

## 원환형 적층 압전 액츄에이터의 전기적 특성

### Electrical Properties of Ring-type Multilayer Piezoelectric Actuator

김국진<sup>1</sup>, 류주현<sup>1,a</sup>

(Kook-Jin Kim<sup>1</sup> and Ju-Hyun Yoo<sup>1,a</sup>)

#### Abstract

In this study, in order to develop low temperature sintering ultrasonic nozzle, single-layer and multilayer ring-type piezoelectric actuators were manufactured using PMN-PNN-PZT ceramics, And then the electrical properties were investigated. A ring-type piezoelectric actuator was modeled by ATILA program using finite element method(FEM). The piezoelectric actuator dimension was  $\Phi 26.5$  (outer diameter),  $\Phi 12$  (inner diameter), 3.5 mm (thickness). By FEM analysis, resonant and anti-resonant frequencies were appeared as 56.7 kHz and 61.5 kHz. The displacement increased with the increases of the number of layer. Based on the result, ring-type multilayer piezoelectric actuators were manufactured at low co-firing temperature of 940 °C. The resonant resistance decreased with the increases of the number of layer. And also, the capacitance increased with the increases of the number of layer. The mechanical quality factor (Qm) decreased with the increases of the number of layer.

**Key Words** : Low temperature sintering, Ring-type piezoelectric actuator, Co-fired, FEM

#### 1. 서론

최근까지 액체연료의 미립화를 위해서는 고압 분무방식이 일반적으로 사용되어졌다. 그러나 고압 분무 방식을 이용할 시 분무 액체 표면적의 불균 일성과 고르지 못한 입경에 의해 불완전 연소가 발생하며, 이로 인해 공해발생과 효율이 떨어지는 문제점을 가지고 있다. 그러나 초음파를 사용하여 액체 연료를 분무할 시에 균일한 입경과 미립화가 우수하여 에너지 절약과 공해방지뿐만 아니라 유속이 낮은 곳과 공급 유량이 적은 곳에서도 이용할 수 있기에 의약품 도포공정, 반도체 제조공정 등의 여러 산업에 응용이 가능하다. 그러나 초음파 진동을 이용하여 액체 연료의 분무 효율을 향상시키기 위해서는 노즐의 기계적인 메카니즘과 더불어 액츄에이터의 특성 향상이 중요하다[1-3]. 적층

압전 액츄에이터형 초음파 노즐은 기존의 초음파 노즐과 비교해 고출력을 위하여 내부 임피던스를 작게 설계하는 기술로써 적층의 제작기술이 무엇보다도 선행되어야 할 과제이다. 그러나 적층화에 따라 압전재료의 압전특성은 현저히 감소하기 때문에 적층시 발생하는 압전재료의 특성저하를 방지하는 기술 또한 중요하게 부각되고 있다. 또한, 적층 세라믹스의 제작 시 구조적 특성상 내부전극이 도포된 상태에서 동시소결이 필요한데, 용점이 약 960 °C 정도로 낮은 Ag 전극 대신 값비싼 Pd 나 Pt가 다량 함유된 Ag/Pd, Ag/Pt 전극이 사용되고 있어 경제적인 문제가 발생하게 된다. 따라서 순수 Ag 전극을 사용하거나 Ag의 비율이 높은 내부전극을 사용하기 위해서는 950 °C이하에서 소결되는 압전 세라믹스를 개발하는 것이 필요하다 [4-8]. 따라서 본 연구에서는 Atila 프로그램을 사용하여 원환형 적층 압전액츄에이터를 설계하여 공진주파수를 해석하고 그 때의 진동특성을 확인하였으며, 저온소결에서 우수한 압전특성을 보이는 PMN-PNN-PZT 조성을 사용하여 원환형의 단판형과 적층형 압전액츄에이터를 Tape casting 공정

1. 세명대학교 전기공학과

(충북 제천시 신월동 579)

a. Corresponding Author : juhyun57@semyung.ac.kr

접수일자 : 2007. 8. 21

1차 심사 : 2007. 9. 11

심사완료 : 2007. 9. 20

으로 제작하여 그 전기적 특성을 연구하였다.

## 2. 실험

본 실험에서는 다음과 같은 조성식으로 단판 및 원환형 적층 압전 액츄에이터를 제작하였다.

$Pb[(Mn_{1/3}Nb_{2/3})_{0.07}(Ni_{1/3}Nb_{2/3})_{0.10}(Zr_{0.48}Ti_{0.52})_{0.83}]O_3$  조성에 따른 시료의 정확한 몰비를  $10^{-4}$  g까지 평량하였고, 아세톤을 분산매로 24시간동안 혼합 분쇄하였으며, 건조 후  $850\text{ }^\circ\text{C}$ 에서 2시간 하소하였다. 하소 후  $Li_2CO_3$ - $Bi_2O_3$ - $CuO$ 를 첨가하여 24시간 동안 재 혼합 분쇄하였다. 단판 액츄에이터는 PVA (0.5 wt% 수용액) 5 wt% 첨가하여 외부직경 31.5 mm 몰더로  $1000\text{ kgf/cm}^2$ 의 압력으로 성형후,  $600\text{ }^\circ\text{C}$ 에서 3시간동안 번아웃 하였다. 적층 액츄에이터는 파우더와 PVB의 비율을 72:28로 하여 혼합하여 Tape casting을 하여  $70\text{ }\mu\text{m}$ 로 시트를 뽑아냈다. 시트를 쌓아  $80\text{ }^\circ\text{C}$ 에서  $300\text{ kgf/cm}^2$ 의 압력으로 일축성형 한 후,  $340\text{ }^\circ\text{C}$ 에서 3시간동안 번아웃 하였다. 이 두 종류의 액츄에이터를  $940\text{ }^\circ\text{C}$ 에서 2시간동안 소결하였다. 소결을 마친 시편의 두께를 3 mm로 연마하여 전극을 발라  $600\text{ }^\circ\text{C}$ 에서 10분간 열처리하였다. 전극이 형성된 시편을  $120\text{ }^\circ\text{C}$  실리콘유속에서  $20\text{ kV/cm}$ 로 분극하였다. 24시간이 지난후에 공진 및 반공진법에 따라 impedance analyzer (Agilent 4294A)를 사용하여 유전 및 압전특성을 측정하였다.

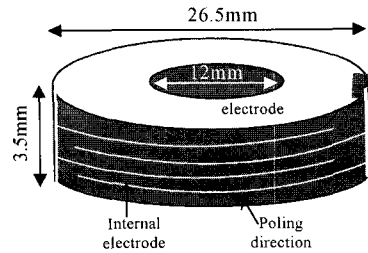
## 3. 결과 및 고찰

표 1은 원환형 적층 압전 액츄에이터로 제작할 조성의 압전 및 유전특성을 나타낸 것이다. 본 실험에서 제작한 조성세라믹은  $940\text{ }^\circ\text{C}$ 의 낮은 소결온도에서 전기기계결합계수  $k_p$ 가 0.59이고, 기계적품질계수  $Q_m$ 가 1,384으로 매우 높아 고효율 압전 액츄에이터로 적용하기에 우수한 특성을 나타내었다.

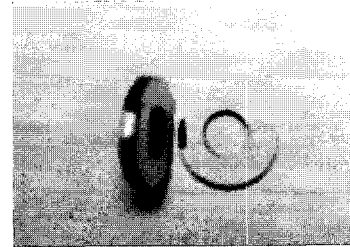
표 1. 시편의 압전 및 유전특성.

Table 1. Piezoelectric and dielectric properties of specimens.

Sintering Temp[ $^\circ\text{C}$ ]	Density [ $\text{g/cm}^3$ ]	Dielectric constant[ $\epsilon_r$ ]	$k_p$	$Q_m$	$d_{33}$ [ $\text{pC/N}$ ]
940	7.89	1423	0.59	1384	363



(a) 원환형 적층 압전 액츄에이터의 개략도 5층



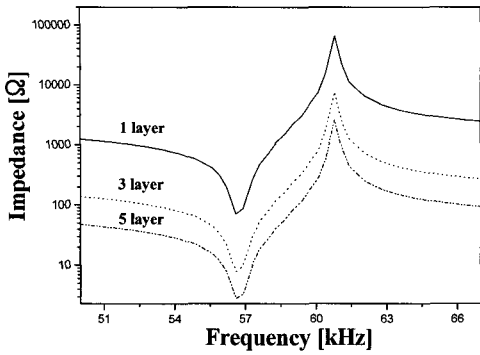
(b) 제작된 원환형 적층 압전 액츄에이터

그림 1. 원환형 적층 압전 액츄에이터.

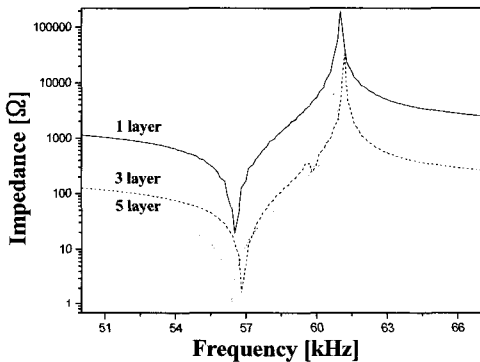
Fig. 1. Ring-type Multilayer piezoelectric actuator.

해석 프로그램을 이용하여 설계하기 위해서는 액츄에이터의 정확한 형태와 경계조건등이 주어져야 한다[9]. 본 연구에서는 그림 1과 같이 외경 26.5 mm, 내경 12 mm 그리고 총 두께는 3.5 mm로 설계하였으며, 3층의 한층 두께는 1.16 mm, 5층의 한층 두께는 0.7 mm로 원환형 압전 액츄에이터를 Atila 5.2.4를 이용하여 설계하였다. 설계한 압전 액츄에이터의 내부전극 구조는 interdigital 구조로 적층 하였다.

그림 2는 Atila 해석과 실제 제작된 압전 액츄에이터의 임피던스 특성곡선을 나타낸 것이다. Atila 해석 결과 56.7~61.5 kHz의 공진 및 반공진 주파수를 나타내었으며, 실제 제작된 액츄에이터에서는 약 56~61 kHz의 공진 및 반공진 주파수를 나타내었다. 또한, 적층수의 증가에 따라 임피던스 값이 감소하는 것을 알 수 있었다. 실제 제작된 액츄에이터의 특성을 측정한 결과 적층수가 높아질수록 공진저항의 값이 1.83~1.09  $\Omega$ 까지 감소하였고, 적층수의 증가에 따라서 정전용량의 값은 12.2~42.5 nF까지 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 공진시의 등가저항은 소자의 전극면적에 반비례하고 두께에 비례하기 때문에 적층수가 증가할수록 등가저항은 반비례하여 감소하고, 정전용량의 경우 전극면적에 비례하기 때문에 적층수의 증가에 따라 증가하는 것으로 사료된다[10].



(a) ATILA 해석



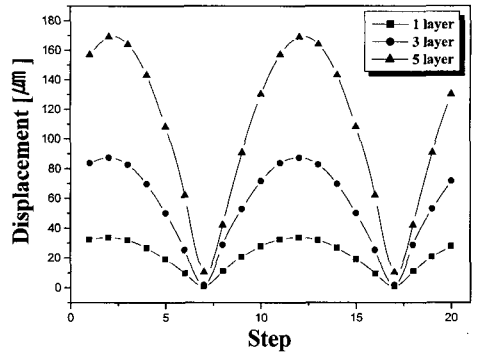
(b) 제작된 액츄에이터

그림 2. 원환형 적층 압전 액츄에이터의 임피던스 특성곡선.

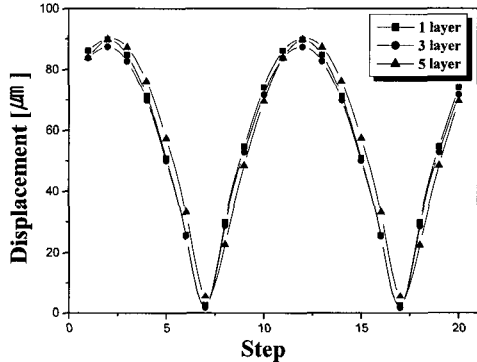
Fig. 2. Impedance characteristic curve of ring-type multilayer piezoelectric actuator.

그림 3은 Harmonic 해석 후 공진주파수 부근인 56.81 kHz에서 스텝에 따른 총 변위값을 나타낸 것으로서 같은 전압에서 적층수에 따른 변위량(a)과 각각 단층 400 V, 3층 135 V, 5층 80 V의 전압을 인가하였을 때의 변위량(b)을 나타낸 것이다. 그림 (a)에서 적층수의 증가에 따라서 변위량도 함께 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 그림 (b)에서 각각 다른 인가전압에서도 거의 비슷한 변위를 보인 것을 확인할 수 있었다. 따라서 같은 두께에서도 적층구조로 제작하게 되면 낮은 구동전압에서도 큰 변위를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

표 2는 제작된 원환형 압전 액츄에이터의 물성 특성을 나타낸 것으로 유효전기기계결합계수는 층수와 관계없이 거의 같은 값을 보였으며, 기계적 품질계수의 값은 층수의 증가에 따라 감소하는 특성



(a)



(b)

그림 3. 스텝에 따른 변위.

Fig. 3. Total displacement according to the step.

표 2. 제작된 원환형 압전 액츄에이터의 물성.

Table 2. Physical characteristics of ring-type piezoelectric actuator.

Sintering Temp.[°C]	Layer	Density [g/cm <sup>3</sup> ]	R [Ω]	C [nF]	k <sub>eff</sub>	Q <sub>m</sub>
940	1	7.70	1.83	11.7	0.41	926
	3	7.81	1.61	18.5	0.40	923
	5	7.82	1.09	42.5	0.41	428

을 보였다. 이는 압전 액츄에이터의 층수가 증가함에 따라 공진저항의 값은 감소하였지만 공진저항 값의 감소율보다 더 큰 정전용량 값의 증가를 보였기 때문에 이러한 결과를 보인 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 적층 압전 초음파 노즐로의 응용을 위하여 유한 요소법의 원리를 이용한 시뮬레이션 프로그램인 Atila 5.2.4를 이용하여 외경 26.5 mm, 내경 12 mm 그리고 총 두께는 3.5 mm의 원환형 압전 액츄에이터를 1층, 3층, 5층으로 각각 설계하여 해석하였으며, Tape casting 방법을 사용하여 직접 단판과 적층 원환형 압전 액츄에이터를 제작하여 층수의 변화에 따른 전기적인 특성을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 원환형 압전 액츄에이터의 공진 및 반공진 주파수는 56~61 kHz 사이에서 나타났으며, 층수의 증가에 따라 임피던스의 값은 감소하는 특성을 보였다.
2. 스텝에 따른 변위량 측정시 층수가 증가할수록 동일한 전압에서도 더 높은 변위량을 나타냈으며, 단층 400 V, 3층 135 V, 5층 80 V의 전압 인가시에 비슷한 변위량을 나타내었다.
3. 적층수의 증가에 따라 공진저항은 감소하는 특성을 보였으며, 정전용량의 값은 증가하는 특성을 보였다.
4. 적층수의 증가에 따라 유효전기기계결합계수의 값은 큰 차이가 없었으나 기계적품질계수의 값은 감소하는 특성을 보였다.

원환형 적층 압전 액츄에이터를 제작함으로써 앞으로 저전압에서도 구동 가능한 적층 압전 액츄에이터를 이용한 초음파 노즐의 개발 가능성을 확인하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 2006년도 과학재단에서 시행하는 특정기초 사업(과제번호: R01-2006-000-10120-0)으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

[1] 이수호, 민석규, 윤광희, 류주현, 사공건, "초음파 액츄에이터 응용을 위한 압전 세라믹의 유전 및 전기적 특성", 한국전기전자재료학회 2000 추계학술대회논문집, 13권, 1호, p. 200, 2000.

[2] 김선우, 정남훈, 선우명호, "피에조 인젝터의 모델링 및 분사율의 추정", 한국자동차공학회 논문집, 13권, 2호, p. 93, 2005.

[3] S. H. Lee, J. H. Yoo, K. H. Yoon, J. Y. Sug, G. H. Rue, K. H. Sin, J. G. Kim, and J. I. Hong, "The dielectric and electric characteristics of piezoelectric ceramics for ultrasonic oscillator application", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 41, No. 11B, p. 7099, 2002.

[4] Y. H. Jeong, J. H. Yoo, S. H. Lee, and J. I. Hong, "Piezoelectric characteristics of low temperature sintering  $Pb(Mn_{1/3}Nb_{2/3})O_3 - Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3 - Pb(Zr_{0.50}Ti_{0.50})O_3$  according to the addition of  $CuO$  and  $Fe_2O_3$ ", Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 135, No. 1, p. 215, 2007.

[5] S. Zhang, R. Xia, and T. R. Shrout, "Low temperature sintering and properties of piezoelectric ceramics PSNT-Mn with  $LiBiO_2$  addition", Materials Science and Engineering: B, Vol. 129, No. 1-3, p. 131, 2006.

[6] K. W. Tang, H. L. W. Chan, Y. M. Cheung, and P. C. K. Liu, "Longitudinal strain response of a 0.9PMN - 0.1PT multilayer actuator", Materials Chemistry and Physics, Vol. 75, No. 1-3, p. 196, 2002.

[7] 류주현, 이상호, 백동수, " $Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3$  치환에 따른 저온소결  $Pb(Mn_{1/3}Nb_{2/3})O_3 - Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3 - Pb(Zr,Ti)O_3$  세라믹스의 압전 및 유전 특성", 전기전자재료학회논문지, 19권, 1호, p. 35, 2006.

[8] S. Zhang, R. Xia, and Thomas R. Shrout, "Low temperature sintering and properties of piezoelectric ceramics PSNT-Mn with  $LiBiO_2$  addition", Mater. Sci. and Eng. B, Vol. 129, No. 1, p. 131, 2006.

[9] 이동균, 조봉희, 김현재, 한득영, 윤석진, "Atila를 이용한 원환형 초음파 모터의 설계", 한국전기전자재료학회 2000추계학술대회논문집, 13권, 1호, p. 184, 2000.

[10] 정수태, 조상희, "적층압전변압기의 전기적 특성", 전기전자재료학회논문지, 9권, 2호, p. 138, 1996.