pi} \left[\frac{1}{r_o} + \frac{1}{r_i} \right] [\Omega/\text{m}] \quad (19)$$

이며, 여기서 R_s 는 skin effect surface resistivity로서 Cu의 경우

$$R_s = 2.61 \times 10^{-7} f^{1/2} [\Omega] \quad (20)$$

이다. 따라서 주파수 $f=50 \text{ MHz}$ 의 고주파 1 MW를 300초 동안 전송하는 경우, $R_s=0.0018 \Omega$, $R'=0.012 \Omega/\text{m}$, $R=0.027 \Omega$, $P_{\text{loss}}=687 \text{ W}$, $h=96.4 \text{ J/s}\cdot\text{kg}$ 이므로 진공 전송선에서의 열 발생으로 인한 온도 상승을 계산하면 $\Delta T=60.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 이다. 이러한 온도 상승은 진공전송선의 중심 도체의 열팽창을 유발하며, vacuum feedthrough와 연결된 끝 부분이 고정되어 있으므로 전류띠 위치에서 플라즈마쪽으로 2.5 mm의 위치 이동이 발생한다. 이를 방지하기 위해 중심도체의 내부에 그림 3-2-61과 같이 냉각통로를 설치하여, 발생하는 열을 제거하도록 하였다. 냉각통로는 전류띠로부터 가운데 관 속으로 인입된 냉각수가 진공전송선 끝에서 두 관 사이로 돌아 다시 전류띠로 돌아갈 수 있는 구조이다. 전류띠와 연결되는 부분에는 전류띠의 크기에 맞도록 직경 98 mm로 확장되어 있으며, 두 개의 냉각통로가 있다. 냉각통로는 Viton O-ring으로 밀폐하였다. 공동의 뒷판에 부착된 VTL-adaptor와 연결되는 부분에는 테프론 지지대를 삽입할 수 있도록 하였다. Vacuum feedthrough와 연결되는 부분은 Detail B와 같이 unflanged connector를 끼울 수 있도록 하였다. 전체 ICRF 계통을 진공 상태에서 이동 가능하도록 하기 위해 진공전송선 외부 도체의 바깥쪽 면에 vacuum bellows의 한쪽 끝을 용접하였으며, 다른 한쪽에는 flange를 부착하여 stationary plate에 고정되도록 하였다. Bellows의 이동 가능 거리는 100 mm이다.

안테나 지지 구조

ICRF 안테나는 그림 3-2-62와 같이 box 형태의 지지구조를 가진다. 4개의 전류

띠와 8개의 진공전송선은 공동에 설치되며, 공동은 다시 support box에 연결된다. 진공전송선의 다른 한쪽도 support box의 바깥쪽에 위치의 미세조정이 가능한 holder에 의해 고정된다. 따라서 모든 하중은 support box에 전달되며, support box를 포함한 전체 하중은 1.5 ton이며, 그 무게 중심은 support box의 앞쪽에서부터 안쪽으로 60 cm 지점에 있다. Support box의 아래 판에는 4개의 roller가 설치되어 있으며, 윗 판에는 guide roller를 부착하였다. 이는 안테나 포트에 삽입, 이송을 위한 것이다. 안테나 전체가 조립된 상태에서 support box는 진공상태에서 bellows와 구동부에 의해 100 mm 이동이 가능하다. 이 때 안테나가 플라즈마 쪽으로 어느 위치 이상 들어가지 못하도록 하기 위해 support box의 바깥쪽 위, 아래에 위치를 제한할 수 있는 bracket를 부착하였다.

본 proto-type 안테나에서는 안테나의 전체 하중이 최종적으로 안테나 포트의 rail를 통해 포트에 전달되도록 하였으며, 수직 방향으로서는 단순히 자체 하중에 의해 고정되며, 플라즈마 disruption 등과 같은 경우 발생하는 회전력 경우, 포트 상단의 guide rail에 의해 지지되나 보다 정확한 응력 해석을 통해 지지구조를 보완할 필요가 있다. 즉, 안테 전체가 받는 모든 힘을 분석하여 어떤 경로를 통해 최종적으로 어디에 지지되게 할 것인가를 정해야 하며, 이는 KSTAR 진공용기 제작과도 관련이 있다.

안테나 구동부

ICRF 안테나는 KSTAR 운전 조건에 따라 플라즈마에 대한 위치를 조정할 필요가 있으며, 고주파 가열없이 운전할 때에는 고열부하 위치로부터 떨어져 있어야 한다. 이를 위해 전체 안테나 계통을 진공을 유지한 상태에서 100 mm 이동 가능하도록 하였으며, 그 구성은 그림 3-2-63과 같다.

주요 구성을 살펴보면, 안테나 포트 플랜지에 고정된 stationary plate 위에 4개의 guide rail이 조립되어 있으며, 4개의 rail은 support plate에 의해 고정된다. 4개의 guide rail 위에서 움직일 수 있게 되어 있는 movable plate에는 8개 진공전송선의 끝에 있는 분해 조립 가능한 플랜지를 vacuum feedthrough와 함께 고정하게 된다. Stationary plate와 support plate에 양쪽 끝이 고정된 driving screw를 motor로 회전시키면 movable plate에 부착된 bushing에 의해 movable plate가 이동하게 되고, movable에 고정된 8개의 진공전송선을 통해 전체 안테나계통이 움직이게 된다. 이 때 stationary plate 안쪽에 부착된 bellows에 의해 진공이 유지된다. Stationary plate는 이동시 위치의 기준이 되는 판으로서 안테나 계통의 진공 경계를 이루며, 안테나 포트 플랜지에 고정된다. 8.7 ton의 진공압력에 대해 변형을 억제하기 위해

그림 3-2-64와 같이 외부 표면에 보강재를 용접하였으며, 4개의 guide rail의 mounting base, driving shaft의 bearing 고정용 base, inlet/outlet coolant feeder, 2개의 진단용 NW50 포트가 용접되어 있다. 구동 motor가 진공에 의해 받는 힘은 2.3 ton이다.

냉각계통

ICRF 계통에서 냉각이 요구되는 것은 전류띠, 파라데이 차폐체, 안테나 공동, 진공전송선의 중심 도체 등이며, 이들에 대한 냉각수 순환도는 그림 3-2-65와 같다.

외부로부터 진공 환경 속의 안테나로 들어오는 inlet & outlet 냉각관로는 그림 3-2-66과 같다. Stationary plate에 용접되어 있는 coolant feeder를 통해 끝에 bellows가 연결되어 있는 직경 73 mm의 주 냉각관로에 의해 냉각수가 공급된다. 관로 끝에는 4개의 current straps, outer wall로 연결되는 3개의 관로, top & bottom plates 및 2개의 septum plates로 연결되는 관로들이 용접되어 있다. 각각의 관로 연결은 VCR를 이용하였다. 주 냉각관로는 앞에서 설명한 support box에 의해 지지된다. Bellows의 stroke는 진공전송선용 vacuum bellows와 마찬가지로 100 mm이 안테나 구성품 중에서 가장 열부하가 높은 파라데이 차폐체는 냉각을 용이하게 하기 위해 관로로 제작하였으며, 냉각통로의 구성은 그림 3-2-67와 같다. 외부로부터 stationary plate를 통해 들어온 주냉각관 끝에 연결된 inlet manifold로부터 3개의 1" 관을 이용해서 cavity box의 outer right wall의 coolant inlet에 연결된다. 3개의 inlet은 wall 내부의 water jacket로 연결되어 있으며, 이 water jacket으로부터 33개의 파라데이 차폐관이 병렬로 연결되어 있다. 각 차폐관의 반대쪽은 inner wall에 연결되어 있으며, inner wall 속에는 각각의 차폐관에 대해 독립적으로 'U'자형 냉각통로가 있다. 이 통로의 끝에는 공동의 인접 section을 감싸고 있는 33개의 파라데이 차폐관으로 각각 연결되어 있다. 다시 이 차폐관들은 outer left wall 속의 water jacket를 통해 빠져 나오게 된다. 즉, 파라데이 차폐관의 냉각관로는 2개씩 직렬로 된 33개의 병렬 연결이다. 이러한 관로 형성은 비교적 구조가 단순하여 제작이 용이하며, 관로의 전체가 길이가 짧아 압력강하가 작다는 장점이 있는 반면 파라데이 차폐관 각각에 대해 유량 차이가 많이 날 수 있으며, 관로 중 어느 하나가 막히는 사고가 발생했을 때 그것을 알 수 없다는 단점이 있다. 본 proto-type 안테나를 이용하여 파라데이 차폐관에 일정한 열부하를 인가하여 각각의 차폐관의 냉각능력을 평가할 예정이다.

전류띠(current strap)의 냉각관로는 그림 3-2-68과 같이 양쪽 모서리를 따라 직경 12 mm의 냉각관로를 구성하였으며, 중앙의 접지 기둥을 통해 coolant manifold

와 연결되어 있다. 즉, inlet manifold로부터 접지 기둥의 한쪽으로 들어온 냉각수는 전류띠와의 연결부에서 'T'자형으로 나누어진 다음 전류띠를 거쳐 양쪽 끝에 연결된 진공전송선의 중심도체로 연결된다. 진공전송선의 냉각관로는 앞에서 설명한 바와 같으며, 진공전송선을 거쳐 나온 냉각수는 다시 전류띠의 다른 한쪽 모서리를 거쳐 접지 기둥을 통해 밖으로 나오게 된다. 이와 같이 진공전송선의 냉각관로를 독립적으로 형성하지 않고 전류띠의 냉각관로와 연결한 것은 진공전송선의 접지측으로 통하는 냉각관로를 독립적으로 형성하기가 어렵기 때문이다. 이 냉각관로의 총 길이는 6.3 m이다. 공동(cavity box)의 각각의 wall에 대한 냉각관로는 앞에서 설명한 바와 같으며, coolant manifold와 직경 12 mm 관으로 각각 독립적으로 연결되어 있다.

(나) Prototype 안테나 제작

상기의 공학설계를 바탕으로 1999년에 prototype 안테나를 제작하였으며, 제작된 안테나는 그림 3-2-69와 같다. 여기서 'prototype'이라는 것은 본제품과 다음과 같은 특성이 다름을 지칭한다.

1. 우선 파라데이 차폐체로서 SUS tube를 사용하였다. 본제품에서는 B₄C가 코팅된 Inconel 625를 사용할 예정임.
2. Viton O-ring을 사용하여 진공 밀폐하였으며, 본제품에서는 Helicoflex를 사용할 예정이다. 따라서 prototype 안테나는 최고 온도가 150 °C로 제한된다. 본제품은 350 °C까지 운전 가능하다.
3. KSTAR 진공용기와의 간섭문제가 충분히 고려되지 않은 상태이다.

제작된 prototype 안테나에 대해 각각의 냉각관로에 대한 유속을 측정하였다. 열부하가 가장 큰 파라데이 차폐관의 경우, 압력차가 26 psig일 때 33개의 냉각통로에 대해 유속이 모두 0.8 m/s로서 균일하였으며, 본제품에서는 보다 높은 유속이 요구되므로 냉각관로의 개선이 요구된다. 전류띠 내의 냉각수의 유속은 1 m/s로서 요구조건을 만족하였다.

제작된 안테나를 고주파 시험용 진공용기에 설치하여 진공 상태에서 반경 방향으로의 동작 특성을 시험하였다. 그 결과 안테나의 이동 속도는 4 mm/s였으며, 위치 설정의 정확도는 ±0.1 mm였다. 안테나의 기계적 동작 특성은 요구조건을 충분히 만족하였으며, 플라즈마와 안테나 사이의 간격을 손쉽게 조절할 수 있음을 알 수

있었다.

(다) Prototype 안테나 시험

제작된 안테나에 대해 고전력 고주파 특성을 확인하기 위해 여러 단계에 걸쳐 시험 특성에 맞게 시험 회로를 수정하면서 시험을 수행하였다. 본 시험은 안테나 제작 후 첫 시험이며, 시험의 목적이 고주파 고전압, 고전류에 대한 특성 시험이므로 전류띠 하나에 고주파를 공급하여 시험하였다. 각각의 전류띠는 거의 유사한 구조이므로 본 시험만으로도 안테나의 고주파 고전압 및 고전류 특성을 조사하기에 충분하다.

① Multipactor 방전 시험

Multipactor 방전은 진공 중에서 고주파를 사용하는 모든 장치에서 문제가 되는 방전으로서 고주파의 주기와 2차전자의 발생이 공명을 이룰 때 발생하는 것으로서 ICRF 영역에서는 비교적 낮은 전력에서 일어난다. 이 방전이 일정한 전압폭 내에서만 일어나므로 정합된 구간의 특정 영역에 국부적으로 발생하여 장치의 손상을 가져올 가능성이 없지는 않으나, 그 보다는 이 방전으로 인한 압력 증가가 또 다른 더 심각한 방전으로 발전되는 것을 방지하여야 한다. 이러한 multipactor 방전의 특성을 파악하기 위해 구성된 시험회로는 그림 3-2-70과 같다. 고주파 전력은 Amplifier Research사의 Model 200L 고주파 송출기를 이용하여 공급하였으며, 두 개의 콘덴서로 구성된 정합회로를 이용하여 주파수 30 MHz에서 임피던스를 정합하였다. 정합된 구간에 형성되는 정상파의 위치에 따른 전압을 측정하기 위해 전압탐침을 설치하였으며 그 위치를 4군데로 변화시킬 수 있도록 하였다. 그림에서 전압탐침의 위치는 전류띠의 중앙접지로부터 각각 ① 3875 mm, ② 4896 mm, ③ 5965 mm, ④ 7493 mm이다. 입사 고주파의 전력을 증가시키면서 반사파의 전력과 각 위치에서의 전압 및 진공용기의 압력을 측정하였다. 입사 고주파의 전압에 따른 각각의 전압 변화를 그림 3-2-71에 나타내었다. 입사파 전압 10 V(peak)부터 반사파가 급격히 증가하는데, 이는 이 때부터 multipactor 방전이 일어나서 초기의 정합 조건으로부터 벗어나기 때문이다. 이 때부터는 입사파의 전압을 증가시켜도 선상의 전압은 증가하지 않고 반사파만 증가함을 알 수 있다. 즉, 입사 전력의 일정 부분만 multipactor 방전을 유지하는데 사용되고 나머지는 모두 반사되는 것이다. multipactor 방전이 일어나는 구간의 피크 전압이 73 V로서 타 저자들의 결과와 잘 일치하였으며, 각 위치에서의 전압 분포는 그림 3-2-72와 같다. Multipactor 방전은

입사파의 전압 60 V(peak), 즉 입사파 전력 36 W까지 유지되었으며, 그 이후에는 소멸되었다. Multipactor 방전이 일어났을 때 VSWR은 초기 1.1에서 6.5까지 증가하였으며, 진공용기의 압력은 초기 9.8×10^{-7} mbar에서 3.1×10^{-6} mbar까지 증가하였다. 이러한 압력 증가로 인한 추가적인 방전으로의 발전은 일어나지 않았다. 즉, 이 영역에서의 multipactor 방전은 입사파의 전력을 증가시킴으로서 쉽게 소멸시킬 수 있었으며, 고려해야할 정도로 심각한 문제는 발생하지 않았다.

② 1단계 고전력 시험

제작된 안테나에 대해 가능한 범위 내에서 고주파 고전압 시험을 수행하였다. 이를 위해 30 kW급 고주파 송출기를 사용하였으며, 시험 주파수는 32 MHz로 하였다. 고주파 시험 계통의 구성도는 그림 3-2-73과 같으며, 사진은 그림 3-2-74와 같다. 이 시험 회로에서 전류띠 #1의 아래 절반 부분에 정합회로를 통해 고주파를 공급하여 시험하였으며, 나머지 7 군데는 진공전송선의 입구에서 접지하였다. 정합 회로는 그림에서 보는 것처럼 trombone형의 위상변환기와 stub tuner로 구성되어 있다. 정합 조건을 만족하여 정상파가 형성되는 구간인 vacuum feedthrough부터 stub tuner까지의 전송선 내부에는 절연파괴 전압을 높이기 위해 고순도 질소 기체를 3 kg/cm^2 으로 충전하였다. 공간상의 제약으로 인하여 vacuum feedthrough 다음단에 6-inch 동축관을 사용하였으며, 조립의 편의를 위해 flexible section을 삽입하였다. 정합된 선상의 전압을 측정하기 위해 3개의 전압탐침이 장착된 동축관을 연결하였다. 전압탐침은 동축관의 외관에 그림 3-2-75와 같이 설치되며, 콘덴서형 전압 분배에 의해 고주파 고전압을 측정할 수 있다. 탐침의 위치를 조정하여 3개의 전압탐침이 모두 비슷한 교정계수를 갖도록 하였으며, 주파수 범위 25~60 MHz 영역에서 network analyzer를 이용하여 교정하였다. 교정 결과는 각각의 전압탐침별로

$$V\text{-probe \#1 : } V_m/V_{\text{line}} = 3.3661 \times 10^{-6} \cdot f[\text{MHz}] + 2.0573 \times 10^{-5}$$

$$V\text{-probe \#2 : } V_m/V_{\text{line}} = 3.6706 \times 10^{-6} \cdot f[\text{MHz}] + 1.7088 \times 10^{-5}$$

$$V\text{-probe \#3 : } V_m/V_{\text{line}} = 3.7269 \times 10^{-6} \cdot f[\text{MHz}] + 1.3596 \times 10^{-5}$$

와 같으며, 주파수에 대해 우수한 선형 비례관계를 나타내었다. 이 관계식에 의하면 주파수 30 MHz에서 측정한 전압의 8k 배를 하면 실제 값이 된다. 본 시험에서는 온도 상승 특성을 조사하기 위해 시험동안 안테나의 냉각관로에는 냉각수를 흘리지 않았으며, 안테나 cavity box의 전류띠 #1쪽 외벽에 3개의 열전대를 설치하여 온도를 측정하였다. 또한 vacuum feedthrough의 세라믹의 온도는 적외선 온도계를 이

용하여 측정하였다. 고주파 펄스가 인가되는 동안 입사파와 반사파의 고주파 전력과 선상의 전압 및 고주파 시험용 진공용기의 압력을 측정하였다. 시험회로의 특성을 표 3-2-8에 요약하였다.

고주파 시험의 결과로서 펄스폭 87초에 대해 최대 전압 23 kVp에 도달하였으며, 그 결과를 그림 3-2-76에 보이고 있다. 최대 전압 23 kVp는 플라즈마로의 결합 저항이 $6 \Omega/m$ 일 때 총 3.6 MW의 고주파 전력을 플라즈마로 전달할 수 있음을 의미한다. 최대전압을 더 이상 증가시키지 못한 것은 고주파 송출기의 출력 한계와 시험 회로 상의 손실로 인한 것이다. 이 때의 선상의 전압 및 전류 분포는 그림 3-2-77과 같다. 고주파가 인가되는 동안 cavity box 벽의 온도가 계속 증가하였으며, 특히 전류가 최대로 흐르는 전류띠 #1의 접지와 마주보고 있는 cavity 벽의 국부적인 영역의 온도가 가장 높았다. 그 온도가 107°C가 되었을 때 viton O-ring의 손상을 방지하기 위해 펄스를 중단하여야 했다. 최대 펄스 폭은 이렇게 결정된 것이다. 이러한 온도 상승은 고주파 전류에 의한 것으로 cavity box의 재료인 SUS316L의 비교적 높은 표면저항에 기인한다. 이후 2단계 시험 때에는 cavity box 표면을 Ni로 도금하여 표면 저항을 감소시켰다. 한편 vacuum feedthrough의 세라믹 온도는 최고 61°C이었으며, 이는 충분히 낮은 값이다. 펄스가 시작되는 부분에서 반사파의 증가와 진공용기 압력의 증가는 multipactor 방전에 의한 것이며, 입사 고주파 전력 4.1 kW 이상에는 소멸되었다. Multipactor 방전이 소멸되는 순간 반사 전력이 급격히 감소하고 방전에 더 이상 고주파 전력이 소요되지 않음으로 해서 입사 전력 값에 gap이 생기며, 영역은 4~8 kW이다. Multipactor 방전이 소멸된 후 진공용기의 압력이 다시 증가하는 것은 온도 상승에 따른 표면 기체방출률이 증가하기 때문이다. 펄스가 종료되는 순간 다시 압력이 증가한 것은 극히 짧은 순간이지만 이 때에도 펄스의 시작 때와 마찬가지로 multipactor 방전이 일어났기 때문이다. 진공용기의 압력은 초기 9.8×10^{-7} mbar에서 최고 3.1×10^{-6} mbar까지 증가하였다.

③ 2단계 고전력 시험

1단계 시험의 결과를 참조하여 보다 높은 전압, 전류에서 시험하기 위해 안테나의 cavity box를 Ni로 도금하였으며, 전체 정합된 구간의 길이를 줄여 손실을 감소시키기 위해 길이가 짧은 자체 제작한 stub tuner를 사용하였다. 또한 고주파 시험용 진공용기의 진공도를 개선하였다. 고주파 송출기로는 100 kW급으로 자체 제작한 것을 사용하였다. 시험 주파수는 고주파 송출기의 운전 주파수인 30 MHz로 하였다. 2단계 시험에서는 시험이 진행됨에 따라 시험회로를 여러 번에 걸쳐 개선하

였으며, 1차적으로 구성된 시험 회로의 개략도는 그림 3-2-78과 같다. 임피던스 정합은 위상변환기와 stub tuner를 이용하여 쉽게 맞출 수 있었다. 절연파괴 전압을 높이기 위해 vacuum feedthrough부터 stub tuner까지의 정합 구간에는 고순도 질소 기체를 3 kg/cm^2 으로 충전하였다.

전체 시험시스템의 고주파 conditioning을 위해 저전력에서 여러 횟수의 펄스를 공급하였으며, 그 효과를 조사하기 위해 시험용 진공용기의 압력 증가를 측정하였다. 고주파 펄스가 공급되었을 때 최고로 증가하는 압력을 펄스의 주입 횟수에 따라 살펴보면 그림 3-2-79와 같다. 펄스의 횟수를 증가시킬수록 압력 증가가 감소함을 알 수 있으며, 입사 고주파 전력을 증가시키면서 conditioning하여 최대 압력이 낮은 10^{-6} mbar 영역에 들도록 하였다. 충분한 conditioning을 수행한 후, 여러 회에 걸쳐 입사 전력을 증가시키면서 고전력 시험을 수행하였다. 시험회로 #1를 이용하여 도달한 최대 전압과 펄스폭은 각각 32 kV(peak)와 5 s이다. 시간에 따른 입사파와 반사파의 전력, 전압탐침으로 측정한 전압과 압력을 그림 3-2-80에 나타내었다. 유사한 펄스 시험을 수 차례 수행하는 도중 정합구간 내에서 방전음이 들리고 반사파가 증가하였다. 시험회로를 분해해 본 결과 전압탐침과 reducer의 절연 재료인 teflon 표면에 방전 흔적이 발견되었다. 이 영역은, 정합 구간에서의 전압과 전류 분포를 나타내는 그림 3-2-81에서 알 수 있듯이 전압이 30 kV 정도로 상대적으로 높은 영역임을 알 수 있다. 또한 이 부분은 상대적으로 절연전압이 낮은 6-inch 전송선으로 구성되어 있어 고주파 고전압에 견디지 못한 것이다. 이 결과로부터 전송선로에 질소기체로 가압을 하더라도 6-inch 선로의 경우 최대 전압 영역에서는 절연파괴가 일어남을 알 수 있었다.

상기의 시험 결과를 바탕으로 전압이 최대가 되는 영역의 6-inch 전송선을 9-inch로 교체하여 그림 3-2-82와 같은 시험 회로를 구성하였다. 9-inch 전송선에 장착된 전압탐침의 경우, 주파수 30 MHz에서 측정값에 19k 배를 하면 실제 전압 값이 되도록 교정하였다. 이렇게 구성된 시험회로를 이용하여 최대 전압 37.8 kV(peak)로 펄스폭 10 s로 시험하였으며, 최대 전압 33.8 kV(peak)로 펄스폭 20 s 시험 또한 성공적으로 수행하였다. 시간에 따른 입사파와 반사파의 전력, 전압탐침으로 측정한 전압과 압력을 그림 3-2-83에 나타내었다. 고주파 펄스가 끝났을 때 cavity box의 최고 온도는 67°C 였다. 이러한 성공적인 시험 결과를 바탕으로 장펄스 시험을 시도하였다. 고주파 펄스가 120초간 유지되고 있을 때 조립의 편의를 위해 전송선로 중간에 삽입되어 있는 6-inch flexible section이, 그림 3-2-84에서 보는 바와 같이, 심하게 변형되었다. 과열에 의한 열변형이 일어난 것이다. 위치에 따른 정상파의 전압 및 전류분포를 나타내는 그림 3-2-85로부터 flexible section 위치

에서의 고주파 전류를 계산해보면 670 A로서, 전류가 최대가 되는 지점이 된다. 이 값으로부터 열부하를 계산하면 2.8 kW/m^2 이며, 장펄스 운전에 따라 온도 상승하고 bellows 형태로 된 외관의 두께가 3 mm로서 너무 얇아 열응력을 지탱하지 못한 것이다. 그 결과 반사파가 급증하였으며, 고주파 송출기는 보호회로가 동작하여 자동으로 고주파 송출을 중지하였다. 또한 상기 일련의 시험을 마친 후 각 부품들을 살펴 본 결과 위상변환기의 내부에 U-형 trombone를 구동하는 유리섬유 절연봉이 심하게 손상되어 있었으며, 그 사진은 그림 3-2-86과 같다. 그림에서 고주파 고전압에 의한 방전 흔적이 길이 방향을 따라 깊게 나있음을 볼 수 있다. 따라서 본 위상변환기는 표 3-2-8의 사양에서도 나타나 있듯이 순간 사용전력은 2 MW로 높으나 장펄스 운전에는 그 성능이 요구조건에 못 미치는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 점을 감안하여 장펄스 운전에 적합한 유체 위상변환기를 개발하였으며, 그 상세한 내용은 뒷 절에서 서술하였다.

이와 같은 시험 경험을 바탕으로 고주파 고전압, 장펄스 시험에 적합한 시험회로는 재구성하였으며, 그 개략도는 그림 3-2-87와 같다. Trombone형 위상변환기를 사용하지 않고 그 대신에 주파수 30 MHz에서 정합이 되도록 하는 정해진 길이를 가진 9-inch 동축관을 사용하였다. 미세 정합은 stub tuner를 사용하였다. 구성된 시험회로의 사진은 그림 3-2-88과 같다. 이 시험회로를 이용하여 그림 3-2-89에서 보는 바와 같이 최대 전압 33.2 kV(peak)에서 60초 동안 시험하였다. 이 전압은 플라즈마 결합 저항이 $6 \Omega/\text{m}$ 일 때 가열 전력 7.5 MW에 해당되며, 요구되는 전력인 6 MW을 넘는 수치이다. 펄스의 초기 순간 최대 전압은 42.9 kV(peak)이었으며, 평균 입사 전력은 31 kW이었다. 고주파 전력이 입사되는 순간 전류띠 #1 주위에서 multipactor 방전이 있어났으며, 그 방전 빛은 그림 3-2-90에서 보는 바와 같다. 펄스의 길이는 cavity box 벽의 과열을 방지하지 위해 60초로 제한되었다. Cavity box 외벽에 장착된 열전대로 측정된 최고 온도는 148°C 이었다. 또 펄스의 중간 시점부터 전류띠 #1의 중앙 접지 부분을 마주보고 있는 cavity 벽의 정면 모서리 부분이 가열되어 시간이 지남에 따라 점점 밝은 빛을 방출하였으며,(그림 3-2-91 참조) 방출되는 빛으로 판단해볼 때 국부적으로 500°C 이상 온도가 상승한 것으로 판단된다. 전류띠의 접지 부분은 전류가 최대가 되는 부분으로서, 이를 마주보고 있는 cavity 벽에도 동일한 전류가 흐르게 되며, 전류 및 전압의 계산 결과인 그림 3-2-92에서 볼 수 있듯이 고주파 전류 758 A가 흘렀던 것으로 판단된다. 한편 vacuum feedthrough 위치에서의 고주파 전류는 최대 580 A였으며, 60초의 장펄스 운전애 아무런 문제가 없었다. 고주파 시험용기의 압력은 고주파 입사 전에 $5.4 \times$

10^{-7} mbar이었던 것이 최고 3.1×10^{-6} mbar까지 증가하였다. 진공용기의 압력이 펄스의 초기에만 상승하고 계속 감소하는 것은 사전에 충분히 conditioning이 되었기 때문에 더 이상 기체 방출율이 증가하지 않기 때문이다.

④ 시험 결과

제작된 proto-type 안테나에 대한 고전력 고주파 시험의 결과, 본 안테나가 요구 조건을 충분히 만족하는 우수한 성능을 가지고 있음을 확인하였다. 냉각수를 공급하지 않은 상태에서 고주파 전압 33.2 kV로 60초의 장펄스 운전이 가능하였다. 이러한 전압 수준은 플라즈마 결합 저항이 6 Ω /m일 때 플라즈마 가열 전력 7.5 MW에 해당되며, 요구되는 전력인 6 MW을 충분히 만족시키는 수치이다. 요구 조건인 300초 운전은 냉각수를 공급함으로써 가능할 것으로 판단되며, 앞으로의 시험 과제이다. 또한 본 안테나의 실제 전기적 회로인 공명회로를 구성하여 시험하는 것 또한 앞으로 수행해야할 시험 내용이다.

㉔ 3-2-6. Characteristics of ICRF antenna for KSTAR

Maximum RF power :	6 MW
Pulse duration :	300 sec
Frequency range :	25~60 MHz
Maximum allowable voltage :	35 kV
Type :	plug-in type
Current straps	
number :	4
type :	center-grounded
material :	Cu-plated SUS316L
size :	752mmH×98mmW
strap cooling :	water cooling
Faraday shield	
type :	mon-layered tube type 2 sections, 33 tubes/section
material :	Inconel 625
surface treatment :	Cu-plated and B ₄ C coated (proto-type antenna : Cu-plated SUS316L)
tube cooling :	water cooling
Cavity box :	4 sections
material :	SUS316L
wall cooling :	water cooling
Vacuum transmission line	
number :	8
size :	6"
characteristic impedance :	40 Ω
material :	Cu-plated SUS304
cooling :	water-cooled center conductor
Radial stroke :	100 mm

⌘ 3-2-7. Electric circuit parameters of the current straps

Electrical parameters		Values
Inductance, $L[10^{-7}\text{H/m}]$	outer strap	2.56
	inner strap	2.59
Mutual coupling coefficient, $k[\%]$	$k_{12}(=k_{34})$	7.98
	k_{23}	7.85
	k_{13}	1.62
	k_{14}	0.49
Effective capacitance, $C_{\text{eff}}[10^{-10}\text{F/m}]$	outer strap	1.17
	inner strap	1.17
Characteristic impedance, $Z_0[\Omega]$	outer strap	46.7
	inner strap	47.0
Relative phase velocity, $\beta = v_p/c$	outer strap	0.609
	inner strap	0.605

ㄨ 3-2-8. Characteristics of the RF test circuit.

Center-grounded current strap-1

Width : 98 mm, height : 782 mm

Material : Cu-plated SUS316L

Characteristic impedance : $Z=47 \Omega$ ($\beta=0.61$)

Vacuum transmission line

Cu-plated SUS304 tubes($r_i=38$ mm, $r_o=72$ mm)

Characteristic impedance : $Z=39 \Omega$

Water cooled center conductor

Vacuum feedthrough

Double ceramic cylinder type(Al_2O_3 , 97%)

Characteristic impedance :

$Z=39 \Omega$ (vacuum side)/ 50Ω (pressurized side)

Water cooling and forced air cooling

Phase shifter and stub tuner

Dielectric 9·3/16", 50 Ω

Transmission phase length : 0 to 90° (@25 MHz)

RF power rating : 2 MW peak, 20 kW average

Pressurized transmission line section

From the vacuum feedthrough to the stub tuner

Insulation gas : N_2 gas, 3 kg/cm²

Characteristic impedance : $Z=50 \Omega$

Diagnostics

Dual directional coupler

3 voltage probes : capacitive(70 dB @30 MHz)

IR thermometer : ceramic temperature of the VF

3 embedded thermocouples : temperature of the antenna cavity

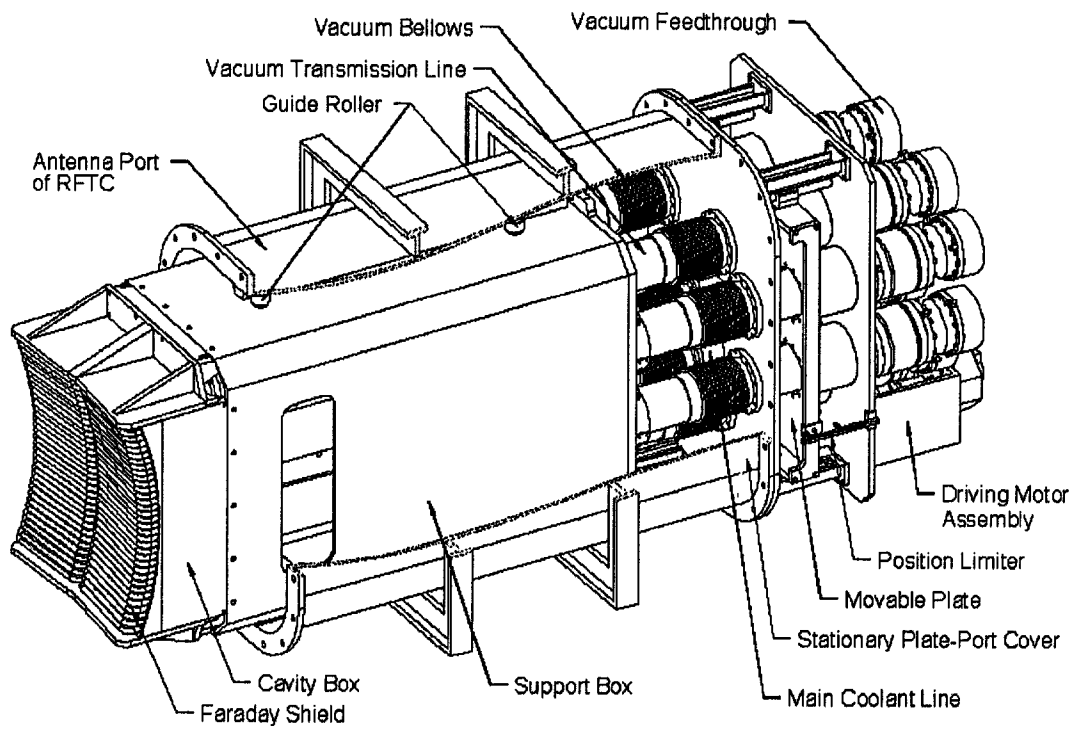


그림 3-2-39. ICRF antenna system for KSTAR.

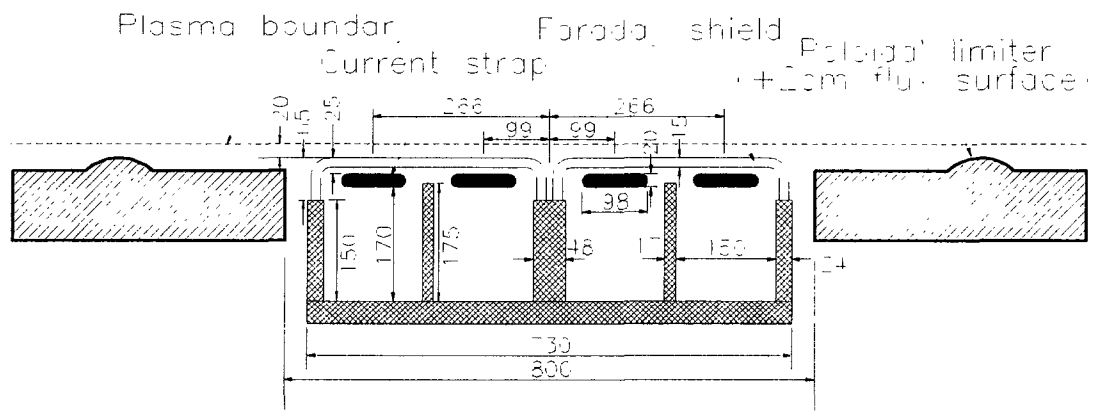


그림 3-2-40. Reference 2-D geometry of the ICRF antenna.

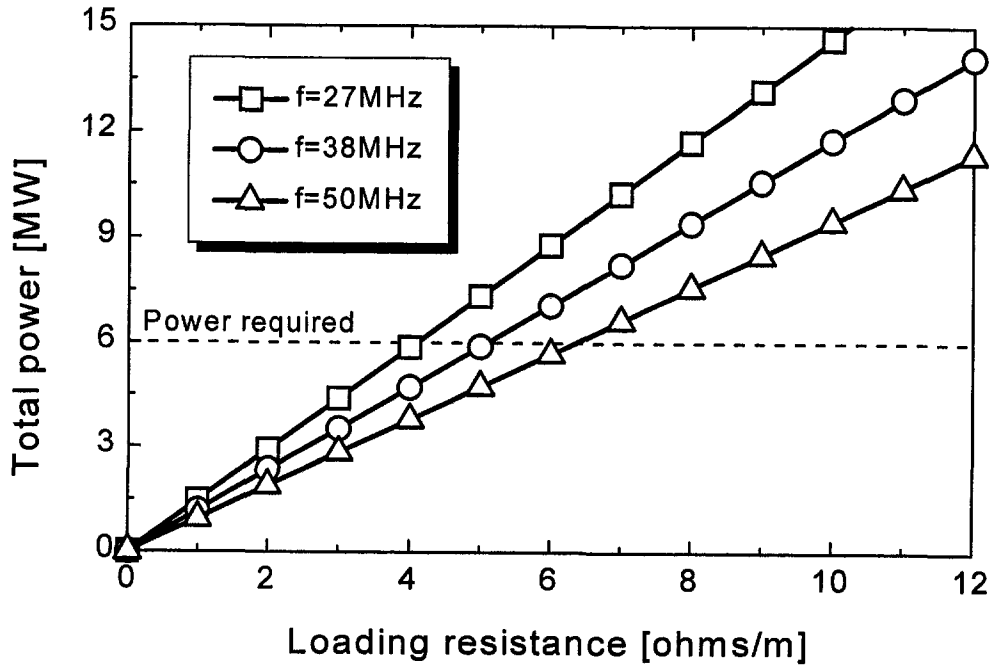


그림 3-2-41. Power radiated to the plasma vs loading resistances.

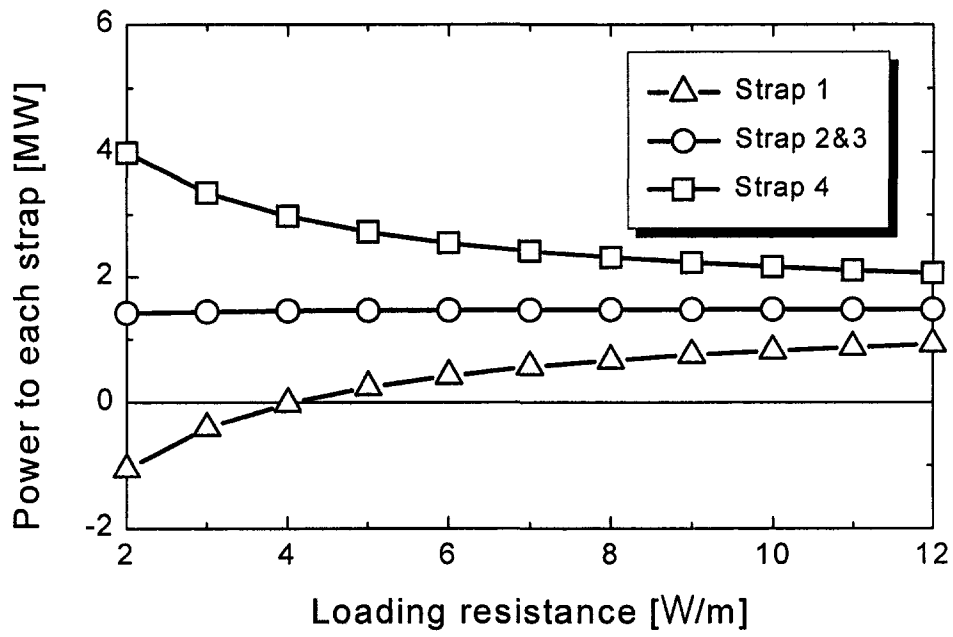


그림 3-2-42. Power to each strap at $f=38$ MHz vs loading resistances

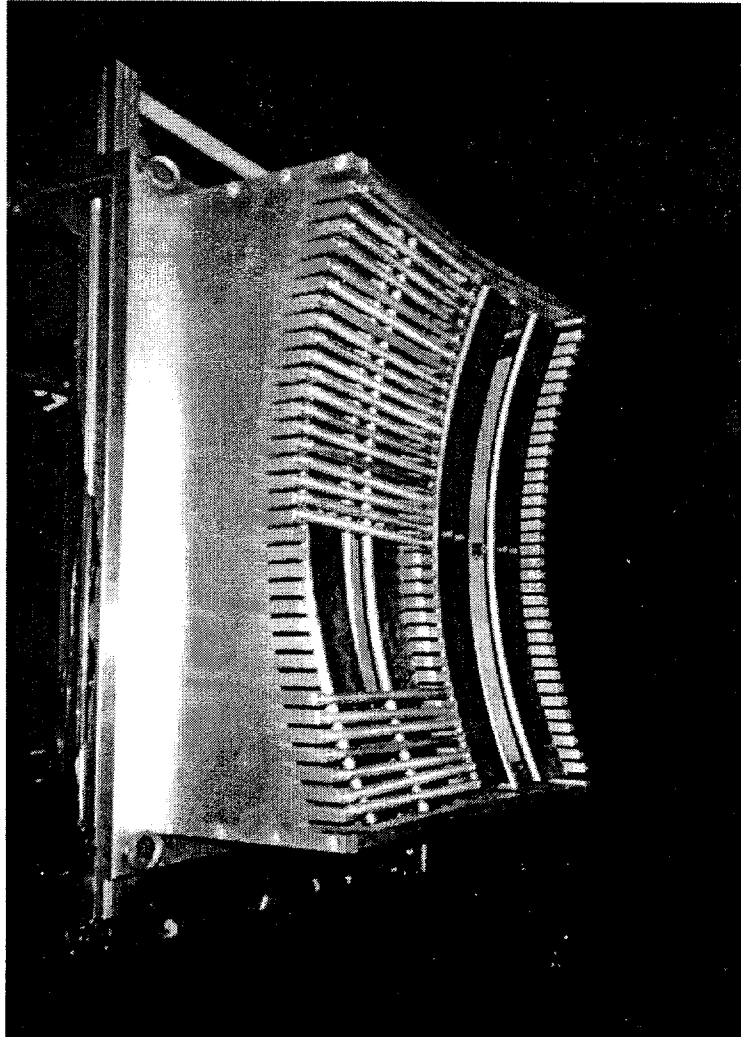


그림 3-2-43. Photograph of mock-up ICRF antenna.

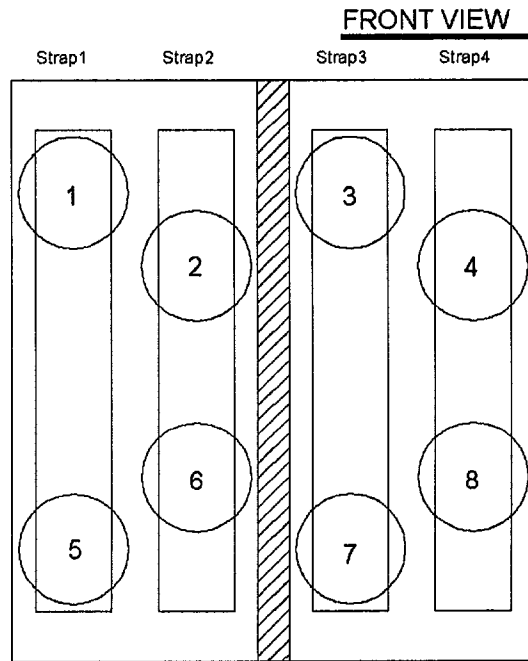


그림 3-2-44. Port numbering of mock-up antenna

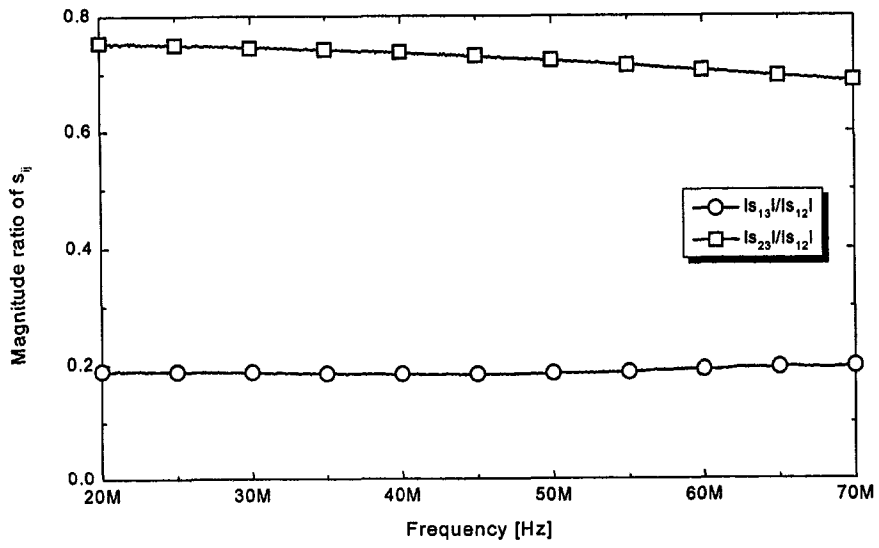


그림 3-2-45. Linear magnitude of s_{ij} for the geometry F15G0S57

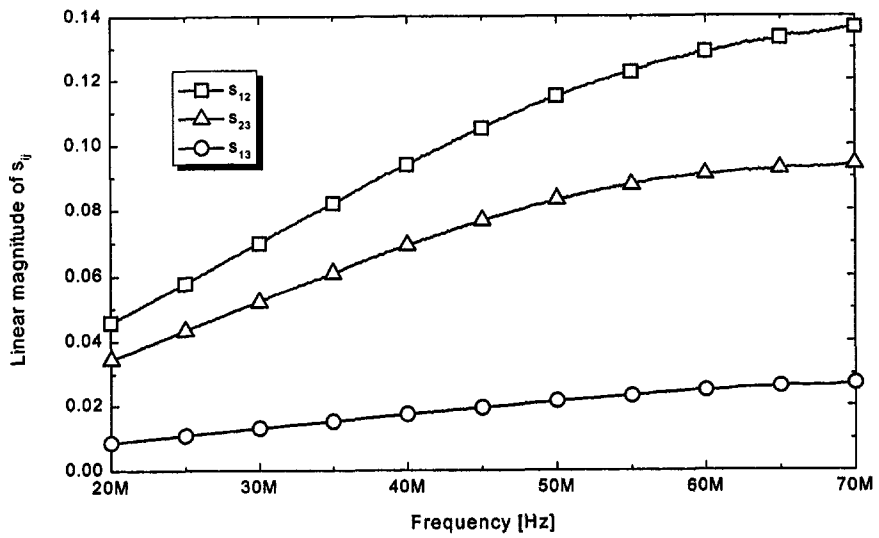


그림 3-2-46. Magnitude ratio of s_{ij} for the geometry F15G0S57.

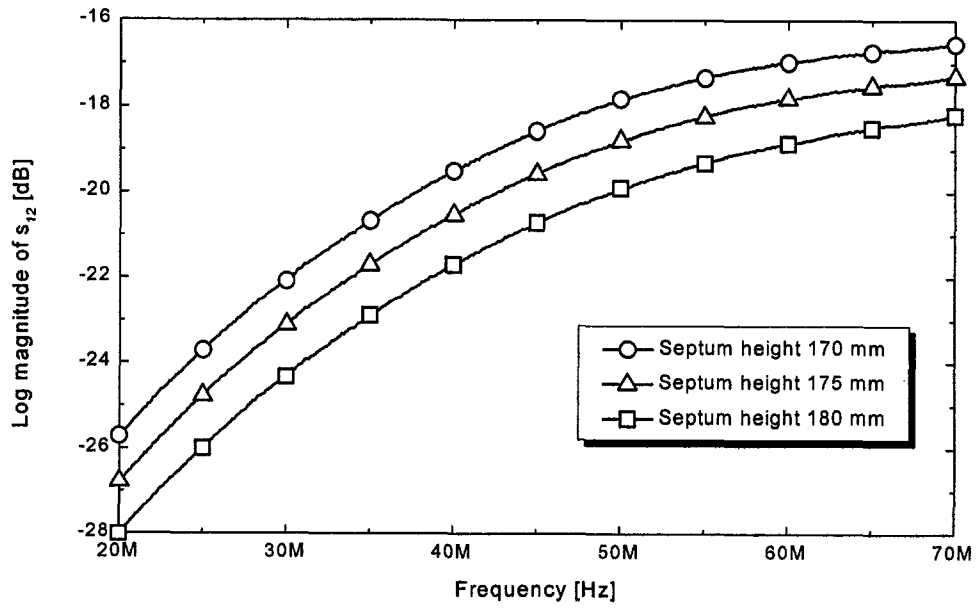


그림 3-2-47. Log magnitude of s_{12} with varying septum height.

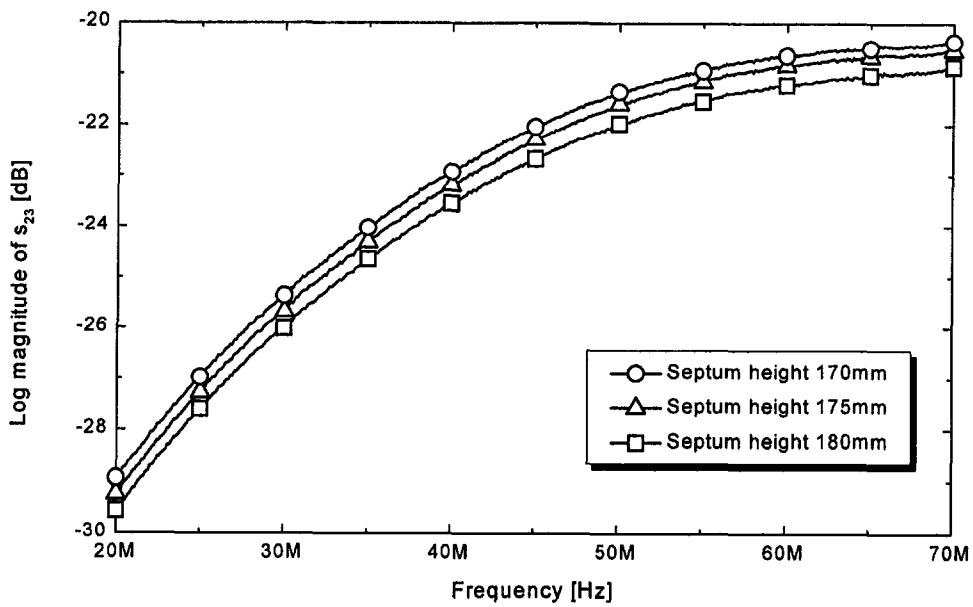


그림 3-2-48. Log magnitude of s_{23} with varying septum height.

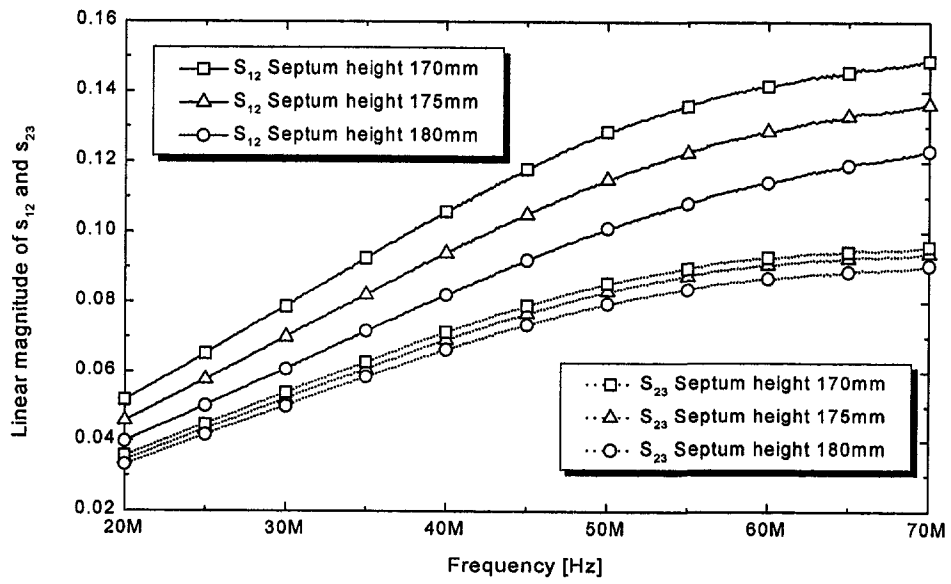


그림 3-2-49. Linear magnitude of s_{ij} with varying septum height

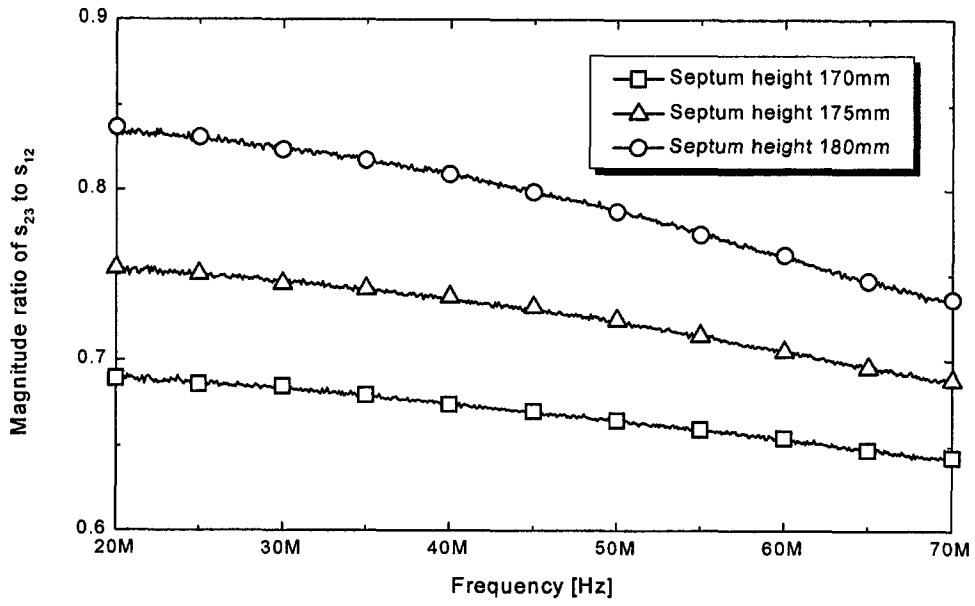


그림 3-2-50. $|s_{23}|/|s_{12}|$ with varying septum height.

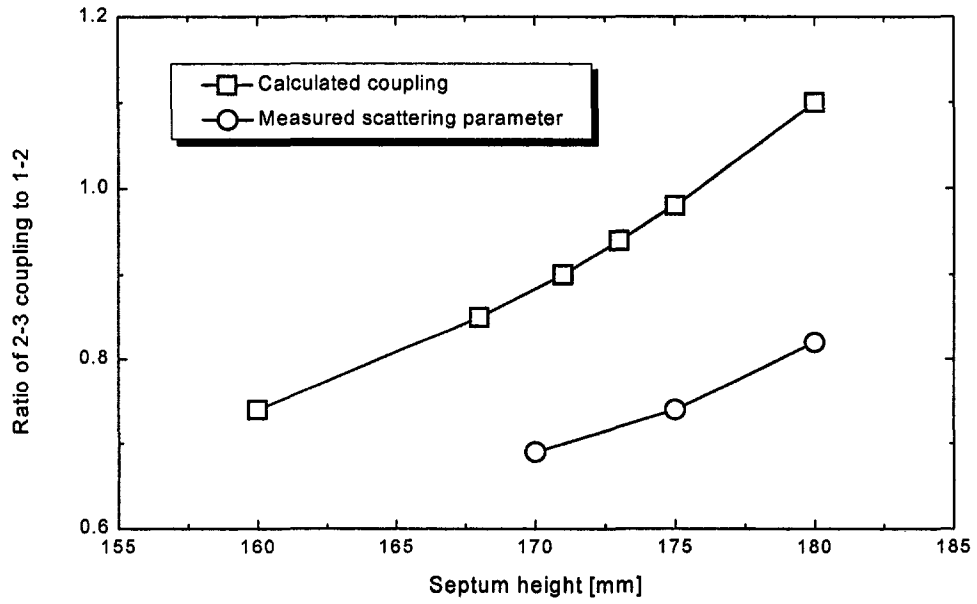


그림 3-2-51. Comparison of design value k_{23}/k_{12} and measured value $|s_{23}/s_{12}|$

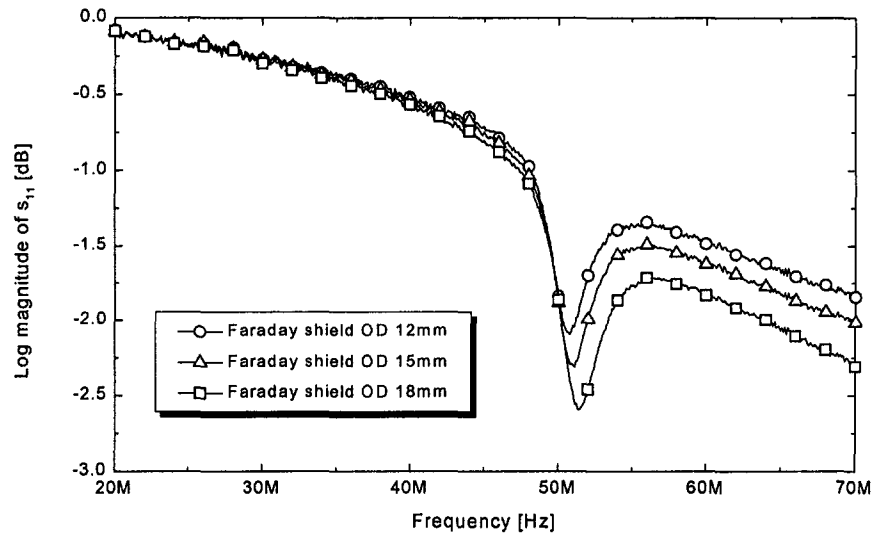


그림 3-2-52. $|s_{11,20}|$ with varying Faraday shield diameter.

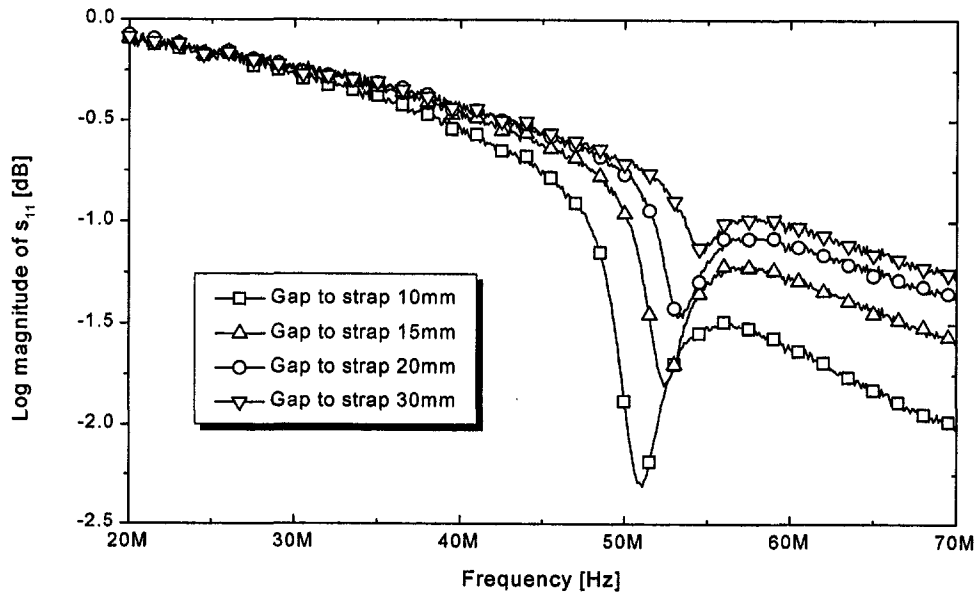


그림 3-2-53. $|S_{11,20}|$ with varying current strap position.

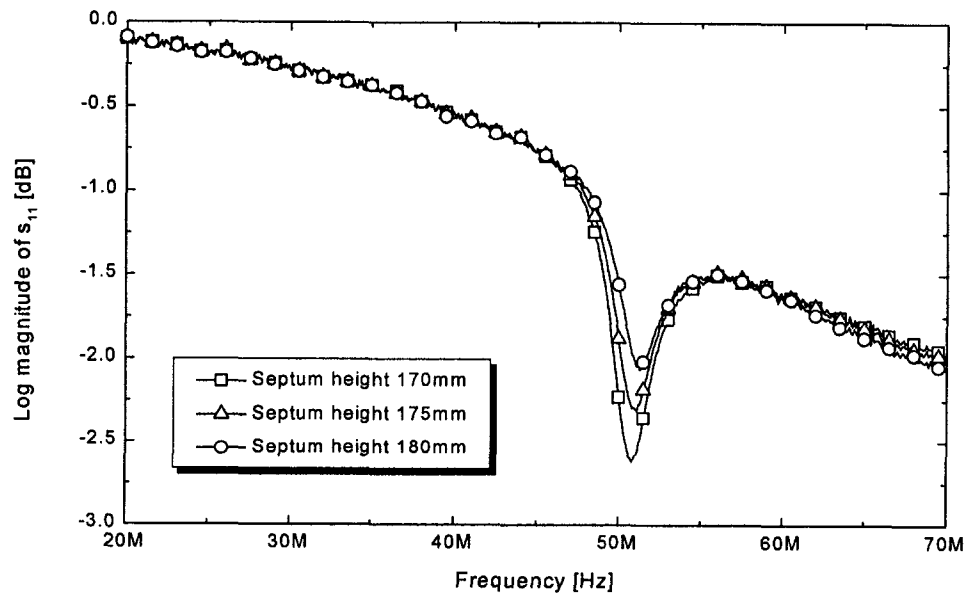


그림 3-2-54. $|s_{11,20}|$ with varying septum height.

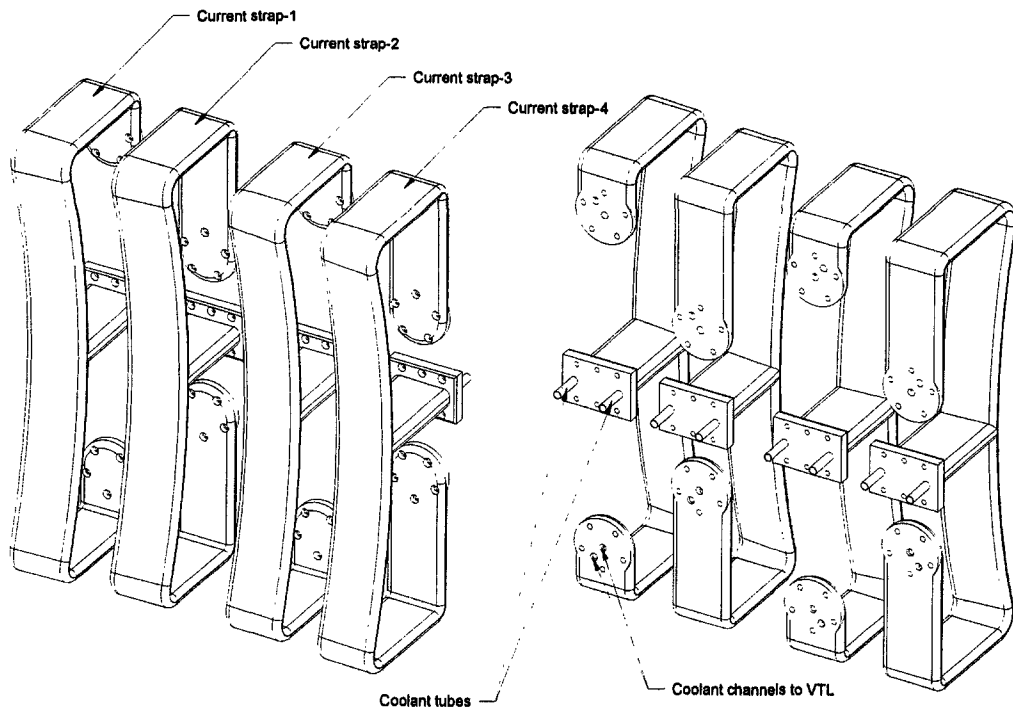


그림 3-2-55. Current strap array of ICRF antenna.

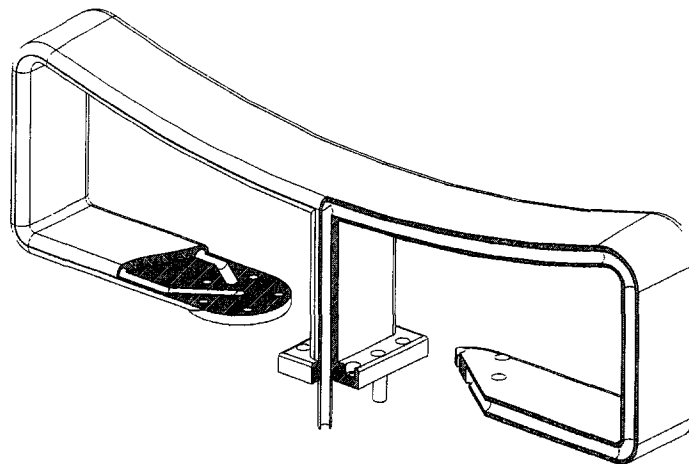


그림 3-2-56. Cut view of the current strap-2.

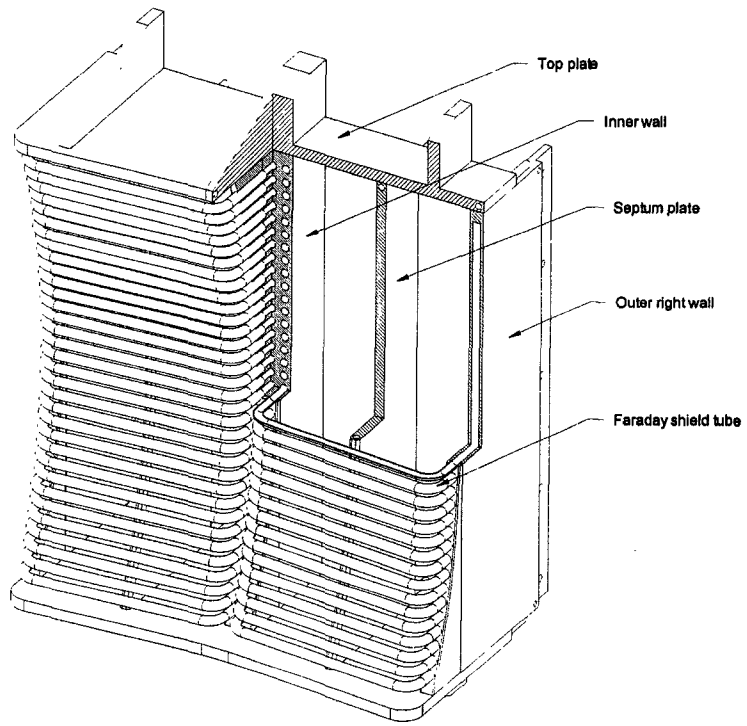


그림 3-2-57. Faraday shield tubes mounted on the cavity wall

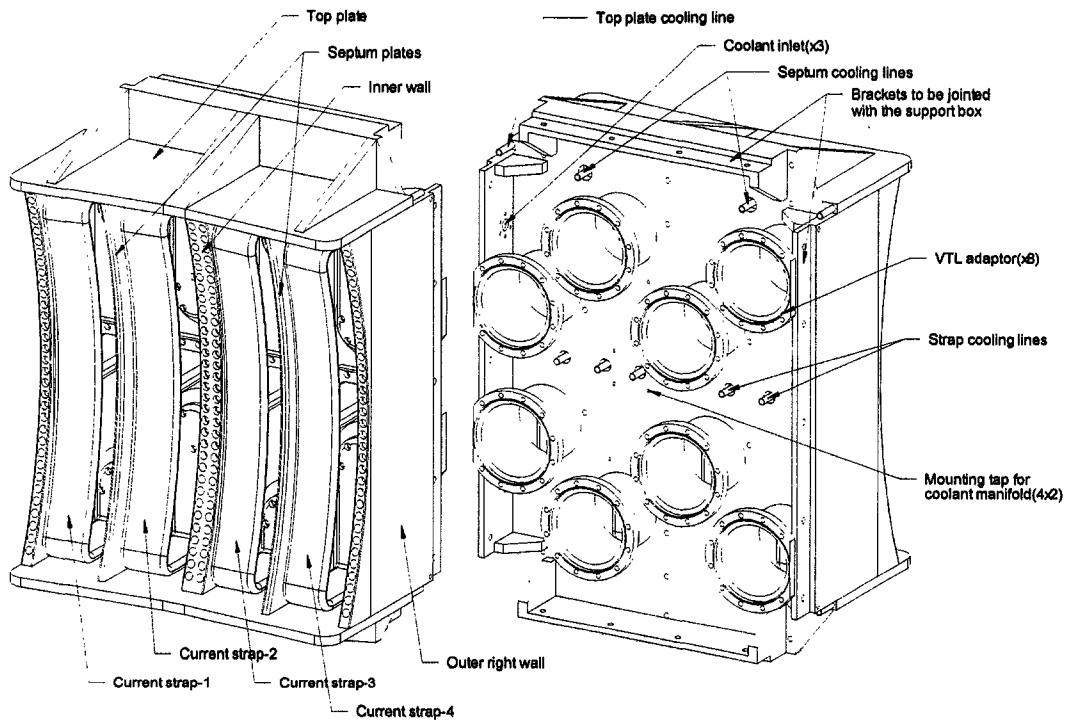


그림 3-2-58. Current straps mounted in the cavity box.
Faraday shield tubes are not shown.

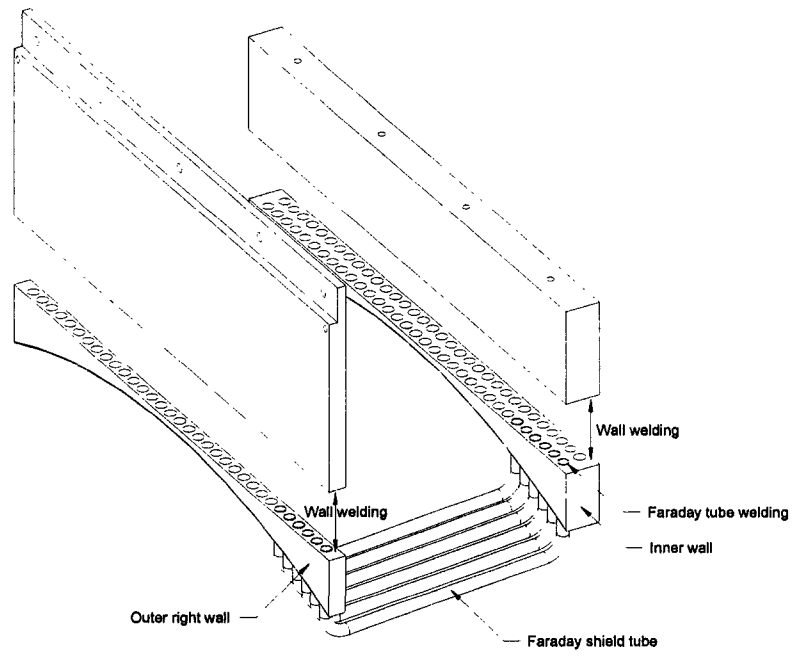


그림 3-2-59. Mounting of Faraday shield tubes on the cavity box.

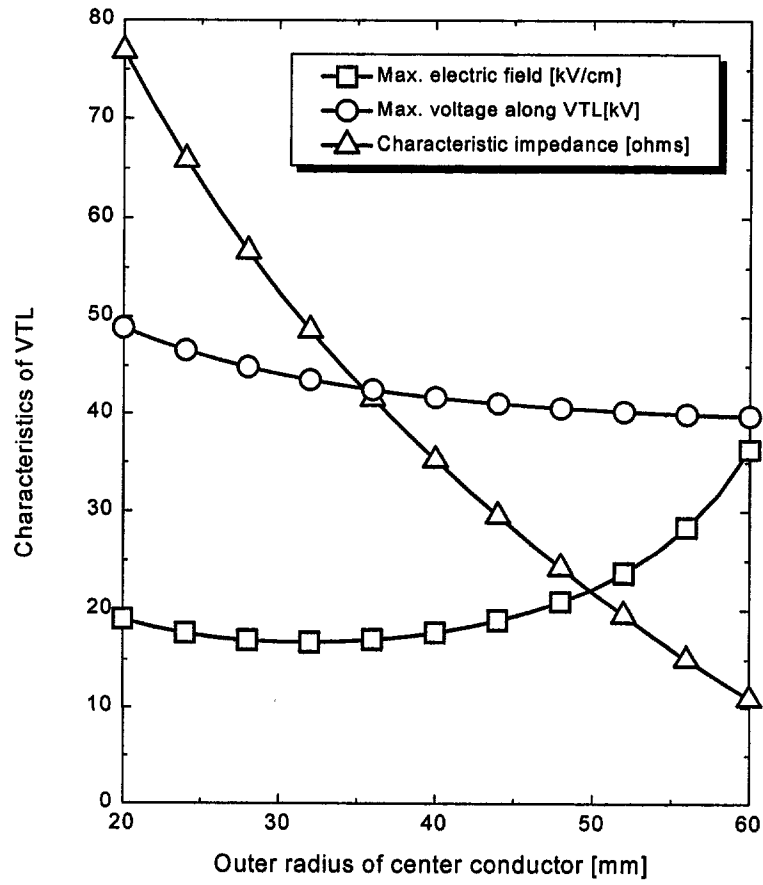


그림 3-2-60. Characteristics of VTL vs radius of center conductor.

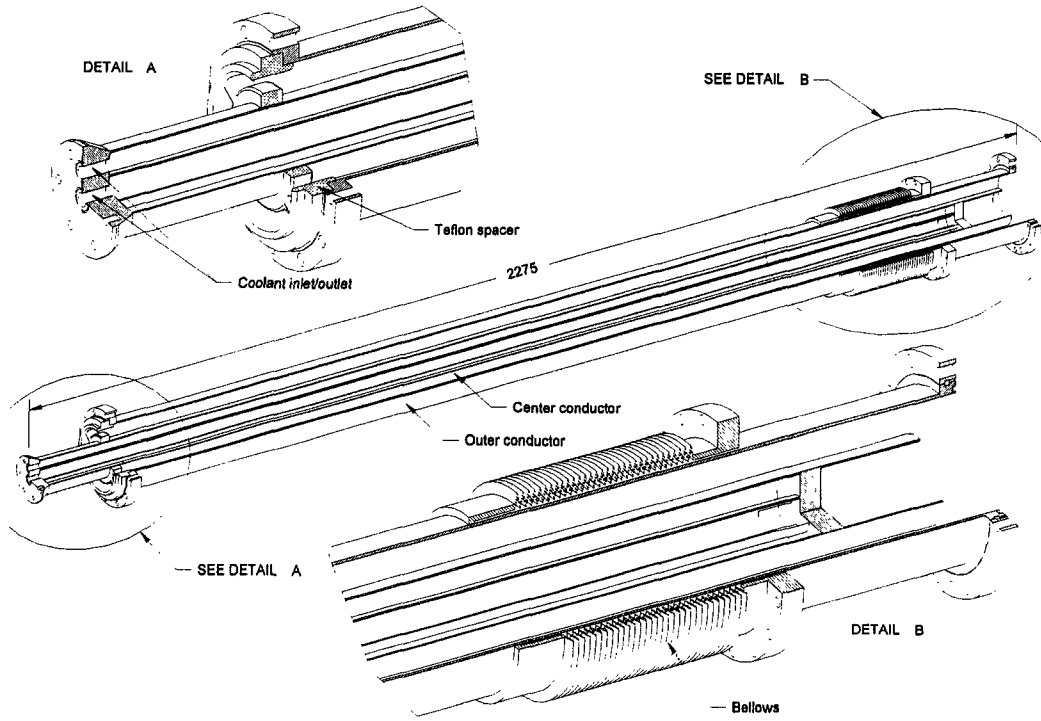


그림 3-2-61. Vacuum transmission line.

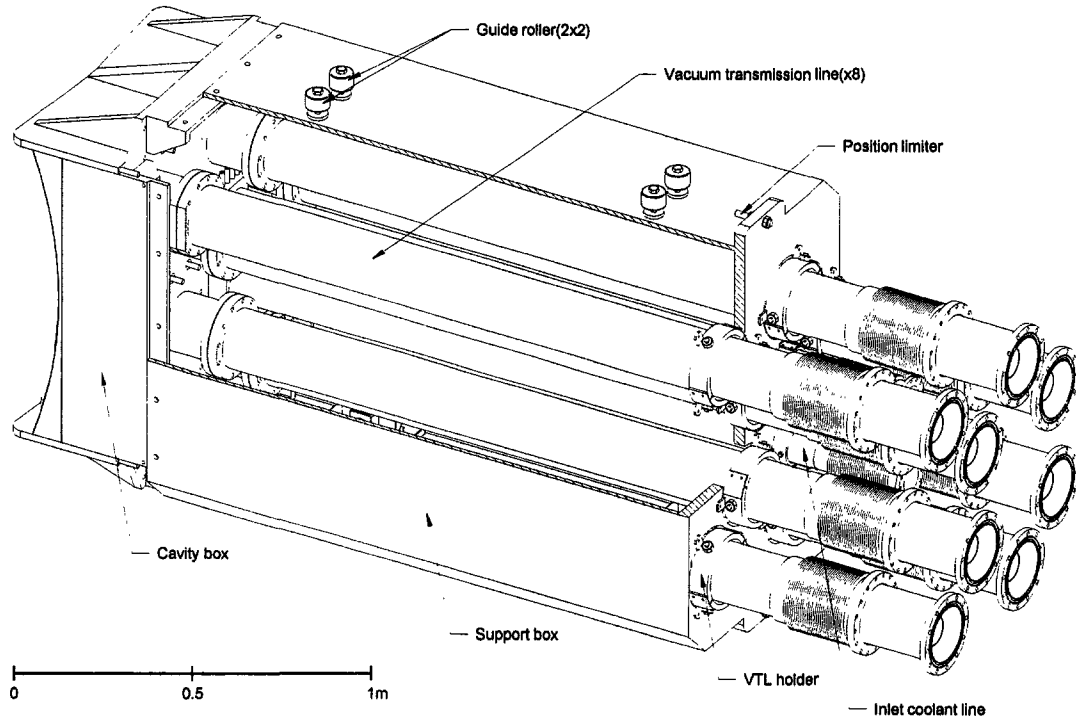


그림 3-2-62. Support structure of the ICRF antenna.

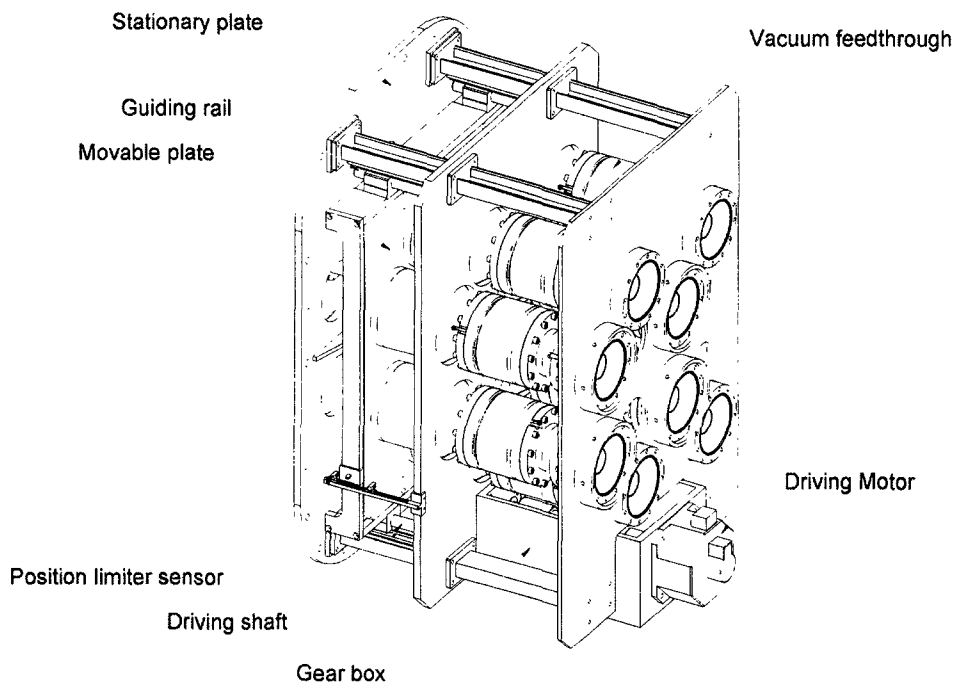


그림 3-2-63. Movable mechanism of the ICRF antenna.

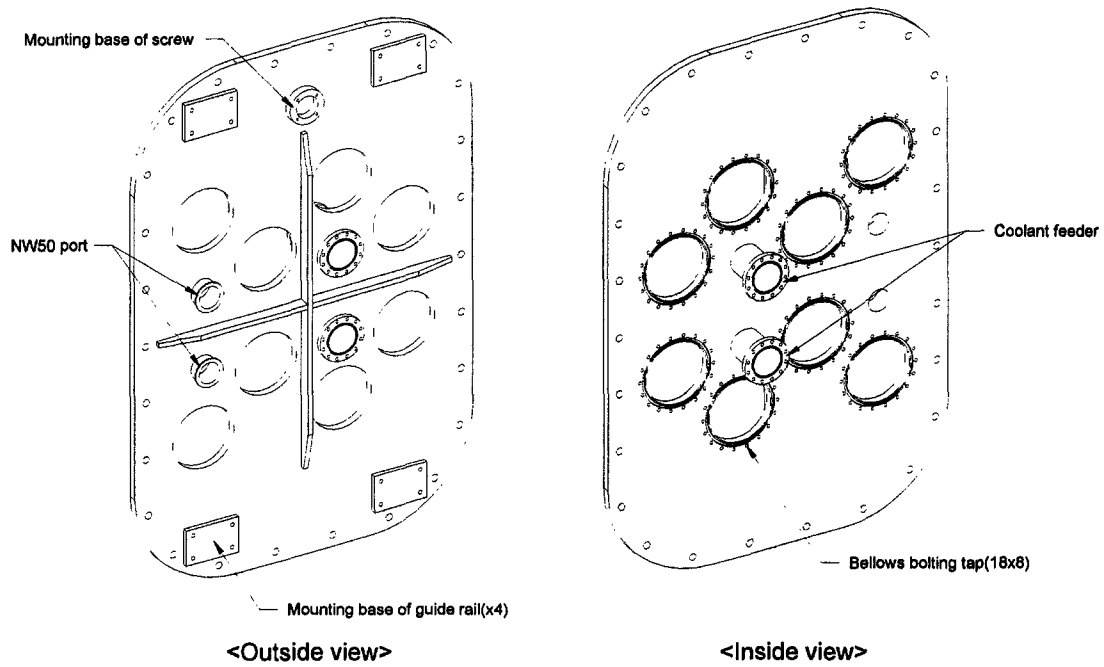


그림 3-2-64. 3-D view of the stationary plate.

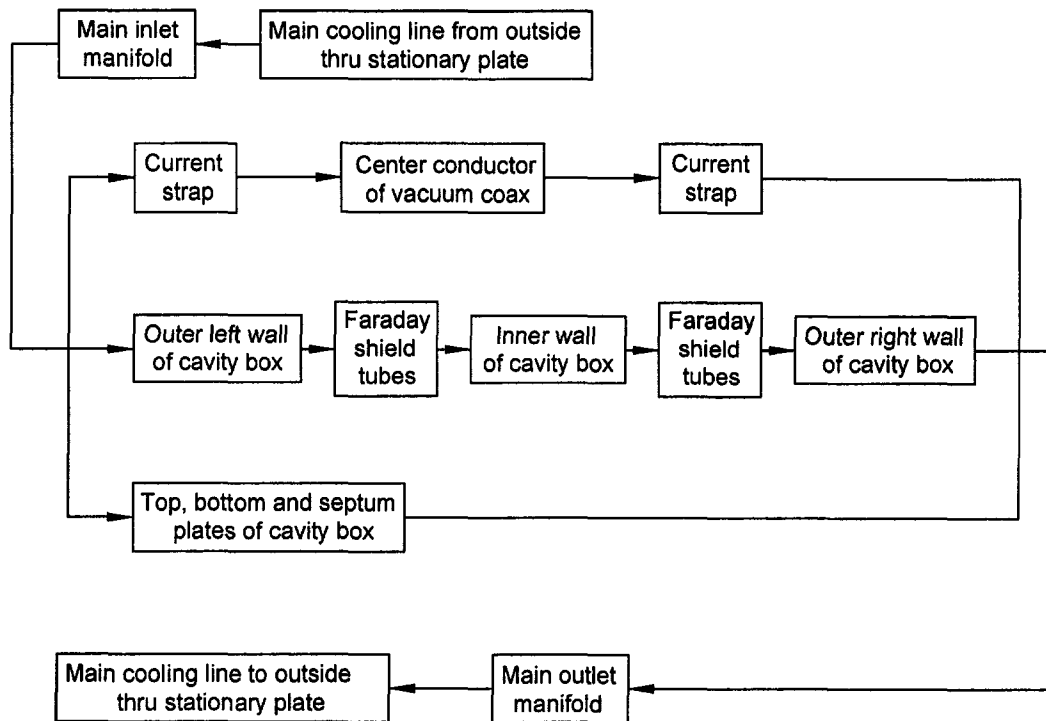


그림 3-2-65. Coolant paths of the ICRF antenna.

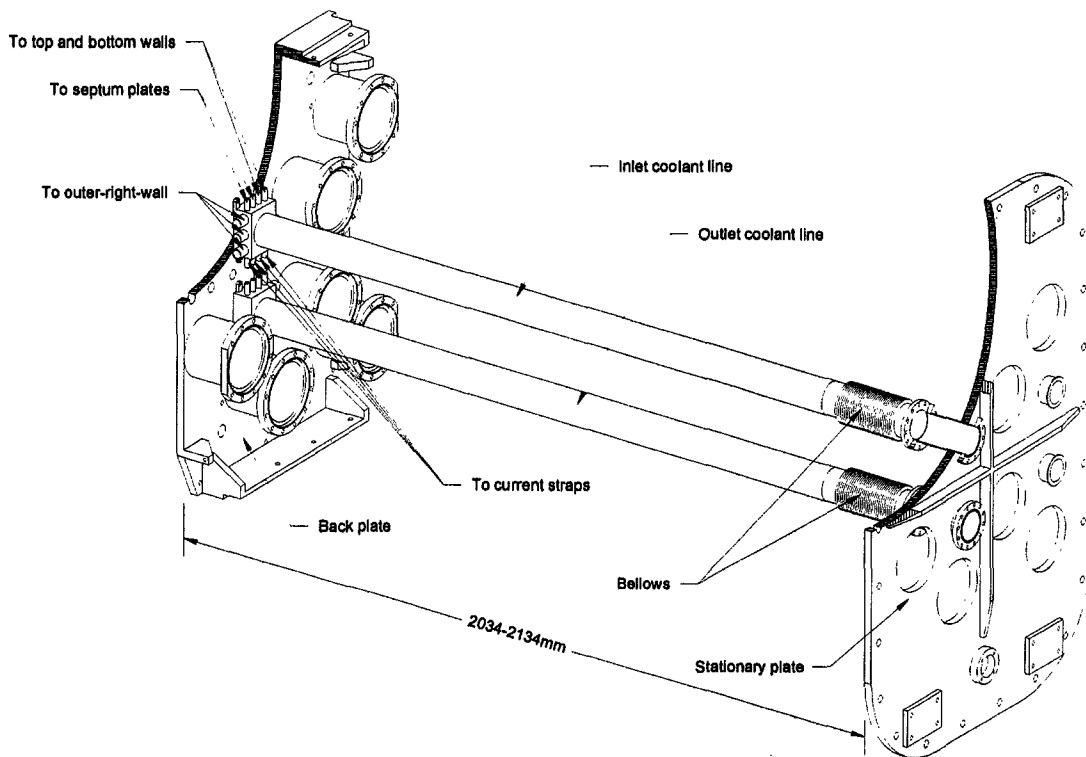


그림 3-2-66. Main inlet & outlet coolant lines.

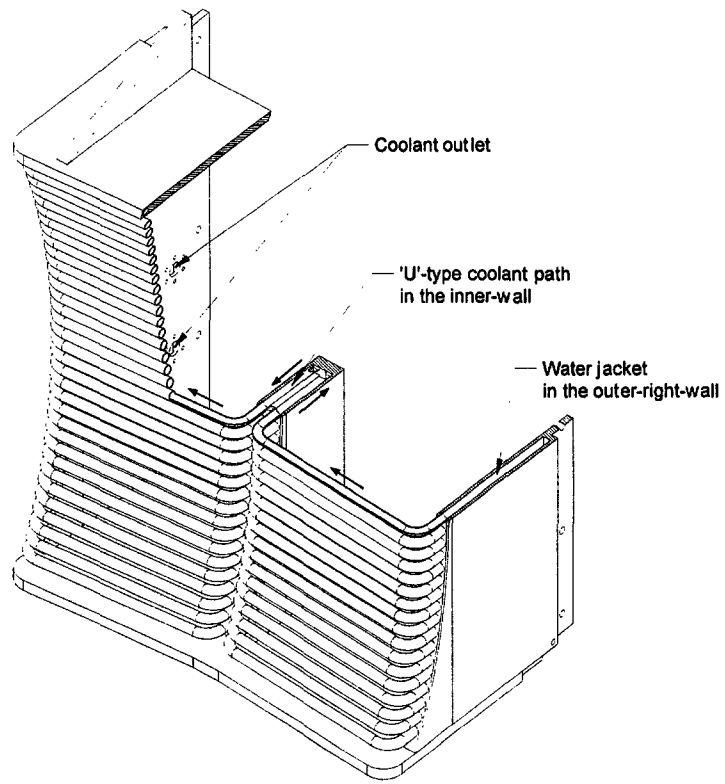


그림 3-2-67. Coolant paths of the Faraday shield tubes

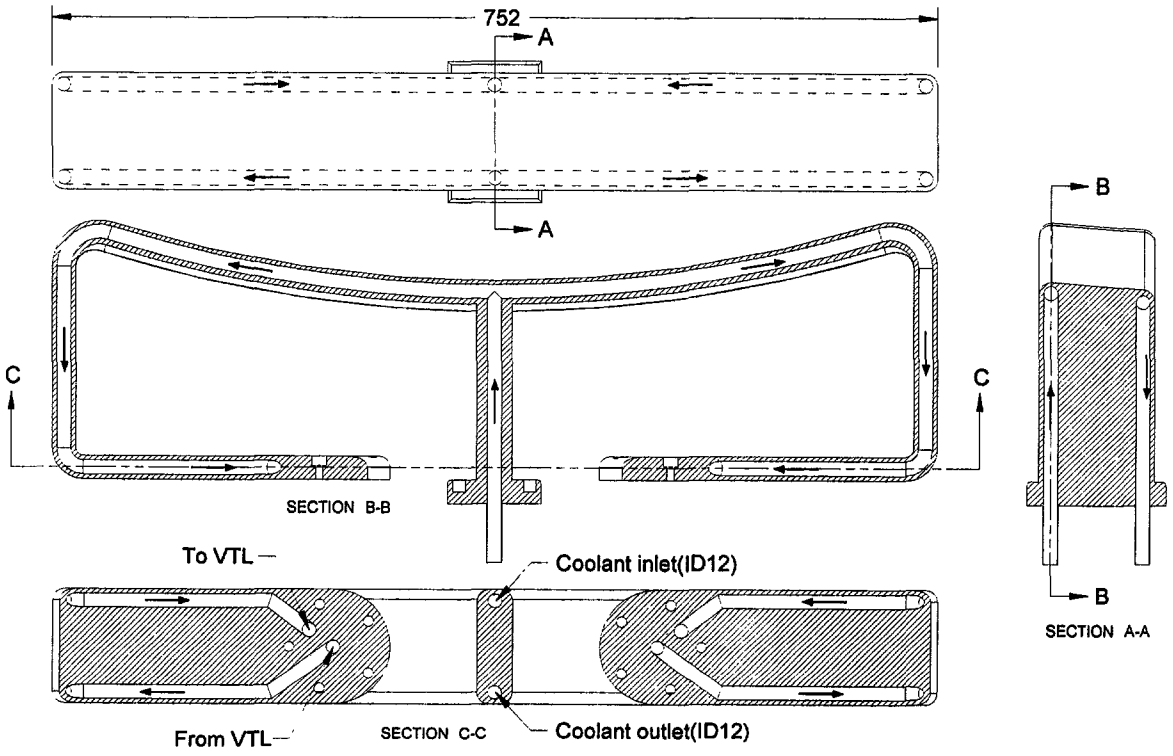


그림 3-2-68. Coolant paths of the current strap.

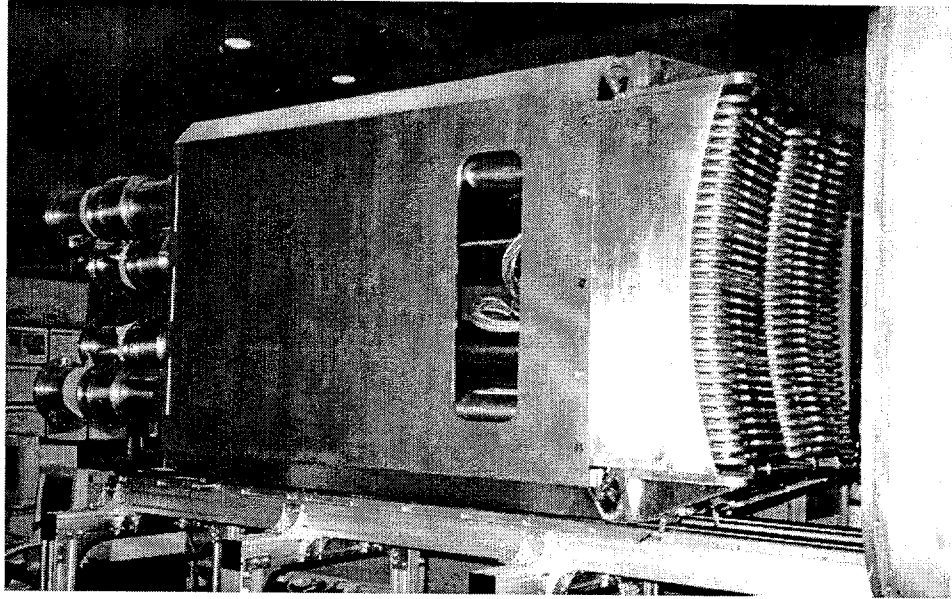


그림 3-2-69. 제작된 안테나

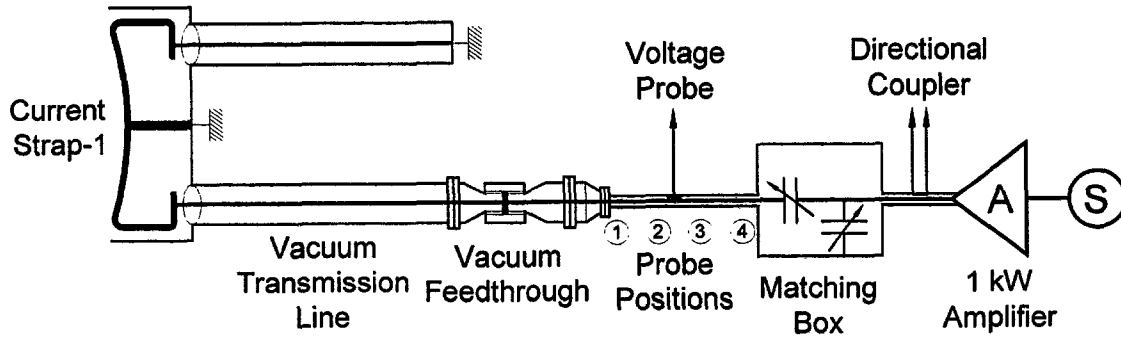


그림 3-2-70. The test circuit for the multipactor discharge.

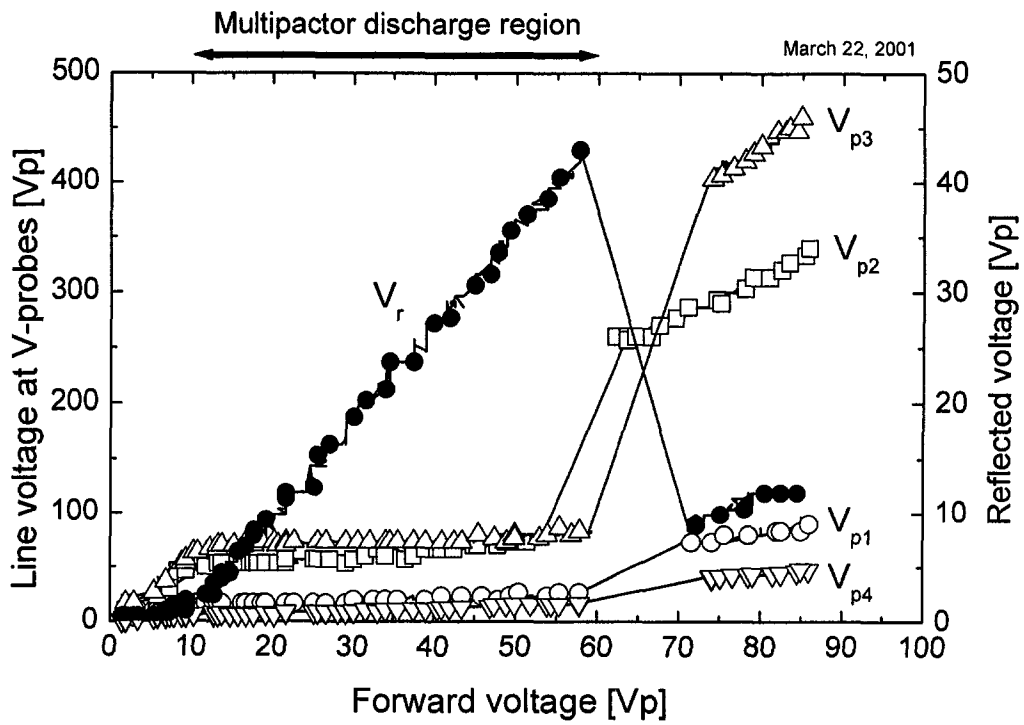


그림 3-2-71. The reflected voltage and line voltages vs the forward voltage

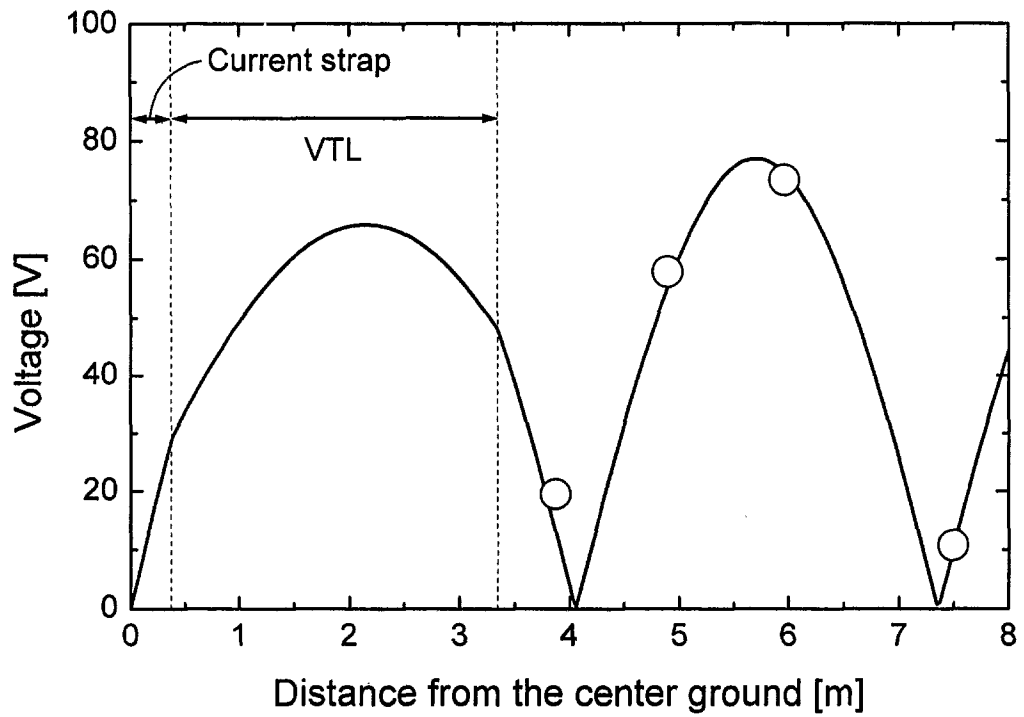


그림 3-2-72. The voltage distribution along the matched line. $x=0$ is the position of center ground of the current strap-1. Four circles denote the measured voltages.

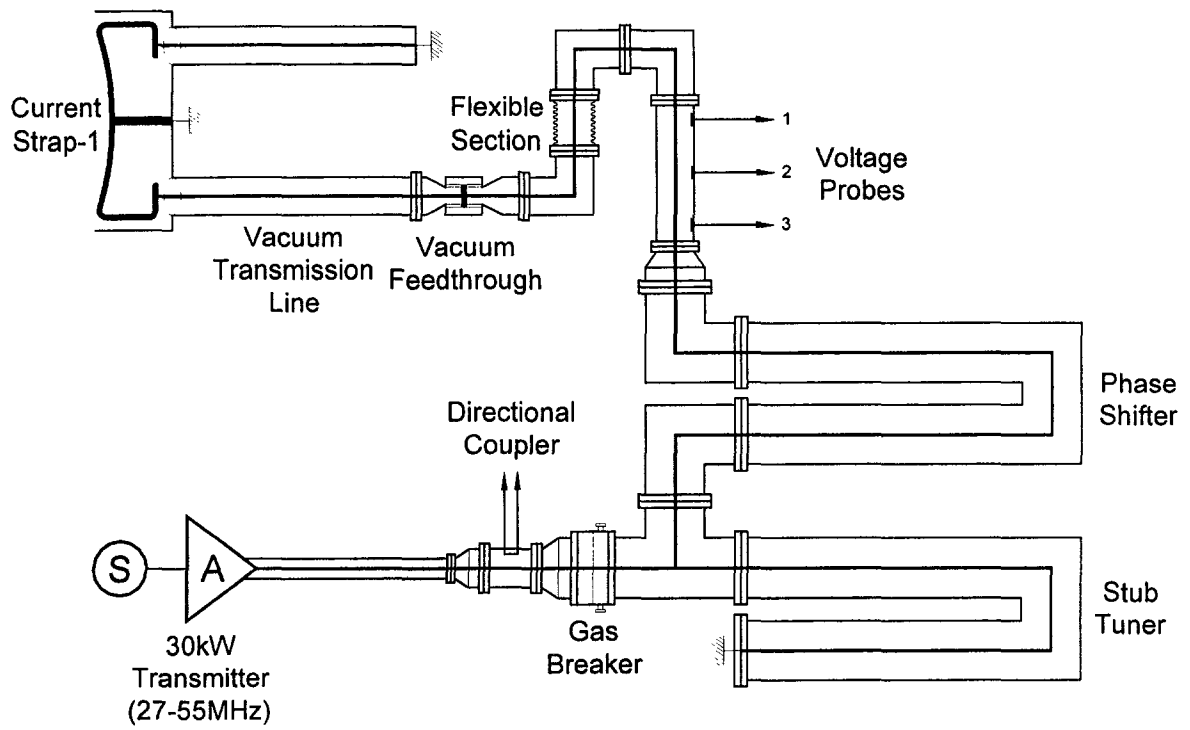


그림 3-2-73. Schematic diagram of the first RF test circuit.

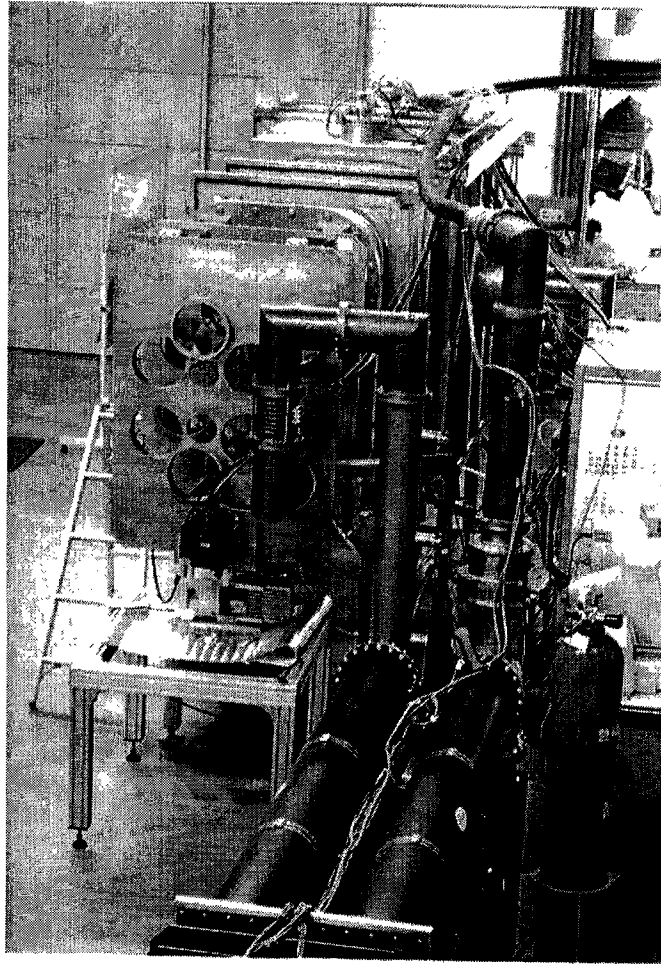


그림 3-2-74. Picture of RF test circuit.

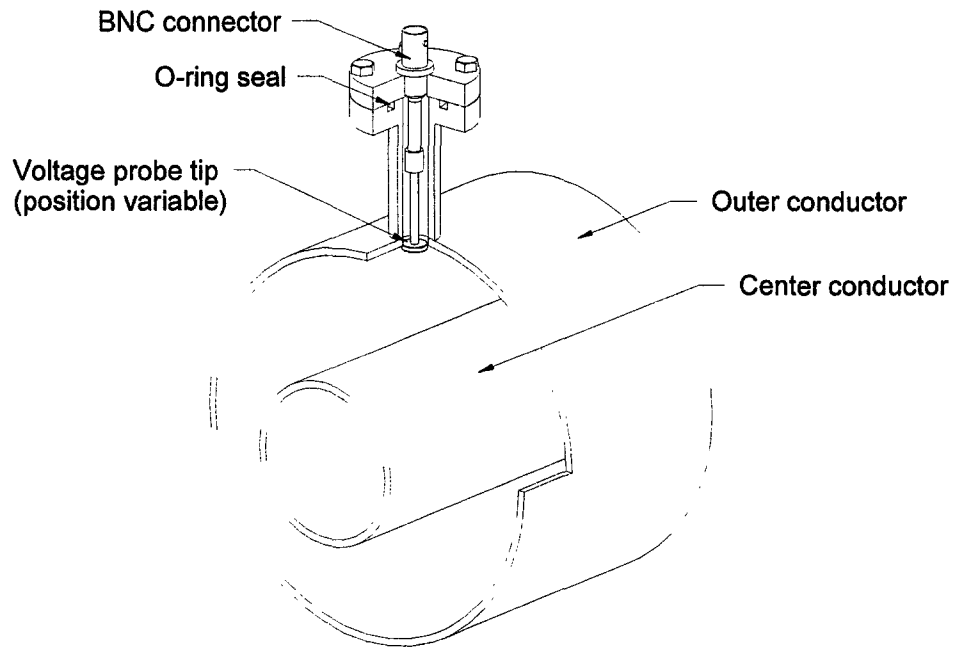


그림 3-2-75. The voltage probe installed on the outer conductor of a coax

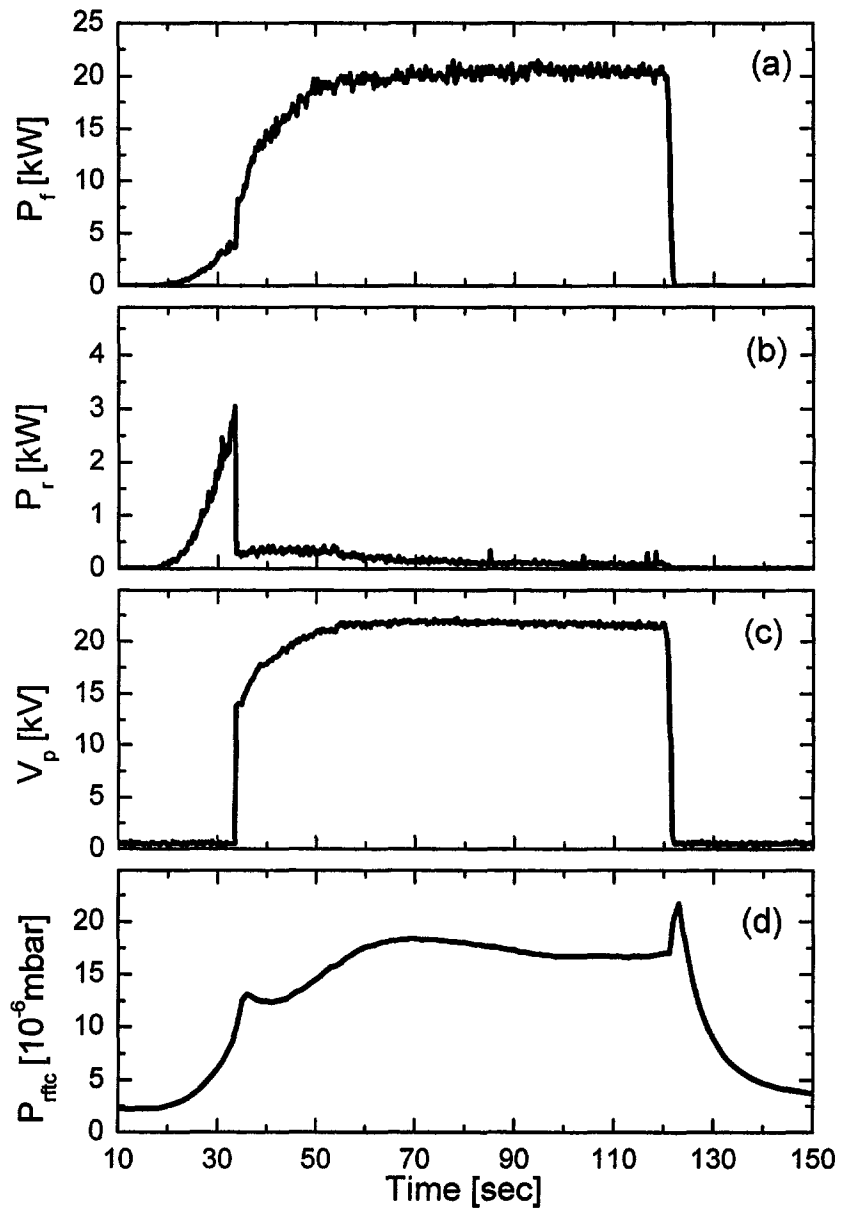


그림 3-2-76. Time evolution of forward(a)/reflected powers(b), peak voltage(c) and gas pressure(d).

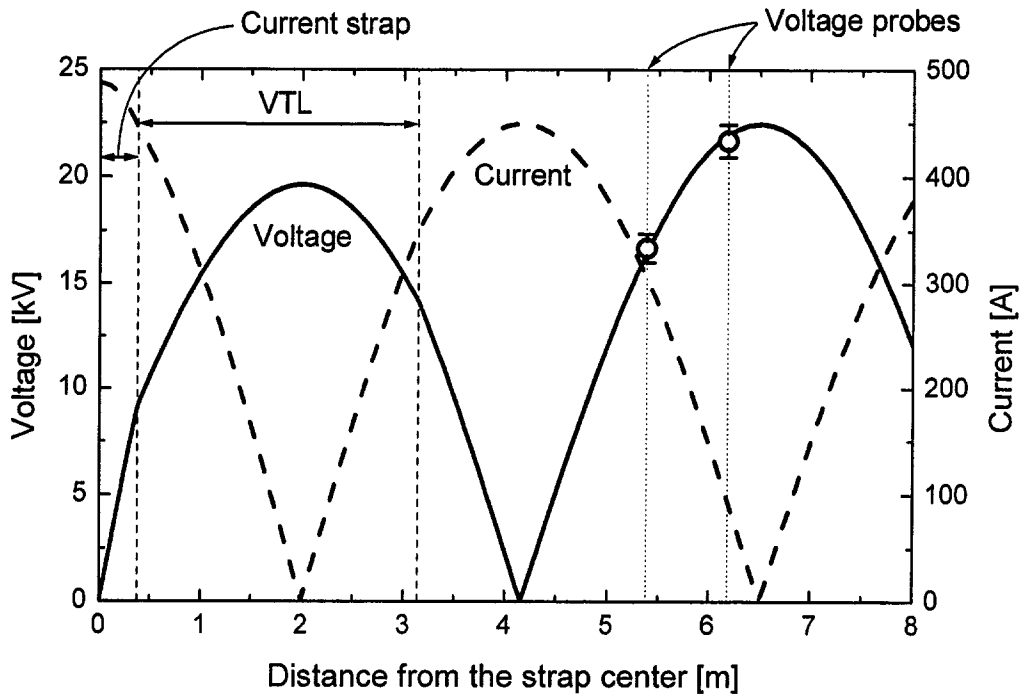


그림 3-2-77. Voltage and current vs distance from the center ground of the current strap. Two open circles denote the measured voltage.

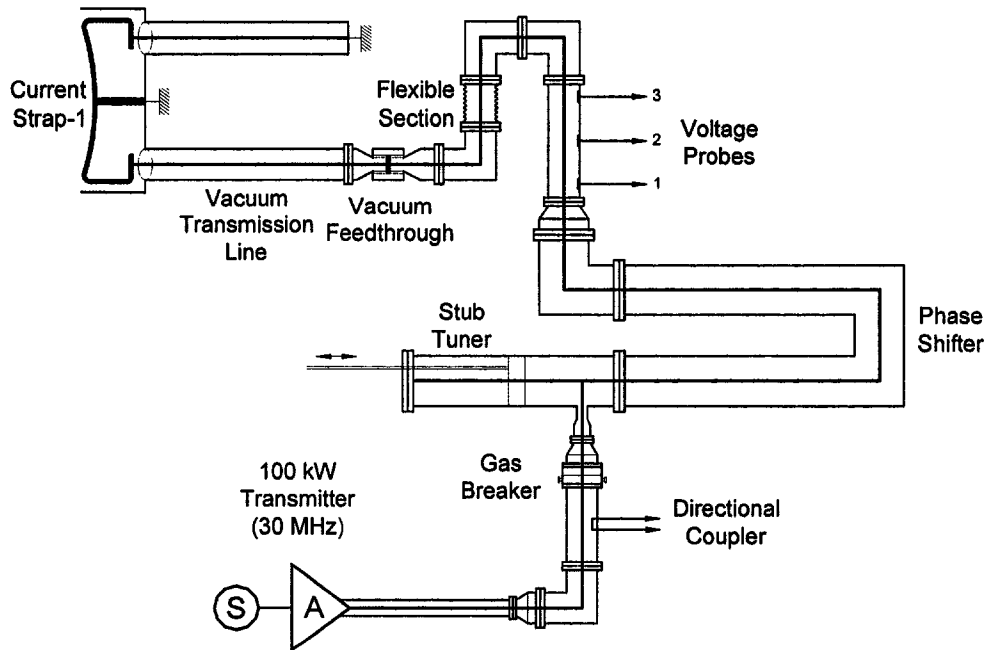


그림 3-2-78. Schematic diagram of the RF test circuit-1.

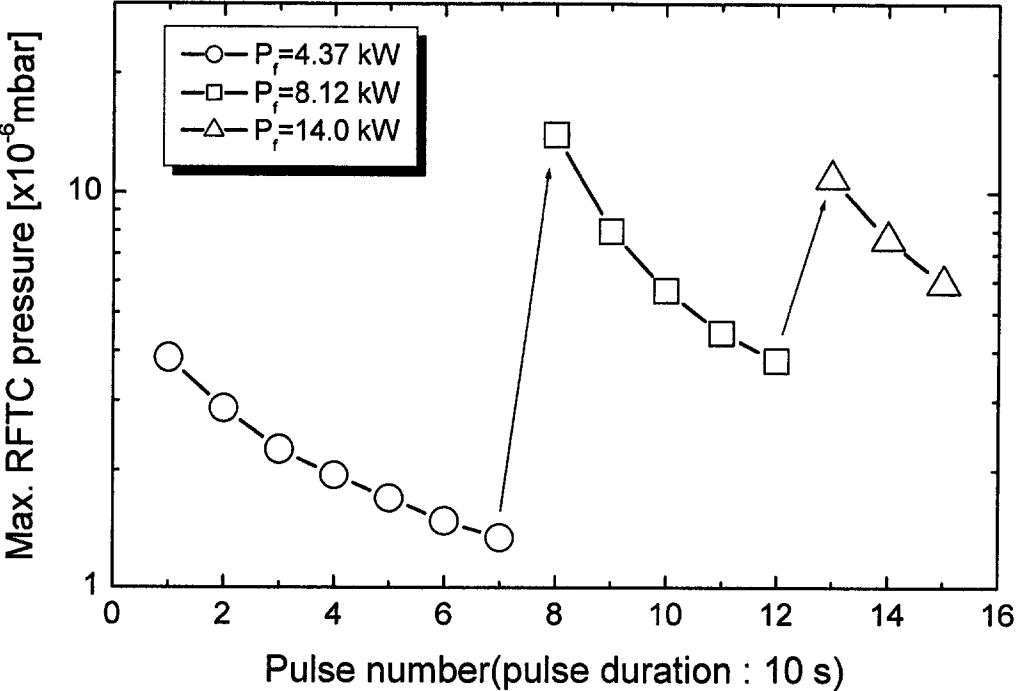


그림 3-2-79. RF conditioning effect. The maximum pressure of the RFTC decreases as the number of the RF pulses.

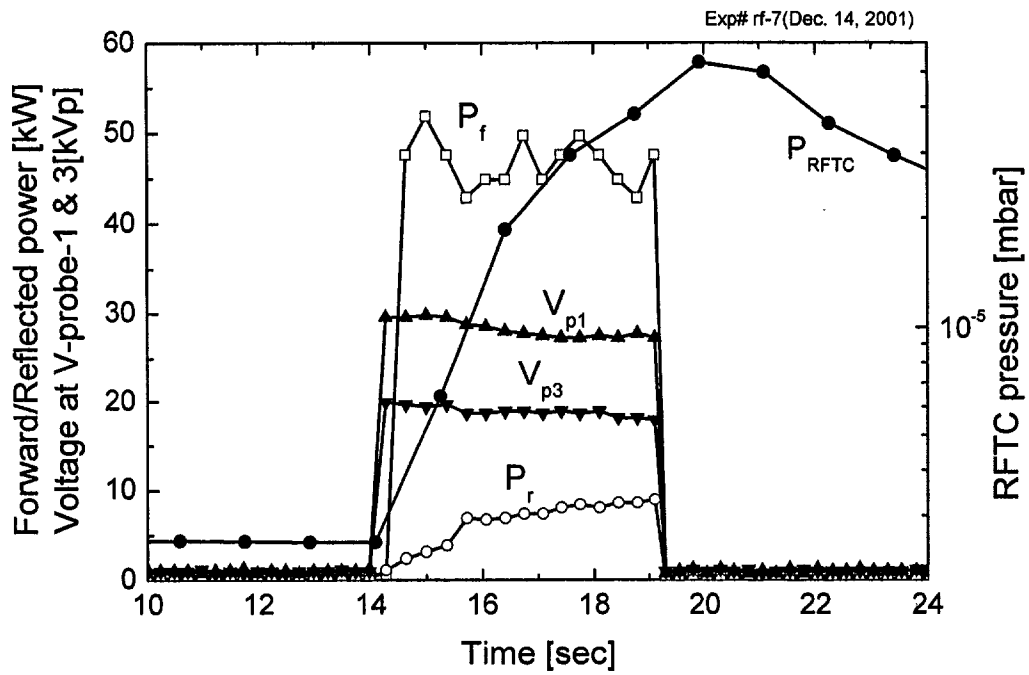


그림 3-2-80. Time evolution of forward/reflected powers, line voltages and gas pressure.

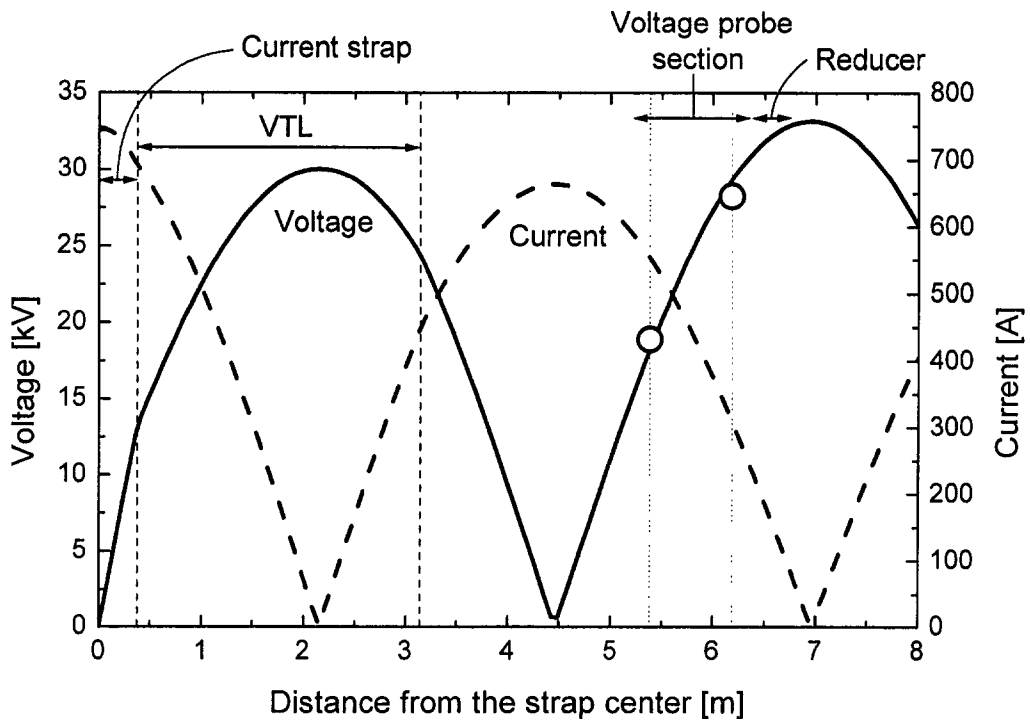


그림 3-2-81. Voltage and current vs distance from the center ground of the current strap. Two open circles denote the measured voltage. The voltage probe section and the reducer are located near the voltage-maximum.

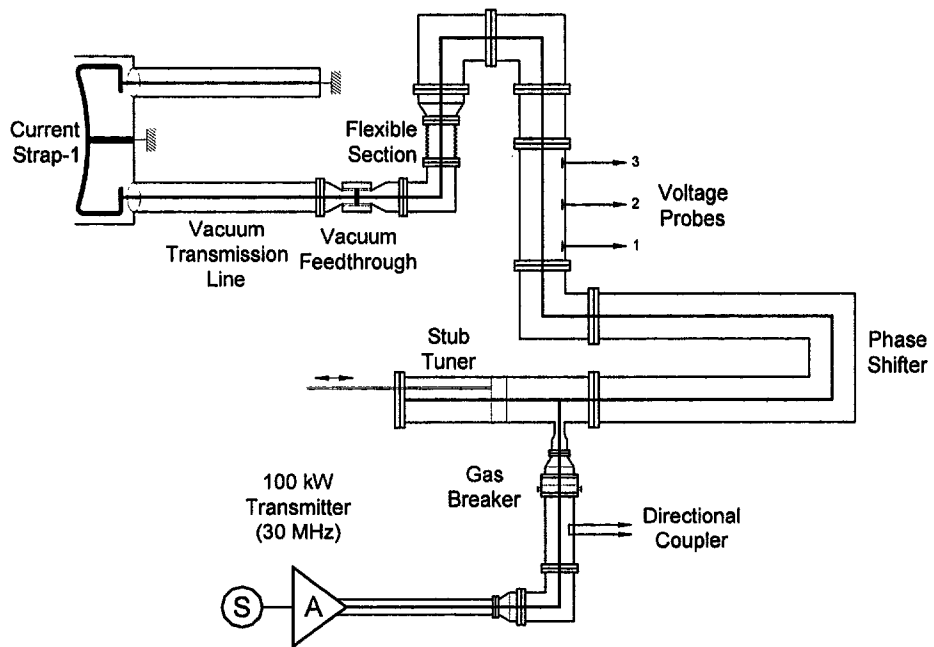


그림 3-2-82. Schematic diagram of the RF test circuit-2.

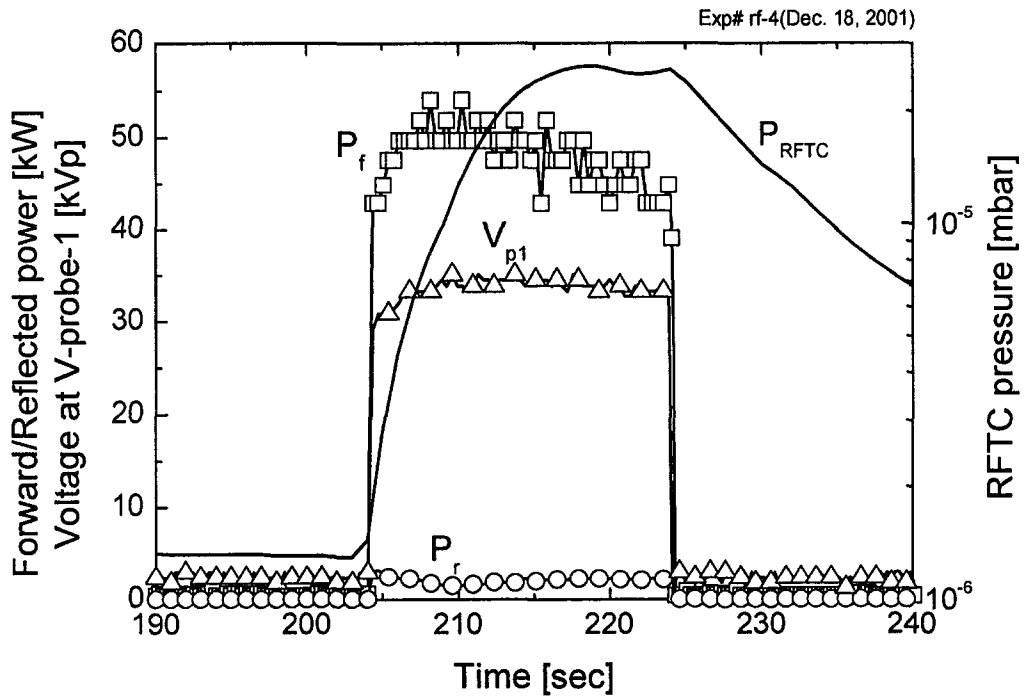


그림 3-2-83. Time evolution of forward/reflected powers, line voltages and gas pressure.

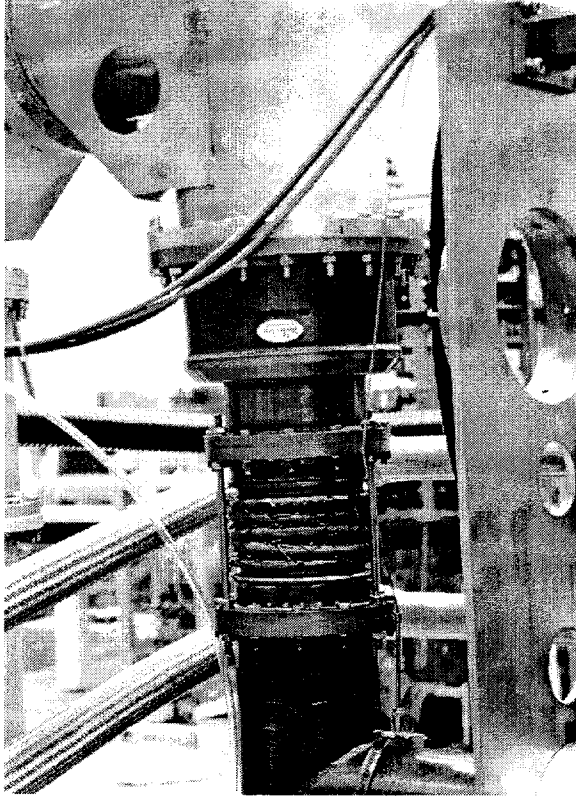


그림 3-2-84. The deformed flexible section by the overheating

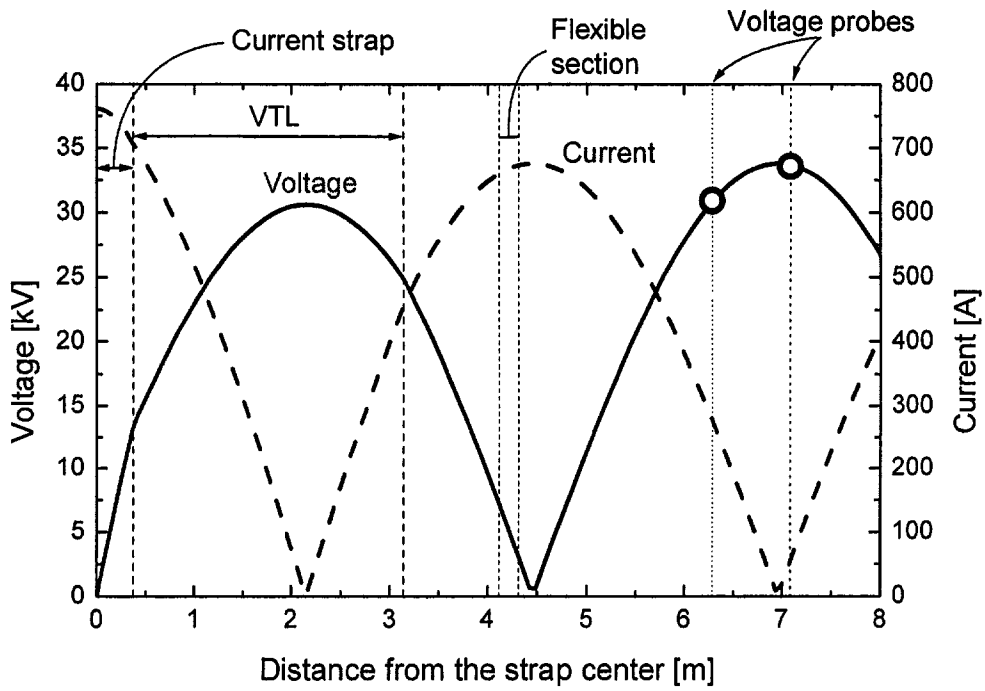


그림 3-2-85. Voltage and current vs distance from the center ground of the current strap in the test circuit-2. Two open circles denote the measured voltage. The flexible section is located near the current-maximum.

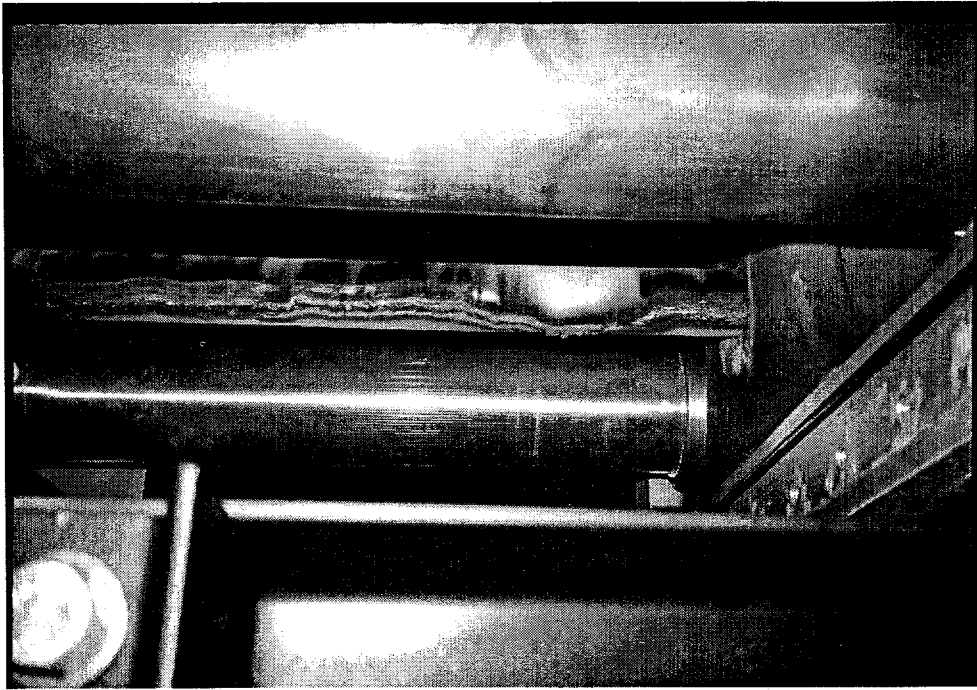


그림 3-2-86. Inside view of the phase shifter. It shows the severely damaged fiber glass rod used to drive the U-type trombone conductor.

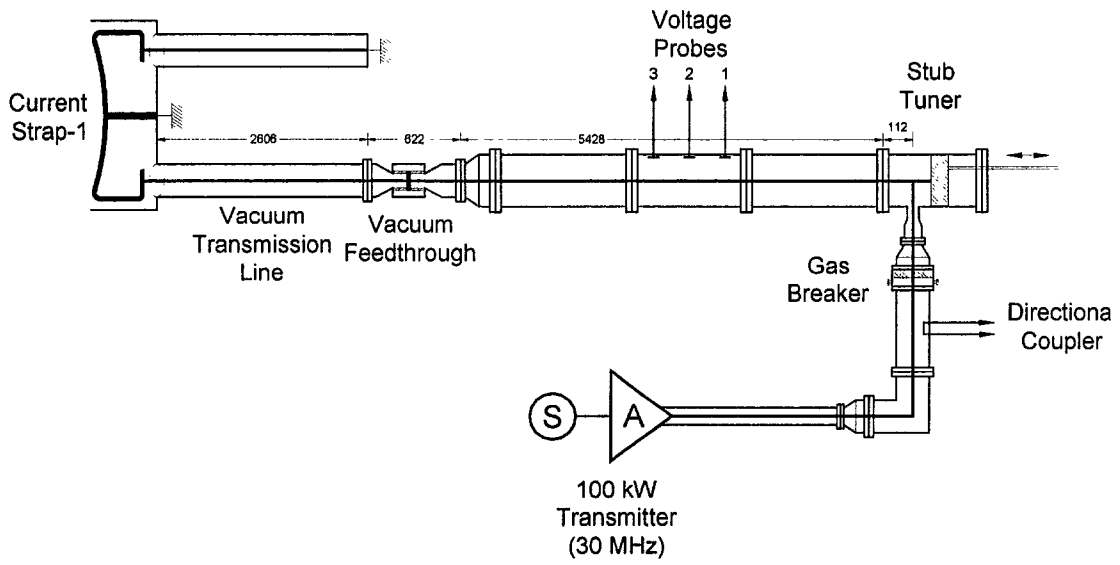


그림 3-2-87. Schematic diagram of the RF test circuit-3.

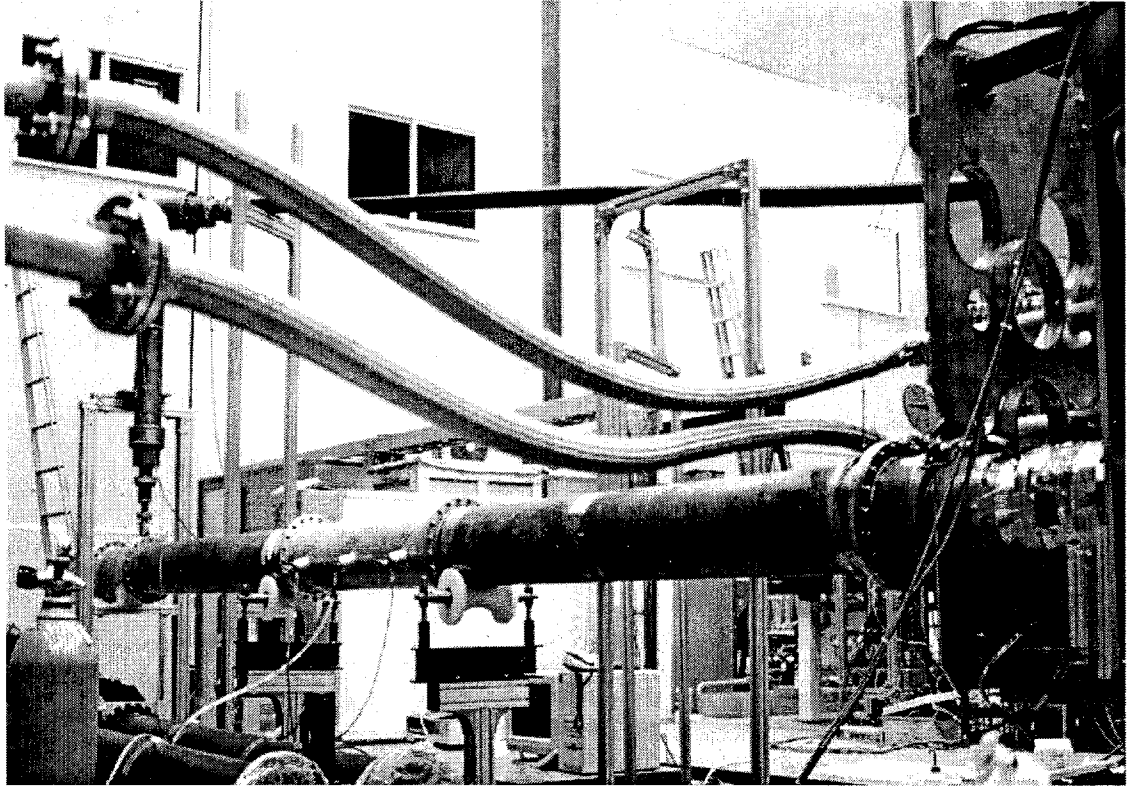


그림 3-2-88. Picture of RF test circuit-3.

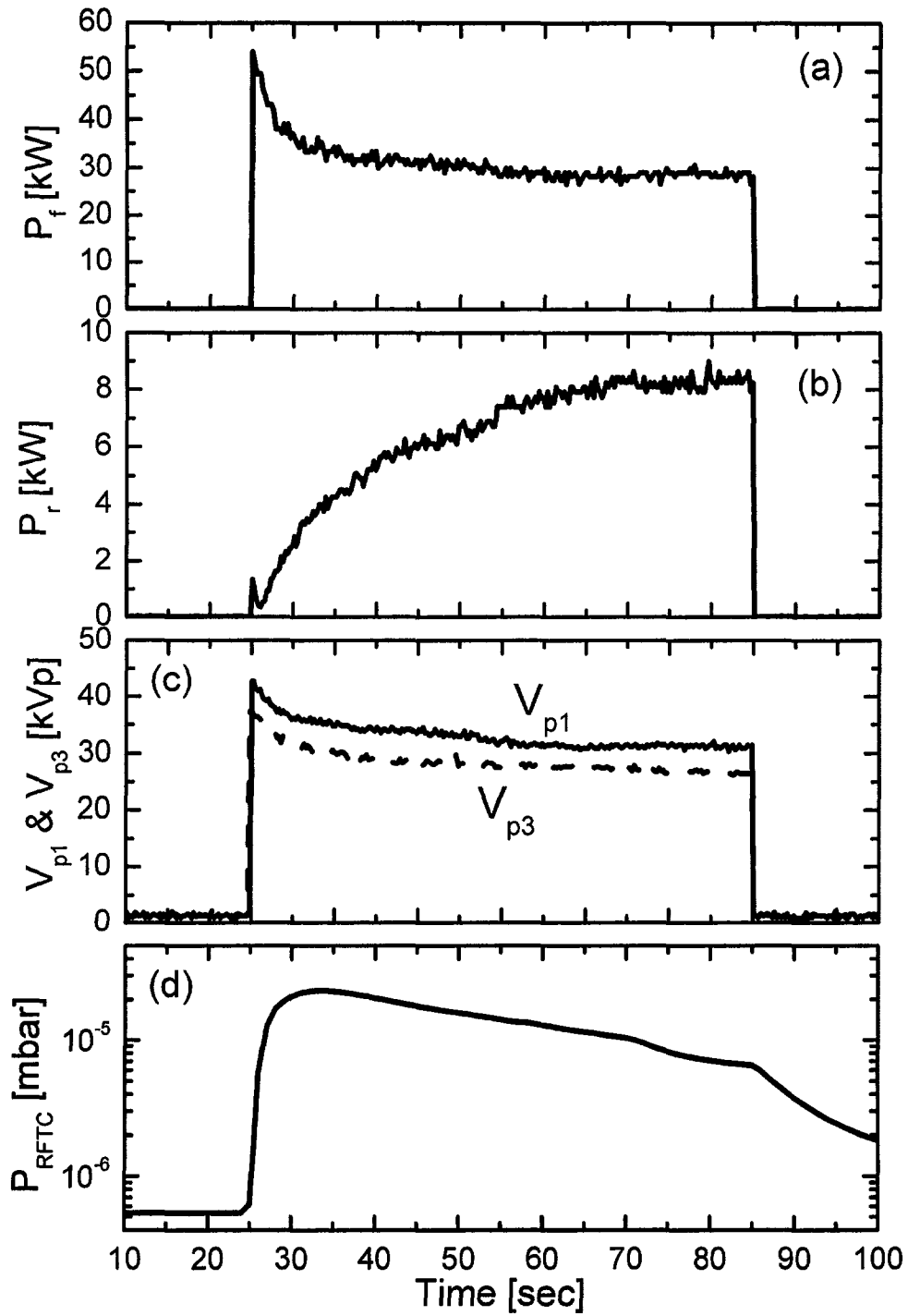


그림 3-2-89. Test result using the test circuit-3 : time evolution of forward(a)/reflected powers(b), peak voltages(c) and gas pressure(d).

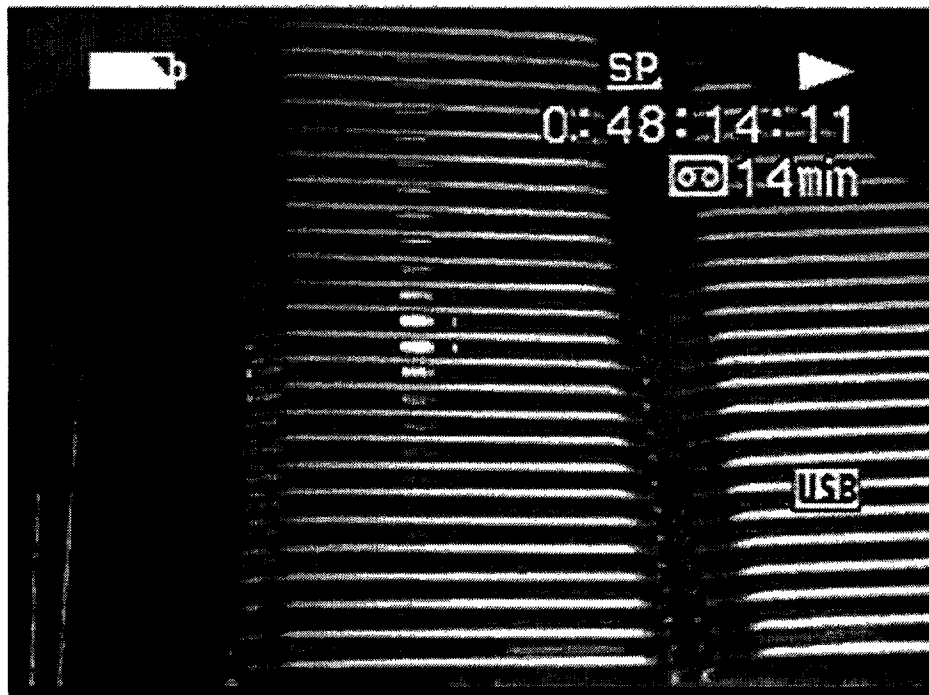


그림 3-2-90. 전류띠 #1 주위에서의 multipactor 방전

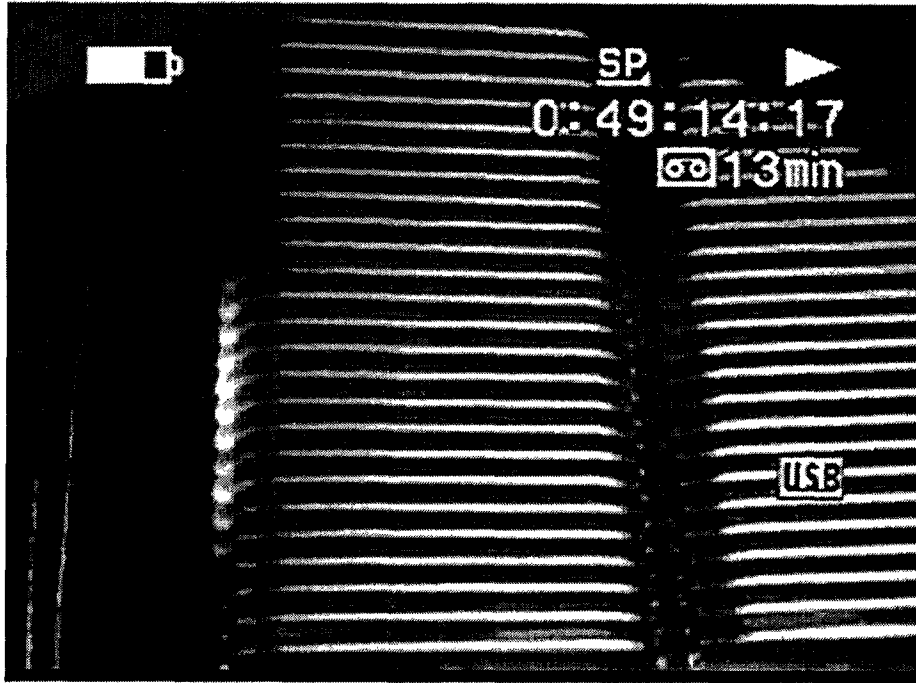


그림 3-2-91. 60초후의 Cavity box 외벽의 가열

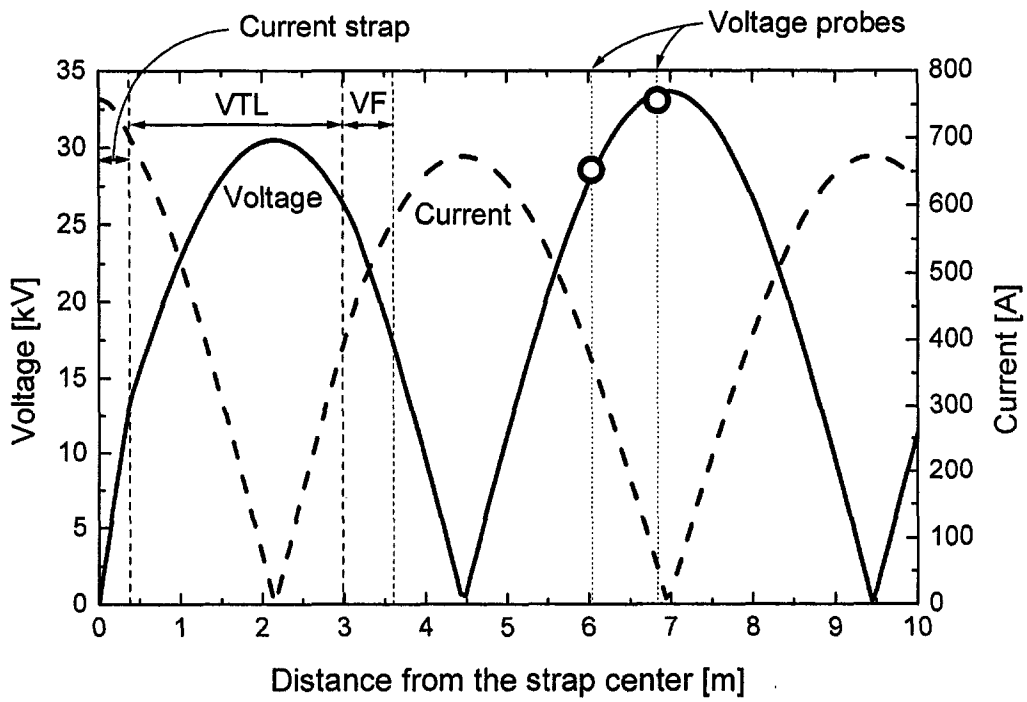


그림 3-2-92. Voltage and current vs distance from the center ground of the current strap in the test circuit-3. Two open circles denote the measured voltage. The flexible section is located near the current-maximum.

(2) 고출력, 고주파 전송부품 제작 및 특성시험

(가) Vacuum feedthrough 제작 및 특성시험

① 공학설계

Vacuum feedthrough는 토카막 진공 용기의 벽을 통과해야하는 고주파 전송선 중간에 두어 진공용기 쪽의 진공 전송선과 고주파원 쪽의 가압 전송선간의 기압 차를 유지하기 위한 부품이다. 따라서 가압측(통상 3~5 기압)과 진공측 사이에 전기적 절연을 겸한 진공 막(고주파 창)을 갖고 있는 동축선 구조를 기본으로 하게 된다. 이러한 vacuum feedthrough는 그 사용 환경이나 요건이 다양하고 흔하게 사용되는 고주파 부품이 아니어서 상용의 제품이 없다. 특히 토카막에서 사용하는 vacuum feedthrough는 그 특유의 사용 요건을 충분히 만족시키는 구조가 아직 발견되지 않아 현재 활발한 연구가 진행되고 있는 부품이다. 그림 3-2-93은 주요 대형 토카막들이 사용하고 있는 vacuum feedthrough의 형상을 보여주고 있다. 대부분 진공 막 재료로는 알루미늄(Al_2O_3) 세라믹을 사용하고 있고 O-ring이나 brazing에 의한 seal을 하고 있다. ASDEX의 설계는 Helicoflex O-ring을 사용하고 있으며, 기계적으로 튼튼한 세라믹과 그 지지 구조를 갖고 있으나 가공상 어려움이 있어 보인다. JT-60는 단순해 보이나 brazing에 어려움이 있고, 특히 KSTAR와 같이 장시간 운전을 해야하는 경우는 이것이 문제를 일으키기 쉬울 것이다. JET의 설계는 conical 세라믹을 Helicoflex O-ring으로 진공 밀폐하고 있으며 토카막 내벽을 이용한 지지 구조를 갖고 있다. NIFS의 설계도 conical 세라믹을 사용하지만 세라믹에 금속을 brazing한 경우이며 bellows를 이용한 지지구조이다. 이 설계는 KSTAR의 경우와 마찬가지로 장시간 운전을 설계요건으로 삼고 있으며 만족스러운 시험결과를 보고하고 있다. 마지막으로 Oak Ridge 연구소 설계는 원통형 세라믹 창을 사용하고 있으며, 지정된 전송선 특성임피던스를 잘 유지하고 있는 구조로 동시에 전기적 내압 특성도 우수한 것으로 보고하고 있다. 다만 brazing을 사용하고 있고 기계적으로 취약해 보인다.

㉞ KSTAR용 Vacuum Feedthrough의 설계 요건

개발에 앞서 설계요건을 다음과 같이 정했다.

- 1) 전송 가능한 고주파 출력은 1.5 MW로 하고 장시간(300초) 운전을 목표로 하며, 사용 주파수는 25~60 MHz이다.
- 2) 고주파 전압의 내압 특성은 30 kV(실효전압)로 한다.
- 3) 고주파 전류는 최고치 600 A(실효전류)에 견디도록 한다.
- 4) Vacuum feedthrough의 외경은 6-inch 전송선의 것으로 하고 가압측은 50 Ω 진공측은 40 Ω의 (진공)전송선에 연결할 수 있는 구조로 한다.

5) 냉각 구조는 연결되는 전송선들과는 독립적으로 운영될 수 있도록 한다.

6) 진공측 진공누설율은 9×10^{-7} Torr·ℓ/sec 이하로 한다.

상기 4)의 기계적 요건으로는 전기적 특성인 요건 1), 2), 3)을 만족시키는 것이 어려울 것으로 예상된다. 그러나 이들 요건은 이미 설계된 안테나 고주파 인입선 구조와 역시 기 작성된 전송선 및 고주파원 운용 계획에 의거하여 설정된 것들이다. 따라서 vacuum feedthrough 일차적인 설계, 제작 그리고 시험 단계를 통하여 상기 설계 요건에 대한 재검토를 실시할 계획이다. 즉, 이번의 제1차 설계에서는 향후 개선가능성에 대한 시험이 가능하도록 하는 점도 참작하였다.

㉠ 설계요약

KSTAR용 vacuum feedthrough설계를 위하여 여타 장치들의 것들을 검토한 결과 Oak Ridge의 것을 설계의 기초로 삼기로 하였다. 비교적 단순한 구조로 국내 제작이 가능하다는 점과 전기적 강점은 살리고 기계적 약점을 보완한다면 설정한 설계요건을 만족할 수 있을 것으로 판단하였다. 우선 세라믹 창은 역시 가공이 편한 원통형으로 하되 한 개 대신 두 개를 대칭으로 사용하여 내부도체의 지지 강도를 높이고 동시에 brazing 대신 O-ring을 사용할 수 있도록 하여 온도 상승에 강점을 갖도록 하였다. 다음에 내부도체의 냉각을 위하여 가압측에 외부로 연결되는 냉각수 통로를 두었다. 통로는 통상의 가압 전송선에서 볼 수 있는 내부도체 지지체(테프론) 구조를 응용하였다. 두 개의 세라믹 창을 갖게 되어 이들 창과 창 사이에 제3의 공간이 발생하였는데 이는 세라믹 창의 냉각을 시험하는데 이용하도록 하였다. 냉각방식은 고압기체를 이 공간을 통하여 순환시키는 것이다. 이와 같이 하여 상세 설계한 vacuum feedthrough는 그림 3-2-94에 보였으며, 국내 제작하였다.(제작사 : Green Tech, 대구광역시)

제작의 편의를 위하여 단순한 원통형 세라믹을 선택한 결과 전기적 내압 특성에 여유가 없었다. 또한 냉각수 통로를 위하여 설치한 테프론 지지체 구조도 전기적으로 만족스럽지 못하다. 한편 brazing없이 O-ring 만을 이용하다보니 O-ring 지지에 미치는 가공오차를 수용하기 어려운 설계로 되어 있다. 그러나 이들 문제점들은 설계 상에서는 해소여부를 판단하기 어려운 것들로 제작품의 시험을 통해서 개선 방향이 들어 날 것으로 기대하고 있다. 일차 제작품에 대한 내부 및 외부 도체 재료는 그것이 시제품인 점과 중량을 고려하여 알루미늄 합금 6061(제작사 추천재료)을 선택하였으며, 세라믹 창은 고순도 알루미나(Al_2O_3 , 99.7%)로 성형한 후 가공하도록 하였다. 사용한 세라믹의 특성은 표 3-2-9와 같다.

㉡ 전기장 및 열변형 분석

㉢ 전기장 분석

설계와 병행하여 도체와 절연체(세라믹, 테프론) 형상에 대한 전기장의 계산을 통

하여 그 적합성을 평가하였다. 전기장은 2차원의 정전기장을 계산하여 평가하였으며 상용 프로그램인 Quick Field(Tera Analysis사 제품)를 사용하였다.

그림 3-2-95은 외부와 내부도체 사이의 전기장세기의 분포로 가압측 쪽 반만을 보이고 있으며, 나머지 반은 거의 대칭구조이므로 이와 유사하다-테프론 지지체 부분은 별도로 계산하였다. 그림에서 보는 것처럼 전기장은 외부도체의 돌출부와 내부도체의 최소 직경 부분에서 거의 같은 값의 최고치를 보인다. 만일 외부 도체의 돌출부의 전장의 세기를 현재보다 줄이려면 돌출부 형상을 키워 주어야하나 이 때 내부 도체의 값이 상승하게 되는 상관 관계를 갖게 되므로 두 곳의 값이 같아지는 경우를 최적의 형상으로 하였다. 그림의 결과는 두 도체 사이에 (직류)전압 30 kV를 인가하였을 때의 결과이다.

세라믹과 도체 사이에는 실제로 항상 틈이 있게 마련이나 미세한 틈에 대한 계산은 수치해석 결과를 직접 사용하기에는 적절하지 못하여 이들의 접촉부위에 대한 전기장의 평가는 별도의 고려를 필요로 하였다. 여기서는 간단히, 수학적으로 틈이 없는 경우에 대한 결과에 유전율을 곱한 값으로 평가하였는데 하나의 보수적인 근사방법이라 하겠다. 이러한 방법으로 평가하였을 때 이 부분에서의 최대 전장의 세기도 앞서 언급한 돌출부 및 최소 직경부위의 값과 비슷하도록 조정하였다. 물론 이러한 틈새에서는 방전입자의 자유행정이 제약을 받고 전기장의 구배도 금속 돌출부의 경우와는 다르므로 여기서 사용한 평가방법이 실제 내압 특성상의 균형에 대한 고려로서 얼마나 적절한 것인지는 의문이다.

그림 3-2-96(a), (b)는 세라믹 원통 표면에서의 전기장의 세기이다. 표면에서 문제가 되는 접선방향의 세기는 원통 내외 면에서 거의 같은 값(0.5 MV/m)을 보이고 있으며, 수직방향의 세기는 내부에서 더 큰 값을 갖는다. 그림 3-2-96(c)에 보인 세라믹 내부(중앙선)에서의 값으로부터 vacuum feedthrough에 걸리는 고주파 전압에 의해 세라믹의 가열효과를 예측할 수 있다. 세라믹에서의 유전손실은

$$P_{RF} = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r \tan \delta \omega \int \int 2\pi r E^2(r, z) dr dz, \quad (1)$$

와 같이 구할 수 있으며, 여기서 ϵ_r 은 상대유전상수이며, $\tan \delta$ 손실각이다. 또한 $E(r, z)$ 은 (r, z) 위치에서의 전기장의 세기의 실효값이다. 그림에서 보는 것처럼 전기장 세기가 평균 0.5 MV/m이므로, 사용 주파수 50 MHz에서 세라믹의 손실각 $\tan \delta$ 값을 5×10^{-4} , 유전율을 10으로 보았을 때, 발열량은 1.74×10^6 W/m³으로 세라믹 원통(부피 : 150 cc) 1개당 260 W에 달한다. 이 값으로부터 세라믹의 온도 상승을 계산해보면 다음과 같다. 능동적인 냉각이 없는 경우, 세라믹의 온도는 유전손실에 의한 발열량이 내부 에너지를 증가시키는 부분과 복사에 의한 손실의 두 부분으로 나누어진다고 볼 수 있으므로, 세라믹의 온도는 다음 식에 의해 계산할 수 있다.

$$P_{RF} = \frac{MC_p(T - T_0)}{\Delta t} + \frac{\sigma A_1(T^4 - T_2^4)}{1/e_1 + \frac{A_1}{A_2}(1/e_2 - 1)}, \quad (2)$$

여기서 M과 C_p 는 각각 세라믹의 질량과 비열이며, T_0 는 초기 세라믹 온도이다. Δt 는 펄스의 폭이며, σ is Stefan-Boltzman 상수이고, A_1 과 A_2 는 각각 세라믹과 세라믹을 마주보고 있는 외부도체의 면적이다. 또한 T_2 는 외부도체의 온도이며, e_1 과 e_2 는 각각 세라믹과 외부도체의 emittance이다. 온도가 낮은 경우나 초기 상황에서는 (2)식의 첫 번째 항이 두 번째 항보다 크며, 이와는 반대로 연속 운전의 경우, 두 번째 항이 온도를 결정하는 주요 요인이 된다. 외부도체의 온도가 $T_2=20$ °C로 유지된다고 가정하고, 초기 세라믹 온도가 $T_0=20$ °C인 경우 세라믹 온도를 계산하면 그림 3-2-97과 같다. 이 계산에서 세라믹과 외부도체의 emittances 값으로는 일반적으로 알려진 $e_1=0.5$ 및 $e_2=0.3$ 을 사용하였다. 본 vacuum feedthrough의 동작 조건 중의 하나인 주파수 $f=50$ MHz에서 300초 펄스의 경우 세라믹의 온도는 165 °C가 됨을 알 수 있으며, 이는 Viton O-ring의 보호를 위해 강제 냉각이 요구되는 온도이다. 이 온도에서 복사 손실 항은 내부에너지 증가 항의 6 %보다 작다. 즉, 대부분의 유전손실은 온도를 증가시키는 데에 기여한 것이다.

㉔ 열변형 분석

세라믹에서의 발열량은 앞 절에서 평가한 바와 같다. 내부 도체에서의 열 발생은 도체 표면을 따라 흐르는 고주파 전류 I에 의한 Ohmic loss에 기인하며, 단위 면적당 그 양은

$$P_{loss} = R_s I^2 / (\pi d)^2 \quad (3)$$

와 같다. 여기서 R_s 는 표면 저항(surface resistance)으로서 $R_s = \rho / \delta$ 이며, d 는 고려하는 곳의 도체 직경이고 ρ 는 비저항, δ 는 skin depth이다. 도체 재료인 알루미늄의 비저항은 $\rho = 2.65 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ 이며, 주파수 50 MHz에 대한 skin depth는 11.6 μm 이다. 따라서 50 MHz 고주파 전류 600 A에 대하여 $P_{loss} = 83.5/d^2 [W/m^2]$ 의 비율로 도체표면에 걸쳐서 열이 발생한다. 내부도체의 표면을 따라 (3)식을 적분하면 내부도체 전체로는(냉각수가 흐르는 부분) 1 kW에 달한다(최소직경 부분만은 140 W). 이 정도의 값이면 설계한 수냉방법으로 별 문제를 일으키지 않을 것으로 판단할 수 있다.

온도 상승으로 인한 열변형이 문제가 되는 점은 세라믹과 도체간 O-ring의 접촉 간극이다. 이 O-ring들은 두 개의 세라믹 원통과 외부 도체 사이에 삽입되어 있는 셈이다. 실제 두 개의 세라믹 사이에는 내부도체의 일부가 삽입되어 있으나 그 길이가 12 mm로 짧아 문제가 되지 않는다. 따라서 열변형에 의하여 외부 도체에 비

하여 세라믹이 더 많이 늘어나는 경우는 문제가 되지 않으나(압축 스트레스는 별문제로 하고) 그 반대의 경우는 O-ring 간극의 팽창을 초래하게 된다. 설계에서 이에 대비하여 외부도체의 공차를 설정하였으며, 실제 외부도체(자연 냉각)의 온도상승은 그 정도로 높지 않을 것으로 판단된다. 가장 취약한 부분의 외부도체 내부 표면에서의 총 발열량은 600 A 전류에 대하여 177 W이고, 이 도체의 외부 표면적은 약 800 cm²이다.

③ 제작 및 시험

상기 공학 설계를 바탕으로 vacuum feedthrough를 국내 제작하였으며, 완성품은 그림 3-2-98과 같다. 2개의 세라믹에 대한 He 누설률 측정 결과 5.3×10^{-9} , 9.1×10^{-10} Torr·ℓ/sec로서 요구 조건을 충분히 만족하였다. Feedthrough의 진공측에 He 누설 시험기를 연결하고 He 누설률 측정 결과, 5.2×10^{-9} Torr·ℓ/sec였으며, 냉각관로에 대한 누설 시험한 결과 9.1×10^{-8} Torr·ℓ/sec였다. 냉각관로는 10기압 냉각수로 누설 시험하였다.

고주파를 이용한 고전력 시험을 위해 시험 장치를 제작하여, 현재 운용중에 있는 100 kW급 고주파 송출기를 이용하여 시험하였다. Vacuum feedthrough에 대한 고출력 고주파 시험을 주파수 30 MHz에서 수행하였으며, 시험계통의 구성은 그림 3-2-99와 같다. 시험계통에서 Vacuum feedthrough는 정합된 회로의 끝에 위치하여 전압이 최대가 되게 하였다. 정합회로의 선상 전압을 측정하기 위해 voltage probe 3개가 장착된 voltage probe section을 연결하였으며, 임피던스 정합을 위해 trombone type의 위상변환기와 stub tuner를 이용하였다. 주파수 30 MHz에서 정합시키기 위해 stub tuner의 끝에 접지를 연장하였다. 정합된 회로인 vacuum feedthrough로부터 stub tuner의 접지 부분까지는 정상파가 형성되는 부분으로서 절연파괴를 방지하기 위해 고순도 질소기체를 2기압으로 충전하였다. 이러한 시험 회로에 이중 방향성결합기를 통해 고주파를 인가하였다. RF transmitter는 최대 출력 100 kW로 연속 운전이 가능하며, 주파수 폭은 30 ± 0.5 MHz이다. 시험 중에는 vacuum feedthrough의 세라믹을 냉각하기 위해 두 개의 노즐을 통해 공기를 200 LPM의 유량으로 분사하였다. 중심 도체의 냉각을 위한 냉각수는 흘리지 않았다. 시험 중 세라믹관의 온도를 측정하기 위해 적외선 온도계를 설치하였으며, voltage probe를 이용하여 선상의 전압을 측정하고, 이중 방향성결합기를 이용 진행파와 반사파의 출력을 측정하였다. 또한 진공용기의 압력 변화를 측정하였으며, 전송선로의 여러 지점에 대한 온도 변화도 감시하였다.

세라믹-A로 조립된 vacuum feedthrough에 대한 고주파 시험 결과로서, 최대 고전압 30.3 kVp에서 60초 유지한 결과를 그림 3-2-100에 나타내었다. 정상파의 최대 고전압은 고주파 증폭기의 최대 출력과 회로상의 손실에 의해 제한되었다. 또한 펄스의 시간폭은 세라믹의 과열로 인해 제한되었다. 즉, 그림 3-2-100의 (c)에서 보는 바와 같이 세라믹-A의 온도가 60초 펄스동안 초기온도 30 °C로부터 112 °C로 증가

하였다. 이러한 온도 증가는 예상치를 훨씬 초과하는 값이며, 진공 밀폐 재료인 viton O-ring의 사용한계에 접근하게되어 펄스를 중단시켜야 했다. 이러한 비정상적인 온도 증가는 세라믹-A의 $\text{loss tan } \delta$ 값이 정상치보다 크기 때문이다. 온도 상승치로부터 세라믹-A의 $\text{loss tan } \delta$ 값을 계산해보면 5×10^{-3} 이 되며, 이 값은 정상치인 5×10^{-4} 보다 10배나 큰 값이 된다. 이것은 세라믹-A의 제조 공정에서 원하지 않는 불순물이 첨가되었거나, 제조 공정에 있어 적절치 못한 재료를 사용한 것으로 판단된다. 본 팀에서 운용 중에 있는 'High Voltage Pot'를 이용하여 세라믹-A의 $\text{loss tan } \delta$ 값을 정밀 측정된 결과 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

고주파 펄스의 시작 시점에 multipactor 방전이 일어났다가 진행출력을 증가시키면 중지되었다. 그로 인해 펄스의 시작 부분에 그림 3-2-100의 (d)에서 보는 바와 같이 좁은 압력 피크가 생기며, 펄스의 중간부터 압력이 증가하는 것은 고주파에 의한 세라믹 온도 상승에 따른 표면 기체방출율의 증가에 기인한다. 반사파는 펄스 동안 점차 증가하였으며, 이는 시간에 따라 전체 시험계통의 온도가 증가하여 초기의 정합조건에서 점차 벗어나기 때문이다. 그러나 반사율은 17%를 넘지 않았으며, 이 때의 VSWR은 2.5 이하였다.

세라믹-B로 조립된 vacuum feedthrough에 대해서도 동일한 고주파 시험을 수행하였다. 시간에 따른 고주파 출력, 전압, 온도 및 기체압력을 그림 3-2-101에 나타내었다. 정상파의 전압은 32.2 kVp였으며, 펄스의 폭은 요구 조건인 300 초였다. 이러한 전압은 플라즈마 저항이 $6 \Omega/\text{m}$ 일 때 0.8 MW의 고주파를 전송할 수 있음을 나타내며, 전체로는 6 MW 이상을 플라즈마로 주입할 수 있다. 300 초의 펄스 동안 세라믹의 온도 상승은 $13 \text{ }^\circ\text{C}$ ($T_0=30 \text{ }^\circ\text{C}$)였으며, 세라믹-A에 비해 펄스 폭이 길었음에도 불구하고 매우 작았다. 이것은 세라믹-B의 $\text{tan } \delta$ 값이 매우 작음을 의미하며, 온도 상승으로부터 계산하면, 2×10^{-4} 의 값을 가진다. 이 값은 요구 조건을 만족하는 충분히 낮은 값이다. 즉, 세라믹-B는 본 vacuum feedthrough에 사용할 수 있는 적절한 재료임을 알 수 있었다. 전체 시험계통의 위치에 따른 고주파의 전압 및 전류 분포를 그림 3-2-102에 나타내었다.

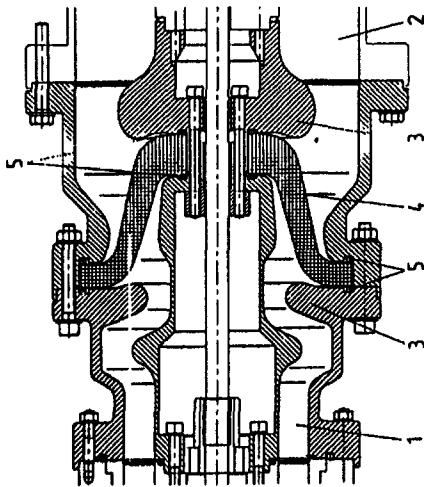
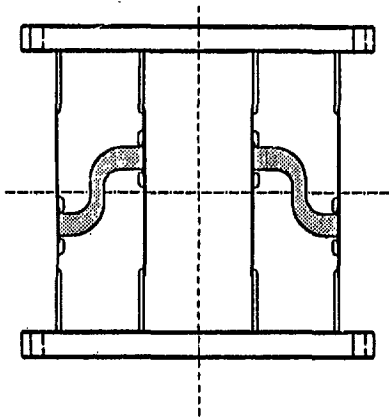
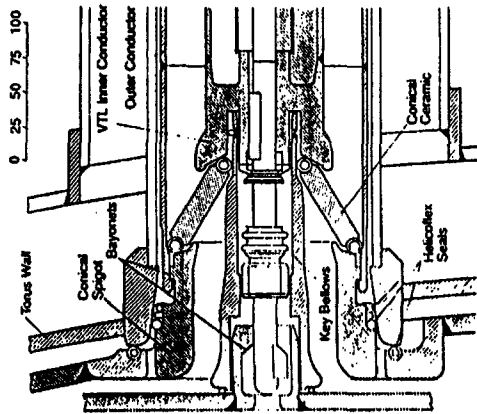
이상과 같이 vacuum feedthrough에 대한 고주파 고전압 시험 결과 제작된 vacuum feedthrough는 30 kVp, 300 초 펄스에 대해 아무런 이상없이 동작하였으며, 요구조건을 만족시킴을 확인하였다.

Vacuum feedthrough의 고전류 특성을 시험하기 위해, 그림 3-2-99의 시험계통에서 vacuum feedthrough의 진공측 끝부분을 접지시키고 동일한 시험을 수행하였다. 시험 결과는 그림 3-2-103과 같다. 입사파 전력 2.4 kW($t=80 \text{ s}$)에서 multipactor 방전이 일어나서 반사파 전력과 기체 압력은 급격한 증가를 보였으며, 이에 따라 선상 전압은 급격한 감소를 보였다. 또한 다른 경우와 달리 입사파 전력을 11 kW까지 증가시켜도 multipactor 방전이 소멸되지 않았으며, 입사파 전력 전부가 반사되었다. 이러한 현상은 접지 부근의 기하학적 구조로 인하여 multipactor 방전이 시작됨과 함께 주위의 전장이 계속 낮은 상태로 유지되기 때문에, 입사 전력을 증가시

켜 전압방전이 소멸되지 않는 것으로 판단된다. 따라서 vacuum feedthrough에 대한 고전류 시험을 위해서는 vacuum feedthrough를 정상과의 접지 부근이 아닌 다른 위치에 설치하고 시험하여야 한다.

ㄧ 3-2-9. Characteristics of the Alumina ceramics

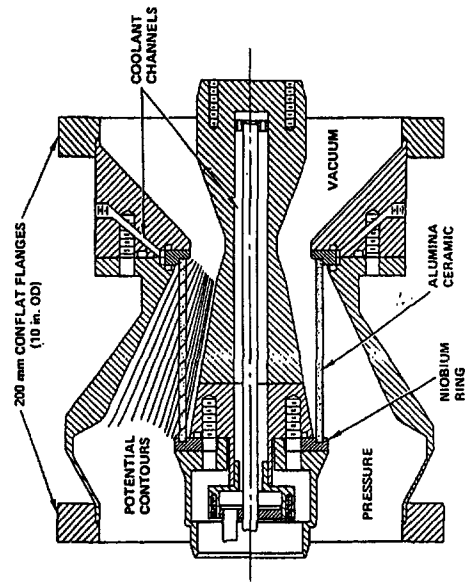
Purity :	$\geq 99.7 \%$
Chemical composition :	$\text{Na}_2\text{O} \leq 0.1 \%$
	$\text{H}_2\text{O} 0.1 \%$
	$\text{MgO} \leq 0.1 \%$
	$\text{SiO}_2 \leq 0.05 \%$
	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 0.03 \%$
Fired density :	$3.86 \sim 3.96 \text{ g/cm}^3$
Compressive strength :	$2,100 \text{ N/mm}^2$
Thermal expansivity :	$7 \sim 8 \times 10^{-6}$



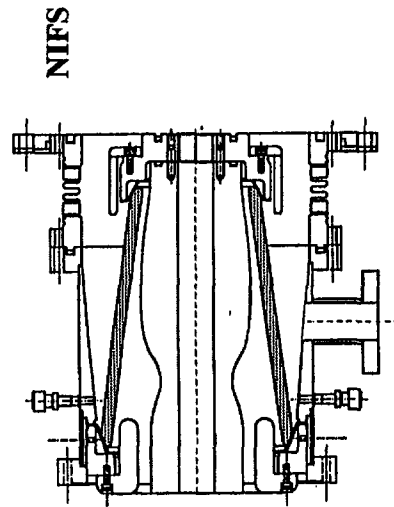
ASDEX

JT-60

JET



TEXTOR
(OAK RIDGE)



NIFS

그림 3-2-93. Various types of vacuum feedthrough for tokamaks.

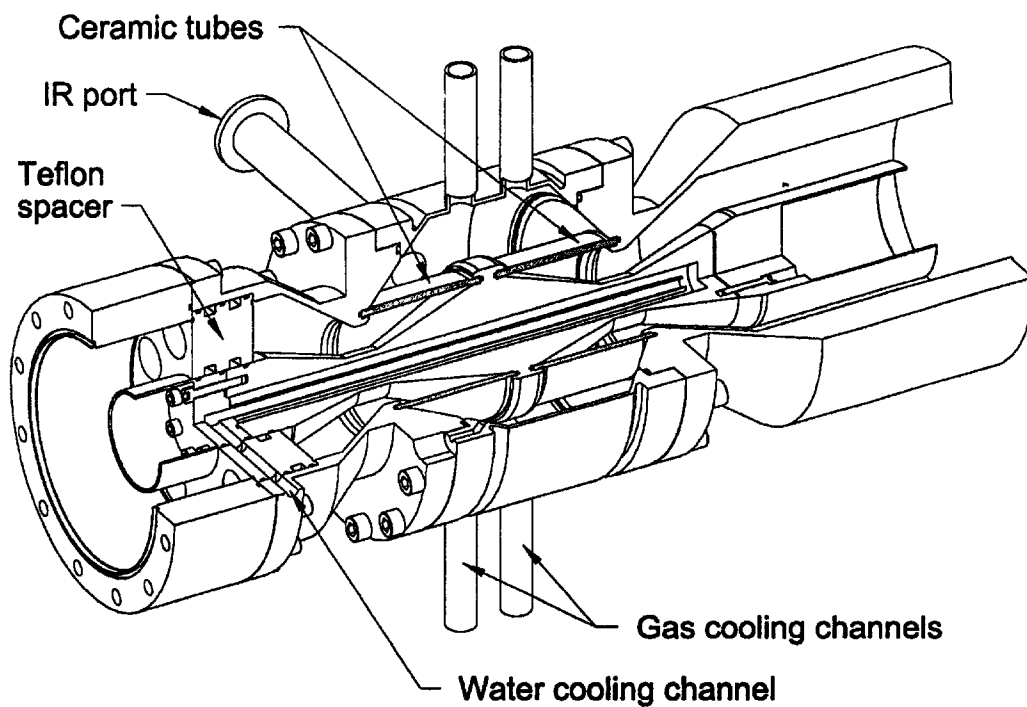


그림 3-2-94. Vacuum feedthrough for KSTAR ICRF antenna.

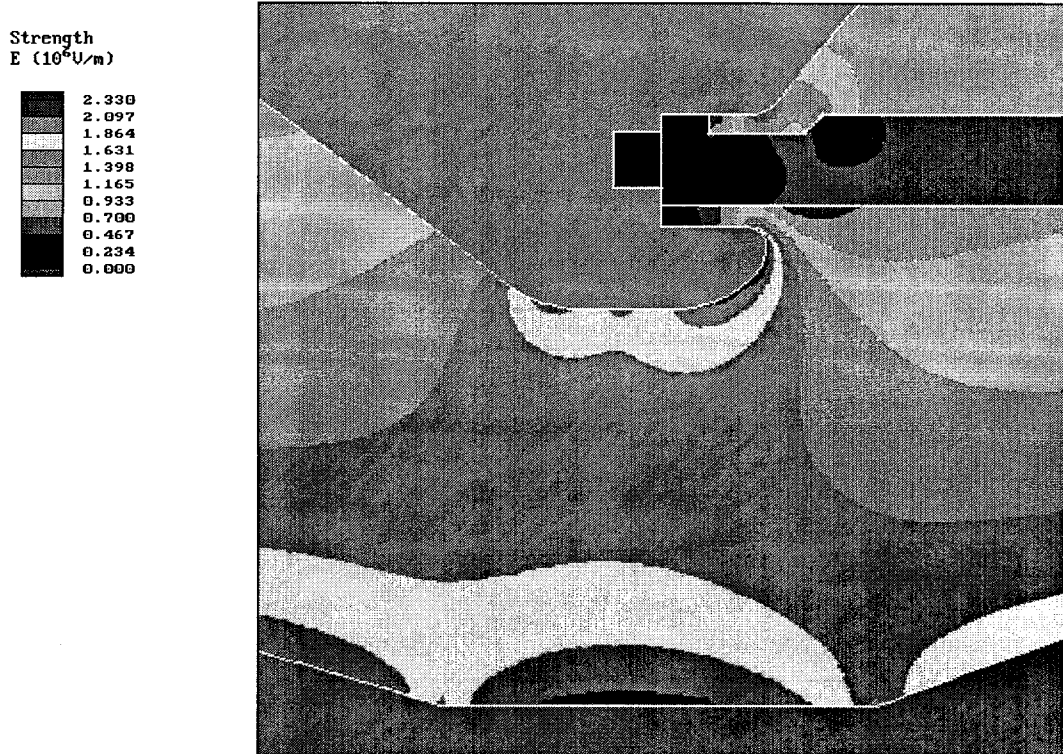
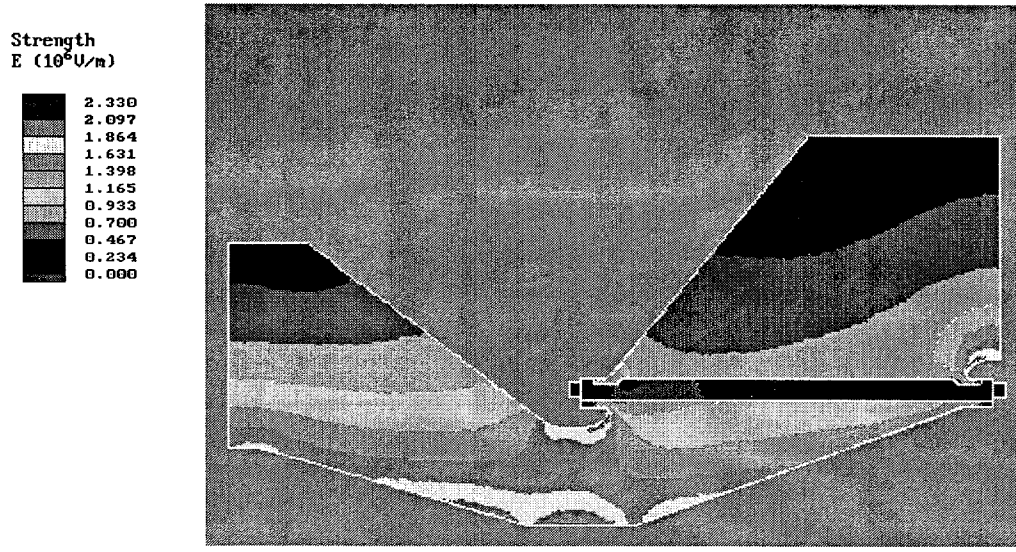


그림 3-2-95. Distribution of the electric field strength.

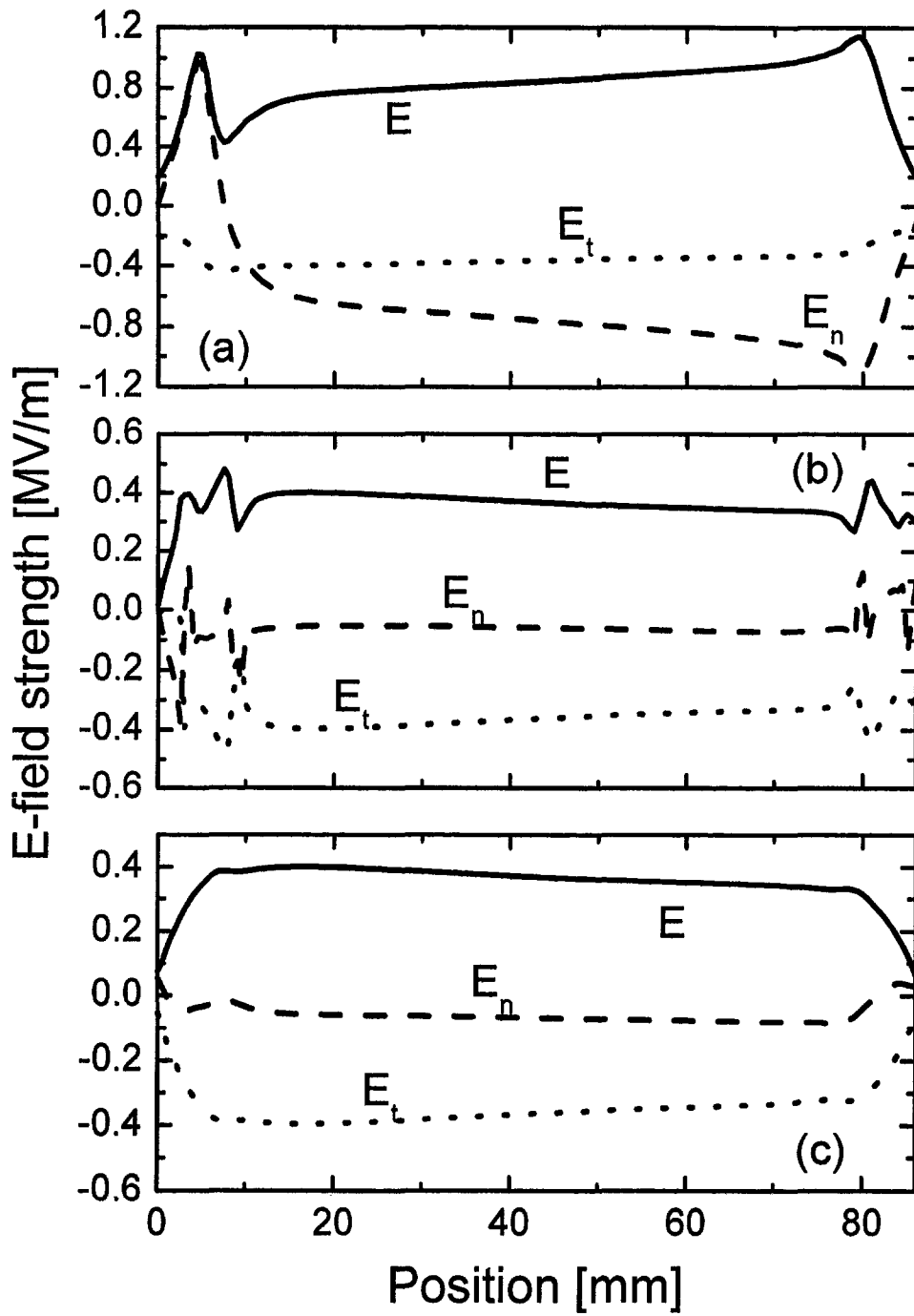


그림 3-2-96. Electric field strength on the inner(a)/outer(b) surfaces, and the inside(c) of the ceramics at V=30 kV of the voltage difference.

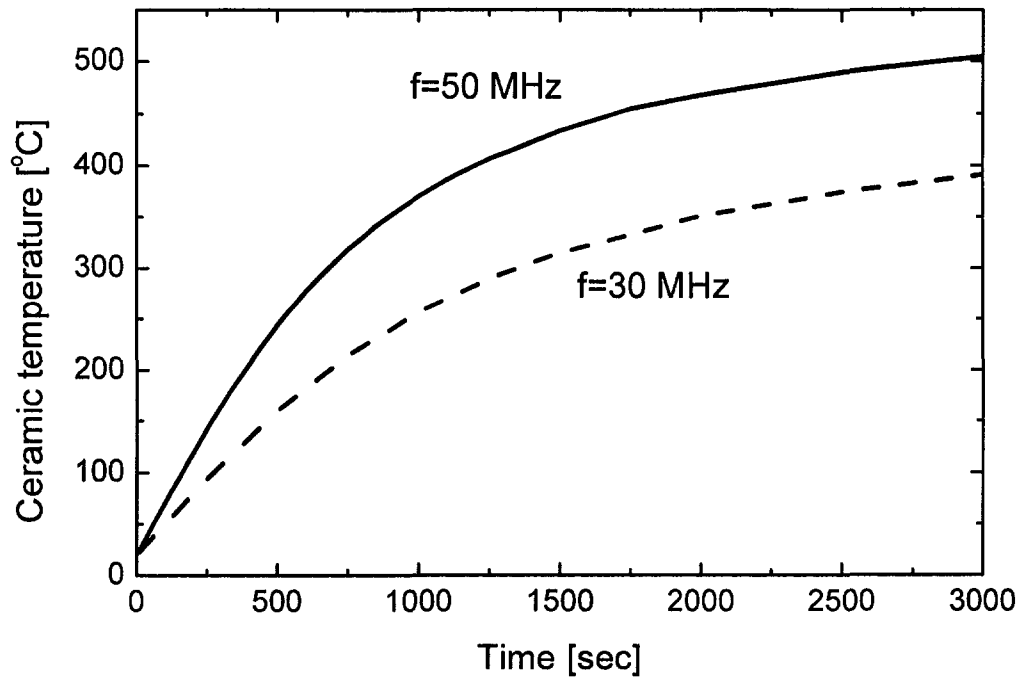


그림 3-2-97. Temperature increase of the ceramic due to the dielectric loss

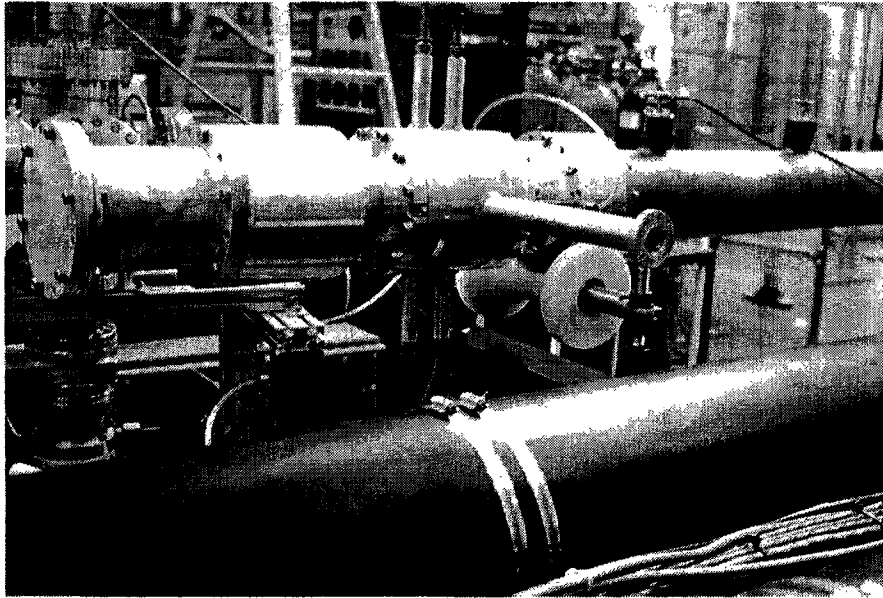


그림 3-2-98. The vacuum feedthrough installed on the test stand

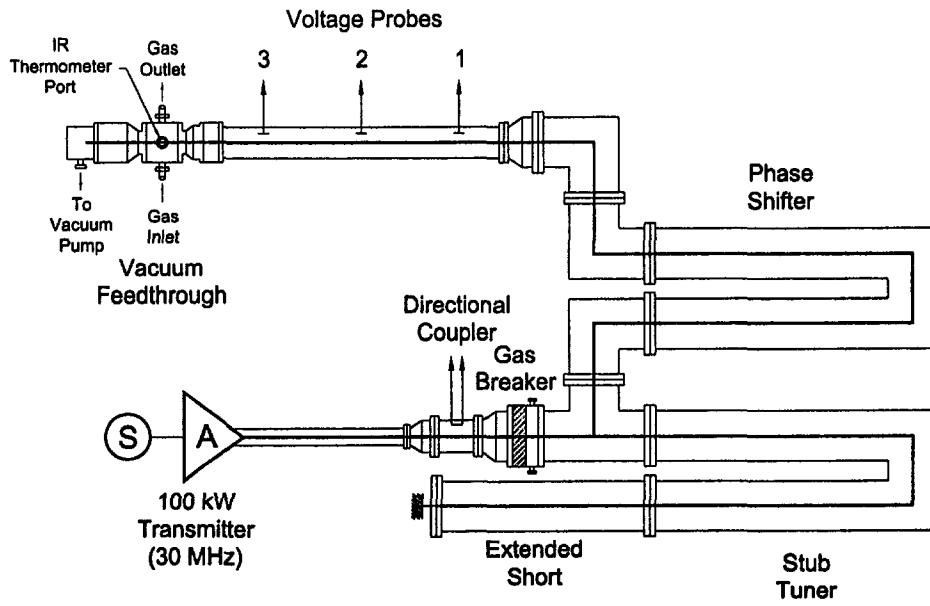


그림 3-2-99. Test stand of the vacuum feedthrough.

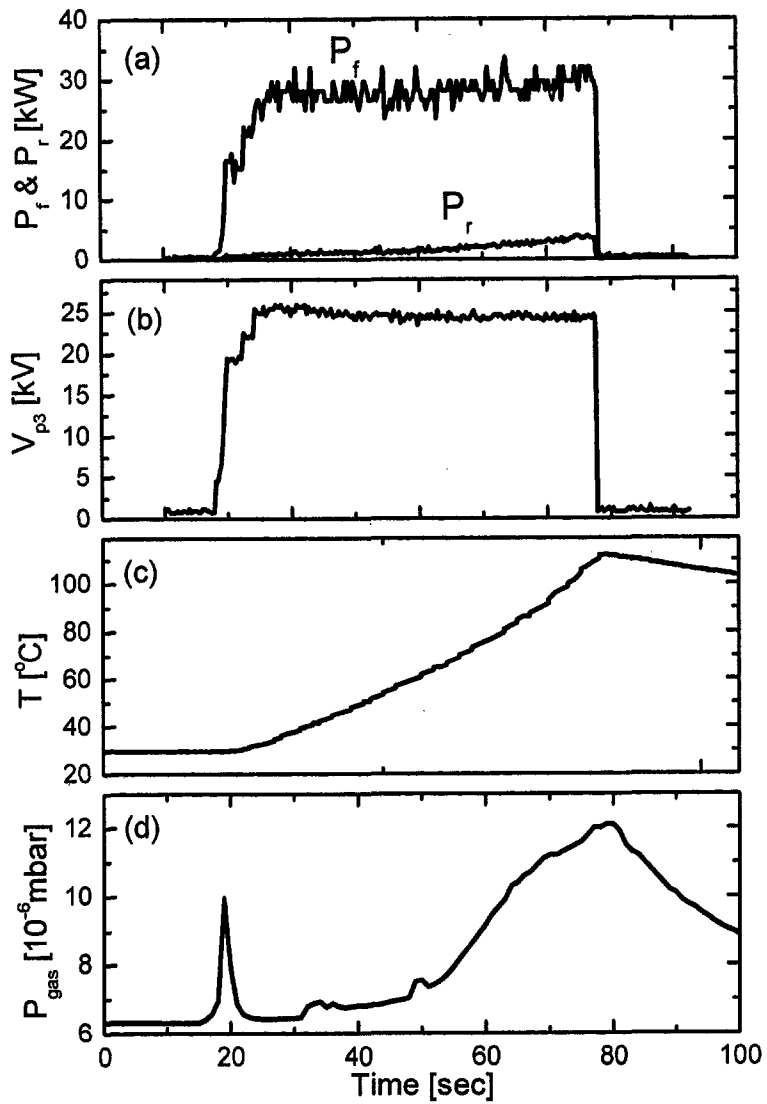


그림 3-2-100. Time evolution of forward and reflected powers(a), line voltage at V-probe #3(b), temperature of the ceramic-A(c), and gas pressure in the vacuum chamber(d).

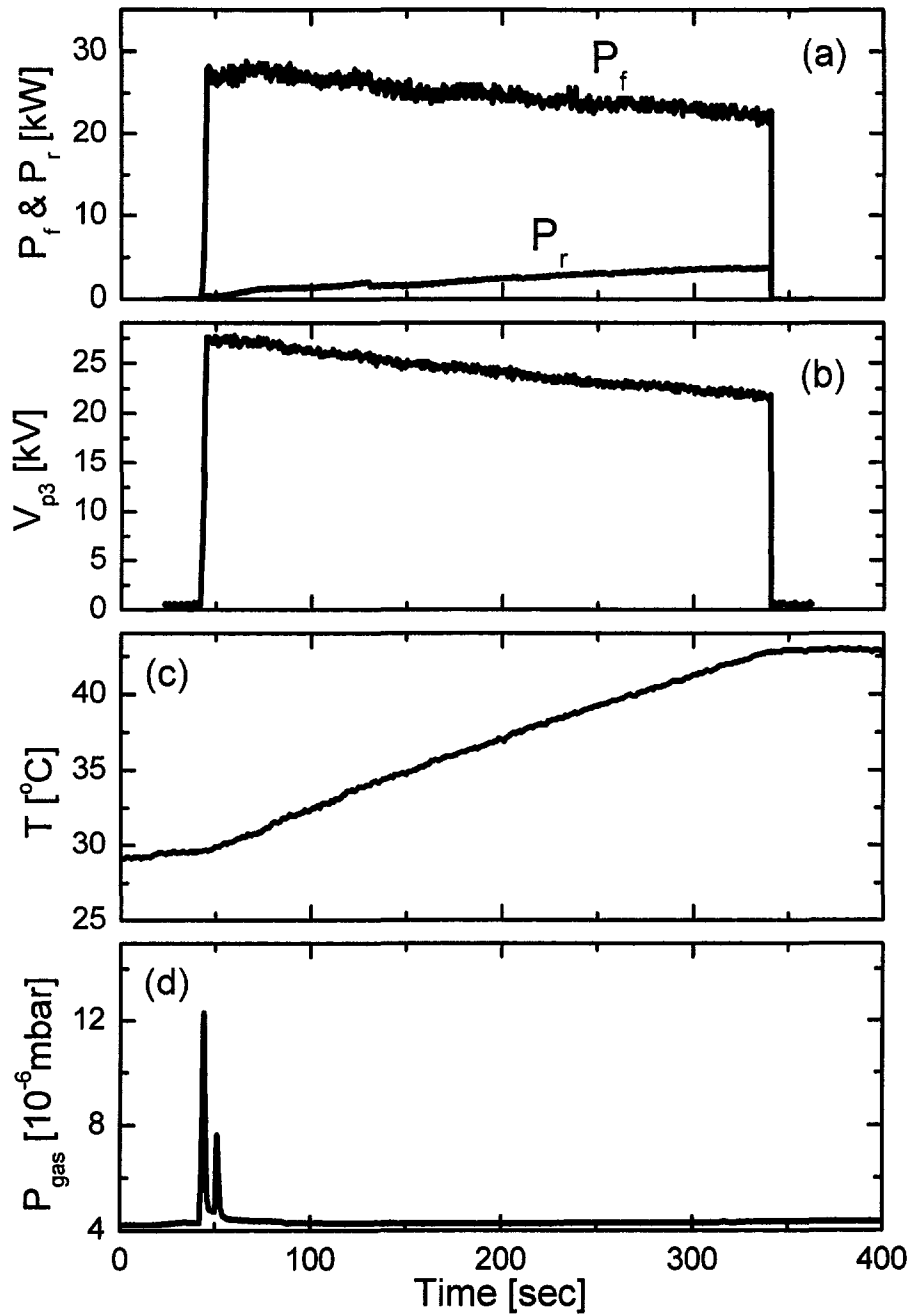


그림 3-2-101. Time evolution of forward and reflected powers(a), line voltage at V-probe #3(b), temperature of the ceramic-B(c), and gas pressure in the vacuum chamber(d).

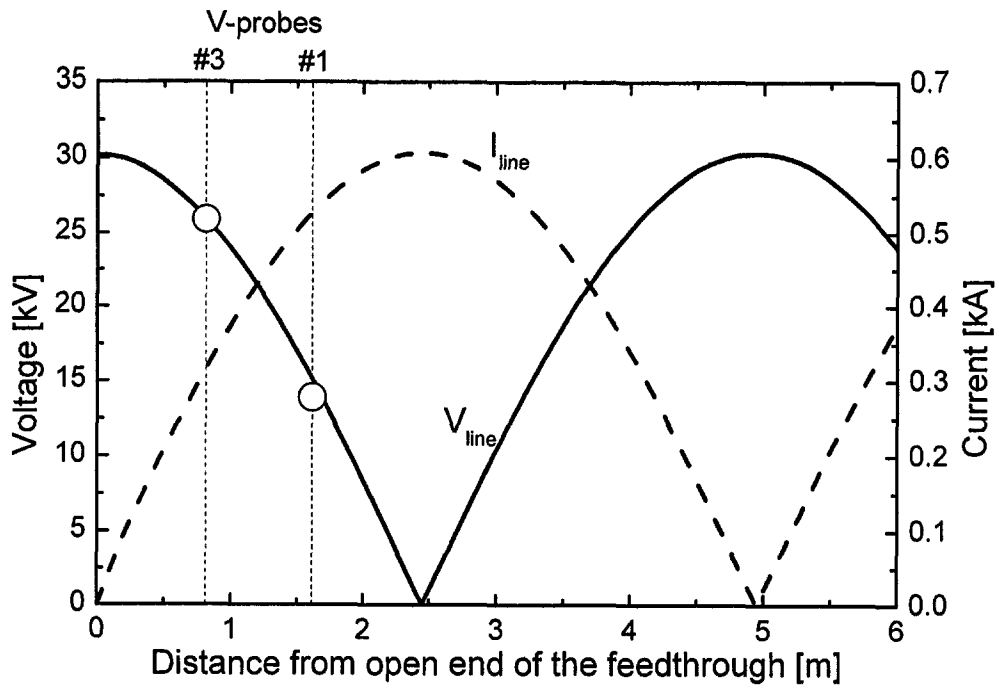


그림 3-2-102. Standing wave voltage and current along the line.

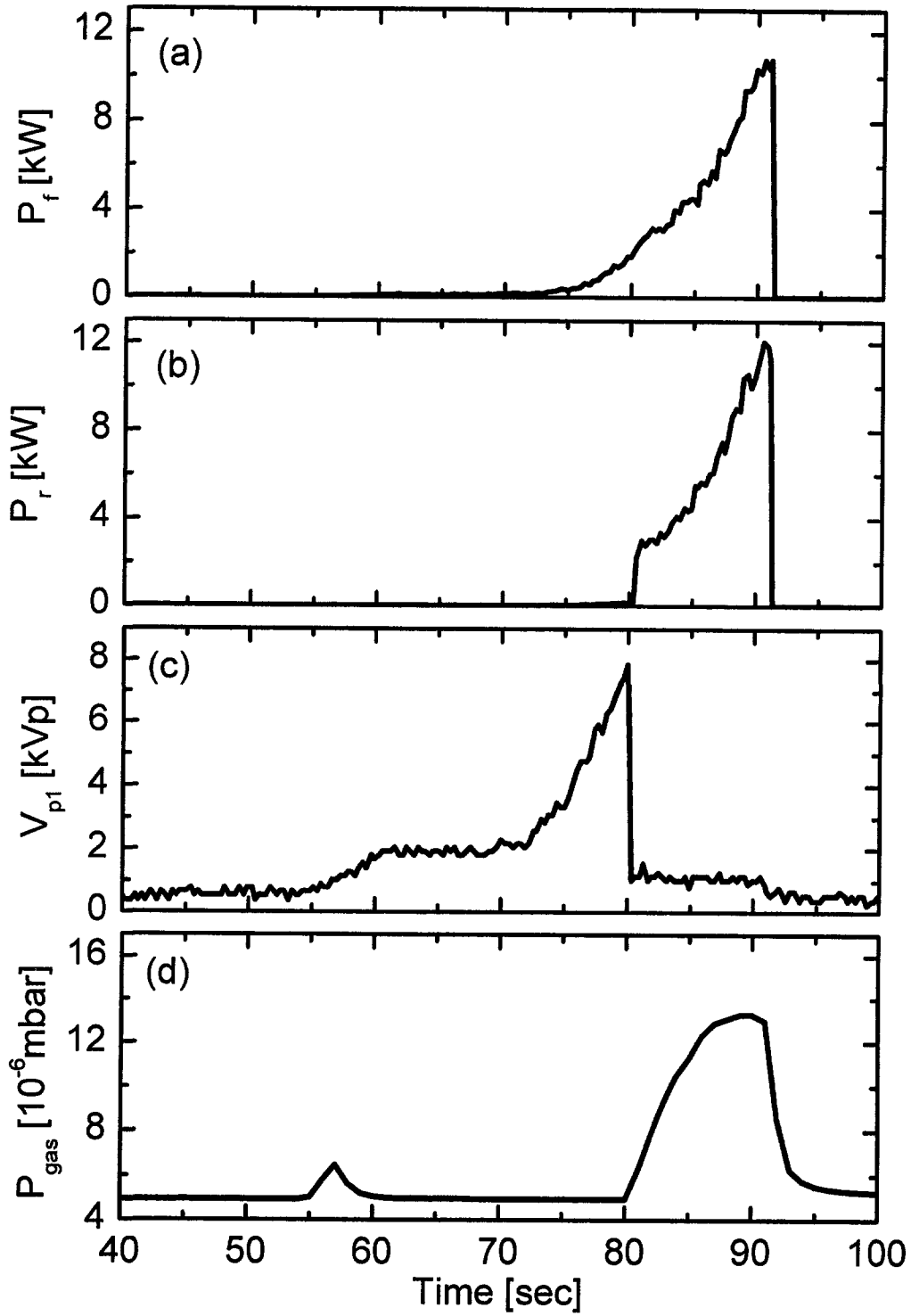


그림 3-2-103. Time evolution of forward(a) and reflected powers(b), line voltage at V-probe #1(c), and gas pressure in the vacuum chamber(d).

(나) 유체를 이용한 전송부품 제작 및 특성시험

①. 유체를 이용한 단락 전송선 동조기(Stub)의 개발

㉞. 전송선 동조기

HF 대역(3MHz ~ 30MHz) 이상의 주파수와 고전압, 고전류가 요구되는 고주파 장치에서 임피던스 변환을 위해서 전송선 동조기를 사용하는 것은 통상적인 캐패시터와 인덕터를 사용하는 네트워크에 비해 많은 장점을 가진다. 고전압(> 10kV), 고전류(> 1kA)의 고주파에서 적용하기 위해서는 캐패시터와 인덕터의 크기가 커질 수밖에 없으며 이에 따라 정확한 캐패시턴스와 인덕턴스를 갖는 부품들을 개발하는 일은 무척 어려워진다. 또한 고정되지 않은 부하 또는 주파수에서 운전하는 경우 각 부품들은 가변이 가능하도록 제작되어야 하며 전자파가 외부로 누출되지 않아야만 한다.

동축 전송선 동조기를 사용하는 경우 전송선의 전기적 길이를 가변 함으로써 정확한 임피던스를 얻는 것이 가능하며 추가적인 고려 없이 전자파의 누출을 막을 수 있다. 전송선 동조기의 기본적인 형태인 이중 단락 전송선 동조기(Double Stub Tuner)는 공명 전송선의 일부분이다. 그림 3-2-104는 고주파 발생기와 부하가 연결된 이중 단락 전송선 동조기를 근사적으로 표현한 것으로써 각각의 단락 전송선(stub)의 길이에 해당하는 l_1, l_2 및 두 단락 전송선을 연결하는 전송선의 길이 l_b 는 정상파 조건을 대략적으로 만족한다.

$$l_1 + l_2 + l_b = n\lambda/2, \quad n=1,2,3\dots$$

정상파가 형성되면 임의의 부하 임피던스 Z_L 이 변환된 임피던스 V_2/I_2'' 와 특성 임피던스 V_1/I_1 을 갖는 지점을 찾을 수 있으며 이때 전압과 전류의 위상차가 반드시 90° 는 아니므로 l_1 및 l_2 를 다소 변화시킬 필요가 있다. 부하 전압, 전류가 $U_L=(V_L, I_L)$ 일 때 특성 임피던스가 Z_0 인 길이 l 의 전송선을 지난 곳에서의 전압, 전류를 $U=(V, I)$ 라 하면,

$$U = T(Z_0, A)U_L$$

$$T(Z_0, A) = \begin{pmatrix} \cos 2\pi A & jZ_0 \sin 2\pi A \\ j\frac{1}{Z_0} \sin 2\pi A & \cos 2\pi A \end{pmatrix}$$

과 같이 쓸 수 있다. $A=fl/\beta$ 는 전송선에서의 파장으로 규격화된 길이이며 통상적인 비유전체 가스 매질 전송선에서 위상속도 $v=c$ 이다. $I_2=I_2'+I_2''$ 이고 $I_2'=V_2/Z(l_2)=V_2[jZ_0 \tan(2\pi A_2)]^{-1}$ 이므로 $U_2=(V_2, I_2)$ 는 $U_2''=(V_2, I_2'')$ 에 대해 다음과 같

이 써진다.

$$U_2 = S(Z_0, A_2)U_2''$$

$$S(Z_0, A_2) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{jZ_0 \tan 2\pi A_2} & 1 \end{pmatrix}$$

이를 전체 네트워크에 대해 종합하여 $U_1=(V_1, I_1)$ 에 대해 쓰면

$$U_1 = S(A_1)T(A_b)S(A_2)T(A_f)U_L$$

이다. 입력 임피던스는 $Z_1=V_1/I_1$ 이고 정합 조건은

$$R_e[Z_1(A_1, A_2)] = Z_0$$

$$I_m[Z_1(A_1, A_2)] = 0$$

이므로 A_1 과 A_2 를 찾아내어 정합을 이루게 된다.

한편 그림 3-2-105와 같이 단락 전송선의 길이를 기계적으로 변화시키지 않고 유전율이 다른 매질을 전송선의 사이에 삽입함으로써 단락 전송선의 전기적 길이를 변화시킬 수 있다. 유전율이 다른 유체 매질을 길이 l_1 만큼 채우고 전체 길이를 l_1+l_g 로 유지하는 stub을 V_2 노드의 stub에 대체하는 경우, stub 입력에서의 $U_2'=(V_2, I_2')$ 은 단락 경계조건 $U_t = (0, I_t)$ 와 $A = fl_1/v_1$, $v_1^2 = 1/\epsilon_r c^2$ 에 대해 다음과 같이 써진다.

$$U_2' = T(Z_{0g}, A_g)T(Z_{01}, A_1)U_t$$

$$= \begin{pmatrix} E & jF \\ jG & H \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ I_t \end{pmatrix}$$

Z_{0g} 는 비유전체 전송선의 특성 임피던스이고 A_g 는 비유전체 전송선의 규격화된 길이이다. I_2' 을 다음과 같이 구하고

$$I_2' = \frac{V_2}{Z(V_2, I_2)}$$

$$= -\frac{jH}{F} V_2$$

$I_2=I_2'+I_2''$ 을 이용하면 액체 매질 효과가 포함된 U_2 를 U_2'' 에 대해 구할 수 있다.

$$U_2 = S_{21}(Z_{01}, A_1)U_2''$$

$$S_{21}(Z_{01}, A_1) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -jH/F & 1 \end{pmatrix}$$

이제 S_{21} 과 S_{22} 를 비교하여 A_2 에 대해 풀면 유체 매질의 길이 변화에 따른 전기적 길이 변화를 계산할 수 있다.

그림 3-2-113은 계산 결과를 나타낸다. 가로축은 전체 stub 길이에 대해 유체가 차지하는 길이의 비율을 나타내며, 세로축은 유체 효과가 포함된 stub의 전기적 길이 변화이고 A_0 는 유체가 없을 때 stub 전체의 길이를 진공 파장으로 규격화한 값으로 유체 stub의 기계적 길이를 나타낸다. 사용된 유체는 $\epsilon_r = 2.72$ 의 silicon oil로서 $Z_{0l} = \epsilon_r^{-1/2} Z_{0g} = 30.317 \Omega$, $Z_{0g} = 50 \Omega$ 이고 $v = 0.606c^{-1}$ 이다. 전체적으로 A_0 가 클수록 가변 효과가 크게 나타난다. $A_0=0.1$ 일 때의 가변효과는 미미하며 $A_0>0.4$ 일 때는 특정 유체 높이의 변화에 대해 가변 효과가 나타나지 않는 평평한 영역이 그렇지 않은 영역 사이에 끼여있는 것을 볼 수 있다.

㉔. 유체 전송선 동조기의 설계와 제작

㉔. 유체의 성질

사용된 유체는 Shinetsu사의 실리콘 오일 KF96-50(디메틸폴리실록산)이다. KF96-50은 무색 투명하고 점성이 있는 유체이다. 본 유체의 주요한 특성은 다음과 같다.

비중(25℃)	0.960
점도(25℃)	50mm ² /s
인화점	300℃ 이상
비열(25℃)	0.36cal/g · °C
열전도율(25℃)	3.7 × 10 ⁻⁴ cal/cm · sec · °C
비저항*	1 × 10 ¹⁴ Ω · cm 이상
절연강도*	50kV/2.5mm 이상
유전율(50Hz)*	2.72
유전손실, tan δ *	0.0001 이하

*-수분 50ppm이하

유체 전송선 동조기 또는 위상 변환기를 제작함에 있어서 가장 중요한 요건은 유전율과 유전 손실이다. 위상속도는 $v_1^2 = c^2/\epsilon_r$ 이므로 큰 유전상수를 갖는 물질을 매질로 사용하는 것이 기계적 부피를 줄일 수 있는 방법이나 많은 경우 유전 상수가 커짐에 따라서 유전손실도 커진다. 고전압이 가해지는 전송선의 매질로 유전 손실이 큰 물질을 사용하면 손실량은 매질의 온도를 상승시키게 되고 일반적으로 온도상승은 유전손실을 더욱 증가시키게 되므로 복잡한 냉각장치를 추가해야하는

부담이 있다. 실리콘 오일이 갖는 유전율과 유전손실은 대략 폴리에틸렌 ($\epsilon_r = 2.3, 10^4 \tan \delta < 2$), 폴리스틸렌 ($\epsilon_r = 2.6, 10^4 \tan \delta = 0.7$), 테프론 ($\epsilon_r = 2.1, 10^4 \tan \delta < 2$) 과 비슷한 정도이다. 제작사의 데이터 표에서 100MHz 이하에서 사용하는 경우 100ppm 이하의 수분함량과 100°C이하의 온도를 유지하면 유전손실에 큰 변화가 없음을 확인할 수 있다. 제작사의 자료에 의하면 사용되는 50CS의 경우 260°C에서 대략 0.1mmHg로서 매우 낮은 값을 나타내고 있으며 사용되는 온도 영역인 100°C 이하에서는 무시할 만큼의 낮은 증기압을 나타내리라 기대된다.

⑥. 장치의 설계.제작

유체 전송선 동조기의 전체 길이는 단락지점으로부터 T junction 까지 4m이며 6⅞" 50Ω, EIA 플랜지 전송선을 이용하였고 (주)한국전자진흥에서 제작되었다. 모든 전송선 부품들은 절연과피 전압을 높이기 위한 최대 3기압의 압력을 견디어야 한다. 유체 동조기는 지면에 대해 수직으로 세워지며 유체는 단락지점인 최하단부에서 유입, 유출되고 overflow 대비 및 가스압력 분배를 위해 최상단에 유체 탱크로 연결된 유출구가 설치되었다. 유체의 높이는 차압계에 의해 측정되며 모터 펌프와 밸브에 의해 조정된다. 차압계와 모터, 그리고 밸브는 연동되어 있어서 궤환 제어에 의해 구동전 설정된 높이로 조절된다.

유체 동조기 각 부분의 고주파 전압을 상세히 측정하기 위해 0.5m 간격으로 8개의 전압 탐침을 설치하였으며, 유전 손실에 의한 온도 상승을 관측하기 위해 2개의 열전쌍을 설치하였다. 유체가 올라갈 수 있는 최대 높이인 3m 높이에는 기화된 유체가 전송선의 내부공간을 따라 이동하는 것을 막기 위해 테프론 막이 설치되었다. 한편 차압계의 초기 지시 값을 보정하고 오동작시 안전을 확보하기 위해 1cm 눈금을 가진 투명한 level viewer를 설치하였다. 그림 3-2-107에 제작된 유체 전송선 동조기의 사진을 나타내었다.

⑦. 유체 배관 및 조절

유체의 배관 및 조절 장치의 개략도는 그림 3-2-108과 같다. 55cm×55cm×80cm 크기의 유체 탱크에 저장된 silicon oil은 펌프와 유량 조절 밸브를 지나 유체 단락 전송선 동조기의 최하단부 단락지점에 유입된다. 유체기둥의 높이를 낮추기 위해서는 모터펌프의 역동작에 의해 동일한 경로를 거슬러 흐르게 된다. 유체의 overflow 발생시 이를 탱크로 다시 회수하고, 유체 높이 변화시 압력 변화를 방지하기 위해 유체 단락 전송기의 최 상단과 유체 탱크를 연결하는 배관을 설치하였다. 이 배관은 외부로부터의 수분 유입을 차단하기 위해 절대적으로 필요한 부분이다. 주 배관은 3기압 이상의 압력을 견디도록 ⅞" 구리 파이프와 폴리에틸렌 호스

를 이용하였으며 차압계의 압력센서로 연결되는 배관은 1/4" 스테인레스 스틸 튜브를 이용하였다. 차압계는 유체 최하단부와 유체가 올라갈 수 있는 최상단부의 압력을 piezoresistive 센서로 측정하여 그 차이를 4~20mA의 신호로 컨트롤러에 전송하는 LG Honeywell사의 ST3000이다. 압력차는 LG Honeywell사의 GH1000 컨트롤러에 의해 유체의 비중을 이용하여 유체 기둥의 높이로 환산되고, 운전자에 의해 설정된 높이와 비교되어 모터의 회전과 역회전 그리고 밸브 조절이 이루어진다. 이 과정은 궤환 제어되며 원하는 경우 궤환 제어를 차단하고 모터의 회전방향 및 밸브량을 수동으로 조작할 수 있다. 조절 밸브는 4~20mA의 아날로그 명령에 의하여 공압으로 밸브량이 조정되는 KOSO사 제품이다. 최대 가변 속도는 1.2cm/sec로서 이 범위 내에서 임의 속도로의 조절이 가능하며, 1mm 이하의 위치설정 정밀도를 갖는다.

④. 특성 시험

Cold test의 일환으로 회로분석기(Hewlett Packard HP4396A)로 측정한 30MHz에서의 유체 전송선 동조기의 입력 임피던스를 그림 3-2-109에 나타내었다. 유체의 높이를 가변함에 따라 -35Ω 에서 35Ω 까지 용량성 또는 유도성 리액턴스를 가지며 이론적 예측과 잘 일치함을 볼 수 있다. 이를 단락 전송선 공식을 사용하여 전기적 길이로 환산한 결과는 그림 3-2-110과 같다. 길이 가변 범위는 2m로서 이론적 예측과 정확히 일치한다. 그림 3-2-106에서의 $A_0=3$ 과 다른 점은 유체 가변 범위 3m에 추가로 1m의 전송선이 직렬로 연결되어 있기 때문에 가변 범위가 4m에서 6m라는 점이다.

설계시 운전중 가변 가능성을 고려한바 있는데, 회로분석기에 의한 관측시 가변에 의한 신호의 왜곡이 나타나지 않았다. 이는 기존 전송선 동조기가 finger stock의 불완전성으로 인해 가변시 심한 신호 왜곡을 주는 현상과 비교할만 하며 유체 동조기의 경우 고전력 인가시에도 임피던스 가변이 가능함을 말해준다. 토카막의 ICH 장치처럼 시간에 따라 변하는 부하를 가지는 설비에서 궤환 제어등을 통해 실시간 임피던스 정합을 가능토록 하기 위한 노력이 다각도로 진행중이며, KSTAR 토카막과 같이 준 연속운전을 목표로 하고 있는 경우 실시간 임피던스 정합의 중요성은 더욱 커진다 하겠다. 그러나 기존의 전송선 동조기를 이용하는 경우 동조기 자체의 제어를 통해 실시간 임피던스 정합을 하는 것은 거의 불가능한데, 최대 ~1kA의 고주파 전류가 동축관의 표면에 흐르는 동안 finger stock의 접점을 미끄러지게 하면 국부적 발열에 의해 finger stock과 도체 표면 모두에게 심각한 손상을 줄뿐만 아니라, 회로 분석기에 의한 측정시 신호의 왜곡현상에서 추정할 수 있는 것과 같이 원활한 전력전송이 불가능해진다. 유체 전송선 동조기는 동작 원리 자체에 전기적 접촉의 변화를 포함하고 있지 않다.

제작된 유체 단락 전송선 동조기의 기계적 길이는 4m이며 30MHz의 주파수에서

4~6m의 전기적 길이 가변폭을 갖는다. 이와 동일한 사양의 기존 단락 전송선 동조기는 6m의 기계적 길이가 필요하다. 유체 배관등의 설비가 필요한 대신 획기적인 부피 축소를 이룰 수 있는 것이다.

그림 3-2-111은 고주파 시험설비를 통해 고주파 전력을 가했을때의 전압 탐침을 이용해 측정한 전압과 이 자료에 근거한 유체 전송선 동조기 전체의 전압 분포를 나타낸다. 전압 최고점에서 약 44kV이며, 이보다 낮은 전압 조건에서 유체 단락 전송선 동조기는 아무런 문제점을 나타내지 않았다.

②. 유체를 이용한 위상 가변기(Phase Shifter)의 개발

㉞. 유체 위상 가변기

위상 가변기(phase shifter)는 단락 전송선(shorted stub)과 마찬가지로 임피던스 정합에 사용되며, 또한 임의로 전송 고주파의 위상을 변환하는데 사용된다. 동축선을 사용한 위상 가변기는 일정한 위상속도에 대해 동축선의 길이를 변화시켜 원하는 위상의 고주파를 얻는 방법이 기본적인이다. 또한 유체 단락 전송선 동조기와 마찬가지로 전송선의 사이에 상이한 유전율의 매질을 일정한 길이로 삽입함으로써 전송선의 기계적 길이를 고정시킨 상태에서 위상속도를 변화시켜 위상을 변화시킬 수 있다

유전체를 삽입한 유체 위상 가변기의 기본 구조를 그림 3-2-112에 나타내었다. L_1 , L_2 , l_b 가 위상 가변기의 기계적 길이이며 L_1 내에서 l_{11} , L_2 내에서 l_{21} 이 유전체가 차지하는 길이이다. l_b 는 L_1 과 L_2 의 유전체를 분리하기 위한 비유전체 전송선이어서 두 개의 독립적인 유체 위상 가변기를 직렬로 더한 것과 같은 구조를 가지고 있는데, 위상속도가 상이한 부분의 길이뿐만 아니라 위치를 변화시키는 효과를 가져오므로 보다 넓은 범위의 임피던스 변환효과를 낳는다.

유체 위상 가변기는 통상적인 위상 가변기와는 달리 VSWR=1인 matched line 상에는 삽입할 수 없는데 이는 비유전체와 유전체 사이의 경계면에서 반사파가 형성되기 때문이다. 비유전체 전송선의 특성 임피던스가 Z_{0g} 이고 유전체 전송선의 특성 임피던스가 Z_{0l} 이면

$$Z_{0l} = \frac{Z_{0g}}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

이고 반사계수 ρ 는

$$\rho = \frac{Z_{0g} - Z_{0l}}{Z_{0g} + Z_{0l}}$$

이므로 $\epsilon_r = 2.72$ 의 silicon oil을 사용하면 $\rho \sim 0.25$ 로서 무시할 수 없는 값이다. 그러나 일반적인 고주파 전송 장치에서 위상 가변기를 matched 영역에서 사용하는 경우는 거의 없으며 unmatched 영역에서는 새로운 반사파의 존재가 문제되지 않는

다. 파장으로 규격화된 길이 $A(=l/\lambda)$ 와 특성 임피던스 Z_0 인 전송선에서 부하 전압 및 전류 $U_L(V_L, I_L)$ 과 입력 전압 및 전류 $U(V, I)$ 의 관계는 다음과 같다.

$$U = T(Z_0, A)U_L$$

$$T(Z_0, A) = \begin{pmatrix} \cos 2\pi A & jZ_0 \sin 2\pi A \\ j\frac{1}{Z_0} \sin 2\pi A & \cos 2\pi A \end{pmatrix}$$

따라서 그림 3-2-112와 같이 5개의 전송선이 직렬로 연결된 경우

$$U = T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 U_L$$

$$T_1 = T_1(Z_{0g}, A_{1g})$$

$$T_2 = T_2(Z_{0l}, A_{1l})$$

$$T_3 = T_3(Z_{0g}, A_b)$$

$$T_4 = T_4(Z_{0l}, A_{2l})$$

$$T_5 = T_5(Z_{0g}, A_{2g})$$

이고 $U(V, I)$ 에 대해 입력 임피던스 $Z=V/I$ 를 구할 수 있다. 여기에서 첨자 붙은 A 는 각각의 전송선 부분의 길이를 해당 매질 속 파장으로 규격화한 값이며 Z_{0g} 는 비유전체 매질 전송선의 특성 임피던스, Z_{0l} 은 유체 전송선의 특성 임피던스이다. 전체 위상차는

$$2\pi(A_{1g} + A_{1l} + A_b + A_{2l} + A_{2g})$$

$$= 2\pi \left\{ \left(\frac{\beta}{\beta_1} - 1 \right) \left(A_{01} \frac{l_{1l}}{L_1} + A_{02} \frac{l_{2l}}{L_2} \right) + A_{01} + A_{02} + A_b \right\}$$

이어서 두 위상 변환 부분 각각에서 유체가 차지하는 길이의 비율 l_{1l}/L_1 및 l_{2l}/L_2 에 대해 선형이다. A_{01} 과 A_{02} 는 각각의 위상 변화 부분의 기계적 길이 L_1, L_2 를 파장으로 규격화한 값이다. 그림 3-2-113은 주파수 $f=30\text{MHz}$ 에서 계산된 위상차와 제작된 유체 위상가변기에서 측정된 위상차를 나타낸다. A_0 와 A_1 은 동일하게 제작되었으며 측정을 위한 콘넥터 등의 길이가 포함되었다. $v_1 = 0.606c$ 이며 $l_b = 1.01\text{m}$ 이다.

㉔. 유체 위상 가변기의 설계와 제작

㉑. 유체의 성질

유체 위상 가변기에 사용된 유체는 50Hz에서 유전율 2.72와 유전손실이 0.001이 하인 Shinetsu의 실리콘 오일 KF96-50이다. 유체 위상 가변기에 사용된 실리콘 오일의 주요특성과 성질은 유체 전송선 동조기에서 설명하였다.

㉒. 장치의 설계 및 제작

유체 위상 가변기는 내관 99.3mm 구리재질의 전송선과 외관 228.6mm인 알루미늄 재질로 된 9-3/16" 50Ω 플렌지 전송선을 이용하여 유체를 가두어 유체의 위치를 제어 할 수 있는 3m 길이의 주 전송선 2개와 이 전송선을 가로, 세로 길이가 40cm인 Elbow 2개를 이용하여 결합시켰다. 그리고 20cm 길이의 전송선을 주 전송선 사이에 결합시켜 유체위상변화기의 조립 및 해체 작업시 주 전송선의 유체가 외부에 노출되지 않게끔 설계 제작하여 유체의 오염을 막게 하였다. 유체 위상 가변기는 높이 조절이 가능한 받침대 위에 설치하여 다른 전송선과 결합 시 높이를 미세 조정토록 하였다

사용된 부품들은 절연 파괴 전압을 높이기 위한 최대 3기압의 압력을 견뎌야 한다. 유체 위상가변기는 두 개의 주 전송선이 서로 마주보는 형태로 수직으로 세워지며 각각 주 전송선의 최하단부에서 유체의 유입 및 유출되며 overflow를 대비하여 주 전송선의 최상단에 유체탱크로 연결된 유출구가 설치되었다. 유체위상변화기의 유체 탱크는 유체전송선 동조기의 유체탱크와 공유하여 쓰고 있다. 유체의 높이 조절은 모터펌프로 제어하는데 유체 전송선 동조기와 공동으로 모터펌프를 이용하고 있다. 유체의 위치는 1cm 간격의 눈금을 가진 플라스틱 재질의 투명한 level viewer로 판단하며 3기압에도 충분히 견딜 수 있도록 스텐레스 재질의 파이프를 level viewer를 덧씌웠다.

각각의 주 전송선에는 고주파 전압을 측정하기 위한 5개의 전압 탐침이 하단부로부터 50cm 간격으로 설치하였으며, 유전손실에 의한 온도 상승을 관측하기 위한 열전쌍을 온도가 가장 높게 올라가리라 추측되는 하단부에 1개를 설치하였다.

제작한 유체 위상 가변기 각 부품의 도면과 특성은 아래와 같다

그림 3-2-114는 9-3/16" 유체 위상 가변기의 외형도 및 실제 치수를 나타낸다. 유체 위상 가변기는 좌우가 대칭인 구조로 이루어졌으며 한쪽의 구조는 전송선과 결선을 위한 가로, 세로의 길이가 각각 40cm의 Elbow와 유체가 들어있는 300cm 주 전송선, 유체 위상 가변기를 설치 및 해체 시 유체가 외부로 노출되는 것을 막아주기 위한 20cm의 두 개의 전송선이 쌍을 이루고 있으며 두 개의 구조물을 연결

해주는 Elbow의 형태로 이루어졌다.

유체가 들어있는 300cm의 주 전송선에는 고전압을 측정할 수 있는 전압 탐침이 전송선 하단으로부터 50cm의 간격으로 5개가 설치되었으며 유체의 유입, 유출구가 하단부에 설치되었고, 유체의 온도를 측정할 수 있는 열전쌍도 역시 하단부에 설치하였다. 투명한 플라스틱 재질로 level viewer를 설치하여 유체의 높이를 직접 보면서 유체의 높이를 제어할 수 있게 하였다. 제작된 유체 위상 가변기의 사진은 그림 3-2-115에 나타내었다.

㉔. 유체 배관 및 조절

유체의 배관 및 조절장치의 개략도는 유체 전송선 동조기에서 보여준 그림 3-2-108과 동일하며 현재 유체 위상 가변기의 위치가 고정형태가 아니라 실험 목적상 위치를 이동시키면서 실험을 수행하고 있기 때문에 주 배관은 3기압의 압력에 견디는 폴리에틸렌 호스를 이용하였다.

유체제어 가변 속도는 현재 유체 위상 가변기의 위치를 이동시켜가며 실험을 수행하는 관계로 모터와 유체 위상 가변기의 배관 선이 상당히 길어져 유체가변 속도는 상당히 늦으나 유체 위상 가변기의 위치가 고정되어 배관 선이 짧아지면 0.2cm/sec의 범위 내에서 임의의 속도로의 조절이 가능하며, 1mm이하의 위치 설정 정밀도를 갖는다.

㉕. 특성 시험

제작된 전압 탐침의 주파수 변화에 따른 전압 탐침의 이득은 10MHz ~ 50MHz에서 -103.5dB ~ -90dB의 이득 특성을 가지며 특성곡선은 그림 3-2-116에 나타내었다. 유체 위상 가변기의 정재파비는 10MHz - 100MHz의 범위에서 1.06 이하의 특성을 가지며 ICRF 가열기가 사용되는 60MHz이하의 주파수 범위에서는 1.03 이하의 특성을 가진다. 주파수 변화에 따른 정재파비의 특성 그래프는 그림 3-2-117에 나타내었다.

Cold Test의 일환으로 회로분석기(Hewlett Packard HP4.394A)로 측정한 유체 위상 가변기의 위상차를 그림 3-2-118에 나타내었다.

유체의 높이를 가변 함에 따라 최대 130°의 위상변화를 가지며, 길이 가변효과로 계산하면 가변의 범위는 3.6m로 계산의 결과와 일치한다. 4m인 동축관을 사용하면 가변길이가 5m 이상 된다.

제작된 유체 위상 가변기의 기계적 길이는 ~9.2m이며 30MHz 주파수에서 9.2 ~ 12.8m의 전기적 길이 가변 폭을 갖는다. 이는 동일한 사양의 기존 위상 가변기가 12.8m의 기계적 길이를 필요로 하는 것과 비교하여 기계장치의 크기를 작게 할 수 있다.

그림 3-2-119는 고주파 시험설비를 통해 고주파 전력을 가했을때의 전압 탐침을 이용해 측정된 전압과 이 자료에 근거한 유체 전송선 동조기 전체의 전압 분포를 나타낸다. 전압 최고점에서 약 29kV이며, 이보다 낮은 전압 조건에서 유체 위상 변환기는 아무런 문제점을 나타내지 않았다.

유체의 온도는 고전압 인가시간이 짧아 변화가 없었다. 인가시간이 길어질 때, 유체에서의 RF 유전손실 출력은 다음과 같이 예측할 수 있다. RF 전압 V_{RF} 가 반경 a 와 b 인 내부와 외부 도체사이에 인가될 때, 전장 $E(r,z)$ 는 다음과 같다.

$$E(r, z) = \frac{V_{RF}}{\ln(b/a)r} \frac{1}{r} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_L} z\right)$$

RF 유전손실, P_L 는 전장을 반경방향과 축방향으로 적분하여 구한다.

$$\begin{aligned} P_L &= \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r \tan \delta \omega \int_0^z \int_a^b 2\pi E^2(r, z) dr dz \\ &= \pi \epsilon_0 \epsilon_r \tan \delta \omega \frac{V_{RF}^2}{\ln(b/a)} \left(\frac{1}{2} z - \frac{\lambda_L}{8\pi} \sin\left(\frac{4\pi}{\lambda_L} z\right) \right) \end{aligned}$$

윗식에서 ϵ_r 은 유전율 상수, $\tan\delta$ 는 유전손실, 그리고 λ_L 은 유체에서의 RF 파장을 나타낸다. 유체의 표면 위치는 RF 파장의 1/4 되는 곳이고 따라서 P_L 은

$$P_L = \frac{\pi}{8} \lambda_L \epsilon_0 \epsilon_r \tan \delta \omega \frac{V_{RF}^2}{\ln(b/a)}$$

로 주어진다. 온도증가로(20°C-60°C) 인한 유전손실, $\tan\delta$ 의 변화는 거의 없다고 보고된 바 있다.[11] 따라서 $\tan \delta = 2 \cdot 10^{-4}$, 주파수가 30 MHz, $\lambda_L = 6.06$ m, $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$, $\epsilon_r = 2.72$, $\ln(b/a) = 0.835$ 를 윗식에 대입하고, 유체가 단열하다는 가정하에 RF 전압이 5분 인가될 때의 온도상승은 유체의 열용량 0.36 cal/g를 고려하면

$$T_{liq} = 0.012 V_{RF}^2$$

으로 된다. 전압 V_{RF} 가 35 kV일 때, RF 전압에 의한 온도상승은 약 15°C이다. 유체의 증기압이 260°C에서 대략 0.1mmHg 이므로 온도증가가 100°C 이하에서는 무시할 만큼의 낮은 증기압이다.

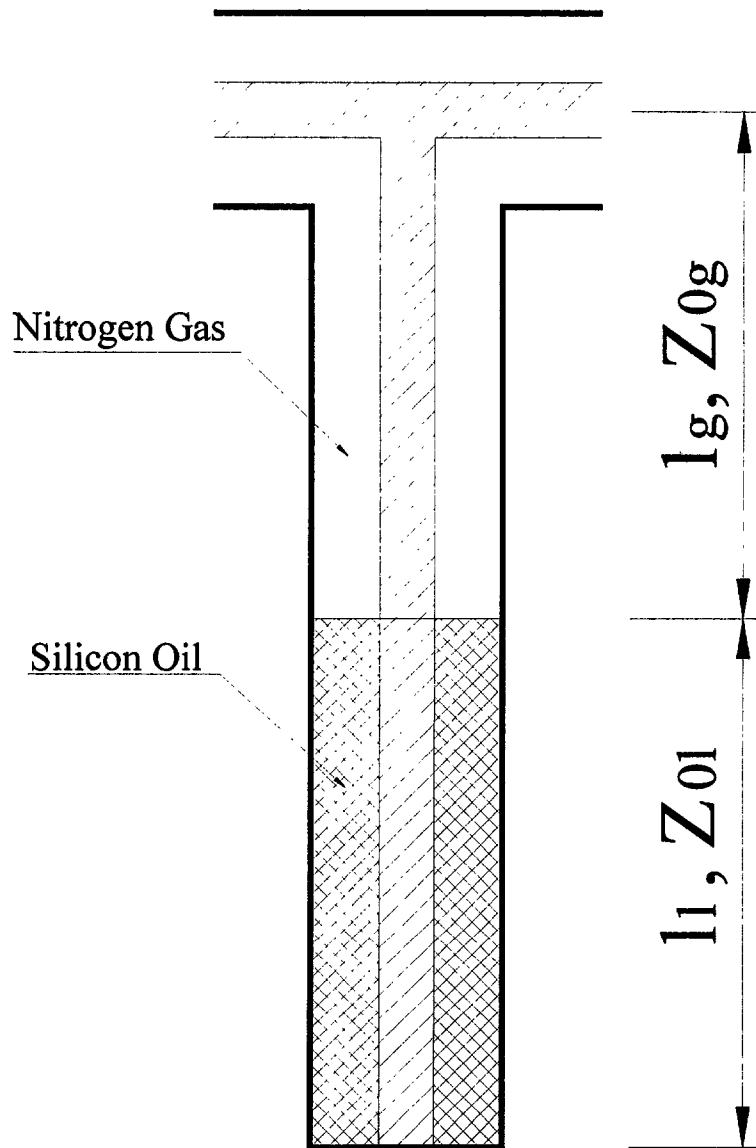


그림 3-2-105. 유체 stub의 길이 조정

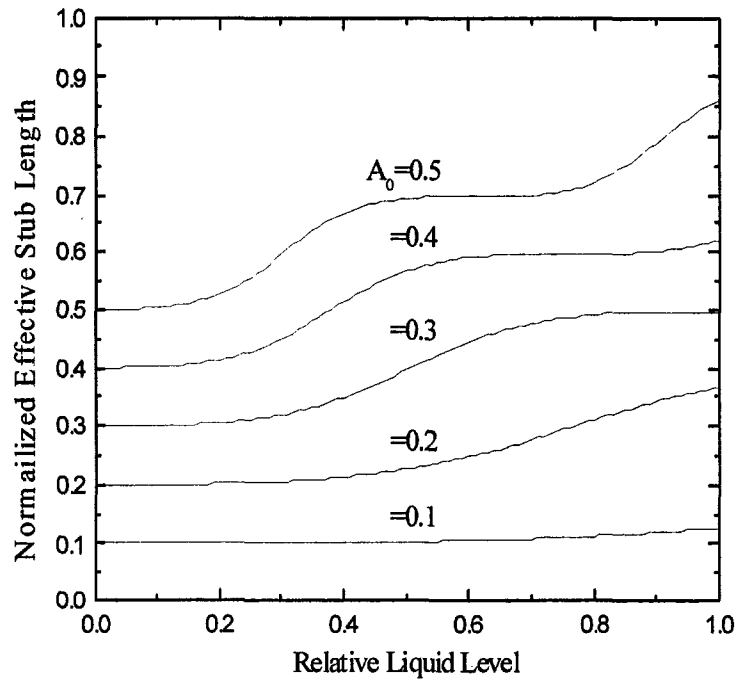


그림 3-2-106. 유체 높이 변화에 대한 stub의 전기적 길이 변화

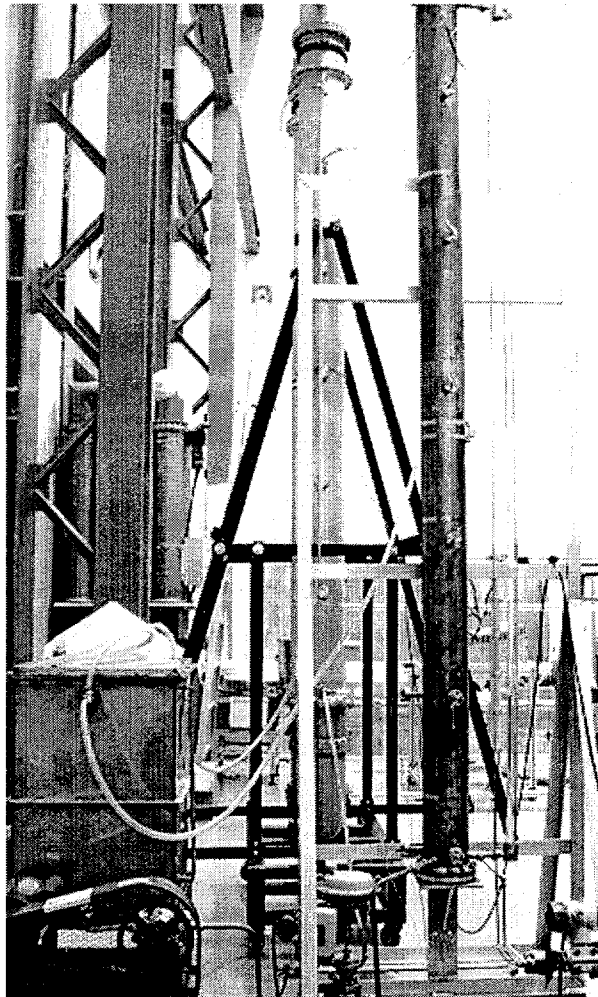


그림 3-2-107. 제작된 6" 단락 전송선 동조기

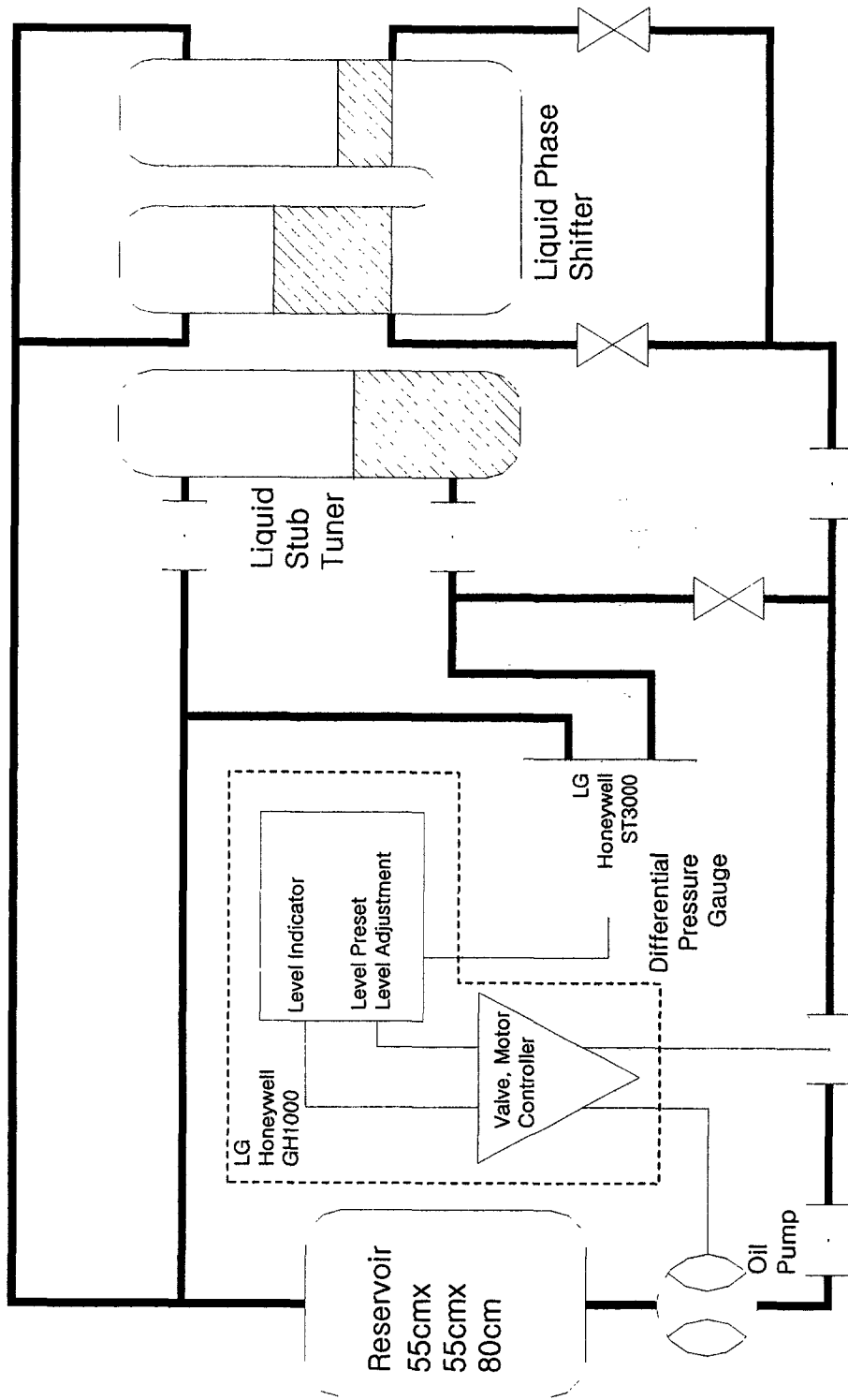


그림 3-2-108. 유체 배관 및 조절 장치

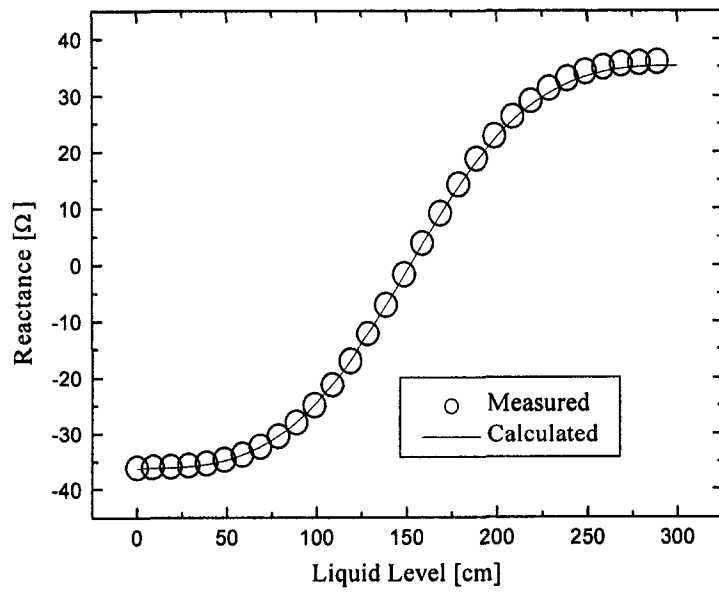


그림 3-2-109. Variation of shorted stub reactance v.s. liquid level

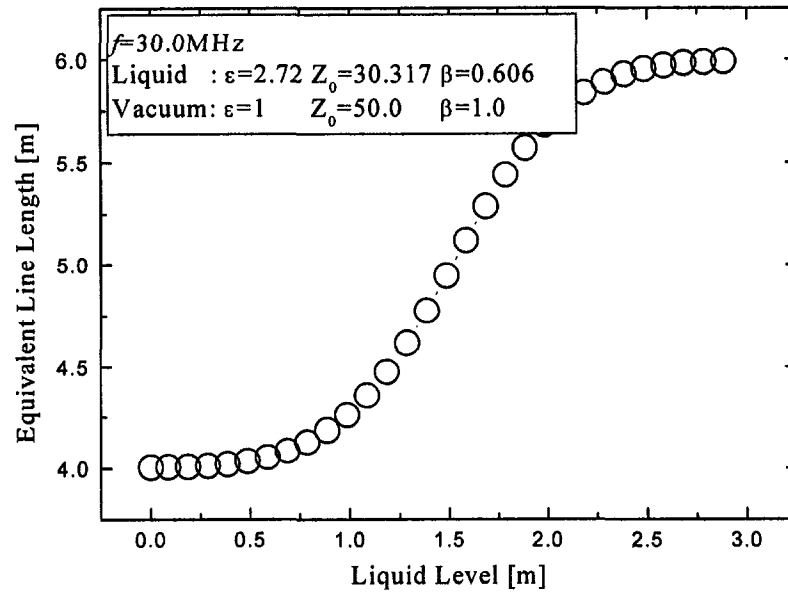


그림 3-2-110. Equivalent line length v.s. liquid level

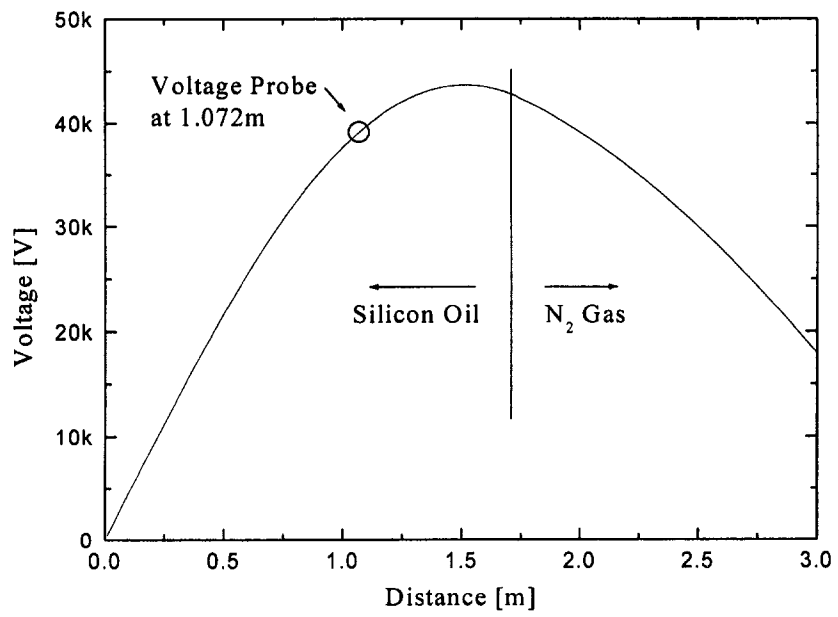


그림 3-2-111. Measured voltage distribution along the line

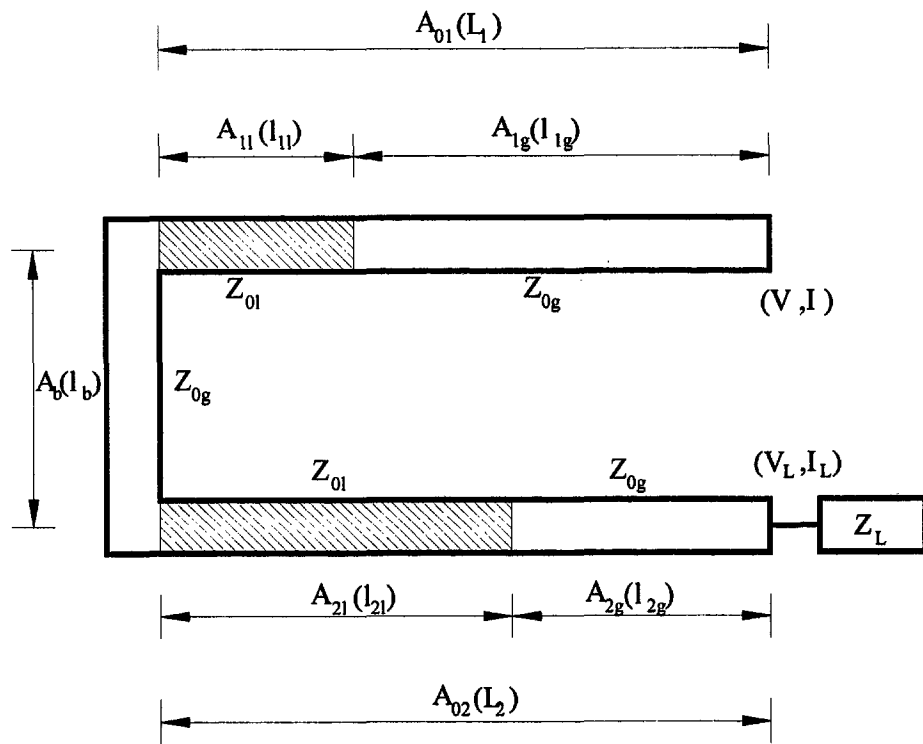


그림 3-2-112. 유체 위상 가변기의 길이 조정

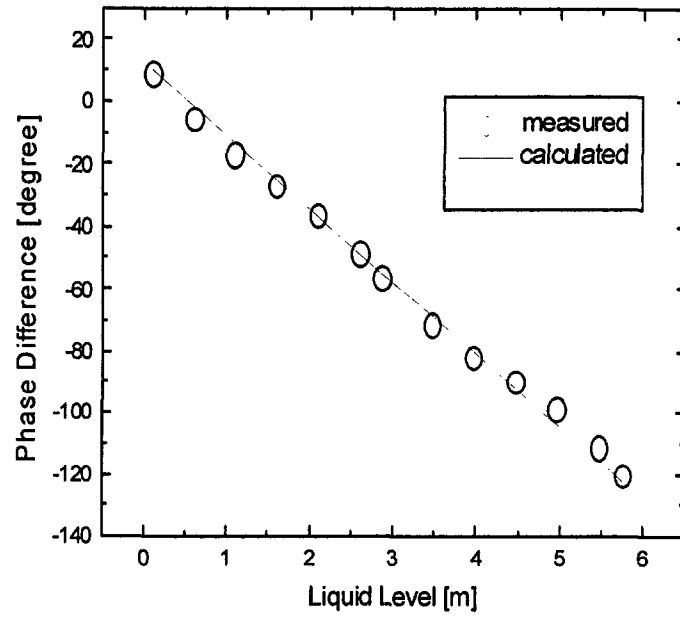


그림 3-2-113. 유체 길이 변화에 따른 위상 변화

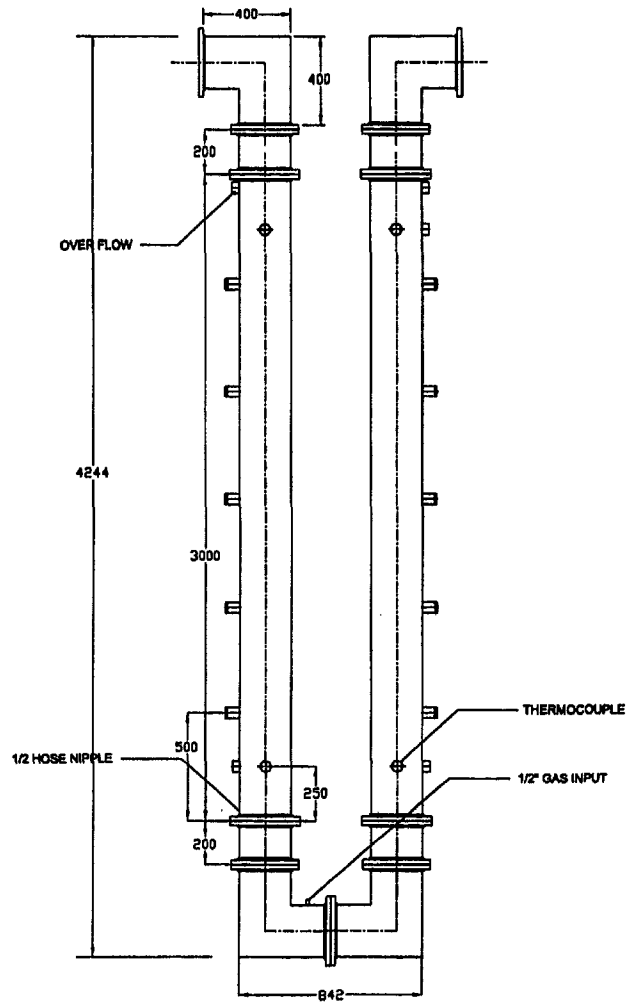


그림 3-2-114. 유체 위상 가변기의 외형도

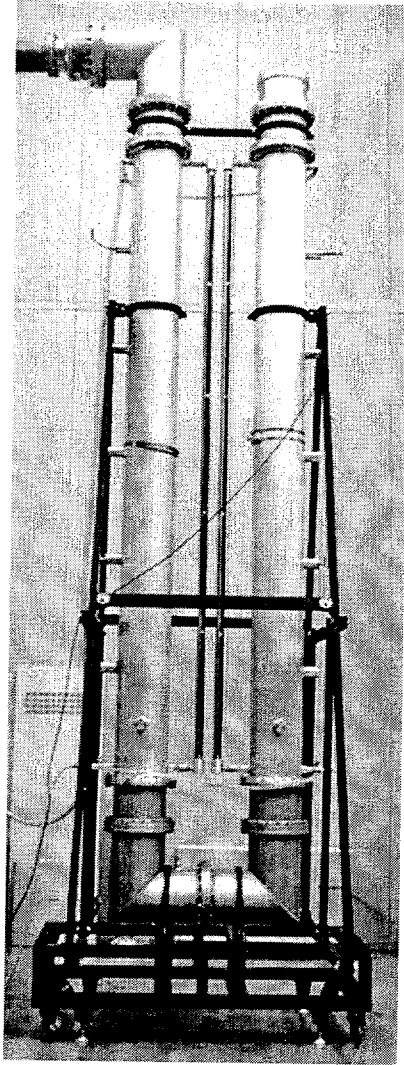


그림 3-2-115. 제작된 유체 위상 변환기

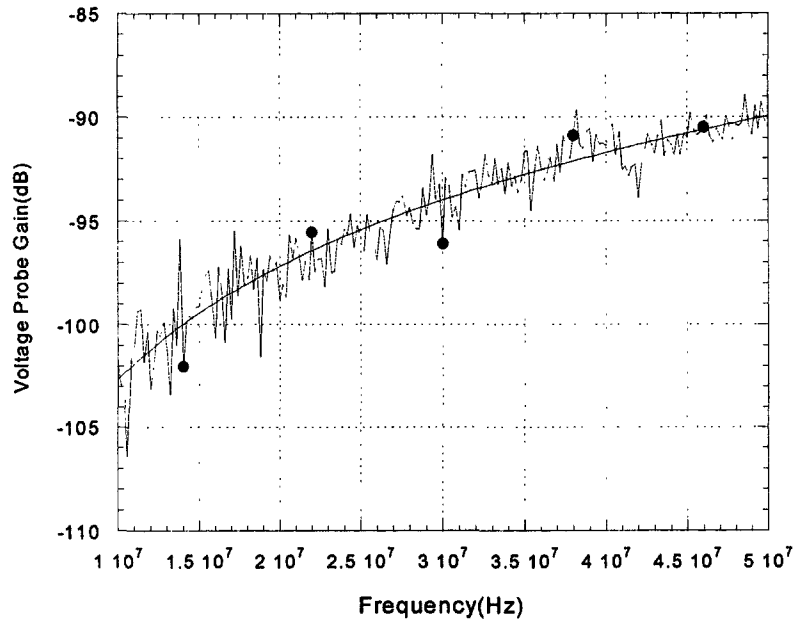


그림 3-2-116. 주파수 변화에 의한 전압 탐침 이득

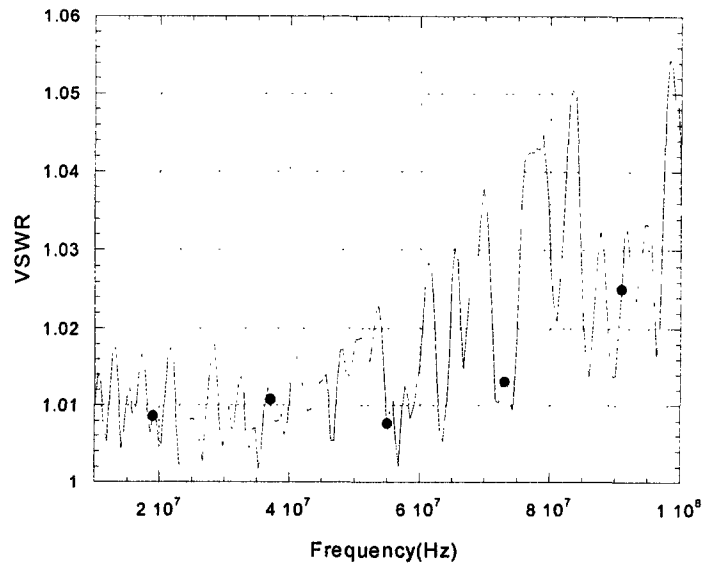


그림 3-2-117. 주파수 변화에 의한 전송선의 정재파비

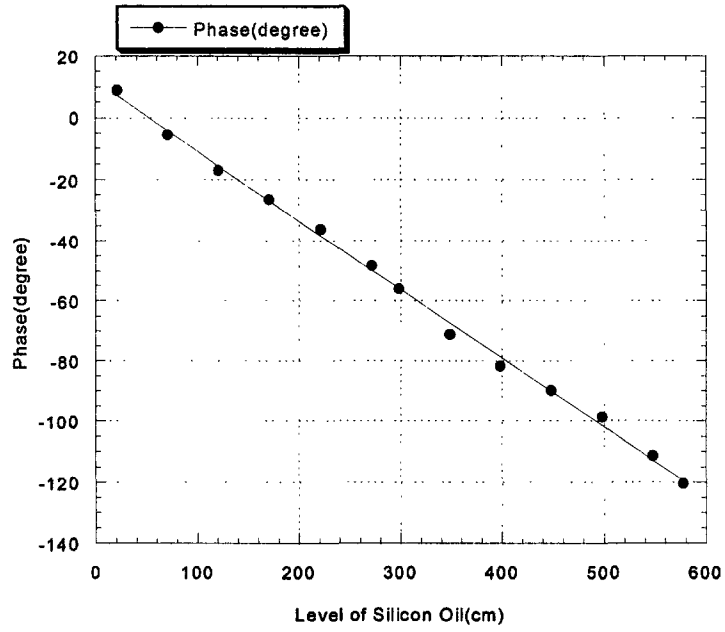


그림 3-2-118. 유체 위치변화에 의한 위상차

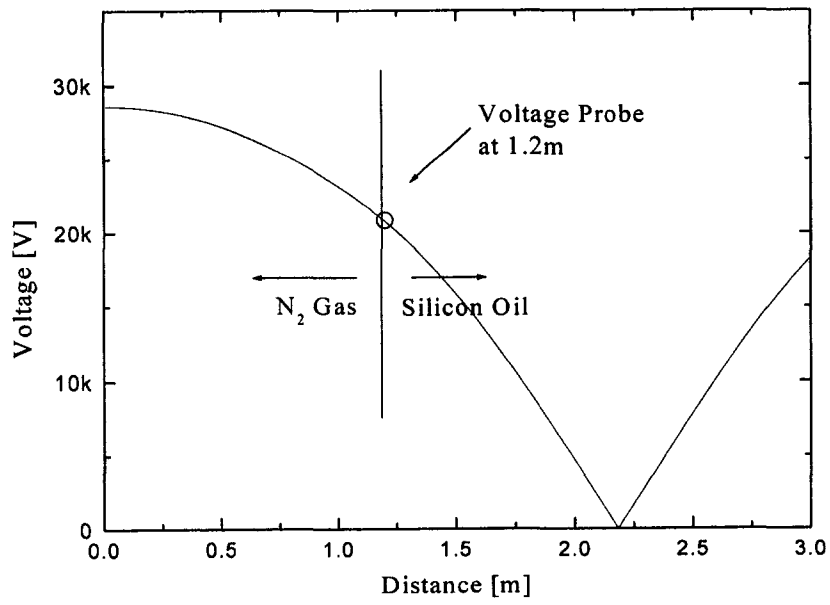


그림 3-2-119. Measured voltage distribution along the line

(다) 수냉각판 제작 및 특성시험

고출력의 고주파를 안테나로 전송하기 위한 전송부품은 고전압 및 고전류에서 장시간 절연파괴가 일어나지 않아야 한다. 고출력의 고주파를 전송선을 통하여 안테나에 전송할 때 전송선에서 전력손실에 의한 온도상승이 발생한다. KSTAR ICRF 장치의 경우 전송선로당 2MW의 고주파를 전송해야 하며 이때 ohmic loss에 의한 온도 상승은 184 °C에 이른다. 온도상승은 100m이상 되는 전송선로에 기계적 결합을 유발할 뿐 아니라 고주파 정합 조건을 변화시킨다. 이를 방지하기 위해 전송선의 내관에 대한 냉각이 필수적이며, 냉각 방법으로는 강제 송풍 방식과 냉각수에 의한 방법이 있다. 본 연구에서는 KSTAR ICRF 장치의 주 전송선로를 구성할 9-3/16", 50Ω 전송선로에 대해 연결이 가능하고 내관을 냉각수에 의해 냉각할 수 있는 전송선로를 개발하였다. 장치는 최대 33kV, 680A의 출력 시험에서 절연파괴가 일어나지 않았으며 인입구 압력 2.8기압, 유량 12000LPM에서 냉각수 누수가 없었다. 전송선의 VSWR은 30 ~55MHz의 범위에서 1.03이하로 우수한 특성을 나타내었다. KSTAR ICRF 장치에 요구되는 수냉식 고주파 전송선을 성공적으로 개발하였다.

① 수냉식 고주파 전송선 제작 및 고주파 시험 설비

수냉식 고주파 전송선은 9 3/16", 50Ω EIA 플렌지 전송선을 이용하여 전송선 내관 냉각을 위한 냉각수 인입구와 출구를 가지며 동축 전송선의 내관에 전기적 연결을 위한 multi-contact 사의 finger와 냉각수의 누수 방지를 위한 이중 O-ring의 구조를 가진다. 고주파 전송선 냉각장치는 절연파괴 전압을 높이기 위해 최대 3기압의 압력을 견딜 수 있도록 제작되었으며 냉각수의 누수 방지를 위하여 3기압에서 누수가 없도록 하였다.

수냉식 고주파 전송선의 가압 및 누수시험은 내관과 외관에 각각 독립적으로 3기압의 공기압을 가압하여 공기의 누수 여부로 확인하였다. 수냉식 고주파 전송선은 각 부분의 고주파 전압을 측정하기 위해 3개의 전압탐침을 설치하였으며 전송선 내관의 온도측정을 위한 포트 및 전송선 내관 및 외관사이의 습도측정을 위한 포트를 설치하였다. 제작된 고주파 전송선 냉각 장치의 구조는 그림 3-2-120에 나타내었다.

그림 3-2-121은 수냉식 고주파 전송선의 내관 접촉부의 사진으로 내관의 냉각수 누수 방지를 위한 이중 구조의 O-ring 과 전기적 결합을 위한 Multi-contact 사의 finger로 이루어졌다.

② 특성 시험

회로분석기(HP4396A)를 이용하여 측정한 수냉식 고주파 전송선의 VSWR은 25 - 55MHz의 범위에서 1.03이하이며 측정한 결과는 그림 3-2-122에 나타내었다. 설치된 전압탐침은 30MHz에서 80dB의 결합도를 가지며 주파수에 변화에 따른 전압탐침의 특성은 그림 3-2-123에 나타내었다. 사각표시는 실제 측정한 결과이고 직선은 선형 fitting한 값이다. 제작된 전압탐침기로 측정되는 출력전압은

$$V_0 = -j\omega CRV \quad (1)$$

와 같이 고주파의 주파수와 전압에 비례하는 값을 가진다. 여기서 ω 는 동작 각주파수, C 는 결합 캐패시턴스, R 은 터미네이션 저항이며 V 전송선로 상의 전압이다.

수냉식 고주파 전송선에 대한 고주파 시험 설비는 그림 3-2-124와 같으며, 100kW 고주파 증폭기와 Dielectric 사의 9-3/16", 50 Ω 이중단락 전송선 동조기 및 위상변환기로 이루어져 있으며 전송선에서의 전압측정을 위해 전압탐침 및 전력 측정을 위해 Directional Coupler(방향성 결합기)를 설치하였다. 절연전압을 높이기 위해 동조기부터 위상변환기까지는 질소기체를 2kgf/cm²으로 충전하였다. 그림 3-2-125는 실험실에 설치한 수냉식 고주파 전송선의 시험 설비를 나타내었다.

그림 3-2-126은 고주파 시험설비를 통해 고주파 전력을 가했을 때의 수냉식 고주파 전송선에 설치한 전압탐침을 이용해 측정한 전압과 이 자료에 근거한 수냉식 고주파 전송선 전체에서의 전압분포를 나타낸다. 원형 표시는 측정된 신호이고 직선은 이론부터 계산된 전압분포이다. 거리는 수냉식 고주파 전송선의 개방된 끝 지점에서부터 표시하였고 최고 43kV의 전압과 870A의 전류가 측정되었다.

그림 3-2-127은 수냉식 고주파 전송선에 고출력을 가한 후 측정한 전압 및 전력을 나타내었다. 약 300초 동안에 43 kV의 고전압 실험에서 절연파괴가 발생하지 않았다. 그림 3-2-128에서 $V_{probe\#7}$ 과 $V_{probe\#4}$ 는 그림 3-2-129에서 전압탐침의 No 1과 No 2에서 측정한 결과이고 $P_{forward}$ 와 $P_{reflected}$ 는 directional coupler에서 측정한 값이다.

그림 3-2-128은 수냉식 고주파 전송선에 고출력을 가한 후 전송선 내관에 수냉을 하지 않은 상태에서의 전송선 내관의 온도를 적외선 카메라를 이용하여 측정한 그림이다. 전송선에 7kW의 고주파 출력을 180초 전송하였을 때 전송선 내관의 온도는 20 °C에서 70 °C로 급속히 증가하는 모습을 보여 전송선에 냉각이 없는 상태에서 고출력 또는 장 펄스 출력 전송에 어려움이 있으리라 예상된다.

그림 3-2-129는 전송선의 내관에 냉각수를 이용하여 냉각을 하면서 9kW의 고주파 출력을 300초 전송하였을 때 전송선 내관의 온도를 나타낸 그림이다. 전송선 내관을 냉각을 하였을 때에는 전송선 내관의 온도 증가는 20 ℃에서 32 ℃로 안정적인 모습을 보여 고출력, 장펄스로 고주파 실험시에는 전송선의 내관의 냉각은 필수적이라 예상된다.

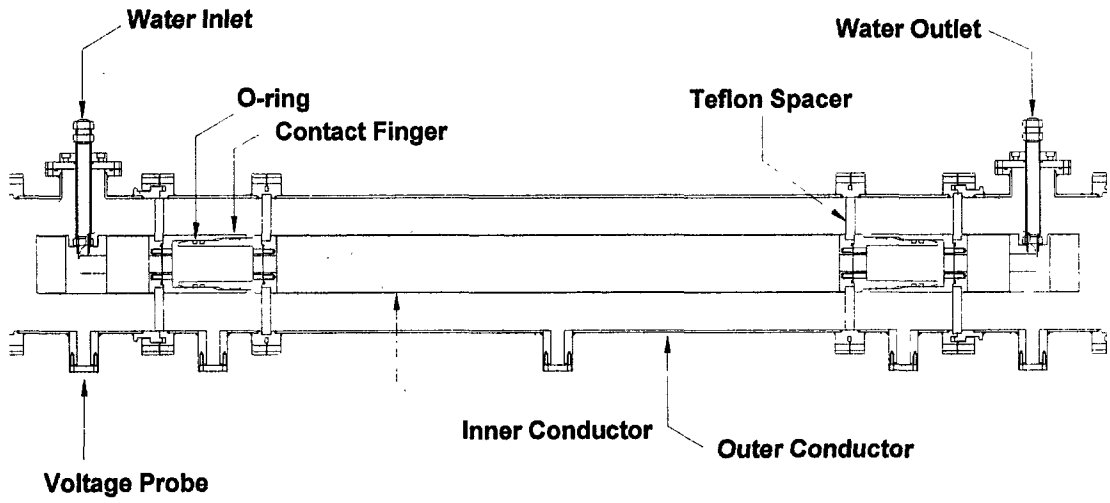


그림 3-2-120. 수냉식 고주파 전송선 개략도

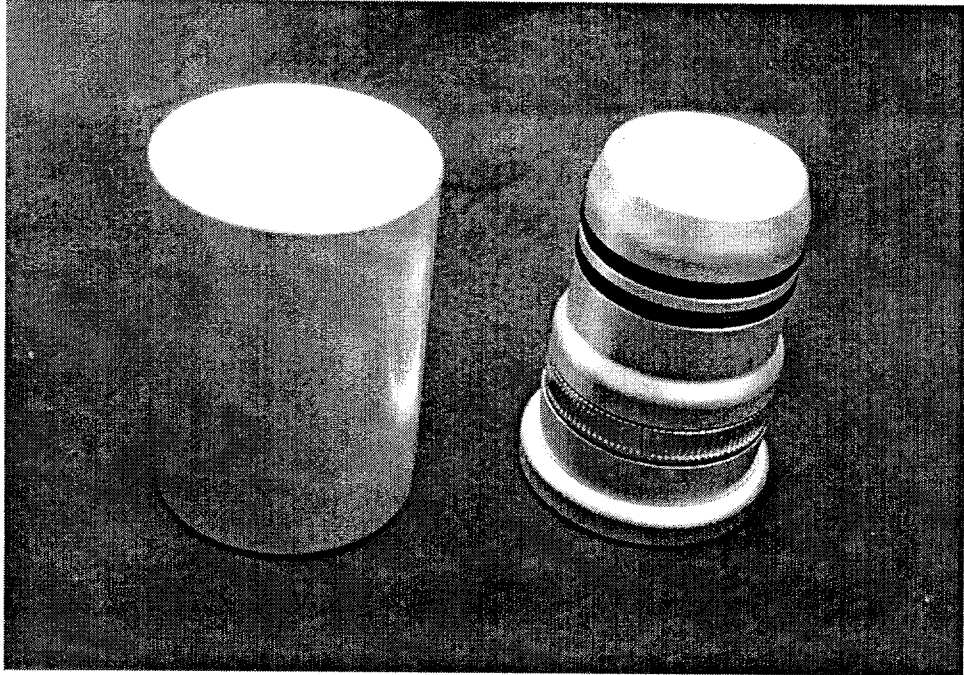


그림 3-2-121. 수냉식 고주파 전송선 내관 결합 부품

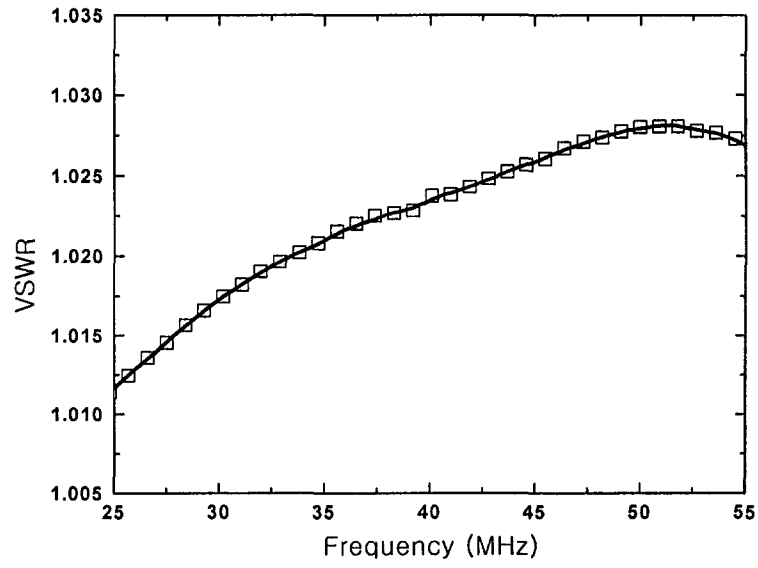


그림 3-2-122. 수냉식 고주파 전송선의 VSWR

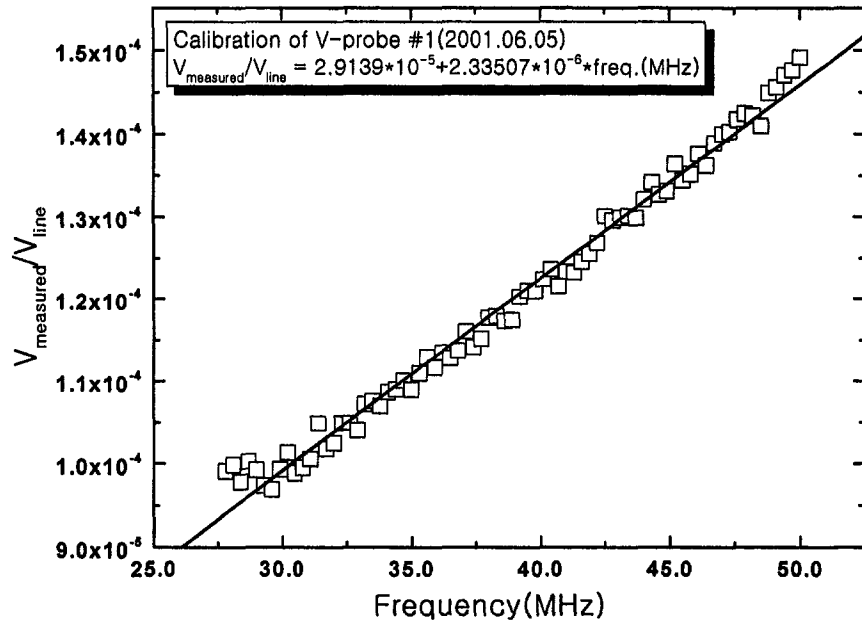


그림 3-2-123. 전압탐침의 교정 직선

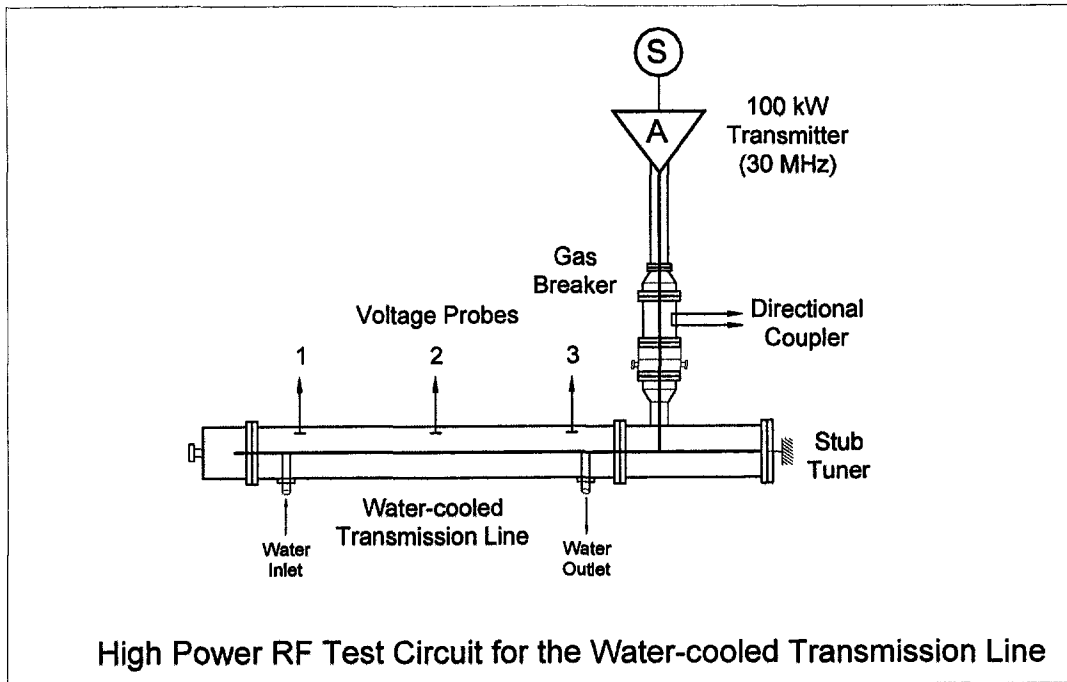


그림 3-2-124. RF 고출력 실험 개략도

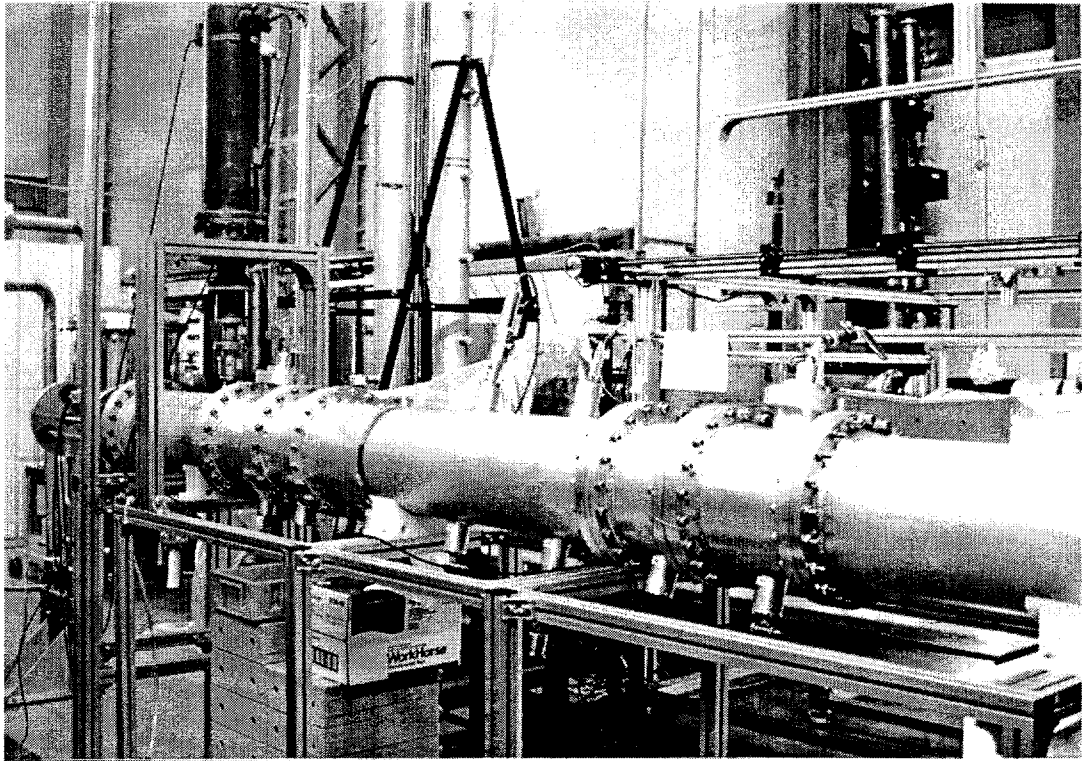


그림 3-2-125. 수냉식 고주파 전송선 장치

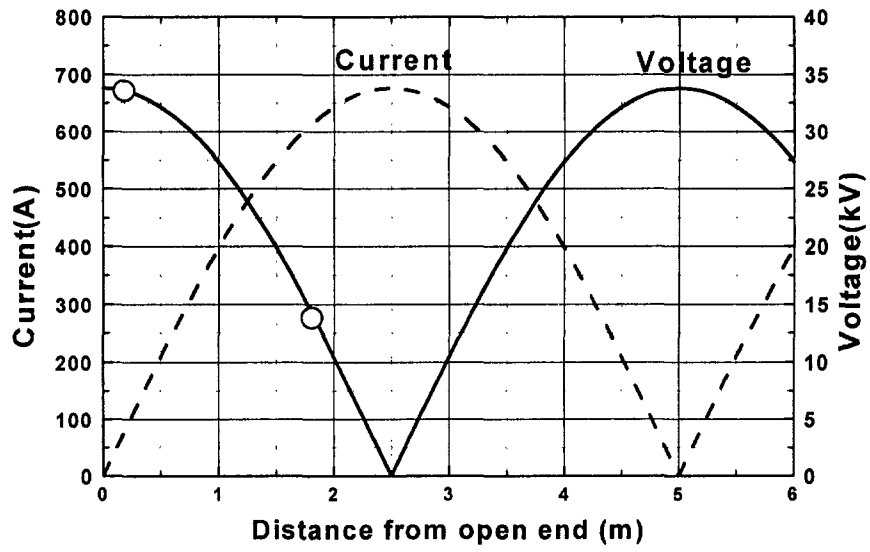


그림 3-2-126. 전압탐침으로 측정한 전압 분포

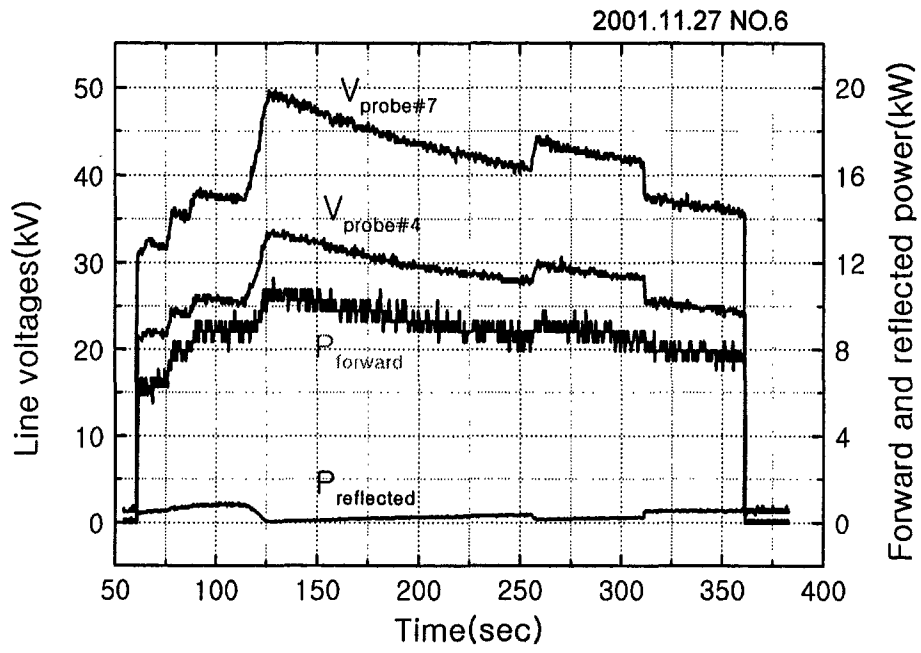


그림 3-2-127. 고출력 실험 결과

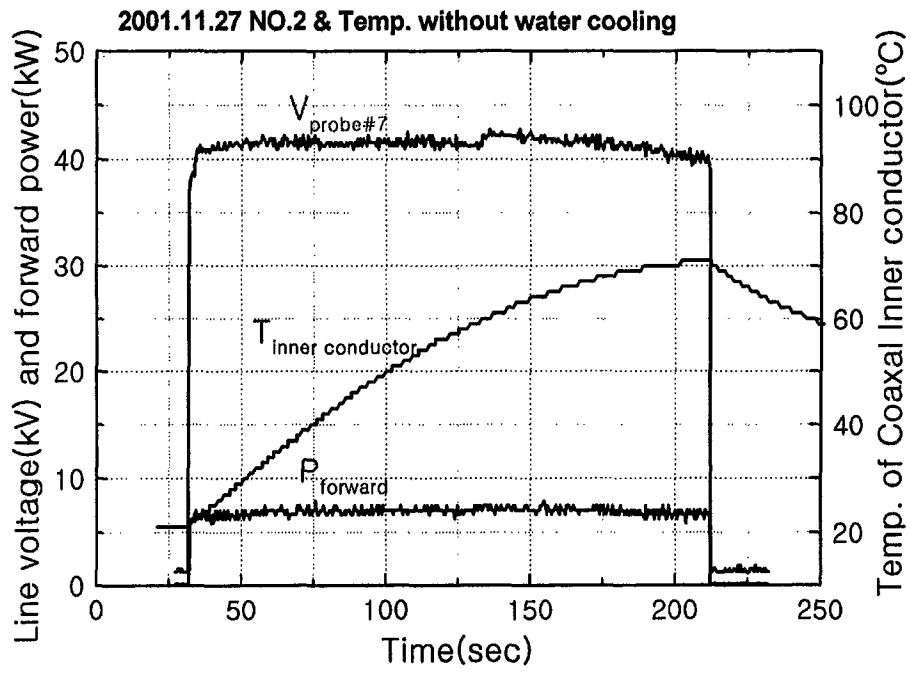


그림 3-2-128. 수냉식 고주파 전송선 내관 온도 변화 (냉각 없음)

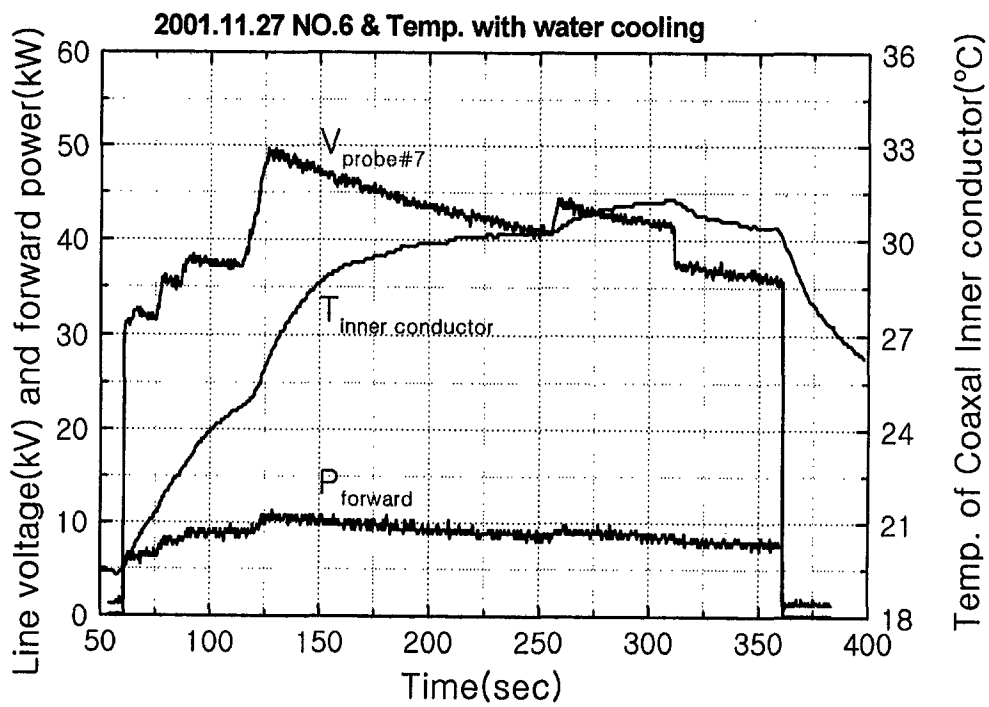


그림 3-2-129. 수냉식 고주파 전송선 내관 온도 변화 (냉각수 냉각)

(라) 고주파용 절연체의 고전압 시험

KSTAR ICRF 장치의 설계에 중요한 두가지 요인은, 안테나로 전달되는 최대 전력을 결정하게 되는 전송계통의 절연과피 전압과 장시간 운전에 따른 Ohmic loss에 의한 열의 제거 문제이다. KSTAR ICRF 장치의 최대 절연과피 전압과 전류는 35 kV와 1 kA 이고 고주파 부품들은 300초 동안 운전 가능하도록 설계되었다. 따라서, 여러 고주파용 절연체들에 대한 고전압/고전류 시험이 필요하게 된다.

최대 35 kV의 전압과 1 kA의 전류를 인가할 수 있는 고주파 시험설비를 이용하여 유전손실값이 널리 알려져 있는 알루미늄, 석영, 파이렉스, 테프론에 대하여 열용량 방법을 이용하여 유전손실을 측정하였다. 유전물질에서 유전손실에 의해서 발생하는 열출력 P_T 는

$$P_T = \rho C_p \frac{\Delta T \Delta V}{\Delta t} \quad (1)$$

이다. 여기서 ρ 는 밀도, C_p 는 열용량, ΔT 는 온도증가, ΔV 는 체적이다. 전기적으로 전기저항이 R 이고, capacitance값이 C 로 이루어진 측정 대상 유전체와 직렬로 연결된 전체시스템의 임피던스를 Z 라하면 전기에너지 P_T 는

$$P_E = \frac{1}{2} \frac{V_{\max}^2}{Z} \quad (2)$$

이다. 따라서 $P_T = P_E$ 의 조건으로부터 Z 를 구하고 $\tan \delta = 1/wRC$ 를 이용하면 유전손실값 $\tan \delta$ 를 구할수 있다.

측정 대상 유전체는 실린더형태이며(바깥/안 지름 93 mm/80 mm, 길이 86 mm), 유전손실값이 작고 열전달계수가 낮은 석영스페이서를 사용하여 유전손실에 의하여 측정 대상물에 생성된 열이 전송선의 내부관으로 전달되는 것을 방지하였다. 절연체의 온도는 120초동안 20 kV를 인가한후 측정하였다. 절연체가 있을때와 없을때에 측정된 전압은 거의 변화가 없었으며 이는 시험대상물의 capacitance값이 전압측정에 큰 영향을 미치지 않았음을 의미한다. 그림 3-2-130에서 알수 있듯이 대상물의 유전상수나 손실률에 따라 인가되는 power에 대하여 전압은 거의 변화가 없음을 알수 있다. 그런데 온도의 경우는 그림 3-2-131에서와 같이, 대상물에 따라 최고 50 °C 이상의 차이가 발생하였다. 이로부터 식 (1)과 (2)를 이용하여 구한 물질의 유전손실값을 표 3-2-10에 나타내었다. 진공상태인 KSTAR ICH 안테나와 가압상태인 외부전송선선간의 진공창(vacuum feedthrough)에 사용되는 알루미늄 세라믹의 유전손실값을 국내 두군데의 업체에서 각각 제작하여 유전손실값을 측정하였다. 제작상의 차이에 의하여 유전손실값은 10배 이상의 차이를 나타냈다.

Æ 3-2-10. Estimated $\tan \delta$ (10^{-4}), where the value in bracket is the nominal tabulated value at 100MHz.

Pyrex	Alumina	Quartz	Teflon
74(50)	30(3.3)	4.4(2)	3.25(2)

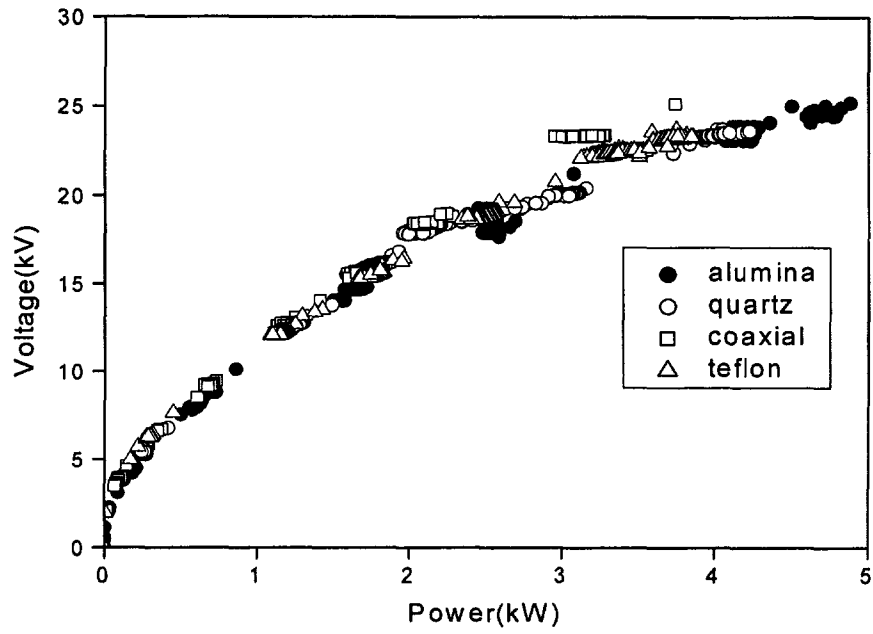


그림 3-2-130. 절연체가 있을 때와 없을 때의 전압 특성

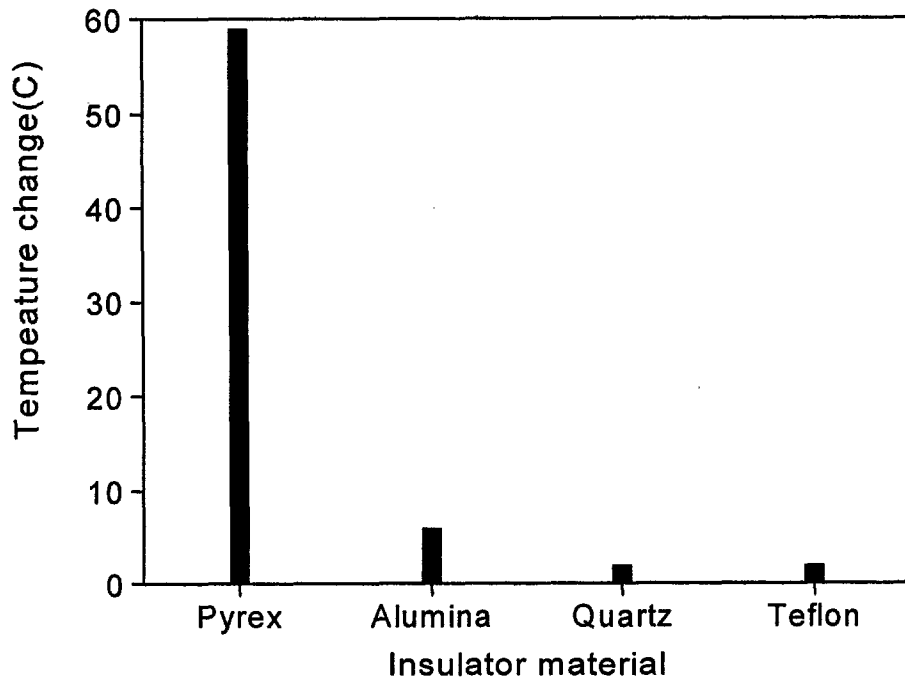


그림 3-2-131. 여러 절연체의 온도변화

(3) 고출력, 고주파 부품 Test Stand

(가) 안테나 Test Stand

① 고주파 시험용 진공용기

제작된 안테나에 대한 진공 특성, 진공중에서의 고전압 및 고전류 특성을 시험하기 위해 시험 용기를 설계, 제작하였다. 시험용 진공용기는 그림 3-2-132에서와 같이 두 부분으로 구성되어 있으며, 이는 본 고주파 안테나 설치될 KSTAR 토카막의 진공용기를 모사한 것이다. 즉, 안테나 포트는 본 안테나가 설치될 KSTAR 토카막의 주수평 포트의 실제 형상 그대로 제작하였으며, 사각 진공용기는 KSTAR 토카막에서의 안테나와 반대편 벽과의 거리에 해당하는 크기를 갖도록 하였다.

㉞ 사각 진공 용기

안테나의 진공중에서의 고전류 및 고전압 특성을 조사하기 위한 진공 환경을 형성하는 부분으로써 KSTAR 진공용기에 해당되며, 그 형상은 그림 3-2-133와 같다. 본 진공용기는 자장 인가를 위한 전자석 설치 및 제작의 용이성을 고려하여 직육면체 형태로 제작하였으며, 재질은 SUS304로 하였다. 진공압력에 의한 용기 벽의 변형을 줄이기 위해 80mmW×95mmH×15mmT의 “T”자형 보강재를 외벽에 500 mm 간격으로 용접하였으며, ANSYS-code로 변형을 계산한 결과 그림 3-2-134에서와 같이 벽면의 변위가 1.3 mm 이하였으며, 실제 제작후 수행한 진공 실험 결과와 잘 일치하였다. 전자석이 설치될 좌우 측면에는 각각 1개씩의 NW400 대형 포트를 부착하였으며, 그 한쪽에 90° 엘보우를 통해 turbomolecular drag pump를 설치하였다. 설치 예정인 전자석은 Pancake형으로서 크기는 OD 1200 mm(ID 460 mm)×250 mmH이며, 도체는 냉각 가능한 hollow conductor(6.5 mm×6.5 mm, ID 3.5 mm)로 제작할 경우, 약 230 kA·Turns의 기자력이 가능하다. 이 때 형성되는 자장 분포는 그림 3-2-135와 같으며, 안테나가 있는 영역에서 930 Gauss 이상의 자장을 얻을 수 있다.

진공용기의 아래, 위에는 각각 NW200 포트 2개와 NW250 포트 1개씩을 부착하였으며, 진공게이지, 시창구, rotary pump용 포트, 기체 주입구 및 각종 진단계통용 포트에 이용하였다. 앞쪽으로는 아래에서 언급할 안테나 포트와 연결되는 플랜지가 있으며, 뒤쪽으로는 직육면체의 한쪽 면을 완전히 개방한 상태로 사각형 플랜지가 부착되어 있으며, 여기에 분리가 가능한 덮개가 조립된다. 이 덮개에는 NW400 포트 1개와 NW200 포트 4개가 설치되어 있으며, 안테나 정면을 바라볼 수 있는 시창

구, 20ch thermocouple feedthrough, 4ch voltage & 4ch current probe용 feedthrough 및 진단계통의 feedthrough 설치용으로 사용된다. 시창구를 통해서 arc detection 및 IR camera를 이용한 온도 측정이 가능하다.

㉔ 안테나 포트

안테나를 수용하는 포트로서 KSTAR 진공용기의 주수평 포트와 그 구조가 동일하며, (그림 3-2-136) 진공용기에 부착되는 쪽을 플랜지 형태로 하여 상기의 사각 진공용기에 분해, 조립이 가능하도록 하였다. 진공 압력에 의한 변형을 줄이기 위해 80mmW×100mmH×20mmT의 “T”자형 보강재를 외벽에 610 mm 간격으로 용접하였다. 제작후 진공 시험 결과 벽면의 변형은 1.0 mm 이하였다. 포트의 안쪽 아래 바닥에는 안테나의 설치 및 KSTAR 진공용기의 반경 방향으로의 위치를 변경시킬 수 있도록 하기 위해 270 mm 간격을 두고 두 줄의 레일을 설치하였으며, 위쪽에는 안테나를 좌·우 방향으로 고정하는 레일을 설치하였다. 이 레일과 바닥 중앙에 설치된 위치 고정용 블록은 안테나가 더 이상 안쪽으로 들어가지 못하도록 하는 역할을 하게 된다. 이것은 안테나가 플라즈마 쪽으로 더 이상 들어가면 심각한 손상을 입게되는 한계를 정해 주기 위한 것이며, 또한 안테나 구동 계통의 고장 발생시 진공 압력에 의해 안테나가 KSTAR 진공용기 안쪽으로 이동하는 것을 방지하고자 하는 것이다.

㉕ 진공계통 및 기체 주입계통

체적이 3.8 m³인 고주파 시험용 진공용기를 배기하기 위한 진공배기계통의 구성은 그림 3-2-137과 같다. 진공계의 구성은 IV-1.1절에서 언급한 사각 진공용기에 부착된 NW400 포트로부터 90° 엘보우, gate valve, turbomolecular drag pump, two stage rotary vane pump 등으로 구성되어 있다. 또한 진공도 측정을 위한 full-range gauge도 설치되어 있다. 압력에 따른 안테나의 고전압 특성을 조사하기 위해 수소 기체를 진공용기 내로 공급하는 기체 주입계통을 설치하였으며, 설정된 진공 압력에 따라 주입량이 자동 설정된다.

㉖ Turbomolecular Drag Pump

Turbomolecular pump(TMP)는 cold trap나 oil trap없이 10⁻¹⁰ Torr 이하의 고진공도에 도달할 수 있으며, 특히 탄화수소계의 불순물이 없는 고진공을 유지시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 질량이 큰 분자계열의 기체에 대한 압축비가 크므로 작동기체가 수소나 중수소인 tokamak 장치와 같은 진공용기내의 순도를 높힐

수 있다. 최근에 개발된 turbomolecular drag pump는 기존의 TMP에 비해 높은 압력에서의 배기 속도를 향상시킨 것으로서 높은 기체 부하에서도 고진공을 유지할 수 있다. 본 진공용기에서는 Pfeiffer Vacuum사의 turbomolecular drag pump TMU-1601을 사용하고 있으며, 표 3-2-10에 그 규격을 나타내었다.

㉔ Rotary pump

Turbomolecular pump의 backing pump로 사용하고 있는 two-stage rotary vane pump는 KODIVAC사(Korea)의 GHP-1300이며, 규격은 표 3-2-11과 같다.

㉕ 진공도 측정계통

고주파 시험용 진공용기내의 진공도를 측정하기 위해 IV-1.1 절에서 언급한 사각진공용기의 상단부에 full-range gauge가 설치되어 있다. full-range gauge는 하나의 gauge내에 Pirani gauge와 cold cathode가 내장된 것으로서 저진공에서부터 고진공에 이르는 매우 넓은 영역의 진공 측정 가능하다. 여기서 사용중인 gauge는 Balzers사의 PKR261로서 그 특성은 표 3-2-12와 같으며 압력에 대한 출력 신호는 다음에서 언급할 기체 주입계통의 주입량 조절 신호로 사용된다. 안테나에 대한 고전력 시험시에는 잔류기체 분석장치를 장착하여 파라데이 차폐관 및 전류띠 등에서 발생하는 기체의 성분을 측정할 예정이다.

㉖ 기체 주입계통

ICH 안테나를 이용하여 플라즈마를 가열하는데 있어 최대 전력은 안테나를 비롯한 전송계통에서의 최대 절연 전압에 의해 결정된다. 따라서 안테나의 진공 중에서의 고주파 고전압 특성은 매우 중요하다. 또한 저전력 고주파 인가시 발생하는 multipactoring discharge[4-1] 특성 또한 필수적으로 검토되어야 한다. 이러한 고전압 특성의 압력 의존성을 조사하기 위해 진공용기내의 수소 기체 압력을 변화시킬 수 있는 기체 주입계통을 설치하였다. 기체 주입계통은 IV-2.3절에서 언급한 진공계이지의 압력 신호를 받아서 설정된 압력 값과 비교하여 기체 주입량을 변화시키는 신호를 내보내는 gas dosing controller (Balzers사 RVC 200) 및 gas dosing valve(Balzers사 EVR 116)로 구성되어 있으며, 그 사양은 표 3-2-13과 같다. Gas dosing valve는 사각진공용기의 아래쪽 NW200 포트에 연결되어 있으며 1/4" SUS316L 관을 통해 기체가 공급된다.

③ 진공 특성

본 진공용기는 안테나를 KSTAR 진공용기에 설치하여 고주파를 인가할 때 요구되는 고전압, 고전류 조건을 만족할 수 있는지를 시험하며 또한 KSTAR 진공 특성에 어떠한 영향을 미칠 것인지를 예측하고 것이 주목적이다. 이를 위해 우선 안테나를 설치하기 전의 본 시험용 진공용기의 특성을 조사하였다.

본 진공용기는 SUS304로 제작되었으며, 용기의 체적 및 표면적 등은 표 3-2-14와 같다. 내부 표면은 전해 연마를 한 상태에서 모든 포트를 blank flange로 밀폐한 후 배기를 시작하였으며, 초기 배기에서 시간에 따른 진공도는 그림 3-2-138과 같다. 제작후 초기 약 50시간의 배기 결과 도달된 전압은 4×10^{-6} mbar였다. Baking이나 특별한 세척 과정이 없는 진공용기를 50시간 정도 배기한 data만을 가지고 용기자체에 남아 있는 기체나 기체분포, 용기의 벽으로부터의 기체 방출률(outgassing rate) 등을 평가하기란 어려운 일이다. 다만 그림 3-2-138의 그래프를 토대로 진공 특성을 분석하고자 한다면 본 진공용기가 어느 정도의 시간 의존형 기체유입을 가진다라는 가정이 가장 바람직한 접근방식이 될 것이다. 배기시간을 충분히 준다면 위의 가정은 곧 기체유입량의 변화가 그대로 압력의 변화로 나타남을 의미한다. 즉,

$$P(t) = Q(t)/S_e \quad (1)$$

여기서 $P(t)$ 는 시간에 따른 압력이며, $Q(t)$ 는 기체유입량, S_e 는 유효 배기속도이다. 유효 배기속도는 진공용기에 연결된 NW400 포트와 여기에 연결된 90° 엘보우에 의해 573 l/sec로 계산되었다. 유효 배기속도가 일정하다고 볼 수 있는 $\sim 10^{-5}$ mbar 이하의 영역에서 측정된 압력의 시간 의존성을 살펴보면 그림 3-2-139와 같이

$$[P(t)]^{-2} \sim t \quad (2)$$

임을 알 수 있다. 이러한 압력 변화는 기체 유입의 요인이 확산에 의한 방출이 현저함을 보여주는 것이다. 측정 결과로부터 표면 방출률을 그림 3-2-140에 나타내었다.

㊦ 3-2-10. Characteristics of turbomolecular drag pump TMU-1601

Vacuum connections :		DN 250 CF
Backing pump connections :		DN 40 KF
Volume flow rate for	N ₂ :	1,500 ℓ/sec
	He :	1,450 ℓ/sec
	H ₂ :	1,150 ℓ/sec
Compression ratio for	N ₂ :	>10 ¹²
	He :	>10 ⁸
	H ₂ :	3×10 ⁶
Max. fore-vacuum pressure for	N ₂ :	12 mbar
	He :	10 mbar
	H ₂ :	4 mbar
Max. gas throughput for	N ₂ :	15 mbar·ℓ/sec
	He :	15 mbar·ℓ/sec
Ultimate pressure :		5×10 ⁻¹¹ mbar
Nominal rotation speed :		36,000 rpm
Start-up time :		6 min
Power :		600 Watts

㊦ 3-2-11. Characteristics of two-stage rotary vane pump

Nominal intake diameter :	DN 25 KF
Nominal outlet diameter :	DN 25 KF
Pumping speed :	1,600 ℓ/min
Ultimate pressure :	5×10 ⁻⁴ Torr
Oil filling :	13.5~6.2 ℓ

㍻ 3-2-12. Characteristics of full-range gauge PKR261

Measurement range :	$5 \times 10^{-9} \sim 1000$ mbar
Baking temperature :	150 °C
Operating temperature :	5~55 °C
Vacuum connection :	DN 40 CF
Output signal :	0~10.5 V
(Voltage-to-pressure : 0.6 V/decade logarithmic)	
Magnetic shielding	

㍻ 3-2-13. Characteristics of gas dosing system

Controllable gas flow :	$5 \times 10^{-6} \sim 1200$ mbar·ℓ/sec
Tightness :	10^{-9} mbar·ℓ/sec
Pressure :	10^{-8} mbar~2.5 bar
Valve connection :	DN 16KF
Control modes :	pressure and gas flow

㍻ 3-2-14. Vacuum characteristics of RFTC

Chamber material :	SUS304
Volume :	3.77 m ³
Surface area :	19.58 m ²
Effective pumping speed :	573 ℓ/sec

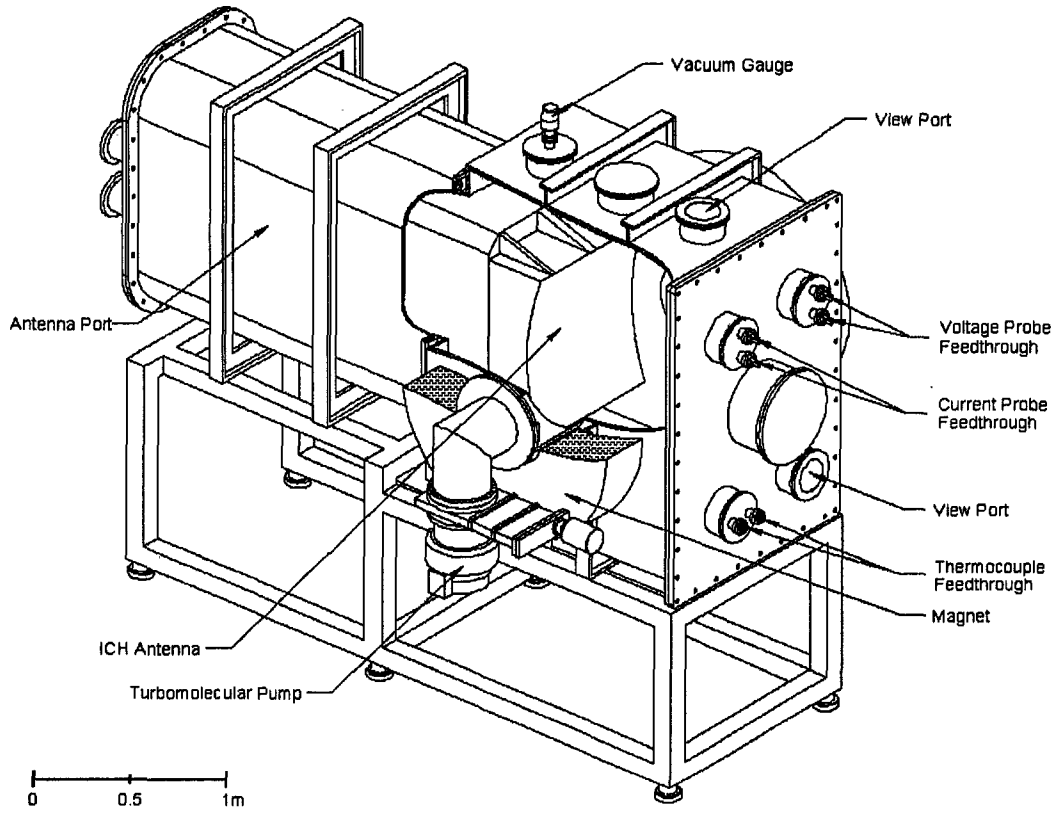


그림 3-2-132. RF test stand.

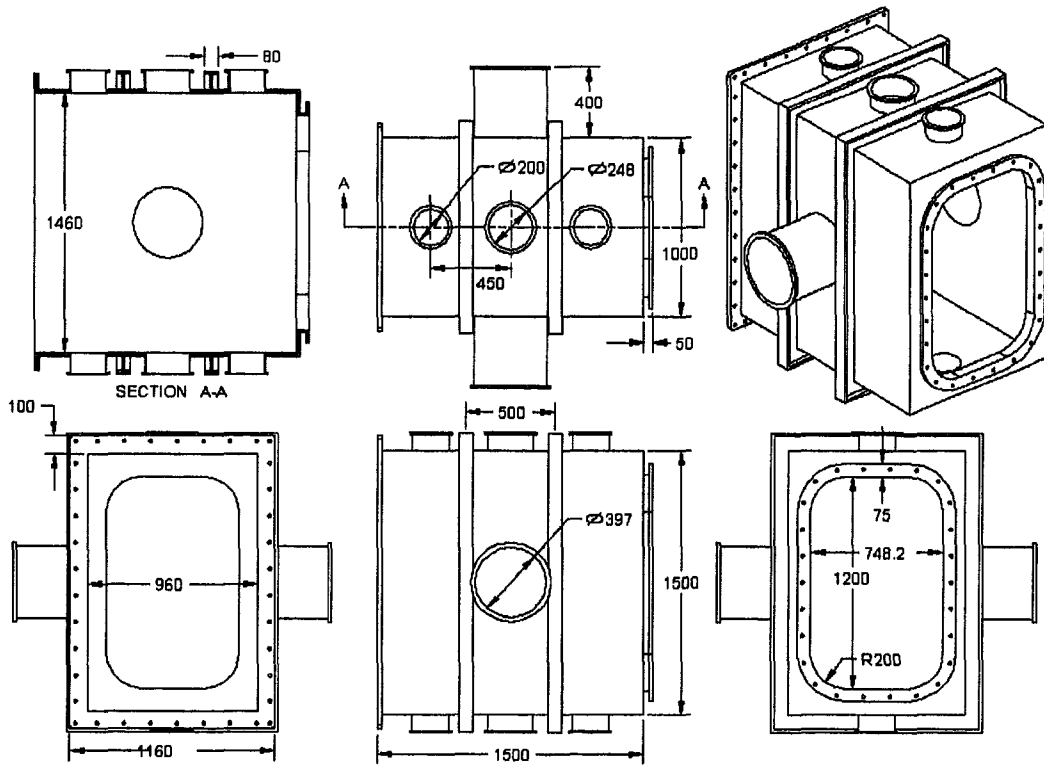


그림 3-2-133. Rectangular type vacuum chamber for RF test.

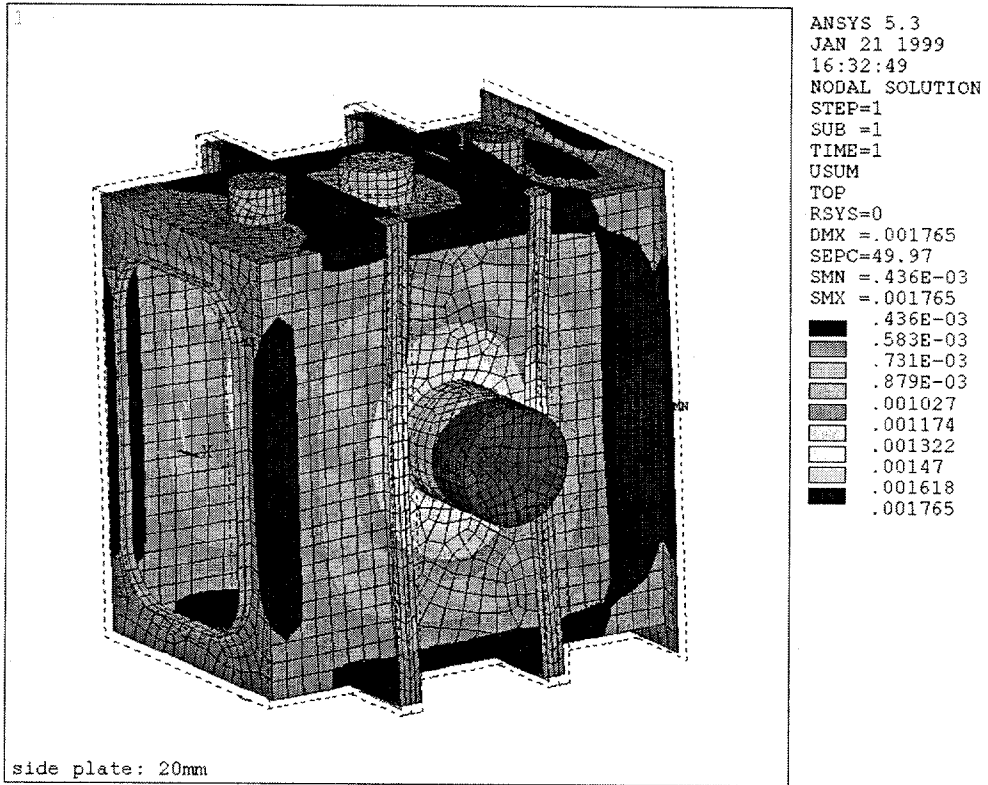


그림 3-2-134. Deflection analysis for RFCTC using ANSYS code.

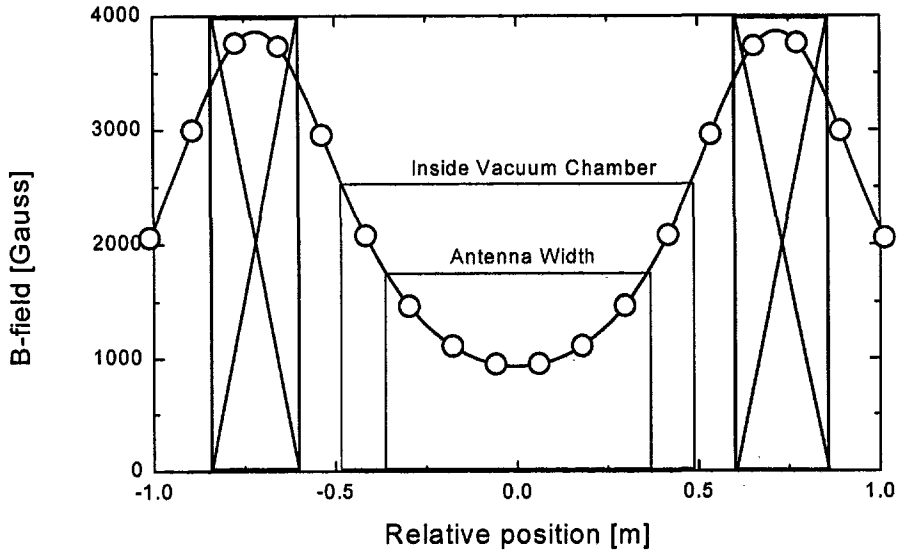


그림 3-2-135. Magnetic field distribution in RFTC.

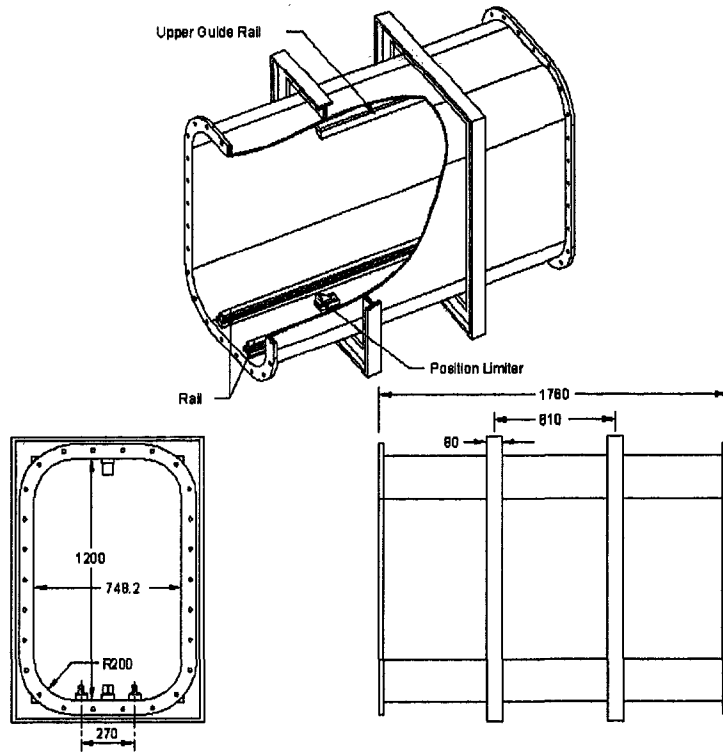


그림 3-2-136. Antenna port for ICH antenna test.

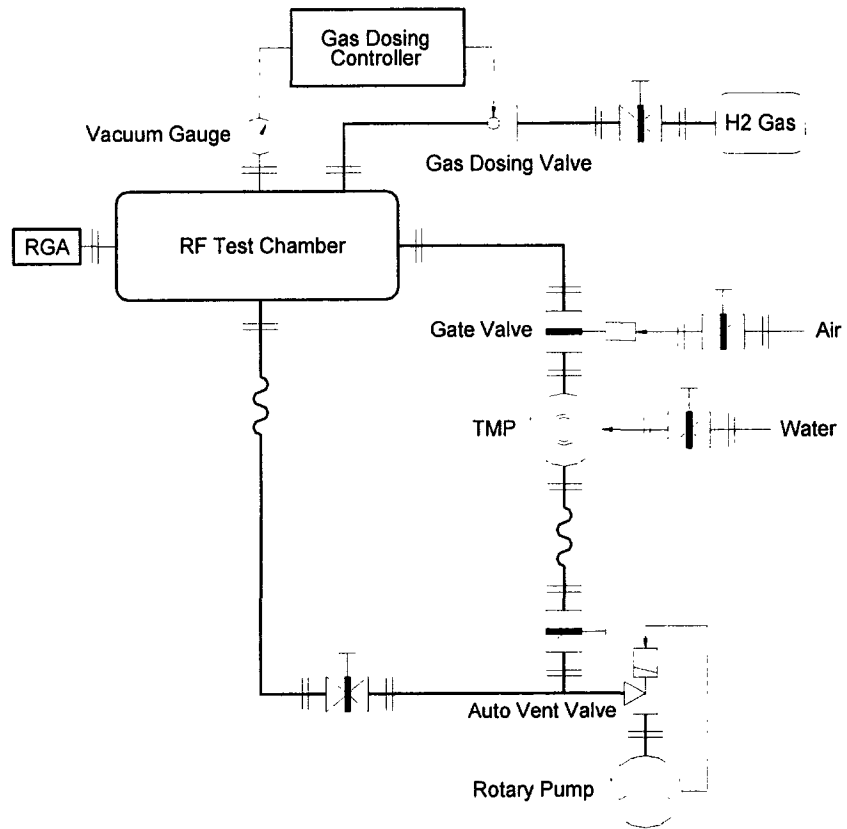


그림 3-2-137. Vacuum system for of RF test chamber.

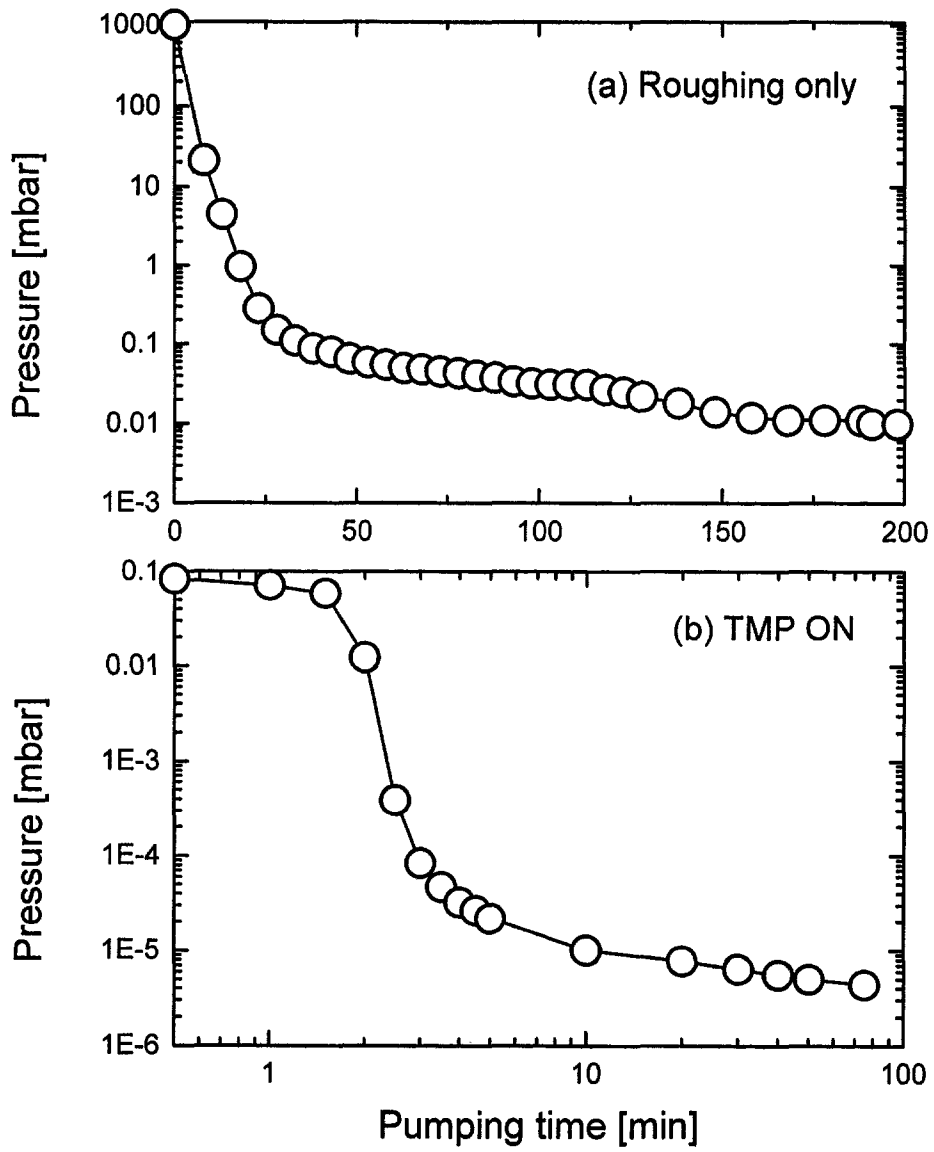


그림 3-2-138. Pump down curve for RFTC.

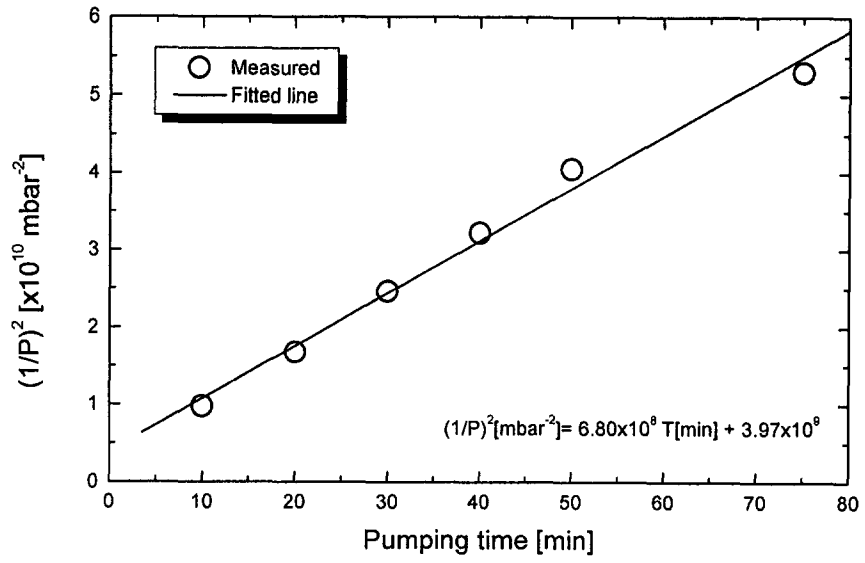


그림 3-2-139. Linear fitting of $P^{-2} - t$ curve.

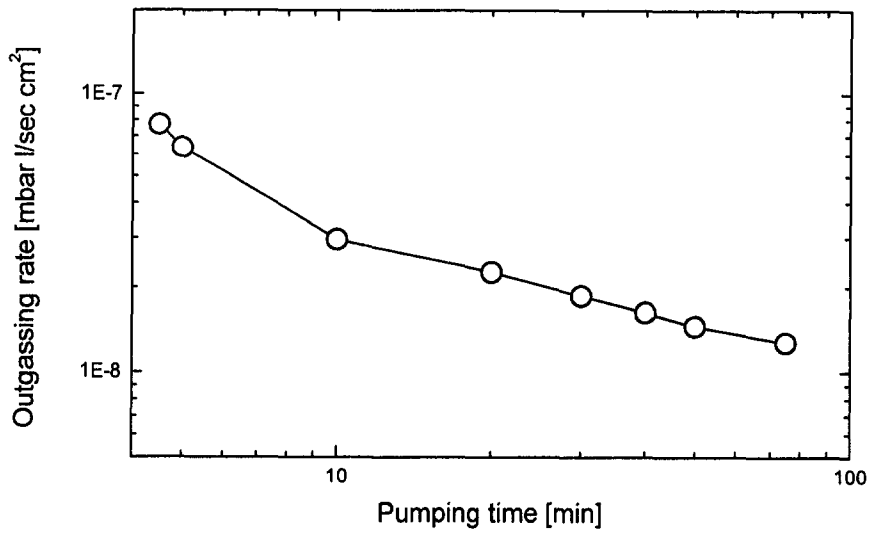


그림 3-2-140. Outgassing rate of RFTC.

(나) 고출력, 고주파 전송부품 Test Stand

① 6⅞" 고주파 시험설비

한국원자력연구소가 보유한 고주파 시험 설비는 100kW 고주파 증폭기와 6⅞" 이중 단락 전송선 동조기로 이루어져 있다. 사용되는 주파수는 28MHz~32MHz이다. 고주파 시험 설비는 유체 전송선 동조기 및 유체 위상 변환기, 고전력 feed-through 개발시 고전압, 고전류의 고주파 인가, KT-1 토카막의 ICRF 실험, KSTAR ICH 장치 개발에 이용되고 있다. 장치의 개관을 그림 3-2-141에 나타내었다.

100kW 고주파 증폭기는 Thomson사의 TH581 4극관을 이용하고 있으며 17dB의 이득을 갖는 C급 증폭기이다. 최대 14kV의 양극 전원을 포함하여 모든 전원이 가변할 수 있도록 설계되어 있어서 동작점 변경이 용이하고, 공냉과 수냉을 병용한 충분한 용량의 냉각시설을 갖추고 있어서 연속 운전이 가능하다. 현재 운전시간을 늘리고 출력을 안정화하는 작업이 진행중이다. 임의의 부하에 출력을 동조시키기 위해 사용되는 이중 단락 전송선 동조기는 각각 30MHz와 40MHz에서 $\frac{1}{4}\lambda$ 의 가변 폭을 가지는 6⅞" 단락 전송선 동조기로서 한국전자진흥과 Dielectric사에서 제작되었다. 동조기의 길이 가변은 U형 내부 도체의 길이를 sliding finger stock을 이용하여 변화시켜 이루어지고 구동력은 원격 조정되는 모터로부터 전달된다. 전체 전송선중 단락 전송선 동조기로부터 부하까지의 unmatched 영역은 내전압 향상을 위하여 질소 가스에 의해 최대 3기압까지 가압된다. 배관은 $\frac{1}{4}$ " 스테인레스 스틸 튜브와 6mm 폴리에틸렌 호스를 이용하였고 가스 용기로부터 가장 근접한 전송선 가스 유입구에 relief valve를 부착하여 초과 압력에 대비하였다. 주배관에는 배기용 로터리 펌프를 설치하여 질소 가스 유입전 잔류 공기중의 수분을 제거한다.

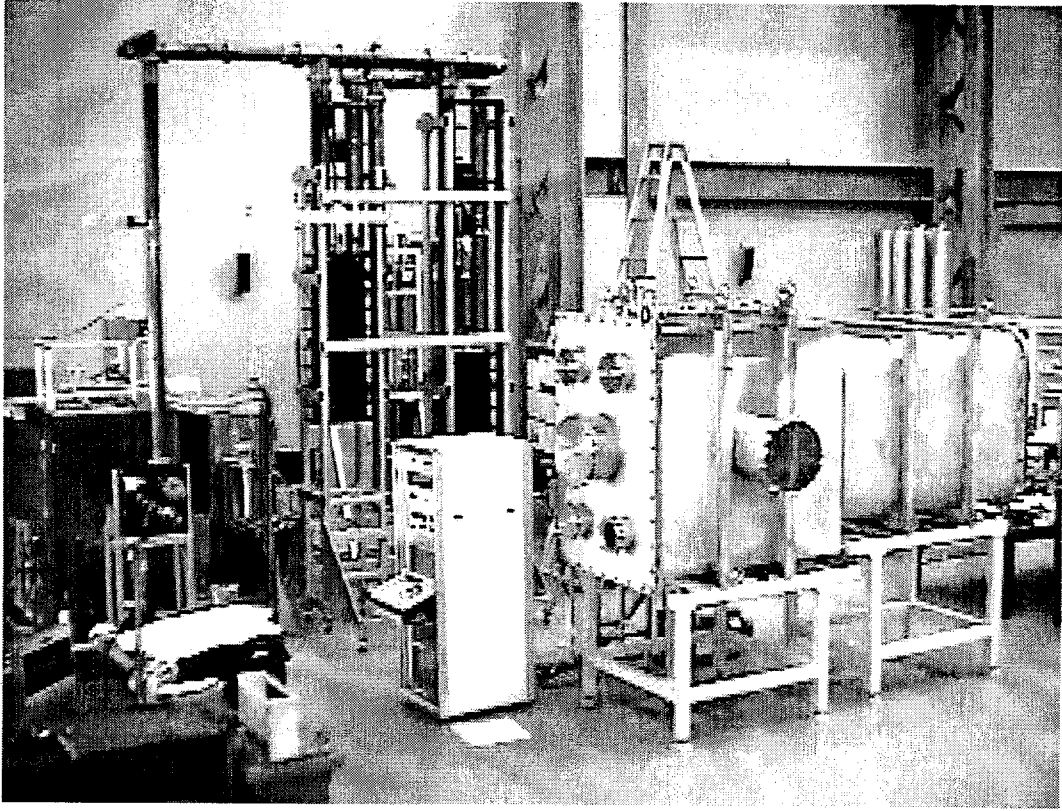


그림 3-2-141 한국원자력연구소 radio frequency test facility

② 전압 탐침의 개발

고주파 전압 분포를 측정하기 위한 전압 탐침은 고주파부품 고유의 특성에 영향을 미쳐서는 안되며 ~10kV의 고주파 전압에 대해 적절한 출력의 전압 소스로 작동해야만 하고 신호 케이블의 길이에 영향을 받아서는 안된다. 이를 위해 약 80dB의 결합계수를 갖는 정전용량성 결합기가 제작되었다. 그림 3-2-142은 6⅞" 전송선에 삽입된 전압 탐침의 도면이며 그림 3-2-143는 등가회로이다. C는 내부 도체와 탐침 끝간의 정전용량이며 C_s는 탐침과 외부 도체간의 정전용량, L_s는 탐침 자체의 인덕턴스이다. R은 터미네이션 저항으로 50Ω이다. V는 내부 도체와 외부 도체 사이에 걸리는 전압이며 V_o는 출력 전압으로 R에 걸리는 전압과 같다. L의 리액턴스 X_L과 C_s의 리액턴스 X_{Cs} 사이에 |X_L| ≪ |X_{Cs}|이 성립하면 전체 임피던스 Z는 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$Z \approx \frac{-X_{Cs}X_L + jRX_{Cs}}{R + jX_{Cs}} + jX_C$$

또 다시 |X_L| ≪ |X_C|를 가정하면 저항 R에 걸리는 전압은 다음과 같이 근사된다.

$$V_R \approx V \frac{R}{R \left(1 + \frac{X_C}{X_{Cs}}\right) + jX_C}$$

마지막으로 X_C와 X_{Cs}가 비교할만 하고 X_C ≫ R이면

$$\begin{aligned} V_o &= |V_R| \\ &= \omega CR |V| \end{aligned}$$

로서 주파수와 전압에 비례하는 출력 전압을 얻을 수 있다.

그림 3-2-142와 같이 6⅞" 전송선에 탐침을 설치하고 회로 분석기(Hewlett Packard HP4396A)를 이용하여 전송선상의 VSWR을 측정하였고 결과를 그림 3-2-144에 나타내었다. 100MHz 이하에서 VSWR이 1.04를 넘지 않음을 확인할 수 있다. 결합계수는 탐침의 길이를 조정함으로써 가변할 수 있다. 그림 3-2-145는 f=30MHz에서 전력 결합이 80dB가 되도록 탐침의 길이를 조정하고 10MHz < f < 100MHz의 주파수 영역에서 결합을 측정한 결과이다. 그림 3-2-145의 작은 그림은 V_o/V를 주파수에 대해 측정한 결과를 log-log로 나타낸 결과로써 기울기 1.003은 계산식에서 추정된 주파수 비례관계를 잘 설명하고 있다. 그림 3-2-145의 큰 그래프의 직선은 측정한 결합 자료를 linear fitting한 결과로써 다음과 같이 정전용량 C를 계산할 수 있도록 해주며 이로부터 유효한 범위 내에서 다른 주파수에서의 결합을 알 수 있다.

$$2.68 \times 10^{-12} = 2\pi CR, R = 50\Omega$$

$$C = 8.53 \times 10^{-15} \text{F}$$

탐침을 유체 stub의 유체를 제거하고 8개의 탐침을 50cm 간격으로 설치하여 시험하였다. 첫 번째 탐침은 단락된 끝으로부터 7.2cm 떨어진 곳에 설치하였으며 약 200W의 고주파를 인가하였다. 그림 3-2-146의 실선은 단락 전송선의 전압분포

$$A \sin\left[\frac{2\pi f}{c} x\right]$$

를 fitting한 결과이며 동그라미 표시는 측정된 V_0 를 나타낸 것이다.

제작된 전압 탐침의 결합은 탐침과 내부 도체사이의 정전용량에만 의존하므로 유체 stub과 같이 유전체를 사용하더라도 결합계수를 쉽게 추정할 수 있다. 유전율 ϵ 인 유전체를 매질로 하는 경우 정전 용량 C 는

$$C = \epsilon C_0$$

이며 C_0 는 앞에서 언급된 진공중 정전용량이다.

실험 결과를 종합하여 보면 $\epsilon=1$ 인 진공 또는 비유전체 가스에서의 전압과 탐침 출력과의 관계는

$$V[V] = \frac{370370}{f[\text{MHz}]} V_0[V] \pm 10\%$$

이고 $\epsilon=2.72$ 인 실리콘 오일의 경우에는

$$V[V] = \frac{136165}{f[\text{MHz}]} V_0[V] \pm 10\%$$

이다.

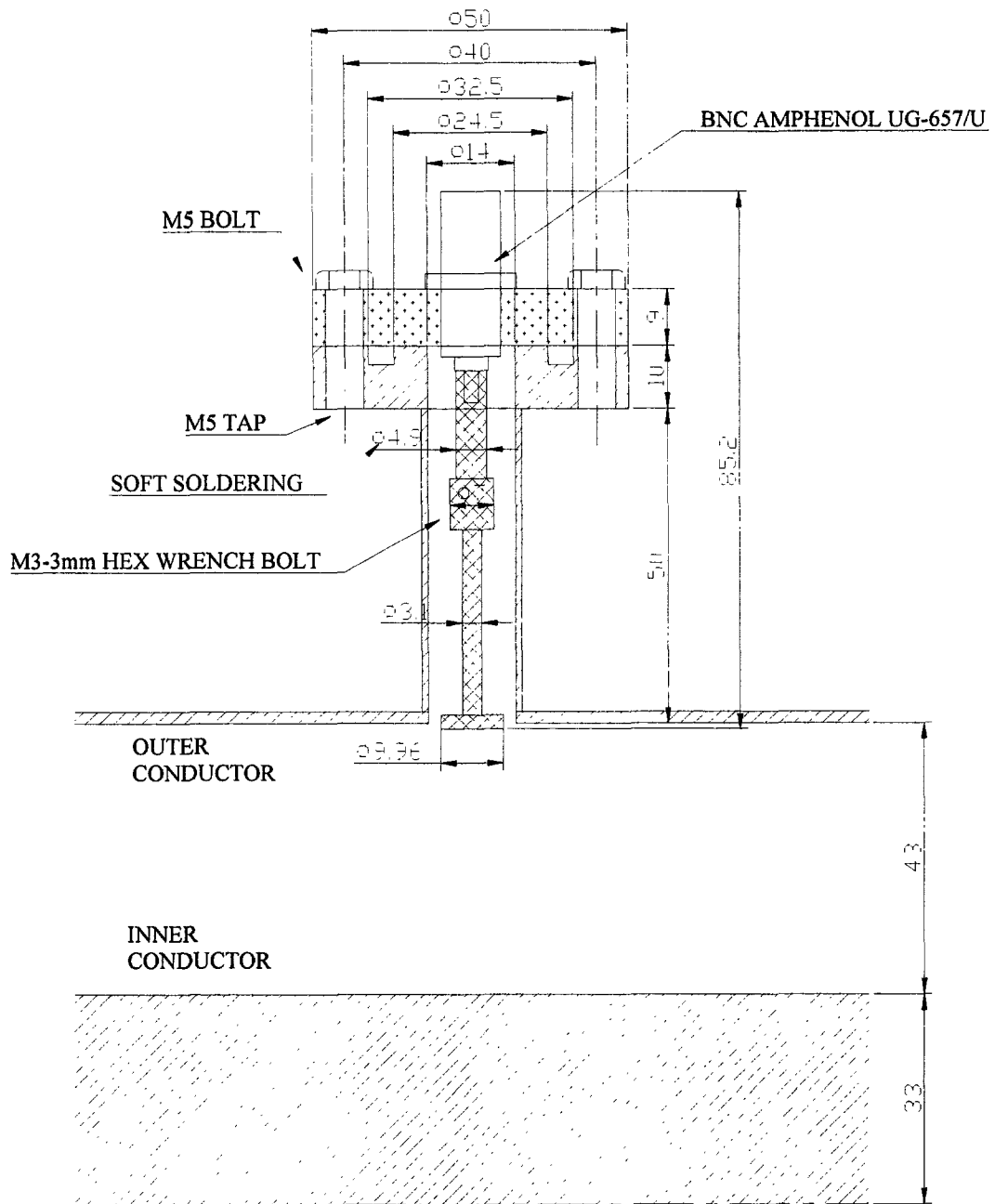


그림 3-2-142 Drawing of coax-line voltage probe

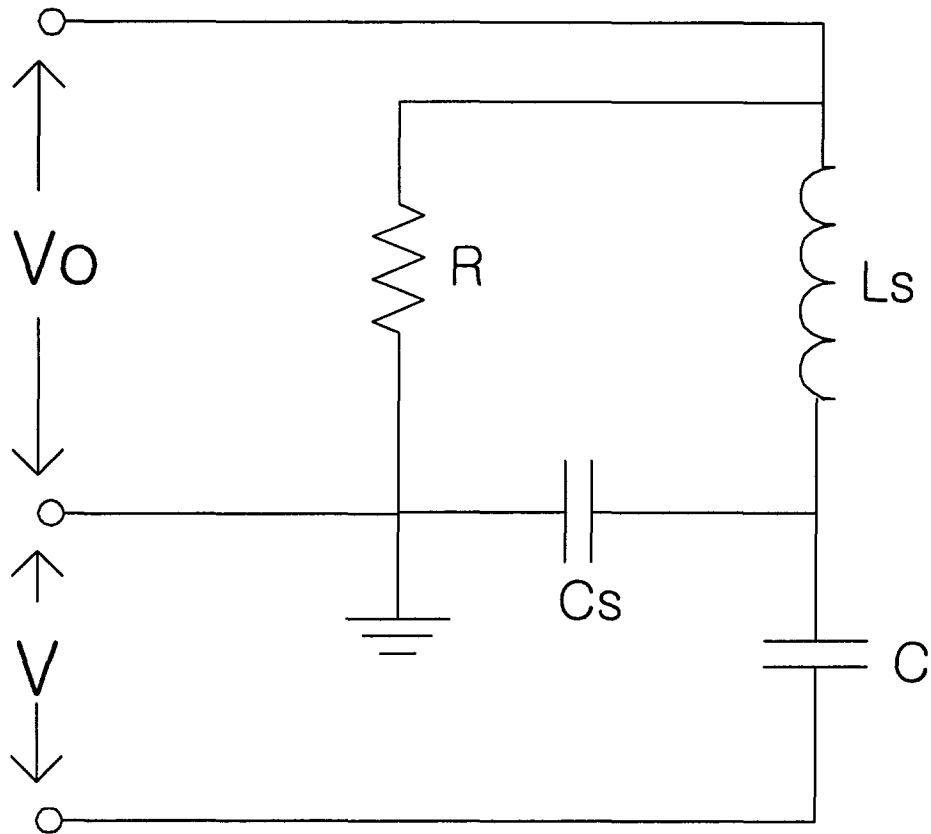


그림 3-2-143 전압 탐침의 등가회로

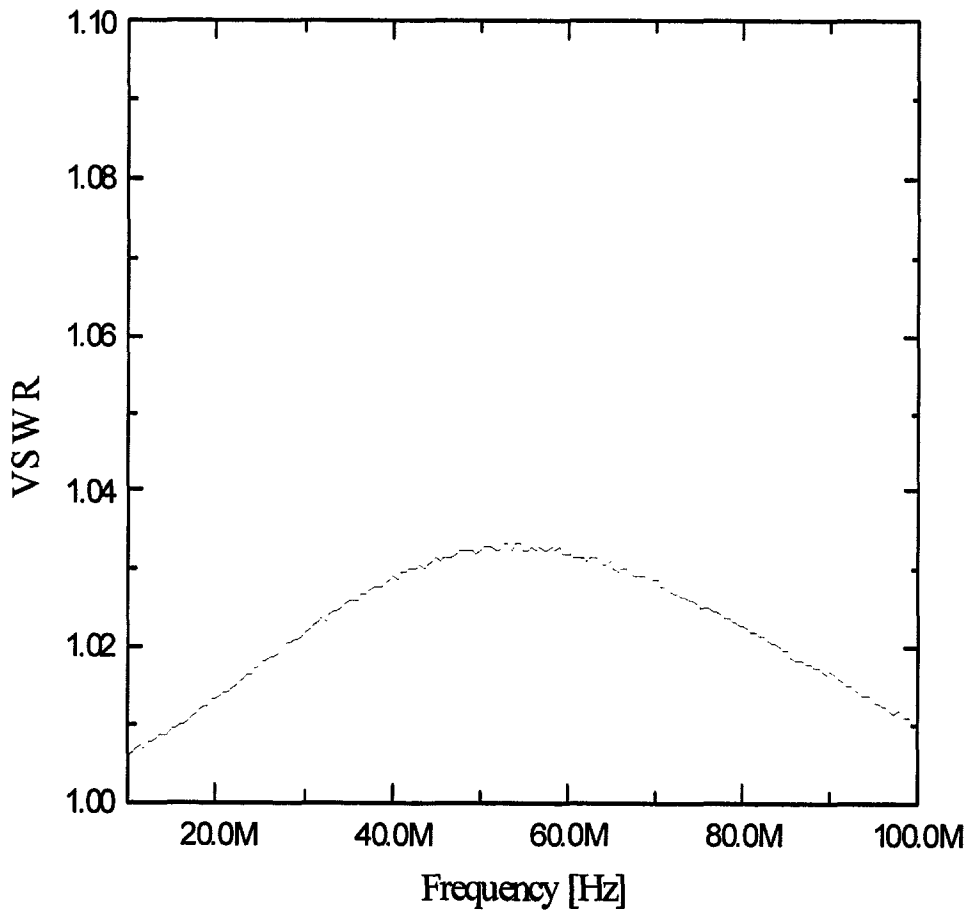


그림 3-2-144 VSWR of voltage probe in the 73.2cm long coax transmission line.

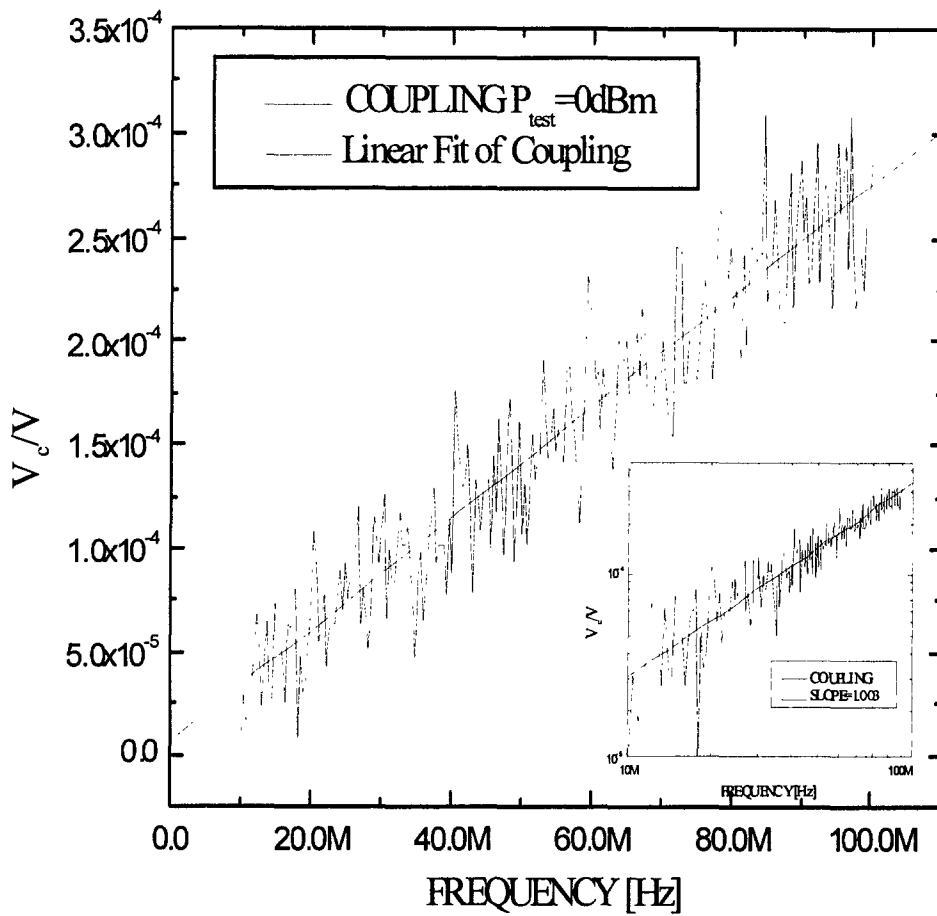


그림 3-2-145 Transmission between line input and the probe output.
Voltage coupling is linear to the frequency.

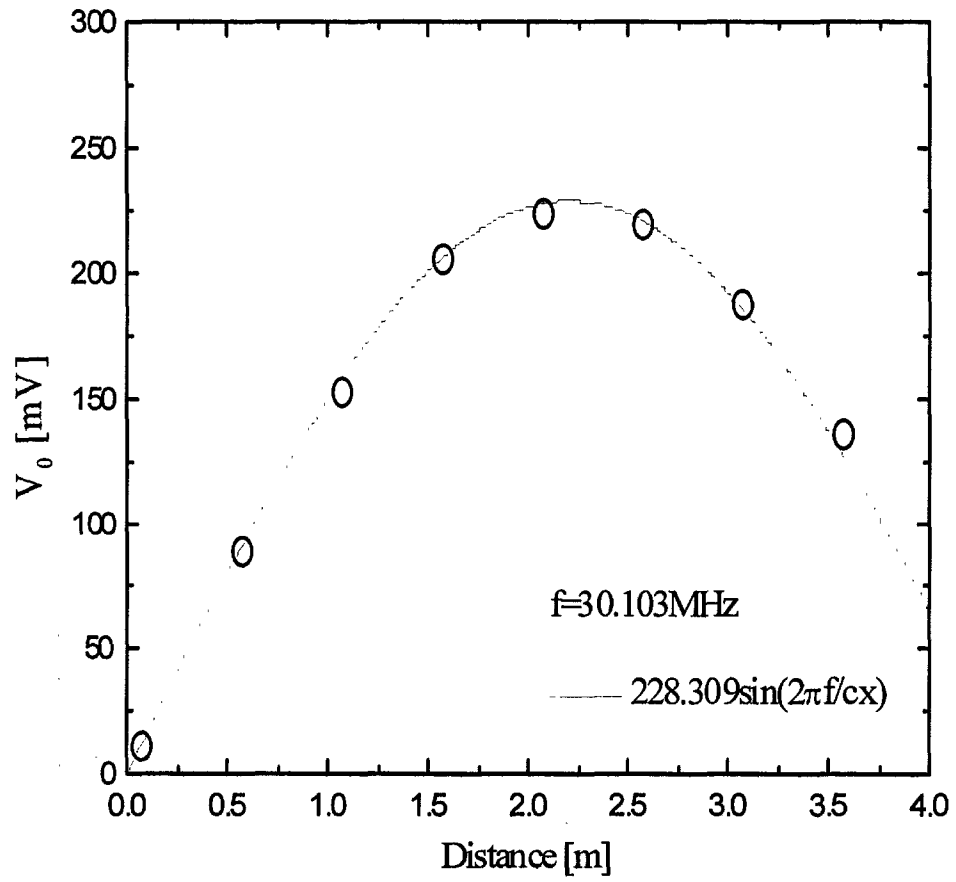


그림 3-2-146 Measured voltage distribution along the shorted line

③ 고주파 부품 시험장비

전송부품의 고전압/고전류 시험을 위한 장치는 3기압 이상으로 가압되고 35 kV/1 kA를 쉽게 인가할수 있고 시험의 편의성을 위하여 기계적으로 간단하고 쉽게 조종할수 있는 구조이어야 한다. 그림 3-2-147 (a)는 제작한 고전압 시험설비의 개략도이고 전압 전류분포도를 그림 3-2-148 (b)에 나타내었다. 주파수와 shorted stub의 길이를 변화시키면 Tee지점에서 송출기의 50 ohm 특성임피던스에 정합시킬 수 있다 이 경우 고전압시험을 위한 시험은 전압값이 최대인 $1/4\lambda$ section의 왼쪽 끝부분인 전기적으로는open된 곳에서 행해진다. $1/2\lambda$ section에 위치한 shorted stub의 길이에 따른 임피던스값의 실수와 허수는 그림 3-2-148 (a)와 같고, $R = 0.003 \text{ ohm/m}$ 일 때 $Q=6000$ 정도의 매우 큰 Q값을 갖는다. 이는 stub의 길이 및 주파수를 각각 mm와 Hz 정도로 정밀히 조종해야함을 의미한다. 전체길이가 $3/4\lambda$ 인 공진기에서 feeding point가 open된 지점으로부터 $1/4\lambda$ 인 경우에 stub의 길이는 주파수에 따라 두 개의 근을 갖는다. 또한 전송선의 단위길이당 저항이 증가할수록 stub의 길이는 증가한다. 그림 3-2-148 (b)에서 보듯이. 만약 저항이 0.003 ohm에서 0.3 ohm으로 증가하면 shorted stub의 가변 길이는 80 cm이상 길어져야 한다.

30 kV/ 600A의 고전압/고전류를 rf power를 20 kW 인가한 조건에서 얻을수 있다. 그림 3-2-149에 고주파부품 시험장비의 개략도와 제작된 사진을 나타내었다. 고주파부품 시험장비의 전체길이는 7.5 m이며 동작주파수는 27에서 55 MHz이다. stub tuner의 전체변위는 1 m이고, 스텝핑 모터를 통하여 1mm 이내로 정밀하게 조정된다. 원형단락판의 안과 바깥쪽에는 finger stock이 설치되어 있다. 또한 내면에는 전기저항을 줄이기 위하여 20 μm 두께의 은이 도금되어 있다. 시험장치는 모두 9(3/16") EIA 전송선을 사용하였고 곡관에서의 전장불균일에 의한 절연파괴를 방지하기 위하여 모두 직관으로 구성되어 있다. 수분을 제거한 공기를 이용하여 3기압까지 가압할수 있으며 진단장비로는 전압측정을 위하여 $1/4\lambda$ section에 전압탐침들이 설치되어 있다. 전송관 표면과 내부의 온도는 각각 열전대와 적외선온도계를 통하여 측정하였다. 측정된 전압은 고주파 출력의 제공근에 비례하며, 5 kW의 rf power를 인가시에 25 kV를 얻을수 있었다. rf power를 인가한 후 수 초가 지나면 반사파 출력과 전송선의 온도가 동시에 증가하였는데 이는 전송선 내부에 생성된 열에 의하여 전체 길이가 증가하여 정합조건이 달라졌기 때문이다. 따라서 synthesizer의 주파수를 수십 kHz 낮추어서 반사파를 줄일수 있었다.

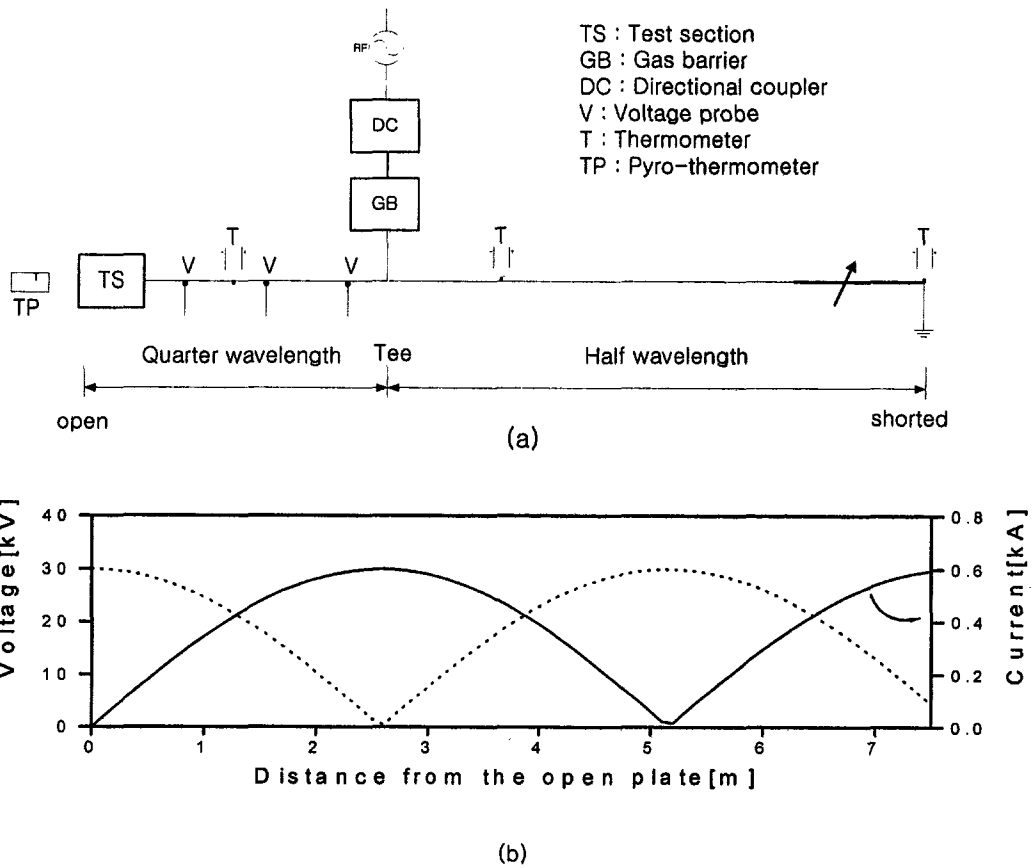


그림 3-2-142. Schematic diagram of the high voltage test bed(a) and the calculated voltage/current distribution on the transmission line for $P_{rf} \approx 20$ kW(b)

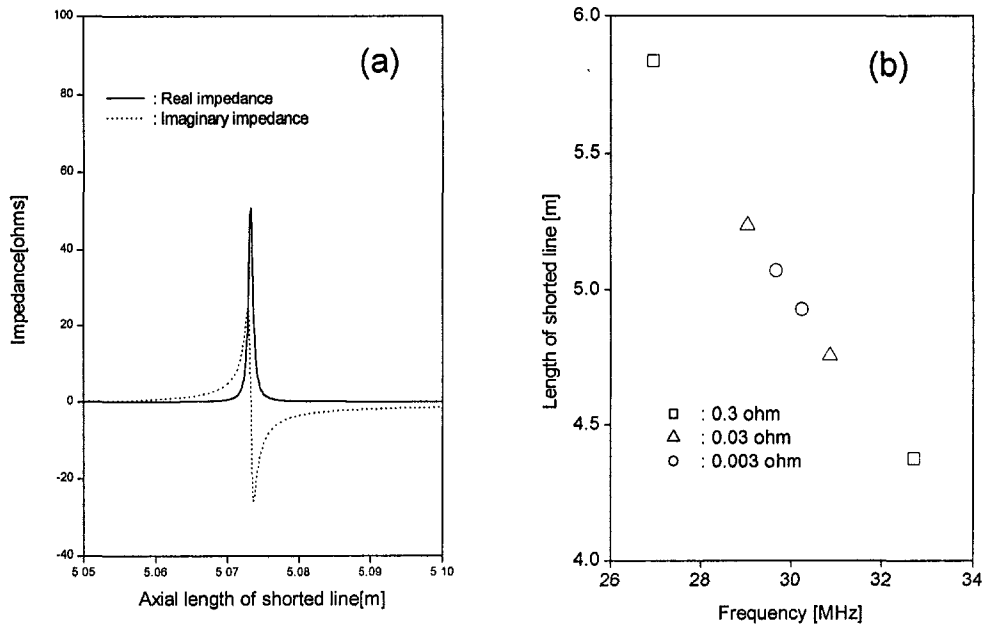


그림 3-2-143. Impedances vs. axial length of the shorted line for $R=0.003$ ohm(a) and matched length of shorted line vs. frequency (b).

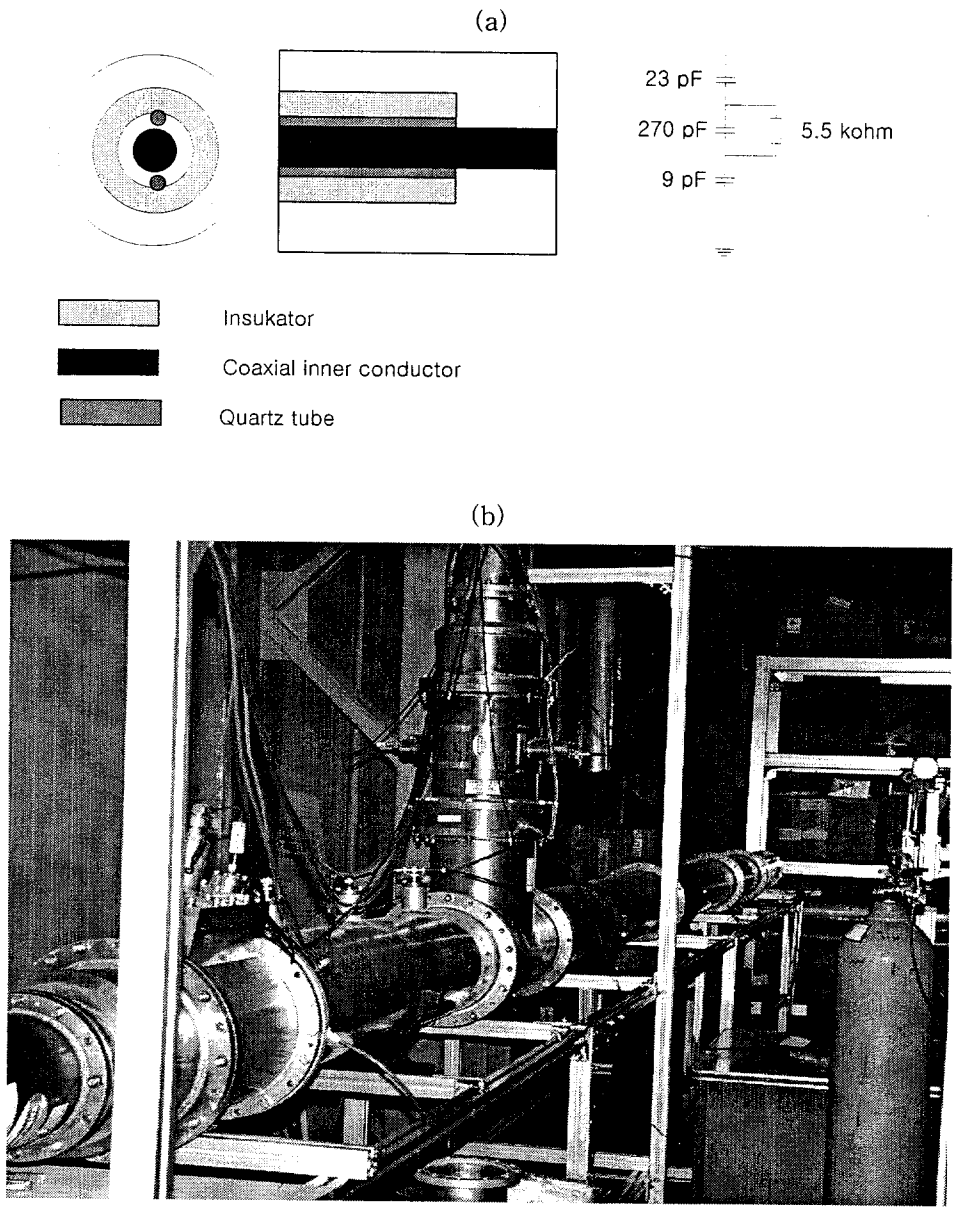


그림 3-2-144. Schematic diagram(a) and photograph(b) of $\tan \delta$ measurements in HV pot

제 3 절 ECH/LHCD 장치개발

1. 서론

KSTAR 장치의 초기운전에 가동되는 마이크로파 가열장치 (ECH)와 KSTAR의 장펄스 운전과 플라즈마 전류 통제를 위한 비유도 전류구동 (LHCD)장치를 개발중에 있다. ECH 장치는 Ohmic current drive (플라즈마 전류구동을 위해 설치된 외부 코일에 가변 전류를 흘려줌으로써 중성기체에 전압이 유도되어 플라즈마 전류 발생)가 인가하기 전 마이크로파로 중성기체의 초기 이온화를 제공함으로써 Ohmic current drive를 위한 volt-sec의 양을 줄일 수 있다. 사용되는 마이크로파는 미국 CPI사에서 제작된 Gyrotron 장치에서 발생되며 주파수는 84 GHz이며 500 kW의 출력을 가지고 있다. 현재 Gyrotron 장치는 (주)포스콘에서 성능시험중에 있다. KSTAR 장치가 장펄스를 운전하기 위해 반드시 필요한 장치중의 하나가 LHCD 장치인데, KSTAR 운전의 정상상태(steady state)유지와 플라즈마 국부가열 및 전체 가열을 통한 MHD 안정성을 최적화시키는데 사용된다. 이 장치는 Off-axis에서 전류를 유도할 수 있으며 LHCD 장치를 통해 입사되는 마이크로파의 방향성을 조절함으로써 전류가 유도되는 위치를 조정할 수 있다. LHCD 장치용 마이크로파는 Klystron tube에서 발생되며 5.0 GHz, 500 kW 출력을 낼 수 있다. Klystron tube는 일본 TOSHIBA에서 개발될 예정이다.

1단계 사업을 통해서는 ECH 장치와 LHCD 장치의 기본개념설계를 수행하였으며, 마이크로파를 이용한 플라즈마 방전현상을 연구하고 전산모사 프로그램 및 연구인력을 준비하였다. 또한 밀리미터파 취급 기본기술 훈련을 수행하였다. 2단계 사업에서는 장치의 상세 설계를 착수하여 실제 운전조건에 적합하도록 하였다. 마이크로파로 인한 플라즈마 방전 현상 및 전류구동효과의 좀더 깊은 이해를 위해 이론 및 전산모사 연구를 수행하였다. ECH 장치의 마이크로파 발생장치인 Gyrotron tube는 CPI사에서 제작되어 참여기업인 (주)포스콘에서 성능시험중에 있다. ECH장치를 구성하는 주요 부품 일부는 확보하였고 전송선 계통의 상세설계가 완료되었다. ECH 장치의 안테나 시스템은 미국 Princeton Plasma Physics Laboratory (PPPL)와 공동개발에 나섰다. LHCD 장치의 개발계획은 KSTAR 사업 계획 변경으로 인해 당초 2단계 목표와는 달리 약간 조정되어 2007년 완성으로 순연되었다. 따라서 1단계에서 결정한 3.7 GHz의 시스템 기본설계는 생략하고 5.0 GHz의 시스템으로 변경 설계 되었다. 5.0 GHz에 적합한 위상 제어 안테나(Launcher) 시스템의 기본 물리설계를 수행하였고 Prototype 제작 및 특성시험은 미국 PPPL과 공동으로 수행중에 있다.

Gyrotron tube용 고전압 전원장치 (85 kV, 30 A)는 참여 기업인 (주)포스콘에 의해 제작이 완료되었으며, 전원장치의 DC Main Power Supply 와 가속전원장치 (Acceleration Power Supply)부의 종합시험이 수행되었다. 특히 고전압 대전력 전원

장치 개발결과에 따라서는 고전압 절연기술, 노이즈 차단기술, 고전압 검출 기술, Magnet switch 설계 기술, 반도체 Switch 응용 기술, 그리고 승압 transformer 설계 기술을 습득하였다. 위와 같은 기술은 다른 어떤 산업용 고전압 대전력 전원장치 개발에도 유용하다. Gyrotron tube 성능시험용으로 100 kV, 20 μ s, 60 Hz Pulse Modulator를 (주)포스콘에 의해 또한 제작이 되어 현재 Gyrotron tube 성능 시험용으로 사용되고 있다. 성능시험시 일어날 수 있는 Arc로부터 Gyrotron tube를 확실히 보호할 수 있도록 Pulse Modulator는 설계되었다.

3단계 사업에서는 ECH 장치 개발을 완료하며 KSTAR 장치에 설치할 계획이다. 또한 ECH-preionization을 통한 KSTAR 플라즈마 시동 기술을 확보한다. LHCD의 위상제어 안테나(Launcher) 시스템 공학 설계는 미국 PPPL과 공동으로 계속해서 추진할 계획이다. Klystron tube 시작품 개발 및 대응 고전압 전원장치 공학설계 또한 진행될 것이다.

2. 연구내용

가. 1차년도 ('98.9.8- '99.9.7)

- ECH 장치 상세설계 및 본체 부품 발주
 - Transmission Line 부품 도면화 작업
 - Gyrotron 고전압 전원장치 (85 kV, 30 A) 의 정류부분 제작 (Inverter Power Supply, Rectifier Unit, Capacitor Bank)
 - 고전압 Regulation, Crowbar 스위치 설계
 - Gyrotron 및 Transmission Line 주요 부품 구매
- LHCD 장치 상세 설계
 - PPPL 과 LHCD Launcher 관련 공동연구 협의
 - TFTR 과 TPX Launcher 구조 비교
- 전산모의 실험 및 기술자료 조사
 - ECH Pre-ionization Start-up 관련 전산모사 프로그램 개발

나. 2차년도 ('99.9.8- '00.9.7)

- LHCD system 부대설비 (냉각수, 압축공기) 용량 조사
- LHCD Launcher 구조 변경 검토
 - 3.7 GHz 와 5.0 GHz, 5.7 GHz launcher 구조 비교
 - Parallel refractive index & reflection 계산 (Brambilla 코드)
 - Waveguide power loss 계산
- LHCD (4.6-5.7 GHz) Launcher 시스템의 PPPL과 공동설계

- GA에서 10-MVA Power Supply 무상 대여 (LHCD에 수정하여 사용할 예정)
- GA Power Supply 검수 (포항가속기 연구소)
- ECH System 부대설비에 파악에 관해 건설 팀과 업무협조
 - 냉각수, 압축공기, LHe, LN2 용량 조사
- ECH MOU (L-box), Launcher 설계 (GA/CPI와 공동)
- ECH transmission-line component 구매 (계속)
- Gyrotron 설치 및 Test에 관련 자료수집
- Gyrotron Power Supply 제작수행 (계속)
 - DC 정류 부분 제작 완료 (Inverter Power Supply, Rectifier Unit, Capacitor bank)
 - APS Power Supply 제작 중
 - Pulse Switch 제작 중 (IGBT Switch : 80 kV, 25 A)
- Gyrotron power supply 특성 테스트 수행(1차, 포스콘)
- ECH Gyrotron Power Supply 컨트롤 시스템의 설계 방향 협의.
- 전산모의 실험: Improved ECH pre-ionization 코드 시뮬레이션 (Impurity 포함).

다. 3차년도 ('00.9.8- '01.9.7)

- 500 kW ECH Source System(CPI Gyrotron) 성능시험 환경구축 및 장비 구매
- Gyrotron Tube, L-box, Water Load 지지대 제작 완료
- ECH System 부대설비 설계 완료 (삼성물산팀과 업무협조)
 - 냉각수 온도 및 유량 확정, 분배기 위치 및 냉각수 회로 설계 확정
- ECH Interlock System 설계 완료 및 구축 진행, ECH control system 상세 설계
 - 계속
- ECH antenna
 - Radiation Pattern 계산 (HE₁₁ mode, 2.5 corrugated waveguide)
- ECH Transmission Line 조립 및 Pumping 테스트 수행
 - 4 미터길이의 전송선 라인을 조립 및 pumping 테스트 수행
- L-box 제작 완료 (CPI) 및 Waveguide adapter 제작
- Gyrotron Power Supply 성능시험 (포스콘)
 - Main DC Power Supply
 - Acceleration Power Supply 단독테스트 완료
 - 연계 시험 연구 및 착수
 - Gyrotron 성능시험을 위한 Test Module Power Supply (Pulse type) 설계 완료 및

제작 진행중

- LHCD Coupler 설계
 - PPPL에 방문하여 C-MOD coupler 설계 파악 및 도면 자료 획득. C-MOD coupler water dump RF test.
 - KSTAR 5.0 GHz LH coupler 3-dB power splitting region 공동설계 (HFSS simulation)
 - Radiation Pattern Analysis (HFSS)
- GA Power Supply 의 KAERI 이동관련 업무 협조
 - Polarity change : -87 kV +87 kV
 - KAERI 이동 및 commissioning

라. 4차년도 ('01.9.8- '02.6.7)

- HFSS simulation을 통한 5.0 GHz Launcher의 waveguide splitter 기본 설계
- Launcher의 water load 설계 (HFSS & Ansys simulation)
- Launcher의 공학 설계를 PPPL과의 공동연구기 위한 준비
- ECH 전송선 설계 완료
- ECH antenna PPPL과 공동제작 추진키로 결정
- 500 kW ECH Source (CPI Gyrotron) 개발
 - Factory 테스트 수행
 - POSCON으로 직접 운송 및 설치
 - 성능시험 완료
- HV DC Gyrotron Power Supply 종합시험 (포스콘)
- HV Pulse Power Supply (Test Module) 제작 (for Gyrotron tube test) 완료 및 성능시험
- Gyrotron Power Supply Interlock system 설계 완료 및 설치
- ECH Local Control System 부품 구매 계속
- ECH preionization code simulation 완료 및 결과 보고
- LSC code simulation 완료

3. 연구개발 결과

가. ECH 장치

(1) ECH 장치 상세 설계

ECH 장치의 상세 설계는 완성되었다. ECH 장치는 크게 마이크로파 발생장치인

Gyrotron system, 대응 전원장치, 마이크로파 전송선, 그리고 안테나로 구성된다. 전체적인 장치의 layout 및 조립구성을 Pro/Engineer 프로그램을 이용하여 설계하였으며 그림 3-3-1과 같다.

Gyrotron tube에서 안테나까지의 전송선 길이는 약 40 m이고 전송선을 통하면서 잃는 power 손실은 아래 표 3-3-1과 같다. 표 3-3-1은 전송선을 구성하는 1.25"와 2.5" 내경의 corrugated waveguide, miter bend에 의해 손실되는 power의 양을 서로 비교해 보여주고 있다. KSTAR ECH 장치의 전송선은 1.25" 내경의 부품들로 구성되고 이 경우 약 93 %의 전송률을 가지도록 설계되었다. 표 3-3-1에서 보여진 것처럼 2.5" 시스템보다는 power 손실이 약간 많지만 조립시 발생할 수 있는 alignment error를 줄일 수 있는 장점이 있다. 전송선 내부는 진공상태 (압력: 1.0×10^{-5} torr)로 유지되며 이는 고출력 마이크로파가 진행할 때 절연파괴를 방지하기 위함이다.

ECH antenna 전단부의 구성 부품들을 자세히 보면 그림 3-3-2와 같다. 먼저 tokamak의 진공과 ECH 전송선의 진공을 분리키 위한 diamond window를 연결하며, diamond window 보호를 위해 충격 흡수제 waveguide bellows를 연결한다. Waveguide bellows는 axial 방향으로 최대 +5 mm/-10 mm 변형이 가능하다. KSTAR center port는 최대 +15 mm의 축방향 변형이 예상됨으로 두 개의 bellows가 필요하다. KSTAR tokamak의 vacuum vessel이 고전압으로 떠 있을 것이 예상되어 그 다음 DC electrical break가 연결된다. 이것은 최대 5 kV DC 까지 절연할 수 있는 부품이다. ECH 전송선의 유지 및 보수 작업 혹은 diamond window 손상 시 KSTAR의 tokamak 진공을 깨뜨리지 않고 하기 위해서는 RF gate valve가 필요하다. DC electrical break의 손상까지도 발생할 것을 고려하여 RF gate valve는 DC electrical break 다음에 설치된다. RF gate valve는 정상 운전시 84 GHz 마이크로파가 진행하므로 valve 내에 1.25" ID corrugated waveguide 가 삽입된 구조로 특수하게 제작된다. 한 가지 주의 할 것은 RF gate valve 가 닫혀져 있을 때 500 kW, 2 sec의 마이크로파가 전송되면 valve의 심각한 손상이 발생됨으로 gate valve 가 닫혀져 있을 때에는 gyrotron system의 interlock이 요구되어야 한다.

ECH antenna 바로 전 waveguide diameter taper가 연결되는 데, 이는 1.25" ID corrugated waveguide에서 2.5" corrugated waveguide로 tapering 된 부품이다. Taper 끝은 open-ended로 되어 있으며, 마이크로파가 open-ended에서 radiation 되어 antenna의 fixed mirror로 향하게 된다. Taper를 사용한 이유에 대해서는 아래 (9)절에서 설명된다.

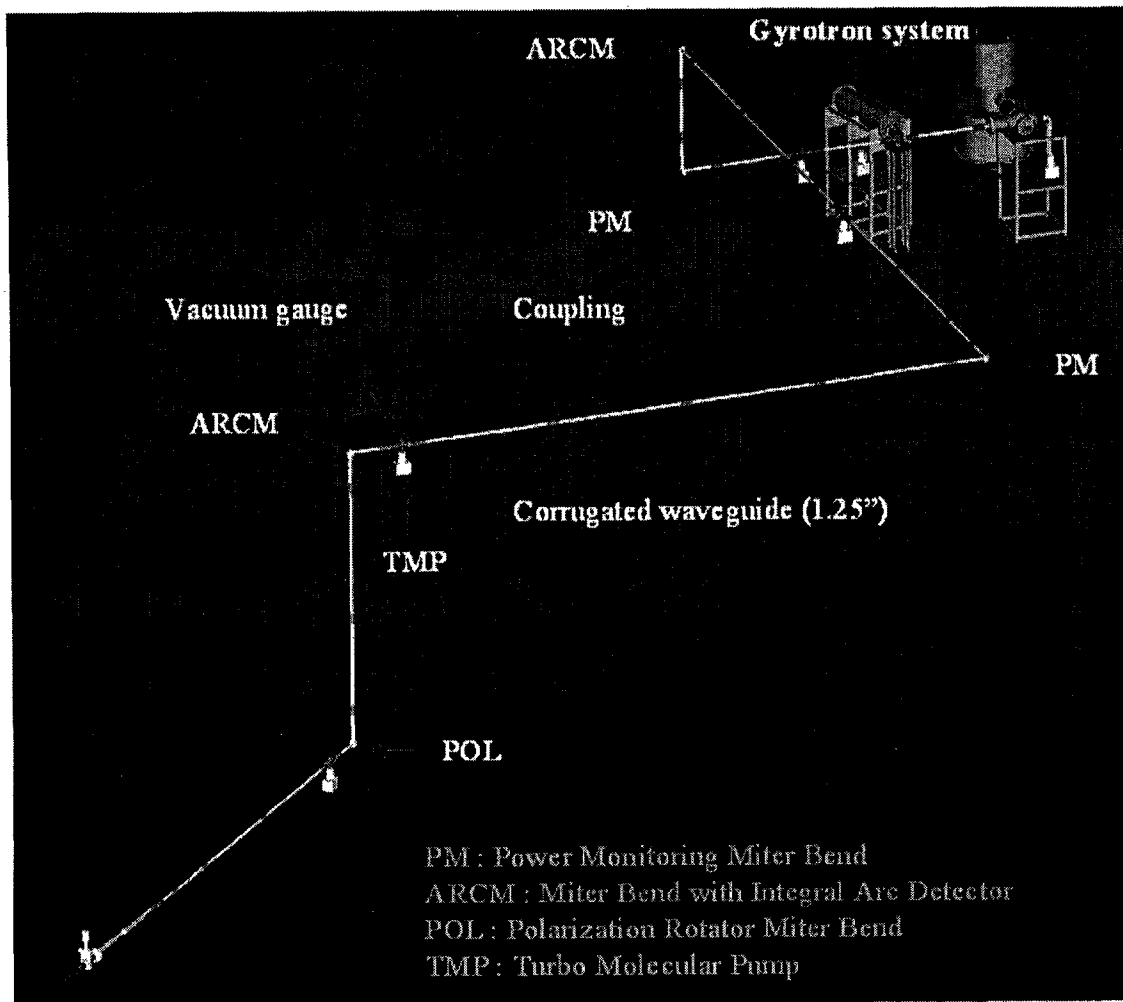


그림 3-3-1. The 3-D layout of the ECH system.

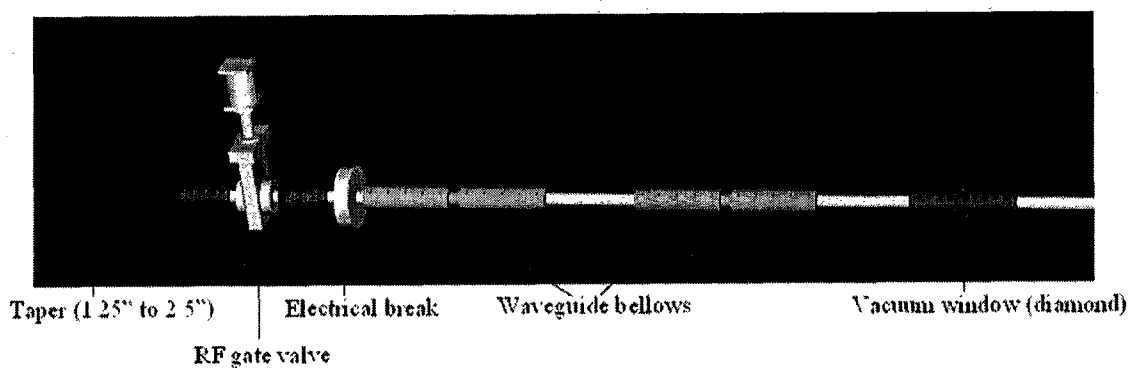


그림 3-3-2 The end region of the ECH transmission system.

표 3-3-1

LOSS		D = 63.5 mm	D = 31.75 mm
Ohmic waveguide loss (40 m)		0.015 % per 10 m	0.12 % per 10 m (x 4)
miter bend	Ohmic loss - H plane	0.1 %	0.07 % (x 5 ea)
	E plane	0.2 %	0.14 % (x 5 ea)
Mode conversion loss (phase corrected)		0.4 %	1 % (x 5 ea)
Mode conversion by Diameter change, $\Delta D = 0.06$ mm		0.0001 %	0.0004 % (x 6 lines)
Axial offset, $\delta = 0.1$ mm		0.002 %	0.009 % (x 6 lines)
Mode conversion by tilts, $\Delta\theta = 2$ mrad		0.13 %	0.03 % (x 6 lines)
Total transmission loss		~6 %	~6.8 %

(2) Gyrotron system

Gyrotron system은 Gyrotron tube, L-box, 10" to 1.25" waveguide adapter로 구성된다. 그림 3-3-3은 Gyrotron system의 구성도를 보여주며 Gyrotron tube에서 발생된 84 GHz 500 kW의 마이크로파가 L-box내에 있는 거울에 의해 반사되어 1.25" corrugated waveguide로 집속된다. 집속된 마이크로파는 waveguide switch를 거쳐 안테나까지 도달한다.

(가) Gyrotron tube

Gyrotron tube는 미국 CPI사와 2000년 초에 계약으로 주문 제작이 시작되어 현재 참여 기업인 (주)포스콘에 설치되어 성능시험중이다. CPI gyrotron tube는 Collector Potential Depression (CPD) Diode type으로서 마이크로파 출력 효율이 40 % 이상이 된다. CPI gyrotron tube는 84 GHz, 500 kW, 2 초 펄스의 마이크로파를 출력할 수 있으며, 주파수 변위폭은 0.1 GHz이다. Tube내에는 internal mode converter가 있어 tube output window로는 TEM00 모드 (Gaussian mode)의 마이크로파가 나오게 된다. Internal mode converter는 3개의 mirror로 구성되며 tube내에 설치되어 있다. Cavity에서 발생된 TE15,4,1 모드의 마이크로파는 일련의 3개의

mirror에 의해 반사되어 output window로 나올 때는 Gaussian mode로 전환된다. Gaussian mode의 마이크로파는 중앙에 power가 집중되어 있으므로 tube output window는 열에 충분히 견디기 위해 chemical-vapor-deposition (CVD) 기술을 이용한 diamond window로 제작되었다. Diamond window의 직경은 2.5"이며 냉각은 edge-cooling방식을 채용한다. 그림 3-3-4는 Gyrotron tube의 도식 설계를 보여주고 있다.

정상 운전 빔 전압과 전류는 각각 80 kV와 25 A이다. CPI diode gyrotron tube는 cathode, body, 그리고 collector의 극을 가지고 있다. Cathode에는 음전압 -56 kV가 인가되고 cathode와 body사이로 +80 kV로 인가되도록 전원장치가 요구된다. Cathode와 body사이의 절연내압은 최고 85 kV이며 body와 collector사이의 절연내압은 30 kV이다. 출력 마이크로파의 Power modulation은 펄스내에서 5 Hz - 20 kHz 주파수로 100 kW와 500 kW 사이에서 가능하다.

CPI diode gyrotron tube는 5개의 초전도 전자석 coil을 사용하며 cavity영역에서의 자장의 세기는 약 3 Tesla가 된다. 2개의 Main coils, 1개의 gun coil (null coil), 그리고 2개의 transverse coils (x and y 방향)로 구성된다. 초전도 코일은 vacuum dewar 내부에 장착되어 있고, 액체 헬륨을 부어 초전도를 유지한다. 액체 헬륨은 약 120 liter로 채워질 수 있으며 boil-off rate를 줄이기 위해 cryo-cooler와 compressor가 작동된다. 일주일에 5일간 매일 10시간씩 코일 전류를 흘려주었을 때 3주후에 액체 헬륨이 보충되어야 된다. Collector의 coil은 비초전도 코일이며, 위 아래 두 개의 코일로 나뉘어 장착되어 있다. 이 코일은 cathode에서 방출된 전자빔이 collector에 적은 power density를 가지고 수집되도록 한다. 그림 3-3-5와 6은 초전도 전자석 coils의 도면과 장치 사진을 보여주고 있다. 자세한 CPI diode gyrotron tube 사양은 부록을 참조 바람.

현재 gyrotron tube는 (주)포스콘에 설치되어 성능시험중에 있으며 그림 3-3-7은 gyrotron tube를 초전도 전자석에 설치하여 초전도 전자석의 vacuum dewar를 pumping 하고 있는 모습을 보여주고 있다.

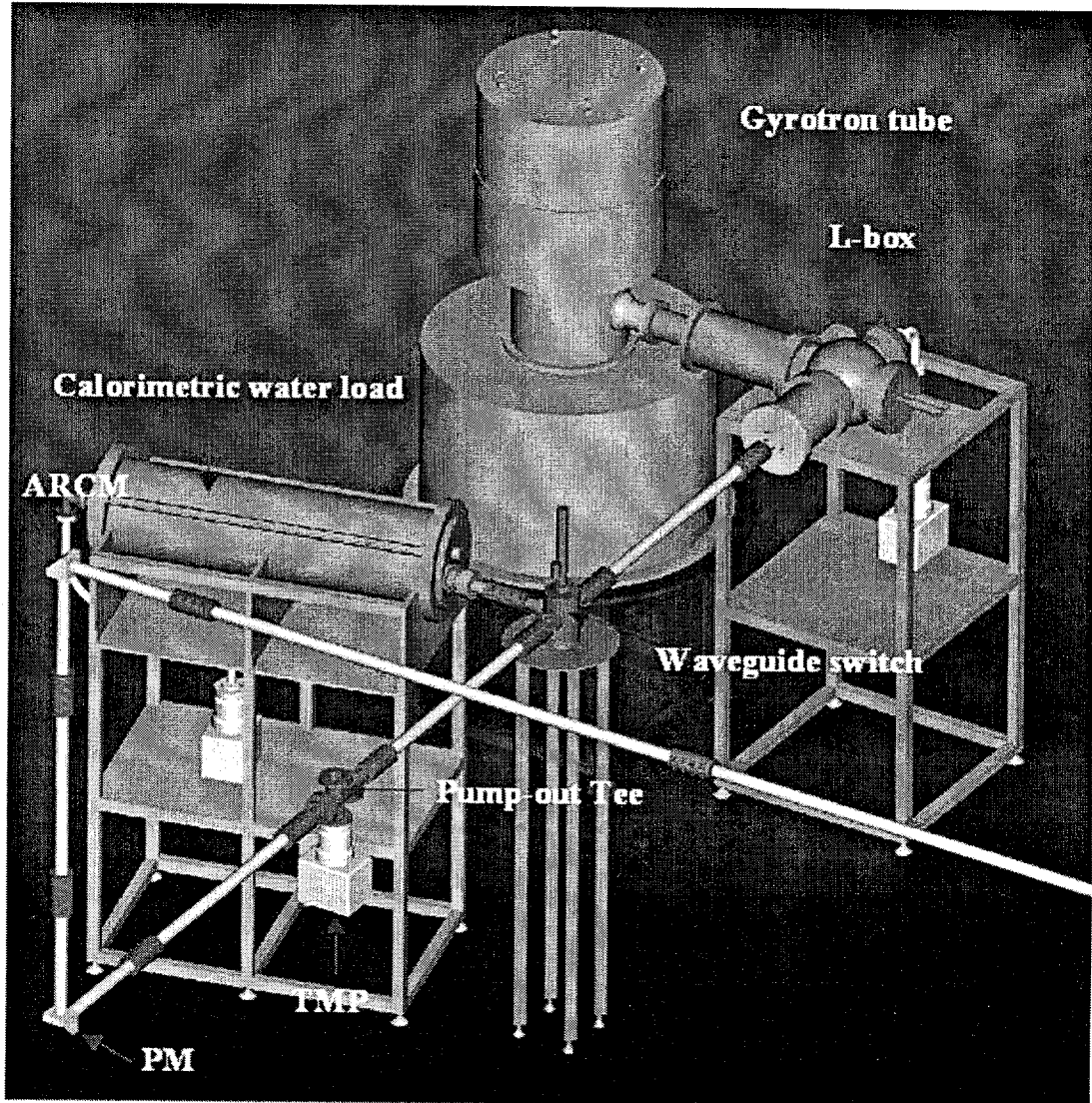


그림 3-3-3. The layout of the gyrotron system assembly.

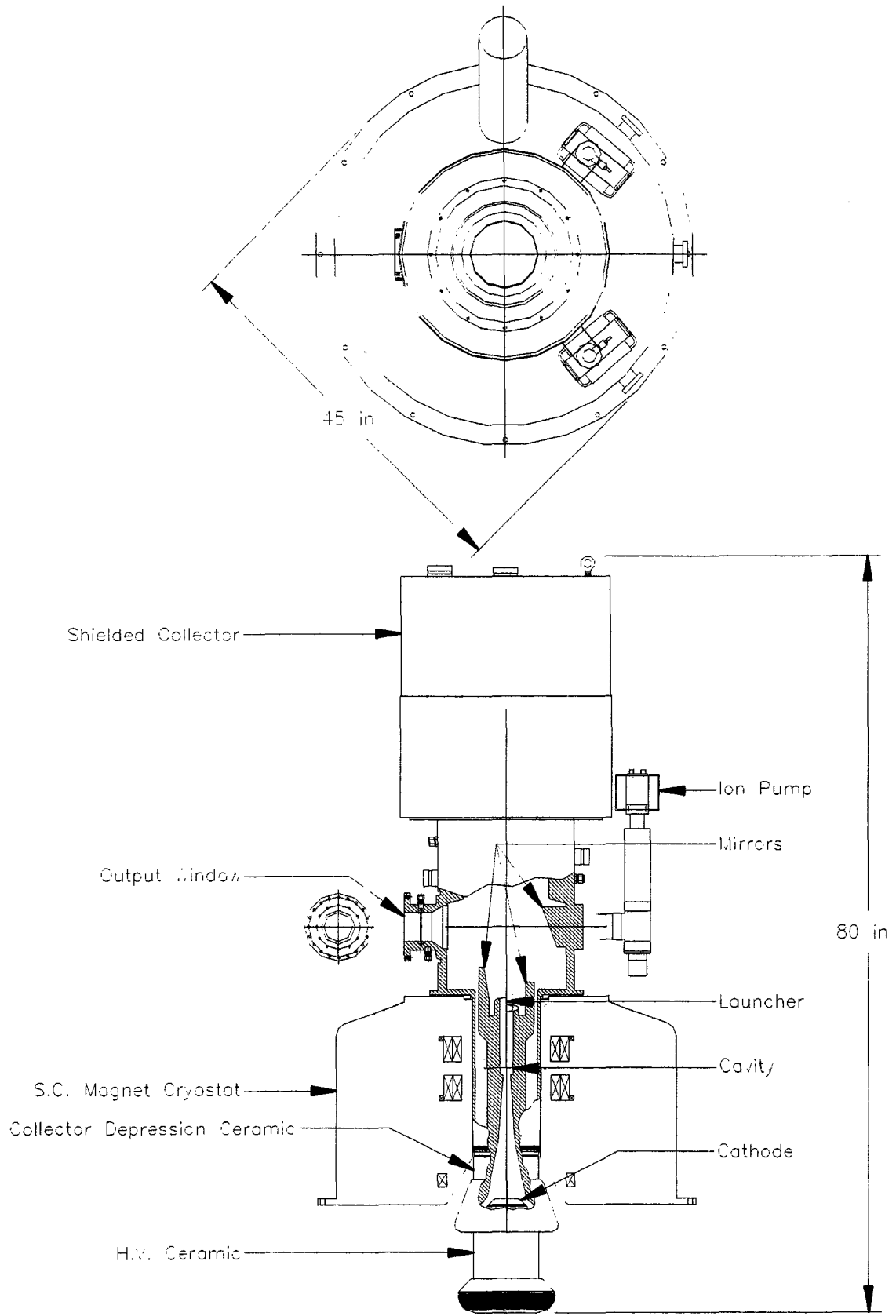


그림 3-3-4. The schematic drawing of the gyrotron tube.

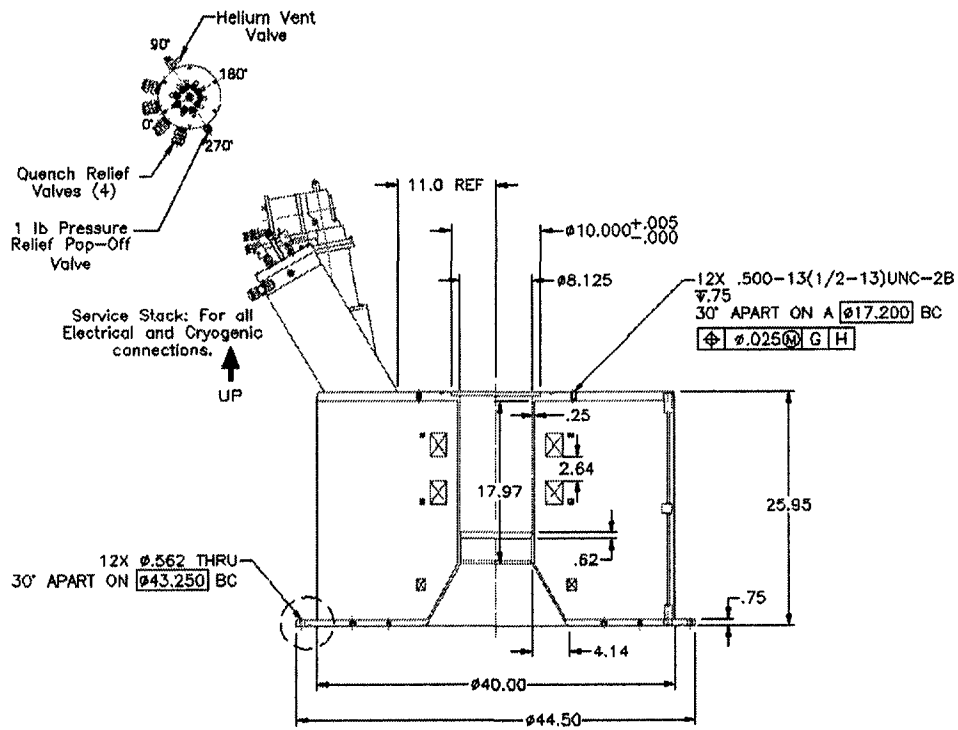


그림 3-3-5. The drawing of the superconducting magnet for the 84 GHz CPI diode gyrotron.



그림 3-3-6. The photo of the superconducting magnet.

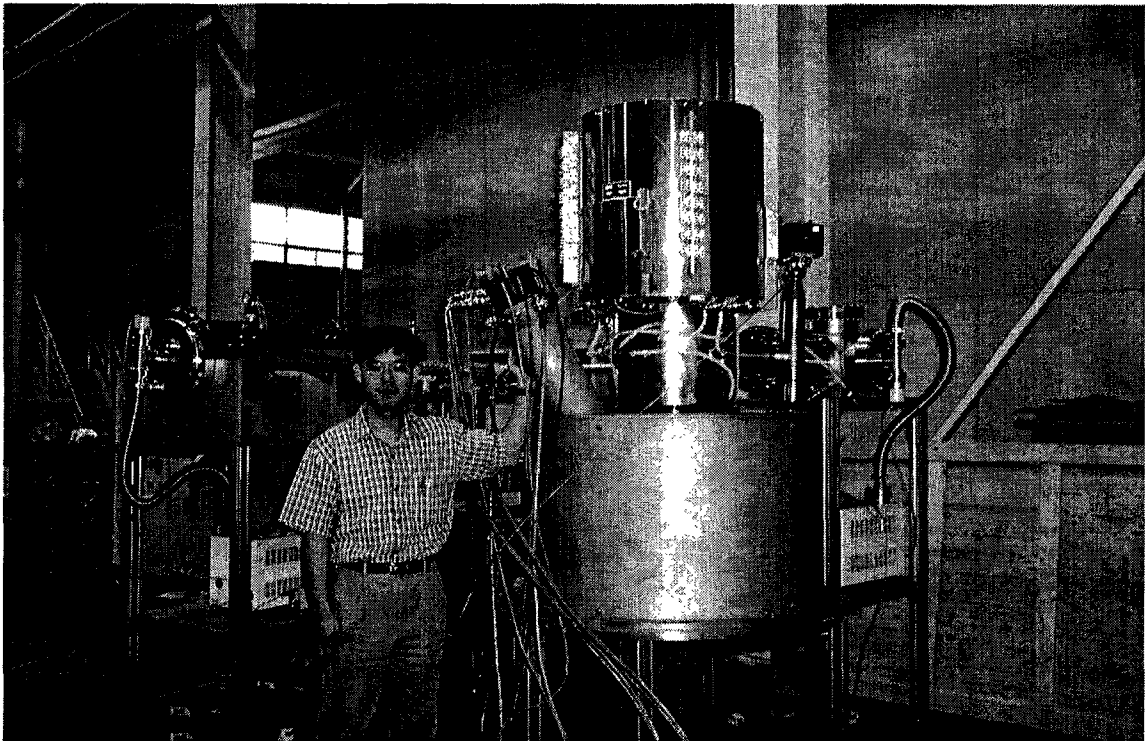
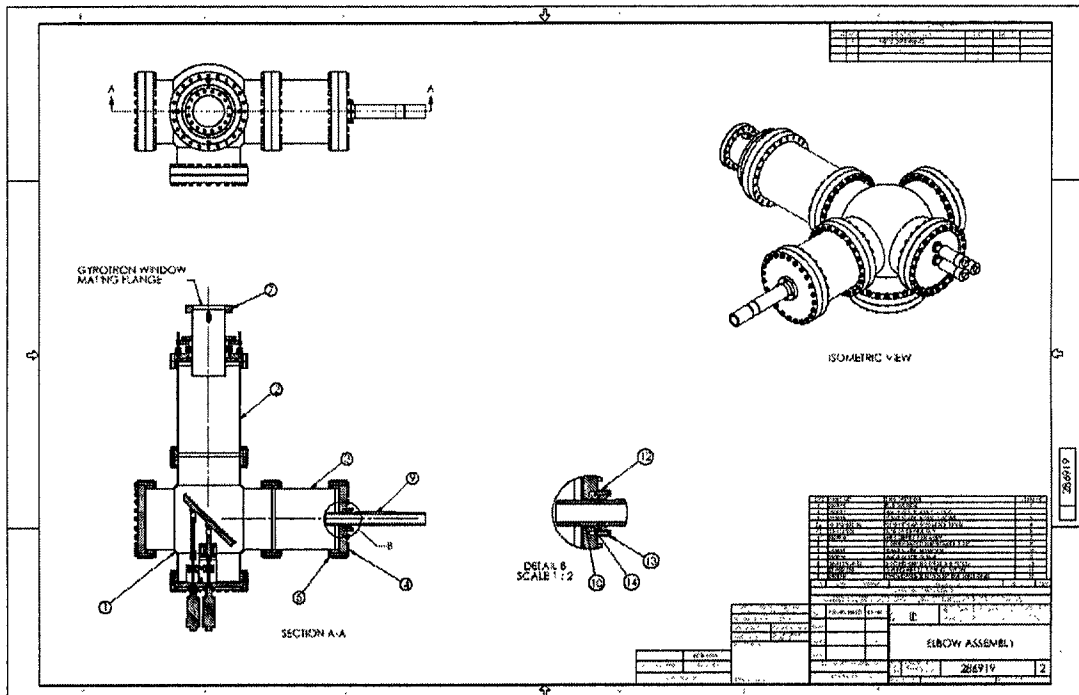


그림 3-3-7. The assembly of the gyrotron tube and the superconducting magnet.

(나) L-box

L-box는 단순히 10 inch port의 5-way chamber와 내부에 copper mirror로 구성된다. L-box는 Gyrotron tube의 output window로 나오는 Gaussian mode beam을 1.25 inch의 corrugated waveguide로 집속하는 역할을 한다. Internal mode converter를 갖고 있지 않았던 구형 gyrotron tube는 Gaussian mode 변환기인 Mirror Optical Unit (MOU)이라는 장치가 별도로 필요하였다. L-box는 단순히 집속장치이며 internal mode converter의 역할로 MOU의 복잡성과 어려운 tuning 작업을 피할 수 있다. 그림 3-3-8과 9는 L-box의 도면과 실제 장치 사진을 보여주고 있다.



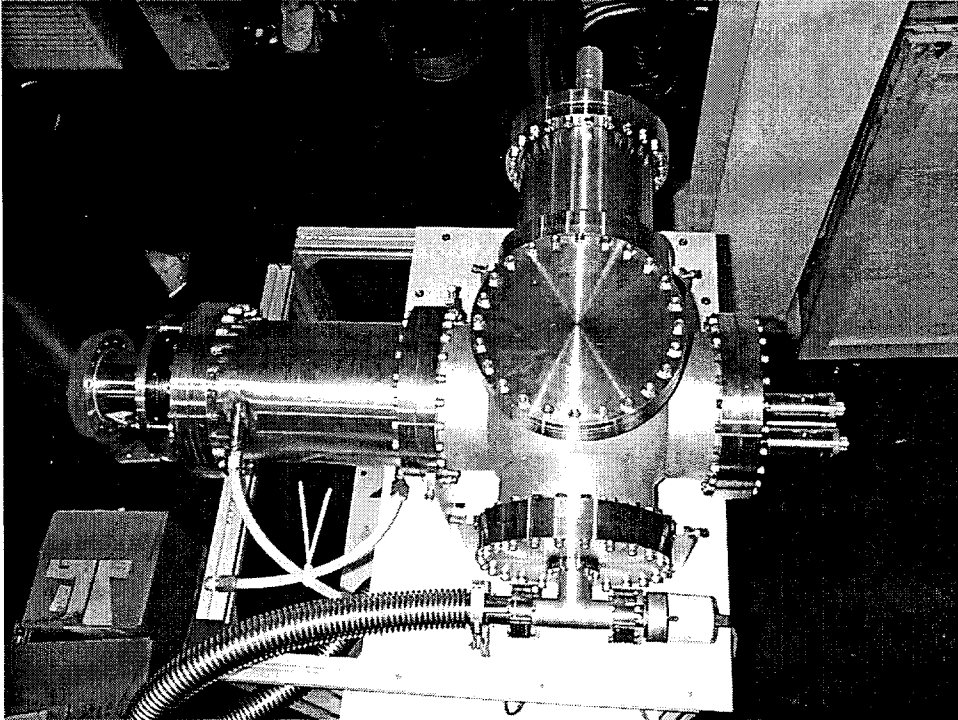


그림 3-3-9. The L-box assembly on the support structure.

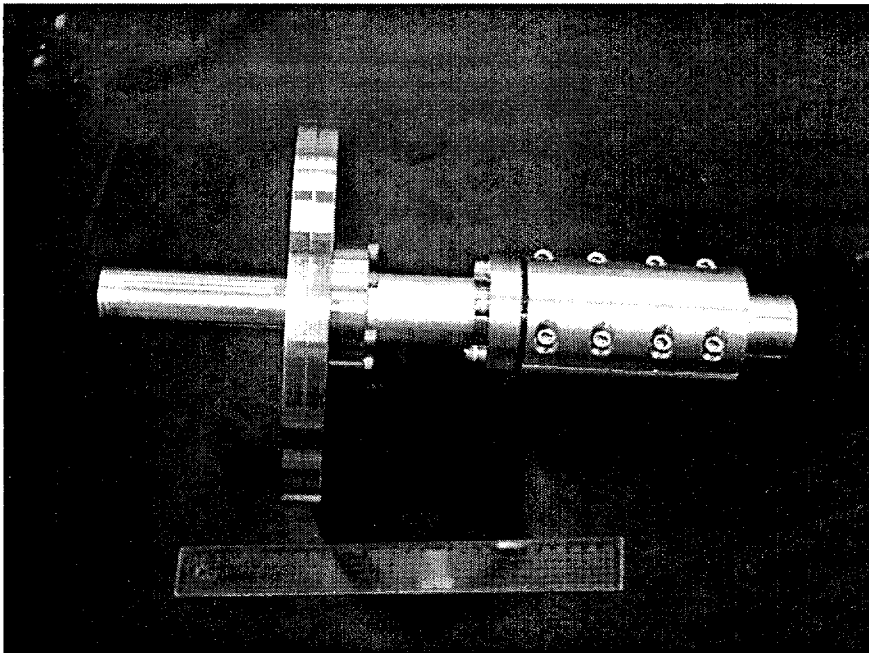


그림 3-3-10. The waveguide adapter manufactured by POSTECH.

(다) Waveguide adapter

L-box의 port의 flange는 10 inch 크기이므로 1.25 inch의 corrugated waveguide를 연결하려면 adapter가 필요하다. 1.25 inch corrugated waveguide의 한쪽 끝은 L-box port로 삽입되고 삽입되는 내부 면이 진공 밀착을 위해 retaining flange가 10 inch flange에 볼트로 조여진다. 이 부분은 포항공과대학교에서 자체 제작하였고 진공테스트를 수행하였다. 그림 3-3-10은 제작 및 조립된 waveguide adapter를 보여주고 있다.

(라) Dummy load

KSTAR plasma를 사용하지 않고 gyrotron tube의 시험운전을 위해서는 마이크로파를 흡수할 수 있는 dummy load가 필요하다. 현재 미국 GA사로부터 주문 제작하여 확보된 dummy load는 calorimetric water load이며 500 kW, 2 sec, 80 -110 GHz의 bandwidth를 가진 마이크로파를 흡수할 수 있는 특성을 가지고 있다. 이 dummy load는 vacuum 조건에서 사용되며 최대 내부 허용 압력은 10^{-3} torr 이다. 마이크로파 입력포트는 수직방향에서 14도 각도로 기울어져 있다. 이는 입력된 마이크로파가 dummy load 내에서 여러 번 반사가 되면서 진행하도록 하여 흡수될 수 있는 시간을 길게 하게끔 한 것이다. 특별히 입력포트는 1.25" ID. corrugated waveguide로 되어 있어 HE11 모드의 마이크로파를 흡수하는데 적합하도록 설계되었다. 입력포트로부터 되 반사되는 마이크로파 출력은 약 5 % 정도이며 마이크로파 leakage는 약 10 mW이다. 일단 마이크로파가 입력되면 마이크로파의 67 %의 에너지가 냉각수에 의해 제거되는 데 걸리는 시간은 약 80 초이며, 99 %의 에너지가 제거되는 데 걸리는 시간은 약 360 초이다. 그림 3-3-11은 support에 장착된 dummy load를 보여주고 있다.

Dummy load 내에서 발생된 흡수열은 내부로 흐르는 냉각수에 의해 전달되며 냉각라인의 입력수의 온도와 출력수의 온도차로 흡수된 마이크로파의 출력을 계산할 수 있다. 입력된 마이크로파의 펄스 폭에 따라 계산 방법이 약간 다르다. 그림 3-3-12는 repetitive short pulses와 single long pulse의 마이크로파가 입력될 경우에 마이크로파 출력을 계산하는 방법을 설명하고 있다.

For single pulses, the integral of the power absorbed in the water must be calculated first. This is because the time constant for heating the dummy load is normally much longer than the gyrotron pulse. The total energy absorbed is thus obtained. Dividing the energy by the gyrotron pulse width gives the power during the pulse. For repetitive pulses lasting longer than the time constant of the dummy load (about 360 seconds), the power measured by the calorimetry should reach a steady state. The power absorbed during each gyrotron pulse is

then the power measured by the calorimetry divided by the duty cycle [The duty cycle is the ratio of the time the gyrotron is on (the pulse width) to the time between the beginning of successive pulses].

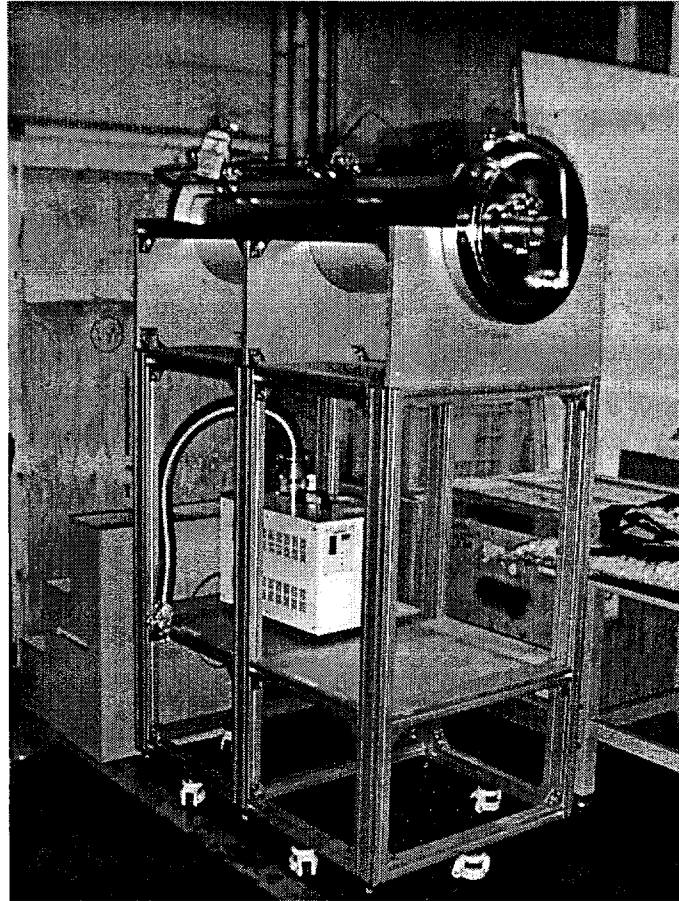


그림 3-3-11. The dummy load on the support.

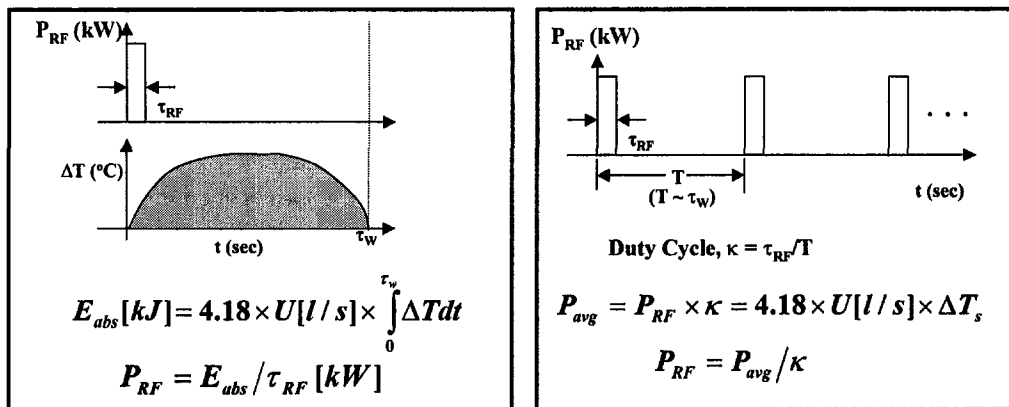


그림 3-3-12. The calorimetric measurement for the repetitive short pulses and the single long pulse.

(마) Water cooling conditions

Gyrotron tube와 calorimetric water load의 냉각수의 조건들은 표 3-3-2에 나타나 있다.

표 3-3-2

Gyrotron Tube							Inlet Coolant Water Conditions						
Coolant Water Flow							Temp	Pressure drop					
	Collector	Diamond Window	Cavity	Body	Internal Loads	Mirror/ Window Support/ Sleeve	---	Collector	Window	Cavity	Body	Internal Loads * Inlet pressure < 40 psi	Mirror/ Window Support/ Sleeve
Tube type	2.5" Victuallic	3/8" Hansen	3/4" Hansen	3/4" Hansen	1/2" Hansen	3/8" Hansen	---	---	---	---	---	---	---
Units	gpm/lps	---	---	---	---	---	°C	psig/kgf-cm ²	20/1.36	150/10.2	150/10.2	20/1.36	80/5.44
Max.	---	3/0.19	20/1.26	20/1.26	10/0.63	5/0.32	30	150/10.2	---	---	---	---	---
Min.	250/15.8	---	---	---	---	---	10	---	---	---	---	---	---
Calorimetric Water Load							Inlet Coolant Water Conditions						
Coolant Water Flow							Temp	Pressure	Pressure Drop	ΔT			
Maximum energy pulses (500 kW, 2 sec, every 5 minutes)							---	---	---	Maximum energy pulses (500 kW, 2 sec, every 5 min.)			
Units	lps						°C	psig/kgf-cm ²	psig/kgf-cm ²	°C			
Max.	0.17						35	80/5.44	---	---			
Nom	---						15	50/3.4	8/ 0.54	20			
Total required water flow							Maximum water pressure		Operating water temperature				
19.6 lps (70 m ³ /hr)							150 psig (10.2 kgf/cm ²)		30 °C				

(3) Gyrotron 고전압 전원장치

Gyrotron 고전압 전원장치는 참여기업인 (주)포스콘에서 개발 및 제작되었다. Gyrotron 고전압 전원장치는 최근 급속도로 발전된 solid-state 기술을 채용하여 고전압/대전류 전원장치에 필수적이었던 진공관을 solid-state 소자로 대체하여 시스템을 경박/단순한 구조로 설계하였고 모든 전원장치 부분이 제작 완료되었다. 또한 Main DC Power Supply와 Acceleration Power Supply의 단독테스트 및 연동테스트가 완료되었으며, 부하를 연결한 종합테스트 또한 완료되었다. 84 GHz, 500 kW CPD (Collector Potential Depression)/Diode Gyrotron을 구동키 위해 두 가지의 전원장치가 필요로 한다. 하나는 Gyrotron의 cathode와 collector 사이에 고전압/대전류 (-56 kV, 25 A nominal)를 걸어주는 전원장치 (Main DC Power Supply)이고 다른 하나는 cathode에서 전자빔이 방출되도록 cathode와 body사이에 가속 고전압 (80 kV)을 걸어주는 전원장치 (Acceleration Power Supply)이다. 위 전원장치는 1 ms

- 2 sec의 고전압 펄스를 발생하도록 고성능 IGBT 스위치 소자를 사용하고 있으며, 두 전원장치가 정확한 timing delay를 두고 운전되도록 설계되었다. 또한 CPI CPD-diode gyrotron의 출력 마이크로파 Power modulation을 펄스내에서 5 Hz - 20 kHz 주파수로 100 kW와 500 kW 사이에서 가능토록 전원장치를 설계하였다.

아울러 Gyrotron의 성능시험을 위해 short pulse (20 μ s) 고전압 전원장치를 참여기업인 (주)포스콘에서 설계하여 제작하였다. 이 전원장치는 20 μ s의 pulse를 최대 60 Hz까지 연속으로 발생할 수 있는 장치이며 최대 85 kV, 30 A까지 출력할 수 있다.

자세한 사양과 회로는 아래에서 기술된다.

(가) Pulse modulator (test module)

Pulse modulator의 출력 변수와 펄스 변수는 아래 표 3-3-3에 나와 있다. Pulse modulator의 스위치 방식은 Pulse Forming Network (PFN)방식을 수용하고 있고, PFN을 통해 스위칭된 펄스는 고전압 펄스 승압기 (High Voltage Pulse Transformer)의 1:12의 승압률로 최대 90 kV까지 승압된다. Pulse modulator의 동작 회로도 및 장치사진은 그림 3-3-13, 14, 15에서 보여진다.

표 3-3-3

정격 출력펄스 전압	90 kV	펄스 폭	20 μ s
펄스출력전압 범위	0 - 90 kV	상승시간	1 μ s 이하
정격 출력펄스전류	30 A	하강시간	3 μ s 이하
최대출력 펄스용량	1.8 MW max	리플전압	1 % 이하 (90 kV)
펄스 주파수	Single, up to 60 Hz	Overshoot	2 % 이하 (90 kV)

Pulse modulator의 부하시험과 Arc 방전시험을 수행하였고 그에 대한 결과 파형이 그림 3-3-16에서 보여진다. 파형의 모양을 통해 상승시간은 2 μ s정도이고 펄스 폭은 18 μ s임을 알 수 있다. Arc 방전시험은 Gyrotron tube내에서 방전이 일어날 시 Arc 에너지와 Pulse modulator의 보호를 점검하기 위해 수행되었다. Arc 방전시험은 부하에 6 J의 에너지까지 견딜 수 있는 0.120 mm 직경, 5 inch 길이의 구리선 (test wire)을 연결하여 행해졌다. Gyrotron tube 내에서 Arc 발생시 허용되는 Arc 에너지는 6 J - 10 J로 주어졌으므로 6 J에 견디는 test wire의 녹음의 유무를 확인하면서 실험이 수행되었다. Test wire 조사 실험에 관한 내용은 (다)에 기술된다. Arc는 Pendulum스위치를 사용하여 발생토록 하였다. 80 kV 고전압 펄스의 Arc를 발생하였을 때 구리선이 녹지 않고 견디었고 Pulse modulator는 아무 이상 없음을 확인하였다.

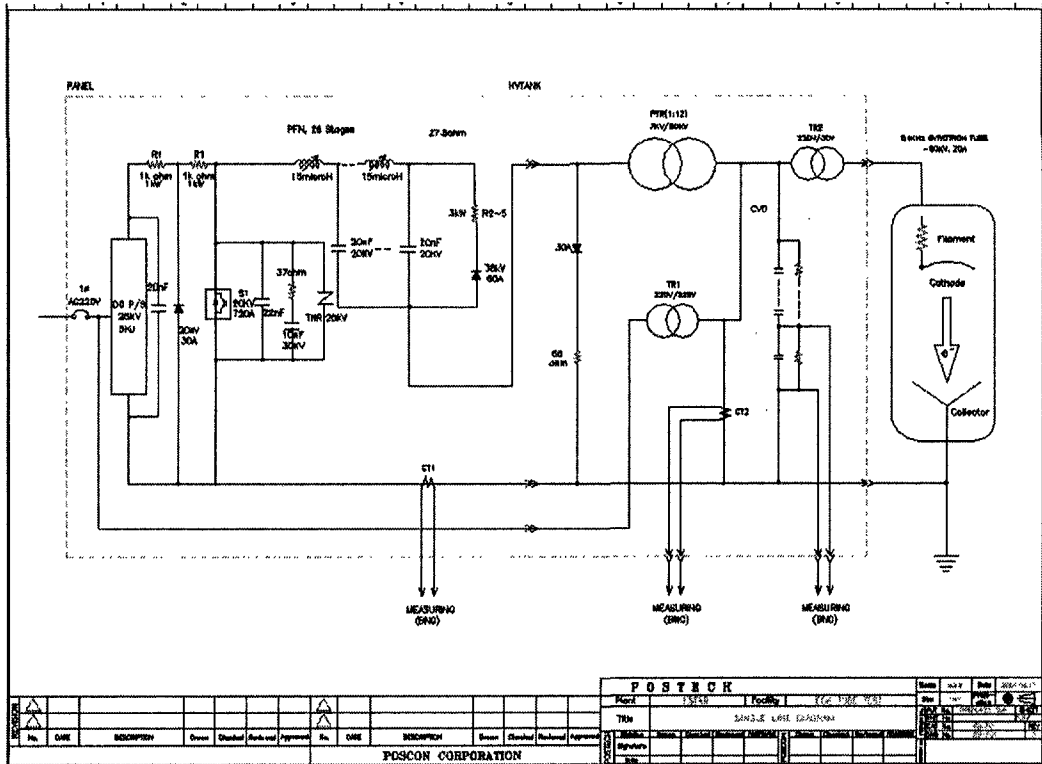


그림 3-3-13. The overall electrical circuit drawing of the pulse modulator.

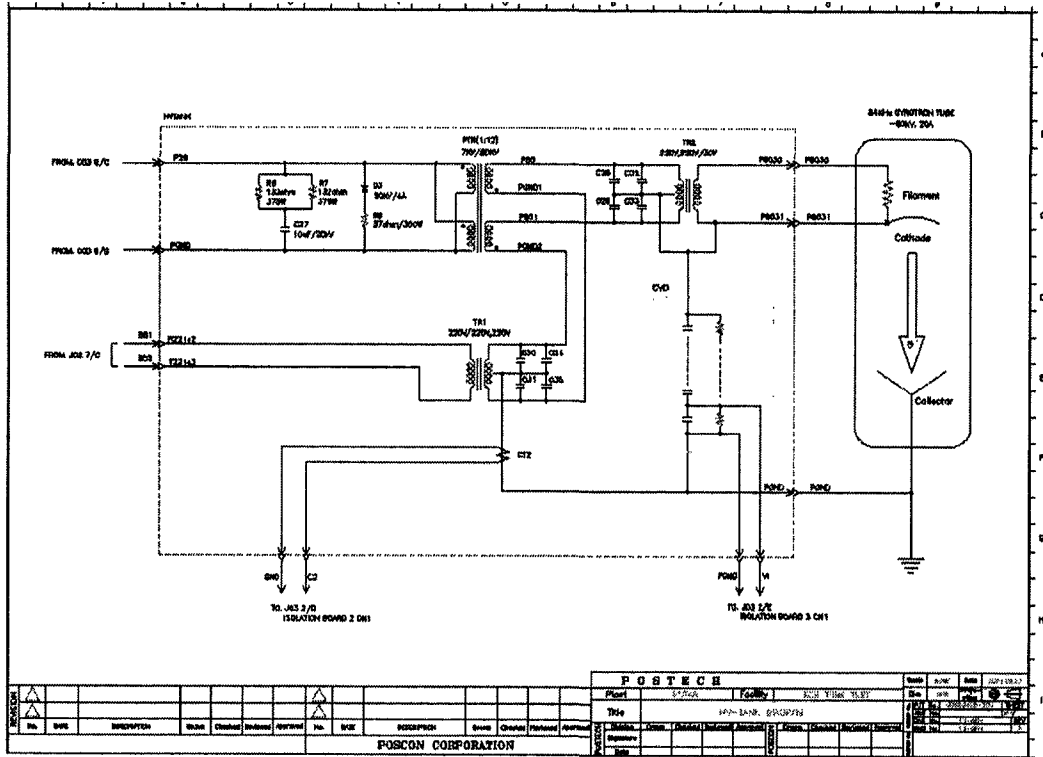


그림 3-3-14. The electrical circuit of the HV transformer of the pulse modulator

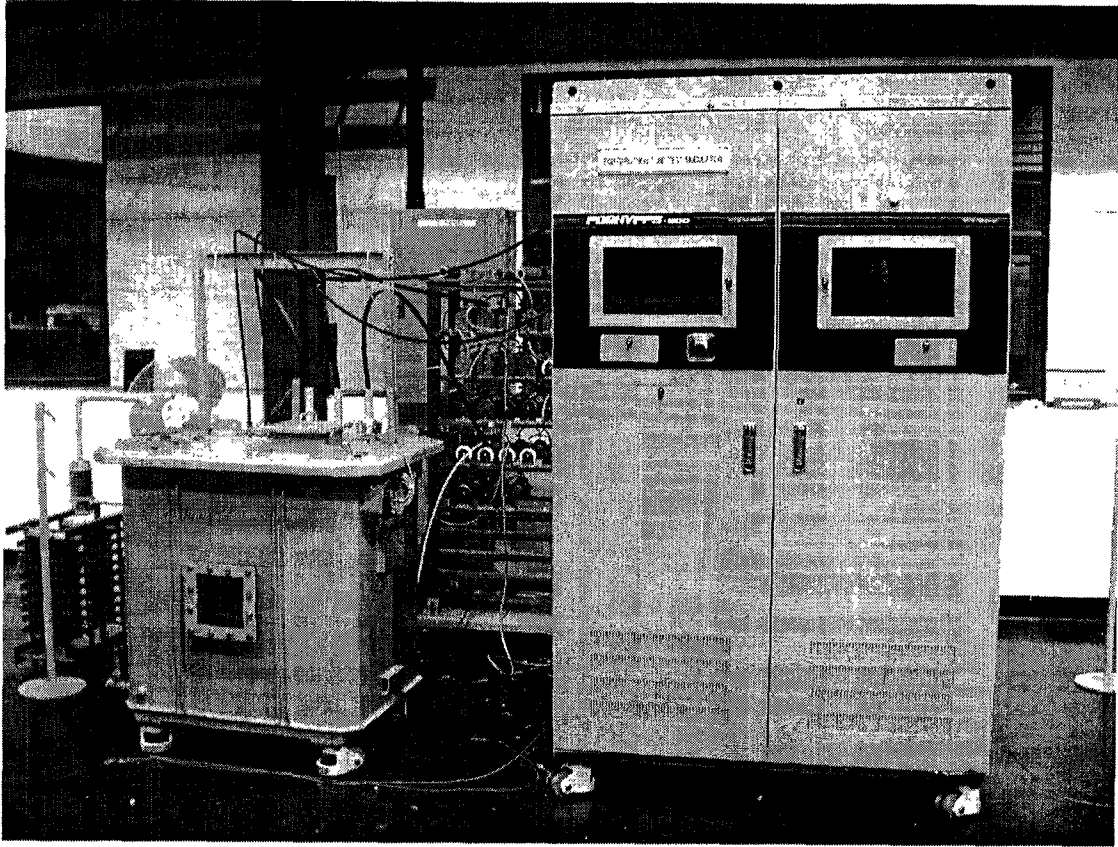


그림 3-3-15. The photo of the pulse modulator at POSCON.

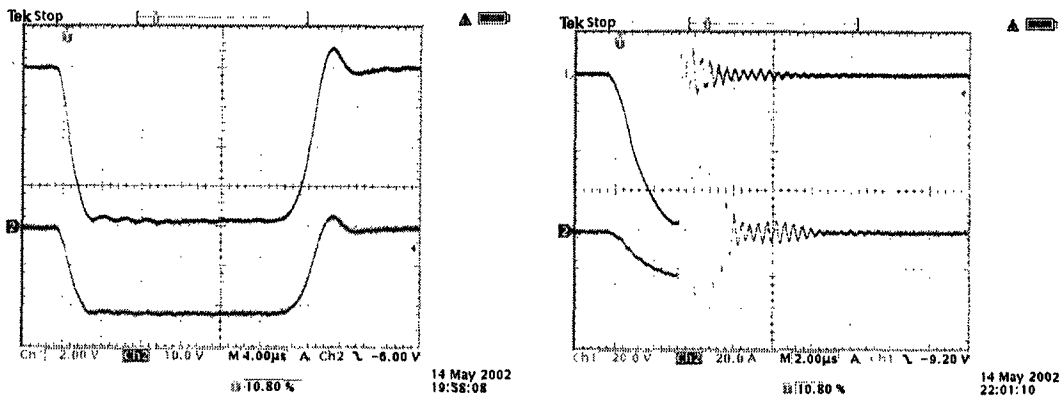


그림 3-3-16. The load test and arc test of the pulse modulator.

(나) 85 kV/30 A DC power supply, 100 kV/100 mA Acceleration Power Supply

이 전원장치는 Gyrotron을 short pulse (1 ms)에서 long pulse (2 sec)로 운전하는데 동시에 사용된다. 표 3-3-4은 위 두 전원장치의 자세한 특성과 사양을 보여준다. 현재 출력 펄스 폭의 범위를 100 μ s - 2 sec로 넓히는 방향으로 upgrade할 계획중에 있다.

실제 전원장치와 Gyrotron tube는 Collector Potential Depression 방식으로 구성되며 그림 3-3-17은 그의 도식도를 보여주고 있다. 그림 3-3-17을 보면 cathode가 common으로 되어 있으며, collector는 항상 earth ground로 되어 있다. 실제 운전시 cathode에 인가되는 전압은 -56 kV이며 Acceleration Power Supply (APS)는 cathode 전압 -56 kV을 공통으로 body에 +80 kV 전압을 인가한다. 따라서 body와 collector사이의 전압은 +24 kV가 된다. Cathode에서 방출된 전자빔 (80 keV, 25 A)은 body와 collector간의 전압 +24 kV 때문에 가속된다. 이것이 Collector Potential Depression의 원리이며 이로 인해 실제 전자빔의 전력량은 56 kV x 25 A로 계산된다. 에너지 효율 입장에서 보면 적은 전력량으로 80 kV x 25 A의 전력으로 얻어낼 수 있는 마이크로파 출력을 얻을 수 있다.

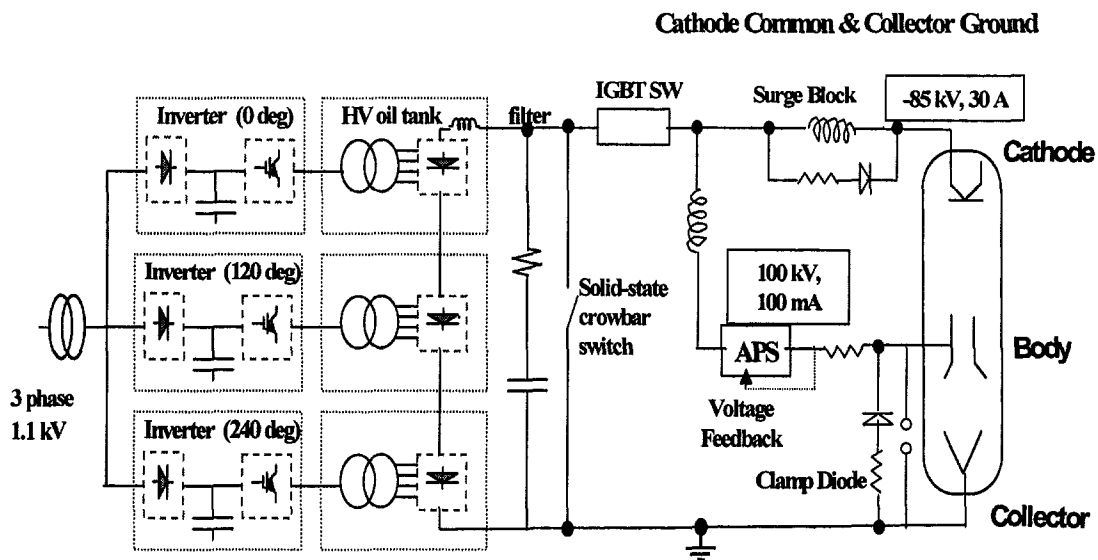


그림 3-3-17. The high voltage wire connection of the gyrotron tube.

표 3-3-4

No.	품 명	규 격	비 고
1	Pulse Switch	<ul style="list-style-type: none"> - IGBT Switch : 80 kV, 30 A - IGBT Switch Drive Pulse Width : 1 ms ~ 2 sec - IGBT Switch Aux. Rising & Falling Time control - Surge Blocker : 100 μs 이하 - Clamping Circuit 	
2	구조물	<ul style="list-style-type: none"> - Capacitor 고정 구조물 - IGBT Switch 구조물 - Gyrotron 구조물 	Gyrotron 주변 구조물의 설계시 비자성물질인 스테인레스 스틸이나 알루미늄을 적용하여 설계한다.
3	Cathode Heater 용 TR	<ul style="list-style-type: none"> - Isolation TR. 120 kV 절연 - 단상, 220V/50V. 1 kVA, Oil Tank 포함 	
4	Sensor 류	<ul style="list-style-type: none"> - Cathode Heater 전류 : 100V 절연 - Pulse 출력 전압 : 100kV 절연, 10000:1 - Pulse 출력 전류 : 50A, 100 kV 절연 - Over Current Sensor (피어슨 CT) : Over Current Protector - Collector 전류 : 50A - APS 전압 : 100 kV 절연, 10000:1 - Isolation AMP Board 	
5	HV 용 cable	절연 강도: 100 kV, 30 A,	
6	Controller	<ul style="list-style-type: none"> - HVPPS Mater Controller : DSP Controller - Control S/W (범용) : LabView Software 	* 기 수행한 고전압 직류 전원장치와 고전압 펄스 전원장치 등을 포함한 HVPPS의 제어를 수행할 수 있게 설계
7	Dummy Load	80 kV/ 80 kW	
8	Protection	<ul style="list-style-type: none"> - Mechanical - Earth Rod : MDC64005 	
9	Acceleration Power Supply	<ul style="list-style-type: none"> - 전압 100 kV , max - 전류 100 mA , max - 전압 안정도: < ± 0.1 % - 펄스 폭: 1 ms ~ 2 sec - 30 kV Clamping Circuit 	

그림 3-3-18은 위 전원장치가 현재 참여기업인 (주)포스콘에 설치된 모습을 보여주고 있다.

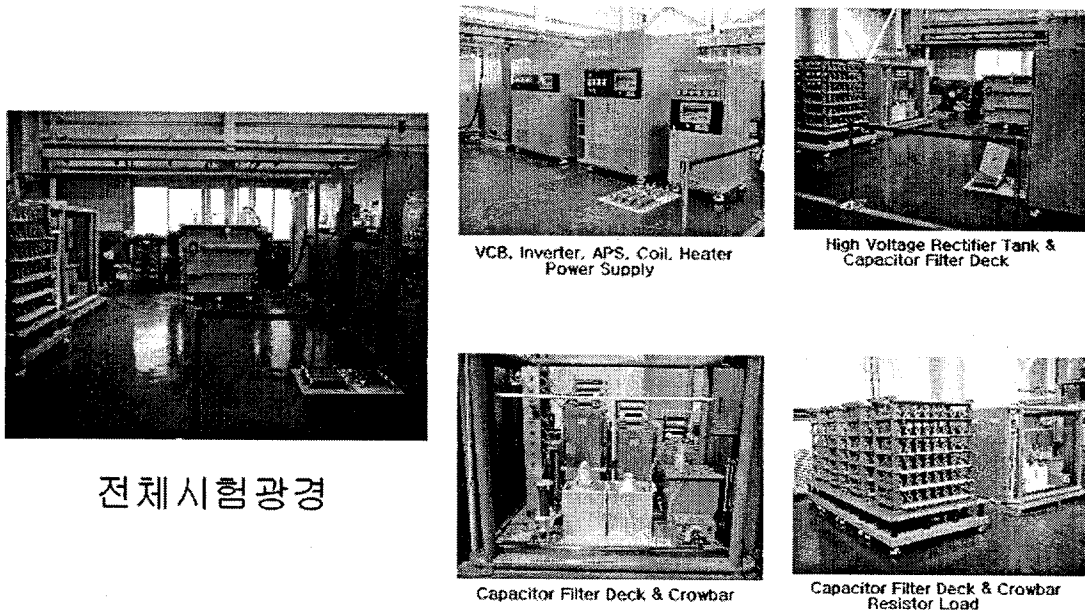


그림 3-3-18. The installation of the gyrotron power supplies in the POSCON.

(다) Test wire 조사실험

6 J의 arc 에너지까지 전달 수 있는 Test wire의 직경 및 길이를 조사하기 위한 실험은 Pendulum 스위치와 capacitor를 사용하여 수행되었다. 실험을 위한 회로 구성은 그림 3-3-19와 20과 같다.

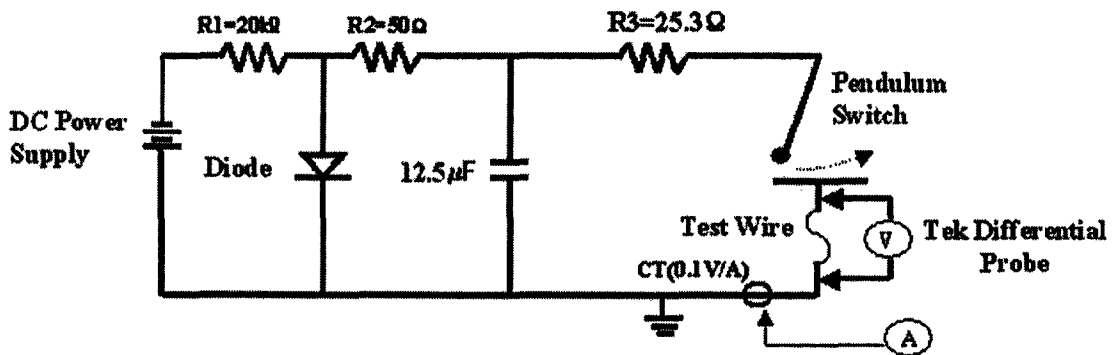


그림 3-3-19. The circuit schematic of the test wire experiment.

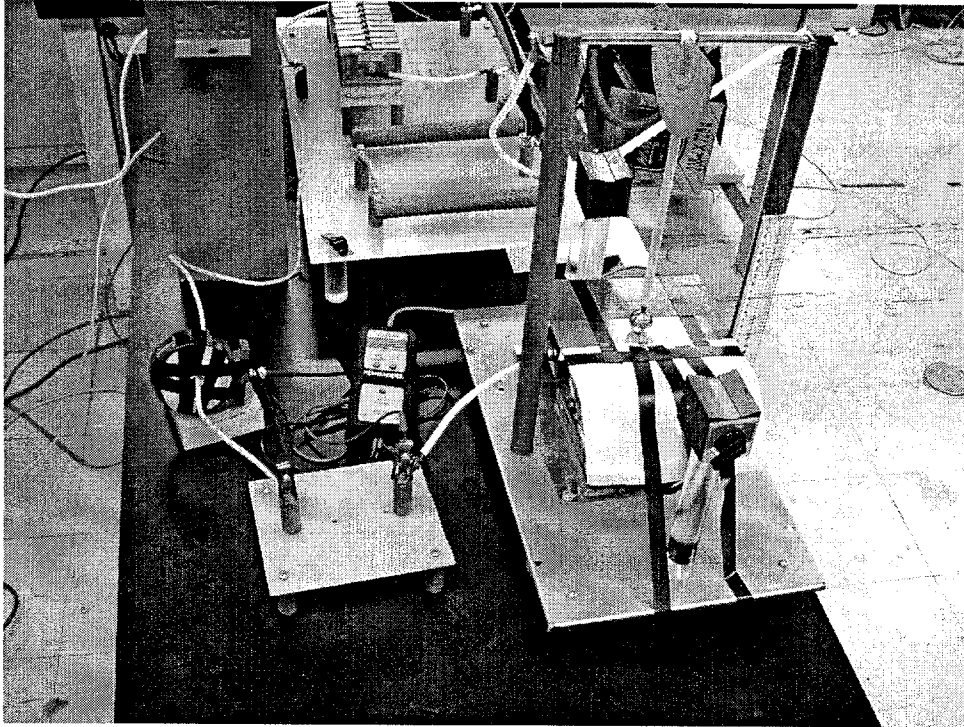


그림 3-3-20. The experimental setup of the test wire investigation.

실험에 이용된 test wire 실험은 세 가지 크기에 대해 행해졌다. 직경이 0.09 mm, 5 inch 길이의 것과 0.120 mm 직경의 5 inch와 10 inch의 것 세 가지 종류로 실험이 수행되었으며 각각의 wire에 dump된 에너지는 wire 양단에 걸리는 전압과 전류를 곱하여 적분하여 계산되었다. 양단 전압은 differential probe에 의해 측정되었고 전류는 Pearson Current Transformer에 의해 측정되었다. 각각의 wire에 대해서 인가된 capacitor 전압 전류 파형은 그림 3-3-21에서 그림 3-3-23까지 보여진다. 0.09 mm 직경, 5 inch 길이의 wire의 경우 capacitor 전압이 2.6 kV일 때 wire는 녹기 시작한다. 0.120 mm 직경 5 inch 길이와 10 inch길이의 wire는 7.1 kV의 전압과 7.6 kV에서 녹기 시작한다. 각각의 전압에 대한 wire의 dump energy는 그림 3-3-24에서 보여진다.

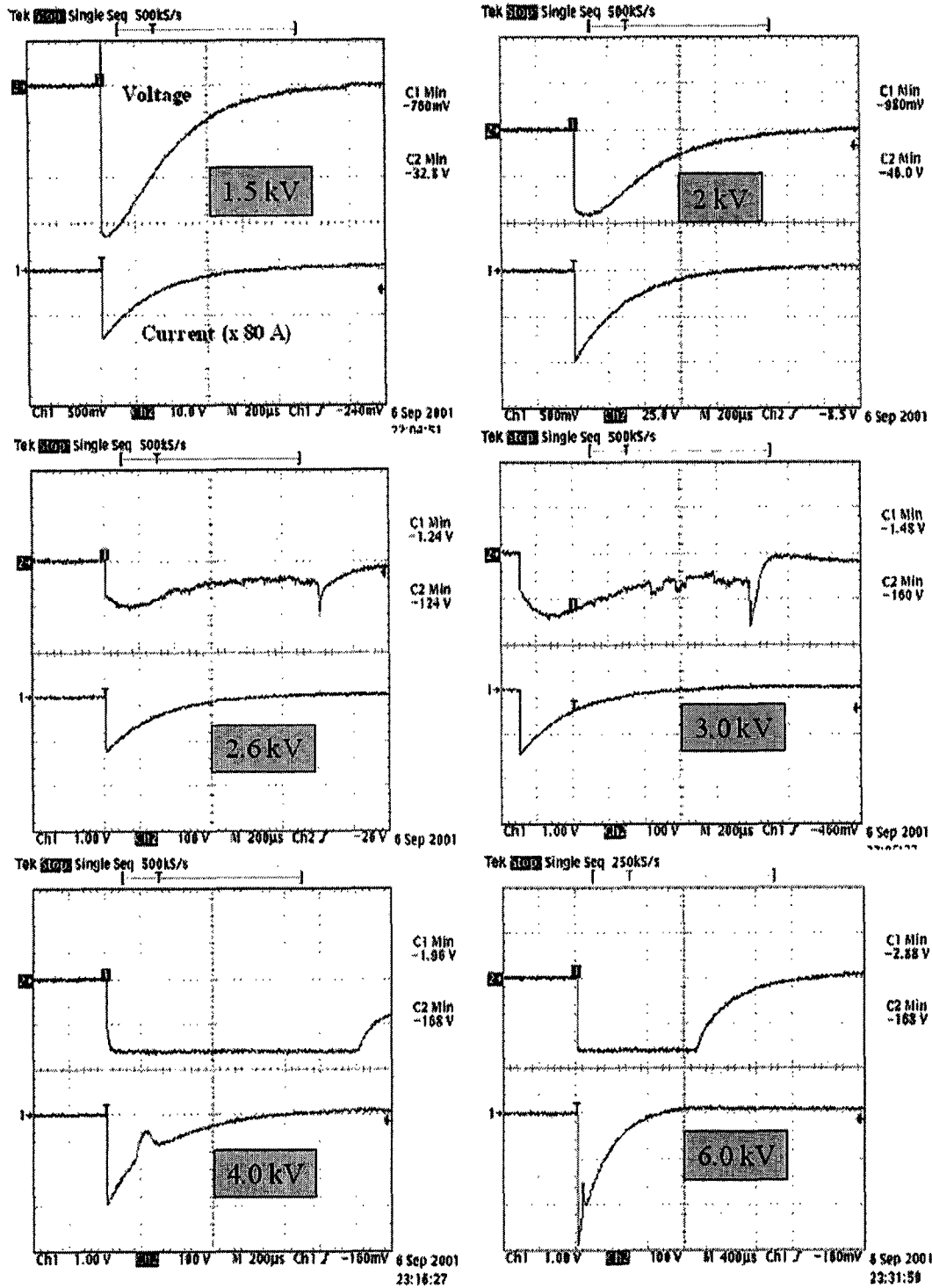


그림 3-3-21. The voltage and current waveforms for the test wire of 0.09 mm diameter and 5 inch length.

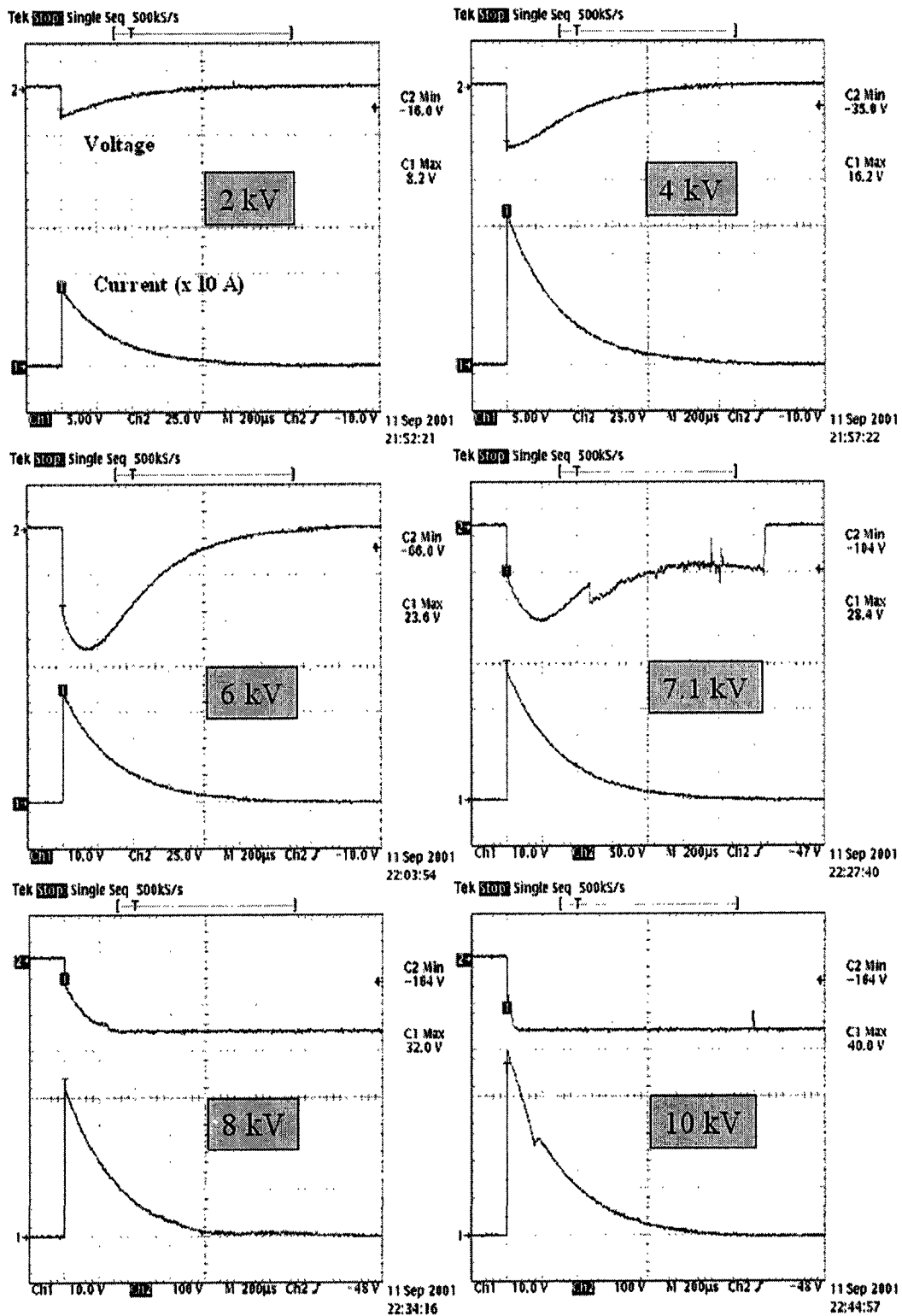


그림 3-3-22. The voltage and current waveforms for the test wire of 0.120 mm diameter and 5 inch length.

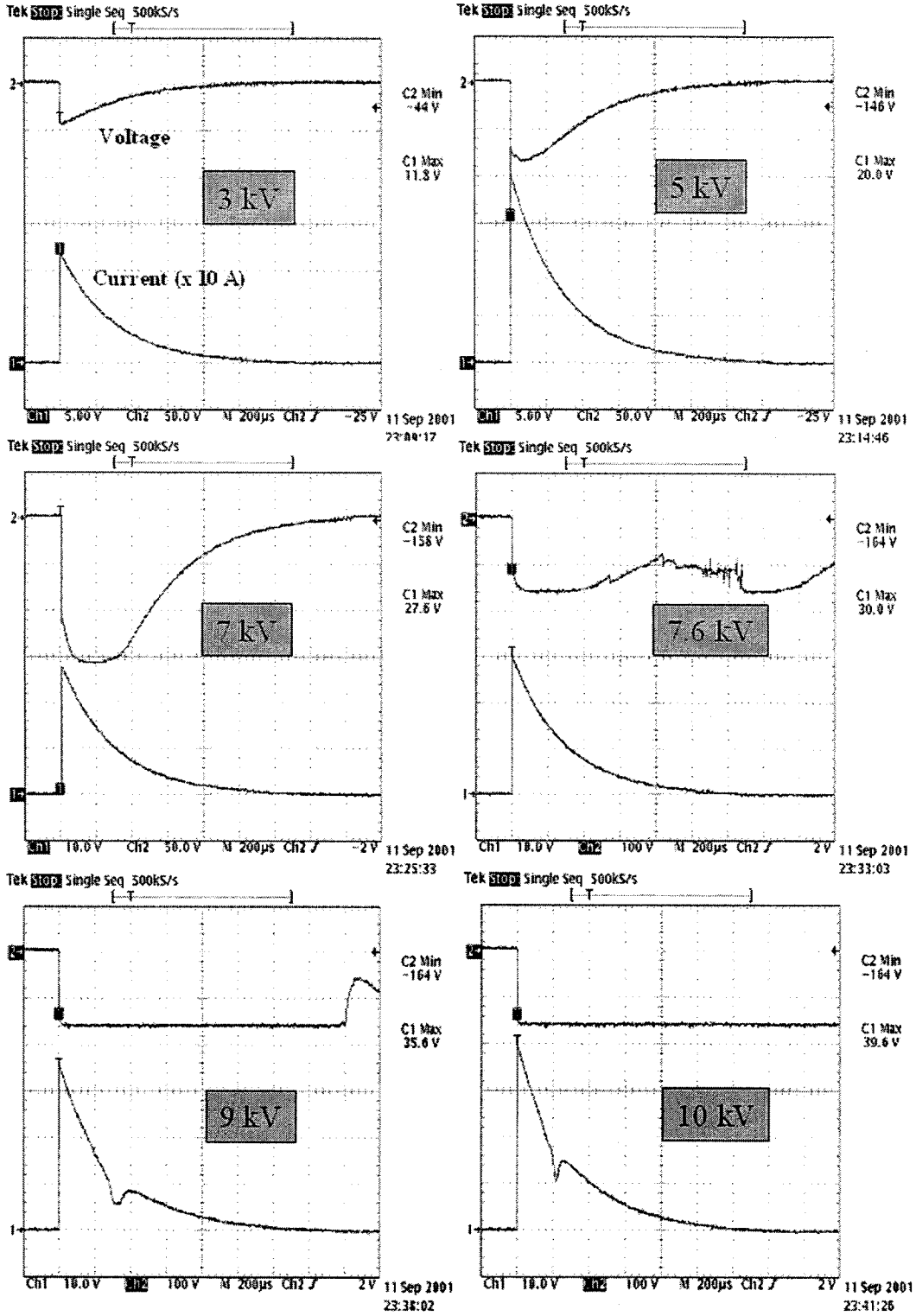


그림 3-3-23. The voltage and current waveforms for the test wire of 0.120 mm diameter and 10 inch length.

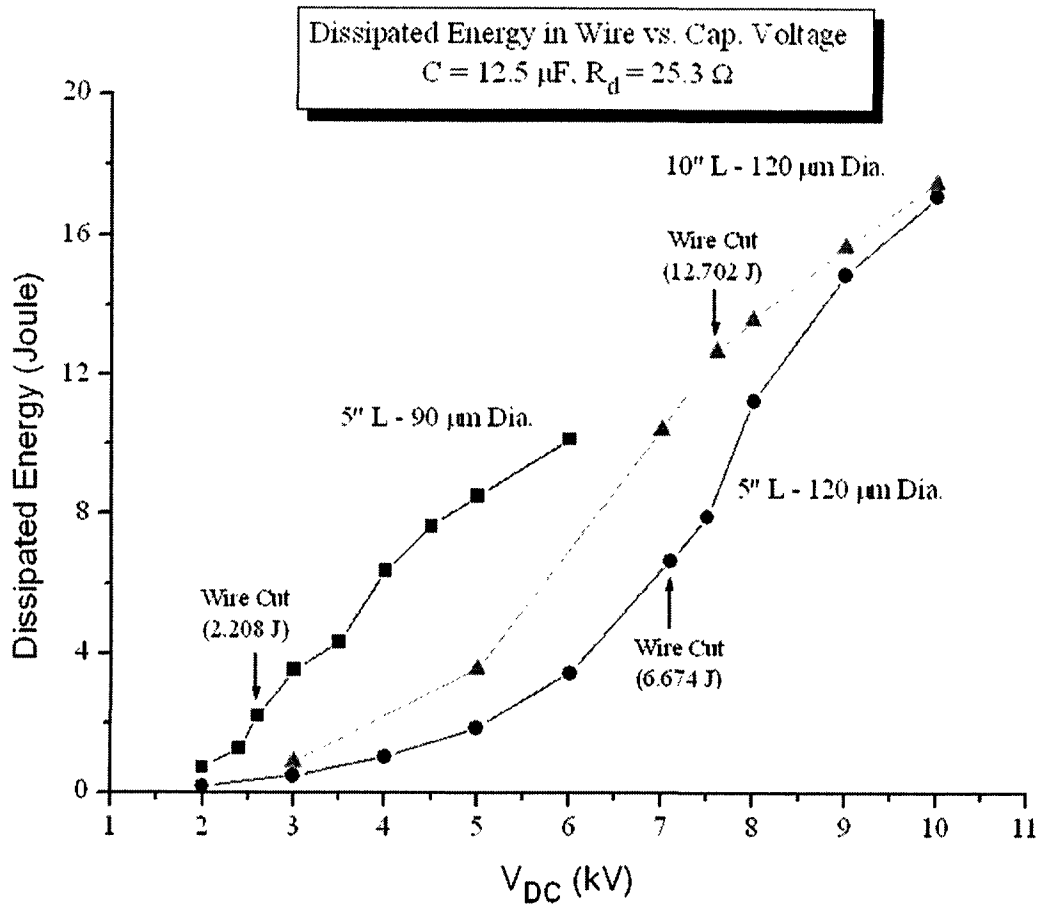


그림 3-3-24. The arc energies are calculated for three test wires.

그림 3-3-24에서 보여진 대로 0.120 mm 직경, 5 inch 길이의 wire가 약 6.7 J의 에너지에 녹음을 알 수 있었고 gyrotron tube 전원장치의 crowbar switch 테스트에 적당한 wire임이 밝혀졌다.

(라) Crowbar switch test

Gyrotron tube 운전시 arc fault가 발생할 경우 tube 보호를 위해 crowbar system이 구성되어야 한다. Crowbar system은 2개의 ignitron (NL37248HNB, Richardson Electronics)과 각각의 trigger module (IG5F, Richardson Electronics)로 구성되어 있다. Arc fault시 arc current가 더 이상 증가하기 전, 즉 tube내 arc energy를 6 J - 10 J로 제한하기 위해 crowbar switch (ignitron)는 10 μ s 내에 작동해야 된다. Crowbar switch가 10 μ s내에 작동된다 하더라도 arc current rise time이 아주 짧아 arc energy가 커질 수 있다. Arc energy를 제한하는 방법은 discharge loop에 external inductor를 연결하는 것이다. 먼저 crowbar switch test를 수행 전 Pspice simulation을 통해 external inductor의 inductance가 얼마면 적당한지 검사하였다. 그림 3-3-25는 simulation circuit model을 보여주며 그림 3-3-26은 그 결과를 보여준다. External inductor의 inductance가 120 μ H인 경우 arc energy는 2.68 J로 계산되었다.

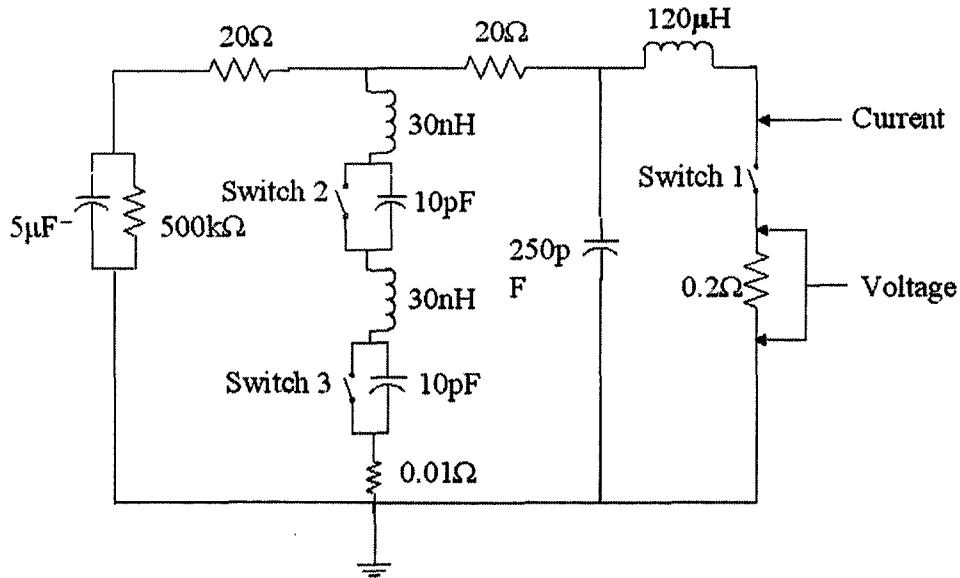


그림 3-3-25. The circuit model of the Pspice simulation.

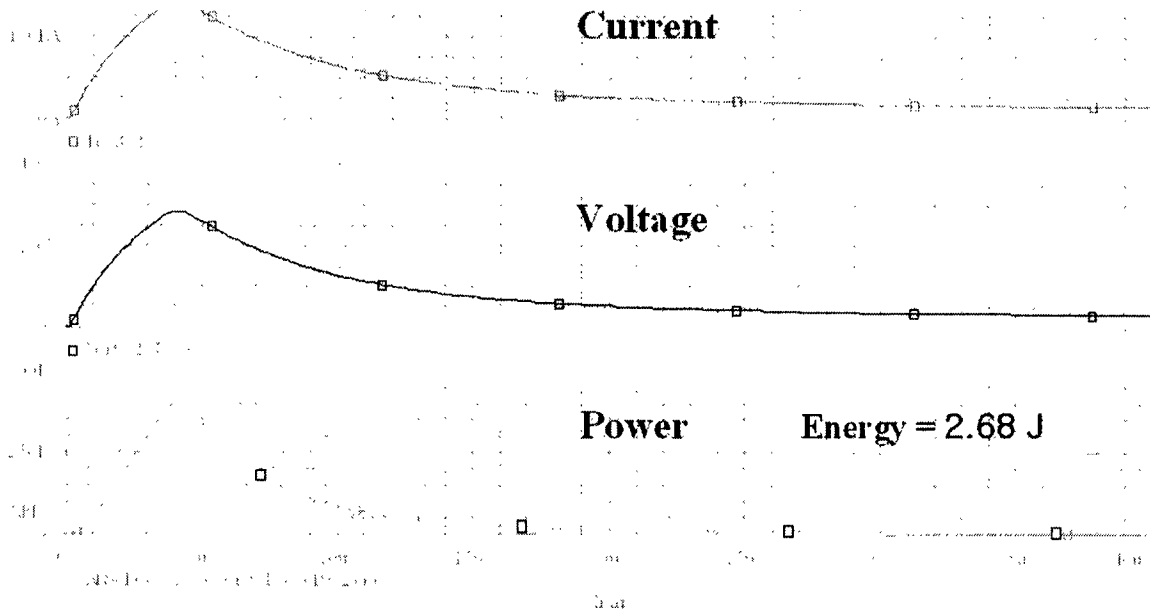


그림 3-3-26. The result of the Pspice simulation. The arc energy is calculated and it's value is 2.68 Joules.

실험은 external inductor 없이 수행되었으며, (다)절에서 기술된 0.120 mm 직경, 5 inch 길이의 test wire를 사용하였다. 그림 3-3-27과 3-3-28은 회로도와 실험 setup을 보여주고 있다.

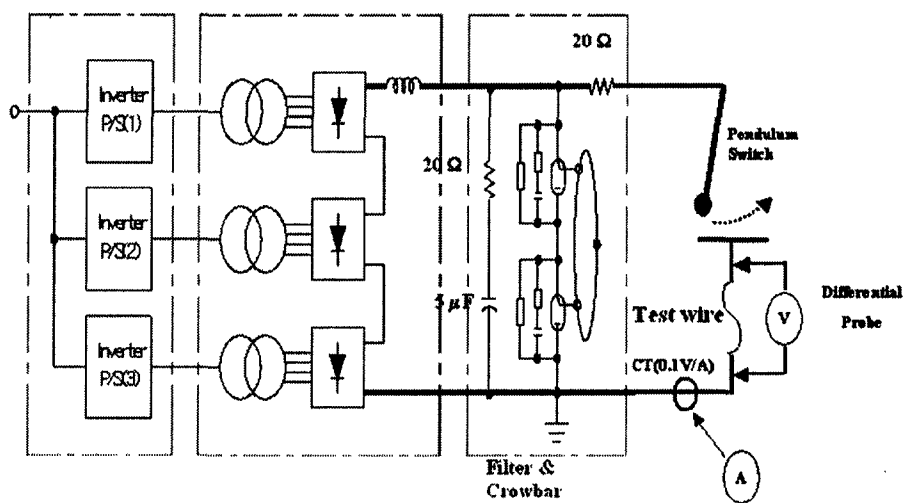


그림 3-3-27. The circuit of the crowbar switch test.

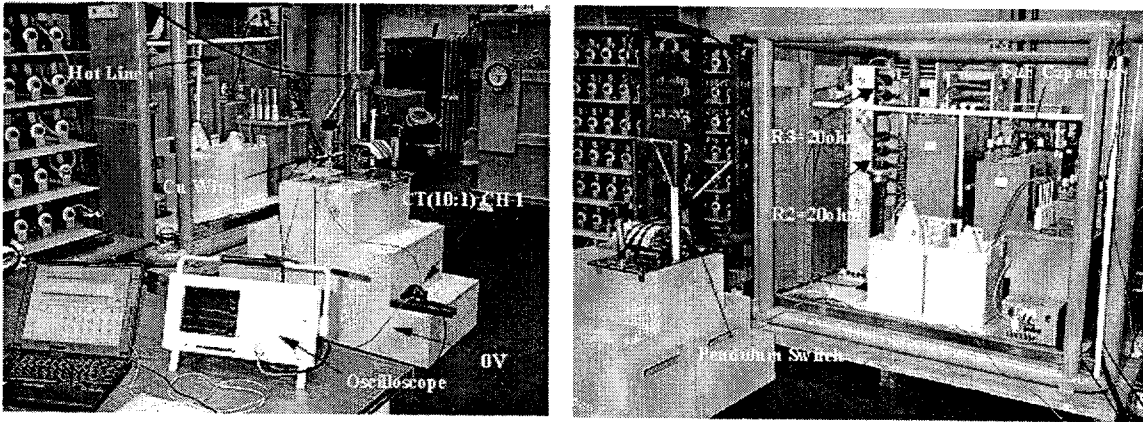


그림 3-3-28. The experimental setup of the crowbar switch test.

5 μF capacitor 에 인가된 전압을 높여가면서 Pendulum 스위치를 이용하여 arc를 발생시켜 crowbar switch가 작동시켜 보았다. 현재 crowbar system trigger module은 DC power supply (80 kV, 30 A)의 DSP board로부터 신호를 받아 ignitron을 도통시키도록 설계되었다. Arc가 발생하면 CT로부터 검출된 전류가 30 A 이상이 되면 trigger module로 TTL신호가 전달된다. CT 전류의 비교 연산과정은 Digital Signal Processor board에서 수행되고 연산처리 속도에 따라 trigger module로 전달되는 시간의 delay가 있음이 고려된다. 그림 3-3-29는 실험 결과이다. Capacitor 전압이 20 kV일 때는 test wire가 녹지 않고, 30 kV일 때는 녹는다. 그림 3-3-29를 보면 crowbar switch가 동작되는 시점이 arc가 발생된지 35 μs 후임을 알 수 있다. 너무 늦게 동작됨을 알 수 있고 또한 external inductor가 꼭 필요함을 알 수 있다.

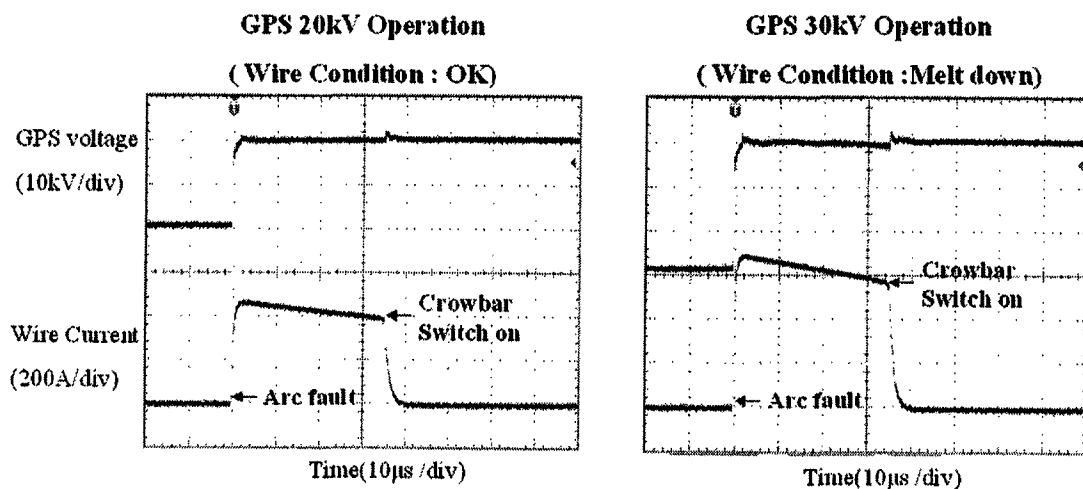


그림 3-3-29. The result of the crowbar switch test. The crowbar switching time is too long.

(4) Gyrotron Interlock System

Gyrotron tube의 단독 운전시 Gyrotron 보호회로 차단 (Interlock) 시스템은 10 μ s 이내로 고전압 전원장치를 차단하는데 주목적을 두고 있다. 그림 3-3-30은 보호회로 차단 구조를 보여준다. Gyrotron 보호회로 차단의 가장 빠른 interlock switch는 Arc detector로부터 나오는 trip signal이다. 현재 구비된 Arc detector는 arc 검출 후 2 μ s - 6 μ s 이내에 전압 펄스를 낼 수 있다. 이외 여러 가지 Interlock points가 그림 3-3-30에서 잘 보여지듯이, 냉각시스템, ventilation fan, body current, ion pump current, liquid helium level of superconducting magnet 등이 있다.

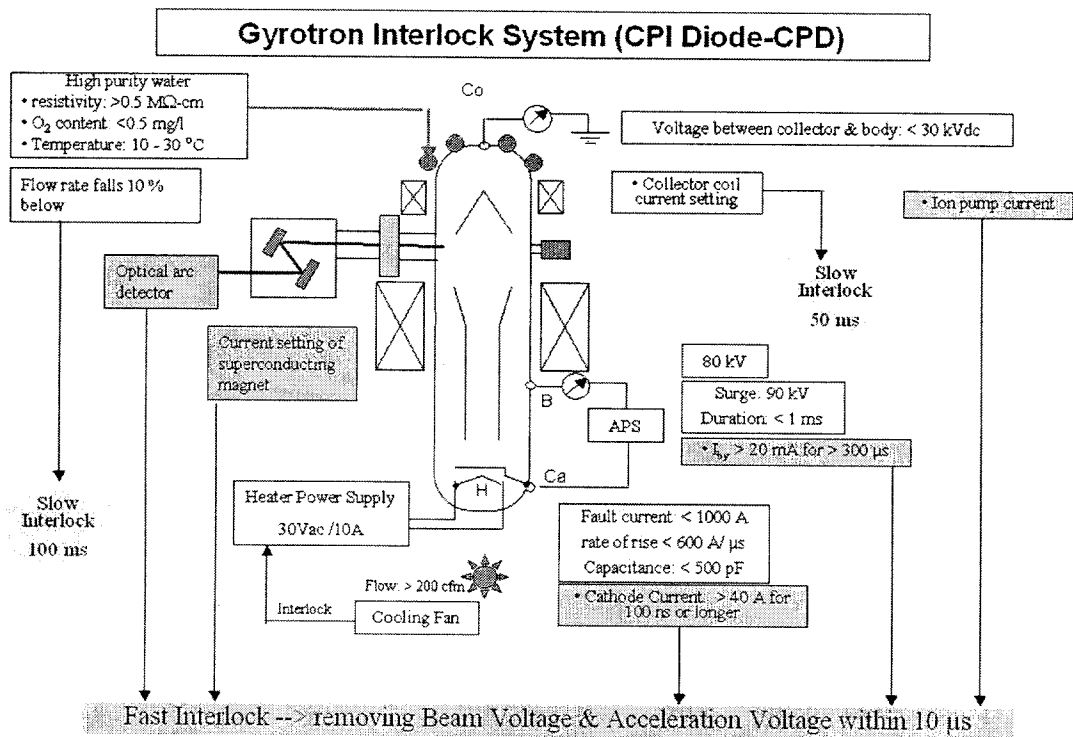


그림 3-3-30. The gyrotron interlock system.

(5) Gyrotron tube 성능시험

VGT-8084 CPI CPD-Diode Gyrotron tube는 CPI사에서 Factory Acceptance Test (현장 검수)를 성공리 마치고 현재 참여기업인 (주)포스콘에서 설치 및 성능시험 중에 있다. 성능시험은 CPI사 기술원 입회하에 수행된 Final Acceptance Test (최종 검수)임을 뜻한다. 성능시험을 위해 사용된 고전압 전원장치는 Short pulse용 Pulse modulator이다. 성능시험 시 Pulse modulator 운전 조건은 펄스 전압 65 kV - 80 kV, 펄스 폭 20 μ s, repetition rate는 60 Hz까지로 가변하였다.

Final Acceptance Test의 수행 결과를 기술하기 전 먼저 현장 검수 결과를 요약해 보기로 한다. 2002년 3월 19일에서 3월 24일에 걸쳐 미국 CPI사에 방문하여 검수를 수행하였다. Short pulse, long pulse의 두 가지 경우에 대해 마이크로파 출력과 주파수를 측정하였고 마지막 날에는 Infrared camera를 이용한 마이크로파의 Gaussian mode생성을 확인하였다. 이에 대한 자세한 결과들은 아래에 기술되어 있다.

(가) 현장 검수 내용

① Calorimetric measurements (RF power measurement)

○ Equipments:

- 16-bit 16 channels A to D board (8 differential channels로 이용하였음)
- calculation program developed using MS visual C++ language
- Flow meters (Yokogawa, input from editing in the program)
- RTD sensors (100 ohm, Yokogawa, Analog input to AD board)

○ Cooling channels;

- Dummy Load (CPI dummy load)
- Waveguide (L-box 12" length tube section)
- Diamond window
- Internal Loads (2 ea, positioned at 90 degrees angled to the diamond window)
- Bottom Water Load (Teflon absorber for downstream RF leakage to the gap between cathode and body)
- Body-1 (Cavity)
- Body-2 (Pre-bunching launcher)
- Collector

e.g) (a) Pulse length = 0.284 seconds, duty = 2 %, Ib = 24.97 Amps

Channels	Flow rate	ΔT	Integral($\Delta T*dt$)	Peak power
Dummy load	59.80 gpm	1.152 deg	9.140 deg*sec	508.08 kW
Waveguide	7.11 gpm	-4.657 deg	11.380 deg*sec	75.22 kW
Window	3.70 gpm	-0.079 deg	0.288 deg*sec	0.99 kW
Internal loads	5.96 gpm	-0.709 deg	3.314 deg*sec	18.36 kW
Bottom W. L.	3.09 gpm	-0.422 deg	2.401 deg*sec	6.90 kW
Body-1 (Cavity)	20.00 gpm	-0.183 deg	0.970 deg*sec	18.04 kW
Body-2 (Launcher)	18.06 gpm	0.156 deg	1.140 deg*sec	19.15 kW
Collector	247.00 gpm	-0.467 deg	3.711 deg*sec	852.03 kW

sum1(dummy load+waveguide)= 583.30kW, sum2 = sum1 + others = 1498.76kW

(b) Pulse length = 2.066 seconds, duty = 2 %, Ib = 23.37 Amps

Channels	Flow rate	ΔT	Integral($\Delta T*dt$)	Peak power
Dummy load	59.80 gpm	7.578 deg	66.937 deg*sec	511.49 kW
Waveguide	7.05 gpm	-24.395 deg	76.612 deg*sec	69.02 kW
Window	3.70 gpm	-0.281 deg	2.456 deg*sec	1.16 kW
Internal loads	6.00 gpm	-4.324 deg	22.568 deg*sec	17.30 kW
Bottom W. L.	3.09 gpm	-2.460 deg	16.399 deg*sec	6.48 kW
Body-1 (Cavity)	19.90 gpm	-0.840 deg	8.586 deg*sec	21.83 kW
Body-2 (Launcher)	18.00 gpm	1.002 deg	8.057 deg*sec	18.53 kW
Collector	244.00 gpm	-2.884 deg	24.565 deg*sec	765.90 kW

sum1(dummy load+waveguide)= 580.51kW, sum2 = sum1 + others = 1411.72kW

Cathode 전압, 전류 그리고 마이크로파 출력에 관한 결과 그래프는 부록 6을 참조바람.

② Frequency measurement

○ Equipments:

- Frequency meter (Millitech)
- Attenuator
- Harmonic mixer (Tektronix)
- Crystal detector (Millitech)
- Spectrum analyzer (Tektronix)

○ Experimental setup

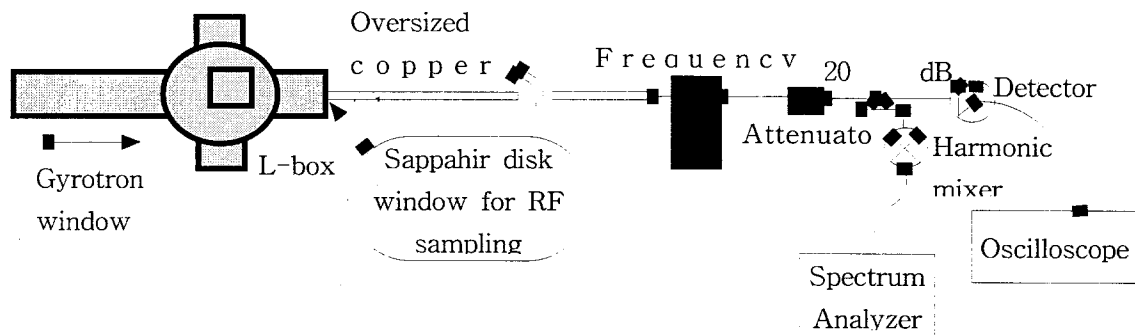


그림 3-3-31. The experimental setup of the frequency measurement at the factory acceptance test.

○ Results

- Frequency meter measurement = 84.15 GHz @ short pulse operation
- Spectrum analyzer measurement

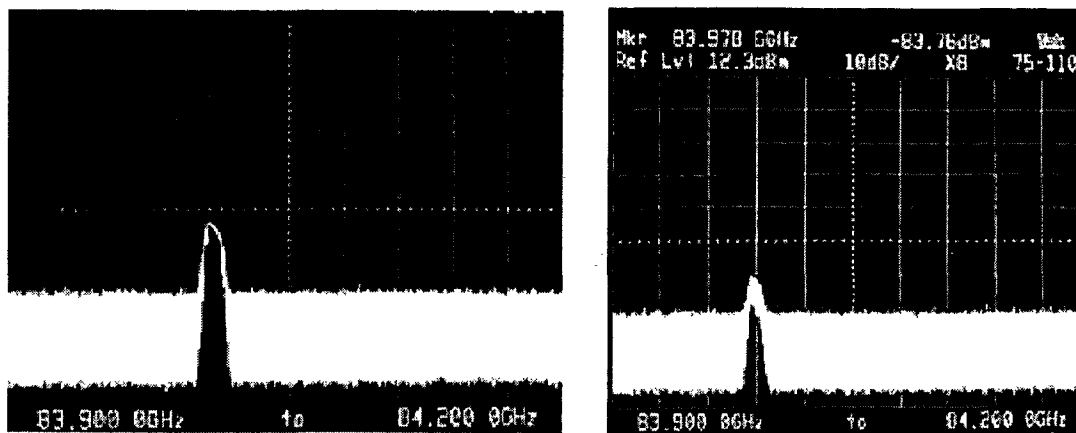


그림 3-3-32. (Left) The start frequency of 84.01 GHz, (right) the frequency is changed to 83.98 GHz after $t \sim 100$ ms.

③ IR-camera measurements

○ Experimental setup

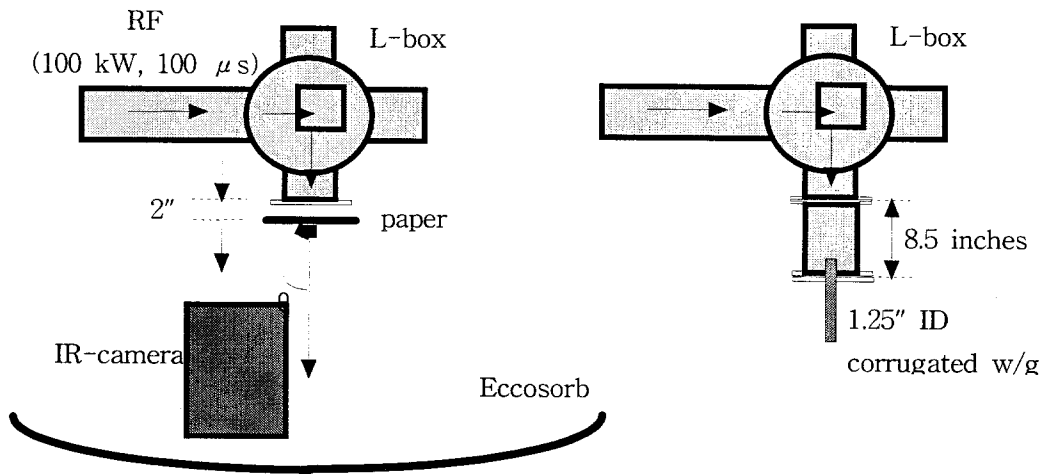
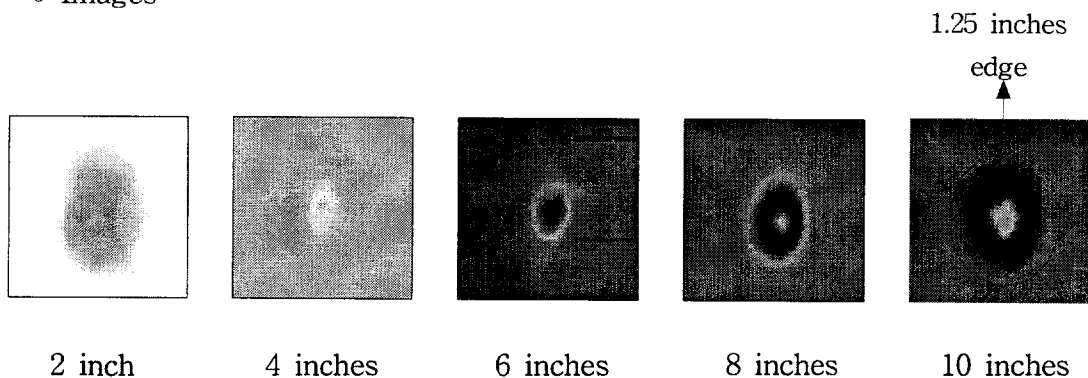


그림 3-3-33. The experimental setup of the IR-camera measurement at the factory acceptance test.

- Input RF 특성: Power = 100 kW, pulse length = 100 μ s
 - (* 500 kW, 1 ms 했을시 큰 폭음소리와 함께 air breakdwon 발생)
- Witness plate: paper (L-box의 flange에서 2 inches 단위로 이동하면서 측정)
- IR-camera 사양:
 - INFRAMETRIC PM 250
 - 16 degree field of view lens.
 - 320x256 detector array with 12 bit resolution
- Images



IDL analysis

- 8 inch offset image
- Contour plot ($\cos\theta$ correction with $\theta = 30$ degrees)

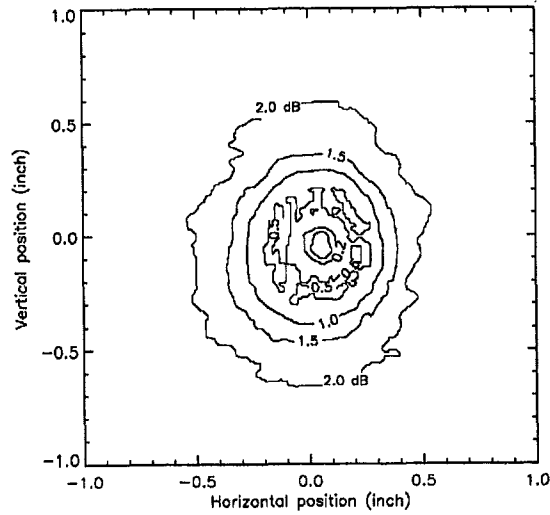


그림 3-3-34. The contour plot of 8 inch offset image. The contour lines are normalized with a logarithm of maximum density.

- Profiles plots

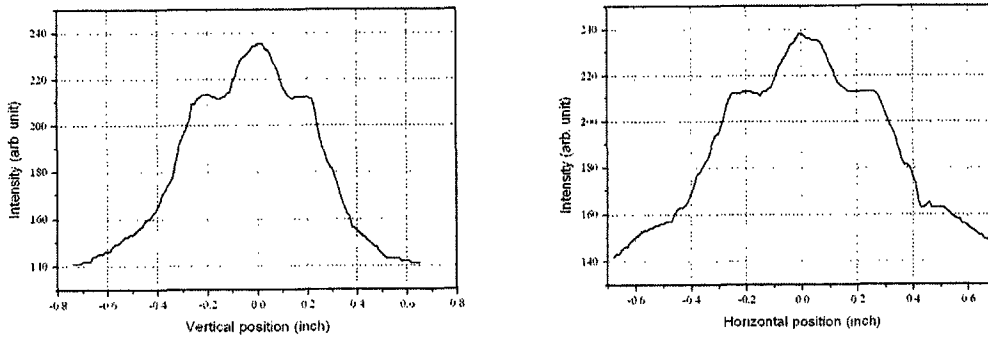
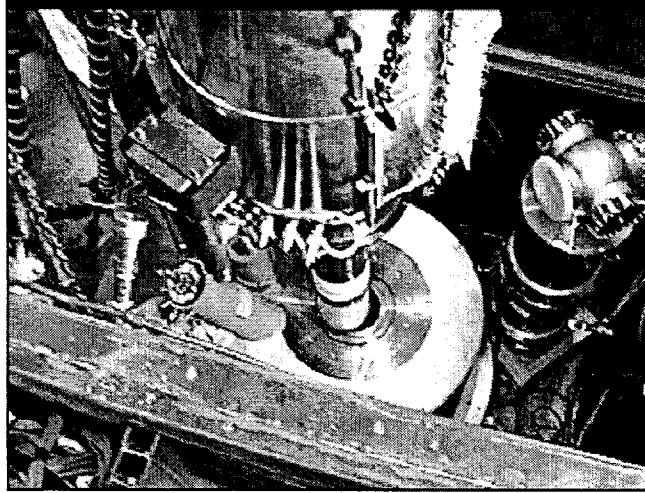


그림 3-3-35. (Left) The profile of the horizontal position at the vertical center. (right) the profile of the vertical position at the horizontal center.

④ Gyrotron installation at CPI



⑤ Gyrotron tube setup

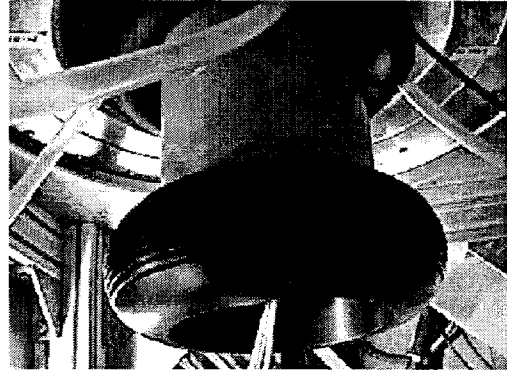
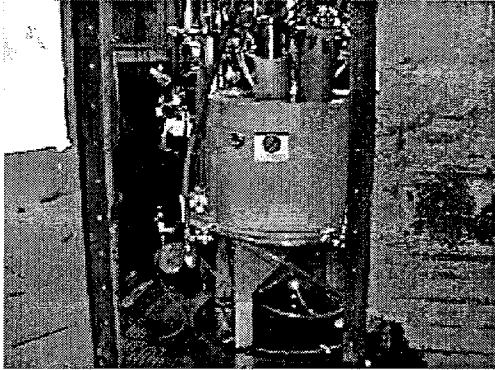


그림 3-3-36. (Left) Gyrotron test setup in lead house, (right) corona rings (one in cathode, the other in body)

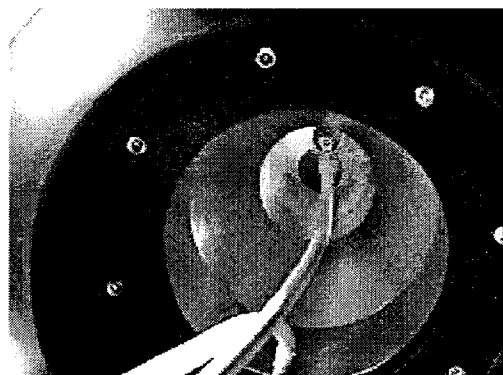


그림 3-3-37. (Left) Cathode HV and heater PS wiring, (right) body HV wiring and the cooling lines

(나) Final Acceptance Test (FAT)

Final Acceptance Test는 gyrotron tube 제작회사인 CPI사의 기술원 입회하에 2002. 5. 27 - 6. 6 동안 수행하였다. FAT의 목적은 gyrotron tube 와 전원장치와의 연결방식, 안전차단 및 운전 방법에 관한 과정을 습득하는 데 있다. 그림 3-3-38는 gyrotron tube 성능시험을 위한 test setup의 schematic layout을 보여준다. test setup은 Gyrotron tube, superconducting magnet, L-box, power monitoring miter bend, waveguide switch, dummy load, cooling system, superconducting magnet power supply, pulse modulator로 구성되어 있다.

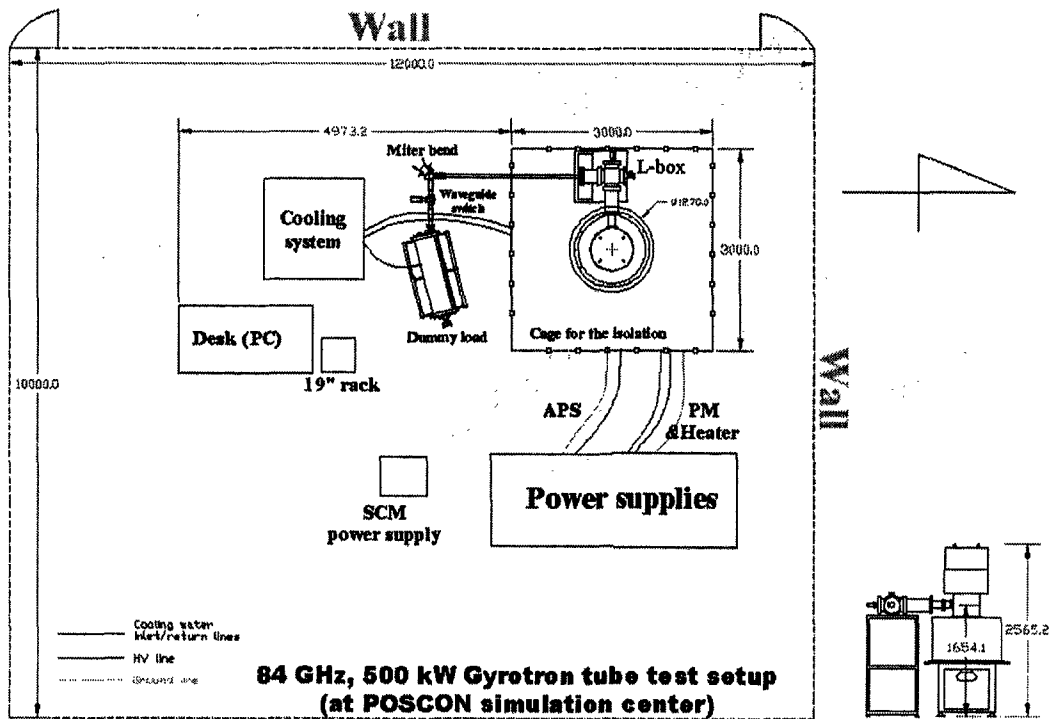


그림 3-3-38. The 2-D schematic layout of the final acceptance test.

① Superconducting magnet cool-down

Gyrotron tube 설치하기 전 먼저 초전도 자석을 테스트하는 일련의 과정을 거쳤다. 초전도 자석 테스트는 액체헬륨을 이용하여 자석의 온도를 4 °K으로 낮춰서 Gyrotron tube가 삽입되는 bore 내에 서리가 끼는지 확인하며 액체헬륨의 boil-off rate를 검사하는 것이다. 자석의 cool-down과정은 아래에서 사진과 함께 기술되어 있다.

The general procedure of cooling the magnet down:

Make sure the vacuum of the magnet is good (10^{-6} torr), then close the valve and stop vacuum pump (그림 3-3-39 참조)

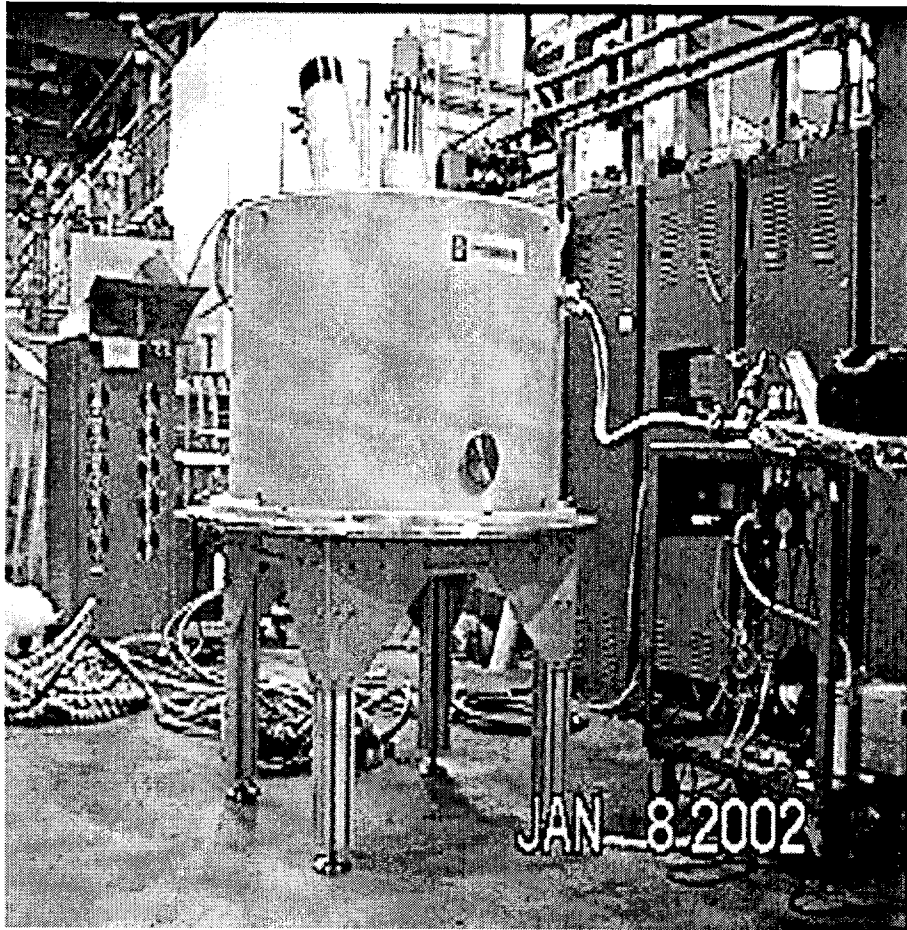


그림 3-3-39. The magnet pumping.

Compressor is ready (helium line, electrical, and water connection) (그림 3-3-40 참조)

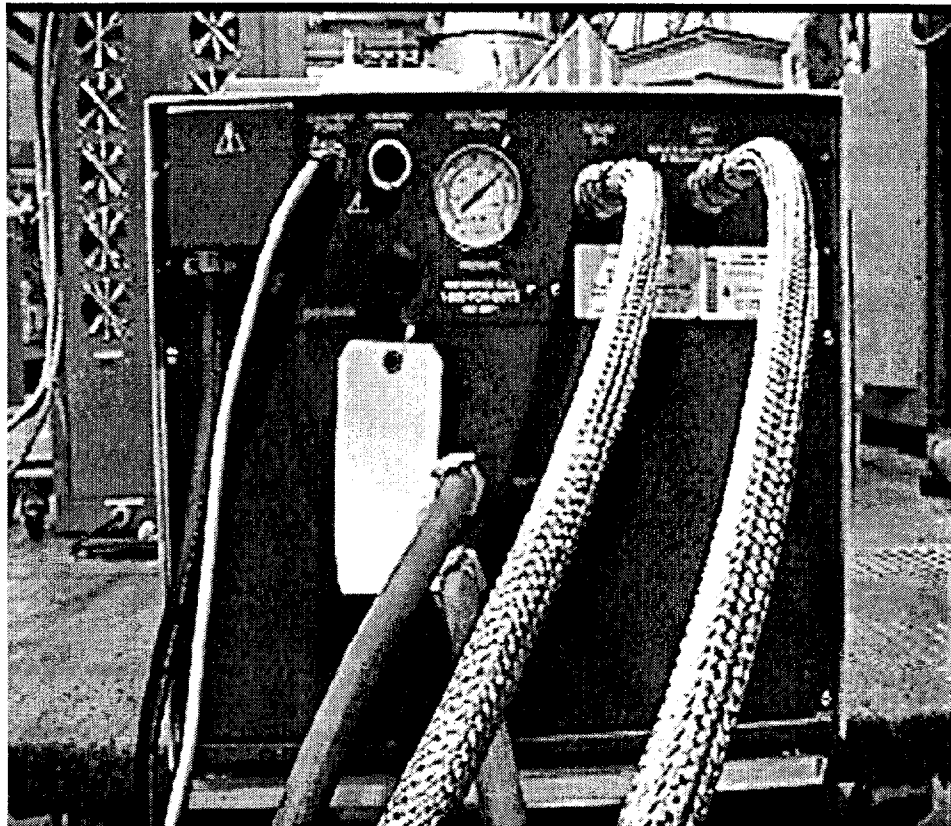


그림 3-3-40. The compressor.

The magnet power supply was set up next (그림 3-3-41 참조)



그림 3-3-41. The superconducting magnet power supply.

The temperature readout unit runs on 208 VAC and is part of the power supply unit. There are four temperature sensors in the system but only two are viewable through the temperature monitoring unit. These two sensors are located at the 20 k shield and the 80 k shield. The other two sensors are located at the magnet and at the current lead.

Make sure you have helium gas, liquid helium, and liquid nitrogen and nitrogen gas

To prepare the helium tank of the magnet, first blow dry nitrogen into the vent port; make sure the fill port is open (the vent port is the horizontal one with the valve and the fill port is the one going straight down)

use the nitrogen stick (the stainless steel tube) by removing the brass cap and inserting the tube in its place. Make sure you make a good seal so moisture can not get in

Stop nitrogen gas and leave vent valve open, start filling liquid nitrogen into fill port, you can use flexible natural latex tubing to connect to the fill stick. You should also have something ready to pinch the latex tube off, like a spring clamp (그림 3-3-42 참조)

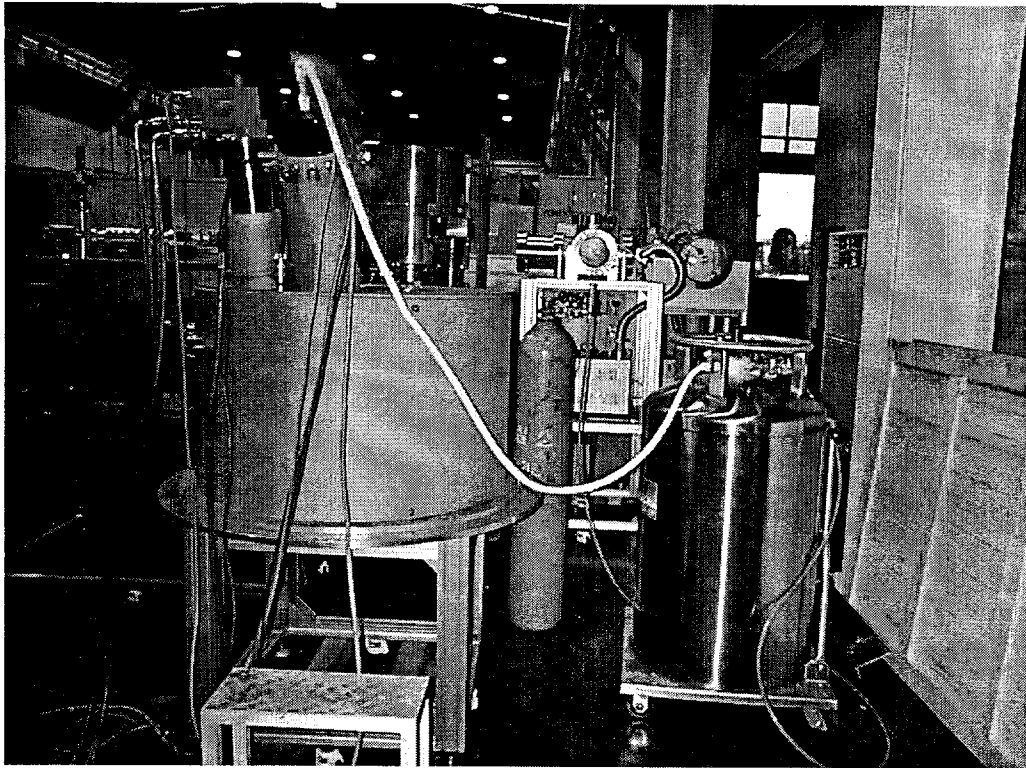


그림 3-3-42. The filling of the liquid nitrogen.

The temperature monitor should tell you the temperature is coming down, fill liquid nitrogen until you see it come out of the vent port or the relief valves

When the magnet is full of liquid nitrogen, pinch off the latex tubing and close the vent valve - the nitrogen will continue to boil-off through the relief valves (그림 3-3-43 참조)

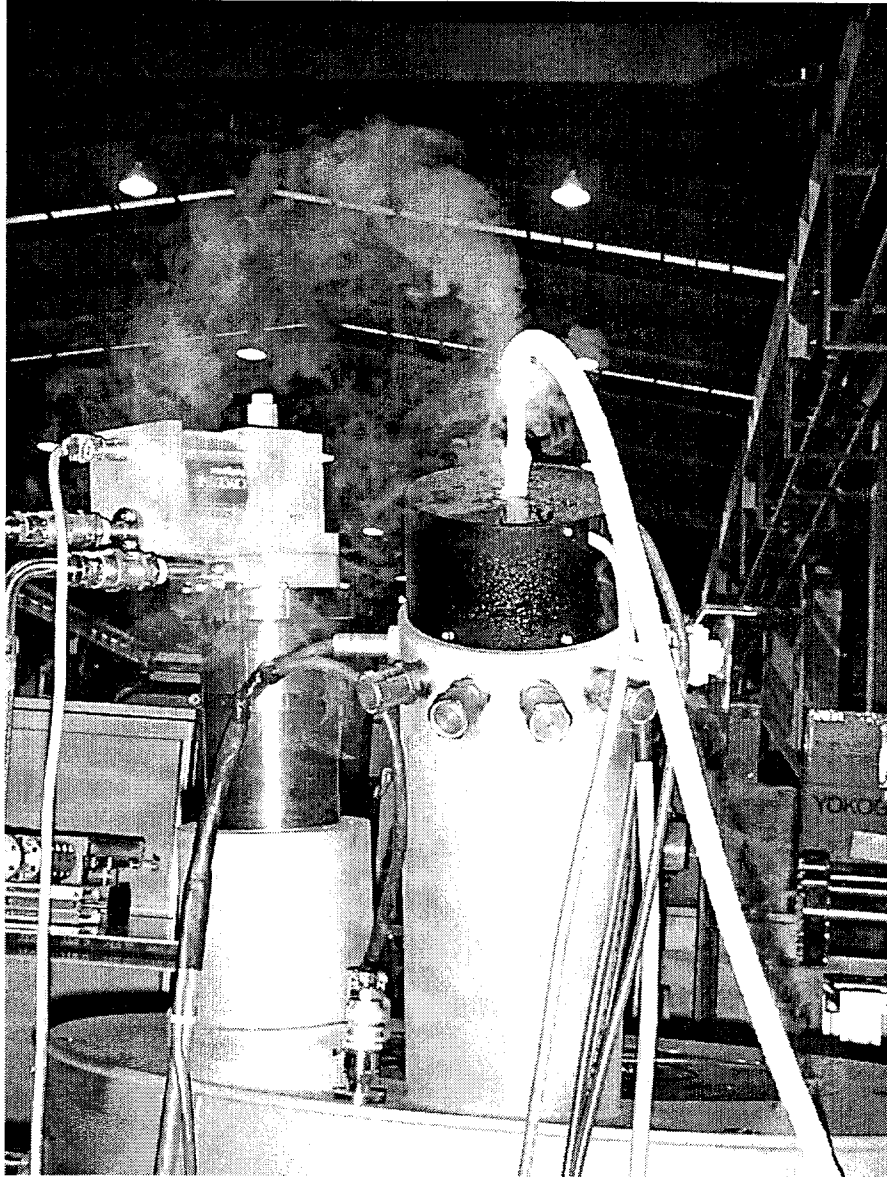


그림 3-3-43. The liquid nitrogen is filled fully.

Let the nitrogen boil-off naturally for about 12 hours

After 12 hours, start blowing the liquid nitrogen out by blowing Helium gas into the vent valve and remove the pinch off of the fill stick, you should see liquid nitrogen coming out; there might not be much left but make sure all the liquid nitrogen is out by leave the helium gas on for at least 15 minutes after you stop see liquid coming out. (그림 3-3-44 참조)

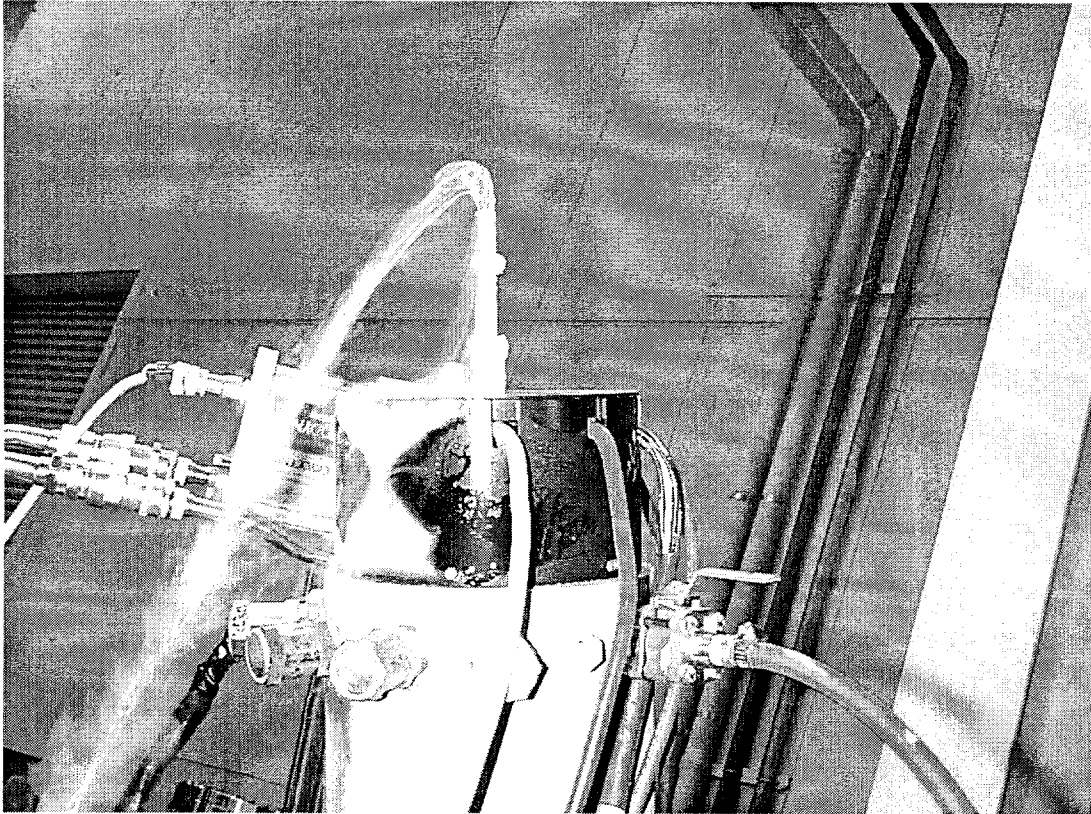


그림 3-3-44. The blowing of the liquid nitrogen.

Stop helium gas, remove the nitrogen fill/blow out stick, start compressor (그림 3-3-45 참조)

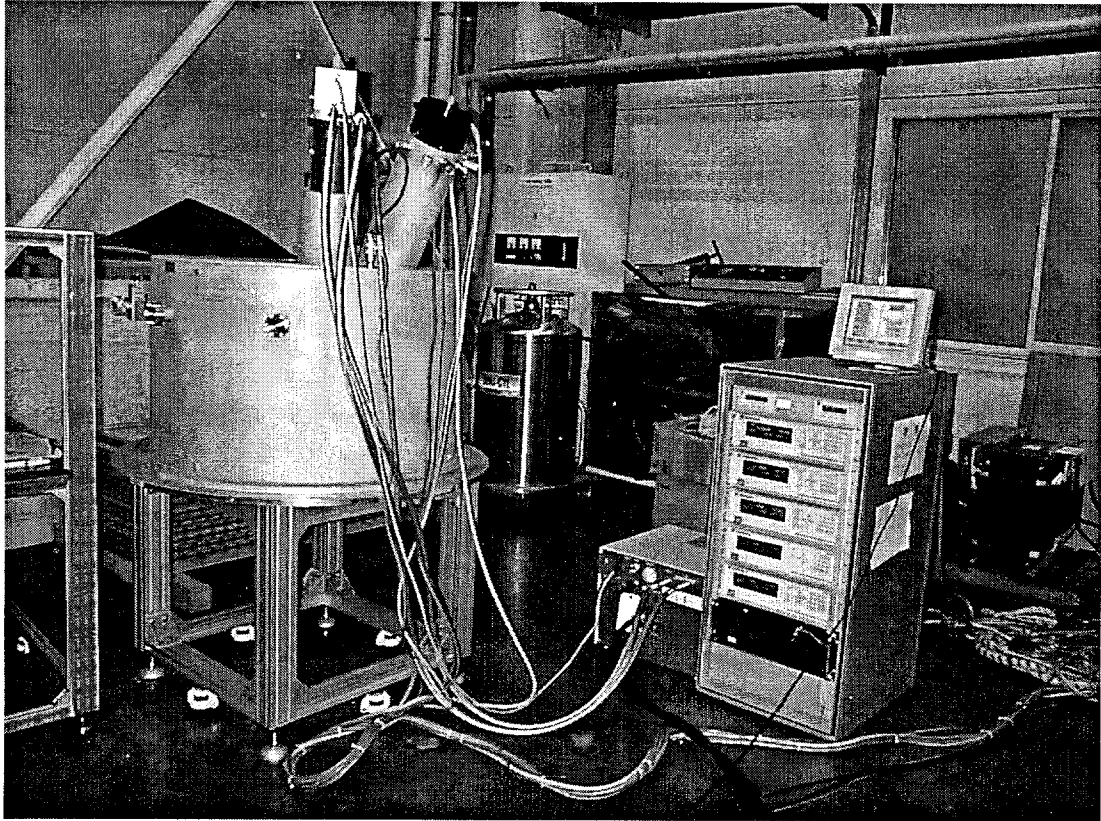


그림 3-3-45. The start of the compressor.

Now you are ready to use the helium fill stick to fill liquid helium into the helium chamber; the fill stick has two ends, the end with the smaller diameter goes into the magnet and it has a valve on top to start and stop the flow of liquid helium. You can first put the end with the larger diameter into your liquid helium tank; then slowly open the valve on the other end; as you see a plume of liquid helium come out, put the stick into magnet; make sure the end of stick reaches the bottom, screw in the brass cap with the brass ring and the O-ring; this prevents moisture from getting in and liquid helium from leaking out; usually at this point you can pressuring the helium tank to force the liquid helium into the magnet; the vent valve to the helium tank is always open and you should see a plume of helium; after a while liquid helium should start collecting inside the magnet; 250 liter of liquid helium is usually used to cool the magnet down to liquid helium temperature. (그림 3-3-46 참조)

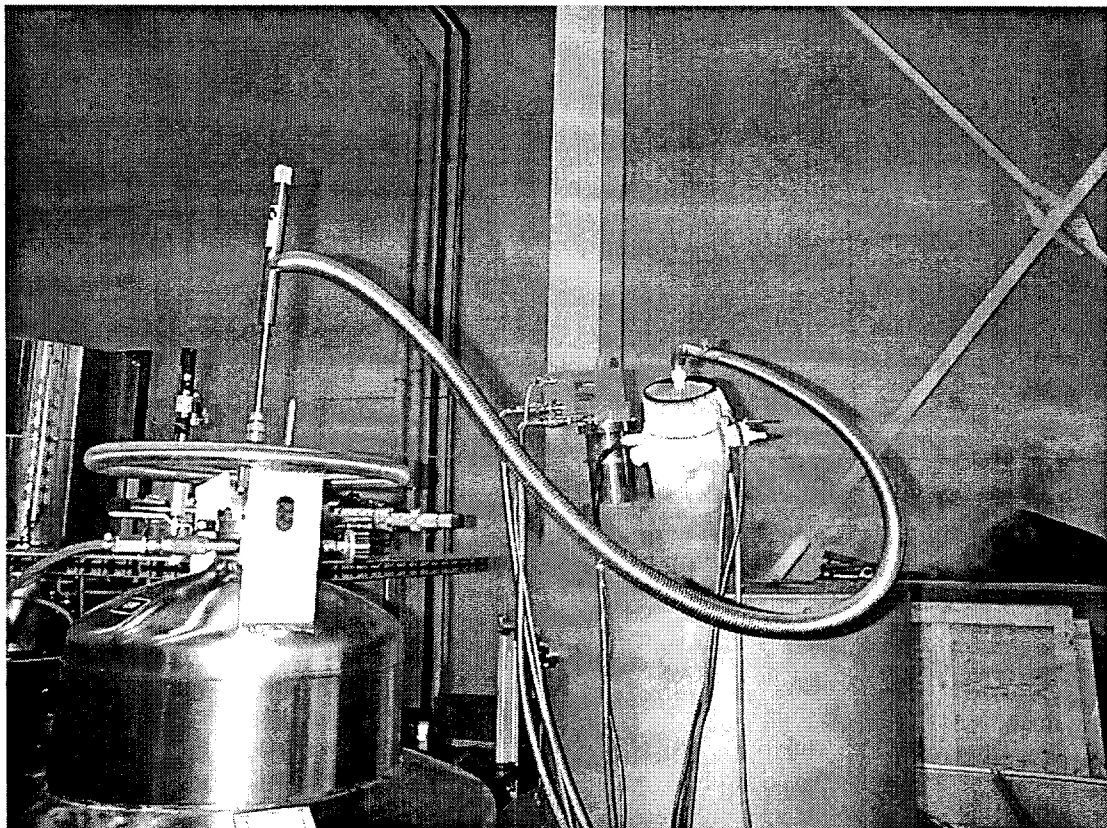


그림 3-3-46. The filling of the liquid helium.

초전도 자석 시스템은 온도센서가 4개가 장착되어있다. 80 K thermal shield와 20 K thermal shield에 각각 온도센서가 설치되어 있으며, 나머지 두 개는 magnet coil과 current lead에 설치되어있다. Cooling 하는 동안에 20 K shield 부분의 온도변화는 아래 그림 3-3-47의 그래프에서 보여진다.

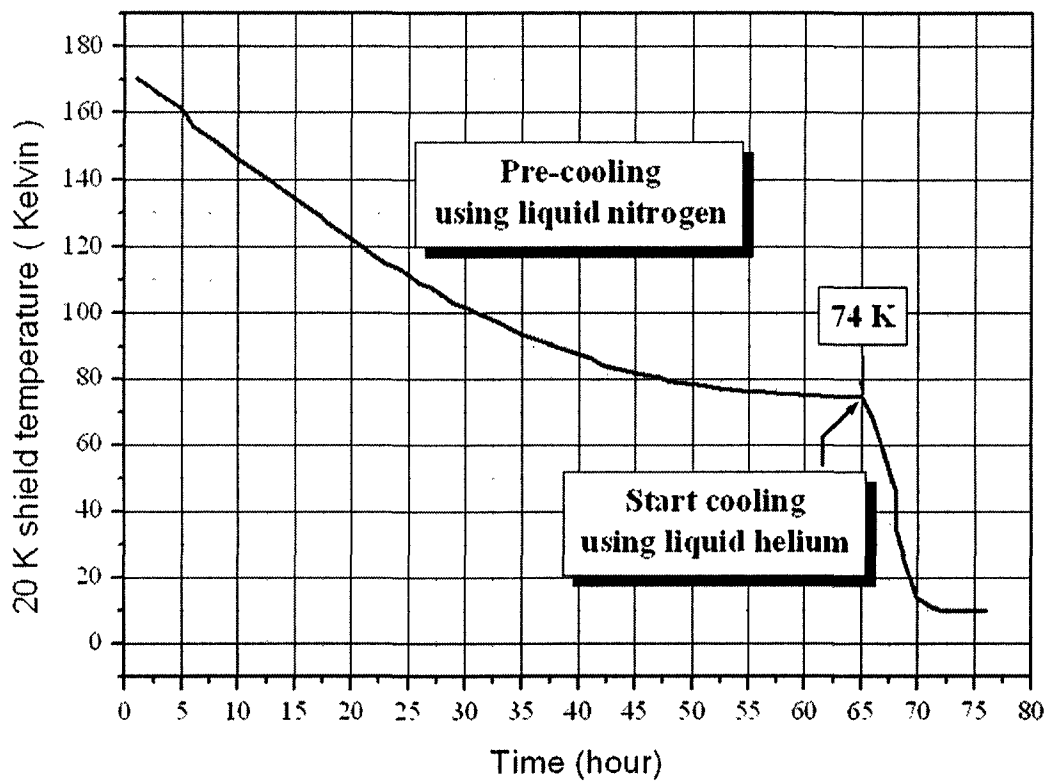


그림 3-3-47. The time history of the magnet temperature.

초전도 자석 vendor인 Cryomagnetics Inc.에서 제공한 자기장 데이터는 그림 3-3-48에 삽입하였다. 그림 3-3-48은 20 K shield의 온도가 12 °K 되었을 때 초전도 코일자석의 전류를 흘려주어 자기장 값을 측정한 결과이다. 그림 3-3-48에서 나타난 38 kG 데이터는 gyrotron tube의 cavity 중심에서 38 kG의 자기장이 걸리도록 전류를 흘려주었을 때의 데이터이다.

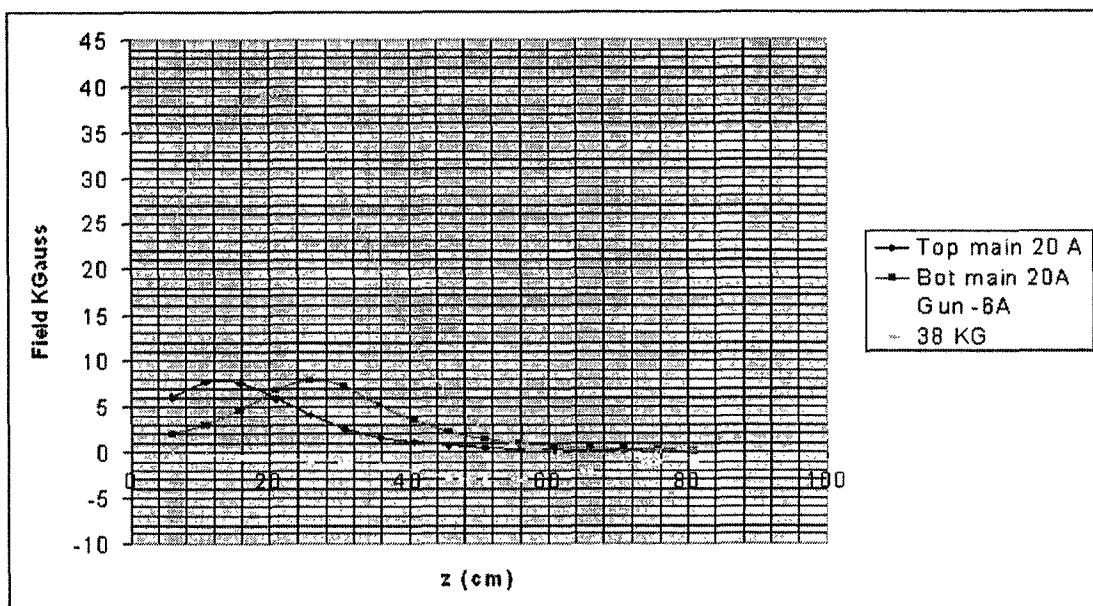


그림 3-3-48. The magnetic field profiles in the magnet.

② Assembly

처음 액체헬륨은 vacuum dewar의 97 % (121 liter/95 %)까지 채워졌고 24시간 뒤 vacuum dewar의 80 K shield에서의 온도와 20 K shield에서의 온도는 각각 86 °K, 12 °K이며 액체헬륨 level은 86 %로 떨어졌다. 액체헬륨의 level이 높을 경우 기압이 높아 boil-off rate가 크지만 level이 어느 정도 낮아지면 boil-off rate는 떨어진다. 초전도 vendor인 Cryomagnetic Inc.에서 보증한 boil-off rate는 level이 68 %일 때 0.245 liter/hr이다. 우리가 테스트 하는 중 boil-off rate를 조사해 본 결과 0.21 liter/hr임을 확인되었다. 20 K shield에서의 온도가 12 °K일 때 초전도 bore 내부에 서리나 이슬이 맺히지 않았으므로 초전도의 열차단이 양호한 상태임을 확인하였고 그 뒤 우리는 gyrotron tube를 초전도 위에 mount 하였다. Gyrotron tube를 설치하는 과정은 아래 그림 3-3-49에서 3-3-51까지 나와 있다.

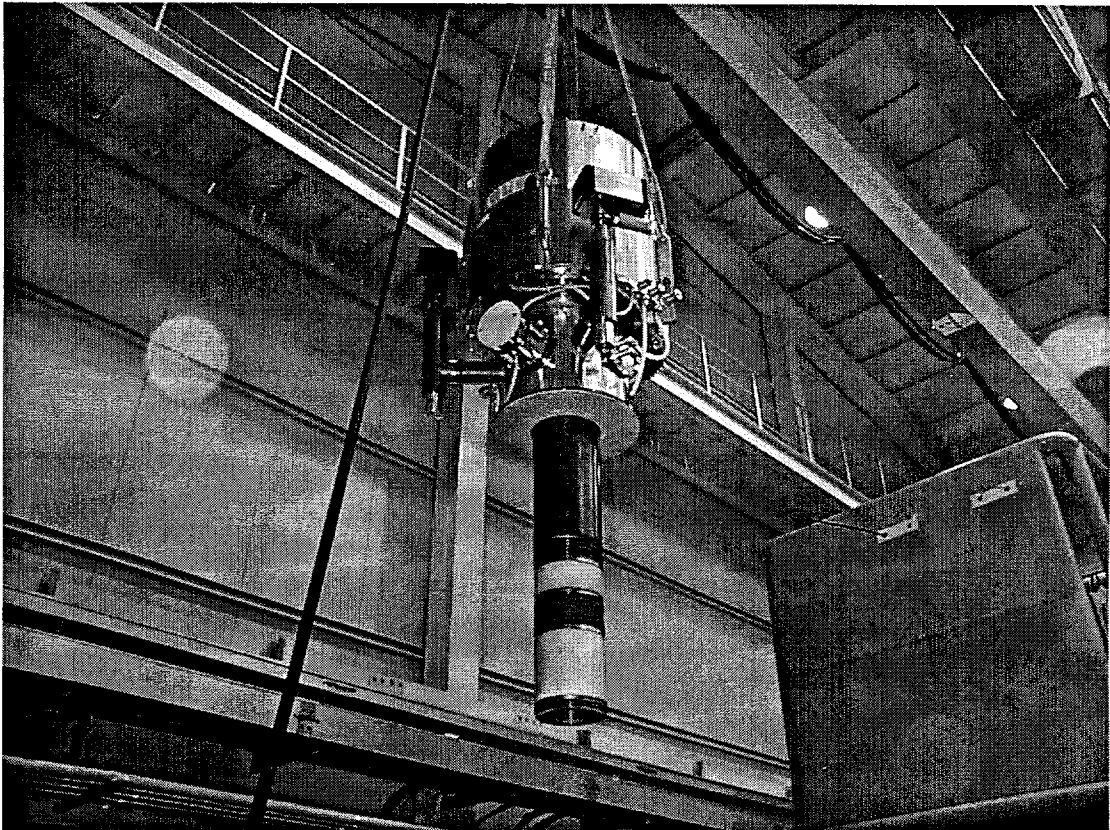


그림 3-3-49. The installation of the gyrotron tube; the lifting.

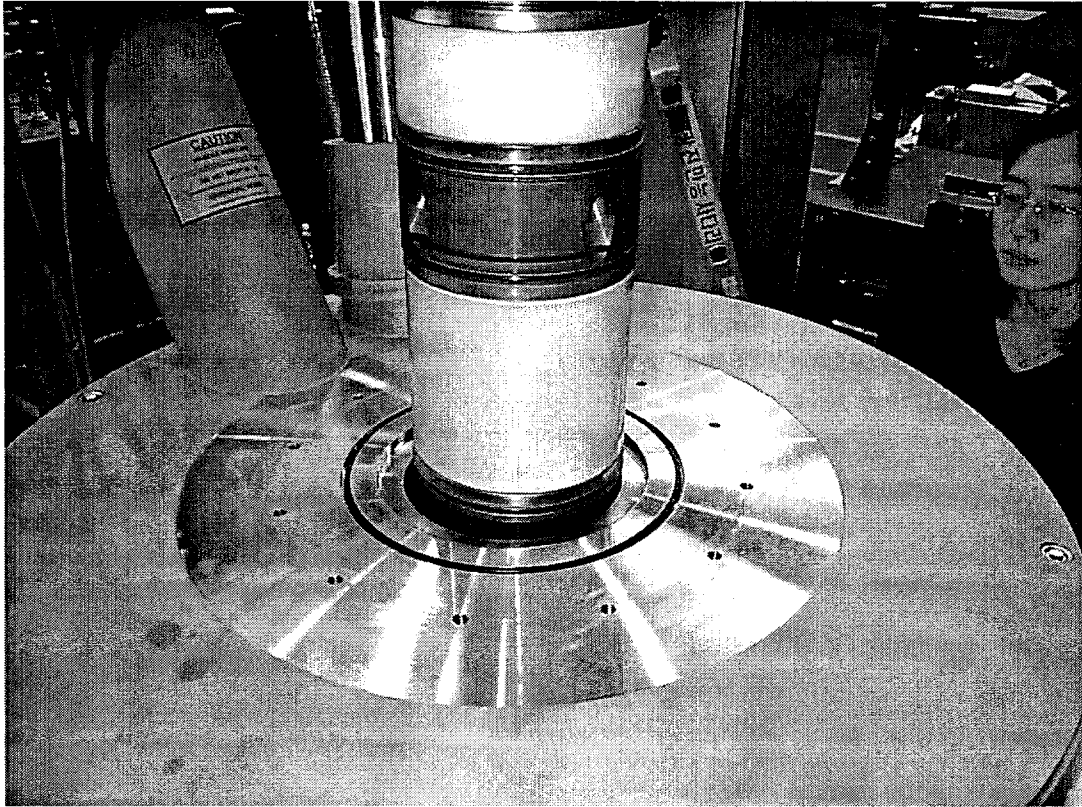


그림 3-3-50. The installation of the gyrotron tube; the lining.

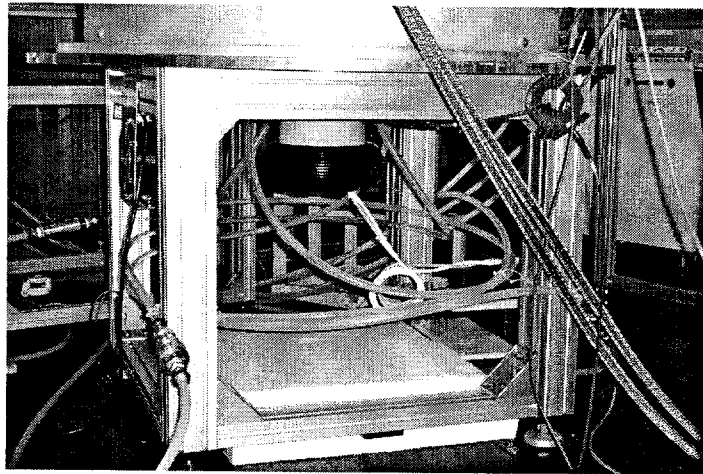
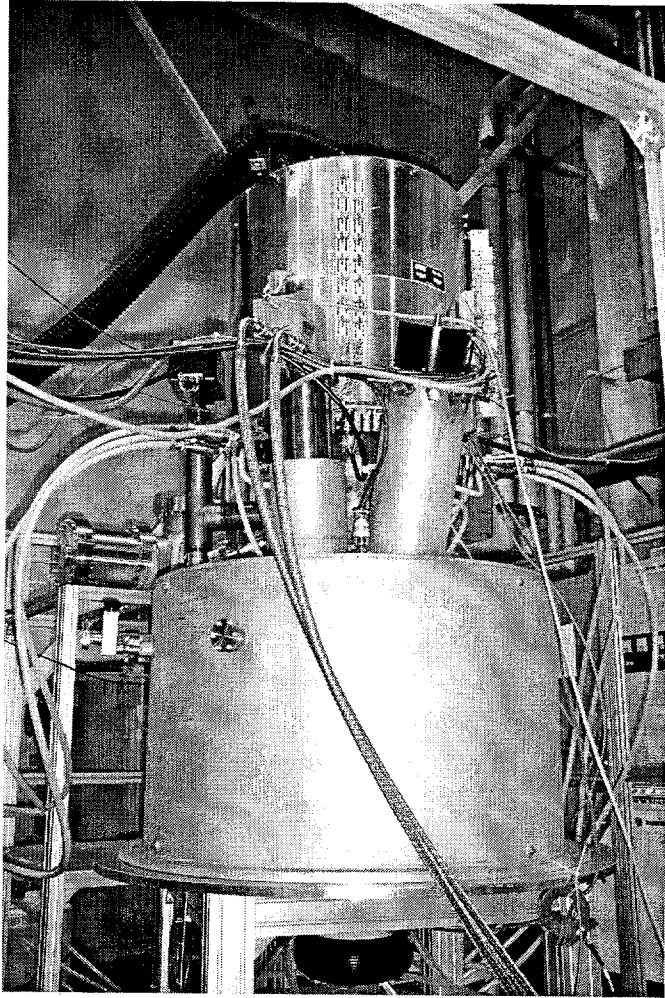


그림 3-3-51. The installation of the gyrotron tube; the assembly of the superconducting magnet and tube (top), the installation of the corona rings and the body cooling lines, and the HV wiring of the cathode and the body (bottom).

그림 3-3-52와 53은 gyrotron tube on superconducting magnet, L-box, power monitoring miter bend, waveguide switch, dummy load, magnet power supply, HV pulse modulator이 설치된 모습이다. 마이크로파 출력을 측정하기 위한 data logging 용 NI-DAQ card가 장착된 computer 도 그림 3-3-52에서 보여진다.

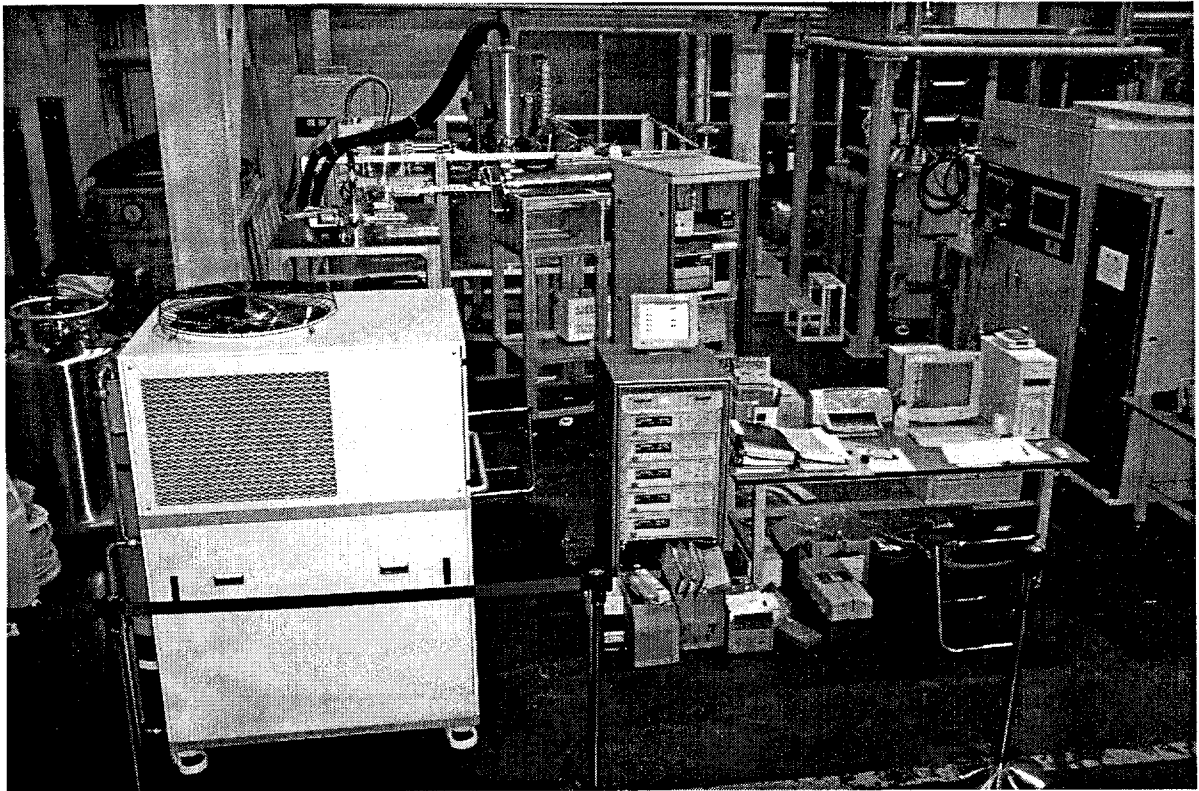


그림 3-3-52. The final acceptance test setup at POSCON.

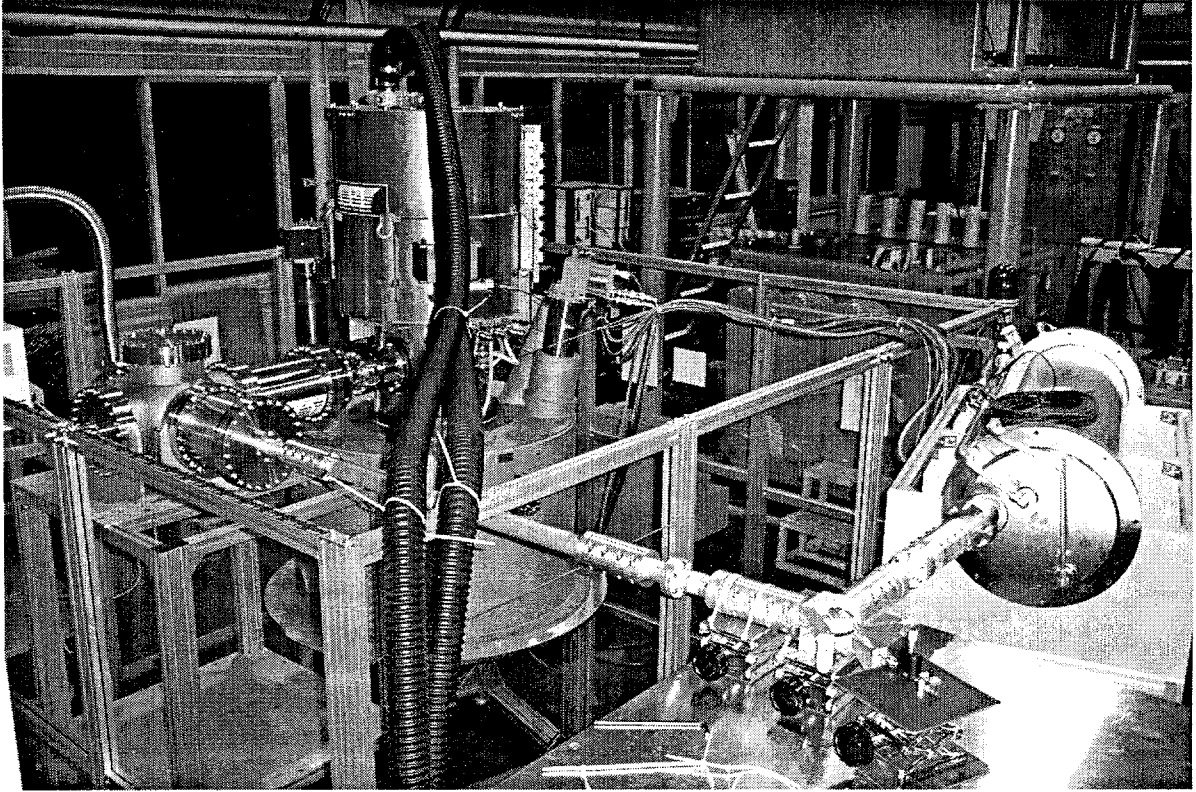


그림 3-3-53. The tube, L-box, waveguide, power monitoring miter bend, dummy load.

③ Cooling system

Cooling system 구성과 gyrotron tube와 dummy load의 cooling channels은 각각 그림 3-3-54와 그림 3-3-55와 같다. Short pulse 테스트로 인해 마이크로파의 평균 출력이 작으므로 사방 1.2 m의 portable cooling system으로 제작되었고 최대 10기압, 170 lpm의 유량을 공급할 수 있도록 설계되었다. 자세한 portable cooling system 구성 설계도는 그림 3-3-56에서 보여진다. 현재 (주)포스콘에 설치된 cooling system은 그림 3-3-57에 보여진다.

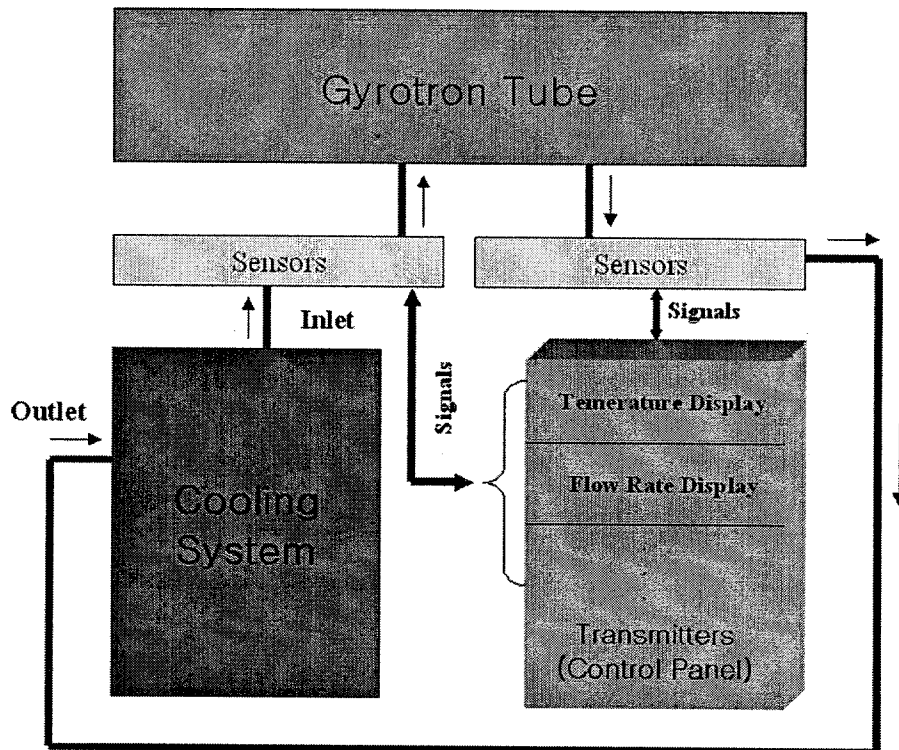


그림 3-3-54. The block diagram of the cooling system.

Gyrotron Tube Cooling Channels

- FM Flow meter sensor
- PG Pressure gauge
- RTD Resistance temperature detector
- dT Difference temperature transducer

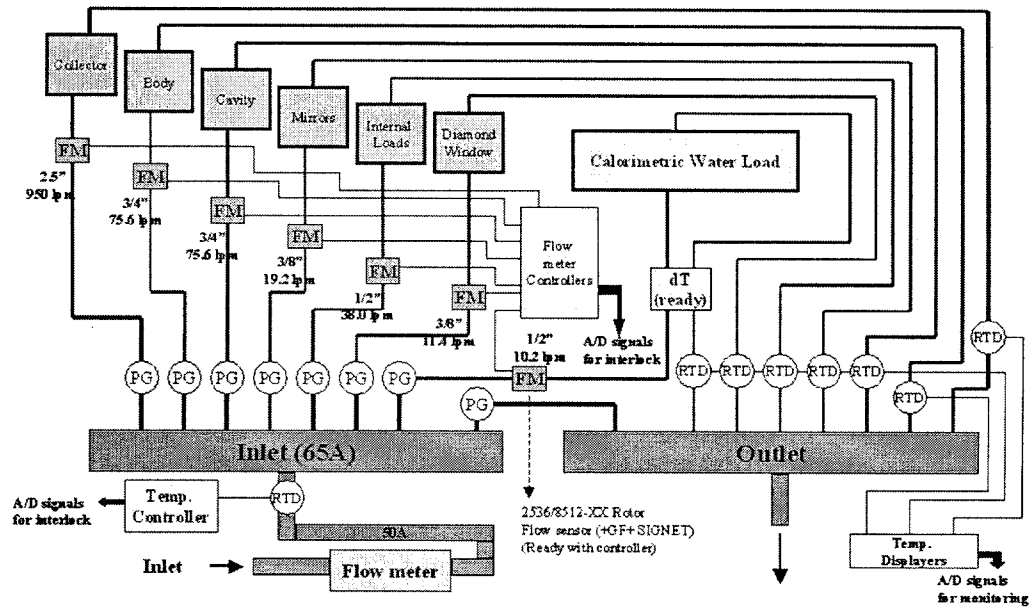


그림 3-3-55. The cooling channels of the gyrotron test.

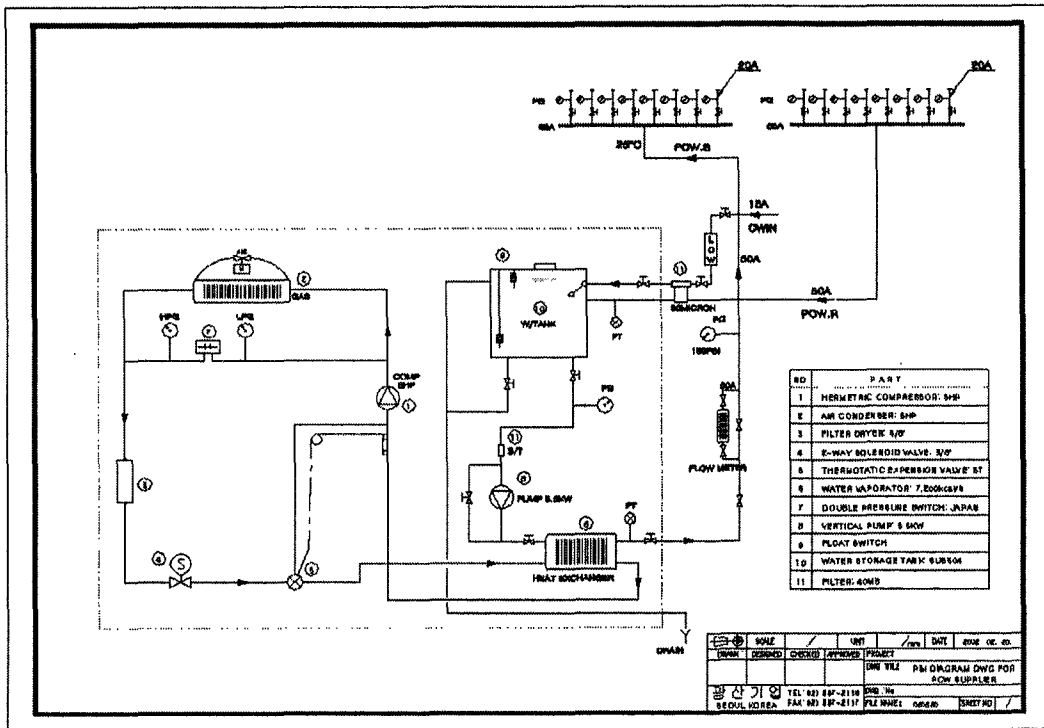


그림 3-3-56. The schematic drawing of the portable cooling system.

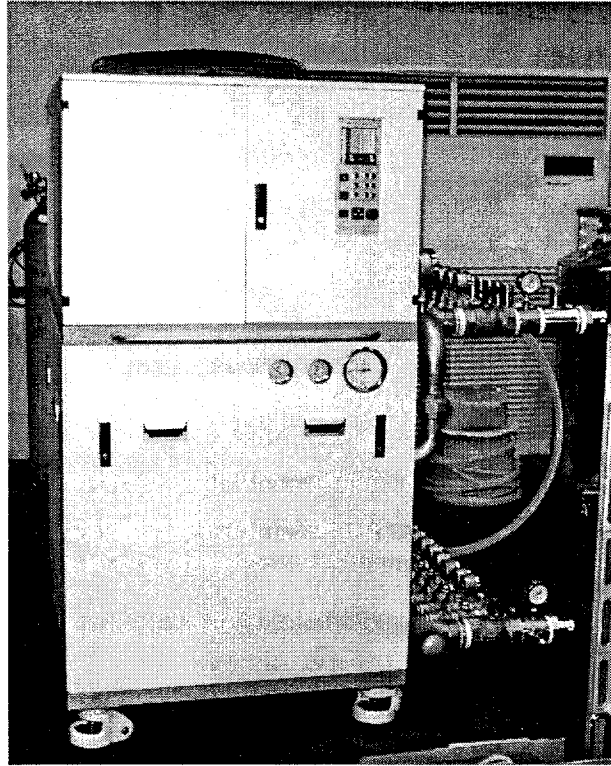


그림 3-3-57. The manufacture of the gyrotron portable cooling system

④ Pulse modulator 와 Interlock의 회로 구성

FAT을 위해 우리는 short pulse 연속 운전을 채택하였고 20 μ s, 60 Hz Pulse modulator를 사용하였다. FAT에서는 Collector Potential Depression 방식으로 하지 않고 gyrotron tube의 body와 collector를 common ground로 연결하여 단순히 cathode와 body/collector의 diode 방식으로 운전하였다.

FAT의 원활한 운전과 안전을 위해 interlock 회로가 구성되었고, gyrotron tube 보호를 위한 interlock signal들은 gyrotron tube의 cathode와 body사이의 arc signal, cathode-collector 전자빔의 over current signal, cooling system의 작동여부 접점, 초전도 자석 전원장치의 alarm relay 접점 (main magnets, transverse coils, gun coils, LHe level, temperature 접점)이 있다.

Arc signal은 L-box에 설치된 arc detector로부터 오고 over current signal은 Pearson Current Transformer로부터 얻는다. 이 두 신호는 pulse modulator에 trip signal로 입력되어 10 μ s 이내로 pulse를 차단할 수 있다. 그 외 접점 signal은 Programmable Logic Controller (PLC)를 통하여 pulse modulator로 입력되도록 하였다. PLC를 통한 interlock은 10 ms 이내로 가능하도록 구성하였으므로 펄스 repetition rate를 60 Hz로 하여 운전해도 interlock이 동작시점에서 다음 번째 펄스는 차단될 것이다. 그러나 현재 pulse modulator의 IGBT의 스위치는 1 ms-on switch 방식으로 작동되므로 10 μ s 이내로 interlock이 작동된다 하더라도 20 μ s 펄스 폭 내에서는 펄스를 차단할 수는 없다.

⑤ FAT 결과 (마이크로파 출력 및 주파수 측정)

Gyrotron tube 성능시험시 측정되는 값들은 실제 gyrotron tube에 인가되는 전압과 전류, 마이크로파 출력, 그리고 주파수이다. 마이크로파 출력은 calorimetric 측정방법을 이용한 간접적 방법과 power monitoring miter bend에서 coupling 되는 low power를 측정하여 power monitoring miter bend를 통과하는 마이크로파 출력을 측정하는 직접적인 방법으로 측정하였다. 주파수는 frequency meter를 이용한 방법과 harmonic mixer와 spectrum analyzer를 이용한 측정방법으로 측정되었다. 그림 3-3-58은 calorimetric 방법을 이용한 마이크로파 출력 측정 구성도이며, 그림 3-3-59는 power monitoring miter bend를 이용한 마이크로파 출력과 주파수 측정 실험장치 setup을 보여주고 있다.

간접적인 방법으로 마이크로파 출력을 측정하는 calorimetric 측정방법이란 gyrotron tube 및 dummy load의 냉각라인으로 흐르는 물의 유량과 입수와 출수의 온도차를 이용하여 냉각수로 흡수된 마이크로파 출력이 얼마인지 계산해 내는 방법이다. 마이크로파 출력이 short pulse (20 μ s - 1 ms)인 경우와 long pulse인 경우, 각각의 경우 흡수된 마이크로파 출력 환산방법은 이미 (2)의 (라)에서 설명되어 있다. 냉각수의 유량 및 입수/출수 온도차의 data는 200 k sampling rate를 가진 A/D

board와 LabView program을 이용하여 얻어졌으며, 얻어진 데이터를 이용한 마이크로파 출력을 얻었다. LabView 프로그램을 이용한 데이터 측정 및 계산 결과는 그림 3-3-60에 나와 있다. 그림 3-3-60은 LabView 프로그램의 control panel을 보여주며 각각의 냉각수 라인의 냉각수 유량과 온도차를 그래프로 보여주고 있다.

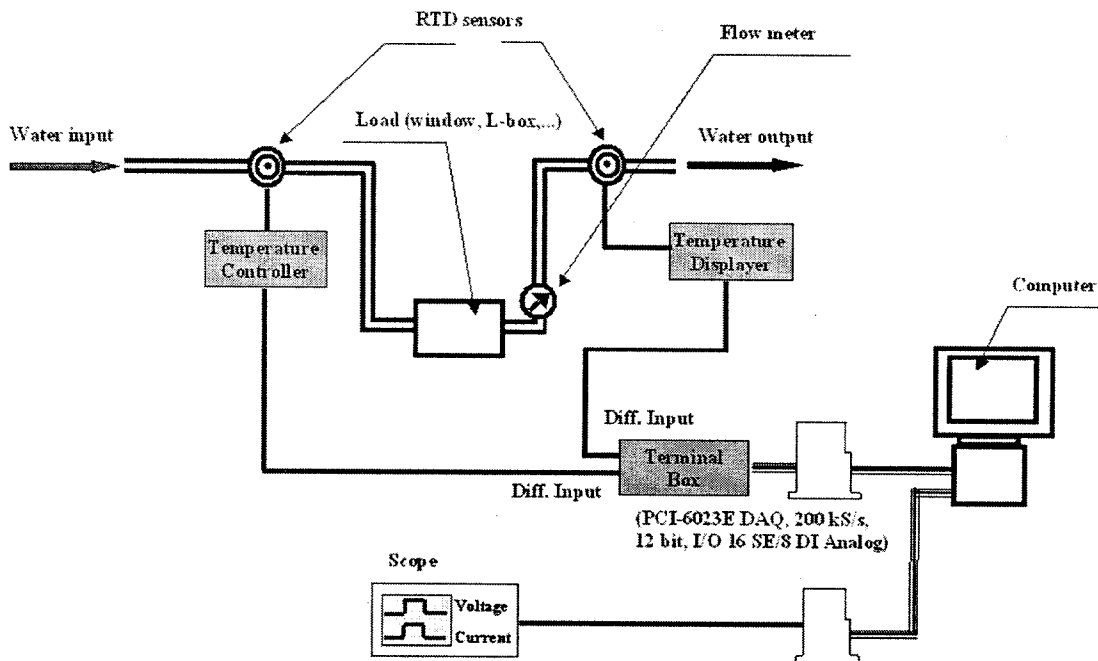


그림 3-3-58. The configuration of the calorimetric power measurement.

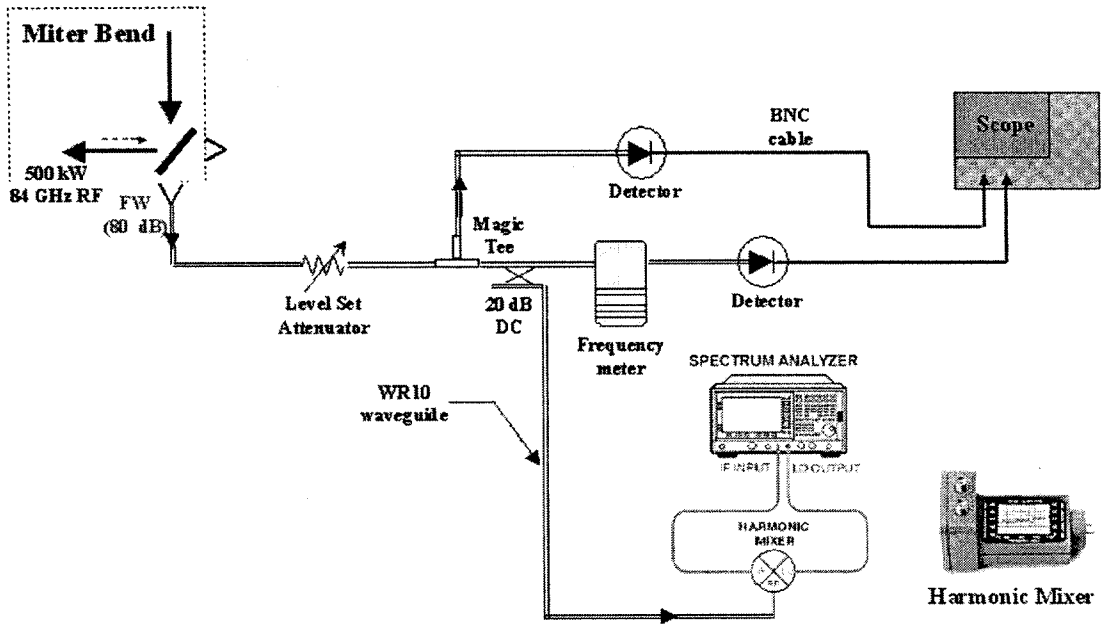


그림 3-3-59. The schematic layout of the frequency measurement and the microwave power.

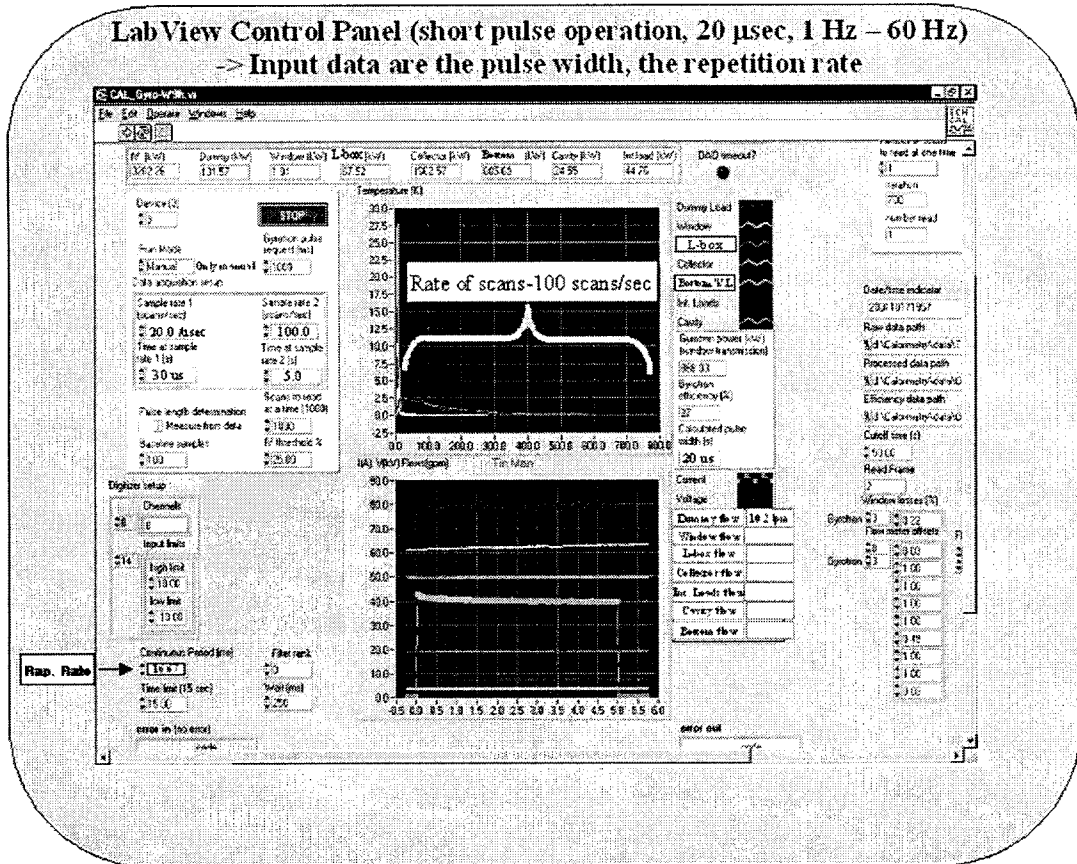


그림 3-3-60. The control panel of the LabView program.

ECH 시스템 전송선에 사용되는 miter bend는 내부에 장착된 동으로 만든 거울 (copper mirror)에 의해 마이크로파의 진행을 아주 적은 power 손실로 90 도 각도로 방향을 바꿔준다. 특별히 power monitoring miter bend는 내부에 장착된 copper mirror 뒷 부분에 선방향으로 작은 slot을 내어 진행하는 마이크로파의 적은 양이 slot을 통해 빠져나가도록 하였다. 빠져나간 마이크로파는 copper mirror 뒷부분에 반원 disk 모양으로 설치된 fused silica에 의해 모아져서 외부 horn antenna에 coupling 된다. 현재 GA로부터 주문 제작되어 입고된 power monitoring miter bend는 마이크로파의 출력의 80 dB까지 horn antenna로 coupling 되게끔 제작되었다. 마이크로파의 출력이 500 kW인 경우 5 mW의 power가 horn antenna로 coupling 된다. 그림 3-3-61은 power monitoring miter bend를 보여주며 horn antenna에 이어 millimeter waveguide components중 하나인 level set attenuator와 crystal detector가 연결된다. Crystal detector는 마이크로파가 입력되어 DC 전압으로 출력시키는 millimeter waveguide component이며 입력 마이크로파 power대 출력 전압의 일정한 sensitivity를 가지고 있다. 대체로 이 sensitivity는 입력되는 마이크로파 power가 수 mW인 경우에 유효하며 그 입력 power는 전단에 연결된 level set attenuator에 의해 조절될 수 있다. 우리가 사용한 crystal detector의 sensitivity는 1290 mV/mW이다.

마이크로파 출력 및 주파수를 power monitoring miter bend를 사용하여 동시에 측정하기 위해서 그림 3-3-61에서 보여진 것처럼 magic tee를 사용하여 horn antenna로 coupling된 마이크로파 출력을 3-dB로 분리하였다. 주파수 측정에 가장 쉬운 방법은 frequency meter를 이용하는 것이며, 입력된 마이크로파의 주파수를 meter내부에 있는 resonator를 mechanically tuning하여 resonator 공진주파수와 일치시켜 찾아내는 것이다. 마이크로파 주파수가 resonator주파수와 일치할 때 meter 뒤에 연결된 crystal detector로부터 나오는 DC 전압신호는 최소가 될 것이다. 다른 주파수 측정방법은 harmonic mixer와 spectrum analyzer를 사용하여 직접적으로 마이크로파 주파수를 측정하는 것이다. 이 방법은 spectrum analyzer의 내부 mixer 대신 외부 harmonic mixer를 사용하는 것이다. 사용된 harmonic mixer는 Agilent 11970W 모델이며 W-band (75 - 110 GHz) 영역의 마이크로파의 입력을 허용한다. Harmonic 수는 18이며 spectrum analyzer로부터 local RF를 입력받아 18 harmonic 신호로 변경해주어 입력된 마이크로파 (84 GHz)와 down converter 시켜준다. Harmonic mixer의 출력은 IF (Intermediate Frequency)으로서 다시 spectrum analyzer로 입력된다. Spectrum analyzer는 Agilent E4407B model이며 입력된 IF 신호를 받아 측정코자 하는 마이크로파 주파수를 display 하여준다.

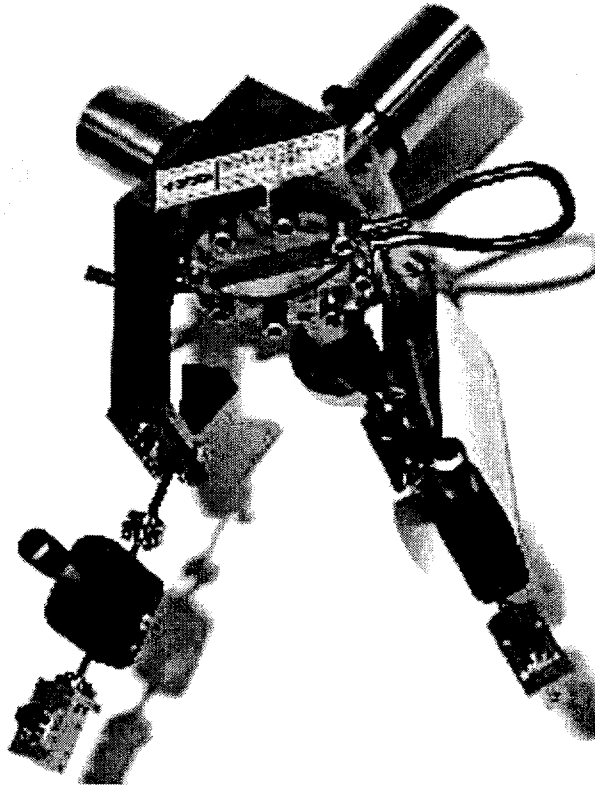
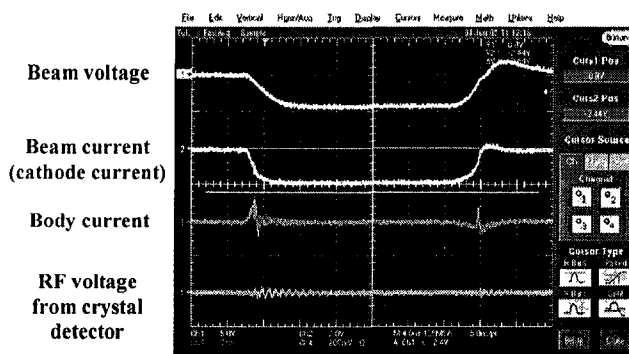
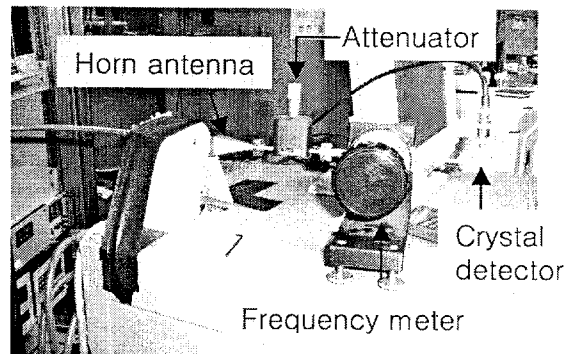
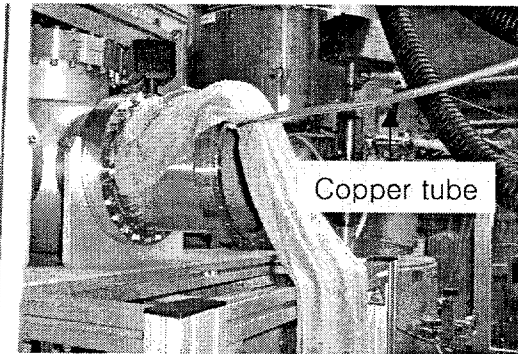


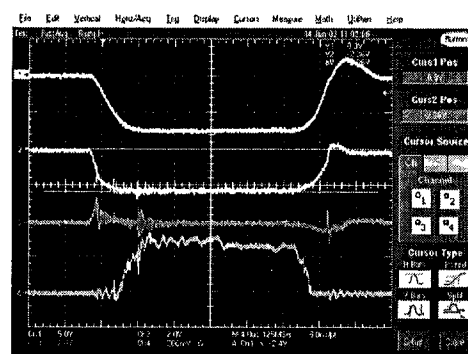
그림 3-3-61. The power monitoring miter bend on which the attenuator and the crystal detector attached.

- Results

a. Test I (for checking RF generation)

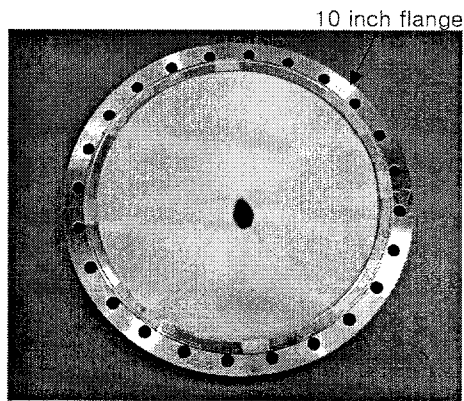
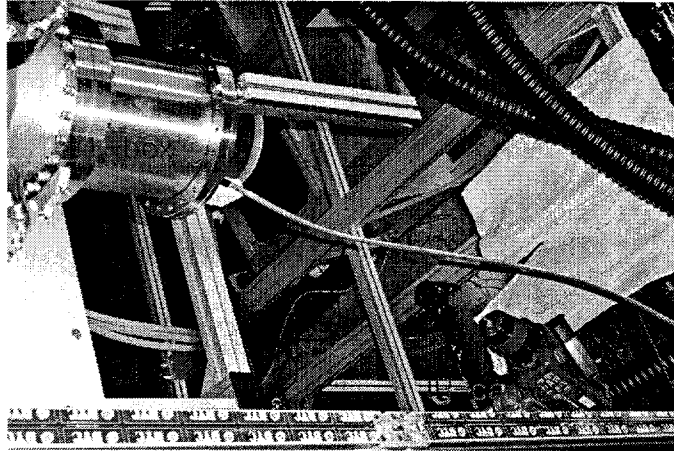


50 kV, 20 A: no RF picked up

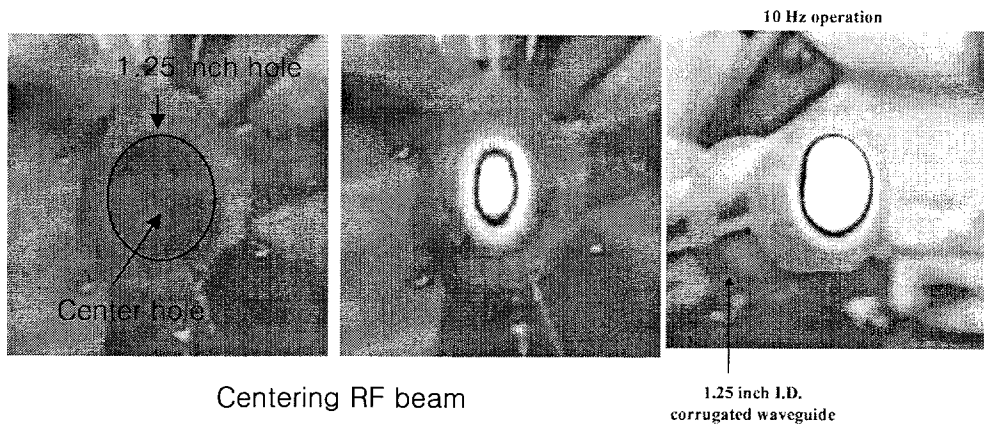


75 kV, 23.6 A: RF picked up

a. Test II (beam alignment using L-box mirror and IR-camera)



Paper burning
(20 μ s, 10 Hz, 10 sec shots)



(6) ECH 장치 전송선

(가) 전송선 구성품 개요 및 특성

전송선 구성품은 미국 General Atomics (GA)사에서 주문 제작하여 확보하고 있는 것이며 각 구성품의 개요 및 특성은 아래 표 3-3-5에 기술되어있다.

표 3-3-5. ECH 전송선 components 와 사양

COMPONENT		NUMBER	SPECIFICATION
Gyrotron (VGB-8084, CPI)		1	500 kW, 2 sec pulsed output at 84 GHz, Diode gun, Single-stage depressed collector
Vacuum window		1	CVD diamond window, edge-cooling
L-box		1	Matching optics unit. One focusing mirror if diamond window is used
Waveguide switch*		1 ea	$\leq 0.1\%$ (normal position); $\leq 2.2\%$ (switched), pneumatic control
Dummy load		1 ea	0.5 MW in 2 sec. Pulses every 5 minutes
Corrugated waveguide		~40 m	31.75 mm(+0.06/-0 mm) ID, 75 - 90 GHz Bandwidth, <1% loss/10m
Waveguide coupler		30 ea	Axial offset ≤ 0.1 mm / Tilt ≤ 2 mrad (if the dummy load part is accounted, the number will be increased.)
Miter bend*	Arc detector	2 ea	$\leq 0.75\%$ loss, Maximum coupling into fiber optic: -75 dB, Mode-mixture generator attached.
	Power monitor	2 ea	A series of cutoff holes in a slot machined in the back of a mirror, Power coupling: 80 dB, Mirror: Glidcop® (copper dispersion strengthened by the addition of the Al ₂ O ₃ particles)
	Polarizer	1 ea	polarization rotator (0.05 deg. Rot.)
Pumpout Tee		5 ea	Gap type (transmission loss < 0.1%, microwave leakage < -40 dB), vacuum conductance 1 Liter/sec, Housing material: SUS 304
DC electrical break		1 ea	5 kV or 25 kV (for KSTAR vessel floating voltage isolation)
Waveguide bellows		2 ea	1.25 inch, axial +5 mm/-10 mm motion (cf. KSTAR center port : Max +15 mm axial motion)
RF Gate valve		1 ea	VAT model 47136-CE44-X all metal gate valve with corrugated waveguide insert. Transmission loss < 0.1 %

(나) 전송선 구성품 구매 현황

지금까지의 전송선 구성품 구매 현황은 아래 표 3-3-6과 같다. 2001년도까지 구매 실적 달성도는 약 50 %이다.

표 3-3-6 전송선 구성품 구매 현황

ECH Transmission Line System 물품 구매 현황															
일련번호	WBS	기명	구매품명	총수량	규격	단가	통화기준	합계	FY1998	FY1999	FY2000	FY2001	FY2001 추가구매	FY2002	FY2003
1	T241	1731	1. L-tbx	1.0	SET	300	KS	300				1			
2	T241	1731	2. Miter bandw/ integral arc detector and mdc m	2.0	EA	260	KS	520		1		1			
3	T241	1731	3. Power Monitor Miter Bendw mode mixture	2.0	EA	385	KS	770		1		1			
4	T241	1731	4. Polarization Rotator Miter Bendw mode mixture	1.0	EA	450	KS	450					1		
5	T241	1731	5. Biplanal polarizer miter bandw mode mixture	1.0	EA	450	KS	450					1		
6	T241	1731	5. Arc Detector Sensor	5.0	EA	10	KS	50			2			3	
7	T241	1731	6. Vacuum Pumpout tee	6.0	EA	200	KS	1200		1		2		2	1
8	T241	1731	7. Waveguide bellows	3.0	EA	120	KS	360				2			1
9	T241	1731	8. Waveguide taper (1.25 inch to 2.5 inch)	2.0	EA	95	KS	190				1	1		
10	T241	1731	9. Electrical Break	1.0	EA	200	KS	200							1
11	T241	1731	10. Torus waveguide window	1.0	EA	1480	KS	1480							1
12	T241	1731	11. Waveguide switch	3.0	EA	250	KS	750	1			1	1		
13	T241	1731	12. Calorimetric water load	2.0	EA	500	KS	1000	1						1
14	T241	1731	13. Corrugated waveguide (2-mlength)	40.0	EA	22	KS	880	2		5	10		10	10
15	T241	1731	14. Corrugated waveguide (1-mlength)	20.0	EA	13	KS	260	2					8	10
16	T241	1731	15. Waveguide Couplings	50.0	EA	0.5	KS	250	10			10		15	15
17	T241	1731	16. Waveguide Gate Valve	2.0	EA	38.0	KS	760						1	
18	T241	1731	17. Waveguide transition (WR10 to 1.25' Corr. W	2.0	EA	90	KS	180							
19	T241	1731	18. Turbo Molecular Pump	5.0	SET	7.1	KS	355		1				2	1
20	T241	1731	19. Vacuum Gauge & controller	1.0	SET	100	KS	100				1			
21	T241	1731	- Gauge (Cathode gauge PKR251)	5.0	EA	1,300.0	KW	6,500.0							
22	T241	1731	- Gauge Controller (6 Channel - ITC2564)	1.0	EA	2,200.0	KW	2,200.0							
23	T241	1731	- Cable (6 m 10 m 20 m 30 m 40 m)	1.0	SET	1,111.0	KW	1,111.0							
24	T241	1731	20. Pump Gate Valve (45' CRF - Manual)	5.0	EA	13	KS	65				5			
25	T241	1731	21. Electronic controller	1.0	SET	200	KS	200							1
26	T241	1731	22. Miscellaneous components	1.0	SET	100	KS	100							
27			- 2.75" Tee (for the Water load & L-tbx)	2.0	EA	128.0	KW	256.0				2			
28			- Zero length reducer (10' - 2.75') (for L-tbx)	1.0	EA	328.0	KW	328.0				1			
29			- Range Adapter (2.75" - NW40)	2.0	EA	96.0	KW	192.0				2			
30			- NW40 Range assembly	2.0	EA	61.0	KW	122.0				2			
31			- Zero length reducer (45' - 2.75') (for Pumpo	5.0	EA			-				5			
32			- 2.75" Copper Gasket	5.0	Pkg	28.0	KW	140.0							
33			- 4.5" Copper Gasket	5.0	Pkg	41.0	KW	205.0							
34	T241	1731	23. Miscellaneous components (for installation of I	1.0	식	150	KS	150							
총 구매 수량				187.0	누 계				16.0	4.0	16.0	40.0	6.0	49.0	42.0
구매 달성도								8.6%	10.7%	19.3%	40.6%	43.9%	70.1%		

(다) 전송선 조립 및 pumping test

ECH 전송선을 통하여 전달되는 마이크로파 power의 적은 손실을 위해 최소한의 조립 misalignment error를 가지고 조립할 필요가 있으며, 또한 500 kW, 2초의 power가 전달될 때 전송선 안에서의 air breakdown을 막기 위해 진공상태로 유지해야 한다. 전송선의 주요 components는 1.25 인치의 내경을 가진 corrugated waveguide이며 Gyrotron에서 KSTAR 플라즈마까지 coupling에 의해 조립된다.

Coupling을 사용한 조립은 과정은 단순하며, vacuum sealing은 Helicoflex metal gasket에 의한 두 waveguide의 만나는 부분에서 이루어진다. 두 waveguide를 연결하여 조립되는 원리는 coupling은 두 개의 shell과 solid ring으로 나뉘질 수 있는데 (그림 3-3-62 참조), 각각의 shell과 solid ring은 두 waveguide에 삽입된 retaining ring에 걸려지게 되고 screw bolts에 의해 두 waveguide는 조여지게 된다. Helicoflex metal gasket은 high vacuum seal 용도로 사용되는 gasket으로서 강한 torque로 조여지지 않더라도 vacuum sealing에 아주 효과적인 gasket이다. ECH 전송선 components인 waveguide, coupling은 모두 알루미늄으로 되어 있어 강한 torque에 손상될 염려가 있으므로 Helicoflex metal gasket이나 viton-oring을 사용하는 것이 적합하다. GA는 Helicoflex metal gasket을 사용하여 vacuum seal을 하도록 추천하고 있다.

1.25 인치 내경의 cylindrical corrugated waveguide에서의 vacuum conductance를 계산하였다. 10^{-3} torr 압력에서는 collision mean free length가 5 cm 임으로 이것은 1.25 인치보다 크므로 collision을 무시할 수 있으며, 또한 corrugation size가 작아 corrugation 효과를 무시하면 vacuum conductance는 단순히 $12.1 D^3/L$ (liter/sec) 로 주어진다. 여기서 D는 내경을 말하며, L은 직선 길이이다. 우리가 꾸며 놓은 조립 및 pumping test stand의 직선 길이는 4 m 임으로 vacuum conductance는 0.97 liter/sec이다. 아래 그림 3-3-61-01과 02는 test stand를 보여준다.

Test stand에서 사용된 펌프인 150 DryVar turbo pump는 turbo pump의 pumping speed가 150 liter/sec이지만 foreline pump의 용량이 적다. 테스트 결과 90도로 꺾인 부분에서의 진공도와 4 m 끝에서의 압력차가 약 100 배 정도 된다. 만일 좀 더 큰 용량의 pump를 사용할 경우 90도로 꺾인 부분에서도 압력을 더 낮출 수 있을 것이다. 그림 3-3-61-03은 시험 결과로서 시간에 대한 pressure의 변화를 보여준다.

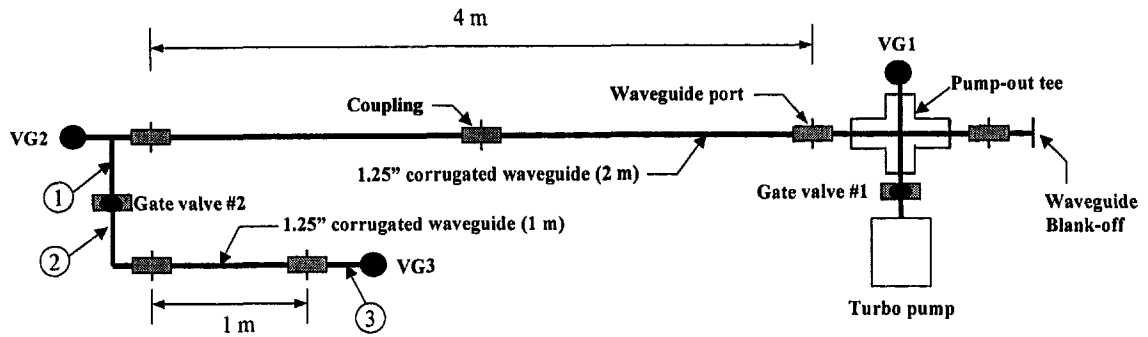


그림 3-3-61-01. The schematic of the pumping test stand. ① A tee for the turning and a vacuum gauge port (fabricated). ② An elbow for the corrugated waveguide going to the opposite direction (fabricated). ③ A Blank-off with a vacuum gauge port (fabricated). VG1-3 indicate vacuum gauge with 2.75 inch CFF. Pump-out tee is purchased from GA and it is fabricated with a 4.5 inch 4-way cross chamber. We used a turbo pump of Varian DryVar 150 model for this test. This pump has the pumping speed of 150 liter /sec.

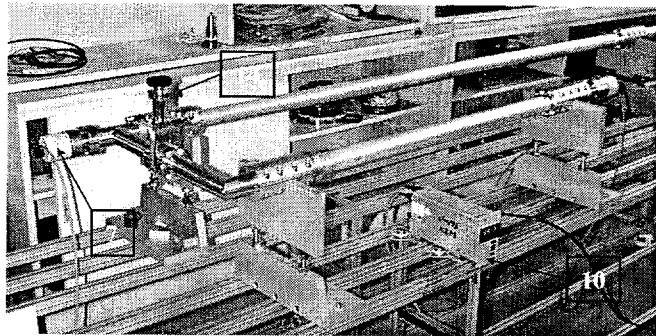
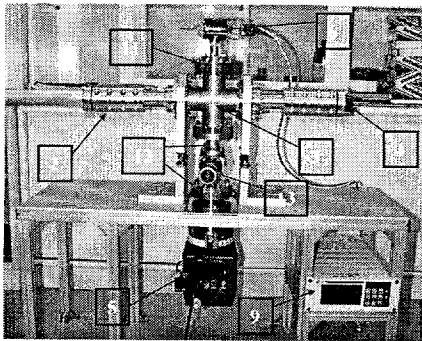
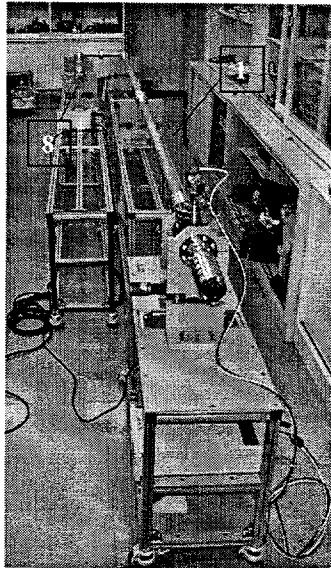


그림 3-3-61-02. The photographs of the test stand. (1) corrugated straight waveguide, (2) waveguide coupler, (3) pump-out tee (4-way cross), (4) blank-off, (5) 150 DryVar Turbo Pump (Varian), (6-8) vacuum gauges, (9) multi gauge controller (Varian), (10) total gauge controller (Balzers TPG252 dual gauge), (11) zero-length reducer (4.5 CFF to 2.75 CFF), (12) reducer (4.5 CFF to 2.75 CFF), (13) manual gate valve (VAT 2.75 CFF type), (14) manual gate valve (Huntington 2.75 CFF type).

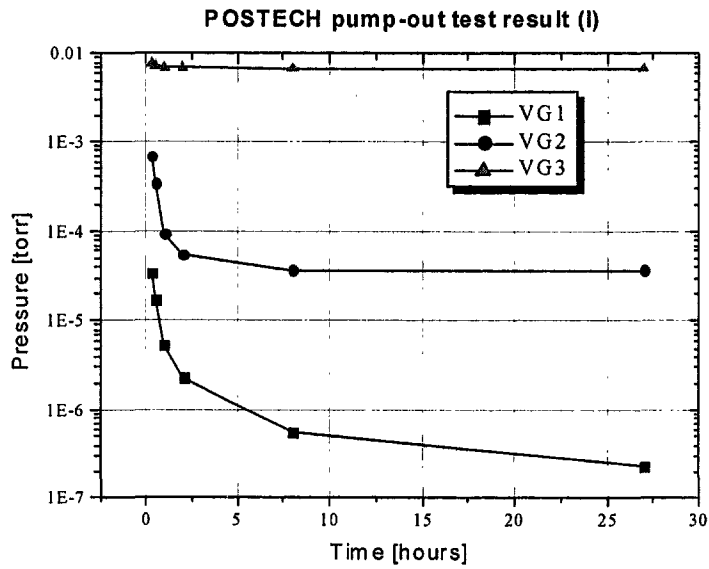


그림 3-3-61-03. The pumpdown time of the 4-m test stand: the pressure change vs. time. VG1 is the pressure at the pumping station, VG2 is the pressure at the end of 4 m, and VG3 is the pressure at the end of the bended line with 90 degrees.

우리는 위와 같은 test stand를 구성하면서 조립의 난해함을 찾을 수 없었고, 또한 vacuum sealing에 큰 문제점들은 없었다. 위의 pumping test 결과를 보면 pumpdown time은 진공펌프에 의해 제한이 있기보다는 1.25 인치의 적은 내경 크기로 인한 나쁜 vacuum conductance에 제한이 있음을 알 수 있다. 더욱이 전송선이 90도로 꺾여 진행할 경우는 더 나쁜 vacuum conductance가 예상되므로 직선라인마다 한 개의 펌프가 설치되는 것이 바람직하다.

(라) High power transmission components (General Atomics products)

General Atomics (GA)사는 DIII-D라는 토카막 핵융합 장치를 운영하고 있으며, DIII-D는 110 GHz의 ECH 시스템을 개발하여 운전중에 있다. ECH 시스템의 고출력 마이크로파 전송선 시스템의 부품들을 제작하고 있으며 주요 핵심부품들의 사진 자료를 아래에 삽입한다. 더 자세한 정보는 인터넷 web site (<http://web.gat.com/products>)에서 검색이 가능하다.

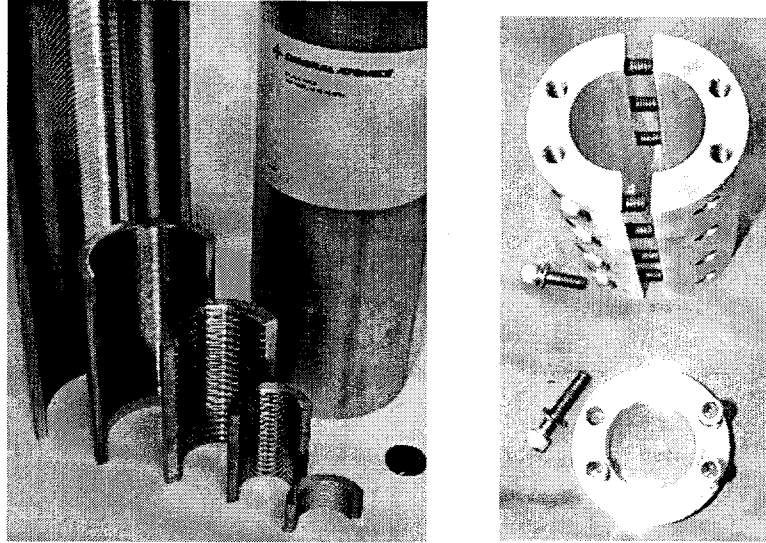


그림 3-3-62. (Left) Corrugated waveguide, (right) coupling between waveguides.

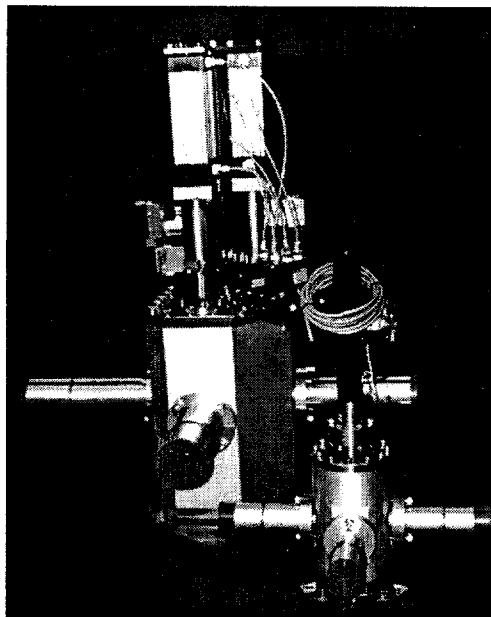


그림 3-3-63. Waveguide switch.

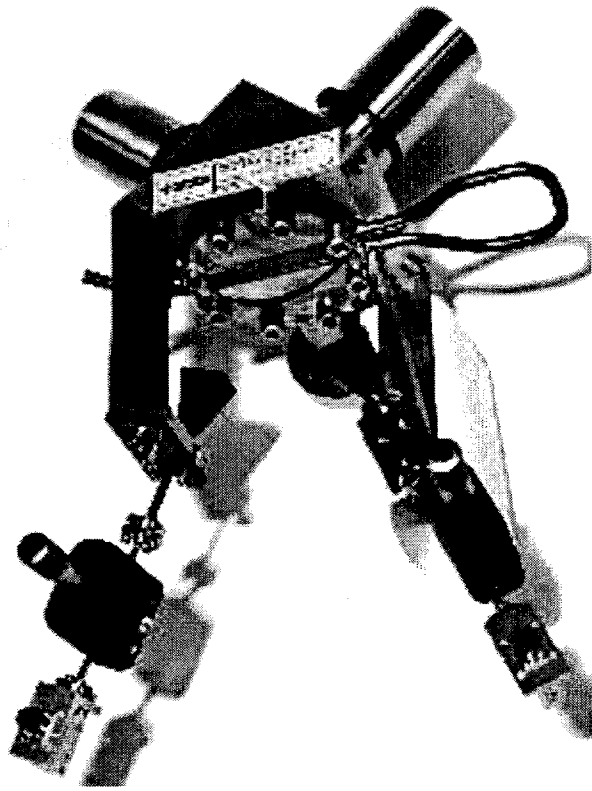


그림 3-3-64. Power monitoring miter bend.

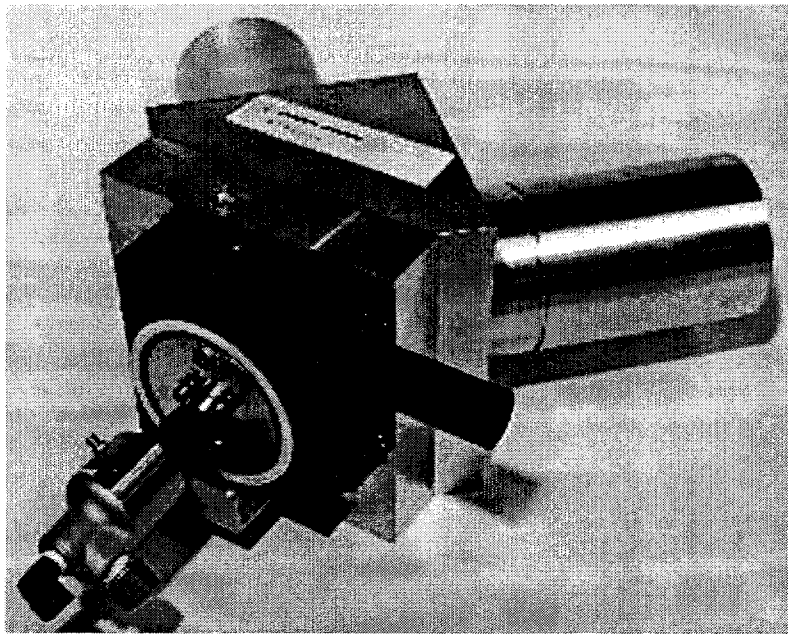


그림 3-3-65. Polarizer miter bend.

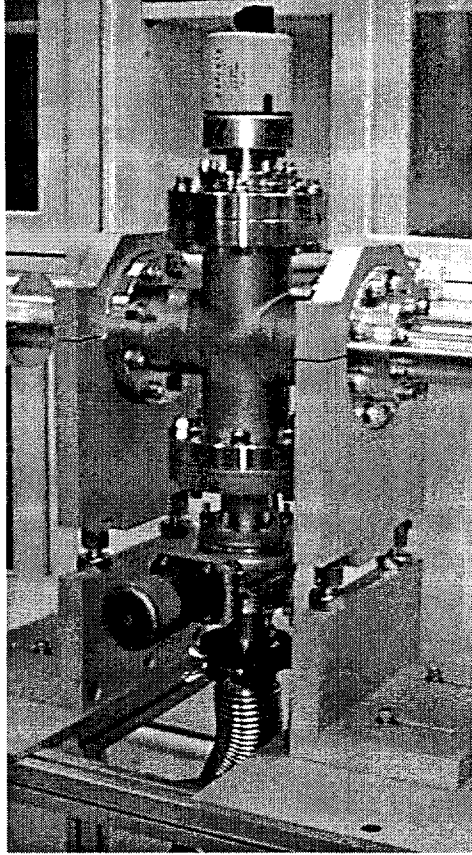


그림 3-3-66. Pump-out tee for the pumping in the transmission system

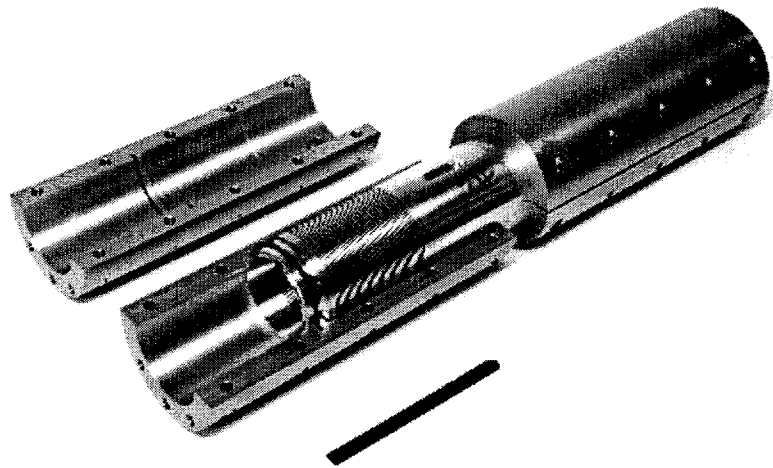


그림 3-3-67. Waveguide bellows.

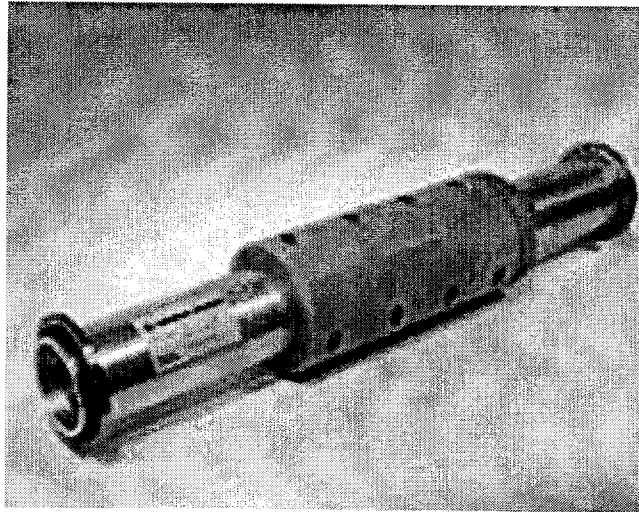


그림 3-3-68. DC electrical break (5 kV).

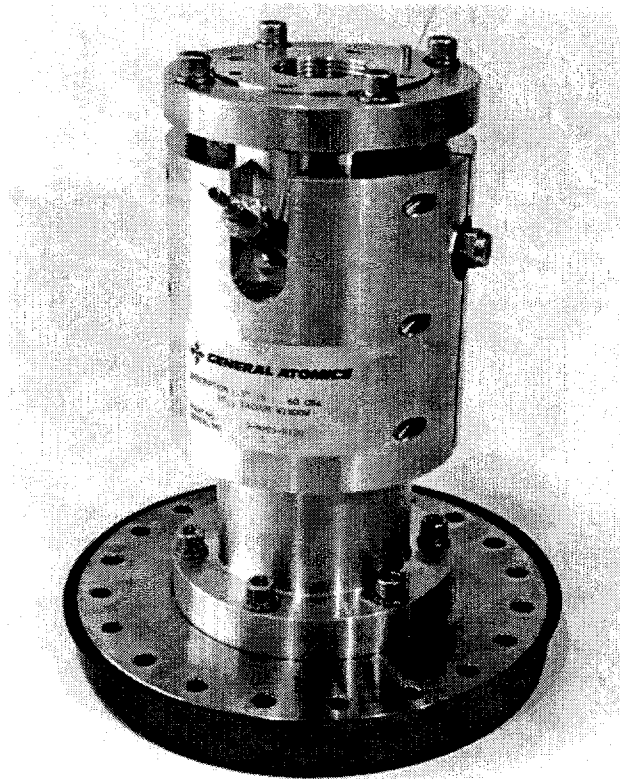


그림 3-3-69. Diamond window assembly in the transmission system

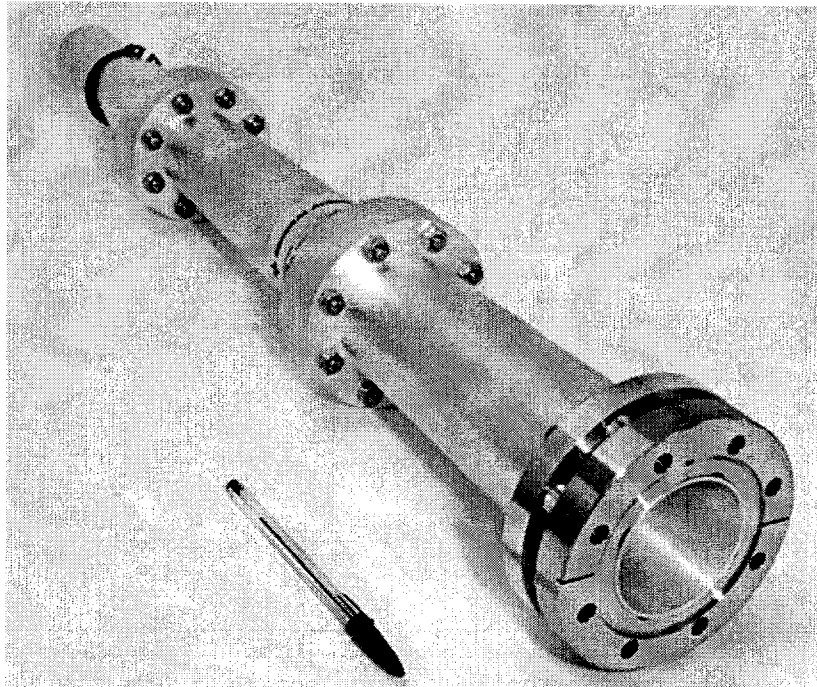


그림 3-3-70. Waveguide diameter taper (1.25" to 2.5").

(7) ECH Local I&C

ECH Local Instrument and Controller system은 현재 참여기업인 (주)포스콘에서 설계 및 개발중에 있으며 gyrotron tube interlock, 전송선 시스템 monitoring, KSTAR 상위 controller와의 timing을 가능하도록 설계하였다. 시스템 구성은 그림 3-3-71에서 보여진대로 OPI (Operator Interface)는 PC로 하며, IOC (Input Output Controller)는 PXI system (NI PXI-1010 model)으로 한다. Field bus와 Field I/O는 GPIB interface, Multi-I/O (NI-DAQ PXI-6071E model), High speed DI/O (NI PXI-6534 model)가 있다. Field controller는 PLC system으로 구축하고 PLC와 PXI는 ethernet으로 통신하여 data를 주고 받도록 한다.

Fast interlock은 field controller인 PLC system의 matrix board를 통해 이루어지며 data logging 및 monitoring은 PXI controller에 의해 이루어진다. PC monitoring & control은 LabView 프로그램을 이용하여 가능토록 한다.

ECH Control System Configuration

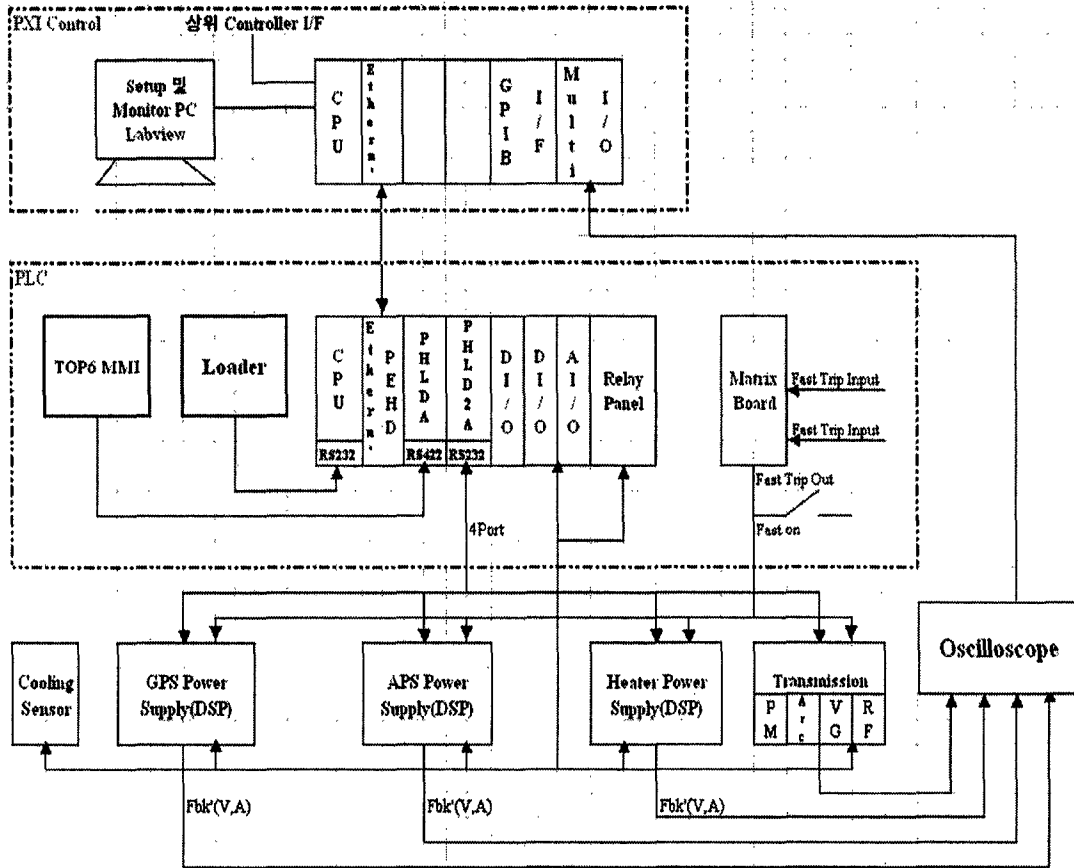


그림 3-3-71. The configuration of the ECH local instrument and control.

(8) ECH antenna system

ECH antenna system은 미국 Princeton Plasma Physics Laboratory (PPPL)과 공동으로 개발할 예정이며 현재 PPPL에서 제안한 antenna system은 마이크로파 launch 및 receiver가 가능토록 설계되었으며, 그림 3-3-72는 구조설계도이다. 그림 3-3-72에서는 scan 가능한 range를 보여주고 있다. PPPL에서 제안한 antenna 구조는 토카막의 toroidal angle과 poloidal angle 양 방향으로 입사되도록 설계되었다. 이를 위해 antenna는 마이크로파를 집속시키는 fixed focusing mirror와 launch 방향을 조절하는 movable flat mirror로 구성된다.

KSTAR 84 GHz, 500 kW, 2 sec의 ECH 시스템에 적합한 자세한 공학 설계는 3단계 1차년도부터 수행될 것이다.

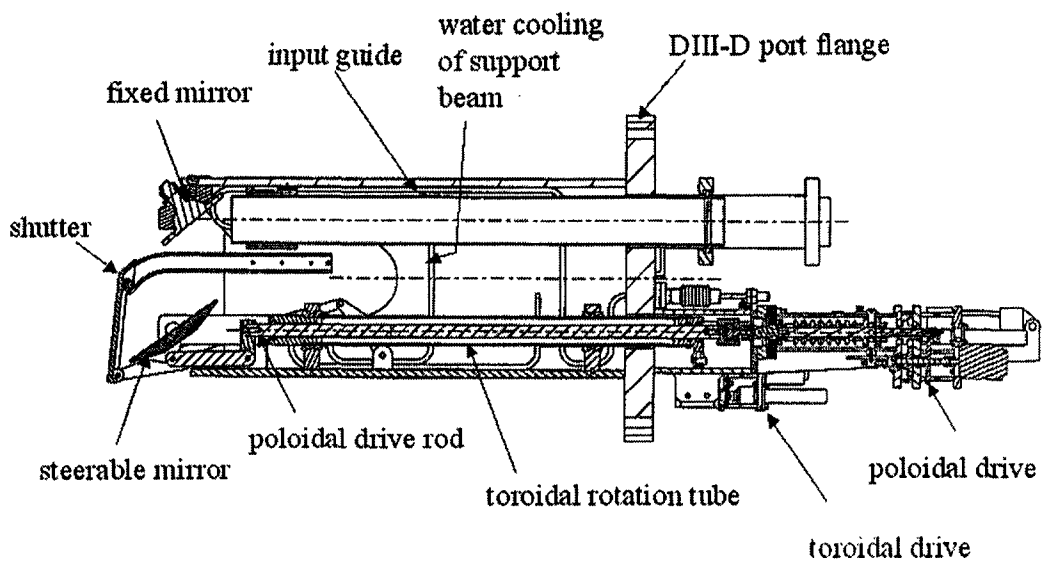


그림 3-3-72. The cross section of the ECH antenna proposed by PPPL.

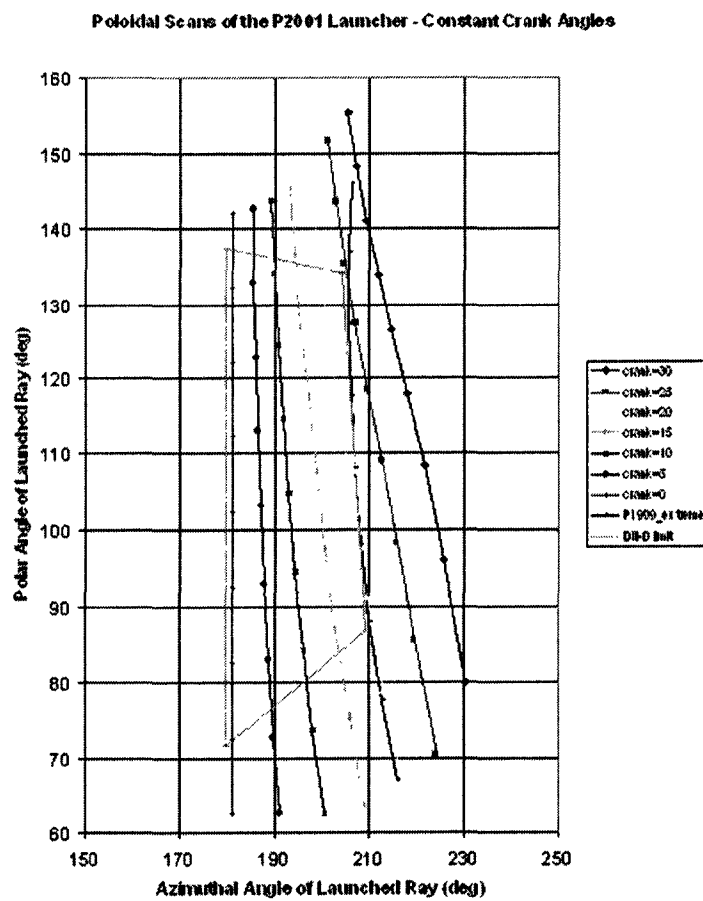


그림 3-3-73. The scanning range in the toroidal and the poloidal direction

(9) Radiation patterns of 84 GHz

Open-ended corrugated waveguide로부터 방사되는 마이크로파의 radiation pattern 계산이 수행되었다. Corrugated waveguide내에서의 마이크로파는 HE_{11} mode로 진행하며 그 마이크로파가 waveguide open-end에서 radiation (그림 3-3-74 참조) 될 때 그 pattern은 일반적인 smooth circular waveguide에서 radiation 되는 pattern과 아주 다르다. HE_{11} mode의 경우 radiated power는 waveguide center에서 가장 크며, smooth circular waveguide 의 경우 center에서 이론적으로 zero가 된다. HE_{11} mode의 경우에서도 corrugated waveguide의 내부 직경에 따라 radiation directivity의 큰 차이점이 보인다. 1.25" ID와 2.5" ID 두 가지의 경우를 비교하면 그림 3-3-75에 나타난 것처럼 2.5" ID의 directivity가 더 크다. 따라서 antenna 전단의 corrugated waveguide 직경은 2.5"가 선호되며 1.25" ID corrugated waveguide의 전송선 시스템을 사용함으로 1.25" ID에서 2.5" ID로 직경이 커지는 waveguide diameter taper가 사용된다.

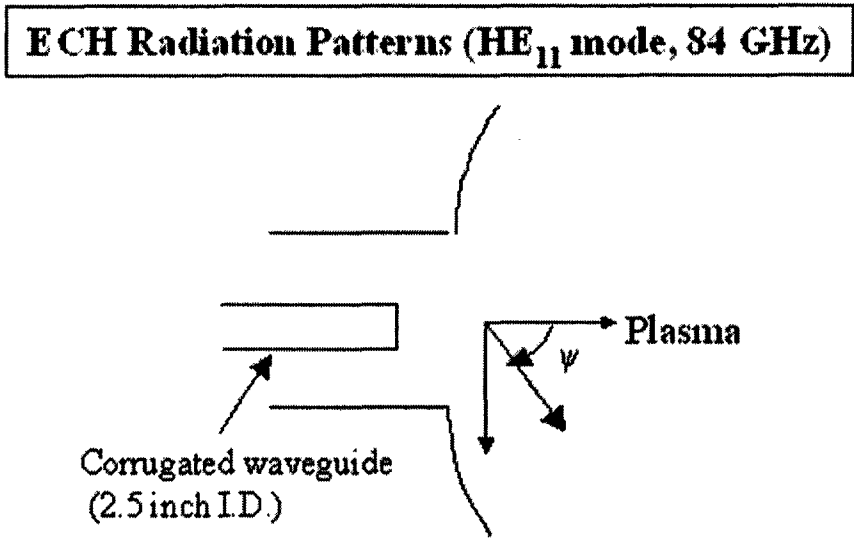


그림 3-3-74. The open-ended waveguide before the ECH antenna.

Corrugated waveguide의 higher modes, HE_{1n} 혹은 EH_{1n} modes 의 radiation pattern을 또한 계산하였고 그림 3-3-76과 그림 3-3-77에서 fundamental mode (HE_{11} mode)의 radiation pattern과 비교 하였다. HE_{1n} modes의 radiation pattern을 보면 higher modes는 fundamental mode에 비해 side lobe의 power level이 크다. EH_{1n} modes의 경우는 모두 다 center에서 최소의 power를 가진다.

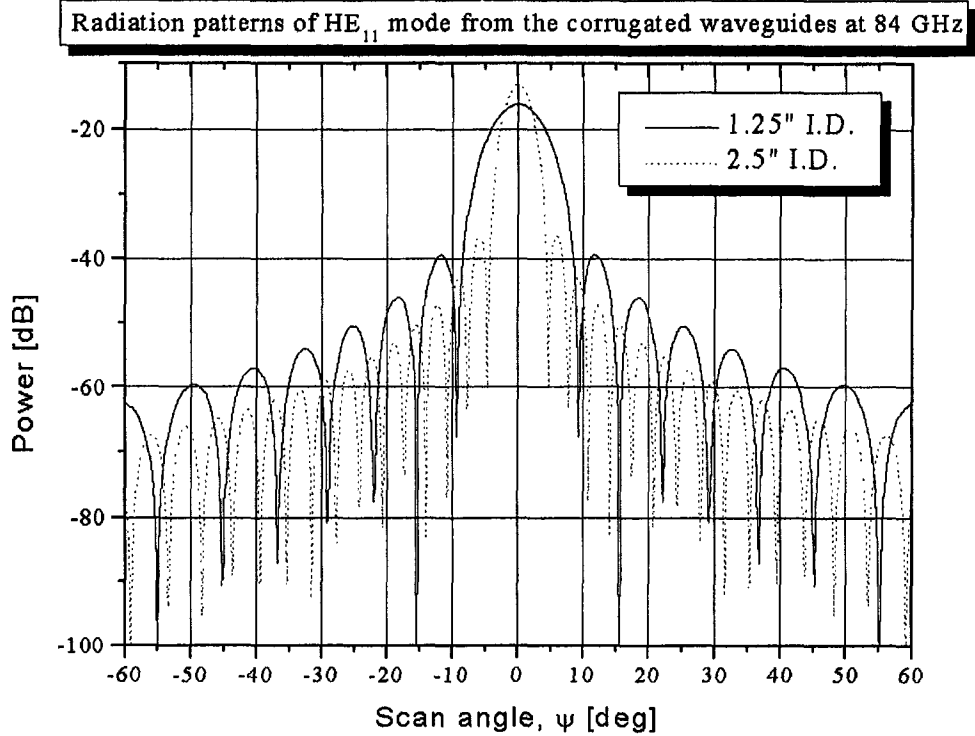


그림 3-3-75. The radiation patterns of 84 GHz microwave from the 1.25" ID corrugated waveguide and 2.5" corrugated waveguide.

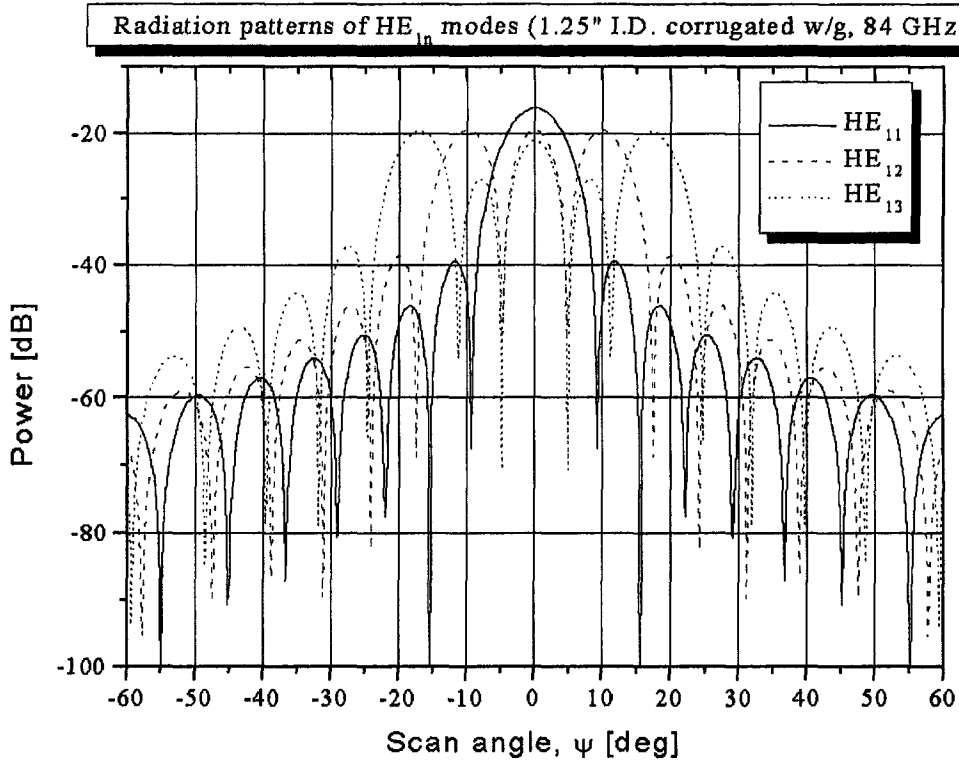


그림 3-3-76. The radiation patterns of HE_{1n} modes of 84 GHz.

Radiation patterns of EH_{1n} modes (1.25" I.D. corrugated w/g, 84 GHz)

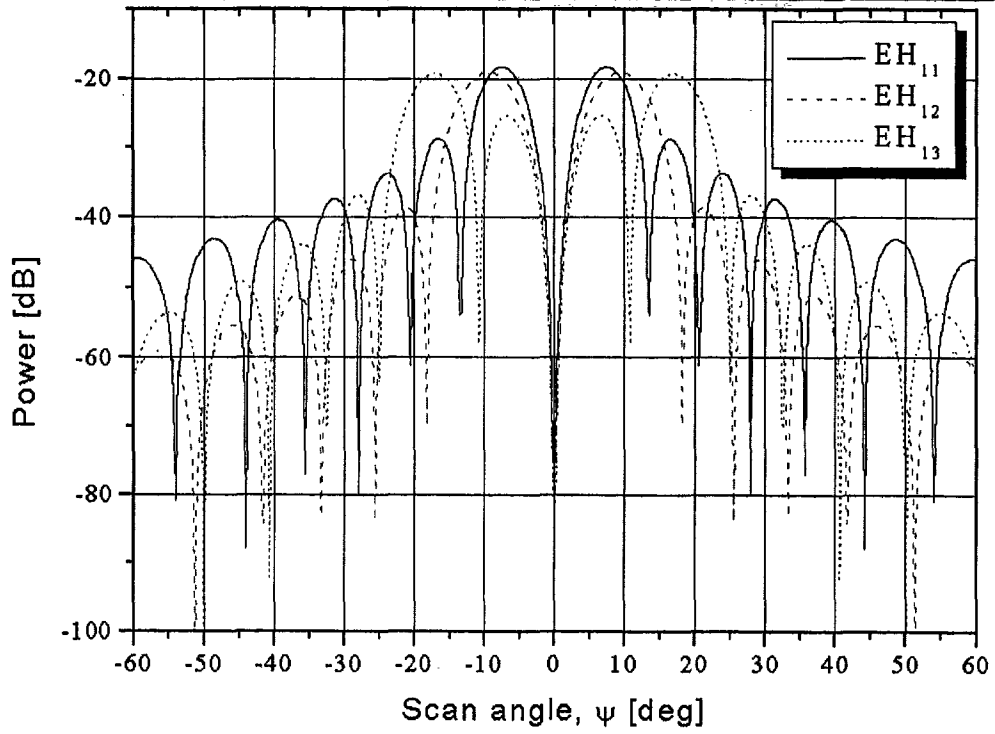


그림 3-3-77. The radiation patterns of EH_{1n} modes of 84 GHz.

(10) Pre-ionization 전산모사

(가) 서론 (연구동기)

ECH 초기이온화 (preionization)는 초기에 토카막 플라즈마를 발생시키는데 큰 도움을 준다. 토카막 내의 중성기체의 방전을 위해서 저항가열을 유도하기 위한 일주 전압 (loop voltage)이 가해지는데 ECH 초기이온화를 이용하면 저항가열만을 이용한 방전보다 일주 전압을 크게 낮출 수 있으므로 토카막 진공용기 (vacuum vessel) 벽이 두꺼워도 된다. 진공용기 벽이 두꺼우면 두꺼울수록 플라즈마의 붕괴 (plasma disruption)에 대해 잘 견딜 수 있게 되는 이점이 있다. 그러나 보통 진공용기가 견딜 수 있는 전기장이 한계가 있으므로 만약 저항가열만으로 플라즈마 초기이온화를 시킬 때 필요한 일주 전압이 진공용기의 한계치를 넘어설 경우에는 일주 전압을 낮추어야만 한다. 이럴 경우 ECH 초기이온화는 일주 전압을 낮추어 줄 수 있다. 또한 세계적인 여러 토카막의 ECH 초기이온화 실험 결과로부터 알 수 있는 것은 첫째, 저항가열로 초기 절연파괴를 시킬 경우에 생기는 runaway 전자들을 ECH 초기이온화를 사용하면 줄일 수 있고 둘째, 플라즈마 전류 상승 (ramp-up) 동안에 플라즈마 파라미터에 대해 민감한 영향을 받지 않고 초기이온화가 된다. 여기서 플라즈마 파라미터는 초기 중성기체의 밀도, 오차 자기장(error field), 그리고 불순물 효과 등이 있다.

현재 KBSI (Korea Basic Science Institute)를 중심으로 설계 중에 있는 KSTAR (Korea Superconducting Tokamak Advanced Research)는 초기 플라즈마 구동을 위해서 ECH 초기이온화를 사용할 예정이다.

본 연구는 KSTAR에서의 ECH 초기이온화를 전산모사를 통해 살펴보는 것이다. KSTAR의 운전 시나리오 중 초기에는 토카막 중심부에 1.5 T의 자기장이 걸리므로 전자 공명진동수는 42 GHz가 된다. 그러나 자이로트론으로부터 공급받는 마이크로파의 진동수는 84 GHz로 고정되어 있으므로, second-harmonic 공명진동수로 플라즈마를 개시해야 한다. 따라서 본 연구는 fundamental-harmonic 뿐만 아니라 second-harmonic ECH에 중점을 두어 초기이온화를 살펴보았다.

(나) ECH 초기이온화 (pre-ionization) 전산모사 결과

① ECH 초기이온화 코드 개요

ECH 초기이온화 코드는 크게 4가지 식을 통해 Runge-Kutta 방법으로 미분방정식 계산을 수행하게 되는데, 첫째는 연속방정식이다.

$$\frac{dn_e}{dt} = n_e \nu_{ion} - n_e (\nu_{err} + \nu_{dr} + \nu_{diff}) \quad (1)$$

이때 ν_{ion} 은 이온화 비율, ν_{err} 은 error field 때문에 생기는 loss rate, ν_{dr} 은 토로이달 (toroidal) 방향으로의 drift에 의한 loss rate, 그리고 ν_{diff} 는 분산 (diffusion)에 의한 drift이다. 또한 초기 주입되는 입자가 모두 플라즈마가 된다는 가정에 의해 다음의 식을 쓸 수 있다.

$$\frac{dn_0}{dt} = - \frac{dn_e}{dt} \quad (2)$$

이때 n_0 는 중성입자 밀도이다.

에너지 균형식 (energy balance)에 의해 다음의 두 식이 표현되는데,

$$\begin{aligned} \frac{dU_e}{dt} &= \frac{P_{ECH} + P_{OH} - P_{RAD}}{V} - U_e (\nu_{err} + \nu_{dr} + \nu_E) - \frac{1}{V} (P_{EQU} + P_{BREM} + P_{IRAD}) \\ \frac{dU_i}{dt} &= \frac{1}{V} (P_{EQU} - P_{CX}) - U_i \nu_E \end{aligned} \quad (3)$$

U_e 는 전자에너지 밀도, U_i 는 이온에너지 밀도이고, P_{ECH} 는 ECH power, P_{OH} 은 Ohmic 가열 에너지이다. 이온화 과정에 의해 생기는 방사 전력 손실 (radiation power loss)은 P_{RAD} , 수소이온과 불순물 이온에 의해서 생기는 Bremsstrahlung 전력 손실인 P_{BREM} , 또한 수소원자와 수소이온 간의 전하 교환에 의한 power loss인 P_{CX} , 불순물에 의한 radiation power인 P_{IRAD} 이 코드에 포함되었다. 본 전산모사에서 는 탄소, 산소, 그리고 철에 의한 불순물 효과가 고려되었다. 위의 (3)식의 P_{ECH} 부분에 ECH 가열율이 이용된다. 특별히 본 연구에서는 second-harmonic 초기이온화 효과를 보고자 하므로 second-harmonic 가열율로 코드가 수정되었다. KSTAR에서는 7개의 Superconducting poloidal field coils 구조로 저항가열을 시키는데 본 코드에서는 KSTAR 토카막의 7개의 PF 코일과 맞는 모델로 짜여진 코드이며 이는 회로 방정식에 플라즈마와 PF 코일 사이의 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스를 포함시킨 것이다. 그 회로 방정식은 다음과 같이 기술된다.

$$\begin{aligned} - \sum_{n=1}^8 M_{n8} \frac{dI_n}{dt} - I_8 R_p = 0 \quad \Rightarrow \quad dI_8 = \frac{- \sum_{n=1}^7 M_{n8} \frac{dI_n}{dt} - I_8 R_p}{M_{88}} \times dt \\ V_{loop} (loop \ voltage) = - \sum_{n=1}^7 M_{n8} \frac{dI_n}{dt}, \quad V_{resis} (resistive \ voltage) = - I_8 R_p \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $n = 1 \sim 7$ 에 해당하는 것은 각각의 7개의 PF 코일을 의미한다. 그리고 $n = 8$ 일때는 플라즈마에 해당되고 R_p 는 플라즈마 저항을 나타낸다. 또한 M_{n8} 은 PF 코일들과 플라즈마 사이의 상호 인덕턴스이다. KSTAR 토카막의 PF 코일의 상호

인덕턴스 값은 표 3에 나타나있다. ECH 초기이온화 시뮬레이션으로 알 수 있는 것은 플라즈마 온도 T_e , 플라즈마 전류 I_p , 플라즈마 밀도 n_e , 일주 전압 V_{loop} 등이다.

② Fundamental-harmonic ECH preionization with 7 pairs PF coils scenario

KSTAR 토카막 장치는 baseline-plasma phase 에서 3.5 T의 토로이드 자기장이 중심부에 걸리게 된다. 이때 사이클로트론 공명은 84 GHz에 해당하고 이는 자이로트론에서 공급 받게 된다. Fundamental-harmonic의 경우에 본 코드 계산에 의하면 ECH 보조 가열 장치를 이용한 초기이온화가 상당히 잘 일어나는 것으로 나타났다. 그리고 비교적 초기 변수들, 즉 중성입자 밀도, RF power, 불순물 비율 그리고 오차자기장 (error field)에 크게 영향을 받지 않고 RF power가 가해지는 순간부터 플라즈마가 큰 비율로 만들어지는 결과를 얻었다. 그림 3-3-78에서처럼 RF power를 500 kW 입사하는 것과 RF power를 인가하지 않는 경우, 즉 ECH 초기이온화 없이 저항가열만으로 시동했을 때를 비교해보면 주어진 PF 코일 전류 시나리오에서는 RF power가 초기이온화를 위해서는 매우 중요하다는 것을 알 수 있다. 그림 3-3-78은 일주 전압이 6 V로 0.06 sec 동안 가해졌을 때인데, 이는 0.53 V/m의 전기장 세기에 해당한다. 결과를 통해 6-V 시나리오로는 ECH 초기이온화 없이 플라즈마가 초기에 만들어지지 않음을 알 수 있다. 순수하게 저항가열만으로 플라즈마를 발생시키기 위해서는 이보다 더 높은 일주 전압을 가해야 한다. 이것은 후에 논할 second-harmonic의 경우에서와 마찬가지로 결과이다. 그림 3-3-78 (C)에서부터 RF power가 있을 때와 그렇지 않을 때 저항 전압도 크게 다르다. RF power를 500 kW 인가했을 때는 일주 전압이 전부 플라즈마 전류를 시간에 따라 ramp-up 시키는데 소모하므로 저항 전압이 급격히 줄게 된다. 그러나 ECH 보조 가열 없이 저항가열만 주었을 때는 일주 전압의 대부분이 플라즈마의 전류를 발생시키는데 쓰이지 않고 저항 전압으로만 가해지게 된다. 그림 3-3-79는 오차자기장의 변화에 따른 전자 온도, 플라즈마 전류 및 저항 전압의 시간에 따른 변화이다. 오차자기장이 수 mT 이내에서는 플라즈마 발생을 위한 초기이온화에는 큰 영향이 없다. RF power에 따른 변화를 보면 적어도 10 kW 이상의 power에서 플라즈마가 생성됨을 알 수 있다. 그림 3-3-80에서의 결과로부터 power가 작아질수록 플라즈마가 초기에 만들어지는 순간의 시간이 늦춰지게 된다. 즉, Fundamental-harmonic에서 RF power는 플라즈마가 ramp-up 되었을 때의 최대 전자 온도와 플라즈마 전류 값에 영향을 줄뿐만 아니라 플라즈마가 초기이온화 되는 순간의 시점에도 큰 영향을 준다. 그림 3-3-81의 결과로부터 초기 토카막 안의 중성입자 밀도가 $2.0 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ 보다 크면 플라즈마가 초기에 만들어지지 않는다. 그러나 $2.0 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ 보다 작기만 하면 처음 플라즈마가 만들어지는 순간의 시간이나 최대 전자 온도 및 최대 플라즈마 전류에 큰 영향을 주지는 않는다. 그림 3-3-82, 83, 84는 불순물 효과를 고려했을 때 초기이온화 결과이다. 전반적으로 불순물이 있으면 그 비율이 높아짐에 따라 플라

즈마의 최대 전자 온도와 최대 플라즈마 전류의 크기가 작아진다. 또한 탄소 불순물 비율은 0.2%, 산소 불순물 비율은 0.5% 이상에서는 ECH 초기이온화가 되지 않는다.

③ Second harmonic ECH preionization with 7 pairs PF coils scenario

KSTAR 토카막의 처음 운전 시나리오에 따르면 first-plasma phase에서는 토로이드 자기장이 1.5 T이고 flattop에서의 플라즈마 전류가 100 kA이다. 토로이드 자기장이 1.5 T일 때 전자 사이클로트론 공명 진동수는 42 GHz가 된다. 그러나 자이로트론에서 내보내는 공명 진동수는 84 GHz로 고정되어 있으므로 second-harmonic ECH를 이용하여 초기이온화 시켜야 한다. 앞서 살펴보았던 것처럼 second-harmonic ECH는 fundamental-harmonic ECH에 비해 그 가열을 값이 작다. 따라서 fundamental-harmonic에서처럼 쉽게 플라즈마가 방전이 되지 않는지만 우리가 초기에 변화시킬 수 있는 입력 값에 따라 플라즈마가 ECH 보조 가열로 발생될 수 있느냐가 결정된다. 계산 결과에 의하면 KSTAR 토카막에서 second-harmonic일 때 초기이온화의 효과가 있는 것으로 나타났다. 그러나 fundamental-harmonic에 비해서는 입력 변수가 플라즈마의 초기이온화에 크게 영향을 준다. 입력 변수에 따른 효과를 살펴보자. 그림 3-3-85에서는 오차자기장의 값에 따른 효과에 관한 결과인데, fundamental-harmonic과는 달리 1.5 mT 이상의 오차자기장에서는 플라즈마가 생기지 않음을 알 수 있다. RF power에 대한 영향도 second-harmonic에서 크게 영향을 미친다. 그림 3-3-86에서처럼 RF power가 400 kW 이상이어야 플라즈마가 만들어진다. 이것은 fundamental-harmonic에서 10 kW 이상이어야 한다는 조건과는 상당한 차이를 보인다.

그림 3-3-86에서 알 수 있는 중요한 정보는 현재 500 kW, 6 V 일주 전압 시나리오로는 저항가열을 준 바로 직전, 수 millisecond 이내에 초기이온화 시키는 것이 어렵다는 것이다. 그림에서 보여지는 것처럼 500 kW일때 플라즈마가 ramp-up되는 시간은 거의 $t = 0.2$ sec일 때이다. 이것은 저항가열을 준($t_{OH} = 0.1$ sec) 0.1 sec 후로서 이렇게 되면 Volt-sec 값이 크게 되는데 이것에 대해서는 잠시 후 다시 살펴보기로 한다. 초기의 중성 입자 밀도도 second-harmonic ECH에서는 중요한 요인이다. 그림 3-3-87에서 살펴보면 초기 중성 입자 밀도가 낮으면 낮을수록 초기에 플라즈마가 발생하는 순간은 짧아지고 최대 전자 온도와 최대 플라즈마 전류는 초기 중성 입자 밀도가 낮으면 작아진다. 그러나 first-plasma phase에서는 flattop 플라즈마 전류가 100 kA를 요구하기 때문에 중성 입자 밀도가 $0.1 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ 정도 되어도 최대 전류값을 맞출 수가 있다. 따라서 second-harmonic에서는 될 수 있는 한 초기 토카막 안의 중성 입자 밀도를 $0.5 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ 이하로 맞추는 것이 Volt-sec를 줄일 수 있는 조건이 된다. 불순물 효과에 대한 결과는 그림 3-3-88, 89, 90을 통해 알 수 있는데, second-harmonic에서는 불순물에 대한 영향이 크다. 그 중에서도 철 불순물 비율이 가장 중요한데, 그림 3-3-90을 보면 철의 불순물 비율이 0.0004% 이

상만 되어도 플라즈마가 만들어지지 않는다. 결과적으로 second-harmonic ECH 초기이온화를 위해서는 토카막 내부에 불순물이 거의 없어야 한다. 앞서 언급했던 것과 같이 second-harmonic ECH 초기이온화는 현재 6 V 일주 전압 시나리오로는 저항가열을 가한 후 수 millisecond 이내에 플라즈마를 ramp-up 시키기 어렵다. 따라서 그림 3-3-91과 3-3-92에서는 일주 전압을 변화시키면서, 그리고 저항가열 후 수 millisecond내의 결과만 보는 것이 아니라 0.5 sec까지의 시간에 따른 변화를 살펴보았다.

그림 3-3-91은 RF power를 500 kW 가했을 때의 ECH 초기이온화 효과의 결과이고, 그림 3-3-92는 ECH 보조 가열없이 저항가열만 가했을 때의 결과이다. 이 두 결과의 가장 큰 차이점은 ECH 초기이온화를 보조적인 가열방법으로 초기 플라즈마를 만들었을 때는 일주 전압이 3 V에서도 플라즈마 전류가 생기는 반면에, 저항가열만으로 가열한 결과는 일주 전압이 6 V보다 작으면 플라즈마 전류가 생기지 않는다는 것이다. 그림 3-3-91(a)에서 일주 전압이 3 V일때 0.5 sec에서의 플라즈마 전류가 70 kA 정도로 flattop 플라즈마 전류가 100 kA보다 약간 작다. 결과적으로 ECH 초기이온화를 이용하면 플라즈마 초기 시동을 위한 전기장 $E \sim 0.26$ V/m이고 ECH 보조 가열 없이 저항가열만으로 플라즈마를 만들면 전기장은 $E \sim 0.53$ V/m이다. 또한 일주 전압이 높으면 높을수록 저항가열이 시작되는 시간 근처에서 플라즈마 전류가 만들어진다. 그러나 second-harmonic에서는 fundamental-harmonic과는 달리 저항 전압이 저항가열 직후에는 크게 줄지 않는다. 이것이 의미하는 바는 second-harmonic에서는 저항가열 후 수 millisecond내에서는 거의 ECH 초기이온화 효과로 플라즈마가 만들어지는 것이 아니라 저항가열의 영향이 크다. 하지만 이후에는 ECH 초기이온화 효과로 플라즈마 전류가 발생된다. 그림 3-3-93은 앞의 결과와 마찬가지로 일주 전압을 변화시키면서 플라즈마 전류와 전자 온도의 시간 변화를 보았는데, 이때는 저항가열 후 수 millisecond내의 변화를 중심으로 보았다. 그림 3-3-93에서 $P_{RF} = 500$ kW일 때 7 V보다 일주 전압이 작으면 그 일주 전압을 가하는 동안 플라즈마가 생기지 않는다. 즉 저항가열을 가한 후 수 millisecond내에 플라즈마를 발생시키기 위해서는 $P_{RF} = 500$ kW일 때 현재의 KSTAR first-plasma scenario는 효과적이지 못하다. 그림 3-3-94에서부터 3-3-98까지는 일주 전압을 고정시켜두고 초기 중성 입자 밀도를 변화시킨 결과이다. 앞에서 언급한 바와 같이 중성 입자 밀도가 작으면 작을수록 초기이온화 되는 시간은 저항가열을 가한 바로 그 순간에 가깝게 일어난다. 그리고 일주 전압이 크면 fundamental-harmonic과 마찬가지로 중성 입자 밀도는 크게 영향을 미치지 못하게 된다. 그림 3-3-99와 3-3-100은 일주 전압을 고정시켜 두고 그 일주 전압을 가하는 시간을 변화시키면서 최대 전자 온도와 최대 플라즈마 전류를 얻은 것이다. 이로부터 Volt-sec를 줄이면서 최대 플라즈마 전류가 100 kA가 되는 최적의 시나리오를 찾을 수 있는데 앞의 결과에 의하면 Volt-sec를 줄이기 위해서는 일주 전압 뿐 만 아니라 일주 전압을 가한 시간도 중요하다는 것을 알 수 있다. 저항가열 직후

수 millisecond내에 초기이온화가 되면서 최대 전류 100 kA를 얻을 수 있는 조건은 다음의 세가지 경우로 나뉜다.

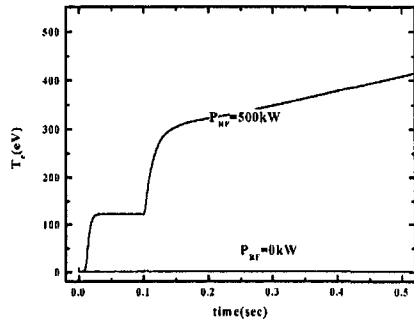
$V_{loop} = 6$ V, time duration of loop voltage = 120 msec

$V_{loop} = 8$ V, time duration of loop voltage = 80 msec

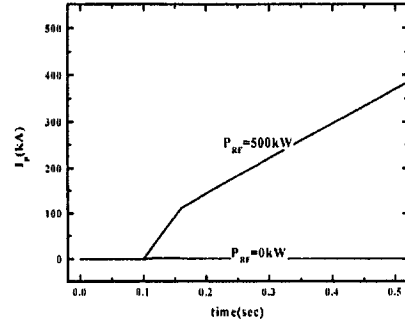
$V_{loop} = 10$ V, time duration of loop voltage = 60 msec

그림 3-3-101은 위의 세 조건일 때 초기이온화 효과를 비교한 것이고 표 3-3-7에서는 fundamental-harmonic과 second-harmonic의 경우 초기이온화를 위한 변수들의 조건을 비교하였다.

(a)



(b)



(c)

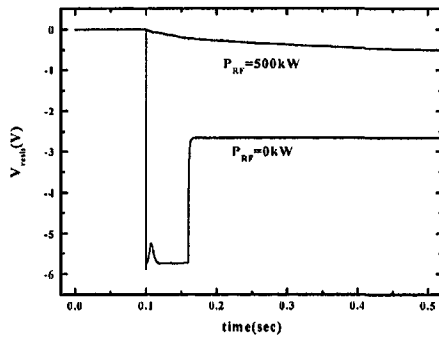
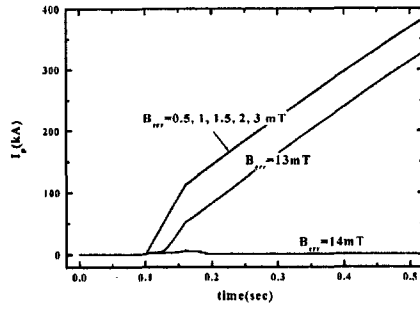
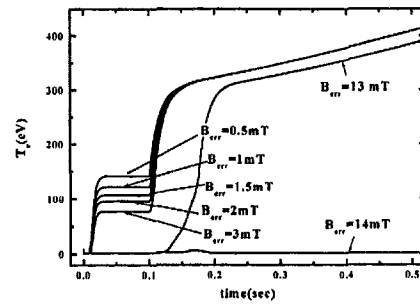


그림 3-3-78. Fundamental harmonic ECH preionization for KSTAR: temporal behavior of (a) electron temperature and (b) plasma current and (c) resistive voltage at $B_T = 3 \text{ T}$, $R = 1.8 \text{ m}$, $a = 0.5 \text{ m}$, RF power on time = 0 sec, $t_{RF} = 2 \text{ sec}$, Ohmic heating on time = 0.1 sec, $B_{err} = 1 \text{ mT}$, $N_0 = 1.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, No impurity and all X-mode propagation

(a)



(b)



(c)

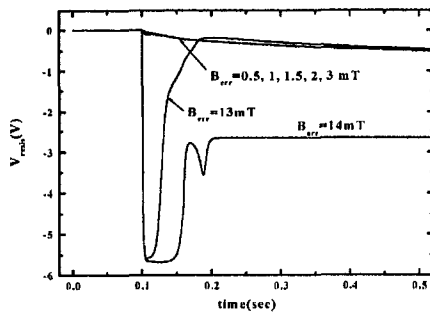
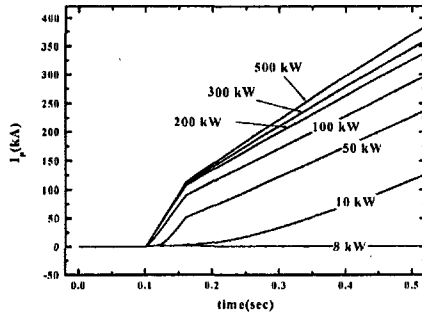
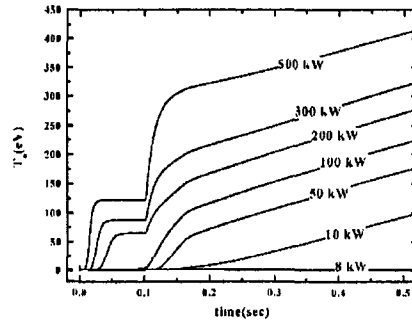


그림 3-3-79. Fundamental harmonic ECH preionization for KSTAR: temporal behavior of (a) plasma current (b) electron temperature and (c) resistive voltage in variation of error field B_{err} at $B_T = 3$ T, $R = 1.8$ m, $a = 0.5$ m, $P_{RF} = 500$ kW, RF power on time = 0 sec, $t_{RF} = 2$ sec, Ohmic heating on time = 0.1 sec, $N_0 = 1.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, No impurity and all X-mode propagation.

(a)



(b)



(c)

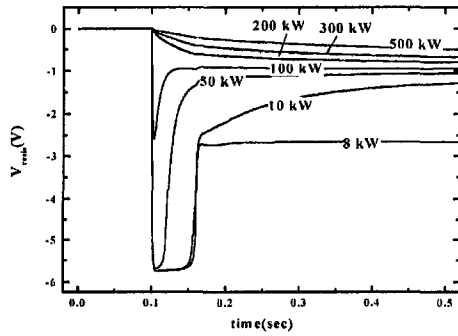
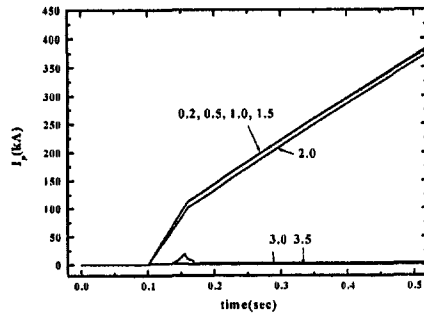


그림 3-3-80. Fundamental harmonic ECH preionization for KSTAR: temporal behavior of (a) plasma current (b) electron temperature and (c) resistive voltage in variation of RF power P_{RF} at $B_T = 3$ T, $R = 1.8$ m, $a = 0.5$ m, RF power on time = 0 sec, $t_{RF} = 2$ sec, Ohmic heating on time = 0.1 sec, $B_{err} = 1$ mT, $N_o = 1.0 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$, No impurity and all X-mode propagation.

(a)



(b)

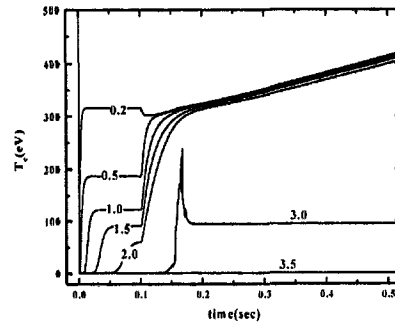
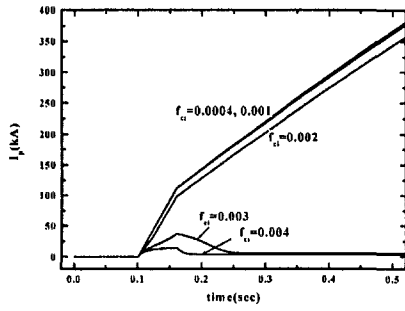
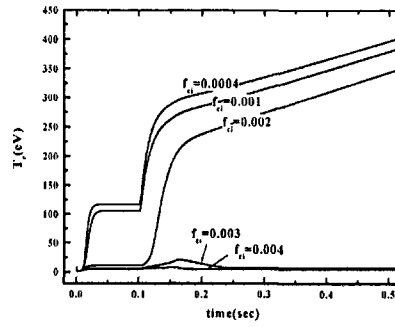


그림 3-3-81. Fundamental harmonic ECH preionization for KSTAR: temporal behavior of (a) plasma current and (b) electron temperature in variation of neutral density N_0 ($\times 10^{13}/\text{cm}^3$) at $B_T = 3$ T, $R = 1.8$ m, $a = 0.5$ m, $P_{RF} = 500$ kW, RF power on time = 0 sec, $t_{RF} = 2$ sec, Ohmic heating on time = 0.1 sec, $B_{err} = 1$ mT, No impurity and all X-mode propagation.

(a)



(b)



(c)

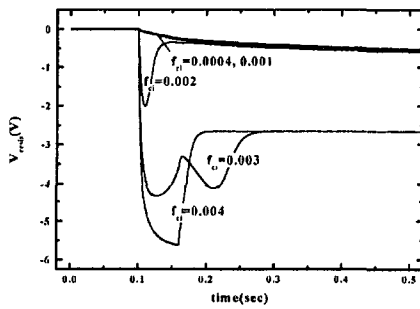
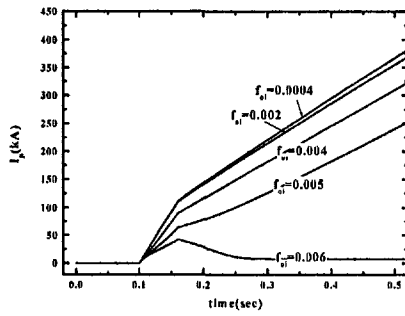
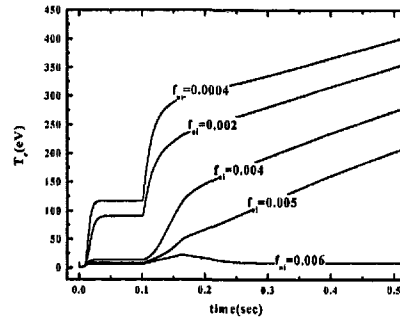


그림 3-3-82. Fundamental harmonic ECH preionization for KSTAR: temporal behavior of (a) plasma current (b) electron temperature and (c) resistive voltage in variation of carbon impurity f_{ci} at $B_T = 3$ T, $R = 1.8$ m, $a = 0.5$ m, $P_{RF} = 500$ kW, RF power on time = 0 sec, $t_{RF} = 2$ sec, Ohmic heating on time = 0.1 sec, $B_{err} = 1$ mT, $N_0 = 1.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ and all X-mode propagation.

(a)



(b)



(c)

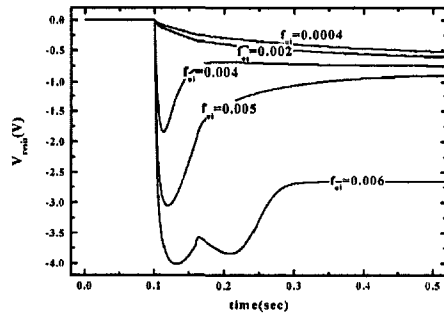
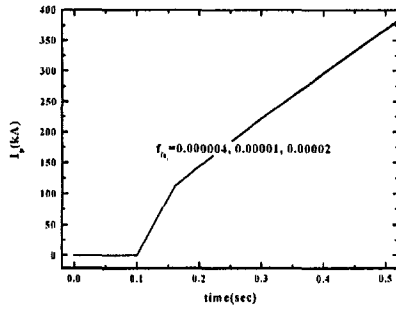
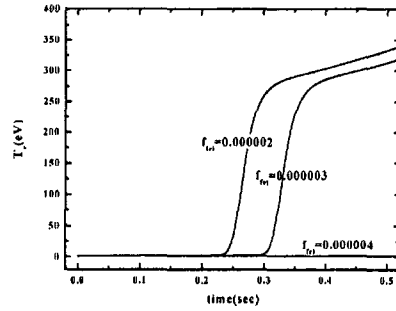


그림 3-3-83. Fundamental harmonic ECH preionization for KSTAR: temporal behavior of (a) plasma current (b) electron temperature and (c) resistive voltage in variation of oxygen impurity f_{oi} at $B_T = 3$ T, $R = 1.8$ m, $a = 0.5$ m, $P_{RF} = 500$ kW, RF power on time = 0 sec, $t_{RF} = 2$ sec, Ohmic heating on time = 0.1 sec, $B_{err} = 1$ mT, $N_o = 1.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ and all X-mode propagation.

(a)



(b)



(c)

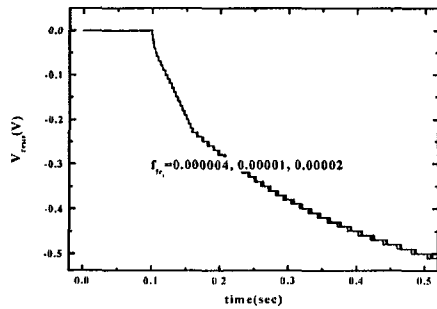
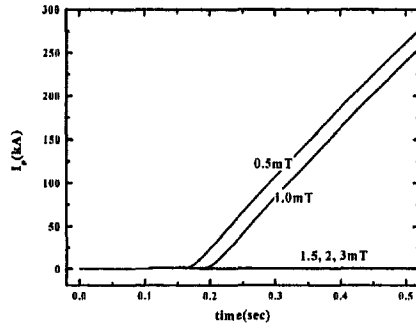
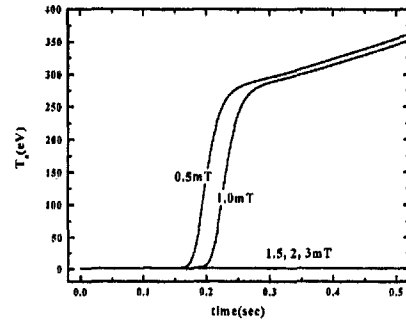


그림 3-3-84. Fundamental harmonic ECH preionization for KSTAR: temporal behavior of (a) plasma current (b) electron temperature and (c) resistive voltage in variation of iron impurity f_{fe_i} at $B_T = 3$ T, $R = 1.8$ m, $a = 0.5$ m, $P_{RF} = 500$ kW, RF power on time = 0 sec, $t_{RF} = 2$ sec, Ohmic heating on time = 0.1 sec, $B_{err} = 1$ mT, $N_o = 1.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ and all X-mode propagation.

(a)



(b)



(c)

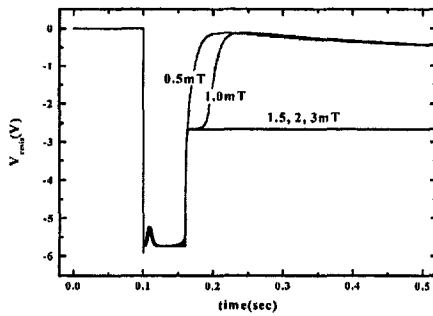
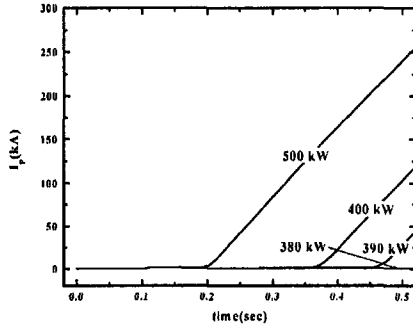
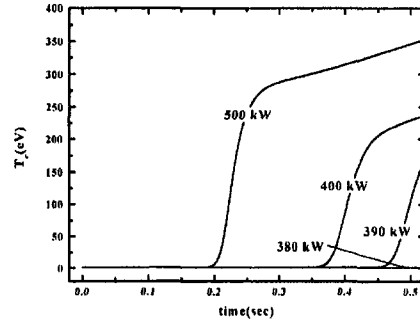


그림 3-3-85. Second harmonic ECH preionization for KSTAR: temporal behavior of (a) plasma current (b) electron temperature and (c) resistive voltage in variation of error field B_{err} at $B_T = 1.5$ T, $R = 1.8$ m, $a = 0.5$ m, $P_{RF} = 500$ kW, RF power on time = 0 sec, $t_{RF} = 2$ sec, Ohmic heating on time = 0.1 sec, $N_0 = 1.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, No impurity and all X-mode propagation.

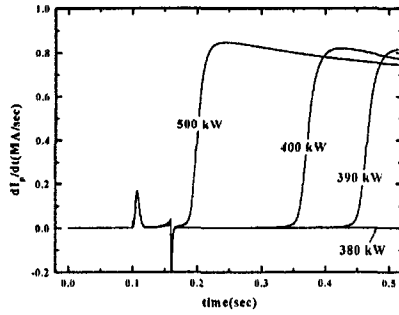
(a)



(b)



(c)



(d)

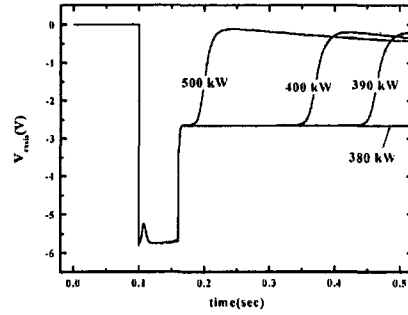
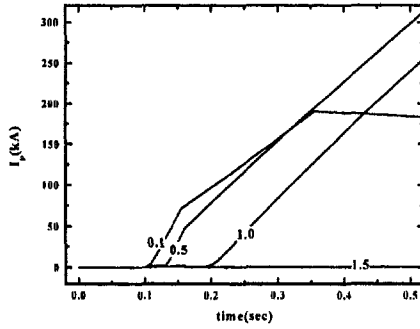
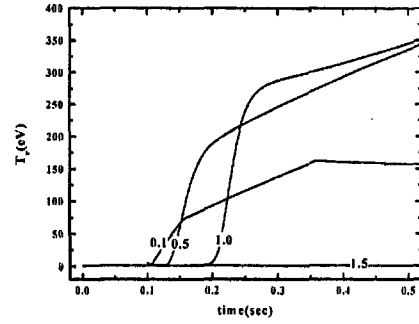


그림 3-3-86. Second harmonic ECH preionization for KSTAR: temporal behavior of (a) plasma current and (b) electron temperature (c) dI/dt and (d) resistive voltage in variation of RF power P_{RF} at $B_T = 1.5$ T, $R = 1.8$ m, $a = 0.5$ m, RF power on time = 0 sec, $t_{RF} = 2$ sec, Ohmic heating on time = 0.1 sec, $B_{err} = 1$ mT, $N_0 = 1.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, No impurity and all X-mode propagation.

(a)



(b)



(c)

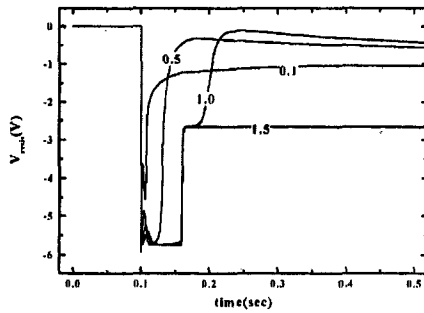
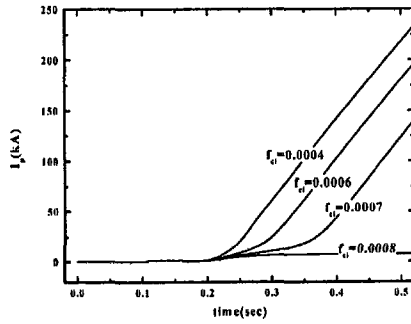
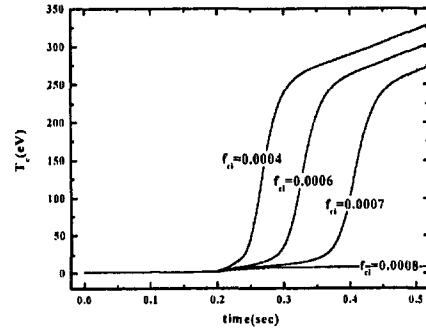


그림 3-3-87. Second harmonic ECH preionization for KSTAR: temporal behavior of (a) plasma current (b) electron temperature and (c) resistive voltage in variation of neutral density N_0 ($\times 10^{13}/\text{cm}^3$) at $B_T = 1.5$ T, $R = 1.8$ m, $a = 0.5$ m, $P_{\text{RF}} = 500$ kW, RF power on time = 0 sec, $t_{\text{RF}} = 2$ sec, Ohmic heating on time = 0.1 sec, $B_{\text{err}} = 1$ mT, No impurity and all X-mode propagation.

(a)



(b)



(c)

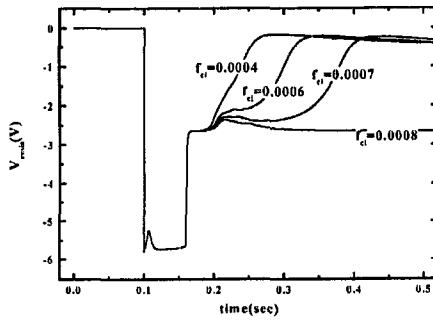
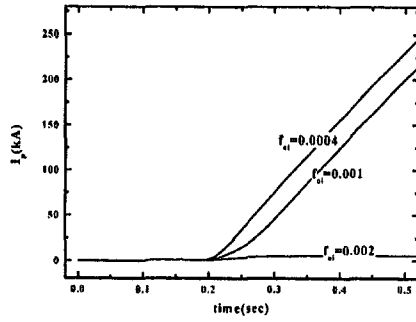
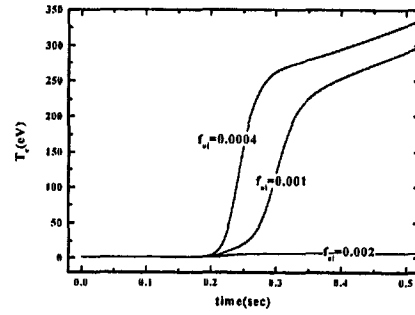


그림 3-3-88. Second harmonic ECH preionization for KSTAR: temporal behavior of (a) plasma current (b) electron temperature and (c) resistive voltage in variation of carbon impurity f_{ci} at $B_T = 1.5$ T, $R = 1.8$ m, $a = 0.5$ m, $P_{RF} = 500$ kW, RF power on time = 0 sec, $t_{RF} = 2$ sec, Ohmic heating on time = 0.1 sec, $B_{err} = 1$ mT, $N_o = 1.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ and all X-mode propagation.

(a)



(b)



(c)

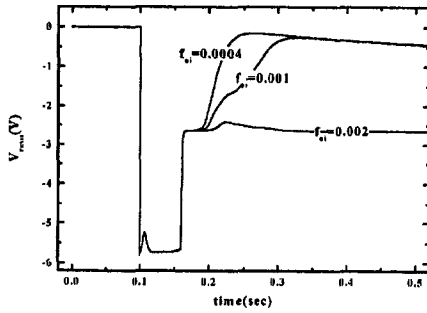
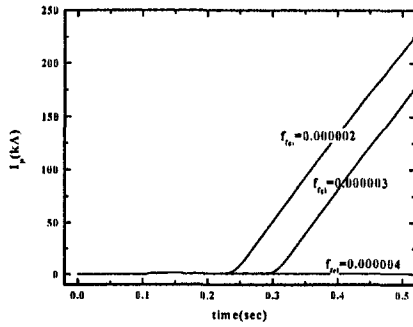
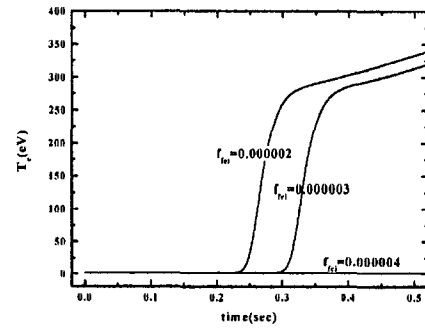


그림 3-3-89. Second harmonic ECH preionization for KSTAR: temporal behavior of (a) plasma current (b) electron temperature and (c) resistive voltage in variation of oxygen impurity f_{oi} at $B_T = 1.5$ T, $R = 1.8$ m, $a = 0.5$ m, $P_{RF} = 500$ kW, RF power on time = 0 sec, $t_{RF} = 2$ sec, Ohmic heating on time = 0.1 sec, $B_{err} = 1$ mT, $N_o = 1.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ and all X-mode propagation.

(a)



(b)



(c)

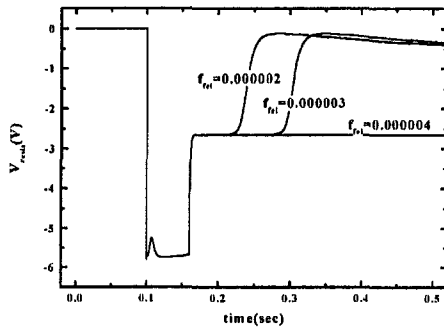
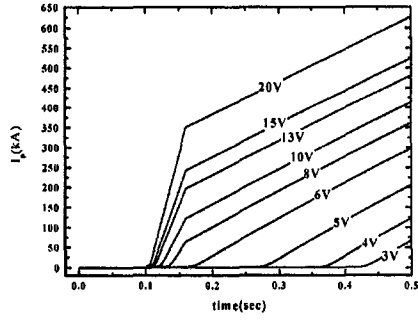
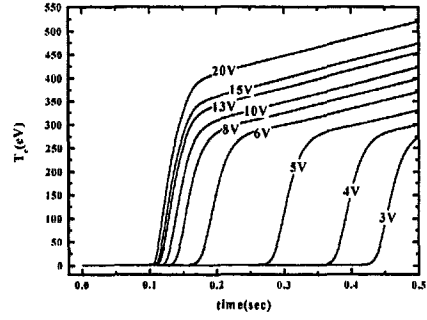


그림 3-3-90. Second harmonic ECH preionization for KSTAR: temporal behavior of (a) plasma current (b) electron temperature and (c) resistive voltage in variation of iron impurity f_{fe1} at $B_T = 1.5$ T, $R = 1.8$ m, $a = 0.5$ m, $P_{RF} = 500$ kW, RF power on time = 0 sec, $t_{RF} = 2$ sec, Ohmic heating on time = 0.1 sec, $B_{err} = 1$ mT, $N_0 = 1.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ and all X-mode propagation.

(a)



(b)



(c)

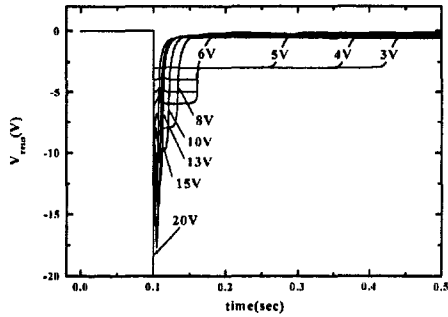
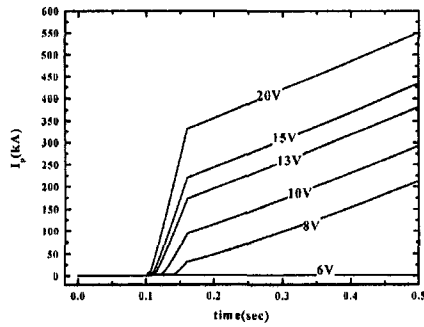
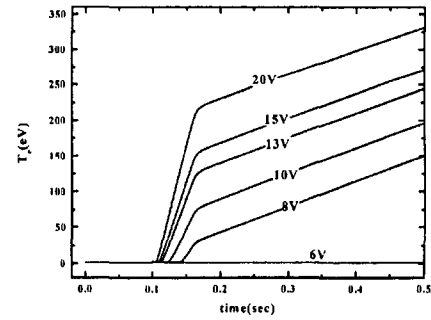


그림 3-3-91. Second harmonic ECH preionization for KSTAR: (a) plasma current (b) electron temperature and (c) resistive voltage in variation of loop voltage at $B_T = 1.5$ T, $R = 1.8$ m, $a = 0.5$ m, $P_{RF} = 500$ kW, RF power on time = 0 sec, $t_{RF} = 2$ sec, Ohmic heating on time = 0.1 sec, duration of applied loop voltage = 0.06 sec, $B_{err} = 1$ mT, $N_0 = 1.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, No impurity and all X-mode propagation.

(a)



(b)



(c)

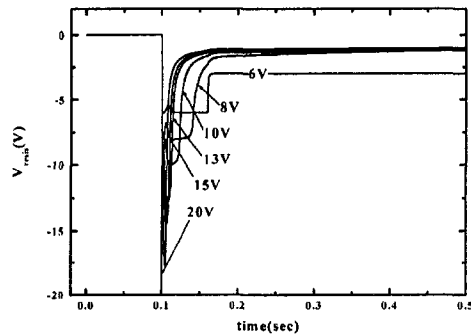
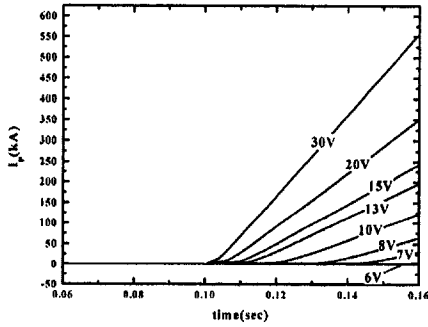
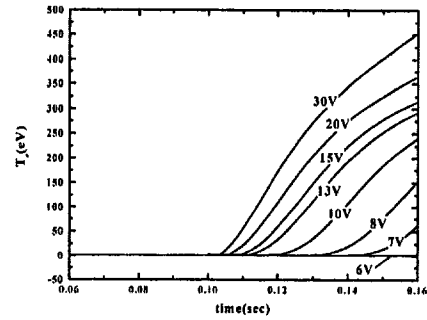


그림 3-3-92. Ohmic startup without ECH preionization for KSTAR: (a) plasma current (b) electron temperature and (c) resistive voltage in variation of loop voltage at $B_T = 1.5$ T, $R = 1.8$ m, $a = 0.5$ m, $P_{RF} = 0$ kW, Ohmic heating on time = 0.1 sec, duration of applied loop voltage = 0.06 sec, $B_{err} = 1$ mT, $N_0 = 1.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, No impurity and all X-mode propagation.

(a)



(b)



(c)

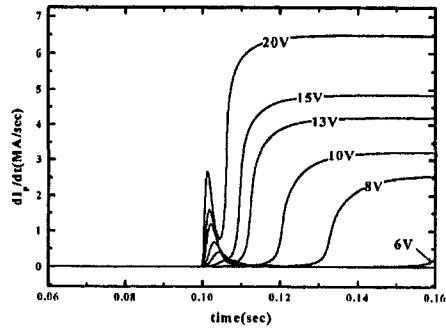
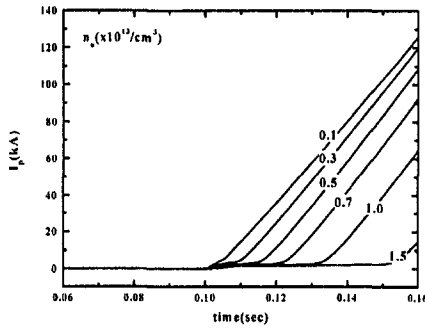


그림 3-3-93. Second harmonic ECH preionization for KSTAR: (a) plasma current (b) electron temperature and (c) dI/dt in variation of loop voltage at $B_T = 1.5$ T, $R = 1.8$ m, $a = 0.5$ m, $P_{RF} = 500$ kW, RF power on time = 0 sec, $t_{RF} = 2$ sec, Ohmic heating on time = 0.1 sec, duration of applied loop voltage = 0.06 sec, $B_{err} = 1$ mT, $N_0 = 1.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, No impurity and all X-mode propagation.

(a)



(b)

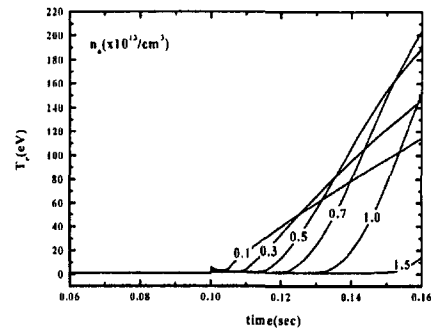
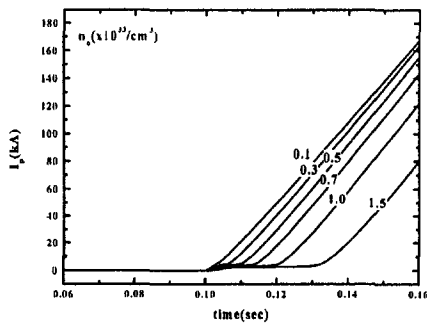


그림 3-3-94. Second harmonic ECH preionization for KSTAR: (a) plasma current and (b) electron temperature in variation of neutral density at $V_{loop} = 8$ V, $B_T = 1.5$ T, $R = 1.8$ m, $a = 0.5$ m, $P_{RF} = 500$ kW, RF power on time = 0 sec, $t_{RF} = 2$ sec, Ohmic heating on time = 0.1 sec, duration of applied loop voltage = 0.06 sec, $B_{err} = 1$ mT, No impurity and all X-mode propagation.

(a)



(b)

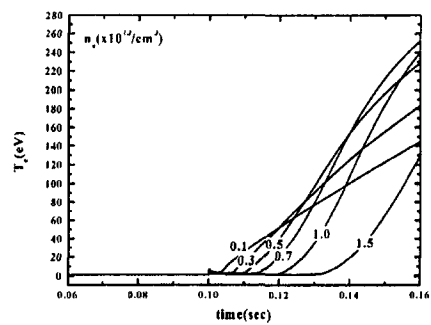
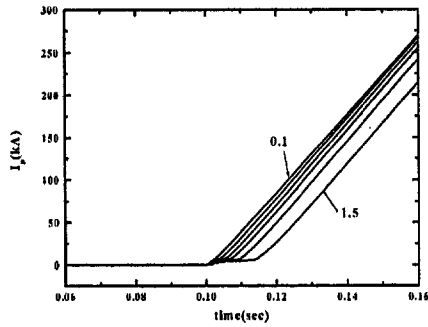


그림 3-3-95. Second harmonic ECH preionization for KSTAR: (a) plasma current and (b) electron temperature in variation of neutral density at $V_{loop} = 10$ V, $B_T = 1.5$ T, $R = 1.8$ m, $a = 0.5$ m, $P_{RF} = 500$ kW, RF power on time = 0 sec, $t_{RF} = 2$ sec, Ohmic heating on time = 0.1 sec, duration of applied loop voltage = 0.06 sec, $B_{err} = 1$ mT, No impurity and all X-mode propagation.

(a)



(b)

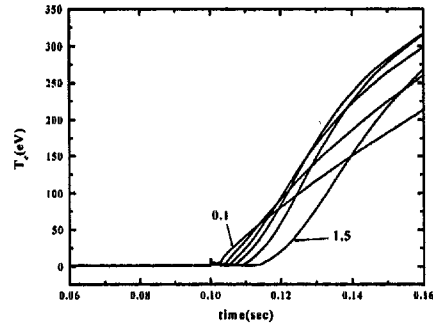
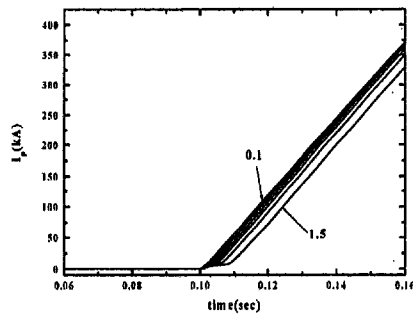


그림 3-3-96. Second harmonic ECH preionization for KSTAR: (a) plasma current and (b) electron temperature in variation of neutral density ($0.1 \times 10^{13} \sim 1.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$) at $V_{\text{loop}} = 15 \text{ V}$, $B_T = 1.5 \text{ T}$, $R = 1.8 \text{ m}$, $a = 0.5 \text{ m}$, $P_{\text{RF}} = 500 \text{ kW}$, RF power on time = 0 sec, $t_{\text{RF}} = 2 \text{ sec}$, Ohmic heating on time = 0.1 sec, duration of applied loop voltage = 0.06 sec, $B_{\text{err}} = 1 \text{ mT}$, No impurity and all X-mode propagation.

(a)



(b)

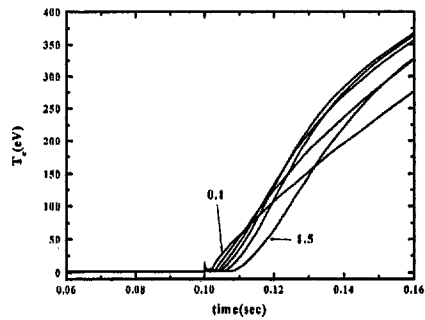
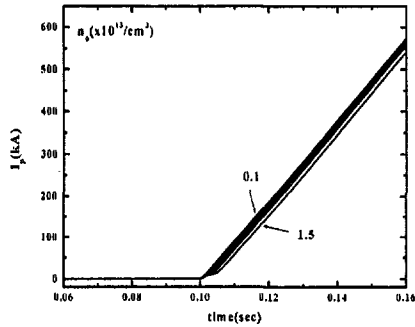


그림 3-3-97. Second harmonic ECH preionization for KSTAR: (a) plasma current and (b) electron temperature in variation of neutral density ($0.1 \times 10^{13} \sim 1.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$) at $V_{\text{loop}} = 20 \text{ V}$, $B_T = 1.5 \text{ T}$, $R = 1.8 \text{ m}$, $a = 0.5 \text{ m}$, $P_{\text{RF}} = 500 \text{ kW}$, RF power on time = 0 sec, $t_{\text{RF}} = 2 \text{ sec}$, Ohmic heating on time = 0.1 sec, duration of applied loop voltage = 0.06 sec, $B_{\text{err}} = 1 \text{ mT}$, No impurity and all X-mode propagation.

(a)



(b)

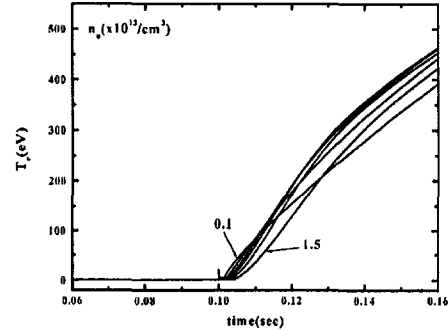
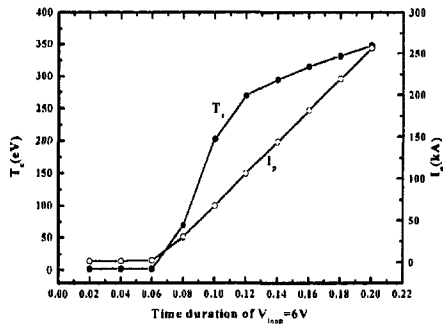


그림 3-3-98. Second harmonic ECH preionization for KSTAR: (a) plasma current and (b) electron temperature in variation of neutral density ($0.1 \times 10^{13} \sim 1.5 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$) at $V_{\text{loop}} = 30 \text{ V}$, $B_T = 1.5 \text{ T}$, $R = 1.8 \text{ m}$, $a = 0.5 \text{ m}$, $P_{\text{RF}} = 500 \text{ kW}$, RF power on time = 0 sec, $t_{\text{RF}} = 2 \text{ sec}$, Ohmic heating on time = 0.1 sec, duration of applied loop voltage = 0.06 sec, $B_{\text{err}} = 1 \text{ mT}$, No impurity and all X-mode propagation.

(a)



(b)

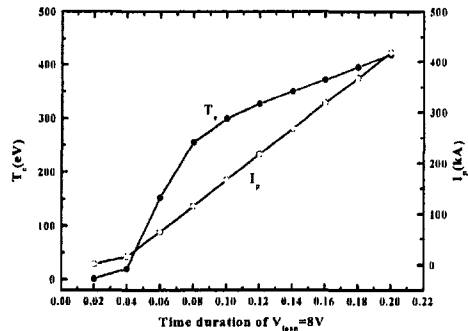
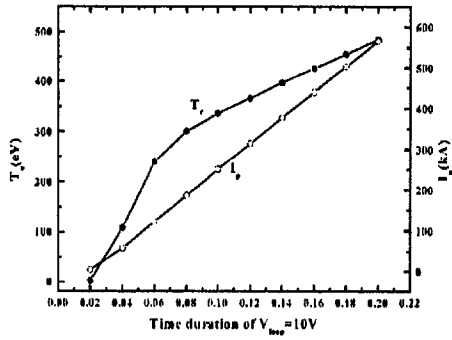


그림 3-3-99. Second harmonic ECH preionization for KSTAR: plot of electron temperature and plasma current in variation of time duration of loop voltage, (a) $V_{\text{loop}} = 6 \text{ V}$ and (b) $V_{\text{loop}} = 8 \text{ V}$ at $B_T = 1.5 \text{ T}$, $R = 1.8 \text{ m}$, $a = 0.5 \text{ m}$, $P_{\text{RF}} = 500 \text{ kW}$, RF power on time = 0 sec, $t_{\text{RF}} = 2 \text{ sec}$, Ohmic heating on time = 0.1 sec, $B_{\text{err}} = 1 \text{ mT}$, $N_0 = 1.0 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$, No impurity and all X-mode propagation.

(a)



(b)

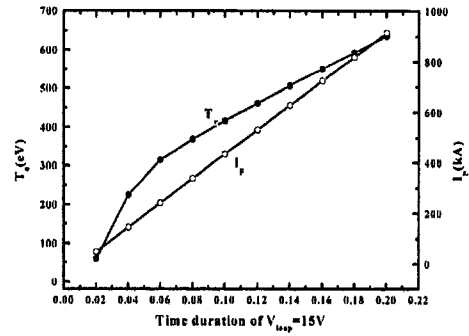
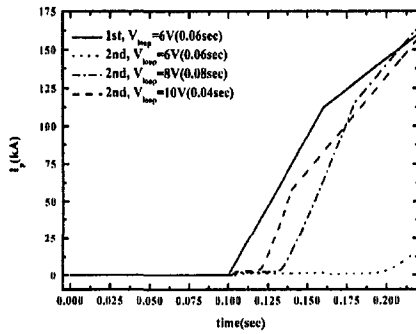
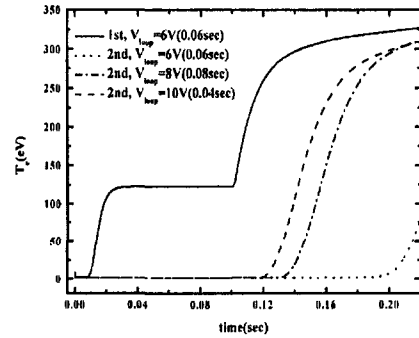


그림 3-3-100. Second harmonic ECH preionization for KSTAR: plot of electron temperature and plasma current in variation of time duration of loop voltage, (a) $V_{loop} = 10$ V and (b) $V_{loop} = 15$ V at $B_T = 1.5$ T, $R = 1.8$ m, $a = 0.5$ m, $P_{RF} = 500$ kW, RF power on time = 0 sec, $t_{RF} = 2$ sec, Ohmic heating on time = 0.1 sec, $B_{err} = 1$ mT, $N_0 = 1.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, No impurity and all X-mode propagation.

(a)



(b)



(c)

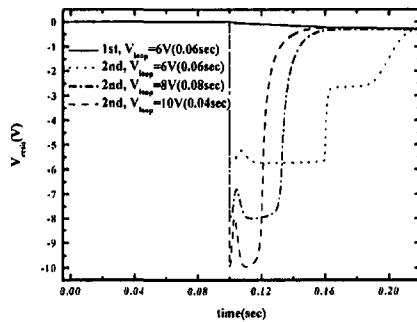


그림 3-3-101. Comparison of several conditions at ECH preionization for KSTAR: plot of (a) plasma current (b) electron temperature and (c) resistive voltage in variation of V_{loop} and duration of applied loop voltage at $R = 1.8$ m, $a = 0.5$ m, $P_{RF} = 500$ kW, RF power on time = 0 sec, $t_{RF} = 2$ sec, Ohmic heating on time = 0.1 sec, $B_{err} = 1$ mT, $N_o = 1.0 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$, No impurity and all X-mode propagation.

표 3-3-7. Comparison of fundamental harmonic ECH heating with second harmonic ECH heating for KSTAR

	Fundamental harmonic ECH	Second harmonic ECH
RF power	≥ 10 kW	≥ 400 kW
Neutral density range for the plasma current start-up	$\leq 2.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$	$\leq 0.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$
Error field limit	≤ 13 mT	≤ 0.1 mT
Carbon impurity fraction	≤ 0.2 %	≤ 0.07 %
Oxygen impurity fraction	≤ 0.5 %	≤ 0.1 %
Iron impurity fraction	≤ 0.007 % for Berr = 5 mT (sensitive)	≤ 0.0003 % (very sensitive)
Present PF coil current scenario (6 V loop voltage scenario)	Good	Must be modified

(다) 결론

KSTAR 토카막의 초기 시동을 위해서 ECH 보조 가열 장치를 이용하여 중성기체를 초기이온화 하게 된다. 이것은 저항가열만으로 가열하는 것보다 일주 전압을 줄일 수 있고, 초기 플라즈마가 플라즈마 파라미터에 덜 민감하게 만들어지는 등의 이점을 많이 가지고 있어서 세계적으로 많은 토카막에 ECH 보조 가열로 초기 시동을 한다. 본 논문에서는 KSTAR 토카막의 fundamental과 second-harmonic ECH 초기이온화에 대해 시뮬레이션을 통해서 살펴보았다.

KSTAR 토카막은 중심부에 3 T의 자기장이 가해진다. 이는 외부 자이로트론에서 공급되는 84 GHz와 전자 싸이클로트론 공명이 일치하므로 fundamental-harmonic ECH으로 가열이 된다. 그러나 초기 KSTAR 시나리오는 1.5 T의 자기장이 중심부에 가해지게 되어 second-harmonic ECH 초기이온화를 이용하게 된다. 시뮬레이션 결과 fundamental-harmonic ECH 초기이온화는 저항가열만을 주었을 경우와 비교해서 매우 만족스러운 결과를 얻었다. KSTAR의 운전 시나리오중 6 V 일주 전압 시나리오에서는 fundamental-harmonic일 때 ECH 보조 가열을 하지 않고는 저항가열만으로 초기 플라즈마가 만들어지지 않음을 코드를 통해서 확인하였다. 또한 ECH 보조 가열의 이점인 플라즈마 파라미터에 민감하게 영향을 받지 않는다는 결론을 얻었다.

Second-harmonic ECH 초기이온화는 fundamental-harmonic에 비해 상대적으로 가열율이 작아서 효과가 그리 크지는 않지만 여러 가지 파라미터들의 조절로 초기 플라즈마를 만들 수 있다. Second-harmonic ECH도 fundamental-harmonic ECH와

마찬가지로 ECH 보조 가열 없이 저항가열만으로 플라즈마를 초기 발생시킬 수 없다. 그러나, 현재 6 V 일주 전압 시나리오로는 second-harmonic ECH 초기이온화를 저항가열 후 수 millisecond 내에 볼 수는 없다는 결론이 시뮬레이션 결과를 통해 얻어졌다. 6 V 일주 전압에서는 120 msec 동안 일주 전압을 가해야 120 kA의 플라즈마 전류에 도달할 수 있다. ECH 보조 가열 없이 초기이온화 시키는 것과 비교하면 RF power를 초기 수 millisecond 보다 더 길게 주면 ECH 보조 가열을 할 때는 일주 전압이 3 V ($E \sim 0.26$ V/m) 이상이면 플라즈마가 만들어지는데 ECH 보조 가열이 없으면 6 V ($E \sim 0.5$ V/m) 이상을 주어야 플라즈마가 발생된다. 이것의 의미하는 바는 ECH 보조 가열이 second-harmonic일 때도 일주 전압을 낮추는 역할을 할 수 있다는 것이다. 일주 전압을 8 V로 하고 일주 전압을 가하는 시간은 80 msec 가하거나 일주 전압을 10 V로 하고 그 가하는 시간을 60 msec로 하면 플라즈마 전류를 100 kA까지 유지시킬 수 있다. 또한 second-harmonic ECH 초기이온화는 초기 중성기체의 밀도, 오차자기장 (error field) 및 불순물 효과 등 플라즈마 파라미터에 민감하게 영향을 받는다.

결론적으로, 현재의 6 V 일주 전압 시나리오로는 저항가열 후 수 millisecond 내에 플라즈마 ramp-up이 불가능하다. 따라서 일주 전압을 8 V ~ 10 V로 증가하거나 초기에 최대 일주 전압을 인가하는 시간을 앞서 제시한 바처럼 120 msec 정도로 가하거나 아니면 초기 중성기체의 밀도를 $0.1 \times 10^{13}/\text{cm}^3$ 미만으로 할 것을 제안한다.

나. LHCD 장치

(1) 5.0 GHz LHCD 장치 설계

The LHCD system will use four 500 kW, 5.0 GHz klystrons. The RF power will be delivered through the long transmission lines composed of waveguides and 3-dB dividers from klystrons to the coupler. Due to the insertion losses in the transmission lines, the smaller RF powers of 1.5 MW than 2.0 MW-klystron RF powers will be transmitted to the KSTAR plasma. The coupler will be composed of two modules that are assembled at upper and lower positions. Each module has a waveguide antenna of 2 rows of 32 guidelets near the plasma. Therefore, the KSTAR front coupler is composed of 4 rows of 32 guidelets, and each klystron feeds 8 columns of guidelets of the waveguide antenna. Fig. 3-3-102 shows the transmission lines and the phase shifters of the KSTAR LHCD system.

(2) LHCD launcher (coupler) 기본 설계

The short dimension of the standard WR187 waveguide is reduced to 0.55 cm (E-plane taper) before the inputs of upper and lower modules as shown in fig. 3-3-69. Each input with the same phase is again divided vertically into two branches using a 3-dB power splitter. The two vertical outputs will be in the same phase via a fixed-phase shifter. Water pipes in the matching waveguide of the splitter serve both as a dummy load and heat removing. The waveguide long dimension, 4.75 cm in each module is tapered up to a larger width, 5.5 cm in order to reduce the RF power flux density at the guidelets maintaining the short dimension of 0.55 cm. With this waveguide dimension, the KSTAR LH coupler will be operated below weak conditioning based on the empirical data of power flux density in the waveguide as shown in fig. 3-3-103. Fig. 3-3-103 shows weak conditioning region and breakdown region as a function of f^2b , where, b is the short dimension in cm, and f is the frequency in GHz. The hexagonal symbol in fig. 3-3-103 corresponds to the KSTAR LH coupler and $f^2b = 13.75 \text{ GHz}^2\text{cm}$ and the power flux density is 3.8 kW/cm^2 . Fig. 3-3-104 shows that each module has a 3-dB power splitter, a fixed phase shifter, a taper section, and a matching waveguide with water load.

The coupler is fabricated by stacking 32 metal plates (septa) with the waveguide patterns milled on. The design of 3-dB power splitter, fixed-phase shifter, and taper section has been optimized for the 5.0-GHz frequency using the High Frequency Structure Simulator (HFSS) program.

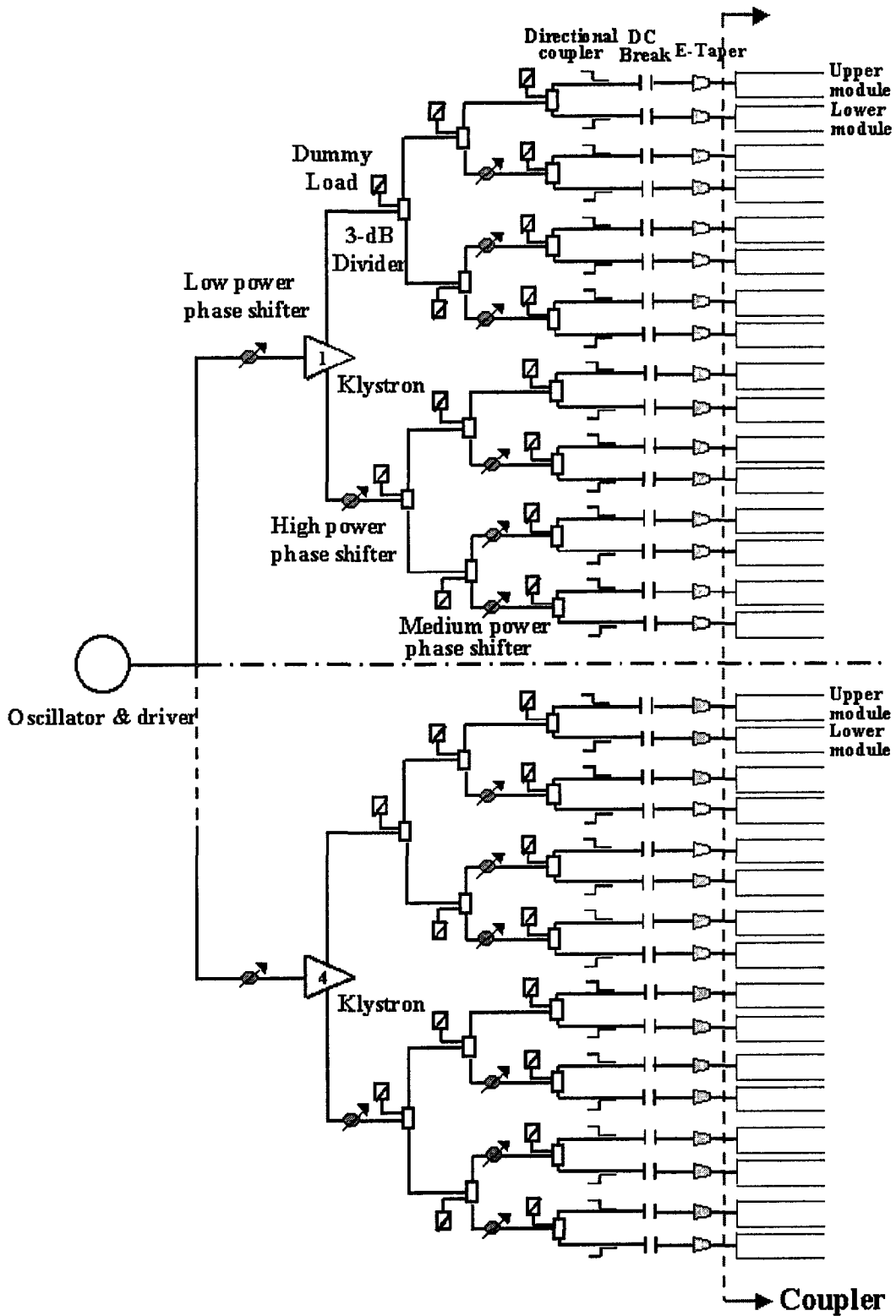


그림 3-3-102. The waveguide network of the KSTAR 5.0 GHz LH coupler

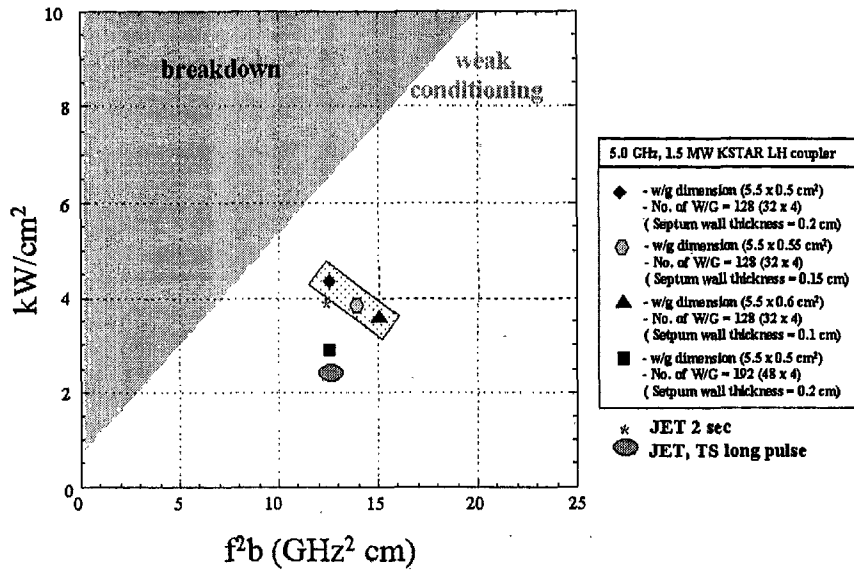


그림 3-3-103. The power flux density in the waveguide channels of the coupler (launcher).

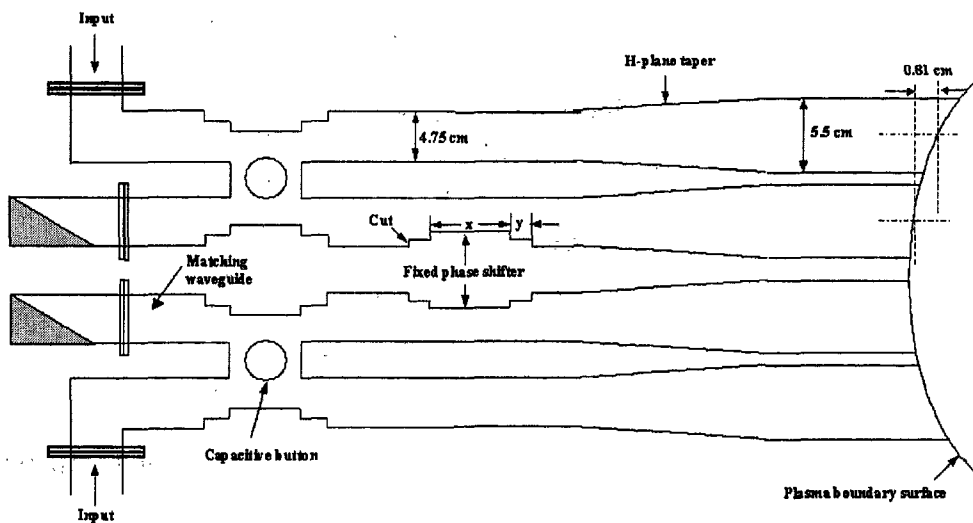


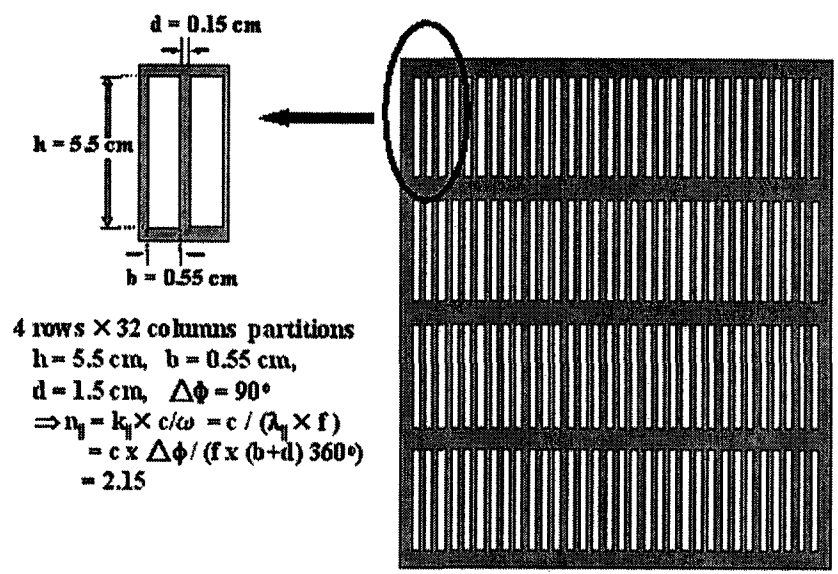
그림 3-3-104. The schematic drawing of the coupler.

(가) Design of the front launcher structure

Fig. 3-3-105 shows the front structure of the LHCD launcher. The dimensions of 5.5 cm and 0.55 cm are determined to have a low reflection from the plasma when the RF is launched and to have weak conditioning operation region as described above. The fig. 3-3-106 shows the reflections vs. waveguide width, b and the power spectrum launched from the waveguide array of 4 rows x 32 columns. These data are obtained from the **Brambilla** code simulation. When the phases of the RF field differ in each column waveguides, the launched power has the toroidal component of the refractive index in the Tokamak plasma. The RF field phase difference can be controlled and changed, therefore we are able to change the refractive index. The right graph of the fig. 3-3-106 shows that the refractive index can be changed from 1.43 to 3.53 when the phase difference is swept between 60 degrees and 150 degrees. The reflections of each waveguide columns are shown in fig. 3-3-107 for the cases of some phase differences.

(나) Design of the septum

The septum is one metal plate with the waveguide patterns milled on. It has 3-dB power splitter, fixed-phase shifter, and taper section and it has been optimized for the 5.0-GHz frequency using the High Frequency Structure Simulator (HFSS) program. Figs. 3-3-108 - 3-3-112 show the results of the HFSS simulation design. Fig. 3-3-108 shows the structure of the 3-dB power splitter and the contour plot is shown in fig. 3-3-109. The reflection and the 3-dB power splitting is also shown in fig. 3-3-110. The taper design is to find the optimum taper length required for the low reflection and the large bandwidth. Fig. 3-3-111 shows the results. It is seen that the taper length, 11.32 cm is proper. The fixed phase shifter is designed from slotting the splitted waveguide channel. The RF phase becomes in phase between two vertical waveguides from the fixed phase shifter. Fig. 3-3-112 shows the phase front that lags in the splitted waveguide channel catches up the phase front that leads in the other waveguide channel.



Front view of the KSTAR 5.0 GHz coupler

그림 3-3-105. The front structure of the KSTAR 5.0 GHz coupler.

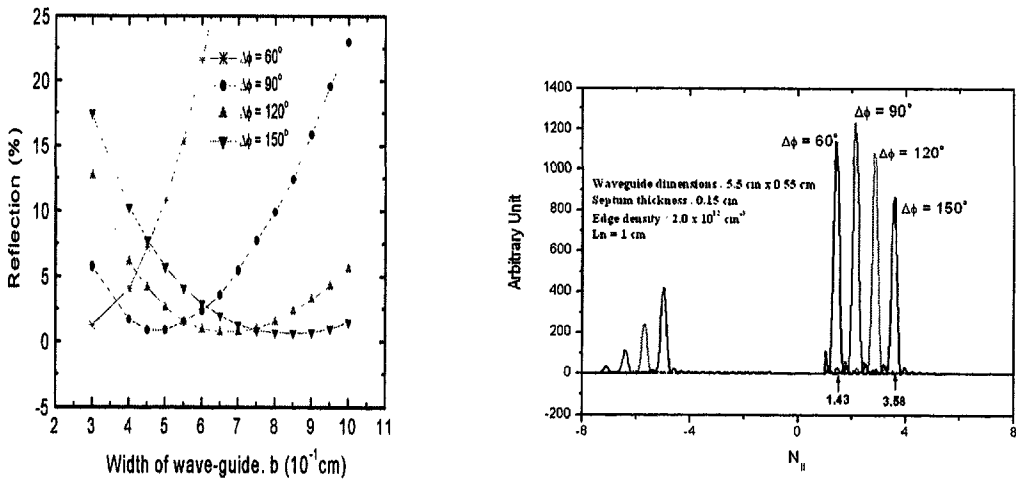


그림 3-3-106. (Left) The reflections vs. the waveguide widths, (right) the power spectrum vs. $N_{||}$.

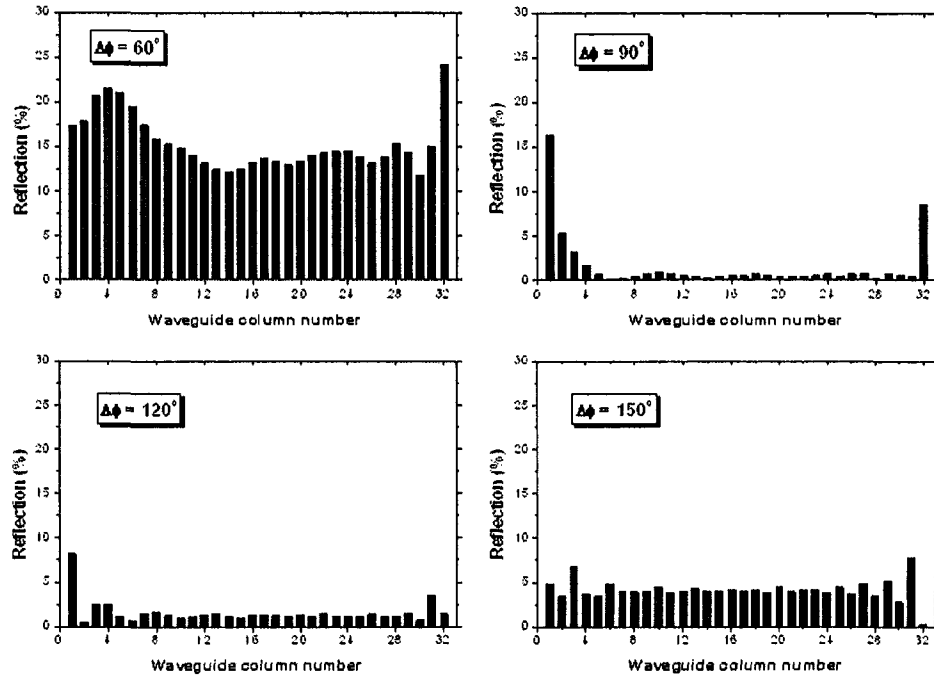


그림 3-3-107. The reflections of each waveguide column for the phase differences.

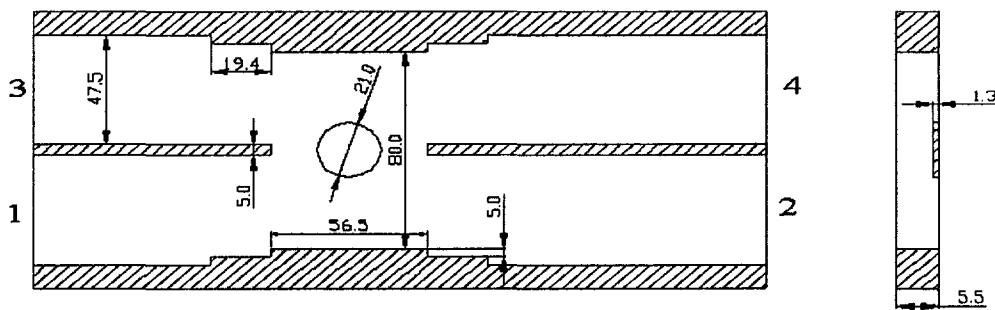


그림 3-3-108. The structure of the 3-dB power splitter.

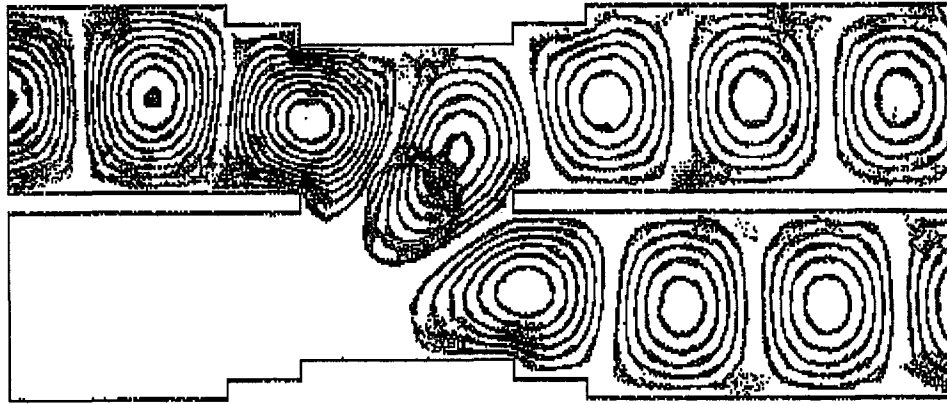


그림 3-3-109. The contour plot of the 3-dB power splitter.

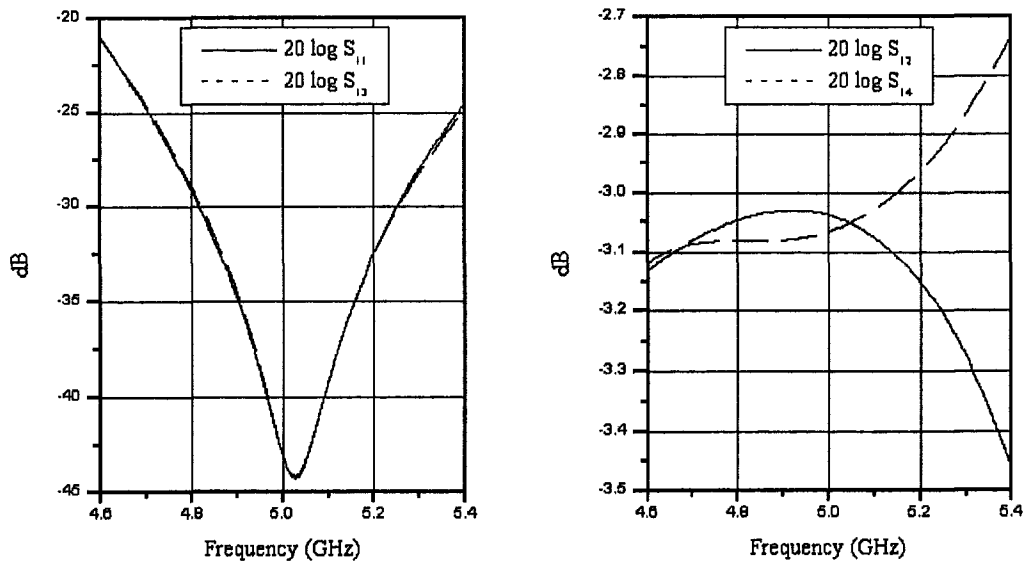


그림 3-3-110. The S-parameters of the 3-dB power splitter ports.

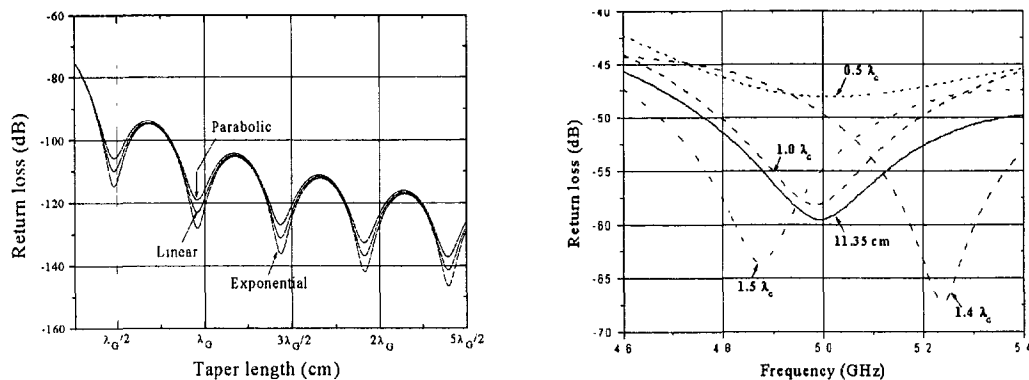


그림 3-3-111. The design of the taper.

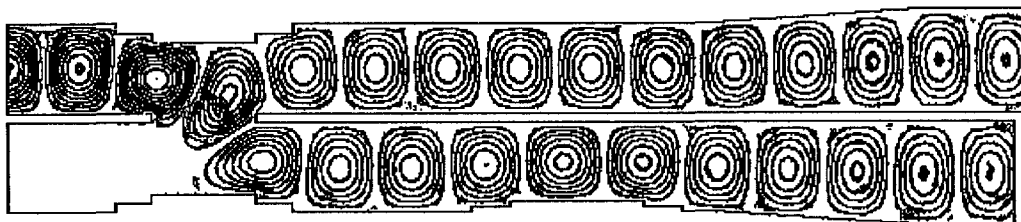


그림 3-3-112. The design of the fixed phase shifter and the contour plot in the 3-dB power splitter, the fixed phase shifter, and the taper.

(다) Design of the water load

The reflected power from the plasma must be absorbed in the water loads which are installed to the each matching waveguide. Since the coupler is fabricated by stacking 32 metal plates with the waveguide patterns milled on, there is no enough space for installing the water loads to the outside of the each matching waveguides independently. Therefore, we designed a solid load using SiC-ceramic placed in the waveguide using the HFSS program and Ansys program. The cooling pipes are brazed on both surfaces of the H-plane walls of the isolated waveguide.

Fig. 3-3-113 shows the schematic drawing of the water load. The basic characteristics of the SiC-ceramic absorber are shown in the table 3-3-8. From the HFSS and Ansys simulation, the optimum design parameters are obtained. Figs 3-3-114 - 3-3-116 show the simulation results. From these results, the VSWR is less than 1.001 and the maximum temperature of the SiC-ceramic absorber is not over 70 °C when $L = 2\lambda_G$, $\alpha = 0.5$, $s = 19.6$ mm, $d = 19.8$ mm, where $\lambda_G = 77.4$ mm.

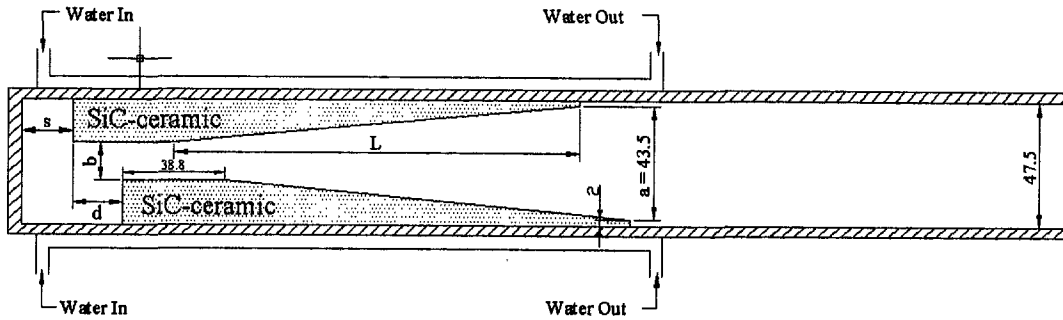


그림 3-3-113. The schematic drawing of the water load.

표 3-3-8

Density (g/cm ³)	3.14	
Hardness (Knoop, kgf/mm ²)	2900	at RT
Thermal conductivity (cal/cm·sec °C)	0.19 0.14	at RT at 600 °C
Thermal expansion coefficient (°C ⁻¹)	4.6 x 10 ⁻⁶	RT to 1200 °C
Oxidation weight gain (mg/cm ²)	0.015	at 1200 °C for 24 hours
DC resistivity (Ohm·cm)	5 x 10 ⁵ 7 x 10 ⁻¹	at RT at 800 °C
Dielectric constant	30 ~ 35	0.5 to 20 GHz
Loss tangent	0.3 ~ 0.5	0.5 to 20 GHz

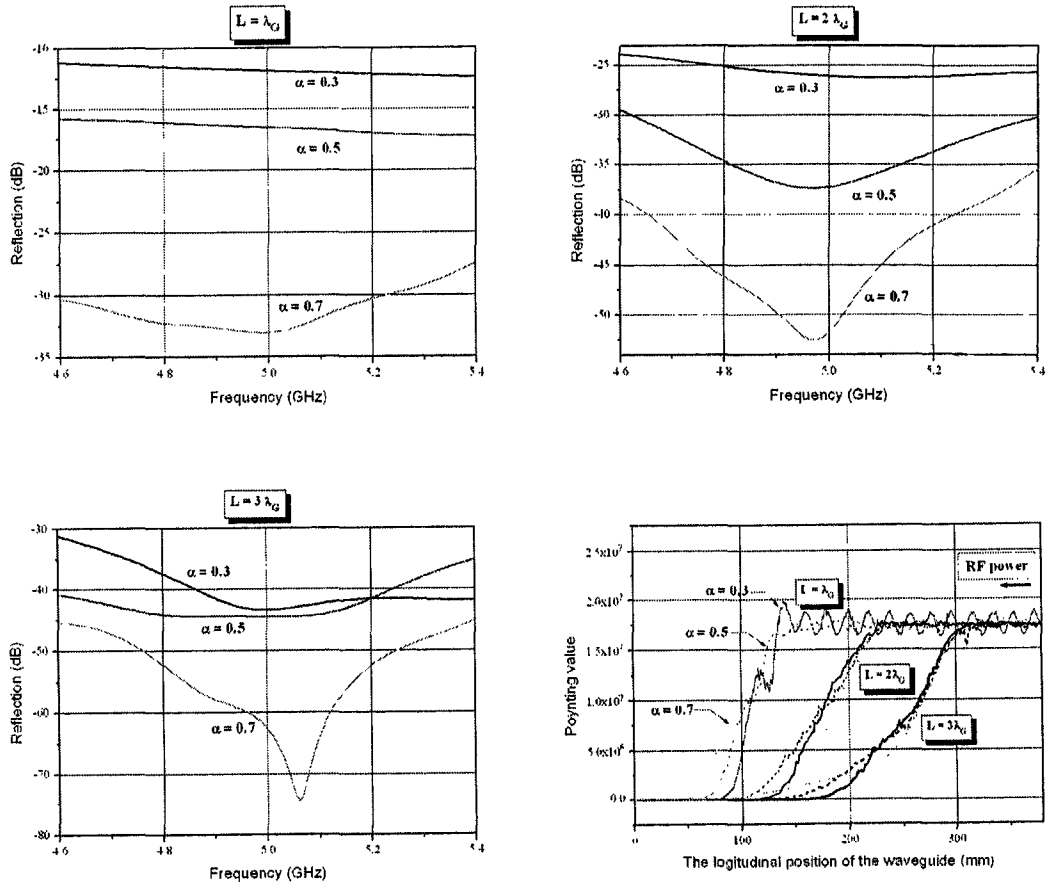


그림 3-3-114. The reflections vs. frequency for the some geometric parameters. The power losses per unit length are show in the right bottom.

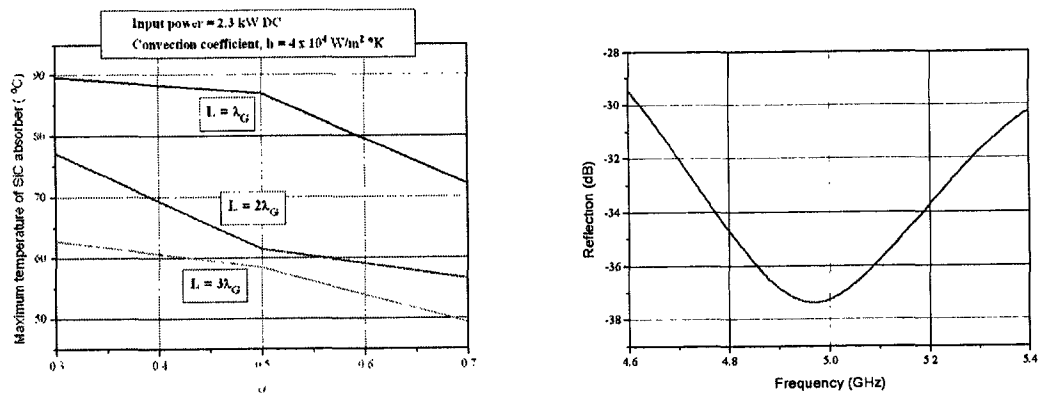


그림 3-3-115. The final design; the taper length of the SiC-ceramic absorber is $2\lambda_G$ and the $\alpha = 0.5$.

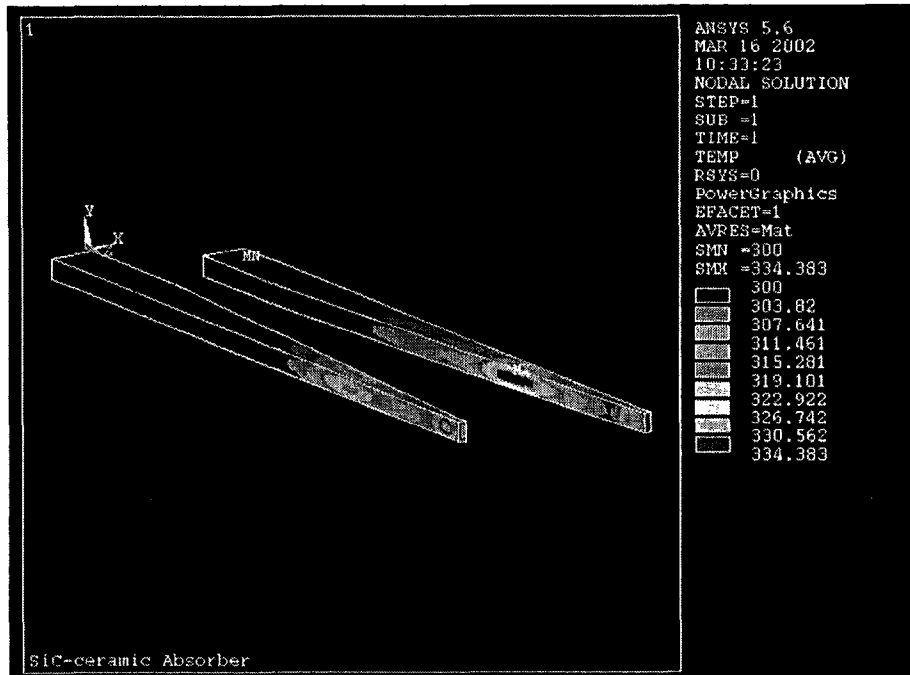


그림 3-3-116. The temperature distribution in the SiC-ceramic absorber

(3) 전류구동 전산모사

LH (Lower-hybrid)파가 토카막 플라즈마로 전파할 경우 fast electrons을 가열 하면서 플라즈마 전류를 유도한다. 여러 가지 플라즈마 평형조건을 가지고 LH파에 의한 전류구동 효율 및 LH파 궤적을 Lower-hybrid Simulation Code (LSC)를 사용하여 조사하였다. LSC 전산모사에 대해 대략적으로 설명을 하면 LH 파의 진행은 축 대칭 토로이드 플라즈마(axis-symmetric toroidal plasma)에서 다중 LH 파의 궤적 (multiple ray trajectory)으로 표현된다. 축 대칭의 토로이드 토카막 기하학적 구조(toroidal tokamak geometry)는 다음 그림 3-3-117과 같이 표현할 수 있다. 즉, 원통 좌표계(cylindrical coordinate system)인 (R, Z, ϕ) 로 나타낸다. R 은 지름 방향의 좌표이고, Z 는 축 대칭 방향의 좌표, ϕ 는 토로이드 방향의 각 (toroidal symmetry angle)을 나타낸다. RF 에너지 흡수는 속도공간(velocity space)에서 flux 표면(flux surfaces) 사이 평균 quasi-linear 감쇠에 의해 계산되어진다. 또한 LH 파와 입자들간의 상호 작용은 자기장과 평행한 방향의 속도공간에서 이루어지고, RF 비유도성 전류는 Fokker-Planck식에 의해 구하여진다.

LSC 전산모사에는 두 개의 입력 파일이 필요한데 그 중 하나인 `jardin.d`는 TSC(Tokamak Simulation Code) 전산모사에서 계산되어져 나온 플라즈마 밀도와 온도 분포 및 토로이드 자기장, 플라즈마 전류 등의 정보로 이루어져 있다. 따라서 이렇게 형성된 토카막 플라즈마에서 LSC 전산모사를 통해 RF 전류 구동 결과를 얻을 수 있다. 다른 하나 입력 파일인 `input.lhh`는 KSTAR LHCD 안테나 구조의 정보와 LSC 전산모사 결과에 대한 출력을 정하는 값들로 이루어져 있다. 따라서 효율적인 전류 구동을 위한 위상차를 이 입력파일에서 조절할 수가 있다.

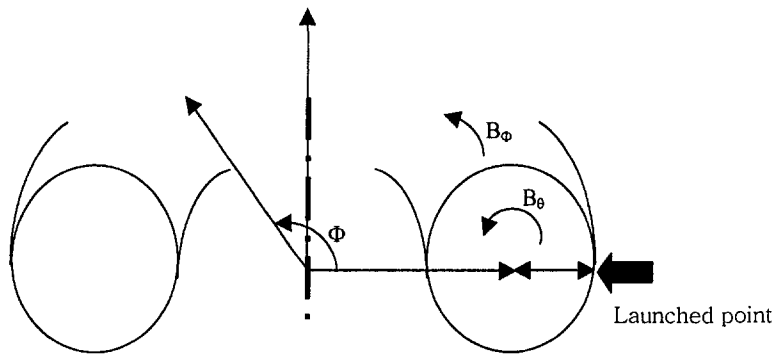


그림 3-3-117. Cylindrical coordinate system on LSC;
 B_ϕ : toroidal magnetic field, B_θ : poloidal magnetic field
 R_0 : major radius, a : minor radius.

(가) LH 파의 궤적 (LH-ray trajectory)

LH 파는 토카막 플라즈마에서 궤적을 그리며 진행하게 되는데, 토로이드 효과 (toroidal effects) 때문에 $k_{||}$ ($n_{||}$)이 변하는 것을 LH 파 궤적 결과에서 볼 수 있다. 이것은 토카막 플라즈마의 기하학적 구조에 의해 발생하는 결과이다.

자화된 플라즈마(magnetized plasma)에서 전기장을 표현하면 다음과 같다.

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = (\vec{E}_0(\vec{r}) + \vec{E}_1(\vec{r}) \cdot \dots) \cdot \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r} - i\omega t) \quad (12)$$

\vec{k} 는 임의의 지점 파동 분산식 $D(\vec{r}, \vec{k}, t) = 0$ 의 해가 된다. 파가 플라즈마에서 진행하기 위해서는 파동 분산식을 만족해야 한다. 임의의 위치 \vec{r} 과 파수벡터 \vec{k} 의 공간에서 표현되는 파는 다음과 같다.

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{-\partial D(\vec{r}, \vec{k}, t) / \partial \vec{k}}{\partial D(\vec{r}, \vec{k}, t) / \partial \omega} \quad (13a)$$

$$\frac{d\vec{k}}{dt} = \frac{\partial D(\vec{r}, \vec{k}, t) / \partial \vec{r}}{\partial D(\vec{r}, \vec{k}, t) / \partial \omega} \quad (13b)$$

위의 식(13)에서 $D(\vec{r}, \vec{k}, t)$ 는 고온 플라즈마 효과를 고려한 파동 분산식이다. 또한 파수 벡터는 $|k|^2 = k_{\perp}^2 + k_{||}^2$ 와 같이 표현 할 수 있다. 일반적으로 LSC 전산모사는 원통 좌표계에 의해 표현을 하지만 LH 파의 궤적은 토로이드 기하학 구조(toroidal geometry)에서 표현하기 때문에 공간의 변수들 (r, θ, ϕ)를 사용하고 canonical variables (k_r, m, n)을 사용한다 (그림 3-3-84). 여기서 r 은 torus의 자기장 중심에서 임의의 지점까지 반경을 나타내고, θ 는 폴로이드 각(poloidal angle)이며 ϕ 는 토로이드 각(toroidal angle)이다. 또한 k_r 는 반경 파수(radial wave-number)이고, $m = rk_{\theta}$, $n = (R_0 + r\cos\theta)k_{\phi}$ 이다. R_0 은 그림 3-3-84에서 보듯이 주 반경 (major radius)이다. 따라서 LH 파의 궤적은 다음과 같이 정의 되어진다.

$$\frac{dr}{dt} = - \frac{\partial D / \partial k_r}{\partial D / \partial \omega} \quad (14a)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = - \frac{\partial D / \partial m}{\partial D / \partial \omega} \quad (14b)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = - \frac{\partial D / \partial n}{\partial D / \partial \omega} \quad (14c)$$

$$\frac{dk_r}{dt} = \frac{\partial D / \partial r}{\partial D / \partial \omega} \quad (14d)$$

$$\frac{dm}{dt} = \frac{\partial D / \partial \theta}{\partial D / \partial \omega} \quad (14e)$$

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\partial D/\partial \Phi}{\partial D/\partial \omega} = 0 \quad (14f)$$

위의 식(14f)에서 n 은 토로이드 대칭성 때문에 시간에 따라 변화가 없는 상수이다. 그러므로 위의 식(14)에서 만족하는 변수로 표현한 LH 파의 k_{\perp} , k_{\parallel} 은 다음과 같다.

$$k_{\parallel} = \left[k_r B_r + \left(\frac{m}{r} \right) B_{\theta} + \frac{n B_{\phi}}{R_0 + r \cos \theta} \right] (|\vec{B}|)^{-1} \quad (15a)$$

$$k_{\perp}^2 = k_r^2 + \left(\frac{m}{r} \right)^2 + \left(\frac{n}{R_0 + r \cos \theta} \right)^2 - k_{\parallel}^2 \quad (15b)$$

위의 식(15)에서 자기장은 $\vec{B} = \vec{e}_r B_r(r, \theta) + \vec{e}_{\theta} B_{\theta}(r, \theta) + \vec{e}_{\phi} B_{\phi}(r, \theta)$ 이다. 만약, $B_r = 0$, $B_{\theta} = (1/2\pi r) \int_0^r \mu_0 J(r') 2\pi r' dr'$, $B_{\phi} \sim (R_0 + r \cos \theta)^{-1}$ 인 간단한 모델의 경우를 고려하면 $B_{\theta} \ll B_{\phi}$ 일 때 k_{\parallel} 은 다음과 같다. 여기서 J 는 토로이드 전류 밀도이다.

$$k_{\parallel} \cong \frac{n}{R_0 + r \cos \theta} \left(1 + \frac{m}{nq} \right) \quad (16a)$$

$$q = \frac{r B_{\phi}}{(R_0 + r \cos \theta) B_{\theta}} \quad (16b)$$

위의 식(16)에서 q 는 safety factor 이다. 그러므로 m 값이 시간에 따라 변하게 되면 ($\frac{dm}{dt} = \frac{\partial D/\partial \theta}{\partial D/\partial \omega} \neq 0$), 식(15a)의 k_{\parallel} 이 변하는 것을 알 수 있다.

그림 3-3-118은 LH 파가 전류 구동을 위해 토카막 내에서 진행되는 모습을 시각적으로 나타내었다. LH 파는 폴로이드 단면적(poloidal cross-section)의 flux 표면에서 플라즈마 밀도와 온도, 전류 밀도 분포(그림 3-3-117)에 따라 진행되는 모습이 다르게 나타났다. 특히 입사 초기 조건인 n_{\parallel} 에 따라 진행되는 궤적이 다르게 나타났고, 진행을 하면서 토로이드 효과에 의한 n_{\parallel} 이 변하는 것을 알 수가 있다. 이것은 이미 LHCD 이론에서 언급했듯이 LH 파가 진행하기 위한 파동 분산식의 해가 n_{\parallel} 에 따라 달라지기 때문이다. 또한 LH 파가 플라즈마 내에서 감쇠하고 플라즈마에 에너지를 전달하게 되는데, 그림 3-3-118(a), (c)에서 전류 구동을 위한 LH 파의 감쇠가 일어나는 감쇠구역(significant Landau damping zone)을 볼 수가 있다. 따라서 LH 파에 의해 구동된 전류 밀도 분포를 LH 파의 궤적 결과에 의해서 예측할 수가 있다.

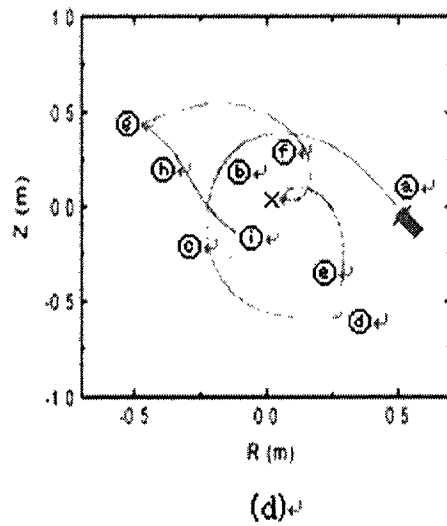
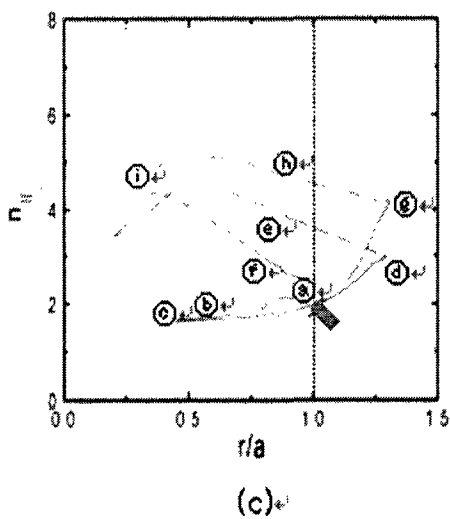
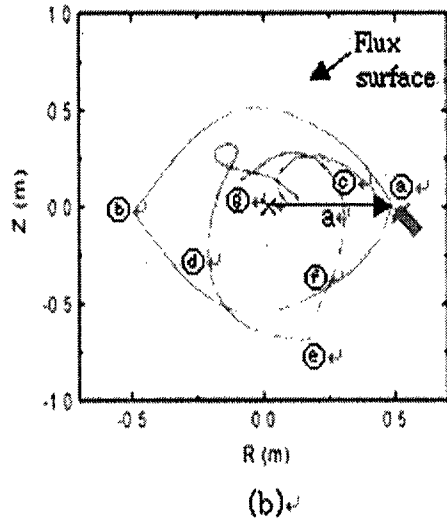
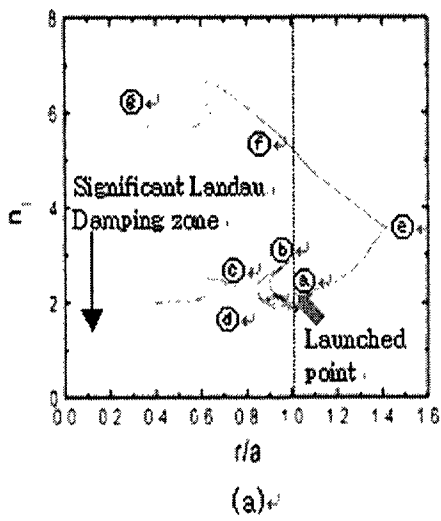


그림 3-3-118. LH ray trajectory in KSTAR; Frequency: 5.0 GHz, Power: 1.5 MW, $n_{||} = 2.15$ ($\Delta\Phi=90^\circ$), $a = 0.5\text{m}$ (a), (b): $n_e(0) = 1.0 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$, $n_e(a) = 0.2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, $T_e(0) = 19 \text{ keV}$ (c), (d): $n_e(0) = 0.6 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$, $n_e(a) = 0.2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, $T_e(0) = 21 \text{ keV}$
 Condition for significant Landau Damping: $n_{||}^{\circ} \geq 6.5 / \sqrt{T_e(\text{keV})}$ Damping zone: (a) - (b), (c), (e); (c) - (b), (c), (f), (e), (h).

(나) 비유도성 전류 밀도 분포와 전류 구동 효율

LH 파를 입사하여 구동된 전류 결과는 주어진 플라즈마 밀도와 온도 분포, 플라즈마 전류 분포에 따라 다르게 나타났으며 특히 다중 도파관 사이 위상차에 의한 결과도 다르게 나타났다.

LSC 전산모사를 하기 위해 Brambilla 전산모사에서 얻은 도파관의 구조($h = 5.5$ cm, $b = 0.55$ cm, $d = 0.15$ cm)를 초기 조건으로 하였으며, 플라즈마 밀도와 온도에 대한 분포를 초기 조건으로 하였다. 플라즈마 밀도와 온도에 대한 분포는 다음 그림 3-3-119와 같다. 높은 밀도($1.0 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$)와 낮은 밀도($0.6 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$)의 경우를 고려하였고, 각각의 플라즈마 온도에 따라 전산모사를 하였다.

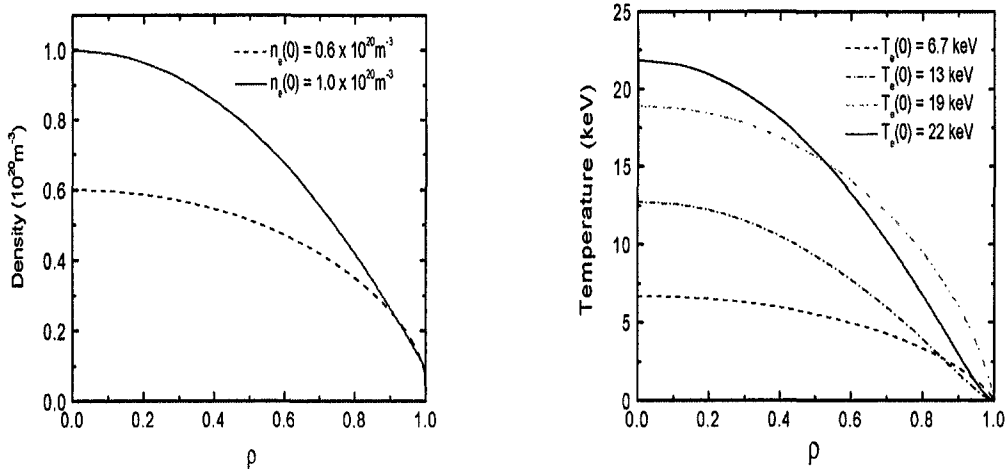


그림 3-3-119. Plasma density and temperature profiles for LSC;

$n_e(0)$ is the central density and $T_e(0)$ is the central temperature. The x-scale, ρ is the normalized radius which is defined as $\sqrt{(\phi - \phi_{\min}) / (\phi_{\max} - \phi_{\min})}$, where ϕ is the poloidal flux.

따라서 그림 3-3-119와 같은 플라즈마 조건에서 주파수가 5.0 GHz이고 전력이 1.5 MW인 LH 파의 전류 구동 결과는 그림 3-3-120, 121과 같다. 전류 구동 결과에서 J_p 는 LH 파를 입사하기 전 순수한 ohmic heating에 의한 토로이드 플라즈마 전류 밀도(toroidal plasma current density)를 나타내고, J_{rf} 는 LH 파를 위상차별로 입사하였을 때 구동된 전류 밀도(RF driven current density)를 나타낸다. 토로이드 플라즈마 전류 I_p 는 그림 3-3-120(a)의 경우에 1.95 MA이며 (b)와 그림 3-3-121(a), (b)인 경우는 각각 1.98, 1.97, 1.95 MA이다. 또한 LH 파에 의해 구동된 총 전류 I_{rf} 는 그림 3-3-122(a)와 같다. 실선(solid line)은 높은 플라즈마 밀도(high density plasma)에서의 결과이고 점선(dotted line)은 낮은 밀도(low density

plasma)에서의 결과이다. 이미 이전 Brambilla 전산모사를 통하여 위상차 90° 가 플라즈마에 에너지를 전달하기 위한 최적 조건이라는 것을 보였고, LSC 전산모사에서 다른 위상차에 비해 전류 구동 효율이 높다는 것을 알 수 있다.

그림 3-3-122(b)와 3-3-123은 각각 도파관의 위상차와 플라즈마 온도에 따른 전류 구동 효율 결과이다. 주어진 플라즈마 밀도와 온도 분포를 따르고, Brambilla 전산모사의 안테나 구조를 따른다. 전류 구동 효율 (η_{CD})은 낮은 플라즈마의 온도 분포일 때 보다 높은 쪽에서 다소 높은 경향을 보였다. 그러나 플라즈마 중심보다는 주로 플라즈마 가장자리에서 전류 구동이 일어난 것이고, 특히 그림 3-3-121, 122의 결과에서처럼 높은 밀도와 온도 분포에서 이러한 현상이 두드러지게 나타났다. 낮은 밀도 분포에서는 구동된 전류도 크고, 어느 정도 플라즈마 중심까지 전류 밀도가 분포하는 것을 볼 수 있다. 위상차에 의한 전류 구동 효율은 위상차가 90° 일 때 최대이며, 그에 해당하는 $n_{||}$ 값은 대략 2.15이다. 이것은 LH 파가 감쇠하여 플라즈마에 에너지를 전달하기 위한 조건에 일치하는 값이다. 이렇게 형성된 전류 분포는 Reversed magnetic shear를 형성하는데 이에 대한 내용과 결과는 다음 장에서 설명한다.

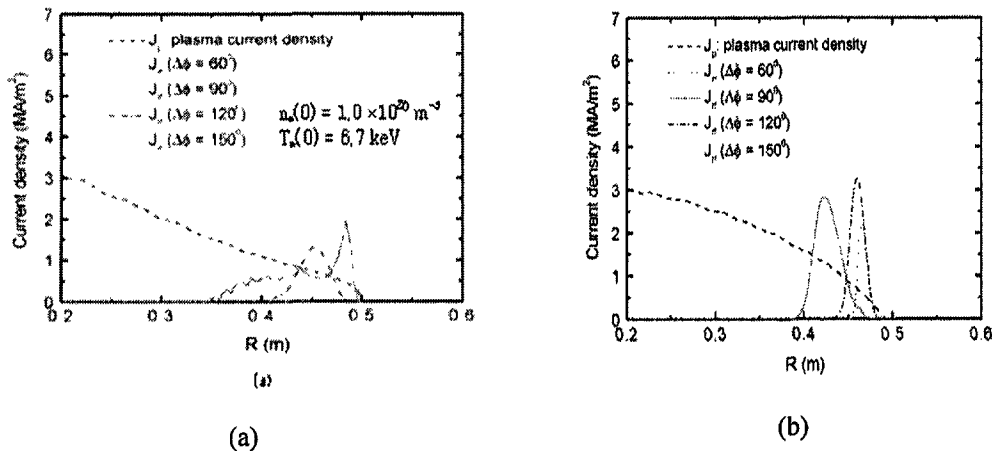


그림 3-3-120. Current density profiles at high density plasma ($1.0 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$).

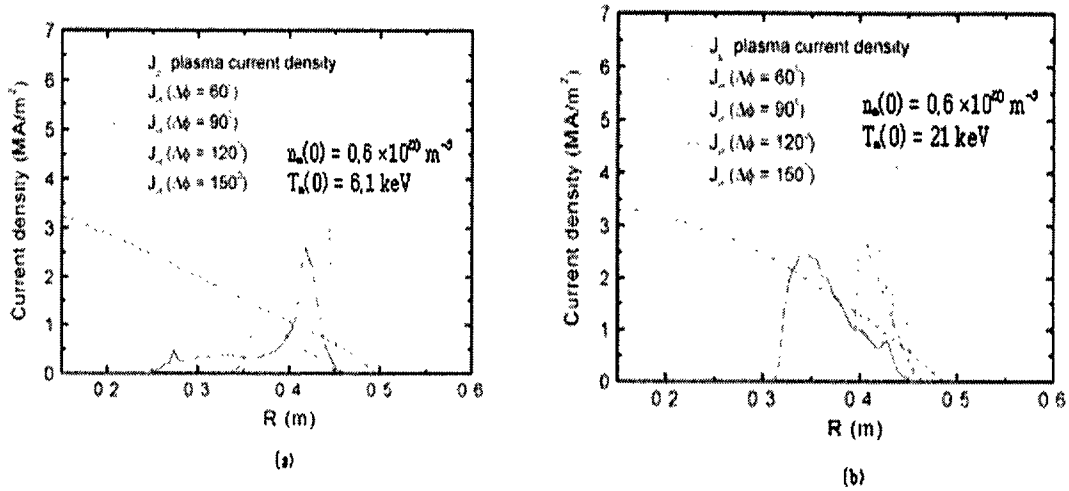


그림 3-3-121. Current density profiles at low density plasma ($0.6 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$).

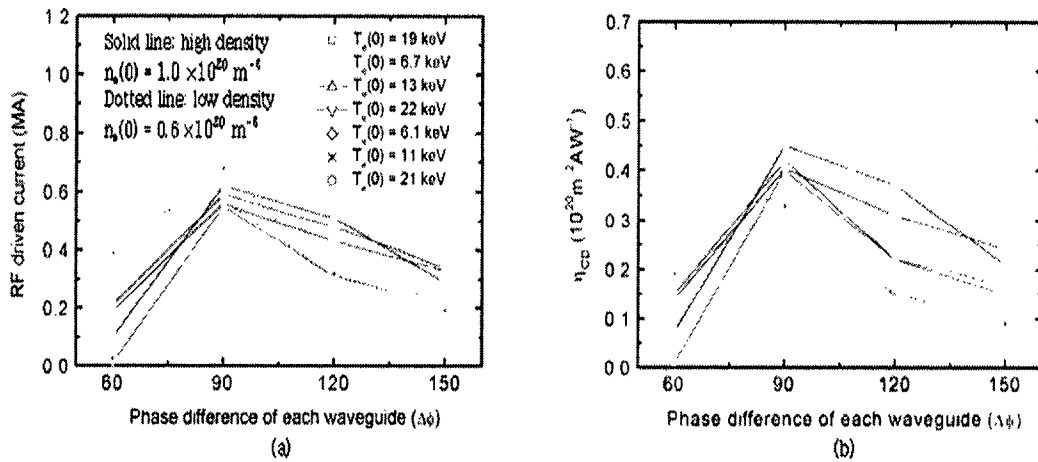


그림 3-3-122. RF driven current and Current Drive efficiency (η_{CD}) vs. $\Delta\phi$.
 $\eta_{CD} = R_0 \bar{n}_e \overline{I_{rf}} / P_w$ ($10^{20} \text{ m}^{-2} \text{ AW}^{-1}$) where $R_0 = 1.8 \text{ m}$, $P_w = 1.5 \text{ MW}$, solid line:
 $\bar{n}_e \approx 0.6 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$, dotted line: $\bar{n}_e \approx 0.4 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$.

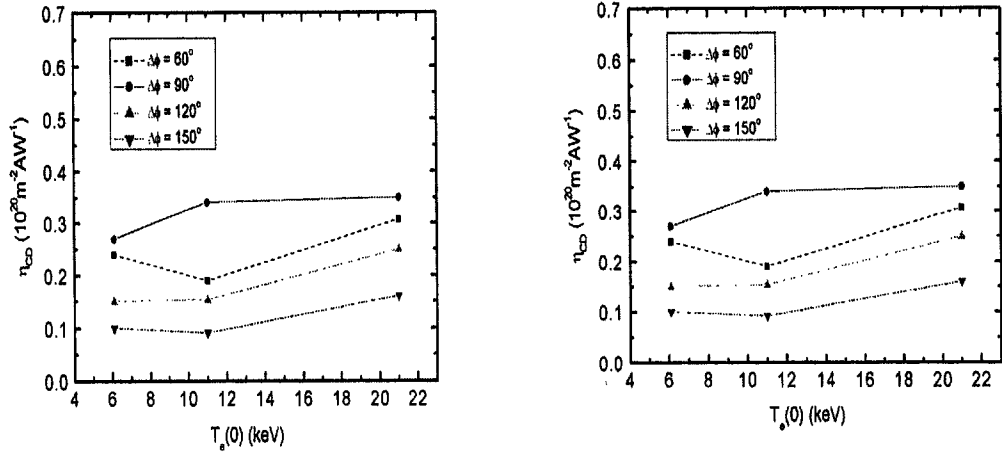


그림 3-3-123. Current Drive efficiency (η_{CD}) vs. $T_e(0)$;
 (a): $n_e(0) = 1.0 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$, (b): $n_e(0) = 0.6 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$.

(다) Reversed magnetic shear q-profile

LHCD는 전류 밀도 분포를 조절할 수 있을 뿐 아니라 reversed magnetic shear 를 형성하고 조절할 수 있다. 본 연구의 KSTAR LSC 전산모사에도 q factor(safety factor)를 계산하고 LH 파에 의한 새로운 q 값을 계산하도록 기본 LSC 프로그램에 부 프로그램(subroutine program)을 첨가하였다. 이미 식(16b)에서 q factor를 정의하였고, 실제 LSC 전산모사 좌표계에 의해 계산되어지는 q factor는 다음과 같다.

$$q(\phi) = \frac{RB_\theta(\phi)}{2\pi} \int dS \frac{1}{R^2 B_\theta} \quad (17)$$

Φ 는 poloidal flux이고, $dS = \sqrt{dR^2 + dZ^2}$ 이며 B_θ 는 토로이드 자기장(toroidal magnetic field), B_θ 는 폴로이드 자기장(poloidal magnetic field)이다. 따라서 첨가한 부 프로그램에서는 먼저 LH 파를 입사하기 전 플라즈마 전류에 의한 B_θ 를 계산하고 그 이후 LH 파에 의해 구동된 전류가 생성하는 $B_{\theta rf}$ 를 계산하여 새로운 q factor를 나타낸다. 이에 대한 결과는 그림 3-3-124, 125와 같다. 또한 Reversed magnetic shear, s 도 새롭게 부 프로그램에 첨가를 하였는데 이에 대한 정의는 다음과 같다.

$$s = \frac{\rho}{q} \frac{dq}{d\rho} \quad (18)$$

ρ : normalized flux radius ($\rho = \sqrt{(\phi - \phi_{\min}) / (\phi_{\max} - \phi_{\min})}$)

q : safety factor

위의 식(18)에서 magnetic shear는 s 의 값이 음수가 될 때 발생되며, 이러한 결과는 플라즈마 가둠 상태를 향상시키고 자기 유체 역학적 안정성을 이루게 함으로써 정상상태의 운행과 높은 bootstrap 전류 발생을 가능하게 하는 것으로 알려져 있다. 따라서 이러한 Reversed magnetic shear는 LHCD 시스템에 의해 발생 되며 조절 될 수 있다.

이미 LHCD 시스템의 안테나 위상조절을 통하여 전류를 구동시키고, 전류 분포를 제어할 수 있음을 보였다. 이러한 전류 분포에 의해 발생한 q 분포는 그림 3-3-124, 125와 같다. q 분포와 s 값 결과에서 각각 높은 밀도 ($n_e(0) = 1.0 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$)와 낮은 밀도 ($n_e(0) = 0.6 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$)의 경우를 고려하였고, 이전 전류 분포 결과에서 높은 효율을 보인 온도의 경우를 고려하였다. 또한 도파관의 위상차 변화에 따라서 전산모사를 하였다. 여기서 q 결과는 실제 토카막 내의 플라즈마 반경(minor radius, $a = 0.5 \text{ m}$)에서 나타내었고, s 결과는 정의에 의하여 정규화된 반경(normalized radius, ρ)에서 나타내었다.

q 와 s 결과도 구동된 전류에 의해 형성되었기 때문에 그 분포는 전류가 발생한 위치와 같고, 높은 온도일수록 플라즈마 가장자리로 분포가 이동하는 것을 볼 수 있으며, 위상차가 크면 클수록($\Delta\phi$ 이 크면) 가장자리로 이동하는 것을 볼 수 있다. 또한 그 위치에서 s 가 음수가 되는 것을 확인 할 수가 있다. 결과에서 나타났듯이 위상차 90° 가 다른 위상차 보다 넓은 분포를 하고 있으며, 플라즈마 중심으로 접근하기에 효율적이라는 것을 알 수 있다.

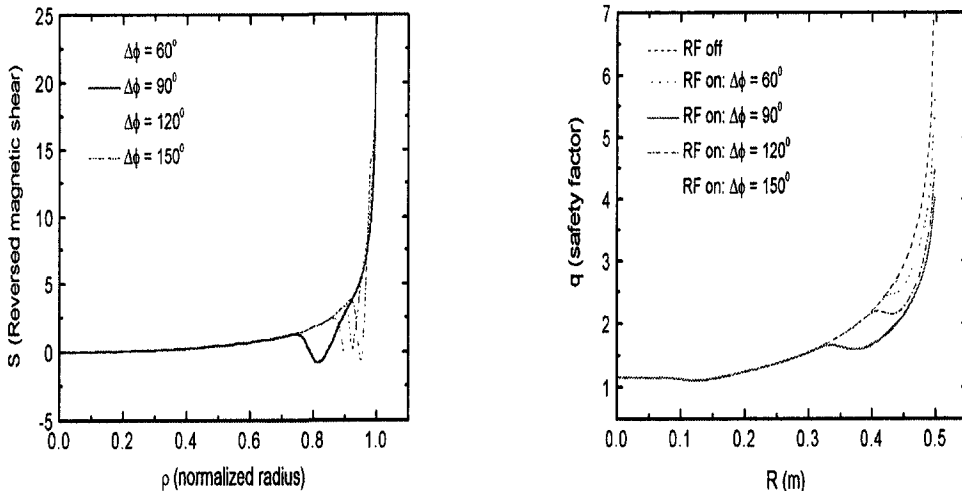


그림 3-3-124. q and s value at high density ($n_e(0) = 1.0 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$); $T_e(0) = 19 \text{ keV}$.

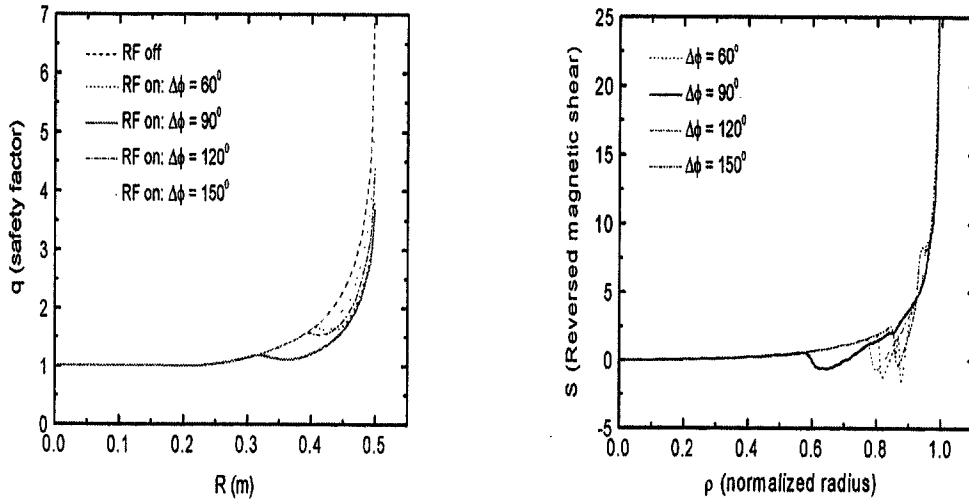


그림 3-3-125. q and s value at low density ($n_e(0) = 0.6 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$); $T_e(0) = 21 \text{ keV}$.

(라) 결론

각각의 플라즈마 밀도와 온도 분포에 따라 LSC 전산모사에서 전류 구동 결과를 확인하였다. 이러한 결과에서도 위상차가 90° 즉, $n_{||} = 2.15$ 일 때 구동 효율이 좋았고 다른 위상차에 비해 넓은 전류밀도 분포를 보였다. 전류 구동 효율은 또한, 낮은 온도 분포보다는 높은 온도 분포에서 다소 높은 경향을 보였다. 그러나 높은 밀도와 높은 온도 분포에서는 플라즈마 중심보다는 가장자리에서 구동된 전류 밀도가 분포하였다. 이와는 반대로 낮은 밀도와 낮은 온도 분포에서는 높은 밀도 분포에서의 구동 효율보다는 다소 낮지만 넓은 분포를 보였다.

또한 LSC 전산모사에는 플라즈마 내에서 전류 구동을 위한 LH 파의 궤적을 나타내었는데, LH 파가 감쇠하여 플라즈마에 에너지를 전달하기까지 LH 파의 진행 및 감쇠 메커니즘을 시각적으로 확인을 할 수 있었다. 또한 Reversed magnetic shear q profile과 s 값을 통하여 LH 파에 구동된 전류밀도 분포의 역할을 이해할 수 있었다.

그러므로 KSTAR LHCD 시스템은 안테나의 위상조절을 통해 전류 밀도 분포를 조절할 수 있음을 LSC 전산모사를 통하여 확인하였다.

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

제 2단계에서 연구개발 목표 대비 달성도는 다음과 같다.

번호	세부연구목표 (연구계획서상에 기술된 연구목표)	달성내용 ('02. 6월초 현재)	달성 도 (%)
1	이온원 시험	중출력 빔인출 시험 - Hydrogen Beam (35 kV, 20 A, 10 sec) * 현재 빔인출 실험 진행중 이온원 Upgrade 설계 및 제작 완료 원형인출구 그리드 Upgrade 제작·시험 완료	95
2	NBI 빔라인 부품제작 및 특성시험	대형진공함 제작완료 Cryosorption Pump 제작 완료 Calorimeter 설계 및 제작 완료 이온 Dump 설계 및 제작 완료 Neutralizer 설계 및 제작 완료 Bending Magnet 설계 및 제작 완료 * 1 Ion Source - 1 Beam Line(Test Stand) 완성	100
3	빔라인 전원 제작	필라멘트 및 아크전원 제작 완료 감속전원 제작 완료 가속전원(120kV, 70A, 300sec) 제작·설치 완료 전원 제어계 제작 완료 * 가속전원 시험 및 빔인출 실험 진행 중	100
4	NBI 장치제어 및 중성 빔 진단 System 개발	Sun W/S에서 EPICS 환경 Setup 완료 Calorimeter Beam Profile Monitoring System 구성 * 100 CH TC Signal Analyzing System 구성 OMA에 의한 빔 Species 및 발산각 측정시험 IR Camera System 구성완료	100
5	NBI 장치 상세설계 및 R&D	LHe Cryocondensation Vacuum Pump용 Prototype 4 K quilted panel 제작 및 시험완료 KSTAR NBI Beam Transport Simulation Code(BTR code) 완성	100

번호	세부연구목표 (연구계획서상에 기술된 연구목표)	달성내용 ('02. 5월초 현재)	달성도 (%)
6	ICRH/FWCD 장치 상세설계	<ul style="list-style-type: none"> - 각 계통별 상세설계 보완 - 저출력 RF 전송계통 제작 및 시험 완료; Mockup antenna S-parameter 시험, Antenna EM field 측정, 전류분포, 위상확인, 4 channel coupling 측정 	100
7	Subsystem 제작 및 특성시험	<ul style="list-style-type: none"> - Prototype 안테나 제작. 시험; • Prototype 안테나 제작 완료 및 성능개선 (Coolant manifold, VTL, Ceramic insulator, 냉각관로밀폐 개선, VTL 지지체, Hot water baking, Vacuum feedthrough 지지구조, 조립, 설치 방법 개선) • 냉각수 유량 시험, 구동시험, 진공특성시험 • 저출력 Multi-ductor 방전시험 • RF 고전압 시험 (23 kV @ 20 kW, for 87 s 42.9 kV @ 31 kW pulse, 33.2 kV @ 31 kW for 60 s) • Resonant loop 구성용 부품 구매 완료 • F.S. Tube 특성시험; (Inconel Tube 도금, 열처리시험, B₄C 코팅, PVD-RF sputtering, Coating 성분 분석) • Plasma-안테나 Coupling 해석모형 확립. - Antenna test stand upgrade; • KSTAR RF port 채움 • RF Test Chamber 제작 완료 • 진공도 < 10⁻⁷ mbar, 115 °C baking • Tuning system, 전송선 설치, 진단 장비설치 - Vacuum Feedthrough 제작. 시험 • 진공시험, DC 고전압 시험 완료 • RF 고전압/고전류 시험 (> 32 kV for 300 s, 500 A for 60 s) • Ceramic insulator 성능 개선 • 1 set 추가 제작 완료 - 고출력 고주파 부품 제작. 시험 • Liquid Stub/Phase Shifter 제작. 시험 완료. (> 40 kV) • 수냉식 전송선 제작. 시험 완료 (35 kV, 300 s) • Arc detector/Control system 개발; 시험중 • Insulator 개발; ceramic spacer 개발 • 고출력 고주파부품 시험장치 제작. 시험 (High Voltage Pot, 9" 동축관, 30kV, 5분 @ 30 kW 능력, 온도 및 출력 조절 가능) 	100
8	고출력 RF파 발생장치 기술개발	<ul style="list-style-type: none"> - 100 kW transmitter 운전 최적화; • 100 kW, 연속운전 가능, • 냉각계통 보완(chiller) 및 cavity 수정, • VXI control/data acquisition • High VSWR load - 300 kW transmitter 제작 • Final Cavity 제작. • Anode power supply 제작. 시험 완료, (12kV, 60A) • Grid, screen power supply 제작 완료 • 30 kW pre-amp. 제작 시험 완료 	100

번호	세부연구목표 (연구계획서상에 기술된 연구목표)	달성내용	달성도 (%)
10	LHCD 시스템 상세 설계	<ul style="list-style-type: none"> ○ LHCD Launcher 5.0 GHz 기본 설계 확보 ○ 전류구동 연구 및 전산모사 	100
11	ECH 장치 I&C 설계	<ul style="list-style-type: none"> ○ ECH 장치 Control system 설계 및 Gyrotron 전원장치의 Interlock system 설계 및 제작완료 	100
12	ECH 장치 상세 설계 및 본체 부품 발주	<ul style="list-style-type: none"> ○ ECH 장치 상세 설계 완료 ○ Gyrotron 전원장치 제작 및 테스트 ○ Gyrotron /Transmission Line 구매 발주 ○ Gyrotron system 3D layout 설계 ○ Gyrotron tube 제작 완료 및 성능시험 완료 ○ ECH Pre-ionization start-up 관련 이론 연구 및 전산 모사 	100

제 1 절 NBI 장치

본 연구 기간동안 NBI 장치 개발 과제의 목표는 장치 전체의 상세설계, 이온원 개발, 이온원 전원과 빔라인 부품 개발 등에 있었다. 단계에 계획된 연구계획을 달성하여, 1기의 이온원, 이온원 전원들, 빔라인 부품들과 냉각수 설비 등을 포함한 NBI장치 Test Stand를 한국원자력연구소에 완성하였다.

NBI 장치의 경우 65A, 120 kV급 대전류 이온원을 설계·제작하고 성능 시험을 통해 300초 운전 가능한 이온원으로 개발하고 있다. 대전류 이온원의 국내개발에 있어서 가장 어려운 부분이었던 가속부 냉각회로 개발을 자체 설계 및 기술에 의해 완료하여 최종적인 시작품을 제작하였다. Calorimeter, Neutralizer, Bending Magnet, Ion Dump 등 중성빔 발생 및 수송을 위한 빔라인 부품들을 개발하였고, 안정된 빔인출을 위해 초고속 전류 스위치를 포함한 120 kV, 70 A, 300 초 운전의 고정밀 가속전원 등 이온원 전원들을 모두 국내 기술에 의해 설계하고 개발하였다. 특히 이번에 제작된 가속전원은 국외에서도 제작된 바가 없는 고성능의 출력특성을 요하는 전원으로 비용을 획기적으로 절감시킬 수 있는 방법을 사용하여 제작되었기 때문에 성능 검증이 완료되면 세계적으로도 경쟁력을 갖는 전원이 될 것으로 기대된다. 또한, KSTAR NBI 가열장치 가동시 요구되는 대용량 배기속도를 얻기 위해 극저온 냉각펌프(cryopump)의 하나인 Cryosorption Pump를 개발하였다. 현재 이온

원, 빔라인 부품 및 가속전원들의 성능검증을 위해 냉각수 설비 등을 포함한 NBI장치 Test Stand를 한국원자력연구소에 완성하여 빔인출 시험을 통하여 개발된 이온원, 빔라인 부품, 전원들의 성능시험을 수행중에 있다. TFTR 이온원을 국내기술 수준에 맞게 개조하여 자체 제작한 이온원의 경우 현재까지 30 kV, 15 A, 1 초의 수소 빔인출 결과를 얻고 있으며 전원 특성의 결과에 따라 계속적으로 빔인출 조건을 높혀가고 있다. 그 이외에 제어 및 DAS를 위한 EPICS-VME-W/S을 기본으로 하는 제어시스템의 일부를 구성하였고, 빔의 질을 측정할 OMA 시스템을 완성하였으며, 빔 모니터링을 위한 IR 카메라를 설치하였으며 또한 빔라인 부품들의 설계 보완 및 장치 Upgrade를 위해 KSTAR NBI 중성빔 수송코드(2-D Code)를 개발하였다. 이에 따라 차기부터는 KSTAR 장치의 최종 목표인 장펄스 운전과 Full Power에서의 특성시험들이 가능하게 되었다.

제 2 절 RF 장치

본 연구 기간동안 RF 장치 개발 과제의 목표는 장치의 상세설계, 고주파 발생장치 개발, 주요 Subsystem 제작 등이었다. 단계에 계획된 연구계획을 달성하여, 고출력의 300초 운전가능한 고주파 안테나, 고주파 부품들(Vacuum feedthrough, 임피던스 정합장치, 수냉식 전송선, 고주파 절연체) 들의 개발하였고, 고주파 발생장치 개발에 있어서 100 kW 송출기의 출력을 최적화하고, 300 kW 송출계를 제작하였다.

RF가열장치는 차세대 토카막 모우드를 지원할 수 있도록, 300초 운전, 가열 및 전류구동을 조절할 수 있도록 설계되어 주요 Subsystem의 제작이 진행중이다. 세계적으로 처음 시도하는 300초 이상의 장 펄스 운전을 위해 새로운 설계개념과 신기술들을 적용하여 초 고출력밀도(10 MW/m^2)와 운전중 가열 및 전류구동효율 조절능력을 갖는 고주파 안테나를 제작하고 특성시험을 수행하였다. 국내 기술이 취약함을 고려하여, 안테나의 제작을 국내업체에서 선정하여 관련 기술이 축적되도록 하였고, 성능시험을 바탕으로 한 Prototype 안테나의 설계 개선과 upgrade 과정에도 참여하여, 습득한 기술을 바탕으로 본 제품의 개발, 제작을 국내 산업체에서 충분히 수행할 수 있도록 하였다. MW급 고출력 고주파 부품도 세계적으로 처음으로 300초 이상의 장 펄스 운전이 가능하도록 개발되었다. MW급 고출력 고주파 전송을 위한, Vacuum feedthrough, 임피던스 정합장치, 수냉식 전송선 등은 국내 기술로 제작하고 특성시험을 수행하였다. 특히, 신뢰성있는 MW급의 고출력 고주파 전송을 위해, 기존방식(기계적인 접점 방식)과는 다른, 유체를 조절하여 전자파의 위상을 조절하는 위상가변기와 단락 전송선 동조기를 개발한 바 있고, 새로운 냉각방식을 적용한 위상가변기를 고안하여 특허 출원중에 있다. 고출력 RF파 발생장치의 기술개발에 있어서는, 2 MW 송출계의 개발, 운영을 대비하여, 자체 개발, 운영 능력을 확보하고자 하였고, 국내산업이 부분적으로 참여 가능하도록 하였다. 100 kW 송

출계는 고주파 부품 시험에 활용, 출력 최적화를 통해 설계, 제작 및 운영 능력을 확보하였고, 300 kW 송출계의 제작에 있어서 전원을 국내 업체에서 제작하여, 관련 기술이 축적되도록 하였다.

제 3 절 LHCD/ECH 장치

“마이크로파 가열 및 전류구동계통 개발” 과제명으로 1998년부터 4 년간 (1998. 9 - 2002. 6) 2단계 연구를 수행하여 LHCD 시스템의 상세 설계를 수행하였고, 5.0 GHz launcher의 기본설계를 확보하였다. LHCD launcher의 기본설계 및 공학설계는 미국 PPPL 연구소와 공동으로 수행되었고 ECH antenna의 설계 및 제작 또한 미국 PPPL 연구소와 공동수행을 목표로 하고 있다. ECH gyrotron tube의 제작은 완료되어 참여기업인 (주)포스콘에서 성능시험을 완료하였다. Gyrotron tube 운전과 성능 시험을 위한 고전압 발생장치의 제작 및 테스트가 완료되었고 ECH 전송선 핵심 부품을 확보하였다. LHCD 시스템을 통한 전류구동 이론 및 효과에 관한 연구 및 전산모사가 수행되었고, ECH 시스템의 토카막 플라즈마 초기 이온화 이론 연구 및 전산모사 또한 수행되었다.

1. LHCD 장치의 설계기술 확보

LHCD 장치의 핵심기술 중에 하나는 플라즈마를 효율적으로 전류구동할 수 있는 launcher 설계이다. Launcher 설계에서 가장 중요한 결정사항은 주파수 (Frequency)와 설비의 초기 및 최종출력(Total Power) 이며, 이에 부수되는 $N_{||}$ -spectrum 이다. Launcher의 구조는 KSTAR의 다양한 수행업무의 조건과 직결되므로 $N_{||}$ -spectrum을 가능한 자유자제로 조절함이 바람직하였고, JET-type과 TPX-type의 launcher 특성분석을 통해 launcher 구조를 TPX-type으로 결정하고 설계 및 특성 전산모사를 수행하였다. 마이크로파의 플라즈마내 전파 및 가열/전류구동특성에 대한 해석, launcher-plasma coupling 특성해석 등을 수행하여 LHCD 전류구동용 5.0 GHz Launcher 기본설계를 HFSS 프로그램을 이용하여 성공적으로 수행하였다. Launcher의 water load는 각각의 waveguide channel당 설치하여 서로 간의 coupling을 피하고 SiC-ceramic absorber를 사용하여 효과적으로 반사되는 RF를 흡수하도록 설계하였다.

클라이스트론 출력부와 전송선은 마이크로파의 위상조절이 용이하고, 클라이스트론을 추가로 설치하는 것이 용이하도록 설계하였다.

2. ECH 장치의 설계 기술 확보

ECH 장치는 5.0 GHz 마이크로웨이브를 사용하는 LHCD 와는 달리 84 GHz 의 밀리미터파를 사용하므로 전송선에서 유사모드 생성에 의한 출력 감소를 최소화하고 밀리미터파 전송의 안정성(stability)을 확보할 수 있는 전송선의 설계가 무엇보다도 중요하다. 특히 자이로트론과 고정밀 고전압전원장치가 그 성능을 좌우하므로 기종의 선택과 전원장치의 설계에 외국연구소의 연구결과를 참고하여 설계하였다. ECH 장치의 설계에 있어서도 외국연구소의 연구결과와 이 분야 전문가의 기술자문을 활용하여 전송선의 기본설계를 완료하였다.

ECH 부분은 KSTAR의 중심자장을 3.0-T로 기준하여 주파수는 84-GHz 이며, 이에 적합한 자이로트론으로 CPI 자이로트론을 결정하였다. 이를 사용한 초기 플라즈마형성에 사용하여 Volt-Sec에의 기여도를 KSTAR/PPPL 팀이 전산모사를 수행하였으며, 이분야의 전문가인 A.C. England (NIFS & ORNL)의 초청 자문을 통해 Pre-ionization 효과를 확인하였다. 또한 ECH Pre-ionization 기초연구를 위한 2.45 GHz ECR 플라즈마 발생시스템을 구축하여 ECR 방전 실험과 플라즈마 밀도 측정등 ECH 관련 기초 R&D를 수행하였다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

2단계 사업의 연구결과는 당해연도에 후속사업에 직접 활용하여, 각 가열장치의 제작·시험 및 건조를 추진할 예정이다. 토카막장치에 의한 핵융합로가 실현된다면 플라즈마 가열장치들은 핵융합 발전로에서 필수적인 보조장치로 채택될 수밖에 없다. 따라서 본 연구에서 목표로 하고있는 준연속운전이 가능한 가열 및 전류구동 장치들은 가깝게는 ITER 등 초대형 토카막들에서 사용될 것이 분명하고, 궁극적으로는 핵융합 발전로에서 활용되는 것을 최종 목표로 한다. KSTAR 가열장치의 제작·운용 기술들이 계획대로 확보된다면 세계적으로 이 분야에 대한 기술적 우위의 선점과 함께 관련 개발 제품들의 수출시장 개척에도 일조할 수 있을 것으로 판단된다.

가열장치에는 첨단기술에 의해서만 가능한 부품들이 많기 때문에 가열장치들을 개발하는 과정에서 축적된 핵심기술들은 협력업체로 연구에 참여했던 국내 산업체로 자연스럽게 기술이 파급되어 이 분야의 국내 기술정착에 밑거름이 될 수 있다. 이들 기술들은 핵융합뿐만 아니라 다른 산업으로의 기술 파급 효과도 크기 때문에 산업현장 적용이 가능한 새로운 기술분야는 관련 기술의 산업적 스핀오프에 최대한 지원할 것이고 더 나아가 선진국과의 이 분야의 국제경쟁력 확보에 노력할 것이다. 국내 산업체와의 협동 연구개발에 의해 기술적인 고난이도가 요구되는 대형 핵융합 가열장치 관련 많은 부품의 설계, 제작 및 시험 기술들이 축적되었으며, 이들 기술들은 핵융합뿐만 아니라 다른 산업으로의 기술 파급 효과도 크기 때문에, 산업현장 적용이 가능한 기술분야는 참여기업 중심으로 연구성과를 이전하여 관련 기술의 산업적 스핀오프에 최대한 활용할 것임

제 1 절 NBI 장치 및 장치기술의 활용

현재 개발된 이온원, 빔라인 부품, 전원들의 성능검증 및 Upgrade가 완료되면 세계수준의 NBI장치 관련 많은 기술들을 확보할 수 있을 것이며, 이들 기술을 중심으로 2006년까지 KSTAR NBI 장치를 완성하여 토카막의 가열 및 전류구동 실험에 활용할 것이다. KSTAR 토카막의 두 번째 빔라인은 첫 번째 빔라인을 제작하면서 축적한 기술들을 모두 기업체 이전하여 기업체 주도로 설계·제작하게 하고, 외국 시장에도 진출하여 외국에서 요구하는 NBI 장치 전체 또는 일부를 맡아서 제작할 수 있도록 한다.

NBI장치 파생기술로서 대용량 이온원이 사용되고 있거나 향후 활용이 예상되는 산업분야로는 대용량 이온빔 스퍼터링 장치 및 이온빔 Mixing장치로서 반도체 분야, 금속/세라믹 분야, 폴리머 분야 등에도 일부 적용되고 있고 향후 큰 활용이 예상된다. 현재 이온빔 장치분야의 전체 국내외 시장 규모로는 세계 시장이 연간 약

16억 달러 정도이고, 국내 시장은 연간 약 800 억원 정도로 추정되는데, 대용량 이온원을 이용한 이온빔 장치기술이 개발되면 이 분야의 양산기술을 촉진하게 될 것이다. 또한 120 kV, 65 A급 고전압·대전류 전원의 개발에 의해 핵융합 발전로가 실현된다면 핵융합로 1기당 약 100억원 이상의 전원 시장이 형성될 것으로 예상되며, 현재에도 대전류 산업용 전자 및 양성자 가속기등 국내시장에 적용해 보면 연간 약 50억원 이상의 수입대체효과가 발생할 것으로 추정된다. 대용량 Cryo 펌프 및 진공계통 구성기술이 개발되면 대용량 이온빔 장치, 대용량 Plasma Processing장치, 항공우주 모사시험 장치등 향후 초 대용량 고진공계가 요구되는 산업분야에서 효과적으로 활용될 것이고, 개발된 Hypervapotron은 대용량 진공관, 대용량 이온원의 덤프로 활용될 수 있으며, Hypervapotron 제작 기술로 개발된 전자빔 용접 및 Brazing 기술은 정밀 기계 부품 등 많은 정밀기계가공 분야에도 응용될 수 있다.

- 대전류 이온원 제작기술 : 120 kV, 65 A 급의 대전류 이온원을 국내 기술에 의해 개발하여 현재 성능시험을 진행하고 있으며, 이 기술을 이용하면 대전류 빔조사 장치와 대용량 스퍼터링 및 빔 Mixing 장치로 활용이 가능하다. 이러한 장치들은 현재 낮은 전류의 이온빔 처리시설을 이용하여 반도체, 금속/세라믹, 폴리머 분야 등에 일부 적용이 되고 있으므로, 향후 이 분야에 대전류 이온원 기술을 이전시키면 양산기술을 촉진할 수 있을 것이다.
- 아크 및 플라즈마 전원 : 이 전원들은 저압 직류방전에 의한 플라즈마 이용기기(예를 들면, 코팅장치, 플라즈마 질화장치 등)에서 안정적인 대용량 플라즈마를 얻는데 매우 효과적이므로, 이들 분야에서의 많은 활용이 예상된다.
- 대용량 고전압 직류 전원 : 참여기업체인 (주)POSCON과 공동으로 개발을 완료한 대용량의 고정밀 고전압 직류(120 kV, 70 A 급)전원 기술은 향후 국내의 고전압 직류전원을 필요로 하는 연구용 가속기나 산업용 대형 설비의 전원으로 활용이 가능한 기술로 현재 성능시험을 진행 중에 있다. 성능이 검증되면 같은 성능에서 가격은 매우 경제적인 전원이 되어 외국 제품과도 경쟁이 충분히 가능하다.
- 대용량 Cryo-pump 및 진공계통 : 대용량의 Cryo-pump는 국내의 기술로 제작이 가능함을 확인하였고, 기술이전이 가능한 상태이다. 이 기술은 대용량 이온빔 조사 장치, 대용량 플라즈마 처리장치, 항공우주 모사시험 장치 등 향후 초대용량 고진공계가 요구되는 산업분야에서 효과적으로 활용될 것이다.
- 대용량 진공용기 : 한국원자력연구소가 설계하고 과제 참여업체인 (주)원신코퍼레이션에서 제작한 대용량 진공용기는 이를 필요로 하는 연구(입자 가속기 등)와 관련산업에 즉시 적용할 수 있도록 준비하며, 제작을 위한 설비 및 대 체적의 진공용기 세정기술 등을 포함하는 기술들은 제작업체에서 확보가 완료되었으므로, 즉시 제품에의 적용 및 상품화를 추진한다.
- Hypervapotron 및 Swirl Tube 기술 : 대용량 진공관, 대용량 이온원의 덤프 등으로 활용될 수 있고, 제작과정의 기술로 개발된 전자빔 용접 및 Brazing 기술은 정밀기계 부품제작 등 많은 정밀기계 가공분야에 활용될 것이다.

제 2 절 RF 장치 및 장치기술의 활용

2단계 사업에 이어 3단계 사업에서는 고출력, 고주파 안테나를 개발하고, 송출계, 전송계 및 제어계의 제작에 착수하여 2007년까지 KSTAR RF 장치를 완성하여 토카막의 가열 및 전류구동 실험에 활용할 것이다. Prototype 안테나 개발을 통하여 확보한 안테나 제작 기술은 본제품의 설계, 제작과정에 활용하여 본제품의 제작을 추진한다. 전송계와 제어계는, 2단계 사업을 통하여 완성한 100 kW, 300 kW 송출계를 이용하여 고출력 RF 부품들의 성능 등을 검증하여 사양을 결정하고, 제작에 착수한다. 또한, 1, 2단계에서 확보된 RF 시험시설의 운영을 통해 시험 및 운영기술을 확보하도록 한다. 6 MW 송출계는 100 kW, 300 kW 송출계 제작경험을 활용하여 사양을 결정하고, 국내산업이 부분적으로 참여 가능하도록 제작을 추진한다.

고주파 플라즈마 기술, 고출력 고주파 기술들은 반도체 가공, 금속표면 가공, 환경, 우주선 추진, 의료용 장비, 방송, 국방 등의 분야에 기술 파급 효과도 크기 때문에 산업현장 적용이 가능한 기술분야는 국내기업으로의 연구성과를 이전하여 관련 기술의 산업적 spin-off에 노력한다.

대출력 RF 장치 기술은 관련 시장이 고주파가열로, 방위산업, 대출력 통신기지 등 비교적 특수분야에 제한되어 있으나, 장비가 고가이며 고부가 가치(고가의 기술비)의 기술분야로서 개발기술을 바탕으로 관련기기들의 국산화시 추진시 많은 수입 대체효과가 기대된다. 고출력 RF전원의 기술개발로 플라즈마 공정 설비, 전력용 반도체 제조설비 관련 핵심 장치기술을 확보할 수 있을 것으로 기대된다. 특히 고출력 고주파 분야의 성장은 전력전자기술, 정밀 기계기술 및 대형 설비의 제어 및 안정성 관련 기술의 신장을 촉진할 것이다. 고주파 전송설비의 경우 국내 각 방송 업체에서는 역시 90%이상 수입에 의존하고 있어 이를 국내 제품으로 대체할 수 있어 연간 50억원 이상의 수입대체가 가능하다.

제 3 절 LHCD/ECH 장치 및 장치기술의 활용

클라이스트론 및 자이로트론관 기술 및 이용분야는 핵융합 뿐 아니라 양성자 가속기 등 차세대 대형 가속기 개발에 활용할 수 있으며, 일반 방송국 및 이동통신 송신국에 직접 활용함으로써 이 분야에 대한 산업계의 선진국 기술의존도를 낮출 수 있다. 자이로트론 기술은 특수 레이더 등 국방과학의 핵심기술로서 안보기술 자립화에 크게 기여할 것이다. 클라이스트론관 제작 기술은 핵융합에 최적인 클라이스트론 자체의 개발은 오랜 시간, 예산 및 인력이 소요된다. 2002 - 2005 년에는 그 동안에 양성된 인력, 기반 기술 및 주변 시설 등을 활용하여 자체 개발을 추진하고, 이 역시 국내개발완료시 안보기술확립에 크게 기여할 것이다.

민수용으로 사용되는 클라이스트론과 Gyrotron을 국내기술로 유지보수 할 수 있고, 운용기술이 확보되고, 그리고 tube의 설계 및 제작기술 기반이 확보 가능하다. 당 분야의 개발성공시 상업적 활용가능성이 가장 높은 분야는 방송통신 분야이다. 현재 국내에서는 라디오, TV 방송국은 물론 각 지역의 중계소 또는 중계기지를 포함하여 상당수에 달하는 마이크로파 송출소에서 사용중인 고출력 장치는 전량 해외에서 도입된 것으로써 이의 유지보수에 많은 외화를 지불하고 있다. 본 기술의 확보시 이에 대한 국산화가 가능하다.

마이크로웨이브파의 발생기술 및 전송기술은 핵융합기술개발에 필수적인 플라즈마 가열기술개발에 핵심이며 특히 산업용 (특수건조, 살균, 특수램프 등), 군사용 (통신, 레이다, 전파방해용 및 대전자전용 등) 및 방송장비분야의 설계, 제작, 시험, 운용 등과 관련하여 핵심기술을 확보할 수 있다.

반도체 산업과 관련된 플라즈마 표면처리에 사용되는 고출력 마이크로웨이브 기술 역시 전량 수입되고 있는 바, 우리나라의 전략산업으로 주목받고 있는 반도체산업기술의 독자성을 확보하는 차원에서도 당 분야의 반도체 산업에의 적용 역시 대단히 중요하다.

높은 효율과 정밀도, 높은 전력 밀도를 갖는 고압 전원장치의 개발을 위해 반드시 필요한 반도체 소자 및 고주파 기술확보, 절연 및 노이즈 방지, 고주파 변압기의 문제 해결로 핵심 기술을 확보하여, 환경분야 응용 등 산업 전반에 걸친 직류전력 시스템에 적용할 계획이다.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

○ 1999년 미국의 “Nainal Research Council Fusion Sence Assessment Committe”의 interim report에 의하면, 핵융합 분야의 미해결 난제들로

Fusion science issue

- Turbulence and transport
- Energy density limits
- Integrated physics issues of self-heated plasmas

Technology issue

- Materials and tehcnology for high heat and neutron flux
- Maintenance and reliable systems
- Economic and environmental attractiveness

등을 꼽았다. 2 단계의 연구기간동안 파악된 핵융합연구 동향은 “**TIME OF SCALING IS OVER !**” 라는 표현으로 요약할 수 있고, 이 같은 난제들의 많은 부분이 해결되었거나 해결 단계에 있음을 알 수 있었다. ITER-FEAT의 부지 선정, 건설시작 등 “ITER Parties” 사이의 정책적인 결정이 2002-2003년에 이루어질 때, 핵융합 실증로의 실현이 멀지 않다고 할 수 있다.

○ 최근의 핵융합연구는 유럽과 일본을 중심으로 활발하게 이루어지고 있고, 핵융합연구의 큰 이정표가 될 국제열핵융합실험로(ITER)의 부지 선정은 2002년, 부지 선정후 2003년에 장치의 건설이 시작될 예정이다. ITER는 현재 일본, 캐나다, 독일이 유치를 제안중이다. 일본의 핵융합 연구는 일본원자력연구소(JAERI)와 국립핵융합과학연구소(NIFS) 중심으로 이루어지고 있고, ITER의 부지 선정시까지의 일본의 핵융합연구의 방향은 크게 결정될 수 없다는 느낌이다. 타 아시아 국가중, 중국과 인도에서 핵융합 연구가 활발하게 진행되고 있고, 중국의 초전도 토카막 HT-7U, 인도의 초전도 토카막 SST-1 프로젝트 등도 계획대로 추진되어 각각 2003년도 “First plasma”를 얻는 것으로 진행되고 있다. 1998년에는 한국, 중국, 일본의 주도로 아시아 각국간의 플라즈마 및 핵융합 연구 부분의 협력을 도모하기 위해 APFA (Asia Plasma and Fusion Association)가 설립되어 3차례 회의가 열린 바 있고, 아시아의 다른 국가들과의 협력기구로 발전될 전망이다. 미국의 핵융합 연구는, 연장된 ITER의 EDA(Engineering Design Activity)에 참여하고 있지 않지만, National lab. 중심의 Tokamak (DIII-D, Alcator C-MOD, NSTX) 연구, ICF (Inertial Confinement Fusion) 연구, 대학 중심의 새로운 개념을 이용한 핵융합 개념연구에 주력하는 등, 새로운 대형 장치를 시작하기 보다, 2002년 ITER EDA 종료, 부지 선정시까지 내실에 치중하고 있다.

○ 가열장치 개발과 관련하여, 음이온원을 이용한 중성입자빔 가열장치를 일본의 JT-60U, LHD에서 개발하여 실험중이고, ECH/ECCD 장치를 이용한 실험은 미국의

DIII-D와 일본의 JT-60U, LHD, ICRF 장치를 이용한 실험은 유럽의 Tore Supra, JET, LHCD 장치를 이용한 실험은 미국의 Alcator C-MOD, 유럽의 Tore Supra, JET 등에서 수행되고 있었다. 특히 유럽의 Tore Supra, JET에서는 새로운 ICRF 장치를 계획하여 개발하고 있다.

o DIII-D 와 Alcator C-MOD 등에서 최근에 Counter-NBI injection이나 Off-axis ICRH heating등을 통해 ETB(edge transport barrier)와 ITB(internal transport barrier)를 결합한 Double barrier 운전모드들을 발견하여 high-performance AT 운전모드 실현을 위한 큰 진전을 거두었다. AT 운전시나리오 개발 관련하여, 특히 Resistive wall mode (RWM)와 Neoclassical tearing mode (NTM)의 제어 방법에 대한 연구 성과가 괄목할 만하다. 하지만 아직 RWM에 대한 field error amplification 이나 NTM의 seeding 과정 등에 대한 물리적 이해가 충분치 않은 것으로 보인다. 또한 그 동안 핵융합 분야에서 가장 큰 난제 가운데 하나로 꼽혀 온 이상수송현상 해석문제에서 최근에 괄목할 만한 진전이 이루어지고 있음도 또한 주목할 점이다. 특히 turbulent transport가 하나의 single-scale 모드에 의해 주도된 diffusive 과정에 의해서라기 보다, 다양한 scale-length를 갖는 fluctuation들에 의한 intermittent 또는 statistical 과정에 의해 보다 복잡하게 일어남이 full gyro-kinetic simulation등을 통해 보여지고 있다.

o KSTAR 5.0 GHz LH-coupler 설계에 참조된 C-MOD tokamak 용 4.6 GHz LH-coupler의 중요설계도면을 미국 CPI로부터 확보하였다. (부록 2에 수록)

제 7장 참고문헌

가. NBI 장치

1. 石川順三, “이온원 工學”, p. 1, 아이오닉스 주식회사 (1986)
2. Mikito Kawai et. al., “Increase of the Positive Ion Source Powers in JT-60 NBI”, JAERI-Tech 98-042
3. L.R. Grisham, C.C. Tsai, J.H. Whealton, and W.L. Stirling, Rev. Sci. Instrum., **48**, 1037 (1977)
4. ANSYS, Inc. , PA 15342-1300, ANSYS Code Manual
5. M. M. El-Wakil, “Nuclear Heat Transport”, International Textbook Co, 1971
6. W.B. Herrmannsfeldt, and Reinard Becker, IGUN Code Manual
7. TFTR Neutral Beam Injection System Conceptual Design, LBL (1975)
8. TPX Systems design description NBI System, PPPL (1993)
9. Design, Construction, and First Operational Experience on the Joint European Torus (JET), Fusion Technology, Vol. 11, No. 1 (1987)
10. Annual Report of National Institute for Fusion Science, NIFS (1996)
11. The Design, Research and Development of JT-60 Neutral Beam Injector, JAERI-M 87-169 (1987)
12. KSTAR Physics Validation Review Documents, KBSI (1997)
13. KSTAR Tokamak Systems Engineering Review Documents, KBSI (1997)
14. J. E. A. John, “Gas Dynamics”, Prentice Hall (1984) ch. 3

15. S. R. Wilson, J. Vac. Sci. Technol. **A5**, 2479 (1987)
16. J.H. Kamperschroer, L. R. Grisham, L. E. Dudek, etc. "TFTR Neutral Beam Injection Power Measurement" Rev. Sci. Instrum. 60(11), November 1989
17. E. D. Perry, G. M. Brown, L. E. Dudek, " TFTR Neutral Beam Calorimeter Fabrication and Instrumentation"
18. J.H. Kamperschroer, L. R. Grisham, L. E. Dudek, etc. "TFTR Neutral Beam Injection Power Measurement" in house report, MTL of PPPL
19. "Systems Design Description" WBS 21 Neutral Beam Injection System, TPX
20. G. Duesing et al., "Neutral Beam Injection System", Fusion Technology, Vol. 11, p. 163, 1987.
21. H. Falter, E. Thompson, "Performance of Hypervapotron Beam-Stopping Elements at JET", Fusion Technology, Vol. 29, p. 584, 1996.
22. L. C. Pittenger, et al., "A Neutral Beam Injection System for the Tokamak Fusion Test Reactor" in PPPL-Report.
23. 배석희, 인상열, et al., "진공공학", 한국경제신문 출판부 (2000)
24. S.J.Yoo, H.L.Yang and S.M.Hwang, J. of the Korean Phys. Soc., V35, #4, Oct., 1999, 315p.

나. RF 장치

1. C.K. Hwang, B.G. Hong, and D. Swain, Fast sweep of current phases in ICH antenna straps , Fusion Engineering and Design **45**, p.127, 1999.
2. A. Fukuyama, S. Nishiyama, K. Itoh and S. Itoh, Nucl. Fusion **23**, p.1005, 1983.
3. M. Brambilla, A Full Wave Code for Ion Cyclotron Waves in Toroidal Plasma," Report IPP 5/66, Garching, 1996.
4. M.D. Carter et al., Nucl. Fusion **36**, p.209, 1996.

5. R. Kumazawa et al., Liquid stub tuner for ion cyclotron heating , Rev. Sci. Instrum. **70**, p.2665, 1999.
6. D. Ehst and C.F.F. Karney, Nucl. Fusion **31**, No.10, 1996.
7. G. Bosisia, M. Makowski and G.Tonon, Plasma Phys. Control. Fusion, **40**, A105, 1998.
8. M. Saigusa, T. Fujii, H. Kimura, S. Moriyama, K.Annoh, M. Terakado, and N. Kobayashi, Fusion Engineering and Design, **24**, p.47, 1994.
9. A. Kaye, J. Jacquinot, P. Lallia, and T. Wade, Fusion Technology, **11**, p.203, 1987.
10. B.G. Hong, J. Korean Phys. Soc., **36**, p.90, 2000.
11. B.G. Hong, Y.D. Bae, C.K. Hwang, J.G. Kwak, M.H. Ju, D.W. Swain, P.M. Ryan and B.W. Riemer, Proc. of the 20th SOFT, Vol.1, p.303, 1988.
12. H. Welder, F. Wesner, W. Becker, and R. Fritsch, Fusion Engineering and Design, **24**, p.75, 1994.
13. JAERI, JAERI Report No. JAERI-memo 63-039, 1988.
14. A. Kaye, T. Brown, V. Bhatnagar, P. Crawley, J. Jacquinot, R. Lobel, J. Plancoulaine, P.H. Rebut, T. Wade, and C. Walker, Fusion Engineering and Design, **24**, p.1, 1994.
15. T. Mutoh, R. Kumazawa, T. Seki. F. Simpo, G. Nomura, T. Ido, and T. Watari, NIFS Report No. NIFS-552, 1998.
16. T.L. Owens, F.W. Baity, D.J. Hoffman, and J.H. Whealton, Fusion Technology, **8**, p.381, 1985.
17. 배영덕, 홍봉근, 곽종구, 한장민, 황철규, 응용물리 **11-6**, p.704, 1998.

18. 배영덕, 황철규, 홍봉근, 광종구, 한장민, 'KSTAR ICH 안테나의 최적 설계 및 전기적 특성 분석', KAERI/TR-1052/98, 1998.
19. P.M. Ryan and D.W. Swain, 'ICRF Array Module Development and Optimization for High Power Density', ORNL/TM-13370, 1997.
20. P.M. Ryan, F.W. Baity, R.H. Goulding, G.R. Haste, D.J. Hoffman, K.E. Rothe and J.H. Whealton, *Fusion Engineering and Design* **24**, p.135, 1994.
21. M. Bures, J.J. Jacquinot, D.F.H. Start and M. Brambilla, *Nuclear Fusion* **30-2**, p.251. 1990.
22. D.W. Swain, R.I. Pinsker, F.W. Baity, M.D. Carter, J.S. deGrassie, E.J. Doyle, G.R. Hanson, K.W. Kim, R.A. Moyer and C.C. Petty, *Nuclear Fusion* **37-2**, p. 211, 1997.
23. S. Ramo, J.R. Whinnery and T.V. Duzer, 'Fields and Wave in Communication Electronics', JohnWiley & Sons, p.250, 1994.
24. JAERI, 'JT-60 設計報告書 第11編 RF 加熱裝置', JAERI-memo 63-039, 1988.
25. H. Kimura, T. Fujii, Y. Ikeda, M. Saigusa, J. Sagawa, M. Seki, M. Uehara, N. Kobayashi and Y. Saito, 'Power Test of the JT-60 ICRF Launching System', JAERI-M86-113, 1986.

다. ECH 장치

1. J. Wesson, *Tokamaks*, 2nd ed., Clarendon press, Oxford, 1997.
2. F. F. Chen, *Introduction to plasma physics and controlled fusion*, 2nd ed., Plenum press, New York, 1984.
3. A. G. Kulchar, O. C. Eldridge, A. C. England, C. E. Bush, P. H. Edmonds, G. G. Kelly, C. M. Loring, Y-K. M. Peng, J. B. Wilgen, and S. K. Borowski, *Phys. Fluids*, vol. 27, no. 7, p 1869, 1984.
4. B. Lloyd, G. L. Jackson, T. S. Taylor, E. A. Lazarus, T. C. Luce, and R. Prater, *Nucl. Fusion*, vol. 31, no. 11, p 2031, 1991.

5. R. M. Gilgenbach, M. E. Read, K. E. Hackett et al., *Nucl. Fusion*, vol. 21, no. 3, p 319, 1981.
6. R. M. Gilgenbach, M. E. Read, K. E. Hackett et al., *Phys. Rev. Lett.*, vol. 44, no. 10, 1980.
7. Y-K. M. Peng, S. K. Borowski, and T. Kammesh, *Nucl. Fusion*, vol. 18, no. 11, p 1489, 1978.
8. Owen Eldridge, *Phys. Fluids*. Vol. 15, no. 4, 1972.
9. B. Lloyd, P. Carolan, and C. Warrick, *Plasma Phys. Control. Fusion*, vol. 38, p 1627, 1996.
10. A. C. England et al., Power Transmission and Coupling for Radiofrequency Heating of Plasma, *Nucl. Fusion*, vol. 29, p 1583-1625, 1989.
11. T. H. Stix, *Waves in Plasma*, AIP, New York, 1992.
12. A. C. England et al., On preionization in KSTAR, *J. Accel. Plasma Res.*, vol. 5, no. 1, 2000.
13. Stefano Bernabei, *Radio frequency power in plasmas 13th Topical Conference*, AIP, New York, p 237-244, 1999.
14. Y-K. M. Peng, S. K. Borowski, and T. Kammash, *Nuclear Fusion* 18, 1489 (1978).
15. A. G. Kulchar, O. C. Eldridge, A. C. England, C. E. Bush, P. H. Edmonds, G. G. Kelley, C. M. Loring, Y-K. M. Peng, J. B. Wilgen, and S. K. Borowski, *Phys. Fluids* 27, 1869 (1984).
16. V. V. Alikhaev, A. A. Bagdasarov, A. A. Borschevskii et al., *Controlled Fusion and Plasma Heating*, (Proc. 17th Eur. Conf. Amsterdam, 1990) Vol 14B, Part III, EPS, 1084 (1990).
17. B. Lloyd, G. L. Jackson, T. S. Taylor, E. A. Lazarus, T. C. Luce, and R.

- Prater, Nuclear Fusion 31, 2031 (1991).
18. I. Fidone and G. Granata, Nuclear Fusion 34, 743 (1994).
 19. C. Maroli and V. Petrillo, Il Nuovo Cimento 10, 677 (1988).
 20. B. Lloyd, P. G. Carloan, and C. D. Warrick, Plasma Phys. Control. Fusion 38, 1627 (1996).
 21. A. C. England et al., "Preionization modeling in KSTAR," Bulletin of the Korean Physical Society 17, 427 (1999).
 22. Y. S. Bae, M. H. Cho, E. M. Choi, O. C. Eldridge, H. S. Kang, G. Y. Kim, K. H. Kim, I. S. Ko, and W. Namkung, "Impurity Effects on Preionization for KSTAR" in Proceedings of the 2000 Korea Accelerator and Plasma Research Association, 18-19 July 2000, Chonan, Korea.
 23. A. C. England, W. Namkung, O. C. Eldridge, M. H. Cho, I. S. Ko, G. N. Kim, H. S. Kang, and Y. S. Bae, J. Accel. Plasma Res. 5, No. 1, 61 (2000).
 24. Private communications with D. K. Lee in KBSI (2000).
 25. R. M. Gilgenbach, M. E. Read, K. E. Hackett et al, Nuclear Fusion 21, 319 (1981).
 26. Owen C. Eldridge et al., Oak Ridge National Laboratory Technical Report 6052, (1977)
 27. P. G. Carolan and V. A. Piotrowicz, Plasma Phys. Vol. 25, No. 10, 1065, (1983)
 28. Francis F. Chen, "Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion", 2nd Edit., Vol. 1, pp 43, (1984)
 29. Private communications with J. Y. Kim in KBSI (2000).
 30. NRL Plasma Formulary, 1998 (revised)

라. LHCD 장치

1. D. W. Ignat, E. J. Valeo, S. C. Jardin, Dynamic modelling of lower -hybrid current drive, *Nuclear Fusion* **34** (6), 837 (1994).
2. P. Bonoli, Linear theory of lower hybrid waves in tokamak plasmas, in *Wave heating and Current Drive in Plasmas*, Edited by V. Granastein and P. Colestock (Gordon and Breach, New York, 1985), Chapter 4.
3. C. F. F. Karney and N. J. Fisch, Current in wave-driven plasmas, *Phys. Fluids* **29** (1), 180 (1986).
4. N. J. Fisch, Theory of current drive in plasmas, *Reviews of Modern Physics* **59** (1), 175 (1987).
5. R. Parker, Alcator C-MOD Lower Hybrid Project, FY 2003 Budget Planning Meeting, <http://www.psfc.mit.edu/cmod/sciprogram>.
6. M. Brambilla, Slow-wave launching at the lower-hybrid frequency using a phased waveguide array, *Nuclear Fusion* **16** (1), 47 (1976).
7. M. Brambilla, Waveguide launching of lower hybrid waves, *Nuclear Fusion* **19** (10), 1343 (1979).
8. Y. S. Bae, C. H. Paek, M. H. Cho, W. Namkung, M. J. Rhee, Design of 5.0-GHz KSTAR Lower-Hybrid Coupler, KAPRA & KPS/DPP Joint Workshop (2001).
9. J. Y. Lee, Basic Design of Lower Hybrid Current Drive System for KSTAR, M. S. Thesis (POSTECH), (1998).
10. G. Tonon, Lower Hybrid Driven Long Pulses in Tore Supra, *Plasma Phys. Control. Fusion* **35** A105 (1993).
11. Y. Peysson, Progress towards high-power lower hybrid current drive in Tore Supra, *Plasma Phys. Control. Fusion* **42** B87 (2000).
12. J. Jacquinet, V. P. Bhatnagar, C. Gormezano, and the JET team, JET recent results on wave heating and current drive consequences for future

- devices, *Plasma Phys. Control. Fusion* **35**, A35 (1993).
13. A. S. Kae, Progress in ICRH and Lower Hybrid Lanucher development, *Plasma Phys. Control. Fusion* **35**, A71 (1993).
 14. <http://www.frascati.enea.it/FTU/radiofrequency/LH>.
 15. J. Jacquinot, and The JET Team, Heaing, Current Drive and Confinement Regimes with the JET ICRH and LHCD systems, *Plasma Physics and Controlled Fusion* **33** (13), 1657 (1991).
 16. D. Moreau, and TORE SUPRA team, Lower hybrid current drive in TORE SUPRA and JET, *Plasma Physics and Controlled Fusion* **33** (13), 1621 (1991).
 17. D. Moreu, Theory and experiment on r.f plasma heaing, current drive and profile control in TORE SUPRA, *Fuision Engineering and Design* **26**, 29 (1995).
 18. S. Ide, T. Fujita, O. Naito and M. Seki, Sustainment and modification of reversed magnetic shear by LHCD on JT-60U
 19. S. Ide, Naito, T. Oikawa, T. Fujita, T. Kondoh, M. Seki, K. Ushigua and the JT-60 Team, LHCD Current Profile Control Experiments towards Steady State Improved Confinement on JT-60U . *Plasma Phys. Control. Fusion* **38**, 1645 (1996).
 20. D. W. Ignat, Toroidal effects on propagation, damping, and liner mode conversion of lower hybrid waves, *Phys. Fluids* **24** (6), 1110 (1981).
 21. Paul T. Bonoli and Edward Ott, Toroidal and scattering effects on lower-hybrid wave propagation, *Phys. Fluids* **25** (2), 359 (1982).
 22. S. Bernabei, A. Cardinali, G. Giruzzi, G. T. Hoang, D. Ignat, R. Kaita, M. Okabayashi, F. Paoletti, and S. von Goeler, Investigation of lower hybrid wave damping in the PBX-M tokamak, *Phys. Plasmas* **4** (1), 125 (1997).
 23. E. Barbato, Recent progress in lower hybrid current drive theory and

- experiments, *Plasma Phys. Control. Fusion* **40**, A63 (1998).
24. The KSTAR Team, The KSTAR Project: Advanced Steady-State Superconducting Tokamak Experiment, Proceedings of the 17th IAEA Fusion Energy Conference, IAEA-F1-CN-69/FT1/1, Yokohama, Japan, 19-24 October, 1998.
 25. 3D EM simulation software for RF wireless, packaging, and opto-electronic design using Finite Element Method (FEM), Ansoft Corporation's product, <http://www.ansoft.com>.
 26. R. B. Neal, The Stanford Two-Mile Accelerator, New York, Amsterdam, 1968, pp. 367-371.
 27. F. Sporleder, H. G. Unger, Waveguide Tapers, Transitions, and Couplers, IEE Electromagnetic Waves Series 6, Ed. J. R. Wait, G. Millington, E. D. R. Shearman, IEE, London and New York, 1979, pp. 151-153.
 28. Private communication with Dr. H. G. Jang.
 29. Private communication with Dr. S. Bernabe

여 백

특정연구개발사업 연구결과 활용계획서

사업명	중사업명	선도기술개발사업			
	세부사업명	차세대 초전도 핵융합 연구장치 개발 사업			
과제명		가열장치 개발·제작			
연구기관		한국원자력연구소	연구책임자	홍봉근	
총연구기간		1998년. 9월. 8일 ~ 2002년. 6월. 7일 (45개월)			
총 연구비 (단위 : 천원)		정부출연금	민간부담금	합계	
		16,414,000	2,113,200	18,527,200	
기술분야		에너지, 기초·원천			
참여기업		(주)POSCON, (주)원신코퍼레이션, (주)한국전자진흥			
공동연구기관		포항공과대학교			
위탁연구기관					
연구결과활용 (해당항목에(√) 표시)		1. 기업화 ()	2. 기술이전 ()	3. 후속연구추진(√)	4. 타사업에 활용 (√)
		5. 선행 및 기초연구()	6. 기타목적활용 (교육,연구)()	7. 활용중단(미활용)()	8. 기타 ()
<p>특정연구개발사업 처리규정 제 31조(연구개발결과의 보고) 제 2항에 의거 연구결과 활용계획서를 제출합니다.</p> <p>첨부 : 1. 연구결과 활용계획서 1부. 2. 기술요약서 1부</p> <p style="text-align: right;">2002년 5월 일</p> <p style="text-align: right;">연구책임자 : 홍 봉 근 (인) 연구기관장 : 장 인 순 (직인)</p> <p>과학기술부장관 귀하</p>					

[첨부1]

연구결과 활용계획서

1. 연구목표 및 내용

○ 최종 목표

차세대 초전도 핵융합 연구장치, KSTAR 토카막 플라즈마를 가열하거나 비유도성 전류를 인가시키기 위한 가열 및 전류 구동 장치의 개발

○ 제 2 단계 목표 ('98~2001)

- 중성입자빔 입사장치 (NBI) 상세설계 및 제작·특성시험
- 고출력 RF파 가열 및 전류구동장치 (ICRH/FWCD) 상세설계 및 주요 Sub-system 제작·특성시험
- 마이크로파 전류구동장치 (LHCD) 상세설계 및 주요 Subsystem 제작·특성시험
- 전자가열(ECRH)에 의한 플라즈마 발생장치 상세 설계 및 제작·특성시험

○ 주요 연구내용

□ NBI 장치 개발

- 대전류 이온원 개발

65A, 120 kV급 이온원을 설계·제작하고 성능 시험을 통해 300초 운전 가능한 이온원의 개발.

- 빔라인 부품 개발

Calorimeter, Neutralizer, Bending Magnet, Ion Dump 등 중성빔 발생 및 수송을 위한 빔라인 부품들의 개발.

- 대용량 진공 배기펌프 개발

KSTAR NBI 가열장치 가동시 요구되는 대용량 배기속도를 얻기 위해 극저온 냉각펌프(cryopump)의 하나인 Cryosorption Pump 개발.

- 고전압 대전류 전원 개발

안정된 빔인출을 위해 초고속 전류 스위치를 포함한 120 kV, 70A 급 고전압 전원의 개발.

□ ICRH/FWCD 장치 개발

- 고출력 RF파 가열 및 전류구동장치 (ICRH/FWCD)의 상세설계

- 장펄스 운전용, 고주파 안테나 개발

초 고출력밀도(10 MW/m^2)로 300초 이상 동작이 가능하고 운전중 가열 및 전류구

동효율 조절능력을 갖는 고주파 안테나의 개발 및 특성시험

- 고출력 고주파 부품 개발

MW급 고출력 고주파 전송을 위해, 300초 이상의 동작이 가능한 고주파 부품들의 개발 및 시험

- 고주파 발생장치 개발

30MHz, 100 kW 송출계와 27-55 MHz, 300 kW 송출계의 설계, 제작 및 시험

□ LHCD 장치 개발

- 마이크로파 전류구동장치(LHCD) 시스템과 Launcher의 상세설계

- Launcher prototype 제작 및 특성시험

PPPL과 공동연구로 수행

- LHCD용 마이크로파 출력장치, 5.7 GHz Klystron tube 개발

Toshiba와 공동으로 추진

□ ECRH 장치 개발

- 마이크로파 가열장치(ECH)의 상세설계

Gyrotron 시스템, transmission line 시스템, antenna 시스템

- 설치 및 시험

2. 연구수행결과 현황(연구종료시점까지)

가. 특허(실용신안) 등 자료목록

발명명칭	특허공고번호 출원(등록)번호	공고일자 출원(등록)일자	발명자 (출원인)	출원국	비고
자기 반사 아크 스위치 Self Bouncing Arc Switch	10-2001-0037972 PCT/KR01/01123	2001. 6. 29	이광원의	한국 미국	출원중
고출력 수냉식 위상가변기		2001. 3	곽종구의 5인	한국	출원중

나. 프로그램 등록목록

프로그램 명칭	등록번호	등록일자	개발자	비고
PC-DAS	프로그램98-169	1998/11/07	서성현,정승호, 홍봉근	

다. 노하우 내역

NBI 장치

- 대전력 장펄스(300초) 이온원 설계 및 제작
- 대전력 및 고정밀 DC 전원 설계 및 제작
- High Energy Surge Blocker 설계 및 제작
- NBI Beam Line Component (Scrapper, Neutralizer, Bending magnet, Ion dump, 냉각수 공급계통, 기체 주입계통 등) 설계 및 제작
- EPICS based VME control Data Acquisition System 구성
- OMA, IR Camera, Calorimeter 등을 사용한 Beam Diagnostic System 구성 및 해석
- Cyro Pumping System (4 K quilted panel) 설계 및 제작
- 중성빔 Transport 해석

ICRH/FWCD 장치

- 고출력밀도 ($> 1\text{kW}/\text{cm}^2$), 장펄스(300초 이상) 운전용 고주파 안테나 설계 및 제작
- 고주파 송출계(수백 kW급) 설계,제작,운영 기술
- 고출력, 고주파 전송부품 설계,제작 기술
- 고출력, 고주파부품 RF시험 기술
- 고주파 절연체 개발
- ICRF파의 플라즈마내 전파 및 흡수과정 해석기술

라. 발생품 및 시작품 내역

□ NBI 장치

1) 장치 설계도

- System 공학 설계도
- 각 빔라인 부품 상세 설계도

2) 확보된 Hardware

- Prototype 이온원 (120 kV, 65 A)
- 이온원 전원
 - 필라멘트 전원 : 15 V, 3200 A, CW
 - Arc 전원 : 150 V, 1200 A, CW
 - 감속전원 : -5 kV, 20 A, CW
 - 가속전원 : 120 kV, 70 A, 320 s
- 빔라인 부품
 - NBI 주진공함 : $3 \times 4 \times 5 \text{ m}^3$, 5×10^{-7} torr
 - Calorimeter : 3 MW CW cooling
 - Cryosorption Pumping System : 400,000 l/s
 - Ion Dump : E, E/2, E/3 ion dump
 - 전자석 : max. 40 kAT
 - 중성화장치 : 165mm \times 500mm \times 125mm cell
 - Turbo Pumping System : 5000 l/s
- 진단 및 장치제어계
 - OMA System : 중성빔 divergence 측정
 - IR Camera System : 270 \times 320 pixel (1500° C)
 - Gas flow control system
 - VME-Epics Based DAS&control system
 - Workstation/RT : Sun/VX works

3) 특성시험시설 확보

- 건물 : 18 m Hall (240 평)
- 전력시설 : 10 MVA (22.9 kV)
- 접지 : 1종 (1 Ω 이하), 접지면적 약 1,000 m²
- 냉각시설 : 3 MW CW
- 기타 : 압축공기

□ RF 장치

1) 장치 설계도

- System 공학 설계도
- 안테나 및 전송부품 상세 설계도

2) 확보된 Hardware

- 고주파 안테나 개발
 - Prototype 안테나 : 고출력밀도($> 1 \text{ kW/cm}^2$), 300초 동작, 25-60 MHz
 - 안테나 Test Chamber : KSTAR RF Port 채용, 진공도 $< 10^{-7}$ torr
- 고주파 발생장치
 - 100 kW 송출계 : 주파수 30 MHz
 - 300 kW Final Cavity : 주파수 27-55 MHz
 - 30 kW Driver : 주파수 27-55 MHz
- 고주파 부품
 - Vacuum Feedthrough : 1MW, 300 초, 내전압 $> 30 \text{ kV}$
 - Phase Shifter/Stub : 내전압 $> 40 \text{ kV}$
 - 수냉각 전송선 : 내전압 $> 35 \text{ kV}$, 300 초
- 고주파 부품 시험 장치
 - H.V. POT : 9" 동축관, 5분 이상 30 kV 이상 시험가능.
 - 저출력 시험장치 : 4 X 1W source,
 - 9" 시험시설 : Phase shifter, Stub, Directional coupler, Voltage probes
 - VXI/PXI DAS system

3) 특성시험시설 확보

- 건물 : 18 m Hall (240 평)
- 전력시설 : 10 MVA (22.9 kV)
- 접지 : 1종 (1Ω 이하), 접지면적 약 $1,000 \text{ m}^2$
- 냉각시설 : 3 MW CW
- 기타 : 압축공기

바. 논문게재 및 발표 실적

□ NBI 장치

○ 논문게재 실적 (필요시 별지사용)

학술지 명칭	제목	게재연월일	호	발행기관	국명	SCI 게재 여부
J. Accel. Plasma Res.	Characteristics of the electron-energy distribution functions in a weakly magnetized hollow cathode plasma source	1998년 12월	3권, 3호	한국가속기 및 플라즈마 연구협회	대한민 국	×
J. Korean Vac. Soc.	KSTAR 중성빔 입사(NBI) 장치 배기계통 설계	1999년 12월	8권, 4(2)호	한국진공학회	대한민 국	×
Rev. Sci. Instrum.	Discharge characteristics of a long pulse ion source for the KSTAR NB system	2000년 2월	71권, 2호	Americn Institute of Phys.	미국	○
Sae Mulli (The Korean Phys. Soc.)	원형 인출구를 갖는 대전류 이온원 가속부 설계	2001년 5월	42권, 5호	한국물리학회	대한민 국	×
Sae Mulli (The Korean Phys. Soc.)	대전류 이온원의원형 인출구 냉각회로 제작 및 시험	2001년. 8월	43권 2호	한국물리학회	대한민 국	×
J. Accel. Plasma Res.	Test Facility for KSTAR NBI System	2001년 12월	6권, 1호	한국가속기 및 플라즈마 연구협회	대한민 국	×
계: 총 6 건						

○ 학술회의 발표 실적 (필요시 별지사용)

학술회의 명칭	제목	게재연월일	호	발행기관	국명
한국진공학회 제16회 학술발표회	KSTAR 중성빔 입사장치 배기계통 설계	1999년 2월		한국진공학회	대한민국
한국물리학회 '99 춘계학술포럼	KSTAR 중성빔 입사장치 이온원의 방전특성	1999년 4월	17권, 1호	한국물리학회	대한민국
한국진공학회 제17회 학술발표회	KSTAR NBI 진공용기와 Grid의 열 및 구조해석	1999년 7월		한국진공학회	대한민국
한국진공학회 제17회 학술발표회	KSTAR 중성입자빔 수송라인 해석	1999년 7월		한국진공학회	대한민국
한국진공학회 제17회 학술발표회	Cold Cathode 및 Pirani Gauge Tube의 제작 및 특성 조사	1999년 7월		한국진공학회	대한민국
한국진공학회 제17회 학술발표회	수소 배기용 저온 흡착펌프의 열설계	1999년 7월		한국진공학회	대한민국
'99 8th International Conference of Ion Sources	Discharge Characteristics of the Long Pulse Ion Source for KSTAR NB System	1999년 9월			미국
International Toki Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion	Design of the KSTAR NBI System for Long-Pulse Operation	2000년 1월			일본
International Toki Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion	Fabrication and Test of an Engineering Model Cryo-Sorption Pump of KAERI Test Stand for KSTAR NBI	2000년 1월			일본
한국진공학회 제18회 학술발표회	Design concept of the cryopumping system for the KSTAR NBI	2000년 2월		한국진공학회	대한민국
한국물리학회 '00 춘계학술포럼	KSTAR NBI Test Stand-용 3MW 열량계 설계	2000년 4월	18권, 1호	한국물리학회	대한민국

학술회의 명칭	제목	계제연월일	호	발행기관	국명
한국원자력학회 '00 춘계 학술발표회	원형 인출구를 갖는 대전류 이온원 가속부의 설계	2000년 5월		한국원자력학회	대한민국
한국원자력학회 '00 춘계 학술발표회	KSTAR 중성빔 입사장치 이온원의 H ₂ 와 D ₂ 에 따른 방전특성	2000년 5월		한국원자력학회	대한민국
한국원자력학회 '00 춘계 학술발표회	KSTAR NBI 장치 제어 및 데이터 처리 시스템 설계	2000년 5월		한국원자력학회	대한민국
2000 KAPRA & KPS/DPP Joint Workshop	KSTAR NBI 빔 전자석의 빔광학 설계	2000년 7월		KAPRA & KPS/DPP	대한민국
2000 KAPRA & KPS/DPP Joint Workshop	KSTAR NBI 장치 이온원의 원형 인출구 가속부 설계	2000년 7월		KAPRA & KPS/DPP	대한민국
2000 KAPRA & KPS/DPP Joint Workshop	KSTAR NBI장치의 제어 및 DAS 시스템 제작을 위한 기본 시스템 연구	2000년 7월		KAPRA & KPS/DPP	대한민국
한국물리학회 '00 추 계학술발표회	Characterization on Prototype Ion Source for the NBI Heating of KSTAR Tokamak	2000년 10월	18권, 2호	한국물리학회	대한민국
한국진공학회 제20회 학술발표회	KSTAR NBI 저온 흡착펌프의 설계 및 제작	2001년 2월		한국진공학회	대한민국
한국물리학회 '01 춘 계학술발표회	KSTAR NBI 장치 Test Stand	2001년 4월	19권, 1호	한국물리학회	대한민국
한국물리학회 '01 춘 계학술발표회	PDP-code를 이용한 KSTAR NBI 빔라인 구성	2001년 4월	19권, 1호	한국물리학회	대한민국
한국물리학회 '01 춘 계학술발표회	MFTF-B 단펄스 이온원의 방전 특성	2001년 4월	19권, 1호	한국물리학회	대한민국
한국물리학회 '01 춘 계학술발표회	4개의 전극구조를 갖는 대전류 이온원 가속부의 제작 및 조립시의 문제점 고찰	2001년 4월	19권, 1호	한국물리학회	대한민국
한국원자력학회 '01 춘계 학술발표회	KSTAR NBI 이온원의 필라멘트 가열조건에 따른 방전 특성	2001년 5월		한국원자력학회	대한민국
한국원자력학회 '01 춘계 학술발표회	KSTAR NBI Test Stand를 위한 저온 흡착패널의 설계와 제작	2001년 5월		한국원자력학회	대한민국

학술회의 명칭	제목	계재연월일	호	발행기관	국명
한국원자력학회 '01 춘계 학술발표회	Test of the Cooling Circuits of the Circular Aperture Grids	2001년 5월		한국원자력학 회	대한민국
2001 KAPRA & KPS/DPP Joint Workshop	Beam Transport with Re-ionization Code (BTR) for KSTAR NBI System	2001년 7월		KAPRA & KPS/DPP	대한민국
한국물리학회 '01 추 계학술발표회	Test and Conditioning of an MFTF-B Short Pulse Ion Source	2001년 10월	19권, 2호	한국물리학회	대한민국
한국원자력학회 '01 추계 학술발표회	Discharge Characteristics of an MFTF-B Short Pulse Ion Source	2001년 10월		한국원자력학 회	대한민국
한국원자력학회 '01 추계 학술발표회	Development of Neutral Beam Injection System for KSTAR Tokamak	2001년 10월		한국원자력학 회	대한민국
2nd Intl. Symp. on Pulsed Power and Plasma Applications	Status of Neutral Beam Injection System Development for KSTAR Tokamak	2001년 월			대한민국
'01 9th International Conference of Ion Sources	Status of Ion Source Development for KSTAR Neutral Beam System	2001년 9월			미국
한국물리학회 '02 춘 계학술발표회	KSTAR 토카막 중성빔 입사 장치의 개발 현황	2002년 4월	20권, 1호	한국물리학회	대한민국
한국물리학회 '02 춘 계학술발표회	4개의 전극구조를 갖는 대전 류 이온원 가속부의 진공 및 고전압 특성	2002년 4월	20권, 1호	한국물리학회	대한민국
한국물리학회 '02 춘 계학술발표회	MFTF-B 단펄스 이온원의 초 기 빔 인출 특성	2002년 4월	20권, 1호	한국물리학회	대한민국
'02 IAEA TCM Meeting	Development of an Acceleration Power Supply for the KSTAR NBI System	2002년 5월			독일
계: 36 건					

□ ICRH/FWCD 장치

○ 논문게재 실적 (필요시 별지사용)

학술지 명칭	제목	게재연월일	호	발행기관	국명	SCI 게재 여부
Proc. of the 20th Symposium on Fusion Technology	Design characteristics of the ion cyclotron system for the KSTAR tokamak	1998년	1권	SOFT	프랑스	×
Fusion Technology	Magneto-hydrodynamics stability analysis of the KT-2 tokamak plasma	1999년	35권	ANS	미국	○
AIP Conference Proceedings	Electron heating and current drive scenarios using fast waves and ion Bernstein waves on KSTAR	1999년	485권	AIP	미국	×
Fusion Eng. and Des	Fast sweep of current phases in ICH antenna straps	1999년	45권	Elsevier	네덜란드	○
Current Applied Phys.	Calculation of transport parameters in KT-1 tokamak edge plasma	2001년	1권	Elsevier	네덜란드	×
AIP Conference Proceedings	Development of KSTAR ICRF System for Long Pulse Operation	2001년	595권	AIP	미국	×
AIP Conference Proceedings	Performance Test of the Transmission Components for KSTAR ICH System	2001년	595권	AIP	미국	×
Fusion Eng. and Des.	Fabrication of Prototype ICRF Antenna for KSTAR and First RF Test	2002년	Accepted	Elsevier	네덜란드	○
응용물리	KSTAR ICH 안테나의 설계와 전기적 특성 분석	1998년	11권	한국물리학회	대한민국	×
J. Korean Phys. Soc.	Simulations of ICRF Fast wave Heating and Current Drive on KSTAR plasma	1998년	32권	한국물리학회	대한민국	○

학술지 명칭	제목	게재연월일	호	발행기관	국명	SCI 게재 여부
J. Korean Phys. Soc.	Self-consistent evaluation of characteristics of operation modes in KSTAR tokamak	2000년	36권	한국물리학회	대한민국	○
Sae Mulli	ICH 안테나의 공학설계 및 Proto-type의 제작	2000년	40권	한국물리학회	대한민국	×
Journal of Accelerator and Plasma Research	Poloidal isoflux during the transients of KT-1 tokamak	2000년 4월		KAPRA	대한민국	×
한국원자력학회 지	Development of Liquid Stub and Phase Shifter, Journal of the Korean Nuclear Society	2001년	33권	한국원자력학회	대한민국	×
한국원자력학회 지	Development and high Power RF Test of Vacuum Feedthrough for KSTAR ICRF Antenna	2002년	34권	한국원자력학회	대한민국	×
계: 15건						

○ 학술회의 발표 실적 (필요시 별지사용) : 35건

학술회의 명칭	제목	개재연월일	호	발행기관	국명
10th International Toki conference	KSTAR ICRF system for long pulse operation	Jan. 17 - 21, 2000.			일본
17th IAEA Fusion Energy Conference	KSTAR HEATING TEAM, Development of Long Pulse Heating and Current Drive Systems for the KSTAR Tokamak	4-10 October, 2000		IAEA	Italy
1998년도 추계 물리학회	KSTAR 이온공명가열(ICH) 및 전류구동(FWCD)용 안테나의 설계와 전기적 특성 분석	1998. 10.		한국물리학회	한국
1998년도 추계 물리학회	100kW 고주파 증폭기의 제작과 KT-1 토카막에서의 ICRH 실험	1998. 10.		한국물리학회	한국
1998년도 추계 물리학회	Design of the Ion Cyclotron System for the KSTAR Tokamak	1998. 10.		한국물리학회	한국
1998년도 추계 물리학회	The Discharge Simulations for the Advanced Operation Modes on the KSTAR Tokamak	1998. 10.		한국물리학회	한국
1998년 추계 원자력학회	The Simulational Study on the KSTAR Operation Modes,	1998. 10.		한국원자력학회	한국
1999년 춘계 원자력학회	Evaluation of the Diamagnetic Energy in JFT-2M Tokamak Compensation of the Poloidal Field Effects on the Diamagnetic Loop	1999. 5.		한국원자력학회	한국
1999년 춘계 물리학회	High Power용 Liquid stub tuner 제작	1999. 4.		한국물리학회	한국
1999년 춘계 물리학회	KSTAR ICH 안테나의 공학설계	1999. 4.		한국물리학회	한국
1999년도 춘계 물리학회	KSTAR ICH Mock-up 안테나의 전기적 특성	1999. 4.		한국물리학회	한국
1999년 추계 물리학회	KSTAR 토카막 이온공명 가열 장치의 개발(I)	1999. 10.		한국물리학회	한국
1999년 추계 물리학회	Engineering Design and Fabrication of ICH Antenna for KSTAR tokamak	1999. 10.		한국물리학회	한국
1999년 추계 물리학회	KSTAR 토카막 이온공명 가열 장치의 유체 단락 전송선 동조기의 개발	1999. 10.		한국물리학회	한국
1999년도 추계 물리학회	KSTAR 토카막 이온공명 가열 장치의 유체 위상 변환기의 개발	1999. 10.		한국물리학회	한국

학술회의 명칭	제목	개제연월일	호	발행기관	국명
1999년도 추계 물리학회	100 kW 고주파 송출기의 성능 개선 및 시험	1999. 10.		한국물리학회	한국
2000년도 춘계 물리학회	KSTAR ICRF 가열장치의 전송특성 연구를 위한 저출력 제어시스템 개발	2000, 5		한국물리학회	한국
2000년도 춘계 물리학회	고전력 장펄스의 ICH 안테나 개발, 한국원자력학회	2000, 5		한국물리학회	한국
2000 추계 한국원자력학회	Development of Liquid Stub and Phase Shifter	2000, 5		한국원자력학회	한국
2000년도 추계 물리학회	KSTAR 가열 및 전류구동장치 개발	2000. 10.		한국물리학회	한국
2000 추계 한국원자력학회	Development of ICRF System Components for KSTAR Tokamak	2000. 10.		한국원자력학회	한국
제 77회 춘계 물리학회	100kW 고주파 송출기의 연속운전 및 동작 시험	2001. 4.		한국물리학회	한국
한국원자력학회	Design of the high voltage test bed for the KSTAR ICH components	2001. 5.		한국원자력학회	한국
KAPRA & KPS/DPP Joint Workshop	Development of High Power RF Transmission Line Component for KSTAR Tokamak, KAPRA & KPS/DPP Joint Workshop, 2001. 7.	2001. 7.		KAPRA	한국
KAPRA & KPS/DPP Joint Workshop	Status of the KSTAR Heating and Current Drive Systems Development	2001. 7.		KAPRA	한국
2001년도 추계 물리학회	RF Test of Prototype ICRF Antenna for KSTAR	2001. 10.		한국물리학회	한국
2001년도 추계 물리학회	High Power RF Test of Vacuum Freedthrough for KSTAR ICRF Antenna	2001. 10.		한국물리학회	한국
2001년도 추계 물리학회	Calorimetric measurements of dielectric loss for the sintered alumina in high power fusion applications	2001. 10.		한국물리학회	한국
2001년도 추계 물리학회	Water-cooled RF Coaxial Transmission Line for ICRF	2001. 10.		한국물리학회	한국
2001 DPP meeting of American Physical Society	Physical Aspects of KSTAR ICRF System for Advanced Tokamak Operation	2001. 10		미국물리학회	미국

학술회의 명칭	제목	게재연월일	호	발행기관	국명
2nd Intl. Symp. on Pulsed Power and Plasma Applications	Status of Neutral Beam Injection System Development for KSTAR Tokamak	2001. 10.			한국
한국원자력학회 추계학술대회	Development of ICRF System Components for KSTAR Tokamak	2001. 10.		한국원자력학회	한국
2002 춘계 한국물리학회	300 kW 고주파 송출기의 설계 및 제작	2002. 4.		한국물리학회	한국
2002 춘계 한국물리학회	수냉식 고주파 전송선 개발(II)	2002. 4.		한국물리학회	한국
3rd IAEA TC Meeting on Steady-State Operation on Magnetic Fusion Device	Development of KSTAR ICRF Antenna for Long Pulse Operation	2002. 5.		IAEA	독일, 프랑스
계: 36 건					

□ LHCD/ECH 장치

○ 논문게재 실적(필요시 별지사용)

학술지 명칭	제목	게재연월일	호	발행기관	국명	SCI게재 여부
Fusion Technology	Heating and Current Drive Requirements and System Design for the	1999년 12월	34			○
Fusion Eng. and Design	The design of the KSTAR tokamak	1999년 12월	46	North-Holland	Netherland	○
Nuclear Fusion	The KSTAR Project: Advanced Steady-state Superconducting Tokamak Experiment	2000년 3월	40	IAEA	스위스	○
JAPR	On preionization in KSTAR	2000년 4월	5	한국 가속기 및 플라즈마 협회 (KAPRA)	Korea	
JAPR	Second Harmonic ECH Preionization for KSTAR	2001년 12월	6	한국 가속기 및 플라즈마 협회 (KAPRA)	Korea	
JAPR	Design of 5.0-GHz KSTAR Lower-Hybrid Launcher	2001년 12월	6	한국 가속기 및 플라즈마 협회 (KAPRA)	Korea	
JAPR	Simulation on 5.0-GHZ KSTAR Lower Hybrid Current Drive	2001년 12월	6	한국 가속기 및 플라즈마 협회 (KAPRA)	Korea	
JAPR	Status of the KSTAR Heating and Current Drive Systems	2001년 12월	6	한국 가속기 및 플라즈마 협회 (KAPRA)	Korea	
Nuclear Fusion	Design and construction of the KSTAR tokamak	2001년 10월	41	IAEA	스위스	
계: 건수	9					

○ 학술회의 발표 실적(필요시 별지사용)

학술회의 명칭	제목	개재연월일	호	발행기관	국명
한국물리학회	Basic design of the Electron Cyclotron Heating System for KSTAR	1998년 10월	16-2	한국물리학회	한국
한국물리학회	ECR Plasma Generation and Ion Beam Extraction for Proton Linear Accelerator	1998년 10월	16-2	한국물리학회	한국
한국물리학회	Basic design of the Lower Hybrid Current Drive System for KSTAR	1998년 10월	16-2	한국물리학회	한국
APFA/ APPTC99	Current Status of Microwave Heating and Current Drive System for KSTAR-tokamak	1999년 7월			
APFA/ APPTC99	On Preionization in KSTAR	1999년 7월			
한국물리학회	Preionization Modeling in KSTAR Tokamak	1999년 10월	17-2	한국물리학회	한국
한국물리학회	Loss Analysis of ECH Transmission Line System for KSTAR	1999년 10월	17-2	한국물리학회	한국
한국물리학회	On RF Frequency of LHCD System for KSTAR	2000년 4월	18-1	한국물리학회	한국
한국물리학회	Impurity Effects on ECH Preionization for KSTAR	2000년 4월	18-1	한국물리학회	한국
KAPRA & KPS/DPP Joint Workshop	Impurity Effects on Preionization for KSTAR	2000년 7월			
8 th APPC	On Microwave Heating to KSTAR-tokamak	2000년 8월			대만
한국물리학회	Advanced ECH pre-ionization model for KSTAR	2000년 10월	18-2	한국물리학회	한국
한국물리학회	Accessibilities for Lower-hybrid Wave Propagation	2000년 10월	18-2	한국물리학회	한국
한국물리학회	Heating Rates for Electron Cyclotron Resonance	2000년 10월	18-2	한국물리학회	한국

학술회의 명칭	제목	계재연월일	호	발행기관	국명
18th IAEA	Development of Long Pulse Heating and Current Drive Systems for the KSTAR Tokamak	2000년 10월			이태리
18th IAEA	Design and Construction of the KSATR Tokamak	2000년 10월			이태리
한국물리학회	Launcher Design for KSTAR Lower-Hybrid Current Drive System	2001년 4월	19-1	한국물리학회	한국
한국물리학회	Higher Harmonic Heating Rates of Electron Cyclotron Resonance for KSTAR Tokamak	2001년 4월	19-1	한국물리학회	한국
한국물리학회	Error-field Effects on ECH Preionization for KSTAR	2001년 4월	19-1	한국물리학회	한국
KAPRA & KPS Joint Workshop	Second Harmonic ECH Preionization for KSTAR	2001년 7월		한국 가속기 및 플라즈마 협회(KAPRA)	한국
KAPRA & KPS Joint Workshop	Design of 5.0-GHz KSTAR Lower-Hybrid Launcher	2001년 7월		한국 가속기 및 플라즈마 협회(KAPRA)	한국
KAPRA & KPS Joint Workshop	Simulation on 5.0-GHZ KSTAR Lower Hybrid Current Drive	2001년 7월		한국 가속기 및 플라즈마 협회(KAPRA)	한국
KAPRA & KPS Joint Workshop	Status of the KSTAR Heating and Current Drive Systems Development	2001년 7월		한국 가속기 및 플라즈마 협회(KAPRA)	한국
한국물리학회	Beam Trajectories in Diode-type Gyrotrons for KSTAR ECH System	2001년 10월	19-2	한국물리학회	한국
한국물리학회	Investigation of Test Wire for Crowbar Switch Test of KSTAR ECH Gyrotron Power-Supply	2001년 10월	19-2	한국물리학회	한국
한국물리학회	Current Density Profiles for KSTAR LHCD	2001년 10월	19-2	한국물리학회	한국

학술회의 명칭	제목	개재연월일	호	발행기관	국명
한국물리학회	Second Harmonic ECH preionization with 7 pairs PF coil scenario for KSTAR	2001년 10월	19-2	한국물리학회	한국
US-Japan RF Workshop	Status of KSTAR Heating and Current Drive System Development	2002년 3월			일본
한국물리학회	New Design of Water Load for KSTAR 5.0 GHz LHCD Coupler	2002년 4월	20-1	한국물리학회	한국
한국물리학회	A Crowbar System for the Protection of 500 kW, 84 GHz Gyrotron Tube for KSTAR ECH System	2002년 4월	20-1	한국물리학회	한국
한국물리학회	Study on the KSTAR 84 GHz second harmonic ECH preionization	2002년 4월	20-1	한국물리학회	한국
계: 건수	31				

3. 연구성과

가열장치에는 첨단기술에 의해서만 가능한 부품들이 많기 때문에 국내의 기업들을 2단계 초기부터 장치개발 및 제작에 참여시켜 관련 부품제작 기술들을 공동으로 연구, 개발하고 기술이 이전되도록 하였다. 연구에 참여한 인력들이 각 분야에서 습득한 기술들을 적용함으로써 효과적인 기술 파급효과를 얻을 수 있었고 더 나아가 이 분야의 해외시장 진출도 가능할 것이다.

□ NBI 장치

- 대용량 이온원 : 120 kV, 65 A 급의 대전류 이온원을 국내 기술에 의해 개발하여 현재 성능시험을 진행하고 있으며, 이 기술을 이용하면 대전류 빔조사 장치와 대용량 스퍼터링 및 빔 Mixing 장치로 활용이 가능하다. 이러한 장치들은 현재 낮은 전류의 이온빔 처리시설을 이용하여 반도체, 금속/세라믹, 폴리머 분야 등에 일부 적용이 되고 있으므로, 향후 이 분야에 대전류 이온원 기술을 이전시키면 양산기술을 촉진할 수 있을 것이다.
- 아크 및 플라즈마 전원 : 이 전원들은 저압 직류방전에 의한 플라즈마 이용기기 (예를 들면, 코팅장치, 플라즈마 질화장치 등)에서 안정적인 대용량 플라즈마를 얻는데 매우 효과적이므로, 이들 분야에서의 많은 활용이 예상되며, 제작 참여기업과 공동으로 개발이 완료되어 필요로 하는 연구나 산업용 전원으로 직접활용이 가능한 기술이다.
- 대용량 고전압 직류 전원 : 참여기업체와 공동으로 개발을 완료한 대용량의 고정밀 고전압 직류 (120 kV, 70 A 급)전원 기술은 향후 국내의 고전압 직류전원을 필요로 하는 연구용 가속기나 산업용 대형 설비의 전원으로 활용이 가능한 기술로 현재 성능시험을 진행 중에 있다. 성능이 검증되면 같은 성능에서 가격은 매우 경제적인 전원이 되어 외국 제품과도 경쟁이 충분히 가능하다.
- 대용량 Cryo-pump 및 진공계통 : 대용량의 Cryo-pump는 국내의 기술로써 충분히 제작이 가능함 확인한 상태이며, 기업체나 기관에서 기술이전을 원하는 경우에는 충분한 협의를 거친 후, 즉시 기술이전이 가능한 상태이다. 이 기술은 대용량 이온빔 조사 장치, 대용량 플라즈마 처리장치, 항공우주 모사시험 장치 등 향후 초대용량 고 진공계가 요구되는 산업분야에서 효과적으로 활용될 것이다.
- 대용량 진공용기 : 순수 국내기술로 이루어진 대용량 진공함(3m×4m×5m) 제작기술은 대용량 진공용기를 필요로 하는 연구(입자 가속기 등)와 관련산업에 즉시 적용할 수 있을 뿐만 아니라, 제작을 위한 설비 및 대 체적의 진공용기 세정기술 등을 포함하는 기술들은 제작업체에서 확보가 완료되어 즉시 제품에의 적용 및 상품화가 가능하다.
- Hypervapotron 및 Swirl Tube 기술 : 대용량 진공관, 대용량 이온원의 덤프 등으로 활용될 수 있고, 제작과정의 기술로 개발된 전자빔 용접 및 Brazing 기술은 정밀기계 부품제작 등 많은 정밀기계 가공분야에 활용될 것이다.

□ ICRH/FWCD 장치

- 고출력, 고주파 안테나 설계, 제작 및 시험 : 세계적으로 처음 시도하는 300초 이상의 장 펄스 운전을 위해 새로운 설계개념과 신기술들을 적용하여 초 고출력밀도(10 MW/m^2)와 운전중 가열 및 전류구동효율 조절능력을 갖는 고주파 안테나를 개발하였다. 국내 기술이 취약함을 고려하여, prototype 안테나의 제작을 국내업체에서 선정하여 관련 기술이 축적되도록 하였고, 성능시험을 바탕으로 한 Prototype 안테나의 설계 개선과 upgrade 과정에도 참여하여, 습득한 기술을 바탕으로 본 제품의 개발.제작을 국내 산업체에서 충분히 수행할 수 있도록 하였다.
- 고출력 RF파 발생장치 개발 : 2 MW급 RF파 발생장치는 국외에서는 장치기술이 완전히 상업화되어 있지만 국내에서는 제작경험과 기술 수준이 전무한 실정이다. 2단계 사업기간 동안, 100 kW 송출계의 설계, 제작 및 운영을 통해 국내의 기술확보에 노력을 하였고, 300 kW 송출계의 제작에 있어서 Anode 전원을 국내 업체에서 제작하여, 관련 기술이 이전되고 축적되도록 하였다. 고출력 RF파 발생장치의 제작과 운영경험을 축적하여 2 MW 송출계의 개발.운영을 대비하여, 자체 개발.운영 능력을 확보하고자 하였고, 국내산업이 부분적으로 참여 가능하도록 하였다.
- MW급 고출력 고주파 부품 개발 : 세계적으로 처음으로 300초 이상의 장 펄스 운전이 가능하도록 개발되었다. MW급 고출력 고주파 전송을 위한, Vacuum feedthrough, 임피던스 정합장치, 수냉식 전송선 등은 국내 기술로 개발하였고, 해당 기업으로 관련 기술이 이전되었다. 특히, MW급 고출력 고주파 전송을 위해, 기존방식(기계적인 접점 방식)과는 다른, 유체를 조절하여 전자파의 위상을 조절하는 위상가변기와 단락 전송선 동조기를 개발한 바 있고, '98 원자력성과이전사업으로, 임피던스 정합장치(위상가변기, 단락전송선 동조기)의 제작기술을 (주)한국전자진흥에 이전한 바 있다.

□ LHCD/ECH 장치

- LHCD 시스템의 사용 주파수는 5.0 GHz로 변경하여 상세설계가 진행중이며, Launcher의 기본 설계는 현재 완료되어 공학설계를 PPPL과 공동으로 추진중에 있다.
- ECH 시스템의 Gyrotron tube는 미국 CPI사에서 제작이 완료되어 현재 참여기업인 (주)포스콘에 설치하여 공동으로 성능시험중에 있다. Gyrotron tube 최대에너지 운전용 고전압 전원장치는 제작이 완료되어 종합시험단계에 있고, Gyrotron tube 성능시험을 위해 고전압 Pulse Modulator를 제작하였다. ECH 전송시스템의 상세설계는 완성하였고, 부품제작은 미국 General Atomics사에서 현재 이루어지고 있다. ECH antenna 시스템은 PPPL과 공동제작으로 추진중에 있다.

4. 기술이전 및 연구결과 활용계획

가. 당해연도 활용계획

2 단계 사업의 연구결과는 당해연도에 후속사업에 직접 활용하여, 각 가열장치의 제작.시험 및 건조를 추진할 예정이다.

□ NBI 장치

- 현재 이온원, 빔라인 부품, 전원들의 성능검증 및 Upgrade 단계에 있지만 부품 개발과정에서 습득한 기술 및 경험들이 성능검증과 관계없이 바로 이용될 수 있는 다음과 같은 분야들은 기술 활용을 위한 기술이전작업을 진행한다.
- 대전류 이온원 제작기술 : 이온원 제작과 관련한 냉각회로 제작기술, 버켓 제작기술, 가속부 제작기술 등은 산업용 대전류 이온원의 제작에 직접 응용이 가능하므로 국내의 관련 기업체의 요구가 있을 경우 원하는 업체와 협력하여 대전류 산업용 이온원의 기술이전을 추진하고, 필요한 생산체제를 갖추도록 추진할 계획이다.
- 아크 및 플라즈마 전원 : 한국원자력연구소와 과제참여 기업체인 (주)POSCON이 개발을 완료한 본 전원들은 저압 직류방전에 의한 플라즈마 이용기기 (예를 들면, 코팅장치, 플라즈마 질화장치 등)에 활용하는 방안을 모색중이다.
- 대용량 Cryo-pump 및 진공계통 : 한국원자력연구소에서 설계한 대용량의 Cryo-pump는 국내의 기술로써 충분히 제작이 가능함 확인한 상태이므로, 관련 기업체 기관과 기술이전에 관한 충분한 협의를 거친 후, 즉시 기술이전 할 수 있도록 준비를 한다.
- 대용량 진공용기 : 한국원자력연구소가 설계하고 과제 참여업체인 (주)원신코퍼레이션에서 제작한 대용량 진공용기는 이를 필요로 하는 연구(입자 가속기 등)와 관련산업에 즉시 적용할 수 있도록 준비하며, 제작을 위한 설비 및 대 체적의 진공용기 세정기술 등을 포함하는 기술들은 제작업체에서 확보가 완료되었으므로, 즉시 제품에의 적용 및 상품화를 추진한다.

□ ICRH/FWCD 장치

- 2단계 사업에 이어 3단계 사업에서는 고출력, 고주파 안테나를 개발하고, 송출계, 전송계 및 제어계의 제작에 착수하여 2007년까지 KSTAR RF 장치를 완성하여 토카막의 가열 및 전류구동 실험에 활용할 것이다.
- 2단계 사업에서 개발한 Prototype 안테나의 성능검증을 통하여 본제품 안테나의 설계, 제작에 반영한다.
- 2단계 사업을 통하여 완성한 100 kW, 300 kW 송출계를 이용하여 고출력 RF 부품들의 성능 등을 검증하여 상세설계에 반영한다. 1, 2단계에서 확보된 RF 시험시설의 지속적인 운영을 통해 시험 및 운영기술을 확보하도록 한다.
- 6 MW 송출계는 100 kW, 300 kW 송출계 제작경험을 활용하여 사양을 결정하고, 제작을 추진한다.
- 고주파 플라즈마 기술, 고출력 고주파 기술들은 반도체 가공, 금속표면 가공, 환경, 우

주선 추진, 의료용 장비, 방송, 국방 등의 분야에 기술 파급 효과도 크기 때문에 산업현장 적용이 가능한 기술분야는 국내기업으로의 연구성과를 이전하여 관련 기술의 산업적 spin-off에 노력한다.

나. 활용방법

- 2단계 사업에 이어 당해연도에 후속사업에 직접 활용하여, 각 가열장치의 제작.시험 및 건조를 추진할 예정이다.
- 국내 산업체와의 협동 연구개발에 의해 기술적인 고 난이도가 요구되는 대형 핵융합 가열장치 관련 많은 부품의 설계, 제작 및 시험 기술들이 축적되었으며, 이들 기술들은 핵융합 분야뿐만 아니라 다른 산업으로의 기술 파급 효과도 크기 때문에, 산업현장 적용이 가능한 기술분야는 참여기업 중심으로 연구성과를 이전하여 관련 기술의 산업적 스핀오프에 최대한으로 활용할 것이다
- 개발된 기술들은 원하는 업체가 있다면 관련 산업체에서 직접 이용할 수 있도록 기술이전을 하는 것을 원칙으로 하지만 현재 연구팀에서는 개발된 이온원, 빔라인 부품, 전원들의 성능검증 및 Upgrade가 추진되고 있는 중이어서 기술 개발을 주관한 연구팀이 활용방법을 주도하기는 역부족이다.
- 따라서 기술 이전 가능성이 있는 기술들을 한국원자력연구소의 산학 협동부서를 통하여 관련 중소기업들에게 홍보하고, 기술이전을 희망하는 업체들이 나타나면 이에 대응하여 관련 기술들을 적극적으로 이전해 나가는 것을 원칙으로 한다.
- 이후에 성능 검증과 Upgrade가 완료되면 Upgrade를 추진하는 과정에서 만들어진 더 많은 Knowhow가 포함된 기술들을 대상으로 적극적으로 활용부분을 찾아 나갈 것이다.

다. 차년도이후 활용계획

- 2단계 사업의 연구결과는 3단계 사업에도 계속하여 각 가열장치의 제작.시험 및 건조에 활용될 것이다.
- 이들은 완성시 KSTAR 토카막의 가열장치들로 직접 사용될 것이고, 핵융합 실증로 (ITER)와 핵융합 발전로의 가열장치들로도 사용이 가능하다.

□ NBI 장치

- 현재 개발된 이온원, 빔라인 부품, 전원들의 성능검증 및 Upgrade가 완료되면 세계수준의 NBI장치 관련 많은 기술들을 확보할 수 있을 것이며, 이들 기술을 중심으로 2006년까지 KSTAR NBI 장치를 완성하여 토카막의 가열 및 전류구동 실험에 활용할 것이다.
- KSTAR 토카막의 두 번째 빔라인은 첫 번째 빔라인을 제작하면서 축적한 기술들을 모두 기업체 이전하여 기업체 주도로 설계·제작하게 하고, 외국 시장에도 진출하여 외국에서 요구하는 NBI 장치 전체 또는 일부를 맡아서 제작할 수 있도록 한다.
- 개발된 대전류 이온원의 제작 및 운전 기술을 국내의 관련 기업체에 이전하여 특성화된 이온원

생산체제를 갖추도록 추진하여, NBI 장치용 이온원 뿐만 아니라 상업용 이온원도 주문 제작 할 수 있도록 한다.

- 한국원자력연구소와 과제참여 기업체인 (주)POSCON이 공동 개발한 대용량 고전압 직류 전원 (120 kV, 70 A 급)은 고성능이면서도 경제적인 비용으로 제작할 수 있도록 특수한 방법을 사용하여 제작하였기 때문에 고전압 직류전원을 필요로 하는 국내의 연구과제 또는 산업체뿐만 아니라 외국의 연구소 또는 업체들을 대상으로 하는 상품을 개발하여 판매할 수 있게 될 것이다.

□ ICRH/FWCD 장치

- 2단계 사업에 이어 3단계 사업에서는 고출력, 고주파 안테나를 개발하고, 송출계, 전송계 및 제어계의 제작에 착수하여 2007년까지 KSTAR RF 장치를 완성하여 토카막의 가열 및 전류구동 실험에 활용할 것이다.
- Prototype 안테나 개발을 통하여 확보한 안테나 제작 기술은 본제품의 설계, 제작과정에 활용하여 본제품의 제작을 추진한다.
- 전송계와 제어계는, 2단계 사업을 통하여 완성한 100 kW, 300 kW 송출계를 이용하여 고출력 RF 부품들의 성능 등을 검증하여 사양을 결정하고, 제작에 착수한다. 또한, 1, 2단계에서 확보된 RF 시험시설의 운영을 통해 시험 및 운영기술을 확보하도록 한다.
- 6 MW 송출계는 100 kW, 300 kW 송출계 제작경험을 활용하여 사양을 결정하고, 국내 산업이 부분적으로 참여 가능하도록 제작을 추진한다.

4. 기대효과

- 본 과제의 주요 연구개발 결과물(장치설계도, 시제품, 장치 부품, 특성시험장치, 특성시험결과 등)들은 KSTAR 토카막에서 사용될 NBI, RF, LHCD, ECH 가열장치의 건조를 위한 장치 설계, 제작 및 특성시험과 관련한 기술의 국내개발 등이다.
- 장치 설계에 있어서 300초 이상의 장 펄스 운전을 위해 새로운 설계개념과 신기술들을 적용하였고, 실제 제작 과정에서 기술적으로 어려운 문제들을 극복하였으며, 부품들의 성능검증과정에서 나타날 수 있는 문제점들을 개선하면서 장시간 운전이라는 분야에서는 세계적인 기술들을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.
- 개발과정에 적용된 새로운 설계개념과 신기술은 관련 산업체로 이전되어 첨단장치분야의 국내기술확보에 일조를 하였다.
- 장펄스 가열장치설계, 제작 및 운영기술은 완성시 세계적인 핵융합발전로 기술 발전에 크게 기여하고, 이 분야에서 세계적인 선두그룹들과도 경쟁이 가능할 것으로 기대된다.

□ NBI 장치

- 중성빔 입사장치는 대형연구시설로서 첨단핵심기술들의 통합기술로 개발되므로 학계, 연구소, 산업계의 공동연구체계가 구축되고 연수수행과정에서 있어 국가첨단기술의 독자적인 기술능력이 개발 축적되며, 학계, 연구소, 산업계로의 기술파급효과가 기대된다.

- 초대형 이온원의 개발과정을 통하여 이온원에 대한 기술을 국내 기업체에서 확보하게 되었고, 이를 통하여 앞으로 산업 부문에 직접 적용될 수 있는 중·소용량 이온원의 상품화를 국내 기업에서 개발 가능하게 되어, 산업적 수요에 충당하고 이 분야의 신상품 개발에 일조할 것이다.
- 대용량 진공펌프, 대형 진공함, 이온 덤프, 칼로리메타 등 국내 기업체와 공동으로 개발하고 있는 빔라인 부품들의 성능검증이 끝나면 진공 관련산업 및 설비 산업으로의 파급효과로 제품의 다양화가 가능해질 것으로 기대된다.
- 이온원 전원으로 개발된 가속전원은 세계적으로도 제작된 바 없는 초대형 전원으로 외국에서 요구하는 금액에 비해 저렴한 비용으로 설계 및 제작을 완료하고 현재 성능 검증 시험이 진행되고 있으며, 이 제품의 성능이 검증되면 외국 제품과도 경쟁력을 갖추게 될 것이다.

□ ICRH/FWCD 장치

- 세계에서 처음으로 시도되는 장 펄스 운전용, MW급 고출력, 고주파 기술개발을 통해 고주파 가열장치의 제작·운용 기술의 확보로, 세계적으로 기술적 우위의 선점과 함께 수출시장 개척에 일조할 수 있다.
- 고출력 고주파 기술들이 확고히 국내기술로 정착되어 장치건설비용을 절감하고, 보수유지를 원활히 하며, 관련기술의 산업적 파급을 보다 활성화시킬 것이다.
- 이들은 또한 반도체 가공, 금속표면 가공, 우주선 추진, 의료용 장비, 방송, 국방 등의 분야에 기술 파급 효과도 크기 때문에 산업현장 적용이 가능한 기술분야는 참여기업으로의 연구성과를 이전하여 관련 기술의 산업적 spin-off에 노력하고, 선진국과의 이 분야의 국제경쟁력 확보에 노력할 것이다.
 - RF 플라즈마 기술분야 : 플라즈마 가공 장치산업의 근간기술으로 반도체 가공, 금속표면 가공 등 플라즈마를 이용한 표면처리 산업의 기존시장은 계속 넓어지는 추세이며 새로운 응용 분야도 꾸준히 창출되어 향후 이들 분야에 활용이 기대된다.
 - 대출력 RF 장치 기술 : 관련 시장이 고주파가열로, 방위산업, 대출력 통신기지등 비교적 특수분야에 제한되어 있으나, 장비가 고가이며 고부가 가치(고가의 기술비)의 기술분야로서 개발기술을 바탕으로 관련기기들의 국산화시 추진시 많은 수입대체효과가 기대된다.
 - 고주파 전송설비 분야 : 전송 설비의 경우 국내 각 방송 업체에서는 역시 90%이상 수입에 의존하고 있어 이를 국내 제품으로 대체할 수 있어 연간 50억원 이상의 수입대체가 가능하다.

□ LHCD/ECH 장치

- 대용량 마이크로파관련 시스템 설계, 제작 및 운용 기술의 국산화를 최대한 도모하여 산업화를 위한 기술기반 마련에 최선을 다한다. 과제 진행과정에서 산업현장 적용이 가능한 기술분야는 참여기업의 연구참여를 추가로 요청하여 관

련 기술의 스피노프를 최대한 활용한다.

- 현재 개발되어 있는 고전압 전원장치는 클라이스트론, TWT 등 마이크로파 발생장치용 고전압 전원장치 제작기술에 적용이 가능하고 관련 고정밀 고전압 장치 국산화를 촉진한다. 높은 효율과 정밀도, 높은 전력 밀도를 갖는 고압 전원장치의 개발을 위해 반드시 필요한 반도체 소자 및 고주파 기술 확보, 절연 및 노이즈 방지, 고주파 변압기의 문제해결로 핵심 기술을 확보하여, 환경분야 응용 등 산업전반에 걸친 직류전력시스템에 적용할 수 있다. 반도체 산업 및 표면처리 분야에서 필수공정중의 하나인 플라즈마 표면처리방법 (식각, 박막코팅 등)에 활용될 수 있다.
5. 문제점 및 건의사항(연구성과의 제고를 위한 제도·규정 및 연구관리 등의 개선점을 기재)

[첨부2]

기술 요약서

■ 기술의 명칭

중성빔 입사장치 개발

■ 기술을 도출한 과제현황

과제관리번호	17-3-1			
과제명	가열장치 개발·제작			
사업명	선도기술개발사업			
세부사업명	차세대 초전도 핵융합 연구장치 개발 사업			
연구기관	한국원자력연구소	기관유형	정부출연연구소	
참여기관(기업)	포항공과대학교, (주)POSCON, (주)원신코퍼레이션, (주)한국전자진흥			
총연구기간	1998. 9. 8 - 2002. 6.7			
총연구비	정부(16,414,000)천원	민간(2,113,200)천원	합계(18,527,200)천원	
연구책임자 1	성명	오 병훈	주민번호	581011-1932120
	근무기관 부서	한국원자력연구소	E-mail	bhoh@kaeri.re.kr
	직위/직급	책임연구원	전화번호	042-868-8643
연구책임자 2	성명	홍봉근	주민번호	581009-1025415
	근무기관 부서	한국원자력연구소 핵물리공학팀	E-mail	bghong@kaeri.re.kr
	직위/직급	과제책임자 /책임연구원	전화번호	042-868-8294
실무연락책임자	성명	오 병훈	주민번호	581011-1932120
	근무기관 부서	한국원자력연구소	E-mail	bhoh@kaeri.re.kr
	직위/직급	책임연구원	전화번호	042-868-8643
	주소	(305-353) 대전시 유성구 덕진동 150		

■ 기술의 주요내용

[기술의 개요]

차세대 초전도 핵융합 연구장치인 KSTAR 토카막의 플라즈마를 핵융합 가능 온도까지 가열하거나 비유도성 전류를 플라즈마 내에 인가시켜주기 위한 대전류·고에너지 중성빔 입사장치로 구성하고 있는 관련 부품 기술들은 다음과 같다.

○ 대전류 이온원 기술

미국에서 개발한 바 있는 LPIS(Long Pulse Ion Source)를 모델로 국내 기술 수준에 맞게 일부 가속전극 등의 구조를 개량하여 65A, 120 kV급 이온원을 독창적으로 설계·제작하여 현재 성능 시험 중에 있음. 장차 300초 운전 가능한 이온원으로 개선 예정임.

○ 빔라인 부품 기술

Calorimeter, Neutralizer, Bending Magnet, Ion Dump 등 중성빔 발생 및 수송을 위한 빔라인 부품들의 제작 기술.

○ 대용량 진공 배기펌프 기술

KSTAR NBI 가열장치 가동 시 요구되는 대용량 배기속도를 얻기 위해 극저온 냉각펌프(cryopump)의 하나인 Cryosorption Pump를 개발.

○ 고전압 대전류 전원 기술

안정된 빔인출을 위해 경제적인 가격의 낮은 리플 특성과 빠른 ON/OFF 시간을 갖는 120 kV, 70A 급 고전압 전원을 개발.

<기술적 특징>

- (1) 300초 운전이 달성되면 세계적인 기록이 됨.
- (2) 개발 및 제작비용을 외국의 사례에 비해 획기적으로 절감시켰음.
- (3) 현재까지는 성능이 완전하지 않으므로 추가적으로 검증 및 수정기간이 필요함.

[용도·이용분야]

- (1) 8 MW, 300 초 중성빔을 다룰 수 있는 설비 제작 기술을 갖추에 따라 세계수준의 NBI 장치 제작이 가능함.
- (2) 대면적·대용량 열부하 시험을 위한 Test Stand로도 사용 가능함.
- (3) 대형 진공장치의 개발에 필요한 진공용기, 진공펌프 등의 관련기술들이 국내에서도 확보되어, 장차 우주관련 산업, 국방관련 산업들에서 대형 장치기술들의 대외 의존도가 줄어들고, 장치의 건설비용, 보수유지 등에서 긍정적인 효과를 기대할 수 있음.
- (4) 대전류 이온원의 개발에 따라 빔의 응용분야에도 활용이 가능함.
- (5) 고정밀 고전압 전원은 가속기 등 새로운 첨단 기술에도 사용됨.

■ 기술의 분류

[기술분야] (1개만 선택(■로 표시)하여 주십시오)

- 정보산업 기계설비 소재 정밀화학·공정 생명과학
 원자력 자원 에너지 항공·우주 해양
 교통 보건·의료 환경 기초·원천 기타

[기술의 활용유형] (1개만 선택(✓로 표시)하여 주십시오)

- 신제품개발 신공정개발 기존제품개선 기존공정개선
 기 타 (특수장치 개발)

[기술의 용도] (복수 선택(✓로 표시)가능합니다)

- 기계설비 부품소자 원료재료 소프트웨어
 가공처리기술 자동화기술 불량률 감소 등 현장애로기술
 제품설계기술 공정설계기술 기 타 ()

■ 산업재산권 보유현황(기술과 관련한)

권리유형	명 칭	국가명	출원단계	일자	등록번호

* '권리유형'란에는 특허, 실용신안, 의장, 컴퓨터프로그램 등을 선택하여 기재

* '출원단계'란에는 출원, 공개, 등록 등을 선택하여 기재

[첨부2]

기술 요약서

■ 기술의 명칭

고주파 가열장치 개발

■ 기술을 도출한 과제현황

과제관리번호	17-3-1			
과제명	가열장치 개발·제작			
사업명	선도기술개발사업			
세부사업명	차세대 초전도 핵융합 연구장치 개발 사업			
연구기관	한국원자력연구소	기관유형	정부출연연구소	
참여기관(기업)	포항공과대학교, (주)POSCON, (주)원신코퍼레이션, (주)한국전자진흥			
총연구기간	1998. 9. 8 - 2002. 6.7			
총연구비	정부(16,414,000)천원	민간(2,113,200)천원	합계(18,527,200)천원	
연구책임자 1	성명	홍봉근	주민번호	581009-1025415
	근무기관 부서	한국원자력연구소 핵물리공학팀	E-mail	bghong@kaeri.re.kr
	직위/직급	과제책임자 /책임연구원	전화번호	042-868-8294
연구책임자 2	성명		주민번호	
	근무기관 부서		E-mail	
	직위/직급		전화번호	
실무연락책임자	성명		소속/부서	
	직위/직급		E-mail	
	전화번호		FAX	
	주소	(305-353) 대전시 유성구 덕진동 150		

■ 기술의 주요내용

[기술의 개요]

- 차세대 초전도 핵융합 연구장치, KSTAR 토카막 플라즈마를 가열하거나 비유도성 전류를 인가시키기 위한 고출력, 고주파(RF) 가열 및 전류 구동 장치의 개발
- 6MW, KSTAR 고주파 가열장치의 설계.제작
국내에서 최초로 MW급 고출력 고주파기술을 개발하여 6MW, KSTAR 고주파 가열장치의 설계.제작.운용의 핵심 기술을 확보하였음.
 - 장펄스 운전용, 고주파 안테나 개발
세계적으로 처음 시도하는 300초 이상의 장 펄스 운전을 위해 새로운 설계개념과 신기술들을 적용하여 초 고출력밀도(10 MW/m^2)와 운전중 가열 및 전류구동효율 조절능력을 갖는 고주파 안테나를 개발하였음.
 - 고출력 고주파 부품 개발
MW급 고출력 고주파 전송을 위해, 300초 이상의 동작이 가능한 고주파 부품들의 개발을 성공적으로 완성하였음.
 - 고주파 발생장치 개발
30MHz, 100 kW 송출계와 27-55 MHz, 300 kW 송출계의 설계, 제작 및 운영을 통해 고출력 RF파 발생장치의 기술을 축적하고 국내기술로 정착하였음.

<기술적 특징>

- (1) 300초 이상의 장 펄스 운전가능
- (2) 광범위한 동작 주파수영역 (25 - 60 MHz)
- (3) 초 고출력밀도(10 MW/m^2)의 고주파 안테나
- (4) MW급의 고출력 고주파 출력 전송능력

[용도 · 이용분야]

- (1) KSTAR 토카막의 고주파 가열장치의 기기들로 직접 사용될 것이고, 핵융합 실증로(ITER)와 핵융합 발전로의 고주파 가열장치의 기기들로도 사용 가능함.
- (2) 타 활용분야
 - 고주파 플라즈마 기술 ; 반도체 가공, 금속표면 가공, 고주파 이온원, 환경, 우주선 추진
 - 고주파 전송기술.설비 ; 방송/통신 분야
 - 고출력 고주파 기술 ; 레이더, RF 무기 등 국방분야, 의료분야
 - 고전압 전원기술 ; 산업용 대용량 고전압 발생장치

■ 기술의 분류

[기술분야] (1개만 선택(■로 표시)하여 주십시오)

- 정보산업 기계설비 소재 정밀화학·공정 생명과학
 원자력 자원 에너지 항공·우주 해양
 교통 보건·의료 환경 기초·원천 기타

[기술의 활용유형] (1개만 선택(✓로 표시)하여 주십시오)

- 신제품개발 신공정개발 기존제품개선 기존공정개선
 기 타 (특수장치 개발)

[기술의 용도] (복수 선택(✓로 표시)가능합니다)

- 기계설비 부품소자 원료재료 소프트웨어
 가공처리기술 자동화기술 불량률 감소 등 현장애로기술
 제품설계기술 공정설계기술 기 타 ()

■ 산업재산권 보유현황(기술과 관련한)

권리유형	명 칭	국가명	출원단계	일자	등록번호
특허	고출력 수냉식 위상가변기	한국	출원	2001. 3	
컴퓨터 프로그램	PC-DAS	한국	등록	1998/11/07	프로그램98-169

* '권리유형'란에는 특허, 실용신안, 의장, 컴퓨터프로그램 등을 선택하여 기재

* '출원단계'란에는 출원, 공개, 등록 등을 선택하여 기재

■ 본 기술과 관련하여 추가로 확보된 기술

기술명	절연 유체를 사용하여 고출력, 고주파 전송 부품 (단락 전송선 동조기(Stub)와 위상가변기(Phase Shifter))의 개발
개발단계	<input type="checkbox"/> 연구개발 계획 <input type="checkbox"/> 연구개발 중 <input checked="" type="checkbox"/> 연구개발 완료
기술개요	기존의 기체를 전송 매질로 하는 위상가변기가 정상적으로 동작할 수 없는 MW급의 고출력에서 동작 가능한 위상가변기를 개발하였음.

[기술을 도출한 과제현황]

과제명	고출력, 고주파 전송부품 개발			
사업명	원자력연구개발사업			
세부사업명	연구성과실용화지원사업			
연구기관	한국원자력연구소	기관유형	정부출연연구소	
참여기관(기업)	주)한국전자진흥			
총연구기간	1998. 12. 1 - 1999. 11. 30			
총연구비	합계 : 176 백만원 정부 : 140 백만원 민간 : 36 백만원			
연구책임자	소속	한국원자력연구소 핵물리공학팀	성명	홍봉근
	전화번호	042-868-8294	E-mail	bghong@kaeri.re.kr
연구개발 주요내용				
<p>절연 유체를 사용한 고출력, 고주파 전송 부품[단락 전송선 동조기(Stub)와 위상가변기(Phase Shifter)]의 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> - 유체를 이용한 위상가변기의 상세설계 - 위상가변기 시제품 제작 - 위상가변기 시제품 특성시험 (위상가변 시험, 내전압 시험, 내열 특성 시험) 				

[첨부2]

기술 요약서

■ 기술의 명칭

약취 및 VOC 처리를 위한 저온 플라즈마 전원장치 개발

■ 기술을 도출한 과제현황

과제관리번호				
과제명	약취 및 VOC 처리를 위한 저온 플라즈마 전원장치 개발			
사업명	차세대 핵심환경기술개발사업			
세부사업명				
연구기관	포항공과대학교	기관유형		
참여기관(기업)				
총연구기간	2001. 8. 1 - 2002. 6. 20			
총연구비	정부(21,000)천원	민간()천원	합계(21,000)천원	
연구책임자 1	성명	남궁 원	주민번호	431013-5460173
	근무기관 부서	포항공대 물리학 과 /가속기 연구소	E-mail	namkung@postech.ac.kr
	직위/직급	교 수	전화번호	(054)279-2066
연구책임자 2	성명		주민번호	
	근무기관 부서		E-mail	
	직위/직급		전화번호	
실무연락책임자	성명	이 용환	소속/부서	환경공학부
	직위/직급	대학원 박사과정	E-mail	yhlee69@postech.ac.kr
	전화번호	(054)279-5862	FAX	
	주소	(790-784)경북 포항시 남구 효자동 산 31번지 포항공과대학교 환경공학부		

■ 기술의 주요내용

[기술의 개요]

KSTAR 플라즈마 마이크로파 가열 및 전류구동시스템의 마이크로파 전송선 설계를 통해 습득한 기술 및 지식으로 환경 유해 가스처리기인 플라즈마 토치를 개발하였다. 플라즈마 토치는 2.45 GHz 마이크로파를 이용하여 대기압에서 5000 도의 고온 플라즈마 flame을 발생시킨다. 현재 마이크로파의 출력이 500 W 이상일 경우 노즐을 통과하는 공기의 유량이 25 lpm 에서도 고온 플라즈마 토치가 유지된다. 공기대신 분해가 어려운 유독가스 즉, 반도체 etching 공정에서 사용되는 fluoro-carbon gase를 노즐을 통해 흘러넘으로써 일반적인 전기방전에서 분해가 어려웠던 문제를 해결할 수 있게 된다. 혹은 분해가 어려운 cloro-carbon gase처리도 가능하다.

플라즈마 토치 시스템은 도파관 부품으로 구성되며, 크게 2.45 GHz의 마이크로파를 발생시키는 Magnetron과 반사파를 흡수할 수 있는 Circulator 및 dummy load, 그리고 토치가 만들어지는 부분으로 구성된다. 토치가 만들어지는 부분에는 가스를 분사시키는 노즐이 도파관을 통과하며 노즐과 도파관사이에 강한 전기장이 형성되어 플라즈마를 생성한다. 대기압상태라 플라즈마 점화 장치가 필요하다. 플라즈마 점화는 노즐을 금속 막대로 단지 건드림으로써 이루어진다.

플라즈마 토치 시스템은 국내와 국외 대학이나 연구소에서 R&D를 활발히 수행하고 있으나 아직 높은 유량의 가스를 처리할 수 있는 구조가 아니었으나 여기서 기술하고자 하는 플라즈마 토치 시스템은 기존 구조를 약간 변경하여 높은 유량의 가스를 처리할 수 있도록 하였다.

<기술적 특징>

대기압에서 도파관 시스템을 이용한 플라즈마 Air torch 생성.

[용도 · 이용분야]

- (1) 반도체 etching 공정에서 사용되는 fluoro-carbon 가스 처리기로 이용될 수 있음.
- (2) 고온 및 높은 유량의 플라즈마 토치는 금속 절단기로도 이용될 수 있음.

서 지 정 보 양 식					
수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드		
KAERI/RR-2252/2001					
제목 / 부제	가열장치 개발 · 제작				
연구책임자 및 부서명 (TR일 경우 주저자)	홍봉근 (핵물리공학팀)				
연구자 및 부서명	곽종구, 김계령, 김성규, 배영덕, 송우섭, 오병훈, 윤병주, 윤재성, 이광원, 인상렬, 정기석, 정승호, 조용섭, 주명희, 최병호, 한장민, 황철규, 남궁원, 고인수, 조부현, 황정연, 오중석, 황운하, 강홍식, 박성주, 장성덕, 손윤규, 최용준, 김승환, 박용정, 김귀년, 박인호, 서유희, 김근호, 서성현, 장두희, 남선우, 서창석, 박미영, 조용기, 장대식, 권종혁, 조찬길, 왕선정, 이규봉, 정성운, 유현중, 양동유, 구삼희, 서우철, 이정균, 양종열, 이종열, 김창연, 유승현, 권오영, 강동권, 박종남, 강현모, 이영숙, 김국희, 김임경, 최유리, 배영순, Neeraj Nepal, 김창범, 이용환, 백채현, 최은미, 이한구, 변철구, 이운학, 이종혁, 민충기, 최창호, 이재학, 이윤운, 강덕중, 박성태, 김광석, 박재안, 송인호, 신현석				
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구소	발행년	2002. 7
페이지	835p	도표	있음(o), 없음()	크기	210 X 297 mm
참고사항					
공개여부	공개(o), 비공개()		보고서종류	연구보고서	
비밀여부	대외비(), __ 급비밀				
연구위탁기관		계약번호			
<p>초록 (15-20줄내외) :</p> <p>KSTAR 토카막에서 사용될 NBI, RF, LHCD, ECH 가열장치의 상세설계, 주요 부품들의 제작 및 특성시험을 수행하였다.</p> <p>NBI 장치의 경우, 300초 운전 가능한 65A, 120 kV급 대전류 이온원을 개발하였고, Calorimeter, Neutralizer, Bending Magnet, Ion Dump 등의 빔라인 부품들을 개발하였으며, 초고속 전류 스위치를 포함한 120 kV, 70 A, 300 초 운전의 고정밀 가속전원 등 이온원 전원들을 모두 국내 기술에 의해 설계하고 개발하였다. 또한, Cryosorption Pump를 개발하였으며, 이온원, 빔라인 부품 및 가속전원들의 성능검증을 위해 냉각수 설비 등을 포함한 NBI장치 Test Stand를 한국원자력연구소에 완성하여 빔인출 시험을 수행하였다.</p> <p>RF가열장치는 상세설계를 수행하고, 주요 Subsystem의 제작이 진행중이다. 300초 이상 운전이 가능한, 초고출력밀도(10 MW/m^2)와 운전중 가열 및 전류구동효율 조절능력을 갖는 고주파 안테나를 개발하였고, MW급 고출력 고주파 부품도 세계적으로 처음으로 300초 이상의 장 펄스 운전이 가능하도록 개발하였다. 고출력 RF파 발생장치의 기술개발에 있어서, 100 kW 송출계는 고주파 부품 시험에 활용, 출력 최적화를 통해 설계, 제작 및 운영 능력을 확보하였고, 300 kW 송출계의 제작을 완료하였다.</p> <p>500 kW ECH 장치 시스템 상세 설계는 완료하였으며, 본체의 핵심 부분을 확보하였다. ECH 장치의 84 GHz, 500 kW 마이크로파 발생장치인 Gyrotron tube는 미국 CPI사에서 제작되어 현재 참여 기업인 (주)포스콘에서 short pulse (20 μ s pulse, 60 Hz) 성능시험 중에 있다. Gyrotron tube의 long pulse (2.0 sec) 테스트를 위한 85 kV, 30 A DC power supply 또한 (주)포스콘에서 개발되어 현재 성능시험 중에 있다.</p> <p>2.0 MW LHCD 장치의 RF 주파수는 5.0 GHz로 결정하였고, 5.0 GHz LHCD Launcher의 기본 설계는 HFSS와 ANSYS 프로그램을 이용하여 완성되었고, 미국 PPPL 연구소와 공동으로 공학설계에 착수하였다.</p>					
주제명키워드 (10단어내외)	핵융합, 가열, 전류구동, 중성입자빔, 고주파				

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.	
KAERI/RR-2252/2001					
Title / Subtitle		Development of Heating System			
Project Manager and Department		B. G. Hong (Nuclear Physico Engineering Team)			
Researcher and Department		J.G. Kwak, K.R. Kim, S.K. Kim, Y.D. Bae, W.S. Song, B.H. Oh, B.J. Yoon, J.S. Yoon, K.W. Lee, S.R. In, G.S. Jung, S.H. Jeong, Y.S. Cho, B.H. Choi, J.M. Han, C.K. Hwang, D.H. Chang, S.w. Nam, C.S. S채, M.Y. Park, Y.G. Cho, D.S. Chang, C.G. Cho, S.J. Wang, S.W. Jung, (KAERI) W. Namkung et al (POSTECH)			
Publication Place	Taejeon	Publisher	KAERI	Publication Date	2002. 7
Page	835p	III & Tab.	Yes(o), No ()	Size	210 X 297 mm
Note					
Open	Open(o), Closed()		Report Type	Research Report	
Classified	Restricted(), ___Class Document				
Sponsoring Org.				Contract No.	
Abstract (15-20 Lines)					
<p>The detailed designs and development of components of NBI, RF, ECH, and LHCD heating and current drive system have been performed.</p> <p>The prototype ion source for the KSTAR NBI system and the beam line components such as calorimeter, neutralizer, bending magnet, and ion dump had been developed. The power supplies for the stable beam of 120 kV and 65 A including acceleration power supply, deceleration power supply, arc power supply, and filament power supply have been developed. Finally a KSATR NB test facility has been completed at KAERI to test and upgrade the ion source and the beam line components. The RF system is under development. Antenna has been fabricated and tested. Transmission components (vacuum feedthrough, impedance matching and water-cooled transmission line) for transmitting MW level of power have been developed. For transmitter, we optimized performance of 100 kW transmitter and completed the fabrication of 300 kW transmitter. We will finalize the procurement specification of 2 MW transmitter system in the third phase. The detailed design of a 500 kW, 84 GHz ECH system has been completed. The gyrotron has been fabricated and successfully tested at Communications and Power Industries (CPI), USA. It is delivered to POSTECH, and under short pulse conditioning test with a pulse modulator operated at 20 μs with 60 Hz repetition rate and a acceleration power supply (APS). The ECH transmission line components are being purchased from General Atomics (GA), USA. The LH frequency of the 2.0 MW LHCD system is chosen to 5.0 GHz for extending the density limit condition. The LHCD system is under design process. The basic design of the 5.0 GHz LHCD launcher (coupler) has been finished using the HFSS and ANSYS programs.</p>					
Subject Keywords (About 10 words)		fusion, heating, current-drive, neutral beam, radio frequency			