

2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

원자력 고분자 재료의 열 노화 성능 평가

Thermal Aging Degradation Assessment of Domestic Nuclear Polymer Materials

권석환, 정영석, 김용수
한양대학교
서울 성동구 행당동 17

배영수, 고성실
새한검증 (주)
경기 안양시 동안구 호계2동 898-26

임남진, 주포국
한국원자력연구소
대전 유성구 덕진동 150

요 약

원자력발전소에서 가장 우선 시 되어야 하는 것은 안전이므로 원전의 각 계통을 구성하고 있는 기기 건전성의 확보와 유지는 매우 중요하다. 특히, 장기 운전에 따른 노화가 심각해질수록 이러한 구성 기기의 건전성 확보 및 유지는 안전에 있어 결정적인 역할을 하게 되므로 구성 기기나 부품 건전성과 성능 유지 여부를 판단하는 기기 검증 기술은 원전의 안전성 및 신뢰성 확보에 필수적인 기술이며, 기기 국산화를 위해서도 필수적인 요소 기술이다. 이러한 기기 검증 기술의 자립을 위해서는 필요 시설의 구축과 함께 검증 기술의 뿌리라 할 수 있는 국산 기기 부품의 노화 성능 자료의 확보가 시급한 형편이다. 이 연구에서는 노화에 가장 민감한 것으로 알려진 국산 원자력 폴리머 재료 중 플라스틱은 PBT(Poly Butylene Telephtalate)를, 고무류는 EPR(Ethylene Propylene Rubber)와 SIR(Silicon Rubber)의 2 종류를 선정하여 열적 노화 시험 평가를 수행하고 그 노화 메카니즘에 대한 기초 연구를 수행하였다. 노화 시험은 가속 노화와 연신율 저하의 측정으로 나뉘어 진행되었다. 가속 노화의 경우 노화 온도는 재료의 기본 물성치와 해외 연구 경험을 참조하여 세 재료 모두 140°C, 155°C와 170°C로 설정하였고 노화 측정은 연신율이 50% 정도로 떨어질 때까지 수행되었다. 노화 평가는 해외의 연구 경향을 따라 인장

시험을 이용하여 60% 연신율 저하율을 측정함으로써 평가하였다. 현재까지 드러난 잠정 연구 결과, 국산 EPR의 경우 연신율이 60%까지 감소하는데 걸리는 시간이 140°C에서 1860.47h, 155°C에서 390.63h, 그리고 170°C에서 172.12h이었으며 연신율 60% 저하의 활성화에너지는 1.25eV로 나타났으며 국산 PBT의 경우 그 활성화에너지가 1.20eV, 국산 SIR은 0.94eV로 나타났다. 이들 결과를 해외 연구 결과와 비교할 때 국산 PBT의 경우를 제외하고 모두 외국 제품과 유사한 것으로 판명되었으며 PBT의 경우 상당한 차이가 있는 것으로 드러났는데 추가적인 실험과 연구를 통해 그 원인을 파악할 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract

It is well-known that polymer materials such as plastics and elastomers are easily degraded under nuclear environments, which always raises great concern on nuclear safety. Nevertheless, aging degradation data on domestic polymer materials are seldom available.

In order to assess the thermal aging domestic nuclear polymers, PBT(Poly Butylene Terephthalate), EPR(Ethylene Propylene Rubber), SIR(Silicon Rubber) degradation, therefore, are chosen for the experimental tests.

In this study, the reduction of elongation of the materials are tested and measured for the degradation evaluation.

Results show that in case of EPR it takes 1860.47hr, 390.63hr, and 172.12hr at 140°C, 155°C, and 170°C, respectively, for 60% elongation reduction, which produces the activation energy of 1.25eV that is very close to that in the international report.

Similarly, the activation of 60% elongation reduction of PBT turns out to be 1.20eV while that of SIR is revealed to be 0.94eV.

1. 서론

원자력 발전소는 수백만 개의 부품이 유기적으로 결합된 시스템으로, 인간의 손에 의해 지금까지 개발된 금세기의 가장 복잡하고 거대한 시스템으로 일컬어지고 있다. 이러한 거대 시스템인 원자력발전소에서 가장 우선 시 되어야 하는 것은 두 말할 것도 없이 안전이다. 그러므로 발전 계통의 설계에서뿐만 아니라 건설과 운전에서라도 계통을 구성하고 있는 기기 건전성의 확보와 유지는 매우 중요하다. 특히, 장기 운전에서 노화가 심각해질수록 이러한 구성 기기의 건전성 확보 및 유지는 안전에 있어 결정적인 역할을 하게 된다. 그러므로, 원자력발전소의 안전성 관련 기기는 정상, 과도상태 운전뿐만 아니라 원자로 냉각재상실사고 (LOCA: Loss of Coolant Accident), 고 에너지 배관 파단 사고

(HELB: High Energy Line Break), 주증기 배관 파단 사고(MSLB: Main Steam Line Break)와 같은 고온, 고압, 화학적 다습 환경, 방사선 조사환경 등의 열악한 환경 하에서도 정상적으로 목표 성능이 유지되어야 하며, 이러한 목표 성능의 유지 여부를 판단하는 기기 검증 기술은 원전의 안전성 및 신뢰성 확보에 필수적인 기술이며, 원전 기기 국산화를 위해 필수적인 요소 및 기반기술이다.

이러한 원전의 안전성과 신뢰성 확보를 위해 국내 원자력법은 성능검증을 필한 부품의 사용과 이에 대한 품질보증에 관한 기준 등을 규정하고 있으나, 1978년 고리 원자력발전소 1호기가 상업 운전을 시작한 이후 현재 16기의 원자력발전소가 가동 중에 있으며 앞으로도 추가적으로 건설·가동될 계획에도 불구하고, 우리는 검증시설의 미비와 경험부족, 연구인력 부족 등으로 검증기술이 낙후되어 국내에서 제작한 기기조차도 선진국의 검증기관에 의뢰하여 막대한 검증비용을 지불하고 검증을 수행하고 있는 실정이다.

따라서 국가적으로 추진하고 있는 원전기술의 고도화를 이룩하고 더 나아가 원전 수출의 국제 경쟁력을 확보하기 위해서는 원자력 발전소에 들어가는 수많은 부품의 국산화가 이루어져야 하고, 이러한 국산화 달성을 위해서는 하루 빨리 국내 생산제품의 성능검증을 독자적으로 수행할 수 있는 체제를 갖추어야 한다. 이러한 취지에 발맞추어 현재 국내에서는 LOCA 실험 설비를 포함한 여러 기기 검증 시설이 구축되고 있으며 기기 검증 기술의 근간이 될 수 있는 기기 검증 재료 DB가 설계되고 있다.

이 연구에서는 기기 검증 기술의 뿌리라 할 수 있는 국산 원자력 부품 재료의 노화 시험 평가 자료 생산을 위해 노화에 가장 민감한 국산 폴리머 재료들에 대한 열적 노화 시험 평가를 수행하고 그 노화 메카니즘에 대한 기초 연구를 수행하였다. 이번 발표에서는 현재 실험이 진행되고 있는 대상 국산 폴리머 재료 10종 중 플라스틱은 PBT (Poly Butylene Terephthalate) 실험 결과를, 고무류는 EPR (Ethylene Propylene Rubber)와 SIR (Silicon Rubber)의 2 종류 재료에 대한 실험 결과를 소개한다.

2. 원자력 폴리머 재료 열적 노화 평가 방법론

열적 열화 검증을 포함한 내 환경 검증은 원자력발전소 설계기준사고 시에 1차 냉각 계통 압력경계의 건전성 유지, 원자로 안전정지 및 정지상태 유지, 방사선물질의 외부누출 방지 및 사고완화에 필요한 안전성관련 품목과 이러한 안전성관련품목 이외의 것으로서, 고장 발생 시 안전성 관련 기기의 기능을 저하시킬 수 있는 품목을 그 적용대상으로 한다. 특히 열적 열화 (thermal aging) 검증의 목적은 원자력 발전소의 안전성관련 계통 기기 및 부품의 정상운전, 비정상 및 사고조건 하에서 열적 환경(온·습도)에 대한 안전성 기능 수행 혹은 재료적 건전성 유지 능력을 실험적 또는 해석적 방법을 통하여 입증하기 위한 것이다.

일반적으로 금속재료의 경우에는 원자력발전소 설계 수명 기간동안 발생한 열적 환경에 대한 노화영향을 무시할 수 있으나, 비금속재료나 전자재료는 열적 환경에 대한 노화현상

이 무시될 수 없는 것으로 알려져 있다. 따라서, 열적 열화 검증은 주로 기기나 부품을 구성하는 비금속재료 및 전자재료에 대해 노화해석 또는 시험을 수행하게 된다.

대부분의 비금속재료의 경우 Arrhenius Model에 따른 열 노화 프로세스가 진행되는 것으로 알려져 있는데 이 모델에 의한 열 노화 프로세스는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$r = A \cdot \exp [-(\Phi/kT)] \quad (1)$$

여기서 r 은 화학 반응율(Reaction Rate), A 는 상수(Frequency Factor), Φ 는 재료의 활성화에너지(Activation Energy, eV), k 는 볼츠만 상수(Boltzmann's Constant, 8.617×10^{-5} eV/K), T 는 절대온도이다.

이 경우 재료의 열 수명(L)은 화학 반응율에 반비례하므로, 화학 반응율을 열 수명으로 치환하여 자연대수함수로 표시하면

$$\ln L = [-(\Phi/kT)] + \ln A \quad (2)$$

이므로 이 식은 다음과 같은 1차 방정식으로 표시할 수 있다.

$$Y = aX + b \quad (3)$$

이때, $Y = \ln L$, $X = 1/T$ 이며 a 는 Φ/k 로 이 직선의 기울기이고 b 역시 상수로서 직선의 Y축 교차점을 나타낸다.

식(3)은 열 수명의 자연대수 값이 절대온도에 반비례하는 직선을 나타낼 수 있다는 것을 보여 주고 있는데 이때 상수 a 와 b 는 열 수명 시험 (thermal life test)을 통해 실험적으로 얻어진다.

열 노화 평가 시 온도는 발전소의 정상적인 운전조건 하에서의 최대운전온도(Maximum Service Temperature)를 기준으로 하고, 시간은 발전소의 설계수명(통상40년)에 설계기준 사고기간(통상 1년)을 포함한 기간을 기준으로 한다. 해당 기기나 부품의 정상운전 시에 기기 내부나 부품자체에서 발생하는 열로 인해 주위온도가 상승할 경우에는, 상기 기준온도에 해당 온도 상승치를 추가하여 적용한다.

열 노화 영향평가의 기준은 온화한 환경(Mild Environment)에 위치하는 기기 및 부품의 경우 Arrhenius Model에 의거하여 계산된 열 수명이 발전소의 설계수명(설계기준사고기간 포함)의 3배 이상인 경우 열 노화 영향이 없는 것으로 판정하고 가혹한 환경(Harsh Environment)에 위치하는 기기 및 부품은 10,000년 이상의 열 수명을 갖는 경우에 열 노화 영향이 없는 것으로 판정한다.

3. 열적 노화 실험 방법 및 절차

가. 가속 노화

이 연구에서는 앞에서 언급한 세 종류의 국산 폴리머 재료들을 가속 노화시킨 후 재료의 연신율 저하 측정을 통해 열적 노화 정도와 그 수명을 평가하였다. 따라서 대상 고무와 플라스틱 각각의 연신율 측정을 위해 인장시험 장치와 고온로 시스템을 포함한 부속 장치들이 설계 제작되었다. 가속 노화는 가열로 내부 온도차가 $\pm 1^\circ\text{C}$ 이하인 여러 종류의

정밀 가열로에서 별도로 수행되었으며 가속 노화 온도는 폴리머 재료들의 기본 물성치와 외국 시험의 예를 참조하여 세 재료 모두 140 °C, 155 °C 그리고 170 °C로 선정하였다.

나. 시험장치와 시편의 준비

인장 시험은 만능재료시험기(INSTRON, Model 5582)를 사용하여 진행되었다. 이 재료 시험기로 열화 된 고분자 재료의 연신율, 인장강도 등을 측정하여 재료의 기계적 건전성과 노화 정도를 평가하고 활성화 에너지를 도출하게 된다. 그림1은 만능재료시험기와 인장시험으로 재료의 연신율과 인장강도를 측정 시험 모습이다. 인장 시험은 시험 절차에 따라 기본적으로 상온에서 진행되었으며 시험 재료의 인장 속도는 고무(EPR/SIR)일 경우에는 500mm/min으로 실험하였고 플라스틱(PBT)일 경우에는 50mm/min으로 수행되었다. 시험이 진행되어 파단이 일어나기까지 인장 응력과 변형을 데이터는 INSTRON사의 Merlin Software를 이용하여 PC로 취득하였다. 본 실험에 사용된 시편의 규격은 EPR과 PBT의 경우에는 ASTM을, SIR의 경우에는 KS을 따랐으며 각 시편의 형상과 치수는 그림2, 3, 4에 나타내었다.

다. 시험절차

연신율 저하를 측정하기 위한 인장 시험은 가속 노화된 폴리머 재료 시편 3개를 선택하여 상온에서 ASTM와 KS 규격에 의해 규정된 시편 형상과 시험방법에 따라 측정하였다. 그리고 선정된 고분자 재료의 장기노화 온도조건은 재료의 연신율 60 % 변화시점을 기준수명으로 설정하였다.

구체적인 시험은 EPR은 ASTM D412, PBT의 경우에는 ASTM D638을 따랐으며 SIR은 KS M6518을 따라 수행되었다. 이들 시험 절차는 KS의 경우 일본의 JIS를 상당부분을 인용하였으나 JIS의 경우도 미국의 ASTM를 상당부분 인용하여 시험절차 및 규격서의 형식도 유사하다. 그러나 시험의 일반조건, 시편의 형상과 치수, 시험 인장속도, 시험편의 수 등은 비슷하면서도 약간의 차이점을 보여주고 있다. 이들 규격을 간단히 정리하면 아래와 같다.]

KS M6518

- 시험의 일반조건 : 시험실의 별도의 규정이 없는 한 20~30°C로 한다. 그리고 시편은 시험 전에 1시간 이상 표준 상태의 실온(23°C)중에 놓아두는 것을 원칙으로 한다.
- 시편의 형상과 치수 : 그림4 참조
- 시험 인장속도 : 500±25mm/min
- 시험편의 수 : 4개로 한다. 다만 4개를 채취할 수 없을 때는 3개 또는 2개로 한다. 이때에는 시험편의 수를 기록하여야 한다.

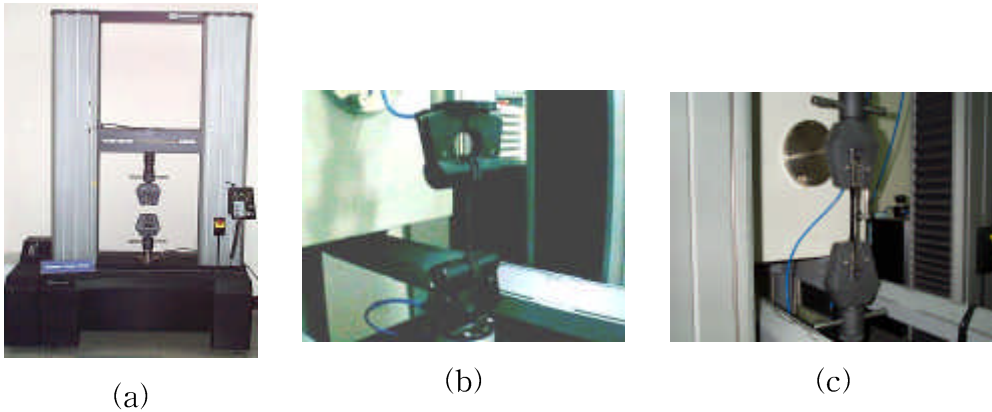
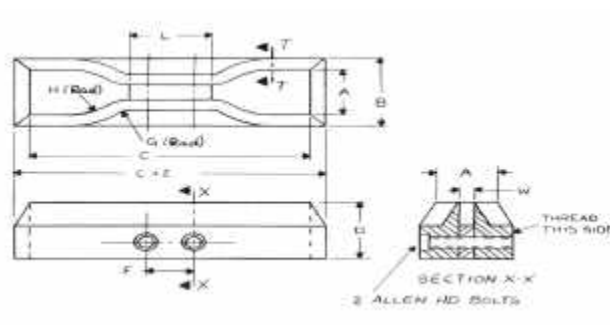
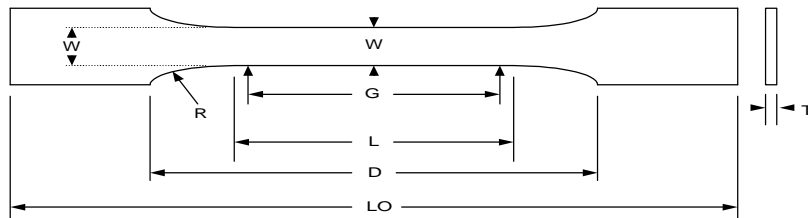


그림1. (a) 만능재료시험기 (INSTRON Model-5582),
(b) 고무의 시험 모습, (c) 플라스틱의 시험모습



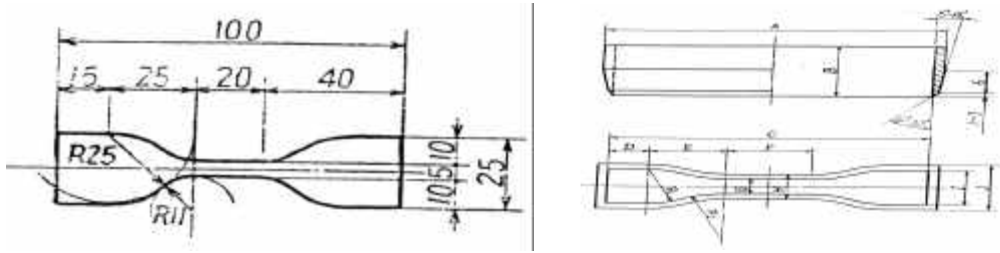
Dimension	A	B	C	D	D-E	F	G	H	L	W	Z
Size	25	40	115	32	13	19	14	25	33	6	13

그림2. EPR의 시편형상과 치수(ASTM D412/ Type: Die C, 단위: mm)



Dimension	W	L	WO	LO	G	D	R	T
Size	10±0.5	60±0.5	20±0.5	150	50±0.25	115±5	60±1	4±0.02

그림3. PBT의 시편형상과 치수(ASTM D638 / Type : M-1, 단위: mm)



Dimension	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	R1	R2
Size	107	34	100	15	25	20~22	5.0±0.1	12	25.0±0.5	32	35	11

그림4. SIR의 시편형상과 치수(KS M6518 / Type : 3호형, 단위: mm)

ASTM D412

- 시험의 일반조건 : 시험실의 온도는 $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ ($73.4\pm 3.6^{\circ}\text{F}$) / 상대습도는 $50\pm 5\%$
- 시편의 형상과 치수 : 그림2 참조
- 시험 인장속도 : $500\pm 50\text{mm}/\text{min}$ 혹은 $20\pm 2\text{in}/\text{min}$
- 시험편의 수 : 등방성 재료의 경우 최소 5개 이상의 시편으로 실험을 수행

ASTM D638

- 시험의 일반조건 : 시험실의 온도는 $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ ($73.4\pm 3.6^{\circ}\text{F}$) / 상대습도는 $50\pm 5\%$
- 시편의 형상과 치수 : 그림3 참조
- 시험 인장속도 : $5\text{mm}/\text{min}\pm 25\%$ ($0.2\text{in}/\text{min}\pm 25\%$) 혹은 $50\text{mm}/\text{min}\pm 10\%$ ($2\text{in}/\text{min}\pm 25\%$) 혹은 $100\text{mm}/\text{min}\pm 10\%$ ($20\text{in}/\text{min}\pm 25\%$) (M- I의 경우)
- 시험편의 수 : 등방성 재료의 경우 최소 5개 이상의 시편으로 실험을 수행

4. 실험결과 및 논의

이 실험에 사용된 시편은 시험 절차서에 맞추어 EPR의 경우 국내의 J사, SIR의 경우 국내의 H사, PBT의 경우 국내의 K사가 제작하여 공급하였기 때문에 별도의 금형 제작 작업 없이 바로 실험에 사용되었다.

가. 국산 EPR (Etylene Propylene Rubber) 고무

EPR 고무의 기본적인 기계적 특성을 조사하기 위해 수행한 인장시험 결과를 그림5에 도시하였다. 그림5(a)의 인장시험 결과는 항복 강도 이후에도 변형에 따라 응력이 비례적으로 증가하는 일반적인 고무의 응력-변형 곡선을 따르고 있으며 그 기계적 물성값도 고무 재료의 특성을 감안할 때 일반적으로 알려진 값과 유사하였다.

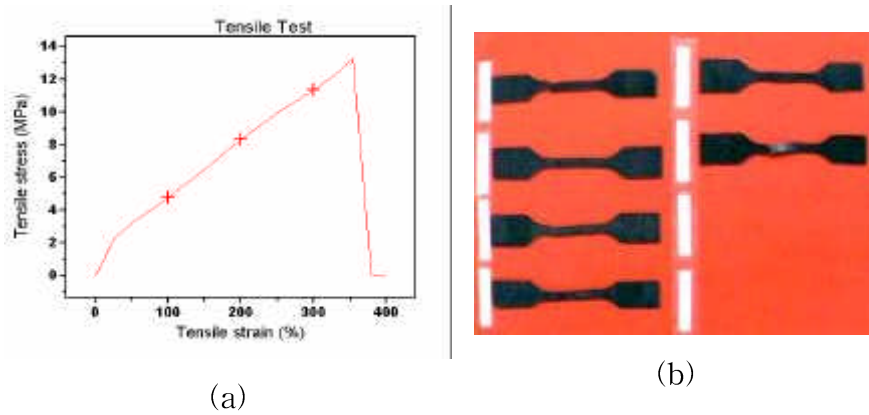


그림5. (a) 상온상태에서 EPR 재료의 응력-변형 곡선, (b) 실험 후 EPR재료의 파단된 모습

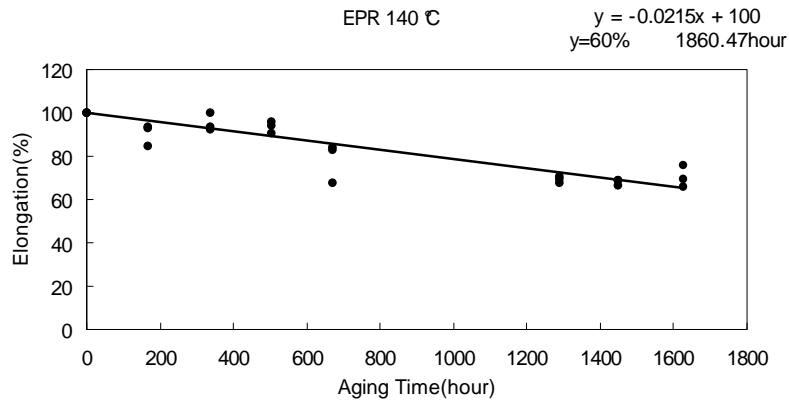


그림6(a). 140°C에서 EPR 재료의 연신율 변화

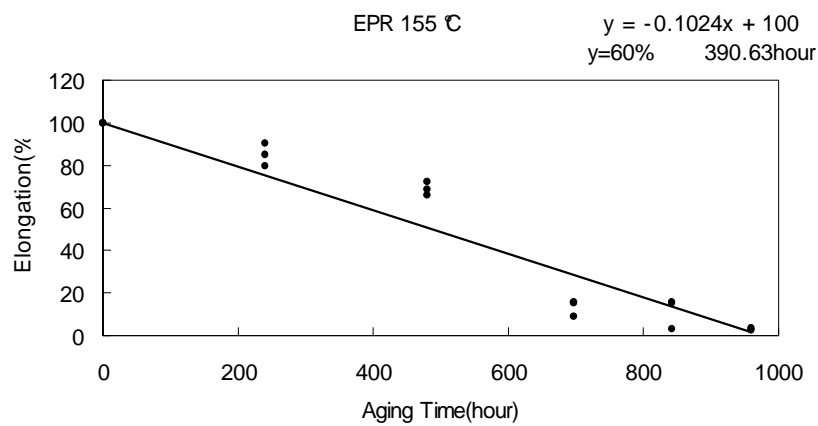


그림6(b). 155°C에서 EPR 재료의 연신율 변화

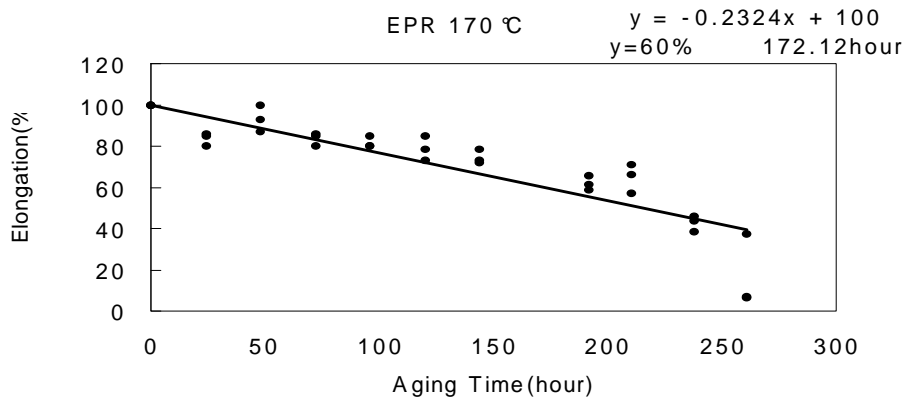


그림6(c). 170°C에서 EPR 재료의 연신율 변화

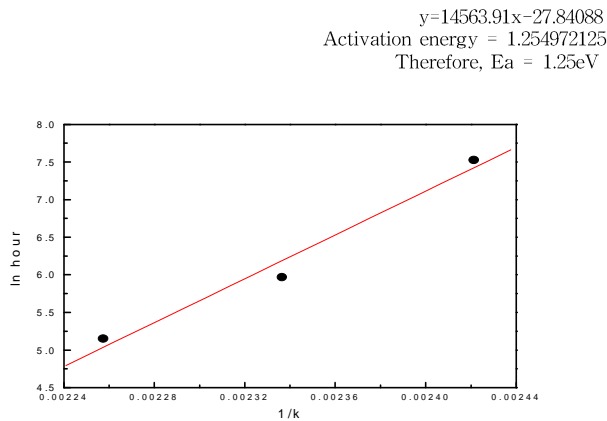


그림7. EPR 재료의 연신율 60% 저하 활성화에너지

이 인장시험 결과를 바탕으로 140°C, 155°C와 170°C에서 가속 노화된 세 개의 시편에 대한 연신율을 측정하였는데 이 연구에서는 열화 되지 않은 시편의 연신율을 100으로 하였을 때 각 가속노화 온도에서 열화시간(Aging Time)에 따른 열화 고분자 재료의 상대적 연신율 감소를 측정하였다. 그 결과는 그림6(a), 6(b)와 6(c)에 도시하였다.

이 가속노화 실험 결과, 연신율이 60%까지 감소하는데 140°C에서 1860.47h, 155°C에서 390.63h, 그리고 170°C에서 172.12h의 시간이 걸리는 것으로 평가되었으며 이 데이터를 바탕으로 Arrhenius 도식(그림7)를 통해 평가한 결과 연신율 60%저하에 대한 활성화에너지(activation energy)는 1.25eV임이 밝혀졌다.

이 활성화 에너지는 해외 결과와 비교하였을 때, 외국의 EPR 재료와 유사하였다. 참고적으로 Wyle Lab.의 실험결과 60% 연신율저하의 활성화 에너지는 1.23eV이다.

나. 국산 SIR (Silicone Rubber) 고무

또 다른 국산 고무류 재료로 SIR 고무의 열적 노화를 평가하였다. 이 SIR 고무의 노화 특성 역시 연신율 저하를 통해 평가되었는데 EPR과 달리 KS 규격을 따라 실험을 수행하였다. 그림 8은 기본적인 기계적 특성을 조사하기 위해 수행한 인장시험의 전형적인 결과이다. 그림 8(a)의 인장시험 결과는 국산 SIR 역시 항복 강도 이후에도 변형에 따라 응력이 비례적으로 증가하는 일반적인 고무의 응력-변형 곡선을 따르고 있다는 것을 보여주고 있으며 이 인장 시험을 통해 평가된 기계적 물성값도 SIR 고무의 특성을 감안할 때 일반적으로 알려진 값과 유사하였다.

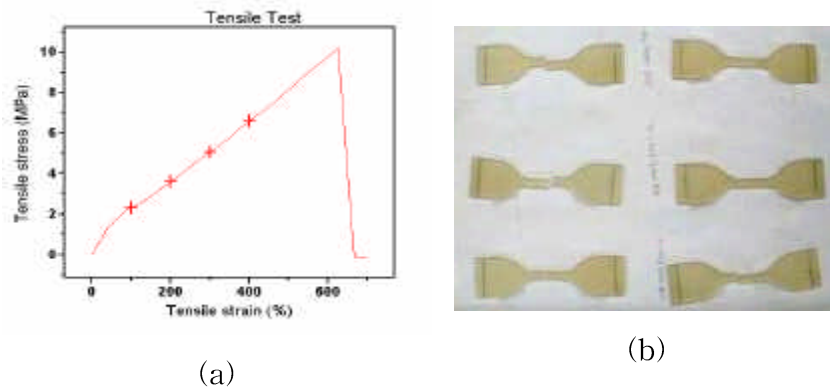


그림8. (a) 상온상태에서 SIR 재료의 응력-변형 곡선, (b) 실험 후 SIR재료의 파단된 모습

이 인장시험 결과를 바탕으로 140°C, 155°C와 170°C에서 가속 노화된 시편들에 대한 연신율을 측정하고 그 상대적 연신율을 각 노화 온도에서 열화시간에 따라 평가하였다(그림9(a), 9(b)와 9(c)).

노화 실험 결과 연신율이 60%까지 감소하는데 140°C에서 3603.6h, 155°C에서 1980.2h, 그리고 170°C에서 593.47h의 시간이 걸리는 것으로 나타났고 이 데이터를 바탕으로 Arrhenius 도식(그림10)를 통해 평가한 결과 연신율 60%저하에 대한 활성화에너지는 0.94eV으로 밝혀졌다.

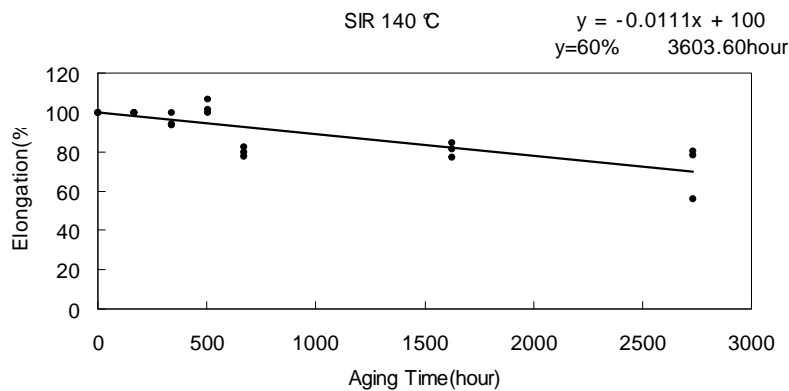


그림9(a). 140°C에서 SIR 재료의 연신율 변화

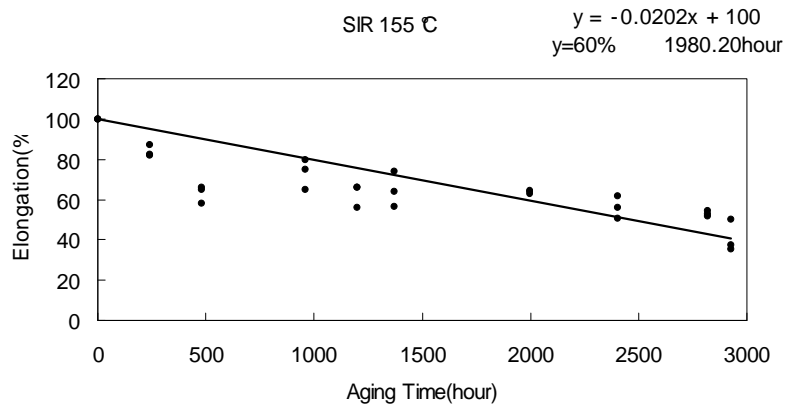


그림9(b). 155°C에서 SIR 재료의 연신율 변화

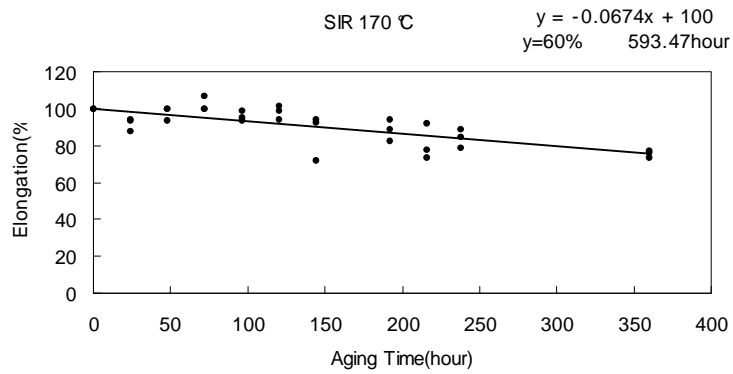


그림9(c). 170°C에서 SIR 재료의 연신율 변화

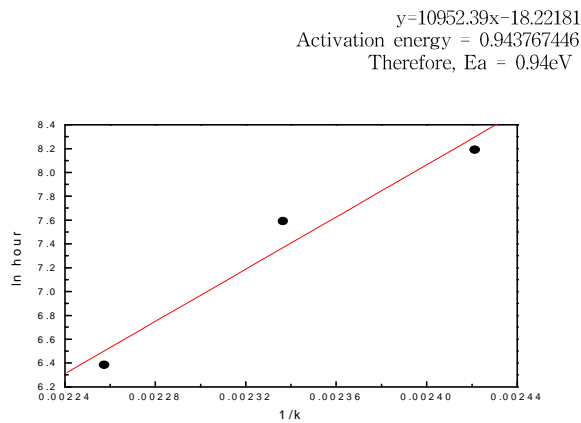


그림10. SIR 재료의 연신율 60% 저하 활성화에너지

이 활성화에너지는 비슷한 실험방법으로 구한 해외 자료와 비교하였을 때 어느 정도 유사한 값을 가지고 있었는데 참고적으로 50% 연신율 저하 활성화 에너지를 Wyle Lab.의

경우 활성화에너지는 0.68~0.80eV이다. 이 정도 차이가 나는 원인이 시편 재료에 기인한 것인지 또는 실험방법 상의 차이 때문인지는 좀 더 많은 실험을 통해 확인될 수 있을 것이다.

다. 국산 PBT (Poly Butylene Telephtalate) 플라스틱

K사에서 제공한 국산 PBT 플라스틱의 열적 노화 특성을 조사하기 위해 인장시험을 수행하였고 그 결과를 그림11에 도시하였다. 실험 결과 고무류의 결과와는 달리 PBT는 항복 강도 이후 곧 바로 최대 인장 강도에 도달하고 소성 변형이 큰 강도 변화의 차이 없이 지루하게 일어나다 파손되는 모습을 보여주고 있다, 그림11(b)는 PBT 시편의 실험 후 파손된 모습이다. 이 인장 시험에서 도출된 인장 강도 등 기계적 물성값도 일반적으로 알려진 값과 유사하였다.

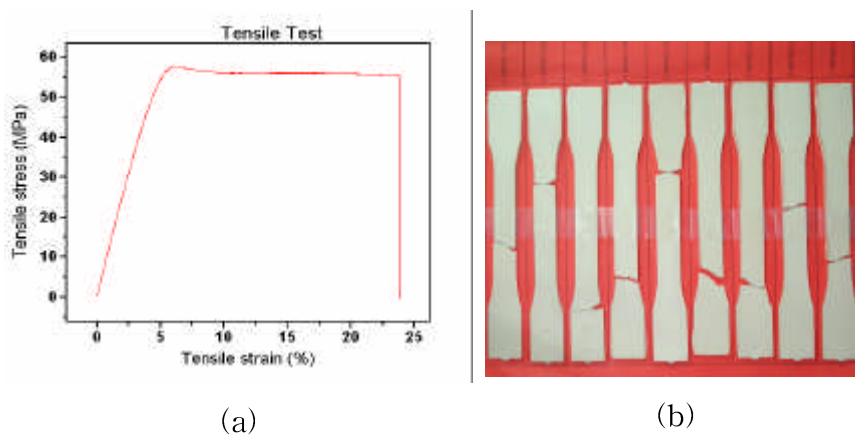


그림11. (a) 상온상태에서 PBT 재료의 응력-변형 곡선,
(b) 실험 후 PBT재료의 파단된 모습

국산 PBT에 대해서도 이 인장 실험을 통해 140°C, 155°C와 170°C에서 가속 노화된 시편의 상대적 연신율 감소를 평가하였고 그 결과를 그림 12(a), 12(b)와 12(c)에 도시하였다. 실험 결과 연신율이 60%까지 감소하는데 걸리는 시간은 140°C에서 2684.56h, 155°C에서 1639.34h, 그리고 170°C에서 268.10h이었으며 이 데이터를 Arrhenius 도식(그림14)를 이용해 구한 연신율 60%저하 활성화에너지는 1.20eV이다.

이 활성화 에너지는 Wyle Lab.이 구한 1.83~2.21eV와는 다소 차이가 나는데 이 결과 역시 좀더 많은 실험과 분석을 통해 시편 재료에 기인한 차이인지 실험방법상의 차이에 기인한 것인지 밝힐 수 있을 것으로 기대된다.

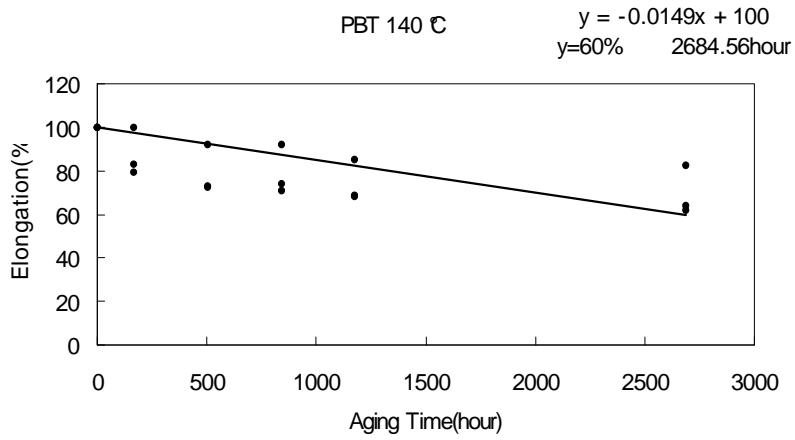


그림11. 140℃에서 PBT 재료의 연신율 변화

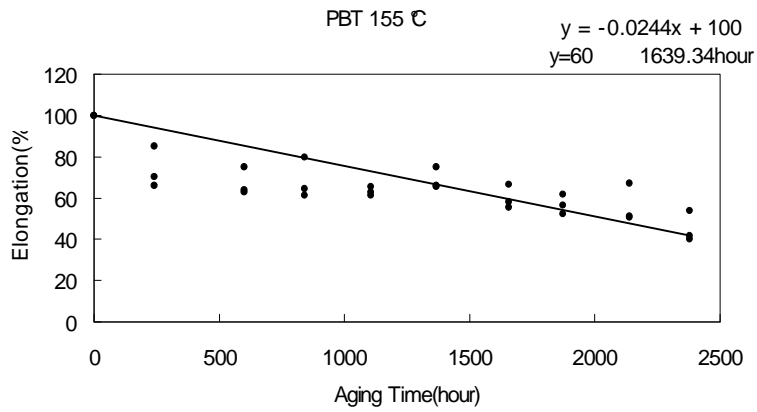


그림12. 155℃에서 PBT 재료의 연신율 변화

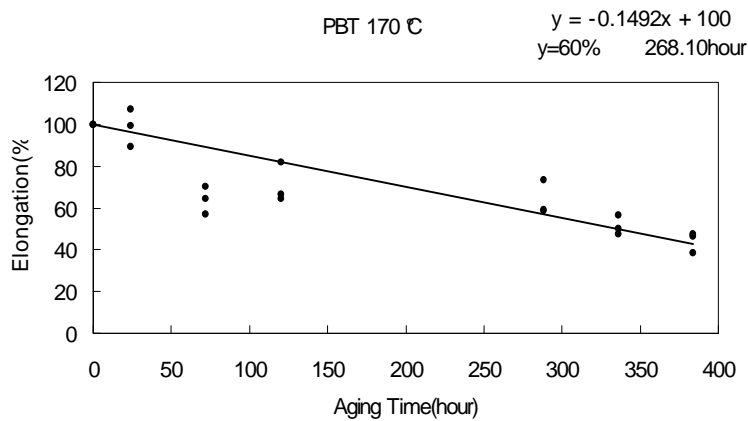


그림13. 170℃에서 PBT 재료의 연신율 변화

$$y=13951x-25.65982$$

Activation energy = 1.20215767
Therefore, Ea = 1.20eV

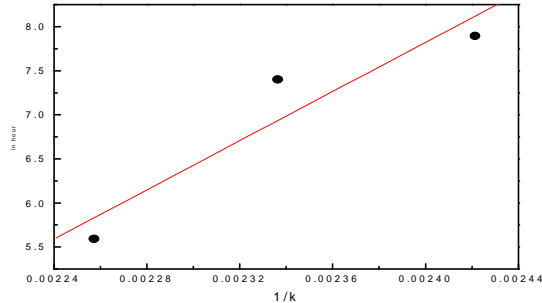


그림14. PBT 재료의 연신율 60% 활성화에너지(activation energy)

5. 결 론

원전의 안전성 및 신뢰성 확보에 필수적인 기기 검증 기술의 뿌리라 할 수 있는 국산 기기 부품의 노화 성능 자료의 확보를 위해 노화에 가장 민감한 것으로 알려진 국산 원자력 폴리머 재료 중 플라스틱은 PBT(Poly Butylene Telephtalate)를, 고무류는 EPR(Ethylene Propylene Rubber)와 SIR (Silicon Rubber)의 2 종류를 선정하여 열적 노화 시험 평가를 수행하고 그 노화 메카니즘에 대한 기초 연구를 수행하였다.

노화 시험은 가속 노화와 연신율 저하의 측정으로 나뉘어 진행되었는데 가속 노화의 경우 노화 온도는 재료의 기본 물성치와 해외 연구 경험을 참조하여 세 재료 모두 140℃, 155℃와 170℃로 설정하였고 노화 측정은 연신율이 50% 정도로 떨어질 때까지 수행되었으나 구체적인 평가는 해외의 연구 경향을 따라 인장 시험을 이용하여 60% 연신율 저하율을 측정 평가하였다.

현재까지 드러난 잠정 연구 결과, 국산 EPR의 경우 인장 특성은 항복 강도 이후에도 변형에 따라 응력이 비례적으로 증가하는 일반적인 고무의 응력-변형 곡선을 따르고 있으며 그 기계적 물성값도 고무 재료의 특성을 감안할 때 일반적으로 알려진 값과 유사하였다. 그리고 연신율이 60%까지 감소하는데 걸리는 시간이 140℃에서 1860.47h, 155℃에서 390.63h, 그리고 170℃에서 172.12h이었으며 연신율 60% 저하의 활성화에너지는 1.25eV로 나타났는데 이 결과는 1.23 eV의 Wyle Lab. 결과와 매우 유사하였다.

국산 SIR 고무도 항복 강도 이후에도 변형에 따라 응력이 비례적으로 증가하는 일반적인 고무의 응력-변형 곡선을 따르고 있었으며 이 인장 시험을 통해 평가된 기계적 물성값도 SIR 고무의 특성을 감안할 때 일반적으로 알려진 값과 유사하였다. 노화 실험 결과 연신율이 60%까지 감소하는데 140℃에서 3603.6h, 155℃에서 1980.2h, 그리고 170℃에서 593.47h의 시간이 걸리는 것으로 나타났고 이 결과에 따른 연신율 60%저하에 대한 활성화에너지는 0.94eV으로 밝혀졌다. 이 활성화에너지는 50% 연신율 저하 활성화 에너지 측

정한 Wyle Lab.의 경우와 (활성화에너지 0.68~0.80eV)와 비교할 때 다소 차이가 나고 있다. K사에서 제공한 국산 PBT 플라스틱의 인장 특성은 고무류의 결과와는 달리 항복 강도 이후 곧 바로 최대 인장 강도에 도달하고 소성 변형이 큰 강도 변화의 차이 없이 지루하게 일어나다 파손되었으며 인장 시험에서 도출된 인장 강도 등 기계적 물성값 역시 일반적으로 알려진 값과 유사하였다. 이 인장 실험을 통해 140°C, 155°C와 170°C에서 가속 노화된 시편의 상대적 연신율 감소를 평가한 결과 연신율이 60%까지 감소하는데 걸리는 시간은 140°C에서 2684.56h, 155°C에서 1639.34h, 그리고 170°C에서 268.10h이었으며 연신율 60%이하 활성화에너지는 1.20eV으로 나타났다. 이 활성화 에너지는 Wyle Lab.이 구한 1.83~2.21eV와는 다소 차이가 나는데 좀더 많은 실험과 분석을 통해 시편 재료에 기인한 차이인지 실험방법상의 차이에 기인한 것인지 밝힐 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] IEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers) 101-1987, "IEEE Guide for the Statistical Analysis of Thermal Life Test Data"
- [2] ASTM(American Society for Testing and Materials) D 412-98a, "Standard Test Methods for Vulcanized and Thermoplastic Elastomers-Tension"
- [3] ASTM(American Society for Testing and Materials) D 638M-91a, "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics (Metric)"
- [4] KS(Korean Standards) M 6518-1996 "가황 고무 물리 시험 방법 - Physical testing methods for vulcanized rubber"
- [5] William D. Callister, Jr., "Materials science and Engineering an introduction"(1993), WILEY
- [6] C.R. Barrett, W.D. Nix, A.S. Tetelman, "The Principles of Engineering Materials"(1973), Prentice-Hall
- [7] Richard W. Hertzberg, "Deformation and fracture mechanics of engineering materials" (1983), John Wiley & Sons
- [8] James E. Mark, "Polymer Data Handbook"(1999), Oxford University Press
- [9] Robert Esposito, Sherri Souffrance, "Rubber Engineering"(2000), McGraw-Hill
- [10] Vishu Shah, "Handbook of Plastics Testing Tech."(1998), John Wiley & Sons
- [11] INSRON, "Instron Merlin Software"(1999), "Instron Merlin Operator's Guide"(1998)
- [12] 한국전력공사 원자력안전처, "원전기기 검증 최적화 연구(최종보고서)"(2000)