

경사기능특성을 모사한 적층 벤더 액츄에이터 특성

정순중, 고중혁, 하문수, 이대수, 송재성

한국전기연구원 전자기소자 연구그룹

AFUNCTIONALGRADIENT-SIMULATEDMULTILAYERBENDERACTUATOR

Soon-Jong Jeong, Hung-Huck Koh, Mun-Su Ha, Dea-Su Ha and Jae-Sung Song

Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract

압전 액츄에이터는 다른 종류의 액츄에이터와 비교할 때 높은 강성, 빠른 응답성의 우수한 특성을 가지고 있다. 벤더형 액츄에이터는 높은 변위의 장점을 가지나 높은 전기장과 기계적 부하인가시에는 내부 응력이 증가하므로 신뢰성이 감소한다는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 여러 방법으로 내부 응력을 줄이려는 시도가 있으며 그중 하나는 경사기능 소재나 경사기능 구조를 가지는 액츄에이터의 개발이다.

본 연구에서는 경사기능 특성을 모사한 액츄에이터 구조를 제작하고 그 특성을 조사하였다. 두 가지의 압전상수 $d_{31} = -220$ pC/N, $d_{31} = -100$ pC/N를 가지는 세라믹층을 적층하여 벤더형 액츄에이터의 특성을 관찰하였다. 그 결과 두 종류의 세라믹층으로 적층한 액츄에이터가 한가지 특성의 세라믹으로 제작한 액츄에이터 보다 전압인가시 20%이상의 우수한 변위 특성을 나타내었다. 이러한 변화는 내부 응력의 감소에 기인한 것으로 예상된다.

Key Words : : PbMgNbO₃-Pb(Zr,Ti)O₃ (PMN-PZT), Multilayer Bender Actuator, Functionally Gradient

Materials

1. 서론

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]. 그러므로 이러한 액츄에이터들은 특히 벤더형 압전 액츄에이터들은 광학, 미소펌프, 하드디스크, 디지털 카메라 등에 사용되고 있다. 벤더형 액츄에이터들은 작동시 위층과 아래층간의 높은 내부 응력 차이가 발생하며 이러한 차이에 의하여 굽힘변형을 나타내게 된다.

이러한 내부 응력의 차이는 그 액츄에이터의 내구성에 악영향을 미치게 된다. 최근에 이러한 문제들을 해결하기위하여 여러 가지 시도, 구조 변경, 소재변화 등의 시도가 수행되고 있다. 그러한 시도들의 하나가 여러 압전상수를 가지는 경사기능 소재를 적용하는 것이다[3~5]. 압전 고용체에서 고용비율을 바꿈으로다른 압전 상수를 가지는 소재로 만들어진 액츄에이터는 각각의 계면에서 발생하는 내부 응력을 감소시키므로써 내구성을 향상시킬 수 있다. 그러나 현실적으로 압전 고용체의 비율을 변화하면서 안정된 경사 기능 특성을 가지는 액츄에이터를 제조하는 것이 쉽지 않다[2]. 이러한 단점을 보완할 수 있는 한 방법으로는 다른 압전 상

수를 가지는 압전층을 적층한 액츄에이터를 만드는 것이다. 그리하여 본 연구에서는 다른 압전상수를 가지는 압전 소재를 이용하여 적층 벤더형 액츄에이터를 제작하고 그 특성을 관찰하였다. 이러한 액츄에이터의 특성을 알기 위하여 벤더빔에서 발생될 수 있는 발생력, 변위를 계산하고 실험값과 비교하였다. 또한 단일 압전 소재를 사용한 액츄에이터의 특성도 관찰하여 상호 비교를 하였다.

2. 실험

2.1 샘플 제작

이 연구에 사용된 두 종류의 압전 세라믹은 $0.2\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-0.8\text{Pb}(\text{Zr}_{0.475}\text{Ti}_{0.525})\text{O}_3$ (이하 PMNZT)와 $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.475}\text{Ti}_{0.525})\text{O}_3$ (이하 PZT) 이다. 그림 1은 제작된 액츄에이터의 개략도이다. 각각 4층의 액츄에이터를 제작하였고, 1층과 4층은 PMNZT 세라믹이고 두께는 $100\ \mu\text{m}$ 이었고, 2층과 3층은 PZT 세라믹이고 두께 $60\ \mu\text{m}$ 이었다. 액츄에이터의 전체 크기는 $10 \times 40 \times 0.32\ (\text{mm})$ ($W \times L \times h$)이었다. 사용된 전극은 Ag-30Pd이었다. 두종류의 압전 소재 및 크기는 표1에 나타내었다.

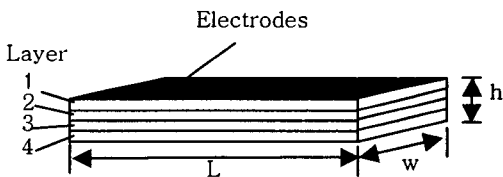


그림 1. 적층 벤더형 액츄에이터의 구조

표 1. 제작된 액츄에이터 내부 구조에 사용된 압전 소재 및 두께

sample No.	1 layer		2 layer		3 layer		4 layer	
	comp.	thick.	comp.	thick.	comp.	thick.	comp.	thick.
1	PMNZT		PZT		PZT		PMNZT	
2	PMNZT	$100\ \mu\text{m}$	PMNZT	$60\ \mu\text{m}$	PMNZT	$60\ \mu\text{m}$	PMNZT	$100\ \mu\text{m}$
3	PZT		PZT		PZT		PZT	

또한 비교를 위하여 PMNZT 소재와 PZT 소재로

같은 형상의 액츄에이터를 제작하고 특성을 비교하였다.

표 2. 사용된 압전 소재의 특성 및 크기

변수	PZT (2,3층)	PMNZT (1, 4층)
전압 (V)	$10^{\sim}60$	$10^{\sim}60$
압전층 두께 (μm)	60	100
압전상수 d_{31} (pC/N)	-100	-210
기계적 영률 (N/mm^2)	1.2×10^{11}	1.0×10^{11}
밀도 (g/cm^3)	7.5	7.5
길이 (mm)	40	40
전체 높이 (μm)	320	
전체 층수	4	

2.2 특성 평가

액츄에이터의 특성중 전계유기변형특성은 시편에 60 V까지 전압을 인가한 후 10 Hz에서 laser vibrometer (Gratec Co.)를 사용하여 살펴보았다. 또한 외부 출력압은 전계 (전압 $10^{\sim}60\text{V}$)를 인가하면서 힘 게이지로 액츄에이터의 출력압 특성을 관찰하였다. 또한 액츄에이터의 전기적 특성을 관찰하기 위하여 압축응력하에서 Impedance analyzer (HP4194A)를 이용하여 임피던스와 정전용량을 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 액츄에이터 설계

압전소재의 두께에 대해서 전계 인가는 기계적 내부 응력을 발생킨다. 만약 그 압전 소재의 압전 특성이 그 액츄에이터의 두께에 대해서 비균일하게 발생되면, 굽힘 변형이 일어난다. 즉, 기계적응력이 한쪽 표면에 인장력이 다른 표면에 압축력이 발생하게끔 하면 굽힘 변형이 발생한다. 그림 2는 굽힘변형된 압전 액츄에이터의 구조를 나타낸 것이다. z 방향은 액츄에이터의 두께치수를 나타내며 액츄에이터의 전체 두께는 h로 정의하였다. 탄성 한계 안에서 액츄에이터가 굽힘 변형이 일어난

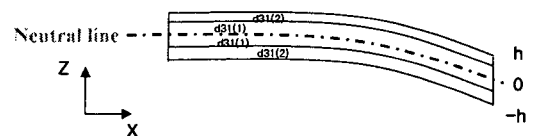


그림 2. 굽힘변형이 일어나는 압전 액츄에이터의 구조

곡률 반경 R이 발생되고 이를 이용한 굽힘 변형률 $S_1(z)$ 은 $S_1 = z/R$ ---(1)로 표현된다. 벤더 액츄에이터에서는 외부에서 가해진 굽힘 모멘트와 내부지지 모멘트가 평형을 이루며, 외부응력이 없는 자유 굽힘 변형시에는 외부 모멘트가 0이된다. 그리하여 그 모멘트는 $\int z \times T_1 \, dA = 0$ ---(2) 이다. 이때 T_1 은 응력이고 $dA = wdz$ 는 폭 W의 요소 면적이다. 압전체에서의 응력 T_1 과 변형률 S_1 과의 관계는 $S_1 = s_{11} \times T_1 + d_{31} \times E_3$ ---(3) 으로 나타낼 수 있다. 이 때 $T_2=T_3=T_4=T_5=T_6$ 는 0이다. 여기서 s_{11} 은 탄성 컴프라이언스 텐서 요소이며 이 경우 영률 $Y(z)$ 의 역비례 관계 $Y(z)=1/s_{11}$ ---(4)를 가진다. d_{31} 은 압전상수, E_3 는 가해진 전계이다. 그리하여 식(3)과 (4)를 식 (2)에 적용하면 곡률 반경 역수 $1/R = \int Y(Z)E_3d_{31}(Z)z \, dz / \int Y(Z) \times z^2 \, dz$ 로 표현된다. 그러므로 변위 $\delta = (2L)^2/2R = 2L^2 \times \int Y(Z)E_3d_{31}(Z)z \, dz / \int Y(Z) \times z^2 \, dz$ ---(5)로 표현된다. 출력압은 압전 벤더 빔에 대한 응력 T 를 적분함으로써 계산될 수 있다. 응력 T 는 식 $x = T/Y + d_{31} E_3$ 에서 최대 출력압은 $x = 0$ 일때 발생하므로 $T = -d_{31} E_3/Y$ 이고 이를 이용하여 $F = \int Tdz = \int d_{31} \times E_3 \times Y(Z) \, dz$ ---(6) 으로 나타낼 수 있다.

위의 식(5)와 식 (6)을 본 연구에서 결정한 벤더 액츄에이터에 적용하였다. 먼저 하나의 압전 소재 (PMNZT나 PZT)를 이용한 액츄에이터의 경우에는 변형 $\delta = 3L^2 \times Y \times h \times d_{31}(1) / (2h^2) \times \{E_3(1) \times t_1^2 + E_3(2) \times (1-t_1^2)\}$ ---(7) 이고, 출력압 $F = \int Tdz = \int d_{31} \times E_3 \times Y(Z) \, dz$ 이며, 이를 4층의 단일 압전소재 빔의 경우에 적용하였을때 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$F = -d_{31} \times Y \times h/2 \times \{E_3(1) \times t^2 + E_3(2) \times (1-t^2)\}$$
---(8)

시료 1의 두개의 압전 상수를 가지는 소재의 경우, 굽힘 변형은 다음과 같이 표현될 수 있다. 모멘트는 $\int Y(Z)E_3d_{31}(Z)z \, dz = h^2/4 \times [Y_{(PZT)} \times E_{(PZT)} \times d_{31(PZT)} \times t_1^2/3 + Y_{(PMNZT)} \times E_{(PMNZT)} \times \{d_{31(PZT)}/2 \times (1-t_1^2) + (d_{31(PMNZT)} - d_{31(PZT)}) / (1-t_1) \times \{(1-t_1^3)/3 - (t_1-t_1^3)\}$ ---(9) 이다.

$$\int Y(Z) \times z^2 \, dz = 1/3 \times \{Y_{(PZT)} \times t_1^3 + Y_{(PMNZT)} \times (1-t_1^3)\}$$
---(10)

식(9)과 (10)로부터 $1/R = \text{식(9)}/\text{식(10)} = \int Y(Z)E_3d_{31}(Z)z \, dz / \int Y(Z) \times z^2 \, dz$

이다. 그러므로 변위 $\delta = (2L)^2/2R = 3L^2h^2/2 \times [Y_{(PZT)} \times E_{(PZT)} \times d_{31(PZT)} \times t_1^2/3 + Y_{(PMNZT)} \times E_{(PMNZT)} \times \{d_{31(PZT)}/2 \times (1-t_1^2) + (d_{31(PMNZT)} - d_{31(PZT)}) / (1-t_1) \times \{(1-t_1^3)/3 - (t_1-t_1^3)\}] / [Y_{(PZT)} \times t_1^3 + Y_{(PMNZT)} \times (1-t_1^3)]$ ---(11)으로 계산할 수 있다. 4층의 두개의 복합 압전소재 빔의 경우(1, 4 층은 PZT소재, 2, 3 층은 PMNZT 소재를 사용함)에 적용하였을때 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다. 그리하여, 출력압 F는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F = -2 [d_{31(PZT)} \times t_1 \times h \times E_3(1) \times Y(PZT) + Y(PMNZT) \times E_3(2) \times \{d_{31}(1) \times h/2 \times (1-t_1) + (d_{31}(2) - d_{31}(1)) / (1-t_1) \times (h/4 - t_1h/2 + t_1^2h/4)\}]$$
이다.

3.2 특성 계산 및 평가

그림 3은 전압에 따른 변위특성을 나타내었다. 그림에서 보듯이 sample 1은 (0.2PMN-0.8PZT)-(0.2PMN-0.8PZT)-(0.2PMN-0.8PZT)-(0.2PMN-0.8PZT), sample 2는 (0.2PMN-0.8PZT)-(PZT)-(PZT)-(0.2PMN-0.8PZT), sample 3는 (PZT)-(PZT)-(PZT)-(PZT)이며, 전압에 따른 변위특성을 나타내었다. Sample 2의 형상은 내부 전극 Ag/Pd가 있는 FGM-simulated structure이다. 그림에서 보는 바와 같이 40V 이상에서 다른 구조에 비해 변위가 더 큼을 알 수가 있다. 이것은 저 전계에서는 Pr 값이 internal stress보다 더 큰 영향을 주게 되어 상대적으로 sample 1의 변형이 크고, 고 전계에서는 internal stress의 영향이 더 커서 sample 2가 상대적으로 변형이 더 큼을 알

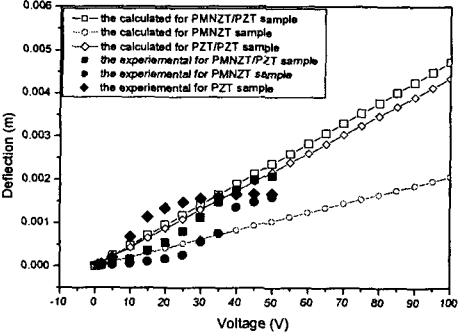


그림 3. 제작된 액츄에이터의 전압-변형 특성 수 있다. 이런 특성에 따라서 sample 1보다

sample 2가 고전계에서 훨씬 더 나은 변위 특성을 나타내고 있으며, 이것은 내부응력이 sample 1 보다는 감소가 되었다고 할 수가 있다. 실험 결과와 계산값이 비슷한 경향을 나타내었다.

그림 4 은 sample 1, 2, 3 의 전압 변화에 따른 발생력을 측정된 그래프이다. Sample 1, 3 에 비해서 sample 2가 훨씬 큼을 알 수가 있다.

Sample 2는 (0.2PMN-0.8PZT)-(PZT)-(PZT)-(0.2PMN-0.8PZT)로서, FGM-simulated 된 구조이다. sample 1은 sample 3 보다는 큰 발생력을 보여 주고 있지만, sample 2 보다는 작은 값을 내내고 있다. 즉 sample 2 (FGM-simulated 된 구조)가 sample 1, 3보다 발생력이 큼을 알 수 있다. 이것은 내부에 존재하는 스트레스가 줄어들어 의해서 나타남을 알 수 있다.

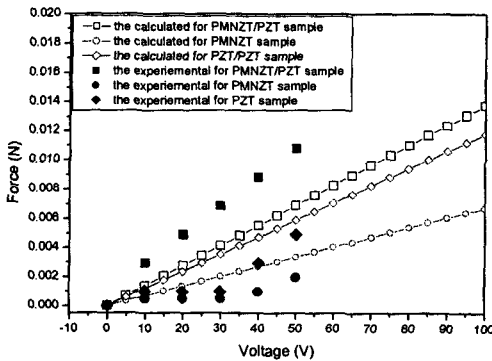


그림 4. 제작된 액츄에이터에 가해진 전압에 따른 출력압.

4. 결론

본 연구에서는 PMN-PZT와 PZT 압전 소재를 이용하여 경사기능 구조를 모사한 적층 벤더 액츄에이터의 특성을 관찰하였다. 두개의 복합 소재를 이용하여 제작한 액츄에이터는 단일 소재의 액츄에이터 보다 큰 변형률과 출력압을 나타내었다. 이는 내부 잔류응력을 감소하는 구조 때문인것으로 사료된다.

감사의 글

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

참고 문헌

- [1] M.A.Marcus, " Performance characteristics of piezoelectric polymer flexure mode devices", *Ferroelectrics* vol. 57. p.203, 1984.
- [2] Th.Hauke, " Bending behavior of functionally gradient materials", *Ferroelectrics* vol. 238, p.195, 2000.
- [3] Kouvatov, A., Steinhausen, R., Seifert, W., Hauke, T., Lanhammer, H.T., Abicht, H.P., " Comparison between bimorphic and polymorphic bending devices" *Journal of the European Ceramic Society* vol. 19, p.1153, 1999.
- [4] Kawai, T., Miyazaki, S., Araragi, M., "A piezoelectric actuator using functionally gradient material.", *material design", Journal of the American Ceramic Society* vol. 79, no. 3, p.516, 1996.
- [5] Wu, C.C.M., Kahn, M., Moy, W., " Piezoelectric ceramics with functional gradients : A new application in material design", *Journal of the American Ceramic Society* vol. 79, no. 3, p.809, 1996.
- [6] G. Robert, D. Damjanovic, and N. Setter, "Piezoelectric hysteresis analysis and loss separation", *Journal of Applied Physics* vol. 90, no. 9, p.4668, 2001.
- [7] K. Uchino and J. Giniewicz, " *Micromechatronics*", Marcel Dekker Inc 169 ~ 218.