한국음향학회지 제30권 제8호 pp. 436~445 (2011)

2-2형 압전복합체 제작 및 등가 물성 도출

Fabrication of a 2-2 Mode Piezocomposite and Derivation of its Equivalent Properties

신 호 섭, 노 용 래*
(Hoseop Shin, Yongrae Roh*)

(주)LIG 넥스원, *경북대학교 기계공학과
(접수일자: 2011년 8월 1일; 채택일자: 2011년 9월 19일)

본 논문에서는 2-2형 압전복합체의 등가 물성 도출에 관해 연구하였다. 먼저 2-2 압전복합체의 특성 변화를 유한요소법으로 해석하였고, 해석 결과와 2-2 압전복합체 시제작품의 특성 측정 결과를 비교하여 유한요소해석의 타당성을 검증하였다. PZT-5H와 고분자재료로 구성된 압전복합체의 단일상 등가물성은 Asymptotic Averaging Method를 이용하여 도출하였고, 도출된 물성을 다양한 진동 모드의 단일상 공진자 유한요소 모델에 대입한 후 완전한 2-2 압전복합체와의 임피던스 스펙트럼 차이를 최소 자승법을 이용하여 보정함으로써, 도출된 등가 물성값의 정확성을 향상시켰다. 본 연구에서 도출한 2-2 압전복합체의 등가 물성은 향후 다양한 음향 센서의 설계에 유용하게 사용될 수 있을 것이다.
핵심용어: 2-2 압전복합체, 등가물성, Asymptotic averaging method, 유한요소해석, 진동 모드
투고분야: 음향 재료 분야 (16)

In this paper, equivalent properties of 2-2 mode piezocomposites were studied. Variation of the properties of 2-2 mode piezocomposites was analyzed by the finite element method, and the result was compared with experimental measurement data to confirm the validity of the analysis. The equivalent properties of a single phase material to represent the piezocomposite composed of PZT-5H and polymer were derived by the asymptotic averaging method. Accuracy of the derived equivalent properties was enhanced by minimizing the discrepancy between the impedance spectra of full 2-2 piezocomposite and equivalent single phase material resonators of various vibration modes by the least square method. The equivalent properties of 2-2 piezocomposites derived in this study can be utilized to the design of diverse acoustic sensors.
Keywords: 2-2 Piezocomposite, Equivalent properties, Asymptotic averaging method, FEA, Resonance mode
ASK subject classification: Acoustic Materials (16)

I. 서 론

압전세라믹의 단점을 보완하고 압전특성을 개선하기 위해 개발된 다양한 압전복합체 중, 2-2 압전복합체는 제작성이 상대적으로 간편하면서도 압전성능이 좋다는 장점을 가지고 있어 초음파 센서에 많이 응용되고 있다 [1-3]. 압전체를 이용한 음향 트랜스듀서를 설계하기 위한 방법으로 근래에는 유한요소해석법을 이용하여 트랜스듀서의 구조 변수에 따른 특성 경향을 파악한 후, 최적 설계를 하는 방법이 많이 사용 된다 [4]. 그러나 초음파 트랜스듀서의 유한요소해석에 있어 구동소자로 2-2 압전복합체를 적용할 경우, 규칙적으로 평행하게 배열된 압전세라믹과 고분자재료를 모두 묘사하기에는 모델이 매우 복잡해져 해석에 과도한 시간과 계산 자원이 소요되는 어려움이 있다. 특히, 채널 수가 많은 트랜스듀서의 설계에 있어서는 각 채널을 나누고 채널 간의 간섭을 억제하기 위해 필요한 kerf 구조뿐만 아니라 2-2 압전 복합체라는 구동소자 자체 내의 구조도 함께 설계를 해야 하므로, 모델이 그만큼 더 복잡해지고 계산이 어려워지는 문제가 있다.

본 연구에서는 이러한 문제를 해결하고자, 압전세라믹과 고분자 재료로 구성되는 이상 (two phase)의 압전복합체와 동일한 특성을 가지는 단일상 (single phase) 재료의 등가 물성을 도출하는 방법을 연구하였다. 도출된 등

책임저자: 노 용 래 (yryong@knu.ac.kr)
702-701 대구광역시 북구 산격동 1370 경북대학교 기계공학과
(전화: 053-950-6828; 팩스: 053-943-8716)

가 물성의 단일상 재료는 트랜스듀서의 모델링 시 복잡한 구조의 2-2 압전복합체를 대신하여 사용됨으로서 트랜스듀서 구조의 설계와 성능 해석을 월등히 용이하게 할 수 있다.

이러한 목적으로 우선 2-2 압전복합체의 유한요소 모델을 구축하고, 구축된 모델의 정확도를 실제 제작된 압전복합체 시편과의 전기-기계 임피던스 스팩트럼 비교를 통해 검증하였다.

일반적으로 압전소자의 물성을 구하는 방법에는 공진법 [5-6], 초음파 측정법 [7], d_{33} meter기와 같은 특정 상수 측정 장치를 이용하는 방법 등이 있다. 그러나 이들 방법들에 의해 이방성 재료의 모든 물성들을 구하기 위해서는 특정 공진 모드가 우세한 많은 종류의 압전소자 모델이 있어야 할 뿐만 아니라 관련 상수를 구할 수 있는 이론식도 충분히 갖추어져야 하므로, 대칭성이 낮은 재료인 경우에는 적용에 많은 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 ensemble 이론을 바탕으로 복합체의 물성을 압전세라믹과 고분자재료의 부피비에 따라 산술 평균함으로써 복합체의 모든 물성을 구할 수 있는 Asymptotic Averaging Method를 이용하여 2-2 압전복합체를 단일상 재료로 나타낼 수 있는 등가 물성을 도출하였다 [8]. 그러나 Asymptotic Averaging Method는 2-2 압전복합체의 물성을 단순히 압전세라믹과 고분자재료의 물성과 부피비만으로 모두 구할 수 있다는 장점이 있는 반면에, 계산된 물성이 실제 복합체 물성에 비해 일정 크기의 오차를 가진다는 문제도 동시에 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 우선 Asymptotic averaging method에 의해 2-2 압전복합체의 등가물성을 구한 다음에, 이를 다양한 진동 모드의 단일상 공진자 유한요소 모델에 대입한 후 완전한 2-2 압전복합체와의 임피던스 스펙트럼 차이를 최소 자승법을 이용하여 보정함으로써, 도출된 등가 물성값의 정확성을 향상시켰다.

II. 이론적 배경

압전복합체란 능동 소자인 압전세라믹의 음향 임피던스가 높다는 단점을 보완하고 전기-기계 결합계수를 향상시키기 위하여 압전세라믹과 고분자재료를 혼합한 복합재료이다 [9]. 특정한 주파수 및 압전성능을 가지는 초음파 트랜스듀서의 설계를 위해서는 압전복합체의 특성 제어가 필수적인데, 압전복합체의 특성은 고분자재료와 압전세라믹의 연결 형태 (connectivity), 부피비, 종횡비

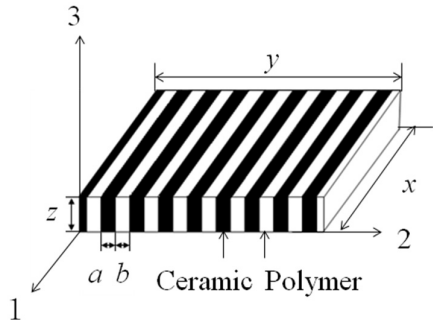


그림 1. 2-2 압전복합체의 개략도
Fig. 1. Schematic of a 2-2 piezocomposite.

(Aspect ratio), 물성 등에 의해 결정되어진다. 대략 10가지의 연결 형태 중 2-2 압전복합체는 그림 1과 같이 압전복합체 내의 압전세라믹과 고분자재료 연결 형태가 각각 2차원인 소자를 말한다 [10].

본 연구에서는 2-2 압전복합체의 특성을 평가하기 위한 값들로 다음 식 (1)-(5)에 나타난 것들을 이용하였다 [8,11,12].

$$\overline{k_{eff}} = \sqrt{\frac{f_a^2 - f_r^2}{f_a^2}} \tag{1}$$

$$\overline{\rho} = v\rho^C + (1-v)\rho^P \tag{2}$$

$$\overline{c_{33}^{\,D}} = 4\rho t^2 f_a^2 \tag{3}$$

$$\overline{V} = \sqrt{\frac{\overline{c_{33}^{\,D}}}{\overline{\rho}}} \tag{4}$$

$$\overline{Z} = \overline{\rho}\,\overline{V} \tag{5}$$

식 (1)-(5)에서 사용한 윗줄 ¯은 압전복합체, 윗 첨자 C는 압전세라믹 상 (ceramic phase), P는 고분자재료 상 (polymer phase)을 말한다. 식 (1)의 $\overline{k_{eff}}$는 2-2 압전복합체의 전기-기계결합계수이고, f_a는 반공진 주파수, f_r은 공진주파수를 의미한다. 식 (2)는 압전세라믹의 부피비 v에 따라 정의되는 2-2 압전복합체의 밀도 ρ를 나타내고, 식 (3)에서 $c_{33}{}^D$는 일정한 전기변위장 (D)에서 측정한 압전복합체의 강성계수 (stiffness)를, 그리고 t는 압전복합체 시편의 두께를 각각 나타낸다. 식 (4)에서 $\overline{V}$는 2-2 압전복합체의 z축 방향 종파 음속을 말한다. 식 (5)에서 $\overline{Z}$는 2-2 압전복합체의 음향 임피던스이다. 이상의 특성 값들은 식에 나타나 있듯이 압전복합체를 구성하는 압전세라믹과 고분자재료의 종류에 따라 달라지게 되며,

표 1. 고분자재료의 물성
Table 1. Properties of the polymer.

물성	기호 및 단위	값
Longitudinal sound velocity	V_l [m/s]	2,550
Shear sound velocity	V_s [m/s]	1,140
Young's modulus	E [GPa]	4.34
Shear modulus	G [GPa]	1.57
Poisson's ratio	σ	0.38
Longitudinal attenuation coefficient	a_l @ 3.5 MHz [dB/mm]	0.79
Shear attenuation coefficient	a_s @ 3.5 MHz [dB/mm]	5.12
Density	ρ [kg/m^3]	1,220
Dielectric constant	$\varepsilon/\varepsilon_0$	3.92

일정한 압전세라믹과 고분자재료에 대해서는 압전복합체 내 세라믹의 부피 분율 v에 따라 다르게 나타난다. 또한 2-2 압전복합체의 특성은 세라믹과 고분자 재료의 종횡비에 따라서도 달라지는데, 종횡비는 그림 1에 나타낸 세라믹의 폭 a와 고분자재료의 폭 b에 따라 다음과 같이 정의된다 [10].

$$Aspect\,Ratio = \frac{Pitch}{Thickness} = \frac{(a+b)}{t} \qquad (6)$$

본 연구에서는 2-2 압전복합체를 구성하는 고분자 재료로 표 1에 나타난 물성을 가지는 재료를 사용하였고, 압전세라믹으로는 PZT-5H를 사용하였다 [12]. 본 연구의 주제인 등가 물성을 도출할 2-2 압전복합체의 특성 분석에는 상용 유한요소 해석도구인 PZFlex를 이용하였다.

III. 2-2 압전복합체 시편 제작 및 음향 특성 분석

유한요소법을 이용한 2-2 압전복합체의 특성 해석 방법이 실제 제작품의 특성을 얼마나 정확히 묘사할 수 있는지 그 타당성을 검증하기 위하여, 복합체 시편을 실제로 제작을 하여 음향 특성을 평가하였다. 2-2 압전복합체 제작은 Dice & Fill법을 이용 하였다. Dice & Fill법은 압전세라믹에 고분자재료가 정해진 폭 만큼 삽입될 수 있도록 그와 같은 폭의 diamond blade로 세라믹을 정밀하게 절단한 다음, 고분자재료의 주재와 경화제를 일정 비율로 섞어 경화되기 전 액체상태의 고분자재료를 Dicing된 부분에 부어 넣어 경화시키는 방법이다. Dice & Fill법을 이용하여 제작한 2-2 압전복합체는 최종 치수로 만들기 위하여 size cutting과정과 연마과정을 거쳐야 한다. 2-2 압전복합체의 제작 공정은 그림 2와 같다.

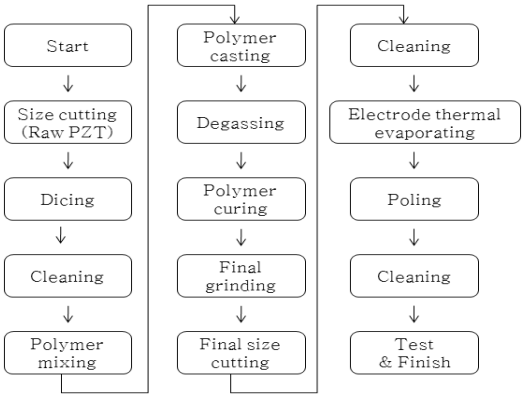


그림 2. 2-2 압전복합체 시편 제작 공정
Fig. 2. Fabrication procedure of 2-2 piezocomposite samples.

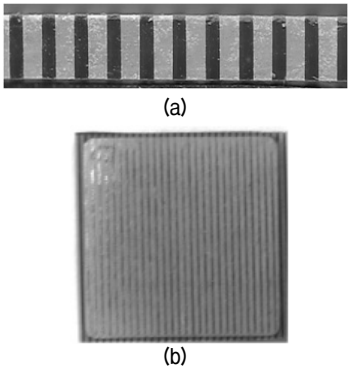


그림 3. 2-2 압전복합체 시편: (a) 정면도 (b) 평면도
Fig. 3. 2-2 piezocomposite sample: (a) front view, (b) plane view.

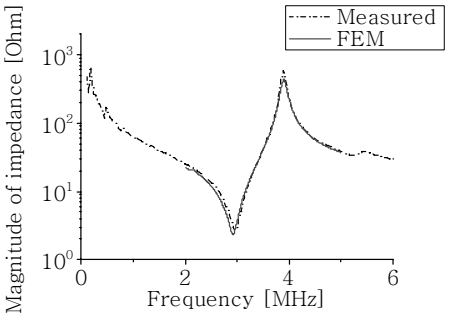


그림 4. 2-2 압전복합체 시편의 전기-기계적 임피던스 측정과 유한요소해석 결과의 비교
Fig. 4. Comparison of measured electro-mechanical impedance spectrum of a 2-2 piezocomposite sample with that of finite element analyses.

2-2 압전복합체 시편은 압전세라믹의 부피 분율 v가 70 %, 세라믹과 고분자 재료의 종횡비가 0.55가 되도록 제작하였다. 그림 3은 제작된 2-2 압전복합체 시편의 사진이며, 이때의 시편 두께 t는 530 μm, 압전세라믹의 폭 a는 200 μm, 그리고 고분자재료의 폭 b는 90 μm이다.

제작된 2-2 압전복합체의 특성 분석과 유한요소 해석 결과와의 비교를 위하여 Agilent사의 4194A Impedance analyzer를 이용하여 전기-기계적 임피던스를 측정하였다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 2-2 압전복합체의 전기-기계적 임피던스 측정 결과와 PZFlex를 이용한 유한요소해석 결과가 매우 잘 일치하는 것으로 나타났다. 이 결과는 본 연구에 사용된 유한요소 모델이 2-2 압전복합체의 특성 해석에 적합함을 밝혀주는 것이다.

IV. 2-2 압전복합체의 등가 물성 도출

4.1. 등가 물성 도출 이론

등가물성 식의 유도에 있어 2-2 압전복합체의 결정축 방향 및 치수의 표기는 그림 1에 나타낸 것을 따랐다. 본 연구에서 압전세라믹으로 사용된 PZT-5H의 결정 구조는 Hexagonal 6 mm이다 [13]. Hexagonal 6 mm의 경우 1방향과 2방향의 물성이 같으므로 구해야 하는 독립된 물성 상수의 개수가 총 10개이다. 그러나 1방향과 2방향의 방향성이 동일한 이방성 재료인 Hexagonal 6 mm의 PZT-5H와 등방성인 고분자재료의 조합으로 구성된 2-2 압전복합체는 이들 재료들이 2방향으로 평행하게 배열되기 때문에 1방향과 2방향의 대칭성을 상실하게 된다. 따라서 그림 1에 나타낸 2-2 압전복합체의 구조적 대칭성은 Orthorhombic mm으로 나타내어진다 [14]. Orthorhombic mm의 대칭성을 가지는 2-2 압전복합체의 물성 행렬을 표 2에 나타내었다.

Orthorhombic mm 결정구조는 Hexagonal 6 mm과는 다르게 독립된 물성 상수가 총 17개이다. 일반적인

표 2. Orthorhombic mm 재료의 물성 행렬
Table 2. Material constant matrix of orthorhombic mm materials.

Property	Matrix
Elastic stiffness matrix	$\begin{pmatrix} c_{11}^E & c_{12}^E & c_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ c_{12}^E & c_{22}^E & c_{23}^E & 0 & 0 & 0 \\ c_{13}^E & c_{23}^E & c_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66}^E \end{pmatrix}$
Piezoelectric matrix	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{24} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
Dielectric matrix	$\begin{pmatrix} \epsilon_{11}^S & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{22}^S & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33}^S \end{pmatrix}$

Asymptotic averaging method를 2-2 압전복합체의 물성 상수 도출에 적용할 수 있도록 본 연구에서 변형한 식들을 각 물성의 종류에 따라 식 (7)-(10)에 나타내었다 [8,15,16].

Elastic stiffness

$$\begin{aligned}
\overline{c_{22}} &= <c_{22}^{-1}>^{-1}, \\
\overline{c_{12}} &= <c_{12}/c_{22}^{-1}>\overline{c_{22}}, \\
\overline{c_{11}} &= \overline{c_{12}}^2/\overline{c_{22}} < c_{11} - c_{12}^2/c_{22} > \\
\overline{c_{23}} &= <c_{23}/c_{22}>\overline{c_{22}}, \\
\overline{c_{13}} &= \overline{c_{12}}\,\overline{c_{23}}/\overline{c_{22}} + <c_{13} - c_{12}c_{23}/c_{22}>, \\
\overline{c_{33}} &= \overline{c_{23}}^2/\overline{c_{22}} < c_{33} - c_{23}^2/c_{22} >, \\
\overline{c_{44}} &= Y_1/Z, \\
\overline{c_{55}} &= <c_{55}>, \\
\overline{c_{66}} &= <c_{66}^{-1}>^{-1},
\end{aligned} \tag{7}$$

Piezoelectric constant

$$\begin{aligned}
\overline{e_{32}} &= <e_{32}/c_{22}>\overline{c_{22}}, \\
\overline{e_{31}} &= \overline{e_{32}}\,\overline{c_{12}}/\overline{c_{22}} + <e_{31} - e_{32}c_{12}/c_{22}>, \\
\overline{e_{33}} &= \overline{e_{32}}\,\overline{c_{23}}/\overline{c_{22}} + <e_{33} - e_{32}c_{23}/c_{22}>, \\
\overline{e_{15}} &= <e_{15}>, \\
\overline{e_{24}} &= Y_2/Z,
\end{aligned} \tag{8}$$

Dielectric constant

$$\begin{aligned}
\overline{\epsilon_{11}} &= <\epsilon_{11}>, \\
\overline{\epsilon_{22}} &= Y_3/Z, \\
\overline{\epsilon_{33}} &= -\overline{e_{32}}^2/\overline{c_{22}} + <\epsilon_{33} + e_{32}^2/c_{22}>,
\end{aligned} \tag{9}$$

, where

$$\begin{aligned}
X &= c_{44}\epsilon_{22} + e_{24}^2, \\
Y_1 &= <c_{44}/X>, \\
Y_2 &= <e_{24}/X>, \\
Y_3 &= <\epsilon_{22}/X>, \\
<(\bullet)> &= \nu(\bullet)^C + (1-\nu)(\bullet)^P
\end{aligned} \tag{10}$$

식 (7)-(10)에 사용될 PZT-5H의 물성 상수는 Ref. 11의 값을 인용하였고, 이들 식에 들어갈 등방성 고분자재료의 elastic stiffness 상수들은 표 1에 나타난 물성값과

식 (11)을 이용하여 구할 수 있다. 고분자재료의 압전 상수들은 모두 “0”이다.

$$c_{11}{}^{P} = c_{22}{}^{P} = c_{33}{}^{P} = \frac{E(1-\sigma)}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}$$

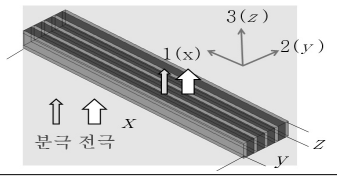
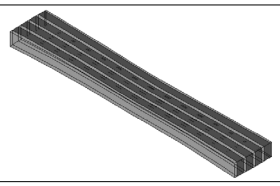
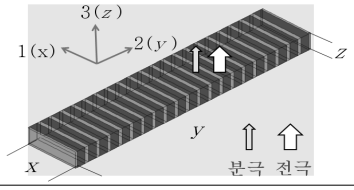
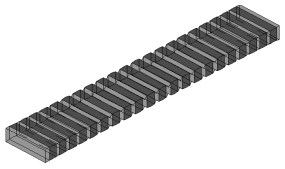
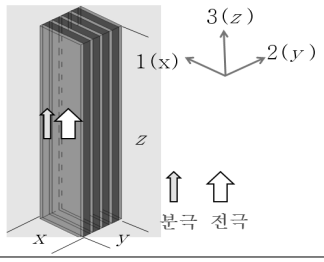
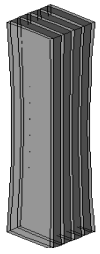
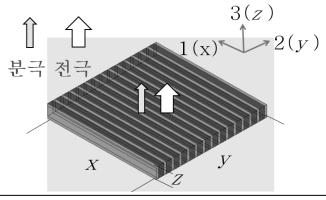
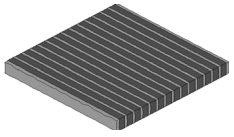
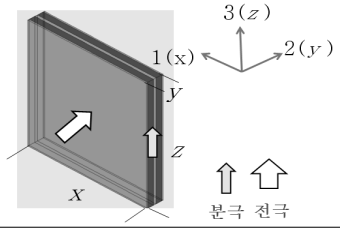
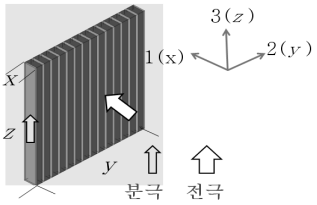
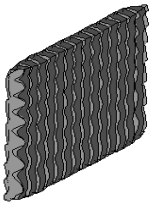
$$c_{12}{}^{P} = c_{13}{}^{P} = c_{23}{}^{P} = \frac{\sigma}{(1-\sigma)} c_{11}{}^{P} \qquad (11)$$

$$c_{44}{}^{P} = c_{55}{}^{P} = c_{66}{}^{P} = \frac{c_{11}{}^{P} - c_{12}{}^{P}}{2}$$

4.2. 2-2 압전복합체 등가 물성 도출 및 검증

식 (7)-(11)에 의해 PZT-5H의 부피비가 70 %이고 종횡비가 0.55인 경우의 등가 물성을 구하였다. 구해진 2-2 압전복합체 등가 물성의 타당성은 각 물성 값들이 우세하게 작용하는 여러 가지 진동 모드를 선정하여 완전한 2-2 압전복합체의 복잡한 구조를 묘사한 유한요소 공진자 모델 (이하 real model)과 등가 물성을 적용한 단일상 유한요소 공진자 모델 (이하 equivalent model)의 전기-기계

표 3. 2-2 압전복합체 공진자의 형상, 치수, mode shape 및 주요 물성 상수
Table 3. Shape, dimension, mode shape and influential material constants of 2-2 piezocomposite resonators.

Mode	Shape	Dimension	Mode Shape	Influential Material Constants
LTE1		z=530 [μm] x=15z y=z		$s_{11}{}^{E}$ e_{31} $\varepsilon_{11}{}^{S}$
LTE2		z=530 [μm] x=3z y=15z		$s_{22}{}^{E}$ e_{32} $\varepsilon_{22}{}^{S}$
LE		x=1.59 [mm] y=x z=5x		$s_{33}{}^{E}$ e_{33} $\varepsilon_{33}{}^{S}$
TE		z=530 [μm] x=10z y=x		$c_{33}{}^{E}$ e_{33} $\varepsilon_{33}{}^{S}$
TS1		y=742 [um] x=10y z=x		$s_{44}{}^{E}$ e_{24} $\varepsilon_{22}{}^{S}$
TS2		x=530 [μm] y=10x z=y		$s_{55}{}^{E}$ e_{15} $\varepsilon_{11}{}^{S}$

적 임피던스 스펙트럼을 비교함으로써 검증하였다. 이 두 종류의 공진자 모델들이 동일한 임피던스 스펙트럼을 보인다면 도출된 등가물성은 원래의 2-2 압전복합체의 특성을 완벽하게 나타내는 것이고, 차이가 난다면 그만큼 등가물성의 정확도가 떨어진다는 것을 의미한다.

이러한 목적으로 orthorhombic mm 결정 구조를 가지는 2-2 압전복합체가 가지는 17개의 독립 물성 상수들을 모두 포함할 수 있도록 표 3에 나타낸 것과 같은 6개의 공진자 모델을 만들었다. 표 3에는 Ref. 17을 근거로 한 사전 분석을 통해 각 공진자 모델별로 진동 모드에 가장 큰 영향을 미치는 물성상수들도 같이 나타내었다. 공진자들은 진동하는 모드에 따라 각각 LTE1 (Length thickness extensional mode 1), LTE2 (Length thickness extensional mode 2), LE (Length extensional mode), TE (Thickness extensional mode), TS1 (Thickness shear mode 1), TS2 (Thickness shear mode 2) 모델로 나누어지는데, 각 공진자 모델의 길이 비는 역시 IEEE standard의 규격에 따라 정하였다 [17]. LTE1은 분극과 전계가 3방향으로 가해졌을 때 1방향 길이 방향으로 진동하는 모드이다. 따라서 이 공진 모드에서 우세하게 작용하는 물성 값은 s_{11}^E, e_{31}, ε_{11}^S이다. LTE2는 분극과 전계가 3방향으로 가해졌을 때 2방향 길이 방향으로 진동하는 모드이고 우세하게 작용하는 물성 값은 s_{22}^E, e_{32}, ε_{22}^S이다. LE는 분극과 전계가 3방향으로 가해졌을 때 3방향 길이 방향으로 진동하는 모드이다. 따라서 우세하게 작용하는 물성 값은 s_{33}^E, e_{33}, ε_{33}^S이다. TE는 분극과 전계가 3방향으로 가해졌을 때 두께 방향으로 가진되는 진동 모드로 3방향의 치수가 1방향, 2방향의 치수에 비해 10배 이하로 작을 때 관찰 할 수 있다. 이 모드에 우세하게 작용하는 물성 값은 c_{33}^E, e_{33}, ε_{33}^S이다. TS1은 분극이 3방향, 전계가 2방향으로 가

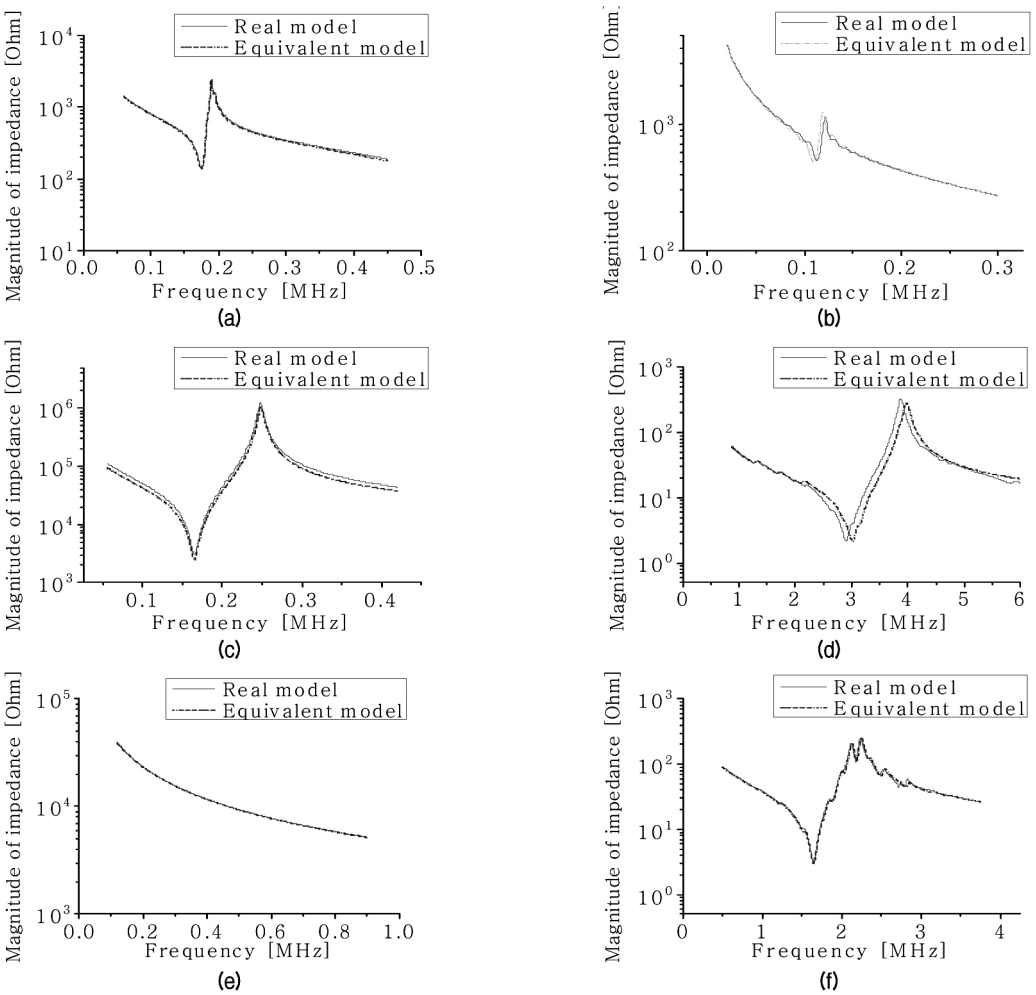


그림 5. 2-2 압전복합체 real model과 equivalent 모델의 전기-기계적 임피던스 스펙트럼 비교
(a) LTE1, (b) LTE2, (c) LE, (d) TE, (e) TS1, (f) TS2

Fig. 5. Comparison of electro-mechanical impedance spectra of the real models and equivalent models of 2-2 piezocomposites.
(a) LTE1, (b) LTE2, (c) LE, (d) TE, (e) TS1, (f) TS2.

해질 때 전극의 양면이 상하로 진동하는 Shear mode이다. 이 모드에 우세하게 작용하는 물성 값은 s_{44}^E, e_{24}, ε_{22}^S이다. TS2은 분극이 3방향, 전계가 1방향으로 가해질 때 전극의 양면이 상하로 진동하는 Shear mode이다. 이 모드에 우세하게 작용하는 물성 값은 s_{55}^E, e_{15}, ε_{11}^S이다. 각 모델의 형상, 치수 및 각 모드별로 우세하게 작용하는 주요 물성 값들을 요약하여 표 3에 나타내었다.

표 3의 6가지 공진자 모델에 대하여 real model과 equivalent model의 전기-기계적 임피던스 스펙트럼을 유한요소 해석을 통해 구하였고, 이를 그림 5에서 비교하였다.

그림 5에서 LTE1, LE, TS1, TS2의 공진 모드 모델에 대해서는 real model과 equivalent 모델의 전기-기계적 임피던스 스펙트럼이 매우 잘 일치하는 것을 알 수 있으나, TE와 LTE2의 경우 다소 오차가 발생하였다. 특히, TE의 경우 공진 주파수에서 3.9 %의 상대오차가 발생하였다. 이는 Asymptotic Averaging Method가 단순히 2-2 압전복합체내 압전세라믹의 부피비만을 고려하고, 압전세라믹의 주기 (pitch)나 종횡비와 같은 다른 구조 변수들은 고려하지 않았기 때문이다. 따라서 이러한 오차를 줄이기 위하여 도출된 등가물성을 보정할 필요성이 확인되었다.

또한, 다른 5가지 모드에 비해 TS1 모델의 경우 임피던스 스펙트럼 상에서 공진과 반공진이 선명하지 않다. 이는 PZT-5H와 고분자재료가 2방향으로 평행하게 배열되어, PZT-5H 사이에 고분자재료가 배열됨에 따라 전계가 2방향으로 충분히 전달되지 못하기 때문이다. 그러나 공진법으로 TS1의 반공진주파수를 정의하는 식 (12)를 이용하여 반공진주파수를 구한 후 그 주파수에서 TS1의 mode shape을 확인하면 표 3에 보인 것과 같은 shear mode의 mode shape이 관찰 되었다 [5-6]. 이때의 주파수는 613.5 kHz이다.

$$f_{a,TS1} = \frac{\sqrt{\overline{e_{24}}^2 + \overline{c_{44}}^E \overline{\epsilon_{22}}^S}}{2y\sqrt{\overline{\rho}\ \overline{\epsilon_{22}}^S}} \tag{12}$$

4.3. 2-2 압전복합체 등가 물성의 보정

2-2 압전복합체의 등가 물성을 보정하기 위하여 오차가 가장 크게 발생한 TE 모델과 그 다음으로 오차가 크게 발생한 LTE2 모델을 이용하였다. 먼저, TE를 이용한 물성 보정을 위하여 $\varepsilon_{33}^S/\varepsilon_0$에 따른 전기-기계적 임피던스의 피크 값 ($|Z_{peak}|$)의 변화경향을 역시 유한요소 해석을

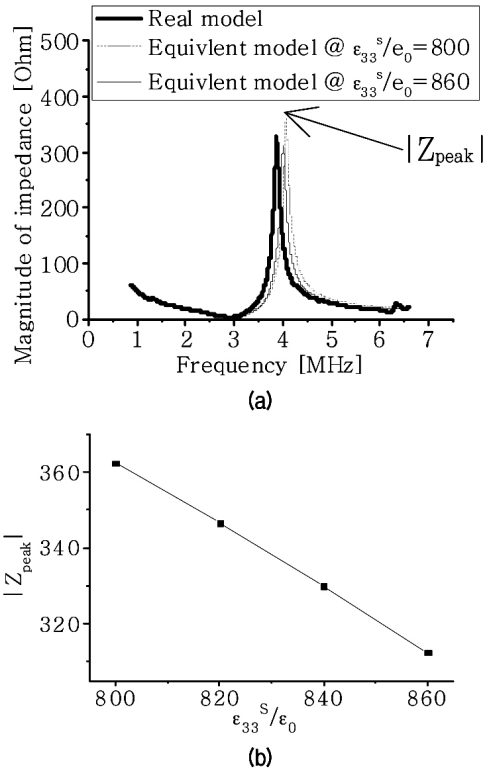


그림 6. $\varepsilon_{33}^S/\varepsilon_0$에 따른 $|Z_{peak}|$ 변화 (TE)
(a) $|Z_{peak}|$ 정의, (b) $\varepsilon_{33}^S/\varepsilon_0$에 따른 $|Z_{peak}|$ 변화
Fig. 6. Variation of $|Z_{peak}|$ in relation to $\varepsilon_{33}^S/\varepsilon_0$ (TE).
(a) definition of $|Z_{peak}|$, (b) variation of $|Z_{peak}|$ with respect to $\varepsilon_{33}^S/\varepsilon_0$

통해 그림 6과 같이 분석하였다. 이는 TE의 $|Z_{peak}|$에 가장 큰 영향을 주는 변수가 $\varepsilon_{33}^S/\varepsilon_0$ 이기 때문이다. 그림 6을 통해 얻은 경향을 바탕으로, 최소자승법을 이용하여 $|Z_{peak}|$와 $\varepsilon_{33}^S/\varepsilon_0$의 관계를 식 (13)과 같은 1차 선형함수로 유도하였다. 식 (13)에 TE 공진자의 real model의 $|Z_{peak}|$ 값을 대입하였을 때, 이 $|Z_{peak}|$값을 가장 근사하게 구현하는 $\varepsilon_{33}^S/\varepsilon_0$으로 841.06이 나왔다.

$$\begin{aligned} &|z_{peak}| = -0.83\,\epsilon_{33}^S/\epsilon_0 + 1028.36, \\ &\text{where } 800 \le \epsilon_{33}^S/\epsilon_0 \le 860,\ R^2 = 0.99 \end{aligned} \tag{13}$$

식 (13)에서 R^2는 유도된 관계식의 적합도를 나타내는데, 1에 가까울수록 관계식이 원래의 data들을 정확히 표시한다는 것을 의미한다. 다음으로 역시 TE 공진자 모델에 $\varepsilon_{33}^S/\varepsilon_0$의 값으로 841.06을 대입하고 e_{33}에 따른 f_a-f_r의 변화 경향을 분석하였다. 그림 7에 나타난 결과를 바탕으로 e_{33}과 f_a-f_r의 관계를 식 (14)과 같이 1차 선형함수로 유도하였고, 이 식을 이용해 TE real model의 f_a-f_r 값을 가장 잘 구현하는 등가 e_{33}으로 18.94이 도출되었다.

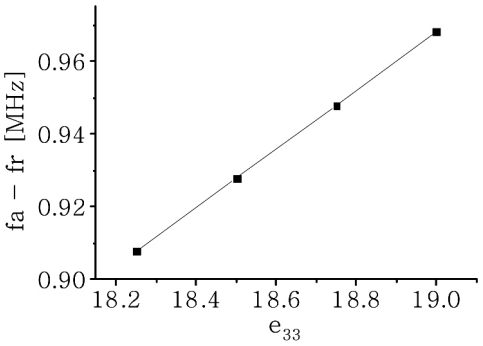


그림 7. e_{33}에 따른 f_a-f_r 변화 (TE)
Fig. 7. Variation of e_{33} in relation to f_a-f_r (TE).

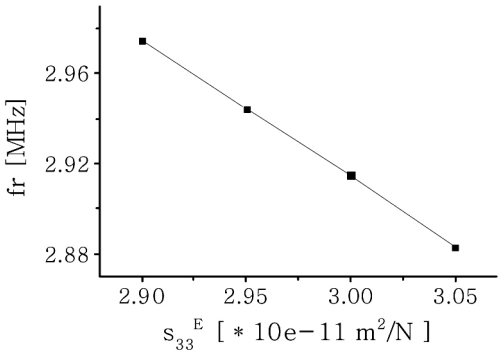


그림 8. s_{33}^E에 따른 f_r 변화 (TE)
Fig. 8. Variation of s_{33}^E in relation to f_r (TE).

$$f_a - f_r = 80272\, e_{33} - 557240, \quad \text{where } 18.25 \le e_{33} \le 19.00,\ R^2 = 0.99 \tag{14}$$

다음으로, 앞서 구해진 $\varepsilon_{33}^S/\varepsilon_0$과 e_{33}을 등가 물성에 적용하여 s_{33}^E에 따른 f_r의 변화 경향을 분석하였다. TE 모델에서 f_r 에 가장 큰 영향을 끼치는 상수가 s_{33}^E이다. 그림 8에 보인 결과를 바탕으로 식 (15)과 같이 s_{33}^E과 f_r 간의 관계식을 구하였고, 이 관계식을 바탕으로 TE real model의 f_r을 대입하여 s_{33}^E으로 30.17*10^{-11} m^2/N을 구하였다.

$$f_r = -6.09\times10^{16} s_{33}^E + 4741880, \quad \text{where } 2.90\times10^{-11} \le s_{33}^E[m^2/N] \le 3.05\times10^{-11},\ R^2 = 0.99 \tag{15}$$

마지막으로 LTE2의 오차를 줄이기 위하여 최소자승법을 이용한 1차 선형함수를 구하였다. LTE2의 경우 $|Z_{peak}|$와 f_a-f_r는 1 % 미만의 작은 오차가 났으므로 관련 물성을 보정하지 않았고, f_r에 대해서만 물성을 보정하였다. 따라서 s_{22}^E에 따른 f_r경향을 구하였고 이를 그림 9에 나타내었다. 또한 이를 이용하여 1차 선형함수를 식 (16)와 같이 구하였다.

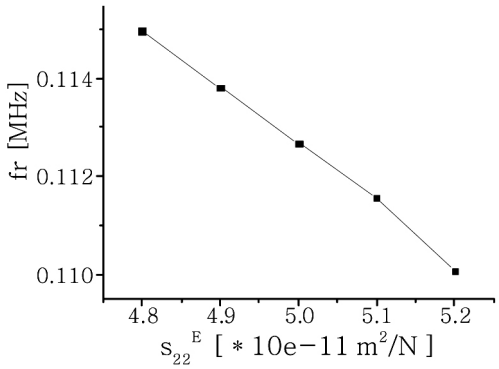


그림 9. s_{22}^E에 따른 f_r 변화 (LTE2)
Fig. 9. Variation of s_{22}^E in relation to f_r (LTE2).

1) Density $\bar{\rho}$ = 5840.30 [kg/m^3]

2) Stiffness matrix [*10^{10} N/m^2]

$$\overline{c^E} = \begin{pmatrix} 6.79 & 1.50 & 3.00 & 0 & 0 & 0 \\ 1.50 & 2.16 & 1.36 & 0 & 0 & 0 \\ 3.00 & 1.36 & 5.64 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.45 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.61 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.46 \end{pmatrix}$$

3) Piezoelectric matrix [C/m^2]

$$\bar{e} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 11.24 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.02 & 0 & 0 \\ -3.11 & -0.95 & 18.85 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

4) Dielectric matrix

$$\overline{\epsilon^s/\epsilon_0} = \begin{pmatrix} 915.23 & 0 & 0 \\ 0 & 11.40 & 0 \\ 0 & 0 & 841.31 \end{pmatrix}$$

5) Quality Factor Q=30

그림 10. 2-2 압전복합체의 등가 물성 (v=70 %)
Fig. 10. Equivalent properties of the 2-2 composite (v=70 %).

$$f_r\,[Hz] = -1.21\times10^{15} s_{22}^E + 172890, \quad \text{where } 4.80\times10^{-11} \le s_{22}^E[m^2/N] \le 5.20\times10^{-11},\ R^2 = 0.99 \tag{16}$$

식 (16)에 LTE2 real model f_r을 대입하여 s_{22}^E를 구하였고 그 값은 5.02*10^{-11} m^2/N로 도출이 되었다.

이상의 절차에 의해 TE와 LTE2 공진자를 이용해 관련 등가물성을 보정하여 최종적으로 구해진 2-2 압전복합체의 등가 물성을 그림 10에 나타내었다. 또한 최종적으로 구해진 등가 물성을 앞서 분석했던 6가지의 공진자 모델에 다시 적용하여, real model과 equivalent model의 임피던스 스펙트럼을 그림 11과 같이 비교 분석하였다. 그림에 나타난 것과 같이, 모든 공진자에 대해서 real model과 equivalent model의 전기-기계적 임피던스가

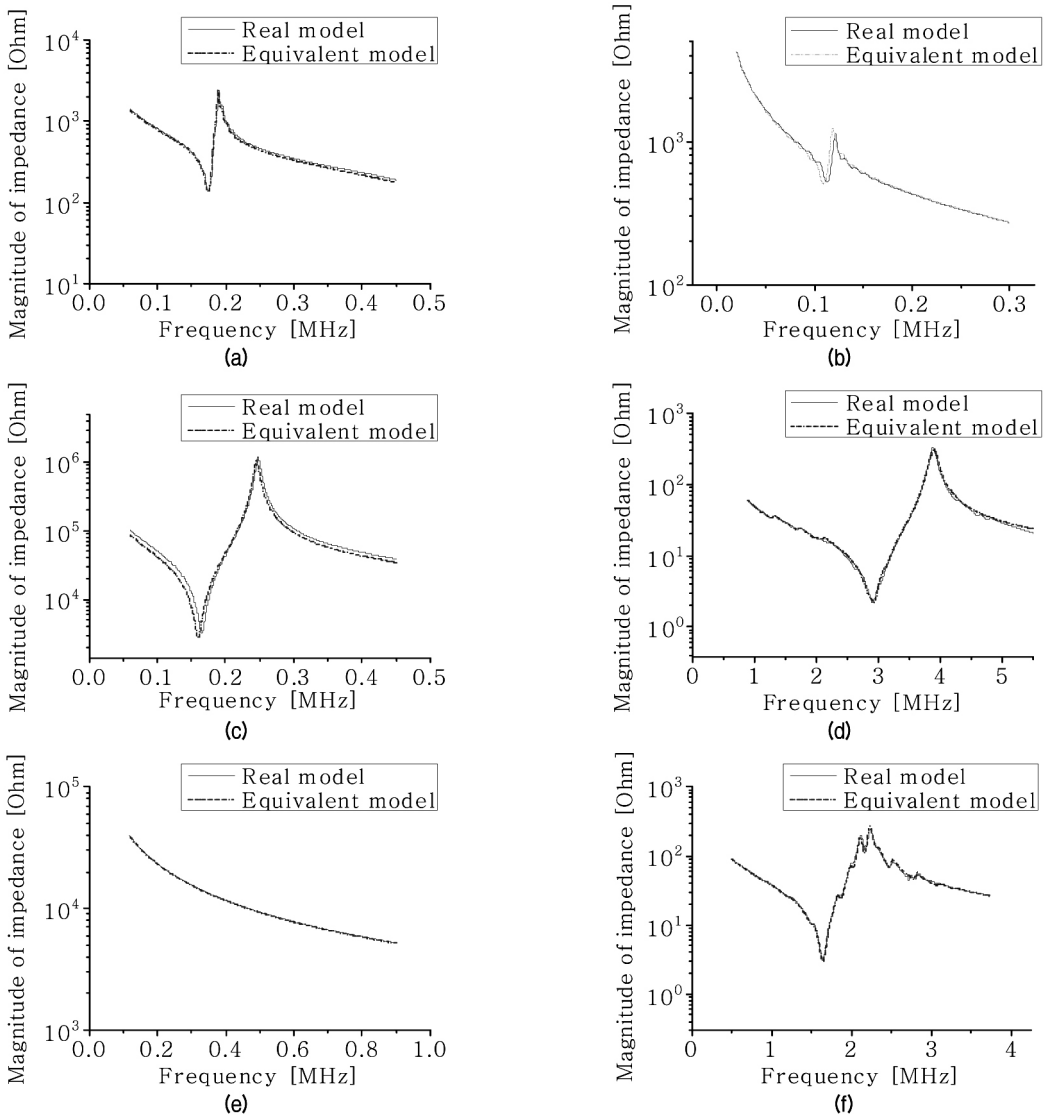


그림 11. 물성 보정 후 2-2 압전복합체 real model과 equivalent 모델의 전기-기계적 임피던스 스펙트럼 비교
(a) LTE1, (b) LTE2, (c) LE, (d) TE, (e) TS1, (f) TS2

Fig. 11. Comparison of electro-mechanical impedance spectra of the real models and equivalent models of the 2-2 piezocomposite after compensation.
(a) LTE1, (b) LTE2, (c) LE, (d) TE, (e) TS1, (f) TS2

거의 완벽히 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 구해진 2-2 압전복합체의 등가 물성이 매우 정확하다고 결론 내릴 수 있다.

V. 결 론

본 연구에서는 압전세라믹과 고분자재료로 구성되는 이상 (two phase)의 2-2 압전복합체와 동일한 특성을 가지는 단일상 (single phase) 재료의 등가 물성을 도출하였다. Asymptotic Averaging Method를 이용하여 등가물성을 구한 다음에, 이를 6가지의 공진자 모델 (LTE1, LTE2, LE, TE, TS1, TS2)에 대입한 후 완전한 2-2 압전복합체와의 임피던스 스펙트럼 차이를 최소화함으로써, 도출된 등가 물성값의 정확성을 향상시켰다. 보정을 거쳐 최종적으로 도출된 등가 물성을 6가지의 공진자 모델에 다시 적용하여 임피던스 스펙트럼을 해석한 결과, 원래의 2-2 압전복합체 real model과 매우 잘 일치하는 결과를 보임으로써 본 연구에서 구해진 2-2 압전복합체의 등가 물성이 정확하다는 것을 확인하였다. 본 연구에서 제시한 2-2 압전복합체의 등가 물성 도출 기법은 압전복합체를 이용한 초음파 트랜스듀서의 설계에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 기술혁신사업 (No. 10035282)의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. W. A. Smith, "The role of piezocomposites in ultrasonic transducers," *Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium*, vol. 2, pp. 755-766, 1989.
2. 한교훈, 노용래, "1-3형 압전복합체를 이용한 초음파 탐촉자 설계 및 시작품 제작," *한국음향학회지*, 17권, 8호, 48-57쪽, 1998.
3. W. Hackenberger, S. T. Kwon, and P. Rehrig, "2-2 PZT-polymer composites for high Frequency (〉20 MHz) ultrasound transducers," *Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium*, vol. 2, pp. 1253-1256, 2002.
4. 이수성, 김동현, 한진호, 노용래, "유한요소해석법을 이용한 1-3형 압전복합체 초음파 트랜스듀서의 개발," *한국음향학회지*, 23권, 4호, 274-281쪽, 2004.
5. 이상한, 노용래, "공진법을 이용한 PMN -PT 단결정의 탄성, 유전, 압전상수 측정," *한국전기전자재료학회*, 17권, 1호, 31-38쪽, 2004.
6. W. Jiang, R. Zhang, B. Jiang, and W. Cao, "Characterization of piezoelectric materials with large piezoelectric and electromechanical coupling coefficient," *Ultrasonics*, vol. 41, no. 2, pp. 55-61, 2003.
7. Y. R. Roh, V. V. Varadan, and V. K. Varadan, "Characterization of all the elastic, dielectric and piezoelectric constants of uniaxially oriented poled PVDF films," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 49, no. 6, pp. 836-847, 2002. 6.
8. R. R. Ramos, J. A. O. Hernandez, J. B. Castillero, and F. J. Sabina, "Electromechanical properties of laminated piezoelectric composites," *Mechanics of composite materials*, vol. 32, no. 3, pp. 286-291, 1996.
9. D. Waller, J. Chen, and T. R. Gururaja, "Requirements of piezoelectric materials for medical ultrasound transducers," *Proceedings of tenth IEEE International Symposium*, vol. 2, pp. 565-568, 1996.
10. R. E. Newnham, D. P. Skinner and L. E. Cross, "Connectivity and piezoelectric-pyroelectric composites," *Materials Research Bulletin*, vol. 13, issue 5, pp. 525-536, 1978.
11. O. B. Wilson, *Introduction to Theory and Design of Sonar Transducers*, Peninsula Publishing, Los Altos, 1988.
12. M. G. Silk, *Ultrasonic Transducers for Nondestructive Testing*, Adam Hilger Ltd, Bristol, 1984.
13. V. M. Ristic, *Principles of Acoustic Devices,* John wiley & Sons, Canada, 1983.
14. J. F. Nye, *Physical Properties of Crystals*, Oxford University Press, New york, 1985.
15. A. A. Grekov, S. O. Kramarov, and A. A. Kuprienko, "Anormalous behavior of the two-Phase lamellar piezoelectric texture," *Ferroelctrics*, vol. 76, issue 1, pp. 43-48, 1991.
16. K. Y. Hashimoto and M. Yamaguchi, "Elastic, piezoelectric and dielectric properties of composite materials," *IEEE Ultrasonics Symposium*, pp. 697-702, 1986.
17. IEEE Standard on Piezoelectricity, IEEE Ultrason. ferro. and Freq. Contr. Soc., ANSI/IEEE Std 176-1987.

저자 약력

•신 호 섭 (Hoseop Shin)
2009년 2월: 경북대학교 기계공학부 (학사)
2011년 2월: 경북대학교 기계공학과 (석사)
2011년 ~ 현재: (주) LIG 넥스원 Maritime 연구소
※ 주관심 분야: 음향 재료 분야, 초음파 및 탄성파 분야

•노 용 래 (Yongrae Roh)
한국음향학회지 제10권 제5호 참조