무연 압전 액츄에이터의 신뢰성 평가 연구

글 _ 문상호, 함용수, 고중혁, 하문수*, 정순종**
광운대학교 전자재료공학과, *삼성전기 LCR 사업부 선행개발그룹, **한국전기연구원

1. 서론

소위 신뢰성이란 것을 이야기 할 때, 그 의미는 기기 또는 부품이 주어진 사용 조건 하에서 사용하고자 하는 시간 동안 그 기능을 적절하게 수행할 확률을 의미한다. 따라서 신뢰성을 정확히 평가 하기 위해서는 기기 혹은 부품이 사용 되는 환경과 비슷한 환경을 만들고, 이로부터 평가하고자 하는 파라미터를 정확히 추출하는 것이 중요한 이슈가 된다. 여기서 파라미터란 시간에 따라서 파괴된 기기 혹은 소자의 파괴 확률 양상, 혹은 전체 갯수에서 특정 비율까지 파괴되는 시간 등을 의미하게 된다.

압전 액츄에이터의 신뢰성을 평가 하기 위해서는 먼저 압전 액츄에이터의 특성을 파악하는 것이 무엇 보다도 중요하다. 일반적으로 압전 액츄에이터는 $Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$-$PbTiO_3$ (PZN-PT)[1], $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$-$PbTiO_3$ (PMN-PT)[2], $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$-$PbZrTiO_3$ (PMN-PZT)[3], $Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3$-$PbTiO_3$[4]와 같은 압전 물질과, Ag-Pd와 같은 내부 전극 재료를 교번으로 적층하여 제작하게 된다. 소재에 따라서 적층 후 1000℃ 이상의 온도에서 소결한 후 외부 전극을 제작하고 이후에 poling 이라는 공정을 거쳐서 소자로 완성하게 되는데, 이 소결 공정중에 많은 소자가 파괴 될 수 있다. 이는 세라믹 유전체 소재는 25% 내외의 수축율을 보이나 금속 전극소재의 경우에는 수축율 현상이 없기 때문이다.

소자가 제작되면 열화 및 신뢰성 평가를 위해서 사용조건과 동일한 조건을 선정해서 실험을 하게 된다. 실제 적층형 액츄에이터가 사용되어지는 조건과 동일한 조건을 선정해서 소자가 열화 되어가는 정도를 파악하고, 열화 후 최종적으로 어떤 파괴 거동을 하는지를 살펴 보는 것이 신뢰성 연구의 중요한 요소가 된다. 이 경우 적층형 액츄에이터의 사용조건과 같거나 유사한 조건하에서 실험을 하게 되는데, 실험 시간을 줄이기 위해서 사용조건보다 조금더 가혹한 조건을 만들어서 실험 시간을 줄이는 가속 열화 실험을 하기도 한다. 가속 열화 실험을 통해서 기기 및 부품의 열화된 정도를 파악하고, 또한 파괴된 시편의 개수를 통계처리함으로써 기기 및 부품의 신뢰성을 파악하게 된다.

일반적으로 신뢰성 평가를 위해서는 시간 혹은 인가된 시그널의 사이클에 대한 파괴된 소자의 개수에 대한 자료가 필요하다. 파괴된 시편을 시간에 따라 나열함으로써, 우리는 소자의 신뢰성을 평가할 수 있는 자료들을 얻게 된다. 물론, 이런 실험 조건들을 연속적으로 변화시켜서 파괴에 대한 자료를 얻고, 이 자료를 통계 처리해서 신뢰성 자료를 얻게 되는 것이다.

압전형 액츄에이터의 경우, 인가 전압의 형태에 따라서 발열이라는 문제가 발생하게 된다. 인가 전압이 '+' '-'의 두 극성으로 교번 인가 되는 경우라면, 전압 바이어스의 극성이 바뀌게 됨에 따라서 압전체 내의 도메인(domain)들이 스위칭을 하게 되고 이때 relaxation 전류가 발생하게 된다. 이때 발생되는 relaxation 전류로 인하여 적층형 압전 액츄에이터의 온도는 소자의 크기에 따라서

70℃ 이상으로 상승하고 이때 발생된 열로 인하여 액츄에이터의 poling 효과가 사라지게 되어 변위 특성이 줄어들게 된다. 이를 피하기 위하여 바이어스의 극성이 바뀌지 않도록 입력 전압을 설계하는 것이 압전 액츄에이터의 신뢰성을 평가하기 위해서는 중요한 요소가 된다.

소자의 수명을 예측하기 위해서는 소자의 열화에 대한 실험 데이터에 물리적 또는 수학적인 모델을 적용시켜서 열화 특성을 나타낼수 있는 열화 특성식을 도출 하는 것 이외에도 통계 이론에 의한 신뢰도를 추정하는 것이 매우 중요하다. 이를 위해서는 외부에서 인가한 열화 조건에 대한 샘플의 파괴 분포를 추정하여 그 평균 수명을 예측하여야 한다.

이러한 관점으로 본다면, 일반적으로 기기 및 부품의 신뢰성 모델로 적합하다고 알려진 Weibull 함수를 사용하여 그 신뢰성을 평가하게 된다.

2. 본론

2.1. 이론적 고찰

부품의 신뢰성 평가 모델로 잘 알려진 2 parameter Weibull 모델을 선정하고, 이 모델을 신뢰성에 적용학 위해서 이 모델의 척도 파라미터 (β: scale parameter) 및 형상 파라미터 (α: shape parameter)에 대한 정확한 추정을 하게 된다. 이 파라미터의 추정을 위해서 median rank 방법중 하나인, Bernard equation을 사용하여, 전체 n개의 샘플 중 i 번째 샘플이 고장날 누적확율 F(n,i)를 구하게 된다.

$$\text{누적확율 F(n,i)} = \frac{i-0.3}{n+0.4} \tag{1}$$

2 parameter Weibull 함수는 다음과 같이 나타내어 질 수 있다.

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\alpha-1}\exp\left[\left(-\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}\right] \tag{2}$$

위와 같은 2 parameter Weibull 함수의 누적고장분포함수 F(t)와 신뢰도 함수 R(t)는 다음과 같이 나타내어 질 수 있다.

$$F(t) = 1-\exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}\right] \tag{3}$$

$$R(t) = 1-F(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}\right] \tag{4}$$

$$\frac{1}{1-F(t)} = \exp\left[\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}\right] \tag{5}$$

윗 (5)번 식의 양변에 자연로그를 두 번 취해주면

$$\ln\ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right) = \beta\ln\left(\frac{t}{\alpha}\right) = \beta\ln t - \beta\ln\alpha \tag{6}$$

따라서 위의 식 (6)은 다음과 같은 선형의 1차 함수로 나타내어 질 수 있다.

$$Y = \beta X - \beta\ln\alpha \tag{7}$$

여기서 $X = \text{In}t$, $Y = \text{InIn}\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)$ 가 된다. 이를 통해서 부품의 신뢰성을 평가 하게 된다.

2.2. 실험적 고찰

Fig. 1은 폴링 공정을 금방 마친 액츄에이터와 오랜시간 동작해서 이미 열화된 액츄에이터에서 외부 인가 전계에 따른 변형율의 그림이다. 만일 압전액츄에이터의 변형이 z-축 방향으로 발생한다면, 축방향 움직임에 대한

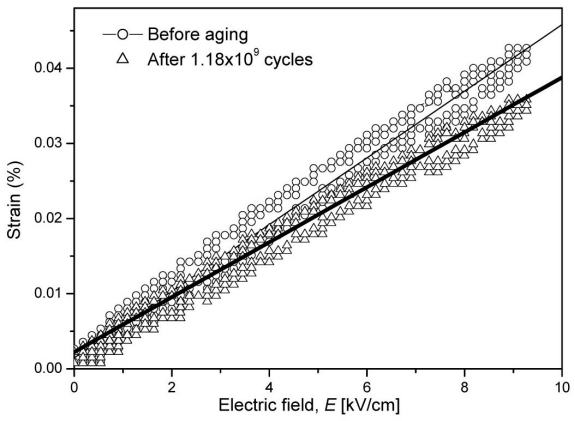

Fig. 1. 적층형 압전액추에이터에서 인가 전계와 변형율의 관계에 대한 그림으로 ○과 △는 각각 폴링되어 열화되지 않은 액츄에이터와 이미 열화된 액츄에이터를 나타낸다.

압전 관계식은 다음 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_3 = s_{33}^E X_3 + d_{33} E_3$$
$$D_3 = d_{33} X_3 + \varepsilon_{33}^X E_3 \quad (8)$$

여기서 E는 인가된 전계, X는 스트레스, x는 변형율, D는 움직인 거리, d는 압전상수, s_{33}^E는 elastic compliance, 그리고, ε_{33}^X는 전기기계 결합계수 이다.

윗 식에서 보는 바와 같이 외부에서 가한 전계에 따라서, 변형율이 변하게 되고, 이때 그래프의 기울기가 압전상수와 관련이 있게 된다.

윗 그림으로부터 전혀 열화가 되지 않은 시편과 1.18×10^9번의 스트레스를 가한 시편의 기울기 즉, 압전상수가 변한 것을 알 수 있다. 위에서 그림에서는 1.18×10^9 번의 스트레스를 가한 경우, 스트레스를 가하지 않은 압전 액츄에이터에 비해서 압전상수가 대략 17.5% 정도 감소한 것을 알 수 있었다. 이렇게 외부에서 전계를 주기적으로 인가해서 압전 액츄에이터 소자가 스트레스를 받게 되면, 열화가 발생하고, 그 압전특성이 나빠지는 것을 알 수 있다.

압전액츄에이터의 경우, 서론에서 이미 언급한 것처럼. 유전체 세라믹과 내부 전극소재를 교번으로 적층해서 제작하게 된다. 소결과정 중에서 유전체와 전극 소재간의 수축율이 다르기 때문에 두 물질의 계면에는 많은 스트레스가 이미 존재하는 상태가 된다. 적층형 액츄에이터의 경우, Z-축 방향으로 인장 변형이 발생하게 되는데, 이때 Poisson's ratio에 따라서 XY-축 상에서도 수축 변형이 발생하게 된다. 이런 인장과 수축의 스트레스가 주기적으로 인가되면, 이미 소결 고정중에 많은 스트레스가 가해져 있는 유전체 내부와 전극의 계면을 중심으로 파괴 거동이 발생하게 된다. Fig. 2의 (c)에서 보는 바와 같이 적층형 액츄에이터는 내부 전극이 있는 active region과 내부 전극 소재가 없는 inactive region이 존재한다. 이때 전극이 있는 active region을 중심으로 변형이 발생하는 반면, 전극이 없는 inactive region은 변형이 발생하지 않아서 두 영역의 사이에도 스트레스가 지속적으로 쌓이게 된다. 즉 압전 액츄에이터가 동작하게 되면, 압전특성 및 전극 형상에 따라서 스트레스가 그 계면 혹은 경계면에 지속적으로 쌓이게 되어 궁극에는 소자가 파괴되게 된다. 그림 (a)는 avtive region과 inactive region 사이

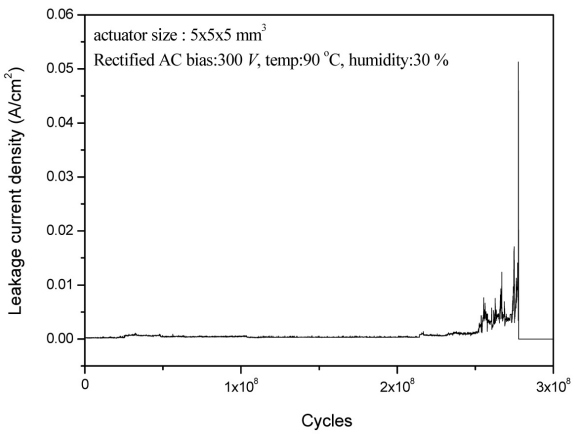

Fig. 3. 90℃, 300 V (3 kV/mm)의 사용환경하에서 압전 액츄에이터의 시간에 따른 누설전류밀도.

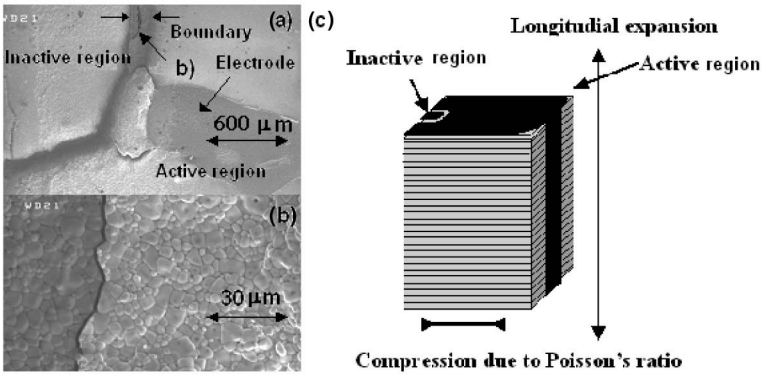

Fig. 2. 적층형 $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$-$PbZrTiO_3$ 액츄에이터에서 그림 (c)는 액츄에이터 내부의 스트레스가 발생하는 지점에 대한 설명, (a)는 스트레스에 의해 crack이 발생한 지점의 SEM 사진이고, 그림 (b)는 발생한 crack의 확대 사진이다.

에서 파괴가 발생한 그림이고, (b)는 확대된 그림으로 grain boundary 사이를 중심으로 파괴가 발생한 것을 명확하게 보여주고 있다. 따라서 압전체에 외부에서 전계가 주기적으로 인가하게 되면, 열화 현상이 발생하게 되고 이후에는 파괴가 발생하는 것을 알 수 있다.[6]

Fig. 3은 적층형 액츄에이터의 신뢰성을 평가하기 위하여 사용환경과 비슷한 조건하에서 인가 전계와 누설전류밀도와의 관계에 대한 그림이다. 압전 액츄에이터를 구성하는 압전체는 저항체와 커패시터 성분으로 나타내

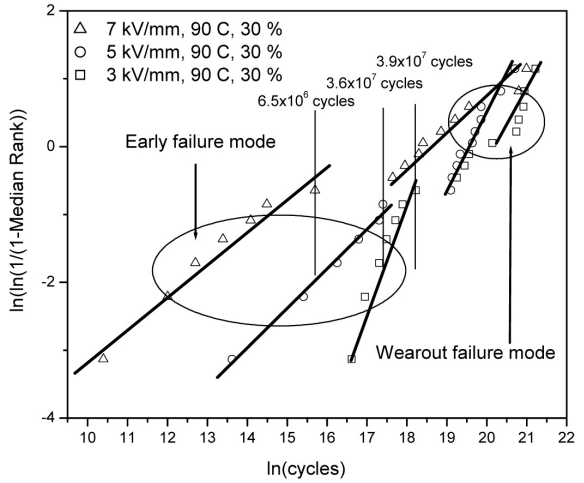

Fig. 4. 90℃의 온도 및 3 kV/mm, 5 kV/mm, 7 kV/mm의 인가 전계하에서 압전 액츄에이터의 파괴 및 이에 따른 Weibull 그림.

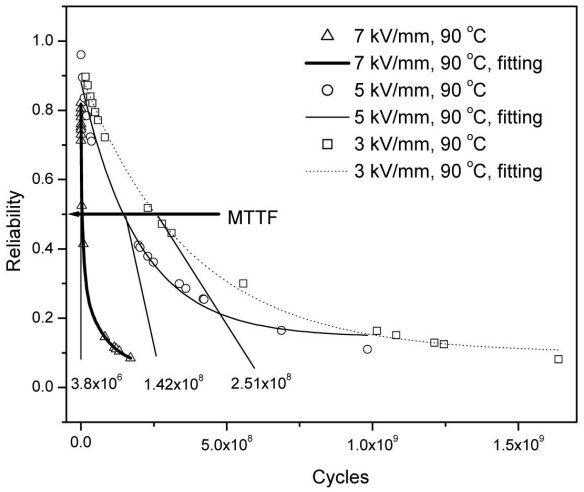

Fig. 5. 90℃의 온도 및 3 kV/mm, 5 kV/mm, 7 kV/mm의 인가 전계에서 압전 액츄에이터의 신뢰성 그림.

어 질 수 있고, 소자의 저항성분을 측정함으로써 압전소자의 열화 정도를 예측할 수 있다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 2.7x10^8 cycles 정도가 지나면 누설전류가 증가하여 소자가 파괴되는 현상을 볼 수 있다. 이렇게 파괴된 소자들을 파괴된 cycle (시간)에 따라 정렬하고 위의 식 (1)-(7)에서 기술한 Weibull 함수에 넣어서 나타내면 Fig. 4와 같은 그림으로 나타내어 질 수 있다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 cycle (시간)이 경과함에 따라서 2개의 서로 다른 파괴 모드가 존재하는 것을 파악할 수 있는데, 이때 초기 파괴 양상 (Early failure mode)은 제품의 공정상에서의 불량과 밀접한 관계가 있고, 사용시간이 증가함에 따라서 나타나는 마모 파괴 양상 (wear out failure mode)은 재료의 열화에 따른 전하의 conduction mechanism과 밀접한 관련이 있다.

Fig. 5는 액츄에이터의 신뢰성에 대한 그림으로 그림에서 나타낸 MTTF (Mean Time To Failure)는 고장까지의 평균 시간으로 신뢰도 그림에서 전체 시료의 50%가 파괴 될 때까지의 시간이다. 이 시간은 시료의 50%가 남아 있을 확률에서의 시간이기 때문에 시편이 모두 파괴되는 시간을 평균한 값과는 다른 값이 되고, 이 이유 때문에 MTTF는 소자의 신뢰성을 평가하는데 중요한 요소가 된다.[7]

Fig. 6은 앞에서 언급된 신뢰성 자료를 가지고 액츄에이터의 평균 수명을 예측한 그래프이다. 일반적으로 사

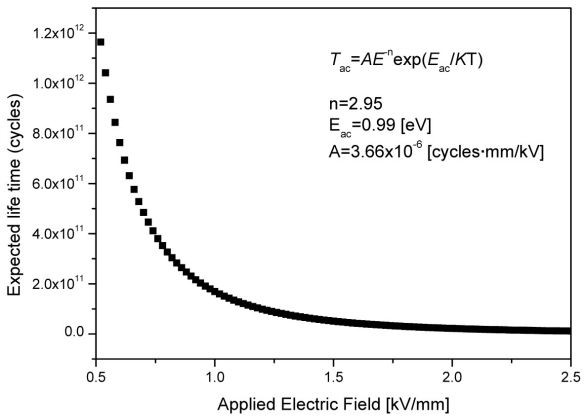

Fig. 6. 적층형 압전 액츄에이터의 예상 수명 그림. 그림에서 n은 지수이고, E_{ac}는 activation energy, 그리고 A는 압전 재료에 따른 상수이다.

용 온도의 변화에 따라서 소자의 열화 현상에 증감이 발생하게 되는데, 이때 열에너지에 의한 소자의 열화는 일반적으로 Arrehnius 모델을 따라서 열화가 발생하게 된다. 또한 외부의 인가 전계의 증가에 의해서 열화(파괴) 거동이 나타나게 되는데, 이때 외부 전계에 의한 파괴 거동은 일반적으로 Power law를 따른 다고 알려져 있다. 이 두가지 모델과 Weibull 함수에서 얻은 결과를 이용하여 예상 수명을 예측하게 되면 Fig. 4와 같은 식으로 표현 가능하게 된다. 이때 Fig. 6에 나타낸 식은 다음과 같이 나타낼수 있다.

$$t_{ac}=AE^{-n}\exp(E_{ac}/kT) \quad (8)$$

윗 식에서 n은 지수이고, E_{ac}는 activation energy, 그리고 A는 압전 재료에 따른 상수이다.

3. 결론

적층형 액츄에이터의 신뢰성 연구를 통하여 액츄에이터의 열화 및 파괴가 나타나게 되는 주된 이유를 파악하고 분석할 수 있다. 특히 열화 및 파괴의 거동을 분석함으로써, 액츄에이터에서 나타나는 문제가 공정상에서의 문제인지, 아니면 재료의 순수한 열화에 의해서 나타나는 것이지도 알 수 있게 될 뿐만 아니라, 이를 통하여 품질 및 공정의 개선을 추구할 수 있다. 온도 및 인가 전압 등 사용 환경하에서의 신뢰성 자료를 확보하고 분석함으로써, 향후 특정 조건하에서 기기 혹은 부품의 예상 사용 수명시간을 예측할 수도 있다.

감사의 글

본 보고서는 지식경제부 소재원천기술개발사업의 지원으로 이루어졌으므로 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. J.-S. Song and S.-J. Jeong, “Effect of Geometry Factor on Characteristics in Multilayer Ceramic Actuators” *Material Science Forum.,* **48** 2225-31 (2003).
2. D. Viehland and J. F. Li “Investigations of Electrostrictive $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$-$PbTiO_3$ Ceramics Under High-Power Drive Conditions” *J. Appl, Phys.,* **89** 1826-35 (2001).
3. A. Halliyal and A. Safari “Synthesis and Properties of Lead Zinc Niobate: $Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ based Relaxor Ferroelectric” *Ferroelectrics.* **158** 295-300 (1994).
4. K. Yamamoto, A. Korubo, K. Sakai, and K. Takagi, “Estimation of Nonlinear Piezoelectric of $0.5Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3$-$0.35PbTiO_3$-$0.15PbZrO_3$ and $0.64Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3$-$0.36PbTiO_3$ Ceramics”, *Jpn. J. Appl. Phys.,* **41** 5686-89 (2002).
5. J.-H. Koh, S.-J. Jeong, M.-S. Ha, and J.-S. Song, “Degradation and Cracking Behavior of $0.2(PbMg_{1/3}Nb_{2/3}O_3)$-$0.8(PbZr_{0.475}Ti_{0.525}O_3)$ Multilayer Ceramic Actuators”, *Sensors and Actuators A,* **112** 232-36 (2004).
6. J.-H. Koh, T.-g. Kim, “Reliability of $Pb(Mg, Nb)O_3$-$Pb(Zr,Ti)O_3$ Multilayer Ceramic Piezoelectric Actuators by Weibull Method”, *Microelectronics Reliability,* **46** 183-88 (2006).

◉◉ 고중혁

- 1993 중앙대학교 전기공학과 학사
- 1997 KAIST 신소재공학과 석사
- 2002 Royal Institute of Technology 전자공학 박사
- 2002-2004 한국전기연구원 선임연구원
- 2004-현재 광운대학교 전자재료공학과 교수

◉◉ 문상호

- 2008 광운대학교 전자재료공학과 학사
- 2008-현재 광운대학교 전자재료공학과 석사과정

◉◉ 함용수

- 2008 광운대학교 전자재료공학과 학사
- 2008-현재 광운대학교 전자재료공학과 석사 과정

◉◉ 하문수

- 2000 울산대학교 재료공학과 학사
- 2002 울산대학교 재료공학과 석사
- 2004 삼성전기 LCR 사업부 선행개발 그룹 책임연구원

◉◉ 정순종

- 1989 연세대학교 금속공학과 학사
- 1991 연세대학교 금속공학과 석사
- 2000 University of Washington 재료공학과 박사
- 2004 동경공업대학 방문연구원
- 1988-현재 한국전기연구원 책임연구원