

GOVP1200509966

최종연구보고서

KAERI/RR-2527/2004

기기 및 구조물 건전성 향상 기술 개발
**Technology Development for Component and
Structure Integrity**

NSSS 기기 건전성 검사·진단 기술 개발
**Development of the Inspection & Diagnosis
Technology for the NSSS Components Integrity**

연구기관
한국원자력연구소

과 학 기 술 부

제 출 문

과 학 기 술 부 장 관 귀 하

본 보고서를 “기기 및 구조물 건전성 향상 기술 개발” 과제 (세부과제 “NSSS 기기 건전성 검사·진단 기술 개발”)의 최종보고서로 제출합니다.

2005. 2.

연 구 기 관 명 : 한국원자력연구소

연 구 책 임 자 : 김 재 희

연 구 원 : 박진호 호섬철락엽상성한철용수칭회섬기섬영종구수
박엄이 최김주문 이최박김이 임전안심김김강김
진홍재유기영순정영기정 사형창주준평현봉

최종연구보고서 초록

과제관리번호		해당단계 연구기관	한국원자력연구소	단계구분	1 / 2
연구사업명	중 사업명	원자력중장기계획사업			
	세부 사업명	원자력중장기계획사업			
연구과제명	대과제명	기기 및 구조물 건전성 향상기술 개발			
	세부과제명	NSSS 기기 건전성 검사·진단 기술 개발			
연구기관명 (연구책임자)	한국원자력 연구소 (김 재 희)	해당단계 연구인력	내부 :18.62 M·Y	연구비	정부 :2,623,000 천원
			외부 :13.99 M·Y		민간 : 0 천원
			계 :32.61 M·Y	계 :2,623,000 천원	
위탁연구	연구기관: 성균관대학교		연구책임자: 송성진		
국제공동연구	상대국명:	상대국연구기관명:		참여기업	
색 인 어 (각5개이상)	한글 :원자력, 기기, 건전성, 검사, 감시, 진단, 케이블				
	영어 : Nuclear, Component, Integrity, Inspection, Monitoring, Diagnosis, Cable				
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				면수	
<p>1. 연구개발 목표 및 내용</p> <p style="margin-left: 20px;">원전 안전계통 기기의 감시·검사·진단·평가 신기술 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> • NSSS 건전성 진단 핵심기술 개발 • 원전 기기 온라인 연속 감시 기술 개발 • 원전기기 안전 검사 및 평가 신기술 개발 • 원전 케이블의 수명평가 및 노후화 진단기술 개발 <p>2. 연구결과</p> <ul style="list-style-type: none"> • 금속파편 충격신호 진단 신기법 및 원자로내부구조물의 지지조건 결함에 대한 동특성해석 모델 개발 • 유도초음파를 이용한 온라인 결함탐지 기술 및 장치 개발 • 네트워크 기반의 원격 검사 시스템 및 원자로 제어봉 안내관 검사용 탐상기 개발 • 원전 케이블의 가속열화시험 및 수명평가기술 개발 <p>3. 기대효과 및 활용방안</p> <ul style="list-style-type: none"> • 원자로 계통의 이물질 감시 및 진단 • 원전 배관의 온라인 감시 및 평가 • 원전 케이블의 열화진단 • 원자로 내부구조물 상태진단용 소프트웨어 • 원격 검사 및 수집 데이터의 원격 평가 • 케이블의 교체시기 파악 					

요 약 문

I. 제 목: NSSS 기기 건전성 검사·진단 기술 개발

II. 연구개발의 목적 및 중요성

현재 국내에는 19기의 원전이 가동 중에 있고 2020년까지 약 20여기의 원전이 추가로 건설 예정인 상황에서 원전의 안전성에 대한 사회적 관심 및 중요도는 매우 커지고 있다. 또한 고리 1호기를 비롯한 국내 가동 원전의 사용년수가 증가함에 따라 이에 대한 종합적이며 체계적인 수명관리 대책이 필요하다.

본 연구에서는 원전 안전계통 기기의 건전성 감시·검사·진단·평가 기술을 개발하는데 그 최종목표를 두고 있다. 이 기술들은 원전 안전등급 기기의 결함을 사전에 인지하고 이에 대처하기 위한 것으로서 원전의 안전을 위하여 필수적으로 요구된다. 특히 최근에 발생한 영광 5,6 호기의 열소매 이탈사고나 일본 Hamaoka 원전 1호기의 열교환기 증기 배관 파열 사고에서 보는 바와 같이 원전 주요 기기 내에 존재하는 결함의 검출과 그 영향 평가는 매우 중요하다.

원자로계통 구조건전성 감시시스템 (NIMS: NSSS Integrity Monitoring System)은 선진국에서 이미 개발되어 국내외 원자력 발전소의 현장에 적용되고 있으나, 기본적인 이상 발생 유무에 관한 경보기능만 가지고 있다. 그러나 예기치 않은 사고 발생 시에 신속하고 안전한 대처를 위하여, 진단 기술을 강화한 전체 시스템의 종합적인 기술 개발이 필요하다.

또한 2004년 일본 미하마 원전의 배관 파열 사고는 직관부의 감육으로 인한 사고로서 현재 수행되고 있는 가동중검사 (ISI; In-service Inspection) 만으로는 결함부위를 찾아내는 데에 제한이 있다는 것을 보여주고 있다. 기존의 ISI를 보완하고 또한 차세대 원전과 같은 새로운 기기의 유지보수를 적절하게 수행하기 위해서는 연속감시(On-line Monitoring)를 통하여 이상부위에 대한 정보를 수집하고 분석하는 온라인 감시 기법이 필요하다.

한편 원전 기기에 대한 검사 및 평가 업무를 가동중 검사 기간 동안 원전 검사 현장에서 수행하던 것을 탈피하여 원전 밖의 안전한 지역에서 원격으로 수행하게하고 수집된 데이터를 관계자들이 모두 공유하게 한다면 더욱 안전하고 경제적인 검사 수행이 가능하게 된다. 이를 위하여 원전 현장의 검사를 인터넷 상의 임의의 장소에서 운전하고 평가할 수 있는 기술이 개발되어야 한다.

마지막으로, 원전에 사용되는 격납용기 내부의 케이블은 미국 IEEE 기준에 규정되어 있는 일반적인 전기적, 물리적 특성을 만족하여야 하며, 정상 운전 기간 및 설계기준사고 시에도 열 및 방사선에 충분히 견딜 수 있어야 한다. 현재 국내에서는 원전 케이블의 수명평가 및 노화관리를 주로 해외 연구 자료에 의존함으로써 인하여 국내 원전별 현장상황과는 상이한 부분이 많아 애로가 발생하고 있는바 원전 케이블에 대한 국내의 연구개발이 절실히 요구된다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구과제의 최종목표는 원전 안전계통 기기의 건전성 감시·검사·진단·평가 기술을 개발하는데 있다. 이를 위하여 최근의 현안이 되고 있는 다음의 네가지 항목에 대하여 2002년부터 2004년까지 제1단계 연구를 수행하였다.

1. NSSS 기기 건전성 진단 기술 개발

- 금속파편 충격 신호 진단 신기법 개발
- 원자로내부구조물의 지지조건 결함에 대한 동특성해석 모델개발

2. 원전기기 온라인 연속 감시 기술 개발

- 탄성관의 유도초음파 기반기술 연구
- 유도초음파를 이용한 결함탐지기술 연구
- 배열탐촉자 장치개발과 장거리 배관 결함탐지 실험

3. 원전기기 안전 검사 및 평가 신기술 개발

- 네트워크 기반의 원격 검사 시스템 개발

- 원자로 제어봉 안내관 검사용 탐상기 개발
4. 원전 케이블의 수명평가 및 노후화 진단기술 개발
- 원전 케이블의 가속열화시험 및 수명평가기술 개발
 - 원전 케이블의 노후화 진단기술 개발

IV. 연구 개발 결과

본 연구에서 개발 목표로 하고 있는 것은 원전 주요 기기에 대한 건전성을 향상시키기 위한 여러 분야의 기술 중 일반 산업체에서 투자하기 어렵고 난이도가 높은 네가지 항목을 모아서 과제를 구성하고 추진하였다. 본 과제에서 수행 중인 각각의 연구 항목들은 선진국과 동시에 착수하거나 먼저 추진되고 있다. 따라서 창의적인 방법으로 추진되고 있으며, 이론적 해석과 실증적 실험을 병합하여 과제가 운용되었다. 각각의 세부 연구 목표에 대한 연구 개발 결과를 기술하면 다음과 같다.

A. NSSS 기기 건전성 진단 기술

- 금속 파편 충격신호의 배경 잡음 감소 신기법과 금속 파편의 위치 및 질량 추정 신기법을 개발하고, 현장신호를 적용하여 분석하고 검증하였음.
- 원자로 축소모델을 이용하여 충격시험을 수행하였으며 개발된 신기법을 적용한 진단 소프트웨어를 개발하였음.
- 원자로 내부구조물의 지지조건 결함에 대한 동특성 해석 모델을 개발하고, 원자로 내부구조물의 지지조건 결함증상 거동 시뮬레이션 완성

B. 원전 기기 온라인 연속 감시 기술 개발

- 원전 기기부품의 온라인 감시를 위한 1차 유도초음파의 신호 발생 방법, 신호 수집 및 처리, 모드 분석 등을 증기발생기 세관을 시편으로 하여 수행.
- 온라인 감시 장치의 개발 및 시험을 위해 인공 결함 시험편 12종,

다채널 초음파 트랜스듀서 (배열 탐촉자), 다채널 초음파 Pulser /Receiver 그리고 동 장치의 제어회로 설계 및 제작.

- 동 장비를 이용하여 26M 배관 (구경 2인치 스테인리스 스틸)에서 원거리 (20M) 결함 탐지 목표를 달성.

C. 원전기기 안전 검사 및 평가 신기술 개발

- 네트워크 기반의 원격 검사 시스템 개발: 네트워크를 이용한 원격검사 시스템 인프라 및 시스템 제어 환경 구축; 원격검사 장비 제어용 웹 애플리케이션 및 원격 DBMS용 웹 애플리케이션 제작; 원격 터미널을 이용한 원격 제어 시스템 구축; JSP와 JNI를 이용한 배관 원격 검사 시스템 구축; 제어봉 안내관 지지핀 원격 검사 소프트웨어 개발
- 원자로 제어봉 안내관 검사용 탐상기 개발: 리눅스 기반의 로봇 제어기 구현; 비디오 영상으로부터 제어봉 안내관 및 지지핀의 위치를 실시간으로 추정하는 자동 주행 시스템 구현; 제어봉 안내관 지지핀 목업 및 로봇 제작; 제어기 내방사선 테스트; 통합 실험

D. 원전 케이블의 수명평가 및 노후화 진단기술 개발

- 활성화 에너지 측정: 가속열화의 지침으로 케이블 재료의 활성화 에너지를 측정하였음. 이는 가속열화의 지침이 될 뿐만 아니라 방사선 열화에 대한 활성화 에너지의 비교로 방사선 열화평가의 기준이 될 수 있음을 검증하였음.
- 방사선 및 열 가속열화에 따른 물성 평가: 난연 케이블 재료의 방사선 가속열화 및 열 가속열화를 수행하여 이에 따른 재료의 열화평가로 열중량분석, 시차주사열량분석, 파단시 연신율, 절연저항, FT-IR, 용매추출, 화학발광 분석을 수행하였음.
- 케이블 수명평가: 상기 가속열화 시험재료의 물성을 IEEE 383 시험조건과 임계특성의 표준ISO 및 IEC에 준하여 수명을 평가하였음.

IV. 활용 분야

상기와 같이 1단계 연구가 수행되었는데 본 과제에서 다루는 원전 기기 건전성에 관련된 기술들은 일차적으로 국내외 원전 기기에 활용된다. 즉, NIMS 국산화, 온라인 감시를 통한 가동중 검사 대체, 원전 주요기기의 원격검사, 노후된 원전 케이블의 잔여 수명 평가 등에 활용된다.

또한 개발과정에서 획득된 요소기술의 파급 효과 매우 크며, 난이도가 높은 원전 기기를 대상으로 기술을 개발하였으므로 기타 일반 산업 기기의 건전성 검사 진단 평가에 널리 응용될 수 있다. 특히 2003년 영광 5, 6호기 열소매 이탈 사고시에는 LPMS 신호분석을 통하여 사고원인 규명에 기여하였으며, 본 과제에서 확립된 기술을 활용하여 간이용 LPMS 신호취득시스템을 개발하여 영광 3,4,5,6 호기에 설치하는 용역을 수행한 바 있다.

- 본 과제를 통하여 개발된 금속파편 충격 신호 진단 소프트웨어는 기존의 LPMS의 성능과 신뢰도를 획기적으로 향상시키며, 원자로 내부구조물 종합 진단 및 평가 기술은 IVMS 성능 향상 및 원자로계통의 이상상태 발생 시 내부구조물 상태 진단에 활용된다.
- 관형 구조물에 대한 연속 감시 기술이 성공적으로 개발되면 광범위한 원전 기기 부품의 결함을 신속하게 탐상할 수 있고 다른 산업설비의 배관과 세관을 탐색하는 데도 활용될 수가 있음. 적용 가능한 대상은 원자력발전소배관, 가스공사배관, 도시가스의 배관, 지하매설배관, 교량 통과배관, 노출배관, PE코팅배관, PE배관, 중화학플랜트배관 등 임
- 네트워크 기반 원격 검사 및 평가 기술은 원전의 원자로, 증기발생기, 배관과 같은 위험성이 도사리는 검사 작업에 모두 적용될 수 있으며, 기타 산업 분야에도 광범위하게 활용될 수 있음. 원자로 용기 원격 검사를 비롯한 여러 가지 가동중 검사를 원격검사로 대체할 수 있으며, 국소기기 초소형 검사 기술을 활용하여 원자로 헤드 관통부 노즐의 결함 탐지기로 활용할 수 있음.
- 원전 케이블의 건전성 평가기술은 원자력 기기 성능검증의 기술지원과

원전의 수명관리 및 연장의 요소기술로 연계지원 된다.

- 안전계통 기기의 건전성을 진단하고 검사하는 기술은 현재 수행중인 신형원자로 개발 사업에 활용될 수 있음. 일체형 원자로의 안전계통 기기에 대한 검사 및 건전성 진단을 위한 원천기술로 활용될 수 있으며 그 밖에 액체금속로나 고온가스로의 안전계통 기기의 감시 및 진단에 활용될 수 있음.

SUMMARY

I. Project Title

Development of the Inspection and Diagnosis Technology
for the NSSS Components Integrity

II. Objective and Importance of the Project

Social interests in the safety of nuclear power plants have increased considerably, as the number of the operating plants has increased to 19 in Korea. And the interest in a synthetic lifetime management has also increased, as the age of the Korean nuclear power plants increases.

This project aims at the development of new technologies for a monitoring, inspection, diagnosis and evaluation of safety related components in nuclear power plants. These technologies are required to detect the defects in the components of nuclear power plants and to prepare thoroughly against accidents, for example, a thermal sleeve breakaway in Youngkwang unit 5 and 6 in Korea or a heat exchanger steam pipe rupture in the Hamaoka nuclear power plant in Japan.

The conventional NSSS integrity monitoring system has been used in the fields of nuclear power plants, however, it only has a function for indicating the occurrence of abnormal faults. For a safer and quicker management against unexpected accidents, systematic development of the overall technologies including the diagnosis functions is especially needed.

The pipe rupture accident which occurred in the Mihama nuclear power plant in Japan in 2004 shows that the currently performed ISI (in-service inspection) has a limit in finding out the flaws embedded in

the pipe materials. In order to compliment the conventional in-service inspection and to perform the maintenance of the next generation nuclear power plants effectively, on-line monitoring technology is necessary which acquires the information for the abnormal components during a plant operation.

If the inspection and evaluation of NPP components can be remotely operated outside of the plant through the internet, rather than at the site of nuclear power plants, it would be more economical and convenient. For the implementation of such a network based inspection system, a series of technologies should be developed.

Finally, the cables used in the containment of the nuclear power plant should meet the electric and physical characteristics specified in IEEE standards, and should endure the heat and radiation during a normal operation and the design basis accidents. However, the life time estimation and aging management of the cables in our nuclear power plants have depended on foreign research data, which is not applicable to our cables. Thus our own research program on cable degradation is extremely necessary.

III. Scope and Contents of the Project

The final goal of this project is to development a new technology for a monitoring, inspection, diagnosis and evaluation of the integrity of the safety related components in nuclear power plants. We performed the 1st stage of the study on the four aforementioned issues during the period of 2002 - 2004.

1. Development of the NSSS component integrity diagnosis technology

- new technology on the diagnosis of a loose part monitoring
- dynamic characteristics analysis model for the support condition

defects of a reactor internals

2. Development of the on-line monitoring technology of the NPP components

- basic technology for an ultrasonic guided wave of elastic tubes
- flaw detection using ultrasonic guided waves.
- development of array probes and an experiment for the flaw detection of long pipes.

3. Development of new technology for the safety inspection and evaluation of NPP components

- development of a remote inspection system based on the networks
- development of a reactor control rod guide tube inspection system

4. Technology development for a lifetime estimation and degradation analysis of the cables in nuclear power plants

- accelerated degradation tests and a lifetime estimation
- diagnosis technology for a cable degradation in a NPP

IV. Results of the Research

This project aimed at four subjects among various topics to improve the integrity of the major components of nuclear power plants. Most of the subjects were started earlier or simultaneously with the advanced countries, so that the project was carried out in a creative manner and through both analysis and experiments. The following describes the research results of each subject.

A. Diagnosis of the NSSS component integrity

- A new technology for a noise reduction of the impact signal, and

an estimation of the position and impact mass of a loose part were developed, and the above algorithms were analysed and verified using field signals.

- Impact tests were performed using a reduced model of the reactor, and diagnosis software was developed by applying the newly developed algorithm.
- Dynamic characteristics analysis model for the support condition defect of a reactor's internal was developed, and a database simulation of its behavior was established.

B. On-line monitoring of the NPP components

- Signal generation, signal acquisition and mode analysis of the 1st ultrasonic guided wave based on steam generator tubes.
- Design and manufacturing of 12 sets of artificial defect specimens, multi-channel ultrasonic transducers (array transducer), a multi-channel ultrasonic pulser/receiver, and a control circuit of the system.
- Experiments for a remote detection using the above devices on pipes 24 meters long and 2 inches in diameter.

C. New technology for the safety inspection and evaluation of the NPP components

- development of a network based remote inspection system
- development of an inspection system for a reactor control rod guide tube

D. Lifetime estimation and degradation diagnosis of NPP cables

- Evaluation of the cable material property during a radiation and heat accelerated degradation: measurement of the activation energy, thermo-gravimetric analysis, time-differential calorimetric

analysis, measurement of the material's strength and isolation resistance, Fourier transform infrared spectrometer, chemical luminescence analysis, and so on.

- Lifetime estimation of the cables according to the IEEE 383 test condition and standard ISO and IEC

V. Proposal for Applications

The technologies developed in this project are applied to the components of nuclear power plants. The applications include localization of the NSSS integrity monitoring system, replacement of an in-service inspection by an on-line monitoring, remote inspection of the major components of the plants, lifetime estimation of the degraded plant cables, and so on.

Elemental technologies obtained through the project can have great ripple effects in general industry, and can be applied to the inspection and diagnosis of the components in other industries.

- Loose part impact signal analysis software developed in this project can be used to improve the performance and reliability of the conventional LPMS, and the reactor internal diagnosis technology can be applied to enhance the IVMS performance.
- When the continuous monitoring technology on circular components is established, many defects in the components of nuclear power plants can be promptly detected, and it could be applied to various pipes in other industries. The application targets are the pipes in nuclear power plants, the natural gas pipes, underground pipes, the pipes along the bridge, polyethylene pipes, the pipes in heavy and chemical plants, and so on.
- Network based remote inspection and evaluation technology can be applied to dangerous components such as a reactor, steam generator

and pipes as well as similar components in the other industries. Various inspections such as the reactor vessel weld inspection can be performed remotely. Micro inspection technology can be utilized for the reactor head penetration inspection.

- Plant cable integrity evaluation technology is used as an elemental technique for an equipment's qualification and its lifetime management and extension.
- The technologies developed in this project can be generally utilized for the inspection and diagnosis of new reactors such as a gas cooled high temperature reactor or a liquid metal reactor.

목 차

제 1 장 연구과제의 개요	1
제 1 절 연구개발 필요성	1
제 2 절 연구개발 목표 및 내용	4
제 2 장 국내·외 기술개발 현황	5
제 1 절 NSSS 기기 건전성 진단 기술	5
제 2 절 온라인 감시 기술	9
제 3 절 네트워크 기반 원격 검사 기술 개발	14
제 4 절 케이블 건전성 평가 기술	22
제 3 장 NSSS 기기 건전성 진단 기술개발	25
제 1 절 금속파편 충격 신호 진단 신기법 개발	25
1. 배경 이론	25
가. 배경잡음 감소 기법	25
(1) 스펙트럼 감산법	25
(2) 적응필터를 이용한 배경 잡음 제거법	26
(3) SVD 기법 이용 잡음제거	60
(4) 웨이블릿 변환을 이용한 배경 잡음제거	66
나. 비정상상태 신호분석 기법	72
(1) STFT(Short Time fourier Transfor) 기법	72
(2) WT(Wavelet Transform) 기법	75
(3) WD(Wigner Distribution) 기법	76
2. 연구 수행 내용	80
가. 배경잡음 감소를 위한 신기법 개발 및 현장신호 적용 분석 ...	80
(1) 스펙트럼 감산법과 적응필터를 적용한 배경잡음 감소 분석	80
(2) SVD 기법 및 웨이블릿 기법을 이용한 배경잡음 감소 적용 분석	90
나. 충격신호 위치 및 질량 추정 신기법 개발 및 검증	92
(1) 금속파편 충격신호 위치 추정 신기법 개발	92

(2) 금속파편 충격신호 질량 추정 신기법 개발	99
다. 금속파편 충격신호 시험장치 개발	111
라. 금속파편 충격신호 진단용 소프트웨어 개발	112
제 2 절 원자로 잡음신호를 이용한 내부구조물 상태진단 기법 개발 ...	113
1. 노내·외 중성자 신호를 이용한 상태진단 분석 기법	113
2. 원자로내부구조물의 지지조건 결함에 대한 동특성 해석 모델 개발 ...	125
가. 원자로 내부구조물의 3차원 해석 모델 개발 및 검증	125
나. 원자로 내부구조물 지지조건 결함 시뮬레이션 및 증상 DB 구축 ...	127
제 3 절 연구결과 및 활용방안	129
제 4 장 온라인 감시 기술 개발	130
제 1 절 탄성관의 유도초음파 기반기술 연구	130
1. 연구 개요	130
2. 유도초음파 기술의 이론적 배경	130
가. 탄성관에서의 유도초음파의 전파	130
나. 탄성관에서 유도초음파의 모드특성	136
다. 유도초음파의 분산선도 계산	138
라. Short Time Fourier Transform (STFT)	143
3. 분산선도 및 실험	145
가. 유도 초음파 분산선도의 계산	145
(1) 계산 과정	146
(2) 탐촉자와 입사각에 따른 이론적인 유도초음파의 속도 ...	147
나. 실험	148
(1) 실험장치	148
(2) 실험	157
4. 분석 및 결론	166
가. 수신신호 모드 신호분석 기법 (GWMIT)	166
나. 결함검출 최적모드 선정	169
(1) 선정방법	169

(2) 최적모드 선정	170
제 2 절 유도초음파를 이용한 결함탐지기술 연구	173
1. 연구 개요	173
2. 실험	174
가. 결함 가공	174
나. 선 결함에서의 유도초음파 실험	175
다. 원 결함에서의 유도초음파 실험	176
3. 패턴 매칭을 이용한 모드 확인	180
제 3 절 배열탐촉자 장치개발과 장거리 배관결함탐지 실험	183
1. 연구 개요	183
2. 배열탐촉자에 의한 모드 선정	184
3. 다채널 초음파 pulser/receiver 제작	187
4. 8채널 pulser/receiver 제어회로구성	189
5. 배열탐촉자 요소 설계	190
6. 개발 시스템 기법의 검증 실험	191
가. 장치 설정	191
나. 유도 초음파 모드발생 실험	192
다. 균속도 측정	194
라. 수신신호의 모드 선택	194
마. 모드 분석	195
바. 장거리 전파특성	196
사. 다채널 고출력 유도 초음파 발생 장치제작	197
7. 결론	200
제 4 절 AE 기술의 기기 온라인감시 적용을 위한 기반기술 연구 ...	201
1. AE 기술의 이론적 배경	201
가. AE(음향방출)의 정의 및 발생기구	201
나. AE 시험 기술의 특징	202
다. AE 신호 해석 평가	204
(1) 음향방출 변수	205

(2) AE 신호 해석방법	207
2. AE기술의 원전 적용	210
가. 경수로 원전	210
나. 중수로 원전(CANDU)	211
다. 액체금속로 (LMR)	212
3. 인장시험시 AE발생특성평가	213
가. 실험 개요	213
나. 실험 과정	213
(1) 시편	214
(2) 인장 시험	215
(3) AE신호분석시스템	215
(4) AE 센서	216
다. AE측정과 분석	217
라. 실험 결과 및 고찰	217
제 5 장 네트워크 기반 원격 검사 기술 개발	222
제 1 절 네트워크 기반의 원격 검사 시스템 개발	222
1. 연구개요	222
2. 원격 검사 시스템 개발 요소 기술	224
가. 웹과 자바	224
(1) 웹	224
(2) 자바	225
나. 3-tier 클라이언트/서버 모델	231
3. 원격 검사 시스템 설계 및 개발	232
가. 웹을 이용한 RISYS의 원격 제어 시스템 구현	233
(1) 시스템 설계	233
(2) 시스템 구현	234
나. Windows 원격 터미널을 이용한 원격 제어 시스템 구현	237
다. 제어봉 안내관 지지판 검사 시스템의 원격 제어 시스템화	239
라. 원격 파이프 검사 장비 구현	242

다. 방사선 조사효과 및 특성 평가 방법	315
2. 원전 케이블의 난연성 평가 실험	324
가. 실험방법	324
나. 실험결과 및 고찰	328
다. 결론	342
제 3 절 원전 케이블의 노후화 진단 기술개발 (Ⅱ)	343
1. 고분자 물질의 분해 및 안정화	343
가. 열산화 과정	343
나. 안정화 원리	345
다. 산화방지제 및 금속불활성제	346
라. 산화방지제 시험	348
2. 원전케이블의 노후화 평가 실험	348
가. 실험방법	348
나. 실험결과 및 고찰	352
제 7 장 연구개발 목표 달성도 및 대외 기여도	360
1. NSSS 기기 건전성 진단 기술 개발	360
2. 원전 기기 온라인 연속 감시 기술 개발	361
3. 원전기기 안전 검사 및 평가 신기술 개발	361
4. 원전 케이블의 수명평가 및 노후화 진단기술 개발	361
제 8 장 연구개발결과의 활용계획	363
1. NSSS 기기 건전성 진단 기술	363
2. 온라인 감시 기술	363
3. 네트워크 기반 원격 검사 기술 개발	365
4. 케이블 건전성 평가 기술	366
제 9 장 참고문헌	367

Contents

Chapter 1. Introduction	1
Section 1. Necessity of R&D	1
Section 2. Contents of R&D	4
Chapter 2. State of the arts	5
Section 1. Diagnosis technique of NSSS equipment integrity	5
Section 2. Online monitoring of the integrity of components	9
Section 3. Remote inspection tech. based on network	14
Section 4. Evaluation technology of cable integrity	22
Chapter 3. Development of diagnosis technique of NSSS equipment integrity	25
Section 1. Development of diagnostic technique for LPMS	25
1. Theory	25
A. Noise reduction technique	25
(1) Spectral subtraction	25
(2) Adaptive filtering technique	26
(3) Singular value decomposition	60
(4) Wavelet denoise	66
B. Non-stationary signal analysis technique	72
(1) STFT (Short Time Fourier Transform)	72
(2) WT (Wavelet Transform)	75
(3) WD (Wigner Distribution)	76
2. Research scope and results	80
A. Developments of new technique for noise reduction and application	80
(1) Application on spectral subtraction & adaptive filtering technique	80

(2) Application on SVD method and Wavelet denoise	90
B. Estimation of impact location and mass	92
(1) Estimation of impact location	92
(2) Estimation of mass	99
C. Development of impact test equipment	111
D. Development of S/W for diagnosis of loose parts	112
Section 2. Development of reactor internal structures condition diagnostic technique using reactor noise signals	113
1. Method of condition diagnostic analysis using incore and excore neutron signals	113
2. Development of dynamic characteristics analysis model for reactor internal structures of support condition faults ...	125
A. Development and verification of reactor internal structures 3D analysis model	125
B. Simulation of reactor internal structures support condition faults and establishment of the faults DB	127
Section 3. Application of research results	129
Chapter 4. Study on online monitoring of the integrity of components ...	130
Section 1. Basics of ultrasonic guided waves in an elastic tube ...	130
1. Introduction	130
2. Theory on ultrasonic guided waves	130
A. Propagation of guided waves in elastic tube	130
B. Mode characteristics of guided waves in elastic tube ...	136
C. Dispersion curves	138
D. Short Time Fourier Transform (STFT)	143
3. Experiments	145
A. Dispersion curves of a steam generation tube	145
(1) Calculation process of dispersion curves	146

(2) Velocity of ultrasonic guided waves according to incident angles	147
B. Experiments	148
(1) Setup for experiments	148
(2) Experiments	157
4. Analysis and conclusion	166
A. Mode analysis techniques	166
B. Selection of optimal mode for fault detection	169
(1) Selection criteria	169
(2) Optimal mode	170
Section 2. Study on fault detection method using ultrasonic guided waves in pipes	173
1. Introduction	173
2. Experiments	174
A. Fabrication of specimen	174
B. Experiments for detection of line-shaped faults	175
C. Experiments for detection of circle-shaped faults	176
3. Mode identification using pattern matching	180
Section 3. Development of an array transducer and experiments of long-range inspection in pipes	183
1. Introduction	183
2. Mode selection of an array transducer	184
3. Fabrication of multi-channel ultrasonic pulser/receiver	187
4. Configuration of multi-channel pulser/receiver control circuit	189
5. Design of elements of an array transducer	190
6. Validation experiments	191
A. Setup for experiments	191
B. Experiments of mode generation	192
C. Measurements of group velocity	194

D. Mode selection of received signal	194
E. Mode analysis	195
F. Characteristic of long-range propagation	196
G. Development of high-power, multi-channel ultrasonic guided waves generation system	197
7. Summary and conclusion	200
Section 4. Study on the application of AE technology to on-line monitoring of components in NPP	201
1. Theoretical background of the AE technology	201
A. Definition and origination of the AE	201
B. Characteristic of the AE technology	202
C. Appreciation for the AE signal	204
(1) Variables for the AE	205
(2) Analytical methods of the AE signal	207
2. Application of the AE in the nuclear power plants	210
A. Pressurized Water Reactor (PWR)	210
B. Canadian Deuterium Uranium (CANDU)	211
C. Liquid Metal Reactor (LMR)	212
3. Estimation of AE generation characteristic during the tensile test	213
A. synopsis of the experiment	213
B. Process of the experiment	213
(1) Specimen	214
(2) Tensile test	215
(3) Signal processing system	215
(4) AE sensor	216
C. Measurement and analysis	217
D. Experimental results	217
Chapter 5. Development of remote inspection tech. based on networks	222

Section 1. Development of remote inspection system	222
1. Introduction	222
2. Basic techniques for developing remote inspection system	224
A. Web and Java	224
(1) Web	224
(2) Java	225
B. 3-tier Client/Server model	231
3. Design and development of remote inspection system	232
A. Development of Web based RISYS	233
(1) System design	233
(2) System development	234
B. RISYS with windows terminal service	237
C. Remote inspection system for guide tube split pins	239
D. Development of web based pipe inspection system	242
E. Development of Java application for remote DBMS	247
Section 2. An inspection robot for guide tube split pins	250
1. Current inspection method of guide tube split pins	250
2. An automatic inspection method we developed	251
A. Estimation of the robot position using guide tube and split pin images	251
B. Estimation of the guide tube center position using matched filter	252
3. Building a mock-up and an inspection robot prototype	256
4. Software for controller operation and environment setup	257
A. Gdbserver setup for application development	257
B. Webserver building in the embedded controller board	262
C. Real-time linux	265
5. Controller h/w and its radiation-tolerant test	281
A. Motion controller	281

B. Radiation-tolerant tests	282
Chapter 6. Evaluation technology of cable integrity	285
Section 1. Environmental accelerated aging test and lifetime evaluation of cable	285
1. Environmental accelerated aging test of cable	285
A. Introduction	285
B. Regulatory and criteria of test	285
C. Activation energy measurement of cable materials	288
D. Environmental accelerated aging of cable materials	294
2. Evaluation of cable using accelerated aging	296
A. Physical properties as accelerated aging	296
B. Conclusions	305
Section 2. Diagnosis of aged cable in NPP (I)	306
1. Flame retardant of cable in NPP	306
A. Flame retardant of cable materials	306
B. Flame retardant advancement of polymer	308
C. Radiation effects and its evaluation	315
2. Evaluation of cable in NPP using flame retardant properties	324
A. Experimental method	324
B. Results and discussion	328
C. Conclusions	342
Section 3. Diagnosis of aged cable in NPP (II)	343
1. Decomposition and stabilization of polymer	343
A. Thermal oxidation process	343
B. Stabilization	345
C. Antioxidant and metallic deactivator	346
D. Experimental method of antioxidant	348
2. Deterioration assessment of cable in NPP	348

A. Experimental method	348
B. Results and discussion	352
Chapter 7. Achievement of R&D Object and Contribution	360
1. Diagnosis technique of NSSS equipment integrity	360
2. Online monitoring of the integrity of components	361
3. Remote inspection technology based on networks	361
4. Evaluation technology of cable integrity	361
Chapter 8. Application plan of R&D results	363
1. Diagnosis technique of NSSS equipment integrity	363
2. Online monitoring of the integrity of components	363
3. Remote inspection technology based on networks	365
4. Evaluation technology of cable integrity	366
Chapter 9. References	367

표 목 차

표 4.1.1 관에서의 유도초음파모드	136
표 4.1.2 증기발생기 세관 사양	146
표 4.1.3 탐촉자에 따른 균속도, 위상속도, 입사각, 모드와의 관계	148
표 4.1.4 RITEC (c) RAM-10000 특징	150
표 4.1.5 실험공통조건	157
표 4.1.6 비행거리에 따른 주파수별 시간-속도 관계	167
표 4.1.7 주파수별 균속도	168
표 4.1.8 비행거리에 따른 균속도와 시간의 관계	172
표 4.4.1 Instron 4505 기본사양	215
표 4.4.2 인장시험 결과	219
표 6.1.1 형식시험에 대한 대표적인 케이블	287
표 6.1.2 원전용 600V EPR/CSP 전력용 케이블 절연재료의 가속열화시간	295
표 6.2.1 고분자 재료의 체적저항율	308
표 6.2.2 고분자 재료의 허용온도	309
표 6.2.3 산소지수에 따른 난연등급 (JIS D1201)	320
표 6.2.4 고분자 재료의 기계적 특성(상온)	324
표 6.2.5 클로로프렌 고무의 조성	325
표 6.2.6 방사선 조사에 따른 CR-1의 FT-IR 특성피크의 정량분석	341
표 6.3.1 고밀도 폴리에틸렌의 물리적 특성	349
표 6.3.2 고밀도 폴리에틸렌의 조성	350

그림목차

그림 2.3.1 JANIS 시스템 클라이언트/서버 모델	16
그림 2.3.2 GraFic 시스템 모델	17
그림 2.3.3 IERNet 시스템 모델	19
그림 2.3.4 RobWebCam	20
그림 2.3.5 TRC에서 개발한 안내관 지지핀 검사장치	21
그림 2.3.6 지지핀 검사 현장	21
그림 2.3.7 Oscar 로봇	22
그림 3.1.1 스펙트럼 감산법에 대한 도식적 설명	25
그림 3.1.2 적응필터를 이용한 배경 잡음 제거 기술	27
그림 3.1.3 적응필터를 필터의 최적화 과정	28
그림 3.1.4 적응필터를 필터의 구조	28
그림 3.1.5 2단계 적응필터이용 LPMS에서의 배경 잡음 제거	31
그림 3.1.6 Signal flow graph for stage m of a lattice predictor	42
그림 3.1.7 The signal flow graph of a lattice based structure for joint process estimate	45
그림 3.1.8 Block diagram of Recursive Least Square Algorithm	47
그림 3.1.9 Signal flow graph of QR-LSL algorithm	59
그림 3.1.10 Wavelet Transform의 창문 변경방법에 대한 설명	67
그림 3.1.11 Wavelet Tranform의 창문 변경방법에 대한 설명	68
그림 3.1.12 스케일링 함수와 모 웨이브렛의 관계: (a) db2를 제작하는 스케일링 함수 (b) 실제 sine 신호에 관계하는 스케일링 함수	70
그림 3.1.13 db4의 스케일링 함수와 모 웨이브렛 및 각각에 해당하는 저주파대역통과 필터 및 고주파대역통과 필터	70
그림 3.1.14 db40의 스케일링 함수와 모 웨이브렛 및 각각에 해당하는 저주파대역통과 필터 및 고주파대역통과 필터	71
그림 3.1.15 다 분해능 웨이브렛 분석 기술에 대한 그림적인 설명	71
그림 3.1.16 다분해능 웨이브렛 분석 기술이용 잡음제거에 가장 좋은 신호	72
그림 3.1.17 STFT 창문함수	73

그림 3.1.18 Garbor 타입 분해능	74
그림 3.1.19 일반적인 분해능	74
그림 3.1.20 창문사이즈에 따른 STFT결과 비교	74
그림 3.1.21 WT 창문함수	75
그림 3.1.22 WT의 분해능	76
그림 3.1.23 인공신호에 대한 WT결과	76
그림 3.1.24 인공신호에 대한 창문사이즈 변경에 대한 위그너 분포	79
그림 3.1.25 위그너분포, Ambiguity 함수	79
그림 3.1.26 Exponential Kernel	79
그림 3.1.27 Ambiguity 함수	80
그림 3.1.28 Weighted 위그너 분포	80
그림 3.1.29 스펙트럼 감산법 적용 결과	82
그림 3.1.30 LMS를 이용한 ALE 기법 적용 결과	83
그림 3.1.31 NLMS를 이용한 ALE기법 적용 결과	84
그림 3.1.32 SMLMS를 이용한 ALE기법 적용 결과	85
그림 3.1.33 충격신호에 대한 스펙트럼감산법 적용 결과	86
그림 3.1.34 충격신호에 대한 LMS를 이용한 ALE기법 적용 결과	87
그림 3.1.35 충격신호에 대한 NLMS를 이용한 ALE기법 적용 결과	88
그림 3.1.36 충격신호에 대한 SMNLMS를 이용한 ALE기법 적용 결과	89
그림 3.1.37 고주파 잡음속에 존재하는 주파수변조를 가진 충격파에 대한 잡음제거 기술의 비교(SNR=-50)	91
그림 3.1.38 백색 잡음속에 존재하는 주파수변조를 가진 충격파에 대한 잡음제거 기술의 비교 (SNR=-51)	91
그림 3.1.39 고주파 잡음속에 존재하는 주파수변조를 가진 충격파에 대한 잡음제거 기술의 비교 (SNR=-45)	91
그림 3.1.40 백색 잡음속에 존재하는 주파수변조를 가진 충격파에 대한 잡음제거 기술의 비교	92
그림 3.1.43 평판실험장치	93
그림 3.1.44 센서 위치 및 충격지점	93
그림 3.1.45 각 센서 신호에 따른 웨이브렛 분포 및 최대값 선도	94

그림 3.1.46 웨이블렛 변환을 이용한 위치 추정	95
그림 3.1.47 각 센서 신호에 따른 위그너-빌 분포	95
그림 3.1.48 Weigner-Ville 적용	96
그림 3.1.49 기존의 방법	96
그림 3.1.50 증기발생기	97
그림 3.1.51 센서위치 및 강구충격방법	97
그림 3.1.52 각 센서별 웨이블렛 분포 및 최대값 선도	97
그림 3.1.53 웨이블렛 변환을 이용한 위치 추정 결과	98
그림 3.1.54 위그너-빌 분포를 이용한 위치추정 결과	98
그림 3.1.55 강구 실험 개략도	99
그림 3.1.56 강구 실험을 통하여 측정된 진동 신호	99
그림 3.1.57 강구의 낙하에 의한 충격 신호에 대한 웨이브렛 변환이용 중심 주파수 측정	101
그림 3.1.58 직경 25.4mm, 19.05mm의 강구에 대한 실험의 time data ..	102
그림 3.1.59 직경 25.4mm, 19.05mm의 강구에 대한 실험의 웨이브렛 변환 이용 중심주파수비교	102
그림 3.1.60 직경 2.54cm에서 충돌에너지별 중심주파수	102
그림 3.1.61 직경 1.905cm에서 충돌에너지별 중심주파수	103
그림 3.1.62 두 직경의 충돌에너지별 평균중심주파수	103
그림 3.1.63 평판의 강구의 충돌에 의한 변위 그래프	105
그림 3.1.64 평판에 대한 충격력	106
그림 3.1.65 (a)Time data (b)거리에 따른 최대가속도	108
그림 3.1.66 직경에 따른 강구 충격 속도 예측	110
그림 3.1.67 속도에 따른 반경예측	111
그림 3.1.68 충격신호 분석 및 DB구축을 위한 실험 장치	112
그림 3.1.69 신기법을 적용한 충격 진단 소프트웨어	113
그림 3.2.1 웨스팅하우스형 원자로의 노외중성자 검출기 설치위치	119
그림 3.2.2 한국 표준형 원자로의 노외중성자 검출기 설치위치	119
그림 3.2.3 노심지지원통 집합체의 진동모우드 형상	120
그림 3.2.4 노외중성자 검출기의 설치 위치 변화	120

그림 3.2.5 노외중성자 신호의 APSD	121
그림 3.2.6 진동 모드별 APSD	121
그림 3.2.7 위치변화를 보정한 진동 모드별 APSD	122
그림 3.2.8 노내·외 중성자 동시 측정 위치	122
그림 3.2.9 노내·외중성자 잡음 APSD	123
그림 3.2.10 노내·외 중성자잡음 CPSD	123
그림 3.2.11 노내·외 중성자잡음 Coherence	124
그림 3.2.12 핵연료집합체 진동 모드	124
그림 3.2.13 원자로 내부구조물 및 3차원 모델링	125
그림 3.2.14 원자로 구조물의 유한요소 모델링	126
그림 3.2.15 해석 결과	127
그림 3.2.16 측정 결과	127
그림 3.2.17 원자로 내부구조물 결합 모델	128
그림 3.2.18 원자로 내부구조물의 결합증상 해석 결과	128
그림 4.1.1 유도초음파 발생 및 전파원리	131
그림 4.1.2 자유경계면, 내반지름, 외반지름, 무한길이중공형 실린더	133
그림 4.1.3 Short Time Fourier Transform의 개념도	145
그림 4.1.4 S/G tube 유도초음파 분산선도(a)군속도선도(b)위상속도선도	147
그림 4.1.5 연구 대상체. (a)증기발생기의 구조, (b)증기발생기 세관	149
그림 4.1.6 RITEC (c) RAM-10000	150
그림 4.1.7 썩기 도면	151
그림 4.1.8 탐촉자의 외관 및 크기	151
그림 4.1.9 가변각 웨지에 장착된 탐촉자	152
그림 4.1.10 실험장치의 구성	152
그림 4.1.11 실험장치 간의 연결도 (Pitch-catch)	153
그림 4.1.12 RF 시간신호의 예	156
그림 4.1.13 STFT 신호의 예	157
그림 4.1.14 실험신호의 예	158
그림 4.1.15 증기발생기 세관의 실험배치.(a)직관부 (b)곡관부	158
그림 4.1.16 각도에 따른 신호(2.25MHz 직관부)	159

그림 4.1.17 각도에 따른 신호(2.25MHz 곡관부)	160
그림 4.1.18 각도에 따른 신호(0.5MHz 직관부)	160
그림 4.1.19 각도에 따른 신호(0.5MHz 곡관부)	161
그림 4.1.20 수신위치 각도에 따른 탐촉자	161
그림 4.1.21 수신위치각도에 따른 신호(2.25MHz 60도)	162
그림 4.1.22 수신위치각도에 따른 진폭	163
그림 4.1.23 수신위치각도에 따른 신호(2.25MHz 30도)	164
그림 4.1.24 수신위치각도에 따른 진폭	164
그림 4.1.25 진행거리에 따른 탐촉자의 배치	165
그림 4.1.26 진행거리에 따른 신호(2.25MHz 직관부 30도)	165
그림 4.1.27 진행거리에 따른 신호(2.25MHz 곡관부 30도)	165
그림 4.1.26 진행거리에 따른 신호(2.25MHz 직관부 60도)	166
그림 4.1.27 진행거리에 따른 신호(2.25MHz 곡관부 60도)	166
그림 4.1.30 주파수별 시간-속도 관계	167
그림 4.1.31 GWMIT (2.25 MHz 탐촉자, 입사각 30°)	168
그림 4.1.32 진행거리에 따른 신호(1.0MHz 직관부 30도)	171
그림 4.1.33 진행거리에 따른 신호(2.25MHz 직관부 20도)	171
그림 4.1.34 시간-속도 관계	172
그림 4.1.35 결함검출 최적모드 선정	173
그림 4.2.1 결함 가공 시편	174
그림 4.2.2 선결함에 대한 유도초음파 실험 결과 (30도젯지).	175
그림 4.2.3 선결함에 대한 유도초음파 실험 결과 (45도젯지).	176
그림 4.2.4 선결함에 대한 유도초음파 실험 결과 (60도 젯지).	176
그림 4.2.5 원결함($\phi=4\text{mm}$)에 대한 유도초음파 실험 결과 (30도젯지). ..	177
그림 4.2.6 원결함($\phi=7\text{mm}$)에 대한 유도초음파 실험 결과 (30도젯지) ...	177
그림 4.2.7 원결함($\phi=7\text{mm}$)에 대한 유도초음파 실험 결과 (45도젯지) ...	178
그림 4.2.8 원결함($\phi=4\text{mm}$)에 대한 유도초음파 실험 결과 (45도젯지) ...	178
그림 4.2.9 원결함($\phi=7\text{mm}$)에 대한 유도초음파 실험 결과 (60도젯지) ...	179
그림 4.2.10 원결함($\phi=4\text{mm}$)에 대한 유도초음파 실험 결과 (60도젯지) ...	179
그림 4.2.11 STFT를 이용한 유도초음파 모드 확인	181

그림 4.2.12 3-D STFT의 결과를 2-D로 변환	182
그림 4.2.13 STFT 결과와 분산선도와의 패턴 매칭 결과	182
그림 4.3.1 배열형 탐촉자를 이용한 위상동조 기구의 개념도	185
그림 4.3.2 Pulse-echo 법에 의한 신호 동조의 개념도	186
그림 4.3.3 다채널 펄서/리시버 외관	187
그림 4.3.4 다채널 펄서/리시버 내부	187
그림 4.3.5 펄서 회로도	188
그림 4.3.6 리시버 회로도	188
그림 4.3.7 펄서 실물 사진	188
그림 4.3.8 리시버 실물 사진	188
그림 4.3.9 채널점검을 위한 실험장치 구성	189
그림 4.3.10 저면 반사 신호	189
그림 4.3.11 펄서/리시버 제어장치 회로도	190
그림 4.3.12 펄서/리시버 제어장치 제작 기판	190
그림 4.3.13 단일 탐촉자 설계도	191
그림 4.3.14. Experimental setup	192
그림 4.3.15 Demonstration of mode tuned generation	193
그림 4.3.16 Mode tuning of generated guided waves by change time interval	193
그림 4.3.17 Measured time of flight for different receiver positions.	194
그림 4.3.18 Tuning the mode of received wave.	195
그림 4.3.19 Diagram for mode identification for time delay of 2.08 μ s.	195
그림 4.3.20 Diagram for mode identification for time delay of 4.17 μ s.	196
그림 4.3.21 Long-range transmission results.	196
그림 4.3.22 40채널 pulser/receiver 와 원주 방향 배열형 탐촉자	197
그림 4.3.23 가공 결함이 있는 24m 스테인리스강 배관	198
그림 4.3.24 40채널 pulser/receiver 와 원주 방향 배열형 탐촉자의 실험	198
그림 4.3.25 펄스-반사법으로 수신된 신호	199
그림 4.4.1 1차 및 2차 AE 발생원의 구분	202
그림 4.4.2 돌발형 AE 및 연속형 AE	202
그림 4.4.3 돌발형 AE 신호의 변수	205

그림 4.4.4 AE시험의 Block Diagram과 시편의 체결	214
그림 4.4.5 시편의 형태와 규격	215
그림 4.4.6 Front panel of the AMSY-5	216
그림 4.4.7 응력 변형 곡선과 AE 이벤트 발생률	219
그림 4.4.8 응력 변형 곡선과 AE 에너지 발생률	220
그림 4.4.9 AE 진폭분포도	220
그림 4.4.10 AE 진폭과 Duration 분포도	221
그림 5.1.1 원격 제어 시스템 개념도	223
그림 5.1.2 JNI 프로그램 순서	230
그림 5.1.3 3-tier 클라이언트/서버 모델	231
그림 5.1.4 웹을 이용한 원격 RISYS 구성도	234
그림 5.1.5 원격 RISYS	235
그림 5.1.6 원격 RISYS 클라이언트 웹 브라우저 인터페이스	236
그림 5.1.7 RISYS 중앙 제어 서버 인터페이스	237
그림 5.1.8 Windows 원격 터미널을 이용한 원격제어 시스템	238
그림 5.1.9 원격 제어봉 안내관 지지편 검사 시스템 개념	240
그림 5.1.10 원격 제어봉 안내관 지지편 검사 시스템 중앙 제어 인터페이스	240
그림 5.1.11 원격 제어봉 안내관 지지편 검사 시스템 웹 브라우저 인터페이스	241
그림 5.1.12 원격 제어봉 안내관 지지편 검사 시스템 구현 화면	241
그림 5.1.13 파이프 검사 로봇	242
그림 5.1.14 원격 파이프 검사 시스템 구조	243
그림 5.1.15 원격 파이프 검사용 웹 브라우저 인터페이스	243
그림 5.1.16 웹을 이용한 원격 데이터베이스 접근 구조	248
그림 5.1.17 원격 데이터베이스 입력 화면	249
그림 5.1.18 원격지 데이터베이스 자료의 차트 표현	249
그림 5.2.1 제어봉 지지편의 위치	250
그림 5.2.2 지지편 검사환경	251
그림 5.2.3 제작된 정합필터	254
그림 5.2.4 입력영상	254
그림 5.2.5 정합 필터 통과한 안내관 영상	255

그림 5.2.6 안내관이 소거된 이진화 영상	255
그림 5.2.7 정합필터 통과한 지지편의 영상	255
그림 5.2.8 안내관의 부분 입력 영상과 이진화 영상	256
그림 5.2.9 정합필터링 한 안내관 영상	256
그림 5.2.10 안내관 소거 후 영상	256
그림 5.2.11 정합필터링 한 지지편의 영상	256
그림 5.2.12 제작된 목업, 검사 로봇 및 지지편	257
그림 5.2.13 로봇의 지지편 검사	257
그림 5.2.14 호스트 PC와 target board의 구성	258
그림 5.2.15 config.h	260
그림 5.2.16 gdbserver 실행	261
그림 5.2.17 DDD 실행	261
그림 5.2.18 debugging	262
그림 5.2.19 Makefile	263
그림 5.2.20 defines.h	263
그림 5.2.21 Makefile	265
그림 5.2.22 컴파일 설정	268
그림 5.2.23 리얼타임 설정 전	269
그림 5.2.24 리얼타임 설정 후	269
그림 5.2.25 rc.local	277
그림 5.2.26 modules	278
그림 5.2.27 preempt test	279
그림 5.2.28 RTAI test	281
그림 5.2.29 로봇 제어기 (PXA-255 프로세서 사용)	282
그림 5.2.30 내방사선 실험	283
그림 5.2.31 CCD에 1krad/h의 감마선 조사전, 조사직후 및 1시간 후 영상	284
그림 6.1.1 Kissinger법을 이용한 XLPE, EPR의 방사선 조사에 따른 활성화 에너지 비교	289
그림 6.1.2 Flynn-Wall-Ozawa법을 이용한 XLPE의 방사선조사에 대한 활성화 에너지의 비교	291

그림 6.1.3 승온속도에 따른 XLPE의 DSC 곡선	292
그림 6.1.4 시차주사열량계법을 이용한 XLPE의 방사선조사에 대한 활성화 에너지	292
그림 6.1.5 온도에 따른 EPR 재료의 유전손실계수	294
그림 6.1.6 방사선 조사에 대한 EPR 재료의 활성화에너지 비교	294
그림 6.1.7 방사선 가속열화에 따른 LDPE와 CSPE 재료의 교류절연파괴강도	297
그림 6.1.8 열가속열화에 따른 EPR 재료의 교류절연파괴강도	297
그림 6.1.9 체적저항을 측정의 개략도	298
그림 6.1.10 방사선 조사에 따른 XLPE의 체적저항을	298
그림 6.1.11 유전측정장치의 개략도	299
그림 6.1.12 방사선 조사에 대한 전이온도에서의 유전손실계수와 유전정접	300
그림 6.1.13 열가속열화에 따른 EPR 재료의 파단시 연신율	302
그림 6.1.14 방사선 가속열화에 따른 XLPE 재료의 파단시 연신율과 인장강도	302
그림 6.1.15 방사선 조사에 따른 CSPE의 5%중량감소온도 및 파단시 연신율	303
그림 6.1.16 방사선 조사에 따른 EPR의 5%중량감소온도와 파단시 연신율	304
그림 6.1.17 방사선 조사에 따른 XLPE의 FT-IR 스펙트럼	305
그림 6.2.1 고분자 재료의 연소과정	309
그림 6.2.2 고분자 재료의 연소 억제 경로	310
그림 6.2.3 인계 난연제의 난연 메커니즘	314
그림 6.2.4 고분자의 방사선 조사효과 - cross-linking	316
그림 6.2.5 고분자의 방사선 조사효과 - unsaturation	317
그림 6.2.6 고분자의 방사선 조사효과 - degradation	317
그림 6.2.7 고분자의 방사선 조사효과 - gas evolution	317
그림 6.2.8 고분자의 방사선 조사효과 - reaction with environment	317
그림 6.2.9 고분자의 방사선 조사효과 - restoration	317
그림 6.2.10 고분자 재료에 따른 응력-변형을 거동	323
그림 6.2.11 클로로프렌 고무의 이성체	325
그림 6.2.12 산소지수 측정용 시편 받침대	326
그림 6.2.13 저항을 측정의 개략도	327
그림 6.2.14 난연제를 첨가한 CR의 방사선 조사에 따른 한계산소지수	330

그림 6.2.15	난연제를 첨가한 CR의 방사선 조사에 따른 분해개시온도	330
그림 6.2.16	난연제를 첨가한 CR의 방사선 조사에 따른 체적저항율의 변화	332
그림 6.2.17	난연제를 첨가한 CR의 방사선 조사에 따른 표면저항율의 변화	332
그림 6.2.18	난연제를 첨가한 CR의 방사선 조사에 따른 파단시 연신율	334
그림 6.2.19	난연제를 첨가한 CR의 방사선 조사에 따른 인장강도	334
그림 6.2.20	난연제 종류에 따른 CR의 열중량 분해곡선	337
그림 6.2.21	방사선 조사에 따른 CR의 열중량 분해 곡선	340
그림 6.2.22	난연제를 첨가한 CR의 방사선 조사에 따른 5% 분해개시온도의 변화	340
그림 6.2.23	방사선 조사에 따른 CR-1의 적외선 분광 흡수 스펙트럼	341
그림 6.3.1	열발광량 측정 장치	351
그림 6.3.2	고분자 시료의 접촉각 측정	352
그림 6.3.3	배합 PE의 방사선 조사에 따른 열발광량 변화	357
그림 6.3.4	방사선 조사에 따른 배합 PE의 열발광 집적량 (50~300℃)	357
그림 6.3.5	방사선 조사에 따른 배합 PE의 파단시 연신율	359
그림 6.3.6	배합 PE의 방사선 조사에 따른 접촉각	359

제 1 장

연구과제의 개요

제 1 장 연구과제의 개요

제 1 절 연구개발 필요성

1. 연구개발의 기술적 중요성

원전기기의 건전성 검사·진단 기술은 원전 안전등급 기기의 결함을 사전에 인지하고 이에 대처하기 위한 기술로서 원전의 안전을 위하여 필수적으로 요구된다. 그간 원전은 기술적 보수성과 인증 비용으로 인하여 첨단 기술을 도입하지 못하였으나 최근 일반 산업에서 검증된 신기술을 접목하여 원전의 안전성과 경제성을 제고할 수 있는 고도의 신기술 구현이 가능하게 되었다.

최근 국내에서는 영광 5,6 호기의 열소매 이탈사고로 인하여, 운용중인 발전소에 대한 원자로계통 구조건전성 감시시스템 (NIMS: NSSS Integrity Monitoring System)의 중요성이 부각되고 있으며, 이와 관련한 기술의 국산화 및 감시/진단 기능의 신뢰성 제고를 위하여 다각적인 조치가 필요한 실정이다.

NIMS의 감시 및 진단기술은 선진국에서 이미 개발되어 원자력 발전소의 현장에 적용되고 있으나, 한국 표준형 원자로의 경우 아직까지 전량 수입에 의존하고 있다. 또한 NIMS의 정비 보수 및 진단 핵심기술은 아직도 선진국에 의존하고 있으며 예기치 않은 문제의 발생 시에 유연한 대처를 위하여, 진단 기술을 강화한 전체 시스템의 종합적인 국산화 개발이 필요하다.

또한 2004년 일본 미하마 원전의 배관 파열 사고는 직관부의 감육으로 인한 사고로서 현재 수행되고 있는 가동중검사 (ISI; In-service Inspection) 만으로는 결함부위를 찾아내는 데에 제한이 있다는 것을 보여주고 있다. 기존의 ISI를 보완하고 또한 차세대 원전과 같은 새로운 기기의 유지보수를 적절하게 수행하기 위해서는 연속감시(On-line Monitoring)를 통하여 이상부위에 대한 정보를 수집하고 분석하는 온라인 감시 기법이 필요하다. 원전기기들의 원격 검사와 원격평가를 실현하기 위하여는 네트워크 기술, 컴퓨팅 파워, 인터페이스, 등의 기본 요소 기술들이 성숙되어야 하는데,

수년전까지만 해도 이러한 기술들의 조합으로 원활한 원격 검사와 평가를 위한 시스템의 구축이 어려웠으나 최근에는 가능하게 되었다. 앞으로는 이러한 기술이 더욱 발전할 것이므로, 원격지의 검사 시스템을 실시간에 가까운 속도로 임의의 장소에서 접근하고 제어하며 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

원전에 사용되는 격납용기 내부의 케이블은 미국 IEEE 기준에 규정되어 있는 일반적인 전기적, 물리적 특성을 만족하여야 하며, 설계수명을 기준으로 하는 정상운전 기간 및 설계기준사고 시에도 발생하는 열 및 방사선에 충분히 견딜 수 있어야 하지만 국내 원전 케이블의 노화관리에 대한 연구는 미흡하다. 원전 케이블의 수명평가 및 노화관리는 주로 해외연구 자료에 의존하는 실정이며 국내 원전별 현장상황과는 상이한 부분이 많아 원전 케이블에 대한 자체적인 연구개발이 필요하다.

2. 연구개발의 경제·산업적 중요성

NSSS 구조물의 건전성에 대한 온라인 감시 및 진단 기술을 순수 독자기술로 개발함으로써 국내 원전의 기기 도입비용을 절감할 수 있으며, 외국으로의 기술수출도 가능하다. 그리고 국내의 화학플랜트 등에 대한 온라인 상태감시 및 진단 분야에 활용이 가능하다.

또한 배관 또는 세관은 원전기기의 핵심요소 중의 하나이며 원전의 가동 중에 예기치 못한 배관의 파단이 일어나면 가동을 중단함으로써 생기는 경제적인 손실은 막대하다. 이 경우 막대한 금전적 손실과 환경의 오염과 재난으로 이어짐으로 사회적인 문제를 초래하게 된다.

한편 원전을 비롯한 산업계의 모든 시스템들이 네트워크에 유기적으로 물리는 시대가 펼쳐지고 있으며, 이러한 시스템들이 단순한 컴퓨터 서버이던 로봇이던 간에 원격지에서 얼마든지 접근과 제어가 가능하게 된다면 산업 자원의 이용 효과가 극대화 될 수 있다. 이미 현재에도 이런 형태의 네트워킹 기술들이 많이 보급되고 있으며, 원전의 중요 설비에 대한 검사 및 평가 시스템의 경우에도 이런 기술이 적용된다면, 그 시스템을 이용하는 여러 관계자들과 회사에 있어 경제적 비용 절감 효과와 검사자의 안전성 향상, 그리고 검사 시스템 및 검사 데이터 활용의 극대화를 추구할 수

있다.

근래 우리나라는 IT산업의 선진국으로 급부상하고 있으며 이러한 강점을 이용하여 원자력분야와 같은 기존의 단일 산업분류에 속해있던 곳에 접목하게 되면 선진국 수준으로 올라설 수 있는 상승효과를 거둘 수 있다. NSSS 구조물의 건전성에 관한 감시 및 진단 기술 또한 우리가 강점을 가지고 있는 IT의 활용으로 세계적인 경쟁력을 갖춘 분야가 될 수 있다. 국내 최초의 상업용 원전 고리 1호기의 연장운전이 시도되고 있으며 향후 건설될 원자력발전소의 수명은 현재의 기준보다 더욱 엄격하게 제정될 것으로 전망된다. 케이블 건전성 평가기술의 국산화는 외국 용역비용 절감과 함께 원자력발전소의 수명관리를 경제적으로 수행할 수 있어 원전 운영의 경제성에 영향을 미칠 것으로 예상된다.

3. 연구개발의 사회·문화적 중요성

현재 20기의 원전이 가동중에 있고 2020년까지 약 20여기의 원전이 추가로 건설 예정인 상황에서 원전의 안전성에 대한 사회적 관심 및 중요도는 매우 커지고 있으며, 특히 고리 1호기 등 가동중 원전의 사용년수 증가에 따른 종합적이며 체계적인 수명관리 대책이 필요하다.

최근의 영광 5,6 호기의 열소매 이탈사고나 일본 Hamaoka 원전 1호기의 열교환기 증기 배관 파열 사고로 인한 원자로 수동 정지 사건을 비롯하여 원전 주요 기기의 결함으로 인한 사고가 간헐적으로 발생함에 따라 원전 주요 기기 내에 존재하는 결함의 검출과 그 영향 평가의 중요성에 대한 사회적 관심을 고조시켰다.

온라인 감시 기술은 원전의 수명기간동안 구조건전성에 대한 체계적이고 지속적인 감시, 진단 및 평가 활동을 수행할 수 있으므로 원전의 안전성 제고는 물론이고 및 대국민 신뢰도 향상에도 기여할 수 있으며, 원전의 노후화와 관련하여 지속적인 검사가 요구되고 위험한 작업도 많이 요구되고 있어 로봇을 이용한 검사와 진단으로 발전하고 있다. 원전 중요 기기에 대한 검사 및 평가를 수행을 원전 밖의 안전한 지역에서 원격으로 수행하게하고 수집된 데이터를 관계자들이 모두 공유하게 함으로써 안전하고 신속한 검사 수행이 가능하게 된다.

제 2 절 연구개발 목표 및 내용

본 연구과제의 최종목표는 원전 안전계통 기기의 건전성 감시·검사·진단·평가 기술을 개발하는데 있다. 이를 위하여 최근의 현안이 되고 있는 다음의 네가지 항목에 대하여 2002년부터 2004년까지 제1단계 연구를 수행하였다.

1. NSSS 기기 건전성 진단 기술 개발

- 금속파편 충격 신호 진단 신기법 개발
- 원자로내부구조물의 지지조건 결함에 대한 동특성해석 모델개발

2. 원전기기 온라인 연속 감시 기술 개발

- 탄성관의 유도초음파 기반기술 연구
- 유도초음파를 이용한 결함탐지기술 연구
- 배열탐촉자 장치개발과 장거리 배관 결함탐지 실험
- AE 기술의 기기 온라인 감시 적용을 위한 기반기술 연구

3. 원전기기 안전 검사 및 평가 신기술 개발

- 네트워크 기반의 원격 검사 시스템 개발
- 원자로 제어봉 안내관 검사용 탐상기 개발

4. 원전 케이블의 수명평가 및 노후화 진단기술 개발

- 원전 케이블의 가속열화시험 및 수명평가기술 개발
- 원전 케이블의 노후화 진단기술 개발

제 2 장

국내·외 기술개발 현황

제 2 장 국내 · 외 기술개발 현황

제 1 절 NSSS 기기 건전성 진단 기술

원자로 일차계통(NSSS: Nuclear Steam Supply System)은 결합 발생 시 방사능 물질의 외부 누출과 직접적으로 관련이 되므로, 구조적 건전성에 대한 상태감시가 매우 중요하다. NSSS의 구조건전성 감시를 위하여 원자력 발전소에는 원자로계통 구조건전성 감시계통(NIMS: NSSS Integrity Monitoring System)을 설치, 운용하고 있다. 이들 감시계통은 음향 누설 감시계통(ALMS), 금속파편 감시계통(LPMS), 원자로 내부 구조물 감시계통(IVMS) 및 원자로냉각재펌프 진동 감시계통(RCP-VMS) 등으로 이루어져 있다. 여기서 금속파편감시계통은 일차계통 유로에서 금속파편의 발생 유무 및 그 크기를 감시한다. 그리고 원자로 내부구조물 감시계통은 원자로 내부구조물의 결합으로 인한 이상 진동을 감시한다.

금속파편 감시 시스템의 경우, 국내에서는 고리 3호기에 처음 설치되기 시작하여 지금은 가압경수로형 발전소에는 모두 설치되어 있다. 한국원자력연구소에서는 1996년에 간이 시험시설을 이용한 금속파편 신호분석 알고리즘을 개발하였고[2.1], 1998년에 영광 3호기를 대상으로 하여 간이 분석용 시스템을 국산화 개발한 바 있다. 또한 2001년 4월에 한국원자력연구소에서 실험실용으로 사용할 수 있는 간이용 LPMS시스템을 개발하여 IAEA에 기기를 수출한 바 있다. 그러나 이들 시스템들은 신호 진단기술에 대한 인식부족 및 조기 사고예방에 대한 개념의 부족 등으로 인해 발전소 운전 시 이상신호가 발생한 경우에도 이러한 시스템을 적절히 활용하지 못하고 있는 실정이다. 또한 기존의 LPMS는 충격신호의 발생 시 운전자 혹은 관련 기술자에게 경보를 알리는 수준이고 정확한 분석은 전문가가 가지고 있는 경험에 의해 분석을 함으로써 진단시간이 상당히 길어 효율적으로 대처하지 못하고 있다. 그리고 국내의 일부 원전(영광 1&2 호기)에서도 금속파편 충격신호의 감시계통을 위한 하드웨어 장치는 기능을 강화한 시스템으로 교체하였으나, 이러한 시스템에 적용 가능한 진단 알고리즘 및 시스템을 효율적으로 지원할 수 있는 소프트웨어 등은 여전

히 미흡한 형편이다. 즉, 현재까지 국내에서 개발한 LPMS용 진단 알고리즘은 제한적인 현장시험 데이터를 이용한 고전적인 시간영역 위주의 기법만을 이용하고 있다. 즉, 필수적인 이론인 위치 및 질량추정 방법에 있어 비정상상태 신호분석이론에 근거한 기법을 적용하지 않아 여전히 분석 엔지니어의 주관적인 판단에 많이 좌우되므로 근본적으로 신뢰도에 문제가 있으며, 때에 따라서는 분석결과의 정확도가 매우 떨어진다. 따라서 앞으로 첨단 디지털 신호분석기법을 이용하고, 구조물내부의 음파현상에 대한 지식을 심도 있게 접목하여 보다 객관화된 분석기법의 지속적인 개발이 절실하다. 한편, 원자력 안전 기술원은 1997년 11월 영광 2호기 금속 파편이 발생한 이후로 원자력 발전소의 안전성을 향상하기 위해 전 발전소에 금속파편에 관한 운영절차서를 강화하고, 금속 파편시스템이 노후화된 발전소에 대하여 개선을 권고하고 있으며, 기존에 설치되어있는 시스템에 대해서는 진단알고리즘의 강화를 권고하고 있다.

선진국의 경우, 기존의 LPMS 감시기술은 국내의 실정과 크게 다를 바가 없으나, 원전 감시계통으로 인한 조기진단의 중요성을 인식한 이후 연구가 현재 활발히 진행 중에 있다. 프랑스에서는 두 종류의 다른 감시계통이 현재 발전소에 설치 운영되고 있다. 즉, 900 MW 계열의 감시계통은 DEVIANT이고, 1300 MW 계열은 SDECE가 설치되어있다. 그리고 최근에는 PSAD라는 디지털 금속파편 감시계통을 개발하여 감시/진단기능을 보강해 놓고 있다. 독일에서는 KÜS 95라는 금속파편 감시 계통을 개발하여 전 세계적으로 44 개 발전소에 설치, 운영하고 있다[2.2]. KÜS 95의 장점으로서는 진단기능을 강화한 것으로, 실제 금속파편 신호의 발생 시에 Fuzzy 논리를 이용하여 Event의 상승시간 및 하강시간 최대 크기 등을 pattern matching 시켜서 실제 금속파편 신호인지 또는 아닌지를 판별할 수 있다. 그리고 이러한 분류를 거친 후 경보를 발생함으로써 거짓경보의 횟수 등을 줄일 수 있다. 그리고 충격 위치 및 충격 질량 추정기법을 mock-up 시설을 이용하여 자체적으로 개발하여 현장에 적용해 오고 있다.

원자로 내부구조물 진동 감시 기술의 경우, 국내에서는 1990년도에 이르러 체계적인 연구가 한국원자력연구소에서 수행되었다. 원자로구조 검사실에

서는 한전기술원과의 공동으로 울진 1호기의 내부구조물 감시계통에 시스템구성을 수행하여 RIVMOS(Reactor Internals Vibration Monitoring System)을 개발하였다[2.3]. 이를 울진 1 호기에 설치하여 성공적으로 운영하고 있으며 이 결과를 국제회의(SMORN VII)에 발표하였다[2.4]. 또 진동연구실에서는 이러한 감시계통으로부터 나오는 잡음신호와 구조물의 진동 특성과의 상관관계에 대한 분석기술을 정립하고 울진 1호기의 내부구조물 진동특성을 밝혀내었으며, 결함을 진단할 수 있는 PC용 소프트웨어를 개발하였다[2.5]. 그 이후 한국원자력연구소에서 과기부가 주관하는 원자력국제공동연구의 일환으로 ‘원자로 잡음을 이용한 결함진단 기술개발’ 과제를 수행하여 원자로 내부구조물 감시를 위한 신호분석 기법을 체계화하였으며, 국내·외(한국 및 독일) 가압경수로형 원자로의 데이터베이스를 구축하고 RENAS(Reactor Noise Analysis System)라는 휴대용 원자로잡음신호분석 시스템을 개발한 바 있다[2.6]. 또한 중소기업으로의 기술이전을 통하여 진단기능이 탑재된 국산 IVMS를 개발하였으며, 현재 영광 2호기에 시범적으로 설치, 운용되고 있다[2.7]. 원자로내부구조물 감시계통의 신호분석 기법에 대한 국내기술수준은 이제 선진국에 가까이 다가선 상태라 할 수 있으나, 결함증상에 관한 다양한 데이터베이스 및 상세 진단을 위한 전문가 판단기준 설정 등과 같은 분야에서 지속적인 연구가 필요한 실정이다. 즉 신호처리 자체는 할 수 있으나 이에 대한 물리적인 설명이나, 기준 데이터와 차이가 발생할 경우 이를 판독할 수 있는 능력은 아직 부족한 실정이라 하겠다. 즉 현장 설비의 운영경험 부족, 원자로 잡음 분석기술에 필수적인 결함사례 및 결함증상과 관련된 데이터베이스의 부족 등으로 선진국에 비하여 동 분야의 기술격차를 줄이지 못하고 있는 형편이다. 선진국의 경우, 원자로내부구조물에 대한 진동감시기술이 1970년도 후반부터 매우 활발하게 연구되었으며, 원자로 잡음해석을 토대로 하여 중성자속(neutron flux)의 잡음을 이용한 원자로 내부구조물의 진동분석 및 이상 진단 기술을 개발하였다[2.8]. 미국의 경우 EPRI(Electric Power Research Institute)와 ORNL(Oak Ridge National Laboratory)을 중심으로 오래 전부터 원자로 잡음해석과 관련한 연구활동이 꾸준히 수행되어 오고 있으며[2.9][2.10] 근래에는 기기 공급자 측과 함께 연속감시 및 자동화 시

스텝의 개발에 주력하고 있다. Westinghouse사는 1988년에 ADPMS (Advanced Diagnostic and Predictive Maintenance System)을 개발하여 일부 발전소에 운용하고 있으며, 1992년에는 RICMS (Reactor Internals and Core Support Monitoring System)를 개발하여 현장에 적용하고 있다. 독일의 경우 GRS (Gesellschaft fuer Reaktorsicherheit)와 Hannover 공대를 중심으로 원자로 잡음해석 기술개발을 수행하고 있으며 [2.11] [2.12], 근래에는 Neural Network을 활용하는 연구를 하고 있는 단계이다[2.13]. 또 미국과 마찬가지로 Siemens/KWU 등과 함께 자동화에 노력하여 1986년에 SŪS (Internal Vibration Monitoring System)를 개발하여 원전설비에 장착하였으며 계속 개선 중에 있다. 프랑스는 Edf와 Framatome사를 중심으로 원자로 잡음해석과 관련하여 가장 다양한 감시계통 및 기술이 연구 개발되고 있는 국가이다[2.14][2.15]. 특히 Edf는 현재 54개의 900MW 및 1300MW PWR을 운영하고 있는데 모두 원자로 잡음감시계통을 설치/운용하고 있다.

캐나다와 일본 역시 IVMS를 설치/운용하고 있으며 원자로 계통의 각종 잡음 신호를 이용하여 원자로내부구조물의 결함 감시 및 상태 진단을 꾸준히 수행하고 있다[2.16][2.17]. 그러나 현재까지의 기술은 노외중성자 신호만을 이용한 원자로내 노심지지구조물의 체결력 변화에 의한 정성적인 진동상태 감시만 가능하다. 따라서 노심지지구조물의 체결력변화에 대한 정량적인 판정기준을 설정하기 위하여 결함증상에 대한 해석모델 개발 및 지속적인 데이터베이스 구축이 시급하며, 노외중성자 이외에 노내중성자 및 가속도 신호를 모두 이용하여 핵연료집합체를 포함한 진동상태 감시 및 진단 기능에 대한 기술개발이 필요하다.

원자로내부구조물 진동 감시 및 진단 기술의 경우, 감시기법의 국내기술수준은 거의 선진국수준에 접근해 있다. 그러나 국내에서는 아직 IVMS가 설치되어 있지 않은 곳이 다수 있으며, 설치되어 있다고 하더라도 이상상태 발생시 결함판정 기준에 대한 정량적인 데이터베이스가 구축되어 있지 못하다. 따라서 이 분야 상태감시기술의 경우 소프트웨어 및 하드웨어 기술이 선진국대비 약 90% 수준에는 육박하였다고 할 수 있다. 그러나 결함상태 발생시 전문적인 진단기술은 선진국 대비 약 50% 수준에 머물러 있

다고 본다.

금속과편 감시 및 진단 기술의 경우, 국외에서는 독일의 KWU, GRS 미국의 노스캐롤라이나, 테네시 공대 등에서 이미 상용화된 기술을 가지고 있으며, 국내에서도 최근에 이분야에 대한 기술개발을 통하여 선진국과의 기술격차를 상당히 좁혀 왔다. 금속과편 신호 발생시 신호대 잡음비의 증가를 위한 배경잡음 감소분야에서는 선진국 대비 약 60% 수준이라고 볼수 있으며, 위치추정기법 분야에서는 약 90%, 질량 및 에너지 추정분야의 경우 약 70% 정도의 수준에 도달해 있다고 판단된다. 그러나 최근 선진국에서는 배경잡음 감소 및 질량추정 기법 그리고 충격신호에 의한 구조물의 영향평가 분야에 대한 연구를 지속적으로 진행하고 있으며, 첨단 신호처리 및 분석 기술을 이용한 진단기술의 개선에 박차를 가하고 있다. 따라서 국내에서도 고전적인 기법을 이용한 현재의 기술개발성과에 안주할 수 없으며, 선진국의 기술개발동향을 벤치마킹하여 독자적인 신기술 개발을 체계적으로 추진해야 할 것이다.

제 2 절 온라인 감시 기술

미국을 비롯한 원자력 선진국에서는 운전 중인 원자력발전소들의 운전 연한이 증가함에 따라 기기 및 구성 부품의 열화에 따른 고장 및 사고 사례가 늘어나고 있으며 이들 기기 및 구성품의 건전성 확보가 경제적 측면과 안전성 측면에서 중요한 문제로 제기되고 있다. 일본의 하마오카 원전 1호기 증기배관 파열사고에서 나타났듯이 원전 주요 기기의 건전성 상실은 경제적(추정 손실액: 6백만~3천2백만 US \$, 1987년 6월 기준)으로나 사회적으로 심각한 피해를 주고 있어 원자력 각 국의 규제기관과 산업체에서는 이 분야에 대한 다각적인 개선 방안을 모색 중에 있다. 국내에서는 지금까지는 특기할 만한 기기 및 구성품의 결함에 의한 고장이나 사고가 없으나 1970년대 이후 건설되어 운전 중인 발전소들의 운전 연한이 늘어남에 따라 외국의 원전과 유사한 현상이 나타날 것으로 예상된다.

현재 가동중인 원자력발전소 기기의 건전성을 확보하기 위해 사용 중인 방법은 주기적인 가동 중 검사 (In-Service Inspection: ISI)와 NIMS와 같은 일부 주요 계통에 대한 온라인 모니터링이다. 그러나 가동중 검사에서

사용되는 기존 비파괴검사 기술과 장비들은 비교적 단순한 재료와 간단한 형상의 피검체에 대한 검사를 가정으로 확립된 기술이어서 원전의 주요 기기와 같이 형상이 복잡하고 재료가 다양하며 또 방사능이나 접근 제한이 있는 피검체의 신뢰성 있는 검사를 위해서는 보완되어야 할 점들이 많다. 또한 현재의 ISI는 핵연료의 재장전 기간 중에 행해지므로 이로 인해 검사 시간의 제한을 받아 충분한 검사를 수행하기가 어렵다는 점이 지적되고 있다. 한편, 현재 원전에 설치되어 있는 NIMS와 같은 일부 계통에 대한 온라인 모니터링 시스템들은 기기의 구조적 결함을 직접적으로 찾는 것이 아니라 구조물의 진동 상태 감시, 냉각수의 누설에 따른 음향 탐지 그리고 금속파편의 음향 신호 감시를 통하여 간접적으로 기기의 결함을 감지하는 기술이다. 이들 기술은 계통의 건전성과 안전성 감시에는 어느 정도 효과가 있으나 기기나 부품에 발생한 결함을 직접적으로 찾고 그 결함의 진행 상태를 파악하는 데는 충분하지 못한 것이 현재의 기술 수준이다. 또 한편으로 Generation IV와 같은 차세대 원자로의 경우에는 핵연료 재장전 간격이 더 늘어나고 이점은 기존의 재장전 주기(1년 ~ 1.5년)를 기준으로 설정되었던 현행 ISI 관련 규제와 관련 비파괴검사 기술에 대한 보완을 필요로 하게 된다. 따라서 Generation IV와 같은 차세대 원자로의 이점을 살리고 현재 수준의 안전성을 보장하기 위해서는 원전의 운전을 방해하지 않고 기기의 건전성 검사를 수행할 수 있는 새로운 접근 방법이 필요하다.

이와 같은 문제점들을 해결하기 위한 하나의 방안으로 원전 주요 기기 및 구성품에 대한 온라인 연속감시 기술이 최근에 제시되고 있다. 원자력발전소가 운전되고 있는 동안 주요 기기와 구성품의 건전성에 대한 온라인 연속 감시를 수행하여 현재의 ISI보다 조기에 결함을 찾고 또 결함의 진행 상태에 대한 정보를 수집하여 이를 토대로 가동 중 검사에서 집중적이고 정밀한 검사를 수행한다면 경제성과 안전성 측면에서 보다 효율적인 성과를 얻을 수 있기 때문이다. 또 핵연료 재장전 간격이 길어진 차세대 원전의 기기 건전성 확보 측면에서도 온라인 연속감시 기술은 기존 ISI가 가진 한계점들을 극복할 수 있는 하나의 방안으로 고려되고 있어 미국의 NERI 프로그램과 같은 차세대 원전을 위한 프로젝트에서 관련 연구들이

진행 또는 계획 중에 있다.

원전 주요 기기 및 구성품의 건전성 온라인 연속감시 분야는 최근에 대두된 분야로 아직 명확한 개념 정립이 되어있지 않은 상태이나 외국에서 현재 진행 중이거나 계획 중인 연구 과제들의 내용을 종합하여 보면 기존의 오프라인 ISI에 대비된 발전소 운전 중 온라인 검사와 감시(on-line inspection and monitoring)에 중점을 두고 있다. 따라서 주요 연구 내용도 기기의 온라인 결함 감시에 필요한 정보처리의 자동화, 온라인 감시용 센서 스위트(sensor suite) 개발, 무선을 비롯한 데이터 전송 방식 연구, 관련 시스템의 통합, 온라인 감시 및 검사에 적용 가능한 검사 기술 개발, 차세대 원전을 위한 불박이형 (built-in) 구조적 건전성 감시 시스템의 개념 개발, 온라인 검사용 센서 시스템의 성능 평가, 발전소 운전 환경(고온, 방사능 등)에서 사용 가능한 센서 및 재료 개발 등이 주류를 이루고 있다. 국내의 경우에는 외국의 연구와는 조금 다르게 온라인 기술보다는 대상 시스템(밸브, 펌프, 터빈, 발전기, 배관 등)별로 고유한 결함의 탐지와 이상 상태 감시 및 진단 기술에 중점을 둔 연구가 대부분이며 외국의 연구에서 나타난 온라인 관련 기술의 개발이 명시적으로 나타나 있지는 않다.

본 연구에서 중점적으로 수행한 유도초음파 기술은 탐촉자를 이동시키지 않고 장거리 배관의 광범위 탐사를 수행할 수 있다는 독특한 장점 때문에 최근 그 연구가 활발히 이루어지고 있으며 최근에는 초기의 정성적인 검사에서 벗어나 신호로부터 결함에 대한 정량적인 평가가 가능한 수준으로 발전 중에 있다. 영국의 Imperial College에서는 유도초음파를 이용하여 석유화학 플랜트의 배관을 검사하는 유도초음파 시스템을 자체 제작하여 현장에 적용하면서 계속해서 유도초음파 기법을 발전시키고 있는데 장거리 배관을 신속히 탐상하고 유도초음파의 해석을 단순화하기 위해 저주파영역의 모드를 선택하고 있으며 유도초음파 해석프로그램을 자체적으로 개발한 상태이다.

국내에서는 2000년에 성균관대학교 안전센터에서 가스배관에 대한 결함 및 유도초음파 분석을 위한 신호 분석기법에 관하여 연구와 박관 구조물의 비파괴 탐상을 위한 유도초음파 모드 분석에 관하여 연구를 수행하였다. 그 이후 노후 배관의 내부 스케일 탐지에 유도 초음파를 적용하기 위한 이론적, 실험적 연구를 수행하였다.

최근에는 한국원자력연구소와 성균관대학교가 공동으로 원전 증기발생기 튜브의 검사를 위한 유도초음파 기법 연구를 수행한 이후, 이를 바탕으로 원전 압력배관의 온라인 비파괴평가를 다채널 위상배열 유도초음파 탐상 시스템을 국내 최초로 개발하였다. 이 시스템은 배열탐촉자의 초음파 방사 시간 간격을 전자적으로 조절함으로써, 결함 탐상에 효과적인 모드를 선별적으로 발전시키는 시스템으로서, 원전 압력 배관의 광범위 탐상을 위한 새로운 기술로 인식되고 있다. 그러나 현재 한국원자력연구소와 성균관대학교가 공동 개발한 다채널 시스템은 아직 프로토타입 수준으로 다양한 재질과 다양한 환경에서 적용하려면 장비의 성능 개선과 신호처리 및 분석에서 보다 연구가 필요하다고 보인다. 원전 기기 부품의 온라인 감시에 적합한 또 하나의 기술로서 음향방출(Acoustic Emission: AE) 기술이 있다. AE는 1950년대 초반, 재료내부의 미시적 변형이나 파괴에 의해 발생하는 음향방출신호를 모니터링 함으로써 압력용기들의 균열과 불연속부를 검출할 수 있다는 사실이 검증됨에 따라 새로운 비파괴검사 기술로서 탄생하게 되었다. 초음파시험법이나 방사선투과시험법과 같은 비파괴검사법과는 달리 피시험체에 어떤 에너지를 주입하거나 검사 부위에 대한 스캐닝 과정이 없이 시험체를 검사할 수 있어 재료시험 평가, 압력용기나 구조물의 수압시험 등을 비롯해 가동 중인 원자력 발전설비나 항공기 구조물의 연속감시에 이르기까지 매우 다양한 적용 사례를 보이고 있다.

AE신호는 피검사체의 물성에 따라 감쇠특성을 보이지만 대략 수십 미터 정도 전파된 후에도 신호의 크기가 충분히 포착할 수 있는 정도로 존재하기 때문에 기존의 다른 체적검사법에서처럼 결함이 존재할 것으로 예상되는 부위에 대하여 구조물 전체를 검사할 필요가 없이 가동상태를 유지하면서 구조물내의 결함 발생이나 성장유무를 연속적으로 감시할 수 있다. 실제 현장에 AE법을 적용함에 있어, 각기 다른 원인으로 인해 발생하는 여러 가지 신호를 명확히 구별하는 것이 어렵고 주위잡음이 클 경우 적용이 불가능함에도 불구하고, AE법이 재료 특성평가 및 구조물 건전성 진단 적용 등에 널리 적용할 수 있는 것은 10^{-13}m 의 미소변위나 수 mPa의 압력 변화까지도 측정이 가능한 높은 감도 때문이다.

원전에서는 기기의 안전성을 확보하기 위해서 가동전검사(PSI)와 가동중

검사(ISI)를 수행하고 있는데 원자로 운전 기간 중에 주기적으로 수행되는 ISI는 핵연료를 교체하는 시점에서 수행되므로 방사능이 존재하는 검사 환경이나 제한된 시간과 같은 어려움이 있다. 이러한 어려움을 해결하기 위한 방안의 하나로 원전 가동중에 온라인으로 실시간 감시를 통하여 원전기기의 주요 부품의 상태에 관한 정보를 수집하고 이렇게 수집된 정보를 바탕으로 ISI에서 집중적으로 효율적인 검사를 수행하려는 시도가 이루어지고 있다 [2.18]. 1965년에 Phillips Petroleum회사(현재의 EG & G Idaho)의 Parry [2.19]는 원자로의 냉각수 누설 탐지에 음향방출법의 적용을 시도하였으며, 미국원자력위원회(USAEC)의 후원아래 Phillips Petroleum과 Battelle 북서태평양 연구소(BPNL)의 Hutton [2.20]과 공동연구를 수행하여 원자력발전소의 적용에 성공하였다. 알곤 국립연구소(ANL)에서는 Anderson [2.21]이 고온 침전식 마이크로폰 센서를 고안하여 소듐 냉각 원자로에서의 냉매 비등현상을 탐지하는데 음향방출을 응용하였다. Rocky Flats Plant의 Drouillard는 주로 가압 또는 응력 하에서의 취성과 파괴를 일으키는 요인에 관해 연구를 수행하였으며 AE 기술개발에 큰 공헌을 하였다 [2.22]. UCLA의 Ono는 Journal of Acoustic Emission을 발행하여 AE 기술을 학술적 연구 분야로 성장할 수 있게 하는 토대를 마련하였다[2.23].

현재 음향방출에 관한 연구가 가장 많이 이루어지고 있는 일본은 격년으로 국제 음향방출심포지엄(IAES)을 개최하고 있는데, 학계에서의 연구는 물론 산업체의 여러 분야에서 실제적인 응용사례가 많이 발표되고 있다 [2.24]. 최근 일본에서는 저잡음 고감도 AE 센서개발에 대한 연구가 진행되기도 하였다. 미국에서는 항공우주분야나 석유화학 계열의 민간회사의 응용기술 개발에 대한 수요에 의해 음향방출 측정기기 개발 등이 이루어지고 있다. Monsanto Chemical회사의 Fowler[2.25]에 의한 FRP 용기에 대한 음향방출 시험기술이 개발되어 현재 미국의 50개 주 대부분에서 이 시험절차를 의무적으로 요구하고 있으며, Boeing과 같은 항공회사에서 이미 수십 년째 음향방출을 연구하고 활용하고 있다.

AE 법을 산업에 이용하기 위해 그 동안 세계 각국에서는 AE 시험법에 대한 표준화 및 규격화 작업이 활발히 추진되었다. 1972년 중반 ASTM

E07.04 AE의 Subcommittee가 형성되었고 1973년 ASME Section V NDE Subcommittee는 AE의 Ad Hoc Working Group을 설립하여 이에 대한 연구가 수행되었다. 그 이후 1981년에 형성된 SWGAE(Special Working Group on Acoustic Emission)는 "Acoustic Emission Examination of Metallic Vessel During Pressure Testing"에 대한 규정을 수압 시험에만 적용하여 사용하기 위해 1987년에 Section V에서 승인되었다. 이외에도 EWGAE (European Working Group on Acoustic Emission)이 1972년에는 결성되어 AE법 적용에 대한 5가지 표준 코드를 제정하였다. 또한 일본에서는 1969년에 일본비파괴검사학회 산하의 JSNDI 006 Committee로서 AE 분과가 자리 잡았으며, 1979, 1980년도에 AE법 응용에 대한 표준화 Code를 제정하였다.

국내의 AE 연구는 1970년대 말 한국원자력연구소에서 처음 시작되어 AE 발생특성 해석 및 균열진전 연속감시 등에 대한 연구가 진행되었다. [2.26] 이후 한국과학기술원 물리학과 김호철 교수 연구실에서 본격적인 AE 연구가 수행되었다. 1990년 중반에 한국음향방출연구회(KWGAE)가 조직되면서 AE와 관련된 연구가 활발히 진행되었다. 한국원자력연구소는 AE에 대한 연구를 국내 처음으로 시작한 이후 원자력발전소의 응용분야에 적용하는 것을 연구방향으로 잡고 "가동전·중검사 및 온라인 모니터링 기술 개발"이란 특정과제를 수행하였으며[2.27, 28], 최근에는 센서에 관한 연구로서 AE센서 제조기술 수립과 특수목적에 맞는 센서개발을 수행한 바 있다[2.12]. 한국표준연구소는 AE에 대한 기초연구인 AE 측정기술, AE 센서기술개발 등에 대하여 과학기술처 지원 하에 연구를 수행하였으며, AE 표준에 관한 연구도 수행하여 AE 측정표준시스템을 구축하여왔다[2.29]. 또한 기계연구원에서는 산업용 용기와 배관의 건전성 감시등에 AE시험법을 적용하는 연구를 수행하기도 하였다[2.30]. 대학교의 경우 인하대학교, 성균관대학교, 부산대학교, 부경대학교 등에서 AE 연구 활동하고 있다. AE 센서 개발과 관련된 벤처 회사로는 하기소닉사와 레트론사를 등을 대표적인 예로 들 수 있다.

제 3 절 네트워크 기반 원격 검사 기술 개발

원격 검사와 평가에 대한 연구는 전 세계에서 수행되고 있다. 3절에서는 이러한 연구 사례 중 원자력 분야에서 활용할 수 있는 원격 검사 기술 개발과 연관되어 있는 연구에 대하여 알아보고, 연구 분야와 연구에 적용된 기술을 파악하여 기술하였다.

1. 원격 검사와 평가 기술 개발 사례

가. JANIS (Java-based Nuclear Information Software)

JANIS는 OECD Nuclear Energy Agency에서 개발한 핵 자료 관리용 소프트웨어이다. 이다. 핵 자료에는 방사능 물질과 원전 연료 등을 포함하는 모든 원자력 관련 자료들이 포함되어있다. 이러한 자료는 매우 방대하면서도 이 자료를 이용하는 사람들이 다양한 어플리케이션을 요구한다.

JANIS는 이러한 요구 사항을 효과적으로 처리하기 위하여 통계 데이터나 그래픽 처리 등으로 핵 자료를 쉽게 접근할 수 있도록 자바를 이용하여 구현되었다.

이 시스템은 핵 자료를 포함하는 데이터베이스 서버와 이 자료에 접근하기 위한 웹 상의 클라이언트로 구성되어있다. 이 시스템의 모체가 되는 Borland C++로 제작된 JEF-PC라는 프로그램이 1990년대에 개발되어 사용되고 있었지만, 이 프로그램은 사용자 인터페이스 문제와 관련한 유연성과 서로 다른 운영체제에서의 사용이 제약되는 문제점을 내포하고 있었다. NEA에서는 1993년부터 관계형 데이터베이스를 이용하여 핵 자료를 관리하고 이 데이터베이스의 자료를 직접 접촉할 수 있는 웹 기반 기술을 사용하고 있었다. JANIS는 JEF-PC의 문제점을 웹 기반 서비스를 이용하여 해결한 시스템인 것이다.

JANIS의 시스템 아키텍처는 핵 자료를 관리하는 데이터베이스 시스템을 NEA에 설치하고, 핵 자료를 이곳에 저장하면서 이 데이터의 사용자들이 웹을 이용하여 NEA의 웹 서버에 접속하여 이용하는 3-tier 구조로 구성되어있다.

다음 그림 2.3.1은 JANIS의 3-tier 타입 클라이언트/서버 모델이다.

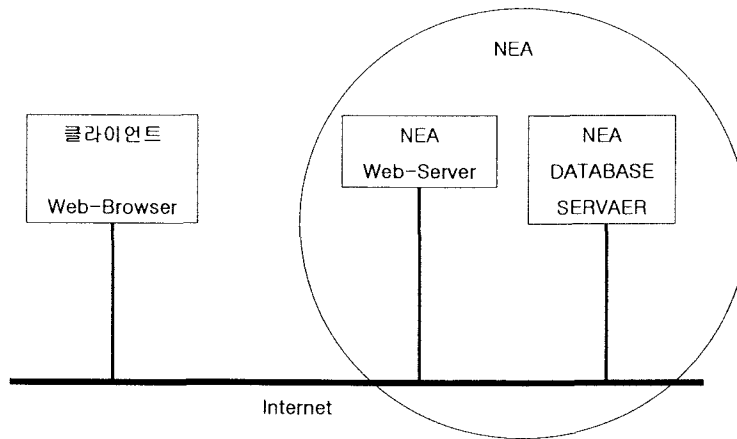


그림 2.3.1 JANIS 시스템 클라이언트/서버 모델

JANIS의 경우 클라이언트인 사용자의 컴퓨터는 인터넷과 웹 환경만 설치하면 된다. 모든 응용처리 프로그램은 웹서버에 구성되어있으며, 사용자는 이 웹서버에 웹을 이용하여 접속한 후 응용처리를 요구하면 된다. 클라이언트쪽 사용자는 NEA의 데이터베이스에 직접 접속할 필요가 없으며, 사용자의 모든 요구는 웹서버에서 직접 처리한다.

나. GraFic (Graphical Facility Information System)

GraFic은 미국 테네시주에 위치한 Oak Ridge Y-12 Plant에서 개발한 핵물질 저장 용기 내의 핵 물질에 대한 상태를 실시간으로 파악하기 위한 시스템이다.

Y-12 Plant는 uranium isotope와 electromagnetic process를 위하여 맨해튼 프로젝트의 일환으로 1943년에 건설되었으나, 2차 대전 이후 이러한 목적에서 벗어나 핵무기와 핵 엔지니어링에 대한 연구를 진행하고 있다.

GraFic은 2차 대전 후 Special Nuclear Mateiral (SNM) 저장 장치에 대한 관리를 위하여 개발되기 시작하였다.

GraFic은 다음과 같은 기능들을 갖추고 있다.

- inventories on demand
- real-time alarm notification
- historical view if facility status and assets

- long-term storage and retrieval of inventory data
- linkage of procedures, drawings, and assets to associates facility areas
- space planning and management
- easy update of configuration information
- many built-in reports that can be viewed on-screen or printed

GraFic은 자체 개발한 패키지를 이용하여 구성된 분산처리 시스템으로 핵 물질 저장 장치에 설치된 센서들로부터 상태 정보를 GraFic 데이터베이스 시스템에 저장하고 원격지 GraFic 워크스테이션에서 이 데이터를 접근하는 방식으로 구성되어 있다.

다음 그림 2.3.2는 GraFic 시스템 모델을 보여준다.

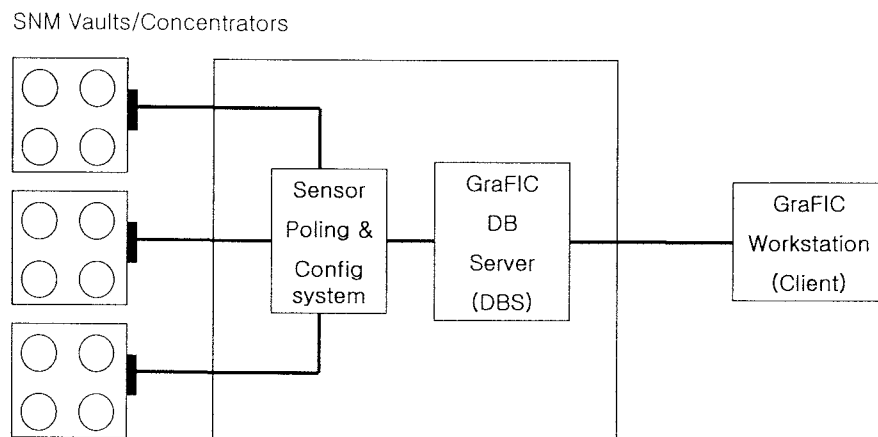


그림 2.3.2 GraFic 시스템 모델

데이터베이스 서버는 클라이언트의 접근을 제어하기 위하여 사용된다. 이 데이터베이스는 다음과 같은 세 개의 서브 셋으로 구성되어 있다.

- 현재 저장 장치의 configuration과 status
- configuration과 status history 테이블
- daily-archive 테이블

센서 값이 데이터베이스에 저장될 때 DBS는 그 값들을 엔지니어링 유닛으로 나눈다. historical 로그는 현재 저장 장치의 configuration이나 상태가 변화할 때마다 자동적으로 업데이트 된다.

센서 서브시스템은 주기적으로 센서의 값을 읽고 DBS에 알람 컨디션을

알려준다.

다. IERNet (Integrated Environmental Radiation Monitoring Network)

IERNet은 한국 KINS(Korea Institute of Nuclear Safety)에서 개발한 방사능 환경 감시 프로젝트이다. 이 프로젝트의 목적은 다음과 같다.

- 핵 관련 장치와 regional monitoring station의 external gamma ray로부터 exposure rate를 측정한다.
- 중앙 감시 시스템에 저장된 데이터를 평가할 수 있는 컴퓨터 기반 데이터 관리 및 감시 시스템을 개발한다.

이 프로젝트의 범위와 구성 요소는 다음과 같다.

(1) IERNet의 구축

- ① IERNet을 위한 적절한 데이터 통신 네트워크를 설정하고, 방사능 환경 감시 시스템과 중앙 컴퓨터를 네트워크를 이용하여 연결한다.
- ② 방사능 감시 시스템을 원격지에서 제어하기 위한 통신 프로토콜을 개발하고, 감시 시스템에서 얻어진 데이터를 실시간으로 수집한다.
- ③ 정상 상태에서의 early warning 프로그램과 비상 상태에서의 altering 프로그램을 개발한다.

(2) 수집된 데이터 평가를 위한 소프트웨어 개발

- ① Regional Monitoring System에 실시간으로 수집되는 데이터를 저장하고 관리하기 위한 데이터베이스 시스템을 구축한다.
- ② 수집된 데이터를 평가하기 위한 사용자 어플리케이션을 윈도우를 기반으로 하는 친숙한 환경으로 구축한다.
- ③ 클라이언트/서버 환경으로 온라인 감시 데이터를 체크할 수 있는 모듈을 개발하고, MOST(Ministry of Science and Technology)에 실시간 데이터를 디스플레이하기 위한 패널 보드를 구축한다.
- ④ 수집된 데이터를 분석하기 위한 데이터 분석 모듈을 개발한다.

(3) 방사능 환경 감시 장비를 위한 데이터 처리 로직 개발

IERNet에서는 Regional Monitoring Station의 방사능 환경 감시 기능을 개선하고, manmade radiation과 natural gamma radiation 사이의 구분을 위한 제어 로직을 개발한다.

이 프로젝트의 수행 결과는 다음과 같다.

- ① DACOM을 IERNet 구축을 위한 데이터 통신 네트워크 선택하여 주요 방사능 환경 감시 시스템들을 KINS의 중앙 시스템에 연결.
- ② Regional Monitoring Station에서 실시간으로 수집된 데이터를 저장하고 관리하기 위한 데이터베이스 시스템 구축.
- ③ WWW를 이용한 사용자 어플리케이션 프로그램과 데이터 평가를 위한 비주얼 프로그램 제작

이 시스템을 다시 간략히 살펴보면, 여러 개의 Regional Monitoring Station에서 수집된 방사능 관련 데이터를 중앙 데이터베이스에서 관리하고, 이 데이터베이스에 저장된 데이터를 인터넷 상의 사용자들이 웹을 이용하여 접근하는 시스템으로 요약할 수 있다.

다음 그림 2.3.3은 IERNet의 시스템 구성 측면에서 본 시스템 모델을 보여준다.

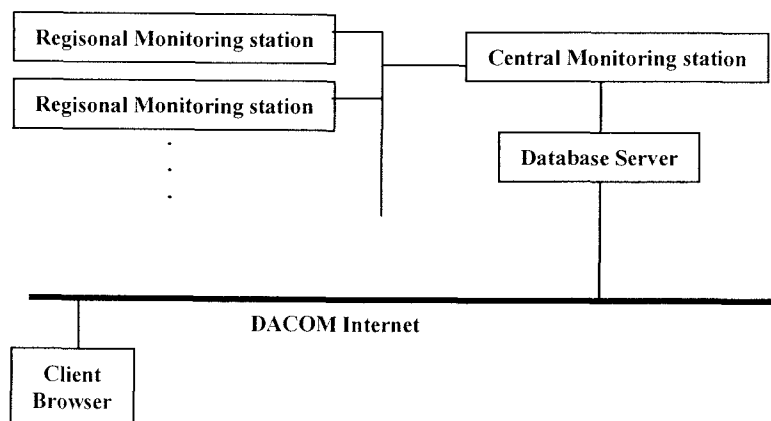


그림 2.3.3 IERNet 시스템 모델

라. RobWebCam - An internet remotely operated two degree-of-freedom CCD-camera

RobWebCam은 브라질 대학교에서 개발된 인터넷을 이용한 원격 CCD 카메라 제어 시스템이다.

이 시스템은 웹 브라우저를 이용하여 원격지에 설치된 CCD 카메라의 움직임을 제어하면서 카메라 화상을 웹브라우저 상에서 볼 수 있도록 구성되어 있다.

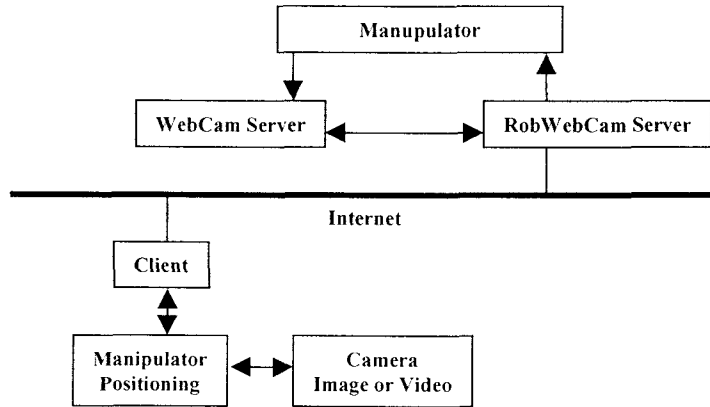


그림 2.3.4 RobWebCam 시스템 모델

비디오 신호는 웹 워크스테이션인 WebCam Server를 이용하여 수집하고, 매니퓰레이터의 제어는 리눅스 머신인 RobWebCam Server를 이용하여 수행된다.

인터넷 상에 연결된 CCD 카메라 사용자는 CCD 카메라가 설치된 사이트의 RobWebCam에 접속하여 CGI 제어 프로그램을 이용한다. 이 프로그램은 매니퓰레이터의 모터와 드라이버를 구동하여 CCD 카메라의 이동을 제어해주며, CCD 카메라에 잡힌 비디오 화상은 WebCam Server로 수집됨과 동시에 RobWebCam Server를 통하여 사용자 브라우저에 실시간으로 전송된다.

2. 국내외 제어봉 안내관 지지핀 검사 기술 개발 현황

1980년대부터 제어봉 안내관 지지핀의 결함을 검사하고 보수하기 위한 다양한 검사 장치가 개발되어왔다. 아래의 그림은 스웨덴에서 개발된 레일을 이용한 안내관 지지핀 검사용 로봇과 이의 검사현장을 보여준다.

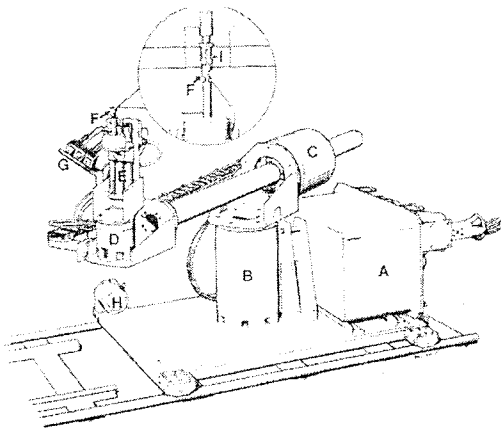


그림 2.3.5 TRC에서 개발한 안내관 지지편 검사장치

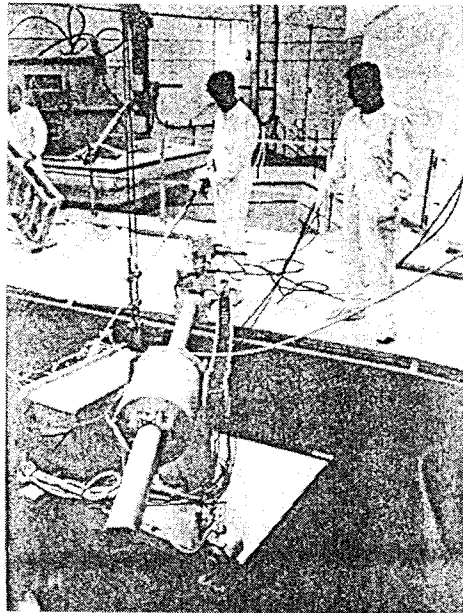


그림 2.3.6 지지편 검사 현장

또한 프랑스에서는 oscar라는 로봇을 투입하여 지지편의 육안 검사를 실행하였다.

국내에서는 한기공이 미국의 웨스팅하우스사의 기술적인 자문을 받아 제어봉 안내관 지지편의 검사 및 교체용역을 수행하고 있다. 이러한 장비들은 레일등의 부수적인 장치를 설치하거나 육안에 의존한 검사로 운전원의 수작업을 단순히 원격 매니플레이션으로 바꾼 정도의 개념이며 자동화의 의미는 다소 미흡하다.

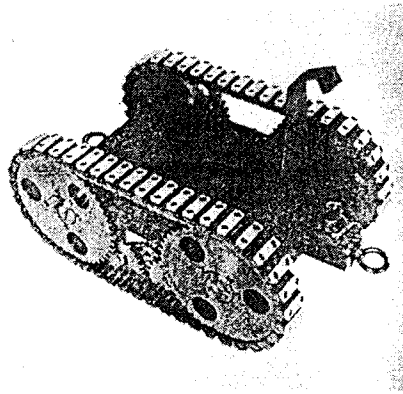


그림 2.3.7 Oscar 로봇

이와 함께 기존의 지지핀의 재료개선에 관한 연구가 이루어져 X-750합금에서 좀더 내구성이 있는 CW-316 스테인레스 스틸로 교체되고 있다.

제 4 절 케이블 건전성 평가 기술

가동원전의 수명을 20년 이상 연장운전하는 것이 전 세계적인 추세이며 국내에서도 고리 1호기를 비롯하여 후속 원전의 수명을 60년까지 연장운전하기 위해서 케이블을 전면 교체할 경우 발전소 운영 및 소요경비 측면에서 막대한 부담을 지게 되며, 또한 원전의 부지확보가 어려운 국내여건을 고려한다면 케이블 건전성 평가기술 개발은 곧 원전 운영의 경제성과 직결되는 문제이다.

원자력발전소의 전력배분 및 제어, 계측 등 다량의 주요기기에 사용되는 케이블 재료에 대한 열화평가기술개발은 원자력발전소의 안전운전 및 수명연장을 위해서 우선적인 과제로 인식되고 있다. 원자로의 통상운전시 케이블 절연재료는 방사선 및 열에 의해 복합열화가 장시간에 걸쳐 발생한다. 장시간 동안 방사선과 열에 의해 발생하는 원전 케이블 재료의 복합열화를 단시간에 보다 정확하게 평가하기 위하여 복합열화거동의 조사, 가속 열화 시험법의 검토가 성행하고 있으며, 최근 비파괴 열화진단법에 대한 연구개발이 진행되고 있다.

1. 외국의 경우

- 미국의 경우 원전 케이블에 대한 환경시험을 Franklin Institute

Research Laboratory (FIRL), Isomedix사 등에 방사선 조사시험 외의 시험과 조사시험 부분을 분리하여 위탁, 평가하였으나, 최근에는 BNL (Brookhaven National Laboratory)의 케이블 노후화 평가기술 개발, NRC (Nuclear Regulatory Commission)의 Nuclear Plant Aging Research Program, Westinghouse의 Electric Equipment Degradation Assessment Program 등으로 방사선 및 열 노화에 관한 열화항목을 묶어 내환경시험을 수행하고 있다. 특히 BNL은 정상운전 시와 시험 시의 선량율의 차이와, 열 및 방사선 피폭의 단계열화시험과 동시열화시험, 내방사선성 시험 시의 전선재료의 허용굴곡경의 문제점에 대한 연구와 최근 비파괴 노후화 검증 기술개발을 추진하고 있다.

- 일본의 경우 안전계통에 대한 전기기기 및 케이블의 환경시험은 IEEE Std. 323에 기초를 두고 있으며, 발전소의 발주회사와 수주회사 간에 적절한 검토를 통하여 시험법을 설정, 실시하고 있어 이들 시험법에 다소의 차이가 있다. 1978년 4월 독자 환경시험을 위해 일본전기학회, 원자력기술위원회를 주축으로 원자력발전소용 케이블 조사전문위원회가 설립되었으며, 1982년 11월 원자력발전소용 전선, 케이블의 환경시험법 및 연소시험법에 관한 추천안이 발간되었다. 현재는 이 방법을 토대로 시험이 수행되고 있다.
- IAEA에서는 CRP (Coordinated Research Project)를 통해 격납용기 계측 케이블의 노화평가에 대한 연구를 수행하고 IAEA-TECDOC-1188 (Dec 2000)을 발행한 바 있다. 본 보고서를 통해 가속열화 배율이 250을 초과하지 않는 저온 장시간 가속열화 실험을 권고하고 있다. EPRI에서는 cable program을 통해 미국 및 해외원전을 대상으로 유료 회원제 연구개발을 수행 중에 있다. EPRI에서는 케이블 인덴터를 개발하여 비파괴적 케이블 노화 진단가능성을 제시하였고 각종 케이블 재질별로 노화상태 진단 실험을 수행하였다. 케이블 인덴터는 노트북에 연결하여 2인 1조가 진단업무를 수행하도록 개발되었으며 현재 더 이상의 장비개선은 진행되지 않고 있다. 케이블 환경온도/방사선량 감시장치는 미국 및 유럽지역 모두 초소형 IC를 이용한 휴대용 감시장치를 개발하여 발전소에 활용하고 있다.

2. 국내의 경우

- 현재 원전 케이블의 안전성 분석, 검증, 경년열화, 성능 등에 관한 평가 관련 국내법규로는 국내 원자력법 제23조의 3, 원자력법 시행령 제42조의 2, 3, 4, 원자력법 시행규칙 제19조의 2, 3 등에 근거하고 있으며, 실시간 상시감시, 진단법보다 10년 단위의 주기적 안전성 평가에만 국한되고 있는 실정이다.
- 케이블 건전성 평가기술은 전력연구원과 한국원자력연구소에서 일부 수행하고 있으나 연구인력, 시설, 장비, 기술수준 등은 선진국 수준에 크게 못 미치고 있다. 최근 원자력 성능검증체계 구축사업으로 LOCA 환경 하에서의 내환경 검증시험시설을 구축 중이며 검증기술에 관한 연구는 거의 없는 상태이다.
- 케이블 열화평가는 인장시험을 통한 연신율 측정이 가장 보편적이며 정확성이 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 연신율 측정은 케이블 시편을 절취하여 시험하게 되므로 가동원전의 중단 및 시편확보를 위하여 케이블의 인위적 손상이 불가피하여, 가동중 케이블의 열화상태를 평가할 수 있는 비파괴 진단 기술 및 감시 장비의 개발이 절실한 실정이다.

케이블의 가속열화를 통해 자연열화와 가장 유사한 열화상태를 만들기 위해 지금까지는 고온 단시간 가속열화 방법을 사용하여왔다. 그러나 고온과 저온에서의 노화 메카니즘의 차이, 활성화 에너지의 변화 등으로 인해 일부 재질의 케이블에 대해서는 고온 단시간 가속열화 방법의 정확성에 대한 문제가 제기되어 정상 운전시와 시험시의 선량율의 차이와, 열 및 방사선 피폭의 단계열화시험과 동시열화시험, 내방사선성 시험시의 전선 재료의 허용굴곡경의 문제점에 대한 수명저하 가속요인, 시편과 실제재료 사이의 물성 연구가 진행되고 있다. 케이블의 열화상태 평가는 연신율 측정이 가장 보편적이고 정확성이 있는 것으로 알려져 왔다. 그러나 이 방법은 케이블 시편을 절취하여 시험을 해야하는 이유로 가동원전의 케이블을 절취해야 하는 문제가 있어 가동중인 케이블의 노화 상태를 비파괴적으로 진단하는 기술의 필요성을 절실히 느끼고 있으며 향후 여러 형태의 비파괴적 진단 및 감시 장비의 개발이 추진될 것으로 예견된다.

제 3 장

NSSS 기기 견전성 진단 기술개발

제 3 장 NSSS 기기 건전성 진단 기술개발

제 1 절 금속파편 충격 신호 진단 신기법 개발

1. 배경 이론

가. 배경잡음 감소 기법

(1) 스펙트럼 감산법 (Spectral Substraction)법

스펙트럼 감산법은 신호에 배경 잡음이 더해진 신호로부터 배경잡음만을 주파수 영역에서 제거하여 역 푸리에 변환을 취함으로 배경잡음이 제거된 신호를 얻는 방법이다. 스펙트럼 감산법에 대한 도식적인 방법은 그림 3.1.1에 나타난 바와 같다.

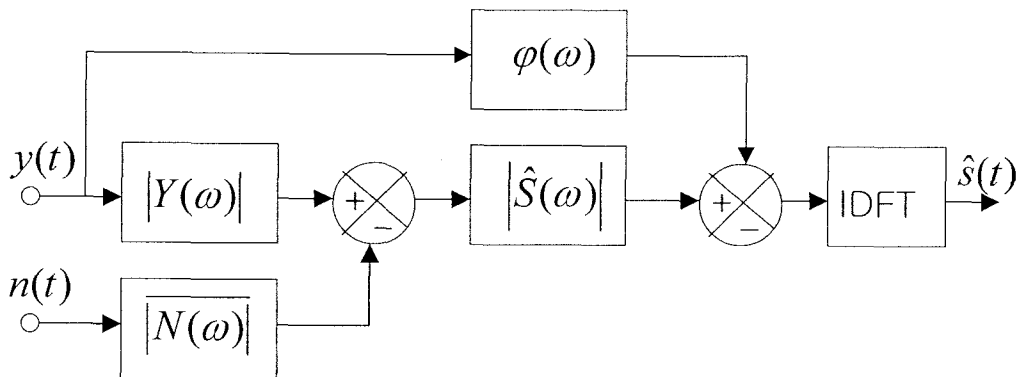


그림 3.1.1 스펙트럼 감산법에 대한 도식적 설명

그림 3.1.1에서 $y(t)$ 는 충격과 $s(t)$ 가 발생하여 충격파에 배경잡음에 추가된 신호이며, $n(t)$ 는 배경잡음을 나타내는 신호이다. 스펙트럼감산법의 수학적 표현은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
S(\omega) &= |S(\omega)|e^{j\phi_s(\omega)} \leftrightarrow s(t) \\
N(\omega) &= |N(\omega)|e^{j\phi_n(\omega)} \leftrightarrow n(t) \\
Y(\omega) &= |Y(\omega)|e^{j\phi_y(\omega)} \leftrightarrow y(t) = s(t) + n(t) \\
|\hat{S}(\omega)| &= |Y(\omega)| - \sum_{i=1}^{N_a} |N_i(\omega)| \\
\hat{S}(\omega) &= |\hat{S}(\omega)|e^{j\phi_s(\omega)} \\
&= |Y(\omega)| \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^{N_a} |N_i(\omega)|}{|Y(\omega)|} \right] e^{j\phi_s(\omega)} \\
&= |H(\omega)|Y(\omega) \\
\hat{S}(t) &= |\hat{S}(\omega)|e^{j\phi_s(\omega)} \leftrightarrow \hat{s}(t)
\end{aligned}$$

스펙트럼감산법의 기본 원리는 그림 3.1.1에서 보여 주는 바와 같이 먼저 배경잡음이 부가된 충격파 $y(t)$ 에 대하여 푸리에 변환을 취하여 $Y(\omega)$ 를 구한다. 그리고 충격파가 발생하기 전에 배경잡음만이 존재하는 경우에 배경잡음 신호 $n(t)$ 에 대하여 푸리에 변환을 취하여 $N(\omega)$ 을 구한다. 여기서 $Y(\omega)$ 신호의 크기 $|Y(\omega)|$ 으로부터 배경잡음의 크기 $|N(\omega)|$ 을 제거하면 예측된 신호 $\hat{S}(\omega)$ 의 크기 $|\hat{S}(\omega)|$ 를 구할 수 있다. 이 신호에 대한 역 푸리에 변환은 신호 $s(t)$ 에 대한 충분한 정보를 주지 못한다. 이유는 위상에 대한 정보가 부족하기 때문이다. 실제 충격파에 대한 위상 정보는 신호 $y(t)$ 에 내포되어 있으므로 $y(t)$ 의 위상 스펙트럼 $\phi_y(\omega)$ 을 이용해야 한다. 마지막으로 위상스펙트럼을 포함하는 충격파에 대한 스펙트럼 $S(\omega)$ 에 대하여 역 푸리에 변환을 취하면 예측된 충격신호 $\hat{s}(t)$ 를 얻을 수가 있다. 이 방법에 대한 성공 여부는 배경잡음에 대한 정보를 얼마나 알고 있는냐에 달려 있다. 즉 배경 잡음이 충격파가 발생하는 경우와 스펙트럼이 서로 다르면 배경 잡음이 충분히 제거되지 않는 결점이 있다.

(2) 적응필터를 이용한 배경 잡음 제거법

배경잡음제거 방법은 항공기 조종사의 잡음으로 인한 통신 장애를 제거하기 위해서 개발된 방법으로 기계적인 시스템의 결함 탐지에도 사용되어 왔다. 예를 들어 특정한 신호에 포함된 협대역(narrow band)간섭을 제거하는 필터를 노치필터라고 하고 노치 필터의 설계에 있어서 신호나 잡음에 대한 사전지식이 없거나 신호의 통계적 성질이 시변일 경우 LMS 알고리즘과 같은 적응 알고리즘을 사용하는데 이를 적응 필터라 한다. 이러한 적응 필터는 심전도측정기의 간섭 제거, 음성신호

의 노이즈 제거, 안테나 side lobe 간섭 제거, adaptive self tuning filter 등 여러 분야에 다양하게 응용되고 있다. 본 연구에서는 적응필터를 이용하여 냉각재의 금속파편 탐지를 위해서 적용하고자 한다. 적응필터는 신호처리 과정에서 목적에 맞게 시스템의 파라미터를 변화시키는 기능을 가지는 필터를 의미하며 필터의 계수를 가변시키면서 최적의 상태에 도달하게 하는 것이 중요한 관건이다. 그림. 9 을 이용하여 적응잡음제어기를 설명하면 충격과 신호 속에 배경잡음이 부가된 상태 $s(t)+n(t)$ 로부터 필터의 출력 신호인 예측 충격과 신호를 제거하면 발생하는 오차 $e(t)$ 가 예측된 배경 잡음이 $\hat{n}(t)$ 이 된다. 이 경우 필터의 출력이 충분히 예측된 충격파가 되기 위해서는 적응필터 $W(t)$ 가 최적화 되어야 한다. 그러나 신호에 대한 정보가 충분히 없으므로 오차 $e(t)$ 를 비용값 (cost function)으로 하여 최적화 해야 한다. 이 필터의 계수가 얼마나 빨리 최적값에 적용하느냐는 최적화 방법에 적용되는 알고리즘에 의해서 결정된다. 본 연구에서는 가정 널리 알려져 있는 LMS 알고리즘, NLMS 알고리즘, SMNLMS 알고리즘에 대해서 적용하였다.

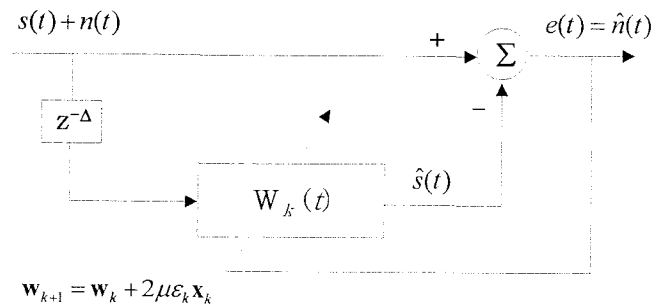


그림 3.1.2 적응필터를 이용한 배경 잡음 제거 기술

(가) LMS 알고리즘

LMS알고리즘은 그림 3.1.3에서 보여주는 바와 같이 초기 출발점 w_0 로부터 최적값 w_{opt} 에 도달하는 방법을 Least Square Method를 사용하여 접근한다. 필터 입력에 대한 데이터 정보를 모두 알고 있다면 필터의 최적값에 쉽게 도달한다. 그러나 실제 상황에서 필터 입력은 계속 변화함으로 최적값에 도달하기 위해서는 이리저리 이동하여 최적값에 가까이 가려고 하지만 완전한 최적값에는 도달하지 못한다. 그리고 얼마나 안정적으로 최적값에 도달하는지는 적응계수 μ 와 필터 의 차수 M에 상당한 영향을 받는다

다. 너무 급히 적응하면 안정도가 문제가 되므로 주의해서 선정해야한다. 이러한 필터 매개변수에 대한 최적 값 선정 방법에 대하여서는 정해진 규칙이 없는 것이 적응필터의 적용을 어렵게 하는 요인이다. 그림1.5의 적응 필터의 구조를 자세히 들여다보면서 LMS 알고리즘에 대해서 알아본다.

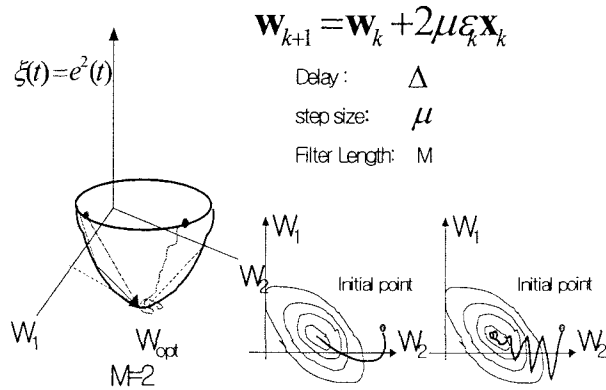


그림 3.1.3 적응필터를 필터의 최적화 과정

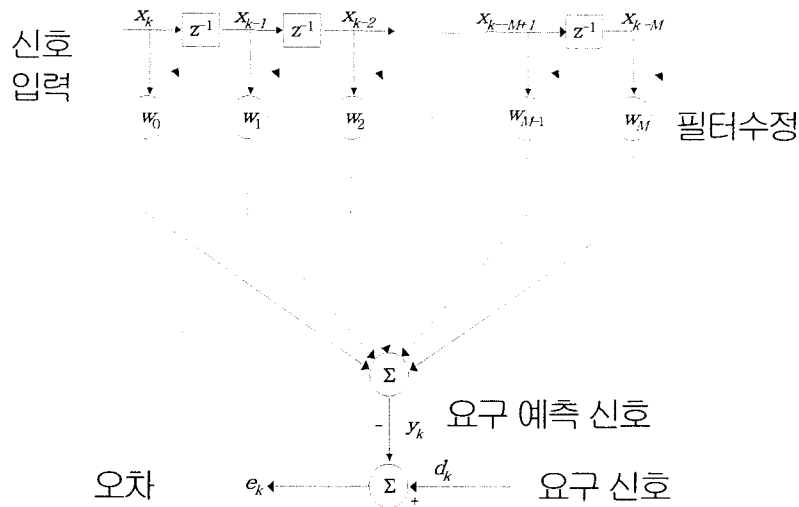


그림 3.1.4 적응필터를 필터의 구조

그림 3.1.4 는 적응 필터의 구조를 보여주고 있다. 오차신호 e_k 는 기준 신호 d_k 와 필터출력의 차이로서 계수들을 변화시키는데 이용된다. 이산 시간 k의 입력 벡터 X_k 는

$$X_k = [x_k \ x_{k-1} \ \dots \ x_{k-L}]^T$$

로 정의되고 가변 필터 계수는 W_k 는

$$W_k = [w_k \ w_{k-1} \ \cdots \ w_{k-L}]^T$$

로 정의된다. k번째 iteration에서 적응 필터의 출력 신호는

$$y_k = W_k^T X_k = X_k^T W_k$$

으로 쓸 수 있다. 여기서 입력 신호와 기준 신호는 정적 과정(stationary) 이라고 가정한다.

필터의 차수는 M이라 하고 간단하게 벡터 W로 나타내면 시간 k에서 오차 신호 e_k 는

$$\begin{aligned} e_k &= d_k - y_k \\ &= d_k - W_k^T X_k \\ &= d_k - X_k^T W_k \end{aligned}$$

이다. 따라서 오차의 제곱은

$$e_k^2 = d_k^2 - 2d_k X_k^T W + W^T X_k X_k^T W$$

이며 알고리즘의 성능을 평가하는 기준으로 많이 사용되는 MSE는

$$\begin{aligned} \xi &= E[e_k^2] = E[d_k^2] - 2E[d_k X_k^T] W + W^T E[X_k X_k^T] W \\ &= E[d_k^2] - 2P^T W + W^T R W \end{aligned} \quad (3.1.1)$$

가 된다. 위에서 입력 신호의 자기 상관 (auto correlation)행렬은

$$R = E[X_k X_k^T]$$

로 정의 되고 입력 신호와 기준 신호 사이의 상호 상관(cross correlation) 벡터는

$$P = E[d_k X_k]$$

로 정의된다. 식 (3.1.1) 으로부터 평균자승오차(MSE: mean square error) 는 필터 계수 제곱의 함수임을 알 수 있으며 이는 MSE가 최소가 되는 최적 필터 계수를 구하는 것으로서 아래 식과 같이 각 샘플시간마다 필터의 계수는 MSE곡선의 음의 기울기 방향으로 수정되고 결국 최적의 계수로 수렴하게 된다.

$$W_{k+1} = W_k + \mu(-\nabla_k) \quad (3.1.2)$$

여기서 μ 는 수렴속도 및 수렴 후 오차를 결정하는 적응상수이고 일반적으로 필터 계수벡터 W가 수렴하기 위해서는 $0 < \mu < 1/\lambda_{\max}$ 범위 안의

값을 가져야 한다. λ_{\max} 는 입력상관행렬(input correlation matrix) R의 최대고유치(eigenvalue)를 의미하며 ∇_k 는 MSE의 기울기이고 다음과 같이 정의한다.

$$\nabla = \frac{\partial \xi}{\partial W} = \left[\frac{\partial \xi}{\partial w_0} \quad \frac{\partial \xi}{\partial w_1} \quad \dots \quad \frac{\partial \xi}{\partial w_M} \right]^T$$

LMS알고리즘은 계산량이 비교적 적고 수식이 간단하기 때문에 널리 사용되는 대표적인 적응 알고리즘의 하나로 기울기를 오차 제곱의 평균에 대한 기울기 대신에 현재의 순간적인 기울기 값으로 정의함으로써 최소급강하법(Steepest descent method)의 기본적인 결격이 유지되므로 기울기 근사 알고리즘이라고도 한다. 즉 LMS 알고리즘에서의 기울기는 현재의 순간적인 기울기 값으로 정의되고 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\nabla_k = \left[\frac{\partial e_k^2}{\partial w_0} \quad \dots \quad \frac{\partial e_k^2}{\partial w_L} \right]^T = 2e_k \left[\frac{\partial e_k}{\partial w_0} \quad \dots \quad \frac{\partial e_k}{\partial w_L} \right]^T = -2e_k X_k \quad (3.1.3)$$

LMS알고리즘은 식 (3.1.2)의 기울기에 식 (3.1.3)을 대입하여 얻을 수 있으며 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$W_{k+1} = W_k + 2\mu e_k X_k$$

여기서 X_k , W_k , e_k 는 각각 입력벡터, 계수벡터, 오차신호이며 μ 는 필터의 수렴속도와 misadjustment를 좌우하는 적응상수이다. 계수가 최적으로 수렴하기 위한 μ 의 범위는 아래와 같다.

$$0 < \mu < \frac{1}{\lambda_{\max}}, \quad \text{where} \quad \lambda_{\max} = \text{행렬 R의 최대 고유치}$$

위의 식에서 알 수 있듯이 LMS알고리즘은 적응도중에 항상 고정된 적응상수 μ 값을 사용한다. 따라서 μ 값이 클 때는 적응속도는 빠르나 적응 후의 안정성이 떨어져 misadjustment가 크고 반대로 μ 값이 작으면 적응 후의 misadjustment가 작아서 안정성은 좋으나 적응속도가 느리게 되는 tradeoff의 문제가 발생하게 된다. 그러므로 시스템에 따라 적응속도와 수렴 후 안정성을 적절히 안배한 적응상수 값을 사용하지만 이 또한 입력

신호에 대한 사전정보가 없으면 적응상수의 값을 적절히 선택하는 것이 어렵다는 문제점이 있다.

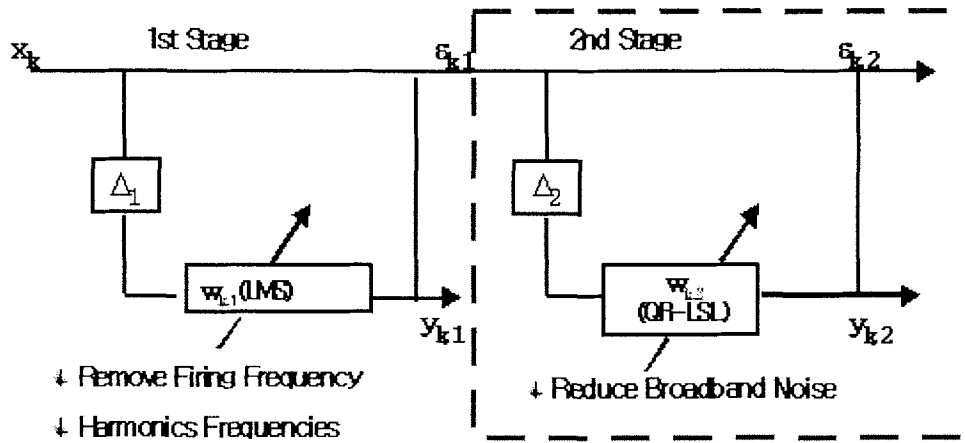


그림 3.1.5 2단계 적응필터이용 LPMS에서의 배경 잡음 제거

그림 3.1.5 는 1단계 적응필터와 2단계 적응필터의 흐름도이다. 위와 같이 1단계 적응필터에서 신호 속에 섞여 있는 공진이나 기계회전체운동과 같은 즉, 순음성분의 잡음을 완전하게 제거할 수 있다. 2단계에서는 충격파에 섞여 있는 백색잡음을 제거하는 것이다. 이를 위해서 잡음에 대해 더욱더 강건하고 정교한 NLMS 알고리즘이나 SMNLMS 알고리즘을 도입하여 백색잡음을 제거하였다. 이 결과를 이용하여 Wavelet 및 Wigner distribution에 적용하여 삼각법으로 LPMS에 최종적으로 적용하여 위치추적과 질량추정을 할 수 있다.

(나) NLMS 알고리즘(Normalized Least Mean Square)

LMS 알고리즘에서는 $k+1$ 회 때 가중치 벡터 w_k 에 인가한 갱신항 $\mu X_k e(k)$ 는 X_k 에 직접적으로 비례한다. 따라서 X_k 가 클 때 LMS에서 경도 추정치 잡음이 증폭되는 문제점이 발생한다. 이 문제점을 해결하기 위해 NLMS알고리즘을 사용한다.

$k+1$ 회 때 w_k 에 인가한 갱신항이 k 회때에 X_k 의 squared euclidean norm에 관해서 정규화된다는 의미에서 “정규화”라는 용어를 사용하였다.

NLMS 알고리즘을 유도하는 과정은 다음과 같다.

“입력신호 시퀀스 와 목적응답 시퀀스가 주어지면 ,

$$d(k) = W_{k+1} X_k^T \quad (3.1.4)$$

의 제약점을 만족하면서 W_k 에 대한 W_{k+1} 의 변화분,

$$\delta W_k = W_{k+1} - W_k \quad (3.1.5)$$

의 squared euclidean norm을 최소화 하도록 W_{k+1} 을 결정하라.”

는 위의 최적화 문제를 풀기 위해서 Lagrange multiplier method를 사용한다.

δW_{k+1} 의 squared norm 은

$$\begin{aligned} \|\delta w_{k+1}\|^2 &= \delta W_{k+1}^T \delta W_{k+1} \\ &= [W_{k+1} - W_k]^T [W_{k+1} - W_k] \\ &= \sum_{i=0}^{M-1} |W_{k+1,i} - W_{k,i}|^2 \end{aligned}$$

이다.

가중치 $W_{k,i}$ 를 복소수로 정의하면,

$$W_{k,i} = a_{k,i} + j b_{k,i} \quad k = 0, 1, \dots, M-1 \quad (3.1.6)$$

이 되고,

$$|\delta W_{k+1}|^2 = \sum_{i=0}^{M-1} [(a_{k+1,i} - a_{k,i})^2 + (b_{k+1,i} - b_{k,i})^2]$$

이 된다. 입력신호 시퀀스와 목적응답시퀀스 를 복소수로 표시하면

$$X_k = X_k^1 + j X_k^2$$

$$d(k) = d_1(k) + j d_2(k)$$

로 된다.

식 (3.1.4)의 복소제약점을 두개의 실수 제약점으로 등가화할 수 있다. 즉

$$\sum_{i=0}^{M-1} (a_{k+1,i} X_{k-i}^1 + b_{k+1,i} X_{k-i}^2) = d_1(k)$$

$$\sum_{i=0}^{M-1} (a_{k+1,i} X_{k-i}^2 + b_{k+1,i} X_{k-i}^1) = d_2(k)$$

이다.

이제 실수로 된 평가함수는 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned}
 J(k) &= \sum_{i=0}^{M-1} [(a_{k+1,i} - a_{k,i})^2 + (b_{k+1,i} - b_{k,i})^2] \\
 &+ \lambda_1 [d_1(k) - \sum_{i=0}^{M-1} (a_{k+1,i} X_{k-i}^1 + b_{k+1,i} X_{k-i}^2)] \\
 &+ \lambda_2 [d_2(k) - \sum_{i=0}^{M-1} (a_{k+1,i} X_{k-i}^2 + b_{k+1,i} X_{k-i}^1)]
 \end{aligned}$$

여기서 λ_1, λ_2 는 Lagrange multiplier들이다.

$a_{k+1,i}$ 와 $b_{k+1,i}$ 의 최적값을 구하기 위해서 평가함수는 이 두 매개 변수에 대해 미분하고 그 결과를 0으로 한다.

즉

$$\frac{\delta J(k)}{\delta a_{k+1,i}} = 0$$

$$2(a_{k+1,i} - a_{k,i}) - \lambda_1 X_{k-i}^1 + \lambda_2 X_{k-i}^1 = 0$$

$$\frac{\delta J(k)}{\delta b_{k+1,i}} = 0$$

$$2(b_{k+1,i} - b_{k,i}) - \lambda_1 X_{k-i}^1 + \lambda_2 X_{k-i}^1 = 0$$

이제 이 두개의 수식 결과를 한 개의 복소결과로 표시하면,

$$2[W_{k+1,i} - W_{k,i}] = \lambda^* X_{k-i} \quad i = 0, 1, 2, \dots, M-1 \quad (3.1.7)$$

이 되고 λ 는 복소 Lagrange multiplier이다.

$$\lambda = \lambda_1 + j\lambda_2$$

미지수 λ^* 를 구하기 위해 식 (3.1.7)의 양변에 X_{k-i}^* 를 곱하고 i 를 0에서 $M-1$ 까지 더하면

$$\begin{aligned}
 \lambda^* &= \frac{2}{\sum_{i=0}^{M-1} |X_{k-i}|^2} \left[\sum_{i=0}^{M-1} W_{k+1,i} X_{k-i}^* - \sum_{i=0}^{M-1} W_{k,i} X_{k-i}^* \right] \quad (3.1.8) \\
 &= \frac{2}{\|X_k\|^2} [W_{k+1}^T X_k^* - W_k^T X_k^*]
 \end{aligned}$$

이 된다. 여기서 $\|X_k\|$ 는 X_k 의 Euclidean norm 이다.

다음, 식 (3.1.4)의 복소제약을 식 (3.1.8)에 대입하면

$$\lambda^* = \frac{2}{\|X_k\|^2} [d^*(n) - W_k^T X_k^*]$$

가 되고, 평가 오차

$$e(n) = d(n) - W_k^T X_k$$

이므로

$$\lambda^* = \frac{2}{\|X_k\|^2} e^*(k)$$

로 쓸 수 있으므로 식 (3.1.5) 에 대입하면

$$\delta W_{k+1} = \frac{1}{\|X_k\|^2} X_k e^*(k) \text{ 이 된다.}$$

반복이 진행될 때 방향을 고수하면서 가중치 벡터를 제어하기 위하여 양의 실수값인 μ 을 도입하여 δW_{k+1} 을 재정의 하면 ,

$$\begin{aligned} \delta W_{k+1} &= W_{k+1} - W_k \\ &= \frac{\mu}{\|X_k\|^2} X_k e^*(k) \end{aligned}$$

로 되고

$$W_{k+1} = W_k + \frac{\mu}{\|X_k\|^2} X_k e^*(k) \tag{3.1.9}$$

가 된다.

이 식은 $X_k e^*(k)$ 를 $\|X_k\|$ 에 관하여 정규화 되고 있으므로 “정규화”된 알고리즘이다. 즉 “Euclidean norm”의미에서 최소변화를 가지도록 가중치 벡터를 갱신하는 알고리즘이다.

이 알고리즘은 알고리즘에 비하여 최소교란원리에 따르고 있다. 즉 새로운 입력 데이터에 대한 적응 시스템의 매개변수들은 단지 최소 형태로만 교란되어야 하는 원칙에 더욱 충실함을 알 수 있다.

NLMS와 LMS를 좀더 자세히 비교하면

① LMS의 적응 상수 $0 < \tilde{\mu} < 2$ 는 inverse power의 차원을 가지고 있으나 NLMS의 $\tilde{\mu}$ 는 차원이 없는 상수이다.

② NLMS는 시변 적응 상수를 갖는 LMS로 볼 수 있다.

③ NLMS 알고리즘은 가 아래의 조건을 만족할 때 mean-square sense로 수렴한다.

$$0 < \tilde{\mu} < 2$$

NLMS는 추정 정도 벡터의 잡음이 증폭되는 문제점은 해결하였으나 입력 신호 시퀀스가 적은 경우에 $\|X_k\|^2$ 가 더욱 작아지게 되어 어떤 수를 나눌 때 치명적인 수치적 오류를 초래할 가능성이 있어 식 (3.1.9)을 아래와 같이 수정하여 사용한다.

$$W_{k+1} = W_k + \frac{\mu}{a + \|X_k\|^2} X_k e_k^*$$

여기서 $a > 0$, $0 < \mu < 2$ 이다.

(다) SMNLMS 알고리즘

SET-MEMBERSHIP (SM)기법은 해법(Solution)을 구할 때 해법을 어떠한 규정(Sets)에 구속시키면서 수치적인 모델링(Modeling)하는 기법이다. 다시 말해 SM는 해답을 어떠한 Set로 제한하는 모델에 대한 절대 참값의 가정을 사용하는 기법으로써 이 적응 성취 능력은 상당한 주목을 받았고 이는 많이 사용되어지고 있으며 최근 몇 년 동안 광범위 하게 연구 되어 오고 있다. SMNLMS Algorithm은 Optimal Bounding Ellipsoid (OBE)와 같은 범주에 있는 SM(Set Membership)이론과 적용이 간편하고 비교적 잡음에 대하여 강건한 NLMS을 이용해서 유도된다. 한편 대부분의 공학적 적용에서는 알 수 없는 오차크기에 대한 한계에 대해서 선택적인 확실한 경계가 필요하고 NLMS알고리즘은 적절한 적응계수에 대한 시행착오가 필요하며 경우에 따라서 적응이 느리다는 단점이 있다. 본 연구에서 규정한 알고리즘은 시간에 따라 천천히 변하는 알 수 없는 크기의

측정 잡음을 가진 경우에 적용 되어진다. 즉 일정크기의 정상적인 백색잡음에 대하여 강건한 알고리즘을 개발하고자 한다. 이와 같이 제안된 알고리즘은 잡음의 크기에 대한 정보와 이 크기를 추출해 낼 수 있다. 따라서 잡음에 대한 적절한 경계치는 이는 과도한 경계의 위험성을 없애고 낮은 경계치 때문에 생기는 효율성의 저감을 줄일 수 있다.

SMNLMS 알고리즘의 문제는 아래의 식과 같이 선형적인 모델을 가지는 식에서 알지 못하는 파라미터의 계수 $W=[w_1, w_2, \dots, w_m]^T$ 을 규명하는 것이다.

$$y_n = W^H X_n + v_n \quad (3.1.10)$$

여기서 $\{y_n, X_n\}$ 는 input-output 시퀀스들이고 v_n 는 알지 못하는 시퀀스, 즉, 방해, 측정된 잡음시퀀스 또는 다른 Input 이다. 그 추정은 새로운 Input/Ooutput의 도달에 의해서 갱신된다. SMNLMS에서는 v_n 은 $\gamma_n^* > 0$ 의 크기에 제한된다.

$$|v_n| \leq \gamma^* \quad n=1, 2, \dots \quad (3.1.11)$$

따라서 각각의 짝 (y_n, X_n) 로써, 위의 두 부등식에서 아래의 식을 만들 수 있다.

$$|y_n - W^H X_n| \leq \gamma^* \quad n=1, 2, \dots \quad (3.1.12)$$

W 의 추정으로써 W_n 을 갱신하는데 LMS에 기초한 알고리즘이 사용되어진다고 가정한다.

$$W_n = W_{n-1} + \alpha_n^H X_n \quad \text{여기서 } \alpha_n \in C \quad (3.1.13)$$

n번째 일 때, W_{n-1} 의 값은 W 의 참 추정치로써 주어지고, 참 추정치 W

위의 오차에서 $\zeta_{n-1} \geq 0$ 이 주어진다. 즉,

$$\|W - W_{n-1}\| \leq \zeta_{n-1} \quad (3.1.14)$$

SMNLMS알고리즘은 위의 부등식(3.1.11),(3.1.12),(3.1.14)와 등식(3.1.13)에서 n 일 때의 W 에 가장 가까운 점을 찾기 위해 v_n 에 대한 가장 나쁜 값을 고려하면 된다. 따라서 W_n 는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} W_n &= \arg \min_{W \in (5)} \left[\max_{|v| \leq \gamma^*} \|W - W_n\| \right] \\ \zeta_n &= \min_{a_n} \left[\max_{|v_n| \leq \gamma^*} \|W - W_n\| \right] \end{aligned} \quad (3.1.15)$$

위의 최적화문제에 대한 해답은 다음과 같이 주어진다.

$$\zeta_n^2 = \begin{cases} \zeta_{n-1}^2, & (|e_n| > \gamma^*) \\ \zeta_{n-1}^2 - \frac{(|e_n| - \gamma^*)^2}{\|X_n\|^2}, & (|e_n| \leq \gamma^*) \end{cases} \quad (3.1.16)$$

여기서 오차신호와 a_n 에 대한 최적화한 값 e_n 은 각각 다음과 같이 주어진다.

$$e_n = y_n - W_{n-1}^H X_n$$

$$a_n = \begin{cases} 0 & (|e_n| \leq \gamma^*) \\ \frac{(1 - \frac{\gamma^*}{|e_n|}) e_n^H}{\|X_n\|^2} X_n & (|e_n| > \gamma^*) \end{cases}$$

위의 식은 다음과 같이 유도된다. 식(3.1.11)에서 W 에 대한 $\|W - W_n\|^2$ 을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\|W - W_n\|^2 = \|W - W_{n-1}\|^2 - \text{Re}[a_n^H (W - W_{n-1})^H X_n] + |a_n|^2 \|X_n\|^2$$

식(3.1.9)과 $e_n = y_n - W_{n-1}^H X_n$ 에서 아래와 같이 얻는다.

$$\|W - W_n\|^2 = \|W - W_{n-1}\|^2 - \text{Re}[a_n^H (e_n - v_n)] + |a_n|^2 \|X_n\|^2$$

그러므로 부등식(3.1.14)과 (3.1.13)에서 다음을 얻을 수 있다.

$$\|W - W_n\|^2 \leq \zeta_{n-1}^2 - 2\text{Re}[a_n^H e_n] + 2|a_n| \gamma^* + |a_n|^2 \|X_n\|^2$$

다음과 같이 정의하면,

$$\zeta_n^2 = \min_{a_n} \{ \zeta_{n-1}^2 - 2\text{Re}[a_n^H e_n] + 2|a_n| \gamma^* + |a_n|^2 \|X_n\|^2 \}$$

식(3.1.16)을 쉽게 유도할 수 있다. 따라서 ζ_0, W_0 에 대한 대략적인 초기 값을 제시한 후에 알고리즘은 식(3.1.16)에 의해서 주어지고 필터는 다음의 식과 같이 갱신된다.

$$W_n = \begin{cases} W_{n-1}, & (|e_n| \leq \gamma^*) \\ W_{n-1} + \frac{(1 - \frac{\gamma^*}{|e_n|}) e_n^H}{\|X_n\|^2} X_n, & (|e_n| > \gamma^*) \end{cases}$$

이 알고리즘이 종래의 OBE알고리즘과 같은 SMNLMS알고리즘으로 알려져 있고 절대 참값으로 주어진 γ^* 에 의해서 v_n 은 $|v_n| < \gamma^*$ 로 제한된다는 전제 조건에 기초한다. 그러나 실제로 v_n 는 식별하기 힘들기 때문에 적절한 제한 순열 $\{\gamma_n^*\}$ 을 선택하는 것이 중요하다. 경계치, γ^* 을 크게 잡으면 추정오차가 커지고 구하고자하는 결과값에 이르지 못하고 경

계치를 너무 작게 잡으면 발산하는 위험이 있어 경계치 선택에 유념해야 한다. 원전신호와 같이 비정상적인 신호에서는 $|e_n| \leq \gamma^*$ 일 때 잡음이기 때문에 필터의 변화가 없다면 계속 증폭되는 위험이 있으므로 NLMS기법을 이용한다. 따라서 필터를 다음과 같이 수정할 수 있다.

$$W_n = \begin{cases} W_{n-1} + \frac{\mu}{a + \|X_n\|^2}, & (|e_n| \leq \gamma^*) \\ W_{n-1} + \frac{(1 - \frac{\gamma^*}{|e_n|}) e_n^H}{\|X_n\|^2} X_n, & (|e_n| > \gamma^*) \end{cases}$$

위와 같이 제안된 알고리즘은 오차가 경계치 γ^* 보다 작을 경우 입력이 거의 잡음이기 때문에 잡음에 대해서 강건하고 오차가 경계치를 넘는 경우의 충격과가 입력될 때 필터를 급속하게 갱신하기에 빠른 수렴의 효과가 있는 장점이 있다. 잡음의 크기가 두개의 연속적인 순열 사이에서 작게 변하거나 거의 고정되는 경우에 탁월한 성능을 가지는 새로운 알고리즘을 제안한다. 즉, 두개의 잡음 순열 사이에서는 아래의 식으로 나타난다.

$$|v_k| \approx |v_{k-1}| \approx \gamma^* \quad (3.1.17)$$

OBE알고리즘에 반대로 여기서 고정된 값은 알지 못하고 랜덤값(random value)을 가지고 있고 시간에 따라 변할 수 있다. 위의 식(3.1.17)에서 아래의 식을 얻을 수 있다.

$$|y_k - W^H X_k| \approx |y_{k-1} - W^H X_{k-1}| \quad (3.1.18)$$

여기서 SM 문제는 위의 등식을 만족하는 해답들의 일련의 교차점을 발견하는 것이다. 자명하게도 이 문제는 계산상 절대 간단하지 않다. 이를 극복하기 위해서 식(3.1.13)에서처럼 LMS에 기초한 예상치에 대해서 우리는 아래와 같은 α_n 을 결정하기 위한 최적화를 제시하였다

$$\alpha_n = \arg \min [(\nu_n - \nu_{n-1})^2 + \lambda_n \|W_n - W_{n-1}\|^2] \quad (3.1.19)$$

여기서 $n_n = |y_n - W^H X_n|$ 이며, 이와 같은 전개방식은 위의 확신은 적절한 표준에 대한 확신을 정당화 한다. 식(3.1.19)에서 첫번째 요소는 식(3.1.18)를 만족시키도록 고려되어졌다. 두번째 요소는 W_n 가 W_{n-1} 에 수렴하도록 고려한다. ; 이는 참 값 W 에 대하여 향하는 W_n 의 Caush-type 수렴을 허용한다. 주어진 값 $\lambda_n > 0$ 은 변동율의 속도와 정상상태방식사이에서 이율배반적인 값을 조절한다.

$$\begin{aligned} a_n &= (1 - (n_{n-1} / |e_n|)) e_n / (\lambda_n + \|X_n\|^2) \\ n_n &= (\lambda_n |e_n| + n_{n-1} \|X_n\|^2) / (\lambda_n + \|X_n\|^2) \geq 0 \end{aligned} \quad (3.1.20)$$

따라서 최종적으로 제안된 알고리즘은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} e_n &= y_n - W_{n-1}^H X_n \\ W_n &= W_{n-1} + \frac{(1 - \frac{n_{n-1}}{|e_n|})}{\lambda_n + \|X_n\|^2} e_n^H X_n, \quad (|e_n| > n_{n-1}) \\ W_n &= W_{n-1} + \frac{\mu}{\lambda_n + \|X_n\|^2} e_n^H X_n, \quad (|e_n| \leq n_{n-1}) \\ n_n &= \frac{\lambda_n |e_n| + n_{n-1} \|X_n\|^2}{\lambda_n + \|X_n\|^2} \geq 0 \end{aligned}$$

SMNLMS 알고리즘에서 제시되었듯이 잡음의 경계는 여기서 주어진 변수가 아니다. 그러므로 잡음경계의 변동에 대하여 강력한 적응도를 가지고 있다. 위의 최적화 기준은 식(3.1.15)에서 제시되었듯이 명백하게 W 의 함수가 아니다. 결과적으로 이 알고리즘은 본능적으로 W 가 시간에 따라서 변할 때 추적에서 SMNLMS를 윗등하게 수행되어지도록 예상되어진다. 식(3.1.19)의 반복은 사실 input으로 $|e_n|$ 와 output으로 n_n 을 가지는 저주파(시변)필터이다. 또한 n_n 는 $|e_n|$ 와 n_{n-1} 의 선형결합으로 볼 수 있다. 그러므로 n_n 는 항상 $|e_n|$ 와 n_{n-1} 의 중간값이 되어야 한

다. 결과적으로 n_n 은 오차 시퀀스의 크기의 시간 평균값이고 n_n 의 분산은 오차순열 $|e_n|$ 에 대한 분산간격보다 작다. 정상상태에서 Borel 이론에 의하면 n_n 는 발산하지 않는다. 이것은 결합의 가중치가 λ_n 와 $\|X_n\|^2$ 에 비례적으로 결정됨을 유념해야 된다. 따라서 n_n 은 즉각적인 input 신호파 위에 비례해서 갱신된다. 시스템이 지속적으로 가진되는 경우 우리는 $\lim_{n \rightarrow \infty} n_n \approx \gamma^*$ 을 예상할 수 있다. 결과적으로 이 알고리즘은 n_n 을 예상되는 잡음의 크기(expected noise magnitude)로 볼 수 있다. 이 알고리즘의 특징은 아래와 같다.

- ① 만일 어떤 연속적인 시간에서 $|e_n|$ 이 n_{n-1} 보다 작은 경우에는 식 (20)의 n_n 은 급격하게 감소할 것이다.
- ② 만일 $|e_n|$ 이 상당히 예상잡음치(ENM)보다 클 경우에는 적응필터 계수는 NLMS알고리즘으로 갱신된다.
- ③ 반대로 만일 오차신호의 크기가 대략적으로 n_{n-1} 와 같은 경우 $(1 - n_{n-1}/|e_n|)$ 은 작은 값이 될 것이다. 이 경우 적응필터는 거의 변하지 않고 이 알고리즘은 잡음에 영향을 받는 오차신호를 간주한다.

따라서 우리는 이 알고리즘이 비선형필터로 작용하고 잡음신호의 영향을 줄인다. 더욱이 반복적인 n_n 에 의해서 자기 조절이 되고 이와 같은 자기 적응필터는 놀라운 효과를 가지고 자연적으로 잡음의 존재에 대해서 강건하다.

(라) QR-LSL 알고리즘

QR-LSL 알고리즘을 유도하기 전에 Gradient Adaptive lattice Algorithm(GAL)을 알아보자. GAL은 구조상 선형구조대신에 선형예측에 대하여 Lattice 구조가 사용된다. 그림 3.1.6은 고정된 비적용 lattice 구조이다. 그림 3.1.6에서, $f_m(k)$ 는 전치선형예측오차이고 $b_m(k)$ 는 후치선형예측오차이다.

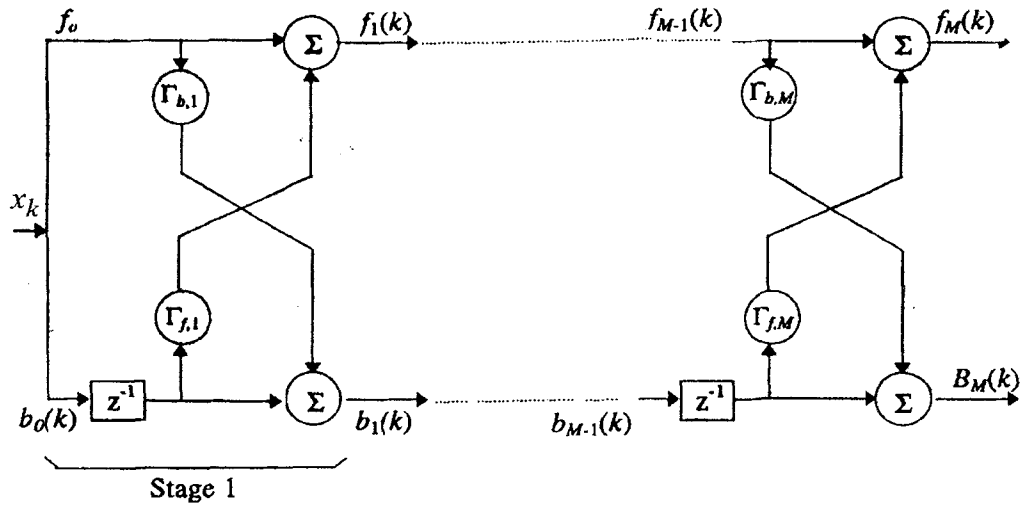


그림 3.1.6 Signal flow graph for stage m of a lattice predictor

$\Gamma_{b,m}(k)$ 는 후치선형예측에 대한 반사계수이고 $\Gamma_{f,m}(k)$ 는 전치선형예측에 대한 반사계수이다. Lebinson-Durvin 순환을 M차 예측오차 필터에 적용하면, 최적화된 반사계수 $\Gamma_{b,m}^o(k)$ 는 비용함수(cost function) ($E[f_m^2(k)]$) or ($E[b_m^2(k)]$)을 최소화함으로써 얻어질 수 있다. 필터의 입력이 정상신호이고 각 필터의 단계의 전치, 후치 반사계수가 최적화된 값, $\Gamma_m^o(k)$ 으로 맞춰진다면, $E[f_m^2(k)]$ 는 $1 \leq m \leq M$ 범위에서 $E[b_m^2(k)]$ 과 같다. 여기서 M은 lattice필터의 차수이다. 이러한 조건아래, 적절한 반사계수 $\Gamma_m^o(k)$ 는 아래와 같이 기술된다.

$$\Gamma_{f,m}^o(k) = \Gamma_{b,m}^o(k) = \Gamma_m^o(k) = - \frac{E[b_{m-1}(k-1)f_{m-1}(k)]}{E[f_{m-1}^2(k)}}, \quad 1 \leq m \leq M \quad (3.1.21)$$

위의 식은 전치예측오차와 후치예측오차사이의 부분상관관계를 나타낸다. 그러므로 반사계수는 아래를 만족한다.

$$\Gamma_m(k) \leq 1, \quad \text{모든 } m \text{ 에 대하여} \quad (3.1.22)$$

식 (3.1.21)과 식(3.1.22)은 만일 필터에 대한 입력이 정상신호일 때 만족된다. 그러나, 비정상 신호가 필터에 적용될 때는 두 반사계수가 항상 1 보다 작고 그들이 같은 값을 가질 거라고는 확신하지 못한다. 이 문제를 극복하기 위해서, 전치-후치 반사계수는 같은 값이라는 가정 아래 Burg는 예측필터의 m차 단계에서 cost function 으로 ξ_m 을 도입하였다.

$$\xi_m(k) = E[f_m^2(k) + b_m^2(k)] \quad (3.1.23a)$$

여기서

$$\begin{aligned} f_m(k) &= f_{m-1}(k) + \Gamma_m(k)b_{m-1}(k-1) \\ b_m(k) &= b_{m-1}(k) + \Gamma_m(k)f_{m-1}(k-1) \\ \Gamma_{m,f}(k) &= \Gamma_{m,b}(k) = \Gamma_m(k) \end{aligned} \quad (3.1.23b)$$

따라서 최적반사계수는 $\Gamma_m(k)$ 에 대하여 $\xi_m(k)$ 을 미분해서 그 결과를 'zero'에 맞추으로써 얻어진다. 이와 같이, 최적반사계수는 항상 모든 m차에 대하여 항상 1 보다 작다. Burg 방법을 적응필터에 적용시킬 때 우리는 식(3.1.23)의 cost function을 사용하고, 간단한 LMS method와 같이, gradient method를 사용함으로써 반사계수를 갱신한다. cost function 의 gradient는 아래와 같이 주어진다.

$$\widehat{\nabla}_m(\xi(k)) = \frac{\partial \xi_m}{\partial \Gamma_m(k)} = 2E[f_m(k)b_{m-1}(k-1) + b_m(k)f_{m-1}(k-1)] \quad (3.1.24)$$

그리고 식(3.1.23)에서 예측을 제거함으로써, 일시적인 비용함수(cost function)의 gradient를 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$\widehat{\nabla}_m(\xi(k)) = 2[f_m(k)b_{m-1}(k-1) + b_m(k)f_{m-1}(k-1)] \quad (3.1.25)$$

따라서 일시각적인 m차에서 반사계수와 k번째 반사계수는 아래와 같이

갱신된다.

$$\hat{\Gamma}_m(k+1) = \hat{\Gamma}_m(k) - 2\mu_m(k) \hat{\nabla}_m(\xi(k)) \quad (3.1.26)$$

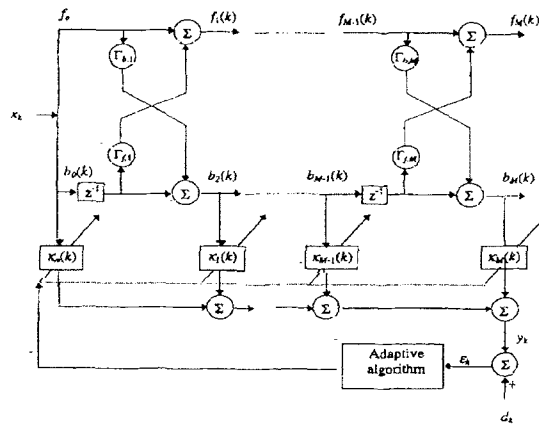
이와 같은 절차는 보통 gradient adaptive lattice (GAL) 알고리즘으로 대체될 수 있다. 적응 lattice 필터는 반사계수의 수렴속도가 본질적으로 입력매트릭스의 고유치와 상관없다는 유용한 특성을 가지고 있다. 그러므로 입력신호가 나쁜 상태일 때 이 적응 lattice 필터는 간단한 LMS 알고리즘을 근거한 선형예측기보다 선호된다. 이 기법을 잡음제거에 적용하기 위해서 lattice joint process estimator가 사용되어야 한다. 정상입력신호가 다단계 필터에 적용될 때 입력순열 $x_k, x_{k-1}, \dots, x_{k-M}$ 과 후치예측오차 $b_0(k), b_1(k), \dots, b_M(k)$ 순열 사이에 하나씩 관련이 있다. 따라서 우리는 이 후치예측오차를 일련의 후퇴계수 $\kappa_0(k), \kappa_1(k), \dots, \kappa_M(k)$ 에 입력으로 사용하자. 오차 ε_k 를 선택하는 방법에는 적어도 두개의 joint 단계추정치 있다. 하나는 각 단계의 오차가 그림 3.1.7(b)에서처럼 각각의 탭에 계수로써 사용되어지고 또는 대신에, 하나의 오차신호가 그림 3.1.7(a)처럼 사용되는 경우가 있다. 전자는 “B type adaptive lattice”라고 불려지고, 후자는 “A type adaptive lattice”라고 불려진다. 다음으로 비선형에 적응효과가 좋은 Least Squares Method (L.S)에 대하여 알아보자. 이 알고리즘은 forgetting factor라는 요소를 사용하여 비선형에 적응효과를 높이는 기법이다. 필터에서 사용되는 가중치의 개수가 M 일때, 우리는 필터의 가중치 w_k 와 좌승오차의 합을 구성되는 비용함수(cost function) $\Psi(k)$ 만든다.

$$\Psi(k) = \sum_{n=0}^k \lambda^{k-n} |\varepsilon_n|^2 \quad (3.1.27)$$

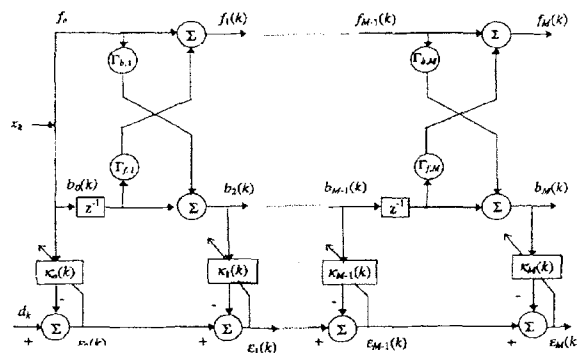
여기서 λ 는 ‘forgetting factor’라고 한다. 이 요소의 사용은 필터가 비정상 환경에서 작용할 때 식별 가능한 데이터의 통계적 분산의 가능성을 허용하기 위해서 멀리 떨어진 과거의 데이터는 잊혀진다는 것을 확신하기 위한 의도이다. 식(3.1.27)의 λ^{k-n} 는 exponential적인 가중치요소이다.

$1-\lambda$ 의 역수는 알고리즘의 메모리라고 불려진다. $\lambda=1$ 인 특별한 경우는 무한한 메모리에 해당한다.

$$\varepsilon_n = d_n - y_n = d_n - w_k^T x_n, \quad 0 < n < k \quad (3.1.28)$$



(a) The signal flow graph of A-type joint process estimate



(b) The signal flow graph of B-type joint process estimate

그림 3.1.7 The signal flow graph of a lattice based structure for joint process estimate

벡터표기법으로 식(3.1.28)은 아래와 같이 표현된다.

$$e(k) = [\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_k]^T \quad (3.1.29)$$

$$d(k) = [d_1, d_2, \dots, d_k]^T \quad (3.1.30)$$

$$e(k) = d(k) - X(k)w_k \quad (3.1.31)$$

식(3.1.27)의 비용함수(cost function)은 또한 아래와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \Psi(k) &= e^T(k)\Lambda(k)e(k) \quad (3.1.31) \\ &= [d^T(k)\Lambda(k)d(k) - d^T(k)\Lambda(k)X(k)w_k^T - w_k X^T(k)\Lambda(k)d(k) + w_k X^T(k)\Lambda(k)X(k)w_k^T] \\ &= [d^T(k)\Lambda(k)d(k) - \Theta^T(k)w_k^T - w_k\Theta(k) + w_k\Phi(k)w_k^T] \end{aligned}$$

여기서

$$\Phi(k) = X^T(k)\Lambda(k)X(k), \quad \Theta(k) = X^T(k)\Lambda(k)d(k) \quad (3.1.32)$$

그리고

$$\Lambda(k) = \text{diag}[\lambda^k, \lambda^{k-1}, \dots, 1]$$

식 (3.1.27)은 위너필터에 대한 대안으로 볼 수 있다. 근본적으로 위너필터는 넓은 의미의 정상상태를 가정하고 평균화로부터 유도된다. 다른 한편 least square 기법은 optimal filter 가 시간함수라는 결론을 가지고 시간평균의 사용을 포함한다. 그러므로 만일 cost function 식(3.1.27)을 최소화한다면, 우리는 입력신호벡터와 출력오차신호의 직교성을 얻을 수 있을 것이고, normal equation의 행렬을 유도할 수 있고 선형 least squares filter는 다음과 같다.

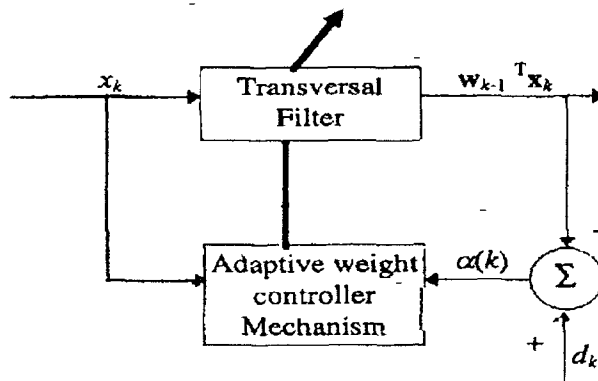
$$\Phi(k)w_k = \Theta(k) \quad (3.1.33)$$

여기서 $\Phi(k) = X^T(k)\Lambda(k)X(k)$ 는 입력신호의 자기상관행렬의 추정치이고 $\Theta(k) = X^T(k)\Lambda(k)d(k)$ 은 입력벡터와 원하는 벡터의 상호상관관계행렬이다. 행렬 $\Phi(k)$ 은 M by M 이고 우리는 time '0' 이전의 입력신호를 'zero' 라는 가정의 윈도우를 사용한다. 하지만 time 'k' 이후의 신호에 대하여는 어떠한 가정도 없다. 이러한 상관관계 행렬의 결과는 non-Toeplitz이다.

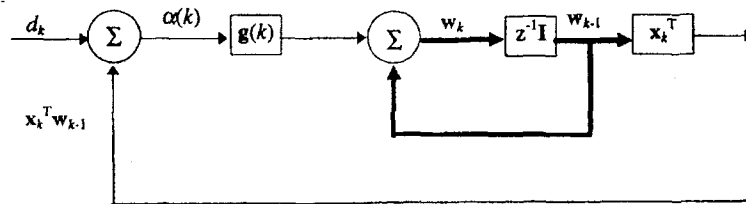
차함수의 선택은 용도에 달려있다. $\Phi(k)$ 가 non-singular이고 그러므로 역행렬 $\Phi^{-1}(k)$ 는 존재한다고 가정하면, 선형 LS filter의 적응가중치벡터에 대해서 식(3.1.33)를 풀 수 있다.

$$w_k = \Phi^{-1}(k)\theta(k) \quad (3.1.34)$$

사실 이 식은 least-squares filter의 recursive formulations의 형성에 대해 기본이 된다.



(a) Block diagram of RLS Algorithm



(b) Signal Flow Graph of RLS Algorithm

그림 3.1.8 Block diagram of Recursive Least Square Algorithm

다음으로 LS기법에 기초한 순환적인 알고리즘인 RLS기법이 있는데 이는 매시간 자기상관행렬을 갱신한다는 특징이 있다. RLS algorithm을 만들기 위해서, 우리는 식(3.1.33)의 normal equations에서 시작한다. M by M행렬은 다음과 같이 정의 될 수 있다.

$$\begin{aligned}
\Phi(k) &= \sum_{n=0}^k \lambda^{k-n} x_n x_n^T \\
&= \lambda \left[\sum_{n=0}^{k-1} \lambda^{k-1-n} x_n x_n^T \right] + x_k x_k^T \\
&= \lambda \Phi(k-1) + x_k x_k^T
\end{aligned} \tag{3.1.35}$$

마찬가지로, 우리는 상호상관관계벡터 $\theta(k)$ 는 다음과 같이 갱신식으로 쓸 수 있다.

$$\theta(k) = \lambda \theta(k-1) + x_k d_k^T \tag{3.1.36}$$

식(3.1.35)(3.1.36)과 matrix inversion lemma을 이용하여

$$\begin{aligned}
A &= B^{-1} + CD^{-1}C^T \\
A^{-1} &= B - BC(D + C^T B C)^{-1} C^T B
\end{aligned} \tag{3.1.37}$$

여기서 $A = \Phi(k)$, $B^{-1} = \lambda \Phi(k-1)$, $C = x_k$ 그리고 $D = 1$, 중벡터 w_k 를 순환적으로 계산하여 아래와 같은 RLS 알고리즘을 기술한다.

$$g(k) = \frac{\lambda^{-1} P(k-1) x_k}{1 + \lambda^{-1} x_k^T P(k-1) x_k} \tag{3.1.38}$$

$$a(k) = d(k) - w_{k-1}^T x_k$$

$$w_k = w_{k-1} + g(k) a(k)$$

$$P(k) = \lambda^{-1} P(k-1) - \lambda^{-1} g(k) x_k^T P(k-1)$$

$$\varepsilon_k = d_k - w_k^T x_k$$

여기서 $g(k)$ 는 ‘gain vector’ 이고 $a(k)$ 는 참추정오차순열이고 $P(k) = \Phi^{-1}(k)$ 이다. RLS 알고리즘의 흐름도는 그림 3.1.8에 있다. RLS 알고리즘을 적용할 때 식(3.1.38)의 순환의 초기화가 필요한데 이는 상관관계 행렬 $\Phi(k)$ 의 non-singularity를 확실하게 하는 초기값 $P(0)$ 의 적절한 선택이 필수이다. 추천하는 값은 $0.01 \sigma_x$ 이고 σ_x 는 입력순열의 분산

이다. RLS 알고리즘의 수렴에서 세 가지 측면의 문제점을 고려해 볼 수 있다.

① 평균값에서의 추정치 w_k 의 수렴

RLS 알고리즘은 근사적으로 치중된 추정치를 만들고 따라서 평균값에 수렴적이다.

② 평균제곱에서의 추정치 w_k 의 수렴

$$\begin{aligned} C(k) &= E\{([w_k - w^o][w_k - w^o]^T)\} \\ &= \sigma_e^2 \Phi^{-1}(k), \quad \text{large } k \end{aligned} \quad (3.1.39)$$

여기서 $C(k)$ 는 가중오차상관관계 행렬이고 $\sigma_e^2(k)$ 는 'zero mean'에서 측정오차과정 ε_k^o 의 분산이다. $\Phi(k)$ 와 'ensemble-averaged' 상관관계행렬 R 의 대략적인 관계를 이해하기 위해서 R 을 입력벡터 x_k 의 ensemble averaged M by M 행렬이라고 하자. 이때 입력벡터 x_k 에 의해 표현되는 stochastic 과정은 'ergodic'하다고 가정하자. 큰 값 k에 대해서 R 은 시간평균공식($\lambda=1$ 일 때)에 의해서 대략화 할 수 있다.

$$\begin{aligned} R &\cong \frac{1}{k} \sum_{n=1}^k x_n x_n^T \\ &= \frac{1}{k} \Phi(k), \quad \text{large } k \end{aligned} \quad (3.1.40)$$

식(3.1.39)와 식(3.1.40)와 양쪽으로 'norm'을 취하여 $C(k)$ 의 'norm'을 아래와 같이 간단화할 수 있다.

$$\begin{aligned} \|C(k)\| &\cong \frac{\sigma_e^2}{k} \|R^{-1}\| \\ &= \frac{\sigma_e^2}{k\lambda_{\min}}, \quad \text{large } k \end{aligned} \quad (3.1.41)$$

여기서 λ_{\min} 은 R 의 가장 작은 고유치이다. 오차상관관계행렬의

'norm', $C(k)$ 은 가장 작은 고유치의 역수에 의해서 크기가 정해진다. 고유치의 분포의 RLS 알고리즘의 민감도는 초기에 가장 작은 고유치의 역수에 비례해서 결정된다. 그러므로 'ill-conditioned' least squares 문제는 나쁜 수렴특성으로 될 수 있다.

③ 이전추정오차의 평균제곱 값의 수렴

$$\Psi' = E[|a(k)|^2] \cong \sigma_e^2 + \frac{M\sigma_e^2}{k}, \quad \lambda=1, \quad k \text{ is large} \quad (3.1.42)$$

$\Psi'(k)$ 는 $\Psi(k) = \sum_{n=0}^k \lambda^{k-n} |\varepsilon_n|^2$ 와는 다르다는 것을 유념해야 한다. 이러한 결과에 근거해서, k 가 무한대에 가까워질 때 평균좌승추정오차 $a(k)$ 는 제로평균값을 가지는 추정오차 ε_k 의 분산 σ_e^2 과 결국 같은 값을 가진다. 그러므로 RLS 알고리즘은 이론상 정상상태($\lambda=1$)에 적용할 때 'zero excess mean-squared error'를 만든다. 그러나 비정상상태에서는 RLS알고리즘의 가중벡터잡음 때문에 'misadjustment'은 대략적으로 다음에 의해서 주어진다.

$$M \cong \frac{1-\lambda}{1+\lambda} M, \quad \lambda \text{ 가 '1'에 매우 가까워질 때} \quad (3.1.43)$$

M 은 필터 갯수이다. 초기에 우리는 $(1-\lambda)^{-1}$ 이 대략적인 RLS알고리즘의 'memory'를 만들었음을 소개했다. 그러므로 알고리즘의 메모리는 exponential 가중치에 의해서 짧아지고 misadjustment 는 증가한다. 그러므로 misadjustment 는 exponential 창에 의존한다. 이것은 입력신호의 4차 statistics에 달려있다. 이 영향은 λ 가 빠른 적응을 위해서 0.9만큼 작게 할당될 때 주목할만하다. 일반적으로 RLS알고리즘의 $(1-\lambda)$ 은 LMS 알고리즘의 step size μ 의 역할을 한다. 먼저 정상신호에 대해서 RLS알고리즘과 LMS알고리즘의 수렴을 비교하여 요약하면, 입력 자기상관행렬의 고유치 spread 는 LMS알고리즘의 수렴속도에 역비례한다. 하지만 RLS알고리즘의 수렴은 입력상관행렬의 고유치와 관련이 없다. 그러므로 일반적으로 RLS알고리즘수렴은 LMS알고리즘보다 빠르다. 두 번째로 비

정상신호에 대하여 LMS알고리즘에 대해서는 step-size선택에서 포함되는 이율배반이 있다. 이는 두개의 misadjustment 때문에 생긴다. 하나는 가중벡터잡음이고 다른 하나는 가중벡터의 지연 때문이다. 전자는 step-size에 직접적으로 비례하고 후자는 step-size에 반비례한다. 그러나 비정상신호에 대해서 비정상에서 야기되는 가중잡음벡터를 줄이기 위해서 작은 step-size가 사용되어진다고 가정된다. 이러한 가정으로 만일 RLS알고리즘에서 step size역할을 하고 있는 $(1-\lambda)$ 를 비교해보면 일반적으로 RLS 알고리즘은 LMS 알고리즘보다 빨리 수렴함을 알 수 있다. 몇 가지 경우에 RLS알고리즘은 비정상상태에 적용될 때 λ 의 값을 '1'보다 작게 선정하는 것이 관례이고 알고리즘에 유한한 메모리를 준다. 이렇게 함으로써 알고리즘은 이것이 작용하는 환경에서 낮은 통계적인 변수를 찾아가는 능력을 고수한다. 불행히도 '1'보다 작은 λ 의 사용은 RLS 알고리즘에 급격한 변화를 준다. 그러므로 RLS 알고리즘은 LMS 알고리즘보다 비정상상태에서 월등한 추적능력을 가지고 있다는 것은 다음에 의해서 인정받지 못한다. 왜냐하면 적응필터알고리즘의 추적능력은 수렴속도 (transient 특성일 때)에 영향을 받을 뿐 아니라 측정과 알고리즘잡음 때문에 알고리즘의 정상상태성능에서 변동에 영향을 받는다. 다음으로 Recursive Least Squares Lattice(LSL)알고리즘에 대하여 알아보자. 이론상, RLS 알고리즘은 Least Squares 문제에서 정확한 해답을 만든다. 하지만 이러한 알고리즘은 필터를 만들고 많은 계산식을 요구한다. 정확한 Least Squares 문제 해답을 찾기 위한 다른 방법으로 갱신사이클당 단지 $O(M)$ 을 사용함으로써 소위 Least Squares Lattice(LSL)알고리즘에 의해 제공되어진다. 정확한 least squares lattice(LSL)알고리즘의 발전은 non-Toeplitz 인 상호관계행렬에 대한 선형예측문제에 대한 효율적인 해답에 대한 Morf의 연구에 있다. LSL알고리즘 자체의 자세한 사항은 Morf에 의해서 주어진다. 이 알고리즘에서 제공된 전치예측오차의 합과 제공된 후치예측오차의 합은 매순간마다 lattice 필터에서 각각의 단계의 출력에서 즉시 최소화된다. 어떠한 대략화도 이 알고리즘의 유도에서 취해지지 않는다. 이 알고리즘은 전치 후치 반사계수에 대한 일련의 시간갱신 순환과 차수갱신으로 구성된다. 반사계수, 즉 예측 오차와 gain 요소는 수렴의 속도를 결정한다. 이는

lattice을 많은 계산없이 적용하는 동안에 길이의 변화가 가능하도록 한다. 후치추정 오차를 근거한 반복적인 LSL을 사용하는 과정의 신호 흐름도는 그림.13에서 보여준다. 이 알고리즘에서 우리는 전치와 후치 lattice 예측의 반사계수를 갱신하고 간접적으로 결합과정추정의 후퇴계수를 갱신한다. LSL은 Burg 방법에 근거한 GAL 알고리즘과 관련이 있고 필터 입력이 Toeplitz인 상관관계행렬을 가정하고 있다. 그러나 필터 입력이 비정상일 때 이 방법의 결과는 다소 부정확하다. 다른 차이점은 반사계수의 계상과정이지만 이 반복의 수학적 유도는 다소 어렵다. 간단히 줄인다면 GAL 알고리즘은 반사계수를 직접적으로 식(3.1.35) 과 식 (3.1.36) 을 인용하여 계산할 수 있다. 그러나 첫째로 LSL알고리즘은 전치와 지연된 후치예측오차사이의 상호상관을 계산한다. 두 번째로 가중된 전치제곱오차와 가중된 후치제곱오차를 계산한다. 마지막으로 이 상호상관을 가중된 오차제곱으로 나눔으로 반사계수와 후퇴계수 계산한다. 따라서 반사와 후퇴계수의 정확성은 이 상호상관의 계산에 있어서 구속되는 정확성에 달려 있고 가중된 오차제곱의 합에 달려 있다. 일반적으로 유한한 계산 길이가 사용될 때 이 양은 덜 정확하게 계산된다. 이는 LSL알고리즘에서 수치적인 부정확성을 유발한다. 이러한 round off 오차는 exponential하게 성장하고 그 알고리즘에서 수치적으로 불안정성을 유발한다. RLS와 LSL알고리즘은 빠른 수렴 때문에 비정상신호에 대해서 넓게 사용된다. 불행히도 이 알고리즘들은 유한한 정확한 환경에서 갑작스런 폭발적인 발산을 유발하는 round-off오차의 경계되지 않은 성장 때문에 부정확성으로 고전을 면치 못하고 있다. 이러한 수치적 부정확성을 극복하기 위해서 QR-Decomposition이 사용된다. QR-Decomposition은 상호상관관계행렬에 대해서 보다 데이터행렬에 바로 사용될 수 있는 장점이 있고 단지 수치적으로 직교적인 회전을 잘 행하는 것을 포함한다. RLS와 LSL알고리즘에서 Least Square문제를 풀기 위해서, 상호상관행렬 $\Phi(k)$, $\theta(k)$ 이 사용된다. 선형 Least Square 문제에서 가중벡터 w_k 는 식 (3.1.33) 에서 보듯이 exponential 가중된 오차벡터 $\Lambda^{1/2}(k)e(k)$ 의 좌승 'norm'인 비용함수(cost function)를 최소화함으로 얻어진다. 또한 직교삼각기법을 이용하여 가중벡터를 얻을 수 있다. 직교삼각기법(orthogonal triangualisation)은 오차벡터에 아래와 같은 ($k \times k$)

unitary 행렬을 곱함으로써 구성된다.

$$Q(k)\Lambda^{1/2}(k)e(k) = Q(k)\Lambda_{1/2}d(k) - Q(k)\Lambda^{1/2}X(k)w_k \quad (3.1.44)$$

여기서 $X(k)$ 는 식의 overdetermined system의 데이터행렬이다. 즉 $k > M$ 이다. 직교행렬은 다음과 같이 선택된다.

$$Q(k)\Lambda^{1/2}(k)X(k) = \begin{bmatrix} R(k) \\ O \end{bmatrix}, \quad k > M \quad (3.1.45)$$

여기서 $R(k)$ 은 $M \times M$ upper삼각행렬이고 O 는 $(k-M) \times M$ null matrix이다. 식(45)에 따라서 $k \times M$ 행렬 $\Lambda^{1/2}(k)X(k)$ 은 unitary 행렬 $Q^T(k)$ 과 $k \times M$ upper 삼각행렬 $[R(k), O]^T$;이와 같은 factorization은 QR-decomposition 으로 간주된다. 그러므로 두 번째 요소는 아래와 같다.

$$Q(k)\Lambda^{1/2}X(k)w_k = \begin{bmatrix} R(k) \\ O \end{bmatrix} w_k = \begin{bmatrix} R(k)w_k \\ O_{k-M} \end{bmatrix}, \quad k > M \quad (3.1.46)$$

w_k 는 $M \times 1$ 벡터이고 O_{k-M} 는 $(k-M) \times 1$ null vector 이다. $k \times k$ unitary matrix $Q(k)$ 은 아래와 같이 나뉜다.

$$Q(k) = \begin{bmatrix} F(k) \\ S(k) \end{bmatrix}, \quad k > M \quad (3.1.47)$$

$F(k)$ 는 $Q(k)$ 와 $S(k)$ 의 첫 번째 M row로 구성되는 $M \times k$ 행렬이다.

$$Q(k)\Lambda^{1/2}d(k) = \begin{bmatrix} F(k) \\ S(k) \end{bmatrix} \Lambda^{1/2}d(k) = \begin{bmatrix} u(k) \\ v(k) \end{bmatrix}, \quad k > M \quad (3.1.48)$$

$$u(k) = R(k)\Lambda^{1/2}(k)d(k), \quad k > M \quad (3.1.49)$$

$$v(k) = S(k)\Lambda^{1/2}(k)d(k), \quad k > M \quad (3.150)$$

$$Q(k)\Lambda^{1/2}e(k) = \begin{bmatrix} u(k) \\ v(k) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R(k)w_k \\ O_{k-M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u(k) - R(k)w_k \\ v(k) \end{bmatrix}, \quad k > M \quad (3.151)$$

다음으로 cost function $\Psi(k)$ 을 unitary matrix $Q(k)$ 을 곱하여 제곱유클리안 norm 아래와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \Psi(k) &= \|\Lambda^{1/2}(k)e(k)\|^2 \\ &= \|Q(k)\Lambda^{1/2}(k)e(k)\|^2 \end{aligned} \quad (3.152)$$

$$u(k) - R(k)w_k = 0 \quad (3.153)$$

$$w_k = R(k)^{-1}u(k) \quad (3.154)$$

$$\Psi_{\min}(k) = \|v(k)\|^2 \quad (3.155)$$

처음에 선형 least squares 문제에 대한 해답으로 QR-Decomposition 의 사용은 좋은 수치적 안정성을 제공한다고 하였다. 이 중요한 특징은 QR-Decomposition의 적용을 직접적으로 가능하게 하고 직교적인 triangualisation 과정을 근본적으로 QR-decomposition을 이용하여 normal equation $\Phi(k)w_k = \theta(k)$ 을 같은 식으로 변환하고, 하지만 수치적으로 더욱 안정적인 형태로 계산하기 쉽게 한다. 이제 QR-decomposition을 적응 필터에 적용하기 위해서, 선형최소적분문제(linear least squares problem) 에 순환적으로 QR-decomposition을 사용할 수 있다. 데이터 행렬 $X(k)$ 은 아래와 같이 쓰여진다.

$$X(k) = \begin{bmatrix} X(k-1) \\ \dots \\ x_k^T \end{bmatrix} \quad (3.156)$$

여기서 $x_k^T = [x_k, x_{k-1}, \dots, x_{k-M+1}]$ 이고 직교삼각법에 대하여 아래의 unitary 행렬(3.1.56)와 exponential하게 가중된 데이터 행렬 $X(k)$ 을 적용하면,

$$Q(k-1) = \begin{bmatrix} Q(k-1) & 0_{k-1} \\ 0_{k-1}^T & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1.57)$$

$$\Lambda^{1/2}(k) = \begin{bmatrix} \lambda^{1/2} \Lambda^{1/2}(k-1) & 0_{k-1} \\ 0_{k-1}^T & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1.58)$$

$$X(k) = \begin{bmatrix} x_1^T \\ x_2^T \\ x_3^T \\ \dots \\ x_k^T \end{bmatrix} \quad (3.1.59)$$

아래의 상위 삼각행렬을 얻는다.

$$Q(k-1)\Lambda^{1/2}(k)X(k) = \begin{bmatrix} \lambda^{1/2} Q(k-1)\Lambda^{1/2}(k-1)X(k-1) \\ \dots\dots\dots \\ x_k^T \end{bmatrix} \quad (3.1.60)$$

그러나 처음에 unitary matrix $Q(k-1)$ 은 $\Lambda^{1/2}(k-1)X(k-1)$ 에 대한 직교전환을 수행한다고 가정했다. 그러므로 간단히 아래와 같이 나타낸다.

$$Q(k-1)\Lambda^{1/2}(k)X(k) = Z(k) = \begin{bmatrix} \lambda^{1/2} R(k-1) \\ O \\ x^T(k) \end{bmatrix} \quad (3.1.61)$$

위의 식의 우변의 $k \times M$ 행렬은 부분적으로 마지막 row 가 'nonzero'의 요소로 구성된 삼각화이다. 따라서 식 (3.1.52)에서 더 나아가서, 연속적으로

그러므로 식(3.1.65)과 식(3.1.68)을 결합하여 아래와 같이 나타낸다.

$$c = \frac{z_{nn}}{\sqrt{|z_{nn}|^2 + |z_{kn}|^2}} \quad (3.1.69)$$

$$s = \frac{z_{kn}}{z_{nn}} c \quad (3.1.70)$$

그러므로 식(3.1.66)으로부터 z_{nn} 은 아래와 같이 바뀐다.

$$z_{nn} \rightarrow \frac{z_{nn}}{c} \quad (3.1.71)$$

Givens rotation matrix $G_n(k)$ 은 행렬 $Z(k)$ 의 마지막 row에 연속적으로 적용하면,

$$T(k)Z(k) = T(k)Q(k-1)\Lambda^{1/2}(k)X(k) = \begin{bmatrix} R(k) \\ O \\ 0_M^T \end{bmatrix} \quad (3.1.72)$$

$T(k) = G_M(k) \cdots G_2(k)G_1(k)$ 는 $(k-M-1) \times M$ null matrix이고 0_M^T 는 $1 \times M$ null row vector 이다. Givens rotation matrix $G_n(k)$ 는 또한 unitary matrix 이다.

$$\begin{bmatrix} R(k) \\ \cdots \\ O \\ 0_M^T \end{bmatrix} = T(k) \begin{bmatrix} \lambda^{1/2}R(k-1) \\ \cdots \\ O \\ x^T(k) \end{bmatrix} \quad (3.1.73)$$

$T(k)$ 는 unitary matrix이다. 즉 $T(k)$ 의 inverse는 transpose와 같다. 그러므로 행렬 $T(k)$ 와 새로운 벡터 x_k 가 주어진다면 상위삼각행렬 $R(k)$ 을 시간갱신하는 반복으로 이용할 수 있다.

$$Q(k) = T(k)Q(k-1)$$

$$= T(k) \begin{bmatrix} Q(k-1) & 0_{k-1} \\ 0_{k-1}^T & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1.74)$$

위의 식(3.1.74)은 QR-decomposition의 순환적인 계산법의 표준갱신기법을 나타낸다. 특별히 $(k-1) \times (k-1)$ unitary 행렬 $Q(k-1)$ 은 $k-1$ 회 때 가중된 데이터행렬의 QR-decomposition을 수행하고 이 행렬과 일련의 주어진 변환법인 unitary 행렬 $T(k)$ 이 주어질 때 갱신된 $Q(k)$ 을 계산할 수 있다. 이제 구하고자 하는 결과벡터 $d(k)$ 을 아래와 같이 나누어보자.

$$d(k) = \begin{bmatrix} d(k-1) \\ \dots \\ d_k \end{bmatrix} \quad (3.1.75)$$

$$Q(k)\Lambda^{1/2}(k)d(k) = T(k) \begin{bmatrix} \lambda^{1/2}Q(k-1)\Lambda^{1/2}(k-1)d(k-1) \\ \dots \\ d_k \end{bmatrix} \quad (3.1.76)$$

$$Q(k-1)\Lambda^{1/2}(k-1)d(k-1) = \begin{bmatrix} u(k-1) \\ v(k-1) \end{bmatrix} \quad (3.1.77)$$

$$\begin{bmatrix} u(k) \\ v(k) \end{bmatrix} = T(k) \begin{bmatrix} \lambda^{1/2}u(k-1) \\ \lambda^{1/2}v(k-1) \\ d_k \end{bmatrix} \quad (3.1.78)$$

식(3.1.73)로부터 갱신된 $M \times M$ 행렬 $R(k)$ 을 계산하고, 식(3.1.78)으로부터 갱신된 $M \times 1$ 벡터 $u(k)$ 를 계산하여, 식(74)에 대입하는 방법을 이용하여, least squares weight vector w_k 를 쉽게 계산할 수 있다. back substitution 방법은 $R(k)$ 의 상위 삼각요소를 이용한다. 식(3.1.73), (3.1.78)와 (3.1.74)에 의해서 정의되는 알고리즘은 QR-decomposition 순환 least squares 알고리즘으로 간주된다. least-squares(QRD-RLS) 알고리즘에 기초한 반복적인 QR-Decomposition은 수치적으로 안전하지만 매우 많은 양의 계산 $O(M^2)$ 이 필요하다. 이 문제를 극복하기 위해서 다음과 같은 특징을 가지는 QR-decomposition에 기초한 least squares lattice filter를 유도하자. : 안정성, 빠른 수렴, 낮은 계산량 $O(M)$. 이는 QR-LSL

알고리즘이라고 부른다. QR-LSL 알고리즘은 그림 3.1.9 에서 보인다. 선형 예측의 적응전치 후치 기법을 접목시킨 것이다. 그렇게 함으로써 반복적인 방법으로 angle-normalised 전치와 후치예측 오차 $\rho_{f,m}(k), \rho_{b,m}(k)$ 들을 계산기 위한 다단계 lattice 구조를 개발하자. 각각의 단계는 주어진 로테이션 $G_{f,m}(k), G_{b,m}(k)$ 을 포함하고 있다. 주어진 로테이션들의 짝들의 곱은 unitary $T_m(k)$ 이다. 각 정규화(angle normalised)된 전치예측오차 $\rho_{f,m}(k)$ 의 계산은 후치예측오차 angle normalised 후치예측오차에 관계되는 cosine-sine 짝을 사용한다. 역으로 angle normalised 후치 예측오차의 계산은 angle normalised 전치 예측 오차에 의존한 로테이션 변수의 다른 삼각함수를 사용한다. 그러므로 angle normalised 전치와 후치예측오차의 계산들은 사실 lattice 구조에서 서로 관계되어 있다.

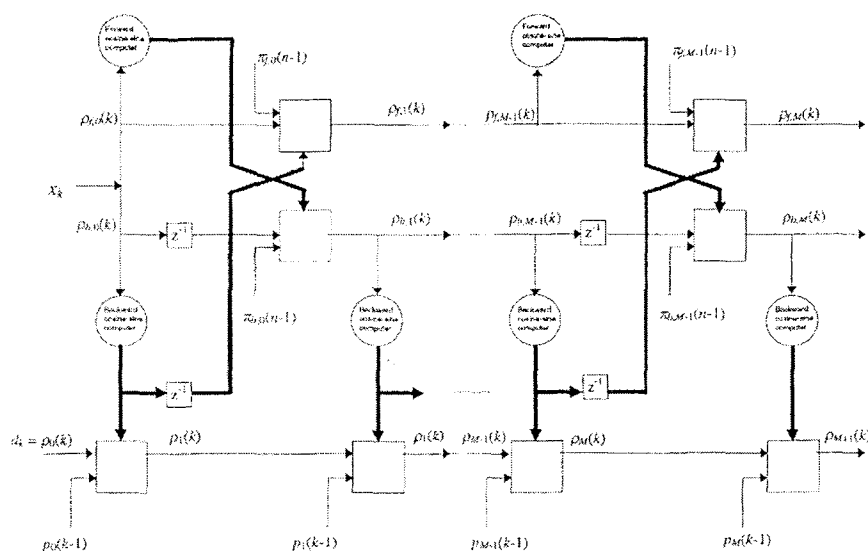


그림 3.1.9 Signal flow graph of QR-LSL algorithm

이러한 과정에서 부가적인 예측변수 $\pi_{f,m}(k), \pi_{b,m}(k)$ 이 창조되고 로테이션 변수의 삼각함수 짝들을 사용하여 시간과 차수 측면에서 갱신된다. 그들은 또한 angle normalised 예측오차를 가지고 상호관계가 있다. 다음으로 angled normalised 후치예측오차를 결합과정추정문제를 풀기 위해서 사용한다. 특별히 결합과정추정문제에 중심이 되는 변환법 $T_m(k)$ 은 직접적으로 angled normalised 후치예측오차로부터 계산될 수 있다. 추정오차

치 $\varepsilon_m(k)$ 에 관련된 angled normalised 결합과정오차 $\rho_m(k)$ 의 계산은 단계마다 근거해서 전개된다. 계산의 각각의 단계는 하나의 주어진 로테이션 $G_{b,m}(k)$ 을 포함하는데 이 로테이션은 angle normalised 후치예측오차의 다음 값에 근거한다. 이 과정에서 결합과정부속변수 $p_m(k)$ 는 생성되고 그 다음 또한 주어진 로테이션 행렬의 삼각함수쌍 $G_{b,m}(k)$ 들을 통해서 차수가 시간과 차수가 갱신된다. 그들은 또한 angled normalised 결합과정오차 $\rho_m(k)$ 를 가지고 상호 관계한다.

(3) SVD (Singular Value Decomposition) 기법 이용 잡음제거

SVD (singular value decomposition) 기법은 구조물의 진동에서 발생하는 에너지의 분포를 특이해의 크기로 표시가능하며 이때 특이 벡터 (singular vector)가 각각의 에너지를 포함하는 신호가 된다. 구조물의 예제에서 일반적으로 백색 잡음은 에너지 레벨이 낮으면서 주파수 영역에 광범위하게 분포되어 있으나 진동 모우드가 존재하는 주파수 영역에서는 에너지레벨이 높고 고유진동 주파수에서는 집중되어있다. 본 연구에서 이러한 원리를 이용하여 배경잡음을 제거하여 충격파를 탐지하는SVD 기법에 대하여 논의 하고자 한다. SVD 기법을 이용하기에 앞서 시스템과 SVD기법의 관계를 먼저 이해하고자 한다.

(가) 시스템의 입출력 관계

원전 구조물의 시스템을 인과적이고 (causal) 선형적 시스템이라고 가정하면 시스템의 입출력 관계는 시스템 행렬과 입출력 벡터로 나타 낼 수가 있다. 이러한 시스템 행렬은 시스템의 입출력 신호와 시스템의 충격 응답 함수 $h(t)$ 의 승적(convolution) 관계로부터 표시 된다. 따라서 입출력에 대한 승적 관계는 다음과 같이 쓸 수가 있다.

$$y(t) = h(t) * x(t) \quad (3.1.79)$$

연속 신호 (continuous signal) 에 대한 승적관계의 수학적 표현은 다음과 같다.

$$y = \int_0^{\infty} h(t-\tau)x(\tau)d\tau \quad (3.1.80)$$

본 연구에 사용되는 이산신호 (discrete signal)에 대한 승적표현은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} y(n) &= h(n) * x(n) \\ &= \sum_{i=0}^n h(n-i)x(i) \end{aligned} \quad (3.1.81)$$

위의 식에 대한 과정을 순서대로 열거하면 다음과 같으며

$$\begin{aligned} y(0) &= h(0-0)x(0) + h(0-1)x(1) + h(0-2)x(2) \dots \\ y(1) &= h(1-0)x(0) + h(1-1)x(1) + h(1-2)x(2) \dots \\ &\vdots \qquad \qquad \qquad \dots \\ y(n) &= h(n-0)x(0) + h(n-1)x(1) + h(n-2)x(2) \dots \end{aligned}$$

이들 연립방정식은 다음의 행렬로 나타낼 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} y(0) \\ y(1) \\ \vdots \\ y(n) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} h(0) & h(-1) & \dots & h(-n) \\ h(1) & h(0) & \dots & h(-n+1) \\ h(2) & h(1) & \dots & h(-n+2) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ h(n) & h(n-1) & \dots & h(0) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x(0) \\ x(1) \\ \vdots \\ x(n) \end{Bmatrix} \quad (3.1.82)$$

또는 $\{y\}=[A]\{x\}$ 로 간단히 나타 낼 수가 있다. 여기서 $\{y\}$ 및 $\{x\}$ 는 각각 입출력벡터이며 $[A]$ 는 시스템 행렬이다. 시스템이 선형적이고 인과적 이라면 시스템의 충격응답함수 (impulse reponses function)의 $h(-i)=0$ 이며 , $i = 1,2,3, \dots$ 이다. 따라서 $n=4$ 인 경우 행렬 $[A]$ 는 다음과 같은 시스템행렬이 된다.

$$[A] = \begin{bmatrix} h(0) & 0 & 0 & 0 \\ h(1) & h(0) & 0 & 0 \\ h(2) & h(1) & h(0) & 0 \\ h(3) & h(2) & h(1) & h(0) \end{bmatrix} \quad (3.1.83)$$

위의 같은 행렬특징을 Toeplizs Matrix 라고 한다. 따라서 일반적인 시스템 행렬은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} h(0) & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ h(1) & h(0) & 0 & \cdots & 0 \\ h(2) & h(1) & h(0) & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ h(n) & h(n-1) & \cdots & h(1) & h(0) \end{bmatrix} \quad (3.1.84)$$

위와 같이 시스템의 행렬에는 Toeplizs 행렬의 모양을 갖춘다. 잡음제거용으로 SVD 기법 사용되는 시스템 행렬은 Toeplizs 변형하여 Hankel 행렬 만들어 사용한다. 시스템 행렬의 Hankel 행렬은 다음과 같이 표기된다.

$$\begin{bmatrix} h(0) & h(1) & h(2) & \cdots & h(n) \\ h(1) & h(2) & h(3) & \cdots & h(n-1) \\ h(2) & h(3) & h(4) & \cdots & h(n-2) \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ h(n) & h(n-1) & \cdots & h(1) & h(0) \end{bmatrix} \quad (3.1.85)$$

금속파편 탐지에 적용되는 원전 시스템의 입출력관계식은 다음의 식과 같이 표현 할 수 가 있다.

$$\begin{aligned} \{y\} &= [A] \{x\} & (3.1.86) \\ \{n \times 1\} &= [n \times n] \{n \times 1\} \end{aligned}$$

식(3.1.86) 에서 원자력 시스템에서 금속파편에 의한 충격력은 시스템의 입력 벡터 {x} 가 되면 가속도 신호는 출력 벡터 {y}가 된다. 따라서 출력 벡터 {y}을 시스템의 Toeplitz 행렬 혹은 Hankel 행렬로 만들어서 SVD 기법 (singular value decomposition)을 이용하여 배경잡음을 제거 할 수

있다. 문헌에 의하면 Hankel 행렬을 이용하는 것이 더 좋은 결과를 얻을 수 있으므로 본 연구에서는 Hankel 행렬을 이용하였다. SVD를 사용하는 이유는 시스템의 입력 벡터 $\{n \times 1\}$ 와 출력 벡터 $\{m \times 1\}$ 의 데이터 길이가 서로 다르면 시스템 행렬 $[A]$ 가 $n \times n$ 행렬이 안 되고 $n \times m$ 행렬이 된다. 이 경우 시스템 행렬의 고유치 (eigen value)를 구하기 위해서는 SVD를 이용해야한다. 만약 시스템행렬이 $n \times n$ 행렬이면 특이값 (singular value) 과 고유치 (eigen value) 가 같아진다. 배경잡음이 존재하면 출력 벡터 $\{y\}$ 에는 시스템의 정보와 입력 벡터 $x\{n\}$ 에 대한 정보 이외에 잡음에 의한 영향도 존재한다. 출력 벡터 $\{y\}$ 를 이용하여 Hankel 행렬을 만들면 신호에 의해서 시스템에 영향을 주는 부분과 잡음에 의해서 시스템에 영향을 주는 부분이 이 행렬에 존재하게 된다. 여기서 신호에 의해서 시스템에 영향을 주는 부분은 Hankel 행렬의 특이값이 크고, 잡음에 의해서 영향을 주는 부분은 Hankel 행렬의 특이값이 작다.

(나) 특이 값 분해(Singular Value Decomposition)

본 연구에서는 순수 신호와 백색 잡음이 존재하는 출력 신호 y 에 대하여 순수 신호 성분 \bar{y} 를 SVD 기법을 이용하여 찾는 방법에 대하여 연구 하였다. 신호와 잡음이 존재하는 LPMS신호를 다음과 같이 표현한다.

$$y = [y_0, y_1, \dots, y_{N-1}]^T \tag{3.1.87}$$

여기서 $y = \bar{y} + n$ 이며 \bar{y} 는 순수 신호이며 n 는 잡음이다. 이러한 신호에 대한 Hankel 행렬을 다음과 같이 표현 할 수 있다 [3.1].

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} y_0 & y_1 & \cdots & y_{M-1} \\ y_1 & y_2 & \cdots & y_M \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{L-1} & y_L & \cdots & y_{N-1} \end{bmatrix} \tag{3.1.88}$$

Hankel 행렬은 에너지 등급에 따라서 신호에 대한 Hankel 행렬과 잡음에 의한 Hankel 행렬으로 구성되어 다음과 같이 나눌 수 있다.

$$\mathbf{H} = \bar{\mathbf{H}} + \mathbf{N} \quad (3.1.89)$$

여기서 $\bar{\mathbf{H}}$ 는 순수 신호에 관계하는 행렬이고 \mathbf{N} 는 잡음에 관계하는 행렬이다. 각각은 신호 \bar{y} 와 잡음 n 에 대한 정보가 들어 있다. 출력 신호 $y(t)$ 에 에너지레벨이 높은 신호가 k 개 존재한다고 하면 행렬 \mathbf{H} 의 rank는 k 이다. 만약 $\mathbf{H} \in \mathbb{R}^{L \times M}$ 이고 $k = M$ 이면 \mathbf{H} 는 full rank를 가진다. 또한, $\mathbf{H} \in \mathbb{R}^{L \times M}$ 이고 $L > M$ 이면, 직교열 벡터를 가지는 $\mathbf{U} \in \mathbb{R}^{L \times M}$ 행렬과, $\mathbf{V} \in \mathbb{R}^{L \times M}$ 행렬이 존재하며 이때 행렬 \mathbf{H} 의 SVD는 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{H} = \mathbf{U} \Sigma \mathbf{V}^T \quad (3.1.90)$$

여기서 $\mathbf{U} = \mathbf{H}\mathbf{H}^T$, $\mathbf{V} = \mathbf{H}^T\mathbf{H}$, 이며 $\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_M)$ 의 대각선 행렬이다. 이때 σ 는 행렬 \mathbf{H} 의 특이값이며 $\sigma_1 \geq \sigma_2, \dots, \geq \sigma_M \geq 0$ 의 관계가 있다. 이들의 세트는 특이값 스펙트럼 (singular value spectrum)이라 불린다. 행렬 \mathbf{U} 와 \mathbf{V} 속의 각 열은 Left singular vector, Right singular vector이라 불린다. 출력 신호 $y(t)$ 속에는 신호성분과 잡음 성분이 내포되어 있으므로, 행렬 \mathbf{H} 의 SVD는 다음과 같이 subspace로 나누어 생각할 수가 있다.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_1 & \mathbf{U}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Sigma_1 & 0 \\ 0 & \Sigma_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1^T \\ \mathbf{V}_2^T \end{bmatrix} \quad (3.1.91)$$

여기서 $\mathbf{U}_1 \in \mathbb{R}^{L \times K}$, $\Sigma_1 \in \mathbb{R}^{K \times K}$, $\mathbf{V}_2 \in \mathbb{R}^{M \times K}$ 이다. 또한 신호에 관계된 행렬

\mathbf{H} 의 SVD는 다음과 같이 나눌 수 있다.

$$\bar{\mathbf{H}} = [\bar{\mathbf{U}}_1 \quad \bar{\mathbf{U}}_2] \begin{bmatrix} \bar{\Sigma}_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{V}}_1^T \\ \bar{\mathbf{V}}_2^T \end{bmatrix} \quad (3.1.92)$$

이 경우 다음의 특성을 가진다.

- ① 신호는 잡음에 대한 직교성이 있다 즉 $\bar{\mathbf{N}}^T \mathbf{N} = 0$ 이다.
- ② 잡음은 백색잡음이고, 이것의 행렬 \mathbf{N} 은 직교성의 열을 가진다. 각 열은 다음의 잡음 성분을 가진다. $\bar{\mathbf{N}}^T \mathbf{N} = \sigma^2_{noise} \mathbf{I}$
- ③ 특이행렬 $\bar{\Sigma}_1$ 의 가장 작은 특이값은 특이 행렬 $\bar{\Sigma}_2$ 의 가장 큰 값 보다 크다. 즉 행렬 $\bar{\mathbf{H}}$ 중에 특이값은 다음과 같이 표현 된다 $\sigma_k > \sigma_{k+1}$.

여기서 $\bar{\mathbf{H}}$ 을 구하면 에너지 레벨이 높은 신호에 대한 Hankel 행렬이 된다. 이것에 대한 방법은 표준편차를 최소화시키는 새로운 행렬 \mathbf{T} 를 찾는 작업이다. 즉 관계식은 다음과 같으며.

$$\min_{\mathbf{T} \in \mathbb{R}^{M \times M}} \|\mathbf{HT} - \bar{\mathbf{H}}\|_{LS, F}^2 \quad (3.1.93)$$

새로운 행렬 \mathbf{T} 는 다음과 같이 표시된다.

$$\mathbf{T} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \bar{\mathbf{H}} \quad (3.1.94)$$

최종적으로 신호성분이 높은 Hankel 행렬은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \mathbf{HT} &= \mathbf{H}(\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \bar{\mathbf{H}} \\ \mathbf{HT} &= \mathbf{U} \mathbf{U}^T \bar{\mathbf{H}} \\ &= \bar{\mathbf{H}} \end{aligned} \quad (3.1.95)$$

여기서 신호 y 는 식(3.1.80)와 같이 첫 번째 열이 되며 잡음 성분이 배제된 신호 성분이 높은 열이 된다. 이 방법은 신호가 비선형일 때 매우 유용하게 사용할 수가 있다.

(4) 웨이브렛 변환을 이용한 배경잡음제거

웨이브렛 변환은 기본적으로 시간에 따라서 급하게 변화하는 비정상 신호에 대한 정보를 보다 효율적으로 추출하기 위한 것으로 일반적인 푸리에 변환에서 얻는 정보보다 시간에 대한 신호의 변화 정보를 추가로 얻을 수가 있다. 웨이브렛은 두가지로 크게 분류하는데 연속 웨이브렛 변환과 이산 웨이브렛 변환으로 구분 할 수가 있다.

(가) 연속 웨이브렛

웨이브렛 변환은 일반적인 충격파 신호가 가지고 있는 특성을 잘 표현하기 위해 사용되는 방법으로 창문의 사이즈를 조정하여 고주파에서는 시간 분해능을 증가시키고, 저주파에서는 주파수 분해능을 증가시킨다. 연속 웨이브렛은 이산웨이브렛과 다르게 창문의 사이즈를 연속적으로 조정하여 함으로 분해능을 증가시킬 수는 있으나 계산시간이 많이 소요된다. 웨이브렛 변환에 대한 수학적 표현은 다음의 식과 같다.

$$CWT(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt = \int s(t) e^{-\left(\frac{t-b}{a}\right)^2 / \sigma^2} e^{j2\pi \frac{f_0}{a}(t-b)} dt \quad (3.1.96)$$

여기서 함수 $\Psi(t)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\Psi(t) = A e^{-\left(\frac{t-b}{a}\right)^2 / \sigma^2} e^{j2\pi \frac{f_0}{a}(t-b)} \quad (3.1.97)$$

함수 $\Psi(t)$ 의 envelop은 창문사이가 된다. 창문사이즈는 a 라는 스케일링 값으로 조정한다. 이 창문 사이즈안에 삼각함수를 곱한 것으로 나타나 웨이브렛을 형성한다. 일반적으로 $\Psi(t)$ 를 모 웨이브렛 (Mother Wavelet) 이라 한다. 이 모 웨이브렛은 스케일링 요소 (Scaling Factor) a 와 이동 요소

소 (Shift Factor) b 에 의해서 조정된다. 이때 a 는 주파수와 역으로 관계가 있으며 b 는 시간축의 이동에 관계한다.

그림 3.1.10 은 여러 단계의 a 값에 대한 창문 사이즈를 표현한 것으로 각 모 웨이브렛의 위치하는 주파수에서 파형이 변화함을 보여준다.

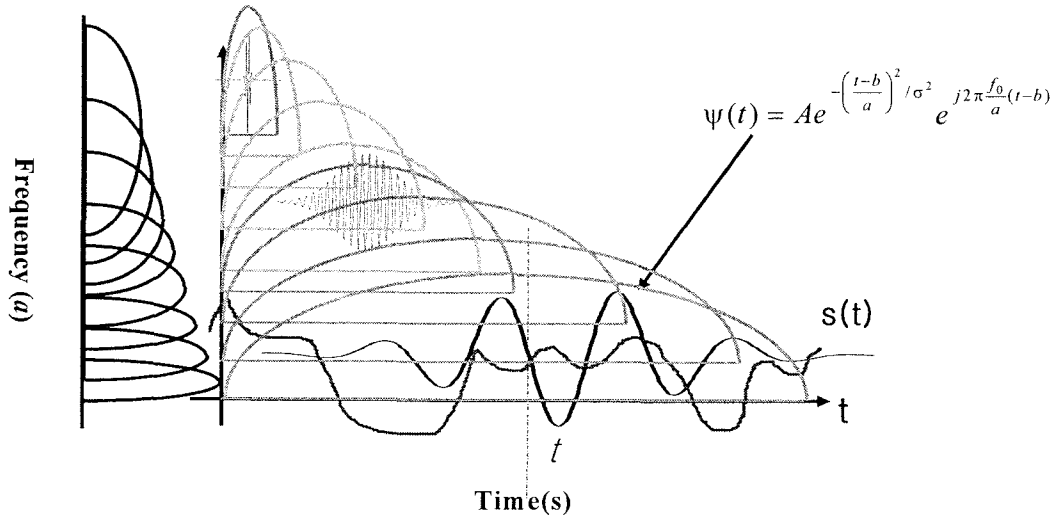


그림 3.1.10 Wavelet Transform의 창문 변경방법에 대한 설명

(나) 이산 웨이브렛

이산 웨이브렛은 이산신호를 가지고 처리하는 것은 연속 웨이브렛과 동일하다. 이산웨이브렛의 과정은 모 웨이브렛을 스케일링 요소 (Scaling Factor) a 와 시간 이동요소 b 에 의해서 조정되면서 이동하는 것도 동일하다. 그러나 이동 값이 연속적으로 되지 않고 2^n 으로 이동한다. 여기서 $n = 1, 2, 3, \dots$ 이다. 이것에 대한 수학적 표현은 식(3.1.98) 과 같다.

$$W_{j,k}(t) = a_0^{-j/2} \psi(a_0^{-j}t - kb_0) \quad (3.1.98)$$

여기서 a_0 와 b_0 는 2가 된다. 그리고 $j=1,2,3, \dots$, $k=1,2,3, \dots$ 가 된다. 따라서 모 웨이브렛은 그림 3.1.11 에서 보여주는 사각공간으로 이산적 (discrete) 으로 이동된다. 그러므로 이것을 이산 웨이브렛 (discrete wavelet) 이라 한다.

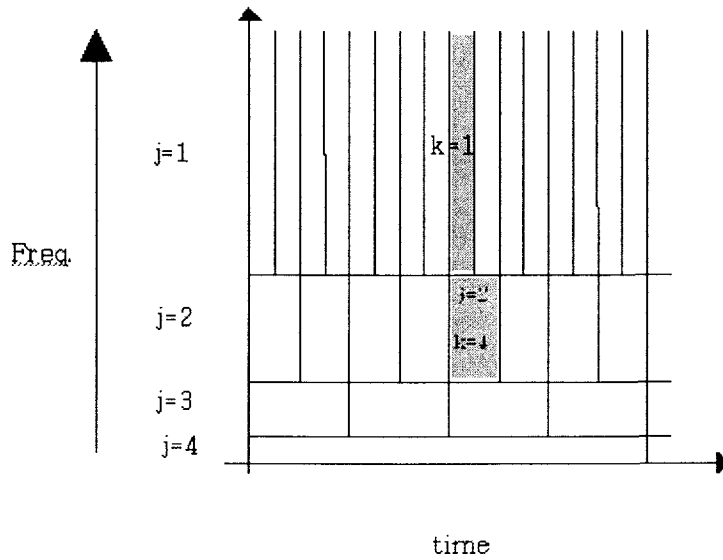


그림 3.1.11 Wavelet Tranform의 창문 변경방법에 대한 설명

(다) 웨이브렛 이용 배경잡음 특징

이산웨이브렛 변환의 수학적 표현은 식(3.1.98)으로 표현되지만 실제 연산 과정은 j 레벨에서 신호 $x(t)$ 와 모 웨이브렛 $\Psi(t)$ 함수와의 승적(convolution)으로 계산 할 수도 있다. 이것이 이산 웨이브렛 변환을 다른 관점에서 개발된 웨이브렛 변환의 다분해능 웨이브렛 분석 이론(multiresolution wavelet decomposition)이다. 따라서 j 레벨에서의 출력 $y[n]$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 y[n] &= x[n] * g[n] \\
 &= \sum_k x[k]g[n-k]
 \end{aligned}
 \tag{3.1.99}$$

이때 $g(n)$ 은 고주파필터 (high pass filter) 의 충격응답함수 (impulse response) 이며 이것은 모 웨이브렛 $\Psi(t)$ 와 관계가 있다. 다분해능 이론은 j 레벨에서 고주파저필터와 충격응답함수의 승적한 결과를 신호 $x[n]$ 의 상세 (details)이라 한다. 또한 동일한 레벨에서 신호 $x[n]$ 을 저주파 필터 (low pass filter) 의 충격응답함수와 승적한 것을 신호 $x[n]$ 의 근사

(approximation)라 한다. 이 경우 저주파 필터의 충격응답함수는 $h[n]$ 는 고주파 충격응답함수 $g[n]$ 과 다음의 식으로 관계한다.

$$h[N-1-n] = (-1)^n g[n] \quad (3.1.100)$$

따라서 저주파 필터링 이후에 얻어지는 결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} y[n] &= x[n] * h[n] \\ &= \sum_k x[k] h[n-k] \end{aligned} \quad (3.1.101)$$

이때 저주파 필터의 충격응답함수 $h[n]$ 은 스케일함수 (scaling function) $\phi(t)$ 에 관계한다. 이것은 또한 모 웨이브렛 $\Psi(t)$ 를 만드는데 기초가 된다. 따라서 이것을 부 웨이브렛 (father wavelet) 이라고도 불린다.

다분해능에 사용되는 모함수의 종류는 다양하지만 일반적으로 그림 3.1.12에서 보여주는 Haar Wavelet (db2)가 기본이며 이것의 가족 (family)인 db4, db8, db16,.. 등 다양하게 존재한다. 그림 3.1.12 (a)은 기본 스케일함수 $\phi(t)$ 을 이용하여 db2의 모함수를 만드는 과정이다. 그림3.1.12(b)는 스케일 함수가 어떻게 일반적인 신호와 관계하는가를 나타내는 그림이다. 이러한 스케일함수의 다양한 변형은 다양한 모함수를 만든다. 그림3.1.13 및 그림3.1.14는 스케일 함수와 이것을 이용하여 제작된 모함수 db4와 db40을 나타낸다. 이때의 스케일 함수 $\phi(t)$ 는 저주파 필터에 관계하며, 모 웨이브렛은 고주파 필터에 관계한다. 분해능 웨이브렛 분석 기법은 매 단계마다 스케일 함수에 의한 저주파 필터링 및 모 웨이브렛에 의한 고주파필터링을 하면서 신호 $x[n]$ 을 근사신호 (approximation) 및 상세신호(details)로 분해한다. 이 과정이 그림3.1.15에 나타나 있다. 여기서 신호의 개수가 $2N$ 이면 $j=N$ 개의 단계를 만들 수가 있다. 또한 매 단계마다 고주파 필터링을 하고 나면, 나머지 신호에는 고주파성분이 없으므로 하향 샘플 (down sampling) 실행한다. 따라서 이러한 과정을 수학적으로 표현하면 다음의 수식이 된다.

$$y_{high}[k] = \sum_n x[n] \cdot g[2k-n] \quad (3.1.102)$$

$$y_{low}[k] = \sum_n x[n] \cdot h[2k - n] \quad (3.1.103)$$

일반적으로 신호 $x[n]$ 에는 대부분 고주파성분의 잡음이 많으므로 저주파 신호는 나중에 근사 (approximation) 신호만을 재구성하면 신호 $x[n]$ 은 잡음이 제거된 모습으로 나타난다. 잡음이 제거되지 않고 전체 신호를 재구성하는 수학적 표현은 다음과 같다.

$$x[n] = \sum y_{high}[k] \cdot g[2k - n] + y_{low}[k] \cdot h[2k - n] \quad (3.1.104)$$

이 결과를 스케일 함수와 모함수로 표시하면 아래와 같다.

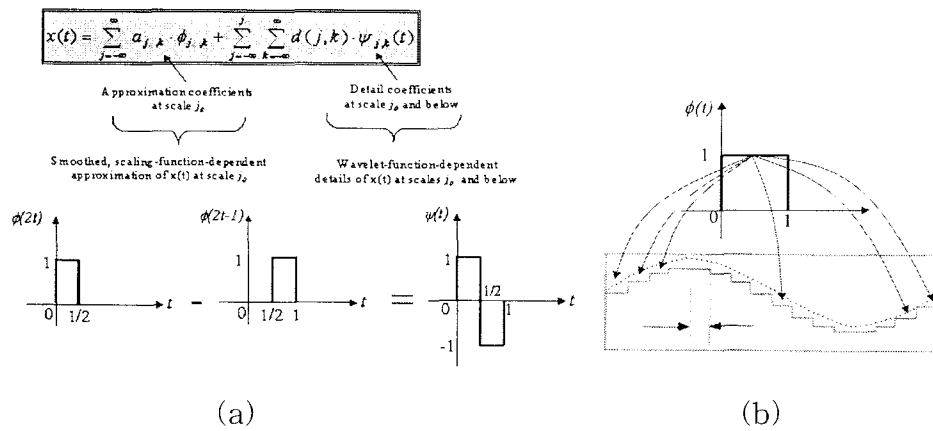


그림 3.1.12 스케일링 함수와 모 웨이브렛의 관계: (a) db2를 제작하는 스케일링 함수 (b) 실제 sine 신호에 관계하는 스케일링 함수

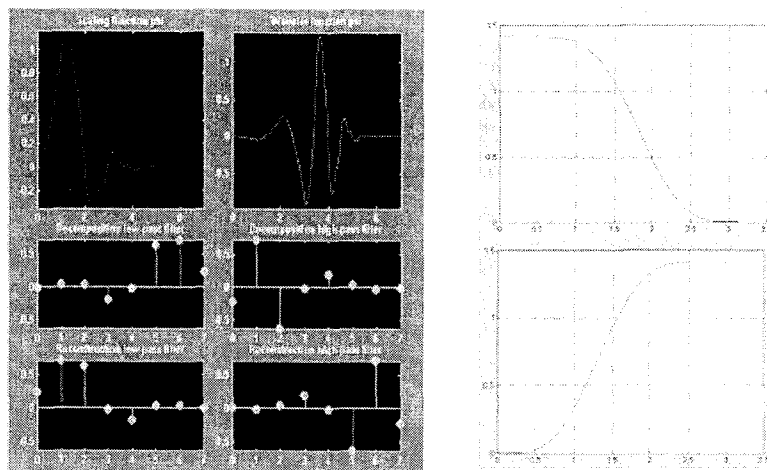


그림 3.1.13 db4의 스케일링 함수와 모 웨이브렛 및 각각에 해당하는 저주파대역통과 필터 및 고주파대역통과 필터

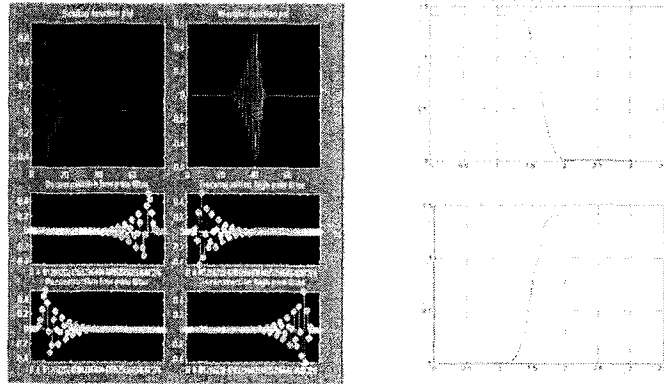


그림 3.1.14 db40의 스케일링 함수와 모 웨이브렛 및 각각에 해당하는 저주파대역통과 필터 및 고주파대역통과 필터

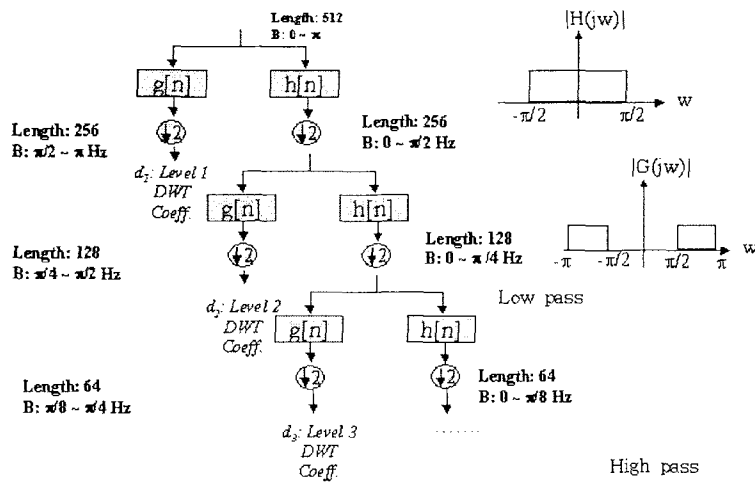


그림 3.1.15 다 분해능 웨이브렛 분석 기술에 대한 그림적인 설명

결론적으로 이산 웨이브렛을 이용한 잡음 제거 기술은 $fs/2$ ($j=1$), $fs/4$ ($j=2$), $fs/8$ ($J=3$).....등의 단계에서 저주파 및 고주파 필터링을 실행하면서 잡음을 제거한다. 신호가 저주파에 있고 잡음이 고주파에만 있으면 상세신호 (details)를 제거하여 근사 신호만 재구성하여도 실제 신호와 거의 동일하여 아주 좋은 결과를 얻는다. 혹은 그 역도 매우 좋은 결과를 얻을 수가 있다. 하지만 잡음 주파수와 신호 주파수가 거의 일치하게 있으면 좋은 결과를 얻기가 어렵다. 하지만 모 웨이브렛의 선택에 따라서 저주파 및 고주파 필터의 모양이 다르므로 이 경우에도 좋은 결과를 얻을 수가 있다. 웨

이브렛 기술을 이용하여 얻을 수가 있는 가정 좋은 신호는 그림 3.1.16과 같이 저주파 신호에 고주파 잡음이 존재하는 경우이다.

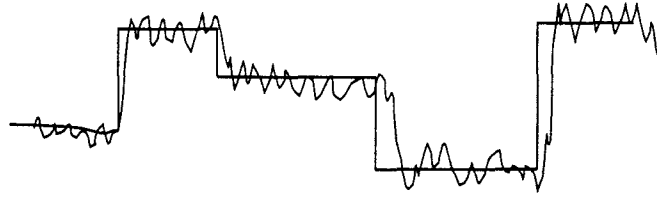


그림 3.1.16 다분해능 웨이브렛 분석 기술이용 잡음제거에 가장 좋은 신호

나. 비정상상태 신호분석 기법

(1) STFT(Short Time fourier Transfor) 기법

STFT의 수학적 표현은 다음과 같다.

$$S(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h^*(\tau - t) s(\tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (3.1.105)$$

그림 3.1.17은 이 수식에 대한 그림적 표현이다. 여기서 검은색으로 표현된 부분이 푸리에 변환을 위한 짧은 구간의 창문으로서 함수 $h(t)$ 로서 표현된다. 창문의 폭은 Δt 이며 창문의 형태 (shape)는 다양하게 있다. 이 경우 일반적으로 해닝 창문 (Hanning Window)을 사용한다. 이러한 창문은 $t=0$ 부터 시작하여 $t=t_{\max}$ 까지 이동한다. 이때 창문을 Overlap 하는 경우가 있으며 일반적으로 50% Overlap하여 사용한다.

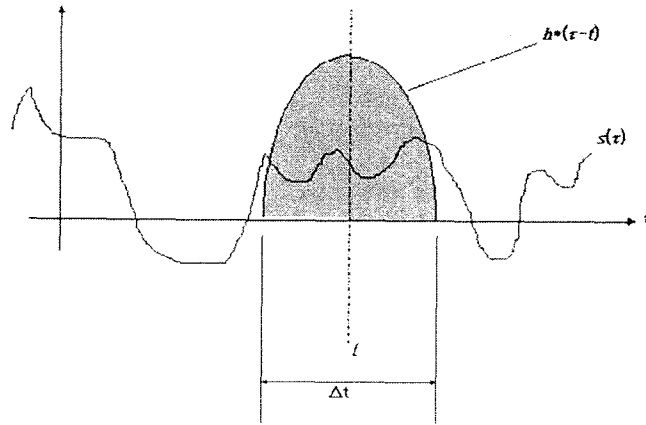


그림 3.1.17 STFT 창문함수

따라서 $S(t, f)$ 는 시간과 주파수 축에 대한 2차원 배열이 되며 창문의 사이즈에 따라서 시간분해능 (Time Resolution)이 결정된다. 시간의 분해능을 증가시키기 위해서는 창문의 사이즈를 축소하면 된다. 이 경우 불확실성의 원리에 의해서 이 창문 속에 있는 데이터에 대한 푸리에변환을 취한 값들의 주파수 분해능이 나쁘게 된다. 그림 3.1.18는 Garbor가 제시한 STFT에 대한 시간-주파수 분해능이며, 그림 3.1.19은 일반적인 STFT의 시간-주파수 분해능이다. Garbor의 방법은 시간분해능 및 주파수 분해능이 동일하도록 창문을 선정했으며, 일반적인 STFT는 다음의 불확실성 법칙 (Uncertainty Principle)에 따라서 창문의 사이즈를 자유롭게 조정할 경우이다.

$$\Delta t \cdot \Delta \omega \geq 1/2$$

즉 Garbor의 방법은 시간-주파수 분해능을 고정하였으므로 신호에 따라서 시간 분해능, 주파수 분해능을 조정할 수가 없다. 일반적인 STFT는 분해능 조정이 가능하다. 그러나 이 방법도 불확실성의 원리에 의해서 시간의 분해능을 증가시키면 주파수의 분해능이 감소한다.

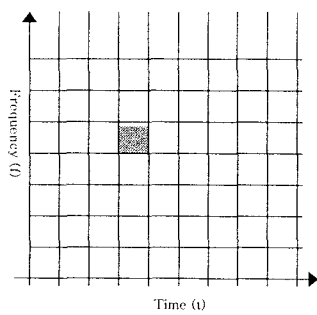


그림 3.1.18 Garbor 타입 분해능

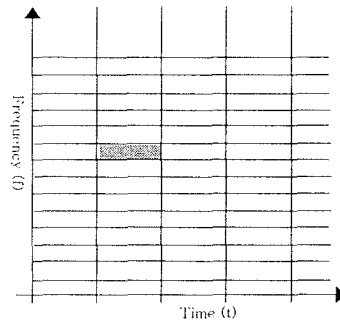


그림 3.1.19 일반적인 분해능

그림 3.1.20은 이것에 대한 설명으로 앞에서 제시된 4개의 충격파에 2개의 순수 sine 신호가 추가된 신호 $s(t)$ 에 대한 STFT 결과이다. 이때 사용된 창문의 사이즈에 따라 여러 가지 다른 표현을 볼 수가 있다. 그림 3.1.20(a)는 신호 시간 분해능이 나쁘지만 주파수 분해능은 우수하여 주파수의 구별을 명확히 이해 할 수 있다. 그러나 충격파가 발생하는 시작점을 정확히 찾을 수가 없다. 반면에 시간의 분해능을 증가하기 위해서 창문의 사이즈를 줄이면 그림 3.1.20(d)처럼 시간의 분해능은 증가하지만 주파수 분해능이 나빠진다. 따라서 STFT 방법은 시간-주파수 분해능의 조정이 한번 결정되면 변경 할 수가 없게되는 단점이 있다.

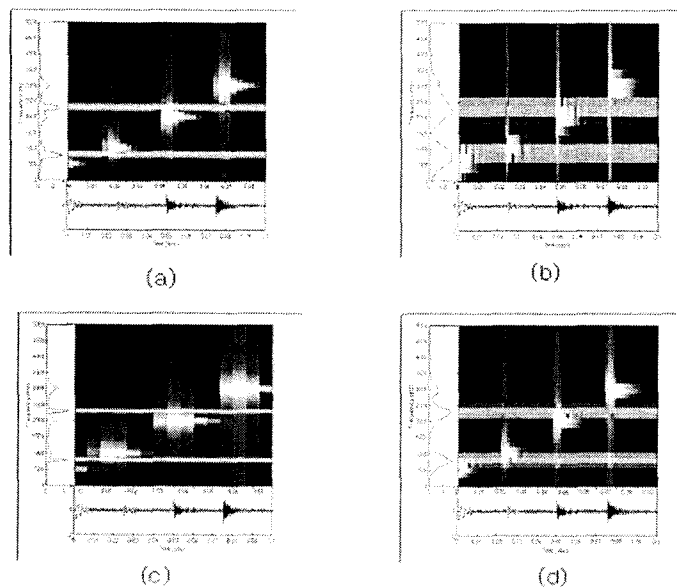


그림 3.1.20 창문사이즈에 따른 STFT결과 비교

(2) WT(Wavelet Transform)

웨이브렛 변환은 일반적인 충격파 신호가 가지고 있는 특성을 잘 표현하기 위해 사용되는 방법으로 창문의 사이즈를 조정하여 고주파에서는 시간 분해능을 증가시키고, 저주파에서는 주파수 분해능을 증가시킨다. 일반적으로 원자력 발전설비처럼 복잡한 기계류의 결함은 회전체의 회전성분과 결함성분으로 섞여 있으므로 회전 주파수를 나타내는 저주파 성분과 결함을 나타내는 충격파 성분을 동시에 잘 표현 할 수 있어야한다. 웨이브렛 변환에 대한 수학적 표현은 다음의 식과 같다.

$$CWT(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt = \int s(t) e^{-\left(\frac{t-b}{a}\right)^2 / \sigma^2} e^{j2\pi \frac{f_0}{a}(t-b)} dt \quad (3.1.106)$$

여기서 함수 $\Psi(t)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\psi(t) = A e^{-\left(\frac{t-b}{a}\right)^2 / \sigma^2} e^{j2\pi \frac{f_0}{a}(t-b)} \quad (3.1.107)$$

함수 $\Psi(t)$ 의 envelop는 STFT에서의 $h(t)$ 에 해당하며 $\Psi(t)$ 의 파형은 지수 함수와 sine함수를 곱한 것으로 나타나 웨이브렛을 형성한다. 일반적으로 $\Psi(t)$ 를 Mother Wavelet이라 한다. 이 Mother wavelet은 Scaling Factor a 와 Shift Factor b 에 의해서 조정된다. 이때 a 는 주파수와 역으로 관계가 있으며 b 는 시간축의 이동에 관계한다.

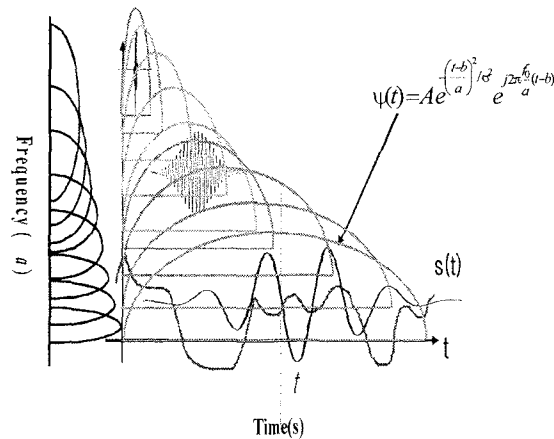


그림 3.1.21 WT 창문함수

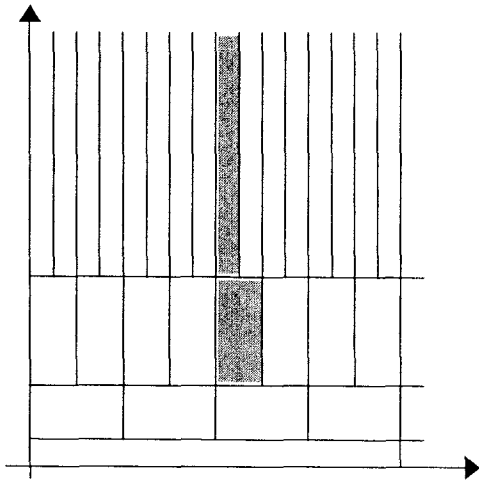


그림 3.1.22 WT의 분해능

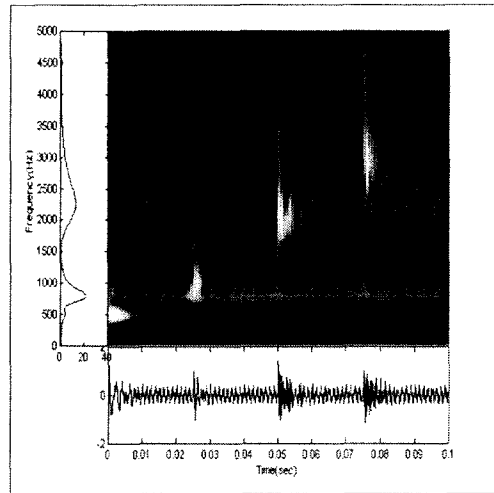


그림 3.1.23 인공신호에 대한 WT결과

그림 3.1.22은 여러 단계의 a 값에 대한 창문 크기를 표현한 것으로 각 Mother Wavelet이 위치하는 주파수에서 파형이 변화함을 보여준다. 이러한 원칙 하에 웨이브렛 변환에 의한 시간-주파수 분해능을 그림으로 표현하면 그림 3.1.22와 같이 불확실성의 원칙은 따르면서도 시간-주파수 분해능을 주파수별로 조정이 가능하다. 그림 3.1.23에 소개된 신호에 대한 웨이브렛 변환은 그림 3.1.23과 같이 표현된다. 이 그림에서 충격파가 발생하는 시간은 주파수 분해능이 우수함으로 정확히 탐지된다. 또한 2개의 sine파형에 대해서도 저주파에서는 발생 주파수를 정확히 탐지된다 이것은 저주파에서 주파수 분해능이 우수하고 고주파에서는 시간 분해능이 우수하기 때문이다. 그러나 고주파에 있는 sine파형에 대한 주파수 분해능은 감소하여 주파수의 정확한 탐지가 어렵다. 웨이브렛의 이러한 결점을 보완하기 위해서 스파이크 웨이브렛이 개발되었다. 이 스파이크 웨이브렛은 향후 원자력 발전소 결함 진단에 사용될 수 있다.

(3) WD(Wigner Distribution) 기법

앞에서 논의된 푸리에변환은 무한대 시간의 창문을 이용하며, STFT 그리고 웨이브렛 변환은 주어진 짧은 구간의 창문을 이용하였다. 여기에 사용된 신호는 원래 신호 $s(t)$ 를 이용한다. 그러나 백색 잡음 속에 충격파

신호 가 묻혀 있다면 푸리에 변환을 통하여 이 충격파 신호에 포함된 주파수 성분을 명확히 찾아내기는 어렵다. 이 경우에 주로 사용되는 방법으로 자기상관함수(auto correlation)의 푸리에 변환이다. 신호 $s(t)$ 의 자기상관함수의 푸리에 변환을 주파수 스펙트라 (frequency spectra)라 불린다. 유사하게 비 정상상태의 충격파 신호가 백색 잡음 속에 숨겨져 있다면, 이 신호 $s(t)$ 에 대한 순간자기 상관 함수 (instantaneous auto correlation)의 푸리에 변환을 이용한다면, 비 정상상태의 충격파 신호도 보다 명확히 찾을 수 있다. 이것을 수학적으로 표현하면 다음 식과 같다.

$$W(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} s\left(t + \frac{\tau}{2}\right) s^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (3.1.108)$$

이 관계식을 위그너분포(Wigner distribution)라 불린다. 이 방법을 전자신호처리학회 빌(Vill) 이 소개함으로써 위그너-빌 분포의 함수가 널리 사용하게 되었다. 여기에 사용되는 창문은 일반 푸리에 변환과 같이 무한대 시간이다. 그러나 실제로 컴퓨터를 이용하여 위그너 분포를 구하려면 무한대의 창문을 사용할 수 없으므로 STFT처럼 짧은 구간의 창문을 이용한다. 이러한 창문 $h(t)$ 을 이용한 위그너 분포를 가상 위그너분포 (pseudo Wigner distribution)이라 불린다. 따라서 가상 위그너 분포는 다음과 같이 표현된다.

$$W_{pw}(t, f) = \int_{-T_w}^{T_w} s\left(t + \frac{\tau}{2}\right) s^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) h\left(\frac{\tau}{2}\right) h^*\left(-\frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (3.1.109)$$

여기서 T_w 가 창문의 크기이다. 이 경우에 시간 분해능은 창문의 이동이, STFT 혹은 웨이브렛 변환처럼 창문 크기 혹은 시간이동 factor b 만큼 이동하지 않고, 연속적으로 모든 데이터에 대해서 이루어지므로 시간 분해능이 완벽하다. 그러나 주파수분해능은 창문의 크기에 따라서 영향을 받는다. 그림 3.1.24는 이것에 대한 설명으로 창문의 크기를 그림 3.1.24(a)로부터 그림 3.1.24(d)까지 점차 증가시키면서 주파수 분해능이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이 방법의 경우 창문의 크기만 증가하면 시간-주파수 분해능이 동시에 증가함으로 비 정상상태의 신호를 보다 정확히 표현할 수 있다. 그러나 이 방법의 문제는 신호 $s(t)$ 에 대한 변환이 아니

고 $s(t)$ 의 곱으로 나타나는 자기상관 함수의 변환을 이용함으로, 만약 신호 $s(t)$ 가 두 개의 신호 (예제: 두 개 이상의 sine 신호 혹은 두 개 이상의 충격파) 항으로 이루어져 있다면 간섭항(cross)이 나타난다. 이러한 간섭항은 원래 신호에 대한 혼선을 불러일으킨다. 이러한 혼선을 방지하기 위해서 간섭항을 제거하기 위한 Kernel이 필요하다[3.2]. Kernel은 신호의 형태에 따라서 다양한 형상을 가진다. 따라서 Kernel을 이용한 위그너 분포를 Cohen이 처음 발견하였으므로 일반적으로 Cohen 분류의 이중선형변환 (Bilinear Time Frequency Transform) 이라 불린다 [3.3]. 이것의 수학적 표현은 다음과 같다.

$$S_c(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\xi, \tau) s(u + \frac{\tau}{2}) s^*(u - \frac{\tau}{2}) e^{-j2\pi(\xi + f\tau - \xi u)} d\xi d\tau du \quad (3.1.110)$$

여기서 $\Phi(\xi, \tau)$ 를 Kernel 함수라 불린다. 결론적으로 위그너 분포를 이용한 비정상상태의 신호를 성공적으로 완성하려면 이 Kernel함수의 바른 선택과 새로운 Kernel 함수의 설계에 달려있다.

Kernel 함수의 설계는 Ambiguity 영역에서 완성된다. Ambiguity 영역은 위그너 분포의 이중 역 푸리에 변환을 통하여 이루어진다. 이것을 도식적으로 표현하면 그림 3.1.25와 같다. 그림 3.1.25에서 위그너 분포의 영역을 $W(t, f)$ 라 표현하면, Ambiguity 영역은 $A(\xi, \tau)$ 로 표현된다. 그리고 $R(t, \tau)$ 는 자기 상관 함수이다. Kernel 설계방법으로서는 먼저 신호에 대한 위그너 분포를 구하면 그림 3.1.24에서와 같이 많은 간섭항이 나타난다. 이러한 간섭항을 제거하기 위해서는 그림 3.1.25에서와 같이 위그너 분포를 이중 역 푸리에 변환을 시도하여 신호에 대한 Ambiguity함수를 구한다. 그림 3.1.27은 신호에 대한 Ambiguity함수를 나타낸다. Ambiguity 함수의 특징은 그림 3.1.27에서 보여 주듯이 간섭항은 원점을 기준으로 떨어져 있으며 원래 신호항들은 원점의 주변에 모여서 큰 값들을 이룬다. 이러한 이유는 위그너 분포상에서 간섭항들은 원래 sine 성분을 가진 파형이지만 신호항들은 DC값을 가진 성분들이다. 따라서 Ambiguity 함수는 이들의 푸리에 변환이므로 원점에 DC성분들이 모이고 원점에서 벗어나면 간섭항이 된다. 여기에 신호항만을 강조하기 위해서 Kernel을 곱하면 간섭항은 축소되고 신호항만은 증가한다. 신호항을 강조하기 위한 Kernel은 매우 다양한

데 그림 3.1.26은 Exponential Kernel로서 원점에서 1을 가지고 지수함수로 2차원적으로 감소하는 함수가 된다. 이 kernel 함수는 다음과 같이 표현된다.

$$\Phi(\xi, \tau) = e^{-\xi^2\tau^2/\sigma} \quad (3.1.108)$$

Ambiguity 함수에 Kernel이 곱해진 함수를 Weighted Ambiguity 함수라 불리면 이것을 다시 이중 푸리에 변환을 하면 Weighted 위그너 분포가 된다. 그림 3.1.28은 그림 3.1.24(d)에 있는 신호에 대한 weighted 위그너 분포를 나타낸다. 여기서 우리는 매우 좋은 시간 및 주파수 분해능을 가지며 간섭항도 사라진 시간-주파수분석 결과를 볼 수 있다.

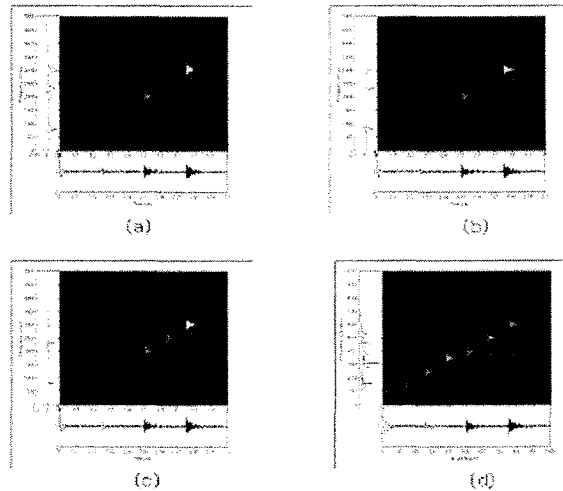


그림 3.1.24 인공신호에 대한 창문사이즈 변경에 대한 위그너 분포

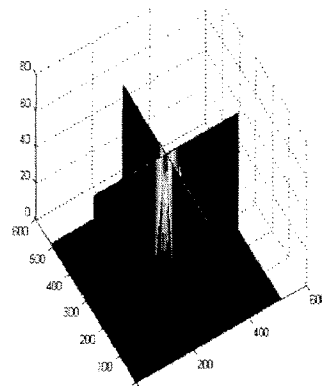
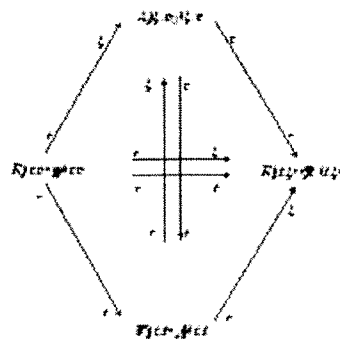


그림3.1.25 위그너분포, Ambiguity 함수 그림3.1.26 Exponential Kernel

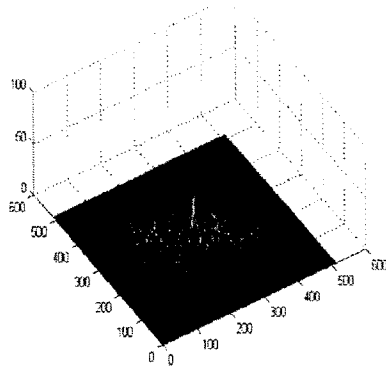


그림 3.1.27 Ambiguity 함수

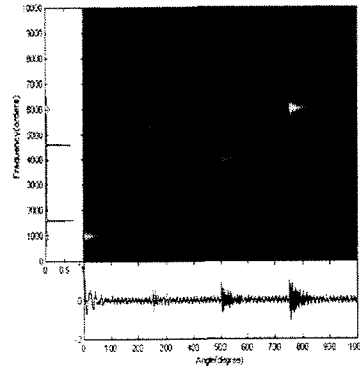


그림 3.1.28 Weighted 위그너 분포

2. 연구 수행 내용

가. 배경잡음 감소를 위한 신기법 개발 및 현장신호 적용 분석

(1) 스펙트럼 감산법과 적응필터를 적용한 배경잡음 감소 분석

본 연구에서는 여러 가지 기법들에 대해 컴퓨터 프로그래밍을 하여 시뮬레이션을 하고 실제 원전 신호를 적용하여 잡음제거의 효과를 비교하였다. 잡음중에서도 백색잡음을 제거하는 것은 많이 힘들고 어려운 과제이다. 먼저 7000Hz에서 2800Hz까지 변조신호에 백색잡음을 추가하여 잡음제거의 효과를 비교해 보았다.

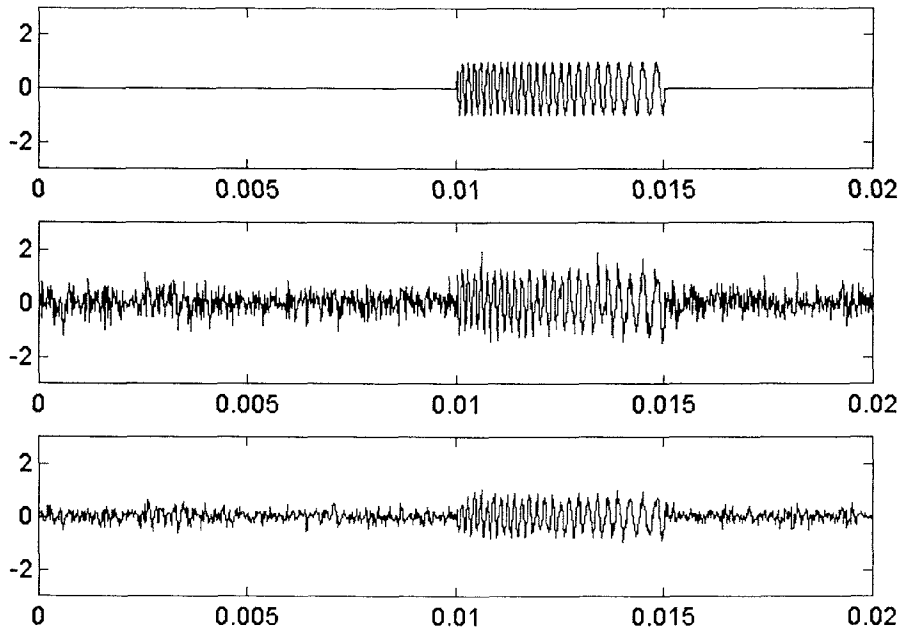
먼저 잡음이 35%일때 스펙트럼 감산법을 적용해 보면, 그림3.1.29 A 의 상단은 잡음이 없을 때의 7000Hz에서 2800Hz까지 변조신호이고, 중간그림은 잡음이 포함된 신호이고 세 번째 그림은 잡음이 스펙트럼 감산법으로 제거된 그림이다. 그림3.1.29 B 는 스펙트럼 분석이다. (a),(b)는 원신호와 스펙트럼 분석이고, (c),(d)는 잡음이고, (e),(f) 는 두개의 신호가 섞였을 때이고, (g),(h)는 잡음이 제거된 후의 신호와 스펙트럼 분석이다. 원신호의 스펙트럼분석인 (b) 와 잡음이 제거된 신호의 스펙트럼 분석(h)에서 잡음의 제거된 정도를 알 수 있다. 그림 3.1.30 은 LMS 알고리즘을 이용한 ALE기법이다. 여기서 그림 3.1.30 A의 첫 번째는 잡음이 포함된 신호이고 두 번째는 오차신호이고 세 번째는 필터를 통과한 후의 찾고자 하는 신호이다. 그림 3.1.30 B 는 스펙트럼 분석이다. 그림 3.1.29 B 의 (h)와 그림

3.1.30 B 의 (h)를 비교해 볼 때 LMS기법이 좀 더 원신호의 스펙트럼 분석에 더욱 더 가까움을 알 수 있고, 또한 잡음제거된 신호인 각 그림 A 의 세 번째 그림을 보면 육안으로도 잡음이 훨씬 제거되었음을 알 수 있다. 다음 그림 3.1.31와 그림 3.1.32은 각각 NLMS 기법과 SMNLMS 기법을 이용한 그림들이다. 각각의 잡음이 제거된 스펙트럼 분석 (h)를 비교해 보면 갈수록 잡음이 많이 제거되어짐을 알 수 있다.

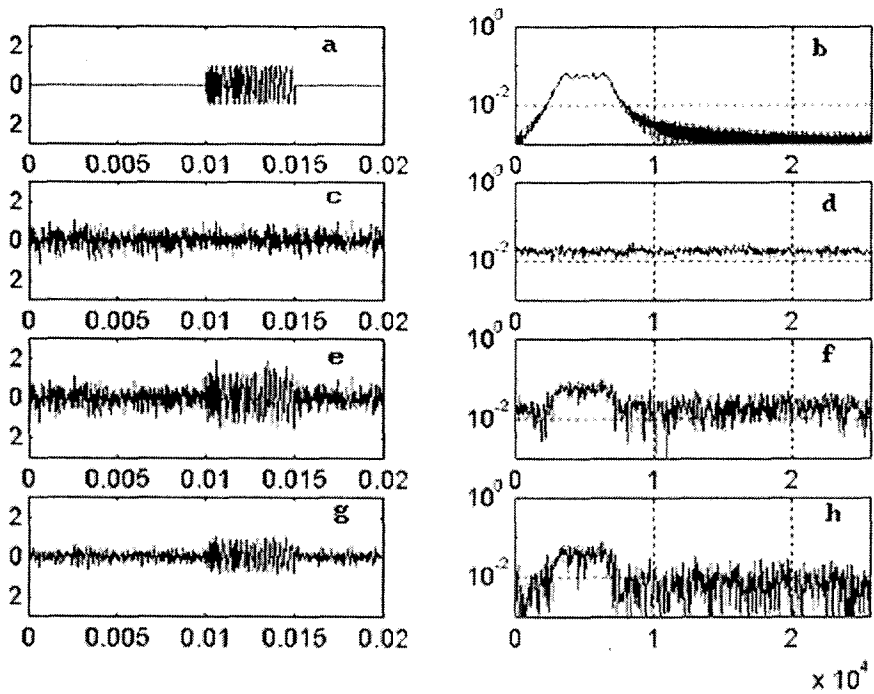
앞의 그림 3.1.29에서 그림 3.1.32은 크기가 일정한 변조신호에 대한 시뮬레이션이다. 하지만 원전신호는 실제 크기가 감소하는 신호이므로 더욱 원전신호에 접근하기 위해서 크기가 exponential 하게 감소하는 신호에 대해서 분석해 보았다.

그림 3.1.33에서 그림 3.1.34는 크기가 감소하고 주파수 또한 작아지는 신호에 대한 시뮬레이션이다. 이와 같은 신호는 더욱 더 실제신호에 접근한다. 앞의 예와 마찬가지로 잡음이 제거된 신호의 스펙트럼을 분석하여 잡음제거기법을 서로 비교해 보았다.

스펙트럼 감산법 $\alpha=0.35$

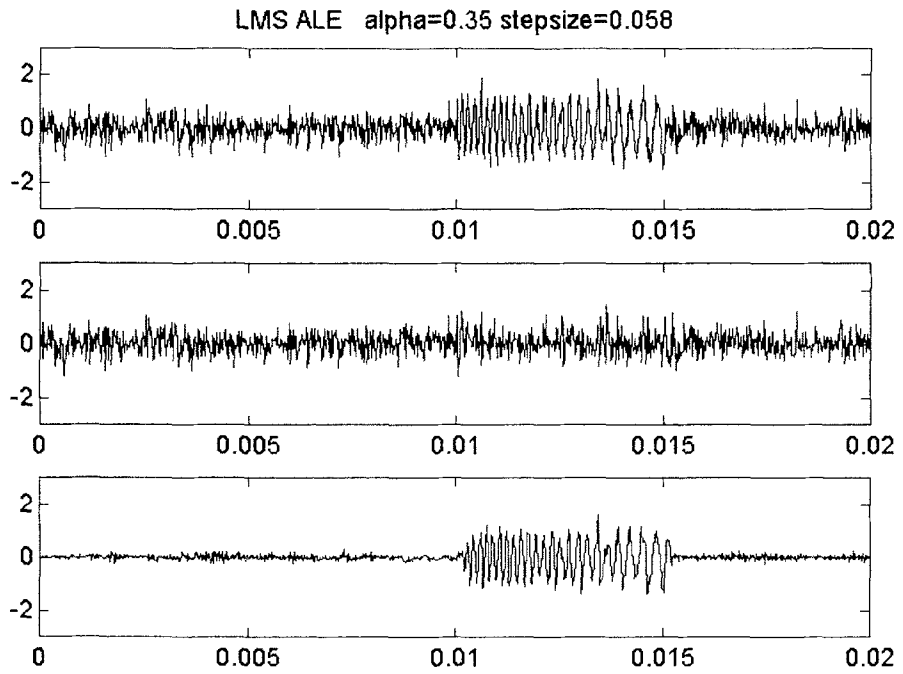


(a)잡음 35%

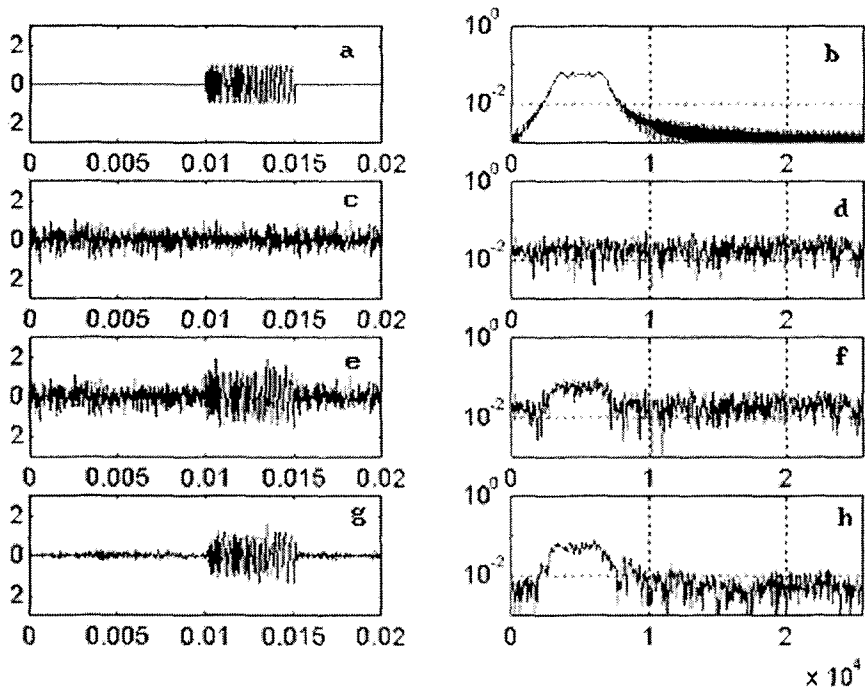


(b)잡음 35%

그림 3.1.29 스펙트럼 감산법 적용 결과

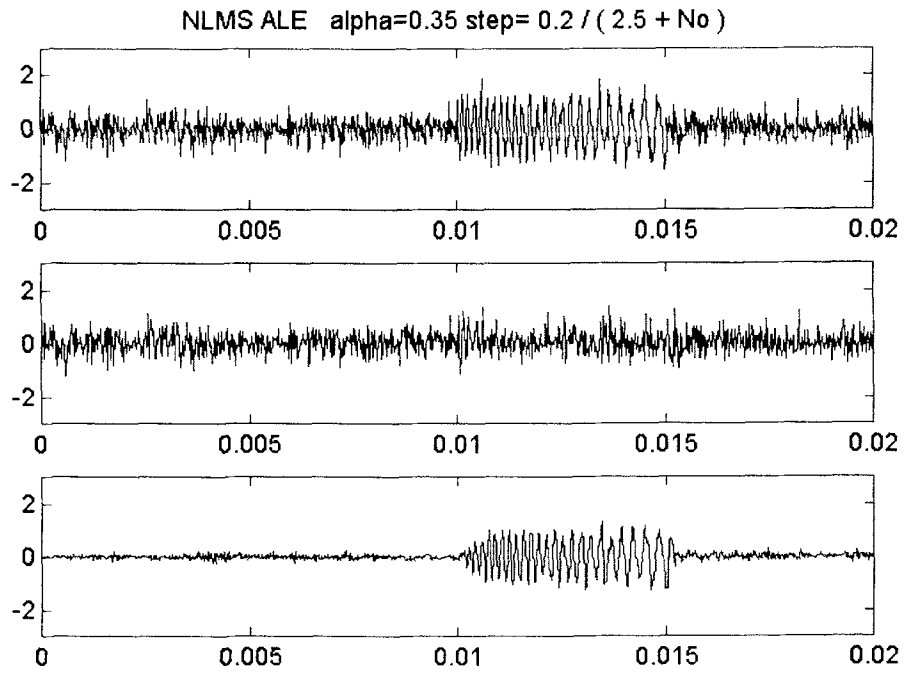


(b) 잡음 35%

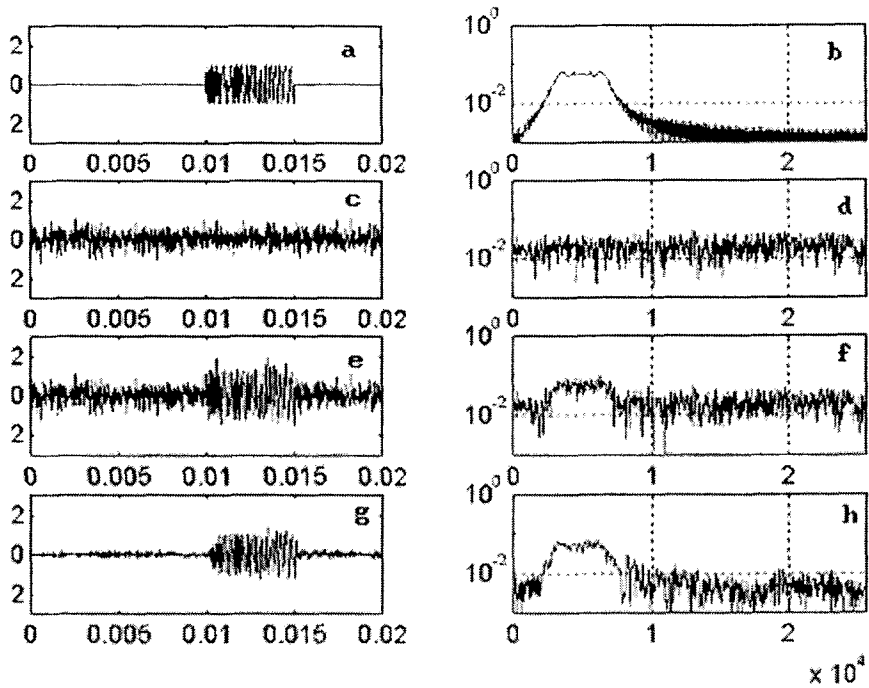


(b) 잡음 35%

그림 3.1.30 LMS를 이용한 ALE 기법 적용 결과

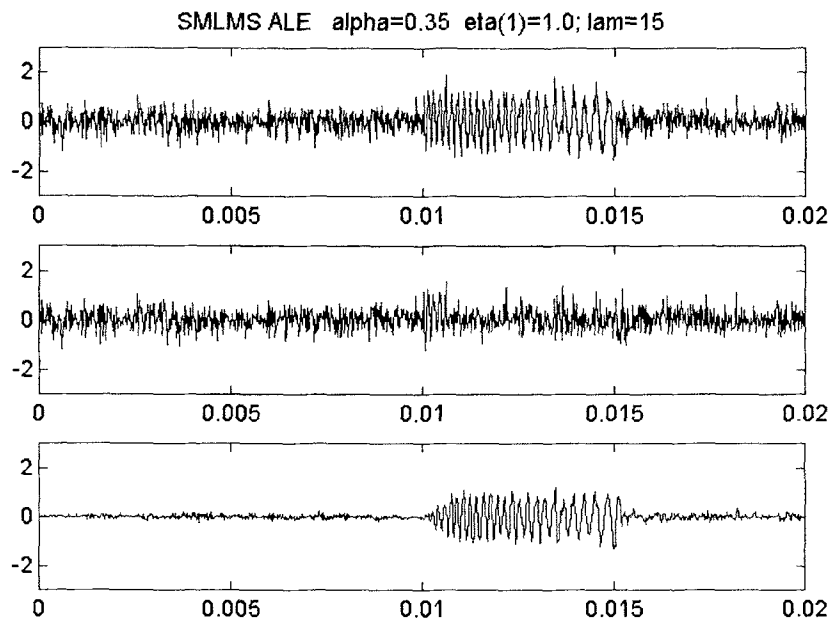


(a) 잡음 35%

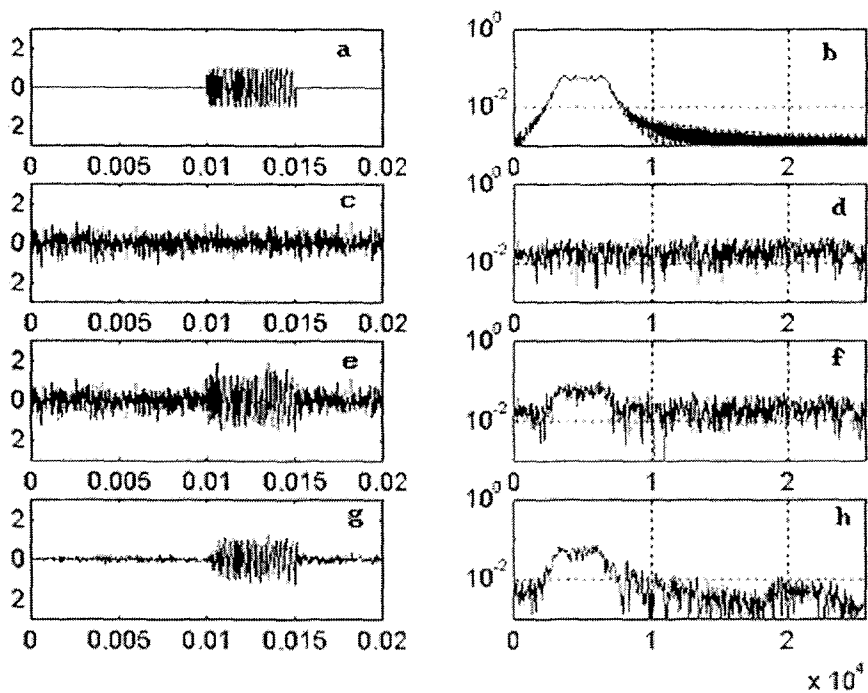


(b) 잡음 35%

그림 3.1.31 NLMS를 이용한 ALE기법 적용 결과



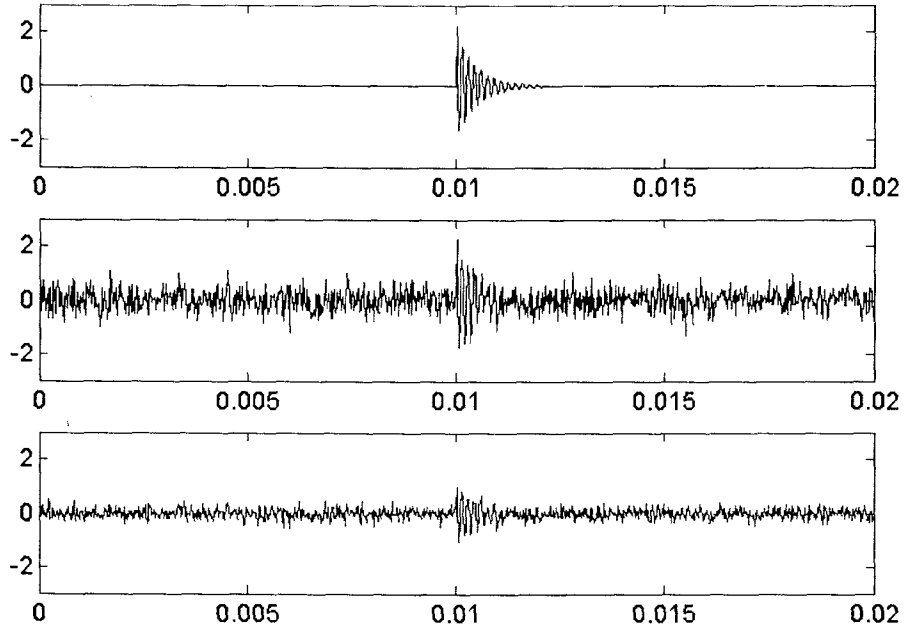
(a) 잡음 35%



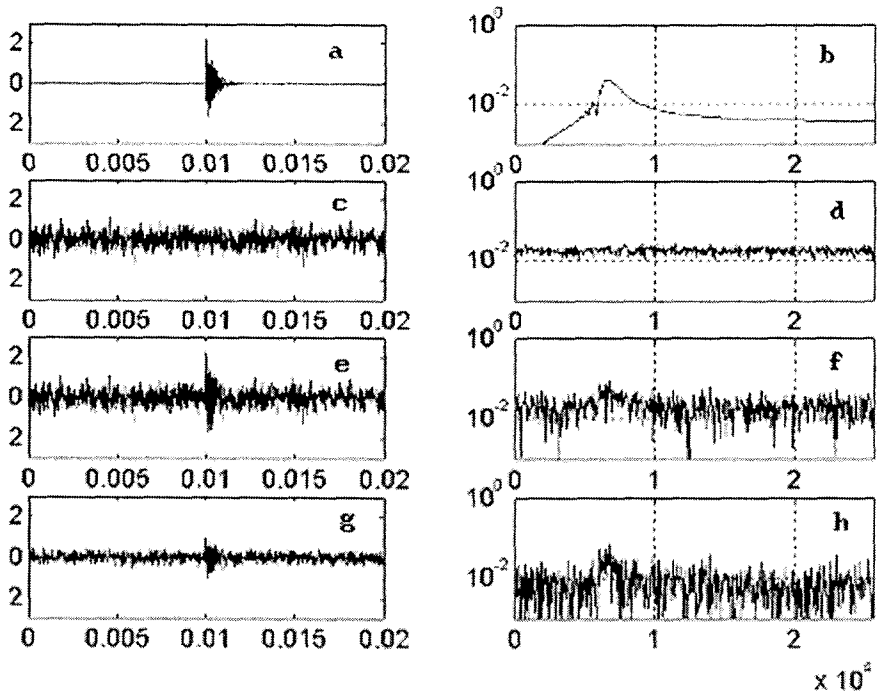
(b) 잡음 35%

그림 3.1.32 SMLMS를 이용한 ALE기법 적용 결과

스펙트럼 감산법 $\alpha=0.35$

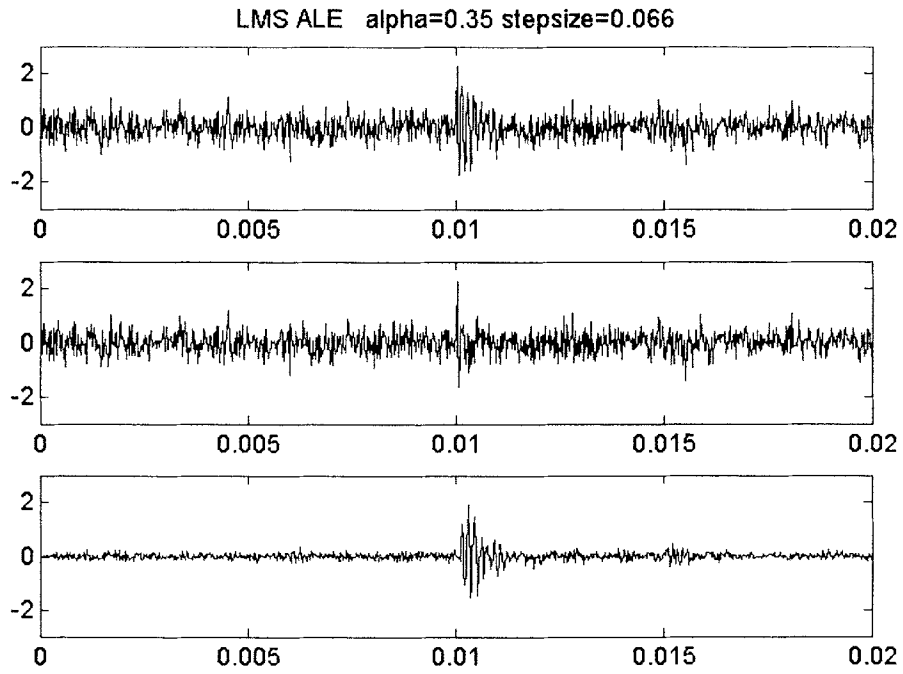


(a) 잡음 35%

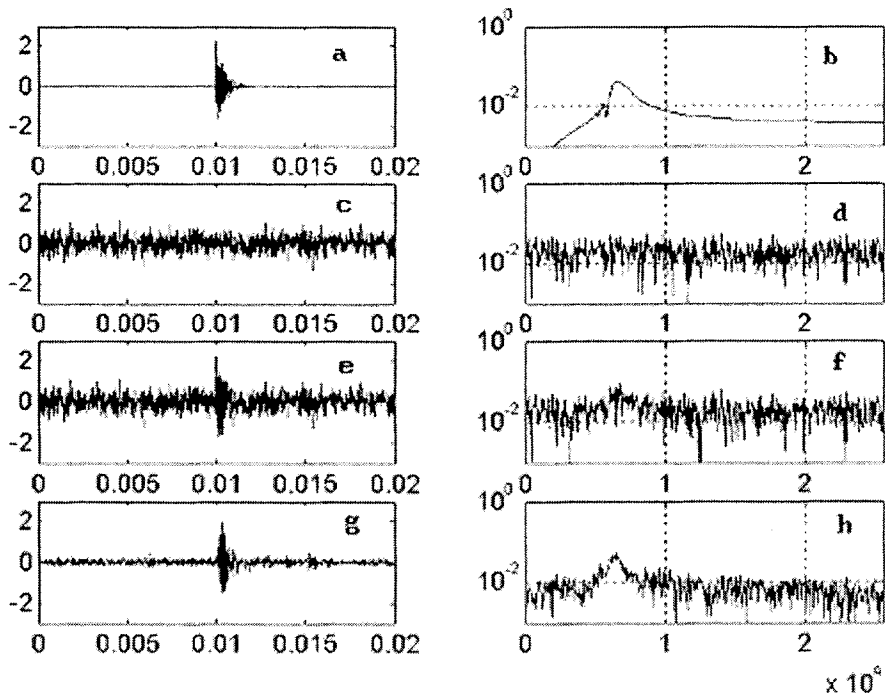


(b) 잡음 35%

그림 3.1.33 충격신호에 대한 스펙트럼감산법 적용 결과

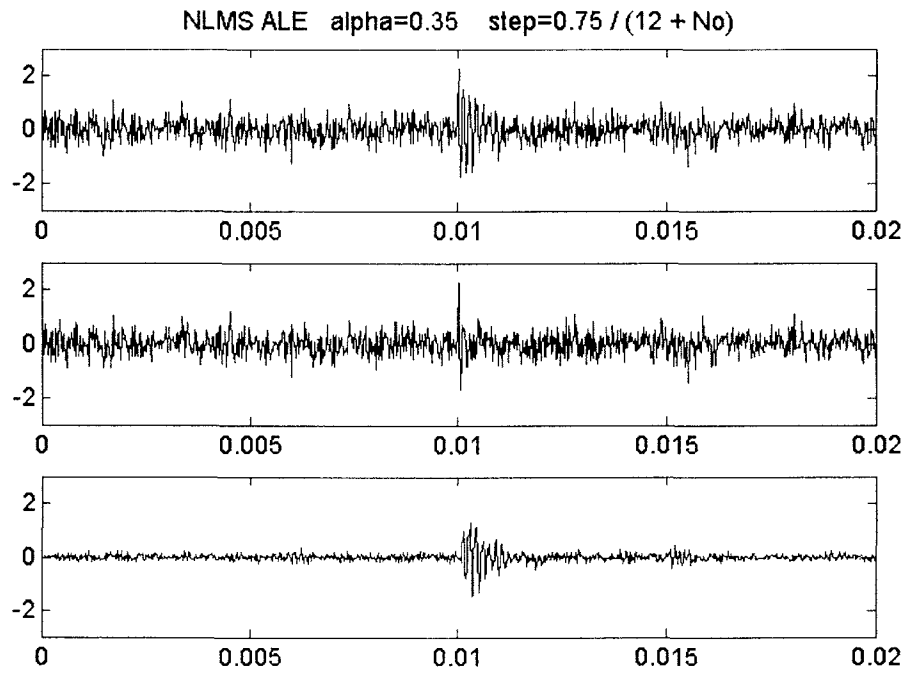


(a) 잡음 35%

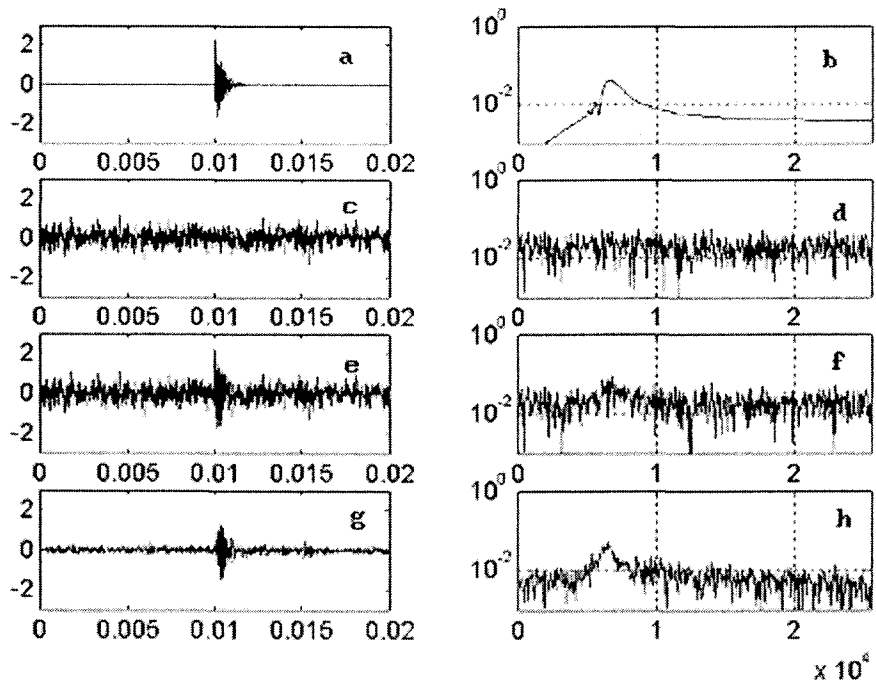


(b) 잡음 35%

그림 3.1.34 충격신호에 대한 LMS를 이용한 ALE기법 적용 결과

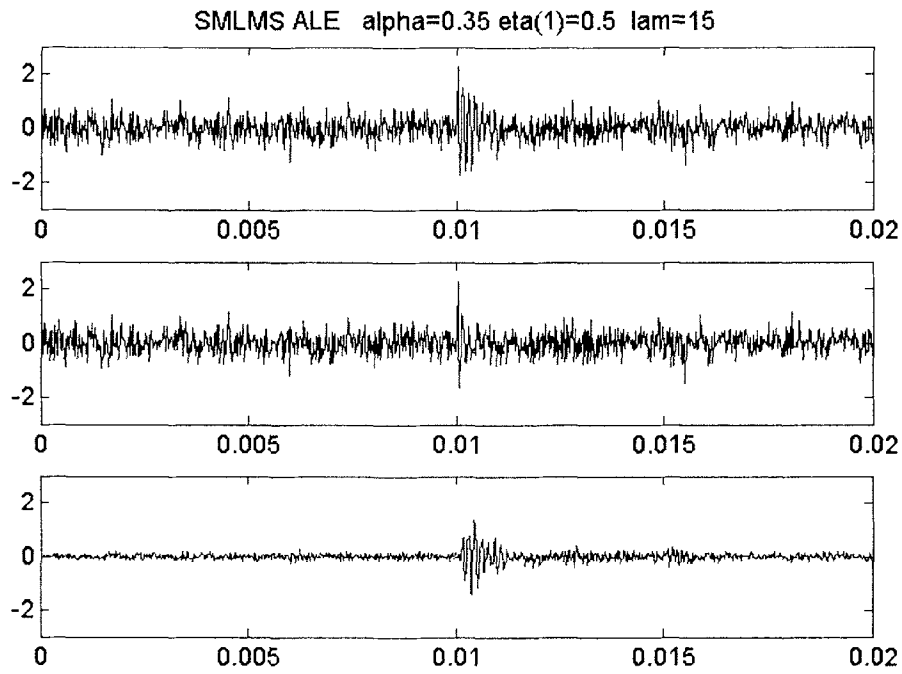


(a) 잡음 35%

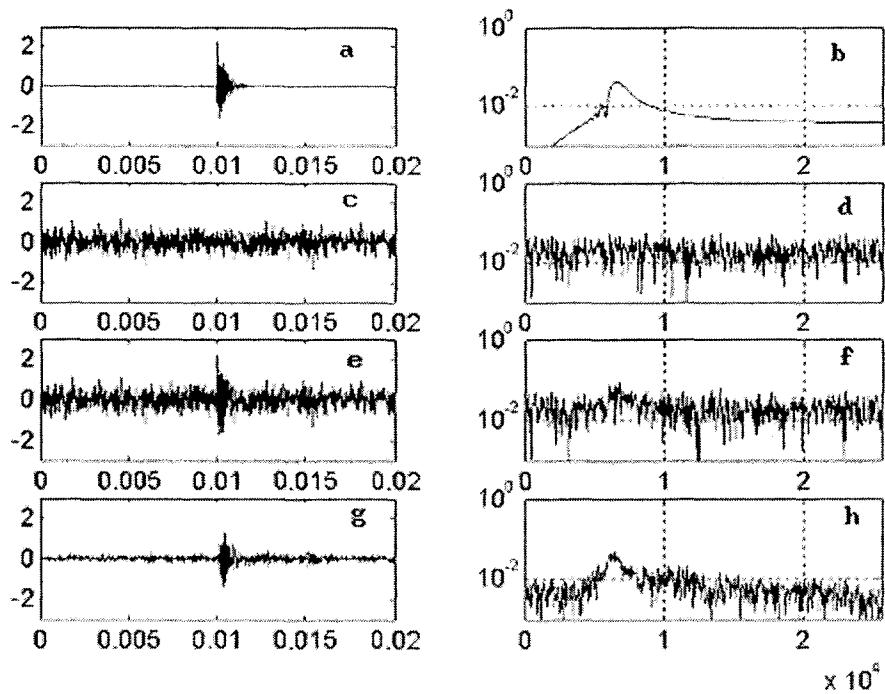


(b) 잡음 35%

그림 3.1.35 충격신호에 대한 NLMS를 이용한 ALE기법 적용 결과



(a) 잡음 35%



(b) 잡음 35%

그림 3.136 충격신호에 대한 SMNLMS를 이용한 ALE기법 적용 결과

(2) SVD 기법 및 웨이브렛 기법을 이용한 배경잡음 감소 적용 분석

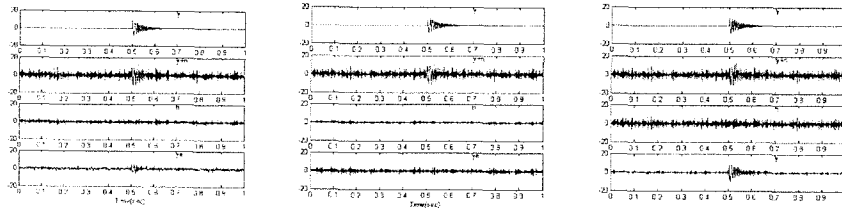
스펙트럼감산법(spectral decomposition), SVD(singular value decomposition) 기법 및 웨이브렛 기법 (Wavelet denoise)을 이용한 배경잡음 제거 기술에 대하여 상호 비교 분석하였다.

특별히 동일한 신호에 대하여 상기 방법들을 적용하여 각 기법들을 비교 분석하였다. 각 기법의 비교분석에 사용된 신호는 앞에서 논의된 신호중에서 원자력 LPMS신호와 유사한 경우인 고주파잡음 및 백색 잡음속에 존재하는 주파수변조의 충격파 신호이다.

그림 3.1.37은 주파수변조를 가진 충격파 신호가 고주파 잡음 속에 존재할 때 이 고주파 잡음을 제거하기위해서 사용된 스펙트럼 감산법(a), SVD 기법 (b), 웨이브렛 기법(c) 등에 관하여 상호 비교한 그림이다. 각 기법을 적용한 결과를 보면 저주파 충격 신호와 고주파 잡음의 분리가 용이함으로 웨이브렛 기술이 고주파 잡음을 매우 잘 제거하여 예측 신호 $y_e(t)$ 가 원 신호 $y(t)$ 에 매우 근사함을 알 수가 있다. 나머지 두 기법은 충격파의 존재는 알 수 있으나 원 신호의 모양대로 예측하는데 는 부족함이 있다. 그림 3.1.38은 백색잡음 (광대역 주파수 성분의 잡음) 속에 존재하는 변조 주파수를 가진 충격파의 탐지에 대한 기술을 비교한 것으로 스펙트럼 감산법의 경우대비 SVD기법 및 웨이브렛 기법이 모두 우수하지만 웨이브렛 기법의 적용결과가 원 신호에 더욱 근사함을 알 수가 있다.

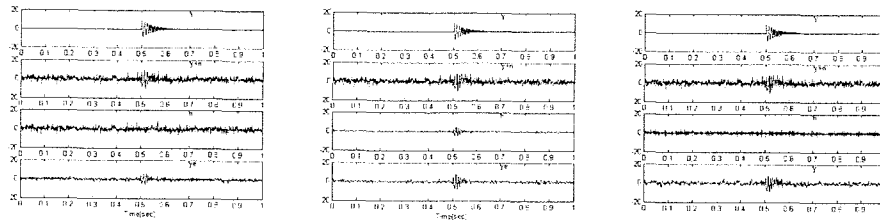
그림 3.1.39 및 그림 3.1.40은 원자로에서 측정된 실제 신호에 고주파 잡음이 존재하는 경우와 백색 잡음이 존재하는 경우에 대한 것이다. 먼저 그림 3.1.39에서 나타나는 결과를 보면 스펙트럼 감산법은 잡음이 충분히 제거되지 않은 채로 잡음 속에 존재하는 충격파를 볼 수 있다. 그러나 웨이브렛 기술은 고주파잡음을 충분히 제거여 고주파 신호의 일부가 제거되는 경우도 존재한다. 그러나 충격파의 초기 피크(peak) 는 원 신호의 형태와 상당부분 근사하다. 이것은 추후 위치 추정 및 질량 추정에 아주 용이하게 사용됨으로 매우 중요하다. SVD 기법은 잡음을 완전히 제거하지만 원 신호의 형태도 상당부분 손상된다. 그러나 신호의 존재 유무를 탐지 하는 방법으로서는 유리하다. 그림 3.1.40에서 보여주는 백색잡음 속에 존재하는

원자력 실제 측정 신호에 대한 결과는 그림 3.139에서 보여주는 바와 같이 유사하게 웨이브렛 기법의 적용후에 나타나는 충격파가 원 신호에 더욱 근사하다. 따라서 LPMS신호를 잡음 속에서 탐지하기위해서는 상기 기술을 상호 도입하여 신호의 존재 유무를 확인한 후에 웨이브렛 필터를 이용하여 잡음제거용 필터의 단계를 정한 후에 잡음을 제거하면 보다 좋은 결과를 얻을 수가 있다. 현재 실험에 사용된 웨이브렛 기법의 단계는 j=1 단계이다.



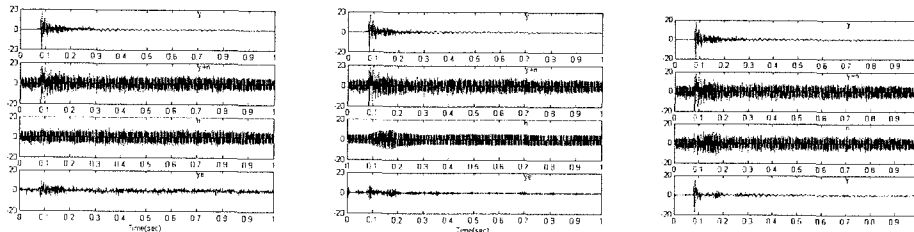
(a)스펙트럼 감산법 (b)특이값 분해법 (c)웨이브렛 기술

그림 3.137 고주파 잡음속에 존재하는 주파수변조를 가진 충격파에 대한 잡음제거 기술의 비교(SNR=-50)



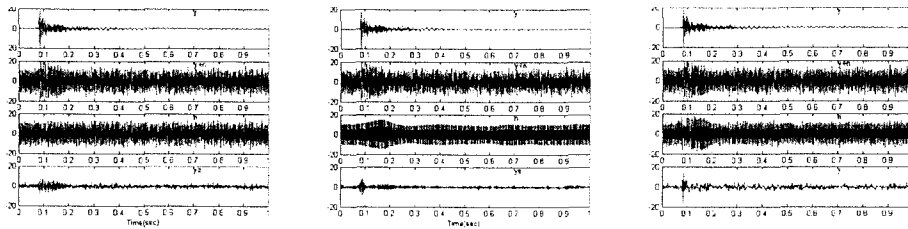
(a)스펙트럼 감산법 (b)특이값 분해법 (c)웨이브렛 기술

그림 3.138 백색 잡음속에 존재하는 주파수변조를 가진 충격파에 대한 잡음제거 기술의 비교 (SNR=-51)



(a) 스펙트럼 감산법 (b) 특이값 분해법 (c) 웨이브렛 기술

그림 3.139 고주파 잡음속에 존재하는 주파수변조를 가진 충격파에 대한 잡음제거 기술의 비교 (SNR=-45)



(a)스펙트럼 감산법 (b)특이값 분해법 (c)웨이브렛 기술

그림 3.1.40 백색 잡음속에 존재하는 주파수변조를 가진 충격파에 대한 잡음제거 기술의 비교

나. 충격신호 위치 및 질량 추정 신기법 개발 및 검증

(1) 금속파편 충격신호 위치 추정 신기법 개발

시간-주파수 분석 기법을 적용하여 금속의 충격 위치 추정 방법을 개선하고자 한다. 시간-주파수 분석 기법 중 Short Time Fourier Transform 기법은 고정 윈도우에 의한 분해능의 문제점으로 인하여 적용 대상에서 제외하였으며, CWT(Continuous Wavelet Transform) 및 CWD(Choi Williams Distribution) 기법을 적용하기로 한다. 상기 기법들은 구조물에서의 충격파의 분산 특성에 따른 파동의 도달 시간차를 시간-주파수 영역에서 구한다. 이를 이용하여 평판에서의 파동이론에 근거한 분산파동의 군속도를 계산하고, 3개의 센서를 이용한 삼각법으로 위치 추정을 시도한다. 먼저 평판 구조물에 대하여 실험을 수행하여 각 기법들의 타당성을 확인 후에 실제 원자로 모델에 적용하여 기존의 방법과 비교, 검증 한다.

(가) 삼각법을 이용한 위치추정

삼각법은 세 개의 센서를 이용하여 음원의 위치를 추정하는 기법이다. 세 개의 센서간의 상대거리와 각 센서의 도달시간의 상대적인 시간차와 음파의 속도를 가지고 음원의 위치를 추정한다.

먼저 첫 번째 센서를 S0라고 하고 두 번째와 세 번째 센서를 각각 S1,S2

라고 하자. 이 때 알고 있는 음원의 속도는 V 이고, 음파가 S_0 에 도착한 시간은 t_0 이고 S_1, S_2 에 각각 도달한 시간을 각각 t_1, t_2 이라고 하면 7개의 미지수 및 7 개의 방정식이 성립되므로, 충격점의 위치 좌표 (x, y) 를 쉽게 구할 수가 있다. 여기서 중요한 것은 센서간의 음파의 도달 시간차이를 구하는 데에 있다. 과거 기존의 방법에서는, 시간영역 데이터 상에서 도달 시간차를 구하였다. 이 방법은 개인의 판단에 근거하므로 노이즈가 포함된 신호에서는 음파의 도달점을 확인하기가 매우 어렵다. 따라서 퍼지이론을 적용한 최대치 상승 시간을 이용하는 방법, probability ratio test 방법 등이 개발되어 적용되었다. 이 경우에도 결국 시간영역 데이터 자체만을 이용하므로 위치 추정 시에 기본적으로 큰 오차를 유발해 왔다. 여기서는 웨이블릿 및 위그너 분포 기법을 적용하여 노이즈가 있는 환경에서도 도달 시간차를 구할 수가 있다.

(나) 평판에서의 충격 위치 추정

평판에서 충격지점의 위치를 추정하기 위한 실험 장치를 그림 3.1.43과 같이 구성하였다. 재질은 스틸이며, 평판의 크기, 센서의 위치 및 충격 지점은 그림 3.1.44와 같다.

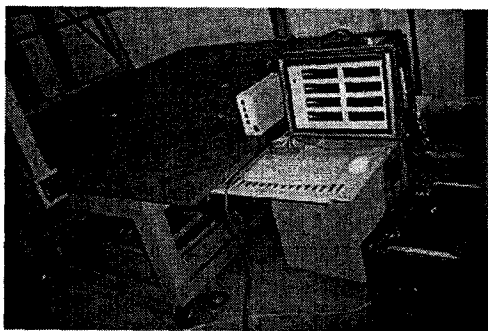


그림 3.1.43 평판실험장치

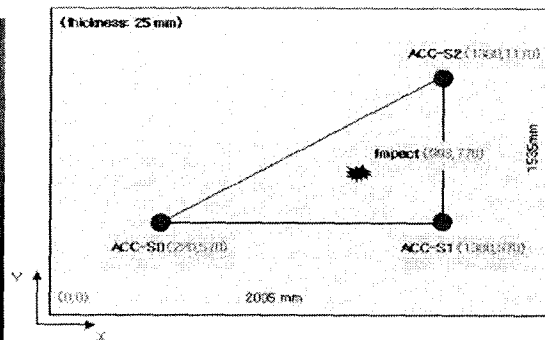


그림 3.1.44 센서 위치 및 충격지점

충격에 의한 응답 가속도신호에 대해 연속 웨이블릿 분석(CWT)하면 그림 3.1.45(a),(b),(c)와 같은 결과를 얻을 수가 있다. 여기서 각 주파수당 최대치를 빨간 점선으로 나타내었으며, 이는 굽힘파의 군속도에 의한 도달시간을 나타낸다. 그림 3.1.45(d)에서 각 센서 간의 주파수별 군속도 도달 시

간차를 쉽게 알 수가 있다. 여기서 충격지점에 가장 가까운 센서의 순(S1, S2, 및 S0)으로 굵힘파가 도달하고 있음을 쉽게 확인 할 수가 있으며 S0 신호의 경우에는 그림 3.1.45에서 보는 바와 같이 고주파수에 의한 반사파의 영향이 존재하고 있음을 확인할 수가 있다. 그리고 균속도가 고주파일 수록 속도가 크므로 굵힘파가 빨리 도달함을 볼 수 있다.

그림 3.1.45에서 충격파의 도달 시간을 각 센서별, 각 주파수별로 알 수 있고 센서의 상대위치를 알고 있으므로 삼각법을 적용하면 보다 쉽게 위치를 추정할 수 있다.

그림 3.1.46은 웨이브렛 변환 기법을 응용하여 균속도의 도달시간차를 구하여 평판에 대하여 충격위치를 추정한 결과이다. 신호분석에 의한 추정 위치가 실제 위치와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

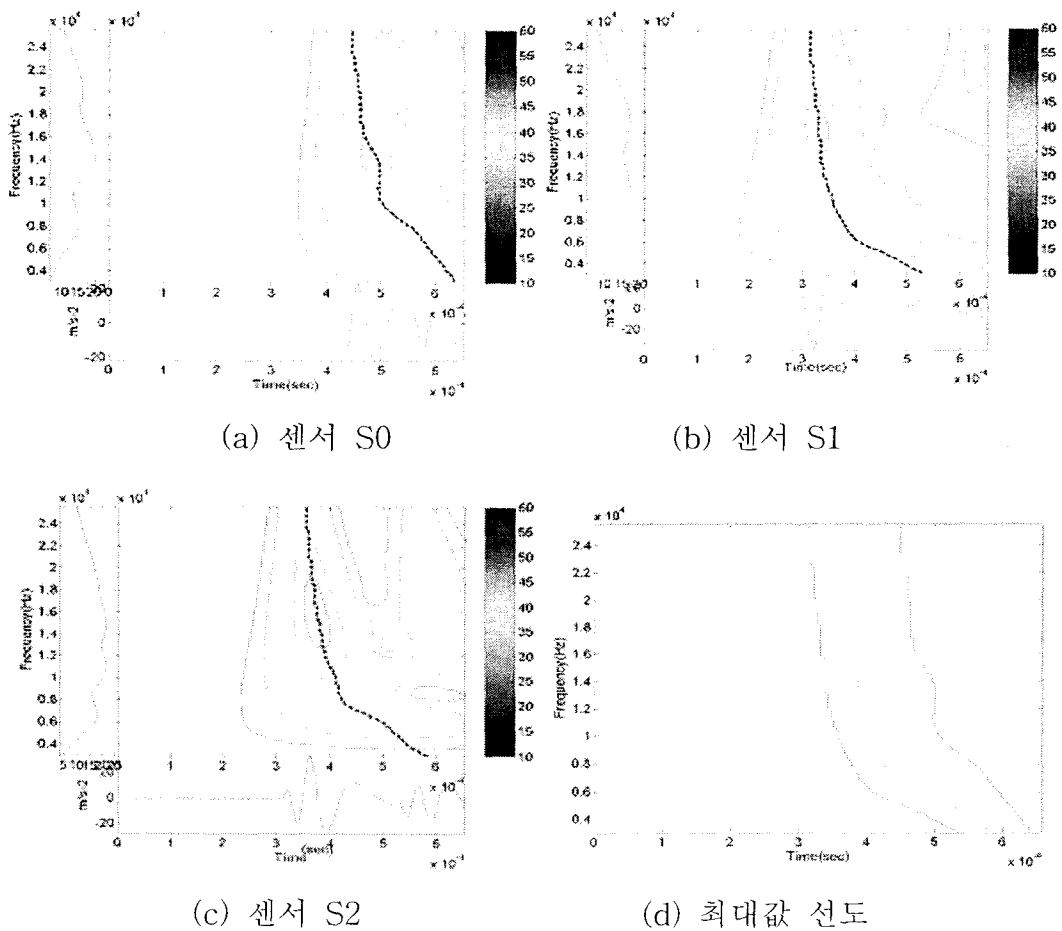
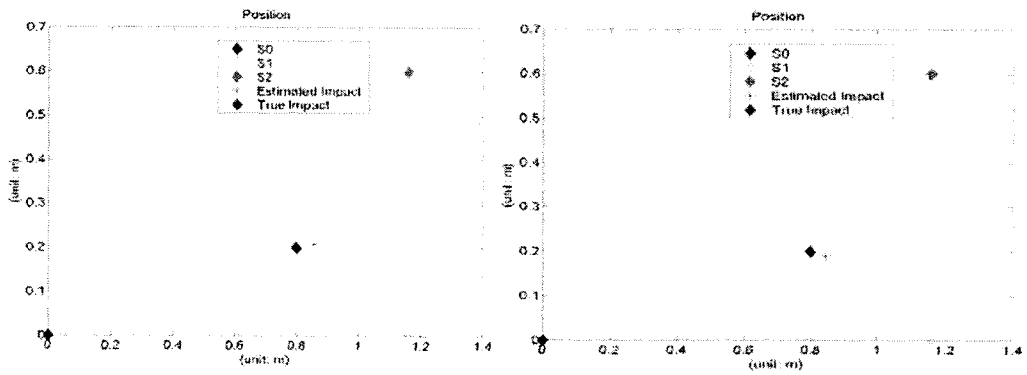


그림 3.1.45 각 센서 신호에 따른 웨이브렛 분포 및 최대값 선도

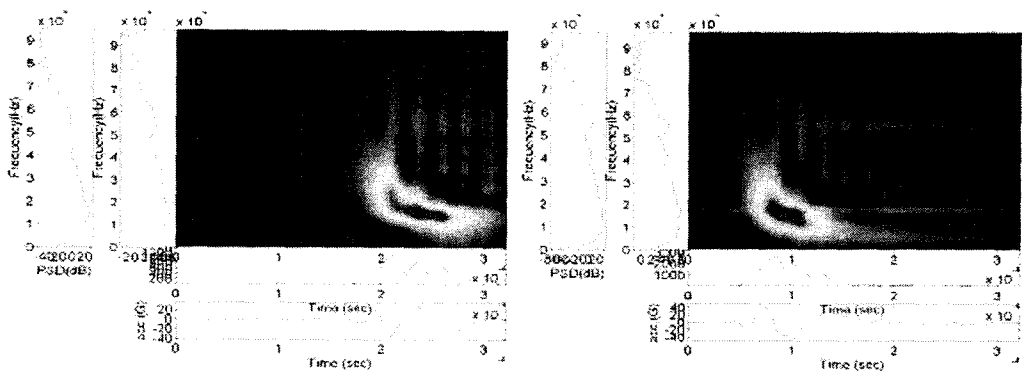


(a) 8 kHz

(b) 14kHz

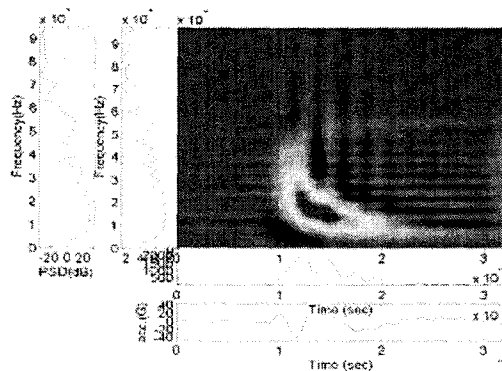
그림 3.1.46 웨이블릿 변환을 이용한 위치 추정

동일한 충격신호에 대하여 위그너-빌 분포를 적용하였다. 그림 3.1.47(a)(b)(c)은 각 센서 신호들에 대한 위그너-빌 분포이다. 웨이블릿분포에 비하여 분해능이 좋으며, 굽힘파의 도달시간을 쉽게 확인할 수 있다.



(a) 센서 S0

(b) 센서 S1



(c) 센서 S2

그림 3.1.47 각 센서 신호에 따른 위그너-빌 분포

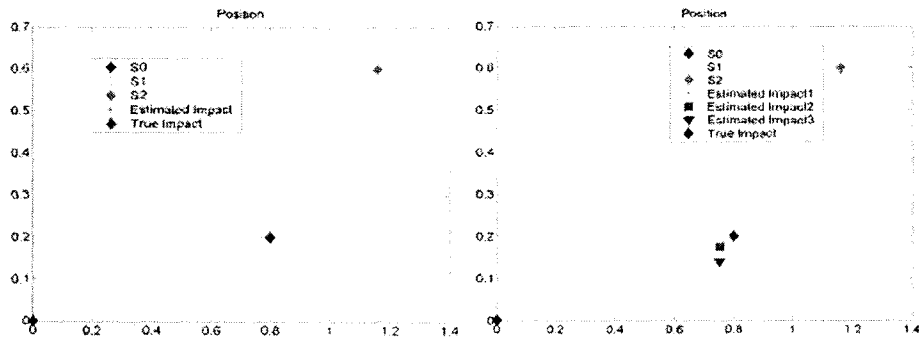


그림 3.148 Weigner-Ville 적용 그림 3.149 기존의 방법

위그너-빌 분포를 적용하여 충격지점의 위치를 추정한 결과는 그림 3.148 와 같다. 웨이블릿 변환의 경우와 마찬가지로 실제 충격위치와 잘 일치하고 있음을 확인할 수가 있다. 기존의 방법인 시간영역에서 균속도 도달 시간차를 이용하여 위치 추정을 수행한 결과가 그림 3.149에 나와 있다. 예상한 바와 같이 시간 데이터의 표시방법 및 사용자의 주관적인 판단에 의하여 도달시간의 평가에 근본적인 오차가 존재하므로, 추정결과에 있어서 오차의 범위가 크다. 잡음의 영향이 거의 없는 이 경우에서만 보더라도, 위치추정의 성능을 20% 이상 향상시킬 수 있음을 볼 수 있다. 특히 잡음의 영향이 큰 신호에서는 기존의 시간영역 방법만으로는 위치추정의 신뢰성이 더욱 저하되지만, 신기법을 적용하면 이 경우에도 위치추정의 성능을 높일 수가 있다

(다) 실제 증기발생기 구조물에서의 충격위치 추정

실제 원자로 계통에서 증기 발생기 하부 구조물에 대하여 시간-주파수 분석 기법을 적용하여 충격위치를 추정하였다. 증기발생기 하부는 그림 3.150에서 보는 바와 같이 대형 셸 구조물로 구성되어 있으므로 각 센서 위치를 기준으로 볼 때 전개하여 보면 유사 평판 구조물로 가정할 수가 있다. 충격은 그림 3.151에서 보는 바와 같이 센서 S0 근처에 강구를 가격하였다.

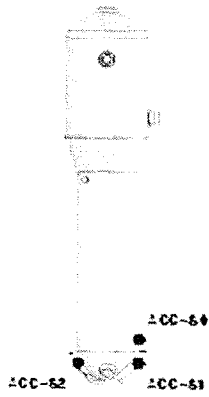


그림 3.150 증기발생기

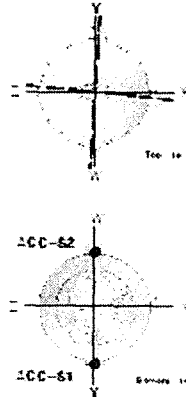


그림 3.151 센서위치 및 강구충격방법

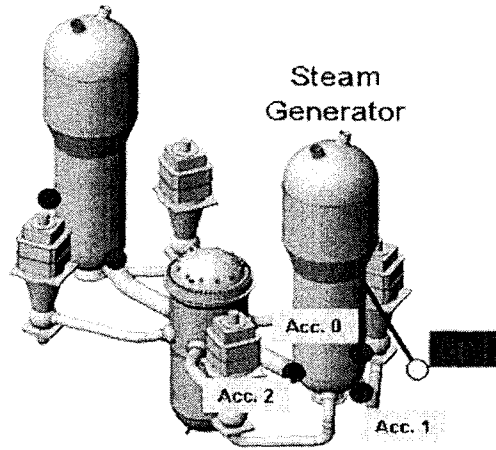
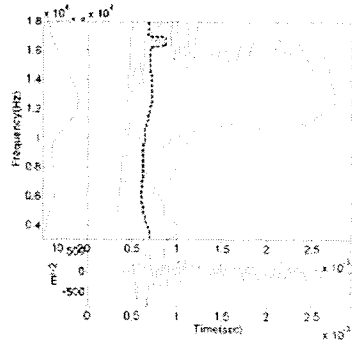
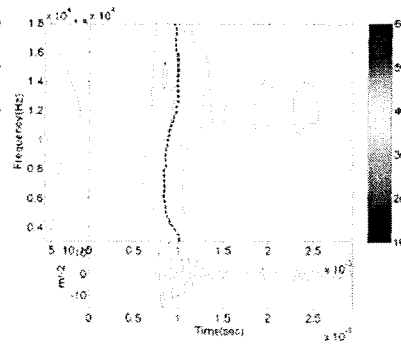


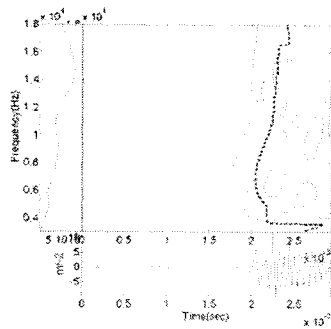
그림 3.152(a)(b)(c)는 각 센서 신호에 대한 웨이블릿 분석 결과이며, 주파수별 최대 크기 선도는 그림 3.152(d)와 같다. 이를 바탕으로 약 11.3 kHz 및 13.8 kHz 성분에 대한 도달시간차를 이용하여 위치를 추정한 결과 실제 충격위치와 잘 일치하였다(그림 3.153).



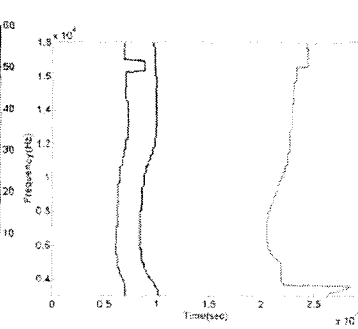
(a) 센서 S0



(b) 센서 S1



(c) 센서 S2



(d) 최대값 선도

그림 3.152 각 센서별 웨이블릿 분포 및 최대값 선도

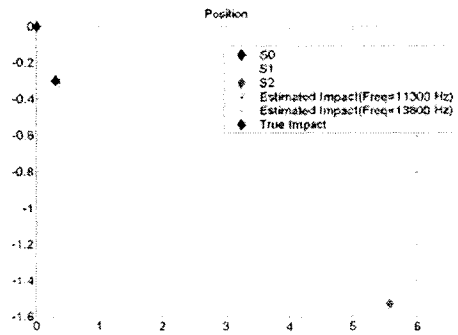
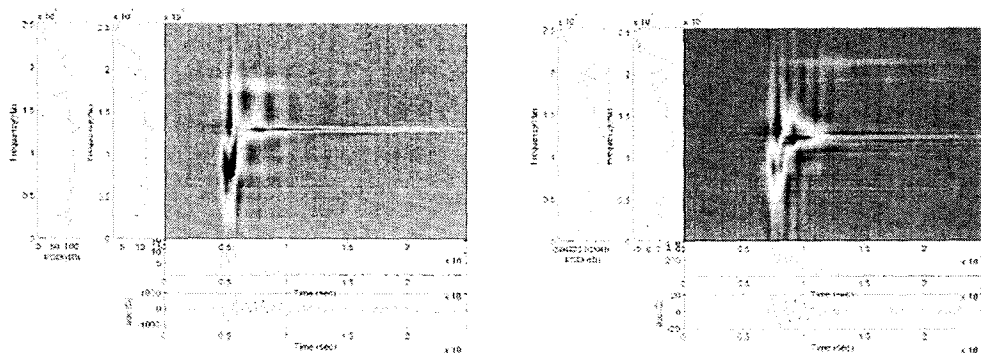


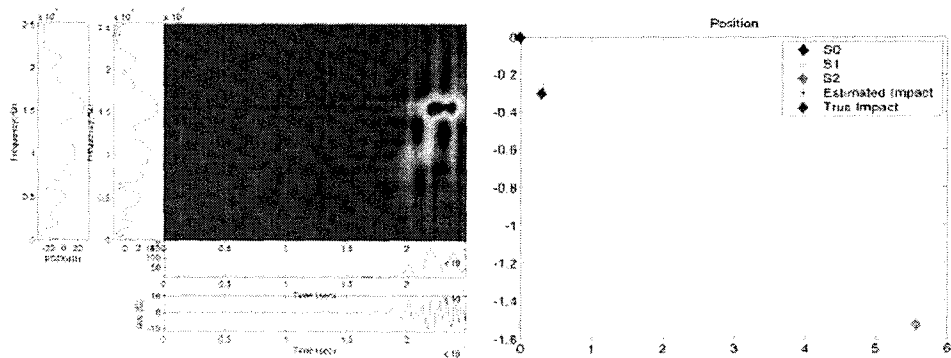
그림 3.153 웨이블릿 변환을 이용한 위치 추정 결과

다시 위그너-빌 분포를 이용하여 유사한 방법으로 위치추정을 수행하였다. 그림 3.154(a)(b)(c)는 각 센서에 대한 위그너-빌 분포를 보여주며, 급힘파의 최초 도달 시점을 보다 쉽게 알 수 있다. 이를 이용하여 위치추정을 수행한 결과, 그림 3.154(d)에서 보는 바와 같이 웨이블릿의 경우와 마찬가지로 실제 충격위치와 잘 일치함을 확인할 수 있다.



(a) 센서 S0

(b) 센서 S1



(c) 센서 S2

(d) 위치추정 결과

그림 3.154 위그너-빌 분포를 이용한 위치추정 결과

(2) 금속파편 충격신호 질량 추정 신기법 개발

(가) 중심주파수판별

질량 추정에 관한 선행된 연구 [3.5] 에 의하면 아래와 같은 시간영역 신호에서 최대값의 반주기를 접촉시간으로 추정하며 이는 주파수의 역수와 관계한다. 따라서 웨이블릿분석을 통하여 계산된 최대값이 시간신호에서 가장 클 때의 주파수이고 반주기의 역수에 관계한다. 그러므로 이를 중심주파수라고 할 수 있다. 이를 증명하기 위해서 다음과 같은 강구 낙하실험을 실행하였다. D의 직경을 가지는 강구를 H(높이)에서 낙하하여 10cm의 거리에서 가속도계로 측정하였다. 가속도계의 측정결과는 아래 그림 3.156 과 같다.

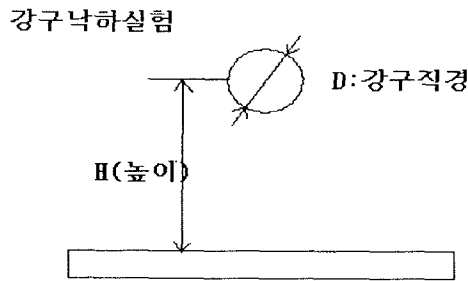


그림 3.155 강구 실험 개략도

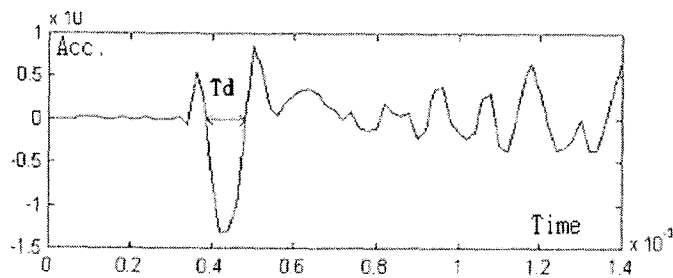


그림 3.156 강구 실험을 통하여 측정된 진동 신호

그러나 선행 연구에 의하면 측정된 T_d (측정 접촉시간)은 T_n (실제접촉시간)보다 1.6배 짧다는 것이 실험으로 증명되었기에 원래는 $f_c = 1/(2T_d)$

이지만 아래와 같이 유도할 수 있다.

$$f_c = 1.6 / (2T_d) \quad (3.1.109)$$

다음 절에서 충격력에 의해 접촉시간을 유도하는데 K_h (충돌계수), E (충돌에너지), R (강구반경)에 의해 아래와 같이 수식으로 나타낼 수 있다.

$$f_c = 1.6 / (2T_d) = 1.6 / (2(\pi K_h m^{0.5} E^{-0.1} R^{-0.2})) = 0.8\pi^{-1} K_h^{-1} m^{-0.5} E^{0.1} R^{0.2} \quad (3.1.110)$$

위의 수식에서 중심주파수는 강구반경에 0.2 지수승, 충돌에너지에 0.1 지수승으로 비례한다는 것을 알 수 있다. 하지만 웨이블릿 변환 방법을 이용하면 그림 3.1.57과 같은 시간-주파수 그림에서 최대값을 가지는 성분의 주파수 성분을 중심주파수를 쉽게 정의할 수 있다. 이 방법을 이용하여 직경이 다른 강구에 대한 낙하실험결과와 중심주파수를 비교하였다. 직경이 서로 다른 강구의 낙하에 의한 평판의 충격 신호는 그림 3.1.58과 같다. 그림 3.1.58 에서 강구직경이 클수록 반주기는 크다는 것을 알 수 있다. 이들 신호에 대한 웨이블릿 변환을 시행하면 그림 3.1.59과 같다. 그림 3.1.59에서 중심주파수는 직경이 클수록 작아짐을 웨이블릿으로 쉽게 확인할 수 있다. 이는 나중에 질량예측에 요긴하게 쓰인다. 다음으로 충돌에너지와 중심주파수간의 관계를 분석하여 보자. 충돌 에너지는 자유 낙하의 높이를 이용하여 구할 수가 있다. 그림 3.1.60 과 그림 3.1.61 는 충돌 에너지와 중심 주파수의 관계를 나타낸다. 이 두 결과를 동시에 비교하면 그림 3.1.62 와 같다. 그림 3.1.62는 반경이 다른 강구에 대한 중심주파수의 평균값이다. 에너지에 대하여 미비하게 증가하고 강구의 직경에 대해서 작으면 작을수록 중심주파수가 커짐을 쉽게 알 수 있다. 그러므로 중심주파수는 강구의 반경추정에 많은 도움을 줄 수 있다. 에너지에 대하여 중심주파수가 미비하게 증가하는 이유는 앞의 수식에서 0.1 승에 비례하기 때문이다.

(나) 질량예측

Hertz's theory 에 의해서 최대 충격력은 논문[3.4]에 의해서 아래와 같이 정의된다. 여기서 최대충격력은 강구가 반무한 매질에 가할 때이다.

$$F_{\max} = 1.23(k_1 + k_2)^{-\frac{2}{5}} \times R^{\frac{1}{5}} \times \left(\frac{1}{2} mV^2\right)^{\frac{3}{5}} \quad (3.1.111)$$

여기서 $k_{1,2} = \frac{1 - \nu_{1,2}^2}{\pi E_{1,2}}$

$$F_{\max} = \frac{1.23}{\pi^{\frac{2}{5}}} \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)^{-\frac{2}{5}} \times R^{\frac{1}{5}} \times \left(\frac{1}{2} mV^2 \right)^{\frac{3}{5}} \quad \text{참고문헌[3.4]} \quad (3.1.112)$$

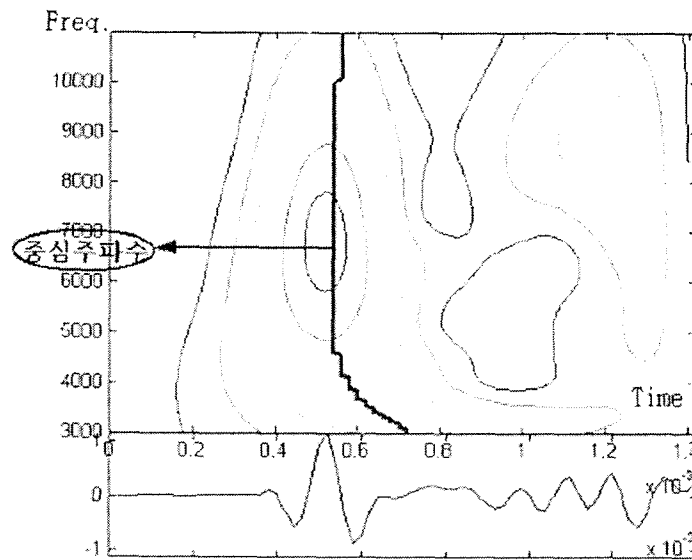


그림 3.1.57 강구의 낙하에 의한 충격 신호에 대한 웨이브렛 변환이용 중심 주파수 측정

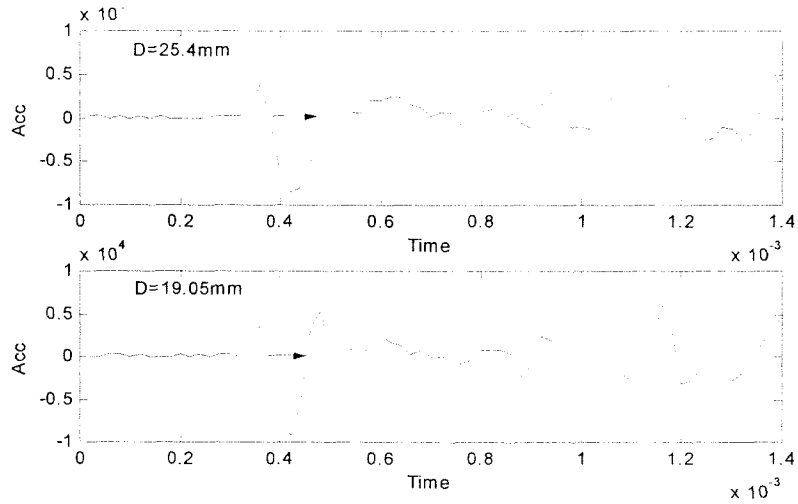


그림 3.158 직경 25.4mm, 19.05mm의 강구에 대한 실험의 time data

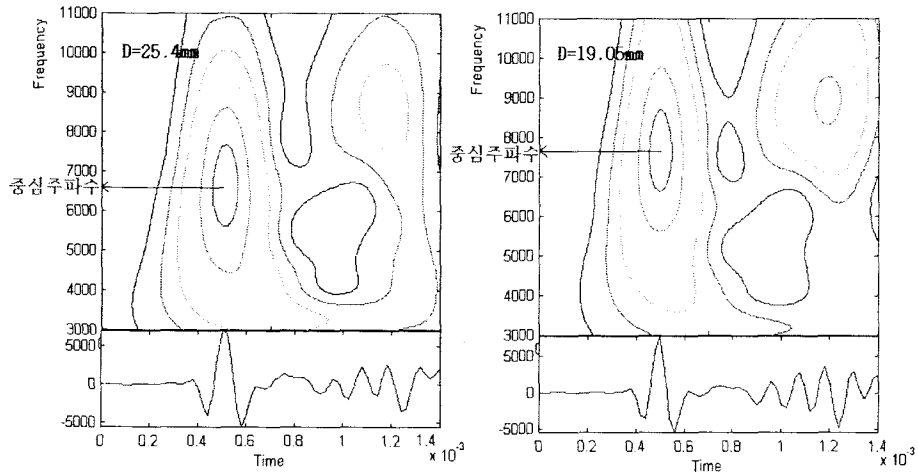


그림 3.159 직경 25.4mm, 19.05mm의 강구에 대한 실험의 웨이브렛 변환 이용 중심주파수비교

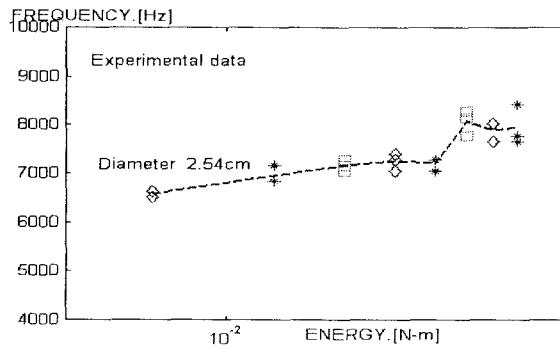


그림 3.160 직경 2.54cm에서 충돌에너지별 중심주파수

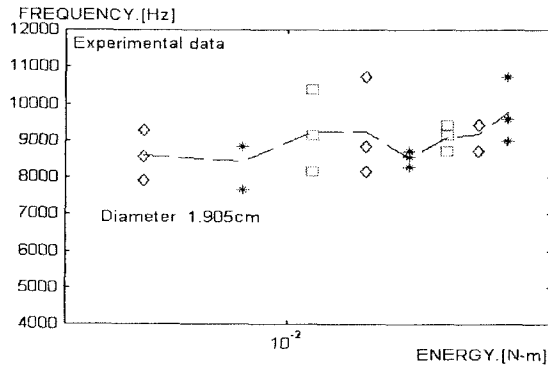


그림 3.1.61 직경 1.905cm에서 충돌에너지별 중심주파수

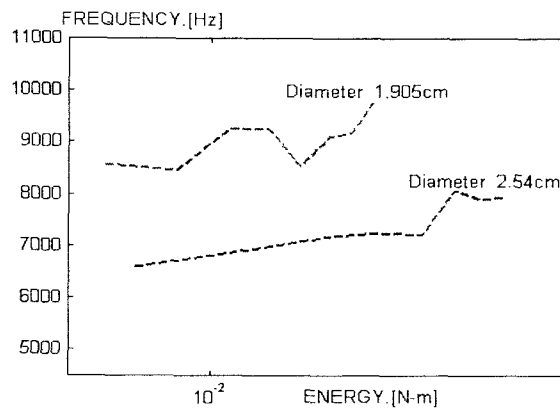


그림 3.1.62 두 직경의 충돌에너지별 평균중심주파수

반면에 유한한 두께를 가지는 평판에 반지름(R)을 가지는 강구가 속도(V)로 충돌시 생기는 최대충격력의 이론식은 다음과 같다.

$$F_{\max} = K_h^{-1} (mV^2)^{0.6} R^{0.2} \quad (3.1.113)$$

여기서 $K_h = \left[\frac{15}{16} \left(\frac{1-v_1^2}{E_1} + \frac{1-v_2^2}{E_2} \right) \right]^{0.4}$ 참고문헌[3.5]

보고서와 논문의 두식을 비교하면 각 변수에 대한 관계는 일치하고 앞의 계수만 맞지 않음을 알 수 있다. 따라서 강구의 운동에너지에 0.6, 강구의 반지름에 0.2 승에 비례하고 있는 것은 동일하다. 다음으로 강구의 최대충

격력이 가할 때 평판의 최대 변위를 유도하자. 에너지 보존의 법칙을 이용하여 최대충격력이 평판(매질)에 한 일은 평판에 충돌하기 직전에 강구가 가지고 있는 에너지와 같다는 가정 하에 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$F_{\max} D_{\max} = \frac{1}{2} m V_0^2 \quad (3.1.114)$$

위의 식에서 최대 변위를 구하면 아래와 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} D_{\max} &= \frac{1}{F_{\max}} \times \left(\frac{1}{2} m V_0^2 \right) = \frac{\pi^{-2/5}}{1.23} \times \left(\frac{1-v_1^2}{E_1} + \frac{1-v_2^2}{E_2} \right)^{2/5} \times R^{-0.2} \times \left(\frac{1}{2} m V_0^2 \right)^{2/5} \\ &= 0.3898 \times \left(\frac{1-v_1^2}{E_1} + \frac{1-v_2^2}{E_2} \right)^{2/5} \times R^{-0.2} \times \left(\frac{1}{2} m V_0^2 \right)^{2/5} \quad \text{참고문헌[3.4]} \quad (3.1.115) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_{\max} &= \left[\frac{15}{16} \times \left(\frac{1-v_1^2}{E_1} + \frac{1-v_2^2}{E_2} \right) \right]^{2/5} \times R^{-0.2} \times (m V_0^2)^{2/5} \quad \text{참고문헌[3.5]} \\ &= 1.2859 \times \left(\frac{1-v_1^2}{E_1} + \frac{1-v_2^2}{E_2} \right)^{2/5} \times R^{-0.2} \times \left(\frac{1}{2} m V_0^2 \right)^{2/5} \quad (3.1.116) \end{aligned}$$

논문에 의하면 반무한 매질에 대한 최대변위를 유도한 것이고 원자력차재 보고서에 의한 식은 두께가 일정하고 유한한 평판에 대해서 유도된 식으로 수식에서 앞의 계수만 맞지 않음을 알 수 있다. 이제 강구가 금속판에 충돌할 때 일시적인 최대속도를 유도하자. 강구의 충돌 순간의 최대속도는 충격에너지를 연산하기 위해서 필요하다. 강구가 금속판에 충돌하는 모양을 정현파로 가정하면 다음의 관계식 (3.1.117)(3.1.119)를 이용하여 변위를 구하면 그림 3.1.63과 같다.

$$D(t) = D_{\max} \sin\left(\frac{\pi}{T_d} t\right) \quad (3.1.117)$$

$$D'(t) = V(t) = \frac{\pi}{T_d} D_{\max} \cos\left(\frac{\pi}{T_d} t\right) \quad (3.1.118)$$

$$D''(t) = A(t) = -\left(\frac{\pi}{T_d}\right)^2 D_{\max} \sin\left(\frac{\pi}{T_d} t\right) \quad (3.1.119)$$

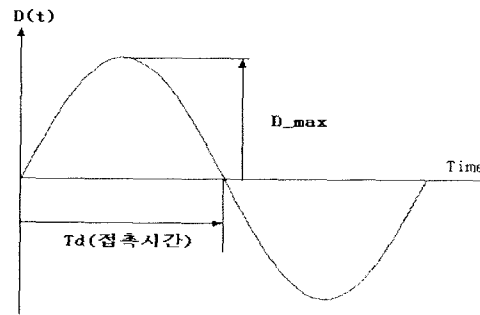


그림 3.1.63 평판의 강구의 충돌에 의한 변위 그래프

이때 t 의 범위 $0 \leq t \leq T_d$ 에서 강구가 금속판에 접촉하고 있다고 가정한다. 아래와 같이 속도는 최대가속도값과 주기를 알 때 구할 수 있다. 이때 주기는 접촉시간과 관계된다.

$$V_{\max} = V_0 = \frac{T_d}{\pi} A_{\max} \quad (3.1.120)$$

$$= V_0 = \frac{\pi}{T_d} D_{\max} \quad (3.1.121)$$

위와 같이 속도와 가속도, 변위사이의 관계에서 최대가속도에 대한 속도를 구할 수 있다. 하지만 유명한 Hertz theory에 의해서 최대속도와 최대변위의 관계식은 아래와 같다.

$$V_0 = \frac{2.94}{T_d} D_{\max} \quad (\text{Hertz theory}) \quad (3.1.122)$$

위의 두 식을 비교하면 $\frac{\pi - 2.94}{2.94} = 7.2\%$ 정도 오차로써 무시할 수 있다.

이제 충격량 보존의 법칙을 이용하여 접촉시간을 구하여보자. 강구가 충돌

할 때 충격력을 그림으로 근사화시키면 아래와 같다.

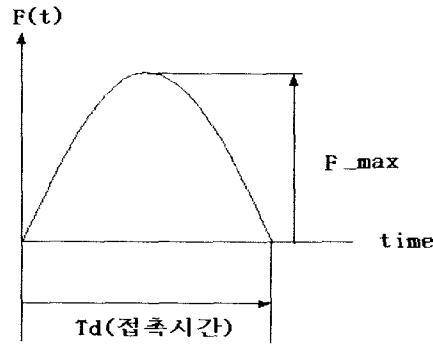


그림 3.1.64 평판에 대한 충격력

위에서 충격량 보존의 법칙을 이용하면 아래식과 같다.

$$\int_{T_d}^0 -F_{\max} dt = -mV_0 + mV'_0 \quad \text{where } V'_0 (\text{충돌직후의 속도}) = 0 \quad (3.1.123)$$

위에서 충돌직후 최대 변위일 때의 순간적인 속도는 'zero'라고 가정되므로 아래와 같은 수식이 나온다.

$$-F_{\max} \int_0^{T_d} \sin\left(\frac{\pi}{T_d} t\right) dt = -mV_0 \quad (3.1.124)$$

$$\frac{F_{\max} T_d}{\pi} = mV_0$$

최대충격력으로 Hertz theory를 이용하여 이론적 접촉시간을 구할 수 있다.

$$T_d = \frac{\pi}{F_{\max}} mV_0 = \pi \frac{(k_1 - k_2)^{2/5}}{1.23} \times R^{-1/5} \times \left(\frac{1}{2} mV_0^2\right)^{-3/5} mV_0$$

$$= \pi \frac{(k_1 - k_2)^{-2/5}}{1.23} \times R^{-1/5} \times \left(\frac{1}{2}\right)^{-3/5} \times m^{2/5} \times V_0^{-1/5} \quad (3.1.125)$$

위의 식을 충돌에너지와 반경에 대해서 정리하면,

$$\begin{aligned}
 &= \pi \frac{(k_1 - k_2)^{2/5}}{1.23} \times \left(\frac{1}{2}\right)^{-1/2} \times R^{-1/5} \times \left(\frac{1}{2} m V_0^2\right)^{-0.1} \\
 &= \pi \frac{2^{1/2}}{1.23} (k_1 - k_2)^{2/5} \times R^{-1/5} \times m^{1/2} \times \left(\frac{1}{2} m V_0^2\right)^{-0.1} \quad (3.1.126)
 \end{aligned}$$

위와 같이 접촉시간을 구할 수 있다. 이는 최대변위와 충돌직전의 최대속도와는 아래와 같이 관계된다.

$$T_d = \pi 2^{4/5} \frac{D_{\max}}{V_0} \quad (3.1.127)$$

위의 식은 논문에 의해 구한 접촉시간이고 보고서에 의하면

$$T_d = \frac{2.94 D_{\max}}{V_0} \quad \text{참고문헌 [3.5]} \quad (3.1.128)$$

와 같다. 역시 계수의 차이가 있다. 하지만 측정되어지는 최대가속도값은 실제 접촉점의 최대가속도에서 감쇄되어 기록된다. 앞에서 구한 음원의 위치로써 음원으로부터의 거리를 알 수 있다. 이 거리를 이용하여 거리에 대한 보상을 할 수 있는데 거리에 대해서 0.40.1 승으로 감소하므로[3.6] 그에 따른 보상추정치를 하여 접촉점에서의 최대가속도값을 구한다. 본 실험에서는 거리에 대해 약0.4승으로 감소하고 기준거리는 0.025m이다. 따라서 거리(r)에서 측정된 최대가속도값은 충격지점으로 감쇄보상하면 식 (3.1.129)와 같다.

$$A_{\max} = \left(\frac{0.025_{ref}}{r}\right)^{-0.4} A_{m(r)} \quad (3.1.129)$$

그림 3.1.65는 거리에 따른 가속도계에서 측정된 data와 이론값과 실제 실험을 비교한 그림이다. 첫 번째 그림은 거리가 0,10,20cm에서 측정된 그래프이고 이를 각 거리에 대하여 최대값을 구하고 이론값과 비교한 결과 거의 일치함을 알 수 있다. 다음으로 실제 질량을 구하기 위하여 뉴턴의 법칙에서 금속판에 가해지는 힘과 평판의 반응 유효질량사이의 관계식은 다음과 같다.

$$F_{\max} = M_{eff} A_{\max} \quad (3.1.130)$$

위의 식에서 최대가속도값(A_{\max})은 가속도계의 측정된 최대값에서 거리 보상으로 예측하고 위와 같이 최대충격력이 작용한 후 평판에서 반응되는 유효질량을 위상속도가 전파하는 속도와 접촉시간의 절반의 곱을 반경으로 하는 원판형태를 가진다고 가정하여 식 (3.1.131)와 같은 수식으로 구할 수 있다.

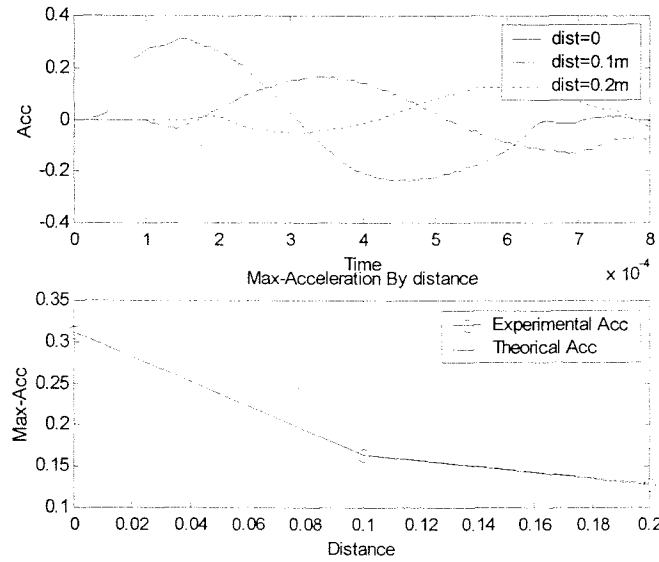


그림 3.1.65 거리에 따른 최대가속도 (a)Time data (b)거리에 따른 최대가속도비교

$$M_{eff} = \pi(C_b T_d)^2 h_{p_{steel}} \quad (3.1.131)$$

금속판에 가해지는 최대충격력은 앞에서 이미 제시한 이론적인 값을 구할 수 있다. 작용, 반작용법칙에 의해서 평판에도 똑같이 최대충격력이 작용한다고 가정한다. 최대충격력관계식은 강구의 반경과 충돌에너지에 관한 식인데 반경은 구하고자 하는 미지수 이고 충돌에너지는 예측된 강구의 최대속도와 반경에 대해서 쓸 수 있다. 물론 강구의 밀도도 필요하다. 최대충격력은 이미 앞에서 아래와 같이 유도되었다.

$$\begin{aligned} F_{\max} &= m A_{\max} \quad (3.1.132) \\ &= m(K_h^{-1} m^{-0.4} V_0^{1.2} R^{0.2}) \end{aligned}$$

$$= K_h^{-1} (m V_0^2)^{0.6} R^{0.2}$$

최대충격력에 대해 참고문헌 [3.4]의 식도 있지만 위의 보고서에 의한 관계식과 아래의 부피밀도 관계식에서 질량은 반지름에 대해서 유도된다.

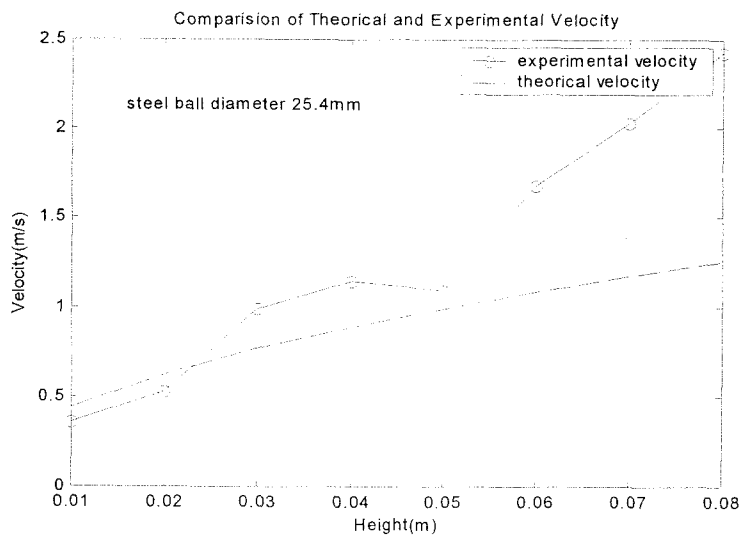
$$m = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho \quad (3.1.133)$$

을 이용해서 최대충격력은 반지름에 대한 관계식으로 아래와 같이 유도된다.

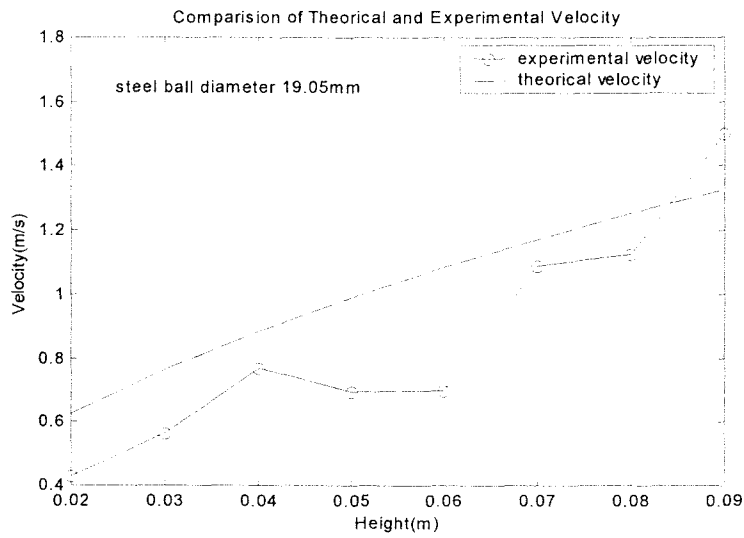
$$F_{\max} = K_h^{-1} \times V_0^{1.2} \times R^2 \times \left(\frac{4}{3} \pi \times \rho\right)^{0.6} \quad (3.1.134)$$

따라서 질량은 반지름을 알면 구할 수 있으므로 지금까지 유도된 식으로 아래와 같은 관계식이 성립되고 최종 유도된다.

$$R^2 \propto K_h \rho_{ball}^{0.6} V_0^{-1.2} \times (C_b T_d)^2 h \rho_{plate} \times A_{\max} \quad (3.1.135)$$

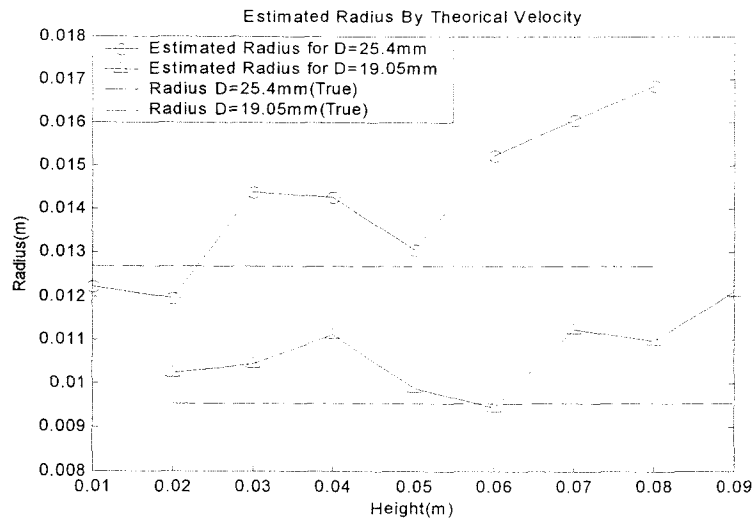


(a) 직경 2.54cm의 강구에 대한 속도예측

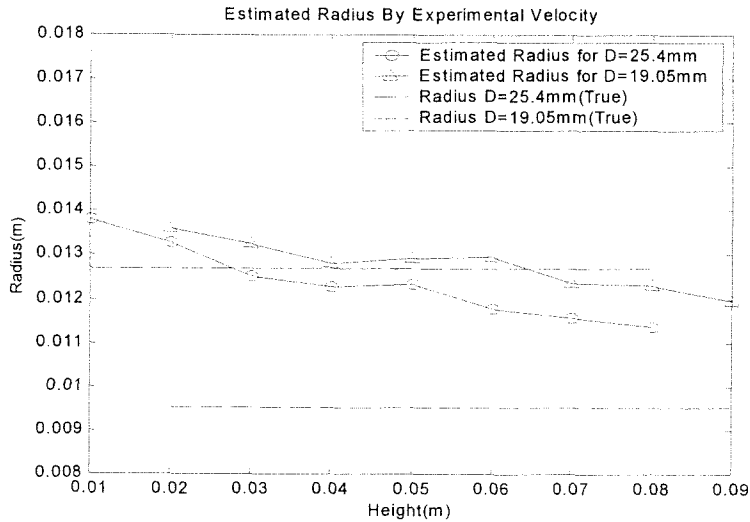


(b) 직경 1.905cm의 강구에 대한 속도예측
 그림 3.1.66 직경에 따른 강구 충격 속도 예측

그림 3.1.66은 강구의 낙하실험을 통하여 속도를 예측하였다. 이론속도는 $V=(2mg)^{0.5}$ 이고 앞의 예측속도와 비교하였고 이는 강구의 반경예측에 오차를 유발할 것이다.



(a) 이론속도에 의한 반경예측



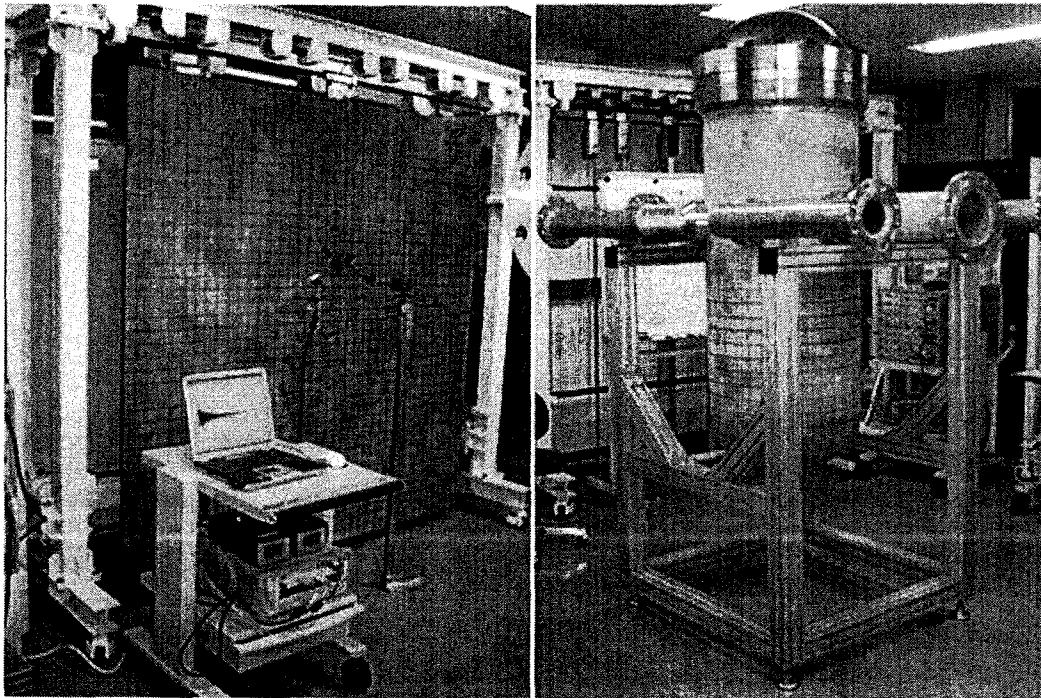
(b) 실제속도에 의한 반경예측

그림 3.1.67 속도에 따른 반경예측

그림 3.1.67은 강구의 반경 예측한 것이다. 이론속도에 의한 반경은 두 반경사이의 차이가 있지만 속도별로 오차가 생기고 예측속도에 의한 반경예측은 다소 오차를 수반한다. 따라서 Hertz 이론을 이용한 강구에 대한 질량 예측은 다소 문제가 있으나 잡음제거 및 시간-주파수 기법을 이용하여 얻어진 결과와 Hertz 이론을 적용하여 질량 예측을 가능 하게 한다.

다. 금속파편 충격신호 시험장치 개발

금속파편 충격 신호 측정 및 DB 구축을 위해 2000mm×2000mm×10mm의 SUS304 재질의 평판을 대상으로 충격 시험을 실시하고, 충격파의 전파 특성 파악, 충격 위치 및 충격 질량 추정 시 신기법을 적용하여 신기법의 타당성 및 충격 진단 소프트웨어 알고리즘을 검증하였다. 한국형 표준 원전 원자로에 대해 상사율을 적용하여 1:8의 축소 모형(그림 3.1.68 (b))을 개발하고 충격파 전파 특성 및 신기법 및 충격 진단 소프트웨어를 검증하였다.



(a) 평판 충격 실험 장치

(b) 원자로 모형 충격 실험장치

그림 3.1.68 충격신호 분석 및 DB구축을 위한 실험 장치

라. 금속파편 충격신호 진단용 소프트웨어 개발

금속파편 충격신호 분석용 소프트웨어는 발전소 1차 계통의 가속도 센서에서 신호 취득 장비(DSP Board)와 신호취득 소프트웨어를 통해 저장된 데이터를 바탕으로 취득된 데이터의 정보를 분석하여 물리적 현상을 파악하고 평가 할 수 있도록 하는 프로그램이다.

개발한 분석 프로그램은 앞서 개발한 신기법 알고리즘을 적용하여 금속파편 충격신호에 대해 보다 신속하고 정확한 분석할 수 있도록 하였다.

분석 프로그램은 윈도우 환경 기반으로 개발하였고, 개발 프로그램은 Visual Studio.Net 버전을 사용하였으며, 사용 언어는 C#을 사용하였다.

프로그램 구성은 첫 번째로 취득된 데이터 파일을 불러들이는 단계를 거치고, 파일 변환 및 인쇄, 저장 등의 프로그램 작업 환경을 구성할 수 있도록 하였다. 다음 단계는 불러온 데이터 파일을 바탕으로 분석작업을 수행하기 전에 배경잡음이 포함된 현장 신호 데이터에서 좀 더 분석이 용이

하도록 앞서 개발한 다양한 배경잡음 감소 기법들을 적용하여 잡음 감소를 이룰 수 있도록 하였다.

배경잡음이 어느 정도 감소된 데이터를 바탕으로 시간-주파수 분석을 실시하는 단계를 거쳐 충격신호의 진위여부를 파악할 수 있도록 하였다.

충격신호로 판단될 경우 다음 단계인 위치추정 모드로 들어가서 충격위치를 파악하고, 금속과편에 의한 충격신호일 경우 충격을 가한 금속과편에 대한 정보 분석을 위해 질량 및 충격 에너지를 추정할 수 있도록 하였다.

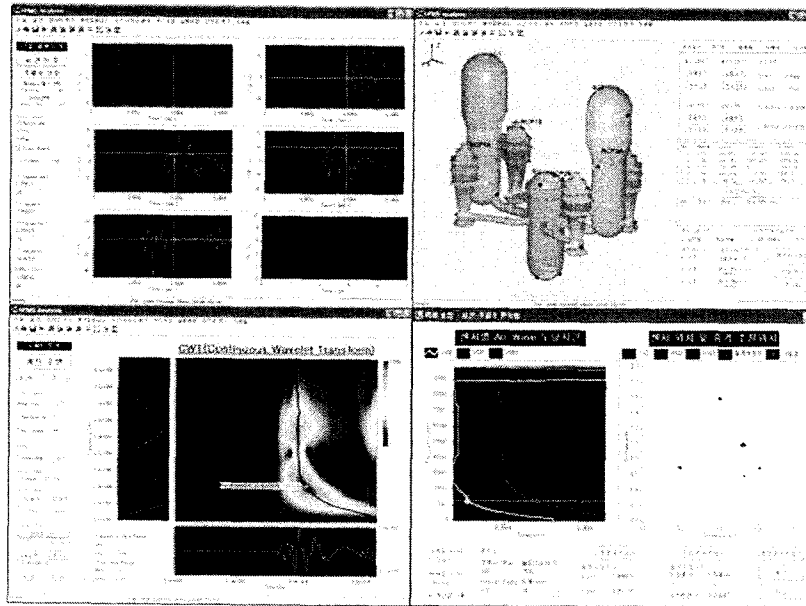


그림 3.1.69 신기법을 적용한 충격 진단 소프트웨어

제 2 절 원자로 잡음신호를 이용한 내부구조물 상태진단 기법 개발

1. 노내·외 중성자 신호를 이용한 상태진단 분석 기법

가압경수로형 원자로의 노외중성자 신호는 본래 노심보호계통의 입력신호로 사용되고 있으며, 부수적으로 원자로 내부구조물의 진동상태 감시/진단에 사용되고 있다. 센서의 위치는 발전소에 따라 차이가 있으나, 주로 원자로 압력용기의 둘레에 동일 평면상으로 약 90°간격으로 설치되어 있으며, 노심의 상부와 하부 또는 상부, 중심부, 하부에 각각 4 개씩 설치되어 있다. 그림 3.2.1은 웨스팅하우스형 원자로의 노외중성자 검출기의 설치 위

치를 보여주며, 한국 표준형 발전소의 경우에는 그림 3.2.2와 같다.

노외중성자 신호분석을 이용하여 알 수 있는 원자로 계통의 진동주파수로
는 원자로 압력용기의 흔들림 모드, 노심지지원통의 beam 및 shell 진동
모우드, 핵연료집합체의 bending 모드 주파수 등이 있으며, 제어봉의 진
동 모드 및 원자로냉각재 펌프에 의한 압력가진 주파수 등도 간접적으
로 확인할 수가 있다. 특히 원자로 내부구조물과 관련한 노심지지원통의
beam 및 shell 진동 모드 그리고 핵연료집합체의 bending 모우는 중
성자 탐지기 사이의 phase의 차이 및 coherence 값의 상대적인 크기에 근
거하여 중성자 신호의 APSD(Auto Power Spectral Density)에 나타나는
peak들을 추출함으로써 구별할 수가 있다^{3.7)}. 그러나 원전에 따라서 CSB
의 beam 진동 모드 성분 및 핵연료집합체의 고차 bending 모드주파
수가 근접하는 경우에는 참고문헌 [3.7]에서 서술한 phase 및 coherence관
계가 성립되지 않을 수가 있다. 핵연료 집합체의 진동모우드의 경우에는
핵연료집합체의 노심평면 위치에 따라서 노외중성자간의 coherence 값의
차이가 크게 나타나므로 노외중성자 만으로는 핵연료집합체의 bending 모
우드를 정확하게 분리하기가 힘들다. 그리고 노외중성자 잡음에는 원자로
내부구조물의 진동성분뿐만 아니라 다른 여러 요인들도 포함되어 있다. 따
라서 최근에는 노내중성자 잡음과 압력변동신호 그리고 원자로 계통의 가
속도신호등을 동시에 분석함으로써 노외중성자 잡음신호분석 결과를 보완
하고 있다.

신호분석 이론에 의하면, 어떤 시스템으로부터 n 개의 신호를 동시에 측
정함으로써 n 개의 서로 독립된 시스템의 고유특성을 알 수 있다. 이 점
에 착안하여 원자로 압력용기의 둘레에 약 90°간격으로 설치된 4 개의 노
외중성자 신호를 동시에 측정, 분석함으로써 노외중성자 신호의 특성을 4
개의 독립된 성분으로 모델링 할 수가 있다. 따라서 앞에서 정의한 노심지
지원통의 beam 및 shell 진동모우드 성분의 phase 특성에 근거하여, 동일
평면에 위치하는 4 개의 노외중성자 신호를 다음과 같이 모델링 할 수 있
다.

$$x_1(t) = g(t) + b_1(t) + b_2(t) + s(t) \quad (3.2.1)$$

$$x_2(t) = g(t) - b_1(t) + b_2(t) - s(t) \quad (3.2.2)$$

$$x_3(t) = g(t) - b_1(t) - b_2(t) + s(t) \quad (3.2.3)$$

$$x_4(t) = g(t) + b_1(t) - b_2(t) - s(t) \quad (3.2.4)$$

여기서 $g(t)$, $b_1(t)$, $b_2(t)$, $s(t)$ 는 각각 global 모우드 성분(모든 방향으로 in-phase를 보이는 성분), 노심지지원통의 beam1 진동모우드 성분, beam2 진동모우드 성분, 그리고 노심지지원통의 shell 진동모우드 성분을 의미한다(그림 3.2.3 참조). 위 모델링으로부터 측정값 $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x_3(t)$, $x_4(t)$ 를 이용하여 각각의 분리된 모우드 성분을 추출할 수가 있다.

식 (3.2.1)식 (3.2.4)로부터 각 모우드 성분에 대하여 연립방정식을 풀면

$$g(t) = \frac{1}{4}\{x_1(t) + x_2(t) + x_3(t) + x_4(t)\} \quad (3.2.5)$$

$$b_1(t) = \frac{1}{4}\{x_1(t) - x_2(t) - x_3(t) + x_4(t)\} \quad (3.2.6)$$

$$b_2(t) = \frac{1}{4}\{x_1(t) + x_2(t) - x_3(t) - x_4(t)\} \quad (3.2.7)$$

$$s(t) = \frac{1}{4}\{x_1(t) - x_2(t) + x_3(t) - x_4(t)\} \quad (3.2.8)$$

로 표현된다. 여기서 각 신호에 대한 FFT 결과를

$$G(f) \equiv F[g(t)] \quad (3.2.9)$$

$$B_1(f) \equiv F[b_1(t)] \quad (3.2.10)$$

$$B_2(f) \equiv F[b_2(t)] \quad (3.2.11)$$

$$S(f) \equiv F[s(t)] \quad (3.2.12)$$

와 같이 정의하면, 분리된 진동 모우드 성분들의 APSD는 다음과 같이 쉽게 얻을 수가 있다:

$$\begin{aligned}
P_{gg}(f) &= G(f) \times G^*(f) \\
&= \frac{1}{16} \{X_1(f) + X_2(f) + X_3(f) + X_4(f)\} \\
&\quad \times \{X_1(f) + X_2(f) + X_3(f) + X_4(f)\}^* \\
&= \frac{1}{16} [G_{11}(f) + G_{22}(f) + G_{33}(f) + G_{44}(f) \\
&\quad + 2Re\{G_{12}(f) + G_{13}(f) + G_{14}(f) + G_{23}(f) \\
&\quad + G_{24}(f) + G_{34}(f)\}]
\end{aligned} \tag{3.2.13}$$

$$\begin{aligned}
P_{b_1b_1}(f) &= B_1(f) \times B_1^*(f) \\
&= \frac{1}{16} \{X_1(f) - X_2(f) - X_3(f) + X_4(f)\} \\
&\quad \times \{X_1(f) - X_2(f) - X_3(f) + X_4(f)\}^* \\
&= \frac{1}{16} [G_{11}(f) + G_{22}(f) + G_{33}(f) + G_{44}(f) \\
&\quad + 2Re\{-G_{12}(f) - G_{13}(f) + G_{14}(f) \\
&\quad + G_{23}(f) - G_{24}(f) - G_{34}(f)\}]
\end{aligned} \tag{3.2.14}$$

$$\begin{aligned}
P_{b_2b_2}(f) &= B_2(f) \times B_2^*(f) \\
&= \frac{1}{16} \{X_1(f) + X_2(f) - X_3(f) - X_4(f)\} \\
&\quad \times \{X_1(f) + X_2(f) - X_3(f) - X_4(f)\}^* \\
&= \frac{1}{16} [G_{11}(f) + G_{22}(f) + G_{33}(f) + G_{44}(f) \\
&\quad + 2Re\{G_{12}(f) - G_{13}(f) - G_{14}(f) \\
&\quad - G_{23}(f) - G_{24}(f) + G_{34}(f)\}]
\end{aligned} \tag{3.2.15}$$

$$\begin{aligned}
P_{ss}(f) &= S(f) \times S^*(f) \\
&= \frac{1}{16} \{X_1(f) - X_2(f) + X_3(f) + X_4(f)\} \\
&\quad \times \{X_1(f) - X_2(f) + X_3(f) + X_4(f)\}^* \\
&= \frac{1}{16} [G_{11}(f) + G_{22}(f) + G_{33}(f) + G_{44}(f) \\
&\quad + 2Re\{-G_{12}(f) + G_{13}(f) - G_{14}(f) \\
&\quad - G_{23}(f) + G_{24}(f) - G_{34}(f)\}]
\end{aligned} \tag{3.2.16}$$

위에서 기술한 바와 같이, 이제까지의 모우드 분리 기법은 노외중성자 검출기가 원자로의 둘레에 정확하게 90°간격으로 설치되어 있다는 가정 하에서 유도되었다. 국내 원전의 경우 대부분이 90°간격으로 설치되어 있으나 일반적으로는 그렇지 않은 경우도 있다. 따라서 동일 평면상의 노외중성자 검출기의 설치간격이 90°를 벗어나는 경우에는, 원자로 내부구조물의 모우드 성분의 크기에 대한 보정을 해주어야 한다. 그리고 beam1 및 beam2 모우드의 경우에는, 실제로 센서에 잡음성분으로 측정되어지는 변동량이 실제크기에 비하여 45°로 기울어져 있다. 즉, 그림 3.2.4에서 보는 바와 같이 동일 평면상의 4 개의 노외중성자 검출기의 간격이 90°이거나

또는 90°로부터 각각 θ (degree)만큼 벗어나 있는 경우에는, beam1, beam2 및 shell 모드 성분의 크기를 다음과 같이 보정하여 노외중성자 신호를 모델링하여야 한다:

$$x_1(t) = g(t) + b_1(t) \cos(45 + \theta) + b_2(t) \cos(45 - \theta) + s(t) \cos(\theta) \quad (3.2.17)$$

$$x_2(t) = g(t) - b_1(t) \cos(45 + \theta) + b_2(t) \cos(45 - \theta) - s(t) \cos(\theta) \quad (3.2.18)$$

$$x_3(t) = g(t) - b_1(t) \cos(45 + \theta) - b_2(t) \cos(45 - \theta) + s(t) \cos(\theta) \quad (3.2.19)$$

$$x_4(t) = g(t) + b_1(t) \cos(45 + \theta) - b_2(t) \cos(45 - \theta) - s(t) \cos(\theta) \quad (3.2.20)$$

위로부터 각 모드 성분에 대하여 연립방정식을 풀면

$$g(t) = \frac{1}{4} \{ x_1(t) + x_2(t) + x_3(t) + x_4(t) \} \quad (3.2.21)$$

$$b_1(t) = \frac{1}{4 \cos(45 + \theta)} \{ x_1(t) - x_2(t) - x_3(t) + x_4(t) \} \quad (3.2.22)$$

$$b_2(t) = \frac{1}{4 \cos(45 - \theta)} \{ x_1(t) + x_2(t) - x_3(t) - x_4(t) \} \quad (3.2.23)$$

$$s(t) = \frac{1}{4 \cos(\theta)} \{ x_1(t) - x_2(t) + x_3(t) - x_4(t) \} \quad (3.2.24)$$

로 표현된다. 여기서 각 신호에 대한 FFT 결과를

$$G(f) \equiv F[g(t)] \quad (3.2.25)$$

$$B_1(f) \equiv F[b_1(t)] \quad (3.2.26)$$

$$B_2(f) \equiv F[b_2(t)] \quad (3.2.27)$$

$$S(f) \equiv F[s(t)] \quad (3.2.28)$$

와 같이 정의하면, 분리된 진동 모드 성분들의 APSD는 다음과 같이 쉽게 얻을 수가 있다:

$$\begin{aligned}
P_{gg}(f) &= G(f) \times G^*(f) \\
&= \frac{1}{16} \{X_1(f) + X_2(f) + X_3(f) + X_4(f)\} \\
&\quad \times \{X_1(f) + X_2(f) + X_3(f) + X_4(f)\}^* \\
&= \frac{1}{16} [G_{11}(f) + G_{22}(f) + G_{33}(f) + G_{44}(f) \\
&\quad + 2\text{Re}\{G_{12}(f) + G_{13}(f) + G_{14}(f) \\
&\quad + G_{23}(f) + G_{24}(f) + G_{34}(f)\}]
\end{aligned} \tag{3.2.29}$$

$$\begin{aligned}
P_{b_1b_1}(f) &= B_1(f) \times B_1^*(f) \\
&= \frac{1}{16 \cos(45 + \theta)} \{X_1(f) - X_2(f) - X_3(f) + X_4(f)\} \\
&\quad \times \{X_1(f) - X_2(f) - X_3(f) + X_4(f)\}^* \\
&= \frac{1}{16 \cos(45 + \theta)} [G_{11}(f) + G_{22}(f) + G_{33}(f) + G_{44}(f) \\
&\quad + 2\text{Re}\{-G_{12}(f) - G_{13}(f) + G_{14}(f) \\
&\quad + G_{23}(f) - G_{24}(f) - G_{34}(f)\}]
\end{aligned} \tag{3.2.30}$$

$$\begin{aligned}
P_{b_2b_2}(f) &= B_2(f) \times B_2^*(f) \\
&= \frac{1}{16 \cos(45 - \theta)} \{X_1(f) + X_2(f) - X_3(f) - X_4(f)\} \\
&\quad \times \{X_1(f) + X_2(f) - X_3(f) - X_4(f)\}^* \\
&= \frac{1}{16 \cos(45 - \theta)} [G_{11}(f) + G_{22}(f) + G_{33}(f) + G_{44}(f) \\
&\quad + 2\text{Re}\{G_{12}(f) - G_{13}(f) - G_{14}(f) \\
&\quad - G_{23}(f) - G_{24}(f) + G_{34}(f)\}]
\end{aligned} \tag{3.2.31}$$

$$\begin{aligned}
P_{ss}(f) &= S(f) \times S^*(f) \\
&= \frac{1}{16 \cos(\theta)} \{X_1(f) - X_2(f) + X_3(f) + X_4(f)\} \\
&\quad \times \{X_1(f) - X_2(f) + X_3(f) + X_4(f)\}^* \\
&= \frac{1}{16 \cos(\theta)} [G_{11}(f) + G_{22}(f) + G_{33}(f) + G_{44}(f) \\
&\quad + 2\text{Re}\{-G_{12}(f) + G_{13}(f) - G_{14}(f) \\
&\quad - G_{23}(f) + G_{24}(f) - G_{34}(f)\}]
\end{aligned} \tag{3.2.32}$$

한국 표준형 원자로의 경우에 대하여 기존의 신호분석기법을 이용하여 구한 노외중성자 신호의 APSD 및 실시간 모드 분리기법을 적용하여 구한 원자로내부구조물의 각 진동 모드별 APSD가 그림 3.2.5 및 그림 3.2.6에 각각 나와 있다. 여기서 보는 바와 같이 모드 분리 기법을 적용할 경우, 각 모드별 주파수의 위치를 뚜렷하게 구분할 수 있음을 알 수 있다. 그리고 노외중성자 검출기의 위치변화를 보정한 결과(그림 3.2.7)로부터는 전체적으로 beam 모드 성분이 지배적임을 확인할 수가 있다. 그림 3.2.8은 노내외 중성자 잡음신호를 이용하여 핵연료집합체의 고유진동수를 분석하기 위한 신호추정 위치이다. 그 결과, 그림 3.2.9, 그림 3.2.11

에서 보는 바와 같이 약 2.3 Hz 및 5.7 Hz 성분은 각각 서로 상관도가 높으면서 phase가 in-phase, out-of-phase로 나타난다. 이로부터 각 주파수에 해당하는 진동모우드를 그림 3.2.12와 같이 예측할 수 있다.

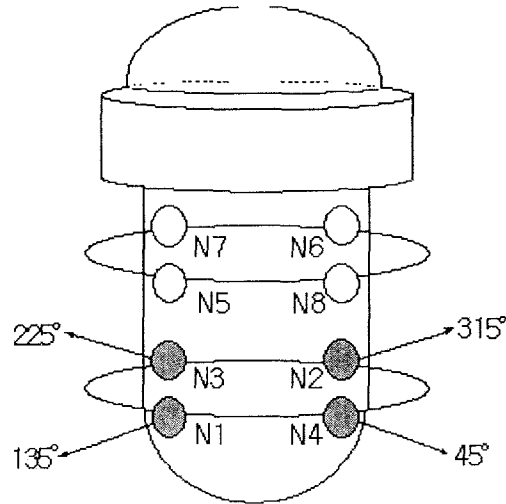


그림 3.2.1 웨스팅하우스형 원자로의 노외중성자 검출기 설치위치

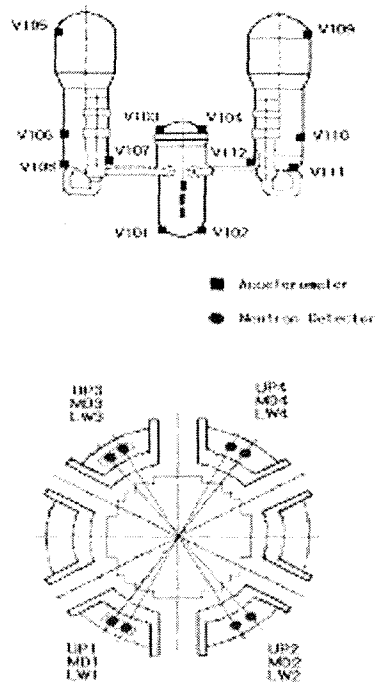


그림 3.2.2 한국 표준형 원자로의 노외중성자 검출기 설치위치

원자로 Core Supported Barrel의 진동 Mode

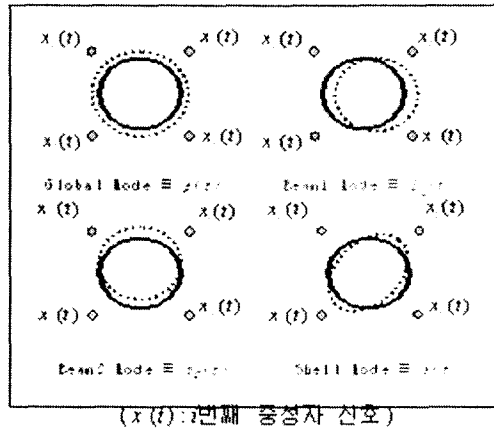


그림 3.2.3 노심지지원통 집합체의 진동모우드 형상

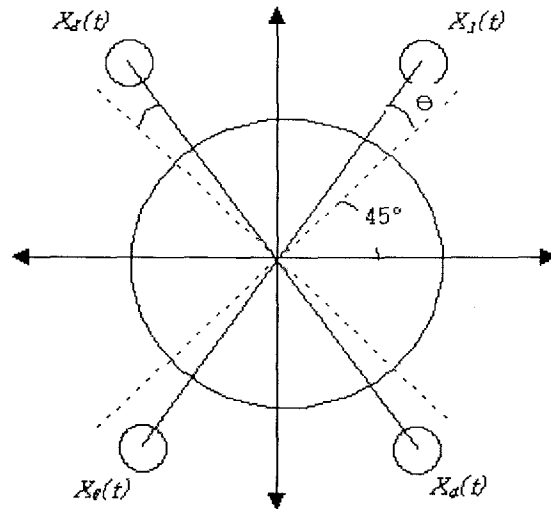


그림 3.2.4 노외중성자 검출기의 설치 위치 변화

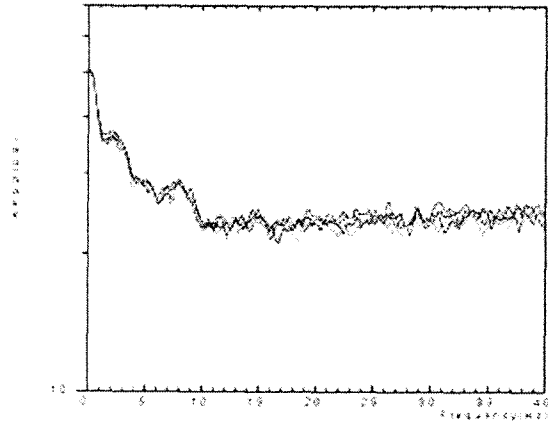


그림 3.2.5 노이즈신호의 APSD

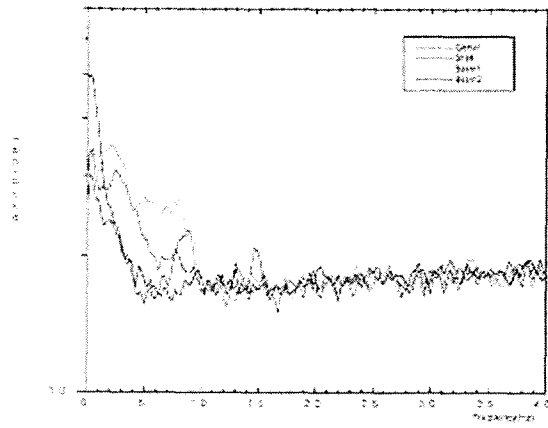


그림 3.2.6 진동 모드별 APSD

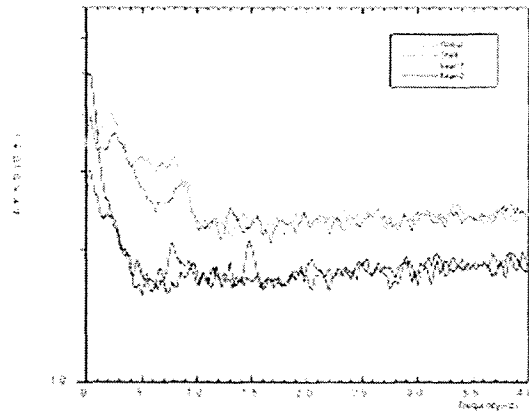


그림 3.2.7 위치변화를 보정한 진동 모드별 APD

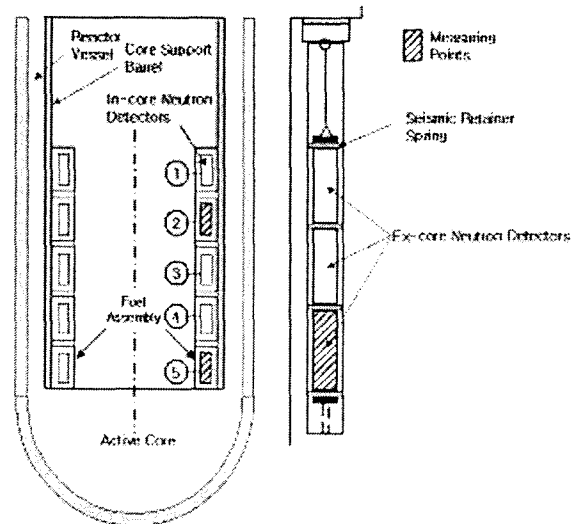


그림 3.2.8 노내·외 중성자 동시 측정 위치

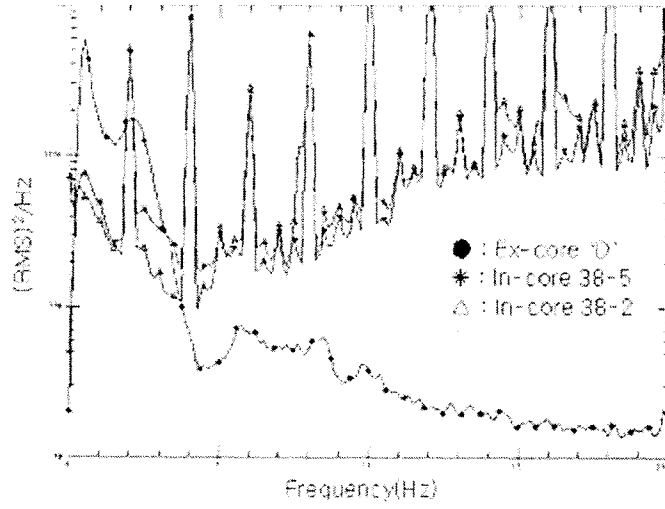


그림 3.2.9 노내·외중성자 잡음 APSD

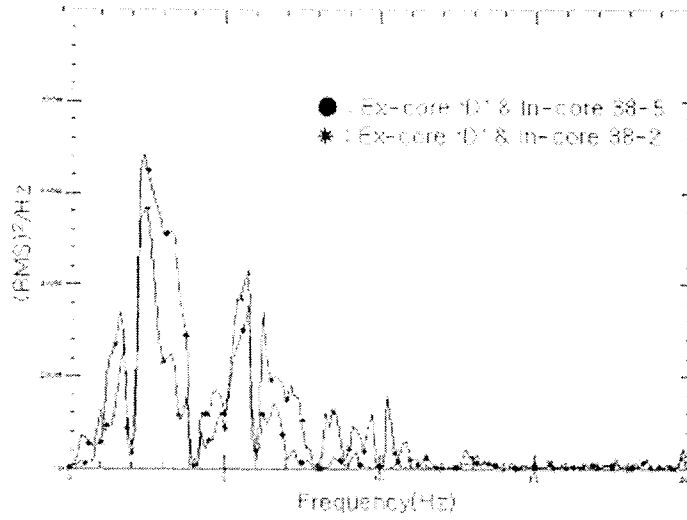


그림 3.2.10 노내·외 중성자잡음 CPSD

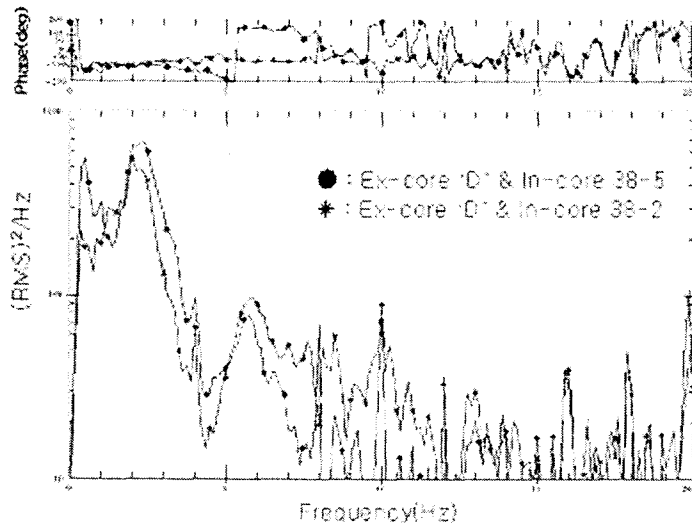


그림 3.2.11 노내 · 외 중성자잡음 Coherence

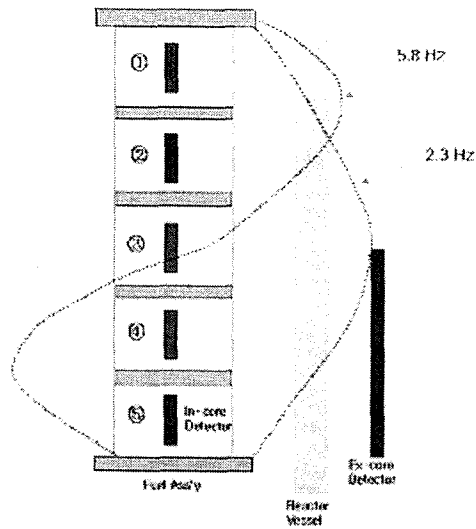


그림 3.2.12 핵연료집합체 진동 모드

2. 원자로내부구조물의 지지조건 결함에 대한 동특성 해석 모델 개발

가. 원자로 내부구조물의 3차원 해석 모델 개발 및 검증

원자로 구조물의 상세 도면을 통하여 동특성에 영향을 미치는 구성요소와 유한요소 모델에 적합한 구조요소를 선정하여 그림 3.2.13과 같이 3차원 원자로 구조 모델을 생성하였다. 아울러, 3 차원 모델을 토대로 상용 프로그램인 TrueGrid를 사용하여 원자로 구조물의 주요 구성 요소인 reactor

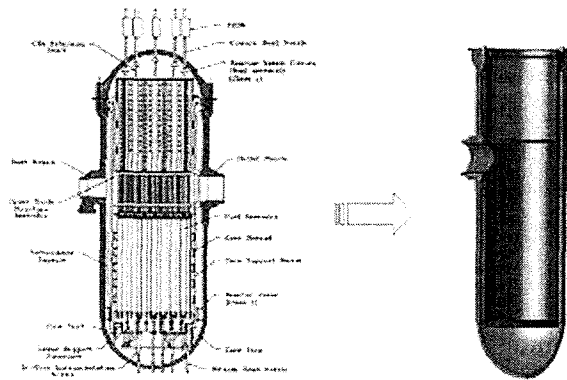


그림 3.2.13 원자로 내부구조물 및 3차원 모델링

vessel, upper guide structure, CSB, hold-down ring, alignment key, 그리고 내부 구성 유체에 대하여 유한요소 모델링을 수행하였다. 유한요소 모델링에 적용된 구조물은 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS에서 제공하는 Solid45 요소를 사용하였으며, 유체는 유동이 없는 정적유체로 가정하였기 때문에 Fluid80 요소를 적용하였다. 3차원 모델링 및 유한요소 해석 모델의 생성에 대한 상세한 방법은 참고문헌 [3.8]에 기술되어 있으며, 본 연구에 대한 3차원 유한요소 모델은 그림 3.2.14에서 보는 바와 같다. 원자로 내부 구조물의 주요 요소 이외의 구성요소들은 강성 및 질량효과를 고려하여 각 절점에 부가질량으로 적용하였다.

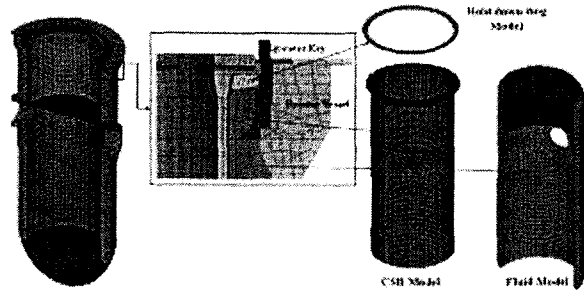


그림 3.2.14 원자로 구조물의 유한요소 모델링

원자로 내부구조물의 3 차원 유한요소 모델을 바탕으로 하여 진동 모우드 해석을 수행하였다. 모우드 해석을 통하여 얻어진 동특성은 실제 원자로의 정상상태 운전 시 원자로 내부 구조물의 응답을 예측하기 위하여 이용되며, 원자로 내부 구조물의 동적 거동에 이상상태가 발생할 경우 동특성 변화의 원인을 파악하는데 기초자료가 된다. 본 연구에서 관심 있는 원자로 내부 구조물은 CSB의 동적 거동이다. 원자로 용기와 CSB사이에 존재하는 유체의 영향으로 인해 CSB의 동특성 변화를 초래하며, 또한 유체의 영향에 따라서 모우드 주파수가 달라지기 때문에 유체의 경계조건 선정이 매우 중요하다. 따라서 유체의 특성과 CSB의 주요 모우드가 beam 모우드와 shell 모우드임을 고려한다면 유체와 CSB사이의 경계조건으로서는 반경방향으로 커플링이 필요하다. 이러한 원자로 내부 구조물의 구조적 특성과 경계조건을 바탕으로 하여 진동 모우드 해석을 수행하였다. 원자로 내부 구조물, CSB의 동특성 해석 결과가 그림 3.2.15에서 나타나 있다. CSB의 1차 beam 모우드 주파수는 7.68.4 Hz이며, 2차 shell 모우드 주파수는 13.614.7 Hz, 3차 shell 모우드 주파수는 18.218.8 Hz로 나타났음. 그림 3.2.16의 측정결과와 비교하면 7.58.5 Hz는 CSB Beam 모드로 판단되는 주파수 특성이 있고, 14.5 Hz가 나타나는 것을 볼 때 해석결과와 잘 일치함을 볼 수 있다. 따라서 원자로 내부 구조물의 3차원 해석 모델이 타당함을 알 수 있으며, 차후 원자로 내부 구조물의 결합해석 모델로 사용이 가능한 것으로 판단되었다.

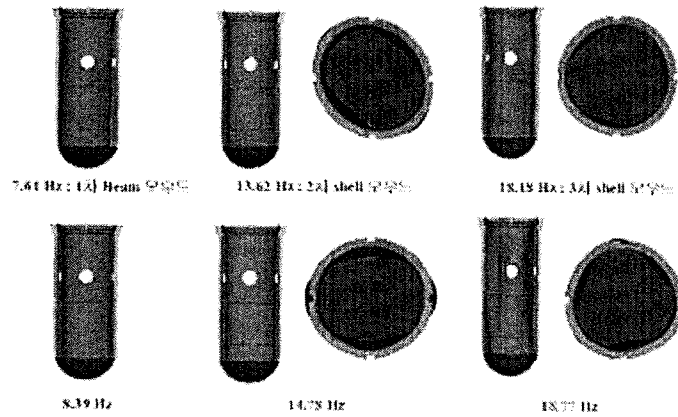


그림 3.2.15 해석 결과

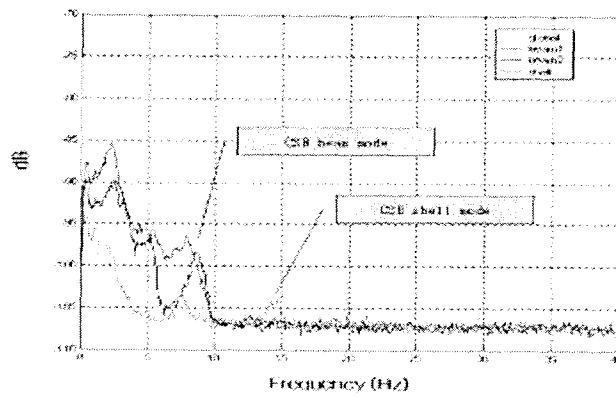


그림 3.2.16 측정 결과

나. 원자로 내부구조물 지지조건 결함 시뮬레이션 및 증상 DB 구축

원자로 내부구조물의 추정 가능한 결함모델로서는(그림 3.2.17 참조), 1) Hold-down ring 결함 모델(Pre-Stress 기능상실에 의한 결함: 전체 기능상실, 부분적 기능상실, Hold-down ring의 Crack에 의한 결함), 2) Alignment Key 결함 모델(Alignment key의 Crack 손상으로 인한 결함), 3) Hold-down ring 결함 및 Alignment Key 결함)등 크게 3 가지의 결함 모델로 분류되어진다.

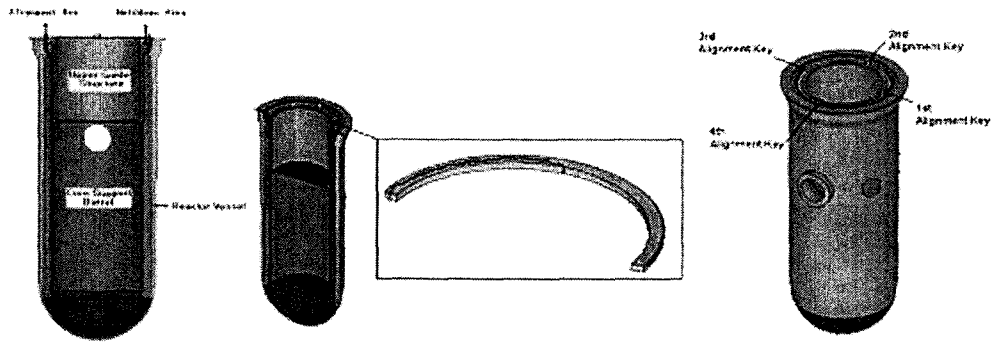


그림 3.2.17 원자로 내부구조물 결합 모델

각각의 결합 모델에 대한 자유진동 해석을 수행하여 고유진동수 변화 및 관련 모드형상을 추출하고, 정상상태 모델에 대한 강제진동 해석을 수행 (Harmonic Analysis 및 Random Vibration Analysis)하여, 결합상태 별 진동주파수 변화를 정량적으로 관찰하여 DB화 하였다. 그 결과, 그림 3.2.18에서 보는 바와 같이 결합의 종류에 상관없이 beam 진동 모우드가 민감하게 변화함을 볼 수 있다.

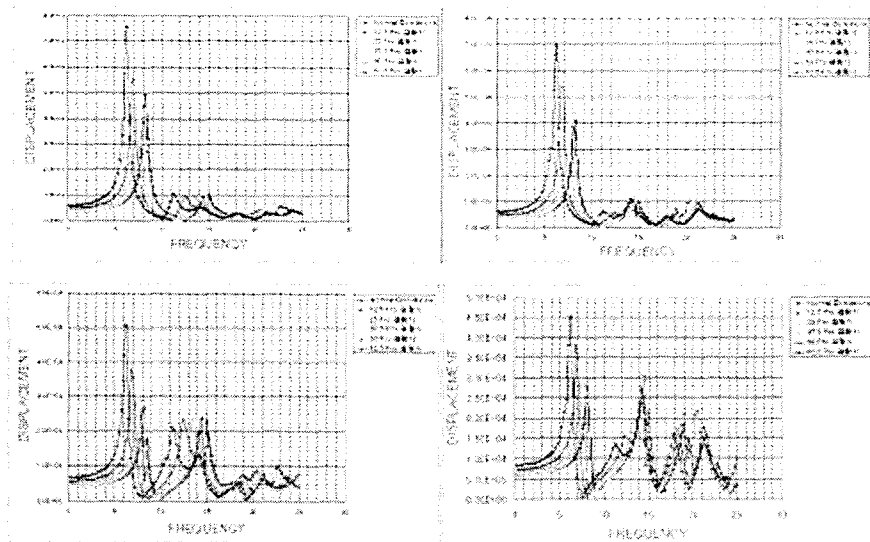


그림 3.2.18 원자로 내부구조물의 결합증상 해석 결과

제 3 절 연구결과 및 활용방안

1. 연구결과

비정상상태 신호분석기법을 연구한 결과, 금속과편 이물질의 위치 추정을 위해서는 스무딩된 위그너 분포가 적합함을 확인하였다. 금속과편신호에 포함된 배경잡음 감소를 위해서는 스펙트럼 감산법 보다는 적응필터를 이용한 잡음감소 기법이 우수함을 알 수 있었다. 그리고 노내·외 중성자 잡음 신호를 종합적으로 분석한 결과, 한국표준형 원자로의 노심지지원통의 기본 고유진동수는 beam mode의 경우 약 8 Hz, shell mode 의 경우 약 14.5 Hz 이며, 핵연료집합체의 경우 beam 1st mode의 경우 2.3 Hz, beam 2nd mode의 경우 약 5.7 Hz 인 것으로 나타났다. 또한 holddown ring의 결합은 그 종류에 상관없이 노심지지원통의 beam 진동 모우드를 가장 크게 변화 시킨다는 사실을 확인하였다.

2. 활용방안

기존의 발전소에서 운용중인 LPMS의 감시 및 진단 성능의 향상에 직접적으로 적용이 가능하며, 원자로 내부구조물의 가동중 구조건전성 감시 및 이상상태 진단에 매우 유효하게 활용이 가능하다. 특히, 과제 수행기간 중에 위 기술들을 활용하여, 영광 5,6 호기의 열소매 이탈 사고 시 사고의 발생 시기를 파악한 바 있다.

제 4 장

온라인 감시 기술 개발

제 4 장 온라인 감시 기술 개발

제 1 절 탄성관의 유도초음파 기반기술 연구

1. 연구 개요

현재 일반적으로 사용되는 배관 결함의 탐상기법은 초음파(UT), 방사선(RT), 와전류(ECT), 누출자력(MFL) 등의 특성을 이용한 기법으로 배관의 국부적인 탐상만 가능하여 센서를 배관의 길이 방향으로 이동시켜야만 하는데 이러한 방법들은 온라인 감시에 사용하기에는 어렵다. 따라서 온라인 실시간 감시를 위해서는 한 지점에서 전체를 검사할 수 있는 광범위 비파괴 검사 기술이 요구되는데 유도초음파가 그 중 하나이다.

본 연구에서는 원전 기기 결함 탐지에 필요한 유도초음파의 기반 기술에 대한 이론적 연구를 수행하였으며, 증기발생기 세관과 2인치 스테인리스 스틸 배관을 대상으로 선정하여 이들에 대한 분산선도를 계산하였다. 증기발생기 세관의 경우 모드 별 입사각을 계산하고 입사각 별 발생하는 초음파 모드를 STFT와 군속도 측정을 통해 확인하였다. 또 유도 초음파가 배관의 곡관부를 지날 때의 모드 변환 여부를 확인하였다. 유도초음파에 있어서는 어느 단일 기법만으로는 복잡한 유도초음파의 모드를 확인하는 것이 매우 어렵다. 본 연구에서는 FR 신호, Fourier Transform 자료, 위상속도 분산곡선, 군속도 분산곡선, 그리고 STFT 자료를 유기적으로 결합하여 종합적으로 유도초음파의 모드를 판별하는 기법을 확립하였다. 또한 결합 검출에 최적인 유도 초음파 모드를 선정하는 기준을 정하고 이에 따라서 증기발생기 세관의 경우 최적 모드를 선정하였으며 이를 실험적으로 확인하였다.

2. 유도초음파 기술의 이론적 배경 [4.1]

가. 탄성관에서의 유도초음파의 전파

피검사체 내부로 사각 입사된 종파나 횡파는 경계면에서 반사시 모드변환

(mode conversion)을 통해 수많은 종파와 횡파로의 다중반사를 일으키게 된다. 이때, 피검사체의 두께에 비해 모드 변환된 종파 및 횡파의 파장이 무시될 수 없는 경우 반사된 이들 부분파동모드(partial wave modes)들 사이에는 상호간섭(interference)과 중첩(superposition)이 발생하게 되는데, 이와 같은 파동의 중첩은 상하 경계면에서 반사된 종파와 횡파, 각 부분 파동 모드의 파동벡터(wave vector)성분 중 피검사체의 종방향으로 진행하는 파동성분을 나타내는 k 성분을 제외한 두께 방향으로의 파동성분인 p , q 로 표시된 파동성분 사이의 상쇄간섭(destructive interference)효과를 발생시킨다.

p , q 는 모드변환에 의해 피검사체 내에서 종파와 횡파로 다중 반사된 부분 파동모드의 파동벡터와 길이방향 벡터성분 k 로부터 Pythagoras의 삼각법을 이용하여 두께 방향 파동벡터 성분을 나타낼 수 있다[4.2].

$$q^2 \equiv k_r^2 - k^2 \equiv \left(\frac{w}{c_r}\right)^2 - k^2 \quad p^2 \equiv k_l^2 - k^2 \equiv \left(\frac{w}{c_l}\right)^2 - k^2 \quad (4.1.1)$$

여기서 p , q 는 두께 방향의 파동벡터 성분을 나타낸다. 이와 함께 피검체의 길이 방향으로의 보강 간섭(constructive interference)효과를 통해 두께 방향이 아닌 종방향으로 전파하게 되는 새로운 형태의 초음파가 합성되는데 이를 유도초음파(guided waves)라고 부른다[4.2].

일반적인 유도초음파의 이론적인 합성형태와 전파 원리를 그림 4.1.1에 나타내었다.

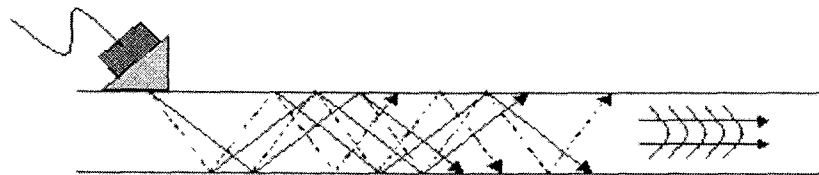


그림 4.1.1 유도초음파 발생 및 전파원리

유도초음파는 앞에서 살펴본 파동 간섭이 가능한 특성의 재료상수(종파, 횡파속도 및 밀도), 두께, 주파수하에서만 발생이 가능하며 이들 조건의 변화에 따라 길이방향으로의 파동 벡터 성분이 다른(파동의 위상속도가

다른) 다양한 모드가 발생된다.

기존의 종파 및 횡파와 달리, 파동 전파시 유도초음파 각 모드의 입자변위 (particle displacement)는 파의 진행방향에 평행한 성분과 수직한 성분을 모두 가지게 되며 이들은 파형구조(wave structure)라고 불리는 피검사체의 두께 방향에 대한 특정 분포를 나타냄으로서 특정 유도초음파 모드의 검사 민감도와 송·수신 감도를 결정짓는 인자가 된다.

유도초음파의 대표적인 물리적 특성중 하나는 균일 등방성 무한매질내의 종파나 횡파와 달리 각 파동모드의 속도가 주파수에 따라 변화하는 분산적(dispersive) 특성을 가지고 있다는 점이다. 주파수 변화 시 간섭조건이 바뀌게 되고 이에 따라 유도초음파의 전파방향으로 새로운 파동벡터가 얻어지므로 이러한 분산성을 가지게 된다.

유도초음파를 발생시키고 이를 수신하여 해석하기 위해서는 탐상조건에 따라 발생 가능한 유도초음파의 모드를 예측하고 이에 따라 신호를 해석하여야 하는데, 이를 위해 주파수와 두께 그리고 속도사이의 함수관계를 나타내는 분산곡선(dispersion curves)을 이용하여 해석한다.

그림 4.1.2에 나타낸 것과 같은 등방성 탄성관을 전파하는 초음파는 관의 내벽과 외벽의 Navier's 방정식으로부터 유도되어진다. 이때 유도초음파는 유한한 주파수대역을 가지고 있는데, 전파속도가 진동수에 의존하기 때문에 시간이 지남에 따라 파형이 변하게 된다. 체적파와 다른 또 한 가지는 여러 종류의 유도초음파 모드가 같은 진동수영역에서 존재할 수 있다는 것이다. 특히 관에서는 중심축에 대해 대칭(axisymmetric) 및 비대칭(non-axisymmetric) 모드가 존재하게 된다. 그러므로 유도초음파에 대한 연구를 수행할 때는 우선 존재할 수 있는 유도초음파 모드를 이론적으로 찾아내야 한다. 이와 같은 모드들은 분산선도로 나타낼 수 있는데, 분산선도를 계산하는 것은 식(4.1.2)와 같은 운동방정식에서부터 출발한다[4.3].

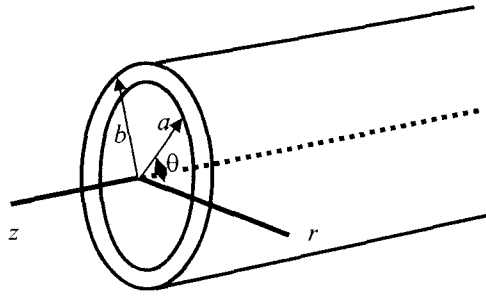


그림 4.1.2 자유경계면, 내반지름 a, 외반지름 b, 무한길이를 가진 중공형 실린더

$$\mu \nabla^2 \mathbf{u} + (\lambda + \mu) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}) = \rho (\partial^2 \mathbf{u} / \partial t^2) \quad (4.1.2)$$

여기서 \mathbf{u} 는 입자의 변위 벡터, ρ 은 밀도, μ 와 λ 는 Lamé의 탄성 상수이다. 그림 2. 2와 같이 내벽과 외벽의 반지름이 a 와 b 이고 경계면이 자유로운 경우, 경계조건은 식(4.1.3)과 같이 쓸 수 있다.

$$\sigma_{rr} = \sigma_{rz} = \sigma_{r\theta} = 0 \quad \text{at } r = a \quad \text{and } r = b \quad (4.1.3)$$

여기서, σ_{rr} , σ_{rz} , $\sigma_{r\theta}$ 는 원통형 좌표계(cylindrical coordinator system)에서 수직응력과 전단응력을 나타내는 것이고, r 은 탄성관의 반경방향 위치를 나타낸다. 식(4.1.2)를 \mathbf{u} 에 대해 풀고 변위-변형률 관계를 이용하여 응력을 구한다. 여기에서, 스칼라 포텐셜 Φ 과 벡터 포텐셜 \mathbf{H} 항으로 변위를 표현한다면, 식(4.1.2)로부터 분산선도를 구하기 위한 계산을 좀 더 간단히 수행할 수 있다.

$$\mathbf{u} = \nabla \Phi + \nabla \times \mathbf{H} \quad (4.1.4)$$

여기서,

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \quad (4.1.5)$$

$$\begin{aligned} C_L^2 \nabla^2 \Phi &= \partial^2 \Phi / \partial t^2 \\ C_T^2 \nabla^2 \mathbf{H} &= \partial^2 \mathbf{H} / \partial t^2 \end{aligned} \quad (4.1.6)$$

여기서, $C_L^2 = (\lambda + 2\mu)/\rho$ 이고 $C_T^2 = \mu/\rho$ 이다. (4.1.7)

C_L 과 C_T 는 각각 무한한 매질에서 종파와 횡파속도이다. 파동방정식 식 (4.1.5)를 만족하는 해를 식(4.1.8)의 형태로 가정할 수 있다.

$$\begin{aligned}\Phi &= f(r) \cos(M\theta) \cos(\omega t + kz) \\ H_r &= g_r(r) \sin(M\theta) \sin(\omega t + kz) \\ H_\theta &= g_\theta(r) \cos(M\theta) \sin(\omega t + kz) \\ H_z &= g_3(r) \sin(M\theta) \cos(\omega t + kz)\end{aligned}\quad (4.1.8)$$

여기서 k 는 파수이고, 알려지지 않은 함수 f 와 g 의 일반적인 해는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}f &= A Z_M(\alpha_1 r) + B W_M(\alpha_1 r) \\ g_3 &= A_3 Z_M(\beta_1 r) + B_3 W_M(\beta_1 r) \\ 2g_1 = (g_r - g_\theta) &= 2A_1 Z_{M+1}(\beta_1 r) + 2B_1 W_{M+1}(\beta_1 r) \\ 2g_2 = (g_r + g_\theta) &= 2A_2 Z_{M-1}(\beta_1 r) + 2B_2 W_{M-1}(\beta_1 r)\end{aligned}\quad (4.1.9)$$

여기서, $\alpha^2 = \omega^2/v_1^2 - k^2$ 이고 $\beta^2 = \omega^2/v_2^2 - k^2$ 이다. (4.1.10)

그리고 $\alpha_1 = |\alpha r|$ 이며 $\beta_1 = |\beta r|$ 이다. (4.1.11)

여기서, Z_M 과 W_M 은 α 와 β 가 실수인가 허수인가에 따라 Bessel 함수 J_M 과 Y_M 으로 나타내거나, modified Bessel 함수, I_M 과 K_M 이 된다. 식 (4.1.8)을 식(4.1.4)으로 대입하여 각 방향의 변위를 구하면 식(4.1.12)와 같은 해를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
u_r &= [f' + (M/r) g_3 + K g_1] \cos M\Theta \cos(\omega t + kz) \\
u_\theta &= [-(M/r)f + k g_1 + g'_3] \sin M\Theta \cos(\omega t + kz) \\
u_z &= [-kf - g'_1 - (M+1)(g_1/r)] \sin M\Theta \cos(\omega t + kz)
\end{aligned} \tag{4.1.12}$$

여기서, 원주방향 차수(circumferential order)는 0, 1, 2, 3 ... 이고, 프라임은 반경 방향인 u_r , 원주방향인 u_θ , 그리고 축 방향인 u_z 를 r 에 대해 각각 미분한 것이다. 선형 탄성 이론에서 잘 알려진 변위-변형률과 응력-변형률 관계를 이용하여 응력에 대한 식을 구한 후, 식(4.1.3)의 경계조건에 대해 정리하면 6개의 선형방정식을 얻을 수 있는데, 이를 행렬 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$C_{ij} X = 0 \tag{4.1.13}$$

여기서, C_{ij} 는 선형탄성계수 행렬이고, X 는 6개의 미지상수를 이루는 벡터 {A, B, A1, B1, A3, B3}이다. 식(4.1.13)의 제차시스템(homogeneous system)이 자명하지 않은 해(nontrivial solution)를 가지기 위해서는 C_{ij} 인 행렬의 판별식이 0이 되어야 하므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$D = | C_{ij} | = 0 \tag{4.1.14}$$

식 (4.1.14)은 진동수식(frequency equation)으로 불리어지는데, 이로부터 위상속도 분산선도를 구할 수 있다[4.4]. 이렇게 구해진 위상속도 분산선도로부터 군속도 분산선도를 도해 할 수 있는데 이 선도들은 유도초음파의 전파개념의 이해에 중요한 두 가지 속도를 나타낸다. 이 두 속도는 위상속도와 군속도를 나타내며 그 정의는 다음과 같다.

※ 군속도 (group velocity)

유도초음파의 시간영역상에서 수신된 초음파 신호는 여러 주파수 성분에 해당되는 시간조화(time harmonic) 신호의 합으로 이루어진 군집형 신호인데 이 군집형 신호의 전파속도를 군속도 (group velocity)라고 한다. 실제 비파괴 검사시 수신된 다중 주파수 성분의 유도초음파의 에너지가 전파되는 속도를 의미한다는 뜻에서 에너지 속도라고 하기도 한다.

※ 위상속도 (phase velocity)

시간조화 신호의 조합으로 이루어진 군집형 신호의 개별 시간조화 신호가 진행되는 속도를 위상속도(phase velocity)라고 한다.

나. 탄성관에서 유도초음파의 모드특성

유도초음파의 진행방향이 관의 길이방향인 경우 유도초음파 모드를 나타내기 위해서 두 개의 첨자 M (circumferential order)과 n (mode number)을 사용하고 있다. circumferential order, 0은 신호가 관의 축에 대해 대칭, 0이 아닌 경우에는 축 대칭이 아님을 의미한다. 축 대칭인 모드(axisymmetric modes)는 다시 Longitudinal 모드와 Torsional 모드로 구별되어 지는데 이는, 파가 관의 벽 속에서 진동하는 양상에 따른다. Longitudinal 모드는 파가 진동하는 성분이 관의 길이방향과 반경방향으로만 있는 경우로서 $L(0,n)$ 으로 나타내며, Torsional 모드는 파의 진동성분이 원주방향으로만 있을 경우로서 $T(0,n)$ 으로 나타낸다. 반면, circumferential order가 1, 2, 3 ...인 경우에는 비축대칭인 모드(non-axisymmetric modes)를 나타내는데 Flexural 모드라고 불리우며 $F(M,n)$ 으로 표시한다. Flexural 모드의 경우에는 관의 벽 속에서 파의 진동성분이 세 방향(반경, 원주 그리고 길이방향)으로 모두 존재한다.

표 4.1.1 관에서의 유도초음파모드

모드	표기	형태
Longitudinal modes	$L(0, n)$	axisymmetric modes
Torsional modes	$T(0, n)$	axisymmetric modes
Flexural modes	$F(M, n)$	non-axisymmetric modes

Longitudinal 모드와 Torsional 모드는 circumferential order가 0에서 무한한 수의 모드를 가지고 있고, circumferential order가 1, 2, 3.....,에서도 circumferential order에 대해 무한한 수의 Flexural 모드의 수를 가지고 있다.

유도초음파가 관을 전파할 때 Longitudinal 모드, Flexural 모드, Torsional 모드의 세 종류의 모드가 존재할 수 있다. 일반적으로 실험적으로 주로 사용되는 모드는 축 대칭인 Longitudinal 모드이다. 그 이유는 일반적인 초음파 센서로 잘 발생될 수 있으며, 축 대칭이기 때문에 분석이 간단하기 때문이다. 그러나 비축대칭 센서의 사용 또는 비축대칭 결함으로부터의 반사 등으로 인하여 실험적으로 비축대칭인 모드, 즉 Flexural 모드가 생성될 수 있기 때문에 비축대칭 모드에 대한 연구가 필수적이다. 그리고

Torsional 모드는 실험적으로 발생시키고 수신하는데 있어서 일반적인 초음파 센서로는 효율이 떨어져서 잘 사용되지 않고 있다.

진동수식으로 불리는 식(4.1.14)으로부터 위상속도 분산선도를 구할 수 있다. 몇 가지의 경우를 제외하고는 같은 진동수에서 서로 다른 몇 가지 위상속도를 가질 수 있다. 이와 같은 특성은 유도초음파의 분산 특성과 잘 일치한다. 위상속도 분산선도는 유도초음파를 가진 시킬 수 있는 조건을 찾는데 사용되는데 식(4.1.15)에 나타낸 Snell의 법칙을 사용하여 유도초음파의 위상속도와 입사각의 관계를 구할 수 있다.

$$\frac{v}{\sin\theta} = c_{ph} \quad (4.1.15)$$

여기서 v 는 초음파 센서에 부착된 웨지의 종파속도, θ 는 웨지에서의 입사각, 그리고 c_{ph} 는 유도초음파의 위상속도이다. 일단 입사각이 결정되면 위상속도가 결정되므로 위상속도 분산선도를 통해 발생될 수 있는 모드들의 fd 값을 찾을 수 있다. 그렇게 되면 실험 시스템에서 진동수를 조절함으로써 원하는 모드를 발생시키는 조건을 만들 수가 있다. 이론적으로는 단일 진동수와 단일위상속도를 결정하여 위상속도 분산선도 상의 특징지점의 모드를 발생시킬 수 있으나, 실질적으로는 가진하는 신호의 시간적인 길이와 센서의 크기 제한으로 인하여 단일 진동수와 단일 위상속도를 갖는 유도초음파를 발생시킬 수가 없다. 그래서 실험적으로 발생하는 유도초음파는 시스템과 센서의 특성에 의해 결정되어지는 진동수 대역과 위상속도의 대역을 가지고 있다.

에너지 전파속도는 위상속도와는 다르다는 것은 잘 알려져 있다. 음향학적으로 에너지 속도는 군속도와 같다. 군속도 분산선도는 식(4.1.16)의 관계식을 이용하여 위상속도로부터 구할 수 있다.

$$V_g = \frac{d\omega}{dk} \quad (4.1.16)$$

여기서, ω 는 각 진동수이고, k 는 파수인데 이는 ω/c_{ph} 와 같다. 식(4.1.16)을 식(4.1.17)로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
V_g &= \frac{d\omega}{d(\omega/c_{ph})} \\
&= \frac{d\omega}{\frac{d\omega}{c_{ph}} - \omega \frac{d c_{ph}}{d\omega}} \\
&= \frac{c_{ph}^2}{c_{ph} - \omega \frac{d c_{ph}}{d\omega}}
\end{aligned} \tag{4.1.17}$$

식 (4.1.17)에서, ω 대신 fd , 즉 주파수와 파유도체 두께의 곱으로 표시하면 군속도를 식(4.1.18)에 의해 구할 수 있다.

$$V_g = \frac{c_{ph}^2}{c_{ph} - (fd) \frac{d c_{ph}}{d(fd)}} \tag{4.1.18}$$

군속도를 아는 것은 모드확인파 반사파로 거리를 측정함에 있어서 유용하게 사용될 수 있다.

다. 유도초음파의 분산선도 계산

앞의 이론적 배경에서 관형 재료를 만족하는 파동방정식을 만족하는 Φ , H_r , H_θ , H_z 와 f , g_1 , g_3 를 식(2.8)과 식(2.9)에 제시한 바 있다.

이 복소 포텐셜(Φ , H_r , H_θ , H_z)과 관에서 대한 변위의 관계식 식(4.1.19)과 같이 나타난다.

$$\begin{aligned}
U_r &= \frac{\delta\Phi}{\delta r} + \frac{1}{r} \frac{\delta H_z}{\delta \theta} - \frac{\delta H_\theta}{\delta z} \\
U_\theta &= \frac{1}{r} \frac{\delta\Phi}{\delta \theta} + \frac{\delta H_r}{\delta z} - \frac{\delta H_z}{\delta r} \\
U_z &= \frac{\delta\Phi}{\delta z} + \frac{1}{r} \frac{\delta}{\delta r}(r H_\theta) - \frac{1}{r} \frac{\delta H_r}{\delta \theta}
\end{aligned} \tag{4.1.19}$$

식(4.1.19)에 식(4.1.8)과 식(4.1.9)를 대입하면 식(4.1.20)에 나타낸 바와 같은 변위에 대한 식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned}
U_r &= [f' + (n/r) g_3 + k g_1] \cos n\theta \cos(\omega t + kz) \\
U_\theta &= [-(n/r)f + k g_1 + g'_3] \sin n\theta \cos(\omega t + kz) \\
U_z &= [-kf - g'_1 - (n+1)(g_1/r)] \sin n\theta \cos(\omega t + kz)
\end{aligned} \tag{4.1.20}$$

여기서 f, g_1, g_3 는 식(4.1.21)과 같은 일반해를 갖는다.

$$\begin{aligned}
f &= A Z_n(a_1 r) + B W_n(a_1 r) \\
g_1 &= A_1 Z_{n+1}(\beta_1 r) + B_1 W_{n+1}(\beta_1 r) \\
g_3 &= A_3 Z_n(\beta_1 r) + B_3 W_n(\beta_1 r)
\end{aligned} \tag{4.1.21}$$

여기에서, 식(4.1.21)의 r 에 대한 미분은 식(4.1.22)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
f' &= a_1 \left[A \left\{ -\lambda_1 Z_{n+1}(a_1 r) + \frac{n}{a_1 r} Z_n(a_1 r) \right\} \right. \\
&\quad \left. + B \left\{ -W_{n+1}(a_1 r) + \frac{n}{a_1 r} W_n(a_1 r) \right\} \right] \\
g_1' &= \beta_1 \left[A_1 \left\{ Z_n(\beta_1 r) - \frac{n+1}{\beta_1 r} Z_{n+1}(\beta_1 r) \right\} \right. \\
&\quad \left. + B_1 \left\{ \lambda_2 W_n(\beta_1 r) - \frac{n+1}{\beta_1 r} W_{n+1}(\beta_1 r) \right\} \right] \\
g_3' &= \beta_3 \left[A_3 \left\{ -\lambda_2 Z_{n+1}(\beta_1 r) + \frac{n}{\beta_1 r} Z_n(\beta_1 r) \right\} \right. \\
&\quad \left. + B_3 \left\{ -W_{n+1}(\beta_1 r) + \frac{n}{\beta_1 r} W_n(\beta_1 r) \right\} \right]
\end{aligned} \tag{4.1.22}$$

그리고 향후 응력을 계산할 때 사용하게 될 식(4.1.21)의 r 에 대한 2차 미분항은 식 (4.1.23)과 같이 결정할 수 있다.

$$\begin{aligned}
f'' &= a_1^2 \left[A \left\{ \left(\frac{n(n-1)}{(a_1 r)^2} - \lambda_1 \right) Z_n(a_1 r) + \frac{\lambda_1}{a_1 r} Z_{n+1}(a_1 r) \right\} \right. \\
&\quad \left. + B \left\{ \left(\frac{n(n-1)}{(a_1 r)^2} - \lambda_1 \right) W_n(a_1 r) + \frac{1}{a_1 r} W_{n+1}(a_1 r) \right\} \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
g_1'' &= \beta_1^2 \left[A_1 \left\{ \left(-\frac{1}{\beta_1 r} \right) Z_n(\beta_1 r) + \left(\frac{(n+1)(n+2)}{(\beta_1 r)^2} - \lambda_2 \right) Z_{n+1}(\beta_1 r) \right\} \right. \\
&\quad \left. + B_1 \left\{ \left(-\frac{\lambda_2}{\beta_1 r} \right) W_n(\beta_1 r) + \left(\frac{(n+1)(n+2)}{(\beta_1 r)^2} - \lambda_2 \right) W_{n+1}(\beta_1 r) \right\} \right] \\
g_3'' &= \beta_1^2 \left[A_3 \left\{ \left(\frac{n(n-1)}{(\beta_1 r)^2} - \lambda_2 \right) Z_n(\beta_1 r) + \frac{\lambda_2}{\beta_1 r} Z_{n+1}(\beta_1 r) \right\} \right. \\
&\quad \left. B_3 \left\{ \left(\frac{n(n-1)}{(\beta_1 r)^2} - \lambda_2 \right) W_n(\beta_1 r) + \frac{1}{\beta_1 r} W_{n+1}(\beta_1 r) \right\} \right] \tag{4.1.23}
\end{aligned}$$

원통 좌표계에서 응력과 변위와의 관계식은 식(4.1.24)와 같이 주어진다.

$$\begin{aligned}
\sigma_{rr} &= \lambda \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + 2\mu \frac{\partial u_r}{\partial r} \\
\sigma_{r\theta} &= \mu \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \right) \\
\sigma_{rz} &= \mu \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{u_z}{\partial r} \right) \tag{4.1.24}
\end{aligned}$$

식(4.1.24)에, 식(4.1.20)로부터 식(4.1.23)을 통해 구한 U_r, U_θ, U_z 를 전개하여 대입하면, 식(4.1.25)를 얻게 된다.

$$\begin{aligned}
\sigma_{rr} &= \left[\lambda \left(f'' + \frac{f'}{r} - \frac{n^2}{r^2} f - \zeta^2 f \right) \right. \\
&\quad \left. + 2\mu \left(f'' - \frac{n}{r^2} g_3 + \frac{n}{r} g_3' + \zeta g_1' \right) \right] \cos(n\theta) \cos(\omega t + \zeta z) \\
\sigma_{r\theta} &= \mu \left[-\frac{2n}{r} \left(f' - \frac{f}{r} \right) - \frac{\zeta}{r} (n+1) g_1 + \zeta g_1' \right. \\
&\quad \left. - \left(g_3'' - \frac{1}{r} g_3' + \frac{n^2}{r^2} g_3 \right) \right] \sin(n\theta) \cos(\omega t + \zeta z) \\
\sigma_{rz} &= \mu \left[-2\zeta f' - g_1'' - \frac{(n+1)}{r} g_1' + \right. \\
&\quad \left. \left(\frac{n+1}{r^2} - \zeta^2 \right) g_1 - \zeta \frac{n}{r} g_3 \right] \cos(n\theta) \sin(\omega t + \zeta z) \tag{4.1.25}
\end{aligned}$$

여기에서 속도와 복소포텐셜의 관계식(4.1.6)과 Gazis가 가정한 식(4.1.8)을

연립하여 풀면 식(4.1.26)과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 f'' + \frac{1}{r} f' - \frac{n^2}{r^2} f - \alpha^2 f &= 0 \\
 \left\{ \beta^2 - \frac{(n+1)^2}{r^2} \right\} g_1 + g_1'' + \frac{1}{r} g_1' &= 0 \\
 g_3'' + \frac{1}{r} g_3' + \left\{ \beta^2 - \frac{n^2}{r^2} \right\} g_3 &= 0
 \end{aligned} \tag{4.1.26}$$

식(4.1.26)을 식(4.1.25)에 대입하면 식(4.1.27)과 같이 간편화된 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \sigma_{rr} &= \left\{ -\lambda(\alpha^2 + \xi^2)f + 2\mu \left[f'' + \frac{n}{r} \left(g_3' - \frac{g_3}{r} \right) + \xi g_1' \right] \right\} \cos n\theta \cos(\omega t + \xi z) \\
 \sigma_{r\theta} &= \mu \left\{ -\frac{2n}{r} \left(f' - \frac{f}{r} \right) - (2g_3'' + \beta^2 g_3) - \xi \left(\frac{n+1}{r} g_1 - g_1' \right) \right\} \sin n\theta \cos(\omega t + \xi z) \\
 \sigma_{rz} &= \mu \left\{ -2\xi f' - \frac{n}{r} g_1' + \left[-\frac{n(n+1)}{r^2} + (\beta^2 - \xi^2) \right] g_1 - \frac{n\xi}{r} g_3 \right\} \cos n\theta \sin(\omega t + \xi z)
 \end{aligned} \tag{4.1.27}$$

여기에 식(4.1.22)와 식(4.1.23)에서 구한 $f, f', f'', g_1, g_1', g_1'', g_3, g_3', g_3''$ 을 대입하고 경계조건 $r = a, b$ 에서 $\sigma_{rr} = 0, \sigma_{r\theta} = 0, \sigma_{rz} = 0$ 을 대입하면 응력계수 (A, B, A_1, B_1, A_3, B_3)에 대한 행렬을 얻을 수 있다.

본 연구에서 계산한 응력 계수 행렬 $C_{i,j}$ 는 식(4.1.28)과 같다.

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ A_1 \\ B_1 \\ A_3 \\ B_3 \end{bmatrix} = 0 \tag{4.1.28}$$

여기에 C_{ij} ($i=1, 2, 3, 4, 5, 6, j=1, 2, 3, 4, 5, 6$)는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 C_{11} &= (2\alpha^2 a^2 + \xi^2 a^2 - \beta^2 a^2 - 2\alpha^2 a^2 \lambda_1 + 2(n^2 - n))Z_n(\alpha_1 a) + 2\alpha_1 \lambda_1 a Z_{n+1}(\alpha_1 a) \\
 C_{12} &= (2\alpha^2 a^2 + \xi^2 a^2 - \beta^2 a^2 - 2\alpha^2 a^2 \lambda_1 + 2(n^2 - n))W_n(\alpha_1 a) + 2\alpha_1 a W_{n+1}(\alpha_1 a)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C_{13} &= 2\xi\beta_1 a^2 Z_n(\beta_1 a) - 2\xi(n+1)a Z_{n+1}(\beta_1 a) \\
C_{14} &= 2\xi\beta_1 \lambda_2 a^2 W_n(\beta_1 a) - 2\xi(n+1)a W_{n+1}(\beta_1 a) \\
C_{15} &= 2n(n-1) Z_n(\beta_1 a) - 2n\beta_1 \lambda_2 a Z_{n+1}(\beta_1 a) \\
C_{16} &= 2n(n-1) W_n(\beta_1 a) - 2n\beta_1 a W_{n+1}(\beta_1 a) \\
C_{21} &= -2n(n-1) Z_n(a_1 a) + 2na_1 \lambda_1 a Z_{n+1}(a_1 a) \\
C_{22} &= -2n(n-1) W_n(a_1 a) + 2na_1 a W_{n+1}(a_1 a) \\
C_{23} &= -2\xi(n+1)a Z_{n+1}(\beta_1 a) + \xi\beta_1 a^2 Z_n(\beta_1 a) \\
C_{24} &= -2\xi(n+1)a W_{n+1}(\beta_1 a) + \xi\beta_1 \lambda_2 a^2 W_n(\beta_1 a) \\
C_{25} &= (2\beta_1^2 \lambda_2 a^2 - \beta^2 a^2 - 2(n^2 - n)) Z_n(\beta_1 a) - 2\beta_1 \lambda_2 a Z_{n+1}(\beta_1 a) \\
C_{26} &= (2\beta_1^2 \lambda_2 a^2 - \beta^2 a^2 - 2(n^2 - n)) W_n(\beta_1 a) - 2\beta_1 a W_{n+1}(\beta_1 a) \\
C_{31} &= -2\xi n Z_n(a_1 a) + 2\xi a_1 \lambda_1 a Z_{n+1}(a_1 a) \\
C_{32} &= -2\xi n W_n(a_1 a) + 2\xi a_1 a W_{n+1}(a_1 a) \\
C_{33} &= -n\beta_1 Z_n(\beta_1 a) + b(\beta^2 - \xi^2) Z_{n+1}(\beta_1 a) \\
C_{34} &= -n\beta_1 \lambda_2 W_n(\beta_1 a) + a(\beta^2 - \xi^2) W_{n+1}(\beta_1 a) \\
C_{35} &= -n\xi Z_n(\beta_1 a) \\
C_{36} &= -n\xi W_n(\beta_1 a) \\
C_{41} &= (2a^2 b^2 + \xi^2 b^2 - \beta^2 b^2 - 2a^2 b^2 \lambda_1 + 2(n^2 - n)) Z_n(a_1 b) + 2a_1 \lambda_1 b Z_{n+1}(a_1 b) \\
C_{42} &= (2a^2 b^2 + \xi^2 b^2 - \beta^2 b^2 - 2a^2 b^2 \lambda_1 + 2(n^2 - n)) W_n(a_1 b) + 2a_1 \lambda_1 b W_{n+1}(a_1 b) \\
C_{43} &= 2\xi\beta_1 b^2 Z_n(\beta_1 b) - 2\xi(n+1)b Z_{n+1}(\beta_1 b) \\
C_{44} &= 2\xi\beta_1 \lambda_2 b^2 W_n(\beta_1 b) - 2\xi(n+1)b W_{n+1}(\beta_1 b) \\
C_{45} &= 2n(n-1) Z_n(\beta_1 b) - 2n\beta_1 \lambda_2 b Z_{n+1}(\beta_1 b) \\
C_{46} &= 2n(n-1) W_n(\beta_1 b) - 2n\beta_1 b W_{n+1}(\beta_1 b) \\
C_{51} &= -2n(n-1) Z_n(a_1 b) + 2na_1 \lambda_1 b Z_{n+1}(a_1 b) \\
C_{52} &= -2n(n-1) W_n(a_1 b) + 2na_1 b W_{n+1}(a_1 b) \\
C_{53} &= -2\xi(n+1)b Z_{n+1}(\beta_1 b) + \xi\beta_1 b^2 Z_n(\beta_1 b) \\
C_{54} &= -2\xi(n+1)b W_{n+1}(\beta_1 b) + \xi\beta_1 \lambda_2 b^2 W_n(\beta_1 b) \\
C_{55} &= (2\beta_1^2 \lambda_2 b^2 - \beta^2 b^2 - 2(n^2 - n)) Z_n(\beta_1 b) - 2\beta_1 \lambda_2 b Z_{n+1}(\beta_1 b) \\
C_{56} &= (2\beta_1^2 \lambda_2 b^2 - \beta^2 b^2 - 2(n^2 - n)) W_n(\beta_1 b) - 2\beta_1 b W_{n+1}(\beta_1 b) \\
C_{61} &= -2\xi n Z_n(a_1 b) + 2\xi a_1 \lambda_1 b Z_{n+1}(a_1 b) \\
C_{62} &= -2\xi n W_n(a_1 b) + 2\xi a_1 b W_{n+1}(a_1 b)
\end{aligned}$$

$$C_{63} = -n\beta_1 Z_n(\beta_1 b) + b(\beta^2 - \xi^2) Z_{n+1}(\beta_1 b)$$

$$C_{64} = -n\beta_1 \lambda_2 W_n(\beta_1 b) + b(\beta^2 - \xi^2) W_{n+1}(\beta_1 b)$$

$$C_{65} = -n\xi Z_n(\beta_1 b)$$

$$C_{66} = -n\xi W_n(\beta_1 b)$$

이 행렬의 해가 자명하지 않은 해(nontrivial solution)를 가지기 위해서는 응력계수 행렬의 판별식이 0이 되어야 한다.

따라서 6×6 행렬의 판별식을 도출해내고 circumferential order와 주파수에 따른 위상속도의 해를 각각 구하면 그 해집단은 해당 circumferential order의 주파수에 따른 위상속도 값을 가지게 된다.

위상속도 분산선도 곡선을 구하기 위해서는 우선적으로 모드를 결정해야 한다. 모드는 앞의 이론에서 언급한 것과 같이 Longitudinal, Torsional, Flexural 모드로 구분될 수 있다.

여기서 Longitudinal 모드와 Torsional 모드는 circumferential order가 0일 때 발생하게 되는데 L모드는 축대칭 모드이면서 파의 진동성분이 관의 길이 방향으로만 존재하므로 θ 방향으로서는 동일한 양상을 가지게 된다. 따라서 L모드인 경우에는 θ, g_1 성분을 제외한 나머지 항들에 대한 응력계수 행렬의 판별식이 0이 되면 된다. 따라서 Longitudinal 모드의 위상속도 분산선도 곡선은 식(4.1.29)의 응력 행렬로부터 구할 수 있다. 그리고 n 값에 0를 대입하고 주파수 영역을 결정하여 각 해 곡선을 구하게 되면 위상속도 분산선도를 구하게 된다.

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{15} & C_{16} \\ C_{31} & C_{32} & C_{35} & C_{36} \\ C_{51} & C_{52} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \quad (4.1.29)$$

반면, 식(4.1.28)의 6×6 행렬 판별식 값이 0이 되는 해 곡선이 분산선도 곡선이라고 하였다. 따라서 앞에서 구한 행렬에 n 값을 1에서부터 대입하면 비축대칭인 모드인 Flexural mode의 모드별 위상속도 분산선도를 구할 수 있다.

라. Short Time Fourier Transform(STFT)

시간 영역과 주파수 영역은 신호를 조사할 때 사용되는 두 개의 상호 보완적인 영역이다. 주어진 연속신호 $f(t)$ 에 대한 Fourier Transform은 $F(\omega)$ 로 표시하며 식(4.1.30)과 같이 정의된다[4.5].

$$F(\omega) = \int f(t) e^{-i\omega t} dt = \langle \chi, e^{-i\omega t} \rangle \quad (4.1.30)$$

여기서, $F(\omega)$ 는 주파수 ω 성분의 크기인데, 이러한 각 주파수 성분을 식(4.1.30)과 같이 합쳐서 원신호 f 를 복원할 수 있다는 것이 Fourier Transform을 이용한 신호분석의 핵심적인 이론이다. 이러한 주파수 정보를 통한 신호분석은 공학의 많은 분야에서 사용되고 있다. 그러나 Fourier Transform의 변환의 문제점은 신호를 분석할 때 시간의 정보를 제공하지 않는다. 즉 시간 영역에서 주파수영역으로 변환을 하면 시간 정보를 잃어버리게 되고 단지 주파수의 정보만을 제공하게 된다. 따라서 신호가 시간에 따라 어떻게 변화하는지에 대한 정보는 없고 여러 시간대의 정보가 모여 $F(\omega)$ 를 이루었다는 것만을 알 수 있다.

이러한 한계를 극복하기 위하여 그림 4.1.3과 같이 시간축 상에 창문함수를 씌워 시간-주파수 영역을 동시에 표현할 수 있는 Short Time Fourier Transform(STFT)을 Dennis Gabor가 1946년에 제안하였다[4.6]. 창문함수 h 에 대한 Short Time Fourier Transform은 식(4.1.31)으로 정의된다.

$$STFT(\omega, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) h(t-\tau) e^{-i\omega t} dt \quad (4.1.31)$$

여기서 $f(t) h(t-\tau)$ 는 신호 $f(t)$ 의 시간 τ 근처에서의 정보를 내포하고 있으며, $f(t) h(t-\tau)$ 의 Fourier Transform인 $STFT(\omega, \tau)$ 는 결국 신호 $f(t)$ 에 대한 시간 τ , 주파수 ω 근처에서의 정보를 제공한다. 이러한 시간과 주파수 대역에서 국소화된 정보를 조합하여 식(4.1.32)와 같이 원신호 $f(t)$ 를 다시 복원할 수 있다.

$$f(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} STFT(\omega, \tau) \psi(t-\tau) e^{i\omega \tau} d\omega d\tau \quad (4.1.32)$$

그러나 Short Time Fourier Transform은 window function의 지지영역의

크기에 따라 분석 가능한 신호의 주파수 영역 범위가 미리 정해지는 단점이 있다. 이는 각각의 창문 영역들 사이에 신호의 불연속성을 일으키는 주요원인이 되며, 또한 Fourier Transform을 통해서도 전체 신호의 에너지를 특정 주파수에 집중시키기 힘들다는 단점이 있다.

STFT를 이용하여 얻은 시간-주파수영역에서의 신호를 보면 진동수에 따른 도착시간의 정보가 함께 나타나있을 뿐 아니라, 각 모드의 분산양상이 또한 명확히 나타나있다. 물론 STFT에 의해 얻어지는 분산양상은 유도초음파의 전파거리에 따라 분산의 정도는 달라지나 분산의 경향은 그대로 유지된다. 이러한 분산양상을 군속도 분산선도와 비교함으로써 모드를 확인할 수가 있다. 이와 같은 방법은 군속도와 함께 모드의 분산 양상을 확인하여 모드를 분별하기 때문에 분산성이 있는 여러 개의 모드가 전파될 때에도 모드를 잘 확인할 수 있다. 따라서 군속도의 측정결과만을 이용하는 기존의 모드분석 방법에 비해 월등히 우수하다.

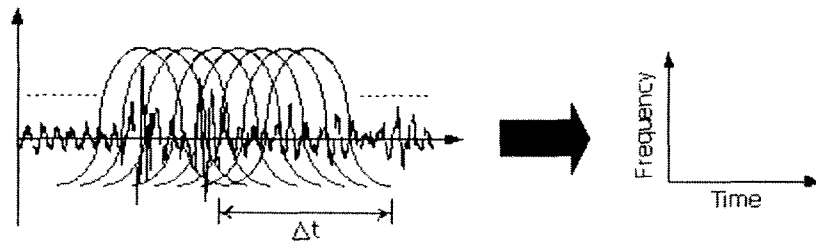


그림 4.1.3 Short Time Fourier Transform의 개념도

3. 분산선도 및 실험

가. 유도 초음파 분산선도의 계산

유도초음파의 대표적인 물리적 특성중의 하나는 일반적인 체적파 (Bulk wave, 종파 & 횡파)와는 달리 각 파동모드의 속도가 주파수에 따라 변화하는 분산(dispersion)특성을 가지고 있다는 것이다. 따라서 이러한 분산특성을 가진 유도초음파의 신호를 정확하게 발생시키고, 이를 수신하여 판독하기 위해서는 피검체의 형상, 두께, 재질, 입사각 및 주파수 등의 탐상조건에 따라 유도초음파의 모드를 예측하고 그에 따른 신호 예측이 가능해야 하는데, 이를 가능케 해주는 것이 바로 분산곡선(dispersion curve)이

다. 이는 각 주파수에 해당하는 유도초음파 모드와 속도사이의 함수관계를 이론적으로 나타내주는 그래프의 데이터 선도로써, 유도초음파를 분석하는 첫 단계이다.

(1) 계산 과정

그림 4.1.4는 본 연구의 대상체로 선정된 두산중공업(주)에서 제작한 울진 원자력발전소 3,4 호기용 Steam generator tube (증기발생기세관, S/G tube) 유도초음파 분산선도이다. 분산선도는 (a)군속도선도, (b)위상속도선도로 되어 있으며, 분산선도를 그리기 위해 필요한 물성치 항목들을 표 4.1.2에 정리하였다. 해(solution)를 구하기 위한 프로그램으로는 Matlab을 사용하였으며, 데이터작업으로는 Microsoft Excel을 사용하였다.

표 4.1.2 증기발생기 세관 사양

Item	contents
Target	Uljin No.3 and No.4
Material	Inconel 600 HTMA
Logitudinal wave velocity (C_L)	5.915 mm/ μ sec
Transverse wave velocity (C_T)	3.078 mm/ μ sec
Density (ρ)	8.45 g/cm ³
Outside Diameter (D)	19.05 mm (0.75")
Thickness (t)	1.09 mm (0.043")
Total Length (L)	16.94 m

먼저 값이 약간씩 튀는 것을 보정하기 위해 적용된 이동평균법(moving averaging)은 5-point법을 사용하였으며, 해가 발산하거나 계산상의 오류로 인해 엉뚱한 값이 생기는 경우에는 앞뒤 수치의 평균값으로 보정하였다. 특히, 횡파속도에 해의 값이 수렴하는 모드의 경우 계산시간을 늘리는 대신 신뢰구간의 범위를 좁혀 정밀한 해를 구하는 방법과, 그럼에도 불구하고 해를 구할 수 없는 경우 편의상 그 수렴하는 값으로 채워주는 방법을 병행하였다.

축은 일반적인 탐촉자의 주파수를 고려하여 0.14.0 MHz의 구간을, 위상속도선도의 Y축은 Cut-off frequency를 고려하여 010 mm/ μ sec의 구간으로 한정하여 계산하였다.

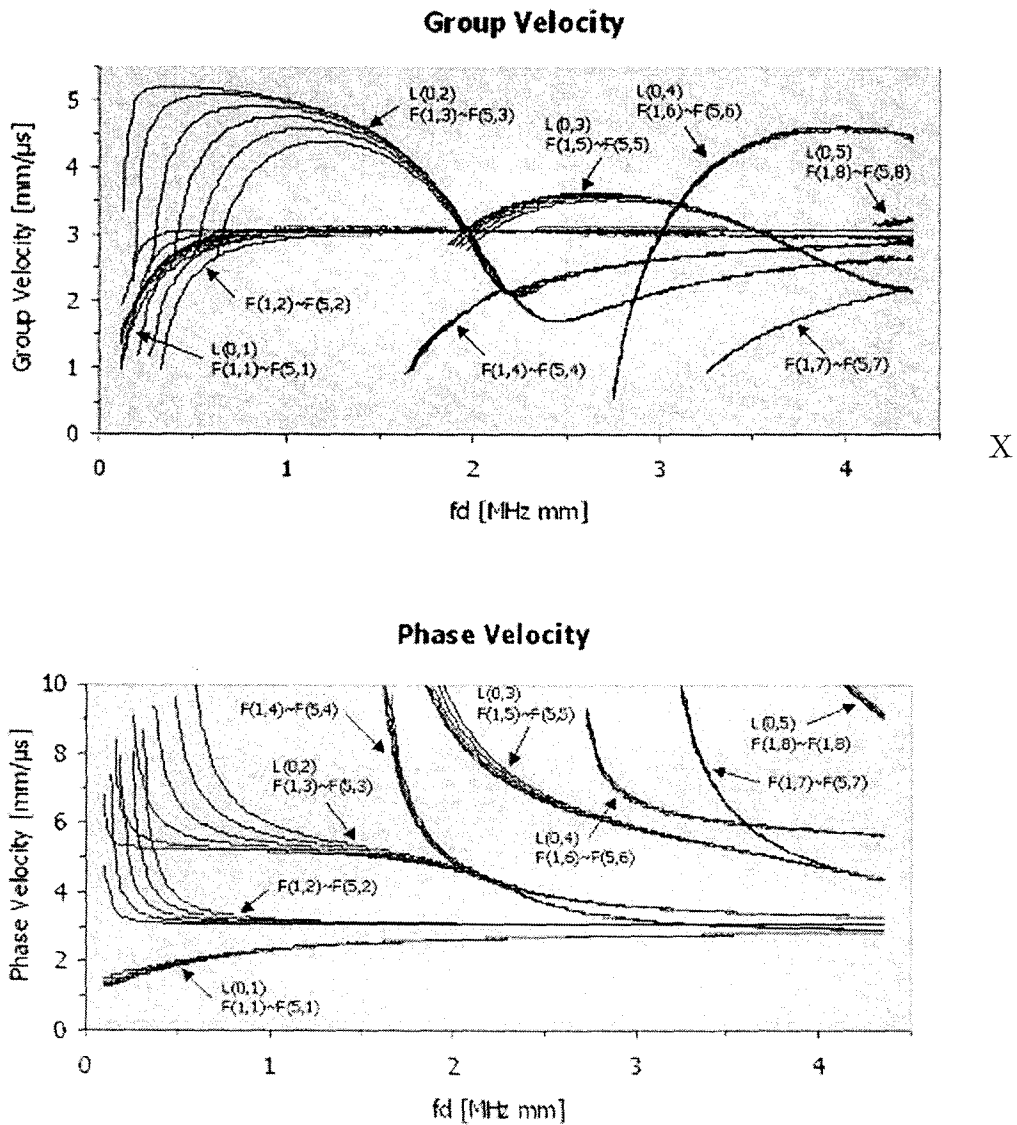


그림 4.1.4 S/G tube 유도초음파 분산선도. (a) 군속도선도, (b) 위상속도선도

(2) 탐촉자와 입사각에 따른 이론적인 유도초음파의 속도

그림 4.1.4에서 구한 분산선도의 모드들은 이론적인 해로써 실제로 모두 발생 가능하지는 않다. 이는 파동의 기본원리에 기인하며, 각의 모드들이 가지는 위상속도(V_{ph})에 식(4.1.33)의 Snell's Law를 적용, 임계각(critical angle) 부근에서 유도초음파가 발생하는 이론적인 발생 입사각 ($\theta_{incidence}$)을 계산 할 수 있다.

$$\frac{V_{Acryl(wedge)}}{\sin\theta_{incidence}} = \frac{V_{ph}}{\sin 90^\circ} \quad (4.1.33)$$

입사각은 선택된 모드의 위상속도에 의해 결정이 되는데, 이 위상속도가 웨지의 종파속도보다 작은 모드들은 전파하지 못한다. 따라서 각각의 모드들에 대한 발생 입사각을 계산할 수 있는데, 3종류의 탐촉자(0.5, 1.0, 2.25 MHz)에 대하여 전파 가능한 모드들의 입사각, 모드, 위상속도, 군속도 (V_g)의 관계를 표 4.1.3에 나타내었다.

표 4.1.3 탐촉자에 따른 군속도, 위상속도, 입사각, 모드와의 관계

Frequency = 0.5 MHz (fd =0.545)				Frequency = 2.25 MHz (fd =2.4525)			
$\theta_{inc} (^{\circ})$	Mode	$V_{ph}(mm/\mu s)$	$V_g(mm/\mu s)$	$\theta_{inc} (^{\circ})$	Mode	$V_{ph}(mm/\mu s)$	$V_g(mm/\mu s)$
20.0401	F(4,3)	7.9375	3.1256	22.9262	F(5,5)	6.9825	3.4599
25.3905	F(3,3)	6.3435	4.1458	23.2609	F(4,5)	6.8875	3.5097
28.7307	F(2,3)	5.6585	4.7501	23.5140	F(3,5)	6.8175	3.5489
30.6119	F(1,3)	5.3415	5.0786	23.6983	F(2,5)	6.7675	3.5751
31.2277	L(0,2)	5.2465	5.1824	23.8066	F(1,5)	6.7385	3.5907
47.2767	F(5,2)	3.7025	2.4845	23.8404	L(0,3)	6.7295	3.5987
52.2831	F(4,2)	3.3485	2.7005	42.6520	F(5,4)	4.0145	2.3190
56.3766	F(3,2)	3.2665	2.8651	42.9169	F(4,4)	3.9945	2.3361
59.4480	F(2,2)	3.1585	2.9836	43.1180	F(3,4)	3.9795	2.3548
61.4173	F(1,2)	3.0975	3.0515	43.2669	F(2,4)	3.9685	2.3684
Frequency = 1.0 MHz (fd =1.09)				43.3486	F(1,4)	3.9625	2.3726
$\theta_{inc} (^{\circ})$	Mode	$V_{ph}(mm/\mu s)$	$V_g(mm/\mu s)$	45.4394	F(5,3)	3.8175	1.7030
27.9227	F(5,3)	5.8085	4.3612	45.6539	F(4,3)	3.8035	1.7058
29.3436	F(4,3)	5.5505	4.5761	45.8242	F(3,3)	3.7925	1.7035
30.4165	F(3,3)	5.3725	4.7448	45.9333	F(2,3)	3.7855	1.7075
31.1749	F(2,3)	5.2545	4.8556	46.0117	F(1,3)	3.7805	1.7098
31.6168	F(1,3)	5.1885	4.9235	46.0431	L(0,2)	3.7785	1.7086
31.7672	L(0,2)	5.1665	4.9458	61.3157	F(5,2)	3.1005	3.0478
58.1648	F(5,2)	3.2015	2.9521	61.5878	F(4,2)	3.0925	3.0926
59.5404	F(4,2)	3.1555	2.9982	61.7944	F(3,2)	3.0865	3.0864
60.6516	F(3,2)	3.1205	3.0345	61.9682	F(2,2)	3.0815	3.0815
61.4513	F(2,2)	3.0965	3.0570	62.0382	F(1,2)	3.0795	3.0795
61.9333	F(1,2)	3.0825	3.0746	88.9015	F(5,1)	2.7205	3.0332

나. 실험

(1) 실험장치

본 연구를 위한 실험장치로 먼저 신호를 표시하고 저장하는 오실로 스코

프는 Lecory 9310A 모델로 400 MHz digital sampling 이 가능하며, 외부와의 통신을 위해 디스켓 드라이브를 비롯한 RS-232C 포트를 가지고 있다. 여기에서는 실험대상체인 증기발생기 세관, 유도초음파를 발진하고 수신하기 장치인 RAM-10000, 가변각 웨지, 초음파 탐촉자 등에 대해 보다 자세히 설명 한 후, 이 장치들의 구성 및 실험과정을 기술하였다.

(가) 증기발생기 세관

연구대상체로 선정된 증기발생기세관은 원자력 발전소의 원자로에서 만들어진 열 에너지를 흡수하는 장치로, 니켈 및 크롬이 다량 함유된 합금강으로 되어있어 내산화 및 내환화성이 좋으며 특히, 고온 내수성이 뛰어나다. 그림 4.1.5(a) 증기발생기 내·외부 사용위치에 따라 그 곡률의 차이는 있으나 그림 4.1.5(b)와 같은 'U'자형으로 되어있으며, 본 연구에서는 울진 3,4호기용이 사용되었다.

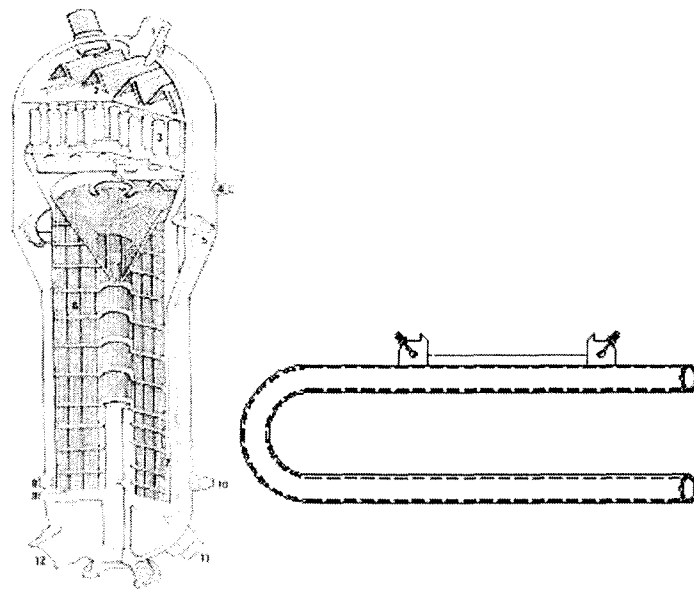


그림 4.1.5 연구 대상체. (a)증기발생기의 구조, (b)증기발생기 세관

(나) RAM-10000 (Pulser / Receiver)

유도 초음파를 발생시키기 위해서, 일반 초음파와는 달리 장거리 탐상을 위한 고출력 발생장치, 보다 정밀한 Tone burst 출력과 연속적인 주파수

등을 제어하기 위한 Pulser/Receiver로 본 연구에서는 RITEC (c) RAM-10000을 사용하였다. 이 장치는 그림 4.1.6과 같이 PC에 연결, 전용 프로그램에서 각종 셋팅 값을 설정하여 실험을 수행한다.

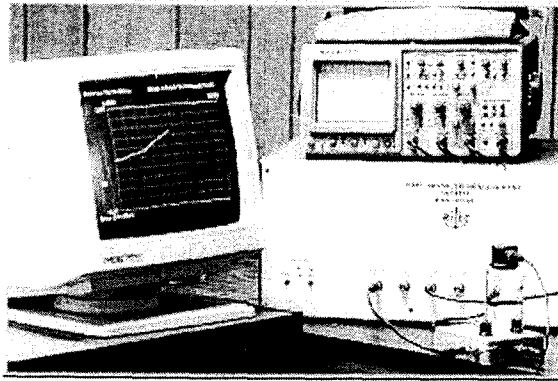


그림 4.1.6 RITEC (c) RAM-10000 [3-1]

표 4.1.4는 본 장치의 대표적인 특징으로 고출력, 연속주파수 파형발생가능, 광주파수 대역, 정밀하고 간편한 제어 등이 나타나 있다.

표 4.1.4 RITEC (c) RAM-10000 특징

Item	Contents
RF Burst Output	Up to 5KW Up to 7MHz
Source	Continuous wave frequency
Frequency Range	20 KHz 45 MHz (3 models)
Signal processing Measurement	Phase angle: within 0.03 deg. Amplitude: within 0.01dB

(다) 가변각 췌기 (Wedge with the changeable angle)

물리적인 파동 법칙을 만족하는 유도초음파를 발생시키고 또 원하는 모드를 선택적으로 발생시키기 위해서는 초음파 입사각의 변경이 가능해야 한다. 이를 위해서 그림 4.1.7과 같은 가변각 웨지 2개를 설계, 제작하였다. 초음파의 왜곡이 발생할 수 있는 접합 계면을 없애기 위해서 특수가공으로 제작되었으며, 재질은 Plexiglass로써 종파속도 2720 m/s 이다.

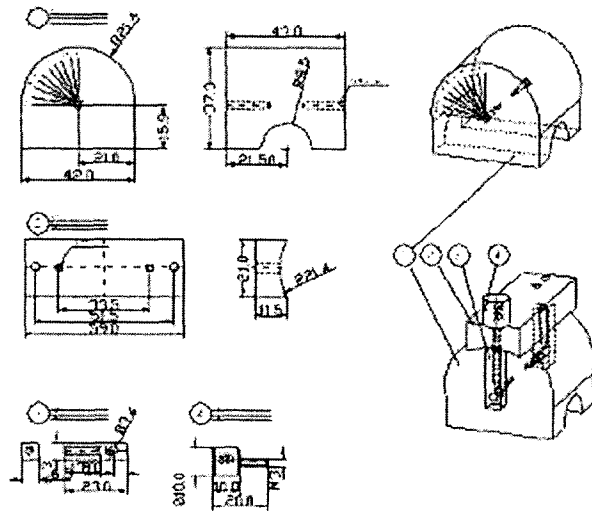
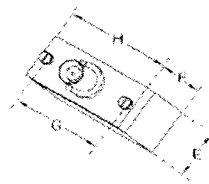
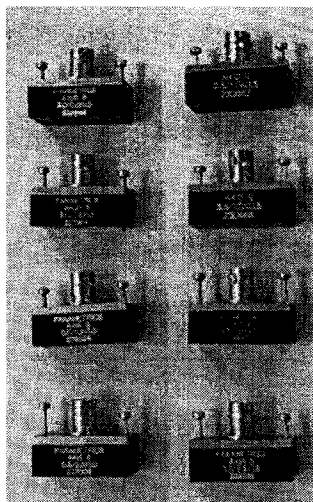


그림 4.1.7 썰기 도면

(라) 초음파 탐촉자 (Probe)

초음파 탐촉자는 그림 4.1.8과 같은 Panametrics INC. ACCUSACN-S, 사
각형 탐촉자 0.5, 1.0, 2.25, 3.5 MHz를 사용하였다.



E : 0.73"
F : 0.63"
G : 1.31"
H : 1.53"

그림 4.1.8 탐촉자의 외관 및 크기

탐촉자는 선택적으로 유도 초음파를 발생시키기 위해서 그림 4.1.9와 같이
썰기에 장착되어 실험이 수행되었다.

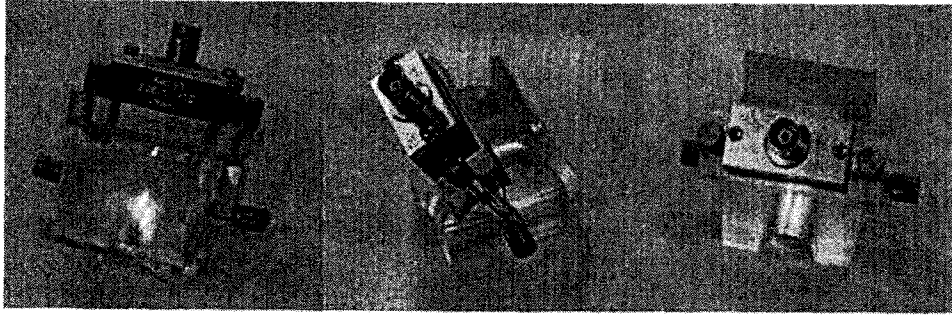


그림 4.1.9 가변각 웨지에 장착된 탐촉자

관경에 비해 상당히 큰 크기로 인한 초음파 빔퍼짐이라는 단점에도 불구하고 본 탐촉자를 사용할 수밖에 없었던 이유는, 고출력에 견뎌내는 탐촉자를 선정하기가 매우 곤란하였기 때문이다. 실제 탐촉자 제작·판매회사에 문의를 해 본 결과, 유도초음파용 탐촉자는 만들지 않는다고 한다. 일반적인 탐촉자는 평균 400 Volt, 최고 900 Volt 까지 견딜 수 있다고 한다. 그러나 RAM-10000에서 유도 초음파를 발생시키기 위해서는, 개인 값과 주파수에 따라 4001400 Volt가 필요하므로 실험 시 초음파 탐촉자의 특성을 보장 할 수 없다. 본 연구에서 사용된 탐촉자는 이전 연구에서 사용되어 그 특성을 검증 받았다. 그럼에도 Attenuaton을 최대한 줄여 실험을 할 경우에는 상당한 주의가 필요했다.

(마) 실험장치의 구성

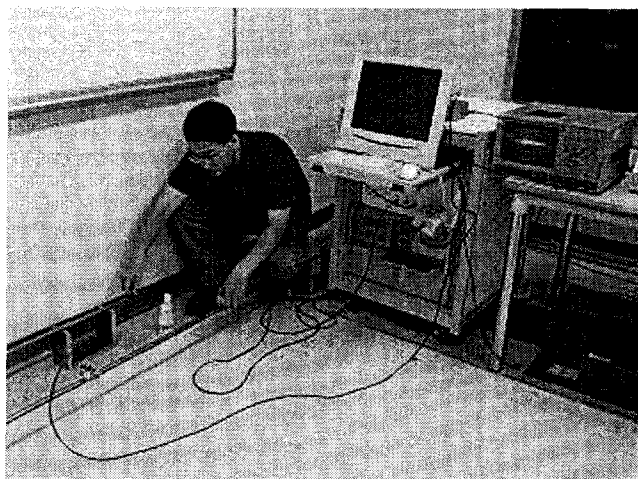


그림 4.1.10 실험장치의 구성

앞서 언급된 오실로 스코프, 증기발생기 세관, RAM-10000, 가변각 웨지 초음파 탐촉자 및 컨트롤 PC 등과 같은 실험 장치는 그림 4.1.10과 같이 구성되어 실험이 수행되어졌다.

(바) 실험과정

<1> 케이블 확인

: 실험을 하는데 앞서 먼저 해야 할 일은 케이블을 확인하는 것이다. 그림 4.1.11은 Pitch-Catch 설정방법으로 다음과 같이 실험 장치들이 연결되어 실험이 수행되어졌다.

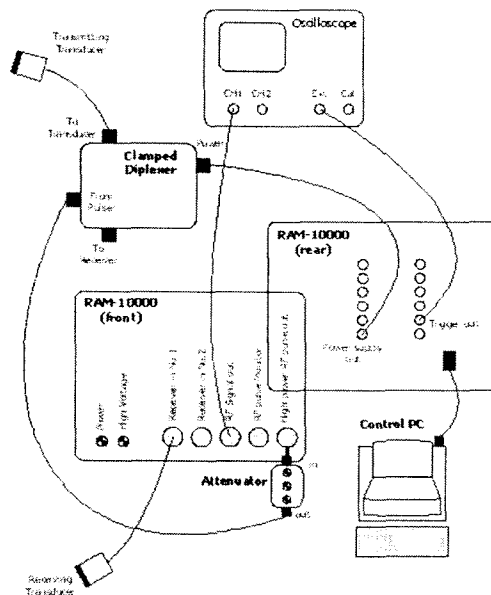


그림 4.1.11 실험장치간의 연결도 (Pitch-catch)

<2> RAM-10000 / Oscilloscope 의 파워를 켜다.

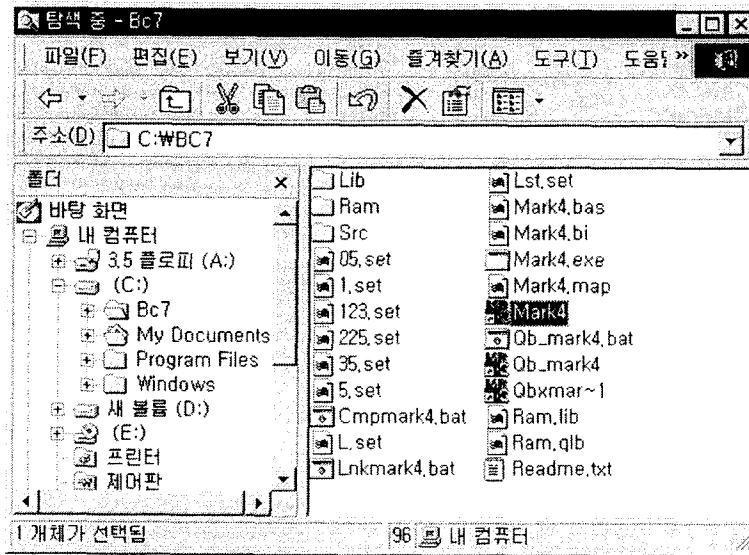
<3> Control PC를 부팅한다.

: 이때 주의해야 할 점은 Control PC의 OS(operating system)가 Win98인 경우에는 인터럽트를 직접 제어할 수 있기 때문에 별도의 셋팅 없이 RAM-10000 제어보드/프로그램을 사용할 수 있으나, Win NT/2000/XP의 경우에는 RAM-10000 제어보드에 인터럽트를 할당하는 셋팅을 해 주어야

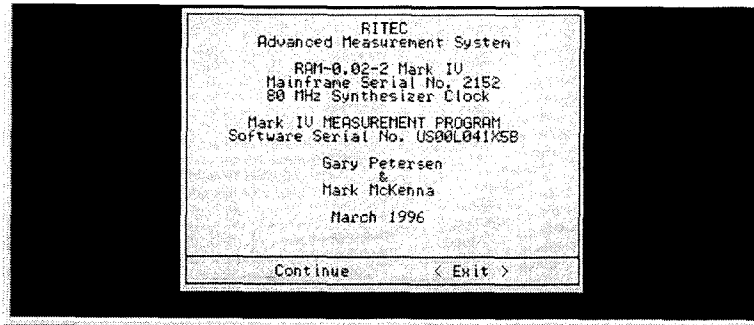
한다. 이때, 윈도우 기본프로그램에서는 이를 구현하기 어려워 별도의 프로그램을 사용하며, 시작 프로그램에 이를 등록하여 사용하면 편리하다

<4> 제어프로그램

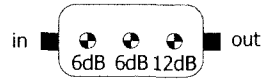
a. Mark4.exe 실행



b. Continue



Attenuator



<6> 실험

: 신호에 따라 오실로스코프의 조정, Attenuation 레벨 조정해 가면서 실험을 수행하였다. 이때 주의 할 점은 썬기와 세관사이 couplant에 기포가 들어가 신호가 왜곡되지 않게 해야 했으며, 가능하면 접촉 상태가 실험전체에 동일하게 유지 되도록 하였다.

<7> 신호 데이터 저장

: Oscilloscope부터 데이터를 저장하는 방법에는 2진 형태(binary)와 ASCII형태가 있다. 일반적으로 2진 형태를 사용하며, 이를 93tran.exe로 10진수로 바꾸어 데이터를 사용한다. 이렇게 변환된 시간 신호를 Matlab을 이용하여 그림 4.1.12와 같이 나타내었다.

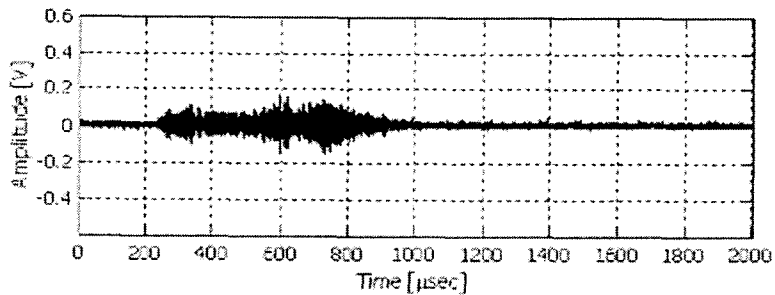


그림 4.1.12 RF 시간신호의 예

<8> STFT (Short Time Fourier Transform)

: 시간-주파수영역의 신호, 도착시간 정보, 모드의 분산양상을 분석하기 위해서 STFT를 사용하였으며, Matlab을 이용하여 그림 4.1.13과 같이 구하였다.

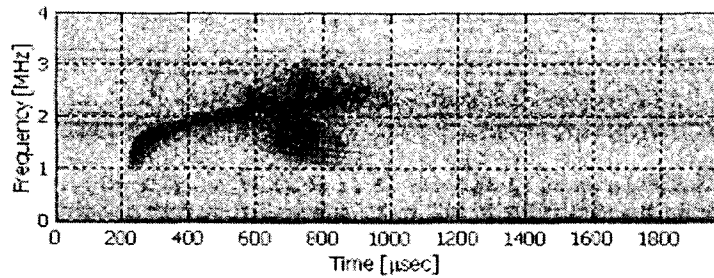


그림 4.1.13 STFT 신호의 예

(2) 실험

모든 실험은 그림 4.1.11과 같이 구성된 실험장치를 가지고 동일하게 수행 되었으며, 표 4.1.5에 나타난 실험조건을 동일하게 한 상태로 발진·수신거리, 발진·수신입사각, 직·곡관부, 탐촉자 주파수를 변화 시켜가면서 실험을 수행하였다. 각 실험과정의 자세한 결과는 기술보고서(KAERI/TR-2414/2003)의 부록1에 첨부 하였다.

표 4.1.5 실험공통조건

Sampling Rate	10 MS/s	Attenuation (on)	12 dB / 6 dB
Cycle	1	Damping	8 dB
Method	Pitch-Catch	Couplant	Baby oil

오실로스코프를 통해 저장된 실험신호는 MATLAB을 통해 그림 4.1.14 과 같이 정리·분석 되었다. 이때, 상단에 보이는 신호는 RF (Radio Frequency) 시간신호로써 X축은 시간, Y축은 신호의 진폭(Voltage)을 나타낸다. 하단에 보이는 신호는 상단신호를 STFT한 결과로써, X축은 시간, Y축은 주파수[MHz]대역을 보여준다. 이때, Sampling rate가 10 MS/s 이므로 X축 한 눈금은 200 μsec이며, 이는 상·하단 신호에 동일하다.

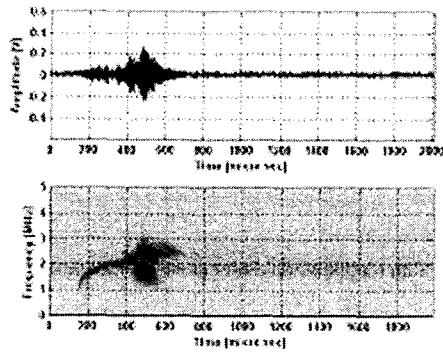


그림 4.1.14 실험신호의 예

본 연구 및 실험에서 언급되는 모든 입사각은 제작된 썰기의 각을 의미하며, 발진·수신 탐촉자의 각은 항상 동일하게 맞추어 실험이 수행 되었다.

(가) 직관부와 곡관부에서의 전파특성 비교

초음파는 그 특성상 임피던스(impedance)차가 나는 계면(boundary)을 만나면 그 입사각에 따라, 종·횡파간의 모드변환이 발생한다. 본 실험에서는 이 모드변환에 의해서 그림 4.1.15 증기발생기 세관 직관부(a)와 곡관부(b)에서 획득된 신호간의 어떠한 차이가 발생하리라 예상하고, 이를 비교한 결과를 통하여 유도초음파의 전파특성을 알아보고자 하였다.

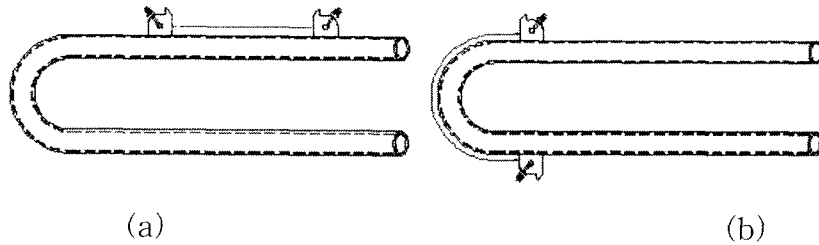
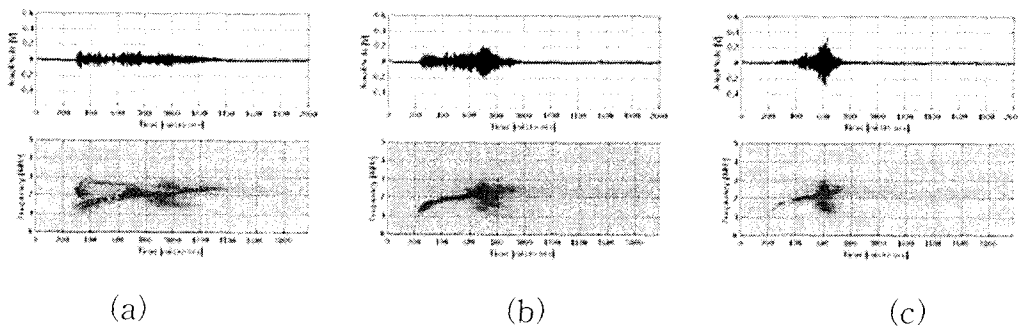
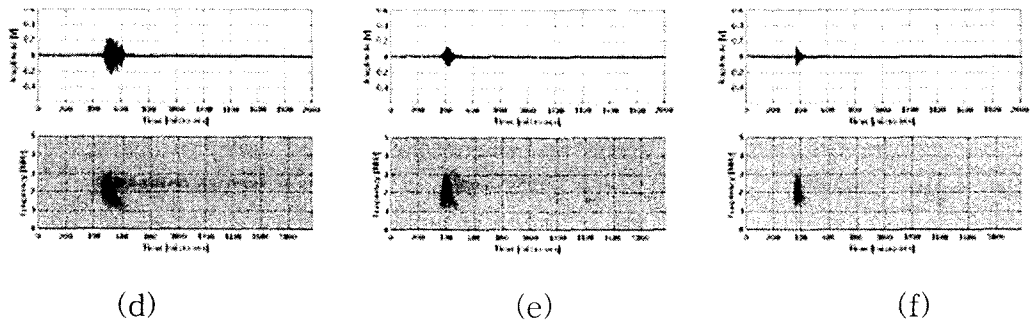


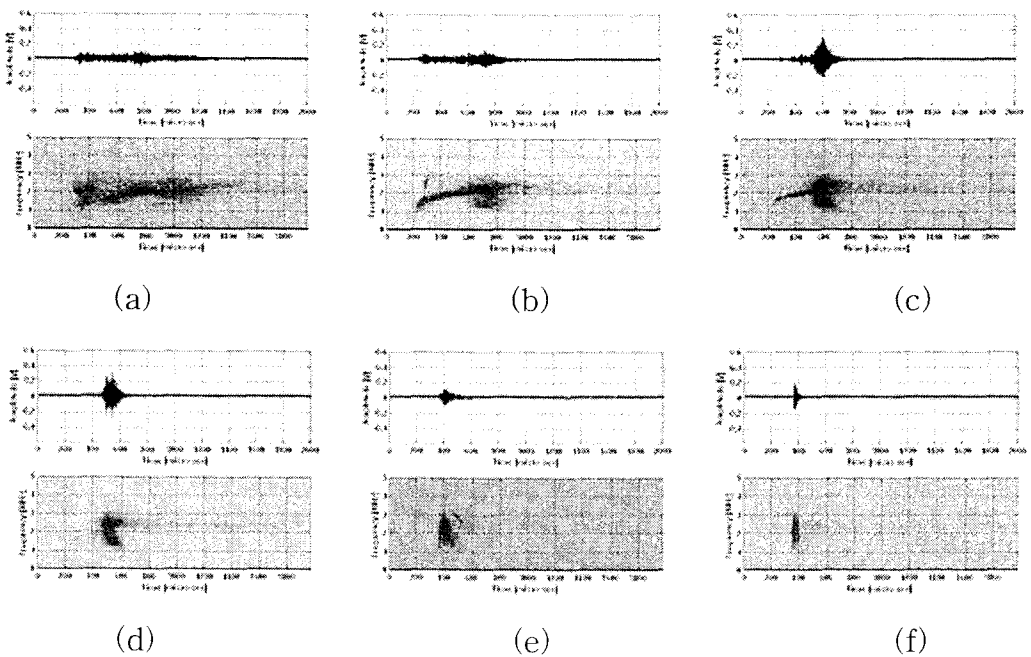
그림 4.1.15 증기발생기 세관의 실험배치.(a)직관부 (b)곡관부



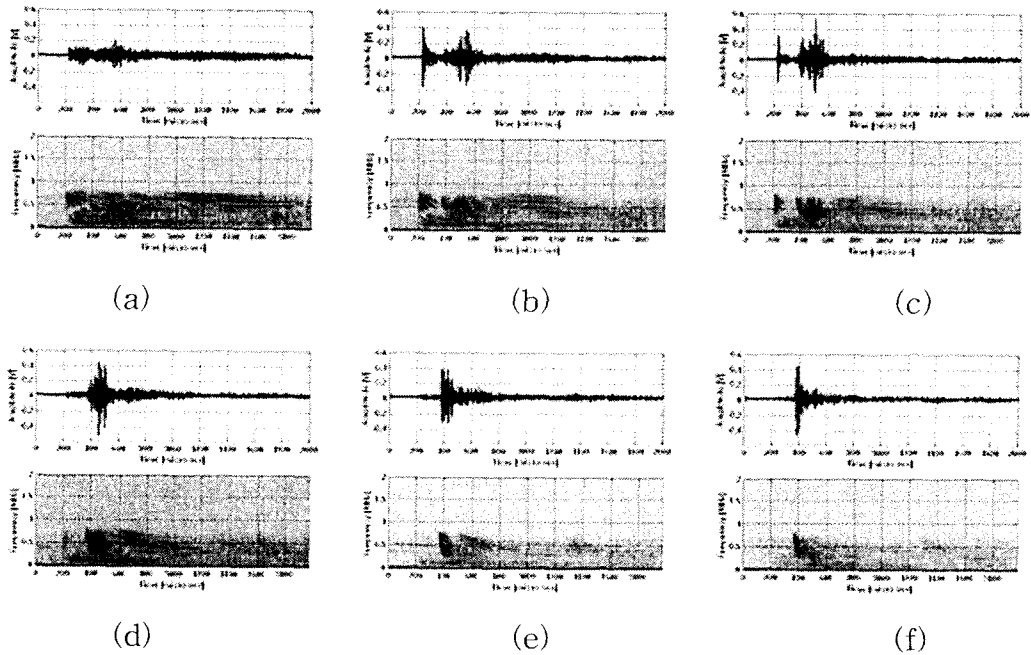


Transducer Frequency	2.25 MHz	Part	직관부
Distance	1.0 m	Method	Pitch-Catch
그림 4.1.16 각도에 따른 신호.(a) 20°(b) 30°(c) 40°(d) 45°(e) 60°(f) 70°			

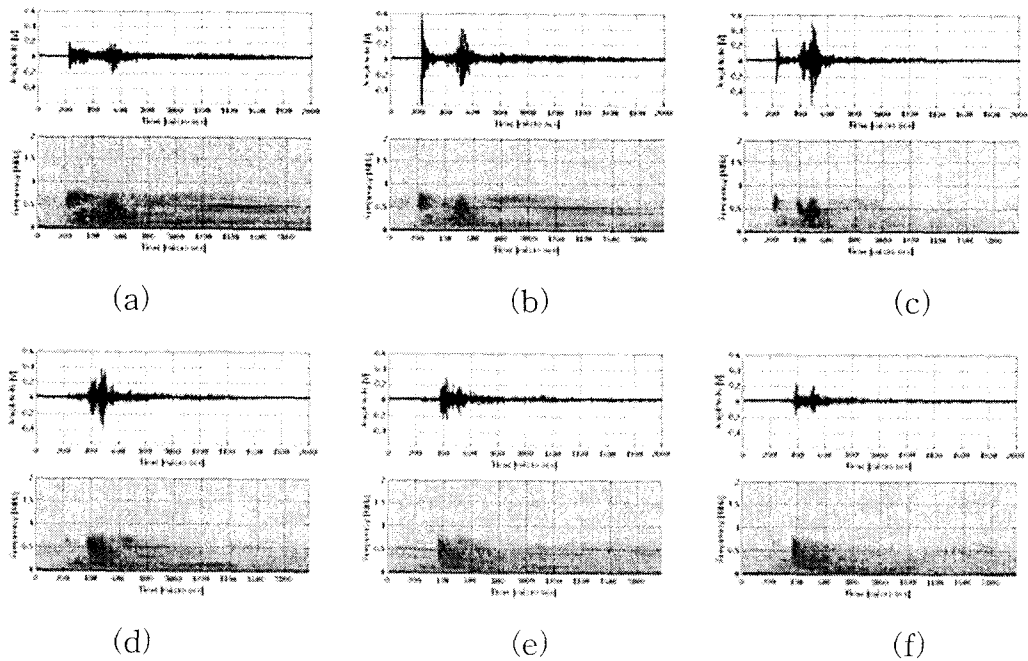
그림 4.1.16과 그림 4.1.17는 2.25 MHz 탐촉자를 가지고 표 4.1.5의 실험공통조건하에서 입사각만을 바꾸어 가며, 각각 직·곡관부에서 획득된 신호를 보여준다. 다양한 각도에서 비교함에도 불구하고 RF 신호의 진폭, 비행시간(Time of flight), STFT 주파수 대역, STFT 형태 등에서 차이가 거의 없다. 이는 실험이 수행된 증기발생기 튜브의 곡률이 관경에 비하여 크지 않아서 모드변환으로 인한 직·곡관부의 신호차이가 발생하지 않음을 보여주고 있다.



Transducer Frequency	2.25 MHz	Part	곡관부
Distance	1.0 m	Method	Pitch-Catch
그림 4.1.17 각도에 따른 신호.(a) 20°(b) 30°(c) 40°(d) 45°(e) 60°(f) 70°			



Transducer Frequency	0.5 MHz	Part	직관부
Distance	1.0 m	Method	Pitch-Catch
그림 4.1.18 각도에 따른 신호.(a) 20°(b) 30°(c) 40°(d) 45°(e) 60°(f) 70°			



Transducer Frequency	0.5 MHz	Part	곡관부
Distance	1.0 m	Method	Pitch-Catch
그림 4.1.19각도에 따른 신호.(a) 20°(b) 30°(c) 40°(d) 45°(e) 60°(f) 70°			

앞의 경우와는 달리 이번에는 0.5 MHz 탐촉자를 가지고 그림 4.1.18과 그림 4.1.19의 직·곡관부 경우에 대해서 비교해 보았다. 이 경우에도 2.25 MHz 탐촉자와 동일하게 모드 변화로 인한 차이가 없었다.

(나) 수신 위치각도에 따른 전파특성 비교

본 실험은 유도초음파 각 모드들이 관 내부를 전파할 때 어떠한 에너지 분포를 보이면서 전파하는 지, 즉 파형구조를 실험적으로 측정해 보고자 하였다.

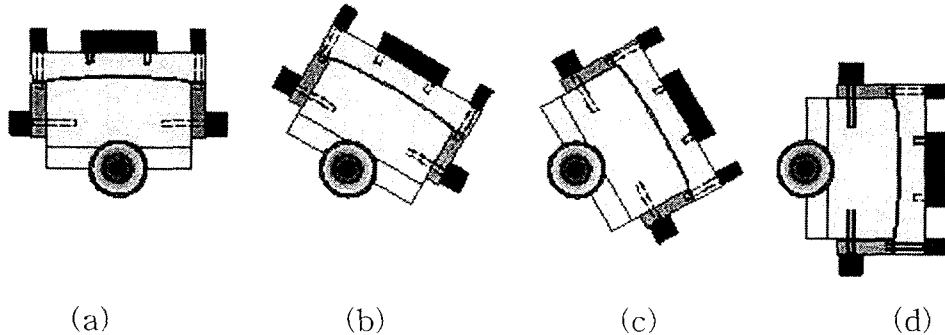
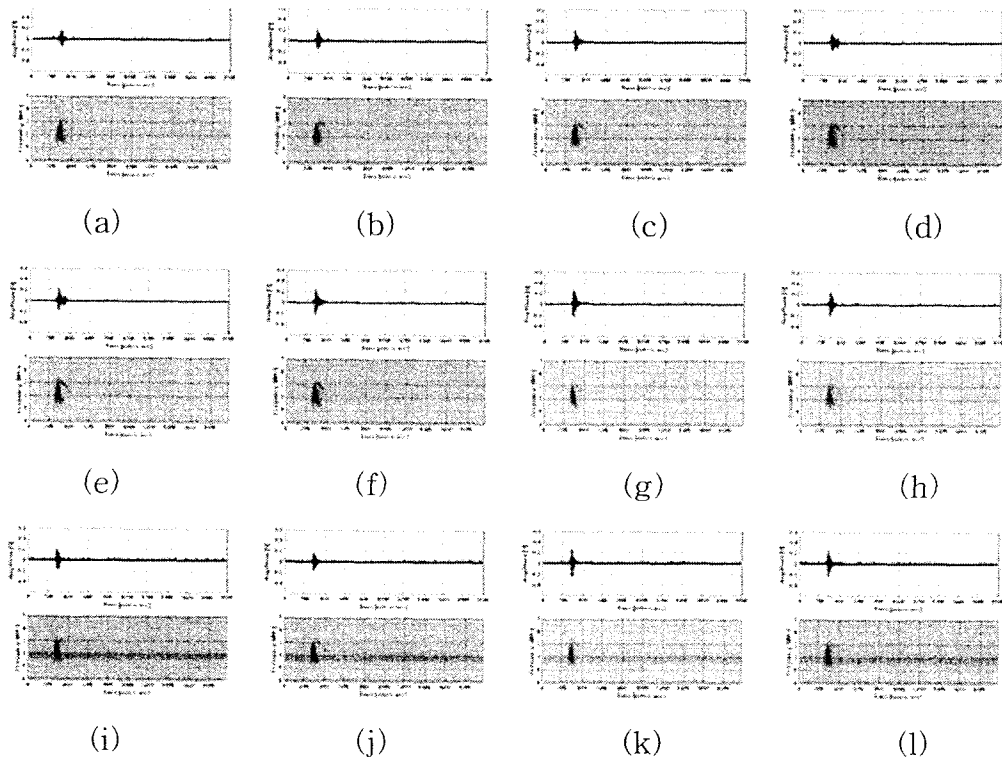


그림 4.1.20 수신위치 각도에 따른 탐촉자.(a) 000°(b) 030°(c) 060°(d) 090°
 그림 4.1.21은 2.25 MHz 탐촉자, 입사각 60°, 표 4.1.5의 실험공통조건하에서 발진탐촉자의 위치는 고정시킨 채, 그림 4.1.20과 같이 수신 탐촉자의 수신위치 각도를 30°씩(000°360°) 바꾸어 가면서, 그 진폭과 STFT의 변화를 나타낸 것이다. 이때 표 4.1.3의 이론상 2.25 MHz 탐촉자의 입사각 60°부근에서 발생 가능한 유도초음파 모드는 F(1,2)F(5,2)이다. 실험으로 구한 RF 신호로부터 계산된 군속도는 약 3.0 mm/μs로 이론적인 발생가능 모드와 거의 일치한다. 즉, 본 실험은 F(1,2)F(5,2)의 파형구조를 알 수 있는 실험이다. 그림 4.1.21 (a)(l)신호를 보면, STFT는 주파수대역이나 형태에서 거의 차이가 없었으며, 같은 곳에 측정하였으므로 비행시간 또한 동일하다.



Transducer Frequency	2.25 MHz	Angle	60°
Distance	1.0 m	Method	Pitch-Catch
그림 4.1.21 수신위치각도에 따른 신호. (a) 0°(b) 030°(c) 060°(d) 090° (e) 120°(f) 150°(g) 180°(h) 210°(i) 240°(j) 270°(k) 300°(l) 330°			

그림 4.1.22는 그림 4.1.21 (a)(l)의 RF 최대진폭의 값을 '1'로 하고, 나머지 값을 정규화(normalizing)하여 각 수신위치각도에 극좌표계(polar coordinate)로 표시한 것이다. 실험상 수신각도를 정확하게 맞추기 어려웠으며, 세관과 탐촉자간의 접촉상태를 정밀한 균일상태를 유지하기 어려웠던 점을 감안하더라도 그림 4.1.22에서 보여주고 있는 결과로는 어떠한 특징도 찾기 어려웠다. 이는 탐촉자의 크기에 비해서 세관의 직경이 작아, 탐촉자 방사폭 (radiation bandwidth, 공간상)이 상당히 크기 때문에, 마치 입사각이 여러 개인 탐촉자가 동시에 발진하는 것과 같은 효과를 내기 때문이다. 또한, F(1,2)F(5,2)의 모드가 비슷한 속도로 전파하기 때문에 각 모드의 특징이 혼재되어 나타나기 때문으로 추정된다.

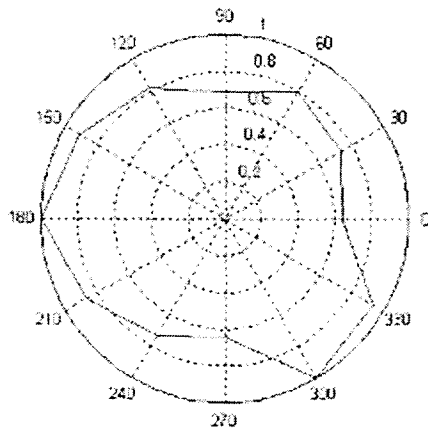
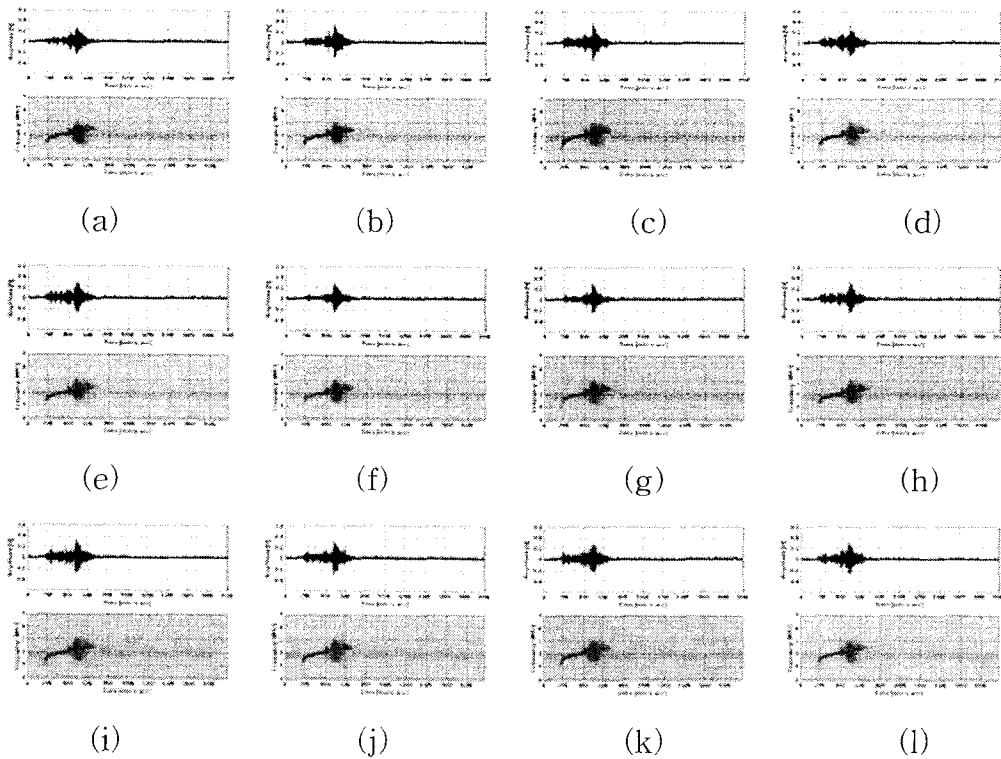


그림 4.1.22 수신위치각도에 따른 진폭

그림 4.1.23은 그림4.1.21과 다른 조건은 동일한 상태로, 입사각만을 30°로 바꾸어 결과를 얻은 것이다. 이때 표 4.1.3의 이론상 2.25 MHz 탐측자의 입사각 30°부근에서 발생 가능한 유도초음파 모드는 L(0,2), F(1,3)F(5,3)이다. STFT와 그림 4.1.3의 군속도분산선도(a)에서 이 모드에 해당하는 전파양상을 비교해 보면 그 형태가 거의 유사해 L(0,2), F(1,3)F(5,3)임을 어느 정도 예상 할 수 있다.



Transducer Frequency	2.25 MHz	Angle	30°
Distance	1.0 m	Method	Pitch-Catch
그림 4.1.23 수신위치각도에 따른 신호. (a) 0°(b) 030°(c) 060°(d) 090° (e) 120°(f) 150°(g) 180°(h) 210°(i) 240°(j) 270°(k) 300°(l) 330°			

그림 4.1.24 또한 그림 4.1.22와 유사하게 그림 4.1.23 (a)(l)의 RF 최대진폭의 값을 '1'로 하고, 나머지 값을 정규화하여 각 수신위치각도에 극좌표계로 표시한 것이다. 이때도 앞의 경우와 마찬가지로 유용한 특징을 가지는 결과를 얻어 낼 수 없었다.

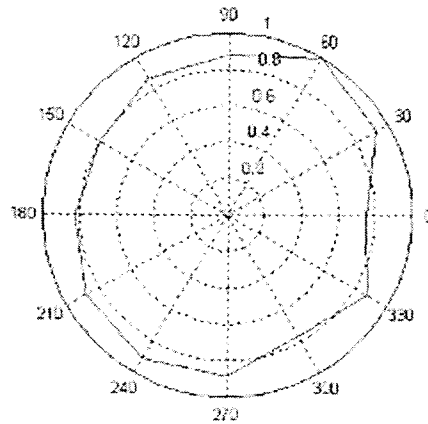


그림 4.1.24 수신위치각도에 따른 진폭

(다) 진행 거리에 따른 전파특성 비교

본 실험에서는 진행거리에 따라 직관부와 곡관부에서 모드의 군속도 차이와 그에 따른 STFT의 변화가 있는지, 또한 비행거리가 늘어남에 따라 RF 신호의 세기가 줄어들면 STFT에는 어떤 변화가 있는지를 알아보려고 하였으며, 더불어 실험으로 구한 군속도와 이론값인 그림 4.1.3의 군속도분산선도(a)의 속도와 비교 할 수 있는 기초실험에 그 목적이 있다.

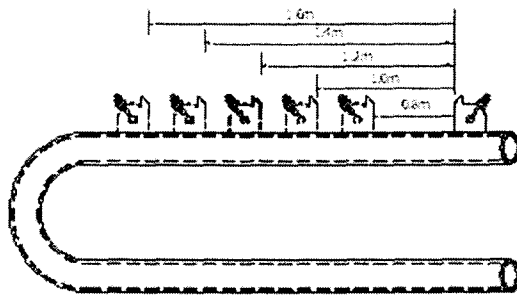
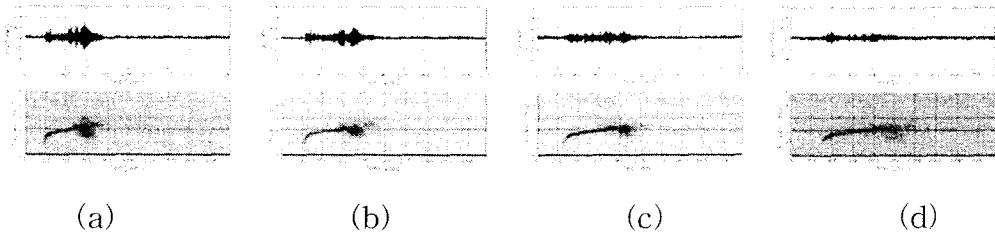


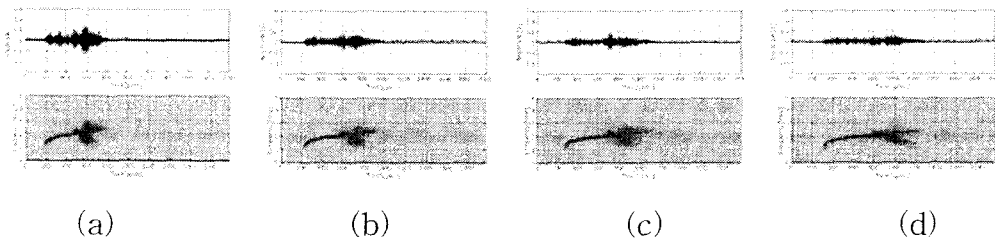
그림 4.1.25 진행거리에 따른 탐측자의 배치

그림 4.1.26와 그림4.1.27는 입사각 30° 및 표 3.4의 실험공통조건하에서 그림 4.1.25에서 나타낸 것처럼, 비행거리만 0.2 m(0.81.6 m)씩 늘려가며 각각, 직관부(그림 4.1.26)와 곡관부(그림 4.1.27)에서 획득된 신호를 보여주고 있다.

이때, 결과를 서로 비교해서 보면 RF 신호의 진폭, 비행시간(Time of flight), STFT 주파수 대역, STFT 형태 등에서 차이가 거의 없음을 보여진다. 이는 세관 환경에 비하여 곡률이 크지 않아 모드변환으로 인한 영향이 없음을 의미한다.

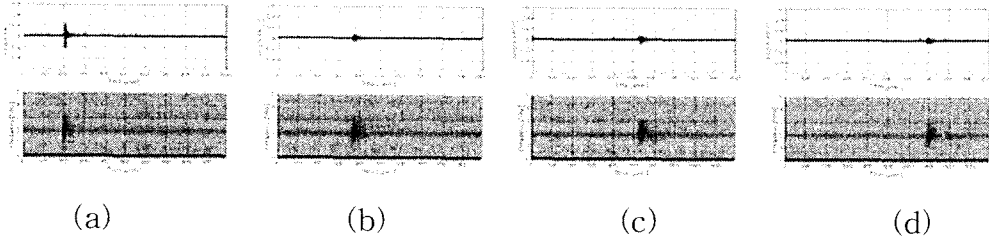


Transducer Frequency	2.25 MHz	Part	직관부
Angle	30°	Method	Pitch-Catch
그림 4.1.26 진행거리에 따른 신호. (a) 0.8 m (b) 1.0 m (c) 1.2 m (d) 1.4 m			

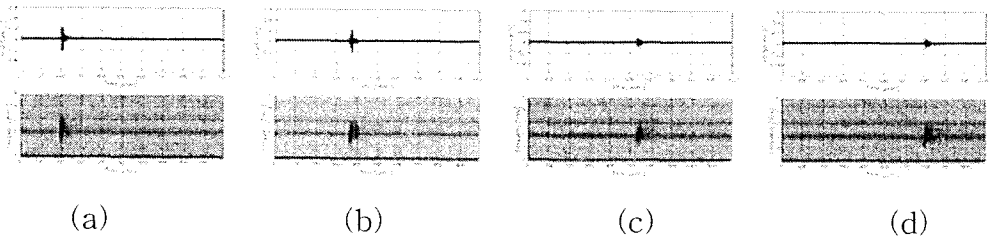


Transducer Frequency	2.25 MHz	Part	곡관부
Angle	30°	Method	Pitch-Catch
그림 4.1.27 진행거리에 따른 신호. (a) 0.8 m (b) 1.0 m (c) 1.2 m (d) 1.4 m			

앞의 경우와는 달리 그림 4.1.28와 그림 4.1.29에서는 입사각을 60° 로 바꾸어 동일한 조건하에서 비행거리를 늘려가며 각각 직관부(그림 4.1.28)와 곡관부(그림 4.1.29)에서 획득된 신호를 보여주고 있다. 이 경우에도 앞의 경우와 동일하게 모드변환으로 인한 영향을 볼 수 없었다.



Transducer Frequency	2.25 MHz	Part	직관부
Angle	60°	Method	Pitch-Catch
그림 4.1.28 진행거리에 따른 신호. (a) 0.8 m (b) 1.0 m (c) 1.2 m (d) 1.4 m			



Transducer Frequency	2.25 MHz	Part	곡관부
Angle	60°	Method	Pitch-Catch
그림 4.1.29 진행거리에 따른 신호. (a) 0.8 m (b) 1.0 m (c) 1.2 m (d) 1.4 m			

4. 분석 및 결론

가. 수신신호 모드 신호분석 기법 (GWMIT)

실험을 통해 획득된 신호의 비행시간은 물체의 내부를 지난 시간뿐 아니라, 탐촉자 지연시간(probe delay)와 썸기지연시간(wedge delay) 및 couplant에서 지연된 시간 등을 포함한다. 따라서 일반 초음파탐상에서는 실험에 앞서 표준화된 시험편 블록으로 앞서 언급된 지연시간을 교정(calibration)한 후 실험을 수행한다. 본 실험에서는 이 과정이 필요 없는 방법을 적용하였다. 즉, 200 mm간격으로 신호들을 획득한 후, 각 신호들의 비행시간 차이를 구하면 지연시간이 배제된 순수하게 시험체 내부만

통과한 시간을 계산해 낼 수 있다.

표 4.1.6 비행거리에 따른 주파수별 시간-속도 관계 (참조: 그림 4.1.26)

Frequency (mm) Distance	1.0 MHz		1.5 MHz		2.0 MHz	
	Time (μ s)	Velocity (mm/ μ s)	Time (μ s)	Velocity (mm/ μ s)	Time (μ s)	Velocity (mm/ μ s)
0800	180.82	-	191.78	-	337.53	-
1000	222.47	4.80	236.71	4.45	410.96	2.72
1200	260.82	5.21	290.41	3.72	493.15	2.43
1400	300.27	5.07	337.53	4.24	574.25	2.47
1600	338.63	5.21	380.27	4.68	654.25	2.50
Average	-	5.08	-	4.27	-	2.53

표 4.1.6은 그림 4.1.26 (a)(d)의 비행거리가 증가함에 따라, STFT의 1.0, 1.5, 2.0 MHz 주파수에 해당하는 측정시간과 속도를 나타낸 표이다. 이때 "Time"은 각 거리에서 측정된 시간이며, "Velocity"는 현재의 행과 이전행에 해당하는 시간차이를 비행거리차(200 mm)에 나누어 계산된 속도를 나타낸다. 평균으로 표시된 속도는 각 열의 산술평균(算術平均)이다.

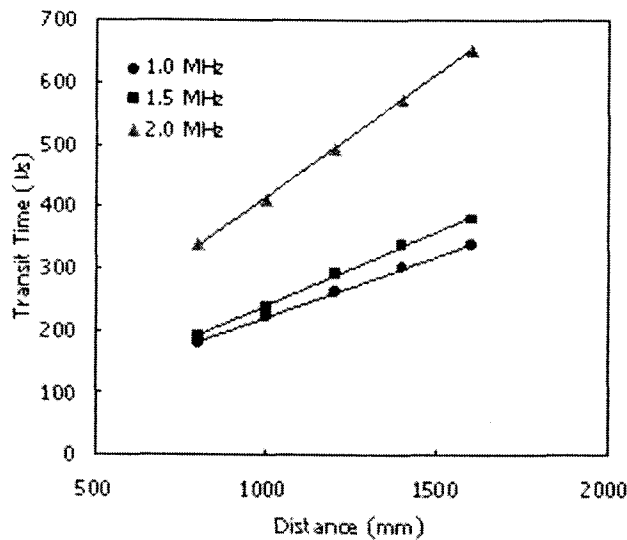


그림 4.1.30 주파수별 시간-속도 관계 (참고: 표 4.1.6)

그림 4.1.30은 표 4.1.6 값의 분포를 보다 쉽게 알 수 있도록 그래프로 나타낸 것으로, 이때 표 4.1.7에서 각 주파수에 해당하는 직선의 기울기 (slope)는 최소자승법(RMS; Root mean square)으로 계산된 값으로, 일반적으로 실험오차를 표현하는 방법으로 알려져 있다. 이 기울기의 역수가 균속도에 해당한다.

표 4.1.7 주파수별 군속도 (참조; 그림 4.1.30)

Frequency	1.0 MHz	1.5 MHz	2.0 MHz
Slope ($\mu\text{s}/\text{mm}$)	0.1967	0.2389	0.3984
Group velocity ($\text{mm}/\mu\text{s}$)	5.08	4.19	2.51

그림 4.1.31는 본 연구에서 제안하고자 하는 유도초음파 수신신호 모드 분석기법 (GWMIT : Guided Wave Mode Identification Technique)를 보여 준다. 이를 통해 표 4.1.7 측정치와, 그림 4.1.4 분산선도 이론치 간의 비교 분석을 할 수 있다.

이론상으로 2.25 MHz 탐촉자는 2.25 MHz 부근에만 주파수성분이 집중되어 있어야 하나, 실제로는 물리적인 특성상 일정한 대역폭(band width)에 분산되어 있으며, 초음파의 발생이 이론상의 점원(點原, point-source)이 아니라, 일정한 크기를 가진 탐촉자의 압전소자(piezoelectric material)로부터 발생 되므로, 빔 퍼짐(divergence)으로 인한 에너지 분산(dispersion)이 존재한다. 이러한 결과, 실제 13 MHz의 주파수 대역에 신호가 존재하는 것을 그림 4.1.31(c), (d)에서 확인할 수 있다. 이때, (a)는 시간 RF 신호이며, (b) 위상속도분산선도, (c) FFT, (d) STFT, (e) 군속도분산선도이다. 특이한 점은 (b), (e)의 경우 일반적인 분산선도와는 달리, X축을 주파수만으로 나타내었다. 이는 (c) FFT 와 (d) STFT와 그 단위를 일치시켜 모드를 보다 명확히 분석 하고자 함이다.

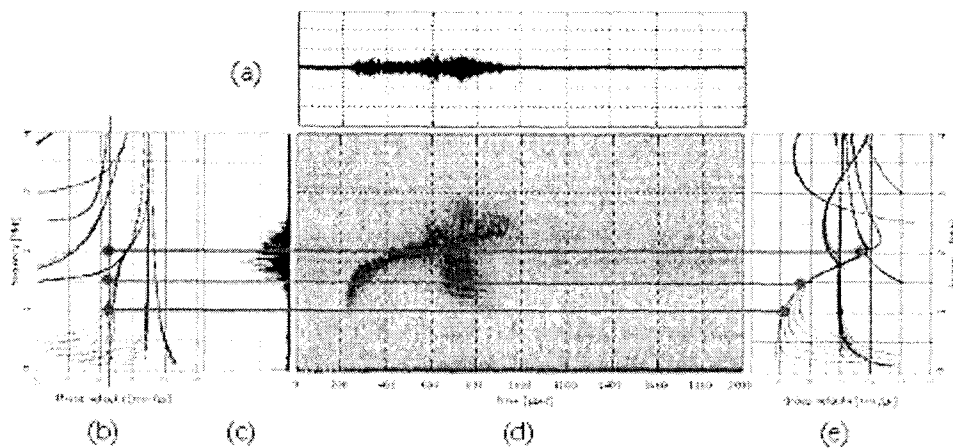


그림 4.1.31 GWMIT (2.25 MHz 탐촉자, 입사각 30°)

췌기의 30°입사각이 정해지면, 이론상의 위상속도는 $5.37 \text{ mm}/\mu\text{s}$ 으로 결

정된다. 그림 4.1.31(b)와 같이 이 위상속도에 해당하는 수직선을 긋고, 이 선분으로부터 각각 1.0, 1.5, 2.0 MHz에 해당하는 주파수상의 수평선을 그림 4.1.31(e) 군속도분산까지 그린다. 그러면 그림 4.1.31(d) STFT 의 경계선과 교차하는 점으로부터 그 주파수성분에 해당하는 신호의 군속도성분의 비행시간을 구할 수 있다. 이 값들이 바로 표 4.1.6에 정리된 실험시간이다. 반면, 수평선을 더 연장하여 그리면, 그림 4.1.31(e) 군속도 분산선도와 교차하는 점으로부터 각각의 군속도를 얻을 수 있다. 이는 이론치로, 표 4.1.6의 실험 측정 속도와 비교해 보면 비교적 잘 들어맞는 것을 볼 수 있다.

이는 30°입사각에서 발생가능한 L(0,2), F(1,3)F(5,3)를 확인 할 수 있는 결과로, 이를 통해 주파수 대역폭, 빔퍼짐 등과 같은 실험적인 한계에도 그림 4.1.4에서 구한 유도초음파 분산선도를 실험에 그대로 적용 할 수 있음을 보여준다. 즉, 본 모드분석기법(GWMIT)은 시간, 주파수, 발생각, 위상속도, 군속도, 모드 등의 관계를 한 눈에 명확히 알 수 있으며, 실험치와 이론치의 관계를 명확히 확인 할 수 있는 장점을 가지고 있으므로 본 연구에서 제안하게 되었다.

나. 결함검출 최적모드 선정

(1) 선정방법

유도초음파를 사용하여 결함을 검출하는 최적모드 선정 기준은 대상체에 따라 크게 달라 질 수 있으며, 특별한 원칙은 없으나 일반적으로 다음과 같은 사항을 고려해야 한다.

군속도 분산선도에서 속도가 되도록 가장 빠른 모드를 선정한다. 피검체에 결함이 존재하게 되면 그 근처를 지나가는 초음파는 물리적인 특성상 경계면에서 모드변환 되어, 그 모드와 속도가 바뀌게 된다. 이에 예상치 못한 신호가 발생하기 때문에 신호해석에 많은 어려움이 따르게 된다. 물론 차기년도에 과제를 수행 하면서 이 신호해석에 대한 연구가 이루어지겠으나, 우선 가장 빠른 군속도를 가지는 모드를 결함검출 모드로 선정하면 다른 모드들과의 식별이 용이 할 뿐 아니라 모드변화 여부를 명확히 확인

할 수 있다.

위상속도 분산곡선에서 비교적 평탄한 부분의 모드를 선정한다. 입사각에 의해 결정되는 위상속도에 대해 fd 의 폭이 넓으면, 탐촉자의 초음파에너지 중에서 많은 양(quantity)이 유도초음파로 변환 될 가능성이 높아지며, 또한 넓은 주파수영역(board band; 주파수영역)으로 인해 펄스 폭(pulse duration; 시간영역)이 비교적 좁아져서 시간 분해능(resolution)이 높아지는 장점이 있다.

선정된 모드 부근에 여러 모드가 발생하지 않아야 한다. 비슷한 속도를 가진 모드가 많게 되면 그 구별이 어려워져, 신호의 특성 분석이 곤란해진다.

선정된 모드 수신신호의 진폭(amplitude)이 되도록 커야 한다. 유도초음파의 가장 큰 장점중의 하나는, 탐촉자의 이동 없이 접근이 어려운 부위에 원거리탐상이 가능하다는 것이다. 즉, 원거리에서도 수신 가능한 모드를 선정해야 할 것이다.

적합한 탐촉자를 쉽게 구할 수 있어야 한다. 현재 일반적으로 구할 수 있는 탐촉자는 주파수 대역폭(Frequency bandwidth), 중심주파수, 크기나 모양 등이 제한되어있다. 이러한 탐촉자 중에서 앞선 언급된 조건들을 만족하는 탐촉자를 선정해야 할 것이며, 또한 유도초음파의 발생 특성상, 고출력에도 그 특성을 잃지 않아야 한다.

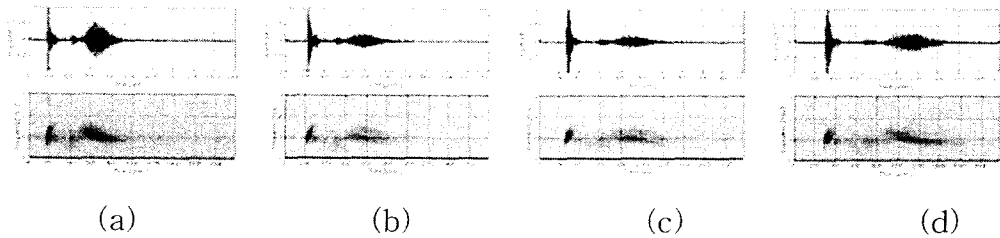
(2) 최적모드 선정

본 결함검출 최적모드는 앞서 언급된 방법에 의거하여 선정되었다. 그림 4.1.4 균속도 분산선도(a)에서 속도가 가장 빠른 모드는 L(0,2)의 0.5 MHz 부근이다. 그러나 위상속도곡선(b)에서 이 부분은 평탄하지 못할 뿐 아니라, 균속도 선도를 보면 부근에 모드가 여러 개 발생될 여지가 있다. 반면 1.0 MHz 부근을 보면 비교적 속도도 빠르며, 위상속도곡선에서 비교적 평탄할 뿐 아니라, 균속도 선도의 모드들이 뭉쳐있어 수신신호의 세기가 클 것으로 예상된다. 또한 1.0 MHz의 중심주파수를 가진 탐촉자는 초음파 탐상에서 가장 일반적으로 쓰이고 있으며, 쉽게 구할 수 있다.

1.0 MHz의 중심주파수를 가진 탐촉자에서 L(0,2)를 발생시키기 위한 이론

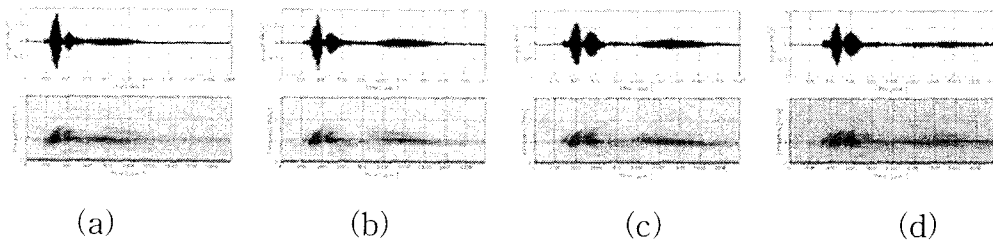
적인 입사각은 31.6° 이다. 그러나 제작된 웨지 각은 10° 혹은 15° 단위로 표기 되어있으며, 탐촉자의 빔퍼짐 각, 주파수 대역폭 등의 고려하여 입사각을 본 연구에서는 적절한 입사각을 30° 로 선정하였다. 이때, L(0,2) 모드의 1.0 MHz 부근에는 F(1,3), F(2,3) 이 비슷하게 뭉쳐있어, 이 모드들 또한 충분히 발생될 가능성을 가지고 있다.

그림 4.1.32는 Pitch-catch 법으로, 입사각 30° 에서 0.2m 거리 차에 따른 RF 신호와 STFT를 보여주고 있다.



Transducer Frequency	1.0 MHz	Part	직선부
Angle	30°	Method	Pitch-Catch
그림 4.1.32 진행거리에 따른 신호. (a) 0.8 m (b) 1.0 m (c) 1.2 m (d) 1.4 m			

그림 4.1.33은 그림 4.1.32와 동일한 조건에 입사각 20° 의 경우로, 그림 4.1.32에 비하여 STFT가 명확하지 않으며, 거리 차에 따라 신호의 진폭이 급격히 감소하기 때문에 선정하기에 적합하지 않음을 알 수 있다. 반면 그림 4.1.32의 입사각 30° 의 경우에는 거리에 따른 진폭의 감쇠가 적기 때문에 보다 멀리 전파 할 수 있는 가능성이 있으며, STFT 또한 보다 명확하기 때문에 선정하게 되었다.



Transducer Frequency	2.25 MHz	Part	직선부
Angle	20°	Method	Pitch-Catch
그림 4.1.33 진행거리에 따른 신호. (a) 0.8 m (b) 1.0 m (c) 1.2 m (d) 1.4 m			

표 4.1.8은 그림 4.1.32 (a)(d) STFT의 1.0 MHz에 해당하는 비행시간을 비행거리에 따라 표시한 것이다. 표시 방법은 표 4.1.6과 같으며 Average

에 해당하는 값은 산술평균값을 나타낸다.

표 4.1.8 비행거리에 따른 균속도와 시간의 관계 (참조: 그림 4.1.32)

Distance(mm)	Time (μ s)	Velocity (mm/ μ s)
0800	165.87	-
1000	208.27	4.72
1200	251.47	4.63
1400	293.33	4.78
1600	328.00	5.77
Average	-	4.97

그림 4.1.34는 표 4.1.8 값의 분포를 그래프로 나타낸 것으로, 이때 직선의 기울기(RMS)로부터 실험상의 균속도가 4.88 mm/ μ s 임을 알 수 있다.

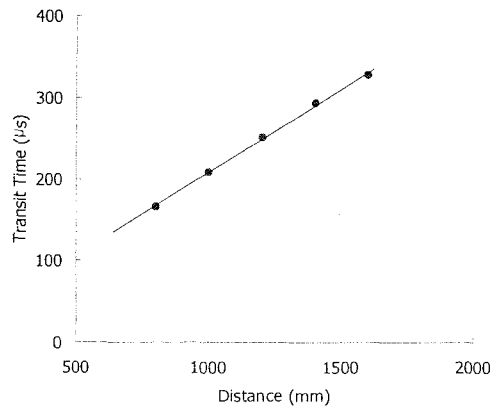


그림 4.1.34 시간-속도 관계 (참조: 표 4.1.8)

그림 4.1.35는 본 연구에서 제안 한 수신신호 모드분석기법(GWMIT)를 통해 결함검출 최적모드 선정을 보여준다. 먼저, 시간영역의 RF 신호(a)를 보면 몇 개의 모드가 중첩되어 전파되고 있어, 어떠한 모드가 어떻게 전파되었는지 알 수 없다. 그러나 STFT를 이용하여 얻은 시간-주파수영역의 신호(d)를 보면 각 주파수에 따른 시간의 정보가 제시되어져 있어 각 모드의 분산양상을 알 수 있다. 이때 표 4.1.8과 비교하면, 보다 정확한 모드를 확인 할 수 있다.

도착시간은 유도초음파의 균속도에 따라 결정되기 때문에, 결국 주파수에 의존하는 균속도의 분산양상이 STFT에 의해 얻어지게 된다. 물론 STFT에 의해 얻어지는 분산특성은 유도초음파의 전파거리에 따라 그 정도는 달라지나, 분산의 경향은 그대로 유지된다. 이러한 분산양상을 균속도 분

산선도(e)와 비교함으로써 모드를 확인 할 수 있다.

보다 구체적으로 설명하면 다음과 같다. 주파수 1.0 MHz, 시편두께 1.09 mm 즉, $fd=1.09 \text{ MHz} \cdot \text{mm}$ 에서 발생할 수 있는 유도초음파의 모드는 다양하게 존재한다. 이때, 입사각이 30° 임으로, 이론적인 위상속도는 $5.37 \text{ mm}/\mu\text{s}$ 로 정해진다. 이를 위상속도 분산선도(b)와 군속도 분산선도(e)에서 찾아보면 어떤 모드가 전파하였는지 확인 할 수 있다. 즉, 그림 4.1.35 (a)의 좌측(속도가 보다 빠른) 신호는 L(0,2) 또는 (1,3), F(2,3) 모드이다. 이는 표 4.1.8의 실험속도와도 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

그림 4.1.35(a) 우측(속도가 보다 느린)신호는 STFT가 명확치 않고, 분산이 커서 정확한 속도를 구할 수는 없었으나, 대략적으로 $1.2 \sim 1.8 \text{ mm}/\mu\text{s}$ 를 얻을 수 있었다. 이는 L(0,3) 혹은 F(1,5) F(5,5) 모드들의 연장선에 해당 될 것으로 추정된다.

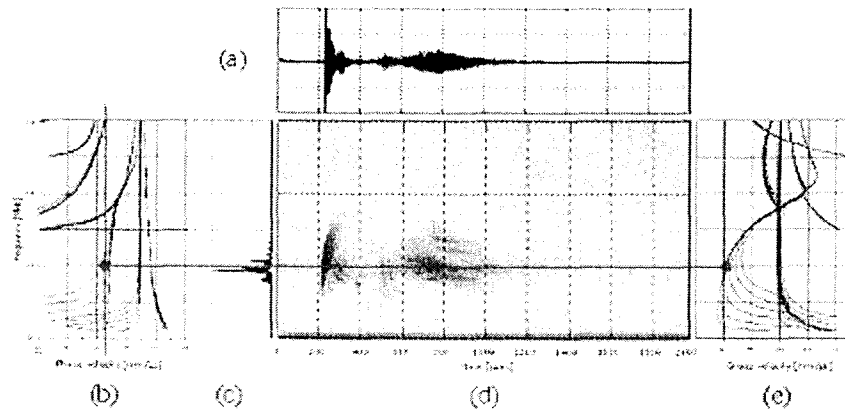


그림 4.1.35 결함검출 최적모드 선정

결론적으로 본 연구과제의 실험대상으로 선정된 증기발생세관에 대하여, 최적모드 선정방법에 적합하며, 제안된 수신신호모드 분석기법으로 선정된 유도초음파 결함검출 최적모드는 L(0,2) 또는 (1,3), F(2,3) 이며, 이를 발생하기 위해서는 1.0 MHz 초음파 탐촉자를 사용하며, 웨지 입사각은 30° 이다.

제 2 절 유도초음파를 이용한 결함탐지기술 연구

1. 연구 개요

본 연구는 원자력 발전소의 가동기간동안 파이프들의 온라인 모니터링의 새로운 방법을 개발하는 것이 목적이다. 이 목적을 위해 수행되는 연구의 범위는 다음과 같다.

- 웨지를 사용한 유도초음파의 발생 및 인공결함 탐지에 관한 연구
- 수신된 유도초음파 모드 분석을 위한 패턴매칭 기법연구
- 위상배열 탐촉자를 사용한 유도초음파 모드제어에 관한 연구
- 위상배열형 초음파 탐촉자 설계
- 다채널 초음파 송수신장치 설계 및 제작

웨지를 사용하여 직경 2인치의 스테인레스 파이프에 유도초음파를 발생시키고 인공결함에서 반사되는 신호를 수신하였다. 또한 수신된 파형의 모드 확인을 위하여 패턴매칭 기법을 도입하였고, 그 결과 계산된 분산선도와 비교하여 수신된 유도초음파의 모드를 확인할 수 있었다. 또한 위상배열형 탐촉자를 사용하여 원하는 모드의 유도초음파를 자유롭게 발생시킬 수 있는 기법에 대하여 연구하였다. 문헌 조사를 통하여 기법의 원리 및 적용기준을 분석하였으며, 이를 기준으로 2인치 스테인레스 배관에 적용할 탐촉자와 초음파 송수신 장치를 설계하였다. 8채널 초음파 pulser/receiver를 제작하였고, 이를 이용하여 배열형 탐촉자를 순차적으로 구동하는 시스템을 설계 제작하였다.

2. 실험

가. 결함 가공

실험에 사용된 시편의 결함은 직경 2인치의 seamless 스테인레스 스틸 배관에 그림 4.2.1과 같이 가공하였다.

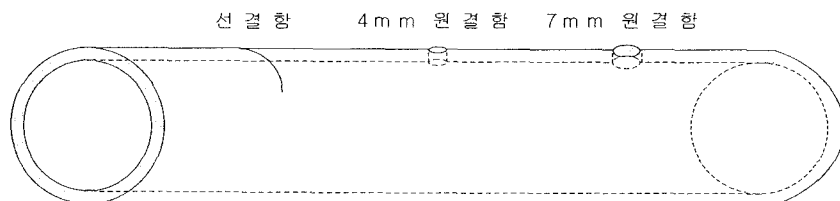


그림 4.2.1 결함 가공 시편

결함탐상을 위한 다양한 모드에 대한 실험을 위해 웨지를 가공하였다. 아크릴 웨지를 30도, 45도, 60도로 가공하였고, 중심주파수가 0.5 MHz인 초음파 탐촉자를 사용하여 실험을 수행하였다.

나. 선 결함에서의 유도초음파 실험

먼저 선결함의 우측에서 30도와 45도 웨지를 사용한 유도초음파 실험을 진행하였으며, 그 결과를 그림 4.2.2와 4.2.3에 나타내었다. 그림 4.2.2에서, 탐촉자의 중심주파수는 0.5 MHz이나 STFT 결과에서는 0.5 MHz와 0.6 MHz가 같이 나타났으며 이는 각각 L(0,4)와 L(0,5)모드로 판명되었다. 앞(0.5 ms)에 나타나는 신호는 결함에서 반사된 신호이고, 뒤(1.2 ms)에서 나타나는 신호는 배관의 끝단에서 반사된 신호이다. 그림 4.2.3의 STFT 결과에서는 0.45 MHz와 0.6 MHz가 같이 나타났으며 이는 각각 L(0,3)와 L(0,6)모드로 판명되었다. 앞(0.5 ms)에 나타나는 신호는 결함에서 반사된 신호이고, 뒤(2 ms)에 나타나는 신호는 배관의 끝단에서 반사된 신호이다.

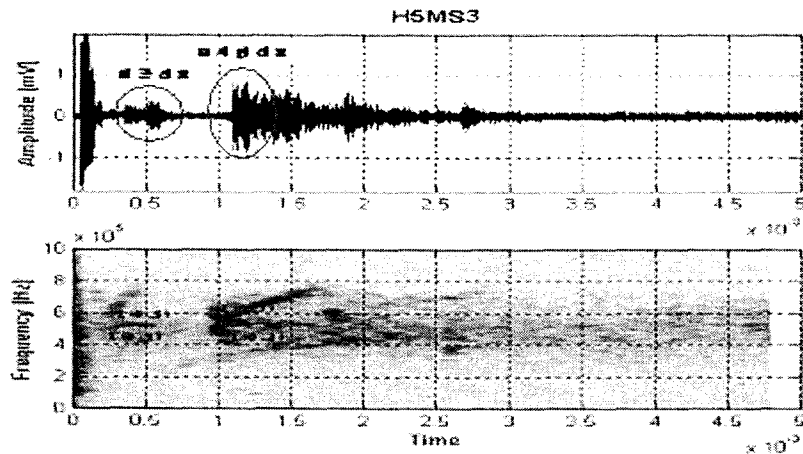


그림 4.2.2 선결함에 대한 유도초음파 실험 결과

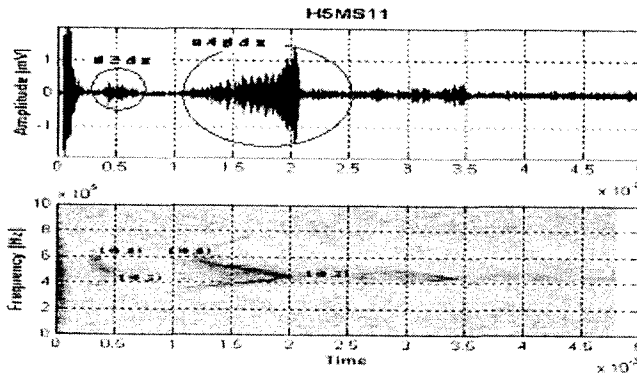


그림 4.2.3 선결함에 대한 유도초음파 실험결과(45도 웨지)

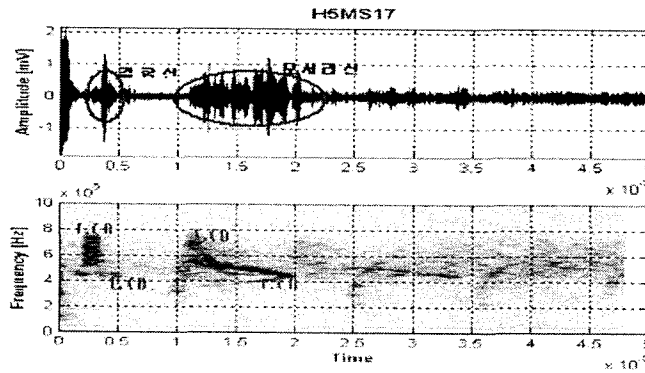


그림 4.2.4 선결함에 대한 실험 결과 (60도 웨지).

그림 4.2.4는 선결함의 우측에서 60도 웨지를 사용한 유도초음파 시험 결과를 보여주고 있다. 앞의 실험과 마찬가지로 중심주파수가 0.5 MHz인 탐촉자를 사용하였다. 그림 4.2.4의 STFT 결과를 보면 0.45 MHz에서 L(0,3) 모드 분산선도와 같은 패턴의 주파수가 분포되어있음을 알 수 있다. 그리고 0.4MHz부터 0.8MHz까지 분산성이 없는 모드가 있는데 이는 L(0,1)모드이다. 앞(0.5 ms)에 나타나는 신호는 결함에서 반사된 신호이고 뒤(1.1 ms)에 나타나는 신호는 배관의 끝단에서 반사된 신호이다.

다. 원 결함에서의 유도초음파 실험

$\phi=4\text{mm}$ 인 원결함의 우측에서 30도웨지를 이용한 유도초음파 시험 결과를 그림 4.2.5에 나타내었다. 그림 4.2.5에서 앞(0.5 ms)에 나타나는 신호는 결함에서 반사된 신호이고 뒤(2.2 ms)에 나타나는 신호는 배관의 끝단에서 반사된 신호이다. 결함에서 반사한 유도초음파의 모드를 구별하기 어렵지만 배관모서리에서 반사한 신호의 STFT 결과에서는 0.5 MHz와 0.6

MHz가 같이 나타났으며 이는 각각 L(0,4)와 L(0,5)모드이다.

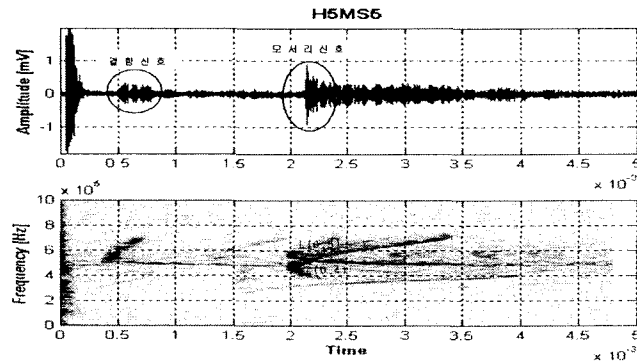


그림 4.2.5 원결함($\phi=4\text{mm}$)에 대한 실험 결과(30도젯지).

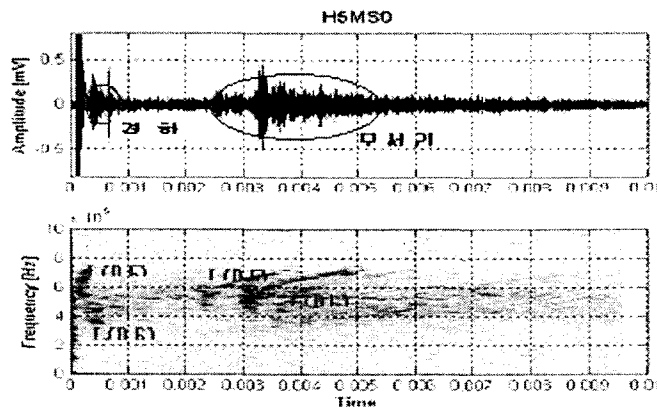


그림 4.2.6 원결함($\phi=7\text{mm}$)에 대한 실험 결과 (30도젯지)

$\phi=7\text{mm}$ 인 원결함의 우측에서 30도 젯지를 사용한 유도초음파 시험 결과는 그림 4.2.6에 나타내었다. 그림 4.2.6에서 앞(0.4 ms)에 나타나는 신호는 결함에서 반사된 신호이고 뒤(2.5 ms)에 나타나는 신호는 배관의 끝단에서 반사된 신호이다. 결함에서 반사한 유도초음파의 모드를 구별하기는 어렵지만 배관모서리에서 반사한 신호의 STFT 결과에서는 0.5 MHz와 0.6 MHz가 같이 나타났으며 이는 각각 L(0,6)와 L(0,5)모드로 판명되었다.

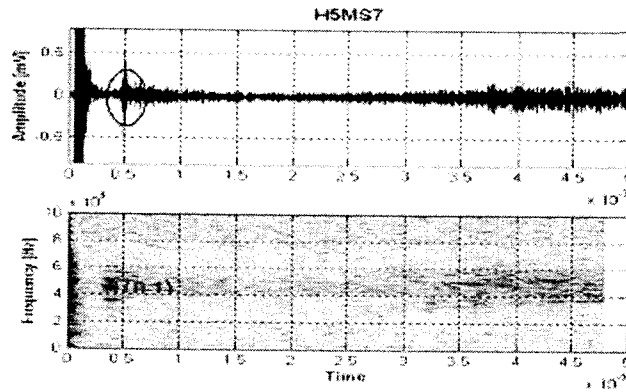


그림 4.2.7 원결함($\phi=7\text{mm}$)에 대한 실험 결과
(45도젯지)

$\phi=7\text{mm}$ 인 원결함의 우측에서 45도젯지를 사용한 유도초음파 시험 결과는 그림 4.2.7에 나타내었다. 그림 4.2.7에서 앞(0.5 ms)에 나타나는 신호는 결함에서 반사된 신호이고 뒤에 나타나는 신호는 배관의 끝단에서 반사된 신호가 존재해야 하지만 많은 다양한 모드가 동시에 발생하였고, 특징적으로 amplitude가 높은 모드가 없어서 발생한 신호의 주파수 분해능이 좋지 않아 모드를 판별하기 어렵다. 결함에서 반사한 유도초음파의 STFT 결과로 0.5 MHz가 분산선도와 같이 나타났으며 이는 L(0,1)모드이다.

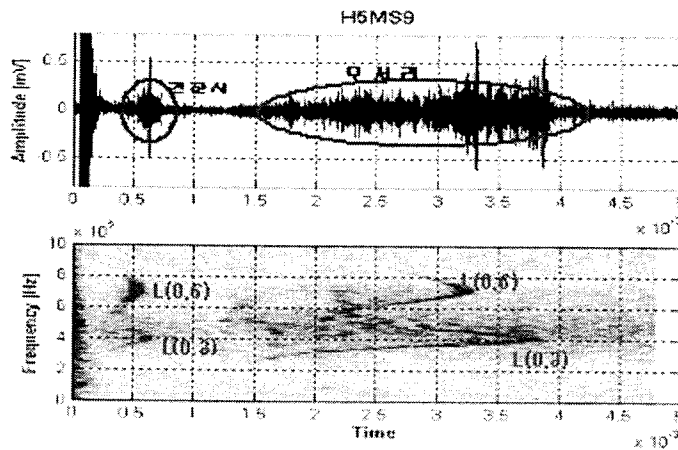


그림 4.2.8 원결함($\phi=4\text{mm}$)에 대한 유도초음파 실험
결과 (45도젯지)

$\phi=4\text{mm}$ 인 원결함의 우측에서 45도 젯지를 사용한 유도초음파 시험 결과는 그림 4.2.8에 나타내었다. 그림 4.2.8에서 앞(0.6ms)에 나타나는 신호는 결함에서 반사된 신호이고 뒤(1.7ms)에 나타나는 신호는 배관의 끝단에서

반사된 신호이다. 결함에서 반사한 유도초음파의 모드를 구별하기 어렵지만 배관모서리에서 반사한 신호의 STFT 결과에서는 0.4 MHz와 0.7 MHz가 같이 나타났으며 이는 각각 L(0,3)와 L(0,6)모드이다.

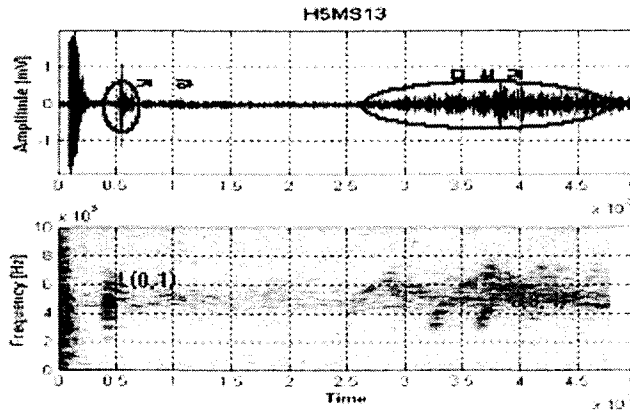


그림 4.2.9 원결함($\phi=7\text{mm}$)에 대한 실험 결과
(60도젯지)

$\phi=7\text{mm}$ 인 원결함의 우측에서 60도젯지를 사용한 유도초음파 시험 결과는 그림 4.2.10에 나타내었다. 그림 4.2.9에서 앞(0.5 ms)에 나타나는 신호는 결함에서 반사된 신호이고 뒤에 나타나는 신호는 배관의 끝단에서 반사된 신호이다. 결함에서 반사한 유도초음파의 STFT 결과로 0.2 MHz에서 0.7 MHz가 분산선도의 L(0,1)모드와 패턴이 비슷하게 나타났다. 배관의 끝단에서 반사된 유도초음파의 STFT 결과는 0.5MHz 근처의 신호가 나왔으면 이 모드는 L(0,4) 모드등 여러 모드가 같이 나타났다.

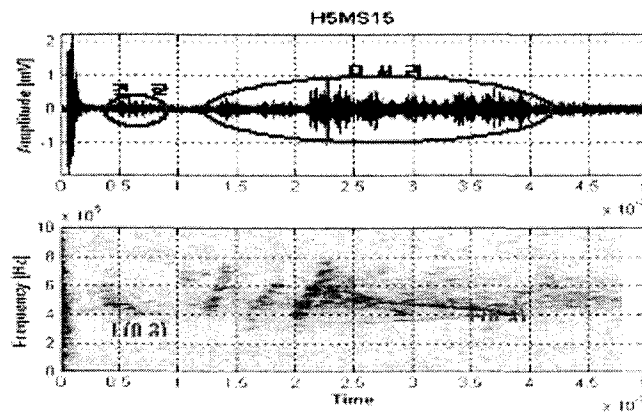


그림 4.2.10 원결함($\phi=4\text{mm}$)에 대한 실험 결과
(60도젯지)

$\phi=4\text{mm}$ 인 원결함의 우측에서 60도젯지를 사용한 유도초음파 시험 결과는 그림 10에 나타내었다. 그림 10에서 앞(0.5 ms)에 나타나는 신호는 결함에
서 반사된 신호이고 뒤에 나타나는 신호는 배관의 끝단에서 반사된 신호
이다. 결함과 배관의 끝단에서 반사된 유도초음파의 STFT 결과는 L(0,1),
L(0,3) 모드 등 여러 모드가 동시에 발생하였다.

3. 패턴 매칭을 이용한 모드 확인

최근 모드를 확인하는 효과적인 방법으로, 유도초음파 신호를 시간-진동
수 영역에서 분석하는 Short Time Fourier Transforms(STFT)나
Wavelet Transforms(WT) 등이 제시되고 있다. 분산성이 있는 유도초음
파를 시간-진동수영역에서 표시하면, 유도초음파의 진동수 성분에 따른
도착시간(arrival time)을 알 수 있고, 여기서 얻어진 정보로부터 유도초
음파의 진동수에 따른 분산양상(patterns of dispersion)을 파악함으로써
모드를 확인할 수 있다.

시간-주파수 분석법과 군속도 분산 선도 사이의 관계를 알아보기 위해 군
속도 분산선도와 단순한 시간 영역 신호 사이의 관계를 검토한다. 유도초
음파가 전파할 때는 속도가 빠른 신호들이 일찍 나타나야만 한다. 그러므
로 군속도 분산 선도는 주파수 성분에 의해서 결정된 유도초음파의 도착
순서를 보여주는 것이다. 군속도 분산 선도의 x축은 주파수·두께(fd), y
축은 군속도(v)이고, 시간과 주파수 분석법의 x축은 비행시간, y축은 주파
수이다. 이는 군속도 분산선도의 x축은 시간과 주파수 분석법의 y축, 군속
도의 y축은 시간과 주파수 분석법의 x축으로 비슷한 양상이 나타나 모드
분석이 가능해진다.

그림 4.2.11은 좀더 쉽게 모드를 확인하기 위해서 본 연구에서 제안한 개
선된 STFT를 적용한 결과를 보여준다. 기존의 STFT는 x축이 시간축이
고, y축은 주파수축 이였기 때문에 군속도 분산선도와 패턴을 비교할 때
불편함이 있었다. 이를 개선하기 위해서 x축을 주파수축, y축을 시간축으
로 변환시켰다. 또한 배관의 두께 d가 일정하다는 가정 하에 주파수에 두
께 d를 곱하여 x축을 군속도 분산선도와 일치시켜 실험 신호에 대한
STFT의 결과를 군속도 분산선도와 패턴을 비교하였다. 그림 4.2.11의 신

호를 보면 L(0,2), F(M,3) 모드, L(0,3), F(M,5) 모드, 그리고 L(0,4), F(M,6) 모드로 3가지 모드가 중첩되어있는 것을 볼 수 있다. RF 파형을 보면 몇 개의 다중 모드가 발생했는지를 파악하기 힘들지만 short time Fourier transform을 사용하면 어떤 모드들이 전파하는지를 알 수 있다.

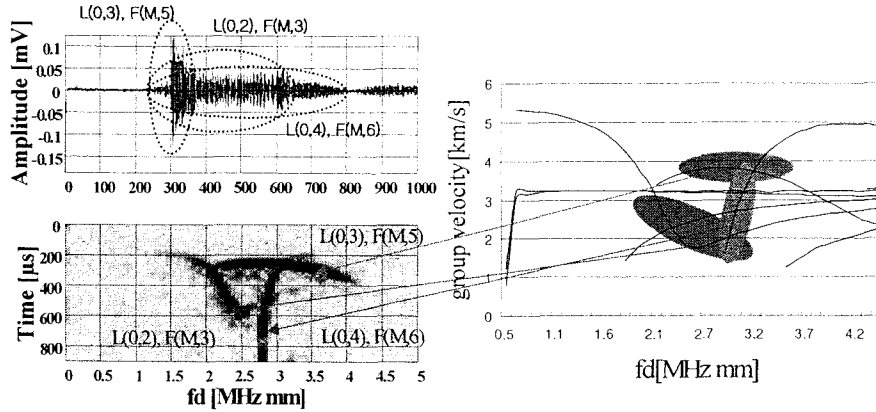


그림 4.2.11 STFT를 이용한 유도초음파 모드 확인

이와 같이 STFT를 이용한 유도초음파 모드 판별은 매우 유용하나 실제의 경우에는 일반 검사자가 눈으로 판별을 하기 때문에 유도초음파에 대한 정확한 이해가 없다면 이 방법 또한 모드 확인 어렵다. 이러한 이유로 패턴 매칭 알고리즘을 이용하여 자동으로 유도초음파 모드를 확인할 수 있는 기법에 대한 연구를 수행하였다.

그림 4.2.12는 기존의 3-D STFT의 결과를 2-D로 나타낸 결과이다. STFT의 결과의 최대값을 기준으로 20%이상의 값을 1, 그리고 그 이하의 값을 0으로 나타낸 후 x축은 fd, 그리고 y축은 시간으로 나타내었다. 패턴이 뒤집어서 나타난 이유는 y축의 스케일이 뒤집어져있기 때문이다.

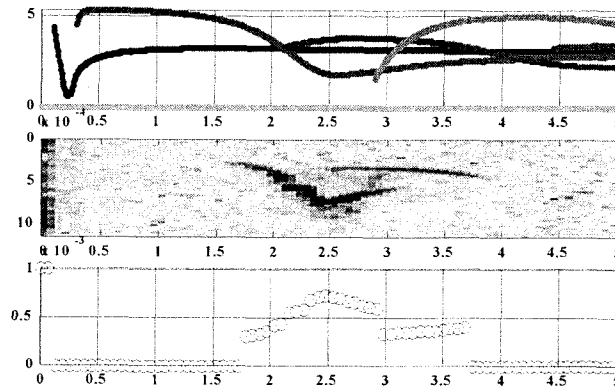


그림 4.2.12 3-D STFT의 결과를 2-D로
변환

그림 4.2.13은 패턴 매칭된 최종 결과를 나타내고 있다. 수신신호의 중심주파수와 군속도 분산선도의 비교를 통해 모드확인이 가능하다. 분산선도 상의 중심주파수에서 여러 모드가 있을 경우 각 모드의 속도를 이용하여 다음과 같은 식으로부터 거리를 계산 할 수 있다.

$$d=vt$$

여기서 v 는 분산선도 상의 속도이고, t 는 2-D STFT 결과의 시간이다. 이렇게 구해진 각각의 d 를 이용하여 2-D STFT의 결과 중 중심주파수에서 일정 부분 떨어진 곳에서 속도를 구한 후 분산선도 상의 같은 fd 축에서 각각의 모드와 속도를 비교하고, 속도 차의 제곱이 최소가 되는 모드를 선택하여 y 축을 시간 축에서의 속도 축으로 변환한다.

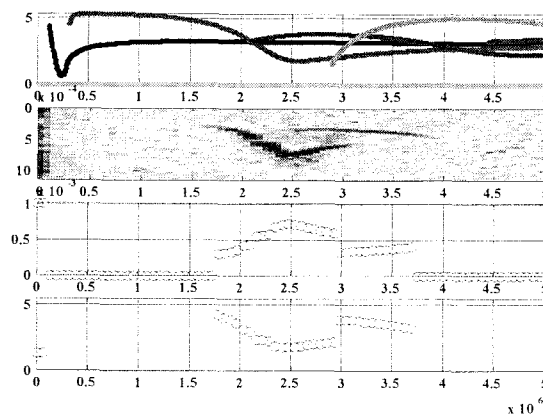


그림 4.2.13 STFT 결과와 분산선도와의
패턴 매칭 결과

제 3 절 배열탐촉자 장치개발과 장거리 배관결함탐지 실험

1. 연구 개요

유도초음파는 광범위하게 두께가 얇은 판, 파이프, 봉 등과 같은 구조물을 검사하는데 널리 사용되고 있다. 그러나 유도초음파는 수많은 모드가 존재하며, 전파속도는 매질의 탄성계수, 밀도, 주파수, 두께에 따라 달라지는데, 이를 분산이라고 일컫는다. 초음파 에너지의 전파속도인 군속도는 위상속도와는 다르다. 유도초음파는 모드에 따라 전파속도와 감쇠가 다르고, 결함에서의 산란 특성이 다르다. 따라서 유도초음파를 이용한 장거리 비파괴 평가에 있어서 선택적으로 유도초음파 모드를 발생시키고 수신하는 것은 매우 중요하다.

유도초음파를 발생시키고 수신하는 방법에 대한 연구가 많이 이루어져 왔다. 이들 중에서 가장 간단한 방법은 연필심 파괴나 레이저 빔을 사용하여 시험체의 국부적인 부분을 가진시키는 것이다. 이 방법은 쉽게 유도 초음파를 발생시킬 수 있지만, 다중모드의 유도초음파가 동시에 발생하기 때문에 수신신호의 해석이 어려운 단점이 있다. 사각탐상기법을 이용한 방식은 유도초음파의 모드를 발생시키고 수신하는 방법이 널리 사용되고 있다. 두께가 얇은 시험체에 경사지게 입사되는 파는 Snell의 법칙에 의해 시험체 내에서 유도초음파로 전환된다 [4.7, 4.8]. 이 기법은 입사각을 정확하게 조절하기는 어렵고 웨지 매질에서의 파속보다 느린 위상속도를 지닌 유도초음파 모드를 발생시키는 것은 어렵다.

따라서, 이러한 문제점을 극복하기 위해서 빗살형 탐촉자나 IDT (Inter-Digit Transducer)와 같은 배열 탐촉자를 이용하여 유도초음파를 발생시키는 연구가 진행되고 있다. 비록, 이 방식이 유도 초음파 시험 절차를 향상시키고, 사각탐상 방식의 한계를 극복하고 있지만, 아직 탐촉자의 간격을 조절해야 하는 기술적 문제점이 남겨 있고, 가장 큰 단점은 파가 탐촉자의 두 방향 모두에 전파된다는 점이라 할 것이다. 이러한 문제를 극복하기 위해서 이론적인 모델링을 통하여 선형 위상 배열 탐촉자가 탐

촉자의 간격을 바꾸지 않고 원하는 모드를 선택적으로 발생시키는 가능성에 대하여 연구되었고, 실험적으로는 거대한 다채널 초음파 발생장치를 사용하지 않기 위해서 개개의 채널에 대한 송수신 신호를 수집한 후에 소프트웨어에 의한 모사를 통해서 모드 선택을 구현하였다. 이러한 방법은 S/N비를 높이는 데에 제한이 있다. 그러나, 현재 의료용 초음파 영상을 얻기 위해서 196채널까지 사용하고 있는 현실을 감안할 때에 다채널 초음파 발생장치를 사용하는 것은 그리 큰 문제가 아니다.

본 연구에서는 다채널 초음파 발생장치와 배열 탐촉자를 사용한 유도초음파 발생 장치를 개발하였다. 배열 탐촉자를 제작하고, 다채널의 초음파 펄서와 이들 펄서를 순차적으로 구동할 수 있는 회로를 개발하여 유도 초음파의 모드를 선택적으로 발생시켰다. 개발된 기법을 검증하기 위하여 심리스 스테인리스강 배관에서 유도초음파의 모드를 선택적으로 발생시키고, 수신된 모드의 판독하는 실험을 수행하였다.

2. 배열탐촉자에 의한 모드 선정

선형 위상배열 탐촉자는 미리 설정된 시간지연에 따라서 각각의 요소들이 따로 구동시킴으로써, 탐촉자의 간격을 바꾸지 않고도 원하는 모드를 동적으로 동조할 수 있다. 그림 4.3.1은 동적위상동조 기법에 대한 방법을 보여주고 있다. 여기서, 유도 초음파가 진행하는 방향에서 가장 멀리 있는 탐촉자 요소부터 구동을 시킨다. 이 요소에서 발생하는 파는 여러 모드이고, 양방향으로 전파하며, 분산성이 있다. 즉, 구동된 탐촉자 요소에서는 여러 모드의 파가 양쪽 방향으로 다른 속도로 전파한다. 그 다음에는 원하는 모드가 이웃한 탐촉자 요소의 바로 아래에 도착할 때에 구동시키는 것이다. 이 순간에 다른 모드들은 다른 속도로 전파하기 때문에 이미 지나갔거나 아직 도착하지 않았다. 따라서 원하는 모드는 보강 간섭을 일으키게 되며, 모든 탐촉자 요소들에 대하여 일련의 반복은 에너지를 증가시키고 따라서 원하는 모드는 크게 증폭된다. 이웃한 탐촉자 요소 사이의 시간 지연은 다음과 같다.

$$\Delta\tau = \frac{d}{c_p} \quad (4.3.1)$$

여기서 d 는 이웃한 탐촉자 요소의 중심간 거리이고, c_p 는 원하는 모드의 위상속도이다. 이 방법은 앞에 언급한 배열 탐촉자와는 달리 각 요소가 분리되어 있으며, 원하는 모드는 순차적인 구동에 의해 조절된다. 이 방법은, 원하는 방향으로 진행하는 파의 에너지는 증가하지만, 반대방향으로 진행하는 파의 에너지는 감소한다. 탐촉자의 요소 개수를 증가시키면 원하지 않는 모드의 신호를 더 크게 줄일 수 있다.

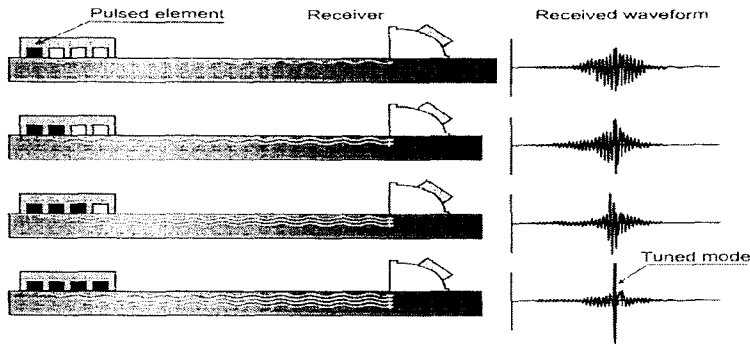


그림 4.3.1 배열형 탐촉자를 이용한 위상동조 기구의 개념도.

그림 4.3.2는 펄스-반사법으로 배열형 탐촉자를 동작시키는 원리를 설명한다. 탐촉자 요소의 폭은 a 이고 요소 사이의 중심간 거리를 d 인 N 개 요소의 배열형 탐촉자가 마지막 요소와 모서리 사이의 거리가 x 이도록 놓여 있다고 하자. SPT의 기본 원리는 Huygen's의 원리에 기초를 둔다. 모드가 동조된 신호는 각각 요소에서 발생한 신호의 시간지연 합이다. n 번째 요소에 의해 수신되는 신호는

$$s_n(t) = \sum_{m=1, m \neq n}^N s_{mn} \left(t - \frac{(m-1)d}{c_p} \right), \text{ for } n = 1, 2, 3, \dots, N \quad (4.3.2)$$

과 같이 주어진다. 여기서 m 은 발신 요소 번호이고, $s_{mn}(t)$ 은 m 번째 요소에 의해 발신되고 n 번째 요소에 의해 수신된 파이다. 여기서 $s_{mn}(t)$ 는 경계에서 발생하는 모드변환 및 반사계수에 대한 정보들을 포함하고 있다. 이 식에서 원하는 모드의 위상속도 c_p 에 의해 동조되었다.

수신모드에서는 시간지연 순서는 반대가 되는데, 이는 파가 반대로 진행하기

때문이다. 수신시 다른 모드를 선택할 수도 있지만 송수신시 동일한 모드에 동조한다고 하면 시간지연은

$$\Delta\tau' = \Delta\tau = \frac{d}{c_p} \quad (4.3.3)$$

와 같다. 이 경우에 수신되는 신호는

$$s(t) = \sum_{n=1}^N s_n(t - (n-1)\Delta\tau') \quad (4.3.4)$$

와 같이 주어진다.

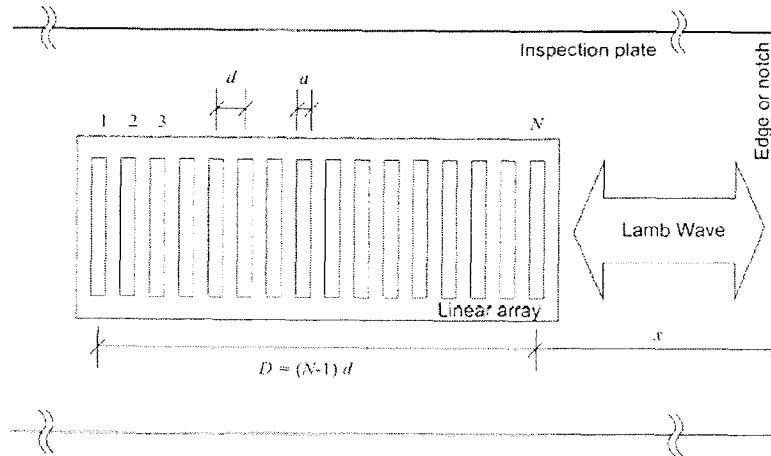


그림 4.3.2 Pulse-echo 법에 의한 신호 동조의 개념도

비파괴평가의 입장에서는 결함의 위치를 정하기 위해서 비행시간 (time-of-flight)를 측정할 필요가 있다. 분산매질에서는 위상속도가 주파수와 모드에 따라서 달라지기 때문에 전파시간을 측정하는 것이 쉽지 않다. 주파수 폭이 매우 좁을 때에는 분산효과가 무시할 정도가 되고 이러한 경우 #1 요소에서 출발하여 동일한 센서에서 수신되는 경과시간은

$$t_g = \frac{2[x + (N-1)d]}{c_g} + t_0 \quad (4.3.5)$$

와 같이 주어진다. 여기서, x 는 N 번째 요소에서 결함까지의 거리, c_g 는 군속도이며 t_0 는 트리거 오프셋 시간이다. 여기서 주목할 것은 첫번째 요소에서 전체적

인 펄스-반사 거리는 $2(D+x)$ 이다. 여기서 주목할 만한 것은 배열 탐촉자를 사용한 경우에 공간 분해능은 탐촉자의 크기($D \approx (N-1)d$)에 거의 영향을 받지 않기 때문에 분해능에 영향을 받지 않고 탐촉자 요소의 수를 늘려 동조 효율을 높힐 수 있다.

3. 다채널 초음파 pulser/receiver 제작

배열탐촉자의 개수를 8개로 결정하고, 독립적인 8개의 pulser/receiver를 가진 다채널 pulser/receiver를 제작하였다. 채널별 설정은 Dip switch를 사용해 개별적으로 조정할 수 있도록 하였으며 주요 특성은 다음과 같다.

- o Pulse/Echo, Through-Transmission 가능, External Trigger
- o 스파이크 펄스, 4단계 damping (10-250 Ohm)
- o Receiver gain(0-60 dB), High-pass filter (0.1/0.5/1/5 MHz), Low-pass filter (10/15/25/35 MHz)
- o Analogue 출력단자

개발된 다채널 pulser/receiver의 외관과 내부 모습은 그림 4.3.3 그림 4.3.4와 같다.

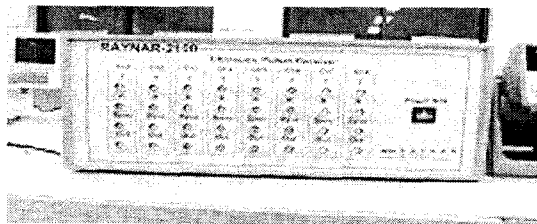


그림 4.3.3 다채널 펄서/리시버 외관

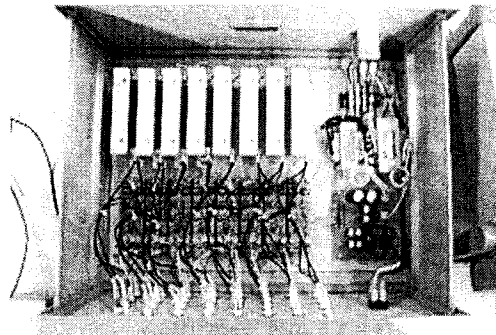


그림 4.3.4 펄서/리시버 내부

다채널 pulser/receiver를 구성하는 단일채널의 회로도 사진은 그림 4.3.5, 그림 4.3.6 그림 4.3.7, 그림 4.3.8과 같다.

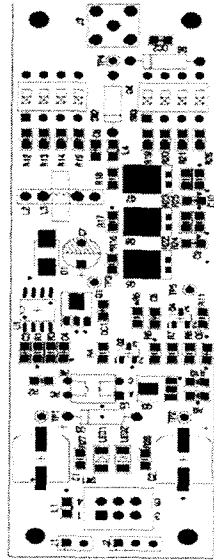


그림 4.3.5 펄서 회로도

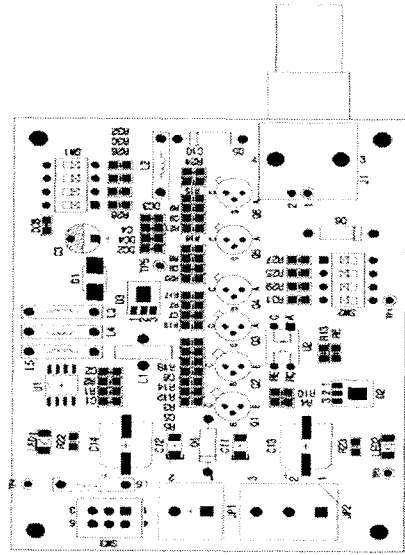


그림 4.3.6 리시버 회로도

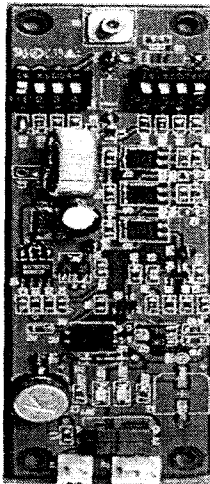


그림 4.3.7 펄서 실물 사진

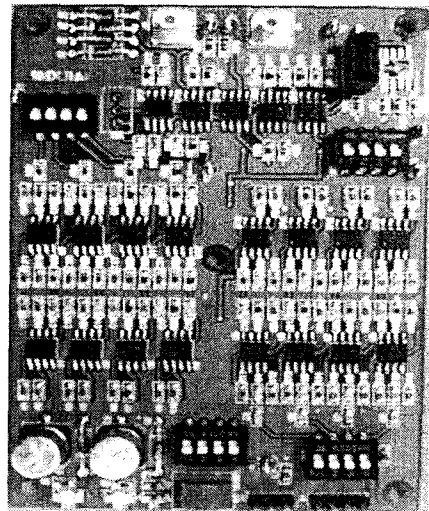


그림 4.3.8 리시버 실물 사진

펄서리시버의 성능 점검을 위해 Steel 시험편의 저면 반사 신호를 수집하고 기존 펄서리시버의 신호와 비교하였다. 신호 수집을 위해 사용한 탐촉자는 KrautKramer사의 5 MHz 접촉식 탐촉자이고, 시험편의 두께는 50mm이다. 성능점검을 위한 실험구성은 그림 4.3.9과 같고 수집한 신호는

그림 4.3.10과 같다.

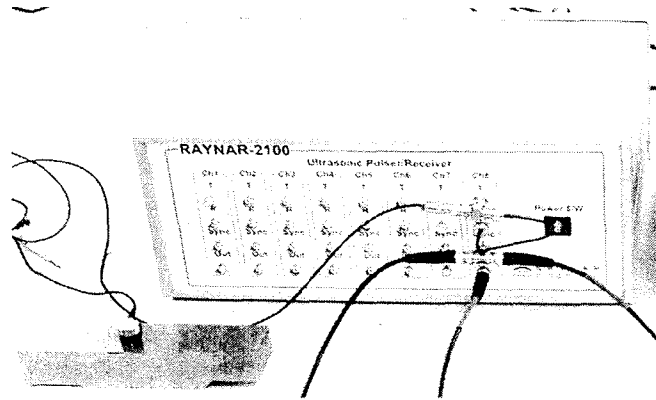


그림 4.3.9 채널점검을 위한 실험장치 구성

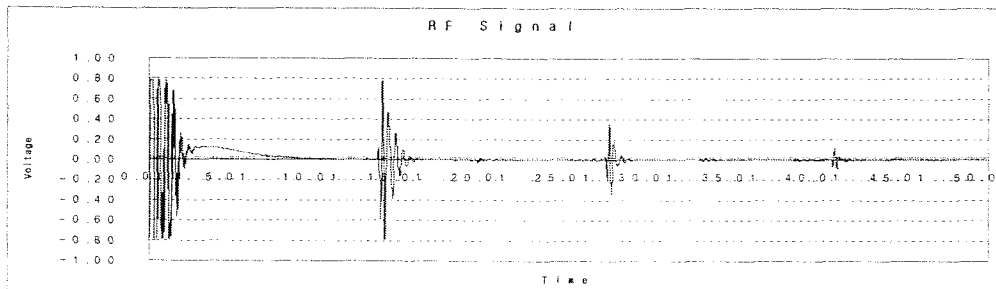


그림 4.3.10 개발된 펄서리시버를 이용 시험편에서 얻은 저면 반사신호 실험결과, 펄스의 주파수와 출력전압, 게인 등의 제반 요건들은 비교적 안정적인 수준이었으나, 특정한 장치 설정에서 노이즈가 일부 섞이는 문제가 발생했다.

4. 8채널 pulser/receiver 제어회로구성

배열 탐촉자에 순차적으로 펄스를 가하기 위해 J-K Flip Flop을 이용한 ring counter 회로를 개발하였다. 입력파는 고정밀 function generator를 이용하여 시간간격을 정밀하게 조절하도록 하였으며, 개발된 제어장치의 회로는 그림 4.3.11와 같고 사진은 그림 4.3.12과 같다.

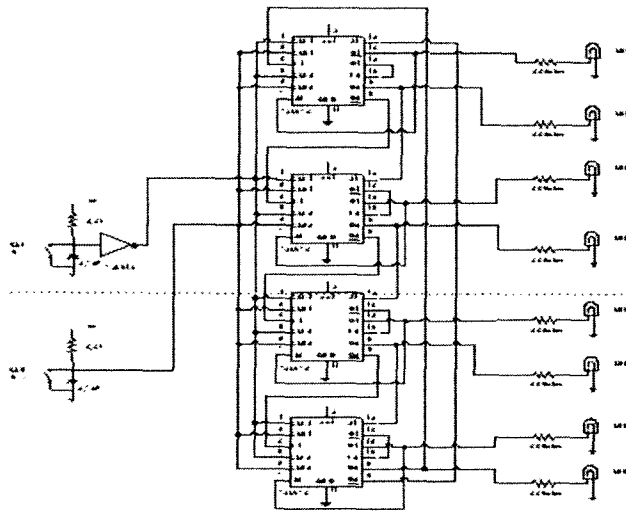


그림 4.3.11 펄서/리시버 제어장치 회로도

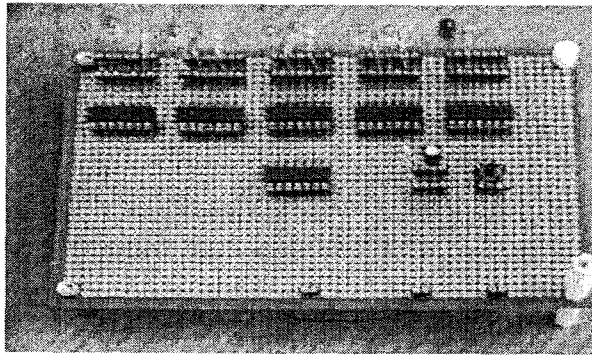


그림 4.3.12 펄서/리시버 제어장치 제작
기판

5. 배열탐촉자 요소 설계

배열탐촉자는 원주방향으로는 4~8개, 축방향으로 8개를 배치하기로 결정하였다. 배관의 곡률을 맞추기 위해 아크릴 웨지를 사용하였다. 최적모드에 해당하는 주파수는 0.5 MHz, 위상속도는 5,000m/s, 그리고 파장은 10mm 이므로 탐촉자 간격은 10mm로 결정되었다. 따라서 압전소자의 폭은 4 mm로 정하였다. 웨지가 곡면으로 되어 있어서 중앙부와 가장자리 부분의 초음파 전파시간의 차이로 간섭이 일어날 수 있는데, 이를 피하기 위해서는 전파거리의 차이가 1 mm 이내로 하기 위해서 압전소자의 길이를 10 mm로 결정하였고 설계된 단일 탐촉자의 설계도는 그림 4.3.13과 같다.

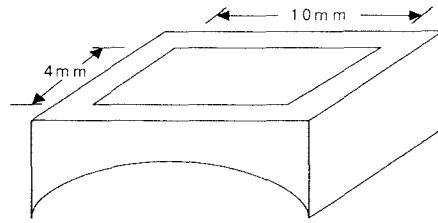


그림 4.3.13 단일 탐촉자
설계도

본 연구로 개발된 다채널 초음파 pulser/receiver는 배열 탐촉자 구동에 사용되며 설계된 배열탐촉자는 탐촉자를 물리적으로 조작하지 않고도 유도 초음파의 다양한 모드를 발생시키는데 필요한 장치이다.

6. 개발 시스템 기법의 검증 실험

가. 장치 설정

개발된 장비와 기법의 유효성을 검증하기 위하여 본 연구에서는 외경 60.3 mm, 두께 5.54 mm의 스테인리스강 배관을 이용하여 일련의 실험을 수행하였다. 본 연구에서 사용된 탐촉자의 배치를 그림 4.3.14와 같으며, 그림 4.3.14 (a)는 유도초음파의 모드를 선택적으로 발생시키기 위한 실험으로, 8개로 구성된 배열 탐촉자와 한개의 수신 탐촉자를 배관에 고정한다. 수신 탐촉자와 배열탐촉자 거리를 L 로 고정하고, 배관에 유도초음파의 모드를 선택적으로 발생시키기 위해 시간지연을 변화시켰다. 그림 4.3.14 (b)는 선택된 모드의 군속도를 측정하기 위한 실험으로, 수신 탐촉자의 위치를 100 mm씩 증가하면서 비행시간을 측정하였다. 그림 4.3.14 (c)는 수신된 유도 초음파 신호에 대한 모드 선택을 위한 실험으로, 배열 탐촉자를 이용한 수신을 모사하기 위해 송신 배열 탐촉자의 각 요소 사이의 거리와 같은 10 mm씩 수신 탐촉자를 이동시키면서 신호를 수신하였다.

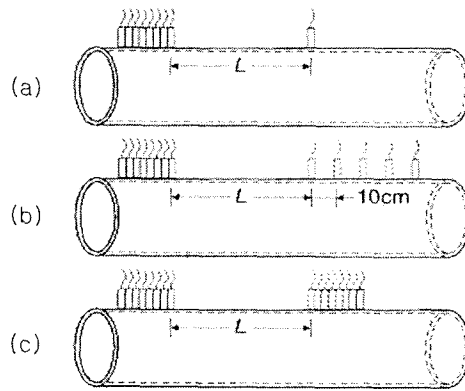


그림 4.3.14. Experimental setup for (a) tuning the mode of a generated wave, (b) group velocity measurement and (c) tuning the mode of a received wave.

나. 유도 초음파 모드발생 실험

배열 탐촉자를 사용하여 유도초음파를 선택적으로 발생시킬 수 있는지 알아보기 위해서 배열 탐촉자의 구동요소를 증가시키면서 신호를 수신하여 그 결과를 그림 4.3.15에 나타내었다. 이때 시간지연은 $2 \mu\text{s}$ 이고 배열탐촉자와 수신탐촉자 사이의 거리, L 은 500 mm 이다. 한개의 요소 탐촉자만 가진할 경우에는 발생하는 초음파 신호가 매우 작아서 그림 4.3.15 (a)에 보이는 바와같이 수신신호가 거의 나타나지 않지만, 구동되는 요소 탐촉자의 수가 늘어날수록 수신되는 신호가 점차 커짐을 알 수 있다. 특히 $150 \mu\text{s}$ 근처에서 수신된 신호의 진폭은 2개의 요소 탐촉자에 의해 구동된 신호에 비해 8개의 요소 탐촉자로 구동되었을 경우 다른 부분의 신호에 비해 상대적으로 더 커짐을 알 수 있다. 이는 구동하는 요소의 개수를 증가시키면 발생하는 초음파의 신호가 커짐은 물론이고, 특정한 모드의 유도초음파가 선택적으로 커져서 모드 선택이 가능함을 의미한다.

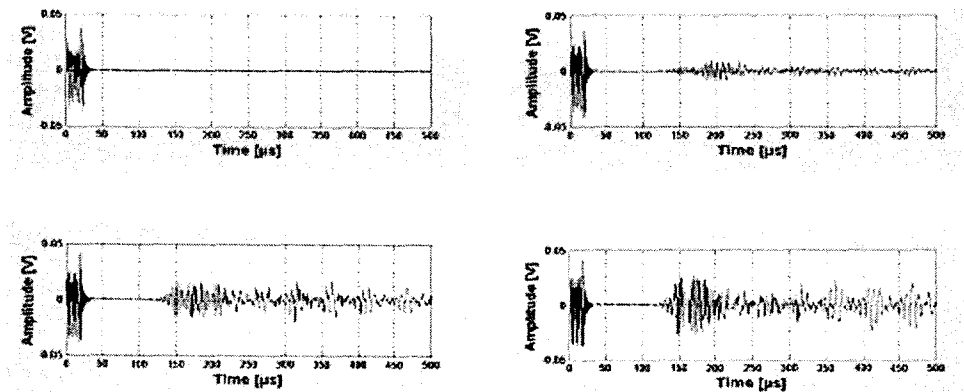


그림 4.3.15 Demonstration of mode tuned generation. Detected rf waveform generated by using (a) single element (b) two elements, (c) four elements and (d) eight elements. $\Delta t = 2 \mu\text{s}$ and $L = 50 \text{ cm}$.

시간지연을 바꾸면 유도초음파의 모드를 선택적으로 발생시킬 수 있다. 두 가지 서로 다른 모드의 유도초음파를 선택적으로 발생시킬 수 있었으며 그 결과를 그림 4.3.16에 나타내었다. 이 경우에 송신용 배열 탐촉자와 수신 탐촉자 사이의 거리, L 은 1,000 mm이다. 그림 4.3.16(a)는 시간지연이 2.08 μs 일 때에 수신된 신호이며 이 때의 위상속도는 4.8 mm/ μs 이다. 그림 4.3.16 (b)는 시간지연이 4.17 μs 일 때에 수신된 신호이며 이 때의 위상속도는 2.4 mm/ μs 이다. 각각의 경우에 대해서 수신된 파형에서 피크가 나타나는 위치는 다른데, 그림 4.3.16 (a)에서는 270 μs , 그림 4.3.16 (b)에서는 330 μs 이다. 이는 발생된 모드의 군속도가 다름을 의미한다. 또한, 그림 4.3.16(b)의 경우에는 270 μs 근처의 신호가 그림 4.3.16 (a)에 비하여 상당히 많이 억제되어 있음을 알 수 있다. 따라서 시간지연을 조절함으로써 발생하는 유도초음파의 모드를 효과적으로 선택할 수 있음을 알 수 있다.

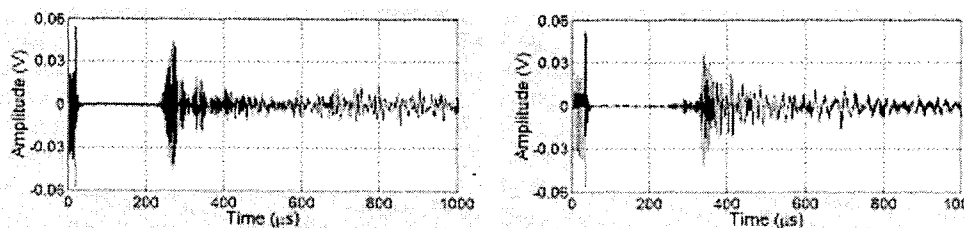


그림 4.3.16 Mode tuning of generated guided waves by change the time interval. (a) $\Delta t = 2.08 \mu\text{s}$ and (b) $\Delta t = 4.17 \mu\text{s}$. The distance between transmitter and receiver was 100 cm.

다. 균속도 측정

유도초음파의 모드를 판별하는 방법 중의 하나는 균속도이다. 균속도는 배열 탐촉자와 수신 탐촉자 사이의 거리와 비행시간으로 쉽게 구할 수 있지만, 측정되는 비행시간은 탐촉자와 전기회로에서의 시간지연뿐 아니라 모드 선택을 위한 시간지연을 포함하고 있다. 이런 시간지연을 상쇄하기 위해서 그림 4.3.14 (b)에 보여준 것과 같이 수신탐촉자를 이동시키면서 비행시간을 측정한다. 비행시간과 송수신 탐촉자 사이의 거리 관계를 그림 4.3.17에 나타내었다. 균속도는 그림 4.3.17의 선분의 기울기 값의 역수로 반비례로 결정되는데, $\Delta t = 2.1 \mu\text{s}$, $\Delta t = 4.2 \mu\text{s}$ 인 경우에 발생된 유도초음파 모드의 균속도는 각각 $4.32 \text{ mm}/\mu\text{s}$, $3.31 \text{ mm}/\mu\text{s}$ 이다.

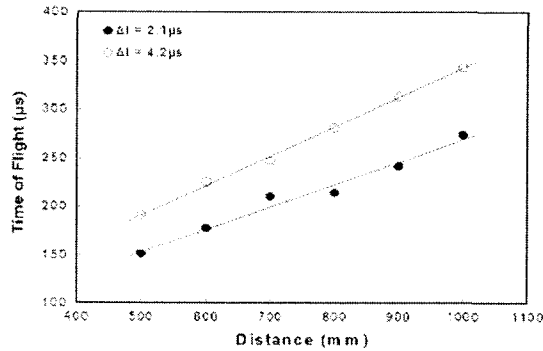


그림 4.3.17 Measured time of flight for different receiver positions.

라. 수신신호의 모드 선택

배열 탐촉자를 사용하여 수신된 유도 초음파 신호의 모드를 선택할 수 있다. 각각의 요소 탐촉자의 수신신호를 시간지연을 두고 중첩하면 원하는 모드에 대해서만 선택적으로 신호를 수신할 수 있다. 본 연구에서는 하나의 수신 탐촉자를 사용하여 그림 4.3.14 (c)와 같이 탐촉자의 위치를 이동시키면서 수신하여 배열형 탐촉자를 모사하였다. 유도초음파 발생시 사용한 시간지연과 동일한 시간지연을 두고 수신신호를 중첩한 결과를 그림 4.3.18에 나타내었다. 수신신호에 대한 모드선택을 수행하면 그림 4.3.16의 결과와 비교하여 원하지 않는 모드를 훨씬 더 줄일 수 있음을 알 수 있다.

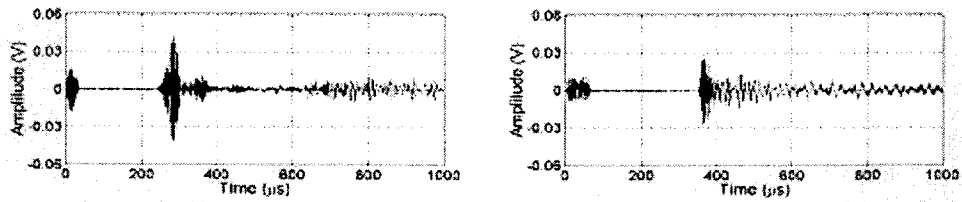


그림 4.3.18 Tuning the mode of received wave. (a) $\Delta t = 2.08 \mu\text{s}$ and
(b) $\Delta t = 4.17 \mu\text{s}$.

마. 모드 분석

유도초음파 신호의 RF 파형, 주파수 스펙트럼, STFT, 위상속도와 군속도의 분산선도는 초음파 모드를 평가하기 위한 요소 들이다. 그림 4.3.19는 유도초음파의 모드를 분석하기 위해서 이들 요소를 유기적으로 결합한 그림이다 [4.9]. 이 그림에서 수직선은 위상속도이고 수평선은 수신된 RF 신호의 주파수 스펙트럼에서의 피크 값을 나타낸다. 따라서, 위상속도 분산곡선에서의 수직과 수평선의 교점은 수신된 유도초음파의 모드를 나타낸다. 그림 4.3.19에서 지연시간이 $2.08 \mu\text{s}$ 이고, 이에 해당하는 위상속도는 $4.8 \text{ mm}/\mu\text{s}$ 이며, 이 경우에 수신된 모드는 그림 4.3.19의 위상속도 분산곡선에서 하나로 구별하기는 어렵지만 L(0,2)F(m,3)의 모드가 됨을 알 수 있다. 이 모드들의 군속도는 군속도 분산 곡선에서 해당하는 모드와 수평선이 만나는 값에 의해 결정되는데, 이는 4.2 절에서 측정된 군속도, $4.32 \text{ mm}/\mu\text{s}$ 와 잘 일치한다. 또한, STFT의 모양이 해당하는 모드의 군속도 분산곡선과 유사한 경향을 나타내고 있다. 따라서, 지연시간이 $2.08 \mu\text{s}$ 인 경우에 수신된 유도초음파의 모드는 L(0,2)나 F(m,3)으로 확인할 수 있다.

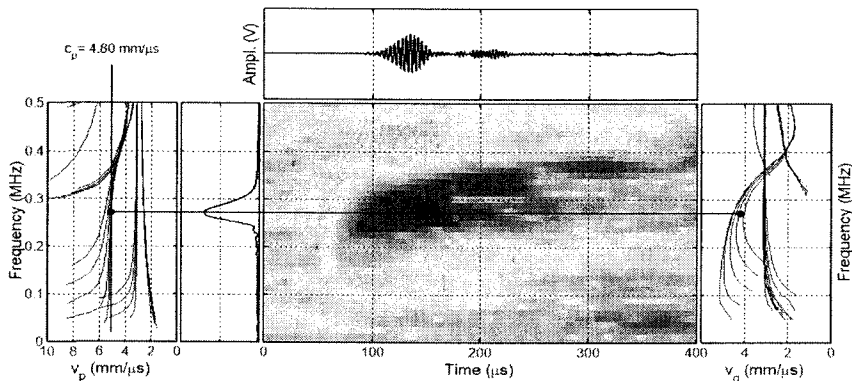


그림 4.3.19 Diagram for mode identification for time delay of $2.08 \mu\text{s}$.

Top: Rf waveform. Bottom: phase velocity dispersion curves, frequency spectrum, STFT result and group velocity dispersion curves (from left to right)

그림 4.3.20는 시간지연 4.17 μs , 위상속도 2.40 $\text{mm}/\mu\text{s}$ 일 때 수신된 유도 초음파의 모드 해석 결과이다. 그림 4.3.19과 마찬가지로 분석하면, 수신된 유도초음파의 모드는 $L(0,1)F(m,1)$ 임을 확인할 수 있으며, 군속도는 측정값 3.31 $\text{mm}/\mu\text{s}$ 와 잘 일치함을 알 수 있었다.

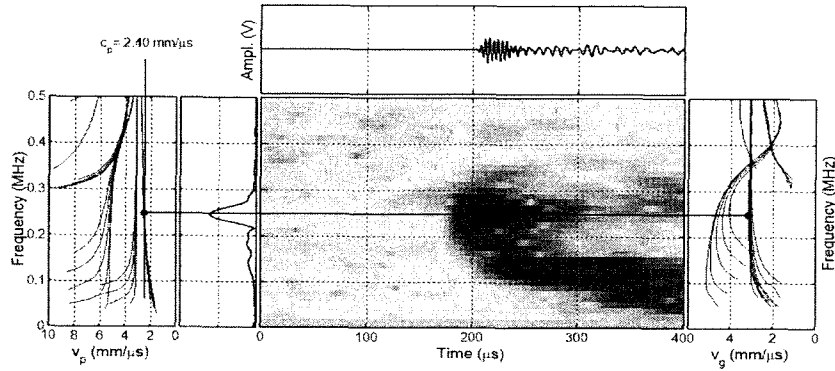


그림 4.3.20 Diagram for mode identification for the time delay of 4.17 μs .

바. 장거리 전파특성

유도초음파의 중요한 장점 중 하나인 장거리 탐상의 가능성을 확인하기 위해서 길이가 24 m인 스테인리스 배관에 대한 유도 초음파 시험을 수행하였다. 송신 배열 탐촉자와 수신 탐촉자 사이의 거리를 16 m까지 늘려가면서 발생된 유도 초음파를 수신하였으며, 그 중에서 거리가 6 m 및 12 m 인 경우에 수신된 신호를 그림 4.3.21에 나타내었다.

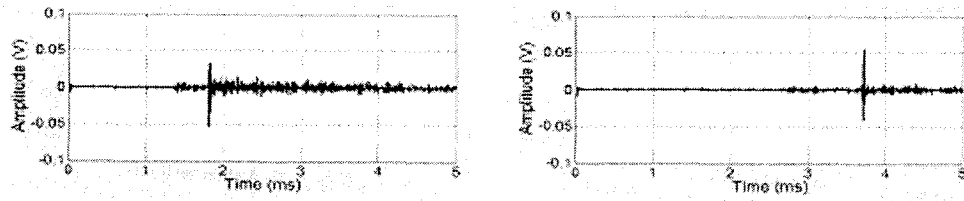


그림 4.3.21 Long-range transmission results. Receiver transducer was placed at (a) 6 m and (b) 12 m far from transmitter.

각각의 경우에 대하여 용접부가 1개 및 2개가 존재하였으나, 수신된 신호의 진폭에는 큰 변화가 없어서 장거리 탐상의 가능성을 확인하였다.

사. 다채널 고출력 유도 초음파 발생 장치제작

본 연구에서 고려하고 있는 24 m 스테인리스강 배관에서 펄스-에코법으로 유도초음파 신호를 검출하기 위해서 기제작되었던 8채널 유도초음파 발생장치를 40채널 고출력 유도초음파 발생장치로 개조하였다. 40채널 고출력 유도 초음파 발생장치를 제작하기 위하여 기 언급된 8채널 Pulser/Receiver 시스템을 40채널로 독립적으로 구동할 수 있도록 확장·개발하였다. 그리고 Synthetic phase tuning(SPT) 기법을 적용하여 유도 초음파의 모드를 발생시켰다. 효과적인 모드를 발생시키기 위해서는 기존의 연구를 통해 입증된 축대칭 모드를 강화하여야 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 탐촉자를 원주방향으로 72°의 간격으로 8개의 탐촉자를 배치하도록 배열 탐촉자를 설계·제작하였고, 그림 4.3.22는 본 연구를 통해 개발한 40채널 Pulser/Receiver 와 원주방향 배열 탐촉자를 나타내고 있다.

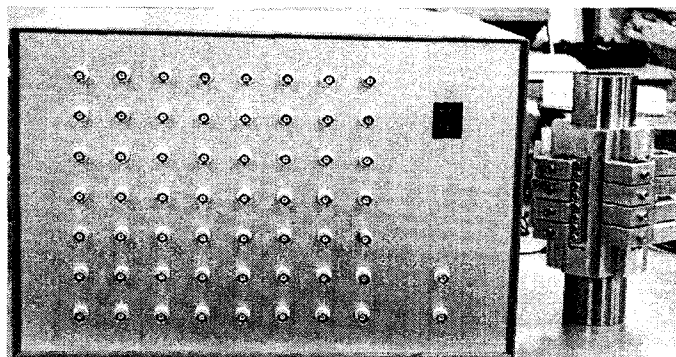


그림 4.3.22 40채널 pulser/receiver 와 원주 방향 배열형 탐촉자

아. 고출력 유도초음파 발생 시스템을 이용한 24 m 배관 실험

본 연구에 사용된 배관은 외경 60.3 mm, 두께 5.54 mm, 길이 24 m의 스테인리스강 배관이고, 재질은 SUS 304, SCH-80으로 6 m 간격의 용접부를 갖고 있으며, S1, S2의 가공 결함이 내재된 장거리 배관이다. 이 배관은 한국 원자력 연구소에서 실험용으로 제작한 배관으로 배관의 구성은

그림 4.3.23과 같다. 그림 4.3.23에서 W.P는 용접부이고, S1, S2는 가공결함을 나타낸다.

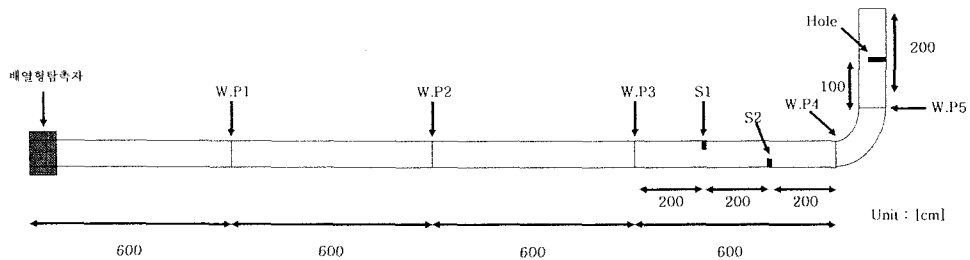
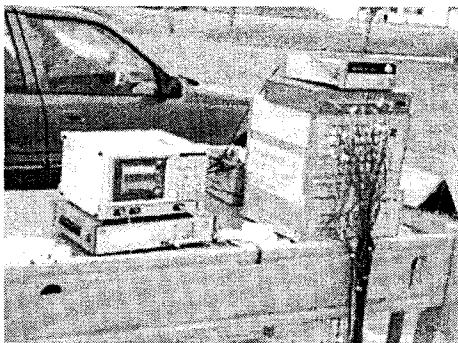
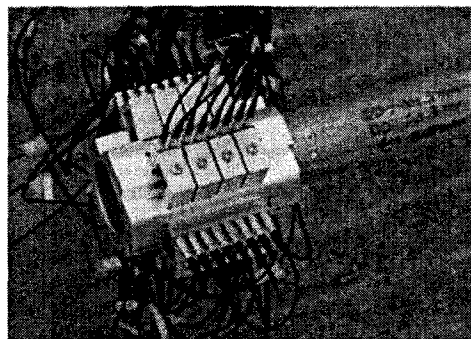


그림 4.3.23 가공 결함이 있는 24m 스테인리스강 배관

그림 4.3.23에 보는 바와같이 실험용 배관 끝단에 제작한 원주방향 배열형 탐촉자를 설치하고, 개발된 고출력 유도초음파 발생 시스템을 적용하여 유도 초음파를 발생시켰다. 이때, 배열탐촉자의 인접 탐촉자 사이의 구동 시간지연으로 원하는 모드의 유도 초음파를 발생시키기 위해 Synthetic phase tuning(SPT) 기법을 적용하였다. 그림 4.3.24 (a)는 24 m 장거리 배관의 유도초음파 검사를 하기 위해 고출력 유도초음파 장치를 설치한 사진으로, 40채널 유도초음파 시스템으로 구성되어 있다. 그림 4.3.24 (b)는 24 m 장거리 배관에 원주방향 배열형 탐촉자를 설치한 사진이다. 그림 4.3.24 (b)에서 보인 40개의 탐촉자 중에서 8개 배열탐촉자는 수신용으로 사용되었으며, 나머지 32개의 배열탐촉자는 유도초음파 발생용으로 사용되었다.



(a)



(b)

그림 4.3.24 40채널 pulser/receiver 와 원주 방향 배열형 탐촉자의 실험 32개의 탐촉자를 이용하여 배관에 원하는 모드의 유도초음파를 발생하면, 발생된 유도초음파는 채널 1번에서 8번 수신용 탐촉자로 수신 하였다. 수신된 신호를 Low-pass, High-pass 필터링하고, 8개의 필터링된 신호는

수신 탐촉자 사이의 거리에 의해 발생하는 시간지연을 보정한 후 중첩 (Summation)을 하였다.

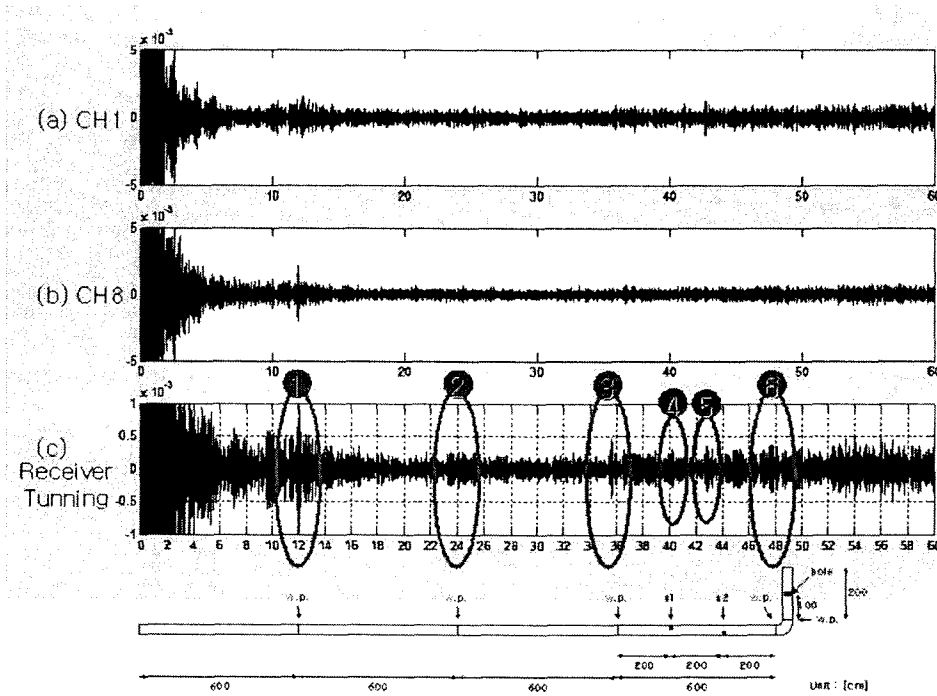


그림 4.3.25 펄스-반사법으로 수신된 신호

그림 4.3.25 (a)는 Receiver 채널 1번에서 수신된 신호를 필터링한 것이고, 그림 4.3.25 (b)는 채널 2번에서 수신된 신호를 필터링한 것이다. 그림 4.3.25 (a)와 그림 4.3.25 (b)에서 보는 바와같이 각각의 8개의 수신된 신호는 용접부와 가공결함에서의 신호를 확인하기 어려웠으나, 8채널에서 수신된 신호를 보정한 후에 중첩하게 되면 그림 4.3.25 (c)와 같이 용접부와 가공결함의 신호를 확인할 수 있음을 알 수 있다. 그림 4.3.25 (c)의 신호를 보면, ①번, ②번, ③번, ⑥번은 용접부 신호이며, ④번, ⑤번 신호는 가공결함의 신호이다.

본 실험을 통해 장거리 배관에서의 탐상 가능성을 다시 한번 확인하였고, 보다 다양한 모드를 발생시키기 위하여 광대역 탐촉자를 사용하는 것이 바람직한 것으로 판단되었다. 또한, 유도초음파를 이용하여 결함의 종류, 크기 등을 정량적 평가를 수행하기 위해서는 유도 초음파를 이용한 정량적 결함 평가에 대한 연구가 추가적으로 수행되어야 될 것으로 사료된다.

7. 결론

원전기기 부품의 온라인 연속감시에 유도초음파 기술을 적용하기 위해서 유도초음파의 전파 특성을 규명하고 원전부품 내를 전파하는 유도초음파의 모드를 예측하고 분석하는 기법을 개발하였다. 이를 위하여 유도 초음파의 특성, 모드 및 분산곡선과 유도 초음파 신호 해석을 위한 Short Time Fourier Transform (STFT)에 관한 이론적인 고찰을 수행하였다. 또한, 대상배관을 S/G tube와 2인치 스테인레스 스틸로 선정하여 이들 배관에 대한 분산선도를 계산하였으며, S/G tube의 경우 모드별로 입사각을 계산하였다. S/G tube에 대해서 입사각을 달리하면서 발생하는 유도 초음파의 모드를 STFT와 군속도 측정을 통하여 확인하였고, 유도 초음파가 곡관부를 지날 경우에 모드변환여부를 확인하였다. 결함검출에 최적인 유도 초음파 모드를 선정하는 기준을 정하고, 이에 따라서 S/G tube를 대상으로 최적모드를 선정하고 실험적으로 확인하였다. 그 결과로 원전기기 부품의 온라인 모니터링에 유도초음파 기술을 적용하기 위한 기초 기술이 확립되었다.

원전기기 부품의 온라인 연속감시에 유도초음파 기술을 적용하기 위해서 유도초음파의 전파 특성을 규명하고 원전부품 내를 전파하는 유도초음파의 모드를 예측하고 분석하는 기법을 개발하였다. 이를 위하여 배열형 탐촉자를 사용한 synthetic phase tuning 기법에 대한 이론적인 고찰을 수행하였다. 또한, 2인치 스테인레스 스틸에 인공결함을 가공하고, 웨지를 사용하여 유도 초음파발 송수신하였으며, 입사각과 결함의 종류에 따른 수신된 파형에서 STFT를 수행하여 각각의 모드를 확인하였다. 수신된 유도 초음파 신호의 모드를 자동으로 판정하기 위한 pattern matching 기법을 개발하였다. 또한, synthetic phase tuning 기법을 적용하기 위하여 8 channel 초음파 pulser/receiver를 설계 제작 하였고, 이를 제어하는 회로를 구성하였다. 또한 2 인치 배관에 적용할 수 있는 배열형 탐촉자를 설계하였다. 그 결과로 원전기기 부품의 온라인 모니터링에 적용할 유도초음파를 synthetic phase tuning 기술로 발생시키고 수신할 수 있는 기초 기술이 확립되었다.

배열 탐촉자를 사용하여 유도초음파의 모드를 선택적으로 발생시킬 수 있는 시스템을 제작하였다. 초음파 탐촉자, 초음파 펄서, 순차적 트리거 회로

를 제작하였으며, 인접한 요소 탐촉자를 구동하는 시간지연을 function generator를 사용하여 정확히 제어하였다. 그리고 본 기술을 장거리 배관의 결함 탐지에 적용하기 위한 연구를 수행하였다. 유도초음파를 이용하여 24 m 스테인리스 배관에 적용 시험하기 위하여 40개의 배열형 탐촉자를 이용한 고출력 유도초음파 발생 시스템을 설계·제작하였으며, 개발된 시스템을 이용하여 용접부의 신호와 결함의 신호를 확인 할 수 있었다. 따라서 본 연구에서 개발한 다채널 고출력 유도초음파 검사 시스템이 장거리 배관의 온라인 연속감시에 적용될 가능성이 있는 것으로 나타났다. 본 연구에서 수행한 실험 결과에 따르면 효과적인 결함 탐지를 위해서는 다양한 모드가 필요하며 이를 발생시키기 위해서는 광대역 탐촉자를 사용하는 것이 바람직한 것으로 판단되었다. 한편, 본 실험은 발전소에서 실제 사용되는 배관을 시편으로 제작하여 수행되었으나, 배관의 배치 환경이 발전소 현장과 동일 수준이 아닌 실험실 수준에서 수행되었다. 발전소 현장과 같이 배관에 부착물이 존재하고 배관 내에 유체가 흐르며 또한 고온, 고압, 방사능, 기타 열악한 환경 하에서 본 기술을 사용하기 위해서는 환경 내구성이 있는 센서 스위트와 신호처리 장치의 개발, 그리고 보다 정밀하고 정확한 결함 신호의 탐지와 해석에 대한 추가적인 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

제4절 AE 기술의 기기 온라인감시 적용을 위한 기반기술 연구

1. AE 기술의 이론적 배경

가. AE(음향방출)의 정의 및 발생기구

음향방출(Acoustic Emission: AE)은 고체매질에 어떠한 힘이 가해지는 경우 기계적, 열적 또는 기타효과에 의한 미시적 변형이나 파괴로 인해 발생하는 탄성응력파(elastic stress wave)로 정의된다. AE는 균열진전 및 재료파괴 손상을 탐지 할 수 있는 주요한 특징으로 말미암아 비파괴 감시분야에서 광범위하게 이용되고 있다. AE 발생원은 변형과 균열에 대한 여러 가지 메커니즘을 내포하고 있다. 특히 금속의 경우에는 균열성장, 변위이

동, 슬립, 결합, 결정경계변화와 더불어 구성물질의 분열 등이 그 발생원으로 확인되었다.

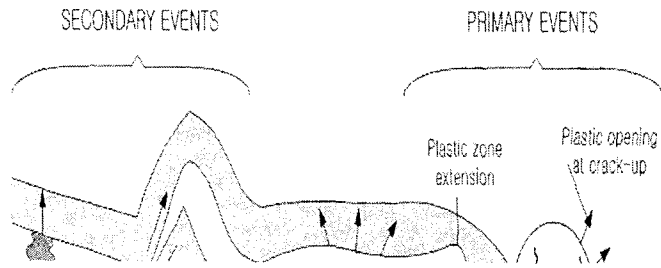


그림 4.4.1 1차 및 2차 AE 발생원의 구분

AE 발생원은 그림 4.4.1과 같이 크게 1차 발생원과 2차 발생원으로 구분된다. 1차 발생원은 전위이동(Dislocation), 소성변형(Plastic Deformation), 상변화(Phase Transformation), 균열의 성장(Crack Growth)등이고 누설, 마찰, 화학 반응 등은 응력을 받은 물질의 기계적인 변형에 의한 전형적인 음향방출원과 구별하기 위해 2차 발생원 또는 가상 발생원(pseudo source)이라 지칭하기도 한다.

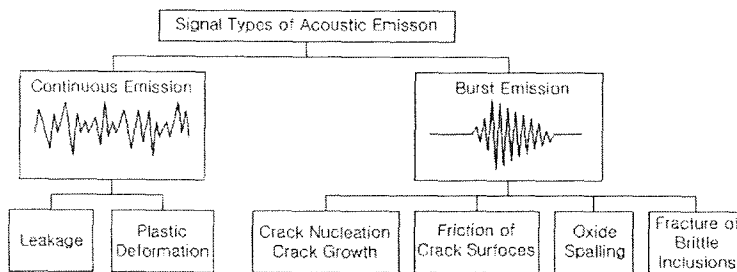


그림 4.4.2 돌발형 AE 및 연속형 AE

AE 신호 측정에 있어서 주파수범위는 초음파검사법보다는 낮은 30kHz에서 1MHz범위의 신호를 수신하고 해석한다.

AE 신호는 일반적으로 그림 4.2.2와 같이 돌발형(burst type)과 연속형(continuous type)으로 구분된다. 재료내의 전위, 균열 생성과 성장 파괴에 의해 발생하는 AE는 대부분 돌발형이고 유체의 누설, 재료의 소성변형 등에 의해 발생하는 AE는 연속형이다. AE는 일종의 파동현상으로 AE 신호 측정에 있어서 가장 기본이 되는 파형인자는 신호진폭이다.

나. AE 시험 기술의 특징

AE 시험법은 재료의 물성을 파악하거나 또는 내부에 존재하는 결함을 검출할 수 있는 비파괴탐상방법의 일종으로, 1964년에 최초로 공학분야의 적용사례가 보고되고 있다. AE 시험법은 다음과 같은 두 가지 중요한 관점에서 다른 비파괴탐상법과 차별된다. 첫째, 초음파나 방사선 시험법 등은 외부의 에너지를 이용하는 반면 AE 시험법은 검사체 내부에서 발생하는 에너지를 이용한다. 둘째, AE 시험법은 구조재의 변형과 파괴에서 수반되는 소성변형과 균열성장 등의 동적과정을 검출하는데 유용하다.

구조물에 존재하는 잠재적 결함들은 하중을 받음으로써 결함이 성장하고 파단사고로 이어질 수 있어 구조안정성의 차원에서 결함성장을 탐지할 수 있는 감시방법의 개발이 아주 중요하게 여겨지고 있다. 일반적으로, 구조적 불안정성은 소성변형, 슬립, 균열의 생성과 전파와 같은 동적 거동을 발생시킨다. 금속이 받는 응력을 탄성한계설계 내에서 잘 고려했다 할지라도 균열근처에서는 응력집중 현상으로 인해 소성변형이 일어나고 결함의 진전은 AE 발생원이 되는 것이다. AE 시험법은 간접적인 측정방식을 취한다. 대부분의 AE 발생원들은 구형파면의 형태로 에너지를 방사하는 점원으로 볼 수 있으며 구조물의 벽을 따라 유도되어 전파하게 되고 AE 발생원 부근에 있는 센서에 의하여 AE 신호를 검출할 수 있게 한다. AE의 이러한 특징은 구조물의 특정 검사영역에 에너지빔을 조사하는 다른 여타 비파괴검사법과는 대조적이라 할 수 있다.

AE 시험은 결함이나 변형이 일어난 지점, 또는 그 주위의 응력 레벨의 동적 분포를 감시하는 수동적인 방법이라 할 수 있다. 따라서 AE 감시는 하중이 가해질 경우에만 그 효력을 발휘할 수 있다. 이러한 응력들의 예로는, 용기나 배관 등에서의 내압 하중을 비롯해 구조요소에서의 장력하중과 굽힘 하중 등이 있다. AE 응용에 있어 주요 특징으로는 대부분의 금속에서 발생하는 비가역적 AE 신호 방출현상이라 할 수 있다. 일단 하중이 가해질 때 그 하중에 의해 AE가 발생하게 되며 하중이 제하되면 AE 신호 발생은 정지하게 되며, 하중을 다시 증가시켜 이전에 가해진 하중 레벨에 도달하기 전까지는 AE가 발생하지 않는 현상을 일컬어 비가역적 AE 신호 발생효과 즉, 카이저 효과(Kaiser Effect)라고 한다.

AE 시험법은 초음파검사법이나 방사선검사법에 비해 매우 우수한 감도를

가지고 있는 검사방법이지만, AE 발생원과 센서의 거리가 멀어짐에 따라 그 감도는 떨어지게 된다. 시편의 표면이나 음향학적 경계면에서 파의 모드변환으로 인해 많은 모드의 파동들이 서로 다른 속도로 전파되어 도달한다. 모드변환은 AE 신호분석을 더욱 복잡하게 할 뿐 아니라 삼각법이나 여타 다른 방법을 이용해 분석한 AE 신호의 위치표정을 어렵게 만든다. AE 시스템의 감도는 특정장비의 구성 특성뿐만 아니라 센서에 민감하게 작용한다. 주위잡음으로 인해 AE 검사법의 감도는 한계에 부딪힐 수 있다. 음향감쇠가 큰 재질의 구조물을 감시함에 있어, 재질의 음향학적 특성은 검사 감도와 최대 센서 간격의 한계 결정에 영향을 미치게 한다. 센서의 커플링과 재현은 다중 AE센서를 적용할 때 고려되는 중요한 인자들이다. AE 감시를 수행하는데 있어 물질의 음향학적 속성과 기하학적 조건에 대한 자세한 지식을 토대로 센서를 선택하고 배치해야 한다. 부착물이나 노즐 부위 또는 두께가 변하는 부위에는 높은 응력집중 현상이 발생되어 결함이 발생할 가능성이 높기 때문에 이러한 부위에 센서를 장착하여 시험하여야 한다. 압력계통을 비롯한 여러 구조물의 AE 감시결과를 분석하기 위해서는 AE 시험법에 대한 깊은 기술지식과 폭넓은 경험이 필요하다. 다채널 AE 시스템들은 가상일괄처리과정에서 데이터를 처리하기 때문에 AE 신호의 양이 AE 시스템의 데이터 처리능력을 초과할 정도로 많을 때는 분석에러를 초래할 수 있다. 압력용기를 비롯한 여타 압력 시스템의 정압검사에 AE 감시가 사용될 때 펌프 잡음과 다른 진동 또는 압력시스템 내의 누설 등은 전체 시스템의 감도를 떨어뜨리고 정확한 데이터 분석을 어렵게 만드는 배경잡음을 유발시킬 수 있다. 따라서 허용 가능한 레벨까지 배경잡음을 감소시키기 위해서는 특별한 조치가 필요하다. 제조단계의 AE감시는 전기적인 잡음이나 음향학적인 잡음과 연관된 특별한 문제를 수반한다. 따라서 효과적으로 AE 감시를 수행하기 위해서는 충분한 전기적, 음향학적 차폐가 선행되어야 한다. 이외에도 배경잡음원의 효과를 감소시키기 위해 기계적 차폐, AE시스템 내의 전기적 필터링, 기계적 하중 과정이나 유압하중과정의 조절, 전기적 게이트의 제어 등이 필요하다.

다. AE 신호 해석 평가

(1) 음향방출 변수

AE신호 분석은 통상적으로 신호의 파형정보를 변수화하여 수행된다. 음향방출 신호는 일반적으로 큰 진폭을 가진 돌발형(burst type) AE가 대부분이므로 AE 측정 파라미터는 돌발형 AE를 중심으로 정의되고 있다. 연속형 AE의 분석에서는 신호의 에너지 값이나 실효전압 및 주파수 스펙트럼을 이용하고 있다. 그림 4.4.3은 돌발형 음향방출 신호의 형태를 나타낸 것으로, 이를 중심으로 음향방출 변수에 대하여 기술하면 다음과 같다.

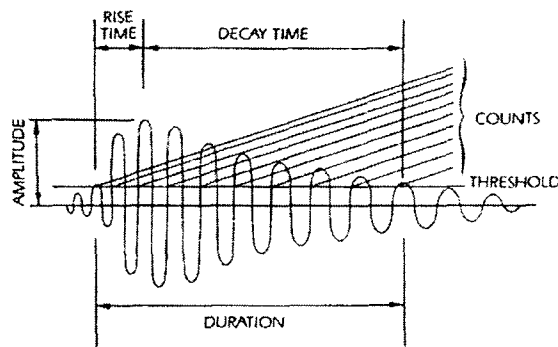


그림 4.4.3 돌발형 AE 신호의 변수

(가) 이벤트 수(event count, N_e)

AE 신호를 해석은 음향방출 발생원이 한 번의 음향방출 신호를 발생시킬 경우 음향방출 측정장치에서는 한 사건만 관찰된다고 가정 하에 이루어진다. 사건 발생수는 돌발형 파형의 개수를 나타내고 음향방출의 발생 빈도를 나타낸다고 볼 수 있다. 일반적으로 전압 문턱값(threshold level)은 외부 잡음보다는 높게 설정하는데 대략 잡음 레벨의 1.5배 정도로 설정한다.

(나) 링다운 카운트 수(Ring-Down Counts, N)

전압 문턱값 이상의 진폭을 갖는 AE 파형의 파고 수로 정의된다. 대부분의 돌발형 음향방출신호는 지수 함수적으로 감쇠하는 파형 패턴을 가지며 최대값은 일반적으로 신호의 초반부에 나타난다. 음향방출 이벤트의 파형을 수학적으로 표현하면 다음과 같고,

$$V(t) = V_p e^{-\alpha t} \sin \omega t \quad (4.4.1)$$

링다운 카운트 수 N은 다음과 같다.

$$N = \frac{\omega}{2\pi\alpha} \ln \frac{V_p}{V_t} \quad (4.4.2)$$

여기서 $V(t)$: AE 신호출력, V_p : 최대 진폭, α : 감쇠상수, ω : 신호 주파수, V_t : 전압 문턱값.

AE 이벤트 수는 방출된 음향방출 신호의 특성을 무시한 채 AE 발생 빈도만을 나타내는 인자이나, 링다운 카운트 수는 AE 발생원의 발생 빈도수와 신호크기에 정성적으로 비례하므로 일반적으로 널리 사용되고 있다.

(다) 최대진폭 (Peak Amplitude, V_p)

AE신호의 최대진폭(V_p)은 한 음향방출 신호 진폭의 최대값을 말한다. 최대진폭은 AE 신호의 감지능력을 결정하고 발생원의 세기와 직접적으로 관련되는 중요한 변수로써, 음향방출 발생원의 크기와 종류에 따라 달라진다.

(라) 에너지(event energy, E)

한 이벤트의 음향방출 에너지는 AE 파형의 면적으로 나타낼 수 있으며 일반적으로는 최대진폭(V_p)의 자승으로 표현한다.

$$E = V_p^2 \quad (4.4.4)$$

평균실효전압(rms Voltage)은 연속형 음향방출신호의 기간-평균값으로 수식적으로 다음과 같이 표현된다.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2 dt} \quad (4.4.5)$$

이것은 연속형 신호를 만드는 누설이나 프로세스 잡음 등의 변화, 경향 등을 측정하는 도구로서 돌발형 신호를 측정하는 에너지와는 그 용도가 구분된다. 실제 원자력 분야에서는 평균실효값은 누설 측정에 많이 적용되고 있다.

(마) 상승시간(rise time, t_R) 및 상승률(slope, s)

음향방출 상승시간은 수 μs 정도이며 AE 발생원의 발생속도와 관계가 있고 발생원의 크기에 의존하며 링다운 카운터와 거의 비례관계에 있다. 균열의 시작 또는 성장시 발생하는 AE는 주위잡음보다 더 빠른 상승시간을 가지고 있으며 파의 진행거리가 길어질수록 일반적으로 상승시간은 길어진다. 상승시간은 잡음을 포함한 다른 간섭신호로부터 음향신호를 구분하는데 사용될 수 있다.

(바) 이벤트 지속시간(event duration, t_D)

음향방출 이벤트 지속시간은 보통 t_D 로 표현되며, 음향방출 시작시각 (t_i)로부터 음향방출 종료시각 (t_f)까지의 시간으로, 즉 $t_D = t_f - t_i$ 와 같이 정의된다.

(사) 도달시간 간격(Arrival time interval, ΔT_{ij})

ΔT 는 음향방출 위치표정에 사용되는 변수로서, 음향방출 센서의 i 번째와 j 번째에 음향방출 신호의 도달되는 시간간격을 나타내고 있다.

(아) 주파수 스펙트럼

음향방출 신호에 대하여 Fourier 변환하여 주파수 성분을 구한 것으로 아래와 같이 기술된다.

$$F(\omega) = \int_0^{\infty} f(t) \exp^{-i\omega t} dt$$

이 주파수 스펙트럼은 발생원의 상승시간과 밀접한 관계가 있으며 손상기구의 해석시 손상 모드에 따라 주파수 성분이 달라진다고 알려져 있어 파형해석에 널리 이용되고 있다.

(2) AE 신호 해석방법

(가) 활성화도분석법

음향방출 활성도에 의한 방법은 시간에 따른 AE 이벤트 발생수, 링다운카운트 수, 최대진폭 및 에너지 등의 변수를 평가하는 것으로 음향방출원의 크기 및 개수와 직접적 관계가 있는데, 카운트 수와 파괴 파라미터와의 상관관계는 일반적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$N_i = A K_1^m (\text{Fracture Crack Propagation}) \quad (4.4.7)$$

$$N = B(K)^n (\text{Fatigue}) \quad (4.4.8)$$

여기서 N_i : 총 카운트 수, K_1 : 응력확대계수, A, B, m, n : 상수, N: 카운터 수.

위의 상관관계를 이용하여 실제 어떤 재질에 대한 균열 특성이 음향방출 발생수로서 표현될 수 있다. 어떤 일정한 응력을 받고 있는 시험편에서 AE 사건, 또는 링-다운 횟수가 일정하게 증가하는 현상이 일어날 수 있으며 이러한 경우 시험편에는 손상의 진전이 일어나고 있다고 평가할 수 있다. 따라서 필리서티 비나 카이저 효과와는 달리 기존에 받은 응력에 의해 얼마만큼의 손상을 입었는지의 척도로 이용될 수 있다.

(나) 파형분석법

파형분석에 의한 방법은 음향방출 신호의 파형이 어떻게 생겼는가를 비교하는 것으로 이때 이용되는 변수로는 상승시간(rising time), 지속시간(event duration), 신호의 상승 기울기(rising slope) 및 주파수 스펙트럼 등이 있다. 어떤 특별한 변형기구에 의해 발생하는 음향방출 신호의 경우, 상승시간, 지속시간, 신호의 상승 기울기 및 신호크기 등을 이용해 특성을 파악하고, 이들을 통계적으로 처리하여 특별한 파괴기구에 대한 규명을 할 수가 있다.

(다) 주파수 분석법

음향방출신호에 대한 주파수 분석법은 음향 방출원의 물리적 메커니즘을 밝히기 위한 방법으로 연구되어 왔다. 그러나 음향방출신호 파형은 진행매질의 구조, 재질, 감지기의 특성, 계측장비의 성능 등에 의해 많이 좌우되고 이것은 주파수 스펙트럼에 직접 영향을 미치므로 주파수 해석에 의해

음향 방출원 메커니즘을 규명하는 것은 매우 어렵다. 최근에는 단순구조를 가진 구조물(Plate, Disk)에 입력 특성이 알려진 인공 신호원인 연필 또는 모세관 파열(Capillary Break)이나 볼 낙하를 사용하여 음향방출신호의 주파수를 분석함으로써 신호원 메커니즘을 규명하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 실제 응용 면에 있어서는 소성변형, 균열 진행 및 누설 시의 물리적 진행과정과 그때 발생하는 음향방출신호의 스펙트럼 양상과의 상대적 관계를 활용하여 정성적으로 신호를 분석하는데 이용되고 있다.

(라) 최대진폭 분포 분석법

최대진폭을 이용할 경우 사건 각각에 대한 최대진폭들을 비교하기도 하지만, 최대진폭 분포는 재질 및 변형 메커니즘의 특성을 나타내 주는 인자로서 일반적으로는 일련의 AE 시험에서 아래 식으로 표현되는 지수법칙(power law)모델을 이용한 최대진폭의 분포를 통계적으로 처리하여 이용한다.

$$N(V_p) = A (V_p)^{-b} \quad (4.4.9)$$

여기서 $N(V_p)$ 은 최대진폭 V_p 를 가지는 AE 사건의 수이고, A 는 비례상수이며, 지수함수의 멱수를 b 값이라고 하고 분포직선의 기울기를 나타낸다. b 값이 크다는 것은 발생한 AE 사건 중에서 낮은 진폭의 사건이 차지하는 비율이 크다는 것을 의미하며, 이 값은 시험편의 재질이나 손상기구와 밀접한 관계를 가지고 있다고 알려져 있다. b 는 변형 또는 균열을 결정지을 수 있는 값으로 변형(deformation)의 경우 b 가 크고 가공경화(work hardening)가 될수록 점점 커진다. 반대로 균열이 진행되면 b 가 점점 작아져 1에 가까워진다. 기계적/전기적 잡음과 같이 불필요한 신호들은 직선이 아닌 곡선의 분포를 가지게 된다.

(마) 형상인식법 (pattern recognition)

AE 신호는 재료의 물성, 구조물의 기하학적 상태, 계측장비 및 측정조건에 민감한 영향을 받는다. 측정될 수 있는 AE 변수는 매우 많아 특별한 변형기구에 의한 AE신호 발생원의 특성규명은 매우 어렵다. 이에 대해

AE 신호에서 얻어질 수 있는 많은 AE 변수 중에서 보다 관련성이 있는 정보를 추출하고 분석할 수 있는 형상인식법이 새로운 방법으로 제안되었다. AE법에서는 신호구별이 가장 큰 근본 문제인데, AE 신호와 잡음과의 구별에 있어서 보편적으로 필터에 의한 주파수 필터링과 잡음 문턱값 설정에 의한 잡음제거가 사용되고 있기는 하지만 근본적인 신호 구별이 어려운 실정이다. 형상인식법은 정량적인 통계적 처리를 이용하는 것으로 특별한 변형기구들에서 발생한 음향방출 신호들에 대하여 신호의 특징(feature)들을 선택하여 신호를 분류한 후 알지 못하는 변형기구에 의해 발생한 음향방출 신호의 변형기구 및 발생원을 유추하는 방법이다.

2. AE기술의 원전 적용

가. 경수로 원전

원자로 및 1차 계통 누설감시분야에 있어, 미국 원자력규정에 의하면 경수로의 누설건전성 확보를 위해 1 gpm(63 ml/sec) 이하의 누출을 1시간 내에 탐지할 수 있는 누출 탐지능을 요구하고 있다.

음향누설감시계통은 여러 개의 음향방출 감지기로 구성되어 있으며 증기 및 고온고압의 냉각수가 누설될 때 배관구조물을 통해 전송된 고주파수의 음향방출신호를 탐지한다. 누설탐지에 사용되는 음향방출 신호는 그 발생원이 고체 내부에서 생긴 에너지가 아닌 누설부위에서 유체흐름의 동요가 구조물의 음향방출 에너지로 바뀌어 생성되는 것이다. 따라서 누설시 발생하는 음향방출 신호는 유체흐름 조건에 크게 좌우되는데 그 신호 모양은 돌발형이 아니고 일정치 않은 잡음과 같은 넓은 대역의 연속형의 신호이다. 원전에의 음향방출 기술 적용에 있어서 가동시 발생하는 큰 신호의 배경잡음(background noise)과 고온 및 방사능에 의한 센서 열화가 가장 큰 문제점이다. 원전에 AE법은 주로 누출탐지를 목적으로 하고 있으나 금속 파편(loose parts) 감시에 매우 유용하게 적용되고 있다. 그림 1과 같이 원자로 용기 및 1차 계통에 센서를 부착할 때는 고온 문제로 도파관(waveguide)을 사용하고 있다.

역지 밸브 건전성 진단은 원자력 안전계통 뿐만 아니라 BOP 계통에도 매

우 중요하다. 예를 들어 안전주입탱크 출구, 고압 안전주입 출구, 잔열제거 계통 출구 등에 설치되어 안전상에 매우 중요한 기능에 담당하고 있다. 역지 밸브의 주요 고장유형은 밸브 디스크 작동 고장과 밸브 누설로 구분되는데 역지 밸브의 고장은 수격 현상, 과압 및 열 충격 등을 초래할 수 있다.

원자로 압력용기 균열 감시에도 음향방출기술의 적용이 가능하다. PNL은 원자로 1차 압력경계에서 발생한 균열 초기와 성장을 연속적으로 감시하기 위한 음향방출의 타당성을 입증하였으며 NRC에서는 음향방출을 원전의 비파괴검사에 사용할 수 있는 대체검사 방법으로 인정하였다.

나. 중수로 원전(CANDU)

중수로 원전(CANDU)의 원자로는 경수로와는 달리 수평으로 배열된 수백 개의 핵연료 압력관들로 구성되어 있으며, 본래의 설치과정에서 발생한 높은 인장 잔류응력과 핵분열에 의한 방사능 조사에 의하여 압력관의 변형이 발생할 수 있다. 제조시 핵연료 안에 존재하거나 핵연료 교환시 유입되어 첨가된 수소는 원자로가 냉각될 때 지르코늄 산화수소물로 응결한다. 이러한 잔류 응력은 표면 불연속점에 집중되는 약한 수소화물 플레이트를 만든다. 작은 불연속점은 지연성 수소화물 균열(delayed hydride cracks) 과정의 되풀이로 인해 성장한다. 이러한 과정은 관통 불연속부를 만든다. 지연성 수소화물 균열을 통해 수반되는 누설은 환형 가스 시스템(annulus gas system)에 있는 이슬점 모니터(dew point monitor)에 의해 빠르게 검출되지만 수백 개의 압력튜브의 균열을 확인할 수는 없다.

일단 환형 가스 시스템을 통해 누수가 검출되면, 누수 채널을 확인하여야 한다. 먼저 특정 채널의 유입구와 유출구에 얼음 플러그(ice plug)를 생성시키고, 뒤이어 연료공급장치를 사용하여 채널의 압력을 증가시킨다. 어느 일정한 압력이 되면 연료공급장치의 밸브를 닫고, 압력강하율을 기록한다. 누수 채널에서는 현저한 압력 저하가 발생한다. 이 방법은 누수 채널을 탐지하는데 많은 시간이 소요된다. 실시간으로 누설을 탐지할 수 있는 검사 방법으로 음향방출법이 적용될 수 있다. 누설부 확인을 위해 원자로 end fitting에 센서가 장착된다. 채널당 2분 정도의 검사시간이 소요되며 각 채

널에서 측정된 AE 신호들의 주파수 스펙트럼들이 기록된다.

다. 액체금속로 (LMR)

액체금속로는 소듐 냉각재를 사용하고 소듐 반응 억제를 위해 보호가스 시스템과 이중 격리 구조를 가짐에 따라 경수로 원전에서 사용되는 일반적인 가동중검사와는 다른 검사 기술이 요구된다. 액체금속로는 낮은 압력에서 운전될 뿐만 아니라 원자로와 주요부품이 스테인레스 강과 같은 인성이 큰 재료로 제작되기 때문에 구조적 악화가 점진적으로 일어나 파손에 대한 조치에 충분한 시간적 여유를 가질 수 있다. 또한 액체금속로 압력 경계면에서 소듐의 누설은 소듐 물 반응으로 인한 화재를 일으키므로 소듐 누설을 감지할 수 있는 감시 방법의 적용이 필요하다. 이러한 특징은 주기적인 가동중검사에 의존하기 전에 연속감시 적용을 가능하게 한다. 액체금속로 가동중검사 코드인 ASME XI, Division 3에서는 이러한 특성을 반영하여 액체금속로의 가동중검사법으로 연속감시법이 적용되도록 요건화하고 있으며 이러한 연속감시 방법으로 적용할 수 있는 검사법으로 AE 시험법이 유용하다. 액체금속로의 증기발생기는 소듐-물 경계를 이루기 때문에 물 누출시 화재 사고의 가능성이 매우 높은 부품이다. 증기발생기 튜브의 파손은 매우 중요하게 감시되어야 한다. 증기발생기 튜브 누설은 소듐-물 화학반응을 일으키고 AE 신호를 발생시킨다. 누설 AE 신호는 증기발생기 용기 외부에 설치된 AE 센서로 감지된다. AE 누설탐지기는 소듐누설을 높은 감도와 빠른 반응시간으로 탐지 가능한 기술로서 프랑스 SuperPhenix를 비롯한 여러 액체금속로에서 증기발생기의 소듐 누설탐지에 매우 유용하게 적용되고 있다.

액체금속로 배관계통의 구조건전성 평가에 AE시험법을 적용하기 위한 기반연구와 응용연구들이 수행되었다. 액체금속로 배관재인 SS 304 스테인레스 강의 시편과 배관재의 피로파괴시험을 통해 AE 발생 특성과 온도 의존성을 연구하였다. AE 시험기술은 배관의 불연속부를 검출하고 그 위치를 찾는 데 있어 탁월한 능력이 있음을 확인하였고, 발전소의 구조 건전성을 평가하기 위한 많은 기초 자료들을 축적하였다. 액체 소듐 배관 테스트 루프를 사용한 점진적 가열시험에 대한 AE 감시 시험 결과, 소듐 흐름

으로 인해 생긴 배경잡음은 매우 적으며 열적 팽창과 수축으로 인해 높은 AE 신호 방출이 관측되었다.

3. 인장시험시 AE발생특성평가

가. 실험 개요

원전 압력경계 구조물의 재료에서 발생하는 AE신호의 발생 메커니즘은 재료의 종류에 따라 달라지므로, AE 감시기술을 적용하기 전에 AE 발생 특성이 먼저 파악되어야 한다. AE 신호 발생특성과 발생기구에 대한 분석이 이루어진 후에 구조물의 구조적 안정성평가와 연속감시에 AE 시험법을 적용할 수 있다. 원전의 1차계통의 압력용기와 배관의 재질은 주로 SA508 저합금 탄소강과 SS304 스테인리스강이다. 본 연구에서는 원전 압력용기와 배관의 건전성 연속감시에의 AE 시험법 적용을 위한 기초 연구를 수행하기 위해 SA508 및 SS304 재료의 인장파단 시험 시 생성되는 AE 신호 발생 특성을 분석 평가한다.

나. 실험 과정

그림 4.4.4는 실험의 대략적인 개략도를 보여준다. 시편에 인장력이 가해짐에 따라 발생하는 AE신호는 두 개의 센서에 의해 입수되고 증폭기를 거쳐 AE신호분석시스템(이하 AMSY-5)으로 입력된다. 오실로스코프(LeCroy 9354A)를 통해 시편으로부터 들어오는 신호의 잡음레벨을 조절할 수 있으며, 인장시험기와 AMSY-5는 각각 PC를 통해 제어된다. 센서는 그림과 같이 시편의 양단에 π 자형 클립을 이용해 고정된다.

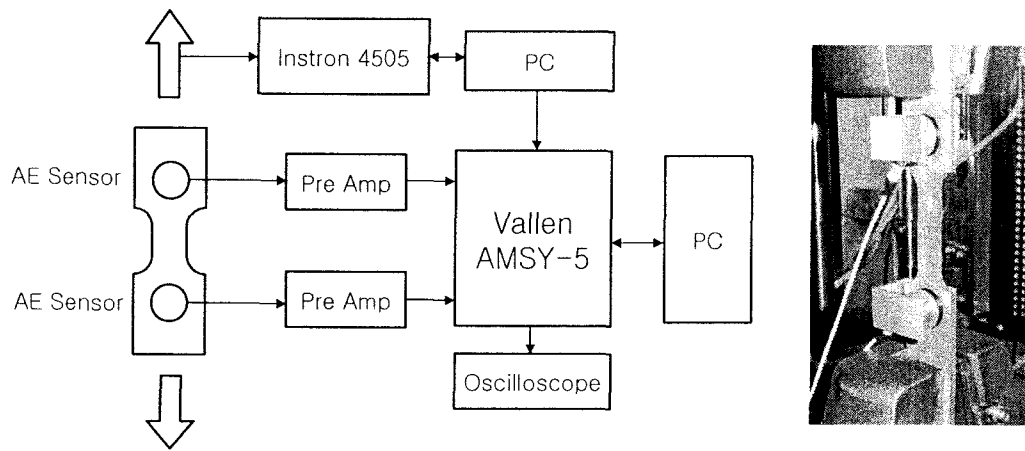


그림 4.4.4 AE 시험의 Block Diagram과 시편의 체결

(1) 시편

본 실험에 사용된 시편은 원전 배관재의 주재료인 SA508 탄소강과 SS304 스테인리스강이다. 모든 시험편은 두께가 4mm이고 폭이 12mm이며 게이지 길이가 40mm인 판상형으로써, 각각의 재질별로 건전시편과 노치시편이 준비되었다. 또한 노치 시험편의 경우, 시편의 중앙부에 방전가공을 이용한 폭이 0.1 mm이고 길이가 3mm 인 노치를 만들었다.

크기나 모양에 관한 효과를 배제하기 위해 각각의 시편들은 그림과 같이 동일한 형태를 갖고 있다.

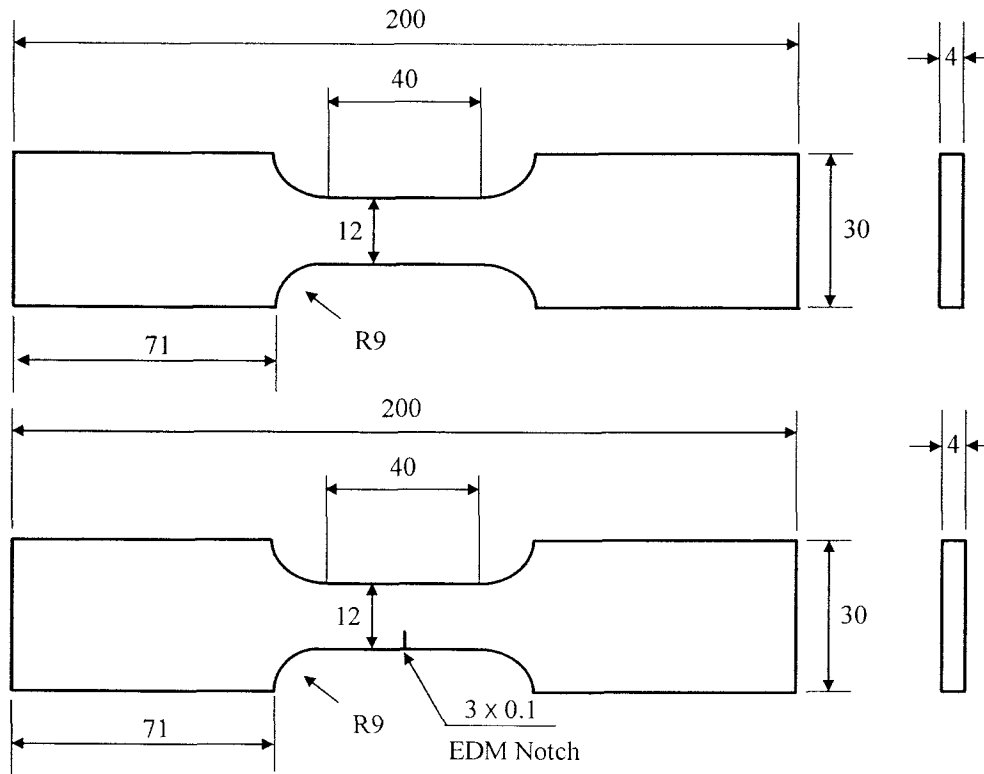


그림 4.4.5 시편의 형태와 규격

(2) 인장 시험

AE시험은 특성상 외력이 가해진 시편의 균열진전으로 인해 발생하는 신호 즉 AE신호를 관찰하게 된다. 따라서 시편의 인장시험을 시행하고 동시에 시편으로부터 발생하는 AE신호를 관찰하게 된다. 본 실험에 사용된 인장시험기는 최대하중이 100kN인 Instron사의 Model 4505이 사용되었으며, 표4.4.1은 Instron 4505의 기본사양을 보여준다.

Instron 4505	Speed Range	0.0005-1016mm/min
	Max. travel	1,330mm
	Clearance	575mm

표 4.4.1 Instron4505 기본사양

(3) AE신호분석시스템

Vallen사의 AMSY-5는 사전에 설정된 문턱값(Threshold)을 넘는 불연속 AE신호나 누수 등으로 인한 연속적인 신호를 측정하고 분석하는 장비로써 그림4.4.6과 같이 4개의 주요 패널 즉, 전원상태를 제어하는 SM(Supply Monitor Panel), 데이터 저장형태를 설정하는 CP(Control Panel), audio output과 parametric input을 제어하는 SF(Special Function Panel), AE신호의 입력을 제어하는 ASIPP(Acoustic Emission Signal Preprocessor)로 구성되어 있다. AMSY-5에서는 채널로 입력된 각각의 웨이브 패킷(wave packet)을 arrival time, peak amplitude, energy, rise time, count, duration과 같은 수치정보로 변환하게 된다.

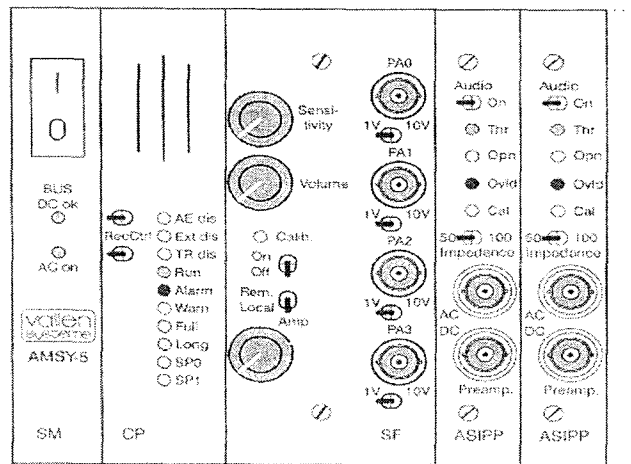


그림 4.4.6 Front panel of the AMSY-5

(4) AE 센서

음향방출 신호는 AE 센서의 특성에 따라 크게 왜곡될 수 있다. 음향방출의 활성도에 관심이 있는 경우 대부분 공진형 센서로 감도가 높은 것을 선택할 필요가 있으며, 파형분석에 관심이 있는 경우라면 감도는 떨어지지만 주파수 범위가 넓은 광대역 센서를 선택하는 것이 좋다. 본 실험에서는 공진주파수가 150kHz 인 Vallen VS150-M을 사용하였다. 각각의 센서는 전치증폭기(AEP-4)를 거쳐 AMSY-5로 연결된다. 이 전치증폭기에서는 센서로부터 들어오는 신호를 34dB로 증폭하게 된다.

다. AE측정과 분석

먼저 센서가 부착된 시편을 인장시험기에 체결한 후 오실로스코프의 RF 신호와 ASIPP panel을 통해 잡음레벨을 관찰하게 되는데, 본 실험에서는 문턱값(threshold level)을 40dB로 설정하였으며, 인장시험기의 crosshead speed는 5mm/min로 설정하였다. 잡음제거와 인장시험기 설정을 마치게 되면 AMSY-5의 Acquisition setting을 해야 한다. 특히 digital waveform의 획득을 위한 “TR-Setting”의 경우, sampling rate을 빠르게 하고 waveform당 샘플을 많이 하면 waveform의 분해능이 증가하는 반면, sampling rate이 느리고 waveform당 샘플들이 적으면 disk space의 확보와 TR-data transfer의 최소화가 가능하다는 점을 고려해야 한다. Parameter의 설정을 마치게 되면 Data Recording 제어창이 활성화되며, 레코드 버튼을 누름과 동시에 데이터 획득이 시작된다. 인장시험기의 인장강도 및 크로스헤드 변위와 함께 AE 이벤트, 카운트, 진폭 및 에너지 등과 같은 AE 변수들이 AE 시스템에 저장된다. 실험으로부터 얻어진 데이터는 AMSY-5의 전용 소프트웨어인 Vallen사의 AE-analysis software를 사용하였으며, 본 소프트웨어는 데이터 분석용 패키지인 VisualAE, VisualTR, VisualClass를 포함하고 있다.

라. 실험 결과 및 고찰

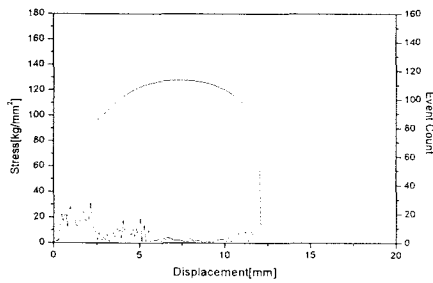
인장시험 결과 얻어진 각 시험편의 항복강도와 최대인장강도(UTS) 및 총 변위는 표 4.4.2와 같다. 건전 시험편의 경우 SA508의 항복강도와 UTS는 각각 433.8MPa과 567.9MPa이었으며, SS304는 각각 393.4MPa, 752.9MPa이었다. SS304가 SA508보다 항복강도는 약간 작으나 UTS는 더 크게 나타났다. SA508과 SS304의 총 변위량은 각각 12mm와 30.89mm로 측정되어 SS304가 SA508에 비해서 약 2.5배 정도 더 연성이 좋은 것으로 나타났다. 노치 시험편은 건전 시험편보다 항복강도와 UTS 및 총 변위가 낮게 나타났다. 그림 4.4.7과 4.4.8은 네 종류의 시험편에서 얻어진 인장시험시의 하중변위곡선과 함께 각각의 AE 이벤트 발생률과 AE 에너지를 보여주고 있다. 각 하중변위곡선에서는 탄성영역, 소성영역, 파단영역

이 나타나고 있음을 알 수 있다. 건전 시험편의 경우, 그림 4.4.7과 4.4.8의 (a)와 (c)에서 보는 바와 같이 SS304 시험편은 탄성영역에서 뚜렷한 AE 신호가 관찰되며 소성영역에서는 AE 발생률이 급격히 줄어드는 현상을 보이고 있다. SA508의 경우는 SS304 보다는 탄성영역에서 AE 가 적게 발생하였지만 소성영역에서는 AE가 더 많이 발생하였다. 또한 노치 시험편의 경우에는, 그림 4.4.7과 4.4.8의 (b)와 (d)에서 보는 바와 같이 SS304 시험편은 노치 선단에서의 소성영역 확장시 AE가 적게 발생하다가 노치 균열이 진전하는 영역에서 AE 신호 발생률이 증가하는 현상을 보인다 반면에, SA508은 노치 균열 선단의 초기 소성영역에서 AE가 관찰되며 노치 균열 진전 영역에서의 AE 신호는 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다. 그림 4.4.9는 인장시험시 발생한 총 AE 신호의 누적 진폭분포도를 나타내며, 그림 4.4.10은 AE 진폭과 Duration의 분포도를 보여준다. 그림에서 나타난 바와 같이 SS304에서 발생하는 AE 신호는 SA508의 AE 신호보다 신호 진폭(amplitude)과 신호 시간폭(duration)이 크게 나타나는 특성을 보이고 있다. 이렇게 재료의 종류와 노치의 유무에 따라 AE 신호 발생 특성이 변하는 것은 재료의 결정 구조와 파괴특성이 다르기 때문일 것이다. SS304 재료는 f.c.c 결정구조이나 상온에서 소성변형시 오스테나이트 조직이 일부 b.c.c. 구조인 마르텐사이트 조직으로 변하는 특성이 있다. SA508의 경우에는 martensitic변형이 발생하지 않는다. 균열 파단이 진전하기 시작하면 AE발생이 현저하게 증가한다. 이는 파단면에서 미세한 덩플들에 의한 균열성장과 결합되는 미세기공(microvoid)의 형성 때문이다. SA508의 경우에 파단시보다는 탄성영역과 소성영역에서 AE가 많이 발생한다. 따라서 AE 발생 원인은 균열성장 과정에서의 파단 원인보다는 재료내부의 물리적 특성 때문일 것으로 보인다. Higgen등은 순수한 철의 탄성영역에서 AE 발생특성을 알아보았는데 철의 경우에 AE 발생은 비가역적 자구벽의 움직임과 같은 magnetomechanism에 기인하는 것으로 추정하고 있다. 탄성영역에서 SA508의 AE 발생은 순수한 철과 같은 강자성체의 원인과 같게 평가된다. 탄소소성영역에서 관측된 AE는 파단에 의한 결합보다는 강자성체의 물리적 특성에 기인한다고 볼 수 있다. 노치가 있는 시험편의 경우, 균열 파단이 시작될 때는 SS304와 SA508 두 시험편에 대한 거시적 파

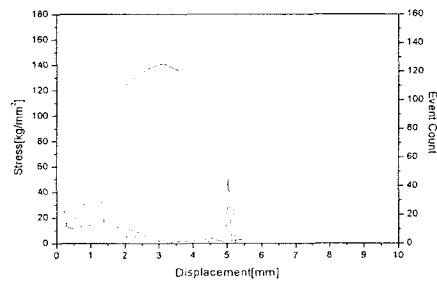
파괴형태는 다르게 나타났다. SS304의 경우는 "double-cup faced" 파괴형태를 보이는 반면, SA508의 경우에는 "45°-shear" 파괴형태를 보였다. SS304의 경우, 균열이 파단되는 초반에 균열의 끝부분에서 인장력의 방향에 수직인 면에 대해 대칭적으로 표면변위가 나타나며, SA508의 경우는 비대칭적으로 나타났다. 균열 파단의 형태가 상이한 것은 결정구조 f.c.c.와 b.c.c.의 소성특성에 기인되는 것으로 판단된다.

	SA508		SS304	
	건전 시편	노치 시편	건전 시편	노치 시편
Yield Strength [MPa]	433.8	289.1	393.4	258.2
Ultimate Tensile Strength [MPa]	567.9	443.9	752.9	449.2
총 변위 [mm]	12.0	5.17	30.89	8.0

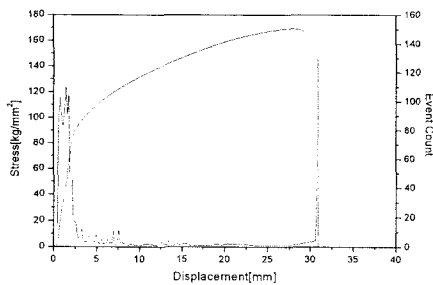
표 4.4.2 인장시험 결과



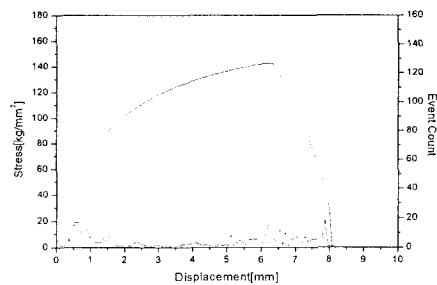
(a) SA508 건전시편



(b) SA508 노치시편

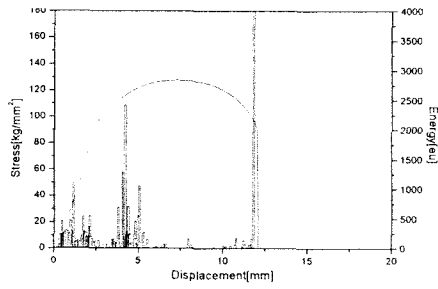


(c) SS304 건전시편

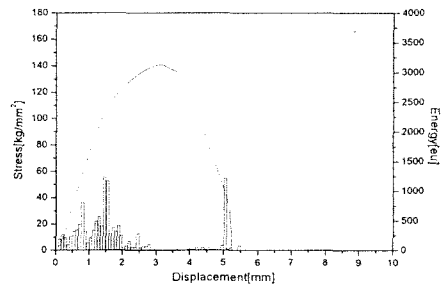


(d) SS304 노치시편

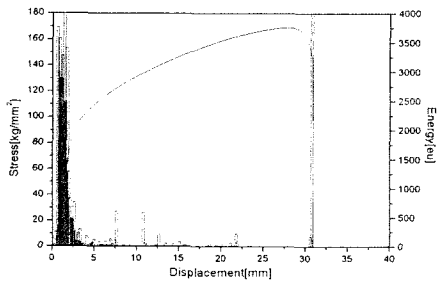
그림 4.4.7 응력 변형 곡선과 AE 이벤트 발생률



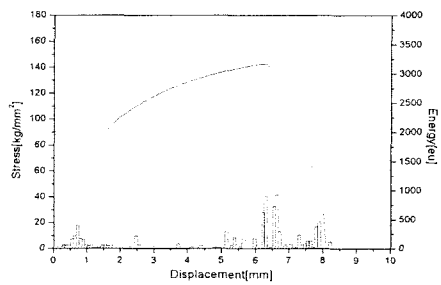
(a) SA508 건전시편



(b) SA508 노치시편

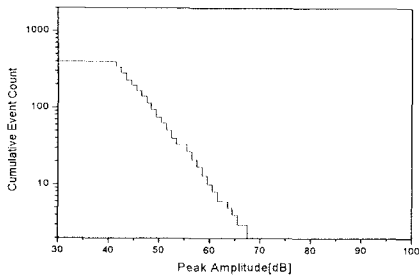


(c) SS304 건전시편

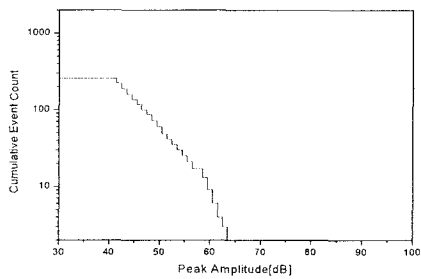


(d) SS304 노치시편

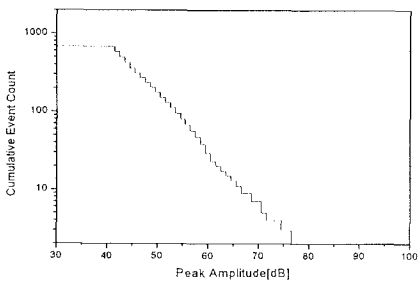
그림 4.4.8 응력 변형 곡선과 AE 에너지 발생률



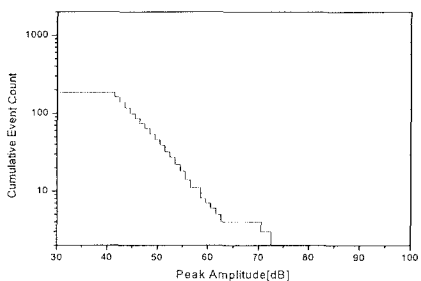
(a) SA508 건전시편



(b) SA508 노치시편

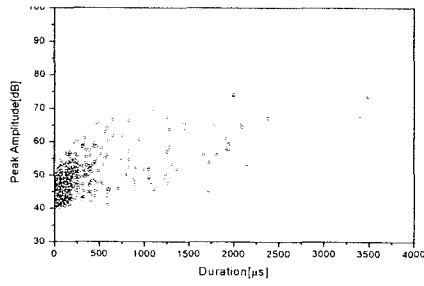


(c) SS304 건전시편

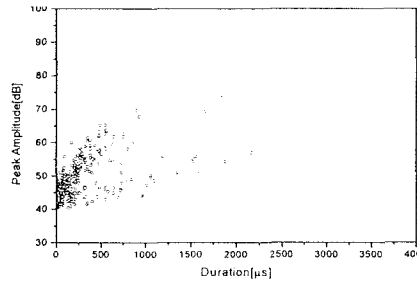


(d) SS304 노치시편

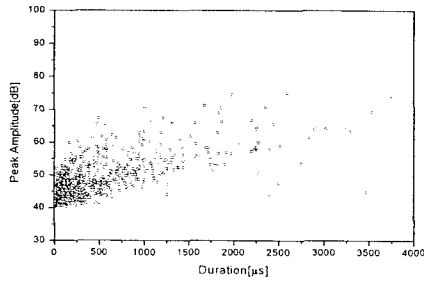
그림 4.4.9 AE 진폭분포도



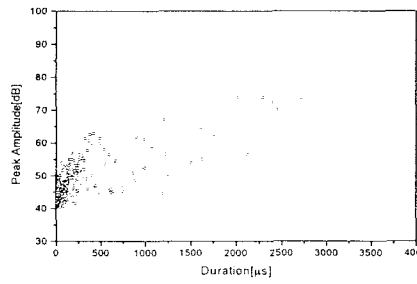
(a) SA508 건전시편



(b) SA508 노치시편



(c) SS304 건전시편



(d) SS304 노치시편

그림 4.4.10 AE 진폭과 Duration 분포도

제 5 장

네트워크 기반 원격 검사

기술 개발

제 5 장 네트워크 기반 원격 검사 기술 개발

제 1 절 네트워크 기반의 원격 검사 시스템 개발

1. 연구개요

원자력발전소는 원자로 압력 용기, 배관, 증기발생기, 케이블 등 안전성을 요구하는 많은 기기들로 구성되어있는데, 이 기기들의 노후화에 따라 기기 안전성에 문제를 일으킬 가능성이 점진적으로 커지고 있다. 이러한 안전성 문제를 예방하고자 국내 원자력발전소의 안전 등급 기기들에 대해서 해마다 over-haul 기간 동안에 UT, RT, ECT 등의 NDT 검사를 수행하여 안전성의 이상 유무를 진단하고 있으며, 원자로 가동 중에는 LPMS(Loose Part Monitoring)나 IVMS(Internal Vibration Monitoring System)와 같은 연속 감시 작업을 수행하고 있다.

현재 안전성 검사와 평가를 위한 시스템들은 대부분 외국 기술에 의존하고 있으나 국내에서도 이러한 시스템의 개발에 꾸준한 노력을 기울이고 있으며, 수년 내에 국산 기술로 개발된 시스템이 현장에 적용될 수 있을 것으로 예측된다. 그러나 이렇게 개발될 시스템들이 기존의 검사 및 평가 시스템에 적용되었던 오프라인 작업 구조를 따라간다면 검사 수행과 검사 데이터 및 평가 자료의 공유에 있어 야기되었던 여러 가지 문제들이 여전히 남게 될 것이다.

지금까지 국내에서도 이러한 문제를 해결하기 위하여 원격 제어 및 감시에 대한 수많은 연구가 수행되었으나, 원격지 검사 및 평가 장비의 제어 컴퓨터 기종과 상관없이 어느 기종의 컴퓨터로나 인터넷상의 어디에서든 원격지 장비로 접근할 수 있는 연구는 미흡했다. 즉 현장의 검사 시스템을 임의의 인터넷 상에서 제어하고 그 시스템에서 수집한 검사 데이터를 인터넷 상에서 자유롭게 검색하여 사용할 수 있는 형태까지는 접근하지 못하였다. 이러한 시스템을 구축하기 위해서는 검사 및 평가 장비와 이 장비를 접근하는 원격지 컴퓨터끼리 별다른 비용과 문제를 발생시키지 않는 인터페이스 기술이 필요한데, 웹과 자바 기술을 이용하면 인터넷으로 언제든지 검사 시스템과 검사 데이터에 접근할 수 있는 기술을 적용시키기가 용이하다.

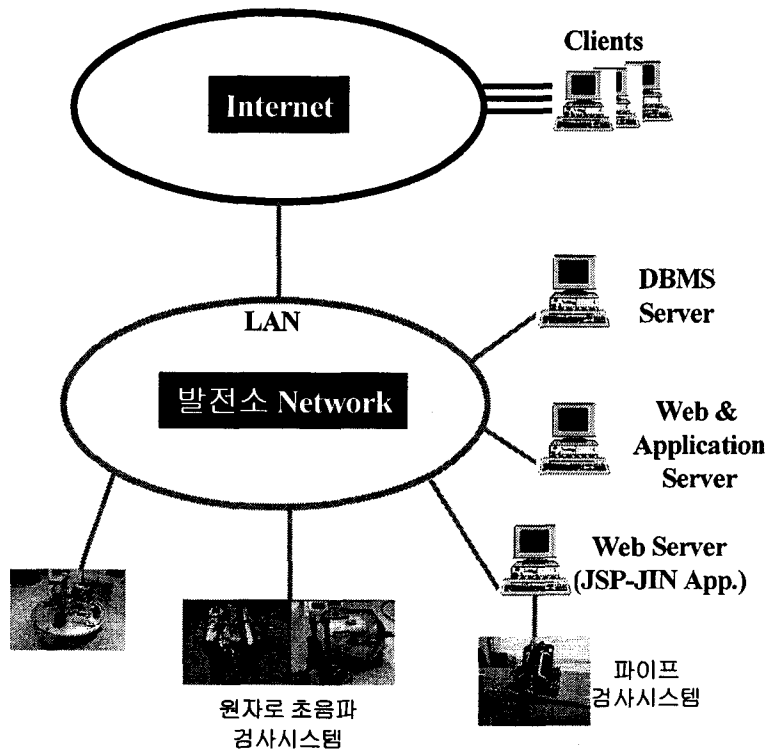


그림 5.1.1 원격 제어 시스템 개념도

원격지 검사 시스템 및 원격지 데이터베이스 접근을 위한 방법 중 가장 일반적으로 사용되는 것은 원격지 시스템을 서버로 하여 사용자의 클라이언트 컴퓨터에 원격지 시스템의 제어가 가능하도록 TCP/IP와 같은 통신 프로토콜을 이용한 원격지 프로그램을 사용하는 것이다. 원격지 시스템의 접근과 제어를 위해서는 복잡한 GUI를 요구하는 경우가 많은데, 이러한 요구를 만족시키기 위해서는 클라이언트 컴퓨터의 환경에 맞는 제어 모듈 및 GUI가 제공되어야 한다.

이러한 시스템 구성 방법에서 MS Windows 기반 PC 사용자를 위해서 C, Visual C++, 그리고 Visual Basic과 같은 프로그래밍 언어를 사용할 수 있다. 그러나 사용자 컴퓨터가 UNIX 기반의 시스템이라면 X-Window와 Motif 등을 이용한 GUI가 제공되어야 한다. 맥킨토시를 이용하는 사용자의 경우도 역시 맥킨토시에서 지원하는 환경에 맞는 GUI가 따로 제공되어야 한다.

기종에 따라 동일한 기능의 프로그램을 다른 언어로 제작하여 배포하는 것은 비용에서 상당한 부담을 주는 동시에 버전 관리에도 상당한 문제점을 내포한다. 서버 시스템에 접근하고 제어하기 위한 프로그램이 어느 한곳에 저

장되고 클라이언트 사용자 쪽에서 사용자 컴퓨터의 기종에 관계없이 필요시마다 이 프로그램을 다운로드받아 원격지 시스템과 접근할 수 있는 방법 중 하나가 자바와 웹을 이용하는 것이다.

네트워크 기반 원격 검사 시스템 개발 과제에서는 웹과 자바를 이용하여 검사 현장에 설치된 검사 장비들을 인터넷에서 제어할 수 있는 방법과 시스템을 개발하였다.

2. 원격 검사 시스템 개발 요소 기술

검사 장비와 원격 사용자 컴퓨터 사이의 인터페이스에 있어, 하나의 프로그램으로 모든 컴퓨터의 O/S에서 사용할 수 있는 인터페이스를 제공하면서 이 인터페이스 프로그램의 버전 관리를 효율적으로 하기 위한 방법으로 웹, 웹 서버, 그리고 웹 브라우저를 이용한 원격 접근 방법이 효율적이다. 웹 인터페이스를 사용하기 위해서는 자바 기술이 필수적으로 요구된다.

웹 서버, 데이터베이스 서버, 검사 장비, 그리고 원격지 사용자의 구조는 자연스럽게 클라이언트/서버 타입으로 구성된다.

가. 웹과 자바

(1) 웹

월드 와이드 웹(WWW)은 유럽의 입자물리학연구소(CERN:the European Laboratory for Particle Physics)에서 얻어지는 엄청난 양의 연구 결과 및 자료의 효율적인 공유를 목적으로 1989년 3월 Tim Berners의 제안에 의해 연구가 시작되어 개발되었으며, WWW 개발 이후 인터넷이 급속도로 발전하였다. 메뉴 방식으로 서비스를 하던 기존의 인터넷 서비스에 비해, 하이퍼텍스트를 기반으로 이루어진 웹은 문서 활용에 엄청난 편리성을 제공하기 때문이다.

특징으로는 첫째, 일관된 사용자 인터페이스를 들 수 있다. 기존의 인터넷 사용 도구의 단점이라면 사용하기가 어렵고 불편할 뿐만 아니라, 각종 인터넷 이용 도구마다 그 사용법이 다르다는 것이다. 그러나 웹은 인터넷상에서

제공되는 많은 서비스의 통합된 접속도구의 역할을 하여 기존 프로토콜과 서비스를 제공한다.

둘째, 문서는 하이퍼텍스트(Hyper Text)로 구성되기 때문에 특정 단어에 대해 관련된 다른 문서를 지정하는 포인터(Pointer)가 존재하여 사용자는 하이퍼텍스트를 이용하여 한 정보와 연결된 다른 자세한 정보를 쉽게 접근할 수 있다.

셋째, 인터넷상에서 생겨나는 가상의 조직체나 공동체에서 능동적 참여를 꾀할 수 있다. 인터넷상에서 피동적인 자세를 지녔던 일반 사용자들이 홈페이지 등을 이용하여 이제는 정보의 공유자와 제공자라는 능동적인 자세로 인터넷 사용을 꾀하게 되었다.

넷째, 웹은 인터넷에서의 분산된 정보의 저장소 역할을 한다. 웹의 경우는 각종 정보들이 실제로는 여러 서버에서 운영되고 있지만 서버들이 전체적인 레이아웃(Layout)을 같이 함으로써, 하나의 서버에서 운영되는 것처럼 보이게 한다. 이렇게 함으로써, 정보 제공 서버의 과중한 부하를 방지할 수 있는 것이다.

다섯째, 웹은 인터넷에 존재하는 일반 텍스트 형태의 문서, 그림, 음성, 그리고 동화상 등의 각종 자료들을 인터넷 주소(URL)를 이용해서 하나의 문서 형태로 통합적으로 관리, 제공해 주는 역할을 한다.

(2) 자바

자바는 월드와이드웹(WWW) 상에서 프로그램을 실행할 수 있는 네트워크 기반의 아주 특별한 언어로 인터넷 프로그래밍 언어의 표준으로 자리잡아가고 있는 인터넷 상에서 실행되는 프로그램이다.

자바는 인터프리터형 프로그래밍 언어로 자바로 프로그램을 작성하면 여러 운영 체제에서 거의 동일한 모습으로 실행될 수 있다. 따라서 클라이언트/서버 모델에서 서로 다른 기종간의 응용처리에 있어 매우 유용한 해결책을 제시해준다. 다양한 운영 체제를 수용하기 위해 자바 컴파일러는 바이트 코드(다수의 하드웨어 및 소프트웨어 플랫폼에 효율적으로 코드를 전송하기 위해 설계된 아키텍처 중립적인 중간 형태)를 생성한다. 자바는 바이트 코드를 이용한 인터프리팅 기법을 사용함으로써 클라이언트에 설치된 웹 브라우저 내

에 탑재된 자바 가상 기계(Java Virtual Machine)만을 이용하여 서버에서 제공하는 바이트 코드로 손쉽게 서버와 접촉할 수는 있으나, 그 만큼 수행 준비와 속도에 있어서는 시간이 요구되기 때문에 실시간 환경에서는 적합하지 않다.

자바에서는 애플릿 같이 자바로 구현된 인터페이스 프로그램을 웹서버로부터 클라이언트 웹 브라우저에서 다운로드 받아 클라이언트 쪽에서 완전히 독립된 형태로 실행시킬 수 있는 기법과 JSP(Java Server Pages)와 같은 동적인 인터페이스가 가능한 기법들을 제공한다. JSP는 자바를 기반으로 한 동적인 웹 사이트 개발 언어로서, ASP, PHP, CGI와 같은 서버측 스크립트 언어이다. 웹 사이트를 개발할 때 많이 사용하는 HTML, 자바스크립트가 클라이언트(사용자의 웹 브라우저) 상에서 실행이 되는 반면에 JSP는 서버에서 실행되고, 실행된 결과를 클라이언트에 전달해 준다. 클라이언트에서 웹 서버에 JSP 파일을 요청하면 웹 서버는 JSP를 서블릿(Servlet)으로 만든 다음에 해당 서블릿을 실행하여 그 결과를 클라이언트에 보내준다. 즉 JSP도 결국은 자바 언어로 변환이 된다.

그러나 JSP를 사용한다고 하여 모든 문제가 해결되는 것은 아니다. 검사 시스템에서 로봇이나 센서를 작동하는 기능이 있다고 할 때 이를 작동하기 위해 제공되는 드라이버들이 자바와 직접 연관되지 않는 경우가 대부분이다. 그렇다고 필요한 모든 드라이버를 자바로 새로 작성하는 것은 쉽지 않다. 자바에서는 이러한 문제 해결을 위하여 JNI(Java Native Interface)라는 것을 이용하여 다른 언어로 작성된 프로그램을 자바 DLL처럼 바꾸어 사용하는 기법을 제공한다.

웹과 자바의 특성을 이용하면 상당히 유연하면서도 효과적인 시스템을 구성할 수 있다. 그러나 웹과 자바도 상당한 취약점을 가지고 있다. 웹과 자바는 서로 다른 기종의 컴퓨터 시스템 사이의 커뮤니케이션에 있어 현재까지는 가장 유연한 플랫폼을 제공하고 있지만, 실시간 개념을 전혀 지원하지 않는다. 웹은 네트워크 상에 존재하는데 네트워크의 물리적 시간 지연 현상과 웹 서버의 처리 시간으로 인해 실시간 접근은 불가능하다. 자바 또한 인터프리팅 언어로 실시간 개념과는 거리가 멀다.

원격 제어와 관련된 용도로 웹과 자바 기법을 적용할 때 원격 시스템 자체

가 실시간 개념 체계라면 곤란한 문제점들이 발생하게 된다. 즉, 검사 장비가 여러 개의 서버 장비들로 구성되어있으면서 인터넷 상의 사용자와 통신을 하는 경우에 있어, 사용자 인터페이스에서 검사 장비를 이루는 서버 장비들과 서로 통신을 하는 경우에는 서버 장비들 간의 커뮤니케이션 지연 현상 때문에 시스템 자체가 불안해질 수 있다. 더구나 서버 장비들 간에 실시간 개념으로 제어를 주고 받아야하는 경우에는 사용자 인터페이스를 경유하는 통신은 불가능해진다.

원격 시스템을 구현하다보면 이런 경우가 많이 생기게 되는데 이때 웹과 자바 환경을 쓰기 위해서는 반드시 검사 장비를 구성하는 서버 장비들 간에 직접 통신을 하도록 설계해야하며, 네트워크에 연결된 사용자 인터페이스 입력에 응답하는 시간 동안에 시스템 자체가 위험한 환경에 빠지지 않도록 하는 절차를 반드시 고려해야만 한다. 만일 검사 장비 전체가 완전한 실시간 개념을 요구한다면 네트워크로 접근한다는 것 자체가 불가능한 일이므로 웹과 자바를 이용하여 구현한다는 것은 포기해야한다.

그러나 검사 장비를 실시간으로 적절히 제어해주는 제어 서버가 검사 현장에 존재하고, 이 검사 서버가 인터넷 상의 사용자 컴퓨터와의 통신 시간을 감내해주면서 검지능형으로 구성된다면 이 방법은 상당히 유용해진다.

① JSP

JSP는 자바를 기반으로 한 동적인 웹사이트 개발 언어로서, ASP(Active Server Pages), PHP(Professional Hypertext Preprocessor), CGI(Common Gateway Interface)와 같은 Server-Side 스크립트 언어이다.

웹사이트를 개발할 때 많이 사용하는 HTML, 자바스크립트(Javascript)가 클라이언트 사용자의 웹 브라우저 상에서 실행이 되는 반면에 JSP는 서버에서 실행되고, 실행된 결과를 클라이언트에 전달해 준다.

클라이언트에서 웹 서버에 JSP 파일을 요청하면 웹 서버는 JSP를 서블릿(Servlet)으로 만든 다음에 해당 서블릿을 실행하여 그 결과를 클라이언트에 보내준다. JSP도 결국은 자바 언어로 변환이 되는데 이것은 JSP 스크립트내에 자바로 프로그램 할 수 있고, 자바 코드나 JavaBean 컴포넌트를 끼워 넣을 수 있다는 것을 뜻한다.

JSP로 구현된 자바 프로그램은 사용자 웹 브라우저에서 실행되지 않는다. 사용자 웹 브라우저에 다운로드 된 웹 페이지에서 JSP로 구현되는 루틴을 클 하면 서버에 있는 JSP 프로그램이 서버에서 수행된다.

JSP와 같은 프로그램 기법은 사용자 웹 브라우저에서 웹 서버에 저장된 프로그램을 직접 구동하는 방법을 제공하므로 웹 서버와 통신을 위한 통신 프로그램을 사용자 웹 브라우저의 웹 프로그램에 포함할 필요가 없다.

② 애플릿과 JNI

애플릿 프로그램은 웹 서버에서 제공하는 웹 문서와 자바 프로그램이 사용자 웹 브라우저에 다운로드 되어 사용자 웹 브라우저에서 독자적으로 수행된다. 애플릿은 사용자 웹 브라우저에서 독립적으로 수행되는 하나의 프로그램이며, 웹 서버와의 통신을 위해서는 자바 통신 프로그램 모듈을 애플릿 프로그램 안에 작성해야한다.

애플릿을 사용하면 애플릿과 네트워크로 연결된 다른 컴퓨터의 네트워크 프로그램과의 통신을 자유자재로 구현할 수 있으나, 프로그램 코딩의 노력이 많이 필요하다.

이에 반해 JNI를 사용하는 경우, 더욱이 JSP 기법을 함께 사용하는 경우에는 애플릿 프로그램과는 매우 다른 특성을 갖게 된다.

JNI는 C나 C++과 같은 다른 언어로 구현된 프로그램을 Shared Library라 불리는 자바 라이브러리 형식으로 바꾸어 사용할 수 있게 하는 인터페이스를 제공하여 기존에 이미 다른 언어로 개발된 코드나 라이브러리를 그대로 사용할 수 있는 방법을 제공한다.

다른 언어로 작성된 프로그램들은 보통 여러 개의 프로그램으로 나뉘어져 있고, 해당 컴파일러가 이들을 연결시켜준다. 그러나 이 프로그램들을 JNI 기법으로 사용할 때에는 여러 프로그램들을 한꺼번에 묶어 사용하기가 매우 어렵다. 의미 있는 코드 생성을 위해 해당 프로그램 언어의 컴파일러를 사용하기는 하나 실행 시에는 자바 환경에서 실행되어 해당 언어의 실행 환경에 대한 지원을 전혀 받지 못하기 때문이다. 따라서 JNI를 이용할 때에는 자바 컴파일러에게 이러한 부분을 모두 프로그램을 통해 알려줘야 하는데, 예를 들어 프로그램 사이의 파라미터 전송의 경우도 모두 자바 환경으로 처리를

해줘야한다. 프로그램이 복잡해질 경우에는 이런 코딩이 불가능해지며, JNI는 JSP와 더불어 간단한 장비를 웹 서버에서 직접 제어하는 경우에 막강한 기능을 지원한다.

㉔ JNI 프로그램 기법

먼저 자바로 다음과 같이 HelloWorld.java 프로그램을 작성한다.

```
class HelloWorld {
    public native void displayHelloWorld();
    static {
        System.loadLibrary("hello");
    }
    public static void main(String[] args) {
        new HelloWorld().displayHelloWorld();
    }
}
```

이 프로그램에서 `public native void displayHelloWorld();` 라는 메소드가 정의 되어있는데 이것이 바로 다른 프로그램 언어로 짜여진 메소드이다.

`System.loadLibrary("hello");`는 `hellow.dll`의 형태로 `displayHelloWorld()`가 작성된 프로그램을 사용하겠다는 것을 알려준다.

다음은 `javac HelloWorld.java` 라는 명령을 통해 이 프로그램을 컴파일 한 후, `javah HelloWorld`를 실행하면 다음과 같은 헤더 파일이 생성된다.

```
#include <jni.h>
/* Header for class HelloWorld */
#ifndef _Included_HelloWorld
#define _Included_HelloWorld
#ifdef __cplusplus
extern "C" {
#endif
/*
 * Class:      HelloWorld
 * Method:     displayHelloWorld
 * Signature:  ()V
 */
JNIEXPORT void JNICALL Java_HelloWorld_displayHelloWorld(JNIEnv *, jobject);
#ifdef __cplusplus
}
#endif
#endif
```

```
#endif
#endif
```

이 헤더 파일은 C 언어로 작성되어 있으며, 다음은 C언어를 이용하여 `Java_HelloWorld_displayHelloWorld(JNIEnv *, jobject);` 에 대한 C 프로그램 `HelloWorldImp.c`를 다음과 같이 작성한다.

```
#include <jni.h>
#include "HelloWorld.h"
#include <stdio.h>

JNIEXPORT void JNICALL
Java_HelloWorld_displayHelloWorld(JNIEnv *env, jobject obj)
{
    printf("Hello world!\n");
    return;
}
```

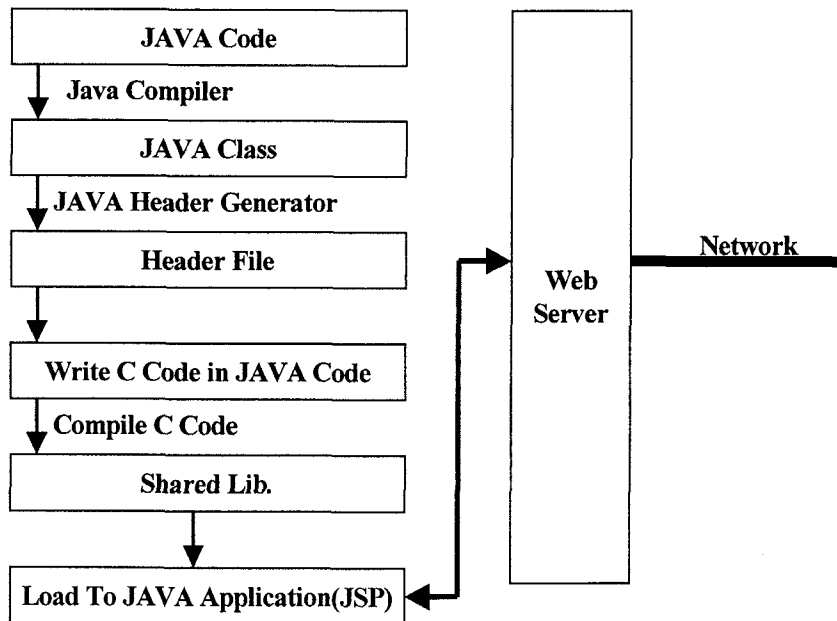


그림 5.1.2 JNI 프로그램 순서

JNI 프로그램 방식을 그림으로 표현하면 그림 5.1.2와 같다.

이 프로그램은 C 컴파일러를 이용하여 컴파일 하기 위해서는 다음과 같은 명령을 사용한다.

cl -Ic:\java\include -Ic:\java\include\win32 -LD HelloWorldImp.c -Fehello.dll
 그리고 원래 자바 파일을 실행하면 System.loadLibrary ("hello")에서 C로 작성된 프로그램을 공유 라이브러리로 이용하여 런타임에 실행하게 된다.

나. 3-tier 클라이언트/서버 모델

3-tier 구조는 클라이언트-서버 구조로 응용 처리를 전담하는 middle-tier를 두고 클라이언트는 모든 서비스를 middle-tier에게 요구하고 middle-tier는 데이터베이스 서버와 같은 최종 서버와 통신을 한 후 그 결과를 클라이언트에게 전달하는 형태로 구성된다.

3-tier에서 각 부분은 각기 다른 팀의 프로그래머들에 의해 각기 다른 언어를 사용하여 동시에 개발될 수 있는 유연성을 제공한다. 어떤 한 계층의 프로그램은 다른 계층에 영향을 주지 않고도 변경되거나 위치가 달라질 수 있기 때문에, 3-tier 모델은 새로운 요구사항에 대하여 어플리케이션을 쉽게 변경할 수 있게 한다.

본 과제에서 채택한 시스템 모델은 그림 5.1.3과 같이 웹&자바 서버, 데이터베이스 서버 및 원격지 검사 장비로 설계되었다.

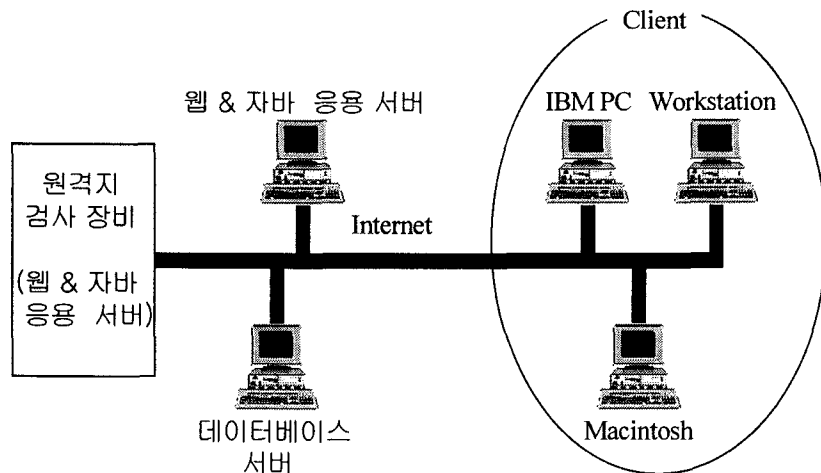


그림 5.1.3 3-tier 클라이언트/서버 모델

중간의 웹&자바 서버는 여러 가지 검사 장비에서 발생한 데이터를 저장한 원격지 데이터베이스를 접근하기 위해 공용으로 사용될 서버로 데이터베이스

스 접근을 위한 자바 응용 프로그램과 데이터베이스 접근을 위한 JDBC 드라이버를 제공한다. 검사 장비에 탑재된 웹&자바 서버는 클라이언트가 직접 검사 장비인 로봇을 제어하기 위해 필요한 자바 응용 프로그램을 제공하는 서버이다. 검사 장비 제어는 인터넷 상의 사용자 컴퓨터의 웹 브라우저가 검사 장비와 연결된 웹 서버를 통해 자바 응용 프로그램 서버에 저장된 해당 자바 프로그램을 다운로드 받아 수행하는 방식을 취한다.

이 구조는 검사 장비가 단일 로봇 장비와 같은 단일 검사 장비로 구현된 경우에 가능하며, 단일 검사 장비가 여러 개의 서브시스템으로 구성되어 있을 경우에는 적합하지 않다.

자바 응용 프로그램 서버와 웹 서버는 일반적인 3-tier 방식에서의 개념인 응용 프로그램 서버의 역할을 하는 것은 아니다. 자바 응용 서버는 애플릿, JSP, JNI, 자바 스크립트 등으로 구현된 검사 시스템 제어 및 데이터베이스 접근을 위한 응용 프로그램을 제공하며, 웹 서버는 이를 외부 사용자에게 브라우저를 통해 연결해주는 역할을 한다.

3. 원격 검사 시스템 설계 및 개발

본 과제에서는 웹과 자바, 그리고 Windows 원격터미널을 이용한 방식으로 여러 검사 장비를 대상으로 원격 시스템을 구축하였다.

웹과 자바를 이용하여 JNI를 이용한 간단한 검사 기계 원격 제어와 애플릿을 이용한 고도로 복잡한 검사 장비 시스템 원격 제어를 동시에 구현하였다. 또한 기본적인 원격 데이터베이스 처리를 위한 자바 애플리케이션도 구현하였다.

애플릿을 이용한 원격 검사 장비 제어 대상은 원자로 초음파 탐상 장비(RISYS : Reactor Inspection System)와 제어봉 지지관 안내핀 검사 장비를 선택하였으며, JNI를 이용한 원격 검사 제어 대상으로는 파이프 초음파 검사 로봇을 선택하였다. 또한 RISYS는 Window 원격터미널 기능을 이용하여 Window 끼리 원격지에서 제어할 수 있도록 수정하였다.

RISYS는 수중 검사 로봇, 레이저 위치 지시기, 초음파 신호 분석 장비, 그리고 중앙 제어 컴퓨터로 구성된다. 수중 검사 로봇은 수중 원자로에서 원자로 벽면에 자석 바퀴를 이용하여 부착된 상태로 레이저 위치 지시기에 의해 유

도되어 이동하면서 원자로 벽면의 초음파 신호를 수집한다. 이 로봇은 stand-alone으로 동작하지 않고 레이저 위치 지시기 및 초음파 탐상 장비와 함께 협력하여 작업을 수행한다.

가. 웹을 이용한 RISYS의 원격 제어 시스템 구현

웹과 자바를 이용하여 RISYS의 장비들을 구동하려면 몇 가지 문제점 발생한다. 각 시스템의 정보를 원거리에 있는 사용자의 웹 브라우저 상에서 인식하고 다시 각 시스템에 명령을 전달하자면 처리 속도에 따른 타이밍상의 문제점이 발생할 수 있다. 예를 들어 로봇의 레이저 감지 반응이 중단되었을 경우 로봇의 검사 수행은 중지되어야 하며 동시에 이를 레이저 위치 지시기에 전달해야 하는데 이러한 타이밍이 제대로 맞지 않는다면 레이저 위치 지시기와 로봇은 따로 작동할 가능성이 매우 높아진다. 또한 RISYS의 장비들을 한꺼번에 제어하기 위한 GUI의 구성도 복잡해진다.

(1) 시스템 설계

각각의 기능이 별도의 모듈로 구성되어 개별적으로 구동하는 조건에서는 장비 내의 여러 구동 장치에 대한 상호 정보 공유와 제어에 문제가 많다. 따라서 이런 경우에는 장비 자체를 제어할 수 있는 제어 프로그램을 구현하고 이 제어 프로그램과 웹이 연동하는 구조를 갖는 것이 효율적이다.

원래의 RISYS는 검사 장비로 검사 로봇, 레이저 위치 지시기, 초음파 신호 분석 장비, 그리고 이 장비들을 제어하는 중앙 제어 컴퓨터로 구성되어 있으며, 검사 장비들과 중앙 제어 컴퓨터는 시리얼 통신을 한다.

원격 검사 시스템으로 구현하기 위하여 먼저 모든 장비 사이의 통신 기법을 TCP/IP로 바꾸어야 하며, 중앙 제어 컴퓨터의 제어 프로그램만이 네트워크에 사용자의 웹 브라우저와 직접 통신하면서 검사를 진행할 수 있도록 한다.

이 시스템을 구성하는 각 검사 장비는 CPU를 탑재하고 독자적이 작업을 수행하되, 중앙 제어 컴퓨터의 제어 프로그램 명령을 수행하면서 서로 협력한다. 따라서 JSP와 JNI 기법을 이용하여 구현하기에는 그 방법이 적절하지 않아 애플릿 기법을 이용하였다.

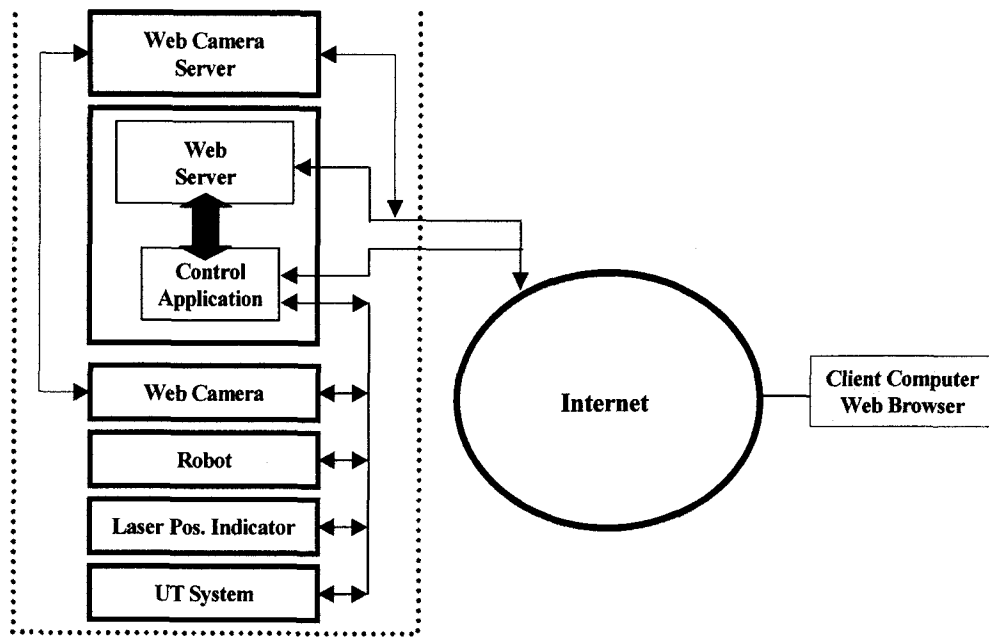


그림 5.1.4 웹을 이용한 원격 RISYS 구성도

사용자의 웹 브라우저는 인터넷 상에 연결되어 있는 웹 서버에서 검사 장비의 중앙 제어 프로그램을 제어할 수 있는 애플릿을 전송 받아 직접 검사 장비의 중앙 제어 프로그램과 통신한다. 검사 상황을 모니터링하기 위하여 웹 카메라를 제공하여 실시간으로 검사 상황을 동영상으로 제공한다. 검사 장비 부분은 모두 C 계열의 프로그램 언어로 구현되어있다.

(2) 시스템 구현

이 시스템은 Windows 2000 Server를 탑재한 IBM Pentium PC, 아파치 웹 서버 1.3.19, JDK 1.3, Jakarta-tomcat-3.2.1, Visual C++ 6.0, 그리고 웹 카메라 서버를 이용하여 구현하였다.

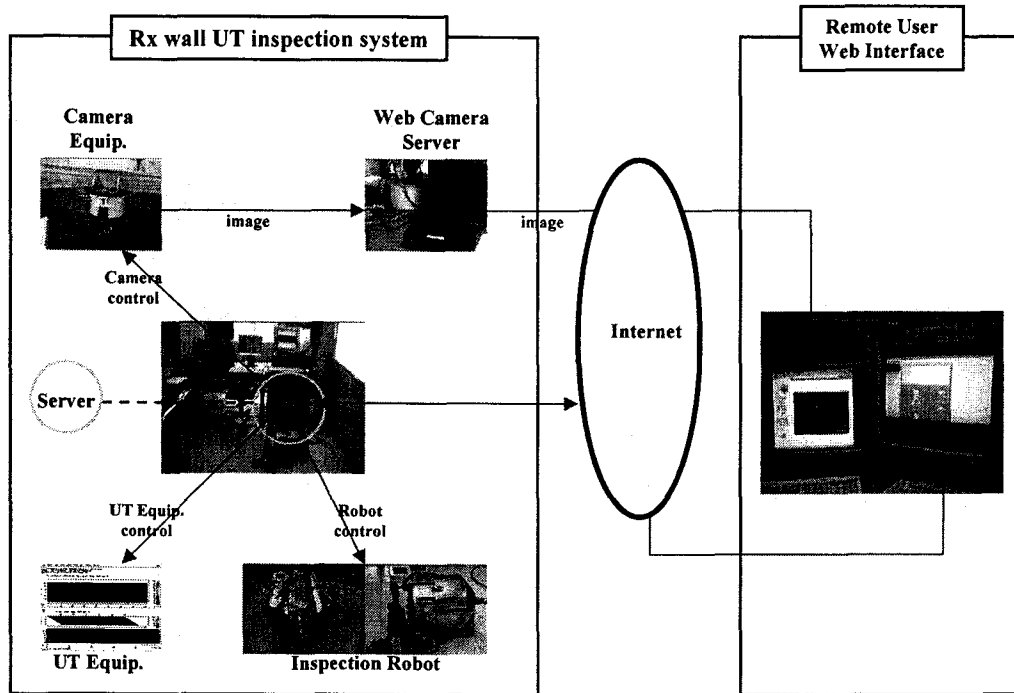


그림 5.15 원격 RISYS

RISYS의 서버에는 검사 장비들의 제어를 위한 중앙 제어 프로그램과 원격지 클라이언트 웹 브라우저와의 통신을 위한 TCP/IP 통신 프로그램, 그리고 웹 서버가 함께 탑재되어 있다. 웹 서버는 따로 분리하여 다른 컴퓨터에 설치하여도 무방하다.

그림 5.15의 오른쪽 그림은 클라이언트, 즉 원격지 사용자의 웹 브라우저 화면이다. 그림의 왼쪽 화면은 원격 RISYS의 웹 카메라 서버로부터 전송 받은 검사 로봇의 작업 모습이며, 오른쪽 화면은 RISYS를 원격 검사하기 위해 자바로 구현된 사용자 웹 브라우저 인터페이스로 그림 5.16과 같이 구현되어 있다. 웹 카메라 기능은 상용 웹 카메라 서버를 이용하여 제품에서 제공하는 어플리케이션을 그대로 사용하였다.

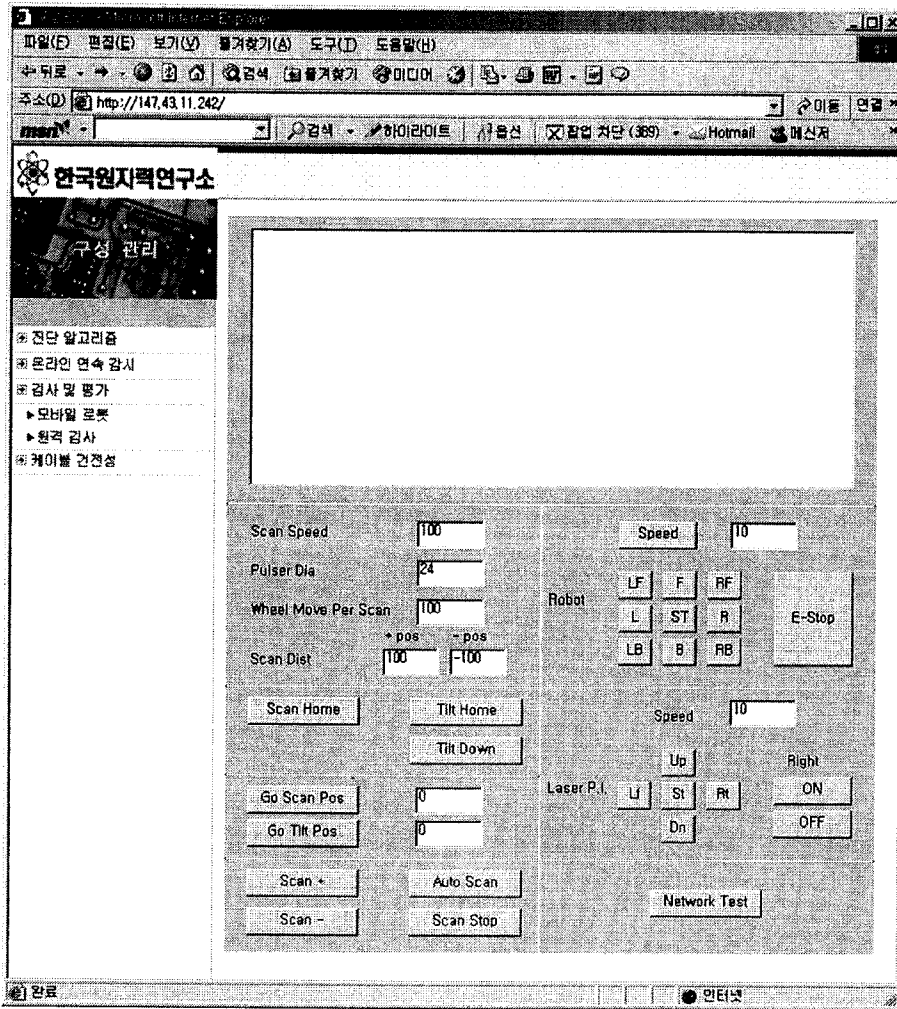


그림 5.1.6 원격 RISYS 클라이언트 웹 브라우저 인터페이스

웹 브라우저 인터페이스는 통신 정보 및 검사 정보를 디스플레이 해주는 정보 창, 초음파 신호 수집 및 분석을 위한 기본 세팅 영역, 스캐닝 테스트 영역, 검사 로봇과 레이저 위치 지시기 수동 이동용 제어 영역, 그리고 자동 검사용 제어 영역과 네트워크 테스트 영역으로 구성되어 있다.

RISYS의 제어를 동시에 여러 명이 하면 작업에 혼란이 올 수 있으므로, 검사 시에는 한사람만 수행 할 수 있도록 RISYS 서버 프로그램에서 조치를 하였다. 그림 5.1.7는 RISYS의 중앙 제어 컴퓨터에 탑재된 검사 장비 제어용 중앙 제어 프로그램 인터페이스이다.

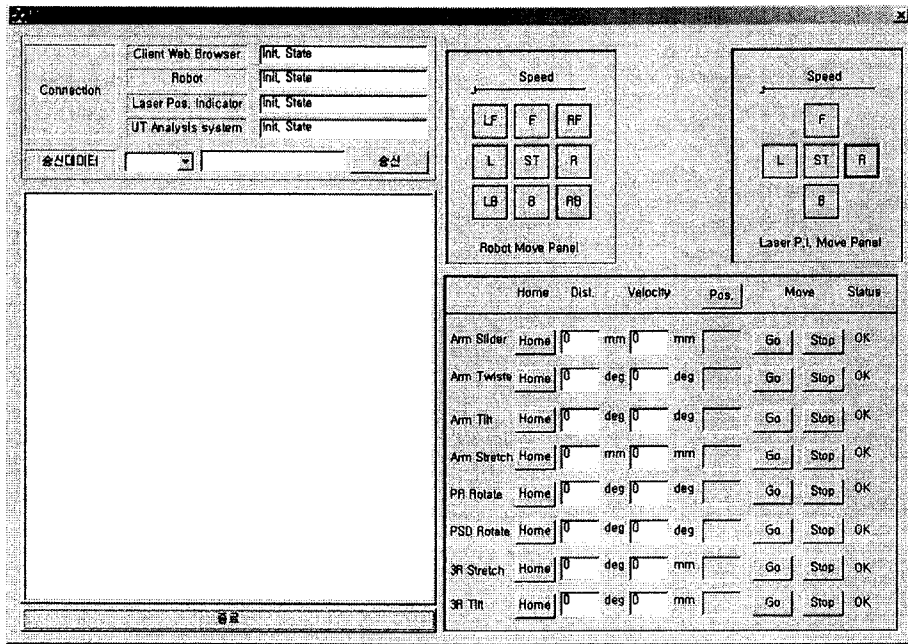


그림 5.1.7 RISYS 중앙 제어 서버 인터페이스

이 프로그램은 Visual C++6.0으로 구현되었다. 인터페이스의 왼쪽 상단은 사용자 웹 브라우저, 검사 로봇, 레이저 위치 지시기, 그리고 초음파 신호 분석 장비와의 네트워크 연결 상태를 나타내는 영역으로 구현되었다.

인터페이스 화면 왼쪽 하단의 정보 창은 검사 장비들 및 웹 브라우저와의 통신 데이터 등 검사에 관련된 모든 정보를 디스플레이 한다. 인터페이스 화면 오른쪽은 검사 로봇과 레이저 위치 지시기 수동 이동용 제어 영역, 그리고 검사 로봇 수동 제어 영역으로 구성되어있다.

나. Windows 원격 터미널을 이용한 원격 제어 시스템 구현

RISYS의 수중 검사 로봇은 레이저를 따라 이동되므로 항상 레이저 감지 여부를 알고 있어야 하며 만일 레이저 반응이 중지되면 즉시 레이저 위치 지시기에 알려야 한다. 검사 로봇에 장착된 매니퓰레이터로 초음파 신호를 수집하기 위해서는 로봇과 초음파 신호 분석 장비 사이에 검사에 대한 정보를 서로 교환해야만 한다.

이 시스템은 시리얼 통신을 이용하여 각 검사 장비와 중앙 제어 컴퓨터가 통신하며 구동되므로 초단거리(20M)내의 원격 검사만 수행할 수 있었다. 이

장비의 중앙 제어 프로그램을 장거리 원격지 컴퓨터에서 제어하기 위한 가장 손쉬운 방법이 Windows에서 제공하는 원격 터미널 기능을 이용하는 것이다.

MS Windows 2000부터는 원격터미널이라는 개념을 제공한다. 원격터미널 서버를 설치한 윈도우즈 PC를 터미널 클라이언트 S/W를 설치한 윈도우즈 PC에서 접근하는 개념으로 서버 PC를 완전히 클라이언트 PC처럼 사용할 수 있게 하는 개념이다.

UNIX 상에서 Telnet을 이용하여 터미널 상에서 서버에 접속하여 작업을 수행하는 것은 사용자 인터페이스가 극히 제한되어 있지만 Windows 2000 원격터미널은 서버의 화면 자체를 클라이언트에서 그대로 사용한다. 따라서 X-Window 터미널과 그 개념이 더 비슷하다.

Windows 원격터미널을 이용하는 경우는 서버나 클라이언트 모두 Windows 기반 PC를 사용해야만하고, 서버를 통제로 열어주는 상황이 생기므로 보안에 심각한 문제를 일으킬 수 있다.

원격지 실험실 검사 장비

클라이언트 컴퓨터

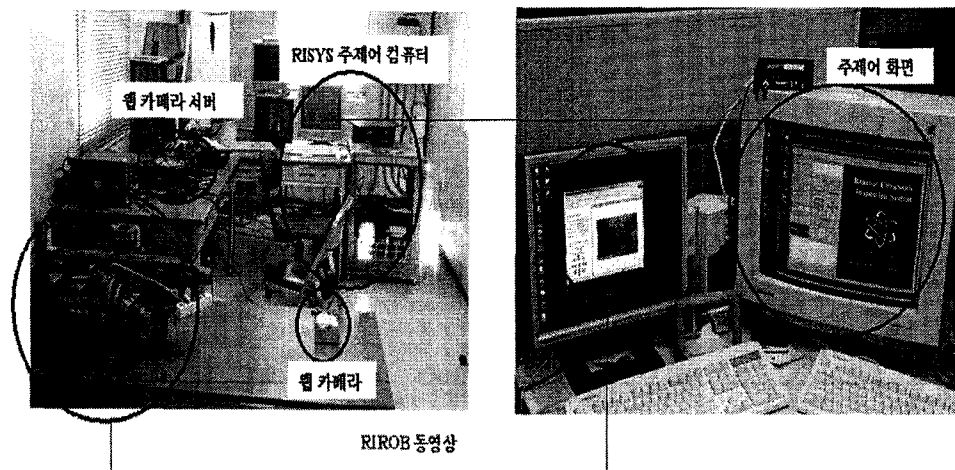


그림 5.18 Windows 원격 터미널을 이용한 원격제어 시스템

그림 5.1.8의 왼쪽 주 제어 컴퓨터는 검사 장비 중앙제어 컴퓨터로 Windows 원격터미널 서버로 세팅되어 있으며, 오른쪽의 그림은 원격지 클라이언트 컴퓨터에서 원격터미널 서버에 접속하여 서버의 화면을 그대로 띄운 모습을 보여준다.

기존에 Windows 상에서 제작된 프로그램들은 모두 원격터미널 기능을 이용해 사용할 수 있다. 다만 Windows 버전이 업그레이드되면서 O/S가 조금씩 달라져 이전 버전에서 사용한 프로그램 언어의 메소드들이 조금씩 변하는 경우가 있다는 것은 반드시 알아두어야 한다.

이는 Windows 98에서 아무 문제없이 수행되던 게임 프로그램들 중 일부가 Windows 2000에서 문제를 일으키는 경우와 마찬가지로다. 이러한 일이 발생하는 이유는 여러 가지가 있을 수 있겠지만, 본 과제를 수행하면서 직접 알게 된 것은 이런 문제가 주로 I/O쪽에서 발생했다는 것이다.

Windows 시스템이 외부의 이벤트를 처리하는 방법에 있어 초기에 Polling이나 인터럽트 개념을 사용한 것과는 달리 버전이 올라가면서 X-Window의 이벤트 핸들링 방식을 채택하면서 이러한 문제들이 계속 발생했었다. MS Windows 프로그래밍을 하게 되면 대부분 리소스에 대해 이벤트 핸들링을 하게 되는데, 이 이벤트 핸들링의 방식이 O/S의 변화에 따라 조금씩 달라지면서 생기는 현상으로 이해하면 된다.

Windows 98에서 잘 수행되던 통신 프로그램이 Windows 2000에서는 전혀 동작되지 않는 경우가 있었는데, 이는 Windows O/S가 업그레이드되면서 통신에 필요한 핸들의 사용 방법이 변한 것이 이유였다. Visual C++의 경우 제공하는 라이브러리 설명에 Windows 2000에서 사용할 때와 그 이하 버전의 O/S에서 사용할 때 달라지는 메소드들의 파라미터에 대하여 정의가 되어 있으므로 위와 같은 문제가 발생할 경우 문제가 되는 코드들에 대해서는 반드시 확인해야만 한다. 이런 문제는 대부분 I/O와 같이 시스템 리소스를 사용하면서 이벤트를 핸들링 하는 부분에서 발생하게 된다.

다. 제어봉 안내관 지지편 검사 시스템의 원격 제어 시스템화

제어봉 안내관 지지편 검사 시스템은 본 대과제의 하부 과제로 수행된 과제의 결과물이다.

제어봉 안내관 지지편 검사 시스템에 대한 설명은 다음절에서 상세히 기술하고 있으니 생략한다. 본 과제에서는 제어봉 안내관 지지편을 검사하기 위한 검사 로봇의 원격 제어를 위한 웹 어플리케이션과 웹 접속을 위한 장비 제어 프로그램을 추가하였는데, 그 개념은 그림 5.1.9와 같다.

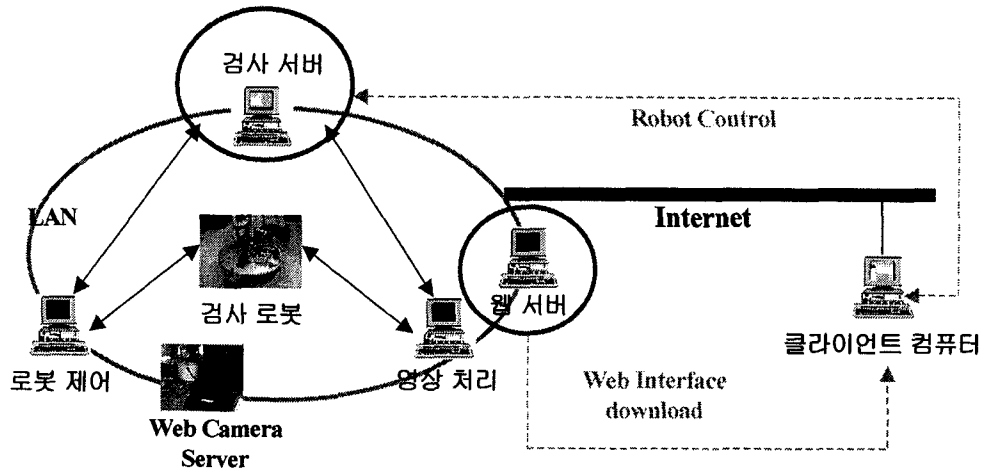


그림 5.1.9 원격 제어봉 안내관 지지편 검사 시스템 개념

추가된 웹 어플리케이션은 검사 로봇 제어를 위한 웹 브라우저 인터페이스, 검사 시스템과 웹 브라우저의 명령 송수신을 돕기 위한 중앙 제어 프로그램, 원격지 검사를 위한 웹 카메라 기능이다. 중앙 제어 프로그램은 검사 장비들인 검사 로봇, 로봇제어 컴퓨터, 영상처리 컴퓨터 사이를 연결해주며, 원격지 클라이언트 웹 브라우저의 검사 명령을 받아 이를 검사 장비들에게 다시 넘겨준다. 다음 그림 5.1.10은 중앙 제어 프로그램의 인터페이스이며, 그림 5.1.11은 웹 브라우저 인터페이스이다. 원격 RISYS 구현에서 사용된 기술이 거의 그대로 사용되었으며, 인터페이스 또한 상당히 유사하게 구현되어 있으므로 자세한 설명은 생략한다.

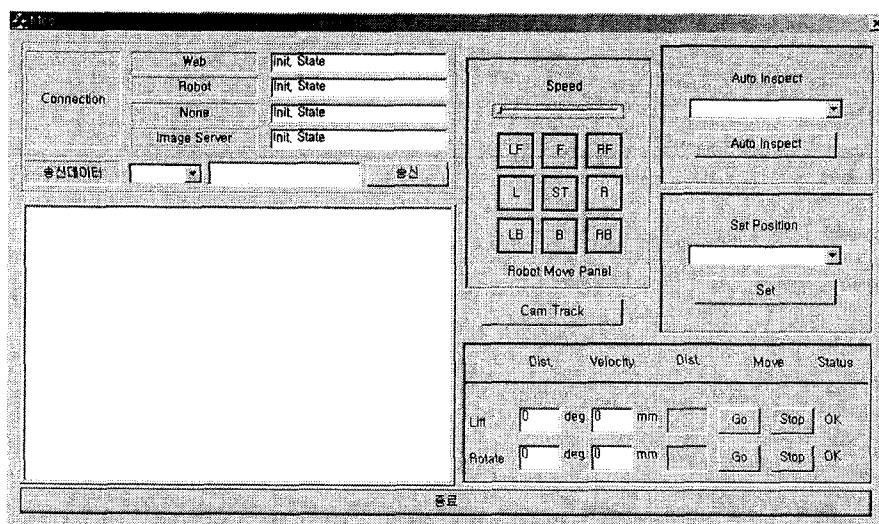


그림 5.1.10 원격 제어봉 안내관 지지편 검사 시스템 중앙 제어 인터페이스



그림 5.1.11 원격 제어봉 안내관 지지핀 검사 시스템 웹 브라우저 인터페이스

그림 5.1.12는 제어봉 안내관 지지핀 검사 로봇과 검사 대상물, 그리고 이를 원격 제어하기 위해 구현된 원격 제어 프로그램의 구현 모습이다.

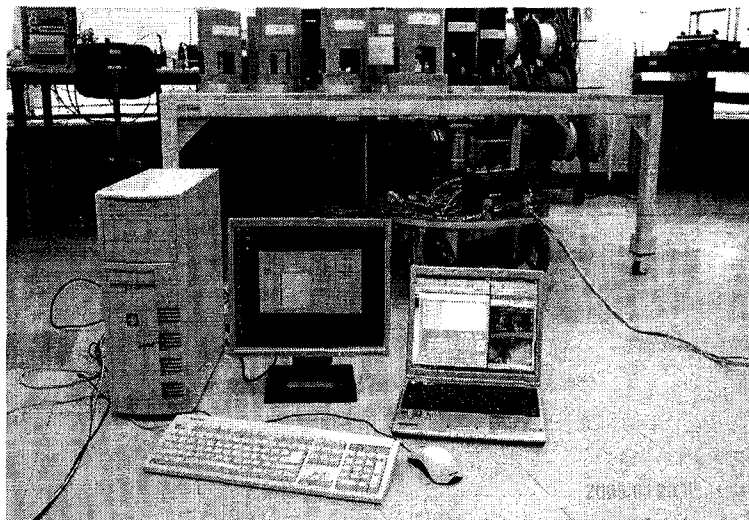


그림 5.1.12 원격 제어봉 안내관 지지핀 검사 시스템 구현 화면

라. 원격 파이프 검사 장비 구현

파이프 검사 장비는 자석 바퀴가 달린 소형 로봇을 파이프에 부착하여 검사 로봇이 파이프를 원주 방향으로 이동하면서 초음파 검사를 수행하는 장비로 프로토타입 형태로 기존에 제작된 연구물로 로봇의 모습은 그림 5.1.13과 같다. 이 로봇은 바퀴 구동 모터 2개, 초음파 스캔 모듈 및 스캐닝용 모터 1개로 구현된 CPU가 없는 단순 기계 장비이다.

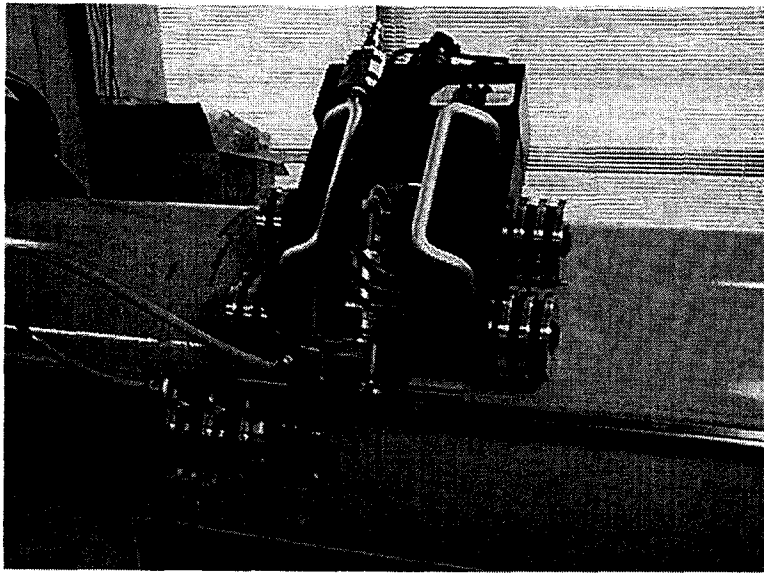


그림 5.1.13 파이프 검사 로봇

본 과제에서는 CPU가 없이 기계적으로만 구성된 단순 검사 장비의 원격 제어를 위한 방법으로 애플릿이 아닌 JNI와 JSP 기법을 이용하여 원격 시스템을 구현하였다.

웹을 이용하여 원격지에서 파이프 검사 로봇을 구동하기 위해서는 웹 브라우저가 탑재된 클라이언트 컴퓨터, 로봇 제어 컴퓨터, 웹 서버, 로봇 모터 구동 라이브러리 및 구동 모듈 등이 필요한데 이들로 구성된 시스템 내부 구조는 그림 5.1.14와 같다.

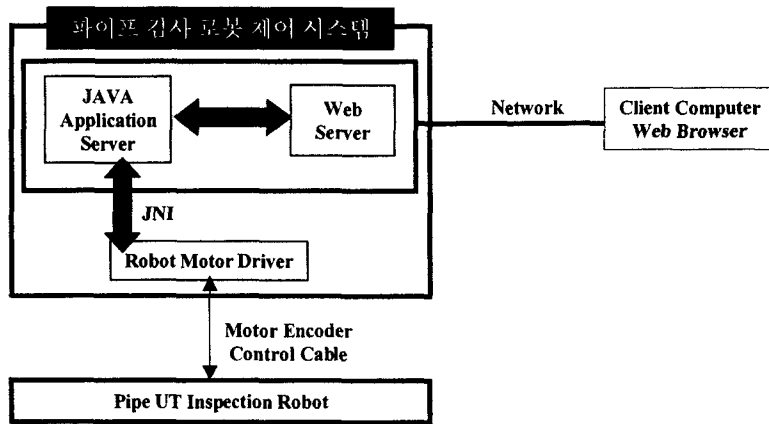


그림 5.1.14 원격 파이프 검사 시스템 구조

웹 서버는 파이프 검사 로봇 제어 컴퓨터 내에 탑재되어있는데, HTML, JSP, 자바 스크립트 등으로 구현된 로봇 제어 인터페이스 화면을 제공한다. 네트워크에 연결된 사용자는 웹 브라우저를 이용하여 원격 파이프 검사 장비의 웹 서버에 연결하여 로봇 제어 인터페이스를 다운로드받아 실행한다. 그림 5.1.15는 HTML과 자바 스크립트로만 구현된 웹 브라우저 인터페이스이다.

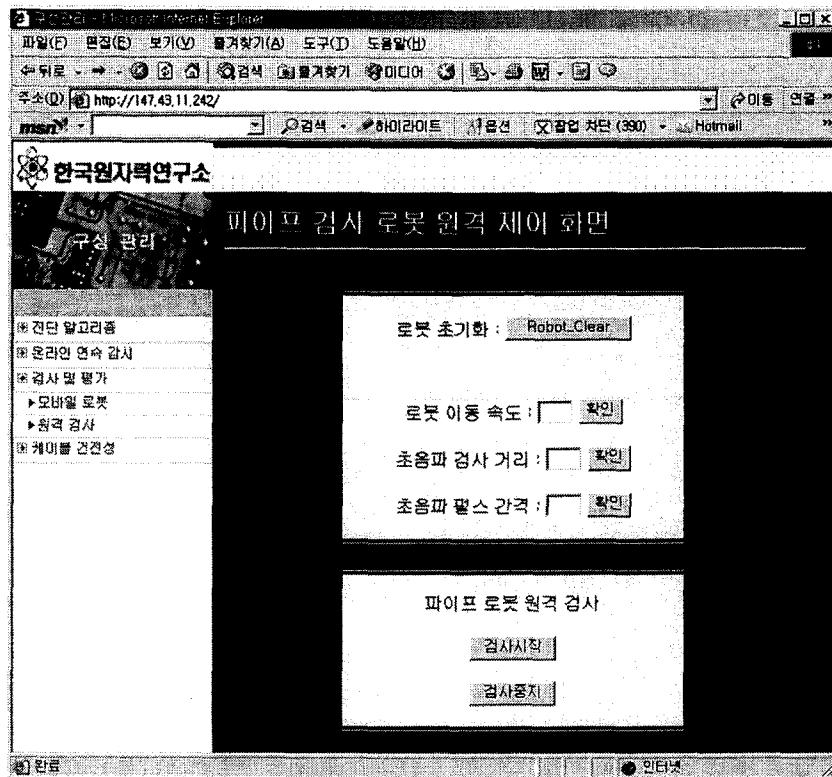


그림 5.1.15 원격 파이프 검사용 웹 브라우저 인터페이스

원격지 로봇을 제어하는 시스템이므로 로봇 제어를 위한 화상 장비도 필요하다. 이 부분은 웹 카메라 서버를 이용하여 로봇의 움직임을 사용자 웹 브라우저에 전달하도록 구현하였다.

문제는 인터페이스를 구성하는 웹 페이지에서 웹 서버에 저장되어있는 C언어로 구현된 모터 드라이버를 구동하는 것이다. 자비 기술에서 설명했듯이 자바에서는 이러한 문제 해결을 위해 JNI라는 인터페이스 기법을 제공한다. JNI 기법을 이용하면 자바 언어와 C 언어를 함께 사용하여 웹과 연결할 수 있다.

원격 파이프 검사 장비를 이용하기 위해서는 먼저 로봇의 모터 구동 드라이버를 클리어 시켜야한다. 이 부분에 대해 JNI와 JSP를 이용하여 구현한 코드 중 일부를 소개하면서 자세한 내용을 기술한다.

원격지 사용자는 웹 브라우저로 파이프 검사 시스템의 웹 서버에 접속하고, 다음과 같은 HTML 페이지를 받아 웹브라우저에서 실행하게 된다.

[HTML 프로그램]

```
<html>
<head>
<font color=#ffffff size=5>
파이프 검사 로봇 원격 제어 화면
</font>
...
</head>
<BODY bgcolor="#000000">
...
<!-- 로봇 DSP 보드 초기화 -->
<script language="JavaScript">
function runBoardInit() {
    pfrm = document.B_Clear;
    <!-- 결과 값 디스플레이를 위한 윈도우 생성 -->
    var openval = "resizable = no, status = no, scrollbars = no,
    height = 240, width = 320, left = 200, top = 200";
    var openurl = "";
    var newwin = window.open(openurl,"result_win",openval);
    newwin.focus();
    return true;
}
</script>
<table border=0 cellpadding=0 cellspacing=3 align=center width=60%>
<br>
```



```

<form name=B_Clear method=post target=result_win method=post action
= "/jsp/PIPE/board_init.jsp" onSubmit="return runBoardInit();">
    로봇 초기화 : <input type=submit value=Robot_Clear>
</table>
...
</body></html>

```

웹 브라우저 화면에서 파이프 로봇 모터 드라이버 클리어에 해당하는 Robot_Clear 버튼을 누르면 HTML 문서중의 “/jsp/PIPE/board_init.jsp” onSubmit = “return runBoardInit();” 라인이 실행된다. 웹 서버로부터 리턴 값을 받고 이를 디스플레이 해주는 기능이 필요한데 이는 현재 사용자 화면을 결과 값 창으로 바꾸기 때문에 이 결과를 별도로 처리하기 위한 runBoardInit() 이라는 자바 스크립트를 수행하면서, 파이프 로봇의 DSP 보드를 초기화하기 위해 웹 서버에 저장되어 있는 board_init.jsp 프로그램을 실행한다. 아래의 board_init.jsp는 DPS 보드 초기화 클래스인 Init 클래스의 인스턴스를 생성하고 Init.java에 구현된 initialize()라는 메소드를 수행하여 결과 값을 돌려준다.

[board_init.jsp 프로그램]

```

@ page contentType = "text/html; charset=KSC5601" %>
<%@ page import="java.sql.*" %>
<%@ page import="java.io.*" %>
<%@ page import="java.util.*" %>
<%@ page import="java.text.*" %>
<%@ page import="Init" %>
<%
    /* JNI 객체 생성 */
    Init b_init = new Init();
    /* JNI Call */
    out.println("<br><br>LaserOn JNI Call Start...");
    int result=b_init.initialize();
    out.println("<br>JNI Call OK...");
%>

```

자바 프로그램에서는 C로 구현된 DPS 보드 라이브러리를 직접 사용하지 못하므로 C 언어와 자바 프로그램을 연결하는 JNI 기법을 사용해야한다.

board_init.jsp에서 사용한 Init 클래스는 Init.java라는 프로그램에서 만들어진 것으로 다음과 같다.

[Init.java 프로그램]

```
public class Init {
    public native int initialize();
    static {
        System.loadLibrary("init_lib");
    }
    public static void main(String[] args) {
        new Init ().initialize();
    }
}
```

이 프로그램에서 `public native int initialize();` 라는 메소드가 정의 되어있는데 이것이 바로 다른 프로그램 언어로 짜여진 메소드이다.

`System.loadLibrary("init_lib");`는 `init_lib.dll`의 형태로 `initialize()`가 작성된 프로그램을 사용하겠다는 것을 알려준다.

다음은 `javac Init.java` 라는 명령을 통해 이 프로그램을 컴파일 한 후, `javah Init`를 실행하면 다음과 같은 헤더 파일이 생성된다.

[Init.h 프로그램]

```
/* DO NOT EDIT THIS FILE - it is machine generated */
#include <jni.h>
/* Header for class Init */
#ifdef _Included_Init
#define _Included_Init
#ifdef __cplusplus
extern "C" {
#endif
/*
 * Class:    Init
 * Method:   initialize
 * Signature: ()I
 */
JNIEXPORT jint JNICALL Java_Init_initialize
    (JNIEnv *, jobject);
#ifdef __cplusplus
}
#endif
#endif
```

이 헤더 파일은 C 언어로 작성되어 있으며, 다음은 C언어를 이용하여 `Java_Init_initialize(JNIEnv *env, jobject obj)` 에 대한 C 프로그램 `InitImp.c`

를 다음과 같이 작성한다.

[Initlmp.c 프로그램]

```
#include "Init.h"
#include "pcdsp.h"
#include <stdio.h>
JNIEXPORT int JNICALL
Java_Init_initialize(JNIEnv *env, jobject obj)
{
    int16 error;
    error=dsp_init(0x320);
    if(error != DSP_OK){
        return -1;
    }
    ....
    return 0;
}
```

Initlmp.c 프로그램은 C 컴파일러를 이용하여 `cl -Ic:\java\include -Ic:\java\include\win32 -LD Initlmp.c -Feinit_lib.dll`로 컴파일 한다.

그리고 원래 자바 파일을 실행하면 `System.loadLibrary ("init_lib")`에서 C로 작성된 프로그램을 공유 라이브러리로 이용하여 런타임에 실행하게 된다.

나머지 로봇의 구동에 대한 모든 명령도 이와 같은 방법으로 구현되었다.

마. 원격 데이터베이스 어플리케이션 구현

원격 데이터베이스 관련 어플리케이션은 데이터가 발생하고 저장해야하는 모든 시스템에서 공히 사용할 수 있는 분야이다. 원격지의 데이터베이스 서버에 접근하여 데이터베이스 작업을 수행하는 인터페이스는 모두 웹 서버에서 제공할 수 있는데, 웹 브라우저에서 자바를 이용하여 원격지의 데이터베이스 시스템을 접근하기 위해서는 DBMS와 웹과의 미들웨어인 JDBC 드라이버가 필요하다. 그림 5.1.16은 웹을 이용한 원격 데이터베이스 접근을 위한 구조를 보여준다.

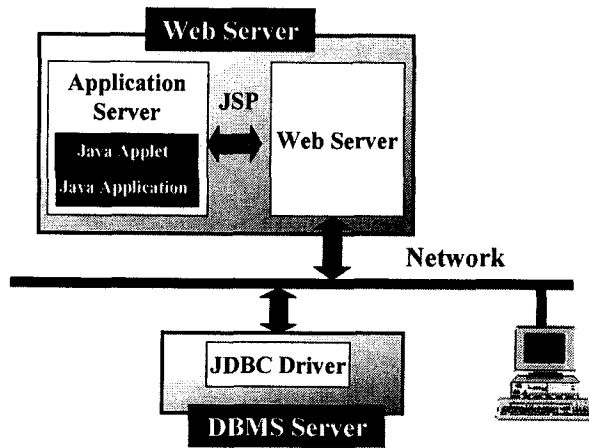


그림 5.1.16 웹을 이용한 원격 데이터베이스 접근 구조

구현 환경 구축을 위해 원격 데이터베이스 서버로 Windows 2000 Server를 탑재한 IBM Pentium PC를 선택하였으며, 데이터베이스 엔진은 MS-SQL 7.0을 사용하였다. 웹 서버로는 아파치 웹 서버를 사용하였고, 웹과 데이터베이스의 연결을 위한 JDBC로 WebLogic 사의 제품을 사용하였다.

원격 데이터베이스 어플리케이션 구현은 극히 제한된 부분에 대해서만 수행되었다. 현재까지 개발된 원격 데이터베이스 시스템 어플리케이션은 데이터베이스 접근 및 데이터베이스 작업, 차트 디스플레이, 그리고 다른 웹 서버에서 자료를 가져와서 원격지 데이터베이스 서버에 저장하는 자바 프로그램 등이다.

다음 그림 5.1.17은 케이블 건전성과 관련된 항목에 대하여 가상의 데이터베이스를 구축하기 위해 데이터를 입력하기 위해 자바 애플릿으로 구현된 화면이다. 데이터베이스의 데이터 검색은 텍스트 타입 데이터 검색과 멀티미디어 타입 데이터 검색, 그리고 이미지나 차트 타입의 검색 등 여러 가지가 있다. 그림 5.1.18은 텍스트 타입의 데이터를 원격지 데이터베이스에서 검색하여 웹 브라우저로 가져온 뒤 가져온 데이터를 차트로 표현한 자바 어플리케이션 화면이다. 차트는 column, Bar, Line, Pie, Stack 등으로 표현할 수 있으며, 3D로도 지원한다. 이 차트 표현을 위하여 EspressViewer를 사용하였다.

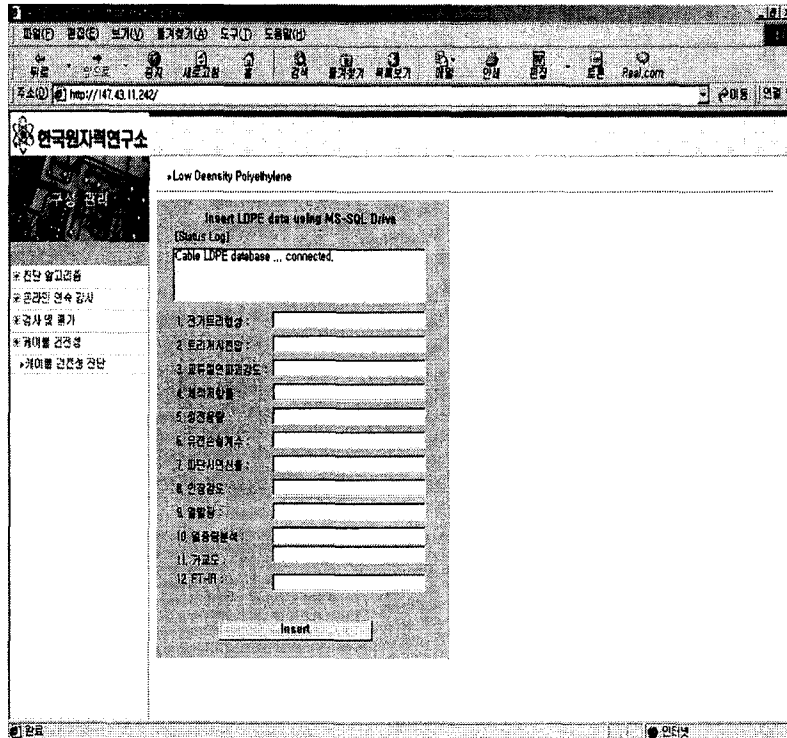


그림 5.1.17 원격 데이터베이스 입력 화면

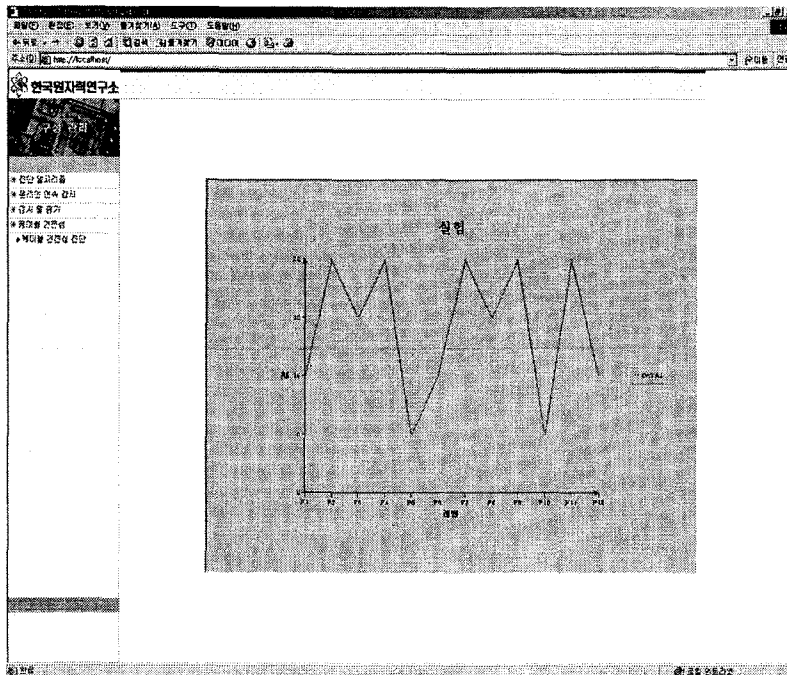


그림 5.1.18 원격지 데이터베이스 자료의 차트 표현

제 2 절 제어봉 안내관 지지핀 검사 로봇

1. 제어봉 안내관 지지핀 검사

제어봉 안내관 지지핀은 제어봉 안내관을 upper support plate에 정확히 정렬 되도록 하는 역할을 하는 기계 부품이다. 원자로 가동시 고압, 고온, 고속의 유체에 노출되어 변형 및 손상이 생길 수 있으며 파손시 loose part의 원인이 되기도 하며 제어봉 인출을 어렵게 하는 원인이 될 수도 있다. 현재 5년 주기로 한 번씩 육안 및 초음파 검사를 하도록 되어있다. 검사 시 약 20m 위의 제어 시스템에서 검사장비의 초음파 탐촉자를 직경 25mm 정도의 지지핀에 밀착하여 검사를 수행한다. 기존의 장비는 바닥에 궤도를 설치하고 검사 장치가 궤도 위를 이동하면서 이동체 위에 부착된 매니플레이터로 지지핀을 검사하도록 되어있다. 궤도설치의 불편 할 뿐만 아니라 검사체의 무게도 수 백 Kg 정도로 운반 및 설치 시 불편하여 본 과제에서는 초소형의 로봇을 원격 제어하여 지지핀의 검사를 수행할 수 있도록 하였다.

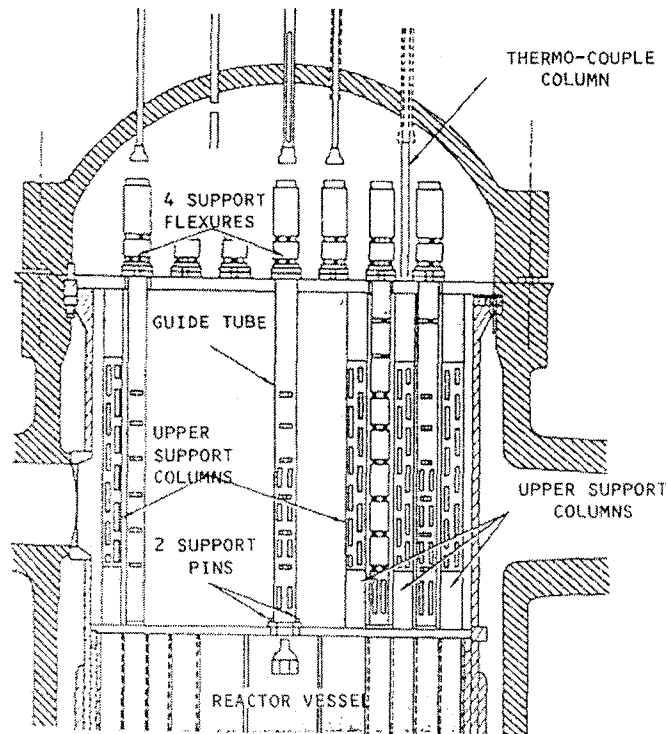


그림 5.2.1 제어봉 지지핀의 위치

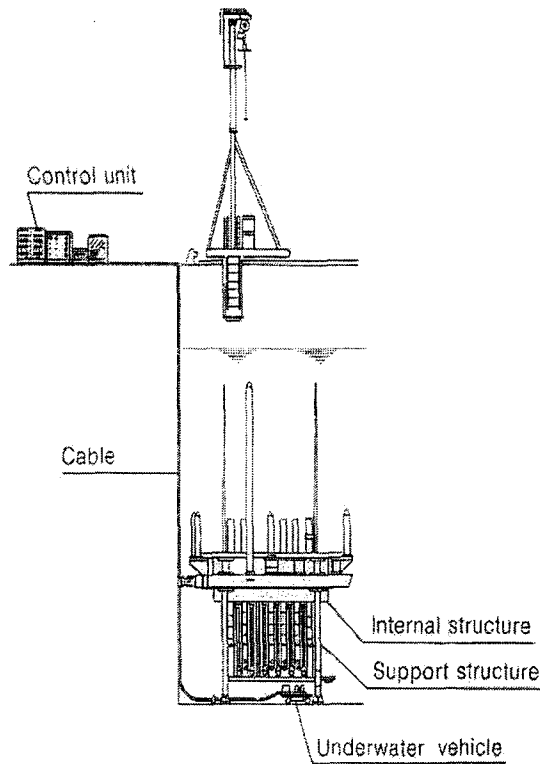


그림 5.2.2. 지지핀 검사환경

2. 안내관 지지핀의 자동 검사

안내관 지지핀은 건전성을 입증하기 위하여 정기적으로 육안 및 초음파에 의한 검사를 하여야한다. 본 과제에서는 초음파 검사를 위한 자동화 검사방법을 주로 연구하였다. 소형의 이동식 검사장비로 대상기기를 검사할 시에는 장비(이하 이동로봇)의 정확한 위치가 매우 중요하다. 대상 검사체인 제어봉 안내관의 지지핀은 원자로의 upper support plate에 안내관과 일정한 거리 및 가도를 가지고 규칙적으로 배열되어 있다. 따라서 안내관의 중심과 지지핀의 중심을 자동으로 정확히 찾을 수 있다면 이에 대한 이동 로봇의 상대 위치를 구할 수 있으며 결론적으로 자동화된 검사가 가능할 것이다. 본 과제에서는 이동로봇의 위치추정에 사용되어온 기구학적 계산에 의한 사산법과 카메라로부터 얻은 검사 대상체의 정보를 결합하여 로봇의 위치를 추정하는 방법을 구현하였다.

가. 안내관 영상으로부터 로봇좌표 추정

카메라에 의하여 추정된 영상좌표계에서의 안내관과 그 지지핀의 좌표로부터 현재 로봇의 위치는 다음과 같이 구하였다. 먼저 안내관 지지핀의 위치로부터 현재 로봇의 방향을 구한다.

$$\theta_r = \tan^{-1}\left(\frac{y_{p2} - y_{p1}}{x_{p2} - x_{p1}}\right) + C_{rot} + \frac{\pi}{2},$$

여기서 (x_{p1}, y_{p1}) , (x_{p2}, y_{p2}) 는 카메라 좌표계 상의 지지핀 1,2의 좌표이며 C_{rot} 는 로봇의 바퀴 진행 방향에 대한 카메라의 y 축이 이루는 오차각도이다. 우리가 구하고자 하는 것은 안내관의 중심과 로봇의 중심간의 물리적 거리이므로 만약 안내관의 중심이 영상좌표계의 중심에 정확히 일치하였다면 현재 로봇의 좌표 (x_r', y_r') 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_r' &= x_{gt} - camoff \cdot \cos(\theta_r) \\ y_r' &= y_{gt} - camoff \cdot \sin(\theta_r) \end{aligned}$$

안내관의 중심과 영상좌표의 원점이 일치하도록 제어하지만 오차가 발생할 수 있으므로 안내관의 중심과 영상좌표와의 중심과의 거리를 구하여 안내관의 중심과 로봇의 중심간의 거리오차를 보정한다.

$$\begin{aligned} x_{cam} &= x_t - x_{center} \\ y_{cam} &= -y_t + y_{center} \\ r &= K\sqrt{x_{cam}^2 + y_{cam}^2}. \end{aligned}$$

여기서 (x_t, y_t) 는 현재 카메라에서 정합필터로 구한 안내관의 중심좌표, (x_{center}, y_{center}) 는 영상좌표계의 중심 좌표, K는 영상좌표에서의 화소와 실제 물체에서의 거리의 비이며 단위는 mm/pixel 이다. 이와 같이 구한 r 은 영상좌표의 중심과 안내관 중심과의 오차를 나타낸다. 로봇의 중심좌표 (x_r, y_r) 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_r &= x_r' - xoff \\ y_r &= y_r' - yoff. \end{aligned}$$

여기서

$$\begin{aligned} xoff &= r \cos(\theta) \\ yoff &= -r \sin(\theta) \end{aligned}$$

이다.

나. 정합필터(matched filter)에 의한 지지핀의 중심위치 추정

디지털화된 카메라 영상으로부터 대상체의 위치를 찾기 위해서는 일반적으로 다양하게 연구되고 발표된 방법들을 사용 할 수 있다[5-1]. 본 과제에서의 검사 대상체와 같이 2차원 평면 위에 있으면서 동시에 그 평면이 로봇의 이동평면과 평행한 경우에는 일반적인 3차원 영상처리를 2차원의 영상처리 문제로 간략화 할 수 있다. 또한 그 대상체가 원형으로만 이루어져 있으므로 그 중심을 구할 때 로봇의 회전에 의한 대상체의 변화를 고려하지 않아도 된다. 즉, 일반적인 대상체의 검출에서 문제가 되는 PRSI(Position, Rotation, Scale Invariant)의 관점에서 Rotation 및 Scale이 불변이라고 가정하여도 무방하다. 대상체의 형상을 알고 있고 그 위치만을 찾는 방법으로는 정합 필터를 이용하는 것이 처리속도와 노이즈 문제를 고려 할 때 적절하다. 처리속도는 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform)을 사용하여 구현할 수 있어서 비교적 빠르며, 대상체의 일부가 가려진 상태에서도 보이는 부분만을 이용하여 그 위치를 정확히 찾아 낼 수 있을 뿐 아니라 대상체와 형상이 다른 물체들이 섞여 있어도 대상체의 위치와 상관 계수를 정확히 찾을 수 있어서 노이즈에도 강하다. 일반적으로 정합 필터는 다음과 같이 정의된다. [5-2]

임펄스 응답이 다음과 같이 되는 필터 $h(x)$ 가 있다고 가정한다.

$$h(x) = As^*(-x),$$

여기서 A 는 상수 이고 이 시스템은 신호 $s(x)$ 에 대하여 정합(matched)이라고 할 수 있다.

이 시스템의 임의의 입력 $f(x)$ 에 대한 출력은

$$\begin{aligned} g(x) &= f(x) * h(x) \\ &= Af(x) * s^*(-x) \\ &= A\gamma_{fs}(x), \end{aligned}$$

와 같으며 여기서 $\gamma_{fs}(x)$ 는 $f(x)$ 와 $s(x)$ 의 complex cross-correlation이다. 만약 $f(x)=s(x)$ 라면 autocorrelation이 되고 출력은 다음과 같이 된다.

$$g(x) = A\gamma_s(x).$$

또한

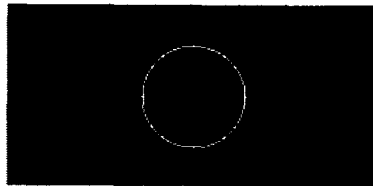
$$\gamma_s(0) \geq |\gamma_{fs}(x)|,$$

인 관계가 항상 성립한다. 즉, 이 시스템의 출력은 $s(x)$ 가 입력되었을 때 원점에서 최대값이 나온다는 의미이다. 이상적인 경우에 문턱 값을 $A\gamma_s(0)$ 로 설정하여 신호 $s(x)$ 를 찾을 수 있지만 입력신호의 노이즈를 고려하여 이보다 약간 작은 값을 문턱 값으로 설정한다. 또한 입력신호가 $s(x)$ 가 아닌 $s(x_0-x)$ 와 같이 신호의 위치변화가

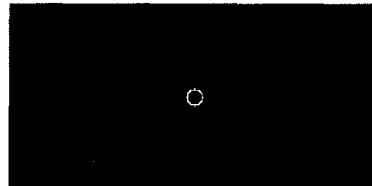
있을 경우 출력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 f(x) &= s^*(x_0 - x) \\
 &= s^*\left(\frac{x - x_0}{-1}\right) \\
 &= s^*(-x) * \delta(x - x_0).
 \end{aligned}$$

즉 $x = x_0$ 에서 최대값이 존재하므로 정합 신호의 존재 유무와 동시에 위치까지 알 수 있다. 이를 2차원으로 확장하면 2차원 평면에서 검출대상 물체의 존재 유무 및 위치를 판별할 수 있다. 본 과제에서는 검출 대상을 안내관 및 그 지지편으로 한정하고 실제 카메라에 입력된 영상을 바탕으로 이진화된 정합 필터를 제작하였다. 아래에 제작된 정합 필터를 보였다.



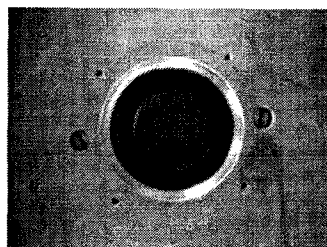
(a) 안내관



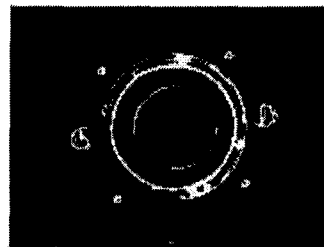
(b) 지지편

그림 5.2.3. 제작된 정합필터

이 신호는 2차원 FFT를 거쳐 정합필터로 저장된다. 다음은 실제 카메라에서 입력된 영상과 이의 이진화 영상을 보였다. 그림에서와 같이 실제 제작한 정합필터의 영상보다 상당히 많은 노이즈가 포함되어 있음을 알 수 있다.



(a) 원래영상



(b) 이진화 영상

그림 5.2.4 입력영상

이를 안내관의 정합필터를 통과하면 아래와 같은 영상이 나온다. 소프트웨어적으로는 위의 이진화 영상을 FFT한 후 이를 안내관의 정합필터와 곱하여 IFFT 연산한 것이다. 그림에서 가장 밝은 점이 제작된 안내관의 정합 필터와 입력영상의 위치가 일치하는 지점이 된다.

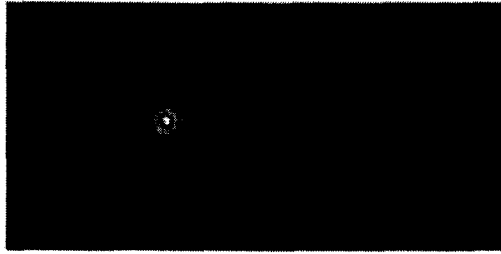


그림 5.2.5. 정합 필터 통과한 안내관 영상

위의 그림에서 최대값의 위치로부터 안내관의 중심좌표를 구하고 미리 알고 있는 안내관의 반지름을 이용하여 이진 영상으로부터 안내관을 소거하는 처리를 하였다. 이는 상대적으로 작은 지지판의 정합필터가 안내관의 일부를 지지판으로 오인하는 경우를 없애기 위한 것이다. 안내관이 소거된 이진화 영상을 아래에 보였다.



그림 5.2.6. 안내관이 소거된 이진화 영상

이 영상을 지지판의 정합필터에 입력하면 2개의 지지판의 위치가 밝은 점으로 나타난다. 이를 다음 그림에서 보였다.

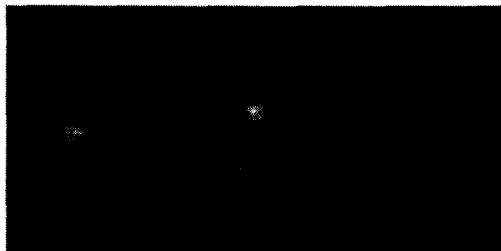


그림 5.2.7 정합필터 통과한 지지판의 영상

이와 같이 하여 입력영상에서 안내관과 지지판의 영상좌표를 구할 수 있었다. 따라서 카메라좌표와 로봇의 좌표와의 관계를 이용하여 현재의 로봇중심좌표로부터 안내관과 지지판의 상대위치를 구할 수 있다. 또한 안내관의 일부만 카메라에 잡힌 경우에도 안내관과 지지판의 위치를 찾아낼 수 있음을 아래에 보였다. 그림은 안내관의 약 55% 정도만 입력된 상태에서도 중심의 위치를 정확히 찾을 수 있었다.

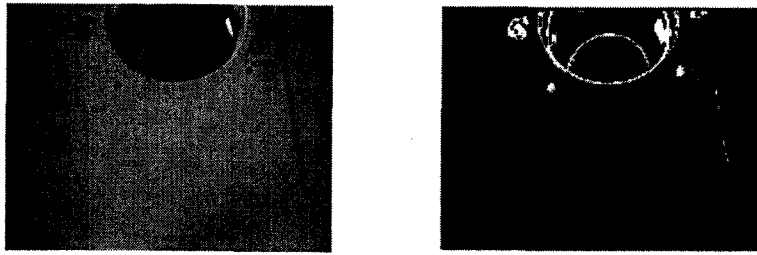


그림 5.2.8 안내관의 부분 입력 영상과 이진화 영상

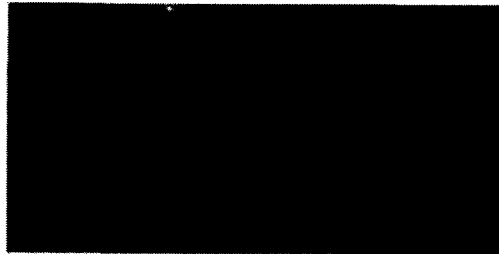


그림 5.2.9. 정합필터링 한 안내관 영상

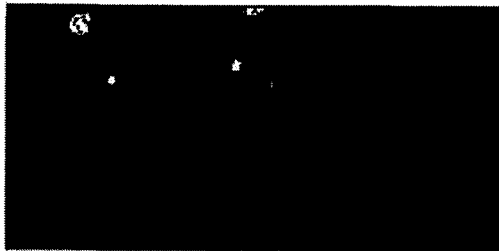


그림 5.2.10. 안내관 소거 후 영상

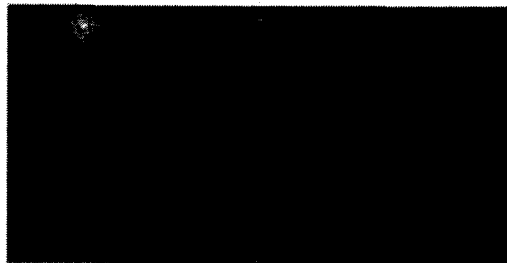


그림 5.2.11. 정합필터링 한 지지판의 영상

3. 검사 로봇 및 안내관 목업 제작

제어봉 안내관 및 지지판의 목업을 실제 치수를 근거하여 제작하였다.[5-2] 지지판은 울진 2호기에 사용된 것과 동일하며 안내관은 10개만을 실측 크기 및 간격으로 배치하였다. 재질은 지지판은 스테인레스 스틸이고 안내관은 탄소강 및 듀랄루민으로 제작하였다. 안내관은 직접 검사하고자 하는 대상이 아니므로 재질은 관계없을 것으로 판

단하였다. 검사용 로봇은 브러쉬리스 직류 모터에 엔코더를 부착한 2개의 우레탄 재질의 바퀴를 사용하여 이동한다. 또한 로봇의 상판에 초음파 탐촉자를 회전시키고 지지판에 밀착시키는 동작을 할 수 있도록 매니플레이터를 설치하였다. 검사하고자 하는 지지판의 중심에 매니플레이터의 중심이 오도록 제어한 후 초음파 탐촉자를 지지판에 밀착시키고 이를 회전하여 지지판을 검사하는 구조로 제작되었다. 제작된 목업, 검사 로봇, 지지판을 아래 사진에 보였다.

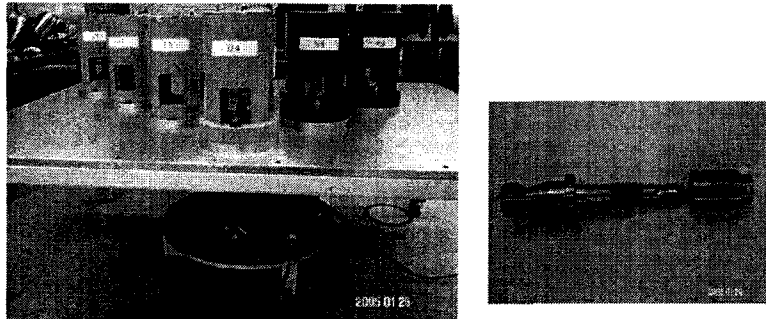


그림 5.2.12. 제작된 목업, 검사 로봇 및 지지판

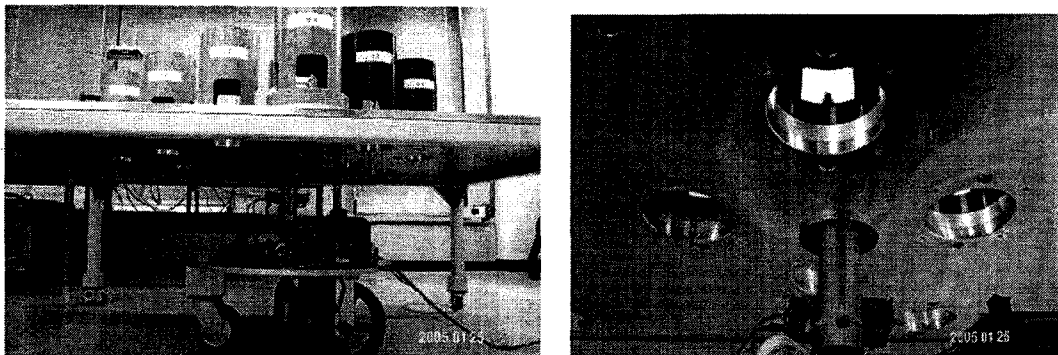


그림 5.2.13. 로봇의 지지판 검사

4. 제어기 소프트웨어 및 개발 환경 구축

가. Application 개발을 위한 gdbserver 구축

(1) 전체 구성

임베디드의 환경에서의 소프트웨어를 개발 할 경우 일반적으로 윈도우와 같은 OS 환경에서 개발 하는 것과 달리 체계적인 디버깅 툴을 구하기 어렵다. 개발한 소프트웨어가 프로그래머의 의도와 다른 실행 결과를 보이는 경우 의심이 되는 부분에 printk

나 printf문을 사용하여 변수 값을 확인하거나 실행과정을 확인할 수밖에 없다. 이렇게 거미줄처럼 프로그램 소스에 printf문을 넣어서 버그를 잡는 방법은 너무나 소극적이고 그 버그가 시스템의 안쪽 깊숙이 숨어버린 경우에는 찾아내는 것만으로도 무척이나 인내심을 요구한다. 본 과제에서 개발한 임베디드 제어기는 Arm core 계열의 인텔 PXA-255 CPU를 사용하고 있다. 이를 사용한 임베디드 제어기의 경우 공개된 운영체제인 리눅스를 설치하기가 용이하고 리눅스에서 일반적으로 사용되는 디버거인 gdb를 사용할 수 있다. 또한 gdbserver를 이용하여 target board에서 실행되는 프로그램을 네트워크를 통하여 원격으로 디버깅할 수 있도록 하였다. 그림5.2.14.는 application 개발을 위한 디버깅 툴의 전체 구성을 보여준다.

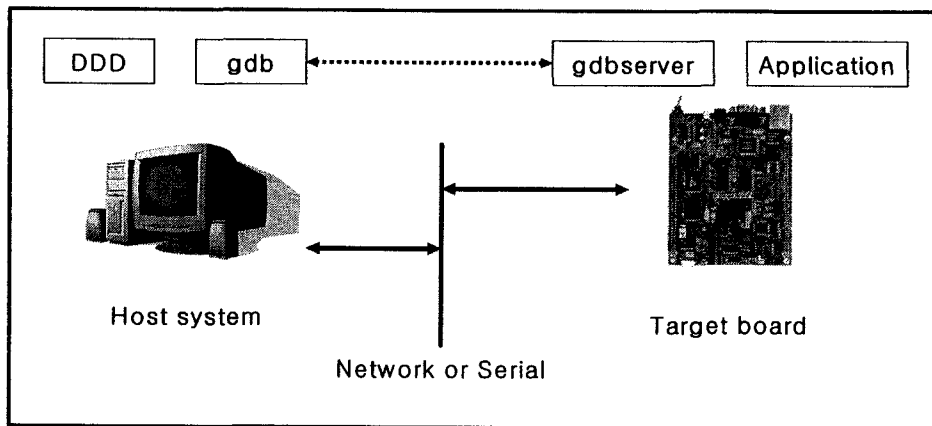


그림 5.2.14 호스트 PC와 target board의 구성

호스트 시스템에는 gdb와 이를 기반으로 한 그래픽 디버거 환경인 DDD(date display debugger)를 설치하고 타겟 보드에는 gdbserver를 구축하였다.

(2) gdb & gdbserver 구축

(가) 컴파일

ftp://ftp.gnu.org에서 gdb-5.2.tar.gz를 구한다. gdb-5.2.tar.gz 파일에는 gdb 개발 호스트와 gdbserver가 모두 있다. gdb 패키지는 대부분의 경우 소스파일로 제공되기 때문에 크로스 컴파일러를 사용하여 pxa-255 임베디드 타겟 보드용으로 컴파일을 하였다. 본 과제의 경우 데스크 탑 컴퓨터에서 프로그램을 개발하고 arm 구조의 타겟 보드에서 실행되므로 ddd는 i386용으로 컴파일하고 gdb와 gdbserver는 arm용으로 크로스컴파일 하여야 한다.

① ARM 용 gdb 컴파일

```
# cd /home/embedded/arm/  
# tar xvpz gdb-5.2.tar.gz  
# cd gdb-5.2  
# ./configure --target=armv5l-linux --prefix=/usr/local/armv5l-linux -v  
# make  
# su - root  
    Password:*****  
# make install
```

/home/embedded/arm/과 같이 적당한 자료방(directory)에 gdb-5.2.tar.gz를 푼다. 그리고 make 파일을 만들기 위해 configure를 실행 한다. 실행 시 몇 가지 옵션들을 줄 수 있는데 가장 중요한 것은 gdb를 컴파일 할 때 실행파일이 어떤 타겟에서 실행 되도록 할 것인가 정해 주는 것이다. 개발한 제어기의 경우에는 armv5l-linux로 옵션을 주었으며 이 경우 armv5l-linux-gcc가 컴파일러로 설정 된다. 그 다음 옵션은 설치 시 결과물이 어디로 들어 갈 것인가 하는 것이다. 여기서는 /usr/local/armv5l-linux로 정했다. 그리고 make 명령으로 실행 파일을 생성 시킨다. 그 다음에 root의 권한으로 make install 한다. 이렇게 하면 실행파일들이 지정한 자료방에 설치된다. 이렇게 하여 gdb호스트를 컴파일 하였다.

② ARM 용 gdbserver 컴파일

```
# cd /home/embedded/arm/gdb-5.2  
# export PATH='echo $PATH':/usr/local/armv5l-linux/bin  
# ./configure --target=armv5l-linux --host=armv5l-linux  
# cd gdb/gdbserver  
# mv config.h config.h.org  
# sed "s/#define HAVE_SYS_REG_H 1/W/*#define HAVE_SYS_REG_H 1*W//1"  
    config.h.org >config.h  
# rm config.h.org  
# make CC=armv5l-linux-gcc
```

우선 PATH에 위에서 컴파일 하여 생성된 gdb관련 파일이 있는 자료방의 위치를 등록 시킨다. 그리고 다시 configure를 실행한다. config.h에는 무슨 파일이 없다는 오류 메시지를 내는 내용이 있다. 그 부분을 주석처리 한다.

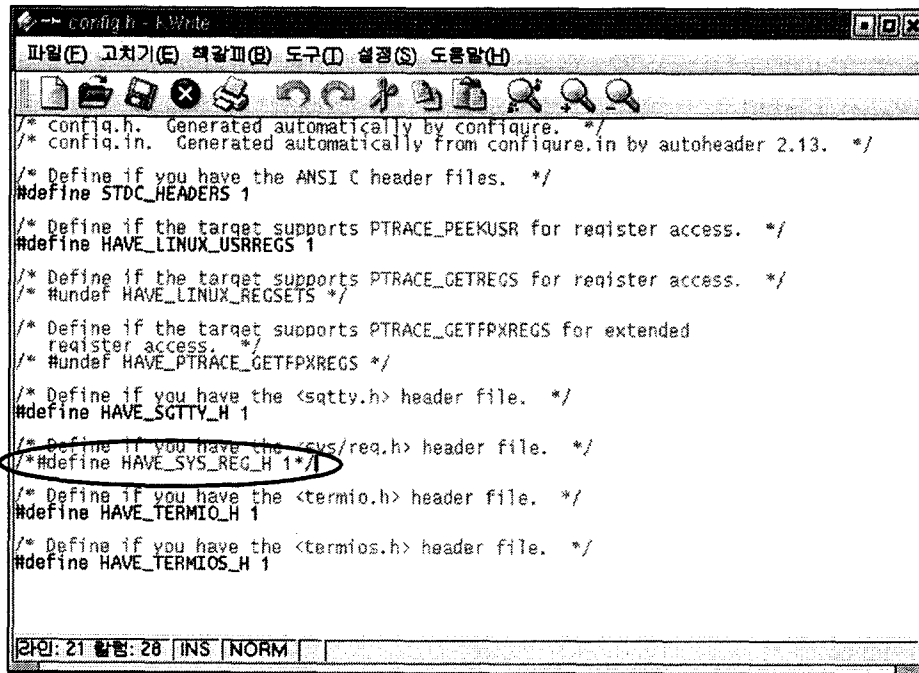


그림 5.2.15 config.h

코드 중에 `sed "s/#define HAVE_SYS_REG_H 1/\#define HAVE_SYS_REG_H 1*\//1" config.h.org >config.h` 부분은 그림 5.2.15와 같이 편집기를 열어 HAVE_SYS_REG_H를 선언한 부분을 주석처리 해버리면 커맨드라인에서 실행 하지 않아도 된다. 또한 gdb전체를 다시 컴파일 할 필요 없이 /gdb/gdbserver 자료방에서 명시적으로 gdbserver를 컴파일 한다. 컴파일이 끝나면 gdbserver와 실행 파일을 타겟보드에 복사한다. DDD는 일반적인 i386구조의 컴퓨터에서 실행되는 실행파일로 배포되므로 설치만하여 바로 사용하였다.

(나) Application debugging

개발 호스트와 타겟보드 사이에는 TCP/IP통신이 되어야 하고 양쪽에 모두 IP주소가 설정되어 있어야 한다. gdb는 시리얼 통신에 의한 디버깅도 가능하다고 한다. 타겟보드가 네트워크를 지원하기 때문에 굳이 하지 않아도 된다. 실행 파일을 컴파일 할 때 -g 옵션을 주어 컴파일 해야 gdb가 실행 파일로부터 정보를 얻어 올 수 있기 때문에 -g 옵션을 주어 컴파일 한다.

① 타겟보드에서 gdbserver 실행

```
[root@ezboard /gdbserver]$ ./gdbserver 147.43.11.37:2345 [실행파일 이름]
```


Process debug create; pid = 130

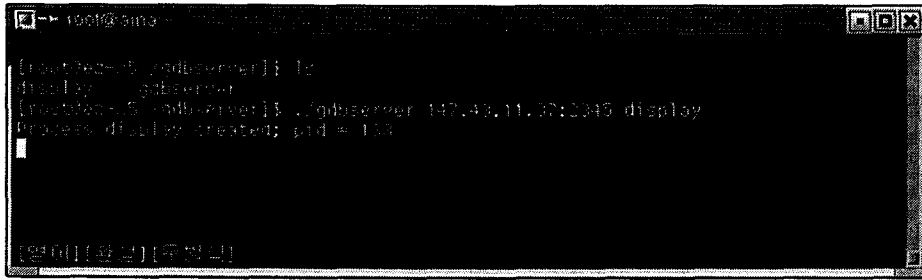


그림 5.2.16 gdbserver 실행

위의 아이피 뒤에 붙은 포트 번호는 1024 이상을 지정해 주는 것이 좋고, pid는 수행할 때 마다 달라질 수 있다. 본격적인 디버깅 작업은 개발 호스트에서 하고, 타겟보드에서 실행한 실행 파일이 같이 있어야 한다.

② 호스트에서 DDD 실행

[root@aina gdb]# ddd -debugger armv5l-linux-gdb [실행파일의 이름]

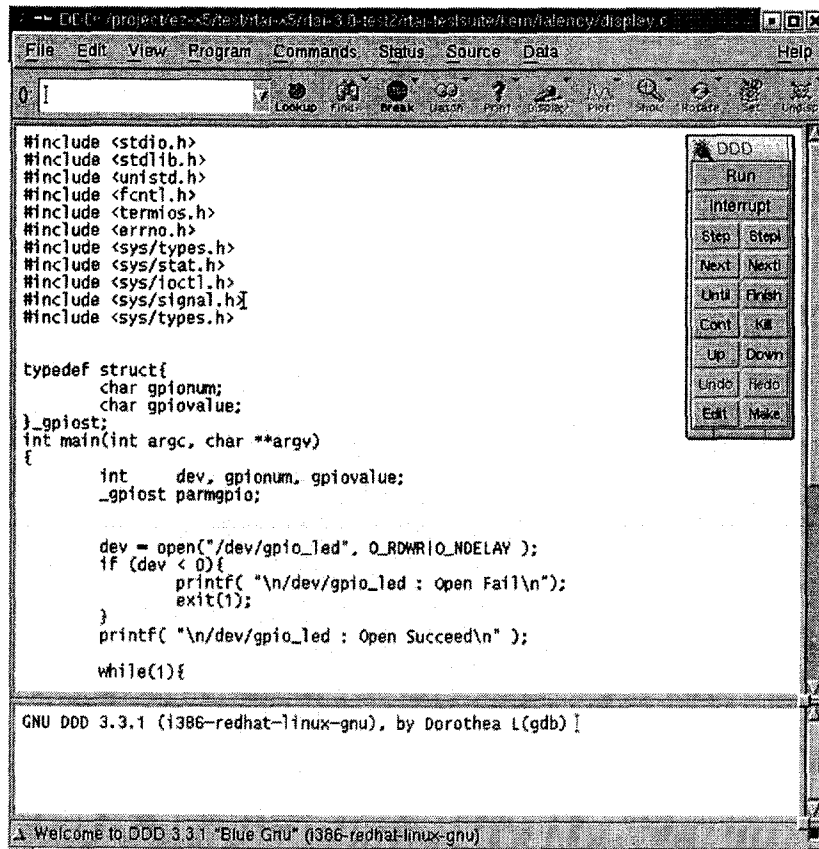


그림 5.2.17 DDD 실행

여기에 (gdb)에 명령어를 입력 하여도 되고 명령 버튼을 사용 할 수 있다. 우선 타겟

보드를 설정해 준다.

```
(gdb) target remote 147.43.11.41:2345
```

```
147.43.11.41:2345: Success.
```

이렇게 나오면 본격적으로 gdb가 타겟보드와 함께 돌아간다. list, break, run, step display, next 등이 gdb 명령어 이다. help를 입력하면 gdb 명령어들을 볼 수 있다

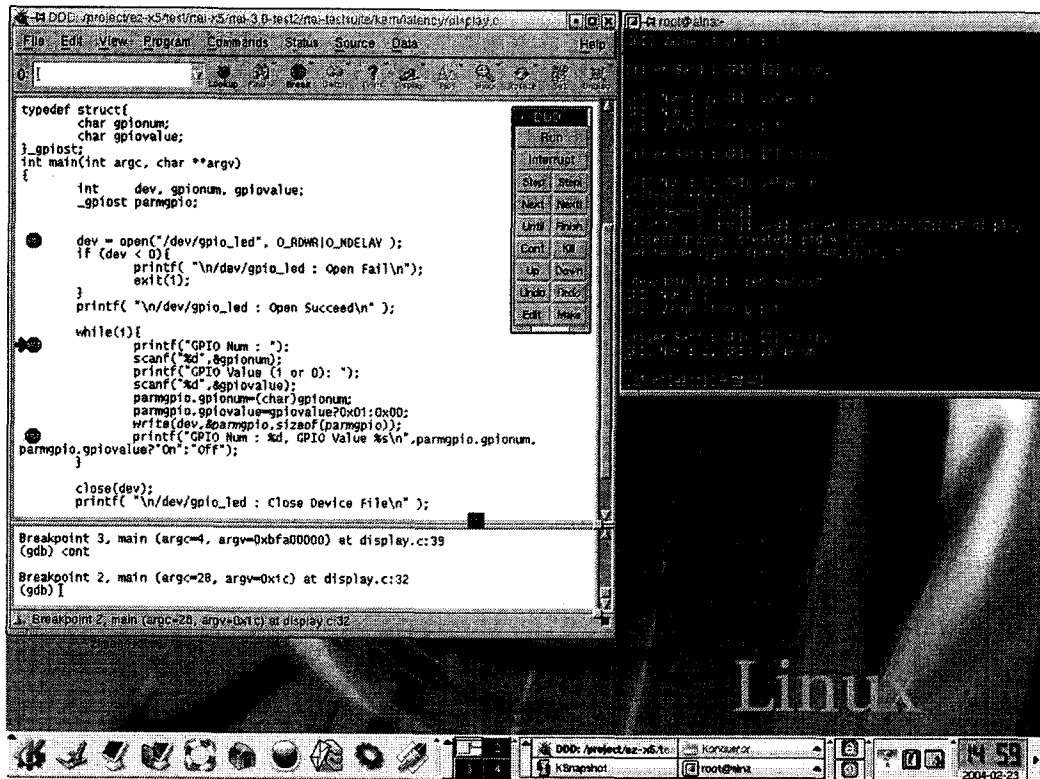


그림 5.2.18 debugging

그림 5.2.18은 debugging 환경을 전체적으로 보여주는 것이다.

나. 임베디드용 webserver 구축

(1) Boa Webserver

보아 웹서버는 아파치와 같은 강력한 성능을 자랑하지는 않지만 임베디드 기기에서 웹 서비스를 제공하기 위한 용도로는 매우 적은 크기의 서버 프로그램이다. 크기가 매우 작기 때문에 기능의 제한은 있으나 기본적인 HTML 문서를 전달하는 HTTP 프로토콜과 CGI를 기본적으로 갖추고 있다.

```
# cd /ez/sw/app
# tar -xvzf boa-0.94.13.tar.gz
# cd boa-0.94.13/src
# ./configure
# cd /ez/sw/app/boa-0.94.13/src/Makefile
--> Makefile에서 그림 2.6과 같이
CC = armv5l-linux-gcc
CPP = armv5l-linux-gcc -E
를 수정한다.
```

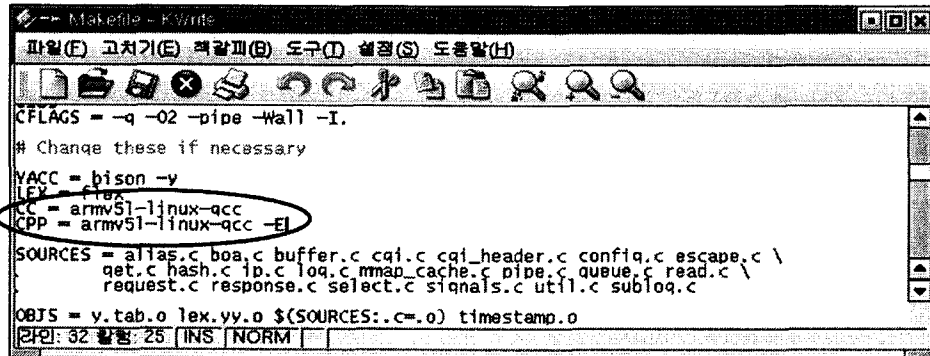


그림 5.2.19 Makefile

```
# cd /ez/sw/app/boa-0.94.13/src/defines.h
--> defines.h에서 그림 5.2.20과 같이
#define SERVER_ROOT "/usr/local/boa"
를 수정한다.
```

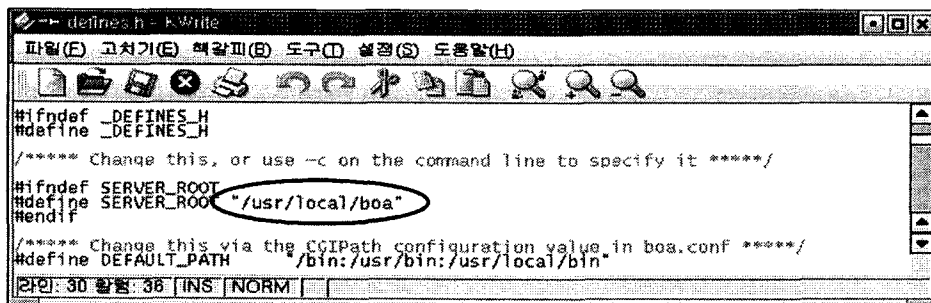


그림 5.2.20 defines.h

```
# make clean
# make all
# cd /ez/sw/app/boa-0.94.13/boa.conf
--> boa.conf의 파일을 아래와 같이 편집하여야 한다.
```

```
User nobody
Group nobody
ErrorLog /user/local/boa/log
AccessLog /user/local/boa/log
ServerName 147.43.11.41 (target board의 IP)
DocumentRoot /user/local/boa/html
```

```

DirectoryMaker /user/local/boa/boa_indexer
MimeTypeTypes /user/local/boa/mime.types

# cd /ez/sw/app/boa-0.94.13
# mkdir /usr/local/boa
# cp -a ./src/boa /usr/local/boa/
# cp -a ./src/boa_indexer /usr/local/boa/
# cp -a ./boa.conf /usr/local/boa/
# cp -a /etc/mime.types /usr/local/boa/
# vi /usr/local/boa/log
--> log 파일을 만들어서 /usr/local/boa 디렉트리에 넣는다.
# mkdir /usr/local/boa/html
--> index.htm 파일을 만들어 /usr/local/boa/html 디렉트리에 넣는다.
# cp -a /usr/local/boa /nfs/
$ cp -a boa /usr/local/
$ cd /usr/local/boa/
$ chmod +x boa
$ ./boa -c /usr/local/boa &

http://147.43.11.41/:index.htm --> 테스트

```

(2) Goahead Webserver

wen21.tqr.gz 를 구한다.

```

# cd /ez/sw/app
# tar -xvzf wen21.tqr.tar.gz
# cd /goa/LINUX/Makefile
--> Makefile에서 그림 5.2.21과 같이
    CC = armv5l-linux-gcc
    CPP = armv5l-linux-ar
    .....
    armv5l-linux-gcc -c -o $@ $(DEBUG) $(CFLAGS) $(IFLAGS) $<
를 수정한다.

```

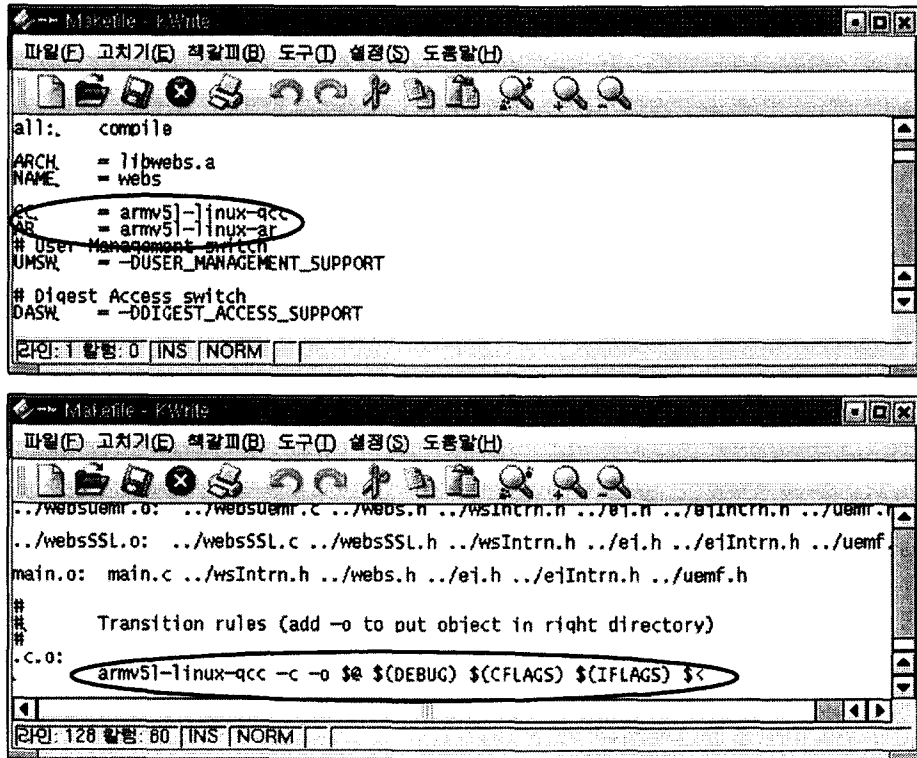


그림 5.2.21 Makefile

```

# make
--> webs 생성
target board에 /web /web/cgi-bin 폴더를 만든다.
/bin 폴더에 webs 파일을 넣는다.
/web 폴더에 index.html 파일을 만들어 넣는다.
/web/cgi-bin 폴더에 cgi파일을 만들어 넣는다.

$ cd /bin
$ ./webs 실행한다.

http://147.43.11.41:/index.html --> 테스트

```

다. Real Time LINUX

리눅스는 MS Windows처럼 인텔 x86 CPU를 기반으로 하는 PC에서 사용할 수 있는 운영체제이다. 처음 리눅스는 인텔 80386에서만 사용할 수 있도록 만들어졌지만, 이후에 Alpha나 PowerPC, MIPS 같은 여러 일반 목적 프로세서와 ARM, SH 같은 특수 목적 프로세서를 사용하는 다른 플랫폼에서도 사용할 수 있도록 포팅이 되었다. 또한 리눅스의 영역도 PC 기반의 서버나 데스크 탑 외에도 Embedded 시스템으로 확장되어가고 있으며, 실제로 리눅스를 탑재한 PDA나 셋탑박스가 등장하고 있다. 1999

년 중순에 열린 리눅스 엑스포에서 리눅스 토발즈는 리눅스가 나아갈 방향으로 데스크탑과 함께 Embedded 시스템 분야를 강조하기도 하였다. 실제로 리눅스를 Embedded 시스템으로 포팅하려는 많은 프로젝트들이 진행되고 있으며, 단순히 Embedded 시스템이 아니라 Real Time 시스템으로까지 리눅스의 영역은 확대되고 있다. Embedded 시스템과 Real Time 시스템은 환경과 목적에서 다르다고 볼 수 있다. Embedded 시스템은 PC 환경이 아닌, 별도로 설계된 환경에서, 정해진 칩들을 이용하여 (근래에는 PDA 등이 계속 발전하면서 확장성이 중요해지고 있다) 그 자체에서 동작하는 운영체제라고 할 수 있다. PDA나 핸드폰 같은 장치들이 대표적인 예로 이들에게는 Real Time 기능이 그다지 중요하지 않다. 하지만 네트워크 장치나 공장 제어 시스템 같은 곳에서는 Real Time 기능이 중요해진다. 현재의 경향을 살펴보면 이 두 영역을 동시에 지원하는 시스템도 있지만, 각자 고유한 영역을 확보해가는 것 같다. 리눅스를 이 영역에서 어떻게 사용할 지는 사용 목적과 환경에 따라서 달라질 것이다. 어떤 분야에서는 코드 크기가 작아야 하고 (리눅스의 코드 크기는 다른 상용 OS에 비하면 - Windows CE를 제외하고 - 큰 편이다), 어떤 곳에서는 기능이 방대해야 하기도 하고, 때론 real time 기능을 필요로 하기도 한다. 리눅스는 많은 분야에 적용할 수 있는 충분한 가능성을 가지고 있다.

(1) Real Time 운영체제 (RTOS)

Real Time 시스템이란 어떤 이벤트가 발생했을 때 이것이 어떤 정해진 시간 이내에 처리되는 것을 보장하는 시스템이다. 즉 이벤트에 대한 반응성이 빠르고, 중요한 이벤트가 덜 중요한 이벤트보다 먼저 수행되며, 이벤트를 놓치는 일이 결코 일어나서는 안 되는 시스템을 말 한다 (이것을 완전하게 보장하는 시스템을 보통 hard real time이라고 하고, 이벤트를 가끔 놓쳐도 크게 문제되지 않는 시스템을 soft real time이라고 한다). 그러기 위해서 중요한 요소는 인터럽트가 발생하였을 때 빠른 시간에 인터럽트 핸들러를 불러주는 것과 (인터럽트 발생에서 인터럽트 핸들러가 불리기까지의 시간을 interrupt latency라고 하는데 이 시간이 짧아야 한다), 중요한 일이 있으면 다른 일을 제치고 이를 처리하도록 하는 것이다. 그래서 보통 Real Time 시스템은 priority-based preemptive scheduling을 한다. 이는 항상 시스템에서 실행할 수 있는 프로세스 중에서 가장 priority가 높은 프로세스가 현재 프로세스가 되는 것을 보장한다. 현재 프로세스보다 높은 priority를 갖는 프로세스가 나타나면, 현재 하는 작

업을 멈추고 이를 수행하며, 절대로 더 낮은 priority를 갖는 프로세스에 선점되지 않는다.

(2) Linux와 Real Time

리눅스는 일반적인 목적으로 설계된 운영체제이기 때문에 real time 운영체제가 아니며, real time 운영체제의 입장에서 보면 많은 문제를 지니고 있다. 우선 리눅스는 다른 UNIX와 마찬가지로 time-sharing scheduling을 한다. 즉 하나의 프로세스를 실행하고 있는데, 이 프로세스가 정해진 time slice를 모두 채우거나, blocking이 되어서 어쩔 수 없이 중단되어야 하는 경우, system call을 하는 경우, paging 메커니즘을 통해서 page를 하드 디스크에서 읽어 와야 하는 경우 등을 제외하고 이 프로세스를 중단하지 않는다. 따라서 지금 실행하고 있는 프로세스보다 높은 priority를 갖는 프로세스가 나타나더라도 현재 프로세스가 time slice를 채우거나 스스로 CPU를 놓아 주기만을 기다려야 한다. 또한 priority가 더 높은 프로세스가 있다고 하더라도 더 낮은 priority를 갖는 프로세스에게도 가끔씩 CPU를 할당해주어야 한다. 높은 priority를 갖는 프로세스라도 정해진 time slice를 채우고 나면 CPU를 놓아주어야 한다. 리눅스는 지금 실행할 수 있는 있는 프로세스 중 가장 중요한 프로세스를 실행하고 있다는 보장을 하지 못한다. 기존 리눅스의 프로세스 관리에 보면 프로세스를 일반 프로세스와 real time 프로세스로 분류하여 real time 프로세스에게 더 높은 priority를 주고 이들에게 별도의 scheduling 정책을 사용하는 것을 볼 수 있다. 그러나 이는 단지 더 높은 권한을 부여하여 scheduling을 할 때 real time 프로세스가 다른 프로세스보다 먼저 수행되게 하는 것이지, preemption을 비롯한 일반적인 real time scheduling 요건을 충족하지 못한다. 리눅스는 커널 모드에서 선점(preempt)할 수 없다. 어떤 프로세스가 시스템 콜을 불러 커널 모드에 진입한 경우 이 프로세스를 중지시킬 수 없다. 또한 커널은 필요한 경우 인터럽트가 발생하는 것을 막아버리기도 한다. 이 경우 인터럽트가 발생하더라도 그 수행이 지연될 수밖에 없다. 리눅스는 가상 메모리를 사용한다. 리눅스는 demand paging 기법을 사용하고 swapping을 하기 때문에, 프로세스 수행 도중 페이지를 디스크에서 메모리로 읽어 들이는 일이 종종 발생하여 프로세스의 수행 시간을 예상할 수 없게 된다. 가상 메모리는 프로세스가 관리해야 하는 자료구조가 많아지게 하기 때문에 task switching이 일어나는 경우 처리해야 하는 일이 많아지게 되어 성능 저하를 가져오게 된다. (가상 메모리를 사용하지 않는 리눅스 프

로젝트도 있다) 리눅스에서 서로 동기화가 필요한 부분에서는 성능을 위하여 자원을 오랜 시간 동안 점유한다. 실제 자원을 필요한 순간에 쓰고 반납하게 되면 자원을 얻고 반납하는 횟수가 늘어나기 때문에 성능이 떨어지게 된다. 그래서 이 횟수를 줄이고 자원을 오랫동안 독점하게 되는데 이를 coarse grained synchronization이라고 한다. 또한 priority가 낮은 프로세스가 점유하는 자원을 priority가 높은 프로세스가 기다려야 하는 priority inversion 문제도 발생한다.

(3) 소프트 리얼 타임 linux

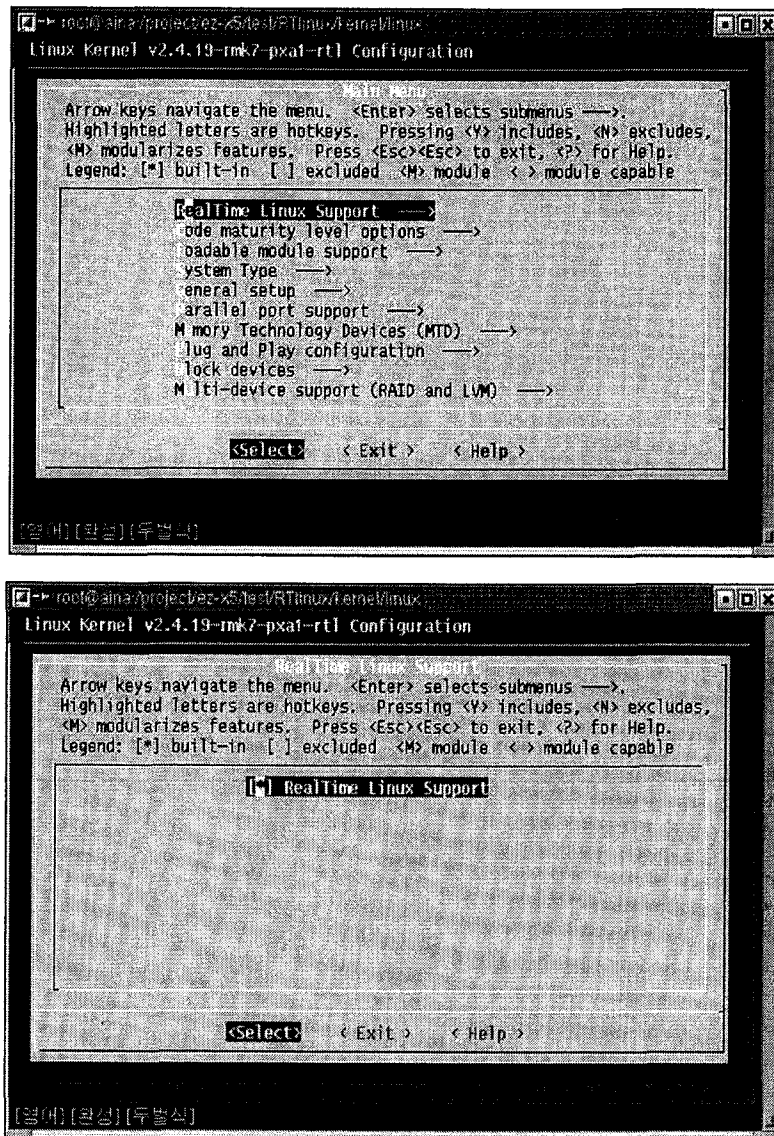


그림 5.222 컴파일 설정

어떠한 패치 없이 표준 커널 안에 들어있는 리얼 타임 지원을 사용하는 것을 소프트웨어 리얼 타임 지원이라고 부르고 있다. 그림 5.2.22와 같이 커널 컴파일 설정 시 문자 장치(Character Devices)-->Enhanced Real Time Clock Support를 설정하고 나서 커널 컴파일을 한다.

그리고 메이저 번호 10, 마이너 번호 135의 문자 장치 파일 /dev/rtc 파일을 만든다.

mknod /dev/rtc c 10 135



그림 5.2.23 리얼타임 설정 전

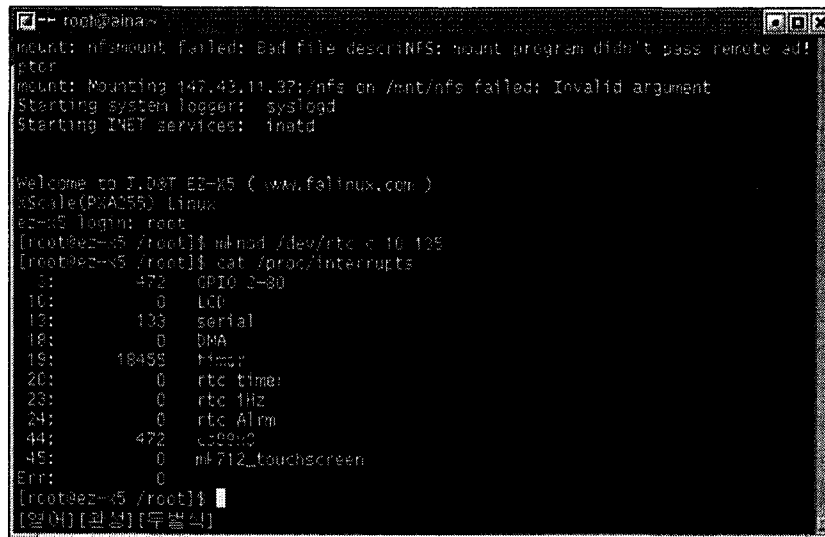


그림 5.2.24 리얼타임 설정 후

그림 5.2.24와 같이 리얼 타임 지원 기능을 갖는 커널로 부팅하고 나서 인터럽트 사용 현황을 살펴보면 20번, 23번, 24번 인터럽트를 rtc 기능에서 사용하고 있다는 것을 볼

수 있다.

리눅스 소프트웨어 리얼 타임 지원을 시험해보기 위한 프로그램을 하나 구해 와야 한다
다음은 바로 리눅스 커널 내부 기능을 사용하는 rt 라는 프로그램 실행기의
LSM(Linux Software Map) 파일이다.

```
Legin3
Title:      rt - run program on realtime priority
Version:    1.0
Entered-date: 12 Jan 1997
Description: rt starts any program on realtime priority, like nice
             does with lower priority. Lets you choose scheduler
             class (SCHED_RR vs SCHED_FIFO policy) and priority.
Keywords:   linux, real time, scheduler
Author:     Boris Tobotras <boris@xtalk.msk.su>
Maintained-by: Boris Tobotras <boris@xtalk.msk.su>
Primary-site: sunsite.unc.edu /pub/Linux/system/Admin
             10 kb rt-1.0.tar.gz
Alternate-site: ftp.macsimum.ru /pub/Linux/local
             10 kb rt-1.0.tar.gz
Platform:   Linux 1.3.87 and later
Copying-policy: GPL
End
```

소스를 가져와 컴파일하고 설치하는 과정은 아주 간단하다. 결과로 나오는 바이너리명
은 rt이다.

Usage: rt [options] command

Recognized options are:

- r Use SCHED_RR scheduling policy (default);
- f Use SCHED_FIFO scheduling policy;
- p N Set priority level N. If N<0, set priority level
to sched_get_priority_min(POLICY)-N.
Default is (sched_get_priority_max()+sched_get_priority_min())/2;
- End of options;
- v Be verbose;
- h This help screen.

rt라는 프로그램은 리눅스 커널에 이미 어느 정도의 리얼 타임 지원이 들어있었다는
것을 보여 준다.

rt [옵션들] -- <리얼타임 지원을 원하는 명령>

(위에서 -- 는 rt에 대한 옵션의 끝임일 알린다)

rt를 통해 수행시킨 프로세스에게 상당한 우선권이 부여되어 있으므로 이것은 루트 사용자만 사용할 수 있다. 당연히 한 프로세스에 대하여 특별한 우선권이 주어졌다는 것은 전체적으로 다른 프로세스들에게 악영향이 간다는 것을 의미한다.

(4) 하드웨어 리얼타임 linux

(가) RTLinux

RTLinux는 Real Time Linux를 줄인 말로서, 최근 임베디드 리눅스분야에 널리 사용되고 있다. 리눅스는 선점형 멀티태스킹 시스템이고, 이러한 체제에서 정확한 시간 주기를 가지고 일을 해야 하는 프로세스에게 커널이 정확한 타이밍을 맞춰준다는 것은 불가능한 것으로 보일 수 있다. 이 문제가 해결되어야 만이 리눅스가 진정한 임베디드 시스템의 운영체제로서 활용될 수 있을 뿐만 아니라, 첨단과학과 로봇에 활용하는 것이 가능하다. 리눅스가 리얼타임 리눅스로 발전하려면, Hard, Soft 시간의 제약성을 만족 시켜주어야 하며, 최악의 실행 시간을 만족해야만 하는 등, 기본적으로 상용 RT-OS인 Vx-Works등에 비해서는 개선되어야 할 점이 한 두 가지가 아니다. 그럼에도 불구하고, 이러한 프로젝트가 활발한 것은 리눅스의 여러 가지 강점 때문이다. 임베디드 시스템에 있어서 나중에 접목시켜야 할 다양한 어플리케이션이 이미 존재한다. 대체적으로 안정적이고 안전하며 성능 또한 우수하다. 그리고 평균적인 성능을 향상시킬 수 있으며 공정한 서비스를 추구할 수 있는 것 등의 강점이 있다. RT Linux는 리눅스에 Hard Real Time 기능을 부여하기 위하여 시작된 프로젝트이다. 이 프로젝트는 New Mexico Institute of Mining and Technology에서 수행되었으며, <http://www.rtlinux.org> 에서 코드와 정보를 얻을 수 있다. 리눅스가 Real Time 기능을 갖추려면 실제로 커널부터 다시 설계되어야 하겠지만, 이는 커널을 구성하는데 많은 시간을 필요로 하며, 리눅스 커널이 업그레이드 될 때마다 이를 신속히 반영하기 어렵고, 버그가 생길 가능성이 더 커지게 된다. 이에 RT Linux 프로젝트는 커널을 다시 설계하지 않고 리눅스 소스 변경을 최소화하는 방향으로 진행되었다. 리눅스 아래에 RT Linux 커널을 올리고 기존 리눅스 커널을 RT Linux 커널에서 돌아가는 하나의 프로세스로 만들어서 Real Time task와 기존의 리눅스 커널이 공존하는 형태를 만들었다. RT Linux 커널은 real time 프로세스를 생성하고 이들을 스케줄링하며, 인터럽트가 발생하였을 때 이를 처리하며 리눅스와의 통신을 담당하는 역할을 한다. 기

존 리눅스 커널은 그대로 일반 리눅스 프로세스를 관리하고, 자신의 인터럽트를 처리한다.

① RTLinux의 구현 특징

- Linux OS Kernel Task :

RTLinux는 기존 리눅스 커널을 RTLinux 상에서 돌아가는 하나의 task로 생각한다. 여기에는 가장 낮은 priority가 부여되므로, 실행할 수 있는 RT task가 하나도 없을 때 실행된다.

- Scheduling :

RTLinux는 현재 두 가지 scheduling 방법을 제공한다. 하나는 priority-based preemptive scheduler로서 모든 task에 priority를 부여하고, 실행할 수 있는 task 중에서 가장 priority가 높은 task를 수행하며, 이보다 더 높은 priority를 갖는 task가 등장하면 이를 곧바로 수행하는 것이다. 다른 스케줄러는 earliest deadline first (EDF) 알고리즘을 사용하며, priority가 아니라 deadline을 기준으로 scheduling을 한다. 이들 외에 사용자가 별도의 scheduler를 커널 모듈로 만들어서 이를 대신 사용할 수도 있다.

- Kernel Preemption :

기존 리눅스 커널은 선점되지 않는다는 가정 하에 만들어져 있다. 하지만 Real Time에서는 커널 작업 중이라도 이를 중단할 수 있어야 하는데, 현실적으로 커널을 재진입 가능하게(reentrant) 수정하는 것은 커널을 다시 설계해야 하는 문제가 있다. RT Linux는 이 문제를 RT task와 RT 인터럽트가 기존 리눅스 커널에서 제공하는 시스템 콜을 사용하지 못하게 함으로써 해결한다. 즉 RT 인터럽트는 기존 리눅스 커널과 무관하기 때문에 기존 리눅스 커널을 선점하더라도 문제가 되지 않는다. 하지만 RT Linux 커널 그 자체는 선점할 수 없도록 설계되어 있다. 이 커널은 아주 작고 빠르게 설계되어서 큰 시간 지연을 발생하진 않는다.

- Interrupt Blocking :

RTLinux에서 인터럽트의 제어권은 RTLinux 커널에 있다. 기존 리눅스 커널은 인터럽트에 의해 중단되고 싶지 않은 경우, 하드웨어 인터럽트를 막을 수 있다. 이렇게 인터럽트를 막아버리면(cli) 그 사이 발생한 인터럽트는 인터럽트가 허용될 때까지(sti) 기다리고 있어야 하고(pending), 이는 인터럽트 반응 속도를 느리게 하는 요소가 된

다. 이에 RTLinux는 기존 리눅스 커널이 인터럽트를 막는 것을 소프트웨어적으로 에뮬레이션을 하고, 실제로 인터럽트를 막을 수 없도록 한다. 리눅스 커널이 인터럽트를 막으면 별도의 플래그에 이를 표시해 두었다가, 실제로 인터럽트가 발생하면 이 플래그를 참조하여 인터럽트 가능 상태이면 인터럽트를 전달하고, 인터럽트 금지 상태이면 인터럽트가 발생했다는 표시를 하고, 인터럽트를 허용할 때까지 전달하지 않는 것이다. 이렇게 하여 기존 리눅스 커널의 입장에서는 자신이 인터럽트 되지 않는 효과를 주고, 실제로 real time 인터럽트를 바로 처리할 수 있도록 한다.

- Interrupt 처리 :

RTLinux에서 인터럽트는 기존 리눅스 커널의 관리 하에 있는 인터럽트와, RT Linux 커널의 관리 하에 있는 RT 인터럽트 두 가지로 나뉜다. RT Linux는 RT 인터럽트를 위하여 request_RTirq(), free_RTirq() 함수를 제공한다. (기존 인터럽트는 request_irq(), free_irq() 함수를 사용한다) 인터럽트가 발생했을 때 real time 인터럽트 핸들러가 등록되어 있다면 이를 불러주고, real time 인터럽트 핸들러가 없거나, 인터럽트를 기존 리눅스 커널과 공유하는 경우 이를 리눅스 커널에 전달한다.

- Resource :

RT 커널은 리눅스에 메모리나 세마포어 같은 자원을 요청하지 않는다. RT task는 동적으로 메모리를 요청할 수 없고, 리눅스 커널과 자료구조를 공유하면서 동기화를 해야 하는 경우도 없다.

- Real Time FIFO :

RTLinux를 이용하여 실제로 프로그램을 짤 때 프로그램을 RT task와 일반 리눅스 프로세스로 나누어서 하도록 한다. RT task에서는 할 수 있는 일이 극히 제한되기 때문에, 실제 RT 기능이 필요한 부분은 RT task에서 구현하고, 그렇지 않은 부분은 기존의 리눅스 프로세스로 만드는 것이다. 이를 위해 RT Linux는 이 두 프로세스가 서로 데이터를 교환할 수 있는 기능을 제공하는데, 이것이 Real Time FIFO이다. 이는 커널 주소공간에 공유 메모리를 이용하여 구현되며 (절대 page out되지 않는 영역이다), 이에 대한 접근은 세마포어 같은 것을 통하지 않고 atomic하게 이루어진다. RT task가 여기에 접근할 때 blocking을 하지 않고, 이 영역의 크기가 고정되어 있기 때문에 버퍼가 넘치거나(overflow) 부족 하는(underflow) 현상이 발생할 수 있다.

- Real Time Task의 특징 :

RT task는 리눅스 커널 task이다. 즉 커널 권한을 가지고 수행되므로 자유롭게 하드웨어에 접근할 수 있다. 또한 코드와 데이터 영역 모두 메모리에 존재하며 page out되지 않는다. 이는 페이지를 읽어 들이면서 발생하게 되는 지연을 막기 위함이다. RT task들은 커널 영역을 함께 공유한다. 메모리 보호를 위해 task들이 별도의 주소 공간을 갖도록 할 수 있지만, 이렇게 하면 task switching을 할 때마다 page directory가 바뀌게 되며, TLB도 갱신해야 하기 때문에 성능이 떨어지게 되고, 시스템 콜을 할 때마다 protection level을 바꾸면서 약간의 오버헤드가 생기게 된다. RT Linux는 성능을 위하여 모든 RT task들이 같은 커널 영역을 공유한다. RT task는 리눅스 커널 모듈로 만들 수 있다. 이는 동적으로 RT task를 실행할 수 있게 한다. 여기서 모듈을 로드하는 역할은 기존의 리눅스에서 한다. RT task에서는 리눅스에서 제공하는 시스템 콜을 사용할 수 없으며 커널에 있는 다른 루틴들을 직접 부르거나 커널에 있는 자료구조들을 사용할 수 없다.

② 장점과 단점

장점

RT Linux의 구조는 무척 단순하기 때문에 기존 리눅스 프로그래머들이 쉽게 접근할 수 있다는 장점이 있다. real time 기능이 필요한 부분만 RT task로 구현하고 나머지는 이미 어느 정도 검증되어 있는 안정된 리눅스 상에서 동작하므로 안정적이고, 디버깅이 용이하다는 장점이 있다.

단점

RT Linux는 기존의 리눅스가 가진 기능들을 real time으로 바꾼 것은 아니다. 단지 RT task 기능을 추가하였을 뿐, 대부분의 서비스는 기존 리눅스에서 그대로 담당하게 된다. 리눅스 코드의 대부분을 차지하는 디바이스 드라이버도 그대로 사용되고 있으며, 이들에게 real time 기능이 필요한 경우 이들 디바이스 드라이버를 다시 설계해서 만들어야 하는 문제가 있다. 또한 RT Linux는 기존의 리눅스의 기능에 추가를 한 것이기 때문에 여전히 덩치가 크다는 부담이 있다.

③ RTLinux 설치

현재 리눅스 커널 안에서 기본적으로 제공하고 있는 리얼 타임 지원을 소프트라고 부르는 것은 Michael Barabanov씨와 Victor Yodaiken씨의 RTLinux 프로젝트에 대한 상대적인 개념으로서 그렇게 부르는 것이다. 커널 패치의 형태로 주어지는

RTLinux는 더욱 더 강력한 형태의 리얼 타임 지원을 해주도록 리눅스 커널 구조에 약간의 변화를 준 것이다. 관련 사이트는 다음과 같다. luz.cs.nmt.edu/~rtlinux/ 여기서 일단 커널 2.0.27에 대한 패치 형식으로 된 `rtlinux-0.5.tgz` 파일을 받아와야 한다. 커널 2.0.29에 대해서는 웹 페이지에서 별도의 패치 파일을 받아오면 된다. 파일을 풀어보면 `rtlinux-0.5`라는 디렉터리가 만들어지고 `kernel_patch`라는 파일을 하나 볼 수 있을 것이다. 그 파일을 `/usr/src` 디렉터리 밑으로 복사한다.

```
# cd /usr/src/linux
# patch -p2 < ../kernel_patch
patch 프로그램에 -p2 옵션을 주는 것에 유의하자.
# make config
# make dep
# make clean
# make zliilo
# make modules
# make modules_install
```

일반적인 커널 컴파일 과정을 마치고 나면 `/lib/modules/2.0.27/misc` 디렉터리에 `rt_prio_sched.o` 라는 모듈 파일이 하나 생긴다. 리얼타임 지원을 사용하려면 바로 저 모듈을 로딩해주어야 한다. 그리고 나서 `rt_fifo_new.o` 모듈도 로딩한다.

```
# modprobe rt_prio_sched.o
# modprobe rt_fifo_new.o
# lsmod
```

Module	Pages	Used by	
rt_fifo_new	2	[rt_process]	0
rt_prio_sched	1		0
sbpcd	14		1
aic7xxx	10		0
bsd_comp	1		0
ppp	5	[bsd_comp]	1
slhc	2	[ppp]	1
lp	2		0

모듈이 로딩되면 리눅스 커널과 하드웨어 레벨 사이에 리얼 타임 커널층을 끼워지게 되어 둘 간의 처리를 중간에 가로채어 처리하게 되는 형태이다. 그 다음에 해주어야 하는 일은 `/dev` 디렉터리에 적절한 장치를 만드는 일이다. 배시 사용자라면 명령행에서 다음과 같이 입력해주면 된다.

```
for i in 0 1 2 3; do mknod /dev/rtf$i c 63 $i; done
```

펜티엄 120 머신에서 RT-Linux는 150 마이크로초 수준의 정확도를 가지고 스케줄링을 해줄 수 있다고 한다. rtlinux-0.5 디렉터리에 보면 testing이라는 디렉터리를 볼 수 있을 것이다. 각 디렉터리의 README를 읽어보고 테스트를 할 수 있다. 하드웨어 리얼타임은 RTLinux 와 RTAI가 있다. RTAI는 패키지에서 기본적으로 ARM을 제공하기 때문에 RTLinux보다는 안정성 측면에서 앞선다고 볼 수 있다.

(나) RTAI

① 전체 구성

리눅스와 하드웨어 사이에 '작은 커널'을 집어넣을 수 있다면 이 커널은 리눅스와 '리얼타임 작업'을 모두를 조절할 것이다. 리눅스를 실행할 높은 우선순위의 '리얼타임' 작업이 없을 때에만 실행되는 매우 낮은 우선순위 작업으로 취급한다. 인터럽트 제어는 이 특수한 커널이 처리한다. 리눅스가 인터럽트를 끄는 요청을 하면 실제 인터럽트를 끄지 않고 리눅스가 인터럽트를 보지 못하도록 처리한다. 그러나 리얼타임 작업은 그대로 많은 지연 시간 없이 리얼타임 인터럽트 핸들러를 실행할 수 있다. Victor Yodaiken 박사가 도입한 이 신기한 개념이 RTLinux의 탄생을 가져왔다. 많은 대학과 연구기관이 구현을 시도했고, 가장 기대되는 (그리고 완전히 공개된) 것중 하나가 Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale - Politecnico di Milano (DIAPM)의 연구자들이 개발한 RTAI이다.

② RTAI를 설치하기

RTAI는 크게 두 가지 구성요소가 있다

- HAL (hardware abstraction layer, 하드웨어 추상화 계층) 리눅스 커널 패치.
- 스케줄링, 프로세스간 통신, 동기화 등을 담당하는 모듈들.

커널을 패치하여 설치하기 전에 README.INSTALL 파일에 있는 지시사항을 주의해야한다 (특히 커널 설정 옵션에 관한 지시사항을. "Set version information on loadable modules"은 꺼야 한다. 당신은 아마도 프로세서가 한개인 시스템을 사용할 것이다 - 그래서 SMP 지원을 (아마도, power management도 같이) 끄는 것도 잊지 마라). 새로운 커널로 재시작하면 RTAI 모듈과 예제를 컴파일할 수 있다. 프로그램을 실행하기 전에 세 모듈들 - rtai.o, rtai_fifos.o, rtai_sched.o을 읽어 들여야 한다.

(RTAI를 위한 커널 환경 설정과 컴파일)

```
# cd /project/ez-x5/test/rtai-x5/
# tar xvzf linux-2.4.21 linux
# mv linux-2.4.21 linux
# cd linux
# zcat ../patch-2.4.21-rmk1.gz | patch -p1
--> arm 패치
# zcat ../patch-2.4.21-rmk1-pxa1.gz | patch -p1
--> pxa255 패치
# zcat ../patch-2.4.21-sallx0-pxa-fixed-rtal5 | patch -p1
--> rtai 패치
# zcat ../patch-2.4.21-rmk1-pxa1-rtal5-ezx5 | patch -p1
--> ez-x5 패치

# make ARCH=arm CROSS_COMPILE=armv5l-linux- ez-x5_config
# make ARCH=arm CROSS_COMPILE=armv5l-linux- oldconfig
--> 'RTAI Realtime Hardware abstraction Layer (CONFIG_RTHAL) [N/y/?] (NEW)'
```

라는 질문이 나오면 'y'를 선택한다. 그렇지 않으면 커널이 실시간 확장을 지원하지 않는다.

```
# make ARCH=arm CROSS_COMPILE=armv5l-linux- dep
# make ARCH=arm CROSS_COMPILE=armv5l-linux- zImage
```

target board Ramdisk의 etc/rc.d/rc.local를 그림 2.12와 같이 수정한다.



```
root@ama:~# cat etc/rc.d/rc.local
arch=$(uname -m)
a="a"
case "$_arch" in
  _a) a="an";;
  _i*) a="an";;
esac

# This will overwrite /etc/issue at every boot. So, make any changes you
# want to make to /etc/issue here or you will lose them when you reboot.
# echo "" /etc/issue
# echo "SAI100 Linux (experimental)" >> /etc/issue
# echo "kernel $(uname -r) on $(a $(uname -m))" >> /etc/issue

mknod -m 666 /dev/rtai_shm c 10 254
mknod -m 666 /dev/rtf0 c 150 0
mknod -m 666 /dev/rtf1 c 150 1
mknod -m 666 /dev/rtf2 c 150 2
mknod -m 666 /dev/rtf3 c 150 3
mknod -m 666 /dev/rtf4 c 150 4
mknod -m 666 /dev/rtf5 c 150 5
mknod -m 666 /dev/rtf6 c 150 6
mknod -m 666 /dev/rtf7 c 150 7
mknod -m 666 /dev/rtf8 c 150 8
mknod -m 666 /dev/rtf9 c 150 9

echo "created /dev/rtai_shm (major 10)"
echo "created /dev/rtf0 - 9 (major 10)"
[root@ez-x5 rc.d]#
```

그림 5.25 rc.local

(RTAI를 위한 실시간 모듈 컴파일)

```
# cd /project/ez-x5/test/rtai-x5/  
# tar xvjf rtai-3.0-test2.tar.bz2  
# cd rtai-3.0-test2  
# cat ../patch-rtai3.0-test2-jhs1 | patch -pl
```

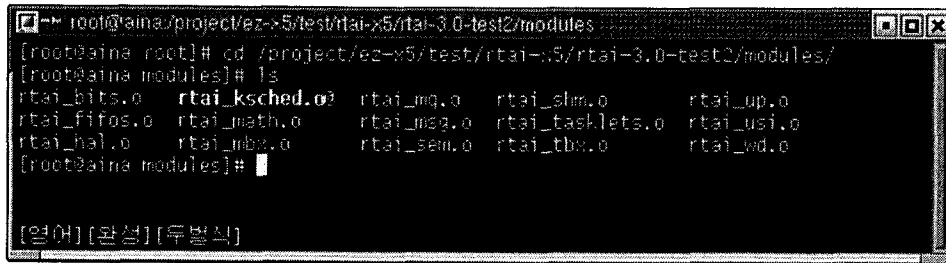
환경 설정과 컴파일에 앞서 커널 패치를 미리 해야하며, 패치 후에 리눅스 커널 디렉토리로 들어가 환경을 설정하고 make dep 명령을 내려야한다. 그렇지 않으면 설치 과정에서 오류가 발생한다.

```
# make ARCH=arm CROSS_COMPILE=armv5l-linux- oldconfig  
--> 리눅스 소스 코드 트리를 먼저 묻는다. 이 때 절대경로를 사용하여  
'/project/ez-x5/test/rtai-x5/linux'를 지정 한다.RTAI용 패치, RTAI를 위한 환경 설정, 컴파일까지 끝난 리눅스 커널 트리가 확실하다면 다음과 같은 환경 설정 변수 확인 피드백을 보여준다.
```

```
using LINUXDIR=/project/ez-x5/test/rtai-x5/linux  
using CROSS_COMPILE=armv5l-linux-  
using ARCH=armv5l
```

```
# make ARCH=arm CROSS_COMPILE=armv5l-linux- dep  
# make ARCH=arm CROSS_COMPILE=armv5l-linux-  
# cd /project/ez-x5/test/rtai-x5/rtai-3.0-test2/modules
```

--> 이곳에 그림 2.13과 같이 modules들이 생성 되어있다.



```
root@aina: /project/ez-x5/test/rtai-x5/rtai-3.0-test2/modules  
[root@aina root]# cd /project/ez-x5/test/rtai-x5/rtai-3.0-test2/modules/  
[root@aina modules]# ls  
rtai_bits.o    rtai_ksched.o  rtai_mq.o     rtai_slm.o     rtai_up.o  
rtai_fifos.o  rtai_math.o    rtai_msg.o    rtai_tasklets.o rtai_usi.o  
rtai_hal.o    rtai_mbx.o     rtai_sem.o    rtai_tbx.o     rtai_wd.o  
[root@aina modules]#
```

그림 5.2.26 modules

③ RTAI 테스트

rtai-3.0-test2 디렉터리에 보면 rtai-testsuite이라는 디렉터리를 볼 수 있을 것이다. 각 디렉터리의 README를 읽어보고 테스트를 할 수 있다.

```
# cd /project/ez-x5/test/rtai-x5/rtai-3.0-test2/rtai-testsuite/kern/preempt  
# cp display_rt_process.o /nfs  
--> 실행파일과 모듈을 target board에서 mount 되어 있는 /nfs 폴더로 카피한다.  
  
$ cd /nfs  
$ insmod rtai_hal.o  
$ insmod rtai_ksched.o
```



```

    int counter = 0;
    float sin_value;

    while (1) {
        rtf_put(FIFO, &counter, sizeof(counter));
        counter++;
        rt_task_wait_period();
    }
}

int init_module(void)
{
    RTIME tick_period;
    rtf_create(FIFO, 8000);

#ifdef ONE_SHOT
    rt_set_oneshot_mode();
#endif

    rt_task_init(&rt_task, fun, 0, STACK_SIZE, TASK_PRIORITY, 0, 0);
    tick_period = start_rt_timer(nano2count(TICK_PERIOD));
    rt_task_make_periodic(&rt_task, rt_get_time() + tick_period,          tick_period)
    return 0;
}

void cleanup_module(void)
{
    stop_rt_timer();
    rtf_destroy(FIFO);
    rt_task_delete(&rt_task);
    return;
}

```

```

-----display.c-----
#include <stdio.h>
#include <unistd.h>
#include <sys/types.h>
#include <sys/mman.h>
#include <sys/stat.h>
#include <fcntl.h>
#include <signal.h>

```

```

static int end;

static void endme(int dummy) { end=1; }

int main (void)
{

```

```

int fifo, counter;
if ((fifo = open("/dev/rtf0", O_RDONLY)) < 0) {
    fprintf(stderr, "Error opening /dev/rtf0\n");
    exit(1);
}

signal(SIGINT, endme);
while (!end) {
    read(fifo, &counter, sizeof(counter));
    printf(" Counter : %d. \n", counter);
}
return 0;
}

```

위의 소스는 RTAI에서 FIFO를 사용하여 counter를 하는 프로그램을 직접 작성하여 real time를 테스트 하였다. 그림 5.2.28은 테스트 하는 모습이다.

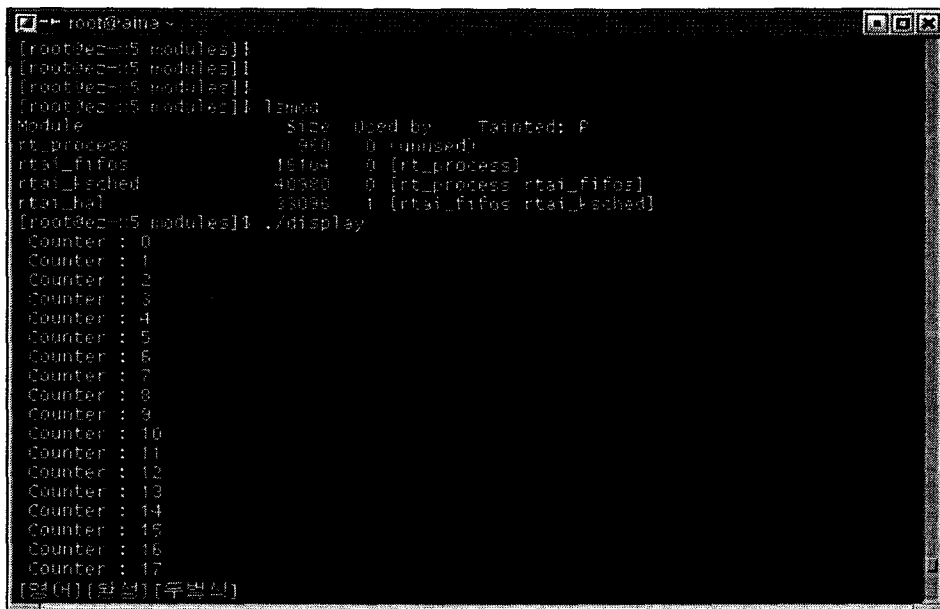


그림 5.2.28 RTAI test

5. 제어기 하드웨어 및 내방사선 실험

가. 모션 제어기

앞에서 설명된 개발환경을 PXA-255 arm 프로세서와 모션제어 칩을 사용한 구조에 적용하였다. 제어기 구성을 그림5.2.28에 나타내었다. 각 구성의 공통되는 점을 살펴보

면 다음과 같다. 모터를 직접 구동하는 서보 앰프 모듈이 있어서 PWM(Pulse Width Modulation) 방식으로 모터를 구동하며 모터에 연동된 엔코더로부터 회전정보를 얻어 모션 제어기 모듈로 전송하여 되먹임 폐루프 제어(feedback closed control)를 행한다. 또한 호스트 컴퓨터와 무선 및 네트워크를 통하여 연결되어 있어서, 인터넷이 접속된 모든 컴퓨터 환경에서 로봇에 접근할 수 있으며 네트워크를 제거할 경우 무선에 의한 원격 시스템으로 구성된다. 다른 점은 모션 컨트롤러와 사용 CPU 모듈 및 비디오 입력 장치이다. PXA-255의 경우 충분한 속도가 나오기 때문에 차후에 시도할 영상에 의한 자동 네비게이션 알고리즘을 구현하기 위하여 비디오의 디지털 화 입력 장치를 장착 하였다. 또한 MPC-860에 비하여 모듈의 크기가 크기 때문에 전체적인 제어기의 크기를 줄이기 위하여 칩 단위의 LM629 모션 제어기를 부착하였다.

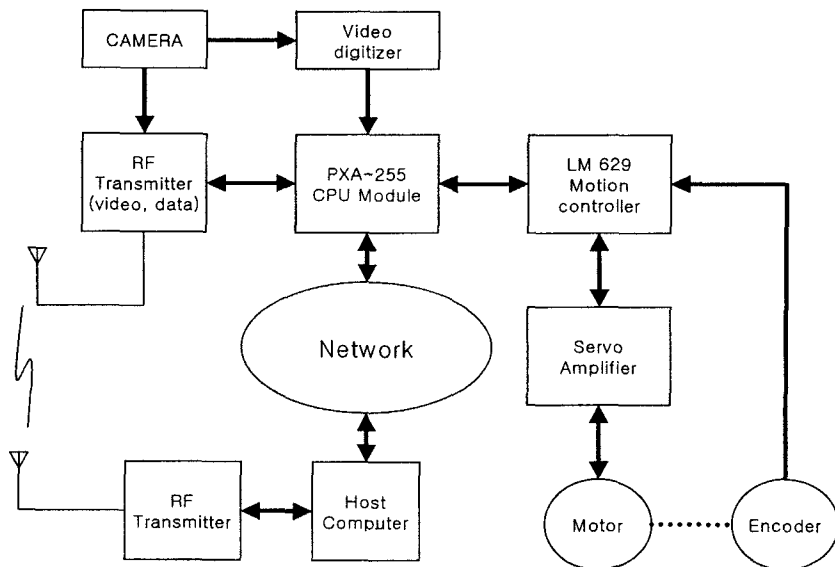


그림 5.2.29 로봇 제어기 (PXA-255 프로세서 사용)

나. 내방사선 실험

본 로봇이 하나의 안내관에 부착된 2개의 지지판을 검사하고 인접 안내관으로 이동하는 시간이 실험 결과 평균 1분이므로 53개의 안내관 모두를 검사하는데 대략 1시간이 소요된다. 영광 6호기에서 실측한 방사선 데이터 4krad/h를 기준으로 할 때 1/2 차폐를 한다고 가정하면 2 krad/h에서 최소한 1시간 이상 정상 동작하여야 한다. 본 연구소에서 보유한 고준위 방사선원이 10krad/h 이하의 선량을 얻기가 곤란하고 저준위 방사선원은 점 형인 관계로 2krad/h 이상인 경우 부품의 위치에 따른 선량 차이가 심

하여 차폐 없이 1krad/h의 감마선으로 실제 로봇이 동작하는 상황(모터 구동하는 상태)에서 실험하였다. 이 와 같은 상태에서는 여러 부품들이 동시에 동작하므로 특정 부품의 에러를 감지하기 어렵기 때문에 모션 제어기, 광 절연기 및 모터 구동기 다수를 설치하고 일부는 납 벽돌로 차폐하고 일부는 감마선에 직접 노출되게 하는 방법으로 이들의 동작을 비교하는 방법을 사용하였다. 나머지 부품의 정상 동작을 확인하기 위하여 완전히 차폐한 CPU(intel pxa-255, 400mhz) 부분을 제외한 모든 부품들이 조사 후 7시간 까지는 정상 동작하였다. 이 후 모터 구동기 LMD18200을 마지막으로 11시간 후 모두 정상 동작을 할 수 있었다. 이 중 모션 제어기 LM629는 모션 제어 부분이 먼저 파손되고 CPU 인터페이스 부분은 정상 동작하는 경우가 3시간 정도 지속되었다. CO-60 방사선원에 대한 납의 반가층 12mm로 차폐하면 4krad/h에서는 최대 7시간 정도 정상 동작 할 것으로 판단된다. 또한 카메라는 조사 직후부터 2시간 까지 스노우잉 현상이 증가 하다가 이 후 실험을 종료 한 20시간 까지는 거의 변화가 없었다. CPU 보드는 별도로 테스트 하였으며 12mm 차폐 후 2 krad/h에서 6시간 후 직렬통신 부분만 파손됨을 확인 할 수 있었다.

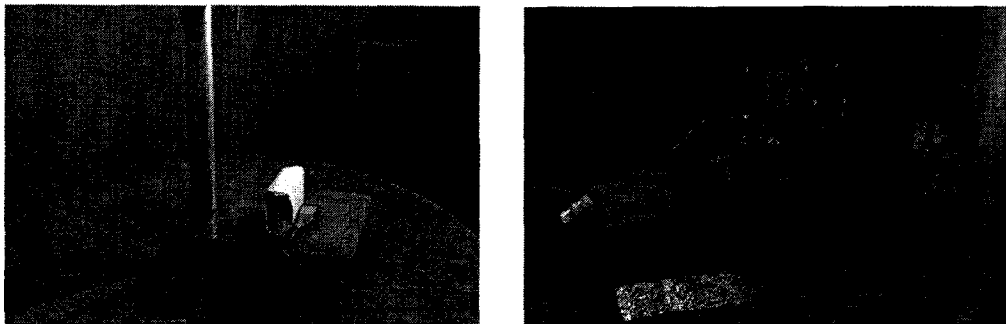


그림 5.2.30 내방사선 실험

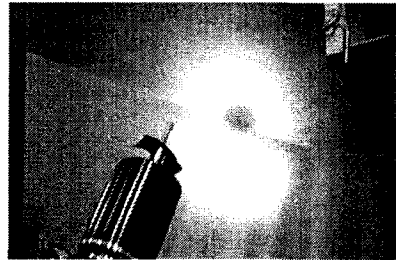
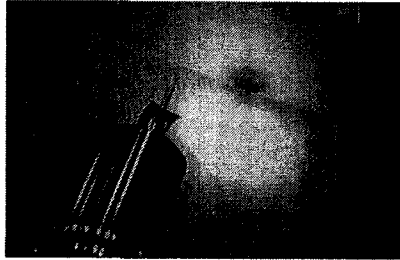
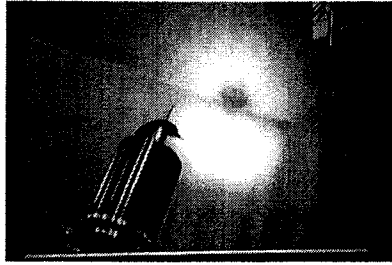


그림 5.2.31 CCD에 1krad/h의 감마선 조사전, 조사직후 및 1시간 후 영상

제 6 장

케이블 건전성 평가 기술 개발

제 6 장 케이블 건전성 평가 기술 개발

제 1 절 케이블의 환경가속열화시험 및 수명평가 기술개발

1. 케이블의 환경가속열화시험

가. 개요

원자력발전소의 가동년수 증가에 따라 발전소 주요 기기의 구조 및 계통의 열화를 전 수명기간 동안 잘 관리하여 운전성능과 안전성을 증대시키고, 나아가 설계수명 이상의 연장운전을 가능하게 하기 위해 필요한 발전소 주요 기기의 노화 원인분석 및 평가, 수명예측, 노화대책의 수립을 위한 수명관리 요소기술개발이 시급한 실정이다.

본 보고서에는 원전 케이블 열화의 검사 기술을 적용하기 위한 연구의 일환으로 케이블 재료의 환경가속열화 실험 및 수명평가 적용에 대하여 기술하였으며 현재 국내 원자력법과 원자력발전소용 Class 1E 등급 기기의 품질인정을 위한 IEEE 표준 시험요건을 중심으로 원전 사용환경 및 열화평가 관련규정/지침을 검토하였다. 원전 케이블의 환경가속열화 시험의 기준이 되는 열가속 열화를 위하여 현장 케이블 재료의 열분해 활성화 에너지를 기존의 방법 및 새로운 방법으로 측정하였으며, 원전의 주된 열화요소인 방사선에 의한 가속열화에 대해 기술하였다. 또 방사선 및 열을 이용하여 가속열화한 케이블 재료의 물성 평가 결과와 수명 평가의 임계치와의 관계에 대하여 기술하였다.

나. 규제 및 시험기준

현재 원전 케이블의 안전성 분석, 검증, 경년열화, 성능 등에 관한 평가관련 국내법규로는 국내 원자력법 제23조의 3 (주기적 안전성평가), 원자력법 시행령 제42조의 2 (주기적 안전성평가의 시기 등), 원자력법 시행령 제42조의 3 (주기적 안전성평가의 내용), 원자력법 시행령 제42조의 4 (주기적 안전성평가의 방법 및 기준), 원자력법 시행규칙 제19조의 2 (주기적 안전성평가의 세부내용), 원자력법 시행규칙 제19조의 3 (주기적 안전성평가의 기준),

영 제42조의 4 제4호[원자로 시설 등의 기술기준에 관한규칙 제12조 내지 제49조 (성능에 관한 기술기준), 원자로 시설 등의 기술기준에 관한규칙 제68조 내지 제85조 (품질보증에 관한 기술기준)] 등에 근거하고 있다.

또 국제법규로는 IEEE 383을 중심으로 열화평가 관련규정 및 지침을 제시하고 있으며[6.1], 여기에서 원자력 발전소용 전기 1급(Class 1E) 케이블, 현장 전선이음(field splice) 및 기타 접속부 검증에 사용할 형식시험 확립에 대한 방향을 제시하고 있다. 검증 일반 지침은 IEEE Std 323-1974에 제시되어 있다[6.2]. 본 기술기준에 명시된 케이블 범주는 전력, 제어 및 계측 설비에 사용하는 것이다. 형식시험은 전기 기기가 정상 및 설계 기준 사건 환경을 포함하는 사용 조건하에서 성능 요건을 만족시킬 수 있음을 입증하는데 있어서 입증 또는 보완하기 위하여 우선되는 방법이다. 형식시험은 설계 기준 사건의 조건 하에서 케이블, 현장 전선이음 및 접속부가 기능을 수행할 수 있음을 입증하기 위하여 주로 사용된다. 설계 기준 사건은 발전소 수명 기간 중 어느 기간에서나 발생할 수 있으므로, 이들 조건을 모의하기 위하여 형식시험에서 요구되는 열 및 방사선 열화는 발전소 정상 사용 조건하에서 운전되는 케이블 유형의 능력을 동시에 나타낼 수도 있다. 케이블, 현장 전선이음 및 접속부는 정상 수명 동안 냉각제 상실 사고로 인한 가상 환경 조건에서 운전할 수 있어야 한다. 부하 및 신호 준위(loading and signal level)의 조건은 냉각제 상실 사고 상황 하에서 예상할 수 있는 케이블의 운전을 위하여 가장 가혹한 환경으로 가정하여야 한다. 검증수명을 모의하기 위한 표본의 열화기간 및 온도조건 설정에 대한 기준은 Arrhenius 곡선 [IEEE Std 1-1969, 전기 기기의 정석에 있어서의 온도 제한에 대한 일반 원칙, IEEE Std 98-1972, 고체 전기 절연 재료(Solid Electrical Insulating Materials)]의 온도 지수 설정 및 열적 평가에 대한 시험 절차의 준비 지침, IEEE Std 99-1970, 전기 기기 절연 계통의 열적 평가에 대한 시험 절차 준비 지침, IEEE Std 101-1972, 열적 수명 시험 데이터의 통계적 해석에 대한 지침] 또는 대상 재료에 대한 유효성과 적용 가능성이 증명된 다른 방법을 근거로 할 수 있다. 설치 수명에 걸친 예상 최대 총 누적 방사선량에 IEEE Std 323-1974의 부록 A 또는 부록 B에 명시된 특정 설치에 대한 1회의 냉각제 상실 사고 선량을 합한 방사선량에 시편을 노출시킨다.

선량율은 시간당 1×10^6 rad를 초과하지 않아야 한다. 이 제한 사항은 냉각재 상실 사고 프로파일의 모의시보다 큰 선량율이 요구될 때는 적용하지 않는다. 시편이 냉각재 상실 사고 사건의 온도, 압력, 습도 및 화학 약품 살수에 동시 노출되는 동안 정격 전압 및 부하 하에서 운전될 수 있도록 만들어진 압력 용기(pressure vessel)내에서 방사선에 조사된 시편(irradiated specimens)을 시험한다. 챔버 설계(chamber designs)는 여기에 명시된 바와 같이 온도 및 증기 압력을 감시하고 변화시키기 위한 설비가 있어야 하며, 화학약품 살수를 재순환시키고 시편에 전기 부하를 인가하기 위한 설비가 있어야 한다. 화재 시험은 화염 침범 지역에서 케이블의 외부 피복(outer covering) 및 절연체가 파괴되더라도 케이블이 화재를 확산시키지 않음을 입증해야 한다. 형식시험을 위하여 권고되는 케이블 크기는 표 6.1.1에 수록된 것으로 하지만, 반드시 이들로만 국한되지는 않는다.

표 6.1.1. 형식시험에 대한 대표적인 케이블

종 류	시 험
2000 V까지의 다심제어용 케이블 또는 차폐된 다심 신호용 케이블 또는 단심 전력용 케이블	내온 및 내습 열 및 방사선 노출 설계 기준 사건 모의 케이블 연합중 한 케이블의 수직 화염 시험 수직 트레이 화염 시험
다심 신호용 케이블 중 2연(pairs), 3연(triple) 또는 4연(quad) 케이블	내온 및 내습 열 및 방사선 노출 설계 기준 사건 모의 수직 화염 시험
동축 또는 3동축(triaxial) 또는 특수 계장용 케이블	내온 및 내습 열 및 방사선 노출 설계 기준 사건 모의 케이블 연합중 한 케이블의 수직 화염 시험
2연 열전대용 연장 케이블	내온 및 내습 열 및 방사선 노출 설계 기준 사건 모의 수직 트레이 화염 시험 케이블 연합중 한 케이블의 수직 화염 시험
2001-15000 V 전력용 케이블 1/C 트라이플렉스 및 다심	수직 트레이 화염 시험

다. 케이블 재료의 활성화에너지 측정

원전 케이블의 구성요소인 고분자 유기재료(절연재, 피복재)의 방사선 열화는 금속도체의 방사선 열화에 앞서 진행된다. 방사선 열화의 요인은 고분자 재료의 방사선에 의한 분자쇄의 절단, 절단된 분자쇄끼리 결합하는 가교 및 절단된 분자쇄와 산소와 결합하여 극성기를 증가시키는 것 등이 있으며, 이로 인한 케이블 및 연결단자의 기계적, 전기적 성질의 저하 즉 트리현상, 접지불량, 부식 쇼트, 작동불량 등으로 나타나고 있다. 원전용 케이블의 절연 및 피복재료는 종류와 배합내용이 다양하기 때문에 종래의 자료로부터 전선/케이블의 열화 또는 수명을 추정하는 것이 극히 어렵다.

케이블의 수명을 평가하기 위한 케이블의 열화를 단시간에 시험할 수 있는 기술과 열화평가 기술개발이 필수적이다. 본 연구에서는 케이블의 피복재료 및 절연재료의 활성화에너지를 측정하여 열 및 방사선 열화물성을 전기적 및 기계적 특성의 변화를 측정하여 평가하였다.

원전 케이블의 절연재 및 피복재를 구성하는 고분자 재료의 열가속열화 수행을 위한 기초적 근거를 위하여 건전한 상태의 시료로 열분해 활성화에너지를 측정하였다. 재료의 활성화에너지 측정법은 다양한 방법을 통한 여러 연구에 의해 이미 알려져 있으며, 방법론에 따라 측정하고자 하는 활성화에너지의 값도 차이가 나게 된다. 본 연구에서는 고분자 재료의 열열화에 따른 반응속도를 이용하여 열중량분석을 이용한 Kissinger법, Flynn-Wall-Ozawa법과 시차주사열량계법, 유전특성을 이용하여 활성화에너지를 측정하였다.

(1) Kissinger 법을 이용한 활성화에너지의 측정

케이블 절연재료 및 피복재료를 단시간에 가속열화하기 위하여 Arrhenius 외삽법(IEEE 1-09, IEEE 98-72, IEEE 99-70, IEEE 101-72)에 의거 활성화에너지를 구하였다. 열중량분석은 TA instrument사의 Thermogravimetric Analyzer(Model. TGA 2950)를 사용하여 질소 분위기에서 50℃로 평형을 유지한 후, 10, 15, 20℃/min의 승온속도로 측정하여 분해반응의 속도 차에 따른 활성화 에너지를 Kissinger 방정식을 이용하여 구하였다[6.3].

$$-\ln\left(\frac{\beta}{T_m^2}\right) = \frac{E_a}{RT_m} - \ln\left(\frac{AR}{E_a}\right)$$

β : heating rate,

T_m : the most rapidly decomposing temperature [K]

E_a : thermal decomposing activation energy [kJ/mol]

R : gas constant (= 8.314 J · mol⁻¹K⁻¹)

A : pre-exponential factor

원전 15 kV XLPE 전력용 케이블의 절연재료인 XLPE(LG전선), 600V EPR/CSP 전력 및 제어용 케이블 절연재료 LG전선)인 EPR의 활성화에너지를 Kissinger법에 의해 측정하였다. 방사선 조사선량의 증가에 따라 XLPE, EPR 재료의 활성화에너지는 모두 초기에는 증가하다 고선량 영역에서는 감소하는 경향을 나타내었다. 초기 활성화에너지의 증가는 분자쇄의 절단으로 방사선에 의한 가교도 증가에 기인한 것으로 생각되며, 고선량 영역에서는 해당 고분자 재료의 주쇄의 절단 및 분해로 활성화에너지가 감소한 것으로 해석된다[6.4].

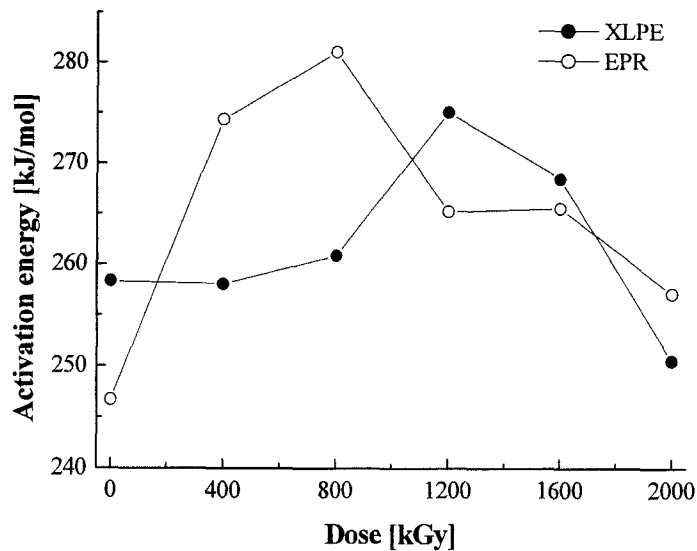


그림 6.1.1. Kissinger법을 이용한 XLPE, EPR의 방사선 조사에 따른 활성화에너지 비교

(2) Flynn-Wall-Ozawa 법을 이용한 활성화에너지의 측정

열중량분석을 이용한 활성화에너지의 측정치를 Kissinger법과 비교, 분석하기 위하여 ASTM E1641법에 의거 Flynn-Wall-Ozawa법을 이용하여 활성화 에너지를 구하였다. Flynn-Wall-Ozawa법에 의한 활성화에너지의 측정은 여러 승온속도에서의 중량감소와 온도에 대해 직접적으로 반응차수에 관계없이 적분법을 이용하여 구하게 된다[6.5].

$$\log F(a) = \log \frac{AE}{R} - \log \beta - 2.315 - 0.4567 \frac{E}{RT}$$

Flynn-Wall-Ozawa법을 이용하여 활성화에너지를 구하기 위해 conversion level을 15%, 20%로 설정하여 각 승온속도에서의 온도를 구한 후, 이것의 로그값과 $1/T \times 10^3$ 의 관계를 이용하여 활성화에너지를 구하였다.

원전 15kV XLPE 전력용 케이블(LG전선)의 절연재료인 XLPE의 Flynn-Wall-Ozawa법에 의한 활성화에너지의 변화를 방사선 조사는 그림 6.1.2에 도시한 것과 같다. Kissinger법에 의해 측정된 활성화에너지와는 다른 경향을 나타내고 있으며, 이는 Flynn-Wall-Ozawa법에 의한 활성화에너지의 계산이 열중량곡선의 전반적인 위치에서 적용가능한 데 비하여, Kissinger법은 반응속도가 가장 빠른 한 점만을 기준으로 하여 계산하기 때문에 서로 차이를 보이게 된다. Flynn-Wall-Ozawa법에 의한 활성화에너지는 시험편의 종류에 따라 가장 중요한 성분이 분해되는 온도를 직접 찾아 그 점을 기준으로 하여 conversion level을 조절해서 구해야 하며, 이는 수명평가를 위한 활성화에너지의 측정법으로는 다소 복잡한 과정이 부가되어야 하는 단점을 가지게 된다.

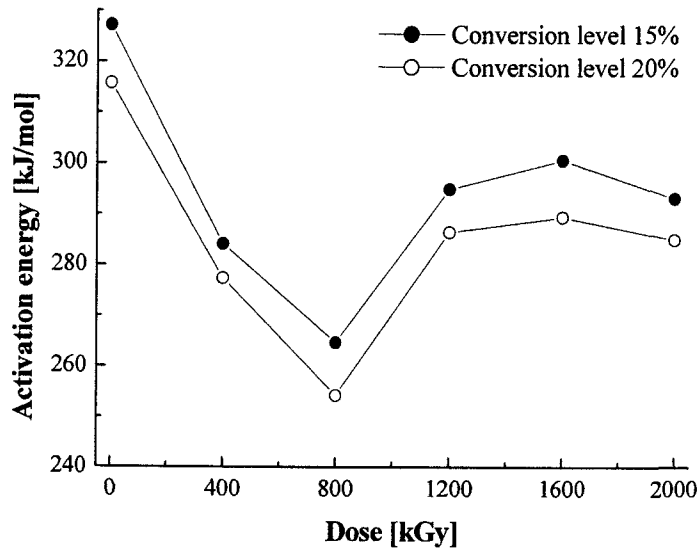


그림 6.1.2. Flynn-Wall-Ozawa법을 이용한 XLPE의 방사선조사에 대한 활성화에너지의 비교

(3) 시차주사열량계법을 이용한 활성화에너지의 측정

열중량분석을 이용한 Kissinger법, Flynn-Wall-Ozawa법에 의한 활성화에너지와 시차주사열량계법으로 분해반응 속도 차에 의한 활성화에너지를 구하여 비교하였다. 시차주사열량계법에 의한 활성화에너지는 ASTM E698, ASTM E474법에 의거하여 1, 2, 5, 7, 10, 15, 20 K/min의 승온속도로 5 mg의 시험편을 분해하여 나타난 흡열피크의 간격비교로 구하였다. 시차주사열량계법에 의한 활성화에너지의 측정은 아래의 식을 이용하였다[6.6].

$$E \cong -2.19R [d \log_{10} \beta / d(1/T)]$$

원전 15kV XLPE 전력용 케이블(LG전선)의 절연재료인 XLPE의 미조사 시료를 승온속도의 차이에 따라 측정한 DSC 곡선은 그림 6.1.3과 같으며, 승온속도의 증가에 따라 피크의 깊이가 더욱 현저하게 나타나고 있다. 방사선 조사에 대하여 시차주사열량계법을 이용하여 구한 활성화에너지를 그림 3-4에 나타내었다. XLPE의 시차주사열량계법으로 구한 활성화에너지는 방사선 열화에 대해 Kissinger 법으로 구한 경우와 같이 저선량 영역에서는 증가, 일정 선량 이후에서는 다시 감소하는 경향을 나타내었다. 열중량분석을 이용한

Kissinger법은 온도증가에 따른 분해정도로 활성화에너지를 측정하지만, 시차주사열량계법은 XLPE의 경우 흡열피크가 현저히 나타나는 용점에서의 온도와 같이 일정온도를 중심으로 승온속도의 차이에 의해 활성화에너지를 계산하는 것으로 계산된 활성화에너지의 수치는 다르지만, 방사선 조사로 인한 열화에 대해서는 비슷한 경향을 나타내었다.

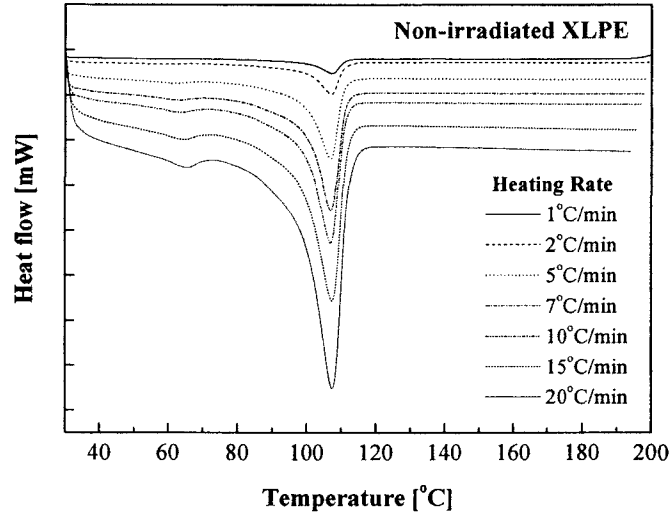


그림 6.1.3. 승온속도에 따른 XLPE의 DSC 곡선

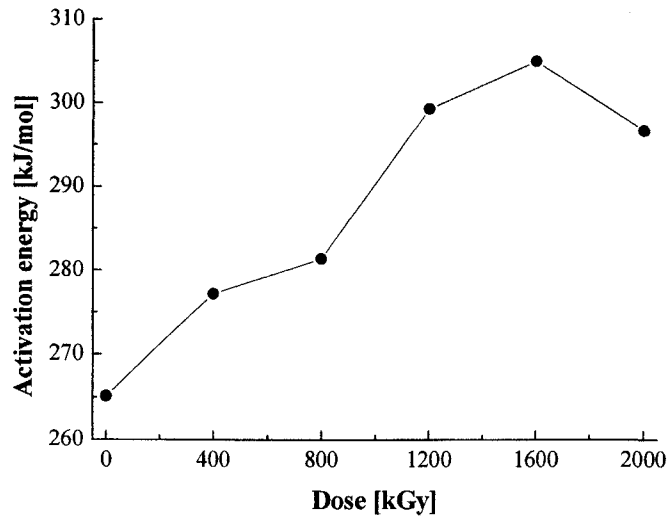


그림 6.1.4. 시차주사열량계법을 이용한 XLPE의 방사선조사에 대한 활성화에너지

(4) 유전특성을 이용한 활성화에너지의 측정

열분해에 의한 고분자 재료의 활성화에너지와 비교하기 위하여 온도상승에 따른 유전특성의 변화로 활성화에너지를 측정하였다. 열중량분석, 시차주사 열량분석에 의한 활성화에너지의 측정은 시험편에 가해지는 승온속도 차에 따른 분해속도의 비로 구해지는 반면, 유전특성에 의한 활성화에너지는 일정한 승온속도로 시험편에 가해지는 전압의 주파수를 변화시켜 이에 따른 활성화에너지를 측정하였다[6.7]. 유전특성의 분석은 TA instrument사의 Dielectric Analyzer(Model. DEA 2970)를 이용하였으며, 시험편을 양 전극 사이에 300 Newton의 압력으로 고정시키고 1, 3, 10, 30, 100, 300, 1000, 3000, 10000, 30000, 100000 Hz의 주파수로 교류 1V의 전압을 인가하여 온도상승에 따른 각 주파수에서 유전율, 유전손실계수, $\tan\delta$ 를 이용하여 측정하였다.

600V EPR/CSP 전력 및 제어용 케이블(LG전선)의 절연재료인 EPR의 유전특성을 $-150\sim 50^{\circ}\text{C}$ 의 범위에서 측정하였다. EPR 재료의 온도에 따른 유전손실계수는 그림 6.1.5와 같이 인가 주파수의 증가에 따라 피크를 가지는 온도가 증가하게 되며, 이는 교류전압 인가에 따른 극성의 반전으로 인해 분자 내 쌍극자의 mobility 변화가 주파수에 의해 직접 영향을 받기 때문이다[6.8]. 이러한 방법으로 방사선 가속열화시킨 EPR 재료의 유전손실계수를 모두 측정하여 계산한 활성화에너지의 변화를 그림 6.1.6에 열중량분석을 이용, Kissinger 법으로 구한 활성화에너지의 값과 비교하여 나타내었다.

Kissinger법에 의한 열분해 활성화에너지와 유전특성의 변화로 구한 활성화에너지는 수치는 다르지만, 방사선 열화에 대해 유사한 경향을 나타내고 있음이 확인되었다.

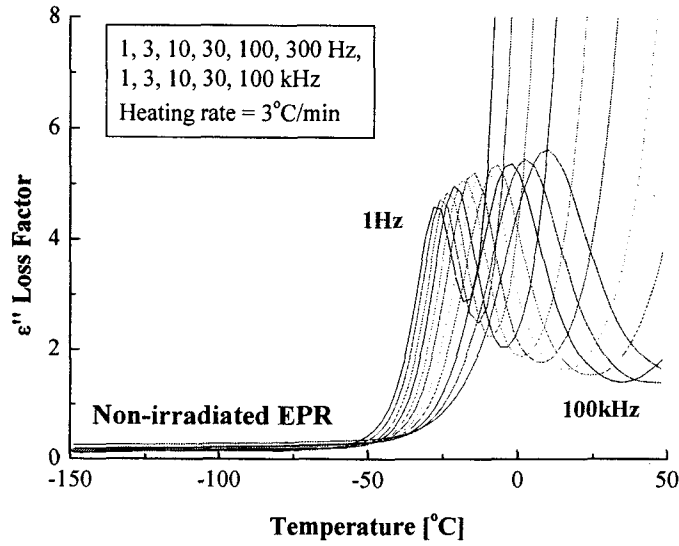


그림 6.1.5. 온도에 따른 EPR 재료의 유전손실계수

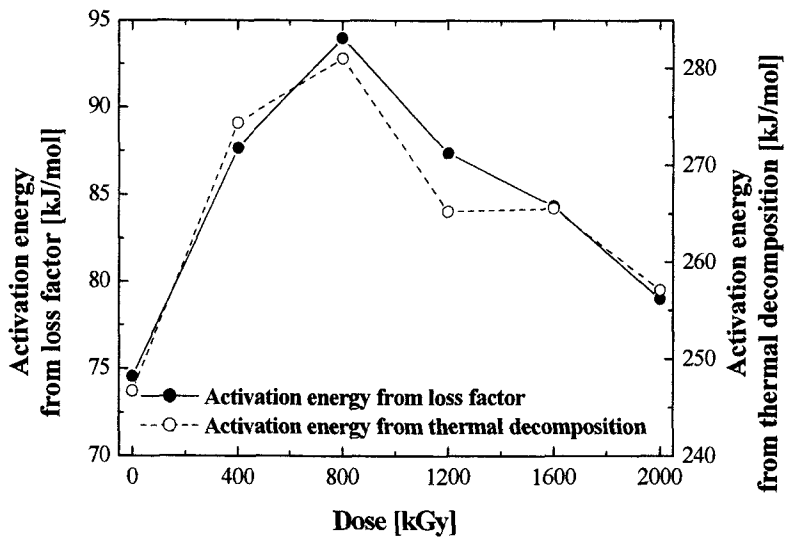


그림 6.1.6. 방사선 조사에 대한 EPR 재료의 활성화에너지 비교

라. 케이블 재료의 환경가속열화

(1) 열 가속열화시험

열가속열화시험은 Kissinger법으로 구한 건전한 상태의 원전 케이블재료의

활성화에너지를 이용하여 Arrhenius 외삽법에 의해 130℃에서의 열화시간을 구하였다.

$$k = A e^{-E_a/RT} \quad (\text{Arrhenius equation})$$

$$\ln\left(\frac{k_2}{k_1}\right) = -\left(\frac{E_a}{R}\right) \cdot \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)$$

R: gas constant (= 8.314 J · mol⁻¹K⁻¹)

k_1, k_2 는 각각 130℃와 활성화에너지에 의한 특정 온도에서 40년 수명을 나타내는 시간이며, T_1, T_2 는 활성화에너지에 의한 온도와 가속열화온도인 130℃이다. 이 식을 이용하여 재료의 활성화에너지를 구하면 130℃의 가속열화 온도에서 시험재료의 사용온도 수명에 상당하는 수명을 계산하였다.

원전용 600V EPR/CSP 전력 및 제어용 케이블(LG전선) 절연재료인 EPR의 Kissinger법을 통해 구한 활성화에너지를 기준으로 Arrhenius 반응속도식에 따라 130℃에서의 가속열화시간을 구하였으며 표 6.1.2에 나타내었다.

표 6.1.2. 원전용 600V EPR/CSP 전력용 케이블 절연재료의 가속열화시간

40℃ 기준	20년 상당	40년 상당	60년 상당	80년 상당	100년 상당	120년 상당
130℃ 기준	35h 50m	71h 40m	107h 30m	143h 20m	179h 10m	215h 00m

(2) 방사선 가속열화시험

원전 케이블 및 케이블 접속재에 관련된 재료의 정상 또는 비정상 상태에서의 가장 큰 열화 요인은 방사선과 열에 의한 열화이다. IEEE standard에서는 원전용 Class 1E 등급의 케이블 재료는 정상상태에서 Co⁶⁰ γ-ray에 0.5 MGy의 선량에, 냉각재 상실사고(Loss of Coolant Accident: LOCA) 시에는 1.5 MGy의 선량에서도 제 기능을 수행하도록 지침하고 있다.

본 연구에서는 이에 따라 국내 원전 케이블 재료의 내방사선성을 시험하기 위하여 한국원자력연구소 방사선 조사시설의 Co⁶⁰ γ-ray 선원을 사용하여 실온, 대기 중에서 5 kGy/hr의 선량율로 각각 400, 800, 1200, 1600, 2000 kGy의 선량으로 조사하였다.

2. 케이블의 가속열화에 의한 물성 평가

가. 가속열화에 따른 물성 변화

(1) 교류절연파괴강도

교류절연파괴강도는 1차전압 100 V, 2차전압 0~50 kV, 60Hz 정격의 교류내압시험장치를 사용하여 평등전계를 구성하는 구대 구 전극사이에 시편을 장착하여 인가 교류전압을 3 kV/sec의 속도로 상승시키면서 측정하였다. 파괴전압의 세기는 각 시편의 두께와 절연파괴시의 전압을 10회씩 측정하여 그 평균값으로 하였으며, 시편의 연면방전을 피하기 위해 시편을 실리콘유에 함침하여 측정하였고 절연파괴전압과 두께를 구한 후 $V=Ed$ 의 관계를 이용하여 전계의 세기를 구하였다. (V : 절연파괴전압 [kV], E : 절연파괴강도 [kV/cm], d : 시편의 두께 [cm])

원전 600V 전력 및 제어용 케이블(LG전선)의 피복재료로 사용되는 CSPE와 저밀도 폴리에틸렌(LDPE)의 방사선 조사에 대한 교류절연파괴강도를 그림 6.1.7에 나타내었으며, 케이블의 절연재료로 사용되는 EPR의 열가속 열화에 대한 교류절연파괴강도를 그림 6.1.8에 나타내었다. LDPE는 방사선 조사에 대해 저선량 영역에서 가교도가 급격히 증가하였다가 선량의 증가에 따라 가교도의 한계를 나타내는 폴리머로 잘 알려져 있으며, 본 실험에서도 100 kGy의 조사선량에서 교류절연파괴강도의 향상을 나타내는 것은 일시적인 가교도의 증가에 기인한 것으로 보인다. CSPE의 방사선 열화에 따른 교류절연파괴강도와 EPR의 열가속 열화에 따른 교류절연파괴강도는 모두 열화가 진행됨에 따라 그 수치가 감소하는 경향을 나타내어 원전재료의 방사선 및 열 열화 평가지침으로 사용할 수 있을 것으로 사료된다. 열화에 따른 교류절연파괴강도의 저하는 분자간의 결합 절단 및 붕괴에 의해 생성된 전도성을 지닌 이온, 쌍극자의 생성에 기인하는 것으로 나타났다[6.9].

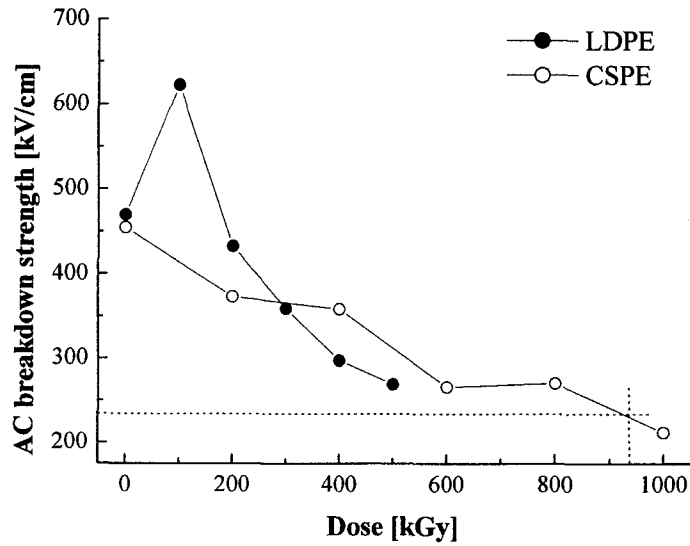


그림 6.1.7. 방사선 가속열화에 따른 LDPE와 CSPE 재료의 교류절연파괴강도

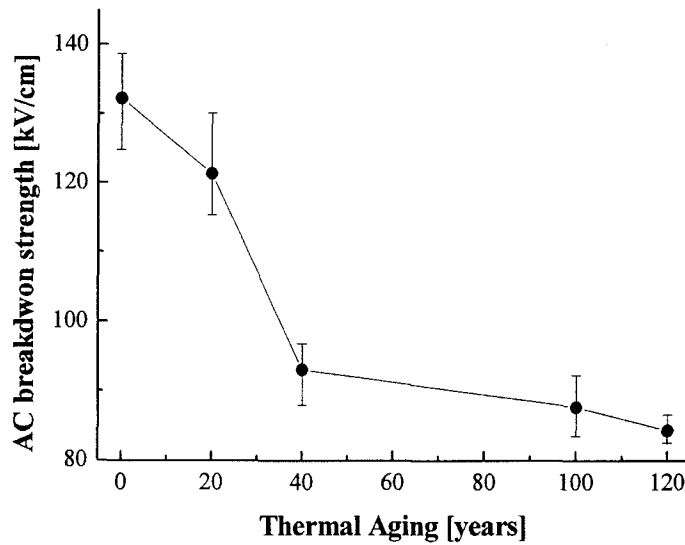


그림 6.1.8. 열가속열화에 따른 EPR 재료의 교류절연파괴강도

(2) 절연저항

절연저항은 재료의 체적저항율을 구하였으며, Electrometer & High Resistance Meter와 Test Fixture를 사용, 인가전압을 1 kV로 하여 실온에서 측정하였다.

체적저항을 측정의 개략도는 그림 6.1.8에 도시한 바와 같다.

원전용 15 kV XLPE 케이블 절연재료(LG전선)로 사용되는 XLPE의 방사선 조사에 따른 체적저항을 그림 6.1.9에 나타내었다. XLPE의 체적저항은 저선량에서의 급격한 감소와 400 kGy 이상의 고선량에서는 포화하는 경향을 나타내었으며, 이것은 교류절연파괴강도의 경우와 같이 열화에 따른 극성을 지닌 이온, 원자의 생성에 기인한 것으로 나타났다. 체적저항은 현재 전력 케이블의 절연 및 피복재료의 평가지침으로 사용되고 있지만, 저항율이 큰 관계로 고전압을 인가하여 미소전류를 측정하는 현재의 방법으로는 현장 측정에 있어 어려움을 나타내고 있다.

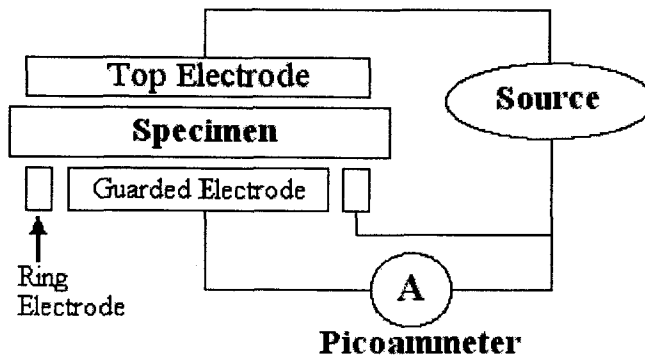


그림 6.1.9. 체적저항을 측정의 개략도

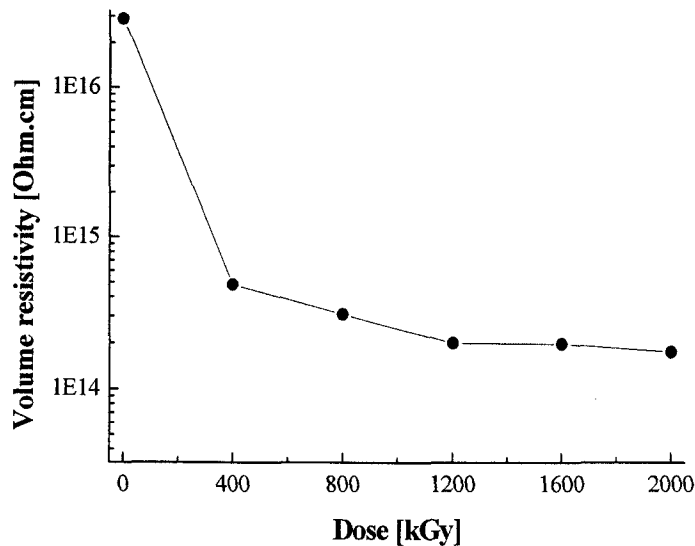


그림 6.1.10. 방사선 조사에 따른 XLPE의 체적저항을

(3) 정전용량 및 유전정접 측정

원전 케이블 절연 및 피복재료의 유전율, 유전손실계수, 유전정접($\tan\delta$)의 측정은 유전측정장치(TA Instruments사, Type. 2970)를 이용하였으며, 본 시스템은 1 kHz에서 유전율은 0.01, $\tan\delta$ 는 1×10^{-4} 의 측정이 가능하다. 두 금(gold) 전극 사이에 두께 0.2 mm의 시편을 장착하고, 30°C의 온도에서 교류 1 V의 정현파 전압을 인가, 교류전계를 생성시켜 시편을 분극시키고, 이로 인해 나타나는 위상각의 차이를 이용하여 유전율, 유전손실계수, 유전정접을 측정하였다. 그림 6.1.11에 유전측정장치의 개략도를 나타내었다.

원전용 600 V 전력 및 제어용 케이블(LG전선)의 절연재료로 사용되는 EPR의 유전특성을 $-150 \sim 50^\circ\text{C}$ 의 온도 범위에서 교류 1 V의 전압을 인가하여 측정하였으며, 이것은 인가한 주파수에 따라 일정 온도에서 전이점을 나타내었다. 이 전이점에서의 유전손실계수 값과 유전정접($\tan\delta$)의 값을 방사선 조사에 대해 그림 6.1.12에 나타내었다. 그림에서 나타낸 것과 같이 10 Hz ~ 100 kHz의 주파수 범위에서 유전손실계수와 유전정접은 모두 열화가 진행됨에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 유전정접의 경우는 거의 선형적인 감소를 나타내고 있어 사용되고 있는 케이블 재료의 열화평가 및 수명에 측에 관한 지침이 될 것으로 보인다[6.10].

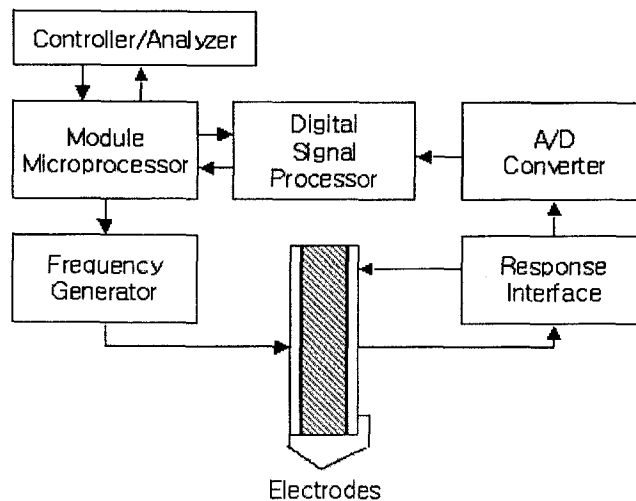
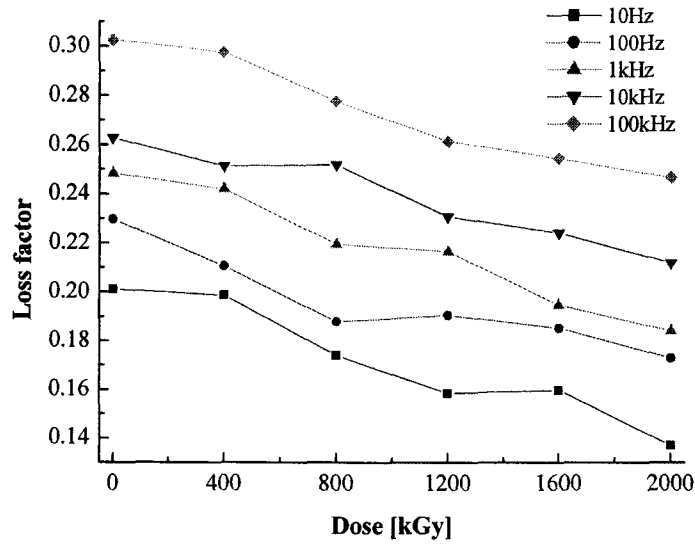
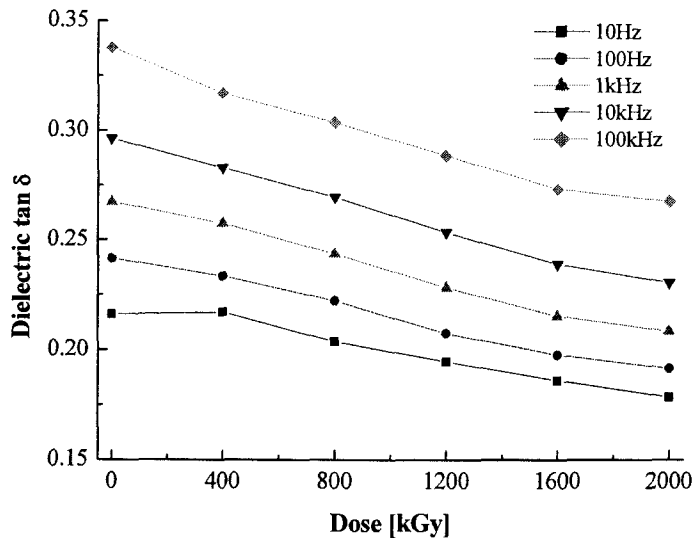


그림 6.1.11 유전측정장치의 개략도



(a) 유전손실계수



(b) 유전정접

그림 6.1.12. 방사선 조사에 대한 전이온도에서의 유전손실계수와 유전정접

(4) 연신율 및 인장강도 측정

원전 케이블 절연 및 피복재료의 파단시 연신율과 인장강도의 측정은 인장

시험기(Instron, Model. 1130)를 사용하여 실온에서 측정하였다. ASTM D638 규정에 의거하여 dumbbell 형태의 시편 양끝을 지그에 3×10^5 MPa의 압력으로 고정시킨 후 재료에 따른 Load cell, crosshead speed를 ASTM 규정에 의해 정하여 시편이 파단될 때까지 인장시켜 시편의 초기길기와 파단 후 시편의 길이를 비교하여 파단시 연신율을 구하였다 [6.11].

원전용 600V 전력 및 제어 케이블(LG전선)의 절연재로 사용되는 EPR의 열가속열화에 따른 파단시 연신율을 그림 6.1.13에 나타내었으며, 열열화의 진행에 따라 연신율의 감소를 나타내었다. 본 열열화에 의한 연신율 측정시험에서는 원전 수명주기인 40년에도 연신율의 감소는 임계치인 건전상태의 50% 이상을 나타내고 있었으며 80년 이상에 상당하는 열열화 시편에서는 급격한 감소를 나타내었다. 실제 현장의 경우는 열열화 뿐만 아니라 방사선에 의한 열화 및 전계 등의 복합적인 열화가 발생하므로 본 열열화에 의한 연신율의 수치는 40년에도 내구성을 지니는 것으로 보인다. 그림 6.1.14에 원전용 15kV 전력용 케이블(LG전선)의 절연재인 XLPE의 방사선 조사에 따른 파단시 연신율과 인장강도를 나타내었으며, 이 경우 400 kGy 정도의 저선량에서 연신율과 인장강도의 급격한 감소를 나타내었다. XLPE는 방사선 열화에 대해서 열화의 임계치가 400 kGy 미만으로 내방사선 특성이 약하기 때문에 제어, 계측용과 같은 원전 격납용기 내부에 매입되지는 않지만, 우수한 내전압 특성으로 인해 고전압 케이블의 절연재로 사용되고 있다. 그림 6.1.15, 6.1.16에는 각각 방사선 조사에 따른 CSPE와 EPR의 파단시 연신율을 나타내고 있으며, 이 경우도 모두 저선량에 대해 급격한 연신율의 감소를 나타내며 고선량 영역에서는 더 이상 연신율의 감소가 나타나지 않고 있다. EPR의 경우 열열화와 방사선 열화를 독립적으로 하였을 때 방사선 열화에 대해서는 저선량에서 급격하게 감소한 반면, 열열화에 대해서는 80년에 상당하는 열화가 진행된 후에 임계치를 보였다. 열화의 진행이 복합적이란 측면을 고려하여 독립적인 열화에 있어서는 열화평가에 대해 충분한 고려가 있어야 할 것으로 보인다.

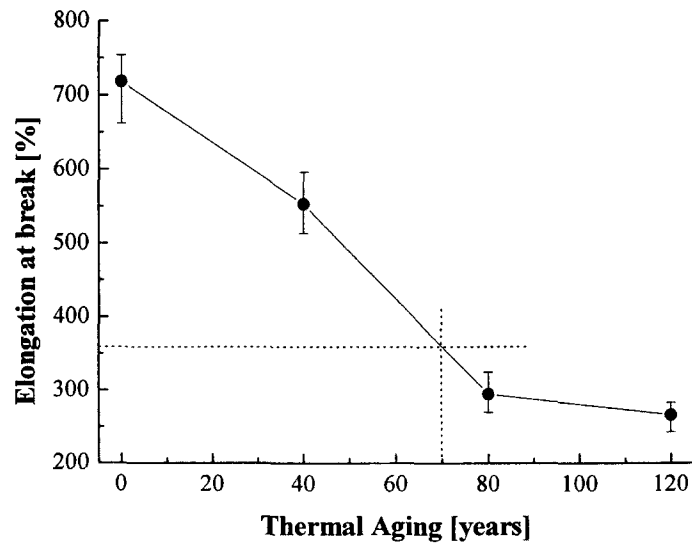


그림 6.1.13. 열가속열화에 따른 EPR 재료의 파단시 연신율

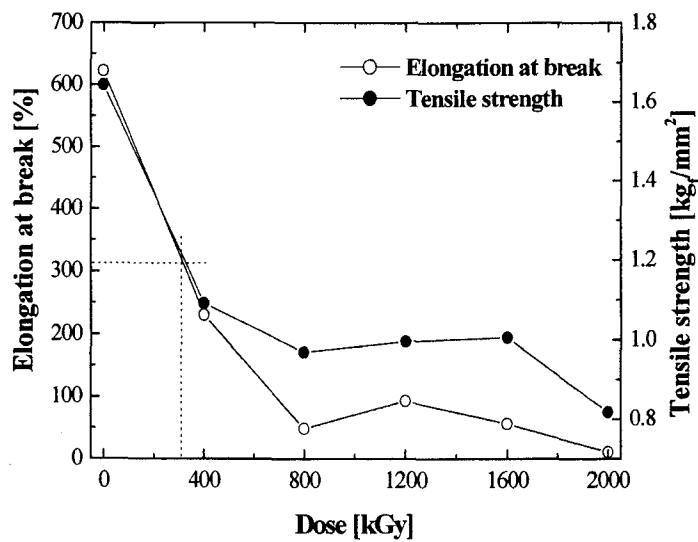


그림 6.1.14. 방사선 가속열화에 따른 XLPE 재료의 파단시 연신율과 인장강도

(5) 중량감소온도 측정

원전 케이블 재료의 중량감소온도를 측정하기 위해 열중량분석을 TA

Instrument사의 Thermogravimetric Analyzer (Model. TGA 2950)를 사용하여 질소 분위기에서 50℃로 평형을 유지한 후, 10℃/min의 승온속도로 측정하였다. 열화에 따른 재료의 분해 정도를 비교, 분석하기 위하여, 시료중량의 5% 감소시 온도를 측정하였다. 기존의 연구[6.12]에 의하면, 현재 유기절연재료의 방사선 열화평가 지침이 되는 기계적 특성과 TGA를 이용한 중량감소 온도의 변화와는 일정한 상관관계가 있는 것으로 알려져 있다.

원전용 600V 전력 및 제어 케이블의 절연재(LG전선)인 EPR과 피복재료로 사용되는 CSPE의 방사선 조사에 따른 5% 중량감소온도를 그림 6.1.15와 6.1.16에 나타내었다. 두 경우 모두 방사선 조사선량 증가에 따라 5%중량감소 온도의 감소를 보이고 있으며, CSPE의 경우는 방사선 조사에 따른 중량감소가 선형적으로 나타난 데 비하여 EPR은 연신율의 결과 거의 유사한 경향을 나타내고 있다.

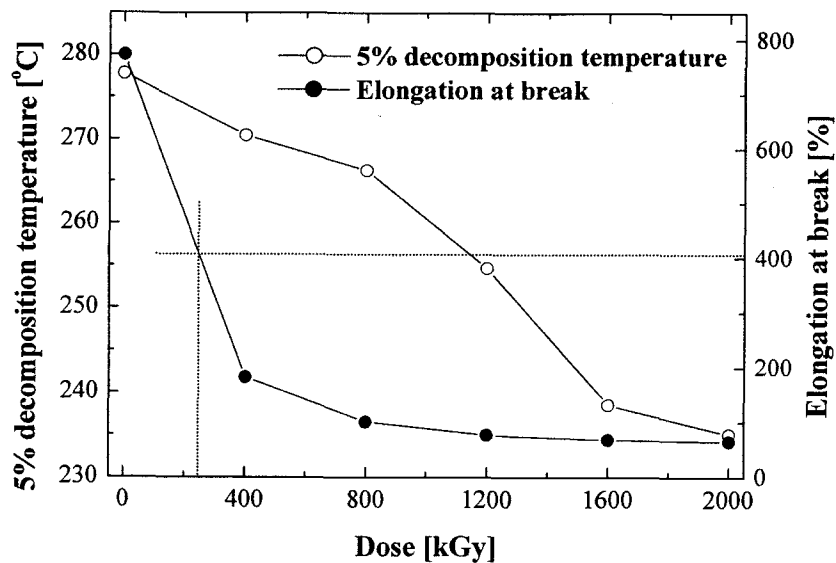


그림 6.1.15. 방사선 조사에 따른 CSPE의 5% 중량감소온도 및 파단시 연신율

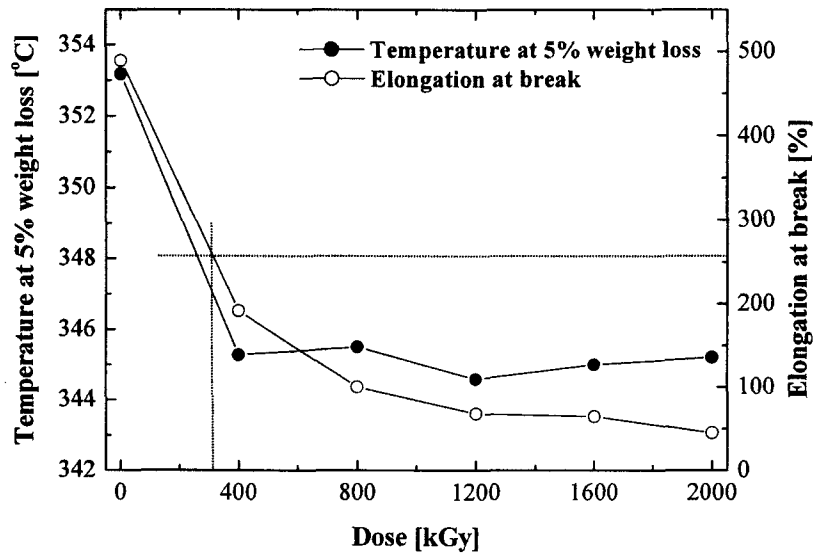


그림 6.1.16. 방사선 조사에 따른 EPR의 5% 중량감소온도와 파단시 연신율

(6) FT-IR 분석

열화에 따른 원전 케이블 재료의 구조적 변화를 확인하기 위하여 ATR (Attenuated total reflection) 방식의 FT-IR (Fourier transform infrared) Spectrometer를 사용하여 분석하였다. 이때 시편의 표면은 열화시 공기와의 접촉이 있었을 것이므로 시료 내부에 비해 가교보다 산화가 더 많이 되었을 것으로 생각되어, 정확한 측정을 위해 두께 0.2 mm 시트형태 시편의 가장자리를 제거하였다

원전용 15 kV 전력 케이블(LG전선) 재료인 XLPE의 방사선 조사에 대한 FT-IR 스펙트럼을 그림 6.1.17에 나타내었다. 그림에서 나타난 바와 같이 방사선 조사가 진행됨에 따라 약 1715cm^{-1} 의 파장에서 카르보닐 그룹이 생성되어 그 정도가 조사선량의 증가에 따라 세어진다는 것이 확인되었다. 이것은 방사선 조사로 인해 XLPE의 분자쇄가 절단하여 주변의 산소와 반응한 것으로 보인다. 또 1610cm^{-1} 의 파장에서 나타나는 탄소 이중결합은 XLPE의 가교와 방사선 조사로 인한 주쇄의 절단 후 재결합이 형성되어 나타난 것으로 보인다. 방사선 조사에 의해서 산화반응이 진행되고 있음이 FT-IR 스펙트럼으로 나타났다.

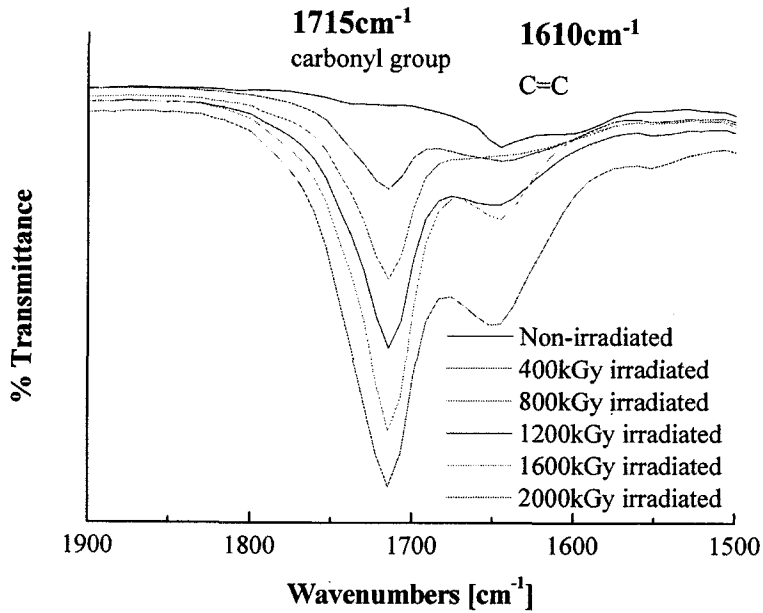


그림 6.1.17. 방사선 조사에 따른 XLPE의 FT-IR 스펙트럼

나. 결론

상기 가속열화 시험재료의 물성을 IEEE 383 시험조건과 임계특성의 표준 ISO 및 IEC에 준하여 수명을 평가하였다. 방사선 열화에 대한 XLPE의 수명은 그림 6.1.13에 표시한 것과 같이 파단시 연신을 초기치의 50%에 해당하는 선량은 350 kGy 정도로 나타내고 있다. CSPE와 EPR의 경우는 방사선 열화에 대해 그림 6.1.14와 그림 6.1.15에 나타낸 것과 같이 각각 약 300 kGy, 350 kGy 정도의 임계수명을 나타내었다. 열 가속열화에 대한 EPR의 수명은 그림 6.1.12와 같이 70년에 해당하는 수명을 나타내고 있어, 열적 열화보다 방사선 열화에 더욱 취약하게 나타내고 있다. 또 열화평가 방법의 일환인 절연파괴강도는 그림 6.1.7에서 CSPE의 경우를 나타내었듯이, 임계치인 초기치의 50%에 해당하는 선량이 약 900 kGy의 고선량으로 나타났지만, 연신율 시험에서는 300 kGy의 저선량에서 수명의 한계를 나타내어 현장시료의 열화 평가 적용에는 연신율의 측정이 더욱 타당한 것으로 나타났다.

제 2 절 원전 케이블의 노후화 진단 기술개발 (I)

1. 원전 케이블의 난연성

가. 케이블 재료의 난연성

(1) 난연성의 정의

일반적으로 연소라 함은 빛과 열 및 가스의 발생을 수반하는 화학반응으로 보통은 물질과 산소 그리고 점화원의 결합으로 발생하지만 산소 이외에도 플루오르, 염소, 질산성 화합물 등이 산화제의 구실을 할 때도 있다. 연소가 시작하는데 필요한 가장 낮은 가열온도를 발화점이라 하며 발화점에 도달하면 기체상의 불꽃이 생긴다. 불꽃은 반응열에 의하여 전파되고, 연소의 반응면은 매질의 표면에서 내부로 이동해 간다. 이때, 정지해 있는 매질 안으로 반응면이 이동해 가는 속도를 연소속도라고 한다[6.13].

난연성이라 함은 위와 같은 연소반응을 억제해 연소를 지연시키거나 차단하여 물질 자체가 화염이나 고온에서 견디는 능력을 향상시키는 것이다. 즉, 발화점을 높이고 연소속도를 느리게 하여 물질을 잘 타지 않게 하는 것이라 정의할 수 있다.

일반적인 난연화 방법은 연소 메카니즘을 차단 혹은 전환시키는 것으로 방사선 가교, 난연제 첨가 등의 방법이 있다.

(2) Cable 절연재료의 난연성

난연성은 화재가 발생할 경우 이 화재의 파급을 억제하고 화재의 조기 예방을 위해서 요구되는 중요한 성질 중 하나이다. 만일 어떠한 물질이 난연성을 갖지 않는 경우 화재 발생시 화재의 급속한 파급으로 많은 인명과 재산 피해를 일으킬 수 있으며, 특히 고온에서 사용하는 재료일 경우 난연성은 필수적이다.

고분자 재료는 일반적으로 전기적인 특성이 우수하고 저렴하기 때문에 cable이나 wire의 절연재료로 널리 쓰이고 있다.

1950년 이후, 절연재료로 고무, 플라스틱 등의 합성 고분자 물질이 이전에

사용되어 왔던 셀룰로오스 등의 절연재료에 대체되어 왔고 현재에는 가정용, 산업용으로 이 합성 고분자 물질이 많이 사용되고 있다. 그러나, 합성 고분자 물질은 대부분 유기 화합물로서 어떠한 경우 예전의 절연재료보다 가연성이 더 크게 될 수도 있다[6.14]. 따라서 합성 고분자 물질을 사용할 경우 이러한 고분자 물질의 가연성 때문에 작은 화재에서도 화염을 확산시켜서 경제적으로 막대한 피해를 유발할 수 있으므로 전기절연용 재료로 쓰이는 합성 고분자 물질은 그 자체의 전기적 특성이 우수해야 할 뿐만 아니라 난연성을 부여할 필요가 있다.

화재경보기, 스프링 쿨러 등과 같은 화재 경보, 진압 계통과 관련된 전선의 피복재로 쓰이는 고분자 절연재료는 화재가 발생되었을 경우 화염으로부터 직접적인 영향을 받을 수 있기 때문에 난연성의 부여는 필수적이라 할 수 있고, 특히 원자력발전소에서 쓰이는 전기절연용 고분자 물질은 고온 또는 고열과 방사선에도 쉽게 노출될 수 있어, 전기적 특성 및 내방사선 특성이 우수해야 함은 물론이고 난연성에 대해서도 고려하였을 경우에만 미국의 Brown Ferry 원자력발전소의 경우와 같은 cable 화재로 인한 중대한 원자력 발전소 사고를 예방할 수 있다.

(3) 난연성 고분자 절연재료의 종류

현재 많이 쓰이고 있는 고분자 절연재료로는 Hypalon, Neoprene 및 Teflon 계열의 불소수지 등이 있다. Chlorosulfonated polyethylene (CSPE: 상품명 Hypalon)은 미국 Dupont사에서 개발한 것으로 polyethylene을 chlorosulfone화 한 것이다[6.15]. Hypalon은 전기적, 기계적 성질이 우수하고 난연성도 함께 가지고 있어 난연성이 요구되는 장소에 사용되는 cable의 피복재료로 많이 쓰이고 있으며, 그 외에도 염소의 함량에 따라 여러 용도의 제품으로 응용되고 있다. Neoprene은 Polychloroprene으로 이미 여러 회사들에 의해 상품화되어 난연성 cable과 wire로 많이 쓰이고 있지만 저온특성과 자외선, 오존에 대한 저항성은 좋은 반면 최고사용온도가 약 116°C 정도이고 체적저항율이 $10^{11} \Omega\text{cm}$ 정도로 낮아 다른 고분자 물질에 비해 전기적 특성이 크게 뒤떨어지며 난연성을 가지기 위해서는 난연특성을 갖는 첨가제를 첨가하는 등의 특별한 조치가 필요하다[6.16, 6.17]. 테프론과 같은 불소수지들은 쇠상 고

분자여서 매우 뛰어난 난연성을 가지고 있지만 가공하기가 어려울 뿐만 아니라 비용이 많이 들고, 특히 방사선이 조사되었을 경우 낮은 선량에서도 불소와 탄소의 결합이 쉽게 절단될 수 있어 원자력발전소에서는 사용이 곤란하다[6.18].

나. 고분자 재료의 난연성 향상 방법

고분자 화합물이란 분자량이 1만 이상이거나 또는 수백에서 1000 이상의 기능성 화합물이 반응하여 수만에서 수십만의 분자량을 갖는 합성물로 구성된 화합물이다. 한편 고분자 화합물은 무질서하게 원자나 분자가 존재하고 있는 것은 아니고, 어떤 구조의 단위가 규칙적으로 반복된 것 같은 구조를 갖고 있다. 이러한 고분자는 분자량의 증대로 인해 저분자 물질에 비해 비점과 융점이 높고 완전한 결정체가 되지 않으며 분자 사슬 상호간에 엉킴과 이차적인 결합으로 결정화 부분을 높일 수 있어 강한 성질도 가질 수 있고 다른 첨가제의 첨가에 의해 기계적, 물리적, 전기적 특성을 향상시킬 수도 있으며 가공성이 뛰어난 장점도 가지고 있다. 또한 대부분의 고분자 물질은 부도체의 특성을 가지고 있어 전선의 피복용에 가장 많이 쓰이고 있다[6.13].

일반적으로 고분자 물질의 체적저항율은 표 6.2.1에 기술한 바와 같이 대부분 큰 값을 가지고 있으며, 허용온도는 표 6.2.2에 나타낸 바와 같이 대부분 허용온도범위가 매우 한정되어 있다[6.15].

표 6.2.1. 고분자 재료의 체적저항율

종 류	체적저항율 [Ωcm]
천연고무	$10^{10} \sim 10^{15}$
폴리에틸렌 (저밀도)	$> 10^{18}$
폴리에틸렌 (고밀도)	$> 10^{18}$
폴리염화비닐	$10^{13} \sim 10^{15}$
폴리스티렌	$> 10^{16}$
테프론	$> 10^{18}$

표 6.2.2 고분자 재료의 허용온도

종 류	허용온도
Polyethylene	105~120℃
Polystyrene	60~80℃
Poly(vinyl chloride) (PVC)	70~80℃
Poly(vinyl formal) (PVF)	50~70℃
Poly(tetrafluoroethylene) (PVDF)	280℃
Poly(ethylene terephthalate) (PET)	150℃

특히, 합성 고분자는 화재의 위험성이 가장 큰 물질 중 하나인데 그 이유는 고분자 재료의 연소과정이 그림 6.2.1과 같이 진행되기 때문이다[6.14]. 이러한 고분자 물질은 주위온도가 200℃ 이상일 경우 물질 내의 휘발성 물질이 방출되는 휘발성 범위가 만들어지며 또한 매우 큰 가연성을 갖는 부산물들이 열적인 열화에 의해 산출되어지고 이것들의 연소로 인해 발생한 열은 다시 물질의 표면을 가열하게 된다. 이와 같은 과정이 반복되므로 고분자 물질의 연소가 촉진되어 심각한 화재가 발생하게 되는 것이다.

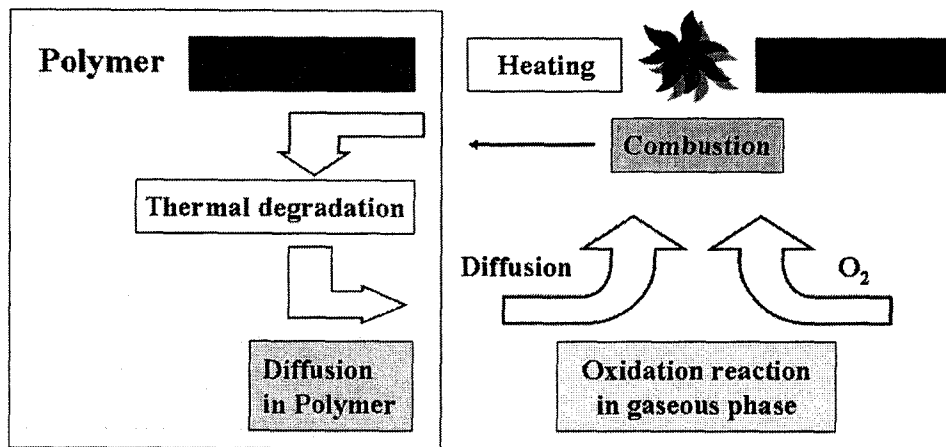


그림 6.2.1. 고분자 재료의 연소과정

그림 6.2.1 및 6.2.2와 같은 과정이 이루어지기 위해서는 일단 외부에서 가해진 열이 고분자 물질을 분해하여 고분자 물질에서 휘발성과 연소성을 가진 물질이 방출되어야 한다. 또 이 부산물이 연소할 때 발생하는 연소열은 다시 고분자를 열화, 분해하는 열로 작용하게 되어 이 사이클을 계속 유지하게 된다.

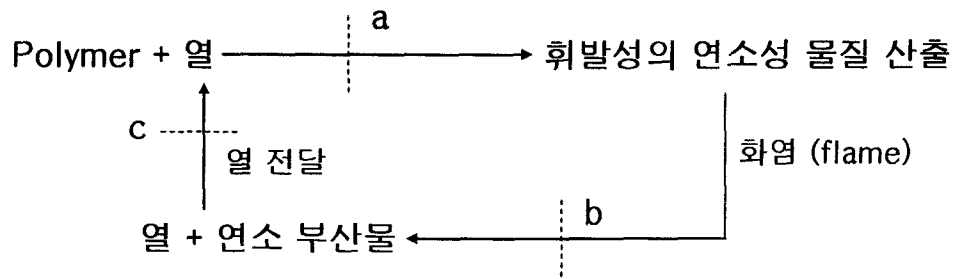


그림 6.2.2. 고분자 재료의 연소 억제 경로

이상의 과정에서 열 열화는 고분자 가연 메커니즘에서 가장 기초가 되는 과정으로 여기서 생성되는 부산물은 고분자의 종류 즉, 기본 성질에 따라 다르게 된다. 위와 같은 연소과정에서 열분해 작용을 억제하거나 열분해 또는 연소과정을 전환하는 기능을 하는 성질이 난연성(Flame retardancy)이다. 여기서, 난연성 첨가제의 역할은 그림 6.2.2의 과정 a, b, c 중 하나 또는 그 이상을 아래 방법으로 억제하거나 전환하는 것이다.

- 1) 열 열화 과정 변경
- 2) 화염의 축소
- 3) 고분자 쪽으로 되돌려지는 화염의 열을 감소

일반적으로 반응의 억제는 화재 시작을 더 어렵게 하여 화재의 초기상태를 확실히 억제하는 방법을 채택한 것이고, 다른 방향으로 연소과정을 전환하는 방법은 휘발성의 가연성 부산물을 줄이는 것이다.

고분자 재료에 난연특성을 부여하거나 난연성을 향상시키는 방법 중 대표적인 것으로 난연특성을 지닌 첨가제 즉, 인, 질소, 할로젠을 함유하고 있는 난연제를 가연성 고분자에 첨가하는 것이다. 일반적으로 폭넓게 사용되는 난연제는 유기할로젠 화합물, 유기 인 화합물과 유기 할로젠 인 화합물이다. 유기 할로젠 화합물이 난연제로 사용될 때는 첨가제, 반응제 및 흡수제의 형태로 사용된다. 불꽃에서의 방재효과는 $I = Br > Cl \gg F$ 의 순서로 나타난다는 것이 여러 실험결과로 널리 알려져 있으며 가장 중요한 할로젠은 브롬과 염소이다. 또한 난연성 시험 결과 지방족 할로젠 화합물이 방향족 할로젠 화합물보다 난연효과가 크고 브롬인 경우 염소보다 약 2배 정도 뛰어난 난연효과가 있다는 것도 알려져 있다. 유기 할로젠 화합물은 독립적으로 첨가될 때 어느 정도 난연성을 나타내지만 다른 난연제를 동시에 첨가할 때에 높은 공동상승효과(Synergy effect)를 발휘하여 우수한 난연성을 나타내게 된다.

공동상승효과가 가장 우수한 경우는 할로젠-안티모니의 조합에서 나타나는 것으로 알려지고 있다. 할로젠화 유기 인 화합물은 인과 할로젠의 공동상승효과 때문에 그 난연효과가 유기 인 화합물보다 월등하게 좋게 나타나 있다 [6.18].

난연 메커니즘은 복잡하고 이 메커니즘을 완전히 설명할 수 없기 때문에 대부분의 난연제의 개발은 실험을 통한 연역적인 방법으로 설명되고 있다. 난연효과를 나타내고 있는 화합물에 대해 종류별로 좀 더 구체적으로 살펴보면 다음과 같다. 고분자의 난연화 방법에는 첫째, 분자 구조의 변경을 통한 내열성 수지의 제조, 둘째, 난연 성분을 고분자 구조 내에 화학적으로 결합시키는 것(반응형 난연제), 셋째, 난연제를 고분자 내에 물리적으로 첨가시키는 것(첨가형 난연제), 넷째, 기타 난연제 코팅 또는 페인팅을 하거나 제품 디자인 변경을 통한 내열성 향상을 도모하는 것 등을 들 수 있으며, 본 연구에서 선정, 실험한 첨가형 난연제를 사용하는 것이 대표적으로 알려진 방법이다.

일반적으로 널리 사용되고 있는 난연제는 크게 첨가형과 반응형으로 나뉘고 첨가형은 다시 유기와 무기 난연제로 구분된다. 첨가형은 물리적으로 고분자에 난연제를 첨가해서 난연성을 향상시키지만 반응형은 수지를 제조할 때 일부에 난연제를 첨가해서 화학반응을 시키고 난연성을 향상시키는 방법이다. 구성성분에 따라서는 유기계와 무기계로 분류되는데, 유기계는 주로 인계, 브롬계, 염소계 등으로 분류되고, 무기계는 수산화알루미늄, 수산화마그네슘, 안티몬계 등으로 분류된다. 현재 브롬계 난연제는 사출시 가스발생과 소각시 다이옥신 발생 가능성으로 관련업계에서는 비할로젠계 난연제에 대한 연구를 계속 진행 중이며, 향후 10년 이내에 대체물질이 개발될 것으로 기대되고 있다. 국내에서도 비브롬계 난연제 연구동향에 따라 여러 업계에서 인계 난연제 개발에 성공하여 상업화한 예가 있으나 특정 모델에만 적용되고 있고, 물성문제로 일부 고분자에는 적용이 어려운 것으로 알려져 있다. 향후에도 당분간 브롬계 난연제 사용량이 늘어날 것이지만 저유해성, 저발연성, 저부식성, 내열성을 겸비한 인계 및 비할로젠계 난연제의 기술 개발이 계속될 것이며, 국내 수지 및 가공업체들의 난연성 수지 생산 증가에 따른 적극적인 대응이 있을 것으로 예상된다. 네덜란드 환경청에 따르면, 난연제

에는 약 350종류가 있으며, 다음의 몇 개의 소그룹으로 분류하고 있다[6.19, 6.20].

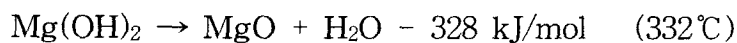
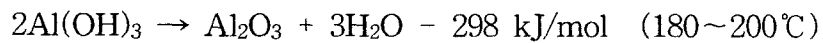
(1) 할로겐계 난연제

할로겐계 난연제는 브롬계와 염소계로 나눌 수 있지만, 브롬계 난연제 압도적으로 많다. 브롬계 난연제는 난연화 효과가 뛰어나며, 비용대비 성능 면에서 뛰어난 난연제로 전기기기나 OA 기기의 하우징 재료, ABS 수지나 PS, PBT, PET, 에폭시 수지 등의 주요 난연제로서 사용되고 있다. 현재 환경문제로 가장 큰 압박을 받고 있으나, 난연특성이 매우 우수하고 아직까지는 브롬계 난연제를 대체할만한 난연제가 개발되지 않아 국내외에서 계속되고 있는 대체제에 대한 연구와는 별도로 브롬계 난연제의 수요가 해마다 늘고 있다. 이는 난연성 규제가 정립된 미국, 일본, 유럽 지역으로의 수출시장을 확보하기 위해 TV, VCR 등 전자기기 외장재를 비롯해 가구, 섬유 등으로 적용범위가 점차 넓어지고 다양해지고 있기 때문이다. 할로겐계 난연제의 난연 메카니즘은 가스상에서 라디칼 트랩 효과에 의한 활성 OH라디칼의 안정화이다. 연소의 추진역할을 하는 활성 OH와 활성 H가 라디칼 HX에 의해 트랩되어 안정화되는데, HX는 불연성이고 희석효과와 함께 산소를 차단하는 효과도 있다[6.21].

(2) 무기계 난연제

무기계 난연제는 종류가 많지만 주로 고분자용으로 생산되는 수산화알루미늄, 수산화마그네슘, 산화안티몬, 주석산아연, 인제품, 구아니딘계, 폴리브덴산염, 지르코늄 등이 무기계 난연제에 포함된다. 이러한 난연제들은 각각 특성이 다르고 첨가하는 양에 따라 많게는 수지 양의 50배 이상에서 소량 첨가하는 것까지 다양하다. 무기계의 주요제품은 수산화알루미늄, 안티몬계로 수산화알루미늄은 값이 싸고 첨가량이 많아 일본에서 연간 4만톤 이상의 수요를 보이고 있다. 수산화알루미늄은 무기계의 대표적인 난연제로 난연제 전체의 30%를 차지하고 있다. 수산화알루미늄은 무독성(할로겐 비함유), 저발연성으로 가공기계의 부식성이 적고 전기절연성도 우수하며 가격이 싸기 때문

에 자동차, 전선, 케이블 등의 분야에 난연 충전제로 사용되고 있다. 수산화알루미늄은 기본적으로 흡열량이 470 kcal/kg으로 높고, 고분자의 온도가 낮도록 연소를 억제한다. 한편 분해도는 200℃ 이상이고 고분자의 성형가공 온도범위에 안정적이기 때문에 사용이 가능하다. 난연제로서 삼산화안티몬은 시너지효과가 크기 때문에 보통 연소계, 브롬계 등의 할로겐 난연제와 함께 사용되고 있다. 난연제 대상은 각종 범용합성수지와 고도의 난연효과가 요구되는 각종 엔지니어링 플라스틱까지 광범위하게 사용되고 있지만 투명성을 요구하는 MMA 수지 등에는 아직 적용되지 않고 있다. 수산화마그네슘은 각종 산화마그네슘의 원료, 중간체로서 사용되고 있는데, 배합량당 난연효과는 수산화알루미늄보다 우수한 것으로 알려지고 있다[6.20, 6.22, 6.23]. 특히적인, 카본블랙 등과 병용하면 난연효과가 상당히 향상되는 것으로 알려져 있다. 수산화마그네슘은 폴리올레핀, 나일론, PVC 등과 일부 합성고무 등에도 사용되고 있다. 현재 가격이 싸고 유독가스 및 연기발생을 억제하는 등의 특징을 가지고 있기 때문에 향후 안정적인 수요가 예상된다.



(3) 인계 난연제

인계 난연제는 크게 무기계와 유기계로 나눌 수 있다. 무기계로는 크게 적인, 암모늄 포스페이트, 암모늄 폴리포스페이트 등이 사용되고 있다. 적인은 응축상에서의 분해를 방해하고 탄화율을 높여서 난연작용을 하며 주로 나일론 에폭시 수지 등에 쓰인다. 암모늄 포스페이트는 셀룰로스, 직물, 종이 등에 사용되고 있으며, 암모늄 폴리포스페이트는 탄화 촉진을 통한 난연작용으로 폴리엔, 에틸렌-비닐 아세테이트, 우레탄 탄성중합체로 첨가되어 사용된다. 유기계에는 지방족 유기인 첨가제 및 할로알킬 포스페이트 등이 있으며, 이 때 chloroalkyl 작용기는 난연제가 증발하거나 물에 녹아 씻기는 것을 막아준다. 방향족 포스페이트 중 트리아릴 포스페이트는 80년 전에 처음으로 합성되어, 가연성인 셀룰로스 나이트레이트나 아세테이트의 난연제로 사용되어 왔으며, PVC가 양산되면서부터는 비닐 가소성 난연제로서 사용되고 있다. 주 용도는 차량 내장재, 전선 절연체, 컨베이어 벨트, 비닐 폼 등이며, 최

근에는 폴리 브롬 첨가제와 함께 유연성이 있는 폴리우레탄 폼에 쓰이고 있다. 수산화기를 갖는 유기 인 화합물은 빌딩과 운송용 차량에 쓰이는 강화우레탄 폼의 가연성이 큰 위험으로 대두되면서 난연제 개발을 위한 노력이 많이 있었고, 그 중 하나가 수산화기를 갖는 인 화합물을 도입하려는 맥락에서 개발되었는데 상용화된 것은 그다지 많지 않다. 인을 포함하는 메틸올 화합물은 면이나 혼방 등의 직물에 주로 쓰이며, 산업용 의복, 군복, 병원용품, 커튼 침구류, 잠옷 등에 이미 상용화되어 있다. 난연메커니즘은 열분해에 의해 인산 메타인산 폴리메타 인산을 생성해, 인산층에 의한 보호층의 형성과 폴리메타 인산에 의한 탈수작용으로 생성된 char에 의한 차단효과가 주로 작용한다.[6.24]

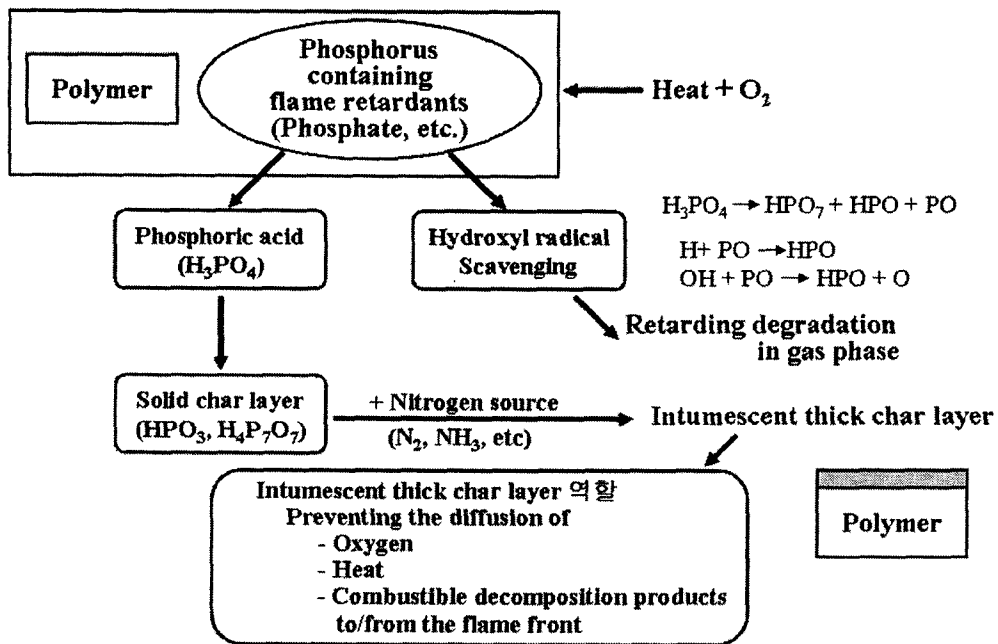


그림 6.2.3. 인계 난연제의 난연 메커니즘

(4) 멜라민계 난연제

할로젠계 대체 난연제로서 새로운 난연제 개발의 요구가 증가함에 따라 인계, 무기계와 더불어 주로 서유럽에서 사용량이 증가하고 있다. 할로젠계보다 독성이 적으며, 취급이 용이한 특성이 있다. 특히, 멜라민을 함유한 연질 폴리우레탄 폼 제품의 열분해시 독성기체의 발생이 없으며, 다른 난연제보다 연기의 발생이 적다. EPA는 멜라민은 환경에 대한 독성의 위험 정도가 낮으

며, 인간의 건강 및 환경에 역행하는 영향을 주는 증거가 없다는 연구결과를 발표하였다. 따라서 멜라민은 독성화학물질의 분류인 SARA의 Title III. 313 조항에 포함되지 않는다. 멜라민계 난연제의 우선 적용 가능성이 있는 분야로는, 대표적으로 나일론, 폴리우레탄 등이 있으며, 에폭시, 폴리에스테르, PBT, 폴리프로필렌 등도 가능성이 제시되고 있다. 현재 국내에서는 나일론의 일부 용도에 난연제로 멜라민 시아누레이트가 사용되고 있으며, 다른 분야에서는 멜라민계 난연제에 대한 정보 부족으로 최근에는 적용실험이 시도되고 있는 상황이다.

대표적인 난연제인 멜라민 시아누레이트는 다음과 같은 특징이 있다.

- 열안정성이 우수하다. (weight loss %)
 - TGA isotherm 275℃ ~0.40
 - TGA isotherm 300℃ ~0.75
- 물에 대한 용해성이 낮다. (< 0.01g/100ml)
- 사용 중 혹은 화재 시에도 독성이 없다.
- 취급 및 가공이 용이하다.
- 열적, 화학적으로 안정하며, 재활용이 용이하다.

포스페이트계로는 멜라민 포스페이트, 디멜라민 포스페이트, 멜라민 파이로포스페이트의 세 가지가 상용화되어 있는데, 잘게 잘라져 있는 고체로서 코팅이나 열가소성 수지에 분산시키는 데 적절하며, 최근에는 폴리올레핀엔도쓰이고 있다. 지금까지의 연구결과로는 열이 가해지면 멜라민이 분해되면서 멜라민과 인산이 각각 응축되며, 난연 작용은 주로 흡열반응과정과 응축상에서의 메커니즘 등에 기인하는 것으로 알려져 있다[6.25].

다. 방사선 조사효과 및 특성 평가 방법

(1) 방사선에 의한 고분자 조직의 변화

고분자 물질은 고에너지를 갖는 방사선 조사의 정도에 따라 여러 가지 반응을 일으킨다. 일반적으로 방사선 조사는 고분자 물질에 가교 및 그래프트(graft) 반응이나 공중합 및 중합의 개시 등의 수단으로 이용된다. 이와 같은 반응을 통해 친화성의 증대, 접착성, 인쇄성, 염색성 등을 개선하는 실질적인

목적으로도 이용되고 있고 또 방사선 조사는 고분자 내에서 조직양상의 변화에 관한 정보를 얻기 위한 수단으로도 이용된다. 그러나 고분자 물질에 대한 이러한 가교나 그래프트와 같은 반응은 임의의 조사량에서 가교결합반응이 절단반응보다 상대적으로 큰 경우에 이루어 질 수 있다. 만일, 절단반응이 가교결합반응보다 더 크게 되는 방사선에 노출되면 주쇄의 절단과 같은 구조의 변화가 일어날 것이고 이 결과 이들 물질의 물리적, 화학적인 변화가 발생하여 전기적, 기계적 수명에 큰 영향을 미친다. 이러한 손상의 정도는 조사형태, 세기 등에 크게 의존하고 조사효과도 물질에 따라 서로 다르게 되는데, 일반적으로 고분자 구조 중에 방향족 화합물을 포함하는 경우 우수한 내방사선 특성을 갖게 되고 또한, 무기질 충전제, 카본블랙 등의 방사선 보호제를 첨가하는 방법으로써 재료의 내방사선 특성을 다소 개선시킬 수 있다[6.26, 6.27].

높은 에너지의 방사선이 고분자 물질에 조사되었을 경우 분자쇄에 일어나는 반응으로는 자유기(free radical)에 의한 것과 이온(ion)에 의한 것으로 구분되는데 결합의 절단으로 생성된 라디칼이 고분자 쇠의 열운동 과정에서 재결합하는 가교 및 불포화 또는 분열의 일종인 붕괴, 가스 발생 등 내부변화 뿐만 아니라, 분위기와의 접촉반응으로 산화 등의 외부적 변화가 유발된다. 이와 같은 변화양상은 다음과 같은 6가지로 나눌 수 있다.

① 2개의 고분자 쇠 사이의 화학적 결합의 상태를 가교(cross-linking)라 한다.

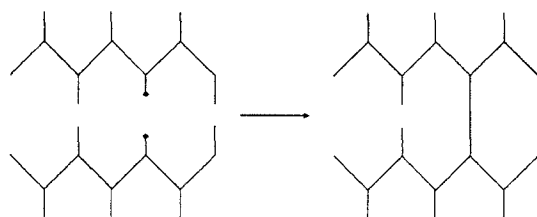


그림 6.2.4. 고분자의 방사선 조사효과 - cross-linking

② 고분자 쇠에서 2중 결합의 형태를 불포화(unsaturation)라 한다.

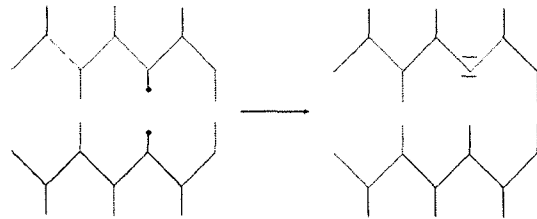


그림 6.2.5. 고분자의 방사선 조사효과 - unsaturation

③ 고분자의 분열을 붕괴(degradation)라 한다.

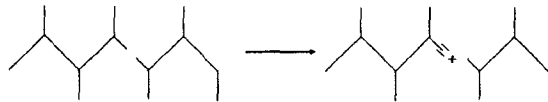


그림 6.2.6. 고분자의 방사선 조사효과 - degradation

④ 고분자 쇄의 분자포획에 의한 방출을 가스방출(gas evolution)이라 한다.

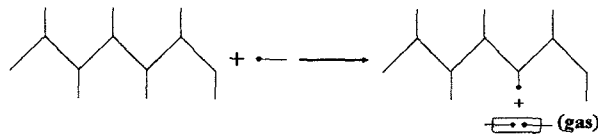


그림 6.2.7. 고분자의 방사선 조사효과 - gas evolution

⑤ 산화물 중의 산소나 공기 중의 산소 등과의 결합을 분위기와의 반응 (reaction with environment)이라 한다.



그림 6.2.8. 고분자의 방사선 조사효과 - Reaction with environment

⑥ 분리된 고분자 쇄의 재결합을 복귀(restoration)라 한다.



그림 6.2.9. 고분자의 방사선 조사효과 - restoration

이들 반응 중 가교와 붕괴과정은 고분자 물질의 거시적 성질에 미치는 영향이 서로 상반적이고 대기 중의 산소, 습기, 온도 등의 환경조건이나 고분자쇄 고유의 조직양상에 의해서도 그 성질은 크게 달라진다.

(2) 방사선 조사와 전기적 특성의 변화

방사선 조사로 인한 위와 같은 화학적인 변화는 절연내력, 유전손실, 체적 및 표면 저항을 등의 많은 전기적 요소에 영향을 미치게 된다.

(가) 방사선 조사에 의한 절연내력의 변화

절연내력은 절연체의 중요한 성질 중 하나로 고전계에서 절연체가 절연 능력을 유지할 수 있는 정도를 의미한다. 방사선 조사 후의 절연파괴강도는 고분자의 종류와 조사강도에 따라 증가하거나 감소함을 보이게 되는데 이러한 효과는 방사선 조사시에 일어나는 가교 또는 붕괴반응에 의한 것이다. PE의 경우 고온에서 2×10^6 Gy의 강도로 전자빔을 조사한 경우가 같은 환경에서 1.5×10^6 Gy로 조사한 것보다 절연파괴강도가 2배로 증가하는 것을 보이는데 이는 전자빔이 분자쇄에 도달할 때 라디칼이 생성되어 가교 결합반응을 하는 것이 붕괴로 인한 절단반응보다 크게 되기 때문이다[6.28]. 반면에 Polystyrene의 절연파괴강도는 전자빔을 조사하기 전과 비교해 3.6×10^7 Gy로 전자빔을 조사한 경우 $63\text{V}/\mu\text{m}$ 에서 $51\text{V}/\mu\text{m}$ 로 감소한다.

(나) 방사선 조사에 의한 유전손실의 변화

유전손실은 방사선이 조사될 경우 조사량의 증가에 따라 거의 모든 고분자 절연재료에서 증가하는 경향을 보인다. 이러한 변화는 방사선을 조사하는 동안 고분자 물질 내에 이온생성, 영구쌍극자의 생성, 공간전하 형성, 불활성 가스의 생성 등에 의한 것이다.

(다) 방사선 조사에 의한 도전율의 변화

X-ray, γ -ray와 같은 이온화 방사선 조사에서 얻어지는 에너지 흡수는 많은

고분자의 도전율을 변화시킨다. 방사선 조사에 의한 도전율의 변화는 일반적으로 3가지 형태로 이루어진다.

- ① 이온화에 의한 이온, 전하(carrier)의 생성
- ② 확산과 drift에 의한 carrier의 이동
- ③ 트래핑이나 다른 재결합과정에 의한 이동의 정지

이러한 carrier의 자유이동, drift, 트래핑, 재결합이 모두 물질의 분자구조 내부의 이물질, 구조 결함에 의한 것이고 이로 인해 도전율의 변화가 발생한다. 많은 고분자 물질에서 도전율의 변화는 일시적인 것이 많은데 이것은 방사선 조사가 끝난 직후에는 carrier들이 트랩되어 더 이상 이동하지 못하지만 시간의 경과와 함께 주위 환경으로부터의 에너지 흡수로 인해 이들이 여기되어 탈트랩, 재결합하기 때문이다.

(라) 방사선 조사에 의한 전기적 저항율의 변화

방사선 조사선량이 10^6 Gy 이상일 경우 필름이나 절연유의 체저적저항율이 심각하게 감소한다. 절연물질에 있어 이러한 변화는 제조과정, 조사에 의한 붕괴나 가스기포의 발생, 불순물 등에 의한 것이다. 또한 조사선량의 증가에 따라 이온 생성물과 전하 carrier가 생기고, 그 결과 체저저항율이 감소한다.

(3) 난연성 절연재료의 특성 평가

고분자 절연재료의 물성을 평가하는 방법으로는 화학적, 물성 분석 외에 열적, 기계적, 전기적 특성의 평가 등 여러 가지 방법이 사용되고 있지만 여기서는 난연성 고분자 절연재료의 특성 평가에 널리 사용되는 난연성 시험법과 기계적 특성 및 전기적 특성 시험법에 대하여 고찰해 보기로 한다. 특히, 고분자 재료의 연소성을 평가하는 시험방법으로는 다음과 같은 6종류가 있다.

- ①착화의 용이성 ②표면연소성 ③열량
- ④발연성 ⑤연소생성기체의 유독성 ⑥연소의 지속성

실제 시험에서는 ①과 ②의 시험으로 충분한 경우가 많지만 연소성은 여러 가지 요소가 결합된 복잡한 특성이기 때문에 시험법도 위에서 분류한 연소

특성 시험과 같이 단순히 분류되지 않으며, 실용상 다음과 같은 시험 방법 중 한 가지 또는 그 이상을 적용하여 평가하는 것이 일반적이다.

(가) 난연특성 평가

① 산소지수법

위에서 언급한 6종류의 시험법 중착화의 용이성을 평가하는 대표적인 시험법이 산소지수법(Limited oxygen index; LOI)이다. 산소지수법은 원통형의 연소용기에 임의의 혼합비를 갖는 산소-질소 혼합기체를 유동시켜 시료를 연소함과 동시에 연소를 지속하는데 필요한 최저 산소농도를 구하는 방법이다. 산소지수는 산소의 유량을 [O₂], 질소의 유량을 [N₂]로 나타내어 혼합가스에 대한 산소의 유량을 백분율로 나타낸다[6.18].

시험장치는 기체공급부, 연소부, 측정부 및 점화기로 구성되며 JIS D1201에서는 산소지수로부터 연소성을 표 6.2.3과 같이 구분하고 있다. 보통 가연물과 난연물의 경계는 산소지수 26%을 기준으로 하여 26% 이상을 난연성 물질, 그 이하를 가연성 물질로 정의한다.

표 6.2.3. 산소지수에 따른 난연등급 (JIS D1201)

구분	산소지수
난연 1급	산소지수 30% 이상인 것
난연 2급	산소지수 27%~30% 미만인 것
난연 3급	산소지수 24%~27% 미만인 것
난연 4급	산소지수 21%~24% 미만인 것

② 표면 연소성 시험 (DOC FF 3-71법)

이 시험법은 미국 상무성(DOC)이 제정한 난연성 측정 방법으로 수직으로 걸쳐 놓은 시료에 아래에서부터 착화하여 연소시키는 방법으로 시험장치는 시험용기, 시험편 홀더 및 버너로 구성된다. 이 시험법에서의 합격 기준은 5개 시료의 평균 탄화길이가 17.8cm 이하이어야 하고, 최대 탄화길이가 25.4cm를 넘지 않아야 하며 이를 초과시 불합격이 된다. 많은 섬유 시료의 연소결과로부터 이 시험에 합격한 것은 산소지수 ≥ 26 으로 볼 수 있다.

③ 매연밀도(Smoke density rate) 측정

매연밀도 측정은 여러 가지 직물의 매연밀도를 측정함으로써 그 직물들의 연소 특성을 알기 위한 것이다. 이 방법은 시편을 시험기간 동안 불꽃에 노출하여 연소시키면서 시험장비 내에 발생하는 매연을 계속 모으는 것이다. 25×25×6 mm의 시편을 금속으로 된 지지 그물 위에 놓고 시험장치 내에서 연소시키며 이때 연소를 위해 2.8 kg/cm²의 압력으로 작동하는 프로판 버너를 사용하여 불꽃을 계속적으로 유지시킨다. 300×300×790 mm의 시험장비는 빛 방출장치, 광전관 및 빛의 흡수율을 측정하는 계기 등이 부착되어 있으며 이 시험장비는 밑바닥에 25 mm의 통풍구를 제외하고는 시험기간(4분) 동안 밀폐되어야 한다.

측정할 물질의 시편을 3개씩 취하여 이들 3개에 대한 빛 흡수율을 15초 간격으로 측정하여 그 값을 평균한 후 이 평균값을 시간에 대한 함수로 표시한다. 이 때 빛 흡수율과 시간에 대한 곡선 중 곡선의 가장 높은 점이 최고 매연밀도이고 곡선 아래 면적을 측정하여 생성된 전체 매연의 양을 결정하며 매연밀도는 4분 동안 시험장치 내에 모여진 매연의 전량을 말한다[6.18].

④ 시차주사열량법

시차주사열량법은 시료물질과 기준 물질을 온도변화 프로그램으로 가열하면서 이 두 물질에 흘러 들어간 열량의 차이를 시료온도의 함수로 측정하는 열분석 방법으로 갑작스러운 열반응과 전체적인 열적 거동에서 기준 물질이 흡열반응 또는 발열반응을 하는지 분석 할 수 있다. 또한 시차주사열량법은 에너지의 차이를 측정하는 것이어서 온도의 차이를 기록하는 시차 열분석법과는 근본적으로 차이가 있으며 전력보상 DSC법, 열 흐름 DSC법을 이용하여 데이터를 얻을 수 있다.

⑤ 분해개시온도(Decomposition onset temperature; DOT)

분해개시온도 측정은 고분자 절연재료의 내산화 안정성을 상대적으로 평가할 수 있는 방법으로서 산화방지제 또는 Copper deactivator의 잔존 유무와 효과를 평가하는 것이다. 즉 시료물질을 산화되기 쉬운 가혹한 조건 하에 두고 산화가 유발되기까지의 온도를 측정하여 시료가 지닌 내산화성 정도를

상대적으로 평가하는 수단이다. 분해개시온도는 가혹한 환경 하에서 물질이 산화되는 온도를 측정하는 것이다. 분해개시온도는 열분석기인 시차주사 열분석기를 이용하여 측정하며 일반적으로 산화되기 쉬운 가혹한 조건에서 실시한다. 시료물질을 Oxidized copper pan에 넣고 10°C/min으로 50~300°C까지 온도를 상승시켜 산화가 시작되는 온도를 측정한다[6.29].

(나) 전기적 특성의 평가

고분자 절연재료의 전기적 특성에 관한 시험법으로는 절연내력 시험, 유전손실, 체적 및 표면 저항율의 측정 등이 있다.

① 절연내력 (Dielectric strength)

절연내력은 일반적으로 절연파괴시의 전계(V/mil 또는 V/cm)로 표시되고 시료를 통하는 아크가 지속되기 위한 전압의 세기를 말한다. 절연내력을 정확히 측정하기 위해서는 측정 시료의 형상과 주위 환경이 같아야만하고 만일 실험 중의 수분함량과 온도 등의 환경요인이 각각 다를 경우 시편의 두께가 증가하여도 절연파괴전계가 감소하는 역효과를 보인다. 시편은 평행한 평판 형태이고 연면방전을 방지하기 위한 충분한 크기를 가진 얇은 판(sheet)이어야 하며 규정된 크기의 전극 사이에 놓이게 된다. 이와 같은 절연내력 시험을 수행하기 위해 다음과 같은 두 가지 방법이 적용된다[6.17].

1. Short-time test : 전압을 0에서 파괴전압까지 0.5~1 kV/sec로 일정하게 상승시키는 방법
2. Step-by-step test : 초기에 가하는 전압을 short-time 시험에서 정의된 파괴전압의 50%를 가한 상태에서 절연파괴가 발생할 때까지 정해진 비율로 증가시키는 방법

② 체적저항율과 표면저항율

전기적 저항은 크기를 Ohm으로 표시하고 높은 저항값을 가질 때 절연체는 좋은 특성이 된다. 이 특성은 실험실 환경이 높은 온도와 습도를 가지거나 시편의 수분함량이 증감됨에 따라 역효과를 보인다. 시편의 표면상태도 저항값에 영향을 주는 중요한 요소 중의 하나이다. 따라서 정확하고 믿을만한 결

론을 얻기 위해서는 측정환경을 정확하게 조절해 주어야 한다.

절연저항(Insulation resistance)은 전극 사이에 놓인 시험 물질에 가해지는 충전류에 대한 직류전압의 비율로 체적과 표면의 요소를 모두 포함하고 있다. 고체의 내부전류만을 고려한 것을 체적저항, 표면에 흐르는 전류만을 고려한 것을 표면저항이라 한다.

고분자 절연재료의 저항성 평가를 위해 이러한 체적, 표면저항을 고려한 체적저항율과 표면저항율 값이 주로 이용되고 있다. 체적저항율은 고분자 절연재료의 저항 특성평가에 많이 이용되는 값으로 재료의 내부전류 방향의 전위경도를 그 전류밀도로 나눈 값이며 한 면이 1m되는 입방체의 체적저항값과 같으며, 표면저항율은 재료의 표면전류 방향의 전위경도를 표면의 단위 폭당 전류로 나눈 값으로 정사각형의 마주보는 변 사이의 표면저항과 같다.

(다) 기계적 특성의 평가

고분자의 기계적 특성치는 금속에 사용되는 것과 동일하게 탄성을, 인장, 충격 및 피로강도 등의 변수로 정의된다. 대부분의 고분자 재료의 경우 기계적 특성변수는 단순한 응력-변형을 시험으로 결정한다.

고분자의 경우 세 가지 유형의 응력-변형을 곡선이 관찰되는데, 이 모식도를 그림 6.2.10에 나타내었다.

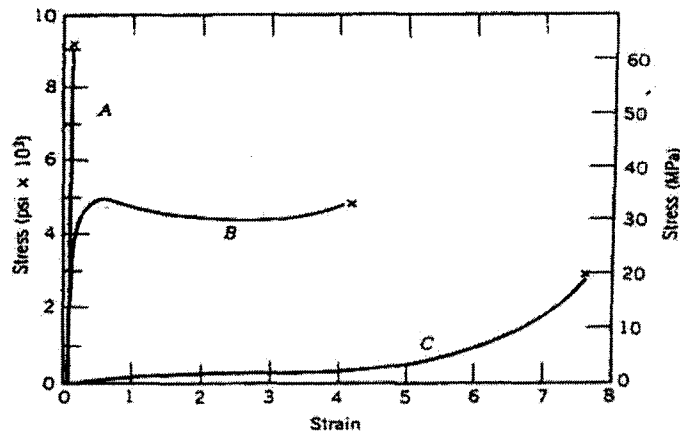


그림 6.2.10. 고분자 재료에 따른 응력-변형을 거동

그림 6.2.10에서 곡선 A는 취성이 강한 고분자의 응력-변형을 특성으로서 파괴가 탄성적으로 변형되는 과정에서 발생한다. 곡선 B는 가소성 고분자 재

료의 거동으로 많은 금속재료의 거동과 유사하다. 즉, 초기에는 탄성적으로 변형하고, 다음으로 항복이 발생하여 소성변형 영역이 존재하게 된다. 곡선 C의 경우에는 완전한 탄성적인 거동을 나타내고 고무와 같이 낮은 응력에서 회복이 가능한 매우 큰 변형을 일으키는 탄성변형이 이와 같은 거동을 하며, 이러한 특성을 가진 고분자를 탄성체라 한다. 표 6.2.4는 일반적인 고분자의 상온에서의 기계적인 특성을 나타낸 것이다[6.30].

표 6.2.4. 고분자 재료의 기계적 특성 (상온)

재 료	비 중	인장강도 [MPa]	파단시 연신율
Polyethylene(low density)	0.917~0.932	8.3~31.7	100~650
Polyethylene(high density)	0.952~0.965	22~31	10~1200
Polyvinyl chloride	1.30~1.58	41~52	40~80
Polytetrafluoroethylene	2.14~2.20	14~34	200~400
Polypropylene	0.90~0.91	31~41	100~600
Polystyrene	1.04~1.05	36~52	1.2~2.5
Polymethyl methacrylate	1.17~1.20	48~76	2~10
Phenol-formaldehyde	1.24~1.32	34~62	1.5~2.0
Nylon66	1.13~1.15	76~94	15~300
Polyester	1.29~1.40	48~72	30~300
Polycarbonate	1.20	66	110

2. 원전 케이블의 난연성 평가 실험

가. 실험방법

(1) 시편의 제작 및 방사선 가속열화

(가) 시편의 제작

원전케이블 피복재료로 클로로프렌 고무를 모재로 사용하였으며 사용한 클로로프렌 고무는 Du Pont사의 Neoprene W로 하였고 난연특성을 향상시키기 위한 첨가제로 암모늄 폴리포스페이트, 수산화마그네슘[Mg(OH)₂], 탄산칼슘[CaCO₃], 수산화알루미늄[Al(OH)₃], 삼산화안티몬[Sb₂O₃]을 각 30 phr 씩 첨가하여 80℃에서 Bunbury mixture로 20분간 혼합한 후, MgO와 ZnO를 경

화제로 하여 170°C에서 약 20분간 경화시켜 시편 제작하였다. 클로로프렌 고무는 네 가지 종류의 구조 이성체를 가지고 있으며 각각의 이성체 단위들을 그림 6.2.11에 나타내었다. 혼합된 이성체 단위들의 특성과 혼합 정도는 클로로프렌 고무의 경화나 안정성과 밀접한 관계를 가진다.

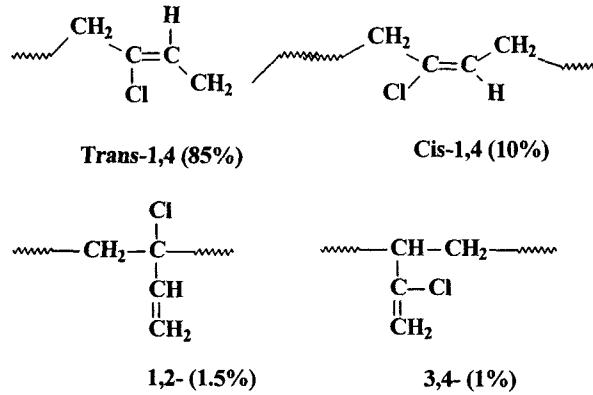


그림 6.2.11. 클로로프렌 고무의 이성체

배합시편의 조성 및 명칭은 표 6.2.5에 나타낸 것과 같이 순수한 클로로프렌 고무는 CR-1로 하였으며, 첨가제 종류별로 암모늄 폴리 포스페이트, 수산화 마그네슘, 탄산칼슘, 수산화알루미늄, 삼산화안티몬을 30 phr 씩 첨가한 것을 CR-2~CR-6으로 명명하였다.

표 6.2.5. 클로로프렌 고무의 조성

Sample	Contents (phr)					
	CR-1	CR-2	CR-3	CR-4	CR-5	CR-6
Composition						
Base polymer (Neoprene W)	100					
MgO	4					
ZnO	5					
Process oil	10					
Ammonium polyphosphate	-	30	-	-	-	-
Magnesium hydroxide	-	-	30	-	-	-
Calcium carbonate	-	-	-	30	-	-
Aluminum trihydroxide	-	-	-	-	30	-
Antimony trioxide	-	-	-	-	-	30

(나) 방사선 가속열화

난연제를 첨가한 케이블 재료의 내방사선성을 시험하기 위하여 한국원자력

연구소 방사선 조사시설의 Co^{60} γ -ray 선원을 사용하여 실온, 대기 중에서 5 kGy/hr의 선량율로 각각 100, 250, 500, 1000, 1500, 2000 kGy의 선량으로 방사선 조사하였다.

(2) 난연특성 시험방법

(가) 산소지수

방사선 조사한 클로로프렌 고무의 산소지수 측정은 JIS D1201 규정에 의거하여 측정하였다. 먼저 시료를 공기 중에서 연소시키면서 연소속도를 파악하여 대략의 산소농도를 추정하며 본 실험의 경우 산소농도 추정치 27%에서 시작하였다. 시편은 각각 120×60 mm의 크기로 재단한 후 연소 원통 내의 총 유량을 11.4 l/min 으로 하고 농도에 대응하는 산소 및 질소의 유량을 유량계를 보면서 밸브로 조절한 후 시편을 그림 6.2.12의 받침대 사이에 끼우고, 연소 원통 내에 똑바로 세운다. 점화기에 착화하여 불꽃의 길이를 6~25 mm로 조절하여 시편의 상단을 착화하고 충분히 착화되었는 지를 육안으로 확인한 후에 점화원을 제거하였다. 그리고 즉시 연소시간과 연소된 길이의 측정을 시작하였다. 최소산소농도는 시편의 연소시간이 3분이 넘는 경우에 있어서는 점차적으로 산소농도를 내리고 반면 시료에 점화한 화염이 3분 이내에 꺼지는 경우에는 산소농도를 높이면서 최소산소농도를 구하였다. 3회의 측정치를 평균하여 그 시편의 산소지수로 하였다.

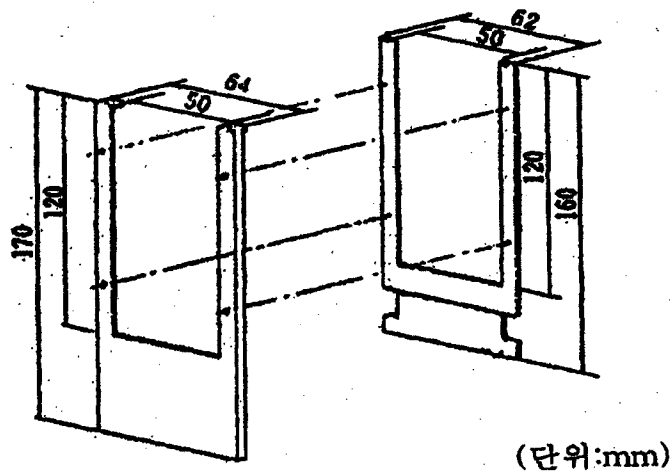


그림 6.2.12. 산소지수 측정용 시편 받침대

(나) 분해개시온도

방사선 열화에 따른 난연제를 첨가한 클로로프렌 고무의 산화유발시간과 분해개시온도는 TA Instrument사의 Differential scanning calorimeter (Model. Q1000)을 사용하여 측정하였다.

분해개시온도(DOT; Decomposition onset temperature)는 가열에 따른 고분자의 산화와 분해온도를 측정하는 실험이므로 산소 분위기에서 측정하였으며, 상온(25℃)에서 5℃/min의 승온속도로 가열하여 산소에 의한 분해가 시작되는 온도를 측정하였다.

(3) 전기적 특성 및 기계적 특성 시험방법

(가) 체적저항을 및 표면저항을

난연제 첨가에 따른 클로로프렌 고무의 체적저항과 표면저항은 실온에서 Electrometer & High Resistance Meter(Keithley, 6517A)와 Test Fixture(Keithley, 8009)를 사용하여 1 kV의 전압을 인가하면서 측정하였다. 체적저항 및 표면저항의 측정 개략도와 결선을 그림 6.2.13에 나타내었다.

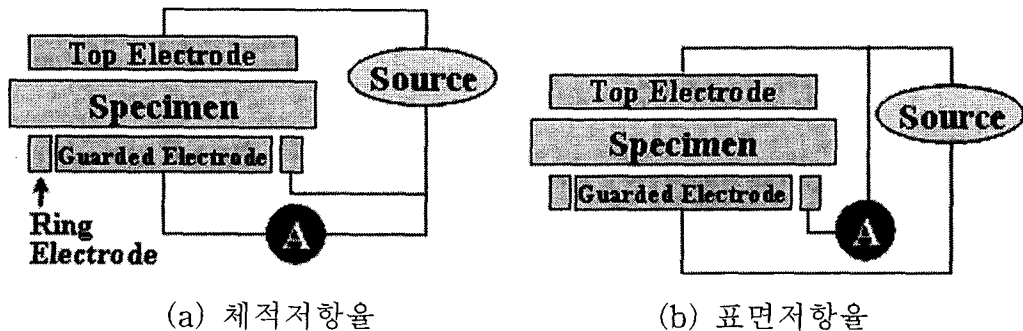


그림 6.2.13. 저항을 측정의 개략도

(나) 인장강도 및 파단시 연신율

난연제를 첨가한 클로로프렌 고무의 방사선 열화에 따른 인장강도 및 파단시 연신율의 측정은 인장시험기(Zwick, Model. Z010)를 사용하여 실온에서 측정하였다. (제1절, 2, 가 항 참조)

(4) 열중량 분석 및 표면특성 시험방법

(가) 열중량 분석

난연제를 첨가한 클로로프렌 고무의 방사선 열화에 따른 중량감소 및 분해 정도를 비교, 분석하기 위하여, 시료 중량의 5% 감소시 온도를 측정하였다. (제1절, 2, 가 항 참조)

(나) 적외선 흡수 분광 스펙트럼

방사선 열화에 따른 원전 케이블 재료의 구조적 변화를 확인하기 위하여 ATR (Attenuated total reflection) 방식의 FT-IR (Fourier transform infrared) spectrometer를 사용하여 분석하였다. (제1절, 2, 가 항 참조)

나. 실험결과 및 고찰

(1) 난연특성

그림 6.2.14는 방사선 조사시 난연제를 첨가한 클로로프렌 고무의 한계산소지수를 측정한 결과이다. 미조사 상태의 클로로프렌 고무 CR-1은 약 31%의 한계산소지수를 나타내고 있는데 이것은 염소를 함유하고 있는 클로로프렌 고무에서 연소시 일어나는 화학반응이 역행 또는 완료되고 염소를 함유하는 무거운 기체를 발생시켜 산소의 접근과 열전달을 억제하기 때문에 클로로프렌 고무 자체의 우수한 난연특성을 나타내고 있다. 반면 난연제를 첨가한 경우 CR-6를 제외한 모든 경우 CR-1보다 더욱 우수한 난연특성을 보이고 있으며 이것은 금속수화물이 흡열, 분해반응을 하여 연소를 지연시키고 수분의 방출을 동반하여 기상에서 가연성 기체를 희석시키기 때문인 것으로 사료된다. 그림 3-5에서 나타낸 것과 같이 CR-6를 제외하고 난연제를 첨가한 경우 난연제를 첨가하지 않은 클로로프렌 고무(CR-1)보다 높은 한계산소지수 값을 나타내어 난연성이 향상된 것으로 보인다. 또 방사선 조사선량의 증가에 대해 한계산소지수는 저선량 영역에서 일부 감소하는 경우를 나타내었으나 전반적으로 한계산소지수 값의 증가를 나타내며, 약 1000 kGy의 고선량 영역에서는 포화하는 경향을 나타내고 있다. 삼산화안티몬[Sb₂O₃]을 첨가한

CR-6은 클로로프렌 고무의 난연특성을 저하시키고 있으며, 방사선 조사 후에도 조사선량에 상관없이 가장 나쁜 특성을 나타내었다. 한계산소지수 측정 결과에서 가장 우수한 특성을 나타낸 시편은 수산화마그네슘[Mg(OH)₃]을 첨가한 CR-3로 나타났으며, 암모늄 폴리 포스페이트와 탄산칼슘[CaCO₃]을 첨가한 CR-2와 CR-4 역시 우수한 난연특성을 나타내었다. CR-1과 CR-2는 1000 kGy의 조사선량까지 한계산소지수가 증가하다가 이후 포화하는 경향을 나타내었으며 CR-6의 경우도 250 kGy 이후 포화하는 경향을 나타내었다. 이러한 현상은 방사선 조사에 의해 클로로프렌 고무 축쇄의 절단현상과 유기성분의 휘발량이 증가하여 상대적으로 무기성분의 양이 증가하기 때문에 나타나는 현상이며 난연특성은 조사선량의 증가로 인해 향상된 것처럼 보인다. 한계산소지수의 측정결과에서 내방사선성이 가장 우수한 시편은 수산화마그네슘을 첨가한 CR-3로 확인되었다.

난연제를 첨가한 클로로프렌 고무의 방사선 조사에 따른 분해개시온도(Decomposition onset temperature; DOT) 측정결과를 그림 6.2.15에 나타내었다. 방사선 미조사시 분해개시온도는 난연제를 첨가한 경우 모두 CR-1에 비해 더 낮은 수치를 보였다. 난연제 첨가시편이 더 낮은 분해개시온도를 나타낸 것은 시편의 배합과정에서 난연제 첨가 과정에서 클로로프렌 고무의 열화가 진행되어 산화가 일부 발생하였기 때문인 것으로 사료된다. 방사선 조사에 따른 분해개시온도의 경향은 모든 시편에서 전반적으로 조사선량의 증가에 대해 저선량 영역에서는 급격한 감소를 보이다가 선량의 증가에 대해 약간의 저하 및 포화하는 경향을 나타내었다. 이러한 현상은 방사선 조사 선량이 증가하면서 클로로프렌 고무 축쇄의 절단으로 인해 대부분의 유기성분이 이미 주쇄에서 떨어져 있어 분해가 쉽게 발생되기 때문인 것으로 사료된다. 난연제를 첨가하지 않은 CR-1의 경우 방사선 조사영향에 대해 가장 우수한 특성을 나타내었으며, 수산화마그네슘과 탄산칼슘을 첨가한 CR-3과 CR-4에서 우수한 내방사선 특성을 나타내었다. CR-4는 저선량 영역의 방사선 조사에 대해 우수한 특성을 나타내었으나 500 kGy 이상의 영역에서는 급격한 감소 후 낮은 분해개시온도를 유지하였으며, CR-3는 선량의 증가에 따라 분해개시온도가 크게 감소하지 않으면서 일정한 수치를 유지하여 가장 우수한 내방사선 특성을 나타내고 있다.

방사선 조사에 따른 한계산소지수와 분해개시온도의 측정 결과로 난연특성이 가장 우수한 시편은 수산화마그네슘을 첨가한 CR-3로 나타났다.

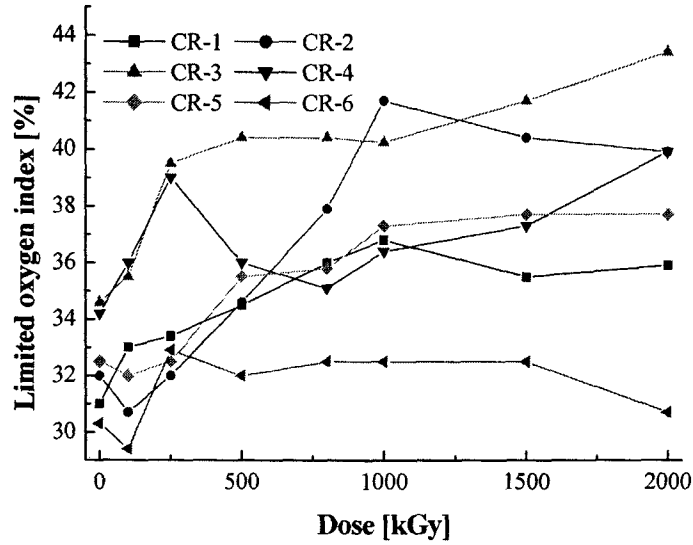


그림 6.2.14. 난연제를 첨가한 CR의 방사선 조사에 따른 한계산소지수

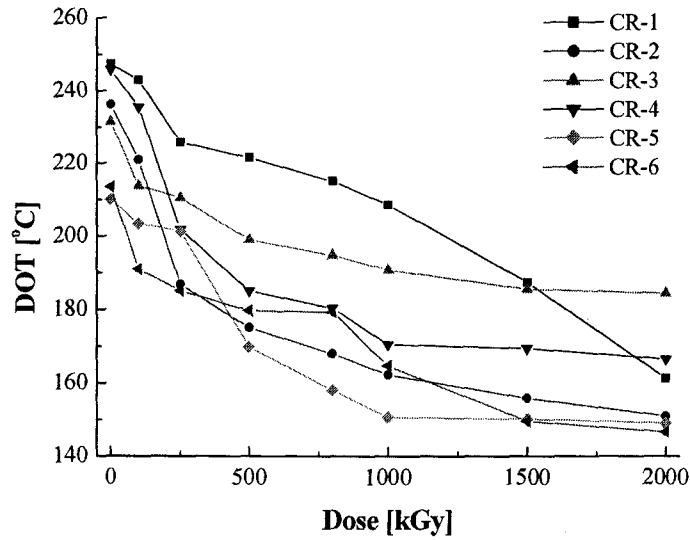


그림 6.2.15. 난연제를 첨가한 CR의 방사선 조사에 따른 분해개시온도

(나) 전기적 특성 및 기계적 특성

그림 6.2.16과 그림 6.2.17은 난연제를 첨가한 클로로프렌 고무의 방사선 조사에 따른 체적저항율과 표면저항율의 변화를 나타낸 것이다. 체적저항율은 초기 100 kGy와 250 kGy의 저선량 영역에서 미조사 시편에 비해 급격한 감소를 보이다 그 후 서서히 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이것은 저선량 영역에서 방사선 조사에 의한 측쇄나 주쇄의 붕괴, 절단 작용과 함께 생성된 가스기포, 불순물, 도전성 이온 등의 급격한 증가로 체적저항율이 급격히 감소하는 것으로 보이며, 이후 지속적으로 서서히 감소하는 경향이 나타나는 것은 방사선 조사에 의해 생성된 도전성을 지니는 이온들의 재결합으로 인하여 생성 캐리어의 수가 감소하기 때문인 것으로 사료된다. 난연제를 첨가한 클로로프렌 고무의 경우, CR-1에 비해 높은 체적저항율을 나타내고 있으며 수산화마그네슘을 첨가한 CR-3가 가장 우수한 체적저항율을 보이며, 방사선 조사에 따른 특성의 변화도 가장 우수한 것으로 나타났다. CR-3와 CR-1의 체적저항율 차이는 현저하게 크게 보이고 있으며, CR-3를 제외한 다른 종류의 난연첨가제를 첨가한 경우는 모두 유사한 수치 보였으며, 방사선 열화에 따른 체적저항율의 경향도 유사하게 나타났다. 기존의 연구에서 고분자 재료에 금속 수화물을 첨가하여 열화시킨 경우 고분자 재료에서 측쇄의 절단과 도전성 이온이 증가하기 때문에 미첨가 시편에 비해 낮은 체적저항율을 보였지만, 본 연구에서는 반대의 경향을 보이고 있다.

난연제 첨가 클로로프렌 고무의 표면특성의 측정으로 표면저항율을 측정한 결과를 그림 6.2.17에 나타내었으며, 표면저항율의 크기는 체적저항율의 경우와 유사하게 순수 클로로프렌 고무의 경우 가장 낮은 수치를 나타내었으며, 수산화마그네슘과 암모늄 폴리포스페이트를 첨가한 CR-3와 CR-2는 높은 값을 보였다. 그러나 CR-2는 방사선 조사에 대해 급격한 표면저항율의 감소를 보이고 있으며, CR-3도 체적저항율 결과와는 달리 1000 kGy 이후 급격한 감소를 나타내고 있다. 이것은 방사선 조사 후 시편의 상온보관으로 인하여 시편의 표면에서 공기 중 산소와 반응하여 급격한 산화반응이 발생하기 때문인 것으로 생각된다.

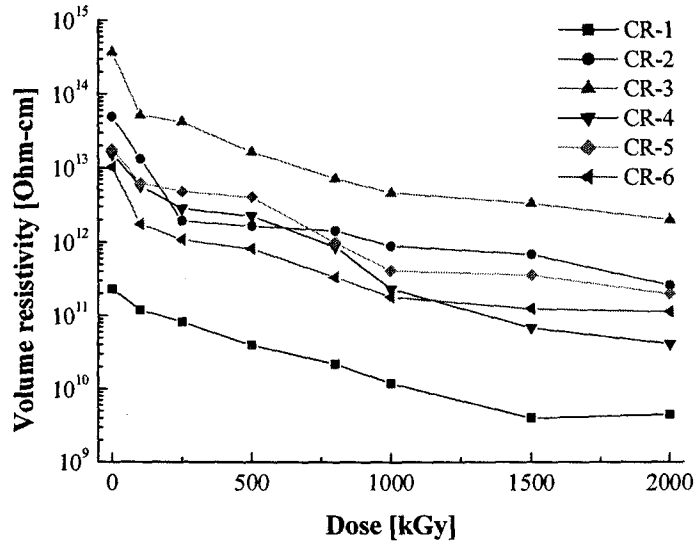


그림 6.2.16. 난연제를 첨가한 CR의 방사선 조사에 따른 체적저항율의 변화

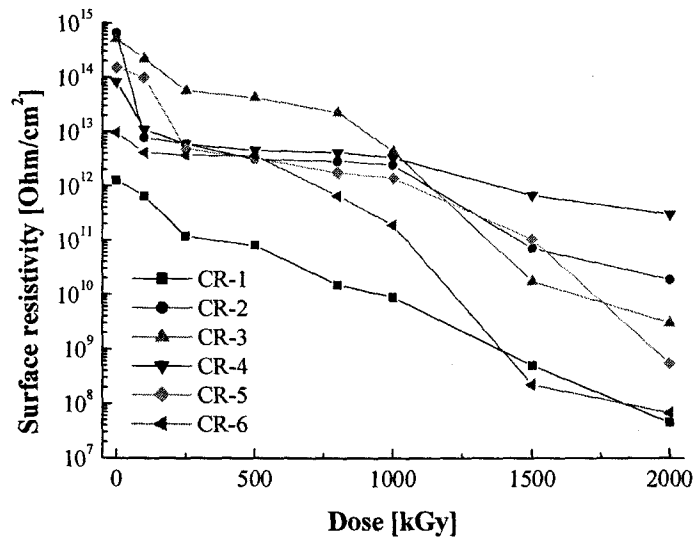


그림 6.2.17. 난연제를 첨가한 CR의 방사선 조사에 따른 표면저항율의 변화

그림 6.2.1과 6.2.19는 난연제를 첨가한 클로로프렌 고무의 방사선 조사에 따른 기계적 특성 변화로 파단시 연신율과 인장강도를 측정된 결과이다. 케이블 절연재료로 파단시 연신율과 인장강도는 초기치의 50% 감소치를 열화에 대한 수명의 한계로 규정하고 있으며, 케이블 절연재료로 적합한 파단시 연신율의 초기치는 대략 500% 이상의 것을 사용하고 있는 실정이다. 본 연구

에서 사용한 클로로프렌의 연신율은 건전상태에서 550% 이상의 파단시 연신율을 나타내고 있으며, 난연제를 첨가하지 않은 경우 약 750%로 우수한 유연성을 가지는 것으로 나타났다. 난연제 첨가에 따라 파단시 연신율은 CR-1의 경우보다 모두 감소하는 것으로 나타났으며, 이것은 무기질 충전제 역할을 하는 난연제의 첨가로 시편 내부에서 유기질의 상대적 감소에 기인하는 것으로 해석된다. 방사선 조사에 따른 변화는 500 kGy까지 급격하게 감소하다가 이후 선량에서 포화하는 경향을 나타내었다. 이러한 연신율의 저하는 방사선 조사로 인해 시편이 취성으로 변하면서 시편의 탄성을 잃게 되고 500 kGy 이후의 선량에서는 시편의 주쇄절단으로 인하여 더 이상의 감소가 나타나지 않은 것으로 보인다. 연신율의 결과에서 CR-1, CR-4, CR-6이 250 kGy의 선량에서 다른 시편에서보다 연신율의 감소 정도가 적게 나타나 우수한 내방사선 특성을 나타낸 것으로 볼 수 있다. 인장강도의 경우도 그림 6.2.19에 나타낸 바와 같이 초기치에 대해 250 kGy의 방사선 조사선량에서 급격한 감소를 보이다 다시 약간의 증가와 함께 포화하는 경향을 나타내고 있다. 본 연구결과에서 파단시 연신율과 인장강도의 방사선에 대한 경향은 유사하게 나타나고 있으나, 방사선 미조사시 인장강도와 초기 100 kGy에서는 연신율 측정결과에서 보여주는 바와 같이 파단시 급격히 시편이 늘어난 상태이므로 파단되는 부분의 단면적이 초기 단면적에 비해 현저히 감소하여 단면적에 대한 힘으로 나타나는 인장강도의 수치가 급격히 증가한 것으로 보인 것으로, 실제 인장강도는 그림 6.2.19에 나타낸 것보다 적을 것으로 사료된다.

기계적 특성 측정결과에서 가장 우수한 내방사선성을 가지는 난연제는 탄산칼슘과 삼산화안티몬을 첨가한 CR-4, CR-6으로 나타났으며, 이것은 난연제를 첨가하지 않은 순수한 클로로프렌 고무와 유사한 유연성을 보였다.

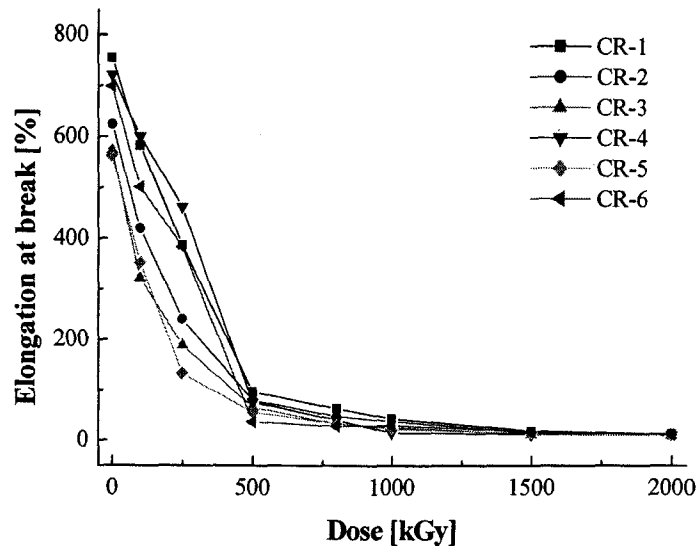


그림 6.2.18. 난연제를 첨가한 CR의 방사선 조사에 따른 파단시 연신율

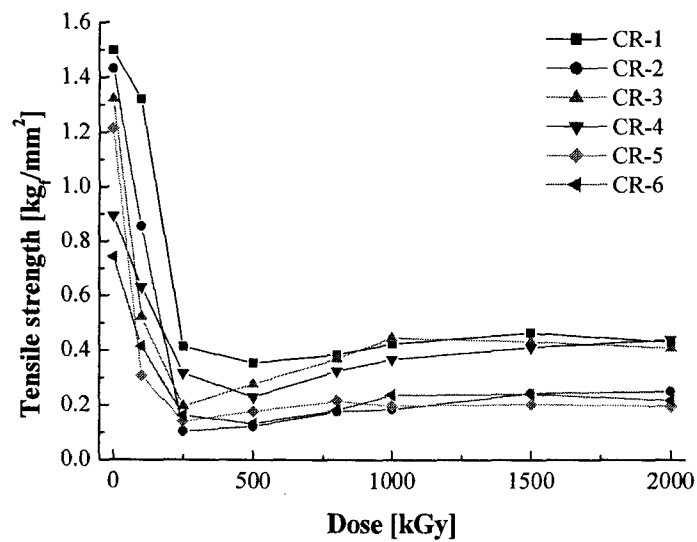


그림 6.2.19. 난연제를 첨가한 CR의 방사선 조사에 따른 인장강도

(다) 열중량 분석 및 표면특성

난연제를 첨가한 클로로프렌 고무의 방사선 미조사시 열중량 분석 결과를 그림 6.2.20에 나타내었다. 열중량 분석에 의한 클로로프렌 고무의 열분해 특성은 두 단계로 나타났다. 첫 번째 단계는 270°C 이상에서 빠르게 발생하는

탈염화수소 반응이며, 두 번째 단계는 370°C에서 시작되는 반응으로 클로로프렌 고무가 열분해 되어 탄화수소를 생성하는 반응이다[6.31]. 첫 번째 단계의 주반응인 탈염화수소 반응은 반응을 통해 쉽게 이중결합을 형성할 수 있는 염화비닐 수지의 경우와 달리 주성분을 이루는 trans-1,4처럼 이중결합에 염소가 결합된 형태에서는 발생하기 어렵고, 1,2-와 같은 다른 구조의 반복단위에서 발생하게 된다. 첫 번째 단계의 탈염화수소 반응에 의해 분해가 가능한 염소의 약 90%가 분해되는 것으로 알려져 있다. 그림 3-10에 나타낸 것과 같이 수산화마그네슘을 첨가한 CR-3를 제외한 다른 난연제들의 첨가에서는 첫 번째 단계의 분해가 시작되는 온도가 CR-1에 비해 현저히 증가하고 있으며, 500°C 이상의 고온에서 남아있는 시료의 잔류량도 증가하였다. 특히, 탄산칼슘을 첨가한 CR-4는 우수한 열 안정성을 나타내고 있으며 700°C까지 서서히 분해가 진행되고 있는 반면 CR-3는 약 100°C부터 서서히 분해되기 시작하여 300°C 이후 CR-1과 유사한 분해 경향을 나타내었다.

난연제를 첨가한 클로로프렌 고무의 방사선 조사에 따른 열분해 거동을 그림 6.2.21에 나타내었다. 그림 6.2.20의 방사선 미조사시 CR-1의 열분해는 100°C 부근에서 서서히 중량이 감소되기 시작하여, 260°C에서 빠르게 진행되었다. 첫 번째 열분해 반응에 의한 분해속도는 320°C에서 감소하였으며, 전체 클로로프렌 고무 중량의 약 30%가 감소하였다. 500 kGy의 방사선을 조사한 클로로프렌 고무의 열분해는 약 230°C에서 빠르게 진행됨으로써, 방사선을 조사하지 않은 클로로프렌 고무보다 더 낮은 온도에서 분해됨을 확인하였다. 방사선의 조사선량이 증가할수록 클로로프렌 고무의 첫 번째 열분해 온도는 낮아졌으며, 열분해에 따른 중량감소량도 작아졌다. 방사선을 조사한 클로로프렌 고무의 열분해 곡선에서 두 번째 단계의 경우 조사선량에 따른 차이가 매우 작게 나타났다. 이것은 방사선 조사에 의한 열화가 클로로프렌에 포함되어 있는 염소의 제거반응에 더 큰 영향을 미치기 때문으로 보이며, 분해되어 탄화수소를 형성하는 두 번째 단계에는 거의 영향을 미치지 않기 때문으로 보인다.

난연제를 첨가한 클로로프렌의 방사선 열화에 따른 열분해 거동은 모두 순수한 클로로프렌 고무 CR-1의 경우에서와 같이 방사선 열화가 진행될수록 첫 번째 분해 단계가 시작되는 온도가 감소하였다. 암모늄 폴리포스페이트와

수산화마그네슘을 첨가한 경우는 방사선 조사선량의 증가에 따라 미조사 경우와 큰 차이를 보이지 않았으나, 탄산칼슘, 수산화알루미늄, 삼산화안티몬을 첨가한 경우, 조사선량 증가에 따른 열분해의 개시가 현저하게 감소하였다. 상기 열중량 분석의 결과로 방사선 열화에 따른 열적 안정성이 우수한 난연 첨가제는 암모늄 폴리포스페이트와 수산화 마그네슘으로 나타났다.

그림 6.2.22에서와 같이 초기 중량에 대해 5%의 중량감소가 발생하는 시점 (5%중량감소온도)을 방사선 조사선량에 대해 측정한 결과 CR-2와 CR-4는 CR-1보다 낮은 온도에서 분해가 발생하였고, 나머지 난연제를 첨가한 경우는 모두 CR-1보다 높은 온도로 측정되었다.

그림 6.2.23에 난연제를 첨가하지 않은 클로로프렌 고무의 FTIR/ATR 분광 스펙트럼을 조사선량에 대해 나타내었다. 난연제를 첨가한 클로로프렌 고무의 방사선 열화에 따른 FT-IR 스펙트럼의 변화는 CR-1의 경우와 유사하게 나타났다. 그림에서 2915cm^{-1} 의 피크는 C-H 결합의 비대칭 신축운동에 의해 나타나며, 1655cm^{-1} 피크는 C=C 결합의 신축운동에 의해 나타나는 특성피크이다. $1445, 1306, 1213, 1115, 1010\text{cm}^{-1}$ 피크들은 다중 C-H와 C-C 결합의 굽힘 및 신축 진동에 의해 나타나며, C-Cl 결합의 신축진동은 830cm^{-1} 의 위치에서 나타난다[6.32]. 본 실험의 FTIR 관측 결과에서 1000 kGy 조사한 클로로프렌 고무의 스펙트럼은 방사선 조사에 따른 시료의 변색으로 인하여 저선량 조사한 경우에 비해 투과율이 낮게 나타났다. 따라서 특성 피크들의 면적을 계산하여 정규화한 값을 표 6.2.6에 나타내었다. 방사선 조사에 따른 피크들의 변화를 살펴보면, 조사선량이 증가하면서 과산화물의 형성에 의한 산화로 3380cm^{-1} 의 위치에서 -OH의 피크가 증가하며, 탈 염화수소 반응이 발생하여 C-Cl의 피크가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. -CH₂-와 C=C의 피크는 500 kGy 또는 그 이상의 선량에서도 큰 변화를 보이지는 않으나, C=C 피크의 경우 산화반응에 의한 C=O 결합의 형성으로 피크들이 중첩되어 정확한 확인이 어렵다. 표 6.2.6에서 나타낸 것과 같이 C=C 피크와 C=O 결합의 피크에 해당하는 면적을 합산하여 조사선량에 따른 클로로프렌 고무의 변화를 보면, 500 kGy 이상의 조사선량에서 급격한 증가를 보이고 있으며, 이 같은 사실은 조사선량 500 kGy 이상에서는 클로로프렌 고무의 화학적 변화가 급속하게 진행되는 것을 추측할 수 있게 한다. 따라서, 이와 같은

사실은 원전에서 사용되는 클로로프렌 고무의 내방사선 한계를 500 kGy로 규정하고 있는 연구결과[6.32]에 대한 근거로 제공될 수 있을 것으로 사료된다.

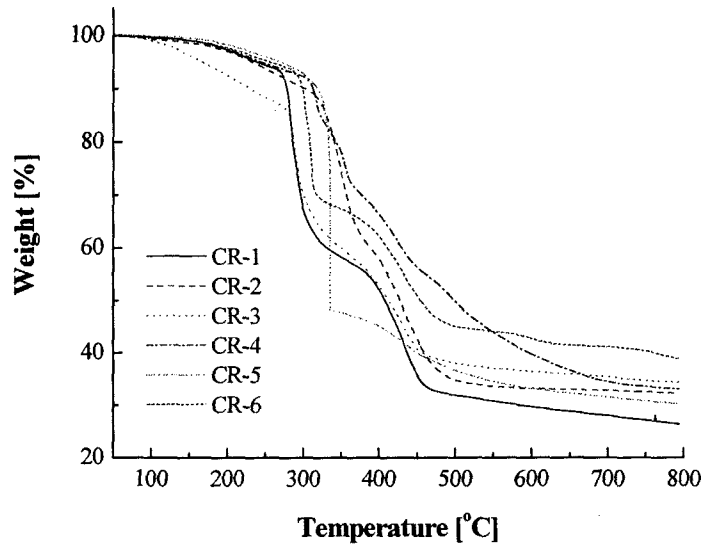
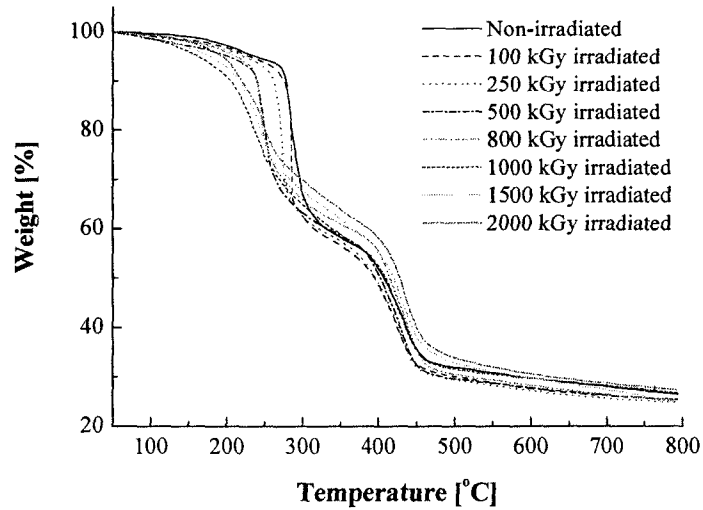
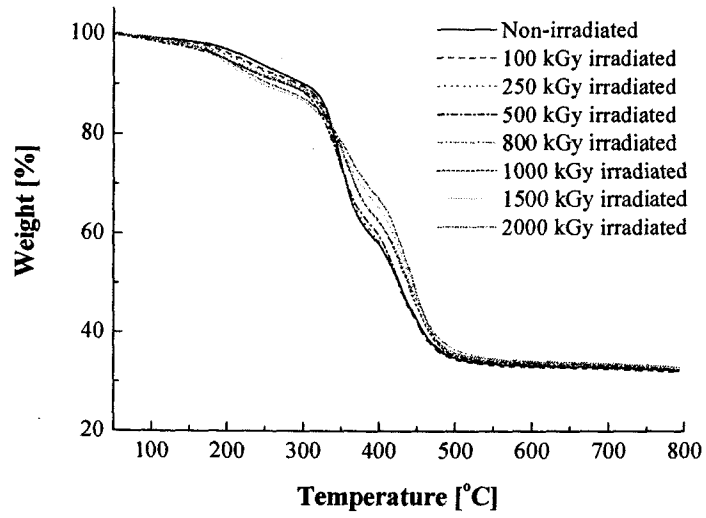


그림 6.2.20. 난연제 종류에 따른 CR의 열중량 분해 곡선

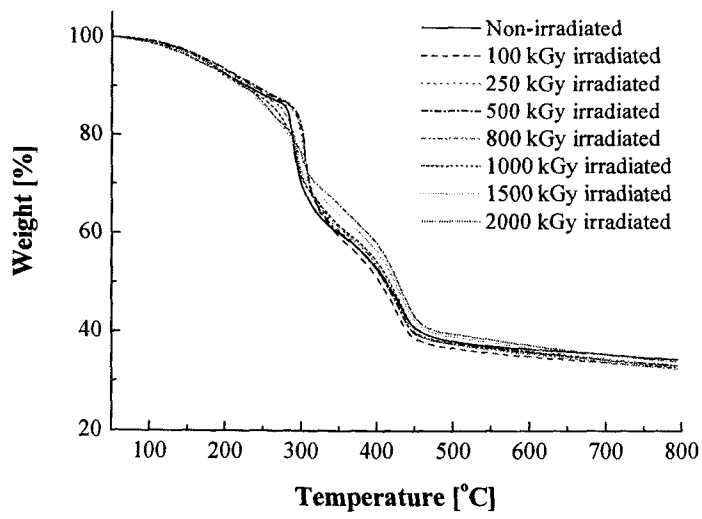


(a) CR-1

그림 6.2.21. 방사선 조사에 따른 CR의 열중량 분해 곡선

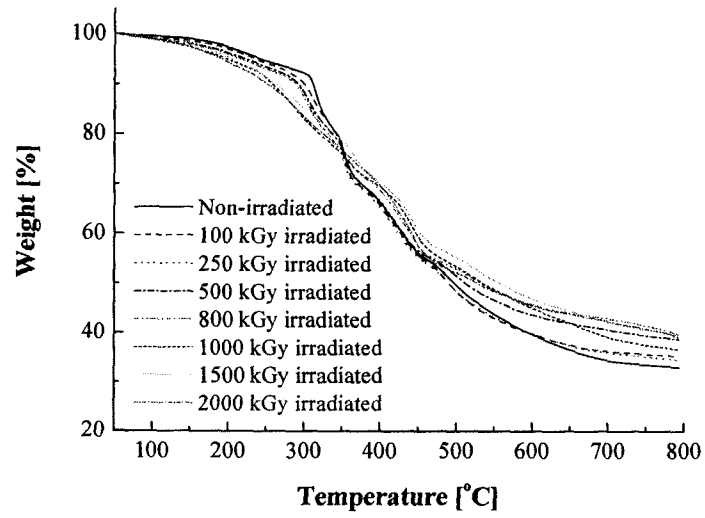


(b) CR-2

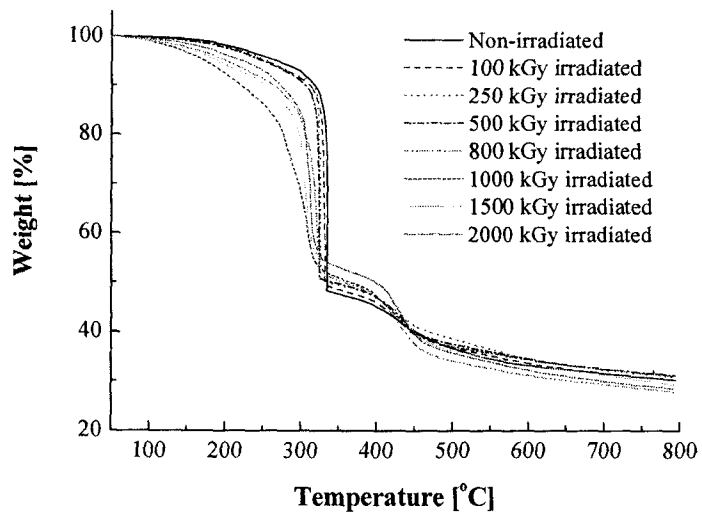


(c) CR-3

그림 6.2.21. 방사선 조사에 따른 CR의 열중량 분해 곡선

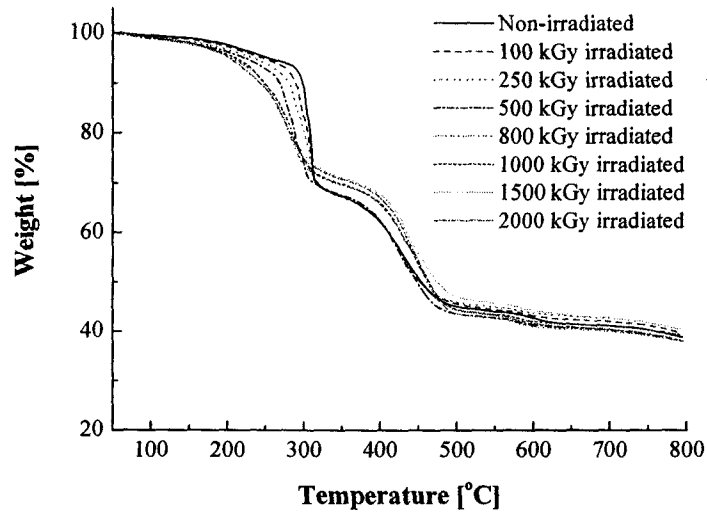


(d) CR-4



(e) CR-5

그림 6.2.21. 방사선 조사에 따른 CR의 열중량 분해 곡선



(f) CR-6

그림 6.2.21. 방사선 조사에 따른 CR의 열중량 분해 곡선

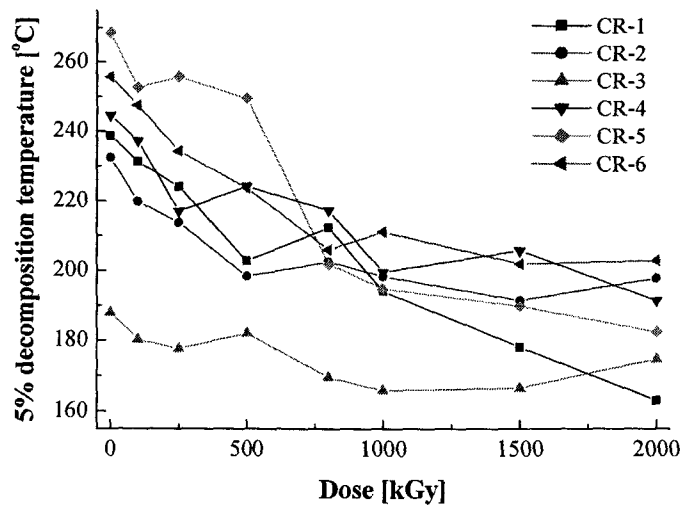


그림 6.2.22. 난연제를 첨가한 CR의 방사선 조사에 따른 5% 분해개시온도 변화

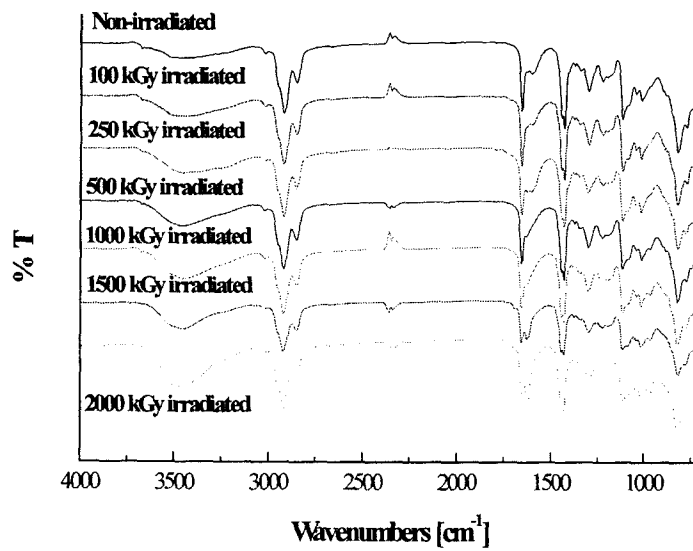


그림 6.2.23. 방사선 조사에 따른 CR-1의 적외선 분광 흡수 스펙트럼

표 6.2.6. 방사선 조사에 따른 CR-1의 FT-IR 특성피크의 정량분석

Radiation Dose [kGy]		Non	200	400	600	1000
Peak areas of experimental peaks	Peak Position 3380	2.143	14.939	18.736	21.642	4.54
	Peak Position 2915+2849	3.169	2.671	2.754	3.185	0.567
	Peak Position 1655+1587	2.572	6.12	15.3	18.742	4.03
Normalized peak areas	Peak Position 3380/(2915+2849)	0.676	5.593	6.803	6.795	8.007
	Peak Position (1655+1587)/(2915+2849)	0.812	2.291	5.556	5.884	7.108

다. 결론

방사선 열화 환경에서 케이블 절연재의 난연성 향상을 위해 클로로프렌 고무와 난연첨가제로 암모늄 폴리포스페이트, 수산화마그네슘, 탄산칼슘, 수산화알루미늄, 삼산화안티몬을 30 phr 씩 첨가한 시편의 연소시험, 전기적 특성, 기계적 특성, 열중량 분석 및 표면특성을 방사선 조사 전, 후에 대하여 검토하였다.

클로로프렌 고무의 난연제 첨가에 대해 한계산소지수와 분해개시온도 측정 결과, 가장 우수한 특성을 나타내는 난연제는 수산화마그네슘과 탄산칼슘으로 나타났다. 방사선 열화의 진행에 대해서는 한계산소지수의 증가를 나타내었으며, 이것은 클로로프렌 고무 측쇄의 절단과 유기성분 휘발량의 증가에 의해 상대적인 무기성분의 양적 증가에 기인하는 것이나, 분해정도는 조사선량 증가에 따라 더 심하게 나타났다. 방사선 열화에 대하여 우수한 내방사선 특성을 나타낸 시편은 난연제를 첨가하지 않은 클로로프렌 고무와 수산화마그네슘을 첨가한 경우인 것으로 나타났다.

전기적 절연특성의 변화는 방사선 조사에 대해 전반적으로 저항율의 감소를 나타내었으며 난연제를 첨가하지 않은 경우보다 난연제 첨가시 더욱 높은 저항율을 나타내었다. 가장 우수한 절연저항을 보인 난연제는 수산화마그네슘과 암모늄 폴리포스페이트로 나타났으며, 두 경우 모두 방사선 열화에 대한 성능의 저하는 유사하게 나타났다.

방사선 열화에 대한 난연제를 첨가한 클로로프렌 고무의 기계적 특성의 변화는 열화의 진행에 따라 난연제의 종류에 관계없이 전반적인 감소를 나타내었지만, 500 kGy의 선량에서 심각한 성능 저하를 보였으며, 500 kGy 이상의 고선량 방사선 조사에 대해서는 포화하는 경향을 나타내었다. 기계적 특성 변화에서 첨가제 효과의 우수성은 미소한 차이를 나타내었으나, 순수한 클로로프렌 고무와 암모늄 폴리포스페이트, 수산화마그네슘, 삼산화안티몬을 첨가한 순서로 열화에 대한 연신율의 저하가 적게 나타났다.

방사선 열화에 대한 클로로프렌 고무의 난연제 첨가 효과를 난연특성, 전기적, 기계적 특성을 관측한 결과, 수산화마그네슘이 가장 우수한 결과를 나타내었으며, 본 연구에서는 난연제의 일정 함량만을 첨가한 경우로 측정하였으나, 향후 난연제의 최적 함량 선정에 관한 연구가 진행되어야 할 것으로 사

료된다.

제 3 절 원전 케이블의 노후화 진단 기술개발 (II)

1. 고분자 물질의 분해 및 안정화

합성고분자는 제조, 보관, 가공 그리고 실제 사용시와 같이 거의 모든 단계에서 분해를 받기 쉽다. 분해를 일으키는 반응은 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 열분해, 가수분해 등의 이종분해반응(이온반응)과 유기된 방사선, 유기된 기계적 응력, 유기된 라디칼 등에 의한 동종분해반응(라디칼 반응)으로 나누어지는데, 일반적으로 고분자 분해반응은 동종분해반응이 대부분이며, 동종분해반응(homolytic reaction)의 특성은 다음과 같다.

- ① 일정한 유도기간(induction time)을 가진 후 자동촉매반응을 한다.
- ② 금속에 의해 반응이 촉진된다.
- ③ 첨가제(antioxidant type)에 의해 억제가 가능하다.

고분자의 분해를 억제하는 방법으로는 안정화 comonomer와 공중합시켜 고분자를 변형시키거나 첨가제를 이용하는 방법이 있는데, 대개는 고분자 변형이 상당히 어려운 과정이므로 두 번째의 방법이 널리 이용된다.

가. 열산화 (thermal oxidation) 과정

플라스틱 절연케이블 제조공정에서 고분자 분해가 일어날 수 있는 부분은 절연, 피복 공정의 열산화, 기타 공정에서의 유기된 기계적 응력에 의한 라디칼 반응이 일어날 수 있다. 즉, 산화가 일어날 수 있는 환경은 산소 분위기(oxygen, ozone, nitrogen, dioxide, sulfur dioxide) 하에 고온, 유기 방사선(UV radiation), 고에너지 라디칼, 유기된 기계적 응력이 합치되었을 때이다. 일반적으로 플라스틱 절연케이블은 옥외폭로 케이블이 아니고, 기계적 응력에 의한 고분자 물질의 분해는 완전품 케이블의 내전압 측정 검사항목이 있으므로 플라스틱 절연케이블의 분해(degradation)는 열에 의한 산화로 한정하여 생각할 수 있다.

열에 의한 산화적 분해는 고온에서 가공하거나, 제조의 마지막 단계에서 또

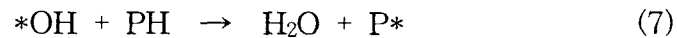
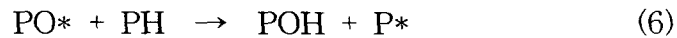
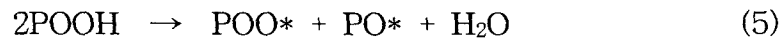
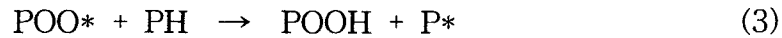
는 실제 사용온도가 높을 때 발생하며, 산화의 결과로서 용융흐름지수가 감소, 변색현상, 투명도 손실, 표면광택 손실, 기계적 성질(충격강도, 인장강도, 연신율)의 손실과 같은 현상이 일어난다.

고분자 산화에 대한 근본적인 원리는 40년 전 Bolland와 Gee에 의해 밝혀졌다. 이들의 연구로부터 라디칼-연쇄반응기구가 다음과 같다는 것을 알 수 있다.

개시반응



성장과 분지화 반응

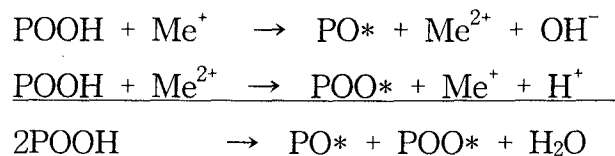


종결반응

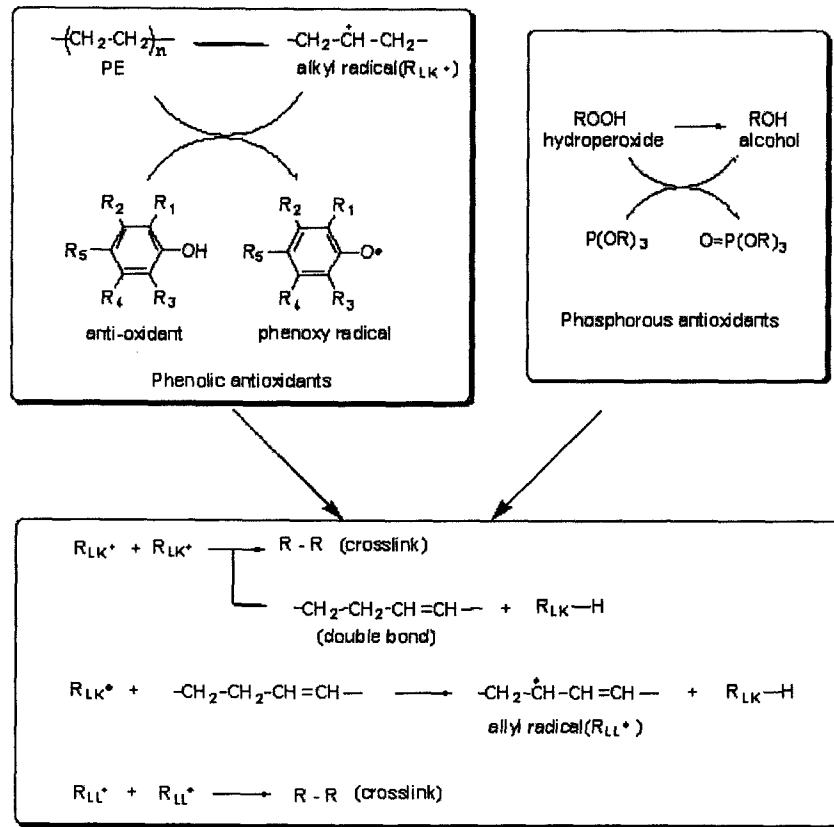


여기서 반응(2)는 매우 빠르고 반응(3)은 속도-결정단계이다.

과산화수소의 단분자 분해반응인 반응(4)는 상당히 높은 활성화에너지를 필요로 하며, 150°C 이상의 온도에서나 빛이 존재할 때 중요하다. 반응(5)는 금속이온에 의해 촉진된다.

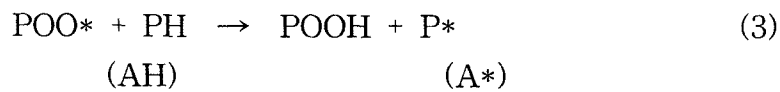


또한, 다음은 산화기구(oxidation mechanism)를 알기 쉽게 표현한 것이다.

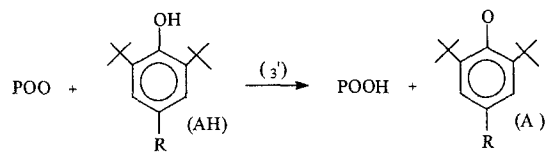


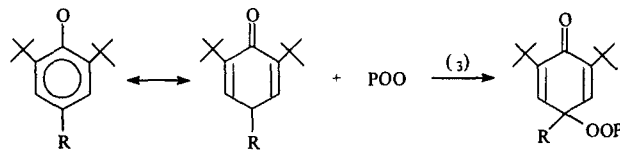
나. 안정화 원리

성장과 분지화 반응 중 반응(3)을 보면,

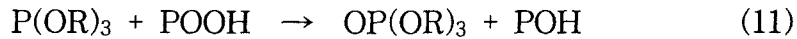


고분자 PH 대신에 산화방지제 AH를 넣어준다면 성장과 분지화 반응을 차단하여 고분자를 보호할 수 있다. 여기서 AH는 일차산화방지제 또는 라디칼 종결제라 말한다. (A*)는 상당히 불활성이므로 아래 반응(3)처럼 안정한 최종산물로 된다.

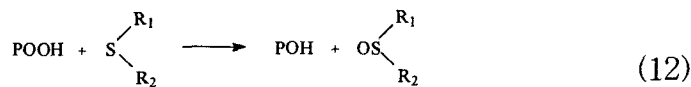




과산화물 분해제로 작용하는 2차 산화방지제에는 황화합물과 Phosphites가 가장 대표적인 것들이다. 이들은 모두가 비-라디컬 산물을 형성하기 위해 이온기구(ionic mechanism)에 의해 과산화수소와 반응한다.



Thioester는 과산화수소와 반응하여 Sulfoxides와 알콜로 된다.



산화방지제는 제품의 특성에 따라 그의 요구조건과 실제사용조건을 고려해서 선택되어야 한다. 전선용에 사용되는 산화방지제는 장기간의 수명을 요구하므로 제품특성에 따라 농업용 Film에 사용하는 것보다 더 효과적인 것을 사용하여야 한다. 1972년 이전에는 절연용 폴리에틸렌 산화방지제로 1차 산화방지제 (라디칼 종결제)인 Santonox R을 단독 사용하였다. 그러나 이는 Copper conductor에 의한 산화촉진반응과 migration 문제 때문에 Santonox R이 빨리 소모되어 장기간의 안정화에 만족스럽지 못했다. 따라서 1972년 이후에는 일차 산화방지제와 금속불활성제를 함께 사용하고 있다.

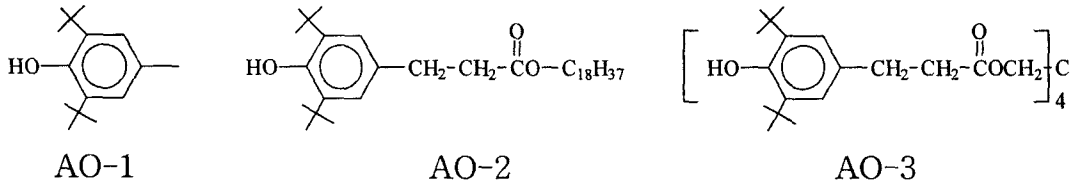
다. 산화방지제 및 금속불활성제

산화방지제는 두 가지 군으로 나눌 수 있다.

1차 산화방지제 (Radical scavenger)	Hindered phenols Secondary aromatic amines
2차 산화방지제 (Hydroperoxide 분해제)	Thioesters Phosphites

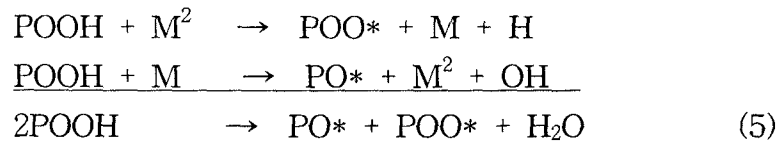
입체적 장애를 받는 페놀류는 여러 가지 다양한 구조를 갖는다. 아민류는 효과적이지만 강한 변색을 일으키므로 흑색 가황탄성체에 국한되어 사용된다. 상업적으로 얻을 수 있는 산화방지제의 60% 이상은 입체적 장애를 받는 페놀류이다. BHT는 이 그룹에 속하는 시초물이다. BHT는 오랫동안

동안 많은 고분자에 사용되어 왔으며 효과적이라고 알려져 있다. 그러나 이는 때때로 변색을 일으키며, 휘발성도 강하다는 불리한 점이 있다. 그러므로 상당히 낮은 휘발성을 갖는 페놀류 산화방지제가 많이 개발되어 왔다. 첨가제 제조회사인 CIBA-GEIGY는 이 분야에 많은 노력을 해 왔으며, 그 제품들은 아래와 같다.

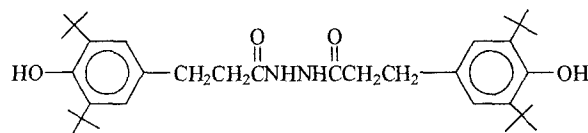


어느 특정 일차 산화방지제가 궁극적으로 사용될 것인가 하는 것은 고분자의 형태와 요구조건에 따라 달라진다. 종종 1차와 2차 산화방지제를 동시에 사용했을 때 보강효과가 관찰된다. 즉 이는 각각의 효과의 합보다 두 개를 동시에 사용했을 때의 효과가 더 뚜렷하다는 것을 의미한다.

과산화수소는 동종분열을 행할 수 있는데 이는 상당히 높은 활성화에너지를 필요로 하므로 150°C 이상의 온도에서만 중요하다. 그러나 금속이온이 존재할 때 과산화수소는 실온에서도 다음의 산화-환원반응에 따라 분해될 수 있다.



금속이온은 직접 혹은 간접적으로 Filler나 Modifiers와 더불어 고분자 속으로 들어간다. 또한 플라스틱 절연케이블의 경우 절연용 compound는 직접 도체와 접촉하므로 산화반응이 촉진될 수 있다. 소량의 금속불활성제를 사용하므로써 금속이온에 의한 분해를 억제시킬 수 있다. 특히 효과적인 금속불활성제는 아래와 같은 Hydrazine 유도체이다.



위의 물질은 금속과 킬레이트-착화합물을 형성하여 금속을 불활성화시키는 금속이온에 대한 complexing agent로 작용한다.

산화방지제의 처방으로서 그레놀이나 펠렛의 저장안정성, 고온가공안정성, 장기 열안정성, 유기된 자외선으로 보로 등의 효과를 얻을 수 있다. 열산화에 의해 형성된 라디칼을 억제시키기 위하여 1차 산화방지제를 처방하여 안정화를 이루는데 고분자량의 페놀계 산화방지제를 사용한다.

또한 고온가공에서 발생할 수 있는 주쇄절단(chain scission) 및 가교(crosslinking)를 감소시키기 위해 Phosphite 계열의 2차 산화방지제를 처방한다. 통신케이블의 경우 금속불활성제를 사용하기도 하는데, 이는 소량으로 충분하며, 장기수명(long-term stabilisation)에는 영향을 주지 않는다는 내용도 보고된 바 있다.

첨가제의 선택 및 함량결정은 사용목적과 중합체의 성질에 따라 달라지기도 하지만 공통적으로 가격과 성능의 비교, 중합체의 상용성 및 병용하는 첨가제와의 반응성, 중합체의 물성에 미치는 영향, 가공시 열안정성 및 내광성, 화학적 활성 및 독성 등을 종합적으로 고려하여야 한다.

라. 산화방지제 시험

아래와 같은 방법으로 산화방지제의 효과를 상대적으로 예측할 수 있다.

- 1) Oven aging 후 물성변화 관찰 및 IR을 이용하여 CO Index 측정
- 2) 열분석(thermal analysis)을 이용한 산화유발시간(oxygen induction time, OIT) 측정
- 3) Processing stability
 - Extrusion 횟수에 따른 용융지수 변동률 측정
 - Viscometer 및 Brabender mixer에서 시간에 따른 토크 및 점도 거동 관찰
 - Blown film으로 압출하면서 skinning(단단하고 산화된 표면) 관찰

2. 원전케이블의 노후화 평가 실험

가. 실험방법

(1) 시편의 제작 및 방사선 가속열화

(가) 시편의 제작

케이블 피복재료로 고밀도 폴리에틸렌을 모재로 사용하였으며 사용한 고밀도 폴리에틸렌은 (주)호남석유화학의 5305E로 하였으며 표 6.3.1에 물리적 특성을 나타내었다. 난연특성을 향상시키기 위한 첨가제로 수산화알루미늄 $[Al(OH)_3]$, 수산화마그네슘 $[Mg(OH)_2]$, 삼산화안티몬 $[Sb_2O_3]$ 을 각 30 phr 씩 첨가하였으며, 내산화 특성 향상을 위하여 산화방지제 Songnox 1010, Songnox 6260을 3 phr 씩 첨가하여 혼련, 제조하였다. 시편의 제작은 Bunbury mixture로 고밀도 폴리에틸렌에 난연첨가제와 산화방지제를 30 phr, 3 phr 씩 혼합하여 170℃에서 약 20분간 배합하였으며, 배합된 시료를 hot press로 180℃에서 10분간 가열, 용융하여 두께 0.5 mm와 1.0 mm의 시트형태로 제작하였다.

배합시편의 조성 및 명칭은 표 6.3.2에 나타낸 것과 같이 순수한 고밀도 폴리에틸렌은 HDPE로 하였으며, 난연제 종류별로 수산화알루미늄, 수산화마그네슘, 삼산화안티몬 30 phr 씩 첨가한 것을 PA, PM, PS로 하였으며, 여기에 산화방지제 Songnox 1010, Songnox 6260을 첨가한 경우를 -1, -2로 명명하였다.

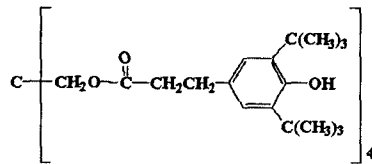
표 6.3.1. 고밀도 폴리에틸렌의 물리적 특성

물성항목	실험방법	단위	특성치
용융지수 (190)	ASTM D-1238	g/10min	0.80
밀도	ASTM D-1505	g/cm ³	0.951
파단시 인장강도	ASTM D-638	kg/cm ²	260
파단시 연신율	ASTM D-638	%	> 800

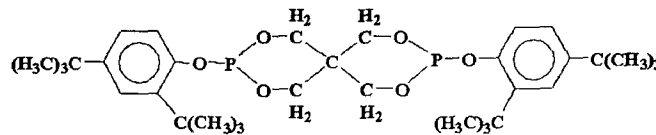
표 6.3.2. 고밀도 폴리에틸렌의 조성

Sample	HDPE	PA-1	PA-2	PM-1	PM-2	PS-1	PS-2
Composition							
HDPE	100						
Aluminum trihydroxide	-	30	30	-	-	-	-
Magnesium hydroxide	-	-	-	30	30	-	-
Antimony trioxide	-	-	-	-	-	30	30
Songnox 1010*	-	3	-	3	-	3	-
Songnox 6260**	-	-	3	-	3	-	3

* Songnox 1010 : Tetrakis[methylene-3-(3,5-di-tert-butyl-4-hydroxyphenyl) propionate]methane



** Songnox 6260 : Bis(2,4-di-tert-butylphenyl) pentaerythritol diphosphite



(나) 방사선 가속열화

난연제와 산화방지제를 첨가한 케이블 재료의 내방사선성을 시험하기 위하여 한국원자력연구소 방사선 조사시설의 Co^{60} γ -ray 선원을 사용하여 실온, 대기 중에서 5 kGy/hr의 선량율로 각각 200, 400, 600, 800, 1000 kGy의 선량으로 방사선 조사하였다.

(2) 발광특성 시험방법

난연제 및 산화방지제의 종류별로 방사선 조사된 시편들의 절연, 난연 특성의 변화 및 방사선 조사에 따른 열적 안정성의 변화관계를 화학적으로 규명하기 위하여 열발광 분석을 실시하였다. 열발광 분석은 Saint-Gobain Industrial Ceramics사의 Thermoluminescence detector (TLS Model 2210)을 사용하여 산소 분위기에서 초기단계에 50°C로 열적 평형을 유지한 후 6°C

/sec의 승온속도로 가열하면서 50~300℃의 온도 범위에서 분자내 탈트랩으로 인한 발광량을 검지하여 이를 방전 전하량으로 환산하여 표시하였다.

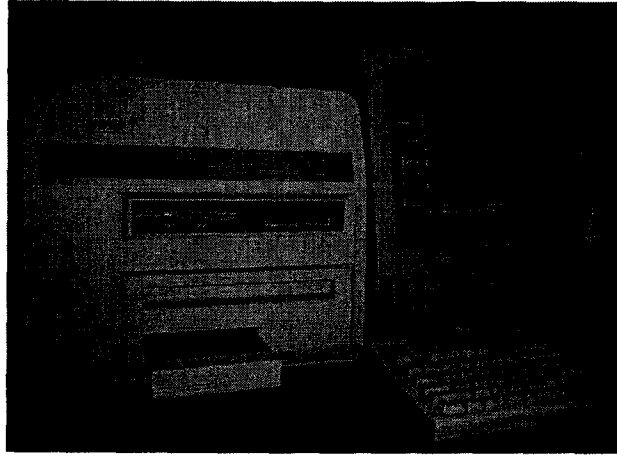


그림 6.3.1. 열발광량 측정 장치

(3) 기계적 특성 시험방법

난연제 및 산화방지제를 첨가한 고밀도 폴리에틸렌의 방사선 열화에 따른 인장강도 및 파단시 연신율의 측정은 인장시험기(Zwick, Model. Z010)를 사용하여 실온에서 측정하였다. (제1절, 2, 가 항 참조)

(4) 표면특성 시험방법

(가) 접촉각

방사선이 조사된 고분자 재료 표면의 접촉각 측정은 Surface & Electro-Optics Corporation의 Contact Angle Measuring System SEO 300을 사용하여 측정하였다. SEO 300은 Sessile drop 방법을 사용하는 접촉각 측정기로 정접촉각을 측정하였다. 평평한 고분자 재료의 표면에 물방울을 떨어뜨리는데 이때 물방울의 지름은 몇 mm 정도로 제한된다. 접촉각은 시간에 따라 변하기 때문에 물방울을 떨어뜨린 뒤 5초 정도의 짧은 시간 내에 측정하였다.

(5) 열중량 분석 시험방법

난연제와 산화방지제를 첨가한 고밀도 폴리에틸렌의 방사선 열화에 따른 중량감소 및 분해 정도를 비교, 분석하기 위하여, 시료 중량의 5% 감소시 온도를 측정하였다. (제1절, 2, 가 항 참조)

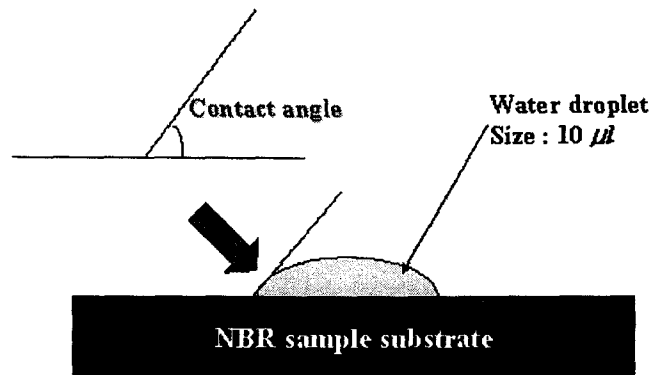


그림 6.3.2. 고분자 시료의 접촉각 측정

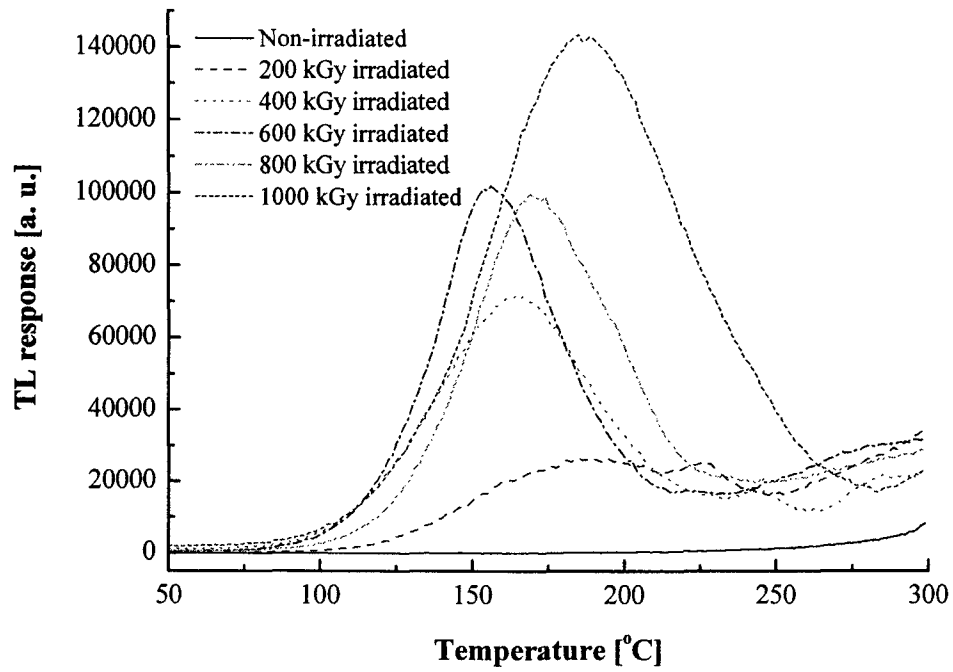
나. 실험결과 및 고찰

(1) 발광특성 및 난연특성

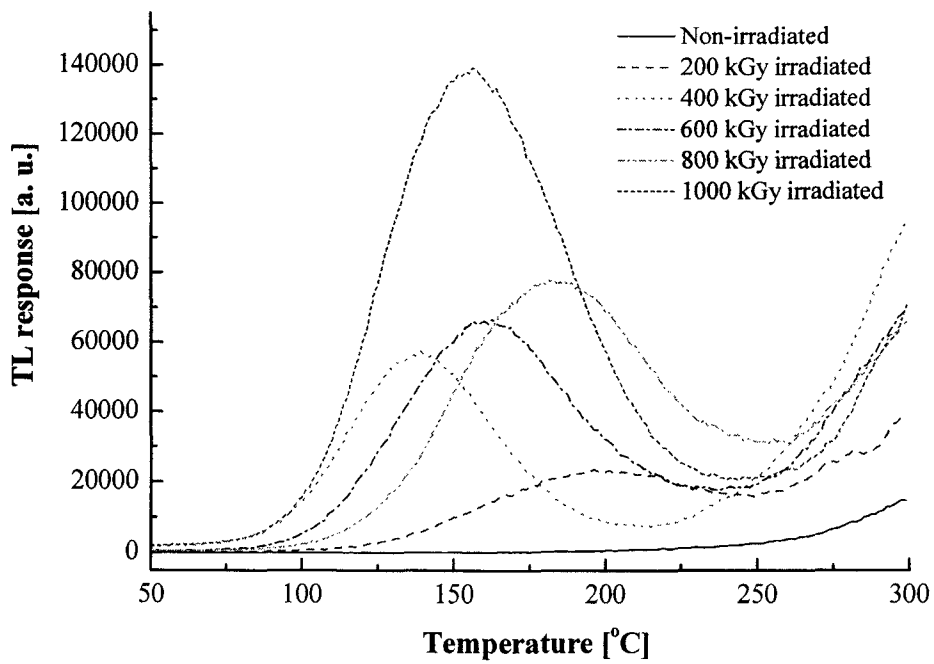
인가한 에너지에 의한 재료의 발광량 검지는 결함 및 열화를 진단하는 유용한 수단이 되어 왔으며, 발광량 검지는 전압인가에 의한 전계발광(electroluminescence)과 열 인가에 의한 열발광(thermoluminescence)으로 나눌 수 있다. 전계발광으로 인한 빛 방출은 고분자 재료에 인가한 고전계에 의해 주로 발생하며, 부분방전이 개시되기 이전에 국부적으로 전계가 집중하는 점에서 전하의 방출에 의한 것이기 때문에 극저온 및 고온의 모든 온도범위에서 미소한 체적에서만 발생한다. 또한 전계발광은 고전압 기기 및 케이블의 절연재에 내재한 결함을 검출하기 위해 발광을 이용한 부분방전 검출법으로도 사용하고 있다[6.34]. 반면, 열발광은 전압을 인가하지 않은 상태에서 실온 이상의 온도에서만 관측이 가능하며 열이 인가된 모든 부분에서 온도에 의해 발광하는 빛의 세기가 의존하게 된다. M. Ieda, T. Mizutani, Y. Suzuoki 등의 연구에 의하면, 실온 이상에서 폴리에틸렌의 열발광은 트랩된 전하 캐리어의 탈트랩과 발광중심부(luminescent center)와의 적절한 재결합에 기인한다고 하였다[6.35]. 본 연구에서 측정된 방사선 조사선량의 변화에 따른 배

합 PE의 열발광량의 변화를 온도에 따라 그림 6.3.3에 표시하였으며, 그림에서 보는 바와 같이 미조사 시편에 비해 방사선이 조사된 시편에서는 전체적으로 열발광량이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 방사선 조사선량에 따라서는 대체로 발광량이 증가하는 경향을 보이고 있으며, 이것은 방사선 조사에 의한 폴리에틸렌의 분자쇄 절단으로 인해 도전성 이온, 가스 등의 캐리어의 생성이 많아져 발광량의 증가를 초래한 것으로 보인다[6.36]. 또 S. S. Bamji 와 A. T. Bulinski 등은 가교 폴리에틸렌에서 가교부산물이 열발광의 광원으로 작용한다고 FT-IR 분석을 통해 지적하였는데[6.37], 이것은 가교 후 생성된 유극성 가교부산물로 인해 전하 캐리어의 트랩 및 탈트랩이 더욱 용이하게 발생하여 열발광량을 증가시키기 때문이다. 저밀도 폴리에틸렌의 방사선 조사에 의한 화학적 변화에 관한 기존의 연구에 의하면[6.38], 조사선량의 증가에 따라 카르보닐, 히드록시, 이중결합 등이 증가하므로 이들 극성기의 생성이 열발광에 직접적인 영향을 미친다고 할 수 있으며 이러한 극성기의 영향은 S. S. Bamji 등의 가교 폴리에틸렌에서 가교부산물의 열발광에 미치는 영향과 같은 경우라고 할 수 있다. 산화방지제와 난연제를 첨가한 배합 PE의 방사선 조사에 따른 열발광 스펙트럼은 산화방지제보다 난연제의 조성에 더욱 의존하는 것으로 나타났다. 이것은 배합시 첨가한 양에 의존하는 것으로 볼 수 있으며 산화방지제의 경우는 방사선 열화로 인한 산화반응에 대한 라디칼 포획 작용으로 열화에 대하여 재료를 안정화시켜주는 것으로 알려져 있으나, 난연제에 비해 현저히 적은 양이 첨가되었기 때문에 안정화보다는 난연제에 의한 열발광 효과가 더욱 크게 나타난 것으로 보인다. 또 온도에 대한 열발광량의 피크치를 보이는 경향도 산화방지제에 의한 분류보다 난연제 종류와 잘 일치하고 있다.

방사선 조사에 따른 배합 PE의 50~300℃ 구간에서 집적된 총발광량의 변화를 그림 6.3.4에 나타내었다. 모든 시편에서 첨가제의 유무에 상관없이 조사선량의 증가에 대해 총발광량은 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이 결과도 첨가한 난연제에 더욱 의존하는 경향을 보이고 있으며 Mg(OH)₂를 첨가한 경우는 순수한 HDPE보다 더욱 불안정한 상태를 보이고 있다. 반면 Al(OH)₃와 Sb₂O₃를 첨가한 경우는 순수한 HDPE보다 집적 발광량이 감소하여 안정화된 것으로 해석된다.

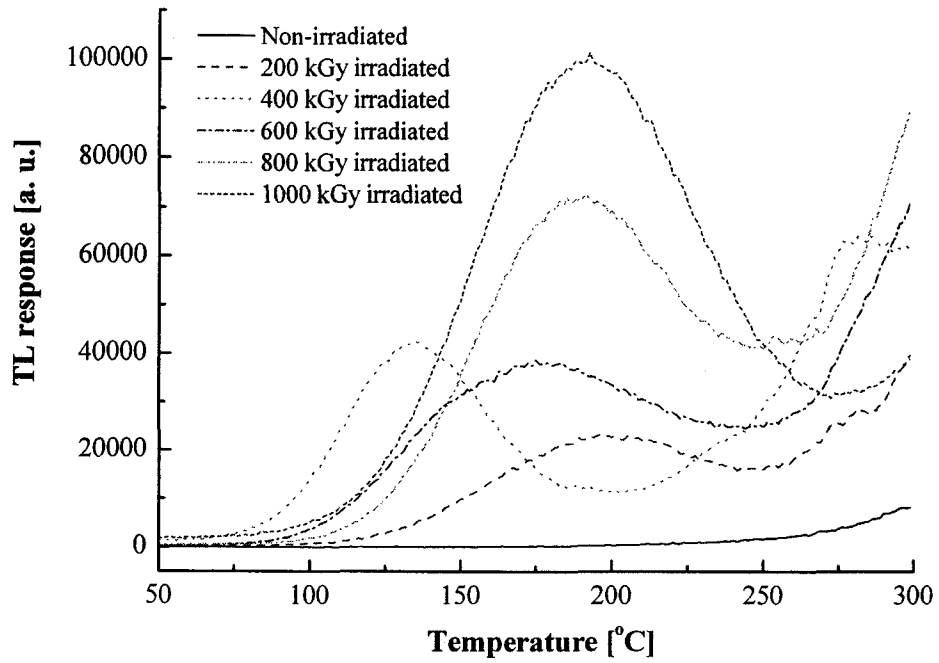


(a) HDPE

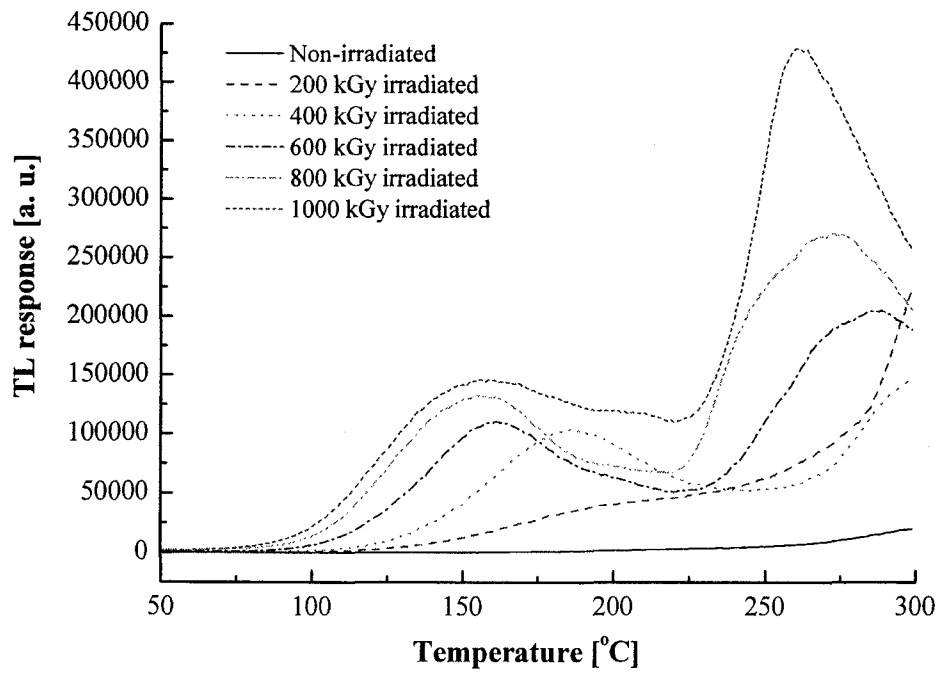


(b) PA-1

그림 6.3.3. 배합 PE의 방사선 조사에 따른 열발광량 변화

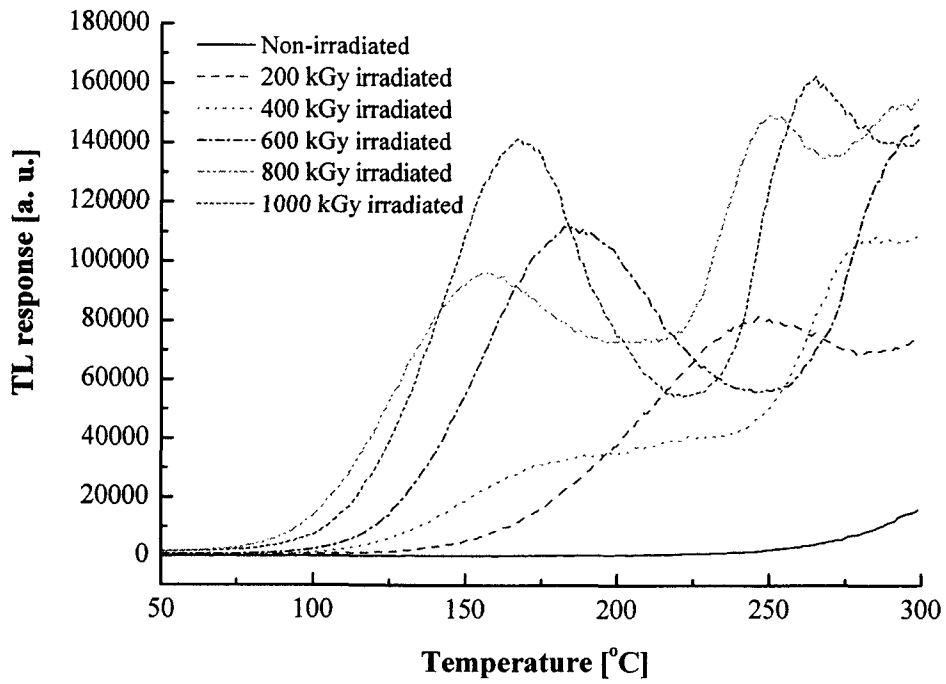


(c) PA-2

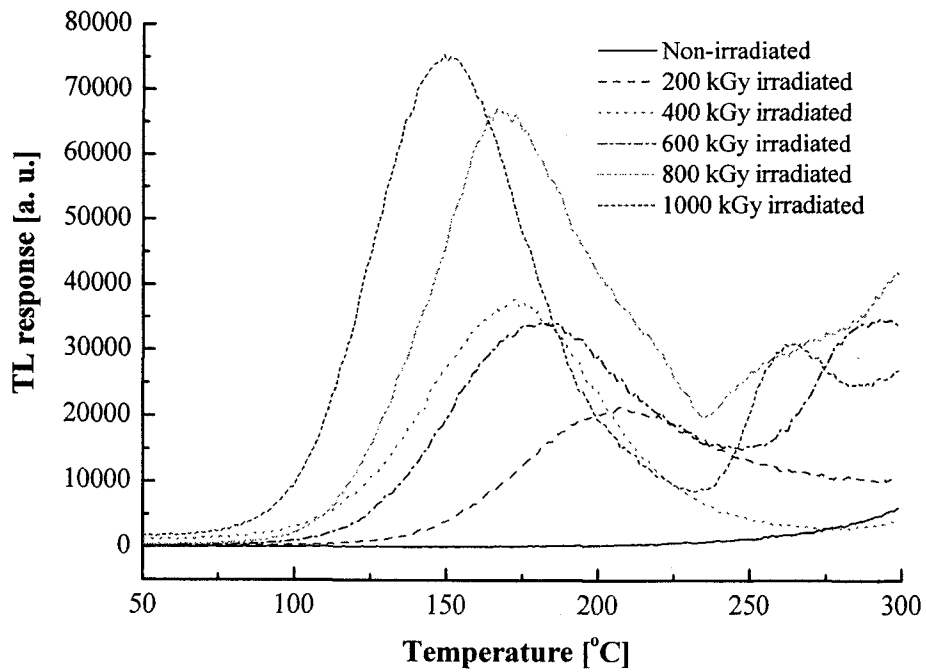


(d) PM-1

그림 6.3.3. 배합 PE의 방사선 조사에 따른 열발광량 변화

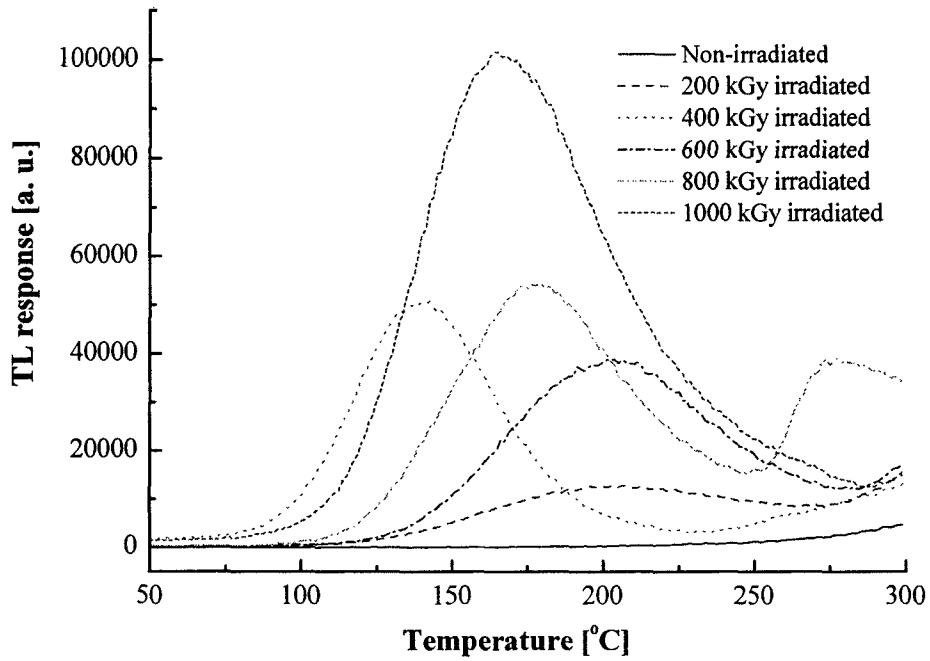


(e) PM-2



(f) PS-1

그림 6.3.3. 배합 PE의 방사선 조사에 따른 열발광량 변화



(g) PS-2

그림 6.3.3. 배합 PE의 방사선 조사에 따른 열발광량 변화

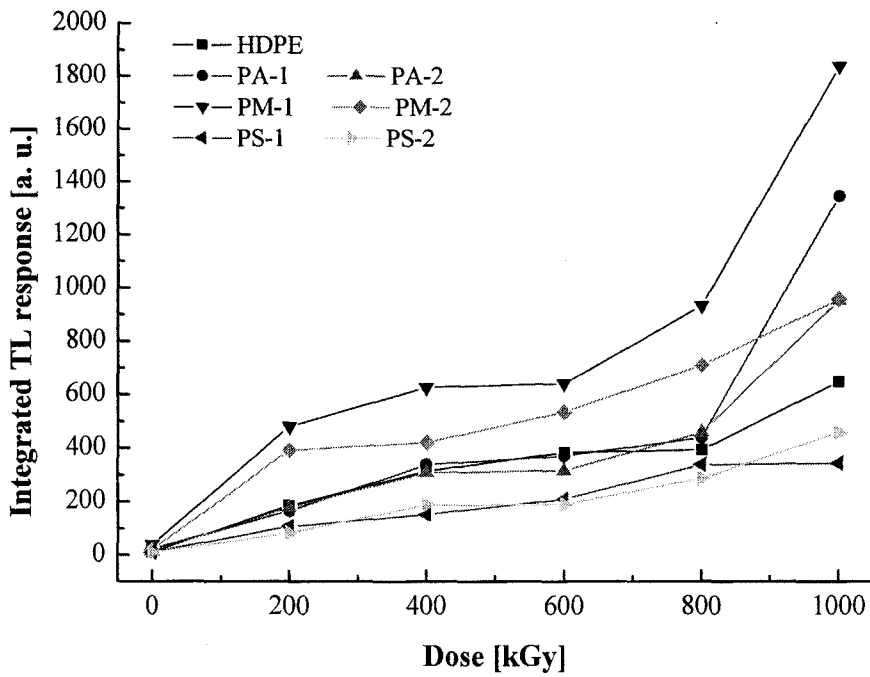


그림 6.3.4. 방사선 조사에 따른 배합 PE의 열발광 집적량 (50~300°C)

(2) 기계적 특성 및 표면특성

방사선 조사에 따른 배합 PE의 파단시 연신율의 변화를 그림 6.3.6에 나타내었다. 케이블 절연재료로 파단시 연신율과 인장강도는 초기치의 50% 감소치를 열화에 대한 수명의 한계로 규정하고 있으나, 본 연구에서 사용한 고밀도 폴리에틸렌의 연신율은 건전상태에서 300% 이상의 파단시 연신율을 나타내고 있으며, 배합제를 첨가하지 않은 경우 약 550%로 적절한 유연성을 가지는 것으로 나타났다. 배합제 첨가에 따라 파단시 연신율은 HDPE의 경우보다 모두 감소하는 것으로 나타났으며, 이것은 무기질 충전제 역할을 하는 난연제의 첨가로 시편 내부에서 유기질의 상대적 감소에 기인하는 것으로 해석된다. 방사선 조사에 따른 변화는 500 kGy까지 급격하게 감소하다가 이후 선량에서 포화하는 경향을 나타내었다. 이러한 연신율의 저하는 방사선 조사로 인해 시편이 취성으로 변하면서 시편의 탄성을 잃게 되고 500 kGy 이후의 선량에서는 시편의 주쇄절단으로 인하여 더 이상의 감소가 나타나지 않은 것으로 보인다. 연신율의 결과에서 PA-1이 200 kGy의 선량에서 다른 시편에서보다 연신율의 감소 정도가 적게 나타나며 HDPE와 유사한 특성을 지니 우수한 내방사선 특성을 나타낸 것으로 볼 수 있다.

방사선 조사에 따른 배합 PE의 접촉각 변화를 그림 6.3.7에 나타내었다. 일반적으로 방사선 조사에 따른 ester 결합을 포함하는 고분자는 방사선에 의해 라디칼을 형성하고, β -scission에 의해 -OH기를 더 많이 갖는 ester를 형성하여, 소수성이 급격히 감소하게 되지만, 조사량이 더 증가하여 phthalate의 형성도 많아지게 되면 소수성이 다시 증가하게 된다[6.39]. 그러나 ester 결합을 갖고 있지 않는 경우의 고분자는 방사선 조사선량이 증가할수록 공기 중의 산소와 반응하여 알콕시 라디칼($RO\cdot$)을 형성하고, 이렇게 형성된 라디칼들이 주쇄를 공격하여 주쇄에 카르보닐기($-C=O$)이나 하이드록시기($-C-OH$)를 형성하게 되어 고분자 표면의 소수성을 감소시키게 된다. 또한 조사량이 더 증가하면 알콕시 라디칼의 농도가 증가하게 되고, 표면의 산화에 그치지 않고 고분자 주쇄를 절단(scission)하거나, 고분자간의 가교를 유도하기도 한다[6.40]. 첨가제의 종류에 따른 배합 PE의 방사선 조사에 대한 접촉각 변화는 초기 방사선 미조사 경우에 높은 접촉각을 보였으나 조사선량의 증가에 따라 접촉각이 감소하는 경향을 나타내고 있다.

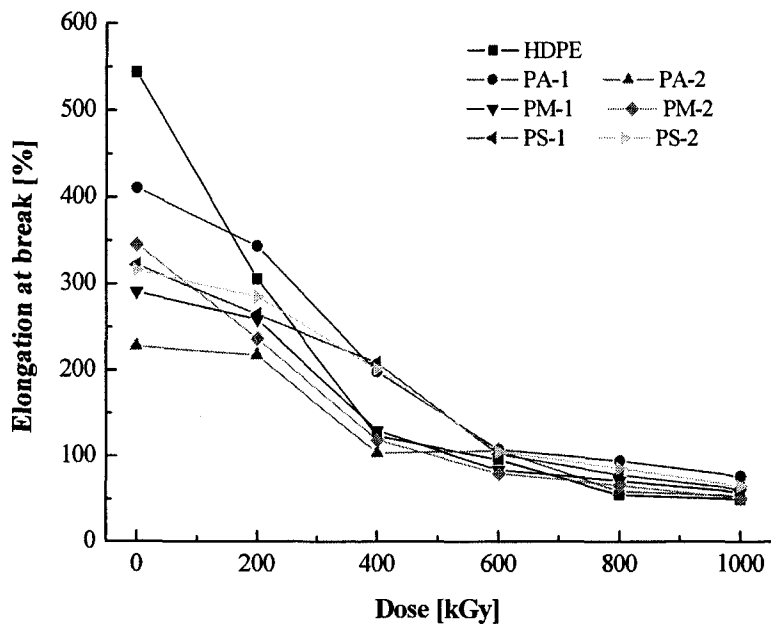


그림 6.3.5. 방사선 조사에 따른 배합 PE의 파단시 연신율

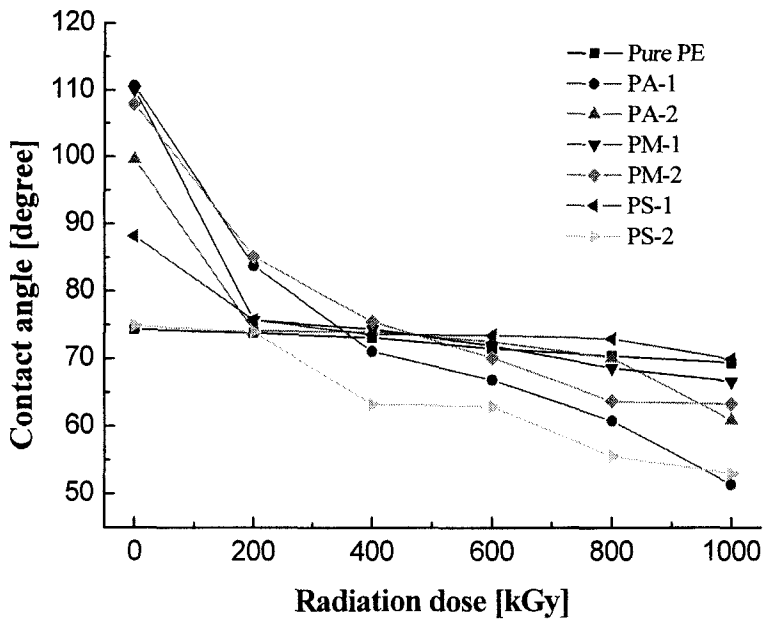


그림 6.3.6. 배합 PE의 방사선 조사에 따른 접촉각

제 7 장

연구개발 목표 달성도 및 대외 기여도

제 7 장 연구개발 목표 달성도 및 대외 기여도

본 연구의 최종 목표는 원전 안전계통 기기의 건전성 감시·검사·진단·평가 기술 개발에 있으며 이를 달성하기 위하여 최근의 현안이 되고 있는 주요 항목에 대하여 2002년부터 2004년까지 제1단계 연구를 수행하였다.

본 연구에서 개발 목표로 하고 있는 것은 원전 주요 기기에 대한 건전성을 향상시키기 위한 여러 분야의 기술 중 일반 산업체에서 투자하기 어렵고 난이도가 높은 항목을 모아서 과제를 구성하고 추진하였다. 본 과제에서 수행 중인 각각의 연구 항목들은 선진국과 동시에 착수하거나 먼저 추진하는 항목으로서 창의적인 방법으로 진행하였으며, 이론적 해석과 실증적 실험을 고려하여 과제를 운용하였다. 종합적으로 볼 때 1단계에는 연구 개발 진행이 차질 없이 진행되었으며, 일부분 계획하지 못했던 부분도 무난히 수행되어 과제의 최종 목표를 달성함에 있어 차질이 없다고 판단된다.

각각의 세부 연구 목표에 대한 연구 수행 내용과 목표 달성도 및 관련분야의 기술 발전에의 기여도를 기술하면 다음과 같다.

1. NSSS 기기 건전성 진단 기술 개발

- 금속 파편 충격신호의 배경 잡음 감소를 위해 신기법을 개발하였고, 검증시험 및 현장신호를 적용 분석하였음.
- 금속 파편 충격신호의 위치추정 및 충격질량 추정 신기법을 개발하였고, 검증시험 및 현장신호를 적용하여 분석하였음.
- 원자로 축소모델을 이용하여 충격시험 및 개발된 신기법을 적용한 진단 소프트웨어를 개발하였음.
- 원자로 내부구조물의 지지조건 결함에 대한 동특성 해석 모델을 개발함.
- 원자로 내부구조물의 지지조건 결함증상 시뮬레이션 및 DB 구축.
- 현장기술지원: 영광5호기 열소매 이탈 사고시 LPMS와 IVMS 신호 분석 기술 지원

2. 원전 기기 온라인 연속 감시 기술 개발

- 원전 기기부품의 온라인 감시를 위한 1차 유도초음파의 신호 발생 방법, 신호 수집 및 처리, 모드 분석 등을 증기발생기 세관을 시편으로 하여 수행.
- 온라인 감시 장치의 개발 및 시험을 위해 인공 결함 시험편 12종, 다채널 초음파 트랜스듀서 (배열 탐촉자), 다채널 초음파 Pulser /Receiver 그리고 동 장치의 제어회로 설계 및 제작.
- 동 장비를 이용하여 26M 배관 (구경 2인치 스테인리스 스틸)에서 원거리 (20M) 결함 탐지 목표를 달성.
- AE 기본이론과 신호계측방법 및 산업계 적용사례에 대한 기술현황 분석
- 원전 배관재의 AE 인장시험을 통해 AE 방출특성을 파악하고 AE 신호 DB를 구축하여 구조물의 손상평가 및 결함진전 온라인 연속 감시법을 개발하기 위한 기본시험을 수행.

3. 원전기기 안전 검사 및 평가 신기술 개발

- 네트워크 기반의 원격 검사 시스템 개발: 네트워크를 이용한 원격검사 시스템 인프라 및 시스템 제어 환경 구축; 원격검사 장비 제어용 웹 애플리케이션 및 원격 DBMS용 웹 애플리케이션 제작; 원격 터미널을 이용한 원격 제어 시스템 구축; JSP와 JNI를 이용한 배관 원격 검사 시스템 구축; 제어봉 안내관 지지핀 원격 검사 소프트웨어 개발
- 원자로 제어봉 안내관 검사용 탐상기 개발: 리눅스 기반의 로봇 제어기 구현; 비디오 영상으로부터 제어봉 안내관 및 지지핀의 위치를 실시간으로 추정하는 자동 주행 시스템 구현; 제어봉 안내관 지지핀 목업 및 로봇 제작; 제어기 내방사전 테스트; 통합 실험

4. 원전 케이블의 수명평가 및 노후화 진단기술 개발

- 규제 및 시험기준 자료 분석: 국내 원자력법과 원자력발전소용 1E급 기기의 품질인정을 위한 IEEE 표준시험 자료를 중심으로 열화 평가 관련 규정/지침을 검토
- 활성화 에너지 측정: 가속열화의 지침으로 케이블 재료의 활성화 에너지를 측정하였음. 이는 가속열화의 지침이 될 뿐만 아니라 방사선 열화에 대한 활성화 에너지의 비교로 방사선 열화평가의 기준이 될 수 있음을 검증하였음.
- 방사선 및 열 가속열화에 따른 물성 평가: 난연 케이블 재료의 방사선 가속열화 및 열 가속열화를 수행하여 이에 따른 재료의 열화평가로 열중량분석, 시차주사열량분석, 파단시 연신율, 절연저항, FT-IR, 용매추출, 화학발광 분석을 수행하였음.
- 케이블 수명평가: 상기 가속열화 시험재료의 물성을 IEEE 383시험조건과 임계특성의 표준ISO 및 IEC에 준하여 수명을 평가하였음.

상기와 같이 1단계 연구가 수행되었는데 본 과제에서 다루는 원전 기기 건전성에 관련된 기술들은 일차적으로 국내외 원전 기기에 활용된다. 즉, NIMS 국산화, 온라인 감시를 통한 가동중 검사 대체, 원전 주요기기의 원격검사, 노후된 원전 케이블의 잔여 수명 평가 등에 활용된다.

또한 개발과정에서 획득된 요소기술의 파급 효과 매우 크며, 난이도가 높은 원전 기기를 대상으로 기술을 개발하였으므로 기타 일반 산업 기기의 건전성 검사 진단 평가에 널리 응용될 수 있다. 특히 2003년 영광 5, 6호기 열소매 이탈 사고시에는 LPMS 신호분석을 통하여 사고원인 규명에 기여하였으며, 본 과제에서 확립된 기술을 활용하여 간이용 LPMS 신호취득시스템을 개발하여 영광 3,4,5,6 호기에 설치하는 용역을 수행한 바 있다.

제 8 장

연구개발결과의 활용계획

제 8 장 연구 개발 결과의 활용 계획

1. NSSS 기기 건전성 진단 기술

- 기존 LPMS의 감시, 진단 성능 및 신뢰성에 비해 위치 추정치의 경우 70%이상, 질량추정의 경우 50%의 향상을 얻을 수 있었고, 기존 IVMS 신호 결과에 대해 원자로 내부구조물의 지지조건 결함율에 대해 50%까지 분석할 수 있다.
- 원자로 내부구조물의 가동중 구조건전성 감시 및 이상상태 진단
- LPMS와 IVMS 신호를 종합적으로 판독하여 원자로 계통의 이상상태 발생시 원인파악에 기여
- 국산 NIMS (NSSS Integrity Monitoring System) 개발
- 일반 플랜트의 상태 감시용 소프트웨어 개발

2. 온라인 감시 기술

- 2004년 일본 미하마 원전의 배관 파열 사고와 같이 직관부의 감육으로 인한 사고 등은 현재 수행되고 있는 가동중 검사만으로는 결함부위를 찾아내는 데에 제한이 있다는 것을 보여주고 있다. 따라서 기존의 가동중 검사를 보완하고 또한 차세대 원전에서와 같이 새로운 기기와 부품의 유지보수를 적절하게 수행하기 위해서는 연속감시 (On-line Monitoring)를 통하여 이상부위에 대한 정보의 수집과 분석이 절대적으로 필요한데 본 연구의 결과들은 이런 온라인 감시의 핵심 요소 기술로 활용될 수 있다.
- 유도초음파를 이용한 온라인 연속 감시 기술은 원전의 기기와 부품 뿐 아니라 타 산업에 많이 사용되고 있는 압력용기나 배관의 건전성 검사에 유사하게 적용될 수 있어 파급효과가 크며 또한 위험한 작업 환경이나 접근이 곤란한 위치의 기기 부품들에 대한 결함 탐지가 가능하여 작업자의 위험을 현격하게 줄일 수 있다.

- 관형 구조물에 대한 연속 감시 기술이 성공적으로 개발되면 안전진단을 위해 광범위 원전 기기 부품의 결함을 신속하게 탐상할 수 있고 다른 산업설비의 배관과 세관을 탐색하는 데도 활용될 수가 있는데 현재 적용 가능한 대상은 다음과 같다.
 - 원자력발전소: 각종압력배관, 증기발생기세관, 열교환기세관
 - 가스공급시설: 가스 인수기지의 단열재 아래의 배관, 가스공급관리소 배관과 부분적으로 노출된 주 배관, 가스 가열을 위한 열교환기 세관
 - 도시가스의 배관: 지하매설배관, 교량 통과배관, 노출배관, PE배관
 - 중화학플랜트배관: 열교환기, 독극물수송배관
- 온라인 감시 기술을 현장에 실용적으로 사용하기 위해서는 유도초음파나 AE와 같은 비파괴 검사기술 뿐 아니라 센서 기술, 온라인 실시간 처리 기술, 검사 및 진단 관련 시스템들의 통합 기술, 붙박이형(built-in) 센서 스위트 개발, 구조적 건전성 감시 시스템의 개념 정립, 감시 환경에의 적합성에 대한 연구 등이 종합적으로 수행될 필요가 있다. 그래서 국외에서도 NERI (Nuclear Energy Research Initiative)를 중심으로 미국 테네시 대학, ORNL, PNNL, Ames Lab 등에서 동 분야에 대한 다양한 연구가 진행되고 있는 실정이다.
- 국내에서는 한국원자력연구소와 성균관대학교가 공동으로 원전 증기발생기 튜브의 검사를 위한 유도초음파 기법 연구를 수행하였고, 이를 바탕으로 원전 압력배관의 온라인 비파괴평가를 위한 다채널 위상배열 유도초음파 탐상 시스템을 국내 최초로 개발하였다. 이 시스템은 배열 탐촉자의 초음파 방사 시간 간격을 전자적으로 조절함으로써 결함 탐상에 효과적인 모드를 선별적으로 발진시키는 시스템으로, 원전 압력배관의 광범위 탐상을 위한 새로운 기술로 인식되고 있다. 그러나 현재 개발된 다채널 시스템은 아직 초기 단계의 시스템으로 실용적인 시스템이 되기 위해서는 지속적인 성능의 개선과 이에 따른 신호처리 및 평가 기술의 연구가 필요하다고 사료된다.

- AE기술은 유도초음파와 더불어 원전의 온라인 감시에 가장 적합하다고 알려진 기술 중의 하나이다. 원전 압력용기와 배관의 주요재질인 SA508과 SS304 재료의 인장 파단시에 발생하는 AE신호의 발생 특성을 분석한 결과, SS304 재료의 AE 발생원은 균열성장의 미케니즘 관점에서 평가되어야 하며 SA508의 경우에는 균열성장 시 적은 AE 발생으로 재료 특성의 관점에서 평가되어야 한다는 결론을 얻었다. 본 연구에서 얻은 데이터들은 온라인 감시기술개발에 있어 재료내의 음향방출 거동에 대한 유용한 정보를 제공할 것이며 또한 향후 파괴인성시험과 피로시험 시 AE 발생 특성의 분석에 있어 기초데이터로써 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

3. 네트워크 기반 원격 검사 기술 개발

- 인터넷을 이용한 원격지 검사 장비 제어는 검사 비용 절약에도 도움이 되지만, 그보다는 검사자의 안전과 검사 데이터의 온라인 공유라는 면에서 그 기대성이 더 크다고 볼 수 있다. 발전소 안전기기 검사 작업은 열악한 검사 환경에서 검사원들은 많은 위험에 노출되면서 수행되고 있다. 일부 검사는 검사원들이 방사능에 노출되는 구역이나 그 밖의 위험한 구역 내에서 수행되고 있다. 검사원들이 최소한 이 위험 구역을 벗어난 안전 지역에서 검사를 수행할 수 있는 환경이 반드시 갖춰져야 하며, 이를 위해서는 단거리뿐만 아니라 중장거리에서도 검사 장비를 제어할 수 있는 기술이 반드시 필요하다.
- 더구나 검사 결과로 수집된 데이터와 평가 데이터가 온라인으로 접근 불가능한 상태가 지속되는 것은 이 데이터를 이용하는 수 많은 관계자들의 불편은 차치하고라도, 데이터의 공유를 통한 전문가들의 빠른 의견 개진도 불가능하게 하여 원전 안전성 향상에 기여할 수 있는 큰 기회를 포기하는 것이라 할 수 있다. 웹을 이용한 네트워크 기반 원격 검사 시스템 개발은 이번 연구를 통해 그 기반을 확보하였으며, 그 기술은 중장기적 차원에서 지속적으로 발전소 안전기기 검사 장비에 적

용되어 실용화 과정을 거쳐야만 한다.

- 발전소에서 습득되고 저장되는 발전소 안전 관련 모든 데이터의 온라인 공유는 매우 중요하다. 웹을 이용한 원격 데이터베이스 접근 기술을 이용하여 이러한 데이터들을 해당 전문가가 지속적으로 모니터링 할 수 있으며, 웹을 이용한 원격 데이터베이스 접근 시스템 구축에 있어 그 비용은 다른 방법을 사용하는 것 보다 매우 저렴하고 일반적인 것이 될 수 있다.
- 본 과제에서 개발된 arm 프로세서 기반의 제어기 및 구축된 sw 개발환경은 원자력분야 뿐만 아니라 일반적인 임베디드 제어기가 필요한 여러 산업분야에 융통성있게 활용될 수 있다. 개발된 제어봉 안내관 검사용 로봇시스템은 제어봉 안내관 지지편의 초음파 검사에 사용될 경우 운전원의 개입이 거의 필요 없는 자동화된 검사 시스템을 구축할 수 있다. 또한 개발된 제어기는 합리적인 차폐방법으로 일반적인 원자로 내부 구조물의 검사와 같은 방사선 환경에서 작동 가능 할 것이다.

4. 케이블 건전성 평가 기술

- 본 과제에서 수행한 원전 케이블 유기재료의 열화 평가법에 관련된 기술들은 국내외 원전 및 위성체에도 직접적으로 활용될 수 있다. 1단계에서 수행한 케이블 건전성 평가기술은 노후화 원전의 안전성 및 신뢰성 확보와 원전 수명연장 기술로 활용될 것이며 기타 일반 산업체의 열화진단 평가에도 널리 응용될 수 있다. 또 다양한 원전 유기재료에 대하여 직접적으로 원자력 성능검증의 요소기술로 적용될 수 있으며, 원전 안전성 및 수명연장과 원전 케이블 재료의 제조 기술에 활용될 수 있으므로 향후 신규 원전재료의 국산화와 원전설계 및 재료개선 요소기술로 활용될 수 있다.

제 9 장

참고문헌

제 9 장 참 고 문 헌

- [2.1] 구인수 외, "디지털 감시기술 개발," 한국원자력연구소 연구보고서 (KAERI/RR-1705/96), 1996
- [2.2] B. Bechtold, W. Knobloch and U. Kunze, "The New Loose Part Monitoring System KUS 95," SMORN-VII, Avignon, France, 1995
- [2.3] 이삼래 외, "NSSS 진동/누설 감시 장치 개발(I): 중성자잡음신호를 이용한 원자로 내부구조물 진동감시장치 개발", 한전기술연구원 최종보고서 (KRC-92N-J05), 1994
- [2.4] Y. S. Joo et al., "Development of Reactor Internals Vibration Monitoring System (RIVMOS) using Excore Neutron Noise," SMORN-VII, Avignon, France, 1995
- [2.5] 김태룡 외, "원자로 잡음을 이용한 결함진단 기술개발", 한국원자력연구소 연구보고서(KAERI/RR-1659/95), 1996
- [2.6] 박진호 외, "원자로 잡음을 이용한 결함진단 기술개발", 한국원자력연구소 연구보고서(KAERI/RR-1908/98), 1999
- [2.7] J. H. Park et al, "Development of an On-Line Reactor Internals Vibration Monitoring System(RIDS)," Condition Monitoring And Diagnostic Engineering Management, Manchester Univ., pp801-807, 2001
- [2.8] J. A. Thie, "Core Motion Monitoring," Nuclear Technology, Vol. 45, 1979
- [2.9] F.J. Sweeney, "Utility Guidelines for Reactor Noise Analysis," EPRI NP-4970, 1987
- [2.10] D. N. Fry et al., "Use of Neutron Noise for Diagnosis of In-Vessel Anomalies in Light Water Reactors," NUREG/CR-3303 (ORNL/TM-8774), Jan. 1984

- [2.11] D. Wach and R. Sunder, "Improved PWR-Neutron Noise Interpretation based on Detailed Vibration Analysis," Prog. Nucl. Energy, Vol. 1, pp. 309, 1977
- [2.12] J. Fiedler et al., "Vibration Measurements in the Argentine CANDU Reactor Embalse by Use of Neutron Noise Analysis," SMORN-VII, Avignon, France, 1995
- [2.13] B. Olma, Y. Ding and R. Enders, "Operational Experiences with Automated Acoustics Burst Classification by Neural Networks," SMORN-VII, Avignon, France, 1995
- [2.14] A. Jousselein et al, "Monitoring and Aid to Diagnosis of French PWRs," SMORN-VII, Avignon, France, 1995
- [2.15] A. Trenty, "Operational Feedback on Internal Structure Vibration in 54 French PWRs during 300 Fuel Cycles," SMORN-VII, Avignon, France, 1995
- [2.16] O. Glockler and M. Tulett, "Development and Application of Noise Analysis in CANDU Reactors: Ontario Hydro's Experience gained in the Past Three years," SMORN-VII, Avignon, France, 1995
- [2.17] Y. Fujita and H. Ozaki, "Neutron Noise Monitoring of Reactor Core Internal Vibrations at PWRs In Japan," Progress in Nuclear Energy, Vo. 9, pp. 423-436, 1982
- [2.18] T. Anderson, T. Mulcahey and C. Hsu, "Survey and Status Report on Application of Acoustic Emission from Boiling Water Reactors", ANL-7469, ANL, 1970.
- [2.19] D. Parry, "Nondestructive Flaw Detection by Use of Acoustic Emission", IDO-17230, Phillips Petroleum Co., 1967.
- [2.20] P. Hutton, R.N. Ord, H.N. Pederson and J.C. Spanner, "Crack Detection in Pressure Piping by Acoustic Emission", BNWL-885,

Batelle Pacific Northwest Laboratory, 1978.

- [2.21] T. Anderson, T. Mulcahey and C. Hsu, "Survey and Status Report on Application of Acoustic Emission from Boiling Water Reactors", ANL-7469, ANL, 1970.
- [2.22] T.F. Drouillard, "Acoustic Emission: A Bibliograph with Abstracts" IFI Plenum Press, NY, 1978.
- [2.23] Journal of Acoustic Emission, K. Ono, Editor, Vol. 1 (1982) ~ Vol. 11 (1993). University of California, LA, CA.
- [2.24] Progress in Acoustic Emission I (1982) ~ VI (1992), Proc. International Acoustic Emission Symposium (IAES), JSNDI.
- [2.25] T.J. Fowler et al., "New Direction in Testing", Proc. 3rd International Symposium on AE from Composite Material (AECM-3), ASNT, pp. 16-27, 1989.
- [2.26] 한국원자력연구소, "AE법을 이용한 결합진전 연속감시 기술개발", KAERI/RR -449-4/84, 1985.
- [2.27] 한국원자력연구소, "원자력발전소 가동안전성 연구 :가동전·중검사 및 온라인 모니터링 기술개발", KAERI/RR-587/86, 1987.
- [2.28] 한국원자력연구소, "원자력발전소 가동안전성 연구 :가동전·중검사 및 온라인 모니터링 기술개발", KAERI/RR-711/87, 1988.
- [2.29] 한국원자력연구소, "음향방출 센서의 특성평가", KAERI/TR-1691/2000, 2000
- [2.30] 한국표준연구원, "음향방출 센서 개발", KRISS-92-079-IR, 1992.
- [2.31] 한국기계연구원, "AE법을 이용한 압력용기 연속감시 기술개발", UCE 216-722 C, 1986.

- [3.1] Papoulis, A. "The Fourier Integral and Its Applications", New York, 1962
- [3.2] Lee, S. K. and White, P. R., "Fault diagnosis of rotating machinery using Wigner Higher Order Moment Spectra",

Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 11, No.4, pp. 637-650, 1997

- [3.3] Cohen, L. L. "Time-frequency analysis", Prentice Hall, 1995
- [3.4] Fujita. F. and Tanaka. M. "Shock and vibration analysis on the impact of metal parts for PWT diagnosis", Progress in Nuclear Energy, vol. 9. pp.531-540, 1982
- [3.5] 한남대. "Development of Loose Part Signal Location Estimating Technique in High Pressured Structure". KAERI/CM-146/96
- [3.6] T. Tsunoda, T. Kato, "Studies on the loose part evaluation technique", Vol 15, Progress in Nuclear Energy. pp.569-576
- [3.7] 박진호 외, "원자로 잡음을 이용한 결함진단 기술개발," 한국원자력연구소 연구보고서 KAERI/RR-1908/98, 1998
- [3.8] 서정문 외, "원자력 구조건전성 평가기술 개발," 한국원자력연구소 연구보고서 KAERI/RR-1893/98, 1998
- [4.1] 이동훈, "유도초음파를 이용한 급수관내의 스케일 탐지에 관한 연구", 석사학위논문, 성균관대학교, pp 6-28, 2001
- [4.2] K. F. Graff, "Wave motion in elastic solids", Dover Publication INC., New York, 1975
- [4.3] A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, "Discrete-Time Signal Processing", Chap 11, Prentice-Hall, New Jersey, 1989
- [4.4] Fitch.A.H., "Observation of Elastic-Pulse Propagation in Axially Symmetric and Nonaxially Symmetric Longitudinal Modes of Hollow Cylinders," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 35, pp 706-708 1963
- [4.5] 송성진, 신현재, 박준수, "폴리에틸렌 코팅 가스배관의 광범위탐상을 위한 유도초음파 모드 선정 및 결함검출", 한국비파괴검사학회 춘계학술발표 논문집, pp 527-534, 2000

- [4.6] Joseph L. Rose "Ultrasonic Waves in Solid Media", Cambridge university press, 2000
- [4.7] 조윤희, "유도초음파에 대한 이해와 응용" 한국비파괴검사학회지 Vol 21. No 4., pp 446-460, 2001
- [4.8] H. Lamb "The Flexur of an elastic plate" Proceedings of London Mathematical Society, pp. 85-90, 1889
- [4.9] Alleyne, D. N, Lowe, M., and Cawley, P., "the Excitation of Lamb Waves in Pipes Using Dry-Coupled Piezoelectric Transducers," Journal of Nondestructive Evaluation, 15 (1), pp. 11-20, 1996
- [5.1] 이재철 외 3인. "화상에 의한 물체 자동추적 기술현황 분석", KAERI/AR-660/2003
- [5.2] Jack D. Gaskill, "Linear Systems, Fourier Transforms, and Optics" Jphn Wiley and Sons, pp.261-263. 1978
- [5.3] "울진 1호기 원자로 제어봉 안내관 지지편 용역보고서" KPS NTSC R-GTSP-04 ULCHIN 1/GTSP , 2000
- [6.1] An American National Standard, "IEEE Standard for Type Test of Class 1E Electric Cables, Field Splices, and Connections for Nuclear Power Generating Stations", ANSI/IEEE Std 383-1974, 1975
- [6.2] An American National Standard, "IEEE Standard for Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations", ANSI/IEEE Std 323-1974, 1975
- [6.3] Y.S. Cho *et al*, "The Degradation Kinetics of PE by Kissinger Equation", Material Chemistry and Physics, Vol.52, pp.94-97, 1998
- [6.4] K.Y. Kim *et al*, "The Improvement of Radiation Characteristics

- of Low Density Polyethylene by Addition of Treeing Inhibitors", J. of KIEE, Vol. , pp.455-462, 2000
- [6.5] Annual Book of ASTM Standards, "Standard Test Method for Decomposition Kinetics by Thermogravimetry", Designation E1641-94, pp.1041-1045, 1994
- [6.6] Annual Book of ASTM Standards, "Standard Test Method for Arrhenius Kinetic Constants for Thermally Unstable Materials" Designation E698-79, pp.467-473, 1973
- [6.7] Thermal Analysis Application Brief, "Calculation of Energy of Activation from Dielectric Studies", <http://www.tainst.com>
- [6.8] K.Y. Kim *et al*, "Dielectric Properties on Gamma Ray Irradiated Low Density Polyethylene", J. of KIEEME, Vol.13, No.11, pp.938-942, 2000
- [6.9] F.J. Campbell, "Radiation Effects on Electrical Insulation", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.4, No.6, p.30, 1998
- [6.10] C. Lee *et al*, "Dielectric Properties of Gamma Ray Irradiated Ethylene Propylene Rubber", 2002 Conf. on ACED, Vol.2, pp.563-566, 2002
- [6.11] Annual book of ASTM standards, D 638, "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics", Vol. 8.02, pp. 52-64, 1998
- [6.12] "원전수명관리연구(I)-(요소기술개발)", 한국전력공사 과제보고서, '96 전력연-단76, pp.445-601, 1996
- [6.13] 睦演洙, 趙泰濟, 全成均, "化學安全工學", 東和技術, pp.185-192, 1997
- [6.14] Norman Grassie, "Polymer Degradation and the Fire Hazard", pp.3-12, 1990

- [6.15] 金鳳洽, “電氣·電子材料”, 文運堂, pp.36-46, 1985
- [6.16] Maurice Morton, “Rubber Technology”, pp.339-344, pp.360-370, 1987
- [6.17] W. Tillar Shugg, “Handbook of Electrical and Electronic Insulating Materials”, pp.26-34, pp.121-122, 1986
- [6.18] Young-Il Mok, “A Review of the Flame Retardation of Flammable Polymer”, 화학공학, Vol.15, No.4, 1977
- [6.19] 고병열, 김은선, 박영서, “난연제”, 한국과학기술정보연구원 정보분석보고서, 2002
- [6.20] 김석준, “난연 플라스틱 현황”, Polymer Science and Technology, Vol.6, No.2, pp.118-127, 1995
- [6.21] A. Torikai, et al, “Photo-degradation of Polystyrene containing Flame Retardants: Wavelength Sensitivity and Efficiency of Degradation”, Polymer Degradation and Stability, Vol.50, pp.261-267, 1995
- [6.22] C.M. Tai and Robert K.Y.Li, “Studies on the Impact Fracture of Flame Retardant Polymeric Material”, Materials & Design, Vol.22, pp.15-19, 2001
- [6.23] U.Hippi, et al, “Compatibilization of Polyethylene/Aluminum Hydroxide (PE/ATH) and Polyethylene/Magnesium Hydroxide (PE/MH) Composites with Functionalized Polyethylenes”, Polymer, Vol.44, pp.1193-1201, 2003
- [6.24] U. Sorathia, et al, “Fire Safety of Composites in the US Navy”, Composites: Part A, Vol.30, pp.707-713, 1999
- [6.25] S.H. Chiu and W.K. Wang, “Dynamic Flame Retardancy of Polypropylene filled with Ammonium Polyphosphate, Pentaerythritol and Melamine Additives”, Polymer, Vol.39, No.10,

pp.1951-1955, 1998

- [6.26] 박승협, "Co⁶⁰ γ 선으로 조사된 이축연신 폴리프로필렌 필름의 전기전도 및 열자격 전류 특성에 관한 연구", 박사학위논문, 광운대학교, 1991
- [6.27] 김봉흡, "합성수지에 대한 방사능의 조사효과", 대한전기학회 전기학회지, Vol.23, No.4, pp.28-31, 1971
- [6.28] J.R. Laghari, "A Brief Survey of Radiation Effects on Polymer Dielectrics", IEEE Trans. on Nuclear Science, Vol.37, No.2, 1990
- [6.29] 배헌재, "電氣 電線 絶緣材料", LG전선연구소, pp.138-140, 1987
- [6.30] D. William, and J. Callister, "Materials Science and Engineering", John Wiley & Sons Inc., pp.509-512, 1997
- [6.31] M. Celina, J. Wise, D.K. Ottesen, K.T. Gillen, and R.L. Clough, "Correlation of chemical and mechanical property changes during oxidative degradation of neoprene", Polymer Degradation and Stability, Vol. 68, pp. 171-184, 2000
- [6.32] C. M. Dick, J. J. Liggat, and C. E. Snape, "Solid state ¹³C NMR study of the char forming processes in polychloroprene", Polymer Degradation and Stability, Vol. 74, pp. 397-405, 2001
- [6.33] F. Bouquet, "A review of equipment aging theory and technology", EPRI Final Report, No. NP-1558, pp. 7-44~77-51, 1980
- [6.34] F. H. Kreuger, "Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment", ISBN 0-408-02063-6, 1989
- [6.35] M. Ieda, T. Mizutani and Y. Suzuoki, Memoirs of the Faculty of Engineering, Nagoya University, Japan, Vol.32-2, pp. 173, 1980
- [6.36] J. R. Laghari and A. N. Hammoud, "A Brief Survey of Radiation Effects on Polymer Dielectrics", IEEE Trans. on

Nuclear Science, Vol.37, No.2, pp.1076-1083, 1990

- [6.37] S. S. Bamji and A. T. Bulinski, "Thermoluminescence in XLPE Cable Insulation", IEEE Trans. on Dielectric and Electrical Insulation, Vol.3, No.2, 1996
- [6.38] K. Y. Kim *et al*, "Dielectric Properties on Gamma Ray Irradiated Low Density Polyethylene", Journ. of KIEEME, Vol.13, No.11, pp.938-942, 2000
- [6.39] Zhang Yiqun *et al*, "The radiation destruction of crystalline polymers", Radiation Physics and Chemistry, Volume 43, Issue 5, 459-462, May 1994
- [6.40] Traian Zaharescu, Silviu Jipa, "Evaluation of Radiochemical Effects in Ethylene-Propylene Elastomers", Polymer Testing 16 107~113, 1997

서 지 정 보

수행기관보고서번호		위탁기관보고서번호		표준보고서번호		INIS 주제코드	
KAERI/RR-2527/2004							
제목 / 부제		NSSS 기기 건전성 검사·진단 기술 개발					
연구책임자(부서명)		김재희 (종합안전평가부)					
연구자 및 부서명		엄홍섭, 이재철, 최유락, 문순성, 임사회, 전형섭 (종합안전평가부) ; 박진호, 이정환, 주영상, 박기용 (기계공학연구부) ; 김기엽, 이청 (방사선응용연구부)					
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구소	발행년	2005. 2		
페이지	416 p.	도표	있음(√), 없음()	크기	210×297 Cm.		
참고사항							
비밀여부	공개(√), 대외비(), ()급비밀		보고서종류	연구보고서			
연구위탁기관		과학기술부		계약번호			
<p>초 록</p> <p>본 연구에서는 원전 안전계통 기기의 건전성을 감시·검사·진단·평가하는 기술을 개발하는데 그 최종목표를 두고 있다. 이 기술들은 원전 안전등급 기기의 결함을 사전에 인지하고 이에 대처하기 위한 것으로서 원전의 안전을 위하여 필수적으로 요구된다. 이를 위하여 기기 건전성을 향상시키기 위한 여러 분야의 기술 중 일반 산업체에서 투자하기 어렵고 난이도가 높은 네 가지 항목에 대하여 연구를 수행하였다. 즉, NSSS 건전성 진단 핵심기술, 원전기기 온라인 연속감시 기술, 원전기기 안전검사 및 평가 신기술, 원전 케이블의 수명평가 및 노후화 진단기술을 개발한다.</p> <p>1단계 연구를 통하여 금속파편 충격신호 진단 신기법 및 원자로내부구조물의 지지조건 결함에 대한 동특성해석 모델을 개발하였고, 유도초음파를 이용한 온라인 결함탐지 기술 및 장치 개발, 그리고 네트워크 기반의 원격 검사 시스템 및 원자로 제어봉 안내관 검사용 탐상기 개발하였다. 또한 원전 케이블의 가속열화시험 및 수명평가 기술을 개발하였다.</p> <p>본 과제에서 다루는 원전 기기 건전성에 관련된 기술들은 일차적으로 국내의 원전 기기에 활용된다. 즉, NIMS 국산화, 온라인 감시를 통한 가동중 검사 대체, 원전 주요 기기의 원격검사, 노후된 원전 케이블의 잔여 수명 평가 등에 활용된다. 또한 개발과정에서 획득된 요소기술의 파급 효과 매우 크며, 난이도가 높은 원전 기기를 대상으로 기술을 개발하였으므로 기타 일반 산업 기기의 건전성 검사 진단 평가에 널리 응용될 수 있다.</p>							
주제명키워드 (10단어내외)		원자력, 기기, 건전성, 검사, 감시, 진단, 케이블					

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION					
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.	INIS Subject Code
KAERI/RR-2527/2004					
Title / Subtitle		Development of the Inspection and Diagnosis Technology for the NSSS Components Integrity			
Project Manager and Department		Jae-Hee Kim (Integrated Safety Assessment Division)			
Researcher and Department		Heung-Soup Eom, Jae-Cheol Lee, You-Rack Choi, Soon-Sung Moon, Jin-Ho Park, Jung-Han Lee, Young-Sang Joo, Ki-Yeop Kim, Chung Lee			
Publication Place	DaeJeon	Publisher	KAERI	Publication Date	2005. 2
Page	416 p.	Ill.& Tab	Yes(✓), No ()	Size	210×297 Cm
Note					
Classified	Open(✓), Document	Restricted(), _Class		Report Type	Research Report
Sponsoring Org.		MOST		Contract No.	
Abstract (15-20 Lines)		<p>This project aims at the development of new technologies for a monitoring, inspection, diagnosis and evaluation of the safety related components in nuclear power plants. These technologies are required to detect the defects in the components of nuclear power plants and to prepare thoroughly against accidents.</p> <p>We performed the 1st stage of the study on the four issues recently focused. Thus we developed an analysis model of dynamic characteristics on the reactor internals, an on-line monitoring technology using an ultrasonic guided wave, a network based remote inspection system and an inspection robot for a control rod guide tube support pin. We also performed a lifetime estimation and degradation analysis of the NPP cables through accelerated degradation tests..</p> <p>The technologies developed in this project are applied to the components of nuclear power plants. The applications include a localization of the NSSS integrity monitoring system, replacement of an in-service inspection by on-line monitoring, remote inspection of the major components of the plants, lifetime estimation of the degraded plant cables, and so on. Elemental technologies obtained through the project can have great ripple effects in general industry, and can be applied to the inspection and diagnosis of the components in the other industries.</p>			
Subject Keywords (About 10 words)		Nuclear, Component, Integrity, Inspection, Monitoring, Diagnosis, Cable			