

공진법을 이용한 PMN-PT 단결정의 탄성, 유전, 압전상수 측정

Measurement of all the Elastic, Dielectric and Piezoelectric Properties of PMN-PT Single Crystals

이상한¹, 이수성², 노용래^{1,a}, 이호용³, 한진호⁴

(Sang-Han Lee¹, Su-Sung Lee², Yongrae Roh^{1,a}, Ho-Yong Lee³, and Jin-Ho Han⁴)

Abstract

PMN-PT, a piezoelectric single crystal, has many useful applications such as sensors and actuators. In this paper, all the elastic, piezoelectric, and dielectric constants of the PMN-32%PT single crystals were measured by the resonance method. For the rhombohedral symmetry, a total of twelve independent material constants were measured such as six elastic compliance constants at constant electric field, two dielectric constants at constant stress, and four piezoelectric constants d . Seven sets of crystal samples of each different geometry were prepared for the measurement of length-thickness extensional, thickness extensional, radial, length extensional and thickness shear modes of vibration, respectively. In order to check the validity of the measurement, experimental impedance spectrum of the PMN-PT crystal was compared with numerical data spectrum calculated with the measured material constants. The good agreement between the two spectra confirmed validity of the results in this paper.

Key Words : PMN-PT single crystals, Resonance method, Vibration mode, Piezoelectricity

1. 서론

압전단결정 PMN-PT를 이용하여 트랜스듀서, 센서, 액추에이터를 제작하면 기존의 압전세라믹을 이용할 때보다 더 좋은 성능을 구현할 수 있다. 즉, 단결정 PMN-PT의 높은 전기-기계결합계수로 인해 넓은 대역폭과 높은 민감도를 가지며 큰 음압을 발생시키는 디바이스를 만들 수 있다. 반면에 PMN-PT 단결정은 성장이 어렵고, 상전이 온도가 낮으며, 재료의 가격이 비싸고 큰 크기로 만들기

어렵다는 등의 단점을 지니고 있다.

단결정 PMN-PT를 성장시키는 방법에는 대표적으로 Flux, Bridgman방법과 고상단결정(SSCG-Solid State Crystal Growth)법 등이 있다. Flux, Bridgman방법은 PMN-PT를 이루는 성분을 고온에서 액체상태로 용융시킨 다음 작은 단결핵으로부터 성장시키는 방법으로서, 값비싼 백금용기와 외부 불순물로부터의 오염을 막는 밀봉작업이 필요하다[1]. 하지만 고상단결정법은 그림 1과 같이 PMN-PT 분말을 혼합한 다음 단결정 시드를 부착시킨 후 소결과정을 거침으로써 단결정으로 성장시키는 방법이다. 이러한 방법은 성장 비용이 적게 들고, 대량생산이 가능하며, 화학적으로 균질한 상태의 단결정을 성장시킬 수 있다는 장점을 가진다[1,2]. 본 연구에서는 고상단결정법으로 성장시킨 PMN-32%PT의 물성을 측정하였다.

단결정 PMN-PT를 이용한 새로운 센서 및 액

1 : 경북대학교 기계공학과
(대구시 북구 산격동 1370번지,
Fax : 053-950-6550
a : Corresponding Author : yryong@knu.ac.kr)
2 : 경북대학교 센서공학과
3 : 선문대학교 재료공학과
4 : (주)프로소닉
2003년 4월 23일 접수, 2003년 6월 13일 1차 심사완료,
2003년 7월 14일 2차 심사완료, 2003년 8월 12일 최종 심사완료

추에이터를 개발하는 과정에서 물성평가는 필수적이다. 압전체의 물성을 평가하는 대표적인 방법으로 공진법[3], 초음파를 이용한 방법[4], 특정한 상수측정장치를 이용하는 방법 등이 있다. 초음파를 이용한 방법과 특정 상수측정장치를 이용하는 방법은 물성값 전체를 구할 수 없고, 측정방법이 복잡하다. 하지만 공진법을 이용한 물성측정 방법은 잘 알려진 방법이며, 측정값이 정확하고, 전체 물성값을 구할 수 있다는 장점을 지닌다.

PMN-PT는 PMN과 PT의 성분비 조성식 (1-x)PMN-x%PT에 따라 결정구조를 달리하는데 PT의 성분비인 x값에 의해 그림 2에서 보는 바와 같이 tetragonal과 rhombohedral의 결정구조를 형성하게 된다[5]. 그리고 각각의 결정구조에 따라 물성값이 달라지게 된다[6]. PMN-PT의 성분비는

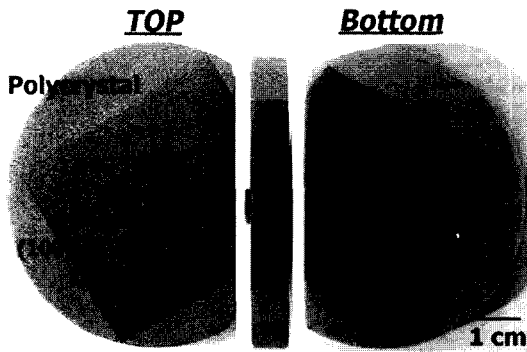


그림 1. 고상단결정법에 의한 PMN-PT 성장과정.
Fig. 1. Process of PMN-PT growth by SSCG method.

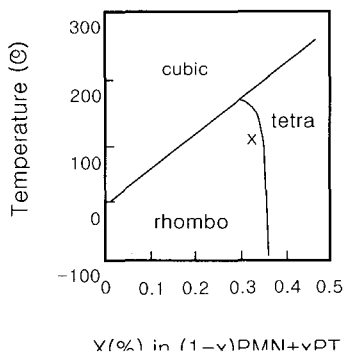


그림 2. PMN-PT 결정의 대칭구조.
Fig. 2. Symmetry of PMN-PT crystals.

Morphotropic phase boundary에 가까울수록 더 좋은 압전특성을 가진다. Morphotropic phase boundary부근에서 tetragonal 결정구조에 속한 PMN-PT에 관한 연구는 많이 진행되었고, tetragonal 결정구조의 PMN-PT의 물성은 이미 보고된 바 있다[7,8]. 하지만 그림 2에서 PMN-32%PT와 같이 rhombohedral 결정구조를 가진 PMN-PT의 전체 물성을 구한 연구는 선행사례가 없다. 본 연구에서는 고상단결정법으로 성장시킨 rhombohedral 결정구조의 PMN-32%PT의 모든 물성을 측정하였다.

2. Rhombohedral구조의 PMN-32%PT 물성

Rhombohedral 결정구조를 가지는 PMN-PT의 물성은 식 (1)과 같은 행렬로 표현된다[6].

$$[s^E] = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & s_{14}^E & 0 & 0 \\ s_{12}^E & s_{11}^E & s_{13}^E & -s_{14}^E & 0 & 0 \\ s_{13}^E & s_{13}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{14}^E & -s_{14}^E & 0 & s_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & s_{14}^E \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{14}^E & 2(s_{11}^E - s_{12}^E) \end{bmatrix}$$

$$[d] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 2d_{22} \\ -d_{22} & d_{22} & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[\epsilon^T] = \begin{bmatrix} \epsilon_{11}^T & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{11}^T & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33}^T \end{bmatrix} \quad (1)$$

식 (1)에서 $[s^E]$ 는 탄성상수행렬, $[d]$ 는 압전상수행렬, $[\epsilon^T]$ 는 유전상수행렬을 나타낸다. 각각의 행렬을 살펴보면 rhombohedral 결정구조의 PMN-PT는 탄성행렬에서 6개의 독립상수 $s_{11}^E, s_{12}^E, s_{13}^E, s_{14}^E, s_{33}^E, s_{44}^E$ 를 가지며, 압전상수행렬에서 4개의 독립상수 $d_{15}, d_{22}, d_{31}, d_{33}$ 을 가지며, 유전상수 행렬에서 2개의 독립상수 $\epsilon_{11}^T, \epsilon_{33}^T$ 를 가진다. 따라서 rhombohedral 결정구조의 PMN-PT는 총 12개의 독립상수를 가진다. 이들 12개의 독립상수를 공진법을 이용하여 측정하면 전체 $[s^E], [d], [\epsilon^T]$ 행렬을 구할 수 있다[9].

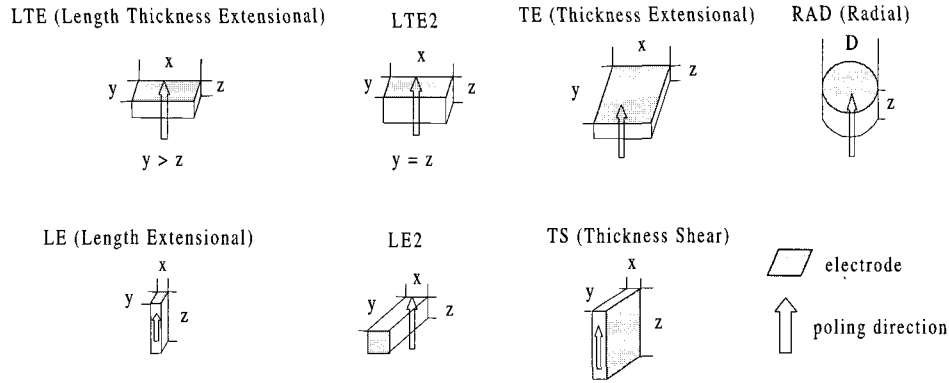


그림 3. 물성상수를 측정하기 위한 PMN-32%PT 시편형상.

Fig. 3. PMN-32%PT sample geometries for characterization of the material constants.

표 1. 측정에 사용된 PMN-PT시편 크기.

Table 1. Dimensions of the experimental PMN-PT samples.

Dimension(mm)	LTE	LTE2	LE	LE2	TE	TS	RAD
x	3.0	6.1	0.51	0.51	6.1	0.5	.
y	1.1	1.1	0.51	2.4	6.1	2.1	.
z	0.8	1.1	1.31	0.51	0.51	2.1	0.51
D	5.2

표 2. PMN-PT시편의 공진주파수와 반공진주파수.

Table 2. Resonance and anti-resonance frequencies of the PMN-PT samples.

frequency(MHz)	LTE	LTE2	LE	LE2	TE	TS	RAD
f_r	0.320	0.151	0.67	0.563	3.938	2.238	0.250
f_a	0.385	0.246	1.94	0.601	4.688	2.963	0.425

3. 공진법을 이용한 물성측정

공진법은 시편의 특정 진동모드 공진주파수, 반공진주파수를 측정하여 물성값을 계산하는 방법이다. 물성측정을 위해 각 진동모드 별로 그림 3과 같은 시편을 제작하였다. 표 1은 실제 제작한 물성 측정용 시편의 크기이다. 각각의 시편은 발생하는

진동모드에 따라 이름을 붙였다[10]. 시편의 크기는 각 시편에서 보고자 하는 진동모드가 우세하게 발생할 수 있도록 설정하였다. 예를 들어 TE시편은 Thickness Extensional의 약자로서, 두께방향의 진동모드를 측정하기 위한 시편을 의미한다. 그림 3에서 LTE시편은 시편의 y방향 크기와 z방향 크기가 $y > z$ 의 관계를 가지며, LTE2시편은 $y = z$ 의 관계를 가진다. LE시편은 분극방향과 전극면의 방

향이 모두 z방향인 시편이며, LE2시편은 분극방향과 전극면의 방향이 각각 z와 y방향을 향한 시편이다. 분극처리 된 시편은 Impedance Analyzer (HP 4194A)를 이용하여 임피던스 스펙트럼을 구함으로써 공진 주파수 f_r 와 반공진 주파수 f_a 를 측정하였다. 표 2는 각각의 시편에서 측정된 공진 주파수 f_r 와 반공진 주파수 f_a 를 정리한 표이다. 각각의 시편에서 구할 수 있는 물성값은 다음과 같다.

LTE 시편의 공진주파수와 반공진주파수를 이용하여 식 (2)~(5)로부터 [9,11,12] s_{11}^E , k_{31} , ϵ_{33}^T , d_{31} 을 계산한다. k_{31} 은 31모드에서의 전기-기계 결합계수이다. 이후의 식에서 나오는 s_{ij}^E 는 전계가 일정한 상태에서의 compliance 상수를 의미하며, ϵ_{ij}^T 는 응력이 일정한 상태에서의 유전율을, C_f 는 정전용량을, ρ 는 밀도, x, y, z 는 각 방향별 시편의 크기를 의미한다.

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

$$\frac{k_{31}^2}{1-k_{31}^2} = -\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_a}{f_r} \cot\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_a}{f_r}\right) \quad (3)$$

$$\epsilon_{33}^T = \frac{C_f \cdot z}{x \cdot y} \quad (4)$$

$$d_{31} = -k_{31} \sqrt{\epsilon_{33}^T \cdot s_{11}^E} \quad (5)$$

RAD 시편으로는 시편의 제1 공진주파수 ($f_r^{(1)}$)와 제2 공진주파수 ($f_r^{(2)}$)를 측정하고, 이 두 값을 이용하여 참고문헌에 [13] 나타난 조건표로부터 포와송 비를 찾을 수 있다. 결정된 포와송 비를 이용하여 식 (6)~(8)에 [9,11,12] 나타난 경방향 진동모드 식들에 대입하여 s_{12}^E , k_r , s_{66}^E 를 계산한다. k_r 은 경방향 진동모드에서의 전기-기계 결합계수이며, ν 는 포와송 비이다.

$$s_{12}^E = -\nu \cdot s_{11}^E \quad (6)$$

$$k_r = -\frac{\sqrt{2}d_{31}}{\sqrt{\epsilon_{33}^T (s_{11}^E + s_{12}^E)}} \quad (7)$$

$$s_{66}^E = 2 \cdot (s_{11}^E - s_{12}^E) \quad (8)$$

TE 시편의 공진주파수와 반공진주파수를 이용하여 식 (9)~(11)로부터 c_{33}^E , k_t 를 계산한다. 이후의 식에서 나오는 c_{ij}^E 는 전계가 일정한 상태에서의 stiffness 상수를 의미하며 c_{ij}^D 는 전기변위가 일정한 상태에서의 stiffness 상수를 의미한다. c_{33}^E 는 s_{13}^E 를 계산하는데 사용된다. k_t 은 두께모드에서의 전기-기계 결합계수이다.

$$c_{33}^D = 4\rho z^2 f_a^2 \quad (9)$$

$$k_t = \sqrt{\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_r}{f_a} \cot\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_r}{f_a}\right)} \quad (10)$$

$$c_{33}^E = c_{33}^D (1 - k_t^2) \quad (11)$$

LE 시편의 공진주파수와 반공진주파수를 이용하여 식 (12)~(15)로부터 s_{33}^E , k_{33} , d_{33} 을 계산한다. k_{33} 은 33모드에서의 전기-기계 결합계수이다. 이후의 식에서 나오는 s_{ij}^D 는 전기변위가 일정한 상태에서의 compliance 상수를 의미한다.

$$s_{33}^D = \frac{1}{4\rho z^2 f_a^2} \quad (12)$$

$$k_{33} = \sqrt{\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_r}{f_a} \cot\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_r}{f_a}\right)} \quad (13)$$

$$s_{33}^E = \frac{s_{33}^D}{1 - k_{33}^2} \quad (14)$$

$$d_{33} = k_{33} \cdot \sqrt{\epsilon_{33}^T \cdot s_{33}^E} \quad (15)$$

지금까지 구한 s_{11}^E , s_{12}^E , s_{33}^E , c_{33}^E 를 식 (16)에 [12] 대입하여 s_{13}^E 를 계산한다.

$$s_{13}^E = \sqrt{\frac{(s_{11}^E + s_{12}^E) \left(s_{33}^E - \frac{1}{c_{33}^E} \right)}{2}} \quad (16)$$

LE2 시편의 공진주파수와 반공진주파수를 이용하여 식 (17), (18)로부터 k_{22} , d_{22} 를 계산한다. k_{22} 는 22모드에서의 전기-기계 결합계수이다.

$$k_{22}^2 = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_r}{f_a} \cot\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_r}{f_a}\right) \quad (17)$$

$$d_{22} = k_{22} \cdot \sqrt{\varepsilon_{11}^T \cdot s_{22}^E} \quad (18)$$

TS 시편의 공진주파수와 반공진주파수를 이용하여 식 (19)~(21)로부터 k_{15} , ε_{11}^T , c_{55}^D 를 계산한다. k_{15} 는 15모드에서의 전기-기계 결합계수이다.

$$k_{15} = \sqrt{\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_r}{f_a} \cot\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_r}{f_a}\right)} \quad (19)$$

$$\varepsilon_{11}^T = \frac{C_{f \cdot x}}{y \cdot z} \quad (20)$$

$$c_{55}^D = 4 \rho x^2 f_a^2 \quad (21)$$

Rhombohedral 결정구조에서는 k_{15} 와 k_{24} 는 같으며 c_{55}^D 와 c_{44}^D 또한 같다. k_{24} , c_{44}^D 를 식 (22)에 대입하여 c_{44}^E 를 계산한다. k_{24} 는 24모드에서의 전기-기계 결합계수이다.

$$c_{44}^E = c_{44}^D(1 - k_{24}^2) \quad (22)$$

지금까지 구한 s_{11}^E , s_{12}^E , s_{14}^E , c_{44}^E , ε_{11}^T , k_{15} 를 식 (23), (24)에 대입하여 s_{44}^E , d_{15} 를 계산한다.

$$s_{44}^E = \frac{2(s_{14}^E)^2 c_{44}^E + (s_{11}^E - s_{12}^E)}{c_{44}^E(s_{11}^E - s_{12}^E)} \quad (23)$$

$$d_{15} = k_{15} \cdot \sqrt{s_{44}^E \cdot \varepsilon_{11}^T} \quad (24)$$

LTE2 시편은 c_{14}^E 를 측정하는 시편이다. 먼저 시편이 외부로부터 응력을 받지 않는 상태에서 공진주파수 (f_r)와 반공진주파수 (f_a)을 측정하고, 그림 4와 같은 장치를 이용하여 LTE2시편에 전단응

력을 인가하여 변화된 공진주파수 (f_r')와 반공진주파수 (f_a')을 측정하여 식 (25)~(27)에[11,14] 대입하여 c_{14}^E 를 계산한다. c_{14}^E 는 s_{14}^E 를 계산하는데 사용된다.

$$x_a' = \frac{1}{2f_r'} \frac{1}{\sqrt{\rho s_{11}}} \quad (25)$$

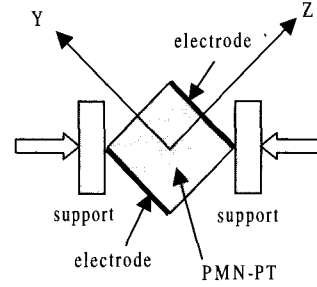


그림 4. LTE2시편을 이용한 c_{14}^E 측정.

Fig. 4. Measurement of c_{14}^E by the LTE2 sample.

$$x' = x_a' / \sqrt{1 + \frac{y}{x} \left(\frac{1}{\rho s_{11}} \left(\frac{1}{2xf_r'} \right)^2 - 1 \right)} \quad (26)$$

$$c_{14}^E = 4 \rho (f_r' - f_r)^2 (x - x')^2 \quad (27)$$

지금까지 6개의 시편에서 s_{14}^E 를 제외한 $[s^E]$ 값을 모두 구하였다. 아직 그 값을 모르는 s_{14}^E 와 측정된 나머지 s^E 값들로 일단 $[s^E]$ 행렬을 구성한 후, $[s^E]$ 의 역행렬 $[c^E]$ 를 계산할 때 s_{14}^E 의 값을 시행착오식으로 대입하여 $[c^E]$ 행렬에서 c_{14}^E 가 LTE2에서 구한 c_{14}^E 와 같아지는 가를 비교함으로써 두 값이 같아지는 s_{14}^E 를 찾아낸다. 이상의 과정을 거침으로써 $[s^E]$, $[d]$, $[\varepsilon^T]$ 의 값을 모두 구할 수 있다.

4. 고상단결정법으로 성장시킨 PMN-32%PT물성

그림 5는 고상단결정법으로 성장시킨 PMN

-32%PT 시편이며 앞 절에서 설명한 공진법을 이용하여 구한 PMN-32%PT의 물성은 표 3과 같다. 표 3의 값을 살펴보면 k_{33} 이 약 0.95로서 기존의 압전세라믹보다 월등히 높은 값을 가지는 것으로 나타났다. 그리고 d_{33} 역시 압전세라믹보다 크게 나타난다. 표 4는 본 연구에서 측정된 고상단결정법으로 성장시킨 rhombohedral 결정구조의 PMN-32%PT의 물성과 Bridgman방식으로 성장시킨 tetragonal 결정구조의 PMN-33%PT의 물성을 비교한 표이다[8]. 표 4를 통해 고상단결정법으로 성장시킨 PMN-32%PT의 경우 compliance 상수와 압전상수 d_{33} 값이 Bridgman방식으로 성장시킨

PMN-33%PT보다 작은 값을 가짐을 알 수 있다. 이것은 고상단결정법의 특성상 결정내부의 공간함 유량이 Bridgman방식보다 많아져서 생기는 현상으로 볼 수 있다. 그러나 두 가지 성장방법에서 모두 k_{33} 이 약 0.95로서 큰 값을 가진다[15].

다음으로 표 3에 나타난 물성의 타당성을 입증하기 위해, 유한 요소해석[16]과 d_{33} -meter (Penne-baker Model 8000 Piezo d_{33} -Tester)를 이용하여 물성분석을 하여 그 결과와 공진법으로 구한 물성 값을 비교하여 보았다. 먼저 유한요소해석을 이용하여 앞서 제시한 그림 3의 물성측정용 시편과 동일한 형상, 크기로 모델을 제작한 후, 공진법의

표 3. 공진법에 의한 PMN-32%PT의 물성측정 결과.

Table 3. Material constants of the PMN-32%PT crystals measured with the resonance method.

Material constant	Sample type	Measured value	Material constant	Sample type	Measured value
Elastic compliance ($\times 10^{-12} m^2/N$)			Piezoelectric strain constant ($\times 10^{-12} C/N$)		
s_{11}^E	LTE	33.65	d_{15}	TS	893.8
s_{12}^E	calculated	-5.38	d_{22}	LE2	508.5
s_{13}^E	calculated	-23.69	d_{31}	LTE	-669.7
s_{14}^E	LTE2	-1.31	d_{33}	LE	1223.6
s_{33}^E	LE	47.97	Electromechanical Coupling factor		
s_{44}^E	TS	27.25	k_{31}	LTE	0.62
s_{66}^E	calculated	78.06	k_r	RAD	0.81
Relative Dielectric constant			k_t	TE	0.59
$\epsilon_{11}^T / \epsilon_0$	TS	6097	k_{33}	LE	0.95
$\epsilon_{33}^T / \epsilon_0$	LTE	3940	k_{15}	TS	0.69

표 4. Tetragonal PMN-33%PT와 rhombohedral PMN-32%PT의 비교.

Table 4. Comparison of the tetragonal PMN-33%PT with the rhombohedral PMN-32%PT.

	s_{11}^E	s_{12}^E	s_{13}^E	s_{14}^E	s_{33}^E	s_{44}^E	s_{66}^E	d_{15}	d_{22}	d_{31}	d_{33}	k_{31}	k_t	k_{33}
	$(\times 10^{-12} m^2/N)$							$(\times 10^{-12} C/N)$						
SSCG rhombohedral	33.7	-5.4	-23.7	-1.31	48.0	27.3	78.1	894	509	-670	1224	0.62	0.59	0.95
Bridgeman tetragonal[8]	69.0	-11.1	-55.7	·	119.6	14.5	15.2	146	·	-1330	2820	0.59	0.64	0.94

로 구한물성을 대입하여 주파수별 임피던스 특성을 구해보았다. 측정된 물성값들이 정확하다면 유한요소해석을 통한 임피던스 스펙트럼이 측정된 스펙트럼과 잘 일치할 것이고, 측정치에 오류가 많다면 그 만큼 두 스펙트럼이 서로 차이를 보일 것이다. 그림 6은 일례로 TE시편 분석용으로 제작된 유한요소 모델을 보인다. 유한요소 해석은 상용 도구인 PZflex를 이용하여 수행하였다. 비교결과 두 스펙트럼이 상당히 우수한 일치를 보였으며, 그림 7~9는 그 예를 보인 것이다. 이로써 공진법으로 측정된 물성값의 타당성을 확인하였다. 또 다른 검증 방법으로 상용 d_{33} -meter를 이용하여 d_{33} 을 측정하여 표 5에 나타난 바와 같이 비교하였다. 표 5에서 두 값이 2%의 오차를 가지며 잘 일치함을 알 수 있다. 이로써 공진법을 통한 물성값이 타당함을 다시금 확인 할 수 있었다.

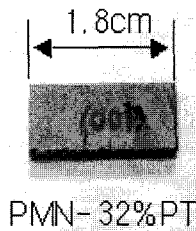


그림 5. PMN-32%PT sample 사진.
Fig. 5. Photograph of the PMN-32%PT sample.

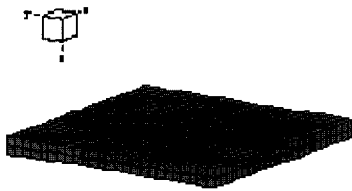


그림 6. TE sample 유한요소모델.
Fig. 6. FEA Model of the TE sample.

표 5. d_{33} -meter와 공진법으로 구한 d_{33} 의 비교.
Table 5. Comparison of the d_{33} measured with the d_{33} -meter and the resonance method.

measurement method	specimen type	d_{33} ($\times 10^{12}$ C/N)	discrepancy
d_{33} -meter	TE	1200	2%
resonance method		1224	

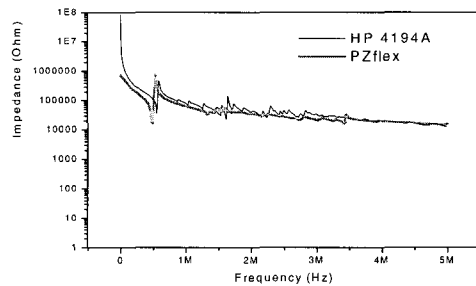


그림 7. LE2시편의 임피던스곡선 비교.
Fig. 7. Impedance spectrum of the LE2 sample.

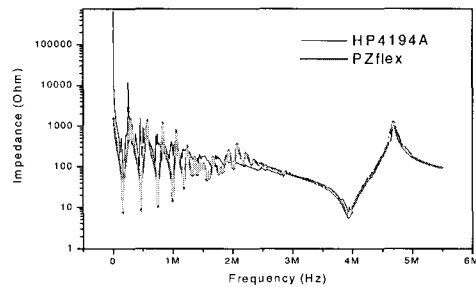


그림 8. TE시편의 임피던스곡선.
Fig. 8. Impedance spectrum of the TE sample.

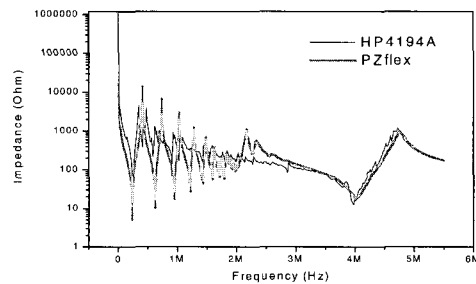


그림 9. RAD시편의 임피던스곡선.
Fig. 9. Impedance spectrum of the RAD sample.

5. 결 론

본 연구에서는 고상단결정법으로 성장시킨 rhombohedral 결정구조를 가진 PMN-32%PT 압전단결정의 모든 물성을 측정하였다. 측정된 물성값들의 타당성은 유한요소해석을 통한 각 시편들의 임피던스 분석결과와 상용 d_{33} -meter를 이용한 측정값들과 비교함으로써 확인하였다. 본 연구를 통해 고상단결정법으로 성장시킨 PMN-32%PT의 압전특성이 기존의 압전세라믹보다 월등히 좋음을 확인하였다. 그러나 기 발표된 Bridgman법에 의한 tetragonal 구조의 단결정[8]에 비해서는 압전특성이 떨어지는데, 이는 결정내의 공극함유량이 높기 때문인 것으로 판단된다. 결론적으로 고상단결정법을 이용하여 성장시킨 PMN-32%PT 단결정은 기존의 압전세라믹 디바이스 보다 더 우수한 성능을 제공할 수 있고, 본 연구에서 측정한 물성은 이 단결정을 이용한 디바이스를 개발할 때 유용하게 사용 될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2001-00367) 지원으로 수행되었음.

참고 문헌

[1] A. W. Vere, "Crystal growth : principles and progress", Plenum Press, p. 67, 1987.
 [2] C. G. Oakley and M. J. Zipparo, "Single Crystal Piezoelectric: A Revolutionary Development for Transducers", IEEE Ultrason. Sym., 2000.
 [3] S. Zhu, B. Jiang, and W. Cao, "Characterization of piezoelectric materials using ultrasonic and resonant techniques", SPIE, Vol. 4431, p. 154, 1998.
 [4] J. D. Maynard, "The use of piezoelectric film and ultrasound resonance to determine the complete elastic tensor in one measurement", J. Acous. Soc. Am., Vol. 91, No. 3, p. 1754, 1992.
 [5] Z. G. Ye and M. Dong, "Morphotropic domain structures and phase transitions in relaxor-based piezo-ferroelectric (1-x)Pb

(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃-xPbTiO₃ single crystals", J. Appl. Phys., Vol. 87, No. 5, p. 2312, 2000.
 [6] J. F. Nye, "Physical properties of crystals", Oxford University Press, p. 82, 1985.
 [7] X. Jiang, F. Tang, J. Wang, and T. P. Chen, "Growth and properties of PMN-PT single crystals", Physical C, Vol. 364-365, p. 678, 2001.
 [8] R. Zhang, B. Jiang, and W. Cao, "Elastic, piezoelectric and dielectric properties of mult-domain 0.67Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃-0.33PbTiO₃ single crystals", J. Appl. Phys., Vol. 90, No. 7, p. 3471, 2001.
 [9] "An American National Standard IEEE Standard on Piezoelectricity 176-1987", IEEE, p. 9, 1988.
 [10] D. J. Powell, G. L. Wojcik, C. S. Cesilets, T. R. Gururaja, K. Guggenberger, S. Sherrit and B. K. Mukherjee, "Incremental model-build-test Validation Exercise for a 1-D Biomedical ultrasonic imagine array", IEEE Ultrason. Sym., p. 1668, 1997.
 [11] B. Jaffe, W. C. Cook, and H. Jaffe, "Piezoelectric Ceramics", Academic press London and New York, 1971.
 [12] 김진수, "압전 액츄에이터와 초음파 전동기", 다성출판사, p. 20, 2000.
 [13] A. H. Meitzler, H. M. O'bryan, and H. F. Tiersten, "Definition and measurement of radial mode coupling factors in piezoelectric ceramic materials with large variations in poisson's ratio", IEEE Trans. on Sonic. and Ultrason., Vol. su-20, No. 3, p. 233, 1973.
 [14] R. V. Damle, "Elastic constants lithium niobate", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 25, p. 1091, 1992.
 [15] 박재환, "MnO₂첨가에 따른 Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃계 완화형 강유전체에서의 전기적 물성 변화", 전기전자재료학회논문지, 14권, 7호, p. 562, 2001.
 [16] M. J. Zipparo and C. G. Oakley, "Finite Element Modeling of PZN-PT and PMN-PT Single Crystal Material", IEEE Ultrason. Sym., p. 1017, 2001.