

## 아이링 모델에 기초한 MLCC 열화데이터의 신뢰성 해석

### Reliability Analysis of MLCC Degradation Data based on Eyring Model

김종철\* , 김광섭\* , 차종범\*\*

Jong-Cheul Kim\* . Gwang-Sub Kim\* . Jong-Bum Cha\*

Accelerated degradation test (ADT) can be a useful tool for assessing the reliability when few or even no failure are expected in an accelerated life test.

In this paper, MLCC (Multilayer Ceramic Capacitors), a sort of passive components which have large capacitance(X7R -55°C~125°C) have been tested, and least-square analyses are used to illustrate our approach in which amount of degradation of a DUT following log-normal distribution. We assumed a simple and useful linear model to describe the amount of degradation over time subjected to different voltage levels applied. Tests for linearity of the performance-time relationship, and provide tests for how well the assumptions hold. Also, by using Eyring Model, MLCC's mean life time is assessed.

가속열화시험은 가속수명시험시에 고장 개수가 적거나 심지어 고장이 발생하지 않는

경우에도 부품의 신뢰성을 평가할 수 있는 유용한 수단이 되고 있다. 본 연구에서는, 능동소자로 높은 유전용량을 갖는 적층 세라믹 콘덴서(X7R -55°C ~ 125°C)에 대한 가속열화시험을 실시하고, 정격온도의 최대치에서 다른 배율의 전압을 인가하여 단순 선형회귀에 의한 특성치의 경시변화를 설명한다고 가정하였다. 최소제곱법을 적용하여 시료가 대수정규분포를 따를 때의 열화량을 설명한 후, 특성치-시간간의 선형관계 및 대수정규분포의 독립성을 검정하여 가정의 적절성을 검정하였다. 마지막으로 아이링모델에 의한 평균수명을 평가하였다.

\*: 아주대학교 산업정보시스템공학부

\*\* : 전자부품연구원

## 1. 서론.

MLCC는 전자제품에서 필요로 하는 전류가 흐를 수 있도록 정류를 하거나, 소량의 전기를 저장하는 역할을 하는 핵심 범용 부품으로서 거의 모든 전자제품의 전자회로에 수십 개에서 수백 개까지 필수적으로 사용되고 있다. 이런 이유로 현재 MLCC의 신뢰성은 전자기기에 있어서 매우 중요시되고 있다.

국내 원자력 발전소의 제어장치에 소요되는 전기전자부품의 신뢰성은 시스템의 목적상 매우 높은 신뢰성을 보장받아야 사용이 가능하며, 단일 부품의 고장에 의해서 시스템에 미칠 수 있는 부정적 영향은 매우 심각하여 개별부품의 높은 신뢰성이 요구되고 있는 실정이다. 이러한 요구 신뢰성을 검증하기 위한 방법으로는 여러 방법이 쓰이고 있으나, 시간적 제약과 비용적 측면을 고려하여 스트레스 인자를 가속하여 고장이나 열화를 유발하는 시험법이 널리 사용되고 있다. 가속화시험의 주된 목적은 짧은 시험시간 동안에 제품수명의 자료를 얻은 후 적절한 통계적 방법을 통하여 사용상태에서의 제품수명을 추정하는 시험방법으로 시험시간에 비해 비교적 고장 발생이 적은 제품의 경우와 고장이 시험시간동안에 전혀 발생하지 않을 경우에는 가속수명시험(Accelerated Life Test ; ALT)의 활용보다 가속열화시험(Accelerated Degradation Test ; ADT)을 통한 분석이 더 효과적이다.

가혹한 스트레스와 사용조건하에서 시간의 경

과에 따른 제품성능의 열화 또는 성능저하 현상에 대한 모형화 및 시험의 자료분석에 활용되는 가속열화시험은 시험장비나 비용의 제약으로 인하여 특정시각마다 간헐적으로 특성치를 측정하는 경우에도 제품수명을 추정하고자 할 때 유용하게 사용될 수 있다. 따라서 고도의 신뢰성이 요구되는 적층 세라믹 커패시터(이하 MLCC)와 같은 고신뢰성 제품에서는 아주 유용한 시험방법이라고 할 수 있겠다.

## 2. 시험대상 MLCC

본 연구의 기종은 고유전율계 제품으로 -5 $^{\circ}$ C~125 $^{\circ}$ C 범위에서 사용 가능하여 동일계의 타 기종에 비해 열 스트레스에 대한 신뢰도가 높아 산업용 사용에 적합하며 일반 가정용까지 광범위하게 사용될 수 있다. 이러한 X7R계 재료를 이용하는 장점으로는

-유전율의 변화가 안정됨

-X7R계는 BaTiO<sub>3</sub> 원료입자가 소성후 성장이 크게 일어나지 않는 Core-shell 구조로 소성후 Grain의 변화가 거의 없음

-기계적, 열적 강도가 우수함 등을 들 수 있다.

X7R계는 기본조성에 기인하여 Grain의 성장이 없으므로 내부전극 Ni metal과 유전체 세라믹의 동시 소성 과정에서 발생할 수 있는 소성 불량 (Crack, delamination 등의 중대결함) 발생 위험이 거의 없다. 그리고 소성 후 Grain size가 매우 적으므로 기계적, 열적 강도가 매우 우수하다. 또한 전계가 인가되는 Active 층간에 많은

수의 Grain이 존재하게 되어 내전압 특성을 향상시킬 수 있다는 특성이 있다. 고장의 형태로는 단락, 단선과 같은 파국고장과 경시적으로 열화되어 고장으로 판정되는 열화고장으로 나눌 수 있으나, 본 연구에서의 MLCC 제품은 고온에서 매우 안정화 되어 있다는 점과 X7R계의 소성과정의 불량인 Crack, Delamination의 위험이 극히 적은 관계로, 전기적 스트레스에 의한 고장의 유발에 초점을 맞추었다.

기존의 MLCC의 고장 원인이나 제품의 사용중에 발생할 수 있는 MLCC의 고장 메커니즘을 기존의 연구에서는 Migration, Avalanche Breakdown, Crack 등으로 크게 세 가지로 나누고 있다[1]. 이중에서 전기적 메커니즘에 의한 고장메커니즘의 수명 예측모델과 가속스트레스 인자를 살펴보면 다음과 같다.

### 3. 제품의 전기적 특성특정 항목 및 평가기준

전기적 특성측정을 위한 항목과 고장기준은 다음 <표 1.>과 같으며, 누설전류에 대해서는 실시간 측정을 하였다. 누설전류는 전원의 인가 전압에 민감하게 반응하므로 별도의 Spec은 결정하지 않고, 전류값이 급격히 상승하는 시점을 단락에 의한 고장으로 판정하도록 하였다.

항목	Cp	DF	IR
초기치	± 10% 이내	3.5%	1000M 이상
후기치	± 12.5% 이내	5%	500M 이상
Setting	1 KHz, 1 V		16v (정격전압)

<표 1. 고장판정기준>

### 4. 시험계획

시료수는 사용최고온도에서 정격전압의 2배, 4배, 6배에서 시험하였고, 각 수준에서의 시험하는 시료의 수는 Meeker와 Hahn(1985)이 추천한 4:2:1의 비율을 적용하여 정하였다[2].

특성치의 측정은 단속적으로 초기, 640h, 1,090h, 1370h, 1650h, 2100h, 2640h에서 관측을 시행하였다.

### 5. 가속열화시험설계

MLCC의 수명에 영향을 미치는 인자는 온도, 습도, 전압, 전류 등의 여러 가지가 알려져 있다 [3]. 평균수명 60년 이상의 고신뢰성을 보증하기 위한 가속열화시험의 목적에 비추어 볼 때, 복합스트레스에 의한 이중 스트레스의 인가가 타당하며, over-stress에 의한 고장메커니즘 보다는 열화에 의한 wearout 고장메커니즘을 중심으로 시험을 설계하는 것이 타당하다 할 수 있겠다. 온도에 의한 가속은 사용온도 최고값인 125℃로 맞춰 놓고, 전압만을 변화 가속시켜 가속수준을 조정하였다. 그 이유는 MLCC의 조속한 열화추이를 유도하기 위하여 복합스트레스를 인가하였으나 대상 시료의 특성상 낮은 스트레스에서의 열화가 단시간 안에 나타나기 힘들고, 여러 조합에 의한 스트레스 배분은 목표시간이 길어지게 되어, 가속열화시험 본연의 목적에 부합되지 않으므로 온도를 사용조건 최대로 고정시킨 후, 전압에 의한 스트레스 조정을 실시하였다. 위에서 언급한 바와 같이 MLCC의 대표적인 고장메커니즘인 Avalanche Breakdown, Crack, Migration중에서 Migration과 Avalanche Breakdown과 같은

절연기능의 상실은 공통적으로 온도와 전압에 의해 가속된다는 물리적 의미를 고려할 때, 이중 스트레스에 의한 Eyring 모델이 바람직하다고 할 수 있다. 이를 유발하기 위한 스트레스 인자를 전압으로 설정한 이유가 여기에 있다.

최소제공법에 의한 회귀분석을 수행하기 위하여 전압수준은 3수준으로 정하였으며, MIL-STD-690C의 전자부품 고장률 시험방법 통칙에 의거한 샘플링 검사방법을 준용하여, MLCC의 고장분포가 지수분포임을 가정할 때, 신뢰수준 90%에서 125℃ 사용조건에서의 평균 수명 60년을 보증할 수 있도록 고장율시험과 병행하였다. 시험시간 목표는 2,000시간을 설정하되 수준별로 융통성 있게 조절하여 열화현상이 충분히 반영될 수 있도록 시험을 진행하도록 하였으며, 따라서 2,000시간 기준으로 고장개수  $r=0$  일 때, 보증을 위한 시료수는 최소 605개 이상이 되도록 하였다. 시험결과 절연저항의 열화경향이 상대적으로 크게 나타났으며, 정전용량, 절연팩터는 열화가 크게 진행되지 않았다. 또한 시험시간 동안 실시시간으로 누설전류 의한 Avalanche Breakdown으로 판명할 고장이 발생하지 않았으므로, 절연저항의 열화데이터를 열화 분석에 이용하였다.

## 6. 가속열화모델

MLCC의 주요 고장메커니즘인 Migration과 Avalanche Breakdown의 수명예측모델은 다음과 같다.

### (1) Migration

$$t_f = A \cdot V^{-n} \cdot H^m \cdot \exp\left[\frac{E_a}{KT}\right] \quad (1)$$

(2) Avalanche Breakdown

$$t_f = A \cdot V^{-n} \cdot \exp\left[\frac{E_a}{KT}\right] \quad (2)$$

A: 재료, 제품의 구조 및 시험방법에 따른 상수

T: 절대온도

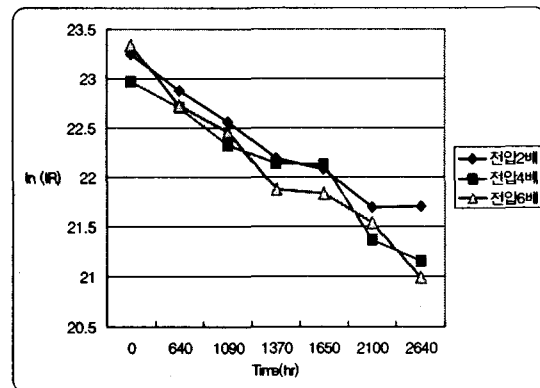
K: Boltzmann 상수( $8.6173 \times 10^{-5} \text{eV/}^\circ\text{C}$ )

Ea: 활성화 에너지

V: 전압

H: 습도

즉, Migration과 Avalanche Breakdown을 유발하기 위한 스트레스 인자로 온도와 전압을 설정한 것에는 무리가 없다고 할 수 있다. 일반적으로 열화데이터의 모델링에서는 성능특성치의 대수값이 시간에 따라 선형관계를 갖는다는 가정에서 시작된다[4]. 시료의 동질성이 보장된다면, 같은 스트레스 수준에서의 특성치는 대수정규분포라고 가정할 수 있으며, 이를 정리하면 다음과 같다.



<그림 1> 절연저항 대수치의 열화경향

$$\mu(t) = a - \beta'x \quad (3)$$

(단, a는 대수치의 초기값, 여기서 기울기  $\beta'$ 는 사용시간과 무관한 상수이며, 가속 스트레스에 의존하는 열화속도)

여기서, 특성치의 대수값이 고장기준에 다다른 임계값을  $\mu^*$ 라고 하면 고장시간은 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$t = (a - \mu^*)/\beta' \quad (4)$$

따라서 온도(T)와 전압(V)의 복합 스트레스에 의한 열화속도  $\beta'$ 은 스트레스인자 상호간의 독립을 가정하여 교호작용이 없다고 가정하면, Eyring 모델의 변형된 형태인 Black의 관계식 [5]에 의해서 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\beta' = \beta \cdot \exp [ -(T/T) - \ln V ] \quad (5)$$

여기서  $\beta$ ,  $\gamma$ , c는 추정해야 할 모수이다.

## 6. 열화데이터의 분석

### (1) 열화속도( $\beta'$ ) 추정 및 검증

각 가속수준에 대한 열화속도는 식(3)에 의해서 절연저항 특성치의 대수값이 시간에 따른 선형적인 경시변화를 가정하며, 다음과 같은 단순 선형회귀에 의해 추정할 수 있다.

$$\mu(t) = a_1 - \beta t + \varepsilon \quad (6)$$

결과를 요약하면 다음과 같다.

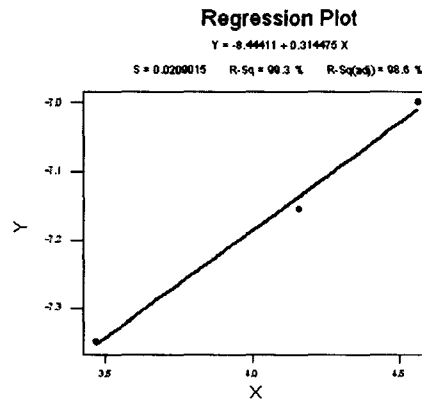
구분	a	$\beta'$	R-sq(adj)
전압2x	23.302	$6.436 \times 10^{-4}$	94.3%
전압4x	23.1	$6.924 \times 10^{-4}$	94.3%
전압6x	23.355	$7.436 \times 10^{-4}$	97.6%

<표 2. 각 수준별 선형열화에 대한 회귀계수>

### (2) 모수 c의 추정

식(5)의 양변대수를 취하여 추정한 열화속도  $\beta'$ 에 대해서 독립변수 전압 V의 대수값을 이용하여 단순선형회귀를 실시하면  $\beta$ 와 c의 추정이 가능하다.

$$\ln \beta' = \ln \beta - \gamma \ln V - \frac{1}{T} + \varepsilon \quad (7)$$



<그림 2. 모수 c 추정을 위한 회귀식>

구분	$\ln(\text{전압}V)$	$\ln\beta'$
전압X2	$\ln 32V$	$\ln(6.436 \times 10^{-4})$
전압X4	$\ln 64V$	$\ln(7.824 \times 10^{-4})$
전압X6	$\ln 96V$	$\ln(9.136 \times 10^{-4})$

<표 3. 회귀 변수들의 요약>

$$\ln \beta' = (-8.44411) + 0.314475 \ln(V)$$

따라서,  $\ln\beta$ 와  $c$ 에 대한 추정치는 다음의 관계에서 도출할 수 있다.

$$(\ln\beta - \gamma \frac{1}{T}) = -8.44411 \quad (8)$$

$$c = -0.314475 \quad (9)$$

### (3) 전압스트레스 모수 $\beta$ , $\gamma$ 의 추정

Eyring 모델에 의한 Black의 명목수명  $\tau$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\tau = A \cdot V^{-n} \cdot \exp\left[\frac{E_a}{KT}\right] \quad (10)$$

이 관계식에서 전압이 고정된 경우 열화모델식은 전압에 관한 부분을 상수로 취급하여 다음과 같이 정의할 수 있다.

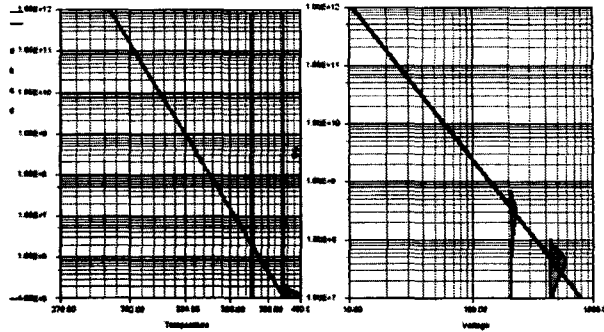
$$\tau = A' \cdot \exp\left[\frac{E_a}{KT}\right] \quad (11)$$

반대로, 온도가 고정된 상수로 취급하는 경우 열화모델식 (5)에서의 전압모수  $c$ 는 수명모델식 (10)의  $n$ 에 대하여  $n = -c$ 의 관계를 가지므로 식 (9)에서 추정한 결과로

$$n = 0.314475 \quad (12)$$

임을 알 수 있다. 식(11)은 식(5)의 열화모델식

에 대하여  $n\left(\frac{E_a}{k}\right) = \gamma$ 의 관계를 가지게 되므로 식  $\gamma$ 을 추정하기 위하여, M사의 X7R 동종제품의 가속수명시험 자료를 통하여 추정하였다.



[Life-Stress Relationship for Temperature and Voltage]

<그림 3> M사의 가속수명시험자료

$$\tau = (2.948 \times 10^{-9}) \cdot V^{-2.6683} \cdot \exp\left[\frac{1.3757}{kT}\right] \quad (13)$$

식(12),(13)에 의해서,

$$\gamma = n\left(\frac{E_a}{k}\right) = 5020.40381 \quad (14)$$

으로 추정할 수 있다. 이는 복합스트레스에 의한 적절한 조합에 의한 스트레스 배분에 의한 시험을 하기에는 시험목표시간이 길어져 부득이하게 동종제품에 대한 활성화 에너지값을 가져다 쓰게 된 경우이며, 위의 식(8),(14)에 의한 결과로 125°C 열화율계수  $\beta$ 는 다음과 같이 추정된다.

$$\beta = 64.3862 \quad (15)$$

### (4) 초기값 (a)의 추정

특성치 대수값인  $\ln(IR_0)$ :  $a$ 는 전체 시험자료의 초기값 대수  $\mu_0$ 의 산술평균으로 추정한다.

$$a = \frac{\sum \mu_{ij}(0)}{N} = 23.2527 \quad (16)$$

위의 과정을 통해서 추정된 모수추정치를 통하여 (4), (5)에서 정의된 열화모델식은 다음과 같이 쓸 수 있게 된다.

$$\mu(t, T, D) = 23.2527 - 64.3862 \cdot t \cdot \exp[-(4509.81/T) - 0.314475 \ln V] \quad (17)$$

### (5) 합동표준편차( $\sigma$ )의 추정

열화 모델링에서의 특성치의 대수정규성을 가정하는 것 외에 그 산포가 가속수준과 시간에 대해 무관한 상수로 가정할 수 있어야 한다. 이러한 표준편차  $s$ 를 추정하기 위한 식은 다음과 같다.

$$\sigma = \left[ \frac{\sum_{i=1}^3 (n_{i1}-1)s_{i1}^2 + \dots + (n_{i3}-1)s_{i3}^2}{\sum_{i=1}^3 (n_{i1}-j)} \right]^{\frac{1}{2}} = 0.124702 \quad (18)$$

### (6) 수명분포 추정

가정한 바와 같이 특성치의 대수값은 정규분포를 따르고, 절연저항의 대수치가  $\mu^* = n(IR^*)$ 에 도달하면 고장으로 판정하게 되며, 그 때의 절연저항치는 고장의 정의에 의하여  $\mu^* = 20.030$ 이하일 때로 규정하게 된다. 이때,  $\mu^*$  이하의 누적고장 분포함수는  $F(t, T, D)$

$$= \Phi \left[ \frac{\mu^* - \alpha + t\beta \exp(-\gamma/T - \delta \ln V)}{\sigma} \right] \quad (19)$$

이므로, 고장시간의 평균과 표준편차는 다음과 같은 평균과 분산을 갖는 정규분포를 따르게 된다.

$$\mu_t = [(\alpha - \mu^*)/\beta] \exp(\gamma/T + \delta \ln V) \quad (20)$$

$$\sigma_t = (\sigma/\beta) \exp(\gamma/T + \delta \ln V) \quad (21)$$

정상사용조건에서의 수명을 예측하기 위해서 설계파라미터  $V=16v$ , 일반적인 전자제품의 내부 온도인  $T(273.16+40^\circ\text{C})$ 을 대입하면 (20),(21)식에 의해 평균수명과 표준편차를 산출하면 다음과 같다.

$$\mu_t = 191,921.96 \text{시간} \quad (22)$$

$$\sigma_t = 7426.39818 \text{시간} \quad (23)$$

평균수명의 95% 신뢰구간은 다음과 같다.

$$177366.2196 \leq \mu_t \leq 206477.7 \quad (24)$$

## 7. 결론

온도와 전압에 의한 복합스트레스 열화시험에서 MLCC 특성치의 조속한 열화를 유발시키기 위하여 사용최고온도에서 전압가속을 실시하였다. 이때, 온도 스트레스에 의한 모수를 활용하였으며, 열화패턴이 뚜렷한 특성을 보인 절연저항에 대하여 열화 모델인 Eyring의 Black 방정식을 사용하여 열화방정식에 대한 선형성을 확인하였다. 특성치가 대수정규분포에 적합성을 검증하였으며 절연저항의 고장기준인  $500M\Omega$  이하의 정의에 따라 분포를 추정한 결과, 수명분포는 평균 191,921.96시간과 표준편차  $\sigma_t = 7426.39818$ 시간인 정규분포를 따른다고 결론지을 수 있었다. 또한 종래의 절연저항의 열화는 온도 스트레스에 영향을 받는 것으로 알려져 있으나 사용조건 최고온도에서 전압가속시에 뚜렷한 열화패턴을 보이는 것으로 확인할 수 있었다.

## 8. 참고문헌

- [1] 김진우, 양석준 “MLCC 신뢰성평가에 관한 연구” -Daewoo Co. Ltd. Quality & Reliability Laboratory 미발간
- [2]Gerald J. Hahn and William Q. Meeker . Statistical Intervals: A Guide for Practitioners, John Wiley & Sons, Inc., New York. (1991)
- [3] 이천우 “PCB의 휨과 분리에 관한 MLCC의 신뢰도평가에 관한 연구” 아주대학교, 2003
- [4] Chan, C. K., Boulanger, M. and Torrorella, M., "Analysis of Parameter-Degradation Data Using Life-Data Analysis Programs", Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp. 288-291, 1994.
- [5] Meeker, W. Q. and Hamada, M., "Statistical Tools for the Rapid Development & evaluation of High-Reliability Products", IEEE Transaction on Reliability, Vol. 44, No. 2
- [6] 권수호, 허양현, 임태진, “가속모델에 기초한 열화데이터의 신뢰성해석”
- [7] 이낙영, “Optimum Design of Accelerated Degradation Tests for Lognormal Distribution,” 품질경영학회지, 23권 1호, pp.29-40, 1995
- [8]Park, J.I and Yum, B.J., "Optimal Design of Accelerated Degradation Tests for Estimation Mean Lifetime at the Use Condition," Engineering Optimization, Vol. 28, pp.199-230, 1997