

Thermal Aging Predictions of Polymeric Materials from Arrhenius Plot Using TGA

沈大燮* · 朴聖均** · 李喆浩***
(Dae-Sub Shim · Sung-Kyun Park · Chul-Ho Lee)

Abstract - Accelerated thermal aging conditions of polymeric materials were studied by Kissinger equation with TGA analysis. The activation energy was obtained from the slope of straight line of each specimen at the different TGA heating rate. Estimating activation energy from Kissinger equation was acquired, and the resulting calculation showed that 3.59, 3.0, 3.86, 3.73 for the PEEK, polyimide, polysulfone and Viton, respectively. The studied polymeric specimens are used for electrical penetration assembly in nuclear power plant. Accelerated aging time and temperature were also determined corresponding to actual service temperature and 41 years.

Key Words : Thermal aging, Kissinger, TGA, Polymeric materials

1. 서 론

$$L = A \exp [-E_a/RT] \quad (1)$$

전기기기가 가동되면 전류에 의하여 필연적으로 발열하여 열열화(熱劣化)에 대한 고분자 절연재료의 장시간 내열수명이 중요하게 된다. 더욱이 최근에는 산업의 발전에 따른 장치의 소형화로 높은 온도나 내방사선 및 고전계성 절연 등 각종 특수 상태에서 운전되는 새로운 고기능성 절연재료 사용이 많아 고분자 절연재료는 물성적 또는 절연적인 장기 수명이 더욱 요구되고 있는 현실이다. 특히 원자력 발전소에 사용되는 고분자 재료는 기본적으로 40년 이상의 장시간 내열수명을 보증해야 하는 숙제를 갖고 있으며 이 수명이 입증되어야 실제로 사용할 수 있게 된다. 이에 따라 내열수명을 예측하는 기법이 예전부터 많은 연구자들에 의해 발전하였으며 오랜 기간 사용되면서 상당한 신뢰성을 갖고 있는 방법들이 개발되어 있다. 이러한 내열수명을 추정하는 방법으로서 초기에는 온도가 8~10도 상승하면 수명이 반감된다는 10도 반감 법칙이 사용되기도 했으나, 그 후 이 법칙은 넓은 온도 범위에서는 사용하기 어렵다는 것이 밝혀졌으며 최근에는 온도와 화학반응 속도식에 대하여 아레니우스(Arrhenius) 법칙을 기초로 한 수명예측 방법이 사용되고 있고[1], 이 방법은 IEEE와 IEC standard에도 채택되어 있을 정도로 그 신뢰성을 인정받고 있다[2-5]. IEEE Std 101과 IEC 216-2에 나와 있는 아레니우스 식을 요약하면 다음과 같다.

L = 절연수명 (hours)
A = 상수(collison factor)
E_a = 활성화에너지
R = 기체상수(gas constant, j/K · mol)
T = 절대온도 (Kelvin)

위 식에서 양변에 ln을 취하여 실험에 적용하기 쉽도록 식을 유도하면 (2)식이 성립된다.

$$\ln L = -E_a/R \cdot 1/T + \ln A \quad (2)$$

위 식은 3 가지 이상의 온도에서 1/T을 x 축으로 lnL을 y 축으로 하여 그래프를 그리면 그 기울기로부터 재료의 활성화 에너지를 구할 수 있으며 절연수명도 결정된다. 그러나 IEEE 및 IEC의 시험 방법에 따라서 아레니우스 식에 의한 수명을 구하기 위해서는 시험이 비교적 복잡하고 장시간이 요구되는 단점이 있다. 우선 수명이 다했다고 판단하는 종지점에 대한 평가항목 및 평가 기준을 정하여야 한다. 평가시험으로 할 수 있는 항목으로는 IEC 216-2에 인장강도, 신장율, 충격강도, 굽곡강도, 절연저항, 절연파괴전압, 질량감소 등 이외에도 여러 가지 항목이 있으며, 중요한 것은 실제로 제품에 요구되는 항목으로 평가하여야 하는 것이다. 실제 제품의 특성과 관련이 없는 항목을 선택하여 종지점으로 계산하면 전혀 다른 결과가 나올 수 있으므로 평가항목의 선택이 수명 예측에 큰 영향을 미친다. 또한 수명이 다했다고 판단하는 종지점에 대한 기준을 얼마로 정하느냐 하는 것도 문제이다. 예를 들면 Anandakumaran 등은 아레니우스 수명 예측에 있어서 일반적으로 사용되는 종지점은 신장율 유지율 50%이지만 가교폴리에틸렌이나 에틸렌 프로필렌 고무 케이블의 경우

* 正會員 : 韓國電氣研究員 電氣試驗研究所 · 工博
** 正會員 : 韓國電氣研究員 電氣試驗研究所 시험센터장
*** 正會員 : 平一産業(朱) 技術研究所長 · 工博
接受日字 : 2002年 6月 10日
最終完了 : 2002年 8月 28日

에는 신장율이 원래 값의 수%만 유지하여도 전기적으로 문제가 없다고 지적하였다[6]. 그 다음으로는 열화 시간이다. IEEE Std 98에 따르면 종지점에 도달하는 시간이 가장 낮은 온도에서는 5,000 시간 이상, 가장 높은 온도에서는 100 시간 이상이 되도록 가열 온도를 정해야 하며, 최소한 25℃ 구간을 갖는 4 가지 이상의 온도에서 최소 5,000 시간(약 7 개월)의 시간이 소요된다. 따라서 아레니우스 식에 의해 종지점을 찾기 위해서는 시료의 수도 많아져야 하고 시간도 길어지게 되는 부담이 따른다.

그러므로 본 연구에서는 상기한 바와 같은 종전의 수명 예측 방법의 단점을 극복하기 위하여 열분석으로부터 얻은 활성화 에너지를 고분자 재료의 수명 예측 데이터로 활용하려고 시도하였다. 최근 열분석기를 이용하여 고분자 재료의 열적 반응 속도를 예측하고 활성화 에너지를 구하는 연구가 진행되고 있다[7-11]. 활성화 에너지는 반응이 일어나기 위해 필요한 최소한의 에너지이므로 열화에 필요한 열에너지가 활성화 에너지보다 작으면 열화는 발생하기 어려울 것이다. 따라서 활성화 에너지가 크면 내열성이 우수하고 장기간의 내열수명을 가지는 재료가 된다. 고분자 노화 연구의 응용으로 Hirata 등은 polymethylmethacrylate를 질소 기류에서 비등온과 등온으로 가열속도와 온도를 변화시킨 실험에서 수학적 처리방법으로 미분에 의한 방법인 Kissinger 법으로 활성화 에너지를 구하는데 응용하였다[12]. 또한 Cooney 등도 섬유 재료인 polyethylene terephthalate를 가열속도 0.1~100 °C/min, 질소기류 유량 50 ml/min 조건으로 활성화 에너지를 구하는데 이용하는 등 여러 연구자들에 의해서 기기분석과 Kissinger 법을 응용하여 활성화 에너지를 구하는데 활용하였다[13, 7-11].

본 연구에서는 원자력 발전소의 돔(containment) 내부에 전력 공급을 하는 장치인 전기관통구설비에 사용되는 고분자 재료에 대한 수명 예측을 하기 위하여 엔지니어링 플라스틱 고분자 재료 4 종류를 선정하고 열분석을 수행한 후 Kissinger 식을 이용하여 활성화 에너지를 구하였고 이를 바탕으로 실제 발전소의 열적 열화 조건을 모의하기 위한 가열 시간 및 온도를 계산하였다.

2. Kissinger 식

물질의 상변화 등의 물리적 변화나 물질의 분해나 반응 등의 화학적 변화가 일어날 때는 언제나 열이 흡수되거나 방출된다. 즉 물질의 특정한 온도에서 용융이나 기화같은 물리적 변화가 일어날 수 있으며, 고온에서 물질의 분해반응이나 산화, 환원, 이성화반응 등의 화학적인 변화가 일어난다. 일반적으로 열분석(Thermal analysis, TA)이란 온도를 증가시키면서 물질의 물리적 성질을 온도함수로서 측정하는 일련의 방법 등을 총칭한다. 본 연구에서는 고분자 재료에 대한 활성화 에너지를 구하는 방법으로 여러 열분석 방법 중 열중량 분석(Thermogravimetric analysis, TGA)법을 이용하였다. 열중량 분석은 온도변화에 따른 시료의 무게변화를 측정하여 분석하는 방법이다. TGA에 의한 온도-무게 변화량의 곡선으로부터 시료의 열 변화 상태를 알고 정성 및 정량 분석을 가능하게 한다. 또한 이 온도-무게 변화량의 곡선은 사용한 시료의 열 안정성 및 물질의 구성비 등을 나타내고 가열 중에

생긴 중간체의 열적 성질도 나타내주며 가열이 끝났을 때 남은 잔류량도 알 수 있다.

열중량법에서의 열분해가 n차 반응이라 하면, 전환율 c의 시간적 변화는 다음과 같다.

$$dc/dt = k(1-c)^n \tag{3}$$

또한 분해속도의 의존성은 Arrhenius 표현으로 다음과 같다.

$$k = A \exp(-E_a/RT) \tag{4}$$

식 (3), (4)로부터 식 (5)가 얻어지며, 식 (5)와 열중량 곡선으로부터 구한 전환율로부터 분해반응의 특성치를 구한다.

$$dc/dt = A(1-c)^n \exp(-E_a/RT) \tag{5}$$

Kissinger법은 열중량 곡선에서 최대의 미분값을 가지는 점의 온도를 T_m이라 하고 이것을 이용해서 활성화 에너지를 구하는 방법이다. T_m은 derivative thermogravimetry(DTG) 곡선의 정점에 해당되는 온도이다. 식 (5)를 t에 대하여 미분하면 다음 식이 얻어진다.

$$E_a \beta / RT_m^2 = An(1-c)_m^{n-1} \exp(-E_a/RT_m) \tag{6}$$

- k: 반응속도 상수
- β: 승온속도 (°C/min), dT/dt
- T_m: 최대 속도로 열분해 반응이 일어나는 온도 (K)
- A: 상수 (collision factor)
- E_a: 열분해반응 활성화에너지(activation energy)
- R: 기체상수 (gas constant, J/K · mol)

온도의 함수로서 반응율을 알기 위해 Murray와 White의 근사법을 이용하여 식 (5)를 적분하면 식 (7)이 되며 식 (6)과 (7)을 결합하면 식 (8)이 된다.

$$1/(n-1) \{ [1/(1-c)_m] - 1 \} = (ART_m^2/E_a \beta) \exp(-E_a/RT_m) [1 - (2RT_m/E_a)] \tag{7}$$

$$n(1-c)_m^{n-1} = [1 + (n-1)(2RT_m/E_a)] \tag{8}$$

Kissinger는 n(1-c)_mⁿ⁻¹이 가열속도와 무관하고 거의 1차 반응인 경우를 가정하여 식 (6)으로부터 식 (9)를 얻었다.

$$E_a \beta / RT_m^2 = A \exp(-E_a/RT_m) \tag{9}$$

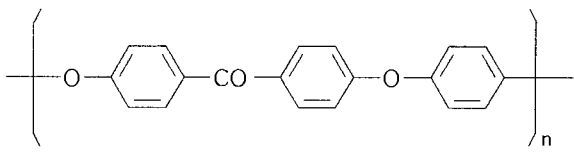
식(9)의 양변에 대수를 취하고 미분하면 Kissinger 식이 얻어지며 ln(β/T_m²)와 1/T_m을 도시하여 활성화 에너지를 얻을 수 있다[14].

$$-\ln\left(\frac{\beta}{T_m^2}\right) = \frac{E_a}{RT_m} - \ln\left(\frac{AR}{E_a}\right) \tag{10}$$

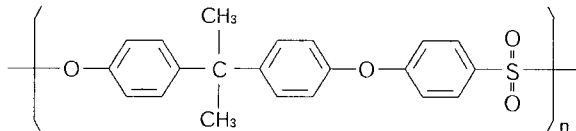
Kissinger equation

3. 실험

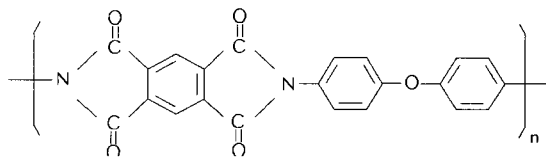
본 연구에는 기계적 특성과 내열성이 우수한 엔지니어링 플라스틱으로서 PEEK(polyetheretherketo-ne), polysulfone, polyimide, polytetrafluoroethylene(Viton) 등 4종류의 고분자 재료를 선정하였으며 상용으로 통용되는 제품을 구입하여 그대로 실험에 사용하였다. 각 재료의 화학 구조식을 그림 1에 나타내었다. PEEK는 Victrex사 제품이고 polysulfone은 Amoco사의 Udel P3500, polyimide는 Dupont사의 Kapton 500H를 사용하였으며 Polytetrafluoroethylene(PTFE Viton)은 Dupont Elastomer사의 E60C를 사용하였다. 열분석은 ISI사의 TGA 100을 사용하여 측정하였다. 각 시료로부터 6.0±0.5 mg을 채취하여 산화를 방지하기 위하여 100 ml/min의 질소분위기에서 각각 10, 20, 30 °C/min의 승온 속도로 온도를 상승시켜 TG 곡선을 구하였다. 얻어진 TG 곡선을 1차 미분하면 DTG 곡선이 구해지는데 피크 값으로 나타나는 온도(Tm)가 열분해에 의해 중량변화가 급격하게 나타나는 부분이다. 각각의 시료에 대하여 DTG 곡선의 피크값과 Kissinger 파라미터값 $(-\ln(\beta/Tm^2))$ 및 $1/Tm \times 103$ 을 구하여 Kissinger 식에 대입한 후 선형의 방정식을 구하고 그 방정식의 기울기로부터 활성화 에너지 Ea를 구하였다.



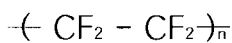
(a) PEEK



(b) Polysulfone



(c) Polyimide



(d) PTFE (Viton)

그림 1 각 시료의 화학 구조식
Fig. 1 Chemical structure of the specimens.

4. 결과 및 고찰

4.1 활성화 에너지

고분자 재료에 대하여 TGA를 활용하면 가열하는 동안 시료 중에서 휘발되는 용제, 가스제, 열분해 생성물 등에 의해 일어나는 무게의 변화를 알 수 있으므로 재료의 조성 분석과 열 안정성을 측정할 수 있다. 그림 2~5에 10 °C/min 승온 속도에서의 각 시료의 TG/DTG 곡선을 나타내었다. 실험한 모든 시료에서 승온 속도가 커질수록 TGA 그래프가 오른쪽으로 이동하는 모습을 볼 수 있었으며 이것은 온도변화가 빠를수록 열분해가 늦게 발생하고 열적으로 더욱 안정성을 갖는다는 것을 의미한다.

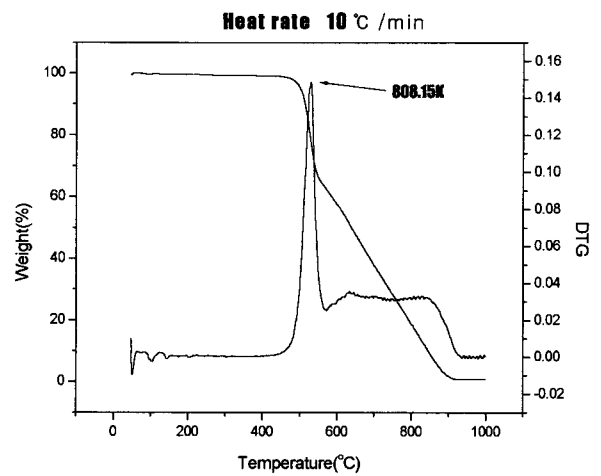


그림 2 PEEK의 TG/DTG 곡선 (10 °C/min)
Fig. 2 TG/DTG curves for PEEK at the heating rate of 10 °C/min

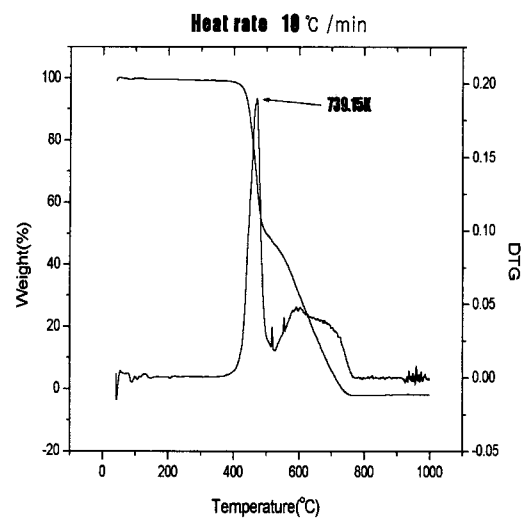


그림 3 Polysulfone의 TG/DTG 곡선 (10 °C/min)
Fig. 3 TG/DTG curves for polysulfone at the heating rate of 10 °C/m

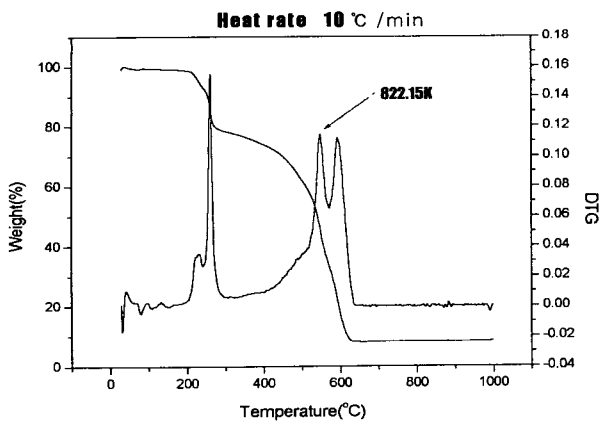


그림 4 Polyimide의 TG/DTG 곡선 (10 °C/min)
 Fig. 4 TG/DTG curves for polysulfone at the heating rate of 10°C/min

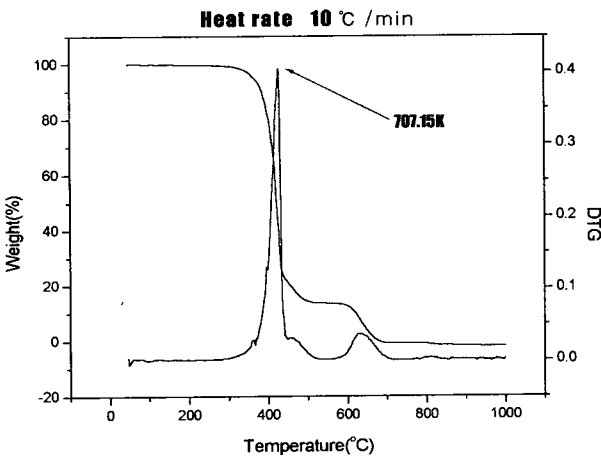


그림 5 Viton의 TG/DTG 곡선 (10 °C/min)
 Fig. 5 TG/DTG curves for Viton at the heating rate of 10 °C/min

PEEK는 약 500°C 근처에서 급격한 1차 열분해가 시작되었고 약 35%의 중량 감소 후에 완만하게 감소하는 2차 열분해의 모습을 보이다가 900°C 이상에서 모두 분해되었다. Polysulfone의 경우에는 420°C 이상에서 급격한 1차 열분해가 일어난 다음 50% 정도의 중량 감소 후에 완만한 2차 열분해가 발생하였고 700°C 이상에서 완전한 열분해가 일어났다. Polyimide는 270°C 이상에서 시작하여 600°C 이상까지 분해되는 가장 완만한 경사를 갖는 열분해 곡선을 나타내었다. 이 곡선을 미분한 결과 중간의 변곡점 때문에 그림 4에서와 같이 2개의 피크 값이 나타났으며 본 연구에서는 피크의 크기가 약간 더 큰 1차 피크를 T_m으로 설정하였다. Viton은 불소고무로서 350°C 이상부터 열분해가 시작되어 500°C 이하까지는 고분자가 완전히 분해되었다가 600°C 이상에서 다시 분해되는 형태를 나타내었으며 600°C 이상에서 분해되는 성분은 첨가제로 혼입된 카본블랙인 것으로 판단된다.

각각의 시료에 대하여 승온 속도를 10, 20, 30 °C/min로 변화시켜 얻은 DTG 곡선으로부터 T_m을 구하였으며 식 (10)의 Kissinger 식에서 필요한 Kissinger 파라미터를 구하여 이를 표 1에 나타내었다.

표 1에서 나타낸 Kissinger 파라미터 $-\ln(\beta/T_m^2)$ 와 $1/T_m \times 10^3$ 값으로부터 Kissinger 속도식에 의하여 1차 방정식을 구하고 이를 그림 6~9에 나타내었다.

또한 이 그림에서 구한 기울기로부터 활성화 에너지를 구하여 이를 표 2에 나타내었다. 3 가지의 승온 속도를 사용한 본 연구 결과, 모든 재료에 대하여 그래프가 일직선에서 크게 벗어나지 않는 결과를 보였으며 이 것은 그래프의 기울기 편차가 크지 않고 따라서 활성화 에너지 값도 비교적 정확하다는 것을 의미한다. 그림 6~9 및 표 2의 결과를 종합하면 4 종류의 시료 중에서 polyimide의 활성화 에너지가 가장 작고 Viton의 활성화 에너지가 가장 큰 것으로 나타났다.

Polyimide는 그림 4에서처럼 가장 낮은 온도에서 분해가 시작되어 완만한 중량 감소를 나타내고 승온 속도에 따른 중량감소의 변화가 가장 커서 높은 승온 속도 의존도를 나타내었다. 따라서 작은 활성화 에너지를 보여줌으로서 4가지 시료 중 내열 수명이 가장 적은 것으로 평가되었다.

활성화 에너지가 높다는 것은 재료를 열화시키는데 필요한 에너지가 높아서 열화가 되기 어렵다는 것을 의미한다. Polysulfone의 활성화 에너지가 가장 커서 내열 수명이 높을 것으로 평가되었다. PEEK와 Viton은 비교적 높은 활성화 에너지를 보여주었는데 PEEK는 알려진 대로 내열성이 높은 엔지니어링 플라스틱인 것을 확인하였다. Viton의 활성화 에너지도 큰 값을 나타내었으며, 이 것은 Viton이 불소고무이기 때문에 불소고무 특유의 내열성과 경화된 고무 구조를 갖고 있어 상대적으로 열적인 분해가 어렵기 때문으로 판단된다

표 1 승온 속도에 따른 T_m과 Kissinger 파라미터 값
 Table 1 The relationship between the heating rates, peak temperature and Kissinger parameters

시료명	Heating rate (°C/min)	Peak temp. T _m (K)	Kissinger parameters	
			$-\ln(\beta/T_m^2)$	$1/T_m \times 10^3$
PEEK	10	808.15	11.08691	1.23739
	20	817.15	10.41591	1.22376
	30	825.15	10.02993	1.21190
Polysulfone	10	739.15	10.90842	1.35290
	20	746.15	10.23410	1.34021
	30	754.15	9.84998	1.32600
Polyimide	10	822.15	11.12126	1.21632
	20	837.15	10.46427	1.19454
	30	842.15	10.07071	1.18744
Viton	10	707.15	10.81990	1.41413
	20	716.15	10.15205	1.39636
	30	719.15	9.75494	1.39053

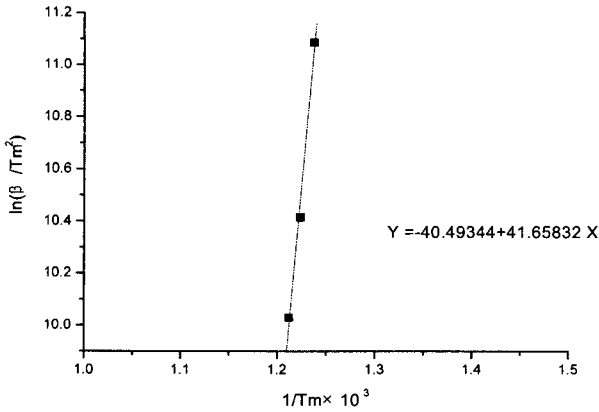


그림 6 PEEK의 Kissinger 식에 의한 $-\ln(\beta/T_m^2)$ 와 $1/T_m$ 의 관계
 Fig. 6 Plots of $-\ln(\beta/T_m^2)$ vs. $1/T_m$ by Kissinger equation for PEEK

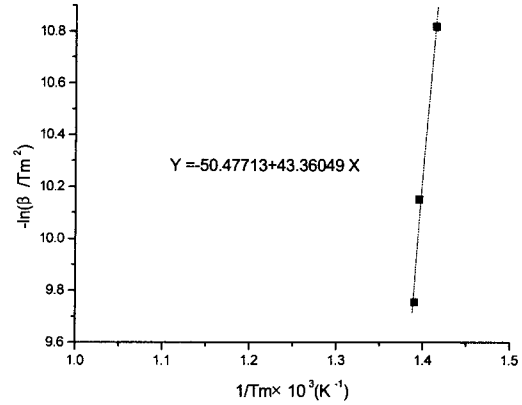


그림 9 Viton의 Kissinger 식에 의한 $-\ln(\beta/T_m^2)$ 와 $1/T_m$ 의 관계
 Fig. 9 Plots of $-\ln(\beta/T_m^2)$ vs. $1/T_m$ by Kissinger equation for Viton

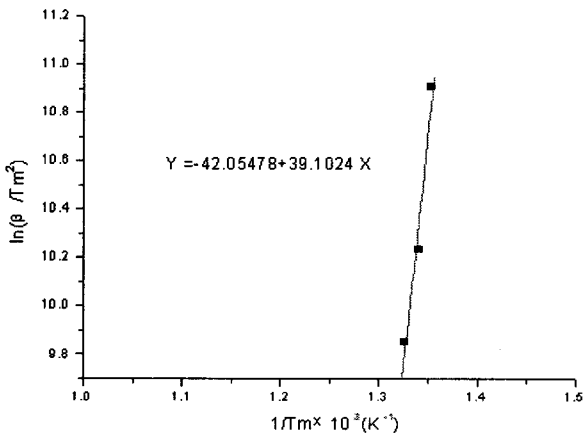


그림 7 Polysulfone의 Kissinger 식에 의한 $-\ln(\beta/T_m^2)$ 와 $1/T_m$ 의 관계
 Fig. 7 Plots of $-\ln(\beta/T_m^2)$ vs. $1/T_m$ by Kissinger equation for polysulfone

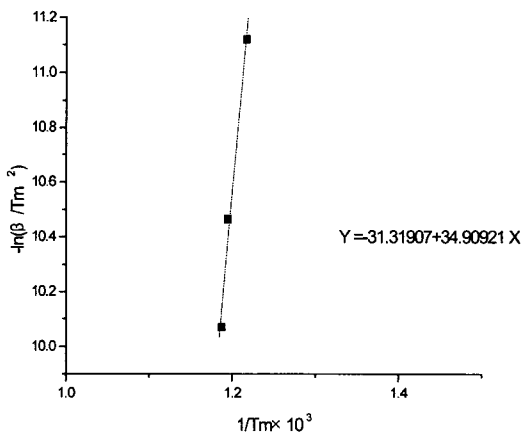


그림 8 Polyimide의 Kissinger 식에 의한 $-\ln(\beta/T_m^2)$ 와 $1/T_m$ 의 관계
 Fig. 8 Plots of $-\ln(\beta/T_m^2)$ vs. $1/T_m$ by Kissinger equation for polyimide

표 2 고분자 재료의 활성화에너지

Table 2 Activation energy of polymeric materials

시료명	활성화 에너지 (Ea)	
	kJ/mol	eV
PEEK	346.35	3.59
Polyimide	290.24	3.00
Polysulfone	372.98	3.86
Viton	360.50	3.73

4.2 수명예측 조건 설정

일반적으로 원자력 발전소에 사용되는 고분자 재료의 수명은 40년 이상을 보증해야 한다. 이러한 내열 수명을 보증하기 위해서 가속열화 시험을 통해서 이를 입증해야 하며, 우선 40년 이상에 상당하는 가속 가열 온도 및 시간이 정해져야 한다. 본 연구에서는 한전의 국내 원자력 발전소 구매 규격 [15]에 따라 발전소 가동 중의 재료의 노출온도 즉, 최고 사용 온도를 90℃, 수명은 41년이라고 설정하였다. 이러한 실제 현장 조건에 상당하는 열화 조건을 구하기 위해 가속 열화 온도를 120℃로 설정하였으며 이미 구하여진 활성화 에너지 값을 다음 아레니우스 식 (11)에 대입하여 41년 동안에 해당하는 가속열화 시간을 구하였다.

$$t_1 = t_2 \times \exp[(E_a/R) \times (1/T_1 - 1/T_2)] \quad (11)$$

t_1 = 온도 T_1 에서의 가속열화 시간

t_2 (90℃) = T_2 (=359,300 h, 41년)에서의 사용시간

E_a = 활성화 에너지 (eV)

R = 볼츠만 상수 (=0.00008617)

T_1 = 가속열화 온도 (=120℃)

T_2 = 연속 사용 온도 (=90℃)

표 2의 활성화 에너지 값을 위의 식에 대입하여 계산한 결과 실제 현장 조건인 90℃에서 41년 동안에 해당하는 열열화 조건을 실험실에서 120℃로 가속열화 했을 때로 환산하면 PEEK 56.3 h, polyimide 238, polysulfone 29.1 h, Viton 40 h의 열화 시간을 얻었다.

4. 결 론

본 논문에서는 질량감소를 시간과 온도의 함수로 측정하는 실험실적 기술인 열중량 분석을 이용하여 절연재료의 장기 내열 수명 평가를 하였다. 특정온도 범위에서 질량감소 곡선이 승은 속도에 따라 달라지므로 이로부터 활성화 에너지를 구하고 재료의 예측수명에 대한 열화온도와 시간을 구현하였다.

원자력 발전소의 동에 전원을 공급하는 전기관통구설비의 절연재료로 사용되는 PEEK, polysulfone, polyimide 및 Viton의 4 종류의 고분자 절연재료에 대하여 장시간 내열수명예측 평가 방법으로서 열중량 감소법을 사용하여 90℃에서 41 년간의 실제 환경 조건에 상당하는 가속열화 조건을 값을 구한결과, 기존의 아레니우스 식을 기초로 한 기계적 특성평가에 의한 내열수명예측법과는 달리 재료의 열분해 반응에 따른 Kissinger 속도식에 따라 파라미터 값 $-\ln(\beta/Tm2)$ 과 $1/Tm$ 을 도시한 직선 그래프의 기울기로부터 활성화 에너지를 계산한 값은, 재료가 모두 직선을 나타낸 실험 결과를 얻었다. 이들의 직선 그래프로부터 기울기의 편차가 거의 없는 비교적 정확한 활성화 에너지 값을 구할 수 있었으며, 이 값으로부터 40년 이상에 상당하는 가열열화 온도 및 시간을 설정하여 제시하였다.

이 연구 결과로부터 4종의 절연재료 중 내열수명은 polyimide가 가장 적은 값을 보였으며, PEEK, Viton, polysulfone의 순으로 평가되었다. 이 방법을 사용하면 실험실적 측정값으로부터 고분자 재료의 배합비 및 가공조건 등에 따라서 달라질 수 있는 열적 안정성을 단시간 내에 평가하여 내열성이 우수한 복합재료를 설계하는 데 유용한 자료로 활용될 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] R. R. Dixon, "Thermal aging predictions from an Arrhenius plot with only one data point", IEEE Trans. Electrical Insulation, Vol. EI-15, pp. 331-334, 1980
- [2] IEEE Std 383-1974, IEEE Standard for Type Test of Class 1E Electric Cables, Field Splices, and Connections for Nuclear Power Generating Stations
- [3] IEEE Std 98-1984, IEEE Standard for Preparation of Test Procedures for the hermal Evaluation of Solid Electrical Insulating Materials
- [4] IEEE Std 101-1972, IEEE Guide for the Statistical Analysis of Thermal Life Test Data
- [5] IEC 216-2, Guide for the Determination of Thermal Endurance Properties of Electrical Insulating materials
- [6] K. Anandakumaran, S. Barreca, W. Seidl and P. V. Castaldo, "Nuclear qualification of PVC insulated cables", IEEE Trans. DEI, Vol. 8, pp. 818-825, 2001
- [7] Y. S. Cho et al., "Thermal degradation kinetics of PE by the Kissinger equation", Material Chemistry and Physics Vol. 52, p. 94, 1998
- [8] J. Y. Lee, M. J. Shim and S. W. Kim, "Thermal degradation of epoxy/natural zeolite composites", J. Materials Science, Vol. 36, pp. 4405-4409, 2001

- [9] B. Z. Li, J. Y. Yu and S. W. Lee, "Crystallizations of poly(ethylene terephthalate co ethylene isophthalate)", Polymer, Vol. 40, pp. 5371-5375, 1999
- [10] S. J. Park, H. C. Kim, "Thermal stability and toughening of epoxy resin with polysulfone resin", J. Polymer Science Part B-Polymer Physics, Vol. 39, pp. 121-128, 2001
- [11] L. Abate, S. Calanna and P. Di, "A Kinetic study of the thermal degradation of some poly(arylenether)s containing naphthalene units", Polymer, Vol. 41, pp. 959-964, 2000
- [12] T. Hirata, T. Kashiwagi and J. Brown, Macromolecules, Vol. 18, p. 1410, 1995
- [13] J. D. Cooney and D. M. Wiles, J. Applied Polymer Science, Vol. 28, p. 2887, 1983
- [14] R. B. Prime, "Thermal Characterization of Polymeric Materials", Academic Press, New York, 1980
- [15] Purchasing Specification of Uljin 5, 6 Nuclear Power Plant, KEPCO

저 자 소 개



심 대 섭 (沈 大 燮)

1951년 1월 15일 생. 1976년 인하대 고분자공학과 졸업. 2000년 단국대 대학원 화학공학과졸업(공박). 현재 한국전기연구원 전기시험연구소 개발시험실 책임기술원
Tel:031-420-6057
E-mail : dsshim@keri.re.ke



박 성 군 (朴 聖 均)

1954년 10월 13일 생. 1977년 연세대 전기공학과 졸업. 1996~2001 한국전기연구원 개발시험실장. 현재 한국전기연구원 시험평가센터장
Tel : 031-420-6050
E-mail : skpark@keri.re.kr



이 철 호 (李 喆 浩)

1959년 11월 19일 생. 1982년 인하대 고분자공학과 졸업. 2000년 서울시립대 대학원 화학공학과 졸업(공박). 현재 평일산업(주) 기술연구소장
Tel: 031-420-6670
E-mail: lch@pyungil.co.kr