

## 적층형 세라믹 압전 액추에이터의 전기장도와 압축응력에 따른 변위특성 해석

### Electric Field Strength and Compressive Stress Effects on the Displacement of Multilayered Ceramic Actuators

송재성<sup>1,a</sup>, 정순종<sup>1</sup>, 김인성<sup>1</sup>, 민복기<sup>1</sup>  
(Jae-Sung Song<sup>1,a</sup>, Soon-Jong Jeong<sup>1</sup>, In-Sung Kim<sup>1</sup>, and Bok-Ki Min<sup>1</sup>)

#### Abstract

The effects of electric field strength and mechanical compressive stress on the displacement of multilayered ceramic actuator, stacked alternatively  $0.2(\text{PbMn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3)-0.8(\text{PbZr}_{0.475}\text{Ti}_{0.525}\text{O}_3)$  ceramic thin films and 70Ag-30Pd electrodes were investigated. Because the actuators were designed to stack ceramic layer and electrode layer alternatively, the ceramic-electrode interfaces may act as a resistance to motion of domain wall. so the polarization and strain were affected by the amount of 180° domain, electric field strength and mechanical compressive stress. Consequently, the change of polarization, displacement with respect to field strength, and mechanical compressive stress were likely to be caused by readiness of the domain wall movement around the ceramic-electrode interfaces.

**Key Words** : Multilayered ceramic actuator, Displacement, Electric field strength, Domain reorientation, Impedance

#### 1. 서론

액추에이터는 전기모터, 유압기기, 공압 기기등과 같이 궁극적으로 기계적 변화를 주는 기기를 통상적으로 일컫는 말로서, 용도에 따라서 다양하게 이용되고 있다. 세라믹 압전 액추에이터는, 다른 액추에이터에 비하여 응답속도, 정밀도, 분해능에서 아주 우수한 특성을 가지고 있어, 마이크로스테이지, 정밀 밸브 및 펌프, 초음파 모터등에 이용가능하고 또 일부는 이미 상업화되어 있다. 세라믹과 전극을 교대로 적층하여 구성하는 적층형 세라믹 액추에이터는 구동전압을 낮추고, 압전 액추에이터의 단점인 발생력을 크게 향상시킬 수 있어,

정밀제어가 요구되는 전기전자 기기에 적용될 것으로 기대된다[1,2].

압전 액추에이터의 변위는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다[2].

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

여기서 X, E, x는 각각 기계적 응력, 전기장, 변위이다. 식 (1)에서와 같이, 보다 큰 변위를 얻기 위해서는 압전상수 ( $d_{33}$ )가 크고, 기계적 영률 ( $1/S_{33}$ )이 작은 재료를 적용할 필요성이 있다. 세라믹 압전재료에서 압전상수는 세라믹 내부의 domain의 형상과 배열 방법에 크게 의존한다. 따라서 분역과 압전 물성과의 관계에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있는데, N. A. Schmidt[3]와 Y. W. Zeng[4]등은 세라믹의 변위는 180°domain보다는 90°domain에 의해 영향을 많이 받는다는 것을 연구결과를 발표하였다[5]. 이들의 연구는 domain의 구조 및 이동행동에 따라 압전 특성이 변화하

1. 한국전기연구원 전자기소자연구그룹  
(경남 창원시 성주동 28-1)

a. Corresponding Author : jssong@keri.re.kr  
접수일자 : 2005. 1. 13  
1차 심사 : 2005. 2. 14  
심사완료 : 2005. 2. 16

는 것을 simulation하여 입증하였는데, domain 구조에 영향을 끼치는 인자로는 소재의 제조 경로, 소재 또는 압전체의 기하학적 구조, 외부의 기계적 응력, 인가 전계등을 고려하였다.

본 연구에서는  $0.2(\text{PbMn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3)-0.8(\text{PbZr}_{0.475}\text{Ti}_{0.525}\text{O}_3)$  조성의 압전 재료를 conventional ceramic process로 제조하여, 후막공정으로 적층형 세라믹 압전 액추에이터를 제조한 후 적층체의 전계 강도, 압축응력, 변위, 임피던스 의 상호관계를 고찰하고, 이를 domain구조 이론을 도입하여 해석하였다.

## 2. 실험

### 2.1 시편제조

순도가 99.9 %이상인 PbO, ZrO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, MnO<sub>2</sub>, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 분말을 출발원료로 사용하여 압전재료를 합성하였다. 고상반응 과정에서 생성될 수 있는 pyrochlore상을 억제하기 위해 MnO<sub>2</sub>와 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>를 우선 반응시키고, PbO, TiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>를 2차로 고상 반응시키는 방법, 즉 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) 조성의 세라믹 압전 분말을 합성하였다. 이렇게 합성된 PMN-PZT소재의 큐리온도는 355 °C, 압전상수 d<sub>33</sub>는 530 pC/N의 값을 나타냈다. 제조된 분말을 유기용매 (MEK/Ethyl Alcohol)와 분산제 (Texaphor 963)를 넣고 24시간 동안 불밀링 한 후 결합제 (PVB)와 가소제 (DBP)를 첨가하고 다시 24 시간 동안 불 밀링 하여 slurry를 제조한 후 닥터 블레이드법 으로 100 μm의 green sheet를 제조하였다. green sheet 위에 여러 가지 전극면적(즉, 적층체의 단면적)을 갖도록 screen printing 하여, 100층의 세라믹/전극 적층체를 구성하였다. 전극재는 70Ag-30Pd paste를 이용하였는데, 본 연구에 사용한 세라믹/전극 압전 적층체의 형상은 표 1에 나타내었다.

제조된 세라믹/전극 압전 적층체를 1100 °C에서 2 시간 동안 소결한 후 Ag paste를 사용하여 외부 전극을 형성하여 적층형 세라믹 압전 액추에이터

표 1. 세라믹/전극 압전 적층체의 형상.

Table 1. Shape of multilayer ceramic actuator.

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

(MCA)를 제조하였다. 제조된 적층형 세라믹 압전 액추에이터는 150 °C에서 전계 3 kV/mm를 인가면서 열처리하여 분극처리 하였다.

### 2.2 측정 및 분석

제조된 적층형 세라믹 압전 액추에이터는 외부 응력 부하에서의 전계유기변형특성, 임피던스, 정전용량을 측정하였다.

외부 응력부하 변화에 따른 전계유기변형특성은 100V(전계1 kV/mm), 10 Hz에서 laser vibrometer(Gratec Co.)를 사용하여 측정하였는데, 외부 응력 부하는 0에서 165 MPa까지 압축 응력 인가량을 변화시켰는데, 매15 MPa마다 전계 유기 변형값을 측정하였다.

압축응력이 액추에이터의 전기적 특성에 미치는 영향을 평가하기위한 임피던스 및 정전용량은 앞 조건에서와 똑같은 압축응력의 변화에 따라서 Impedence analyzer(HP4194A)를 이용하여 측정하였다.

액추에이터의 비선형적 특성 변화는 공진주파수와 영률의 변화로도 관찰하는 것이 가능한데[7,8], 본 연구에서 제작된 적층형 세라믹 압전 액추에이터의 비선형 기계적 특성은 일정한 전계를 인가한 상태에서 압축응력의 변화에 따른 변화를 측정, 분석하는 방법을 이용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

세라믹 압전 액추에이터의 기계적 변위특성의 비선형거동은, 압전체의 전압인가에 따른 변위가 전계변화에 의한 도메인의 이동에 기인한다는 연구결과와 밀접한 관계가 있다. 세라믹 압전체의 압전 상수는 전계 강도에 비례해서 증가하는데, 이는 인가된 전계의 방향과 일치하지 않는, 즉 전계방향과 parallel하지 않은 domain이 전계의 방향과 같은 180° domain으로 이동함으로써 압전 상수 d<sub>33</sub>, d<sub>31</sub>의 변화가 유기된다는 연구 결과가 보고 되고 있다[9,10]. 또한 전계의 강도의 변화에 따라 공진주파수와 출력압 등도 영향을 받게 되는데, 이는 세라믹 압전체가 갖는 영률과의 연관성이 크다. 본 연구에서는 외부의 기계적 응력이 적층형 세라믹 압전 액추에이터의 기계적 변위에 미치는 영향을 domain의 이동의 관점에서 고찰하였다.

적층형 세라믹 압전 액추에이터의 압축응력에 따른 비선형적 거동은 압전 액추에이터의 응용과 관련하여 의미 있는 현상으로서, 이론적, 실험적

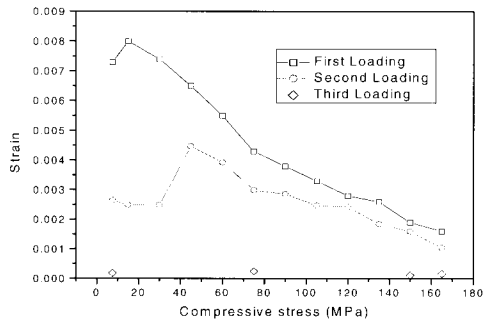


그림 1. 1 kV/mm의 인가전압에서, 압축응력에 따른 적층형 세라믹 압전 액추에이터의 변위변화.

Fig. 1. Strain vs compressive stress and number of loading cycle at MCA.

고찰이 요구되는 현상이다. 인가전압을 일정하게 하고, 압축응력을 변화에 따라서 변위의 변화를 고찰하였다.

제조된 적층형 세라믹 압전 액추에이터에 1 kV/mm의 인가전압을 가했을 때, 압축응력에 따른 변위의 변화를 그림 1에 나타내었다.

적층형 세라믹 압전 액추에이터에 150 MPa까지 압축응력을 높이면서 변형률을 측정하였다. 그런후 다시 압축응력을 제거하고 같은 방법으로 응력을 증가하면서 변형률을 관찰하였다. 이러한 응력인가를 반복적으로 3번 실시하였다. 첫 번째 응력을 인가할 때는, 20 MPa 정도의 압축 응력에서 조그만 변위 peak을 형성하고, 압축 응력이 커질수록 거의 직선적으로 감소해서 165 MPa의 압축응력에서의 변형률은 0.002이하가 되었다. 20 MPa의 압축응력에서 전계유기 변형률이 최고가 되는 것은 압축응력이 커짐에 따라, 압축응력에 의한  $180^\circ$ 에서 어긋난 domain/ $180^\circ$  domain 비율이 증가하기 때문이며, 그이상의 압축응력에서는  $180^\circ$ 에서 어긋난 domain이  $180^\circ$  domain으로 배열되는데 필요한 에너지가 증가되어 거기에 비례하여 변형률이 적어진다. 두 번째 사이클에서도 첫 번째 사이클과 유사한 경향을 보여주는데, 다만, 변형률이 첫 번째 사이클에서 보다 전체적으로 낮아졌고, 변형률이 최고가 되는 peak이 나타나는 압축응력이 20 MPa에서 40 MPa로 약간 증가하였다. 이는 압축응력 변화사이클이 반복됨에 따라서 적층형 세라믹 압전 액추에이터의 변위특성이 열화되기 때문으로 생각된다. 변화율이 최고가 되는 peak의 이동은 변

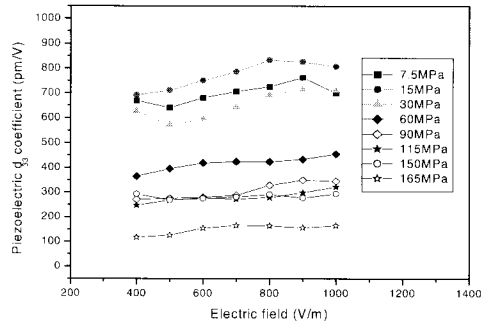


그림 2. 압축응력과 전계 변화에 따른 적층형 세라믹 압전 액추에이터의 압전 상수( $d_{33}$ ) 변화.

Fig. 2. Piezoelectric constant of MCA as a function of electric field strength and compressive stress.

형율 열화에 따라서, 압전체의 압축응력에 대한 내력이 커진것에 기인하는 것으로 사료된다. 세 번째 사이클에서는 압축응력에 따른 변위가 거의 나타나지 않았다. 이는 압전체가 큰 압축응력의 반복에 의해서 탈 분극현상이 일어났기 때문이다. 이를 입증하기 위하여, 100 MPa까지의 압축응력을 반복적으로 가하면서 똑같은 실험을 하였다.

그 결과에 의하면, 압축응력 변화에 따른 변형율이 거의 없었는데, 이는 액추에이터 제작에 사용된 압전체의 압축응력에 대한 내력이 100 MPa이상인 것을 보여주는 결과이다.

그림 2에 제작된 적층형 세라믹 압전 액추에이터의 압축응력과 전계변화에 따른 준 압전 상수  $d_{33}$  (pseudo-piezoelectric coefficient)의 변화를 나타내었다.

일정한 압축응력에서 전계강도가 증가 할수록 준압전 상수가 압축응력의 크기에 상관없이 완만하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이러한 경향은 대부분의 소프트 압전 세라믹스에서 나타내는 현상인데, domain 거동으로 해석할 수 있다. 즉, 전계강도가 증가함에 따라 영률에 감소하는데, 식 (1)에서 알 수 있듯이 일정한 변위, 압축응력에서 압전체의 영률이 감소할수록 압전 상수  $d_{33}$ 가 증가한다.

일정 전계강도에서의 압축 응력에 따른 압전 상수  $d_{33}$ 의 변화를 그림 3에 나타내었다.

그림 1에서와 같이 압축응력이 증가함에 따라, 일정 압축응력까지 증가하다가 그 이상의 압축응력에서는 감소하였다.

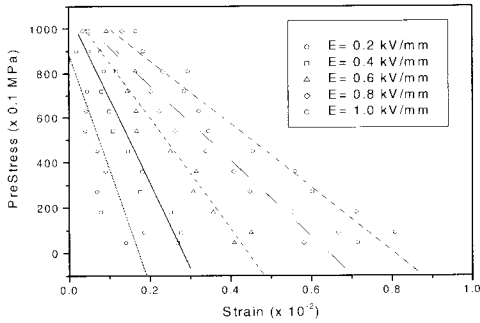


그림 3. 일정 전계에서의 압축응력에 따른 변위 변화.

Fig. 3. Pre-stress vs strain curve of MCA at constant electric field strength.

그림 3에서 나타낸바와 같이 일정한 전계에서의 압축응력에 따른 적층형 세라믹 압전 액추에이터의 변위변화는 흥미롭게도 상호 선형관계를 가지고 있다.

전계의 범위는 0.2~1 kV/mm이었으며 그림 3에서 보듯이 응력과 변형률의 기울기(영률)는 가해진 전계에 따라 변화함을 알 수 있다. 즉, 전계강도가 증가할수록 영률이 점차로 감소함을 알 수 있다. 이러한 변화는 보다 큰 전계강도에서 많은 수의 domain들이 전계가 인가되는 방향으로 배열되기 때문인 것으로 여겨지는데, 이렇게 배열된 domain들이 압전체의 물성에 크게 영향을 미친다.

압축응력에의 변화에 따른 적층형 세라믹 압전 액추에이터의 주파수 임피던스 특성을 그림 4에 나타내었다.

압축응력은 0~90 MPa의 범위에서 일정한 값을 인가하였으며, 측정주파수범위는 1 kHz에서 1 MHz 까지이다. 그림 4에서 보듯이 주파수에 따른 임피던스 변화로부터 공진 주파수를 측정할 수 있다. 여러 공진 주파수중에서 첫 번째 공진 주파수의 크기는 압전 액추에이터의 영률에 반비례한다[11]. 압축응력이 증가할수록 첫 번째 공진 주파수의 크기가 점차로 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이 결과로부터 압전체의 영률이 압축응력이 커짐에 따라 감소하고, 압전 상수는 증가할 것으로 예상되는데, 그림2의 실험결과와 잘 일치한다.

세라믹 적층체의 파괴거동을 고찰하기위하여, 적층체의 파괴가 일어날 때까지 인장력을 가하여 그 결과를 그림 5에 나타내었다.

그림 5(a)는 파괴면의 SEM 이미지로, 파괴된 세라믹 적층체의 표면에 작은 전극이 붙어있었다.

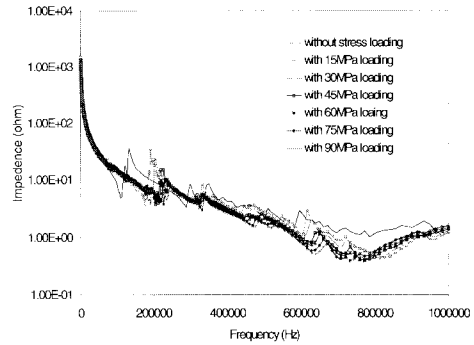


그림 4. 압축응력의 변화에 따른 주파수-임피던스 특성.

Fig. 4. Impedance characteristics of MCA as function of frequency and compressive stress.

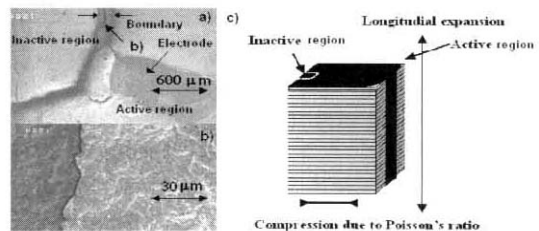


그림 5. 적층형 세라믹 액추에이터의 파괴거동 (a) crack의 SEM 사진 (b) 파괴면의 확대사진 (c) 적층체내에서 발생하는 인장 응력의 개념도.

Fig. 5. Images of SEM, which show a) cracked surface of MCA, b) crack line of destroyed MCA, and c) illustration of tensile stress generated within the MCA.

적층형 압전 액추에이터는 일반적으로  $d_{33}$  모드의 변형을 하기 때문에, 전기장이 인가됨에 따라 전극과 세라믹간의 active region과 inactive region 사이에 매우 큰 인장응력이 주기적으로 유기된다. 동시에 전기장의 인가방향과 수직인 방향으로 또다른 인장응력이 생기는데, 이는 전기장과 평행한 방향으로의 부피 팽창을 보완하기위한 Poisson's ratio에 기인한다. 이러한 요소들이 종합적으로 작용하여 궁극적으로 active region과 inactive region 사이에 crack이 발생한 것으로 분석된다.

그림 5(a)의 crack부분을 확대하여 그림 5(b)에 나타내었다. active region과 inactive region사이의 경계가 분명하게 보이는데, crack이 입계에 상관없이 active region과 inactive region의 경계면을 따라서 전파되는 것을 알 수 있다. 그림 5(c)는 적층체의 crack에 영향을 주는 팽창방향과 인장응력의 개념도이다.

#### 4. 결론

원료물질로부터 PMN-PZT계 압전분말을 합성하고, 그것을 이용하여 적층형 세라믹 압전 액추에이터를 제작하여 전계강도-압축응력-압전상수의 상호 관계에 대해서 고찰하였다. 적층형 세라믹 압전 액추에이터에 150 MPa까지 압축응력을 높이면서 변형률을 측정하였다. 그런 후 다시 압축응력을 제거하고 같은 방법으로 응력을 증가하면서 변형률을 관찰하였는데, 이를 세 사이클 반복하였다. 그 결과 일정 압축응력까지는 압축응력이 커짐에 따라 변형율이 증가하다가 감소하였고, 사이클이 반복됨에 따라, 전체적인 변형율이 크게 감소하였는데 이는 domain 재배열과 이동에 대한 내부저항 응력, 임계압축응력에 기인하는 것으로 해석하였다. 또한, 일정한 압축응력에서 전계강도가 증가할수록 준 압전상수가 압축응력의 크기에 상관없이 완만하게 증가하였는데, 이러한 경향은 대부분의 소프트 압전 세라믹스에서 나타내는 현상인데, 이 역시 domain의 재배열과 이동에 기인하는 것으로 사료된다.

적층체의 파괴거동을 고찰한 결과, 적층체의 파괴는 세라믹과 전극간의 active region과 inactive region간의 계면을 따라서 진행되는 것을 관찰하였는데, 이는 계면에서의 응력집중 현상에 의한 것으로 여겨진다.

#### 감사의 글

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

#### 참고 문헌

[1] 하문수, 정순중, 송재성, 이재신, “적층형 세라믹 액추에이터의 세라믹-전극간 계면이 전기적 특성에 미치는 영향”, 전기전자재료학회 논문지, 15권, 10호, p. 896, 2002

[2] 이수호, 류주현, “전체 액추에이터의 특성 및 기술동향”, 전기전자재료학회논문지, 11권, 2호, p. 164, 1998.

[3] N. A. Schmidt, “Coercive force and 90° domain wall motion in ferroelectric PLZT ceramics with aquare hysteresis loops”, *Ferroelectrics*, Vol. 31, No. 3/4, 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 electro-mechanical anisotropy by the X-ray diffraction technique”, *J. Mater. Sci.*, Vol. 26, p. 4293, 1991.

[5] G. Kruger, “Domain wall motion concept to describe ferroelectric rhombohedral PLZT ceramics”, *Ferroelectrics*, Vol. 11, No. 3, p. 417, 1976.

[6] 하문수, 정순중, 고중혁, 이대수, 송재성, “기계적 부하 인가하에서 적층형 압전 세라믹 액추에이터의 비선형 특성”, 전기전자재료학회 학계학술대회 논문집, p. 684, 2004.

[7] Q. M. Wang and L. E. Cross, “Determination of young’s modulus of the reduced layer of a piezoelectric rainbowactuator”, *J. Appl. Phys.*, Vol. 83, No. 10, 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, No. 4, 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, No. 10, p. 2913, 1999.

[10] 윤광희, 윤석진, 홍제일, 류주현, 박창엽, “미소변위 제어용 전체 세라믹스의 특성에 관한 연구”, 전기전자재료학회논문지, 3권, 4호, p. 77, 1990.

[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.