

## 교류강전계가 PSN-PZT 압전체의 압전 및 유전 특성에 미치는 non-180° 분역 효과

윤만순 · 채홍인  
주성대학 전자재료응용학과  
(2000년 5월 15일 접수)

### The Effect of Non-180° Domain on the Piezoelectric and Dielectric Properties of the PSN-PZT Ceramics under Alternating Strong Electric Field

Mansoon Yoon and Hongin Chae

Department of Electronic Material & Application, Juseong College, Chungbuk, 363-794, Korea  
(Received May 15, 2000)

#### 초 록

본 연구는 3 mol% Pb(Sb<sub>1/2</sub>Nb<sub>1/2</sub>)O<sub>3</sub>가 첨가된 상경계 영역의 Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub> (PSN-PZT) 세라믹스에 대하여 RT66A와 광섬유 센서를 이용하여, 교류강전계 하에서 압전 및 유전특성을 조사하였다. PSN-PZT 세라믹스의 압전 및 유전 특성에 미치는 non-180° 분역 재배열의 영향을 평가하기 위하여 RT66A와 MTI-2000 Fotonic™ sensor를 이용하여 인가전계와 주파수의 함수로 전계유기변위를 측정하였다. 그 결과, 교류강전계 하에서 전계유기변위는 강전계, 저주파수에서 큰 이력현상을 나타내고, 전계유기변위로 부터 결정된 유효압전상수는 주파수가 감소할수록 증가하는 거동을 나타내고 있으며, 이러한 거동은 non-180° 분역 재배열의 영향으로 해석되었다.

#### ABSTRACT

In this study, the use of RT66A and a fiber optic technique for the measurement of the piezoelectric and dielectric properties of the 3 mol% Pb(Sb<sub>1/2</sub>Nb<sub>1/2</sub>)O<sub>3</sub>-doped Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub> (PSN-PZT) ceramics having morphotropic phase boundary(MPB) was investigated under alternating strong electric field. In order to evaluate the contribution of the non-180° domain reorientation in the piezoelectric and dielectric properties of the PSN-PZT ceramics, RT66A and the MTI-2000 Fotonic™ sensor was constructed and the electric field-induced strain was measured as a function of electric field and frequency. The electric-field-induced strain curve showed a large hysteresis under alternating high electric field and low frequency. The effective piezoelectric constant determined from the electric-field-induced strain increased with decreasing frequency under alternating high electric field. These behaviors were interpreted as the effect of non -180° domain reorientation.

**Key words :** Piezoelectricity, PSN-PZT, Fiber optic technique, Non-180° domain

#### 1. 서 론

정방정계와 능면정계가 혼재된 상경계 영역의 Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub> (이하 PZT라 칭함)계 압전세라믹스 재료는 180° 분역과 90°, 71°, 107° 분역과 같은 non-180° 분역 둘로 구성되어 있으며, 이 분역 들은 1000 kV/m 이상의 강전계에서 180° 분역은 switching이 발생하며, non-180° 분역 들은 재배열되는 것으로 알려져 있다. 특히 non-180° 분역의 재배열은 초탄성변형(ferroelastic)을 일으키므로 변위가 수반되어진다. 또한 강전계에서의 non-180° 분역의 재배열은 압전세라믹의 유전율,<sup>1-4)</sup> 전계유기변위,<sup>2-5)</sup> 열적안정성,<sup>6)</sup> 내구성<sup>7)</sup> 등과 같은 압전특성에 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있다.

압전세라믹의 역압전효과를 이용한 액츄에이터 분야에서, 강전계하에서 압전세라믹스의 전계유기변위는 공진-반공진법에 의하여 측정된 d상수로부터 예측되는 값에 비하여 큰

값을 갖는 것으로 알려져 있다.<sup>8)</sup> 이러한 현상은 압전액츄에이터를 이용한 정밀 변위 제어소자로의 응용시 설계상의 부정확성을 발생시키게 되며, non-180° 분역 들의 재배열거동이 교류강전계에서 반복됨에 따라 열손실과 피로파괴현상에 의한 내구성의 저하를 발생시키게 된다. 이러한 non-180° 분역의 재배열 현상을 정량적으로 분석하기 위하여, Tani 등<sup>9)</sup>은 저전계에서 non-180° 분역의 재배열 현상이 발생하지 않는다는 가정 하에 전체 변위에서 non-180° 분역의 재배열에 의한 기여도를 분리하였으며, Tsurumi 등<sup>10)</sup>은 X-ray 분석에 의하여 정방정계 영역에서 강전계를 인가할 때 정방정 결정격자의 a축과 c축의 차이가 90° 분역의 재배열에 의하여 변화하게되므로 변위의 증가가 나타나며, 따라서, 압전세라믹의 전계유기변위는 압전효과에 기인한 변위와 90° 분역의 재배열에 의한 변위의 합으로 나타나는 것으로 설명하고 있다. 또한 Masuda<sup>3)</sup>의 연구결과에 따르면 변성 압전재

료의 전계유기변위는 역압전효과와 전왜효과의 합으로 나타나며, 전왜효과는 분역의 재배열에 기인하는 것으로 해석하였다. 그러나 이러한 해석결과는 전계유기변위 내에서 180° 분역과 non-180° 분역의 기여를 분리하지 못하였다. 이러한 분역의 기여도를 분리하기 위한 방법으로 최근 Tsumuri 등<sup>11)</sup>은 Mach-Zehnder Interferometer<sup>12,13)</sup>를 이용하여 교류강전계에서 주파수에 따른 전계유기변위를 측정하는 것에 의하여 non-180° 분역의 기여도를 분리하는 실험을 제안하고 있다. 그러나 이러한 방법은 He-Ne laser와 같은 고가의 장비를 사용하며, 변위의 재현성을 확보하는 것이 어렵고, 측정 결과의 분석이 복잡하고, 교류강전계에서 발생하는 유전율의 유효값을 구할 수 없으므로 압전액튜에이터를 설계하는데 필요한 값을 정량화 시키기 어렵다.

본 연구의 목적은 1) RT66A와 MTI-2000 Photonic<sup>TM</sup> sensor를 이용하여 일정 주파수에서 인가전계에 따른 변위 이력곡선과 전기변위이력현상을 측정하여, 인가전계에 따른 압전상수 및 유전율의 변화를 조사함으로써, non-180° 분역 재배열이 발생하는 전계 값을 예측하고 2) 실제 구동전계에서 압전상수와 유전율 값의 변화를 측정하여, 공진-반공진 법과 Belincourt d<sub>33</sub> meter에 의하여 구한 값과 비교하고자 하며, 3) 인가전계에 따른 S<sub>33</sub>, S<sub>31</sub> 값을 측정하여 실제 구동전계에서 포아송 비를 측정하고, 4) 일정 교류전계에서 인가주파수에 따른 180° 분역과 non-180° 분역의 거동을 분리하는 새로운 측정방법을 제시함으로써 압전액튜에이터의 개발에 필요한 정확한 설계치를 구하는 방법을 정립하고자 하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 시편 준비

본 실험에 사용된 조성은 주파수 온도안정성이 우수하며, 경시변화가 적어 액튜에이터재료로서 적합한, 0.03Pb(Sb<sub>1/2</sub>Nb<sub>1/2</sub>)O<sub>3</sub>-0.50PbZrO<sub>3</sub>-0.47PbTiO<sub>3</sub> (이후 PSN-PZT로 표시함) 조성을 선택하였다. X-ray 상분석 결과 실온에서 상경계 영역임을 확인하였다.

### 2.2. 시편제조

PSN 고용체 합성 시 발생하는 pyrochlore 상 형성을 효과적으로 제거하기 위하여 columbite 방법<sup>14)</sup>을 사용하여 분석용 시약급의 Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>를 화학 양론적인 양으로 평량한 후, 용매로서 에탄올을 사용하고 지르코니아 볼(zirconia ball)을 분쇄 매체로 사용하여 습식 혼합 및 분쇄를 행하고 건조한 후 1100°C에서 6시간 하소를 행하였다. 하소된 분말은 X-ray 분석을 통하여 pyrochlore 상이 존재하지 않는 것을 확인하였다. 그 다음 0.03Pb(Sb<sub>1/2</sub>Nb<sub>1/2</sub>)O<sub>3</sub>-0.50PbZrO<sub>3</sub>-0.47PbTiO<sub>3</sub> 조성의 고용체를 합성하기 위하여 이 미 합성된 전구체 Sb<sub>2</sub>Nb<sub>2</sub>O<sub>8</sub>과 PbO, TiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>를 평량하

여 혼합, 건조한 후 850°C에서 4시간 하소를 행하고, X-ray 분석을 통하여 pyrochlore상이 없음을 확인하였다. 하소된 분말을 습식 분쇄 후 건조하여 형상을 유지할 정도로 유압 프레스를 이용하여 10 mm의 성형 몰드와 가로 15 mm, 세로 5 mm의 사각 볼드에 의하여 1차 성형 후, 냉간 정수압 프레스에 의하여 190 MPa의 압력으로 성형하였다.

성형된 pellet은 PbO 분위기의 밀폐된 알루미늄 도가니 속에서 1270°C의 온도로 2시간 소결을 행하였다. 소결된 시편들은 양면 연마기에 의하여 1 mm의 두께가 되도록 연마한 후, 시편 표면의 응력을 제거하기 위하여 650°C에서 2시간 소둔을 행하였다. 소결된 시편의 길보기 밀도는 수정된 Archimedes 방법(ASTM C-20)을 이용하여 측정하였으며, 이론밀도의 약 97~98%였으며, 평균 입경은 1~2 μm였다.

### 2.3. 물성 측정

#### 2.3.1. 교류약전계에서 압전·유전물성 측정

PSN-PZT 상경계 조성의 압전상수를 측정하기 위하여 교환되는 실리콘 oil 속에서 1/3 T<sub>max</sub> 정도의 온도에서 3 kV/mm의 직류 전계를 10분간 가한 후, d<sub>33</sub> meter를 이용하여 압전 상수를 측정하였으며, HP4194 Impedance/Gain Phase Analyzer를 이용하여 상온에서의 정전용량 및 1차 공진 (f<sub>r</sub><sup>(1)</sup>) 및 2차공진 (f<sub>r</sub><sup>(2)</sup>)과 1차 반공진 (f<sub>a</sub><sup>(1)</sup>) 주파수를 구한 후, 다음 식에 의하여 유전율 (K<sub>33</sub><sup>T</sup>) 및 경방향 전기기계 결합계수 (K<sub>p</sub>)와 d<sub>31</sub>을 구하였다.

$$K_{33}^T = \frac{C_r \cdot t}{\epsilon_0 A} \quad (1)$$

$$\frac{1}{K_p^2} = 0.395 \frac{f_r^{(1)}}{f_a^{(1)} - f_r^{(1)}} + 0.574 \quad (2)$$

$$K_p^2 = \left( \frac{2}{1 - \sigma} \right) \cdot K_{31}^2 \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{f_r^{(2)}}{f_r^{(1)}} \quad (4)$$

$$s_{11}^E = \frac{1}{4\rho l^2 f_r^2} \quad (5)$$

$$d_{31} = K_{31} \sqrt{K_{33}^T \cdot \epsilon_0 \cdot s_{11}^E} \quad (6)$$

여기서 C<sub>r</sub>는 1 kHz에서의 정전용량, t와 A, l는 각각 시편의 두께, 면적, 길이, 그리고 ε<sub>0</sub>는 진공 중 유전율, σ는 포아송 비, s<sub>11</sub><sup>E</sup>는 탄성정수, ρ는 소결밀도이다.

#### 2.3.2. 교류강전계에서 압전 및 유전특성 평가

1) 일정주파수에서 전계변위 및 전기변위이력곡선 측정  
인가전계에 따라 발생하는 변위를 측정하기 위하여, PSN-PZT 상경계 조성의 시편을 소결한 후 양면 연마기에 의하여 1 mm 두께로 연마하였다. 연마한 시편에 Dupont 4095은 전극을 도포하여 590°C에서 15분간 열처리한 후 교반되

는 120°C의 실리콘 oil 속에서 3 kV의 직류전계를 10분간 인가하여 분극하였으며, 10 Hz의 일정주파수에서 변위를 인가전압의 함수로서 구하였다. 시편에 발생하는 변위량은 Mechanical Technology, Inc에서 제작된 MTI-2000 Fotonic™ Sensor와 2032RX 고 분해능 모듈을 사용하였다. 변위를 측정하는 센서는 광섬유로 제작되었으며, 수신부와 발신부로 나누어져있고, 변위의 변화가 발생함에 따라 optical level이 변화하게되며, 이를 변환기에 의하여 전압으로 출력하게된다. 고 분해 능 모드로 설정할 경우 출력전압은 10배로 증폭되며 5.410 Å/mV의 분해능으로 향상시킬 수 있다. 인가된 파형은 삼각파이며 RT66A의 고전압증폭기(Trek-609D)에 의하여 증폭된 후 시료에 인가되며, 이때 발생된 변위는 전압으로 변환되어 인가 전압에 따른 변위곡선과 전기변위곡선이 동시에 얻어지도록 되어있다.

2) 일정교류전계에서 주파수변화에 따른 진동변위 측정 압전체의 인가전압 및 인가주파수변화에 따른 압전물성의 변화를 측정하기 위하여 파형 발생기(HP3245A)의 주파수를 100 Hz~3 kHz(사인파)로 변화시키고, 전압 증폭기(Trek609D)를 사용하여 0.6~2 MV<sub>p-p</sub>/m의 전압을 시편에 가한 후 일정 전압에서 주파수 변화에 따른 진동변위 및 인가파형을 오실로스코프에 연결하여 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 교류약전계 하에서 압전 및 유전특성 평가

본 연구에 사용된 PSN-PZT 상경계 조성의 시편을 EMAS-6007의 규격에 따라 원판형진동자와 단형판상진동자로 가공한 후 Belincourt d<sub>33</sub> meter를 이용하여 d<sub>33</sub> 값을 구하고, 식(1)~(6)을 이용하여 압전·유전상수를 구하여 Table 1에 정리하였다.

Table 1의 값에서 본 조성의 상은 약전계에서 물성은 전형적인 soft PZT의 특성을 나타내고 있다.

#### 3.2. 교류강전계에서 압전 및 유전특성 평가

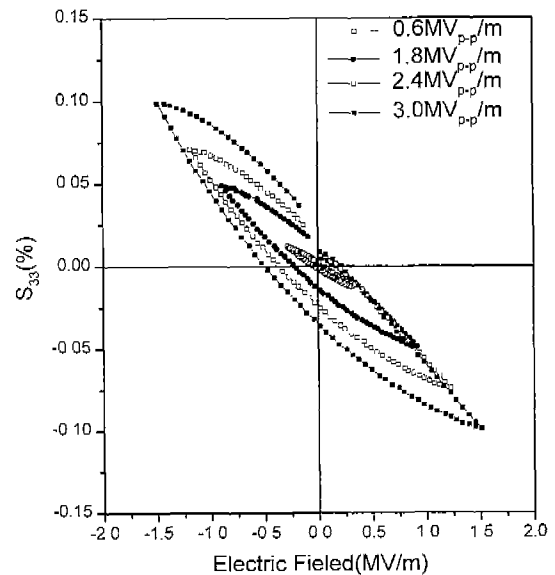
3.2.1 일정 주파수에서 인가전계변화에 따른 압전상수 및 유전율의 변화

##### 1) d<sub>33</sub> 값 및 유효유전을 변화

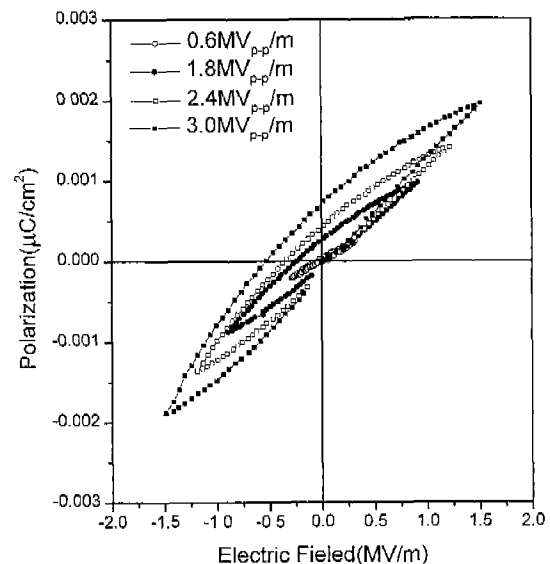
인가 전계의 세기에 따른 d<sub>33</sub> 값 및 유전율의 변화를 측정하기 위하여 분극된 시료를 일정 주파수에서 항전계 이하의 인가전계에 따른 변위곡선과 전기변위이력곡선을 측정하여 Fig. 1 과 Fig. 2에 나타내었으며, 항전계 이상에서 변

**Table 1.** Piezoelectric and Dielectric Constants of PSN-PZT Measured by HP4194 Impedance/Gain Phase Analyzer and Belincourt d<sub>33</sub> Meter

d <sub>33</sub> (pC/N)	K <sub>p</sub>	K <sub>31</sub>	K <sub>33</sub> <sup>T</sup>	ρ(kg/m <sup>3</sup> )	σ <sup>E</sup>
415	0.65	0.38	1650	7.83 × 10 <sup>3</sup>	0.327

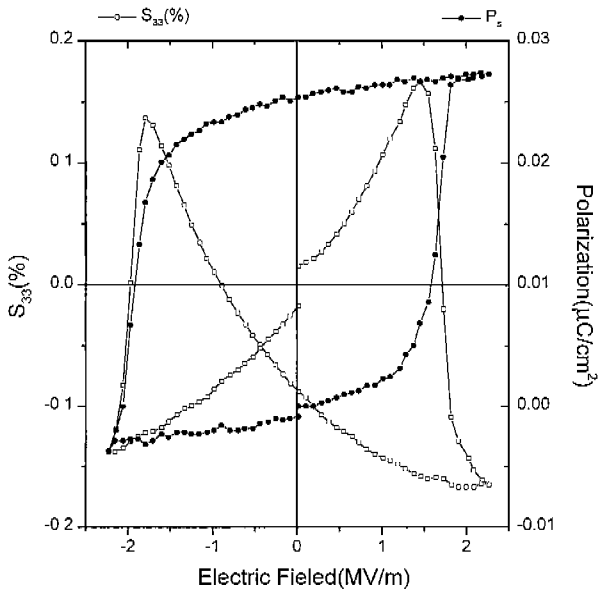


**Fig. 1.** Longitudinal field-induced-strain( $S_{33}$ ) in  $0.03\text{Pb}(\text{Sb}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3\text{-}0.50\text{PbZrO}_3\text{-}0.47\text{PbTiO}_3$  ceramics as a function of applied electric field below coercive electric field.



**Fig. 2.** P-E hysteresis curve in  $0.03\text{Pb}(\text{Sb}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3\text{-}0.50\text{PbZrO}_3\text{-}0.47\text{PbTiO}_3$  ceramics as a function of applied electric field below coercive electric field.

위이력곡선 및 전기변위이력곡선을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 1의 변위이력곡선에서 보듯이 인가전계의 크기가 증가함에 따라, 변위이력현상의 증가와 함께 잔류변위량도 증가하고 있다. 이러한 현상은 non-180° 분역이 변위하게 됨에 따라 잔류변위를 증가시키는 것으로 설명될 수 있다. Non-180° 분역이 전계 방향에 따라 변위하기 위해서는 주변 이온들을 영구변위 시켜 재배열하게되고, 이렇게 변위된 이온들은 전계가 제거된 후에도 잔류하게 된다. 따라서 이를 원



**Fig. 3.** P-E hysteresis curve and longitudinal field-induced-strain( $S_{33}$ ) in  $0.03\text{Pb}(\text{Sb}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3\text{-}0.50\text{PbZrO}_3\text{-}0.47\text{PbTiO}_3$  ceramics as a function of applied electric field above coercive electric field.

래상태로 하기 위해서는 역전계에 의한 에너지 공급이 수반되어야한다. 또한 Fig. 2에서 보듯이 Fig. 1에서 관찰된 것과 같은 유사한 현상이 전기변위이력곡선의 변화에도 관찰되고 있다. 즉 인가전계가 증가할수록 잔류분극의 양이 증가하고 있으며, 이러한 잔류분극과 잔류변위의 증가는 이력곡선의 내부면적의 증가를 가져오며, 연속구동시 열에너지로 소모되는 손실 분에 해당된다. 즉 전기 - 기계 에너지 변환효율이 감소하고 압전체 내부응력의 증가를 발생시킨다. 이력곡선 내부면적의 증가가 열손실을 발생시키는 것으로 미루어 볼 때, 분역의 이동에 제약이 존재하고 있으며, 이러한 제약은 주변의 교류 강전계에서 연속구동 시 분역 사이의 마찰열을 발생시키게 된다. 또한  $0.03\text{Pb}(\text{Sb}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3\text{-}0.50\text{PbZrO}_3\text{-}0.47\text{PbTiO}_3$  조성의 경우 Fig. 3과 같이 항전계 이상의 전계( $4.5 \text{ MV}_{\text{p-p}}/\text{m}$ )가 인가될 때 압전체에서 일반적으로 관찰되는 전형적인 나비곡선의 변위이력현상을 나타내고 있다. 교류강전계에서의 압전정수는 Fig. 1의 측정결과를 식(7)의 Gibbs Free energy 압전방정식을 이용하여 구하였다.

$$\partial S_{\alpha} = s_{\alpha\beta}^E \partial T_{\beta} + d_{j\alpha} \partial E_j \tag{7}$$

인가전계에 따른 변위곡선을 측정할 경우 시편은 속박되지 않아 응력의 변화가 없어  $\partial T \equiv 0$  로 되어, 식(7)은 식(8)과 같이 표현될 수 있다.

$$\partial S_{\alpha} = d_{j\alpha} \partial E_j \tag{8}$$

즉, 분극방향이 3방향이고 측정 변위가 동일한 3방향일 때 압전상수  $d_{33}(\text{pm/V})$ 는 식(9)와 같이 표현된다.

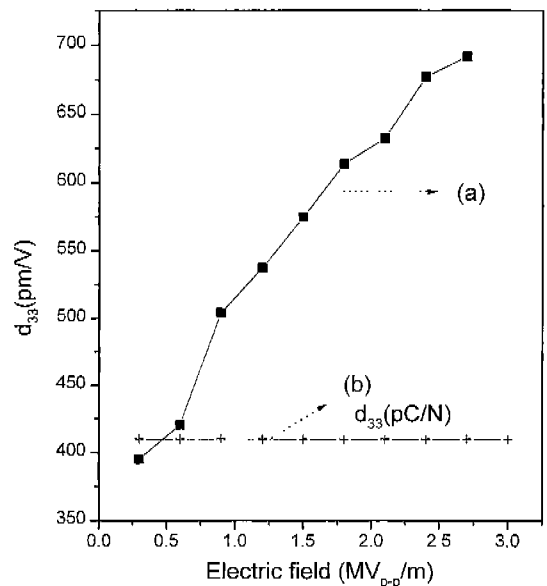
$$d_{33} = \frac{\partial S_{33}}{\partial E_{33}} \tag{9}$$

즉, 인가전계방향과 동일한 방향의 strain을 측정하여 기울기를 구하면 10 Hz 일정 주파수에서 인가전계에 따른  $d_{33}$  값의 변화를 구할 수 있으며, 그 값의 변화를 Fig. 4의 (a)에 나타내고 있다. Belincourt  $d_{33}$  meter로 구한 측정값을 동일 그래프상의 (b)로 나타내었다. 측정값으로부터 알 수 있듯이 인가전계의 세기가 증가함에 따라 non- $180^\circ$  분역의 전계 방향으로의 재배열에 의한 변위의 기여도가 증가하여  $d_{33}(\text{pm/V})$ 값이 직선적으로 증가하고 있는 것을 알 수 있다.

한편, 전기변위이력곡선을 이용하여 인가전계에 따른 유전율의 변화를 구하기 위하여 다음과 같은 식을 이용하였다. 즉, 인가전계의 최대 값에서 유효분극량은 식(10)과 같이 표현된다.

$$P^* = P_m(V_{\text{max}}) - P_r(-V_{\text{max}}) \tag{10}$$

여기서,  $P_m(V_{\text{max}})$ 는 최대 인가전압에서의 분극 양이며,  $P_r(-V_{\text{max}})$ 는 음의 최대전압이 인가된 후에 0 Volt에서의 잔류 분극 양을 의미한다. 또한 전압이 인가될 때 유효 정전용량 ( $C_{\text{eff}}$ )은 식(11)과 같이 구한다.



**Fig. 4.** Comparisons of effective piezoelectric constant  $d_{33}(\text{pm/V})$  as a function of applied electric field below coercive electric field and piezoelectric constant( $\text{pC/N}$ ) in  $0.03 \text{Pb}(\text{Sb}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3\text{-}0.50\text{PbZrO}_3\text{-}0.47\text{PbTiO}_3$  ceramics (a) effective piezoelectric constant  $d_{33}(\text{pm/V})$ , and (b) piezoelectric constant  $d_{33}(\text{pC/N})$  measured by Belincourt  $d_{33}$  meter.

$$C_{eff} = \frac{Q}{V} = \frac{P^* \times A}{V_{max}} \quad (11)$$

따라서, 인가전계에 따른 유전율은 식(12)와 같이 표현되어진다.

$$K_{eff} = \frac{C_{eff} \times t}{\epsilon_0 \times A} \quad (12)$$

Fig. 2의 전기변위이력곡선으로부터 구한 P\* 값으로부터 식(11), (12)를 이용하여 인가 전계에 따라 구한 유효유전율의 변화를 Fig. 5의 (a)에 나타내었으며, 1 kHz의 약전계에 서 구한 유전율 값을 동일 그래프상의 (b)로 나타내었다. 측정결과로부터 알 수 있듯이 인가 전계가 증가함에 따라 유효유전율의 값은 직선적으로 증가하고 있으며, 인가전계가 3.5 MV/m 이상에서 급격히 증가하고있다. 이러한 유효유전율의 급격한 증가는 3.5 MV/m 이상에서 분역 반전이 시작되어, 이력곡선의 폭이 증가함에 따라 P\* 값이 크게 증가하여 발생하는 것으로 판단된다.

2) d<sub>31</sub> 값 및 포아송 비 변화

Table 1에 EMAS-6007의 규격에 따라 원판형진동자와 단형판상진동자로 가공한 후 공진 - 반공진 법에 의하여 d<sub>31</sub> 및 포아송 비를 구하였다. 그러나 이렇게 하여 구한 d<sub>31</sub> 값은 전계에 따른 압전 물성의 변화를 고려하지 않으므로, 실제 강전계에서 측정된 값과 차이를 나타내게 된다. 즉 전계가 인가될 때 공진 주파수 및 반공진 주파수가 변하게되며, 유전율 값도 크게 변화하므로 오차를 발생시키게 된다.

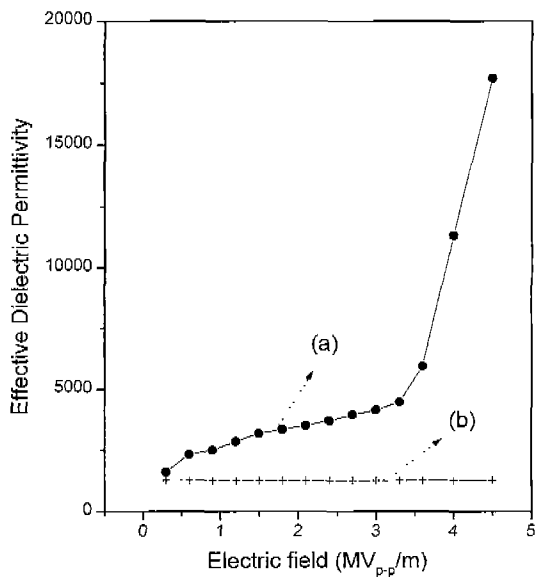


Fig. 5. Comparisons of effective dielectric constant as a function of applied electric field and dielectric constant in 0.03Pb(Sb<sub>1/2</sub>Nb<sub>1/2</sub>)O<sub>3</sub>-0.50PbZrO<sub>3</sub>-0.47PbTiO<sub>3</sub> ceramics : (a) effective dielectric constant, and (b) dielectric constant measured by HP4194 Impedance/Gain Phase Analyzer.

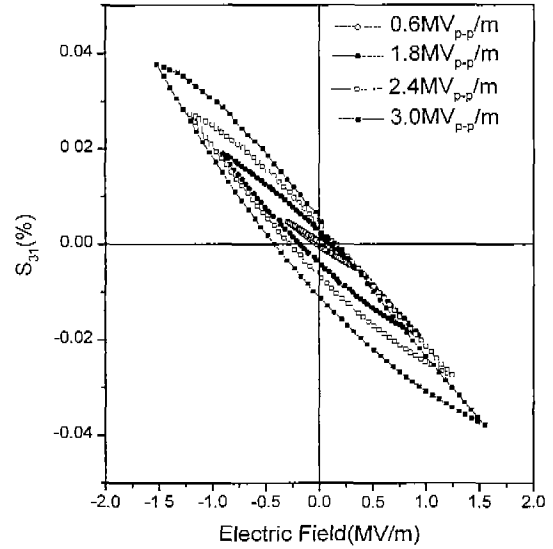


Fig. 6. Transverse field-induced-strain(S<sub>31</sub>) in 0.03Pb(Sb<sub>1/2</sub>Nb<sub>1/2</sub>)O<sub>3</sub>-0.50PbZrO<sub>3</sub>-0.47PbTiO<sub>3</sub> ceramics as a function of applied electric field below coercive electric field.

따라서 압전액튜에이터 설계 시 유효한 값을 얻기 위하여, 실제 구동전계에서 d<sub>31</sub> 값을 구하고자 하였다.

3방향에 전계를 인가할 때 발생하는 수직방향의 변위를 직접 측정하여 Fig. 6에 나타내고 있다. S<sub>31</sub> 값 역시 S<sub>33</sub> 값과 같이 인가전계가 증가할수록 이력곡선의 폭이 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 인가전계에 따른 S<sub>31</sub> 값을 측정 한 후 압전방정식(13)에 의하여 d<sub>31</sub> 값을 구하여 Fig. 7에 나타내었다.

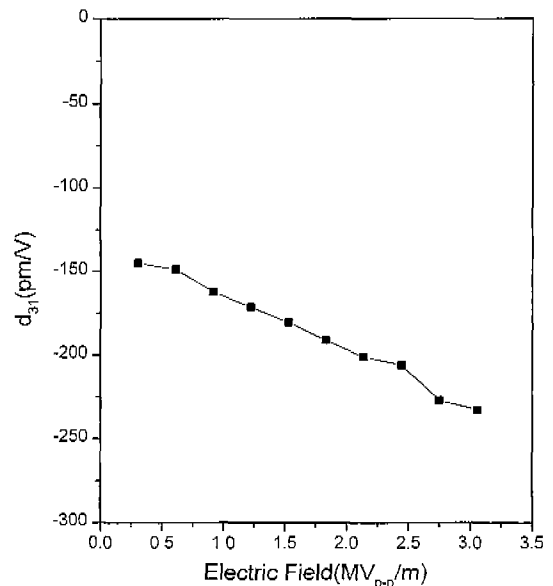
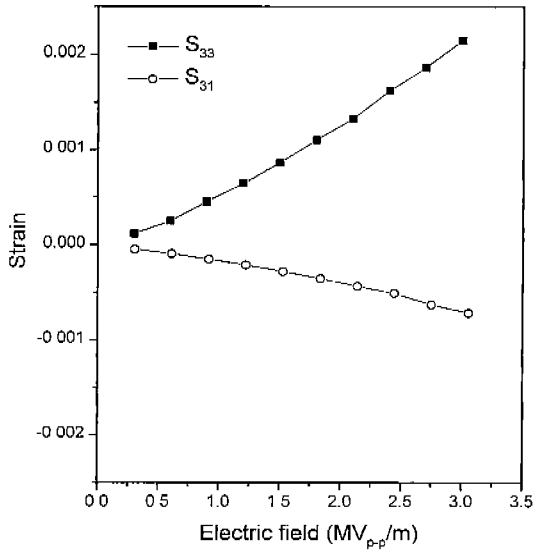


Fig. 7. Variations of effective piezoelectric constant d<sub>31</sub>(pm/V) as a function of applied electric field below coercive electric field.



**Fig. 8.** Variations of longitudinal field-induced-strain( $S_{33}$ ) and transverse field-induced-strain( $S_{31}$ ) in  $0.03\text{Pb}(\text{Sb}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3-0.50\text{PbZrO}_3-0.47\text{PbTiO}_3$  ceramics as a function of applied electric field below coercive electric field.

$$d_{31} = \frac{\partial S_{31}}{\partial E_{33}} \quad (13)$$

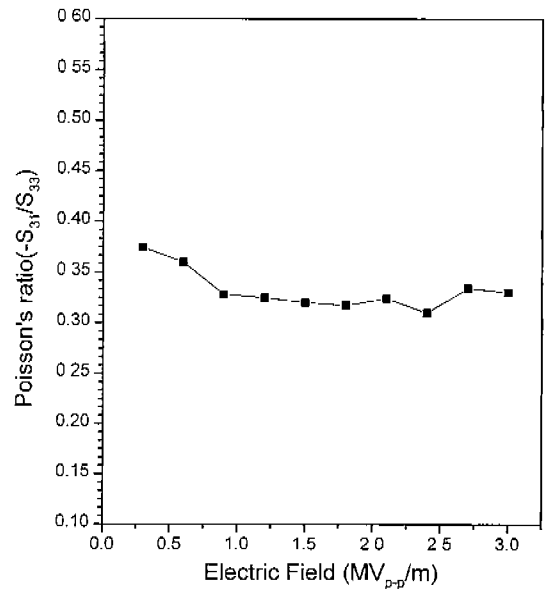
Strain 값은 두께방향 팽창 시 길이방향은 수축함으로  $d_{31}$  값은 음의 값을 갖게 되며, 인가 전계가 증가할수록 non-180° 분역의 기여도가 증가하여  $d_{31}$  절대값 역시 148(pm/V)에서 238(pm/V)증가하고 있는 것을 알 수 있다. 최대 인가전계에서 3방향과 1방향의 strain을 측정하여 Fig. 8에 나타내었으며, 식(14)에 따라 포아송 비를 인가전계에 따라 직접 구하는 것이 가능하다. 즉

$$\sigma = -\frac{S_{31}}{S_{33}} \quad (14)$$

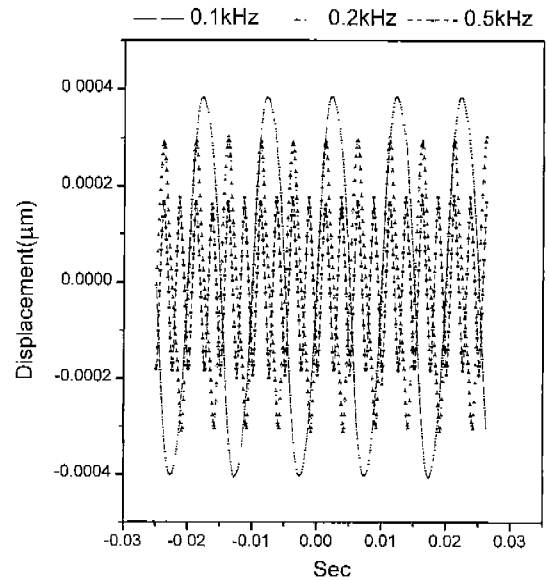
이므로, Fig. 8의 측정값을 식(14)에 대입하면 포아송 비가 구하여지며, 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 즉, 포아송 비는 저전계에서 0.38에서 최대 값을 이루며 1 MV<sub>p-p</sub>/m에서 0.325로 일정하게 유지되는 특성을 나타내고 있다. 이러한 특성은 저전계에서 non-180° 분역의 기여도가 낮아 분극 방향과 분극의 수직방향의 전계변위의 이방성이 감소되며, 강 전계에서 non-180° 분역의 기여도가 높아 전계변위의 이방성이 증가됨에 따라 나타나는 현상으로 설명될 수 있다. 또한 이 값은 공진·반공진법에 의하여 구한 0.327 값과 비슷한 값을 갖는다.

3.2.2. 인가주파수 변화에 따른 non-180° 분역 재배열 거동

교류강전계에서 주파수 변화에 따른 변위특성을 오실로스코프로 측정한 결과를 Fig. 10에 나타내었으며, 주파수가 증가함에 따라 진동변위가 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 인가주파수에 따른 변위이력곡선의 변화를 구하기 위하여,



**Fig. 9.** Variations of Poisson's ratio in  $0.03\text{Pb}(\text{Sb}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3-0.50\text{PbZrO}_3-0.47\text{PbTiO}_3$  ceramics as a function of applied electric field below coercive electric field.



**Fig. 10.** Change in vibration displacement of  $0.03\text{Pb}(\text{Sb}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3-0.50\text{PbZrO}_3-0.47\text{PbTiO}_3$  ceramics as a function of frequency under constant electric field(2 MV<sub>p-p</sub>/m).

동일 전계(2 MV<sub>p-p</sub>/m)에서 0.1 kHz와 3 kHz의 주파수에서 이력곡선을 측정하여 Fig. 11에 나타내었으며, 인가주파수가 높으면 발생변위와 이력현상이 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 저주파수에서 이력 폭의 증가는 non-180° 분역의 재배열효과에 의한 것이며, non-180° 분역 이동속도가 결정 내 변위와 이온의 이동에 의하여 제한되므로 전계 인가 주파수가 증가할수록 non-180° 분역의 재배열이 인가전계 방향에 동조하지 못하게 되므로 기여도가 감소하며, 따라서 전

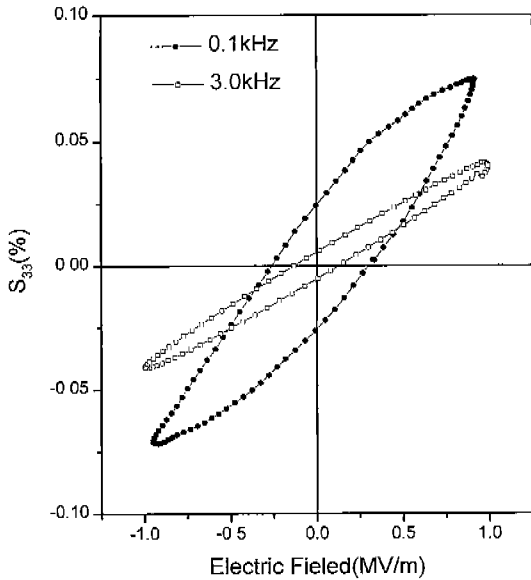


Fig. 11. Longitudinal field-induced-strain( $S_{33}$ ) in 0.03Pb(Sb<sub>1/2</sub>Nb<sub>1/2</sub>)O<sub>3</sub>-0.50PbZrO<sub>3</sub>-0.47PbTiO<sub>3</sub> ceramics as a function of frequency under constant electric field(2MV<sub>p-p</sub>/m).

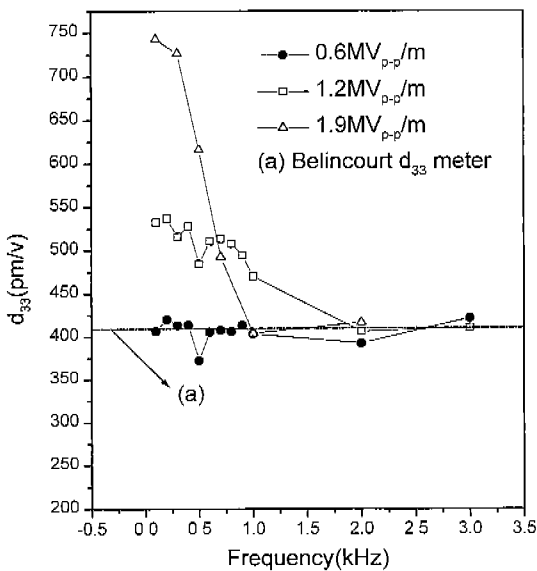


Fig. 12. Variations of effective piezoelectric constant  $d_{33}$ (pm/V) in 0.03Pb(Sb<sub>1/2</sub>Nb<sub>1/2</sub>)O<sub>3</sub>-0.50PbZrO<sub>3</sub>-0.47PbTiO<sub>3</sub> ceramics as a function of frequency under constant electric field.

계유기변위 만이 지배적으로 나타나게되어, 주파수가 높아질수록 이력 폭의 감소가 발생하게된다.

한편, 인가주파수가 증가함에 따라 발생하는 진동변위의 크기와 인가전계를 오실로스코프로 측정된 결과를 이용하여 압전 방정식에 따라  $d_{33}$ (pm/V)값을 구한 후, 인가전계와 인가주파수에 따른 압전상수의 변화를 Fig. 12에 정리하여 나타내었으며, Belincourt  $d_{33}$  meter로 측정된 압전상수 값을 동일 그래프 상에 점선으로 나타내었다. 측정결과에서 알 수

있듯이 고주파수(1 kHz이상)에서 Belincourt  $d_{33}$  meter로 측정된 압전상수 값과 최대인가전계에서 발생하는 변위 값으로부터 구한 압전상수 값과 일치하고 있는 것을 알 수 있다. 그러나, 주파수가 1 kHz 이하로 감소할수록  $d_{33}$ (pm/V) 값이 증가하고 있는 것이 관찰되고 있으며, 이러한 거동은 인가 전계가 증가할수록 더욱 현저하게 나타나고 있다. 즉, non-180° 분역의 재배열 현상은 본 실험에 사용된 PSN-PZT 상경계 조성의 경우 0.6 MV<sub>p-p</sub>/m 이상에서 발생하기 시작하며, 동일주파수에서 전계 값이 클수록, 동일전계에서는 인가주파수가 낮을수록 증가하여 전체 발생변위를 증가시키며, 따라서  $d_{33}$ (pm/V)값이 증가하는 것을 알 수 있다.

즉, 교류강전계에서 전체 변위는 식(15)와 같은 표현이 가능하다.

$$\partial S_{33}^{total} = \partial S_{EPI} + \partial S_{DR} \quad (15)$$

여기서,  $S_{EPI}$ 는 전계유기변위이며,  $S_{DR}$ 은 non-180° 분역의 재배열에 의한 변위를 나타낸다. 임계주파수이상과 임계전계이하에서  $\partial S_{DR} \approx 0$ 이 되므로 순수 전계변위에 의한 값만이 나타나며, 이 값은 Belincourt  $d_{33}$  meter로 구한 값과 일치하게된다. 이때 임계전계와 임계주파수는 압전재료에 인가되는 전계나 압전재료의 조성 및 미세구조, 상분율, 온도 등에 따라 변하게 된다. 이상의 실험 결과로부터 RT66A와 MTI-2000 Fotonic™ sensor는 압전세라믹의 강전계구동에서 non-180° 분역의 동적거동을 해석하는데 유용한 측정방법임을 알 수 있으며, 압전액튜에이터의 실제 구동전계에서 압전 및 유전특성의 변화를 구하는 것이 가능함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구를 통하여 RT66A와 MTI-2000 Fotonic™ sensor와 RX2032R module을 이용한 전계유기변위 및 전기변위를 측정하는 장치를 구성하였으며, PSN-PZT 상경계 조성의 교류강전계구동 하에서 압전 및 유전특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 일정 주파수에서 교류강전계 변화에 따른 압전상수의 변화를 측정된 결과 non-180° 분역의 전계 방향으로의 재배열에 의한 변위의 기여도가 증가하여  $d_{33}$ (pm/V),  $d_{31}$ (pm/V) 값이 선형 적으로 증가하고 있는 것을 알 수 있으며, 포아송 비는 저 전계 하에서 0.38에서 최대 값을 이루며 1 MV<sub>p-p</sub>/m 이상에서 0.325로 일정하게 유지되는 특성을 나타내고 있다. 특히 포아송 비는 변위의 이방성을 나타내며, non-180° 분역의 기여도가 클수록 변위의 이방성이 작아지는 것을 알 수 있다.

2. 일정 주파수에서 교류강전계 변화에 따른 유효유전율의 변화를 측정된 결과 인가전계의 크기가 증가됨에 따라, 증가하는 현상을 나타내고 있으며, 이러한 현상은 non-180°

분역 재배열 현상에 기인한 잔류분극의 크기가 증가되는 것으로 설명될 수 있다.

3. 인가주파수 변화에 따른 non-180° 분역 재배열 거동을 조사한 결과, 고주파수(1 kHz이상)에서 Belincourt  $d_{33}$  meter로 측정된 압전상수 값과 최대 인가전계에서 발생하는 변위 값으로부터 구한 압전상수 값과 일치하고 있는 것을 알 수 있다. 그러나, 주파수가 1 kHz 이하로 감소할수록  $d_{33}$  (pm/V)값이 증가하고 있는 것이 관찰되고 있으며, 이러한 거동은 인가 전계가 증가할수록 더욱 현저하게 나타나고 있다. 즉, non-180° 분역의 재배열 현상은 본 실험에 사용된 PSN-PZT 상경계 조성의 경우 0.6 MV<sub>p-p</sub>/m 이상에서 발생하기 시작하며, 동일 주파수에서 전계 값이 클수록, 동일전계에서는 인가 주파수가 낮을수록 증가하여 전체 발생변위를 증가시키며, 따라서  $d_{33}$ (pm/V)값이 증가하는 것을 알 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 1999년도 주성대학학술연구비에 의하여 지원되었으며, 실험을 도와준 전공동아리 학생 황인성, 김영훈 군에게 감사 드립니다.

### REFERENCES

1. E. I. Bondarenko, V. Yu. Topolov and A. V. Turik, "The Effect of 90° Domain Wall Displacements on Piezoelectric and Dielectric Constants of Perovskite Ferroelectric Ceramics," *Ferroelectrics*, **110**, 53-56 (1990).
2. N. Uchida and T. Ikeda, "Electrostriction in Perovskite-Type Ferroelectric Ceramics," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **4**, 867-880 (1965).
3. Y. Masuda, "Variation of Dielectric constant Affected by Domain Structure and Electric-Field-Induced Strain in Ferroelectric Ceramics," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33**, 5549-5554 (1994).
4. M. S. Yoon and H. M. Jang, "Characteristics of the High-Field Phase Transition in PbZrO<sub>3</sub>-Doped Pb(Ni<sub>1/3</sub>Nb<sub>2/3</sub>)O<sub>3</sub>-PbTiO<sub>3</sub> Relaxor Ferroelectrics," *Ferroelectrics*, **173**, 191-206 (1995).
5. A. Kurihara, K. Nomura, K. Hirota and T. Ikeda, "Piezoelectricity and Electrostriction in Ferroelectric Actuator," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **31**, 3085-3089 (1992).
6. M. Hirose, N. Takada, H. Oka and K. Miya, "Relationship between Poling Condition and Heat Resisting Properties in Lead Zirconate Titanate," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33**, 5345-5347 (1994).
7. T. Sakai, M. Ishikiriyama and R. Shimazaki, "Durability of Piezoelectric Ceramics for an Actuator," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **31**, 3051-3054 (1994).
8. K. Furuta and K. Uchino, "Electric-Field-Induced Strain in (Pb,Lu)(Zr,Ti)O<sub>3</sub> Ceramics," *Adv. Ceram. Mater.*, **1**, 61-65 (1986).
9. T. Tani, N. Watanabe, K. Takatori and S. Hori, "Piezoelectric and Dielectric Properties for Doped Lead Zirconate Titanate Ceramics under Strong Electric Field," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33**, 5352-5355 (1994).
10. T. Tsurumi, Y. Kumano, T. Takenaka and O. Fukunaga, "90° Domain Reorientation and Electric-Field-Induced Strain of Tetragonal Lead Zirconate Titanate Ceramics," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **36**, 5970-5975 (1997).
11. T. Tsurumi, N. Ikeda and N. Ohashi, "Non-180° Domain Contribution in Electric-Field-Induced Strain of PZT Ceramics Measured by a Mach-Zehnder Interferometer," *Jpn. J. Ceram. Soc.*, **106**(11), 1062-1066 (1998).
12. Q. Zhang, W. Pan and L. E. Cross, "Laser Interferometer for the Study of Piezoelectric and Electrostrictive Strain," *J. Appl. Phys.*, **63**, 2492-2496 (1988).
13. W. Pan, W. Gu, D. Taylor and L. E. Cross, "Large Piezoelectric Effect Induced by Direct Current Bias in PMN:PT Relaxor Ferroelectric Ceramics," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **28**, 653-661 (1989).
14. S. L. Swartz and T. R. Shrout, "Fabrication of Perovskite Lead Magnesium Niobate," *Mater. Res. Bull.*, **17**, 1245-1250 (1982).