

원전 케이블용 절연재료의 열분석과 등가수명

김지연¹, 양종석¹, 박경흠², 성백용¹, 방정환³, 박대희^{1,a}

¹ 원광대학교 정보통신공학과

² 한국수력원자력 중앙연구소

³ 서남대학교 보건환경학과

Thermal Analysis and Equivalent Lifetime Prediction of Insulation Material for Nuclear Power Cable

Ji-Yeon Kim¹, Jong-Suk Yang¹, Kyeong-Heum Park², Baek-Yong Seong¹, Jeong-Hwan Bang³, and Dae-Hee Park^{1,a}

¹ Department of Information & Communication Engineering, Wonkwang University, Iksan 54538, Korea

² Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd., Plant, Daejeon 34101, Korea

³ Department of Environmental Health, Seonam University, Namwon 55724, Korea

(Received November 25, 2015; Revised December 16, 2015; Accepted December 21, 2015)

Abstract: The activation energy of a material is an important factor that significantly affects the lifetime and can be used to develop a degradation model. In this study, a thermal analysis was carried out to evaluate and collect quantitative data on the degradation of insulation materials like EPR and CSP used for nuclear power plant cables. The activation energy was determined from the relationship between $\log \beta$ and $1/T$ based on the Flynn-Wall-Ozawa method, by a TGA test. The activation energy was also derived from the relationship between $\ln(t)$ and $1/T$ based on isothermal analysis, by an OIT test. The activation energy of EPR derived from thermal analysis was used to calculate the accelerated aging time corresponding to the number of years of use, employing the Arrhenius equation, and determine the elongation corresponding to the accelerated aging time.

Keywords: Insulation material, Thermal analysis, Arrhenius, Activation energy, Lifetime

1. 서 론

원자력발전소(원전) 내에서 전력용, 계측용 케이블의 절연 및 피복재로 고분자 재료가 널리 사용되고 있다. 원전 케이블은 고온, 고압, 방사선에 견디는 절연재료가 요구된다. 또한 원전 케이블의 수명은 최소 40년 또는 60년 이상을 보증해야 하는데, 이는 케이블 내의

절연체 즉, 고분자 재료와 직접적인 연관이 있다. 또한 원전 케이블의 수명은 수명연장을 위해 우선적으로 고려해야하며, 원전의 안전성과 직접적인 관계를 가진다 [1].

일반적인 고분자재료는 온도와 요구물성 간의 가역적인 관계가 성립되지만, 열화가 일어날 경우 일반적인 재료의 가역적인 관계가 성립되지 않는다. 사용 온도에서의 수명을 예측하고자 할 때에는, 절연재료의 물성, 물리적 성질 등 열화의 진행 정도(전환율)에 따른 복합적인 함수이며 비선형적이라는 사실을 인지해야 한다 [2].

TGA (thermogravimetric analysis), DSC (differential scanning calorimetry)를 이용한 열분석은 온도를 일정 프로그램에 따라 변화시키면서 물질의 물리적

a. Corresponding author; parkdh@wku.ac.kr

성질을 온도 또는 시간의 함수로 측정하므로 오븐에서 열화시키는데 비해 실용적인 대안을 제공한다 [4,5].

[6]에서 Van Krevelen 등에 의해 TGA를 이용하여 다양한 유기물질의 열분해 과정에 대한 과정을 분석한 이후로, [7]은 TGA를 통해 고분자 물질의 반응차수, 활성화에너지, 반응 정수 및 아레니우스 인자 등을 결정하는 연구가 진척되어 왔다. 특성의 해석을 통해 특정 물질의 열 안정성, 분해거동, 중합 및 경화반응, 모폴로지 등의 변화를 정량적으로 파악할 수 있다 [8].

본 연구에서는 원전 케이블에 사용되는 절연재료 EPR (ethylene propylene rubber), CSP (chlorosulfonated polyethylene, Hypalon) 재료를 sheet 형태로 만든 후 열분석을 통해 재료의 정량적인 데이터를 얻고, 각각의 활성화에너지를 도출하였다. 또한 열분석에 의해 도출된 활성화에너지로 아레니우스 식을 이용하여 151°C의 가속열화온도에서 EPR 재료의 사용 온도 수명에 상당하는 등가수명을 계산하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 시편준비

EPR은 에틸렌과 프로필렌 제 3의 단량체(보통 다이엔 계통)로 합성한 재료로서 5~35 kV의 전력용 케이블의 우수한 절연체로 사용된다. 분자 내에 불포화기가 없어서 화학적, 전기적 안정성이 뛰어나다.

CSP는 염소와 황을 혼합하여 가교시킨 물질이다. 다른 고분자 중합 절연체에 비해 난연성과 내방사선이 우수하여 원자력발전소에 많이 사용된다. 특히 온도, 습도에 대한 저항성이 강한 장점을 가지므로 외피로 사용하면 케이블의 기계, 화학적 손상에 대해 절연체 보호가 가능하다. 본 연구에서는 원자력발전소 내 케이블 절연으로 사용되고 있는 EPR과 피복재로 사용되고 있는 CSP를 배합하여 시편을 시트 형태로 성형하였다. 열분석을 위해서는 만들어진 시트(sheet) 형태를 잘게 잘라서 동결 분쇄시켰다. 동결분쇄기는 (SPEX 사 6770 Freezer Mill)을 사용하였다.

2.2 TGA (thermogravimetric analysis)

고분자 화합물의 손실과 산화로부터 오는 케이블 절연의 취성을 기반으로 일어나는 물리적 수축으로 인한 절연 열화에 유용하다 [9]. 열중량분석기(TGA)는 시료의

주변 환경을 제어한 상태에서 온도 또는 시간의 함수로 시료의 중량 변화량과 속도를 측정하는 열분석 방법이다. 또한 온도가 변화하면서 인가되는 열, 방사선 등에 의해 결합력이 깨지는 최소한의 에너지를 손쉽게 얻을 수 있고, 샘플의 양은 미량만 사용한다. TGA 곡선은 온도에 대한 무게 변화이므로, 여러 온도에서 시료의 무게 변화를 한 곡선에 나타낼 수 있다 [10].

물질의 조성에 의한 특성은 각각의 중량손실 단계의 온도와 구간의 높이로 결정된다. 물이나 잔류용매, 첨가유와 같은 휘발성 물질은 상대적으로 낮은 온도에서 방출된다. 이러한 물질의 제거는 기체압력에 따라 다르다. 낮은 압력(진공상태)에서는 증발이 가속화되어 질량 손실이 낮은 온도 쪽으로 이동된다.

열중량 분석은 ASTM E-1641 기준에 따라 진행하였고, 사용 장비는 (TA 사 Q5000IR)이며, 온도 범위가 상온에서 1,200°C이고, 최대량 5,000 mg, 감도 0.1 µg, 무게 정확도 ±0.1%, 무게 정밀도 ±0.01%의 사양을 가진다. 열분해 활성화에너지는 평균 5 mg의 시료로 100 ml/min의 질소 분위기에서 1, 2, 5, 10°C/min의 승온 속도로 50~800°C까지 가열하여 열중량 분석을 관측하였으며, 중량 감소 곡선에서 95%의 잔류량이 남는 부분(5% conversion level)에서의 온도를 구하여 반응속도 차에 의한 열분해 활성화에너지를 계산하였다. Flynn-Wall Ozawa 방법 [11]에 의해 활성화에너지를 산출하였으며, $\log \beta$ 와 $1,000/T$ 의 관계 그래프를 얻은 후 기울기를 식 (1)에 대입하여 계산하였다.

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

여기서, T 는 일정 전환율 값에서의 온도(K)를 나타내며, β 는 가열속도(°C/min), R 은 기체상수(8.314 J/mol·K), E_a 는 활성화에너지(kJ/mol, eV/mol)를 의미한다.

2.3 OIT (oxidative induction time)

산화유도시간(OIT)은 열화를 정량화함으로써 케이블의 잔존수명 예측, 결합원인 규명에 유용하다. 또한 고분자 재료가 분해될 때 산화방지제 손실을 측정할 수 있다. 측정 물질의 기준물질에 대한 에너지 입력차를 온도의 함수로 측정하는 방법으로, 시료에 대한 열적 흐름(heat flux)을 측정한다.

산화유도시간이란, 일정 온도에서 산소를 주입했을

경우 비금속 재료가 산화되기까지 걸린 시간을 말한다. 비금속 재료 내에는 산화를 방지하기 위한 산화방지제가 포함되어있다 [12]. 일정온도에서 산소를 주입했을 때 산화방지제가 다 타고 없어지면 재료가 산소와 반응하여 산화가 일어난다. 이러한 산화반응이 일어나면 재료 내 산화방지제의 분해 및 손실 등으로 인해 산화유도시간이 줄어들게 된다.

산화유도시간 측정은 ASTM E 2070-03 기준에 따라 측정하였고, 사용 장비는(Perkin Elmer 사 Diamond DSC)이다. 재료의 활성화에너지를 구하기 위해 최소 4 지점의 온도에서 실험한 산화유도시간이 필요하다 [13]. 데이터의 신뢰도를 높이기 위해 발열반응 (산화반응)이 일어난 온도 구간 내에서 235°C, 237.5°C, 240°C, 242.5°C, 245°C인 5개의 온도 지점을 선택하였다.

질소분위기 하에서 산소분위기로 교체된 후 산화반응이 개시되기까지의 점점의 기울기를 도출하였다. 등온분석법에 의해 활성화에너지를 산출하였으며 $\ln(\Delta t)$, $1,000/T$ 의 관계 그래프를 얻은 후 기울기를 다음 식 (2)와 같이 1차식으로 간단히 표현할 수 있다. 그래프의 기울기를 m 으로 두면, 식 (3)과 같이 구해지며, 활성화에너지를 계산할 수 있다. 반응은 발열반응이며 주로 경화반응, 결정화 변이 반응 등이 많이 사용되며 산화반응도 포함될 수 있다.

$$\ln(\Delta t) = \frac{E_a}{RT} + C \quad (2)$$

$$E_a = m \times R \quad (3)$$

반응이 시작되는 순간까지 걸린 시간 Δt 은 산화유도시간, T 는 발열반응이 일어난 절대온도(K), R 은 기체상수 (8.314 J/mol·K), E_a 는 활성화에너지 (kJ/mol, eV/mol), m 은 산화유도시간과 반응온도 간의 기울기를 의미한다.

2.4 등가수명 계산

$$k_2 = k_1 \times \exp\left[\frac{E_a}{K_b} \times \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)\right] \quad (4)$$

아레니우스 변형식인 식 (4)를 이용하여, 실제 케이블의 잔여수명을 평가할 때 일반적으로 사용되는 방법이다. IEC60802-2 규격을 참고하여 최고 사용 온도인 90°C로 적용하였고 [14], 가속열화온도는 시험기간을 고려하여 151°C로 설정하였다.

k_1 , k_2 는 각각 151°C와 활성화에너지에 의한 특정 온도(90°C)에서 40년 수명을 나타내는 시간이며, T_1 , T_2 는 활성화에너지에 의한 온도와 가속열화온도인 151°C이다. K_b 는 볼츠만상수 (8.617×10^{-5} eV/K) 값이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 TGA 결과

승온 속도가 증가할수록 열중량 분해 곡선은 우측으로 이동되어 같은 전환율에서 비교했을 때 분해온도가 높았다. 또한 승온 속도가 증가할수록 우측으로 이동하는 것은 승온 속도가 느릴수록 산화반응이 활발히 진행되기 때문이다.

물질의 조성에 의한 특성은 각각의 중량감소 단계의 온도와 구간의 높기로 결정된다. 물이나 잔류용매, 첨가유와 같은 휘발성 물질은 상대적으로 낮은 온도에서 방출된다. 낮은 압력(진공상태)에서는 증발이 가속화되어 질량손실이 낮은 온도 쪽으로 이동하게 된다 [15].

동결 분쇄시킨 EPR과 CSP 샘플을 5~10 mg의 미량으로 중량 분석을 2회 진행하였다. 2회 실험 중 활성화에너지 값이 온도와 시간에 따라 일정한 것으로 정했다 [16]. 온도범위는 50°C에서 800°C까지이며, 승온속도 1, 2, 5, 10°C/min에 따른 중량감소를 나타내었다.

그림 1은 EPR 재료의 온도에 따른 중량감소 곡선을 나타낸 것이다. 분해 시작온도는 약 200°C 부근에서 1차 분해가 시작되었다. 1차 열분해 초기 온도인 200°C 부근을 기준으로 가속계수 적용에 분해율을 5%로 선정하였다. 5% 중량 감소가 일어난 온도는 승온속도 1, 2, 5, 10°C/min에서 각 250.9°C, 263.5°C, 283°C, 298.5°C의 값을 나타내었다.

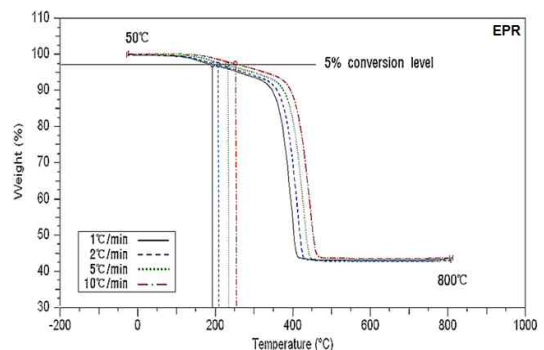


Fig. 1. The weight loss of EPR by rising rate of 1, 2, 5, and 10°C/min.

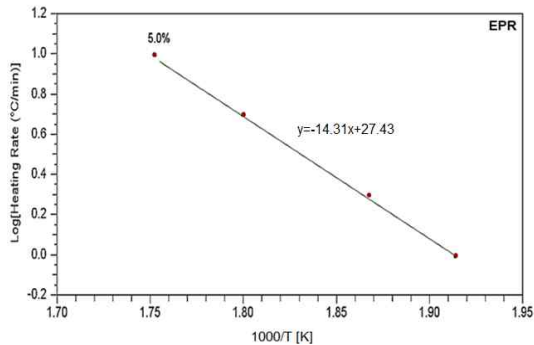


Fig. 2. The relationship of the temperature at a 5% weight loss and heating rate of the EPR.

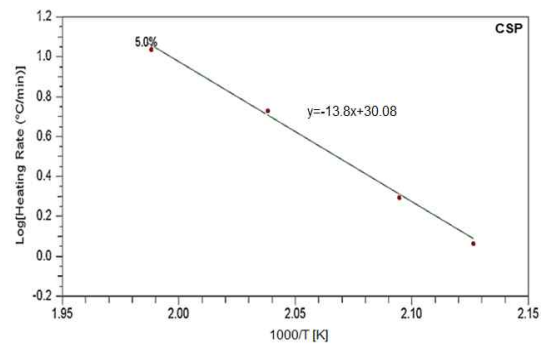


Fig. 4. The relationship of the temperature at a 5% weight loss and heating rate of the CSP.

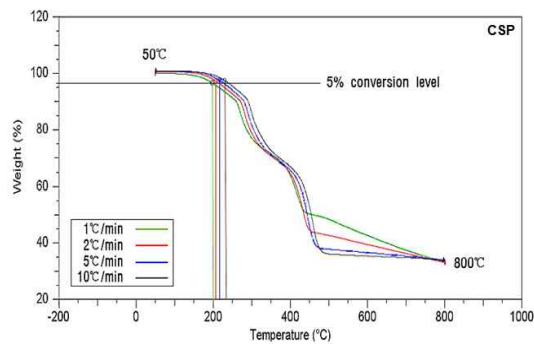


Fig. 3. The weight loss of CSP by rising rate of 1, 2, 5, and 10°C/min.

그림 2는 그림 1에서 도출한 EPR의 5% 중량감소가 일어난 온도($1/T$)와 승온 속도($\log \beta$)를 1차식으로 나타내었다. 활성화에너지는 Flynn-Wall Ozawa 법에 의한 식 (1)을 이용하였고, 도출된 값은 118.6 kJ/mol, 즉 7.81×10^{30} eV/mol이었다.

그림 3은 CSP 재료의 온도에 따른 중량감소 곡선을 나타낸 것이다. 분해온도는 200°C 부근에서 일어났고, 가속계수 적용에 5% 분해율을 선택하였다. 5% 중량 감소가 일어난 온도는 승온속도 1, 2, 5, 10°C/min에서 각 193.8°C, 209.5°C, 218.7°C, 233.8°C의 값을 나타내었다.

그림 4는 그림 3에서 도출한 CSP의 5% 중량감소가 일어난 온도($1/T$)와 승온 속도($\log \beta$)를 1차식으로 나타내었다. 활성화에너지는 Flynn-Wall Ozawa법에 의한 식 (1)을 이용하였고, 도출된 값은 114.8 kJ/mol, 즉 7.56×10^{30} eV/mol이었다. EPR 절연과 CSP 피복재는 350~450°C 사이에서 열분해 반응이 일어나는 것을 알 수 있다. 또한 EPR과 CSP의 TGA 분석 결과로부터 온도($1/T$)와 승온 속도($\log \beta$)의 관계는 모두 양호한 선형성을 보였다.

3.2 OIT 결과

고분자 재료는 산화반응이 일어나서 하이드로퍼옥사이드(hydro peroxide)기 등이 생성 또는 축적되면서 서서히 열화가 진행된다. 하이드로퍼옥사이드는 결합에너지가 126~147 J/mol로 낮으며, 분해되면 라디칼을 쉽게 생성하기 때문에 승온에 의해 발열현상이 일어나서 산화반응이 진행된다. 산화유도시간은 산화반응에 기초한 열적 성질로 열화가 진행됨에 따라 저온으로 이동한다 [17]. 동결 분쇄시킨 EPR과 CSP 샘플을 5~10 mg의 미량으로 DSC (differential scanning calorimetry) 기기에 넣은 후 5개의 온도 지점을 선택하여 측정하였다. 온도는 산화유도시간이 지속된 구간에서 선택하였고, 각 235°C, 237.5°C, 240°C, 242.5°C, 245°C이다.

표 1은 EPR의 설정 온도에 따른 산화유도시간 값을 나타낸 것이다.

그림 5는 표 1에서 계산된 $\ln(t)$ 와 $1,000/T$ 의 관계를 1차식으로 나타내었다. EPR의 활성화에너지는 등온 분석법에 의한 식 (3)을 이용하였고, 도출된 값은 174.93 kJ/mol 즉, 1.15×10^{31} eV/mol이었다.

EPR 절연의 활성화에너지 값은 1.15×10^{31} eV/mol로 TGA 실험에서 도출한 값에 비해 높은 값을 보였다. 산화유도시간을 구하기 위해 산화반응이 일어나기 시작하는 점과 다음 반응 즉, 발열반응이 일어나기 바로 전의 점을 이은 기울기 값을 도출해야 한다. 각 온도에서 OIT를 구하기 위해 얻은 EPR 그래프는 굴곡이 심해서(매끄럽지 않음) 기울기를 구하기 위한 접점이 분석자의 보는 위치에 따라 결과 값이 달라져 오차가 발생하였다. CSP 피복재도 EPR 절연과 같은 방식으로 OIT 실험을 진행하였다.

Table 1. OIT value according to the temperature of EPR.

Temperature [K]	OIT (t, min)	1,000/T	ln(t)
506.3	16.181	1.975	2.784
508.8	13.211	1.965	2.581
511.8	11.29	1.956	2.424
513.8	9.769	1.946	2.279
516.3	6.874	1.937	1.928

Table 2. OIT value according to the temperature of CSP.

Temperature [K]	OIT (t, min)	1,000/T	ln(t)
501.3	30.881	1.995	3.430
506.3	23.972	1.975	3.177
511.3	17.934	1.956	2.887
516.3	14.459	1.937	2.671
521.3	10.721	1.918	2.372

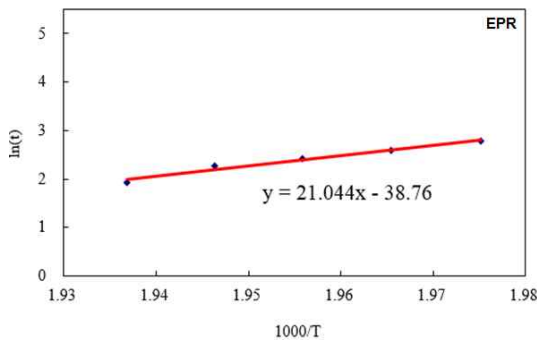


Fig. 5. The relationship with oxidative induction time depending on the temperature of EPR.

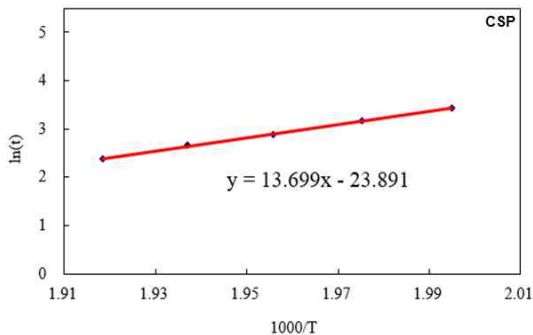


Fig. 6. The relationship with oxidative induction time depending to the temperature of CSP.

표 2는 CSP의 온도에 따른 산화유도시간 값을 나타낸 것이다.

그림 6은 표 2에서 계산된 ln(t)와 1,000/T의 관계를 1차식으로 나타내었다. CSP의 활성화에너지는 등온분석법에 의한 식 (3)을 이용하였고, 도출된 값은 113.9 kJ/mol 즉, 7.5×10^{30} eV/mol이었다.

OIT를 구하기 위한 EPR의 그래프에 비해 CSP 그래프는 굴곡이 매끄럽고 접점의 위치가 상대적으로 일치하여, 활성화에너지 값이 TGA 분석과 비슷한 결과를 보였다. EPR, CSP의 OIT 분석 결과로부터 발열반응 온도에 따른 산화유도시간의 기울기는 선형을 나타내었다.

3.3 절연재료의 등가수명

아레니우스 식은 사용온도에 따른 반응속도를 나타내며, 활성화에너지 측정 등 사용온도와 기간에 의한 등가수명을 예측하는 데 사용된다 [18]. 식 (4)를 이용하여 특정 온도에서의 가속시간을 계산할 수 있다. TGA 열분석으로 구한 EPR의 활성화에너지를 이용하여, 반응속도 식에 따라 151°C에서의 등가수명을 계산하였다.

표 3은 사용온도 90°C를 기준으로 EPR의 등가수명에 해당되는 가속열화시간을 나타낸 것이다.

Table 3. Equivalent lifetime of EPR at $T_1 : 151^\circ\text{C}$, $T_2 : 90^\circ\text{C}$.

Equivalent lifetime [yr]	Accelerated degradation time [hr]
20	614
40	1,228
60	1,843
80	2,457
100	3,072

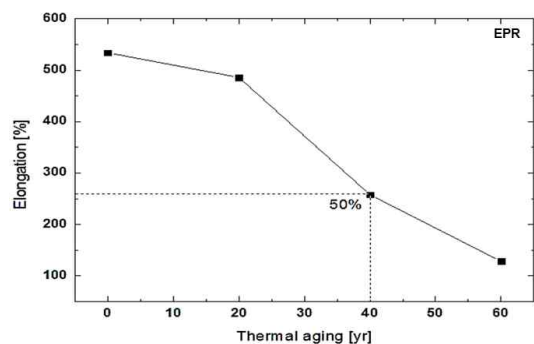


Fig. 7. Elongation of the EPR material according to the accelerated thermal degradation.

표 3에서 구한 값은 실제 케이블로 실험하여 잔여 수명평가를 하거나, 사용 년 수에 해당되는 시간만큼 가속열화를 시켜서 재료에 대한 평가를 할 수 있다.

그림 7은 표 3에서 구한 EPR 절연의 열 가속열화 시간에 따른 신장률(EAB) 값을 측정하였다. 즉, EPR 배합 시편의 20년, 40년, 60년에 해당하는 등가 가속열화를 시켜 신장률을 측정하였다. 열 열화가 진행됨에 따라 신장률은 감소하였고, 원전 수명주기인 40년에 초깃값의 50% 값을 나타내었다.

원전 수명주기를 60년으로 연장하려는 최근 연구동향에 따르면 재료의 내구성, 내열성이 좋은 처방과 여러 조건에서의 열화평가에 대한 충분한 데이터가 필요하다.

4. 결 론

본 논문에서는 원전 케이블에 사용되는 절연체 EPR과 피복재 CSP에 대한 열분석(TGA, OIT)을 진행하였다. TGA 실험으로 구한 활성화에너지는 아레니우스 식을 이용하여 EPR 재료의 사용 년 수(수명)에 해당하는 등가수명을 계산하였다.

1) TGA 실험은 승온속도가 증가할수록 열중량 분해 곡선은 우측으로 이동되어 같은 전환율에서 분해온도가 높았다. 또한 도출된 EPR의 활성화에너지 값은 118.6 kJ/mol 즉, 7.81×10^{30} eV/mol이고, CSP의 활성화에너지 값은 114.8 kJ/mol, 즉 7.56×10^{30} eV/mol이었다.

2) OIT 실험으로 인해 도출된 EPR의 활성화에너지 값은 174.93 kJ/mol 즉, 1.15×10^{31} eV/mol이고, CSP의 활성화에너지 값은 113.9 kJ/mol 즉, 7.5×10^{30} eV/mol이었다.

3) EPR과 CSP의 열분석 결과로부터 승온속도와 온도 의존성, 산화유도시간과 온도 의존성은 1차식으로 나타내었고, 데이터는 선형성을 보였다.

4) 아레니우스 식을 이용하여 20년, 40년, 60년에 해당하는 가속열화 시간을 계산하고, 신장률을 측정하였다. EPR 절연은 원전 수명 주기인 40년에 신장률 50%를 나타내었다.

실제 원전 환경의 경우는 열화가 복합적으로 발생하므로 독립적인 열화 평가의 충분한 고려가 필요하다. 즉, 재료의 열에 의한 열화평가 방법으로 활용 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2015학년도 원광대학교의 교비지원에 의해서 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] C. Lee, G. Y. Kim, and P. H. Kang, *J. KSIEC, Applied Chemistry*, **10**, 13 (2006).
- [2] *Irradiation Effects on Polymers* (D. W. Clegg and A. A. Collyer, United Kingdom, 1991) p. 360.
- [3] *ASTM D 2307*, Standard Test Method for Tensile Properties of Organic Coatings
- [4] N. R. Mann and K. W. Fertig, *Technometrics*, **17**, 361 (1975). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00401706.1975.10489342>]
- [5] A. Brodido, *J. Polymer Science part A-2*, **7**, 1761 (1969). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/pol.1969.160071012>]
- [6] E. S. Kim, *Activation Energy and Adhesion of Silicone Rubber/Clay Nanocomposites*, Inha University, Incheon (2006).
- [7] C. Lee, G. Y. Kim, B. H. Ryu, and K. J. Lim, *J. Korean Society of Safety*, **18**, 50 (2003).
- [8] V. Placek, *J. Thermal Analysis and Calorimetry*, **80**, 525 (2005). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10973-005-0688-4>]
- [9] K. S. Kang, *J. Journal of the Electric World / Monthly Magazine*, **46** (2014).
- [10] K. H. Park, *Study on Vulcanization and Degradation Reaction of Modified NR Rubber Compound Using DSC, TGA and TMA*, Keimyung University, Daegu (2009).
- [11] M. J. Starink, *Thermochimica Acta*, **404**, 163 (2003). [DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0040-6031\(03\)00144-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0040-6031(03)00144-8)]
- [12] K. J. Bang, *A Study on the Analysis of Activation Energy for Class 1E Cable in Nuclear Power Plant*, Chosun University, Gwangju (2011).
- [13] Y. N. Gupta, S. M. Abbas, R. B. Sharma, and D. K. Setua, *J. Therm. Anal. Calorim.*, **119**, 1393 (2015). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10973-014-4282-5>]
- [14] S. J. Jung, H. S. Kwon, and D. S. Hong, *Proc. of the Korean Inst. Electr. Engineers, Annual Summer Conf.* (2013).
- [15] J. Y. Kim and D. H. Park, *Proc. of the IEEE Electr. Insula. Conf.* (IEEE EIC, Seattle, USA, 2015) p. 5.
- [16] *IEEE Std. 1205-2000*, IEEE Guide for Assessing, Monitoring, and Mitigating Aging Effects on Class 1E Equipment Used in Nuclear Power Generating Stations.
- [17] *EPRI TR-106370*, Reduction of Oxidation Induction Time Testing to Practice as a Life Assessment Technique for Cable Insulation (1996).
- [18] K. Y. Kim, H. G. Kang, C. Lee, and B. H. Ryu, *Journal of the KIIS*, **18**, 57 (2003).