Weibull 식을 이용한 적층형 세라믹 액츄에이터의 수명예측

고중혁, 정순종, 하문수, 이대수, 최형봉, 송재성
한국전기연구원, 전자기소자연구그룹

Lifetime estimation of multilayer ceramic actuators using Weibull function

Jung-Hyuk Koh, Soon-Jong Jeong, Mun-Su Ha, Dae-Su Lee, Hyeong-Bong Choi, Jae-Sung Song
Korea Electrotechnology Research Institute, Electric & Magnetic Devices Research Group

Abstract

적층형 piezoelectric ceramic actuators를 제작하여 신뢰성을 평가하였다. 소자의 신뢰성 측정을 위하여 3kV/mm, 5kV/mm, 7kV/mm의 정류된 교류전압을 인가하였으며, 실험중 온도와 습도를 일정하게 유지하기 위하여 항온항습조안에서 실험을 실시하였다. 각 실험의 경우에 16개의 소자를 동시에 평가하였으며, 평균파괴시간을 Weibull 통계방식을 이용하여 계산하였으며, Arrhenius model, Power law model을 이용하여 사용 조건하에서 예상수명을 예측하였다.

Key Words : Weibull function, 적층형 세라믹 액츄에이터 (Multilayer Ceramic Actuator)

1. 서 론

액츄에이터, 센서, 트랜스듀서의 분야는 기능성 세라믹의 발전과 더불어 아주 급격하게 발전되고 있는 소자이다. [1-3] 액츄에이터의 분야중 많은 연구가 진행되고 있는 적층형 세라믹 액츄에이터 (mulilayer ceramic actuator)는 다른 극성의 바이어스를 압전세라믹 위에 교번으로 프린팅된 전극에 인가하여 변위를 유발하는 소자로서 큰발생력, 빠른 응답속도, 그리고 정교한 제어의 장점을 지닌다. 이러한 특성으로 인하여 적층형 세라믹 액츄에이터는 정교하게 제어되는 밸브, 펌프, 그리고 나노스테이지 (nano-stage)등에 이용되는 소자이다. 적층형 세라믹 액츄에이터를 제작하기 위해서 요구되는 특성은 높은 압전계수 d_{33}, 높은 전기기계결합계수 k_p, 그리고 높은 큐리온도 (T_c)이다. $0.2(PbMg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ - $0.8(PbZr_{0.475}Ti_{0.525})O_3$는 MPB(morphotropic phase boundary)에 존재하는 성분으로 높은 압전계수인 550 - 650과 높은 전기기계결합계수인 0.6 정도를 지니며, 대략 300 ℃이상의 큐리온도를 지니는 우수한 소재이다.

일반적으로 분극방향을 변화시키는 빠른 스위칭은 domain의 변화를 유발하게 되고, 변화되는 domain으로 인하여 상당한 양의 에너지를 열로서 잃게 된다. 이렇게 발생되는 열은 압전 세라믹의 특성에 상당히 나쁜 영향을 미치게 된다. 따라서 소자 내부에서 발생되는 열을 제거한 상태에서 외부환경에 의해 발생되는 조건하에서 정밀한 신뢰성 실험을 할 필요성이 있다. 또한 적층형 세라믹 액츄에이터는 압전소재를 이용하여 소자를 제작하기 때문에 소자의 특성은 소자내의 절연전계를 통하여 특성을 예측할수 있다. 따라서 본 연구에서는 인가전압에 의한 누설전류밀도를 측정함으로써 소자의 특성을 파악할수 있으며 소자 내부에서 발생되는 열을 제거하기 위하여 정류된 AC (alternative current)를 인가하여 누설전류 특성을 파악하였다. 또한 Weibull finction을 이용하여 파괴된 소자의 통계적인 처리를 하여 평균파괴시간 (Mean Time To Fiailure)를 추정하였다.

2. 실 험

2.1 적층형 세라믹 액츄에이터의 제작

이 실험에서는 적층형 세라믹 액츄에이터를 제작하기 위해서 tape casting 방법을 사용하였다. 99.9 % 이상의 순도를 지니는 PbO, ZrO_2, TiO_2, MgO, Nb_2O_5의 파우더를 사용하였으며, $Ag_{70}Pd_{30}$ 전극을 사용하였다. 제작된 tape 의 두께는 100 μm 였으며, 소결온도는 1100℃였다.

2.2 측정 및 분석

16개의 시편을 준비해서 온도와 습도가 유지되는 항온/항습조에 시편을 설치하였다. 입력 전압으로는 정류된 AC 전압을 사용하였으며, 각각의 소자에서 측정되는 누설전류를 개별적으로 기록하였다. 온도는 60℃ - 90℃ 까지 변화시켰으며, 습도는 30%를 유지하도록 하였다. cycling number에 따른 누설전류를 측정하여 소자의 상태를 파악하였으며, 소자의 파괴는 50 mA/cm^2 이상의 전류가 3초 이상 흐르면 소자의 파괴로 정의하였다.

2.3 신뢰성 평가

적층형 세라믹 액츄에이터의 신뢰성 평가는 환경온도, 가해진 전계, 그리고, 습도 등에 따라서 영향을 받는다. 따라서 이러한 요소들을 포함하여 신중하게 이루어 져야 한다. 이 실험에서 습도는 30%로 고정하여 실험이 진행되었다. 예상수명시간 및 신뢰성을 평가하기 위해서 상용 전압 보다 높은 전계와 높은 온도에서 가속열와 시험을 실시하였다. 실험은 모든 시료가 파괴될때까지 진행되었으며, 실험으로부터 통계적인 결과를 추출하기 위하여 2-parameter Weibull 함수를 이용하여 실험을 진행하였다. 2-parameter Weibull 함수는 다음과 같이 나타내어질수 있다.

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} exp\left[\left(-\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}\right] \qquad (1)$$

여기에서 α는 scale parameter, β는 shape parameter, $f(t)$는 Weibull 확률밀도함수, (t)는 시험시간(cycling 수)를 의미한다.
식 (1)로부터 누적확률함수 $F(t)$는 다음과 같이 구현할 수 있다.

$$F(t) = 1 - exp\left(-\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta} \qquad (2)$$

여기에서 scape parameter α는 총 파괴확율이 63.2 %에 이를때 가지 걸린 시간을 의미하고, shape parameter β는 파괴분포형상을 의미한다.

3. 결과 및 고찰

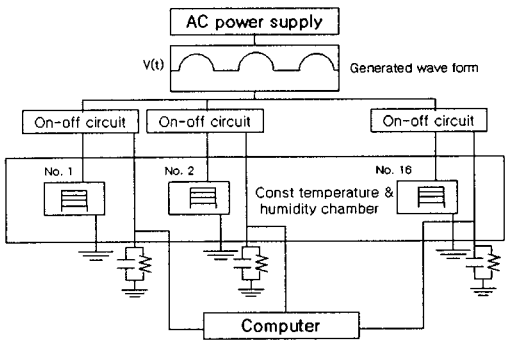

그림 1. 신뢰성 측정 시스템의 개략도. 측정시스템은 컴퓨터와 항온/항습조가 연결되어 있다.

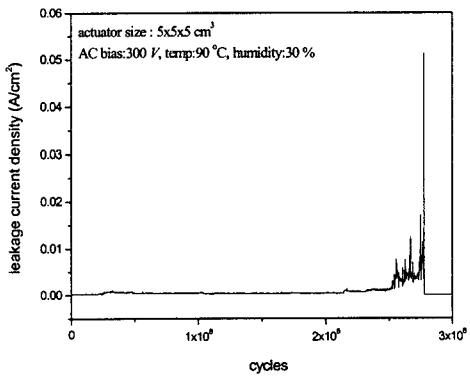

그림 2. Cycling에 따른 누설전류밀도 그래프. 300 V (3 kV/mm)의 정류된 AC 전압을 인가하였으며 이때의 온도는 90 ℃, 습도는 30 %였다.

Cycling에 따른 누설전류를 측정하는 시스템의 개략도가 그림1에 나타나 있다. 입력은 정류된 AC 바이어스를 인가하였으며 16개의 시편은 항온/항습조 안에 설치하여 누설전류를 측정하였다. 시스템

에서 정류된 AC 바이어스를 인가하기 때문에 적층형 세라믹 액츄에이터에서 발생될수 있는 열로 인한 문제는 제거하였다. 적층형 액츄에이터는 반파 정류동안 충전이 이루어지며, 정류된 반파 사이클에서는 방전되는 상태로 시스템이 설계되었다.

그림 2에서는 cycling에 따른 적층형 세라믹 액츄에이터의 누설전류 밀도를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 2.7×10^8 cycling동안 0.3 mA/cm^2의 누설전류 밀도를 유지한후 파괴되었다.

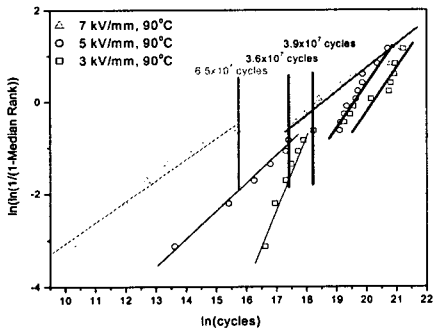

그림 3. 적층형 세라믹 액츄에이터의 Weibull plot. scale parameter α와 shape parameter β는 그림의 y축과 기울기로부터 계산 하여 진다. 심벌 △, ○, □는 각각 전계 7kV/mm, 5kV/mm, 3kV/mm를 나타낸다.

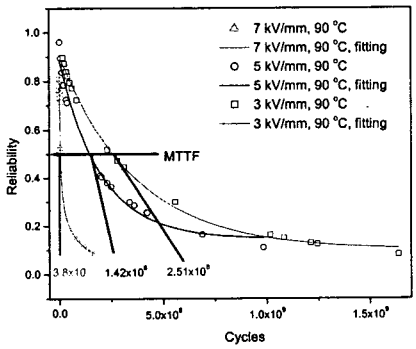

그림 4. Cycling 수에 따른 적층형 세라믹 액츄에이터의 신뢰성 그림. 심벌 △, ○, □는 각각 전계 7kV/mm, 5kV/mm, 3kV/mm를 나타내고, 실선은 시뮬레이션된 값을 나타낸다.

그림 3에서 보듯이 파괴경향의 분포는 두부분으로 나눌수 있다. 첫 번째의 파괴 분포는 early failure range 이고 두분째 파괴분포는 wearout failure range 로 표현할수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 6.5×10^6, 3.7×10^7, 3.9×10^7의 사이클은 각각 early failure mode의 마지막 cycling수를 나타낸다. 이러한 early failure mode의 발생이 아마도 소자의 mishandling에서 발생한것이라고 사료된다.

4. 결 론

적층형 세라믹 액츄에이터의 신뢰성 평가를 위하여 각 조건별로 한번에 16개의 소자를 이용하여 연구가 진행이 되었다. 정류된 AC 전압을 인가하여 불필요한 소자의 발열문제를 해결하였다. Cycling에 따라서 파괴된 소자로부터 평균파괴시간(Mean Time To Failure)을 계산하기 위하여 Weibull 함수를 이용하여 신뢰성 평가를 하였다. 실험 결과로부터 Arrhenius model과 Power law model을 이용하여 실험 결과를 시뮬레이션 하였다. 우리는 실험 결과로부터 액츄에이터의 평균파괴시간을 예측할수 있었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 21C 프론티어 연구 사업중 차세대 소재 성형기술 사업단의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] Qing-Min Wang, Qiming Zhang, Baomin Xu, Ruibin Oliu, L. Eric Cross, J. Appl. Phys. Vol. 86, p 3352, 1999.

[2] K. Yao, K. Uchino, Y. Xu, S. Dong, K. E. Lim: IEEE Trans on Ultrasonics, Ferroelectrics, and frequency control. Vol. 47, p. 819, 2000.

[3] Q. M. Wang, L. E. Cross: J. Am. Ceram. Soc, 82, p. 103, 1999.