

Ti와 W이 첨가된 SBT 세라믹스의 강유전 특성

천채일[†] · 김정석

호서대학교 신소재공학과

(2004년 3월 2일 접수; 2004년 4월 24일 승인)

Ferroelectric Properties of Ti-Doped and W-Doped SBT Ceramics

Chae Il Cheon[†] and Jeong Seog Kim

Department of Materials Engineering, Hoseo University, Asan 336-795, Korea

(Received March 2, 2004; Accepted April 24, 2004)

초 록

순수한 $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ 세라믹스와 도너와 억셉터가 치환된 $\text{Sr}_{0.99}\text{Bi}_2(\text{Ta}_{0.99}\text{W}_{0.01})_2\text{O}_9$ 와 $\text{SrBi}_2(\text{Ta}_{0.99}\text{Ti}_{0.01})_2\text{O}_{8.99}$ 세라믹스를 제조하고 미세구조, 강유전 P-E 이력특성, 상전이 온도를 조사하였다. 입자크기는 $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ 세라믹스의 강유전 이력곡선에는 영향을 주지 않았다. 도너를 치환한 $\text{Sr}_{0.99}\text{Bi}_2(\text{Ta}_{0.99}\text{W}_{0.01})_2\text{O}_9$ 세라믹스는 순수한 $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ 세라믹스보다 잔류 분극이 크고 더욱 포화된 강유전 P-E 이력곡선을 보였으며, 억셉터가 치환된 $\text{SrBi}_2(\text{Ta}_{0.99}\text{Ti}_{0.01})_2\text{O}_{8.99}$ 세라믹스는 잔류분극이 크게 감소하여 가운데가 잘룩한 모양을 보였다. 도너가 치환된 $\text{Sr}_{0.99}\text{Bi}_2(\text{Ta}_{0.99}\text{W}_{0.01})_2\text{O}_9$ 세라믹스의 강유전 분극이 순수한 $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ 세라믹스보다 더 큰 것은 Sr 공공의 생성에 의하여 분역벽 이동이 용이해졌기 때문이다.

ABSTRACT

Undoped $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$, donor-doped $\text{Sr}_{0.99}\text{Bi}_2(\text{Ta}_{0.99}\text{W}_{0.01})_2\text{O}_9$ and acceptor-doped $\text{SrBi}_2(\text{Ta}_{0.99}\text{Ti}_{0.01})_2\text{O}_{8.99}$ ceramics were prepared and their microstructure, ferroelectric P-E hysteresis and Curie temperature were investigated. Grain size did not influence P-E hysteresis curve in undoped $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ ceramics. Donor-Doped $\text{Sr}_{0.99}\text{Bi}_2(\text{Ta}_{0.99}\text{W}_{0.01})_2\text{O}_9$ ceramics showed more saturated P-E hysteresis curve with larger remanent polarization (P_r) than undoped $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ ceramics while acceptor-doped $\text{SrBi}_2(\text{Ta}_{0.99}\text{Ti}_{0.01})_2\text{O}_{8.99}$ ceramics led to a pinched P-E hysteresis loop. Larger polarization in donor-doped $\text{Sr}_{0.99}\text{Bi}_2(\text{Ta}_{0.99}\text{W}_{0.01})_2\text{O}_9$ ceramics resulted from easier domain wall motion by Sr-vacancies.

Key words : SBT ceramics, Doping, Nonstoichiometry, Ferroelectric property, P-E hysteresis, Polarization

1. 서 론

$\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ (SBT) 박막의 우수한 강유전성으로 인하여 이를 강유전체 메모리에 응용하고자 하는 많은 연구가 최근 진행되고 있다.¹⁾ SBT는 $A2_1am$ 공간군의 사방정(orthorhombic) 결정구조를 가지며, 두 개의 페로브스카이트 층, $(\text{SrTaO}_3)^-$ 사이에 $(\text{Bi}_2\text{O}_2)^{2+}$ 층이 끼어 있는 구조의 Bi 층상 구조 강유전상(Bismuth-Layered Aurivillius Ferroelectrics, BLAF)의 하나이다.²⁾

SBT 박막에 대한 대부분의 보고는 화학양론 조성의 SBT 박막보다는 Sr이 부족하고 Bi가 과잉인 비화학양론 조성의 SBT 박막에 관한 것이며, 이는 비화학양론 SBT 박막이 화학양론 SBT 박막보다 훨씬 우수한 강유전성을 보이기 때문이다.³⁻⁵⁾ 비화학양론 SBT 박막이 우수한 강유

전성을 보이는 원인으로서는 큰 입자 크기, 큰 구조 변형(structural distortion), 분역벽 이동의 용이성 등이 제시되고 있다.⁶⁻⁸⁾ Chen 등은 Bi가 과잉으로 들어간 $\text{SrBi}_{2.3}\text{Ta}_2\text{O}_9$ 박막이 화학양론 $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ 박막보다 입자 크기가 더 크며, 이러한 입자크기의 차이가 강유전성의 차이를 야기하였다고 보고한 바 있다.⁶⁾ Shimakawa 등은 화학양론 $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ 분말과 비화학양론 $\text{Sr}_{0.8}\text{Bi}_{2.2}\text{Ta}_2\text{O}_9$ 분말에 대한 중성자 회절 분석을 통하여 비화학양론 조성의 경우 과잉으로 첨가한 Bi의 일부가 Sr 자리에 치환되어 있으며, 전하 중성을 유지하기 위하여 Sr 자리에 공공(vacancies)이 함께 발생한다고 보고한 바 있다.⁷⁾ 또한 상온의 강유전 SBT는 각 이온의 위치가 대칭적 고온 구조인 정방정($14/mmm$) 구조의 이온 위치에서 변위되어 구조 변형(structural distortion)이 발생하므로 a축 방향으로 자발분극이 생기며, 비화학양론 SBT의 구조 변형이 화학양론 SBT보다 더 크기 때문에 자발 분극(spontaneous polarization, P_s)이 크다고 주장하였다. 한편, Cheon 등은 $\text{Sr}_{1-x}\text{Bi}_{2+2/3x}\text{Ta}_2\text{O}_9$ ($x=0, 0.02, 0.3, 0.45$) 세라믹스를 제조하고 강유전 이

[†]Corresponding author : Chae Il Cheon

E-mail : cicheon@office.hoseo.ac.kr

Tel : +82-41-485-5207 Fax : +82-41-548-3502

력곡선을 측정하였다. 또한, 결정구조 분석으로부터 결정된 원자 위치를 기초로 자발분극(P_s)을 계산하여 측정된 잔류분극과 비교하였다.^{8,9)} 특히, $Sr_{0.98}Bi_{2.01}Ta_2O_9$ 세라믹스는 구조 변형이 화학양론 조성과 거의 같지만, P-E 곡선에서 측정된 잔류분극은 화학양론 SBT 세라믹스보다 훨씬 큰 사실을 관찰하고, 비화학양론 SBT가 화학양론 SBT 보다 분극(polarization)이 큰 이유는 격자 변형이 크기 때문이 아니라 Sr 공공의 생성에 의하여 분역 벽의 이동이 훨씬 용이해졌기 때문이라고 보고한 바 있다.^{8,9)} PZT 세라믹스에서 Pb 자리에 공공이 있는 경우 분역벽의 이동이 용이하여 잔류분극이 크다는 것은 잘 알려져 있는 사실이며, Bi 층상 페로브스카이트 결정구조(Bi-layered perovskite structure)를 가진 SBT의 경우도 동일하게 해석할 수 있을 것이다.

한편, SBT의 화학양론 비의 변화에 따른 강유전 특성의 변화에 대한 연구는 많이 보고되어 있으나, 첨가제에 의한 특성 변화에 관한 보고는 많지 않다. PZT 세라믹스의 경우에는 여러 가지 첨가제에 의한 강유전 및 압전 특성의 향상에 관한 많은 연구들이 보고되어 있다. PZT 세라믹스에서 La^{3+} , Nb^{5+} 등 도너(donor) 첨가제는 유전상수, 압전상수, 강유전 분극 등을 증가시키고, 기계적 품질계수, 탄성계수, 항전계 등은 감소시키며, Fe^{3+} , Al^{3+} 등 억셉터(acceptor) 첨가제는 반대 효과가 있다고 알려져 있다.¹⁰⁾ SBT 세라믹스에서는 V, W, La, Y 등의 치환에 의한 상전이 온도와 전기전도도의 변화에 대한 보고가 있었으나, 억셉터나 도너 첨가에 의한 강유전 이력특성의 변화에 대한 보고는 없었다.¹¹⁻¹³⁾

본 연구에서는 첫째, 소량의 격자 결함이 SBT 세라믹스의 강유전 이력곡선에 미치는 영향을 조사하여 비화학양론 SBT가 큰 강유전 분극을 갖는 원인을 규명하고자 한다. 둘째, SBT 세라믹스에서의 도너와 억셉터의 첨가가 PZT 세라믹스에서와 같이 강유전성에 영향을 주는지를 알아 보고자 한다. 이를 위하여 1 atomic %의 도너(W)와 억셉터(Ti)를 SBT에 첨가하여, 구조 변형을 크게 유발하지 않으면서 각각 Sr 자리와 O 자리에 공공(vacancy)을 발생시키는 $Sr_{0.99}Bi_2(Ta_{0.99}W_{0.01})_2O_9$ (SBTW)와 $SrBi_2(Ta_{0.99}Ti_{0.01})_2O_{8.99}$ (SBTT) 세라믹스를 제조하였으며, 또한 undoped $SrBi_2Ta_2O_9$ (SBT) 세라믹스를 함께 제조하여 강유전 특성을 비교하였다.

2. 실험방법

일반적인 고상반응법에 의하여 SBT, SBTW, SBTT 세라믹스를 제조하였다. $SrCO_3$, Bi_2O_3 , Ta_2O_5 , WO_3 , TiO_2 를 각각 물 비에 맞도록 칭량하여 플라스틱 통에 넣고, 지르코니아 볼과 증류수와 함께 24시간동안 볼 밀링하여 혼합하였다. 혼합된 분말을 건조한 후 $1000^\circ C$ 에서 3시간동

안 열처리하여 하소하였다. 하소된 분말을 X-선 회절 분석하여 Bi 층상 구조 강유전상(BLAF)이 합성되었음을 확인한 후 다시 플라스틱 통에 결합제(1 wt% PVA)와 함께 볼 밀링하였다. 이를 건조하여 100메쉬 체를 이용하여 조립화한 후 1.2 ton/cm^2 의 압력을 인가하여 직경 9 mm의 원판형으로 성형하였다. 성형된 시편내의 결합제를 휘발시킨 후 $1150\sim 1300^\circ C$ 에서 2시간 유지하여 소결하였으며, Bi의 휘발을 억제하기 위하여 Bi_2O_3 분위기 분말을 사용하였다. 소결 시편의 전기적 특성을 측정하기 위하여 양면에 은 페이스트를 도포한 후 $650^\circ C$ 에서 10분동안 열처리하여 은 전극을 형성시켰다. 하소 분말과 소결 시편의 상형성은 X-선 회절기기(Shimadzu, XD-D1)을 이용하여 분석하였으며, 소결 시편의 미세구조는 주사전자현미경(RJ LEE Instrument, PSM-75)을 이용하여 조사하였다. 유전특성은 임피던스 어널라이저(HP 4192A)를 이용하여 측정하였으며, 강유전 이력 특성은 강유전 측정기(Radiant Technologies, Inc., RT66A)와 고전압 증폭기(Radiant Technologies, Inc., RT6000 HVA)를 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

먼저, 입자크기가 SBT 세라믹스의 강유전 특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 $1150, 1200, 1250, 1300^\circ C$ 에서 각각 소결한 시편을 비교하였다. 소결 후 선 수축률은 13.6~13.9%로 큰 차이를 보이지 않았으며, X-선 회절 분석으로부터 모두 BLAF 상으로 결정화되었고 제 2상은 관찰되지 않았다. Fig. 1은 소결 시편의 표면 미세구조이

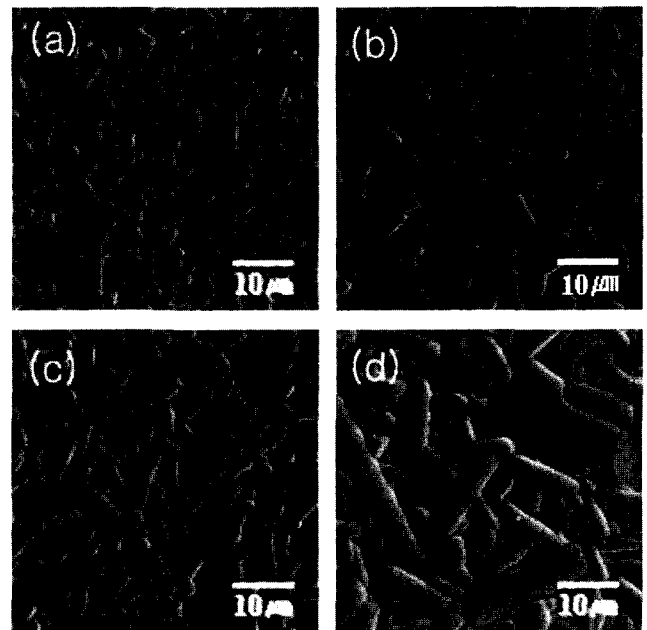


Fig. 1. Surface morphologies of undoped SBT ceramics sintered at (a) $1150^\circ C$, (b) $1200^\circ C$, (c) $1250^\circ C$, and (d) $1300^\circ C$.

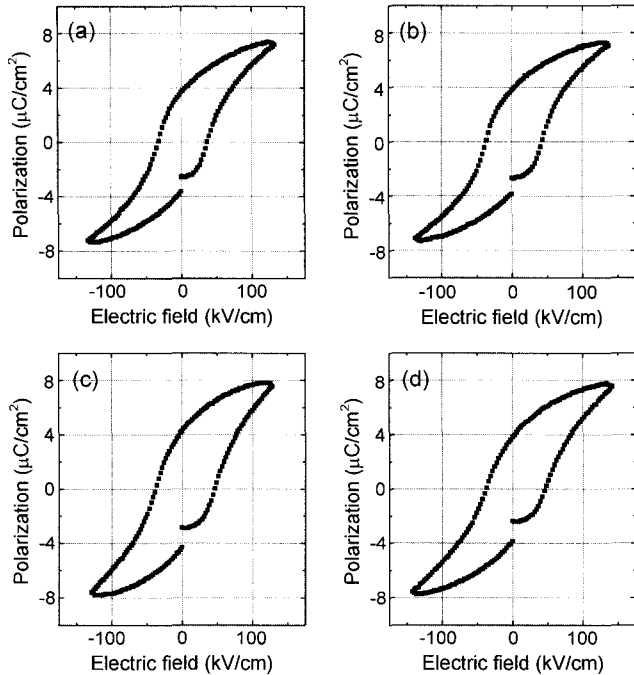


Fig. 2. Ferroelectric P-E hysteresis curves of undoped SBT ceramics sintered at (a) 1150°C, (b) 1200°C, (c) 1250°C, and (d) 1300°C.

며, 소결 온도가 증가함에 따라 입자 크기가 증가하였음을 알 수 있다. 1150~1300°C의 온도에서 소결한 시편의 P-E 이력 곡선을 Fig. 2에 나타내었으며, 소결 온도에 따른 이력 곡선의 변화는 거의 없는 것을 알 수 있다. 이로부터 SBT 세라믹스에서 입자크기는 강유전 이력 특성에 영향을 주지 않음을 알 수 있다. Chen 등은 SBT 박막에서 과잉의 Bi가 포함된 조성이 화학양론 조성보다 잘 발달된 강유전 이력곡선을 관찰하고 이를 입자크기의 차이로 설명한 바 있다.⁶⁾ 이 경우는 입자크기가 수백 나노미터 이하였으며, Fig. 1에서 볼 수 있는 SBT 세라믹스의 입자크기는 수 μm 이상이다. 그러므로 입자 크기가 서브마이크로미터인 SBT 박막에서는 입자크기가 클수록 강유전 분극이 증가하지만, 입자크기가 수 μm 이상인 SBT 세라믹스에서는 입자크기가 강유전 이력 곡선에 영향을 주지 않는다.

소량의 격자결함이 SBT의 강유전 이력곡선에 미치는 영향을 조사하기 위하여 SBT의 Ta 자리에 각각 1 atomic %의 텅스텐(W)과 티타늄(Ti)이 치환된 세라믹스를 제조하였다. Fig. 3은 1250°C에서 소결된 SBT, SBTW, SBTT 세라믹스의 X-선 회절 패턴이다. 모든 시편에서 BLAF 상 이외의 제 2상은 관찰되지 않았으며, 이로부터 첨가된 W과 Ti가 모두 SBT 격자 내에 치환되었음을 확인하였다. Fig. 4는 1250°C에서 소결한 SBT, SBTW, SBTT 세라믹스의 유전상수의 온도 의존성을 보여 주고 있다. 모든 시편에서 전형적인 강유전-상유전 상전이 곡선을 보이고 있

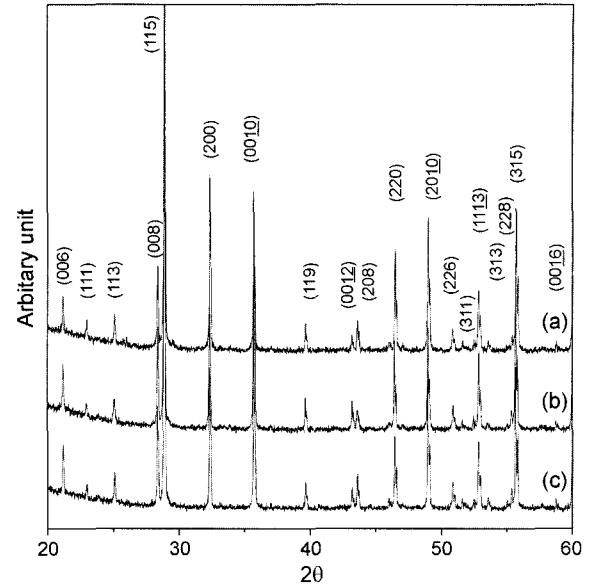


Fig. 3. X-ray diffraction patterns of (a) SBT, (b) SBTW, and (c) SBTT ceramics sintered at 1250°C.

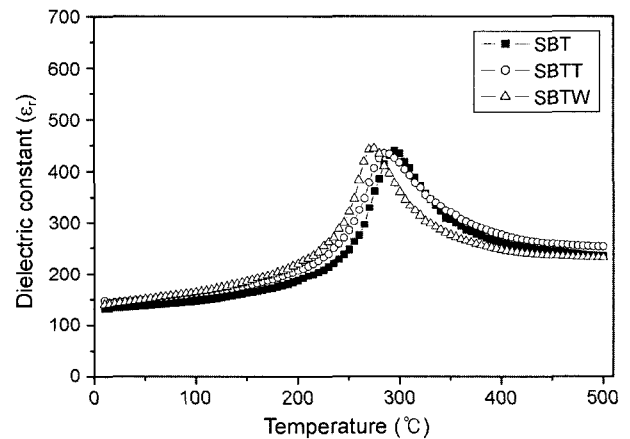


Fig. 4. Temperature dependence of a dielectric constant in (a) SBT, (b) SBTW, and (c) SBTT ceramics sintered at 1250°C.

으며, 유전상수가 최대 값을 보이는 상전이 온도는 순수한 SBT 세라믹스가 295°C, SBTT 세라믹스는 285°C, 그리고 SBTW 세라믹스는 275°C로, Ti와 W이 치환된 SBTT와 SBTW 세라믹스의 상전이 온도가 SBT 세라믹스보다 각각 10°C와 20°C가 낮았다. 한편, 비화학양론 조성인 $\text{Sr}_{0.8}\text{Bi}_{2.2}\text{Ta}_2\text{O}_9$ 이나 $\text{Sr}_{0.7}\text{Bi}_{2.2}\text{Ta}_2\text{O}_9$ 세라믹스의 상전이 온도는 순수한 SBT 세라믹스보다 각각 100°C와 138°C가 더 높다.^{7,9)} Shimakawa 등은 대칭적인 고온 상으로부터의 구조 변형(structural distortion)이 클수록 강유전 상전이 온도가 높고, 비화학양론 조성인 $\text{Sr}_{0.8}\text{Bi}_{2.2}\text{Ta}_2\text{O}_9$ 의 구조 변형이 화학양론 조성의 SBT 보다 크기 때문에 강유전 상전이 온도가 훨씬 더 높다고 보고한 바 있다.⁷⁾ 본 연구에서는 SBT에 W과 Ti이 치환된 SBTT와 SBTW 세라믹스

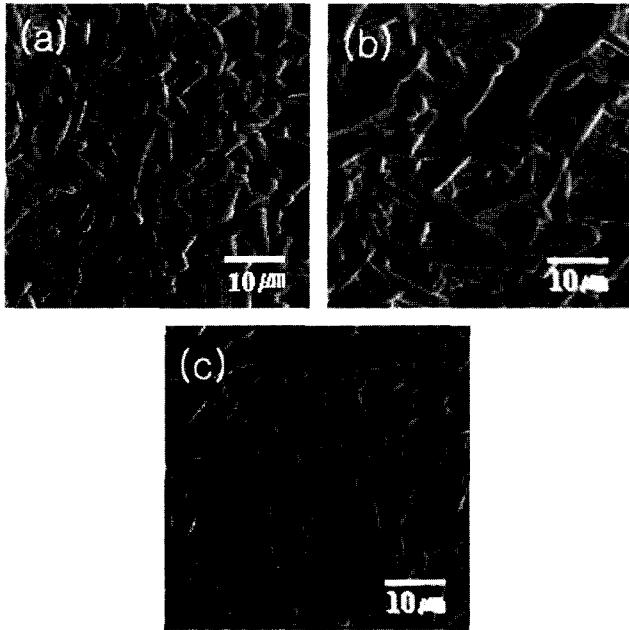


Fig. 5. Surface morphologies of (a) SBT, (b) SBTW, and (c) SBTT ceramics sintered at 1250°C.

모두 상전이 온도가 감소하였으며, SBT의 상전이 온도와 의 차이도 일반적인 비화학양론 조성인 $\text{Sr}_{0.8}\text{Bi}_{2.2}\text{Ta}_2\text{O}_9$ 또는 $\text{Sr}_{0.7}\text{Bi}_{2.2}\text{Ta}_2\text{O}_9$ 보다 훨씬 작는데 이는 치환량이 1 atomic %의 소량이었기 때문에 구조 변형의 차이가 훨씬 작았기 때문이라고 생각된다. 이로부터 비화학양론 조성인 $\text{Sr}_{0.8}\text{Bi}_{2.2}\text{Ta}_2\text{O}_9$ 또는 $\text{Sr}_{0.7}\text{Bi}_{2.2}\text{Ta}_2\text{O}_9$ 세라믹스와 비교하여 본 연구에서 제조한 SBTT와 SBTW 세라믹스는 화학양론 SBT 세라믹스와의 이온 변위, 구조 변형, 그리고 자발분극의 차이가 훨씬 작을 것으로 판단된다. 한편 1250°C에서 소결한 시편의 표면을 주사전자현미경으로 관찰하였으며, 이를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5로부터 순수한 SBT 세라믹스에 도너인 W을 치환하면 입자크기가 증가하며, 억셉터인 Ti를 치환하면 입자 크기가 감소함을 알 수 있다. 하지만, 세 시편 모두 입자크기는 수 μm 이상으로 앞에서 설명한 바와 같이 이러한 입자크기의 차이는 강유전 이력곡선에 영향을 주지 않을 것으로 생각된다.

Fig. 6은 1250°C에서 소결한 SBT, SBTW, SBTT 세라믹스의 강유전 이력곡선이다. 도너인 W을 치환한 SBTW 세라믹스의 경우 순수한 SBT 세라믹스보다 잔류분극은 증가하였고 항전계는 거의 변화가 없어, 더욱 포화된 강유전 이력곡선을 보이고 있다. 하지만, 억셉터인 Ti를 치환한 SBTT 세라믹스는 순수한 SBT 세라믹스의 이력곡선보다 잔류분극이 훨씬 감소되어 가운데가 잘록한 모양을 보이고 있다. PZT 세라믹스에서 도너(donor) 첨가제는 강유전 분극을 증가시키고, 억셉터(acceptor) 첨가제는 반대로 강유전 분극이 감소된다고 알려져 있으며, Fig. 6에서 볼 수 있는 것처럼 SBT 세라믹스에 도너와 억셉터를

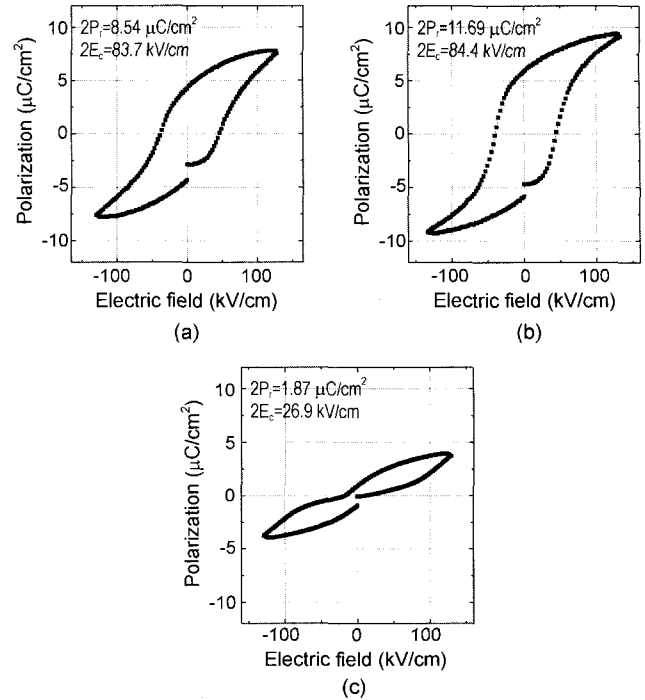


Fig. 6. Ferroelectric P-E hysteresis curves of (a) SBT, (b) SBTW, and (c) SBTT ceramics sintered at 1250°C.

첨가한 경우에도 PZT 세라믹스와 동일한 변화를 보였다. 이로부터 PZT 세라믹스와 유사하게 SBT 세라믹스에 도너를 첨가하면 $(\text{SrTaO}_3)^-$ 페로브스카이트 층 내의 Sr 자리에 공공이 발생하여 분역 벽의 이동이 용이하게 되므로 잔류 분극이 증가하고, 억셉터를 첨가하면 산소 공공이 발생하여 분역 벽의 이동을 어렵게 하여 잔류 분극이 감소한다고 생각된다.

4. 결 론

SBT 세라믹스를 1150, 1200, 1250, 1300°C에서 각각 소결하여 입자크기가 강유전 이력특성에 미치는 영향을 조사하였다. 소결 온도가 증가함에 따라 입자 크기가 증가하였으나, 소결 온도에 따른 이력 곡선의 변화는 거의 없었다. 이로부터 입자크기가 수 μm 이상인 SBT 세라믹스에서는 입자크기가 강유전 이력 곡선에 영향을 주지 않음을 알 수 있었다.

소량의 도너와 억셉터 첨가가 SBT 세라믹스의 강유전 이력특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 순수한 $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ 세라믹스와 Ta 자리에 W과 Ti가 각각 1 atomic % 치환된 $\text{Sr}_{0.99}\text{Bi}_2(\text{Ta}_{0.99}\text{W}_{0.01})_2\text{O}_9$ 와 $\text{SrBi}_2(\text{Ta}_{0.99}\text{Ti}_{0.01})_2\text{O}_{8.99}$ 세라믹스를 제조하였다. 구조 변형을 크게 일으키지 않도록 소량(1 atomic %)의 도너가 치환된 $\text{Sr}_{0.99}\text{Bi}_2(\text{Ta}_{0.99}\text{W}_{0.01})_2\text{O}_9$ 세라믹스가 순수한 $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ 세라믹스보다 자발분극이 더 크고 더욱 포화된 P-E 이력곡선을 보였으며, 이는 Sr

공공의 생성에 의하여 분역 벽의 이동이 용이해졌기 때문이다. 한편, 엑셉터가 치환된 세라믹스는 잔류분극이 크게 감소하여 가운데가 잘룩한 모양을 보였다.

REFERENCES

1. Y. Ito, M. Ushikubo, S. Yokoyama, H. Matsunaga, T. Atsuki, T. Yonezawa, and K. Ogi, "New Low Temperature Processing of Sol-Gel $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ Thin Films," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **35** 4925 (1996).
2. G. A. Smolenskii, V. A. Isupov, and A. I. Agranovskaya, "Ferroelectric of the Oxygen-Octahedral Type with Layered Structure," *Soviet Physics-Solid State*, **3** 651-55 (1961).
3. T. Atsuki, N. Soyama, T. Yonezawa, and K. Ogi, "Preparation of Bi-Based Ferroelectric Thin Films by Sol-Gel Method," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **34** 5096-99 (1995).
4. H. Watanabe, T. Mihara, H. Yoshimori, and A. P. Araujo, "Preparation of Ferroelectric Thin Films of Bismuth Layer Structured Compositions," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **34** 5240-44 (1995).
5. C. I. Cheon and J. S. Kim, "Crystal Structure, Microstructure, and Electrical Properties in Nonstoichiometric SBT Thin Films," *Integrated Ferroelectrics*, **21** [1-4] 229-40 (1998).
6. T. C. Chen, T. Li, X. Zhang, and S. B. Desu, "Structure Development Studies of $\text{SrBi}_2(\text{Ta}_{1-x}\text{Nb}_x)_2\text{O}_9$ Thin Films," *J. Mater. Res.*, **12** [8] 2165-74 (1997).
7. Y. Shimakawa, Y. Kubo, Y. Nakagawa, T. Kamiyama, and H. Asano, "Crystal Structures and Ferroelectric Properties of $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ and $\text{Sr}_{0.8}\text{Bi}_{2.2}\text{Ta}_2\text{O}_9$," *Appl. Phys. Lett.*, **74** [13] 1904-96 (1999).
8. C. I. Cheon, B. Y. Lee, and J. S. Kim, "Ferroelectric Properties of Nonstoichiometric $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ Ceramics," *Ferroelectrics*, **271** 81-6 (2002).
9. J. S. Kim, C. I. Cheon, H. S. Shim, and C. H. Lee, "Crystal Structures and Phase Transitions of $\text{Sr}_{1\pm x}\text{Bi}_{2\pm y}\text{Ta}_2\text{O}_9$ Ceramics," *J. Euro. Ceram. Soc.*, **21** 1295-98 (2001).
10. B. Jaffe, W. R. Cook, Jr., and H. Jaffe, "Piezoelectric Ceramics," pp. 154-59, Academic Press, New York, 1971.
11. Y. Wu, M. J. Forbess, S. Seraji, S. J. Limmer, T. P. Chou, and G. Cao, "Impedance Study of $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ and $\text{SrBi}_2(\text{Ta}_{0.9}\text{V}_{0.1})_2\text{O}_9$ Ferroelectrics," *Mater. Sci. Eng. B*, **86** 70-8 (2001).
12. Y. Wu, S. J. Limmer, T. P. Chou, C. Nguyen, and G. Cao, "Influence of Tungsten Doping on Dielectric Properties of Strontium Bismuth Niobate Ferroelectric Ceramics," *J. Mater. Sci. Lett.*, **21** 947-49 (2002).
13. J. S. Kim, T. K. Song, M. H. Kim, and S. S. Kim, "AC Conductivity and Dielectric Relaxation of Ion Doped Ferroelectric $\text{SrBi}_2\text{Nb}_2\text{O}_9$ Ceramics," *Ferroelectrics*, **268** 345-50 (2002).