

기계적인 부하 인가하에서 적층형 압전 액츄에이터의 비선형 특성

하문수, 정순중, 고중혁, 이대수, 송재성
한국전기연구원

Non linear properties of multilayer piezoelectric actuator under compressive stress in static electric fields

Mun Su Ha, Soon Jong Jeong, Jung Hyuk Koh
Dae Su Lee, Jae Sung Song
Korea electrotechnology Research Institute

Abstract

일반적으로 적층형 압전 액츄에이터의 변위는 액츄에이터의 내부 적층수와 압전정수(d_{33})에 비례적으로 증가한다. 그러나 압전현상을 이용한 액츄에이터는 전기적, 기계적 부하에 의한 dipole 거동을 보이기 때문에 domain wall에 의한 압전정수의 비선형 거동을 보인다.

본 논문에서는 PMN-PZ-PT 세라믹스를 이용하여 $2 \times 3 \times 10$ (mm)의 적층형 세라믹 액츄에이터를 제조 후 1kV/mm의 일정한 전계를 인가하고 0~990N의 기계적 부하 인가하에서 적층형 세라믹 액츄에이터의 비선형 특성을 조사하였다.

압전 액츄에이터의 비선형 거동은 기계적 응력에 의한 유전 및 전왜 특성에 영향주고, 액츄에이터의 변위 특성은 유전 및 전왜 특성의 영향에 크게 의존한다.

Key Words : 적층형 압전 액츄에이터, 비선형 거동, 압축 응력, 압전 정수(d_{33}), 유전상수

1. 서론

압전 세라믹 액츄에이터, 초음파 모터, 압전 밸브 등 정밀기기 부품에 널리 응용되고 있는 $0.2\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-0.8\text{Pb}(\text{Zr}_{0.475}\text{Ti}_{0.525})\text{O}_3$ 세라믹¹은 MPB 영역에서 전기기계 결합계수가 0.65이고 압전 정수가 550 pC/N 정도로 우수하기 때문에 높은 변위량과 발생력을 가지고 있으며, 큐리온도가 310°C로 고온 안정성이 우수하다. 그러나 압전세라믹은 전계에 의해서 강한 비선형 유전 및 압전 현상을 보이며, 최근에는 전계에 의한 비선형 거동뿐만 아니라, 압축응력하에서의 비선형 유전 및 압전 현상에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.²

Lynch³ 등은 PLZT의 압축 응력이 잔류 분극량(P_r), 압전 정수, 압전체의 항전계(E_c)에 큰 영향을 미친다고 보고하였고, Carman⁴ 등은 압전 세라믹에 dipole의 방향과 같은 방향으로 전계가 인가되면 180° domain의 양을 증가시키고, 압축 응력은 non-180° domain의 분율을 증가시킨다고 보고하였다. 압전 세라믹에 인가된 높은 전계와 압축 응력은 domain damping 현상을 일으켜 전계 방향으로 회전하는 domain의 양을 감소시킨다. 그리고 이러한 비선형 거동은 domain이 회전하거나 재배열될 때 발생하는 stain energy의 흡수에 의해서도 발생된다.

본 논문에서는 $0.2\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-0.8\text{Pb}(\text{Zr}_{0.475}$

Ti_{0.525}O₃ 압전 세라믹을 이용하여 제작된 적층형 압전 액츄에이터의 비선형 특성에 대하여 알아보았다. 압전 액츄에이터의 비선형 특성은 전기 및 기계적 응력하에서 압전 액츄에이터의 actuation 거동과 관련하여 살펴보았다.

2. 실험 방법

0.2Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃-0.8Pb(Zr_{0.475}Ti_{0.525})O₃ 세라믹 조성을 사용하여 pyrochlore를 억제하도록 columbite 법으로 분말을 제조하였다. 제조된 분말은 유기용매, 분산제, 가스제동 유기 첨가물과 함께 볼밀링하여 슬러리를 제조하였다. 제조된 슬러리를 사용하여 100 μ m의 얇은 tape을 doctor blade 법으로 제조하였고, 각 green tape에 Ag/Pd(70/30) paste를 screen printing 방법으로 2 \times 3(mm²)의 내부전극을 인쇄하였다. 그리고 내부전극이 인쇄된 100층의 green sheet를 가열압착하여 적층하고 1100 $^{\circ}$ C에서 2시간동안 소결하였다.

제조된 적층형 압전 액츄에이터에 1kV/mm의 전계를 인가시키면서 0~990N의 압축 응력을 인가시킨 후 laser vibrometer(GRAPHTEC, Japan)를 사용하여 strain-stress 특성을 측정하였고 HP 4194A impedance/phase analyser를 사용하여 공진 주파수를 측정하고 측정된 공진 주파수로 아래의 식을 이용하여 적층형 압전 액츄에이터의 탄성계수를 계산하였다⁵.

$$f_0 = \left(\frac{1}{2\pi}\right) \sqrt{\frac{k_r}{m_{eff}}} \quad (1)$$

$$k_r = \frac{A}{L} Y_{33} \quad (2)$$

$$m_{eff} = \frac{m}{3} \quad (3)$$

f_0 is the resonance frequency(Hz), k_r is the actuator stiffness(N/m)
 m_{eff} is the effective mass(kg) of actuator
 Y_{33} is the Young's modulus A = area of actuators L = length of actuator

3. 결과 및 고찰

압전 세라믹의 압전효과는 아래 식과 같은 Gibbs free energy로 나타낼 수 있다⁶.

$$G = -\left(\frac{1}{2}\right)s^E X^2 - dXE - \left(\frac{1}{2}\right)\epsilon^X \epsilon_0 E^2 \quad (4)$$

$x = strain, X = stress, E = electric field$

$s^E = elastic compliance, \epsilon^X = dielectric permittivity$

$$x = -\frac{\partial G}{\partial X} = s^E X + d_{33} E + \frac{1}{2} \frac{\partial \epsilon_{33}^X}{\partial X} \epsilon_0 E^2 \quad (5)$$

식 (5)는 역압전 효과를 압축응력에 관한 식으로 표현한 것이다. 식 (5)를 다시 경계조건을 고려하여 압전 정수에 관한 식으로 나타낼 수 있다.

$$X=0, \quad d_{33} = \frac{x}{E} \quad (6)$$

$$X \neq 0, \quad d_{33} = \frac{x}{E} - \frac{1}{2} \frac{\partial \epsilon_{33}^X}{\partial X} \epsilon_0 E - \frac{s^E X}{E} \quad (7)$$

식 (6), (7)을 통해서 높은 전계와 압축 응력이 인가된 압전 액츄에이터의 압전 특성에 영향을 미치는 중요한 요소를 살펴보았다.

그림 1에 압축응력에 대한 적층형 압전 액츄에이터의 탄성계수를 나타내었다. 탄성계수는 압축 응력을 인가시키면서 측정된 d_{33} 을 식 (1)~(3)으로 계산하여 나타낸 것이다. 압축 응력이 증가함에 따라 탄성계수는 서서히 증가하며 75N 이상의 압축 응력하에서는 일정하였다.

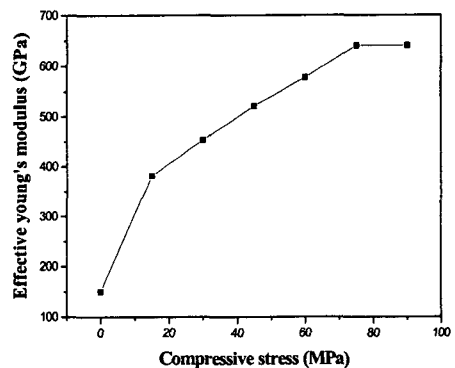


그림 1. 압축 응력 인가상태에서 계산된 적층형 압전 액츄에이터의 Young's modulus.

그림 2에 압축 응력 하에서의 적층형 압전 액츄에이터의 유전상수를 나타낸 것이다. 압축 응력이 증가할수록 적층형 압전 액츄에이터의 유전상수는

선형적으로 감소하였다. 이것은 압전 액츄에이터에 인가된 압축 응력이 non-180° domain wall의 움직임 방해하기 때문인 것으로 사료된다.

대부분의 연구자들^{6,7}은 식 (7)의 3번째 항인 압축 응력에 대한 유전상수의 변화를 무시해오고 있었다. 그러나 그림 2에서도 알 수 있듯이, 유전상수의 변화는 압축 응력이 증가함에 따라 큰 변화를 보이고 있고, 이것은 압전 특성에 영향을 줄 수 있다.

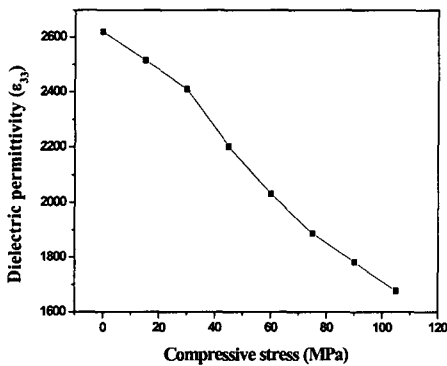


그림 2. 압축 응력에 따른 유전상수의 변화.

이것을 알아보기 위해서, 전계가 인가된 적층형 압전 액츄에이터를 압축 응력을 증가시키면서 d_{33} 을 측정하고("experimental d_{33} "), 식 (7)을 이용해서 계산된 d_{33} 을 서로 비교한 것을 그림 3에 나타내었다. "simulated d_{33} "는 식 (7)의 유전상수항을 무시하고 계산된 값이며, "modified d_{33} "는 유전상수항을 고려하여 계산된 값이다. 그림 3에서 "modified d_{33} "이 "experimental d_{33} "에 더 일치하는 것을 확인할 수 있으나, 높은 응력에서는 여전히 차이를 보이고 있다.

이것을 이해하기 위해서는 아래와 같은 dipole의 열역학 거동을 고려하여야 한다.

$$d_{33} = 2Q_{11}\epsilon_{33}P \quad (8)$$

Q_{11} 은 압전 세라믹의 전왜상수(electrostrictive coefficient)이고, P 는 dc bias 상태에서의 polarization, ϵ_{33} 은 유전상수를 나타낸다.

그림 2와 3에서 P 와 ϵ_{33} 을 고려했음에도 불구하고

고, 높은 압축 응력상태에서는 압전 특성에 영향을 크게 미치지 않았다. 따라서 압전 특성은 식 (8)에서 나타낸 Q_{11} 에 더 크게 영향을 받을 것을 알 수 있다.

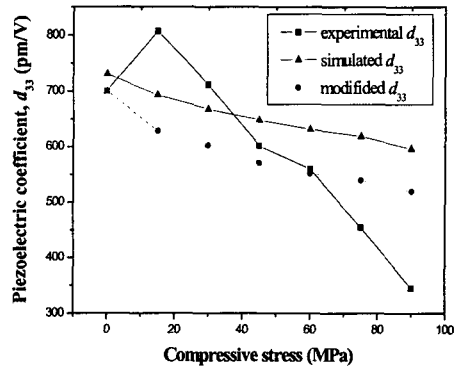


그림 3. 측정된 액츄에이터의 d_{33} 와 식 (7)로부터 계산된 d_{33} 의 비교.

4. 결론

PMN-PZT를 사용하여 제조된 적층형 압전 액츄에이터의 전기 및 기계적 응력하에서의 비선형 거동을 살펴보았다. 적층형 압전 액츄에이터의 압전 정수(d_{33})는 낮은 응력하에서는 유전상수(ϵ_r)의 변화에 영향을 받고, 높은 응력하에서는 전왜상수(Q_{11})에 크게 영향을 받는 것을 알 수 있다.

감사의 글

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

참고 문헌

- [1] A. V. Shil'nikov, A. V. Sopot, A. I. Burkhanov and A. G. Luchaninov, "The dielectric response of electrostrictive (1-x) PMN-xPZT ceramics", J. Euro. Ceram. Soc., Vol. 19, No. 6-7, p. 1295, 1999.
- [2] Ken Yamamoto, Akira Korubo, Keiji Sakai, and Kenshiro Takagi, "Estimation of nonlinear piezoelectricity of

0.5Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O₃-0.35PbTiO₃-0.15PbZrO₃
and 0.64Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O₃-0.36PbTiO₃
ceramics", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 41, p.
5686, 2002.

- [3] C. S. Lynch, "The effect of uniaxial stress on the electro-mechanical response of 8/65/35 PLZT", Acta Materialia, Vol. 44. No. 10, p. 4137. 1996.
- [4] P. M. Chaplya and G. P. Carman, "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.
- [5] PI catalog for MicroPositioning, NanoPositioning, NanoAutomation, 2001.
- [6] K. Uchino, J. R. Giniewicz, "Micromechatronics", Marcel Dekker. Inc., New York, p. 277, 2001.
- [7] Qiming M. Zhang and Jianzhong Zhao, "Electromechanical properties of lead zirconate titanate piezoceramics under the influence of mechanical stresses", IEEE, p. 1518, 1999.