

매개변수 평가법을 이용한 압전재료의 재료물성 최적화 연구 Part I. 다결정 PZT 세라믹스

신호용¹, 이호용², 홍일곡^{1,3}, 김종호^{1,4}, 임종인¹ 

¹ 한국세라믹기술원 디지털소재혁신센터

² 선문대학교 신소재공학과

³ 한양대학교 에너지공학과

⁴ 경상대학교 나노신소재공학과

Optimization Study for Material Properties of Piezoelectric Material Using Parameter Estimation Method: Part I. Polycrystal PZT Ceramics

Ho-Yong Shin¹, Ho-Yong Lee², Il-Gok Hong^{1,3}, Jong-Ho Kim^{1,4}, and Jong-In Im¹

¹ Materials Digitalization Center, Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, Jinju 52851, Korea

² Department of Advanced Material Engineering, Sunmoon University, Asan 31460, Korea

³ Department of Energy Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Korea

⁴ Department of Materials Science and Engineering, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea

(Received March 28, 2022; Revised May 16, 2022; Accepted May 23, 2022)

Abstract: Recently, piezoelectric devices, such as ultrasonic surgery, ultrasonic atomizer, and ultrasonic speaker, are analyzed and designed by finite element simulation methods. However, the discrepancy between the design and the experiment results of the device typically occurs due to the inaccuracy of the piezoelectric material properties. To improve the simulation accuracy, the material properties of the PZT ceramics were better refined using parameter estimation method. The material parameters are elastic stiffness c_{ij}^E and piezoelectric constant e_{ij} of PZT ceramics. The impedance curve characteristics for the LTE mode of PZT ceramics were calculated. The mismatch between the simulation and the experimental data were compared and minimized by a least square method. Finally, the simulated impedance data were compared with the experimental data for the various vibration modes of PZT ceramics and the optimized material properties of PZT ceramics were verified. To further verify the accuracy, this method was also applied to piezoelectric PMN-PT single crystals.

Keywords: PZT ceramics, Piezoelectric material properties, Impedance characteristics, Parameter estimated optimization

1. 서론

✉ Jong-In Im; jongin@kicet.re.kr

Copyright ©2022 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.

PZT 세라믹스로 대표되는 압전재료는 초음파 수술기 및 세척기, 용착기, 초음파 분무기 등의 BLT 진동자, 진동센서, 초음파센서, SONAR 등 다양한 분야에 활용되고 있다. 최근 차량용 초음파 센서, 의료기기 및 음향부품용 정밀 액

츄에이터 등의 고성능의 압전부품 개발이 이루어지고 있으며[1-3] 부품 개발 시 시뮬레이션을 이용하여 복잡한 구조나 정확한 성능 예측이 가능한 신뢰성 있는 설계가 필요하다.

일반적으로 상용 유한요소법 프로그램을 이용하여 압전 응용제품을 설계하여 개발하고 있다. 그러나 개발한 압전 응용제품의 특성은 초기 설계한 특성과 상당한 차이를 보이는 경우가 많으며, 이는 주로 압전 세라믹스 재료의 물성 부정확성에 기인한 경우가 많다. 그러므로 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 압전 응용제품의 정확한 특성 예측 및 설계 정밀성 향상을 위해서는 신뢰성 있는 압전물성의 적용이 필요하다.

압전재료 물성 측정방법은 공진측정법, d33 meter, 레이저변위계(laser doppler vibrometry) 및 초음파(pulse-echo)를 이용하여 공진측정하는 방법이 있다. d33 meter 측정방법은 가진에 의한 발생 전하를 이용하여 d_{ij} 를 측정하는 방식으로 측정샘플의 형상에 둔감하다 [4,5]. 레이저 변위계 이용방법은 표면 변위로 d_{ij} , Q_m , k_{ij} 를 측정하며, 초음파를 이용한 방법은 일부 c_{ij} 를 측정하는 방법이다 [4,6]. 이 같은 측정방식은 압전재료의 일부 물성을 측정하는 방식으로 시뮬레이션에 적용을 위한 탄성계수와 압전상수의 측정이 제한적이다.

일반적으로 해석에 적용 가능한 전체 압전물성을 측정하기 위해서 공진측정법을 사용하며, 그림 1은 공진측정법에서 필요한 다양한 모드별 형상과 평가 가능한 압전물성을 나타내었다. 공진측정법은 TE (thickness extensional) 모드, RAD (radial) 모드, LE (length extensional) 모드, LTE (length thickness extensional) 모드, TS (thickness

shear) 모드의 다양한 모드형태의 많은 시편이 필요하다 [14-26]. 시편 제작은 전극도포, 분극, 소결 및 가공 등 제조 공정에 많은 시간이 소요되며, 일부 진동모드의 오차가 최종 전체 압전물성 영향을 미친다 [15,16]. 특히 LE 모드의 경우 형상이 작고 제작 시 고전압 분극이 필요하여 잘못된 상수 (d_{33} , s_{33}^E)로 평가될 경우가 많다. 이와 같은 문제를 보완하고자 다양한 압전물성 평가 측정법 연구가 진행 중에 있다.

매개변수 평가 최적화 시뮬레이션 기법은 참고 데이터를 토대로 매개변수를 평가하고, 실험치와 일치하는 시뮬레이션 결과를 찾는 과정이다. 시뮬레이션을 이용한 압전 소자 물성 최적화 기법은 2000년대 초부터 시도되었으며 [8-10], 최적화를 기반으로 하는 해석기법은 해석 최소화를 위하여 초기 조건과 매개변수를 얻기 위한 비선형 최소화 기술이 필요하였다. 이 같은 문제를 해결하기 위해 몇 가지 비선형 기술이 제안되었으며, 독일 프리드리히-알렉산더 대학의 센서 기술부 연구원들은 Newton-conjugate gradient 및 regularization 기술의 적용에 중요한 기여를 하였다 [11-13]. 고전적인 기술은 Nelder-Mead 방법 [14] 있으며, Andrad는 압전 디스크의 재료 특성을 얻기 위해 이 최적화 알고리즘의 사용을 제안했습니다 [15].

비선형화 최소화 기술은 상용 해석 툴의 최적화 알고리즘 개발 및 컴퓨터의 성능향상으로 보다 용이하게 다양한 매개변수로 해석이 가능해지고 있으며, 곡선 정합(curve fitting), 미분방정식을 이용한 매개변수 평가, 역설계 등에 활용되고 있다. 최적화 시뮬레이션은 기하학(topology), 형상(shape), 매개변수(parameter) 최적화, 역설계 해석으로 분류되고, 이중 매개변수 평가 최적화는 출력의 실험 data와 일치하는 입력 data를 찾는 일종의 역설계 과정이다. 최적화 형태는 설계변수, 목적함수, 구속조건으로 구성된다. 설계변수는 두께, 형상, 치수 등 변경할 수 있는 독립변수이고, 목적함수는 강도, 효율, 내구수명 등 독립변수에 따라 변경되는 종속변수 중 최대화 또는 최소화되어야 하는 함수이다. 구속변수는 독립변수에 따라 변경되는 종속변수 중 상한 및 하한을 가지는 함수이다.

본 연구는 PZT계 세라믹스의 물성 매개변수 평가기법을 활용한 최적 압전물성을 분석하고자 하였다. 이를 위하여 PZT 세라믹스의 LTE 모드에 대한 임피던스 특성을 해석하고, 매개변수로는 압전소자의 c_{ij} 과 e_{ij} 를 사용하였다. 그리고 LTE 모드의 해석 임피던스 특성과 측정된 임피던스 특성을 비교하여 오차가 최소화된 최적 물성을 도출하고, 타 모드의 측정결과와 교차 비교하여 도출된 최적 물성의 신뢰성을 검증하고자 하였다 [13-16]. 향후 본 논문에서 개발된 방법을 PMN-PT 등과 같은 압전 단결정에 적용하고, 그 결과의 신뢰성을 추가 검증할 예정이다.

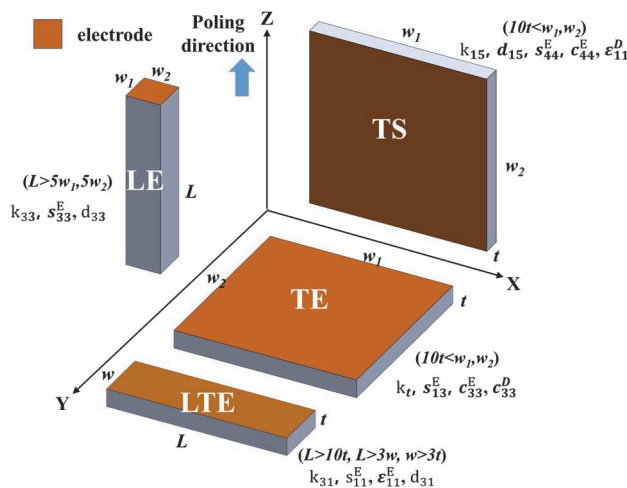


Fig. 1. Geometry of the resonator used to measure the piezoelectric material constant.

2. LTE 모드의 임피던스 특성

압전재료의 압전특성 지배방정식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있고, 여기서 S는 변형, T는 응력, E는 전계, D는 변위를 의미한다 [14-17].

$$T = c^E S - eE \quad (1)$$

$$D = eS + \epsilon^S E$$

PZT 압전소재의 경우 6 mm 대칭 행렬로, 탄성계수 c_{ij}^E , 유전상수 e_{ij} 및 유전율 ϵ_{ij}^S 특성 매트릭스는 식 (2)~(4)와 같이 표현된다 [14-26].

$$c_{ij}^E = \begin{bmatrix} c_{11}^E & c_{12}^E & c_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ c_{12}^E & c_{11}^E & c_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ c_{13}^E & c_{13}^E & c_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66}^E \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$e_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\epsilon^S / \epsilon_0 = \begin{bmatrix} \epsilon_{11}^S / \epsilon_0 & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{11}^S / \epsilon_0 & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33}^S / \epsilon_0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

일반적으로 압전구조방정식에서 LTE 모드에 관여하는 성분만 표시하면 식 (5)와 같다 [7].

$$S_1 = s_{11}^E T_1 + d_{31} E_3 \quad (5)$$

$$D_3 = d_{31} E_3 + \epsilon_{33}^T E_3$$

LTE 모드를 나타내는 파동방정식(Governing Equation: Christofel Eq.)은 식 (6)과 같다 [17].

$$\rho \frac{\partial^2 \xi^2}{\partial t^2} = c_{11}^E \left(1 + \frac{e_{31}^2}{c_{11}^E \epsilon_{33}^S} \right) \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} \quad (6)$$

여기서 ξ 는 변위성분(Component of displacement)이며, 압전체를 통과할 수 있는 전류량(current flow)은 식 (7)과 같다 [6-8].

$$I = \int_0^w \int_0^w \frac{\partial D_3}{\partial t} dxdt \quad (7)$$

$$= j\omega l \epsilon_{33}^T E_0 e^{j\omega t} \left[(1 - k_{31}^2) + \frac{k_{31}^2}{kl} \tan \frac{kl}{2} \right]$$

여기서 ω 는 각진동수(angular frequency)이며, 두께에 걸쳐 인가될 수 있는 전압은 식 (8)과 같다.

$$V = \int_0^w E_3 dz = E_3 s \quad (8)$$

그러므로 두께 진동모드를 나타내는 압전체의 전기기계 임피던스는 다음과 같이 결정된다.

$$\therefore Z = \frac{V}{I} = \frac{s}{j\omega l \epsilon_{33}^T E_0 e^{j\omega t} \left[(1 - k_{31}^2) + \frac{k_{31}^2}{kl} \tan \frac{kl}{2} \right]} \quad (9)$$

3. PZT 세라믹스의 물성 최적화 방법

본 연구에 사용된 PZT 압전세라믹은 한국세라믹기술원에서 개발한 PZT-8 기반의 hard계 압전 소자를 사용하였다. 최종 추출 물성의 검증용 비교데이터와 해석 임피던스 특성을 측정하기 위하여 PZT 세라믹스의 TE, TS, LTE, RAD, LE 모드의 진동모드 시편을 성형하여 소결하였다. 소결된 세라믹을 특정 진동모드의 형상으로 가공하고 실리콘 오일에서 2.5 kv/mm로 인가하여 압전특성을 부여하였다. 그리고 임피던스 분석기(Agilent社, 4294A)로 정전용량, 공진주파수(f_r) 및 반공진주파수(f_a) 등을 측정하여 공진측정법으로 PZT 세라믹스의 물성을 평가하였다. 이렇게 측정된 물성의 정확성을 검증하기 위하여 다물리계 유한요소 프로그램인 COMSOL Multiphysics S/W ver.6을 이용하여 PZT 세라믹스의 TE 모드, RAD 모드 및 LE 모드에 대한 주파수 응답특성을 해석하여 측정된 모드별 임피던스 데이터와 비교하였다.

본 연구의 매개변수평가(parameter estimation) 최적화 방법을 이용한 PZT계 압전세라믹스의 물성 최적화 과정을 그림 2에 나타내었고, 사용한 PZT 세라믹스의 물성 변수 범위는 표 1에 나타내었다. 고정 매개변수는 타모드의 특성과 상관없이 독립적인 탄성계수와 압전상수를 나타내는 TS모드의 c_{44}^E , e_{15} , $\epsilon_{11}^T / \epsilon_0$, $\epsilon_{11}^S / \epsilon_0$ 를 하였으며, LTE 모드에서 측정된 밀도, s_{11}^E , d_{31} , $\epsilon_{33}^T / \epsilon_0$, $\epsilon_{33}^S / \epsilon_0$ 를 적용하였다. 해석에 적용한 매개변수로 c_{11}^E , c_{12}^E , c_{13}^E , c_{33}^E , c_{66}^E ($(c_{11}^E - c_{12}^E) / 2$), e_{31} , e_{33} 로 정의하였으며, 표 1에 나타낸 바와 같이 PZT2부터 PZT8까지 물성 데이터로부터 물성범위를 분석하고 $\pm 10\%$ 확대하여 범위로 지정하였다 [27]. 그리고 수치해석한 PZT의 임피던스 특성과 측정된 임피던스 특성을 비교 분석하고, least square method로 해석오차를 계산하였다. 또한 매개변수를 변화시켜 계산

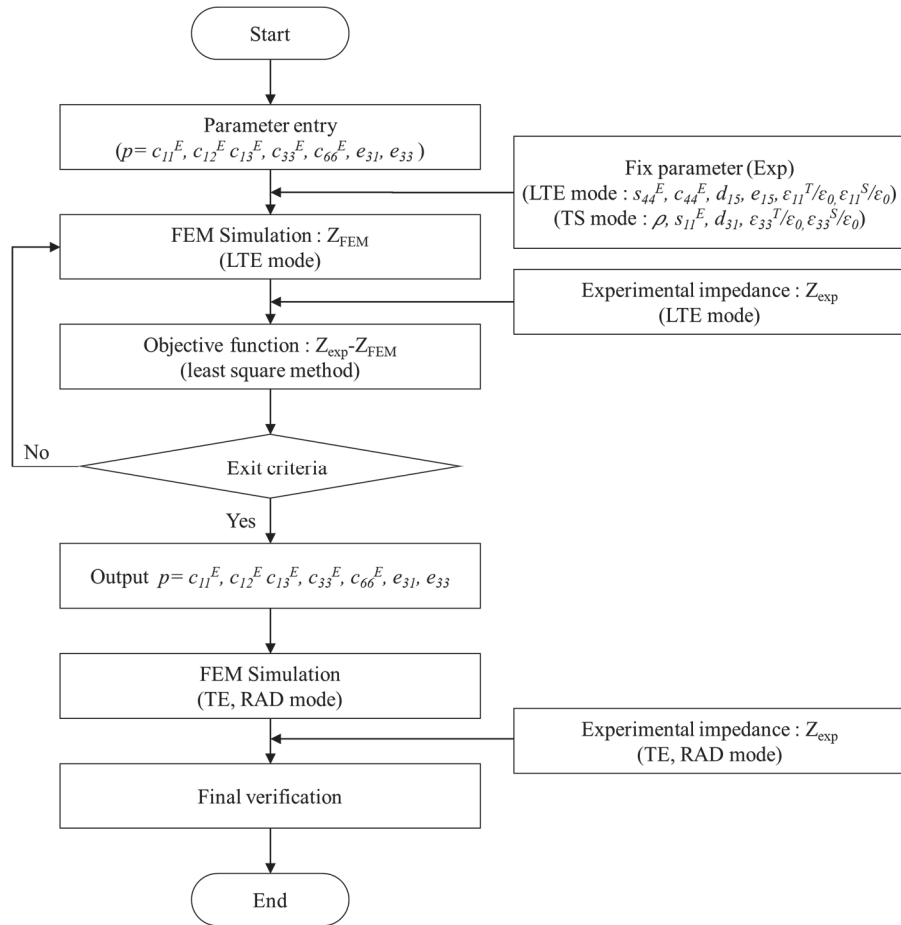


Fig. 2. Optimization process diagram for the piezoelectric property of the PZT ceramics.

Table 1. Material property ranges of the representative commercial PZT ceramic.

Material properties		Min.	Max.	Ranges Min-(10% · Min) ~ Max+(10% · Max)
Elastic stiffness constants (10 ¹⁰ N/m ²)	c_{11}^E	12.1 ^{5a}	14.9 ⁸	10.89~16.39
	c_{12}^E	6.79 ²	8.11 ⁸	6.11~8.92
	c_{13}^E	6.81 ²	8.41 ^{5h}	6.12~9.25
	c_{33}^E	11.1 ^{5a}	13.2 ⁸	9.99~14.52
Piezoelectric constants (C/m ²)	e_{31}	-6.55 ^{5h}	-1.86 ²	-7.21~-1.75
	e_{33}	9 ²	23.3 ^{5h}	7.20~27.96

² PZT-2, ⁴ PZT-4, ^{5a} PZT-5A, ^{5h} PZT-5H, ⁸ PZT-8

된 해석오차를 최소화하고, LTE 모드에 대한 PZT 세라믹스의 최적 물성을 도출하였다. 도출 물성의 정확성을 평가하기 위하여 모드별로 해석하고 측정 임피던스들과 비교하여 최종물성을 검증하였다.

4. 결과 및 고찰

측정된 임피던스 데이터와 공진법으로 평가한 압전물성을 적용한 해석한 결과를 비교하여 그림 5에 나타내었고, 그림 3(a), (b), (c)는 각각 LTE 모드, RAD모드 및 TE모드의 비교 결과이다. 그림 3(a), (b), (c)는 각각 LTE 모드, RAD모드 및 TE모드이며, 해석결과와 측정 임피던스 데이터의 비교 결과 불일치하였다(그림 3(a)~(c)참조). 이처럼 압전물성평가 결과의 오류는 PZT 응용부품 설계에 대한 부정확성을 증가시키게 되며, 공진법 측정오류를 보완하기 위하여 본 연구에서는 매개변수추정(parameter estimation) 평가 방법을 이용하여 PZT계 압전세라믹스의 최적 물성을 예측하고자 하였다

최적 물성 예측에 앞서 탄성계수 c_{ij} 에 따른 임피던스 변화의 경향성을 분석하기 위하여 해석을 수행한 결과는 표 2~3과 그림 3과 같았다. 매개변수 c_{11}^E 과 c_{33}^E 가 증가하면 주파수가 f_r , f_a 이 증가하고, 반대로 c_{12}^E 와 c_{13}^E 는 증가하면 f_r , f_a 는 감소하였다(그림 4(a)~(d) 참조). $\Delta f(f_r - f_a)$ 는 매개변수가 증가하면 c_{11}^E , c_{12}^E , c_{33}^E 는 증가하며, c_{13}^E 은 감소하였다(표 2 참조). 매개변수 e_{31} , e_{33} 증가하면 f_r 는 변화가 없지만, e_{31} 는 f_a 와 $\Delta f(f_r - f_a)$ 는 감소하며, e_{33} 는 f_a 와 $\Delta f(f_r - f_a)$ 는 증가한다(그림 5(a), 5(b), 표 3 참조). 경향성 분석 결과를 최적화 시 매개변수 우선 순위 인자결정기준으로 활용하였으며, 압전물성과 임피던스 특성 간의 상관관계를 규명할 수 있었다.

매개변수평가(parameter estimation) 기법으로 도출한 PZT계 압전세라믹스의 압전물성과 검증을 위해서 측정된 압전 물성의 비교 결과를 표 4에 나타내었다. c_{ij} 와 e_{ij} 를 예측하고 s_{ij} 와 d_{ij} 로 변환하였으며, 고정 변수로 반영한 LTE 모드와 TS 모드에서 측정된 압전물성은 동일하며, 그 외 압전물성을 차이를 나타내었다. d_{33} 의 경우 d_{33} meter (PH300, Piezotest社)로 측정한 결과와 유사하게(303×10^{-12} C/N) 예측되었다.

최적화 물성을 검증하기 위하여 TE, RAD모드의 임피던스 특성을 해석한 결과는 LTE 모드의 f_r 는 1 kHz차이에서 0.01 kHz로, f_a 는 1.3 kHz에서 0.05 kHz로 감소하였다. RAD모드의 f_r 는 0.44 kHz차이에서 0.14 kHz로, f_a 는 0.66 kHz에서 0.3 kHz로 감소하였으며, TE 모드도 f_r 는 71 kHz 차이에서 12 kHz로, f_a 는 173.5 kHz에서 19.5 kHz로 감소하였다. 본 결과를 통하여 연구 개발 평가 방법이 물성평가에 적용 가능할 것으로 기대된다(그림 6(a)~(c) 참조).

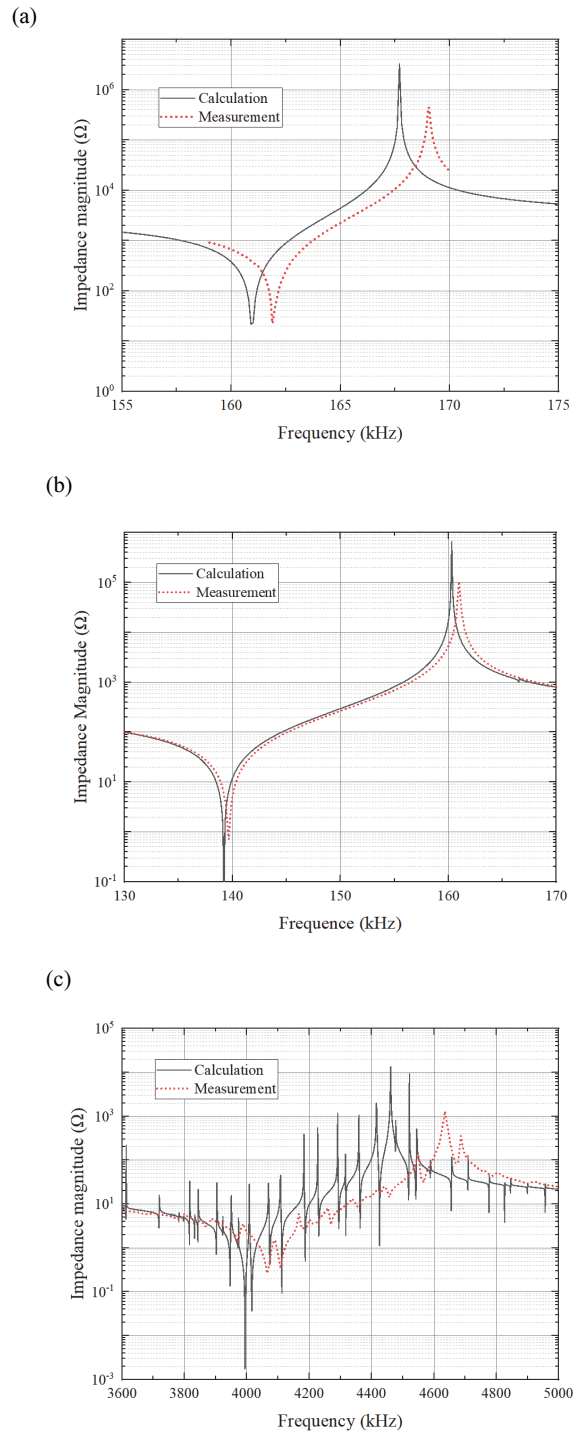


Fig. 3 Comparison of the measured with the calculated impedance spectrum of the PZT using the measured material properties. (a) LTE mode, (b) RAD mode, and (c) TE mode.

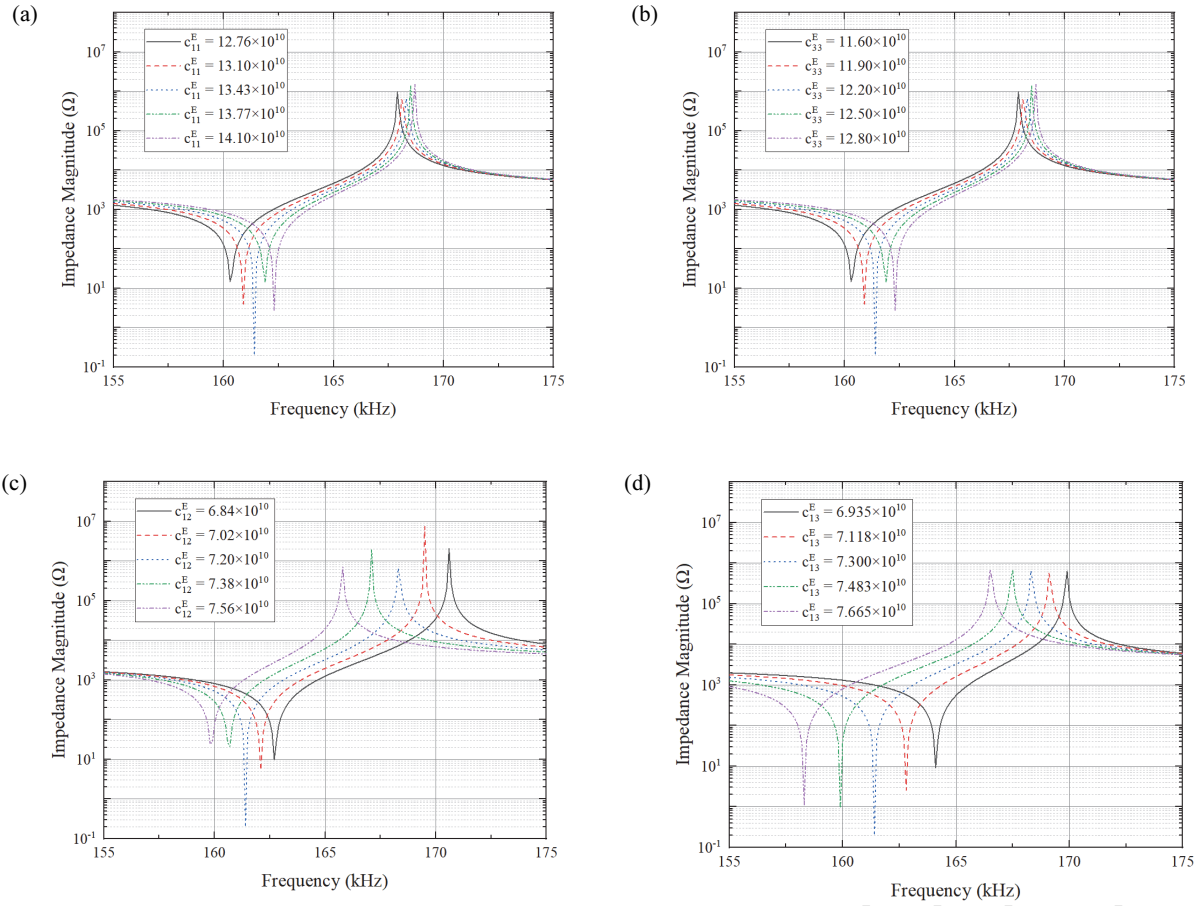


Fig. 4. Simulated impedance spectrum with the elastic stiffness modulus of the PZT ceramics. (a) c_{11}^E , (b) c_{33}^E , (c) c_{12}^E , and (d) c_{13}^E .

Table 2. Analysis results of the resonance and anti-resonance frequency characteristics with the elastic stiffness constants of the PZT ceramic.

	Parameter (10^{10} N/m^2)	12.76	13.1	13.43	13.77	14.1
c_{11}^E	f_r (kHz)	160.3	160.9	161.4	161.9	162.3
	$\Delta f(f_r-f_a)$	7.6	7.2	6.9	6.6	6.4
	Parameter (10^{10} N/m^2)	11.59	11.9	12.2	12.51	12.81
c_{33}^E	f_r (kHz)	160.3	160.9	161.4	161.9	162.3
	$\Delta f(f_r-f_a)$	7.6	7.2	6.9	6.6	6.4
	Parameter (10^{10} N/m^2)	6.84	7.02	7.2	7.38	7.56
c_{12}^E	f_r (kHz)	162.7	162.1	161.4	160.7	159.8
	$\Delta f(f_r-f_a)$	7.9	7.4	6.9	6.4	6
	Parameter (10^{10} N/m^2)	6.935	7.118	7.3	7.483	7.665
c_{13}^E	f_r (kHz)	164.1	162.8	161.4	159.9	158.3
	$\Delta f(f_r-f_a)$	5.8	6.3	6.9	7.6	8.2

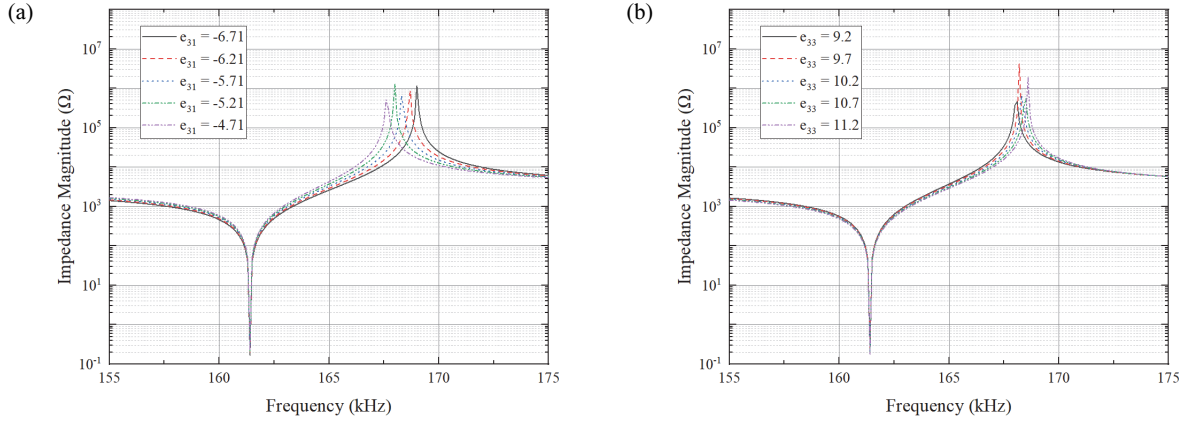


Fig. 5. Simulated impedance spectrum with the piezoelectric constants of the PZT ceramics. (a) e_{31} and (b) e_{33} .

Table 3. Analysis results of the resonance and anti-resonance frequency characteristics with the piezoelectric constants of the PZT ceramic.

Parameter (C/m ²)		-6.71	-6.21	-5.71	-5.21	-4.71
e_{31}	fa (kHz)	169	168.7	168.3	168	167.6
	$\Delta f(fr-fa)$	7.6	7.3	6.9	6.6	6.2
	Parameter (C/m ²)		9.20	9.71	10.20	10.70
e_{33}	fa (kHz)	168.1	168.2	168.3	168.5	168.6
	$\Delta f(fr-fa)$	6.7	6.8	6.9	7.1	7.2

Table 4. Comparisons of the optimized material properties with the measured values of the KICET-PZT8 ceramics.

Material properties			Optimized	Measured	Discrepancy
Density	kg/m ³	ρ	7750	7750	-
Elastic stiffness constants	10 ¹⁰ N/m ²	C_{11}^E	13.50	13.43	0.07
		C_{12}^E	7.27	7.30	-0.03
		C_{13}^E	7.30	7.25	0.05
		C_{33}^E	12.00	11.92	0.08
		C_{44}^E	3.53	3.53	-
		C_{66}^E	3.12	3.07	0.05
Elastic compliance constants	10 ⁻¹² m ² /N	s_{11}^E	12.35	12.35	-
		s_{12}^E	-3.82	-3.95	0.13
		s_{13}^E	-5.12	-5.11	-0.01
		s_{33}^E	14.46	14.61	-0.15
		s_{44}^E	28.32	28.32	-
		s_{66}^E	32.10	32.61	-0.51
Piezoelectric constants	C/m ²	e_{15}	10.20	10.20	-
		e_{31}	-5.77	-5.71	-0.06
		e_{33}	16.60	14.50	2.1
	10 ⁻¹² C/N	d_{15}	289	289	-
		d_{31}	-133	-133	-
Dielectric constant	-	$\epsilon_{11}^S/\epsilon_0$	725	725	-
		$\epsilon_{33}^S/\epsilon_0$	683	683	-
		$\epsilon_{11}^T/\epsilon_0$	1417	1417	-
		$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	1058	1058	-

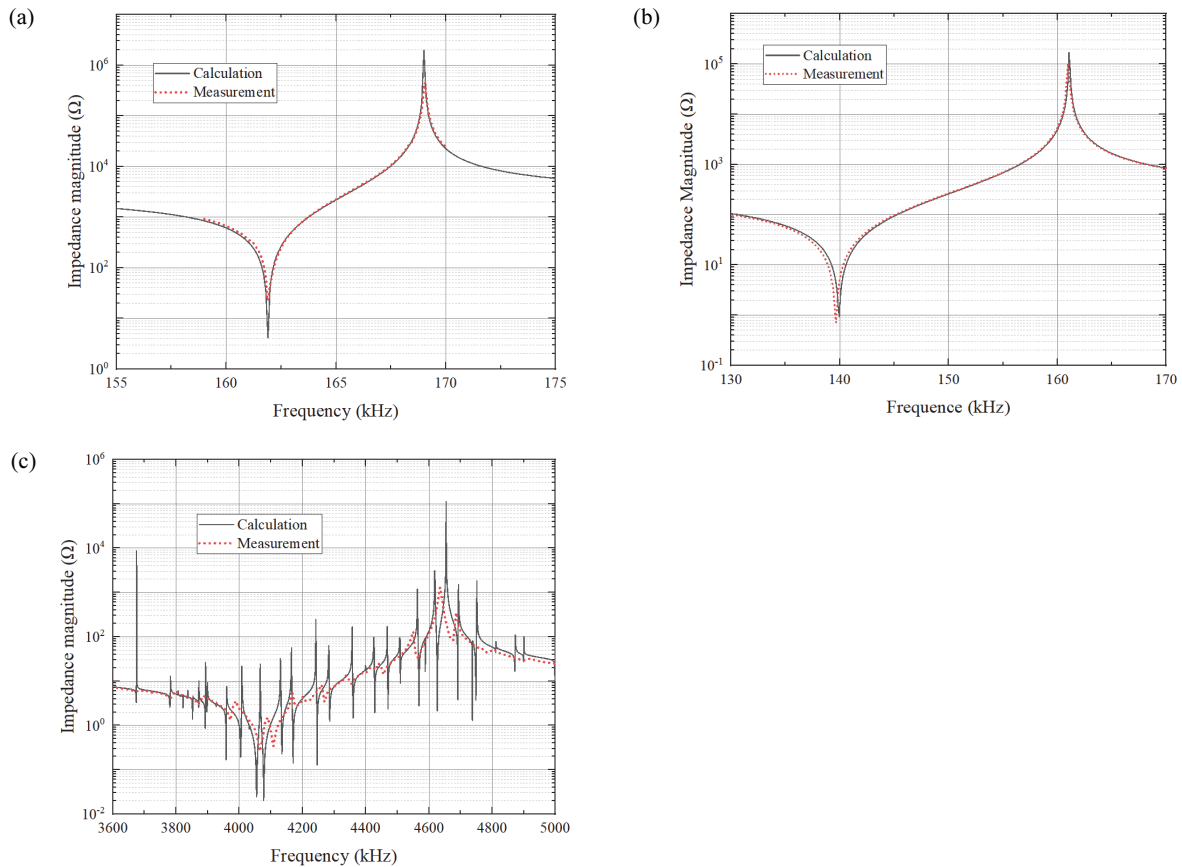


Fig. 6. Comparison of the measured with the calculated impedance spectrum of the PZT using the optimized material properties using the parameter estimation method. (a) LTE mode, (b) RAD mode, and (c) TE mode.

5. 결론

본 연구는 PZT계 세라믹스의 일반적인 물성평가방법인 공진측정법 오차를 보완할 수 있는 매개변수 평가 기법을 활용한 압전물성 예측 방법을 개발하고자 하였다. 매개변수로는 압전소자의 탄성율과 압전상수를 매개변수로 사용하여 LTE 모드에 대한 임피던스 특성 해석 결과와 측정된 임피던스 데이터를 비교 계산하여 최소 오차의 최적 물성을 도출하였으며, 계산 결과의 신뢰성을 검증하였다.

매개변수(C_{11}^E , C_{12}^E , C_{13}^E , C_{33}^E , $C_{66}^E((C_{11}^E - C_{12}^E)/2)$, e_{31} , e_{33})에 따른 임피던스 특성 변화를 분석하였으며, 공진측정법으로 TE, LTE, LE, TS, RAD 모드의 진동모드 시편을 제작하여 물성을 평가하였다. 측정 물성치를 반영한 LTE, RAD, TE의 해석 결과와 측정 임피던스 특성 비교를 통하여 측정결과의 부정확성을 확인하였다. 또한 동일한 방법으로 매개변수평가 기법으로 도출한 물성과 측정 임피던스 특성 비교한 결과, 측정물성 기반 해석결과에 비하여 오차가 현저히 감소하여, 물성의 정확성이 향상되었음을 확

인하였다.

본 연구를 통하여 개발한 매개변수평가 기법을 활용하여 신뢰성 있는 PZT계 압전세라믹스 물성을 용이하고 평가할 수 있었다. 개발 기법을 활용할 경우 압전조성 개발에 적용시 신속하게 평가가 가능하며, 응용부품 설계 결과에 신뢰성을 향상 시킬수 있을 것으로 기대된다.

ORCID

Jong-In Im

<https://orcid.org/0000-0001-6758-8521>

REFERENCES

- [1] B. G. Ahn, D. K. Lee, D. Y. Han, C. Y. Kang, J. W. Choi, H. J. Kim, and S. J. Yoon, *Journal of the Korean Ceramic Society*, **40**, 225 (2003). [DOI: <https://doi.org/10.4191/kcers.2003.40.3.225>]
- [2] T. Li, Y. Chen, F. Boey, and J. Ma, *Sensors and Actuators A: Physical*, **134**, 544 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna>]

- 2006.06.032]
- [3] K. Tanaka, Y. Tanaka, H. Shiomi, Y. Kurumi, and T. Tani, *Procedia Engineering*, **47**, 366 (2012). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.159>]
- [4] X. Liao, Z. Qiu, T. Jiang, M.R. Sadiq, Z. Huang, C.E.M. Demore and S. Cochran, *Materials*, **8**, 8304 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.3390/ma8125456>]
- [5] M. Stewart and M. G. Cain, Direct Piezoelectric Measurement: The Berlincourt Method. *Characterisation of Ferroelectric Bulk Materials and Thin Films* (Springer: Dordrecht, 2014), pp. 37–64.
- [6] H. J. McSkimin, *J. Acoust. Soc. Am.*, **33**, 606 (1961). [DOI: <https://doi.org/10.1121/1.1908740>]
- [7] B. Kaltenbacher, M. Kaltenbacher, R. Lerch, and R. Simkovic, *Proc. 2000 IEEE Ultrasonics Symposium* (San Juan, Puerto Rico, 2000). [DOI: <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2000.921501>]
- [8] D. Kybartas and A. Lukoševičius, *Ultragarsas*, **45**, 22 (2002).
- [9] H. W. Joo, C. H. Lee, J. S. Rho, and H. K. Jung, *IEEE Trans. Ultrason. Ferr.*, **50**, 965 (2003). [DOI: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1226540>]
- [10] H. W. Joo, C. H. Lee, and H. K. Jung, *Ultrasonics*, **43**, 13 (2004). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TUFFC.2003.1226540>]
- [11] B. Kaltenbacher, T. Lahmer, M. Mohr, and M. Kaltenbacher, *Eur. J. Appl. Math.*, **17**, 383 (2006). [DOI: <https://doi.org/10.1017/S0956792506006474>]
- [12] T. Lahmer, M. Kaltenbacher, B. Kaltenbacher, R. Lerch, and E. Leder, *IEEE Trans. Ultrason. Ferr.*, **55**, 465 (2008).
- [13] S. J. Rupitsch and R. Lerch, *Appl. Phys. A.*, **97**, 735 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s00339-009-5438-1>]
- [14] B. Jaffe, W. R. Cook Jr. and H. Jaffe, *Piezoelectric Ceramics* (Academic Press, London and New York, 1971).
- [15] J. F. Nye, *Physical Properties of Crystals* (Clarendon Press, Oxford, 1985).
- [16] ANSI/IEEE Standard No. 176-1987 IEEE Standard on Piezoelectricity, IEEE, New York, 1987.
- [17] O. B. Wilson, *Introduction to Theory and Design of Sonar Transducers* (Peninsula Press, LosAltos, 1988).
- [18] K. W. Kwok, H.L.W. Chan, and C. L. Choy, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, **44**, 733 (1997). [DOI: <https://doi.org/10.1109/58.655188>]
- [19] R. Zhang, B. Jiang, and W. W. Cao, *J. Appl. Phys.*, **90**, 3471 (2001). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1390494>]
- [20] R. E. Newnham, *Properties of Materials: Anisotropy* (Symmetry, Structure, Oxford, New York, 2005).
- [21] M. J. Zipparo and C. G. Oakley, *Proc. IEEE Ultrason Sym.* (IEEE, Atlanta, GA, USA, 2001) p. 1017. [DOI: <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2001.991892>]
- [22] S. H. Lee and Y. R. Roh, *The Journal of the Acoustical Society of Korea*, **23**, 103 (2004). [DOI: <https://doi.org/10.7776/ASK.2011.30.7.368>]
- [23] C. Joh, J. Kim, and Y. Roh, *Smart Mater. Struct.*, **22**, 12 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/22/12/125027>]
- [24] M. Wild, B. Martin, H. Einar, H. Lars, and H. Karina, *J. Acoust. Soc. Am.*, **144**, 2128 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1121/1.5057443>]
- [25] L. Li, L. K. Wang, L. Qin, and Y. Lv, *IEEE Trans. U.F.F.C.*, **56**, 1476 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2009.1203>]
- [26] J. Kim, S. Pyo, and Y. Roh, *The Journal of the Acoustical Society of Korea*, **30**, 368 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.7776/ASK.2011.30.7.368>]
- [27] D. Berlincourt and H.H.A. Krueger, *Proc. Properties of Morgan Electro Ceramic Ceramics* (Tech. Publication TP-226, Cleveland, OH, USA, 2002).