

## 압축응력인가에 따른 적층 액츄에이터의 특성

정순중(책임저자)\*, 고중혁\*, 송재성\*, 홍원표\*\*, 최현중\*\*,

\* 한국전기연구원 전자기소자연구그룹, 경남 창원시 성주동 28-1

\*\* 한국생산기술연구원 나노가공팀, 충남 천안시 입장면 흥천리 35-3

### 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  $0.2(\text{PbMn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3)-0.8(\text{PbZr}_{0.475}\text{Ti}_{0.525}\text{O}_3)$  ceramics and Ag-Pd electrode, alternately. The deformation behaviors were attributed to relative  $180^\circ$  domain, determined by pre-loaded compressive stress and electric field. The non-linearity of piezoelectricity and strain are dependent upon the young's modulus resulting from the domain reorientation.

### 1. 서론

위치 결정 기술은 초정밀 미세 기술의 발달과 고정밀 제품 개발로 인하여 현재 서브마이크론, 나노의 위치 정밀도를 요구하고 있다. 여러 초정밀 가공 장비, SPM, FIB의 등장으로 초정밀 미세 가공 표면의 형상을 나노미터 수준에서 관찰할 수 있게되었고, 이에 자극받아 새로운 측정원리에 의한 표면 측정 및 가공기가 계속 개발되고 있다. 이러한 미세 측정검사공정을 실현하기 위해서는 넓은 범위를 측정할 수 있는 스캐닝 스테이지의 개발[1]이 필수적이다.

이러한 스테이지의 미소위치결정 기술에 적용되는 액츄에이터로는 보이스코일 타입 액츄에이터, 압전 액츄에이터, 초음파 모터 등이 있다. 이러한 액츄에이터 중에서 압전 액츄에이터[2]는 빠른 응답성, 정밀한 이송거리의 장점을 지니고 있어서 초정밀, 특히 나노 정밀도를 요구하는 기기에 많은 응용이 되고있다. 그러나 압전 액츄에이터는 이러한 장점에도 불구하고 비선형성, 이력 현상을 지니고 있어서 이를 보정해주는 정밀한 서보제어를 필요로 한다. 이러한 보정기구에도 불구하고 압전 액츄에이터의 특성은 외부 기계적부하에 의해 그 비선형 거동이 크게 변화하며 이에 대한 정확한 해석[3]이 필요하다. 이러한 이유는 압전 액츄에이터가 가지는 미세분역 (domain)의 전기장에 대한 비선형성[4]에 기인한다.

본 연구에서는 적층형 액츄에이터에서 기계적 부하 인가시 변형거동 변화에 대한 결과를 조사하였다. 특히, 압축응력인가시에 전기장-변위의 비선형 거동이 변화하는 특성을 살펴보았다

### 2. 실험 방법

#### 2.1 시료제작

순도가 99.9%이상인  $\text{PbO}$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MnO}_2$ ,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  분말을 출발원료로 사용하였다. 고상반응 과정에서 나타나는 파이로클로아 (pyrochlore) 상을 억제하기 위해  $\text{MnO}_2$  와  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  를 먼저 반응시키고,  $\text{PbO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$  를 2 차로 고상 반응시키는 컬롬바이트(columbite precursor) 방법을 이용하여  $0.6\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-0.4\text{Pb}(\text{Zr}_{0.475}\text{Ti}_{0.525})\text{O}_3$  (이하 PMN-PZT) 분말을 제조하였다. 이 PMN-PZT 소재는 큐리온도가  $355^\circ\text{C}$ , 압전상수  $d_{33}$  은  $530 \text{ pC/N}$  으로 측정되었다. 제조된 분말을 유기용매 (MEK/Ethyl Alcohol)와 분산제 (Texaphor 963)를 넣고 24 시간 동안 볼밀링 한 후 결합제 (PVB)와 가소제 (DBP)를 첨가하고 다시 24 시간 동안 볼밀링하여 slurry 를 제조한 후 닥터 블레이드 (doctor blade) 방법으로  $100 \mu\text{m}$ 의 green sheet 를 제조하였다. green sheet 위에 전극면적을 달리하여 screen printing 하고, 100 층까지 적층하였다. 이 때 사용된 전극용 페이스트는 Ag(70)-Pd(30)를 사용하였고, 전극면적은  $2 \times 3 \text{ mm}$ 이었다. 표 1 에 제조된 시편의 전극 크기를 나타내었다.

|     | Length (mm) | Width (mm) | Green sheet thickness ( $\mu\text{m}$ ) | Layer |
|-----|-------------|------------|---|-------|
| MCA | 2           | 3          | 100                                     | 100   |

Table 1. Shape of multilayer ceramic actuator

제조된 적층체를 1100°C에서 2 시간 동안 소결한 후 Ag paste 를 사용하여 외부전극을 형성하여 적층형 세라믹 액추에이터를 제조하였다. 제조된 적층 액추에이터는 150°C에서 전계 3kV/mm 를 인가하여 분극하였다.

## 2.2 특성 분석

액추에이터의 특성중 전계유기변형특성은 시편에 100 V 까지 전압을 인가한 후 10 Hz 에서 laser vibrometer (Gratec Co.)를 사용하여 살펴보았다. 이때 외부 응력 부하 조건을 0 에서 165 MPa 까지 15MPa 단위로 변화시키면서 액추에이터에 압축응력을 인가하였다. 이러한 압축응력인가한 상태에서 전계 1kV/mm (전압 100V)를 인가하면서 액추에이터의 변위 특성을 관찰하였다. 또한 압축응력이 액추에이터의 전기적 특성에 미치는 영향을 관찰하기위하여 압축응력하에서 임피던스 분석기(HP4194A)를 이용하여 임피던스와 정전용량을 관찰하였다.

액추에이터의 비선형적 특성 변화는 공진주파수와 영률의 변화로 관찰된다[14]. 이러한 비선형 기계적 특성을 관찰하기 위하여 일정한 전계를 인가한상태에서 압축응력에 따른 변형량을 관찰하였다.

## 3. 결과 및 고찰

압전체의 비선형 거동은 압전특성이 분역의 이동에 기인되기 때문이다. 압전 상수가 전계 강도에 따른 증가하며 이는 가해진 전계의 방향과 일치하지 않는 non-180° 분역이 전계의 방향과 같은 180°분역으로 전환될 때 압전 상수  $d_{33}$  이 변화된다고 알려져 있다[6].

압전 액추에이터의 변위특성은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다 [7].

$$x_3 = S_{33}X_3 + d_{33}E_3 \text{-----}(1)$$

큰 변위를 위해서는 압전상수 ( $d_{33}$ )와 기계적 영률( $1/S_{33}$ )이 작은 재료가 유리하다. 여기서 X, E, x 는 각각 기계적 응력, 전계, 변형률이다. 이러한 압전액추에이터의 특성은 세라믹 내부의 분역이 변형률에 크게 영향을 받게 된다. N. A. Schmidt[8]와 Y. W. Zeng 등[9, 10]은 세라믹의 변형률은 180°분역보다는 90°분역에 의해 영향을 많이 받는다는 것을 보고하였다. 이들의 연구는 분역 구조 및 이동행로에 따라 압전특성들이 변화함을 해석하였으며 분역 구조에 영향을 끼치는 인자로는 압전 소재 및 액추에이터의 기하학적 구조, 외부의 기계적 응력, 인가 전계 등이다 [11]. 이러한 특성중 전계의 강도에 따라 공진주파수와 출력압 등도 변화하게 되며 이는 영률의 변화와 연관이 있다. 본 연구에서는 외부의 기계적 응력이 액추에이터에 미치는 영향을 관찰하였다.

### 3.1 외부 압축응력하에서의 변형률 측정

그림 1 은 액추에이터에 여러 값의 일정 압축응력을 인가한후 전계 1kV/mm 를 인가하였을때 변형율을 측정한 결과이다. 액추에이터에 15MPa 단위로 150MPa 까지 압축응력을 단계적 증가시키면서 전계인가하여 변형률을 측정하였다. 그런 다음 다시 압축응력을 제거하고 같은 방법으로 응력을 증가하면서 변형률을 관찰하였다. 이러한 응력인가를 반복적으로 3 회 실시하였다. 먼저 첫 번째 응력증가에서는 15MPa 압력인가시 전계유기 변형률이 증가하다가 압축 응력이 점점 증가할수록 같은 전계인가 변형률은 감소해서 165MPa 인가시 전계인가 변형률

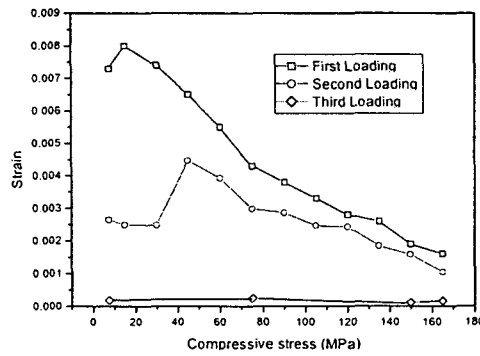


Fig. 1 Plots of strain vs. pre-stress loading of multilayer ceramic actuator subjected to an electric field of 1 kV/mm

은 0.002 이하가 되었다. 15MPa 인가시 전계유기 변형률이 증가하는 것은 압축응력에 의한 non-180° 분역량이 180° 분역량에 비해서 상대적으로 증가하고 이렇게 증가된 non-180° 분역이 전계에 의해 재배열하므로써 변형률이 증가된다 (그림 2 (a)에 개념 도식도를 나타내었다). 그러나, 15MPa 이상의 압력 인가 경우에는 압력인가에 따른 액츄에이터 내부응력이 증가되고, non-180° 분역이 180° 분역으로 전환시 요구되는 에너지가 증가되어 (그림 2 (b))보다 적은 변형률을 나타낸다.

이러한 가해진 압축 응력을 완전히 제거한 다음 다시 응력을 인가한 경우에도 비슷한 경향이 관찰되었다. 하지만 이 과정에서의 전체변형률은 첫번째 응력 인가 경우 보다 전체적으로 감소한 것을 관찰하였다. 이 두 번째 응력인가 이후 다시 세 번째 응력인가 경우에는 전계인가 변형이 거의 나타나지 않았다. 이는 큰 응력인가 시 액츄에이터 내부에 형성되었던 분극이 점차로 사라져서 세 번째 응력인가 시 거의 분극효과가 사라지기 때문인 것으로 사료된다.

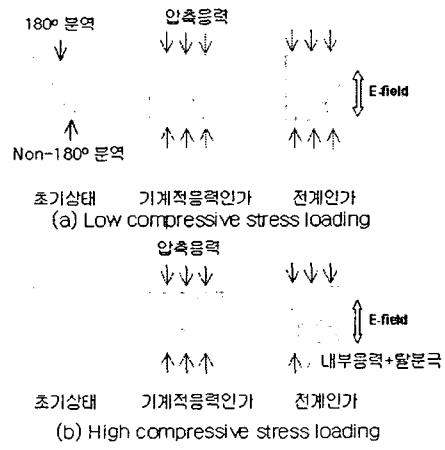


Fig. 2 Schematic illustration showing domain configurations of electric field-induced multilayer ceramic actuator under (a) low compressive stress and (b) high compressive loadings

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

그림 3 은 액츄에이터에 일정한 압축응력을 인가한 상태에서 전계인가에 따른 압전  $d_{33}$  상수를 측정된 결과이다. 외부 기계적 압축응력이 없는 경우에는 인가되는 전계가 증가할수록 압전 상수의 값은 증가하는 경향을 관찰할 수 있다. 이러한 증가 경향은 소프트 압전 세라믹스의 일반적인 특성이며 전계인가시 분역이 전계방향으로 회전하므로써[10] 압전상수가 증가된다고 해석할 수 있다. 그러나 외부 부하 인가시 특히, 150 MPa 의 큰 압축응력이 인가된 경우에는 일정한 압전상수가 측정되었다. 즉, 외부 압축응력에 의해 분역의 이동이 억제되어서 전계에 의한

압전 상수의 증가는 관찰되지 않았다. 이러한 결과는 외부의 기계적 부하는 압전액추에이터의 비선형 거동을 줄일 수 있다는 것을 의미한다.

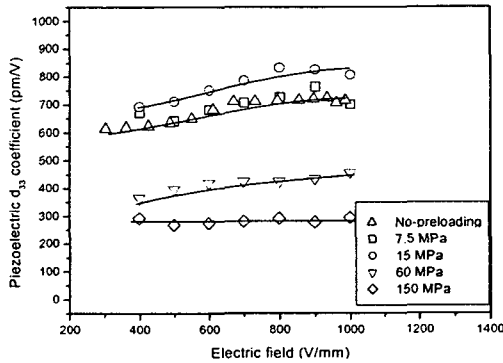


Fig. 3 Pseudo-piezoelectric  $d_{33}$  coefficient vs. electric field of multilayer ceramic actuator under various pre-compressive loadings.

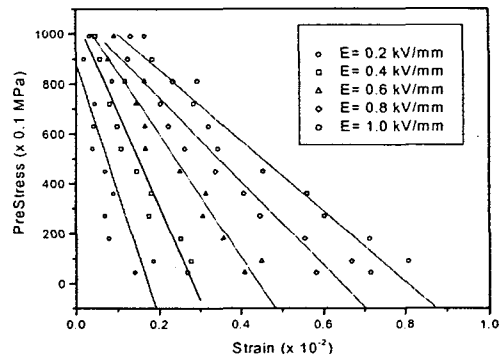


Fig. 4 compressive stress vs. strain for multilayer ceramic actuator subjected to various electric fields

### 3.3 일정 전계인가시 응력인가에 따른 변형을 변화

위의 식 (1)에서 보듯이 액추에이터의 특성은 압전상수  $d_{33}$  과 더불어 기계적 성질인 영률에 의해 영향을 받는다 [11, 13]. 실제로 일정 전압이 인가된 경우에 영률의 변화를 관찰하였다.

그림 4 는 액추에이터에 일정 전계를 인가하고 압축응력을 변화할 때 변형률을 측정하는 결과이다. 가해진 전계는 0.2 ~ 1kV/mm 이었으며 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 전계량이 인가될 때 많은 량의 분역들이 전계방향으로 배열되는 것을 의미한다. 이러한 배열된 분역들이 압축응력인가시에 변형에 기여하여 낮은 영률이 관찰된다 [13].

### 3.4 응력에 따른 공진주파수의 변화

그림 5 는 여러 일정 압축응력을 인가한 후 액추에이터의 임피던스 특성을 측정한 결과이다. 측정주파수는 1kHz 부터 1MHz 까지이다. 그림에서 보듯이 주파수에 따른 임피던스 변화로부터 공진 주파수를 관찰할 수 있다. 여러 공진 주파수가 관찰되는데 첫 번째 공진 주파수는 액추에이터의 영률에 반비례한다 ( $f_{res} = 2\pi\sqrt{m/Y_{33}} = 2\pi\sqrt{mS_{33}}$ ).  $f_{res}$  는 공진 주파수,  $m$ ,  $Y_{33}$ ,  $S_{33}$  는 액추에이터의 질량, 영률, 영률의 역수 [11]. 그림 (a)에서 보듯이 압축응력이 증가할수록 첫 번째 공진 주파수가 점차로 증가하는 것을 관찰할 수 있으며 이로부터 영률이 감소하는 것을 예상할 수 있다 (그림 4(b)). 이러한 결과는 그림 3 의 결과에 보여주는 경향과 일치함을 알 수 있다.

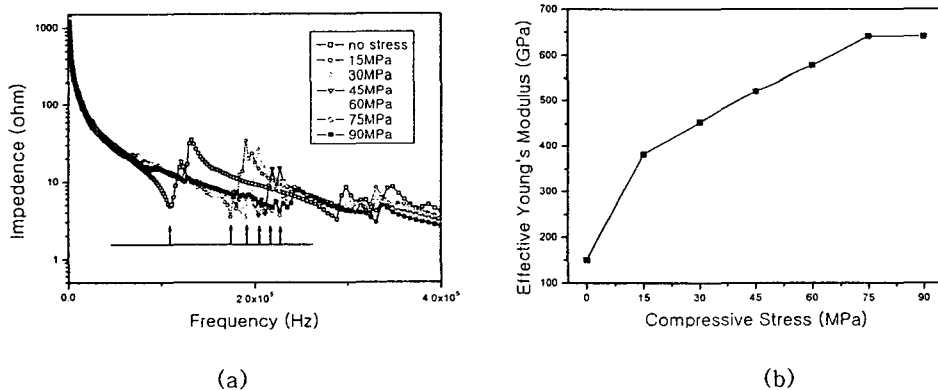


Fig. 5 Plots of (a) impedance vs frequency and (b) resultant effective young's modulus for multilayer ceramic actuator subjected to various compressive loadings.

#### 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 분역 이동에 대한 내부 저항 응력의 증가에 때문인 것으로 사료된다. 압전상수는 전계와 관련이 있으며 외부 압축응력인 경우에는 일정한 압전 상수가 관찰되며 이는 비선형성 특성이 감소됨을 의미한다. 또한 높은 전계가 인가된 경우에는 영률이 감소되는 것을 관찰할 수 있었는데 이는 기계적 변형시 많은 량의 분역들이 기여할 수 있는 것으로 예상된다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업자원부 차세대 신기술 개발 사업 중 이온빔이용 나노가공용 장비 개발의 지원에 의해 수행되었습니다

#### 참고문헌

- [1] A. Nakamura, K. Mitsui and T. Goto, " Development of Dual Servo Scanning Probe Microscopy" , JSPE, Vol. 62, No. 6, pp.850-854, 1996.
- [2] S. Sakuta, M. Adachi, K. Ogawa and K. Ueda, " Newly Developed Inchworm Dual Movement Method to Reduce Interference between Fine and Coarse Positions" , JSPE Vol. 62, No. 6, pp.825-829, 1996.
- [3] K. Nagaya, S. Ikai, T. Fukushima, A. Kurusu and K. Kashimoto, " Analysis of a Piezoelectric Actuator with a Displacement Enlargement Mechanism and its Control" , JSME (c) Vol. 62, No. 588, pp.2721-2729, 1996-1997.
- [4] D. Damjanovic, " Nonlinear Piezoelectric Response in Ferroelectric Ceramics" , Piezoelectric Materials: Advances in Science, Technology and Applications, 123-135, 2000, Kluwer Academic Publishers.
- [5] D. Damjanovic and M. Demartin, " Contribution of the Irreversible Displacement of domain walls to the piezoelectric effect in Barrium Titanate and Lead Zirconate Titanate Ceramics, J. Phys.: Condens. Matter, Vol. 9, pp. 4943, 1997.
- [6] 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, pp. 2913, 1999.
- [7] Y. Masuda, "Variation of dielectric constant affected by domain structure and electric-field-induced strain in ferroelectric ceramics", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 33, pp. 5549, 1994.
- [8] N. A. Schmidt, "Coercive force and 90° domain wall motion in ferroelectric PLZT ceramics with square hysteresis loops", Ferroelectrics, Vol. 31, pp. 105, 1981.
- [9] Y. W. Zeng, W. R. Xue, and G. F. Fu, "Investigation on switching behaviour of 90° domains in  $(\text{Pb}_{0.85}\text{Sm}_{0.10})(\text{Ti}_{0.98}\text{Mn}_{0.02})\text{O}_3$  piezoelectric ceramics of ultra-high electromechanical anisotropy by the X-ray diffraction technique", J. Mater. Sci. Vol. 26, pp. 4293, 1991.
- [10] G. Kruger, "Domain wall motion concept to describe ferroelectric rhombohedral PLZT ceramics", Ferroelectrics, Vol. 11, pp. 417, 1976.
- [11] 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 180o domain wall motion", J. Appl. Phys., Vol. 90, pp. 5278, 2001.
- [12] J. Fan, W.A. Stoll and C.S. Lynch, "Nonlinear constitution behavior of soft and hard PZT : Experiments and modelling", Acta Mater., Vol. 47, pp. 4415, 1999.
- [13] 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, pp. 197, 2000.
- [14] 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, pp. 5358, 1998.