

전기기기의 발열을 고려한 다단계 가속열노화 방법

임병주^{*†} · 박창대^{*} · 정경열^{*}

Multi-phase Accelerating Test Method of Thermal Aging Considering Heat Generation of Electric Equipment

Byung-Ju Lim^{*†}, Chang-Dae Park^{*}, Kyung-Yul Chung^{*}

Key Words : Thermal Aging(열노화), Accelerating Test Method(가속시험방법), Multi-phase Method(다단계 방법), Electric Equipment(전기기기), 발열(Heat Generation)

ABSTRACT

Thermal aging test is performed to qualify the life time of equipment in thermally aged condition. Due to long life time more than 10 years like as in power plant, the equipment is subjected to the accelerated thermal aging condition which is able to shorten the long aging test period by increasing aging temperature. Normally, conservatism of thermal aging test causes to impose unbalanced and excessive thermal load on components of the equipment, and deformation and damage problems of the components. Additionally, temperature rise of each component through heat generation of the electric equipment leads to long-term problem of the test period.

Multi-phase accelerating aging test is to perform thermal aging test in multiple aging conditions after dividing into groups with various components of equipment. The groups might be classified considering various factors such as activation energy, temperature rise, glass transition temperature and melting temperature. In this study, we verify that the multi-phase accelerating aging test method can reduce and equalize the thermal over load of the components and shorten aging test time.

1. 서 론

1.1. 가속열노화시험의 이론적 배경

검증 수명이 10년 이상 되는 긴 시간 동안 사용되는 기기들의 열적 환경에 대한 검증을 위해서 환경 온도를 상승시켜 시험 시간을 단축시킬 수 있는 가속열노화시험 방법을 사용한다. 가속열노화시험의 이론적인 배경은 아레니우스 방정식을 토대로 도출되었다.⁽¹⁻²⁾ 아레니우스 방정식은 온도에 따른 화학반응율의 관계를 나타내는 방정식으로, 온도가 상승할수록 분자들의 운동에너지가 상승하기 때문에 반응율도 증가한다는 것을 수식화한 것이다. 식 (1)에 아레니우스 방정식을 제시하였다.

$$r = A \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (1)$$

여기서,

r : 화학반응율(#/s), A : 상수

E_a : 활성화에너지(eV), T : 온도(K)

k : 볼츠만 상수(1.38×10^{-23} J/K)

이다.

식 (1)의 양변에 자연로그를 취하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\ln r = \ln A - \frac{E_a}{kT} \quad (2)$$

여기서 서로 다른 온도 조건 T_1 과 T_2 가 있을 경우 두 조건을 식 (2)에 각각 대입 후 정리하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

* 한국기계연구원 (Korea Institute of Machinery and Materials)

† 교신저자(Corresponding Author), E-mail : bzoo77@kimm.re.kr

$$\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right) = -\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right) \quad (3)$$

식 (1)에서 화학반응율의 역수는 화학반응시간을 의미하므로 식 (3)을 다시 정리하면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right) = \frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right) \quad (4)$$

식 (4)에 의해 서로 다른 환경온도 및 화학반응시간 조건 간의 등가관계를 얻을 수 있다. 기기의 노화 관점에서 화학반응시간은 온도 환경에 의해 재료가 변형되는 시간으로서 기기의 노화가 진행되는 시간으로 볼 수 있다. 따라서 낮은 온도 조건에 오랜 시간 사용되는 기기의 경우 식 (4)를 통해 더 높은 온도에서 시간을 단축시켜 동일한 노화 환경을 인가하여 열노화시험을 수행할 수 있다.⁽³⁾

1.2. 일반 가속열노화시험의 한계

기기를 구성하는 부품들은 크게 금속재료와 비금속재료로 나눌 수 있다. 두 재료들이 동일한 열적 환경에 노출되었을 경우 시간의 경과에 따라 금속보다는 비금속재료가 더 빠르게 노화되어 기기의 정상 작동에 문제를 발생시킨다.⁽⁴⁾ 따라서 기기의 열노화시험에서 주요 노화 대상은 기기를 구성하는 비금속재료의 부품들이다.

현재 일반적으로 열노화 시험기관에서 주로 적용하고 있는 가속열노화시험의 절차 및 방법은 다음과 같다.

- I. 기기의 검증 온도 및 시간 설정
- II. 기기의 비금속재료 부품리스트 작성
- III. 각 비금속재료들의 활성화에너지 값 조사
- IV. 아레니우스 방정식에 I의 온도와 시간, III의 활성화에너지 중 가장 낮은 값을 대입하여 가속열노화 환경 조건 도출⁽⁵⁾
- V. 비금속재료의 유리전이온도, 녹는점 및 시험시간을 고려하여 가속열노화환경 선정

위 절차에서 가장 낮은 활성화에너지 값을 사용하는 이유는 활성화에너지가 낮을수록 상대적으로 쉽게 노화가 진행되기 때문이다. 즉, 기기를 구성하는 비금속재료들의 활성화에너지가 서로 다를 경우 가장 낮은 활성화에너지 값을 사용하는 것이 가장 보수적인 환경에서 열노화 시험을 수행한 것이 된다. 가속노화시험의 환경 온도 조건을 결정할 때 비금속재료의 변형이나 손상을 방지하기 위해 유리전이온도와 녹는점을 고려하여 선정한다.⁽⁶⁾

만일 스위치류, 모터, 솔레노이드 액츄에이터 등의 전기기

기와 같이 기기 자체에서 열이 발생할 경우 식 (5)와 같이 온도상승(ΔT) 을 고려하여 아레니우스 방정식을 적용한다.

$$\ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right) = \frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1 + \Delta T}\right) \quad (5)$$

전기 기기에 일반 가속열노화시험을 적용시켜보면 다음과 같다. 해당 기기가 서로 다른 비금속재료로 이루어져 있으며 각 재료에 대한 활성화에너지 값과 최고사용온도가 표 1과 같다. 본 기기의 비금속재료는 임의로 선정하였고 활성화에너지와 최대온도 값은 재료 데이터베이스를 통해 얻었다. 일반적으로 비금속재료의 활성화에너지 값은 약 0.5 eV~3.0 eV 범위에 있으며 동일한 재료라도 제조사 및 제조환경에 따라 다르다.^(7~8)

위 전기 기기를 표 2와 같이 원자력 발전플랜트의 환경과 유사한 조건인 45 °C 온도에서 30년(10,950 일) 동안 사용한다고 했을 때 그리고 동일한 조건에서 기기의 자체 발열에 의해 20 °C 온도상승이 될 경우를 고려하여 각각 앞에서 제시한 절차와 방법에 따라 식 (4)에 대입하면 표 3과 같은 다양한 가속열노화환경을 도출할 수 있다.⁽⁹⁾ 표 3에서 가속 환경조건에서 온도가 낮을수록 온도 변화에 따라 가속시간의 변화량 및 온도상승에 의한 가속시간 증가량이 커지는 것을 알 수 있다.

표 3의 가속환경조건들 중 표 1에서 제시한 최대온도 값을 고려하여 120 °C의 온도에서 노화시킨다고 가정할 때, 기기의 각 부품에 대한 검증 수명을 활성화에너지를 고려하여 역으로 계산하면 표 4과 같은 결과를 얻는다. 부품 E의 활성화에너지 값인 0.8 eV를 기준으로 가속열노화환경을 계산하였기 때문에 활성화에너지가 0.8 eV를 초과하는 부품 A~D의 경우 활성화에너지 값에 따라 각 검증수명은 모두 다르며 그 값은 30년 이상이다.

여기서 검증수명과 활성화에너지와의 관계를 살펴보면 다음과 같다. 식 (4)에서의 왼쪽 항에서 t_2 를 부품의 검증수명, t_1 을 가속노화시간(41.86 일) 그리고 오른쪽 항에서 T_1 은

Table 1 Components lists of example equipment

Components List	Material	Activation Energy(eV)	Maximum Applicable Temperature(°C)
A	Acrylic	1.1	155
B	Polyester-imide	1.5	240
C	Polyamide-imide	2.0	130
D	Epoxy	1.3	120
E	Polyester Laminate	0.8	130

Table 2 Assumptions of environmental conditions

Environmental Conditions	Assumption Value
Environmental temperature(°C)	45
Qualification time(years)	30
Temperature rise(°C)	Case I : 0°C, Case II: 20°C
Activation Energies of Components	Refer to Table 1

Table 3 Thermal aging conditions of example equipment

Accelerating Temp.(°C)	Accelerating Time(days)	
	Case I (Without temp. rise)	Case II (Temp. rise of 20°C)
100	148.4	883.73
110	77.53	435.52
120	41.86	235.15
130	23.3	130.91
140	13.35	74.97
150	7.85	44.08
170	2.92	16.38
190	1.81	6.63

Table 4 Qualified life of the components after thermal aging test

Components List	Qualified Life(days)	
	Case I	Case II
A	88,315	46,231
B	1,428,398	315,478
C	46,330,418	3,479,445
D	355,175	120,768
E	10,950	

가속노화온도(120 °C), T₂는 일반환경온도(45 °C)라고 하면 부품 A와 부품 E에 관하여 정리하면 식 (6)과 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ln\left(\frac{t_A}{t_1}\right) = \frac{E_A}{k} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (6)$$

$$\ln\left(\frac{t_E}{t_1}\right) = \frac{E_E}{k} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (7)$$

여기서 t_A와 t_E는 각각 부품 A와 부품 E의 검증수명이다. 두 식을 빼면 식 (8)과 같이 나타낼 수 있는데, 부품 E를 기준으로 두 부품의 검증수명 비를 초과율이라고 정의할 때 초과율과 활성화에너지는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\ln\left(\frac{t_A}{t_E}\right) = \frac{(E_A - E_E)}{k} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (8)$$

위 식에서 초과율은 활성화에너지의 차이에 따라 지수적으로 증가함을 알 수 있다. 기기의 발열에 의한 온도상승을 고려할 경우 해당 초과율은 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다. 앞의 식과 같이 초과율은 활성화에너지 차에 따라 지수적으로 증가하는데 온도상승 값이 커질수록 초과율 값은 낮아짐을 알 수 있다.

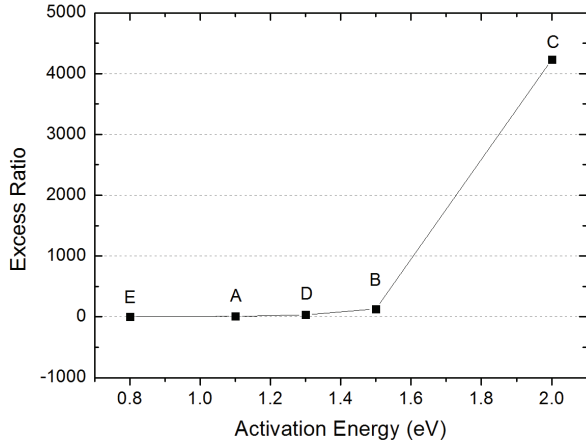
$$\ln\left(\frac{t_A}{t_E}\right) = \frac{(E_A - E_E)}{k} \left(\frac{1}{T_2 + \Delta T} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (9)$$

표 4의 결과를 이용하여 활성화에너지와 초과율의 관계를 그래프로 나타내면 그림 1과 같다. 앞에서 설명한 바와 같이 수명 초과율은 활성화에너지에 따라 지수적으로 증가하고 있으며, 20 °C 온도상승이 있을 경우 온도상승이 없을 때에 비해 상대적으로 수명 초과율 값은 감소하였다.

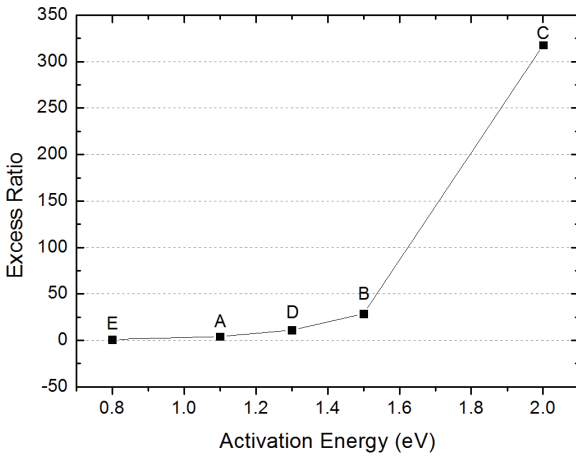
일반 가속열노화시험에서 적용하는 보수적인 계산에 의한 방법은 활성화에너지 차이에 의해 각 부품들에 인가된 열적 부하 차이가 크기 때문에 실제 현장 설치된 환경에서의 열적 노화 조건과 매우 다르다. 만일 일반 가속열노화시험 후 기기의 작동성 문제가 발생하였을 경우, 다양한 원인 중 부품의 열적 내구성을 초과한 과도한 부하 및 부품별 불균일한 부하도 그 원인일 수 있다. 이러한 보수적인 시험은 비금속 재료의 사용 주기를 단축시켜 유지관리 비용을 증가시키며, 제조사가 열적으로 과도한 사양의 비금속재료를 사용하게 하여 기기 단가를 증가시킬 수 있다.

그리고 앞의 120 °C 가속노화온도 조건에서 발열이 없을 때 노화시간은 41.86 일이지만 20°C 온도상승을 고려하면 235.15 일로 무려 5.1 배가 증가하였다. 시험시간을 줄이기 위해서는 노화온도를 상승시켜야 하는데 부품의 최고사용온도를 초과하면 안 되기 때문에 적용하기 힘들다. 가속열노화 시험은 기간이 길어질수록 비용 부담이 증가하기 때문에 단축시킬 필요가 있다.

본 연구에서는 기존 가속열노화시험 시 보수적 계산 방법으로 발생하는 부품들의 과도한 열적 부하를 줄이기 위해 새로운 가속열노화방법을 제시하였다. 또한 새로운 노화시험 방법을 통해 전기 기기의 발열로 인한 가속열노화시험 시간의 장기화 문제를 해결할 수 있는 방안을 제시하였다.



(a) Without temperature rise



(b) Temperature rise of 20 °C

Fig. 1 Excess ratio of qualified life for each component

2. 다단계 가속열노화시험 방법

일반적인 가속열노화시험에서 부품들 간에 불균일한 열적 부하가 인가되는 가장 큰 원인은 각 부품별 활성화에너지가 서로 다름에도 불구하고 아레니우스 관계식에서 대표 활성화에너지로 가장 낮은 값을 선정하는데 있다. 노화 실험의 보수성 측면에서 합리적이지만 불균일한 열적 부하에 의해 비금속재료의 변형, 수명초과로 인한 기능 상실 등 의도치 않은 시험 결과를 초래할 수 있다.

식 (8)과 식 (9)에서 알 수 있듯 부품 간 활성화에너지 차이가 클수록 검증수명의 차이는 더욱 커진다. 따라서 각 부품을 그룹으로 묶어 그룹간 활성화에너지 차이를 줄이면 그룹간의 열적 부하 차이를 줄일 수 있다. 다단계 가속열노화 시험 방법의 핵심은 부품의 열적부하를 줄이기 부품의 사양을 고려하여 몇 개의 그룹으로 분리한 뒤 각 그룹별 서로 다른 여러 단계의 환경조건에서 부품을 노화시키는 것이다. 구체적으로 설명하면 기기의 부품을 단일 환경조건에서 노화시키지 않고 활성화에너지, 온도상승 값, 유리전이 온도, 녹

Table 5 New groups and conditions for thermal aging test

Group	Accelerating Thermal Aging Conditions (O: Aging, X: Non-aging)					
	1	2	3	4	...	n
I	O	O	O	O	O	O
II	X	O	O	O	O	O
III	X	X	O	O	O	O
IV	X	X	X	O	O	O
...	X	X	X	X	O	O
N	X	X	X	X	X	O

는점 등이 서로 유사한 부품끼리 그룹으로 묶어 여러 개의 그룹으로 나눈 뒤, 노화 온도와 시간이 다른 여러 단계의 환경조건으로 분리시키는 방법을 사용한다. 그룹은 여러 개의 부품이 아니라 하나의 부품이 될 수도 있으며, 이는 각 부품들의 재료 특성을 고려하여 결정한다.

표 5에 다단계 가속열노화시험을 위한 그룹과 환경조건을 관계를 일반화하여 나타내었다. 어떤 기기 내 부품들을 N개의 그룹으로 분리하면 같은 개수의 가속노화시험 환경조건이 생성된다. 가속노화시험 시 환경 1부터 시작하여 차례대로 환경 n까지 노화조건을 변화시키면서 시험을 수행한다. 먼저 시험하는 환경일수록 노화 온도가 더 높다. 그룹의 순서는 활성화에너지가 낮을수록, 부품의 온도상승 값이 클수록 그룹 I에 가까운 상위그룹에 속한다. 표 5에서 칸 내에 O 표시가 되어있는 곳은 해당 환경조건에서 노화를 시키며, X 표시된 곳은 해당 환경조건에서 노화시키지 않는다. 그룹 I의 경우 환경 1부터 환경 n까지 N번의 서로 다른 노화조건에서 차례대로 노화를 시키지만 그룹 N은 환경 n에서만 노화시킨다. 따라서 각 그룹의 여러 노화 환경 조건에 대한 검증수명을 계산하면 최종 검증수명이 되며 이를 수식으로 나타내면 식 (10)과 같다.

$$t_N = \sum_{e=1}^n t_e e^{\left\{ \frac{E_N}{k} \left(\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_c} \right) \right\}} \quad (10)$$

여기서 t_N 와 E_N 는 N번째 그룹의 검증수명과 활성화에너지, t_e 와 T_e 는 각각 e번째 가속열노화 시간 및 온도 그리고 T_c 은 일반 환경온도를 나타낸다.

3. 다단계 가속열노화시험의 적용

1장에서 제시한 전기기기 샘플에 대해 표 1의 활성화에너지와 표 2의 환경조건을 동일하게 적용하여 다단계 가속열노화시험 방법을 적용하였다. 표 1에서 제시한 5개 부품의 활성화에너지는 서로 다르며 0.8 eV ~ 2.0 eV 범위에 있다. 활성화에너지 값이 서로 비슷한 부품들끼리 묶어 세 개의 그

Table 6 New group considering on activation energy

Group	Components	Activation Energy(eV)	Limit Temperature(°C)
I	A, E	0.8	130
II	B, D	1.3	120
III	C	2.0	130

Table 7 Phased accelerating thermal aging condition of the groups without temperature rise

Group	Phased Aging Condition					
	Step 1		Step 2		Step 3	
	Temp. p.(°C)	Time (d)	Temp. (°C)	Time (d)	Temp. (°C)	Time (d)
I	125	29.94	120	1.21	83.5	4.2
II	-	-				
III	-	-	-	-		

Table 8 Phased accelerating thermal aging condition of the groups with temperature rise of 20 °C

Group	Phased Aging Condition					
	Step 1		Step 2		Step 3	
	Temp. (°C)	Time (d)	Temp. (°C)	Time (d)	Temp. (°C)	Time (d)
I	125	158.4	120	19.96	108.77	4.2
II	-	-				
III	-	-	-	-		

Table 9 Qualified life and excess ratio in multi-phase thermal aging condition

Group	Components List	Qualified Life(days) (Excess Ratio of Qualified Life)	
		-	Temp. rise of 20°C
		I	A
	E	10,950 (1)	
II	B	42,832 (3.91)	50,774 (4.64)
	D	10,950 (1)	
III	C	10,950 (1)	

그룹으로 분리하면 표 6과 같이 구분될 수 있다. 여기서 각 그룹의 활성화에너지는 기존 방법과 동일하게 그룹 내 부품 중 가장 낮은 활성화에너지 값을 사용한다. 또한 표 1에서 제시한 최대온도 값을 고려하여 각 그룹에서 가장 낮은 최대온도를 제한온도로 설정한다.

온도상승이 없는 조건에서 노화환경 1단계는 1,2절의 노화온도와 동일한 125 °C, 2단계 120 °C, 그리고 3단계는 83.5 °C로 점차 노화온도를 낮추어 환경조건을 설정하면 다단계 가속노화환경을 표 7과 같이 정리하여 나타낼 수 있다. 각 단계별 가속 환경온도는 그룹의 제한온도를 고려하여 설정하였다. 그러나 단계 3의 경우는 그룹 3의 제한온도인 130 °C를 사용하지 않고 더 낮은 온도를 사용하였다. 그 이유는 가속열노화시험 관련 규정에서 최소 가속열노화온도를 최소 100시간 이상으로 권고하고 있으므로 본 시간을 고려하여 온도를 설정하였기 때문이다.⁽¹⁰⁾ 본 환경조건에서 그룹 I~III의 경우 각각 35.35 일, 5.41일, 4.2일 동안 가속열노화시험을 수행하게 된다. 20 °C의 온도상승을 고려할 경우 단계별 노화온도를 표 7과 동일하게 설정할 때 가속열노화시험의 환경조건을 표 8과 같이 제시하였다. 20 °C 온도상승의 경우 그룹 I~III의 총 노화시간은 각각 182.56 일, 24.16일 그리고 4.2일이다.

표 7과 표 8에서 제시한 다단계 노화환경에서 기기를 가속열노화시켰을 때 검증수명과 수명 초과율을 계산해 보면 표 9와 같다. 1,2절에서 가속열노화 시 검증수명의 초과율은 온도상승이 없을 때 약 4,200 그리고 20 °C 온도상승 일 때 약 320인 반면 다단계 노화기법을 적용하여 3개의 그룹으로 분리하였을 때 초과수명은 모두 10 이하로 감소하였으며, 가속열노화시간은 온도상승이 없을 경우 15.6 %, 20 °C 온도상승일 때 22.4 % 감소하였다. 결국 다단계 노화환경에서는 각 부품에 대한 열적부하가 단일 노화환경보다 균등하게 인가되며 가속열노화시간도 단축시킬 수 있다는 결과를 얻을 수 있다.

다단계 가속열노화시험을 위한 그룹의 분리와 가속노화온도 및 시간 설정 시 기기의 기능, 각 부품들의 사양, 시험 설비 등을 고려하여 가속노화환경을 최적화 할 수 있기 때문에 일반 가속열노화시험 방법보다 시험자가 결정할 수 있는 변수가 많다.

5. 결론

일반 가속열노화시험의 보수적인 적용에 의해 발생하는 기기의 과도하고 불균일한 열적 부하 및 노화 시간의 장기화 문제를 해결하기 위해 다단계 가속열노화방법을 제시하였다. 기존 가속열노화시험과 다단계 가속열노화시험의 비교를 위해 5개의 서로 다른 비금속재료를 갖는 전기 기기를 제시하고 두 가속열노화시험 방법을 적용하였다.

45 °C에서 30년 동안 열적으로 노화되는 일반환경에 대해 120 °C의 가속 환경조건에서 시험을 수행할 경우 가장 낮은 활성화에너지 값인 0.8 eV를 갖는 비금속재료를 제외하고 각 재료의 검증수명은 30년을 초과하였다. 목표 검증수명에

대한 초과수명의 비를 수명 초과율이라고 정의하면 그 값은 활성화에너지 증가에 따라 지수적으로 증가하였으며, 발열이 없는 경우 그리고 발열에 의해 20 °C의 온도상승 된 경우를 고려하면 수명 초과율은 계산하면 각각 4231.1, 317.8 이다. 같은 열적 노화환경에서 사용에서 대해 다단계 가속열노화 방법을 적용할 경우 수명 초과율은 10 이하로 감소하였고 가속열노화시간은 온도상승이 없을 경우 15.6 %, 온도상승이 있을 경우 22.4 % 감소하였다.

본 연구를 통해 다단계 가속열노화시험 방법은 기기의 과도하고 불균일한 열적 부하를 줄이고 노화 시간의 장기화 문제를 해결할 수 있음을 확인하였다. 본 다단계 시험방법은 활성화에너지, 온도상승, 최대사용온도 등의 다양한 인자에 영향을 받으므로 향후 다양한 전기 기기를 대상으로 실제 적용하여 방법론을 구체화 할 필요가 있다.

후 기

본 연구는 2013년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2010T100100537)

참고문헌

(1) S. Schuller, P. Schilinsky, J. Hauch, C.J. Brabec, 2004, "Determination of the degradation constant of bulk heterojunction solar cells by accelerated lifetime

measurements," *Appl. Phys. A* 79, pp. 37~40.

(2) M. Celina, K.T. Gillen, R.A. Assink, 2005, "Accelerated aging and lifetime prediction: review of non-Arrhenius behaviour due to two competing processes," *Polym. Degrad. Stab.* Vol. 90, pp. 395~404.

(3) 우창수, 박현성, 최병익, 양신추, 장승엽, 김은, 2009, "가속 열노화시험을 통한 레일패드 사용수명 예측," 한국철도학회 학술발표대회논문집, pp. 1010~1015

(4) 임병주, 박창대, 정경열, 2011, "Procedure and Method of Equipment Qualification for Solenoid-Operated Valves Used in Nuclear Power Plants," 대한기계학회논문집 A권, 제35권 제6호, pp. 683~691.

(5) 김태원, 이경호, 1998, "전자 구성품 신뢰도 평가 및 활성화 에너지 예측," 대한산업공학회 추계 학술대회논문집, pp. 100~104.

(6) 이명현, 이정훈, 김창은, 김대준, 오남식, 1998, "유기물 첨가제 조성에 따른 Al₂O₃ 그린 테이프의 유리전이온도 및 저장탄성률 변화," 한국세라믹학회, 제35권 제7호, pp. 726~732.

(7) EMA+2005, GLS Enterprises, Inc.

(8) Elena V. Bystritskaya, Tatyana V. Monakhova, Victor B. Ivanov, 2013, "TGA application for optimising the accelerated aging conditions and predictions of thermal aging of rubber, *Polymer Testing*," Vol. 32, pp. 197~201

(9) 조재원, 이준구, 허섭, 구인수, 홍석봉, 2008, "원전 극한환경적용 센서 통신망 구조," 대한전기학회 학술대회논문집, pp. 540~541

(10) IEEE Std. 323, 2003, Standard for Qualification Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations.