

고장 분석과 가속 수명시험을 통한 PTC 히터의 신뢰성 평가

최형석^a

한국세라믹기술원 에너지환경소재본부

Reliability Evaluation on PTC Heater Using Accelerated Life Test and Failure Analysis

Hyung-Seuk Choi^a

Energy & Environmental Division, Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology (KICET), Jinju 52851, Korea

(Received November 18, 2015; Revised November 23, Accepted November 24, 2015)

Abstract: In this paper, the failure mechanism of PTC heater were examined closely by failure analysis and based on it, accelerated life test were conducted. Finally, life distribution and acceleration model were established. The failure mechanism of PTC heater such as crack, increase of resistance due to heating were identified. Two acceleration factors such as temperature, humidity were chosen with two levels each and accelerated life test were done. Life distribution were identified as Weibull distribution with shape parameter 5.4 and Temperature-Humidity model was fitted as an acceleration model.

Keywords: BaTiO₃, PTCheater, Thermalproperties, Reliability, Lifeprediction

1. 서론

BT(BaTiO₃)는 실온에서 3.05 eV의 에너지 밴드갭을 가지는 부도체이며 BT에 Nb 등의 doner를 doping 할 경우 반도체성을 가지게 된다 [1,2]. 이렇게 n-doping된 BT는 강유전 전이온도(T_c)에서 급격하게 저항이 증가되는 PTCR (positive temperature coefficient of resistivity) 특성을 가지게 된다 [3,4]. Heywang은 이러한 PTCR 현상을 Grain boundary의 이중 쇼트키 장벽에 의한 것으로 설명한다 [5,6]. BT는 일반적으로 온도 센서 또는 히터로 사용되며 히터로 사용될 때는 온도가 T_c 이상 올라가지 않으므로 안전하다는 장점이 있다. 그러나

일반적인 BT는 120°C 이상으로 온도를 올릴 수 없으므로 PbTiO₃를 더해서 T_c를 증가시켜 사용하고 있다 [7,8]. 본 연구에서는 Ba_{1/2}Na_{1/2}TiO₃PTC 히터의 실제 고장 메커니즘을 조사하였으며 2단계 품질기능 전개(2 level quality function deployment)를 통해서 수명 시험을 설계하였다. 설계된 수명시험 방법에 따라 온도, 습도, 전압을 인가한 상태에서 가속 수명시험을 수행하였으며 수명 분포와 수명 모델을 구하였다. 그리고 마지막으로 수명시험에서 고장이 발생한 시료에 대한 고장 분석을 수행하여 field 고장 메커니즘과 비교하여 수명시험의 정확성을 확인하였다.

2. 실험 방법

신뢰성 시험은 Ba_{1/2}Na_{1/2}TiO₃PTC 히터를 사용하여 수행하였다. Thermistor는 그림 1과 같이 동전 모양의 PTC 소자의 양면에 Ag 전극을 입힌 구조로 되어 있다.

a. Corresponding author; hschoi@kicet.re.kr

Copyright ©2015 KIEEME. All rights reserved.
 This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

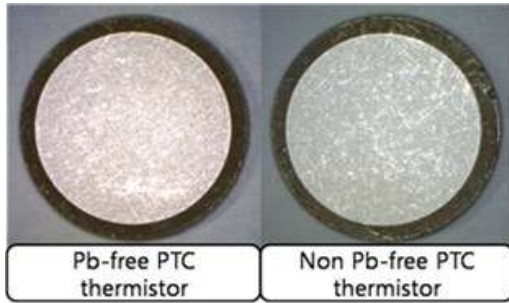


Fig. 1. PTC heater appearance.

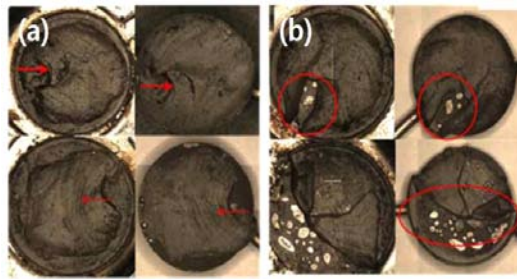


Fig. 2. PTC heater appearance.

Table 1. Specification of PTC heater.

	Rated Resistance (Ω)	Surface Temp (°C)	Inrush Current (Arms)
Non Pb-free PTC thermistor	2.3±0.1	145±10	8.0

정격전압은 12.0 V, 최대 사용전압 13.5 V, -20°C ~ +60°C의 사용 온도 범위를 갖고 기본적 규격은 표 1과 같다. PTC 히터의 고장모드는 히터 내의 미세한 균열이 전압, 온도 등에 따른 지속적인 스트레스를 받으면서 일어나는 파괴현상과, 사용 시간에 따른 열화 현상, 전극부와 세라믹부의 열팽창계수 차이에 의한 전극 박리현상 등이 일어나고 있다. 그림 2(a)에서의 crack 현상은 반복적인 스트레스가 히터의 micro-crack에 집중되어 원형으로 퍼지면서 최종적으로 파단되는 현상을 나타내고 있으며, 그림 2(b)에서는 도선과의 접촉면에서 열팽창계수 차이에 의해 파괴되는 모습을 나타내고 있다. Field 고장모드에 근거하여 표 2, 표 3과 같이 PTC 히터의 two level quality function deployment을 유도하였다. Field 고장을 재현할 수 있는 시험 방법이 단속 동작, 내습, 고온 시험 순이므로

Table 2. Requirements (stresses and performance) and failure mode matrix. ※ Point :◎ 5, ○ 3, △ 1

Failure mode requirements (Stress and performance)	Failure mode requirements			
	Short circuit	Breaking of wire	Resistance variation	Breaking crack
Temperature(°C)		○	○	○
Humidity(%)	△			
Overvoltage(V)	○	○	○	△
Migration		○	○	
Thermal shock	○	◎	◎	◎
Score	7	14	14	9

Table 3. Failure modes and test methods matrix. ※ Point :◎ 5, ○ 3, △ 1

Failure mode	Test methods	Test methods				
		Migration test	Humidity bias test	High voltage withstand test	Low temp. operating test	High temp. operating test
Short Circuit	7	○	○			
Breaking of wire	14		△	○	△	△
Resistance variation	14	○	◎		○	◎
breaking crack	9			○	△	◎
Score	42	80	69	93	129	

가속 수명시험은 전압, 내습, 고온 시험의 복합 가속 수명시험으로 계획하기로 하였다.

잠재 고장메커니즘 분석 결과 PTC 히터의 고장 메커니즘은 자체 반복 발열에 의한 열 충격, 전극 탄화, delamination 등으로 분석되었다. Crack, 탄화, delamination 모두 온도, 습도, 전압을 필요로 하므로 이 3가지 factor를 이용하여 실험 계획을하기로 하였다. 시험 factor를 결정하였으면 각 factor의 Level을 정하는 것이 중요하다. PTC 히터는 자체 발열체 의해 140°C 이상 상승하므로 외부 온도의 영향은 상대적으로 적을 것으로 예상되지만 다른 히터에 비해 발열 온도가 낮으므로 온도 factor를 완전히 무시할 수는 없다.

따라서 온도, 습도 모두 가속 level을 두었으며 세라믹 자체가 습도에 민감하지 않으므로 최대 습도를 주기 위하여 온도는 70°C, 85°C, 습도는 70%, 85%

Table 4. Failure modes and test methods matrix.

Factor Run	Voltage (V)	R.H.(%)	Temperature (°C)	No. of Sample
1	13.5	85	85	10
2	13.5	70	85	10
3	13.5	85	75	10
4	13.5	70	75	10

를 가속 level로 설정하였다.

전압 가속의 경우 정격 전압과 최대 사용전압의 차이가 12.5% 밖에 안 되기 때문에 가속의 의미가 없을 것으로 판단되어 제외하였다. 항온항습조(ESPEC/SH-641)를 사용하여 온도와 습도를 모두 가속하였으며 전압 가속은 수행하지 않고 파워 서플라이(Hanyoung Elec. Co.)를 이용하여 정격 전압을 인가하였다. 효과적인 실험을 위하여 직교배열법에 의하여 실험 계획을 수립하였다. 수립된 계획은 표 4와 같다.

수명은 migration과 diffusion에 의한 열화의 동시 작용으로 판단하였으며 수명 식은 식 (1)과 같이 temperature-humidity model을 가정하여 사용하였다.

$$t_f = A \times \exp\left[\frac{E_a}{k} \times \frac{1}{T}\right] \times \exp\left[\frac{B}{H}\right] \quad (1)$$

여기서 k는 Boltzmann 상수이며 E_a는 activation energy, H는 상대습도, A와 B는 상수이다. PTC 히터는 외부온도에 따른 저항 변화를 이용한 소자이므로 저항이 기준치 이상 변화했을 경우 고장으로 판정한다. 본 시험에서는 제품 사양에 명기된 대로 상온(25°C)에서의 저항 변화율이 30% 이상일 경우를 고장으로 판정하기로 하였다. 또한 일반적인 고장 현상인 open, short일 경우와 간헐적인 오동작이 발생할 경우도 고장으로 판정하였다.

3. 결과 및 고찰

가속 수명시험을 통해 얻어진 고장 시간을 이용하여 그림 3과 같이 수명 분포를 구하였다. 온도, 습도 2 factor, 2 level 가속 수명시험 데이터를 와이블 분포를 이용하여 분석하면 식 (2)와 같이 형상 모수 5.4으로 파악되며 이 수준의 형상 모수는 마모 고장 메커니즘이

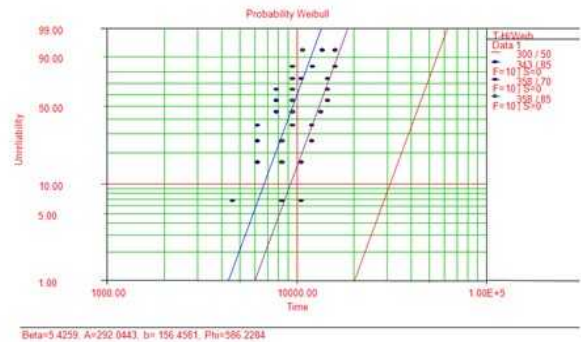


Fig. 3. Plot of accelerated life test.

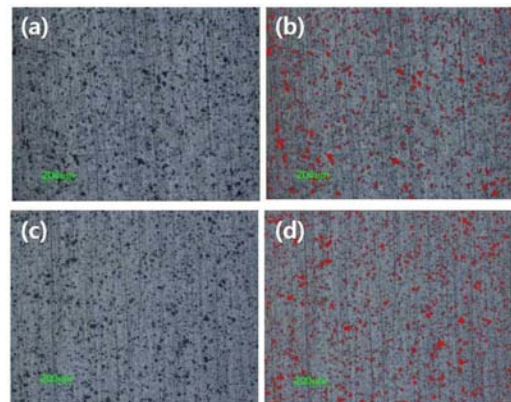


Fig. 4. Pore distribution on good and failed sample surface.

있다는 것을 의미한다. 일반적인 전자 제품이 스트레스가 강도를 유연히 넘을 때 발생하는 우발 고장메커니즘을 보이는 것과 달리 PTC 히터는 외부 온도와 습도에 의한 열화에 의한 마모 고장 메커니즘을 확인할 수 있다. Activation energy는 식 (3)과 같음을 확인할 수 있었다.

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)}; \beta = 5.4 \quad (2)$$

$$E_a = 0.05eV \quad (3)$$

가속 수명시험 후 고장 시료의 고장 원인을 분석하고, field 고장품과의 고장 메커니즘 비교를 위하여 시험 후 시료의 고장 분석을 수행하였다. 그림 4(a), 4(c)는 양품과 고장품의 단면을 광학현미경(NIKON/ECLIPSE ME600L)으로 분석한 것이다.

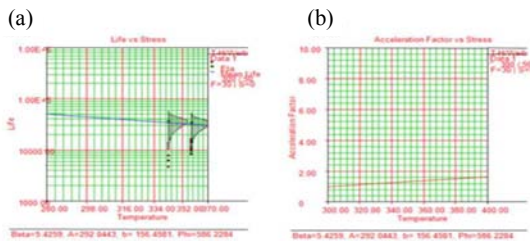


Fig. 5. Relation between temperature vs. (a) Life and (b) acceleration factor.

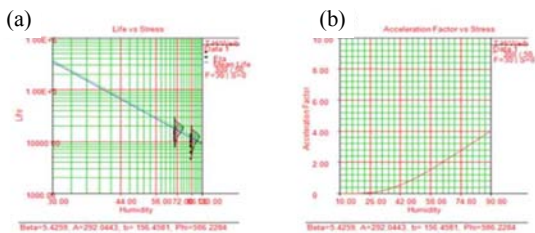


Fig. 6. Relation between humidity vs. (a) life and (b) acceleration factor.

Table 5. Temperature and humidity in (a) field condition, (b) accelerated life test condition.

	Field condition	Accelerated life condition
Temperature(°C)	25	85
Humidity(%)	50	85

그림 4(b), 4(d)는 각각 양품, 불량품의 pore 면적 비율을 이미지 처리(MEDIA CYBERNETICS/IMAGE PRO ver 6.2)에 의해 계산한 모습이다. 양품이 3.13%의 pore 면적을 가지는 반면 불량품은 4.3%의 pore를 가져 crack에 취약함을 알 수 있다. 따라서 제조 공정에서 발생한 pore 분포 및 비율의 차이가 PTC 히터의 수명을 결정하는 것으로 볼 수 있다. 온도와 수명 분포의 관계는 그림 5에 나와 있다. 그림 5(a)는 온도의 증가가 수명의 감소를 유발하는 것을 보여준다. 그림 5(b)는 온도와 가속계수의 관계를 보여준다. 온도가 올라갈수록 가속계수가 커짐을 알 수 있다.

그림 6은 습도와 수명 분포의 관계 그래프이다. 상대습도가 올라갈수록 수명이 짧아지며(그림 6(a)) 가속계수는 커지는 것(그림 6(b))을 알 수 있다. 이것은 습도가 올라갈수록 내부 재료들의 이온화를 촉진하고 이온화가 촉진될수록 재료 자체의 포텐셜 에너지가 높아져

activation energy를 넘기가 쉬워지기 때문이다. 따라서 습도가 높을수록 고장이 빨리 발생하는 것으로 판단된다. 위의 해석 결과로 볼 때 PTC 히터의 가속 모드는 온도와 습도라고 판단되며 temperature-humidity model에 의한 최종 가속 모델은 식 (4)와 같으며 표 5와 같은 가속 조건일 경우에는 식 (4)에서 보는 바와 같이 4.95배로 가속시험을 할 수 있게 된다.

$$AF = \frac{L_{field}}{L_{acc}} = \frac{e^{\frac{\phi}{V_f} + \frac{b}{U_f}}}{e^{\frac{\phi}{V_a} + \frac{b}{U_a}}} = e^{\phi(\frac{1}{V_f} - \frac{1}{V_a}) + b(\frac{1}{U_f} - \frac{1}{U_a})} = 4.95 \quad (4)$$

4. 결론

본 연구에서는 고장 분석을 통하여 PTC 히터의 고장메커니즘을 규명하고 이에 근거한 시험 조건으로 가속 수명시험을 실시하여 수명모델 및 가속모델을 정립하였다. PTC 히터의 고장 메커니즘으로는 미세 크랙에 의한 파단 및 저항 증가 등을 확인할 수 있었으며 이에 대한 가속 인자로 온도, 습도 2 factor를 선정하여 각 factor 당 2 level로 가속 수명시험을 실시하였다. 실험계획법에 의해 시험 반복 횟수를 줄일 수 있었으며 시험 후 형상 모수 5.4인 Weibull 분포임을 밝혀내었고 가속 모델은 temperature-humidity model을 사용하여 구할 수 있었다.

REFERENCES

- [1] K. Park and K. U. Jang, *J. Alloy Compounds*, **391**, 123 (2005). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2004.07.087>]
- [2] B. K. Park, J. H. Lee, D. Y. Kim, and N. M. Hwang, *J. Am. Ceram. Soc.*, **84**, 2707 (2001). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1151-2916.2001.tb01077.x>]
- [3] H. M. Al-Allak, T. V. Parry, G. J. Russell, and J. Woods, *J. Mater. Sci.*, **23**, 1083 (1988). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BF01154017>]
- [4] K. Park, *Mater. Sci. Eng.*, **B107**, 19 (2004). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mseb.2003.10.003>]
- [5] E. Brzozowski and M. S. Castro, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **24**, 2499 (2004). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2003.07.015>]
- [6] W. Heywang, *J. Am. Ceram. Soc.*, **47**, 484 (1964). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1151-2916.1964.tb13795.x>]
- [7] T. Shimada, K. Touji, Y. Katsuyama, H. Takeda, and T. Shiosaki, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **27**, 3877 (2007). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2007.02.171>]
- [8] L. Affleck and C. Leach, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **25**, 3017 (2005). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2005.03.178>]