한국공작기계학회 2004 춘계학술대회 논문집 pp.478~481

적층형 세라믹 액츄에이터의 전기-기계거동

정순종**, 고중혁+, 송재성+,홍원표++, 최원종++
+전자기소자 연구그룹, 한국전기연구원
+나노연구그룹 , 생산기술연구원

Electro-mechanical properties of Multilayer Ceramic Actuators

Soonjong Jeong*, Joonghuck Koh+, Jaesung Song+, Younpyo Hong++, Wonjong Choi++

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($PbMn_{1/3}Nb_{2/3}O_3$)-0.8($PbZr_{0.475}Ti_{0.525}O_3$) 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 나타날 수 있다[2].

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

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. 실험방법

순도가 99.9%이상인 PbO, ZrO_2, TiO_2, MnO_2, Nb_2O_5 분말을 출발원료로 사용하였다. 고상반응 과정에서 나타나는 파이로클로아 (pyrochlore) 상을 억제하기 위해 MnO_2와 Nb_2O_5를 먼저 반응시키고, PbO, TiO_2, ZrO_2를 2차로 고상 반응시키는 콜롬바이트 (columbite

* 발표자, 한국전기연구원,전자기소자그룹 (sjjeong@keri.re.kr)
주소: 641-120 경남 창원시 성주동 28-1
+ 한국전기연구원, 전자기소자그룹
++ 생산기술연구원, 나노가공팀

precursor) 방법을 이용하여 $0.6Pb(Mn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$-$0.4Pb(Zr_{0.475}Ti_{0.525})O_3$ (이하 PMN-PZT) 분말을 제조하였다. 이 PMN-PZT소재는 큐리온도가 355℃, 압전상수 d_{33}은 530 pC/N으로 측정되었다. 제조된 분말을 유기용매 (MEK/Ethyl Alcohol)와 분산제 (Texaphor 963)를 넣고 24시간 동안 볼밀링 한 후 결합제 (PVB)와 가소제 (DBP)를 첨가하고 다시 24 시간 동안 볼밀링하여 slurry를 제조한 후 닥터 블레이드 (doctor blade) 방법으로 100 ㎛의 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 ㎟이었다. 표 1에 제조된 시편의 전극 크기를 나타내었다.

표 1. MCA의 내부전극 크기.

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

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

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 관찰하기위하여 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 인가한상태에서 압축응력에 따른 변형량을 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

압전체의 비선형 거동은 압전특성이 도메인의 이동에 기인한다는 이유 때문이다. 압전 상수가 전계 강도에 따른 증가하며 이는 가해준 전계의 방향과 일치하지 않는 비 180° 도메인이 전계의 방향과 같은 180도메인으로 전환될 때 압전 상수 d_{33}, d_{31}이 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.

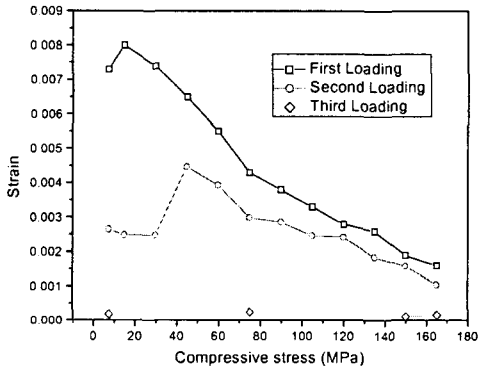

그림1. 액츄에이터에서 인가한 압축응력에 따른 1kV/mm인가시 변형률.

그림 1은 액츄에이터에 여러 값의 일정 압축응력을 인가한후 전계 1kV/mm를 인가하였을 때 변형율을 측정한 결과이다. 액츄에이터에 15MPa단위로 150MPa까지 압축응력을 단계적 증가시키면서으로 인가하여 변형률을 측정하였다. 그런후 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 변형률은 0.002이하가 되었다. 15MPa인가시 전계유기 변형률이 증가하는 것은 압축응력에 의한 비 180°/180° 도메인 비율이 증가하기 때문이며 그이상의 압력인가시 발생되는 액츄에이

터 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 액츄에이터내부에 제작시 형성되었던 분극이 점차로 사라져서 세 번째 응력인가시 거의 분극효과가 사라지기 때문인 것으로 사료된다.

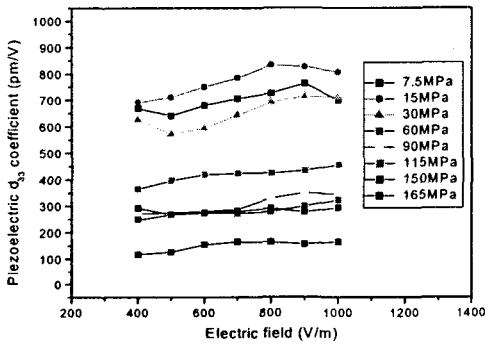

그림2. 압축응력인가시 전계인가에 따른 준 압전 d_{33} 상수.

그림 2는 액츄에이터에 일정한 압축응력을 인가한 상태에서 전계인가에 따른 준 압전 d_{33} 상수를 측정한 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.

위의 식 (1)에서 보듯이 액츄에이터의 특성은 압전상수 d_{33} 과 더불어 기계적 성질인 영률에 의해 영향을 받는다 [6, 11]. 실제로 일정 전압이 인가된 경우에 영률의 변화를 관찰하였다.

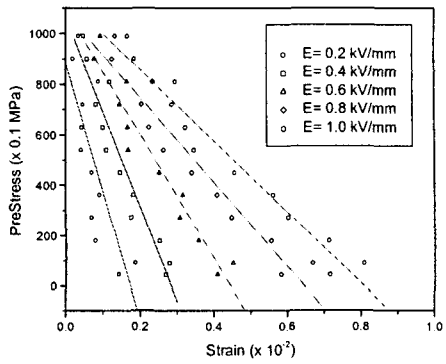

그림 3. 일정 전계인가시 압축응력-변형률

그림 3은 액츄에이터에 일정 전계를 인가하고 압축응력을 변화할 때 변형률을 측정한 결과이다. 가해준 전계는 0.2~1kV/mm이었으며 그림에서 보듯이 응력과 변형률의 기울기(영률)는 가해준 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 도메인들이 전계방향으로 배열된다. 이러한 배열된 도메인들이 압축응력인가시에 변형에 기여하여 낮은 영률이 관찰된다 [11].

(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.

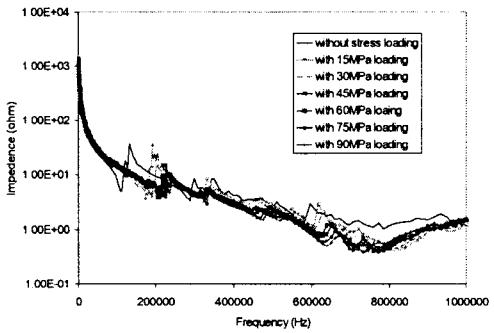

그림 4. 압축응력인가하에서 임피던스-주파수 곡선

4. 결론

적층형 압전 액츄에이터를 제작하고 그 액츄에이터에 | 기계적인 변형과 압전 변형의 상호 효과를 관찰하였다. |가응력과 전압을 변화시키면서 압전에 의한 변형률과 기 |적 응력에 의한 변형률을 조사하였다. 그 결과 인가응력 | 증가할수록 압전상수는 감소하였고 이의 변화는 도메인 |동에 대한 내부 저항 응력의 증가에 때문인 것으로 사료 |다. 또한 높은 전계가 인가된 경우에는 영률이 감소되는 |을 관찰할 수 있었는데 이는 기계적 변형시 많은 량의 도 |인들이 기여할 수 있는 것으로 예상되었다.

후 기

본 연구는 산업자원부 차세대 신기술 개발 사업 중 이온 |이용 나노가공용 장비 개발의 지원에 의해 수행되었습니 |

참 고 문 헌

.) 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 Pubrishers, 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 180o 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 rainbowactuator", 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.