



## 저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

2011年 2月  
碩士學位 論文

原子力發展所 Class 1E 케이블  
활성화에너지 分析에 관한 研究

朝鮮大學校 大學院

原子力工學科

房 極 珍

# 原子力發展所 Class 1E 케이블 활성화에너지 分析에 관한 研究

A Study on the Analysis of Activation Energy for  
Class 1E Cable in Nuclear Power Plant

2010년 11월 일

朝鮮大學校 大學院

原子力工學科

房 極 珍

原子力發展所 Class 1E 케이블  
활성화에너지 分析에 관한 研究

指導教授 金 辰 源

이 論文을 工學 碩士學位 申請 論文으로 提出함.

2010年 11月 日

朝 鮮 大 學 校 大 學 院

原 子 力 工 學 科

房 極 珍

# 房極珍의 碩士學位論文을 認准함

委員長 朝鮮大學校 教授 金崧平 (印)

委員 朝鮮大學校 教授 李庚鎭 (印)

委員 朝鮮大學校 副教授 金辰源 (印)

2010年 12月 日

朝鮮大學校 大學院

# 목 차

ABSTRACT .....	iv
제1장 서론 .....	1
제2장 내환경검증 연구배경 .....	2
제1절 내환경검증 대상기기 분류기술 .....	2
1. 기기검증 시험 기술기준 .....	2
2. 용어정리 .....	3
3. 검증 프로그램 .....	6
4. 검증 문서 .....	7
제2절 내환경검증 상태감시 기술 .....	8
1. 환경온도 및 방사선 모니터링 .....	8
2. 케이블 상태감시 .....	8
제3절 내환경검증 사고분석 기술 .....	9
1. 배관 파단시의 증기 분출량 분석 .....	9
2. 온도 및 압력 변화 그래프 분석 .....	9
3. 침수 및 화학적 부식성 분석 .....	9
4. 기기 방사선 조사량 분석 .....	9
제3장 분석방법 .....	10
제1절 분석개요 .....	10
제2절 분석장비 .....	10
1. 적외선 분광분석기(FT-IR) .....	10
2. 열중량 분석기(TGA) .....	12
3. 시차주사열량 분석기(DSC) .....	15
제3절 분석시편 .....	19
제4장 분석결과 및 고찰 .....	20
제1절 활성화 에너지 분석 .....	20
제2절 열·노화·LOCA 분석 .....	33
제5장 결론 .....	45
참고 문헌 .....	46

# 표 목 차

표 3.3.1	검증시험 케이블 시편 .....	19
표 4.1.1	TGA 케이블 종류별 시험결과 종합표 .....	29
표 4.1.2	Insulation 등은 온도에 따른 OIT .....	30
표 4.1.3	Jacket 등은 온도에 따른 OIT .....	30
표 4.1.4	DSC 케이블 종류별 시험결과 종합표 .....	32
표 4.2.1	시험 케이블 사양 .....	33
표 4.2.2	절연저항 측정기준 .....	34
표 4.2.3	누설 전류 측정 기준 .....	35
표 4.2.4	열적 가속 노화 수명 .....	39
표 4.2.5	방사선 조사기준 .....	40
표 4.2.6	시험시편 적용전압 .....	42

## 그림 목차

그림 3.2.1	Smiths사의 Travel IR 장비 .....	10
그림 3.2.2	FT-IR에 이용되는 마이켈슨 간섭계 .....	11
그림 3.2.3	열중량 분석기 .....	12
그림 3.2.4	Perkin Elmer사 Diamond DSC .....	15
그림 3.2.5	산화유도시간 반응 그래프 .....	16
그림 4.1.1-17	Insulation 및 jacket 비교분석 그래프 .....	20
그림 4.1.18-21	열중량 분해 곡선 그래프 .....	27
그림 4.1.36-37	$\ln(\Delta t)$ 와 $\frac{1000}{T}$ 의 그래프 .....	30
그림 4.2.1	C935 케이블 시편 .....	33
그림 4.2.2	열적 가속 노화 전 절연저항 측정 .....	38
그림 4.2.3	열적 가속 노화 전 침수 내전압 측정 .....	38
그림 4.2.4	C935-A 열적 가속 노화 시험 .....	39
그림 4.2.5	열적 가속 노화 시험 후 절연저항 측정 .....	40
그림 4.2.6	방사선 조사 후 시편 유연성 시험 .....	41
그림 4.2.7	방사선 조사 후 침수 내전압 시험 .....	41
그림 4.2.8	DBE 환경 모의시험 시편 준비 .....	42
그림 4.2.9	DBE 환경 모의시험 중 절연 저항 시험 .....	43
그림 4.2.10	DBE 환경 모의시험 후 절연저항 시험 .....	43
그림 4.2.11	DBE 환경 모의시험 후 침수 내전압 시험 .....	44
그림 4.2.12	DBE 환경 모의시험 완료 후 시편 .....	44



# ABSTRACT

## A Study on the Analysis of Activation Energy for Class 1E Cable in Nuclear Power Plant

By Bhang, Keug Jin

Advisor : Prof. Kim, Jin Weon Ph. D.

Department Nuclear Engineering

Graduate School of Chosun University

Extending the lifetime of a NPP is one of the most important concerns in the global nuclear industry. Cables are one of the long - life items that have not been considered for replacement during the design life of a NPP. To extend the cable life beyond the design life, it is first necessary to prove that the design life is too conservative compared with actual aging. Condition monitoring is useful means of evaluating the aging condition of cable. In order to simulate natural aging in a nuclear power plant, a study on accelerated aging must first be conducted. In this study, evaluations of mechanical aging degradation for a neoprene cable jacket were performed after accelerated aging under continuous and intermittent heating conditions.

The equipment and cables used for nuclear power plants shall be maintained following the guidance of USNRC Regulatory Guide 1.89. In particular, strict management is required for the maintenance of cables. For the replacement of previously installed cables without qualification documentations, thorough review is required considering cost and the intent of environmental qualification (EQ). In this study, we are to take the specimens of EQ cables for Nuclear Power Plant, analyze them to identify their similarity, and make use of them as the reference material substituting qualification documentation.

Polymer materials of EQ cables for Yonggwang Unit 1&2 were analyzed using FT-IR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy), TGA (Thermo-Gravimetric Analysis), and DSC (Differential Scanning Calorimetry) to qualify the similarity with the cables having qualification documentations. The similarity of materials was analyzed through FT-IR and the activation energies of the cables were analyzed through TGA and DSC equipment to compare them with the cables having qualification documentations.

Examining the activation energies derived, it is possible to have different values based on the thermal characteristics according to cable materials and field condition of plants.

For five cables of Yonggwang Unit 1&2 without qualification documentation, FR-IR, TGA, and DSC analysis were performed and their results were compared with the data in EQDB(EQ Data base) to derive the findings as below.

1. The criteria for the similarity is assumed to be 98% for FT-IR analysis of cable insulation and jacket.
2. Comparing the result of the cables collected from Yonggwang Unit 1&2 with EQDB, jacket showed conformance while insulation showed slight nonconformance.
3. Comparing the activation energy values measured from TGA and DSC analysis with those of EQDB, their values fell within the range of  $\pm 3\%$ , which shows the similarity with the cables having qualification documentations.

Subsequently, thermal, aging and LOCA testing were performed for replacement cable has satisfied all the performance requirements of the tests. So, it was validated that the replacement cable can maintain its integrity when DBE(HELB) occurs after its normal operation of 40 years at 40°C, which result in the reduction of enormous replacement cost for the cable.

# 제1장 서론

원자력법 시행규칙 제 19조 2항은 원자력발전소 운영자가 발전소의 안전성 관련 전기 및 계측기기에 대한 기기검증을 수행하고 검증상태를 유지 관리하도록 요구하고 있다. 내환경검증은 발전소의 설계기준사고 분석에서 제시하는 온도, 압력, 방사선 조사량, 화학물질 및 침수상태에 따라 시험, 분석, 경험 및 복합적인 방법에 의한 검증을 하는 것이다. 분석은 부분적 시험결과 및 이론적 계산식을 토대로 하므로 내환경검증의 대부분은 시험이 차지한다. 시험이란 압력용기에 기기를 넣은 뒤 발전소 설계기준사고 시의 환경조건을 모사한 LOCA/HELB 프로파일에 따라 온도 압력을 변화시키면서 기기의 정상작동 여부를 확인하는 것이다.

본 논문에서는 국내외에서 일반적으로 적용되고 있는 IEEE Std 323-2003년판의 내환경검증 시험방법에 따라 국내 원전 영광 1,2호기 내환경검증(EQ) 대상 케이블 5종의 케이블 절연체 및 자켓 시편을 채취하여 적외선 분광 분석(FT-IR; Fourier Transform Infrared Spectroscopy)으로 재질의 유사성을 분석하고, 열중량 분석(TGA; Thermogravimetric Analysis) 및 시차주사열량분석(DSC; Differential Scanning Calorimetry)으로 활성화 에너지를 분석하여 각 원전의 케이블 데이터베이스와의 유사성을 비교 검토하는 것이다.

시험결과, 재질의 유사성이 없는 케이블에 대해서는 열·방사선노화·LOCA시험 수행으로 케이블의 내구성이 원전에 40년 설계수명까지 계속 사용할 수 있는지를 검증함으로써 국내, 외 각 원전의 케이블 데이터베이스를 분석하여 상호간 공유할 수 있는 프로세스가 되도록 논 하고자 하였다.

## 제2장 내환경검증 연구배경

### 제1절 내환경검증 분석기술

#### 1. 기기검증 시험 기술기준

##### 가. 법적 기술기준

- 원자력법 시행규칙 제 19조의 2 기기검증에 관한 사항
- 10CFR50.49, “Environmental Qualification of Electrical Equipment Important to Safety for Nuclear Power Plants”
- 10CFR50 Appendix B, “Quality Assurance Criteria for Nuclear Power Plants”
- NRC Regulatory Guide 1.89, “Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Plants”

##### 나. Code and Standards

- IEEE 323-2003(1983, 1974), “IEEE Standard for Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations”
- IEEE 383-2003(1974), “IEEE Standard for Qualifying Class 1E Electric Cables and Field Splices for Nuclear Power Generating Stations”
- IEEE 572-1985, “IEEE Standard for Qualification of Class 1E Connection Assemblies for Nuclear Power Generating Stations”

##### 다. 기타 참고 자료

- NUREG/CR-6384, "Literature Review of Environmental Qualification of Safety-Related Electric Cable"
- IEC 60780-1998, “Nuclear Power Plants - Electrical Equipment of the Safety System - Qualification”

## 2. 용어의 정의

### 가. 내환경검증

내환경검증은 중요한 안전성 기기가 사고 후의 열악한 환경에서 안전기능을 충분히 수행할 수 있음을 시험, 분석 및 운전경험을 통해 증명하는 것이다.

### 나. 설계기준사고(DBE: Design Basis Event)

설계기준사고란 정상운전 중 예상 과도상태 사고, LOCA/HELB와 같은 냉각수 계통 및 고에너지관 파단 사고, 외부사건 및 자연재해 등을 의미한다. 발전소는 재해에 대비하여 원자로 냉각재 계통 압력경계의 건전성 유지, 원자로 정지 및 안전정지 상태로 유지하는 능력, 10CFR100 guidelines 에 해당하는 외부 방사성 물질 누출 사고를 방지하거나 경감시킬 수 있도록 설계되어야 한다. 안전성 계통 전기/계측기류 기기의 동적 거동, 내진 검증, 자연재해 및 외부사건은 내환경검증에서 제외된다.

### 다. LOCA

Loss of Coolant Accident 의 줄임말 이며 HELB와 함께 사고분석에서 고려되는 중요한 사고환경이다. 원자로 냉각재 압력 경계에서 파단사고가 발생하여 화학체적제어계통의 보충수 공급량을 초과하는 누설이 발생하는 사고를 말한다. 원자로 냉각재 계통의 가장 큰 배관에서 양단 파단사고와 동등한 규모의 파단이 일어난 경우를 말한다.

### 라. HELB

High Energy Line Break 의 줄임말로써 고에너지 배관 계통에서 소규모 혹은 대형 파단 사고가 발생하는 경우를 말한다. 내환경검증에서 LOCA와 함께 고려되어야 할 변수중 하나이다. HELB 중 주증기관 파단사고를 MSLB (Main Steam Line Break)라고 부른다.

### 마. High Energy Piping System

고에너지 배관 계통은 원자로 정상운전 및 예상 과도상황에서 가동온도 200°F 이상, 설계압력 275psig이상인 경우이다. 고에너지 배관 계통에는

주증기 계통(터빈 구동 보조급수펌프 공급관 포함), 주급수 계통, 화학체적 제어 계통 추출수 열 교환기의 Upstream라인, 증기발생기 취출수 라인, 샘 플링 시스템 라인이 있다.

바. 열악한 환경(Harsh Environment)

예상 운전 과도상태를 포함하는 정상 운전 중 환경보다는 설계기준사고 중 또는 사고 후의 열악한 조건은 다음과 같이 설정되어 있다.

- (1) 60 °C(140 °F) 보다 높은 온도의 경우
- (2) 1.1 kg/cm<sup>2</sup>(15.7 psia) 보다 높은 압력의 경우
- (3) 화학물질 분사가 있는 경우
- (4) 방사선이 5×10<sup>4</sup> Rad 보다 크거나, Teflon이나 반도체 장비에 대한 조사량이 1×10<sup>3</sup> Rad 보다 큰 경우
- (5) 침수가 있는 경우
- (6) 습도 자체는 심각한 변수로 고려하지 않으나 상기의 어떤 조건과 습도 80%보다 큰 환경이 공존한다면 내환경검증에서 습도는 하나의 검증인자로 고려되어야 한다.

사. 온화한 환경(Mild Environment)

10CFR50.49는 온화한 환경을 정상운전 및 운전과도상태시 정상운전 보다 더 열악한 환경에 처해지지 않는 조건으로 다음과 같다.

- (1) 온도가 60 °C(140 °F) 보다 같거나 낮을 때
- (2) 압력이 1.1 kg/cm<sup>2</sup>(15.7 psia) 과 같거나 낮을 때
- (3) 화학물질 분사가 없을 때
- (4) 방사선이 5×10<sup>4</sup> Rad 과 같거나 작을 때, Teflon이나 반도체 장비에 대한 조사량이 1× 10<sup>3</sup> Rad 보다 같거나 작을 때
- (5) 침수가 없는 경우

아. Class 1E 기기

IEEE Std 323-1974에 의하면 원자로 비상정지, 격납용기 격리, 원자로 노심 냉각, 격납용기와 원자로 잔열제거 또는 중대한 방사선 물질 외부누출 사고 방지에 필수적인 기기를 의미한다.

자. 10CFR50.49

10CFR50.49는 안전성 관련 전기기기의 내환경검증을 위한 미국법으로 1983년 1월에 발행되었다. 본 내환경검증 법은 내환경검증 대상기기 목록 작성 요건, 검증방법, 검증 인자, 검증문서 관리방법을 제시하고 있다. 내환경검증 대상 기기로 안전성 관련 기기, 안전성 영향 비안전성 기기, 사고후 감시기기를 규정하고 있다. 내환경검증 인자로 온도, 압력, 습도, 화학적 영향, 방사선, 노화, 침수, 복합효과, 여유도를 제시하고 있으며 내환경검증 방법으로 시험, 분석을 포함한 부분 시험, 분석을 포함한 운전경험 반영 및 부분 형식시험 데이터를 결합한 분석을 제시하고 있다.

차. Reg. Guide 1.89

Reg. Guide 1.89는 10CFR50.49와 유사한 내용이나 수행방법에 있어서 구체적인 예를 들어 설명한 규제지침서로서 1984년 6월에 발행되었다. 본 NRC 지침서에는 10CFR50.49 요구사항에 대한 설명, 격납용기 내부 온도 및 압력 조건, 살수시 화학물질의 영향, 격납용기 내 외부의 방사선 조건, 격납용기 외부의 환경 조건, IEEE Std 323-1974의 “Type Test Procedures”에 대한 설명, 시험 여유도에 대한 해설, 노화에 대한 설명, 기기 교체시 검증요건, 검증문서 요건 등에 대해 기술하고 있다.

카. NUREG-0588

NUREG-0588(“Interim Staff Position on Environmental Qualification of Safety-Related Electrical Equipment”, 1980. 11)은 NRC의 내환경검증 검토지침으로 활용하기 위해 발간되었으며 IEEE Std 323-1974 기준에 따른 Category I 과 IEEE Std 323-1971 기준에 따른 Category II가 있다. 온도, 압력, 화학물질 분사, 방사선 검증에 대한 상세 요건을 제시하고 있으며 검증수행 절차, 시험 여유도, 노화영향 및 검증 문서화를 기술하고 있다.

타. IEEE Std 323-1974, 1983, 2003

원자력발전소 Class 1E 등급의 내환경검증 수행을 위한 산업기준이며 검증 원리, 절차 및 검증방법에 대해 기술하고 있다. 내환경검증 방법으로 형식시험, 운전경험, 분석, 조합 검증, 가동 중 검증을 제시하고 있다.

파. CSA N290.13-05

CANDU형 원자력 발전소의 기기에 대한 내환경검증 수행을 위한 산업기준이며, 검증원리, 절차 및 검증방법에 대해 기술하고 있다. 내환경검증 방법으로 형식시험, 운전경험, 분석, 조합 검증, 가동 중 검증을 제시하고 있다.

하. DOR Guidelines

NRC의 “Division of Operating Reactors”는 “Guidelines for Evaluating Environmental Qualification of Class 1E Electrical Equipment in Operating Reactors”을 1980년 1월에 발행하였다. 본 규정은 IE Bulletin No.79-01B의 붙임으로서 오래된 가동 원전의 Class 1E 기기의 내환경검증 평가용 안내서로 발간된 것으로 분석에 의한 검증요건들이 기술되어 있다. 최근 건설 또는 운전되는 원전의 경우 10CFR50.49를 따른다.

### 3. 검증 프로그램

기기검증 대상기기는 기기명칭, 기기 현장 연결 상황, 검증수명 목표, 안전기능, 정상, 비정상 및 설계기준사고 환경 조건 및 시험여유도에 대한 정보를 문서화해야 한다. 정상 및 비상 운전시의 환경조건은 주변 압력/온도, 상대습도, 방사선, OBE 내진 및 진동, 운전 횟수, 전기부하 및 신호, 응축/화학물질 살수/침수 및 EMI/RFI 및 전력서지에 대한 내용을 문서에 수록한다.

검증프로그램에서는 시험, 검사, 성능평가, 성능한계, 안전성능을 포함된다. 검증 계획에는 경년열화 영향, 경년열화 메카니즘, 경년열화 고려사항, 검증수명 목표, 시험 여유도, 주기적 정비 및 교체, 안전성능 제한치에 대한 내용이 포함된다.

### 4. 검증 문서

온화한 환경에 위치한 Class 1E 기기의 검증문서는 설계/구매 사양서, 내진시험 보고서, 품질보증서(C of C) 이다. 설계/구매 사양서는 정상 및 예상 운전조건별 특정 환경지역에서의 기능 요구 값을 수록하여야 한다. 온화한 환경에 위치한 기기의 경우 중대한 노화 메카니즘이 없을 경우 검증수명을 문서화할 필요가 없다.

내진검증의 경우 중대한 노화메카니즘이 존재할 경우만 경년열화 된 시험편을 사용하여 내진검증을 수행하고 이를 문서화 한다.



Class 1E 기기의 검증문서는 요구사항의 만족 여부, 검증수명, 감시/정비 혹은 상태 감시 주기의 설정이 수립되어 있음을 보여주어야 한다. 검증에 사용된 데이터는 적용 타당성이 있어야 하며 이해가 쉽고 추적이 가능한 형태로 정리되어 제시된 결론에 대한 독립적 감시가 가능하도록 하여야 한다.

본 방법론은 EPRI 보고서 NP-1558에 상세히 언급되어 있는 아레니우스 방법론이다. 아레니우스 방법론은 안전성 기기의 검증에 있어서 노화분석 방법으로 NRC가 NUREG-0588 문서로 승인한 모델이다. 이 모델의 활성화 에너지는 노화과정의 비율로서 온도의 영향을 측정하는 것이다.

활성화 에너지는 IEEE Std 1-1986, IEEE Std 98-2002, IEEE Std 101-1987, ANSI/UL 764B-1969 및 관련 문서에서 설명되는 시험방법으로 통상 결정된다. 본 보고서는 DSC 등온분석법을 사용하였다.

열적 가속 노화는 케이블 절연체 재질의 보수적 활성화 에너지를 기준으로 계산하며, 열적 가속 노화 온도 및 기간은 아레니우스 방법론을 사용하여 계산한다.

본 내환경검증 시험에 사용되는 케이블 시편은 영광 1,2호기 계속운전 안전등급 케이블 샘플이다. 시험 대상 케이블은 절연체 및 자켓의 40년 이상 내환경검증 시험을 위하여 열적 가속 노화 온도 및 시간을 계산하였다.

## 제2절 내환경검증 상태감시 기술

### 1. 환경온도 및 방사선 모니터링

내환경검증 대상기기의 수명은 기기가 가동중에 받아들이는 온도 및 방사선량에 따라 정해진다. 기기의 온도 및 방사선량은 기기의 표면에서 측정되는 것을 원칙으로 한다. 기기에 가해지는 온도와 방사선량은 기기의 운전조건 및 계절별로 달라지기 때문에 1년이상 온도와 방사선량을 모니터링하여 수명산출에 필요한 기준량이 정해진다.

금번에 적용된 감시기는 국내 전력연구원에서 내환경검증 대상기기의 표면온도

및 방사선 조사량을 측정할 수 있는 전자식 온도-방사선량 기록계를 국내 최초로 개발하여 내장 배터리만으로 2년 동안 기기의 환경온도를 측정할 수 있도록 저전력 회로로 설계되었으며, Alanine- EPR tablet을 이용하여 방사선 조사량을 측정할 수 있도록 제작되었다. 적외선 무선통신 방식을 이용하여 데이터 송수신을 편리하게 하였으며 데이터 압축기법을 이용해 시중품에서 구현되지 못한 2년간의 온도 데이터 저장이 가능하다.

## 2. 케이블 상태감시

원자력발전소의 케이블은 교체가 용이하지 않기 때문에 발전소의 설계수명과 유사하게 사용할 수 있도록 제작한다. 그러나 설계 시에 예상치 못한 열악한 환경에 설치된 케이블의 경우 예상수명보다 더 빨리 열화될 수 있어 설계수명의 재평가가 필요하다.

일반적으로 케이블의 수명은 발전소의 운전환경 중 최고온도 및 방사선량을 기준으로 결정된다. 그러나 발전소의 환경은 운전조건 및 지역에 따라 달라지므로 일반적으로 최악의 환경만을 적용하는 것은 사용수명의 입장에서 비경제적이다. 국제전기전자기술자협회(IEEE)는 IEEE323-2003년판을 통해 상태감시에 의한 수명 평가방법을 제시하고 있다.

## 제3절 내환경검증 사고분석 기술

### 1. 배관 파단시의 증기 분출량 분석

배관이 파단되는 사고 발생시 기기가 어떤 환경에 접하는지를 알기 위해서는 배관 파단시의 압력, 온도 및 방사선량을 전산프로그램으로 계산해야 한다. 원자력발전소에서 일어날 수 있는 배관 파단사고 중 대표적인 것은 원자로를 냉각시키는 주냉각재 배관의 파단사고와 증기발생기로 부터 나오는 증기를 터빈으로 보내는 주증기 배관의 파단사고이다.

## 2. 온도 및 압력 변화 그래프 분석

발전소를 안전하게 정지시키는데 필요한 기기들은 원자력발전소의 고온고압 배관이 파단되어 증기가 발전소 내부로 확산되어 가혹한 열 및 방사선에 노출되어도 정상적인 기능을 수행하도록 설계되어 있다. 이러한 설계요건에 맞게 제작된 기기들이 설치된 건물 및 격실에 대하여 사고조건별로 스펙트럼을 분석한 후 기기검증용 압력·온도 한계곡선을 작성해야 한다.

## 3. 침수 및 화학적 부식성 분석

발전소 건물 내부 및 외부에서 발생하는 침수사고는 발전소 안전정지 평가를 위해 반드시 고려되어야 할 발전소 재해중의 하나이다. 침수사고의 원인은 지진 및 기상 조건과 같은 외부사건에 의한 침수사고와 기기파손 등과 같은 내부요인에 의한 내부 침수사고 두 가지로 분류된다.

## 4. 기기 방사선 조사량 분석

방사선조사량 분석은 안전성 기기가 설치된 지역의 총누적흡수선량(TID)을 계산하는 것이다. 총누적흡수선량은 정상운전시 발전소 수명기간 동안 기기가 흡수하는 누적 방사선량과 배관파단 사고시 기기의 작동시간 동안 기기가 흡수하는 누적 방사선량을 합한 것이다.

## 3장 분석 방법

### 제1절 분석 개요

원자력발전소의 내환경검증(EQ) 대상 케이블 재질에 대한 분석적 방법으로는 적외선분광분석(FT-IR; Fourier Transform Infrared spectroscopy), 열중량분석(TGA; Thermogravimetric Analysis), 시차주사열량분석(DSC; Differential Scanning Calorimetry) 등이 있다. 분석평가 대상은 영광 1,2호기에서 채취된 5종의 케이블 절연체 재질이며, FT-IR로 재질의 유사성을 분석하고, TGA 및 DSC 장비로 케이블 활성화에너지를 분석한 결과를 기존의 영광 1,2호기, 고리 1,2호기, 고리 3,4호기 및 월성 1호기의 내환경검증 대상 케이블과 유사한 것이 있는지를 확인하였다.

### 제2절 분석 장비

#### 1. 적외선 분광 분석기(FT-IR)

##### 가. 시험 장치

본 시험장치 그림 3.2.1은 용액 및 고체상 시약, 폴리머(케이블)로 구성된 다양한 고체 지지체의 표면을 전처리 없이 IR Spectrum을 얻을 수 있다.



그림 3.2.1 Smiths사의 Travel IR 장비

## 나. FT-IR 작동 원리

흑체 광원으로부터 나온 빛은 광분할기( beamsplitter)에 의해 두개의 빛으로 나뉜다. 나뉜 빛은 각각 고정 거울과 이동거울에 의해 반사되고, 다시 광분할기에 의해 합쳐져 시료에 입사된다. 각각의 빛은 간섭 현상을 일으키는데, 이동거울의 위치에 대하여 두 빛의 경로차(Phase Shift  $\Delta$ )가 달라진다. 감응기(detector)를 통해 이동 거울의 위치에 대한 간섭된 빛의 세기를 얻는다.

적외선 분광 분석기의 개략적인 구조는 아래 그림 3.2.2와 같다.

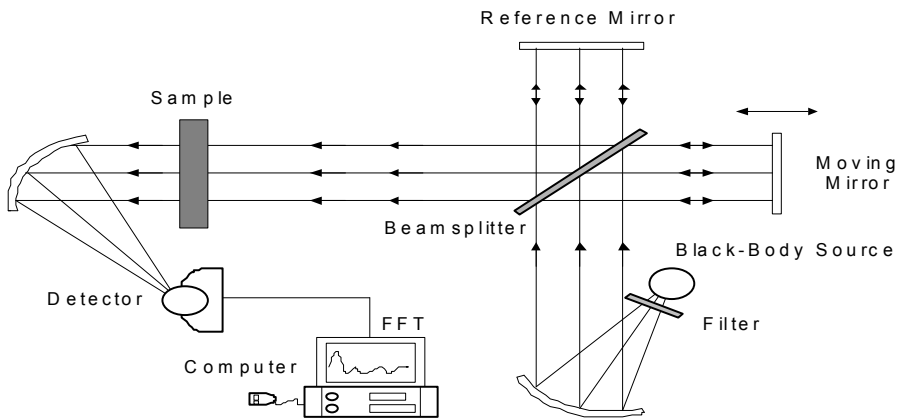


그림 3.2.2 FT-IR에 이용되는 마이켈슨 간섭계

## 다. 적외선 분광 분석

먼저 검사하고자 하는 케이블 시편의 시료 2mm 이상을 준비하여 장비의 Dura Disk 중심에 시료를 올려놓는다. 시료를 상부의 Pressure Arm을 이용하여 밀착시키고, 컴퓨터의 프로그램을 이용하여 스펙트럼을 확인한다. 분석된 스펙트럼을 프로그램 자체 DB와 기존 발전소의 DB에 일치하는 케이블이 있는지 분석한다.

분석 결과는 %로 나타내고, 98%이상이면 유사한 것으로 간주한다.

## 2. 열중량 분석기(TGA)

### 가. 시험 장치

본 장비는 TA사의 열중량 분석기 Q-5000로 아래 그림 3.2.3 과 같다.



그림 3.2.3 열중량 분석기

### 나. 시험 방법

TGA를 이용한 열중량 분석은 열분해에 따른 휘발성 고체나 액체, 가연성 물질 등의 질량 혹은 질량변화를 측정하는 실험이다. 이 실험은 열분해에 따른 폴리머 재료의 노화를 평가하는데 사용될 수 있다. 여기서는 평가 모델을 설명하는 여러 가지 열중량 분석 방법 중 통계학적 기반을 갖고 있으며 수식 적용이 간단한 Ozawa법을 중심으로 열중량 분석법을 설명한다.

열적 노화에 따른 재료의 물성변화가  $n$ 차 반응을 하고 있다면 반응물이  $t$ 시간 후에  $c$ 로 변하여  $1-c$ 로 변하므로  $t$ 시간 후의 반응속도는 다음과 같다.

$$\frac{dc}{dt} = k(1-c)^n \quad (1)$$

여기서, n은 반응차수, c는 전환율(또는 열분해율, 질량 감소율), k는 반응속도상수를 의미한다. 반응속도 상수의 온도 의존성은 Arrhenius 식으로 아래와 같이 표현된다.

$$k = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (2)$$

이며 여기서, A는 Collision Factor, E는 Activation Energy, R은 기체상수, T는 온도이다. 식 (1)과 (2)를 결합하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dc}{dt} = A(1-c)^n \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (3)$$

이 TGA 실험이 동적 방법, 즉 시간당 일정비율로 온도를 올리는 방법으로 시행될 경우, 그 가열속도( $\beta = dT/dt$ )를 식 (3)에 대입하면,

$$\frac{dc}{(1-c)^n} = \frac{A}{\beta} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) dT \quad (4)$$

위의 식을 주어진 가열 속도에서 적분형으로 나타내면 다음과 같다.

$$\int_0^c \frac{dc}{(1-c)^n} = \frac{A}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) dT \quad (5)$$

Ozawa는 A, c, n 및 E가 T에 무관하다고 가정하여 우변을 F(c)로 두어 다음과 같이 정리하였다.

$$F(c) = \int_0^c \frac{dc}{f(c)} = \frac{A}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) dT \quad (6)$$

여기서, 위의 식의 우변을 적분하고 다음과 같이  $p(x)$ 로 치환하면,

$$p(x) = \exp(-x)x^{-1} - \int_0^{\infty} \exp(-x)x^{-1} dx \quad (7)$$

그러므로 아래의 식이 구해진다. 여기서,  $x = E/RT$  이다

$$F(c) = \frac{AE}{\beta R} [p(x) - p(x_0)] \quad (8)$$

이때  $p(x) - p(x_0)$  는 Flynn과 Slade에 의하면  $p(x) - p(x_0) \cong p(x)$  이므로 위의 식은 다음과 같이 된다.

$$F(c) = \frac{AE}{\beta R} p(x) \quad (9)$$

위의 식 양변에 대수를 취하면

$$\log F(c) = \log\left(\frac{AE}{R}\right) - \log \beta + \log p\left(\frac{E}{RT}\right) \quad (10)$$

$10 < E/RT < 60$ 에서 Dolye 근사법을 사용하면

$$\log p\left(\frac{E}{RT}\right) \cong -2.315 - 0.4567 \frac{E}{RT} \quad (11)$$

위의 식을 일정한 전환율에서 미분하면 상수항들은 모두 사라지고

$$\frac{d \log \beta}{d(1/T)} \cong \left(\frac{0.4567}{R}\right) E \quad (12)$$

주어진 전환율에 대하여  $\log \beta$ 와  $1/T$ 의 관계로부터 활성화 에너지를 구할 수 있다.



### 3. 시차주사열량 분석기(DSC)

#### 가. 시험 장치

본 장비는 Perkin Elmer 제조사의 Diamond DSC이며, 아래 그림 3.2.4와 같다.



그림 3.2.4 Perkin Elmer사 Diamond DSC

#### 나. 시험 방법

##### (1) OIT(Oxidation Induction Time)

산화유도시간이란 일정 온도에서 산소를 주입했을 경우 비금속 재료가 산화되기 까지 걸린 시간이다. 비금속 재료 내에는 재료의 산화를 방지하기 위한 산화방지제 (antioxidant)가 포함되어 있다. 일정온도에서 산소를 주입시켰을 경우 산화방지제가 다 타고 없어지게 되면 비금속 재료가 산소와 반응하여 산화가 일어나 발열반응이 생기게 된다.

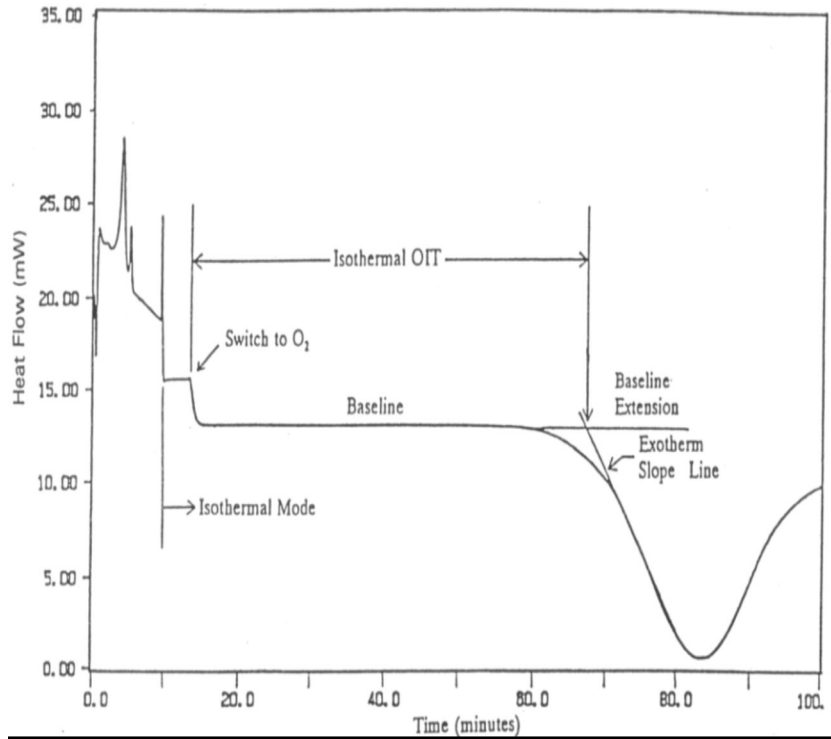


그림 3.2.5 산화유도시간 반응 그래프

(2) OIT와 등온분석법을 이용한 활성화에너지 계산

등온분석법이란 활성화에너지를 구하는 방법 중의 하나로서, 어떤 물질의 샘플을 등온 온도로 유지했을 경우 발열반응이 일어날 때까지 시간과 등온 온도와의 관계를 통해 활성화에너지를 구하는 방법이다. 등온분석법은 미국 재료시험협회의 ASTM E-2070에 잘 설명되어 있다.

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(T)(1 - \alpha)^n \quad (13)$$

$\frac{d\alpha}{dt}$  : 반응속도(min<sup>-1</sup>)

$k(T)$  : 온도  $T$ 에서 반응 비례 상수

$\alpha$  : 반응양

또한 반응비례상수  $k(T)$ 는 식 15과 같이 아레니우스의 방정식이 성립된다.

$$k(T) = Ze^{-\frac{E}{RT}} \quad (14)$$

$Z$  : 물질의 고유상수

$E$ : 활성화에너지

$R$  : 기체상수

식 14를 식 13에 대입하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{(1-\alpha)^n} \frac{d\alpha}{dt} = Ze^{-\frac{E}{RT}} \quad (15)$$

식 15의 양변에 로그함수를 취하면 다음과 같은 식이 된다.

$$\ln\left(\frac{d\alpha}{dt}\right) = \ln(Z) - \frac{E}{RT} + n \ln(1-\alpha) \quad (16)$$

만약, 반응량의 변화 없이 반응이 시작되는 순간까지 걸린 시간을  $\Delta t$ 라 하면 다음과 같이 간단하게 표현할 수 있다.

$$\ln(\Delta t) = \frac{E}{RT} + C \quad (17)$$

식 17은  $y=mx+b$ 의 형태로,  $y$ 를  $\ln(\Delta t)$ 로 하고  $x$ 를  $\frac{1}{T}$ 로 하면 그 기울기가  $\frac{E}{R}$ 이 된다.

따라서,  $\ln(\Delta t)$ 와  $\frac{1}{T}$ 의 그래프의 기울기를  $m$ 이라고 하면 활성화에너지  $E$ 는 다음식과 같이 구해질 수 있다.

$$E = m \times R \quad (18)$$

여기서, 반응은 발열반응으로서, 주로 경화 반응, 결정화 변이 반응 등이 많이 사용되며 산화반응도 포함될 수 있다. 따라서, 반응이 시작되는 순간까지 걸린 시간  $\Delta t$ 를 산화유도시간으로 대체할 수 있게 된다.

### (3) DSC 사용방법

DSC 본체 뒤에 있는 스위치와 레귤레이터 스위치를 켜고 사용하고자 하는 가스의 밸브를 연다. 컴퓨터를 켜고 Diamond DSC 프로그램을 실행시킨 다음에 DSC 본체의 sample holder(왼쪽)에는 sample pan을, referenece holder(오른쪽)에는 reference pan을 넣는다. 모든 실험이 끝나면 가스의 밸브를 닫고, DSC 본체 및 레귤레이터의 스위치를 끈다.

### 다. 적용 사례

본 장비는 전력연구원이 기 보유하고 있는 장비로 송전용, 배전용, 발전소의 XLPE 케이블의 활성화에너지 계산에 자주 이용되고 있다.

### 제3절 분석 시편

#### 1. 영광 1, 2호기 검증시험 케이블 목록(5종)

표 3.3.1 검증시험 케이블 시편

시편번호	계통	기기번호	기기명	케이블 번호	CABLE CODE	검증보고서 보유 유무
1	BB	A-7J-BB-TE-4 12B2-2	RC LOOP1 HOT LEG TEMP ELEMENT	A7EBBHBCAXP	EP61	보유
2	GN	N-7J-GN-TE-0 28F-2	UPPER CTMT AMBIENT TEMP ELEMENT	N7EGNHBC1XM	IE6	보유
3	BB	A-7J-SE-NE-0 41A-2	PWR RANGE1-3 UPPER CHAMBER DETECTOR	A7ESEHAC1XE	L151	보유
4	BM	N-7J-BM-HV- 305-HS-1	SG3 NORM SAMPLE ISOLATION VALVE	N7EBMHAC5SD	C935	미보유
5	ZJ	N-7J-ZJ-P0 -570-1	CABIT-NSSS CONTROL INST GP2	N7ENKHCC6LL	91C	미보유

상기 케이블 시편은 아래 그림 3.3.1과 같다.

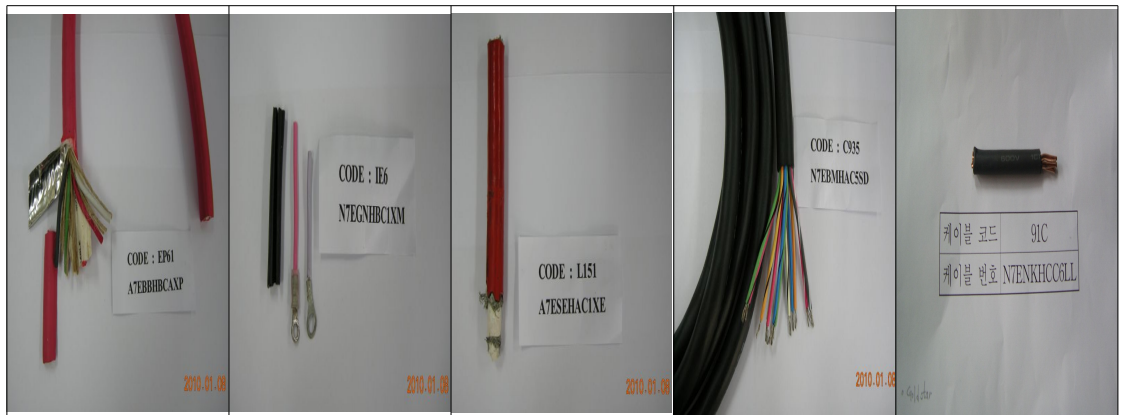


그림 3.3.1 영광 1,2호기 시험대상 케이블 시편

## 제4장 분석결과 및 고찰

### 제1절 활성화 에너지 분석

케이블 재질의 유사성 분석은 주요 재질 및 첨가물이 유사한지 판별하는 것이다. 유사도 판결 기준은 FT-IR 분석 스펙트럼 유사도 결과값이 98% 이상이며, TGA 및 DSC 활성화에너지 값이 유사하면 유사한 종류의 케이블로 평가할 수 있다.

다음은 기존에 분석된 영광 1,2호기 케이블 28종과 금번에 분석한 영광 1호기 케이블 4종 및 영광 2호기 1종을 비교한 결과이다.

#### 가. 케이블 FT-IR 스펙트럼 그래프

##### 1) EP61 케이블 스펙트럼

###### 가) Insulation

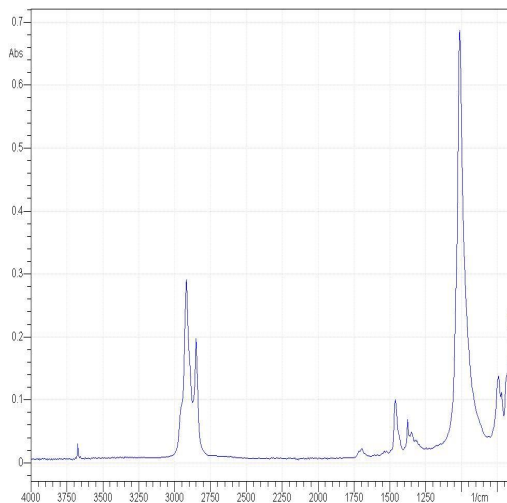


그림 4.1.1 EP61\_Insulation

###### 나) Jacket

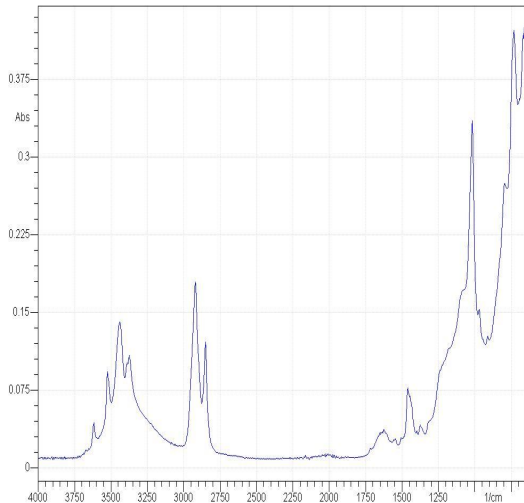


그림 4.1.2 EP61\_Jacket

## 2) IE6 케이블

### 가) Insulation

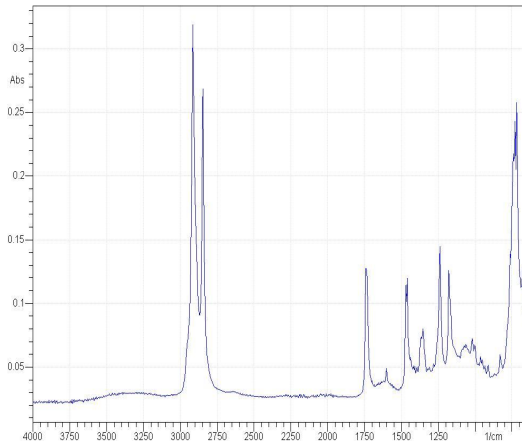


그림 4.1.3 IE6\_Insulation

### 나) Jacket

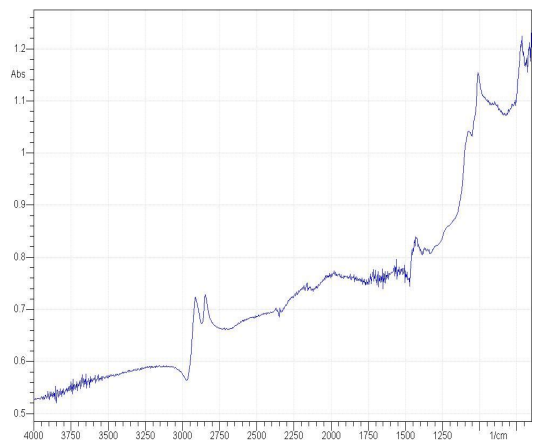


그림 4.1.4 IE6\_Jacket

## 3) L151 케이블

### 가) Insulation

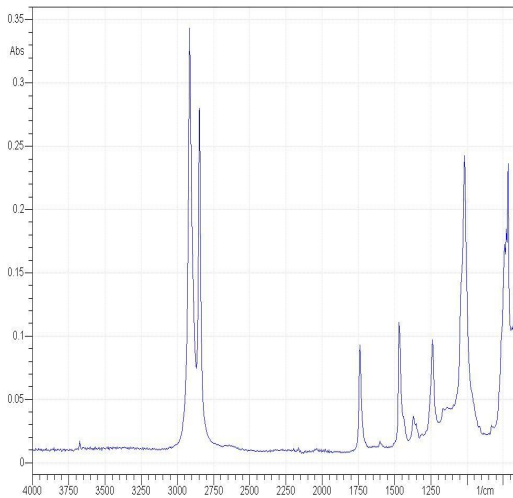


그림 4.1.5 L151\_Insulation

### 나) Jacket

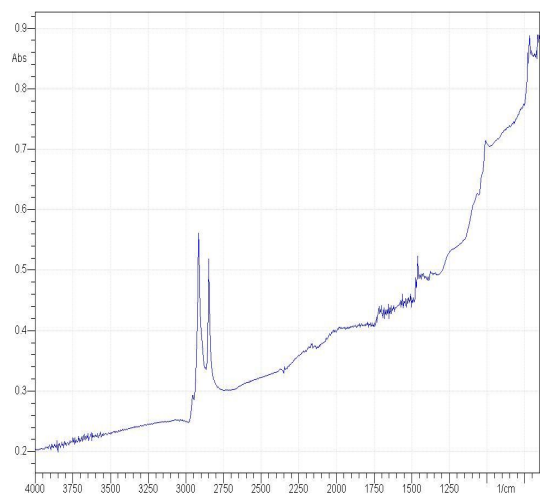


그림 4.1.6 L151\_Jacket

#### 4) C935 케이블

##### 가) Insulation

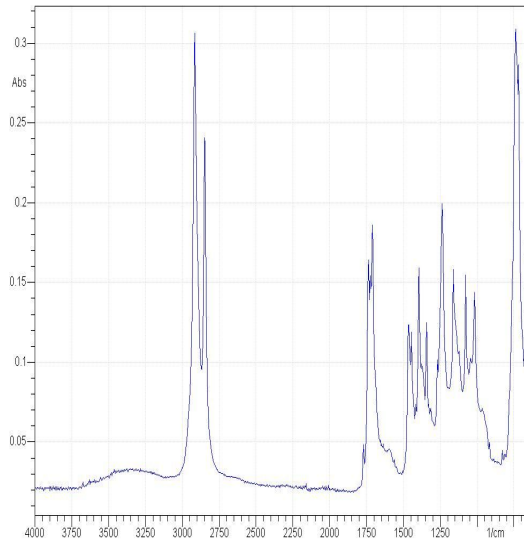


그림 4.1.7 C935\_Insulation

##### 나) Jacket

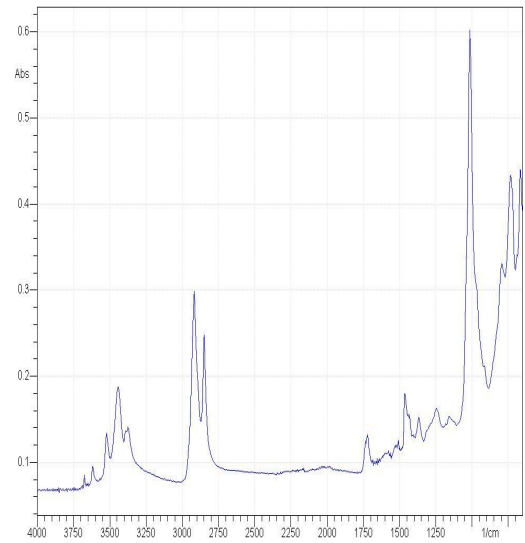


그림 4.1.8 C935\_Jacket

#### 5) 91C 케이블

##### 가) Insulation

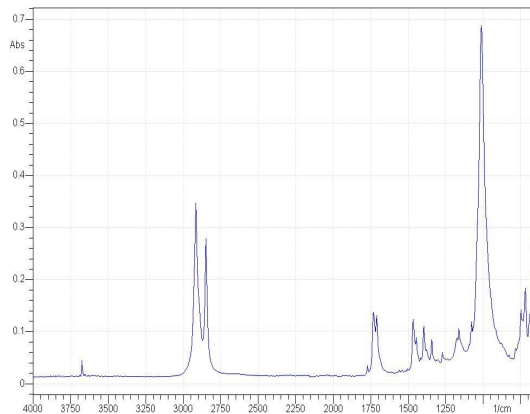


그림 4.1.9 C91\_Insulation

#### 나. 영광 1,2호기 케이블 5종의 FT-IR 분석 결과



## 1) EP61 케이블

### 가) Insulation

EP61\_Insulation은 영광 1,2호기, 고리 1,2호기 및 고리 3,4호기 케이블과 비교 분석 하였다. 본 재질은 고리 3호기 A5EAEHEC4SA와 99.0%, N5EABHFC9SA와 84.8% 유사성이 있다. FT-IR 비교분석 결과 80% 이상 유사성을 가진 케이블은 아래 그림4.1.10과 같다.

### 나) Jacket

EP61\_Jacket은 영광 1,2호기, 고리 1,2호기 및 고리 3,4호기 케이블과 비교분석 하였다. 본 재질은 고리 3호기 A5EAEHEC4SA와 99.9%, 영광 2호기 A7EBHHBC1SC와 89.5% 유사성이 있다. FT-IR 비교분석 결과 80% 이상 유사성을 가진 케이블은 아래 그림 4.1.11과 같다.

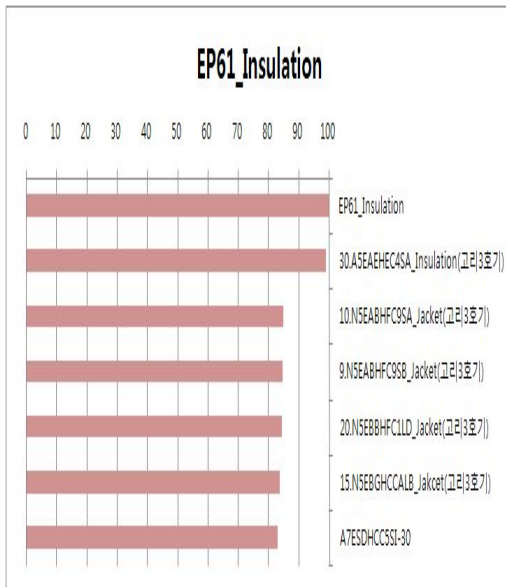


그림 4.1.10 EP61\_Insulation 비교분석

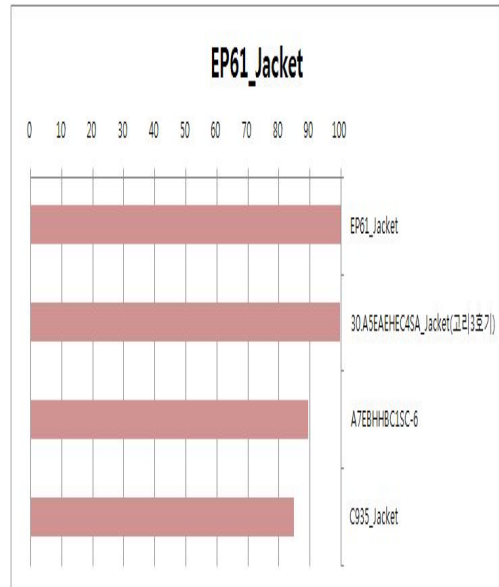


그림 4.1.11 EP61\_Jacket 비교분석

## 2) IE6 케이블

### 가) Insulation

IE6\_Insulation은 영광 1,2호기, 고리 1,2호기 및 고리 3,4호기 케이블과 비교분석 하였다. 본 재질은 고리 3호기 A5EBMHBC1XC와 97.7%, A5EABHCC3SD와 95.7%, 영광 1호기 A7EABHFC1XB와 93.0% 유사성이 있다. FT-IR 비교분석 결과 80% 이상 유사성을 가진 케이블은 아래 그림4.1.12와 같다.

### 나) Jacket

IE6\_Jacket은 영광 1,2호기, 고리 1,2호기 및 고리 3,4호기 케이블과 비교분석 하였다. 본 재질은 영광 1호기 L151\_Jacket 및 시편번호 10번과 97%, 영광 2호기 시편번호 8, 9, 16, 17, 26, 28, 46번과 95%, 고리 3호기 A5EBMHBC1XC와 99.9% 유사성이 있다. FT-IR 비교분석 결과 80% 이상 유사성을 가진 케이블은 아래 그림 4.1.13 같다.

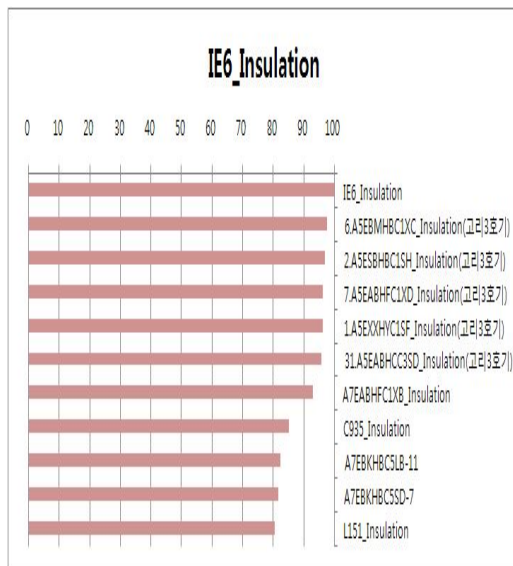


그림 4.1.12 IE6\_Insulation 비교분석

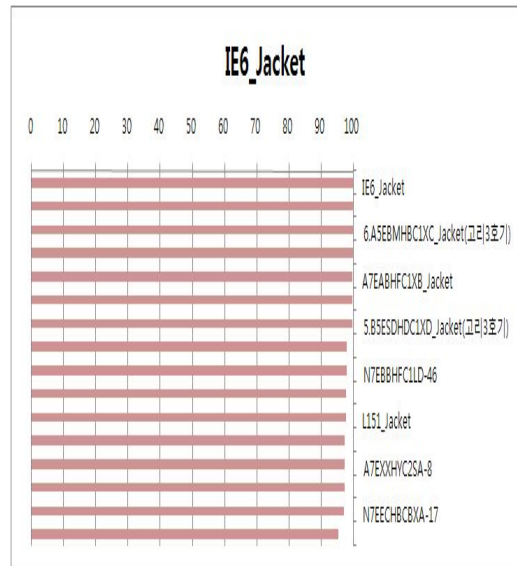


그림 4.1.13 IE6\_Jacket 비교분석

### 3) L151 케이블

#### 가) Insulation

L151\_insulation은 영광 1,2호기, 고리 1,2호기 및 고리 3,4호기 케이블과 비교 분석 하였다. 본 재질은 고리 3호기 B5ESDHDC1XD와 99.6%, A5EBMHBC1XC와 83.1% 유사성이 있다. FT-IR 비교분석 결과 80% 이상 유사성을 가진 케이블은 아래 그림4.1.14와 같다.

#### 나) Jacket

L151\_Jacket은 영광 1,2호기, 고리 1,2호기 및 고리 3,4호기 케이블과 비교분석 하였다. 본 재질은 영광 2호기 시편번호 8, 9, 16, 17, 26, 28, 46번과 95%, 영광 1호기 시편번호 10번 Jacket 및 IE6\_Jacket와 97%, 고리 3호기 B5ESDHDC1XD와 98.1%, A5EBMHBC1XC와 97.8% 유사성이 있다. FT-IR 비교분석 결과 80% 이상 유사성을 가진 케이블은 아래 그림 4.1.15와 같다.

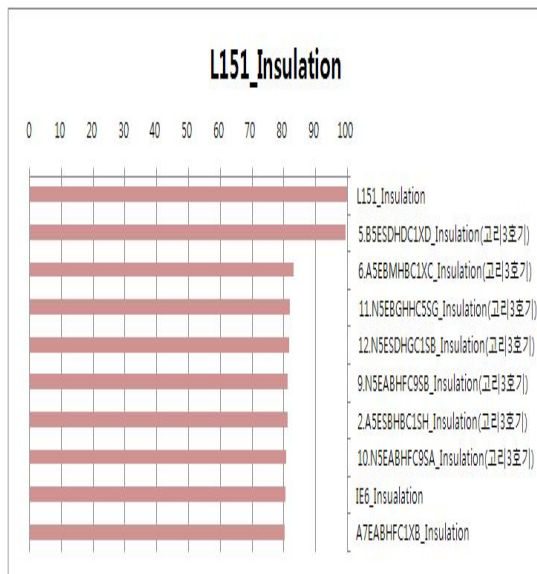


그림 4.1.14 L151-insulation 비교분석



그림 4.1.15 L151-Jacket 비교분석

#### 4) C935 케이블

##### 가) Insulation

C935\_Insulation은 영광 1,2호기, 고리 1,2호기 및 고리 3,4호기 케이블과 비교 분석 하였다. 본 재질은 영광 1호기 A7EABHFC1XB와 88.7%, 고리 3호기 DRPI 절연체와 88.2% 유사성이 있다. FT-IR 비교분석 결과 80% 이상 유사성을 가진 케이블은 아래 그림4.1.16과 같다.

##### 나) Jacket

C935\_jacket은 영광 1,2호기, 고리 1,2호기 및 고리 3,4호기 케이블과 비교분석 하였다. 본 재질은 영광 2호기 시편번호 6번(A7EBHHBC1SC)과 96.7%, 월성 1호기 FV53와 93.4%, 718L2325와 92.5% 유사성이 있다. FT-IR 비교분석 결과 80% 이상 유사성을 가진 케이블은 아래 그림4.1.17과 같다.

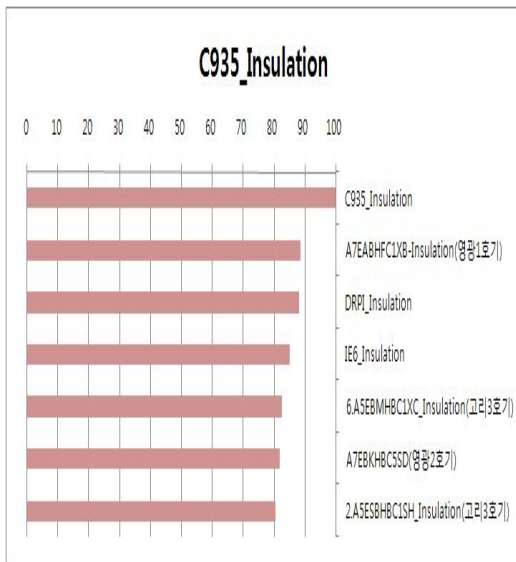


그림 4.1.16 C935\_Insulation비교분석

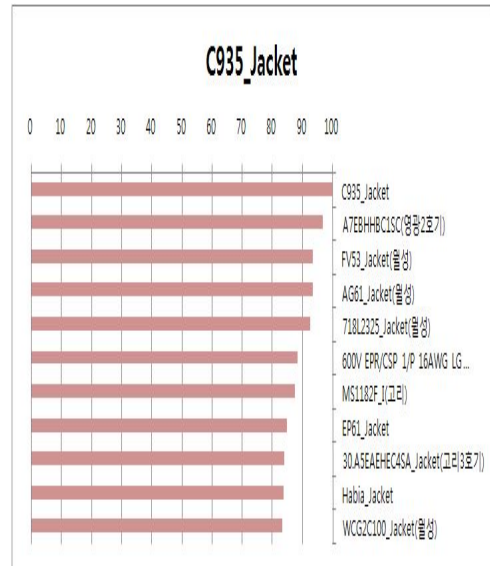


그림 4.1.17 C935-jacket 비교분석

5) 91C(N7ENKHCC6LL) 케이블

가) Insulation

91C\_insulation 재질은 영광 1,2호기, 고리3,4호기 케이블과 유사한 재질이 일부 있다. 본 재질은 영광1,2호기 EP61\_insulation과 95.59%, 고리 3호기 A5EAEHEC4SA 와 94.62% 유사하다.

다. 케이블 열중량분석(TGA) 결과

1) Insulation 분석

다음 그림 4.1.18은 승온속도 1, 2, 5, 10°C/min에 따른 EP61\_Insulation 재질의 열중량 분해곡선을 나타낸 것이다. 승온속도 1, 2, 5, 10°C/min에 대한 5%의 Conversion Level에서의 온도를 Ozawa 방법에 적용하여  $\log\beta$ 와  $1/T$ 의 관계를 그림 4.1.19에 나타내었다. 이 기울기를 식 (12)에 대입하여 활성화에너지를 계산하였으며, 계산된 EP61\_Insulation 재질의 활성화에너지는 118.0kJ/mole(1.23eV) 이다.

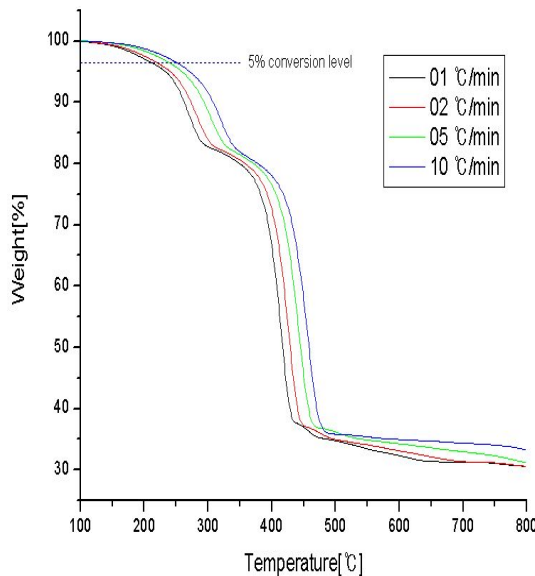


그림 4.1.18 열중량 분해 곡선

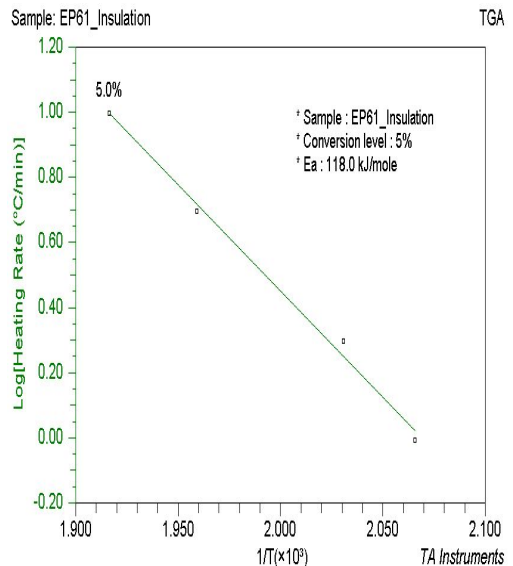


그림4.1.19 5% 중량 감소시 그래프

나) Jacket 분석

아래 그림 4.1.20은 승온속도 1, 2, 5, 10°C/min에 따른 EP61\_Jacket 재질의 열중량 분해곡선을 나타낸 것이다. 승온속도 1, 2, 5, 10°C/min에 대한 5%의 Conversion Level에서의 온도를 Ozawa 방법에 적용하여  $\log\beta$ 와  $1/T$ 의 관계를 그림 4.1.21에 나타내었다. 이 기울기를 식 (12)에 대입하여 활성화에너지를 계산하였으며, 계산된 EP61\_Jacket 재질의 활성화에너지는 127.5kJ/mole(1.32eV) 이다.

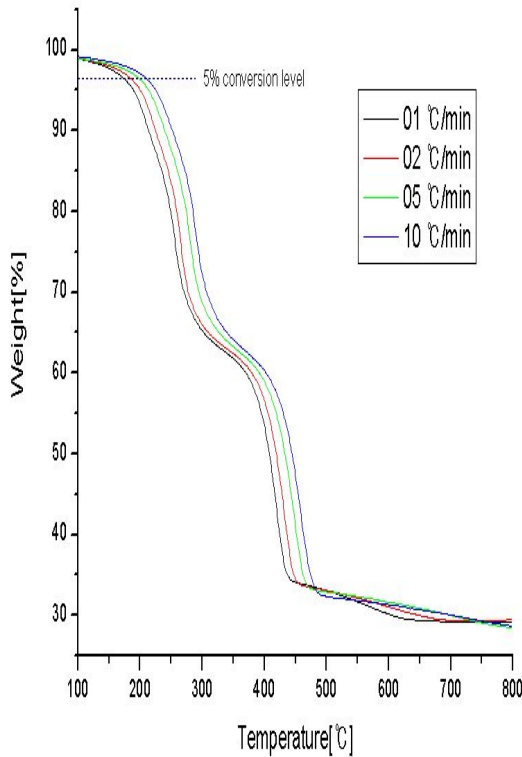


그림 4.1.20 열중량 분해 곡선

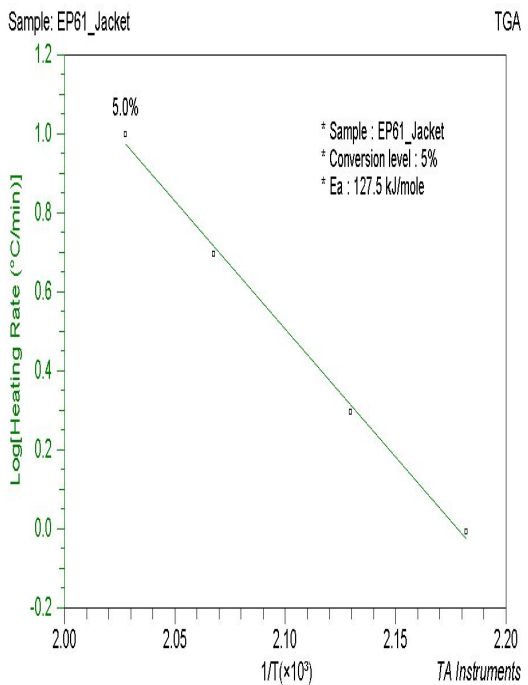


그림 4.1.21 5% 중량 감소시 그래프

위와 같은 열중량 분석 모델로 5종의 각 시편에 대해서 Insulation과 Jacket 의 활성화에너지 분석을 수행하였으며 그 종합 결과는 아래의 표 4.1.1과 같다.

표 4.1.1 TGA 케이블 종류별 시험결과 종합표

케이블 Code 및 종류		열중량분석(TGA)에 의한 활성화에너지 분석 결과	비 고
EP61	Insulation	118.0kJ/mole(1.23eV)	
	Jacket	127.5kJ/mole(1.32eV)	
IE6	Insulation	130.8kJ/mole(1.36eV)	
	Jacket	104.2kJ/mole(1.08eV)	
L151	Insulation	133.5kJ/mole(1.39eV)	
	Jacket	113.9kJ/mole(1.18eV)	
C935	Insulation	183.8kJ/mole(1.91eV)	
	Jacket	129.5kJ/mole(1.34eV)	
91C	Insulation	195.2kJ/mole(2.03eV)	

라. 케이블 시차열주사(DSC) 분석 결과

1) Insulation 분석

EP61\_Insulation 재질의 OIT 측정 시 무게는 5mg으로 하였고, 등온 온도 (isothermal temperature)는 190, 195, 200, 205, 210℃로 시험하였다.

시험한 결과 OIT는 다음의 표 4.1.2와 같이 측정되었고, 이 결과를  $\ln(\Delta t)$ 와  $\frac{1000}{T}$ 의 그래프로 그리면 아래의 그림4.1.36과 같이 나타난다.

표 4.1.2 Insulation등온 온도에 따른 OIT

온도 (T, °C)	OIT (t, min)	온도 (T, K)	1000/T	ln(t)
190	167.753	461.3	2.168	5.122
195	107.722	466.3	2.145	4.680
200	67.546	471.3	2.122	4.213
205	42.756	476.3	2.100	3.756
210	28.978	481.3	2.078	3.367

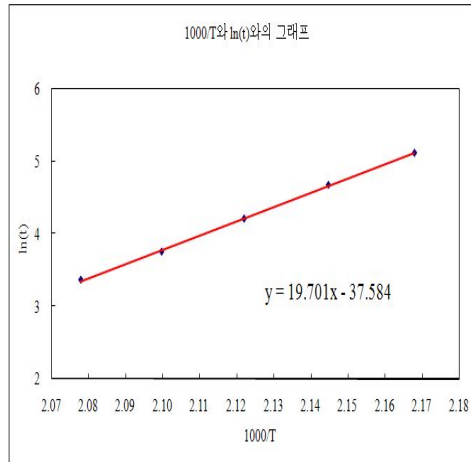


그림 4.1.36  $\ln(\Delta t)$ 와  $\frac{1000}{T}$ 의 그래프

위의 그림에서 직선의 기울기(m)는 Linear Fitting을 통하여 구하면 19.701이며, DSC 활성화에너지 계산 방정식6에 대입하여 계산하면 163.79kJ/mol (1.70eV)가 된다.

#### 나) Jacket

EP61\_Jacket 재질의 OIT 측정 시 무게는 5mg으로 하였고, 등온 온도 (isothermal temperature)는 210, 212.5, 215, 217.5, 220°C로 시험하였다. 시험한 결과 OIT는 다음 표4.1.3와 같이 측정되었고, 이 결과를  $\ln(\Delta t)$ 와  $\frac{1000}{T}$ 의 그래프로 그리면 아래 그림 과 4.1.37과 같이 나타난다.



표 4.1.3 등온 온도에 따른 OIT

온도 (T, °C)	OIT (t, min)	온도 (T, K)	1000/T	ln(t)
210	77.330	481.3	2.078	4.348
212.5	66.715	483.8	2.067	4.200
215	61.684	486.3	2.056	4.122
217.5	53.495	488.8	2.046	3.980
220	48.928	491.3	2.035	3.890

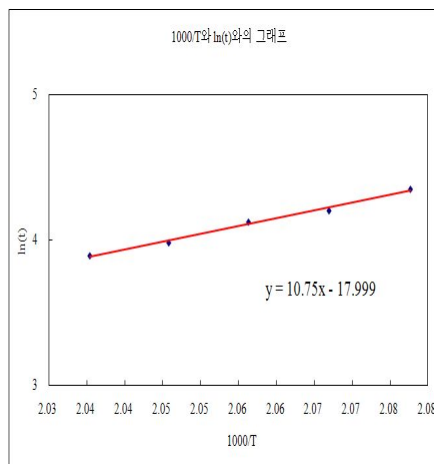


그림 4.1.37  $\ln(\Delta t)$ 와  $\frac{1000}{T}$ 의 그래프

위의 그림에서 직선의 기울기(m)는 Linear Fitting을 통하여 구하면 10.750이며, DSC 활성화에너지 계산 방정식 6에 대입하여 계산하면 89.38kJ/mol (0.93eV)가 된다.

위와 같은 시차열주사(DSC) 분석 모델로 5종의 각 시편에 대해서 Insulation과 Jacket 의 활성화에너지 분석을 수행하였으며 그 종합 결과는 아래의 표 4.1.4와 같다.

표 4.1.4 DSC 케이블 종류별 시험결과 종합표

케이블 Code 및 종류		시차열주사(DSC)에 의한 활성화에너지 분석 결과	비 고
EP61	Insulation	163.79kJ/mol (1.70eV)	
	Jacket	89.38kJ/mol (0.93eV)	
IE6	Insulation	175.37kJ/mol (1.82eV)	
	Jacket	113.19kJ/mol (1.18eV)	
L151	Insulation	132.62kJ/mol (1.38eV)	
	Jacket	110.37kJ/mol (1.15eV)	
C935	Insulation	125.13kJ/mol (1.30eV)	
	Jacket	121.11kJ/mol (1.26eV)	
91C	Insulation	166.26kJ/mol(1.73eV)	

## 제2절 열·노화·LOCA 시험

### 1. 목적

내환경검증을 위해 제4장 제1절에서 수행한 활성화 에너지 분석에 의한 케이블의 유사성 검토결과 부적합으로 분석된 케이블 C935에 대해 열적가속시험과 방사선 조사시험 및 LOCA시험 등을 연계 시험하여 40년 수명기간 동안 연속 사용이 가능한지를 평가하여 검증시험보고서를 취득하는데 있다.

### 2. 케이블 사양

표 4.2.1 시험 케이블 사양

Cable ID	C935	Cable Type	Control
Material	Unknown	Conductor No.	13/C
Using Voltage	600 V	Using Frequency	3.0 A
Conditions	HELB	Diameter(mm)	14.0

\* HELB : High Energy Line Break



그림 4.2.1 C935 케이블 시편

### 3. 시험 환경조건

원자력발전소 안전성 케이블이 포설되어 있는 위치는 격납건물, 보조건물, 핵연료건물, MSIV Room, 터빈건물 등 대부분 지역이다. 본 케이블의 시험 환경조건은 포설되어 있는 지역 중에서 가장 열악한 환경지역을 선정하여 DBE사고조건에서 시험함으로써 케이블의 전체 통과지역에 대한 검증시험을 수행한다.

### 4. 성능요건 및 허용기준

#### 가. 시험시편의 성능요건

본 시험의 성능 허용 요건은 시험 프로그램 동안 시험 시편의 성능평가에 필요한 사항을 기술한다. 시험 시편의 성능평가는 성능 허용 요건과 시험 결과를 비교하여 평가하고 성능요건에 불만족한 부적합사항은 발생하지 않아야 한다. 만약 기본 성능시험 허용 요건에 불만족하면 발전소 전기회로 분석을 통한 성능평가결과의 만족여부를 재 평가하게 된다.

#### 나. 절연저항 측정시험

시편의 절연저항 시험은 케이블의 전도체와 전도체간, 전도체와 접지간 모든 측정 가능한 부분에서 측정한다. 측정전압은 500Vdc로 60초간 측정하며 허용 기준은 시편의 종류에 따라 다음 표4.2.2와 같다.

표 4.2.2 절연저항 측정기준

No.	Application	Acceptable IR
1	Instrumentation Cable	10 MΩ
2	Control Cable	1 MΩ
3	Power Cable	0.1 MΩ

영광 1,2호기 EQ 대상 케이블 “C935” 는 제어 케이블로 사용되므로 절연저항이 1 MΩ 이상이면 만족된다.

다. 침수 내전압 시험

침수 내전압 시험은 기본 성능시험, 방사선 노화 후 성능시험, 설계기준사건 환경 모의시험 후에 수행한다. 침수 내전압 시험의 대상은 케이블의 전도체와 전도체간, 전도체와 접지간 모든 측정 가능한 부분에서 측정한다. 가압 전압은 절연체 두께 기준으로 80Vac/mil 또는 240Vdc/mil로 300초간 측정하여 누설전류가 5.0 mA 보다 작고, 어떠한 전기적 특성 변화가 없고, 아크발생이 없어야 한다.

영광 1,2호기 EQ 대상 케이블 “C935”는 절연체 두께가 25.59 mil로 침수 내전압 시험전압은 2,048Vac 이다.

라. 누설 전류 측정 시험

DBE 환경 모의시험 중에 시험 챔버 내 케이블은 시험 전압, 전류가 가압되어 전기 통전 상태이고, 그에 따라 누설전류가 발생한다. 이때 가해진 전압, 전류 및 발생한 누설 전류는 고속 데이터 취득 시스템에 의해서 연속적으로 측정하고 기록하여, 허용 기준치와 비교한다. 단, 시험 케이블의 성능 시험이 수행될 때는 부분적으로 연속 측정이 불가능할 수 있다. 누설전류 허용값은 5 mA 이하로 한다. 이 때 시험 시편에 가할 시험 전압은 해당 케이블의 최대 사용 전압의 110% 이고, 시험 전류는 최대 사용 전류로 다음 표 4.2.3과 같다.

표 4.2.3 누설 전류 측정 기준

Group No.	Cable		사용전압	사용전류	시험전압
	ID	Type			
1	C935	Control	600 V	3 A	660 V (600V + 10% Margin)

마. 물리적 건전성

케이블 시편은 검증시험 프로그램의 각 시험단계에서 안전성 관련 기능 수행에 관련된 영구적이며 물리적 손상이 없어야 한다. 물리적 손상은 케이블 시편의 운전성에 영향을 미치는 전기적 특성 유지에 관련된다.

## 5. 검증시험 절차

검증시험 프로그램은 IEEE 323-2003(1983, 1974)에 따라 다음과 같이 설정하였으며, 각 단계별로 성능시험을 수행한다.

- 활성화 에너지 산정
- 시험시편 준비
- 인수 검사
- 기본 성능시험
- 열적 가속 노화 시험 및 성능시험
- 방사선 조사시험 및 성능시험
- DBE 환경 모의시험 및 성능시험
- 최종 검사

## 6. 시험 설비

### 가. 일반장비

시험 중 데이터 수집을 위한 Data Logger, 전원공급장치, 기기의 전압과 전류를 측정할 수 있는 Digital Multimeter, 절연저항측정기, 온도계, 유량계 등이 있다.

### 나. 열적 가속 노화 및 방사선 조사시험 장비

열적 가속 노화 시험에는 온도와 습도를 일정하게 유지할 수 있는 대형 가열로와 5단 가열로를 사용한다. 방사선 조사 시험은 한국원자력연구원 정읍 방사선과학연구소에서 수행한다.

### 다. DBE 환경 모의시험 설비

DBE 시의 온도와 압력이 모사되는 시험 챔버, 포화증기를 생성하는 전기식 보일러, 포화증기 및 포화수를 저장하는 축열기, 과열증기를 생성하는 과열기, 화학약품 살수를 위한 화학약품조 및 펌프, 압력을 공급하기 위한 에어공급탱크 및 콤프레셔, 설비 상태 변수 모니터링을 위한 애질런트사의 DAQ와 제어용 컴퓨터 등이 있다.

## 7. 내환경검증 시험 내용 및 결과

케이블의 내환경검증 시험은 IEEE 323-2003(1983, 1974) 및 IEEE 383-2003(1974)의 기준에 근거하여 수행하였다. 방사선 가속 노화시험은 정상 방사선량이 낮아 사고 방사선량과 통합하고 여유도 10%를 가산한 방사선 노화시험을 수행하였다.

### 가. 활성화 에너지 산정 결과

케이블 C935 절연체의 활성화 에너지는 125.13kJ/mol(1.30 eV)로 산출된 값을 적용 하였다.

### 나. 시험시편 준비

본 시험에 사용된 케이블 C935의 시험 시편은 영광 1,2호기 EQ 대상 케이블 샘플 시편으로 가동 원전에서 제공된 것이다. 시험 시편은 C935-A 1종을 준비하였다. 시험 시편의 길이는 3.00 m로 케이블 시험시편 DBE 모의시험 압력 챔버 내부에서 최소 길이 3.05 m를 불만족하여 시험결과를 보수적으로 평가하였다. 케이블 시험 시편 인식표는 케이블 자켓 외부에 견고하게 부착하고 고온, 고방사선 및 DBE 조건에서 변형되지 않는 재질로 하였다.

영광 1,2호기 EQ 대상 케이블 "C935"의 케이블 시편 ID C935-A는 40년 검증 예정 수명이다.

### 다. 인수 검사

시험대상 케이블의 인수검사는 케이블의 사양 확인, 물리적 손상, 자켓의 경화 여부 확인이다. 자켓의 물리적 손상 및 경화 여부는 특별한 이상이 없었다.

### 라. 기본 성능시험

시편의 기본 성능시험은 열적 가속 노화 및 방사선 조사가 실시되기 이전에 발생된 시편의 경화상태나 자켓 및 절연체의 물리적 손상 등이 있는지 여부를 점검하는 것이며, 점검결과 특이한 증상은 없었다.

마. 절연저항 측정시험

영광 1,2호기 EQ 대상 케이블 “C935”는 제어 케이블로서 절연저항값의 허용기준이 1 M $\Omega$ 이상이고, C935-A 시편은 허용기준을 만족하였다. 그림 4.2.2는 C935-A의 열적 가속 노화 전 절연저항 시험 사진을 나타내었다.



그림 4.2.2 열적 가속 노화 전 절연저항 측정

바. 침수 내전압 시험

영광 1,2호기 EQ 대상 케이블 “C935”의 침수 내전압 시험 전압은 2,048 Vac이다. 시험 중 어떠한 전기적 특성변화 및 아크발생도 없었으며, 누설전류도 5 mA이하로 측정되어 허용기준을 만족하였다. 그림 4.2.3은 C935-A의 열적 가속 노화 전 침수 내전압 시험 사진을 나타내었다.



그림 4.2.3 열적 가속 노화 전 침수 내전압 측정



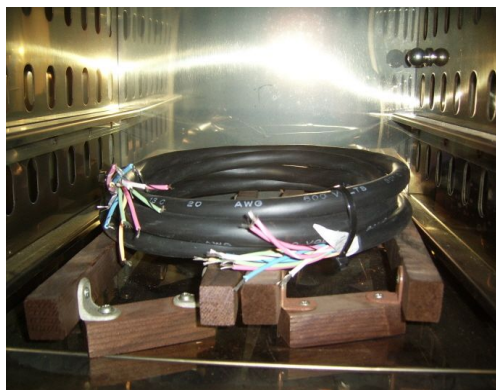
### 사. 열적 가속 노화 시험

열적 가속 노화는 공기순환 전열기 가열 오븐에서 수행하였다. 열적 가속 노화는 케이블 절연체의 활성화 에너지를 기준으로 계산하였으며, 열적 가속 노화 온도 및 시간은 아레니우스 방법론을 사용하여 계산하였다. 케이블 “C935”의 기준 운전온도는 정상 온도조건인 40 ℃를 적용하였다.

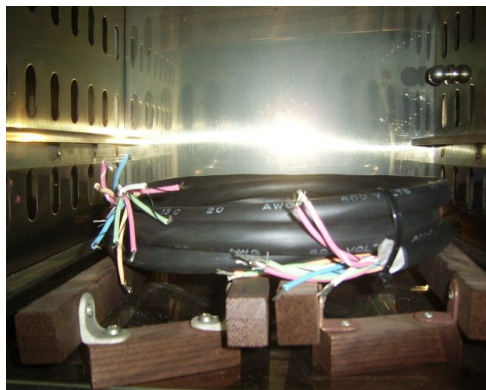
본 내환경검증 시험에 사용되는 케이블 시편은 영광 1,2호기 EQ 대상 케이블 샘플 시편으로 가동 원전에서 제공된 것이다. 시험 대상 케이블은 절연체 및 자켓의 40년 이상 내환경검증 시험을 위한 열적 가속 노화 온도 및 시간을 아래의 표 4.2.4와 같이 계산하였다. 계산은 EPRI NP-1558(A Review of Equipment Aging Theory and Technology)의 아레니우스 방정식을 적용하여 일부 시험시간을 단축 적용하였다.

표 4.2.4 열적 가속 노화 수명

No.	케이블 ID	Material (I/J)	Type	Diameter (mm)	DBE Conditions	Thermal Base Temp. (℃)	Aging Temp. (℃)	Aging Time (hrs)	Aging Life (yrs)
1	C935-A	Unknown	CO	14.0	HELB	40	102	122.2	40



(a) 열적 가속 노화 시험 전



(b) 열적 가속 노화 시험 후

그림 4.2.4 C935-A 열적 가속 노화 시험

아. 열적 가속 노화 시험 후 성능시험

영광 1,2호기 EQ 대상 케이블 "C935"는 절연저항값의 허용기준이 1 MΩ이상이고, C935-A 시편은 허용기준을 만족하였다. 그림 4.2.5는 C935-A 의 열적 가속 노화 후 절연저항 측정시험 사진을 나타내었다.



그림 4.2.5 열적 가속 노화 시험 후 절연저항 측정

1) 방사선 조사시험

방사선 조사는 Cobalt-60 Source를 사용하여 1.0E+06 Rad/h를 초과하지 않는 범위 내에서 아래의 기준에 요건에 적합하게 수행하였다. 또한, 방사선 조사 시 시험 시편은 맨드롤에 고정하여 시험을 수행하였다.

방사선 조사 시 방사선의 선량을, 총집적선량(TID)을 감시하고 기록하였고, 영광 1,2호기 EQ 대상 케이블 "C935"의 결과는 아래와 같다.

표 4.2.5 방사선 조사기준

No.	Cable ID	검증목표 수명(year)	TID (Rad)	TID × 110% (Rad)
1	C935-A	40	1.0E+ 04	1.1E+ 04

## 2) 유연성 시험

방사선 조사를 수행한 후, 시험 시편의 재질이 경년열화 되었는지, 적절한 유연성이 있는지 평가하기 위해서 시험 시편을 직선으로 펴 유연성 시험을 수행하였다. 그림 4.2.6는 C935-A의 방사선 조사 후 시편 유연성 시험을 수행한 결과이고 이상 현상은 발견되지 않았다.



그림 4.2.6 방사선 조사 후 시편 유연성 시험

## 3) 침수 내전압 시험

검증 시편은 케이블 직경의 20배 크기의 맨드롤에 감아 수돗물에 1시간 이상 담가 놓았으며, 1시간 이상 충분히 담겨진 시험 시편에 대해 시험을 수행하였다.

침수 내전압 시험 결과, 케이블의 전도체와 전도체간, 전도체와 접지간 모든 측정 가능한 부분에서 누설전류가 5.0 mA 보다 작게 측정되어 허용기준을 만족하였고, 어떠한 전기적 특성 변화나 아크발생도 발견되지 않았다. 그림 4.2.7은 C935-A의 방사선 조사 후 침수 내전압 시험 사진을 나타내었다.



그림 4.2.7 방사선 조사 후 침수 내전압 시험

### 자. DBE 환경 모의시험

#### 1) 시험 시편 설치

시험시편을 DBE시험 챔버에 설치하여 DBE 환경 모의시험을 실시하였다. C935-A 시험시편은 열적 가속 노화 및 방사선 조사 시험을 수행한 시편이다. 고정된 시험 시편은 DBE 환경 모의시험 전에 사진촬영을 하였고, 그림 4.2.8 은 시험 시편의 시험 전 사진을 나타낸 것이다.

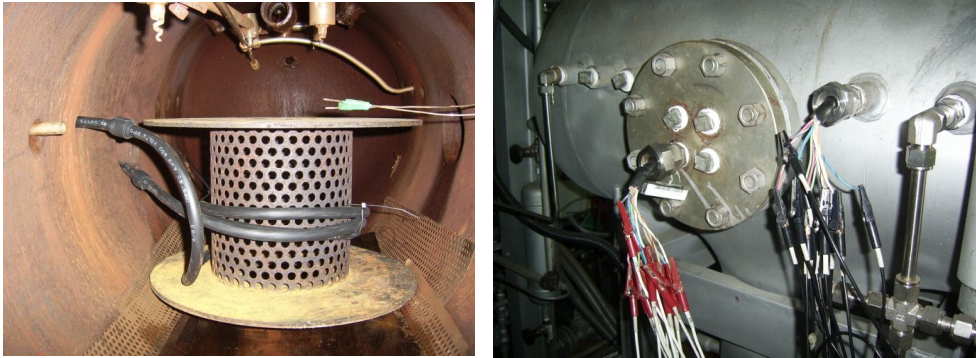


그림 4.2.8 DBE 환경 모의시험 시편 준비

#### 2) 시험 시편의 전기 통전

시험 시편의 가압된 전압 및 전류는 다음과 같다.

표 4.2.6 시험시편 적용전압

No.	Cable		직경	사용전압	사용전류	시험전압
	ID	Type				
1	C935	Control	14.0 mm	600 V	3.0 A	660 V (600 V + 10% Margin)

#### 3) 시험 수행

시험 시작 전에 DBE 시험 챔버는 전압 및 전류를 가압한 상태에서 설계기준 사고 이전에 존재하는 초기 환경조건인 45 ℃로 하여 최소 1시간동안 안정화를 시켰다.

#### 4) 시험 시편 감시

DBE 환경 모의시험 중 가압된 전압에 따른 누설전류는 5 mA 이하로 측정되어 허용 기준을 만족하였다. DBE 환경 모의시험 중 2회 이상에 걸쳐 절연저항(IR)을 측정하기 위해 가압된 전압 및 전류를 일시적으로 단전시키고, 절연저항을 측정하였다. 절연저항 측정결과 C935-A 시편은 1 M $\Omega$ 이상으로 측정되어 허용기준을 만족하였다. 아래 그림 4.2.9는 시편의 시험 중 절연 저항 측정시험 사진이다.



그림 4.2.9 DBE 환경 모의시험 중 절연 저항 시험

#### 차. DBE 환경 모의시험 후 성능시험

##### 1) 절연저항 측정 시험

영광 1,2호기 EQ 대상 케이블 “C935”는 제어 케이블로서 절연저항값의 허용기준이 1 M $\Omega$ 이상이고, C935-A 시편은 허용기준을 만족하였다. 아래 그림 4.2.10은 시험 시편의 모의시험 후 절연 저항 측정시험 사진이다.



그림 4.2.10 DBE 환경 모의시험 후 절연저항 시험

## 2) 침수 내전압 시험

DBE 시험 챔버의 온도가 예열온도 45 °C 이하로 낮아진 후 챔버 내부를 개봉하고 시편을 인출하였다. DBE 시험 챔버로부터 인출된 시험시편은 사진촬영을 하고 케이블 자켓이 손상이 되었는지 육안점검을 수행하였으며 이상현상은 없었다. 누설전류 측정결과, 모든 시편이 5.0 mA 이하로 측정되어 허용기준을 만족하였으며, 특이한 증상은 없었다. 아래 그림 4.2.11은 시험시편의 모의시험 후 침수 내전압 시험 사진이다.



그림 4.2.11 DBE 환경 모의시험 후 침수 내전압 시험

### 카. 시험 종료 후 최종 검사

모든 시험단계를 완료한 후, 시험 시편은 케이블 자켓 외피 손상 부분 및 정도, 전기적 접촉 여부, 전기적 결선 등 성능에 관련된 정밀 육안점검을 실시하였으며, 그 결과 어떠한 부분도 손상되지 않았다. 아래 그림 4.2.12은 C935-A의 DBE 환경 모의 시험 완료 후 챔버 내부 및 인출 후의 사진을 나타내었다.



그림 4.2.12 DBE 환경 모의시험 완료 후 시편

## 제5장 결 론

원자력발전소 케이블은 정상운전 조건에서 40년 이상 사용될 수 있도록 설계 되었다. 그러나 HOT SPOT 지역의 케이블은 사용조건에 따라 케이블 수명이 단축될 우려가 있어 HOT SPOT 지역에 설치된 케이블은 설계수명 이전에 적절한 교체시기 분석이 필요하다.

본 연구에서는 검증시험보고서가 확보되지 않은 영광 1,2호기 케이블 시편 5종(EP61, IE6, L151, 91C, C935)을 채취하여 적외선 분광 분석(FT-IR), 열중량 분석(TGA), 시차주사 열량분석(DSC)등을 수행하여 각 원전의 케이블 데이터베이스와 비교 평가하여 다음과 같은 결과를 얻게 되었다.

- 케이블 3종(EP61, IE6, L151)은 고리3호기 케이블(A5EAEHEC4SA, A5EBMHBC1XC, B5ESDHDC1XD)과 유사성을 비교한 결과 98%이상 일치한 것을 확인하였으며,
- 91C 케이블은 절연체 일치율이 최대 95.59%(영광 1호기 EP61\_insulation), 94.62%(고리 3호기 A5EAEHEC4SA)를 나타내 국내에 확보된 EQ 케이블과 유사하지 않은 것으로 판단되었다.
- 또한, C935 케이블은 절연체 일치율이 최대 88.7%(영광 1호기 A7EABHFC1XB)를 나타내었고, 자켓 일치율이 최대 96.7%(A7EBHHBC1SC)를 나타내어 국내에 확보된 EQ 케이블과 유사하지 않은 것으로 판단되어,
- 교체가 불가피한 C935 및 91C 케이블 중에서 비교적 교체범위가 많은 C935에 대해서 열·방사선노화-LOCA시험을 연계하여 수행한 결과 40년간 DBE(HELB)가 발생하여도 건전성을 유지할 수 있음을 확인함으로써 향후 국,내외 전 원전 사업자들과 본 검증시험보고서의 공유로 케이블 수명관리 체계에 큰 공헌을 할 수 있게 되었다.

## REFERENCES

- [1] USNRC Reg. Guild 1.89 Environmental Qualification of Certain Electric Equipment Important to Safety for Nuclear Power Plants, 1984
- [2] S.Y. Kim, Analysis of Nuclear Power Plant Cable using DMA, Korea Nuclear Society, 2005 October
- [3] IEEE Std 383-1983, Standard for Type Test Class 1E Cable, Field Splices and Connections for Nuclear Power Generation Stations.
- [4] ASTM E 1641-1999, Standard Test Method for Decomposition Kinetics by Thermo gravimetry.
- [5] Takeo Ozawa, A New Method of Analyzing Thermo gravimetric Data, 1965
- [6] ASTM E 2070-2003, Standard Test Method for Kinetic Parameters by Differential Scanning Calorimetry using Isothermal Methods.
- [7] EPRI NP-1558, "A Review of Equipment Aging Theory and Technology", 1980.10
- [8] EPRI TR-106370, "Reduction of Oxidation Induction Time Testing to Practice as a Life Assessment Technique for Cable Insulation", 1996.03
- [9] 원자력법 시행규칙 제 19조의 2 기기검증에 관한 사항
- [10] 10CFR50.49, "Environmental Qualification of Electrical Equipment Important to Safety for Nuclear Power Plants"
- [11] 10CFR50 Appendix B, "Quality Assurance Criteria for Nuclear Power Plants"
- [12] KEPRI "Quality Assurance Program Manual"
- [13] KEPRI-RP-40 "EQ Test Plan for Cable"
- [14] KEPRI-RP-33 "품질경영절차서(EQ Test Procedure of Cable)"
- [15] KEPRI "영광 1,2호기 C935 케이블 내환경검증 시험 계획서"
- [16] NUREG/CR-6384, "Literature Review of Environmental Qualification of Safety-Related Electric Cable"
- [17] IEC 60780-1998, "Nuclear Power Plants - Electrical Equipment of the Safety System - Qualification"



## 감사의 글



學如不及. 배움에는 끝이 없다!

바쁜 업무에도 불구하고 학업을 계속하게 해주신 강재열 본부장님과 본 논문이 나오기까지 세심하게 지도해 주신 김진원 지도 교수님께 먼저 깊은 감사를 드리고 싶습니다.

그리고 논문심사에 지도 편달을 아끼지 않으신 김승평 교수님과 이경진 교수님께 감사드리며, 대학원 생활동안 많은 조언을 주신 정운관 교수님, 나만균 교수님, 그리고 송종순 교수님께도 감사를 드립니다.

또한, 후배들을 위해서 열강을 해주신 강재열 본부장님과 전제근 소장님, 장응수 소장님, 김대겸 소장님 그리고 양창호 실장님과 양연석 실장님께 깊은 존경과 감사를 드립니다.

처음부터 노심초사 수업을 함께한 김정옥 차장과 모든 동기생, 동료 여러분들에게도 더 없는 성원과 애정을 담아 주신데 거듭하여 감사를 드립니다.

마지막으로, 저의 영원한 동반자이며 사랑하는 아내 김선영, 듬직한 아들 민혁, 재혁 그리고 지극정성을 다하신 부모님께도 감사드립니다.

53세, 늦깎이로 시작했지만 금세 졸업하게 된 것 같습니다.  
늘 정진하는 제 모습이 내 가족에게, 모든 사람들에게도 힘이 되었으면 좋겠습니다.

방 극 진 올림

## 저작물 이용 허락서

학 과	원자력공학과	학 번	20097287	과 정	석사
성 명	한글:방극진 한문:房極珍 영문 :Bhang, Keug-jin				
주 소	전남 영광군 흥농읍 상하리 422 한수원 사택102-503호				
연락처	E-MAIL : kjbhang@khnp.co.kr				
논문 제목	한글 : 원자력발전소 Class 1E 케이블 활성화에너지 분석에 관한 연구				
	영문 : A Study on the Analysis of Activation Energy for Class 1E Cable in Nuclear Power Plant				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음
7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의( o )    반대(    )

2010년 11 월 일

저작자: 방극진 (서명 또는 인)

**조선대학교 총장 귀하**