

투광성 $Ba(La_{1/2}Nb_{1/2})O_3-Pb(Zr_yTi_{1-y})O_3$ 세라믹의 $PbZrO_3$ 조성에 따른 강유전 특성

Ferroelectric Properties of the $Ba(La_{1/2}Nb_{1/2})O_3-Pb(Zr_yTi_{1-y})O_3$ Ceramics with $PbZrO_3$ Contents

류기원*, 이성갑*, 배선기**, 이영희*
(Ki-Won Ryu, Sung-Gap Lee, Seon-Gi Bae, Young-Hie Lee)

요 약

본 연구에서는 투광성 $0.085Ba(La_{1/2}Nb_{1/2})O_3-0.915Pb(Zr_yTi_{1-y})O_3$ ($0.45 \leq y \leq 0.70$) 세라믹을 2단 소성법으로 제작한 후, $PbZrO_3$ 조성 및 온도에 따른 구조적, 강유전적 특성을 측정하였다. XRD 측정 결과, $PbZrO_3$ 조성이 감소할수록 격자상수 및 단위격자 체적은 감소하였으며 시편의 결정구조는 입방정계에서 능면체정계, 정방정계로 변화되었다. 8.5/60/40 시편의 경우 포화분극, 잔류분극 및 항전계가 각각 $33.28(\mu C/cm^2)$, $4.15(kV/cm)$ 로 전형적인 메모리 특성을 나타내었으며, $PbZrO_3$ 조성이 증가함에 따라 강유전 이력곡선은 slim loop 특성을 나타내었다. 잔류분극은 온도가 증가함에 따라 감소하였으며, 특히 PE-FE 상경계 부근에 위치한 조성의 경우, 상전이 온도 이하의 온도에서 급격히 감소하는 경향을 나타내었다.

Abstract

In this study, $0.085Ba(La_{1/2}Nb_{1/2})O_3-0.915Pb(Zr_yTi_{1-y})O_3$ ($0.45 \leq y \leq 0.70$) transparent ceramics were fabricated by two-stage sintering method. The structural and ferroelectric properties were measured with $PbZrO_3$ contents and temperatures.

As the results of XRD, lattice constant and unit cell volume were decreased with decreasing the contents of $PbZrO_3$. Decreasing the $PbZrO_3$ contents, the crystal structure of a specimen was varied from cubic to rhombohedral and tetragonal. In the 8.5/60/40 specimen which showed a typical memory characteristics, saturation polarization, remanent polarization and coercive field had $33.28(\mu C/cm^2)$, $22.0(\mu C/cm^2)$, $4.15(kV/cm)$ respectively. Increasing the $PbZrO_3$ contents, ferroelectric D-E hysteresis curves showed the slim loop characteristics. Remanent polarization were decreased with increasing temperature, especially in the compositions which located on the PE-FE phase boundary were showed a abrupt decrease at below transition temperature.

1. 서론

오늘날 PZT계 전기광학 세라믹의 응용분야는 광도파로(optical waveguide)의 수동적 기능 뿐만 아니라 전기광학 효과를 이용하여 진행하는 광의 편광, 세기, 진폭 등을 변조(modulation)시키는 능동적 기능에 까지 확대되고 있다¹⁾. 이러한 PZT계 세라믹의 전기광학 특성은 크게 전기광학 기억효과(electrooptic memory effect), 1차 전기광학 효과(linear electrooptic effect), 2차 전기광학 효과(quadratic electrooptic effect)로 구분되어지며, 결정립 크기와 같은 intrinsic parameter 및 온도, 잔류분극, 인가전계 등의 extrinsic para-

meter에 따라 전기광학 효과의 형태와 크기가 달라지게 된다²⁾.

1971년 G. H. Haertling³⁾은 Hot-press된 PLZT 세라믹을 이용하여 La의 고용량 및 Zr/Ti 비에 따른 복굴절(birefringence)과 강유전 이력곡선을 측정하고, 복굴절 특성이 잔류분극과 항전계 값에 크게 의존함을 발견한 이후, 인가전계 및 온도에 따른 전계 유기 강유전 분역(electric field induced ferroelectric domain)들의 거동을 통해 투광성 세라믹의 전기광학 특성을 해석하려는 연구가 지속적으로 수행되어져 왔다^{4) 5) 6)}.

따라서 본 연구에서는 투광성 $0.085Ba(La_{1/2}Nb_{1/2})O_3-0.915Pb(Zr_yTi_{1-y})O_3$ ($0.45 \leq y \leq 0.70$) 세라믹을 2단 소성법으로 제작한 후, $PbZrO_3$ 조성 및 온도에 따른 구조적, 강유전적 특성을 측정하였다.

* : 광운대학교 전자재료공학과

** : 인천대학교 전기공학과

接受日字: 1993년 1월 13일

2. 실험

2.1 시편의 제작

각 시료를 시편의 조성식 $x\text{Ba}(\text{La}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3 - (1-x)\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti}_{1-y})\text{O}_3$ ($x=0, 0.85, 0.45 \leq y \leq 0.70$)에 따라 평량한 후, 아세톤을 분산매로 하여 볼밀로 50시간 동안 혼합 분쇄하였다. 혼합 분쇄된 시료를 100°C 에서 24시간 동안 건조시킨 후, 알루미늄이나 도가니에 넣어 900°C 에서 2시간 동안 하소시켰다. 하소된 시료를 원통형 금형 ($\phi=30(\text{mm})$)에 넣어 $400(\text{kg}/\text{cm}^2)$ 의 압력으로 성형하였으며, 성형된 시료를 지름 $35(\text{mm})$ 의 알루미늄 몰드에 넣고 내부를 이형제인 Al_2O_3 분말로 채운 다음 1150°C 에서 1시간 동안 진공 핫프레스 (NHP-10, Nishimura Kogyo Co., Ltd.) 하였다. 진공 핫프레스된 시편을 다이아몬드 커터 (ISOMET 11-1180)를 사용하여 $10(\text{mm}) \times 10(\text{mm}) \times 0.4(\text{mm})$ 크기로 절단한 후, 1270°C 에서 20시간 동안 2차 분위기 소결하였다⁷⁾. 분위기 소결시 PbO 의 휘발을 억제하기 위해 $\text{PbZrO}_3 + \text{PbO}_2$ (10(wt. %))의 분위기를 분말과 2중 알루미늄 도가니 구조를 사용하였으며, 소결된 시편을 $0.3(\text{mm})$ 두께로 표면 연마한 후 은전극 (Du Pont 7095)을 부착하였다. 전극이 형성된 시편을 실리콘유내에서 DC $30(\text{kV}/\text{cm})$ 의 전압을 30분간 인가하여 분극처리를 행한 후, PbZrO_3 조성 및 온도에 따른 구조적, 강유전적 특성을 측정하였다.

2.2 측정

시편의 PbZrO_3 조성 변화에 따른 결정학적 특성과 pyrochlore상 및 미반응 물질등 2차상의 존재 여부를 관찰하기 위해 X-ray generator (D/MAX-IIIC, Rigaku)를 사용하여 $2\theta = 20^\circ \sim 70^\circ$ 사이에서 X-선 회절 분석을 행하였다.

시편의 PbZrO_3 조성과 온도에 따른 유전상수는 LCR-meter (ANDO AG-4311B)를 사용하여 정전용량 C와 시편의 크기로 부터 계산하였으며, PbZrO_3 조성에 따른 공진, 반공진 주파수의 변화는 Impedance/Gain-Phase Analyzer (HP 4194A)를 이용하여 측정하였다. 또한 Sawyer-Tower 회로를 이용하여 PbZrO_3 조성과 온도에 따른 포화분극, 잔류분극 및 항전계의 변화를 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 $0.085\text{Ba}(\text{La}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3 - 0.915\text{Pb}(\text{Zr}_y\text{Ti}_{1-y})\text{O}_3$ 시편의 PbZrO_3 조성에 따른 X-선 회절 모양을 나타낸 것으로 pyrochlore상 및 미반응 물질 등의 2차상 peak가 관찰되지 않은 것으로 보아 단일상 고용체가 형성되었음을 알 수 있다.

표 1은 시편의 결정학적 특성을 관찰하기 위해 정방성 (tetragonality)의 변화 양상이 명확히 나타나는 (200), (002)면과 능면체정계에서 비교적 회절피크의 갈라짐 (splitting)이 뚜렷한 (220), (202)면을 선택하여 X-선 회절분석을 행

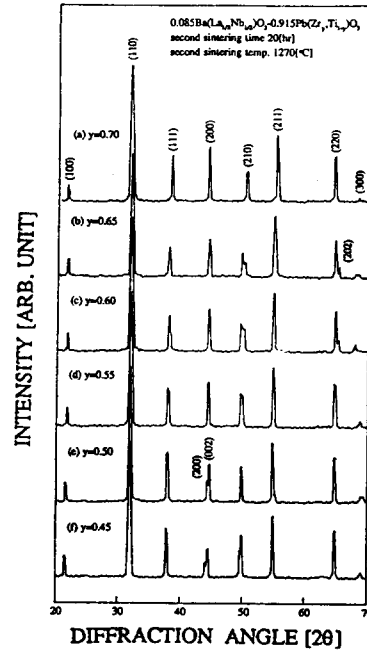


그림 1 $0.085\text{Ba}(\text{La}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3 - 0.915\text{Pb}(\text{Zr}_y\text{Ti}_{1-y})\text{O}_3$

Fig. 1 X-ray diffraction patterns with contents of PbZrO_3 of the $0.085\text{Ba}(\text{La}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3 - 0.915\text{Pb}(\text{Zr}_y\text{Ti}_{1-y})\text{O}_3$ specimen.

한 결과를 나타낸 것이다. 시편의 결정구조는 8.5/70/30시편의 경우, 입방정계를 나타내었으나 PbZrO_3 조성이 감소함에 따라 강유전상인 능면체정계, 정방정계로 변화되었으며, PbZrO_3 조성이 55~50(mol. %) 부근에 조성 변태 상경계면 $\text{FE}_{\text{Rhom}} - \text{FE}_{\text{Tet}}$ 이 존재함을 관찰하였다. 또한 PbZrO_3 조성이 감소함에 따라 ABO_3 perovskite 구조의 B-site에 Zr^{4+} 이온 ($r=0.81\text{Å}$) 보다 이온

표 1 $0.085\text{Ba}(\text{La}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3 - 0.915\text{Pb}(\text{Zr}_y\text{Ti}_{1-y})\text{O}_3$ 시편의 PbZrO_3 조성에 따른 결정학적 특성

Table 1 Crystallographic properties with contents of PbZrO_3 of the $0.085\text{Ba}(\text{La}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3 - \text{Pb}(\text{Zr}_y\text{Ti}_{1-y})\text{O}_3$ specimen.

composition BLN/PZ/PT	structure	lattice parameter				unit cell volume (Å ³)
		a	c	α	c/a	
8.5/70/30	Cubic	4.1020	-	-	-	69.0219
8.5/65/35	Rhom.	4.0876	-	89.69	-	68.2976
8.5/60/40	Rhom.	4.077	-	89.67	-	67.7676
8.5/55/45	Rhom.	4.067	-	89.66	-	67.2702
8.5/50/50	Tet.	4.0426	4.0858	-	1.01069	66.7727
8.5/45/55	Tet.	4.0242	4.0845	-	1.01498	66.1452

반경이 작은 Ti^{4+} 이온 ($r=0.63\text{\AA}$) 의 치환이 증가하여 격자상수 및 단위격자 체적은 감소하였으며, 정방성 (c/a) 은 증가하여 8.5/45/55 시편에서 1.01498의 최대값을 나타내었다.

그림 2는 0.085Ba($La_{1/2}Nb_{1/2}$) O_3 -0.915Pb(Zr_yTi_{1-y}) O_3 시편의 PbZrO₃ 조성과 온도에 따른 유전상수를 나타낸 것으로 PbZrO₃ 조성이 증가함에 따라 유전상수가 완만하게 변화하는 확산형 상전이 특성을 나타내었다. 확산형 상전이 특성은 unit cell의 격자자리(A, B-site)에 양이온들이 불규칙적으로 치환됨에 따라 상전이 온도 부근에서 유전상수가 분산(dispersion)되는 현상으로 8.5/70/30 시편과 같이 강유전상과 상유전상이 공존하는 혼정영역(PE-FE_{room} region)에 근접한 조성에서 더욱 증가되는 경향을 나타내었다. 상온에서의 유전상수는 PbZrO₃ 조성에 대해 큰 의존성은 나타내지 않았으나 조성 변태 상경계 부근에 위치한 8.5/55/45 시편에서 1825의 최대값을 나타내었다.

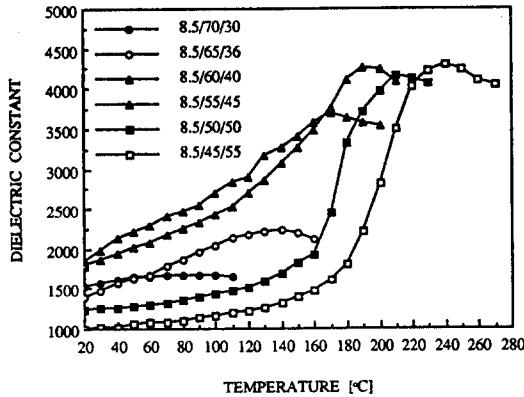


그림 2 0.085Ba($La_{1/2}Nb_{1/2}$) O_3 -0.915Pb(Zr_yTi_{1-y}) O_3 시편의 PbZrO₃ 조성과 온도에 따른 유전상수

Fig. 2 Dielectric constant with contents of PbZrO₃ and temperature of the 0.085Ba($La_{1/2}Nb_{1/2}$) O_3 -0.915Pb(Zr_yTi_{1-y}) O_3 specimen.

그림 3은 0.085Ba($La_{1/2}Nb_{1/2}$) O_3 -0.915Pb(Zr_yTi_{1-y}) O_3 시편의 PbZrO₃ 조성과 주파수에 따른 병렬 정전용량(C_p)의 변화를 나타낸 것으로 입방정계인 8.5/70/30 시편을 제외한 조성들에서 굴곡진동(flexure vibration)과 두께진동(thickness vibration)이 관찰되었다. 일반적으로 강유전 세라믹스의 등가회로에서 공진 주파수(f_r) 및 반공진 주파수(f_a)는 손실이 없을 경우 각각

$$f_r = 1 / (2\pi\sqrt{L_1 C_1}) \quad (1)$$

$$f_a = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 / (1/C_1 + 1/C_0)}} \quad (2)$$

로 근사화되며, 병렬 정전용량과 공진, 반공진

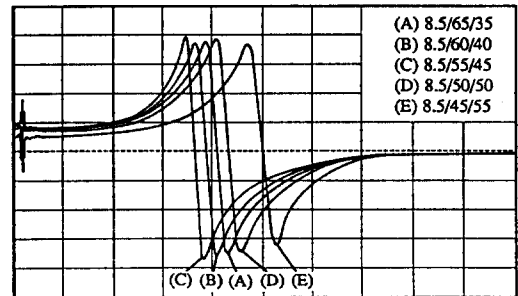
주파수는 반비례 관계를 갖는다⁹⁾. 따라서 두 계공진 및 반공진주파수는 최대 유전상수를 나타내는 8.5/55/45 시편에서 3.55(MHz), 3.90(MHz)의 값을 나타내었으나 병렬 정전용량이 감소함에 따라 고주파대로 이동하여 8.5/45/55 시편의 경우, 각각 4.825(MHz), 5.155(MHz)를 나타내었다.

사진 1은 0.085Ba($La_{1/2}Nb_{1/2}$) O_3 -0.915Pb(Zr_yTi_{1-y}) O_3 시편의 PbZrO₃ 조성에 따른 이력곡선을 나타낸 것이다. 사진에서 관찰할 수 있는 바와 같이 8.5/60/40 시편은 낮은 항전계와 높은 잔류분극을 갖는 전형적인 메모리 특성을 지니고 있으며, 8.5/45/55 시편은 높은 항전계 특성을 나타내고 있다. 또한 PbZrO₃ 조성이 증가함에 따라 slim loop의 이력곡선 특성이 증가함을 관찰할 수 있었다.

사진 2는 8.5/65/35 시편의 온도에 따른 강유전 이력곡선의 변화를 나타낸 것이다.

일반적으로 강유전 세라믹의 거시적인 유전 특성은 개개 결정립들에 의한 공존 현상(cooperative phenomena)의 결과이며, 또한 다중 분역구조(multi-domain structure)에 기인하여 열적 불안정성을 나타나게 된다⁴⁾. 따라서 전 조성 모두 상전이 온도보다 낮은 온도 부근에서 잔류분극이 급격히 감소되는 현상을 관찰할 수 있었으며, 상전이 온도 부근에서는 상유전상의 이력곡선 특성을 나타내었다.

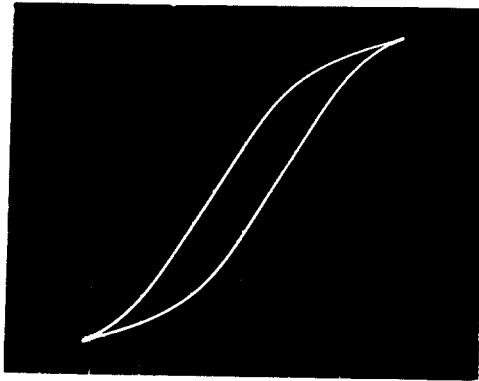
그림 4는 온도에 따른 이력곡선의 변화로부터 계산된 0.085Ba($La_{1/2}Nb_{1/2}$) O_3 -0.915Pb(Zr_yTi_{1-y}) O_3 시편의 PbZrO₃ 조성과 온도에 따른 포화분극의 변화를 나타낸 것으로 전 조성에 걸쳐 온도가 상승함에 따라 포화분극이 감소하는 경향을 나타내었다. 상온에서 전형적인 메모리 특성을 갖는 8.5/60/40 시편의 경우 33.28($\mu C/cm^2$)의 최대값을 나타내었으며, slim loop의 이력곡선 특성을 갖는 8.5/70/30 시편 또한 31.89($\mu C/cm^2$)의 매우 높은 분극값을 나타내었다.



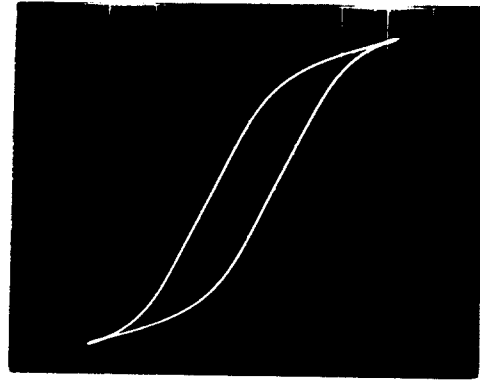
A/DIV 5.000 nF START 100.000 Hz
B/DIV 5.000 STOP 10 000 000.000 Hz
STOP = 10000000.000 Hz

그림 3 0.085Ba($La_{1/2}Nb_{1/2}$) O_3 -0.915Pb(Zr_yTi_{1-y}) O_3 시편의 PbZrO₃ 조성과 주파수에 따른 병렬 정전용량(C_p)

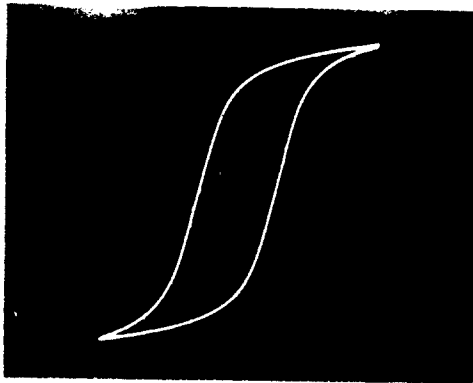
Fig. 3 Parallel capacitance(C_p) with contents of PbZrO₃ and frequency of the 0.085Ba($La_{1/2}Nb_{1/2}$) O_3 -0.915Pb(Zr_yTi_{1-y}) O_3 specimen.



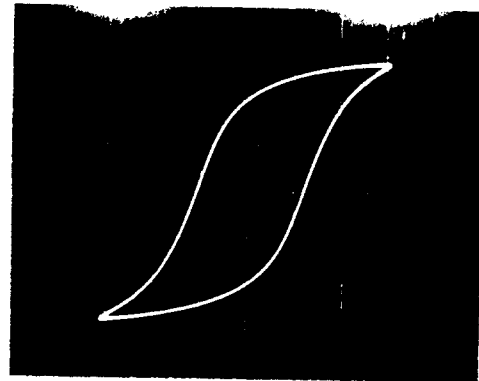
(a) 8.5/70/30



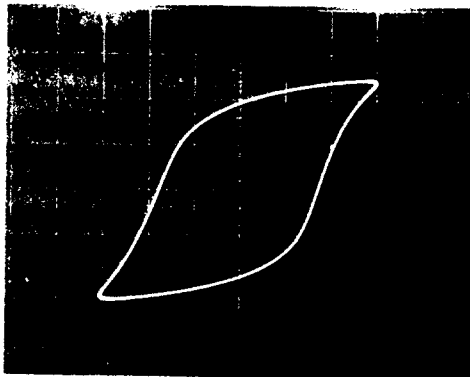
(b) 8.5/65/35



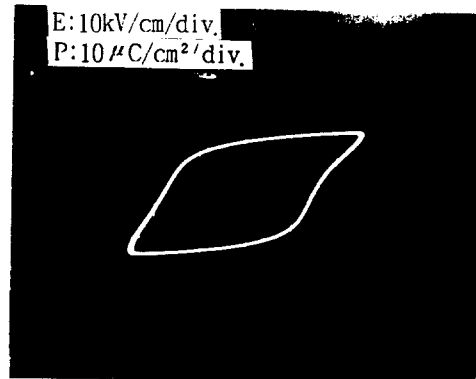
(c) 8.5/60/40



(d) 8.5/55/45



(e) 8.5/50/50

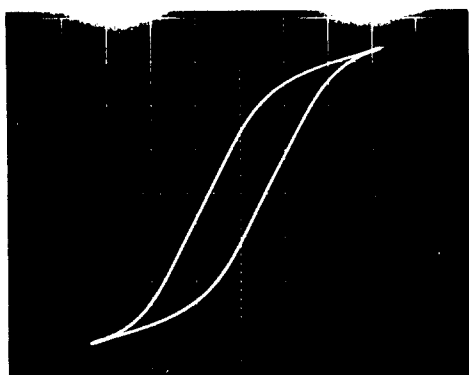


(f) 8.5/45/55

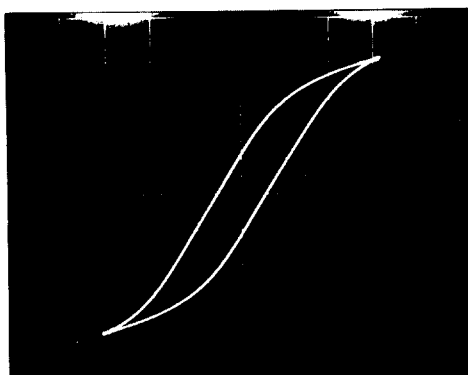
횡축(E) : 5kV/cm/div. 종축(P) : 10 μ C/cm²/div.

사진 1 0.085Ba(La_{1/2}Nb_{1/2})O₃-0.915Pb
(Zr_yTi_{1-y})O₃시편의 PbZrO₃조성에
따른 이력곡선

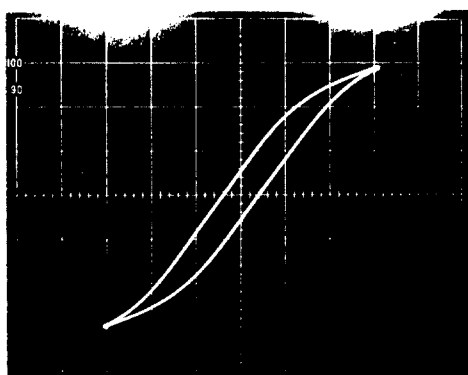
Photo. 1 Hysteresis loops with contents of
the 0.085Ba(La_{1/2}Nb_{1/2})O₃-0.915Pb
(Zr_yTi_{1-y})O₃ specimen.



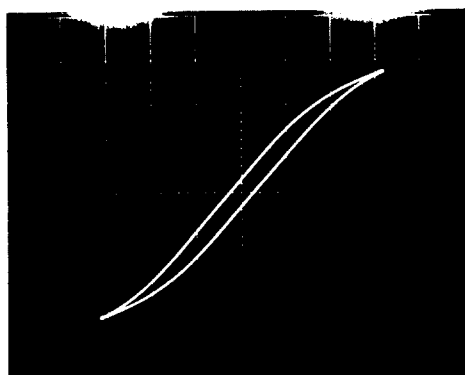
(a) 20[°C]



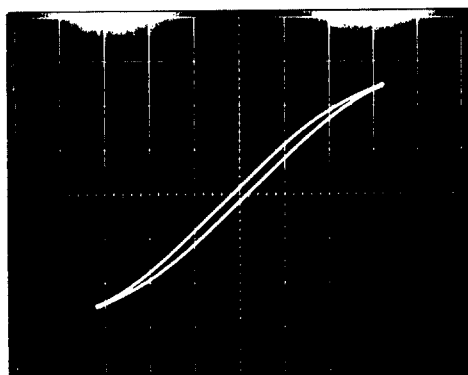
(b) 40[°C]



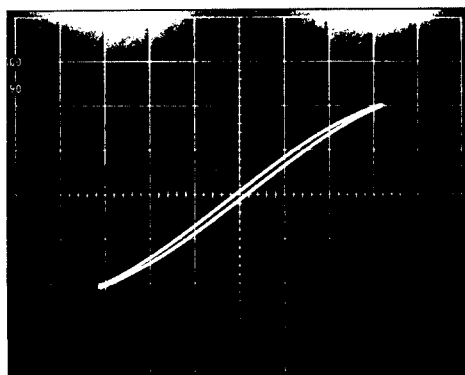
(c) 60[°C]



(d) 80[°C]



(e) 100[°C]



(f) 120[°C]

횡축(E) : 5kV/cm/div. 종축(P) : 10 μ C/cm²/div.

사진 2 8.5/65/35시편의 온도에 따른 이력 곡선

Photo. 2 Hysteresis loops with temperature of the 8.5/65/35 specimen.

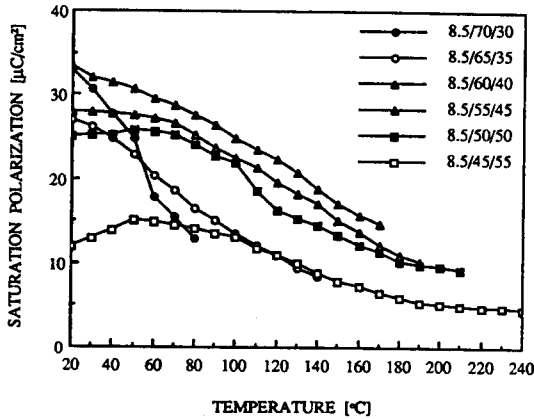


그림 4 0.085Ba(La_{1/2}Nb_{1/2})O₃ - 0.915Pb(Zr_γTi_{1-γ})O₃ 시편의 PbZrO₃ 조성과 온도에 따른 포화분극

Fig. 4 Saturation polarization with contents of PbZrO₃ and temperature of the 0.085Ba(La_{1/2}Nb_{1/2})O₃-0.915Pb(Zr_γTi_{1-γ})O₃ specimen.

이는 8.5/70/30 시편이 능면체정계상과 입방정계상이 공존하는 혼정영역내에 위치하여 불안정한 결정구조를 갖고 있으므로 인하여 인가전계에 의해 쉽게 배향되어 유기분극이 크게 형성되기 때문이며, 이러한 불안정한 결정구조는 열적 불안정성을 증대시켜 온도가 상승함에 따라 포화분극을 감소시키는 원인이 된다.

그림 5는 0.085Ba(La_{1/2}Nb_{1/2})O₃ - 0.915Pb(Zr_γTi_{1-γ})O₃ 시편의 PbZrO₃ 조성과 온도에 따른 잔류분극의 변화를 나타낸 것으로 능면체구조를 갖는 8.5/60/40 시편의 경우 상온에서 22.0(μC/cm²)의 가장 높은 잔류분극값을 나타내었다. 이는 능면체정계 대칭성을 갖는 미세분역

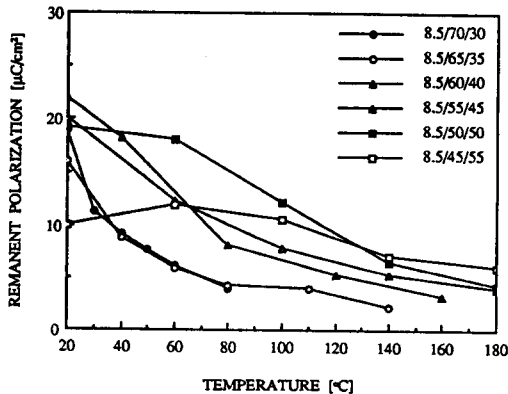


그림 5 0.085Ba(La_{1/2}Nb_{1/2})O₃ - 0.915Pb(Zr_γTi_{1-γ})O₃ 시편의 PbZrO₃ 조성과 온도에 따른 잔류분극

Fig. 5 Remanent polarization with contents of PbZrO₃ and temperature of the 0.085Ba(La_{1/2}Nb_{1/2})O₃-0.915Pb(Zr_γTi_{1-γ})O₃ specimen.

들이 인가 전계에 대해 허용된 8개의 결정학적 방향으로 재배열됨에 따라 분극효율이 증가되어 전계를 제거하여도 안정한 분역배열을 유지하기 때문인 것으로 사료된다.

일반적으로 상온에서 전계 인가에 의해 발생하는 분극현상은 강유전 분역들이 전계방향으로 배향됨에 따른 결과이며, 전계를 제거할 경우 세라믹 내부에서는 다중 분역구조(multi-domain configuration)를 채택하여 인가 전계에 의해 생성된 응력(strain)을 완화시키는 정도에 따라 고유한 잔류분극값을 나타내게 된다. 이때 온도가 상승하게 되면 상유전상으로서의 상전이에 의해 잔류분극은 감소하여 큐리온도에서 0의 값을 나타낸다. 그러나 그림에서 관찰할 수 있는 바와 같이 혼정영역에 근접한 8.5/70/30, 8.5/65/35 시편의 경우, 상전이온도보다 낮은 온도에서 잔류분극이 급격히 감소하는 경향을 나타내었다. 이러한 현상은 결정이 지닌 열적 불안정성, unit cell의 격자자리(A, B-site)에 양이온들의 불균일적인 치환에 따른 조성의 불균일성(compositional heterogeneity) 외에 W.R.Saaneck⁴¹가 보고한 바와 같이 결정입계 부근에 존재하는 비극성 영역들에 의한 유전 장벽효과(dielectric screening effect)에 기인하는 것으로 사료된다.

그림 6은 0.085Ba(La_{1/2}Nb_{1/2})O₃ - 0.915Pb(Zr_γTi_{1-γ})O₃ 시편의 PbZrO₃ 조성과 온도에 따른 항전계의 변화를 나타낸 것으로 포화분극 및 잔류분극과는 달리 뚜렷한 온도 의존성은 관찰되지 않았으나 PbZrO₃ 조성이 감소함에 따라 결정학적 이방성이 증가하여 분극 반전에 필요한 항전계값이 증가하는 경향을 나타내었다.

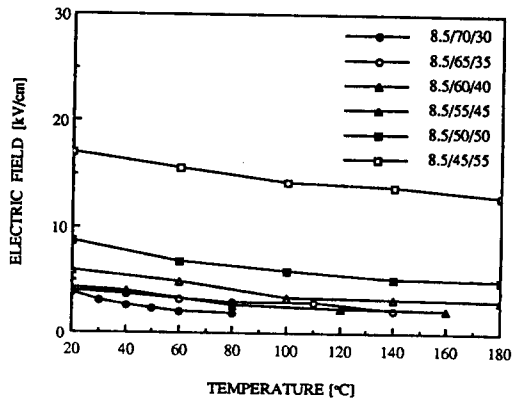


그림 6 0.085Ba(La_{1/2}Nb_{1/2})O₃-0.915Pb(Zr_γTi_{1-γ})O₃ 시편의 PbZrO₃ 조성과 온도에 따른 항전계

Fig. 6 Coercive field with contents of PbZrO₃ and temperature of the 0.085Ba(La_{1/2}Nb_{1/2})O₃-0.915Pb(Zr_γTi_{1-γ})O₃ specimen.

4. 결론

본 연구에서는 투광성 $0.085\text{Ba}(\text{La}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3-0.915\text{Pb}(\text{Zr}_y\text{Ti}_{1-y})\text{O}_3$ ($0.45 \leq y \leq 0.70$) 세라믹을 2단 소성법으로 제작한 후, PbZrO_3 조성과 온도에 따른 구조적, 강유전적 특성을 측정하고 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. PbZrO_3 조성이 감소할수록 격자상수 및 단위 격자 체적은 감소하였으며, 시편의 결정구조는 입방정계에서 능면체정계, 정방정계로 변화되었다.
2. PbZrO_3 조성이 증가함에 따라 확산형 상전이 특성이 관찰되었으며, 상온에서의 유전상수는 조성 변화 상정계 부근에 위치한 8.5/55 45시편에서 1825의 최대값을 나타내었다.
3. PbZrO_3 조성이 증가함에 따라 slim loop의 이력곡선 특성이 증가함을 관찰하였다.
4. 잔류분극은 전 조성에 걸쳐 온도가 증가함에 따라 감소하였으며, 특히 PE-FE상정계 부근에 위치한 조성의 경우 상전이 온도 이하의 온도 범위에서 급격히 감소하는 경향을 나타내었다.

참고 문헌

1) K. Chang et al., "Handbook of Microwave and Optical Components Vol. 4", John Wiley & Sons, pp. 168~326, 1991

2) G. H. Haertling et al., "Electrooptic Ceramics", Applied Solid State Science Vol. 4, Academic Press, pp. 137~233, 1974

3) G. H. Haertling, "Improved Hot-Pressed Electrooptic Ceramics in the (Pb, La) (Zr, Ti) O_3 System", J. Am. Ceram. Soc., Vol. 54, pp. 303~309, 1971

4) W. R. Salaneck, "Temperature-Dependent Ferroelectric Domain Alignment in PLZT Ceramics", J. Appl. Phys., Vol. 43, pp. 4468~4473, 1972

5) N. N. Bolshakova et al., "Processes of Domain Structure Realignment in PLZT Ceramics in a Broad Temperature Range", Ferroelectrics, Vol. 74, pp. 77~79, 1987

6) F. Shemin et al., "A Study on Domain Transition in Relaxor Ferroelectric PLZT Ceramics", Ferroelectrics, Vol. 77, pp. 181~187, 1988

7) 이영희 등, "투광성 $\text{Ba}(\text{La}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3-\text{PbZrO}_3-\text{PbTiO}_3$ 세라믹의 강유전 및 전기광학특성에 관한 연구", 대한전기학회지, Vol. 41, pp. 858~868, 1992

8) IRE Standards and Piezoelectric Crystals, Pro. IRE, Vol. 49, pp. 1161~1169, 1961

9) T. Shiosaki et al., "壓電材料の製造と應用. シ-エムシー", pp. 35~50, 1984

著者紹介



류기원
1962년 2월 4일생. 1985년 광운대 전자재료공학과 졸업. 1987년 동 산업대학원 졸업(석사). 현재 광운대 전자재료공학과 박사과정 수료.



배선기
1950년 4월 9일생. 1976년 2월 숭전대학 전기공학과 졸업. 1979년 2월 연세대학 산업대학원 석사. 1989년 2월 광운대학 전자재료공학과(공박). 1993년 현재 인천대학교 전기공학과 교수.



이성갑
1963년 5월 1일생. 1985년 광운대 공대 전자재료공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전자재료공학과(석사). 1991년 동 대학원 전자재료공학과(공박). 1993년 현재 광운대 공대 전자재료공학과 강사.



이영희
1951년 9월 23일생. 1973년 연세대 공대 전기공학과 졸업. 1975년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1981년 동 대학원 전기공학과(공박). 1985년~86년 Penn. State MRL. 객원 연구원. 현재 광운대 공대 전자재료공학과 교수.