

PNN-PZ-PT 계 세라믹스의 압전변위특성

정수태·남효덕*·조상희**

부산공업대학 전자공학과

*영남대학교 전자공학과

**경북대학교 재료공학과

(1989년 8월 10일 접수)

The Characteristics of Piezoelectric Strain Constants on PNN-PZ-PT Ceramics

S.T.Chung, H.D.Nam* and S.H.Cho**

Dept. of Electronic Eng., Pusan National Institute of Technology

*Dept. of Electronic Eng., Young Nam University

**Dept. of Materials Science and Eng., Kyung Pook University

(Received August 10, 1989)

요 약

0.5[xPT-(1-x)PZ]-0.5PNN계에 있어서, 조성에 대한 압전변위상수의 온도의존성과 전계의존성을 조사하였다. 압전변위상수 d_{31} 은 상경계조성인 PT=0.68에서 가장 높은 값($360 \times 10^{-12} \text{m/V}$)을 가졌다. d_{31} 의 온도의존성은 시료의 큐리온도가 높을수록 개선되었고, 변위의 전계의존성은 항전계가 높은 시료일수록 저하되었다.

전계 인가시에 본 조성은 모두 압전효과와 전왜효과를 나타내었는데, 압전효과는 정방정조성이 삼방정조성보다 높고, 전계의존성의 정도를 나타내는 전왜계수의 크기는 상경계, 삼방정 및 정방정상 순으로 나타났다.

전계를 인가한 압전변위상수는 90°분역의 변위에 기인하는 전왜효과를 고려해야만 하고, 바이모프형 액츄에이터의 미소변위는 계산값과 잘 일치하였다.

ABSTRACT

The temperature dependence of piezoelectric strain constant and the electric field induced strain are investigated as a function of PT in 0.5[xPT-(1-x)PZ]-0.5PNN ceramics. The piezoelectric strain constant d_{31} has the highest value ($360 \times 10^{-12} \text{m/V}$) at PT=0.68. The temperature dependence of d_{31} is improved as Curie temperature of sample is increased, and the electric field dependence of induced strain is decreased with the coercive field increased. This ceramic system shows both piezoelectric effect and electrostrictive effect under the applied electric field.

The piezoelectricity of tetragonal phase is higher than that of rhombohedral phase, and the magnitude of electrostrictive constant is appeared in the order of morphotropic, rhombohedral and tetragonal phase.

The piezoelectric strain constant with applied field must be considered the electrostrictive effect due to

90° domain wall displacements, and the displacement of bimorph type actuator agrees with the calculated value well.

1. 서 론

최근 광학기구나 정밀가공 등을 요구하는 분야에서는 마이크로미터 또는 그 이하 범위의 변위까지의 제어가 요구되고 있다. 이러한 미소변위를 제어하는 소자의 대표적인 예가 액츄에이터인데, 이 새로운 액츄에이터의 소재로써 압전세라믹 재료가 대두되고 있다¹⁾. 압전액츄에이터의 재료는 주로 강유전체 세라믹스를 이용하며, 압전재료와 전왜재료를 대별한다. 압전재료는 Pb(Zr, Ti)O₃ [PZT] 계나 PZT에 제 3의 성분계를 가한 조성이 주로 사용되고²⁻⁴⁾, 전왜재료는 Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃ [PMN]에 PbTiO₃을 약간 치환한 조성이 주로 사용되어 왔다⁵⁻⁷⁾. Uchino⁸⁾는 PLZT(7/62/38) 및 0.9 PMN-0.1 PT에 있어서 변위의 전계의존성을 조사하였는데, PLZT는 압전재료로써 인가전계가 커짐에 따라 변위의 형태가 나뭇잎에서 나비형태로 바뀔 때 동시에 변위의 히스테리시스가 증가하고, PMN 계는 전왜재료로써 인가전계에 의한 변위의 히스테리시스가 적음을 보고하였다. 그 외에도 전왜재료에 있어서, 변위의 전계의존성 및 온도의존성을 보고한 문헌은 다수 있다^{5-7,9)}. 일반적으로 압전재료는 전왜재료에 비하여 유리온도가 높고 유전률이 적으며 또 항전계가 크므로 변위의 온도 및 전계의존성이 적고, 응답속도가 빠른 것으로 알려져 있다¹⁰⁾.

압전재료로써 비교적 높은 압전상수를 가지는 것으로 알려진¹¹⁾ Pb(Zr, Ti)O₃-Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O₃ [PZT-PNN]계의 조성에 대한 액츄에이터 특성에 대한 논문도 발표되어 있다^{3,4)}. 그리고 Ogawa 등¹²⁾은 변위의 전계의존성을 논의할 때 압전변위상수를 전계의 함수로 표현함으로써 전계의존성을 명확하게 나타내었고, Wersing 등¹³⁾은 변위의 전계의존성에 있어서 실측된 변위가 계산값보다 크고, 전계의 증가에 따라 그 비가 증가함을 보고하였다. 그러나 PZ-PT-PNN 계에 있어서, 변위의 온도특성 및 전계의존성에 대한 자세한 문헌을 접하지 못했다.

본 실험은 PZ-PT-PNN 계의 조성에 대한 압전변위상수의 온도 및 전계의존성을 검토하고, 전계의존성을 갖는 압전변위상수, $D_{31}(E) = d_{31} + M \times E$ 을 유도하여 시료의 조성에 대한 압전효과와 전왜효과를 고찰하였다. 아울러 본 조성으로 비대칭형 바이모프(bimorph)압전액츄에

이터를 실제로 제작하여 외부전계에 대한 변위특성도 조사하였다.

2. 실험

본 실험의 조성은 $0.5[x \text{ PbTiO}_3 - (1-x) \text{ PbZrO}_3] - 0.5 \text{ Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ 이고, x의 값은 0.5에서 0.8로 변화시켰다. 본 조성의 세라믹스와 같이 Pb와 Nb를 포함하는 세라믹을 일반적인 방법으로 소성할 경우 파이로클로아(pyrochlore)상이 생성되기 쉽다는 점을 감안하여 그림 1과 같이 콜롬바이트(columbite)상 화합물인 NiNb₂O₆를 먼저 만들고, 이 화합물과 PbO, TiO₂, ZrO₂을 조합하는 방법을 택하였다¹⁴⁾. NiNb₂O₆을 만들기 위하여 NiO와 Nb₂O₅을 1:1의 몰비로 섞고, 16시간동안 습식 혼합하여 1000°C에서 4시간 반응시켰다. 이것을 분쇄하여 얻어진 분말은 XRD로 분석하였고, 그 결과 본 시료

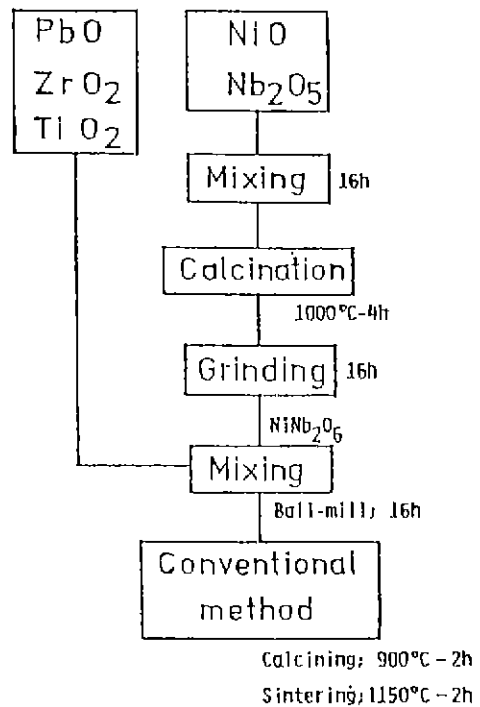


Fig.1. Sequence of process.

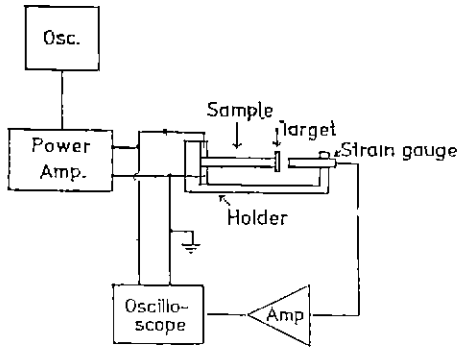


Fig. 2. Circuit for measuring strain.

의 격자상수 d 는 NiNb_2O_6 에 대한 ASTM 카드의 격자상수 d 의 값과 일치하였다. 이 NiNb_2O_6 을 PbO , TiO_2 및 ZrO_2 에 정량적으로 혼합하고 900°C 에서 2시간 하소한 후 분쇄하였다. 이 분말에 PVA 결합제를 첨가하고, 1000 kg/cm^2 을 가하여 직경 15 mm 두께 3 mm로 성형하였다. 이 시편을 MgO 도가니에 넣고, 1150°C 에서 2시간 소결하였다. 얻어진 시료의 소결밀도는 약 $7.9\sim 8.1 \text{ g/cm}^3$ 의 양호한 값을 가졌다.

전기특성을 측정하기 위하여 시료를 소정의 크기로 연마하였고, 전극은 금을 증착하였다. 분극처리는 80°C 의 실리콘 오일중에서 30 kV/cm 의 전계를 30분동안 인가하였다. 압전특성은 IRE 공진법에 의하여 계산하였는데, 전기기계결합계수 k_p 는 직경 13 mm, 두께 0.75 mm의 원판형 시료를, k_{31} 및 d_{31} 들은 길이 11.5 mm, 폭 2.3 mm, 두께 0.75 mm의 길이방향시료를 사용하였다. 길이방향 시료에 있어서 전계에 대한 미소변위 (Δl)측정은 비접촉 스트레인게이지 (KD-2810)를 사용하였고, 인가전계는 AC. 60 Hz이며, 그림 2는 그 측정장치를 나타낸 것이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. PZ-PT-PNN 계의 격자상수

그림 3은 PZ-PT-PNN 계의 상태도와 소결시료의 격자상수를 $\text{Ti}/(\text{Zr}+\text{Ti})$ 의 함수로써 나타낸 것이다. 격자상수의 계산은 시료의 X선 분석결과로부터 $2\theta=44^\circ\sim 46^\circ$ 범위내에서 (200)면과 (002)면의 피크가 나타난 것은 정방정(tetragonal)상으로 구분하여 (200)면과 (002)면의 d_{hkl} 을 구하여 격자상수를 계산하였고, (200)면의 피크

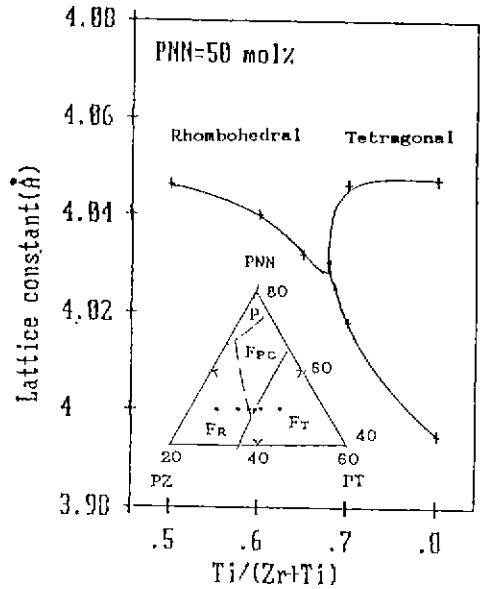


Fig. 3. Phase diagram and lattice constant of sintered samples as a function of PT contents. (P Paraelectric, F_{pc} : Pseudocubic, F_R : Rhombohedral, F_T : Tetragonal)

만 나타난 것은 삼방정(rhombohedral)상으로 구분하여 (111)면과 (200)면의 d_{hkl} 을 구하여 격자상수를 계산하였다 그러나 이러한 방법으로 격자상수를 구하는 것은 다소 무리가 있으나, 결정상을 파악하는 데는 이 격자상수와 상태도 그리고 $\text{Ti}/(\text{Zr}+\text{Ti})$ 의 변화에 대한 유전률 및 압전상수의 값을 참조함으로써 시료의 결정상을 추론할 수 있다고 사료된다. 이 그림에서 $\text{Ti}/(\text{Zr}+\text{Ti})$ 의 양이 0.68 부근에서는 상경계조성, 그 이하에서는 삼방정조성, 그 이상에서는 정방정조성을 알 수 있다.

3.2. 큐리온도 및 항전계

압전세라믹의 액츄에이터는 응용시에 높은 전계를 인가하고 또한 장시간 동작에 의한 열이 발생되므로, 큐리온도와 항전계는 시료의 중요한 특성 중의 하나이다. 그림 4는 PT와 PZ의 조성에 대한 시료의 항전계와 큐리온도를 나타낸 것이다. 시료의 큐리온도 및 항전계는 상경계를 중심으로 그 값이 크게 변하였다. 즉 삼방정영역에서는 큐리온도와 항전계가 낮은 반면에 정방정영역에서는 그들의 값들이 높았다. 이러한 결과는 2성분계 PZT의 결과와 일치하였다¹⁵⁾ 한편 본조성시료의 큐리온도가 2성분계 PZT보다 낮은 이유는 큐리온도가 약 -120°C 인 $\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ 의 치환때문이다¹⁶⁾.

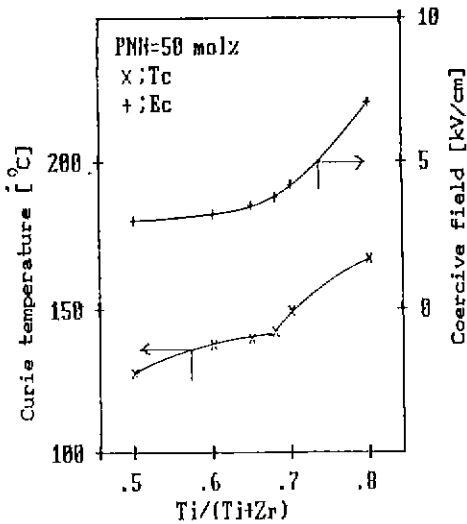


Fig. 4. Curie temperature and coercive field as a function of PT contents.

3.3. 압전상수

Table 1은 본 실험의 조성에 대한 압전상수를 나타낸 것이다. k_p (원판의 직경방향진동의 결합계수), Q_m (원판 시료의 기계적 품질계수) 및 k_{31} (길이방향진동의 결합계수)은 측정값이며, s_{11} (탄성정수), d_{31} (압전변위상수) 및 g_{31} (압전전압상수)은 계산값으로써, 다음식을 이용하였다¹⁷⁾.

$$s_{11} = \frac{1}{4 \cdot \rho \cdot (fs \cdot l)^2} \dots\dots\dots (1)$$

$$d_{31} = k_{31} \sqrt{s_{11} \cdot \epsilon_{33} \cdot \epsilon_0} \dots\dots\dots (2)$$

$$g_{31} = \frac{d_{31}}{\epsilon_{33} \cdot \epsilon_0} \dots\dots\dots (3)$$

여기서 ρ 는 밀도, fs 는 k_{31} 측정시 공진주파수이고, l 은

Table 1. Piezoelectric Constant of 0.5[(1-x)PZ-xPT]-0.5PNN.

PT x	ϵ_{33}	k_p (%)	Q_m	k_{31} (%)	s_{11} 10^{-12} $[m^2/V]$	d_{31} 10^{-12} $[m/V]$	g_{31} 10^{-3} $[Vm/N]$
0.5	1980	0.4	90	0.22	10.1	95	5.4
0.6	2350	0.475	63	0.26	12.6	144	6.0
0.65	3150	0.56	45	0.33	14.2	212	7.0
0.68	6200	0.625	27	0.36	17.0	360	6.5
0.7	5400	0.575	35	0.325	16.1	270	6.3
0.8	2640	0.445	70	0.285	11.6	152	6.4

길이방향시편의 길이, ϵ_{33} 은 비유전률, ϵ_0 는 진공의 유전률이다.

그림 3과 같이 상경계조성인 $Ti/(Ti+Zr)=0.68$ 일때, 압전변위상수 d_{31} 은 $360 \times 10^{-12} [m/V]$ 였다. 이 압전상수의 값은 지금까지 알려진 다른 3 성분계의 값에 비해 비교적 높은 값을 알 수 있다.

3.4. 압전변위상수의 온도의존성

그림 5는 압전변위상수 d_{31} 의 온도의존성을 나타낸 것이다. 온도가 증가함에 따라 삼방정조성에서는 d_{31} 가 급격히 증가한 반면 정방정조성에서는 비교적 완전하게 증가하였다. 이것은 그림 4에서 볼 수 있는 바와같이 정방정조성보다는 삼방정조성의 큐리온도가 낮기 때문이다. 특히 큐리온도가 약 130°C부근인 PT=0.5조성에서는 낮은 큐리온도 때문에 약 80°C이상에서는 열적 분극풀림(depoling) 현상이 나타나 오히려 d_{31} 이 감소하였다. 그러므로 큐리온도가 높은 시료일수록 온도특성이 개선됨을 알 수 있다. 한편 상경계부근의 조성에서는 온도의 증가에 대하여 완만한 山형 특성을 보였다.

3.5. 변위의 전계의존성

그림 6은 분극처리한 $Ti=0.5$ 시료에 있어서, 그림 2의 회로를 이용하여 측정된 전계에 대한 변위를 나타낸 것이다. 인가전계가 시료의 항전계보다 낮은 때는 변위가 나

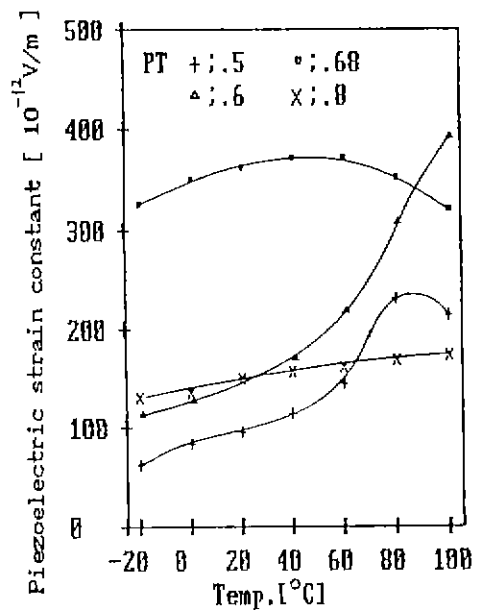


Fig. 5. Temperature dependence of piezoelectric strain constant.

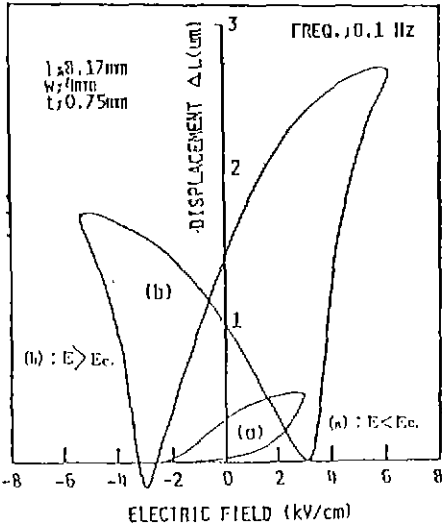


Fig. 6. Displacement as a function of electric field in the poling field.

못일의 형태를 가지나, 항전계보다 높은 전계를 가할 때는 나비형의 형태를 나타내었다. 이러한 현상은 PLZT에 있어서 인가전계에 대한 변위의 형태를 보고한 Furuta 등¹⁶⁾의 결과와 일치하였다. 그는 이러한 변화는 내부 분역 배열에 관계하는 것으로 보고하였으나, 변위의 형태가 나뭇잎형과 나비형은 각각 90°분역과 180°분역배열 중 어느 것에 기인하는지는 언급하지 않았다.

본 실험에서의 결과와 Uchida¹⁹⁾의 전계에 대한 90°분역 및 180°분역배열의 결과에서 고려해 볼때, 변위가 나뭇잎의 형태는 90°분역에 주로 기인하고, 나비형의 형태는 180°분역에 주로 기인한다고 사료된다. 그리고 그림 6에서 전계에 대한 변위가 비대칭적으로 나타났다. 즉 분극 처리방향과 인가전계방향이 동일할 때는 그 변위정도가 크고, 반대일 때는 작다. 이러한 현상은 시료에 높은 직류전계로 분극처리하므로써 시료의 내부 바이어스전계가 존재하기 때문이다²⁰⁾. 그러나 역방향의 강한 인가전계로 시료의 분극풀림이 일어나거나, 내부 바이어스 전계가 감소하면 180°분역의 분극반전이 용이하게 되어 변위가 거의 좌우 대칭으로 나타난다. 한편 인가전계가 항전계보다 클 때는 그 변위가 크게 증가하였지만, 바이모프형 액츄에이터로 사용할 경우 항전계보다 큰 인가전계에서의 동작은 바람직하지 못하다. 바이모프형 압전액츄에이터에서는 인가전계의 방향이 시료의 분극처리 방향과 동일한 압전체는 수축하고, 반대의 압전체는 팽창하므로써 시료의 길이

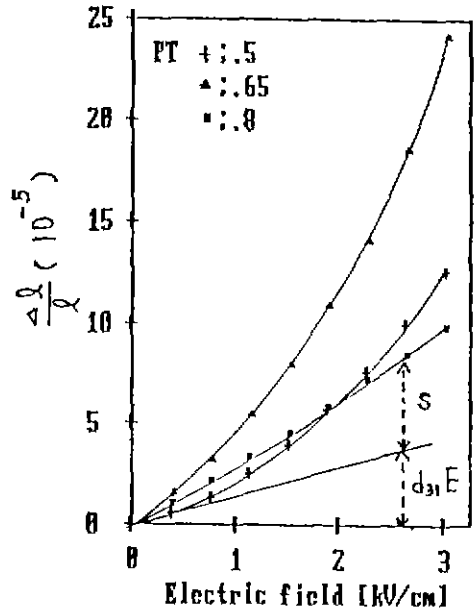


Fig. 7. Electric field dependence of strain.

방향으로 휘어짐이 나타난다²¹⁾. 따라서 항전계 이상의 전계에서는 시료의 분극풀림이 일어날 뿐만 아니라, 동일한 방향으로 변위가 나타나므로, 두압전체는 모두 팽창 또는 수축하기 때문에 바이모프로써 구동하지 못한다. 그러므로 바이모프형 압전액츄에이터로써 사용한 경우는 항전계 이하의 전계에 대한 변위특성을 논하는 것이 타당하다고 사료된다.

그림 7은 시료의 길이방향변위의 전계의존성을 나타낸 것이다. 압전변위 $\Delta l/l$ 은 전계가 높아짐에 따라 지수적으로 증가하였는데, 그 증가정도는 상정계 부근에서 가장 컸으며, 또한 삼방정조성이 정방정조성보다 전계의존성이 크게 나타났다. 한편 측정된 변위는 IRE 공진법으로 계산한 변위 $d_{31} \times E$ 의 값과는 그림 7과 같이 s만큼 차이가 있다. Uchida 등²²⁾은 전계에 의한 시료길이 변화는 다음식

$$\Delta l/l = s + d_{31} \times E \dots\dots\dots (4)$$

여기서 l은 시료의 길이, Δl 은 시료길이의 미소변화분, s는 분역에 기인하는 변위, d_{31} 은 IRE 공진법에 의해서 계산한 압전변위상수이고 E는 시료의 인가전계이다. 분극 처리한 시료에서 분극풀림이 일어나지 않으면 180°분역의 배열이 흐트러지지 않는다. 따라서 항전계 이하의 낮은 전계에서는 d_{31} 값의 변화가 없다고 가정하면, $d_{31} \times E$ 는 압

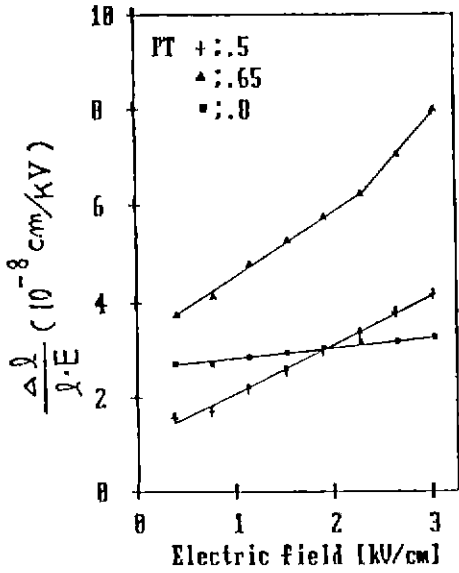


Fig.8. Electric field dependence of $\Delta l / (l \cdot E)$.

전효과의 향으로써 전계에 대하여 선형적으로 증가한다.

한편 분역에 기인하는 변위 s 는 90°분역의 배열에 관계하는 것으로써, 전계의 증가에 대하여 비선형적으로 증가함을 보였다. 그러므로 변위 s 를 전계에 의해서 일어나는 전왜효과의 향으로 생각하여 다음과 같이 둘 수 있다.

$$s = M \times E^2 \dots\dots\dots (5)$$

여기서 M 은 전왜계수이다. 따라서 식(4)의 s 대신에 식(5)를 대입하면 식(6)과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta l / l &= d_{31} \times E + M \times E^2 \\ &= (d_{31} + M \times E) E \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

이때 식(6)을 압전효과와 전왜효과를 나타낸 압전전왜 방정식이라 한다. 식(6)을 전계 E 로 양변을 나누면 식(7)과 같고, 전계 E 에 대한 직선의 식이 된다. 한편 압전방정식의 d 형식($S = s \cdot T + d \cdot E$)에서 장력 $T=0$ 라 하면 $S = d \cdot E$ 가 되고, 여기서 $S = \Delta l / l$ 이다.

따라서 S 를 E 로 나누면 d 는 전계의존성을 갖는 함수를 의미하므로, $\Delta l / (l \times E) = D_{31}(E)$ 로 둔다. 여기서 $D_{31}(E)$ 는 전계의존성을 가진 압전변위상수이다.

$$D_{31}(E) = \Delta l / (l \times E) = d_{31} + M \times E \dots\dots\dots (7)$$

여기서 M 은 직선의 기울기가 된다. 따라서 직선의 기울기를 알면 시료의 전왜효과 정도를 알 수 있다. 이 수식

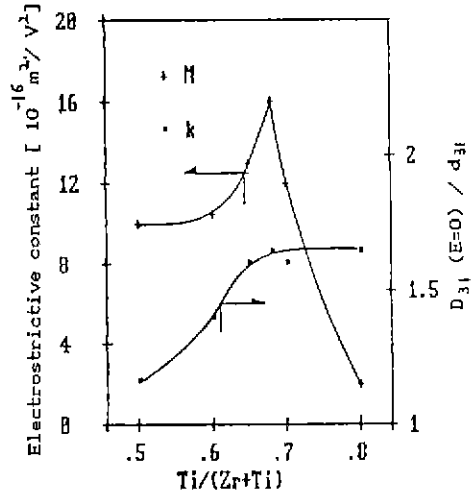


Fig.9. Electrostrictive constant(M) and $D_{31}(E=0) / d_{31} = k$ as a function of PT contents.

으로부터 시료가 압전효과만 있는 경우는 $M=0$ 이고, 전왜효과만 있는 경우는 $d_{31}=0$ 이다.

그림 8은 전계에 대한 $\Delta l / (l \times E)$ 을 나타낸 것으로써, 압전변위상수 $D_{31}(E)$ 의 압전효과와 전왜효과의 정도를 파악할 수 있다. 여기서 본 조성의 모든시료는 압전효과 이외에 전왜효과도 공존함을 보였고, 삼방정조성과 상경계 조성의 시료는 전왜효과가 큰 반면에 정방정조성은 적음을 알 수 있다.

한편 상경계조성시료의 경우 어떤 전계값에서 직선의 기울기가 다르게 나타났는데, 이는 전계에 따른 자발분극의 비선형적 증가가 이 전계값에서 급격히 증가하기 때문이다. 그리고 $\Delta l / (l \times E)$ 의 절편은 식(7)에서 $E=0$ 일때 $D_{31}(E=0) = d_{31}$ 의 관계가 성립해야하나, 실제 $D_{31}(E=0)$ 의 값이 IRE에 의한 계산값 d_{31} (표 1)보다 다소 높은 값을 나타내었다. 지금 전계인가에 의한 압전정수 $D_{31}(E=0)$ 와 d_{31} 과의 비를 k 라하면 식(8)과 같이 정의된다.

$$k = D_{31}(E=0) / d_{31} \dots\dots\dots (8)$$

여기서 k 는 전계인가에 의한 압전효과의 정도를 나타내고, 시료의 인가전계에 의한 자발분극의 영향에 기인된다고 사료된다.

그림 9는 조성에 따른 k 와 전왜계수 M 을 나타낸 것이다. k 의 값은 삼방정조성에서 상경계조성으로 갈수록 증가하다가 정방정조성에서는 거의 일정하였다. 상조성으로 보아서 정방정조성의 쪽이 삼방정조성보다 k 의 값이 높은

이유는 정방정조성이 인가전계에 의한 자발분극의 영향이 크기 때문이다²³⁾. 한편 전계계수 M은 압전상수 및 유전률의 경우와 비슷하게 상경계조성>삼방정조성>정방정조성의 순서로 높은 값을 나타내었다. 이는 시료의 결정구조와 항전계에 관계되는 것으로 사료된다. 즉, 전계에 유기되는 변위는 정방정상보다는 삼방정상의 쪽이 큼을 보고한 Uchida²²⁾의 결과와 또한 그림 4에서 알 수 있는 바와 같이 정방정조성이 삼방정조성보다 항전계가 높아져 90°분역배열의 전계의존성이 적기 때문이다. 그러므로 변위의 전계의존성을 줄이기 위해서는 항전계가 높고, 또한 정방정조성의 시료가 삼방정조성의 시료보다 좋다고 생각한다.

3.6. 바이모프(bimorphor)형 액츄에이터

바이모프형 액츄에이터는 대칭형(series type)과 비대칭형(parallel type)으로 나눈다. 비대칭형은 분극처리가 용이하고 동작전압이 대칭형의 1/2 이므로, 본 실험에서는 비대칭형 바이모프 액츄에이터를 제작하였고, 그림 10은 그 모형도이다. 여기서 제작한 액츄에이터의 조성은 압전변위상수 d₃₁이 가장 높은 PT=0.68의 것을 선택하였으며, 시편의 유효길이는 18 mm, 폭 3.3 mm, 두께 0.45 mm이며, 두 시편사이의 접착재료는 은(Ag)이다.

그림 11에서 전계에 대한 변위의 히스테리시스 현상이 나타난 것은 시료내부의 공간전하분극의 완화시간이 존재하기 때문이다. 이러한 히스테리시스 현상은 인가전계가 증가할수록 커지고, 유전률이 큰 시료일수록 증가하는 경향이 있는데, 보통 히스테리시스의 값(h=δh/δ×100)은 5-30% 범위이다^{12,24)} 이 값은 응용범위에 따라 다르나 변위의 선형성을 요구하는 관점에서 볼때, 비교적 낮은 것이 좋고, 본 시료에서는 인가전계가 3 kV/cm일때 그 값이 약 32%였다.

일반적으로 액츄에이터의 변위는 다음식과 같이 표현된다.

$$\delta = a \cdot D_{31}(E) (l^2/2 \cdot t) E \dots\dots\dots (9)$$

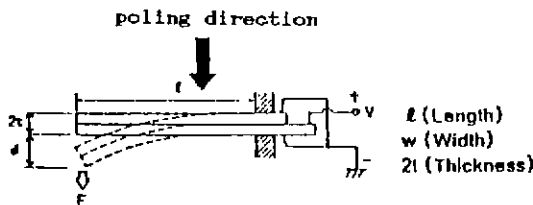


Fig.10. Construction of bimorph type actuator.

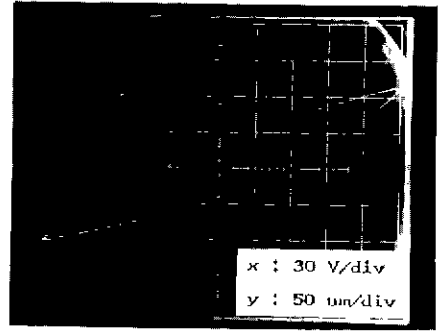
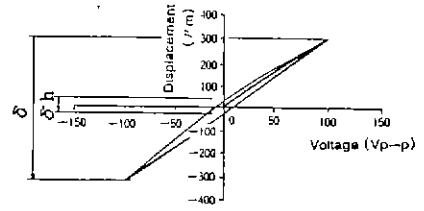


Fig.11. Displacement of bimorph type actuator.

여기서 δ은 그림 10과 같이 시편 끝부분의 미소변위, l은 유효길이, t는 두께이고 a는 상수로써 전극 및 두 압전체 사이의 접착재료의 종류에 따라 다르다. 그리고 D₃₁(E)는 식(6)과 같이 전계의존성을 가지는 압전변위상수로써 D₃₁(E)=d₃₁+M×E이다.

그림 12는 미소변위 δ와 (δ/E)(2t/l²)의 전계의존성을 나타낸 것이다. 전계의 증가에 따라 미소변위값은 지수적

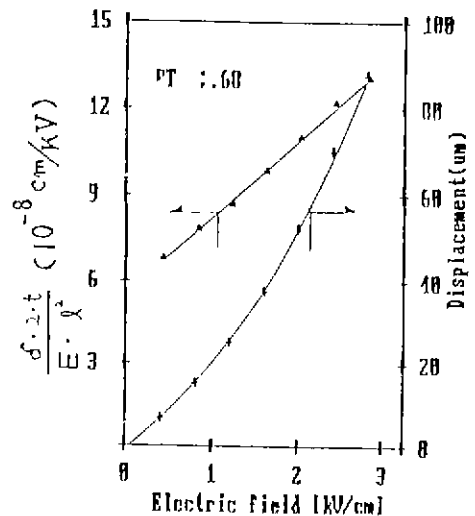


Fig.12. Electric field dependence of (δ/E) · (2t/l²) and displacement on the actuator.

으로 증가하였고, $(\delta/E) (2t/l^2)$ 즉 $a \cdot D_{31}(E)$ 는 선형적으로 증가하였다. y 축의 절편 $a \cdot D_{31}(E=0)$ 의 값은 약 $580 \times 10^{-12} [m/V]$ 이고, 본시료의 d_{31} 은 $360 \times 10^{-12} [m/V]$ 이므로 a의 값은 약 1.6이었다. 바이모프 액츄에이터는 두 압전체 사이에 보통 비압전성 접착물질을 사용하므로 그 변위는 이론적인 값 1.5보다 적다. 그러나 그림 9에서와 같이 k의 값($D_{31}(E=0)/d_{31}$)이 1보다 커므로 실제 변위가 증가한다고 생각한다.

보통 a의 값은 전극이나 접착물질 또는 시료의 재질 등에 따라서 차이가 있다. PZT 계를 소재로 한 바이모프형 액츄에이터에 있어서, 접착물질이 Pd인 경우 a는 $1.55^{12)}$ 이고, 에폭시(epoxy)인 경우 1.95, Pb를 주입한 다층구조인 경우 1.5-1.6 정도를 보고하였다¹³⁾. 그러므로 Ag를 사용한 본 실험에서의 a=1.6의 값은 Ogawa¹²⁾나 Wersing 등¹³⁾의 금속 접착물질의 결과와 비슷하였다.

한편 액츄에이터의 전왜계수 M은 $16 \times 10^{-6} [m^2/V^2]$ 으로써, 그림 9의 압전체의 길이방향 전왜계수에 대한 결과(PT=0.68의 경우)와 잘 일치하였다. 따라서 바이모프형 액츄에이터의 변위를 계산한 경우 진계인가에 의한 압전변위상수 $D_{31}(E) = d_{31} + M \times E$ 을 고려해야 한다.

4. 결 론

0.5(PT/PZ)-0.5 PNN 3성분계 조성에 대하여 압전계수와 변위의 온도의존성 및 전계의존성을 조사한 실험의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 압전변위상수 d_{31} 은 상경계 조성 부근인 PT=0.68 일때가 가장 높고 ($d_{31} = 360 \times 10^{-12} [m/V]$), 큐리 온도가 높은 시료일수록 그의 온도의존성이 적었다.

2) 길이방향 변위의 전계의존성은 삼방정조성보다는 정방정조성이 적었고, 또한 항전계가 클수록 전계의존성이 적었다.

3) 본 조성 시료의 변위는 모두 압전효과와 전왜효과를 가지고 있으며, 압전효과는 180°분역배열에 전왜효과는 90°분역배열에 기인한다고 사료된다.

4) $D_{31}(E=0)$ 의 값이 d_{31} 보다 큰 것은 ($k = D_{31}(E=0)/d_{31} > 1$) 시료 내부의 자발분극 영향이고, 이는 정방정조성이 삼방정조성보다 높았다. 전왜계수 M의 크기는 상경계, 삼방정, 정방정 순으로 나타났으며, 전왜계수가 클수록 변위의 전계의존성이 증가하였다.

5) 비대칭형 바이모프 액츄에이터에서 전계인가에 의한 압전변위상수는 $D_{31}(E) = d_{31} + M \times E$ 로 고려해야 한다. 본 실험의 조성인 경우(PT=0.68)는 전왜계수 M은 $16 \times 10^{-6} [m^2/V^2]$ 였다. 이 값은 길이방향시료의 전왜계수의 값과 잘 일치하였다.

「감사의 글」

본 연구는 1988년도 한국과학재단 목적기초연구비 지원으로 이루어진 것의 일부를 맡을 알려드리고, 이에 감사드립니다.

REFERENCE

1. K. Uchino, "Essentials of Development and Applications of Piezoelectric Actuators", Electronic Essentials No. 3(Nippon Kogyo Center), Tokyo, (1984).
2. T. Kitamura et al, "A Piezoelectric Ceramic Material and a Bimorph for Auto-Tracking in VTR", *Jpn. J. Appl. Phys.* 20, Suppl 20-4, 97-100 (1981).
3. Y. Fuda et al, "Multilayer Piezoelectric Ceramic Bimorph Actuator", *Jpn. J. Appl. Phys.* 24, Suppl 24-2, 385-487 (1985).
4. S. Takahasi, "Longitudinal Mode Multilayer Piezoceramic Actuators", *Ceram. Bull.*, 65, 88), 1156-1157 (1986).
5. L.E. Cross et al "Large Electrostrictive Effects in Relaxor Ferroelectrics", *Ferroelectrics.* 23, 187-192 (1980).
6. K. Uchino et al, "Review Electrostrictive Effect in Perovskites and its Transducer Applications", *J. Mat. Sci.* 16, 569-578 (1981).
7. S. Takahasi et al, "Internal Electrode Piezoelectric Ceramic Actuator", *Ferroelectrics.*, 50, 181-190 (1983).
8. K. Uchino "Electrostrictive Actuators: Materials and Application", *Ceram. Bull.* 65, (4) 647-653 (1986).
9. S. Nomura and K. Uchino "Electrostrictive Effect in $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ Type Materials", *Ferroelectr-*

- ics. **41**, 117-132 (1982).
10. 内野研二 “壓電/電歪 アクチユエータ” 森北出版社, 東京, p. 54, (1986).
 11. E.A. Buyanova et al “Ferroelectric Properties of $\text{PbTiO}_3\text{-PbZrO}_3\text{-PbNi}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ Solid Solutions”, *Bull. Acad. Sci. USSR, Phys. Ser.* **29**, 1877-1879 (1965).
 12. T. Ogawa, A. Ando and K. Wakino, “Electrostrictive Properties of Monolithic Bimorphous Actuator”, *Ferroelectrics* **68**, 249-256 (1986).
 13. W. Wersing, M. Schnoller and H. Wahl “Monolithic Multilayer Piezoelectric Ceramics”, *Ferroelectrics*, **68**, 145-156 (1986).
 14. S.L. Swartz and T.R. Shrout, “Fabrication of Perovskite Lead Magnesium Niobate”, *Mat. Res. Bull.*, **17**, 1245-1250 (1982).
 15. 정수태, “PZT 고용체에 있어서 정방정상과 삼방정상의 전기적 특성”, 부산공업대학 연구보고, **29**, 623-629 (1987).
 16. G.A. Smolenskii and A.I. Agranovskaya, “Dielectric Polarization of a Number of Complex Compounds”, *Fizika Tverdogo Tela(English)* **1**, (10), 1562-1572 (1952).
 17. 電子材料工業標準規格, “壓電セラミツワ振動子の試験方法(材料定數の測定及び算出”, 電子材料工業會, EMAS 6004, p 9, (1986).
 18. K. Furuta and K. Uchino, “Electric-Field-Induced Strain in (Pb, La)(Zr, Ti) O_3 Ceramics”, *Adv. Ceram. Mater.*, **1**, (1), 61-66 (1986).
 19. N. Uchida and T. Ikeda, “Temperature and Bias Characteristics of Pb(Zr, Ti) O_3 Families Ceramics”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **4**, (11) 867-880 (1965).
 20. S. Takahashi, “Effects of Impurity Doping in Lead Zirconate Titanate Ceramics”, *Ferroelectrics*, **41**, 143-156 (1982).
 21. J. Vanderaat, “Piezoelectric Ceramics”, Eindhoven Netherlands, p 30-40 (1968).
 22. N. Uchida and T. Ikeda, “Electrostriction in Perovskite-type Ferroelectric Ceramics”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **6**, (9) 1079-1088 (1967).
 23. 内野研二, “壓電/電歪 アクチユエータ” 森北出版社, 日本 東京, 17-27 (1986).
 24. Murata MFG. Co. LTD. “Piezoelectric Ceramics (Piezotite)”, Cat. No. P 19 E-1, Japan, Kyoto, 1988. 7.