

# 압전 액츄에이터의 제작 및 그 특성에 관한 연구

## (A Study on the Fabrication and the Properties of Piezoelectric Actuator)

柳道鉉\*, 韓民九\*\*, 李能憲\*\*\*, 金鎮洙\*\*\*\*, 李德出\*

(Do Hyun You, Min Gu Han, Neung Heon Lee,  
Jin Su Kim and Duck Chool Lee)

### 要約

본 논문에서는 PZT powder 를 이용하여 단판형 및 적층형 압전 액츄에이터를 제작한 후 압전특성, 변위특성 및 시간응답특성을 조사하였다. 단판형 액츄에이터는 소결온도가 증가함에 따라서 압전정수 및 변위량이 증가하였으며 적층형은 적층수가 증가함에 따라 압전정수와 변위량이 증가하였다. 10 층으로 적층한 경우 단판형보다 압전정수에 있어서는 3 배이상의 증가를 보이고 있으며 전압인 가시 변위량에 있어서는 6 배이상의 증가량을 보였다. 전압인가시의 응답속도는 적층형이 단판형보다 2 배이상 빠르게 관측되었다.

### Abstract

In this paper, the single round type and the multilayered type actuator using PZT powders were manufactured and their piezoelectric, displacement and time response characteristics were investigated. In the single round type actuator, the piezoelectric coefficient and the displacement increased with sintering temperature. In the multilayered actuator, the piezoelectric coefficient and the displacement increased with the layered number. In ten layered case, the piezoelectric coefficient and the displacement were higher over three times and six times than those of the single round type, respectively. At the voltage applied, the response velocity of the multilayered type was higher over two times than that of the single round type.

### 1. 서론

\* 正會員 仁荷大學校 電氣工學科  
(Dept. of Electrical Eng., Inha Univ.)  
\*\* 正會員 서울大學校 電氣工學科  
(Dept. of Electrical Eng., Seoul Univ.)  
\*\*\* 正會員 暎園大學校 電子工學科  
(Dept. of Elec. Eng., Kyungwon Univ.)  
\*\*\*\* 正會員 韓國敎員大學校 技術敎育科  
(Dept. of Tech. Educ., Korea Univ. of Educ.)  
接受日字 : 1993年 3月 9日

압전특성이란 어떤 재료에 기계적 응력을 가하였을 때 그 응력에 비례하여 전하가 발생하고 역으로 재료에 전계를 가하면 전계에 비례하여 기계적인 변형이 발생하는 현상을 말한다.<sup>[1]</sup>

강유전체인  $PbTiO_3$  와 반강유전체인  $PbZrO_3$  를 이용한 복합 퍼브스카이트형 산화물인  $Pb(Zr,Ti)O_3$  (이하 PZT)의 압전성이  $BaTiO_3$  세라믹스의 압전성보다 우수하다는 것이 알려지면서 압전 세라믹스의

응용분야는 더욱 확대되고 있으며 최근에는  $Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O_3$ 를 기본 조성으로 하여 여기에 여러가지 첨가원소를 넣어 특성을 변화시킨 변성 PZT 가 많이 쓰이고 있다. 또한 이들 재료로 조성된 압전 세라믹스는 액츄에이터, 음향기기, 통신기기, 초음파기기, 접화장치, 세라믹스 필터 및 각종 센서등에 폭넓게 응용되고 있다.<sup>2</sup>

최근 관심을 끌고 있는 압전 액츄에이터는 전기에너지를 기계에너지로 변환하여 부하의 운동을 전기적으로 제어하는 일종의 트랜스듀서로서 응답속도가 0.1 ms 정도로 매우 빠르고 열손실이 적으며 submicron 정도의 미소변위를 고속, 고정밀하게 제어할 수 있는 특징이 있다.<sup>1</sup> 압전 액츄에이터의 응용분야로서는 정밀기계, 천문학, 광학기기, 전자부품, 초음파 모터 등 초정밀을 요구하는 산업에 널리 쓰이고 있다.

본 연구에서는 단관형과 적층형 액츄에이터를 제작한 후 온도와 습도변화에 따른 압전특성, 변위특성등을 측정, 검토하였다.

## II. 실험

### 1. 사용재료

본 실험에서 사용한 압전 세라믹스 분말은 UPI (Ultrasonic Powders Inc.)사 제품인 PZT 401A (이하 PZT-1) 와 PZT 501A (이하 PZT-2) 로서 평균 직경이 1 $\mu$ m 정도인 하소공정을 마친 powder 이다.

### 2. 시편제작

#### 1) 단관형

PZT-1, PZT-2 powder 에 각각 증류수를 일정배율로 첨가하여 10 시간 동안 ball milling 한 후 binder 를 첨가하여 ball milling 을 더 행하였다. 이 혼합체를 80 $^{\circ}$ C 의 hot plate 에서 30 분동안 저으면서 건조시키고 건조된 파우더는 sieving 과정을 거친 후 압력을 가하여 성형하였다. 성형된 시편을 PbO 분위기에서 1100 $^{\circ}$ C, 1200 $^{\circ}$ C, 1270 $^{\circ}$ C, 1300 $^{\circ}$ C 1400 $^{\circ}$ C 로 소결온도를 변화시켜 가면서 소결하였다.

다음에 Ag paste 를 도포한 후 600 $^{\circ}$ C 에서 10분간 유지하여 전극처리를 했다. 마지막으로 100 $^{\circ}$ C 의 실리콘 oil 중에서 2kV/mm 의 전계를 10 분간 인가하여 분극처리를 행했으며 24 시간이 지난 후 측정하였다.

#### 2) 적층형

PZT-1 powder 와 binder 를 일정비율로 혼합하여 18 시간동안 ball milling 한 후 slurry 는

vacuum pump 를 사용하여 de-airing 처리를 행하였다. 다음에 tape casting 법에 의해 두께 20 $\mu$ m 정도의 green sheet 를 만든 후 이를 절단해서 Pt 를 사용, silk screen 법으로 내부전극을 인쇄하였다. 인쇄된 green sheet 는 4-10 매까지 적층시킨 후 hot press 를 사용하여 성형, 적층시켰다.

적층된 시편은 PbO 분위기에서 600 $^{\circ}$ C 까지 2.5 $^{\circ}$ C/min 의 승온속도로 서서히 가열한 후 1시간 동안 유지시켜 탈 binder과정을 거친 다음 1270 $^{\circ}$ C 까지 4 $^{\circ}$ C/min 로 승온시키고 1270 $^{\circ}$ C 에서 1 시간 30 분동안 유지시켜 소결하였다. 유공사의 Ag paste로 외부전극처리를 한 후 600 $^{\circ}$ C 에서 10 분간 유지하여 전극처리과정을 마쳤다. 마지막으로 분극처리는 단관형 액츄에이터와 같은 방법으로 행하였다.

### 3. 측정

#### 1) 전기적 특성

##### (1) 압전정수측정.

측정장치로서는 상하부의 전극면에 발생하는 전하를 검출할 수 있는 Berlincourt piezo d33 meter (channel products Inc., CPDT-3300)를 사용하였으며 이때의 측정조건으로 주파수는 100 Hz, 압력은 0.3 Newton 으로 하였다.

##### (2) 변위특성

##### a. 전압의존성

전압인가시 발생하는 변위측정을 위해 polimid foil strain gauge (Kyowa, KFC-5-C1-11L10) 를 그림 1과 같이 시편상에 부착시킨 후 전압인가에 따른 발생변위를 dynamic strain amp.로 증폭하여 recorder 로 측정하였다.

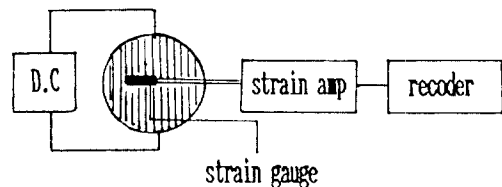
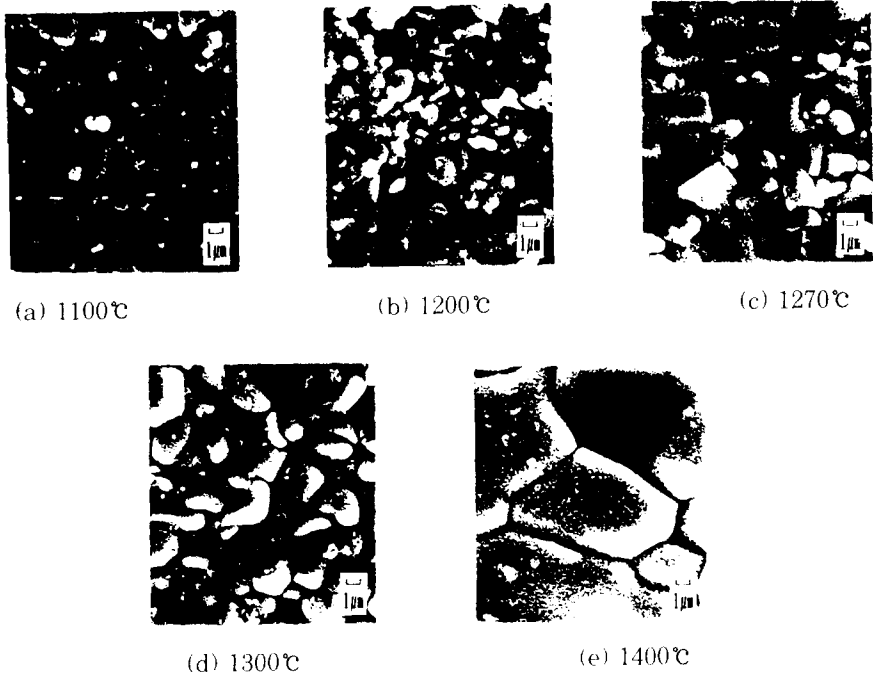


그림 1. 인가전압 따른 유기왜형 측정시스템

Fig. 1. Measurement system of strain with the applied voltage.

##### b. 습도의존성

습도변화에 따른 변위특성을 알아보기 위해서 항온항습조 (HC 7005, Heraeus Vötsch사, German) 내의 온도를 20 $^{\circ}$ C 로 일정하게 한 후 각각의 측정습도에서 30 분동안 유지하고 습도를 45%-93% 로 변



사 진 1. 소결온도에 따른 시편의 미세구조 (시료 : PZT-1)

Photo. 1. Microstructure of specimen with sintering temperature (powder:PZT-1).

화시켜 가면서 발생변위를 측정하였다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 단판형 액츄에이터

1) 시편의 미세구조

사진 1은 소결온도에 따른 PZT-1 시편의 미세구조를 나타낸 것이다. 사진에서 보는 것처럼 PZT-1 시편은 소결온도의 증가에 따라 grain size가 성장. 소결이 촉진되고 있음을 알 수 있다. 이는 소결온도가 증가함에 따라 grain boundary 내에 존재하는 PbO가 증발함으로 인해 grain이 성장하는 것으로서 이러한 bulk 구조의 변화는 압전 및 변위특성에 영향을 미칠 것으로 예상된다.

2) 소결온도에 따른 압전특성

그림 2에 PZT-1, PZT-2 단판형 시편의 소결온도에 따른 압전정수의 변화를 나타내었다.

그림 2에서 보면 소결온도에 따라서 PZT-2의 압전정수가 PZT-1 보다 큰 것을 알 수 있는데 이는 PZT-1과 PZT-2 powder의 고유 압전정수가 각각 275 (pC/N)와 400 (pC/N)으로 PZT-2가 더 크기 때문이다.

또한 소결온도가 증가함에 따라서 압전정수는 증가하고 있는데 그 원인으로서 분극처리된 시편들은 소

결온도가 증가함에 따라 grain size는 성장하고 크기가 성장한 grain 들은 내부응력의 증가로 인해 주변에 압력을 미치기 때문이라고 사료된다.<sup>5</sup>

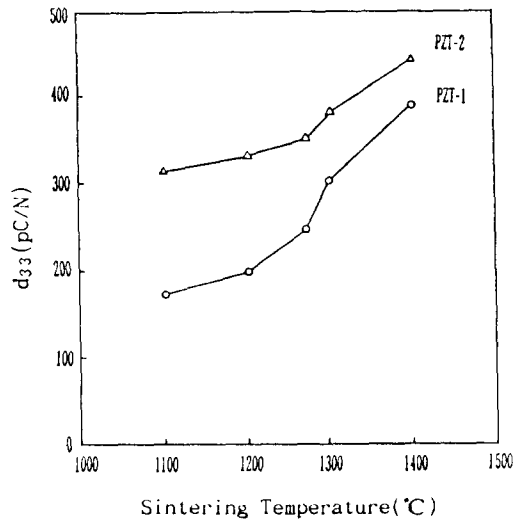


그림 2. 압전정수-소결온도특성

Fig. 2. Characteristics of piezoelectric coefficient-sintering temperature.

3) 변위특성

(a) 전압의존성

전압변화에 따른 PZT-1 과 PZT-2 의 변위특성을 각각 그림 3 과 4 에 나타내었다. 압전정수 d는

$$d = \frac{\Delta L}{L} \cdot \frac{t}{V}$$

여기서, L : 시편의 길이    ΔL : 변위량  
 t : 시편의 두께        V : 인가전압

인 관계가 있으므로 인가전압이 증가함에 따라 변위량도 증가함을 알 수 있다.

PZT-1 에서는 소결온도가 1400℃ 일때 가장 큰 변위특성을 보이고 있지만 이력현상이 크게 나타나고 있으므로 최적소결온도라고 할 수 없고 소결온도를 1270℃ 로 했을 때는 변위량이 1400℃ 의 경우보다는 다소 적지만 1100℃ 나 1200℃ 인 경우보다 비교적 크고 이력현상이 양호하므로 1270℃ 를 최적소결 온도라고 제시할 수 있다.

PZT-2 는 소결온도가 1200℃ - 1400℃ 영역인 시편에서 큰 변위량이 관측되지만 이력이 비교적 크게 나타나는 편으로써 대체적으로 1300℃ 일때가 소결 온도로서 양호함을 나타내고 있다.

그림 3 과 4 의 결과를 비교해 보면 PZT-2 가 PZT-1 보다 다소 큰 변위량을 나타내고 있는데 이는 PZT-2 의 압전정수가 PZT-1 보다 높기 때문이라고

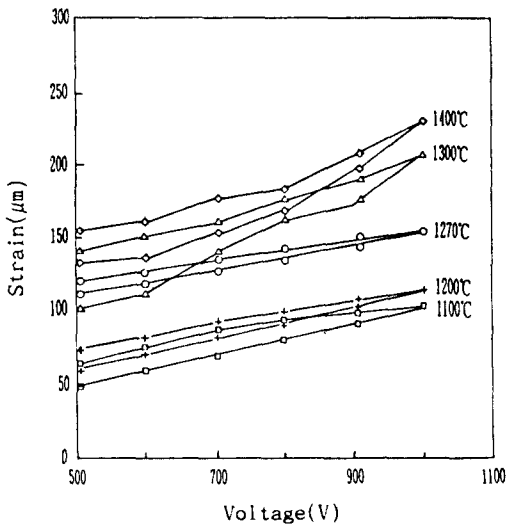


그림 3. 이력특성곡선의 소결온도 의존성 (시료: PZT-1)

Fig. 3. Dependence of hysteresis loops on sintering temperature (powder: PZT-1).

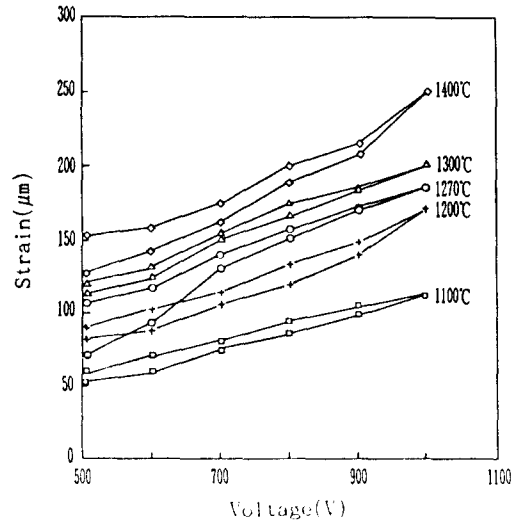


그림 4. 이력특성곡선의 소결온도 의존성 (시료: PZT-2)

Fig. 4. Dependence of hysteresis loops on sintering temperature (powder: PZT-2).

생각된다. 또한 PZT-1 이나 PZT-2 의 변위특성에 있어서 정도의 차이는 있지만 거의 대부분이 이력현상을 보이고 있는데 이력현상이 일어나는 원인으로서는 전계를 인가하면 시료 내부의 극성이 변하는데 이때 극성이 변화함으로 인해 분극방향이 바뀔때 생기는 공간전하의 분극완화시간이 존재하기 때문이다. 이와 같은 이력현상은 인가전계가 증가하고 유전율이 큰 시료일수록 커지는 경향이 있는데 이러한 이력현상을 줄이기 위해서는 낮은 항전계를 갖는 재료의 선택이 요구된다.

(b) 습도의존성

시편에 일정전압 (800V) 을 인가하여 둔 채 습도 변화에 따른 변위특성을 그림 5 와 6 에 나타내었다.

습도가 증가함에 따라 대체로 변위량이 증가하는 것을 알 수 있는데 이는 습도가 증가할수록 시료표면 및 내부에 수분의 흡착으로 인해 분극도가 변하기 때문이라 볼수 있다. 분극도가 변하는 이유로서 저습도 영역에서는 하나의 물분자가 두개의 수산기와 이중수소결합을 이루지만 고습도 영역에서는 하나의 물분자가 하나의 수산기와 단일수소결합을 이루고 있다. 따라서 고습도 영역으로 갈수록 이중수소결합을 이루고 있던 물분자가 단일수소결합을 이루면서 재배열을 쉽게 이루어 분극도가 높아지게 되고 이로 인해 전압인가시 변위가 증가하는 것을 알 수 있다.<sup>9)</sup>

그림 5 와 6 에서 PZT-1 과 PZT-2 시편의 변위량을 비교해 보면 상대습도가 저습도에서 고습도로 증가함에 따라서 물분자는 시료표면에 흡착되어 OH-

와 H<sup>+</sup> 로 해리된다. 이때 PZT-1 과 PZT-2 powder 의 고유 유전율 ( $\epsilon_{33}$ )은 각각 1250 과 1850 으로 PZT-2 의 고유 유전율이 PZT-1 보다 높기 때문에 물분자 흡착시 PZT-2 는 PZT-1 에 비해 높은 분극

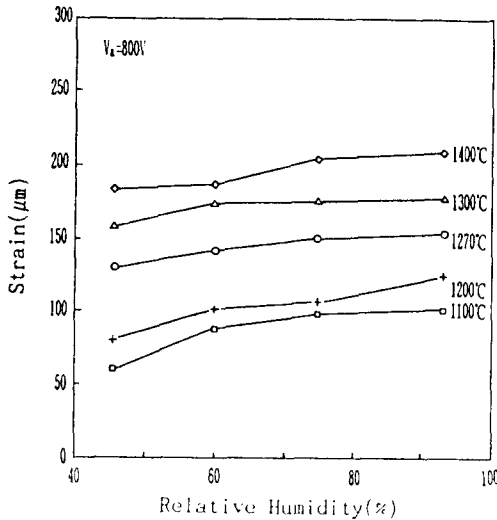


그림 5. 습도-변위특성의 소결온도 의존성 (시료: PZT-1)

Fig. 5. Dependence of humidity-strain characteristics on sintering temperature (powder: PZT-1).

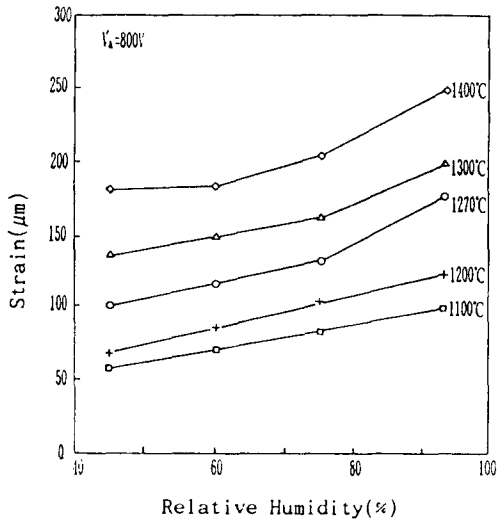


그림 6. 습도-변위특성의 소결온도 의존성 (시료: PZT-2)

Fig. 6. Dependence of humidity-strain characteristics on sintering temperature (powder: PZT-2).

도를 나타내어 더 큰 변위량을 보이고 있다.

변위특성에 있어서 시편의 구성시료 및 소결온도와와 분석결과를 비교해 볼때 PZT-1 중에서 소결온도가 1270 °C 일때 비교적 높은 변위량과 함께 좋은 선형성을 나타 낸 반면, PZT-2 중에서는 1200°C 일때 선형성이 가장 우수하지만 변위특성은 그다지 좋지 않으며 1400°C 일때는 변위특성은 좋으나 선형성이 좋지 않다. 그러므로 습도변 화에 따라서 가장 양호한 변위특성을 나타내는 시료는 PZT-1 이며 소결온도는 1270°C 라고 생각된다.

## 2. 적층형 액츄에이터의 특성

### 1) 적층수에 따른 압전특성

단층형 액츄에이터의 특성결과로부터 시료는 PZT-1. 소결온도는 1270°C 일때가 가장 양호하므로 이하 적층형 에서의 각층은 상기의 조건으로 시편을 제조하였다.

적층수 변화에 따른 시편의 압전정수 ( $d_{33}$ ) 값의 변화를 그림 7 에 나타내었다. 그림에서도 알 수 있는 바와 같이 적층수가 증가됨에 따라서 압전정수값은 거의 직선적인 큰 폭의 증가를 나타내고 있다. 이는

$$d_{33} = \frac{\partial Q_3}{\partial T_3}$$

여기서,  $T_3$  : 시편에 가해지는 응력

$Q_3$  : 시편에서 발생하는 전하량

인 관계에서 응력 ( $T_3$ ) 이 일정하게 가해지는 상태에

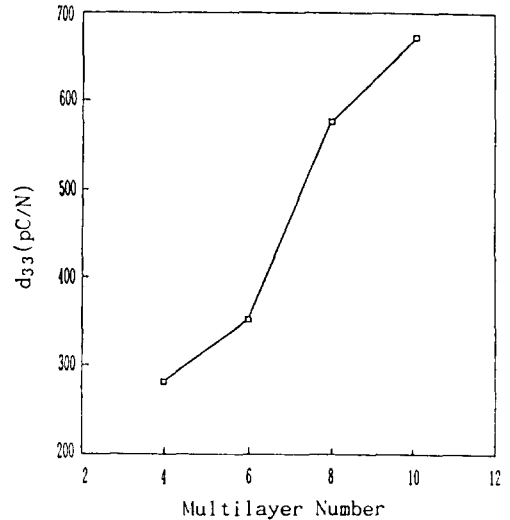


그림 7. 압전정수-적층수특성 (시료: PZT-1, 소결 온도 : 1270°C))

Fig. 7. Characteristics of piezoelectric coefficient-multilayered number (powder: PZT-1, sintering temperature: 1270°C).

서 전하량 ( $Q_3$ ) 값은 적층수가 커짐에 따라 비례적으로 증가됨으로서  $d_{33}$  값이 커짐을 알 수 있다.<sup>17)</sup>

2) 변위특성

전압변화에 따른 시편의 변위량을 그림 8 에 나타

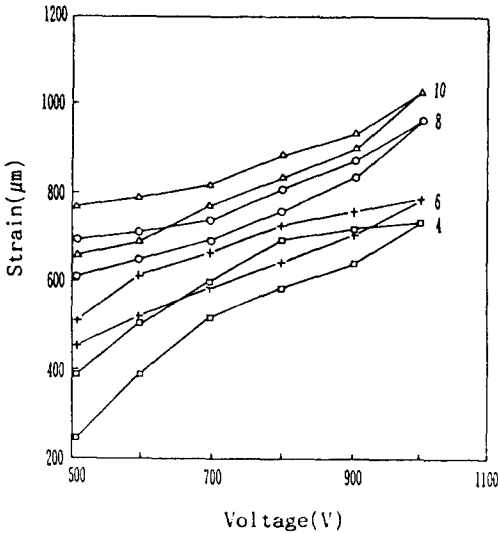


그림 8. 이력특성곡선의 적층수 의존성 (시료: PZT-1, 소결온도 : 1270℃)

Fig. 8. Dependence of hysteresis loops on multilayered number (powder: PZT-1, sintering temperature: 1270℃).

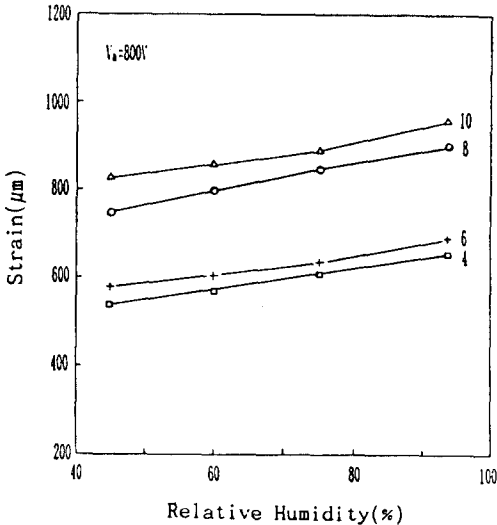


그림 9. 습도-변위특성의 적층수의존성 (시료: PZT-1, 소결온도 : 1270℃)

Fig. 9. Dependence of humidity-strain characteristics on multilayered number (powder: PZT-1, sintering temperature: 1270℃).

내었다.

변위량 ( $\Delta L/L$ ) 은

$$\Delta L/L = d_{33} \cdot N \cdot V$$

여기서, N : 적층수

인 식에서 압전정수, 적층수 그리고 인가전압에 의해 결정되어지므로 적층수가 높아질수록 변위량은 증가한다.<sup>8)</sup>

적층수가 증가함에 따라 각 시편의 습도변화에 따른 변위량을 그림 9 에 나타내었다.

그림 9 에서는 습도가 증가할수록 각 시편의 변위량은 증가하는 현상을 나타내는데 이는 단판형에서와 같이 수증기 흡착에 따른 분극도의 변화에 기인한다고 사료된다.

3) 응답속도

압전 액츄에이터의 경우, 낮은 전압을 인가시 큰 변위가 일어나며 응답속도가 빠를수록 우수한 성능의 액츄에이터라 할 수 있는데 응답속도가 빠르다는 것은 결정내의 쌍극자 모멘트가 인가전계에 의해 빠르게 회전하는 것을 의미한다.

PZT-1, PZT-2 powder 로 제작된 단판형 시편과 PZT-1 powder 로 제작된 적층형 시편에 있어서 시간변화에 따른 변위량을 그림 10에 나타내었다.

응답속도에 대해 살펴보면 액츄에이터의 용량을

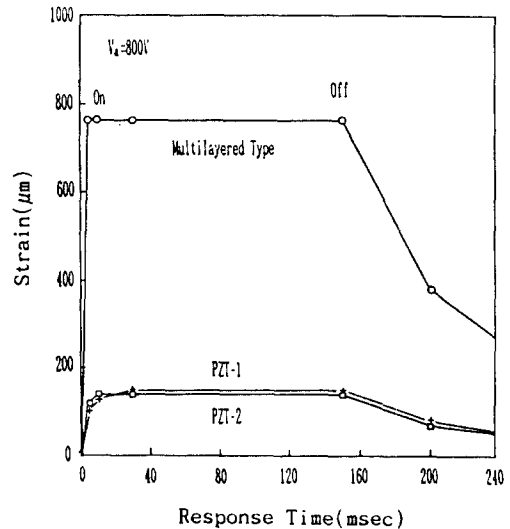


그림 10. 단판형과 적층형의 응답 시간 (소결온도: 1270℃)

Fig. 10. Response time of the single round type and the multilayered type (sintering temperature: 1270℃).

C. 전원출력의 impedance 를 R 이라고 하면

편의 20 ms 보다 빠른 현상을 나타냈다.

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \times wL/t_s$$

$$R = \rho \times L/wt_s$$

여기서, w : 시편의 종방향 길이  
 L : 시편의 횡방향 길이  
 ρ : 세라믹스의 밀도  
 t<sub>s</sub> : sheet 1층당의 두께  
 tr : 전극의 두께

감사의 글

본 실험에 적극 협조한 동양중앙연구소 민화순 연구원에게 진심으로 감사하고 본 연구는 과학기술처에서 시행한 특정 연구개발사업의 연구결과임을 알려며 관계당국에 감사드립니다

參考文獻

인 관계<sup>9)</sup>에서 응답속도는 시정수 τ = RC 인 식으로 나타내어 지는데 적층형과 단판형의 응답속도를 비교하면 적층수가 증가함에 따라 R 과 C 가 작아지고 그로 인해 시정수는 감소하게 됨으로써 적층형이 단판형보다 빠른 응답특성을 보이고 있다고 사료된다.

IV. 결론

PZT-1, PZT-2 powder 를 사용하여 소결온도에 따라 각각의 단판형 압전 액츄에이터를 제작하고 그 특성을 분석한 후 이 중 PZT-1 Powder 를 선택하여 Dr.blade 법으로 적층형 압전 액츄에이터를 제작하였다.

이들의 압전특성, 변위특성 그리고 응답특성을 비교, 측정하고 검토한 결과는 다음과 같다.

- 1) 단판형 시편은 소결온도가 높아질수록 압전정수와 변위량이 증가하며 특히 PZT-1 powder 로 제작된 단판형 압전 액츄에이터인 경우, 1270℃ 일때 시편의 이력이 거의 없음이 관측되었다.
- 2) 적층형 시편은 적층수가 증가함에 따라서 압전정수와 변위량이 증가하며 10층을 적층했을 경우 단판형에 비해 압전정수는 3 배이상, 변위량은 6 배이상의 증가량을 나타냈다.
- 3) 단판형과 적층형 시편 모두 고습도 영역으로 갈수록 분극도가 높아져 변위량이 증가함을 알 수 있다.
- 4) 적층형 시편의 응답시간은 10 ms 로 단판형 시

- [1] 内野研 : 壓電 / 電歪 アクチュエータ, 日本工業技術センター編, pp.10-44 (1986).
- [2] B.Jaffe, et al : Piezoelectric Properties of Lead Zirconate Lead Titanate Solid-Solution Ceramics, *J. Appl. Phys.*, vol. 25, pp.809-810 (1954).
- [3] M.Suga and M.Tsuzuki : *J.J. Appl. Phys.*, vol.23, no.6, pp.765-773 (1984).
- [4] L.J.Bowen, T.ShROUT, W.A.Schulze and J.V.Biggers : *Ferroelectrics*, vol. 27, pp.59-62 (1980).
- [5] Takahashi Yamamoto : New Preparation Method of Ferroelectric and Dielectric Ceramics and Evaluations, no.5, pp.55-60 (1991).
- [6] T.Seiyama, N.Yamazoe and H.Arai : *Ceramic Humidity Sensors, Sensors and Actuators*, 4, pp.85-96 (1983).
- [7] Sadayuki Takahashi and Atushi Ochi : Internal Electrode Piezo- electric Ceramics Actuator, *Ferroelectrics*, vol. 50, pp.181-190 (1983).
- [8] S.Takahashi : Multilayer Piezoelectric Ceramic Actuators and their Application, *J.J. Appl. Phys.*, vol.24, p41 (1985).
- [9] 内野研 : 壓電 / 電歪 アクチュエータ, 日本工業技術センター編, pp. 71-93 (1986).

著 者 紹 介



柳道鉉(正會員)

1965年 10月 20日生. 1990年 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1992年 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992年 ~ 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정 재학중. 주 관심 분야는 액츄에이터와 박막형 습도센서 등임.

습도센서 등임.



韓民九(正會員)

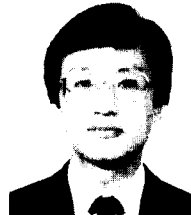
1948年 7月 21日生. 1971年 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1979年 미국 Johns Hopkins Univ. 졸업(공학). 1979年 ~ 1984年 미국 뉴욕 주립대 조교수. 1984年 ~ 현재 서울대 공대 전기공학과 교수. 주 관심 분야는 반도체재료 및 소재 (TFT와 전력용 반도체 및 센서) 등임.



李能憲(正會員)

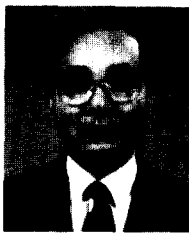
1950年 5月 15日生. 1975年 서울대 사대 물리학과 졸업. 1987年 인하대 공대 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1985年 일본 나고야 대학교 객원연구원. 1990年 일본 상지대학교 객원연구원. 1988年 ~ 현재 경원대 공대 전자공학과 부교수. 주 관심 분야는 전자세라믹스(센서 및 액츄에이터) 등임.

~ 현재 경원대 공대 전자공학과 부교수. 주 관심 분야는 전자세라믹스(센서 및 액츄에이터) 등임.



金鎮洙(正會員)

1960年 9月 6日生. 1986年 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1988年 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992年 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1989年 ~ 1992年 경원전문대학 조교수. 1992年 ~ 현재 한국 교원대학교 기술교육과 전임강사. 주 관심 분야는 압전 세라믹스, 압전복합재료, 초음파 센서 및 압전 액츄에이터 등임.



李德出(正會員)

1939年 1月 22日生. 1963年 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1966年 동 대학원 졸업 (석사). 1976年 일본 나고야 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1970年~1978年 단국대 공대 전기공학과 부교수.

1981年 일본 나고야 대학교 초빙교수. 1978年~현재 인하대 공대 전기공학과 교수. 주 관심 분야는 액츄에이터, 습도센서, 플라즈마중합 및 유동대전 등임.