

Bridgeman 성장 [011] 분극 Mn:PIN-PMN-PT 압전단결정의 물성 분포 연구

임수현¹, 제 업¹, 조요한¹, 이상구², 서희선¹ 

¹ 국방과학연구소 해양기술연구원

² (주)아이블포토닉스

A Study on Property Distribution of [011] Poled Mn:PIN-PMN-PT Single Crystals Grown by Bridgeman Method

Soohyun Lim¹, Yub Je¹, Yohan Cho¹, Sang-Goo Lee², and Hee-Seon Seo¹

¹ Maritime Technology Research Institute, Agency for Defense Development, Changwon 51504, Korea

² IBULE PHOTONICS, Incheon 21999, Korea

(Received January 15, 2024; Revised February 14, 2024; Accepted March 6, 2024)

Abstract: Mn-doped $\text{Pb}(\text{In}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3\text{-Pb}(\text{Mg}_{2/3}\text{Nb}_{1/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ (Mn:PIN-PMN-PT) single crystals, which exhibit improved phase transition temperatures and coercive field properties compared to $\text{Pb}(\text{In}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3\text{-Pb}(\text{Mg}_{2/3}\text{Nb}_{1/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ (PIN-PMN-PT) single crystals, are expected to be utilized in high-power acoustic transducers. Bridgeman method, growing single crystals along the axial direction from melt, is most widely used method for single crystal growth with large size and high quality. However, single crystal boules grown by the Bridgeman method demonstrate a PT compositional variation, giving rise a distribution of crystal structure and material properties along the growing axis. To employ piezoelectric single crystals grown by the Bridgeman method for acoustic transducers, it is essential to investigate their overall property distribution. In this study, the compositional distribution and property variation of Mn:PIN-PMN-PT single crystals grown by the Bridgeman method was investigated. Measured compositional distribution of PT was from 29% to 32.5% in the Rhombohedral crystal region of the boule. Two types of specimen, [011]-poled Mn:PIN-PMN-29PT and Mn:PIN-PMN-32PT single crystals, were fabricated and tested to obtain full property variation at both ends of the Rhombohedral crystal region. The properties related to the 32 directional vibration mode and the properties related to high-power driving were measured to confirm the overall distribution of properties by composition.

Keywords: Mn:PIN-PMN-PT, Single crystals, Bridgeman method, Property distribution

1. 서론

강유전체 압전단결정 소재는 기존에 널리 사용되고 있는 $\text{Pb}(\text{ZrTi})\text{O}_3$ (PZT) 압전세라믹 소재 대비 우수한 압전 특성을 보유하여 군수용 수중 음향 센서나 산업용 초음파 센서에 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

✉ Hee-Seon Seo; hsseo@add.re.kr

Copyright ©2024 KIEEME. All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

$\text{Pb}(\text{Mg}_{2/3}\text{Nb}_{1/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ (PMN-PT), $\text{Pb}(\text{In}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3\text{-Pb}(\text{Mg}_{2/3}\text{Nb}_{1/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ (PIN-PMN-PT)로 대표되는 PT 계열의 압전단결정 소재는 높은 압전상수($d_{33} \geq 1,500$ pC/N)와 전기-기계 결합계수($k_{33} \geq 0.90$)를 가진다. 이러한 특성의 압전단결정 소재를 수중 음향 센서에 활용할 경우, 넓은 주파수 대역폭 및 고출력/고감도 음향 송수신 특성 확보가 가능하고, 낮은 강성계수를 활용하여 수중 음향 센서 소형화 및 경량화 설계가 가능하다 [1-4].

PMN-PT로 대표되는 1세대 압전단결정은 높은 압전상수를 가지지만 압전 성능이 저하되는 온도인 Rhombohedral-Orthorhombic 상전이 온도(T_{RT} : $\sim 80^\circ\text{C}$) 및 분극임계전압(E_c : ~ 2.5 kV/cm)이 낮아 구동 온도 및 구동 전압의 한계가 존재했다. 이후 개발된 PIN-PMN-PT 및 PZN-PT와 같은 2세대 압전단결정에서 상전이 온도(T_{RT} : $\sim 120^\circ\text{C}$)와 분극 임계 전압(E_c : ~ 5.0 kV/cm) 특성이 개선되어 능동 음향 센서로의 적용 가능성이 증가되었으며, 최근에는 2세대 압전단결정 대비 상전이 온도(T_{RT} : $\sim 130^\circ\text{C}$), 구동 전압 한계(E_c : ~ 6.0 kV/cm) 및 발열 특성(Q_m : ~ 800)이 개선된 3세대 압전단결정 소재(Mn:PIN-PMN-PT)가 개발되어 고출력 구동이 요구되는 음향센서로의 적용이 기대되고 있다 [3-5].

압전단결정 성장 방법 중 하나인 브릿지만 성장 방식 (bridgeman growing method)은 용융법을 기반으로 원하는 조성의 산화물을 고온고압하에서 용융하여 수직 방향으로 성장시킨다. 이러한 용융법 기반의 브릿지만 방식은 압전단결정을 비교적 큰 크기 및 좋은 품질로 성장 가능하고 대량 생산에 유리하여 가장 널리 활용되고 있는 압전단결정 성장 방법 중 하나이다. 하지만 브릿지만 방식은 잉곳의 아랫부분부터 결정화되어 성장되므로 Ti의 편석 계수(segregation coefficient)에 의한 영향으로 성장된 잉곳 위치에 따라 서로 다른 PT 조성을 가지게 된다. 일반적으로 브릿지만 방식으로 성장된 압전단결정은 잉곳의 성장 방향으로 약 27%에서 36%의 PT 조성 분포를 가지며 이로 인해 Rhombohedral-Orthorhombic-Tetragonal로 변화하는 상이한 결정 구조를 갖는다 [6-8]. 압전 특성과 유전 특성이 비교적 우수한 Rhombohedral 결정 구조 영역이 주로 압전 소재로 활용되는데, Rhombohedral 결정 구조 영역에서도 PT 조성 분포로 인한 물성 분포가 존재한다 [9,10]. 따라서 브릿지만 방식으로 성장된 압전단결정의 효과적인 음향센서 적용을 위해서는 압전단결정의 성장 위치에 따른 정확한 물성 분포 범위를 파악하여 설계 시 고려하는 것이 필수적이다.

본 논문에서는 브릿지만 방식으로 성장된 Mn:PIN-PMN-PT 잉곳의 성장 위치별 조성 분포 및 물성 분포를 확

인하였다. 브릿지만 방식으로 성장 시 성장 영역이 넓고, 우수한 압전 특성과 안정적인 분포를 가지는 Rhombohedral 영역에서 시편을 제작하여 성장 위치별 조성 분포를 확인하였고, 이를 바탕으로 고출력 구동 특성이 뛰어난 [011] 분극 압전단결정의 조성별 물성 분포를 확인하였다. [011] 방향으로 분극된 Mn:PIN-PMN-PT의 경우, 32방향의 높은 압전상수를 보유하여 32 진동모드 가짐에 적합하고 구동 전계의 방향(3)과 변형 방향(2)이 달라 온도 및 압력에 강인하며 고출력 구동에 유리하다 [11,12]. Mn:PIN-PMN-PT 잉곳의 성장 위치에 따른 조성분포 확인을 위해 위치별로 제작된 웨이퍼 시편의 electron probe micro-analysis (EPMA)를 측정하여 PT 조성 분포와 유전 특성 분포를 확인하였다. 해당 영역에서 PT 조성이 최소로 함유된 Mn:PIN-PMN-29PT와 최대로 함유된 Mn:PIN-PMN-32PT의 두 가지 조성의 시편을 제작하여 [011] 분극 압전단결정의 32 진동모드 관련 물성과 고출력 구동 관련 물성의 조성별 분포를 확인하였다. 32 진동모드 관련물성으로 전기기계결합계수(k_{32}), 2방향의 탄성계수(S_{22}^E), 압전상수(d_{32}) 및 기계적 품질계수(Q_m)를 측정하였고, 고출력 구동 관련 물성으로 상전이 온도(T_{RO} , T_{OT} , T_c), 분극임계전압(E_c) 및 기계적 강도를 측정하였다.

2. 성장 위치별 조성 측정

브릿지만 방식을 사용하여 [011] 축 방향으로 성장된 Mn:PIN-PMN-PT 압전단결정 소재의 잉곳은 그림 1(a)와 같다. 성장된 압전단결정 잉곳은 성장 위치에 따라 Rhombohedral, Orthorhombic 및 Tetragonal의 결정 구조 분포가 존재하는데, 압전소재로 활용 가능한 Rhombohedral 결정 구조를 가지는 잉곳 범위($\sim 5\sim 35$ mm)에서 조성 및 유전 특성 분포를 측정하였다. 그림 1(b) 및 (c)는 조성 측정 시편의 설계 및 제작 형상이다. 저주파 정전용량의 정확한 측정을 위해 시편의 제원은 전극이 넓고 두께가 얇은 $5 \times 5 \times 1$ (X×Y×Z) mm로 설계하였다. 물성 측정 시편의 전극은 Au 박막을 증착하여 사용하였고, [011] 방향으로 시편을 분극하였다.

그림 2는 잉곳 성장 위치에 따라 제작된 조성 측정 시편의 PT 조성 성분을 EPMA 방식으로 측정한 결과이다. 측정 결과로부터 압전단결정의 성장 위치가 증가함에 따라 PT 조성 분포가 29~32.5%로 선형적으로 증가하는 것을 확인하였고, PMN의 조성 분포는 40~37%, PIN 조성은 31%, Mn의 조성분포는 1~5%로 확인되었다.

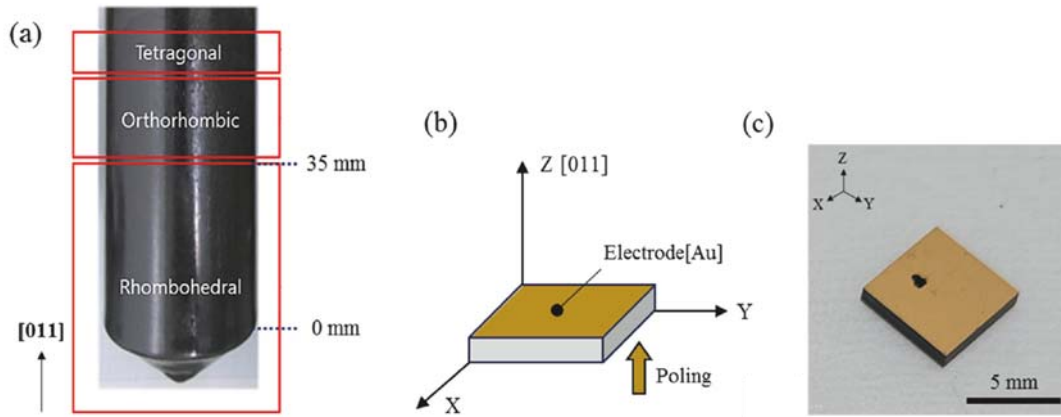


Fig. 1. (a) Mn:PIN-PMN-PT single crystal boules grown by Bridgman method, (b) schematic drawing of the sample used for PT composition characterization, and (c) the sample used for PT composition characterization.

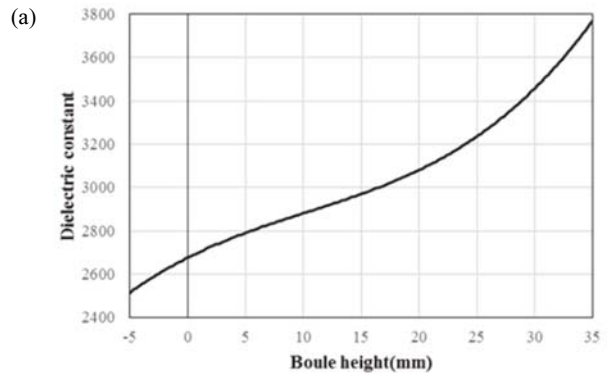
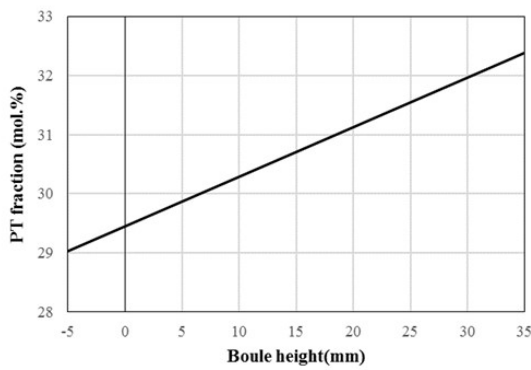


Fig. 2. The mole fraction of the single crystal samples along the boule height.

그림 3은 제작된 조성 측정 시편의 유전상수(ϵ_{33}^T) 및 유전 손실($\tan\delta$)을 확인한 결과이다. PT 조성 분포로 인해 성장 위치에 따라 유전 특성이 증가하는 것을 확인할 수 있고, 유전상수(ϵ_{33}^T) 분포 및 유전 손실($\tan\delta$) 분포는 2,500~3,800 및 0.1~0.21%로 측정되었다. 유전상수 측정 결과, 잉곳의 30~35 mm 영역에서 유전상수의 급격한 증가를 확인할 수 있는데, 이는 해당 영역이 Rhombohedral 결정 구조에서 Orthorhombic 결정 구조로 변하는 상전이 영역에 해당하기 때문이라고 판단된다 [7]. 일반적으로 PT 계열의 완화형 강유전체(relaxor-PT) 압전단결정경의 경우 PT 조성이 증가함에 따라 결정 구조가 Rhombohedral에서 Tetragonal로 가깝게 변화하는데, 이에 따른 에너지 준위가 상승하여 분극 입계 전압과 상전이 온도가 높아지는 것으로 알려져 있다. 또한, 분극 회전이 용이해져 압전 및 유전 특성이 증가하게 된다 [13,14].

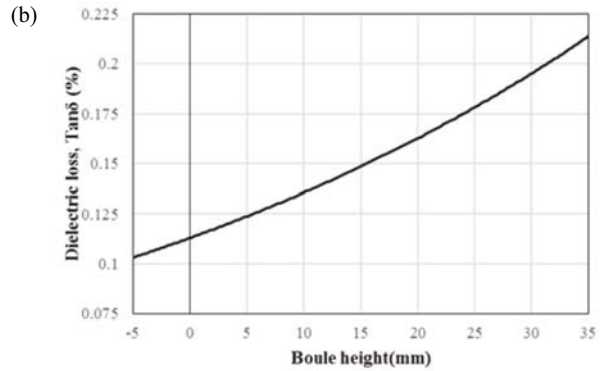


Fig. 3. (a) The dielectric constant and (b) the dielectric loss of the single crystal samples along the boule height.

본 논문에서는 브릿지만 방식으로 성장된 [011] 분극 Mn:PIN-PMN-PT 압전단결정경의 Rhombohedral 결정 구조 영역에서 조성 분포가 29%에서 32.5%까지 변화하는 것을 고려하여, 결정 구조 양 끝단의 조성을 가지는 Mn:PIN-PMN-29PT 및 Mn:PIN-PMN-32PT 압전단결정 두 가지 소재에 대한 물성을 측정하였다.

3. 조성별 물성 측정 결과

3.1 32 진동모드 구동 물성상수 측정 결과

[011] 분극 Mn:PIN-PMN-PT 소재의 32 진동모드 관련 물성 측정을 위해 횡방향 공진 모드(transverse extension)가 주도적으로 가진될 수 있는 물성 측정 시편을 그림 4(a) 및 (b)와 같이 설계 및 제작하였다 [15,16]. 물성 측정 시편을 Mn:PIN-PMN-29PT 및 Mn:PIN-PMN-32PT 두 가지 조성으로 제작하였고, 32 진동모드 측정을 위해 시편의 제원은 3방향 대비 2방향 길이가 긴 $4 \times 12 \times 4$ (X×Y×Z) mm로 설계하였다. 물성 측정 시편의 전극은 Au 박막을 증착하여 사용하였고, [011] 방향으로 시편을 분극하였다. Mn:PIN-PMN-29PT 및 Mn:PIN-PMN-32PT 두 가지 조

성을 가지는 물성 측정 시편의 유전 특성을 측정한 결과는 표 1과 같다. 유전 특성 측정 결과로부터 Mn:PIN-PMN-29PT 및 Mn:PIN-PMN-32PT 압전단결정의 유전상수(ϵ_{33}^T) 및 유전 손실($\tan\delta$) 값이 그림 3에 나타난 유전 특성 측정 결과와 일치하는 것을 확인할 수 있다.

그림 5는 Mn:PIN-PMN-29PT 및 Mn:PIN-PMN-32PT 두 가지 조성으로 제작된 물성 측정 시편의 임피던스 스펙트럼을 측정한 결과이다. 측정된 물성 측정 시편의 공진주파수(f_r) 및 반공진주파수(f_a)로부터 표 1과 같이 전기-기계 결합계수(k_{32}), 2 방향 탄성계수(S_{22}^E) 및 압전상수(d_{32})를 산출하였다. 압전 시편의 물성 상수 추출을 위한 수식은 아래와 같고, ρ 는 밀도, Y는 시편의 Y방향 크기를 의미한다.

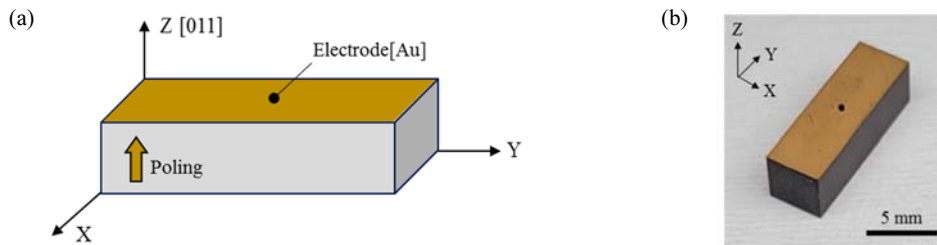


Fig. 4. (a) Schematic drawing of the sample used for property characterization and (b) the sample used for property characterization.

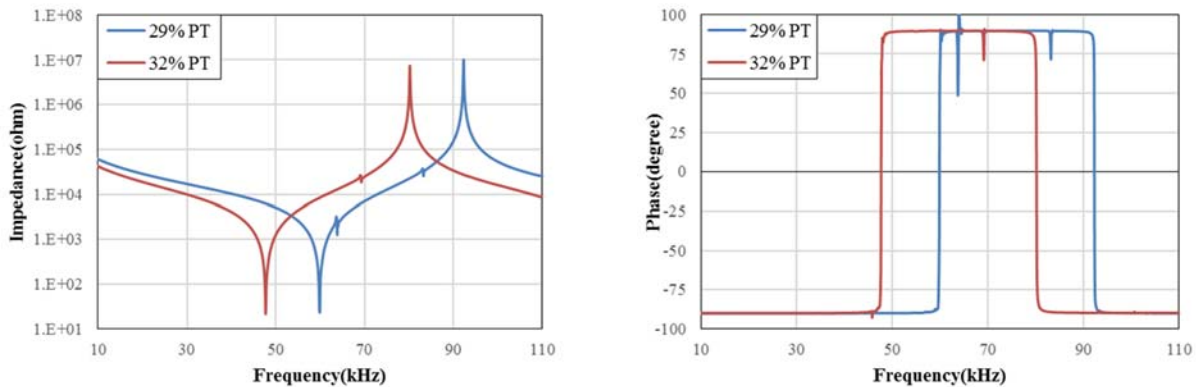


Fig. 5. Measured impedance curve of the [011] poled Mn:PIN-PMN-PT single crystals.

Table 1. Measured material properties of the [011] poled Mn:PIN-PMN-PT single crystals.

Samples	ϵ_{33}^T	$\tan\delta$ (%)	f_r (kHz)	f_a (kHz)	k_{32}	S_{22}^E (pm ² /N)	d_{32} (pC/N)	Q_m
29% PT	2,464	0.12	59.9	92.4	0.86	58.5	-969	1,193
32% PT	3,549	0.21	47.7	80.2	0.91	92.7	-1,554	741

$$\frac{k_{32}^2}{1-k_{32}^2} = -\frac{\pi f_a}{2 f_r} \cot\left(\frac{\pi f_a}{2 f_r}\right), S_{22}^E = \frac{1}{4\rho(f_r V)^2}, d_{32}^2 = k_{32}^2 S_{22}^E \epsilon_{33}^T \quad (1)$$

물성 상수 산출 결과로부터 PT 조성이 증가할수록 전기-기계 결합계수, 탄성계수 및 압전상수 값이 증가하는 것으로 확인되었다. Mn:PIN-PMN-29PT 및 Mn:PIN-PMN-32PT 압전단결정의 전기-기계 결합계수는 $k_{32} = 0.86 \sim 0.91$, 탄성계수는 $S_{22}^E = 58.5 \sim 92.7 \text{ pm}^2/\text{N}$ ($\pm 23\%$) 및 압전상수는 $d_{32} = -969 \sim -1,554 \text{ pC/N}$ ($\pm 23\%$)의 분포를 가지는 것으로 나타났다. 기계적 품질계수(mechanical quality factor, Q_m)는 기계적 진동에 의한 손실을 나타내는 계수로 기계적 공진주파수와 송신 구동 파워가 절반이 되는 주파수 대역폭의 비로 정의된다. 측정 결과로부터 PT 조성이 증가함에 따라 기계적 품질계수 값이 감소하는 것으로 확인되었고, Mn:PIN-PMN-29PT 및 Mn:PIN-PMN-32PT 압전단결정의 기계적 품질계수는 $Q_m = 1,193 \sim 741$ ($\pm 23\%$)로 나타났다.

3.2 상전이 온도 측정 결과

[011] 분극 Mn:PIN-PMN-PT 압전단결정 소재의 구동 온도 한계를 측정하기 위해 그림 1의 조성 측정 시편을 Mn:PIN-PMN-29PT 및 Mn:PIN-PMN-32PT 두 가지 조성으로 제작하였고, 조성 측정 시편의 온도 변화에 따른 정전 용량을 측정하였다. 그림 6은 온도별 유전상수 측정 결과이다. 그래프에서 온도가 증가할수록 유전상수가 증가하고, 결정 구조가 변화하는 온도에서 다중 변곡점이 발생하는 것을 확인할 수 있다 [5,6]. 첫 번째 변곡점인 Rhombohedral-Orthorhombic 상전이 온도(T_{RO}), 세 번째 변곡점 Orthorhombic-Tetragonal 상전이 온도(T_{OT}) 및 마지막 변곡점 Tetragonal-Cubic 상전이 온도(T_C)의 측정값은 표 2와 같다. 측정 결과로부터 PT 조성이 증가함에 따라 상전이 온도 T_{RO} 및 T_{OT} 값이 감소하고 상전이 온도 T_C 값이 증가하는 것을 확인하였다. 이는 PT 조성이 증가함에 따라 결정 구조 변화에 의해 에너지 준위가 증가하여 상전이 온도 T_C 가 증가하고, 결정 구조가 R-O 상전이 경계에 가까워지기 때문에 상전이 온도 T_{RO} 값이 감소하는 것으로 판단된다 [6-8]. Mn:PIN-PMN-29PT 및 Mn:PIN-PMN-32PT 압전단결정의 상전이 온도는 $T_{RO} = 127 \sim 119^\circ\text{C}$ ($\pm 3.3\%$), $T_{OT} = 137 \sim 130^\circ\text{C}$ ($\pm 2.6\%$) 및 $T_C = 192 \sim 202^\circ\text{C}$ ($\pm 2.5\%$)로 나타났다.

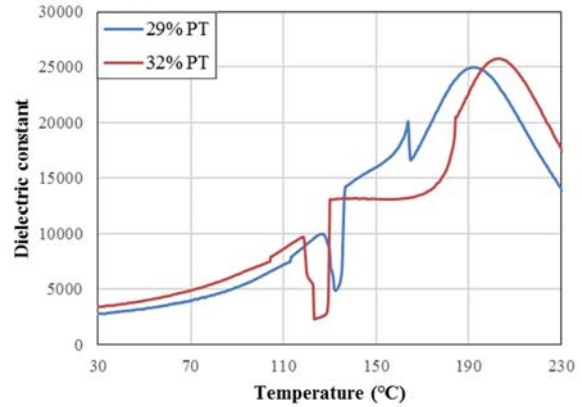


Fig. 6. Measured dielectric constant-temperature response of the [011] poled Mn:PIN-PMN-PT single crystals.

Table 2. Measured phase transition temperature of the [011] poled Mn:PIN-PMN-PT single crystals.

Samples	T_{RO} ($^\circ\text{C}$)	T_{OT} ($^\circ\text{C}$)	T_C ($^\circ\text{C}$)
29% PT	127	137	192
32% PT	119	130	202

3.3 분극임계전압 측정 결과

[011] 분극 Mn:PIN-PMN-PT 압전단결정 소재의 구동 전압 한계를 측정하기 위해 Mn:PIN-PMN-29PT 및 Mn:PIN-PMN-32PT 두 가지 조성으로 제작된 그림 4의 물성 측정 시편을 사용하였다. 분극임계전압(E_C)은 전압에 의해 분극이 반전되는 시점의 전계로 정의되며, 전계 변화에 따른 분극 변화를 측정한 결과는 그림 7과 같다. Mn:PIN-PMN-PT 압전단결정 소재는 도핑된 $\text{Mn}^{2+,3+}$ 이온에 의해 Internal bias E_i 가 발생한다 [17,18]. 전계별 분극 측정 결과인 그림 7에서 E_i 에 의해 + 전계방향으로 편향된 것을 확인할 수 있고, 측정된 분극임계전압은 표 3과 같다. 측정 결과로부터 PT 조성이 증가함에 따라 분극임계전압 및 잔류 분극(remanent polarization)이 증가하는 것을 확인하였고, Mn:PIN-PMN-29PT 및 Mn:PIN-PMN-32PT 압전단결정의 분극임계전압은 $E_C = 10.6 \sim 11.1 \text{ kV/cm}$ ($\pm 2.3\%$)로 나타났다.

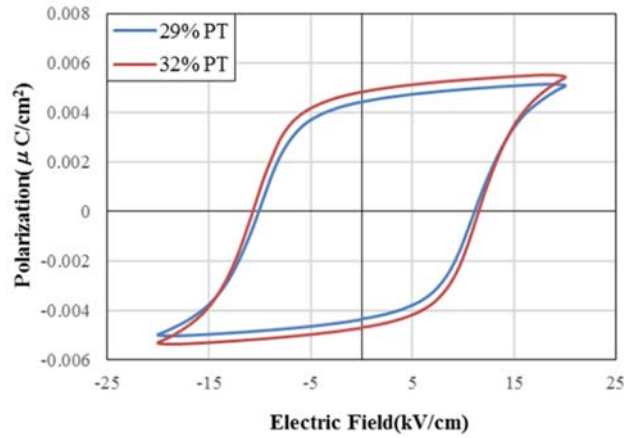


Fig. 7. Measured polarization-electric field response of the [011] poled Mn:PIN-PMN-PT single crystals.

Table 3. Measured coercive field of the [011] poled Mn:PIN-PMN-PT single crystals.

Samples	+E (kV/cm)	-E (kV/cm)	E _i (kV/cm)	E _c (kV/cm)
29% PT	11.1	-10.1	0.4	10.6
32% PT	11.5	-10.7	0.4	11.1

3.4 기계적 강도 측정 결과

Mn:PIN-PMN-PT 소재의 기계적 강도를 측정하기 위해 그림 8과 같이 시편을 제작하였다. 각각 (a) 압축강도(L5×W5×T5 mm), (b) 인장 강도(L25.4×Φ2.14 mm) 및 (c) 굽힘 강도(L35×W4×T3 mm)의 시편을 한국산업규격(KS L 1601, KS L ISO 14704, KS L 1599)에 따라 제작하였다. 제작된 기계적 강도 측정 시편이 파괴되는 응력인 최대 강도(ultimate strength)를 측정한 결과는 표 4와 같다. 기계적 강도 중 인장 강도가 상대적으로 낮은 값을 가지는 것을 확인할 수 있고, Mn:PIN-PMN-29PT 및 Mn:PIN-PMN-32PT 압전단결정의 압축 강도는 645~605 MPa (±3.2%), 인장 강도는 29.8~29.6 MPa (±0.34%) 및 굽힘 강도는 109~108 MPa (±0.46%)로 나타났다. 측정 결과로부터 기계적 강도는 PT 조성에 따른 강도 차이가 크지 않은 것으로 확인되었고, 압축 강도는 측정 오차로 인한 강도 차이가 발생한 것으로 판단된다.

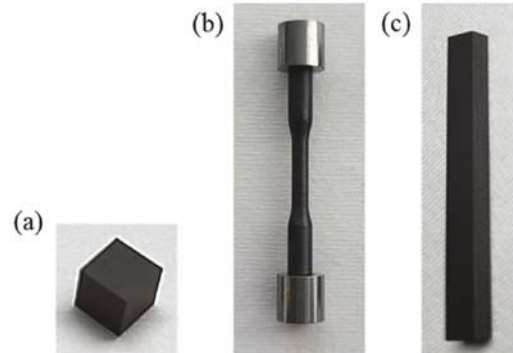


Fig. 8. The samples used for mechanical strength of the [011] poled Mn:PIN-PMN-PT single crystals, (a) compression, (b) tensile, and (c) flexure.

Table 4. Measured mechanical strength of the [011] poled Mn:PIN-PMN-PT single crystals.

Samples	Compression strength (Mpa)	Tensile strength (Mpa)	Flexure strength (Mpa)
29% PT	645	29.8	109
32% PT	605	29.6	108

4. 결론 및 종합

표 5는 [011] 분극 Mn:PIN-PMN-29PT 및 Mn:PIN-PMN-32PT 압전단결정의 물성 측정 종합 결과이다. 알려진 바와 같이, 완화형 강유전체 압전단결정의 경우 PT 조성이 증가함에 따라 분극입계전압과 상전이 온도가 높아지며 압전 및 유전 특성이 증가하게 된다 [13,14]. 본 논문의 측정 결과도 PT 조성 변화에 따라 동일한 특성 변화를 확인할 수 있었다. 3세대 압전단결정 Mn:PIN-PMN-PT 압전단결정의 [011] 분극 단결정 32모드 관련 물성 분포 측정 결과, 전기-기계 결합계수는 $k_{32} = 0.86 \sim 0.91$, 탄성계수는 $S_{22}^E = 58.5 \sim 92.7 \text{ pm}^2/\text{N} (\pm 23\%)$ 및 압전 상수는 $d_{32} = -969 \sim -1,554 \text{ pC/N} (\pm 23\%)$ 의 분포를 가지는 것을 확인하였고, 2세대 압전단결정 PIN-PMN-PT의 물성 특성과 유사함을 확인하였다. 3세대 압전단결정 기계적 품질계수는 $Q_m = 1,193 \sim 741 (\pm 23\%)$ 의 분포를 가지며, 2세대 압전단결정의 기계적 품질계수($Q_m = 180$) 대비 4배 이상 우수한 발열 특성을 가지는 것을 확인했다. 3세대 압전단결정의 최초 상전이 온도는 $T_{RO} = 127 \sim 119^\circ\text{C} (\pm 3.3\%)$ 의

Table 5. Measured material properties of the [011] poled Mn:PIN-PMN-PT single crystal and PIN-PMN-PT.

Property	Mn:PIN-PMN-29PT	Mn:PIN-PMN-32PT	PIN-PMN-PT [4,12]
ϵ_{33}^T (-)	2,464	3,549	3,154
Tan δ (%)	0.12	0.21	-
k_{32} (-)	0.86	0.91	0.88
S_{22}^E (pm ² /N)	58.5	92.7	64.5
d_{32} (pC/N)	-969	-1,554	-1,177
Q_m (-)	1,193	741	180
T_{RO} (°C)	127	119	125
T_{OT} (°C)	137	130	-
T_C (°C)	192	202	191
E_C (kV/cm)	10.8	11.6	5.0
Compression strength (Mpa)	854	941	-
Tensile strength (Mpa)	35.6	33.2	-
Flexure strength (Mpa)	109	108	-

분포를 가지며, 2세대 압전단결정의 상전이 온도($T_{RT} = 125^\circ\text{C}$) 대비 높은 값을 가지는 것으로 확인되었다. 3세대 압전단결정의 분극임계전압 확인 결과 Mn 도핑에 의한 Internal bias E_i 가 발생하는 것을 확인하였고, $E_C = 10.8 \sim 11.6$ kV/cm ($\pm 2.3\%$)로 나타났다. 2세대 압전단결정 PIN-PMN-PT의 분극임계전압($E_C = 5.0$ kV/cm) 대비 2배 이상 높은 값을 가지는 것으로 확인되었다. Mn:PIN-PMN-29PT 및 Mn:PIN-PMN-32PT 압전단결정의 기계적 강도 측정 결과 인장 강도에 취약하고 PT 조성에 따른 값의 차이가 미미한 것을 확인하였다.

본 논문에서는 브릿지만 방식으로 성장된 Mn:PIN-PMN-PT 잉곳의 성장 위치별 물성 분포를 측정하였다. 성장 위치별 조성 분포 및 유전 특성 분포 확인을 위해 Rhombohedral 결정 구조를 가지는 영역에서 위치별로 제작된 시편의 EPMA를 측정하고 유전 특성을 측정하였고, PT 조성 분포가 29~32.5%임을 확인하였다. 두 가지 조성의 [011] 분극 Mn:PIN-PMN-29PT 및 Mn:PIN-PMN-32PT 압전단결정 소재의 32 진동모드 시편을 제작하여 물성 분포를 확인하였고, 고출력 구동 시 발열 특성, 온도/전압/응력 한계와 관계된 기계적 품질계수, 상전이 온도, 분극임계전압 및 기계적 강도를 확인하였다. 브릿지만 방식으로 성장된 [011] 분극 Mn:PIN-PMN-PT 압전단결정

소재의 전체 범위 물성 분포를 확인하였고, 음향센서 설계 시 물성 범위를 고려한 설계가 가능할 것으로 기대된다.

ORCID

Hee-Seon Seo

<https://orcid.org/0009-0006-1329-8610>

감사의 글

이 논문은 2024년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과 학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(912874001).

REFERENCES

- [1] S. Zhang, F. Li, F. Yu, X. Jiang, H. Y. Lee, J. Luo, and T. R. Shrout, *J. Korean Ceram. Soc.*, **55**, 419 (2018). doi: <https://doi.org/10.4191/kcers.2018.55.5.12>
- [2] L. M. Ewart, E. A. McLaughlin, H. C. Robinson, J. J. Stace, and A. Amin, *IEEE Trans. Ultrason. Eng.*, **54**, 2469 (2007). doi: <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2007.561>
- [3] S. Zhang, F. Li, X. Jiang, J. Kim, J. Luo, and X. Geng, *Prog. Mater. Sci.*, **68**, 1 (2015). doi: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2014.10.002>
- [4] S. Zhang and F. Li, *J. Appl. Phys.*, **111**, 031301 (2012). doi: <https://doi.org/10.1063/1.3679521>
- [5] X. Huo, S. Zhang, G. Liu, R. Zhang, J. Luo, R. Sahul, W. Cao, and T. R. Shrout, *J. Appl. Phys.*, **113**, 074106 (2013). doi: <https://doi.org/10.1063/1.4792661>
- [6] F. Li, S. Zhang, D. Lin, J. Luo, Z. Xu, X. Wei, and T. R. Shrout, *J. Appl. Phys.*, **109**, 014108 (2011). doi: <https://doi.org/10.1063/1.3530617>
- [7] Y. Liu, Z. Xu, Z. Li, Y. Zhuang, Y. Tian, D. Hu, K. Song, and H. Guo, *J. Alloys Compd.*, **742**, 958 (2018). doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.01.027>
- [8] K. Song, Q. Li, H. Guo, Q. Hu, Z. Li, F. Li, S. Fan, and Z. Xu, *J. Alloys Compd.*, **851**, 156145 (2021). doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156145>
- [9] E. Sun, S. Zhang, J. Luo, T. R. Shrout, and W. Cao, *Appl. Phys. Lett.*, **97**, 032902 (2010). doi: <https://doi.org/10.1063/1.3466906>
- [10] K. K. Rajan, M. Shanthi, W. S. Chang, J. Jin, and L. C. Lim, *Sens. Actuators, A*, **133**, 110 (2007). doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2006.03.036>
- [11] S. Zhang and L. C. Lim, *AIP Adv.*, **8**, 115010 (2018). doi: <https://doi.org/10.1063/1.5064418>
- [12] Y. Je, M. S. Sim, Y. Cho, W. Lee, S. Lee, J. M. Lee, and H. S. Seo, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **34**, 466 (2021).

- doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2021.34.6.11>
- [13] S. E. Park and T. R. Shrout, *J. Appl. Phys.*, **82**, 1804 (1997).
doi: <https://doi.org/10.1063/1.365983>
- [14] T. Rojac, *Commun. Mater.*, **4**, 12 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1038/s43246-023-00336-9>
- [15] S. H. Lee, S. S. Lee, Y. Roh, H. Y. Lee, and J. H. Han, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **17**, 31 (2004).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2004.17.1.031>
- [16] W. S. Kang, G. J. Lee, and W. Jo, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **34**, 301 (2021).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2021.34.5.301>
- [17] N. Luo, S. Zhang, Q. Li, Q. Yan, Y. Zhang, T. Ansell, J. Luo, and T. R. Shrout, *J. Mater. Chem. C*, **4**, 4568 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1039/c6tc00875e>
- [18] S. Zhang, S. M. Lee, D. H. Kim, H. Y. Lee, and T. R. Shrout, *Appl. Phys. Lett.*, **93**, 122908 (2008).
doi: <https://doi.org/10.1063/1.2992081>