

적층형 세라믹 액츄에이터의 전기-기계적 거동

정순종, 고중혁, 하문수, 이재석, 송재성

한국전기연구원 전자기 소자 연구그룹

Electro-mechanical properties of Multilayer Ceramic Actuators

Soon-Jong Jeong, Junghyuk Koh, Mu-Su Ha, Jae-Suk Lee, Jae-Sung Song

Korea Electrotechnology Research Institute, Electric and Magnetic Devices Group

Abstract

This study presents the combined effect of electric field application and mechanical compressive stress loading on deformation in a multilayer ceramic actuator, designed with stacking alternatively $0.2(\text{PbMn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3)$ - $0.8(\text{PbZr}_{0.475}\text{Ti}_{0.525}\text{O}_3)$ ceramics and Ag-Pd electrode. The deformation behaviors were thought to be attributed to relative 180° domain quantities which is determined by pre-loaded stress and electric field. The non-linearity of piezoelectricity and strain are dependent upon the young's modulus resulting from the domain reorientation.

Key Words : Multilayer Ceramic Actuator, Electric Field-induced strain, Compressive stress Loading, Domain

1. 서 론

액츄에이터 (actuator)란 전기적 에너지를 기계적 에너지로 변환하는 소자로 유압식, 공압식, 전기식 액츄에이터로 분류할 수 있다. 전기식 액츄에이터 중에서도 세라믹 액츄에이터는 큰 변위, 높은 분해능, 빠른 응답속도, 큰 발생력, 낮은 구동전압 등의 장점을 가지고 있다[1].

압전 액츄에이터의 변위특성은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다[2].

$$x = S_{33}X + d_{33}E \quad (1)$$

큰 변위를 위해서는 압전상수 (d_{33})와 기계적 영률($1/S_{33}$)이 작은 재료가 유리하다. 여기서 X, E, x는 각각 기계적 응력, 전계, 변형률이다. 이러한 압전액츄에이터의 특성은 세라믹 내부의 분역 혹은 도메인 (domain)이 변형률에 크게 영향을 받게 된다. N. A. Schmidt[3]와 Y. W. Zeng[4] 등[5]은 세라믹의 strain은 180° 분역보다는 90° 분역에 의해

영향을 많이 받는다는 것을 보고하였다. 이들의 연구는 도메인의 구조 및 이동행로에 따라 압전특성들이 변화함을 해석하였으며 도메인 구조에 영향을 끼치는 인자로는 소재의 제조 경로, 소재 또는 압전체의 기하학적 구조, 외부의 기계적 응력, 인가 전계등이다 [6].

본 연구에서는 적층형 세라믹 액츄에이터를 제조한 후 압전 액츄에이터의 기계적 응력과 인가전압이 액츄에이터의 특성에 미치는 영향에 대하여 도메인 이동을 중심으로 조사하였다.

2. 실험

2.1 시료 제조

순도가 99.9%이상인 PbO, ZrO₂, TiO₂, MnO₂, Nb₂O₅ 분말을 출발원료로 사용하였다. 고상반응 과정에서 나타나는 파이로클로아 (pyrochlore) 상을 억제하기 위해 MnO₂와 Nb₂O₅를 먼저 반응시키고, PbO, TiO₂, ZrO₂를 2차로 고상 반응시키는 콜롬바이트 (columbite precursor) 방법을 이용하여

0.6Pb(Mn_{1/3}Nb_{2/3})O₃-0.4Pb(Zr_{0.475}Ti_{0.525})O₃ (이하 PMN-PZT) 분말을 제조하였다. 이 PMN-PZT 소재는 큐리온도가 355°C, 압전상수 d₃₃은 530 pC/N으로 측정되었다. 제조된 분말을 유기용매 (MEK/Ethyl Alcohol)와 분산제 (Texaphor 963)를 넣고 24시간 동안 불밀링 한 후 결합제 (PVB)와 가스제 (DBP)를 첨가하고 다시 24 시간 동안 불밀링하여 slurry를 제조한 후 닥터 블레이드 (doctor blade) 방법으로 100 μm의 green sheet를 제조하였다. green sheet 위에 전극면적을 달리하여 screen printing 하고, 100층까지 적층하였다. 이 때 사용된 전극용 paste는 Ag(70)-Pd(30)를 사용하였고, 전극면적은 2×3 mm²이었다. 표 1에 제조된 시편의 전극 크기를 나타내었다.

표 1. MCA의 내부전극 크기.

Table 1. Size of multilayer ceramic actuators.

	Length (mm)	Width (mm)	Green sheet thickness(μm)	Layer
MCA	2	3	100	100

제조된 적층체를 1100°C에서 2 시간 동안 소결한 후 Ag paste를 사용하여 외부전극을 형성하여 적층형 세라믹 액츄에이터 (MCA)를 제조하였다. 제조된 적층 액츄에이터는 150°C에서 전계 3kV/mm를 인가하여 분극하였다.

2.2 시편의 측정과 분석

액츄에이터의 특성중 전계유기변형특성은 시편에 100 V까지 전압을 인가한 후 10 Hz에서 laser vibrometer (Gratec Co.)를 사용하여 살펴보았다.

이때 외부 응력 부하 조건을 0에서 165 MPa까지 15MPa단위로 변화시키면서 액츄에이터에 압축응력을 인가하였다. 이러한 압축응력인가한 상태에서 전계 1kV/mm (전압 100V)를 인가하면서 액츄에이터의 변위 특성을 관찰하였다. 또한 압축응력이 액츄에이터의 전기적 특성에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 압축응력하에서 Impedence analyzer (HP4194A)를 이용하여 임피던스와 정전용량을 관찰하였다.

액츄에이터의 비선형적 특성 변화는 공진주파수와 영률의 변화로 관찰된다[7, 8]. 이러한 비선형 기계적 특성을 관찰하기 위하여 일정한 전계를 인가한

상태에서 압축응력에 따른 변형량을 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

압전체의 비선형 거동은 압전특성이 도메인의 이동에 기인한다는 이유 때문이다. 압전 상수가 전계 강도에 따른 증가하며 이는 가해진 전계의 방향과 일치하지 않는 비 180°도메인이 전계의 방향과 같은 180도메인으로 전환될 때 압전 상수 d₃₃, d₃₁이 변화된다고 알려져 있다[9]. 또한 전계의 강도에 따라 공진주파수와 출력압등도 변화하게 되며 이는 영률의 변화와 연관이 있다. 본 연구에서는 외부의 기계적 응력이 액츄에이터에 미치는 영향을 관찰하였다.

(1) 외부 압축응력하에서의 변형률 측정

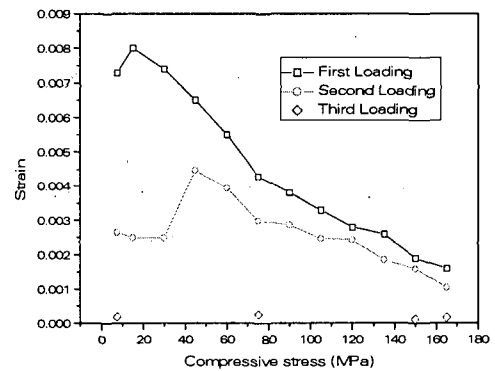


그림 1. 액츄에이터에서 인가한 압축응력에 따른 1kV/mm인가시 변형률.

그림 1은 액츄에이터에 여러 값의 일정 압축응력을 인가한후 전계 1kV/mm를 인가하였을 때 변형율을 측정된 결과이다. 액츄에이터에 15MPa단위로 150MPa까지 압축응력을 단계적 증가시키면서 인가하여 변형률을 측정하였다. 그후 다시 압축응력을 제거하고 같은 방법으로 응력을 증가하면서 변형률을 관찰하였다. 이러한 응력인가를 반복적으로 3번 실시하였다. 먼저 첫 번째 응력증가에서는 15MPa 압력인가시 전계유기 변형률이 증가하다가 압축 응력이 점점 증가할수록 같은 전계인가 변형률은 감소해서 165MPa인가시 전계인가 변

형률은 0.002이하가 되었다. 15MPa인가시 전계유기 변형률이 증가하는 것은 압축응력에 의한 비 180°/180° 도메인 비율이 증가하기 때문이며 그 이상의 압력인가시 발생하는 액츄에이터 내부응력이 증가되어 비 180°도메인이 180° 도메인으로 전환시 요구되는 에너지가 증가되어 보다 적은 변형률을 나타내기 때문이다. 그런후 응력을 완전히 제거한 다음 다시 응력을 인가한 경우에도 비슷한 경향이 관찰되었다. 하지만 이 과정에서의 전체변형률은 첫번째 응력 인가시 보다 전체적으로 감소한 것을 관찰하였다. 이 두 번째 응력인가이후 다시 세 번째 응력인가시에는 전계인가 변형이 거의 나타나지 않았다. 이는 큰 응력인가시에 액츄에이터 내부에 제작시 형성되었던 분극이 점차로 사라져서 세 번째 응력인가시 거의 분극효과가 사라지기 때문인 것으로 사료된다.

(2) 응력인가시 전계인가에 의한 준압전상수 (pseudo-piezoelectric d_{33} coefficient) 변화

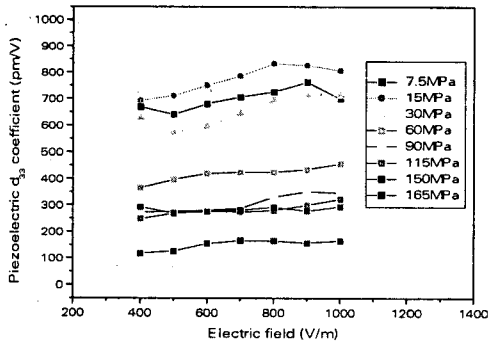


그림 2. 압축응력인가시 전계인가에 따른 준 압전 d_{33} 상수.

그림 2는 액츄에이터에 일정한 압축응력을 인가한 상태에서 전계인가에 따른 준 압전 d_{33} 상수를 측정된 결과이다. 인가되는 전계가 증가할수록 준 압전 상수의 값은 증가하는 경향을 관찰할 수 있다. 이러한 증가 경향은 소프트 압전 세라믹스의 일반적인 특성이며 다음과 같이 해석할 수 있다. 도메인 거동으로 인하여 인가 전계증가에 의하여 영률이 감소되고 이러한 영률의 감소가 d_{33} 의 증가에 기여한다 [10]. 이러한 결과는 아래 그림 4에서도 관찰된다.

(3) 일정 전계인가시 응력인가에 따른 변형률 변화. 위의 식 (1)에서 보듯이 액츄에이터의 특성은 압전 상수 d_{33} 과 더불어 기계적 성질인 영률에 의해 영향을 받는다 [6, 11]. 실제로 일정 전압이 인가된 경우에 영률의 변화를 관찰하였다.

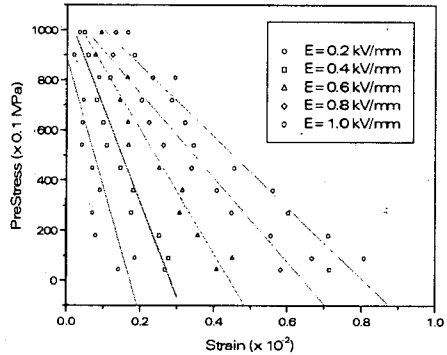


그림 3. 일정 전계인가시 압축응력-변형률

그림 3은 액츄에이터에 일정 전계를 인가하고 압축응력을 변화할 때 변형률을 측정된 결과이다. 가해진 전계는 0.2~1kV/mm이었으며 그림에서 보듯이 응력과 변형률의 기울기(영률)는 가해진 전계에 따라 변화함을 알 수 있다. 즉, 인가된 전계가 증가할수록 영률이 점차로 감소함을 알 수 있다. 이러한 변화는 보다 큰 전계방향이 인가될 때 많은 량의 도메인들이 전계방향으로 배열된다. 이러한 배열된 도메인들이 압축응력인가시에 변형에 기여하여 낮은 영률이 관찰된다. [11].

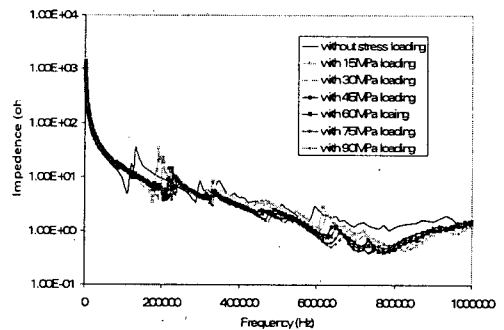


그림 4. 압축응력인가하에서 임피던스-주파수 곡선

(4) 인가응력에 따른 공진주파수의 변화
 그림 4는 여러 일정 압축응력을 인가한 후 액츄에이터의 임피던스 특성을 측정한 결과이다. 측정주파수는 1kHz부터 1MHz까지이다. 그림에서 보듯이 주파수에 따른 임피던스 변화로부터 공진 주파수를 관찰할 수 있다. 여러 공진 주파수가 관찰되는데 첫 번째 공진 주파수는 액츄에이터의 영률에 반비례한다 [11]. 그림에서 보듯이 압축응력이 증가할수록 첫 번째 공진 주파수가 점차로 증가하는 것을 관찰할 수 있으며 이로부터 영률이 감소하는 것을 예상할 수 있다. 이러한 결과는 그림 3의 결과에 보여주는 경향과 일치함을 알 수 있다.

4. 결론

적층형 압전 액츄에이터를 제작하고 그 액츄에이터에서 기계적인 변형과 압전 변형의 상호 효과를 관찰하였다. 인가응력과 전압을 변화시키면서 압전에 의한 변형률과 기계적 응력에 의한 변형률을 조사하였다. 그 결과 인가응력이 증가할수록 압전상수는 감소하였고 이의 변화는 도메인 이동에 대한 내부 저항 응력의 증가에 때문인 것으로 사료된다. 또한 높은 전계가 인가된 경우에는 영률이 감소되는 것을 관찰할 수 있었는데 이는 기계적 변형시 많은 량의 도메인들이 기여할 수 있는 것으로 예상되었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 21C 프론티어 연구 사업 중 차세대 소재 성형기술 사업단의 지원에 의해 수행되었습니다

참고 문헌

[1] C. Schuh, K. Lubitz, Th. Steinkopff, and A. Wolff, "Piezoelectric components for technical applications", *C. Galassi et al. (eds.), Piezoelectric Materials : Advances in Science, Technology and Applications*, p. 391, Kluwer Academic Publishers, 2000.
 [2] Y. Masuda, "Variation of dielectric constant affected by domain structure and electric-field-induced strain in ferroelectric ceramics", *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 33, p. 5549, 1994.

[3] N. A. Schmidt, "Coercive force and 90° domain wall motion in ferroelectric PLZT ceramics with aquare hysteresis loops", *Ferroelectrics*, Vol. 31, p. 105, 1981.
 [4] Y. W. Zeng, W. R. Xue, and G. F. Fu, "Investigation on switching behaviour of 90° domains in $(Pb_{0.85}Sm_{0.10})(Ti_{0.98}Mn_{0.02})O_3$ piezoelectric ceramics of ultra-high electromechanical anisotropy by the X-ray diffraction technique", *J. Mater. Sci.* 26, p. 4293, 1991.
 [5] G. Kruger, "Domain wall motion concept to describe ferroelectric rhombohedral PLZT ceramics", *Ferroelectrics*, Vol. 11, p. 417, 1976.
 [6] P.M. Chaplya and G.P. Carmen, "Dielectric and piezoelectric response of lead zirconate-lead titanate at high electric and mechanical loads in terms of non 180° domain wall motion", *J. Appl. Phys.*, Vol. 90, p. 5278, 2001.
 [7] Q.M. Wang and L.E. Cross, "Determination of Young's modulus of the reduced layer of a piezoelectric rainbow actuator", *J. Appl. Phys.*, Vol. 83, p. 5358, 1998.
 [8] K.Yao, W. Zhu, K.Uchino, Z. Zhang and L.C. Lim, "Design and fabrication of a high performance multilayer piezoelectric actuator with bending deformation", *IEEE Trans. ultrasonics, ferroelectrics and frequency control*, Vol. 46, p. 1020, 1999.
 [9] W. Lu, D.N. Fang, C. Q. Li and K. C. Hwang, "Nonlinear electric-mechanical behavior and micromechanics modelling of ferroelectric domain evolution", *Acta mater.*, Vol. 47, p. 2913, 1999.
 [10] J. Fan, W.A. Stoll and C.S. Lynch, "Nonlinear constitution behavior of soft and hard PZT : Experiments and modelling", *Acta Mater.*, Vol. 47, p. 4415, 1999.
 [11] T. Fett, M. Kamlah, D. Munz and G. Thun, "Strength of a PZT ceramic under different test conditions", *Proc. SPIE, Smart structures and materials 2000: Active Materials*, Vol. 3992, p. 197, 2000.