

98-ND-02-04-A-01

GOVP 12017202

인위재해 방재기술 개발

Development of Man-made disaster Prevention Technology

중화학플랜트 고온설비의 상시 안전수명 감시시스템
개발

Development of On-line Life Monitoring System for High
Temperature Components of Petrochemical Plant

중앙대학교 생산공학연구소

과 학 기 술 부

제 출 문

과학기술부 장관 귀하

본 보고서를 “중화학 플랜트 고온설비의 상시 안전수명 감시시스템 개발” 과제의
보고서로 제출합니다.

2000. 10. 18.

주관연구기관명 : 중앙대학교 생산공학연구소

주관연구책임자 : 윤 기 봉

연 구 원 : 김 동 영, 김 준 홍
남 재 영, 박 태 규
박 호 림, 서 현 욱
심 도 준, 심 상 훈
오 현 우, 윤 필 기
이 상 민, 이 종 식
이 진 상, 이 택 진
임 창 빈, 장 영 균
조 성 욱, 최 재 민
최 재 봉, 표 창 룰
허 남 수

협 · 공동연구기관명 : 성균관대학교

협 · 공동연구책임자 : 김 영 진

요 약 문

I. 제 목

중화학플랜트 고온설비의 상시 안전수명 감시시스템 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

중화학 산업이 시작된 이후 약 30년여 동안 압력용기(pressure vessel), 반응기(reactor), 가열기(heater), 개질로(reformer), 분해로(cracker) 등을 비롯한 중화학 산업설비는 초기 국가경제 건설 및 부흥의 기초가 되어왔다. 그러나 초창기 건설된 대부분의 설비는 가혹한 운전조건에 의한 설비의 노화와 재질의 열화로 인하여 현재 수명을 다하여 교체가 필요한 실정이나 경제적, 환경 요인으로 신규 설비의 건설은 매우 어려운 현실이다. 또한 각종 장치산업에 필수적인 대형, 고가의 설비는 제작이 어렵고 생산단가가 매우 높으며 장시간의 생산과정을 요구하기 때문에 기존 설비의 상태를 감시하고 잔여수명 및 교체 시기를 예측하는 것이 반드시 필요하다. 기존의 예측방법은 잦은 기동 정지 후 많은 시간과 경비를 소요하는데 비하여 가동 중에 설비의 상시 감시 시스템은 저가이고 가동중 감시를 통한 설비의 생산성을 높이고 설비의 실제이력을 바탕으로 한 교체주기의 합리적인 예측을 가능하게 한다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 취약부 선정 및 손상기구 규명
- 후육내압부 열응력 해석기술
- 크리프·피로 해석기술 개발
- 건전성 평가 프로그램 개발
- 상시 신호처리 및 사용자 인터페이스 기술 개발

- 모니터링 시스템 검증
- 광섬유센서의 개발
- HiL 적용방법 개발
- DAS의 개발
- HiL을 이용한 FMA Simulator의 개발
- 통합 OLM 시스템의 개발

IV. 연구개발결과

- 취약부 선정 및 손상기구 규명
- 후육내압부 열응력 해석기술
- 크리프·피로 해석기술 개발
- 건전성 평가 프로그램 개발
- 상시 신호처리 및 사용자 인터페이스 기술 개발
- 모니터링 시스템 검증
- 광섬유센서의 개발
- HiL 적용방법 개발
- DAS의 개발
- HiL을 이용한 FMA Simulator의 개발
- 통합 OLM 시스템의 개발

V. 연구개발결과의 활용계획

- 기존의 중화학설비는 물론 건설 예정인 설비에 적용함으로써 중화학설비의 파괴역학을 기초로 한 건전성을 확보하고 경제적인 운영을 가능하게 한다.
- 에너지 설비와 같은 다른 대형 산업설비에 사용을 확장함으로써 산업구조물의 건전성과 경제성을 확보한다.
- 센서 기술의 개발 등을 통해 측정장비의 국산화를 가져올 수 있으며 건전성 평가에 적합한 파라미터를 선정할 수 있다.

S U M M A R Y

I. Title

Development of On-line Life Monitoring System for High Temperature Components of Petrochemical Plant

II. Purpose and Necessity of Study

Conventional prediction methodologies require concerning amount of time and effort on inspection after the unit shut down. In contrast, on-line monitoring system of facilities is relatively inexpensive and has the advantage of increased productivity via employing on-line monitoring method to facilities under operation. Also, this system enables reasonable prediction of replacement frequencies based on real operation history of the facility. Special interest is focused on reformer tubes due to the fact that these tubes experience severe operation environment resulting in high possibility of fatal accidents. Therefore, on-line monitoring system applicable to these facilities is required.

III. Contents of the Study

- Selection of critical point and definition of damage mechanism
- Thermal Stress analysis technique
- Development of Creep/Fatigue analysis technique
- Development of structural integrity evaluating software
- Development of on-line signal treatment and GUI
- Accuracy of monitoring system
- Development of optical fiber
- Development of applying method of HiL
- Development of DAS
- Development of FMA simulator using HiL

- Development of OLM system

IV. Results of the Study

- Selection of critical point and definition of damage mechanism
- Thermal Stress analysis technique
- Development of Creep/Fatigue analysis technique
- Development of structural integrity evaluating software
- Development of on-line signal treatment and GUI
- Accuracy of monitoring system
- Development of optical fiber
- Development of applying method of HiL
- Development of DAS
- Development of FMA simulator using HiL
- Development of OLM system

V. Application Plan of Results of the Study

- Applying fabricating equipment as well as operating equipment, structural integrity and economic operation can be ensured.
- Expanding to other equipments, structural integrity and economic operation can be ensured.
- Measuring equipment can be produced domestically by development of sensor and parameter for integrity evaluation can be selected.

C O N T E N T S

Chap 1. Introduction	12
Chap 2. Technique Environment of Domestic and Foreign	15
Sec 1. Conventional On-Line Monitoring System	15
1. System for Nuclear Power Plant	
2. System for Fossil Plover Plant	
Sec 2. Conventional Life Assessment Code and Algorithm	17
1. API-530	
2. Green Function	
Sec 3. Fiber-Optical Sensor	20
1. Overview - international	
2. Overview - Domestic	
Chap 3. Results of the Study	24
Sec 1. Selection of Equipment to Apply	24
Sec 2. Selection of Critical Point and Definition of Damage Mechanism ...	25
1. Reformer Structure	
2. Critical Point and Damage Mechanism of Reformer	
Sec 3. Derivation of Temperature and Stress Green Function by FEM	28
Sec 4. Life Assessment Algorithm	31
1. Introduction	
2. Calculation of Monitoring Location Temperature	
3. Evaluation of Internal Pressure	
4. Evaluation of Thermal Stress	
5. Evaluation of Creep Life	
6. Evaluation of Residual Life	
Sec 5. Database	43
1. Introduction	

2. Database vs. Software	
3. Database Structure	
Sec 6. LIMOs Software	46
1. Program Setup	
2. Function	
3. LIMOs Server	
4. LIMOs Client	
Sec 7. Development of a Fiber-Optic Acoustic Emission Sensor	58
1. Acoustic Emission	
2. Fabry-Perot Interferometer	
3. Configuration of AE Sensor and Signal Processing	
4. Experimental Equipment and Method	
5. Experimental Result	
6. Conclusion	
Sec 8. Development of a Fiber-Optic Strain Sensor	77
1. Principle of the developed Strain Sensor	
2. Configuration of Strain Sensor	
3. Signal Processing	
4. Experimental Method and Result	
5. Conclusion	
Sec 9. On-Line Monitoring System(SES I)	85
1. Configuration	
2. Experiment	
3. Experimental Result	
4. Conclusion	
Sec 10. Development of Hardware-in-the-Loop(HiL) application method	91
1. Hardware part	
2. Software part	
3. Conclusion	

Chap 4. Accomplishment and Contribution of the Study	103
Chap 5. Application Plan of Results of the Study	105
Chap 6. References	106
* APPENDIX	110
Appendix I : Hardware Circuit	110
Appendix II : Programing Source	116

목 차

1장. 서론	12
2장. 국내외 기술개발 현황	15
1절 기존의 상시감시 시스템	15
1. 원자력발전용 상시감시시스템	
2. 화력발전용 상시감시시스템	
2절 기존의 수명평가 코드 및 알고리즘	17
1. API-530	
2. Green 함수	
3절 광섬유 센서	20
1. 국외 현황	
2. 국내 현황	
3장. 연구개발 수행 내용 및 결과	24
1절 적용대상 선정	24
2절 적용 대상의 취약부위 선정 및 손상기구 규명	25
1. 개질로의 구성	
2. 개질로의 취약부위 및 주요 손상기구	
3절 유한요소 해석에 의한 온도 및 응력그린함수 도출	28
4절 수명평가 알고리즘	31
1. 개요	
2. 감시위치의 온도계산	
3. 내압에의한 응력평가	
4. 열응력 평가	
5. 크리프수명 평가	
6. 잔여수명 평가	
5절 데이터베이스	43
1. 개요	
2. 소프트웨어와의 관계	

3. 데이터베이스의 구성	
6절 Limos 소프트웨어	46
1. Limos 설치	
2. Limos 프로그램의 기능	
3. Limos Server의 실행	
4. Limos Client의 실행	
7절 광섬유 음향방출센서의 개발	58
1. 음향방출법	
2. 패브리-페롯 간섭계	
3. 음향방출센서 및 신호처리장치의 구성	
4. 실험장치 및 실험방법	
5. 실험결과	
6. 결론	
8절 광섬유 변형률센서 개발	77
1. 광섬유 변형률센서의 원리	
2. 광섬유 변형률센서	
3. 신호처리장치	
4. 실험방법 및 결과	
5. 결론	
9절 상시감시 시스템(SES I)의 개발	85
1. 구성	
2. 실험	
3. 실험결과	
4. 결론	
10절 HiL 적용방법의 개발	91
1. 하드웨어부	
2. 소프트웨어부	
3. 결론	
4장. 연구개발목표 달성도 및 기여도	103
5장. 연구개발결과의 활용계획	105
6장. 참고 문헌	106

* 부록 110
 부록 I : 하드웨어 회로도 110
 부록 II : 프로그램 소스 116

제1장 서론

상시감시 기술(on-line monitoring technique)은 구조물의 건전성을 실제 가동상태에서 실시간에 준하여 평가하기 위한 공학적 수단으로서, 대상 구조물에 존재하는 각종 물리·화학적 상태량을 일정시간 간격으로 측정하여 구조물의 이상 상태를 판단하고 더 나아가 수명평가를 수행하는 것이다.

상시감시 기술은 대상 구조물의 운전 조건, 환경 및 위험성에 따라 다양하게 적용되는데 특히 고온 고압하에서 가동되는 중화학 설비의 평가는 일반적인 감시방법의 접근이 용이하지 않고 변수가 다양하기 때문에 구조물의 건전성 평가에 어려운 점으로 대두되고 있다. 현재 중화학 설비를 진단하는 방법에 음향방출법, 적외선 카메라 사용법등이 있으며 실제 현장에서는 단순한 육안 검사법, 온도 측정법 및 압력 측정법 등을 사용하고 있고 정기적인 수리나 교환을 통하여 예방보전하고 있다. 기존의 진단방법은 주기검사를 위한 사용 정지 후 검사에 많은 시간과 경비를 소요하며 평가결과가 작업자의 주관적인 경험과 판단에 좌우되기도하므로 진단결과의 일관성 또는 신뢰성을 확보하기가 어렵다. 반면 가동중 설비의 상시 감시 시스템은 저가이고 가동중 감시를 통한 설비의 생산성을 높이고 설비의 실제이력을 바탕으로 한 교체주기의 합리적인 예측을 가능케하며 설비 신뢰성을 높일수 있다. 특히 개질로(reformer)의 경우 사용환경이 가혹하고 사고의 위험이 높기 때문에 상시감시 시스템 기술이 매우 필요하다. 또한 상시감시 시스템 기술의 국산화를 통해 타 발전 설비 및 중화학설비의 상시 감시 시스템을 개발 필요성도 요구되고 있다.

본 연구에서는 중화학 고온 설비인 개질로에 대한 손상과 수명소진에 관련된 자료 수집, 분석 및 센서신호를 이용하여 설비의 가동시 발생하는 내압응력 및 열응력을 실시간으로 계산할 수 있는 알고리즘 및 크리프-응력 이완 등에 의한 수명 소비율을 실시간으로 계산하는 알고리즘을 개발하였으며 또한 설비 주요 요소의 누적 손상 및 잔여 수명을 평가하는 통합 상시 안전 수명 감시 시스템 개발하였다.

본 알고리즘을 사용하여 개발된 시스템의 주요기능은 다음과 같다.

- 설비 센서 데이터를 이용하여 센서에서 떨어져 있는 감시위치의 온도를 계산한다.
- 유한요소 해석의 수행결과인 응력그린함수(stress Green function)를 사용하여 계산된 열응력에 내압에의해 계산된 기계적 응력을 합하여 전체응력을 결정한다.
- 응력완화(stress relaxation) 사이클로부터 크리프 손상을 및 크리프 수명 소비율을 계산한다.
- 균열발생 수명 시점을 예측한다.

위의 주요과정에 필요한 재료물성 데이터를 확보하고, 상시 수명감시 시스템의 알고리즘을 개발하였으며, 객체지향 언어인 MS Visual Basic 언어를 사용하여 프로그램을 코딩하였다. Database는 MS Access를 사용하여 구축하였다. 또한, 상시 수명감시 시스템을 설치 운영하는 경우, 중화학 플랜트의 특성상 각 설비에 따라서 운전조건이 상이하므로 초기 customisation 작업이 필요하며 정기적인 현장 측정에 의해 검사 시점까지의 사용 수명을 실측하여 수명감시 시스템에서 평가된 사용수명과 일치하는지 검토하여 실측값으로 보정(calibration)하여 주어야 한다.

상시 수명감시 소프트웨어의 기본적인 모듈은 다음과 같다.

- 데이터 로깅 및 데이터수집 모듈
- 수명감시 지점의 온도 계산 모듈
- 수명감시 지점의 열응력 계산 모듈
- 설비 손상/수명 해석 및 계산 알고리즘 모듈
- 실시간 결과 화면 출력 모듈
- 프로그램 제어 모듈

본 연구에서 개발한 상시 수명감시 소프트웨어는 server 와 client로 나누어지며 server에서는 해석과 데이터베이스 관리를 담당하고 client에서는 사용자 인터페이스를 지원하여 해석결과 및 센서정보를 출력한다.

상시감시 시스템을 구축하기 위해서는 측정 물리량의 잡음 없는 원거리 전송이 가능하고 고온·고압 등의 열악한 가동 조건에서 사용할 수 있는 계측장비의 개발이 필요하다. 광섬유는 전선에 비하여 가볍고 연결하기 쉬우며 데이터 전송량을 획기적으로 높일 수 있을 뿐만 아니라 전송손실이 전선에 비하여 매우 낮고 외부 잡음의 유입이 거의 없다는 장점이 있다. 또한 광섬유는 유리와 같은 재질로 구성되어 기존의 전송 매체에 비하여 고온에서 사용할 수 있다는 장점이 있다. 이와 같은 장점을 바탕으로 1970년대부터 광섬유를 이용한 센서가 개발되기 시작하였으며 현재에는 변위, 온도, 변형량, 압력, 진동뿐만 아니라 대형 구조물 거동 예측도 수행하고 있다.

본 연구에서는 중화학 플랜트설비 상시감시 시스템에 적용이 용이한 계측장비의 개발을 위해 기존의 광섬유 센서를 검토하여 변형률센서와 음향방출센서를 개발하고자 한다. 광섬유를 이용한 변형률센서와 음향방출센서를 개발하여 광섬유 센서를 중화학 플랜트설비 상시감시 시스템에 적용하기 위한 방법을 모색하고 음향방출법을 이용하여 원거리 균열 거동 감시 가능성을 검토하고자 한다. 또한 상시감시 시스템에 적합한 경제적인 광신호변조기술 및 신호처리기술을 개발하고 적절한 적용방법과 현장 적용에 필요한 파라미터를 선정함으로써 경제적인 중화학플랜트 상시감시 시스템 개발의 기반을 마련하고자 한다.

1장의 서론에 이어 2장에서는 기존의 상시 수명감시 시스템, 알고리즘 및 광섬유 센서에 대해 설명하고 3장에서는 적용대상, 주요 손상기구, 수명평가 알고리즘, 소프트웨어, 광섬유 음향방출센서, 광섬유 변형률센서, SES I 및 HiL 적용방법에 대해 설명하였다. 4, 5장에는 본 연구의 달성도 및 향후 연구내용에 대한 의견과 활용계획에 대해 기술하였다. 또한 부록에 Hardware의 도면 및 소프트웨어 주요 코딩 부분을 첨부하였다.

제2장 국내외 기술개발 현황

1절 기존의 상시감시 시스템

상시 감시 시스템의 구축을 위해서는 대상 중화학 플랜트 설비에 관한 일반적인 진단 기술에 대한 폭 넓은 이해, 구조해석 및 파괴역학해석 능력, 각종 계측장비 및 실제 현장에서의 경험이 요구된다. 현재 국외에서는 80년대 초부터 상시 감시 시스템에 관한 연구가 활발히 진행되어 지금까지 축적된 현장경험과 연구결과를 바탕으로 발전설비의 경우 헤더 등을 중심으로 한 통합 상시감시 시스템의 구축을 위한 연구가 진행되고 있다. 또한, 개질로 반응관 등의 경우에도 손상평가용 소프트웨어 등이 개발되고 있다. 반면 국내에서는 최근 잇따른 대형사고와 함께 공학적 해결 방안으로 상시 감시 시스템의 중요성이 고조되고 있으나 원자력분야에서 연구가 진행 중이며, 최근 화력발전소 고온헤더 등에서 시스템 개발이 진행되고 있다. 그러나 중화학 설비의 경우 발전설비와 같이 사용기관이 한 개의 대형회사가 아니고, 여러 개의 작은 회사가 설비를 각각 운용하므로 기술 개발이 미진한 실정이다.

국외에서는 상시 감시 시스템의 관한 연구가 안정화 단계에 접어들었고, 이미 영국의 AEA에서는 개질로 고온부에 LMS(life monitoring system)를 개발중이며, 미국의 EPRI에서는 상용 시스템인 Creep-FatiguePro⁽¹⁾를 제작하여 사용 중이다. 또한 산업설비 관련 각 분야의 해석기술과 측정기술을 연결한 통합 상시 감시 시스템을 구축하려는 노력과 네트워크를 이용한 재료물성치의 데이터베이스 구축과 연계, 인터넷을 이용하여 구조물의 잔존수명을 예측하는 연구 및 neural network 등의 인공 신경망 기법을 도입하여 건전성 평가를 수행하려는 연구가 진행 중이다. 계측 기술 측면에서는 고온·고압 등의 환경에서 사용할 수 있는 측정장비의 개발, 균열 성장의 정량적인 측정을 위한 새로운 측정법의 개발, 측정장비의 각종 환경에 따른 물리적 특성 및 실제 구조물의 시험을 통한 건전성평가의 파괴역학적 해석과 이론적 연구의 현장접목을 시도하려는 연구가 진행 중이다.

1. 원자력발전용 상시감시시스템

원자력 발전설비의 위험요소에 적용되는 손상기구로는 중성자 조사취화, 피로 및 균열성장, 침식 및 부식을 들 수 있다. 여러 가지 손상기구 중에서 피로감시 시스템이 가장 널리 개발되어 있다. 대부분의 원전 기기 및 배관은 온도변화에 의한 열응력과 내압을 비롯한 기계적 하중을 반복적으로 경험하므로 피로손상을 고려한 온라인 피로 모니터링 프로그램은 미국을 비롯하여 각국에서 개발·적용되어왔다. EPRI는 BWR 및 PWR에 적용 가능한 원전 위험위치의 피로 모니터링 프로그램을 PC기반으로 개발하였다. FatiguePro⁽²⁾라 불리는 온라인 모니터링 시스템은 입력데이터로 기존의 측정장비를 이용한다. 온도 및 응력 상관함수(transfer function)⁽³⁾로는

그린함수를 사용하였고 방대한 온도·하중이력을 처리, 추출하기 위해 OOR(Ordered Overall Range) 카운팅 방법을 이용하여 응력/주기 스펙트럼을 계산한다. 이 스펙트럼과 ASME Code⁽⁴⁾의 S-N 곡선을 이용하여 피로 손상을 결정한다. 프랑스의 SYSFAC, 독일의 FAMOS, 일본의 OPDAS 또한 온라인 피로 모니터링 시스템으로서 잘 알려져 있다.

2. 화력발전용 상시감시시스템

화력발전 보일러는 원자력보다 고온(530℃)에서 작동한다. 따라서 열피로 뿐만 아니라 크리프 손상 또한 총 손상을 결정하는 중요한 인자가 된다. 기존 사례와 경험을 통해 손상이 심각한 요소는 superheater header, reheater header, main steam line, reheat line 등으로 알려져 있다. 특히 헤더의 경우 균열성장이론을 고려하여 리가먼트 균열을 모델링 해석하는 여러 가지 프로그램이 개발되어 왔다. 대표적으로 EPRI의 Creep-FatiguePro와 ERA사의 PLUS를 들 수 있다. 보일러의 위험 요소에 부착된 센서로부터 일정시간 간격으로 수집한 실시간 데이터는 코드 또는 유한요소해석으로 결정된 상관함수를 통하여 응력으로 변환된다. 수명소비율 관점의 크리프-피로 해석을 수행하고 선형손상법칙을 이용 크리프-피로의 상승효과를 고려한다. 또한 가정된 또는 탐지된 균열의 성장모델을 가정하여 균열성장 관점의 크리프-피로 해석을 수행하여 잔여수명을 계산하는 구조를 띄고 있다. 현재 국내에서 온라인 모니터링 기술은 화력발전 설비에 개발되어 적용되고 있다. 이 밖에도 AEA사의 LMS, TÜV사의 LENA 또한 온라인 크리프-피로 모니터링 시스템으로서 개발되고 있다.

화력발전용 시스템의 경우 국내에서는 상시 감시기술에 관한 전반적인 검토와 함께 안전사고 방지를 위해 상시 감시 기술의 필요성을 강조하는 분위기가 고조되고 있다. 상시 감시기술에 관해서는 파괴역학 해석과 더불어 음향방출법의 도입이 적극 검토되고 있는데, 최근에는 원자력발전소의 균열 진전에 관한 연구 및 화력발전소 베어링의 진단에 음향방출법이 적용된 사례도 있다. 또한 상시감시 기술의 경제성에 관한 연구도 진행되고 있는데, 최근에는 RBI(Risk Based Inspection) 기법을 도입하여 위험순위와 사고의 파급효과를 분석함으로써 평가의 집중도를 차별화하는 연구도 진행되고 있다. 그러나 상시감시 기술개발에 관한 연구가 활발히 진행되는 것에 비하면 현장에 실제로 적용되는 사례는 장비등의 높은 해외의존도로 인하여 많지 않은 편이다.

2절 기존의 수명평가 코드 및 알고리즘

1. API 530⁽⁵⁾

이 기준은 석유 정제 히터용 신규튜브의 필요 두께의 계산에 대한 절차 및 설계 기준을 제시하고 있다. 부식환경 및 비 부식환경에서 사용되는 튜브를 설계하는데 사용되며, 특히 정제 및 관련 가열기 튜브(밀폐된 곳에서 직화열을 받는 흡열 튜브)의 설계에 적합하다.

가. 대류 열전달 계수

최대 튜브 금속 온도를 계산하는데 필요한 값은 튜브 내벽의 유체의 열전달 계수이다. 식 (2-1)-(2-2)의 열전달 계수 관계식이 널리 사용되고 가열기 설계에 적용되고 있지만 복잡한 관계식을 간략화된 관계식으로 표현하기 때문에 근사적인 결과를 주는 식이다. 단상 유체 유동(single phase fluids)에서 열전달 계수는 다음과 같이 계산되어진다.

액상 유동인 경우($Re \geq 10000$ ⁽⁶⁾) 열전달 계수식은 식(2-1)과 같다.

$$h_l = 0.023 \left(\frac{k}{D_i} \right) Re^{0.8} Pr^{0.33} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (2-1)$$

$$Re = \frac{D_i G}{\mu_b} \quad (2-2)$$

$$Pr = \frac{C \mu_b}{k} \quad (2-3)$$

여기서, h_l 는 액상 유동인 경우의 열전달 계수, k 는 혼합유체 평균온도에서의 유체의 열전도도, D_i 는 튜브의 내경, Re 는 Reynold Number, Pr 는 Prantle Number, μ_b 는 혼합유체 평균온도에서의 유체의 절대 점도, μ_w 는 튜브 내표면 온도에서의 유체의 절대 점도, G 는 질량유속, C 는 열용량이다.

기상 유동인 경우($Re \geq 15000$ ⁽⁶⁾) 열전달 계수식은 식(2-4)와 같다.

$$h_v = 0.021 \left(\frac{k}{D_i} \right) Re^{0.8} Pr^{0.4} \left(\frac{T_b}{T_w} \right)^{0.5} \quad (2-4)$$

여기서, h_v 는 기상 유동인 경우의 열전달계수, T_b 는 혼합유체 평균온도, T_w 는 튜브 내표면 온도이다.

2상 유체유동인 경우 열전달 계수는 식 (2-5)를 사용해서 근사화할 수 있다.

$$h_{tp} = h_l W_l + h_v W_v \quad (2-5)$$

여기서, h_{tp} 는 2상 유동인 경우의 열전달 계수, W_l 는 액체의 중량을, W_v 는 기체의 중량을이다.

나. 최대튜브 금속온도

튜브 내부에서의 혼합 유체 평균 온도가 알려지면 최대 튜브 금속온도는 식 (2-6)⁽⁶⁾와 같이 계산될 수 있다.

$$T_m = T_b + \Delta T_f + \Delta T_c + \Delta T_w \quad (2-6)$$

$$\Delta T_f = \frac{q_m}{h} \left(\frac{D_o}{D_i - 2t_c} \right) \quad (2-7)$$

$$\Delta T_c = \frac{q_m t_c}{k_c} \left(\frac{D_o}{D_i - t_c} \right) \quad (2-8)$$

$$\Delta T_w = \frac{q_m t_a}{k_w} \left(\frac{D_o}{D_o - t_a} \right) \quad (2-9)$$

여기서, T_m 는 최대 튜브 금속 온도, T_b 는 혼합 유체 평균 온도, ΔT_f 는 유체 필름에 따른 온도 차이, ΔT_c 는 코크나 스케일에 따른 온도 차이, ΔT_w 는 튜브 벽에 따른 온도 차이, q_m 는 외표면에서의 최대 복사 열유속, h 는 유체 필름 열전달 계수, D_o 는 튜브의 외경, D_i 는 튜브의 내경, t_c 는 코크나 스케일의 두께, k_c 는 코크나 스케일의 열전도도, t_a 는 평균 튜브 두께, k_w 는 튜브 금속의 열전도도이다.

다. 열응력

최대 열응력은 식(2-10)⁽⁵⁾으로 계산될 수 있다.

$$S_{th} = X \left[\frac{2Y^2}{Y^2 - 1} \ln Y - 1 \right] \quad (2-10)$$

단, X 는 식(2-11)으로 계산된다.

$$X = \left[\frac{aE}{2(1-\nu)} \right] \left[\frac{\Delta T}{\ln Y} \right] \left[\frac{aE}{4(1-\nu)} \right] \left[\frac{q_0 D_0}{k} \right] \quad (2-11)$$

여기서, a 는 금속의 열팽창 계수, E 는 탄성 계수, ν 는 프와송 비, ΔT 는 튜브 내 표면과 외표면의 온도차, Y 는 D_o/D_i , q_0 는 튜브 외표면에서의 열유속, k 는 금속의 열전도율이다. 재료 물성치(a , E , ν , k)는 튜브 벽의 평균 온도에서의 값이며 이

식에서 튜브 두께는 평균 벽 두께가 사용되었다.

2. Green 함수

온도변동으로 발생된 열응력은 플랜트의 순간적인 온도상태의 함수일 뿐만 아니라 그이전의 열적 천이 이력의 함수이기도 하다. 예를 들어 서로 다른 시점에서 플랜트 설비의 열수력학적 조건에 대한 센서의 측정값이 정확히 일치하더라도 그순간 이전의 온도천이가 서로 다를 경우(가열 및 냉각시) 완전히 다른 응력상태를 가질 수 있다. 다음에 설명할 그린함수 접근은 그러한 상황에서 열응력을 계산하기 위해 개발되었다.

실시간 천이응력은 다음과 같이 두 부분으로 나뉘어 해석된다. 첫째는 관내 압력, 열팽창에 의한 응력으로 센서의 순간적인 측정값에 의존하며 구체적인 감시위치에서의 모든 센서의 측정값을 포함하는 벡터에 재료물성의 함수와 감시요소의 기하학적 환경설정을 나타내는 두 개의 변환행렬을 곱하여 계산된다. 둘째는 급속한 유체온도의 변화에 기인한 벽두께 방향의 열응력 구배로서 이전의 천이 이력에 의존하며 이미 결정된 그린함수와 열적 천이 데이터와의 곱을 시간에 대해 적분하여 계산된다. 이 그린함수 적분의 개념은 구조동역학에 사용되어 잘 알려진 Duhamel⁽⁷⁾ 이론과 유사하다.

발전 플랜트에서의 감시위치에 대한 응력은 식(2-12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma(t) = \sigma_p(t) + \sigma_T(t) \quad (2-12)$$

여기서, $\sigma(t)$ 는 수명감시 위치에서 총응력, $\sigma_p(t)$ 는 기계적 하중에 의한 응력, $\sigma_T(t)$ 는 열적 천이하중에 기인한 응력이다.

Boley & Weiner⁽⁸⁾와 Carslaw & Yeager⁽⁹⁾는 시간에 따른 열적 경계조건의 변화에 관련한 부재의 천이온도분포는 다음과 같이 식(2-13)으로 표현됨을 보였다.

$$T(P, t) = \int_0^t E(P, t - \gamma) \frac{\delta}{\delta \gamma} \Phi(\gamma) d\gamma \quad (2-13)$$

여기서, P 는 부재 내부의 한 점, γ 와 t 는 시간, $\Phi(\gamma)$ 는 시간에 따라 변하는 온도경계조건, $E(P, t)$ 는 시간 γ 에서 경계조건 Φ 의 단위온도변화에 기인한 물체 내부의 온도분포이며 초기값은 0°C이다.

$T(P, t)$ 와 $E(P, t)$ 는 식(2-14)와 같은 형태의 대표적인 열전도 방정식을 만족한다.

$$\lambda \nabla T(P, t) = \frac{\delta}{\delta t} T(P, t) \quad (2-14)$$

여기서, λ 는 $k/(\rho \cdot Cp)$, k 는 열전도도, ρ 는 밀도, Cp 는 재료의 비열이다. Boley와 Weiner에 의해 각기 달리 제안되었던 준정적 열탄성이론⁽⁸⁾(quasi-static thermoelastic theory)에서 열적천이의 발생으로 인한 변형율은 탄성체에서 응력과 전파에 의해 유발되는 변형율보다 훨씬 작기 때문에 해석과정에 적용이 가능하다. 이러한 준정적 열탄성 이론하에서 탄성체의 응력분포는 온도분포의 유일한 함수로 정의된다.

이 때문에 Duhamel 이론의 개념은 광범위하게 온도를 계산하지 않고도 직접 응력 계산에 적용된다. 즉, 열응력은 온도분포에 관한 식(2-13)의 중간과정을 생략하고 식(2-15)와 같이 온도경계조건으로부터 직접 계산될 수 있다는 장점이 있다.

$$\sigma_T(P, t) = \int_0^t G(P, t-\gamma) \frac{\delta}{\delta \gamma} \Phi(\gamma) d\gamma \quad (2-15)$$

여기서, $\Phi(t)$ 는 경계온도, $G(P, t)$ 는 점 P 에서 열응력에 대한 그린함수이다. 물리적으로 식(2-15)의 $G(P, t)$ 는 부재의 온도경계조건에서 단위온도변화에 대한 부재의 열응력분포를 나타낸다.

위의 접근방법은 다음과 같은 이유로 유한요소해석과 같은 다른 수치해석적 방법보다도 상당한 이점을 갖는다. 그린함수 $G(P, t)$ 는 주어진 부재와 경계조건에 대해 전통적인 수치해석적인 방법으로 단 한번 결정된다. 따라서 수반하는 경계조건 $\Phi(t)$ 에 기인한 열응력은 시간이 소요되는 다른 수치해석적 계산에 의하지 않고 단순히 그린함수의 적분을 통해 계산될 수 있다. 서로 다른 열적 천이의 발생이 증가할 때 이 그린함수 접근방법은 효율적이다.

대부분의 부재에서 그린함수가 상대적으로 짧은 감쇠기간(decay period) 후에 임의의 상수로 수렴한다는 결과에 의거하여 식(2-15)의 적분구간은 단축되어 식(2-16)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \sigma_T(P, t) &= \int_{t-t_d}^t G(P, t-\gamma) \frac{\delta}{\delta \gamma} \Phi(\gamma) d\gamma \\ &= G_0(P)\Phi(t) + \sum_{t-t_d}^t \hat{G}(P, t-\gamma) \Delta\Phi(\gamma) \end{aligned} \quad (2-16)$$

여기서, t_d 는 감쇠기간이다.

3절 광섬유 센서

1960년대부터 개발되기 시작한 광섬유는 1970년대 들어서면서 낮은 손실의 광섬유가 개발되면서 그 실용성이 점차 확대되었다. 1980년대부터 광통신의 효율성이 향상

되면서 광원과 광검출기 뿐 만 아니라 광섬유의 가격이 저렴해지면서 기존 전선에 비하여 비교우위인 곳에 활발하게 적용되고 있다. 광섬유의 장점은 전선에 비하여 무게가 가볍고 연결하기 쉬우며 데이터 전송량을 획기적으로 높일 수 있는 것이다. 또한 전송손실이 전선에 비하여 매우 낮고 외부 잡음의 유입이 거의 없다. 이와 같은 장점을 바탕으로 1970년대부터 광섬유를 이용한 센서가 개발되기 시작하였으며 현재에는 변위, 온도, 변형률, 압력, 진동뿐만 아니라 대형 구조물 거동 예측도 수행하고 있다. 광섬유센서는 차세대 스마트 구조물(smart structure)의 핵심역할을 하고 있으며 이에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

1. 국외현황

광섬유를 이용한 계측 방법은 광섬유의 장점을 바탕으로 광원, 광검출기 및 광섬유의 가격이 저렴해짐에 따라 세계 각국에서 많은 연구가 수행 중에 있다. 광섬유를 이용한 센서는 빛의 에너지 크기를 이용하는 광도센서(intensity sensor)와 파장의 변화를 측정하는 편광센서(polarimetric sensor) 및 빛의 간섭현상을 이용하는 간섭센서(interferometric sensor)로 분류된다.

가. 광도센서(intensity sensor)

광도 센서는 빛의 광도(intensity)를 이용한 것으로써 빛의 전달유무를 판단하거나 마이크로벤드(microbend)나 매크로벤드(macrobend)에 의한 빛의 손실을 측정하는 방법 등이 이에 해당된다. 다른 감지 원리에 비해 민감도가 떨어지는 단점이 있으나 원리가 가장 단순하고 구성하기 쉽다는 장점이 있다.

최근에는 광섬유의 품질개선과 함께 마이크로벤드 센서의 민감도를 높이고 내구성을 향상시키는 연구와 매크로벤드 센서를 이용하여 변형률 및 온도 등을 측정하는 연구를 수행하고 있다. Donlagic과 Zavrnsnik⁽¹⁰⁾은 센서부위에 단일모드와 다중모드 광섬유를 혼합하는 SMS(single mode-multi mode-single mode) 구조를 사용하여 광섬유의 전송 손실을 낮추는 동시에 민감도를 높이는 연구를 수행하였다. 또한 Anderson 등⁽¹¹⁾은 마이크로벤드 센서의 가장 큰 단점인 마찰에 의한 파손을 줄이고 민감도를 향상시키기 위해 유연성 있는 재질로 센서를 구성하였고, Andriesh 등⁽¹²⁾은 클래드 모드변환을 이용하여 변위를 측정할 수 있는 센서에 관한 연구를 수행하였다. Voss와 Wanser⁽¹³⁾는 매크로벤드 효과를 이용한 Elastica fiber sensor를 이용하여 5.4μ strain의 분해능으로 변형률을 측정하였고 Sharma 등⁽¹⁴⁾은 whispering gallery mode에 관한 연구를 수행하였으며 Haran 등⁽¹⁵⁾은 매크로벤드 효과와 클래딩이나 buffer의 whispering gallery mode의 관계를 이용하여 온도를 측정하는 연구를 수행하였다.

광도 센서는 내구성이 부족하고 민감도가 떨어지는 단점을 가지고 있지만, 제작비용이 다른 방법에 비해 저렴하고 구성이 단순하다는 장점을 가지고 있어 단점을 보완한다면 상시감시 시스템에 적용이 가능할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 매크로벤드 효과를 이용하여 변형률센서를 구성하였다.

나. 편광센서(polarimetric sensor)

편광 센서는 80년대부터 광센서의 발달과 함께 각광받기 시작한 방법으로 빛의 스펙트럼(spectrum)을 분석하여 파장의 이동(wavelength shift)량을 측정하는 것이다. 대표적인 편광 센서로서 Fiber Bragg Grating Sensor가 있으며 이 원리를 이용하면 변위, 온도 등을 정확하게 측정할 수 있다.

최근에는 Bragg Grating 센서를 이용한 스마트 구조물(smart structure)에 대한 관심이 커지면서 변위나 온도 등의 물리량을 측정하는데 필요한 여러 파라미터 측정에 관한 연구가 수행되고 있다. Cavaleiro 등⁽¹⁶⁾은 Bragg Grating 방법을 이용하여 변형량과 온도를 동시에 측정하는 센서에 관한 연구를 수행하였고 Huang 등⁽¹⁷⁾은 변형량을 측정하는데 필요한 브레그 그레이팅 센서의 관련 인자들에 관한 연구를 수행하였다.

이 방법은 빛의 파장변화를 측정해야 하므로 반응성이 좋은 광센서와 고가의 측정장비가 요구되기 때문에 상시계측 시스템에 적용하기에 부적합하며 향후 광센서와 측정장치의 가격이 저렴해 진다면 적용 가능할 것으로 판단된다.

다. 간섭센서(interferometric sensor)

간섭 센서는 고전 광학 이론에서 제안되었던 간섭계들을 이용하여 광섬유를 통해 구현한 것으로 광섬유가 가지고 있는 고유한 기계적 특성과 간섭계로서의 센서특성을 함께 나타내고 있다. 일반적으로 간섭계 센서로는 Mach-Zehnder간섭계, Michelson간섭계 및 Fabry-Perot간섭계가 이용되며, Mach-Zehnder간섭계와 Michelson간섭계는 기준선(reference line)과 감지선(sensing line)이 서로 다르게 존재하므로 기준선에 대한 조치를 해주어야하는 단점이 있다. 이에 비해 Fabry-Perot간섭계는 센서신호가 게이지(gage) 구간 외에서는 영향을 받지 않는 장점을 가지고 있다.⁽¹⁸⁾

최근에는 전송손실이 낮은 광섬유의 특성을 이용하여 원거리의 Monitoring에 적용하는 방법과 함께 민감도가 높은 센서에 관한 연구가 진행 중이다. Kao 등⁽¹⁹⁾은 단일 모드 광섬유를 이용하여 민감도가 높은 IFPI방식의 압력센서에 관한 연구를 수행하였고 Beard 등⁽²⁰⁾은 얇은 중합체(Polymer)를 이용하여 음향방출 신호를 측정하는 연구를 수행하였다. 또한 Furstenau 등⁽²¹⁾⁽²²⁾은 원거리의 음향 및 진동 신호를 EFPI방식의 센서를 이용하여 측정하는 연구를 수행하였으며 Luo 등⁽²³⁾은 구조물의 변위나 변형량을 측정하는 연구를 수행하였다.

광섬유 센서를 강한 자기장 환경, 높은 레벨의 방사능이나 진공 상태와 같은 열악한 환경에 적용하기 위하여 비접촉 방식 센서에 관한 연구도 수행되고 있다. Zivanovic 등⁽²⁴⁾은 비접촉식 EFPI방식을 이용하여 변위를 측정하는 연구를 수행하였고, Doi 등⁽²⁵⁾은 도파관을 이용한 변위 측정 센서에 관한 연구를 수행하였다.

또한 Carolan 등⁽²⁶⁾은 Sagnac간섭계를 사용하여 비접촉식 음향방출센서를 구성하였는데, 수 nm의 변위를 측정하였으며 수백 kHz의 신호를 검출하였다. 그러나 30mW의 고출력의 광원과 200m상당의 광섬유를 사용하였고, 고 정밀도의 광 관련 부품을 사용함으로써 경제적인 상시감시 시스템에는 적합하지 않은 것으로 판단된다.

현재까지의 간섭 센서는 비교적 높은 민감도와 내구성을 가지고 있지만 센서의 구

성이 어렵고 광도센서에 비하여 제작비용이 고가라는 단점이 있다. 그러나 구성을 단순하게 하고 설치방법을 간편하게 한다면 높은 내구성과 민감도를 고려할 때 상시감시 시스템에 적용하기에 적합하다고 판단된다. 본 연구에서는 EFPI 방법을 이용하여 음향방출센서를 구성하였다.

2. 국내현황

국내에서도 광섬유를 이용한 통신의 대중화가 진행되면서 광섬유 센서의 개발과 적용에 관한 많은 연구가 수행되고 있다.

최근 국내에서는 Bragg Grating 방법을 이용하여 변형량을 측정하고 구조물의 상태를 모니터링하는 방법에 관한 많은 연구가 수행되고 있다. 홍창선 등⁽²⁷⁾은 구조물의 변형 상태를 실시간으로 오차없이 감지할 수 있는 Bragg Grating 광섬유 센서와 이를 이용한 안전감시시스템에 관한 연구를 수행하였고 강성철 등⁽²⁸⁾은 온도변화와 관계없이 변형량을 측정할 수 있는 Bragg Grating 센서를 개발하였다. 또한 윤병호와 서완석⁽²⁹⁾은 파장 선택형 광검출기를 이용한 Bragg Grating 온도센서를 개발하였으며 정재훈 등⁽³⁰⁾은 열팽창계수가 높은 재료를 이용하여 고감도 광섬유 Bragg Grating 온도센서를 개발하였다. LG전선⁽³¹⁾에서는 광섬유 한가닥을 이용하여 2km까지의 온도변화를 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 까지 1m간격으로 측정할 수 있는 센서를 개발하였다고 보고하였다.

여러 가지 광간섭계와 광강도형 방법을 이용한 광섬유센서 개발에 관한 연구도 활발히 수행되고 있다. 전병선 등⁽¹⁸⁾은 Fabry-Perot 간섭계를 이용한 진동센서 개발에 관한 연구를 수행하였고 박기환 등⁽³²⁾은 광간섭계를 이용하여 복합재료내의 음향방출 신호의 측정에 관한 연구를 수행하였다. 또한 김영환 등⁽³³⁾은 Michelson 간섭계를 이용하여 음향방출신호를 측정하였는데 광로차 보상 회로를 장착하여 저주파의 잡음을 감소시킨 신호를 측정하였다. 강성철 등⁽³⁴⁾은 Mach-Zehnder 간섭계와 광섬유 격자 센서를 이용하여 동적 변형률을 실시간으로 측정하는 연구를 수행하였으며 이호일 등⁽³⁵⁾은 교량이나 빌딩 등과 같은 대형 구조물의 파손이나 붕괴 등의 위험을 실시간으로 감시할 수 있는 Fabry-Perot 간섭계를 이용한 광섬유 센서를 개발하였다.

이와 같이 국내에서도 광섬유센서에 관한 많은 연구가 수행 중에 있으며 본 과제의 연구 결과는 기존의 국내 광섬유센서 개발에 관한 기술개발현황에서 센서의 개발 및 적용 연구에서 한 단계 수준을 높이는 결과를 가져올 것으로 판단된다.

제 3장 연구개발수행 내용 및 결과

1절 적용대상 선정

석유 화학·정제 설비의 주요 고온 설비는 크게 다음과 같이 구분할 수 있다.

- 반응기(reactor)
- 가열기(heater)
- 개질로(reformer)
- 분해로(cracker)
- 열교환기(heat exchanger)
- 배관(pipe)
- 압력용기(pressuer vessel)

표 3-1 석유 화학 공업에서의 주요 개질로/분해로 고온 설비⁽³⁶⁾

공정 장치명		유 체 조 건			구 성 재 료	
		온 도 (℃)	압 력 (kg/cm ²)	조 성	종 류	최고사용온도 (부하시)(℃)
열 분 해	에틸렌 제 조	700~950	2~5	탄화수소	Incoloy 800	983
				수증기	HK-40	1050
				수 소 에틸렌	Modified HP	1100
접 촉 분 해	수소화 분해	350~500	70~130	수 소	CR-Mo 강	565
				탄화수소	SUS 316	816
접 촉 개 질	수 소 제 조	350~500	5~40	수증기	Cr-Mo강	565
				수 소	HK-40	1050
				탄산가스	SUS-310	816
				메탄 등	Incoloy 800	983
기 타	암모니아 합 성	350~950	100~1000	수 소	Cr-Mo 강	565
				질 소	SUS-316	816
기 타	합 성 가 스	800~900	10~30	암모니아		
				수 소	HK-40	1050
				일산화탄소 탄산가스 메탄 등	Incoloy 800	1100

표 3-1의 고온설비에서 현재 가장 사고 사례가 많이 보고되고 있으며 주요 관심 대상이 되고 있는 설비는 암모니아와 메탄을 합성의 원료가 되는 농축 수소가스를

생산하는 개질로와 석유 화학공업의 기초 원료인 에틸렌을 생산하는 분해로이다.

개질로는 수소를 주성분으로 하는 가스를 발생시키는 반응장치로 제조 목적에 따라 운전 조건이 다르지만 반응관은 표면 온도 800~950℃, 내압 5~40kg/cm²의 고온·고압의 가혹한 환경조건에서 사용된다.

사용조건에서 개질로 반응관은 크리프 현상이 분해로 반응관은 침탄현상이 수명을 좌우하는 주요인으로 되고 있다. 그와 더불어 열피로, 열충격, 이종금속용접 접합부의 박리균열 등 열응력에 기인하는 손상, σ 상이나 탄화물 분석에 의한 재질열화등의 고온부식이나 침식과 같은 각종 고온 손상이 복잡하게 작용하여 설계수명이 전에 파손된다. 이와 같이 가열로 반응관은 화학장치의 금속재료로서 가장 가혹한 환경하에 놓여져 있고 가연성 가스를 취급하므로 반응관의 누적된 손상의 평가는 플랜트의 보안, 보전면에서 특히 중요하다고 할수 있다.

그러므로 본 과제에서는 상시 감시 시스템의 적용대상으로 개질로 및 분해로를 선택하였고 특히 개질로를 중심으로 본 연구를 진행하였다.

2절 적용대상의 취약부위 선정 및 손상기구 규명

1. 개질로의 구성

개질로는 원료를 개질(reforming)반응시키는 복사부 및 원료의 예열과 폐열회수를 실시하는 대류부와 연소용공기 예열기·연돌 등의 보조기기류로 구성된다. 복사부의 주요 고온 구성부재는 그림 3-1에서 보는바와 같이 반응관, 출입구 배관, 버너 및 관 지지대로 이루어져 있다.

가. 반응관

직관부, top부 및 bottom부로 구성된다. 내부에 촉매가 충전되어 있으므로 촉매관이라고도 부른다. 탄화수소와 수증기의 혼합기인 공급가스가 대류부에서 450~550℃로 예열된 후 도입되고 복사전열로 750~900℃로 가열한다. 이 사이에 개질반응을 일으키고 플랜트의 용도에 따른 합성가스를 만들어 내는 개질로의 가장 중요한 요소이다. 직관부는 복사열에 의해 관표면온도는 800~1050℃까지 상승한다. 이 때문에 25Cr-20Ni(HK-40) 및 25Cr-35Ni(HP)의 고크롬 고니켈강인 원심주조관을 사용한다. 외경은 120~200mm, 두께는 9~20mm, 길이는 8~15m이다. 기존에는 2~3m의 주조 소관을 5~6개를 용접하여 사용하였으나 용접부에 손상이 많이 발생하여 용접선 수를 감하고 용접부를 보다 저온역에서 가져갈 목적으로 최근에는 5~6m의 긴길이의 소관이 사용되고 있다. 또한 관 수명에 큰 영향을 주는 관내외 온도차에 의해 야기하는 열응력을 줄일 목적으로 원심주조관의 내면측에 발생하는 불건전층을 보링으로 제거하여 사용한다. 크리프 손상으로 관의 수명소비가 진행되므로 잔여수명예측은 정기수리시에 1~2개의 관을 떼어내서 파괴검사와 함께 각종 기계적성질의 변화·관벽내의 거시조직의 상태 등으로 잔여수명을

예측한다.

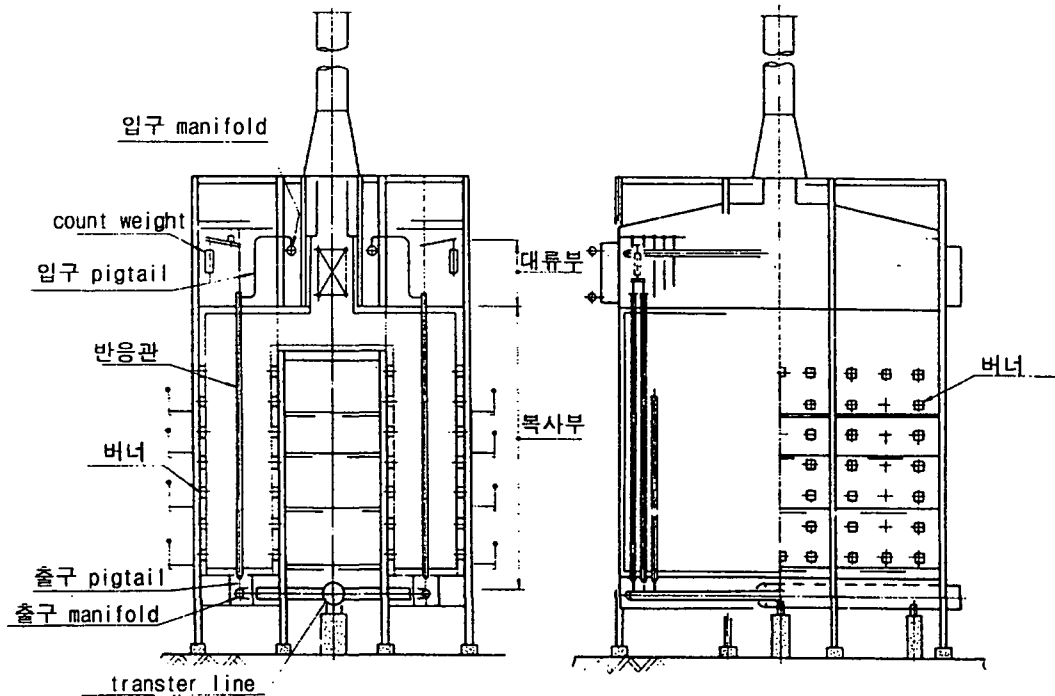


그림 3-1 개질로와 분해로의 형상

나. 출입구배관

반응관은 1개당 용량이 작아서 여러개를 사용하며 대규모 플랜트에서는 1개의 로당 수백개가 사용된다. 이런 이유 때문에 로의 상류 및 하류의 배관접속부에 분지 및 합류용의 manifold를 설치한다. 일반적으로 Pigtail이라 부르며 입구 manifold, 입구 Pigtail, 출구 Pigtail, 출구 manifold로 구성된다.

다. 버너

사용되는 재료에 따라 가스버너, 오일버너, 오일가스 혼합버너로 분류된다. 더욱이 연소공기의 공급방법에 따라 연소실내의 압력에 의해 대기를 빨아들이는 자연통풍식과 송풍기로 공기를 밀어넣는 강제통풍식으로 분류된다.

라. 관지지대

관지지대는 반응관의 중량을 지지하며 동시에 고온사용의 의한 그 열팽창을 흡수하고 더욱이 사용중에 관의 종방향으로 인장력을 받아 자중에 의한 변형을 막는 역할을 한다. 개질로의 연소실밖에 counter weight 또는 spring hanger를 설치하여 반응관을 지지한다.

2. 개질로의 취약부위 및 주요 손상기구

가. 손상 원인

반응관과 그 외의 각 부재의 사용온도가 높아 크리프가 발생하므로 설계시에 재료의 크리프를 고려한다. 즉 사용중 크리프 손상에 의해 열화되는 것을 전제로 설계되고 있다. 주요 손상원인은 표 3-2에서 보는 바와 같이 경년열화에 의한 것임을 쉽게 알 수 있고, 이의 대부분은 반응관의 크리프 손상이다.

표 3-2 개질로 재료의 손상원인 ⁽³⁷⁾

	부 위			내 역
	반응관	그 외	합 계	
I 설계·계장상	16	23	39	용접설계 부적합, 후육부 설계부적합 등
II 제조·시공상	8	10	18	용접시공부적합 (용접봉부적합을 포함), 제조결함 등
III 운전·보전상	8	4	12	과열, 국부과열, 빈번한 기동정지 등
IV 경년열화	26	23	49	크리프 외 열피로 등

나. 손상 형태

표 3-3, 표3-4에서 보는바와 같이 반응관 등 대부분의 요소에 균열 형태로 보이는 기계적 손상이 제일 많으며, 온도에 따른 부식손상은 적다. 메탄올플랜트의 경우는 크리프 변형에 의해 팽창(1-7%)이 상당하다. 외면에서 균열이 발생하여 원주 방향으로 균열진전이 일어나는 manifold등의 튜브와는 달리 반응관은 튜브의 내면이 균열시작점으로 해서 축방향으로 균열이 성장한다. 한예로 암모니아 플랜트의 반응관의 경우는 손상이 표3-4에 보인 바와 같이 축방향의 크리프 파괴, 용접부의 원주방향 균열, 고온부식 순서로 나타났다.

크리프 손상 속도는 온도 및 응력에 의존한다. 반응관 출입구의 압력차이는 크지 않으며 튜브의 온도도 전체 길이에서 균일하게 분포되는 것을 목표로 개질로를 설계하고 있다. 그러나 실제로는 반응관의 온도 및 사용 조건은 길이 방향으로 또한 원주방향으로도 차이가 생기게 됨을 그림 3-2를 통해 알 수 있다. 즉, 온도는 과열부 근방에서 가장 높게 나타나며 응력은 열유속이 튜브 위치에 따라 다르므로 튜브 내외면의 온도차에 의한 열응력의 크기도 위치에 따라 다른 분포가 발생한다. 또한, 재료강도는 재료 강도특정 온도 영역에서는 시그마(σ)상 생성이 현저한 경우 이에 의한 재료강도 자체가 저하됨을 그림 3-3을 통해 알수있다. 이러한 조건은 개질로가 사용되고 있는 공정의 종류(수소 제조장치, 암모니아 플랜트 등)와 개질로의 형식에 따라 차이가 있다.

위의 설명에서 보는바와 같이 개질로관의 주요 손상기구는 크리프이다. 크리프 손상에 주요한 영향을 미치는 요소는 주로 정상 상태에서 압력에 의해 발생하는 응력과 온도이며 작용시간에 따라서 크리프 손상이 누적되고, 기동·정지시에 관

벽 두께방향의 온도구배가 발생하고 이 온도구배로 인해 열응력은 시간이 지남에 따라 이완되어 크리프 변형이 누적되고 연성이 소진되어 손상이 발생하는 원인으로 작용 한다. 또한 개질 반응은 튜브의 입구측 1/2부분에서 일어나며 이부분에서 흡열 반응은 현저해지고 따라서 내외면의 온도차에 의한 열응력이 튜브의 손상을 발생시키는 주원인으로 작용된다. 일반적으로 이 열응력은 내압에 의한 응력의 약 10배정도로 알려져 있다.

그이외의 손상 원인으로는 용접부의 크리프 손상, 반응관이 굽힘, 팽창, 시그마(σ)상 생성, 고온부식, 습식(濕食)등의 요인등이 있다

표 3-3 개질로 재료의 손상 형태 ⁽³⁷⁾

	부 위				비 고
	반응관	pigtail	manifold	합 계	
1. 굽힘	1	-	-	1	
2. 팽창	21	-	-	21	
3. 균열	17	8	3	28	크리프, 열피로, 열충격, 시그마상 생성에 의함
4. 침탄·산화	2	9	2	13	
5. 응력부식균열	3	-	-	3	
합 계	44	17	5	66	

표 3-4 반응관의 주요 손상형태 ⁽³⁷⁾

손상 형태	튜브의 누수	개질로 타부분의 손상
축방향의 크리프 파괴	352	29
용접부의 원주방향 균열	10	4
고온 부식	11	2

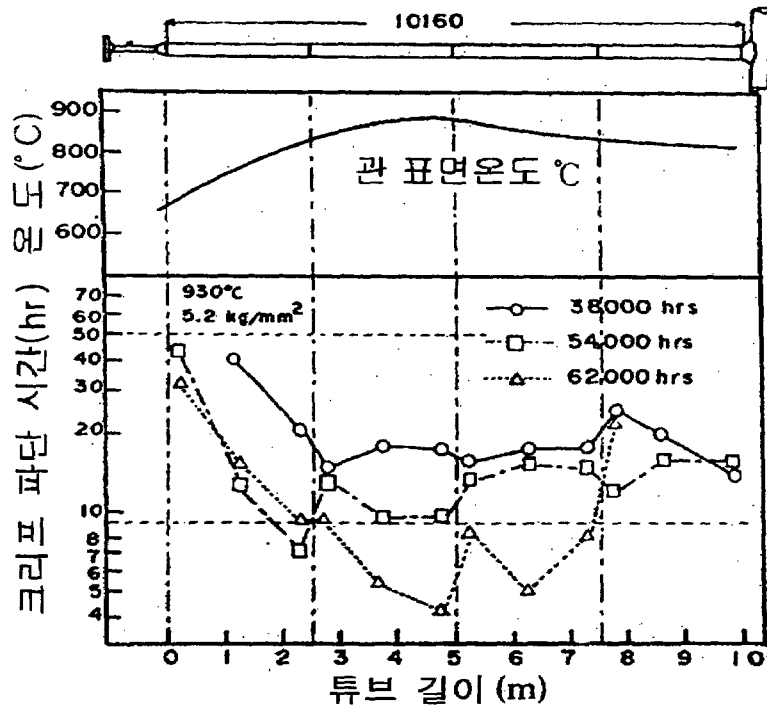


그림 3-2 HK-40 반응관의 크리프 파단 강도의 축방향 분포

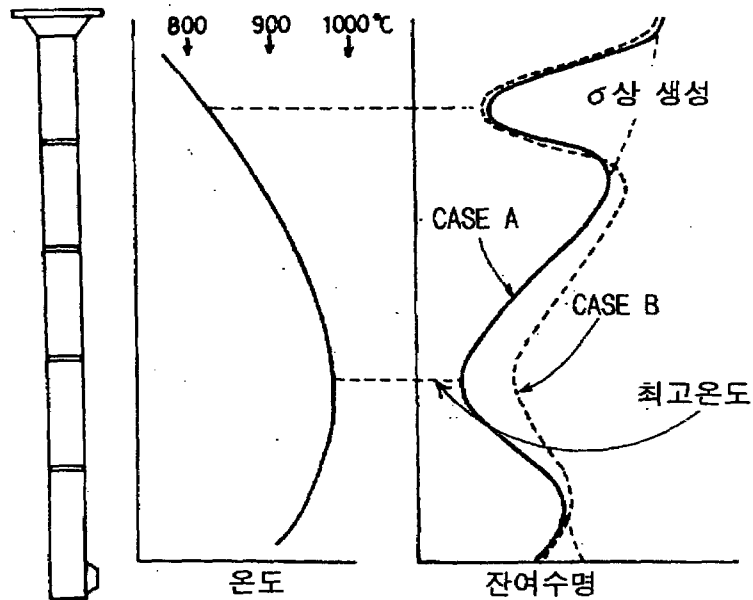


그림 3-3 장시간 사용후의 개질로 튜브의 길이 방향의 잔여수명비

3절 유한요소해석에 의한 그린함수 도출

개질로관의 주요 손상원인으로 알려진 크리프를 적절히 평가하기 위해서는 관내부의 열응력을 구해야 한다. 열응력은 일반적으로 현재의 경계 온도 뿐만 아니라 과거의 온도이력 에도 영향을 받는다. 또한, 복잡한 형상이나 경계온도 조건을 갖는 문제에서는 해석적인 해를 구하기가 어렵고, 유한 요소법은 복잡한 경계조건이나 하중조건을 다룰 수는 있지만 계산 시간이 많이 요구되기 때문에 실시간으로 열응력을 계산하여 수명을 감시하는 시스템에 적용하기에는 어렵다.

따라서 본 연구에서는 수명감시 시스템의 핵심인 열적 천이에 의한 열응력을 실시간으로 계산하여 수명을 감시하는 모듈의 개발을 위해 실시간 운전이력(온도, 압력)으로부터 그린 함수를 사용하여 열응력을 계산하는 알고리즘을 이용하였다.

요약하면 열응력은 이전의 온도 천이 이력과 순간적인 계측 데이터에 의존하며 이미 유한요소 해석적 방법으로 결정된 그린함수와 열적 천이 데이터와의 곱을 시간에 대해 적분하여 계산된다⁽³⁾.

FEM(유한 요소 해석)소프트웨어는 ABAQUS 5.8을 사용하였고 해석 대상은 수소제조 개질로관을 사용하였고 그림3-4와 같은 형상을 가지고 있으며 입구측에 탄화수소와 증기와의 혼합 유체를 반응관에 공급하고, 버너를 이용하여 관의 외측에 열을 가하여 개질 반응을 한후 outlet collector로 배출 된다. 관의 원형 단면을 그림 3-5와 같이 편의상 1/8부분만 모델링 하였고 재료 물성치는 표 3-5와 같다.

그림 3-6의 온도 그린 함수는 관 내표면에서의 열하중이 단위스텝온도(1℃)로 변화할 경우 온도 계산지점(관 외부 표면)의 시간에 따른 온도 반응상태를 나타낸 것이다.

그림 3-7의 응력 그린 함수는 같은 조건에서의 응력 계산지점(관 내부 표면)의 시간에 따른 성분별 응력 반응상태를 나타낸 것이다.

개질로 관의 경우 튜브 외부의 버너로부터 받는 열원과 튜브 내면의 흡열 반응으로 나타나는 음열원이 동시에 작용하므로 튜브 외표면에도 단위 온도 하중을 주어서 위의 해석 과정을 반복 수행하여 온도 및 응력 그린함수를 구한후 이를 중첩한다.

표 3-5 유한요소 해석 조건

재 질	HK-40
밀 도	7.75E-6 [kg/mm ³]
열 팽창 계수(α)	18.3E-6 (800~1000℃)
Young Modulus(E)	72520 [Mpa (1000℃)]
Poisson's ratio	0.3
열 전도 계수	2.946E-4 [kcal/mm·min·℃]
비 열	0.12 [kcal/kg℃]
내 경	103.0 [mm]
외 경	134.4 [mm]

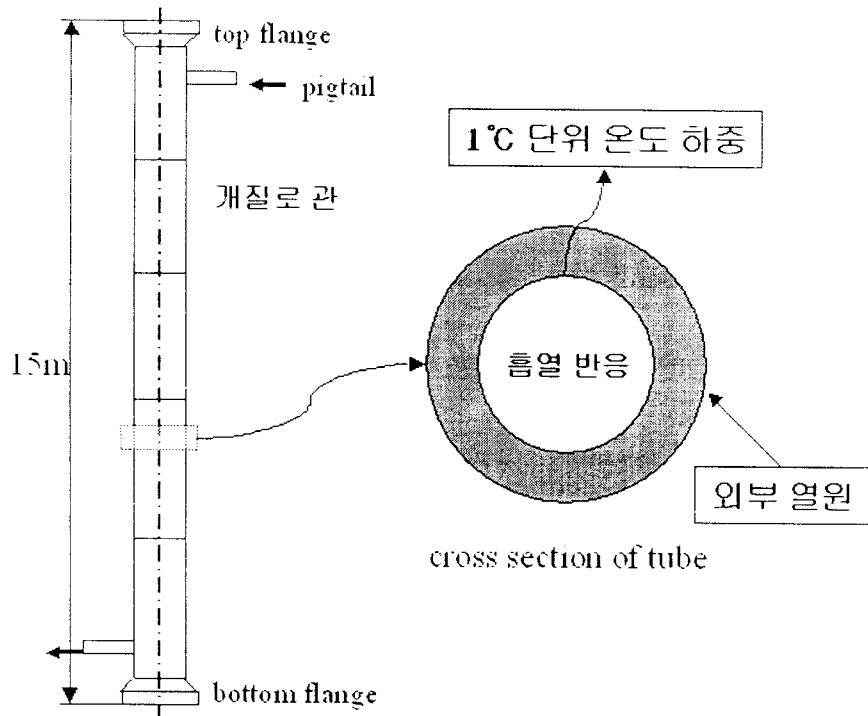


그림 3-4 개질로관의 형상과 해석 부위

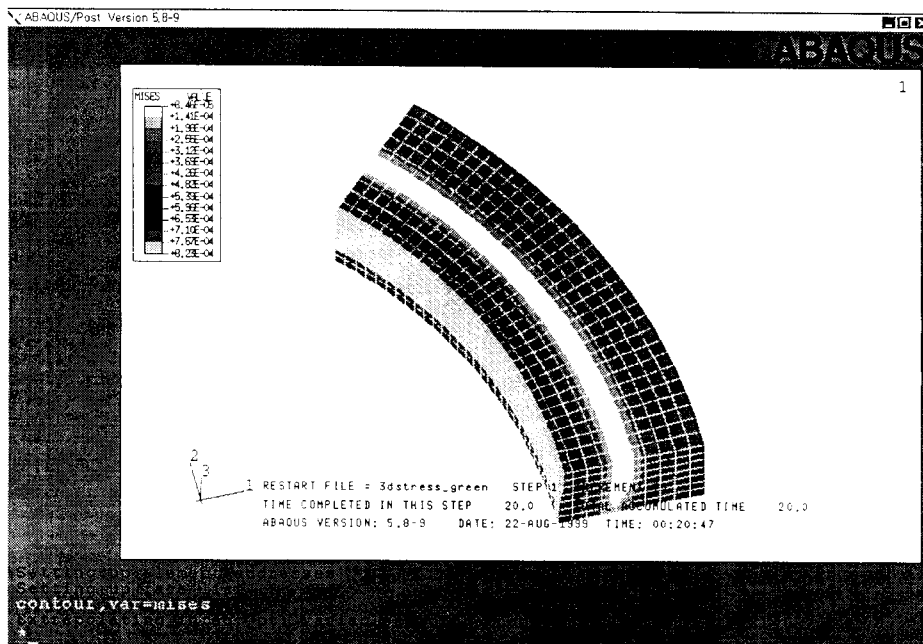


그림 3-5 응력 해석 결과

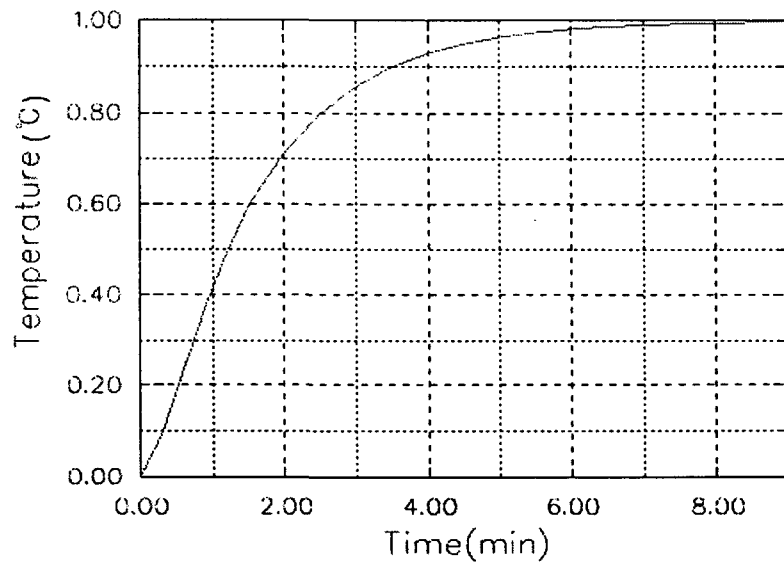


그림 3-6 온도 그린 함수

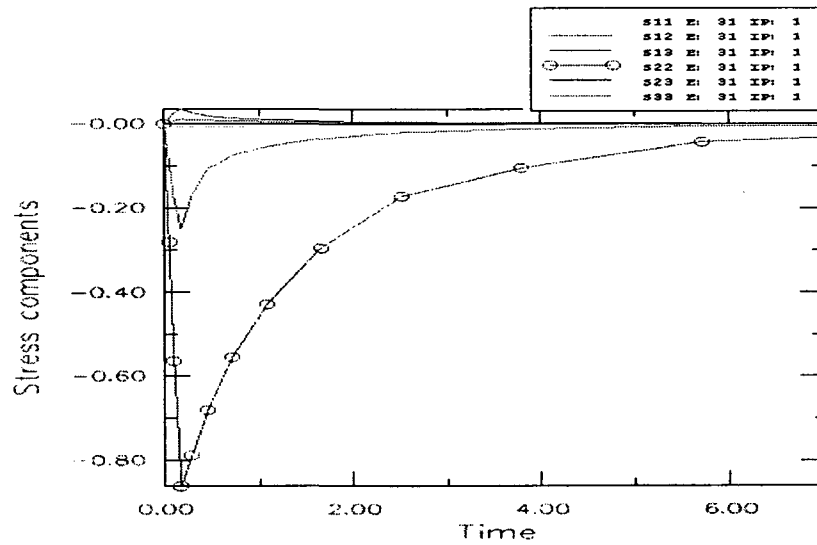


그림 3-7 응력 그린 함수

4절 수명평가 알고리즘

1. 개요

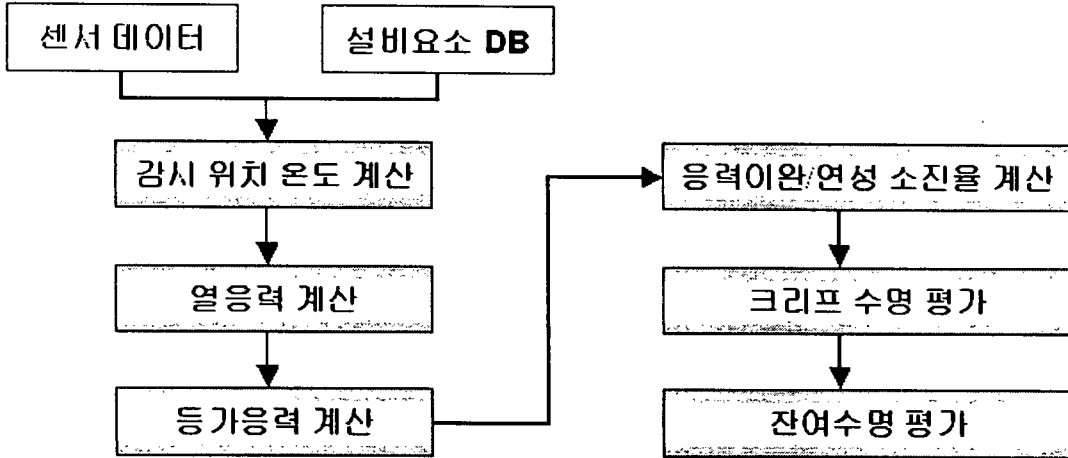


그림 3-8 수명 평가 알고리즘

이 절에서는 본 과제로 개발한 LIMOs server에 적용된 크리프 손상/수명평가 알고리즘에 대해 설명한다. LIMOs는 Life Monitoring System의 약자이다. LIMO는 영문 Limousine의 약자로서 고급 자동화의 대명사이므로 LIMOs는 고급사양의 온라인 모니터링 시스템을 지칭한다고 볼수있다. 그림3-8에서 보는바와 같이 개질로관 표면의 온도와 내압의 센서 데이터, 관재질에 대한 재료 및 유체 물성 데이터가 입력 데이터이다. 감시 위치의 관 내/외 표면 온도 계산, 내압에 인한 응력계산, 관내표면의 열응력 계산, 등가 응력 계산, 응력 이완 및 연성 소진을 계산, 크리프 수명 평가의 과정을 거쳐 최종적으로 잔여 수명 평가가 이루어 진다.

2. 감시위치의 온도 계산

본 과정에서 구하고자 하는 감시 온도는 개질로관의 내/외표면 온도이다. 관 외 표면에 열전대 센서를 장착해서 온도를 구하는 것이 가장 이상적이지만 900~1000℃의 고온이 운전환경이므로 이 온도에서 견딜수 있는 일반적인 고온센서는 없으며 측정데이터의 신뢰성도 높지않다. 그러므로 본 알고리즘에서는 측정이 용이한 개질반응전의 입구 pigtail에서의 유체온도와 개질반응후의 반응관 하단의 관 외표면온도를 이용하여 감시위치의 관 내/외표면온도를 계산하는 알고리즘을 적용하였다. 온도 측정위치 및 계산위치는 다음과 같고 그림 3-8의 개략도에 표시하였다.

- T_p : 개질반응전의 입구 Pigtail에서의 유체온도
- T_{so} : 개질반응후의 반응관 하단의 관 내표면온도
- T_{ti} : 개질 반응관과 로상단벽이 접하는 지점의 관 내표면 온도
- T_{to} : 개질 반응관과 로상단벽이 접하는 지점의 관 외표면 온도

- T_{bo} : 개질 반응관과 로하단벽이 접하는 지점의 관 외표면 온도
- T_i : 개질 반응관의 온도 감시지점의 관 내표면온도
- T_o : 개질 반응관의 온도 감시지점의 관 외표면온도

[첨자 정의: p(pigtail), t(top), b(bottom), o(outer), i(inner), s(sensor))]

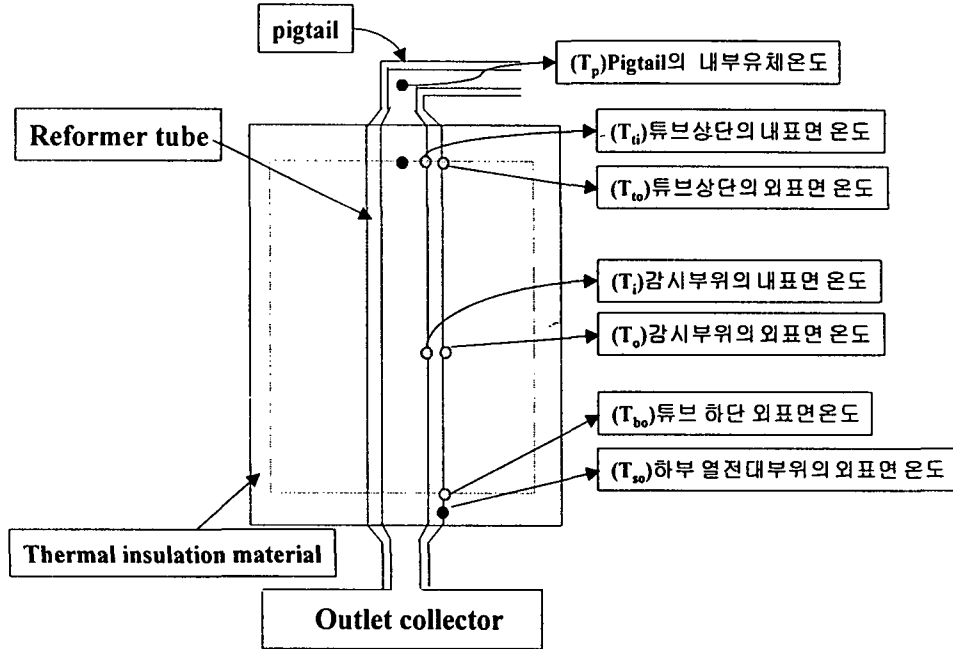


그림 3-9 온도계산 위치

온도계산 순서는 다음과 같다.

가. T_{so} 로부터 T_{bo} 를 구한다.

열전대 온도(T_{so})에 기존의 이력데이터를 바탕으로 두지점의 온도차를 더해준다. 이 온도차는 각 튜브별로 구해져야 하며 이 부분은 단열 되어있으므로 외부조건에 따른 온도강하의 변화가 적다. 이력 데이터가 없는 튜브는 전체 튜브의 평균값을 사용한다.

나. T_p 로부터 T_{ti} 를 구한다.

열전대로부터 측정된 T_p 로부터 T_{ti} 는 식(3-1)⁽⁵⁾을 이용하여 계산한다.

$$T_{ti} = T_p + \frac{q \left(\frac{D_o}{D_i} \right)}{h} \quad (3-1)$$

$$q = q' \times \frac{\text{대상 개질로의 평균열유속}}{\text{설계 평균열유속}} \quad (3-2)$$

$$h = 0.021 \left(\frac{k_p}{D_i} \right) Re^{0.8} Pr^{0.4} \left(\frac{T_p}{T_{fi}} \right)^{0.5} \quad (3-3)$$

여기서, D_o 는 외경, D_i 는 내경, q 는 복사열유속, q' 는 설계 열유속 profile로 구한 감시위치에서의 열유속, h 는 대류 열전달계수, k_p 는 유체의 열전도도, Re 는 Reynold Number, Pr 는 Prantle Number이다.

그림 3-10은 side-fired 방식의 개질관의 상단으로 부터의 길이에 따른 열유속의 변화 형상을 보여주고 있다. 식(3-2)의 q' 은 그림3-10의 해당 길이에 대한 열유속을 사용한다. 하지만, 이 열유속은 설비의 설계 열유속이기 때문에 실제 운전 조건을 고려하여 열유속을 보정할 필요가 있다. 식(3-2)를 이용하여 해당 가열기의 평균열유속에 대한 설계 평균 열유속이 비를 고려함으로써 열유속을 보정할 수 있다.

식(3-3)에서 보는바와 같이 본과정의 결과값(T_i)이 대류열전달계수(h)를 계산하는 입력값으로 사용되므로 iteration 과정을 거쳐서 결과값을 계산할 수 있다. 본 알고리즘에서는 실시간 해석에 적합한 수렴성이 좋은 Newton's Method를 사용하였다.

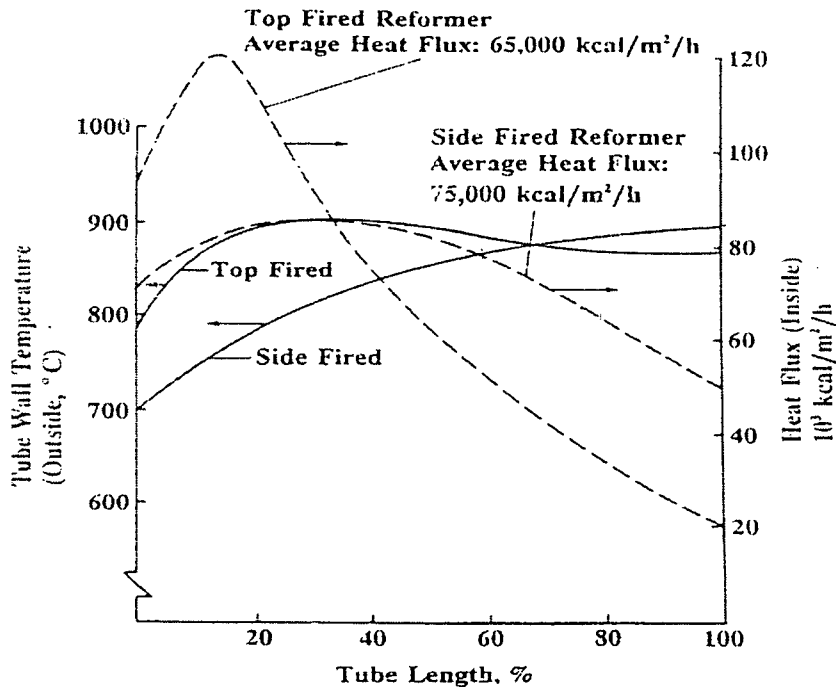


그림 3-10 증기 개질로의 Heat Flux Profile⁽³⁸⁾

다. T_{fi} 로부터 T_{to} 를 구한다.

T_{to} 는 식(3-4)⁽⁵⁾으로 구하였다.

$$T_{to} = T_{ti} + \frac{q t_a}{k_w} \left(\frac{D_o}{D_o - t_a} \right) \quad (3-4)$$

여기서, T_{to} 는 튜브상단 외표면 온도, T_{ti} 는 튜브상단 내표면 온도, q 는 복사열유속, t_a 는 튜브 평균두께, D_o 는 외경, k_w 는 튜브 금속의 열전도도이다.

라. T_{to} , T_{bo} 를 이용하여 T_o 를 구한다.

T_o 는 T_{to} 와 T_{bo} 를 기준으로 그림 3-11에서와 같은 개질로관 외표면 온도 profile을 이용하여 구할 수 있다. 온도 profile은 가열기 제작사에서 제공하는 설계 profile과 운전이력으로 가공된 profile이 있다. 각 설비별로 설계 profile과 실제 운전 profile은 운전 조건에 따라 그림3-12에서 보는바와 같이 많은 차이가 있으므로 본 알고리즘에서는 운전 profile은 적용하였고 운전 이력이 없는 상태에서는 설계 profile을 선택할 수 있다. 본 연구에서의 외표면 온도 profile은 튜브 상단온도를 기준으로 615°C~645°C의 6개 대역, 튜브 하단온도를 기준으로 940°C~985°C의 9개 대역으로 분할함으로써 각 튜브별로 54개의 profile을 작성하였다. 또한 이 profile은 과거 운전 이력의 데이터를 바탕으로 T_{bo} 및 T_{to} 를 기준으로 데이터를 정리한 결과 온도 대역별로 profile의 일정한 패턴을 확인하였고 데이터의 편차가 그림3-13에서 보는 바와 같이 약 5°C~8°C이므로 적용 가능성을 알 수 있다. 따라서 T_o 는 외표면 온도 profile과 온도 보정상수 β 를 이용하여 식(3-5)로 계산하였다.

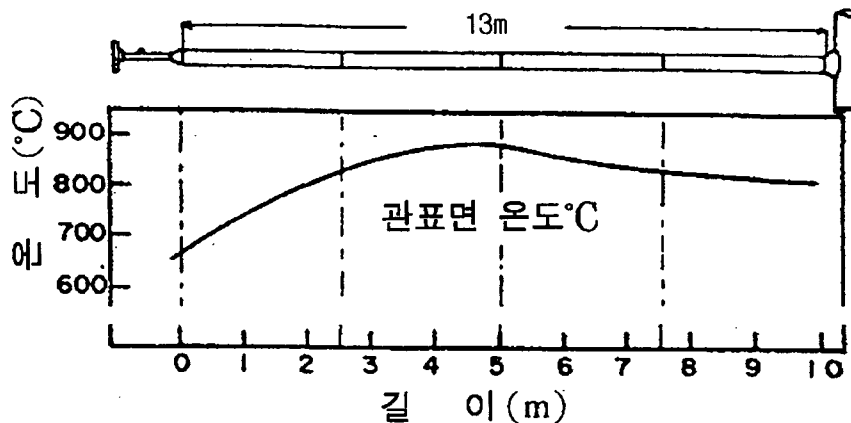


그림 3-11 개질로 반응관의 외표면 온도 Profile

2D Graph 3

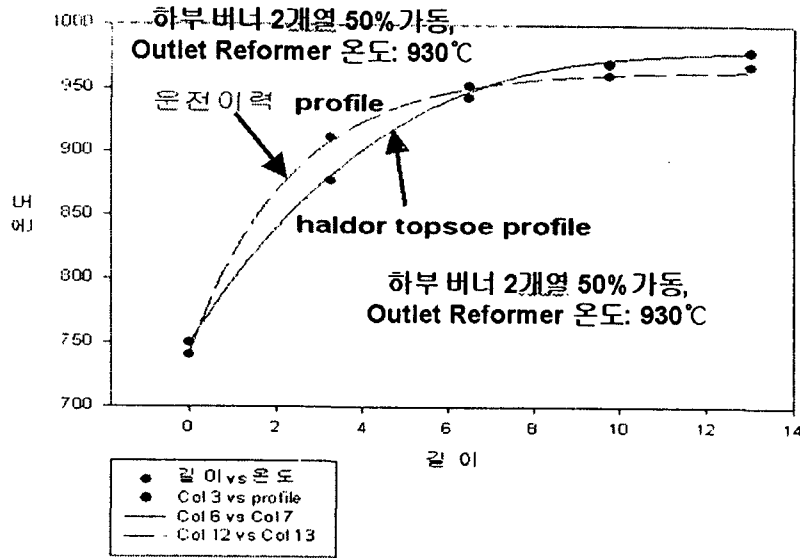


그림 3-12 외표면 온도 설계 profile과 이력 profile의 비교

$$T_o = T_{to} + \beta (T_{bo} - T_{to}) \quad (3-5)$$

$$\beta = \frac{T'_o - T_{to}}{T_{bo} - T_{to}} \quad (3-6)$$

여기서, T_o 는 튜브 감시위치에서의 외표면 온도, T_{to} 는 튜브 상단의 외표면온도, T_{bo} 는 튜브 하단의 외표면 온도, β 는 온도 보정상수, T'_o 는 해당 온도 profile을 사용하여 계산된 외표면온도, T_{to}' 는 해당 온도 profile의 튜브상단 온도대역, T_{bo}' 는 해당 온도 profile의 튜브하단 온도대역이다.

마. T_o 를 이용하여 T_i 를 구한다.

T_i 는 식(3-7)⁽⁵⁾으로 구하였다.

$$T_i = T_o - \frac{q t_a}{k_w} \left(\frac{D_o}{D_o - t_a} \right) \quad (3-7)$$

여기서, T_o 는 튜브감시 위치에서의 외표면 온도, T_i 는 튜브감시 위치에서의 내표면 온도, q 는 복사열유속, t_a 는 튜브 평균두께, D_o 는 외경, k_w 는 튜브 금속의 열전도도이다.

위의 과정을 거쳐 최종적으로 감시위치에서의 개질로관의 내/외표면 온도 T_i , T_o 를 구할 수 있다.

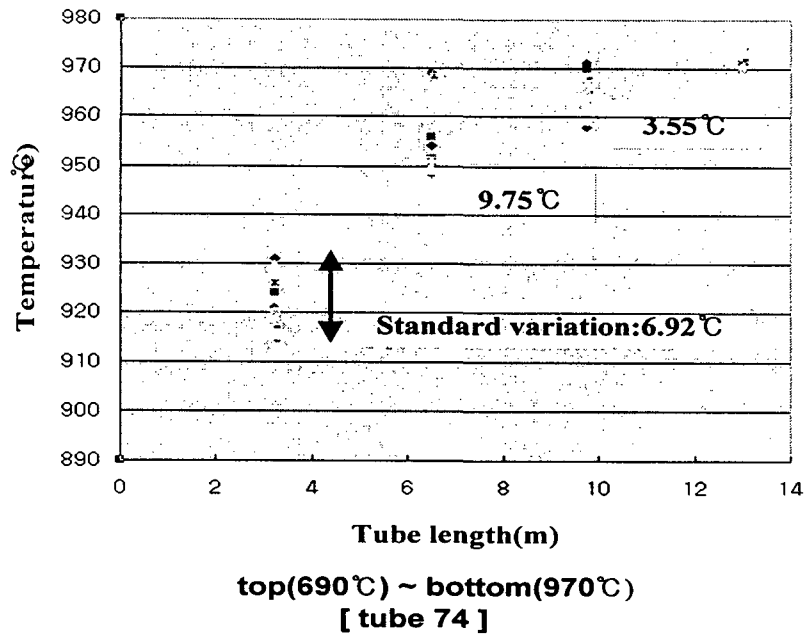


그림 3-13 온도 profile의 표준편차

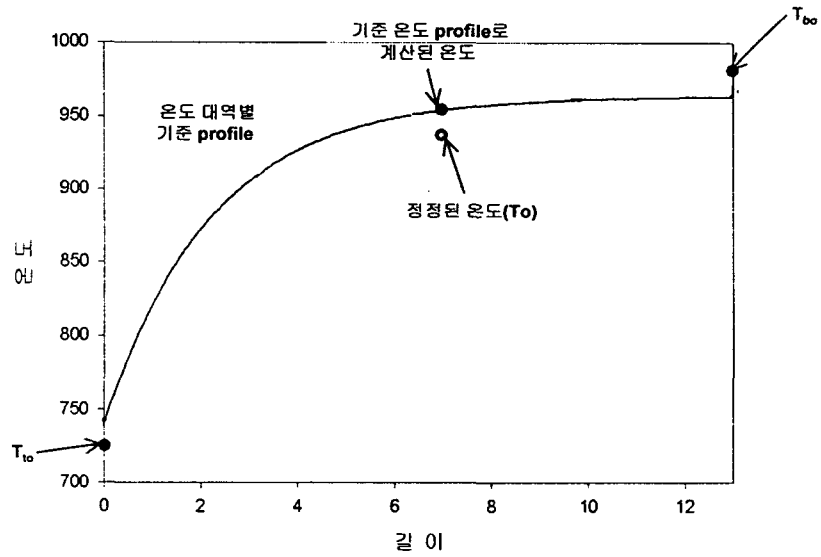


그림 3-14 감시위치의 온도보정

표 3-6 감시위치의 측정온도와 계산온도의 비교

pigtail 내부 유체온도 (T_p)	Tube 하단 6cm 하부 표면온도 (T_{so})	계산된 온도 (하단에서 상부 3.25m지점)	측정온도 (by pyrometer)	오 차
647	930	954.3	952	1.3
650	920	950.5	943	7.5
638	925	963.5	951	2.5
644	934	958.3	968	-9.7
639	932	967.3	948	19.3
644	921	963.9	952	11.9
637	929	967.3	957	10.3
642	933	969.2	956	13.2
635	942	973.3	961	12.3
641	934	969.2	962	7.2
630	916	962.7	963	-0.3
632	932	971.1	966	5.1
629	930	970.7	973	-2.3
633	935	972.4	969	3.4
630	915	962.7	961	1.7
635	916	960.6	969	-8.4

본 온도계산 알고리즘 결과값과 실제 온도 측정치와 비교하면 표 3-6과 같다. 입력 데이터는 pigtail에서의 내부 유체온도와 튜브 하단 6cm하부에 설치된 열전대 온도 데이터이다. 계산에 필요한 다른 데이터는 편의상 생략하였다. 본 계산결과는 약 20개월의 개질로 플랜트 데이터를 기준으로 외표면 온도 profile을 작성하였으며 입력 데이터는 99년 11월의 데이터를 이용하여 튜브 하단을 기준으로 3.25m 상단의 외표면 온도를 계산한 결과와 실제로 peep hole에서 pyrometer로 측정한 온도 데이터를 비교한 결과이다. 본 알고리즘을 사용한다면 표의 오차범위에서 온도를 유추할 수 있을 것이다.

3. 내압에 의한 응력평가

튜브의 내압에 의한 응력을 평가하기 위해서는 박육튜브 기준인 두께와 외경의 비가 0.15⁽⁵⁾가 초과될시 다음의 식(3-8)으로 구하였다.

$$\sigma_{\theta} = \frac{P_i [(r_o/r)^2 + 1]}{(r_o/r_i)^2 - 1} \quad (3-8)$$

여기서, σ_{θ} 는 hoop stress, P_i 는 내압, r_o 는 외반경, r_i 는 내반경이다.

4. 열응력 평가

튜브의 열응력은 다음의 2가지 경우로 평가할 수 있다.

가. API-530 Appendix D⁽⁵⁾에 따라 다음의 열응력 평가식(3-9)을 사용한다.

$$S_{th} = X \left[\frac{2 Y^2}{Y^2 - 1} \ln Y - 1 \right] \quad (3-9)$$

$$X = \left[\frac{aE}{2(1-\nu)} \right] \left[\frac{\Delta T}{\ln Y} \right] = \left[\frac{aE}{4(1-\nu)} \right] \left[\frac{q_o D_o}{k} \right] \quad (3-10)$$

여기서, S_{th} 는 열응력, a 는 열팽창 계수, E 는 탄성 계수, ν 는 프와송 비, ΔT 는 튜브 내표면과 외표면의 온도차, Y 는 D_o/D_i , q_o 는 튜브 외표면에서의 열유속, k 는 금속의 열전도율이다.

나. 유한요소 해석으로 수행한 응력그린함수를 사용하여 열응력을 평가한다.

감시위치의 실시간 열응력을 구하기 위하여 다음 단계를 거친다.

- (1) 각 열원의 온도를 유추한다.
- (2) 각 열원의 온도이력을 저장한다.
- (3) 각 열원의 시간온도차를 계산한다.
- (4) 각 열원의 시간온도차의 이력을 저장한다.
- (5) 각 열원의 시간온도차 이력에서 각 데이터의 발생시간을 기록하고 현재로부터 떨어진 시간차를 계산한다.
- (6) 각 시간온도차 데이터의 시간차에 대해 6개 방향성분의 응력그린함수를 찾는다.
- (7) 각 시간온도차 데이터와 응력그린함수를 곱한다.
- (8) 각 열원의 시간온도차 이력에 대해 (7)의 과정을 반복하여 중첩한다.
- (9) 모든 열원에 대해 (8)의 과정을 반복하여 중첩한다.
- (10) (1)~(10)의 과정을 마치면 6개 방향성분별 열응력이 계산된다.
- (11) 등가응력을 계산한다.

6개 방향 응력성분으로부터 Von Mises식에서 등가응력 σ_{eq} 를 계산한다. 식 (3-11)을 적용한다.

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ (\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2) \}^{\frac{1}{2}} \quad (3-11)$$

5. 크리프 수명 평가

가. 크리프 파단 수명평가 (손상기구가 크리프인 경우)

크리프 수명예측을 위해 식(3-12)⁽³⁹⁾와 같이 LMP (Larson-Miller Parameter)를 도입하였다.

$$P = (T + 273.15)(C + \log t_R) \quad (3-12)$$

여기서, P 는 LMP, t_R 은 크리프 파단 시간, T 는 계이지 온도, C 는 재료상수이다. LMP와 작용 응력과의 관계는 식(3-13)과 같다.

$$P = b_0 + b_1 \log S + b_2 (\log S)^2 \quad (3-13)$$

여기서, S 는 응력이고 b_0 , b_1 및 b_2 는 NRIM data sheet⁽³⁹⁾의 재료물성값이다. 크리프 파단 수명소비율은 식(3-14)과 같이 life fraction으로 계산하였다.

$$U = \sum_{r=1}^k \left[\frac{t}{t_f(\sigma_{ref}^R, T_{ref})} \right]_r \quad (3-14)$$

여기서, U 는 크리프 파단 수명소비율, t 는 시간, t_f 는 기준 온도·응력상태에서 재료의 크리프 파단시간이며 r 은 하중유지기간의 횟수를 나타낸다.

나. 크리프 연성소진 수명평가 (손상기구가 크리프-피로 경우)

손상기구가 크리프-피로인 부재의 크리프 수명평가는 고온 응력조건에서의 크리프 변형에 의해 크리프 연성소진(creep ductility exhaustion) 모델⁽⁴⁰⁾을 사용된다. 사이클 당 크리프 손상 D_c 는 유지기간 기간 t_h 동안 비탄성 크리프 변형율을 적절한 재료의 연성값(그림 3-15 및 그림 3-16)으로 나누어 예측한다. 비탄성 변형율 속도, elastic follow-up 그리고 압축상태의 유지기간을 고려하여 D_c 는 식(3-15)과 같이 계산된다.

$$d_c = \int_0^{t_u} \frac{\dot{\epsilon}_c}{\epsilon_f(\dot{\epsilon}_c)} dt \quad (3-15)$$

여기서 $\dot{\epsilon}$ 는 유지기간 동안 순간적인 비탄성 변형률 속도, $\epsilon_f(\dot{\epsilon})$ 는 상응하는 크리프 연성이다.

총 크리프 손상은 연성소진 법칙(ductility exhaustion method)을 적용하여 식 (3-16)과 같이 계산한다.

$$D_c = \sum d_c = \sum \int_0^{t_u} \frac{\dot{\epsilon}_c}{\epsilon_f(\dot{\epsilon}_c)} dt \quad (3-16)$$

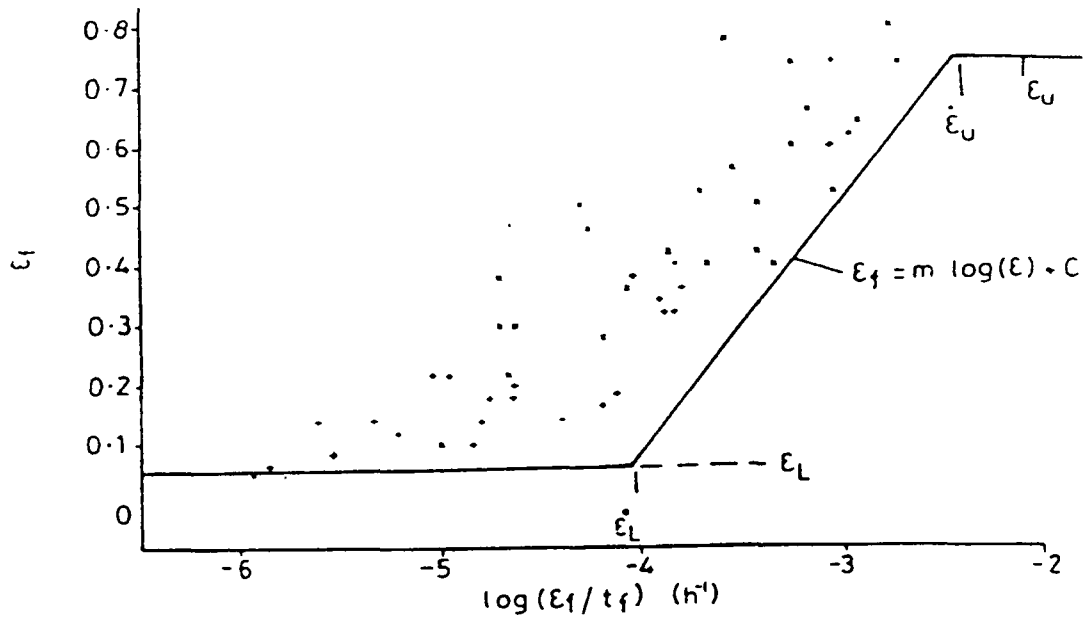


그림 3-15 크리프 변형률 속도와 크리프 연성과의 관계 I

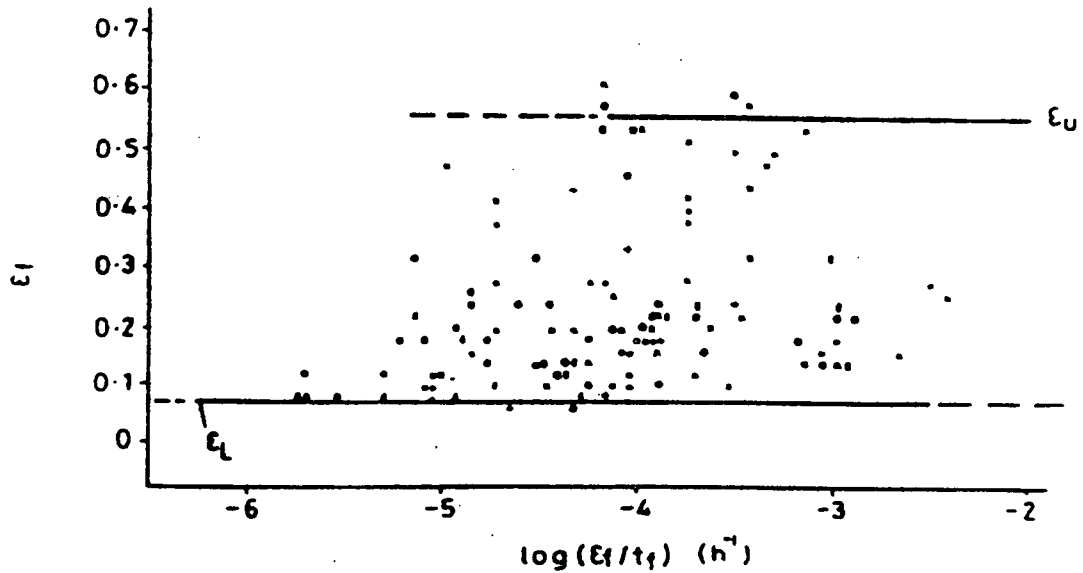


그림 3-16 크리프 변형을 속도와 크리프 연성과의 관계 II

6. 잔여수명 평가

잔여수명은 식(3-17)과 같이 계산한다.

$$T_{life} = T_{his} \times \left(\frac{1}{T_{con}} - 1 \right) \quad (3-17)$$

여기서, T_{life} 는 잔여수명, T_{his} 는 총 이력시간, T_{con} 는 총 수명소비율이다.

5절 LIMOs 데이터 베이스

1. 개요

데이터베이스는 자료의 입력, 저장, 갱신, 검색이 기능을 갖는다. 본 프로그램에서는 MS Access를 사용하였고 데이터 베이스 인터페이스는 ODBC(Open DataBase Connectivity)를 이용하였다. 본 수명감시 소프트웨어에서 필요한 configuration 데이터 및 재료물성 등을 데이터베이스에 입력하면 해석 수행후 결과를 갱신, 저장하고 GUI(Graphic User Interface) 환경을 통해 저장된 결과를 출력, 검색할 수 있도록 지원한다.

2. 소프트웨어와의 관계

그림 3-17은 데이터베이스와 소프트웨어간의 관계를 도시하고 있다. 데이터베이스는 server program이 설치되어 있는 server computer에 설치되며 server program

과는 상호 관계가 설정되어 reading과 writing을 할 수 있다. 기본적으로 ODBC로 인터페이스를 설정하였다면 server/client 환경이 구축되므로 다른 컴퓨터 또는 다른 프로그램에서 다중 접속이 가능하다. 따라서 client computer에 설치된 client program에서 접속하여 reading을 할 수 있다. 소프트웨어 특성상 server는 하나만 존재해야 하므로 내부적으로 하나의 server만이 접속할 수 있도록 제한하였다.

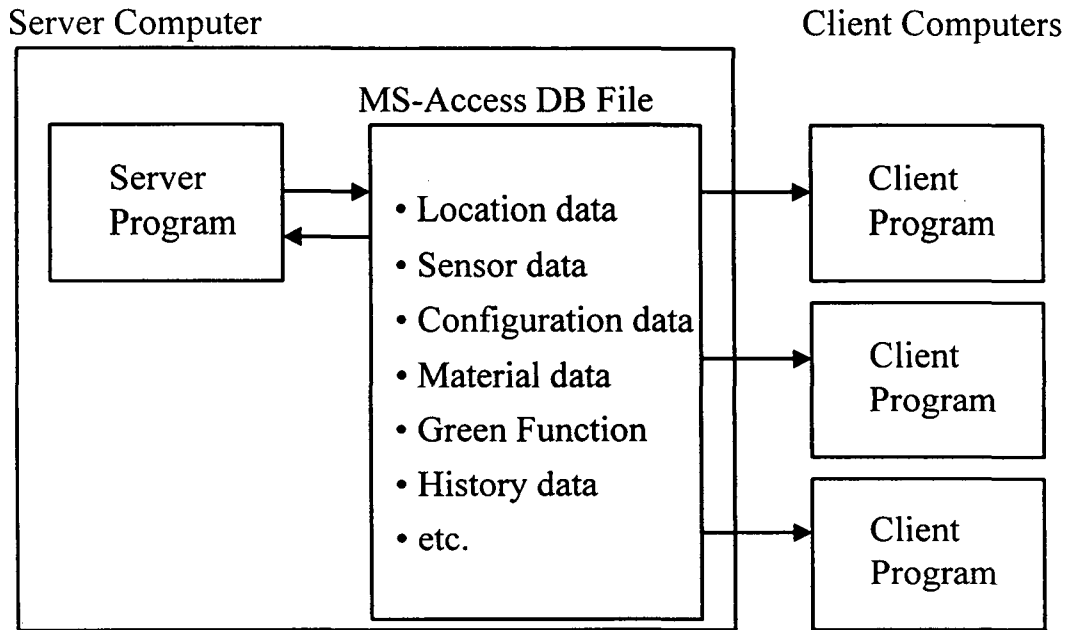


그림 3-17 데이터베이스와 소프트웨어와의 관계

3. 데이터베이스의 구성

가. 데이터베이스 파일

본 수명감시 소프트웨어에서 필요한 데이터베이스는 5개의 mdb파일이다. 메인 데이터베이스는 LimosDB.mdb이고 부가 데이터베이스는 OfflineDB, CurrentDB, HistoryDB, DisplayDB.mdb이다.

(1) LimosDB.mdb

메인 데이터베이스 파일로서 configuration 데이터 및 재료물성등의 데이터를 포함하고 있으며 총 32개의 테이블로 구성되어 있다.

(2) OfflineDB.mdb

Server 프로그램의 Offline_Mode에서 실행시 사용되는 데이터베이스이다. Sensor, Location, Alarm, Logging, SensorInput의 정보를 포함 하고있다.

(3) CurrentDB.mdb

Server 프로그램의 online_mode에서 실행시 사용되는 데이터베이스이다. sensor,

location, alarm, logging의 실시간 정보를 보관하고 있다.

(4) HistoryDB.mdb

이력만을 저장하는 데이터베이스 파일로서 sensor, location, alarm, logging에 대한 정보를 포함하고 있다. server 프로그램 실행시 저장되는 데이터베이스이다.

(5) DisplayDB.mdb

Client 프로그램의 화면출력에 필요한 임시 데이터베이스이다. Location의 임시 정보를 보관하고 있다.

나. 테이블의 속성상의 분류

(1) Configuration table

개질로, 설비형상, 감시위치, 센서타입에 대한 전반적인 정보를 포함하고 있다. 해당 테이블은 Unit, Component, Location, Sensor, GreensFn, Greens_Map, Virtual_map이다.

(2) 재료물성 table

설비의 재질정보와 해석에 사용되는 재료물성치를 포함하고 있다. 일반적인 정보는 Material에 포함되어 있고, 온도에 따른 변화 물성치는 Material_..., Fluid_... 에 포함되어 있다.

(3) Profile table

설비의 heatflux와 온도계산과정에 필요한 외표면 온도 profile에 대한 정보를 포함하고 있다.

(4) 참고 table

사용자의 편의를 도모하기 위해 만든 테이블이다. 예를 들어 센서의 종류나 속성 등에 대한 설명을 포함한다. 해당하는 테이블은 ItemTypes이다.

(5) 실시간 정보 table

현재 순간의 해석결과 및 센서 등의 정보를 포함하고 있다. 해당하는 테이블은 Current_Alarms, Current_Locations, Current_Logging, Current_Sensors이다

(6) 과거 이력 table

과거 해석결과 및 센서 정보의 이력을 포함하고 있다. 해당하는 테이블은 History_Alarms, History_Locations, History_Logging, History_Sensors이다.

(7) 화면출력 table

client 프로그램의 화면출력에 필요한 정보를 포함하고 있다. 해당 테이블은 Display_Locations이다.

(8) Offline 정보 table

offline mode 해석시 사용된 정보를 포함하고 있다. 해당 테이블은 Offline_Alarms, Offline_Sensor, Offline_Location, Offline_Logging, Offline_SensorInput 이다.

(9) Message table

각종 warning에 대한 정보를 포함하고 있다. 해당 테이블은 Message이다.
 위의 내용을 요약하면 표 3-7 및 3-8과 같다. 그림 3-18은 LimosDB의 실제 테이블 구성모습을 보여준다.

표 3-7 데이터베이스의 각 테이블 명칭, 속성 및 기능 I

DB File	속성분류	테이블 이름	내 용
LimosDB	환경설정	Unit	Unit(Heter)의 정보
		Component	Component(Reformer)의 정보
		Location	Location(감시위치)의 정보
		Sensor	Sensor의 정보
		GreensFn	응력그린함수 데이터
		Greens_Map	응력그린함수와 열원과의 관계
		Virtual_Map	실제 센서와 가상 센서와의 관계
	재료물성	Material	재료물성
		Material_Creep_A	재료물성(온도별)
		Material_Creep_ex_n	
		Material_Cycle_D	
		Material_Cycle_m	
		Material_Density	
		Material_Ei_modulus	
		Material_Monotonic_ID	
		Material_Monotonic_m	
		Material_Poission_ratio	
		Material_RA	
		Material_Specific_Heat	
		Material_Thermal_Cond	
		Material_Thermal_Exp	
	Material_Ultimate_ss		
	Material_Yield_ss		
	유체물성	Fluid_Density	유체물성(온도별)
		Fluid_Specific_Heat	
		Fluid_Thermal_Cond	
		Fluid_Viscosity	
	참고	ItemTypes	각종 아이템 종류
	Message	Message	Warning의 종류
	Profile	TempProfile	Temp Profile의 종류
		HeatFluxProfile	HeatFlux Prfile의 종류

표 3-8 데이터베이스의 각 테이블 명칭, 속성 및 기능

DB File	속성종류	테이블 이름	내용
CurrentDB	실시간 정보	Current_Alarms	실시간 경고 정보
		Current_Locations	실시간 감시위치 정보
		Current_Logging	실시간 로깅 정보
		Current_Sensors	실시간 센서 정보
HistoryDB	과거이력	History_Alarms	과거이력 경고 정보
		History_Locations	과거이력 감시위치 정보
		History_Logging	과거이력 로깅 정보
		History_Sensors	과거이력 센서정보
DisplayDB	화면출력	Display_Locations	화면출력 감시위치 정보
OfflineDB	Offline 정보	Offline_Alarms	Offline 경고 정보
		Offline_Locations	Offline 감시위치 정보
		Offline_Logging	Offline 로깅 정보
		Offline_SensorInput	Offline 센서계산 순서 정보
		Offline_Sensors	Offline 센서 정보

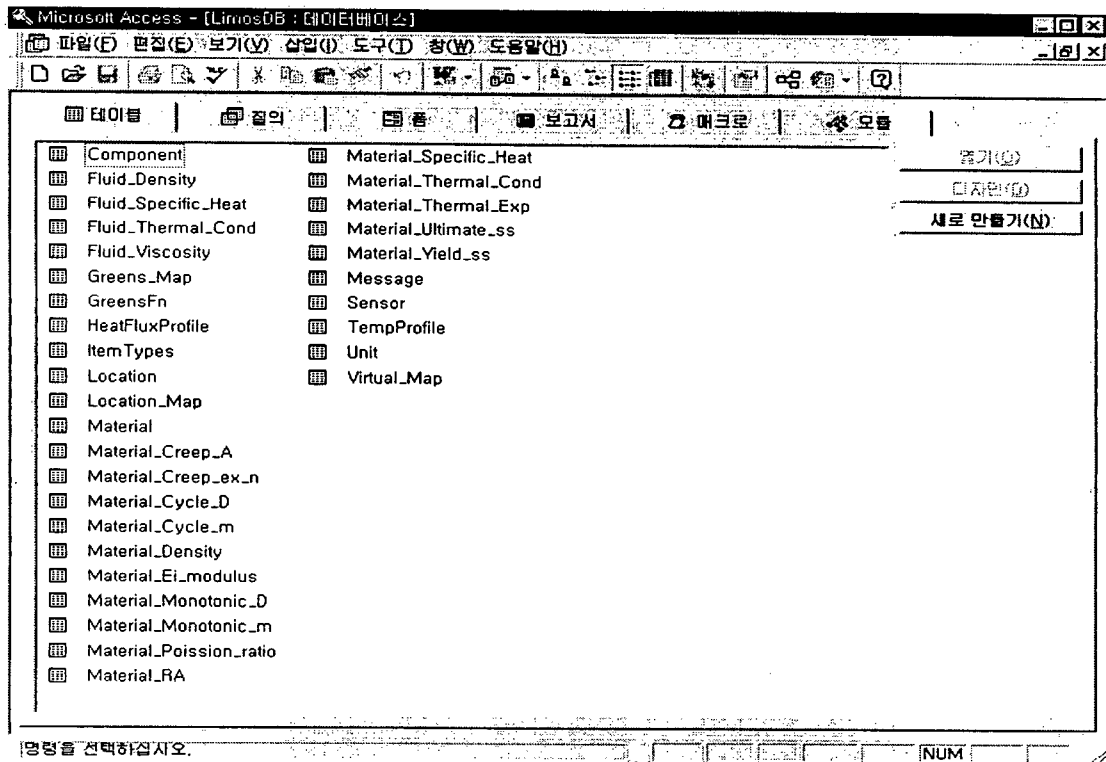


그림 3-18 LimosDB의 테이블

6절 Limos 소프트웨어

1. Limos 설치

가. 시스템 사양

(1) 하드웨어

LIMOs가 설치될 컴퓨터는 기본적으로 다음과 같은 사양으로 설계되었다.

- Processor : Pentium II 233MHz
- Memory : 128 MByte
- Hard Disk : 14GByte
- Monitor Size : 17", (1024-768 mode로 고정)

위의 사양은 최소 사양이며 더욱 좋은 성능의 컴퓨터는 소프트웨어의 보다 안정적이고 빠른 기능을 지원한다.

(2) 운영체제 및 응용 소프트웨어

LIMOs가 설치될 컴퓨터에 필요한 운영체제 및 개발 Tool은 기본적으로 다음과 같다.

- O/S : Windows NT Server 4.0
- 개발 Tool : Microsoft Visual Basic 6.0, MS-Access 97
- 설치 소프트웨어 : Microsoft Visual Basic 6.0, MS-Access 97
- 설치 드라이버 : MS-Access ODBC driver 4.0

나. LIMOs 소프트웨어의 설치

(1) 구성

LIMOs 소프트웨어의 구성은 그림 3-19와 같다. 상위 폴더 LIMOs아래에 3개의 부폴더가 있으며 내용은 다음과 같다.

(가) Bitmaps\

소프트웨어 구동시 필요한 그림 파일을 포함한다. 확장성을 위해서 bmp파일로 저장되어 있으며 파일명은 코딩상에 사용되어었으므로 변경되어서는 안된다.

(나) Data\

데이터베이스 파일들이 포함한다. 5개의 데이터베이스 파일을 포함하며 HistoryDB는 이력을 저장하기 때문에 주기적인 백업이 필요하다.

(다) Exe\

소프트웨어 실행화일을 포함한다. Limos_Server.exe는 Server 실행화일이며 Limos_Client.exe는 Client실행화일이다.

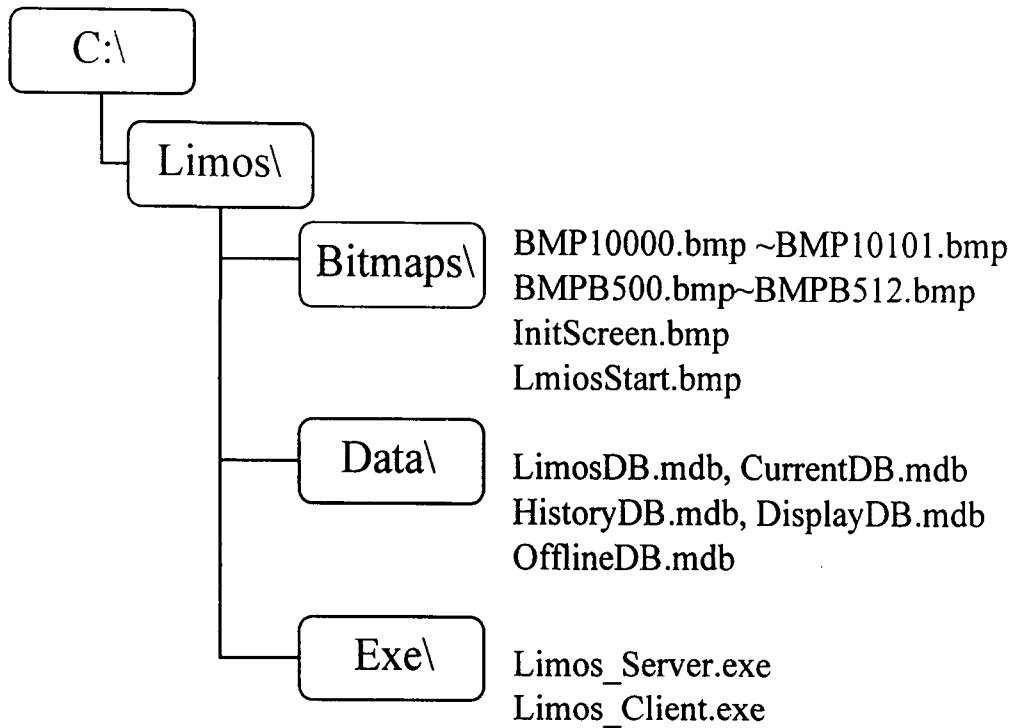


그림 3-19 소프트웨어의 폴더 구조 및 파일 구성

(2) 설치

- (가) Window NT Server 4.0, Microsoft Visual Basic 6.0, MS_Access 97을 설치한다.
- (나) C:\에 Limos폴더를 복사한다.
- (다) 그림 과 같이 파일을 구성한다.
- (라) ODBC Driver 4.0을 설치한다.
- (마) 5개의 데이터베이스를 “시스템 DSN”에 등록한다.

2. LIMOs 프로그램의 기능

가. LIMOs 프로그램의 내장 모듈

(1) 데이터 로깅 및 데이터수집 모듈

열전대와 압력계에서 읽어들이는 센서 측정값을 프로그램 내에서 로깅하여 유효성 여부를 판단한 후 데이터베이스에 저장하는 모듈이다.

(2) 수명감시 지점의 온도 계산 모듈

설비에 설치된 센서 데이터를 이용해서 수명감시 지점이 온도를 계산하는 모듈이다.

(3) 설비 손상/수명 해석 및 계산 알고리즘 모듈

중화학 고온설비의 주요 손상기구인 크리프 손상을 해석적인 방법으로 계산하는 알고리즘이다. 실시간 및 주기적으로 반복 실행된다.

(4) 실시간 결과 화면 출력 모듈

센서 측정값 및 해석결과를 실시간으로 화력출력하는 모듈이다. 실시간 결과뿐만 아니라 과거 이력을 그래프 모드와 텍스트 모드로 검색, 출력한다.

(5) 프로그램 제어 모듈

프로그램의 각 모듈의 순서와 반복여부를 결정하는 모듈이다. 또한 사용자 인터페이스 환경을 지원하기 위한 모듈이다.

나. LIMOs server의 기능

(1) 센서 로깅

(가) 센서 로깅

가열기 주요설비에 설치된 온도, 압력센서등의 신호를 프로그램으로 읽어들이는 기능을 말한다. 입력된 센서신호는 데이터베이스에 저장된 유효화 값과 비교하는 유효화 과정을 거친후 데이터베이스에 저장된다.

(나) 센서 데이터 유효화(validation) 과정

입력된 센서신호는 센서의 고장 및 외부 간섭등에 의한 노이즈등의 이유로 불규칙한 신호가 입력될수 있으므로 유효화과정을 거쳐야한다. 이런 불규칙한 신호는 해석의 신뢰성이나 시스템에 심각한 영향을 줄 수 있다. 유효화기준은 다음과 같다.

- ① 신호가 하한값 이하일 때
- ② 신호가 상한값 이상일때
- ③ 가장 최근의 두신호값의 차이가 기준값 이상일때

이상의 유효화과정에 부합되지 않는 신호는 무시되고 데이터베이스에서 정해진 백업센서값을 가져온다. 백업센서값도 같은 유효화 과정을 거친후 이상이 발견되면 같은 위치의 가장 최근의 데이터로 대체해서 프로그램에 로깅된다.

(2) 데이터베이스 입출력

Limos Server가 구동되기 위해서는 데이터베이스의 일부내용을 메모리에 상주시킬 필요가 있다. 실시간으로 해석을 수행하기 때문에 많은 시간이 소요되는 데이터베이스로의 접근을 최소한으로 줄이기 위해서이다. 한번 로딩된 데이터는 프로그램이 종료될때까지 메모리에 상주하며 해석과정에서 사용된다. 로딩되는 데이터는 configuration관계 테이블, 재료물성 테이블, 참조 테이블 및 profile 테이블이다. 또한 해석이 완료된 데이터는 데이터베이스에 저장된다. CurrentDB에 저장된후 일정시간 간격으로 HistoryDB와 DisplayDB에 저장 및 갱신작업을 반복한다. 저장되는 정보는 센서정보, 감시위치 정보, 경고정보, 로깅정보이다.

(3) 수명해석

(가) 로깅된 온도 및 압력신호를 이용하여 감시위치의 온도를 계산한다. 온도데이터

가 없는 위치의 온도는 주변 데이터를 Weigth average method를 사용하여 계산한다.

(나) 감시위치의 온도 및 내압 데이터를 이용하여 내압응력 및 벽두께 방향의 열응력을 계산한다.

(대) 크리프 및 크리프-피로 수명소비율 및 과거이력에 근거한 잔여수명을 계산한다.

(4) 경고 발생

온도, 압력 및 잔여수명에 대한 설정치에 부합되지 않는 위치에 대해 경고를 발생한다.

다. LIMOs client의 기능

(1) 데이터베이스 읽기

Client 프로그램을 구동하기 위해서는 Configuration 관계 테이블중에서 화면 출력에 필요한 내용을 한번 읽어들이고 CurrentDB에서 실시간 센서, 감시위치, 경고, 로깅 정보등을 읽어들인다.

(2) 화면 출력

client에서는 Unit, Component, Location으로 세단계 출력화면으로 나누어지며 각각의 단계마다 수명소비율을 출력한다. 또한 Location의 상세화면에서는 실시간 모드 및 이력모드로 구분되어 사용자의 요구에 따라 필요한 정보를 출력한다.

3. LIMOs server의 실행

가. 실행절차

(1) LIMOs_Server를 실행시킨다.

(2) 사용자 인증을 위한 login과정을 거친다.

(3) Start_Up Option을 설정한다.

(4) database의 내용의 이상유무를 판단하는 DBCheck과정을 거친다.

(5) sensor이 이상유무를 판단하는 SensorCheck과정을 거친다.

(6) StartUp을 실행하면 database이 내용을 읽어들이고 센서신호를 로깅한다.

(7) 일정시간 간격으로 수명해석을 수행하고 해석결과를 데이터베이스에 저장 및 갱신한다.

나. 실행화면

(1) 그림 3-20은 LIMOs_Server 프로그램의 실행화면이다.

Login, Option설정, DBCheck, SensorCheck, StartUp순서로 진행한후 해석을 수행하고 있는 과정이다.

(2) 그림 3-21은 LIMOs_Server 프로그램의 Optiont 설정화면이다.

Operation Mode(online/offline)설정후 세부설정을 선택한후 server를 구동할 수 있다.

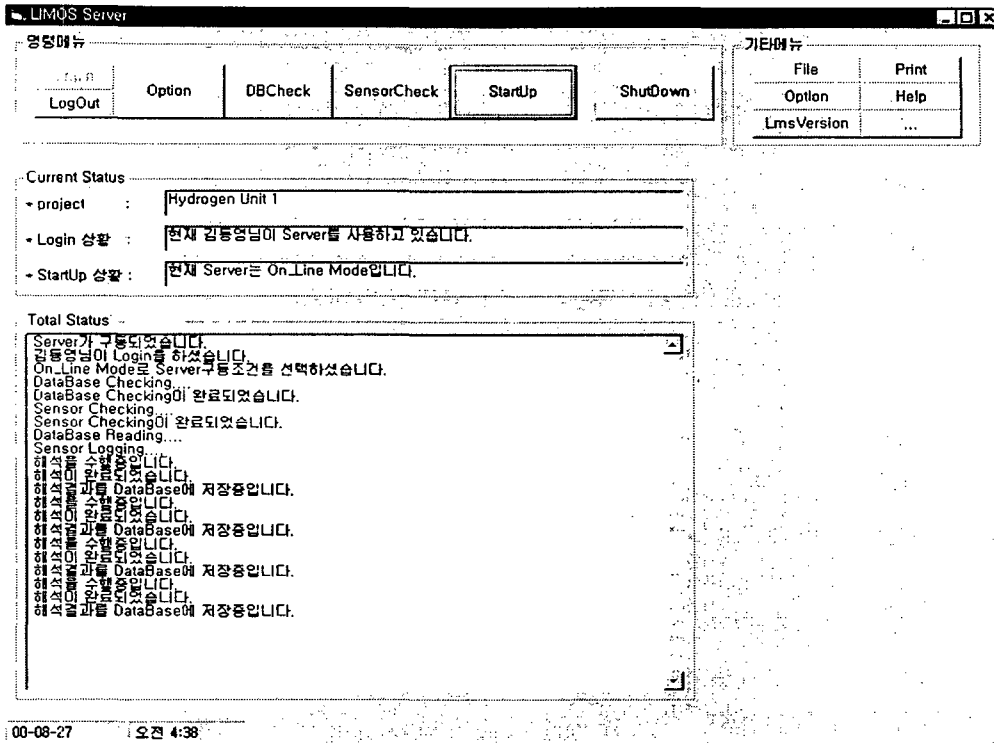


그림 3-20 Server 프로그램 실행화면

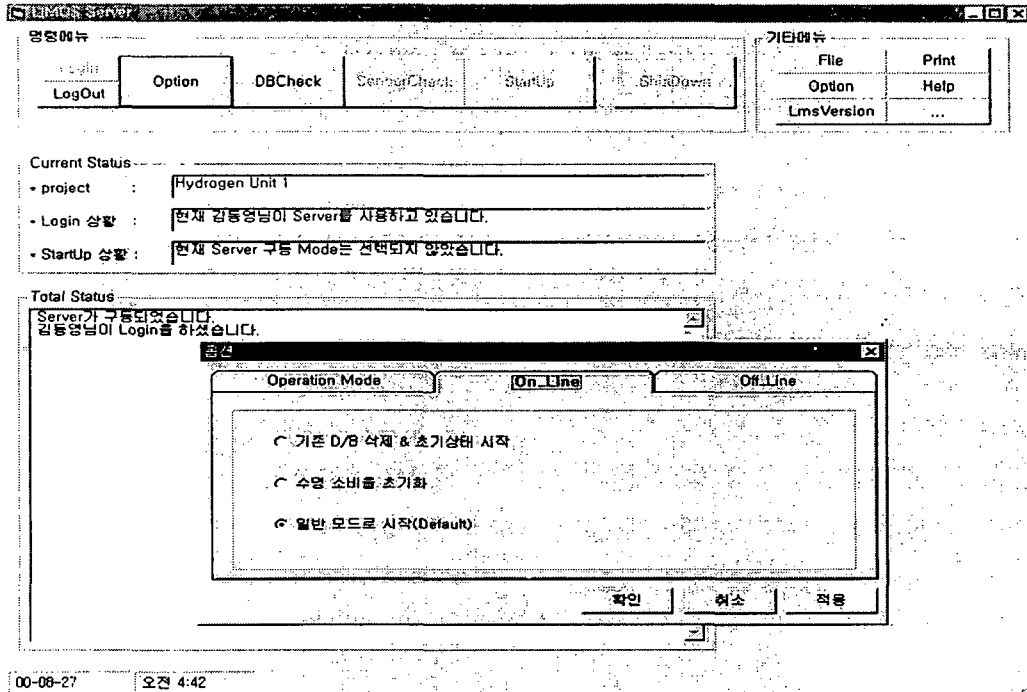


그림 3-21 Server 프로그램의 Option화면

4. LIMOs Client의 실행

가. 실행절차

- (1) LIMOs_Client를 실행시킨다.
- (2) 사용자 인증을 위한 login과정을 거친다.
- (3) 실행모드를 선택해서 실행한다. (online 또는 offline)
- (4) 초기화면에 최 상위단계인 Unit 정보화면이 출력된다.
- (5) 해당 Unit을 더블클릭하면 Component화면이 출력된다.
- (6) 해당 Component를 더블클릭하면 Location화면이 출력된다.
- (7) 원하는 Location을 클릭하면 좌측에 해당 Location의 정보를 실시간으로 출력하는 그래프가 출력되고 그하단에 상세화면이 동시에 출력된다.
- (8) 상단 '출력선택'의 radio button을 통해 원하는 정보를 선택할수 있고 '위험위치'의 combo box안에는 수명소비율순으로 Location이 저장되어있으므로 위험위치를 사용자가 인식하기 쉽게 구성하였다.
- (9) 원하는 Location이 상세정보를 보고싶으면 해당 Location을 더블클릭하면 상세정보화면이 출력된다. 상세정보화면에서는 종합정보, 실시간 운전정보의 그래프 및 텍스트 출력화면, 과거이력의 그래프 및 텍스트 출력화면, Offline 운전정보의 그래프 및 텍스트 출력화면, 경고 정보화면으로 구성되어있다.
- (10) 상위 단계로의 이동의 편의를 위해서 3단계의 단축이동 버튼도 좌측상단에 구성하였다.
- (11) 이상의 사용자의 작업진행상황은 우측상단의 '진행상태' 창을 통해 출력 및 저장할수있게 구성하였다.

나. 실행화면

- (1) 그림 3-22는 Unit출력화면이다.

server가 해석을 수행하는 Unit의 정보를 나타내며 위험 Component, Location의 정보를 포함한다.

- (2) 그림 3-23은 Component출력화면이다.

위험 Location의 정보를 포함한다.

- (3) 그림 3-24는 Location출력화면이다.

선택된 Location의 정보를 포함하며 출력선택 버튼을 이용하여 원하는 정보를 선택할 수 있다. 또한 좌측 그래프 형식으로도 정보가 출력된다.

- (4) 그림 3. 25는 Location의 상세정보화면중 종합화면이다.

해당 Location의 모든 정보를 출력하는 종합 정보창이다.

- (5) 그림 3. 26은 Location의 상세정보화면중 그래프 화면이다.

해당 Location의 실시간 그래프정보 출력창이다.

- (6) 그림 3. 27은 Location의 상세정보화면중 그래프 이력화면이다.

해당 Location의 임의의 기간동안의 과거 이력을 그래프 형식으로 보여준다.

(7) 그림 3.28은 Location의 상세정보화면중 텍스트 화면이다.
해당 Location의 실시간 텍스트정보 출력창이다.

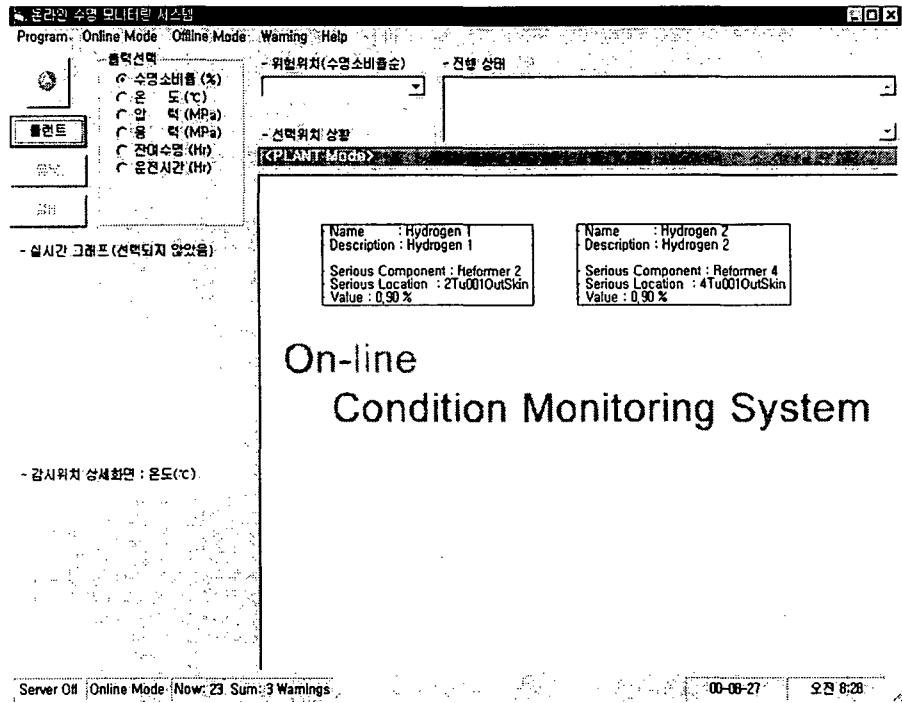


그림 3-22 Client프로그램의 Unit출력화면

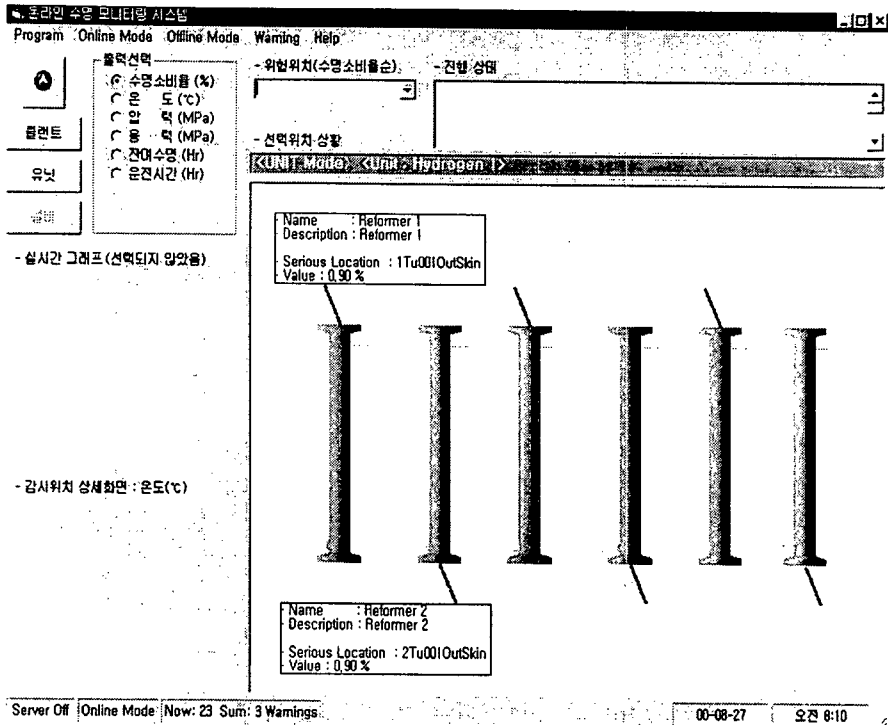


그림 3-23 Client 프로그램의 Component 출력화면

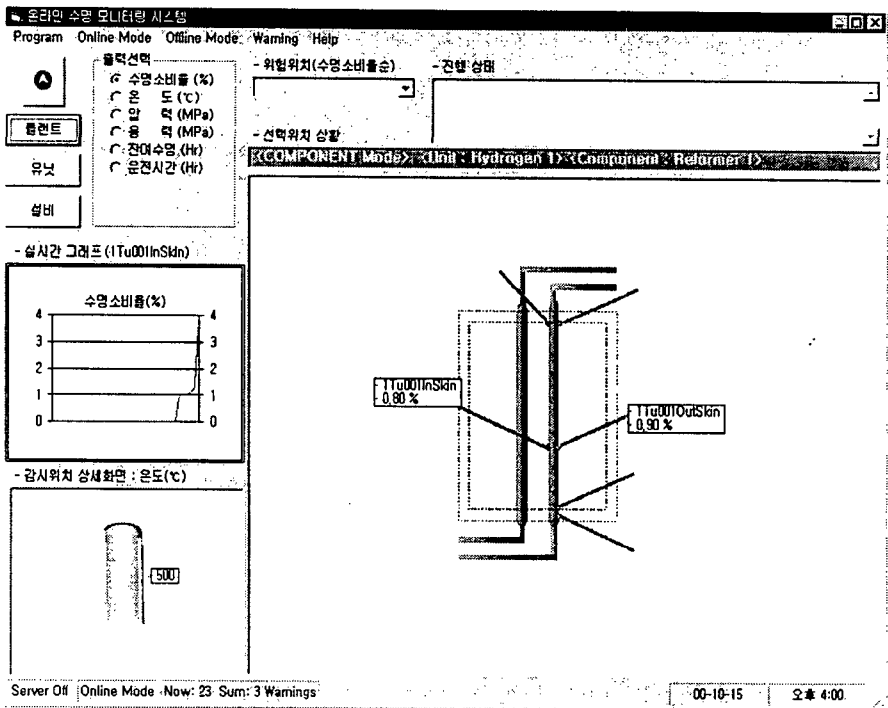


그림 3-24 Client 프로그램의 Location 출력화면

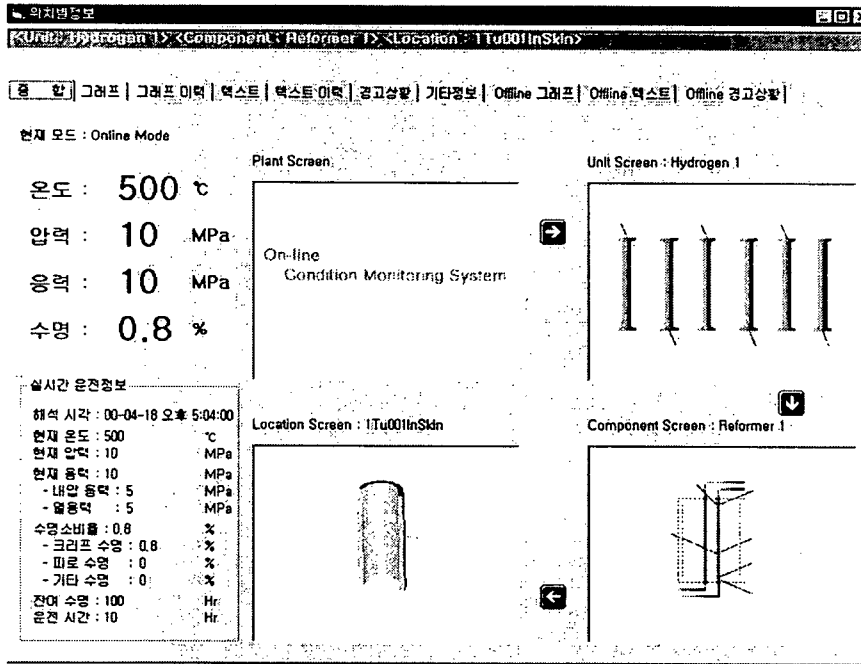


그림 3-25 Client프로그램의 Location 상세정보화면(종합)

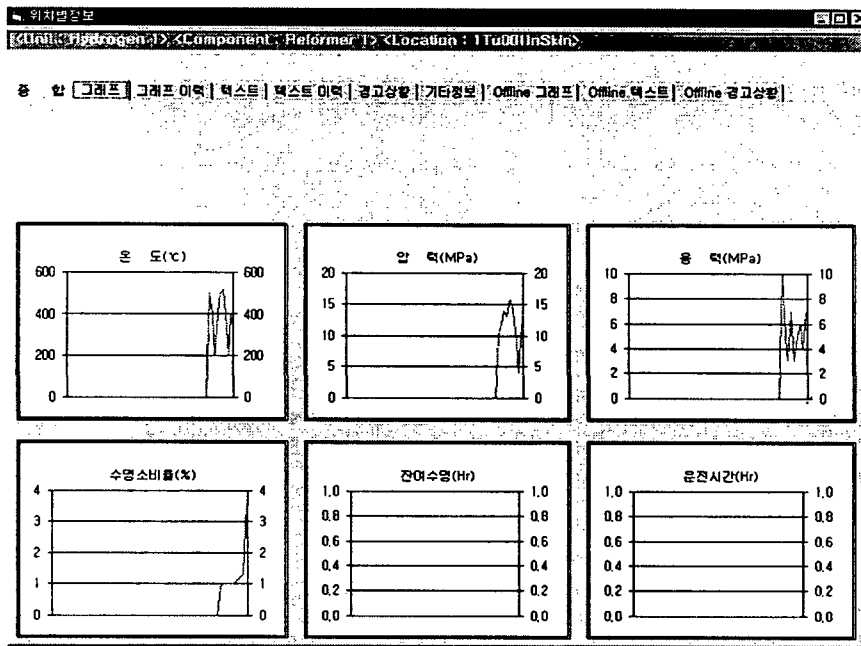


그림 3-26 Client프로그램의 Location 상세정보화면(그래프)

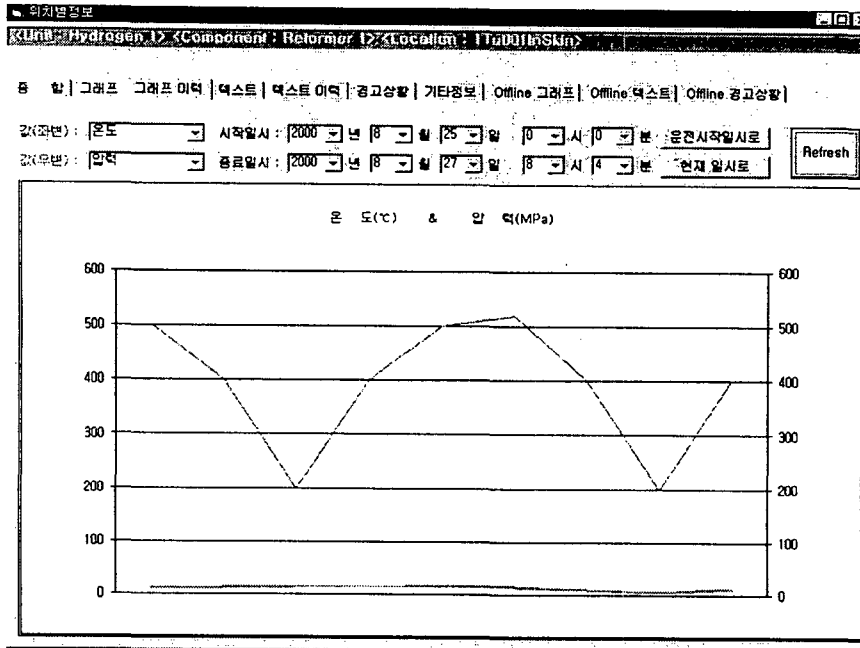


그림 3-27 Client프로그램의 Location 상세정보화면 (그래프 이력)

위치정보

<<Unit: Hydrogen 1> <Component: Reformer 1> <Location: 1Tu001InSidn>

종 합 | 그래프 | 그래프 이력 | 텍스트 | 텍스트 이력 | 경고상황 | 기타정보 | Offline 그래프 | Offline 텍스트 | Offline 경고상황

Current Operating Information (Text Mode)

Data	Unit ID	Comp ID	Loc ID	Temp	Pressure	Stress	Stress/Press	Stress_Th
00-04-18 오후			7	500	10	10		5
0-04-18 오후 5:05:00			7	400	12	5		2
0-04-18 오후 5:06:00			7	200	14	3		3
0-04-18 오후 5:07:00			7	400	13	7		5
0-04-18 오후 5:08:00			7	500	16	3		3
0-04-18 오후 5:09:00			7	520	14	5		3
0-04-18 오후 5:10:00			7	400	9	6		3
0-04-18 오후 5:11:00			7	200	4	4		4
0-04-18 오후 5:12:00			7	400	12	7		3

그림 3-28 Client프로그램의 Location 상세정보화면 (텍스트)

7절 광섬유 음향방출센서 개발

1. 음향방출법(Acoustic Emission: AE)

가. 음향방출법

AE는 재료의 변형 또는 균열의 발생 및 전파시 수반되는 순간적인 에너지 방출에 의해 발생하는 탄성과 또는 이 현상을 이용한 시험방법을 뜻하며, 기존의 비파괴 시험법이 갖는 단점을 보완할 수 있는 새로운 비파괴 시험법의 하나로 각광받고 있다. AE는 신호원이 극히 미세한 비가역적 변형에 기인하며 다른 비파괴 시험법과는 달리 피시험체에 어떤 에너지를 주입하기 위하여 인공적인 환경하에 두어야 할 필요가 없기 때문에 재료 내부의 미시적 변형이나 파괴 거동의 규명에서부터 가동 중에 있는 원자력 발전설비 등의 연속 감시 체제에 이르기까지 매우 다양한 경우에 응용되고 있다.⁽⁴¹⁾

AE는 파동현상의 일종으로 고체내 dislocation의 이동이나 microcrack의 생성 및 성장 등이 대표적인 발생원으로 알려져 있으며, 전자의 경우는 연속형 신호를, 후자의 경우는 돌출형 신호를 발생한다. 그러나 실제 AE의 발생원은 대상재료의 특성에 의해 좌우되며 금속재료의 경우 전술의 두 가지 외에도 twinning이나 grain boundary sliding, 그리고 비금속 개재물과 모재의 decohesion, 상변태, 용융 및 응고, magnetic domain의 이동, 성장 및 소멸 등이 알려져 있다. 표3-9은 AE신호의 진폭에 영향을 미치는 재료의 특성 또는 현상의 종류를 나타낸다.

AE신호의 발생은 재료 내부의 국부적인 스트레인 에너지의 해소 과정에서 자발적으로 발생하기 때문에 예측할 수 없으며 발생이 순간적이기 때문에 잡음 제거가 용이하지 않다. 또한 균열의 발생과 성장 등 우리가 알고 있는 어떤 발생원이라도 언제나 AE를 생성한다는 보장이 없다는 단점이 있다. 이것은 AE가 발생하기 위해서는 국부적으로 형성되었던 에너지가 결함을 형성하는 표면에너지나 열에너지로 전부 소모되지 않고 탄성파의 형태로 일부 방출되어야 하는 까다로운 조건을 만족해야 하기 때문이다.

이러한 단점에도 불구하고 AE법이 새로운 비파괴시험 방법으로 많은 잠재력을 갖는 이유는 다음과 같은 장점이 있기 때문이다. 먼저 AE는 dynamic inspection이 가능하므로 구조물이 응력을 받고 있는 상태에서 결함의 성장에 따른 구조물의 반응을 측정할 수 있는 장점이 있다. 두 번째로 구조물의 가동 중 검사가 가능하고 사용 중단 시간을 최소화할 수 있으며, 재보중 검사가 가능하다. 세 번째로는 접근이 용이하지 못한 위치의 결함 측정 및 미지의 결함을 갖는 구조물의 돌발적 파손을 예측할 수 있다. 이외에도 복수개의 센서를 사용하여 한 번의 시험으로 전체 구조물에 존재하는 결함의 발생여부를 평가할 수 있으며 위치표정(source location)이 가능하다는 장점

표3-9 AE 신호 진폭의 상대적 크기에 영향을 미치는 인자의 분류⁽⁴²⁾

Factors Resulting in Higher Amplitude Signals	Factors Resulting in Lower Amplitude Signals
High Strength	Low strength
High strain rate	Low strain rate
Anisotropy	Isotropy
Nonhomogeneity	Homogeneity
Thick section	Thin section
Twinning materials	Nontwinning materials
Cleavage fracture	Shear deformation
Low temperatures	High temperature
Flawed material	Unflawed material
Martensitic phase transformations	Diffusion controlled transformations
Crack propagation	Plastic deformation
Cast structure	Wrought structure
Large grain size	Small grain size

을 가지고 있다.

나. 음향방출신호원

음향방출신호는 재료의 균열이 진전됨에 따라 균열에 작용하는 하중의 반대 방향으로 반발력이 발생하면서 방출되는데 힘의 평형이 이루어질 때까지 지속적으로 발생된다. 이 과정에서 미세한 균열의 발생은 급작스런 변형 에너지를 유발하고 재료의 기하학적 형상에 따라 다양한 형태의 탄성파를 발생시킨다. 이런 탄성파가 음향방출신호원이 되고 돌발형 신호를 발생시킨다. 그러나 음향방출신호의 발생에 관한 정확한 메카니즘은 밝혀지지 않았고 재료의 형상이나 탄소성 변형에 따른 초음파로 분류되고 있다.

다. 음향방출센서의 종류

음향방출신호는 주로 100kHz ~ 1MHz의 주파수 대역에서 검출되며 10^{-10} ~ $10^{-13}m$ 의 변위를 측정할 수 있는 센서로 측정한다. 음향방출신호를 검출하는 센서⁽⁴³⁾는 전기용량형(capacitative type), 압전형(piezoelectric type) 및 광간섭형(laser interferometric type)이 있는데 전기용량형 센서는 최소 $10^{-11}m$ 까지 측정되며 압전

형 센서는 공진형과 광대역형에 따라 $10^{-12} \sim 10^{-13}m$ 까지 측정된다. 압전형 센서는 부착방식이 용이하고 작은 진폭에도 민감하게 반응하므로 가장 보편적으로 사용되고 있으나 전기 신호를 이용하므로 잡음 유입 가능성이 크고 고온의 환경에 적용하기 어렵다. 공간섭형 음향방출센서는 최소 $10^{-10}m$ 까지 측정되는데 절대 변위를 측정할 수 있고 신호의 왜곡을 최소화할 수 있으므로 센서 보정이나 비교적 큰 변위의 신호 검출에 적용되고 있다.

2. Fabry-Perot interferometer

Fabry-Perot 간섭계는 코어 부분에 부분반사면(semi-reflective surface)을 형성시켜서 반사 또는 투과된 빛의 간섭무늬를 얻게 되며, 게이지 구간을 형성하는 방법에 따라 IFPI(intrinsic Fabry-Perot interferometer)와 EFPI(extrinsic Fabry-Perot interferometer)로 구분된다.

가. EFPI(extrinsic Fabry-Perot interferometer)

EFPI에서는 그림3-1과 같이 광섬유에 입사된 빛이 Fabry-Perot 탐촉자 끝단에서 4%가 반사되도록 하고 나머지 약 96%는 광섬유를 빠져 나와 공공간극(air gap) 중을 통과한 후 다시 다른 쪽 끝단의 단면에서 4%가 반사되도록 한다. 이 반사된 두 빛이 입사된 쪽으로 되돌아 나가면서 광섬유 연계기에서 만나 서로 위상간섭을 일으키게 되며, 이 때 공공간극의 변형량, 즉 두 광경로의 변화 발생량 만큼 위상차를 발생하도록 하여 정현파의 광출력 신호가 발생하도록 구성한다.⁽⁴⁴⁾ EFPI는 공공간극을 형성하기 위해 모세관(hollow tube)이 필요하게 되므로 직경의 불연속성으로 인한 응력집중이 생길 수 있지만 기계적 특성이 좋다는 장점이 있다.

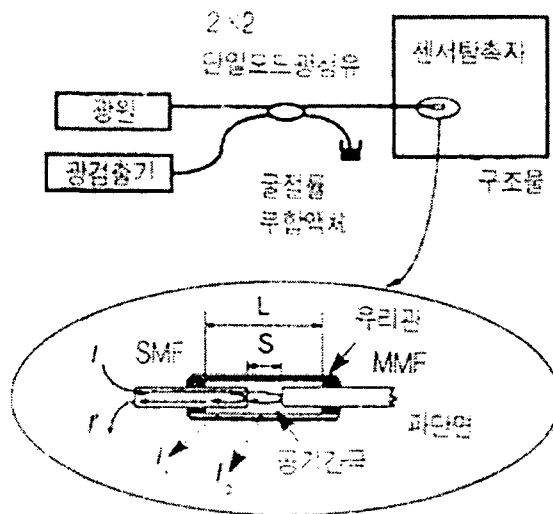


그림 3-29 광섬유 외부 패브리-페롯 센서⁽³⁰⁾

나. IFPI (intrinsic Fabry-Perot interferometer)

IFPI에서는 EFPI와는 달리 광섬유 내부에 부분반사면을 형성하여 Fabry-Perot cavity 역할을 광섬유가 하게 된다. 이런 IFPI는 부분반사면의 용착(splicing)과정에서 센서자체의 기계적 특성이 나빠진다는 단점이 있으나 직경의 연속성으로 인하여 응력집중을 피할 수 있다.

다. Fabry-Perot 간섭계에서의 간섭신호

Fabry-Perot 간섭계는 다중광 간섭계(multiple-beam interferometer)로써 반사된 빛들에 의한 간섭신호는 다음과 같이 정의된다.⁽¹⁸⁾

$$E_R = E_0 r + E_0 t^2 r e^{i\phi} + E_0 t^2 r^3 e^{2i\phi} \dots \quad (3-18)$$

식(3-18)은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$E_R = E_0 r \left(1 + \frac{t^2 e^{i\phi}}{1 - r^2 e^{i\phi}} \right) \quad (3-19)$$

여기서 E_0 는 초기 반사가 일어나기 직전 입사된 빛의 진폭이며, r 과 t 는 각각 반사계수(coefficient of reflection)와 투과계수(coefficient of transmission)이다.

ϕ 는 인접한 두 빛의 위상차(phase difference)로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\phi = 2ks \cos \theta = \frac{4\pi}{\lambda} s \cos \theta = \frac{4\pi}{\lambda_0} ns \cos \theta \quad (3-20)$$

여기서 λ_0 는 진공에서의 빛의 파장이며, s 는 두 반사면간의 거리이고, n 은 빛의 매질의 굴절률로 여기서는 Fabry-Perot cavity를 구성하는 물질의 굴절률에 해당하며, θ 는 빛의 입사각으로 빛이 Fabry-Perot 반사면의 법선과 이루는 각도에 해당한다.

반사된 빛의 세기(intensity)는 다음과 같이 나타난다.

$$I_R = |E_R|^2 = E_R \cdot E_R^* \quad (3-21)$$

여기서 $*$ 는 복소수의 공액(complex conjugate)을 의미하며, 광섬유 코어에 입사되는 빛의 세기를 $I_0 = E_0^2$ 라고 하면 반사되어 나오는 빛의 세기는 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned}
I_R &= I_0 r^2 \left(1 + \frac{t^4 - 2r^2 t^2 + 2t^2 \cos \phi}{1 + r^4 - 2r^2 \cos \phi} \right) \\
&= I_0 R \left(1 + \frac{T^2 - 2RT + 2T \cos \phi}{1 + R^2 - 2R \cos \phi} \right)
\end{aligned}
\tag{3-22}$$

이 때 R 과 T 는 각각 반사율(reflectance)과 투과율(transmittance)을 나타내며 그 관계식은 다음과 같다.

$$R = |r|^2 = r r^* \tag{3-23}$$

$$T = |t|^2 = t t^*$$

한편, 투과된 빛들에 의한 간섭신호는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
E_T &= E_0 t^2 + E_0 t^2 r^2 e^{i\phi} + E_0 t^2 r^4 e^{2i\phi} \dots \\
&= \frac{E_0 t^2}{1 - r^2 e^{i\phi}}
\end{aligned}
\tag{3-24}$$

투과된 빛의 세기 I_T 를 입사된 빛의 세기 $I_0 = E_0^2$ 로 나타내면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
I_T &= E_T \cdot E_T^* = I_0 \left(\frac{t^4}{1 + r^4 - 2r^2 \cos \phi} \right) \\
&= I_0 \left(\frac{T^2}{1 + R^2 - 2R \cos \phi} \right)
\end{aligned}
\tag{3-25}$$

식(3-23)과 식(3-25)에 의하면 반사율이 작을 때는 투과된 빛과 반사된 빛의 간섭 모두 이중광 간섭(two beam interference)과 거의 유사한 정현파 형태로 나타나지만 반사율이 커질수록 상대적으로 신호가 강해지고 sharpness가 증가하여 정현파의 모양에서 어긋나게 된다.

Intrinsic의 경우 광매질이 광섬유가 되므로 식(3-18)과 식(3-23)을 그대로 사용해도 무방하다. 그러나 빛이 광섬유에서 공기층으로 전달되는 과정에서 일정한 각도로 퍼지는 현상이 나타나는 extrinsic의 경우 빛이 공기층으로 전달된 후 반사와 투과되는 과정에서 발생하는 손실을 고려해야만 한다. 이것은 코어와 클래딩의 경계면

에서

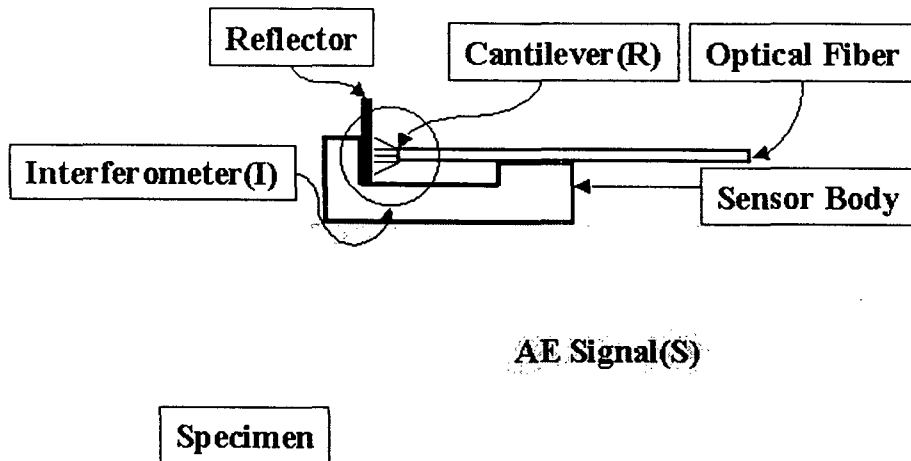


그림3-30 광섬유 음향방출센서의 구성

전반사를 이루기 위한 조건으로 빛의 임계입사각(θ_c)이 결정되며 빛은 광섬유를 통과하여 θ_c 의 각으로 공기층으로 전파되기 때문이다.

3. 음향방출센서 및 신호처리장치의 구성

가. 음향방출센서의 원리

그림3-30는 본 연구에서 개발한 음향방출센서의 원리를 나타낸 것으로서 Fabry-Perot 간섭계와 외팔보의 진동 원리를 이용하여 구성하였으며 기본 원리는 다음과 같다.

시편에서 발생된 음향방출신호는 센서의 본체에 전달되어 광섬유로 구성된 외팔보의 공진을 발생시키고 광섬유로부터 출력되는 빛의 간섭현상을 일으킨다. 광간섭계로부터 출력된 신호는 광섬유를 통해 광검출기(photo-detector)로 전달되어 전기신호로 변환된다. 이 때 음향방출신호의 출력(A)은 음향방출신호원(S), 외팔보의 공진(R) 및 광검출기를 포함한 광간섭계(I)의 컨볼루션 적분으로 표현할 수 있다.⁽⁴²⁾

$$A = S * R * I \quad (3-26)$$

(1) 음향방출신호 모델

음향방출신호는 연필심 부러뜨림(pencil lead fracture; PLF)시험이나 유리모세관 파괴 시험 등을 통해 실험적으로 모사된다. 실제 음향방출신호와 PLF 시험의 차이는 전자는 재료내부에서 방출되고 후자는 재료 표면에서 방출된다는 점이다. PLF 시험은 센서를 보정하거나 모의실험을 수행하기에 간편하므로 센서를 개발하는데 활용되고 있다. 이와 같은 PLF 시험의 수학적 모델은 보통 반주기의 정현파 형태나 펄스파로 가정되는데⁽⁴³⁾ 본 연구에서는 펄스파로 가정하였다. 음향방출신호를 펄스파로 가정할 수 있는 것은 실제 재료의 탄소성 변형시 방출되는 첫 번째 파형만 원신호와 관련된

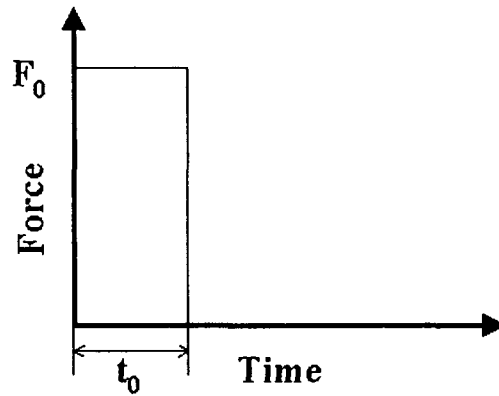


그림3-32 음향방출신호원

것이고 그 후에 검출되는 신호는 시편의 형상이나 압전 센서의 공진 현상과 관련되기 때문이다. Caloran 등⁽²⁶⁾의 실험에서도 광간섭계를 이용하여 음향방출신호를 측정하였는데 압전 센서에서 유발되는 공진현상이 배제되었으므로 단순한 돌발형의 파형이 측정되었다. 본 연구에서는 음향방출신호를 그림3-3과 같은 펄스파로 가정하였다.

(2) 광섬유로 구성된 외팔보의 공진

그림3-30에서 센서 본체에 전달된 음향방출신호는 광섬유로 구성된 외팔보의 공진을 발생시키고 광간섭이 발생하는데 이 때 공진 주파수는 외팔보의 길이와 광섬유의 물리적 성질로 결정된다. 이와 같은 공진 특성은 잡음을 제거하고 특정 주파수만을 여과하는 필터 기능을 포함하는데 압전형 음향방출센서는 고주파수인 음향방출신호에 민감하게 반응하고 저주파 대역의 외부 잡음을 감소시키는 필터 기능을 갖고 있다.

그림3-32는 음향방출센서의 진동 모델로서 음향방출신호가 센서 본체를 통해 광섬유에 전달되는 과정을 단순화하여 구성하였다. 이 때 등가 질량(M_{eq})과 등가 탄성계수(k_{eq})는 외팔보의 질량(m), 길이(l), 탄성계수(E), 광섬유 단면의 관성 모멘트(I)를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽⁴⁵⁾⁽⁴⁶⁾

$$M_{eq} = 0.23m = 0.18\rho l d^2$$

$$k_{eq} = \frac{3EI}{l^3} = \frac{0.15\rho d^4 v^2}{l^3}$$
(3-27)

여기서, ρ 는 광섬유의 밀도, d 는 광섬유의 직경, v 는 광섬유에서의 음속을 나타낸다.

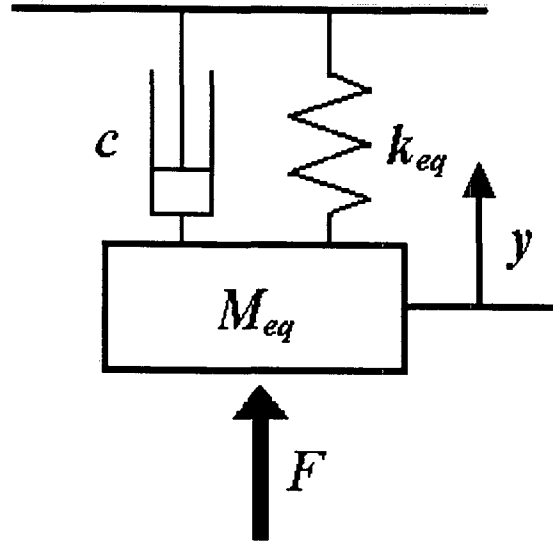


그림3-32 광섬유 음향방출센서의 수학적 모델

이 때 공진 주파수(ω_n)는 M_{eq} 와 k_{eq} 를 이용하여 산출할 수 있으며 다음과 같다.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_{eq}}{M_{eq}}} \quad (3-28)$$

식(3-28)에 광섬유의 음속($5200m/s$)⁽⁴⁶⁾, 밀도($2340kg/m^3$), 직경($125\mu m$)을 대입하고 외팔보의 길이를 $2\sim 10mm$ 까지 증가시켜보면 공진 주파수는 $23.3kHz$ 에서 $0.9kHz$ 까지 감소된다. 감쇠계를 고려하더라도 외팔보의 고유 진동수 대역은 크게 변화하지 않으므로 센서는 대략 $1\sim 10kHz$ 의 공진 주파수를 갖는다.

또한 그림3-32의 진동 모델에 그림3-3과 같은 펄스파형이 입력될 때 변위(y)는 다음과 같다.⁽⁴⁵⁾

$$y(t) = \frac{F_0 e^{-\xi \omega_n t}}{k_{eq} \sqrt{1 - \xi^2}} [-\cos(\omega_d t - \psi) + e^{\xi \omega_n t_0} \cos\{\omega_d(t - t_0) - \psi\}] \quad (3-29)$$

$$\text{where, } \psi = \tan^{-1}\left(\frac{\xi}{\sqrt{1 - \xi^2}}\right)$$

여기서, k_{eq} 는 등가 탄성계수, ω_d 는 감쇠고유진동수(frequency of damped vibration), ξ 는 감쇠비(damping ratio), t 는 시간을 나타낸다.

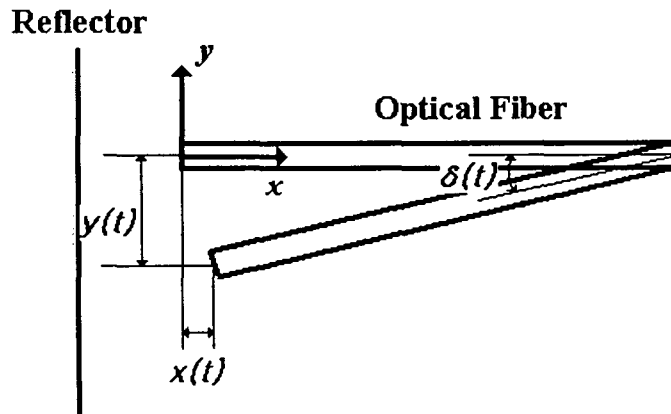


그림3-33 광섬유 외팔보의 변위

(3) 외팔보의 응답

식(3-29)는 음향방출신호에 대한 외팔보의 수직 변위이므로 실제로 공간섭을 발생시키는 수평 변위로 환산해야 한다. 그림3-33는 광섬유로 구성된 외팔보의 끝 부분을 단순화시켜 확대한 것으로 y , x 는 각각 외팔보의 수직 변위와 수평 변위를 나타낸다. 수직 변위와 수평 변위의 관계는 $\theta(t)$ 의 값이 미소하면 $\sin \theta \approx \theta$, $\tan \theta \approx \theta$ 이므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x(t) = \frac{y(t)^2}{l} \quad (3-30)$$

이 때 y 의 변위가 매우 작다고 가정하면 y 에 대한 x 의 변위를 선형적으로 가정할 수 있으므로 상수 C_1 을 이용하여 수직변위 y 를 수평변위 x 로 환산할 수 있다. 이 때 외팔보의 응답은 다음과 같다.

$$S * R = x(t) = C_1 y(t) \quad (3-31)$$

(4) 공간섭 센서

그림3-34은 음향방출센서에서 빛의 반사를 이용한 간섭이 발생하는 부분만을 확대해 놓은 것으로서 그림에 설명된 바와 같이 광섬유에서 출력된 빛은 광섬유 단면을 통과하여 반사면에서 간섭을 일으킨다. 공기층에서 빛의 손실을 고려하면 반사된 에너지(E_R)는 다음과 같다. ⁽¹⁸⁾

$$E_R = E_0 r_1 + E_0 t^2 a \sum_{\beta=1}^{\infty} r_1^{\beta-1} r_2^{\beta} e^{(2\beta-1)in} \frac{a}{a + (2\beta-1)h} \quad (3-32)$$

($\beta = 1, 2, 3, \dots, \infty$)

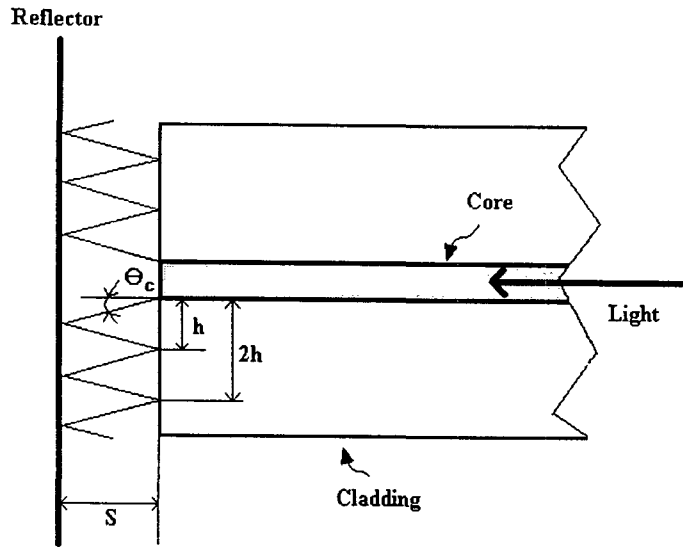


그림3-34 광섬유 끝단의 패브리-패롯 간섭계

여기서 E_0 는 광원의 에너지, r_1 은 광섬유의 반사 계수, r_2 는 반사면의 반사 계수, a 는 광섬유 코어의 반경, η 는 빛의 위상차, h 는 임계각(θ_c)과 갭간극(s)으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$h = 2s \cdot \tan \theta_c \quad (3-33)$$

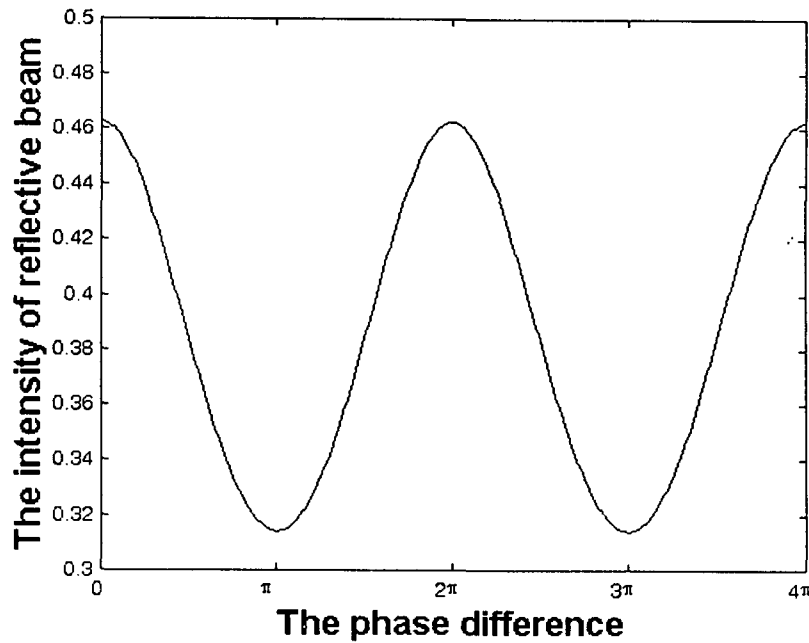


그림3-35 패브리-패롯 간섭계에서의 위상차에 따른 간섭 무늬

그림3-35은 식(3-32)에 광섬유의 반사계수 0.05, 반사면의 반사계수 0.95를 대입한 결과로서 변위가 파장을 움직일 때마다 반복되는 파형이 나타난다. 이때 광섬유의 길이를 미세조절하여 η 를 $1/2\pi$ 되는 곳에 고정하고 위상차가 충분히 작은 범위에서 움직인다고 가정하면 반사된 에너지는 다음과 같다.

$$\Delta E_r = C_2 \cdot \Delta\eta \quad (3-34)$$

여기서 C_2 는 상수이다.

또한 EFPI 센서의 위상차는 외팔보의 수평 변위에 의해 다음 식과 같이 결정된다.⁽⁹⁾

$$\Delta\eta = \frac{4n\pi}{\lambda_0} \cos \theta_c \Delta x(t) \quad (3-35)$$

여기서 n 은 공기의 굴절률로 1이고, λ_0 는 광원의 파장이다.

또한 식(3-35)의 우변에서 $\Delta x(t)$ 를 제외하고는 모두 상수이므로 $\Delta x(t)$ 를 제외한 나머지 상수를 C_3 로 가정하면 식(3-34)과 식(3-35)에서 다음 식이 성립한다.

$$\Delta E_r = C_2 C_3 \Delta x(t) \quad (3-36)$$

따라서 식(3-26)의 공간섭계(I)는 상수 C_2, C_3 로 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 실험을 통해 위상차를 조절함으로써 선형적인 특성을 나타내도록 센서를 구성하였다.

(5) 음향방출센서의 응답

직사각펄스 하중이 광섬유에 전달되고 광섬유로 구성된 외팔보의 공진으로 인하여 간섭이 발생할 때 감쇠계를 고려한 응답은 식(3-26), 식(3-31), 및 식(3-36)를 이용하여 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$A(t) = \frac{C^* F_0 e^{-\xi \omega_n t}}{Lk\sqrt{1-\xi^2}} [-\cos(\omega_d t - \phi) + e^{\xi \omega_n t_0} \cos\{\omega_d(t - t_0) - \phi\}] \quad (3.37)$$

여기서, C^* 는 상수이다.

나. 음향방출센서의 구성

본 연구에서 개발한 음향방출센서는 앞서 언급한 바와 같이 Fabry-Perot 간섭계를 이용하여 EFPI 센서로 구성하였다.

센서 구성에는 800nm에서 사용하는 단일모드 광섬유를 사용하였으며 그 물성치는

표3-10 광섬유 제원

	Property
Mode Type	Single Mode
Density	2340 kg/m^3
N. A. (Numerical Aperture)	0.12
Core Diameter	5 μm
Cladding Diameter	125 μm

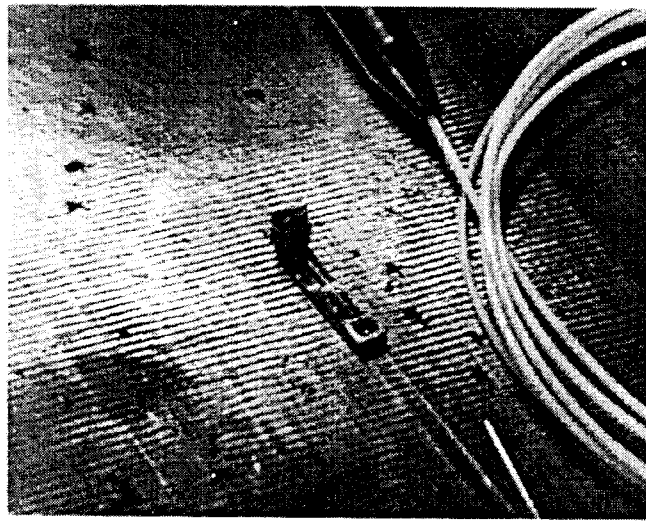


그림3-36 광섬유 음향방출센서

표3-10와 같다. 광섬유로 구성된 외팔보의 길이는 9.4mm, 감쇠고유진동수(ω_d)는 1.06kHz이었다. 반사면과 광섬유 끝단의 간격은 초기위치가 선형성을 나타내는 구간 중심에 최대한 근접하도록 미세 조정 후 에폭시로 완전히 고정시켰다. 또한 간섭계를 구성하는 반사면은 금박 코팅된 금속판을 이용하여 반사계수를 높였다. 반사면과 광섬유의 각도는 광섬유 외팔보의 처짐을 이용하여 90° 보다 작은 각을 이루도록 조절하였다. 이와 같이 조절하여 출력 전압 값이 미소 변위에 대해 선형적인 값을 갖도록 제작하였다.

또한 음향방출센서의 몸체는 시편과 같은 재질의 재료를 사용하여 임피던스가 같게 하고 몸체의 크기를 작게 구성하여 신호 감쇠를 줄였다. 그림3-36은 본 연구에서 개발한 음향방출센서의 사진을 나타낸다.

다. 신호처리장치의 구성

본 연구에서는 음향방출법을 상시감시 시스템에 적용하기 위해 필요한 파라미터를

선정하고 그에 적합한 신호처리장치를 구성하였다. 압전센서를 이용한 일반적인 음향방출신호의 측정은 100kHz~1MHz 영역의 주파수 대역에서 신호를 측정하지만 개발된 센서는 센서의 특성상 수 kHz의 주파수 영역에서 음향방출신호가 측정되므로 특성을 살릴 수 있는 파라미터를 선정하고 신호처리장치를 구성하였다.

(1) rms 에너지

음향방출법은 재료 또는 구조의 특성이나 현상을 규명하기 위해서 사용되므로 재료 내의 일정한 거리를 통과한 파동을 측정하고 분석하여야 하며, 이 때 가장 기본이 되는 파형인자는 주파수와 진폭이다. 음향방출파형의 매개 변수로는 event, count, 에너지, 진폭, 지속 시간, 상승 시간, 쇠퇴 시간 등이 있다. 음향방출수(event number)를 측정하는 방법으로는 크게 주어진 문턱값(threshold level)이상의 진폭을 가지는 파의 갯수를 세는 ring down count법과 주어진 문턱값(threshold level)이상의 파에 내접하는 4각형의 면적의 합을 나타내는 펄스 면적 측정법이 있다. 음향방출 에너지는 음향방출 파형 아래의 면적을 뜻하며 다음 식과 같이 정의된다.

$$U = \int_{t_1}^{t_2} V^2(t) dt \tag{3-38}$$

여기서 U 는 시간 t_1 에서 t_2 까지의 에너지이며 V 는 시간 t 에 대한 파의 진폭이다. 에너지의 평균값 개념을 가진 rms전압 V_{rms} 는 식(3-39)와 같이 정의되며 rms전압은 파형의 아래 부분의 면적의 합을 나타낸다.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\Delta t} \int_{t_1}^{t_2} V^2(t) dt} \tag{3-39}$$

rms전압은 데이터량이 적고 신호처리가 간단하며 균열 성장을 측정하는데 용이하여 음향방출법을 상시감시 시스템에 적용하는데 최적의 파라미터로 판단되어 본 연구에서는 음향방출신호를 측정하는데 rms전압을 이용하였다. 본 연구에서는 센서를 통하여 측정된 음향방출신호 전압을 rms 전압으로 변환하기 위해 rms미터를 제작하였고 이 rms미터를 이용하여 rms전압을 측정하였다. 제작된 rms 미터는 함수 발생기의 정현파를 이용하여 검증하였는데 정현파 진폭의 rms 전압 값이 0.707배를 갖도록 제작하였다.

(2) 신호처리장치

본 연구에서는 중화학 플랜트설비 상시감시 시스템 구축에 필요한 신호처리장치를 구성하기 위해 개발된 센서를 통해 측정된 rms전압을 PC가 인식할 수 있는 디지털 신호로 변환시키는 A/D converter, 증폭기(amplifier) 및 여파기(filter)를 제작하였

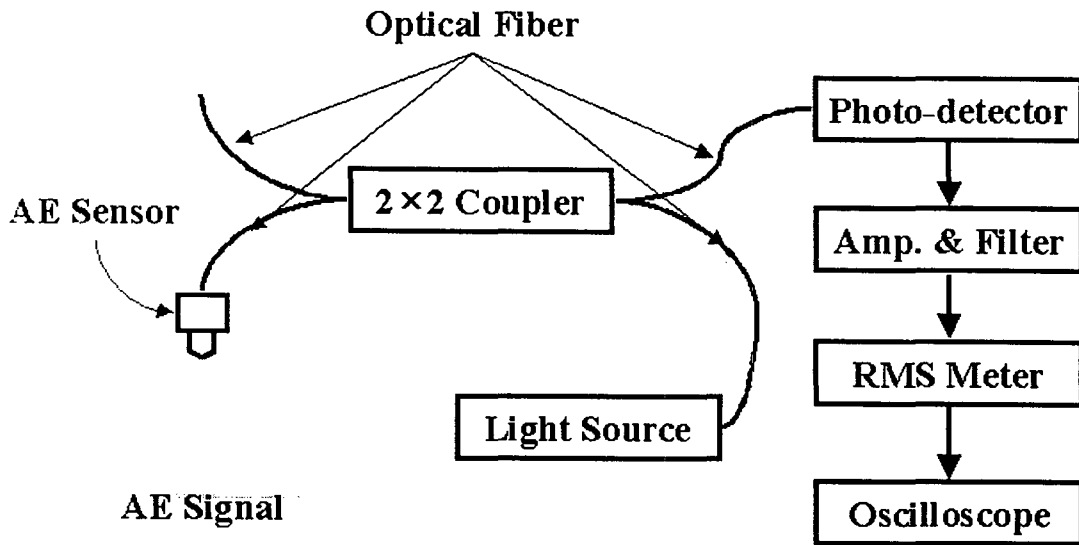


그림3-37 광섬유 음향방출센서 시스템

다. A/D converter는 최대 샘플링 주파수는 200kHz이고 Turbo C++를 이용하여 제어된다. 증폭기는 rms전압의 교류 성분만을 측정하므로 op-amp를 사용하여 최대 80dB 증폭이 가능한 반전증폭회로를 구성하였다. 또한 여파기는 광섬유로 구성된 외팔보의 고유진동수로 설계된 수동 여파기와 능동 여파기를 제작하여 사용하였다.

본 연구에서 측정된 rms신호는 수동여파기를 거치고 증폭기를 통해 증폭된 후 다시 능동 여파기를 통과한 후 다시 한 번 증폭과 여파를 반복한 후 PC나 오실로스코프를 통하여 측정하였다.

4. 실험장치 및 실험방법

가. 실험장치

그림3-37는 개발한 음향방출센서 실험장치의 개략도로서 센서부와 신호 처리부로 구성된다.

음향방출센서부 구성에 사용된 광원은 최대 출력이 1.5 mW, 파장이 635 nm이고 전송 손실을 줄이기 위해 pigtailed 된 레이저 다이오드를 이용하였다. 이렇게 입사된 빛은 3 dB의 연결손실을 갖는 양방향 연계기(2x2 coupler)를 통해 1:1로 분할하였다. 분할된 두 경로 중 한 쪽은 센서와 연결되고 나머지 한 쪽은 파단(breakage)시켜 재반사되는 빛이 없도록 하였다. 간섭계를 거친 빛은 다시 양방향 연계기를 거쳐 통신용 포토디텍터를 통해 전류 신호로 변환된다.

신호 처리부는 포토디텍터를 통해 전류로 인식된 신호를 저항을 통하여 전압으로 변환하고 증폭회로를 통하여 십만 배 증폭시킨 후 광섬유 외팔보의 공진 주파수로 설계된 대역형 여파기(bandpass filter)로 필터링하였다. 이 음향방출신호는 제작된 rms(root mean square) to dc converter를 통하여 rms 에너지로 변환되고 이 변환된

rms 전압을 오실로스코프 또는 A/D converter를 통해 PC로 검출하였다.

나. 실험방법

본 연구에서는 개발된 음향방출센서를 검증하고 중화학 플랜트설비 상시감시 시스템 적용 가능성을 검토하기 위해 PLF 시험과 인장시험을 수행하였다.

(1) PLF 시험

광섬유센서의 성능을 시험하기 위하여 PLF 시험을 수행하였다. PLF 시험은 지름이 0.5mm인 샤프심을 이용하여 수행하였는데, 센서를 200×200×10mm의 철판 위에 커플러를 이용하여 고정시켰다. 광섬유센서 외에 압전형 음향방출센서(0.1~1MHz : 광대역형)를 부착하고 100배 증폭시킨 후 필터링하여 두 신호를 비교하였다.

(2) 인장 시험

본 연구에서는 재료의 탄소성 변형시 발생하는 음향방출신호와 균열 성장시 발생하는 음향방출신호를 측정하기 위해 인장 시험을 수행하였다.

인장 시편의 재료는 폭 3mm, 너비 20mm의 SM45C강이고 초기 균열의 발생위치를 고정하고 균열의 성장을 확인하기 위해 실톱을 이용하여 길이 2mm의 노치를 만들었다. 광섬유센서는 노치에서 30mm 떨어진 곳에 커플러와 클립을 이용하여 부착하였고 시험기를 정지시킨 상태에서 주변 잡음을 측정하였다. 인장 시험시 인장 하중과 음향방출신호의 rms전압을 오실로스코프로 측정하였고 인장 시험의 속도는 4mm/min이었으며 rms전압을 측정하는 샘플링 주파수는 250Hz이었다.

인장 시험시 측정된 rms 전압이 음향방출신호임을 확인하기 위해 PZT 센서를 부착하여 신호를 비교해 보았으며 Kaiser effect가 나타나는지를 확인하였다. 본 연구에서는 Kaiser effect를 확인하기 위해 인장 시험 중 탄소성 영역에서 갑자기 하중을 제거하고 다시 하중을 증가시키면서 음향방출신호를 측정하였다.

5. 실험결과

가. PLF 시험

그림3-38(a), (b), (c)는 각각 광섬유센서, 압전센서 및 이론해의 측정결과를 나타낸다. 그림3-39(a), (b), (c)는 각각 광섬유센서, 압전센서 및 이론해의 주파수 분석 결과로서, 그림3-11(a)에 나타난 바와 같이 광섬유센서의 기본 진동수인 1.06kHz에서 첨두치가 검출되었으며, 광섬유로 구성된 외팔보의 특성상 기본 진동수의 3배인 3.1kHz에서 첨두치가 검출되었다. 또한 740Hz의 판파가 발생되었는데 이것은 그림 3-39(b)에서 압전센서로 측정된 결과와 일치한다. 또한 그림3-39(c)에 도시한 이론해의 주파수는 1.06kHz로 광섬유 외팔보의 기본 모드를 나타낸다. 광섬유로 측정된 신호는 압전센서로 측정된 결과와 일치하였으며 수 kHz의 진동을 잘 나타내었다. 광섬유센서로 측정된 신호의 740Hz의 진폭이 4.9dB이고 압전센서로 측정된 신호의 740Hz의 진

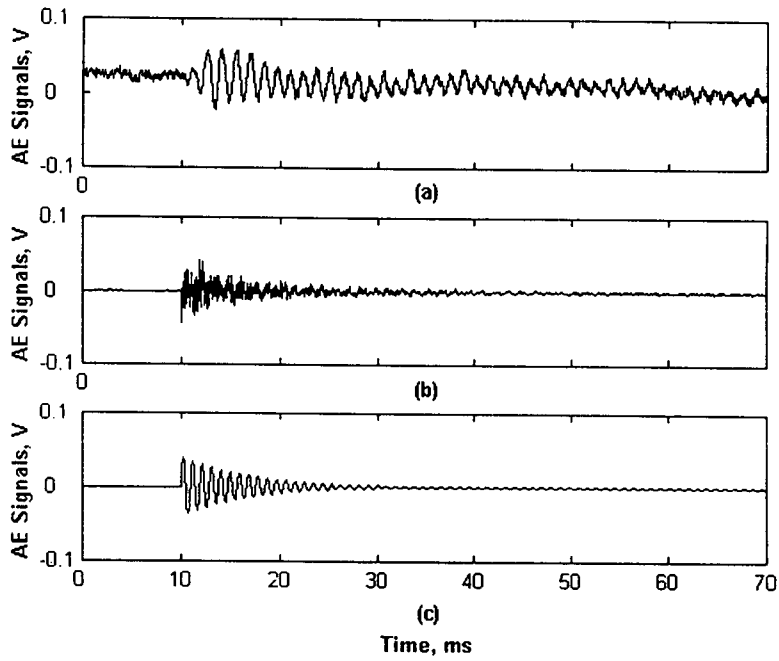


그림3-39 PLF 시험시 측정된 신호 결과

- (a) 광섬유센서 결과
- (b) 압전센서 결과
- (c) 수치적해석 결과

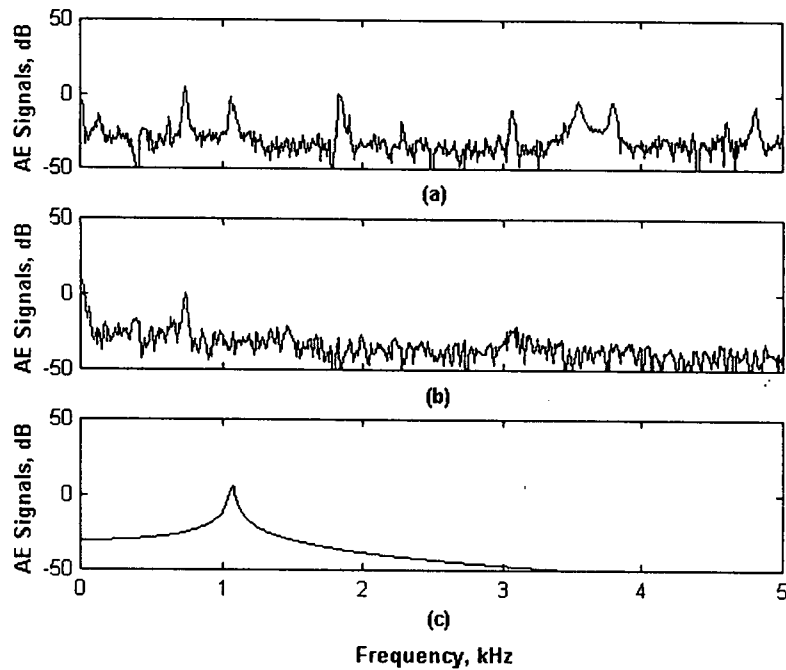


그림3-39 PLF 시험시 측정된 신호의 주파수 분석 결과

- (a) 광섬유센서 결과
- (b) 압전센서 결과
- (c) 수치적해석 결과

폭이 0.6dB로 나타났는데 광섬유센서로 측정된 신호가 40dB 증폭되었음을 감안하면 약 35dB 정도 민감도가 떨어졌다. 이와 같이 민감도가 떨어지는 것은 증폭률을 높임으로서 보완할 수 있는데 압전센서로 측정된 신호가 잡음을 고려하여 최대 60dB까지 증폭할 수 있는 반면 광섬유센서로 측정된 신호는 기본 모드의 주파수만 통과시키는 공진형 필터를 사용하므로 최대 100dB까지 증폭할 수 있다. 따라서 이와 같은 공진 특성을 이용하면 압전센서에 비해 낮은 민감도를 보완할 수 있다.

나. 인장 시험

인장 시험을 수행하기 전에 인장 시험기의 유압 장치나 기타 소음으로 인한 잡음은 rms 전압계를 이용하여 측정된 결과 400mV이었다.

그림3-40은 인장 시험시 하중과 광섬유센서로 측정된 rms 전압 변화를 나타낸 것이다. 인장 시험을 시작하여 탄성 구간을 지날 때 미약한 음향방출신호가 검출되었으며 약 40초 부근에서 약간 높은 진폭의 신호가 검출되기 시작하여 약 110초에 이르렀을 때 노치를 낸 부분이 급격히 늘어나면서 3V 이상의 rms 전압이 검출되었다.

그림3-41은 광섬유센서의 민감도를 확인하기 위해 압전센서를 기준으로 인장 시험시 방출되는 음향방출신호를 오실로스코프를 통해 측정된 결과를 나타낸다. 샘플링 주파수가 너무 낮아 압전센서를 측정된 결과가 잘 보이지 않지만 트리거 레벨을 압전센서를 기준으로 설정하여 측정된 결과이므로 압전센서의 신호 검출과 동시에 광섬유센서에서도 신호가 측정됨을 알 수 있다.

그림3-42는 광섬유센서에서 측정된 신호가 음향방출신호인지 확인하기 위해 카이

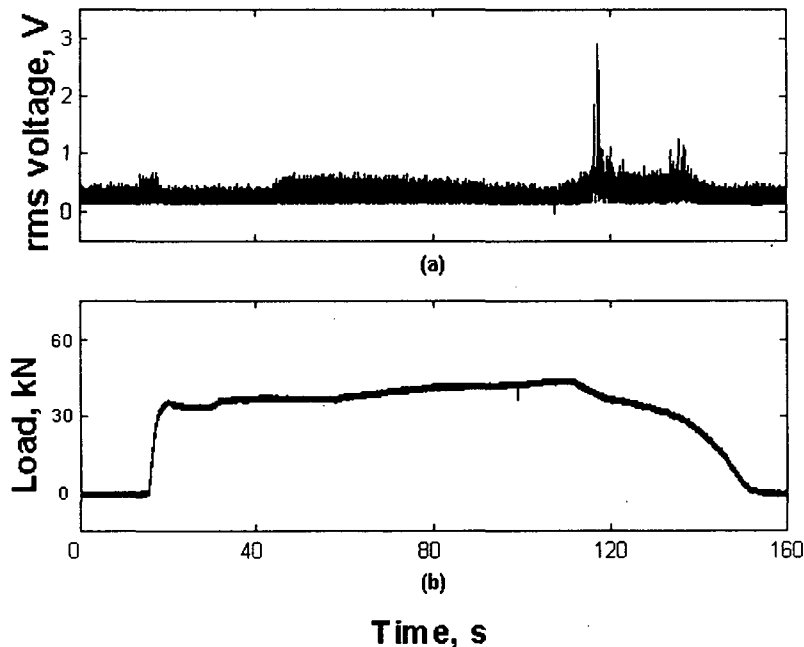


그림3-40 인장시험시 하중변화에 따른 음향방출신호 변화

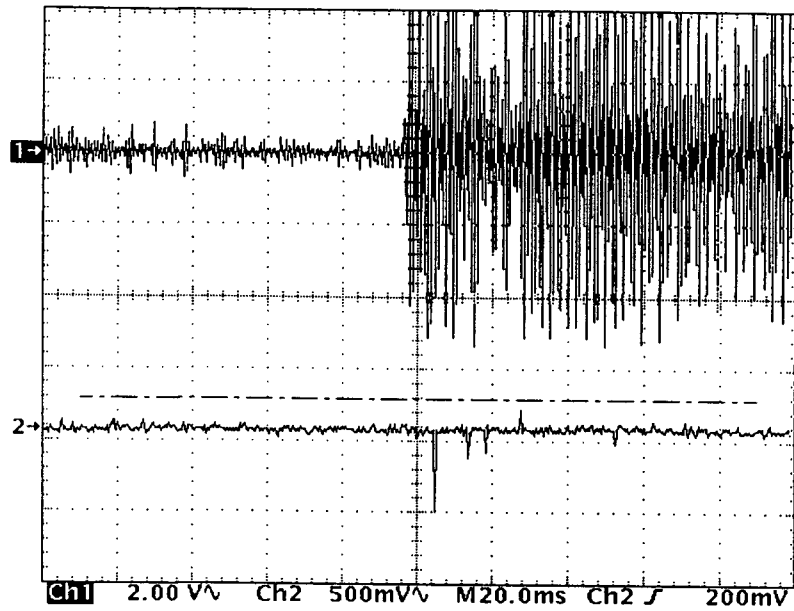


그림3-42 인장시험시 압전센서와 광섬유센서의 측정 결과

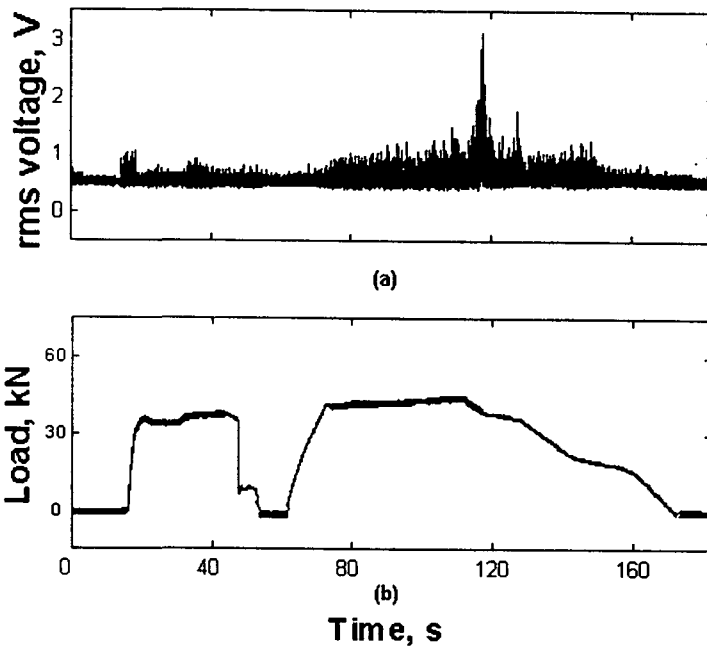


그림3-42 카이저 효과 확인을 위한 인장시험 결과

저 효과를 확인한 결과이다. 하중이 3.5ton에서 감소된 시점부터 음향방출신호는 발생하지 않았으며 하중이 3.5ton으로 다시 복원된 후부터 음향방출신호가 검출되어 노치의 균열이 증가하는 부분에서 높은 진폭의 신호가 출력되었다.

다. 실험결과와 고찰

본 연구에서 개발한 음향방출센서는 광섬유 외팔보의 공진원리를 이용함으로써 수 kHz의 저주파 대역의 음향방출신호를 검출하였다. 이와 같은 저주파 신호는 시편의 기하학적 형상에 따라 결정되며 이러한 저주파 신호를 처리함으로써 고주파의 전기 잡음을 감소시킬 수 있고 증폭기와 여파기의 사용이 용이하며 신호를 저장할 때 샘플링 주파수를 낮출 수 있다는 장점이 있다. 또한 저주파인 기계잡음은 공진형 필터를 사용함으로써 감소시킬 수 있으며 기계 잡음이 광섬유 외팔보의 공진 주파수와 일치할 경우 광섬유 외팔보의 길이를 조절하여 설치환경에 적합한 센서를 구성할 수 있다.

인장시험시 압전형 센서로 음향방출신호를 측정하면 항복강도를 기준으로 높은 그 이상의 응력 하에서 rms 전압이 검출되는데(7) 본 연구의 실험결과에서는 인장강도 부근에서 가장 높은 rms 전압이 검출되었다. 인장시험시 음향방출신호는 탄성구간에서는 거의 검출되지 않으며 주로 탄소성 영역에서 발생한다. 탄소성 변형 초기에는 전위의 이동에 따른 연속형 신호가 발생하고 가공 경화가 시작되면서 돌발형의 신호가 발생한다. 본 연구에서 개발한 광섬유센서는 공진형 센서로서 돌발형 신호에 민감하게 반응하므로 압전센서로 측정한 음향방출신호와 달리 인장강도 부근에서 가장 높은 민감도를 나타낸 것으로 판단된다.

압전형 센서는 고주파 대역의 신호를 민감하게 검출할 수 있으므로 재료의 특성 연구에 적용하기 용이하다. 그러나 현장에서 사용하기에는 잡음 제거나 신호 전송의 효율성이 낮다는 단점이 있다. 본 연구에서 개발한 광섬유센서는 공진형 센서로서 재료의 변형과 관련된 주파수 대역별 특성을 분석하기는 어려우나 균열의 성장을 감시하기 용이하고 재료의 전반적인 특성 변화를 검출할 수 있다. 따라서 재료 연구나 현장 적용시 압전센서와 광섬유센서를 상보적으로 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 신호의 원거리 전송에 효율적이고 상시감시 시스템에 적합한 음향방출센서를 구성하였다. 음향방출센서는 광섬유 외팔보의 공진과 광간섭계를 이용하여 구성하였다. 개발된 센서는 광섬유 외팔보의 공진을 이용하여 수백 kHz의 음향방출신호를 수 kHz의 저주파신호로 변환하였으며, 광섬유를 이용한 신호의 장거리 전송이 가능하도록 설계하였다.

PLF 시험 결과 공진형 압전센서 보다 약 35dB 정도 낮은 민감도를 나타냈으나, 공진형 센서의 특성상 100dB 이상 신호를 증폭하여 압전센서와 비슷한 민감도를 유지했다. 인장 시험 결과 개발된 음향방출센서는 탄소성 구간보다 균열 증가시 민감하게 반응하였으며 카이저 효과도 잘 나타내었다. 향후 센서의 민감도와 내구성을 향상시키기 위한 연구가 필요하며 센서 부착 방식을 개선하기 위한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

8절 광섬유 변형률센서 개발

변형률은 설비의 건전성평가를 위한 가장 기본적인 물리량이며 구조물의 이상상태를 파악하는데 매우 유용한 값으로 실제 측정시 주로 전기저항식 스트레인 게이지를 이용하여 측정한다. 전기저항식 스트레인 게이지는 변형률을 정량적으로 측정하는 센서로서 가장 보편적으로 사용되고 있으나 고온환경에 적용하기 까다롭고, 스트레인 게이지와 측정장치 사이의 거리가 수 백미터 이상인 경우에는 적용하기 어려운 단점이 있다. 이와 같이 센서와 신호처리 장치의 거리가 길 때 사용되는 방법으로 광섬유센서가 있다. 광섬유는 단일모드 섬유인 경우 신호감쇠가 0.01dB/km 로서 수 km인 경우에도 큰 감쇠없이 전송될 뿐 만 아니라 전송 중에 전자기 잡음의 유입을 차단할 수 있고 내구성이 높아 차세대 센서 기술로 각광받고 있다. 특히 스트레인 게이지를 적용하기 어려운 고온에서 사용할 수 있는 잠재력이 있으므로 광섬유를 이용한 다양한 변형률 측정방안이 제시되고 있다.

변형률센서를 상시감시 시스템에 적용하기 위해서는 센서의 민감도나 변형률의 정량화 뿐만 아니라 원거리 측정능력과 부착의 용이성 및 경제성이 매우 중요한 현안이다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 부착방식이 용이하고 기존의 광강도형 센서보다 형태가 단순하며 경제성 있는 광섬유 변형률센서를 개발하였다. 광섬유 변형률센서는 기존 광강도형 센서의 최대 문제점인 정렬문제를 해결하기 위해 센서부위의 광섬유 끝단을 파단시키지 않고 매크로벤딩을 이용하여 구성하였다.

1. 광섬유 변형률센서의 원리

가. 빛의 전파

(1) 광섬유 구조

일반적으로 광섬유는 주구조인 코어(core)와 클래딩(cladding), 그리고 코어와 클

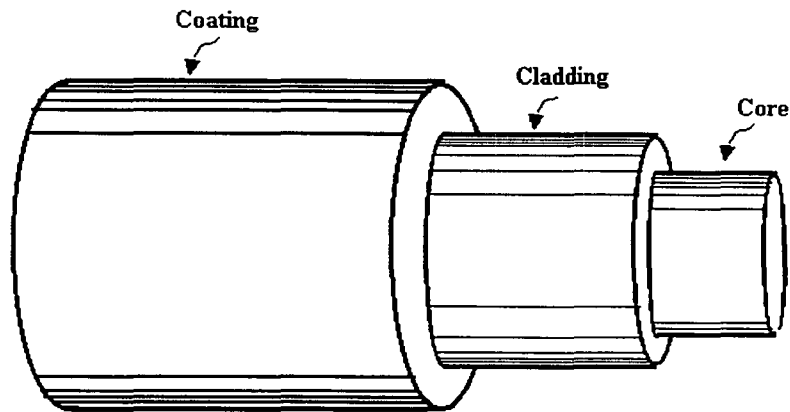


그림3-43 광섬유 구조

래딩을 보호하기 위한 코팅(coating or buffer)의 세 부분으로 구성되어 있으며 그림 3-43는 광섬유의 구성을 나타낸다. 광섬유에 입사된 빛은 주성분이 유리인 코어와 클래딩의 경계면에서의 굴절률 차이에 의해 반사가 이루어지며 전파되고, 특히 경계면에서 전반사가 이루어질 때 빛의 손실이 가장 적어진다.

(2) 전반사

그림3-44은 전형적인 계단형 굴절률 분포의 광섬유와 두 광선의 전파를 나타내고 있다. 두 개의 광선 중에서 직선이 점선보다 작은 각도로 입사되고 공기와 코어 사이의 A 점면에서 굴절이 발생하고 광선은 중심축에 가까운 작은 각도로 진행한다. 즉 $\theta_{L2} > \theta_{L1}$ 이면 광선은 코어와 클래딩 접면인 B점으로 가서 굴절한 후 휘어져 클래딩에서 진행한다. 마지막에는 클래딩과 공기의 경계면인 점 C에서 휘어져 공기 밖으로 진행한다. 이 광선은 광섬유 내로 제한되지 못하며 따라서 섬유 내에서 전파될 수 없다. 두 번째 직선에서는 점 A에서 굴절이 발생하고, 점 B'에서 전반사가 발생하면 광선은 코어 내로 전파된다. 편의상 코어와 클래딩 접면에서 입사각은 임계각 $\alpha_c = \sin^{-1}(n_2/n_1)$ 로 가정하며 여기서 n_1 과 n_2 는 각각 코어와 클래딩의 굴절률이다.

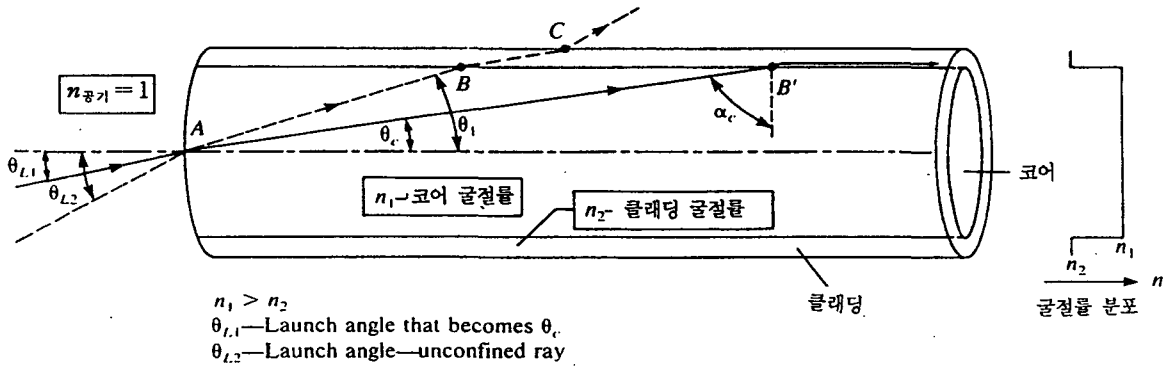


그림3-44 계단형 광섬유에서의 빛 전파⁽³³⁾

α_c 보다 큰 각도로 입사하는 광선은 광섬유로 전파한다. 그림3-16에서 임계광선은 중심축과 θ_c 의 각도를 이루며 θ_c 보다 큰 광선은 전파하지 못한다. 즉 $\theta_1 > \theta_c$ 이면 θ_1 광선은 광섬유를 벗어나며 이 때 θ_c 를 임계전파각이라 한다.⁽⁴⁷⁾

$$\sin \alpha_c = \cos \theta_c = n_2/n_1 \tag{3-40}$$

또한 내부 전반사는 빛이 굴절률이 높은 매질에서 굴절률이 낮은 매질로 진행할 경우에만 발생한다.

(3) 광섬유 손실

광섬유에는 크게 재료 손실, 빛 산란에 의한 손실 및 도파관 등의 휨(bending)

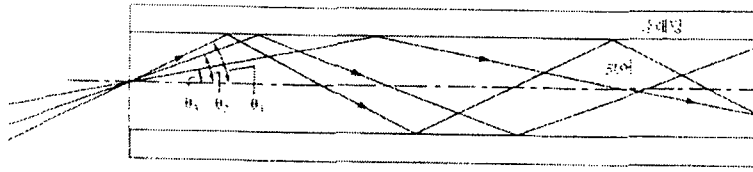


그림3-45 3가지 전파 모드⁽³³⁾

손실의 세가지 손실이 있다. 먼저 재료 손실은 빛과 물질의 분자 구조와의 상호작용으로 인한 흡수와 같은 물질에 의한 흡수, 그리고 물질의 불순물로 인한 손실이다. 빛의 산란에 의한 손실은 물질의 구조적 결함과 불순물에 의해 물질의 분자에 의한 빛의 산란 등이 있으며 산란된 빛은 섬유를 통해 전파하지 못하고 손실된다. 도파관 및 튜브 손실은 섬유구조의 결함과 불완전함으로 인한 손실이며 이런 손실은 파장에 의존하며 동작 파장을 잘 선택하면 손실을 줄일 수 있다. 본 연구에서 변형률센서를 개발하는데 이용한 매크로벤딩에 의한 손실이 여기에 포함된다.

나. 매크로벤딩 효과

임계각보다 작은 각도의 모든 광선은 섬유 내에서 전파되며 전자파 이론에 근거하면 이 광선들은 다른 각도로 전파되므로 임계광선이 전파할 때 다른 광선은 임계각 미만의 다른 각도에서 전파할 것이다. 그림3-45은 3개의 다른 광선을 보여주고 이렇게 다른 각도로 전파되는 광선을 전파 모드라고 하며 임계각이 증가하면 광섬유에서 전파되는 모드수가 증가한다. 임계각은 모드수와 같이 굴절률의 비에 의존하며 전체 모드 수는 상대 굴절률차가 증가함에 따라 증가한다. 전파모드는 임계각에 근접한 전파각을 갖는 고차 모드와 임계각보다 훨씬 작은 전파각을 갖는 저차 모드로 구분하는 것이 일반적이다. 고차 모드는 빛에너지를 클래딩으로 보내는 경향이 있고 따라서 손실이 크다.

빛이 대부분 고차 모드, 저차 모드 또는 혼합 모드로 전파하는 것은 광섬유의 주입조건(수광각)과 모드 결합(한 모드에서 다른 모드로의 빛의 전달) 정도에 따라 분류된다.

광섬유에 광원을 접속하는 경우 그림3-46(a)와 같이 대부분의 빛에너지가 비교적 큰 각도로 광섬유에 결합되면 고차모드가 형성된다. 이런 경우는 특히 광섬유가 구부러질 때 손실이 발생하며 그림3-46(b)는 광원이 작은 각으로 광섬유에 주입되는 경우로 저차 모드가 형성되고 에너지의 손실은 작아진다. 그림3-46(c)는 광원이 잘못 정렬될 때 고차 및 누설 모드가 발생하는 것을 나타내며 (a)와 (c)는 손실이 발생하게 된다.

광섬유에서 초기에 형성된 모드 분포(각 모드에 의해 전달되는 에너지의 상대적인 양)는 모드 결합으로 상당히 변경된다. 광섬유에서 1~2km 진행한 후의 모드 분포를 정상 상태 모드 분포라고 한다. 즉 모드 사이의 빛 에너지 분포는 그 지점에서부터 일정하며 각 모드는 자기 고유의 빛을 전달한다. 비록 광섬유 전체 구간에서 모드 결

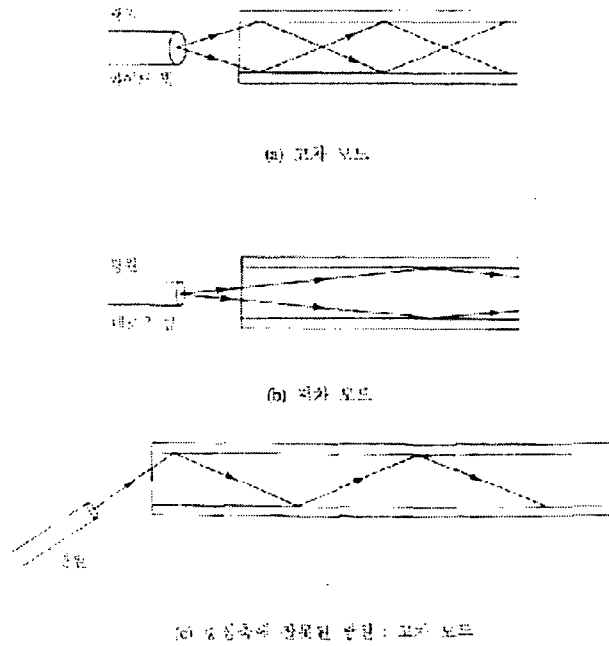


그림3-46 고차 및 저차모드의 생성⁽⁴⁷⁾

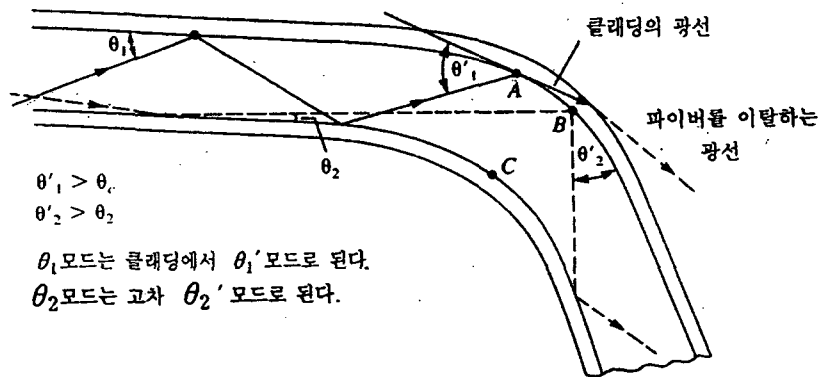


그림3-47 매크로벤딩 결과⁽⁴⁷⁾

합이 계속되지만, 모드 분포는 변하지 않는다. 모드 결합은 광섬유가 구부러질 때 발생하는 매크로벤딩과 마이크로벤딩의 두 가지가 있다. 그림3-47는 매크로벤딩을 나타낸 것이다. θ_1 의 각을 갖는 광선이 점 A에 도달하고 이 때 전파각은 θ_1 보다 크다. 이 각이 임계각 θ_c 보다 크면 광선은 밖으로 탈출하고 θ_1 모드는 누설 모드로 변환되어 손실로 없어진다. θ_2 각도로 전파하는 모드는 휘어서 고차모드 θ_2' 로 변환되며, 고차 및 저차 모드로의 모드 변환이 평상시에 발생된다.⁽⁴⁷⁾

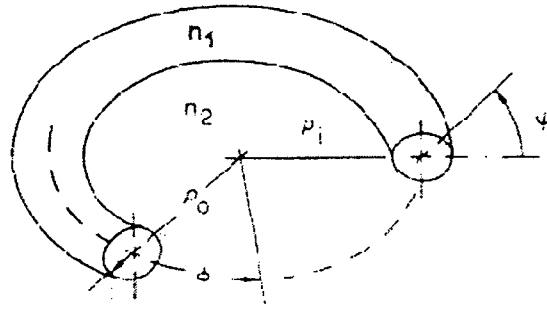


그림3-48 원형 굽힘 상태의 광섬유⁽⁴⁸⁾

이런 매크로벤딩에 의한 손실은 그림3-48과 같이 원형으로 광섬유가 굽힘을 받는 경우 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.⁽⁴⁸⁾

$$Loss = \frac{P_{out}}{P_{in}} = e^{-a\phi} \quad (3-41)$$

$$\text{where, } a(\theta) = k\rho_0(\theta_c^2 - \theta^2)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{2}{3}k\rho_0(\theta_c^2 - \theta^2)^{\frac{3}{2}}\right), \quad k = 2\pi n_1/\lambda$$

식(3-41)에서 매크로벤딩에 의한 손실은 광섬유가 원형 굽힘을 받는다고 가정하면 원형 굽힘 반지름과 광섬유 물성치에 의해 결정된다고 할 수 있다. 그림3-49은 원형 굽힘 반지름에 따른 매크로벤딩 효과에 의한 손실을 나타낸 것이다. 광섬유의 물성치는 사용파장대가 1310nm인 단일 모드 광섬유의 물성치를 사용하였으며 반지름의 길이가 4.2~4.8mm 사이에서 빛의 손실이 선형적인 구간을 형성하였다.

2. 광섬유 변형률센서

그림3-50는 본 연구에서 개발한 변형률센서의 개략도로서 매크로벤딩에 의한 손실을 이용하여 구성하였다.

센서 구성에 사용된 광섬유는 1310nm에서 사용하는 단일모드 광섬유를 사용하였으며 광원은 최대출력 2mW, 사용파장 1310nm인 pigtail된 광원을 이용하였다. 아크릴판으로 구성된 센서 본체의 gage length는 그림3-49의 결과로부터 선형성을 나타내는 구간의 중심인 9mm로 제작하였다. 아크릴판의 두께는 2mm이며 gage length를 유지하기 위해 윗 아크릴판은 H자 형태로 제작하였고 센서 부착 후에는 인두를 이용하여 제거하였다. 또한 매크로벤딩이 일어나는 부분의 초기 모양이 원형 상태로 만들기 위하여 광섬유의 길이를 측정하여 에폭시를 이용하여 고정하였다.

3. 신호처리장치

본 연구에서는 중화학 플랜트설비 상시감시 시스템 구축에 필요한 신호처리장치를 구성하기 위해 개발된 센서를 통해 측정된 변형률을 PC가 인식할 수 있는 디지털 신

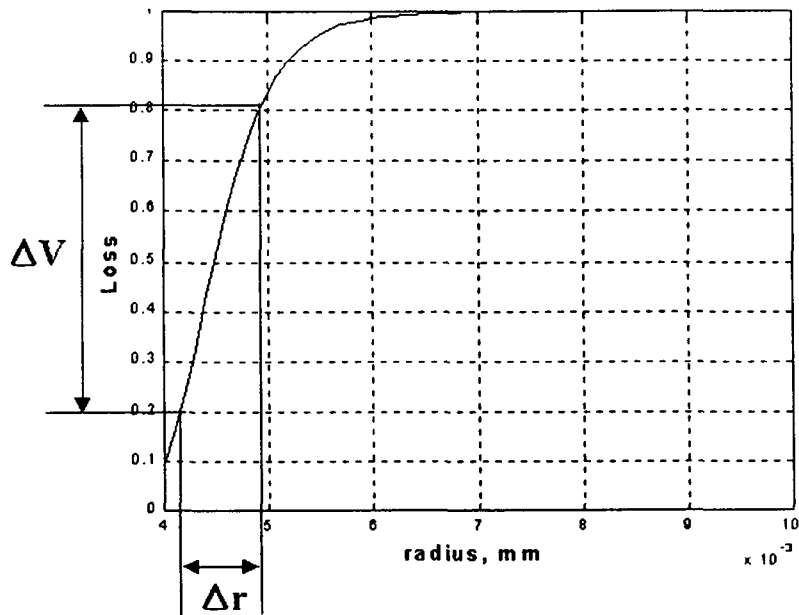


그림3-49 매크로벤드 반지름에 따른 전송 손실

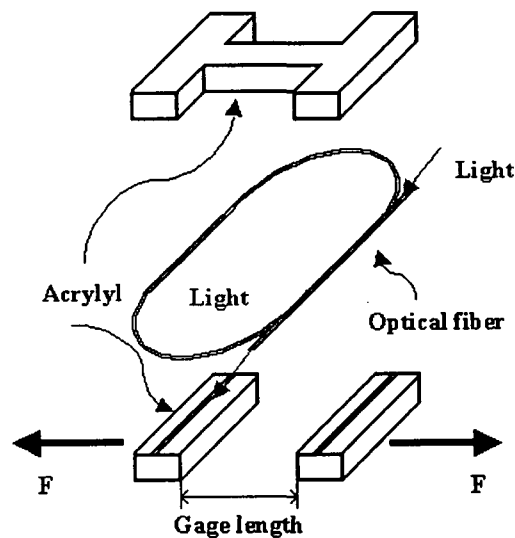


그림3-50 광섬유 변형률센서

호로 변환시키는 A/D converter, 증폭기 및 여파기를 제작하였다. A/D converter는 최대 샘플링 주파수 200kHz로, Visual Basic을 이용하여 제어되며 증폭기는 op-amp를 사용하여 최대 40dB 증폭이 가능하도록 증폭회로를 구성하였다. 또한 여파기는 100Hz low pass로 설계된 수동 여파기와 능동 여파기를 제작하여 사용하였다.

본 연구에서 측정한 변형률신호는 수동여파기를 거치고 증폭기를 통해 증폭된 후 다시 능동 여파기를 통과시키고 다시 한 번 증폭과 여파를 반복한 후 PC나 오실로스코프를 통하여 측정하였다.

4. 실험방법 및 결과

가. 실험방법

본 연구에서는 개발된 변형률센서를 검증하고 중화학 플랜트설비 상시감시 시스템 적용 가능성을 검토하기 위해 인장시험을 수행하였다.

인장 시편의 재료는 폭 3mm, 너비 20mm의 SM45C강으로 제작하고 광섬유센서는 전기저항식 변형률센서와 함께 시편 중앙에 부착하였다. 잡음 제거를 위해 시험기를 정지시킨 상태에서 주변 잡음을 측정하였다. 인장시험시 인장하중과 변형률신호는 오실로스코프로 측정하였고 인장 시험의 속도는 4mm/min이었으며 샘플링주파수는 100Hz로 고정하였다. 전기저항식 변형률센서는 120Ω 크기의 스트레인 게이지를 사용하여 상용화되어 있는 스트레인앰프에 연결하여 사용하였으며 광섬유센서는 광섬유센서의 DC성분을 제거하기 위해 DC성분의 전압값을 측정하고 함수발생기를 이용하여 DC성분을 제거하여 제작된 신호처리장치를 이용하였다. 또한 광섬유센서로 측정된 신호는 40dB 증폭하고 전기저항식 변형률센서로 측정된 신호는 20dB 증폭하여 측정하였다.

나. 실험결과

인장시험을 수행하기 전에 인장시험기의 유압 장치나 기타 전기장치에 의한 잡음은 60Hz의 전기 잡음이 측정되었다. 이를 제거하기 위하여 상용여파기를 사용하였다.

그림3-51은 인장시험시 전기저항식 변형률센서와 광섬유 변형률센서에서 탄성 구간 200 마이크로스트레인까지 변화시켰을 경우 측정된 전압의 변화를 나타낸다. 광섬유센서와 전기저항식 변형률센서는 증폭률을 고려할 때 거의 유사한 분해능을 나타내었다.

그림3-52는 인장시험시 복수개의 광섬유 변형률센서에서 탄성 구간 200 마이크로스트레인까지 변화시켰을 경우 측정된 전압의 변화를 나타낸다. Gage length를 9mm로 고정시켜 복수개의 센서를 이용하여 변형률을 측정된 결과 검은 실선의 선형성을 나타내었다.

다. 실험결과의 고찰

본 연구에서 개발된 변형률센서는 매크로벤딩 효과를 이용함으로써 광섬유를 절단하지 않고 변형률을 측정하는 방식이다. 이와 같이 광섬유를 절단하지 않음으로서 센서의 내구성을 높일 수 있고 기존의 광섬유 변형률센서에 비해 저렴한 제작비용으로 센서를 구성할 수 있다. 또한 민감도 역시 전기저항식 변형률센서에 비해 떨어지지 않았고 광강도형 센서이므로 신호처리과정이 비교적 단순하다는 장점이 있다.

광섬유의 종류에 따라 반지름을 조절하여 실험 환경에 적합한 센서를 구성할 수 있으며 센서 몸체와 광섬유의 종류를 변화시켜 센서를 구성하여 고온 환경에도 적합한

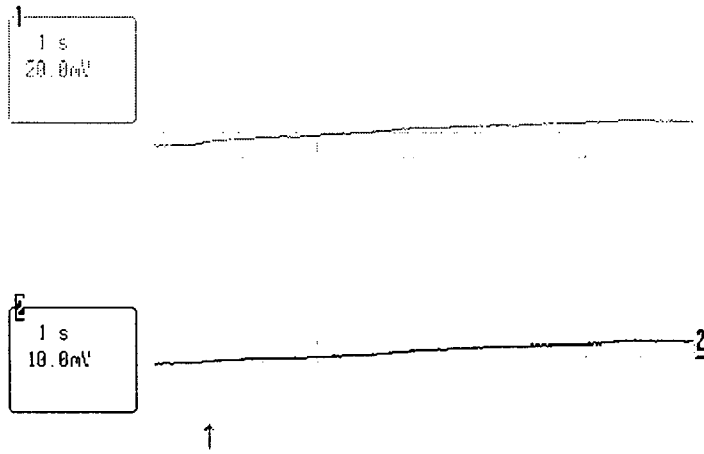


그림3-51 인장시험결과
 ch.1 광섬유센서 결과
 ch.2 스트레인 게이지 결과

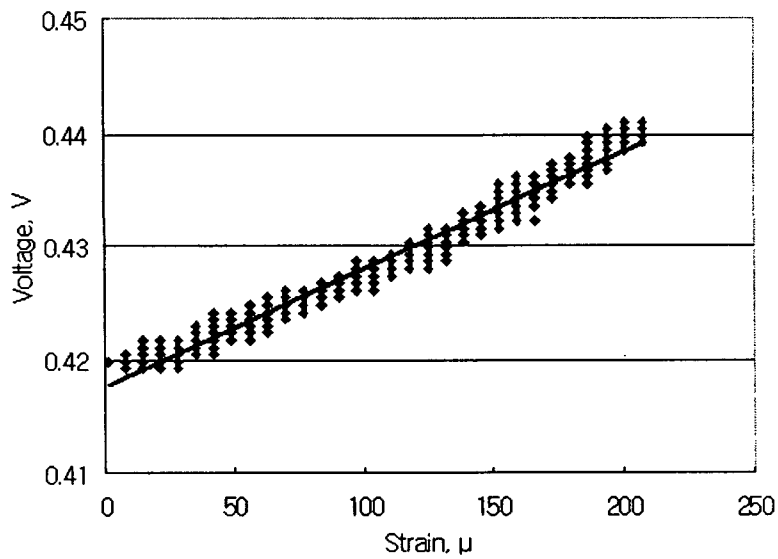


그림3-52 인장시험시 하중에 따른 변형률 변화

센서를 구성할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 변형률 원거리 전송에 효율적인 변형률센서를 구성하였다. 변형률 센서는 광강도형으로 매크로벤딩 효과를 이용하여 구성하였다. 개발된 센서는 광섬유 매크로벤딩 효과를 이용하여 광섬유를 절단하지 않고 구성하여 내구성이 뛰어나며, 광섬유를 이용하여 손실 없는 신호의 장거리 전송을 가능하도록 설계하였다.

인장시험 결과 전기저항식 변형률센서와 유사한 민감도를 나타냈으며, 부착 방법

을 개선함으로써 시편 위에 부착이 용이하였다. 향후 센서의 정밀도를 향상시키기 위한 연구가 필요하며 센서 packaging 방식을 개선하기 위한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

9절 상시감시 시스템(SES I)의 개발

본 연구에서는 앞에서 언급한 광섬유 음향방출센서와 변형률센서를 이용하여 상시감시 시스템(SES I; System Evaluation System I)에 관하여 개발하였다. SES I은 기초적인 stand-alone 형태의 상시감시 시스템으로 광섬유 음향방출센서와 변형률센서, ECU(Electronic Control Unit), web server로 구성된다. 그림3-53는 SES I을 이용한 상시감시 시스템의 개략도이다.

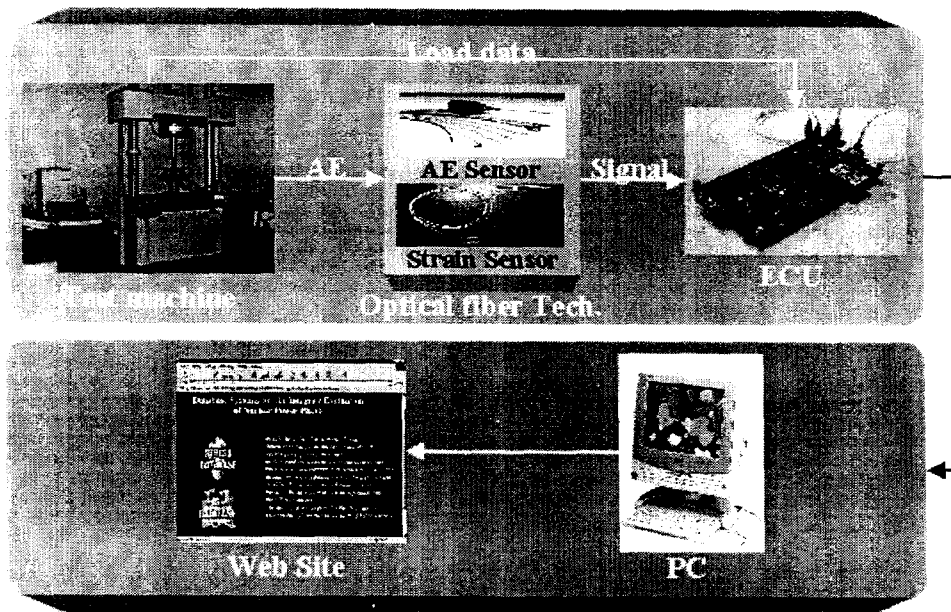


그림3-53 상시감시 시스템 구조

1. 구성

가. 광섬유 음향방출센서와 변형률센서

SES I에 사용된 광섬유 음향방출센서와 변형률센서는 본 연구에서 개발한 센서이며 음향방출센서의 경우 민감도와 전송 손실을 향상시키기 위해 사용파장대가 1310nm인 단일 모드 광섬유와 최대 출력이 3mW인 광원을 사용하여 구성하였다.

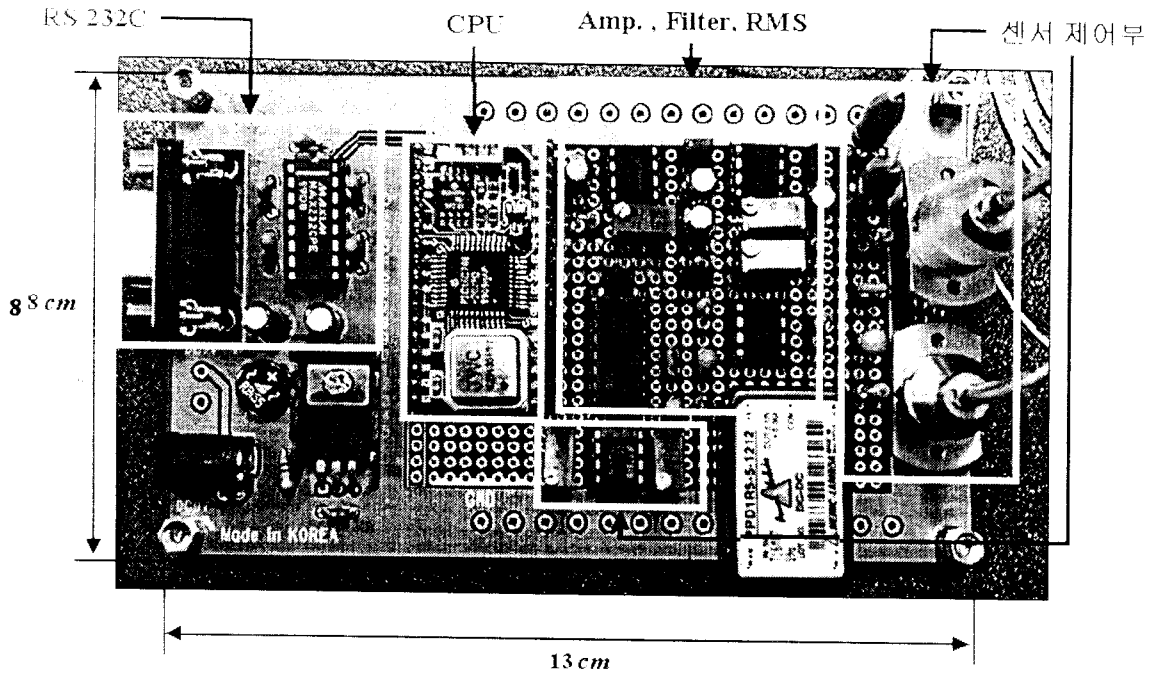


그림3-54 Electrical Control Unit

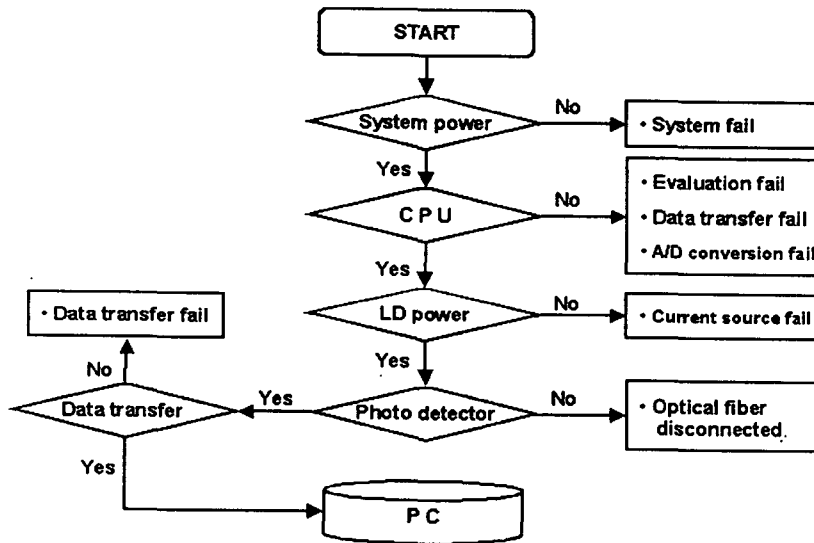


그림3-55 자기진단회로 흐름도

나. ECU(Electronic Control Unit)

ECU는 전원, CPU, 증폭기(Amplifier), 여파기(Filter), A/D Converter, RS-232C로 구성되며 센서로부터 입력된 아날로그신호를 증폭과 필터링을 통해 디지털신호로 변환하는 기능과 변환된 신호를 이용하여 구조물의 안전성을 평가하는 기능 및 자기 진단기능을 갖고 있다. 그림3-54은 ECU의 외형과 각 기능을 보여준다. 자기 진단기능은 power의 입력 유무, LD power의 입력 유무, 광검출기의 일정신호 유입 유무를 판단하

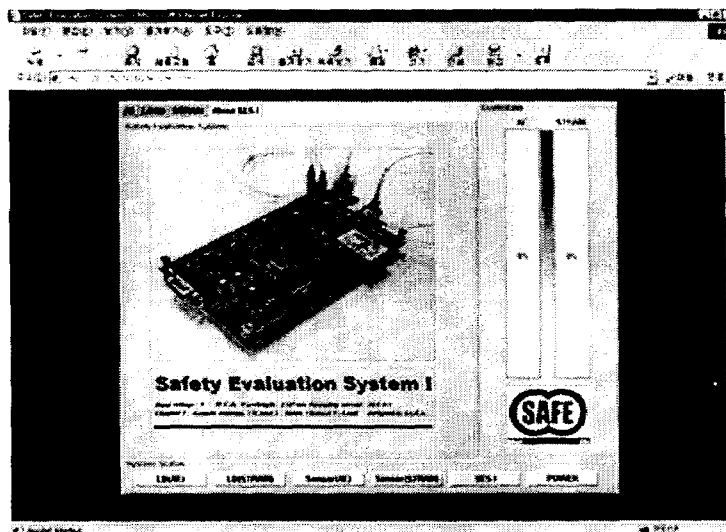
는 역할을 수행한다. AE센서의 진단부에서는 간섭된 신호를 입력받아 직류전압의 값을 비교함으로써 센서의 이상유무나 광섬유의 이상유무를 판단한다. 이상상태로 진단된 경우 LCD(소형액정화면)와 web server에 경고메시지를 출력하도록 구성하였다. LCD에서는 이상상태 발생 유무와 데이터 값을 출력한다. 그림3-55은 자기진단기능의 흐름도이다.

통신부에서는 RS-232C통신 포트로 PC에 데이터와 센서의 작동상태를 전송한다. 본 연구에서 개발한 SES I은 stand alone 타입으로 주요산업설비 및 구조물에 부착되어 이상유무를 판단하고 데이터를 PC로 전송할 수 있다.

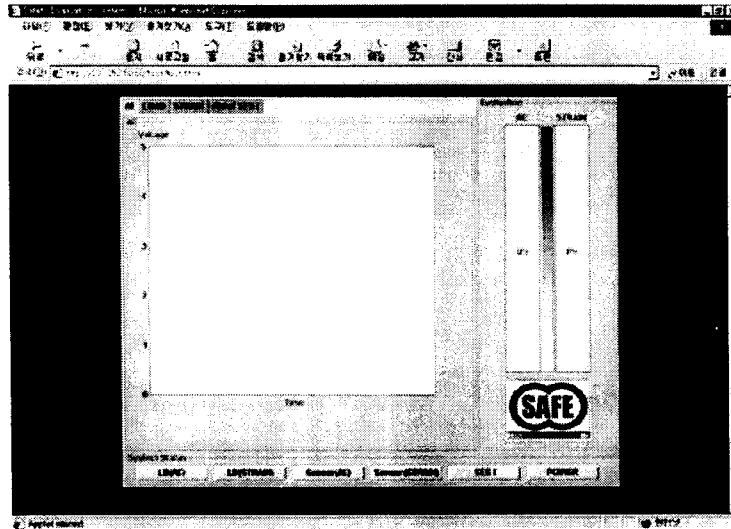
다. Web server

본 연구에서는 PC를 사용하여 web server를 구현하고, 상시감시 정보를 제공하기 위한 software를 개발하였다.

Web server는 검출된 음향방출신호를 인터넷상에서 실시간으로 확인하고 위험상황을 판단하여 경고하는 역할을 한다. 그러나 일반적인 인터넷 브라우저용 언어인 HTML(hyper text markup language)언어로는 실시간 감시나 데이터에 대한 접근이 불가능하다. 따라서 실시간 감시나 데이터에 대한 접근을 위하여 인터넷상에서 직접 실행가능한 JAVA2 (version JDK 1.2.2)를 사용하였다. Control program에서 저장된 data를 실시간으로 graph로 출력하기 위하여 JAVA2의 thread 기능을 사용하였으며 약 2초마다 update하여 graph로 출력하고 음향방출신호의 위험상황과 상시감시 시스템의 자체 진단 데이터를 이용하여 상시감시 시스템의 상황을 표시한다. 그림3-56(a)와 (b)는 각각 web site의 실제 실행 화면과 음향방출신호를 그래프로 출력하는 화면이다.



(a)



(b)

그림3-56 SES I의 출력화면

(a) 초기화면

(b) 결과출력화면

2. 실험

가. PLF 시험

본 연구에서는 개발된 시스템의 성능을 검증하기 위하여 PLF실험을 수행하였다. PLF실험은 지름이 0.5mm인 샤프심을 이용하여 수행하였는데, 센서를 길이 200mm, 넓이 200mm, 높이10mm의 철판 위에 커플런트로 고정하였다. 출력신호는 80dB 증폭하여 AC성분만을 측정하여 오실로스코프로 저장하고 시스템의 출력 결과와 비교하였다.

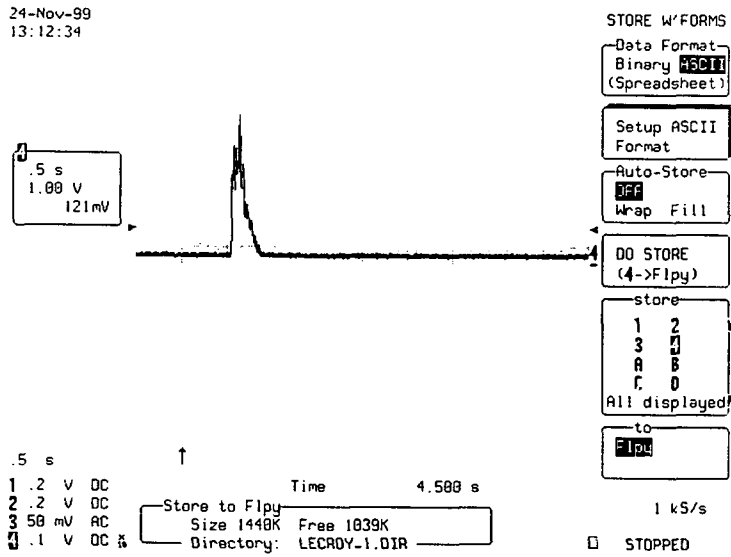
나. Power off 실험

본 연구에서 개발한 SES I은 음향방출센서와 변형률센서를 이용하여 대상설비의 건전성을 평가하는 기능과 함께 포함되어 있는 자기 진단 기능을 검증하기 위해 시스템의 작동 중 전원을 차단하고 web 상에서 시스템의 이상신호를 확인하였다.

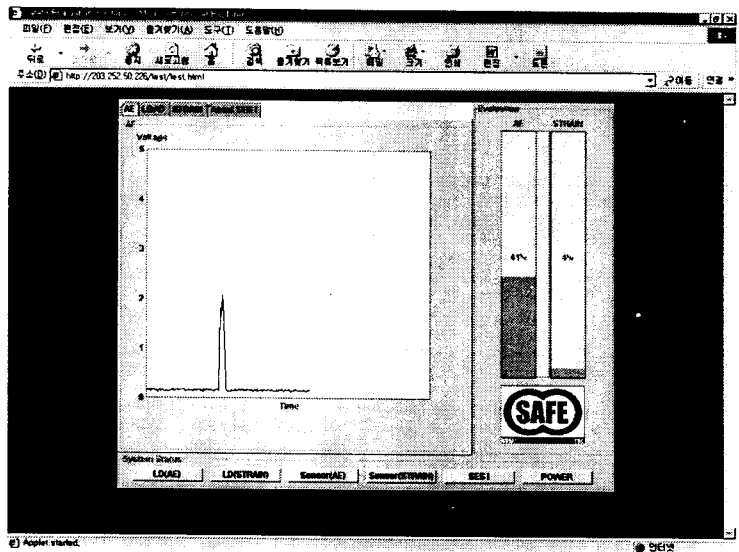
3. 실험결과

그림3-57(a)와 (b)는 각각 PLF시험시 발생하는 음향방출신호를 오실로스코프를 사용하여 측정한 것과 SES I을 통해 검출된 결과이다. 오실로스코프로 측정한 값이 2.8V이고 시스템으로 측정한 값이 2.1V로 약 33%의 오차가 발생하였다.

그림3-58는 작동 중 시스템의 전원을 차단하였을 때 web server상에 나타난 결과이다. 우측 하단부의 power 부분이 붉은색으로 되어 system의 전원이 차단된 것을 web



(a)



(b)

그림3-57 PLF시험시 측정된 음향방출신호
 (a) 오실로스코프를 이용한 경우
 (b) SES I을 이용한 경우

상에서 확인할 수 있다. 같은 방식으로 센서, 광원의 작동유무와 시스템 자체의 자기 진단을 확인할 수 있다.

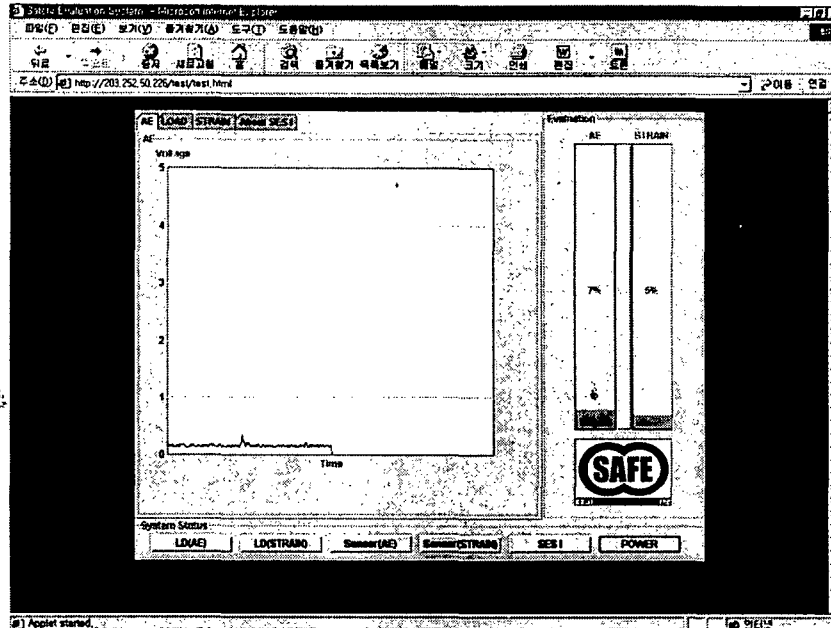


그림3-58 자기진단기능 확인을 위한 전원 차단 시험 결과

가. 실험결과의 고찰

PLF실험을 통하여 시스템이 stand alone 타입으로 작동함을 확인할 수 있었고, 음향방출신호가 발생하였을때 시스템을 통해 검출할 수 있었으며, rms 값으로 변환되어 PC로 전송이 되었다. PC에서는 음향방출신호를 실시간으로 인터넷상에서 제공하였고 인터넷으로 확인할 수 있었다.

PLF 실험 결과 오실로스코프로 측정된 신호와 web server상의 신호 크기가 33%의 오차를 나타내었다. 이것은 시스템의 LCD 화면상의 신호와 오실로스코프로 측정되는 신호가 같은 크기를 나타내는 것으로 보아 SES I과 PC간 RS-232C통신 중 발생하는 데이터의 손실이 그 원인으로 판단된다. RS-232C통신은 PC와 외부기기간의 통신을 쉽게 구현할 수 있다는 장점이 있지만 많은 양의 데이터를 송수신 할 경우와 장거리 전송 시 에러가 발생할 확률이 높다는 단점이 있다. 따라서 향후 보다 향상된 시스템을 구성하기 위해서는 PC와 시스템간의 통신에 관한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 광섬유 음향방출센서와 변형률센서를 이용하여 기초적인 stand-alone 형태의 상시감시 시스템인 SES I을 개발하였다.

SES I은 대상 구조물의 건전성 평가 및 자체 진단 기능이 있으며 인터넷을 이용하여 web상에서 대상 설비의 실제 상태를 client들에게 실시간으로 제공하는 기능을 포함하고 있다. 향후 시스템과 PC 간의 효율적인 신호전송방법과 실제 적용 실험을 통한 SES I을 개선하기 위한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

10절 HiL(Hardware-in-the-Loop)적용 방법 개발

HiL 방법은 기존의 소프트웨어 시뮬레이션 알고리즘에서 비선형성이 심하거나 해석하기 어려운 부분을 실제 하드웨어로 대체하여 시뮬레이션을 수행하는 것으로서 현실적으로 실험이 불가능하거나 시험비용이 고가인 우주항공 분야에서 처음으로 도입되었으며 근래에는 차량의 성능 향상을 위해 적용되고 있다. 이 방법을 중화학플랜트 상시감시 시스템에 응용하면 탄성거동을 하는 전체실형은 유한요소해석을 통해 그 거동을 묘사하고 국부적으로 탄소성변형을 일으키는 취약 부위 등을 실제 실험 시편으로 연계하여 실형 구조물 거동에 대한 건전성 평가를 수행할 수 있다.

본 연구에서는 중화학플랜트 상시감시 시스템 구축에 HiL 방법을 적용하기 위해 균열 측정을 위한 다채널 DCPD(direct current potential drop; 직류전위차법) system 과 시험기 제어기술 등의 각종 하드웨어부, 유한요소해석 등의 소프트웨어부 및 디스플레이부를 개발하고자 한다.

1. 하드웨어부

가. DCPD(Direct Current Potential Drop)

(1) DCPD system

DCPD법은 피로균열 측정을 위해 30년 전에 최초로 시도되었으며 지속적인 연구개발을 거쳐 정확도를 높여가고 있다. 최근 이 실험법은 안정성과 정확성이 높아져 ASTM에서도 피로균열성장 측정을 위해 DCPD법을 채택하고 있다.⁽⁴⁸⁾

본 연구에서는 다채널 DCPD system을 개발·보완하고 유한요소법과 관통 균열이 있는 wide plate 피로 시험을 통하여 검증하였다.

(가) DCPD법의 원리

저항 R 인 도체에 전류 I 가 흐를 때 도체의 양단 전압 V 는 옴의 법칙에 의하면 다음과 같다.

$$V = IR \quad (3-42)$$

또한 도체의 저항은 비저항 ρ , 전류가 흐르는 길이 L , 전류가 흐르는 단면적 A 에 의하여 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (3-43)$$

식(3-43)에서 전류가 일정할 때 전압과 저항은 비례관계에 있다. 일정한 전류가

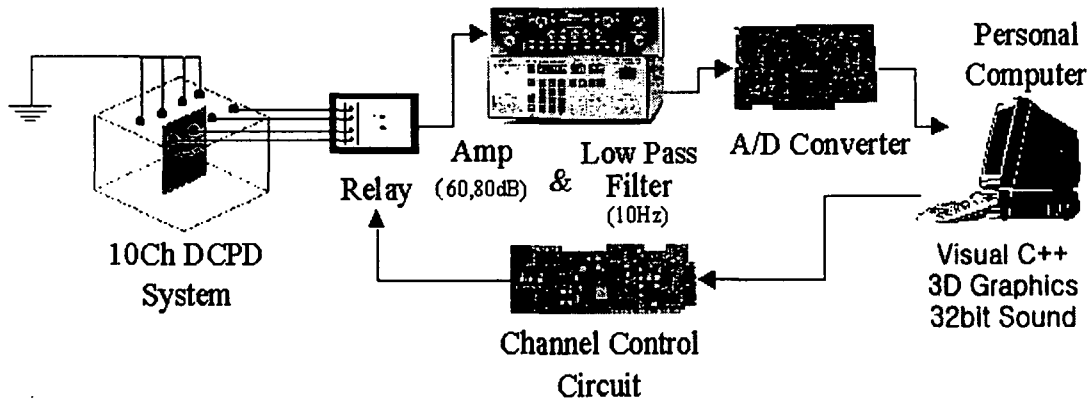


그림3-59 다채널 DCPD 시스템

흐르는 도체 내에 균열이 존재하게 되면 전류가 흐르는 단면적이 작아진다. 단면적이 작아지면 식(3-43)로부터 저항이 커지므로 식(3-42)에 의해 전압값이 커지게 된다. 이러한 관계로부터 도체재료에 일정한 전류를 공급하면서 전압의 변화를 측정하면 균열의 발생과 성장을 측정할 수 있다.

(나) DCPD system의 구성

본 연구에서 개발한 DCPD system은 관통 균열이나 표면 균열 길이와 형상을 측정할 수 있도록 제작하였다.

① 하드웨어부

그림3-59은 개발한 다채널 DCPD 시스템의 구성도를 나타내며, DCPD 시스템의 하드웨어부는 신호처리부와 전원제어부로 구성된다. 신호처리부는 증폭기와 여파기 및 A/D converter로 구성되는데, 증폭기는 수십 μV 의 진폭변화를 측정할 수 있도록 신호를 80dB 증폭하였다. 또한 측정된 신호의 잡음 제거와 릴레이(relay) 작동을 고려하여 3Hz low pass 여파기를 사용하였다. A/D converter의 분해능은 12bit이고 0~10V 사이의 전압을 측정하며 릴레이 작동에 맞추어 측정하도록 구성하였다.

제어회로부는 채널제어회로(channel control circuit)와 전원제어회로(power control circuit)로 구성된다. 채널제어회로는 릴레이를 사용함으로써 한 set의 증폭기와 필터만으로 신호를 측정할 수 있도록 구성하였고, 프로그램을 이용하여 임의의 특정 채널을 통해서 전압을 측정하거나 모든 채널에서 교번식으로 측정할 수도 있도록 설계하였다. 전원제어회로는 열전기 효과(thermal EMF)의 영향을 제거하기 위하여 구성한 장치로서, 입력전원의 극을 변환하여 시험편의 온도변화를 방지하는 기능을 갖추고 있다. 그림3-60은 개발한 다채널 DCPD 시스템의 사진이다.

PC에서는 다채널 DCPD 시스템에서 발생하는 신호를 처리하고 시스템을 전체적으로 제어하는 프로그램을 구동한다. 특히 10개의 채널 중 사용하고자 하는 채널을 선택하고 측정된 데이터의 저장과 균열형상을 출력하는 기능을 한다.

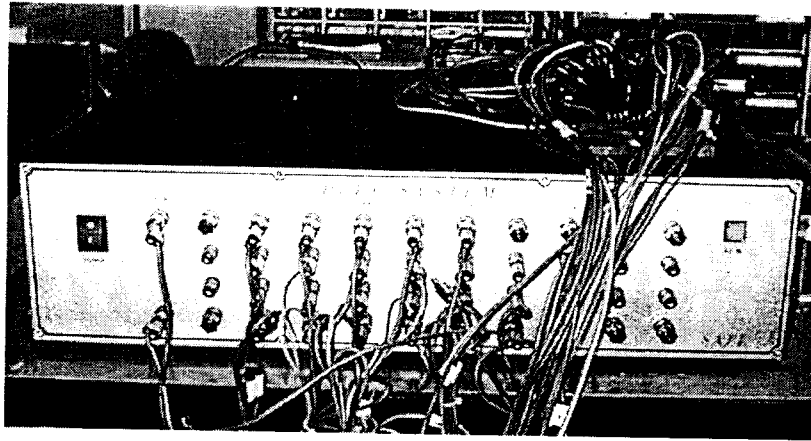


그림3-60 다채널 DCPD 시스템

② 소프트웨어부

소프트웨어부는 GUI를 지원하는 Microsoft Visual C++로 작성하였으며 크게 입력부와 출력부로 구성하였다.

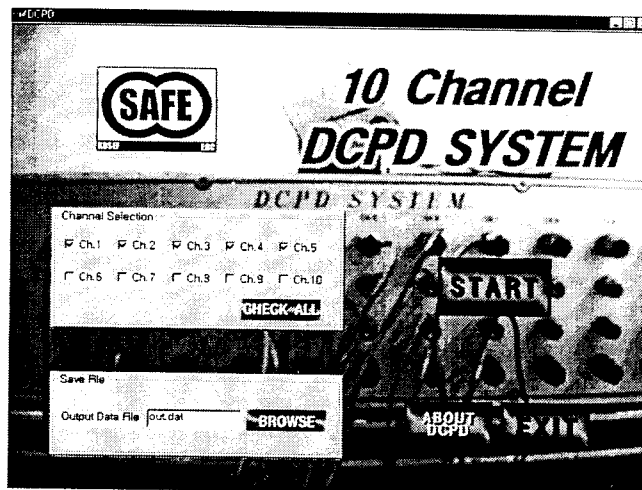
그림3-61은 입력부의 초기화면과 실행화면으로 초기화면에서는 사용하려는 채널의 선택과 데이터 저장 파일의 지정이 가능하도록 구성하였으며 실행화면에서는 균열형상과 각 채널에서의 측정값을 나타낸다.

(다) DCPD system 검증을 위한 유한요소해석 및 실험방법

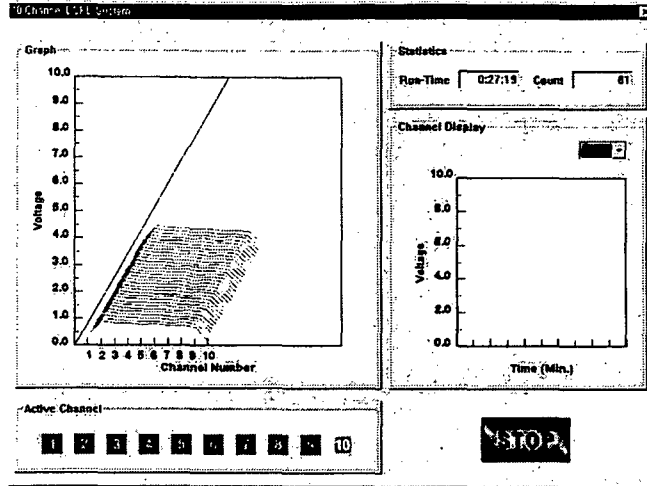
본 연구에서는 개발된 DCPD system을 검증하기 위하여 관통 균열이 있는 wide plate의 유한요소해석 및 피로 실험을 수행하였다.

① DCPD법을 이용한 균열길이의 측정

Johnson⁽⁴⁹⁾은 MT시편에 존재하는 균열의 길이와 측정 전압과의 관계식을 다음과 같이 제안하였다.



(a)



(b)

그림3-61 다채널 DCPD 시스템 출력화면

(a) 초기화면

(b) 결과출력화면

$$a = \frac{2W}{\pi} \cos^{-1} \frac{\cosh\left(\frac{\pi y}{2W}\right)}{\cosh\left\{\left(\frac{V}{V_0}\right) \cosh^{-1}\left[\frac{\cosh\left(\frac{\pi y}{2W}\right)}{\cos\left(\frac{\pi a_0}{2W}\right)}\right]\right\}} \quad (3-44)$$

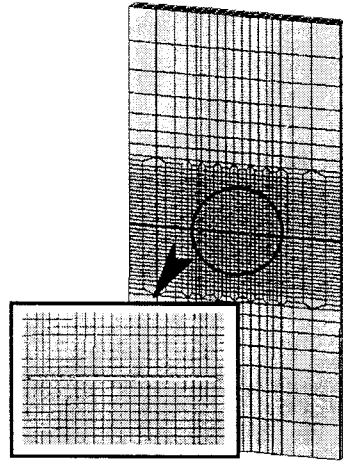
여기서 a 는 균열길이, a_0 는 기준균열길이, W 는 시편의 폭, V 는 측정된 전압값, V_0 는 a_0 에서의 전압값, y 는 균열과 전압측정단자간의 거리이다.

식(3-44)은 균열면에 균일밀도의 전류(uniform current density)가 흐를 때만 적용이 가능하므로 전류공급단자가 균열에서 멀리 설치되어야 한다는 단점이 있다.

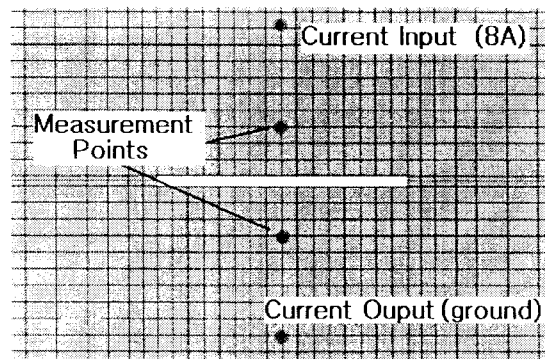
② 유한요소해석 모델 및 해석 방법

그림3-62(a)는 관통 균열이 있는 wide plate의 균열길이해석을 위해 사용한 유한요소모델로 정확한 전기장 해석을 위해 3차원 모델을 이용하였다. 해석모델에 대한 타당성을 검증하기 위해 ASTM-E647에서 제시하고 있는 방법과 동일하게 시편의 상하단부에 전류를 공급하고 유한요소해석은 균열길이를 25mm에서 63.3mm까지 증가시키면서 9가지의 균열길이에 대하여 수행하였고, 해석을 통해 얻은 두 전압측정단자에서의 전압차를 식(3-44)에 대입하여 균열길이를 산출하고 이를 각 해석모델의 균열길이와 비교하였다.

검증된 해석모델을 이용하여 본 연구에서 수행한 실험에 대하여 유한요소해석을 수행하였다. 그림3-62(b)는 실험조건과 동일한 경계조건을 적용한 유한요소모델이다. 이 모델을 이용하여 균열을 25mm에서 63.3mm로 증가시키면서 9가지 경우에 대하여 해



(a)



(b)

그림3-62 (a) MT 시험편의 3차원 mesh
(b) 유한요소해석을 위한 경계조건

석을 수행하였고, 해석결과를 이용하여 전압값 비(V/V_0)에 대한 균열길이 비(a/W)의 관계식을 도출하였다. 이 관계식의 타당성을 검증하기 위해 실제 실험으로부터 얻은 전압값을 관계식에 대입하여 균열길이를 계산하고 이를 실제 측정된 균열길이와 비교하였다.

③ 실험방법

그림3-63는 관통 균열이 있는 wide plate의 균열길이 측정을 위해 본 연구에서 수행한 실험의 구성도로서 전류를 전압측정단자에 근접하게 공급하는 것이 ASTM-E647에서 제시하고 있는 실험방법과 상이하다. 실험에 사용한 시편은 폭($2W$)이 $98mm$, 높

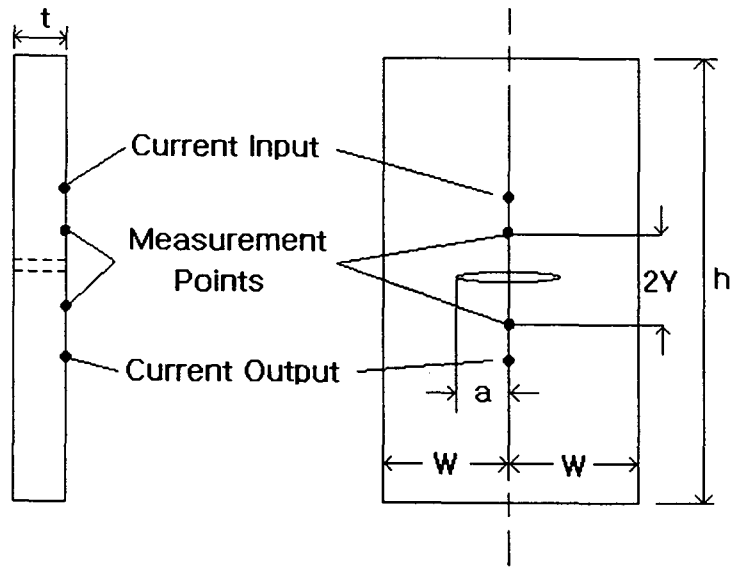


그림3-63 DCPD법 적용을 위한 MT 시험편

이(h)가 200mm , 두께(t)가 8mm 로 재질은 SM45C를 사용하였다. 초기균열(a_0)의 길이는 25mm 로 제작하였다. 균열과 전압측정 단자간의 간격은 5mm , 균열과 전류공급 단자간의 간격은 15mm 로 구성하였고, 본 실험에서는 $8A$ 의 정전류를 공급하였다. 균열성장을 위해서는 Instron사에서 제작된 만능시험기를 사용하였다.

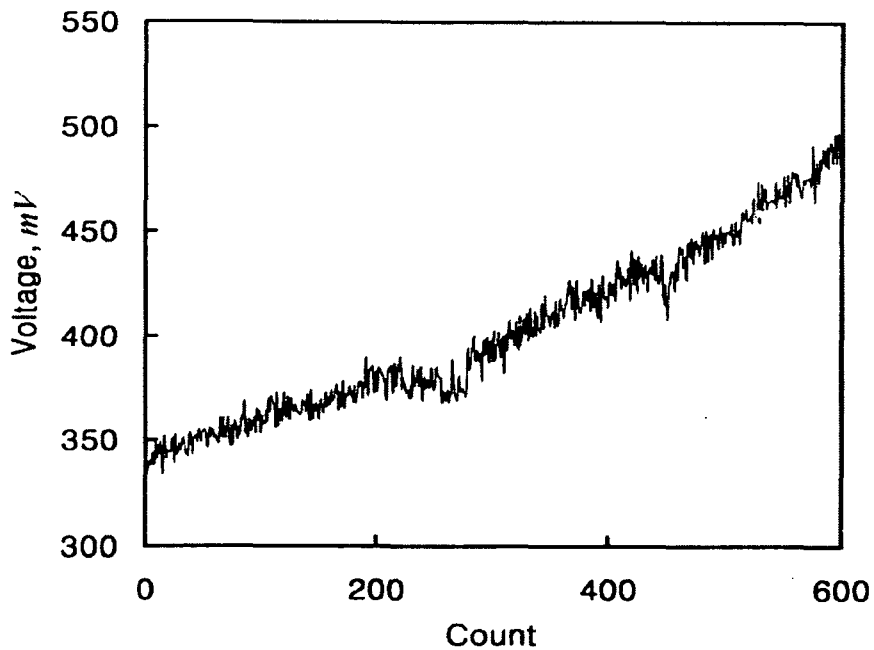


그림3-64 피로균열성장에 따른 DCPD법 적용 결과

(라) 실험 및 유한요소해석 결과

① 실험 결과

그림3-64는 관통 균열이 있는 wide plate에 피로하중을 작용시키며 DCPD 시스템으로 측정된 전압값으로 초기균열 25mm에 대한 전압값(V_0)은 343mV이었고 최종균열 길이에 대한 전압값은 500mV이었다. 실제 최종균열길이를 측정하기 위해 시편에 인장하중을 가하여 파단 시킨 후 최종균열길이를 측정하였고, 그 값은 21mm이었다.

② 유한요소해석 결과

그림3-65은 해석모델에 대한 타당성을 검증하기 위해 ASTM-E647에서 제시하고 있는 방법과 동일하게 시편의 상하단부에 전류를 공급하고 해석을 수행하여 얻은 전기장의 분포 통하여 구한 a/W 와 식(3-44)을 사용하여 도출한 a/W 를 비교한 것이다. 초기균열 길이에 대해서는 두 값이 일치하였고, 균열길이가 증가할수록 식(3-44)을 이용하여 구한 a/W 가 작은 값을 나타내었으며, 균열길이가 63.3mm인 경우에는 두 값이 약 2%의 오차를 나타내었다. 따라서 본 연구에서 작성한 유한요소해석모델은 전기장 해석에 적합하다는 것을 입증하였다.

그림3-66은 검증된 해석모델에 본 연구에서 수행한 실험조건을 적용하여 해석을 수행한 결과로서 9가지의 균열길이에 대하여 해석을 수행한 결과로서, 이를 이용하여 본 연구에서 수행한 실험에 대한 전압값 비(V/V_0)에 대한 균열길이 비(a/W)의 관계식을 도출하였고, 그 식은 다음과 같다.

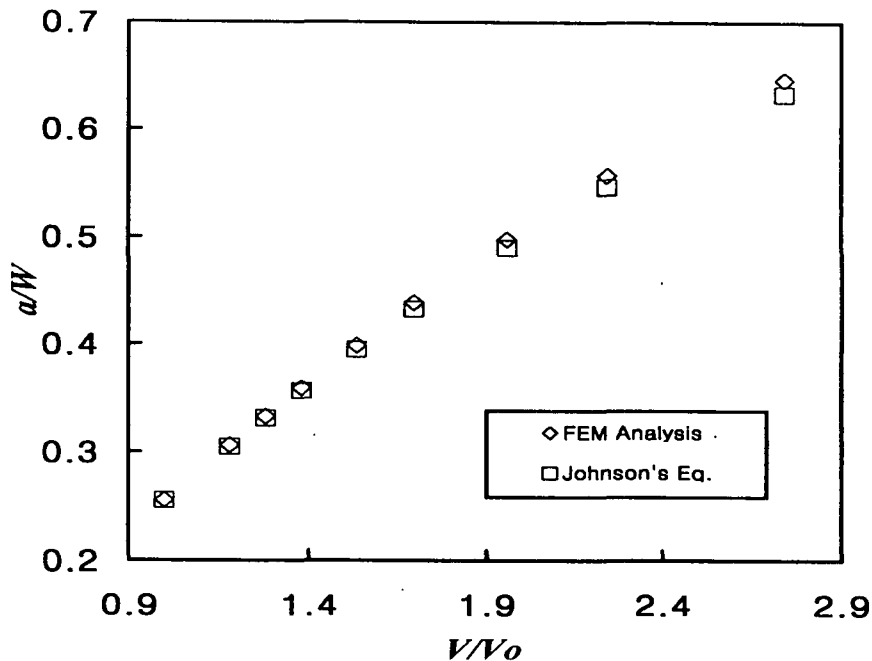


그림3-65 유한요소해석과 Johnson 방정식을 이용한 균열길이 비교 결과

$$\frac{a}{W} = -0.047\left(\frac{V}{V_o}\right)^3 + 0.198\left(\frac{V}{V_o}\right)^2 + 0.092\left(\frac{V}{V_o}\right) + 0.013 \quad (3-45)$$

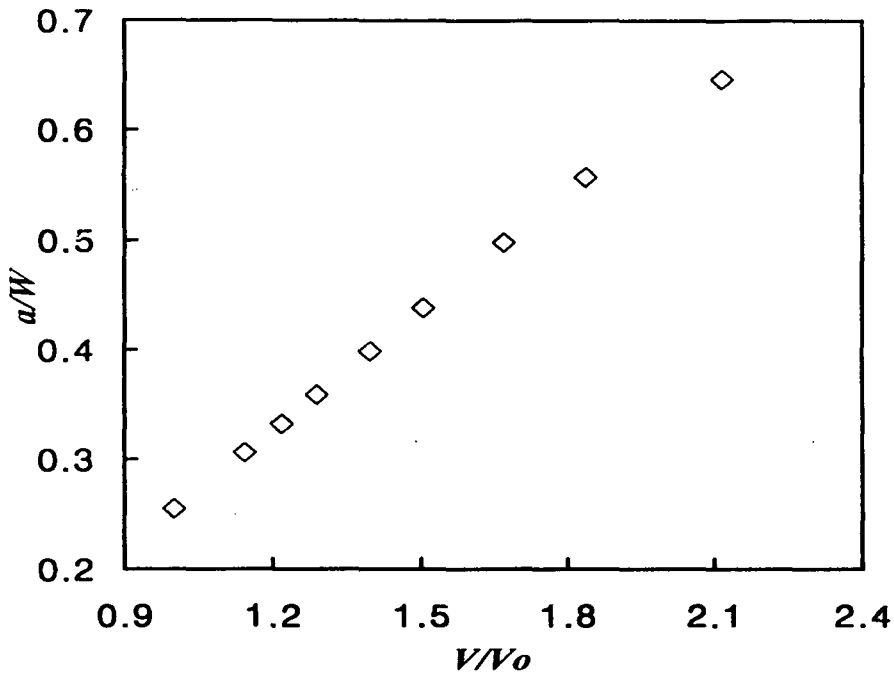


그림3-66 시험을 적용한 유한요소해석결과

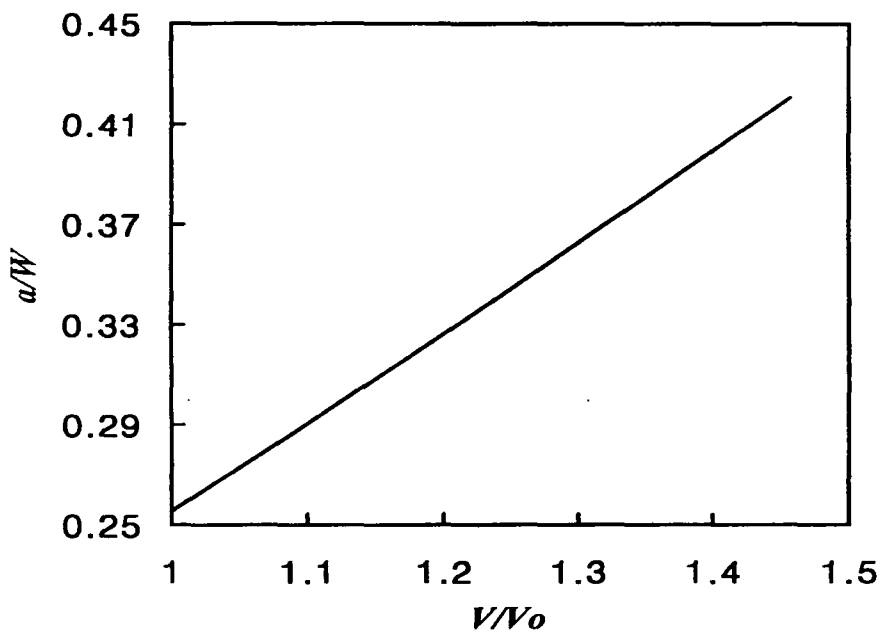


그림3-67 제시한 식에 따른 전압비와 균열비의 관계



그림3-68 16 채널 스트레인 측정장치

③ 실험결과와 유한요소해석결과 비교

본 연구에서 수행한 실험결과와 유한요소해석결과를 비교하고, 식(3-45)의 타당성을 검증하기 위해 실험을 통해 얻은 전압값을 식(3-45)에 대입하여 균열길이를 구하고 이를 실제 측정된 균열길이와 비교하였다. 그림3-67는 실험으로부터 얻은 전압값을 식(3-45)에 대입하여 얻은 결과로 최종 a/W 는 0.421이었다. 여기서 W 는 49mm이므로 최종균열길이는 20.6mm이었다. 실제 최종균열길이는 21mm이었으므로 두 결과는 1.7%의 오차로 잘 일치하였다.

나. 다채널 스트레인 측정장치

본 연구에서는 HiL 방법을 적용하기 위해 유한요소해석에서 구한 시험편의 경계조건을 생성, 확인하기 위해 다채널 스트레인 측정장치를 개발하였다. 본 연구에서 개발한 다채널 스트레인 측정장치는 휘트스톤 브릿지(wheatstone bridge), 채널 변환부, 여파기(filter), 증폭기(amplifier), A/D converter로 구성되어 있다. 다채널 스트레인 측정장치는 16개의 채널을 동시에 구동할 수 있으며 필요시 채널을 선택적으로 사용할 수 있다. 특히, 각 채널마다 필요한 필터와 증폭기를 릴레이를 이용하여 채널 변환부에 추가함으로써 1개의 필터와 증폭기를 사용한 경제적인 시스템을 구성하였다. 그림3-40은 본 연구에서 개발한 다채널 스트레인 측정장치의 사진이다.

(1) 하드웨어부

(가) 휘트스톤 브릿지(wheatstone bridge)

스트레인 게이지의 저항 변화를 전압 변화값으로 변환시키는 부분으로 변형률 값은 다음 식과 같이 wheatstone bridge의 입력 전압과 출력 전압의 비로 나타내어진다.

$$\epsilon = \frac{4e_o}{Ke_i} \quad (3-46)$$

여기서, ϵ 은 변형률, e_i 는 입력전압, e_o 는 출력전압, K 는 gage factor이다.

(나) 채널변환부

채널변환부는 한 개의 필터와 증폭기만을 사용한 다채널 스트레인 측정장치를 구성하기 위한 장치로 릴레이를 이용하여 구성하였다. 채널 변환부에서는 소프트웨어를 이용하여 자유롭게 필요한 채널을 선택할 수 있다.

(다) 여파기(filter)

여파기는 다채널 스트레인 측정장치로 신호를 측정하는 경우, 외부에서 유입되는 전기적인 잡음을 제거하기 위한 장치이다. 본 연구에서는 차단 주파수가 10Hz인 low pass 여파기를 사용하였다.

(라) 증폭기(amplifier)

증폭기는 미세한 전압변화를 측정하기 위하여 wheatstone bridge에서 출력되는 전압을 증폭시키는 장치이다. 본 연구에서 개발한 다채널 변형률 측정 시스템의 증폭기의 배율은 40dB, 54dB, 60dB, 74dB로 설정되었으며 소프트웨어로 배율을 선택할 수 있다.

(2) 소프트웨어부

소프트웨어부는 GUI를 지원하는 Microsoft Visual C++로 작성하였으며 크게 주 화면과 보정 화면으로 구성하였다.

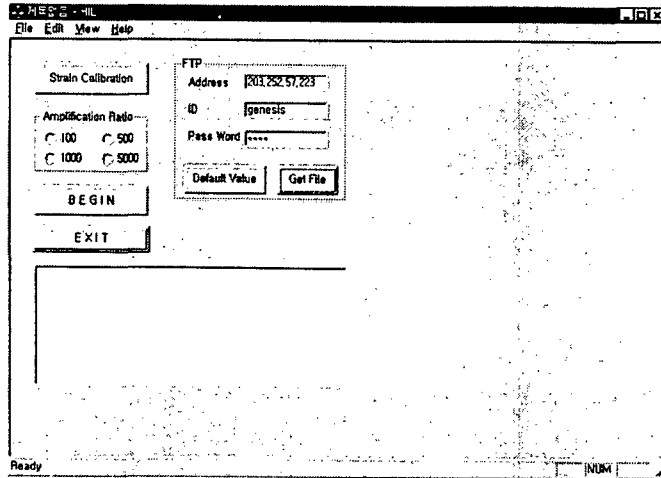
그림3-69(a)와 (b)는 각각 주 화면의 초기 화면과 Strain Calibration 단추를 누르면 각 채널을 보정할 수 있는 보정 화면의 초기 화면으로서 시험기 제어를 위한 FTP 모듈과 증폭률을 결정하고 BEGIN 단추를 누르면 변형률을 측정하게 된다.

다. 시험기 제어장치

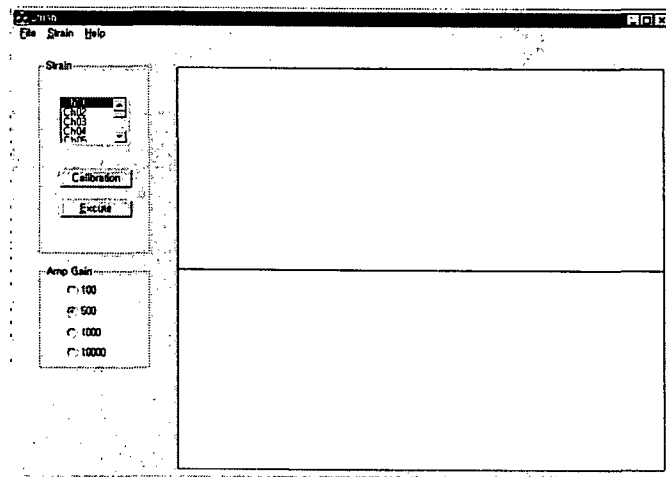
소프트웨어부에서 결정된 경계조건을 실제 시험편에 작용시키기 위해 스텝모터를 사용하여 시험기 제어장치를 구성하였다.

2. 소프트웨어부

본 연구에서는 HiL 적용 방법을 개발하기 위한 표면 균열이 있는 wide plate의 예비실험을 위해 하중 조건을 결정하고 유한요소해석을 수행하였다.



(a)



(b)

그림3-69 다채널 스트레인 측정장치의 출력화면

(a) 초기화면

(b) 보정화면

가. 하중 조건 생성부

하중 조건 생성부는 wide plate를 표면 균열이 있는 실 배관의 일부로 가정하여 실 배관에 작용하는 하중의 변화를 모사하는 부분이다.

나. 유한요소해석부

유한요소해석부는 시편에 작용하는 경계조건을 구하기 위해 전체 모델에 대한 유한요소해석을 수행하는 부분이다. 유한요소해석에는 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 프로그램을 사용하였다. 또한 본 연구에서는 전체 배관 모델에 대한 신속하고

효율적인 유한요소해석을 위해 3차원 자동 요소망 생성 프로그램을 사용하였다.

3. 결론

본 연구에서는 중화학플랜트 상시감시 시스템 구성에 HiL 방법을 적용하기 위해 균열 측정을 위한 다채널 DCPD system 등의 각종 하드웨어 소프트웨어를 개발·보완하고 인터페이스부를 개발하였다.

본 연구에서 개발한 다채널 DCPD system은 전기장의 유한요소해석과 실험을 통해 정확성이 입증되었고 HiL 시뮬레이터 구성을 위한 각 부분들의 성능도 확인하였다. 본 연구에서 개발한 각종 측정장비들과 소프트웨어를 이용한 HiL 시뮬레이터를 사용하면 중화학플랜트 대상의 실제 실험에 소요되는 막대한 경비와 시간을 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 또한 중화학플랜트 상시감시 시스템 구축을 위한 데이터베이스 구축에도 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

제 4장 연구개발목표 달성도 및 기여도

본 과제 의 연구목표인 중화학플랜트 고온설비의 상시안전 감시 시스템 구축을 위하여 고온설비인 개질로를 중심으로 손상기구를 규명하였고 설비 데이터베이스 구축, 유한요소 해석에 의한 응력그린함수 도출, 온도 모니터링 기술, 후속 내압부 열응력 해석기술, 크리프-피로 해석기술, 상시 감시 소프트웨어 기술을 개발, 상시 감시 시스템 구축을 위해 신호의 장거리 전송이나 고온 환경 적용에 비교적 용이한 광섬유를 이용하여 측정 장비를 개발하였고 이에 적합한 신호처리장비를 개발하였다. 또한 개발된 센서를 이용하여 음향방출법을 기초로 한 기초적인 상시감시 시스템(SES I)을 구축하였으며 상시감시 시스템 구축에 필수적인 실기 실험을 실험실 규모로 수행할 수 있는 시뮬레이터 기술을 개발하였다.

차세대 센서 소재로 각광받고 있는 광섬유를 이용하여 음향방출신호와 변형률을 측정함으로써 국내 광섬유 센서 개발을 촉진시키고 적용 영역을 확장할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서 개발한 음향방출센서는 광섬유 외팔보의 공진과 공간섭계를 이용하여 구성하였다. 개발된 센서는 광섬유 외팔보의 공진을 이용하여 수백 kHz의 음향방출신호를 수 kHz의 저주파신호로 변환하였으며, 광섬유를 이용하여 신호의 장거리 전송을 가능하도록 설계하였다. 향후 센서의 민감도와 내구성을 향상시키기 위한 연구가 필요하며 센서 부착 방식을 개선하기 위한 연구가 필요하다. 또한 변형률 센서는 광강도형으로 매크로벤딩 효과를 이용하여 구성하였으며 개발된 센서는 광섬유 매크로벤딩 효과를 이용하여 광섬유를 절단하지 않고 구성하여 내구성이 뛰어나며 부착 방법을 개선하여 시편 위에 부착 용이하다는 장점이 있다. 향후 센서의 정밀도를 향상시키기 위한 연구가 필요하며 센서 packaging 방식을 개선하기 위한 연구가 필요하다.

신호처리기술 개발과 인터넷을 기반으로 구성한 기초적인 상시감시 시스템 개발은 전기신호를 이용한 측정기술, 데이터 저장과 전송기술 및 상시감시 시스템 적용 영역 및 활용 영역을 확대시킬 수 있을 것이다. 본 연구에서는 광섬유 음향방출센서와 변형률센서를 이용하여 기초적인 stand-alone 형태의 상시감시 시스템인 SES I을 개발하였다. SES I은 대상 구조물의 건전성 평가 및 자체 진단 기능이 있으며 인터넷을 이용하여 web상에서 대상 설비의 실제 상태를 client들에게 실시간으로 제공하는 기능을 포함하고 있다. 향후 시스템과 PC 간의 효율적인 신호전송방법과 실제 적용 실험을 통한 SES I을 개선하기 위한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서는 HiL 방법을 적용하기 위해 균열 측정을 위한 다채널 DCPD system 등의 각종 하드웨어 소프트웨어를 개발·보완하고 인터페이스부를 개발하였다. 이런 각종 측정장비들과 소프트웨어를 이용한 HiL 시뮬레이터를 사용하면 중화학플랜트 대상의 실제 실험에 소요되는 막대한 경비와 시간을 줄일 수 있으며 중화학플랜트 상시감시 시스템 구축을 위한 데이터베이스 구축에도 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

본 시스템을 기존의 중화학 설비나 건설 예정인 설비에 적용함으로써 시간과 경

비를 많이 소요하는 기존의 검사방법에 비해 저가이고 가동중 감시를 통한 설비의 생산성을 높이고 설비의 실제이력을 바탕으로 한 교체주기의 합리적인 예측을 가능하게 한다. 또한 상시감시 시스템 개발 기술의 국산화를 통해 중화학설비의 상시감시 시스템을 개발하여 기술, 자료 축적 및 설비의 수출시 대외 경쟁력 확보에 기여할 수 있을 것이다. 또한 중화학 설비 외에 에너지 설비등의 다른 대형설비로의 상시감시 시스템을 적용함으로써 산업설비의 안전성과 경제성을 높일 수 있다.

본 연구과정중 총 8편의 논문발표(논문집 1건, 학술대회 논문 7건)를 하였으며 '광섬유 외팔보의 공진을 이용한 음향방출센서'(출원번호:99-40978)의 특허출원과 '개질로 튜브 온라인 수명 모니터링 시스템 소프트웨어'의 소프트웨어 등록예정이다.

제 5장 연구개발결과의 활용계획

본 과제를 통해 개발된 중화학 플랜트 상시안전 감시 시스템은 중화학 플랜트 설비중 개질로를 대상으로 개발되었다. 개질로의 특성상 대상설비별로 운전조건에 따라 발생하는 온도, 응력이 상당한 차이를 보이고 있으므로 시스템의 실기장착시에 configuration과정에 상당한 시간이 필요하다. 이런 과정을 줄일 수 있는 설비 configuration 모듈에 대한 연구가 필요할 것이다. 또한 본 시스템에 사용된 수명평가 모듈의 크리프, 크리프-연성소진 알고리즘 이외에 확률론적 평가등의 평가 모듈을 추가시켜 수명평가의 신뢰성을 향상시킬수 있는 방법에 대한 연구, MS-SQL Server의 적용을 통한 안정성 및 대용량 데이터베이스 구축에 대한 연구가 필요하다. 또한 중화학 플랜트설비 상시감시 시스템 구축을 위하여 광섬유를 이용한 센서 개발, 기초적인 상시감시 시스템 구축 및 실기 실험을 위한 시뮬레이터를 구성하였으며 개발된 광섬유 음향방출센서와 변형률센서는 간단한 구성과 경제적인 제작비용으로 구성되어 구조물의 음향방출신호나 변형률 측정에 적용할 수 있으며, 실제 대형산업설비의 균열발생과 같은 이상상태를 판단하는 핵심 센서부로 활용할 수 있다. 또한 음향방출센서는 광섬유 외팔보를 이용하여 진동 신호 측정에도 효율적으로 활용될 수 있으며 음향방출신호 측정이 중요변수인 박막코팅부 강도실험 등에 적용하여 센서의 효율성을 확인할 계획이다. 변형률센서는 packaging 방법을 개선하면 전기저항식 변형률센서의 적용이 어려운 고온 부위에 적용이 가능할 것으로 판단되며 그 구성원리인 매크로밴딩 효과를 이용하여 온도 등의 다른 물리량을 측정에도 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

개발된 상시감시 시스템은 광신호 처리 뿐 만 아니라 전기신호를 이용한 측정기술, 데이터 저장과 전송기술 및 상시감시 시스템 적용 영역 및 활용 영역을 확대시킬 수 있을 것이다. 또한 인터넷 기반이므로 인터넷을 이용한 각종 데이터베이스 공유 및 확장 등에 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 HiL 방법을 적용함으로써 실기 시험이 어려운 영역의 실험으로 적용 영역을 확장하고 균열 측정을 위한 다채널 DCPD system 등의 각종 하드웨어 소프트웨어를 개발·보완하여 사용함으로써 실제 실험에 소요되는 막대한 경비와 시간을 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

본 시스템은 개질로이외의 기타 고온설비로의 적용도 가능하며 온도모니터링 기술, 열응력 해석기술, 수명평가 기술은 개질로이외의 기타 설비의 모니터링 시스템에 독립적으로 이식이 가능하다. 또한 연구를 진행시켜 시제품화 할 예정이며 실기 장착후 주기적인 검사 데이터와 비교, 보완작업을 거치면 현장 플랜트 운영의 안전성과 경제성에 많은 도움을 줄 수 있을 것이다.

제 6장 참고 문헌

1. Creep-FatiguePro: On-Line Creep-Fatigue Damage and Crack Growth Monitoring System Copeland, J. F., et. al, EPRI TR-100907, July, 1992
2. FatiguePro: On-Line Fatigue Usage Transient Monitoring System, Ricardella, P.C., et. al, EPRI NP-5835M, May, 1988
3. Green's Function Technique for Structures Subjected to Multiple Site Thermal Loading, Kuan-Luen Chen, An-Yu Kuo, SMiRT 11 Transactions Vol. D, Aug. 1991, Tokyo, Japan
4. ASTM, Vol. 3.01, E1049-85, Standard Practice for Cycle Counting in Fatigue Analysis, 1994
5. API-RP530 "Calculation of Heater Tube Thickness in Petroleum Refineries", 4th Ed, 1996
6. McEligot, D. M., Magee, P. M., and Leppart, G., "Effect of Large Temperature Gradients on Convective Heat Transfer: The Downstream Region," Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, Series C: Journal of Heat Transfer, Vol. 87, pp. 67-76, February 1965
7. Ricardella, P. C., et al, "FatiguePro : On-Line Fatigue Usage Transient Monitoring System ", EPRI NP-5835M, 1998
8. Boley, B. A., and Weiner, J. H., "Theory of Thermal Stresses", John Wiley & Sons, New York, New York, 1960
9. Carslaw, H. S., and Jaeger, J. C., "Conduction of Heat Transfer", Second Ed., Oxford University Press, London, U.K., 1959
10. Donlagic and M. Završnik, "Fiber-Optic Microbend Sensor Structure," Optics Letters, Vol. 22, No. 11(1997), pp. 837-839.
11. B. L. Anderson, "New Approach to Microbending Fiber Optic Sensors : Varying the Spatial frequency," Optical Engineering, Vol. 34, No. 1(1995), pp. 208-213.
12. A. Andriesh, I. Culeac, V. Binkevich, and V. Abashkin, "Fiber Optic Displacement Sensor Based on Clad Modes Detection," SPIE Vol. 2778 Optics for Science and New Technology(1996), pp. 1128-1129.
13. Karl F. Voss and Keith H. Wanser, "Fiber-optic strain-displacement sensor employing nonlinear buckling", APPLIED OPTICS, Vol. 36, No. 13(1997), pp. 2944-2946.
14. A. Sharma, Y. Powell-Friend, T. George, and L. Phillips, "Oscillatory light loss within the cladding of a straight optical fiber : comparison with whispering-gallery modes," OPTICS LETTERS, Vol. 23, No. 4(1998), pp.

- 262-264.
15. F. M. Haran, J. S. Barton, and J. D. C. Jones, "Determination of monomode fiber buffer properties from bend-loss measurements," OPTICS LETTERS, Vol. 18, No. 19 (1993), pp. 1618-1620.
 16. P. M. Cavalerio, F. M. Araujo, L. A. Ferreira, J. L. Santos, and F. Farahi, "Simultaneous Measurement of Strain and Temperature Using Bragg Gratings Written in Germanosilicate and Boron-Codoped Germanosilicate Fibers," IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, Vol. 11, No. 12(1999), pp. 1635-1637.
 17. S. Huang, M. M. Ohn, and R. M. Measures, "Phased-Based Bragg Intragrating Distributed Strain Sensor", Applied Optics, Vol. 35, No. 7(1996), pp. 1135-1142.
 18. 전병선, 김경진, 박현철, 황운봉, 박위상, "광섬유센서를 이용한 복합적충보의 진동 제어," 대한기계학회 춘계학술대회논문집(A)(1996), pp. 321-324.
 19. T. W. Kao and H. F. Taylor, "High Sensitivity Intrinsic Fiber-Optic Fabry-Perot Pressure Sensor," Optics Letters, Vol. 21, no. 8(1996), pp. 615-617.
 20. P. C. Beard and T. N. Mills, "Extrinsic Optical-Fiber Ultrasound Sensor Using a Thin Polymer Film As a Low-Fitness Fabry-Perot Interferometer," Applied Optics, Vol. 35, No. 4(1996), pp. 663-675.
 21. N. Fustenuau, T. Beyer, and A. Werner et al, "Fiber-Optic Vibration and Acoustic Sensor Systems for Traffic Monitoring," SPIE Vol. 2778 Optics for Science and New Technology(1996), pp. 1092-1093.
 22. D. Janzen, N. Furstenuau, and W. Goetze, "Fiber-optic sensors for smart taxiways," The International Society for Optical Engineering USA, SPIE, 2509(1995), pp. 36-45
 23. F. Luo, J. Liu, and S. Chen, "Fiber Optic Distributed Sensing Scheme for Monitoring Structural Strain and Deformation," Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers(1997), pp. 1548-1551.
 24. S. Zivanovic, J. Elazar, and M. Tomic, "A Fiber-Optic Position Sensor for Non- Contact Measurement in Hostile Environment," IEEE(1997), pp. 562-563.
 25. M. Doi, Y. Iwasaki, T. Shionoya, and K. Okamoto, " High-Resolution Displacement Sensor Using Mode Interference in the Optical Waveguide", EWD 5(1996), pp. 106-109.
 26. T. A. Carolan and R. L. Reuben et al, "Fiber-Optic Sagnac Interferometer for Noncontact Structural Monitoring in Power Plant Applications," Applied Optics, Vol. 36, No. 1(1997), pp. 380-385.
 27. 홍창선, 류치영, 구본용, "광섬유센서를 이용한 대형구조물 안전감시시스템."

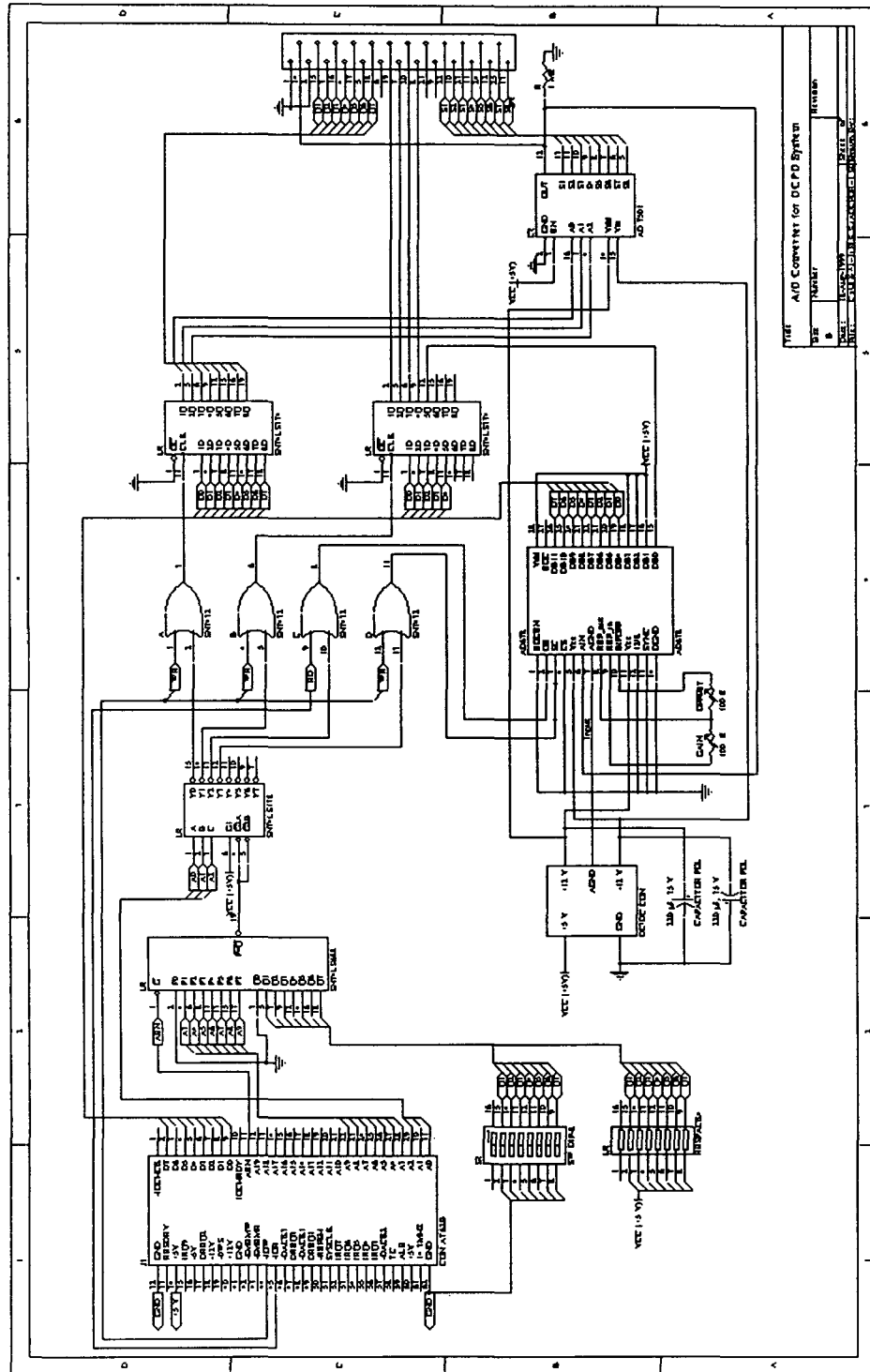
- 인위재해 방재기술 workshop(1999), pp. 3-12.
28. 강성철, 김세윤, 이상배, 권서원, 최상삼, 이병호, "Temperature Independent Strain Sensor System Using a Tilted Fiber Bragg Grating Demodulator," IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 10, NO. 10(1998), pp.1461-1463.
 29. 윤병호, 서완석, "파장 선택형 광 검출기를 이용한 광섬유 브래그 격자 온도센서," 제5회 광전자공학 학술회의 논문 FA2-1(1998), pp. 61-62.
 30. 정재훈, 남희, 이병호, 변재오, 김남성, "고감도 광섬유 브래그 격자 온도센서," 제5회 광전자공학 학술회의 논문 FA2-2(1998), pp. 63-64.
 31. LG전선, http://www.lg.co.kr/h_lg/group/news/press/199803/980312.html
 32. 박기환, 박진우, 서광석, "광섬유센서를 이용한 탄소 섬유/에폭시 복합재료의 음향방출신호의 측정," 고려대학교 공과대학 공학논집 제31집(1990), pp. 95-100.
 33. 김영환, 소철호, 권오양, "광로차 보상회로가 부착된 마이켈슨 간섭계에 의한 탄성과 신호검출," 비파괴검사학회지, Vol. 13 No. 4(1993), pp.32-40.
 34. 강성철, 김성철, 이상배, 최상삼, 이병호, "광경로차가 조절된 마하-젠더 간섭계와 광섬유 격자 센서를 이용한 동적 스트레인의 실시간 측정," 제5회 광전자공학 학술회의 논문 FA2-3(1998), pp. 65-66.
 35. 이호일, 이경진, 박재희, 강신원, "콘크리트 구조물에 매설된 광섬유 다중화 Fabry -Perot 센서," 제5회 광전자공학 학술회의 논문 FA2-7(1998), pp. 73-74
 36. 수증기 개질로·분해로 핸드북, 고압가스 보안에 관한 정보소개 No.96, 고압가스 보안협회, 1985
 37. 수증기 개질로·분해로의 반응관수명예측, 고압가스 보안에 관한 정보소개 No.85, 1983
 38. Dr. Ib Dybkjar, "Steam Reforming Technology", Haldor Topsoe A/S, DK-2800 Lyngby, Denmark
 39. "NRIM Creep Data Sheet No.3B, "National Research Institute for Metals, Tokyo, Japan,1989
 40. "Assessment Procedure R5, Issue 2, Vol. 2, Vol. 3", Nuclear Electric Ltd, U.K, 1996
 41. 문영식, 정현규, 주용상, "On-Line Monitoring of Crack Propagation by Acoustic Emission", 한국원자력연구소 Research Report, No. KAERI/RR-449/84(1985), pp. 482-483
 42. "회전기 베어링 AE 진단기술 개발", 한국전력공사 기술연구원 Research Report, KRC-90G-05(1993), pp. 35.
 43. I. G. Scout, Basic Acoustic Emission, Gordon and Breach Science Approach(1991).
 44. 홍창선, 권일범, "광섬유센서를 이용한 스마트 구조물의 안전진단 기술",

- 테마기획 대한기계학회지 6월호(1997), pp. 42-46.
45. S. S. Rao, "Mechanical Vibration," Addison Wesley, pp.182-192.
 46. L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, and J. V. Sanders, "Fundamental of Acoustics," John Wiley & Sons, pp.58-60, Appendix 10.
 47. 구인모, 남기진, 송윤원, 송정태, 안규철, 정명덕, 정종래, "광통신," 복두출판사 (1997), pp. 61-85.
 48. A. W. Snyder and D. J. Mitchell, "Bending losses of multimode optical fibers," ELECTORNICS LETTERS, Vol. 10, No. 1(1974), pp. 11-12.
 49. "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates", ASTM standard E647.

* 부록

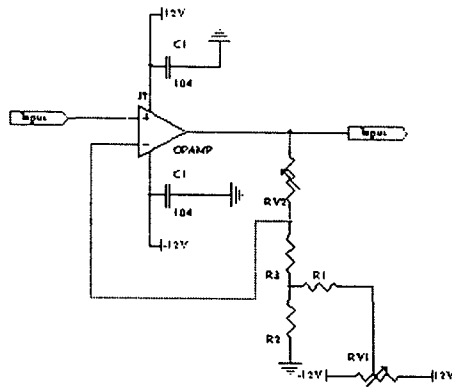
< Appendix I : Hardware Circuit >

AI-1 A/D Converter(AE System & DCPD System)

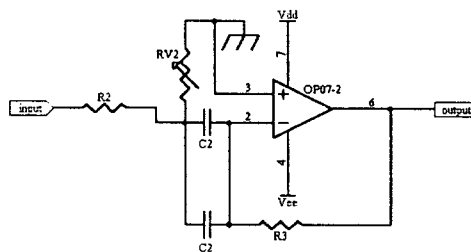


AI-2 Amplifier & Filter(AE System)

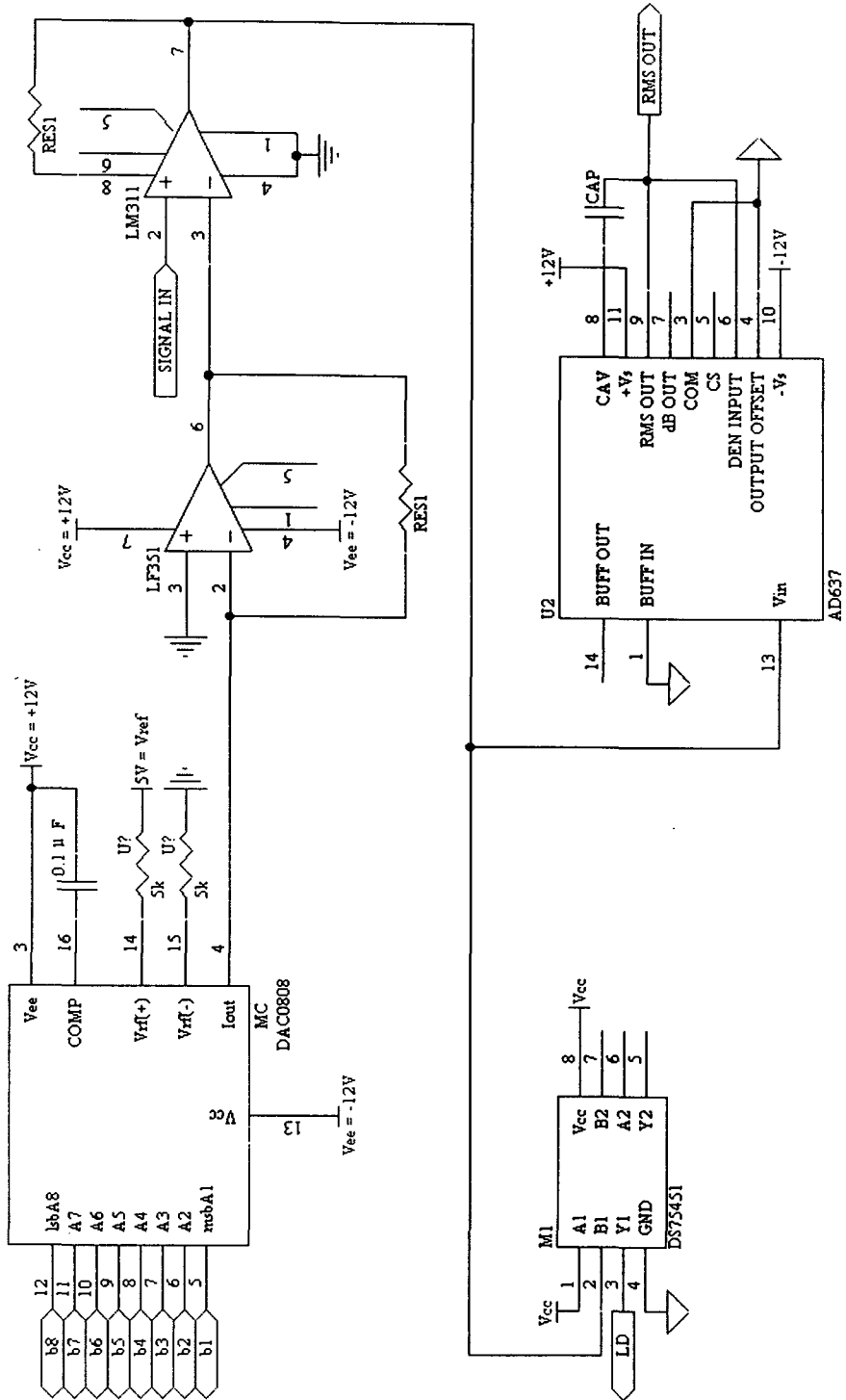
AI-2.1 Amplifier



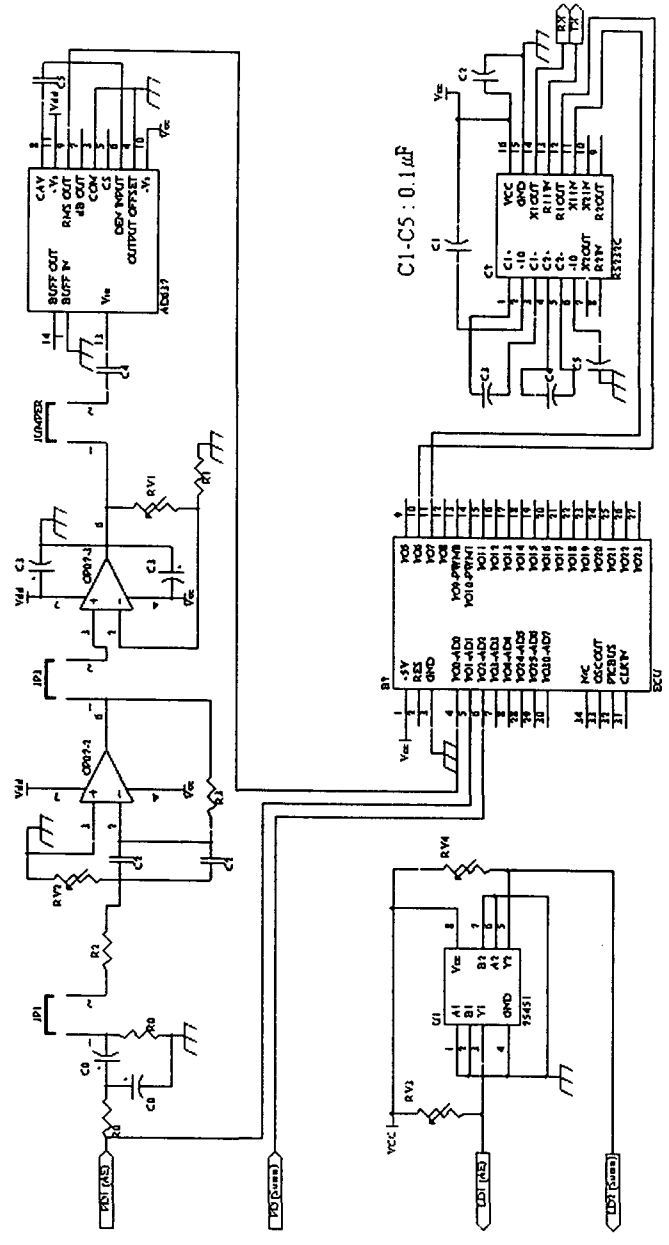
AI-2.2 Filter



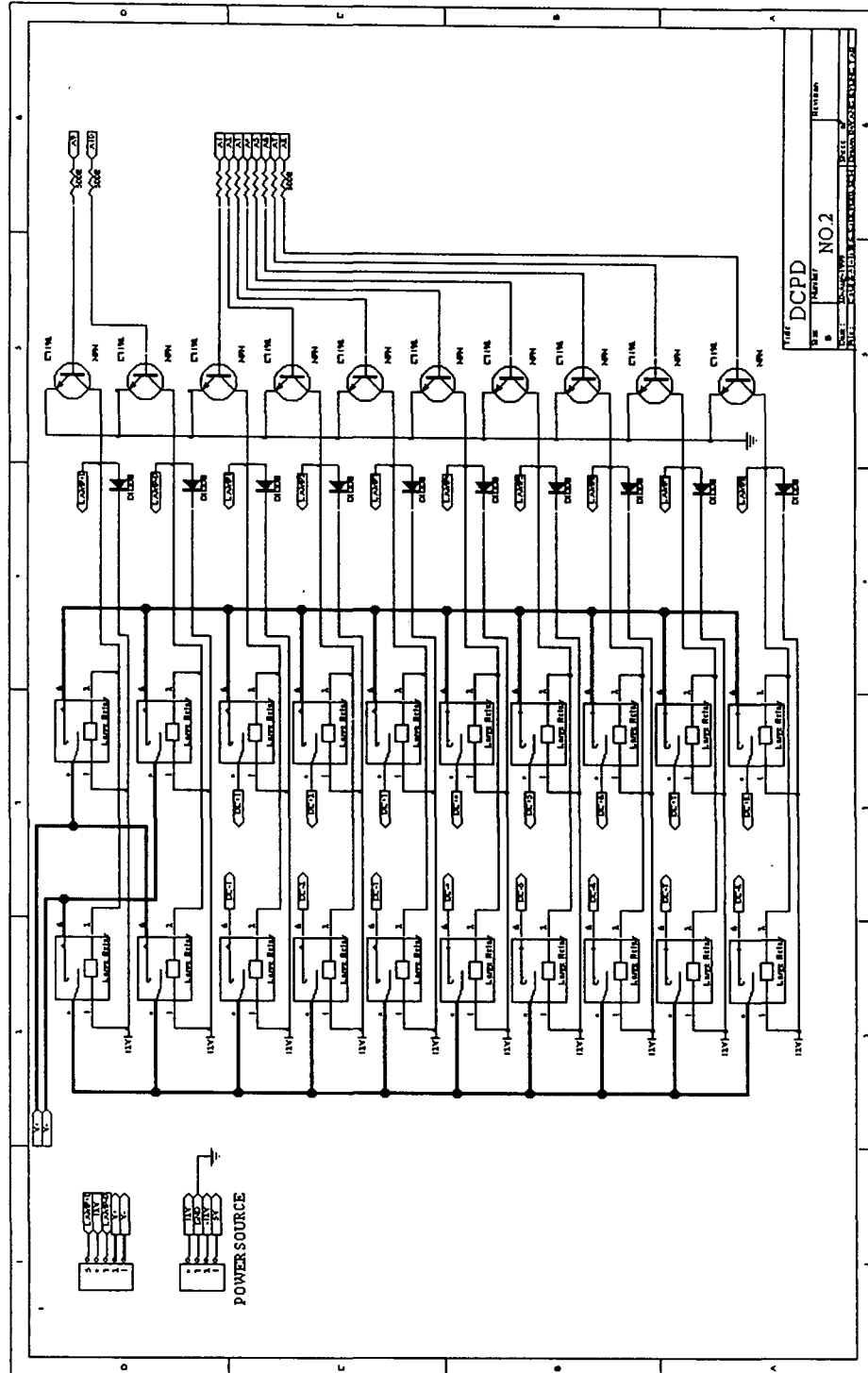
AI-3 RMS Circuit(AE System)



AI-4 ECU Circuit (SES I System)



AI-6 DCPD Circuit(Hardware-in-the-Loop) - 2



< Appendix II : Programing Source >

AI1-1 JAVA Programing Source(Web Server)

```
import java.io.*;
import java.net.*;
import java.awt.*;
import java.awt.event.*;
import javax.swing.*;
import javax.swing.event.*;
import javax.swing.border.*;
import java.awt.Graphics.*;
import java.awt.geom.*;
import java.awt.image.*;

public class test extends JApplet implements Runnable{
    Container frameContainer;
    JTabbedPane tabbedPane = new JTabbedPane();
    JPanel dialogPanel = new JPanel();
    JPanel evaluationPanel = new JPanel();
    JPanel onPanel = new JPanel();
    JPanel aePanel = new JPanel();
    JPanel loadPanel = new JPanel();
    JPanel strainPanel = new JPanel();
    JPanel[] panels={aePanel,loadPanel,strainPanel,onPanel}
    JTextArea aboutArea = new JTextArea();
    JButton sensor1=new JButton("LD(AE)");
    JButton sensor2=new JButton("LD(STRAIN)");
    JButton fiber1=new JButton("Sensor(AE)");
    JButton fiber2=new JButton("Sensor(STRAIN)");
    JButton ses=new JButton("SES I");
    JButton power=new JButton("POWER");
    Image icon1;
    Image icon2;
    Image icon3;
    Image icon4;
    JLabel em1=new JLabel("AE",JLabel.CENTER);
    JLabel em2=new JLabel("STRAIN",JLabel.CENTER);
    JLabel volt1=new JLabel("Voltage",JLabel.CENTER);
    JLabel time1=new JLabel("Time",JLabel.CENTER);
    JLabel volt2=new JLabel("Voltage",JLabel.CENTER);
```

```

JLabel time2=new JLabel("Time",JLabel.CENTER);
JProgressBar aePBar=new JProgressBar(JProgressBar.VERTICAL,0,100);
JProgressBar strainPBar=new JProgressBar(JProgressBar.VERTICAL,0,100)
AudioClip clip;

String[] tabs={"AE","LOAD","STRAIN","About SES I"};
String[] tabTips={"AE","LOAD","STRAIN","Safety Evaluation System"};
int data[][]=new int[1000][7];
int curPanel=3;
int emrms=50,emraw=250,emstrain=250,
    emsensor1=1,emsensor2=1,emses=0,emfiber1=0,emfiber2=0;
int imax=0,checkfile=0,audio=0;
int aemax=0,strainmax=0;

// 2초간격으로 Update
public void run(){
    while(){
        if (imax>400) checkfile=checkfile+4;
        imax=checkFileNumber(checkfile);
        repaint();
        try{
            Thread.sleep(2000);
        }catch (Exception e) {}
    }
}

// 애플릿 시작시 Thread시작
public void start() {
    Thread thd = new Thread(this);
    try{
        thd.start();
    }catch (Exception e) {}
}

// 애플릿 시작시 기본값 지정
public void init() {
    clip = getAudioClip(getCodeBase(),"beep.au");
    for (int i=0;i<tabs.length;++i){
        panels[i].setBackground(Color.lightGray);
        panels[i].setBorder(new TitledBorder(tabTips[i]));
        tabbedPane.addTab(tabs[i],null,panels[i],tabTips[i]);
    }
    dialogPanel.setBackground(Color.lightGray);
}

```

```

        dialogPanel.setBorder(new TitledBorder("System Status"));
        evaluationPanel.setBackground(Color.lightGray);
        evaluationPanel.setBorder(new TitledBorder("Evaluation"))
        addComponentsToTabs();
        frameContainer = getContentPane();
        frameContainer.setLayout(null);
        tabbedPane.setBounds(0,0,500,500);
        dialogPanel.setBounds(0,500,700,50);
        evaluationPanel.setBounds(500,0,200,500);
        frameContainer.add(dialogPanel);
        frameContainer.add(tabbedPane);
        frameContainer.add(evaluationPanel);
        tabbedPane.addChangeListener(new TabbedPaneHandler());
        setSize(700,550);
    }

    public void addComponentsToTabs() {
        setupOnPanel();
        setupAePanel();
        setupLoadPanel();
        setupStrainPanel();
        setupDialogPanel();
        setupEvaluationPanel();
    }

    void setupDialogPanel() {
        dialogPanel.setLayout(null);
        sensor1.setBorder(new BevelBorder(BevelBorder.RAISED));
        sensor2.setBorder(new BevelBorder(BevelBorder.RAISED));
        fiber1.setBorder(new BevelBorder(BevelBorder.RAISED));
        fiber2.setBorder(new BevelBorder(BevelBorder.RAISED));
        ses.setBorder(new BevelBorder(BevelBorder.RAISED));
        power.setBorder(new BevelBorder(BevelBorder.RAISED));
        sensor1.setBounds(20,20,100,20);
        sensor2.setBounds(130,20,100,20);
        fiber1.setBounds(240,20,100,20);
        fiber2.setBounds(350,20,100,20);
        ses.setBounds(460,20,100,20);
        power.setBounds(570,20,100,20);

        dialogPanel.add(sensor1);
    }

```

```

        dialogPanel.add(sensor2);
        dialogPanel.add(fiber1);
        dialogPanel.add(fiber2);
        dialogPanel.add(ses);
        dialogPanel.add(power);
    }

    void setupEvaluationPanel() {
        evaluationPanel.setLayout(null);
        em1.setBounds(40,20,50,20);
        em2.setBounds(110,20,50,20);
        icon1 = getImage(getCodeBase(),"bar.jpg");
        icon2 = getImage(getCodeBase(),"safe-logo.jpg");
        ImageIcon icon_ae=new ImageIcon(icon1);
        ImageIcon icon_logo=new ImageIcon(icon2);
        JButton bar=new JButton("",icon_ae);
        JButton logo=new JButton("",icon_logo);
        bar.setBounds(90,40,20,350);
        logo.setBounds(40,400,120,84);
        aePBar.setBounds(40,40,50,350);
        aePBar.setStringPainted(true);
        strainPBar.setBounds(110,40,50,350);
        strainPBar.setStringPainted(true);
        evaluationPanel.add(bar);
        evaluationPanel.add(logo);
        evaluationPanel.add(em1);
        evaluationPanel.add(em2);
        evaluationPanel.add(aePBar);
        evaluationPanel.add(strainPBar);
    }

    void setupOnPanel() {
        onPanel.setLayout(null);
        icon3 = getImage(getCodeBase(),"ecu.jpg");
        icon4 = getImage(getCodeBase(),"label.jpg");
        ImageIcon icon_ecu=new ImageIcon(icon3);
        ImageIcon icon_label=new ImageIcon(icon4);
        JButton ecu=new JButton("",icon_ecu);
        JButton label=new JButton("",icon_label);
        ecu.setBounds(40,40,400,300);
        label.setBounds(40,350,400,84);
    }

```



```

        onPanel.add(ecu);
        onPanel.add(label);
    }

    void setupAePanel() {
        aePanel.setLayout(null);
        volt1.setBounds(5, 20, 80, 15);
        time1.setBounds(40, 400, 400, 10);
        aePanel.add(volt1);
        aePanel.add(time1);
    }

    void setupLoadPanel(){
        loadPanel.setLayout(null);
        volt2.setBounds(5, 20, 80, 15);
        time2.setBounds(40, 400, 400, 10);
        loadPanel.add(volt2);
        loadPanel.add(time2);
    }

    //애플릿에 Event발생 검출자 부착
    public class TabbedPaneHandler implements ChangeListener{
        public void stateChanged(ChangeEvent e) {
            curPanel=tabbedPane.getSelectedIndex();
            repaint();
        }
    }

    public void paint(Graphics g){
        tabbedPane.setSelectedIndex(curPanel);
        dialogPanel.repaint();
        evaluationPanel.repaint();
        Font newFont = new Font("Dialog", Font.BOLD, 12);
        g.setFont(newFont);
        if (curPanel==3) drawonPanel(g);
        else if (curPanel==2) drawstrainPanel(g);
        else if (curPanel==1) drawloadPanel(g);
        else if (curPanel==0) drawaePanel(g);
    }

    //그래프화면 초기화
    public void initPanel(Graphics g){

```

```

Graphics2D g2d = (Graphics2D) g;
GradientPaint acyclicGradient = new
    GradientPaint(0, 0, Color. white, 400, 350, Color. white, false)
g2d. setPaint(acyclicGradient);
g2d. fill(new Rectangle2D. Float(40, 70, 400, 350));
g. setColor(Color. darkGray);
g. drawRect(40, 70, 400, 350);
if (curPanel==0){
    g. drawString(5+"", 30, 75);
    for (int i=1;i<5;i++){
        g. setColor(Color. darkGray);
        g. drawString(5-i+"", 30, 75+i*70);
        g. setColor(Color. lightGray);
        g. drawLine(40, 70+i*70, 440, 70+i*70);
    }
    else if (curPanel==1 || curPanel==2){
        g. drawString(4+"", 30, 75);
        for (int i=1;i<4;i++){
            g. setColor(Color. darkGray);
            g. drawString(4-i+"", 30, 75+i*88);
            g. setColor(Color. lightGray);
            g. drawLine(40, 70+i*88, 440, 70+i*88);
        }
    }
    g. setColor(Color. darkGray);
    g. drawString("0", 30, 425);
    g. setColor(Color. lightGray);
    for (int i=2;i<10;i=i+2)
        g. drawLine(40+i*40, 419, 40+i*40, 69);
    g. setColor(Color. darkGray);
}

//위험 상황시 Alarm
public void bell(){
    clip. play();
}

//위험 상황 판단
public void status(){
    for (int i=0;i<imax;i++) {
        if (data[i][1]>aemax) aemax=data[i][1];
        if (data[i][3]>strainmax) strainmax=data[i][2];
        if (data[i][1]>emrms || data[i][3]>emstrain) bell();
        else if (audio==1) audio++;
    }
}

```

```

if(data[i][4]==emsensor1) sensor1.setBorder(new MatteBorder(2,2,2,2,Color.red))
if(data[i][5]==emsensor2) sensor2.setBorder(new MatteBorder(2,2,2,2,Color.red))
if(data[i][2]<emfiber1) fiber1.setBorder(new MatteBorder(2,2,2,2,Color.red));
if(data[i][3]<emfiber2) fiber2.setBorder(new MatteBorder(2,2,2,2,Color.red));
if(data[i][1]==0 && data[i][2]==0 && data[i][3]==0 && data[i][4]==0)
    power.setBorder(new MatteBorder(2,2,2,2,Color.red));
    else power.setBorder(new BevelBorder(BevelBorder.RAISED));
dialogPanel.repaint();
}
aePBar.setValue(aemax*100/255);
aePBar.setString(aemax*100/255+"%");
strainPBar.setValue(strainmax*100/255);
strainPBar.setString(strainmax*100/255+"%");
}

```

//AE 신호 출력

```

public void drawaePanel(Graphics g){
    int c=0,x=40,temp=0,oldy=0,curry=0;
    if (imax>400) c=400;
        else c=imax;
    initPanel(g);
    g.setColor(Color.blue);
    for (int i=0;i<c;i++) {
        temp=(350*data[i][1])/255;
        curry=420-temp;
        g.drawLine(data[i][0]==1 ? data[i][0]+39 : data[i-1][0]+40 ,
            data[i][0]==1 ? curry : oldy , data[i][0]+40 , curry);
        oldy=curry;
    }
    status();
    g.setColor(Color.black);
}

```

//Load 신호 출력

```

public void drawloadPanel(Graphics g){
    int c=0,x=40,temp=0,oldy=0,curry=0;
    if (imax>400) c=400;
        else c=imax;
    initPanel(g);
    g.setColor(Color.red);
    for (int i=0;i<c;i++) {
        temp=(350*data[i][1])/255;
        curry=420-20;

```

```

        g.drawLine(data[i][0]==1 ? data[i][0]+39 : data[i-1][0]+40 ,
                   data[i][0]==1 ? curry : oldy , data[i][0]+40 , curry);
        oldy=curry;
    }
    status();
    g.setColor(Color.black);
}

//Strain 신호 출력
public void drawstrainPanel(Graphics g){
    int c=0,x=40,temp=0,oldy=0,curry=0;
    if (imax>400) c=400;
        else c=imax;
    initPanel(g);
    g.setColor(Color.green);
    for (int i=0;i<c;i++) {
        temp=(350*data[i][3])/255;
        curry=420-temp;
        g.drawLine(data[i][0]==1 ? data[i][0]+39 : data[i-1][0]+40 ,
                   data[i][0]==1 ? curry : oldy , data[i][0]+40 , curry);
        oldy=curry;
    }
    status();
    g.setColor(Color.black);
}

//데이터 입력
public int checkFileNumber(int num_file){
    int k=0;
    String filename;
    k=0;
    try {
        for(;;){
            filename = new String("http://10.24.31.41/ecudata/Test"+num_file+".dat");
            BufferedReader inStream = new
                BufferedReader(new InputStreamReader(filename.openStream()));
            for (int i=0;i<100;i++){
                for (int j=0;j<6;j++) {
                    data[k][j]=Integer.parseInt(inStream.readLine());
                }
                k++;
            }
            num_file++;
            inStream.close();
        }
    }
}

```

```
    }  
    }catch (MalformedURLException ex) {return k;  
    }catch (IOException e) {return k;}  
    }  
    }
```

All-2 Visual Basic™ Programing Source(ECU Control)

```
// 데이터 저장될 directory 지정
Private Sub browse_Click()
    Dlg1.ShowSave
    If Err.Number = cdlCancel Then Exit Sub
End Sub

// 프로그램 정지시
Private Sub Close_Click()
    MSComm1.Output = "AB" + Chr(3)
    End
End Sub
Private Sub Graph_Click()
    Form2.Show
End Sub

// RS-232C 통신 setup
Private Sub MSComm1_OnComm()
    Dim e As Integer
    e = MSComm1.CommEvent
    If e = 1 Then
        er = er + 3
    Else: er = 0
    End If
    If er > 5 Then
        'Close f
        Print #f, 0 & Chr(10) & 0 & Chr(10) & 0 & Chr(10) & 0
        Close f
        fname = Dlg1.FileName & (FileNo + 1) & ".dat"
        f = FreeFile
        Open fname For Output As f
        MsgBox ("Check power or Connector !!!")
        er = 0
        msgcheck = 1
        If (msgcheck = 1) Then Exit Sub
        Exit Sub
    End If
End Sub
Private Sub Quit_Click()
    MSComm1.Output = "AB" + Chr(2)
    StatusBar1.Panels(1).Text = "ECU Closing ..."
    StatusBar1.Panels(1).Text = "ECU Closed."
```

```

    Timer1.Enabled = False
    Close f
End Sub

```

```

// 프로그램 start

```

```

Private Sub Start_Click()
    If Dlg1.FileName <> "" Then
        f = FreeFile
        fname = Dlg1.FileName & FileNo & ".dat"
        Open fname For Output As f
    End If

    StatusBar1.Panels(1).Text = "ECU Loading ..."
    Timer1.Enabled = True
    StatusBar1.Panels(1).Text = "ECU Activated !!!"

    S = Timer
End Sub

```

```

// 변수 초기화

```

```

Private Sub Form_Load()
    MSComm1.PortOpen = True
    FileNo = 0
    DataSet = 0
    er = 0
    row = 0
    before = 0
    after = 0
End Sub

```

```

// Timer 장착

```

```

Private Sub Timer1_Timer()
    MSComm1.Output = "AB" + Chr(1)
    Instring = MSComm1.Input
    Data0 = Len(Instring)
    If Data0 <> 3 Then Exit Sub
    Data(j. 1) = Asc(Mid(Instring, 1, 1))
    Data4 = Asc(Mid(Instring, 2, 1))
    Data5 = Asc(Mid(Instring, 3, 1))
    row = row + 1 ' 데이터를 출력하는 Grid의 index
    DataSet = DataSet + 1 ' 생성되는 데이터 SET의 수
    DataNo = DataNo + 1 ' 데이터의 총 번호

```

```

Grid1.AddItem (row)
Grid1.TextMatrix(row, 0) = DataNo
Grid1.TextMatrix(row, 1) = Format((Data(j, 1) / 51), "0.000")
Grid1.TextMatrix(row, 2) = Data(j, 1)
Bar1.Value = Data(j, 1)
If (Data4 = 0) Then Label1.Caption = "LD #1 : On" Else Label1.Caption = "LD #1
Off"

If (Data5 = 0) Then Label2.Caption = "LD #2 : On" Else Label2.Caption = "LD #2
Off"

Call Form2.Draw_data
Print #f, DataNo & Chr(10) & Data(j, 1) & Chr(10) & Data4 & Chr(10) & Data5
If DataNo = 400 Then DataNo = 0
j = j + 1
If j = 9 Then j = 0
If DataSet = 100 Then
    DataSet = 0
    FileNo = FileNo + 1
    Close f
    fname = Dlg1.FileName & FileNo & ".dat"
    f = FreeFile
    Open fname For Output As f
End If
Fi = Timer
Form2.Text2.Text = Format((Fi - S), "0.000")
End Sub

```


LIMOs Server Algorithm Module Source (Visual Basic)

Option Explicit

Option Base 1

// 튜브 bottom 외표면온도 계산

Public Function CalTempBottomOuter(ByVal LoTempBelowBottom As Single, ByVal LoDeltaTemp As Single) As Single

 CalTempBottomOuter = LoTempBelowBottom + LoDeltaTemp

End Function

// Modified Heat Flux 계산

Public Function CalHeatFlux(ByVal LoHeatFluxRatio As Single, ByVal LoP1 As Single, ByVal LoP2 As Single, ByVal LoP3 As Single, ByVal LoP4 As Single, ByVal LoLength As Single) As Single

 Dim LoSourceHeatFlux As Single

 LoSourceHeatFlux = LoP1 + LoP2 * LoLength + LoP3 * LoLength ^ 2 + LoP4 * LoLength ^ 3

 CalHeatFlux = LoHeatFluxRatio * LoSourceHeatFlux

End Function

// Reynold Number 계산

Public Function CalReynoldNum(ByVal LoOuterDiameter As Single, ByVal LoThickness As Single, ByVal LoMassFlux As Single, ByVal LoViscosity As Single) As Single

 Dim LoInnerDiameter As Single

 LoInnerDiameter = LoOuterDiameter - 2 * LoThickness

 CalReynoldNum = (LoInnerDiameter * LoMassFlux) / LoViscosity

End Function

// Prantle Number 계산

Public Function CalPrantleNum(ByVal LoSpecificHeat As Single, ByVal LoViscosity As Single, ByVal LoFluidTherCond As Single) As Single

 CalPrantleNum = (LoSpecificHeat * LoViscosity) / LoFluidTherCond

End Function

// 열전도 계수 계산

```
Public Function CalHeatTransfer(ByVal LoFluidTherCond As Single, ByVal LoOuterDiameter As Single, ByVal LoThickness As Single, ByVal LoReynoldNum As Single, ByVal LoPrantleNum As Single, ByVal LoTempTopBulk As Single, ByVal LoTempTopInner As Single) As Single
```

```
    Dim LoInnerDiameter As Single
```

```
    LoInnerDiameter = LoOuterDiameter - 2 * LoThickness
```

```
    CalHeatTransfer = 0.021 * (LoFluidTherCond / LoInnerDiameter) * (LoReynoldNum ^ 0.8) * (LoPrantleNum ^ 0.4) * ((LoTempTopBulk / LoTempTopInner) ^ 0.5)
```

```
End Function
```

// 튜브 Top 내표면온도계산

```
Public Sub CalTempBulkToInner(ByVal LoHeatFlux As Single, ByVal LoOuterDiameter As Single, ByVal LoThickness As Single, ByVal LoHeatTransfer As Single, ByRef LoTempTopBulk As Single, ByRef TempTopInner As Single)
```

```
    Dim LoInnerDiameter As Single
```

```
    LoInnerDiameter = LoOuterDiameter - 2 * LoThickness
```

```
    TempTopInner = LoTempTopBulk + (LoHeatFlux * LoOuterDiameter / LoInnerDiameter) / LoHeatTransfer
```

```
End Sub
```

// 튜브 Top 내표면온도계산 (by Newton Method)

```
Public Function CalTempBulkToInnerByNewton(ByVal LoHeatFlux As Single, ByVal LoOuterDiameter As Single, ByVal LoThickness As Single, ByVal LoMatTherCond As Single, ByVal LoReynoldNum As Single, ByVal LoPrantleNum As Single, ByVal LoTempTopBulk As Single, ByRef NewtonError As Integer) As Single
```

```
    Dim i As Integer
```

```
    Dim LoInnerDiameter As Single
```

```
    Dim LoInitialTemp, LoNextTemp As Single
```

```
    Dim a, b, Convergence As Single
```

```
    Dim Fn, DiffFn, SZ As Single
```

```
    LoInnerDiameter = LoOuterDiameter - 2 * LoThickness
```

```
    LoInitialTemp = LoTempTopBulk
```

```
    Convergence = 0.01
```

```
    a = (LoHeatFlux * (LoOuterDiameter / LoInnerDiameter) / (0.021 * LoMatTherCond / LoInnerDiameter * (LoReynoldNum ^ 0.8) * (LoPrantleNum ^ 0.4) * LoTempTopBulk ^ 0.5))
```

```
    b = LoTempTopBulk
```

```

If (LoInitialTemp < 1 Or LoInitialTemp > 1000) Then
    NewtonError = -1: CalTempBulkToInnerByNewton = LoTempTopBulk: Exit Function
End If

For i = 1 To 30 Step 1

    If (LoInitialTemp < 1) Then
        NewtonError = -1: CalTempBulkToInnerByNewton = LoTempTopBulk: Exit Function
    End If

    Fn = LoInitialTemp - a * LoInitialTemp ^ (0.5) - b
    DiffFn = 1 - 0.5 * a * (LoInitialTemp) ^ (-0.5)

    If DiffFn = 0 Then
        NewtonError = -1: CalTempBulkToInnerByNewton = LoTempTopBulk: Exit Function
    End If

    LoNextTemp = LoInitialTemp - Fn / DiffFn
    SZ = (LoNextTemp - LoInitialTemp) / LoNextTemp

    If (SZ < 0) Then
        SZ = -SZ
    End If

    If (SZ <= Convergence) Then
        NewtonError = 0: CalTempBulkToInnerByNewton = LoNextTemp: Exit Function
    End If

    LoInitialTemp = LoNextTemp

Next i

NewtonError = -1: CalTempBulkToInnerByNewton = LoTempTopBulk

End Function

// 튜브 Top 외표면온도계산

Public Function CalTempInnerToOuter(ByVal LoHeatFlux As Single, ByVal LoThickness As Single,
ByVal LoOuterDiameter As Single, ByVal LoMatTherCond As Single, ByVal LoTempTopInner As
Single) As Single

    CalTempInnerToOuter = LoTempTopInner + LoHeatFlux * LoThickness / LoMatTherCond *
        (LoOuterDiameter / (LoOuterDiameter - LoThickness))

```

End Function

// 튜브 감시위치의 외표면온도계산

```
Public Function CalMonitorOuterTemp(ByVal LoLength As Single, ByVal LoTempTopOuter As Single,
ByVal LoTempBottomOuter As Single, ByVal LoEqnType As Long, ByVal LoBottomTempType As Single,
ByVal LoTopTempType As Single, ByVal LoP1 As Single, ByVal LoP2 As Single, ByVal LoP3 As
Single, ByVal LoP4 As Single, ByVal LoP5 As Single, ByVal LoP6 As Single) As Single
```

```
    Dim LoTemp As Single
```

```
    Dim CorrectionFactor As Single
```

```
    If (LoEqnType = 1) Then 'Hyperbolic Decay Eqn (3 parameter)
```

```
        LoTemp = LoP1 + (LoP2 * LoP3) / (LoP3 + LoLength)
```

```
    ElseIf (LoEqnType = 2) Then 'Rational Eqn(3 parameter)
```

```
        LoTemp = (LoP1 + LoP2 * LoLength + LoP3 * LoLength ^ 2) / (1 + LoP4 * LoLength + LoP5 *
LoLength ^ 2 + LoP6 * LoLength ^ 3)
```

```
    End If
```

```
    CorrectionFactor = (LoTemp - LoTopTempType) / (LoBottomTempType - LoTopTempType)
```

```
    CalMonitorOuterTemp = LoTempTopOuter + CorrectionFactor * (LoTempBottomOuter -
LoTempTopOuter)
```

End Function

// 튜브 감시위치의 내표면온도계산

```
Public Function CalTempOuterToInner(ByVal LoHeatFlux As Single, ByVal LoThickness As Single,
ByVal LoOuterDiameter As Single, ByVal LoMatTherCond As Single, ByVal LoTempMonitorOuter As
Single) As Single
```

```
    CalTempOuterToInner = LoTempMonitorOuter - LoHeatFlux * LoThickness / LoMatTherCond *
(LoOuterDiameter / (LoOuterDiameter - LoThickness))
```

End Function

// 내압에 의한 응력계산

```
Public Function CalPressureStress(ByVal LoInnerPressure As Single, ByVal LoOuterDiameter As
Single, ByVal LoThickness As Single, ByVal LoRadiusRatio As Single) As Single
```

```
    Dim LoInnerRadius As Single
```

```
    Dim LoOuterRadius As Single
```

```
    Dim LoMonitorRadius As Single
```

```

LoOuterRadius = LoOuterDiameter / 2
LoInnerRadius = (LoOuterDiameter - 2 * LoThickness) / 2
LoMonitorRadius = LoInnerRadius + LoRadiusRatio * LoThickness
CalPressureStress = (LoInnerPressure * ((LoOuterRadius / LoMonitorRadius) ^ 2 + 1)) /
                    ((LoOuterRadius / LoInnerRadius) ^ 2 - 1)

End Function

// 크리프 파단수명소비율 계산

Public Function CalCreepRutureLifeUsed(ByVal LoTemp As Single, ByVal LoStress As Single, ByVal
LoUsedTime As Single, ByVal LoLMPC As Single, ByVal LoLMPb0 As Single, ByVal LoLMPb1 As
Single, ByVal LoLMPb2 As Single) As Single

    Dim LoLMP As Single
    Dim LoRuptureTime As Single

    LoUsedTime = LoUsedTime

    LoLMP = LoLMPb0 + LoLMPb1 * Log10(LoStress) + LoLMPb2 * (Log10(LoStress)) ^ 2
    LoRuptureTime = 10 ^ (LoLMP / (273.15 + LoTemp) * 1000 - LoLMPC)
    CalCreepRutureLifeUsed = LoUsedTime / LoRuptureTime * 100

End Function

// D/B 에서. 온도에 따른 물성치 Reading시 필요

Public Function FindMaterialProperty(ByVal LoTemp As Single, ByRef TempArray() As Single,
ByRef PropertyArray() As Single, ByVal LoRecordNum As Integer, ByRef ResultValue As Single) As
Integer

    Dim i As Integer

    If (LoRecordNum = 1) Then
        ResultValue = PropertyArray(1)
        Exit Function
    End If

    If (LoRecordNum = 2) Then
        ResultValue = Interpolation(TempArray(1), TempArray(2), PropertyArray(1),
PropertyArray(2), LoTemp)

        Exit Function
    End If

    If (LoRecordNum > 3) Then

```

```

If (LoTemp <= TempArray(1)) Then
    ResultValue = Interpolation(TempArray(1), TempArray(2), PropertyArray(1),
                                PropertyArray(2), LoTemp)
    Exit Function
End If

If (LoTemp >= TempArray(LoRecordNum)) Then
    ResultValue = Interpolation(TempArray(LoRecordNum - 1), TempArray(LoRecordNum),
                                PropertyArray(LoRecordNum - 1), PropertyArray(LoRecordNum), LoTemp)
    Exit Function
End If

For i = 1 To LoRecordNum Step 1
    If (LoTemp < TempArray(i)) Then
        ResultValue = Interpolation(TempArray(i - 1), TempArray(i), PropertyArray(i - 1),
                                    PropertyArray(i), LoTemp)
        Exit Function
    End If
Next i

End If

End Function

// 열응력 계산 (by API 530)

Public Function CalThermalStress(ByVal LoMatTherExp As Single, ByVal LoE As Single, ByVal
LoPoissionRatio As Single, ByVal LoThickness As Single, ByVal LoOuterDiameter As Single, ByVal
LoHeatFlux As Single, ByVal LoMatTherCond As Single, ByVal LoOuterTemp As Single, ByVal
LoInnerTemp As Single) As Single

    Dim X, Y, DeltaT As Single

    DeltaT = Abs(LoOuterTemp - LoInnerTemp)
    Y = LoOuterDiameter / (LoOuterDiameter - 2 * LoThickness)
    X = ((LoMatTherExp * LoE) / (2 * (1 - LoPoissionRatio))) * (DeltaT / Log(Y)) *
        ((LoMatTherExp * LoE) / (4 * (1 - LoPoissionRatio))) * (LoHeatFlux * LoOuterDiameter
        / LoMatTherCond)

    CalThermalStress = X * ((2 * Y ^ 2) / (Y ^ 2 - 1) * Log(Y) - 1)

End Function

// Interpolation

Public Function Interpolation(ByVal LoA As Single, ByVal LoB As Single, ByVal LoC As Single,

```

```
ByVal LoD As Single, ByVal LoAlpa As Single) As Single
```

```
Interpolation = (LoAlpa - LoA) / (LoB - LoA) * (LoD - LoC) + LoC
```

```
End Function
```

LIMOs Client MainFrame Module Source

// LIMOs Client을 시작할 때 맨 처음 실행됨

Private Sub Form_Load()

```
YN_ProgramStart = False      //Online이든 Offline이든 아직 실행되지 않았습.
LogOutProgram.Enabled = False //메뉴-Program-Log Out 을 비활성화한다.
StartUpProgram.Enabled = False //메뉴-Online Mode-Start Up 을 비활성화한다.
SU_Online = True      //Online StartUp을 할수있다는 상태설정(로그인 문제 때문에 이렇게 설정)
ShutDownProgram.Enabled = False //메뉴-Online Mode-Shut Down 을 비활성화한다.
SD_Online = False //Online Shutdown을 할수없다는 상태설정(로그인 문제 때문에 이렇게 설정)
StartUpOffline.Enabled = False //메뉴-Offline Mode-Start Up 을 비활성화한다.
SU_Offline = True
ShutDownOffline.Enabled = False
SD_Offline = False
CurrentWarning.Enabled = False
AccumulatedWarning.Enabled = False
OfflineWarning.Enabled = False
Set Image_Big.Picture = LoadPicture("c:\lms\bitmaps\InitScreen.jpg")

Num_MaxUnit = 10
Num_MaxComp = 100
Num_MaxLoc = 500
Num_MaxLocSub = 10
OnOff_Mode = 0

Call Init_Control
```

End Sub

Private Sub AboutLimos_Click()

frmAbout.Show

End Sub

Private Sub AccumulatedWarning_Click()

AcuWarn.Show

End Sub

Private Sub C_LifeList_Click()

Call Find_Loc_NameID(C_LifeList.Text, Active_Loc_ID)

Call compulsory_update_locationscreen(Active_Loc_ID)

End Sub

Private Sub CurrentWarning_Click()


```

CurWarn.Show
End Sub

//실행초기에 control 초기화
Private Sub Init_Control()

    B_UpStepScreen.Enabled = False
    B_PlantScreen.Enabled = False
    B_UnitScreen.Enabled = False
    B_ComponentScreen.Enabled = False
    F_SelOutput.Enabled = False
    L_CurrentScreen.Enabled = False
    L_CurrentScreen.Caption = " It can be seen after START-UP
R_LifeUsed.Enabled = False
R_Temperature.Enabled = False
R_Pressure.Enabled = False
R_Stress.Enabled = False
R_RemLife.Enabled = False
R_OperHour.Enabled = False
T_Status.Enabled = False
T_Status.Text = ""
L_CurrentLocation.Caption = "(선택되지 않았음)"

Chart_Location.Visible = False
Image_Small.Visible = False
StatusBar.Visible = True
Timer1.Enabled = False
C_LifeList.Enabled = False
C_LifeList.Clear

For i = 0 To Num_MaxUnit - 1 Step 1
    T_Unit(i).Visible = False
Next i
For i = 0 To Num_MaxComp - 1 Step 1
    T_Comp(i).Visible = False
Next i
For i = 0 To Num_MaxLoc - 1 Step 1
    T_Loc(i).Visible = False
Next i
For i = 0 To Num_MaxLocSub - 1 Step 1
    T_LocSub(i).Visible = False
Next i

End Sub

//LogIn

```

```

Private Sub LogInProgram_Click()
    frmLogin.Show 1
    If frmLogin.LoginSucceeded = True Then
        LogInProgram.Enabled = False
        LogOutProgram.Enabled = True
        StartUpProgram.Enabled = SU_Online
        ShutDownProgram.Enabled = SD_Online
        StartUpOffline.Enabled = SU_Offline
        ShutDownOffline.Enabled = SD_Offline
    End If
End Sub

```

```
//LogOut
```

```

Private Sub LogOutProgram_Click()
    frmLogin.Show 1
    If frmLogin.LoginSucceeded = True Then
        LogInProgram.Enabled = True
        LogOutProgram.Enabled = False
        StartUpProgram.Enabled = False
        ShutDownProgram.Enabled = False
        StartUpOffline.Enabled = False
        ShutDownOffline.Enabled = False
    End If
End Sub

```

```

Private Sub OfflineWarning_Click()
    OffWarn.Show
End Sub

```

```
//OffLine mode 로 실행시 초기화
```

```

Private Sub StartUpOffline_Click()
    StartUpProgram.Enabled = False
    SU_Online = False
    ShutDownProgram.Enabled = False
    SD_Online = False
    StartUpOffline.Enabled = False
    SU_Offline = False
    ShutDownOffline.Enabled = True
    SD_Offline = True
    CurrentWarning.Enabled = False
    AccumulatedWarning.Enabled = False
    OfflineWarning.Enabled = True

```

```

OnOff_Mode = 2

StatusBar.Panels.Item(2).Text = "Offline Mode"

Call Activate_Control_Offline
Call Init_ID
End Sub
Private Sub Activate_Control_Offline()

    B_PlantScreen.Enabled = True
    StatusBar.Visible = True

End Sub

//Offline mode로 실행시 일전시간 간격으로 화면 Updata

Private Sub Compulsory_Update_Offline(Smode As Long, Rmode As String, UCL_ID As Integer)
    Dim rv_Rmode As Double
    Dim rvunit_Rmode As String
    Dim rv_Comp_ID As Integer
    Dim rv_Comp_IDIndex As Integer
    Dim rv_Loc_ID As Integer
    Dim rv_Loc_IDIndex As Integer

    Call InitTextBox
    //지금은 unit 1개만 고려하는데 향후 여러개 unit을 고려할것
    If Smode = 0 Then

        Set Image_Big.Picture = LoadPicture("c:\lms\bitmaps\InitScreen.jpg")

        For i = 0 To Num_Unit - 1 Step 1
            Set db = CreateObject("adodb.connection")
            db.Open "LimosDB", "", ""
            SQL = "select * from Unit where ID = "
            SQL = SQL & T_Unit(i).Tag
            SQL = SQL & " order by ID"
            Set rs = CreateObject("adodb.recordset")
            rs.Open SQL, db

            T_Unit(i).Left = Image_BigLeft + Image_BigWidth * Unit_HotSpotX(i) / 1000
            T_Unit(i).Top = Image_BigTop + Image_BigHeight * Unit_HotSpotY(i) / 1000
            T_Unit(i).Visible = True

            T_Unit(i).Caption = Unit_Name(i)

        rs.Close
    End If
End Sub

```

```

db.Close
Set rs = Nothing
Set db = Nothing

Next i

If YN_ProgramStart = True Then
    L_CurrentScreen.Caption = " <PLANT Mode> "
End If

End If

If Smode = 1 Then

    Dim Active_Num_Comp As Long

    Set db = CreateObject("adodb.connection")
    db.Open "LimosDB", "", ""
    SQL = "select * from Unit where ID = " & UCL_ID
    Set rs = CreateObject("adodb.recordset")
    rs.Open SQL, db

    imsi1 = rs("PictureName")
    imsi2 = "C:\lms\bitmaps\" + imsi1
    Set Image_Big.Picture = LoadPicture(imsi2)

    rs.Close
    db.Close
    Set rs = Nothing
    Set db = Nothing

    B_UnitScreen.Enabled = True

    Set db = CreateObject("adodb.connection")
    db.Open "LimosDB", "", ""
    SQL = "select * from Component where Unit_ID = " & UCL_ID
    Set rs = CreateObject("adodb.recordset")
    rs.Open SQL, db

    i = 0
    Do Until rs.EOF

        Dim Active_Comp_ID As Integer
        Active_Comp_ID = rs("ID")

        Set db1 = CreateObject("adodb.connection")

```

```

db1.Open "CurrentDB", "", ""
SQL1 = "select * from Current_Locations where Comp_ID = "
SQL1 = SQL1 & Active_Comp_ID & " AND AssessmentType <> 3"
SQL1 = SQL1 & " order by " & Rmode & " desc"
Set rs1 = CreateObject("adodb.recordset")
rs1.Open SQL1, db1
If rs1.EOF Then
Else
    T_Comp(i).Left = Image_BigLeft + Image_BigWidth * Comp_HotSpotX(i) / 1000
    T_Comp(i).Top = Image_BigTop + Image_BigHeight * Comp_HotSpotY(i) / 1000
    T_Comp(i).Visible = True

    rv_Rmode = Val(rs1(Rmode))
    Select Case Rmode
    Case "LifeUsed"
        rvunit_Rmode = Format(rs1(Rmode), "0.00")
        rvunit_Rmode = rvunit_Rmode & " %"
    Case "Temp"
        rvunit_Rmode = Format(rs1(Rmode), "0.0")
        rvunit_Rmode = rvunit_Rmode & " °C"
    Case "Pressure"
        rvunit_Rmode = Format(rs1(Rmode), "0.0")
        rvunit_Rmode = rvunit_Rmode & " MPa"
    Case "Stress"
        rvunit_Rmode = Format(rs1(Rmode), "0.0")
        rvunit_Rmode = rvunit_Rmode & " MPa"
    Case "RemLife"
        rvunit_Rmode = Format(rs1(Rmode), "0")
        rvunit_Rmode = rvunit_Rmode & " Hr"
    Case "OperHours_Logging"
        rvunit_Rmode = Format(rs1(Rmode), "0")
        rvunit_Rmode = rvunit_Rmode & " Hr"
    End Select

    rv_Loc_ID = rs1("Loc_ID")
    Call Find_Loc_IDIndex(rv_Loc_ID, rv_Loc_IDIndex)
    T_Comp(i).Caption = " · Name : " & Comp_Name(i) & " " & Chr(13) &
        Chr(10) & " · Description : " & Comp_Description(i) & "
        " & Chr(13) & Chr(10) & Chr(13) & Chr(10) & " · Serious
        Location : " & Loc_Name(rv_Loc_IDIndex) & " " & Chr(13)
        & Chr(10) & " · Value : " & rvunit_Rmode & " "

    T_Comp(i).Tag = rs1("Comp_ID")
End If

rs1.Close

```

```

        db1.Close
        Set rs1 = Nothing
        Set db1 = Nothing

i = i + 1
rs.MoveNext
Loop

Active_Num_Comp = i
rs.Close
db.Close
Set rs = Nothing
Set db = Nothing

Dim rv_unitid As Integer
Call Find_Unit_IDIndex(Active_Unit_ID, rv_unitid)
L_CurrentScreen.Caption = " <UNIT Mode> <Unit : " & Unit_Name(rv_unitid) & ">

End If

If Smode = 2 Then

    Dim Active_Num_Loc As Long

    Set db = CreateObject("adodb.connection")
    db.Open "LimosDB", "", ""
    SQL = "select * from Component where ID = " & UCL_ID
    Set rs = CreateObject("adodb.recordset")
    rs.Open SQL, db

    imsi1 = rs("PictureName")
    imsi2 = "C:\lms\bitmaps\" + imsi1
    Set Image_Big.Picture = LoadPicture(imsi2)

    rs.Close
    db.Close
    Set rs = Nothing
    Set db = Nothing

    B_ComponentScreen.Enabled = True

    Set db = CreateObject("adodb.connection")
    db.Open "CurrentDB", "", ""
    SQL = "select * from Current_Locations "
    Set rs = CreateObject("adodb.recordset")
    rs.Open SQL, db

```

```

i = 0
Do Until rs.EOF
    If UCL_ID = rs("Comp_ID") And rs("AssessmentType") <> 3 Then
        T_Loc(i).Left = Image_BigLeft + Image_BigWidth * Loc_HotSpotX(i) / 1000
        T_Loc(i).Top = Image_BigTop + Image_BigHeight * Loc_HotSpotY(i) / 1000
        T_Loc(i).Visible = True

        rv_Rmode = Val(rs(Rmode))
        Select Case Rmode
            Case "LifeUsed"
                rvunit_Rmode = Format(rs(Rmode), "0.00")
                rvunit_Rmode = rvunit_Rmode & " %"
            Case "Temp"
                rvunit_Rmode = Format(rs(Rmode), "0.0")
                rvunit_Rmode = rvunit_Rmode & " °C"
            Case "Pressure"
                rvunit_Rmode = Format(rs(Rmode), "0.0")
                rvunit_Rmode = rvunit_Rmode & " MPa"
            Case "Stress"
                rvunit_Rmode = Format(rs(Rmode), "0.0")
                rvunit_Rmode = rvunit_Rmode & " MPa"
            Case "RemLife"
                rvunit_Rmode = Format(rs(Rmode), "0")
                rvunit_Rmode = rvunit_Rmode & " Hr"
            Case "OperHours_Logging"
                rvunit_Rmode = Format(rs(Rmode), "0")
                rvunit_Rmode = rvunit_Rmode & " Hr"
        End Select

        T_Loc(i).Caption = "· " & Loc_Name(i) & " " & Chr(13) & Chr(10) _
            & "· " & rvunit_Rmode & " "

        T_Loc(i).Tag = rs("Loc_ID")
    End If
    i = i + 1
    rs.MoveNext
Loop

rs.Close
db.Close
Set rs = Nothing
Set db = Nothing

Dim rv_compid As Integer
Call Find_Comp_IDIndex(Active_Comp_ID, rv_compid)

```

```
        L_CurrentScreen.Caption = " <COMPONENT Mode> <Unit : " & Unit_Name(rv_unitid) & ">" &
" <Component : " & Comp_Name(rv_compid) & ">"
```

```
    End If
```

```
    If YN_ProgramStart = True Then
```

```
        Call Find_LifeList
```

```
    End If
```

```
End Sub
```

```
// Offline mode 실행의 종료
```

```
Private Sub ShutDownOffline_Click()
```

```
    StartUpProgram.Enabled = True
```

```
    SU_Online = True
```

```
    ShutDownProgram.Enabled = False
```

```
    SD_Online = False
```

```
    StartUpOffline.Enabled = True
```

```
    SU_Offline = True
```

```
    ShutDownOffline.Enabled = False
```

```
    SD_Offline = False
```

```
    CurrentWarning.Enabled = False
```

```
    AccumulatedWarning.Enabled = False
```

```
    OfflineWarning.Enabled = False
```

```
    OnOff_Mode = 0
```

```
    StatusBar.Panels.Item(1).Text = "Server Status"
```

```
    StatusBar.Panels.Item(2).Text = "On-Offline Mode Status"
```

```
    StatusBar.Panels.Item(3).Text = "Warning Status"
```

```
End Sub
```

```
// 프로그램 종료
```

```
Private Sub StartUpProgram_Click()
```

```
    Call Check_Server_OnOff(Server_OnOff)
```

```
    If Server_OnOff = False Then
```

```
        MsgBox ("Server가 동작하고 있지 않습니다.")
```

```
    Else
```

```
        MsgBox ("Server가 동작하고 있습니다.")
```

```
    End If
```

```
    Call Check_Warning_Status
```



```

screenmode = 0
locationscreen = 0
Dim RmodeString As String
resultmode = "LifeUsed"

StartupProgram.Enabled = False
SU_Online = False
ShutdownProgram.Enabled = True
SD_Online = True
StartupOffline.Enabled = False
SU_Offline = False
ShutdownOffline.Enabled = False
SD_Offline = False
CurrentWarning.Enabled = True
AccumulatedWarning.Enabled = True
OfflineWarning.Enabled = False

YN_ProgramStart = True

OnOff_Mode = 1

Call Activate_Control
Call Init_ID
ReDim C_LifeListString(Num_Loc) As String ' 위험위치순서에 표시할 문자열배열 등적선언
Call Compulsory_Update(screenmode, resultmode, 0) ' 여기서 0은 아무의미없음
StatusBar.Panels.Item(2).Text = "Online Mode"

End Sub

Private Sub Activate_Control()

    B_PlantScreen.Enabled = True
    F_SelOutput.Enabled = True
    L_CurrentScreen.Enabled = True
    R_LifeUsed.Enabled = True
    R_LifeUsed.value = True
    R_Temperature.Enabled = True
    R_Pressure.Enabled = True
    R_Stress.Enabled = True
    R_RemLife.Enabled = True
    R_OperHour.Enabled = True
    T_Status.Enabled = True

    StatusBar.Visible = True
    Timer1.Enabled = True
    C_LifeList.Enabled = True

```

```

End Sub

// Unit, Component, Location의 정보 reading

Private Sub Init_ID()

    Set db = CreateObject("adodb.connection")
    db.Open "LimosDB", "", ""
    'Unit ID를 물어오고 개수를 파악
    SQL = "select * from Unit order by ID"
    Set rs = CreateObject("adodb.recordset")
    rs.Open SQL, db
    i = 0
    Do Until rs.EOF
        T_Unit(i).Tag = rs("ID")
        Unit_ID(i) = rs("ID")
        Unit_Name(i) = rs("Name")
        If rs("SerialNo") <> "" Then
            Unit_SerialNo(i) = rs("SerialNo")
        End If
        Unit_Description(i) = rs("Description")
        Unit_PictureName(i) = rs("PictureName")

        SQL1 = "select * from ItemTypes where item = 'UNIT' and ID"
        SQL1 = SQL1 & rs("TypeID")
        Set rs1 = CreateObject("adodb.recordset")
        rs1.Open SQL1, db
        Unit_Type(i) = rs1("Name")
        rs1.Close
        Set rs1 = Nothing

        Unit_HotSpotX(i) = rs("HotSpotX")
        Unit_HotSpotY(i) = rs("HotSpotY")

        i = i + 1
        rs.MoveNext
    Loop
    Num_Unit = i
    rs.Close

// Component ID를 물어오고 개수를 파악
    SQL = "select * from Component order by ID"
    Set rs = CreateObject("adodb.recordset")
    rs.Open SQL, db
    i = 0

```

```

Do Until rs.EOF
T_Comp(i).Tag = rs("ID")
Comp_ID(i) = rs("ID")
Comp_Unit_ID(i) = rs("Unit_ID")
Comp_Name(i) = rs("Name")
If rs("SerialNo") <> "" Then
    Comp_SerialNo(i) = rs("SerialNo")
End If
Comp_Description(i) = rs("Description")
Comp_PictureName(i) = rs("PictureName")

    SQL1 = "select * from ItemTypes where item = 'COMP' and ID
    SQL1 = SQL1 & rs("TypeID")
    Set rs1 = CreateObject("adodb.recordset")
    rs1.Open SQL1, db
    Comp_Type(i) = rs1("Name")
    rs1.Close
    Set rs1 = Nothing

Comp_HotSpotX(i) = rs("HotSpotX")
Comp_HotSpotY(i) = rs("HotSpotY")

i = i + 1
rs.MoveNext
Loop
Num_Comp = i
rs.Close

// Location ID를 물어오고 개수를 파악
SQL = "select * from Location order by ID"
Set rs = CreateObject("adodb.recordset")
rs.Open SQL, db
Active_Loc_ID = rs("ID") 'ID가 가장 작은것이 초기화된다.
i = 0
Do Until rs.EOF
T_Loc(i).Tag = rs("ID")
Loc_ID(i) = rs("ID")
Loc_Unit_ID(i) = rs("Unit_ID")
Loc_Comp_ID(i) = rs("Comp_ID")
Loc_Name(i) = rs("Name")

    SQL1 = "select * from ItemTypes where item = 'LOC' and ID
    SQL1 = SQL1 & rs("TypeID")
    Set rs1 = CreateObject("adodb.recordset")
    rs1.Open SQL1, db
    Loc_Type(i) = rs1("Name")

```

```

rs1.Close
Set rs1 = Nothing

Loc_Description(i) = rs("Description")

SQL1 = "select * from ItemTypes where item = 'ASSESS' and ID :
SQL1 = SQL1 & rs("AssessmentType")
Set rs1 = CreateObject("adodb.recordset")
rs1.Open SQL1, db
Loc_AssessmentType(i) = rs1("Name")
rs1.Close
Set rs1 = Nothing

If rs("SerialNo") <> "" Then
    Loc_SerialNo(i) = rs("SerialNo")
End If
Loc_HotSpotX(i) = rs("HotSpotX")
Loc_HotSpotY(i) = rs("HotSpotY")
If rs("PictureName") <> "" Then
    Loc_PictureName(i) = rs("PictureName")
End If
Loc_HotSpotSubX(i) = rs("HotSpotSubX")
Loc_HotSpotSubY(i) = rs("HotSpotSubY")

If rs("Material") <> 0 Then
    SQL1 = "select * from ItemTypes where item = 'MAT' and ID
    SQL1 = SQL1 & rs("Material")
    Set rs1 = CreateObject("adodb.recordset")
    rs1.Open SQL1, db
    Loc_Material(i) = rs1("Name")
    rs1.Close
    Set rs1 = Nothing
End If

i = i + 1
rs.MoveNext
Loop
Num_Loc = i
rs.Close

db.Close
Set rs = Nothing
Set db = Nothing

End Sub

```

```
// Unit 버튼 클릭시 화면 출력
```

```
Private Sub T_Unit_DblClick(index As Integer)
    B_UpStepScreen.Enabled = True
    Active_Unit_ID = T_Unit(index).Tag
    Active_UCL_ID = T_Unit(index).Tag
    screenmode = 1
    Call Compulsory_Update(screenmode, resultmode, Active_Unit_ID)
    If locationscreen = 1 Then
        Call compulsory_update_locationscreen(Active_Loc_ID)
    End If
End Sub
```

```
End Sub
```

```
// Component 버튼 클릭시 화면 출력
```

```
Private Sub T_Comp_DblClick(index As Integer)
    Active_Comp_ID = T_Comp(index).Tag
    Active_UCL_ID = T_Comp(index).Tag
    screenmode = 2
    Call Compulsory_Update(screenmode, resultmode, Active_Comp_ID)
    If locationscreen = 1 Then
        Call compulsory_update_locationscreen(Active_Loc_ID)
    End If
End Sub
```

```
End Sub
```

```
// Location 버튼 클릭시 화면 출력
```

```
Private Sub T_Loc_Click(index As Integer)
    Active_Loc_ID = T_Loc(index).Tag
    locationscreen = 1
    Call compulsory_update_locationscreen(Active_Loc_ID)
End Sub
```

```
Private Sub T_Loc_DblClick(index As Integer)
    ImsiLocID.Tag = Active_Loc_ID
    Dim frm As LocFrm
    Set frm = New LocFrm
    frm.Show
End Sub
```

```
End Sub
```

```
Private Sub B_UpStepScreen_Click()
    If screenmode = 1 Then
        Call B_PlantScreen_Click
    End If
End Sub
```

```

End If
If screenmode = 2 Then
    Call B_UnitScreen_Click
End If

End Sub

Private Sub B_PlantScreen_Click()

    B_UpStepScreen.Enabled = False
    B_UnitScreen.Enabled = False
    B_ComponentScreen.Enabled = False
    screenmode = 0
    Call Compulsory_Update(screenmode, resultmode, 0) '여기서 0은 아무의미없음
    If locationscreen = 1 Then
        Call compulsory_update_locationscreen(Active_Loc_ID)
    End If

End Sub

End Sub

Private Sub B_UnitScreen_Click()

    B_ComponentScreen.Enabled = False
    screenmode = 1
    Active_UCL_ID = Active_Unit_ID
    Call Compulsory_Update(screenmode, resultmode, Active_Unit_ID) '여기서 0은 아무의미없음
    If locationscreen = 1 Then
        Call compulsory_update_locationscreen(Active_Loc_ID)
    End If

End Sub

End Sub

// 화면창의 크기 변경시 실행됨

Private Sub Form_Resize()
    MFWidth = MainFrm.Width
    MFHeight = MainFrm.Height
    If MFWidth >= 12090 And MFHeight >= 9495 Then
        If MainFrm.WindowState <> 1 Then
            Image_Big.Visible = False
            T_Status.Visible = False
            L_CurrentScreen.Visible = False

            Image_Big.Left = 3540
            Image_Big.Left = Image_Big.Left
            Image_Big.Top = 1700
        End If
    End If
End Sub

```

```

Image_BigTop = Image_Big.Top
Image_Big.Width = MFWidth - 300 - 3410
Image_BigWidth = Image_Big.Width
Image_Big.Height = MFHeight - 600 - 2200
Image_BigHeight = Image_Big.Height

T_Status.Width = MFWidth - 300 - 6120
L_CurrentScreen.Width = MFWidth - 300 - 3400

Image_Big.Visible = True
T_Status.Visible = True
L_CurrentScreen.Visible = True
End If
Call Compulsory_Update(screenmode, resultmode, Active_UCL_ID)
Else
If MainFrm.WindowState <> 1 Then
MsgBox ("윈도우 사이즈를 더이상 줄일수 없습니다.")
MainFrm.Width = 13000
MainFrm.Height = 9495
End If
End If

End Sub

// 출력정보의 변경시

Private Sub Change_ResultMode(Rmode As Long)

Dim RmodeString As String
If Rmode = 0 Then
resultmode = "LifeUsed"
ElseIf Rmode = 1 Then
resultmode = "Temp"
ElseIf Rmode = 2 Then
resultmode = "Pressure"
ElseIf Rmode = 3 Then
resultmode = "Stress"
ElseIf Rmode = 4 Then
resultmode = "RemLife"
ElseIf Rmode = 5 Then
resultmode = "OperHours_Logging"
Else
resultmode = "LifeUsed"
End If

Call Compulsory_Update(screenmode, resultmode, Active_UCL_ID)

```

```

    If locationscreen = 1 Then
        Call compulsory_update_locationscreen(Active_Loc_ID)
    End If

End Sub

Public Sub Find_Unit_IDIndex(U_ID As Integer, index As Integer)
    For i = 0 To Num_Unit - 1 Step 1
        If U_ID = Unit_ID(i) Then
            index = i
        End If
    Next i
End Sub

Public Sub Find_Comp_IDIndex(C_ID As Integer, index As Integer)
    For i = 0 To Num_Comp - 1 Step 1
        If C_ID = Comp_ID(i) Then
            index = i
        End If
    Next i

End Sub

Public Sub Find_Loc_IDIndex(L_ID As Integer, index As Integer)
    For i = 0 To Num_Loc - 1 Step 1
        If L_ID = Loc_ID(i) Then
            index = i
        End If
    Next i

End Sub

Public Sub Find_Loc_NameID(L_Name As String, L_ID As Integer)
    For i = 0 To Num_Loc - 1 Step 1
        If L_Name = Loc_Name(i) Then
            L_ID = Loc_ID(i)
        End If
    Next i

End Sub

Private Sub Find_LifeList()
    Set db = CreateObject("adodb.connection")
    db.Open "CurrentDB", "", ""
    SQL = "select * from Current_Locations where AssessmentType <> 3 order by " & resultmode &

```



```

        " desc"
Set rs = CreateObject("adodb.recordset")
rs.Open SQL, db

i = 0
Dim rv_id As Integer
Dim rv_index As Integer
Do Until rs.EOF
    rv_id = rs("Loc_ID")
    Call Find_Loc_IDIndex(rv_id, rv_index)
    If i < Num_Loc Then
        C_LifeListString(i) = Loc_Name(rv_index)
    End If
    i = i + 1
    rs.MoveNext
Loop

rs.Close
db.Close
Set rs = Nothing
Set db = Nothing

For i = 0 To Num_Loc - 1 Step 1
    C_LifeList.List(i) = C_LifeListString(i)
Next i

End Sub

Private Sub R_LifeUsed_Click()
    Call Change_ResultMode(0)
End Sub
Private Sub R_Temperature_Click()
    Call Change_ResultMode(1)
End Sub
Private Sub R_Pressure_Click()
    Call Change_ResultMode(2)
End Sub
Private Sub R_Stress_Click()
    Call Change_ResultMode(3)
End Sub
Private Sub R_RemLife_Click()
    Call Change_ResultMode(4)
End Sub
Private Sub R_OperHour_Click()
    Call Change_ResultMode(5)
End Sub

```

```

Private Sub InitTextBox()

    For i = 0 To Num_Unit - 1 Step 1
        T_Unit(i).Visible = False
        T_Unit(i).MousePointer = 1
        T_Unit(i).BorderStyle = 1
        T_Unit(i).Appearance = 0
        T_Unit(i).AutoSize = True
        T_Unit(i).BackColor = &HCOFFCO 'green
    Next i

    For i = 0 To Num_Comp - 1 Step 1
        T_Comp(i).Visible = False
        T_Comp(i).MousePointer = 1
        T_Comp(i).BorderStyle = 1
        T_Comp(i).Appearance = 0
        T_Comp(i).AutoSize = True
        T_Comp(i).BackColor = &HCOFFCO
    Next i

    For i = 0 To Num_Loc - 1 Step 1
        T_Loc(i).Visible = False
        T_Loc(i).MousePointer = 1
        T_Loc(i).BorderStyle = 1
        T_Loc(i).Appearance = 0
        T_Loc(i).AutoSize = True
        T_Loc(i).BackColor = &HCOFFCO
    Next i

    For i = 0 To Num_MaxLocSub - 1 Step 1
        T_LocSub(i).Visible = False
        T_LocSub(i).MousePointer = 1
        T_LocSub(i).BorderStyle = 1
        T_LocSub(i).Appearance = 0
        T_LocSub(i).AutoSize = True
        T_LocSub(i).BackColor = &HCOFFCO
    Next i

End Sub

// 상태창 정보 갱신

Private Sub T_Status_Update(new_string As String)
    Dim T_Status_String_imsi(9) As String
    For i = 0 To 9 Step 1
        T_Status_String_imsi(i) = T_Status_String(i)
    Next i
    For i = 0 To 8 Step 1
        T_Status_String(i + 1) = T_Status_String_imsi(i)
    
```

```

Next i
T_Status_String(0) = new_string
T_Status.Text = " " & T_Status_String(0) & Chr(13) & Chr(10) _
                & " " & T_Status_String(1) & Chr(13) & Chr(10) _
                & " " & T_Status_String(2) & Chr(13) & Chr(10) _
                & " " & T_Status_String(3) & Chr(13) & Chr(10) _
                & " " & T_Status_String(4) & Chr(13) & Chr(10) _
                & " " & T_Status_String(5) & Chr(13) & Chr(10) _
                & " " & T_Status_String(6) & Chr(13) & Chr(10) _
                & " " & T_Status_String(7) & Chr(13) & Chr(10) _
                & " " & T_Status_String(8) & Chr(13) & Chr(10) _
                & " " & T_Status_String(9) & Chr(13) & Chr(10)

End Sub

// Location 화면의 정보 갱신

Private Sub compulsory_update_locationscreen(L_ID As Integer)
    Chart_Location.Visible = True
    Call ChartControl(L_ID)

    Set db = CreateObject("adodb.connection")
    db.Open "LimosDB", "", ""
    SQL = "select * from Location where ID = " & L_ID
    Set rs = CreateObject("adodb.recordset")
    rs.Open SQL, db

    Dim imsi1 As String
    Dim imsi2 As String
    imsi1 = rs("PictureName")
    imsi2 = "C:\lms\bitmaps\" + imsi1
    Image_Small.Visible = True
    Set Image_Small.Picture = LoadPicture(imsi2)

    Dim rv_locid As Integer
    Call Find_Loc_IDIndex(L_ID, rv_locid)
    L_CurrentLocation.Caption = "(" & Loc_Name(rv_locid) & ")"

    SQL = "select * from Location_Map where ID = " & L_ID & " Order by Input_Seq"
    Set rs = CreateObject("adodb.recordset")
    rs.Open SQL, db

    i = 0
    Dim num_LocSub As Long
    Do Until rs.EOF
        T_LocSub(i).Tag = rs("Source_ID")
        i = i + 1
    
```

```

rs.MoveNext
Loop
num_LocSub = i

rs.Close
Set rs = Nothing
db.Close
Set db = Nothing

Set db = CreateObject("adodb.connection")
db.Open "CurrentDB", "", ""
Set rs = CreateObject("adodb.recordset")

For i = 0 To num_LocSub Step 1
    SQL = "select * from Current_Locations where Loc_ID = " & T_LocSub(i).Tag
    rs.Open SQL, db
    Dim rv_locsubid As Integer
    rv_locsubid = CInt(T_LocSub(i).Tag)
    Call Find_Loc_IDIndex(rv_locsubid, rv_locid)

        T_LocSub(i).Left = Image_Small.Left + Image_Small.Width *
            Loc_HotSpotSubX(rv_locid) / 1000
        T_LocSub(i).Top = Image_Small.Top + Image_Small.Height *
            Loc_HotSpotSubY(rv_locid) / 1000
        T_LocSub(i).Visible = True
        T_LocSub(i).Caption = " " & rs("Temp") & " "
        T_LocSub(i).ToolTipText = " " & Loc_Name(rv_locid) & " "
    rs.Close
Next i
Set rs = Nothing
db.Close
Set db = Nothing

End Sub

```

// 일정시간 간격의 화면의 정보 갱신 함수

```

Private Sub Compulsory_Update(Smode As Long, Rmode As String, UCL_ID As Integer)
    Dim rv_Rmode As Double
    Dim rvunit_Rmode As String
    Dim rv_Comp_ID As Integer
    Dim rv_Comp_IDIndex As Integer
    Dim rv_Loc_ID As Integer
    Dim rv_Loc_IDIndex As Integer
    Dim i As Integer

```

```

Call InitTextBox
//지금은 unit 1개만 고려하는데 향후 여러개 unit을 고려할것
If Smode = 0 Then

    Set Image_Big.Picture = LoadPicture("c:\lms\bitmaps\InitScreen.jpg")

    For i = 0 To Num_Unit - 1 Step 1
    Set db = CreateObject("adodb.connection")
    db.Open "CurrentDB", "", ""
    SQL = "select * from Current_Locations where Unit_ID = "
    SQL = SQL & T_Unit(i).Tag & " AND AssessmentType <> 3"
    SQL = SQL & " order by " & Rmode & " desc"
    Set rs = CreateObject("adodb.recordset")
    rs.Open SQL, db

    T_Unit(i).Left = Image_BigLeft + Image_BigWidth * Unit_HotSpotX(i) / 1000
    T_Unit(i).Top = Image_BigTop + Image_BigHeight * Unit_HotSpotY(i) / 1000
    T_Unit(i).Visible = True

    rv_Rmode = Val(rs(Rmode))
    Select Case Rmode
    Case "LifeUsed"
        rvunit_Rmode = Format(rs(Rmode), "0.00")
        rvunit_Rmode = rvunit_Rmode & " %"
    Case "Temp"
        rvunit_Rmode = Format(rs(Rmode), "0.0")
        rvunit_Rmode = rvunit_Rmode & " ℃"
    Case "Pressure"
        rvunit_Rmode = Format(rs(Rmode), "0.0")
        rvunit_Rmode = rvunit_Rmode & " MPa"
    Case "Stress"
        rvunit_Rmode = Format(rs(Rmode), "0.0")
        rvunit_Rmode = rvunit_Rmode & " MPa"
    Case "RemLife"
        rvunit_Rmode = Format(rs(Rmode), "0")
        rvunit_Rmode = rvunit_Rmode & " Hr"
    Case "OperHours_Logging"
        rvunit_Rmode = Format(rs(Rmode), "0")
        rvunit_Rmode = rvunit_Rmode & " Hr"
    End Select

    rv_Comp_ID = rs("Comp_ID")
    Call Find_Comp_IDIndex(rv_Comp_ID, rv_Comp_IDIndex)
    rv_Loc_ID = rs("Loc_ID")
    Call Find_Loc_IDIndex(rv_Loc_ID, rv_Loc_IDIndex)
    T_Unit(i).Caption = " · Name          : " & Unit_Name(i) & " " & Chr(13) & Chr(10)

```

```
    & " · Description : " & Unit_Description(i) & " " & Chr(13) &  
    Chr(10) & Chr(13) & Chr(10) & " · Serious Component : " &  
    Comp_Name(rv_Comp_IDIndex) & " " & Chr(13) & Chr(10) & " · Serious  
    Location : " & Loc_Name(rv_Loc_IDIndex) & " " & Chr(13) & Chr(10)  
    & " · Value : " & rvunit_Rmode & " "
```

```
rs.Close
```

```
db.Close
```

```
Set rs = Nothing
```

```
Set db = Nothing
```

```
Next i
```

```
If YN_ProgramStart = True Then
```

```
    L_CurrentScreen.Caption = " <PLANT Mode> "
```

```
End If
```

```
End If
```

```
If Smode = 1 Then
```

```
Dim Active_Num_Comp As Long
```

```
Set db = CreateObject("adodb.connection")
```

```
db.Open "LimosDB", "", ""
```

```
SQL = "select * from Unit where ID = " & UCL_ID
```

```
Set rs = CreateObject("adodb.recordset")
```

```
rs.Open SQL, db
```

```
imsi1 = rs("PictureName")
```

```
imsi2 = "C:\lms\bitmaps\" + imsi1
```

```
Set Image_Big.Picture = LoadPicture(imsi2)
```

```
rs.Close
```

```
db.Close
```

```
Set rs = Nothing
```

```
Set db = Nothing
```

```
B_UnitScreen.Enabled = True
```

```
Set db = CreateObject("adodb.connection")
```

```
db.Open "LimosDB", "", ""
```

```
SQL = "select * from Component where Unit_ID = " & UCL_ID
```

```
Set rs = CreateObject("adodb.recordset")
```

```
rs.Open SQL, db
```

```
i = 0
```

```

Dim imsi_Comp_ID As Integer
Do Until rs.EOF

    imsi_Comp_ID = rs("ID")
    Call Find_Comp_IDIndex(imsi_Comp_ID, i)

    Set db1 = CreateObject("adodb.connection")
    db1.Open "CurrentDB", "", ""
    SQL1 = "select * from Current_Locations where Comp_ID = "
    SQL1 = SQL1 & imsi_Comp_ID & " AND AssessmentType <> 3"
    SQL1 = SQL1 & " order by " & Rmode & " desc"
    Set rs1 = CreateObject("adodb.recordset")
    rs1.Open SQL1, db1
    If rs1.EOF Then
    Else
        T_Comp(i).Left = Image_BigLeft + Image_BigWidth * Comp_HotSpotX(i) / 1000
        T_Comp(i).Top = Image_BigTop + Image_BigHeight * Comp_HotSpotY(i) / 1000
        T_Comp(i).Visible = True

        rv_Rmode = Val(rs1(Rmode))
        Select Case Rmode
        Case "LifeUsed"
            rvunit_Rmode = Format(rs1(Rmode), "0.00")
            rvunit_Rmode = rvunit_Rmode & " %"
        Case "Temp"
            rvunit_Rmode = Format(rs1(Rmode), "0.0")
            rvunit_Rmode = rvunit_Rmode & " °C"
        Case "Pressure"
            rvunit_Rmode = Format(rs1(Rmode), "0.0")
            rvunit_Rmode = rvunit_Rmode & " MPa"
        Case "Stress"
            rvunit_Rmode = Format(rs1(Rmode), "0.0")
            rvunit_Rmode = rvunit_Rmode & " MPa"
        Case "RemLife"
            rvunit_Rmode = Format(rs1(Rmode), "0")
            rvunit_Rmode = rvunit_Rmode & " Hr"
        Case "OperHours_Logging"
            rvunit_Rmode = Format(rs1(Rmode), "0")
            rvunit_Rmode = rvunit_Rmode & " Hr"
        End Select

        rv_Loc_ID = rs1("Loc_ID")
        Call Find_Loc_IDIndex(rv_Loc_ID, rv_Loc_IDIndex)
        T_Comp(i).Caption = " · Name : " & Comp_Name(i) & " " & Chr(13) &
            Chr(10) & " · Description : " & Comp_Description(i) & " "
            & Chr(13) & Chr(10) & Chr(13) & Chr(10) & " · Serious

```

```

Location : " & Loc_Name(rv_Loc_IDIndex) & " " & Chr(13)
          & Chr(10) & " · Value : " & rvunit_Rmode & " "

    T_Comp(i).Tag = rs1("Comp_ID")
End If

rs1.Close
db1.Close
Set rs1 = Nothing
Set db1 = Nothing

i = i + 1
rs.MoveNext
Loop

Active_Num_Comp = i
rs.Close
db.Close
Set rs = Nothing
Set db = Nothing

Dim rv_unitid As Integer
Call Find_Unit_IDIndex(Active_Unit_ID, rv_unitid)
L_CurrentScreen.Caption = " <UNIT Mode> <Unit : " & Unit_Name(rv_unitid) & ">"

End If

If Smode = 2 Then

    Dim Active_Num_Loc As Long

    Set db = CreateObject("adodb.connection")
    db.Open "LimosDB", "", ""
    SQL = "select * from Component where ID = " & UCL_ID
    Set rs = CreateObject("adodb.recordset")
    rs.Open SQL, db

    imsi1 = rs("PictureName")
    imsi2 = "C:\lms\bitmaps\" + imsi1
    Set Image_Big.Picture = LoadPicture(imsi2)

    rs.Close
    db.Close
    Set rs = Nothing
    Set db = Nothing

```



```

B_ComponentScreen.Enabled = True

Dim imsi_Loc_ID As Integer
Set db = CreateObject("adodb.connection")
db.Open "CurrentDB", "", ""
SQL = "select * from Current_Locations "
SQL = SQL & "where Comp_ID = " & UCL_ID & " AND AssessmentType <> 3"
Set rs = CreateObject("adodb.recordset")
rs.Open SQL, db

i = 0
Do Until rs.EOF

    imsi_Loc_ID = rs("Loc_ID")
    Call Find_Loc_IDIndex(imsi_Loc_ID, i)
    T_Loc(i).Left = Image_BigLeft + Image_BigWidth * Loc_HotSpotX(i) / 1000
    T_Loc(i).Top = Image_BigTop + Image_BigHeight * Loc_HotSpotY(i) / 1000
    T_Loc(i).Visible = True

    rv_Rmode = Val(rs(Rmode))
    Select Case Rmode
    Case "LifeUsed"
        rvunit_Rmode = Format(rs(Rmode), "0.00")
        rvunit_Rmode = rvunit_Rmode & " %"
    Case "Temp"
        rvunit_Rmode = Format(rs(Rmode), "0.0")
        rvunit_Rmode = rvunit_Rmode & " °C"
    Case "Pressure"
        rvunit_Rmode = Format(rs(Rmode), "0.0")
        rvunit_Rmode = rvunit_Rmode & " MPa"
    Case "Stress"
        rvunit_Rmode = Format(rs(Rmode), "0.0")
        rvunit_Rmode = rvunit_Rmode & " MPa"
    Case "RemLife"
        rvunit_Rmode = Format(rs(Rmode), "0")
        rvunit_Rmode = rvunit_Rmode & " Hr"
    Case "OperHours_Logging"
        rvunit_Rmode = Format(rs(Rmode), "0")
        rvunit_Rmode = rvunit_Rmode & " Hr"
    End Select

    T_Loc(i).Caption = ". " & Loc_Name(i) & " " & Chr(13) & Chr(10) _
        & ". " & rvunit_Rmode & " "

    T_Loc(i).Tag = rs("Loc_ID")

```

```

        rs.MoveNext
    Loop

    rs.Close
    db.Close
    Set rs = Nothing
    Set db = Nothing

    Dim rv_compid As Integer
    Call Find_Comp_IDIndex(Active_Comp_ID, rv_compid)
    L_CurrentScreen.Caption = " <COMPONENT Mode> <Unit : " & Unit_Name(rv_unitid) & ">" &
" <Component : " & Comp_Name(rv_compid) & ">"

    End If

    If YN_ProgramStart = True Then
        Call Find_LifeList
    End If

End Sub

// Graphic mode 화면의 control 설정

Private Sub ChartControl(Location_ID)

    Dim value(59) As Double

    For i = 0 To 59 Step 1
        value(i) = 0
    Next i

    Set db = CreateObject("adodb.connection")
    db.Open "DisplayDB", "", ""
    SQL = "select * from Display_Locations where Loc_ID = "
    SQL = SQL & Str(Location_ID)
    SQL = SQL & " Order by Date DESC"
    Set rs = CreateObject("adodb.recordset")
    rs.Open SQL, db

    i = 0
    Do Until rs.EOF
        value(59 - i) = rs(resultmode)
        i = i + 1
        rs.MoveNext
    Loop

```

```

rs.Close
db.Close
Set rs = Nothing
Set db = Nothing

Chart_Location.chartType = VtChChartType2dLine

Chart_Location.TitleText = resultmode

Select Case resultmode
Case "LifeUsed"
    Chart_Location.TitleText = "수명소비율(%)”
Case "Temp"
    Chart_Location.TitleText = "온  도(℃)”
Case "Pressure"
    Chart_Location.TitleText = "압  력(MPa)”
Case "Stress"
    Chart_Location.TitleText = "응  력(MPa)”
Case "RemLife"
    Chart_Location.TitleText = "잔여수명(Hr)”
Case "OperHours_Logging"
    Chart_Location.TitleText = "운전시간(Hr)”
End Select

// Increase the size of the chart plot. 차트 그림의 위치를 설정함
Chart_Location.Plot.AutoLayout = False
With Chart_Location.Plot.LocationRect
    .Min.X = -150
    .Min.Y = 200
    .Max.X = 3650
    .Max.Y = 2300
End With

With Chart_Location
    .RowCount = 60
    .ColumnCount = 1
    .Column = 1
    For i = 0 To 59 Step 1
        .Row = i + 1
        .Data = value(i)
    Next i
End With

End Sub

```

```
// 일정시간 간격으로 실행함수 수행

Private Sub Timer1_Timer()
    Call Compulsory_Update(screenmode, resultmode, Active_UCL_ID)
    If locationscreen = 1 Then
        Call compulsory_update_locationscreen(Active_Loc_ID)
    End If
    Call T_Status_Update("aaa")
    Call Check_Server_OnOff(Server_OnOff)
    Call Check_Warning_Status

```

```
End Sub
```

```
// Server의 On & Off 상태 체크
```

```
Private Sub Check_Server_OnOff(OnOff As Boolean)
    Set db = CreateObject("adodb.connection")
    db.Open "CurrentDB", "", ""
    SQL = "select * from Current_Logging"
    Set rs = CreateObject("adodb.recordset")
    rs.Open SQL, db

    If rs.EOF Or rs.BOF Then
        StatusBar.Panels.Item(1).Text = "Server Off"
        OnOff = False
    ElseIf rs("Status") = 1 Then
        StatusBar.Panels.Item(1).Text = "Server On"
        OnOff = True
    End If

    rs.Close
    db.Close
    Set rs = Nothing
    Set db = Nothing

```

```
End Sub
```

```
// Warning 상태 체크
```

```
Private Sub Check_Warning_Status()
    Dim Num_CurWarn As Long
    Dim Num_AcuWarn As Long

    Set db = CreateObject("adodb.connection")
    db.Open "CurrentDB", "", ""
    SQL = "select * from Current_Alarms"

```

```

Set rs = CreateObject("adodb.recordset")
rs.Open SQL, db

Num_CurWarn = 0
Do Until rs.EOF
Num_CurWarn = Num_CurWarn + 1
rs.MoveNext
Loop

rs.Close
db.Close
Set rs = Nothing
Set db = Nothing

Set db = CreateObject("adodb.connection")
db.Open "HistoryDB", "", ""
SQL = "select * from History_Alarms"
Set rs = CreateObject("adodb.recordset")
rs.Open SQL, db

Num_AcuWarn = 0
Do Until rs.EOF
Num_AcuWarn = Num_AcuWarn + 1
rs.MoveNext
Loop

rs.Close
db.Close
Set rs = Nothing
Set db = Nothing

StatusBar.Panels.Item(3).Text = "Now:" & Str(Num_CurWarn) & " Sum:" & Str(Num_AcuWarn) &
" Warnings"

End Sub

Private Sub ShutDownProgram_Click()
StartupProgram.Enabled = True
SU_Online = True
ShutDownProgram.Enabled = False
SD_Online = False
StartupOffline.Enabled = True
SU_Offline = True
ShutDownOffline.Enabled = False
SD_Offline = False
CurrentWarning.Enabled = False

```

AccumulatedWarning.Enabled = False

OfflineWarning.Enabled = False

YN_ProgramStart = False

OnOff_Mode

End Sub