

## 적층형 압전 액츄에이터의 제조 및 압전특성

Processing Parameter and Piezoelectric Properties of  
Multilayered Piezoelectric Actuator

김 용 혁\* · 박 수 창\* · 최 명 규\* · 김 재 호\*

(Yong-Hyuk Kim · Soo-Chang Park · Myung-Kyu Choi · Jae-Ho kim)

## 요 약

본 논문에서는 내부전극 Pt를 갖는 적층형 압전액츄에이터의 제조와 적층수에 따른 압전액츄에이터 압전특성에 대해 조사 연구하였다.

먼저, Dr. blade 방법을 사용하여 두께  $\sim 220\mu\text{m}$ 의 PZT green sheet를 제작하였다. green sheet의 밀도는 결합제 양과 외부압력에 대해 크게 의존하였으며 소결체의 밀도는 green sheet의 밀도가 커질수록 더 높게 나타났다. 다음에는 적층수에 따른 압전정수의 변화에 대한 것으로써, 압전정수( $d_{33}$ )는 PZT세라믹스의 적층수가 증가할수록 매우 크게 증가되었으며 압전정수를 도입하여 계산된 변형량( $\Delta l/l$ )은 10층 시편에 대해  $2 \times 10^6 \text{V/m}$ 의 전계에서  $3 \times 10^{-3}$ 값을 얻었다. 이와같은 결과로써, 적층형 압전액츄에이터는 저전압에서도 큰 변위를 나타내며, 따라서 제어장치의 미세작동에 충분히 이용 될 수가 있다.

## ABSTRACT

In this paper, multilayer piezoelectric ceramic actuators with the Pt internal electrode were investigated on the fabrication processing and dependence of piezoelectric properties on the layer numbers.

In the first part, a green sheet of PZT ceramics was fabricated using doctor blade technique. Then PZT green sheets with thickness  $\sim 220\mu\text{m}$  were prepared. The density of green sheets depends largely of the binder amounts and pressure. The higher the density of green sheets was the higher density of sintered ceramics becomes. second part contains piezoelectric

\*경원전문대학 전기과

properties of the layer numbers. Piezoelectric coefficient ( $d_{33}$ ) was increased largely with increasing layer number of PZT ceramics.

The strain ( $\Delta l/l$ ) induced by the electric field in multilayer was calculated using piezoelectric coefficient. On the 10 layer specimen the magnitude of strain obtained was  $3 \times 10^{-3}$  at  $2 \times 10^6 \text{V/m}$  electric field.

So that the multilayered actuator can yield relatively large displacement in spite of low input voltage and sufficiently applicable to fine movement control devices.

## 1. 서 론

액츄에이터(Actuator)는 가동 에너지를 기계적인 변위 또는 용력으로 변환시키는 트랜스듀서로써 광학, 천문학, 정밀가공 등의 정밀분야에 있어서 Submicron 정도의 미소변위를 능동적으로 제어하기 위한 정밀위치 변위소자로 이용된다.<sup>1~3)</sup>

지금까지 정밀위치 제어에 사용되어온 액츄에이터는 공기압식, 유압식 방식으로써 이들은 모두 기계적인 동작특성에 의존하기 때문에  $10\mu\text{m}$ 이하의 미소변위를 제어하기에는 정밀성의 한계를 안고 있다.

최근에 들어 소형경량 이면서 낮은 전압하에서 비교적 큰 변위량( $\Delta l/l \sim 10^{-4} - 10^{-2}$ )를 가지며 변위량의 정밀도가 매우 높은 압전세라믹스 재료를 사용한 액츄에이터(이하 압전액츄에이터)가 개발되어 정밀계측산업, 우주항공분야에 이르기까지 폭넓게 이용되기에서 이르렀다.

압전형 액츄에이터는 압전세라믹스의 전기-기계 상호변환 작용중 전계에 의해 유기되는 압전체의 변형특성(압전효과)을 이용하게 되므로 기계동작 방식에 비해 동작시간이 0.1ms 정도로 매우 짧고, 열손실이 적으며, 변위 정밀도가  $0.01\mu\text{m}$ 정도로써 미세 영역에서의 위치 제어능력이 매우 뛰어난 특성을 갖고

있다.

압전액츄에이터 중에서 적층형은 세라믹 압전체와 내부 전극이 층상으로 중복해 쌓여져 있고 소결에 의해 일체화한 구조로 되어 있어서 단층구조의 것보다 변위의 확대율은 작으나 용력 발생력 및 응답속도가 높고 내구성이 풍부하며 전기기계 변환효율이 큰 특징을 지니고 있다.<sup>4~6)</sup>

적층형 압전액츄에이터는 수십~수백  $\mu\text{m}$ 에 이르는 얇은 압전세라믹스 판으로 이루어지기 때문에 제조공정상 많은 어려움을 갖고 있다. 특히, 세라믹스 판의 성형과정은 많은 요소가 작용되며, 현재까지 개발된 기술은 Dr. blade방법으로써 이는 적층 세라믹 콘덴서의 제조에 이용되어 왔다.

Dr. blade 방법에 의해 박막의 압전세라믹스 판을 제조하는 과정에서 성형체의 특성을 결정하는 요소인 Slip의 점도, Casting 속도, Dr. blade구조 등이 균일성 관점에서 연구 보고된 바 있다.<sup>7~8)</sup>

그러나 균일성 있는 압전세라믹스 판을 얻을 수 있다 하더라도 압전액츄에이터의 전기적 성질은 결국 소결후의 압전체 물성에 크게 의존 된다.

특히, 세라믹스 재질이 갖는 전계강도는 한계가 있으므로 높은 구동전계 하에서 안정된

변위를 얻기 위해서는 세라믹스 재질의 고밀도화가 요구된다. 소결체의 밀도는 공정의 첫 단계인 성형과정에서 부터 결정되므로 성형체의 밀도를 결정하게 되는 요인들을 조사하는 것은 신뢰성 있는 압전액츄에이터 제조에 있어 매우 중요한 일이라 생각된다.

따라서, 본 논문에서는 Dr. blade 방법에 의한 압전액츄에이터의 제조 과정을 통하여 세라믹스 성형체의 밀도 변화에 영향을 미치는 요소들을 조사하였고, 고밀도의 박막 세라믹스 판으로 제조한 적층형 압전액츄에이터의 압전 성질에 대해서 연구 하였다.

2. 실험방법

2-1. 시편 제조

Dr. blade 방법을 이용한 적층형 압전액츄에이터의 시편제조 공정도를 그림 1에 도시하였다.

본 실험에서 사용한 압전세라믹스 분말은 PZT 401A (UPI사)이며 성형용 결합제는 B73210(Metoramic-sciences사)이다.

PZT분말에 결합제를 일정비율로 첨가하여 ball mill 방법으로 20시간 균일혼합한 후 진공 내에서 De-Airing 과정으로 혼합체 내에 혼입된 공기를 제거하였다. 이어서, Dr. blade 장치를 사용하여 평균두께 ~220 $\mu$ m(건조후)의 세라믹스 판(이하 green sheet)을 제조하였다. 이때 Dr. blade의 높이는 750 $\mu$ m, 성형용 필름의 이동속도는 40cm/min로 고정하였다. 성형 후 24시간 건조하여 2 $\times$ 2cm의 크기로 절단한 후 Silk Screen 방법으로 내부전극(Pt)을 green sheet 위에 0.5cm $\times$ 1cm의 크기로 인쇄하였다. 인쇄를 마친 green sheet를 4~10매까지 적층한 후 hot press로 80 $^{\circ}$ C 온도하에서 50kg/cm $^2$ 의 압력을 5분간 가하여 열압착 하

였다. 적층시편을 알루미늄이나 도가니에 넣은 후 PbO분위기에서 600 $^{\circ}$ C까지 30 $^{\circ}$ C/hr의 승온속도로 서서히 가열하여 4시간 유지시켜 탈바인다 과정을 거친뒤 1310 $^{\circ}$ C에서 1시간 유지하여 소결하였다.

소결후 은전극(Dupont 7095)으로 시편 양단을 도포한 후 600 $^{\circ}$ C에서 5분간 유지하여 전극처리 과정을 마쳤다. 분극은 100 $^{\circ}$ C의 silicon oil 내에서 30KV/cm의 전계를 10분간 가하여 행하였다.

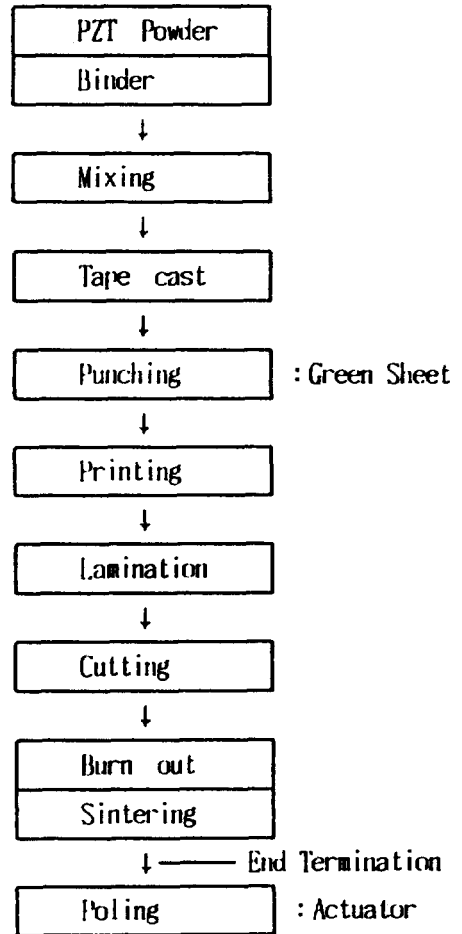


그림 1. 시편 제조 공정도

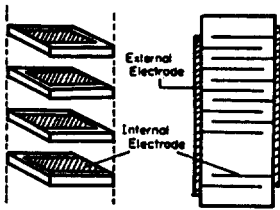
Fig.1. Block diagram of fabrication process of specimen.

그림 2에 적층형 압전액츄에이터의 구조와 제조한 시편의 내부 전극처리된 미세구조를 나타내었다.

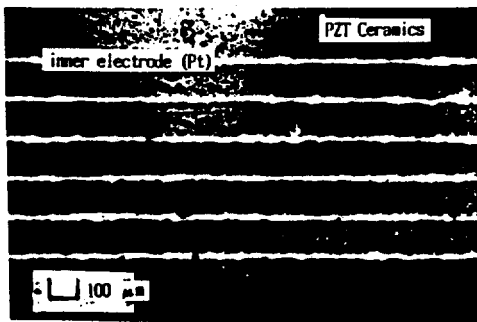
그림에서와 같이 소결된 시편의 두께는 ~ 140 $\mu$ m로 되었다.

2-2 측정방법

시편의 밀도는 electronic balance로 무게를 측정하여 dimension을 나누어 구하였다. 공진 특성은 spectrum analyzer를 사용하여 관찰하였고 D-E 곡선은 Sawyer-Tower 회로를 이용하였다. 압전정수는 Berlincourt  $d_{33}$  meter (100 Hz 0.3N)로 측정하였다. 모든 data처리에 사용된 측정값은 시편 5개의 평균치이다.



(a)



(b)

그림 2. (a) 적층형 압전액츄에이터의 구조  
(b) 시편의 단면적

Fig. 2. (a) Construction of multilayer piezoelectric actuator.  
(b) Cross section of specimen.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 밀도 관련 특성

그림 3에 결합제(binder)양에 따른 green sheet의 밀도변화를 나타내었다. 결합제 양이 증가됨에 따라서 33wt% 이상에서는 거의 직선적인 밀도 감소 현상을 보이고 있으며 그 이하에서는 변화량이 매우 둔화된 특성을 나타내었다. PZT세라믹스 분말과 결합제와의 혼합비율은 green sheet의 기계적 강도 열압착성, 가공의 형성과정 등에 크게 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.<sup>9)</sup>

특히, 이론치와 비교하여 결합제 양 33wt% 이상과 그 이하에서 현저한 차이를 나타내고 있다. 이는 비교적 결합제 비율이 낮은 28-33wt%에 대해서는 혼합제(slurry)의 점도가 3200~2770(SPDL 62. rpm6)으로 매우 높기 때문에 혼합제 내부에 함유된 공기가 De-Airing과정중에 외부로 완전하게 방출되지 않아 건조후 green sheet내부에 기공이 형성된 원인에 기인된 것으로 생각된다.

결합제 혼합과정에서 결합제 양이 적게 되면 성형체의 표면상태가 균일치 않으며 또한 건조과정에서 용해제 (solvent)의 급격한 휘

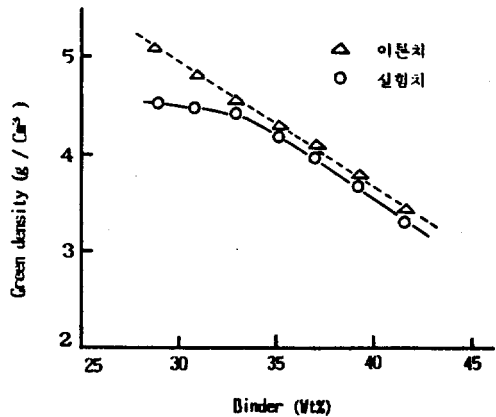


그림 3. 결합제 양에 대한 green 밀도  
Fig. 3. Green density for binder amounts.

발의 영향으로 PZT세라믹스 내부에 미세 균열현상이 수반되기 때문에 전극처리가 어려워지고 소결후의 물성이 나빠진다. 이에 반하여 결합제량이 너무 과다해지면 성형작업은 용이해지나 밀도가 현저히 감소되므로 압전특성에 많은 영향을 미치게 된다.

본 실험에서는 적정의 밀도값을 유지하면서 세라믹스 sheet의 표면상태가 양호한 결합제 비율로 33wt%가 가장 최적 비율임을 알 수 있었다.

결합제는 가소제, 분산제, 용매 등의 여러 유기물(organic)로 이루어져 있으며 이들은 건조후 분산된 PZT세라믹스 입자 주위에 둘러 쌓여 있게 된다. 따라서 외부의 압력이 작용하면 이 유기물들의 수축에 의해 세라믹스 입자와 입자사이의 거리가 좁아짐에 따라 밀도의 변화효과가 나타난다.<sup>10)</sup>

그림 4에 결합제 양 30~50wt% 시편에 대해서 green sheet 밀도의 압력 의존성을 나타내었다. 압력이 증가됨에 따라서 300kg/cm<sup>2</sup> 정

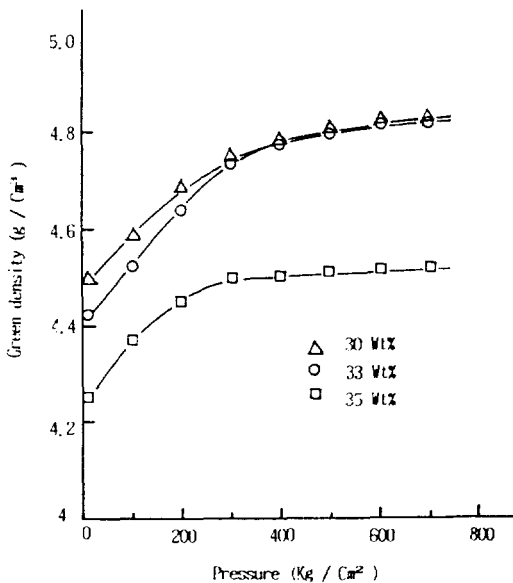


그림 4. 압력에 대한 green 밀도  
Fig. 4. Green density for pressure.

도까지는 큰폭으로 밀도의 증가가 일어났으나 그 이후부터는 거의 둔화되는 경향을 보이고 있다. 특히, 결합제의 양이 많은 35wt%에서는 빠르게 최대밀도에 도달되는데 반해 33wt%이하에는 압력변화에 대해 서서히 최대밀도에 도달됨을 알 수 있다. 이 경향은 결합제 양이 감소됨에 따라 PZT세라믹스 입자의 재배열 및 충전에 요하는데는 보다 큰 압력이 필요하게 되는 원인에 따른 것이라 생각된다. 이때, 33wt% 시편의 경우 외부 압력에 의한 최대밀도는 압력을 받기전보다 약 10% 정도의 밀도증가 효과를 나타내었다.

그림 5는 압력을 받기 전, 후의 green sheet 밀도와 소결 후의 밀도와의 관련성을 나타낸 것이다.

green 밀도와 소결 밀도는 선형적인 관계를 나타냈으며 압력을 받은 시편의 green 밀도가 압력을 받지 않은 시편보다 증가됨으로 해서 결국 소결 밀도가 증가된 것임을 알 수 있다.

따라서, 압력효과만에 의해서도 PZT 401A의 이론밀도  $\approx 7.6\text{g/cm}^3$ 에 거의 접근되는 PZT세라믹스체의 제조 가능성이 있음을 확인하였다.

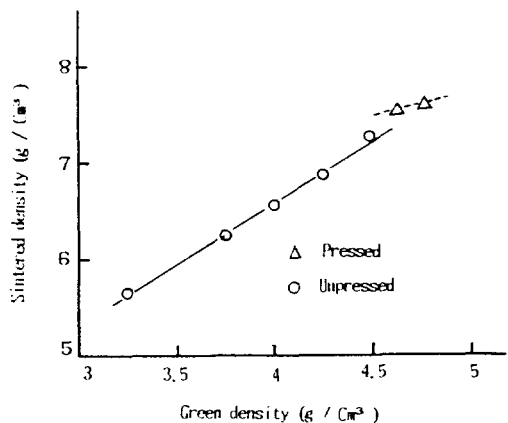


그림 5. Green 밀도에 대한 소결밀도  
Fig. 5. Sintered density for green density.

특히, 이같은 고밀도 세라믹스는 소결체 내부의 결정립(grain)이 매우 치밀하게 배열되기 때문에 기공을 다수 포함하는 저밀도 세라믹스에 비해 절연과괴 강도가 크게 증대될 것이다.

3-2. 압전 특성

그림 6에 압전세라믹스 판의 층수에 따른 진동특성의 변화를 나타내었다. 시편의 내부 전극 크기에 의해서 결정되는 공진주파수는 길이방향 진동시 42kHz로 측정되었으며 두께 방향 진동은 9.2MHz의 고주파 측에서 나타났다. 그리고 공진시의 임피던스는 적층수에 따라 거의 변함이 없이 ~4Ω 정도이며 여가된 진동특성은 적층수가 증가됨에 따라서 다소 둔화되는 경향을 나타내었다. 이 현상은 단일 판 세라믹스에서는 외부의 영향없이 자유로운 진동을 하는 반면에 적층된 세라믹스에서

는 상, 하로 인접된 세라믹스 층의 상호진동 간섭으로 인해 진동효과가 다소 저지되는 것으로, 이는 층수가 커짐에 따라서 더욱 증대되는 것으로 생각된다. 또한, 이 적층효과는 기본진동 이외에도 spurious 발생면에 있어서도 동일한 현상을 보이고 있다.

그림 7은 적층수의 증가에 따른 압전정수( $d_{33}$ )값의 변화를 나타낸 것이다. 세라믹스 판의 적층수가 증가됨에 따라서 압전정수 값은 매우 큰폭으로 거의 직선적인 증가 추세를 나타내며 이들의 값은 단판형 압전세라믹스의 값 ~275정도에 비해 매우 큰값으로 나타났다. 이 결과는

$$d_{33} = \frac{\partial Q_3}{\partial T_3} \dots\dots(1)$$

의 관계에서<sup>11)</sup> 모든 시편에 비해 응력( $T_3$ )이 일정하게 가해지는 상태에서 시편에서 발생되는 전하량( $Q_3$ )값이 적층수가 커짐에 따라

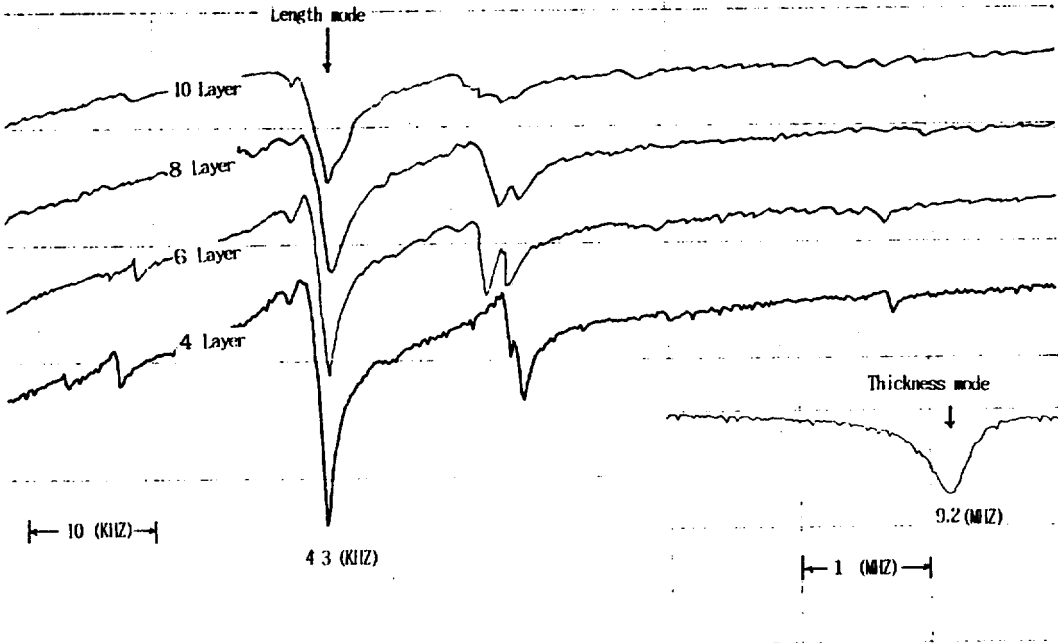


그림 6. 적층수에 따른 공진특성  
Fig. 6. Resonance spectra for Layer numbers.

비례적으로 증가됨으로써  $d_{33}$  값이 커지게 되는 것임을 알 수 있다.

또한, 적층수에 비례하여 압전정수가 증가하는 특성은 전계에 대해 잔류분극량의 크기를 나타내는 D-E 곡선의 관찰을 보인 그림 8의 그림으로 부터도 알 수 있다.

즉, 그림에서와 같이 일정전계하에서 적층수가 증가됨으로써 잔류분극량 Pr은 점차 증가하고 있으며 이는 (1)식의  $dQ_3$ 값의 증가특성과 잘 일치되고 있다.

분극직후 비대칭 hysteresis 곡선이 관찰되는 것은 분극과정에서 직류전계의 인가에 의해 자발분극의 전계방향 배열의 분극효과와 임계층에 존재하는 상유전성물질에 의한 공간전하 분극효과에 기인되어 나타나는 내부전계가 bias로 작용하기 때문인 것으로 생각된다. 또한 이 비대칭 변화는 오랜 aging 과정을 거치면서 나비형 hysteresis 곡선으로 변형되어지는 것으로 알려져 있다.

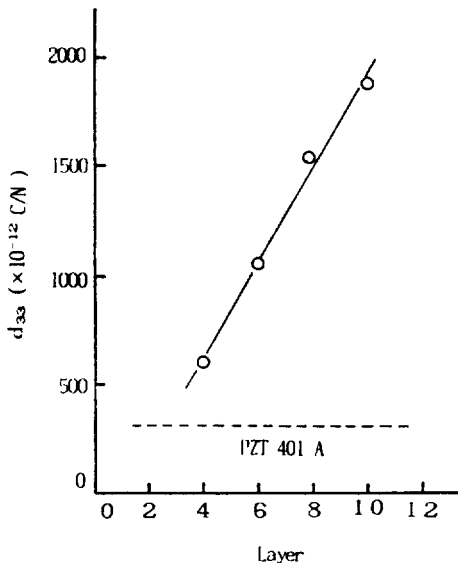


그림 7. 적층수에 대한 압전정수  
Fig. 7. Piezoelectric constant of Layer numbers.

이 그림에서 계산된 잔류분극량은 4~10층에 대해  $1.6 \sim 2.4 \times 10^{-4} \text{ C/cm}^2$ 로 나타났다. 또한, 임계전계(항전계) 이상으로 되면 좌, 우대칭으로 되는 나비형의 이력곡선(hysteresis)을 이루게 되는데 이때에는 이력면적이 크게 증가되어 안정하게 사용될 수 없음이 보고된 바 있다.<sup>1)</sup> 따라서, 가능하면 낮은 항전계를 갖는 재료의 선택이 요구되며 본 실험에서 얻은 항전계는  $14 \text{ kv/cm}$ 로써 안정된 범위이며 이는 분극의 용이성 등에도 작용되었다.

또한, 압전정수 (d)는

$$d = \frac{\Delta l}{l} \cdot \frac{t}{\Delta V} \quad \dots(2)$$

- 여기서,  $l$  : 시편의 길이
- $\Delta l$  : 변형량
- $t$  : 시편의 두께
- $\Delta V$  : 공급전압

로 나타내므로<sup>2)</sup> 압전정수 값의 측정에 의해 전계 변화( $t/\Delta V$ )에 따른 변형량  $\Delta l/l$  값을 계산에 의해 구할 수 있다.

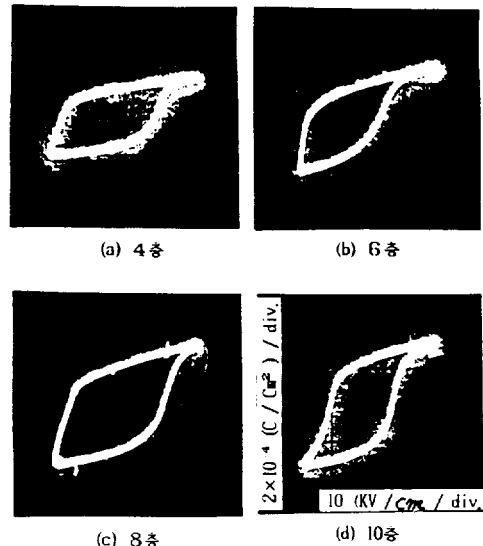


그림 8. 적층수에 대한 이력곡선  
Fig. 8. Hysteresis Curve for Layer numbers.

그림 9에 전계에 따른 변형량의 크기를 적층수에 따라 나타내었다.

전계  $1\sim 4(\times 10^6 \text{V/m})$ 의 범위에서  $\Delta l/l$ 의 값은 10층 시편에 대해  $1.8\sim 7.2 \times 10^{-3}$ 로 나타났으며 적층수에 비례하여 전계 의존성은 큰 폭으로 증가하는 경향을 나타냈다.

이 결과에 따라서, 본 시편의 길이가 1cm 이므로 전계  $2 \times 10^6 \text{V/m}$ 를 가했을 때 실제 늘어난 길이는 적층수 8에서 길이 방향으로  $\sim 30 \mu\text{m}$  정도가 됨을 알 수 있다.

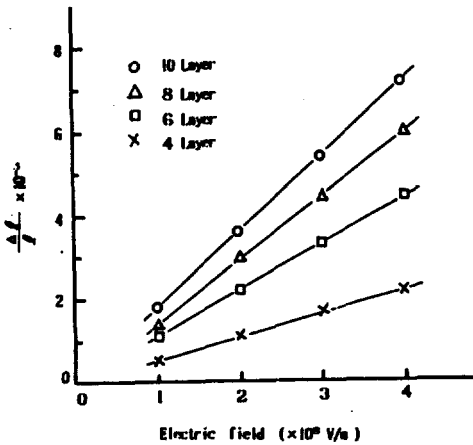


그림 9. 전계에 대한 변위량의 변화

Fig. 9. Strain of electric field.

#### 4. 결 론

- 1) 결합제량의 감소에 따라 green sheet 밀도는 증가하며 결합제량 33wt%에서 가장 양호한 것으로 나타났다.
- 2) 압력 증가에 따라 green sheet 밀도가 증가하였으며 밀도증가의 포화점은 결합제량이 증가될수록 압력이 낮은 측으로 이동하는 경향을 나타내었다.
- 3) 소결밀도는 green 밀도에 비례하여 증가되었고 압력효과에 의해 시편밀도를  $7.6 \text{g/cm}^2$ 까지 증가시킬 수 있었다.
- 4) 적층수와 압전정수( $d_{33}$ )는 선형적인 비례관계를 나타내었으며, 단판형 세라믹

스의 값( $\sim 275 \times 10^{-12} \text{C/N}$ )에 비해 4~10층 시편에서 약 2~6배 정도 증가되었다.

- 5) 적층수가 증가될수록 변형량 ( $\Delta l/l$ )의 전계 의존성이 증가되었고 10층 시편의 경우  $1\sim 4(\text{kV/mm})$ 의 전계에 비해 이론적으로 계산한 변형량은  $1.8\sim 7.2 \times 10^{-3}$  정도가 되었다.

#### 참 고 문 헌

- 1) 内里子研二; 壓電/電歪 Actuator, (1986)
- 2) M. Suga and M. Tsuzuki; *Jap. J. of Appl. phys.*, 23, (6), 765~773(1984)
- 3) M. Gomi, et al; *Appl. Opt.*, 21, (14), 2615~2619
- 4) L. J. Bowen, T. ShROUT, W. A. Schulze, and J. V. Biggers; *Ferroelectrics*, 27, 59~62(1980)
- 5) F. E. Scire and E. C. Teague; *Rev. Sci. Instrum.* 49, (12), 12(1978)
- 6) L. E. Cross, S. J. Jang and R. E. Newnham; *Ferroelectrics*, 23, 187~192(1980)
- 7) R. B. Runk and M. J. Anderjco; *Ceram. Bull.* 54, (2), 199~200(1975)
- 8) C. Wentworth and G. W. Taylor; *Ceram. Bull.* 46, (12), 1186~1193(1967)
- 9) CMC; 壓電材料の製造と應用, 第14章, (1984)
- 10) J. V. Biggers, T. R. ShROUT, and W. A. Schulze; *Ceram. Bull.* 58, (5), 516~521(1979)
- 11) 電子材料工學會; 壓電セラミクスとその應用, 第2章, 電子材料工學會(1974)
- 12) R. W. Basedow and T. D. Cocks; *J. Phys. E: Sci. Instrum.* 13, 840~844(1980)  
(1989년 4월 11일 접수)