

보안과제 ( ), 일반과제 (○)

## 제4세대 소듐냉각 고속로 핵심기반기술개발

Development of Basic Key Technologies  
for Gen IV SFR

## 소듐 열유체 실증시험시설 구축 및 종합효과시험

Construction of Sodium Thermal-Hydraulic Experimental  
Facility and Integral Effect Test

한국원자력연구원

교육과학기술부



# 수정 · 보완요구사항 대비표

과제명 : 소듐 열유체 실증시험시설 구축 및 종합효과시험

주관기관(책임자) : 한국원자력연구원 (이용범)

전문기관의 수정 · 보완요구사항	주 <sup>1)</sup> 수정 · 보완요구사항 반영내용 요약	주 <sup>2)</sup> 비 고
1.RFP 상의 STELLA-1 구축완료 후 종합 시운전이 수행되지 않았고 개별 시험이 미흡함	- 시운전 실험계획은 “(6) 종합 시운전” 항목에 상세히 기술하였음	- 48쪽
2.향후 실증실험 시운전 및 실험 계획을 구체적으로 수립 제시요망	- 열교환기 개별실험계획은 “다. 성능검증 개별실험” 항목에 상세히 기술하였음	- 49-51쪽
3.STELLA-1 시험시설의 종합시운전, 소듐펌프 성능시험 등 RFP 대비 지연되고 있는 바, 이에 대한 만회 대책을 수립하여 보고서 반영요망	- 물을 이용한 소듐펌프 성능시험은 기수행하여 “(3) 기계식 소듐 펌프 성능시험”에 기술하였으며	- 52-64쪽
4.차기 단계에서 기기 성능개별시험을 수행할 예정인데 이에 대한 자세한 시험계획 제시요망	- 소듐을 이용한 소듐펌프 성능실험 계획은 “(라) 소듐환경 펌프 성능시험 계획 “에 기술하였음	- 65쪽
5.레벨 센서의 측정정밀도가 개발 목표치인 1% FS를 달성하지 못한 것에 대한 대책을 보고서에 제시요망	- 차기단계에서 소듐 고유 열유동 특성인자 계측을 위한 계기장치의 개량 및 국산화를 목표로 수행되는 “소듐 열유동 계측을 위한 고유 계기장치 개발” 위탁과제에 포함하여 수행할 예정이며 “(1) 레벨 센서 시제품” 항목에 계획을 제시하였음	- 67쪽

※ 주1) 수정 · 보완반영내용은 반드시 최종보고서 내에 반영하고 경우에 따라 별지를 사용하여 작성하기 바람.

주2) 비고란에는 수정 · 보완요구사항을 반영한 최종보고서의 해당 page를 기입하고 별지가 있을 경우 별지의 제목을 기입할 것.



# 제 출 문

교육과학기술부 장관 귀하

이 보고서를 "제4세대 소듨냉각 고속로 핵심기반기술개발"과제(세부과제 "소듨 열유체 실증 시험시설 구축 및 종합효과시험")의 보고서로 제출합니다.

2012 년 3 월

주관연구기관명: 한국원자력연구원

주관연구책임자 : 이 용 범

연구원 : 김 병 호

연구원 : 김 석 훈

연구원 : 김 영 일

연구원 : 김 종 만

연구원 : 김 태 준

연구원 : 김 희 령

연구원 : 남 호 훈

연구원 : 소 동 섭

연구원 : 어 재 혁

연구원 : 이 귀 림

연구원 : 이 태 호

연구원 : 이 형 연

연구원 : 장 진 욱

연구원 : 정 지 영

연구원 : 조 충 호

연구원 : 최 병 해

연구원 : 최 중 현

연구원 : 한 지 응

연구원 : 김 동 훈

연구원 : 김 정 택

연구원 : 박 기 용

연구원 : 박 재 창

연구원 : 이 규 일

연구원 : 이 용 희

연구원 : 이 정 운

연구원 : 이 철 권

연구원 : 이 현 철

연구원 : 장 통 일

연구원 : 천 세 영

연구원 : 허 섭

연구원 : 황 인 구

## 보고서 요약서

과제 고유번호	2011-0001864	해당단계 연구기간	2010.3.1~ 2012.2.29	단계구분	2/2
연구사업명	중사업명	원자력기술개발사업			
	세부사업명	미래형원자로시스템			
연구과제명	대과제명	제4세대 소듐냉각 고속로 핵심기반기술개발			
	세부과제명	소듐 열유체 실증시험시설 구축 및 종합효과시험			
연구책임자	이용범	해당단계 참여 연구원수	총 : 32.7 명 내부: 28.5 명 외부: 4.2 명	해당단계 연구비	정부: 14,580,000 천원 기업:            천원 계 : 14,580,000 천원
		총연구기간 참여 연구원수	총 : 59.5 명 내부: 51.3 명 외부: 8.2 명	총연구비	정부: 19,367,000 천원 기업:            천원 계 : 19,367,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국원자력연구원   고속로실증연구부			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명: 제주대학교			연구책임자: 정범진	
요약 (연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내로 작성합니다)					보고서 면수: 156 쪽
<p>○ 선진기술 개발 및 검증 : 안전성 입증 실험 기반 구축</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 기기 열유체 성능검증 소듐루프 (STELLA-1) 구축</li> <li>- 열교환기 및 기계식 소듐펌프 성능검증 개별실험</li> <li>- 소듐 고유 계측기 시작품 시험용 실험장치 구축</li> <li>- 소듐 고유 계측기 시작품 설계, 제작 및 성능시험</li> <li>- 소듐 열유체 실증시험시설 및 종합효과시험 범위 평가</li> <li>- 소듐 열유체 실증시험시설 (STELLA-2) 기본설계</li> </ul> <p>○ 기반기술 검증 : 소듐기술 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 이중벽 전열관 특성실험</li> <li>- SWR 조기 감지설비 설계 및 제작</li> <li>- SG 배경소음 측정</li> <li>- 전열관 wastage 특성 실험 및 SWR 해석모델 개발</li> <li>- 소듐 화재확산방지 구조물 개발 및 성능실험</li> <li>- 소듐내 불순물 측정실험 및 특성평가</li> <li>- 중금속 냉각재 정적 및 동적 부식 특성실험</li> <li>- 노심 및 핵연료 감시 모형 사양 개발</li> <li>- 원자로 내부 광역/ 지발중성자속 계측 개념설정 및 측정 민감도 평가</li> <li>- Multi-target wastage 특성실험</li> <li>- SWR 사고 확대전파모델 개발</li> <li>- 사용 후 소듐 처리공정 개발</li> <li>- 소듐 주입노즐 물모의 실험</li> <li>- 소듐 처리장치 설계·제작 및 소듐 처리 예비실험</li> </ul>					
색인어 (각 5개 이상)	한글	소듐냉각고속로, 소듐시험시설, 개별실험, 종합효과시험, 소듐기술			
	영어	SFR, Sodium test facility, Separate effect test, Integral effect test, Sodium technology			

# 요 약 문

## I. 제 목

- 소듐 열유체 실증시험시설 구축 및 종합효과시험

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 소듐 열유체 실증시험시설을 통한 피동형 잔열제거 안전계통의 성능 확보

- 제4세대 소듐냉각고속로(Gen IV SFR)는 기술목표 중 하나인 “안전성의 획기적 향상과 입증”을 위해 피동형 잔열제거계통을 채택하고 있으며, Gen IV SFR Concept으로 채택된 KALIMER-600(한국), JSFR-1500(일), SMFR(미) 원자로 모두 피동형 잔열제거계통을 포함하고 있음
- 제4세대 원자로 표준설계인증 인허가 요건: 혁신적 피동안전계통 설계개념은 실험적 검증이 필수

- 2020년 원형로 특정설계승인 획득 및 2028년 건설을 위한 핵심 연구시설

- 2020년 특정설계승인 및 2028년 건설완료를 목표로 하고 있는 원형로는 혁신적 피동안전계통 설계개념을 포함하므로, 기기 열유체 성능검증 소듐루프 구축 및 개별효과 실험과 소듐 열유체 실증시험시설 구축 및 종합효과시험을 통하여 원형로 안전계통의 성능검증, 안전계통과 일차열전달계통과의 상호영향 평가 및 적합성 검증이 필수적임

- 소듐냉각고속로 개발 중간 성과물로서의 가치

- 지금까지 개발한 설계기술, 전산체제, 소듐기술 등 축적된 연구결과의 종합적 실증이 가능함
- 본 시험시설 구축은 원형로 특정설계승인 획득에 필요한 실험데이터 생산을 수행하여, 그동안 설계 중심의 SFR 기술개발 능력을 하드웨어적 검증단계까지 발전시킴으로써 SFR 기술경쟁력 확보라는 국가 정책목표 구현에 직접적으로 기여함

## III. 연구개발의 내용 및 범위

### < 선진기술 개발 및 검증 : 안전성 입증 실험 기반 구축 >

- 기기 열유체 성능검증 소듐루프 구축 및 기기 성능검증 개별실험

- 기기 열유체 성능검증 소듐루프 구축
- 성능검증 개별실험

□ 소듐 고유 계측기법 개발

- 소듐 고유 계측기 시작품 시험용 실험장치 구축
- 소듐 고유 계측기 시작품 설계, 제작 및 성능시험

□ 소듐 열유체 실증시험시설 기본설계

- 소듐 열유체 실증시험시설 및 종합효과시험 범위 평가
- 실증시험시설 기본설계

< 기반기술 검증 : 소듐기술 개발 >

□ SG 신뢰성 향상기술 개발

- 이중벽 전열관 특성실험
- SWR 조기 감지설비 설계 및 제작
- SG 배경소음 측정
- 전열관 wastage 특성 실험 및 SWR 해석모델 개발

□ 소듐 안전관리기술 개발

- 소듐 화재확산방지 구조물 개발 및 성능실험
- 소듐내 불순물 측정실험 및 특성평가
- 중금속 냉각재 정적 및 동적 부식 특성실험

□ 원자로 내부 계측 및 감시방법 개발

- 노심 및 핵연료 감시 모형 사양 개발
- 원자로 내부 광역/ 지발중성자속 계측 개념설정 및 측정 민감도 평가

□ 불순물 측정 및 제어기술 개발

- 개량형 불순물 정제장치 개발
- 개량형 불순물 정제장치 검증실험

□ SWR 사고 방호기술 개발

- Multi-target wastage 특성실험
- SWR 사고 확대전과모델 개발

□ 사용 후 소듐 처리공정 개발

- 소듐 주입노즐 물모의 실험
- 소듐 처리장치 설계 및 제작
- 소듐 처리 예비실험



## IV. 연구개발결과

### < 선진기술 개발 및 검증 : 안전성 입증 실험 기반 구축 >

#### □ 기기 열유체 성능검증 소듐루프 구축 및 기기 성능검증 개별실험

- 2009년에는 개발 중인 소듐냉각고속로의 안전성 입증을 위한 소듐 열유체 종합효과 시험시설(STELLA-1)의 기본설계를 완료하였으며 2010년 상세설계를 완료하였다. 2011년에는 열교환기, 기계식 펌프, 압력탱크 등 주요 기기의 제작 및 배관설치 등을 완료하였으며, 실험장치의 시운전을 통해 차기년도부터 기기 성능검증을 위한 개별 실험을 수행할 예정이다.

#### □ 소듐 고유 계측기법 개발

- 소듐 고유 계측기 시작품을 설계, 제작하여 정밀도  $\pm 1.9\%FS$ 의 계통유량센서, 정밀도  $\pm 2.5\%FS$ 의 국부유속센서, 응답성 0.7초의 압력트랜스미터, 정밀도  $\pm 3.7\%FS$ 의 레벨 센서의 성능을 확인하였다.

#### □ 소듐 열유체 실증시험시설 기본설계

- 3단계 상사성 분석 방법론을 기초로 하여, 잔열제거계통 작동시 주요 계통간 상호작용 및 각 기기의 국부 열수력 현상이 잘 보존될 수 있도록 STELLA-2 실험장치의 기본 설계를 수행하였다. 본 연구를 통해 설계된 STELLA-2 실험장치의 실험결과는 향후 원형로 SFR 건설을 위한 인허가 과정에 유용하게 활용될 수 있다.

### < 기반기술 검증 : 소듐기술 개발 >

#### □ SG 신뢰성 향상기술 개발

- 증기발생기에서의 소듐-물 반응 가능성을 배제하기 위한 신개념 이중벽관을 설계, 제작하여 on-line 파손 감지기술 검증을 위한 누출감지 실험을 수행하였다. 또한 물 누출 조기 감지설비 시제품을 제작하였으며, Mod.9Cr-1Mo 강의 소규모 누출 시의 wastage rate에 대한 실험식을 얻었다.

#### □ 소듐 안전관리기술 개발

- 소듐 화재의 확산을 방지하기 위해 누출된 소듐을 수집하여 진화하는 트레이의 최적 설계 조건을 설정한 후 실험을 통해 검증하였으며, 소듐 순도관리를 위한 기기의 효율적 운영기술을 개발하고 최적의 분석방법을 수립하였다. 또한 전열관 재료와 납-비스무트 공융물과의 양립성 실험을 통해 활용 가능성을 확인하였다.

#### □ 원자로 내부 계측 및 감시방법 개발

- 핵연료의 건전성 감시를 위해 핵분열가스의 감마선과 지발중성자를 검출하여 파손유무를 검출하고 태그가스를 분석하여 그 위치를 파악하는 방법을 개발하였으며, 이를 통합하여 감시하는 계통의 구성개념을 도출하였다. 또한 노외 중성자속 감시를 위한 검출기의 사양과 운전조건, 검출된 신호의 처리방법과 감시계통의 구성, 타 분야와의 연계사항 등에 대한 개념을 정립하였다.

#### □ 불순물 측정 및 제어기술 개발

- 소듐 불순물 측정 및 제어기술 개발을 위하여 1단계에서는 소듐 순도관리 기술현황을 분석하여 설계요건을 설정하고, 소듐 불순물에 대한 최적의 화학분석기법을 도출하였으며, 소듐 질량속도가 약 400g/s인 소규모 불순물 측정 실험장치를 설치하여 실험결과를 분석하였다. 2단계에서는 콜드트랩의 성능 개선을 위해 주요 설계 파라미터인 mesh packing의 형상이 다른 두 개의 콜드트랩과 대용량 콜드트랩을 설계 및 설치하여 실험을 수행하였으며 콜드트랩의 성능을 평가하였다.

#### □ SWR 사고 방호기술 개발

- 중규모 누출로 인해 복수의 전열관이 손상되는 사고 현상에 대한 실험적 연구를 증기발생기 전열관 번들 모형을 대상으로 수행하였으며, 초기 미량누출이 발생해서 시간이 지남에 따라 대규모 누출로 단계적으로 확대 전파되는 과정을 개략적으로 예측해 볼 수 있는 사고 전파모델을 개발하였다.

#### □ 사용 후 소듐 처리공정 개발

- 기술현황을 분석하여 기존 소듐처리공정의 문제점을 보완한 신개념의 소듐처리공정을 개발하였다. 소듐 주입노즐 물모의 실험을 수행하여 사용후 소듐 처리장치 설계 및 제작을 위한 유체적 최적조건 등 설계요건을 도출하였으며 반응성을 균일하게 하기 위한 분무노즐을 개발하였다. 소듐 처리장치를 구축하여 소듐환경에서 분무노즐과 개발한 공정의 타당성을 확인하였다.

### V. 연구개발결과의 활용계획

- 2020년 원형로 특정설계승인 획득을 위한 핵심 연구시설로서 혁신적 피동안전계통 성능 검증으로 실증로 인허가 요건 충족
- 시험시설 구축, 개별실험 및 종합효과시험을 통한 안전해석 방법론 확립 및 전산코드 검증을 위한 데이터 생산에 활용
- 소듐 열유체 실증시험시설은 원자로용기 내부의 다차원 현상에 대한 신뢰성 있는 실험자료를 생산하므로, 풀형 원자로의 해석코드 검증용 실험자료 제공을 조건으로 Gen IV를 포함한 다국 간 및 양국 간 국제협력을 증진시킬 수 있음
- '09년 9월 파리에서 개최된 제3차 TAREF(Task on Advanced Reactor Experimental Facilities) 국제회의에서 시설의 중요도 점수 11점(12점 만점)의 높은 평가를 받았으며, 이는 제4세대 소듐냉각고속로 안전연구 관점에서 본 시설의 중요도 및 활용도가 매우 크다는 것을 인정한 것이므로 시험시설의 국제공동연구 활용 가능성이 매우 높으며 국내기술이 국제적 기술수준으로 향상되었음을 보여 줌 ("Experimental Facilities for Sodium Fast Reactor Safety Studies," '11년 OECD/ NEA 발행 보고서에 STELLA 시험시설 수록)
- 소듐 내 불순물 정제장치 효율 향상기술과 소듐시설에서 발생하는 폐소듐을 안전하게 폐기 및 처분할 수 있는 소듐 처리공정기술 개발로 소듐 실험장치 및 중·대형 시험시설 구축과 해체에 직접적으로 활용 가능

# SUMMARY

## I. Project Title

- Construction of Sodium Thermal-Hydraulic Experimental Facility and Integral Effect Test**

## II. Objectives and Necessity of the Study

- Performance Test of PDRC(Passive Decay Heat Removal Circuit) through the Sodium Thermal-Hydraulic Experimental Facility STELLA-1**
  - Gen IV SFR adopts a passive residual heat removal system as one of the Generation IV design targets "Enhanced Safety and its Verification", and all the Gen IV SFR concepts such as KALIMER-600, JSFR-1500, SMFR have incorporated the passive residual heat removal system.
  - Licensing requirement for the Gen IV standard design approval should be satisfied: Experimental demonstration is essentially required for adopting an innovative PDRC design concept.
- Key R&D Facility for the Design Approval of Specific Prototype Reactor by 2010 and its Construction by 2028**
  - Since the prototype reactor, of which the specific design goal is to be approved by 2020 and the construction goal is to be completed by 2028, incorporates an innovative PDRC concept as one of the safety system, the followings are essentially required; the performance demonstration of the safety system, the assessment of the reciprocal effect between the safety system and the PHTS(Primary Heat Transport System) and the suitability of the safety system. These should be verified through the construction of a large scale separate effect test facility for demonstrating the thermal-hydraulic performance of major components, and through the construction of sodium integral effect test facility for testing the integral effect.
- Importance of the Intermediate Achievements during the SFR Development**
  - It is possible to realize the comprehensive demonstration of the research results of the design technology, computing system and sodium technology achieved until now.
  - The construction of the experimental facility contributes directly to the realization of national goal of securing competitive SFR technology through the production of the experimental data required for the design approval of a prototype reactor and through the expanding the SFR design technology from software oriented design to hardware-demonstration design.

## III. Contents and Scope of the Study

- < **Advanced Technology Development: Fundamental Facility Construction for the Safety Demonstration** >
- Construction of Component Performance Test Sodium Loop, STELLA-1 and Separate Performance Test of Major Components**

- Construction of component performance test sodium loop
- Separate performance test of major components

**□ Development of Sodium Measurement Methodology**

- Construction of test facility for sodium measurement instruments
- Design, manufacture and performance tests of sodium measurement instruments

**□ Basic Design of Sodium Thermal-Hydraulic Experimental Facility STELLA-2**

- Scope evaluations of the sodium thermal-hydraulic test and the integral effect test
- Basic design of sodium thermal-hydraulic experimental facility

**< Verification of Fundamental Technology: Sodium Technology Development >**

**□ Steam Generator Reliability Improvement Technology Development**

- Experiment on the double wall tube characteristics
- Design and manufacture of a prototype Sodium-Water Reaction(SWR) early detection equipment
- Measurement of background noises in a real steam generator
- Experiment on the wastage characteristics of a heat transfer tube and development of SWR analysis model

**□ Sodium Handling Safety Technology Development**

- Design and performance test of sodium fire propagation prevention structures
- Acquisition of measuring data of sodium impurity and estimation of impurity properties of sodium
- Test on the static and dynamic corrosion behaviors of metals in a heavy metal coolant

**□ In-core Instrumentation and Monitoring Technology Development**

- Development of the mockup specification of core and fuel surveillance
- In-core wide area/delayed neutron flux monitoring concept and measurement sensitivity analysis

**□ Development of Impurity Measurement and Control Technology**

- Development of an improved impurity purification apparatus
- Performance test of the improved impurity purification apparatus

**□ Development of SWR Protection Technology**

- Multi-target wastage test
- Development of a SWR leak propagation model

**□ Development of Sodium Treatment Process Technology**

- Water mockup test for a sodium feed nozzle
- Design and manufacture of sodium treatment apparatus
- Preliminary test of a sodium treatment

**IV. Results of the Research and Development**

**< Advanced Technology Development: Fundamental Facility Construction for the Safety Demonstration >**

- Construction of Component Performance Test Sodium Loop and the Separate Performance Test of Major Components**

- As the first step of the sodium thermal-hydraulic test program at KAERI, the detailed design of STELLA-1 facility for demonstrating the thermal-hydraulic performances of the major components has been completed. The manufacturing and installation process for heat exchangers, mechanical sodium pump, pressure vessels and related pipe lines were successfully completed in 2011, and the performance tests will be started in next fiscal year.

#### **□ Development of Sodium Measurement Methodology**

- Sodium measurement instruments were designed and manufactured. The performance tests of these instruments were successfully performed. Measurement uncertainties of the prototype were as follows; for the flow rate transducer within  $\pm 1.9\%$ FS, for the local velocity transducer within  $\pm 2.5\%$ FS, for level transducer within  $\pm 3.7\%$ FS, and the response time of pressure transducer was 0.7 sec.

#### **□ Basic Design of Sodium Thermal-Hydraulic Experimental Facility**

- Based on the three-level scaling law for the similarity preservation, basic design of the integral effect test loop called STELLA-2 was completed in 2011 to investigate plant dynamic response after reactor shutdown and to demonstrate overall safety features. The results of STELLA-2 experiment will support the design approval for the prototype SFR.

### **< Verification of Fundamental Technology: Sodium Technology Development >**

#### **□ Steam Generator Reliability Improvement Technology Development**

- New concept of a double wall tube has been developed and fabricated to reduce SWR probability in a SFR steam generator. And an experiment has been carried out to verify the on-line leak detection method in DWTS. Also the prototype of an early leak detection system for SWR was fabricated and an experimental correlation was developed for the wastage rate of the modified 9Cr-1Mo steel by small leaks.

#### **□ Sodium Handling Safety Technology Development**

- Optimum conditions of sodium cover tray for the prevention of sodium fire propagation were established through the experiment. We confirmed the possibility of continuous measurement of oxygen content in sodium by use of the plugging meter and cold trap. T91's(Mod. 9Cr-1Mo coated with Al) compatibility with lead-bismuth eutectic was tested and confirmed.

#### **□ In-core Instrumentation and Monitoring Technology Development**

- Failed fuel detecting method was developed with detecting the fission gas gamma-ray and the delayed neutron for monitoring the fuel integrity. In addition, failed fuel location method was developed by detecting and sorting the leak gases from each fuel rod. These two detecting methods were combined to configure the concept of the fuel surveillance system. And also following concepts were established for the ex-core neutron flux monitoring; detector specifications, operating conditions, detecting signal processing method, surveillance system configuration and interface conditions with other systems.

#### □ **Development of Impurity Measurement and Control Technology**

- Analysis of the up-to-date technology for the improved impurity purification apparatus was performed. Cold traps with a different shapes of the mesh packing which is a major factor for the performance of the cold traps, were developed. An experimental facility including these cold traps was designed and installed, and the performance test of cold traps is carried out. With this test results, an evaluation of the improved cold trap has been performed. In addition, a large cold trap was designed and the performance test and an evaluation are carried out in a same loop.

#### □ **Development of SWR Protection Technology**

- Experimental study on the multi-target wastage and consequential surface degradation effect was carried out for the reference SG tube bundle model. The test conditions are totally based on the prototype SFR SG with an intermediate steam leak rate. The event propagation model, which can predict preliminarily the process of stepwise leak propagation from micro leak to large leak, was developed.

#### □ **Development of Sodium Treatment Process Technology**

- New improved concept of sodium treatment process technology was developed by reviewing the current state-of-the-art. With water mockup test, a sodium atomizing feed nozzle was developed to maintain a uniform reaction. Design requirements such as optimum flowing conditions were obtained for the design and manufacture of test facility. A test facility for the sodium treatment process technology was installed and the feasibility test for the nozzle and this new process is being performed with sodium.

### **V. Future Application of the Study**

- To satisfy the specific design licensing requirements of the prototype SFR by 2020 through the performance verification of the innovative PDRC with this key research facility.
- To produce the data for the establishment of safety analysis methodology and the verification of computing system through the construction, the separate effect test and the integral effect test of the experimental facility.
- To enhance the various bilateral or multilateral cooperation including Gen IV international cooperation by supplying the reliable data of multidimensional phenomena in the reactor vessel for verifying the computer code of the pool-type reactor analysis through this sodium thermal-hydraulic experimental facility.
- To have the high potential use of this experimental facility for the international cooperation on the SFR safety study since the importance of this sodium experimental facility achieved 11 points( full marks 12 points) reflecting the importance and usefulness of the facility in a viewpoint of the Gen IV SFR safety study at the 3rd TAREF (Task on Advanced Reactor Experimental Facilities) international conference held in Paris, France in September, 2009.
- Some technologies such as a technology of the purification efficient improvement of sodium impurity control apparatuses and technologies of the waste treatment process and disposal process of the waste sodium during this study can be directly applied to the construction of the sodium experimental facility and the medium/large scale sodium test facility.

# CONTENTS

<b>Chapter 1 Introduction</b> .....	<b>1</b>
Section 1 Necessity of the Study .....	1
Section 2 Objective and Contents .....	1
<b>Chapter 2 State-of-the-art in the Related Technology Development</b> .....	<b>4</b>
Section 1 State-of-the-art for the Safety Study in the Foreign Countries .....	4
Section 2 State-of-the-art in Korea .....	5
Section 3 Level of Contribution to State-of-the-art for the International Technology Development .....	7
<b>Chapter 3 Contents of the Research Development and the Results</b> .....	<b>9</b>
<b>Section 1 Advanced Technology Development: Fundamental Facility         Construction for the Safety Demonstration</b> .....	<b>9</b>
1. Construction of a Component Performance Test Sodium Loop and the Separate Performance Tests of Major Components .....	9
A. Construction of a component performance test sodium loop .....	10
B. Performance test .....	49
2. Development of Sodium Measurement Methodology .....	66
A. Construction of a test facility for sodium measurement instruments .....	66
B. Design, manufacture and performance test of sodium measurement instruments .....	67
3. Basic Design of a Sodium Thermal-Hydraulic Experimental Facility .....	70
A. Scope evaluation of the sodium thermal-hydraulic test and the integral effect test .....	70
B. Basic design of a sodium thermal-hydraulic experimental facility .....	72
<b>Section 2 Verification of Fundamental Technology:         Sodium Technology Development</b> .....	<b>96</b>
2. Steam Generator Reliability Improvement Technology Development .....	96
A. Experiment on the double wall tube characteristics .....	96
B. Design and manufacture of Sodium-Water Reaction(SWR) early detection equipment .....	99
C. SG background noise measurements .....	102
D. Experiment on the wastage characteristics of a heat transfer tube	

and the development of SWR analysis model .....	103
2. Sodium Handling Safety Technology Development .....	105
A. Design and performance test of sodium fire propagation prevention structures .....	105
B. Acquisition of measuring data of sodium impurity and estimation of impurity properties of sodium .....	107
C. Test on the static and dynamic corrosion behaviors of metals in a heavy metal coolant .....	110
3. In-core Instrumentation and Monitoring Technology Development .....	115
A. Development of the mockup specification of core and fuel surveillance .....	115
B. In-core wide area/delayed neutron flux monitoring concept and measurement sensitivity analysis .....	116
4. Development of Impurity Measurement and Control Technology .....	119
A. Development of an improved impurity purification apparatus .....	119
B. Performance test of the improved impurity purification apparatus .....	120
C. Development of large-scale impurity purification apparatus .....	122
5. Development of SWR Protection Technology .....	125
A. Multi-target wastage test .....	125
B. Development of a SWR leak propagation model .....	130
6. Development of Sodium Treatment Process Technology .....	132
A. Water mockup test for sodium feed nozzles .....	132
B. Design and manufacture of a sodium treatment apparatus .....	134
C. Preliminary test of the sodium treatment .....	138
 <b>Chapter 4 Achievement to the Research Objectives and Its Contribution to Outsides .....</b>	 <b>142</b>
 <b>Chapter 5 Application Plan of the Research Development Results .....</b>	 <b>151</b>
 <b>Chapter 6 Overseas Science and Technology Information through the Research and Development .....</b>	 <b>152</b>
 <b>Chapter 7 Status of Research Facility and Equipment .....</b>	 <b>153</b>
 <b>Chapter 8 References .....</b>	 <b>154</b>



# 목 차

제출문 .....	i
보고서 요약서 .....	ii
요약문 .....	iii
Summary .....	vii
Contents .....	xi
목차 .....	xiii
표목차 .....	xv
그림목차 .....	xvii
<b>제 1 장 연구개발과제의 개요 .....</b>	<b>1</b>
제 1 절 연구개발의 필요성 .....	1
제 2 절 연구개발 목표 및 내용 .....	1
<b>제 2 장 국내·외 기술개발 현황 .....</b>	<b>4</b>
제 1 절 국외 기술개발 현황 .....	4
제 2 절 국내 기술개발 현황 .....	5
제 3 절 국내·외 기술개발 현황에서 차지하는 위치 .....	7
<b>제 3 장 연구개발 수행내용 및 결과 .....</b>	<b>9</b>
제 1 절 선진기술 개발 및 검증 : 안전성 입증 실험 기반 구축 .....	9
1. 기기 열유체 성능검증 소듐루프 구축 및 기기 성능검증 개별실험 .....	9
가. 기기 열유체 성능검증 소듐루프 구축 .....	10
나. 성능검증 개별실험 .....	49
2. 소듐 고유 계측기법 개발 .....	66
가. 소듐 고유 계측기 시제품 시험용 실험장치 구축 .....	66
나. 소듐 고유 계측기 시제품 설계, 제작 및 성능시험 .....	67
3. 소듐 열유체 실증시험시설 기본설계 .....	70
가. 소듐 열유체 실증시험시설 및 종합효과시험 범위 평가 .....	70
나. 실증시험시설 기본설계 .....	72
제 2 절 기반기술 검증 : 소듐기술 개발 .....	96
1. SG 신뢰성 향상기술 개발 .....	96

가. 이중벽 전열관 특성실험 .....	96
나. SWR 조기 감지설비 설계 및 제작 .....	99
다. SG 배경소음 측정 .....	102
라. 전열관 wastage 특성 실험 및 SWR 해석모델 개발 .....	103
2. 소듐 안전관리기술 개발 .....	105
가. 소듐 화재확산방지 구조물 개발 및 성능실험 .....	105
나. 소듐내 불순물 측정실험 및 특성평가 .....	107
다. 중금속 냉각재 정적 및 동적 부식 특성실험 .....	110
3. 원자로 내부 계측 및 감시방법 개발 .....	115
가. 노심 및 핵연료 감시 모형 사양 개발 .....	115
나. 원자로 내부 광역/ 지발중성자속 계측 개념설정 및 측정 민감도 평가 .....	116
4. 불순물 측정 및 제어기술 개발 .....	119
가. 개량형 불순물 정제장치 개발 .....	119
나. 개량형 불순물 정제장치 검증실험 .....	120
다. 대용량 콜드트랩 설계, 제작, 설치 및 검증실험 .....	122
5. SWR 사고 방호기술 개발 .....	125
가. Multi-target wastage 특성실험 .....	125
나. SWR 사고 확대전파모델 개발 .....	130
6. 사용 후 소듐 처리공정 개발 .....	132
가. 소듐 주입노즐 물모의 실험 .....	132
나. 소듐 처리장치 설계 및 제작 .....	134
다. 소듐 처리 예비실험 .....	138
<b>제 4 장 목표 달성도 및 관련 분야에의 기여도 .....</b>	<b>142</b>
<b>제 5 장 연구개발결과의 활용계획 .....</b>	<b>151</b>
<b>제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외 과학 정보 .....</b>	<b>152</b>
<b>제 7 장 연구시설·장비 현황 .....</b>	<b>153</b>
<b>제 8 장 참고문헌 .....</b>	<b>154</b>

# 표 목 차

표 1.1-1	실험장치 각 계통 기능 및 주요 설계변수	13
표 1.1-2	STELLA-1 DHX 설계제원 및 물량	23
표 1.1-3	STELLA-1 AHX 설계제원 및 물량	24
표 1.1-4	평가결과 비교(DHX)	29
표 1.1-5	평가결과 비교(AHX)	34
표 1.1-6	원형펌프와 모형펌프의 설계사양 비교	42
표 1.1-7	STELLA-1 DHX 실험조건	49
표 1.1-8	STELLA-1 AHX 실험조건	50
표 1.1-9	DHX-AHX 소듐루프 자연순환 실험조건	51
표 1.1-10	수력성능 시험장치 주요제원	52
표 1.1-11	모형펌프 성능시험 매트릭스	54
표 1.1-12	호모로고스 1상한 시험 매트릭스	56
표 1.1-13	호모로고스 2상한 시험 매트릭스	57
표 1.1-14	호모로고스 3상한 시험 매트릭스	58
표 1.1-15	호모로고스 4상한 시험 매트릭스	59
표 1.1-16	호모로고스 변수들과 계산공식	62
표 1.1-17	소듐환경에서의 펌프 성능시험 일정	65
표 1.2-1	소듐 고유 계측기 시작품 특성	66
표 1.3-1	척도법에 의한 일반상사요건 및 설계변수 요건	79
표 1.3-2	설계 조건별 실험 열출력	80
표 1.3-3	Assembly 가장 바깥쪽 봉 배열수에 따른 모델 출력 민감도	80
표 1.3-4	펌프 상사요건	81
표 1.3-5	STELLA-2 IHX 설계제원	82
표 1.3-6	STELLA-2 DHX 설계제원	83
표 1.3-7	STELLA-2 AHX 설계제원	84
표 1.3-8	STELLA-2 FDHX 설계제원	85
표 1.3-9	STELLA-2 UHX 설계제원	87
표 1.3-10	원자로 내부구조물 제원	89
표 1.3-11	원자로 내부구조물 고도	90
표 1.3-12	Cross sectional dimension of reactor structure	90
표 1.3-13	Elevation and regional volume in reactor vessel	91
표 1.3-14	상부내부구조물 (UIS)	92

표 1.3-15	PHTS 주요 설계인자 .....	92
표 1.3-16	PHTS 펌프 주요 설계인자 .....	93
표 1.3-17	IHTS 주요 설계인자 .....	93
표 1.3-18	IHTS 펌프 주요 설계인자 .....	94
표 1.3-19	모의노심 전열봉 설계 .....	95
표 1.3-20	모의 노심 비발열부 구성 .....	95
표 2.2-1	소듐정화계통 요건 .....	107
표 2.2-2	시편의 조성 .....	111
표 2.2-3	실험조건 .....	111
표 2.4-1	Mesh 유형별 구성 .....	119
표 2.4-2	콜드트랩 유형별 실험 데이터 .....	121
표 2.4-3	대용량 콜드트랩 열전달 계산결과 .....	122
표 2.4-4	대용량 콜드트랩 실험 데이터 .....	123
표 2.4-5	불순물(산소) 설계포획량 계산식 .....	124
표 2.4-6	불순물(산소) 설계포획량 비교 .....	124
표 2.4-7	계측기법 실험장치의 구조재 표면적 .....	124
표 2.5-1	실험조건 .....	125
표 2.6-1	최적 주입조건 .....	134
표 2.6-2	운전조건 .....	135
표 2.6-3	관련 유체들의 물성 .....	135
표 2.6-4	실험자료 기록 항목 .....	138
표 2.6-5	On-Off 매트릭스 .....	138
표 2.6-6	실험조건 .....	139

# 그림 목 차

그림 1.1-1	STELLA-1 준공식 사진	9
그림 1.1-2	전력공급계통 설치 현황	10
그림 1.1-3	배전반	10
그림 1.1-4	소듐 이송 및 저장고내 소듐	10
그림 1.1-5	소듐기술실험동 내 STELLA 설치위치 및 지하시설	11
그림 1.1-6	제어실 설계도면 및 건축사진	11
그림 1.1-7	STELLA-1 Plan Drawing	12
그림 1.1-8(a)	STELLA-1 주실험계통 P&ID (1/4)	14
그림 1.1-8(b)	STELLA-1 주실험계통 P&ID (2/4)	14
그림 1.1-8(c)	STELLA-1 주실험계통 P&ID (3/4)	15
그림 1.1-8(d)	STELLA-1 주실험계통 P&ID (4/4)	15
그림 1.1-9	자동 소화설비 계통도	16
그림 1.1-10	개량형 콜드트랩 개념도	17
그림 1.1-11	개량형 콜드트랩 설계도면	17
그림 1.1-12(a)	대용량 콜드트랩 설계도면	18
그림 1.1-12(b)	대용량 콜드트랩 제작	18
그림 1.1-12(c)	플러깅미터 설계도 및 제작품 사진	18
그림 1.1-13	배관에 대한 고온 기계구조 건전성 평가결과	19
그림 1.1-14	전자기 펌프	20
그림 1.1-15	전자기 펌프 특성실험 결과	20
그림 1.1-16	STELLA-1 DHX 및 AHX의 제작 사진	21
그림 1.1-17	STELLA-1 주요 탱크류 제작 사진	21
그림 1.1-18(a)	STELLA-1 DHX 설계도면	22
그림 1.1-18(b)	STELLA-1 DHX 모형도 및 제작 사진	23
그림 1.1-19	AHX 척도설계인자 왜곡도 평가	24
그림 1.1-20(a)	STELLA-1 AHX 설계도면	25
그림 1.1-20(b)	STELLA-1 AHX 모형도 및 제작 사진	25
그림 1.1-21	DHX의 3D 유한요소모델	26
그림 1.1-22	DHX 내 일차 및 이차 유로	26
그림 1.1-23	DHX 내 일차측 소듐 설계 과도	26
그림 1.1-24	DHX 내 이차측 소듐 설계 과도	26
그림 1.1-25	410°C→510°C Heatup 시 DHX의 온도 분포	27

그림 1.1-26	510°C→410°C Cooldown 시 DHX의 온도 분포	27
그림 1.1-27	410°C→510°C Heatup 시 DHX의 응력 분포	28
그림 1.1-28	410°C→510°C Heatup 시 DHX의 노즐 및 상·하부 관관의 응력 분포	28
그림 1.1-29	크립-피로 손상평가	29
그림 1.1-30	STELLA-1 DHX 제작 과정	30
그림 1.1-31	AHX의 3D 형상 및 유한요소모델	30
그림 1.1-32	AHX 내 일차 및 이차 냉각재의 유로	31
그림 1.1-33	AHX 내 일차측 소듐 설계 과도	31
그림 1.1-34	AHX 내 이차측 공기 설계 과도	31
그림 1.1-35	400°C→500°C Heatup 시 온도분포	32
그림 1.1-36	500°C→400°C Cooldown 시 AHX의 온도분포	32
그림 1.1-37	410°C→510°C Heatup 시 AHX 본체, 노즐 및 상·하부 관관의 응력 분포	33
그림 1.1-38	AHX 내 크립-피로 손상평가 대상 부위	33
그림 1.1-39	헬리컬 튜브-셸 형태의 STELLA-1 AHX 제작 및 조립 사진	34
그림 1.1-40	DHX 형상 및 격자 구성	35
그림 1.1-41	DHX 수평/수직단면에서의 속도 및 온도분포	36
그림 1.1-42	1차원 및 CFD 해석결과 비교	36
그림 1.1-43	AHX 형상 및 격자 구성	37
그림 1.1-44	AHX 수평/수직단면에서의 온도 및 속도분포	37
그림 1.1-45	1차원 및 CFD 해석결과 비교	38
그림 1.1-46	엇갈리게 배열된 두 개의 수평관 열전달 실험개요	38
그림 1.1-47	엇갈리게 배열된 두 개의 수평관 열전달 실험결과	39
그림 1.1-48	원형펌프 유량 대비 수두곡선	40
그림 1.1-49	모형펌프 설계인자 민감도 분석	42
그림 1.1-50	모형펌프 제작 단면도	43
그림 1.1-51	펌프 해석 영역 및 해석 격자	43
그림 1.1-52	펌프 유량 대비 내부유속 분석	44
그림 1.1-53	온도상승에 의한 펌프 케이싱 변형분석	44
그림 1.1-54	임펠러 및 디퓨저 상세 구조	45
그림 1.1-55	베어링시험장치	45
그림 1.1-56	모형펌프 외형/단면도/주요부품 및 제작완료 사진	45
그림 1.1-57	STELLA-1 주요 설치일정	46
그림 1.1-58	STELLA-1 개념도 및 설치완료 사진	47
그림 1.1-60	DHX 실험시 STELLA-1 루프 구성도	49
그림 1.1-61	AHX 실험시 STELLA-1 루프 구성도	50

그림 1.1-62	DHX-AHX 소듐루프 자연순환 시험시 STELLA-1 루프 구성도	51
그림 1.1-63	모형펌프 성능 시험장치	52
그림 1.1-64	모형펌프 수력성능 시험장치 개념도(펌프성능, NPSHre, 코스트다운, 압력맥동 시험용)	53
그림 1.1-65	모형펌프 수력성능 시험장치 개념도(호모로고스 1상한 및 4상한, 유동저항 시험용)	53
그림 1.1-66	정격유량 대비 성능곡선 및 회전수별 성능곡선	61
그림 1.1-67	호모로고스 수두 곡선	62
그림 1.1-68	NPSHre(캐비테이션) 곡선	63
그림 1.1-69	코스트다운 유량, 회전수 및 소비전력 곡선	63
그림 1.1-70	흡입 및 토출배관에서의 압력 맥동 및 FFT 분석 결과(적색:흡입관, 청색:토출관)	64
그림 1.2-1	시험장치 P&ID	66
그림 1.2-2	시작품 시험용 시험장치	66
그림 1.2-3	레벨센서 시작품	67
그림 1.2-4	압력센서 시작품	68
그림 1.2-5	유량센서 시작품	69
그림 1.2-6	국부유속 센서 시작품	69
그림 1.3-1	STELLA-2 시험장치 개략도	73
그림 1.3-2	STELLA-2 3차원 배치도	73
그림 1.3-3	STELLA-2 IHX 개략도	82
그림 1.3-4	STELLA-2 DHX 개략도	83
그림 1.3-5	STELLA-2 AHX 개략도	84
그림 1.3-6	STELLA-2 FDHX 개략도	86
그림 1.3-7	STELLA-2 UHX 개략도	88
그림 2.1-1	신개념 DWT	96
그림 2.1-2	누출감지 개념	96
그림 2.1-3	이중벽관 제작	96
그림 2.1-4	누출특성 측정장치	97
그림 2.1-5	3차원 형상	97
그림 2.1-6	누설량 비교	97
그림 2.1-7	접촉압력 영향	97
그림 2.1-8	검증장치 배관도	98
그림 2.1-9	능동형 음향감지 시험장치와 기포거동특성	99

그림 2.1-10	음향감지 논리 성능평가 결과	100
그림 2.1-11	혼합형 음향누출 감지논리	100
그림 2.1-12	시제품	101
그림 2.1-13	피동형 음향감지논리	101
그림 2.1-14	시제품의 성능시험 결과	102
그림 2.1-15	배경소음 측정장치	102
그림 2.1-16	Self-wastage 특성	103
그림 2.1-17	KALIMER SG 운전조건	103
그림 2.1-18	Wastage 특성	103
그림 2.1-19	해석모델 검증장치 개념	103
그림 2.1-20	사고 확대 시간 모형	104
그림 2.1-21	해석모델 검증장치	104
그림 2.2-1	화재 확산방지 개념	105
그림 2.2-2	화재영향 계산 결과	105
그림 2.2-3	커버트레이의 구조	106
그림 2.2-4	실험장치 P&ID	106
그림 2.2-5	벤트관 1/2인치-배출관 1/2인치 수위별 배출 평균시간	106
그림 2.2-6	벤트관 1/2인치-배출관 1인치 수위별 배출 평균시간	107
그림 2.2-7	벤트관 1/2인치-배출관 2인치 수위별 배출 평균시간	107
그림 2.2-8	불순물 측정 실험장치의 P&ID	108
그림 2.2-9	불순물 측정 실험장치	109
그림 2.2-10	냉각속도가 막힘온도에 미치는 영향	109
그림 2.2-11	플러깅 미터 온도 변화에 따른 소듐 유량변화 (CT 온도: 270°C)	109
그림 2.2-12	막힘온도와 용해도 등가온도	110
그림 2.2-13	정적실험 시편	111
그림 2.2-14	질소이온 주입시편	111
그림 2.2-15	LBE 동적실험 시편 지지봉 및 시편	112
그림 2.2-16	T91 및 Al 코팅 시편 SEM/EDX 분석결과	113
그림 2.2-17	T91 SEM/EDX 분석결과	113
그림 2.2-18	T91 시편 SEM/EDX 분석결과	113
그림 2.2-19	W 시편 SEM/EDX 분석결과	114
그림 2.3-1	지발중성자속 검출기 및 감마선 검출기 예상 설치위치	115
그림 2.3-2	표식가스 분석시스템 중 질량분석방법의 개념도	115
그림 2.3-3	지발중성 자원 전달경로	116
그림 2.3-4	경로분석 결과	116



그림 2.3-5	검출기 설치 후보영역 .....	116
그림 2.3-6	계측기 측정가능 영역 .....	117
그림 2.3-7	원자로 내부설치 중성자속 검출기 집합체 예비 구성도 .....	117
그림 2.3-8	노외중성자속 감시계통의 채널 구성도 .....	118
그림 2.4-1	개량형 콜드트랩 개념도 .....	119
그림 2.4-2	Mesh packing의 유형 (axial & radial) .....	119
그림 2.4-3	개량형 콜드트랩 .....	119
그림 2.4-4	개량형 콜드트랩 루프 .....	120
그림 2.4-5	소듐 중 산소, 수소, 탄소, 규소의 용해도 .....	120
그림 2.4-6	개량형 콜드트랩 유형별 정제효율 비교 .....	121
그림 2.4-7	대용량 콜드트랩 도면 .....	122
그림 2.4-8	대용량 콜드트랩 제작 .....	123
그림 2.4-9	대용량 콜드트랩 정제효율 .....	123
그림 2.5-1	전열관 번들 모형 .....	125
그림 2.5-2	노즐 구경 .....	126
그림 2.5-3	반응 flame jet 형성 길이 .....	126
그림 2.5-4	스팀 분사 방향 .....	127
그림 2.5-5	소듐 유입 방지기구 .....	128
그림 2.5-6	일련번호 색인 .....	128
그림 2.5-7	전열관 손상형태 .....	129
그림 2.5-8	반응 flame jet 분사각 (12g/s) .....	130
그림 2.5-9	전열관 손상 3차원 분석사례 .....	130
그림 2.5-10	사고 확대전파모델 .....	131
그림 2.6-1	사용후 소듐처리 공정도 .....	132
그림 2.6-2	물모의 실험장치 .....	133
그림 2.6-3	분무노즐 .....	133
그림 2.6-4	최적상태 .....	134
그림 2.6-5	NaOH 수용액 특성 ref. [2.6-3] .....	135
그림 2.6-6	사용후 소듐처리 장치 .....	137
그림 2.6-7	분무노즐 설치 .....	137
그림 2.6-8	NaOH 농도계 .....	137
그림 2.6-9	수소 농도계 .....	137
그림 2.6-10	DAS 신호 획득 다이어그램 .....	138
그림 2.6-11	On-Off 유량제어밸브 .....	139

그림 2.6-12	On-Off 유량제어밸브 검정곡선 .....	139
그림 2.6-13	수소, 가성소다 농도 및 반응기압력 변화 .....	140
그림 2.6-14	반응기내 수용액 온도 변화 .....	141
그림 2.6-15	소듐 누적처리량 .....	141

# 제 1 장 연구개발과제의 개요

## 제 1 절 연구개발의 필요성

### ○ 소듐 열유체 실증시험시설을 통한 피동형 잔열제거 안전계통의 성능 확보

- 제4세대 소듐냉각고속로(Gen IV SFR)는 기술목표 중 하나인 “안전성의 획기적 향상과 입증”을 위해 피동형 잔열제거계통을 채택하고 있으며, Gen IV SFR Concept으로 채택된 KALIMER-600(한국), JSFR-1500(일), SMFR(미) 원자로 모두 피동형 잔열제거계통을 포함하고 있음
- 제4세대 원자로 표준설계인증 인허가 요건: 혁신적 피동안전계통 설계개념은 실험적 검증이 필수

### ○ 2020년 원형로 특정설계승인 획득 및 2028년 건설을 위한 핵심 연구시설

- 2020년 특정설계승인 및 2028년 건설완료를 목표로 하고 있는 원형로는 혁신적 피동안전계통 설계개념을 포함하므로, 기기 열유체 성능검증 소듐루프 구축 및 개별효과실험과 소듐 열유체 실증시험시설 구축 및 종합효과시험을 통하여 원형로 안전계통의 성능검증, 안전계통과 일차열전달계통과의 상호영향 평가 및 적합성 검증이 필수적임

### ○ 소듐냉각고속로 개발 중간 성과물로서의 가치

- 지금까지 개발한 설계기술, 전산체제, 소듐기술 등 축적된 연구결과의 종합적 실증이 가능함
- 본 시험시설 구축은 원형로 특정설계승인 획득에 필요한 실험데이터를 생산하여, 그동안 설계 중심이었던 SFR 기술개발 능력을 하드웨어적 검증단계까지 발전시킴으로써 SFR 기술경쟁력 확보라는 국가 정책목표 구현에 직접적으로 기여함

## 제 2 절 연구개발 목표 및 내용

### 1. 최종목표

본 과제는 1단계 3년 ('07.03.01~'10.02.28), 2단계 2년('10.03.01~'12.02.29)으로 구분되어 있으며, 연구개발의 최종목표는 다음과 같다.

#### ○ 소듐 열유체 실증시험시설 구축 및 종합효과시험

### 2. 단계 목표 및 내용

□ 1단계 : 소듐 핵심 기반기술 개발 ('07.03.01~'10.02.28)

○ 1단계 목표

- 국내기반기술개발
  - SG 신뢰성 향상기술 개발
  - 소듐 안전관리기술 개발
  - 원자로 내부 중성자속 계측 및 감시방법 개발

○ 1단계 연구개발내용

'07년도	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 국내 기반기술 개발                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- SG 신뢰성 향상기술 개발                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>· 이중벽 전열관 열전달 모델 개발 및 특성 측정장치 설계 및 제작</li> <li>· 소듐-물 반응음 생산 및 능동형 감시방법 개발</li> <li>· 전열관 wastage 특성 실험 및 SWR 해석모델 검증장치 설계</li> </ul> </li> <li>- 소듐 안전관리 기술 개발                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>· 소듐 화재확산방지기념 설정 및 소듐화재 연소모델 개발</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>· 소듐내 불순물 특성 제어 설계개념 설정</li> <li>· 알루미늄을 이용한 중금속 냉각재 정적 및 중단기 동적 부식 특성실험(합금강, 2,000시간)</li> <li>- 원자로 내부 계측 및 감시방법 개발                             <ul style="list-style-type: none"> <li>· 노심 및 핵연료 감시 계측변수 및 논리 구체화</li> <li>· 원자로 내부 광역/ 지발중성자속 계측 개념설정</li> </ul> </li> </ul>
'08년도	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 국내 기반기술 개발                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- SG 신뢰성 향상기술 개발                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>· 이중벽 전열관 특성 측정장치 설치 (tube 직경 : 1")</li> <li>· SWR 피동형 음향감지논리 성능평가 및 최적화</li> <li>· 국외 SG 배경소음 측정장치 구축</li> <li>· Wastage 모델 개발 및 SWR 해석모델 검증 장치 제작</li> </ul> </li> <li>- 소듐 안전관리기술 개발                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>· 소듐 화재확산방지 구조물 개발 및 화재 실험장치 제작, 설치</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>· 소듐 불순물 화학분석 기술 확보 및 불순물 측정 실험장치 설치</li> <li>· 질소이온빔을 이용한 중금속 냉각재 정적 및 중단기 동적 부식 특성실험(알루미늄 코팅 , 2,000시간)</li> <li>- 원자로 내부 계측 및 감시방법 개발                             <ul style="list-style-type: none"> <li>· 노심 및 핵연료 감시 모형 사양 개발</li> <li>· 원자로 내부 광역/ 지발중성자속 계측기 후보 측정 민감도 평가</li> </ul> </li> </ul>
'09년도	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 국내 기반기술 개발                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- SG 신뢰성 향상기술 개발                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>· 이중벽 전열관 열전달 및 기계적 특성 분석자료 생산, 평가</li> <li>· SWR 조기 감지설비 시제품 제작 (&lt;1/100 dB, &lt; 0.1g/sec)</li> <li>· 국외 SG 배경소음 확보</li> <li>· SWR 해석모델 개발 및 검증장치 설치, 시운전</li> </ul> </li> <li>- 소듐 안전관리기술 개발                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>· 소듐화재 연소모델 개선 및 확산방지 구조물의 성능실험</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>· 소듐 내 불순물 측정 자료 생산 및 불순물 특성 평가± 0.001 민감도)</li> <li>· W와 Nb를 이용한 중금속 냉각재 정적 및 중단기 동적 부식 특성실험 (질소이온빔, W or Nb, 2,000시간)</li> <li>- 원자로 내부 계측 및 감시방법 개발                             <ul style="list-style-type: none"> <li>· 노심 및 핵연료 감시 모형 제작</li> <li>· 원자로 내부 광역/ 지발중성자속 계측기 설치/제작성 검토</li> </ul> </li> </ul>

□ 2단계 : 소뚱 열유체 실증시험시설 구축 및 종합효과시험 ('10.03.01~'12.02.29)

○ 1단계 목표

- 선진기술 개발 및 검증 : 안전성 입증 실험 기반 구축
  - 소뚱 열유체 실증시험시설 기본설계
  - 기기 열유체 성능검증 소뚱루프 구축 및 개별실험
- 기반기술 검증 : 소뚱기술 개발
  - 불순물 측정 및 제어기술 개발
  - SWR 사고 방호기술 개발
  - 사용 후 소뚱 처리공정 개발

○ 2단계 연구개발내용

'10년도	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 선진기술 개발 및 검증 &lt;안전성 입증 실험 기반 구축&gt;                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 소뚱 고유 계측기법 개발</li> <li>- 기기 열유체 성능검증 소뚱루프 구축                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>· 소뚱루프 제작 및 설치</li> <li>· 실험용 소형 열교환기 제작 및 설치</li> <li>· 기계식 소뚱 펌프 시제품 제작 및 설치</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>• 기반기술 검증 &lt;소뚱기술 개발&gt;                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 불순물 측정 및 제어기술 개발                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>· 개량형 불순물 정제장치 개발</li> </ul> </li> <li>- SWR 사고 방호기술 개발                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>· Multi-target wastage 특성실험</li> </ul> </li> <li>- 사용 후 소뚱 처리공정 개발                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>· 소뚱 주입노즐 물모의 실험</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>
'11년도	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 선진기술 개발 및 검증 &lt;안전성 입증 실험 기반 구축&gt;                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 소뚱 열유체 실증시험시설 기본설계                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>· 소뚱 열유체 실증시험시설 및 종합효과시험 범위 평가</li> <li>· 실증시험시설 기본설계</li> </ul> </li> <li>- 기기 열유체 성능검증 소뚱루프 구축 및 기기 성능검증 개별실험                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>· 설치완료</li> <li>· 종합 시운전</li> <li>· 열교환기 성능실험 및 설계 전산코드 검증</li> <li>· AHX-DHX 간 자연대류 실험 및 설계 전산코드 검증</li> <li>· 기계식 소뚱 펌프 성능시험</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>• 기반기술 검증 &lt;소뚱기술 개발&gt;                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 불순물 측정 및 제어기술 개발                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>· 개량형 불순물 정제장치 검증실험</li> </ul> </li> <li>- SWR 사고 방호기술 개발                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>· SWR 사고 확대전파모델 개발</li> </ul> </li> <li>- 사용 후 소뚱 처리공정 개발                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>· 소뚱 처리장치 설계 및 제작</li> <li>· 소뚱 처리 예비실험</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>

## 제 2 장 국내·외 기술개발 현황

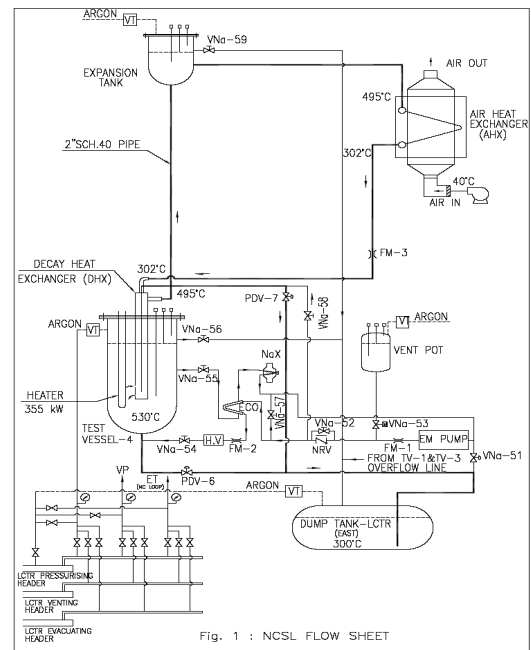
### 제 1 절 국외 기술개발 현황

#### ○ 소듐 열유체 실증시험시설 구축

- 미국은 PRISM (Power Reactor Innovative Small Modular) 원자로 개발의 일환으로 피동잔열제거계통 RVACS 성능입증을 위한 실험을 ANL (Argonne National Laboratory) 에서 수행한 바 있음
- 일본 JAEA는 "PLANDTL" 실험시설을 이용하여 기존의 잔열제거계통에 관련된 자연순환 열유동 실험을 수행한 바 있으며, 현재 실험시설의 보안을 완료하여 JSFR-1500의 잔열제거계통에 관련된 자연순환 열유동 실험을 수행 중에 있음. 또한 2012년 준공을 목표로 Large-scale Sodium Test Facility를 구축 중에 있으며 이를 통하여 증기발생기, 펌프, ISI, 핵연료기기, CRDM 등 기기 시험과 잔열제거계통 실증, 계통 종합효과 시험, 펌프-증기발생기 통합 기기 등의 계통 및 기기 실증을 추진 중에 있음
- 인도는 PFBR의 잔열제거계통에 관련된 자연순환 열유동 실험을 위하여 SADHANA (SAfety grade Decay Heat removal of NAtrium) 실험시설을 구축하여 실험 중임



<PLANDTL 실험시설>



<SADHANA 실험시설 개략도>

#### ○ 소듐기술 개발

- 불순물 측정 및 제어기술 개발
  - 미국, 프랑스 등 소듐냉각고속로 선진국들의 경우 소듐순도관리기술을 이미 확립한 상태이지만 불순물 농도를 측정하기 위한 기기의 정확도와 응답성, 불순물 측정센서의 내구성을 향상시키기 위한 연구는 현재도 계속 진행하고 있음.
  - 러시아는 금속불순물에 대한 실시간 측정/제어기술을 개발하고 있음

## - SWR 사고 방호기술 개발

- 일본은 1970년대부터 다양한 전열관 후보 재료들에 대해 self-wastage 특성실험→wastage 특성실험→중·대규모 누출 특성실험 순서로 가장 활발하게 지속적으로 실험을 수행해 오고 있으며, 2000년대에 들어서부터는 12Cr 강에 대한 실험들을 주로 수행하고 있음
- 중국의 경우, 1991년 이후 스팀 누출량 1g/sec 이하(소듐온도 300~500°C)에서의 소듐-물 반응 실험을 수행하고 있음
- 일본, 프랑스 등에서는 소듐-물 반응 생성물을 효율적으로 제거하는 방법에 대한 연구도 수행 중임

## - 사용 후 소듐 처리공정 개발

- 프랑스에서는 RAPSODIE를 해체하는 동안 발생하는 사용 후 소듐을 처리하기 위하여 안전성, 작업의 단순성, 공정의 조밀성이 뛰어난 DEORA 소듐처리공정을 1994년에 개발하였고, PHENIX 가동 중에 발생된 대규모 사용 후 소듐 처리를 위하여 안전성 측면에서 지속적인 기술개발을 추진하고 있음
- 미국에서는 EBR-II 해체 시 발생된 사용 후 소듐을 소듐카보네이트 분말로 가공하기 위해 Sodium Process Facility(SPF)를 설계, 건설하여 2000년대 중반까지 운영하였음
- 중국은 최근 10 kg/hr 용량으로 소듐을 처분할 수 있는 간단한 소듐 처분장치가 CIAE에서 운영되었고, 대규모 소듐 제정을 위하여 LAVEL 제정플랜트 및 SLAPSO 제정플랜트가 이탈리아로부터 도입되었음
- 일본에서는 50 MW급 증기발생기 시험시설의 해체 시 발생된 소듐의 처리를 위한 다양한 소듐제거법이 응용되었음
- 인도에서는 혼합탄화물연료를 사용하는 소듐냉각로(FBTR)를 10년간 가동하는 동안 노심 컴포넌트, 1차 소듐펌프, CRDM부품, 취급컴포넌트, 콜드트랩을 해체하는 과정에서 많은 소듐 처리경험이 축적되었음

## 제 2 절 국내 기술개발 현황

### ○ 소듐 열유체 실증시험시설 구축

- 제4세대 소듐냉각고속로 핵심기반기술개발을 위한 핵심 연구시설 구축의 일환으로 한국 원자력연구원에서는 소듐 열유체 실증시험시설 STELLA (Sodium Integral Effect Test Loop for Safety SimuLation and Assessment) 구축을 추진해 왔음.
- 지난 연구단계(2008-2010)를 통해 국내 최초로 KALIMER-600 피동잔열제거시스템의 성능검증 및 안전성 입증에 위한 소듐 열유체 종합실증 시험시설인 PDRC-EF에 대한 척도분석 및 기본설계를 완료하였고, 기본설계 자료를 활용한 Scoping 분석을 수행하여

척도해석 방법론 및 척도설계에 대한 타당성을 평가하였음.

- 기 수행연구에서 습득한 자연순환 유동 시험장치에 대한 척도해석 방법론의 타당성 평가 결과를 토대로, 이번 연구단계(2010-2011)에서는 600MWe 실증로의 안전성 입증을 위한 소듐 열유체 종합효과 시험시설(STELLA)의 구축을 추진하였음.
- 1단계로 구축되는 STELLA-1은 잔열제거계통 열교환기 성능검증 및 기계식 소듐 펌프 성능시험과 같은 주요 기기의 개별효과실험을 통한 설계 전산코드 및 설계 방법론 검증을 주목적으로 하며, 2011년도에 주요기기의 제작 및 장치 설치를 완료하고 차기년도부터 기기 성능검증을 위한 개별실험을 수행할 예정임.
- 2단계로 구축되는 STELLA-2는 잔열제거계통의 성능검증, 잔열제거계통과 일차열전달계통과의 상호영향에 의한 잔열제거성능의 종합효과시험 수행을 목적으로 하며, 2011년도에는 잔열제거계통 작동시 주요 계통간 상호작용 및 각 기기의 국부 열수력 현상이 잘 보존될 수 있도록 STELLA-2 시험장치의 기본 설계를 완료하였음.
- 소듐 열유체 종합효과 실험으로부터 얻어진 주요 실험 결과는 향후 원형로 SFR 건설을 위한 인허가 과정에 유용하게 활용될 수 있음.

#### ○ 소듐기술 개발

- '97년 첫 연구가 시작된 이래 지금까지 소듐냉각고속로의 냉각재인 소듐을 취급하고 측정하는 제반 기술을 개발하고 기기설계 및 전산코드 검증실험을 수행하였으며, 소듐시설의 운영 및 관리를 통해 안전성 확보에 관한 다양한 기술적 경험들을 축적하였음.
- '97.07~'02.03 기간 동안에는 소듐 열유체 기초연구, 요소기기 개발 등의 기초실험과 더불어 설계분야와의 연계 하에 전산모델 검증실험 및 소듐 안전취급 실험을 수행하였음.
- '02.04~'05.02 기간 동안에는 소듐냉각고속로의 개념설계 타당성을 입증하기 위하여 IHTS 단순화 특성, SWR 중·후반기 거동특성, Thermal striping 특성에 대한 실험적 검증자료를 생산하였으며, 중요한 실험을 보다 정확하고 효율적으로 수행하기 위해 증기발생기에서 소듐으로의 물 누출 감지, 차압 및 유량 측정, 복합 열전달모드의 측정오차 최소화와 같은 측정기술 개발 연구를 주도적으로 수행하였음.
- 지난 단계('05.03~'07.02)에는 UIS의 영향을 고려한 자유액면 요동특성 분석기술, 소듐-물 반응사고 발생 시 물 누출을 조기에 감지할 수 있는 감지기술, 소듐으로 오염된 실험장치 및 정밀기기를 손상 없이 재사용하기 위한 소듐 세정기술, 실험의 신뢰성과 효율성을 높이기 위한 소듐 측정기술에 대한 연구를 수행하였음.
- 이번 단계('07.03~'12.02)에서는 소듐냉각고속로의 안전성 향상을 위해 채택된 피동형 잔열제거계통의 성능입증을 위한 실험요건을 설정하였으며, 소형 열교환기와 기계식 펌프의 성능을 검증하기 위한 기기 및 루프를 제작, 설치 완료하였음. SG 신뢰성 향상을 위한 연구, 소듐을 안전하게 취급하고 관리하기 위한 기술 및 공정 개발도 함께 수행되었음.



### 제 3 절 국내·외 기술개발 현황에서 차지하는 위치

○ 현기술상태의 취약성 및 해소방안

- 소형 소듐 실험장치의 제작·설치 및 운영에 대한 경험은 풍부하지만, 중·대형 소듐 루프 및 열유체 시험시설의 제작·설치 및 운영에 대한 경험은 미약
- 그간 축적된 소듐 실험기술을 기반으로 원내의 대형 물 열수력 실험시설의 건설 및 운영 경험, 그리고 국제협력 및 해외전문가 자문을 통해 일본, 프랑스, 러시아 등 외국의 대형 소듐 열유체 실험시설의 구축 및 운전 경험 활용
- 소듐 내 불순물 정제장치의 설계 및 제작기술은 확보한 상태이나 효율 향상을 위한 연구 개발 필요
- 증기발생기 내 소듐-물 반응 사고 확대현상을 종합적으로 유추할 수 있는 해석모델 개발이 필요하며 이를 위한 현상학적 wastage 실험 연구가 수행 중에 있음
- 사용 후 소듐 처리를 위한 소듐-가성소다 화학반응 기초연구가 국내에서 수행되었고, 소듐시설에서 발생하는 폐소듐을 안전하게 처분할 수 있는 소듐 처리공정기술 개발 필요

○ 상용화 기술수준 대비 국내외 기술수준을 요약하면 다음과 같음

기술분야	세부기술 분야	상용화 기술수준 대비 국내외 기술수준 (상용화 기술수준 = TRL 10, DRL 10, 원형로/실증로 건설 및 운영능력 보유)		기술수준 (%)
소듐 열유체 실증시험 기술	소듐 시험시설 구축 및 운용기술	국내	- 소형 소듐 실험장치의 제작, 설치 및 운용에 대한 경험은 풍부하나, 중·대형 소듐 루프 및 열유체 시험시설의 제작, 설치 및 운영 경험 미흡	50
		국외	- 제 3세대 원형로는 운전하고 있으나 상업적으로 실증하지 못함 - 현재, 4세대 고속로 개발을 위한 신개념 검증 시험 수행 단계임	70
	소듐 순도관리 기술	국내	- 비금속 불순물의 측정, 제어를 위한 기본기술은 확보되었으나, 기술의 고도화 및 금속 불순물, 방사성 불순물에 대한 순도관리 기술개발은 확보되지 못함	50
		국외	- 대부분의 기술이 정립된 상태로 불순물 정화장치의 효율 향상과, 방사화 불순물 처리기술의 정립 단계임 - 원자로 내 금속 불순물의 처리기술 개발은 미흡	92
	소듐화재 방호기술	국내	- 실험실 규모의 소듐화재에 대한 현상해석, 누출감지, 소화 및 방호 기술은 확보되었으나, 원자로 규모에서의 방호공간 구획과 방사성 소듐화재 방호기술은 확보하지 못함	60
		국외	- Monju 화재사고 처리과정에서 대부분의 기술이 정립되었으나 경제성 향상을 위한 기술의 최적화 방안은 남아 있음 - 화재 예방을 위해 배관의 LBB 기술 적용은 현재 진행 중임	90
	소듐-물 반응 방호기술	국내	- 음향에 의한 물 누출 감지기술 실용화 이전 단계	50
			- 수소감지에 의한 물 누출 감지 기초실험 수행 - 누출 규모별 전열관 파손 특성 해석 실험 중 - 중대형 소듐-물 반응사고 방호 및 처리 기술 확보 못함 - 이중벽 전열관 모형제작 및 누출감지 특성 실험	

기술분야	세부기술 분야	상용화 기술수준 대비 국내외 기술수준 (상용화 기술수준 = TRL 10, DRL 10, 원형로/실증로 건설 및 운영능력 보유)		기술수준 (%)
소동 열유체 실증시험 기술	소동-물 반응 방호기술	국외	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 수소 및 음향감지에 의한 누출 감지방법들이 개발되어 성능향상을 위한 연구를 수행 중임</li> <li>- 다양한 전열관 후보재료에 대한 누출 규모별 손상특성 해석 실험을 지속 수행중임</li> <li>- 소동-물 반응성을 완화하기 위해 나노입자를 소동에 분산 코팅하는 연구를 수행 중임</li> <li>- 소동-물 반응 가능성 억제 및 배제를 위한 이중벽 전열관 기술이 개발되고 있음</li> </ul>	75
	소동 취급 및 관리 기술	국내	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 실험실 규모의 소동 저장, 이송, 관리기술은 확보하였고, 대형 시설의 관리기술 확보 중</li> <li>- 방사성 소동 취급. 관리기술은 확보하지 못함</li> <li>- 사용후 소동 처리공정을 개발하기 위한 기초 실험과 함께 반응성 완화 및 연속처리를 위한 연구를 수행 중</li> </ul>	55
		국외	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 소동 취급 기술은 대부분 정립되어 기술향상 단계임</li> <li>- 사용 후 소동의 처리, 원자로 폐기시의 기기세정 및 폐소동 처분 기술은 연구 수행 중임</li> </ul>	90

## 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

### 제 1 절 선진기술 개발 및 검증 : 안전성 입증 실험 기반 구축

#### 1. 기기 열유체 성능검증 소듐루프 구축 및 기기 성능검증 개별실험

한국원자력연구원에서 개발 중인 소듐냉각고속로는 제4세대 원자로 기술목표 중 하나인 “안전성의 획기적 향상과 입증”을 위해 능동형 및 피동형 잔열제거계통을 채택하고 있으며, 제4세대 원자로 인허가 요건 만족을 위하여 혁신적 피동안전계통 설계개념에 대한 실험적 검증이 필수적이다. 본 연구에서 구축 중인 소듐 열유체 실증시험시설 (STELLA: Sodium Integral Effect Test Loop for Safety Simulation and Assessment)은 실증로에 채택된 혁신적 안전계통의 성능검증을 위한 핵심 연구시설이다.

1단계로 추진 중인 기기 열유체 성능검증 소듐루프 STELLA-1 은 피동 잔열제거계통 열교환기 성능검증, 1차 계통 기계식 소듐 펌프의 열유체 성능시험 등 개별효과실험을 목적으로 구축을 완료하였다. 또한 2단계로 구축 예정인 STELLA-2는 잔열제거계통의 성능검증, 잔열제거계통과 일차열전달계통과의 상호영향에 의한 잔열제거성능 종합효과시험 수행을 목적으로 2013년 기본설계를 시작하여 2016년 준공될 예정이다.

STELLA-1은 가로15m×세로8m×높이22m (지상15m+지하7m)의 규모이며, 작동유체는 소듐, 실험시 소요 최대전력은 2.5MW, 실험시 사용되는 소듐량은 11톤, 최고설계온도 600℃, 열교환기 용량 1.0MWth, 열교환기 최대유량 10kg/sec, 기계식펌프 정격유량은 123kg/sec 이다.

2009년에는 STELLA-1의 구축 타당성 평가, 기본설계 및 시방서 작성을 완료하였으며, 기반시설로서 4.5MW 고압배전반과 2.5MW 저압배전반 등 전력공급계통 구축을 완료하였고 원자로급 소듐 18톤을 구매하였다.

2010년에는 가로24m×세로8m×깊이7m의 지하시설 구축과 4층 규모 제어실 건축을 완료하였으며, 기계, 배관, 계측제어, 전기분야 등 상세설계를 완료하였고 탱크류 및 철구조물 등의 기기제작과 밸브류, 송풍기, 배관재, 전기/계측기기 등의 기기구매를 진행하였다.

또한 STELLA-1의 주요 구성요소인 열교환기는 척도해석, 열적크기 생산, 상세설계, 제작성 평가, 구조해석 등을 수행하였으며 기계식 소듐펌프 또한 원형펌프 설계특성 분석, 모형펌프 설계계산서와 도면작성, 모형펌프 유동해석 등을 수행하여 2011년 기기제작 및 설치를 완료하였다. 2011년 12월 배관작업 등이 완료된 상태이며 2012년 2월 전기 및 계장 관련 설비의 설치가 완료되어 2012년 2월 24일 준공식을 거행하였다.



<그림 1.1-1 STELLA-1 준공식 사진>

## 가. 기기 열유체 성능검증 소듐루프 구축

### (1) 기반시설 구축

#### (가) 전력공급계통

STELLA 시험시설을 위하여 한국원자력연구원 내 154kV 변전소로부터 소듐기술실험동 지하까지 6,600V 전기를 7.0MW 용량까지 공급할 수 있도록 대용량 전력선을 새로 매설하였고 이를 위하여 변전소 내 전류측정변환기도 교체하였다.

소듐기술실험동 지하에 6,600V에서 400V로 전압을 변환할 수 있는 2.5MW 및 2.0MW 용량의 변압기와 고압배전반을 설치하였다.

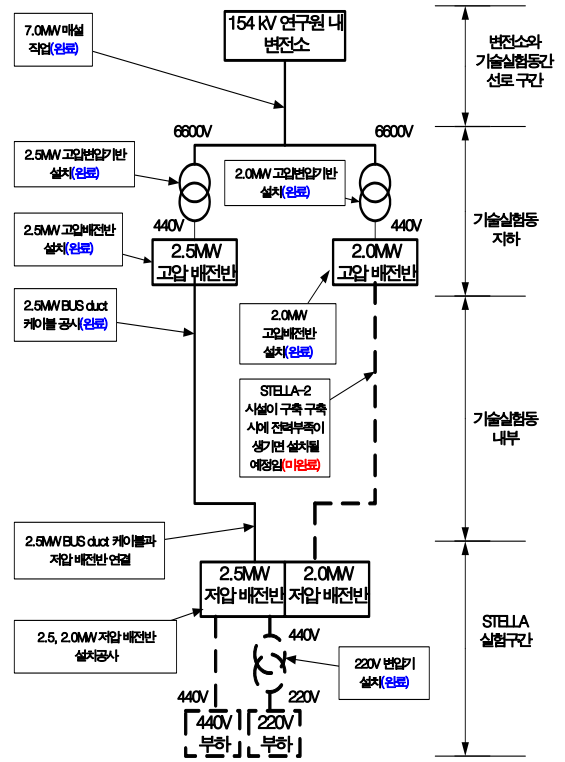
소듐기술실험동 지하로부터 STELLA-1 까지 2.5MW BUS duct 케이블을 설치하였으며, 2.5MW 저압배전반을 구매하여 STELLA-1 제어실 1층 전기실에 설치하였다.



(a) 고압배전반

(b) 저압배전반

<그림 1.1-3 배전반>



<그림 1.1-2 전력공급계통 설치 현황>

#### (나) 소듐 구매 및 저장

INNER MONGOLIA LANTAI사(중국)에서 생산된 원자로급 소듐 18톤을 구매하여 이송용기에 담아 소듐저장고에 보관 중이다. 소듐 이송용기는 용기 외부에 부착된 히팅튜브를 이용하여 가열 매체로 소듐을 용융시키도록 설계되어 있으며 STELLA-1 설치 완료후 150kW 용량의 oil 열매체를 사용하여 소듐을 200°C 이하로 용융한 후 2012년 상반기 소듐저장탱크에 주입할 예정이다.

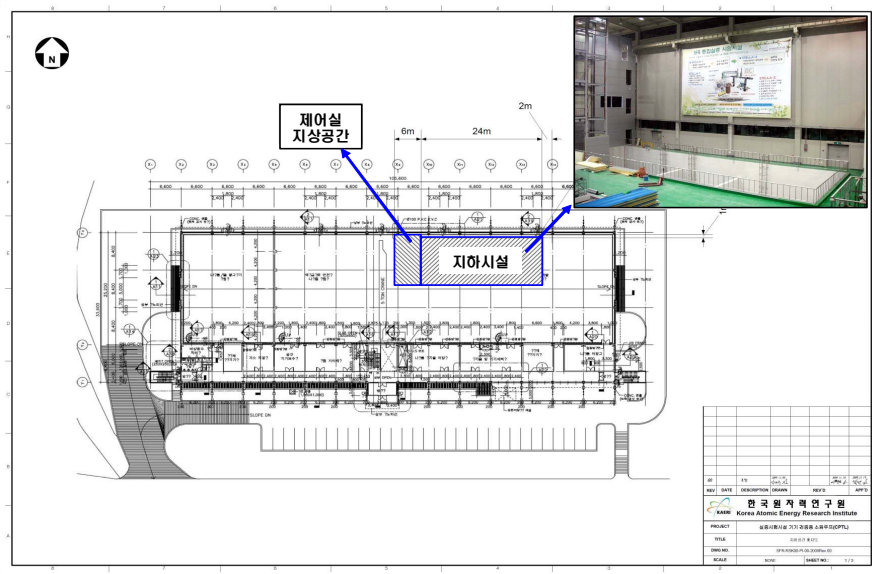


<그림 1.1-4 소듐 이송 및 저장고내 소듐>

#### (다) 지하시설 구축

STELLA 지하시설은 가로 24m, 세로 8m, 깊이 7m 규모의 콘크리트 구조물로 가로 9m, 6m, 9m의 3칸으로 구분되는데 가운데 공간에 소듐저장탱크가 설치된다. 이 공간은 액체소듐

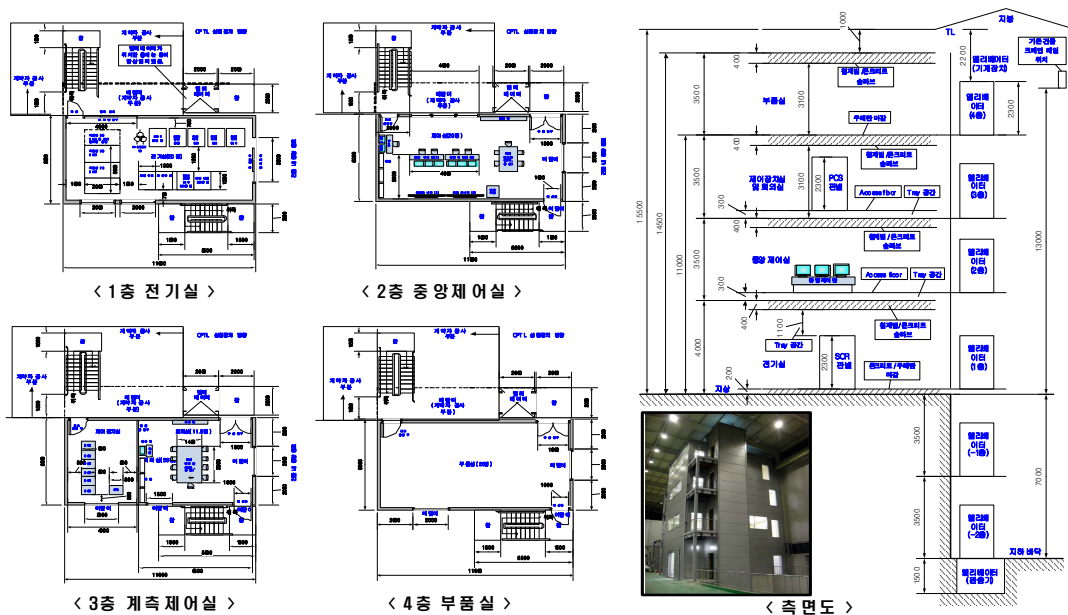
의 누출에 대비하여 바닥과 벽면 높이 2미터까지 4mm 두께의 스테인레스 스틸로 라이닝을 하였으며, 밀폐형 지하 공간이기 때문에 운전원의 안전을 위해 지하공간의 공기를 환기할 수 있게 흡입, 배기용의 블로어를 설치하였다.



<그림 1.1-5 소동기술실험동 내 STELLA 설치위치 및 지하시설>

(라) 제어실 건축

제어실은 지상 4층 규모로 1층 전기실, 2층 주제어실, 3층 계측제어실, 4층 부품실로 구성된다. 각층은 양쪽으로 비상계단 및 시험시설로 통하는 통로 및 계단, 지하 2층 및 지상 4층 운행할 수 있는 6층 엘리베이터로 구성된다. 1층 전기실은 2.5MW, 2.0MW 저압배전반 등 각종 배전반 및 전력제어반이 설치되었으며, 2층 주제어실은 DCS(분산제어시스템)의 서버, 클라이언트 및 monitor, 3층 계측제어실은 DCS와 STELLA-1 현장계기와 연결되는 계측제어장치가 설치되었다.



<그림 1.1-6 제어실 설계도면 및 건축사진>

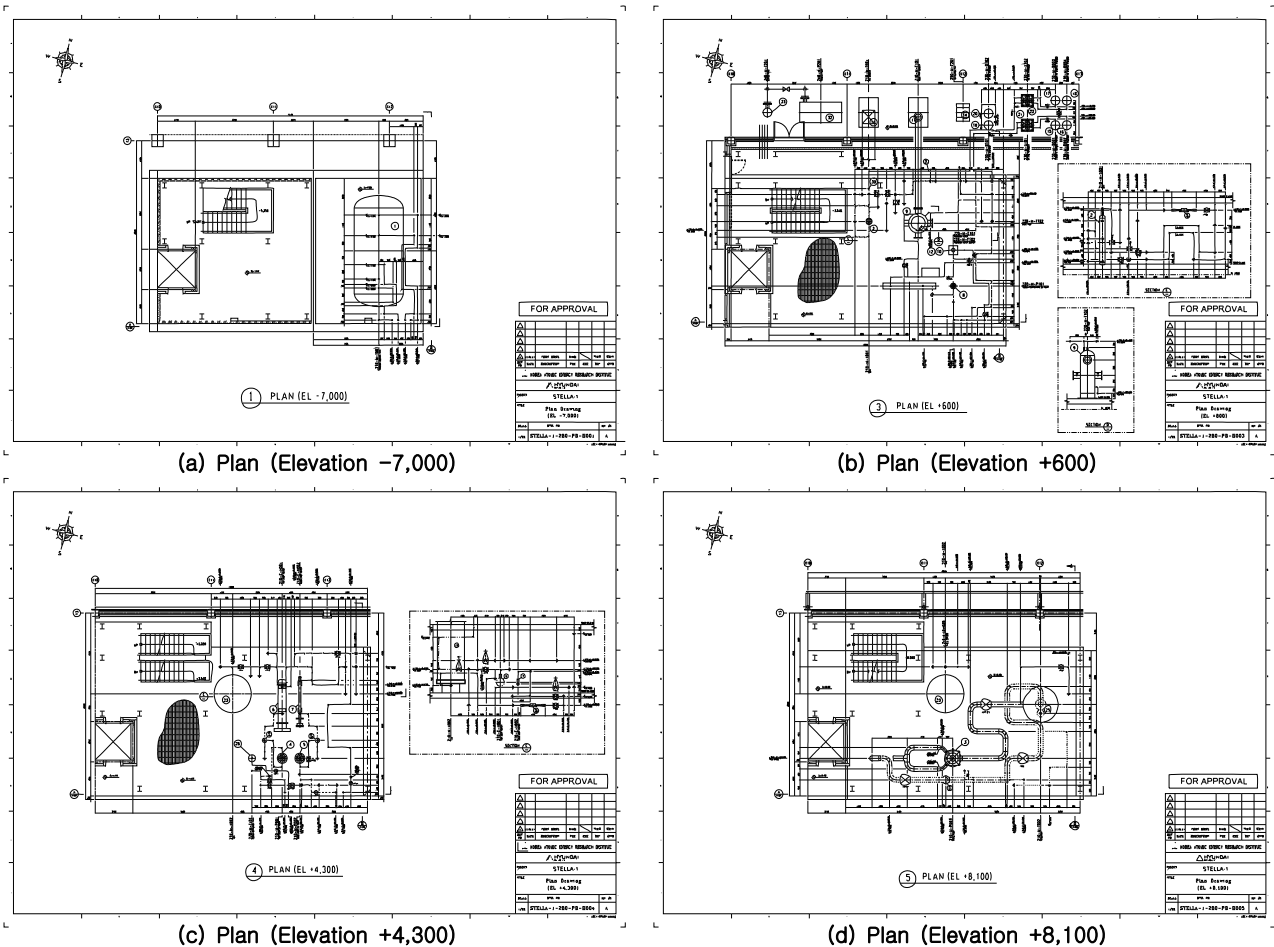
## (2) 소듐루프 제작 및 설치

STELLA-1은 '09년 연구원에서 수행한 기본설계[1.1-1]를 기반으로 실험장치 제작/설치 주계약자인 (주)현대엔지니어링이 전반적인 상세설계, 제작 및 설치용역을 수행하였고, 연구원은 화재방호계통, 소듐정화계통, 진공계통, 가스계통과 소듐밸브, 유량계, 주 히터, 전자기펌프 등 주요 연구원 공급분 기기의 상세설계 및 제작·구매 업무와 기계구조 건전성 평가, 그리고 계약자 상세설계(안)의 검토, 수정·보완 및 승인업무를 수행하였다.

### (가) 상세설계

STELLA-1은 소듐-소듐 열교환기인 DHX, 소듐-공기 열교환기인 AHX 및 기계식 소듐펌프의 시험부가 설치되는 주실험계통과 소듐정화계통, 가스공급계통, 진공계통, 환기배기계통, 화재방호설비로 구성되는 보조계통, 그리고 계측제어계통으로 구성되며 실험장치 상세설계는 기계분야, 배관분야, 계장분야 및 전기분야로 나누어 수행하였다.

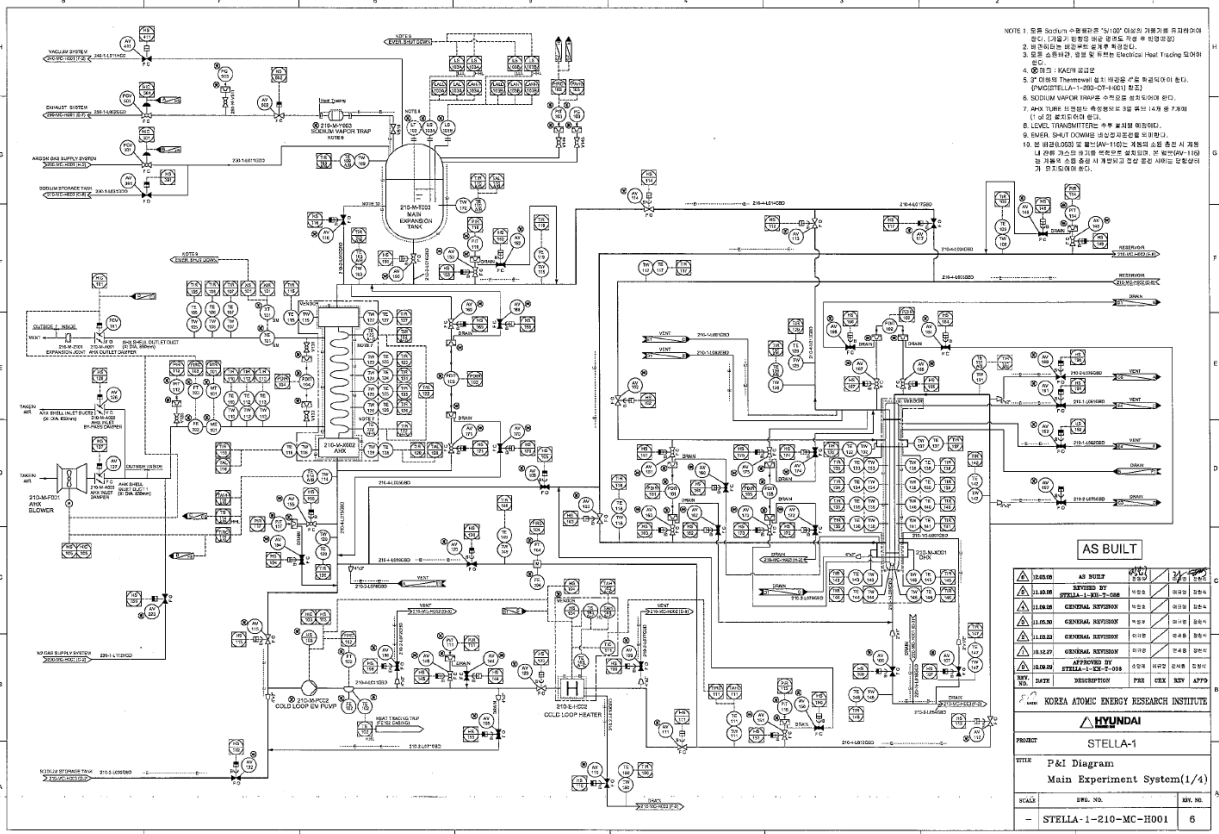
설계된 주실험계통과 소듐정화계통의 3차원 형상 및 배관의 기기연결 배치를 상세 도식화한 plan drawing 및 주실험계통의 P&ID를 그림 1.1-7 및 그림 1.1-8에 각각 도시하였으며, 실험장치 각 계통의 기능과 주요 설계변수를 표 1.1-1에 정리하였다.



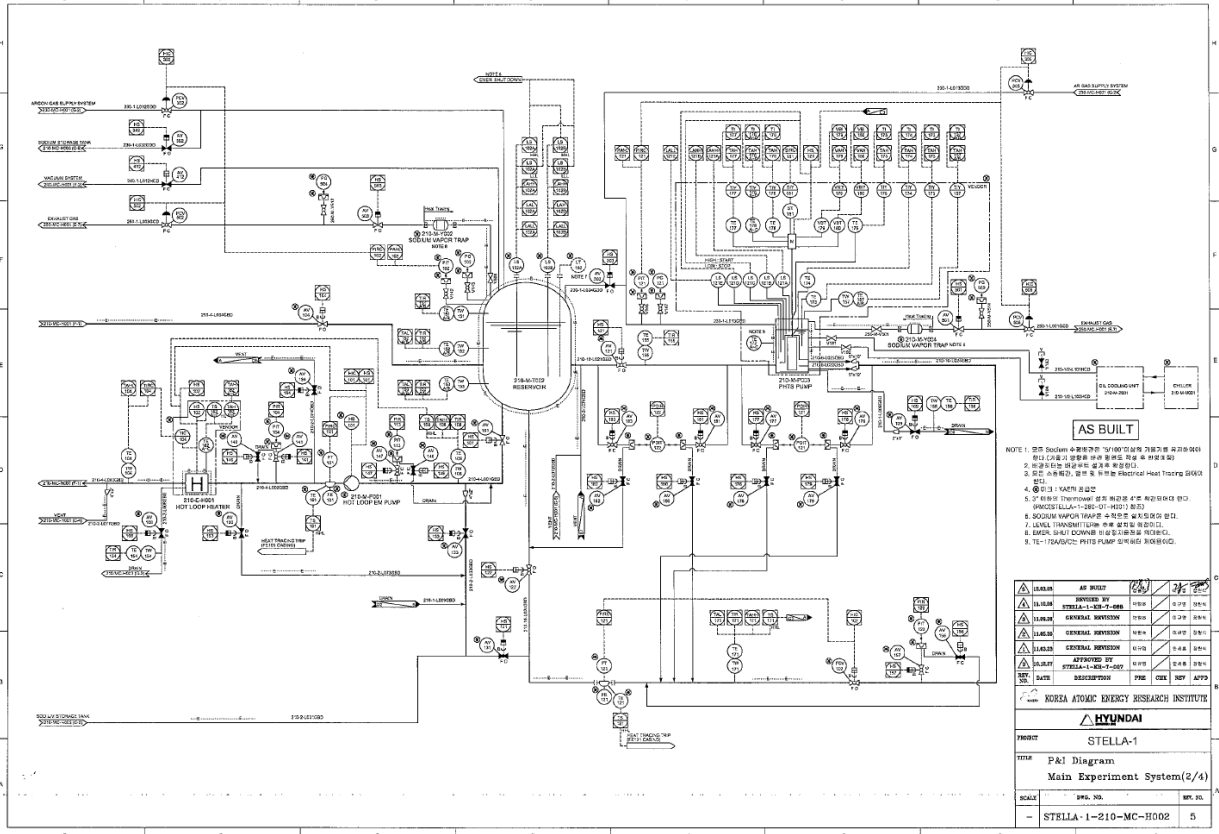
<그림 1.1-7 STELLA-1 Plan Drawing>

<표 1.1-1 실험장치 각 계통 기능 및 주요 설계변수>

계통	기능	주요 설계변수
주실험계통	열교환기 및 기계식 소듐펌프 시험부	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 설계조건 (온도, 압력, 유량)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• 열교환기 시험루프: 600℃, 1.0MPa, 10kg/s</li> <li>• 기계식 소듐펌프 시험루프: 500℃, 1.0MPa, 180kg/s</li> </ul> </li> <li>- 주요 재질: STS316</li> <li>- 주요 구성기기: DHX, AHX, 기계식 소듐펌프, 소듐 저장탱크, Reservoir Tank, Expansion tank, 고·저온 루프히터, 고·저온 루프 전자기펌프, 송풍기, 증기트랩</li> </ul>
소듐정화계통	소듐저장탱크 내부의 18ton 소듐 정화 및 순도 관리	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 설계조건 (온도, 압력, 유량): 400℃, 1.0MPa, 1.5kg/s</li> <li>- 주요 재질: STS304, STS316</li> <li>- 주요 구성기기: 콜드트랩, 플러깅미터, 전자기펌프, Expansion tank, 히터, 송풍기, 증기트랩</li> </ul>
가스공급계통	주실험계통과 소듐정화계통 운전에 요구되는 아르곤가스, 압축공기 및 질소가스 공급	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 설계조건 (온도, 압력, 유량): 상온, 1.0MPa, 30m<sup>3</sup>/hr</li> <li>- 주요 재질: STS304</li> <li>- 주요 구성기기: 저장 실린더, 증발기, 히터, 압축기</li> </ul>
진공계통	주실험계통과 소듐정화계통의 소듐 충전전 계통내부 잔류 공기제거 및 누설시험을 위한 진공 형성	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 설계조건 (온도, 목표진공도): 상온, 10<sup>-3</sup> torr</li> <li>- 주요 재질: STS304</li> <li>- 주요 구성기기: 진공펌프, 버퍼탱크, 냉각기</li> </ul>
환기배기계통	실험장치 주변 환기 및 주실험계통과 소듐정화계통 내부 아르곤 가스 배기	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 설계조건 (온도, 압력)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• 배기계통: 300℃, 0.2MPa</li> <li>• 환기계통: 50℃, 0.1MPa</li> </ul> </li> <li>- 주요 구성기기: 배기 팬, 가스분배기, 배기덕트</li> </ul>
화재방호설비	소듐누출에 의한 화재 발생 시 경보, 소듐 포집 및 소화	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 자동소화설비</li> <li>- 주요 구성기기: Dry chemical tank, Expellant, Catch pan, Funneling floor, 경보설비</li> </ul>
계측제어계통	공정계측, 기기제어, 운전상태 감시, 실험자료 취득 및 저장	<ul style="list-style-type: none"> <li>- DCS 기반의 디지털 방식: 1,115 개 입·출력 수량</li> <li>- 인간공학적 MMI 설계</li> </ul>

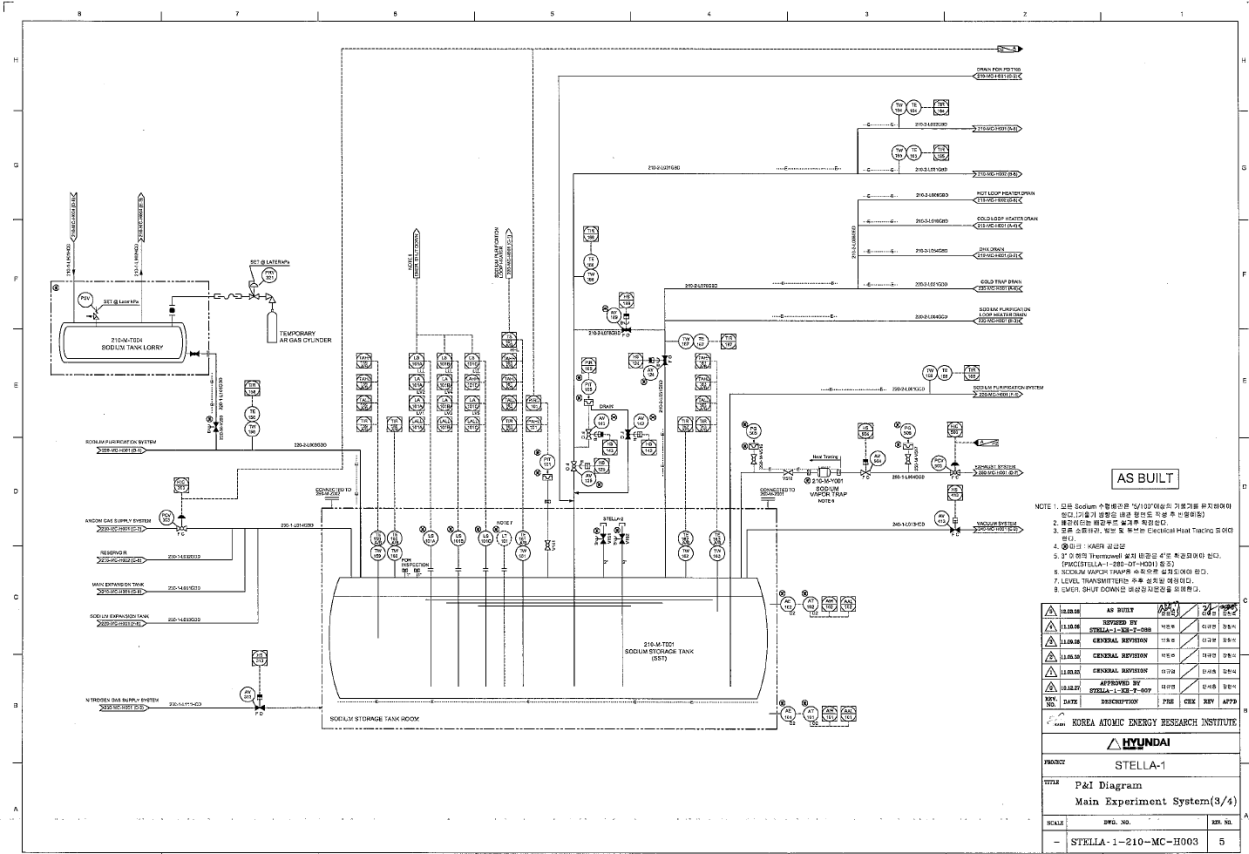


<그림 1.1-8(a) STELLA-1 주실험계통 P&ID (1/4)>

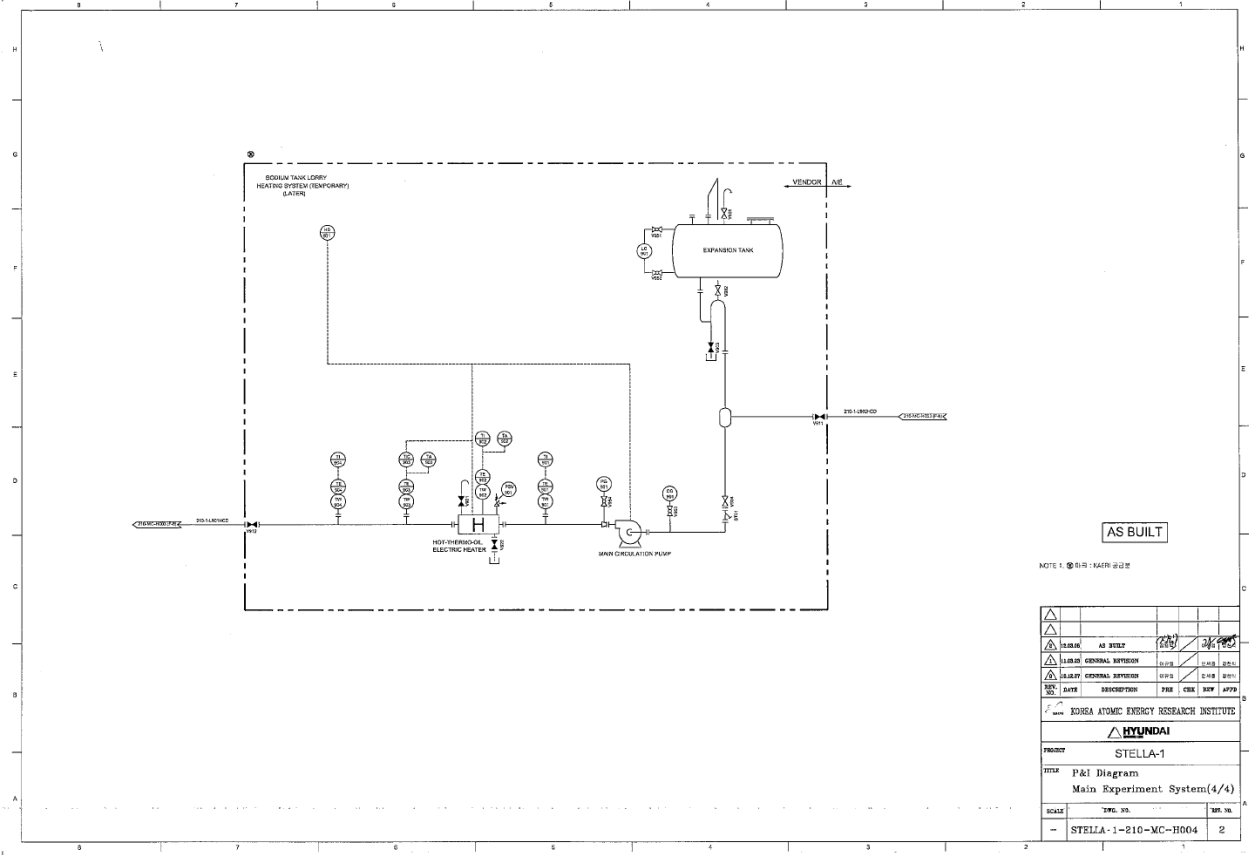


<그림 1.1-8(b) STELLA-1 주실험계통 P&ID (2/4)>





<그림 1.1-8(c) STELLA-1 주실험계통 P&ID (3/4)>



<그림 1.1-8(d) STELLA-1 주실험계통 P&ID (4/4)>

모든 소듐배관과 기기는 소듐고화를 방지하고, 외부로의 열손실을 보상하기 위해 트레이서 히터가 설치되며, 소듐 누출방지를 위해 모든 배관과 기기는 용접방식으로 연결된다. 수평 배관은 5% 하향 기울기를 유지하여 실험 후 소듐루프로부터 소듐을 지하격실에 설치된 소듐저장탱크로 배출할 때 배관 내부에 액체소듐이 잔류하지 않도록 설계하였다.

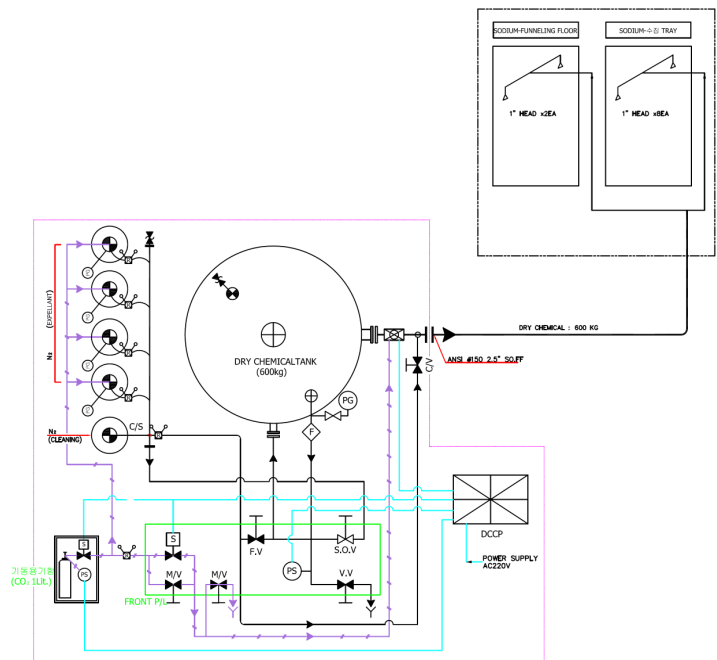
성능실험 시 측정되는 주요 계측변수는 유량, 압력, 차압, 온도, 탱크 내부 소듐 액위이다. 유량 측정에는 현재 가장 높은 정확도를 보장하는 코리올리 유량계를 사용하였으며, 압력과 차압의 측정에는 고온에 적용 가능한 Remote seal을 이용한 다이아프램 형식 압력계를 사용하였다.

특히 압력도관에는 소듐기포 응축에 의한 관막힘 가능성을 배제한 설계를 고안하였다. 또한 온도는 열전대를 이용하여 측정하며, 탱크 내부 소듐 액위 측정에는 고온용 전극식 레벨스위치를 사용하였다.

고온에서 운전되는 소듐 실험장치는 위험물 안전관리법에 의해 소화 및 보조설비와 경보 및 피난설비를 갖추어야 한다. 이를 위하여 실험장치 운전 중 소듐누출에 의한 소듐화재 발생 시 이를 소화하기 위한 Sodium Chloride 성분의 600kg 용량 자동소화설비를 그림 1.1-9와 같이 설계하여 화재방호설비에 대한 상세설계를 완료하였다.

더불어 누출된 소듐이 장치 주변으로 흘러가서 지속적으로 연소되는 것을 방지하기 위해 장치 하단에 누출된 소듐을 전량 포집할 수 있는 Catch pan과 상부에 위치한 소듐탱크 등에 균열이 생겨 소듐이 하부로 비산되는 것을 방호할 목적으로 Funneling floor에 대한 설계를 완료하였다.

뿐만 아니라 실험장치의 용기, 배관 등으로부터 소듐이 누출되는 것을 조기에 감지할 수 있는 누출감지기, 화염감지기, 방송장비 등 경보설비에 대한 개념 및 설치방법을 도출하였으며, 화재 발생 시 대피에 이용되는 비상등과 유도등의 설치를 위한 계획을 수립하였다.



<그림 1.1-9 자동 소화설비 계통도>

STELLA-1 소듐정화계통의 주요기기인 콜드트랩과 플러깅미터는 산소, 수소등과 같은 액체소듐 중 비금속불순물이 온도가 낮아짐에 따라 소듐 내 용해도가 감소하여 산화물로 침전되는 원리를 이용해 소듐을 정제하는 장치로서 액체소듐은 냉각지역에서 산소 포화온도 이하로 냉각된다. 이때 과포화된 산소의 일부분이 환형모양의 벽과 콜드트랩 하부바닥에 소듐산화물의 결정으로 침전되며 나머지 침전물 대부분은 mesh packing 표면에 침전된다.

보편적으로 사용되는 mesh-packed 형 콜드트랩의 성능은 trapping 효율 및 capacity 특성으로 평가되며, 트랩의 구조, mesh packing의 형태 및 운전조건과 같은 다양한 설계인자들에

의해 영향을 받는다. 따라서 콜드트랩 개선을 위해서는 그 성능에 대한 인자 영향 평가가 필수적이다. Trapping 효율  $\eta$  및 capacity  $M_t$ 는 다음과 같다.

$$\eta = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in} - C_e}, \quad M_t = \int_0^{t_p} (C_{in} - C_{out}) W dt$$

식에서  $\eta$ 는 trapping 효율,  $C_e$ 는 산소의 포화용해도,  $C_{in}$ 는 콜드트랩 입구에서의 산소농도,  $C_{out}$ 는 콜드트랩 출구에서의 산소농도,  $C$ 는 시간  $t$ 에서의 농도,  $t_p$ 는 콜드트랩 총 운전시간,  $W$ 는 소듐 유량을 나타낸다.

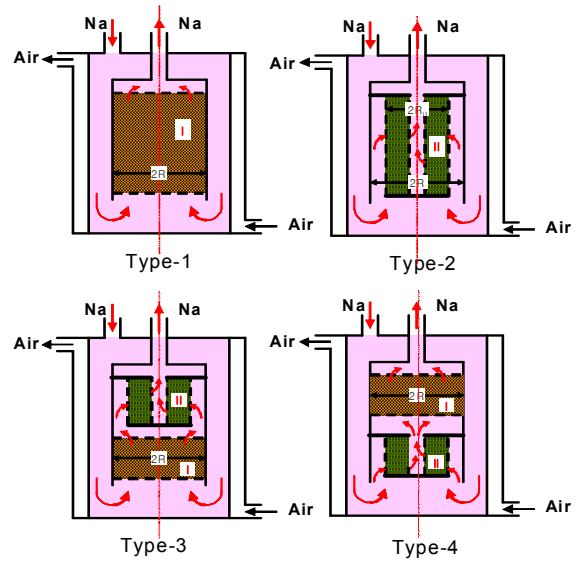
본 연구단계에서는 개량형 콜드트랩의 개념을 설정하여 설계 파라미터인 소듐유량, 체류시간, mesh packing의 부피, trapping 온도 등에 대한 분석과 성능해석, 설계 및 제작을 완료하였으며, 대용량 콜드트랩에 대한 설계 및 제작을 완료하였다.

콜드트랩 성능개선을 위해 그림 1.1-10과 같이 4 가지 형태의 개량형 콜드트랩 개념을 도출하였으며 mesh packing 형상에 따른 영향을 분석하였다. Mesh packing type-1과 type-2는 단일형으로서 type-1은 소듐이 축 방향으로 흐르고, type-2는 반경 방향으로 흐르는 개념이다.

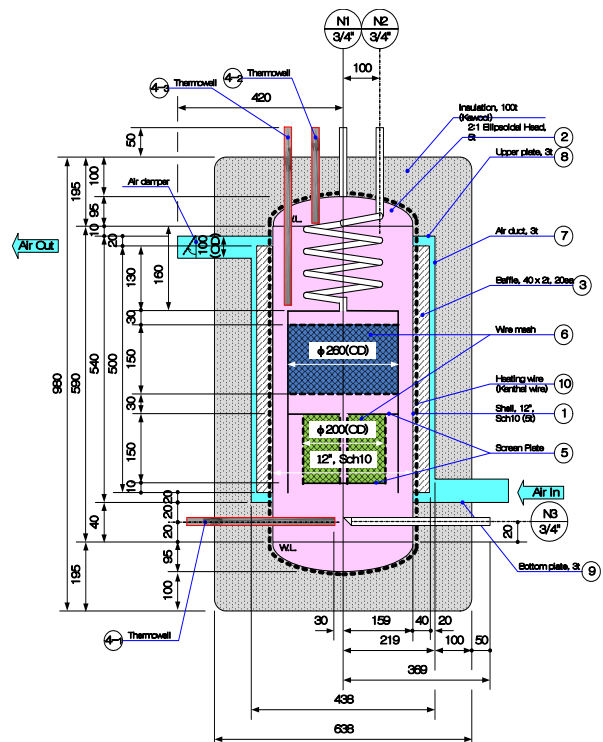
Type-3과 type-4는 이중형으로서 type-3은 소듐이 상부에서 반경 방향으로 흐른 후 하부에서 축 방향으로 흐르는 개념이고, type-4는 type-3과 반대로 상부에서 축 방향으로 흐른 다음 하부에서 반경 방향으로 흐르는 개념이다.

설계한 개량형 콜드트랩은 mesh packing의 형상에 따른 콜드트랩의 성능을 확인하기 위한 소규모 정제장치로서 공기냉각방식이고, 규격  $\phi 438\text{mm} \times H590\text{mm}$ , 소듐 유량  $0.07\text{kg/s}$ , 소듐 운전온도  $120 \sim 300^\circ\text{C}$ , 체류시간 약 4분으로 설계하였으며, 현재 제작 중에 있다. Mesh packing이 이중형인 type-3 설계도면은 그림 1.1-11과 같다.

대용량 콜드트랩은 소듐유량, trapping 온도, 체류시간 그리고 wire mesh의 선경, 밀도 및 기하구조 등의 설계인자를 바탕으로 불순물을 포집하기 위한 mesh 부피, 열 및 물질수지, 열전달 등의 계산을 통하여 설계하였다.



<그림 1.1-10 개량형 콜드트랩 개념도>

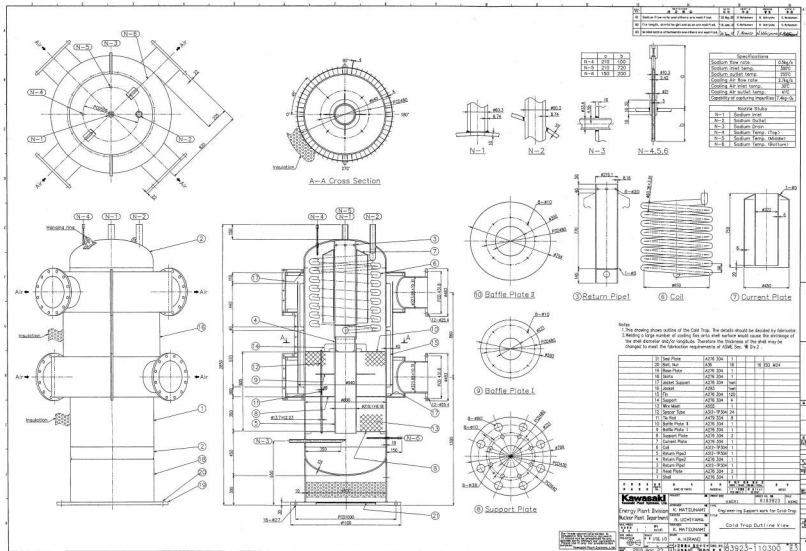


<그림 1.1-11 개량형 콜드트랩 설계도면>

설계·제작한 대용량 콜드트랩은 규격이  $\phi 940\text{mm} \times H2,700\text{mm}$ 인 공기냉각방식으로서 소듐

유량 0.5kg/s, 소듐 운전온도 120~300°C, 냉각공기 유량 2.7kg/s, 체류시간 약 5분, 불순물 정제성능 약 7.4kg-O<sub>2</sub> 이다.

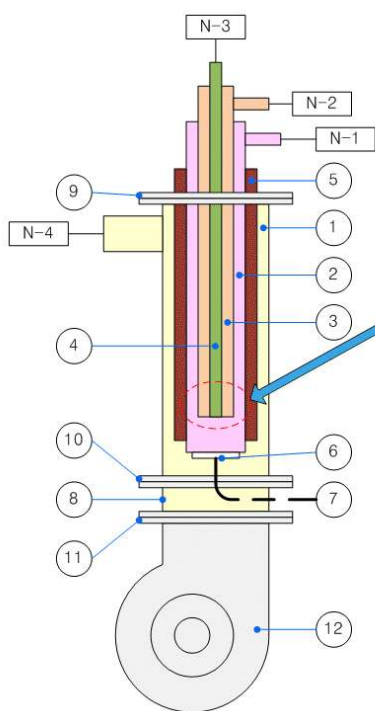
소규모 소듐 실험장치에서 사용되는 소용량 콜드트랩은 자체적으로 개발하여 사용해왔지만, 대용량 콜드트랩은 국내에서 설계한 경험이 없기 때문에 일본 가와사키 중공업과의 기술협력을 통하여 설계기술을 확보하였고, 이를 토대로 STELLA-1 대형 콜드트랩 및 플러깅미터를 설계·제작하였다. 정화계통의 설계도면 및 주요기기, 그리고 플러깅미터의 설계도 및 제작품 사진을 그림 1.1-12에 도시하였다.



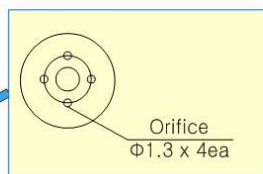
<그림 1.1-12(a) 대용량 콜드트랩 설계도면>



<그림 1.1-12(b) 대용량 콜드트랩 제작>



Plugging Meter 히터



**Nozzles**  
 N-1 : Sodium Inlet  
 N-2 : Sodium Orifice Outlet  
 N-3 : Sodium Bypass Outlet  
 N-4 : Air Outlet

**Plugging Meter 구성**  
 1. Air Duct  
 2. Sodium Body  
 3. Sodium Internal Pipe  
 4. Sodium Internal Tube  
 5. Heater  
 6. Thermocouple

**Name of Parts**  
 1. Air Duct  
 2. Sodium Body  
 3. Sodium Internal Pipe  
 4. Sodium Internal Tube  
 5. Heater  
 6. Cap/Nut  
 7. Thermocouple  
 8. Air Duct Adapter  
 9,10, 11. Air Duct Flanges  
 12. Blower



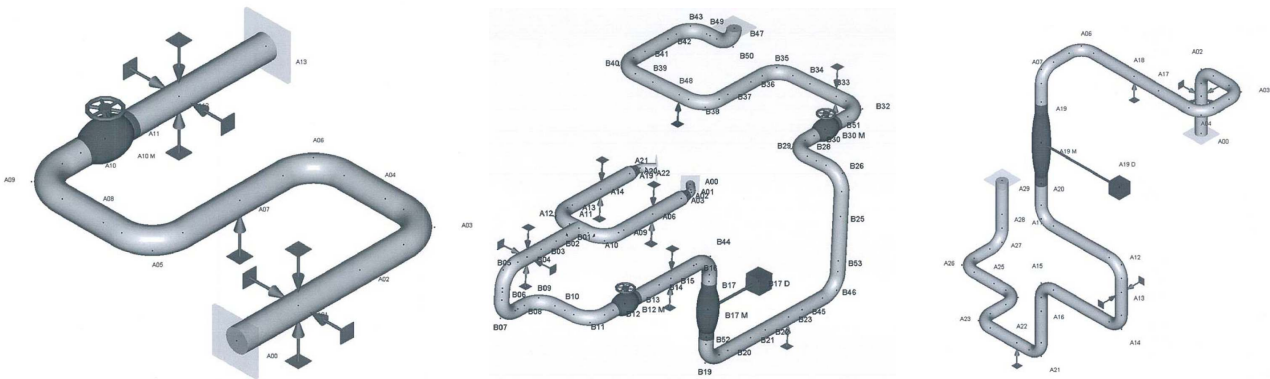
Plugging Meter

<그림 1.1-12(c) 플러깅미터 설계도 및 제작품 사진>

본 실험장치와 같이 최고 510°C에서 운전되는 소듐 시험시설을 구축하고 신뢰성 있게 운영하기 위해서는 고온에서의 기계구조 건전성 보장이 매우 중요하다. 이를 위해 고온에서 운전되는 주실험계통의 주요기기 및 배관에 대한 고온 기계구조 건전성 평가를 수행하였다.

기계구조 건전성 평가의 대상이 되는 주실험계통의 기기는 DHX와 AHX 열교환기, 소듐저장탱크, Expansion tank, Reservoir tank, 고/저온 루프히터 용기 등 압력용기와 기계식 소듐펌프 등이다. 열교환기와 압력용기는 일반 설계 기술기준인 ASME Section VIII Div.2에 따라 1차 설계를 수행하였고, 특히 고온 크립 영역에서 운전되는 DHX, AHX, Expansion tank, 고·저온 루프히터 용기 건전성은 3D 유한요소해석 및 연구원에서 자체 개발된 SIE-ASME-NH를 이용하여 고온 비탄성 변형 및 손상평가를 수행하였다.

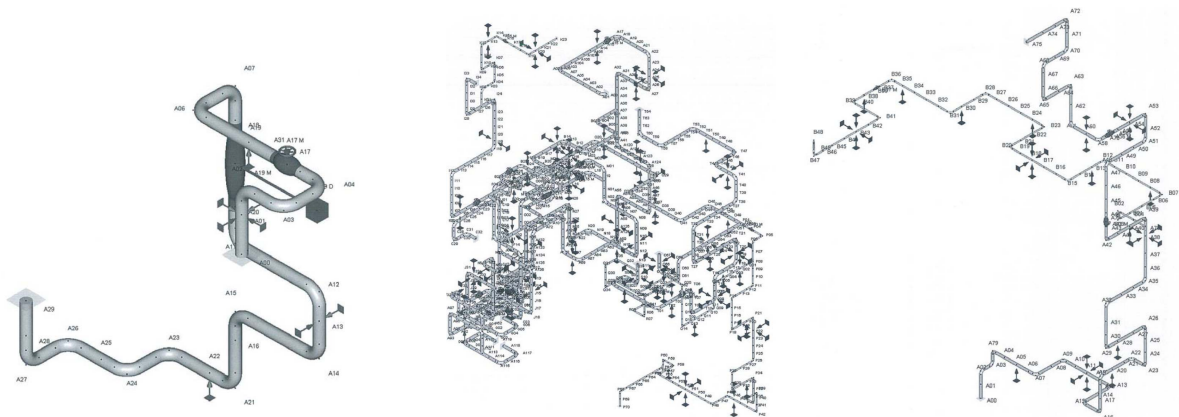
그림 1.1-13은 배관에 대한 고온 기계구조 건전성 평가결과로 최대응력 값을 갖는 정점에 대한 코드허용기준 만족여부를 나타낸다.



Code Equation	Node	Pipe Stress	Code Allowables	% of Allowables
11	A06	1488	11436	12.0
12	A06	1488	13723	10.8
13	A09	14802	38048	38.9

Code Equation	Node	Pipe Stress	Code Allowables	% of Allowables
11	B15	2319	11436	20.3
12	B15	2319	13723	16.9
13	A09	13340	37830	35.3

Code Equation	Node	Pipe Stress	Code Allowables	% of Allowables
11	A07	3709	10788	34.4
12	A07	3709	12946	28.6
13	A07	19355	34776	55.7



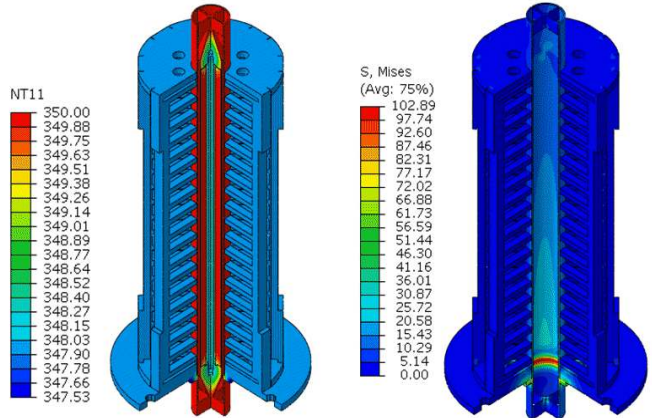
Code Equation	Node	Pipe Stress	Code Allowables	% of Allowables
11	A18	3811	10788	35.3
12	A18	3811	12946	29.4
13	A14	19128	36359	52.6

Code Equation	Node	Pipe Stress	Code Allowables	% of Allowables
11	I01	4255	10788	39.2
12	I01	4255	12946	32.6
13	Q14	28723	37635	76.4

Code Equation	Node	Pipe Stress	Code Allowables	% of Allowables
11	A75	2820	10788	26.1
12	A75	2820	12946	21.8
13	A53	22518	37016	60.8

<그림 1.1-13 배관에 대한 고온 기계구조 건전성 평가결과>

STELLA-1의 주실함계통에 사용할 유량 35kg/s, 토출압력 4bar의 전자기펌프 설계 및 제작을 완료하였다[1.1-2]. 전자기펌프의 기초 동작시험을 수행하였으며 결선 및 전기적 입력에 따른 자기장, 임피던스, 속도 및 온도특성을 파악하여 결선방식에 따른 전자기펌프의 구동 최적조건을 도출하였다.

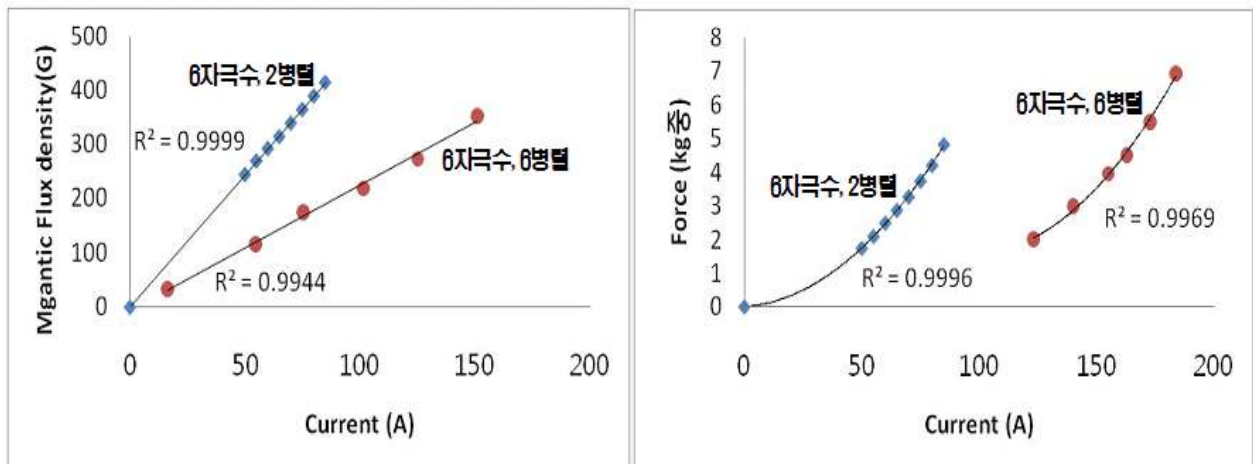


< EMP 온도해석 결과 >

< 응력분포 >

<그림 1.1-14 전자기 펌프>

그림 1.1-15에 나타난 바와 같이 펌프 내부유로에서 발생하는 자기장 및 정지 상태에서의 힘의 세기는 동일 입력전류 및 자극수 (6개)에 대하여 2병렬 결선의 경우가 6병렬 결선보다 큰 것으로 나타났다. 이로부터 2병렬 결선이 더욱 효율적으로 액체소듐 유체를 구동하는 최적의 결선 상태임을 도출하였다.



<그림 1.1-15 전자기 펌프 특성시험 결과>

## (나) 제작 및 설치

STELLA-1 실험장치의 설치는 '11년 3월부터 철구조물 설치를 시작하여 '12년 2월 완료하였으며, 모든 구성기기 및 계약자 공급분인 열교환기 및 탱크류는 제작 및 설치가 완료된 상태이다. STELLA-1 실험용 열교환기 및 주요 탱크의 제작/설치 모습은 그림 1.1-16 및 그림 1.1-17과 같다.

기계식 소듐펌프, 주실험계통 히터, 전자기펌프, 콜드트랩, 플러깅미터, 화재방호설비, 증기 트랩, 소듐밸브 등 제작이 필요한 연구원 공급분 기기도 모두 제작이 완료되어 설치가 완료되었으며, 기타 각종 소듐유동 계측기, 진공펌프, 가스히터 등 연구원 공급분 구매품목도 구매가 완료되어 STELLA-1 시설에 설치 완료되었다.



(a) DHX

(b) AHX

<그림 1.1-16 STELLA-1 DHX 및 AHX의 제작 사진>



< Sodium Storage Tank >

< Sodium Reservoir >

< Main Expansion Tank >

<그림 1.1-17 STELLA-1 주요 탱크류 제작 사진>

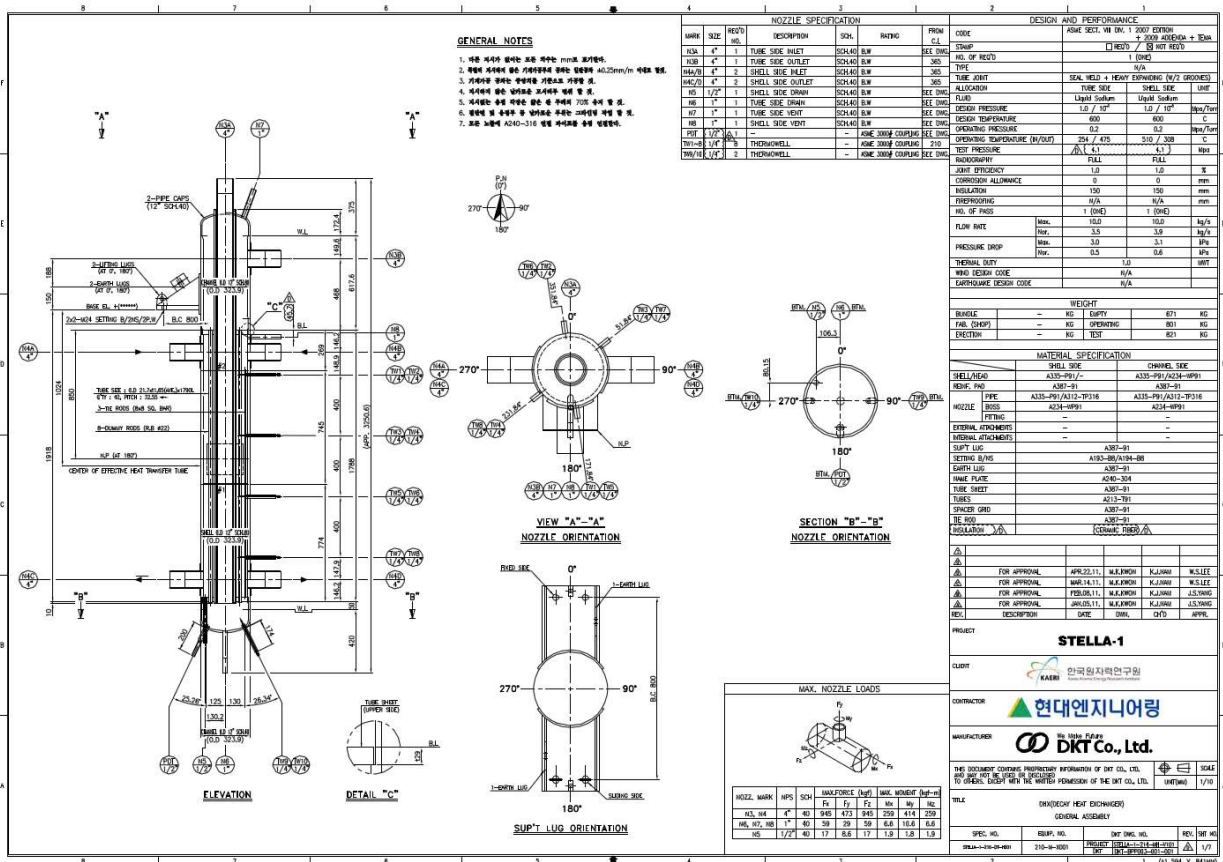
### (3) 실험용 소형 열교환기 제작 및 설치

#### (가) STELLA-1 열교환기 설계 및 제작

STELLA-1 실험용 열교환기는 600MWe 실증로의 피동간열체계통을 대상으로 주요 물리적 현상이 보존되도록 축소하여 설계하였다. 축소설계 대상 열교환기는 소듐-소듐 열교환기인 DHX와 소듐-공기 열교환기인 AHX이며, 기본적으로 전열관 직경 및 두께, 재질을 그대로 유지하여 실험결과로부터 실제 열교환기의 열전달 성능입증이 가능하도록 설계하였다.

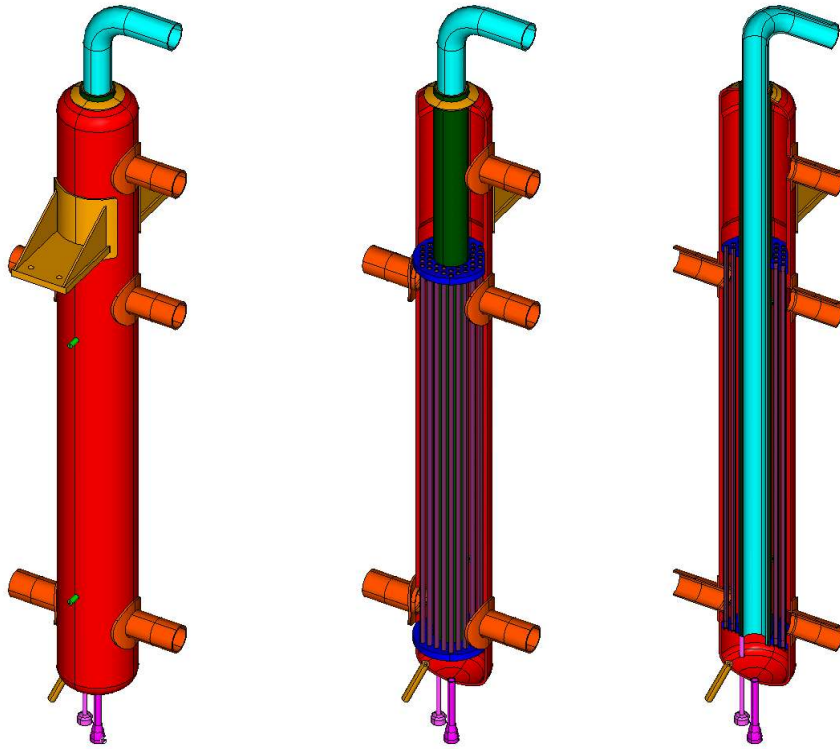
열교환기 설계 열용량은 원형의 1/9로 축소하여 DHX 및 AHX 각각 1.0MWt의 열용량을 가지며, 유량비 역시 1/9로 축소하여 열교환기 입·출구 온도차를 유지하였다. 특히, 열교환기 높이비(Height scale)와 온도분포를 원형대비 1:1로 유지함으로써 Full scale 실험이 아닌 축소 실험에서 예상되는 열전달 및 압력손실 등 주요 물리현상의 왜곡을 최소화하도록 설계하였다.

소듐을 작동유체로 하는 소듐-소듐 열교환기 DHX는 전열관 삼각배열 및 피치를 원형과 동일하게 유지함으로써 1차원 설계 및 성능분석 전산코드를 사용하여 계산되는 전열량, 로그평균온도차(LMTD), 압력손실, 종합전열계수 등의 주요 열교환기 성능인자의 검증이 가능하도록 설계 및 제작하였다. STELLA-1 DHX의 설계도면 및 주요 설계제원은 그림 1.1-18 및 표 1.1-2와 같다.



<그림 1.1-18(a) STELLA-1 DHX 설계도면>





<그림 1.1-18(b) STELLA-1 DHX 모형도 및 제작 사진>

<표 1.1-2 STELLA-1 DHX 설계제원 및 물량>

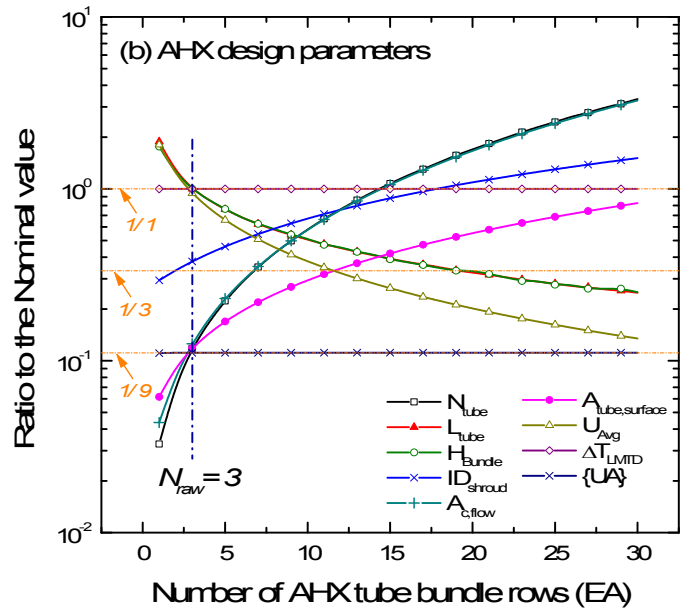
설계인자	제원 및 물량
No. of tubes	42
Tube O.D (mm)	21.7
Tube I.D (mm)	18.4
Tube thickness (mm)	1.65
Active tube length (m)	1.73
Tube material	Mod.9Cr-1Mo
Shroud I.D (m)	0.298
Shroud length (m)	2.456
Tube total mass (kg)	58.6
Tube inside sodium (kg)	17.5
Downcommer pipe (T91; kg)	54.3
Shroud (T91; kg)	100.6
Grid structure (P91; kg)	0.6
Co-axial pipe structure(T91; kg)	43.6
DHX total mass (kg)	~275

헬리컬 전열관을 사용하는 소듐-공기 열교환기 AHX는 특수목적 열교환기에 대한 전열관 재질특성 평가결과를 토대로 유효전열관 길이비 및 전열관 번들의 높이비 등을 원형 대비 1:1로 보전하도록 설계하였다. AHX는 전열관 내부 소듐으로부터 shell측 공기로의 모든 전열경로

에서 공기측 전열저항이 차지하는 비율이 약 97%이므로, 공기측 전열저항을 적절히 모의할 필요가 있다.

따라서 그림 1.1-19와 같이 전열 성능 결정에 주된 영향을 미치는 조정인자(control factor)인 전열관 열(row) 수를 변화시키면서 전열량, 로그평균온도차, 압력손실, 총합전열계수 등의 주요 열교환기 성능인자의 원형대비 변화 폭을 평가하였다. 평가 결과 전열관 열 수가 3인 경우, 총합전열계수 및 전열관 내·외측 소듐 및 공기 압력손실 특성 등이 원형 대비 가장 잘 보전되는 것으로 분석되었다.

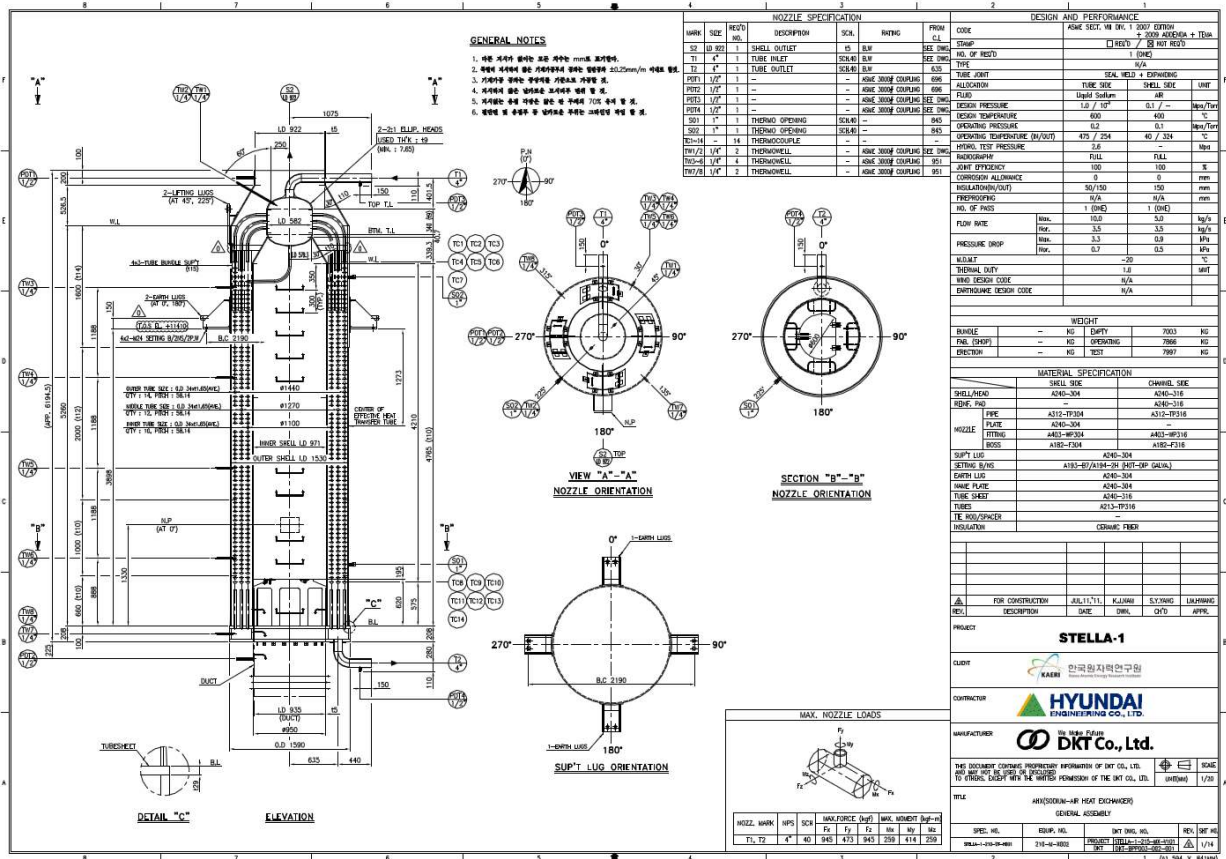
따라서 총 3열로 구성되는 헬리컬 전열관 부분을 원형과 배치특성이 유사하게 설계하였고, 헬리컬 전열관 회전수, 수직·반경피치, 적층(accumulated tube layer) 특성에 대한 상세검토를 통해 열교환기 제작성을 평가하였다. STELLA-1 AHX의 설계도면과 주요 설계제원은 그림 1.1-20 및 표 1.1-3과 같다.



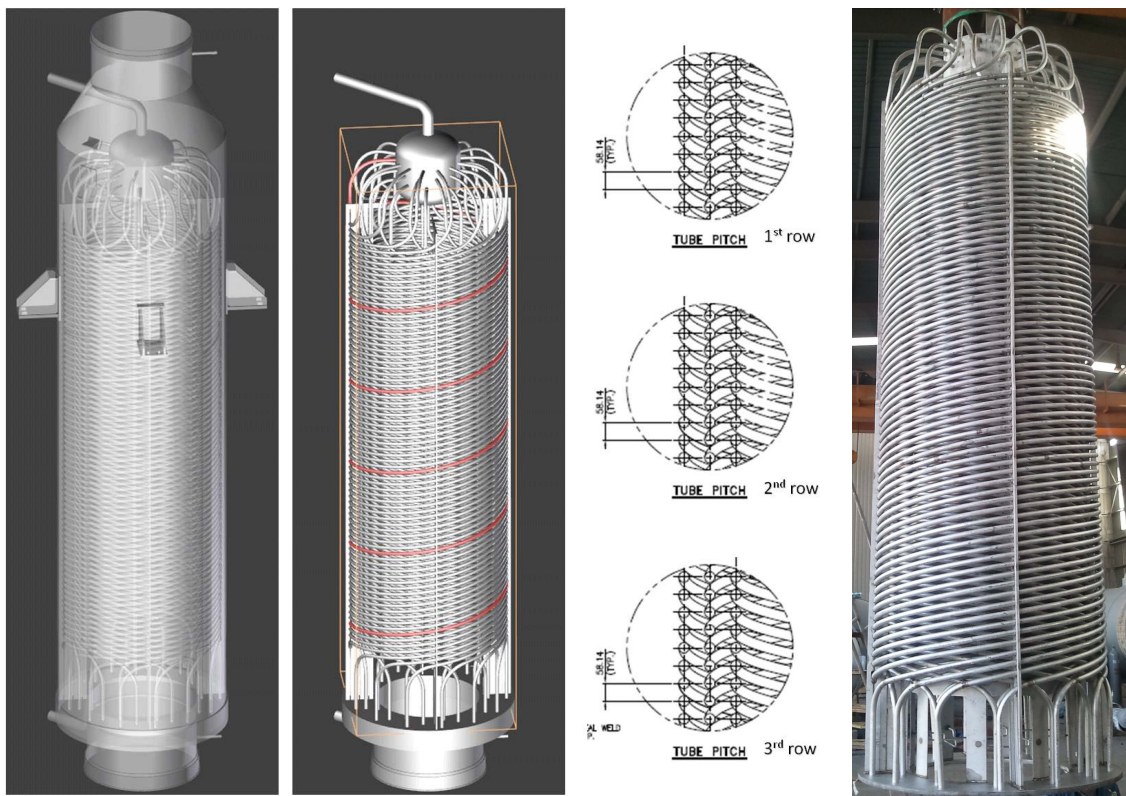
<그림 1.1-19 AHX 척도설계인자 왜곡도 평가>

<표 1.1-3 STELLA-1 AHX 설계제원 및 물량>

설계인자	제원 및 물량
No. of tubes / tube row	36 / 3
Tube O.D (mm)	34.0
Tube I.D (mm)	30.7
Thickness (mm)	1.65
Length (m)	23.76
Material	STS316
Shroud I.D (m)	1.53
Shroud length (m)	5.66
Tube total mass (kg)	1137.4
Center pipe mass (316SS; kg)	812.5
Tube inside sodium (kg)	572.2
Downcommer pipe (T91; kg)	54.3
Shroud (304SS; kg)	577.4
Tube sheet mass (316SS; kg)	82
Grid structure mass (316SS; kg)	247.4
AHX total mass (kg)	~3483



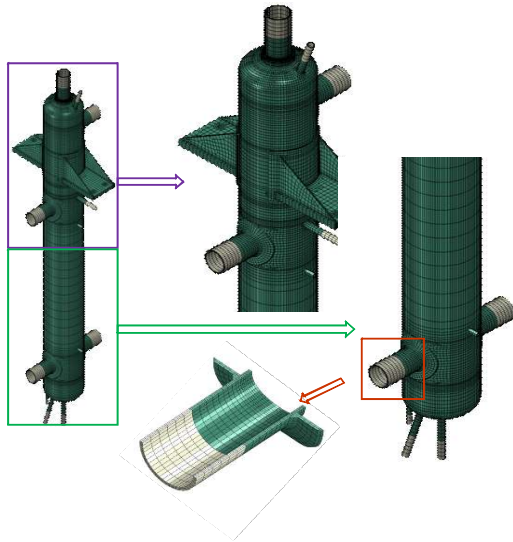
<그림 1.1-20(a) STELLA-1 AHX 설계도면>



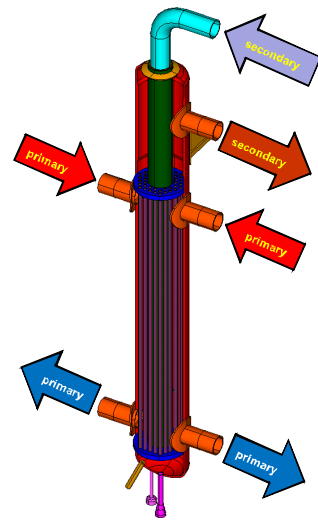
<그림 1.1-20(b) STELLA-1 AHX 모형도 및 제작 사진>

이와 같은 과정을 통해 DHX 및 AHX의 전열성능 및 압력손실 특성을 평가하기 위한 실험용 소형 열교환기의 열적크기 설계인자 생산, 기기 전열성능 및 압력손실 평가, 물량자료 생산, 기술규격서 작성, 기기 상세 제작도면 작성을 완료하였으며, 현재 STELLA-1 장치에 설치 완료되었다. 본 연구로부터 획득한 실험자료는 향후 원형로 열교환기의 설계특성 및 제작성 확인, 실험상관식을 활용하는 1차원 설계 및 성능해석 전산코드의 확장성 검증에 활용될 예정이다.

고온에서 운전되는 STELLA-1 시험루프 내 DHX 및 AHX에 대해 고온설계 기술기준인 미국의 ASME-NH[1.1-5]와 프랑스의 RCC-MR[1.1-6]을 따라 보수적으로 설정된 설계 운전과도 하중 하에서 고온설계 평가를 수행하였다. STELLA-1 실험장치의 설계수명은 25년, 소듐 계통의 주입 및 배출운전 횟수는 20회/년, 소듐 저장온도(200°C)와 최고 실험온도(510°C) 사이의 가열 및 냉각 운전 횟수는 20회/년으로 보수적으로 설정되어 있다. STELLA-1 열교환기의 재료는 DHX의 경우 셸과 튜브가 모두 Mod.9Cr-1Mo강이고, AHX의 경우 튜브는 316SS, 셸은 304SS이다.

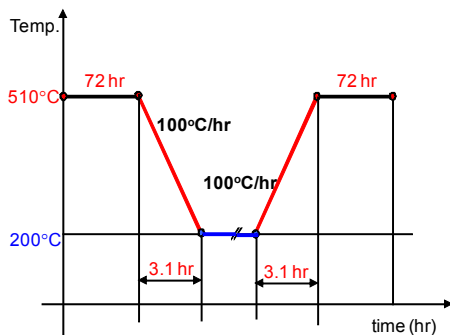


<그림 1.1-21 DHX의 3D 유한요소모델>

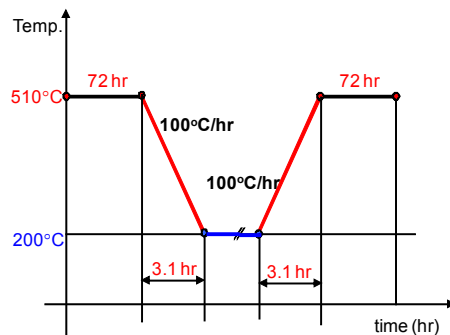


<그림 1.1-22 DHX 내 일차 및 이차 유로>

DHX의 유한요소(FE) 해석 모델은 그림 1.1-21과 같이 3D 모델이며, 225,511 3D linear solid 요소와 290,790 절점으로 구성되어 있다. 대상 원자로의 DHX는 일차 소듐 냉각재가 DHX의 셸 상·하에 가공된 창(window)을 통해 유입 및 유출되지만 스텔라 시험루프에서는 배관루프 시스템의 특성상 그림 1.1-22에서와 같이 배관을 통해 유입 및 유출되도록 설계하였다.

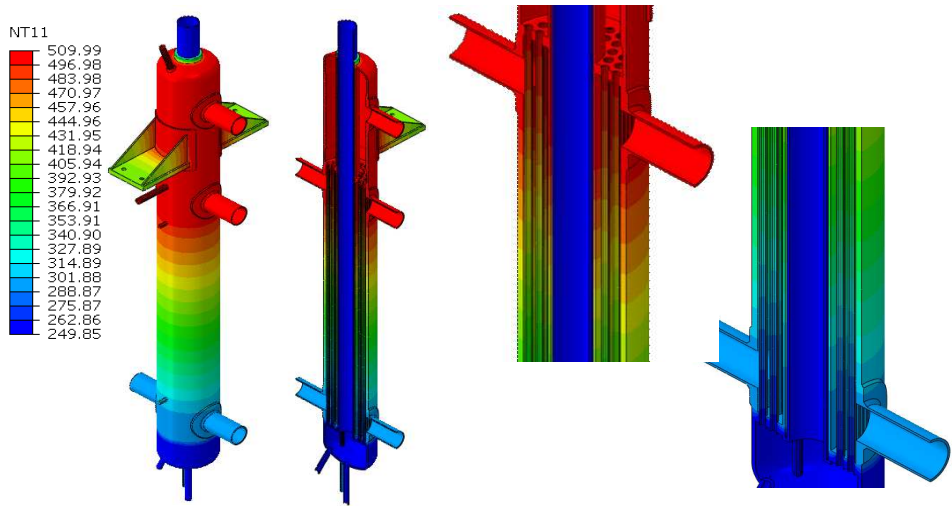


<그림 1.1-23 DHX 내 일차측 소듐 설계 과도>

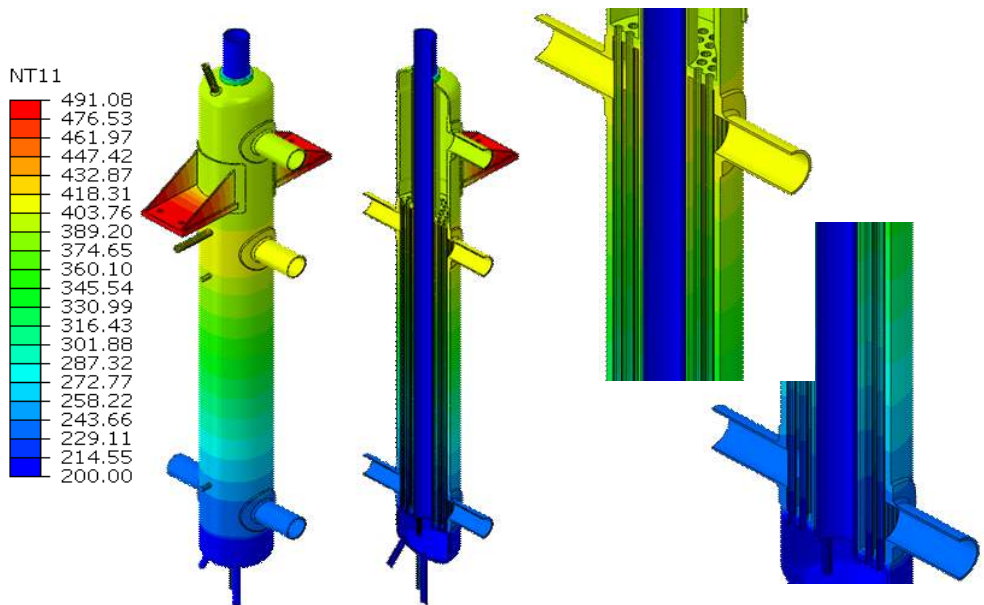


<그림 1.1-24 DHX 내 이차측 소듐 설계 과도>

시험루프에서 소듐의 유로는 그림 1.1-21에서와 같이 일차 소듐이 셸 측으로, 이차 소듐은 튜브 내 측으로 유동한다. 소듐이 정상상태인 510°C 에서 410°C로 냉각(cool-down)이 개시된 후 1시간이 지난 시점에서의 온도 분포와 410°C에서 510°C로 가열(heat-up)된 후 1시간이 지난 시점에서의 온도 분포는 각각 그림 1.1-25 및 1.1-26에서와 같은 양상을 보였다.



<그림 1.1-25 410°C→510°C Heatup 시 DHX의 온도 분포>

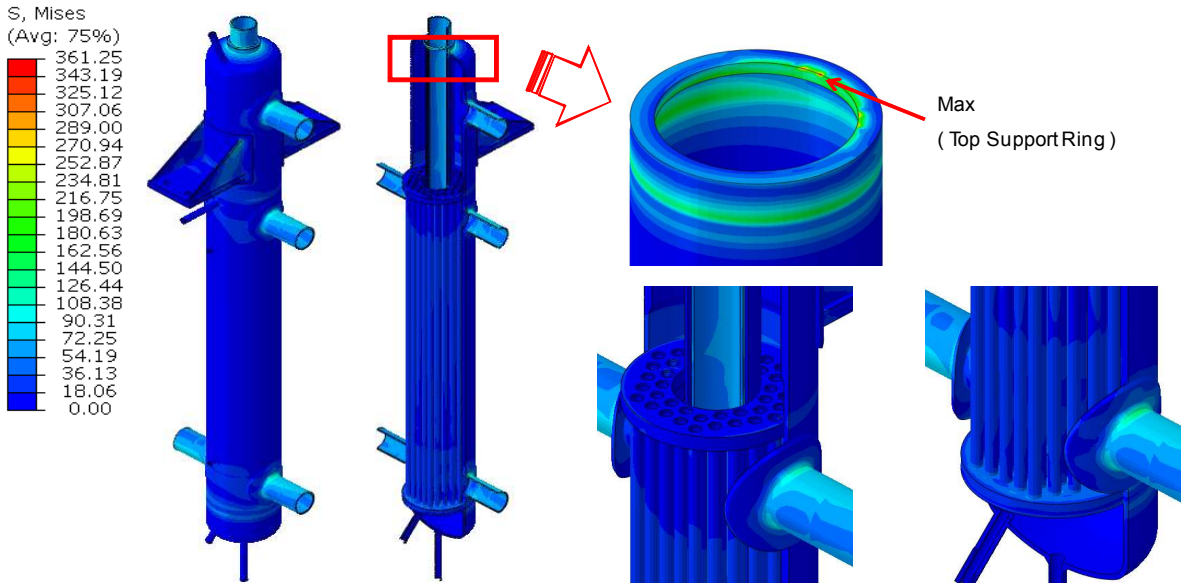


<그림 1.1-26 510°C→410°C Cooldown 시 DHX의 온도 분포>

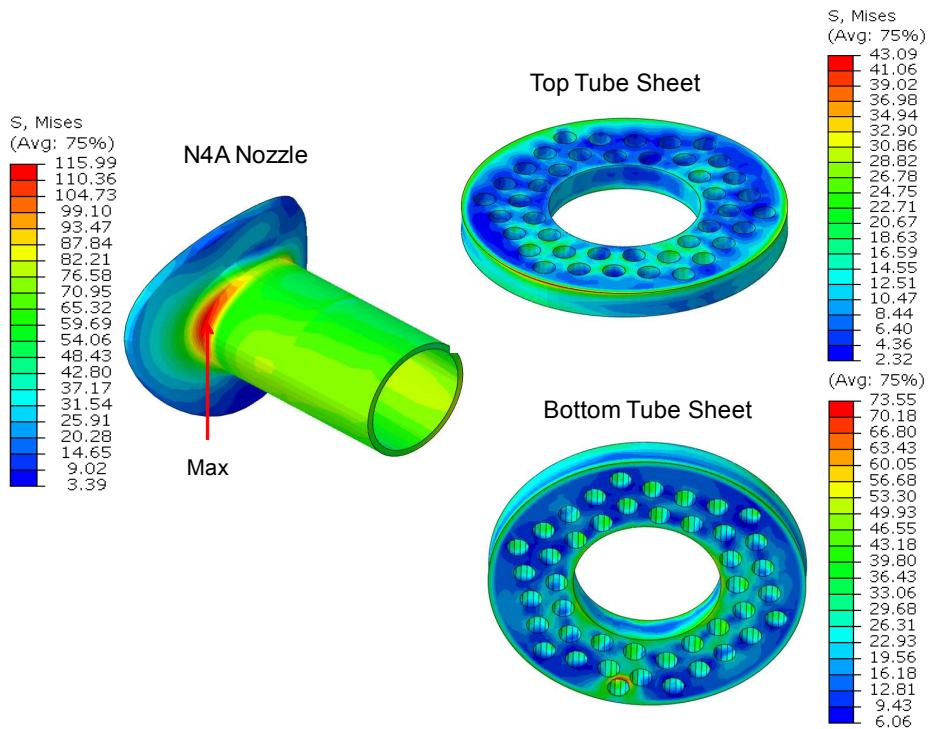
위의 열전달해석 결과 및 연결 배관의 시스템 하중을 고려하여 열교환기의 열응력해석을 수행하고, 동 결과를 이용하여 크립-피로 손상평가를 수행하였다. 410°C에서 510°C로 가열(heat-up)된 후 1시간이 지난 시점에서의 응력 분포는 그림 1.1-27과 같으며, 이차응력 하에서 최대 361.25MPa의 Mises 응력이 DHX의 상부 목 부위에서 발생한 것으로 나타났다.

통상 열교환기에서는 관판(tubesheet)과 튜브 및 관판과 셸이 접하는 부위에서 최대응력이

발생하는 것으로 알려져 있지만, STELLA-1 DHX의 관관 접합부위에서의 응력은 그림 1.1-24 및 그림 1.1-25에서 보는 바와 같이 3D 유한요소 해석을 수행한 결과 실제 응력수준은 그림 1.1-28의 N4A 노즐 부위에 비해 낮은 것으로 나타났다.



<그림 1.1-27 410°C→510°C Heatup 시 DHX의 응력 분포>



<그림 1.1-28 410°C→510°C Heatup 시 DHX의 노즐 및 상·하부 관관의 응력 분포>

설계과도 조건 하에서 그림 1.1-28의 다섯 군데 고응력 부위 중 3번 (그림 1.1-28의 N4A) 노즐부가 가장 취약한 것으로 나타났다. 동 부위에 대해 고온 설계기술기준인 미국의 ASME-NH와 프랑스의 RCC-MR을 따라 크립-피로 손상 평가를 수행한 결과를 표 1.1-4에 제시하였다. 최신 버전의 ASME-NH 및 RCC-MR 설계 기술기준을 따라 평가한 결과는

Table 1에서 보는 바와 같이 DHX는 의도하는 수명기간 동안 크립 및 피로 손상에 대해 건전성을 유지하는 것으로 평가되었다. 그렇지만 표 1.1-4에서 보는 바와 같이 RCC-MR이 ASME-NH보다 덜 보수적인 결과를 주는 것으로 나타났다. 이는 Mod.9Cr-1Mo강 구조에 대한 이전 연구결과[1.1-8]와 동일한 경향을 보여주고 있다.

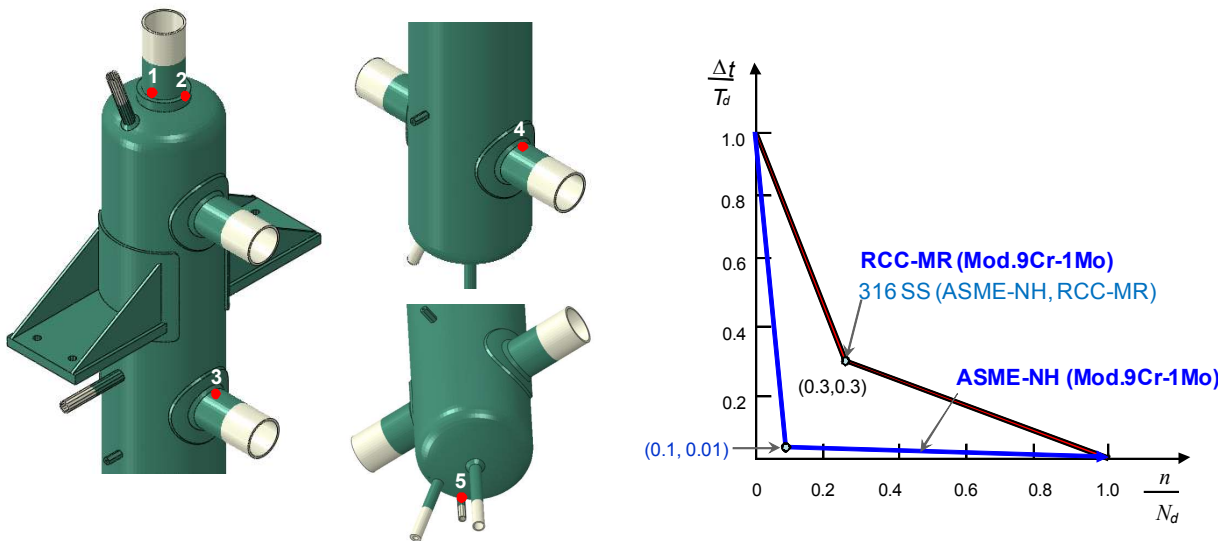
DHX의 재질은 튜브와 셸을 포함한 모든 부위가 Mod.9Cr-1Mo강이고, 크립-피로 손상 포락선(envelope)에서 RCC-MR의 교점(intersection point)이 (0.3, 0.3)인 반면 ASME-NH의 교점은 (0.1, 0.01)로 크립 손상의 ASME-NH의 허용 영역이 RCC-MR의 1/30인 점을 감안하면 Mod.9Cr-1Mo강 구조에 대해 ASME-NH는 RCC-MR에 비해 훨씬 더 보수적임을 알 수 있다.

Mod.9Cr-1Mo강의 보수성을 저감시키기 위해 ASME Section III 고온분과 부위원회에서는 자체 보수성을 내포하고 있는 ASME-NH의 탄성 평가절차를 따르고, 동 코드 내 등시곡선(isochronous) 데이터를 활용할 경우 Mod.9Cr-1Mo강에 대해 교점 (0.3, 0.3)을 사용하도록 규정하고 있는 ASME Code Case N-812(Code Case N-812, Alternative C-F Damage Envelope for Gr.91)를 2011년 제정한 바 있다.

<표 1.1-4 평가결과 비교(DHX)>

Design code	$N_d^{(*)}$ (cycles)	$T_d^{(**)}$ (hours)	Wall Temp.
ASME-NH	10,753,904	1,463	509.8(°C)
RCC-MR	$> 1 \times 10^7$	130,539	

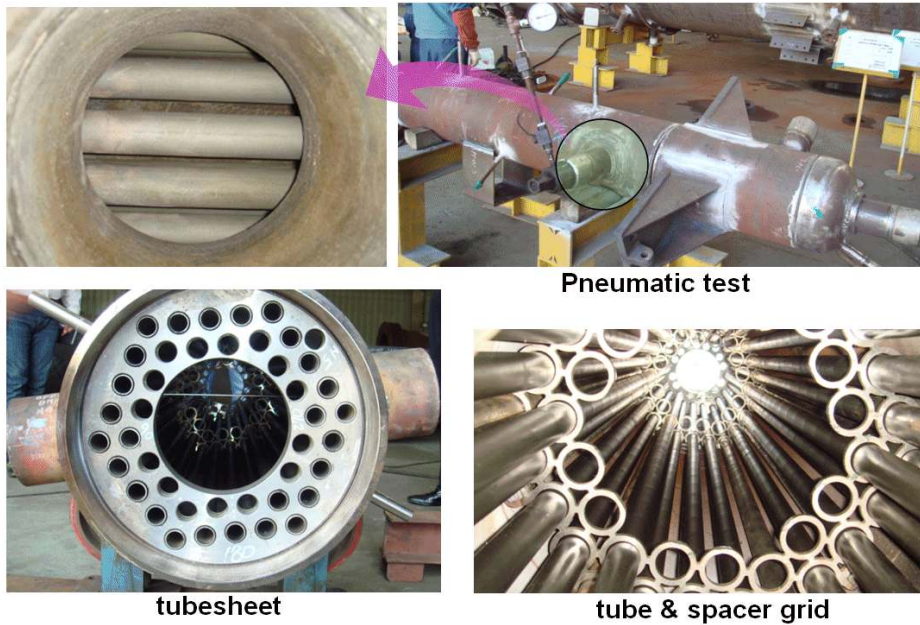
$N_d^{(*)}$  : Number of design allowable cycles  
 $T_d^{(**)}$ : Allowable time duration to stress-to-rupture



<그림 1.1-29 크립-피로 손상평가>

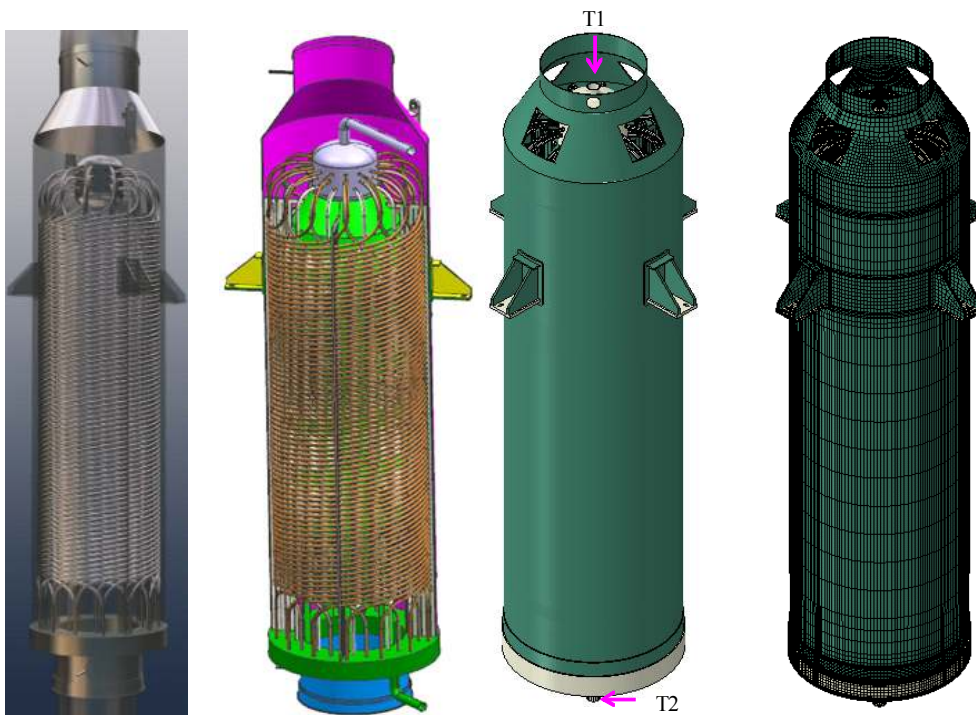
DHX의 제작은 스테인리스강 대비 재질의 강도가 높고, 제작성 및 용접성이 떨어지는 Mod.9Cr-1Mo강이어서 제작 초기에 몇 차례 시행착오를 겪는 등 어려움이 있었지만 일련의 용접 및 비파괴검사를 통과하면서 성공적으로 제작이 이루어졌다. STELLA-1 DHX의 제작과

정과 전열관 배열, 전열관 간격 유지를 위한 스페이서 그리드(spacer grid) 및 관판의 형상은 그림 1.1-30과 같다.



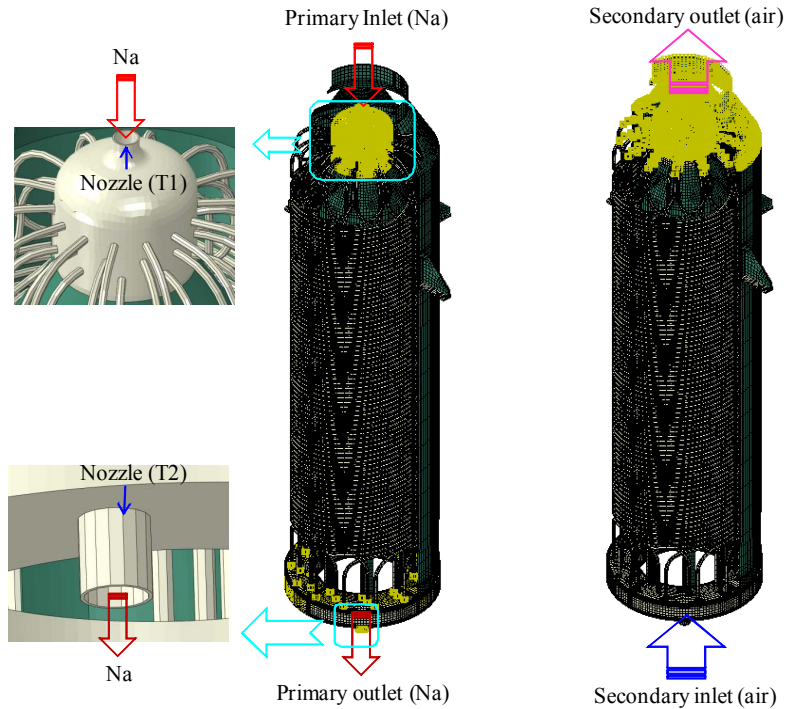
<그림 1.1-30 STELLA-1 DHX 제작 과정>

한편 STELLA-1 AHX의 형상은 그림 1.1-31과 같으며, AHX에는 36개의 튜브가 설치된다. AHX의 3D FE 모델은 그림 1.1-31과 같으며, 해석 모델에는 803,199절점과 523,754개의 3D linear solid 요소가 사용되었다. 고온에 노출되는 AHX 튜브의 재질은 내열강도가 우수한 스테인리스강 316 (316SS)을 사용하였고, 크립 영역 이하에서 가동되는 셸 부분은 상대적으로 경제적인 304SS를 사용하였다.



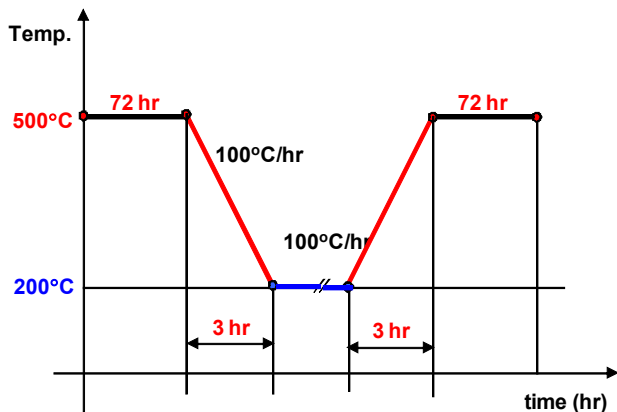
<그림 1.1-31 AHX의 3D 형상 및 유한요소모델>



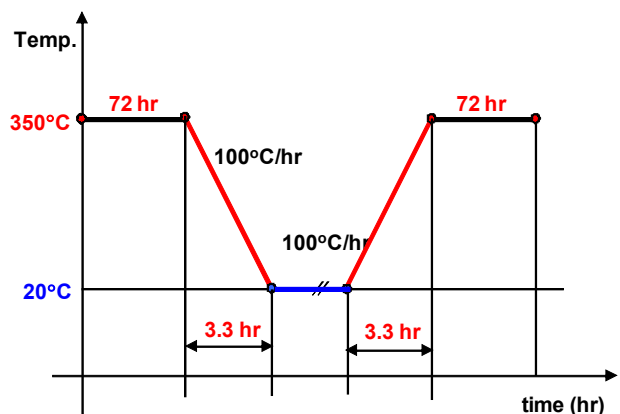


<그림 1.1-32 AHX 내 일차 및 이차 냉각재의 유로>

AHX 내에서 일차측 고온 소듐은 그림 1.1-32에서와 같이 최상부 T<sub>1</sub> 노즐로 유입된 후 헤드로부터 36개의 헬리컬 튜브로 유입된 후 관관 하부의 도넛 공간에 모인 후 하부의 T<sub>2</sub> 노즐을 통해 빠져나가고, 이차측 냉각재인 공기는 그림에서 보는 바와 같이 하부에서 상부로 흐른다. 일차측 및 이차측 냉각재의 설계 과도는 DHX에서와 비슷한 형태로, 그림 1.1-33에서와 같으며, 다만 일차측 최고 온도는 500°C, 이차측 최고/최저 온도는 그림 1.1-34에서와 같이 350°C/20°C로 설정되었다.



<그림 1.1-33 AHX 내 일차측 소듐 설계 과도>

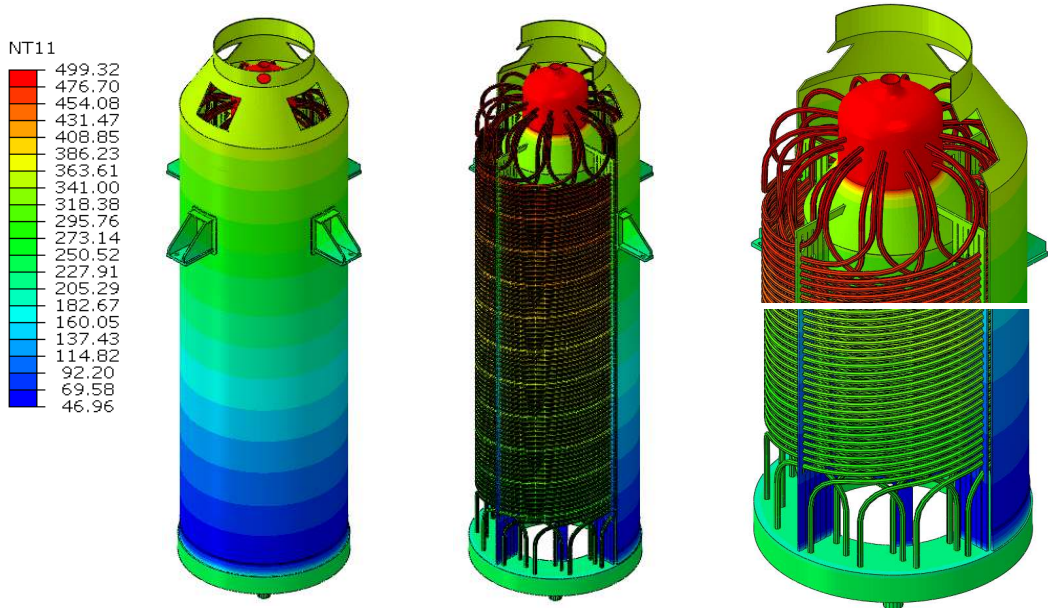


<그림 1.1-34 AHX 내 이차측 공기 설계 과도>

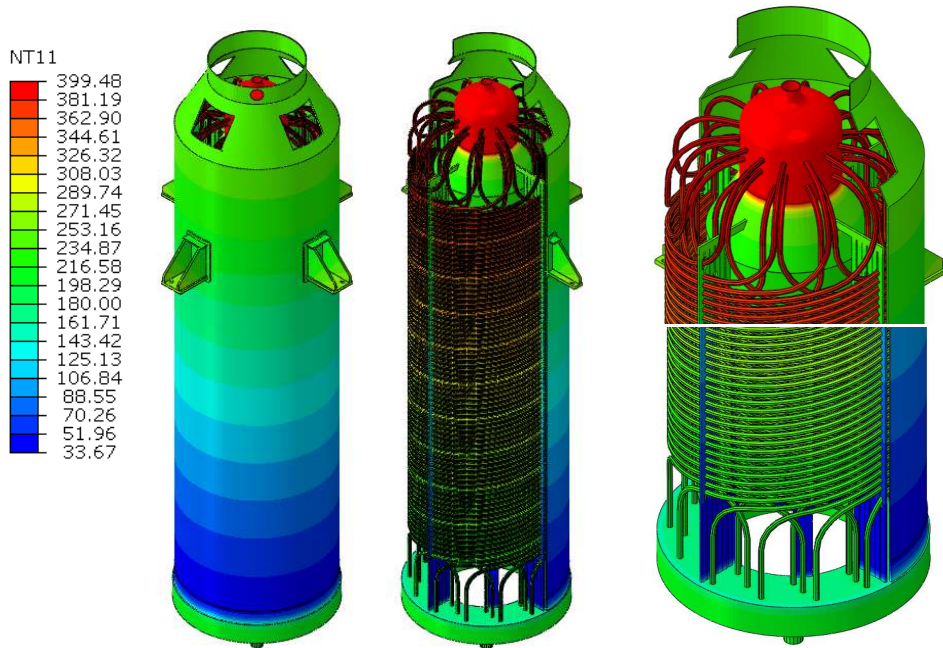
AHX의 열전달해석 결과는 가열(heatup) 끝 단계로서 400°C에서 500°C로 가열이 종료되는 시점의 온도 분포는 그림 1.1-35에서와 같이 상부 헤드 부분에서 고온 분포를 보이고, 점차 아래로 내려가면서 튜브 온도가 떨어지는 것을 볼 수 있다.

또한 500°C에서 400°C로 냉각이 종료되는 시점에서의 온도 분포는 그림 1.1-36에서와 같

은 분포를 보였다. 그림 1.1-35 및 1.1-36을 비교해보면 일차 냉각재의 가열 및 냉각이 이루어질 때 AHX 튜브의 전체 온도 분포 양상은 유사하지만, 최고 온도에서 약 100°C의 온도차이가 있음을 알 수 있다.

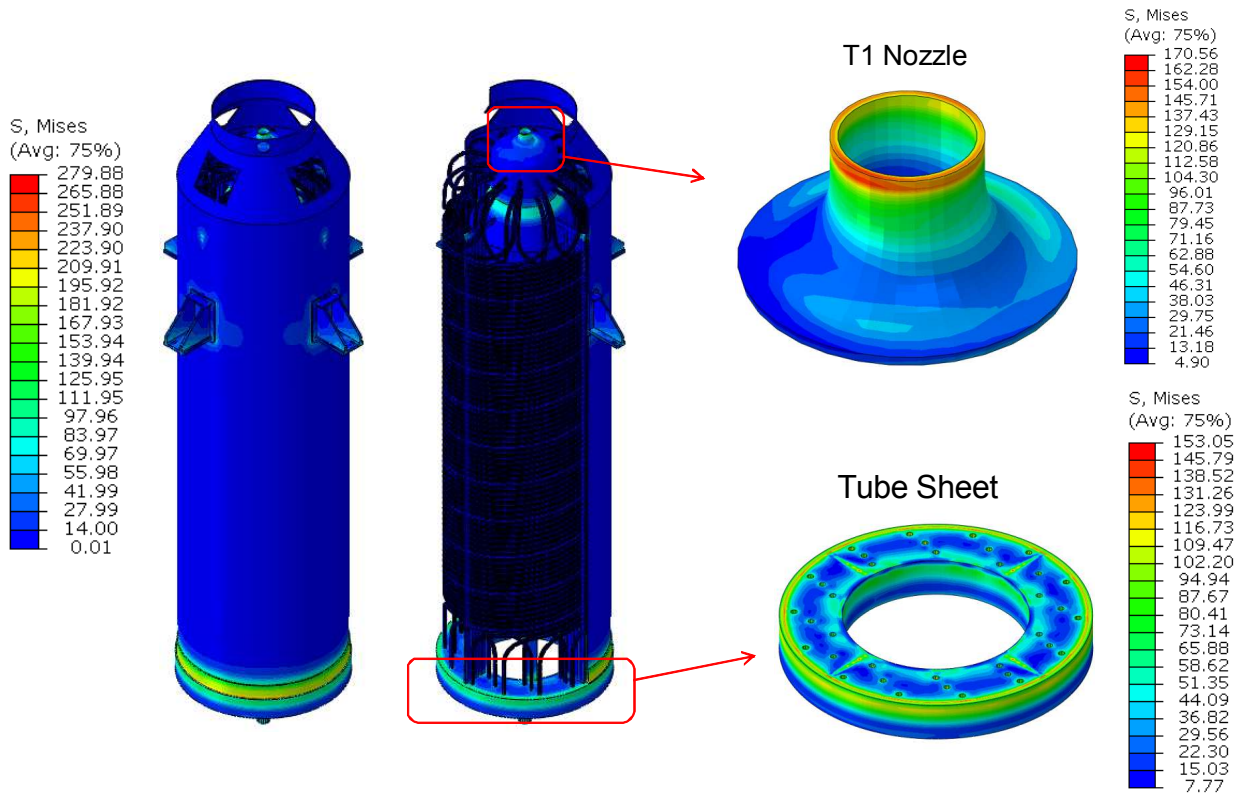


<그림 1.1-35 400°C→500°C Heatup 시 온도분포>



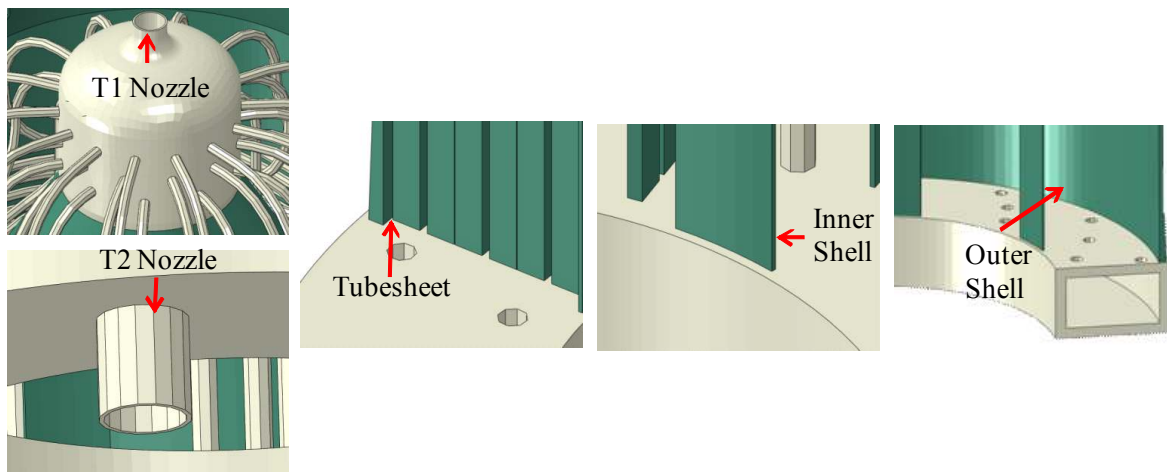
<그림 1.1-36 500°C→400°C Cooldown 시 AHX의 온도분포>

AHX에 대해 이상의 열전달해석 결과 및 연결 배관의 시스템 하중을 고려하여 열응력 해석을 수행하였다. 400°C에서 500°C로 가열이 종료되는 시점에서 응력 분포는 그림 1.1-37에서와 같이 최대 Mises 응력강도가 279.88MPa로 계산되었다. 최대 응력 발생 부위는 AHX 하부 내부 셸(inner shell)과 관관이 접하는 부분으로 저온 영역에 속한다. 크립 손상이 발생하는 고온 영역에서의 최대 응력강도 발생 부위는 그림 1.1-37에서와 같이 최상부 T<sub>1</sub> 노즐 부위였으며, 최대 응력강도는 170.56MPa로 나타났다.



<그림 1.1-37 410°C→510°C Heatup 시 AHX 본체, 노즐 및 상·하부 관판의 응력 분포>

또한 통상 높은 응력집중 부위로 알려진 관판 부위의 응력강도 분포는 그림 1.1-38의 우측 하부에서 보는 바와 같이 비교적 응력강도가 낮은 것으로 나타났다.



<그림 1.1-38 AHX 내 크립-피로 손상평가 대상 부위>

오스테나이트 스테인리스강 재질의 AHX에 대해서도 이상의 열응력해석 결과를 이용하여 고온 구조의 건전성에서 가장 중요한 평가 항목인 크립-피로 손상평가를 수행하였다. 적용한 설계 기술기준은 DHX에서와 마찬가지로 최신 버전의 ASME-NH와 RCC-MR이며, 동 기술기준을 따른 크립-피로 손상 평가를 수행한 결과는 표 1.1-5에서 보는 바와 같이 수명 기간 동안 AHX는 고온 구조 건전성을 유지하는 것으로 나타났다.

고온 설계 기술기준 비교와 관련하여 316SS 재질의 T<sub>1</sub> 노즐 부위의 크립-피로 손상평가 결과를 비교해보면 표 1.1-5와 같이 AHX에 대해서도 ASME-NH가 RCC-MR보다 더 보수적

인 것으로 나타났다. 그러나 ASME-NH와 RCC-MR을 따른 평가결과는 모두 STELLA-1 AHX가 설계 과도에 대해 수명 기간 동안 크립-피로 손상에 대해 충분히 건전함을 보여주고 있다.

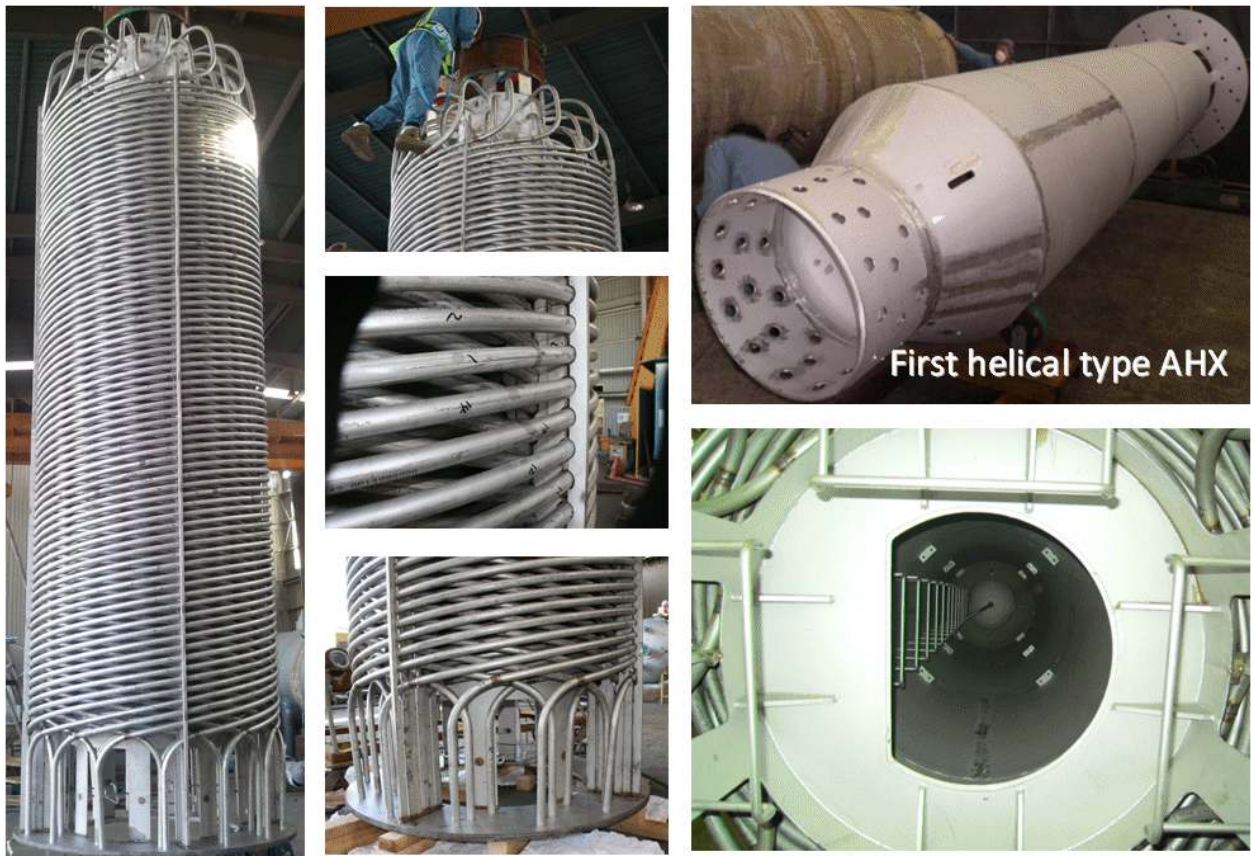
<표 1.1-5 평가결과 비교(AHX)>

Design code	$N_d^{(*)}$ (cycles)	$T_d^{(**)}$ (hours)	Wall Temp.
ASME-NH	2,993	$> 3 \times 10^5$	498°C
RCC-MR	92,593	$> 3 \times 10^5$	

$N_d^{(*)}$  : Number of design allowable cycles  
 $T_d^{(**)}$ : Allowable time duration to stress-to-rupture

AHX의 제작과 관련하여 3열, 36개의 튜브로 구성된 내부 코일 조립사진은 그림 1.1-39와 같다. 외경 34mm, 두께 1.65mm, 길이 23.76m의 튜브를 3열로 성형 및 설치하는 것은 높은 정밀도를 요구하는 작업이었다. 헬리컬형 공기-소듐 열교환기(AHX)에 대한 실제 제작은 STELLA-1에서 처음으로 시도한 것이다.

본 연구에서는 튜브 길이가 9m인 상용 관을 구입하여 사용하였고, 제작 및 설치 여건을 고려하여 튜브 전장 23.76m에서 제작·설치를 위해 세 군데 용접을 하였다. 소듐누설을 방지하기 위해서는 용접부를 최소화하는 것이 필요한바 실제 소듐냉각원자로의 AHX 제작 시에는 용접 포인트의 수를 최소화하기 위한 제작·설치 및 비파괴 기술의 개발이 요구된다.



<그림 1.1-39 헬리컬 튜브-셸 형태의 STELLA-1 AHX 제작 및 조립 사진>

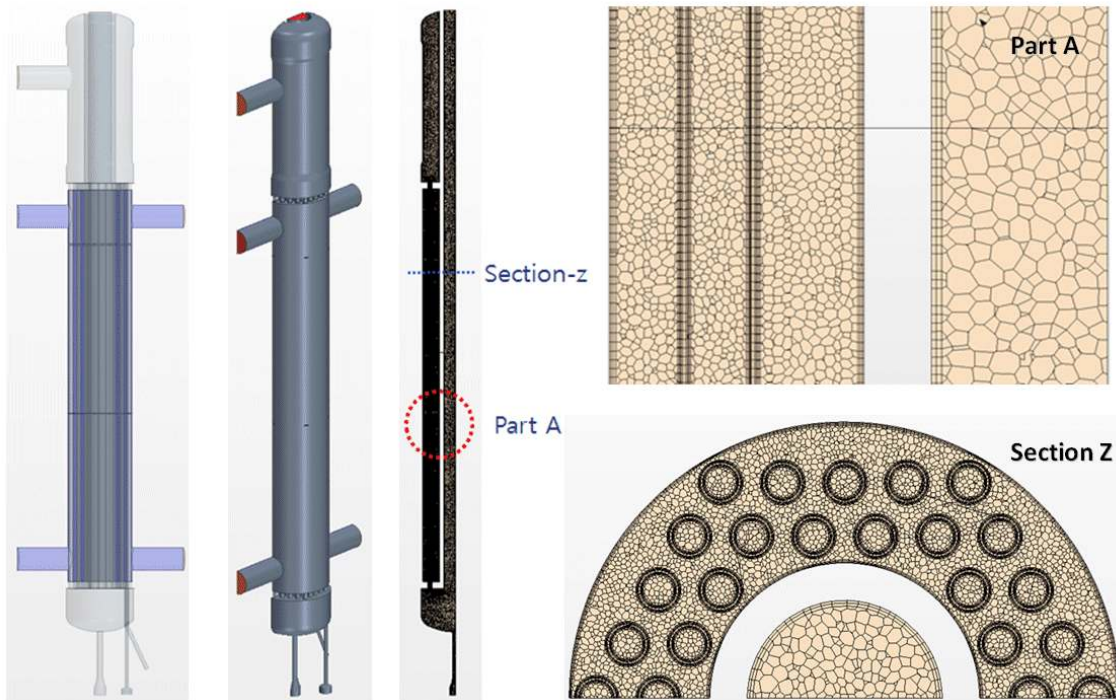
## (나) STELLA-1 열교환기 CFD 해석

STELLA-1의 실험용 열교환기는 원형(Prototype) 열교환기의 물리적 현상을 잘 보존할 수 있는 적절한 척도법에 의해 축소하여 설계하였으나, 실제 원형 열교환기의 다양한 열유체 현상이 축소 열교환기에서도 재현될 수 있는지를 평가하여 축소 열교환기 설계의 타당성을 확인할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 복잡한 기하형상에서 발생하는 다차원 단상유동에 널리 적용되고 있는 CFD (Computational Fluid Dynamics) 전산코드를 활용하여, DHX와 AHX에 대해 원형 열교환기와 실험장치 축소 열교환기 간의 CFD 계산결과에 대한 비교·검토를 수행하여 축소 열교환기 설계 타당성을 평가하고, 평가결과를 축소 열교환기 설계개선 및 상세설계에 활용하였다.

실험장치 DHX의 CFD 분석은 전열관 배치를 고려한 180° 대칭형태를 대상으로 3차원 CAD 모델 구성 및 3차원 CFD 해석모델 구성을 통해 경계조건 변화에 따른 3차원 정상상태를 해석하는 방법으로 수행하였다. 실험장치 AHX 해석은 헬리컬 영역전체를 대상으로 360° 전 영역을 해석대상으로 CAD 모델구성을 완료하고, 3차원 CFD 해석모델 구성 및 복합전열과정에 대한 계산을 수행 중이다.

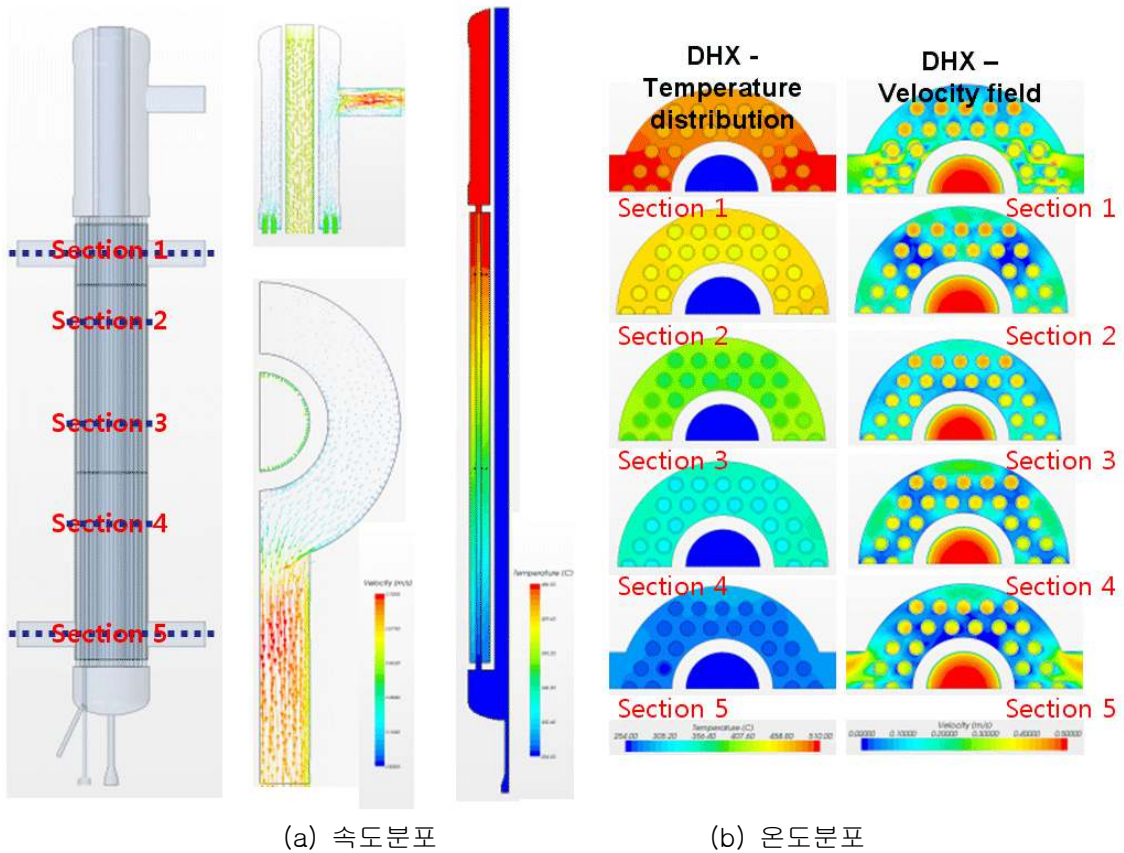
STELLA-1의 축소 DHX에 대한 열유동 특성은 그림 1.1-40과 같이 총 645만개 격자를 사용하여 수행하였으며, CFD 계산 결과를 열교환기 설계에 사용되는 1차원 코드 계산결과와 비교하였다. Shell측과 전열관측 유속계산결과를 비교한 결과, 전열관 내부 유동은 1차원 코드와 CFD 해석결과 사이에 차이가 없이 잘 일치하는 결과를 나타냈으며, Shell 측의 경우에는 유로의 형상변화 및 단일 유로를 토대로 계산되는 1차원 전산해석 모형의 불확실성 등이 반영되어 CFD 해석결과와 약 10%의 차이를 나타내는 것으로 분석되었다.



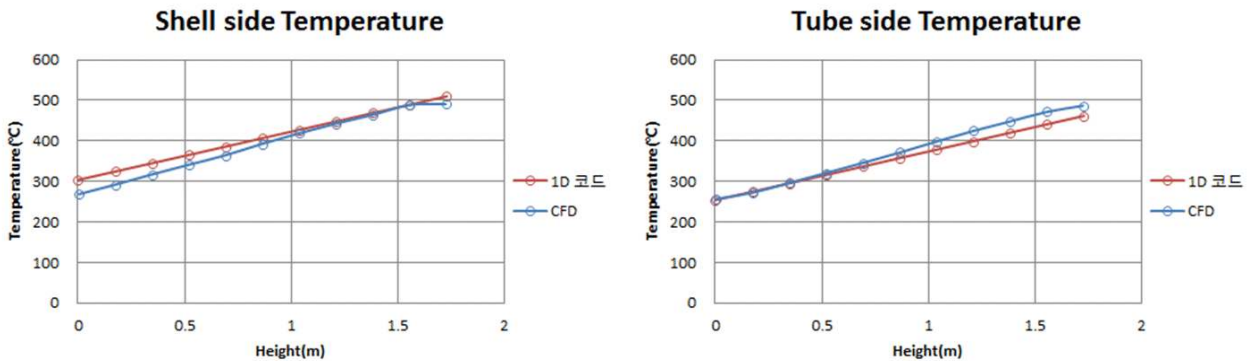
<그림 1.1-40 DHX 형상 및 격자 구성>

이는 주어진 유량을 실제 기하형상에 대해 분배하는 과정에서 필연적으로 유동면적의 차이가 발생하여 결과적으로 1차원 코드와의 속도 차이가 발생하고, 그로 인해 속도차이 만큼에 해당하는 압력손실 차이가 발생한 것으로 판단된다.

이와 관련해서는 향후 유량보정과 같은 방법을 통해 압력손실에 대한 평가를 추가로 수행할 예정이다. 한편, 1차원 코드와 CFD 코드의 출구온도 비교에서는 전열관측과 Shell측의 오차가 각각 5.24%와 7.7%로 모두 10% 이내로 나타남에 따라 복합열전달 현상을 토대로 계산하는 CFD 해석 결과와 1차원 해석 결과가 비교적 잘 일치하는 것으로 평가되었다. 그림 1.1-41은 DHX 각 해석영역에 대한 속도 및 온도분포이고, 그림 1.1-42는 일차원 해석코드와의 비교 결과를 도시한 그림이다.

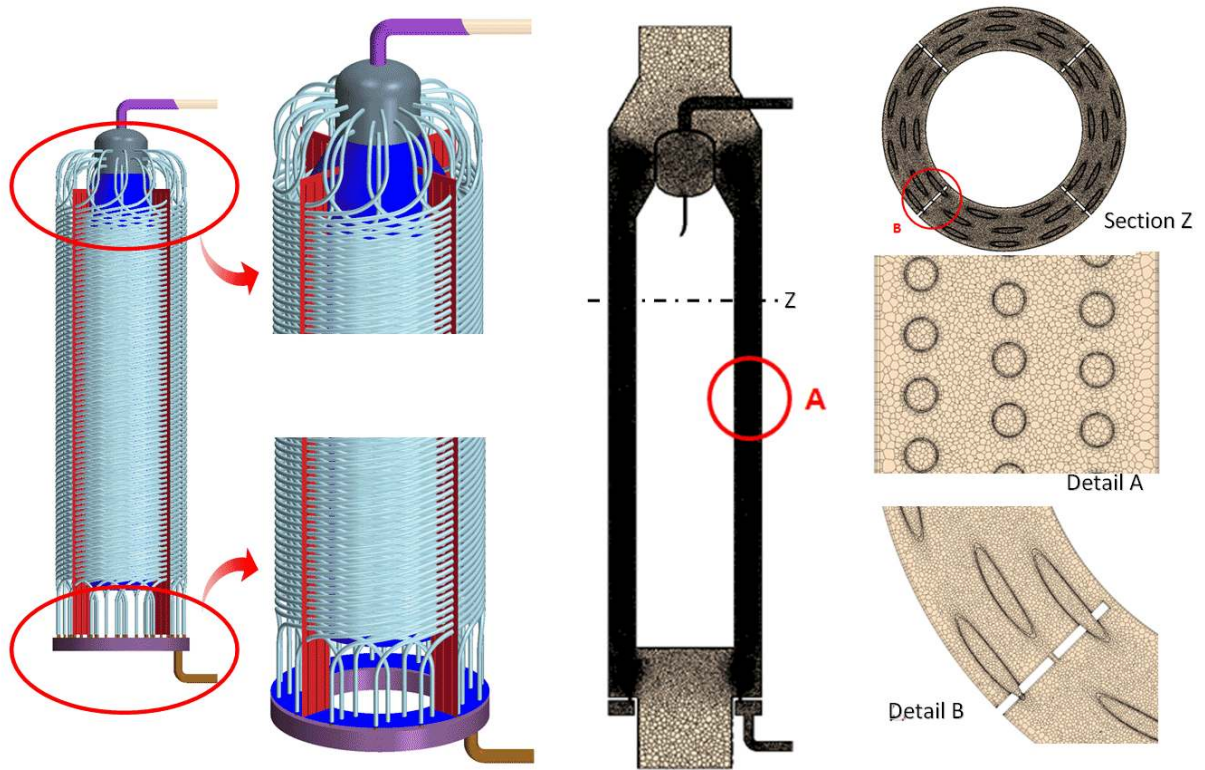


(a) 속도분포 (b) 온도분포  
 <그림 1.1-41 DHX 수평/수직단면에서의 속도 및 온도분포>

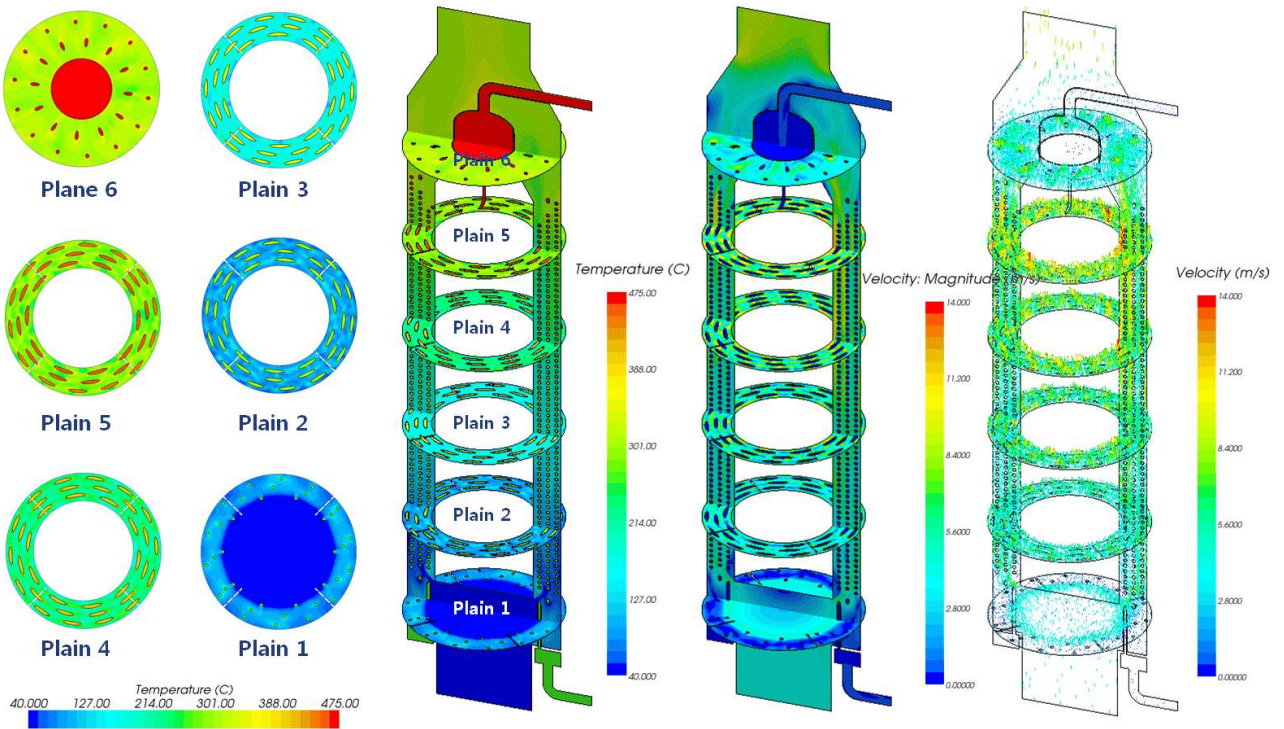


<그림 1.1-42 1차원 및 CFD 해석결과 비교>

STELLA-1의 축소 AHX에 대한 열유동 특성은 그림 1.1-43과 같이 총 8,150만개 격자를 사용하여 수행하였으며, DHX 각 해석영역에 대한 속도 및 온도분포도를 그림 1.1-44에 도시하였다[1.1-3].

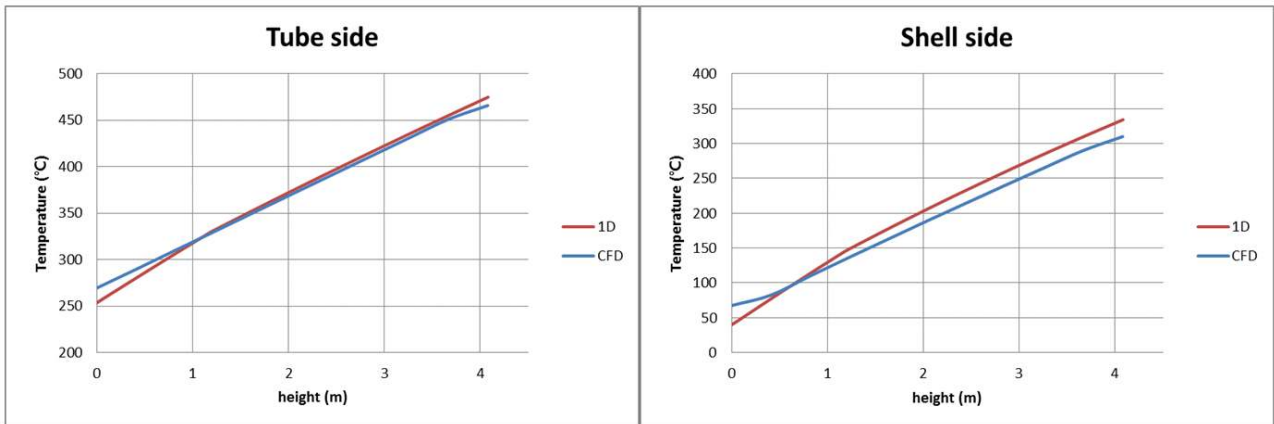


<그림 1.1-43 AHX 형상 및 격자 구성>



<그림 1.1-44 AHX 수평/수직단면에서의 온도 및 속도분포>

STELLA-1 AHX의 Shell측과 전열관측 온도해석 결과를 열교환기 설계에 사용되는 1차원 코드 계산결과와 비교한 결과, 그림 1.1-45와 같이 전열관 내/외부 유동 모두 1차원 코드와 CFD 해석결과가 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.



<그림 1.1-45 1차원 및 CFD 해석결과 비교>

특히, AHX 전열관 내부의 소뿔유동으로부터 전열관 외부의 공기로 전달되는 전체 열전달량은 1차원 코드와 CFD 코드의 계산 결과가 5% 이내로 매우 잘 일치하는 것으로 분석되었다. 이는 공기측의 대류전열저항이 전체 전열 저항의 98% 이상을 차지한다는 점을 감안할 때, 1차원 설계 전산코드가 계산의 불확실성이 큰 shell측 공기유동을 적절히 모델하고 있음을 보여주는 결과로서, 매우 고무적인 평가 결과라고 할 수 있다.

#### (다) 소뿔-공기 열교환기 척도해석 방법론 개발

본 연구의 목적은 소뿔냉각고속로 피동잔열제거시스템의 소뿔-공기 열교환기 AHX의 성능확인을 위한 실험장치의 척도해석 방법론의 적절성 확인을 위하여 문헌조사, 현상연구, 척도분석을 수행하고 기초실험을 통해 실증 실험장치의 상사성 유지를 위한 매개변수를 도출하는 것이다.

1차년도 연구에서는 소뿔-공기 열교환기의 1차적인 열제거 성능 확인에 앞서 헬리컬 튜브, 기울어진 실린더, 실린더의 배열 등에서 발생하는 자연대류 현상론에 대한 문헌조사와 기초실험을 통하여 부분효과에 대한 예비실험을 수행하였고 헬리컬 튜브에 대한 상사 매개변수를 확인하기 위하여, 개방수조에서의 헬리컬 튜브에 대하여 전체길이, 헬리컬 튜브의 높이, 튜브의 반지름, Pitch, 헬리컬 튜브의 감긴 반지름 사이의 관계를 제시하였다.

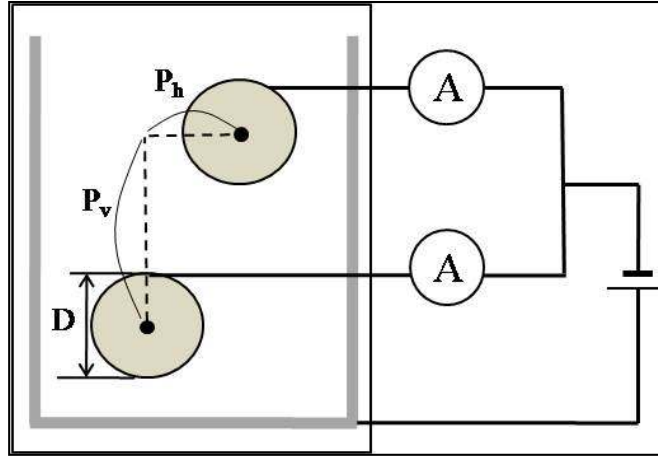
2차년도 연구에서는 그림 1.1-46과 같이 두 개의 수평관이 엇갈리게 배치되었을 경우 자연대류에 의한 열전달 특성을 실험하였다. 상단 실린더의 경우 하단 실린더에서 발생된 플룸의 영향으로 인하여 열전달이 달라졌다. 그림 1.1-47과 같이 매우 근접한 경우 하단 실린더로부터의 뜨거운 플룸이 상단 실린더의 열전달을 악화시켰고 거리가 멀어지면서 하단 실린더에서 제공한 초기속도로 인하여 상단 실린더의 열전달이 향상되었다[1.1-4].

부분효과실험(Separate effect tests)을 통하여 AHX에 대한 현상론적 이해에 도달하였고 이를 통하여 매개변수를 도출하기 위한 작업을 수행 중이며, 현재까지의 결론은 다음과 같다. 첫째, 원형과 실험장치의 부력은 헬리컬 튜브의 길이나 감긴 높이가 아니라 굴뚝의 길이에 의

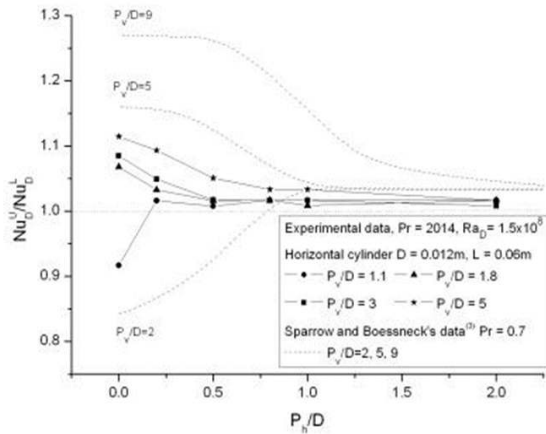


존함을 확인하였다. 현실적으로 굴뚝의 길이를 유지해서는 축소실험이 불가능하다.

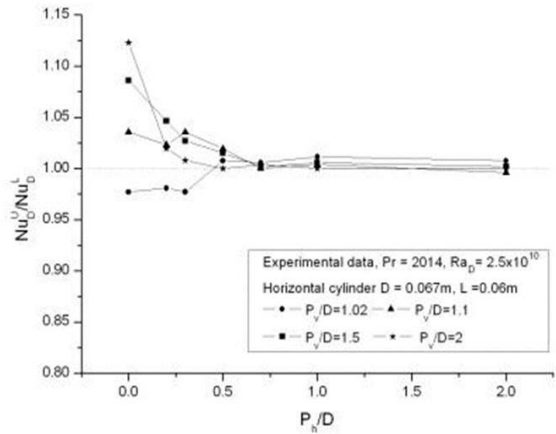
따라서 블로워 등을 통하여 원형과 실험장치에서의 유속을 동일하게 하면 상사성을 유지시킬 수 있을 것으로 판단된다. 둘째, 헬리컬 튜브에서의 열전달은 자연대류가 아니라 강제대류에 의하여 지배받는다. 따라서 난류영역의 강제대류 실험을 통해서 도출된 상관식을 사용할 수 있다. 셋째, 헬리컬 튜브의 기울기가 30도 이내인 경우 열전달은 수평관과 거의 유사하다. 따라서 수평관에 대한 열전달 상관식을 사용하는 것도 무방할 것으로 판단된다.



<그림 1.1-46 엇갈리게 배열된 두 개의 수평관 열전달 실험개요>



(Laminar)



(Turbulent)

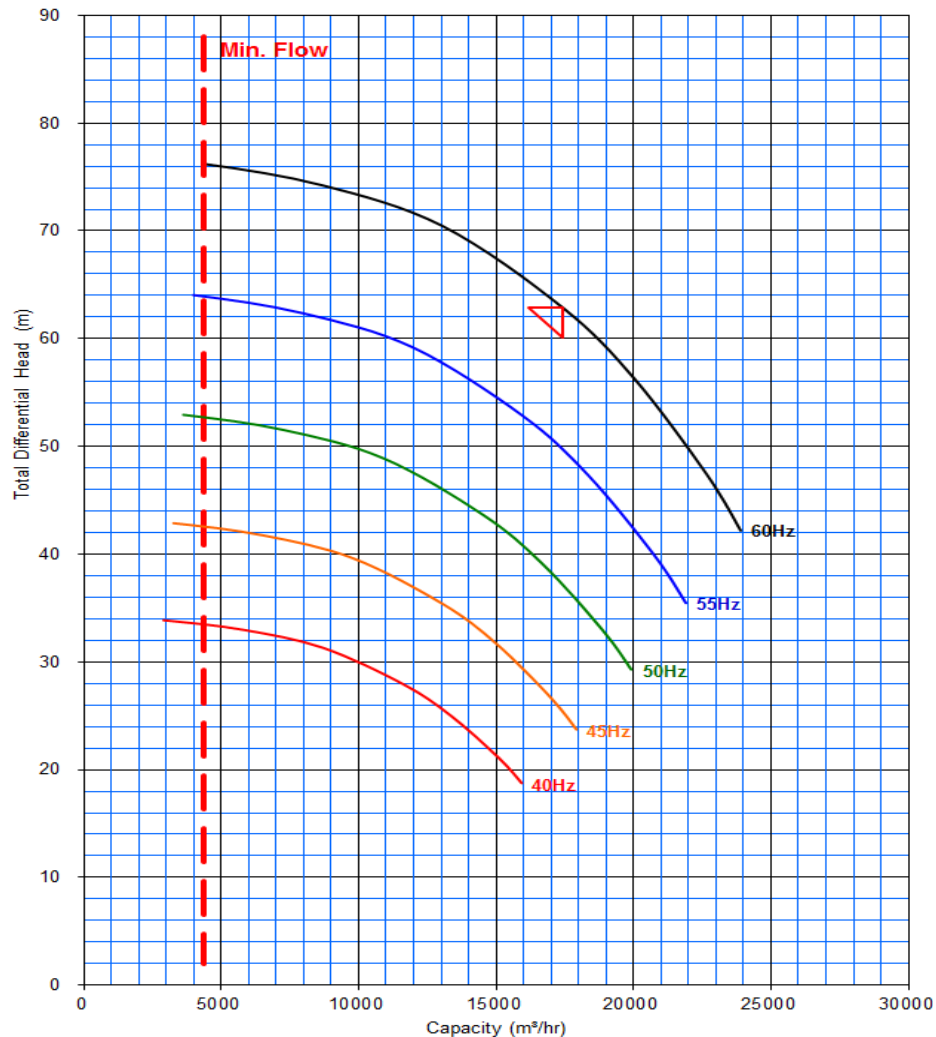
Nu ratio as a function of horizontal Pitch-to-Diameter.

<그림 1.1-47 엇갈리게 배열된 두 개의 수평관 열전달 실험결과>

#### (4) 기계식 소듐펌프 시작품 설계 및 제작

기계식 소듐펌프 시작품(모형펌프) 제작을 위해 원형펌프에 대한 기본설계를 수행하였고, 관련 수력학적 특성을 분석하였다. 또한, 축소 제작하는 모형펌프에서 원형펌프와 동일한 수력학적 특성을 재현할 수 있도록 상사법칙에 의거하여 모형펌프의 최종 설계 제원을 결정하였다.

도출된 설계 제원을 기초로 모형 펌프 제작을 위한 설계 계산서 및 상세 도면을 생산하였으며, 모형 펌프의 3차원 형상을 수치해석을 통해 미리 구현하고 유동해석을 수행하였다. 최종 결정된 상세도면을 기초로 하여 원형펌프의 수력학적 성능을 재현할 수 있는 축소 모형펌프를 제작 완료하였다.



<그림 1.1-48 원형펌프 유량 대비 수두곡선>

#### (가) 원형펌프 설계특성 분석

모형펌프 제작에 앞서 원형 펌프 정격운전조건 및 외형크기와 같은 주요 설계요건을 기초로 원형 펌프의 주요부분에 대한 기본설계를 수행하였다.

이러한 원형펌프 기본설계에 기초하여 설계특성 분석을 수행하여, 그림 1.1-48과 같이 원

형 펌프의 유량변화에 따른 NPSHR, 수두, 펌프 효율 변화 곡선을 도출하였다. 이러한 특성곡선은 원형 펌프의 특성을 정의할 뿐만 아니라 축소된 모델 펌프의 특성곡선을 정의하는 데에도 활용된다.

### (나) 모형펌프 설계사양 도출 및 상세설계

펌프 내부유동의 수력학적 특성은 다음과 같이 Buckingham의 차원분석 방법론에 의해 도출한 세 개의 무차원 변수인 비속도( $N_s$ ), 비유량( $Q_s$ ), 비수두( $H_s$ )로 표현이 가능하다.

$$N_s = \frac{NQ^{1/2}}{H^{3/4}}$$

$$Q_s = \frac{Q}{Nd^3}$$

$$H_s = \frac{gH}{N^2d^2}$$

여기서,  $N$ 은 회전수,  $Q$ 는 유량,  $H$ 는 수두,  $d$ 는 임펠러 직경,  $g$ 는 중력가속도를 의미한다. 유동학적으로 동일한 펌프 유동의 경우 전술한 무차원 변수들이 동일하게 된다. 동일한 방법을 모형펌프와 원형펌프에 대해 적용할 경우, 모형펌프와 원형펌프의 무차원 변수비인 비속도비( $N_{sR}$ ), 비유량비( $Q_{sR}$ ), 비수두비( $H_{sR}$ )는 각각 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$N_{sR} = \frac{N_{s,m}}{N_{s,p}} = \frac{N_R Q_R^{1/2}}{H_R^{3/4}}$$

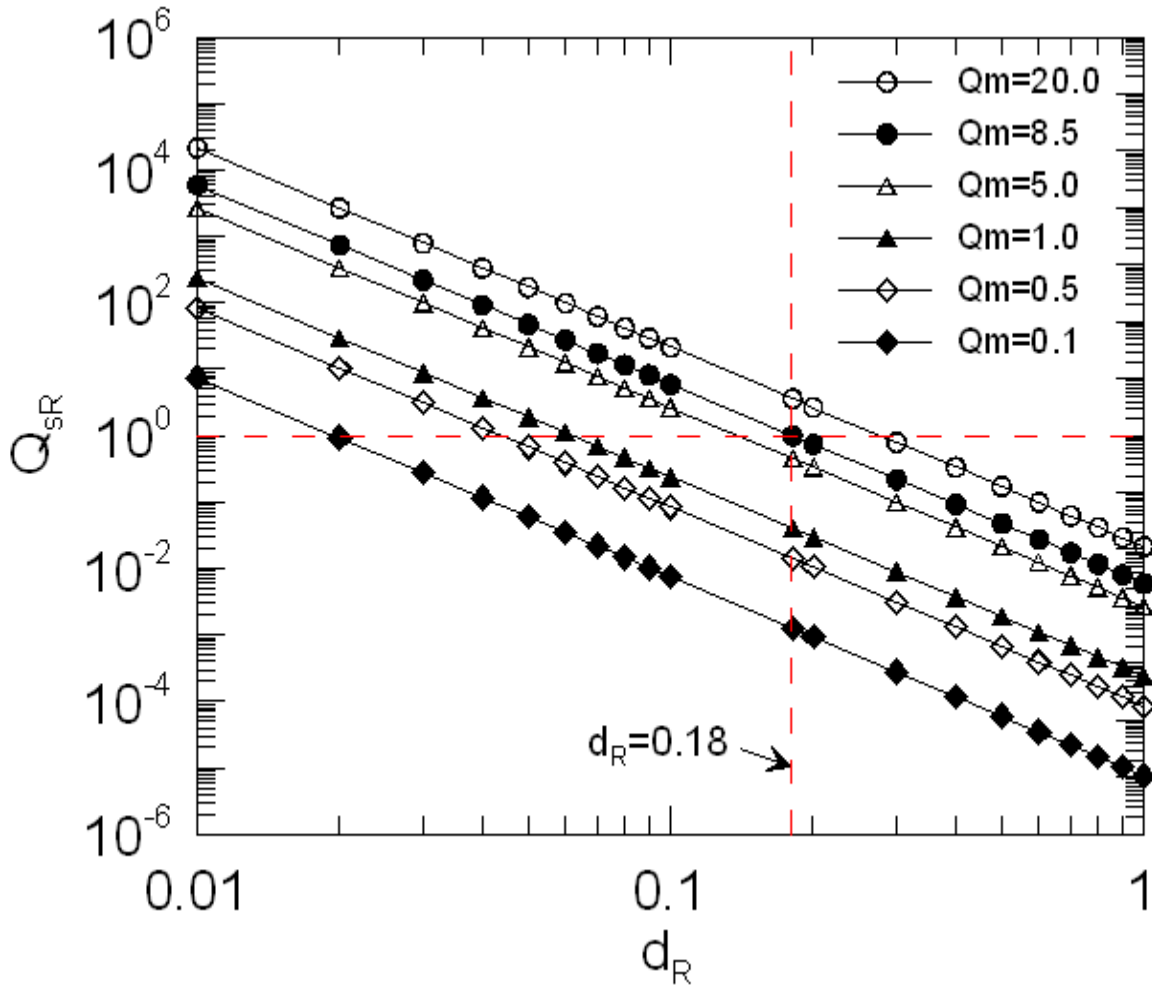
$$Q_{sR} = \frac{Q_{s,m}}{Q_{s,p}} = \frac{Q_R}{N_R d_R^3}$$

$$H_{sR} = \frac{H_{s,m}}{H_{s,p}} = \frac{H_R}{N_R^2 d_R^2}$$

여기서, 첨자  $m$ 과  $p$ 는 각각 모형펌프 및 원형펌프를 의미하며, 세 가지 무차원 변수비가 모두 1인 경우 모형펌프와 원형펌프간 완벽한 상사가 성립한다.

원형펌프는 양수량 290.3 m<sup>3</sup>/min, 전 양정 62.9 m, 회전수 433 rpm, 펌프의 효율 80%, 임펠러 외경 1768 mm, 모터의 정격출력 4000 kW, 설계압력 1.0MPaG 인 벌류트 임펠러(Francis Vane)로 설계되어 있다.

이때, 모형 펌프 설계사양은 원형 펌프와 동일한 비속도를 유지하도록 비양정비( $H_{sR}$ ) 및 비유량비( $Q_{sR}$ )가 1을 만족하도록 결정하였으며, 축소비 80%의 최소 수두 요건 및 직경 12인치 이상의 임펠러 최소 직경 요건을 초과하지 않는 범위에서 모형펌프 설계인자 민감도 분석을 그림 1.1-49과 같이 수행하였다. 이로부터 모형 펌프의 최종 설계사양을 결정하였고 최종 도출된 모형 펌프 설계사양은 표 1.1-6과 같다.

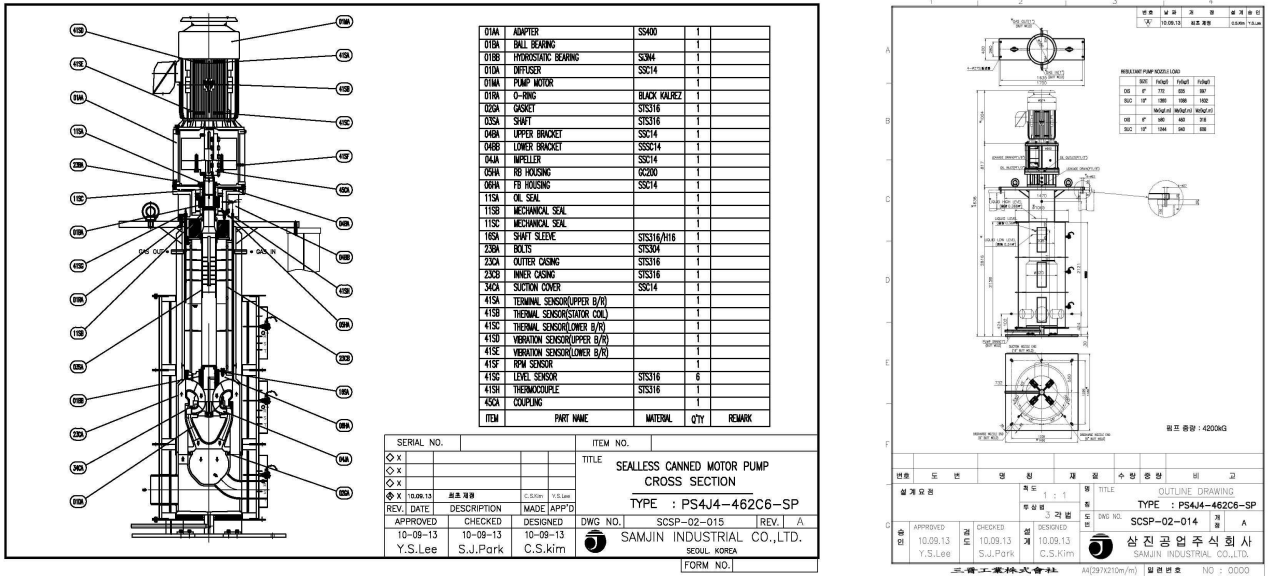


$Q_m$ : 모델펌프유량,  $d_R$ : 직경비,  $Q_{sR}$ : 비유량비  
 <그림 1.1-49 모형펌프 설계인자 민감도 분석>

<표 1.1-6 원형펌프와 모형펌프의 설계사양 비교>

Description	Unit	Prototype Pump	Model Pump	Ratio (M/P)
Impeller Type		Francis	Francis	
Capacity	kg/sec	4183	122.6	3 %
Head	m	62.888	50.31	80 %
NPSH available	m	14.702	11.76	
Synchronous speed	rpm	450	2235	497%
Impeller O.D.	mm	1685	305.0	18 %
Pump speed	rpm	433	2140	
Specific speed		330.3	330.3	
WHP	kW	2572.7	60.3	
Pump efficiency	%	80.0%	71.8%	
Motor output	kW	4000.0	110.0	

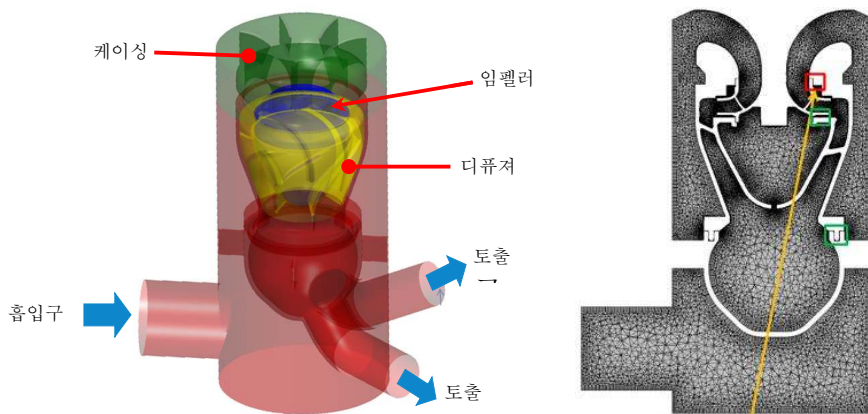
도출된 모형펌프의 설계사양과 원형펌프와의 구조적 상사관계를 고려하여 모형펌프에 대한 설계 계산서 및 상세 제작도면을 그림 1.1-50과 같이 생산하였다.



<그림 1.1-50 모형펌프 제작 단면도>

또한, 상용 CFD 툴을 이용하여 소동환경에서 발생가능한 구조역학 및 유체역학적 문제점을 수치해석적으로 분석하고 이에 대한 보완설계를 수행하였다. 펌프 유동부에 대한 분석을 위해 ANSYS사의 CFX 상용코드를 활용하였으며, 해석에서의 난류모델은  $k-\epsilon$  모델을 사용하였다.

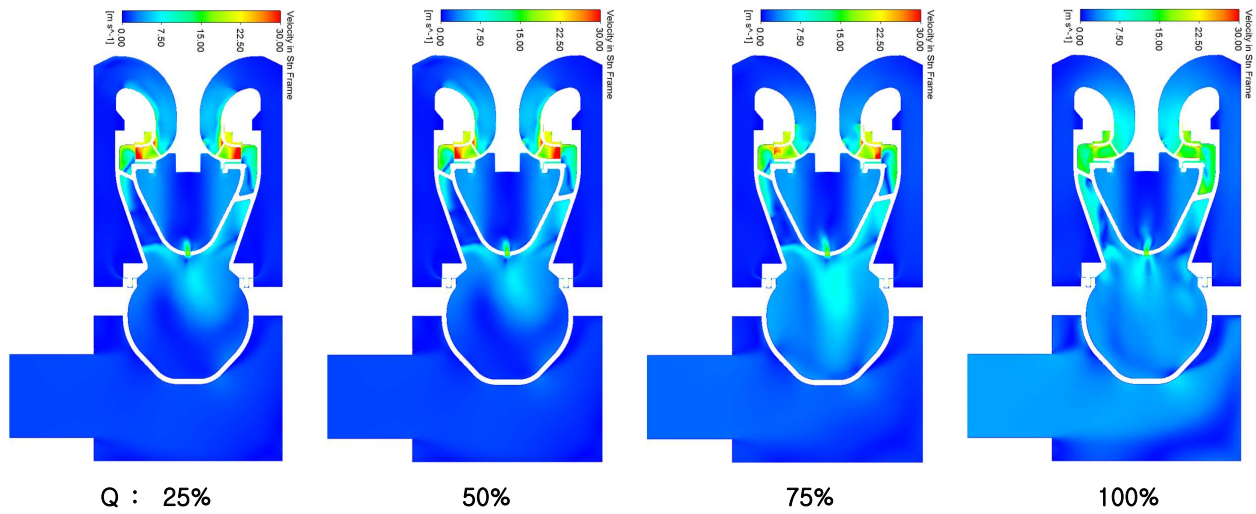
해석에서 임펠러 부분을 회전체로 설정하여 규정 회전수로 회전시켰으며, 회전하지 않는 경계면은 Counter Rotating Wall로 설정하였다. 회전체와 비회전체 사이의 인터페이스는 프로즌 로터 기법을 사용하였다. 유동분석을 위하여 총 752만개의 Node, 2297만개의 Element로 격자를 구성하였으며, 최종 생성된 격자 형상을 모형 펌프의 구조와 그림 1.1-51에 비교, 도시하였다.



<그림 1.1-51 펌프 해석 영역 및 해석 격자>

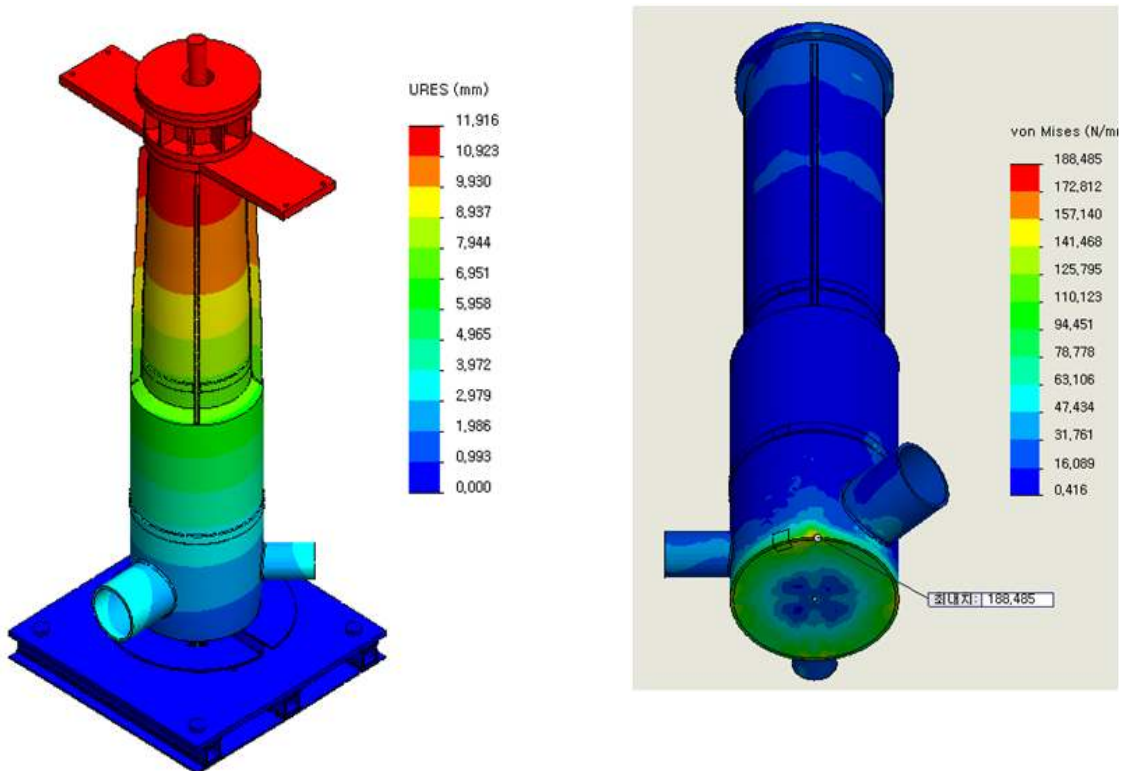
그림 1.1-52는 정격운전조건(100%) 및 정격운전조건 대비 25%, 50%, 130% 유량조건에서의 모형펌프내부 유동해석 결과를 비교한 것이다. 모든 조건에서 임펠러 주위에서 가장 높은 속도분포를 나타내고 있으며 반경이 증가하면서 임펠러 Trailing edge 부분에서 빠른 속도분포

를 나타내고 있는 것을 확인할 수 있다.



<그림 1.1-52 펌프 유량 대비 내부유속 분석>

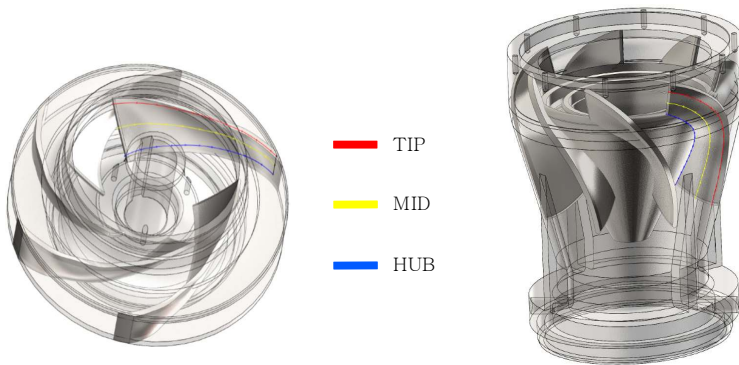
그림 1.1-53은 고온의 실험조건에서 펌프 케이싱의 변형 정도를 예측하기 위하여 온도상승에 의한 펌프 케이싱의 변위를 평가한 해석결과를 도시한 것이며, 응력집중이 용이하도록 상단 및 하단 지지대의 일부 구조를 변경하였다.



<그림 1.1-53 온도상승에 의한 펌프 케이싱 변형분석>

그림 1.1-54는 펌프 내부에 설치되는 임펠러 및 디퓨저의 3차원 형상을 각각 도시한 것이다. 소듐환경에서의 정압베어링 작동 건전성 여부를 확인하기 위하여 알루미늄( $Al_2O_3$ ) 및 질화규소( $Si_3N_4$ )의 2가지 베어링 후보재질을 대상으로 그림 1.1-55와 같이 별도의 베어링 시험장치를 제작 및 설치하여 소듐환경에서 베어링 작동성을 시험하고 최종적으로 질화규소 재질의 베어링을 제작하여 장착하였다.

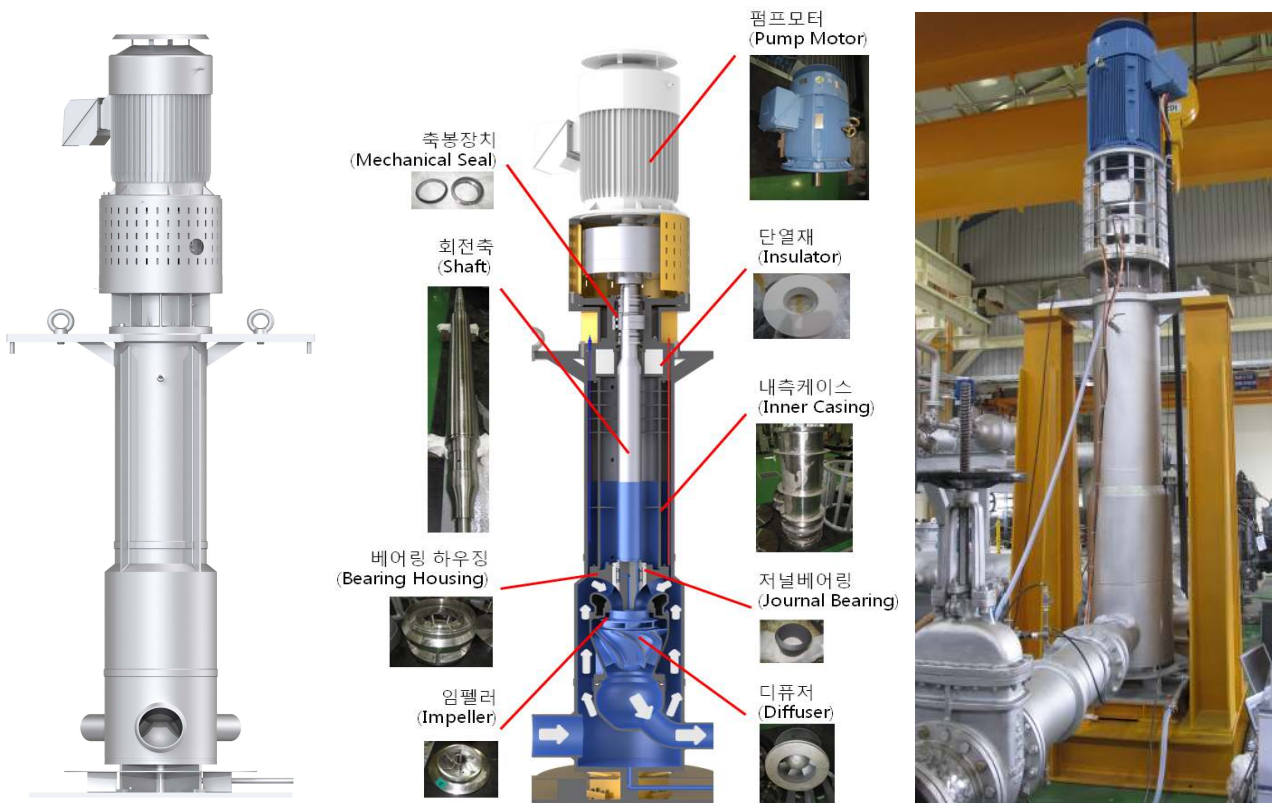
전술한 상세설계를 기초로 주조작업 및 기계가공을 수행하여 모형펌프의 각 부품을 제작하였으며, 최종 제작이 완료된 모형펌프 외형, 단면도, 주요 부품 및 제작 완료사진을 그림 1.1-56에 도시하였다.



<그림 1.1-54 임펠러 및 디퓨저 상세 구조>



<그림 1.1-55 베어링시험장치>



<그림 1.1-56 모형펌프 외형/단면도/주요부품 및 제작완료 사진>

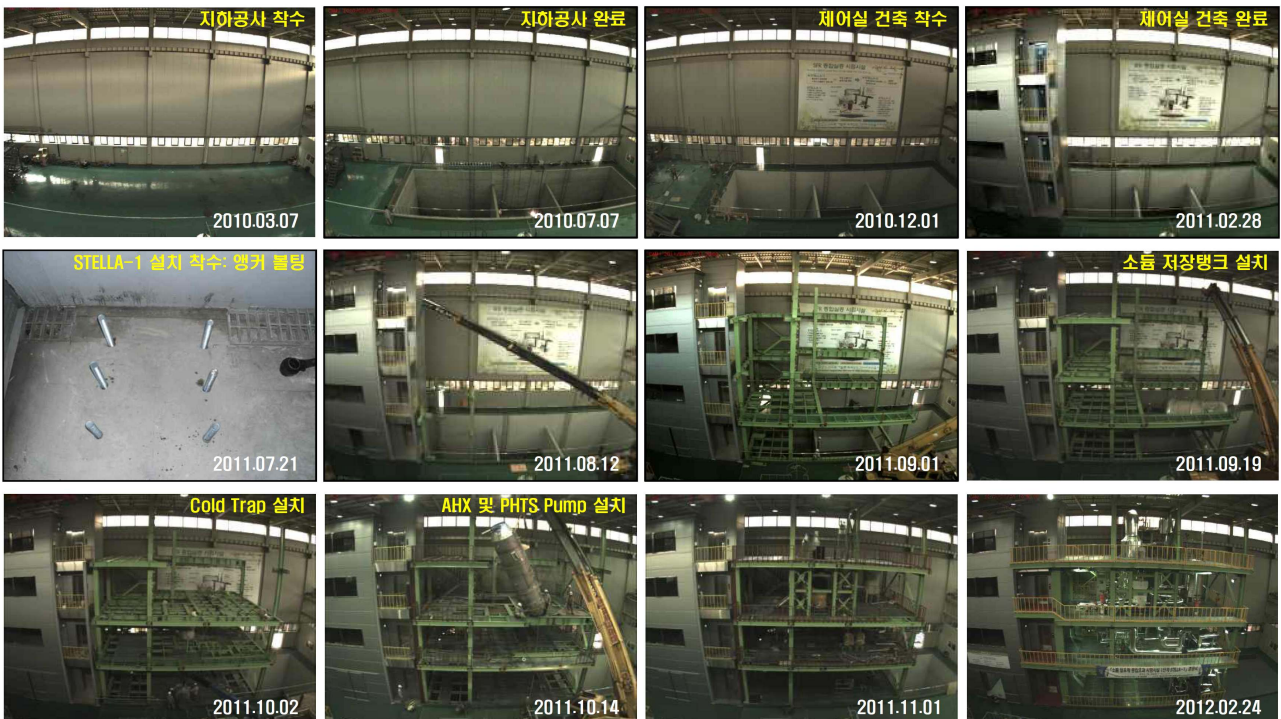
### (5) 설치완료

2009년에는 STELLA-1의 구축 타당성 평가, 기본설계 및 시방서 작성을 완료하였으며, 기반시설로서 전력공급계통 구축을 완료하였다. 2010년에는 지하시설 구축과 제어실 건축을 완료하였으며, 기계, 배관, 계측제어, 전기분야 등 상세설계를 완료하였고 탱크류 및 철구조물 등의 기기제작과 밸브류, 송풍기, 등의 기기구매를 진행하였다.

또한 STELLA-1의 주요 구성요소인 열교환기는 척도해석, 열적크기 생산, 상세설계, 제작성 평가, 구조해석 등을 수행하였으며 기계식 소듐펌프 또한 원형펌프 설계특성 분석, 모형펌프 설계계산서와 도면작성, 모형펌프 유동해석 등을 수행하여 2011년 기기제작 및 설치를 완료하였다. 2011년 12월 배관작업 등이 완료된 상태이며 전기 및 계장 관련 설비의 설치를 2012년 2월 완료하여 2012년 2월 24일 준공식을 거행하였다.

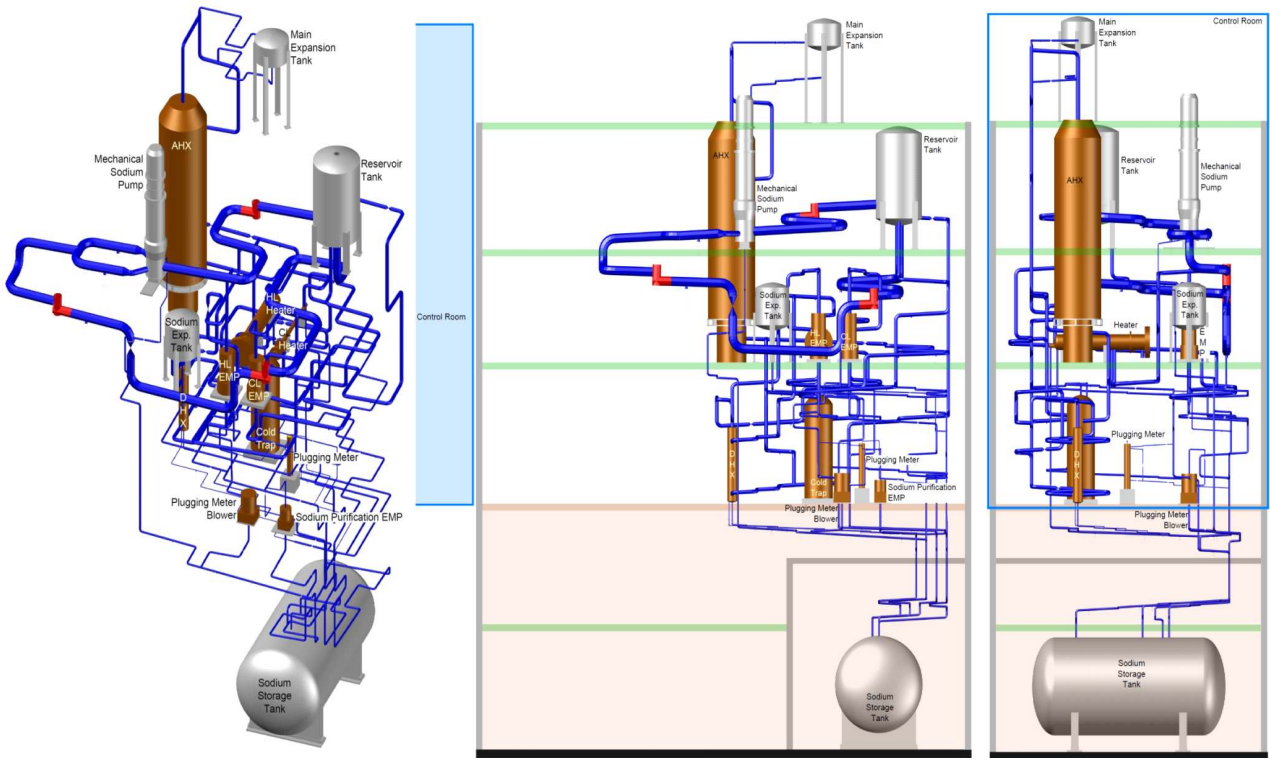
STELLA-1 주요 설치 일정은 다음과 같다

<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 2009년도             <ul style="list-style-type: none"> <li>- STELLA-1 구축 타당성 평가, 기본설계 및 시방서 작성</li> <li>- 전력공급계통 구축</li> </ul> </li> <li>◦ 2010년도             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 지하시설 구축 및 제어실 건축</li> <li>- 기계, 배관, 계측제어, 전기분야 등 상세설계</li> <li>- 탱크류 및 철구조물 등의 기기제작과 밸브류, 송풍기 등 기기구매</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 2011년도             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 기기제작 및 설치 완료                 <ul style="list-style-type: none"> <li>+ 11.07.21 철골 구조물 설치 개시</li> <li>+ 11.09.19 소듐저장탱크</li> <li>+ 11.10.02 콜드트랩 설치 및 루프히터 설치</li> <li>+ 11.10.07 Sodium expansion tank 설치</li> <li>+ 11.10.14 AHX 및 소듐 기계식 펌프 설치</li> <li>+ 11.10.21 전자기 펌프 설치</li> <li>+ 11.10.26 DHX 설치</li> <li>+ 11.11.10 Loop heater 설치</li> <li>+ 11.12.05 Stack 설치 개시</li> </ul> </li> <li>- 11년 12월 배관작업 등 완료</li> <li>- 12년 2월 전기 및 계장설비 설치 완료</li> <li>- 12년 2월 24일 준공식</li> </ul> </li> </ul>
--	---



<그림 1.1-57 STELLA-1 주요 설치일정>





<그림 1.1-58 STELLA-1 개념도 및 설치완료 사진>

## (6) 종합 시운전

실험시설의 시운전은 각종 구조물이나 장치설비(플랜트) 등의 설치가 완료된 후, 이들이 설계에 규정된 성능으로 정상 가동되는지 여부를 확인하는 절차이다. 장치 및 시설의 완공 이후, 전체적인 운전을 통해 설계 성능을 점검 및 확인하고 발생된 문제점에 대해 수정 및 보완하며, 각 기기별 및 설비간의 연계작동을 검토하여 시설의 원활한 운영이 가능하도록 하는 절차이다.

STELLA-1 장치의 기밀시험 및 단일기기 동작시험 등의 기본 절차가 완료되면 실험장치에 대한 종합시운전에 들어가며, 종합 시운전은 실험장치의 초기상태에서 운전을 위한 정상운전 상태에 도달하기까지의 전 과정을 포함한다.

일반적인 시운전 절차는 시운전 일정, 시운전 항목 및 종류, 시험장비 확보 및 보정 계획, 설비기구 사용 계획, 운전요원 및 검사요원에 대한 선임 계획 등을 포함하여야 한다. STELLA-1 장치의 시운전 시에는 기기점검, 예비운전 (공탑시험: 소듐 충전 전), 시운전 (소듐 충전 후), 성능보장운전, 최종검수 및 운전인도를 포함하는 일련의 절차가 수행되어야 하며, 시운전 후에는 각각의 시운전 내용, 각종 기기류의 작동 성능, 시험성적서, 성능시험 결과 등의 보고서가 제출될 예정이다.

특히, 실험장치의 예열, 소듐 충전, 정화계통 운전, 주실험 루프 전자기펌프 기동운전, Expansion Tank 내 비활성 가스 충전, Loop Heater 기동 및 유틸리티 공급 등에 관한 운전절차에 따라 수행될 예정이며, 정상운전 뿐만 아니라 고온의 시운전상태에서 급작스럽게 저온의 정지상태에 도달하는 경우에 대한 비상 운전절차를 작성할 예정이다.

시운전 이전에 검토할 사항으로는 관련 기기의 정상 설치 여부, 해당전원의 준비 상태, 해당 제어장치의 정상설치 및 가동 여부, 윤활유, 냉각수, 냉각 fan 등과 같이 기기 운전에 필요한 사항들의 준비 여부, 안전장치 정상작동 확인 여부, 시운전에 필요한 운전자 선임 및 교육 완료 여부, 시운전 절차서 준비 여부 등을 확인해야 한다.

특히, 시운전 절차서에는 운전개시, 가동절차 및 방법, 점검항목 checklist, 운전지침, 기기류 단독 시운전 방법, 실가동 diagram 등이 반드시 포함되어야 한다. 이와 함께 시운전 시 확인이 필요한 각종 측정 장비의 준비 및 보정 여부, 시운전 결과 값을 기록할 양식의 준비 여부, 그리고 각 시운전별 소요 시간 등에 대한 검토가 선행되어야 한다.

이와 같은 종합 시운전 절차를 통해 실험장치의 성능 및 안전성이 확인되면, 품질보증 절차를 거쳐 도출된 실험 Matrix별 조건에 대하여 열교환기(DHX 및 AHX) 및 기계식 소듐펌프 등에 대한 실험이 수행될 예정이며, 모든 실험은 품질보증에 의해 확인된 절차서 및 diagram을 구비하여 수행될 예정이다.

## 나. 성능검증 개별실험

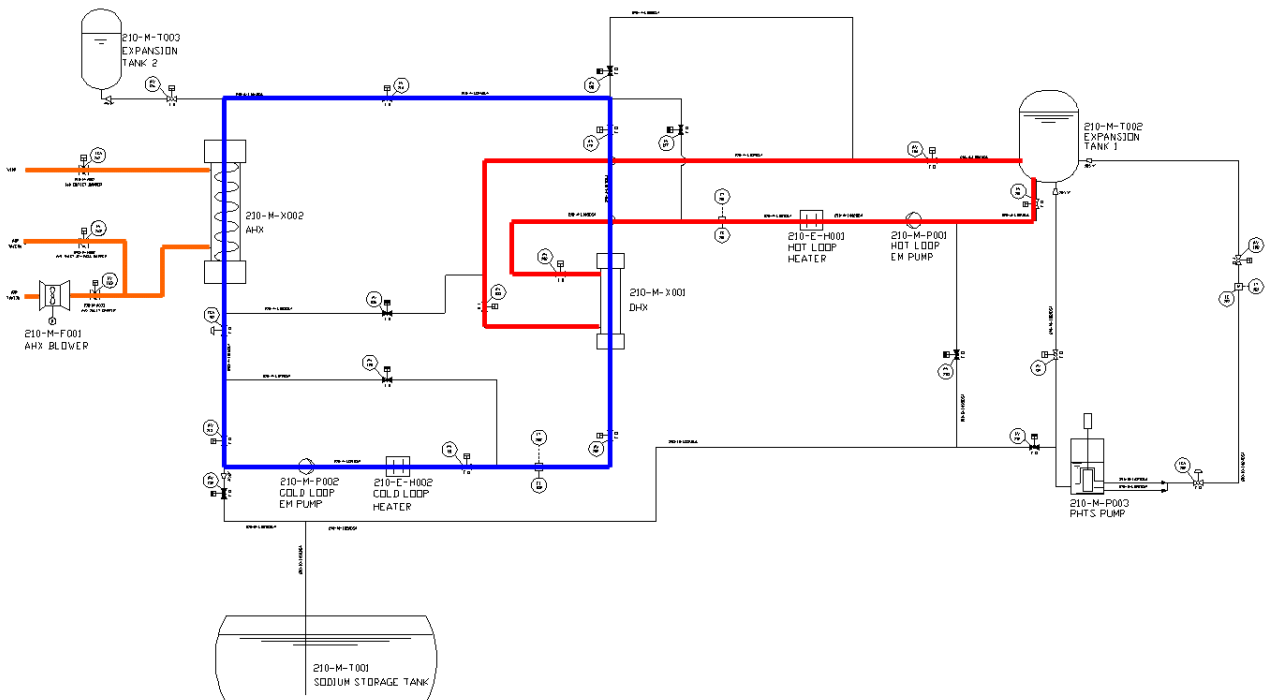
### (1) 열교환기 성능실험 및 설계 전산코드 검증

DHX는 잔열제거계통 성능에 중요한 영향을 미치는 주요 기기 중 하나로서, 열교환부의 유동 및 열전달 관련 물리 현상에 대한 적절한 모의를 통해 제반성능이 확인되어야 한다. DHX 성능실험의 모든 실험항목은 DHX Shell 측 및 전열관 측 유량 변화에 따른 Peclet 수 변화에 의해 분류되며, 각각의 실험은 항목별로 나열되는 초기조건과 경계조건을 조합하여 수행되어야 한다. 즉, 1차적으로 정격조건에서의 성능실험을 수행하고, 유량을 증가 또는 감소시켜 Peclet 수에 따른 성능실험을 추가적으로 수행하여야 한다.

실험자료의 건전성 및 신뢰도를 검증하기 위하여 실험장치의 재가동시마다 실험조건인 Reproducibility Test가 수행되어야 하며, 정격조건에서의 대표적인 온도, 압력 및 유량 조건 등이 확인되어야 한다. 모든 실험은 각 조건에서 3회 이상 반복실험을 수행하여 실험자료의 신뢰도를 높인다. DHX 성능실험의 주요 실험조건 및 실험 루프 구성도는 각각 표 1.1-7 및 그림 1.1-60과 같다.

<표 1.1-7 STELLA-1 DHX 실험조건>

Tube-side (Sodium)		유량 (kg/sec)		
		3.5	3.9	10.0
Shell-side (Sodium)	3.6	○	○	○
	5.3	○	○	○
	10.0	○	○	○



<그림 1.1-60 DHX 실험시 STELLA-1 루프 구성도>

AHX는 잔열제거계통의 열제거 성능에 가장 지배적인 영향을 미치는 열교환기로서, 공기 유동 및 열전달 관련 물리 현상에 대한 적절한 모의를 통해 제반성능이 확인되어야 한다.

AHX 열전달 성능실험의 모든 실험항목은 AHX Shell 측 공기와 전열관측 소듐 유량 변화

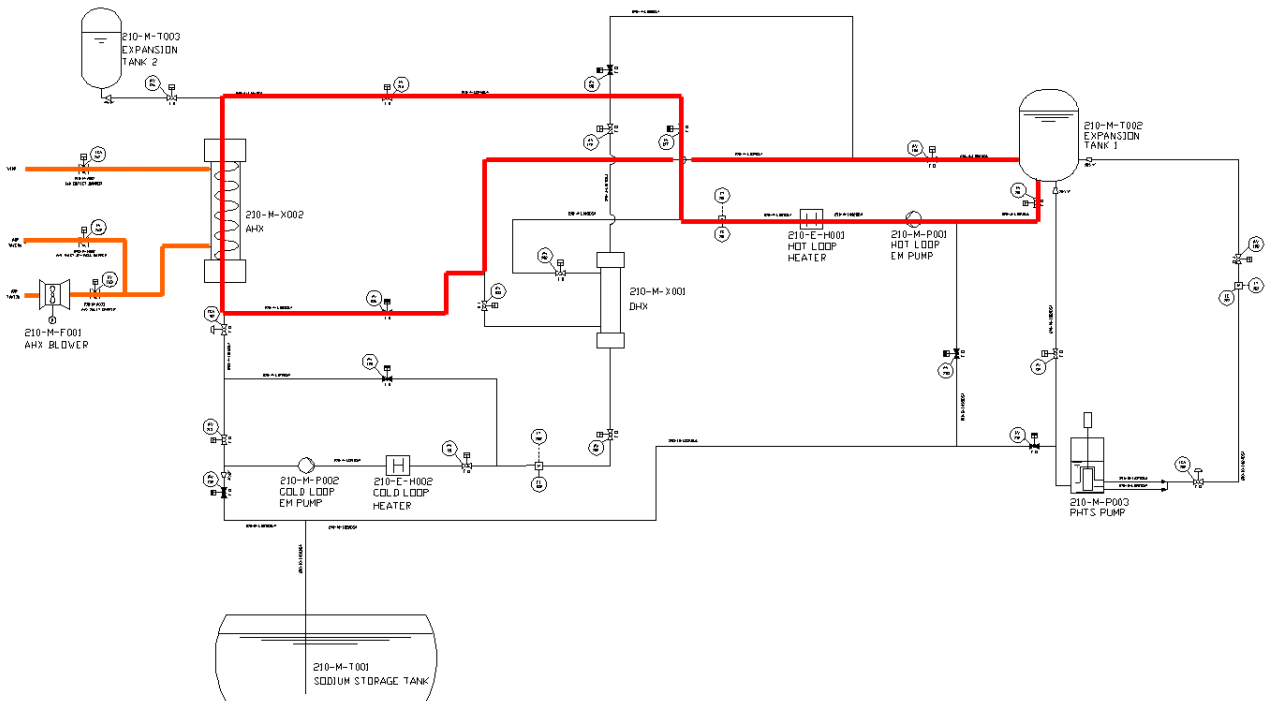
에 따른 공기 측 Reynolds 수와 소듐 측 Peclet 수 변화에 의해 분류되며, 각각의 실험은 항목 별로 나열되는 초기조건과 경계조건을 조합하여 수행되어야 한다.

특히 AHX Shell 측 공기유로의 유량은 강제통풍 조건 및 자연통풍 조건에 대하여 구분하여 구성된다. 즉, 1차적으로 정격조건에서의 강제통풍 조건에서 성능실험을 수행하고, 공기 및 소듐 유량을 증가 또는 감소시켜 유동조건에 따른 성능실험을 추가적으로 수행하여야 한다. 그 다음에 자연통풍 조건에 대하여 동일한 전열관측 소듐 유량조건 실험을 수행하여 그 결과를 수집 및 비교한다.

실험자료의 건전성 및 신뢰도를 검증하기 위하여 실험장치의 재가동시마다 실험조건외의 Reproducibility Test를 수행되어야 하며, 정격조건에서의 대표적인 온도, 압력 및 유량 조건 등이 확인되어야 한다. 모든 실험은 각 조건에서 3회 이상 반복실험을 수행하여 실험자료의 신뢰도를 높인다. AHX 성능실험의 주요 실험조건 및 실험 루프 구성도는 각각 표 1.1-8 및 그림 1.1-61과 같다.

<표 1.1-8 STELLA-1 AHX 실험조건>

Tube-side (Sodium)		유량 (kg/sec)		
		3.5	3.9	10.0
Shell-side (Air)	강제통풍	○	○	○
	유량 (kg/sec)	3.5	5.0	10.0
자연통풍 유량		N/A	○	○



<그림 1.1-61 AHX 실험시 STELLA-1 루프 구성도>

본 실험을 통해 획득한 실험자료는 N개 전열관으로 구성되는 DHX 및 AHX의 전형상 (Full Shape)에 대한 1차원 설계 및 성능해석 전산코드의 적용성 및 확장성 평가에 활용된다.

STELLA-1 실험용 열교환기의 열전달 및 압력손실 특성실험을 위하여 2012년 상반기까지 실험계획 및 QA 절차 수립, 그리고 핵심 실험 매트릭스 설정 및 시운전을 끝마칠 예정이며, 제반 절차가 완료 되는대로 DHX 및 AHX 열전달 및 압력손실 특성실험을 수행할 예정이다.

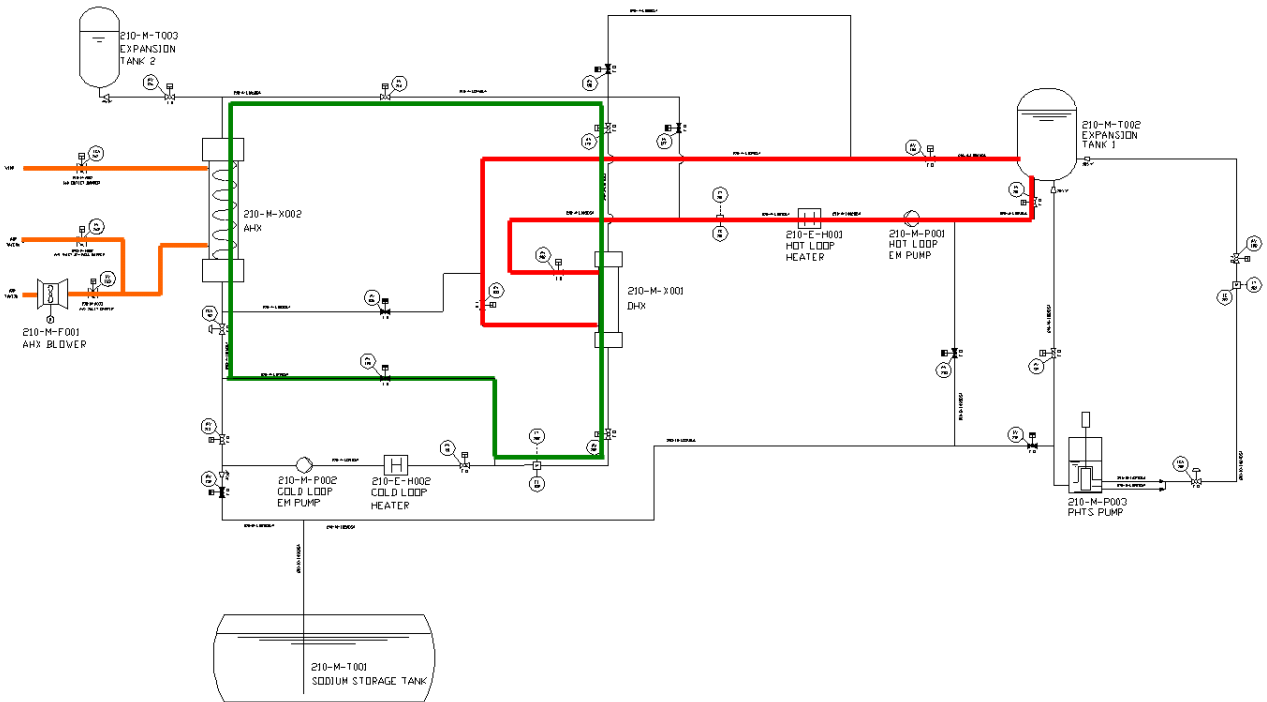
## (2) AHX-DHX 간 자연대류 실험 및 설계 전산코드 검증

실증로의 피동 잔열제거계통은 DHX와 AHX를 연결하는 잔열제거 루프에서의 자연순환 유동에 의해 일차열전달계통을 냉각한다. 자연순환 유동은 열 공급원인 DHX와 열침원인 AHX 사이의 높이 차이 및 밀도 차이에 의해 생성되는 구동력과 잔열제거 루프 배관의 압력손실 사이의 균형에 의해 형성된다. 이와 같은 잔열제거 루프에서의 자연순환에 관련된 제반 열유체 특성을 평가하기 위하여 DHX와 AHX를 연결하는 소듐 배관에서의 자연순환 유동 실험을 수행한다.

DHX-AHX 소듐루프 자연순환 실험의 모든 실험항목은 DHX Shell 측 및 AHX 공기 측 유량에 따라 분류되며, 각각의 실험은 항목별로 나열되는 초기조건과 경계조건을 조합하여 수행한다. DHX Shell 측 소듐 유량은 DHX 실험에서 모의하는 정격유량을 그대로 적용하고, AHX 공기 측 유량은 강제통풍 시의 정격조건 및 자연통풍 조건을 각각 모의한다. DHX-AHX 소듐루프 자연순환 실험조건 및 실험루프 구성도는 각각 표 1.1-9 및 그림 1.1-62와 같다.

<표 1.1-9 DHX-AHX 소듐루프 자연순환 실험조건>

		AHX: Air-side		
		강제통풍 유량(kg/sec)		
DHX: Shell-side(sodium)		3.5	5.0	10.0
유량 (kg/sec)	3.6	○	○	○
	5.3	○	○	○
10.0		○	○	○



<그림 1.1-62 DHX-AHX 소듐루프 자연순환 실험시 STELLA-1 루프 구성도>

STELLA-1 실험용 열교환기의 개별 열전달 및 압력손실 특성실험이 완료되는 시점인 2013년 하반기부터 STELLA-1 소듐루프에서의 자연순환 소듐 유동 특성실험을 수행하여 실험 자료 DB를 구축할 예정이다.

### (3) 기계식 소듐 펌프 성능시험

기계식 모형펌프 시험은 우선 소듐에 비해 상대적으로 취급이 용이하며 열수력학적 특성이 유사한 물을 활용하여 펌프의 특성을 파악할 수 있는 다양한 시험을 수행 완료하였다. 이러한 수력성능 시험을 통하여 시험장치 구축, 시험절차 및 방법, 시험결과 후처리 등과 관련한 기술을 취득하였으며, 호모로고스 곡선과 같은 안전해석에 필요한 입력자료도 생산하였다. 향후 물 시험을 통해 축적한 지식을 기반으로 STELLA-1에서 소듐을 활용한 펌프 특성시험을 수행할 예정이다.

#### (가) 수력성능 시험장치

제작된 기계식 모형펌프의 수력성능을 평가하기 위하여 펌프제작업체(삼진공업(주))에 기 설치되어 있는 시험장치에서 상온의 물을 순환유체로 사용하여 성능시험을 수행하였다. 수력성능 시험장치는 펌프성능시험, 호모로고스(Homologous)시험, NPSHr(캐비테이션)시험, 코스트다운(Coastdown-flow)시험 및 흡입구/토출구 압력맥동시험을 수행할 수 있는 폐순환루프이며, 호모로고스 시험 기준으로 모형펌프 설계 유량 대비 최대 200%인 1020.6 m<sup>3</sup>/h의 유량까지 시험가능하다.

주순환배관은 STS 304 재질의 12인치(300A) 스케줄20S인 스테인리스 강관으로 구성 하였다. 배관의 외경은 318.5 mm이고 내경은 305.5 mm이고 총 배관기장은 19 m 이다. 수력성능 시험장치의 주요 설계제원은 표 1.1-10과 같고, 관련 사진은 그림 1.1-63과 같다.

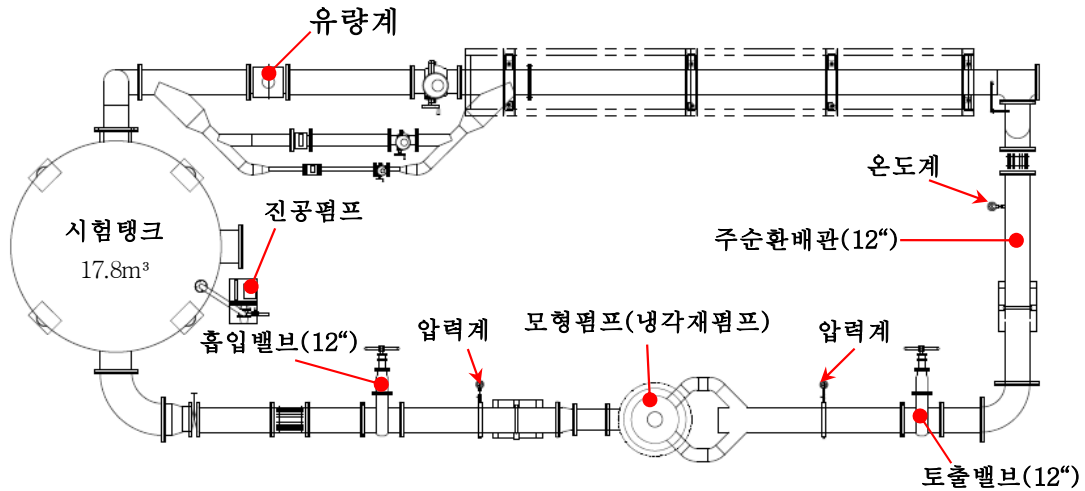
<표 1.1-10 수력성능 시험장치 주요제원>

설계압력	1.0 MPaG
탱크용량	17.8 m <sup>3</sup>
시험가능 용량	2000 m <sup>3</sup> /h
보조펌프	총 2기 직렬 배치
보조펌프 유량	960 m <sup>3</sup> /h
보조펌프 양정	50.0 m
보조펌프모터 정격출력	220 kW

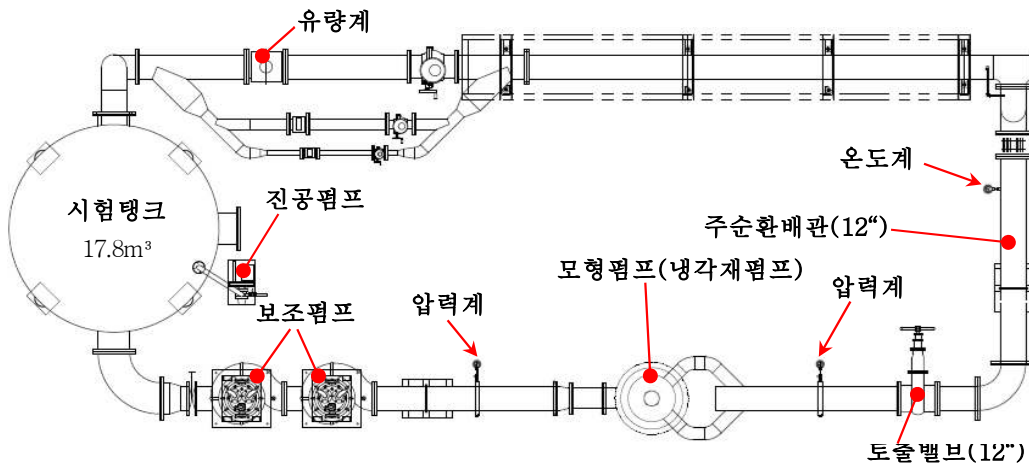


<그림 1.1-63 모형펌프 성능 시험장치>

모형펌프 수력성능 시험장치는 수력성능 시험항목에 따라 크게 2가지로 분류할 수 있으며, 시험장치의 개략도는 각각 그림 1.1-64 및 1.1-65와 같다. 그림 1.1-64는 펌프성능, NPSH<sub>re</sub>, 코스트다운, 압력맥동을 측정하기 위한 시험장치 개략도이며, 그림 1.1-65는 호모로고스 시험중 1상한 및 4상한 영역에 해당하는 시험을 수행하기 위한 시험장치 개략도이다. 여기서, 호모로고스 2상한 및 3상한 시험의 경우 그림 1.1-65와 동일한 구조의 시험장치에서 펌프의 흡입과 토출구를 반대로 연결하여 시험을 수행하였다.



<그림 1.1-64 모형펌프 수력성능 시험장치 개략도(펌프성능, NPSH<sub>re</sub>, 코스트다운, 압력맥동 시험용)>



<그림 1.1-65 모형펌프 수력성능 시험장치 개략도(호모로고스 1상한 및 4상한, 유동저항 시험용)>

### (나) 수력성능 시험절차 및 범위

펌프 수력성능 시험을 수행하기 위하여 각 시험항목 별로 아래와 같이 시험절차를 정리하였고, 시험 수행 범위를 정의하는 시험 매트릭스를 시험항목별로 결정하였으며, 실제 시험수행 범위를 음영으로 구분하여 표시하였다.

- 펌프성능시험

모형펌프의  $N/N_R$ 가 25%부터 75%까지 10% 단위로 75%부터 100%까지는 5% 단위로 인버터의 주파수를 조절하여 상승시킨다. 유량조절은 수력성능 시험장치의 토출밸브를 조절하여 모형펌프의  $N/N_R$ 이 100% 일 때는  $Q/Q_R$ 은 30%부터 130% 유량까지 10%단위로 상승시켜 측정하며, 모형펌프의  $N/N_R$ 의 비가 25%부터 95%까지는  $Q/Q_R$ 은 각각의 펌프의 회전수에서 가능한 최소 유량부터 최대 유량까지 10%단위로 상승시켜 측정한다.

펌프 성능시험 범위는 펌프성능시험 시험매트릭스의 황색으로 표시된 영역을 시험한다. 측정변수는 토출량, 흡입구 압력, 토출구 압력, 펌프 차압, 모형펌프의 회전수, 시험전압, 전류, 주파수, 입력 및 시험 액온 등이다.

<표 1.1-11 모형펌프 성능시험 매트릭스>

시험영역: 황색 부분

$N/N_R$ $Q/Q_R$	0%	25%	35%	45%	55%	65%	75%	80%	85%	90%	95%	100%
0%	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5%	0.000	0.200	0.143	0.111	0.091	0.077	0.067	0.063	0.059	0.056	0.053	0.050
10%	0.000	0.400	0.286	0.222	0.182	0.154	0.133	0.125	0.118	0.111	0.105	0.100
15%	0.000	0.600	0.429	0.333	0.273	0.231	0.200	0.188	0.176	0.167	0.158	0.150
20%	0.000	0.800	0.571	0.444	0.364	0.308	0.267	0.250	0.235	0.222	0.211	0.200
25%	0.000	1.000	0.714	0.556	0.455	0.385	0.333	0.313	0.294	0.278	0.263	0.250
30%	0.000	0.833	0.857	0.667	0.545	0.462	0.400	0.375	0.353	0.333	0.316	0.300
35%	0.000	0.714	1.000	0.778	0.636	0.538	0.467	0.438	0.412	0.389	0.368	0.350
40%	0.000	0.625	0.875	0.889	0.727	0.615	0.533	0.500	0.471	0.444	0.421	0.400
45%	0.000	0.556	0.778	1.00	0.818	0.692	0.600	0.563	0.529	0.500	0.474	0.450
50%	0.000	0.500	0.700	0.900	0.909	0.769	0.667	0.625	0.588	0.556	0.526	0.500
55%	0.000	0.455	0.636	0.818	1.000	0.846	0.733	0.688	0.647	0.611	0.579	0.550
60%	0.000	0.417	0.583	0.750	0.917	0.923	0.800	0.750	0.706	0.667	0.632	0.600
65%	0.000	0.385	0.538	0.692	0.846	1.000	0.867	0.813	0.765	0.722	0.684	0.650
70%	0.000	0.357	0.500	0.643	0.786	0.929	0.933	0.875	0.824	0.778	0.737	0.700
75%	0.000	0.333	0.467	0.600	0.733	0.867	1.000	0.938	0.882	0.833	0.789	0.750
80%	0.000	0.313	0.438	0.563	0.688	0.813	0.938	1.000	0.941	0.889	0.842	0.800
85%	0.000	0.294	0.412	0.529	0.647	0.765	0.882	0.941	1.000	0.944	0.895	0.850
90%	0.000	0.278	0.389	0.500	0.611	0.722	0.833	0.889	0.944	1.000	0.947	0.900
95%	0.000	0.263	0.368	0.474	0.579	0.684	0.789	0.842	0.895	0.947	1.000	0.950
100%	0.000	0.250	0.350	0.450	0.550	0.650	0.750	0.800	0.850	0.900	0.950	1.000
105%	0.000	0.238	0.333	0.429	0.524	0.619	0.714	0.762	0.810	0.857	0.905	0.952
110%	0.000	0.227	0.318	0.409	0.500	0.591	0.682	0.727	0.773	0.818	0.864	0.909
115%	0.000	0.217	0.304	0.391	0.478	0.565	0.652	0.696	0.739	0.783	0.826	0.870
120%	0.000	0.208	0.292	0.375	0.458	0.542	0.625	0.667	0.708	0.750	0.792	0.833
125%	0.000	0.200	0.280	0.360	0.440	0.520	0.600	0.640	0.680	0.720	0.760	0.800
130%	0.000	0.192	0.269	0.346	0.423	0.500	0.577	0.615	0.654	0.692	0.731	0.769
135%	0.000	0.185	0.259	0.333	0.407	0.481	0.556	0.593	0.630	0.667	0.704	0.741
140%	0.000	0.179	0.250	0.321	0.393	0.464	0.536	0.571	0.607	0.643	0.679	0.714
145%	0.000	0.172	0.241	0.310	0.379	0.448	0.517	0.552	0.586	0.621	0.655	0.690
150%	0.000	0.167	0.233	0.300	0.367	0.433	0.500	0.533	0.567	0.600	0.633	0.667
155%	0.000	0.161	0.226	0.290	0.355	0.419	0.484	0.516	0.548	0.581	0.613	0.645
160%	0.000	0.156	0.219	0.281	0.344	0.406	0.469	0.500	0.531	0.563	0.594	0.625
165%	0.000	0.152	0.212	0.273	0.333	0.394	0.455	0.485	0.515	0.545	0.576	0.606
170%	0.000	0.147	0.206	0.265	0.324	0.382	0.441	0.471	0.500	0.529	0.559	0.588
175%	0.000	0.143	0.200	0.257	0.314	0.371	0.429	0.457	0.486	0.514	0.543	0.571
180%	0.000	0.139	0.194	0.250	0.306	0.361	0.417	0.444	0.472	0.500	0.528	0.556
185%	0.000	0.135	0.189	0.243	0.297	0.351	0.405	0.432	0.459	0.486	0.514	0.541
190%	0.000	0.132	0.184	0.237	0.289	0.342	0.395	0.421	0.447	0.474	0.500	0.526
195%	0.000	0.128	0.179	0.231	0.282	0.333	0.385	0.410	0.436	0.462	0.487	0.513
200%	0.000	0.125	0.175	0.225	0.275	0.325	0.375	0.400	0.425	0.450	0.475	0.500

$a=N/N_R$ ,  $v=Q/Q_R$ , HAN & BAN 영역( $v/a$ ):  $Q>0$ ,  $H>0$ ,  $N>0$ ,  $a>0$ ,  $v>0$ ,  $v/a<1$

HVN & BVN 영역( $a/v$ ):  $Q>0$ ,  $H>0$  or  $H<0$ ,  $N>0$ ,  $a>0$ ,  $v>0$ ,  $v/a>1$



## - 호모로고스 시험

### + 1상한 시험

호모로고스 1상한 시험 영역은 표 1.1-12와 같이 매트릭스N100%(청색), 매트릭스A(황색), 매트릭스B(녹색)의 3 영역으로 구분하였다. HAN 및 BAN 영역은 모험펌프가 정회전으로 가동하고 유량 및 수두가 양인 영역이고 HVN 및 BVN 영역은 모험펌프가 정회전으로 가동하고 유량이 양이고 수두가 양 또는 음인 영역이다.

인버터를 사용하여  $N/N_R$ 을 100%(매트릭스A : 90%, 매트릭스B : 70%)로 고정하고, 토출밸브 및 보조펌프를 조절하여  $Q/Q_R$ 을 0%부터 150%까지 5%단위로 상승시켜 측정한다. 또한,  $Q/Q_R$ 을 100%(매트릭스A : 90%, 매트릭스B : 70%)로 고정하고 인버터를 사용하여  $N/N_R$ 은 0%부터 100%까지 10%단위로 상승시켜 측정한다.

### + 2상한 시험

호모로고스 2상한 시험 영역은 표 1.1-13과 같고 매트릭스A(황색) 및 매트릭스B(녹색)의 2 영역으로 구분하였다. HAD, BAD, HVD, BVD 영역은 모험펌프가 정회전으로 가동하고 유량이 음이고 수두가 양인 영역이다.

인버터를 사용하여  $N/N_R$ 을 90%(매트릭스B : 70%)로 고정하고, 토출밸브 및 보조펌프를 조절하여  $Q/Q_R$ 을 0%부터 -90%까지 -5%단위로 감소시켜 측정한다. 또한,  $Q/Q_R$ 을 -90%(매트릭스B : -70%)로 고정하고 인버터를 사용하여  $N/N_R$ 을 0%부터 90%(매트릭스B : 70%)까지 10%단위로 상승시켜 측정한다.

### + 3상한 시험

호모로고스 3상한 시험 영역은 표 1.1-14와 같고 매트릭스A(황색) 및 매트릭스B(녹색)의 2 영역으로 구분하였다. HAT, BAT, HVT, BVT 영역은 모험펌프가 역회전으로 가동하고 유량이 음이고 수두가 양인 영역이다.

인버터를 사용하여  $N/N_R$ 을 -90%(매트릭스B : -70%)로 고정하고, 토출밸브 및 보조펌프를 조절하여  $Q/Q_R$ 을 0%부터 -140%까지 -5%단위로 감소시켜 측정한다. 또한,  $Q/Q_R$ 을 -90%(매트릭스B : -70%)로 고정하고 인버터를 사용하여  $N/N_R$ 을 0%부터 -90%(매트릭스B : -70%)까지 -10%단위로 감소시켜 측정한다.

### + 4상한 시험

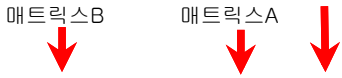
호모로고스 4상한 시험 영역은 표 1.1-15와 같고 호모로고스 4상한 시험영역은 매트릭스의 황색 및 녹색으로 표시된 영역이다. 호모로고스 4상한 시험 영역에서 HAR 및 BAR 영역은 모험펌프가 역회전으로 가동하고 유량이 양이고 수두가 양 또는 음인 영역이고 HVR 및 BVR 영역은 모험펌프가 역회전으로 가동하고 유량이 양이고 수두가 음인 영역이다.

인버터를 사용하여  $N/N_R$ 을 -90%(매트릭스B : -70%)로 고정하고, 토출밸브 및 보조펌프를 조절하여  $Q/Q_R$ 을 0%부터 100%(매트릭스B : 120%)까지 5%단위로 증가시켜 측정한다. 또한,  $Q/Q_R$ 을 90%(매트릭스B : 70%)로 조절하고 인버터를 사용하여  $N/N_R$ 을 0%부터 -90%(매

트릭스B : -70%)까지 -10%단위로 감소시켜 측정한다.

<표 1.1-12 호모로그스 1상한 시험 매트릭스>

시험영역: 매트릭스N100%, 매트릭스A 및 매트릭스B

매트릭스B                      매트릭스N100%  
 매트릭스A                      매트릭스A                      매트릭스A  


Q/Q <sub>R</sub> \ N/N <sub>R</sub>	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
0%	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5%	0.000	0.500	0.250	0.167	0.125	0.100	0.083	0.071	0.063	0.056	0.050
10%	0.000	1.000	0.500	0.333	0.250	0.200	0.167	0.143	0.125	0.111	0.100
15%	0.000	0.667	0.750	0.500	0.375	0.300	0.250	0.214	0.188	0.167	0.150
20%	0.000	0.500	1.000	0.667	0.500	0.400	0.333	0.286	0.250	0.222	0.200
25%	0.000	0.400	0.800	0.833	0.625	0.500	0.417	0.357	0.313	0.278	0.250
30%	0.000	0.333	0.667	1.000	0.750	0.600	0.500	0.429	0.375	0.333	0.300
35%	0.000	0.286	0.571	0.857	0.875	0.700	0.583	0.500	0.438	0.389	0.350
40%	0.000	0.250	0.500	0.750	1.000	0.800	0.667	0.571	0.500	0.444	0.400
45%	0.000	0.222	0.444	0.667	0.889	0.900	0.750	0.643	0.563	0.500	0.450
50%	0.000	0.200	0.400	0.600	0.800	1.000	0.833	0.714	0.625	0.556	0.500
55%	0.000	0.182	0.364	0.545	0.727	0.909	0.917	0.786	0.688	0.611	0.550
60%	0.000	0.167	0.333	0.500	0.667	0.833	1.000	0.857	0.750	0.667	0.600
65%	0.000	0.154	0.308	0.462	0.615	0.769	0.923	0.929	0.813	0.722	0.650
70%	0.000	0.143	0.286	0.429	0.571	0.714	0.857	1.000	0.875	0.778	0.700
75%	0.000	0.133	0.267	0.400	0.533	0.667	0.800	0.933	0.938	0.833	0.750
80%	0.000	0.125	0.250	0.375	0.500	0.625	0.750	0.875	1.000	0.889	0.800
85%	0.000	0.118	0.235	0.353	0.471	0.588	0.706	0.824	0.941	0.944	0.850
90%	0.000	0.111	0.222	0.333	0.444	0.556	0.667	0.778	0.889	1.000	0.900
95%	0.000	0.105	0.211	0.316	0.421	0.526	0.632	0.737	0.842	0.947	0.950
100%	0.000	0.100	0.200	0.300	0.400	0.500	0.600	0.700	0.800	0.900	1.000
105%	0.000	0.095	0.190	0.286	0.381	0.476	0.571	0.667	0.762	0.857	0.952
110%	0.000	0.091	0.182	0.273	0.364	0.455	0.545	0.636	0.727	0.818	0.909
115%	0.000	0.087	0.174	0.261	0.348	0.435	0.522	0.609	0.696	0.783	0.870
120%	0.000	0.083	0.167	0.250	0.333	0.417	0.500	0.583	0.667	0.750	0.833
125%	0.000	0.080	0.160	0.240	0.320	0.400	0.480	0.560	0.640	0.720	0.800
130%	0.000	0.077	0.154	0.231	0.308	0.385	0.462	0.538	0.615	0.692	0.769
135%	0.000	0.074	0.148	0.222	0.296	0.370	0.444	0.519	0.593	0.667	0.741
140%	0.000	0.071	0.143	0.214	0.286	0.357	0.429	0.500	0.571	0.643	0.714
145%	0.000	0.069	0.138	0.207	0.276	0.345	0.414	0.483	0.552	0.621	0.690
150%	0.000	0.067	0.133	0.200	0.267	0.333	0.400	0.467	0.533	0.600	0.667
155%	0.000	0.065	0.129	0.194	0.258	0.323	0.387	0.452	0.516	0.581	0.645
160%	0.000	0.063	0.125	0.188	0.250	0.313	0.375	0.438	0.500	0.563	0.625
165%	0.000	0.061	0.121	0.182	0.242	0.303	0.364	0.424	0.485	0.545	0.606
170%	0.000	0.059	0.118	0.176	0.235	0.294	0.353	0.412	0.471	0.529	0.588
175%	0.000	0.057	0.114	0.171	0.229	0.286	0.343	0.400	0.457	0.514	0.571
180%	0.000	0.056	0.111	0.167	0.222	0.278	0.333	0.389	0.444	0.500	0.556
185%	0.000	0.054	0.108	0.162	0.216	0.270	0.324	0.378	0.432	0.486	0.541
190%	0.000	0.053	0.105	0.158	0.211	0.263	0.316	0.368	0.421	0.474	0.526
195%	0.000	0.051	0.103	0.154	0.205	0.256	0.308	0.359	0.410	0.462	0.513
200%	0.000	0.050	0.100	0.150	0.200	0.250	0.300	0.350	0.400	0.450	0.500

a=N/N<sub>R</sub>, v=Q/Q<sub>R</sub>, HAN & BAN 영역(v/a): Q>0, H>0, N>0, a>0, v>0, v/a<1

HVN & BVN 영역(a/v): Q>0, H>0 or H<0, N>0, a>0, v>0, v/a>1

<표 1.1-13 호모로고스 2상한 시험 매트릭스>

시험영역: 매트릭스A 및 매트릭스B

매트릭스B

매트릭스A



Q/Q <sub>R</sub> \ N/N <sub>R</sub>	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
0%	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
-5%	0.000	-0.500	-0.250	-0.167	-0.125	-0.100	-0.083	-0.071	-0.063	-0.056	-0.050
-10%	0.000	-1.000	-0.500	-0.333	-0.250	-0.200	-0.167	-0.143	-0.125	-0.111	-0.100
-15%	0.000	-0.667	-0.750	-0.500	-0.375	-0.300	-0.250	-0.214	-0.188	-0.167	-0.150
-20%	0.000	-0.500	-1.000	-0.667	-0.500	-0.400	-0.333	-0.286	-0.250	-0.222	-0.200
-25%	0.000	-0.400	-0.800	-0.833	-0.625	-0.500	-0.417	-0.357	-0.313	-0.278	-0.250
-30%	0.000	-0.333	-0.667	-1.000	-0.750	-0.600	-0.500	-0.429	-0.375	-0.333	-0.300
-35%	0.000	-0.286	-0.571	-0.857	-0.875	-0.700	-0.583	-0.500	-0.438	-0.389	-0.350
-40%	0.000	-0.250	-0.500	-0.750	-1.000	-0.800	-0.667	-0.571	-0.500	-0.444	-0.400
-45%	0.000	-0.222	-0.444	-0.667	-0.889	-0.900	-0.750	-0.643	-0.563	-0.500	-0.450
-50%	0.000	-0.200	-0.400	-0.600	-0.800	-1.000	-0.833	-0.714	-0.625	-0.556	-0.500
-55%	0.000	-0.182	-0.364	-0.545	-0.727	-0.909	-0.917	-0.786	-0.688	-0.611	-0.550
-60%	0.000	-0.167	-0.333	-0.500	-0.667	-0.833	-1.000	-0.857	-0.750	-0.667	-0.600
-65%	0.000	-0.154	-0.308	-0.462	-0.615	-0.769	-0.923	-0.929	-0.813	-0.722	-0.650
-70%	0.000	-0.143	-0.286	-0.429	-0.571	-0.714	-0.857	-1.000	-0.875	-0.778	-0.700
-75%	0.000	-0.133	-0.267	-0.400	-0.533	-0.667	-0.800	-0.933	-0.938	-0.833	-0.750
-80%	0.000	-0.125	-0.250	-0.375	-0.500	-0.625	-0.750	-0.875	-1.000	-0.889	-0.800
-85%	0.000	-0.118	-0.235	-0.353	-0.471	-0.588	-0.706	-0.824	-0.941	-0.944	-0.850
-90%	0.000	-0.111	-0.222	-0.333	-0.444	-0.556	-0.667	-0.778	-0.889	-1.000	-0.900
-95%	0.000	-0.105	-0.211	-0.316	-0.421	-0.526	-0.632	-0.737	-0.842	-0.947	-0.950
-100%	0.000	-0.100	-0.200	-0.300	-0.400	-0.500	-0.600	-0.700	-0.800	-0.900	-1.000
-105%	0.000	-0.095	-0.190	-0.286	-0.381	-0.476	-0.571	-0.667	-0.762	-0.857	-0.952
-110%	0.000	-0.091	-0.182	-0.273	-0.364	-0.455	-0.545	-0.636	-0.727	-0.818	-0.909
-115%	0.000	-0.087	-0.174	-0.261	-0.348	-0.435	-0.522	-0.609	-0.696	-0.783	-0.870
-120%	0.000	-0.083	-0.167	-0.250	-0.333	-0.417	-0.500	-0.583	-0.667	-0.750	-0.833
-125%	0.000	-0.080	-0.160	-0.240	-0.320	-0.400	-0.480	-0.560	-0.640	-0.720	-0.800
-130%	0.000	-0.077	-0.154	-0.231	-0.308	-0.385	-0.462	-0.538	-0.615	-0.692	-0.769
-135%	0.000	-0.074	-0.148	-0.222	-0.296	-0.370	-0.444	-0.519	-0.593	-0.667	-0.741
-140%	0.000	-0.071	-0.143	-0.214	-0.286	-0.357	-0.429	-0.500	-0.571	-0.643	-0.714
-145%	0.000	-0.069	-0.138	-0.207	-0.276	-0.345	-0.414	-0.483	-0.552	-0.621	-0.690
-150%	0.000	-0.067	-0.133	-0.200	-0.267	-0.333	-0.400	-0.467	-0.533	-0.600	-0.667
-155%	0.000	-0.065	-0.129	-0.194	-0.258	-0.323	-0.387	-0.452	-0.516	-0.581	-0.645
-160%	0.000	-0.063	-0.125	-0.188	-0.250	-0.313	-0.375	-0.438	-0.500	-0.563	-0.625
-165%	0.000	-0.061	-0.121	-0.182	-0.242	-0.303	-0.364	-0.424	-0.485	-0.545	-0.606
-170%	0.000	-0.059	-0.118	-0.176	-0.235	-0.294	-0.353	-0.412	-0.471	-0.529	-0.588
-175%	0.000	-0.057	-0.114	-0.171	-0.229	-0.286	-0.343	-0.400	-0.457	-0.514	-0.571
-180%	0.000	-0.056	-0.111	-0.167	-0.222	-0.278	-0.333	-0.389	-0.444	-0.500	-0.556
-185%	0.000	-0.054	-0.108	-0.162	-0.216	-0.270	-0.324	-0.378	-0.432	-0.486	-0.541
-190%	0.000	-0.053	-0.105	-0.158	-0.211	-0.263	-0.316	-0.368	-0.421	-0.474	-0.526
-195%	0.000	-0.051	-0.103	-0.154	-0.205	-0.256	-0.308	-0.359	-0.410	-0.462	-0.513
-200%	0.000	-0.050	-0.100	-0.150	-0.200	-0.250	-0.300	-0.350	-0.400	-0.450	-0.500

a=N/N<sub>R</sub>, v=Q/Q<sub>R</sub>, HAD & BAD 영역: v/a: Q<0, H>0, N>0, a>0, v<0, v/a>-1

HVD & BVD 영역: a/v: Q<0, H>0, N>0, a>0, v<0, v/a<-1

<표 1.1-14 호모로고스 3상한 시험 매트릭스>

시험영역: 매트릭스A 및 매트릭스B

매트릭스B

매트릭스A



$N/N_R$ $Q/Q_R$	0%	-10%	-20%	-30%	-40%	-50%	-60%	-70%	-80%	-90%	-100%
0%	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
-5%	0.000	0.500	0.250	0.167	0.125	0.100	0.083	0.071	0.063	0.056	0.050
-10%	0.000	1.000	0.500	0.333	0.250	0.200	0.167	0.143	0.125	0.111	0.100
-15%	0.000	0.667	0.750	0.500	0.375	0.300	0.250	0.214	0.188	0.167	0.150
-20%	0.000	0.500	1.000	0.667	0.500	0.400	0.333	0.286	0.250	0.222	0.200
-25%	0.000	0.400	0.800	0.833	0.625	0.500	0.417	0.357	0.313	0.278	0.250
-30%	0.000	0.333	0.667	1.000	0.750	0.600	0.500	0.429	0.375	0.333	0.300
-35%	0.000	0.286	0.571	0.857	0.875	0.700	0.583	0.500	0.438	0.389	0.350
-40%	0.000	0.250	0.500	0.750	1.000	0.800	0.667	0.571	0.500	0.444	0.400
-45%	0.000	0.222	0.444	0.667	0.889	0.900	0.750	0.643	0.563	0.500	0.450
-50%	0.000	0.200	0.400	0.600	0.800	1.000	0.833	0.714	0.625	0.556	0.500
-55%	0.000	0.182	0.364	0.545	0.727	0.909	0.917	0.786	0.688	0.611	0.550
-60%	0.000	0.167	0.333	0.500	0.667	0.833	1.000	0.857	0.750	0.667	0.600
-65%	0.000	0.154	0.308	0.462	0.615	0.769	0.923	0.929	0.813	0.722	0.650
-70%	0.000	0.143	0.286	0.429	0.571	0.714	0.857	1.000	0.875	0.778	0.700
-75%	0.000	0.133	0.267	0.400	0.533	0.667	0.800	0.933	0.938	0.833	0.750
-80%	0.000	0.125	0.250	0.375	0.500	0.625	0.750	0.875	1.000	0.889	0.800
-85%	0.000	0.118	0.235	0.353	0.471	0.588	0.706	0.824	0.941	0.944	0.850
-90%	0.000	0.111	0.222	0.333	0.444	0.556	0.667	0.778	0.889	1.000	0.900
-95%	0.000	0.105	0.211	0.316	0.421	0.526	0.632	0.737	0.842	0.947	0.950
-100%	0.000	0.100	0.200	0.300	0.400	0.500	0.600	0.700	0.800	0.900	1.000
-105%	0.000	0.095	0.190	0.286	0.381	0.476	0.571	0.667	0.762	0.857	0.952
-110%	0.000	0.091	0.182	0.273	0.364	0.455	0.545	0.636	0.727	0.818	0.909
-115%	0.000	0.087	0.174	0.261	0.348	0.435	0.522	0.609	0.696	0.783	0.870
-120%	0.000	0.083	0.167	0.250	0.333	0.417	0.500	0.583	0.667	0.750	0.833
-125%	0.000	0.080	0.160	0.240	0.320	0.400	0.480	0.560	0.640	0.720	0.800
-130%	0.000	0.077	0.154	0.231	0.308	0.385	0.462	0.538	0.615	0.692	0.769
-135%	0.000	0.074	0.148	0.222	0.296	0.370	0.444	0.519	0.593	0.667	0.741
-140%	0.000	0.071	0.143	0.214	0.286	0.357	0.429	0.500	0.571	0.643	0.714
-145%	0.000	0.069	0.138	0.207	0.276	0.345	0.414	0.483	0.552	0.621	0.690
-150%	0.000	0.067	0.133	0.200	0.267	0.333	0.400	0.467	0.533	0.600	0.667
-155%	0.000	0.065	0.129	0.194	0.258	0.323	0.387	0.452	0.516	0.581	0.645
-160%	0.000	0.063	0.125	0.188	0.250	0.313	0.375	0.438	0.500	0.563	0.625
-165%	0.000	0.061	0.121	0.182	0.242	0.303	0.364	0.424	0.485	0.545	0.606
-170%	0.000	0.059	0.118	0.176	0.235	0.294	0.353	0.412	0.471	0.529	0.588
-175%	0.000	0.057	0.114	0.171	0.229	0.286	0.343	0.400	0.457	0.514	0.571
-180%	0.000	0.056	0.111	0.167	0.222	0.278	0.333	0.389	0.444	0.500	0.556
-185%	0.000	0.054	0.108	0.162	0.216	0.270	0.324	0.378	0.432	0.486	0.541
-190%	0.000	0.053	0.105	0.158	0.211	0.263	0.316	0.368	0.421	0.474	0.526
-195%	0.000	0.051	0.103	0.154	0.205	0.256	0.308	0.359	0.410	0.462	0.513
-200%	0.000	0.050	0.100	0.150	0.200	0.250	0.300	0.350	0.400	0.450	0.500

$a=N/N_R$ ,  $v=Q/Q_R$ , HAT & BAT 영역( $v/a$ ):  $Q<0$ ,  $H>0$ ,  $N<0$ ,  $a<0$ ,  $v<0$ ,  $v/a<1$

HVT & BVT 영역( $a/v$ ):  $Q<0$ ,  $H>0$ ,  $N<0$ ,  $a<0$ ,  $v<0$ ,  $v/a>1$

<표 1.1-15 호모로고스 4상한 시험 매트릭스>

시험영역: 매트릭스A 및 매트릭스B

매트릭스B

매트릭스A



Q/Q <sub>R</sub> \ N/N <sub>R</sub>	0%	-10%	-20%	-30%	-40%	-50%	-60%	-70%	-80%	-90%	-100%
0%	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5%	0.000	-0.500	-0.250	-0.167	-0.125	-0.100	-0.083	-0.071	-0.063	-0.056	-0.050
10%	0.000	-1.000	-0.500	-0.333	-0.250	-0.200	-0.167	-0.143	-0.125	-0.111	-0.100
15%	0.000	-0.667	-0.750	-0.500	-0.375	-0.300	-0.250	-0.214	-0.188	-0.167	-0.150
20%	0.000	-0.500	-1.000	-0.667	-0.500	-0.400	-0.333	-0.286	-0.250	-0.222	-0.200
25%	0.000	-0.400	-0.800	-0.833	-0.625	-0.500	-0.417	-0.357	-0.313	-0.278	-0.250
30%	0.000	-0.333	-0.667	-1.000	-0.750	-0.600	-0.500	-0.429	-0.375	-0.333	-0.300
35%	0.000	-0.286	-0.571	-0.857	-0.875	-0.700	-0.583	-0.500	-0.438	-0.389	-0.350
40%	0.000	-0.250	-0.500	-0.750	-1.000	-0.800	-0.667	-0.571	-0.500	-0.444	-0.400
45%	0.000	-0.222	-0.444	-0.667	-0.889	-0.900	-0.750	-0.643	-0.563	-0.500	-0.450
50%	0.000	-0.200	-0.400	-0.600	-0.800	-1.000	-0.833	-0.714	-0.625	-0.556	-0.500
55%	0.000	-0.182	-0.364	-0.545	-0.727	-0.909	-0.917	-0.786	-0.688	-0.611	-0.550
60%	0.000	-0.167	-0.333	-0.500	-0.667	-0.833	-1.000	-0.857	-0.750	-0.667	-0.600
65%	0.000	-0.154	-0.308	-0.462	-0.615	-0.769	-0.923	-0.929	-0.813	-0.722	-0.650
70%	0.000	-0.143	-0.286	-0.429	-0.571	-0.714	-0.857	-1.000	-0.875	-0.778	-0.700
75%	0.000	-0.133	-0.267	-0.400	-0.533	-0.667	-0.800	-0.933	-0.938	-0.833	-0.750
80%	0.000	-0.125	-0.250	-0.375	-0.500	-0.625	-0.750	-0.875	-1.000	-0.889	-0.800
85%	0.000	-0.118	-0.235	-0.353	-0.471	-0.588	-0.706	-0.824	-0.941	-0.944	-0.850
90%	0.000	-0.111	-0.222	-0.333	-0.444	-0.556	-0.667	-0.778	-0.889	-1.000	-0.900
95%	0.000	-0.105	-0.211	-0.316	-0.421	-0.526	-0.632	-0.737	-0.842	-0.947	-0.950
100%	0.000	-0.100	-0.200	-0.300	-0.400	-0.500	-0.600	-0.700	-0.800	-0.900	-1.000
105%	0.000	-0.095	-0.190	-0.286	-0.381	-0.476	-0.571	-0.667	-0.762	-0.857	-0.952
110%	0.000	-0.091	-0.182	-0.273	-0.364	-0.455	-0.545	-0.636	-0.727	-0.818	-0.909
115%	0.000	-0.087	-0.174	-0.261	-0.348	-0.435	-0.522	-0.609	-0.696	-0.783	-0.870
120%	0.000	-0.083	-0.167	-0.250	-0.333	-0.417	-0.500	-0.583	-0.667	-0.750	-0.833
125%	0.000	-0.080	-0.160	-0.240	-0.320	-0.400	-0.480	-0.560	-0.640	-0.720	-0.800
130%	0.000	-0.077	-0.154	-0.231	-0.308	-0.385	-0.462	-0.538	-0.615	-0.692	-0.769
135%	0.000	-0.074	-0.148	-0.222	-0.296	-0.370	-0.444	-0.519	-0.593	-0.667	-0.741
140%	0.000	-0.071	-0.143	-0.214	-0.286	-0.357	-0.429	-0.500	-0.571	-0.643	-0.714
145%	0.000	-0.069	-0.138	-0.207	-0.276	-0.345	-0.414	-0.483	-0.552	-0.621	-0.690
150%	0.000	-0.067	-0.133	-0.200	-0.267	-0.333	-0.400	-0.467	-0.533	-0.600	-0.667
155%	0.000	-0.065	-0.129	-0.194	-0.258	-0.323	-0.387	-0.452	-0.516	-0.581	-0.645
160%	0.000	-0.063	-0.125	-0.188	-0.250	-0.313	-0.375	-0.438	-0.500	-0.563	-0.625
165%	0.000	-0.061	-0.121	-0.182	-0.242	-0.303	-0.364	-0.424	-0.485	-0.545	-0.606
170%	0.000	-0.059	-0.118	-0.176	-0.235	-0.294	-0.353	-0.412	-0.471	-0.529	-0.588
175%	0.000	-0.057	-0.114	-0.171	-0.229	-0.286	-0.343	-0.400	-0.457	-0.514	-0.571
180%	0.000	-0.056	-0.111	-0.167	-0.222	-0.278	-0.333	-0.389	-0.444	-0.500	-0.556
185%	0.000	-0.054	-0.108	-0.162	-0.216	-0.270	-0.324	-0.378	-0.432	-0.486	-0.541
190%	0.000	-0.053	-0.105	-0.158	-0.211	-0.263	-0.316	-0.368	-0.421	-0.474	-0.526
195%	0.000	-0.051	-0.103	-0.154	-0.205	-0.256	-0.308	-0.359	-0.410	-0.462	-0.513
200%	0.000	-0.050	-0.100	-0.150	-0.200	-0.250	-0.300	-0.350	-0.400	-0.450	-0.500

a=N/N<sub>R</sub>, v=Q/Q<sub>R</sub>, HAR & BAR 영역(v/a): Q>0, H>0 or H<0, N<0, a<0, v>0, v/a>-1

HVR & BVR 영역(a/v): Q>0, H<0, N<0, a<0, v>0, v/a<-1

### - NPSHre(캐비테이션) 시험

N/N<sub>R</sub>가 100%인 경우에 대하여 시험한다. 유량조절은 N/N<sub>R</sub>이 100% 일 때 Q/Q<sub>R</sub>은 30%부터 130% 유량까지 10%단위로 상승시켜 측정한다. 전 양정이 3% 이하 한 지점을 토출량에서의 NPSHre로 한다. 측정변수는 토출량, 흡입구 압력, 토출구 압력, 펌프 차압, 모형펌프의 회전수, 시험전압, 전류, 주파수, 입력 및 시험 액온 등이다.

### - 코스트다운 시험

코스트다운시험은 모형펌프에 플라이휠이 없는 경우 및 플라이휠을 장착한 경우에 대하여 수행한다. 이때, 플라이휠 장착 시험의 경우 중량이 각기 다른 4가지 종류의 플라이휠에 대하여 반복 수행한다.

모든 조건에 대하여 펌프정상운전을 확인한 후 공급전원을 강제로 상실시킨 상태에서 토출량, 펌프 차압, 모형펌프의 회전수, 주파수, 입력 및 시험 액온 등을 모형펌프의 회전이 정지하는 시점까지 측정한다.

### - 흡입구/토출구 압력맥동시험

흡입구/토출구 압력맥동시험은 모형펌프 회전주파수와 임펠러의 회전에 의해 발생하는 날개깃 통과 주파수에 대한 시간에 따른 압력맥동을 펌프 흡입구와 토출구에서 측정하는 시험이다. N/N<sub>R</sub>가 100%인 경우에 대하여 시험한다. 정격유량 및 정격양정 운전조건에서 흡입구 및 토출구에 부착된 동압센서를 통해 측정한다. 측정변수는 흡입구 및 토출구에 동압, 토출량, 펌프 차압, 모형펌프의 회전수, 시험전압, 전류, 주파수, 입력 및 시험 액온 등이다.

## (다) 수력성능 시험결과

### - 펌프성능시험

그림 1.1-66은 모형펌프에 대한 유량 대비 수두 시험결과 및 회전수별 유량-수두 시험결과를 정격유량으로 무차원화하여 비교, 도시한 것이며 효율도 함께 표시하였다. 축소설계 제작된 모형펌프 성능시험 결과 100% 정격유량 조건에서 모형펌프의 설계수두(50m)요건을 잘 재현하는 것을 확인하였다. 펌프 효율은 펌프 축동력에 대한 수동력의 비로서 다음 식을 이용하여 도출하였다.

$$\begin{aligned}\eta(\%) &= \frac{L_W}{L} \times 100 \\ &= \eta_V \times \eta_m \times \eta_h\end{aligned}$$

여기서  $\eta$ ,  $L$ ,  $L_W$ ,  $\eta_V$ ,  $\eta_m$ ,  $\eta_h$  는 각각 펌프효율(%), 펌프 축동력(kW), 펌프 수동력(kW), 펌프체적효율(손실: 웨어링부 등의 누설), 펌프기계적효율(손실: 축봉장치, 베어링 및 임펠러 외부의 마찰), 펌프수력효율(손실: 임펠러 내부의 마찰 등의 수력손실)을 의미한다.

$L_W$ (수동력)은 다음의 식을 이용하여 계산하였다.

$$L_W = \frac{1}{60 \times 10^3} \rho g Q H$$

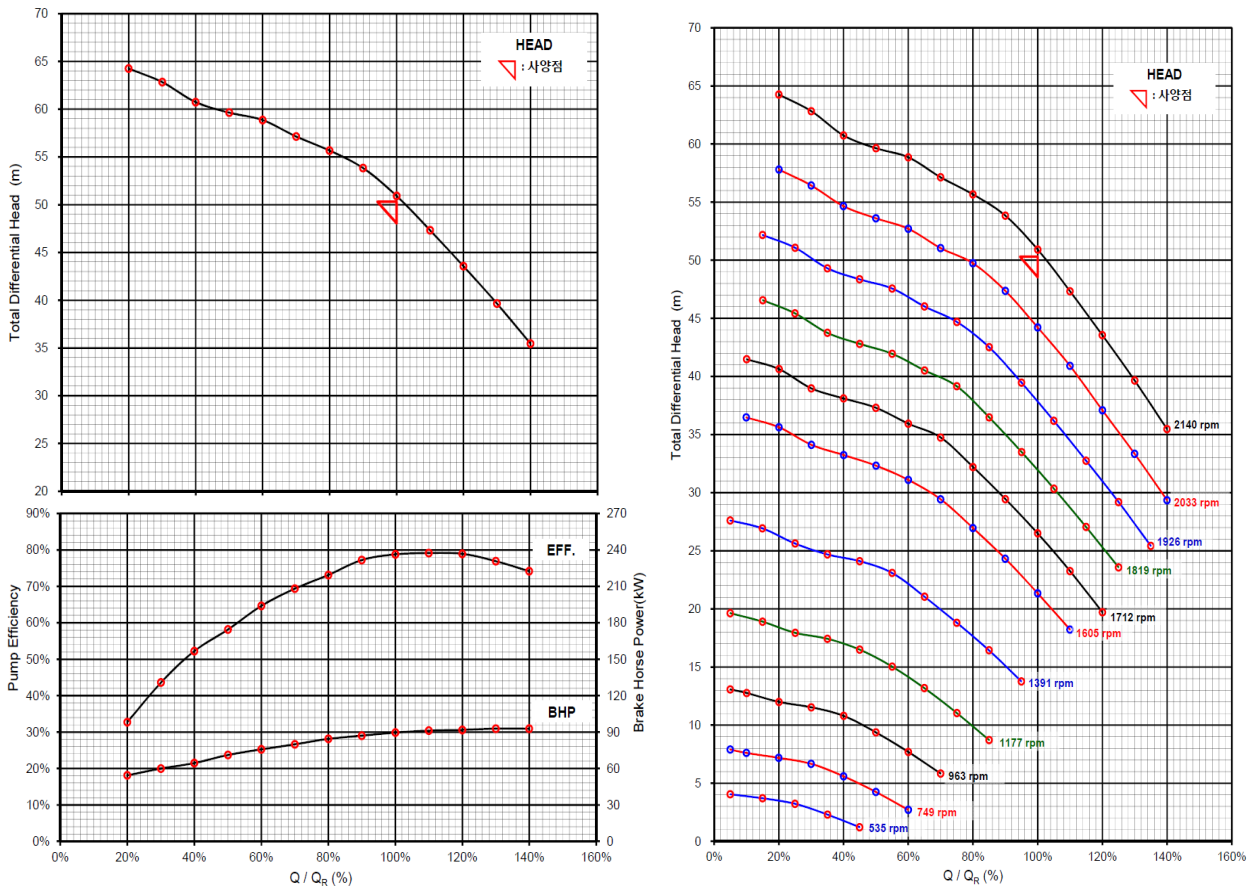
여기서,  $\rho$ ,  $g$ ,  $Q$ ,  $H$ 는 각각 액체의 밀도( $\text{kg/m}^3$ ), 중력 가속도( $\text{m/s}^2$ ), 토출량( $\text{m}^3/\text{min}$ ) 및 전양정( $\text{m}$ )을 의미한다.

$L$ (축동력)은 다음의 식을 이용하여 도출하였다.

$$L = \frac{2 \times \pi \times T \times n}{60 \times 1000}$$

여기서, 상기 식에서  $T$ ,  $n$ 은 각각 토크( $\text{N}\cdot\text{m}$ ), 회전수( $\text{rpm}$ )을 의미한다.

또한 회전수 별 성능곡선을 도출하기 위하여 회전수를 정격운전조건대비 25% 조건부터 순차적으로 증가시키면서 각 회전수별 유량 대비 수두 시험을 수행하여 결과를 도출하였다.



<그림 1.1-66 정격유량 대비 성능곡선 및 회전수별 성능곡선>

### - 호모로고스 시험

호모로고스 곡선은 다음과 같이 정의된 변수를 사용하여 작성한다. 이때, 1사분면부터 4사분면까지 각 사분면에 속하는 곡선의 종류에 따라 x축과 y축을 구성하는 변수는 각각 상이하 며, 사분면 대비 곡선별 호모로고스 변수 정의는 표 1.1-16과 같다.

$$v = \frac{Q}{Q_R}, \quad Q_R: \text{모형펌프의 정격유량}$$

$$a = \frac{N}{N_R}, \quad N_R: \text{모형펌프의 정격회전수}$$

$$h = \frac{H}{H_R}, \quad H_R: \text{모형펌프의 정격양정}$$

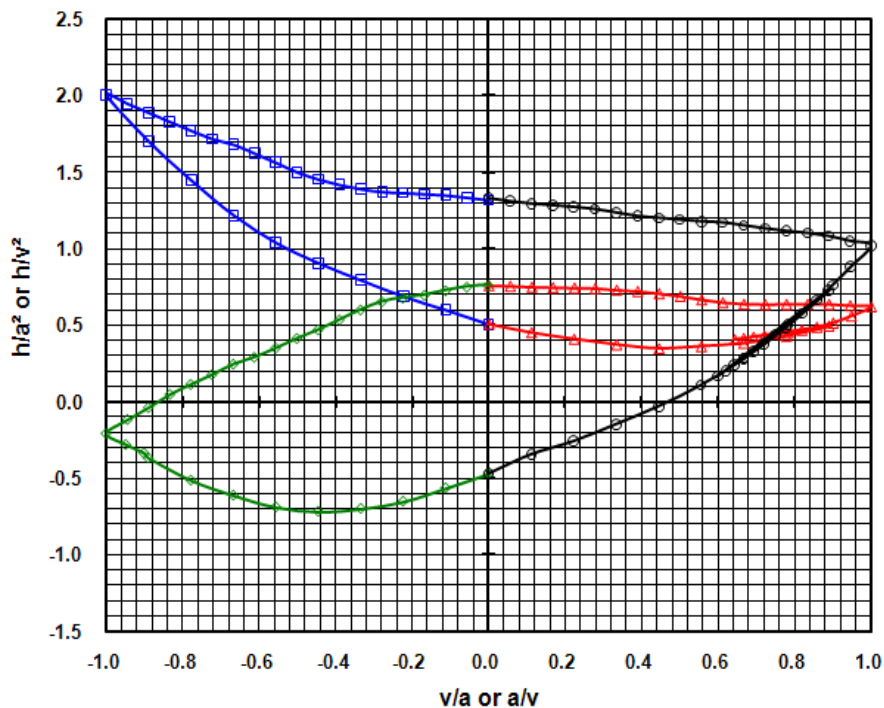
$$b = \frac{T}{T_R}, \quad T_R: \text{모형펌프의 정격토크}$$

여기서 모형펌프의 정격유량  $Q_R$ 은 510.3m<sup>3</sup>/hr, 정격회전수  $N_R$ 은 2140rpm, 정격양정  $H_R$ 은 50.31m, 정격토크  $T_R$ 은 390.19 N-m이다.

<표 1.1-16 호모로고스 변수들과 계산공식>

Quadrant	Symbol	Description	Variable	Head	Torque
1	HAN, BAN	Q>0, H>0, N>0, a>0, v>0, v/a<1	v/a	h/a <sup>2</sup>	b/a <sup>2</sup>
	HVN, BVN	Q>0, H>0 or H<0, N>0, a>0, v>0, v/a>1	a/v	h/v <sup>2</sup>	b/v <sup>2</sup>
2	HAD, BAD	Q<0, H>0, N>0, a>0, v<0, v/a>-1	v/a	h/a <sup>2</sup>	b/a <sup>2</sup>
	HVD, BVD	Q<0, H>0, N>0, a>0, v<0, v/a<-1	a/v	h/v <sup>2</sup>	b/v <sup>2</sup>
3	HAT, BAT	Q<0, H>0, N<0, a<0, v<0, v/a<1	v/a	h/a <sup>2</sup>	b/a <sup>2</sup>
	HVT, BVT	Q<0, H>0, N<0, a<0, v<0, v/a>1	a/v	h/v <sup>2</sup>	b/v <sup>2</sup>
4	HAR, BAR	Q>0, H>0 or H<0, N<0, a<0, v>0, v/a>-1	v/a	h/a <sup>2</sup>	b/a <sup>2</sup>
	HVR, BVR	Q>0, H<0, N<0, a<0, v>0, v/a<-1	a/v	h/v <sup>2</sup>	b/v <sup>2</sup>

그림 1.1-67은 호모로고스 시험 결과를 기초로 호모로고스 변수를 활용하여 수두 곡선으로 정리하여 도시한 것이다. 호모로고스 곡선의 모든 값은 무차원 변수로 표현되므로, 본 실험에서 생산된 모형펌프에 대한 곡선은 비속도비, 비수두비, 비유량비가 1을 만족하는 원형펌프의 특성곡선으로 사용이 가능하다. 따라서 본 실험에서 생산된 호모로고스 곡선은 향후 실증로 펌프와 관련한 안전해석 입력자료로 활용될 예정이다.

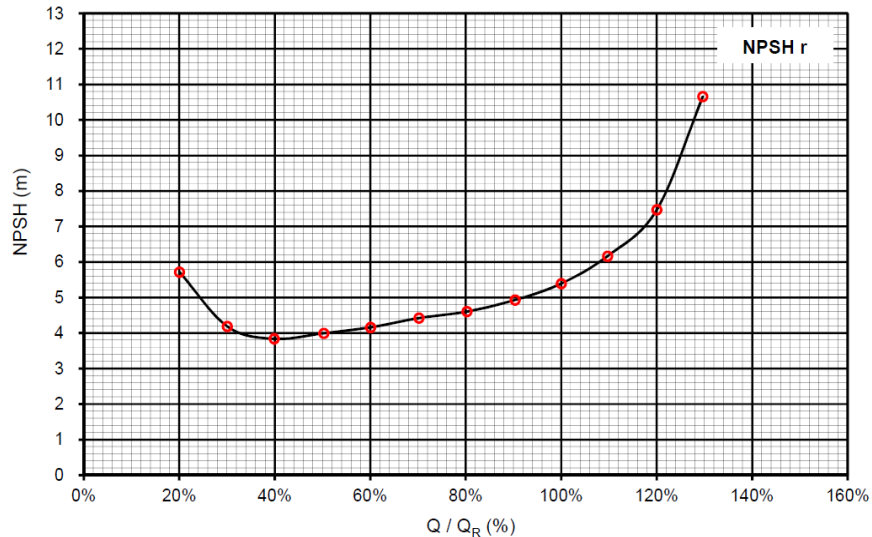


<그림 1.1-67 호모로고스 수두 곡선>



### - NPSHre(캐비테이션) 시험

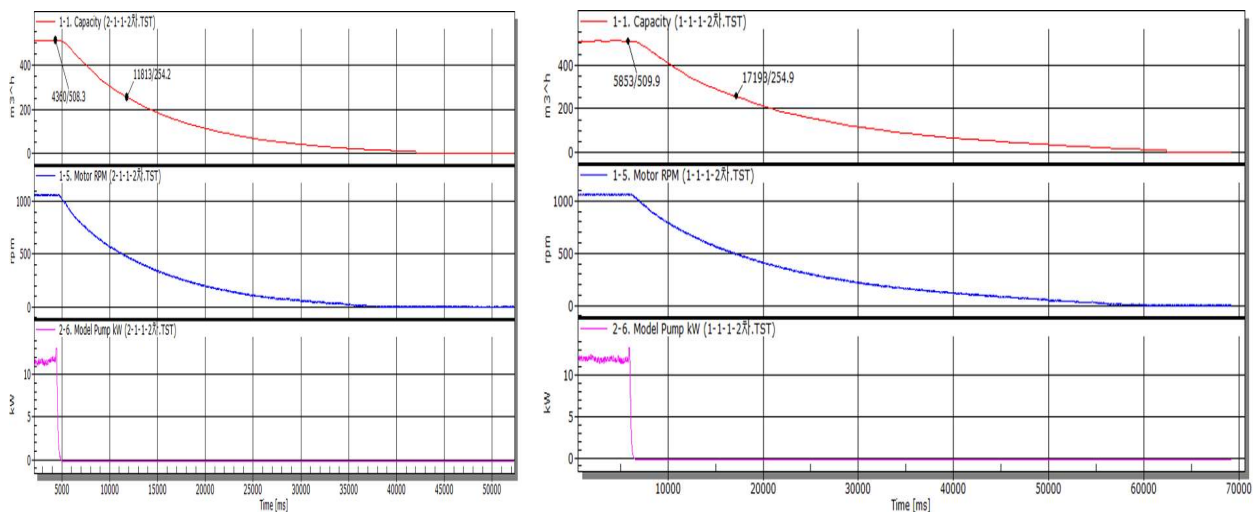
그림 1.1-68은 NPSHre 시험 수행결과를 정격유량기준으로 무차원화된 유량에 대해 정리한 결과이다. 모형펌프의 NPSHre 시험은 회전수 비가 100% 일 때 유량비를 20%부터 130%까지 10%단위로 상승시켜 시험하였으며, 전 수두가 3% 저하하였을 때를 기준으로 NPSHre 값을 산출하였다.



<그림 1.1-68 NPSHre (캐비테이션) 곡선>

### - 코스트다운 시험

코스트다운 시험의 경우 펌프 성능 시험장치에 표시된 토출밸브를 조절하여 정격운전조건을 맞춘후 공급전원을 강제로 상실시켜 측정하였다. 이때, 다양한 코스트다운 유량을 형성하기 위하여 유량반감기(정격운전유량 대비 50% 유량이 형성되는데 소요되는 시간)가 각기 다른 플라이휠을 제작하여 실험을 수행하였다. 그림 1.1-69는 유량반감기가 각각 4초 및 7초인 조건에서의 코스트다운 유량, 회전수 및 소비전력을 비교, 도시한 것이며, 이러한 해석결과는 향후 원형 펌프의 플라이휠 제작 및 코스트다운 유동 특성분석에 활용될 예정이다.

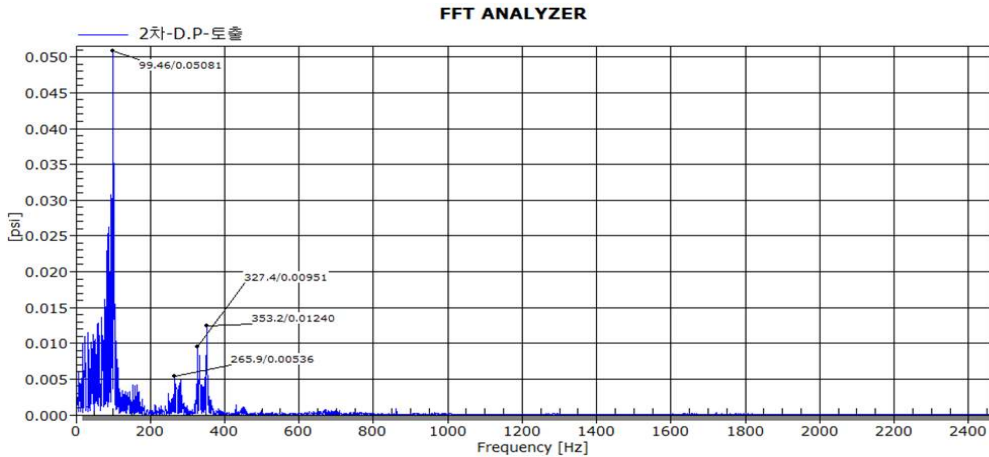
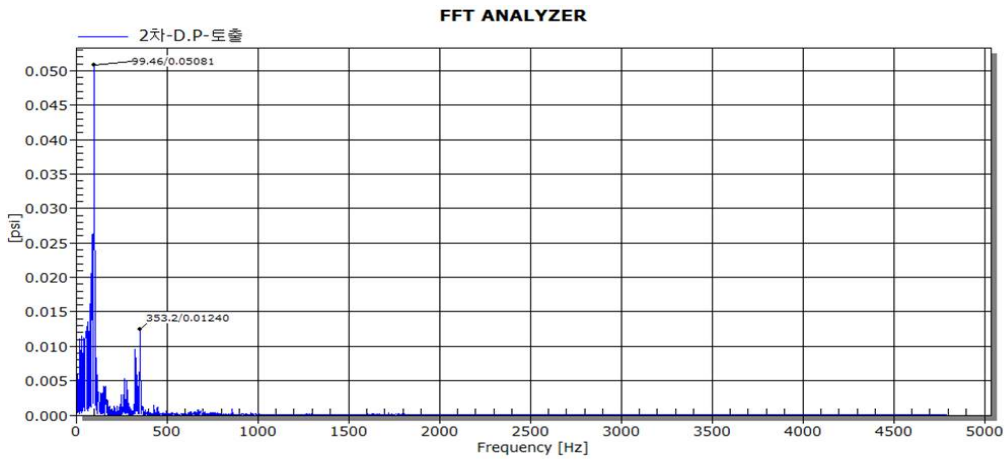
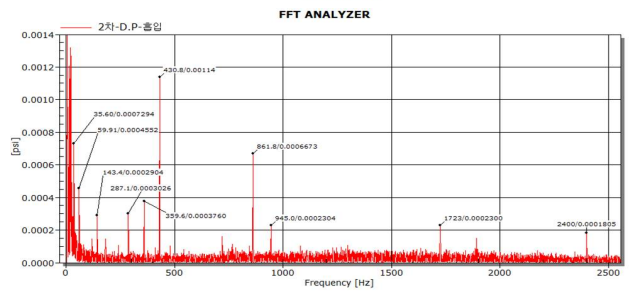
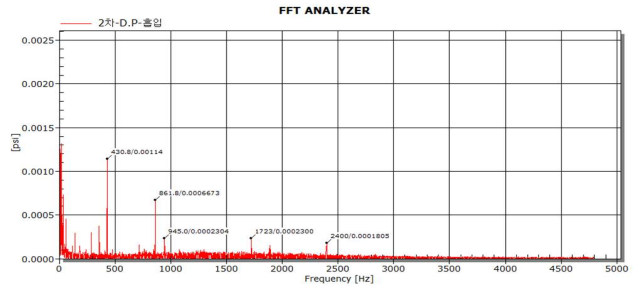
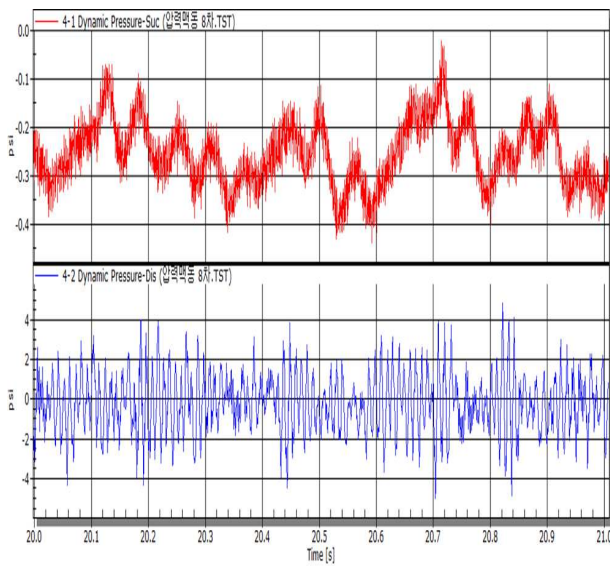


유량반감기 : 4초      유량반감기 : 7초

<그림 1.1-69 코스트다운 유량, 회전수 및 소비전력 곡선>

## - 흡입구/토출구 압력맥동시험

펌프 흡입구/토출구 압력맥동시험은 정격운전조건에서 흡입배관, 토출배관, 케이싱의 흡입구 및 토출구에 동압센서를 부착해 측정하였으며 흡입 및 토출 배관에서의 압력맥동 파형 측정 결과의 일부를 그림 1.1-70에 도시하였다. 이러한 압력맥동시험 자료는 향후 구조물의 건전성 평가 및 설계 개선을 위한 기초자료로 활용할 예정이다.



<그림 1.1-70 흡입 및 토출배관에서의 압력 맥동 및 FFT 분석 결과(적색:흡입관, 청색:토출관)>

### (라) 소듐환경 펌프 성능시험 계획

상온의 물을 순환유체로 사용하여 수력성능 시험장치에서 모형펌프의 성능시험을 수행하면서 다양한 성능시험에 대한 절차, 방법, 시험결과 후처리 등과 관련한 지식을 축적하였다. 이렇게 축적된 지식을 기초로 STELLA-1에 설치된 기계식 소듐 펌프를 활용하여, 소듐환경에서의 펌프성능 시험을 수행할 예정이다. 향후 소듐환경에서의 펌프 성능시험 수행과 관련한 일정은 아래 표와 같다.

<표 1.1-17 소듐환경에서의 펌프 성능시험 일정>

		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2
2013	- 기계식 소듐펌프 성능시험												
	·소듐펌프 성능시험 운전절차 수립												
	+ 실험계획 수립	■											
	+ 핵심 실험 매트릭스 설정		■										
	+ 펌프 시험루프 운전절차 수립			■	■								
	·소듐펌프 실험루프 시운전												
	+ 펌프 및 계통 기기 연계특성 실험					■	■	■	■				
	+ 저속조건 시운전									■	■		
+ 정격조건 시운전											■	■	
2014	·소듐펌프 성능시험												
	+ 시험 매트릭스 도출	■	■										
	+ 시험조건별 루프 운전방안 수립			■	■								
	+ 펌프 성능시험 및 결과분석					■	■	■	■	■			
	·소듐펌프 Coastdown 특성실험												
	+ 시험 매트릭스 도출					■	■						
	+ 시험조건별 루프 운전방안 수립							■	■				
	+ Coastdown 시험 및 결과분석										■	■	■

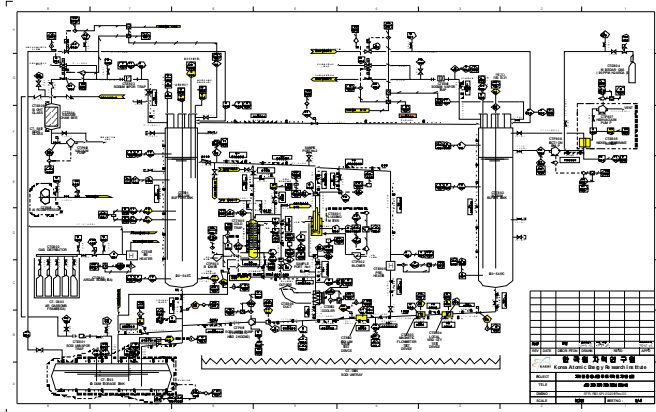
## 2. 소듐 고유 계측기법 개발

소듐 실험시설의 안전한 운전과 정확하고 신뢰성 있는 열유체 실험을 수행하기 위해서는 정밀하고도 신뢰성 있는 제어 및 계측이 요구된다. 현재 소듐용 계측센서는 적합한 상용제품이 없거나 고가의 수입품이므로 자체적으로 소듐용 계측센서 시작품을 개발하여 STELLA-2 등 소듐 실험시설에 활용하고자 한다.

이를 위하여 본 연구에서는 미소 액위 변화 측정용 레벨센서, PHTS 계통유량 센서, 풀 내부 국부속도 센서, 고온 소듐 풀 압력센서 등의 시작품을 개발하였고, 시작품 시험용 실험장치를 구축하여 시작품 성능시험을 수행하였다.

### 가. 소듐 고유 계측기 시작품 시험용 실험장치 구축

실험장치는 크게 소듐 고유 계측기 시작품 시험용 루프와 대형 콜드트랩 및 개량형 콜드트랩 성능검증 루프로 구성된다. 또한 장치는 소듐 저장탱크, 소듐 완충탱크 2개, 콜드 트랩, 플러깅미터, 전자기 유량계, 1,600m<sup>3</sup>/hr 용량의 진공펌프, Ar 가스 공급장치, 소듐밸브 등으로 구성되며 실험에 사용되는 소듐의 양은 약 2.5톤, 운전온도는 200~550℃이다[1.2-1].



<그림 1.2-1 실험장치 P&ID>



<그림 1.2-2 시작품 시험용 실험장치>

<표 1.2-1 소듐 고유 계측기 시작품 특성>

구분	미소 액위 변화 센서	고온 소듐 풀 압력 센서	PHTS 계통유량 센서	풀내부 국부유속 센서
용도	- 소듐 액위 변화 정밀 측정	- 소듐 풀 및 배관 내 정압 및 차압 측정	- 소듐 풀 내 설치된 배관내 소듐유량 측정	- 소듐 풀 내 유속 측정
필요성/목표	- 고가 수입품 대체 국산화 - 정밀도 향상: ±2% ▶ ±1%	- 고가 수입품 대체 국산화 - 응답성 향상: 6초 ▶ 1초	- 상용제품 없음	
기술 현안 및 개발 방안	- 정밀도 및 수명을 높이기 위한 고온구조재료 선정 • 고온용 광물 절연 케이블 적용 코일 사용 • 열팽창 최소 인바 합금 (Fe64%-Ni36%) 적용 • 자유액면요동 영향 최소화 동심원 구조	- 풀 및 배관에 장착할 수 있는 고온 센서 구조 • 다이어프램 압력 전달관 냉각 및 온도제어 - 압력전달관 및 다이어프램 속 소듐 배출 구조	- 고온용 소형 영구자석 가공기술, 착화 및 자석 자기장 안정화 기술 등 - 러시아 IPPE 기술협력 • 영구자석: ALNICO 계열, 적용온도: 최대 550℃, 정밀도: ±3% FS	- 측정범위: 풀 내 0.5~80cm/초 - 주기적 자화성능 확인 및 탈부착 기능 필요
	활용	- 고/저온 풀 액위, 소듐 자유액면 측정	- 펌프 입출구 유량 측정	- 노심내부, 고/저온 풀 내부 유속 측정
특허	- 출원 2건/등록 1건	- 등록 1건	- 등록 1건	

## 나. 소듐 고유 계측기 시작품 설계, 제작 및 성능시험

### (1) 레벨 센서 시작품

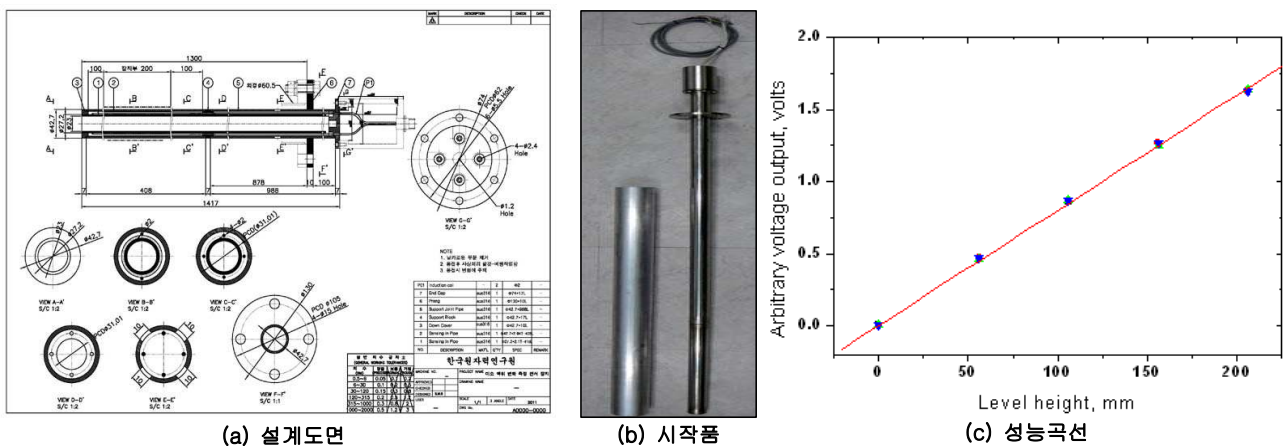
개발한 induction 형 레벨센서는 1차 코일에 일정 주파수의 Sine 파를 공급하여 2차 코일에 유도된 전압을 측정하는 원리로 1차 전압은 약 4kHz, 1.5V이다. 내부 코일은 약 1mm 굵기의 고온케이블을 사용한다. 시작품의 특징으로 측정부 중심에 빈 공간을 두어 소듐의 유동에 의한 측정부 정밀도를 향상시키기 위한 구조를 갖추었으며 길이는 1m, 센서부는 20cm, 지름은 43.7mm, 재질은 SUS304로 제작하였다[1.2-2].

시작품의 설계도면, 시작품 사진 및 성능시험 결과를 그림 1.2-3에 도시하였다. 2차 코일에 유도된 전압 측정 데이터로부터 hysteresis 0.094%FS, 비직진성 3.672%FS, repeatability 0.094%FS가 도출되었으며 이에 따른 측정 정밀도는 개발 목표치  $\pm 1\%$ FS 에는 도달하지 못한 3.7%FS로 나타났으나, 이는 cold run 상태에서 알루미늄 환봉 이동장치의 정밀도에 기인한 것으로 판단된다.

이번 실험에서 얻어진 정밀도가 목표치보다 낮게 측정된 것은 알루미늄 환봉의 구경과 시작품의 측정부위의 구경 간격이 약 5mm 간격이 있는 상태에서 수평 이동시에 그 간격이 일정하게 유지되지 못하는 실험적 환경이 있음으로써 발생한 것으로 판단하며, 정밀도를 정확하게 하기 위해서는 변위 위치 이동이 정확하게 이동 가능한 장치를 사용하여야 하고, 소듐에서 정밀도를 측정할 시에도 소듐 레벨을 정확히 조절할 수 있는 장치에서 정밀도를 측정하는 것이 필요하며, 추가적으로는 측정을 반복하여 정밀도를 계산하는 방법론도 개발되어야 한다.

본 시작품의 정밀도를 높이기 위한 연구는 차기단계에서 소듐 고유 열유동 특성인자 계측을 위한 계기장치의 개량 및 국산화를 목표로 수행되는 “소듐 열유동 계측을 위한 고유 계기장치 개발” 위탁과제에 포함하여 수행할 예정이다.

2012년 2월 현재, 시작품 개발 관련 3건의 국내특허출원(한국, 10-2010-0052219, 10-2010-0054754, 10-2010-0055274)을 완료하였으며 그 중 1건(한국, 10-1080537)이 등록되었다. 주요 특허내용은 정밀도 및 수명을 높이기 위한 고온구조재료의 선정, 고온용 광물 절연케이블 적용 코일 사용, 열팽창 최소 인바 합금 (Fe64%-Ni36%) 적용, 자유액면요동에 의한 영향을 최소화 할 수 있는 동심원 구조 등이다.



<그림 1.2-3 레벨센서 시작품>

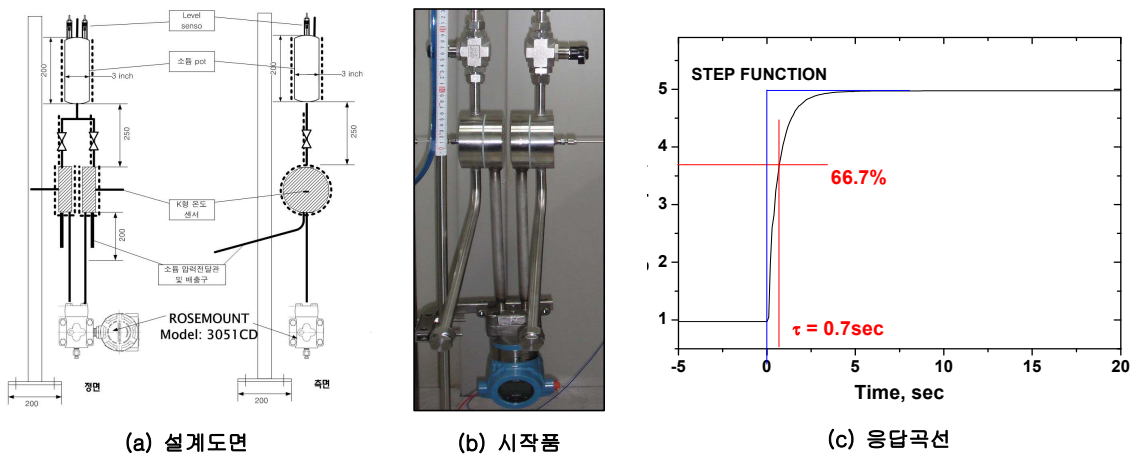
## (2) 압력 센서 시작품

고온의 소듐 풀 차압 및 정압을 측정할 수 있는 압력센서 시작품은 sensing diaphragm이 압력에 의해 휘게 되면 이 diaphragm이 정전용량 판 (capacitor plates)과 근접하게 되고 근접에 의한 capacitance 값의 변화량을 전기신호로 바꿔주게 되어 압력을 측정하는 원리이다.

소듐 루프에 적용하기 위해서 diaphragm differential transmitter, EMERSON Model 3051을 개조하였다. Diaphragm과 transmitter 본체 사이의 도압관을 1/2인치로 확장하였으며, 315°C의 고온 열유체를 사용하였다. 550°C 이상의 소듐에 적용하기 위해서 도압관의 길이를 길게 하였으며 히터를 이용한 온도 제어를 통하여 diaphragm의 온도를 200°C로 유지할 수 있게 하였다[1.2-3].

개발한 압력센서 시작품의 설계도면, 시작품 사진, 응답곡선을 그림 1.2-4에 제시하였으며, 정밀도는 0.135%FS로 측정되었다. 또한 응답 특성 곡선은 step function의 water 액위를 제어하여 트랜스미터의 신호 출력이 66.7%에 도달하는 응답시간( $\tau$ )을 측정하여 구하였다. 측정된 시작품의 응답시간은 0.7초로써 기존 capillary 형의 차압 트랜스미터의 응답시간 약 6초에 비해 월등히 우수한 결과를 보여주었다.

2012년 2월 현재, 시작품 개발 관련 1건의 국내특허등록(한국, 10-1040332)을 완료하였으며 주요 특허내용으로 압력전달관 및 다이어프램 속 소듐 배출이 원활한 구조이며, 소듐이 다이어프램에 채워질 때 소듐을 정제하는 기구가 부착되어 있다.



<그림 1.2-4 압력센서 시작품>

## (3) 유량 센서 시작품

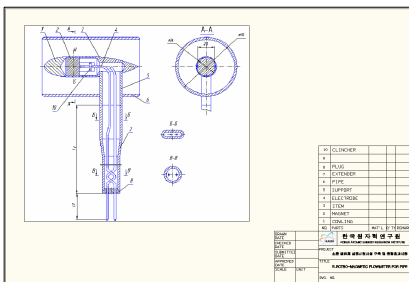
유량 센서의 작동원리는 파라데이 전자유도 법칙을 응용한 것으로 플레밍 오른손 법칙과 같다. N-S극 자기장 공간내에 배관을 설치하고 유체를 흘려주면 자장의 방향과 유체의 방향에 직각인 제3의 방향으로 기전력이 발생하며 기전력은 자속밀도와 유체 유속에 비례한다. 자속밀도가 일정하다면 유체 유속에 따라 기전력이 비례하여 나타나며 micro-voltage 수준의 electromagnetic eddy current를 증폭하여 측정 신호를 얻어 유량을 측정한다.

제작된 PHTS 계통 유량 센서 시작품의 유속 측정 가능 영역은 0.5~80cm/sec, 적용온도는 200~550°C로서, 센서부에는 ALNICO 계열의 자석을 사용하였고 배선은 고온 케이블을 사용

하였다. 그림 1.2-5와 같이 시작품 배관 직경은 50mm이며, 내부 전자기 센서부의 지름은 26mm로 제작하였다[1.2-4].

정밀도(uncertainty,  $\delta_K$ )는  $\delta_K(\%) = \sqrt{\delta_{RF}^2 + \delta_a^2}$ 로 정의한다. 이때 reference flowmeter의 uncertainty는 온도 (T)에 따라  $\delta_{RF} = 0.654 / (0.384 + 4.1 \times 10^{-5} T)$ 로 산출되며, 측정센서의 uncertainty는  $\delta_a = 0.95\sigma / K$ 로 산출한다.

예비 계산 및 성능시험 결과 80cm/s 유속에서 50mm 파이프 내 유량은 1.57L/s 이며, 30°C에서 0.545mV/(L/s)의 민감도를 가지는 것으로 측정되었다. 또한 온도에 따른 유량과 센서 신호값의 온도 변화에 따른 기울기(K)에 대한 보정값을 구하였으며 측정된 시작품의 정밀도는 1.9% 이내로서 목표한 정밀도를 달성하였다.



(a) 설계도면



(b) 시작품

온도(°C)	기울기(K)	표준편차( $\sigma$ )
147	0.5858	$4.05 \times 10^{-3}$
152	0.5820	$3.70 \times 10^{-3}$
307	0.5616	$1.97 \times 10^{-3}$
359	0.5503	$5.79 \times 10^{-3}$
448	0.5442	$1.00 \times 10^{-3}$
484	0.5131	$1.13 \times 10^{-3}$

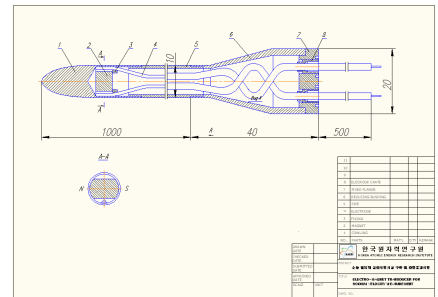
(c) 유량과 센서 신호값과의 관계

<그림 1.2-5 유량센서 시작품>

#### (4) 국부유속 센서 시작품

작동원리 및 정밀도 정의는 유량 센서의 경우와 동일하다. 지름 10mm로 제작된 풀 내부 국부유속 센서의 유속 측정 가능 영역은 0.5~80cm/sec, 적용온도는 200~550°C로서, 유량센서 시작품과 마찬가지로 센서부에는 ALNICO 계열의 자석을 사용하였고 배선은 고온 케이블을 사용하였다[1.2-5]. 그림 1.2-6과 같이 예비 성능시험 결과 온도에 따른 유량과 센서 신호값의 온도 변화에 따른 기울기(K)에 대한 보정값을 구하였다. 정밀도 계산은 유량 센서의 계산식과 같으며 측정된 시작품의 정밀도는 2.5% 이내로서 목표한 정밀도를 달성하였다.

2012년 2월 현재, 시작품 개발 관련 1건의 국내특허등록(한국, 10-1092037)을 완료하였으며 주요 특허내용은 전자기 와류를 발생시키는 회전체를 이용한 전자기 센서의 시험기 발명이다.



(a) 설계도면



(b) 시작품

온도(°C)	기울기(K)	표준편차( $\sigma$ )
157	-0.212	$0.372 \times 10^{-3}$
290	-0.208	$0.595 \times 10^{-3}$

온도(°C)	기울기(K)	표준편차( $\sigma$ )
456	-0.212	$1.79 \times 10^{-3}$
531	-0.215	$2.12 \times 10^{-3}$

(c) 유량과 센서 신호값과의 관계

<그림 1.2-6 국부유속 센서 시작품>

### 3. 소듐 열유체 실증시험시설 기본설계

#### 가. 소듐 열유체 실증시험시설 및 종합효과시험 범위 평가

##### (1) 주요 열유체 현상

원자로계통을 대상으로 하는 대규모의 열유체 실험장치 구축을 위해서는 먼저 대상원자로에서 발생 가능한 주요 사건/사고의 시나리오를 분석하고, 이로부터 실험목적에 부합하는 실험 매트릭스를 선정해야 한다. 그리고 각 실험 매트릭스별로 중요하게 취급해야 하는 주요 열유체 현상을 도출하여, 이를 바탕으로 적절한 척도 해석 방법론을 적용하여 대상원자로를 축소, 모의하는 절차가 요구된다.

대상원자로인 600MWe 실증로의 안전성 평가시 고려하는 주요 설계기준사고 (DBE: Design Basis Events)로는 TOP (Transient of Over Power), LOF (Loss of Flow), LOHS (Loss of Heat Sink), SBO (Station Black Out) 등이 있다. TOP 사고는 제어봉 인출, 노심 내 가스기포 통과, 기타 양의 반응도 삽입 등으로 인하여 노심 출력이 증가하는 사고로서 이 사고의 주요 초점은 초기 반응도 삽입으로 인한 노심 출력상승과 원자로 정지 후 노심에서 발생하는 잔열의 효율적인 제거이다. 원자로 정지 후의 열제거 관련 현상은 초기 PHTS에 축적된 열에너지만이 다를 뿐 관련 현상은 LOF와 유사하다.

LOF 사고는 PHTS 펌프의 고장이나 펌프 방출배관 파단 등으로 인하여 노심 냉각능력이 감소하는 사고로서, 실험을 통해 확인되어야 하는 주요 사고들을 포함하고 있다. LOHS 사고는 IHTS나 SGS 등의 기능 상실로 노심 냉각 성능이 저하되는 사고로서 피동잔열제거 성능을 입증하기 위해 반드시 수행되어야 한다. SBO 사고는 소외전원상실로 인해 LOF와 LOHS가 결합된 사고의 특징을 갖추고 있으므로 실제 사고의 심각성 측면을 고려한다면 안전해석 측면에서 가장 중요하게 다루어져야 되는 사고이다.

실험장치의 설계요건은 이와 같은 사고모의를 기준으로 설정된다. 즉, 선정된 각각의 실험 대상 사고 과도기간 동안 발생할 것으로 예상되는 중요한 열유체 현상이 실험장치에서 적절하게 모의될 수 있도록 실험장치의 설계 시 요구되는 제반 요건을 설정하여야 한다. 이를 위해 600MWe 실증로 설계의 안전해석 결과[1.3-1,2,3]를 활용하고, 풀형 소듐냉각고속로에 대한 기존의 해외의 운전 및 사고해석 자료[1.3-4]를 참조하여 실험대상인 주요 사고 시나리오별로 예상되는 열유체 현상을 도출하였다.

또한 도출된 열유체 현상으로부터 실험장치의 설계에서 고려해야할 주요 열유체 현상의 상대적인 중요도를 나타내는 우선순위를 결정하기 위해서 대상원자로에 대하여 수행한 예비 PIRT 결과를 활용하였다. 이와 같은 열유체 현상의 분석을 통해 모의 사고 별로 발생하는 개별적인 열유체 현상을 실험장치의 계통 또는 기기 설계에 우선적으로 반영해야 한다[1.3-5].

##### (2) 실험장치 설계기준

실험장치의 규모는 재현하고자하는 열유체 현상을 중대한 왜곡 없이 모의할 수 있고, 장치 건설에 과도한 비용이 소요되지 않도록 선정되어야 한다. 실험장치의 높이는 1:1 (Full height)로 모의하거나 또는 적절한 길이 축소비에 따라 척도 모의하는 두 가지 방안이 있다. 이들은 실험장치



에서의 열생성원, 열침원, 주요 기기에서의 열유체 현상, 구축비용 그리고 실험 재현 시간 등의 관점에서 검토되어야 한다.

높이가 축소된 (Reduced height) 실험장치에서는 척도해석의 특성으로 인해 1:1 높이비 (Full height) 장치에 비해 속도와 시간 척도가 변하는 특성이 있다. 따라서 속도 척도가 중요한 빠른 과도상태의 모의에는 척도왜곡이 심화되는 경향이 있으며, 따라서 Reduced height 실험장치는 준평형상태의 느린 과도상태의 모의에만 적합한 단점이 있다[1.3-6].

일반적으로 실험장치의 모의 노심 출력을 Full power 상태로 유지한 조건에서 실험을 수행하지 못하는 이유는 실제 원자로 노심을 사용하지 않는 한 그 만큼의 단위출력밀도를 생성하는 전기히터를 제작할 수 없을 뿐 만 아니라, 가능하더라도 전기히터의 배치 상 막대한 용량의 전원이 소요되기 때문이다.

따라서 경수로를 대상으로 한 대부분의 대규모 열유체 실증시설에서는 모의 노심의 출력을 붕괴열 수준으로 낮추어 모사한다. 노심의 붕괴열 수준의 조건만을 모사하는 실험장치에서는 사건 발생 초기의 급격한 과도현상에는 관심을 가지지 않으며, 노심 출력이 붕괴열 규모로 감소된 사건의 진행 과정에 대해서만 관심을 갖게 된다.

따라서 거의 대부분의 경우에는 이러한 제한 특성으로 인한 문제점은 없는 것으로 알려져 있다. 본 실험에서는 원자로 정지 후의 자연순환유동에 의한 잔열제거 성능이 중점적으로 고찰될 예정이기 때문에 붕괴열을 적절히 모사할 수 있는 수준의 모의 노심 출력을 설정하는 것이 적절하다고 판단된다.

실험장치의 높이 척도비의 경우, 모사하고자 하는 실험 매트릭스에서 다루어져야 할 가장 중요한 항목이 느린 과도현상인 단상 자연순환 유동에 의한 노심의 잔열제거 성능이며, 또한 1:1 높이비를 유지하지 않더라도 척도왜곡을 유발시키지 않으면서 Gravity force/Friction force 비 유지를 위해 주어진 높이비에 대해 구성기기를 통한 압력손실의 조절이 용이하기 때문에 Reduced height 실험장치를 본 실험 목적에 부합하는 설계 기준으로 설정하였다. 높이 척도비는 실험장치가 설치될 실험실 공간의 최대 높이, 요구 전력 등을 고려하여 가능한 범위 내에서 대상원자로의 크기에 가까워질 수 있도록 1/5로 선정하였다.

체적 척도비의 경우에는 다차원 유동 현상 모사를 위한 원자로용기의 종횡비 (Aspect ratio) 유지, 원자로용기 내부 유동에 대한 충분한 계측 공간 및 기기의 설치 공간 확보, 대상원자로 원자로용기의 내부 형상 보존, 전기 가열봉의 제작성 및 건설비용의 한계 등을 고려하여 1/125로 결정하였다.

모의 노심 출력의 경우에는 100 % 출력 상태에서의 척도 출력은 대상원자로의 1/55.9인 약 27 MW가 되어 노심 전력공급계통의 구입에 필요한 비용이 과대해질 뿐만 아니라, 이러한 용량을 갖는 전기히터의 제작에 어려움이 있다. 또한 선정된 실험 매트릭스에서 노심 출력은 원자로 정지에 따라 빠른 시간 내에 붕괴열 수준으로 떨어지기 때문에 막대한 용량의 정격 출력을 모의하는 것은 비현실적이다.

따라서 실험장치의 모의 노심 출력은 원자로 정지 후의 시간에 따른 붕괴열 변화를 고려하여 100 % 척도 출력의 7 %로 선정하였다. 또한 작동유체, 온도 분포 및 압력 조건은 이들 인자에 의한 척도 왜곡을 제거하기 위해 대상원자로와 동일하게 유지한다.

이상에서 기술된 실험장치 설계를 위한 일반 설계기준을 요약하면 다음과 같다.

- 대상원자로 : 600MWe 실증로
- 척도비 :
  - . 체적 척도비 : 1/125
  - . 높이 척도비 : 1/5
  - . 모의 노심 출력 : 100 % 척도 출력의 7 %
- 실제 운전조건 (작동유체, 온도, 압력) 모의
- 대상원자로 원자로용기 내부 배치 형태 보존

이와 같은 일반적인 설계기준에 따라 대상원자로를 축소 모의하는 본 실험장치는 대상원자로에서 발생이 예상되는 주요 열유체 현상들이 가능한 동일하게 재현될 수 있도록 제반 상사성이 유지되어야 한다.

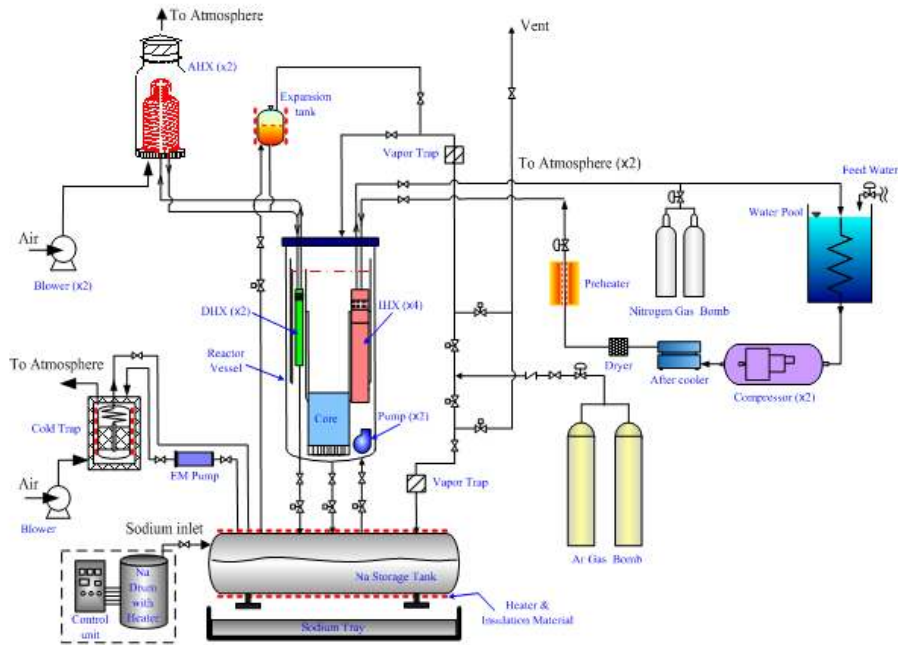
## 나. 실증시험시설 기본설계

STELLA-2 실험장치는 크게 일차열전달계통(PHTS), 중간열전달계통(IHTS) 및 안전등급 잔열제거계통(PDRC 및 ADRC)로 이루어지는 주계통과 증기발생기 급수측을 모의하기 위한 보조계통 및 계측/제어/감시 계통으로 구성된다. PHTS는 모의 원자로용기 및 대상원자로와 동일한 구조를 갖는 내부 구조물, 전기 가열봉 집합체로 구성된 모의노심, 4대의 IHX, 2대의 PHTS 펌프로 구성된다.

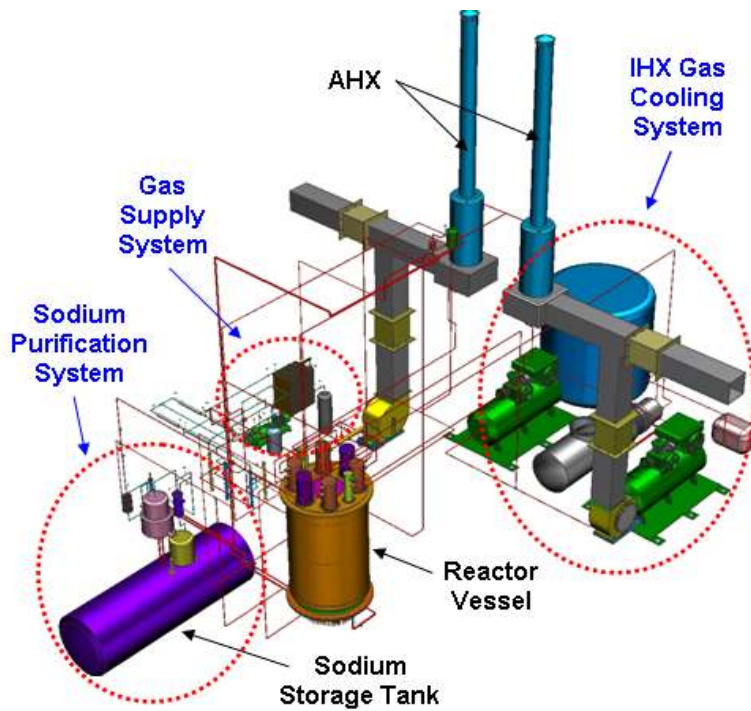
IHTS는 IHX 전열관측과 증기발생기를 모의하는 최종열제거교환기, 그리고 연배관 및 압력탱크로 구성되며, IHX에서 가열된 중간계통 소듐의 온도를 최종열제거교환기를 통해 냉각함으로써, 모의하고자 하는 사고조건을 만들어 주는 기능을 제공한다. 안전등급 잔열제거계통인 PDRC 및 ADRC는 PHTS 소듐 풀 지역에 설치되는 총 4대의 DHX와 시험시설의 최상부에 위치하는 2대의 AHX 및 2대의 FDHX가 각 루프당 한 대씩 설치되고 이 두 열교환기를 잇는 연결배관 및 완충탱크 등으로 구성된다.

보조계통은 소듐 공급/정화계통, IHX 가스냉각계통, 열손실보상계통 및 기타 실험장치 운전 에 필요한 계통으로 구성된다. 소듐 공급/정화계통은 주계통에 필요한 약 17 ton의 액체 소듐을 공급·배출하고 정화하는 기능을 수행한다. 최종열제거계통은 증기발생기를 모의하는 최종열제거교환기(Ultimate heat exchanger; UHX)를 통해 필요한 만큼 열을 제거하여 실험 초기조건과 경계조건을 모의하는 기능을 수행하며, 한 개의 IHTS 루프당 핀(Fin)이 부착된 1대의 UHX가 설치되며 냉각을 위한 작동유체는 외부 공기이다.

열손실보상계통은 부품 표면에서의 과도한 열손실을 보상하거나 소듐고화를 방지하기 위한 기능을 수행하며, 실험장치에서 구역별로 제어되는 전기히터와 단열재로 구성된다. 이 밖에 실험장치 운전 에 필요한 Ar 가스, N<sub>2</sub> 가스 및 압축공기를 제공하는 가스공급계통, 4.5 MW 용량의 전력공급계통, 화재방호계통이 포함된다. 실험장치의 개략도 및 3차원 예비 배치도를 그림 1.3-1 및 그림 1.3-2에 도시하였으며, 본 그림들은 향후 STELLA-2에 대한 기본설계가 완료되는 시점에서 최신 설계자료를 활용한 3차원 drawing을 이용하여 개정될 계획이다.



<그림 1.3-1 STELLA-2 실험장치 개략도>



<그림 1.3-2 STELLA-2 3차원 배치도>

### (1) 척도해석

본 실험장치의 설계를 위한 척도해석 방법론으로 Reduced height scale 실험장치에서 자연 순환 현상의 보존이 용이하도록 개발된 3단계(3 level)로 이루어진 Ishii 척도법 [1.3-7]을 적용하였다. 본 척도해석법은 현재 가장 포괄적이고 적용성이 우수한 척도해석 방법으로 알려져 있으며, Zuber et al. [1.3-8]의 Top-down 및 Bottom-up Approach와도 유사한 개념으로서 전체적인 요건을 만족시킴과 동시에 세부적인 현상도 보존할 수 있는 방법이다.

첫 번째 단계인 Global scaling에서는 연속방정식, 루프를 통한 운동량방정식, 유체 및 고체 영역에서의 에너지방정식과 유체와 고체의 경계면에서의 열전달에 관계되는 경계조건에 기반한 보존방정식으로부터 실험장치와 대상원자로 사이에 만족되어야할 전체적인 상사화 요건이 도출된다. 이 단계를 통해 실험장치와 대상원자로 사이에 계통의 전체적인 정상상태와 과도상태가 보존될 수 있도록, 기하학적 조건, 시간척도 및 여러 열유동 변수들에 대한 상사요건이 결정된다.

두 번째 단계는 Boundary flow & inventory scaling이라 하며, 이로부터 각 계통 사이의 유동 및 각 계통의 질량과 에너지 재고 변화량에 대한 상사요건이 도출된다. 마지막 단계인 Local phenomena scaling에서는 각 기기에서 중요한 국부적 열유체 현상들이 보존되도록 한다.

Ishii 척도법은 Global scaling으로 이루어지는 Top-down 척도해석 방법과 Boundary flow & inventory scaling 및 Local phenomena scaling을 포함하는 Bottom-up 척도해석 방법이 결합된 방법론이다. 일반적으로 Global scaling과 Boundary flow & inventory scaling은 전체적인 계통 반응의 상사화를 만족시키지만, 특정 기기 내부의 국부적인 열유체 현상은 만족되지 않을 수 있다.

그러므로 국부적인 주요 현상에 대한 상사성 분석을 별도로 수행하는 것이 중요하다. Local phenomena scaling에 의해 도출되는 특정 기기의 상사화 요건이 Global scaling에 의한 상사화 요건과 달라질 경우에는, 특정 기기 내의 물리적 현상을 보존하기 위해 Global scaling에 따른 주요 열유동 변수의 상사성은 유지하면서 해당 기기의 기하학적 요건을 Local phenomena scaling에 의한 요건으로 대체한다.

예를 들면, 배관의 압력손실에 대한 상사성을 보존하기 위해 Global scaling에 따른 이상적인 배관 유동면적보다 크게 설계될 수 있다. 그러나 이러한 경우에도 수평관의 길이를 축소하여 배관 내부 체적을 Global scaling에 맞추도록 한다. 즉 특정 기기내의 물리적 현상을 보존하면서 Global scaling에 따른 주요 변수는 상사성을 보존한다. Ishii 척도법은 높이 척도비를 1:1로 유지할 경우에 적용되어왔던 체적척도법을 포함하는 보다 일반화된 척도법으로 볼 수 있다.

### (가) 상사 변수 유도 (Similarity Parameters)

본 절에서는 냉각재인 소듐의 기본적인 물성치를 상수로 가정하고 Ishii, M. et al.[1.3-7]을 참조하여, 각 지배방정식에 대한 무차원화 과정을 통해 다음과 같이 기본적인 무차원화 그룹을 유도하였다.

○Richardson Number

$$R \equiv \frac{g\beta\Delta T_0 l_0}{u_0^2} = \frac{\text{buoyancy}}{\text{inertia force}} = \frac{Gr}{Re^2} \quad (1.3-1)$$

○Friction Number

$$F_i \equiv \left( \frac{fl}{D_H} + K \right)_i = \frac{\text{friction}}{\text{inertia force}} \quad (1.3-2)$$

○Reynolds Number

$$Re \equiv \frac{\rho u_0 l_0}{\mu} = \frac{\text{inertia force}}{\text{viscous force}} \quad (1.3-3)$$

○Prandtl Number

$$Pr \equiv \frac{c_p \mu}{k} = \frac{\text{viscous diffusion}}{\text{thermal diffusion}} \quad (1.3-4)$$

○Modified Stanton Number

$$St_i \equiv \left( \frac{4hl_0}{\rho c_p u_0 D_H} \right) = \frac{\text{wall convection}}{\text{axial convection}} \quad (1.3-5)$$

○Time Ratio Number

$$T_i^* \equiv \left( \frac{l_0 / u_0}{\delta^2 / \alpha_s} \right) = \frac{\text{transport time}}{\text{conduction time}} \quad (1.3-6)$$

○Biot Number

$$Bi_i \equiv \left( \frac{h\delta}{k_s} \right) = \frac{\text{wall convection}}{\text{conduction}} \quad (1.3-7)$$

○Heat Source Number

$$Q_{si} \equiv \left( \frac{\dot{q}_s'' l_0}{\rho_s c_{ps} u_0 \Delta T_0} \right)_i = \frac{\text{heat source}}{\text{axial energy change}} \quad (1.3-8)$$

Re 수와 Pr 수의 곱은 상대적으로 매우 큰 값을 나타내며 상대적인 중요도가 낮은 항이 되게 하므로 이 항을 생략할 수 있다. 이는 원천적으로 유체 에너지 방정식에서 유체간의 열전도가 미치는 영향이 상대적으로 작음을 의미한다.

지배방정식을 무차원화하기 위하여 도입한 변수에 상수 기준값이 있는데 기준 속도와 기준 온도 (혹은 온도차)가 있다. 전술한 바와 같이 무차원화 변수를 도입할 때 그 크기가 ~1이 되도록 설정하면 이점이 많다. 이러한 의미에서 기준 온도차를 가열 부분에서의 입구와 출구 온도차로 설정하면 이 값이 최대 온도차에 근사하는 값이므로 크기가 ~1이 되게 할 수 있다. 이 온도차를 구하기 위하여 다음과 같은 에너지 보존을 고려하고, 이 식의 온도차를 적분형 운동량 방정식에 대입한 후 기준 위치를 가열부로 설정하면 다음과 같이 자연순환 정상상태 속도를 구할 수 있다.

$$\Delta T_0 = \frac{\dot{q}_s'' l_0}{\rho u_0 c_p} \left( \frac{a_{s0}}{a_0} \right) \quad (1.3-9)$$

$$u_0 = \left\{ \frac{\beta \left( \frac{\dot{q}_s'' l_0}{\rho c_p} \right) l_h \left( \frac{a_{s0}}{a_0} \right)}{\frac{1}{2g} \sum_i (F_i / A_i^2)} \right\}^{1/3} = \left\{ \frac{\beta \Delta T u_0 l_h}{\frac{1}{2g} \sum_i (F_i / A_i^2)} \right\}^{1/3} \quad (1.3-10)$$

## (나) 상사 법칙 (Similarity Law) 및 일반상사 요건

원형 (Prototype)과 모델 (Model)에서 상사성을 얻기 위해서는 앞 절에서 유도한 무차원방정식에 나타난 모든 무차원 변수들이 다음을 만족해야 한다.

$$\Psi_R \equiv \frac{\Psi_m}{\Psi_p} = 1 \quad (1.3-11)$$

기본 기하학적 상사성은 다음과 같으며, 무차원 지배 방정식에 나타난 기하학적 항에 기하학적 상사요건을 추가로 적용하면 다음과 같이 정리된다.

$$L_{i,R} = \frac{(l_i/l_0)_m}{(l_i/l_0)_p} = 1 \quad (1.3-12)$$

$$A_{i,R} = \frac{(a_i/a_0)_m}{(a_i/a_0)_p} = 1 \quad (1.3-13)$$

$$\left( \frac{A_r}{A_i} \right)_R = \frac{(a_r/a_i)_m}{(a_r/a_i)_p} = 1 \quad (1.3-14)$$

무차원 그룹에 대해서도 마찬가지로의 상사 요건을 적용할 수 있다. 먼저 Richardson 수에 대한 상사 요건을 구하면 다음과 같다. 우선 온도를 동일하게 유지하여 물성치를 동일하게 유지한다는 가정하에서 요건을 구한다.

$$R_R = \left( \frac{g\beta\Delta T_0 l_0}{u_0^2} \right)_R = 1 \quad (1.3-15)$$

Friction 수에 대한 상사 요건은 이 수 자체의 상사 요건을 만족하도록 할 수도 있고 무차원 유동 면적을 포함하여 상사 요건을 만족하도록 할 수도 있다. 즉 Friction 수가 포함된 항을 살펴보면 다음과 같은 형태를 하고 있다.

$$\frac{U_r^2}{2} \sum_i F_i / A_i \quad (1.3-16)$$

위 식에서  $A_r = 1$  이 가정되었다. 위 식에서 만약  $A_{i,R} = 1$  이라고 가정하면 (이는 기하학적 상사성이 만족되고 있으면 저절로 만족되는 조건이다) Friction 수 자체가 원형과 모델에서 서로 같아야 한다.

$$F_{i,R} = \left( \frac{fl}{D_H} + K \right)_{i,R} = 1 \quad (1.3-17)$$

이 식에서 마찰에 의한 압력강하의 양은 Minor Loss를 이용하여 보상될 수 있으며, 이는 Friction 수에 대한 상사 요건의 만족이 용이함을 의미한다. 만약 면적비까지 포함된 형태로 상사 요건을 고려하면 더 쉽게 상사 요건을 만족시킬 수 있다. 이 식은 Friction 수로 맞추지 못

한 것을 면적 비, 즉 오리피스 등을 이용하여 면적으로 조절하는 방법을 사용하여 만족시킬 수 있음을 의미한다.

$$(F_i/A_i)_R = 1 \quad (1.3-18)$$

Time Ratio 수에 대한 상사 요건을 다음과 같이 고려하고, 동일한 재질 물성치를 고려하면 배관 벽면의 두께 요건을 다음과 같이 간단히 구할 수 있다.

$$T_{i,R}^* = \left( \frac{\alpha_s l_0}{\delta^2 u_0} \right)_{i,R} = 1 \quad (1.3-19)$$

$$\delta_{i,R} = \sqrt{\alpha_{s,R} (l_0/u_0)_{i,R}} = \alpha_{s,R}^{1/2} l_{0,R}^{1/4} = l_{0,R}^{1/4} \quad (1.3-20)$$

즉, 벽면 두께는 유동 면적에 관계되는 것이 아니라 유동 길이에 관계됨을 알 수 있으며, 길이 축소보다 더 작은 스케일로 축소해야 한다. 예를 들어 길이 척도비가 1/5이라면 1/1.5로 벽 두께를 만들어야 한다. 만약 원형의 핵연료가 우라늄 금속 ( $\alpha \sim 12.5 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ )이고 실험장치에서의 전열기가 스테인리스스틸 ( $\alpha \sim 3.9 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ ) 또는 니크롬 ( $\alpha \sim 3.4 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ )이라면 참고문헌 [1.3-8] Table A.1의 300K에서의 Thermal Diffusivity의 비가 대략  $\sim 1/3$  정도이므로 연료봉의 직경비는  $\sim 1/2.6$ 이 된다.

한편, Heat Source 수에 대한 상사 요건을 적용하면 필요한 열량을 구할 수 있다. 원형과 모델 사이에 동일 물성치 및 동일 온도 분포를 가정하고 위에서 구한 속도비 요건을 적용하면, 단위체적당 열원의 비는 길이 비의 제곱근이 되며 이는 속도 비와 동일하다. 실제 필요한 열량비를 구하면 다음과 같다. 열구조물 체적비가 유체 체적비와 같다고 가정한다.

$$Q_{si,R} = \left( \frac{\dot{q}_{s0}'''}{\rho_s c_{ps} u_0 \Delta T_0} \right)_{i,R} = 1 \quad (1.3-21)$$

$$\dot{q}_{s,R}''' = \Delta T_{0,R} \rho_{s,R} c_{ps,R} / \sqrt{l_{0,R}} = \rho_{s,R} c_{ps,R} / \sqrt{l_{0,R}} = 1 / \sqrt{l_{0,R}} \quad (1.3-22)$$

$$\dot{q}_{s,R} = \dot{q}_{s,R}''' V_{s0,R} = \dot{q}_{s,R}''' (a_{0,R} l_{0,R}) = \rho_{s,R} c_{ps,R} a_{0,R} l_{0,R}^{1/2} = a_{0,R} l_{0,R}^{1/2} \quad (1.3-23)$$

이 조건에서 만일 유동 면적의 비가 길이 비 제곱과 같다면, 즉 선형적으로 축소한 모델이라면 필요한 열량은 다음과 같이 정리된다.

$$\dot{q}_{s,R} = \dot{q}_{s,R}''' V_{s0,R} = l_{0,R}^{5/2} \quad (1.3-24)$$

이들 관계들을 토대로 구해지는 수정 Stanton 수에 대한 상사 요건 및 Biot 수에 대한 상사 요건은 대류 열전달 계수와 관련이 있으며, 다음과 같이 표현된다.

$$St_{i,R} = \left( \frac{4hl_0}{\rho c_p u_0 D_H} \right)_{i,R} = 1 \quad (1.3-25)$$

$$Bi_{i,R} = \left( \frac{h\delta}{k_s} \right)_{i,R} = 1 \quad (1.3-26)$$

위의 식이 Time Ratio 수 상사성을 위하여 도출된 식 (1.3-20)과 동일한 벽두께 조건이 되기 위해서는 다음이 만족되어야 한다. 또한, 수정된 Stanton 수 및 Biot 수 각각에 대한 상사 조건을 고려하면 다음과 같이 정리된다.

$$D_{Hi,R} = (k_s \rho_s c_{ps})_R^{1/2} l_{0,R}^{1/4} = l_{0,R}^{1/4} \quad (1.3-27)$$

$$h_R = D_{Hi,R} / l_{0,R}^{1/2} \quad (1.3-28)$$

$$h_R = \frac{k_{s,R}}{\delta_R} = \frac{k_{s,R}}{\alpha_{s,R}^{1/2} l_{0,R}^{1/4}} = (k_s \rho_s c_p)_R^{1/2} l_{0,R}^{-1/4} (= l_{0,R}^{-1/4}) \quad (1.3-29)$$

식 (4.2-23)의 관계에 의하여 위의 두식은 동일한 조건이 되지만 식 (1.3-20)의 관계가 이용될 경우 서로 상이한 조건이 된다. 따라서 수정 Stanton 수와 Biot 수에 대한 상사성을 Time Ratio 수를 만족시키면서 동시에 만족시키기는 어렵다는 결론을 얻을 수 있다. 그러므로 벽면 열전달에 대해서는 향후 척도해석 단계에서부터 별도의 고려가 필요할 것으로 판단된다.

대상원자로인 600MWe 실증로에 대하여 길이 척도비가 1/5, 면적 척도비가 1/25, 온도 척도비가 1, 그리고 대상원자로와 동일한 작동유체가 사용되는 실험장치의 전체적인 설계 변수의 일반상사요건은 표 1.3-1과 같이 정리할 수 있으며, 세부현상과 관련해서는 Bottom-up Approach로부터 추가적인 조건이 제시된다.

즉, Bottom-up 상사와 관련하여 경계 유량에 대한 상사성을 위해서는 다음과 같이 유동 면적을 주면 된다. 또한, 계통으로 들어오는 (또는 나가는) 열량과 축일은 동일 물성치 조건하에서는 유량비로 설정해야 한다.

$$a_{in,R} = a_{0,R}$$

$$\dot{q}_R = \dot{w}_R = \dot{m}_R = a_{0,R} l_{0,R}^{1/2} = l_{0,R}^{5/2}$$

열구조물 내의 열 생성과 유체 사이의 열전달 관계는 다음과 같은 간단한 Lumped 모델을 고려할 수 있다.

$$\dot{q}_s = V_s \langle \rho_s c_{ps} \rangle \frac{d\langle T \rangle}{dt} + a_s h (T_s - T_f)$$

일반상사요건으로부터 얻는 열원(전열기)에 대한 설계 요건은 다음 표 1.3-2와 같다. 또 Assembly 내에서 최외곽 봉의 배열은 원래 구하면 정수가 아닌 수가 나오는데, 이를 정수로 변환해야 한다. 이로 인한 영향은 표 1.3-3에 제시되어 있다. 기하학적 척도가 크기 때문에 이에 따른 변화가 큼을 알 수 있다. 압력 강하 및 유량 분배, 유동 저항을 보존하기 위해서는 일반상사요건으로부터  $(u_m/u_p) = l_R^{1/2}$ 이 되므로, 다음과 같은 식이 요구된다.



$$\left( \frac{(K + f \frac{l}{d})_m}{(K + f \frac{l}{d})_p} \right) = 1$$

모델에서 유동 면적이 줄어들어 따라, 수력학적 직경은  $d_R = a_R^{1/2}$ 과 같이 감소하게 된다. 축소 모델은 적절한 수직높이를 확보하기 위해  $l_R > d_R$ 을 유지하도록 한다. 그러나 원형과 모델에서의 Friction에 의한 압력손실만으로 차압을 스케일 하는 것이 쉽지 않으므로, 이를 Minor Loss인  $K$ 를 적절히 변경하여 위 식을 만족하도록 한다.

<표 1.3-1 척도법에 의한 일반상사요건 및 설계변수 요건>

변수	척도	설계 예시 ( $\Delta T_{0,R}^{1/2} = 1$ )	근거	
길이비	$l_{0,R}$	1/5	요건	
유동면적비	$l_{0,R}^2$	1/25	요건 및 길이비	
체적비	$l_{0,R}^3$	1/125	요건 및 길이비	
수력학적직경	$l_{0,R}^2 / \xi_R = l_{0,R}$	1/25	길이비 및 형상	
속도비	$\Delta T_{0,R}^{1/2} l_{0,R}^{1/2}$	1/2.24	Richardson 수	
시간 (Time ratio)	$l_{0,R}^{1/2} / \Delta T_{0,R}^{1/2}$	1/2.24	길이비 및 속도비	
벽 두께	$\alpha_{s,R}^{1/2} l_{0,R}^{1/4}$	1/1.5	Time ratio 수 (동일한 열전도체 사용 가용)	
출력밀도비	$l_{0,R}^{-1/2}$	1/0.45	Heat source 수	
출력비 (유체로의 열전달비)	$l_{0,R}^{5/2}$	1/55.9	Heat source 수 및 체적비	
유량비	$l_{0,R}^{5/2}$	1/55.9	Heat source 수 및 체적비 (Energy Balance)	
St 수 비*	$\left( \frac{4hl_0}{\rho c_p u_0 D_H} \right)_R = \frac{h_R l_{0,R}^{1/2}}{D_{H,R}}$	11.2	강제 대류 (층류)	실제 Nu
		1.62	강제 대류 (난류)	
		3.34	자연 대류	
Bi 수 비*	$\left( \frac{h\delta}{k_s} \right)_R = \frac{h_R l_{0,R}^{1/4}}{(k_s \rho_s c_{ps})_R}$	3.34	강제 대류 (층류)	실제 Nu
		0.49	강제 대류 (난류)	
		1	자연 대류	

\* 열전달 계수 비는 등가 직경을 길이 척도로 축소할 경우를 가정한 것임. 이 두 수는 왜곡될 수밖에 없으며 결과적으로 열전도체 표면 온도가 차이 남. 이를 보정하기 위해서는 다른 물성치의 열전도체를 사용해야 함

<표 1.3-2 설계 조건별 실험 열출력>

	설계 조건*	근거	실험 열출력
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 금속 우라늄을 열원 재료 사용</li> <li>● 열구조물 체적은 유체 체적 척도와 동일</li> </ul>	$\dot{q}_{s,R} = a_{0,R} l_{0,R}^{1/2}$	1939kW
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 스테인리스스틸 및 니크롬을 열원 재료 사용 (<math>\rho_{s,R} c_{ps,R} \approx 1/0.67</math>)</li> <li>● 열구조물 체적은 유체 체적 척도와 동일</li> </ul>	$\dot{q}_{s,R} = \rho_{s,R} c_{ps,R} a_{0,R} l_{0,R}^{1/2}$	2894kW
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 스테인리스스틸 및 니크롬을 열원 재료 사용 (<math>\rho_{s,R} c_{ps,R} \approx 1/0.67</math>)</li> <li>● 열구조물 체적은 유체 체적 척도와 다름 (<math>V_{s,R} = n_{ass,R} n_{rod/ass,R} d_{rod,R}^2 \approx 1/478</math>)</li> </ul>	$\dot{q}_{s,R} = V_{s,R} \rho_{s,R} c_{ps,R} / \sqrt{l_{0,R}}$	756kW
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 실제 제작될 전기 히터 재질 구성 비 고려 (<math>\langle \rho_s c_{ps} \rangle_R \approx 1/0.56</math>, 표 5.2-8 참고)</li> <li>● 열구조물 체적은 유체 체적 척도와 다름 (<math>V_{s,R} \approx 1/381</math>)</li> </ul>	$\dot{q}_{s,R} = V_{s,R} \rho_{s,R} c_{ps,R} / \sqrt{l_{0,R}}$	1136kW (1140kW) **

\* DSFR 정상 출력의 7%인 108.4MWth을 원형 출력으로 함  
\*\* 는 표 5.2-2에서와 같이  $m=4.01385$ 로 두고 정상상태 식으로부터 구한 값임

<표 1.3-3 Assembly 가장 바깥쪽 봉 배열수에 따른 모델 출력 민감도>

	$m = 3.0$ (Smaller solution)	$m = 3.62375$ (Exact solution)	$m = 4.0$ (Larger solution)
Rod number ratio	1/14.3	1/9.18	1/7.3
Total rod cross-sectional area ratio	1/95.7	1/61.58	1/49.1
Heating structure volume ratio	1/478.4	1/307.9	1/245.7
Core power ratio (식 (5.2-18))	1/143.3	1/92.25	1/73.6
Core power ratio (정상상태)*	1/139.4	1/89.7	1/71.6
요구 모델 출력 (식 (5.2-18))	756kW	1175kW	1472kW
요구 모델 출력 (정상상태)*	778kW	1208kW	1514kW

\* 노심 출력비는 다음과 같이 구해진다.  

$$\dot{q}_{s,R} = a_{s,R} h_R (T_s - T_f)_R = (n_{ass,R} n_{rod/ass,R} d_{rod,R} l_{0,R}) (1/D_{H,R}) (1)$$

DSFR 계통에는 일차열전달계통(PHTS)에 사용되는 PHTS 펌프와 중간열전달계통(IHTS)에 사용되는 IHTS 펌프가 있다. 기계식 원심 펌프를 사용하는 PHTS 펌프는 원자로 풀 내부의 효율적인 소듐 순환을 위해 소듐을 흡입하여 노심 입구 플레넘으로 토출시키며, 유량 및 수두는 임펠러의 회전 속도를 조절하여 제어된다. PHTS 펌프에는 관성서행(Coastdown)을 위한 플라이휠이 장착된다. 역시 기계식 원심펌프를 사용하는 IHTS 펌프는 일차계통의 열을 증기발생기로 전달하기 위해 중간계통 소듐을 작동유체로 사용한다. 이들 펌프에 대한 상사법칙과 관련하여, 일반적으로 기하학적으로 서로 같은 임펠러와 케이싱으로 구성된 펌프 사이에는 다음과 같은 상사성이 성립한다. 이로부터 구한 펌프에 대한 상사요건은 표 1.3-4와 같다.

○유량비

$$Q_R = \frac{Q_m}{Q_p} = K_d^3 K_n$$

○수두비

$$\Delta H_{dR} = \frac{\Delta H_{d,m}}{\Delta H_{d,p}} = K_d^2 K_n^2$$

○NPSH비

$$NPSH_R = \frac{NPSH_m}{NPSH_p} = K_d^2 K_n^2$$

○출력비

$$P_R = \frac{P_m}{P_p} = K_d^5 K_n^3$$

<표 1.3-4 펌프 상사요건>

Quantity	Model to Prototype Ratio
수두 ( $\Delta H_{dR}$ )	$l_{0R}$
유량 ( $Q_R$ )	$a_{0R} l_{0R}^{1/2}$
회전수 ( $N_R$ )	$a_{0R}^{-1/2} l_{0R}^{1/2}$
출력 ( $P_R$ )	$a_{0R} l_{0R}^{3/2}$
토크 ( $T_R$ )	$a_{0R}^{3/2} l_{0R}$
Inertia ( $I_R$ )	$a_{0R}^2 l_{0R}$

원자로 풀(pool)과 같이 다차원 현상이 지배적인 유동 공간에 대하여 다차원 유동특성을 보존하기 위해서는 기하학적 상사성의 유지가 중요하다. 따라서 열구조물의 설계에 있어서 Time Ratio 수 보존을 위해 Conduction Depth를 길이 척도와 다르게 할 필요가 있으며, 열구조물의 역할이 크지 않다면 이를 왜곡하고 원래의 길이 척도로 설계하는 것이 다차원 현상의 보존을 위해서는 유리하다.

## (2) STELLA-2 유체계통 설계

본 연구를 통해 정립된 실험장치 척도방법론 및 설계기준을 토대로 STELLA-2 유체계통 기본설계를 수행하였다. 실험장치의 원자로용기는 대상원자로와 동일한 배치 형태를 갖는 내부 구조물과 실린더 형태의 원자로용기로 구성하였으며, 모든 재질은 대상원자로와 동일한 STS316L을 사용하였다.

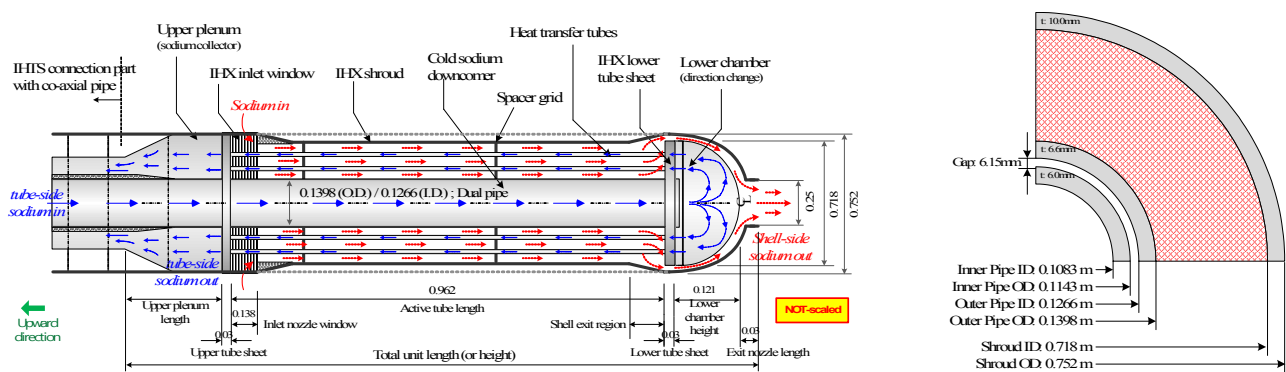
실험장치의 모의 노심은 실제 핵연료봉이 아닌 전기가열봉으로 구성되기 때문에 사용된 재질의 차이로 인한 물성치의 차이 및 길이의 축소 등으로 인하여 실제 핵연료봉과 다른 열적 거동을 보일 수 있다. 모의 노심은 영역별 유동면적 척도비, 영역별 노심 출력 및 유량 척도비, 노심 높이 및 직경 척도비, 그리고 압력강하 척도비 등을 보존하고, P/D(피치/직경)를 보존하

여 대상원자로의 영역별 발열특성 및 냉각재의 유동특성을 보존하도록 설계하였다.

실험장치 IHX는 100% 출력 운전조건을 기준으로 총합전열계수(U)와 로그평균온도차 ( $\Delta T_{LMTD}$ )가 보존되도록 설계하였으며, 척도 왜곡도(distortion) 분석을 통해 Reduced height scale 에서 압력 손실을 포함하는 열교환기 성능인자들이 적절한 성능을 나타내는지를 평가하였다. STELLA-2 IHX 설계제원 및 개략도는 각각 표 1.3-5 및 그림 1.3-3과 같다.

<표 1.3-5 STELLA-2 IHX 설계제원>

Design parameters		Design value
No. of IHX		4
Thermal duty (MWt)		6.932
No. of tubes		742
Pitch to Dia. (P/D)		1.50
Tube OD (mm)		15.875
Tube ID (mm)		13.405
Thickness (mm)		1.235
Tube material		Mod.9Cr-1Mo
Active tube Length (m)		0.962
Heat transfer surface area (m <sup>2</sup> )		35.61
No. of spacer grid		2
IHX shroud ID (Outer / Inner, m)		0.752 / 0.718
IHX center cylinder pipe OD (m)		0.140
LMTD (°C)		25.65
UA total (kW/°C)		272.96
Shell-side (Sodium)	Flow rate (kg/sec)	37.42
	Inlet temp. (°C)	509.8
	Outlet temp. (°C)	364.8
	Pressure drop (Pa)	788
Tube-side (Sodium)	Flow rate (kg/sec)	27.49
	Inlet temp. (°C)	305.4
	Outlet temp. (°C)	502.0
	Pressure drop (Pa)	4220



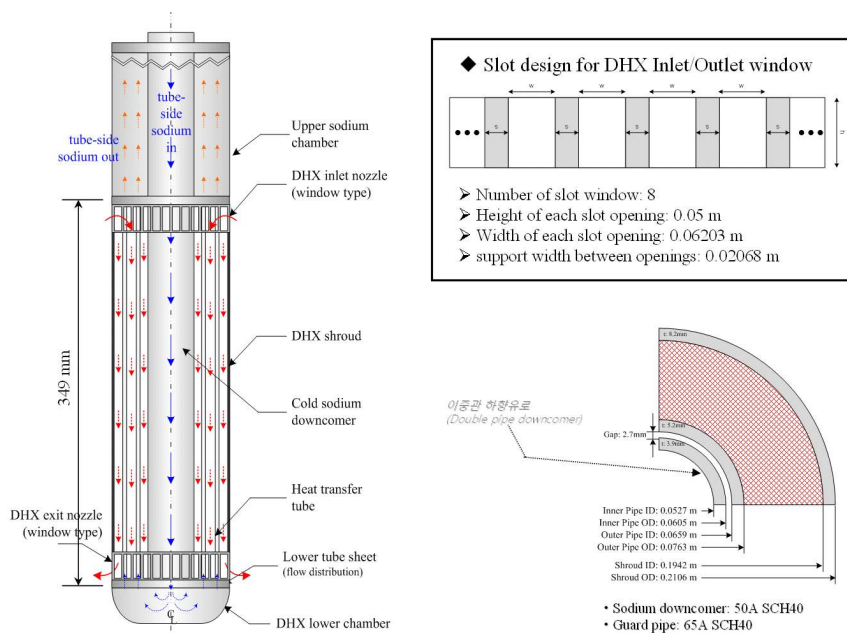
<그림 1.3-3 STELLA-2 IHX 개략도>

IHTS 척도설계는 STELLA-2 모의 IHTS의 소듐 inventory 상사를 통해 루프 전체의 압력손실이 기준 척도비에 맞도록 설계하였으며, 실험 초기조건 및 경계조건 설정시의 온도 변화 폭을 고려하여 관련 압력탱크 체적 등을 상사하여 설계인자를 생산하였다.

안전등급 잔열제거계통에 대한 척도설계에서는 주요 열교환기인 DHX 및 AHX, FDHX에 대하여 설계점(design point)에서의 주요 공정변수를 대상으로 척도설계를 수행하였으며, 대상 원자로의 열교환기를 기준으로 총합전열계수(U)와 로그평균온도차( $\Delta T_{LMTD}$ )가 보존되도록 설계하였고, 척도 왜곡도(distortion) 분석을 통해 Reduced height scale에서 압력 손실을 포함하는 열교환기 성능인자들이 적절한 성능을 나타내는지를 평가하였다. STELLA-2 DHX, AHX 및 FDHX의 설계제원 및 개략도는 각각 표 1.3-6~8 및 그림 1.3-4~6과 같다.

<표 1.3-6 STELLA-2 DHX 설계제원>

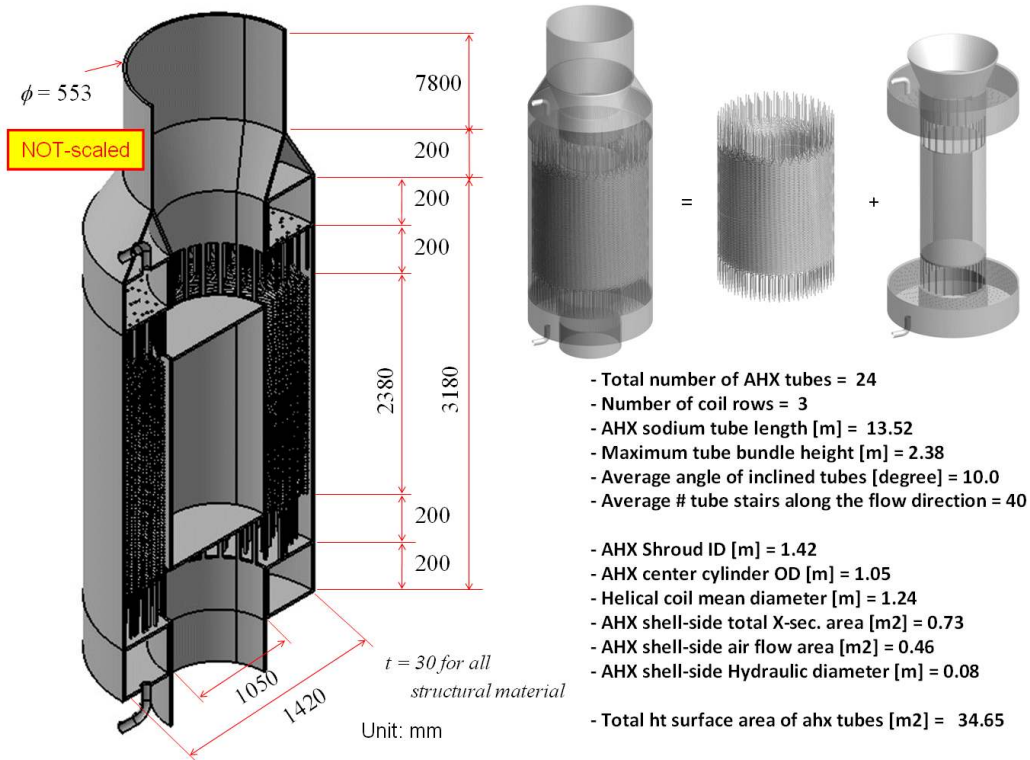
Design parameters		Design value
No. of unit		4
Thermal duty (kWt)		161
No. of tubes		24
Pitch to Dia. (P/D)		1.5
Tube OD/ID (mm)		21.7 / 18.4
Thickness (mm)		1.65
Tube material		Mod.9Cr-1Mo
Effective tube length (m)		0.349
Unit Length (m)		0.463
No. of spacer grid		1
Shell ID/OD (m), thickness (mm)		0.1942 / 0.2106, 8.2
Heat transfer area (m <sup>2</sup> )		0.57
Shell-side (Sodium)	Flow rate (kg/sec)	0.6762
	Inlet temp. (°C)	510
	Outlet temp. (°C)	324
	Pressure drop (Pa)	50
Tube-side (Sodium)	Flow rate (kg/sec)	0.5653
	Inlet temp. (°C)	254
	Outlet temp. (°C)	474
	Pressure drop (Pa)	445



<그림 1.3-4 STELLA-2 DHX 개략도>

<표 1.3-7 STELLA-2 AHX 설계제원>

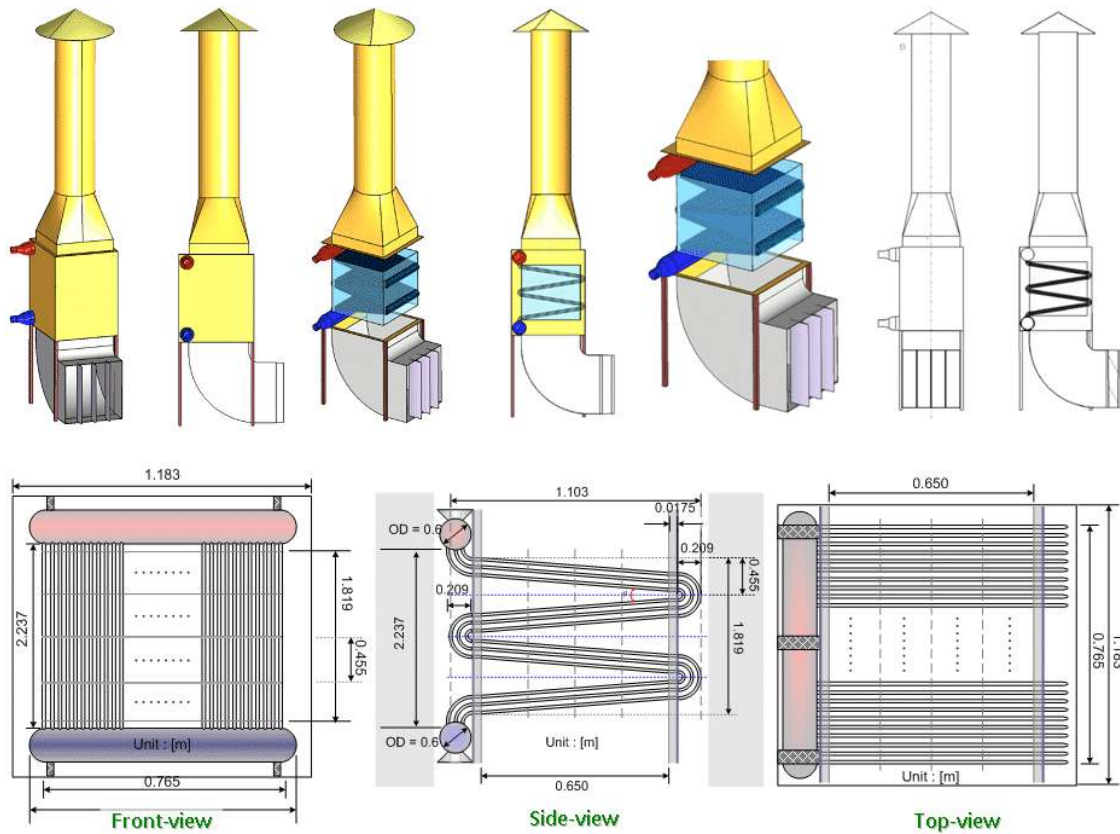
Design parameters		Design value
No. of unit		2
Thermal duty (kWt)		161
No. of tubes		24
Pitch to Dia. ( $P_T/P_L$ )		2.5/1.71
Tube OD/ID (mm)		34.0 / 30.7
Thickness (mm)		1.65
Tube material		STS316
Effective tube length (m)		13.52
Bundle height (m)		2.38
Tube outside fouling (W/m/K)		2841
Shroud ID (m)		1.05
Heat transfer area (m <sup>2</sup> )		34.65
Shell-side (Air)	Flow rate (kg/sec)	0.5492
	Inlet temp. (°C)	40
	Outlet temp. (°C)	335
	Pressure drop (Pa)	19
Tube-side (Sodium)	Flow rate (kg/sec)	0.5653
	Inlet temp. (°C)	474
	Outlet temp. (°C)	254
	Pressure drop (Pa)	11



<그림 1.3-5 STELLA-2 AHX 개략도>

**<표 1.3-8 STELLA-2 FDHX 설계제원>**

Design parameters		Design value
No. of unit		4
Thermal duty (kWt)		161
No. of tubes		24
Tube arrangement with pitch data		4 passes serpentine tubes [P <sub>L</sub> =2.05]&[P <sub>T</sub> =2.5]
Tube material		STS316
Bare tube OD/ID (mm)		34.0 / 30.7
Thickness (mm)		1.65
Finned tube length (Total, m)		2.780
Fin height (mm)		15.0
Fin thickness(width, mm)		1.5
Tube inclined angle (degree)		20.7
No. of fin (per unit length, m)		208
Spacing between Fins (mm)		3.31
Tube outside fouling (W/m/K)		2841
Total heat transfer area including Fin surface (m <sup>2</sup> )		75.41
Total number of Fins per each tube row (ea)		578
Surface area of single Bare tube (m <sup>2</sup> )		3.14
Fin surface area on single tube (m <sup>2</sup> )		2.85
Ratio of Finned surface (AFin/Atot) (-)		0.905
Surface extension ratio (-)		10.580
Overall surface efficiency (-)		0.873
Overall unit size (WxDxH, m)		1.183 x 1.103 x 2.237
Shell-side (Air)		
Flow rate (kg/sec)		0.55
Inlet temp. (°C)		40
Outlet temp. (°C)		335
Pressure drop (Pa)		61
Tube-side (Sodium)		
Flow rate (kg/sec)		0.57
Inlet temp. (°C)		474
Outlet temp. (°C)		254
Pressure drop (Pa)		10



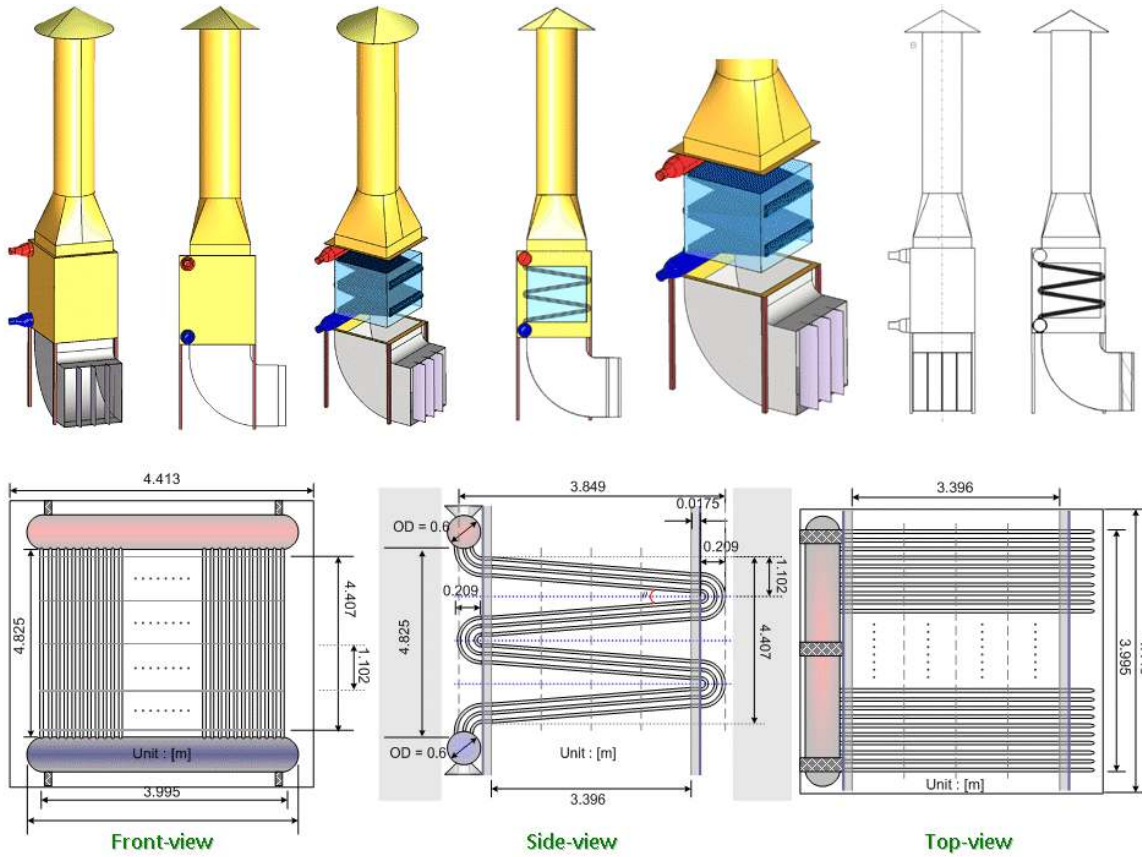
<그림 1.3-6 STELLA-2 FDHX 개략도>

대상원자로의 증기발생기를 모의하기 위한 최종열체거교환기는 기준 설계 없이 모의노심 및 IHTS의 열용량을 고려하여 그 용량을 선정하였으며, 실험장치의 초기조건 및 경계조건을 만들어주기 위해 충분한 용량을 갖도록 핀(Fin)이 부착된 소듐-공기 열교환기 형태로 설계하였다. 본 연구를 통해 생산된 STELLA-2 기본설계 자료는 Scoping 분석의 입력자료로 활용되어 향후 Reduced height scale의 적용 타당성 평가에 활용될 예정이다. STELLA-2 UHX 설계 제원 및 개략도는 각각 표 1.3-9 및 그림 1.3-7과 같다.



**<표 1.3-9 STELLA-2 UHX 설계제원>**

Design parameters		Design value
	No. of unit	2
	Thermal duty (MWt)	9.0
	No. of tubes	138
	Tube arrangement with pitch data	4 passes serpentine tubes [P <sub>L</sub> =2.05]&[P <sub>T</sub> =2.5]
	Tube material	STS316
	Bare tube OD/ID (mm)	34.0 / 30.7
	Thickness (mm)	1.65
	Finned tube length (Total, m)	14.044
	Fin height (mm)	15.0
	Fin thickness(width, mm)	1.5
	Tube inclined angle (degree)	14.7
	No. of fin (per unit length, m)	208
	Spacing between Fins (mm)	3.31
	Tube outside fouling (W/m/K)	2841
	Total heat transfer area including Fin surface (m <sup>2</sup> )	2190.32
	Total number of Fins per each tube row (ea)	2921
	Surface area of single Bare tube (m <sup>2</sup> )	15.87
	Fin surface area on single tube (m <sup>2</sup> )	14.37
	Ratio of Finned surface (AFin/Atot) (-)	0.905
	Surface extension ratio (-)	10.580
	Overall surface efficiency (-)	0.873
	Overall unit aize (WxDxH, m)	4.413 x 3.849 x 4.825
Shell-side (Air)		
	Flow rate (kg/sec)	42.86
	Inlet temp. (°C)	20
	Outlet temp. (°C)	347
	Pressure drop (kPa)	2.473
Tube-side (Sodium)		
	Flow rate (kg/sec)	54.97
	Inlet temp. (°C)	502
	Outlet temp. (°C)	305
	Pressure drop (kPa)	3.734



<그림 1.3-7 STELLA-2 UHX 개략도>

STELLA-2 기본설계와 관련하여, 원자로용기 및 내부구조물 설계 결과는 표 1.3-10~14와 같고, PHTS 및 IHTS 주요 기기 설계 결과는 표 1.3-15~18과 같다. 모의노심을 구성하기 위한 전기 가열봉의 설계는 표 1.3-19와 같고, 제어봉집합체, 반사체집합체, B<sub>4</sub>C 차폐집합체, 노내저장소 (IVS, In-Vessel Storage), 방사선 차폐집합체로 구성되는 비 발열체에 대한 설계결과는 표 1.3-20과 같다.

**<표 1.3-10 원자로 내부구조물 제원>**

Structures	DSFR		STELLA		척도비		Remarks
	Outer dia. (cm)	Thickness (cm)	Outer dia. (cm)	Thickness (cm)	Outer dia.	Thickness	
Reactor head	1250	50	250.0	33.3	(1/5)	(1/1.5)	Time ratio 수
Reactor vessel	1200	5	240.0	3.3	(1/5)	(1/1.5)	Time ratio 수
Containment vessel	1245	2.5	249.0	-	(1/5)	-	
Core	497.4	-	99.5	-	(1/5)	-	
Core support	560(t)	15	112.0	3.0	(1/5)	(1/5)	다차원
	660(b)		132.0		(1/5)		
Inlet plenum	560	10	112.0	2.0	(1/5)	(1/5)	다차원
Core shield	534	5	106.8	1.0	(1/5)	(1/5)	다차원
Flow guide	550	5	110.0	1.0	(1/5)	(1/5)	
Support barrel	560	5	112.0	1.0	(1/5)	(1/5)	다차원
Separation plate	1180	5	236.0	1.0	(1/5)	(1/5)	다차원
Reactor baffle	1180	2.5	236.0	0.5	(1/5)	(1/5)	다차원
Former ring	534	10	106.8	2.0	(1/5)	(1/5)	다차원
Insulation plates	1190	3	238.0	0.6	(1/5)	(1/5)	다차원
Rotating plugs	570	50	114.0	10.0	(1/5)	(1/5)	다차원
	435		87.0		(1/5)		
UIS	328	2.5	65.6	0.5	(1/5)	(1/5)	다차원
		5		1.0		(1/5)	
Inlet pipes	72.6	1.3	14.5	0.26	(1/5)	(1/5)	다차원
Core catcher	360	-	72.0	-	(1/5)	-	
Pump barrels	260(t)	2.5	52.0	0.5	(1/5)	(1/5)	다차원
	280(b)		56.0		(1/5)		

t: top, b: bottom

<표 1.3-11 원자로 내부구조물 고도>

Location	DSFR	STELLA	척도비	Remarks
	Elevation (m)	Elevation (m)	Elevation	
Top Head	0.0	0.00	(1/5)	길이척도
차폐부 하부	1.2	0.24	(1/5)	길이척도
RB top	2.2	0.44	(1/5)	길이척도
고온풀 자유액면	2.5	0.50	(1/5)	길이척도
SB top (=DHX inlet top)	4.7	0.94	(1/5)	길이척도
저온풀 자유액면	6.0	1.20	(1/5)	길이척도
IHX inlet top	6.5	1.30	(1/5)	길이척도
SP-RB 접합부	8.9	1.77	(1/5)	길이척도
Core top	9.9	1.98	(1/5)	길이척도
Pump impeller	10.0	2.00	(1/5)	길이척도
SB-SP 접합부	11.0	2.20	(1/5)	길이척도
Fuel slug top	12.2	2.44	(1/5)	길이척도
펌프 외부원통	13.5	2.70	(1/5)	길이척도
상부판 상단	14.1	2.82	(1/5)	길이척도
하부판 상단	15.2	3.04	(1/5)	길이척도
CSS 지지패드	16.2	3.24	(1/5)	길이척도
RV 외부바닥	17.0	3.40	(1/5)	길이척도

<표 1.3-12 Cross sectional dimension of reactor structure>

Location	DSFR		STELLA		척도비		Remarks
	O.D. (m)	Thickness (m)	O.D. (m)	Thickness (m)	O.D.	Thickness	
Reactor core (RC)	4.97	-	0.99	-	(1/5)	-	
Core shield (CS)	5.34	0.050	1.07	0.01	(1/5)	(1/5)	다차원
Flow guide (FG)	5.50	0.050	1.10	0.01	(1/5)	(1/5)	다차원
Support barrel (SB)	5.60	0.050	1.12	0.01	(1/5)	(1/5)	다차원
Reactor baffle (RB)	11.80	0.025	2.36	0.005	(1/5)	(1/5)	다차원
Reactor vessel (RV)	12.00	0.050	2.40	0.01	(1/5)	(1/5)	다차원
Containment vessel (CV)	12.45	0.025	-	-	-	-	
Air separator (AS)	13.05	0.100	-	-	-	-	
Reactor support wall (SW)	16.65	1.200	-	-	-	-	

**<표 1.3-13 Elevation and regional volume in reactor vessel>**

No.		DSFR		STELLA		척도비		Remarks
Elevation No.	Volume No.	Elevation (m)	Volume (m <sup>3</sup> )	Elevation (m)	Volume (m <sup>3</sup> )	Elevation	Volume	
E0	V1	17.00	81.570	3.40	0.65	(1/5)	(1/125)	
E0-1	V2	16.50	22.350	3.30	0.18	(1/5)	(1/125)	
E1	V3-1	15.80	82.670	3.16	0.66	(1/5)	(1/125)	
E2	V3-2	14.80	50.950	2.96	0.41	(1/5)	(1/125)	
E3	V4	14.50	43.990	2.90	0.35	(1/5)	(1/125)	
E4	V5-1	12.38	3.930	2.48	0.03	(1/5)	(1/125)	
E4-1	V5-2	10.81	2.630	2.16	0.02	(1/5)	(1/125)	
E4-2	V5-3	10.56	4.620	2.11	0.04	(1/5)	(1/125)	
E5	V6	10.50	168.020	2.10	1.34	(1/5)	(1/125)	
E6	V7	9.81	62.570	1.96	0.50	(1/5)	(1/125)	
E7	V8-1	12.30	6.870	2.46	0.05	(1/5)	(1/125)	
E7-1	V8-2	12.05	15.390	2.41	0.12	(1/5)	(1/125)	
E8	V8-3	11.00	108.920	2.20	0.87	(1/5)	(1/125)	
E9	V9-1	8.15	13.750	1.63	0.11	(1/5)	(1/125)	
E9-1	V9	8.10	68.200	1.62	0.55	(1/5)	(1/125)	
E9-2	V10	7.40	13.750	1.48	0.11	(1/5)	(1/125)	
E10	V11	7.10	173.120	1.42	1.38	(1/5)	(1/125)	
E11	V12	6.00	23.580	1.20	0.19	(1/5)	(1/125)	
E12	V13	2.90	126.030	0.58	1.01	(1/5)	(1/125)	
E13	V14	1.80	35.320	0.36	0.28	(1/5)	(1/125)	
E14	V15	3.00	103.480	0.60	0.83	(1/5)	(1/125)	
E15	V16	0.80	7.070	0.16	0.06	(1/5)	(1/125)	
E16	V17	0.00	48.590	0.00	0.39	(1/5)	(1/125)	
E17	V18-1	-0.25	109.750	-0.05	0.88	(1/5)	(1/125)	
E18	V18-2	4.98	124.840	1.00	1.00	(1/5)	(1/125)	
E19	V18-3	4.83	7.570	0.97	0.06	(1/5)	(1/125)	
E20	V19	3.50	2.430	0.70	0.02	(1/5)	(1/125)	
E21	V_cold	7.00	539.470	1.40	4.32	(1/5)	(1/125)	
	V_hot	5.60	570.450	1.12	4.56	(1/5)	(1/125)	
	V_avg		106.560		0.85		(1/125)	
	V_sodium		1216.470		9.73		(1/125)	
	V_rv		1373.160		10.99		(1/125)	

<표 1.3-14 상부내부구조물 (UIS)>

Structure	DSFR			STELLA			척도비			Remarks
	O.D.(m)	Thick.(m)	Length (m)	O.D.(m)	Thick.(m)	Length (m)	Dia. (outer)	Thick.	Length	
Insulation plates	-	0.030	-	-	0.006	-	-	(1/5)	-	다차원
Upper cylinder	3.28	0.025	4.400	0.66	0.005	0.880	(1/5)	(1.5)	(1/5)	다차원
Support plate	3.28	0.001	-	0.66	0.0002	-	(1/5)	-	-	다차원
Intermediate cylinder	2.02	0.050	4.000	0.40	0.01	0.800	(1/5)	(1/5)	(1/5)	다차원
Lower cylinder plate	3.10	0.075 (upper) 0.025 (lower)	-	0.62	0.015 (upper) 0.005 (lower)	-	(1/5)	(1/5)	-	다차원
Lower cylinder	3.28	0.025	0.700	0.66	0.005	0.140	(1/5)	(1/5)	(1/5)	다차원
Control rod shroud tube	0.20	0.005	-	0.04	0.001	-	(1/5)	(1/5)	-	다차원
Lower CR shroud tube	0.20	0.005	0.300	0.04	0.001	0.060	(1/5)	(1/5)	(1/5)	다차원

<표 1.3-15 PHTS 주요 설계인자>

설계인자	DSFR	STELLA	척도비	Remarks
노심 열출력 (MWt)	1548.2	27.7	(1/55.9)	
노심 입구온도 (°C)	510.0	510.0	(1/1)	
노심 출구온도 (°C)	365.0	365.0	(1/1)	
PHTS 순환유량 (kg/sec)	8366.1	149.7	(1/55.9)	
IHX shell-side 입구온도 (°C)	509.8	509.8	(1/1)	
IHX shell-side 출구온도 (°C)	365.0	365.0	(1/1)	
IHX tube-side 입구온도 (°C)	305.4	305.4	(1/1)	
IHX tube-side 출구온도 (°C)	503.1	503.1	(1/1)	
PHTS 기계식 펌프 개수	2.0	2.0	(1/1)	
IHX 개수	4.0	4.0	(1/1)	
IHTS 루프 개수	2.0	2.0	(1/1)	
IHTS 총 유량 (kg/sec)	6146.0	109.9	(1/55.9)	

<표 1.3-16 PHTS 펌프 주요 설계인자>

설계인자	DSFR	STELLA	척도비	Remarks
펌프의 종류	기계식 원심펌프	기계식 원심펌프	-	
유량 (m <sup>3</sup> /sec)	290.3	5.19	(1/55.9)	
유체 입구 및 출구온도 (°C)	365	365.00	(1/1)	
실양정 (MPa)	0.44	0.09	(1/5)	
전양정 (MPa)	0.53	0.11	(1/5)	
회전수 (rpm)	433	968.22	(1/0.45)	
비속도	330	330.00	(1/1)	
수동력 (MW)	2.58	0.009	(1/279.5)	
펌프 효율 (%)	80	80.00	(1/1)	
축동력 (MW)	3.08	0.011	(1/279.5)	
전동기의 출력 (MW)	3.7	0.013	(1/279.5)	
회전차 보스지름 (m)	0.47	0.09	(1/5)	
회전차 축지름 (m)	0.26	0.05	(1/5)	
회전차 안지름 (m)	1.18	0.24	(1/5)	
회전차 바깥지름 (m)	1.69	0.34	(1/5)	
회전차 원주속도 (m/s)	38.36	85.78	(1/0.45)	
회전차 잇의 수	7	7.00	(1/1)	
Required NPSH	11.31	2.26	(1/5)	
Available NPSH	14.7	2.94	(1/5)	
송출관의 바깥지름 (m)	1.92	0.38	(1/5)	
흡입관의 바깥지름 (m)	2.26	0.45	(1/5)	
펌프 수직길이 (m)	15	3.00	(1/5)	

<표 1.3-17 IHTS 주요 설계인자>

설계인자	DSFR	STELLA	척도비	Remarks
IHTS 형식	Loop type	Loop type	-	
IHTS 루프 개수	2	2.0	(1/1)	
IHTS 루프당 IHX/SG 개수	(2/1)	(2/1)	(1/1)	
총 전열량 (MWt)	1549.1	27.7	(1/55.9)	유량척도
유량 (2 루프 전체)	6146	109.9	(1/55.9)	
IHX 입구온도 (°C)	305.4	305.4	(1/1)	
IHX 출구온도 (°C)	502	502.0	(1/1)	
SG 입구온도 (°C)	502	502.0	(1/1)	
SG 출구온도 (°C)	305	305.0	(1/1)	
IHTS ΔT (°C)	197	197.0	(1/1)	
IHTS 펌프 developing head (MPa)	0.35	0.07	(1/5)	
IHTS 고온관 직경 (OD) (m)	0.6	0.12	(1/5)	
IHTS 저온관 직경 (OD) (m)	0.82	0.16	(1/5)	

**<표 1.3-18 IHTS 펌프 주요 설계인자>**

설계인자	DSFR	STELLA	척도비	Remarks
펌프의 종류	기계식 원심펌프	기계식 원심펌프	-	
유량 (m <sup>3</sup> /sec)	209.81	3.75	(1/55.9)	
유체 입구 및 출구온도 (°C)	305	305.00	(1/1)	
실양정 (MPa)	0.26	0.05	(1/5)	
전양정 (MPa)	0.31	0.06	(1/5)	
회전수 (rpm)	433	968.22	(1/0.45)	
비속도	425	425.00	(1/1)	
수동력 (MW)	1.09	0.004	(1/279.5)	
펌프 효율 (%)	80	80.00	(1/1)	
축동력 (MW)	1.31	0.005	(1/279.5)	
전동기의 출력 (MW)	1.57	0.006	(1/279.5)	
회전차 보스지름 (m)	0.35	0.07	(1/5)	
회전차 축지름 (m)	0.2	0.04	(1/5)	
회전차 안지름 (m)	1.05	0.21	(1/5)	
회전차 바깥지름 (m)	1.34	0.27	(1/5)	
회전차 원주속도 (m/s)	30.37	67.91	(1/0.45)	
회전차 깃의 수	6	6.00	(1/1)	
Required NPSH	9.11	1.82	(1/5)	
Available NPSH	13.66	2.73	(1/5)	
송출관의 바깥지름 (m)	1.62	0.32	(1/5)	
흡입관의 바깥지름 (m)	1.97	0.39	(1/5)	



<표 1.3-19 모의노심 전열봉 설계>

	원형	모델	척도비
재질	우라늄	SS316 등	
		실제 전열기	
봉 직경	7.4mm	2.86mm	$d_{rod,R} = \alpha_{s,R}^{1/2} l_{0,R}^{1/4} (\approx 1/2.59)$
		2.30mm	
봉 피치	8.9mm	4.0mm	$(2\sqrt{3}p^2 - \pi d_{rod}^2)_R = D_{H,R} d_{rod,R}$
		3.5mm	
어셈블리 수	151+174+72...	151+174+72...	동일
어셈블리 내부 봉 수	271 (18, 17, 16, ..., 10)	19 (5,4,3) ( $m=3.62375$ )	$\left[ \frac{3\sqrt{3}}{2}(mp)^2 - \left\{ (3m^2 - 3m + 1) \frac{\pi}{4} d_{rod}^2 \right\} \right]_R$ $= l_{0,R}^2 = 1/25$ $n_{rod/ass} = 3m^2 - 3m + 1$
		37 (7,6,5,4) ( $m=4.01385$ )	
노심 출력	108.4MWth**	1208kW***	$\dot{q}_{s,R} = a_{s,R} h_R (T_s - T_f)_R$ $= (n_{ass,R} n_{rod/ass,R} d_{rod,R} l_{0,R}) (1/D_{H,R}) (1) \quad (***)$
		1140kW***	
<p>* 원래는 94개가 가장 근사치이지만 배치를 위해서는 91개가 됨.                  ** 정상 출력의 7%임.                  *** 이 출력은 정수가 아닌 m값으로부터 도출된 값임.</p>			

<표 1.3-20 모의 노심 비발열부 구성>

구성	봉 직경 (mm)	봉 수 (개)	Assembly 처리
Control Rod	25	1/ Assembly	Assembly 수 보존
Reflector	12	395 (총 갯수임)	Assembly 들을 환형으로 서로 연결
B <sub>4</sub> CShield	25	105 (총 갯수임)	Assembly는 서로 연결
IVS	-	-	육각형 Assembly 각 변의 길이를 1/5로 축소하여 19mm로 제작
Radiation Shield	36	124 (총 갯수임)	Assembly는 서로 연결

## 제 2 절 기반기술 검증 : 소듐기술 개발

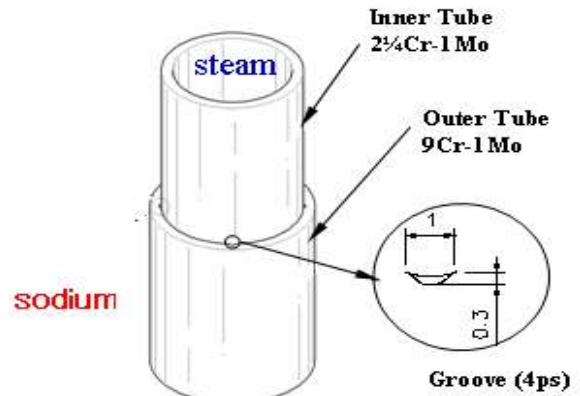
### 1. SG 신뢰성 향상기술 개발

#### 가. 이중벽 전열관 특성실험

##### (1) 이중벽 전열관 열전달 모델 개발 및 특성 측정장치 설계 및 제작

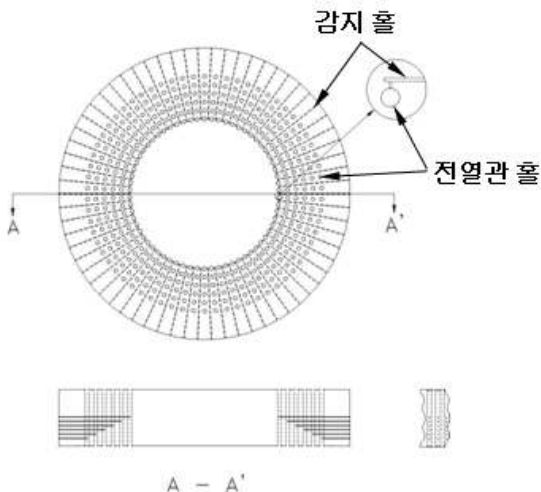
1950년 EBR-I부터 2005년 JSFR 증기발생기까지 DWTSG 기술 변천과정과 문제점을 분석하여 개발방향을 설정하였고, 개발계획을 수립하였다[2.1-1]. DWTSG 개발에서의 현안은 이중벽 전열관(이중벽관: double wall tube)의 내관과 외관 사이에 gap이 있으므로 인해 발생하는 열전달성능 저하를 극복하는 문제와 소듐-물 반응이 일어나기 전 내관 또는 외관의 파손을 감지하는 on-line 누출감지기술을 개발하는 것이다.

또한 직관형 이중벽관인 경우, 전열관다발과 셸 사이의 열팽창 차이와 전열관다발 내에서 전열관 간의 열팽창 차이를 극복하는 것이 기술적 현안이다. 열전달성능 향상을 위해 내관과 외관을 서로 다른 재질로 설계한 신개념 이중벽관(그림 2.1-1)과 하부 튜브시트에서 개별 전열관의 파손을 소듐-물 반응이 일어나기 전에 on-line으로 감지할 수 있는 파손감지 방법(그림 2.1-2)을 도출하였다. 또한 헬리컬 증기발생기를 채용하여 재질의 열팽창 문제를 극복하였다.

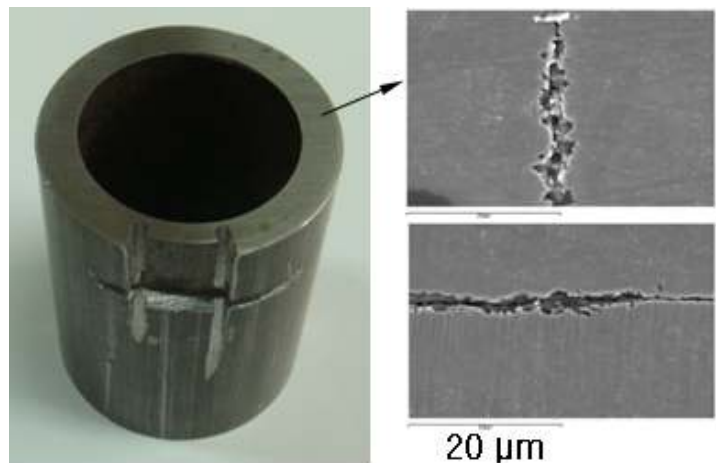


<그림 2.1-1 신개념 DWTS>

이중벽관의 모형(그림 2.1-3)을 제작하였으며, Gap에서의 압력변동으로 전열관의 파손을 감지하는 신개념 on-line 누출감지기술의 타당성을 평가하고, 파손 시 감지하는데 필요한 지연시간을 예측할 수 있는 기초자료를 생산하기 위해, 상온 누출감지특성 측정용 시험시편을 제작하고 실험장치를 설계하였다.



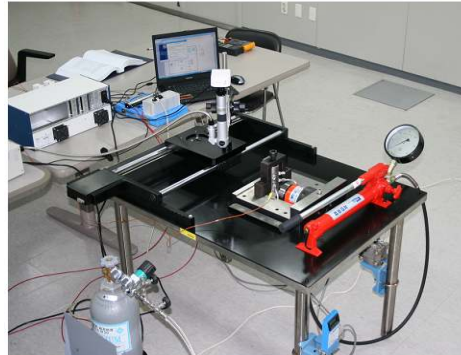
<그림 2.1-2 누출감지 개념>



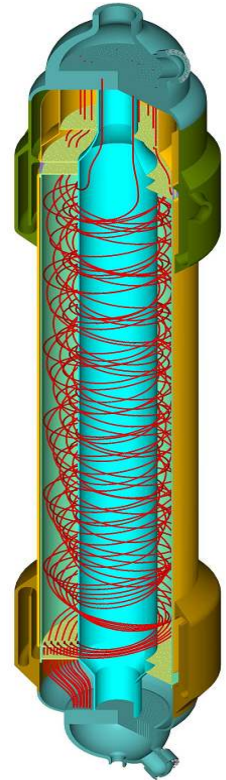
<그림 2.1-3 이중벽관 제작>

## (2) 이중벽 전열관 특성 측정장치 설치

누출감지특성 측정용 실험장치 (그림 2.1-4)를 설치하여 실험을 수행하였다. 이 장치에서는 맞붙은 두 평면 사이에 헬륨가스를 주입하여 헬륨가스의 주입량과 두 평면 사이를 통과하면서 발생하는 압력손실을 측정하였다. 측정변수는 평면의 표면 조도와 두 평면을 접촉시키는 접촉 압력이었다.



<그림 2.1-4 누출특성 측정장치>



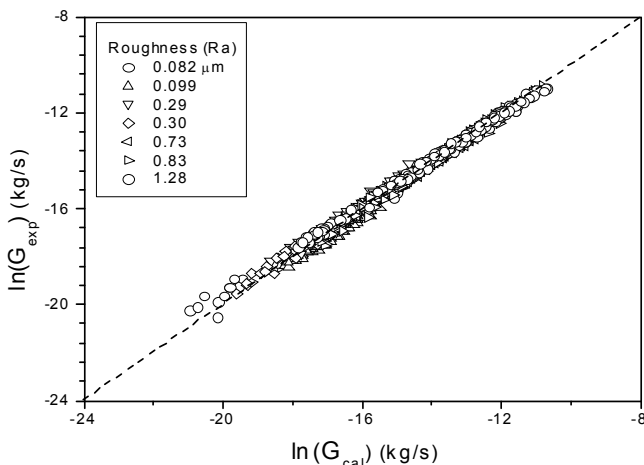
<그림 2.1-5 3차원 형상>

위에서 기술한 신개념 이외에 다수의 신개념(청구항목 20개)을 도입하여 4개국에 특허 출원하였다. 상기 기술을 구현시키는 375MW 용량 헬리컬형 DWTSG 개념을 개발하여 3차원 설계도를 상세제도하였다(그림 2.1-5). 이 증기발생기에서는 운전 중 전열관의 파손검지가 on-line으로 가능하며, 타 DWTSG에 비해 열전달 성능이 높다.

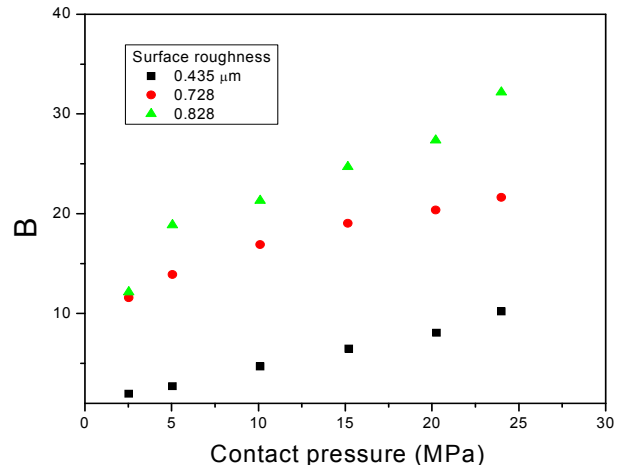
또한 이 증기발생기에서 초과설계기준사고에 해당하는 소듐-물 반응사고 시에 압력상승을 완화시키는 기능과 소듐 자유액면의 요동으로 인한 전열관의 열피로를 완화시키는 기능을 갖고 있다.

## (3) 이중벽 전열관 열전달 및 기계적 특성 분석자료 생산, 평가

누설특성 측정장치에서 925세트의 실험자료를 생산하여 파손시 누설량을 예측할 수 있는 실험식(그림 2.1-6)을 개발하였고, 실험결과 분석보고서[2.1-2]를 작성하였다. 그림 2.1-7은 접촉압력에 따른 누설특성의 실제 예를 보여주고 있다. 상온 누출감지 실험결과에 의하면 홈(groove)이 있는 이중벽관에서는 gap 사이로 계측에 필요한 충분한 양의 헬륨가스가 통과하므로 상기 누출감지 방법은 타당성이 있음을 확인하였다.



<그림 2.1-6 누설량 비교>



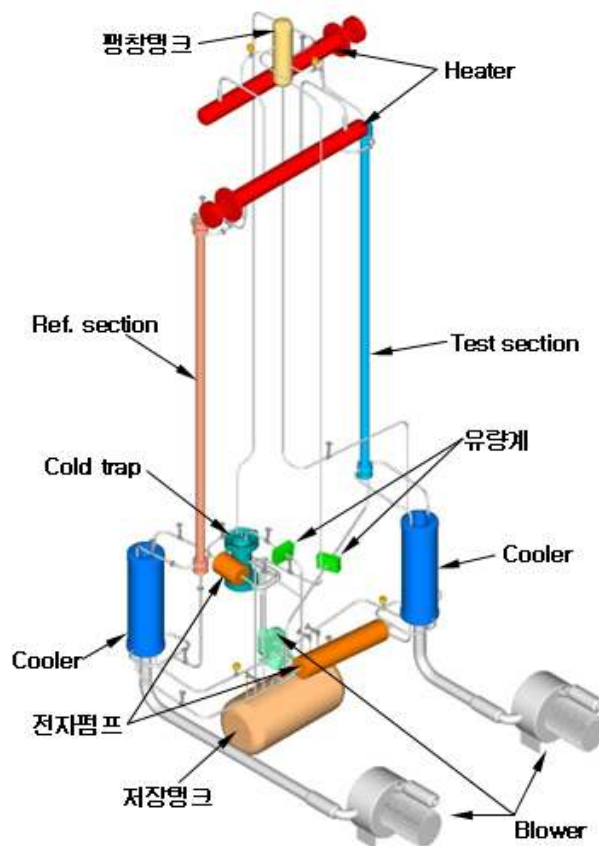
<그림 2.1-7 접촉압력 영향>

이중벽 전열관 제작기술은 제작경험이 축적된 일본에서조차 JAEA 내 극소수 전문가에게만 접근이 허용되는 금수 품목 기술이므로 국내 제작이 필수적이다. 국내 제관인발업체와 공동으로 여러 종류의 시험과 기술논의를 통하여 gap 특성과 내/외관 재질을 달리한 3종의 이중벽관을 설계, 제작하였다. 이 이중벽관들을 사용한 실험으로 신개념 이중벽관의 열수력적 특성을 비교, 분석하여 그 타당성 평가하고자 한다.

제작한 이중벽 전열관은 내경 24mm, 외경 30mm, 두께가 각 4mm, 길이 6m 이다. 누설감지를 위한 홈의 형태는 외관 내부에 길이방향으로 높이 0.3mm, 폭 1mm이다.

제작한 이중벽관은 내경 24mm, 외경 30mm, 내관과 외관의 두께는 각 2mm, 길이 6m 이다. 누설감지를 위한 홈의 형태는 외관 내부에 길이방향으로 높이 0.3mm, 폭 1mm이다. 제작한 이중벽관은 하나로 원자로에서 중성자 회절법으로 이중벽관의 중요한 특성인 gap에서의 잔류응력을 측정하였다. 측정결과 내관은 압축성 응력이 외관에는 장력성 응력이 생성되었다.

이중벽관 내·외관의 경계인 gap에서의 열유동 특성을 측정하기 위하여, 소듐/소듐 열교환기 형태의 시험부를 갖는 실험장치를 상세 설계하였다. 이 장치는 150kW 열용량인 두개의 loop로 구성되고, 질량유속은 1.2kg/sec이다. 실험장치에 설치할 8종의 부품과 배관도를 상세설계 하였고, 3D 배관도는 그림 2.1-8과 같고 규격은 4.6×5.4m 면적에 높이가 11m이다.



<그림 2.1-8 검증장치 배관도>

## 나. SWR 조기 감지설비 설계 및 제작

### (1) 소듐-물 반응음 생산 및 능동형 감지방법 개발

#### (가) 소듐-물 반응음 생산

소듐-물 반응음 생산은 피동형 감지논리를 개발하고 이후에 조기 물 누출 감지설비 시제품 개발에 활용하기 위함이다. 소듐-물 누출 반응음 생산은 300°C의 소듐 속으로 스팀(0.379g/초)을 평균 구멍지름이 0.2mm의 노즐을 통해 주입하여 음향신호를 측정하였다. 스팀 공급압력을 125kg/cm<sup>2</sup> 까지 제어하여 총 10종의 KAERI 소듐-물 반응음을 생산하고, 피동형 음향누출 감지논리를 장착한 시제품의 감지 틀의 성능 시험에 활용하였다.

#### (나) 능동형 감지방법 개발

능동형 음향감지방법은 매질 속에 기포가 존재하면 방출된 초음파가 기포에 의해서 음향감쇠가 일어나는 것을 측정하여 기포층의 존재 유무 등을 확인할 수 있는 방법이다.

소규모 누출 시 수소 기포의 크기는 주로 2mm 크기이며, 4~6mm가 일부 있다. 다른 결과에서는 2mm이하 혹은 훨씬 작은 크기의 수소 기포가 존재한다고 보고되었다[2.1-3].

그림 2.1-9는 능동형 음향감지 실험장치에서 중규모 수준의 누출이 발생할 경우 기포가 하부 즉, 증기발생기 소듐 출구 측으로 이동하는 것을 확인한 실험장면이다. 기포 거동 특성을 보면 대부분 상부에서 하부로 흘러가는 것을 확인할 수 있고, 이를 고려하여 보상형 음향누출감지 기법을 제안하였다[2.1-4].



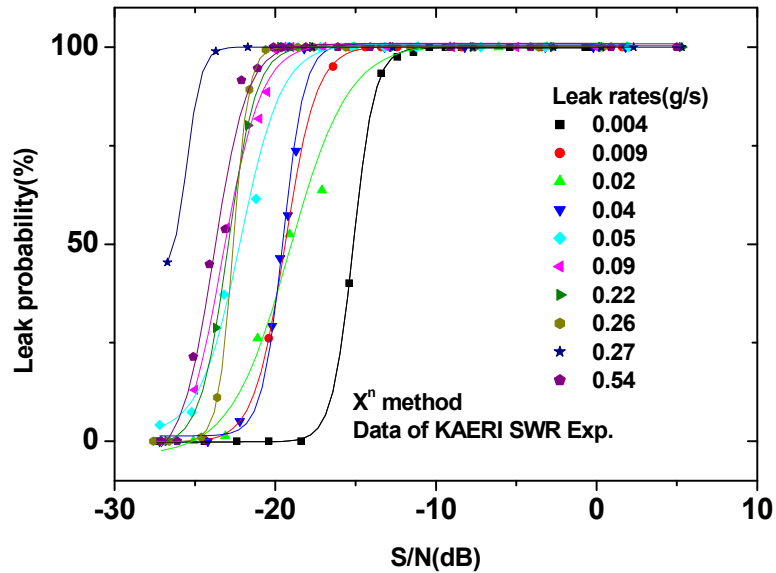
<그림 2.1-9 능동형 음향감지 실험장치와 기포거동특성>

### (2) SWR 피동형 음향감지논리 성능평가 및 최적화

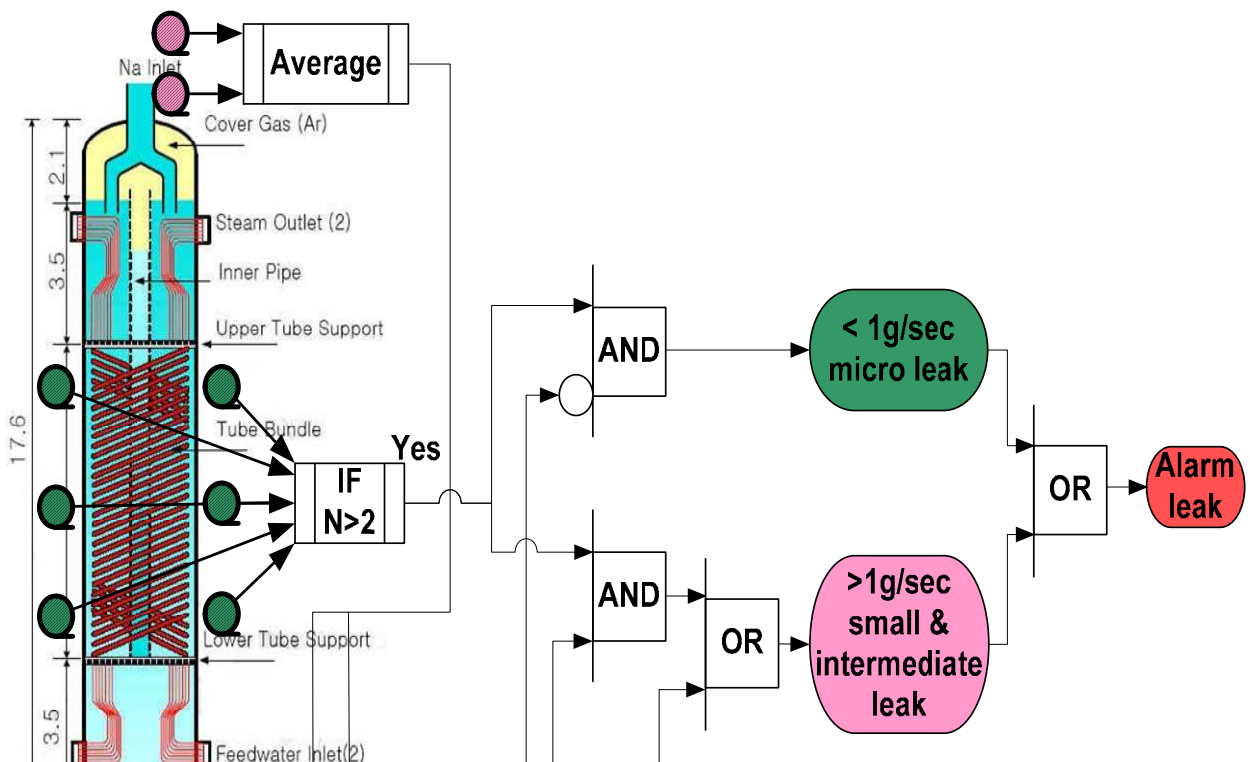
그림 2.1-10은 KAERI에서 생산된 소듐-물 반응음을 PFR SUPER-HEATER 배경소음을 혼합하여 생산한 170개의 분석자료를 이용하여 피동형 음향감지논리의 성능을 재평가한 결과로써, 0.1g/sec 누출량도 S/N=1/100 (-20dB)에서 감지 성능이 우수함을 나타내었다.

개발된 음향감지논리는 0.5g/sec의 소듐-물 반응을 S/N:-25~-27dB에서도 감지함을 보여

주었고, 0.1g/sec의 소듐-물 반응 누출음의 경우 S/N:-20dB에서도 감지가 가능함을 보여주었다. 한편, 음향누출감지방법의 최적화를 위해서, 증기발생기의 소듐 입, 출구에 초음파 센서를 설치하는 새로운 능동형 음향감지 논리를 개발 시험하였다. 또한 개발된 피동형 음향감지논리와 합하여 혼합형 감지논리를 그림 2.1-11과 같이 구성하였고 이를 시제품 개발에 적용하였다.



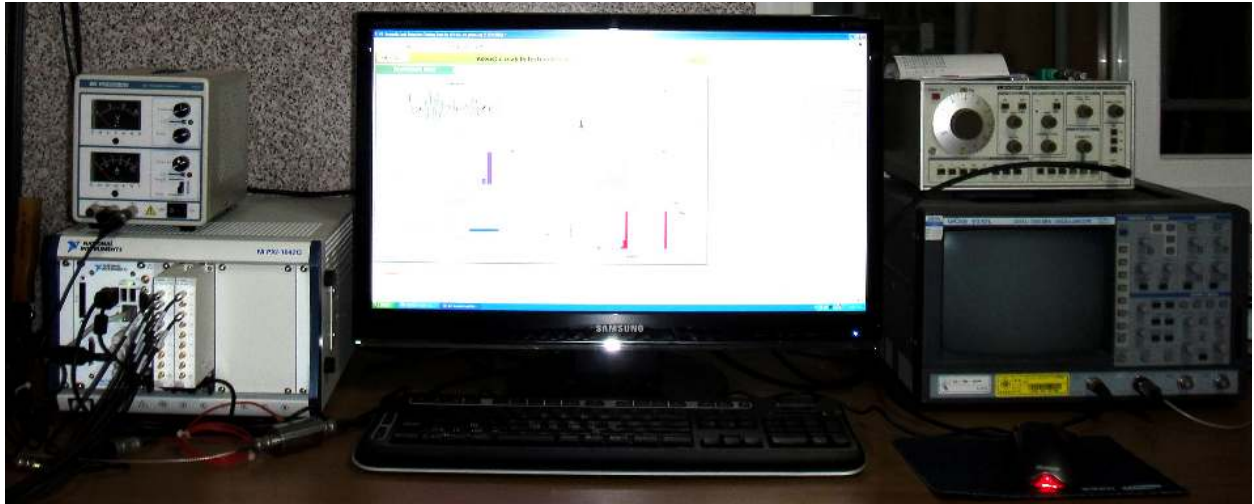
<그림 2.1-10 음향감지 논리 성능평가 결과>



<그림 2.1-11 혼합형 음향누출 감지논리>

### (3) SWR 조기 감지설비 시제품 제작

그림 2.1-12와 같이 제작된 시제품 하드웨어는 DAS 8채널, 3Msamples/sec/channel, simultaneous sampling, LabVIEW, PXI system, 19인치 rack 설치 형으로 구성되었으며, 시제품은 앞서 개발된 피동형 음향감지논리에 2층 구조의 neural network를 응용하며, 학습기능과 측정/감지 기능이 제작되었고, 그림 2.1-13과 같이 피동형과 능동형이 혼합된 혼합형 음향감지논리가 적용되었다.

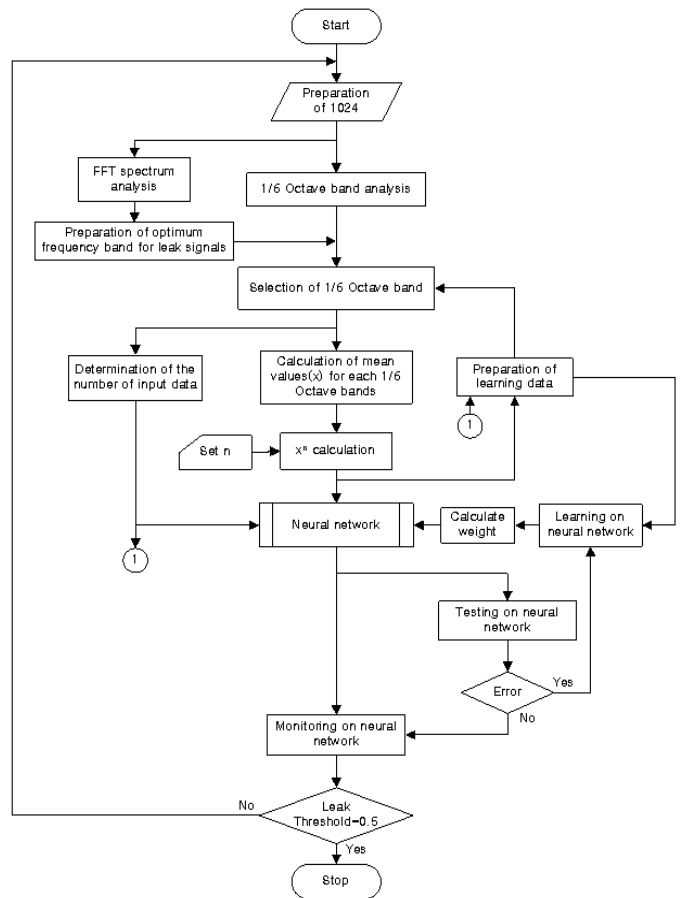


<그림 2.1-12 시제품>

그림 2.1-14는 한국원자력연구원 소듐-물 반응 실험자료와 PFR 증기발생기 계통의 배경소음(background noise)을 가지고 시제품을 시험한 결과이다. 실험실 내에서 발생하는 실험장치 배경소음을 추가적인 학습자료로 활용하였다. 그 결과 0.1 g/sec 누출 신호음도 S/N: -20dB에서 감지 성능을 나타낼 수 있었다.

소듐-물 반응(SWR)에 의한 물 누출 감지논리와 누출감지용 튄을 보완하였고, On-line 누출감지 튄을 개발하여 SWR 실험장치에서 성능검증 시험을 수행하였다.

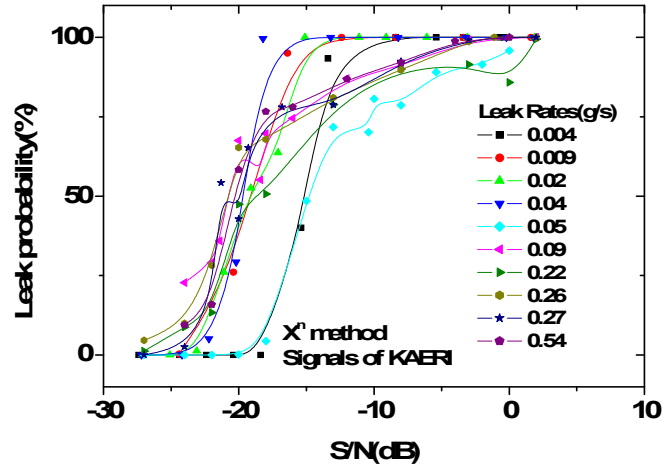
보완한 감지논리 및 튄로 PFR(영국) S/H의 배경소음과 IPPE(러시아) 소듐-물 반응음을 사용한 시험에서는 학습방법에 따라 차이가 있으나 -27dB까지 100% 감지할 수 있었다. 세계적인 기술개발 수준은 실험규모에



<그림 2.1-13 피동형 음향감지논리>

서는 -16dB~-22dB 정도이다. 본 연구에서 개발된 on-line 감지 틀의 성능도 S/N=1/100 (-20dB) 수준의 감지 성능을 가지고 있음을 확인하였다.

시제품을 제작하여 앞서 KAERI에서 생산한 소듐-물 반응음, PFR SUPER-HEATER 배경소음, 실험실 배경소음을 모두 활용하여 시제품의 음향감지 논리의 성능시험 결과, 예전과 유사하게 0.1g/sec를 S/N: -20dB에서 감지성능을 나타내었다. 개발된 기술은 방호계통설계의 기초 자료로 활용된다.



<그림 2.1-14 시제품의 성능시험 결과>

## 다. SG 배경소음 측정

### (1) 국외 SG 배경소음 측정장치 구축

국외에서 배경소음을 측정하기 위한 음향신호 측정장치 및 분석 기능을 갖춘 음향누출감지 장치 구축하였다. 실험장치는 지름 300mm x 높이 2000mm 용기에 지름 5mm x 길이 500mm 인 waveguide 및 음향 센서 DECI SE1000-HI 1개를 설치하였다. 그림 2.1-15와 같이 증기발생기 배경소음 측정장치는 Pentium PC, Windows XP, LabVIEW 환경으로 구축하였다.



<그림 2.1-15 배경소음 측정장치>

### (2) 국외 SG 배경소음 확보

당초 국제 협력을 통해 Monju SG에서 배경소음을 얻고자 하였으나 현실적으로 어려움이 많아 영국 PFR 증기발생기 계통의 super-heater 배경소음 및 IPPE 소듐-물 반응에 의한 누출음을 확보하여 음향감지 논리의 성능 시험에 활용하였다. 시제품의 성능을 시험하기 위하여 PFR 증기발생기 계통의 super-heater의 배경소음과 IPPE의 SWR의 누출음을 혼합하여 S/N=1/100(-20dB) 까지 KAERI의 감지논리의 성능 시험을 수행하였다.

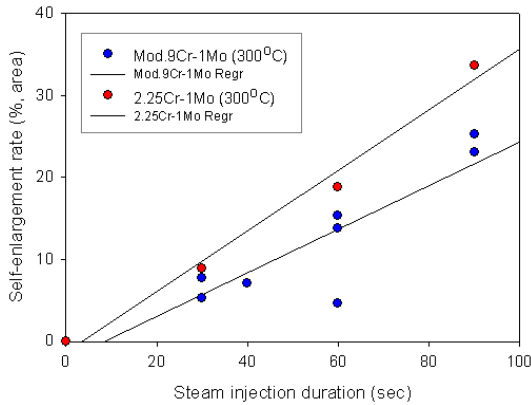


라. 전열관 wastage 특성 실험 및 SWR 해석모델 개발

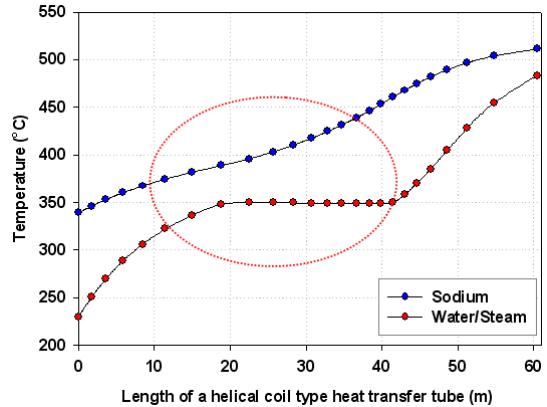
(1) 전열관 wastage 특성 실험 및 SWR 해석모델 검증장치 설계

(가) 전열관 후보재료의 self-wastage 특성 실험

소듐냉각고속로 증기발생기 전열관 재료로 사용 중인 2.25Cr-1Mo강과 mod.9Cr-1Mo 강의 소듐-물 반응에 대한 self-wastage 특성 비교실험을 수행한 결과, mod.9Cr-1Mo 강의 내식성이 그림 2.1-16에서 볼 수 있는 것과 같이 약 1.4배 이상 우수함을 확인하였다.



<그림 2.1-16 Self-wastage 특성>



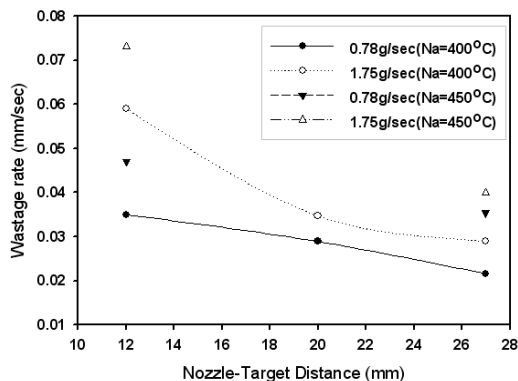
<그림 2.1-17 KALIMER SG 운전조건>

(나) Mod.9Cr-1Mo 강의 single-target wastage 특성 실험

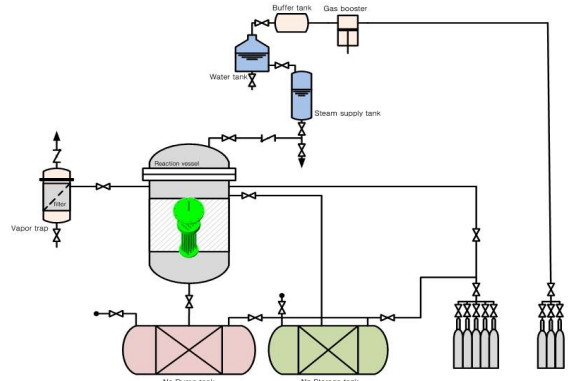
기계적 특성과 함께 내식성이 좋은 것으로 확인된 mod.9Cr-1Mo 강에 대해 그림 2.1-17과 같은 KALIMER-600 증기발생기 운전조건에서의 단일표적 wastage 특성 실험을 수행하였다.

실험에 사용된 전열관 재질 및 규격은 KALIMER-600 증기발생기 전열관 설계사양과 동일하며, 길이방향 크기만 축소 제작하여 사용하였다.

실험결과 소듐 온도, 전열관 사이 거리가 wastage rate에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 확인된 반면, 전열관 두께와 크기, 형태(단일벽/이중벽) 등은 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다(그림 2.1-18). 다만 누출되는 스팀 양의 영향은 전열관 사이의 거리에 따라 상호 다르게 나타났는데, 이는 wastage 형성에 가장 큰 영향을 미치는 반응 flame jet의 길이가 누출 구경의 크기와 누출되는 압력에 따라 다르기 때문인 것으로 판단된다.



<그림 2.1-18 Wastage 특성>



<그림 2.1-19 해석모델 검증장치 개념>

### (다) SWR 해석모델 검증장치 설계

초기 미량 누출로 인해 소듐-물 반응이 시작된 후 시간이 지남에 따라 점차 누출이 확대되어 대규모 누출 사고로 확대 전과되는 과정을 종합적으로 해석할 수 있는 모델을 개발하고 이를 검증하기 위한 실험장치를 그림 2.1-19와 같이 설계하였다. 장치는 크게 소듐-물 반응 실험을 수행하는 반응기, 스팀을 공급하는 스팀생성기와 압축기, 그리고 반응기에 소듐을 공급하는 소듐 저장탱크 및 실험이 끝난 사용 후 소듐을 보관하는 덤프탱크와 데이터 수집 장치 등으로 구성된다.

#### (2) Wastage 모델 개발 및 SWR 해석모델 검증 장치 제작

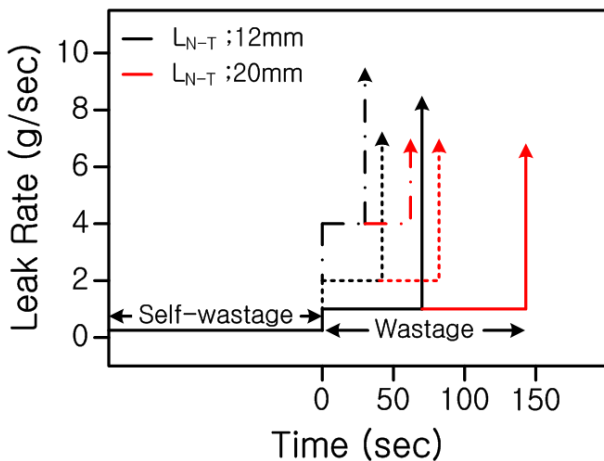
보다 정확한 결과 해석을 위해 single-target wastage 현상에 대한 보완실험을 수행하였으며, 실험결과들을 종합해서 소듐온도 400~450°C, 스팀온도 350°C 조건에서 소규모 누출에 따른 전열관 wastage rate를 예측할 수 있는 실험식을 아래와 같이 개발하였다. 또한 해석모델 검증장치에 들어가는 각종 component들을 설계 기준에 맞춰 모두 제작하였다.

$$W_R = \left(\frac{T_{Na}}{400}\right)^{2.5} \left[0.001869 \left(\frac{Q_{steam}}{1.75}\right)^{1.1} (34 - L_{N-T}) + 0.018\right]$$

#### (3) SWR 해석모델 개발 및 검증장치 설치, 시운전

종합적인 SWR 사고 해석모델을 개발하기 위한 첫 단계로 소규모 누출에 의해 전열관의 손상이 확대되는 시간에 대한 기본모형을 그림 2.1-20과 같이 정립하였다. 보다 정확한 해석모델을 개발하기 위해서는 다양한 조건에서 수행된 보다 많은 실험자료들이 필요하나, 내외적으로 생산된 자료가 적고 이 역시 극히 제한적이어서 연구수행에 많은 어려움이 있다.

차기 단계 연구에 사용될 검증장치를 그림 2.1-21과 같이 설치한 후 기밀, 공탑 시험을 거쳐 전 계통에 대한 시운전을 성공적으로 수행하였으며, 실험에 사용될 소듐을 저장탱크에 약 1.1톤 정도 충전하였다. 더불어 소듐-물 반응 생성물인 수소가스의 누출로 인한 2차적인 위험을 예방하기 위해 반응기 상부에 수소감지기를 설치하였다.



<그림 2.1-20 사고 확대 시간 모형>



<그림 2.1-21 해석모델 검증장치>

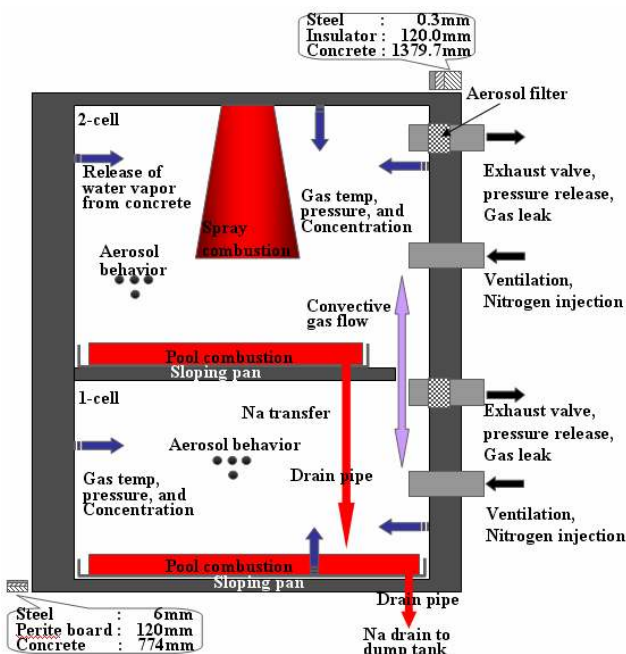
## 2. 소듐 안전관리기술 개발

### 가. 소듐 화재확산방지 구조물 개발 및 성능실험

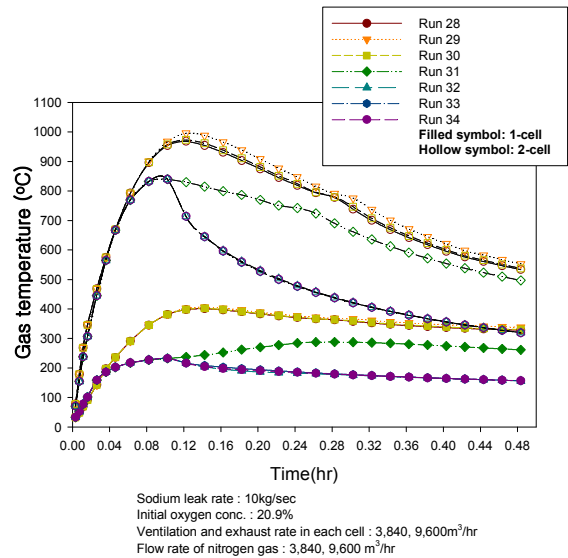
#### (1) 소듐 화재확산방지기념 설정 및 소듐화재 연소모델 개발

##### (가) 소듐 화재확산방지기념 파라미터 타당성 평가

소듐 화재영향을 누출지역에만 국한시켜 화재를 조기에 진화하기 위해 건물을 구획화 하는 개념 등이 있는데, 본 연구에서 고려하는 원자로에서의 소듐 화재 확산 방지 설계개념은 그림 2.2-1과 같다. 소듐 화재확산 방지 파라미터가 소듐 화재에 미치는 영향을 살펴보기 위해 계산 변수들을 설정하여 계산을 수행하였다. 그림 2.2-2에 보인 바와 같이 소듐 화재 확산방지기념이 반영된 증기발생기 건물에서의 소듐 화재로 인한 내부 온도상승이 그렇지 않은 경우보다 낮게 나타났다.



<그림 2.2-1 화재 확산방지기념>



<그림 2.2-2 화재영향 계산 결과>

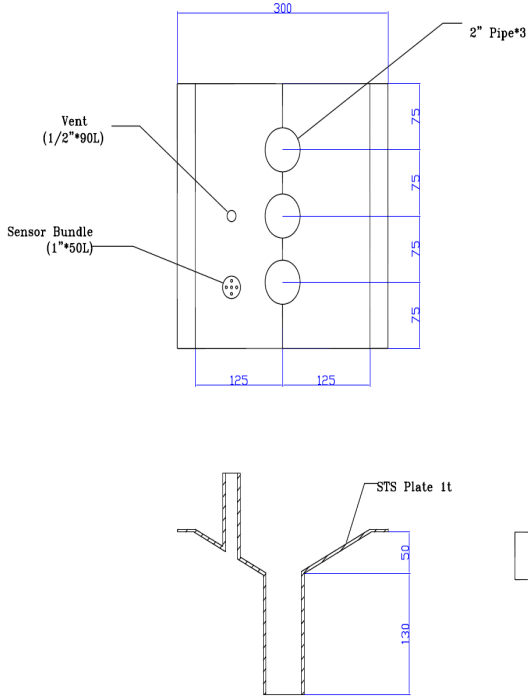
##### (나) 소듐화재 연소모델 개발

다양한 소듐 액적 크기 분포의 재현이 가능한 Gaussian 분포 함수를 도입하여 화재영향을 계산한 결과, 액적의 분산을 고려하지 않은 NACOM, SPRAY 코드와 비교하여 보다 실험값에 가까운 결과를 보였으며, 평균 액적 크기가 증가함에 따라 분산 증가로 인해 실험용기내 압력에 미치는 영향이 크게 나타났다.

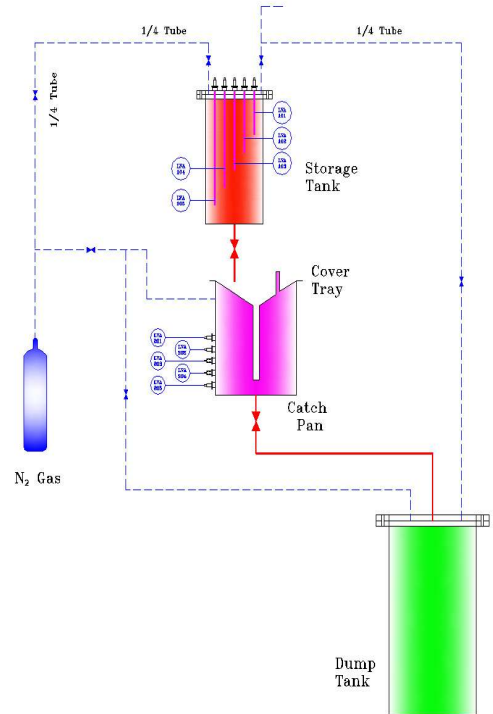
#### (2) 소듐 화재확산방지 구조물 개발 및 화재 실험장치 제작, 설치

피동형 소듐화재 방호방법중 하나는 누출 소듐을 소듐 수집용기로 신속하게 배출시키는 것

이다. 그림 2.2-3과 4에 sloping cover tray와 실험장치의 P&ID를 나타내었다. Sloping cover tray에는 tray상의 소듐을 소듐 수집용기로 배출시키기 위한 drain pipe와 소듐 수집용기에서 발생된 열과 반응생성물을 외부로 배출시키기 위한 vent pipe가 설치되어 있다. Sloping cover tray에 누출된 소듐은 drain pipe를 통하여 중력에 의하여 sodium hold-up vessel로 배출된다.



<그림 2.2-3 커버트레이의 구조>



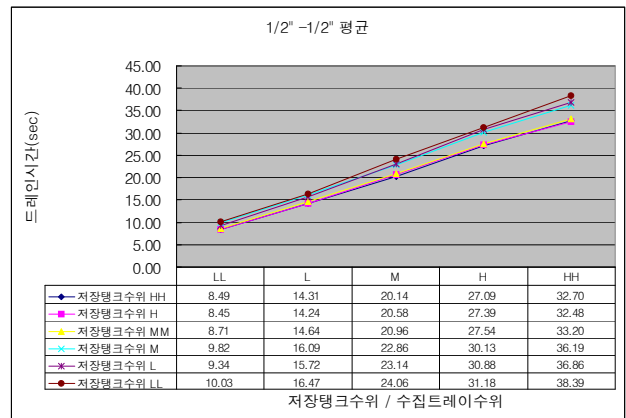
<그림 2.2-4 실험장치 P&ID>

### (3) 소듐화재 연소모델 개선 및 확산방지 구조물의 성능실험

저장탱크의 상부에는 물 이송관과 가스관, 수위센서 6개가 설치되어 있으며 하부에는 1인치 드레인 밸브가 설치되어 있다. 탱크의 총체적은 약 28리터이며 1회 실험에 필요한 소요량은 약 4리터로 6회의 실험을 위해 24리터의 물이 소요된다.

실험은 커버트레이 1개당 저장탱크 수위별, 캐치팬 수위에 대해 측정하였으며 커버트레이 1개당 30개의 데이터를 측정하여 커버트레이의 규격별로 배출 시간과 배출 현상을 비교하였다.

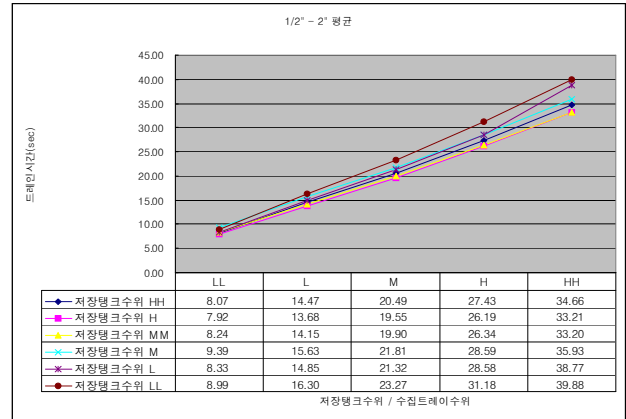
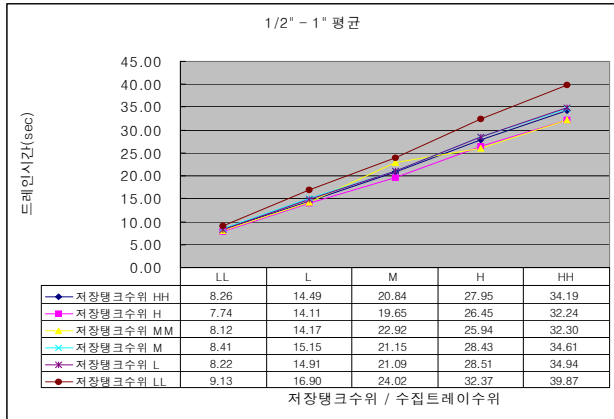
그림 2.2-5~7에 나타난 것처럼 관 1/2인치, 배출관 1/2인치일 경우에는 9.13초, 1인치일 경우에는 9.06초, 2인치일 경우에는 8.49초로 미미하지만, 벤트관 구경이 일정할 때 배출관 구경이 클수록 배출 시간이 단축됨을 알 수 있다. 또한 저장탱크의 수위에 따라 차이도 나타내었다. 저장탱크 수위 LV-HH에서 캐치팬 LV-LL까지의 도달 시



<그림 2.2-5 벤트관 1/2인치-배출관 1/2인치 수위별 배출 평균시간>

간은 1/2인치가 8.49초, 1인치가 8.26초, 2인치가 8.07초로서 드레인 시간의 차이는 저장탱크에 작용하는 유체의 수두에 기인한 것으로 볼 수 있다.

벤트관 1인치의 경우 배출관 구경 1/2인치일 경우에는 8.88초, 1인치일 경우에는 8.22초, 2인치일 경우에는 9.11초로 나타났다. 2인치의 경우에도 미미하지만 벤트관 구경이 일정할 때 배출관 구경이 클수록 배출 시간이 단축됨을 알 수 있다. 또한 저장탱크의 수위에 따라서 차이를 나타내었다.



<그림 2.2-6 벤트관 1/2인치-배출관 1인치 수위별 배출 평균시간>

<그림 2.2-7 벤트관 1/2인치-배출관 2인치 수위별 배출 평균시간>

## 나. 소듐 불순물 측정실험 및 특성평가

### (1) 소듐 불순물 특성 제어 설계개념 설정

소듐 불순물은 재료를 부식시키고, 상대적으로 온도가 낮은 영역에서 침적, 석출되어 배관을 막는 사고를 발생시킬 수 있으므로 고속로의 안전운전을 위해서는 소듐정화계통 설치가 필수적이다. 따라서 불순물이 유입되는 경로, 이를 계측/제어하는 방법들을 분석하여 고속로 소듐정화계통의 안전 설계요건을 표 2.2-1과 같이 설정하였다.

<표 2.2-1 소듐정화계통 요건>

	Method	1차 소듐계통	2차 소듐계통
계측	Plugging Meter	Continuous operation	Continuous operation
	O-meter (in-line)	○	○
	H-meter (in-line)	×	1 ea/loop
	T-meter (in-line)	×	○
	C-meter (in-line)	×	×
	Sampling port	Fuel failure, if need or period	Period or if need
제어	Radionuclide trap	Fuel failure and if need	-
	Cesium trap	Fuel failure and if need	-
	Cold trap	2 ea (1 spare) PMJ alarm, refueling and if need	2 ea/loop (1 spare) Continuous operation

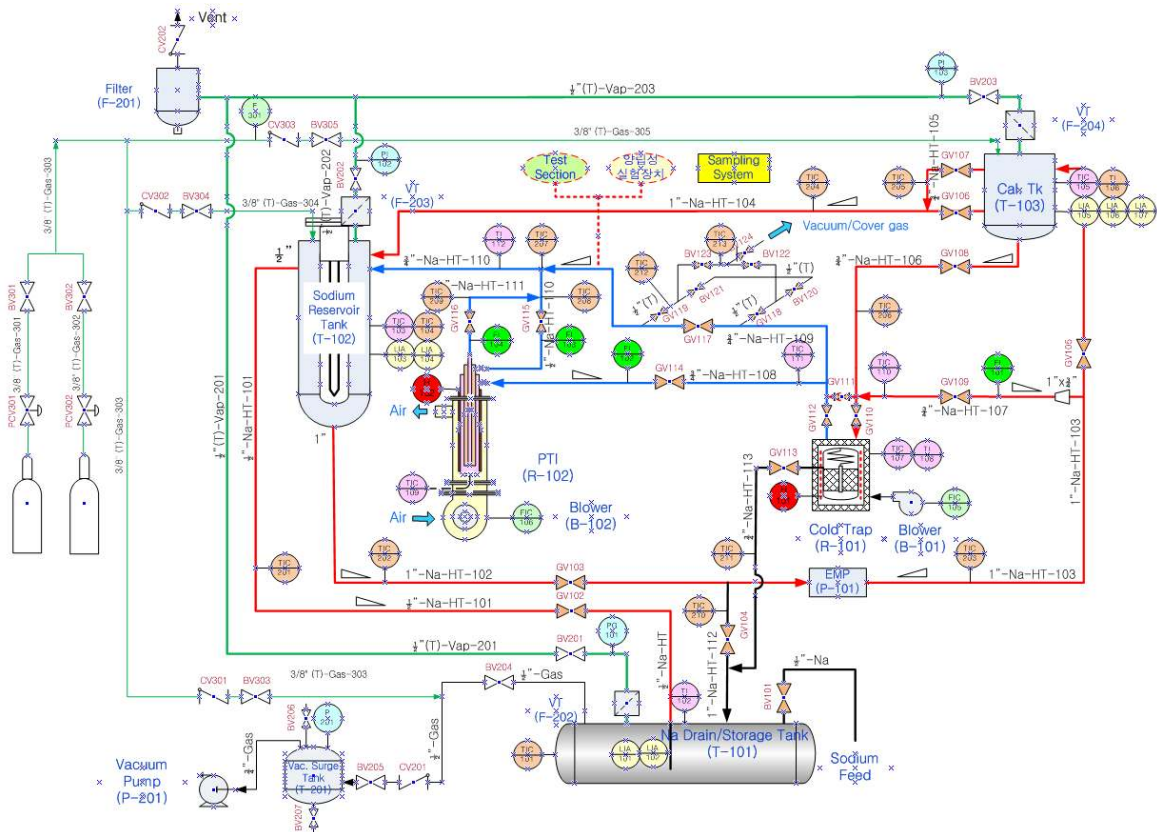
## (2) 소듐 불순물 화학분석 기술 확보 및 불순물 측정 실험장치 설치

소듐 불순물에 대한 화학분석법들 가운데 산소분석방법으로는 불활성가스 반송용해 열진도도법, mercury amalgamation, vacuum distillation, spectroscopy, butyl bromide separation 법 등이 있고, 탄소 측정방법으로는 고온산화법, oxyacidic flux 법, foil 평형법 등이 있다 [2.2-1].

본 연구에서는 이들 가운데 산소 분석방법으로 불활성 가스 반송용해 열진도도법을 선정하였다. 이는 불활성 가스 분위기에서 임펄스 가열 및 용해하여 적외선으로 흡수하는 방법으로 높은 정밀도를 가지고 있다.

탄소분석법으로는 고온산화법을 선정하였다. 이는 시료를 silica와 함께 헬륨가스와 산소가스 분위기에서 고온으로 연소시켜 탄산가스를 발생시킨 후, 방출된 탄산가스를 IR 흡수에 의해 탄소 양을 분석하는 방법이다.

실험장치 설계기준은 소듐 질량속도 400 g/s, 소듐 유속 약 1.5 m/s, 운전온도 500°C로 하였으며, 순환루프의 주 배관 크기는 1" 와 3/4" (Sch 40)이다. 실험 루프는 탱크류, 순환계통, 정제 및 감지계통, 커버가스계통과 기타 보조설비 등으로 구성되어 있으며, 실험장치의 크기는 3.5m(W) x 2.4m(L) x 2.0m(H) 이다.

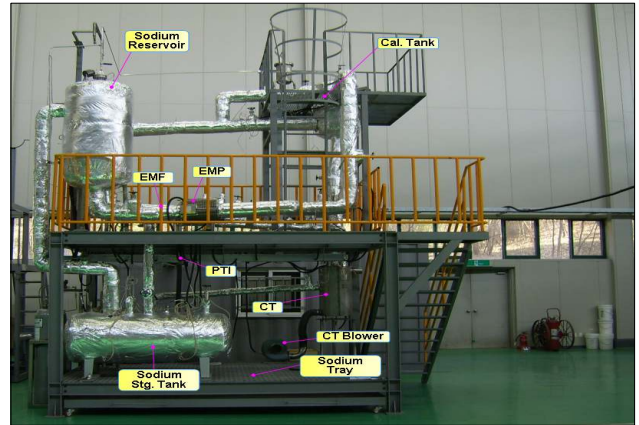


<그림 2.2-8 불순물 측정 실험장치의 P&ID>

콜드트랩은 소듐산화물과 같은 액체소듐 중의 비금속불순물이 소듐 온도가 낮아짐에 따라 소듐 내 용해도가 감소되어 침전되는 원리를 이용한 소듐 불순물 정제장치로서 유량, 체류시간 등을 계산하여 소규모로 자체 설계하였다. 콜드트랩의 규격은 314mm(ID)×450mm(H) 이고, 냉

각방법은 gas-cooled 형, 유량은 약 4 L/min, trapping 온도는 120~300°C, 체류시간은 약 3분이며, 내부에는 소듐 불순물이 침적되는 304 SUS wire mesh가 충전되어 있다.

플러깅미터는 액체소듐 중의 불순물 양을 측정하는 측정장치로서 콜드트랩과 같이 저온에서 비금속 불순물이 용해도 차이로 인하여 산화물로 침전되는 원리를 이용한 것으로 자체 설계하여 실험루프에 설치하였다.



<그림 2.2-9 불순물 측정 실험장치>

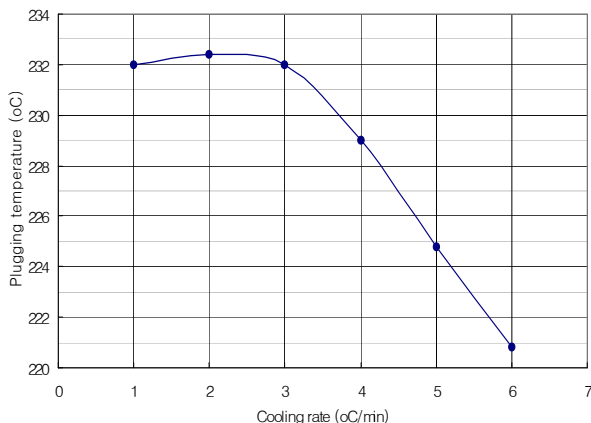
### (3) 소듐 불순물 측정자료 생산 및 불순물 특성 평가

#### (가) 냉각속도가 막힘온도에 미치는 영향

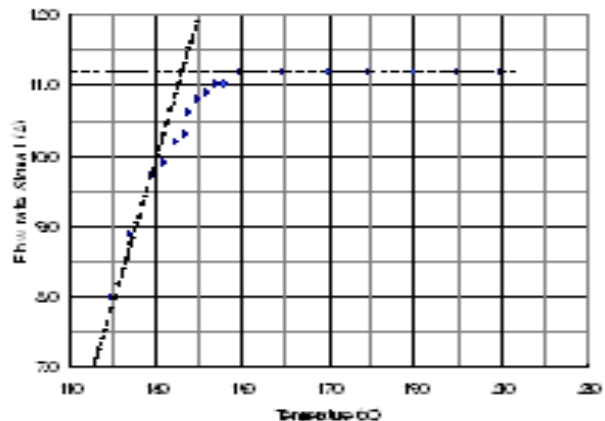
콜드트랩을 가동한 후 운전온도에 해당하는 온도에서의 용해도만큼만 불순물을 남기려면 어느 정도의 시간이 필요하다. 콜드트랩의 가동시간에 따른 막힘온도의 변화는 270°C에서 20시간 정도 지나면 충분히 평형에 도달하였다.

플러깅미터에서 오리피스가 막히는 시점의 온도를 막힘온도로 간주한다. 시간에 따른 유량 변화는 크게 두 구간으로 나눌 수 있으며, 초기에 유량이 일정한 구간과 오리피스가 냉각을 시작하여 유량이 감소하는 구간이 만나는 점에서의 온도를 막힘온도로 정의하였다.

냉각속도가 막힘온도의 측정에 미치는 영향을 알아보기 위해 온도를 1, 2, 3 및 4 °C/min로 변화시켰다. 그림 2.2-10은 냉각속도에 따라 달라진 막힘온도의 변화를 나타낸다. 냉각속도가 커짐에 따라 막힘온도가 급격히 낮아져서 포화온도와는 차이가 더 커졌다. 이처럼 냉각속도가 느리면 포화온도와 막힘온도의 차이가 작아서 유리하지만, 반면에 막힘온도를 측정하는 소요시간이 늘어난다. 따라서 막힘온도를 측정할 때 실험에 소요되는 시간 등을 고려하여 오리피스의 냉각속도를 2°C/min로 고정하였다.



<그림 2.2-10 냉각속도가 막힘온도에 미치는 영향>



<그림 2.2-11 플러깅 미터 온도 변화에 따른 소듐 유량변화 (CT 온도: 270°C)>

## (나) 플러깅미터 온도 변화에 따른 소듐 유량 변화

포화온도가 270 및 160°C일 때 오리피스 온도변화에 따른 유량의 변화를 측정하였으며, 그림 2.2-11은 포화온도가 270°C일 때의 변화를 나타내고 있다. 그림에서처럼 유량변화곡선이 얻어지면 막힘온도를 구할 수 있고, 막힘온도는 포화온도에 따라 달라짐을 알 수 있다.

콜드트랩의 운전온도와 막힘온도의 관계는 포화온도가 270 및 160°C일 때 플러깅미터로 측정한 막힘온도는 각각 232 및 137°C이었다. 높은 온도에서는 약 40°C, 낮은 온도에서는 약 20°C의 포화온도와 막힘온도 사이의 편차가 발생하였다.

그림 2.2-12는 막힘온도와 포화온도의 상관관계를 도시한 것으로 아래의 3차 다항식의 곡선으로 얻어졌으며, 매우 잘 일치하였다.

$$Y = 9.676B - 5X^3 - 4.753B - 2X^2 + 8.596X - 3.744B + 2$$

막힘온도가 얻어지면 이 상관관계에 의해 소듐 중의 산소농도 값을 얻을 수 있다. 이처럼 플러깅미터를 이용하면 시료 채취 등의 작업 없이 액체금속 내의 산소농도를 비교적 쉽게 연속적으로 측정할 수 있다.

플러깅미터로 측정한 막힘온도는 보통 포화온도와 일치하지 않으며, 이들의 관계가 잘 규명되어야 불순물의 농도를 정확하게 측정할 수 있다. 막힘온도로부터 포화온도를 알 수 있지만 재현성 등의 이유로 막힘온도와 포화온도의 차이가 작은 것이 바람직하다.

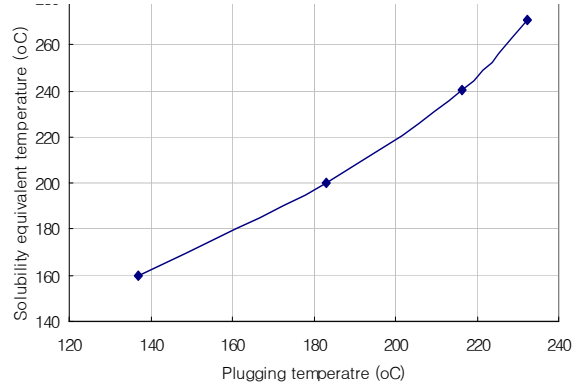
이상의 결과들을 종합해 보면 수동모드에서는 장치가 간단하고, 조업방법이 비교적 간단하였으나, 반면에 막힘온도를 구하기 위해 오리피스가 거의 막힐 정도까지 온도를 낮추어야 하고, 이를 다시 가열하여 오리피스가 완전히 개방되는데 시간이 많이 소요되어 연속적으로 측정하기에는 비교적 불리하였다.

### 다. 증금속 냉각재 정적 및 동적 부식 특성실험

본 연구의 목적은 소듐냉각고속로의 2차 계통 대안 냉각재로서 가능성이 있는 납합금의 부식특성을 바로 이해하고, 이를 효율적으로 억제할 수 있는 기술을 개발하는데 있다. 따라서 소듐냉각고속로의 중간냉각재로서 납-비스무트(Lead-Bismuth Eutectic, LBE) 합금을 사용했을 경우 산소농도 조절, 부식특성 평가 등에 대한 연구를 수행하였다.

부식특성 확인을 위한 실험으로 정적실험과 동적실험을 수행하였다. 정적실험은 원재료에 대한 부식특성 확인실험인 무산소 실험과 산소농도 조절에 의해 시편 표면에 산화막을 형성시켜 부식억제 가능성을 고찰하는 유산소 실험으로 구분하여 수행하였으며, 루프에서 유동상태의 LBE에 의한 재료의 부식특성을 고찰하기 위하여 동적실험도 병행하여 수행하였다.

실험재료로는 증기발생기 전열관 재질인 T91을 포함한 여러 재료를 선정하였고, 실험조건



<그림 2.2-12 막힘온도와 용해도 등가온도>



으로서 산소농도의 범위는  $<1.0 \times 10^{-8} \text{wt\%} \sim 1.05 \times 10^{-5} \text{wt\%}$ , 운전온도는 증기발생기 온도인  $520^\circ\text{C}$ 로 하였으며 실험시간은 500~2000hr으로 하였다. 사용된 액체금속은 납-비스무트 합금이며, 99.9% 이상의 45% Pb-55% Bi의 조성을 갖고 녹는점이  $125^\circ\text{C}$ 인 공융합금으로서 미국 Ney-Metal 사에서 제조한 것을 사용하였다. 실험 종료 후 각 시편에 대한 부식특성 분석은 scanning electron microscope(SEM) 및 energy-dispersive X-ray micro-analysis(EDX) 분석기를 이용하여 분석하였다.

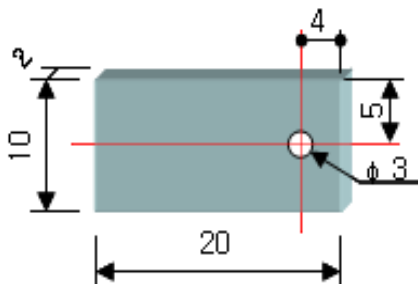
<표 2.2-2 시편의 조성>

	Cr	Ni	Si	Mo	Mn	V	Nb	P	S	N	C
T91	8.87	0.15	0.224	0.92	0.35	0.18	0.08	0.010	0.001	0.05	0.116
	Al	Ca	Si	Fe	Mg	Ni	O	P	S	N	W
W	0.001	0.001	0.001	0.003	0.0011	0.0012	0.003	0.0012	0.0009	0.002	99.95

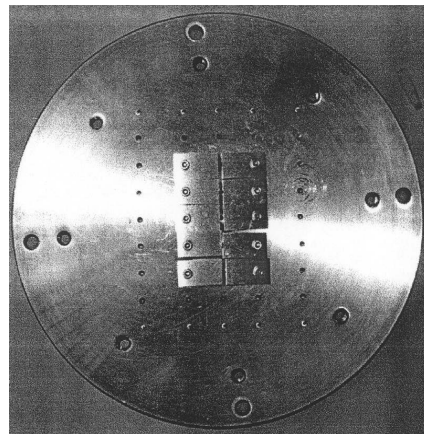
<표 2.2-3 실험조건>

Test	Stagnant Test			Flowing Test	
Specimen	T91			W	T91
	As-received	Al-coated (60~100 $\mu\text{m}$ )	N+ ion implanted	As-received	As-received
Oxygen Control	$<1.0 \times 10^{-8} \sim 1.05 \times 10^{-5} \text{wt\%}$		$<1.0 \times 10^{-8} \text{wt\%}$	$1.05 \times 10^{-5} \text{wt\%}$	$1.05 \times 10^{-5} \text{wt\%}$
Temperature	$520^\circ\text{C}$				
Time	500~1000hr	500~1000hr	2000hr	2000hr	500~1000hr

실험에 사용된 각 시편에 대한 조성은 표 2.3-1과 같다. 시편은 증기발생기의 전열관 재질인 T91과 특수강인 텅스텐(W)을 선정하였다. T91의 경우에는 원재료(as-received material) 시편(그림 2.2-13), 재료 표면에 알루미늄을 코팅한 시편 및 질소이온을 주입한 시편(그림 2.2-14)이 사용되었다.



<그림 2.2-13 정적실험 시편>



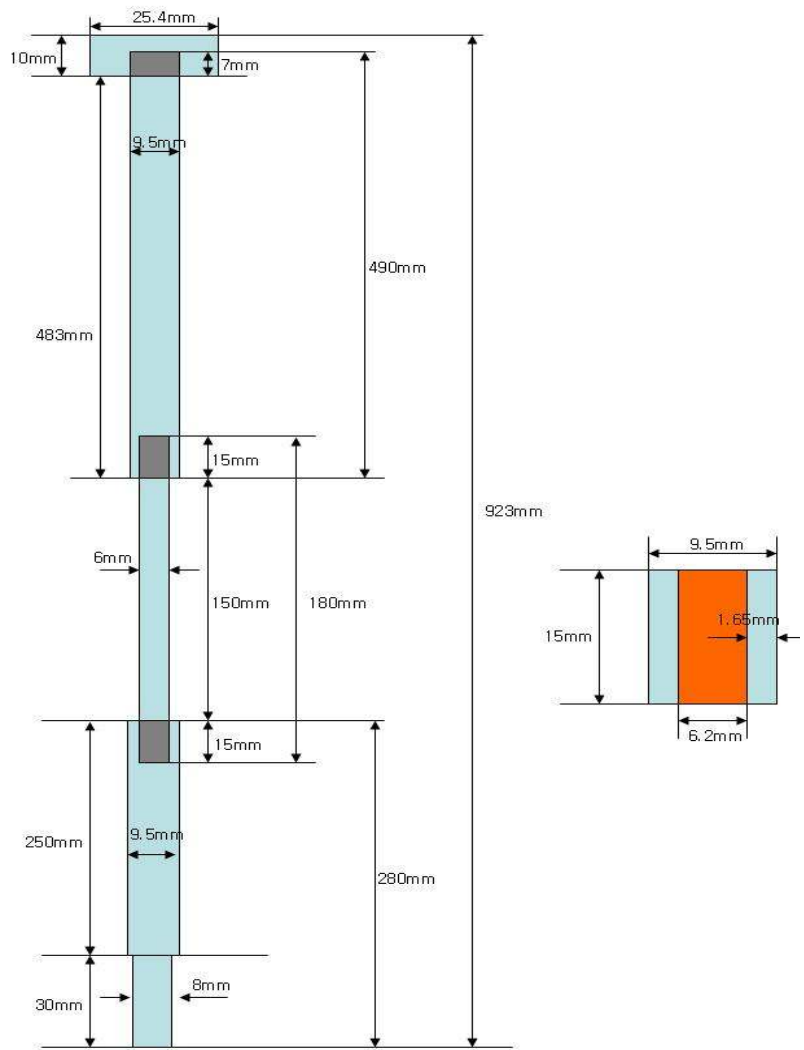
<그림 2.2-14 질소이온 주입시편>

실험을 수행하기 위한 실험조건은 표 2.2-2와 같다. 정적실험은 도가니( $\text{Al}_2\text{O}_3$  Crucible)에 시편들을 장착하고 LBE를 약 100g 정도 넣은 후 글로브박스를 통해서 가열로 안의 유리 튜브에 도가니를 여러 개 넣고 운전온도( $520^\circ\text{C}$ )를 유지하면서 튜브 안의 가스 상태를 수소와 수증기의 비율을 조절·유지하여 LBE의 산소농도를 조절하였다.

이때 아르곤 가스의 유량은 최대 200cc/min, Ar-4%H<sub>2</sub> 혼합 가스의 유량은 최대 20cc/min까지 조절할 수 있는 MKS사의 MFC 1179A를 사용하였다.

동적실험은 그림 2.2-15에서 보는 바와 같이 6.2(ID) x 9.5(OD) x 15(H) mm인 원통형 T91 시편들을 시편 지지봉에 장착한 후, 실험 환경에 영향을 주지 않도록 글로브박스 내부에 설치되어 있는 시편 지지봉 장입구를 통하여 시편실험부(Test Section)에 장착하였다.

실험 중 동적실험 루프 전체가 균일한 온도를 유지할 수 있도록 하기 위해 장치 및 배관에 설치되어 있는 히터로 액체 LBE를 520°C로 가열하였으며, 시편실험부에서 균일하고 지속적인 유동이 이루어질 수 있도록 전자기 펌프를 사용하여 액체 LBE를 1.2m/s 속도로 순환시켰다.



<그림 2.2-15 LBE 동적실험 시편 지지봉 및 시편>

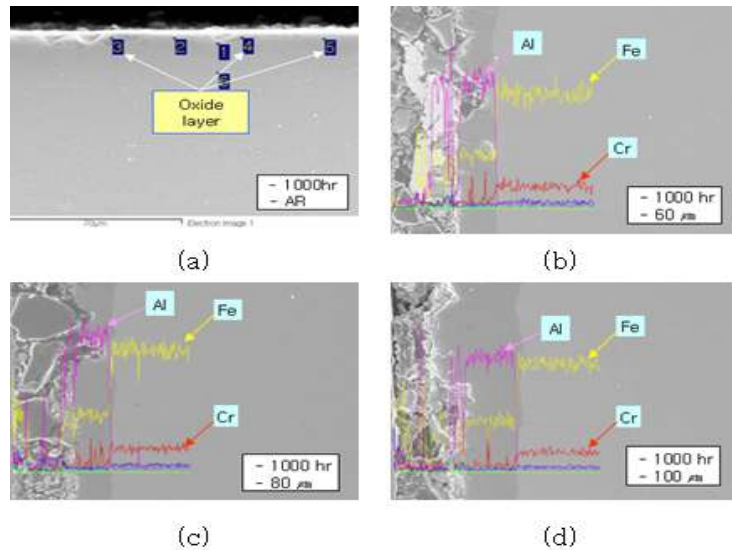
### (1) 알루미늄을 이용한 중금속 냉각재 정적 및 중단기 동적 부식 특성실험

알루미늄을 이용한 중금속 냉각재 정적 및 중·단기 동적 부식특성 실험은 증기발생기 전 열관 재료로 사용되는 T91(Mod. 9Cr-1Mo)의 원재료 및 표면에 알루미늄을 코팅한 재료에 대해 LBE에 의한 부식특성 평가를 수행하였다.

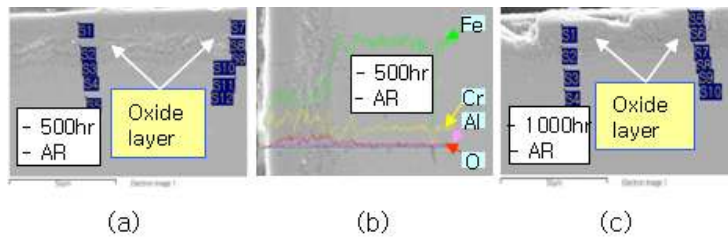
정적부식실험은 무산소 분위기 및 산소농도 조절을 통한 실험을 수행하였고, 동적 부식실험은 T91의 원재료를 대상으로 산소농도 조절을 통한 실험을 수행하여 부식억제 효율을 평가하였다. 그림 2.2-16에 산소농도  $1.05 \times 10^{-5}$  wt% 및 520°C에서 정적 납합금(LBE)에 1000 시간 동안 노출된 T91 원재료(a) 및 알루미늄이 코팅된(b~d) 시편에 대한 SEM/EDX 분석결과를 보여주고 있다.

그림 2.2-17에 산소농도  $1.05 \times 10^{-5}$  wt% 및 520°C에서 동적 납합금(LBE)에 500 시간 (a,b) 및 1000 시간 (c) 동안 노출된 T91 시편에 대한 SEM/EDX 분석결과 T91에 대해 LBE에서의 부식특성 확인을 위하여 520°C에서 시간별로 정적실험과 동적실험을 수행한 결과 정적실험에

서 알루미늄 코팅에 의한 내식성이 유지됨을 알 수 있었고, 동적실험에서 중금속의 용해침투가 발견되지 않아 T91에 알루미늄을 코팅할 경우 LBE에서의 증기발생기 전열관 재료로 사용할 수 있음을 확인하였다.



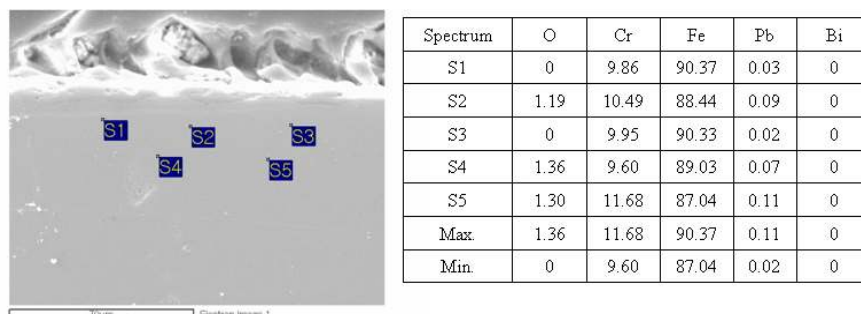
<그림 2.2-16 T91 및 Al 코팅 시편 SEM/EDX 분석결과>



<그림 2.2-17 T91 SEM/EDX 분석결과>

## (2) 질소이온빔을 이용한 중금속 냉각재 정적 및 중단기 동적 부식 특성실험

부식억제기술의 한 방법으로서 active 코팅방법인 N+ 이온 주입방법을 사용하였다. T91 원재료와 질소이온이 주입된 재료에 대하여 LBE에 2000시간 동안 노출시킨 후 XRD로 분석하였다. 그림 2.2-18은 산소농도  $<10^{-8}wt\%$  및 온도 520°C에서 정적 LBE에 2000시간 동안 노출된 질소이온이 주입된 T91 시편에 대한 SEM/EDX 분석결과로서 표면에 산화막 형성이 이루어지지 않음을 알 수 있고, 고용 강화 및 새로운 질화물의 형성으로 LBE 분위기에서 표면처리의 효과를 나타냄으로써 부식에 대한 저항성을 유지하고 있음을 알 수 있다.

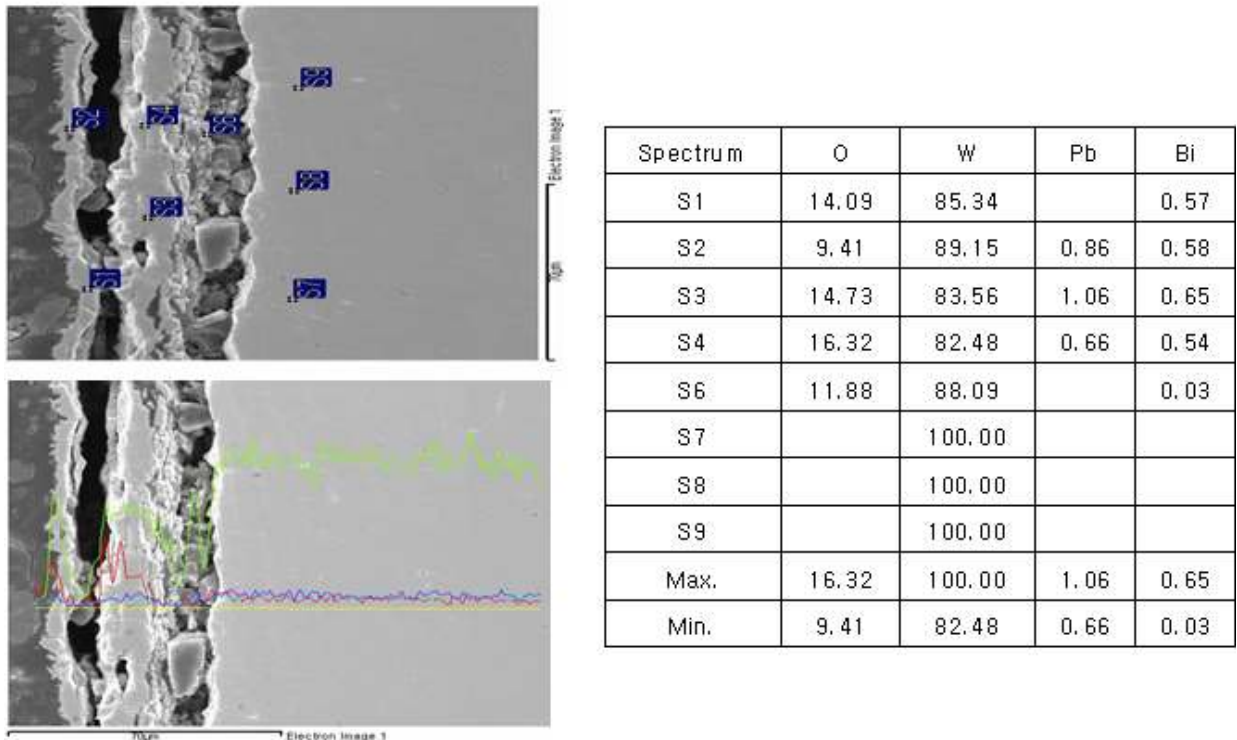


<그림 2.2-18 T91 시편 SEM/EDX 분석결과>

### (3) W와 Nb를 이용한 중금속 냉각재 정적 및 중단기 동적 부식 특성실험

LBE에서 텅스텐(W) 시편에 대한 부식특성 실험을 수행하였다. 그림 2.2-19는 농도를  $1.0 \times 10^{-5}$  wt%로 하여 텅스텐 원재료를 520°C에서 2000시간 동안 LBE에 노출시켜 수행된 실험에 대한 분석 결과이다. 그림 및 표에서 보는 바와 같이 산화막이 형성되었으며, 성분 고갈 없이 부식에 대한 저항성을 보이고 있다. 따라서 텅스텐으로 보호코팅을 할 경우 부식으로부터 보호될 수 있음을 알 수 있었다.

연구결과를 요약하면 정적실험에서 모든 재료들은 부식현상이 관찰되지 않았다. 특히 T91 재료에 알루미늄(Al)을 코팅한 시편들은 부식으로부터 잘 보호되고 있음을 알 수 있었다. 동적 실험에서는 T91 시편에 산화층이 형성되지는 않았으나 부식현상은 나타나지 않았으며, 표면에 Fe 또는 Fe-Cr 혼합산화물이 형성되었다. 또한 시편에 산화철( $Fe_3O_4$ )에 의한 외부층과 크롬스피넬(Cr-rich spinel)에 의한 내부층으로 이루어진 이중층으로 구성되어 있음이 관찰되었다.



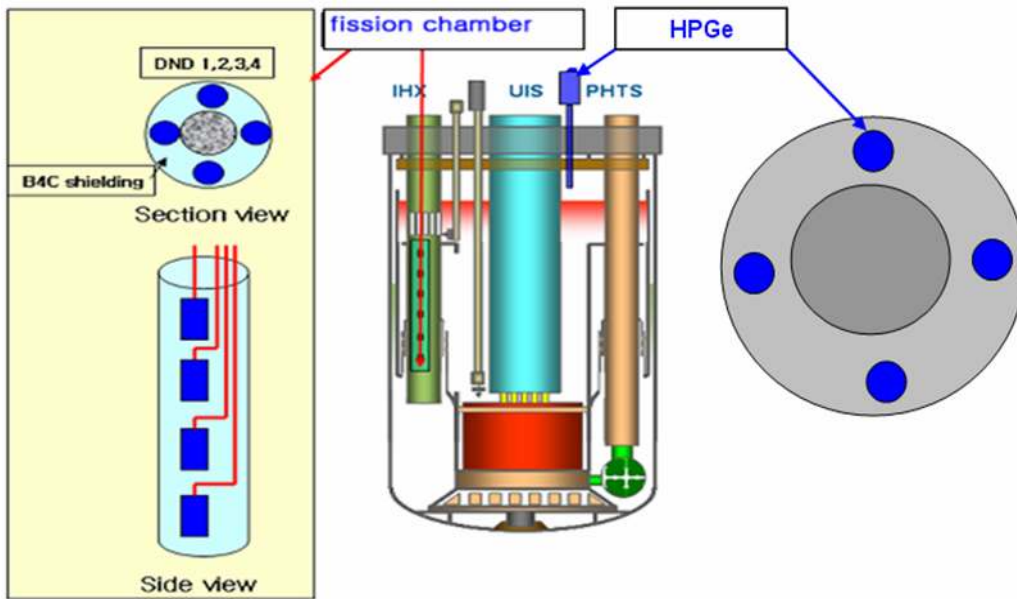
<그림 2.2-19 W 시편 SEM/EDX 분석결과>

### 3. 원자로 내부 계측 및 감시방법 개발

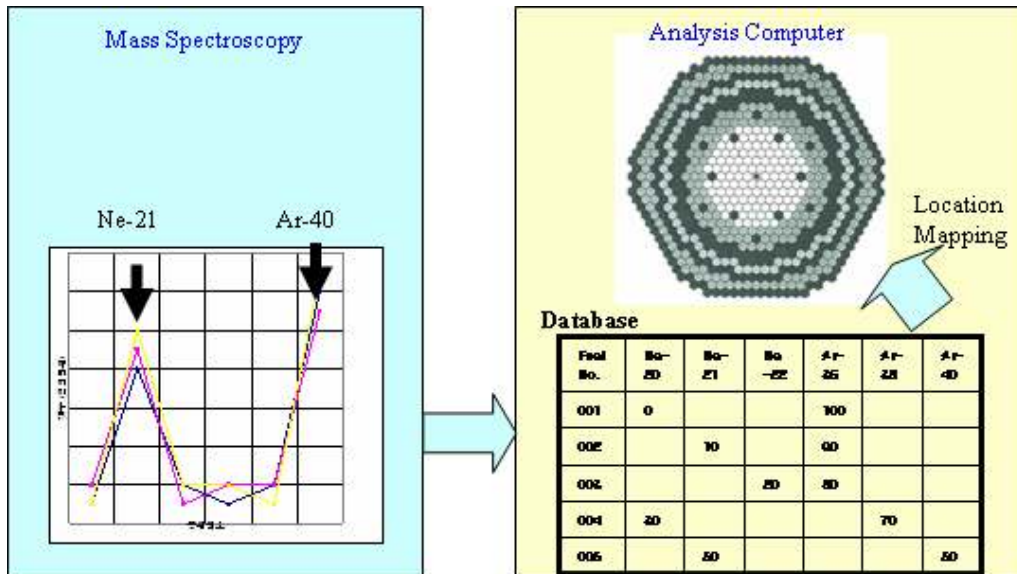
#### 가. 노심 및 핵연료 감시 모형 사양 개발

##### (1) 노심 및 핵연료 감시 계측변수 및 논리 구체화

소듐냉각고속로의 파손 핵연료 유무 탐지 방법으로 핵분열 생성물의 붕괴에 의해 특정 에너지를 갖는 감마선 및 지발 중성자를 측정하는 방안(그림 2.3-1)을 제시하고, 파손된 어셈블리의 위치 파악을 위해 커버가스 내에 존재하는 표식가스의 성분비율분석 방법(그림 2.3-2)을 제시함으로써 개념설계를 위한 기초자료를 확보하였다.



<그림 2.3-1 지발중성자속 검출기 및 감마선 검출기 예상 설치위치>



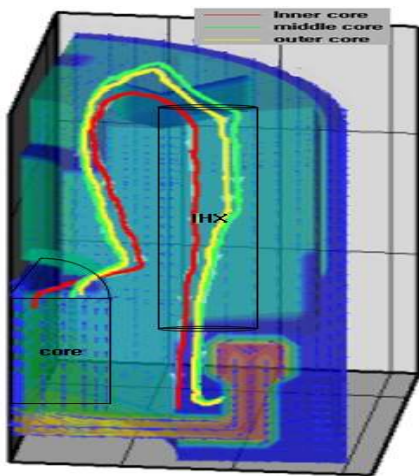
<그림 2.3-2 표식가스 분석시스템 중 질량분석방법의 개념도>

## (2) 노심 및 핵연료 감시 모형 사양 개발

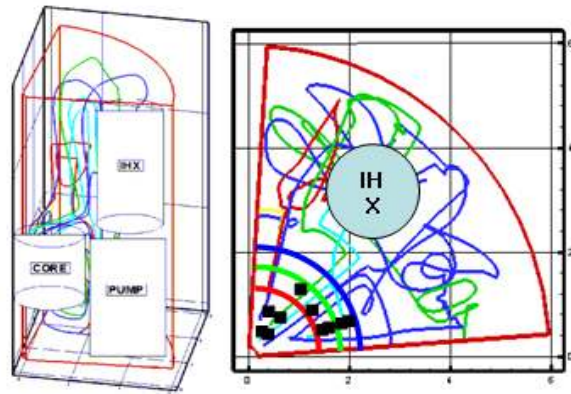
파손 핵연료 유무를 탐지하기 위해 소듐 풀 내부의 지발 중성자원을 측정하는 개념을 설정하고, 핵연료 파손 시 지발중성자원의 전달경로(그림 2.3-3)에 대한 연구를 수행하였다.

## (3) 노심 및 핵연료 감시 모형 제작

지발중성자원의 전달 경로는 그림 2.3-4와 같이 모두 IHX를 통과하게 되고, 파손 핵연료 위치에 거의 무관하게 비슷한 전달시간을 가짐을 확인하였다. 향후 핵연료 파손크기에 따른 지발중성자원의 농도 및 지발중성자속을 계산하고, 핵분열함의 계측 모델 및 정확한 위치 산출이 필요하다.



<그림 2.3-3 지발중성 자원 전달경로>



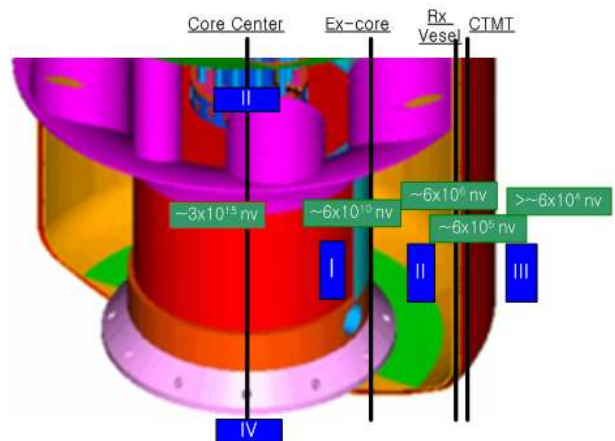
<그림 2.3-4 경로분석 결과>

## 나. 원자로 내부 광역/ 지발중성자속 계측 개념설정 및 측정 민감도 평가

### (1) 원자로 내부 광역/ 지발중성자속 계측 개념설정

현존하는 중성자속 검출기를 소듐냉각고속로에 적용할 경우 발생하는 제한사항에 대해 분석한 후 향후 보완해야 할 기술적 내용과 이에 대한 해결방안을 제시하였다.

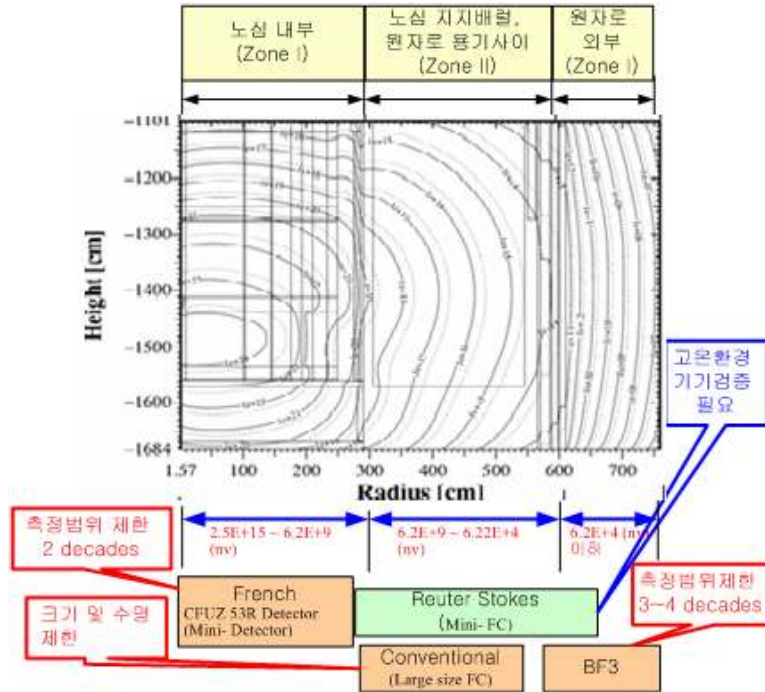
수명 예측을 위해 검출기의 설치위치는 원자로 용기 내, 즉 노심과 원자로용기 사이로 가정하였다. 소듐냉각고속로 운전온도 범위에 서의 영향을 분석한 결과 검출기 크기가 소형화될수록 온도변화에 더 민감한 것으로 조사되었다(그림 2.3-5).



<그림 2.3-5 검출기 설치 후보영역>

## (2) 원자로 내부 광역/ 지발중성자속 계측기 후보 측정 민감도 평가

중성자속 검출기의 운전범위는 약  $10^{-7}$  % 원자로 출력에서 150 %까지로 설정하였으며, 이는 기존 경수로 대비 약 2 decades 가 줄어든 측정 범위를 갖는다. 설정된 운전범위를 기반으로 예비 중성자속 누설 프로파일을 이용, 현존하는 중성자속 검출기들에 대한 측정 민감도를 그림 2.3-6과 같이 분석하였다.

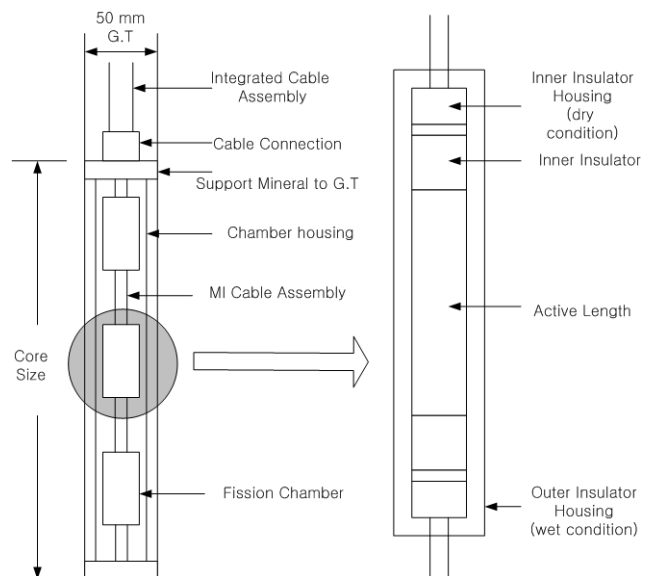


<그림 2.3-6 계측기 측정가능 영역>

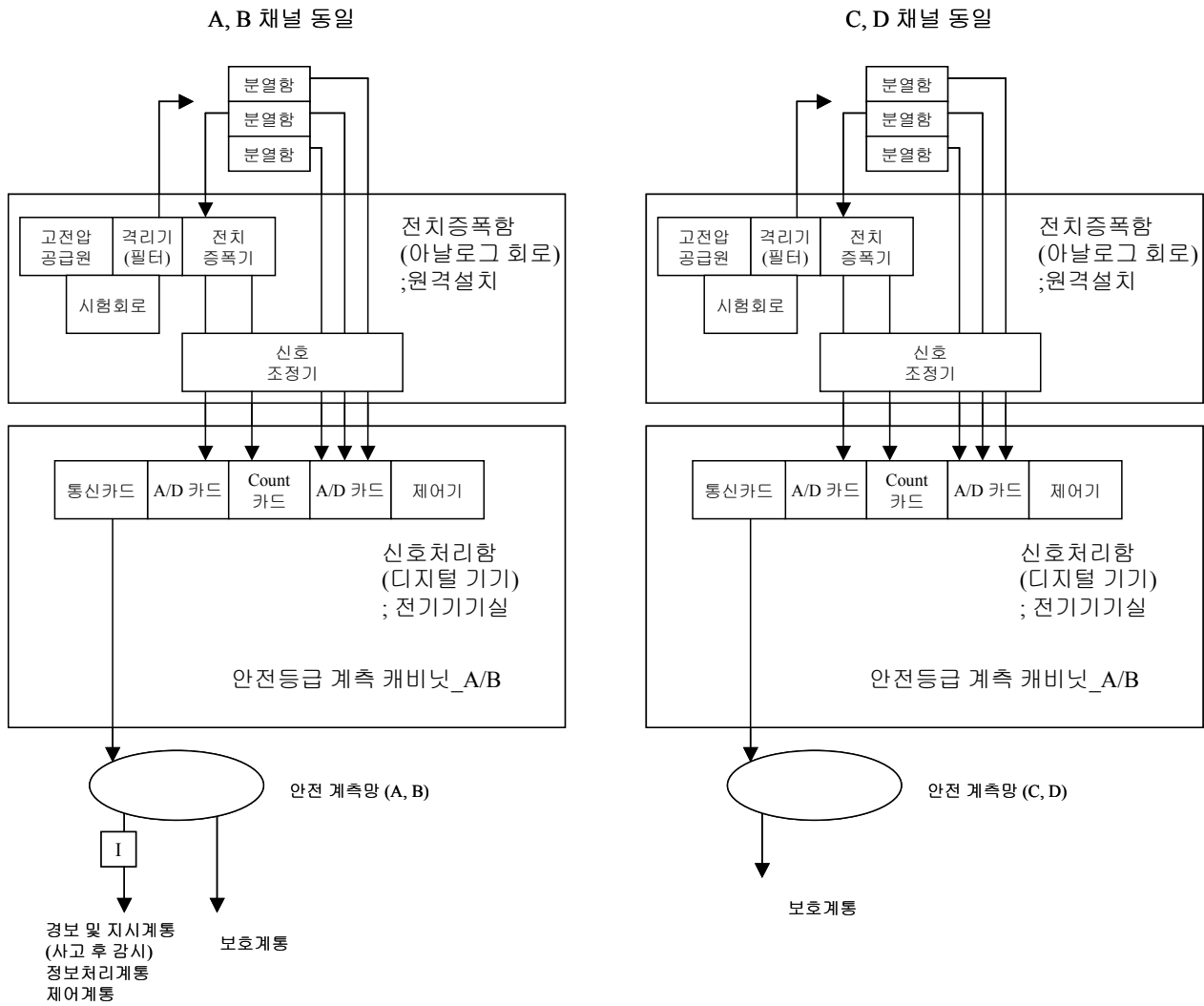
## (3) 원자로 내부 광역/ 지발중성자속 계측기 설치/제작성 검토

그림 2.3-7은 현재까지 조사된 검출기 중 일체형 원자로의 요건에 가장 근접하다고 판단된 Reuter Stokes 사의 핵분열함을 근거로 검출기 집합체를 구성한 것이다. 고온 및 소듐 환경에 적용하여 사용하기 위해 핵분열함 각각마다 하우징을 설치하였으며, 계측기 안내관을 통해 자유롭게 삽입 및 제거가 가능하도록 하였다.

원전에서 사용된 사례가 많은 아날로그 회로는 부품 단종에 따른 유지보수의 어려움과 같은 단점이 있기 때문에 그림 2.3-8과 같이 노외 중성자속 계측계통 디지털기술 및 통신망에 대한 적용 방안과 감시계통 구성도를 분석하였다.



<그림 2.3-7 원자로 내부설치 중성자속 검출기 집합체 예비 구성도>



<그림 2.3-8 노외중성자속 감시계통의 채널 구성도>



#### 4. 불순물 측정 및 제어기술 개발

##### 가. 개량형 불순물 정제장치 개발

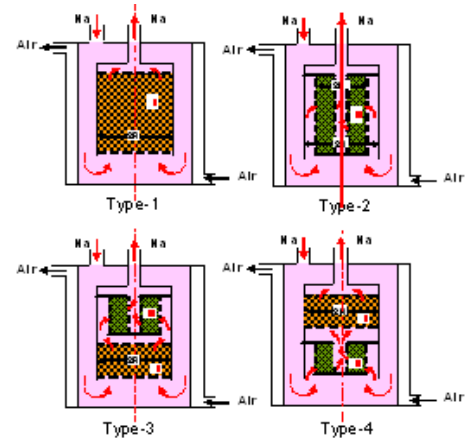
액체소듐 정제장치로서는 mesh-packed 형 콜드트랩을 보편적으로 사용하고 있으며, 그 성능을 trapping 효율 및 capacity 특성으로 평가하고 있다. 국외에서 실험 및 해석학적 연구가 수행되었으나, 결과들은 콜드트랩을 개선하기에 충분하지 못하였다.

그 이유로 콜드트랩 성능은 콜드트랩의 구조, mesh packing의 형태 및 운전조건과 같은 다양한 설계인자들에 의해 영향을 받는데, 이러한 연구들은 제한된 설계로 수행되었기 때문이다. 그러므로 콜드트랩 개선을 위해서는 그 성능 인자의 영향에 대한 평가가 필수적이다.

개량형 불순물 정제장치를 개발하기 위해 콜드트랩의 개념을 설정하여 설계 파라미터인 소듐유량, 체류시간, mesh packing의 부피, trapping 온도 등에 대한 분석을 수행하여, 그림 2.4-1 및 표 2.4-1과 같이 4 가지 형태의 개량형 콜드트랩 개념을 도출하였다. Mesh의 선경은 0.254mm 이며, mesh packing의 유형은 그림 2.4-2에서 보는 바와 같이 소듐이 축방향으로 흐르는 axial type과 반경방향으로 흐르는 radial type 두 가지를 고려하였다.

Mesh packing type-1과 type-2는 단일형으로서 type-1은 소듐이 축방향으로 흐르고, type-2는 반경방향으로 흐르는 개념이다. Type-3과 type-4는 이중형으로서 type-3은 소듐이 상부에서 반경방향으로 흐른 후 하부에서 축방향으로 흐르는 개념이고, type-4는 type-3과 반대로 상부에서 축방향으로 흐른 다음 하부에서 반경방향으로 흐르는 개념이다.

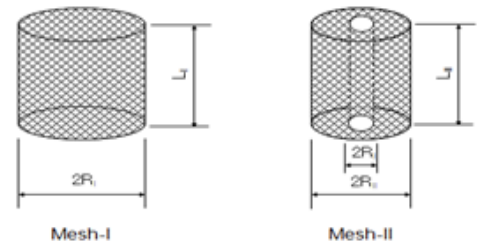
Mesh packing 형상에 따른 영향을 분석한 결과 type-3 및 4의 콜드트랩 성능이 좋은 것으로 판단되어 이 두 형태의 콜드트랩을 설계하였다. 설계한 개량형 콜드트랩은 mesh packing의 형상에 따른 콜드트랩의 성능을 확인하기 위한 소규모 정제장치로서 공기냉각방식이고, 규격  $\phi 438\text{mm} \times H590\text{mm}$ , 소듐 유량 0.07kg/s, 소듐 운전온도 120~300°C, 체류시간 약 4분이다. 그림 2.4-2는 제작된 개량형 콜드트랩 사진이며, 그림 2.4-3은 개량형



<그림 2.4-1 개량형 콜드트랩 개념도>

<표 2.4-1 Mesh 유형별 구성>

Mesh shape		Sodium flow direction	
Type-1	Single	Axial	
Type-2	Single	Radial	
Type-3	Dual	Axial	Radial
Type-4	Dual	Radial	Axial



<그림 2.4-2 Mesh packing의 유형 (axial & radial)>



<그림 2.4-3 개량형 콜드트랩>

콜드트랩들이 설치된 루프를 보여주고

## 나. 개량형 불순물 정제장치 검증실험

개량형 콜드트랩 성능 검증실험은 콜드트랩 성능에 미치는 영향이 가장 큰 파라미터인 mesh packing의 두 가지 형태에 대한 성능을 비교평가 하기 위한 실험이다. 운전조건으로는 소듐 유량이 0.07kg/s, 소듐 운전온도가 120~300°C, 가열 및 냉각 속도가 약 1~6°C/min, 소듐 체류시간이 약 4분이며, 실험방법은 다음과 같다.

콜드트랩에서는 액체소듐을 냉각지역에서 산소 포화온도 이하로 냉각한다. 이때 과포화된 산소의 일부분이 환형모양의 벽과 콜드트랩 하부바닥에 소듐산화물의 결정으로 침전되며, 나머지 침전물 대부분은 mesh packing 표면에 침전될 것이다.

콜드트랩 운전과 함께 플러깅미터로 불순물을 측정한다. 플러깅미터의 운전순서는 온도 감소 → 용해성 불순물 침적 → 플러깅 온도 측정 → 플러깅 온도와 불순물 농도 측정 순으로 이루어지며, 플러깅미터의 조업변수는 냉각 및 가열속도, 소듐의 유량, 불순물의 농도 및 다중 불순물의 존재 등이 있다.

오리피스를 통한 소듐 유량의 변화에 따라 오리피스의 내부 표면상에 침전되는 불순물의 침적조건이 변화되며, 각 불순물의 포화온도에 따라 소듐의 유량이 증가하면 각 불순물의 평균 플러깅 온도도 증가한다.

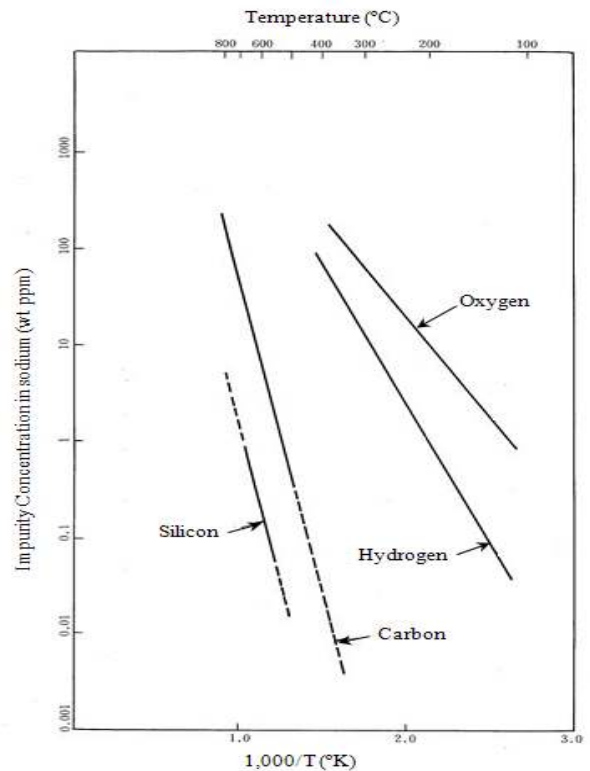
또한 소듐의 유량은 각 불순물의 포화온도에서 측정되는 플러깅 온도의 오차를 최소화 할 수 있도록 소듐의 최적유량 범위를 고려하여 조절한다.

플러깅미터의 운전온도는 150~300°C 범위 내에서 조절하고 있으며, 오리피스를 플러깅 온도까지 냉각한다. 이때 오리피스에서 불순물이 침적되어 핵형성 및 성장이 이루어진다. 유량 손실이 있는 어느 지점 (약 20%)에 이르면 가열을 시작하고, 형성된 부분 플러그가 완전히 녹기 전에 냉각한다. 이와 같이 오리피스의 가열 및 냉각을 약 1~6 °C/min로 반복한다. 오리피스에서 부분 플러그가 생성되면 이때 온도가 포화온도이다.

플러깅 온도와 불순물 농도의 상관관계는 불순물의 용해도곡선을 이용하여 얻어지며,



<그림 2.4-4 개량형 콜드트랩 루프>



<그림 2.4-5 소듐 중 산소, 수소, 탄소, 규소의 용해도>

산소농도의 경우 아래의 Eichelberger[2.4-1] 식 등으로부터 구할 수 있고, 이 식에 의한 도표 (그림 2.4-5)를 이용할 수도 있다.

$$\text{Log } C_e [O_2, wppm] = 6.239 - \frac{2447K}{T} \quad (1)$$

운전시간은 아래 식(2)를 이용하여 계산하였으며, 소듐저장탱크의 소듐량이 약 1톤이고, 소듐 유량이 0.07 kg/s이므로 1회 순환하는데 소요되는 시간을 약 5시간으로 하였다.

$$t = - \frac{W}{F} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \ln \left( \frac{C_t - C_{sat}}{C_0 - C_{sat}} \right) \quad (2)$$

여기서, t는 소요시간, W는 소듐량, F는 소듐 유량, C<sub>0</sub>는 초기산소농도, C<sub>sat</sub>는 trapping 온도에서의 산소포화용해도, C<sub>t</sub>는 요구온도에서의 산소농도, η는 정제효율이다.

위에서 언급한 실험방법으로 실험을 수행한 결과 시간에 따른 산소농도 변화는 표 2.4-2와 같다.

<표 2.4-2 콜드트랩 유형별 실험 데이터>

Item		Type-3					Type-4				
t	hr	0	5	10	15	20	0	5	10	15	20
C <sub>in</sub>	wppm	8.00	6.62	5.67	5.02	4.57	8.00	6.60	5.60	4.90	4.42
C <sub>out</sub>	wppm	6.62	5.67	5.02	4.57	4.30	6.60	5.60	4.90	4.42	4.10
C <sub>in</sub> -C <sub>out</sub>	wppm	1.38	0.95	0.65	0.45	0.27	1.40	1.00	0.70	0.50	0.30

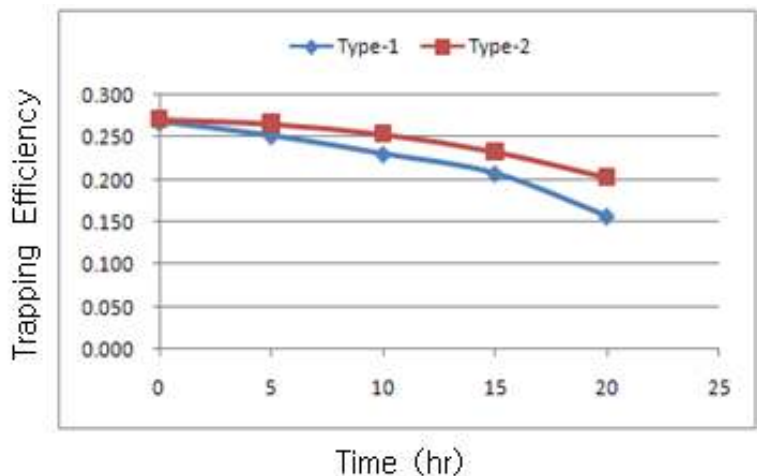
위의 실험 데이터로부터 아래 식을 이용하여 각 콜드트랩의 trapping 효율 η 및 capacity M<sub>t</sub> 를 계산하여 콜드트랩의 성능을 비교 평가하였다.

$$\eta = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in} - C_e} \quad (3)$$

$$M_t = \int_0^{t_p} (C_{in} - C_{out}) W dt \quad (4)$$

여기서, η는 trapping 효율, C<sub>e</sub>는 산소의 포화용해도, C<sub>in</sub>은 콜드트랩 입구에서의 산소농도, C<sub>out</sub>는 콜드트랩 출구에서의 산소농도, t<sub>p</sub>는 콜드트랩 총 운전시간, W는 소듐 유량을 나타낸다.

약 20시간을 운전한 후 콜드트랩의 정제효율을 비교 평가한 결과 그림 2.4-6에서 보는 바와 같이 소듐의 흐름 방향에 따라 mesh packing의 구성을 반경방향-축방



<그림 2.4-6 개량형 콜드트랩 유형별 정제효율 비교>

향으로 한 Type-4가 축방향-반경방향으로 한 Type-3보다 약 23% 좋은 것으로 나타났다. 따라서 개량형 콜드트랩의 성능은 초기효율은 유사하였지만 radial mesh packing이 axial mesh packing보다 소듐 흐름 방향의 상류에 위치하는 것이 좋은 것으로 나타났다.

#### 다. 대용량 콜드트랩 설계, 제작, 설치 및 검증실험

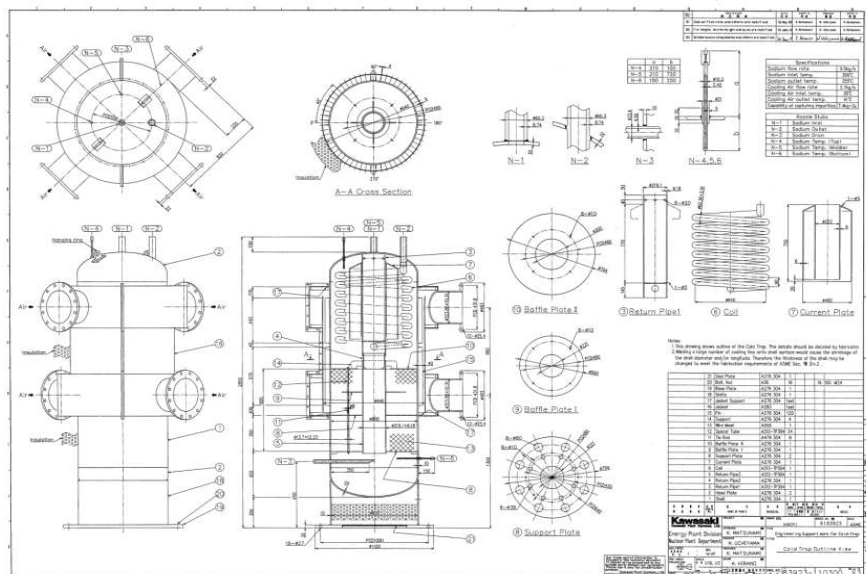
본 실험은 RFP에 포함되지 않은 번외의 실험으로서 잔열제거계통 열교환기 및 기계식 소듐 펌프의 성능 시험시설인 STELLA-1 (Sodium Integral Effect Test Loop for Safety Simulation and Assessment-1)에 사용될 소듐을 정제하기 위한 목적으로 설계된 대용량 콜드트랩의 성능을 검증하기 위하여 다른 시험시설인 계측기법시험시설에서 수행한 실험이다.

<표 2.4-3 대용량 콜드트랩 열전달 계산결과>

	Unit	Tube side	Shell side	Jacket side
Free flow area	m <sup>2</sup>	3.23×10 <sup>-2</sup>	0.465	0.156
Hydraulic diameter	m	0.203	0.581	6.05×10 <sup>-2</sup>
Velocity	m/s	1.58×10 <sup>-2</sup>	1.17×10 <sup>-3</sup>	15.1
Reynolds number	-	5.06×10 <sup>3</sup>	1.05×10 <sup>3</sup>	5.49×10 <sup>4</sup>
Nusselt number	-	5.57	4.36	115
Heat transfer coeff.	W/m <sup>2</sup> K	2.37×10 <sup>3</sup>	642	50.5

대용량 콜드트랩은 소듐유량, trapping 온도, 체류시간 그리고 wire mesh의 선경, 밀도 및 기하구조 등의 설계인자를 바탕으로 불순물을 포집하기 위한 mesh 부피, 열 및 물질수지, 열 전달 등의 계산을 통하여 설계하였다.

대용량 콜드트랩 설계를 위한 주요 열전달 계산결과는 표 2.4-3과 같고, 설계 및 제작도면은 그림 2.4-7 및 2.4-8과 같다.



<그림 2.4-7 대용량 콜드트랩 도면>

설계·제작한 대용량 콜드트랩은 규격이  $\phi$  940mm×H2,700mm인 공기냉각방식으로서 소듐유량 0.5kg/s, 소듐 운전온도 120~300°C, 냉각공기 유량 2.7kg/s, 체류시간 약 5분, 불순물 정제용량이 약 7.4kg-O<sub>2</sub> 이다.

운전시간은 식 (2)를 이용하여 계산하였으며, 소듐저장탱크의 소듐량이 약 1톤이고, 소듐 유량이 0.5kg/s이므로 1회 순환하는데 소요되는 시간을 약 1.5시간으로 하였으며, 개량형 콜드트랩 실험을 위해서 산소농도를 8ppm까지 수행하였다.

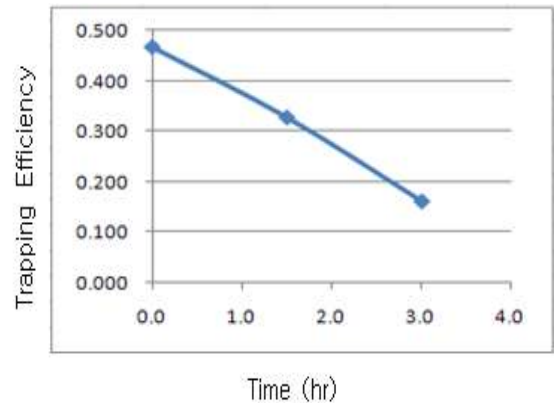
실험방법은 위에 기술한 개량형 콜드트랩과 같은 방법으로 수행하였으며, 실험결과로서 시간에 따른 산소농도 변화는 표 2.4-4와 같다.



<그림 2.4-8 대용량 콜드트랩 제작>

<표 2.4-4 대용량 콜드트랩 실험 데이터>

항목		대용량 CT (계측기법)		
t	hr	0.0	1.5	3.0
C <sub>in</sub>	wppm	20.00	12.00	9.00
C <sub>out</sub>	wppm	12.00	9.00	8.00
C <sub>in</sub> -C <sub>out</sub>	wppm	8.00	3.00	1.00
C <sub>e</sub>	wppm	2.8453	2.8453	2.8453



<그림 2.4-9 대용량 콜드트랩 정제효율>

위의 실험 데이터로부터 식 (3)을 이용하여 콜드트랩의 trapping 효율  $\eta$  및 capacity  $M_t$  를 계산하여 콜드트랩의 성능을 비교 평가하였다.

대용량 콜드트랩의 정제효율은 그림 2.4-9에서 보는 바와 같이 초기효율이 설계값인 0.5보다 약간 못미치는 0.48로서 설계값과 거의 유사하게 나타남을 알 수 있었다.

대용량 콜드트랩의 성능은 평가 대상이 산소로서 콜드트랩의 설계 포획량 대비 실험에서 실제로 포획된 불순물량으로 평가할 수 있으며, 성능평가 식은 아래 식 (5)와 같다.

$$\text{콜드트랩의 성능 (산소, \%)} = \frac{\text{불순물 포획량 (kg)}}{\text{설계 포획량 (kg)}} \times 100 \quad (5)$$

여기서, 불순물 산소의 설계 포획량은 오염원 별로 (1) 시설에 loading 되어 있는 소듐 중의 초기 산소, (2) 구조재의 표면으로부터 이동되는 산소, (3) 커버가스로부터 이동되는 산소를 대상으로 표 2.4-2의 초기 불순물(산소) 설계 포획량 계산식으로부터 구할 수 있다.

**<표 2.4-5 불순물(산소) 설계포획량 계산식>**

번호	항목	계산식
1	소듐 중의 초기 산소량	$Wa_{(O_2)} = (C_{O_1} - C_{O_2}) \times 10^{-6} \times W, (kg)$
2	구조재 표면의 산소량 (재질: 스테인레스강)	$Wb_{(O_2)} = 1.0 \times 10^{-3} \times S, (kg)$
3	커버가스로부터 이동되는 산소량	$Wc_{(O_2)} = V \cdot \rho \cdot Y_O \times 10^{-2}, (kg)$

본 실험을 수행한 계측기법시험시설은 STELLA-1 보다 규모가 작으므로 시설의 기준이 다르기 때문에 콜드트랩의 성능을 상대적으로 평가하기 위해서는 우선 불순물 산소의 설계포획량을 비교해야 할 필요가 있다. 대용량 콜드트랩은 STELLA-1용으로 설계되어 있기 때문에 이에 대한 설계포획량은 이미 확보되어 있으므로, 계측기법시험시설에 대한 산소의 설계포획량을 표 2.4-5에 있는 계산식을 이용하여 계산한 결과와 비교한 설계포획량은 표 2.4-6과 같다.

**<표 2.4-6 불순물(산소) 설계포획량 비교>**

오염원	설계포획량 (kg)		비고
	STELLA-1	계측기법시험장치	
초기 산소	0.6373	0.0354	소듐량 : STELLA-1 (18,000kg), 계측기법시험장치 (1,000kg)
구조재 표면의 산소	0.6430	0.1653	장치 및 배관 표면적 : STELLA-1 (643.03㎡), 계측기법시험장치 (165.3㎡) [표 2.4-7 참조]
커버가스 중의 산소	0.1347	0.0075	
합계	1.4150	0.2082	

계측기법시험시설의 설계포획량 계산을 위해 사용된 계측기법시험장치에 대한 구조재 표면적 계산결과는 표 2.4-7과 같다.

**<표 2.4-7 계측기법시험장치의 구조재 표면적>**

	장치	표면적 (㎡)	비고
Tank	Sodium storage Tank	11.0	Cylindrical part surface
	Sodium Buffer Tank (A)	6.9	Cylindrical part surface below "HH" level
	Sodium Buffer Tank (B)	6.9	Cylindrical part surface below "HH" level
Heat exchanger units	Cooler , Tube-side (Na)	2.2	1" inside/outside coil
	Pre-heater (Na)	2.0	Cylindrical part surface
Cold trap	Main Cold Trap	119.5	
	Test Cold trap (A)	4.6	
	Test Cold trap (B)	4.6	
Piping	2", 1", 1/2"	7.7	2", 1" and 1/2" pipe
Total		165.3	

위의 표 2.4-6에서 보는 바와 같이 STELLA-1과 계측기법시험장치의 설계포획량은 각각 1.415 및 0.208kg으로서 이는 계측기법시험장치의 규모가 STELLA-1에 비해 상대적으로 작기 때문이다. 본 실험을 통하여 획득한 불순물 중의 산소 포획량은 약 0.19kg으로서 식 (5)를 이용하여 성능을 평가한 결과 설계포획량 0.208kg과 거의 유사하게 나타남을 알 수 있다.

## 5. SWR 사고 방호기술 개발

본 연구의 목적은 소듐냉각고속로 증기발생기 내부에서 전열관 벽이 기계적 결함 등으로 인해 손상되어 소듐-물 반응 사고가 발생한 후 시간이 지남에 따라 인접한 전열관을 손상시키면서 점차 확대 전파되는 과정을 초기 누출되는 물의 양에 따라 종합적으로 유추해 볼 수 있는 모델을 개발함에 있다. 소듐-물 반응 현상을 초기 미량 누출부터 시작해서 최종 대규모 누출까지 연속공정으로 실험하기에는 안전성과 경제성 측면에서 많은 어려움이 있기 때문에 지난 단계에서부터 주요 누출 규모별로 구분하여 연구를 수행하였다.

### 가. Multi-target wastage 특성실험

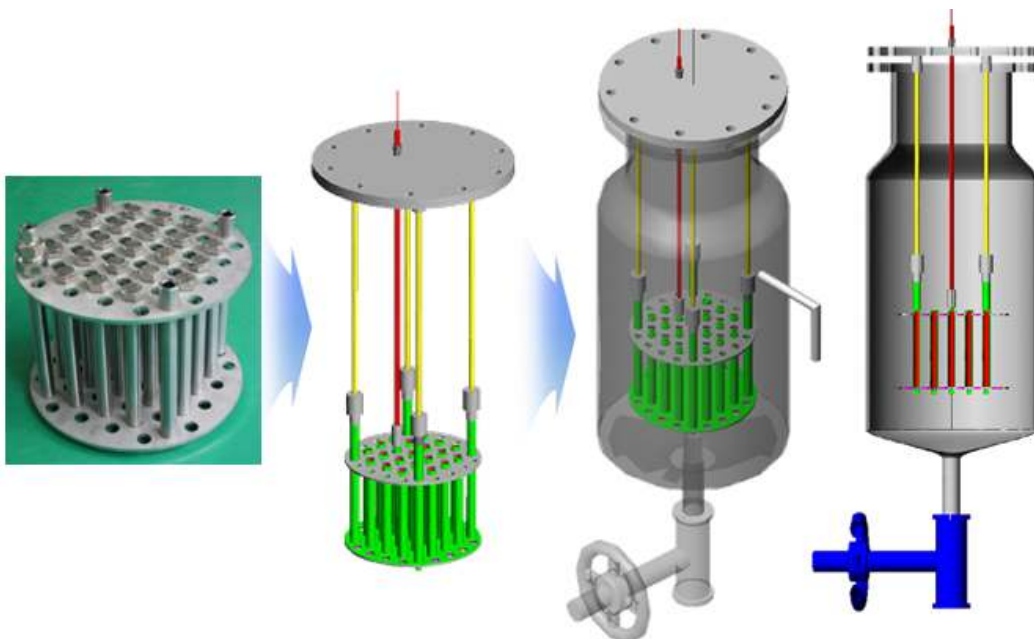
소위 중규모 누출 (누출량 10g/s~2kg/s) 영역에서는 소규모 누출 때와는 달리 형성되는 반응 flame jet의 길이가 상대적으로 길어 대부분 전열관 피치를 넘어서기 때문에 1개의 반응 flame jet 내에 복수의 전열관이 동시에 포함된다. 따라서 중규모 누출 실험에서는 전열관 배열 구조와 전열관 표면에서 반응 flame jet의 반사, 산란현상들이 종합적으로 고려되어야 한다.

#### (1) 실험 조건 및 방법

KALIMER-600 증기발생기 설계 및 운전조건을 반영하여 그림 2.5-1과 같은 전열관 번들 모형을 제작, 반응기 내부에 장착한 후 표 2.5-1과 같은 조건으로 수행하였다.

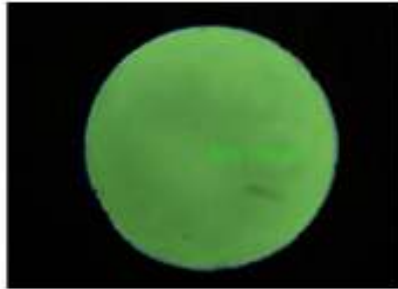
<표 2.5-1 실험조건>

전열관 재료	전열관 배열	소듐 온도	스팀 온도	스팀 누출량	누출 시간
Mod.9Cr-1Mo	5×5 layer	450℃	350℃	> 10 g/s	30 sec

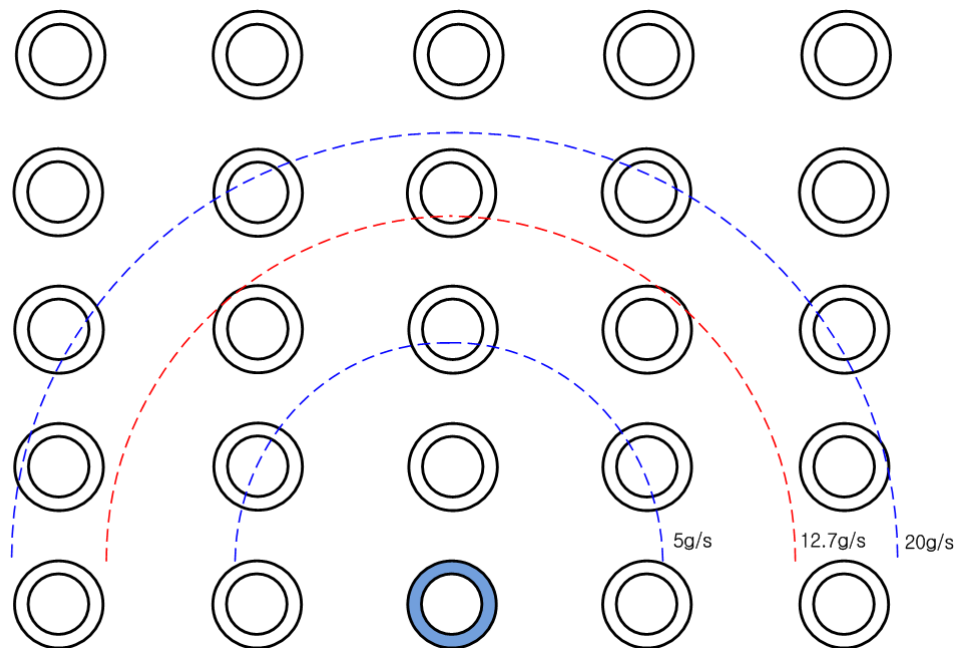


<그림 2.5-1 전열관 번들 모형>

스팀은 그림 2.5-2와 같이 전열관 모형( $\Phi 23\text{mm}$ , 길이 200mm) 벽면에 super drill과 wire cutting 작업을 통해 가공한 미세 hole( $\Phi 0.8\text{mm}$ ,  $\Phi 1.0\text{mm}$ )을 통해 분사되었다. 누출되는 스팀의 양은 노즐을 통해 형성되는 반응 flame의 jet 크기를 Dumm[2.5-1]의 계산식을 통해 미리 예측(그림 2.5-3)하여 그 길이가 전열관 피치를 넘어 다른 layer의 전열관까지 손상을 줄 수 있는 충분한 양을 선정하였으며, 그림 2.5-4와 같이 서로 다른 세 방향으로 분사하며 그 영향을 확인하였다.

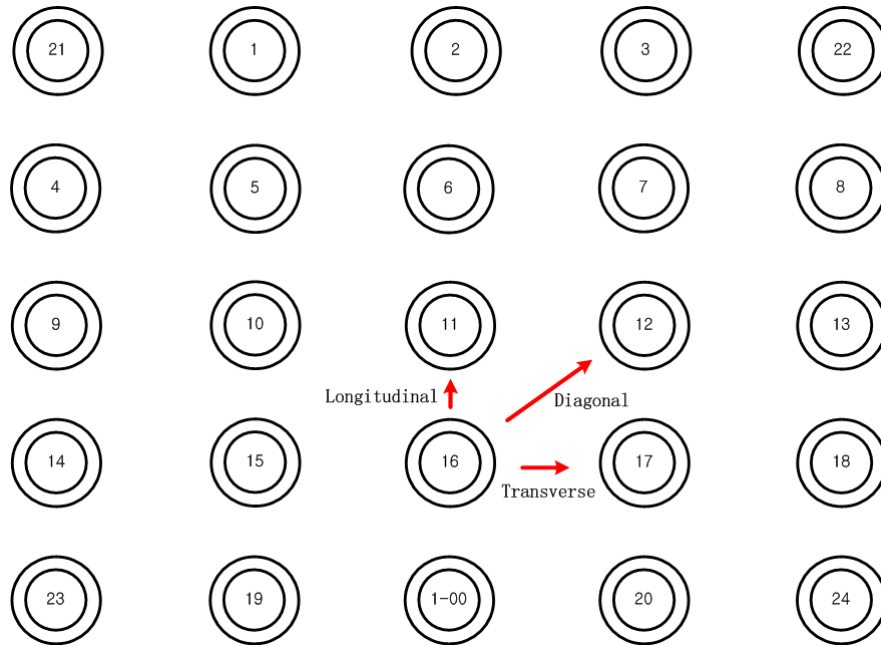


<그림 2.5-2 노즐 구경>



<그림 2.5-3 반응 flame jet 형성 길이>





<그림 2.5-4 스팀 분사 방향>

## (2) 실험

저장탱크 내부로 소듐을 공급하기 전 탱크의 예열히터와 제어설비의 절연저항 이상 유무를 확인한 후 탱크를 100℃로 예열하며 아르곤 가스를 0.2kg/cm<sup>2</sup>로 주입하여 배출하는 작업을 3회 이상 반복하며 내부에 남아있을 수 있는 공기와 수분을 제거하였다. 그 후 순도 99.6% 이상의 소듐이 담겨있는 200kg 용량의 소듐드럼을 자체 제작한 용융장치로 예열하여 녹인 후 이송관을 통해 가스 가압방식으로 소듐 1.1톤을 공급하였다.

실험은 그림 2.5-1과 같이 반응기 내부에 전열관 번들 모형을 조립, 장착한 후 저장탱크로부터 150℃로 용융된 소듐을 약 100kg 정도를 공급하여 실험온도인 450℃까지 온도를 올린 후 스팀 공급계통을 통해 공급된 150~160kg/cm<sup>2</sup> 압력의 스팀을 전열관 번들로 분사하며 수행하였다. 이때 전열관 번들 내부에 함께 장착된 스팀 주입노즐이 상대적으로 오랜 시간동안 충전된 소듐 속에 담겨있음으로 인해 노즐 구멍을 통해 소듐이 스팀배관 내부로 유입되어 스팀 주입 시 반응하여 노즐 구멍을 폐쇄시킬 위험이 있다.

이를 방지하기 위해 그림 2.5-5와 같은 다양한 형태의 소듐 유입방지 기구를 설계한 후 모형제작을 시도하였으나 국내 관련 업체의 기술력 부족으로 인해 만족할만한 결과를 얻지 못했다. 따라서 실제 실험을 수행할 때에는 예열된 아르곤 가스를 2kg/cm<sup>2</sup>의 압력으로 스팀 배관을 통해 노즐 외부로 불어내는 방법을 사용하였다.

또한 실험을 통해 손상된 전열관의 위치와 범위를 정확히 인식할 수 있도록 실험에 사용된 모든 전열관 모형에는 그림 2.5-6과 같이 레이저를 이용한 고유번호를 색인하였으며, 실험 후 반응생성물 세정작업 후에도 반응 위치 인식에 어려움이 없도록 전열관 모형 조립 시 스팀 분사 방향이 일련번호와 180° 방향이 되도록 하였다.



### (3) 결과 및 분석

Φ23mm의 전열관 모형을 5×5 layer 형태로 배열한 번들에서 누출량 12g/s로 실험한 결과를 그림 2.5-7에 정리하였다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 전열관 피치가 가장 짧은(35 mm) longitudinal 방향의 경우 표적 중앙에 직경 5 mm 크기의 분화구 형태 손상이, 그리고 그 외곽에 직경 15 mm 정도 크기의 동심원 형태의 손상이 나타났다. 이를 기준으로 계산한 결과 flame jet의 주 반응부위 형성 각도는 그림 2.5-8과 같이 약 24° 정도인 것으로 예측되었다.

Transverse 방향(피치 50mm)의 경우 표적 중앙에 직경 10 mm 정도의 원형 손상부위와 함께 그 중앙에 미세한 기공들이 생성되어 longitudinal 방향의 손상형태와는 전혀 다른 손상형태를 보였다. 따라서 이는 반응 flame jet에 의한 손상과 더불어 고온의 부식성 반응생성물의 충돌에 의한 손상이 중요 인자인 것으로 추정된다. 세 가지 방향의 모든 실험결과 있어서 노즐과 가장 인접한 표적(전열관) 이외에 주변의 다른 전열관에서 반응생성물의 반사나 산란에 의한 2차적인 손상은 나타나지 않았다. 이는 스팀 누출 시간이 상대적으로 짧기 때문에 나타나는 현상일 수도 있다.

모든 경우의 실험에 있어서 전열관 벽의 손상 정도는 소규모 누출에 비해 심하지 않은 것으로 나타났다. 전열관 손상여부, 형상 및 깊이 등은 전문 분석기관에 의뢰하여 ATOS 3D Digitizer라는 분석 장비를 이용해 그림 2.5-9와 같이 3차원 해석을 수행하였다.

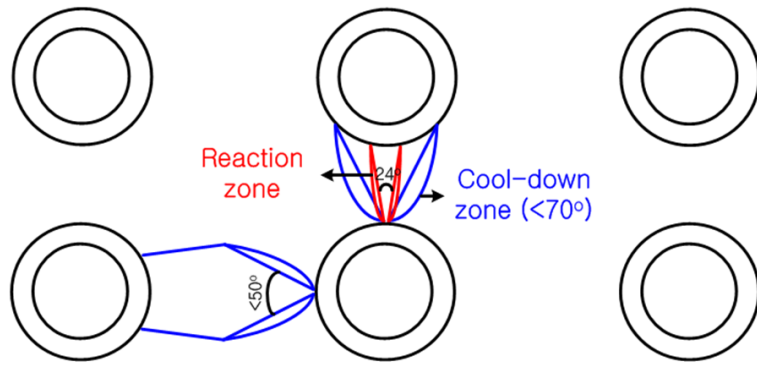
일본에서 수행된 실험결과를 보면 스팀 누출량이 15~128g/s일 경우 주 target 전방 2~6 개 정도의 전열관 표면에서 wastage 현상이 나타나며, 90초 이상이 지나면 2차적인 파손이 나타난 것으로 보고되어있다.

한편, 물 누출량이 2kg/s 부근에 이르면 다수의 전열관이 반응 flame jet에 덮여 국부적으로 가열됨으로 인해 기계적인 강도가 약해져서 내압에 의해 전열관이 파열되는 고온 라체트 현상이 나타날 수 있으나, 이번 단계에서는 실험장치의 한계 등으로 인해 이와 관련된 실험은 수행하지 못했다.

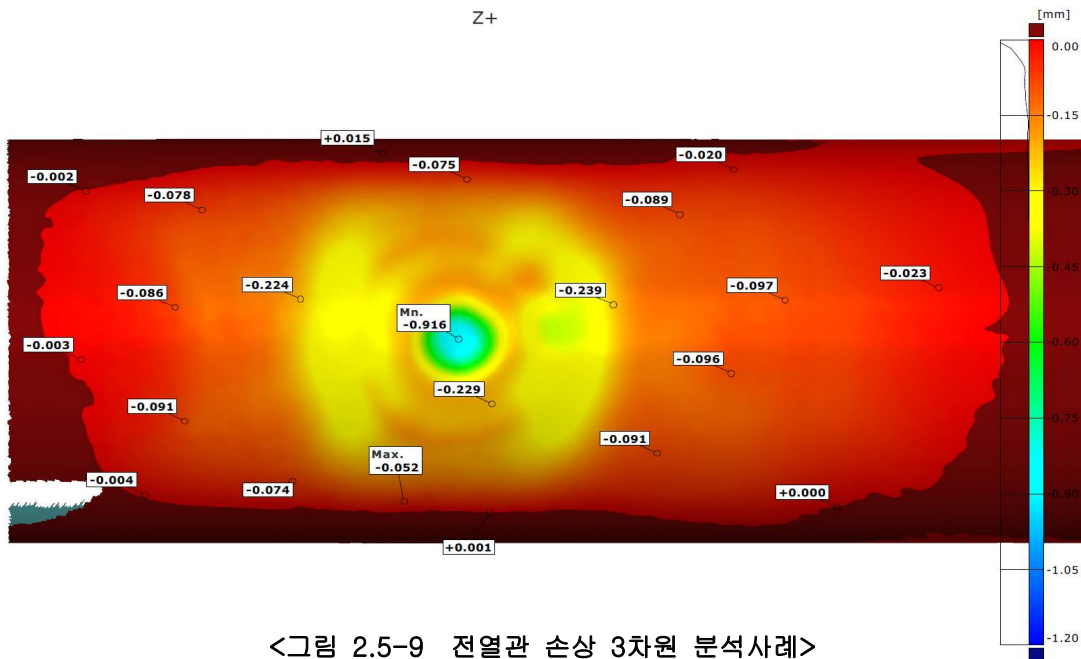


①, ②longitudinal, ③Transverse, ④Diagonal

<그림 2.5-7 전열관 손상형태>



<그림 2.5-8 반응 flame jet 분사각 (12g/s)>



<그림 2.5-9 전열관 손상 3차원 분석사례>

## 나. SWR 사고 확대전파모델 개발

지금까지 국내에서 수행된 소듐-물 반응현상 실험 결과와 기존에 보고된 해외 실험자료들을 종합, 분석하여 micro 누출이 발생해서 시간이 지남에 따라 대규모 누출 사고로 확대 전파되는 과정을 누출되는 스팀의 양에 따라 종합적으로 예측해 볼 수 있는 전파모델을 그림 2.5-10과 같이 개발하였다. 모델에 적용된 파손 전파의 의미와 개요는 아래에 서술된 내용과 같다. 보다 정확한 사고 확대전파모델을 개발하기 위해서는 상황별 매우 많은 실험자료를 필요로 하나 현재로서는 국내·외적으로 전열관 재료별 관련 실험 결과가 절대적으로 부족한 관계로 전체적인 완성도는 그다지 높지 않다. 하지만 이러한 일련의 작업들이 미래의 증기발생기 계통 설계 및 소듐-물 반응 현상 연구를 위한 하나의 초석이 될 수 있을 것으로 생각된다.

### (1) 파손 전파의 정의

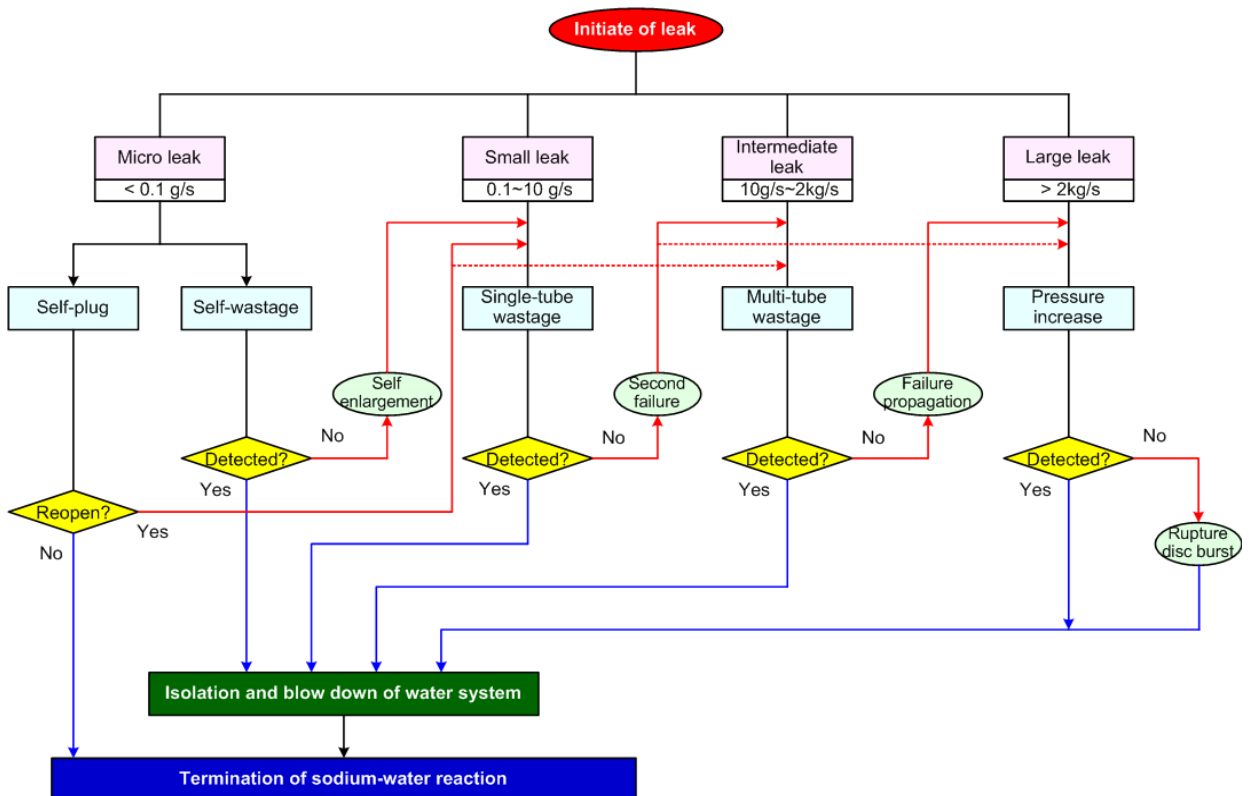
증기발생기 전열관 벽에 결함이 발생하면 고압의 물이 저압의 소듐 측으로 누출되어 소듐-물 반응을 일으키며 고온의 반응 flame jet가 형성된다. 이 반응 flame jet가 인접한 전열관에

닿을 만큼 커지면 표면에 부식 및 침식 작용(wastage)을 일으켜 새로운 누출 구멍을 만들고, 이러한 누출 상태가 감지되지 못하고 진행이 되면 차례로 주변의 인접한 전열관을 파손시키면서 누출규모를 확대해 가는데 이 현상을 파손 전파라 정의한다.

## (2) 모델의 개요

전열관 파손 전파는 다음과 같은 현상을 따라 진행된다.

- ① 전열관 결함으로 인해 물 누출이 시작된다.
- ② 누출되는 구멍으로부터 분사되는 물/증기가 외부 셀 측 소듐과 반응해서 고온의 반응 flame jet를 형성하며 가장 인접한 전열관 벽에 충돌한다.
- ③ 반응 flame jet와 충돌한 전열관의 벽 표면이 손상되고, 일정한 시간이 지나고 나면 전열관 벽이 관통된다.
- ④ 관통된 구멍을 통해 또 다른 물/증기가 분출되어 ②, ③과 같은 과정을 반복한다.
- ⑤ 물이 누출되는 구멍은 표면이 소듐과 반응하며 점차 부식되어 확대되는 자기 확대손상 (self-wastage) 현상이 일어나면서 누출되는 물의 양이 많아지고, 이에 따라 손상되는 전열관의 범주와 손상정도가 변화된다.
- ⑥ 지금까지의 과정이 지속적으로 반복되어 결국에는 하나의 전열관이 파단 되는 사고로 확대된다.



<그림 2.5-10 사고 확대전파모델>

## 6. 사용 후 소듐 처리공정 개발

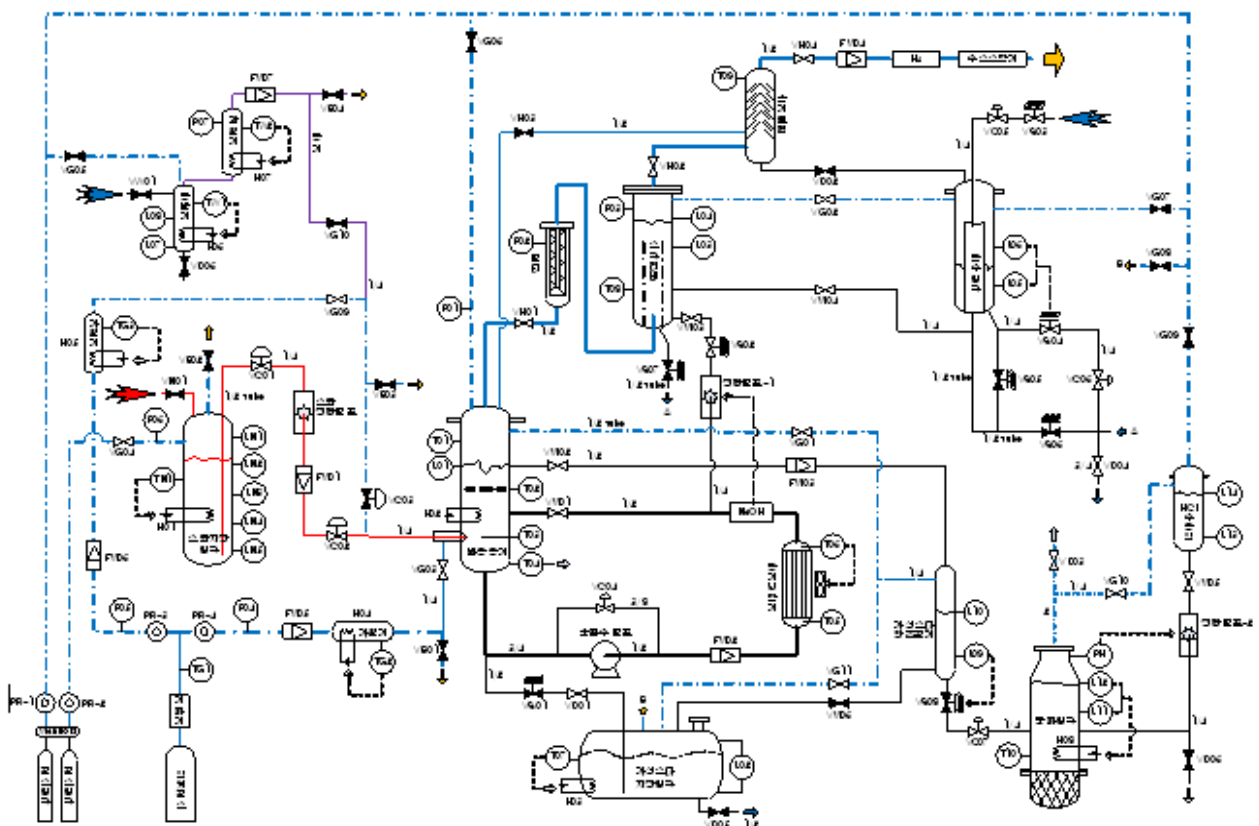
### 가. 소듐 주입노즐 물모의 실험

#### (1) 사용후 소듐처리 공정개발

사용후 소듐은 안전한 처리가 매우 중요하며 원자로 설계단계에서부터 이를 고려하고 있다. 한국원자력연구원은 1990년대부터 소듐실험을 수행하여 현재 약 1.3톤 정도의 사용후 소듐을 보관 중에 있으며, 향후 수행예정인 대형 검증실험 등을 고려할 때 사용후 소듐 처리기술 개발이 필수적이다.

사용후 소듐 처리공정에 대한 기술현황을 분석하였다[2.6-1]. 보편적인 NOAH 소듐처리공정[2.6-2]은 소듐을 가성소다 수용액에 주입하여 서서히 반응시켜 소듐을 가성소다로 만들어 처리하는 공정이다. 그러나 이 공정에서는 상부에서 주입된 소듐이 가성소다 용액보다 비중이 적어 소듐이 용액 상부에 적체되어 균일한 반응이 일어나지 않거나 적체된 소듐이 순간적으로 용액과 반응하는 문제점이 있다[2.6-3].

이러한 NOAH 공정상의 문제점을 보완하여, 가성소다 액면 하부에 사용후 소듐을 주입하여 혼합을 원활히 하며, 액면에 소듐이 적체되는 것을 방지하는 특성을 가진 신개념 사용후 소듐처리 공정을 개발하였다(그림 2.6-1). 이 공정에서는 반응 시 수소가스와 열이 발생하고 가성소다의 농도가 증가하므로 그림에서와 같이 반응용기를 중심으로 여러 계통이 필요하다.

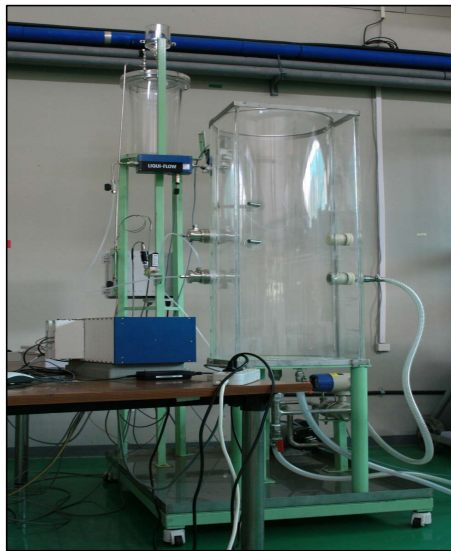


<그림 2.6-1 사용후 소듐처리 공정도>

## (2) 물모의 실험

개발한 신개념 공정을 사용후 소뚝처리에 적용하려면 소뚝이 반응용기의 중심부에서 균일하게 반응을 일으키기 위한 유체적 최적조건 도출이 선행되어야 하며 소뚝 분무노즐 영향이 지배적이다. 그러므로 소뚝과 열수력학적 특성이 유사한 물을 이용한 소뚝 분무노즐 물모의 실험을 선행하여 사용후 소뚝처리 장치 설계 및 제작을 위한 유체적 최적조건 등 설계요건을 도출하였다.

실험장치(그림 2.6-2)는 실험부, 소뚝을 모의한 색소 공급계통, 물 순환계통 및 질소가스 공급계통으로 구성된다. 실험부는 내경 384mm, 높이 1,200mm 투명 아크릴 원통으로 구성되고, 내부에는 위치를 변화시킬 수 있는 다공판을 설치하였다. 분무노즐은 색소와 질소가스가 동시에 공급되는 노즐로서 질소가 와류를 일으켜 혼합이 잘 되어 주입되도록 나선형으로 설계 및 제작하였다(그림 2.6-3). 주입노즐의 각도는 15°, 36°, 63°, 80° 4종이며 주입위치는 3종류이다.



<그림 2.6-2 물모의 실험장치>



<그림 2.6-3 분무노즐>

3cc/s 이하 색소를 정량펌프로 주입하였고, 질소가스 주입량은 질량유량계로 측정하였다. 물순환계통에는 0°, 30°, 45°, 60°의 각도가 다른 4종 순환수 노즐을 5곳에 설치하였다. 홀 규격이  $\phi 5 \times p10\text{mm}$ ,  $\phi 10 \times p20\text{mm}$ 인 다공판 두 개를 제작하였고, 위치를 조절할 수 있게 구성하였다.

최적조건 도출을 위하여 분무노즐 위치와 각도, 질소가스 주입량, 순환수 주입량, 순환수 주입 위치와 각도, 다공판 위치와 형상, 용액의 수위 등 9종의 실험인자를 변화시켜 실험을 수행하였다. 실험인자가 유체적 혼합에 미치는 영향은 사진촬영을 통해 분석하였고 300세트의 실험자료를 생산하였다.

소뚝을 모의하는 색소주입량이 증가하면 질소가스에 혼입되지 못하는 색소가 독립적으로 확산하였다. 다공판을 설치하거나 순환수가 작동하면 와류는 발생하지 않아 색소가 순환수의 흡입구로 곧바로 흡입되는 경향이 없으므로 분무노즐의 위치는 낮아도 문제가 없었다. 분무노즐에서 가장 큰 문제점은 질소가스가 분사된 후 분무상태로 작게 분리되지 못하고 큰 기포형태로 상승하는 것이었다. 분무노즐의 각도가 작을수록 색소와 질소가스가 혼입하는 경향이 양호하였으며 큰 기포가 발생하는 빈도도 감소하였다.

질소가스 주입량이 적으면 기포가 벽면을 따라 상승하므로 질소가스 주입량은 많을수록 더 좋은 혼합 현상을 보였다. 그러나 질소가스 양이 많아지면 소비량, 가열기의 용량 및 냉각기의 용량이 증가하므로 최소 550cc/s 정도를 최적조건으로 판단하였다. 순환수노즐 위치는 분무노즐의 90° 위치에서, 분사노즐과 순환수 노즐의 수직거리는 200mm 정도가 최적조건이었다. 순환수노즐 각도는 45° 이상이면 양호한 혼합조건을 유지하였다. 순환수 유량은 다공판이 없을 경우에 0.35L/s가 최적이었으나 다공판을 설치하면 0.55L/s가 최적이었다.

다공판이 없을 경우에는 큰 질소기포가 색소를 포함한 상태로 액면까지 상승하였고, 다공판을 설치한 경우에는 홀의 직경이 작을수록 작게 분리되어 상승하였지만 다공판의 하부에 기포가 어느 정도 적체하는 현상을 보였다. 수위가 낮을수록, 질소가스 주입량이 많을수록 액면의 요동이 심하였으나, 수위를 높일 경우에는 반응용기 용량이 증가하는 단점이 있다.

실험결과 분석을 통하여 표 2.6-1과 같이 소듐이 반응용기 중심부에서 균일하게 반응을 일으키기 위한 유체적 최적조건을 도출하였으며 최적조건 시 반응용기 내 분사현상은 그림 2.6-4와 같다. 자세한 내용은 실험보고서 [2.6-4]에 기술되어 있다.

**<표 2.6-1 최적 주입조건>**

실험인자	단위	최적조건
질소 주입량	cc/s	>550.
물(색소) 주입량	cc/s	1.0
순환수 유량	ℓ/s	0.55
분무노즐 위치	mm	200
분무노즐 각도	°	< 15°
Type-1 순환수노즐 위치	mm	-
Type-2 순환수노즐 위치	mm	400
Type-2 순환수노즐 각도	°	60
수위	mm	800
다공판 위치	mm	600
다공판 규격 (t5)	mm	Φ5×p10



**<그림 2.6-4 최적상태>**

## 나. 소듐 처리장치 설계 및 제작

### (1) 공정요건 설정

실제 공정에서는 용융 소듐이 주입되어 화학반응이 일어나므로 화학반응에 미치는 조건 즉, 소듐 주입량, 가성소다 농도 및 온도조건 등 여러 조건들을 분석하여 표 2.6-2에서와 같이 장치의 설계 및 운전조건을 설정하였다. 설계조건은 안전을 고려하여 소듐 주입량을 2g/s로 설정하였다.

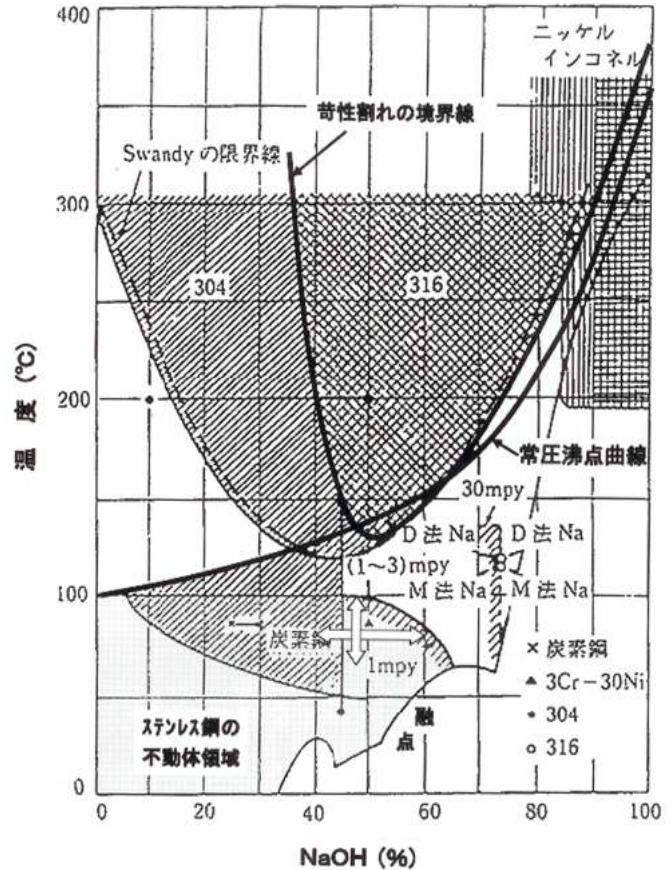
이 장치로 처리할 사용후 소듐에는 200°C에서 포화용해도가 0.012wt% 이고, 319°C에서 용융되는 가성소다가 함유되어 있어 200°C보다 약간 낮은 온도로 사용후 소듐을 저장탱크로 이송한 후에 저장탱크를 200°C로 유지시키며, 소듐 주입계통의 외부에는 wire heater를 사용하여 300°C로 예열하고, 분무노즐은 350°C의 질소가스를 주입하여 예열하는 방법으로 운전조건을 설정하였다.



가성소다 수용액에서 가성소다의 농도가 높고 수용액의 온도가 낮을 경우에는 가성소다가 석출하고, 가성소다의 농도가 낮으면 물의 비가 높아져서 소듐과 가성소다 수용액과의 반응속도가 빨라진다. 그림 2.6-5는 가성소다 수용액의 특성으로 100℃ 이하에서 운전할 경우에는 장치의 재질로 SS304와 SS316이 모두 가능함을 보여주고 있다.

<표 2.6-2 운전조건>

실험인자	단위	최적조건
소듐 주입량	g/s	1.0
저장탱크 소듐 온도	℃	200
소듐 배관 온도	℃	300
질소가스 주입량	Nl/s	1.0
질소가스 주입 온도	℃	350
가성소다 수용액 온도	℃	60
가성소다 농도	wt%	50
수소발생량	Nl/s	0.49
순환수 유량	l/s	0.55
보충 급수량	g/s	2.253
보충 급수온도	℃	< 30
냉각기 열제거량	kW	6.77
염산수용액 농도	wt%	50
염산수용액 온도	℃	25
염산수용액 주입량	g/s	3.18
소금생성량	g/s	2.54
중화시 발열량	kW	2.78
중화 탱크 전력	kW	7.5



<그림 2.6-5 NaOH 수용액 특성 [2.6-3]>

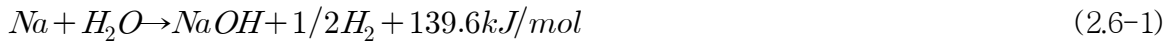
수용액의 온도가 높아지면 반응속도가 빨라지고, 낮으면 분무노즐이 자주 막혔다. 그러나 온도가 80℃ 이하이면 소듐과 가성소다 수용액의 반응속도는 온도에 별로 영향을 받지 않는 것으로 나타났다[2.6-3]. 본 공정에서는 비금속 불순물의 농도는 높으나 분무노즐에서의 온도가 일본의 실험에서보다 100℃ 정도 높기 때문에 분무노즐이 막힐 가능성이 적어 수용액의 운전온도를 60℃로, 설계온도는 80℃로 설정하였다. 표 2.6-3은 이 공정에 관련된 물질들의 특성이다.

<표 2.6-3 관련 유체들의 물성>

특성	가성소다 (60℃, 50%)	소듐 (300℃)	질소가스 (200℃)	수소가스 (80℃)
밀도 (kg/m <sup>3</sup> )	1.497x10 <sup>3</sup>	0.88x10 <sup>3</sup>	0.7287	0.05211
비열 (kJ/kg℃)	3.22	0.773	1.05	14.5
점성 (kg/m-s)	0.018	3.45x10 <sup>-4</sup>	2.47x10 <sup>-5</sup>	1.22x10 <sup>-5</sup>
열전도도(W/m℃)	0.167	77.1	0.03809	0.261

가성소다가 냉각용 순환수 배관이나 저온부에서 석출되어 막히는 것을 방지하고, 반응속도를 가능한 낮추기 위하여 가성소다 수용액의 운전농도는 50wt%로 설정하였다. 이 경우 그림 2.6-5에서와 같이 비등점이 대략 139℃이므로 운전온도에 비해 79℃ 정도의 여유도가 있다.

소듐과 가성소다 수용액이 반응하면 다음과 같이 수소가스가 생성하고 열이 발생한다.



소듐 주입량이 많으면 열과 수소가스가 더 많이 발생하여 열교환기가 커지고 질소가스를 일정하게 주입할 경우, 방출되는 가스 속에 수소의 농도가 증가한다. 소듐 1mole 은 23g 이므로 2g/s로 반응하면 약 13.2kW의 열이 발생한다. 60°C에서 순수한 물의 증기압은 0.197 bar인데 비하여 가성소다 수용액의 증기압은 0.01645 bar이다.

혼합가스에 편승된 가성소다는 교환이 가능한 필터를 설치하여 제거하고, 증기압에 의해 포함된 가성소다는 물을 사용하는 스크러버에 의해 제거한다. 2g/s 유량으로 주입되는 소듐과 가성소다 수용액이 반응하는데 필요한 물과 생성한 가성소다가 50wt% 수용액을 유지하는데 필요한 물의 총량은 5.05g/s 이다. 밀도를 고려할 경우 가성소다 수용액은 4.71cc/s 부피가 증가하게 된다.

질소가스의 주입량이 많을수록 혼합에는 유리하다. 그러나 다량 주입하면 액면의 요동이 심하고, 질소가스를 350°C로 가열하여 주입하여야 하므로 가열기와 냉각기의 용량이 증가한다. 물 모의실험에서는 혼합이 잘 되기 위해서는 질소가스를 0.55L/s 이상 주입하는 것이 필요하였고, 대략 1.0L/s가 적정한 것으로 판단되었다. 일본의 실험에서는 1.5L/s 이상으로 주입하면 질소가스의 영향으로 소듐을 일정한 속도로 주입할 수 없는 것으로 나타났다. 이들을 고려하여 질소가스 설계주입량은 1.5L/s로 설정하였다.

소듐을 2g/s로 주입하면 대략 1 NL/s로 수소가스가 생성한다. 질소가스의 설계주입량은 1.5 NL/s이므로 배기가스계통으로 방출되는 가스의 부피는 2.5NL/s이다. 예상되는 다양한 주입조건들을 고려하면, 이 공정에서 배기가스 속에 수소의 비율은 대략 33~63vol% 범위이므로 수소가스 연소기를 설치하였다.

물 mock-up 실험에서 순환수의 적정량은 상온에서 0.55L/s이었다. 반응용기로 주입 시에 순환수 노즐에서의 속도가 중요하기 때문에 60°C 가성소다 수용액도 0.55L/s로 주입한다. 소듐을 2g/s로 주입할 경우에 발열량이 13.2kW이고, 질소가스를 가열하는데 0.72kW, 공급수 5.05g/s를 30°C에서 60°C로 가열하는데 필요한 열량 0.63kW 이므로 냉각기에서 제거하여야 할 열량은 13.3kW 정도이고, 온도감소량은 보수적으로 5.01°C이다.

가성소다의 중화제로는 염산(HCl)과 질산(HNO<sub>3</sub>)이 사용되고 있다. 중화제의 좋은 조건으로는 위험성이 적어야 하고, 발열량이 적고, 반응시 생성된 염의 용해도가 낮아 쉽게 석출되어 제거할 수 있어야 한다. 50wt% 가성소다 수용액 100g을 중화하기 위하여 필요한 염산은 45.634g, 질산은 78.75g이 필요하고, 두 경우 모두 22.5g의 물이 생성된다. 그러므로 초기 수용액에 들어있던 물을 포함하면 물의 총량은 72.5g이 된다. 염산으로 중화한 후에는 물 72.5g에 녹을 수 있는 NaCl은 20°C에서는 26.1g이므로 60.9g의 NaCl이 석출한다.

질산으로 중화한 후에는 물 72.5g에 녹을 수 있는 NaNO<sub>3</sub>는 20°C에서는 63.8g이므로 43g의 NaNO<sub>3</sub>가 석출한다. 즉, 중화 후에 20°C로 냉각시키면 NaCl은 생성된 량의 83%, NaNO<sub>3</sub>는 40.5% 정도 석출시킬 수 있다. 또한 염산 사용시 발열량은 질산을 주입하는 경우의 63% 정도이고, 생성된 NaCl (소금)이 질산 사용시 생성되는 NaNO<sub>3</sub>보다 친숙하므로 염산을 중화제로 선정하였다.

## (2) 사용후 소듐처리장치 설계, 제작

사용후 소듐을 처리할 실험장치를 그림 2.6-6과 같이 설계, 제작하였다. 그림 2.6-1의 공정도와 다른 점은, 실험에서는 가성소다의 생성량이 적어 생성된 가성소다를 저장하는 방법을 택해 중화계통을 설치하지 않았다.

이 실험장치는 소듐과 가성소다 수용액이 반응하는 반응용기, 소듐 주입계통, 질소 주입계통, 가스배기계통, 냉각을 위한 순환수계통, 저장/공급기능을 하는 보조계통 등으로 구성되어 있다. 분무노즐은 내관과 외관으로 환형으로 구성되고 내관의 중심으로는 소듐이 주입되고 외관에는 고온의 질소가스가 주입된다.



<그림 2.6-6 사용후 소듐처리 장치>

소듐, 가성소다 수용액 및 물이 한 개의 장치에 공존하여 있으므로 만일 계통의 파손으로 혼합할 경우에는 극렬한 화학반응을 유발하고 정상운전 중에도 다량의 수소가스가 발생한다. 그러므로 이 공정 중에서 중요계통인 반응용기에서는 자동제어에 따라 가성소다의 농도가 균일하게 유지하도록 구성되었고, 중력에 의해 모든 유체가 드레인 되어 분리되게 설계, 제작하였다. 각 부품과 기기의 규격은 기술보고서[2.6-5]에 상세히 기술되어 있다.

또한 사용하는 물질들의 누설이나 비정상적인 외부조건에 대비하여 비상정지 기능을 강화하여 2개의 비상정지 버튼 즉, 소듐용과 계통용 비상버튼들을 작동시키면 공정이 정지되고, 용액들이 자동으로 저장탱크로 드레인 되고, 급수계통에 들어있는 물이 실험실 외부로 완전히 배출되도록 설계되어 있다. 이 장치 운영에 필요한 정상/비상 운전절차서를 작성하였다[2.6-6].

지지대는 100mm H-beam으로 제작하였고, 장치의 크기는 가로 4m, 세로 2.5m, 높이 4m이다. 정면에서 보았을 때에, 이층으로 구성되어 있고, 소듐계통과 급수계통 사이에 가성소다 계통을 배치하였다. 우측의 하단에는 가성소다 저장탱크, 중앙에는 수용액 순환 계통인 펌프와 유량계, 좌측에는 질소가스 공급계통을 설치하였다.

아래층의 뒤쪽에는 냉각기가 대부분을 차지하고 있다. 60°C 가성소다 수용액을 공기로 13.3kW열을 제거하기 때문에 냉각기의 열전달 면적과 공급 공기 유량이 많아 큰 부피를 차지하고 있다. 상부의 중앙에는 반응용기를, 우측에는 소듐 저장탱크를 배치하였다. 중앙 뒤편에는 가스배기계통을 좌측 뒤편에는 급수탱크가 설치되어 있다. 그림 2.6-7~2.6-9에서는 사용후 소듐 처리장치에 설치한 주요기기의 형상을 보이고 있다. 가성소다 농도계의 방식은 굴절형이다.



<그림 2.6-7 분무노즐 설치>



<그림 2.6-8 NaOH 농도계>



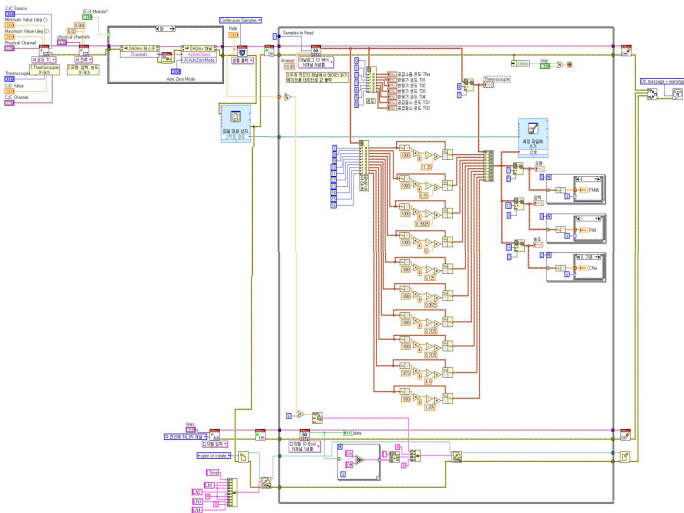
<그림 2.6-9 수소 농도계>

## 다. 소듐 처리 예비실험

### (1) 장치의 기능 시험

소듐 주입계통, 반응계통, 물 공급계통, 가성소다 순환계통, 반응가스 배출계통 등으로 구분하여 용기와 배관에서 기밀 유지를 확인하였다. 가압시험에 사용된 질소가스의 압력은 2~3 bar이었다. 가성소다 순환펌프가 가성소다의 순환유량 0.55L/s를 만족하는지에 대한 시험을 수행하였고, 반응용액의 냉각을 위한 공기순환계통의 냉각 기능을 확인하였다.

비상시 급수계통의 물이 자동으로 외부로 배출되는 비상운전 기능을 시험하였고, 각 용기의 커버가스와 분무가스로 사용되는 질소가스의 압력제어시험을 수행하였다. 또한 열전대, 압력계, 수위계를 비롯한 각종 계측기기에 대한 정상 신호 출력여부를 확인하였다. 또한 실험자료를 기록하기 위한 Data Acquisition System(DAS)을 제작하여 신호 획득시험을 수행하였다. DAS의 신호 획득 다이어그램과 DAS에 기록되는 중요 실험 측정자료 항목을 그림 2.6-10과 표 2.6-4에 나타내었다.



<그림 2.6-10 DAS 신호 획득 다이어그램>

<표 2.6-4 실험자료 기록 항목>

No	Tag	Description	Signal
1	FM01	공급소듐 유량	4~20 mA
2	FM02	순환수 유량	4~20 mA
3	FM04	배기가스 유량	4~20 mA
4	FM05	질소가스 유량계	4~20 mA
5	FM06	NaOH 펌프 유량	4~20 mA
6	TNa	공급소듐 온도	~ mV
7	T01	반응기 온도	~ mV
8	T02	반응기 온도	~ mV
9	T03	반응기 온도	~ mV
10	T04	반응기 온도	~ mV
11	TG1	질소 공급온도	~ mV
12	TG2	공급질소 온도	~ mV
13	P01	반응용기 압력	4~20 mA
14	P04	반응용기 압력	4~20 mA
15	P05	질소 공급가스압	4~20 mA
16	CNa	NaOH농도 제어	4~20 mA
17	CH2	수소가스 농도계	4~20 mA

### (2) 교정 및 검정실험

반응용기의 액위를 측정하는 차압식 액위계를 가성소다 대신에 물을 사용하여 교정하였으며, 가성소다 표준용액 30, 50, 70 %wt를 제조하여 가성소다 농도계를 교정하였다.

소듐과 가성소다용액의 반응에 의해 생성되는 수소농도를 측정하기 위하여 사용된 수소농도분석기는 thermal conductivity detector type이다. 교정에 사용된 가스로는 zero gas로 질소가스(99.99%), span gas로 두 가지의 수소-질소가스 혼합가스(수소농도: 4.0%, 30%, Balance: 질소)를 사용하였다.

1 g/s이하의 소듐을 정량적으로 주입하기 위하여 그림

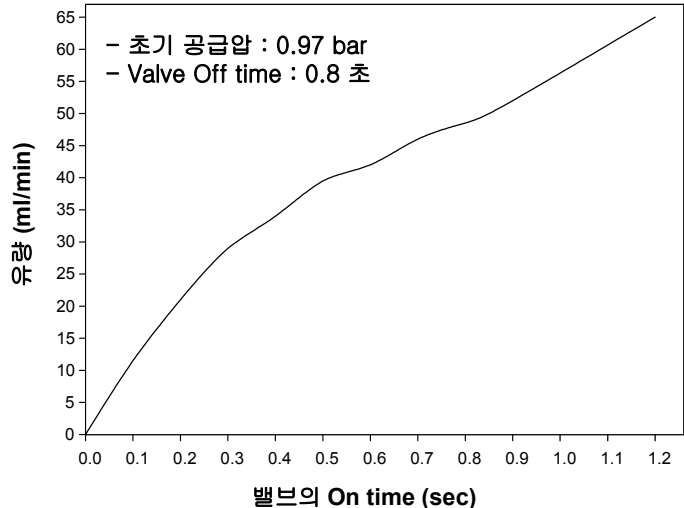
<표 2.6-5 On-Off 매트릭스>

On time, sec	Off time, sec
0.1	0.8
0.2	0.8
0.3	0.8
0.4	0.8
0.5	0.8
0.6	0.8
0.7	0.8
0.8	0.8
0.9	0.8
1.0	0.8
1.2	0.8

2.6-11 과 같은 솔레노이드 구동 On-Off 유량 공급밸브를 자체 고안하였다. 이 소듐 공급장치는 압축공기 공급부, On-Off 타이머, 벨로즈형 게이트밸브로 구성되어 있다. 0.97 bar에서 밸브의 개방율에 따라 다양한 유량 측정실험을 수행한 결과를 바탕으로 밸브의 최대 개방율을 결정하였고, 이 개방율에서 밸브를 개방하고 닫을 수 있도록 솔레노이드의 구동부를 개선하였다. On time 동안 밸브는 열리고 Off time 동안 밸브는 닫힌다. 표 2.6-5는 On-Off 유량 공급 밸브를 검정하기 위한 On-Off time매트릭스를 보여주고 있으며, 그림 2-6-12는 물을 사용하여 On-Off 유량 공급 밸브의 유량검정실험을 수행한 결과를 나타내고 있다.



<그림 2.6-11 On-Off 유량제어밸브>



<그림 2.6-12 On-Off 유량제어밸브 검정곡선>

### (3) 소듐 처리실험

#### (가) 실험조건 및 방법

소듐 분무노즐 물모의 실험을 통하여 도출된 실험조건을 사용하여 소듐 처리실험을 수행하였다(표 2.6-6). 소듐 저장탱크에 압력을 가하여 300°C의 용융 소듐을 분무노즐을 통하여 반응기에 주입하였다. 소듐 저장탱크에 5개의 수위계를 설치하여 4 구간, 즉 Level HH-H (970.5 ml), H-M (10,680.6 ml), M-L (5,822 ml), L-LL (5,822 ml)에서 소듐의 정량적인 주입량을 확인하였다.

두 가지 소듐 주입유량조건에서 소듐 처리실험을 수행하였다. Level HH-H 구간에서는 On-Off 유량제어밸브의 소듐 주입 조건을 On time 1.0 초, Off time 0.8 초, 소듐 주입압력 0.97 bar로, Level H-M 구간에서는 On-Off 유량제어밸브의 소듐 주입 조건을 On time 0.4 초, Off time 0.8 초, 소듐 주입압력 1.92 bar로 하여 소듐을 주입하였다

소듐을 주입하기 전에 반응기내 가성소다가 역류하는 것을 방지하기 위하여 역류방지 질소

<표 2.6-6 실험조건>

실험 조건	범위
반응 온도(°C)	60
소듐 주입 압력(MPa)	0.97
반응용기 수용액 량 (l)	111
소듐 저장탱크 온도 (°C)	300
소듐 주입량 (g/s)	< 1.0
질소가스 주입온도(°C)	350
질소가스 주입량 (Nl/s)	1.0
순환수 유량 (l/s)	0.55
가성소다 운전온도 (°C)	60
가성소다 농도 (wt %)	50 ~ 60
보충 급수온도 (°C)	30

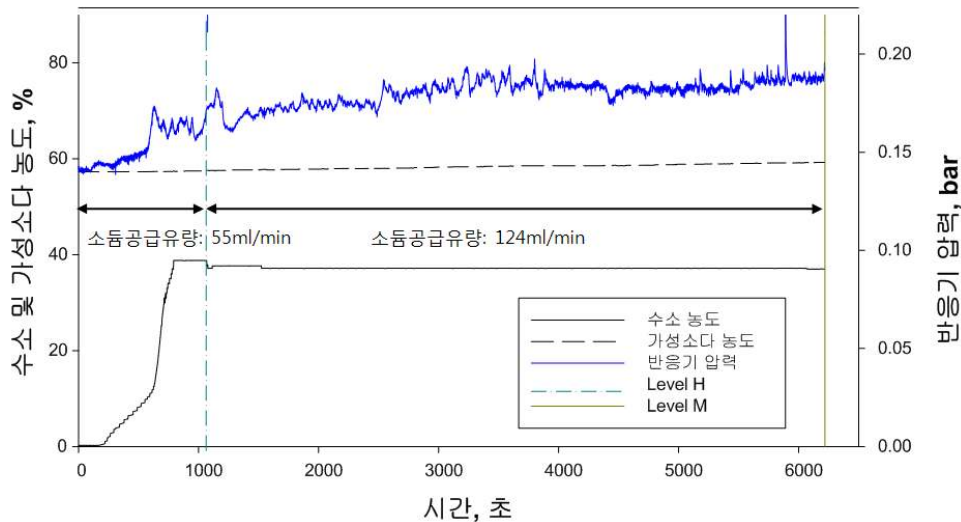
가스를 0.5 NL/s 유량으로, 소듐 분무가스를 1NL/s 유량으로 공급하였다. 이때 역류방지 질소가스와 소듐과 분무가스의 온도를 350℃로 유지시켜 분무노즐을 가열하도록 하였다.

반응기내 가성소다와 주입되는 소듐의 반응을 균일하게 유지하고, 어느 특정 부분에서 미반응 소듐이 농밀화되거나 혹은 급격하게 가성소다용액과 순간적으로 반응하는 것을 방지하기 위하여 가성소다를 용액을 0.55/L 속도로 순환시켰다. 소듐의 과잉 주입으로 인하여 가성소다와 소듐의 반응이 급격히 일어나 수소 농도가 40 %를 넘지 않도록 하여야 하며, 수소농도가 그 이상일 경우 소듐 주입량을 줄여야 한다.

소듐과 가성소다 수용액이 반응하여 생성되는 열을 제거하기 위하여 냉각기를 가동시켜 반응기내 수용액의 온도는 60℃ 근처에서 유지하도록 하였다. 가성소다의 농도를 50%이하로 유지할 경우 소듐과 가성소다 수용액의 반응이 빨라지므로 가성소다의 농도를 50~60%로 유지하도록 하였다. 소듐과 가성소다 수용액의 반응으로 인하여 가성소다의 농도가 55%를 초과할 경우 급수탱크로부터 물을 공급하여 가성소다 농도를 감소시켰다.

### (가) 실험결과

그림 2.6-13은 각기 다른 유량 조건에서 소듐처리실험을 수행한 결과로서 시간에 따른 수소 및 가성소다 농도, 반응기 압력의 변화를 보여 주고 있다. 수소농도는 소듐이 주입되기 시작한 직후 급격히 증가하기 시작하여 790 초를 지나면서 37%에 도달한 후 일정하게 유지되었다. 반응기의 압력은 약 0.17 bar에서, 가성소다 농도는 57% 근처에서 안정적으로 유지되었다. 반응기중 수용액의 온도 역시 그림 2.6-13에서 보는 바와 같이 약 62 ℃에서 냉각기에 의하여 일정하게 유지되었다.



<그림 2.6-13 수소, 가성소다 농도 및 반응기압력 변화>

그림 2.6-14에서 보여진 Level HH-H 구간은 On-Off 유량제어밸브의 소듐 주입 조건을 On time 1.0 초, Off time 0.8 초, 소듐 주입압력 0.97 bar로 하여 소듐을 공급한 결과를 나타내고 있다. 표 2.6-5에서 나타난 유량제어밸브의 검정곡선으로부터 이 조건에서 소듐 유량은 55 ml/min임을 알 수 있다. 실제적으로 이 구간에서 소듐이 정량적으로 잘 주입되었는지 확인

하기 위하여 반응가스 배출량, 발생한 수소 농도를 바탕으로 소듐처리량을 다음과 같이 계산하였다.

$$\text{소듐 처리량} = \text{FN}_2 \times \text{CH}_2 / 100 \times \rho\text{H}_2 \times 23 \text{ (g/min)}$$

여기에서, FN<sub>2</sub> : 반응가스 배출량 (ml/min)

CH<sub>2</sub> : 배출가스중 수소농도 (%)

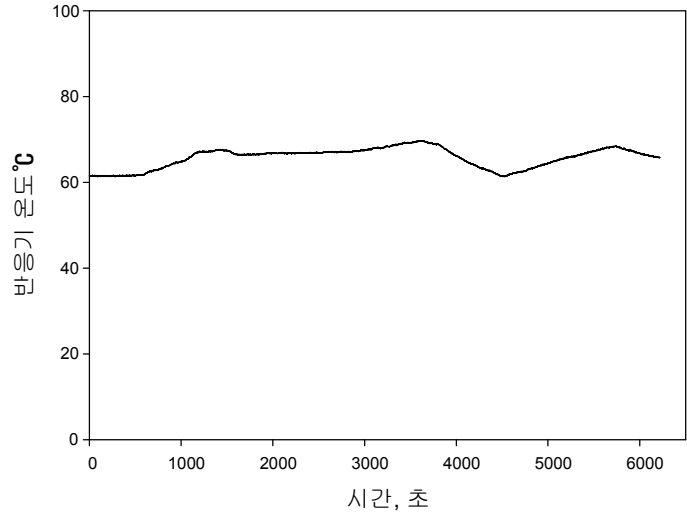
ρH<sub>2</sub> : 수소농도 비중 (g/cm<sup>3</sup>)

23 : 수소에 대한 소듐의 원자량 계수

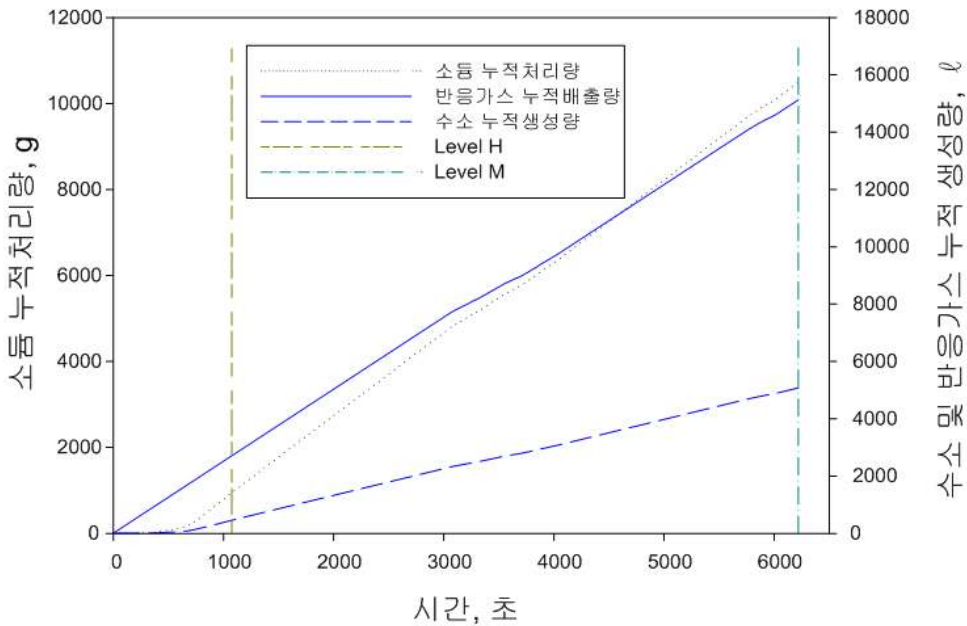
그림에서 보여진 바와 같이 이 구간에서 소듐 누적처리량은 940.8 g(1,066 ml)으로서 실제로 소듐 저장탱크에서 주입된 소듐량 970.5 ml와 거의 일치하고 있다. 이때 소듐 실제 주입유량은 54 ml/min으로서 물로 검정한 유량 55 ml/min와 거의 유사하였다.

전체적으로 100 여분이 경과한 후 소듐 누적처리량은 10.49 kg(11.89L)로서 소듐 저장조에서 실제로 주입된 소듐량 11.65L와 반응가스 배출량, 발생한 수소 농도를 바탕으로 계산한 소듐처리량과 거의 일치하고 있다.

이상의 결과로부터 본 연구에서 개발한 소듐 처리장치의 소듐 반응 완화성, 물모의 실험으로부터 도출된 소듐 주입조건, 그리고 처리공정 개념과 분무노즐의 타당성을 확인하였다.



<그림 2.6-14 반응기내 수용액 온도 변화>



<그림 2.6-15 소듐 누적처리량>

## 제 4 장 목표 달성도 및 관련분야에의 기여도

안전성 입증 실험 기반 구축 및 소듐기술 개발 분야에서 다음과 같은 연구개발 결과를 도출함으로써 RFP 상 제시하였던 연구목표를 달성하였으며 관련분야 국내 기술수준 향상에 기여하였다.

### < 선진기술 개발 및 검증 : 안전성 입증 실험 기반 구축 >

#### □ 기기 열유체 성능검증 소듐루프 구축 및 기기 성능검증 개별실험

- 2009년에는 개발 중인 소듐냉각고속로의 안전성 입증을 위한 소듐 열유체 종합효과 시험시설(STELLA-1)의 기본설계를 완료하였으며 2010년 상세설계를 완료하였다. 2011년에는 열교환기, 기계식 펌프, 압력탱크 등 주요 기기의 제작 및 배관설치 등을 완료하였으며, 실험장치의 시운전을 통해 차기년도부터 기기 성능검증을 위한 개별실험을 수행할 예정이다.

#### □ 소듐 고유 계측기법 개발

- 소듐 고유 계측기 시제품 시험용 실험장치는 2.5톤 소듐을 정제하는 콜드 트랩 및 플러깅미터로 소듐을 정제할 수 있으며, 시제품을 설계, 제작하여 정밀도  $\pm 1.9\%$ FS의 계통유량센서, 정밀도  $\pm 2.5\%$ FS의 국부유속센서, 응답성 0.7초의 압력트랜스미터, 정밀도  $\pm 3.7\%$ FS의 레벨센서의 성능을 확인하였다.

#### □ 소듐 열유체 실증시험시설 기본설계

- 3단계 상사성 분석 방법론을 기초로 하여, 잔열제거계통 작동시 주요 계통간 상호작용 및 각 기기의 국부 열수력 현상이 잘 보존될 수 있도록 STELLA-2 실험장치의 기본 설계를 수행하였다. 본 연구를 통해 설계된 STELLA-2 실험장치의 실험결과는 향후 원형로 SFR 건설을 위한 인허가 과정에 유용하게 활용될 수 있다.

### < 기반기술 검증 : 소듐기술 개발 >

#### □ SG 신뢰성 향상기술 개발

- 증기발생기에서의 소듐-물 반응 가능성을 배제하기 위한 신개념 이중벽관을 설계, 제작하여 on-line 파손 감지기술 검증을 위한 누출감지 실험을 수행하였다. 또한 물 누출 조기 감지설비 시제품을 제작하였으며, Mod.9Cr-1Mo 강의 소규모 누출 시의 wastage rate에 대한 실험식을 얻었다.

#### □ 소듐 안전관리기술 개발

- 소듐 화재의 확산을 방지하기 위해 누출된 소듐을 수집하여 진화하는 트레이의 최적 설계 조건을 설정한 후 실험을 통해 검증하였으며, 소듐 온도관리를 위한 기기의 효



율적 운영기술을 개발하고 최적의 분석방법을 수립하였다. 또한 전열관 재료와 납-비스무트 공융물과의 양립성 실험을 통해 활용 가능성을 확인하였다.

#### □ 원자로 내부 계측 및 감시방법 개발

- 핵연료의 건전성 감시를 위해 핵분열가스의 감마선과 지발중성자를 검출하여 파손유무를 검출하고 태그가스를 분석하여 그 위치를 파악하는 방법을 개발하였으며, 이를 통합하여 감시하는 계통의 구성개념을 도출하였다. 또한 노외 중성자속 감시를 위한 검출기의 사양과 운전조건, 검출된 신호의 처리방법과 감시계통의 구성, 타 분야와의 연계사항 등에 대한 개념을 정립하였다.

#### □ 불순물 측정 및 제어기술 개발

- 소듐 불순물 측정 및 제어기술 개발을 위하여 1단계에서는 소듐 순도관리 기술현황을 분석하여 설계요건을 설정하고, 소듐 불순물에 대한 최적의 화학분석기법을 도출하였으며, 소듐 질량속도가 약 400g/s인 소규모 불순물 측정 실험장치를 설치하여 실험결과를 분석하였다. 2단계에서는 콜드트랩의 성능 개선을 위해 주요 설계 파라미터인 mesh packing의 형상이 다른 두 개의 콜드트랩과 대용량 콜드트랩을 설계 및 설치하여 실험을 수행하였으며, 콜드트랩의 성능을 평가하였다.

#### □ SWR 사고 방호기술 개발

- 중규모 누출로 인해 복수의 전열관이 손상되는 사고 현상에 대한 실험적 연구를 증기발생기 전열관 번들 모형을 대상으로 수행하였으며, 초기 미량누출이 발생해서 시간이 지남에 따라 대규모 누출로 단계적으로 확대 전파되는 과정을 개략적으로 예측해 볼 수 있는 사고 전파모델을 개발하였다.

#### □ 사용 후 소듐 처리공정 개발

- 기술현황을 분석하여 기존 소듐처리공정의 문제점을 보완한 신개념의 소듐처리공정을 개발하였다. 소듐 주입노즐 물모의 실험을 수행하여 사용후 소듐 처리장치 설계 및 제작을 위한 유체적 최적조건 등 설계요건을 도출하였으며 반응성을 균일하게 하기 위한 분무노즐을 개발하였다. 소듐 처리장치를 구축하여 소듐환경에서 분무노즐과 개발한 공정의 타당성을 확인하였다.

< 세부 연구 목표별 주요 연구개발 실적 및 성과물 요약 >

세 부 연 구 목 표	주요 연구개발 실적	달성도 (%)																													
<b>&lt; 선진기술 개발 및 검증 : 안전성 입증 실험 기반 구축 &gt;</b>																															
○기기 열유체 성능검증 소동루프 구축 및 기기 성능검증 개별실험 ('10-'11년 수행)																															
- 소동루프 제작 및 설치	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 주요기기 및 배관 상세설계, 제작 및 설치                             <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 콜드트랩, 루프히터, 플러깅미터, 전자기펌프, Sodium storage tank 등 각종 tank류, 배관 및 밸브 등</li> </ul> </li> <li>- 철구조물 상세설계, 제작 및 설치                             <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Steel structure, AHX stack, sodium catch pan 등</li> </ul> </li> <li>- 기계구조 건전성 평가                             <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 열교환기, 압력용기, PHTS 펌프, 배관계통, 전자기펌프</li> </ul> </li> <li>- 계측제어계통 설계 및 설치                             <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 용도별 계측기 형태선정 및 구매, 감시 및 제어계통 상세설계 및 구현</li> </ul> </li> <li>- 총 226건 상세설계 결과물 생산</li> </ul>	100																													
- 실험용 소형 열교환기 제작 및 설치	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 열교환기 상세설계                             <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ AHX 및 DHX 상세설계</li> <li>◦ 상세 열유동 해석을 위한 CFD 해석                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>+ 1-D 설계 전산코드와의 비교평가</li> <li>+ 온도, 압력, 속도분포 특성 확인</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>- 열교환기 주요 설계인자                             <table border="0" style="width: 100%; margin-left: 20px;"> <tr> <td style="width: 50%;">◦ AHX</td> <td style="width: 50%;">◦ DHX</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"> <table border="1" style="font-size: small;"> <thead> <tr><th>설계인자</th><th>사양</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>No. of tubes/rows</td><td>36/3</td></tr> <tr><td>Tube O.D,mm</td><td>34.0</td></tr> <tr><td>Tube I.D,mm</td><td>30.7</td></tr> <tr><td>Tube thickness,mm</td><td>1.65</td></tr> <tr><td>Length,m</td><td>23.76</td></tr> </tbody> </table> </td> <td style="text-align: center;"> <table border="1" style="font-size: small;"> <thead> <tr><th>설계인자</th><th>사양</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>No. of tubes</td><td>42</td></tr> <tr><td>Tube O.D,mm</td><td>21.7</td></tr> <tr><td>Tube I.D,mm</td><td>18.4</td></tr> <tr><td>Tube thickness,mm</td><td>1.65</td></tr> <tr><td>Active tube length,m</td><td>1.73</td></tr> </tbody> </table> </td> </tr> </table> </li> <li>- 열교환기 제작 및 설치                             <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ STELLA-1 현장설치</li> </ul> </li> </ul>		◦ AHX	◦ DHX	<table border="1" style="font-size: small;"> <thead> <tr><th>설계인자</th><th>사양</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>No. of tubes/rows</td><td>36/3</td></tr> <tr><td>Tube O.D,mm</td><td>34.0</td></tr> <tr><td>Tube I.D,mm</td><td>30.7</td></tr> <tr><td>Tube thickness,mm</td><td>1.65</td></tr> <tr><td>Length,m</td><td>23.76</td></tr> </tbody> </table>	설계인자	사양	No. of tubes/rows	36/3	Tube O.D,mm	34.0	Tube I.D,mm	30.7	Tube thickness,mm	1.65	Length,m	23.76	<table border="1" style="font-size: small;"> <thead> <tr><th>설계인자</th><th>사양</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>No. of tubes</td><td>42</td></tr> <tr><td>Tube O.D,mm</td><td>21.7</td></tr> <tr><td>Tube I.D,mm</td><td>18.4</td></tr> <tr><td>Tube thickness,mm</td><td>1.65</td></tr> <tr><td>Active tube length,m</td><td>1.73</td></tr> </tbody> </table>	설계인자	사양	No. of tubes	42	Tube O.D,mm	21.7	Tube I.D,mm	18.4	Tube thickness,mm	1.65	Active tube length,m	1.73	
◦ AHX	◦ DHX																														
<table border="1" style="font-size: small;"> <thead> <tr><th>설계인자</th><th>사양</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>No. of tubes/rows</td><td>36/3</td></tr> <tr><td>Tube O.D,mm</td><td>34.0</td></tr> <tr><td>Tube I.D,mm</td><td>30.7</td></tr> <tr><td>Tube thickness,mm</td><td>1.65</td></tr> <tr><td>Length,m</td><td>23.76</td></tr> </tbody> </table>	설계인자	사양	No. of tubes/rows	36/3	Tube O.D,mm	34.0	Tube I.D,mm	30.7	Tube thickness,mm	1.65	Length,m	23.76	<table border="1" style="font-size: small;"> <thead> <tr><th>설계인자</th><th>사양</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>No. of tubes</td><td>42</td></tr> <tr><td>Tube O.D,mm</td><td>21.7</td></tr> <tr><td>Tube I.D,mm</td><td>18.4</td></tr> <tr><td>Tube thickness,mm</td><td>1.65</td></tr> <tr><td>Active tube length,m</td><td>1.73</td></tr> </tbody> </table>	설계인자	사양	No. of tubes	42	Tube O.D,mm	21.7	Tube I.D,mm	18.4	Tube thickness,mm	1.65	Active tube length,m	1.73						
설계인자	사양																														
No. of tubes/rows	36/3																														
Tube O.D,mm	34.0																														
Tube I.D,mm	30.7																														
Tube thickness,mm	1.65																														
Length,m	23.76																														
설계인자	사양																														
No. of tubes	42																														
Tube O.D,mm	21.7																														
Tube I.D,mm	18.4																														
Tube thickness,mm	1.65																														
Active tube length,m	1.73																														
- 기계식 소동 펌프 시제품 제작 및 설치	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 기계식 소동 펌프 상세설계                             <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 임펠러, 디퓨저 및 펌프 내부유로 상세해석</li> <li>◦ 기계적 씰 선정 및 오일 공급장치 설계</li> </ul> </li> <li>- 전산유동을 이용한 모형펌프 설계보완                             <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 모형펌프 유동영역 상세 모델링</li> <li>◦ 펌프 내부 유량분석 및 설계 보완</li> </ul> </li> <li>- 펌프 주요 설계인자                             <table border="0" style="width: 100%; margin-left: 20px;"> <tr> <td style="width: 50%; text-align: center;"> <table border="1" style="font-size: small;"> <thead> <tr><th>설계인자</th><th>사양</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>Capacity, kg/s</td><td>122.6</td></tr> <tr><td>Head, m</td><td>50.31</td></tr> <tr><td>NPSH available, m</td><td>11.76</td></tr> <tr><td>Synchronous speed, rpm</td><td>2235</td></tr> <tr><td>Pump speed, rpm</td><td>2140</td></tr> </tbody> </table> </td> <td style="width: 50%;"></td> </tr> </table> </li> <li>- 펌프 부품제작 및 조립</li> <li>- 펌프 STELLA-1 현장설치</li> </ul>	<table border="1" style="font-size: small;"> <thead> <tr><th>설계인자</th><th>사양</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>Capacity, kg/s</td><td>122.6</td></tr> <tr><td>Head, m</td><td>50.31</td></tr> <tr><td>NPSH available, m</td><td>11.76</td></tr> <tr><td>Synchronous speed, rpm</td><td>2235</td></tr> <tr><td>Pump speed, rpm</td><td>2140</td></tr> </tbody> </table>	설계인자	사양	Capacity, kg/s	122.6	Head, m	50.31	NPSH available, m	11.76	Synchronous speed, rpm	2235	Pump speed, rpm	2140																	
<table border="1" style="font-size: small;"> <thead> <tr><th>설계인자</th><th>사양</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>Capacity, kg/s</td><td>122.6</td></tr> <tr><td>Head, m</td><td>50.31</td></tr> <tr><td>NPSH available, m</td><td>11.76</td></tr> <tr><td>Synchronous speed, rpm</td><td>2235</td></tr> <tr><td>Pump speed, rpm</td><td>2140</td></tr> </tbody> </table>	설계인자	사양	Capacity, kg/s	122.6	Head, m	50.31	NPSH available, m	11.76	Synchronous speed, rpm	2235	Pump speed, rpm	2140																			
설계인자	사양																														
Capacity, kg/s	122.6																														
Head, m	50.31																														
NPSH available, m	11.76																														
Synchronous speed, rpm	2235																														
Pump speed, rpm	2140																														

세 부 연 구 목 표	주요 연구개발 실적	달성도 (%)
<b>&lt; 선진기술 개발 및 검증 : 안전성 입증 실험 기반 구축 &gt;</b>		
○기기 열유체 성능검증 소듐루프 구축 및 기기 성능검증 개별실험 ('10-'11년 수행)		
- 설치완료	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 2009년도               <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ STELLA-1 구축 타당성 평가, 기본설계 및 시방서 작성</li> <li>◦ 전력공급계통 구축</li> </ul> </li> <li>- 2010년도               <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 지하시설 구축 및 제어실 건축</li> <li>◦ 기계, 배관, 계측제어, 전기분야 등 상세설계</li> <li>◦ 탱크류 및 철구조물 등의 기기제작과 밸브류, 송풍기 등 기기구매</li> </ul> </li> <li>- 2011년도               <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 기기제작 및 설치 완료</li> <li>+ 2011.07.21 철골 구조물 설치 개시</li> <li>+ 2011.09.19 소듐저장탱크</li> <li>+ 2011.10.02 콜드트랩 설치 및 루프히터 설치</li> <li>+ 2011.10.07 Sodium expansion tank 설치</li> <li>+ 2011.10.14 AHX 및 소듐 기계식 펌프 설치</li> <li>+ 2011.10.21 전자기 펌프 설치</li> <li>+ 2011.10.26 DHX 설치</li> <li>+ 2011.11.10 Loop heater 설치</li> <li>+ 2011.12.05 Stack 설치 개시</li> <li>◦ 2011년 12월 배관작업 등이 완료된 상태로 전기 및 계장 관련 설비의 설치가 진행 중이며 2012년 2월 준공 예정</li> </ul> </li> </ul>	100
- 종합 시운전	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 기밀시험 및 단일기기 동작시험</li> <li>- 열선 및 보온공사</li> <li>- 종합시운전</li> </ul>	
- 열교환기 성능실험 및 설계 전산코드 검증	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 열교환기 열유동 및 고온구조해석</li> <li>- DHX 및 AHX 성능실험 계획수립               <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Shell/tube 축 열전달 및 마찰손실 특성 평가</li> <li>◦ 유량조건별 성능 실험</li> </ul> </li> </ul>	
- AHX-DHX 간 자연대류 실험 및 설계 전산코드 검증	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 소듐 루프 압력손실 특성평가</li> <li>- DHX-AHX 소듐루프 자연순환 특성실험 계획 수립               <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 자연순환 유량 특성 평가</li> </ul> </li> </ul>	
- 기계식 소듐 펌프 성능시험	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 저널베어링 시험</li> <li>- 펌프 수력성능 시험               <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Hz별 성능시험</li> <li>◦ 호모로고스 시험</li> <li>◦ 임펠라 유동저항 시험</li> <li>◦ NPSH 시험</li> <li>◦ 코스트다운 시험</li> <li>◦ 진동측정시험</li> </ul> </li> </ul>	

세 부 연 구 목 표	주요 연구개발 실적	달성도 (%)
<b>&lt; 선진기술 개발 및 검증 : 안전성 입증 실험 기반 구축 &gt;</b>		
○소듐 고유 계측기법 개발 ('10년 수행)		
<ul style="list-style-type: none"> <li>- 소듐 고유 계측기 시작품 시험용 실험장치 구축</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 계측기법 개발 실험장치 설계               <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 장치도면 및 LAYOUT 작성</li> <li>◦ 제작시방서 작성 및 부품 구매</li> </ul> </li> <li>- 실험장치 제작 및 설치               <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 구성: 소듐 저장탱크, 소듐 완충탱크 2개, 콜드 트랩, 플러깅미터, 전자기 유량계, 진공펌프, Ar 가스 공급장치, 소듐밸브 등</li> <li>◦ 소듐 양 1.2톤, 운전온도 200~550℃</li> </ul> </li> </ul>	100
<ul style="list-style-type: none"> <li>- 소듐 고유 계측기 시작품 설계, 제작 및 성능시험</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 시작품 제작 및 성능시험               <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 미소 액위 변화 측정용 level sensor 시작품                   <ul style="list-style-type: none"> <li>+ 측정범위 200mm, 정밀도 ±1%</li> </ul> </li> <li>◦ PHTS 계통유량 센서 시작품                   <ul style="list-style-type: none"> <li>+ 측정범위 0.5-80cm/s, 정밀도 ±3%</li> </ul> </li> <li>◦ 고온 소듐 풀 압력센서 시작품                   <ul style="list-style-type: none"> <li>+ 응답성 1초 이내</li> </ul> </li> <li>◦ 풀 내부 국부속도 센서 시작품                   <ul style="list-style-type: none"> <li>+ 측정범위 0.5-80cm/s, 정밀도 ±3%</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>- 특허출원4건, 특허등록2건 달성</li> </ul>	
○소듐 열유체 실증시험시설 기본설계 ('11년 수행)		
<ul style="list-style-type: none"> <li>- 소듐 열유체 실증시험시설 및 종합효과시험 범위 평가</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 실증로 설계 특성 분석</li> <li>- 안전해석, PIRT 결과 검토               <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 실증로 개념설계 예비안전성 평가 결과 검토</li> <li>◦ 실증로 예비 PIRT 검토</li> </ul> </li> <li>- 시설 및 시험범위 평가               <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 실험항목 예비도출</li> <li>◦ STELLA-2 시험범위 및 모의 능력 평가</li> </ul> </li> <li>- 주요사건/사고 종류 분석을 통한 실험 매트릭스 설정</li> </ul>	100
<ul style="list-style-type: none"> <li>- 실증시험시설 기본설계</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 실험 매트릭스와의 적합성 평가</li> <li>- 실험요건 작성</li> <li>- 기본설계 수행 및 보고서 작성               <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 모의 원자로용기 및 내부 구조물 척도설계</li> <li>◦ 주요 연계계통 설계</li> </ul> </li> <li>- Scoping Analysis 수행 및 보고서 작성               <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 시험시설 해석용 입력 작성</li> <li>◦ 시험시설 과도 특성 분석</li> <li>◦ 시험시설 실증로 안전 특성 모의 능력 평가</li> </ul> </li> </ul>	

세 부 연 구 목 표	주요 연구개발 실적	달성도 (%)
<b>&lt; 기반기술 검증 : 소동기술 개발 &gt;</b>		
<b>OSG 신뢰성 향상기술 개발 ('07-'09년 수행)</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>- 이중벽 전열관 열전달 모델 개발 및 특성 측정장치 설계 및 제작</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 현안분석, 개발방향 설정 및 개발계획 수립</li> <li>- DWT gap 열전달모델 개발 및 검증장치 설계</li> <li>- 누출특성 측정장치 제작: 상온에서 두 평면 간 누출측정용 실험장치 및 시편 제작</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- 이중벽 전열관 특성 측정장치 설치 (tube 직경: 1")</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- On-line 누출감지기술 검증을 위한 실험장치 설치 및 예비실험</li> <li>- 헬리컬형 DWTSG 개념설계: 이중 재질을 사용하는 DWT 개념개발</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- 이중벽 전열관 열전달 및 기계적 특성 분석자료 생산, 평가</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- DWT 상온 누출감지 925세트 실험자료 생산</li> <li>- DWT 설계, 제작 및 시험: 내관 2.25Cr-Mo강, 외관 mod. 9Cr-1Mo강 DWT 설계</li> <li>- DWT 검증장치 상세설계 및 주요기기 발주</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- 소동-물 반응음 생산 및 능동형 감지방법 개발</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 소동-물 반응음 10종을 생산하고, 각 반응음에 대해 FFT 분석에 의한 주파수 스펙트럼 분석</li> <li>- 증기 발생기 소동 입출구에 신호 측정 센서를 설치하는 보상기법 제안 및 발명특허 출원</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- SWR 피동형 음향감지논리 성능평가 및 최적화</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 실험장치에서 생산된 소동-물 반응음 분석 및 성능시험에 필요한 주파수 특성 조사</li> <li>- 피동형 음향감지 논리와 능동형 음향감지 논리를 혼합하여 소·중규모 누출을 조기에 감지하는 혼합 감지논리 구축</li> </ul>	100
<ul style="list-style-type: none"> <li>- SWR 조기 감지설비 시제품 제작</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- SWR 조기 감지설비 시제품 제작: Embed controller, Windows XP, LabVIEW 환경</li> <li>- 소량의 음향 센서로 감지논리 구축. 비용절감 효과가 큼</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- 국외 SG 배경소음 측정장치 구축</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 측정장치: 지름 300mmx높이 2000mm 용기, 지름 5mmx길이 500mm waveguide, 음향 센서 DECI SE1000-HI</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- 국외 SG 배경소음 확보</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- PFR 증기발생기 계통의 super-heater 배경소음 및 누출음을 확보하여 음향감지 논리의 성능 시험에 활용</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- 전열관 wastage 특성실험 및 SWR 해석모델 검증장치 설계</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Self-wastage 특성 비교 실험자료 생산: 재료( 2.25Cr-1Mo 및 Mod.9Cr-1Mo steel), 소동온도(400℃), 증기압력( ~ 100kg/cm<sup>2</sup>)</li> <li>- SWR 해석모델 검증장치 기본설계도 작성</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Wastage 모델개발 및 SWR 해석모델 검증장치 제작</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 소동 400℃, 스팀 350℃ 조건에서 스팀 누출량 및 전열관 거리 따른 기초 실험식 획득</li> <li>- SWR 해석모델 검증장치 상세설계도 작성</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- SWR 해석모델 개발 및 검증장치 설치, 시운전</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 주요 변수에 따른 종합적인 기초 실험식 획득</li> <li>- SWR 해석모델 검증장치 설치: 규격(3.2m×3.7m×4.2m)</li> </ul>	

세 부 연구 목 표	주요 연구개발 실적	달성도 (%)
<b>&lt; 기반기술 검증 : 소동기술 개발 &gt;</b>		
○소동 안전관리기술 개발 ('07-'09년 수행)		
<ul style="list-style-type: none"> <li>- 소동 화재 확산 방지개념 설정 및 소동화재 연소모델 개발</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 화재 확산 방지개념 파라미터 설정 및 타당성 평가</li> <li>- 분무형 소동화재 연소모델 보완 및 개선 (NACOM 분무형 화재분석 코드)</li> </ul>	100
<ul style="list-style-type: none"> <li>- 소동 화재 확산 방지 구조물 개발 및 화재 실험장치 제작, 설치</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 설계변수를 고려한 소동 수집 트레이 설계</li> <li>- 설계변수에 따른 화재 영향 평가: 트레이 경사도, 소동 배출구경 및 소동 수위 변수</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- 소동화재 연소 모델 개선 및 확산 방지 구조물의 성능실험</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- NACOM 분무형 화재 연소 모델 개선: Gaussian 분포 함수 도입</li> <li>- 소동화재 확산방지 구조물 성능실험장치 설치 및 성능실험</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- 소동내 불순물 특성 제어 설계개념 설정</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 사례조사를 통한 불순물 유입경로 분석</li> <li>- 비금속불순물 주요대상 및 제거방식 분석</li> <li>- 소동 정화계통 설치 및 요건 수립</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- 소동 불순물 화학분석 기술 확보 및 불순물 측정 실험장치 설치</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 불활성 가스 반송용해 열전도도법을 이용한 산소분석 및 고온산화법을 이용한 탄소분석에 대한 최적 화학분석기법 도출</li> <li>- 소동 유량 약 400g/s인 소동 불순물 측정 실험장치 설치</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- 소동 내 불순물 측정 자료생산 및 불순물 특성 평가</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 불순물 측정 실험 및 분석               <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 냉각속도가 막힘온도에 미치는 영향</li> <li>◦ 플러깅 미터의 온도변화에 따른 소동 유량 변화</li> <li>◦ 막힘온도와 용해도 등가온도</li> </ul> </li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- 알루미늄을 이용한 중금속 냉각재 정적 및 중단기 동적 부식 특성실험</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 시편제작 및 알루미늄 코팅</li> <li>- 산소농도 제어실험 수행</li> <li>- 부식특성 실험               <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 산소농도: <math>&lt;1.0 \times 10^{-8} \text{wt}\% \sim 1.05 \times 10^{-5} \text{wt}\%</math></li> <li>◦ 운전온도 및 실험시간: 520°C, 500~2000 hr</li> </ul> </li> <li>- SEM/EDX 분석을 통한 부식 특성 평가</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- 질소이온빔을 이용한 중금속 냉각재 정적 및 중단기 동적 부식특성 실험</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 중금속에 대한 재료 및 실험조건에 따른 부식특성 분석 및 비교평가</li> <li>- 질소이온 주입 실험               <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 부식억제방법: N+ 이온 주입방법</li> <li>◦ 운전온도: 520°C</li> <li>◦ 실험시간: 1500 hr</li> </ul> </li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- W와 Nb를 이용한 중금속 냉각재 정적 및 중단기 동적 부식 특성실험</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 시편 제작</li> <li>- 특성실험               <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 재료: 텅스텐</li> <li>◦ 산소농도: <math>1.0 \times 10^{-5} \text{wt}\%</math></li> <li>◦ 운전온도: 520°C</li> <li>◦ 실험시간: 2000 hr</li> </ul> </li> </ul>	

세 부 연 구 목 표	주요 연구개발 실적	달성도 (%)
<b>&lt; 기반기술 검증 : 소동기술 개발 &gt;</b>		
○원자로 내부 계측 및 감시방법 개발 ('07-'09년 수행)		
- 노심 및 핵연료 감시 계측변수 및 논리 구체화	- 핵분열가스 감시변수, 식별(tag)가스, 지발중성자속 감시를 위한 핵분열생성물 등에 대해 구체화하고, 이를 이용하여 개략적인 감시논리를 설정	100
- 노심 및 핵연료 감시 모형 사양 개발	- 지발 중성자원 및 핵분열가스 생성물 측정을 위한 전달 개념 수립 - 소동 풀 내부 지발 중성자원 전달 경로 분석 - 파손 핵연료로부터 IHX 주변 핵분열함까지의 전달모델 개발	
- 노심 및 핵연료 감시 모형 제작	- 노심출구에서 IHX로의 지발중성자원 상세분석 - 노심 내 파손 핵연료 위치에 따른 영향 분석 - 지발중성자속 검출기 후보계측기와 핵분열물 검출기 후보계측기 분석	
- 원자로 내부 광역/지발중성자속 계측 개념설정	- SFR 중성자속 검출기 검출 운전범위 예비설정 - 중성자속 누설분포에 따른 계측기 제한성 분석 - 광역중성자속 계측기 수명 및 환경요인 분석	
- 원자로 내부 광역/지발중성자속 계측기 후보 측정민감도평가	- 원자로 내부 광역, 지발중성자속 계측기 소동/고온 환경 영향 분석 및 소형검출기 어셈블리 구성 개발	
- 원자로 내부 광역/지발중성자속 계측기 설치/제작성 검토	- 광역, 지발중성자속 계측기 설계사양서 개발 - 기존 아날로그 기술기반에 통신망적용 등 디지털기술을 적용하여 성능개선과 함께 디지털계측제어시스템과의 연계를 해결함	
○불순물 측정 및 제어기술 개발 ('10-'11년 수행)		
- 개량형 불순물 정제장치 개발	- 기술개발 동향 및 콜드트랩 설계 파라미터 분석 - 개량형 콜드트랩 및 플라깅미터 설계 및 제작 ◦ 규격: $\phi 438\text{mm} \times 590\text{mm(H)}$ ◦ 소동유량: 0.07kg/s ◦ 소동 운전온도: 120-300℃ ◦ 냉각공기 체류시간: 4분 - 대용량 콜드트랩 및 플라깅미터 설계 및 제작 ◦ 규격: $\phi 940\text{mm} \times 2,700\text{mm(H)}$ ◦ 소동유량: 0.5kg/s ◦ 소동 운전온도: 120-300℃ ◦ 냉각공기 체류시간: 5분 ◦ 불순물 정제능력: 7.4kg-O <sub>2</sub>	100
- 개량형 불순물 정제장치 검증실험	- 콜드트랩 루프설치 및 운전절차서 작성 - 개량형 콜드트랩 성능시험 ◦ Mesh packing 유형에 따른 성능시험 - 대용량 콜드트랩 성능시험 ◦ 불순물 농도에 미치는 영향 분석 ◦ 불순물 농도측정 및 분석 - 결과분석 및 신개념 도출	

세 부 연 구 목 표	주요 연구개발 실적	달성도 (%)
<b>&lt; 기반기술 검증 : 소등기술 개발 &gt;</b>		
<b>○SWR 사고 방호기술 개발 ('10-'11년 수행)</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Multi-target wastage 특성실험</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 스팀 분사노즐 제작               <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 2종 (φ0.8mm, 1.0mm) 10개</li> </ul> </li> <li>- 전열관 번들 모형 조립               <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ φ23mm 5×5 layer</li> <li>◦ φ30mm 5×4 layer</li> </ul> </li> <li>- 스팀 공급계통 작동 시험</li> <li>- Multi-target wastage 특성 실험               <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 온도: 소등 450℃, 스팀 350℃</li> <li>◦ 스팀 누출량: &gt; 10g/s</li> <li>◦ 스팀 분사방향: 단방향, 장방향, 대각방향</li> </ul> </li> </ul>	100
<ul style="list-style-type: none"> <li>- SWR 사고 확대전파모델 개발</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Target 분석 및 실험결과 해석               <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Target 분석                   <ul style="list-style-type: none"> <li>+ 분석기: ATOS 3D Digitizer</li> <li>+ 손상 면적, 깊이 분석: μm-mm order</li> </ul> </li> <li>◦ 결과해석                   <ul style="list-style-type: none"> <li>+ Flame jet의 반사 및 산란형태</li> <li>+ Flame jet의 분사각</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>- SWR 사고 확대 전파모델 개발               <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 기본모델                   <ul style="list-style-type: none"> <li>+ 해석범위: 미량누출-대규모누출</li> </ul> </li> <li>◦ 모델보완</li> </ul> </li> </ul>	100
<b>○사용 후 소등 처리공정 개발 ('10-'11년 수행)</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>- 소등 주입노즐 물모의 실험</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 소등 반응성 완화개념 도출</li> <li>- 사용후 소등 처리공정 개발</li> <li>- 분무노즐 및 물모의 실험장치 설계, 제작 및 설치</li> <li>- 실험자료 생산 및 분석               <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 분무노즐 위치, 순환주입 위치, 주입각도 등 총 300 세트</li> </ul> </li> <li>- 최적 주입조건 도출</li> </ul>	100
<ul style="list-style-type: none"> <li>- 소등 처리장치 설계 및 제작</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 상세설계               <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 실험요건, 운전절차 설정 및 부품 구조 개선</li> <li>◦ 제작도면 작성</li> </ul> </li> <li>- 장치제작               <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 부품 구매 및 선정</li> <li>◦ 제작시방서 작성 및 발주</li> <li>◦ 제작 및 설치</li> </ul> </li> </ul>	100
<ul style="list-style-type: none"> <li>- 소등 처리 예비실험</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 소등처리 예비실험               <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 장치 시운전</li> <li>◦ 소등환경에서 분무노즐 성능시험                   <ul style="list-style-type: none"> <li>+ 반응기 내 온도 및 압력 측정</li> <li>+ 수소 생성량 측정 및 소등 반응량 분석</li> <li>+ 분무노즐 타당성 검증</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>	100



## 제 5 장 연구개발결과의 활용계획

### ○ 연구개발결과의 활용방안

- STELLA-1 시험시설은 2020년 원형로 특정설계승인 획득을 위한 핵심 연구시설로서 혁신적 피동안전계통 성능 검증으로 원형로 인허가 요건 충족에 활용
- STELLA-1 시험시설 구축, 개별실험 및 종합효과시험을 통한 안전해석 방법론 확립 및 전산코드 검증을 위한 데이터 생산에 활용
- 소듐냉각 고속로 주요 안전현안 실증을 통한 인허가 지원에 활용
- 소듐 열유체 실증시험시설은 원자로용기 내부의 다차원 현상에 대한 신뢰성 있는 실험자료를 생산하므로, 풀형 원자로의 해석코드 검증용 실험자료 제공을 조건으로 Gen IV를 포함한 다국 간 및 양국 간 국제협력을 증진시킬 수 있음
- '09년 9월 프랑스 파리에서 개최된 제3차 TAREF (Task on Advanced Reactor Experimental Facilities) 국제회의에서 시설의 중요도 점수 11점(12점 만점)의 높은 평가를 받았으며, 이는 제4세대 소듐냉각 고속로 안전연구 관점에서 본 시설의 중요도 및 활용도가 매우 크다는 것을 반영한 것이므로 시험시설의 국제공동연구 활용 가능성이 높음
- 소듐 내 불순물 정제장치 효율 향상기술과 소듐시설에서 발생하는 폐소듐을 안전하게 폐기 및 처분할 수 있는 소듐 처리공정기술 개발로 소듐 실험장치 및 중·대형 시험시설 구축 및 해체에 직접적으로 활용 가능

### ○ 기대성과

- 기술적 측면
  - STELLA-1의 구축으로 지금까지 개발한 설계기술, 전산체제, 소듐기술 등 축적된 연구결과의 종합적 실증이 가능함
  - 소듐냉각 고속로 주요 안전현안 실증을 통한 인허가 지원이 가능함
  - 본 시험시설 구축은 실증로 표준설계 인가획득에 필요한 실험데이터 생산을 수행하여, 그동안 설계 중심의 SFR 기술개발 능력을 하드웨어적 검증단계까지 발전시킴으로써 SFR 기술경쟁력 확보라는 국가 정책목표 구현에 직접적으로 기여할 수 있음
- 경제적·산업적 측면
  - Gen IV SFR SO (Safety and Operation) 프로젝트에 “A Improvement and demonstration of passive decay heat removal performance” Task로 참여 중이며 시험시설 확보를 통해 Gen IV SO Project에 기여함으로써 국제 소듐냉각 고속로 무대에서 한국의 지위 확보가 가능
  - 기계식 소듐 펌프, 전자기 펌프, 소듐 밸브, 콜드트랩, 플러깅미터 등과 같은 핵심 요소기기의 설계 및 제작 기술은 국산화가 필요하며, 시험시설의 구축을 통하여 연구원에서 설계기술을 국내 제작업체에 전수하여 이를 바탕으로 제작기술의 국산화가 가능하므로 국내 산업발전에 커다란 경제적 영향을 미침

## 제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

- IAEA TWG-FR 활동자료
- 각국의 Sodium technology 기술 개발 현황 자료
- 러시아 IPPE의 저유속 및 국부 유속 센서 제작도면 및 측정 시험자료
- 프랑스와 일본의 소듐 스쿨 강의 자료
- 프랑스, 일본 및 인도와의 기술회의를 통해 획득한 소듐기술실험자료
- 해외 학회에서 발표된 논문집
- 온라인상에 등재된 저널

## 제 7 장 연구시설 · 장비 현황

### 1. 연구시설

순번	시설명	용도	설치년도
1	불순물 측정 실험장치	소듐 중 불순물 농도측정 및 제어	2008
2	SWR 해석모델 검증장치	중규모 누출 SWR 현상 해석	2009
3	소듐 고유계측기법 실험장치	소듐용 계측기기 성능 검증	2011
4	사용 후 소듐 처리장치	사용 후 소듐 처리공정 개발	2011
5	기기 열유체 성능검증 소듐루프 (STEELA-1)	열교환기, 기계식 펌프 성능 검증	2011

### 2. 연구장비

순번	장비명	장비고유번호	취득년도
1	Electromagnetic pump	NFEC-2011-01-136762	2011
2	Sodium heater	NFEC-2011-01-136763~64	2011
3	Electromagnetic pump	NFEC-2011-02-142565~66	2011
4	Prototype of acoustic leak detection system	NFEC-2011-02-145105	2011
5	100HP Rotary screw compressor	NFEC-2011-03-145624	2011
6	Electromagnetic pump	NFEC-2011-09-149037~38	2011
7	EM flowmeter	NFEC-2011-09-149040	2011
8	Coriolis type flowmeter	NFEC-2011-12-152015	2011
9	Coriolis type flowmeter	NFEC-2011-12-152020~22	2011

## 제 8 장 참고문헌

- [1.1-1] 고속로기술개발부, 한국원자력연구원, 2010. "기기 열유체 성능검증 소듐루프 제작. 설치 시방서"
- [1.1-2] Hee Reyoung Kim and Sang Hee Hong, 1999. "Design and Experimental characterization of an EM Pump," J. of the Korean Physical Society, Vol. 35.
- [1.1-3] Jae-Hyuk EOH et al., "Design and Evaluation of the Helical-coil Sodium-to-Air Heat Exchanger of STELLA-1," KNS 2011 Fall meeting, Oct.27-28, Kyeong-ju, Korea, 2011
- [1.1-4] Myeong-Seon Chae and Bum-Jin Chung, "Natural Convection Heat Transfer of Two Vertically Staggered Cylinders," Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting pp.373-374, Gyeongju, Korea, October 27-28, 2011
- [1.1-5] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components, Div. 1, Subsection NH, Class 1 Components in Elevated Temperature Service, ASME, 2010.
- [1.1-6] RCC-MRx, Section I Subsection B, Class 1 N1RX Reactor Components its Auxiliary Systems and Supports, 2010 Edition (Draft), AFCEN, 2010.
- [1.1-7] H.Y. Lee et. al., "Creep-fatigue damage for a structure with dissimilar metal welds of Mod 9Cr-1Mo and 316L stainless steel," International Journal of Fatigue, 29, pp.1868-1879, 2007.
- [1.1-8] H.Y. Lee, Jong-Bum Kim, H.Y Park "High temperature design and damage evaluation of Mod.9Cr-1Mo steel heat exchanger," Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of ASME, accepted for publication, Nov., 2011.
- [1.1-9] Jae-Hyuk EOH et al., "Design and Evaluation of the Helical-coil Sodium-to-Air Heat Exchanger of STELLA-1," KNS 2011 Fall meeting, Oct.27-28, Kyeong-ju, Korea, 2011
- [1.1-10] Myeong-Seon Chae and Bum-Jin Chung, "Natural Convection Heat Transfer of Two Vertically Staggered Cylinders," Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting pp.373-374, Gyeongju, Korea, October 27-28, 2011
- [1.2-1] 김태준 외, "소듐 고유 계측기법개발 실험장치 제작시방서," KAERI Report, SFR-RSL1A-DS-02-2010 Rev.00 (2010)
- [1.2-2] 김태준 외, "소듐 미소액위 측정센서장치 제작시방서," KAERI Report, SFR-RSL1A-DS-00-2010 Rev.00 (2010)
- [1.2-3] 김태준 외, "소듐 풀 차압 측정센서장치 제작시방서," KAERI Report, SFR-RSL1A-DS-01- 2010Rev.00 (2010)

- [1.2-4] 김태준 외, “PHTS 계통 유량 센서장치 제작시방서,” KAERI Report, SFR-RSL1A-DS-07-2010 Rev.00 (2010)
- [1.2-5] 김태준 외, “폴 내부 국부유속 센서장치 제작시방서,” KAERI Report, SFR-RSL1A-DS-06-2010 Rev.00 (2010)
- [1.3-1] Kwon, Y.M., 2005, Acceptance Criteria for KALIMER-600 Safety Analysis," LMR/SA221-WR-01, Rev.01/05, Korea Atomic Energy Research Institute.
- [1.3-2] Kwon, Y.M. et al., 2006, Evaluation of Inherent Safety Features of the KALIMER-600 Design Concept for Anticipated Transient Without Scream Events, KAERI/TR-3163/2006, Korea Atomic Energy Research Institute.
- [1.3-3] 하귀석 외, "KALIMER-600 설계의 대표적 설계기준사고에 대한 안전해석," KAERI/TR-3938/2009
- [1.3-4] 어재혁 외, "소듐냉각고속로 모의 열유동 종합효과 실험을 위한 실험조건," KAERI/TR- 4424/2011
- [1.3-5] US NRC, "Preapplication Safety Evaluation Report for the Power Reactor Innovative Small Module (PRISM) Liquid-Metal Reactor", NUREG-1368, 1994.
- [1.3-6] 송철화 외, “가압경수로 모의 열수력 종합실험을 위한 실험조건”, KAERI/TR-1771/2001, 한국원자력연구원, 2001.
- [1.3-7] Ishii, M. et al., "The three Level Scaling Approach with Application to the Purdue University Multi-dimensional Integral Test Facility", Nuclear Engineering and Design, Vol. 186, 1998.
- [1.3-8] Zuber, N., et al., 1998, “An Integrated Structure and Scaling Methodology for Severe Accident Technical Issue Resolution: Development of Methodology”, Nuclear Engineering and Design, Vol.186, pp.1- 21
- [1.3-9] Incropera, F.P., et al., 1996, Introduction to Heat Transfer, 3<sup>rd</sup>Ed.,JohnWiley&Sons
- [2.1-1] 남호윤, 최병해, 김종만, 김병호, “이중벽관 증기발생기 개발현황,” KAERI/AR-788/2007, 한국원자력연구원 (2007)
- [2.1-2] 남호윤, 김종만, 최병해, 김종범, 이용범, “이중벽관 상온 누출감지 실험,” KAERI/TR-4160/2010, 한국원자력연구원 (2010)
- [2.1-3] H. Kumagai, K. Yoshida and I. Kinoshita, 일본원자력학회지.Vol.43(6), 2001
- [2.1-4] Tae-Joon Kim, and et.al., "A Correlated Active Acoustic Leak Detection in a SFR Steam Generator", Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, Gyeongju, Korea, October 29-30, 2009
- [2.5-1] Hans R, Dumm K, "Leak Detection of steam or water into sodium in steam generators of liquid metal fast breeder reactors", Atomic Energy Review, Vol.15(4),

(1977)

- [2.6-1] Kim, B., Kim, J., Kim, T, Nam, H, Jeong, B., Choi, B., Choi, J., and Lee, Y.,  
“Current Status on Development of Sodium Waste Treatment Process,”  
*KAERI/AR-856/2010*, 한국원자력연구원 (2010)
- [2.6-2] Magny, E., “Fast Reactor Bulk Sodium Coolant Disposal NOAH Process  
Application, IAEA Social Mtg. on Sodium Removal and Disposal from LMFBRs in  
Normal Operation and in the Framework of Decontamination,” Aix En Provance,  
France, pp. 145-151.(1997)
- [2.6-3] Matsumoto, T., Yoshida E., Suzuki, S., and Yasu, T., “Development of Sodium  
Conversion Technology - Method and Basic Features of Conversion Process,“  
*JAEA Technoloy 2007-038* (2007)
- [2.6-4] 남호윤, 김종만, 김병호, 이용범, “사용후 소듐처리 물모의 실험,” *KAERI/TR-  
4249/2010*, 한국원자력연구원 (2010)
- [2.6-5] 남호윤, 김종만, 김병호, 이용범, “사용후 소듐처리 실험장치,” *KAERI/TR-  
4501/2011*, 한국원자력연구원 (2011)
- [2.6-6] 남호윤, “사용후 소듐처리 실험장치 운전절차서,” *SFR-RSM3B-PD-01-2011  
Rev.00*, 설계문서, 한국원자력연구원 (2011)