

# 비금속부품 내환경검증 수명평가 Evaluation of the Environmental Qualification for Non-metallic Parts

방극진\* · 홍준희\*\*†

Keug-Jin Bhang\* and Jun-Hee Hong\*\*†

(Received 20 June 2016, Revision received 27 September 2016, Accepted 28 September 2016)

**Abstract:** Environmental Qualification has been almost developed except those of Non-Material Sub-components for valves and pumps though the time has only passed about 10years since EQ test launch of Korea. However EQ test has been performed by a few of engineers under the conditions that experience of EQ test is insufficient and EQ system is not developed completely. In recent years, Strengthen Nuclear Safety Regulation is being done Strictly Nuclear safety components Verification Procedure for Non-Material Sub-components, but the reports contain only performance test results, not Environmental test methods relating to real Aging Degradation. In this Study, there were developed to performance systematically research to acquire EQ technology for five specimens of the Non-Material Sub-components in the Nuclear Power Plant.

**Key Words :** Arrheninus, Non-metallic Material, Environment Qualification, activation energy

## — 기호 설명 —

k : 불쓰만 상수( $8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/}^\circ\text{K}$ )

$\phi$  : 활성화에너지(eV) (1eV = 23.06 Kcal/분자)

## 1. 서 론

원자력발전소의 안전성 관련 기기들은 설계당시부터 발전소 정상운전 및 설계기준 사고환경에서도 고유의 기기성능이 유지되는지를 입증하는 기기검증(Environment Qualification, EQ)제도가 법

제화되어 있다. 이는 2011년 3월 11일 일본 후쿠시마 원전사고가 발생한 이후 정부에서는 국내 원자력안전 강화대책의 일환으로 「원자력안전위원회의 설치 및 운영에 관한 법률」을 제정, 2011년 10월 26일자로 대통령직속 중앙행정기관으로 원자력안전위원회를 출범시키면서 전 원전에 대한 기기검증이 활발히 전개되었다. 이런 가운데 지난 2012. 11월 원전부품 납품업체의 일반규격품 품질 검증서류 위조 사건이 발생하였고, 2013. 5월에는 원전부품 기기검증시험보고서가 위조되는 유사 사건이 재발되면서 최근에 원자력안전위원회는

\*\*† 홍준희(교신저자) : 충남대학교 기계공학과

E-mail : hongjh@cnu.ac.kr Tel : 042-821-5642

\*방극진 : 한수원(주) 중앙연구원 안전검증센터

\*\*† Jun-Hee Hong(corresponding author) : Mechanical Engineering

Department, Chugnam National University.

E-mail : hongjh@cnu.ac.kr, Tel : 042-821-5642

\*Keug-Jin Bhang : Safety Qualification Center, KHNP Central Research Institute.

원자력안전법 개정을 통해 새로운 기기성능검증 인증기관 제도를 도입하여 모든 원자력안전성 부품들에 대한 기기검증체계를 강화하면서 엄격한 검증시험과 분석·해석적인 평가모델이 필요하게 되었다.<sup>1)</sup>

본 연구에서는 국내 및 해외에서 지금까지 시한성 품목으로 간주되어 기기검증 수행 사례가 없는 비금속기기 표준시편 5종을 선정하여 원자력발전소 수명기간 동안 정상운전 및 사고 환경 조건에서도 구조적인 고유의 기기성능을 유지하는지를 기기검증 기준에 따라 형식시험에 의한 실증시험 방법으로 확인하고자 하였다. 먼저, 미국 연방규제기준(10CFR50.49), 미국 전기전자학회 규정(IEEE 323,382) 및 우리나라 원자력안전법 시행규칙 제20조에 따른 기기검증에 관한 기술기준 및 기기검증 방법, 적용사례를 파악하였다.<sup>2,3)</sup> 그리고 비금속기기 표준시편 5종에 대한 내환경검증 단계별 노화시험을 거쳐 시편의 노화 특성 변화 및 상태를 분석하였다. 비금속부품 5종에 대한 내환경검증을 위한 단계별 노화시험 결과 Nitril 재질은 원자력발전소 평균 설계수명 30년에 미달 하였으며, EPDM, Teflon, Viton, EPR 등은 30년 이상의 설계수명을 보유한 것으로 확인되었다.

## 2. 이론적 고찰

비금속부품의 열적노화 현상은 시간과 응력의 크기라는 함수 관계이며, 이 경우에는 통계적인 의미를 갖는 시험 등의 자료가 여러 가지 범주에 걸쳐서 수집이 될 때에만 그 이론적 관계는 유효하게 고려될 수가 있다. 일반적으로 아레니우스 방정식을 채택하는 가속 열노화 이론에는 활성화에너지법이 적용되고 있다.<sup>4)</sup>

$$\text{반응율} = \frac{dR}{dt} = r = Ae^{-\phi/kT} \quad (1)$$

여기서  $\frac{dR}{dt}$  = 화학반응속도에 대한 성질감소

- A : 재료의 상수 T : 절대온도(k)
- $\phi$  : 재료의 활성화 에너지(eV)
- k : 볼츠만 상수(8.617×10<sup>-5</sup> eV/k)

상기 식(1)은 IEEE 101에서 말하는 온도의 함수로서 반응속도를 예측하는데 널리 사용되는 아레니우스 방정식이다. 이 방정식에서 중요한 것은 장기간 열노화 물성시험 및 가속 열노화시험에 적용하는데 있어 비금속 재료의 화학적인 관계의 퇴화(Degradation)를 수학적인 특성으로 나타낼 수 있다. 열수명 계산 방정식을 도출하기 위해서 일정한 온도에서 상기의 식 (1)의 아레니우스 방정식을 시간에 대하여 적분을 하면,

$$R = Ae^{-\phi/kT} t \quad (2)$$

여기에서 (R)L을 재료 열적 수명의 종료를 정의하는 반응 수준으로 가정 한다. 즉 어떤 비금속 재료의 절연 및 탄성체 재질의 연신율(%)을 노화되지 않은 재료에 대해 연신율의 반(50%)으로 감소하는 경우를 수명종료로 한 것이다. (R)L에 해당하는 t 값은 온도 T에서의 열적 수명(L)으로 표시한다.

$$(R)L = (Ae^{-\phi/kT})L \quad (3)$$

(R)L의 값을 알 수 없을지라도, 연신율에서 동일한 기능적 변화를 받게 되는 모든 실험에 있어서 동일함을 인식하기에는 충분하다. 그러므로 그것을 상수로 다룰 수 있다. 상기 식 (3)의 방정식을 고치면,

$$L = \frac{(\Delta R)L}{A} e^{\phi/KT} \quad (4)$$

양변에 자연 Log를 취하면

$$\ln(L) = \ln \frac{(\Delta R)L}{A} + \frac{\phi}{KT} \quad (5)$$

여기서 ln(L)에 대한 1/T 도표는 Fig. 1의 아레니우스 회귀수명 선도 (Regression Plot)에서 보듯이 절대온도에 반비례하는 직선임을 알 수 있다.

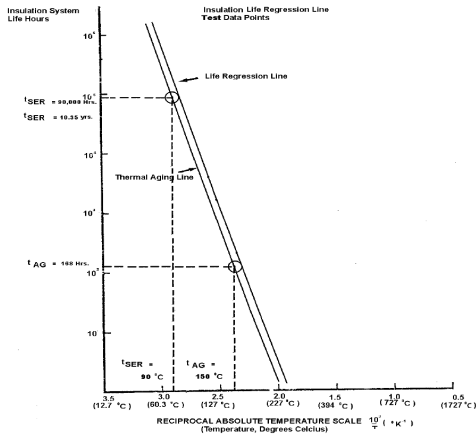


Fig. 1 Life Regression Line

### 3. 실험데이터 및 측정방법

#### 3.1 활성화에너지 산출방법

##### 3.2.1 활성화에너지 산출

본 연구에서는 보수적인 활성화에너지적용을 위해서 Table 1과 같이 EPRI EMA+, System-1000의 데이터베이스의 열증량분석시험자료를 인용하였으며, 내환경검증 단계별 실증시험 후에 실제 적용 시험시편에 대한 열증량분석시험을 통하여 활성화에너지 변화추이를 분석하였다.<sup>5)</sup>

Table 1 System-1000DB Activation Energy(eV)

Material Name	Activation Energy(eV)			
	No.of Records	Min.	Avg.	Max.
EPDM	7	0.45	1.08	1.43
Teflon	6	1.77	2.19	3.47
Viton	5	0.96	1.05	1.09
EPR	21	1.06	1.30	1.38
NBR	2	0.95	1.01	1.06

Arrhenius 노화 모델에서 활성화에너지값은 수명말기 기준에 따라 변화하기도 한다. 따라서 특정한 재질 및 기술특성에 대한 통계적 인자 (statistical factor)에 근거하여 실험적으로 개발되어야 한다. 많은 활성화에너지 데이터베이스가 있지만,

특정한 재질이나 원하는 온도범위에서의 열화 진행구조에 적용할 만한 자료는 찾기가 쉽지 않다. 결과적으로, 분석자들은 가장 적절하다고 생각되는 자료들을 보수적으로 가장 낮은 활성화에너지 값을 선정하고 있으며, 일반적으로 인용되는 활성화에너지의 보수적 값은 0.5 eV 정도로 알려져 있다.<sup>6)</sup>

##### 3.2.2 열적 가속 노화시험

###### 1) 가속 열수명 시험온도의 선정

가속 열수명 시험에서의 가속 온도는 비금속부품의 기본 물성 데이터와 기 수행한 시험 데이터를 참조하여 최소한 4점 이상의 온도에서 수행하며, 재료의 수명 임계온도 이상은 가열하지 않는다. 즉 각 시험온도는 최소한 25°C 이상의 차이를 갖도록 선정하며 시험 시편의 최대허용 온도범위 (통상 열변형 온도 이내)에서 선정한다. 단, 특정 기기나 부품에 대해 해당 기술 기준이나 구매기술규격 등에서 요구하는 경우에는 그에 따른다. 예를 들어, 전선의 경우는 IEEE 383에 의거, 13 6°C를 포함하는 3점 이상의 온도를 각 10°C 이상의 차이를 갖도록 선정하며, 격납용기 전기관통부의 경우에는 IEEE 317에 의거, 4점 이상의 온도를 각 25°C 이상의 차이를 갖도록 선정한다.

###### 2) 열노화 및 수명 시험 측정

장기간 가속열노화 및 수명 시험은 열화시험설비(Thermal Chamber, Thermal Oven 등)를 이용하여 시험 시편에 대해 선정된 시험온도에 충분한 시간 동안 노출시킨다. 노출시간은 최저 온도에서 최소한 5,000시간 이상이어야 하며, 최고온도에서 100시간 이상이어야 한다. 열화 시험설비의 내부 온도와 시험시편의 온도는 온도감지기, 온도기록계 등을 이용하여 주기적으로 측정 및 감시해야 한다. 최소한 3개의 시험시편에 대해 특성변화를 측정하고 이를 기록한다.

##### 3.2.3 방사선조사 노화시험

###### 1) 정상 방사선조사 시험

정상 방사선 조사시험은 Cobalt-60 Source를 사

용하여 1.0E+6 rad/h를 초과하지 않는 범위 내에서 수행한다. 방사선 조사시 시험 시편은 정상 사용 가능한 상태로 준비하고, 누적 정상방사선 조사선량(TID) 값은 4.0E+06rads이다.

2) 사고 방사선조사 시험

방사선 조사시험은 Cobalt-60 Source를 사용하여 1.0E+6 rad/h를 초과하지 않는 범위 내에서 수행한다. 방사선 조사시 시험 시편은 정상 사용 가능한 상태로 준비하고, 누적 사고방사선 조사선량(TID) 값은 7.7E+06rads이다.

3.2.4 진동 및 내진 노화시험

1) 진동노화 시험

유체역학적 부하 및 왕복형/회전형 기계로부터 유발되는 유체가속진동은 EEE Standard 382 에 따라 3방향 직각축 각각에 대해 90분 동안 5~100 Hz 주파수 범위 내에서 0.75 g을 인가하여 시험한다.

2) 지진노화 시험

지진동작은 대략 33 Hz 이상의 복합 주파수 에너지를 갖고 있다. 특별한 형식의 기기(예 : 밸브 구동부)가 다양한 배관계통 위에 설치될 수 있는 경우, 그 자신의 지배적인 주파수와 함께, 일반적으로 임의입력동작(random input motion [RIM])시험이 수행된다. RIM 시험은 일련의 단일 주파수 시험을 포함하며, 전형적으로 1/3 옥타브 간격을 유지한다. 지진 진동테이블은 하나, 둘 또는 3개의 직각 축에 대한 진동동작을 모의하기 위하여 설계된다. 테이블에 여기 되는 서보 기구에 대한 전기 입력신호는 특정한 기기 위치를 위해 개발된 요구 응답 스펙트럼(RRS)을 포괄하는 시험 응답 스펙트럼(TRS)을 발생시키도록 설계된다.

3) 사이클링 노화시험

IEEE Standard 382에 따른 작동기 대표적인 사이클 노화시험은 40년을 검증수명을 기준으로 개폐식 밸브는 대표적인 부하가 적용된 상태에서 2,000번, 조절밸브는 100,000번 이상의 사이클 노화시험을 거쳐야 한다. 단, 조절밸브의 경우 사용

환경에 따라 밸브의 전 행정을 사이클하지 않을 수도 있다.

3.2.5 설계기준사고(DBE) 환경 모의시험

1) DBE 모의시험 환경

LOCA/HELB와 같은 DBE 환경 모의시험은 검증수명 말기에 DBE 환경 즉, 규정된 시험 온도, 압력, 습도, 화학살수(Chemical Spray) 등의 사고환경에서 규정된 성능을 발휘할 수 있는지 입증한다.

2) DBE 모의환경 성능시험

적용 시험온도 및 압력 프로파일에 따라 초기, 중기, 말기로 구분하여 시험시편의 동작 상태를 점검하였으며, 감시 변수는 데이터 취득시스템을 통해 연속적으로 기록한다.

4. 실험결과

4.1 시편의 활성화에너지 분석

열중량분석(TGA : Thermogravimetric Analysis)에 의한 시험방법을 이용하여 시편의 열분해에 따른 질량변화를 통계학적인 Ozawa법으로 활성화에너지 산출에 적용하였다. Table 2는 내환경검증을 위한 비금속재료의 노화 시험 전, 후의 활성화에너지값을 비교한 것이다. 내환경검증시험 전, 후 활성화에너지값 변화추이를 분석한 결과 노화시험이 진행될수록 활성화에너지값은 큰 변화 추세를 보이지 않았다. 그러나 Nitrile과 같은 합성고무는 내구성 및 연신율은 뛰어나지만 항복강도 이후에는 노화가 진행됨에 따라 연신율이 점차 감소하여 균열을 일으킨다는 점에 유의할 필요가 있다.

Table 2 Activation Energy(eV) 시험산출 결과

Material Name	TGA Activation Energy(eV)	
	내환경검증 노화시험전	내환경검증 노화시험후
EPDM Gasket	1.09	1.20
Teflon Gasket	3.75	3.77
Viton O-Ring	2.65	1.95
EPR Cable	1.71	1.73
Nitrile Diaphragm	1.08	1.12

#### 4.2 시편 인수검사

시편에 대한 인수검사는 제품의 규격 및 형태 일치, 물리적 손상여부, 기타 물성 변질 상태 등을 육안으로 검사하였다. Table 3과 같이 모든 시편의 육안 상태는 양호하였으며, Fig. 2는 O-RING 및 Diaphragm 형상을 보여주고 있다.

Table 3 시편 인수검사 결과

인수검사 항목	인수검사 결과
EPDM Gasket	양호
Teflon Gasket	양호
Viton O-Ring	양호
EPR Cable	양호
Nitrile Diaphragm	양호



Fig. 2 O-RING 및 Diaphragm 시편 형상

#### 4.3 기본 성능시험

시편에 대한 기본 성능시험은 육안검사 및 지그를 제작하여 밀봉압력 누설시험을 수행하였다. Fig. 3은 O-RING 및 Diaphragm 압력시험 상태를 보여주고 있다. 다른 시편의 기본 성능시험도 일반적으로 Fig. 4와 유사한 방법으로 입구 및 출구 압력변화 상태를 나타내므로 본 문서의 상세한 내용에서는 생략하였다.

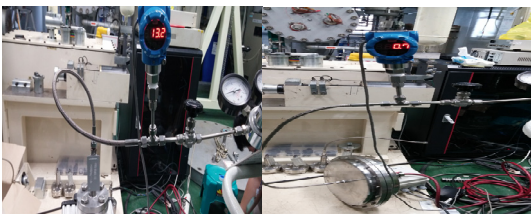


Fig. 3 O-RING 및 Diaphragm 사전 압력시험

#### 4.4 방사선조사 노화시험

정상 및 사고 방사선 조사시험은 한국원자력연구원 첨단방사선연구소에서 Cobalt- 60 Source를 사용하여  $1.0 \times 10^6$  Rad/h를 초과하지 않는 범위 내에서 수행하였다. 사고시의 누적 방사선조사선량은 사고환경 1년을 기준으로 시험 여유도 10%를 포함하여 충분한 마진을 확보하였다. Fig. 4는 O-RING 및 Diaphragm 방사선 조사시험 선원 및 장치치를 보여주고 있다.

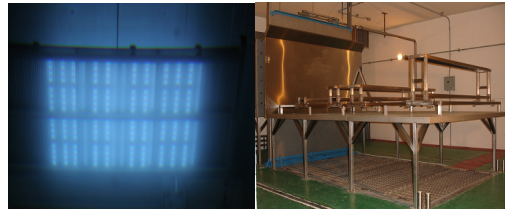


Fig. 4 Co-60SOURCE 및 Table of Irradiation

#### 4.5 열적 가속 노화시험

열적 가속 노화시험은 공기 순환식 대형 전기 가열로에서 온도 및 시간 조건에서 가열하였다. 온도 및 시간은 검증수명에 해당하는 열적 노화 감쇠를 시뮬레이션하기 위해 적용되는 아레니우스 기법으로 산출하여 가속하였다. 열적 가속노화 시험은 정상 사용수명 기간 동안 사용 가능하도록 가속열화 시간을 계산하였으며, 실시간 노화 상태를 감시하였다. Fig. 5는 O-RING 및 Diaphragm의 열적 가속 노화시험 상태를 보여주고 있다.



Fig. 5 O-RING 및 Diaphragm 열적노화시험

#### 4.6 DBE환경 모의 노화시험

원전 LOCA/HELB와 같은 설계기준사고(DBE) 환경 모의시험의 목적은 시험 대상 시편이 검증수명 말기에 DBE 환경 즉, 규정된 시험 온도,

압력, 습도, 화학살수(Chemical Spray) 등의 환경에서 규정된 성능을 발휘할 수 있는지 입증하는 것이다. DBE 모의 환경시험에서는 시편의 동적인 재질 특성을 확인하기 위해서 온도 구간별 기능 시험을 수행하였다. Fig. 6은 O-RING 및 Diaphragm의 설계기준사고(DBE)환경 모의시험 상태를 보여주고 있다.



Fig. 6 O-RING 및 Diaphragm의 DBE시험

#### 4.8 단계별 노화시험 후 성능시험

내환경검증을 위한 아래의 방사선 조사시험, 열적 가속노화시험, DBE환경 모의시험 등 단계별 노화시험이 진행되기 전, 후에 상기 4.3항에 따른 기본 성능시험 결과 값이 계속 유지되는지 확인하였다. 성능시험은 지그에 설치된 시편이 고유기능을 유지하는지 허용된 압력 유지시험을 통해 건전성을 입증하였다. Fig. 7은 O-RING 및 Diaphragm의 설계기준사고(DBE) 모의 환경시험 후의 압력 시험 상태를 보여주고 있다.



Fig. 7 O-RING 및 Diaphragm 노화 후 압력시험

#### 4.9 성능시험 후 최종검사

시편 5종에 대한 모든 내환경검증 시험단계를 완료한 후 최종검사를 위하여 시험시편 지그를 분해점검을 수행하였다. 비금속부품을 정밀 육안 점검하였다. Fig. 8은 Nitrile O-ring 및 Diaphragm의 최종 DBE 환경 모의시험 완료 후 최종검사를

위해 시험 지그를 해체한 후의 시편 상태를 보여주고 있다. 그림과 같이 Diaphragm은 단계별 노화 시험을 거치면서 고무판이 경화되어 Diaphragm 지지판과 접촉면에 균열이 발견되었다.

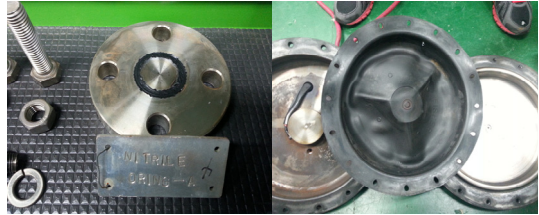


Fig. 8 O-RING 및 Diaphragm 최종검사

#### 4.10 결과의 분석

비금속재료 시편 5종에 대한 내환경검증을 시험기준인 미국 전기전자학회 규정(IEEE 323)에 따라 위의 Fig. 2부터 Fig. 8에서 보여준 내용과 같이 내환경검증 Full Scope시험을 수행한 결과 적용시편 5종 모두 시험단계별 노화 및 성능시험 기준을 만족하였으나, 성능시험 종료 후 최종검사 단계에서 Fig. 9의 최종검사에서의와 같이 Nitrile Diaphragm 표면에 Crack이 발견되었다. 이의 원인은 열적가속 및 DBE환경 노화시험 단계에서 Nitrile Diaphragm의 작동성시험에 가해지는 누적된 피로 노화현상으로 확인되어 Crack 자국의 형상 및 크기가 주어진 검증 수명기간에 부적합한 것으로 판정하였다. 본 연구를 통해서 비금속시편의 노화에 따른 활성화에너지값 변화 추이분석은 최초의 내환경검증 적용시험을 위해서 일반 산업계에서 적용하고 있는 Table 1의 System-1000DB 자료를 기준으로 시편의 활성화에너지값을 적용하였으며, 내환경검증에 따른 노화시험 후에 Table 2의 열중량분석법(TGA)에 의한 활성화에너지 실증시험값을 비교·분석하였다. 아래 Fig. 10부터 Fig. 14까지 보여준 내환경검증 시험 후 활성화에너지값 변화 추세를 분석한 결과, 내환경검증 시험단계별 노화진행에 따른 시편의 활성화에너지값 변동은 크게 변화되지 않는 것으로 나타났다. 즉 정상 및 사고 방사선 노화, 열적가속노화, DBE환경 노화 및 노화 후의 최종 성능시험 등 단계별 시험결과 모두 내환경검증 환경조건에서

주어진 수명시험에 만족한 것으로 나타났다.



Fig. Photo 9 Nitrile Diaphragm 최종검사(Crack)

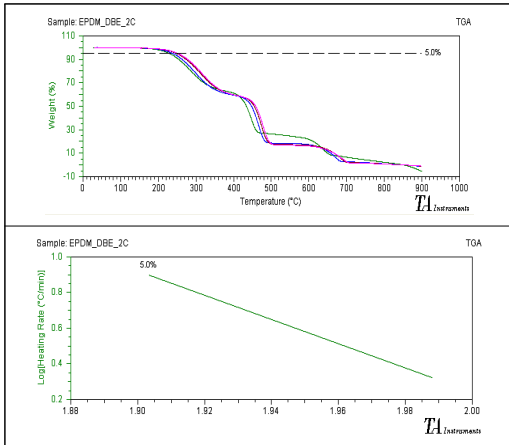


Fig. 10 EPDM 노화후 활성화에너지 분포

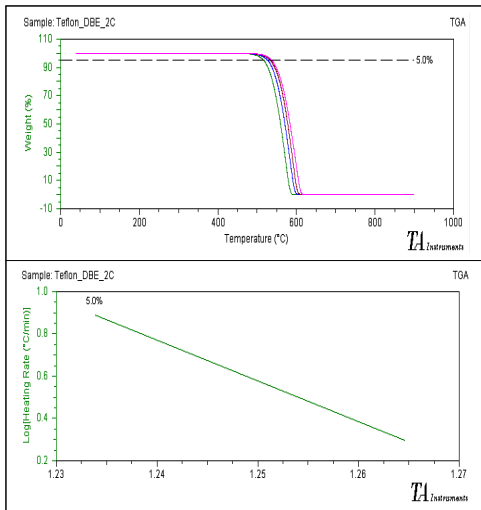


Fig. 11 Teflon 노화후 활성화에너지 분포

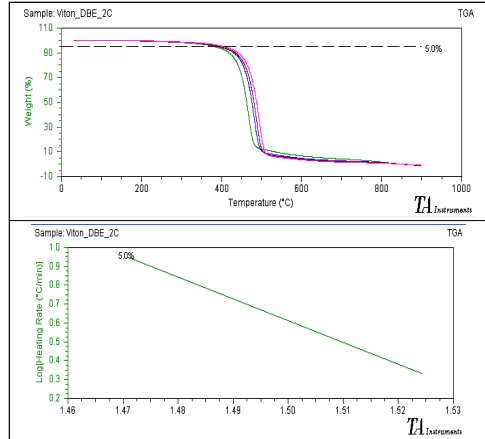


Fig. 12 Viton 노화후 활성화에너지 분포

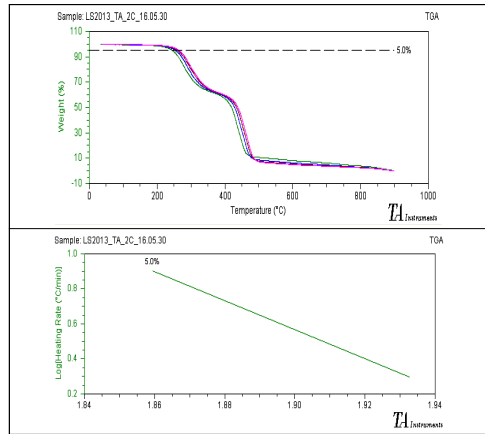


Fig. 13 EPR 노화후 활성화에너지 분포

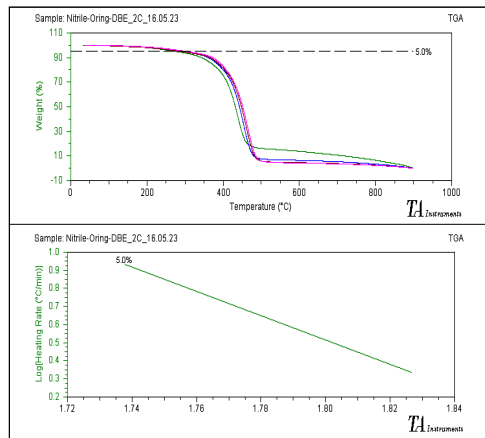


Fig. 14 Nitrile 노화후 활성화에너지 분포

## 5. 결 론

비금속부품 표준시편 5종에 대해서 노화시험 수행 전, 후의 활성화에너지값을 분석한 결과, Nitrile Diaphragm 재질은 원자력발전소 30년 기준 설계수명에 미달하였으나, VITON, EPDM, Teflon, EPR 등은 30년 이상의 충분한 설계수명을 유지한 것으로 확인되었다. 본 연구에서 적용된 내환경 검증 단계별 가속노화시험은 IEEE Std 323(전기1급 기기검증)기준에 따라 정상적으로 시행하였다. 플라스틱과 천연고무재료와 같은 복합화합물은 열화가 진행되는 동안 재료의 노화에 따른 과단현상이 항복점에 도달하면 점차 균열현상이 일어날 수 있다는 것을 Nitrile Diaphragm 실증시험과 제작사 재질 변경정보를 통해 확인할 수 있었다. 이는 주기에 조합된 비금속부품 선정은 능동 및 피동 기구 특성에 맞는 중합된 고분자물질을 선정하여 설계 수명기간 동안 반복적 사이클 노화 스트레스를 충분히 극복해야 한다는 것을 본 내환경검증 수명평가 시험을 통해 인식하게 하였다.

## References

1. "Nuclear Safety and Security Commission Annual Report", May 2013
2. IEEE Standard 323 and KEPIC END 1100 "Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations Rev 1", September 2003.
3. IEEE Standard 382 and KEPIC END 3700 "Qualification of Safety-Related Actuators for Nuclear Power Generating Stations Rev 1", November 2010.
4. EPRI. "Plant Support Engineering : Nuclear Power Plant Equipment Qualification Reference Manual Rev.1", September 2010.
5. KIMM. Technology Development of Environmental Qualification Test of Cable, "Motor and valve for Nuclear Power Plant Rev. 0", May 2007.
6. KEPIC. "Evaluation of the Thermal Aged Database for Nuclear Safty Non-Material Components Rev. 0", November 2015.