

# 압전복합재료를 이용한 초음파 트랜스듀서의 음향 특성

## Acoustic Properties of Ultrasonic Transducer Using Piezocomposites

이 상 욱\*, 김 연 보\*\*, 류 정 탁\*\*, 남 효 덕\*\*\*

(Sang-Wook Lee\*, Yeon-Bo Kim\*\*, Jeong-Tag Ryu\*\*, Hyo-Duk Nam\*\*\*)

\*영남대학교 전자공학과, \*\*대구대학교 전자공학부, \*\*\*영남대학교 전자정보공학부

(접수일자: 2006년 10월 14일, 수정일자: 2007년 1월 30일, 채택일자: 2007년 2월 20일)

본 연구에서는 압전세라믹과 고분자재료를 사용하여 다이스와 필 방법으로 2-2형 압전복합재료를 제작하고 이것을 이용하여 초음파 센서를 설계하고 제작하여 전기적 및 음향 특성을 조사하였다. 제작된 시편의 공진특성은 유한요소 해석 결과와 임피던스 분석기 (HP4194A)를 이용하여 실제로 측정한 결과와 유사하게 나타났다. 2-2형 압전복합재료의 고유음향 임피던스는 PZT의 부피분율이 감소함에 따라 선형적으로 감소하였다. 이것을 이용하여 제작된 초음파 센서의 공진특성 및 전기기계결합계수는 PZT의 부피분율이 0.6일 때 가장 우수하였다. 또한, 이것의 음향특성을 측정한 결과 PZT 부피분율이 0.6일때 진폭, 주파수 대역폭, 울림감쇠 특성 등이 가장 우수하게 나타났으며, 단일 압전세라믹으로 제작된 센서에 비하여 상당히 우수한 감도 특성을 나타내었다.

**핵심용어:** 2-2형 압전복합재료, 고유음향 임피던스, 전기기계결합계수, 압전세라믹, 유한요소해석법

**투고분야:** 초음파 및 탄성과 분야 (4.1)

We have investigated on the development of 2-2 type piezocomposites that have better piezoelectric activity and lower acoustic impedance than those of conventional piezoceramics. In this study, we have investigated the piezoelectric and acoustic properties of 2-2 type piezocomposites sensor which was fabricated using dice-and-fill technique for the different volume fraction of PZT. The specific acoustic impedance of 2-2 type piezocomposites decreased linearly when PZT volume fraction was decreased. The resonance characteristics measured by an impedance analyzer (HP4194A) were similar to the analysis of finite element method (FEM). The resonance characteristics and the electromechanical coupling factor were the best when the volume fraction PZT was 0.6. It also showed the highest result from the standpoint of sensitivity, bandwidth and ring-down property and so on at the same condition. The specific characteristics show that the 2-2 type piezocomposites turned out to be superior to the ultrasonic sensor composed by single phase PZT.

**Key words:** 2-2 type piezocomposites, Specific acoustic impedance, Electromechanical coupling factor,

Piezoceramics, Finite element method

**ASK subject classification:** Ultrasonic and Elastic Waves (4.1)

### 1. 서론

기존의 수중 통신 및 의료용 초음파 트랜스듀서의 제작에 사용되는 압전소자는 기계적 에너지를 전기적 에너지로 또는 역변환 하는 압전효과를 응용한 PZT계 압전세라믹이 광범위하게 사용되고 있다. 수중이나 인체에 효과적으로 사용할 수 있는 초음파 트랜스듀서의 제작을

위한 압전재료는 전기기계결합계수가 높아야 하고, 초음파 트랜스듀서를 구동하고 신호를 받아들이는 전자장치의 임피던스 정합이 적절하여야 한다. 또한 발생한 초음파 신호가 수중이나 인체 등의 매질에 적은 손실로 전달되기 위해서는 재료의 고유음향 임피던스 값이 대상 매질의 고유음향 임피던스 값과 비슷할수록 우수한 전달 특성을 가진다 [1]. 일반적으로 PZT 압전재료의 전기기계결합계수는 0.4~0.6이고 유전상수는 100~2,500까지 선택이 가능한 특성을 가지나 큰 밀도로 인하여 고유음향 임피던스 값이 커서 수중이나 인체 등 측정 매질과의

책임저자: 김 연 보 (ybkim@daegu.ac.kr)  
713-714 경북 경산시 진량읍 내리리 15, 대구대학교 전자공학부  
(전화: 053-850-6614; 팩스: 053-850-6619)

고유음향 임피던스 부정합 문제가 발생되며, 높은 비유전율로 인하여 사용 주파수 대역이 좁아 초음파 송수신 감도가 떨어지는 단점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 Jeffrey [2]는 초음파 파장의 1/4이 되는 두께의 정합층 (matching layer)을 PZT계 압전세라믹의 전면면에 부착하여 개선할 수 있는 구조를 제안하였다. 그러나 수 MHz 이상의 주파수를 사용하는 초음파 트랜스듀서의 경우 정합층의 두께가 0.1~0.2 mm로 얇아야 하는 등 정합층 제작시 복잡한 설계 및 제어공정이 요구된다 [3]. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 R. E. Newnham [4] 등이 제시한 상접속도 (phase connectivity) 개념을 이용한 압전특성이 우수한 압전재료와 고유음향 임피던스가 낮은 고분자재료를 결합시킨 압전복합재료에 관한 연구가 진행되고 있다. 특히 1-3형, 2-2형 등의 압전복합재료는 높은 두께방향 전기기계결합계수와 낮은 비유전율 및 고유음향 임피던스를 가지고 있으며, 유전 및 기계적 손실이 적고 광대역 주파수 특성을 얻을 수 있어 고주파용 트랜스듀서 및 초음파 트랜스듀서 등에 응용이 기대되고 있다. 1997년 Y. Shui [5] 등은 2-2형 압전복합재료를 사용한 트랜스듀서에서 두께 방향으로 전파하는 램 웨이브 (Lamb wave)의 전파개념을 해석하였다. N. Lamberti [6]는 정합층의 두께 변화에 따른 2-2형 압전복합재료의 음향특성 변화를 해석하였다. 이와 같이 2-2형 압전복합재료에 대한 이론적 해석 [7-9]이나, 이것의 제작공정에 대한 연구 [10][11]는 다수 있지만, 2-2형 압전복합재료를 이용하여 초음파 트랜스듀서의 시제품을 제작하고 음향 특성을 연구한 결과나 유사한 결과는 찾을 수 없었다. 따라서 본 연구에서는 압전성이 우수한 PZT와 낮은 밀도를 가지는 고분자재료를 결합시킨 2-2형 압전복합재료를 이용한 초음파 트랜스듀서를 설계하고 제작하여 음향특성을 조사하였다.

## II. 실험방법

본 연구는 압전복합재료를 PZT와 고분자재료를 이용하여 다이스와 필 (dice-and-fill)방법으로 제작하였다 [12]. 압전복합재료 제작시 사용된 고분자재료의 경화에 따른 수축 현상은 시편의 변형을 일으키고 PZT와 고분자재료의 접착력을 약화시키는 원인이 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 사용된 고분자재료는 수축률과 밀도가 낮으며 상용으로 많이 사용되고 있는 Araldite

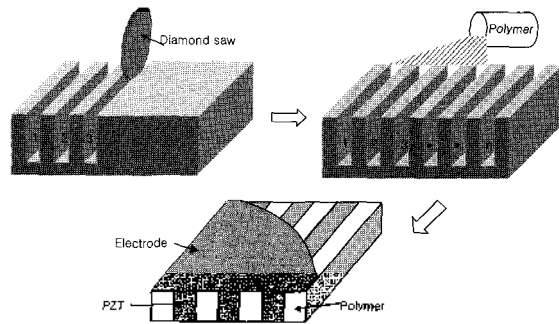


그림 1. 2-2형 압전복합재료 제작 공정  
Fig. 1. Fabrication procedure of 2-2 type piezocomposites.

(Ciba Geigy), Epofix (Struers Corp.)와 DEP (Daihan Poly.)를 선정 하였다. 또한, 고분자재료의 수축률을 최소화시키고 PZT와의 접착력을 증가시키기 위해 TiO<sub>2</sub> 분말을 충전제로 선정한 후 고분자재료에 각각 10 wt% 첨가하였다. PZT의 제작은 PZT (PZT-5A) 분말 (Fuji Titan PZT-5A)을 닥터블레이드 (doctor blade)법 [13]을 이용하여 60×50×2 mm 크기의 시트를 제작한 후 580 °C에서 1시간 동안 바인더를 태우고, 1,180 °C에서 2시간 소결하였다. 소결된 PZT 시트는 25×25×1.5 mm의 크기로 절단하여 은전극을 도포한 후, 120 °C 실리콘 오일에서 2 kV/mm의 전압으로 30분간 분극을 실시하였다.

2-2형 압전복합재료의 제작은 그림 1에서 보는 바와 같이 분극된 PZT 시편을 다이아몬드 톱날 (두께 300 μm)을 이용하여 폭 (kerf)을 일정하게 300 μm로 고정하고 PZT의 시편의 폭을 변화시켜 PZT의 부피분율이 각각 0.8, 0.6, 0.4, 0.2가 되도록 하였다. 가공된 PZT 시편의 홈 (kerf)에는 충전제가 첨가된 고분자재료를 채우고 침투성을 높이기 위하여 진공펌프를 이용하여 고분자재료 내부의 기포를 제거한 후 30 °C와 100 °C에서 24시간 경화시켰다. 경화된 시편은 두께가 1 mm가 되도록 래핑기계를 이용하여 양면 연마를 실시하였다. 연마된 시편의 제 특성을 측정하기 위하여 10×10×1 mm의 크기로 절단한 후 상온용 은 전극 (Nilaco Co.)을 양면에 도포하고 은선 (silver wire)을 신호선으로 연결하였다. 그림 1은 2-2형 압전복합재료의 제작 공정을 나타내고 있다.

## III. 결과 및 고찰

압전복합재료의 유전상수  $\overline{\epsilon_{33}^*}$ 은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다 [14].

$$\overline{\epsilon}_{33}^T = V_{PZT} [\epsilon_{33}^T - d_{33}^E \frac{V_{polymer}}{V_{PZT} s_{11} + V_{polymer} s_{33}^E}] + V_{polymer} \epsilon_{11} \quad (1)$$

여기서,  $V_{PZT}$ ,  $V_{polymer}$  는 각각 PZT 및 고분자재료의 체적비를 나타내고,  $\epsilon_{33}^T$ ,  $s_{33}^E$  는 각각 PZT의 분극방향 유전상수, 탄성상수 이고  $\epsilon_{11}$ ,  $s_{11}$  은 각각 고분자재료의 유전상수와 탄성상수 이다. 이때  $\epsilon_{33}^T \gg \epsilon_{11}$  이므로 복합재료의 유전율  $\overline{\epsilon}_{33}^T$  는 PZT의 유전율과 체적비에 의존하게 된다. PZT (PZT-5A)와 고분자재료를 이용하여 제작한 2-2형 압전복합재료의 PZT 부피분율에 따른 비유전율은 임피던스 분석기 (Impedance Analyzer, HP4194A)를 사용하여 1 kHz에서 정전용량 (C)을 측정하여, 다음 식 (2)를 이용하여 계산하였다.

$$\epsilon_r = \frac{C d}{\epsilon_0 S} \quad (2)$$

여기서  $S$ 는 시편의 단면적,  $d$ 는 시편의 두께,  $\epsilon_0$ 는 진공에서의 유전율이다.

그림 2는 2-2형 압전복합재료의 PZT 부피분율 변화에 따른 비유전율 변화를 Haun [15]에 의한 이론적 계산 값과 실제 측정 계산 값을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 압전복합재료의 비유전율은 고분자재료의 종류에는 거의 영향을 받지 않으며, 단일 PZT의  $\epsilon_r=2,091$ 에 비하여 PZT 부피분율이 감소함에 따라 1,600~230으로 일정하게 감소함을 알 수 있다. 이는 PZT와 고분자재료가 단순히 병렬 구조만을 갖고 있다는 가정하에 PZT의 부피분율을 변화에 따른 유전상수의 변화를 계산한 Haun의 이론 모델 결과와 유사한 경향을 나타내었다. 따라서 압전복합재료의 비유전율은 고분자재료의 체적과 유전율 보다는 PZT의 체적비와 유전율에 의존함을 확인할 수 있었다.

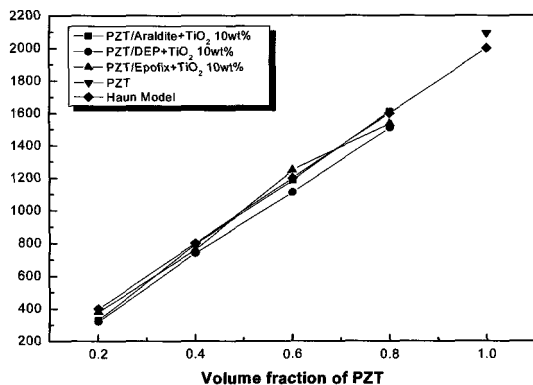


그림 2. PZT 부피분율에 따른 비유전율 변화  
Fig. 2. Variation of relative permittivity with PZT volume fraction.

그림 3은 상용의 구조해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 유한요소해석 (FEA)법에 의한 공진특성을 나타내었다. 해석에 사용된 압전재료와 고분자재료는 각각 PZT (PZT-5A)와 Epofix를 사용하였으며 그 물성은 표 1과 같다. 압전복합재료 모델은 기계-전기-자기-열의 커플 요소 (couple element)인 solid5를 사용하여 직육면체로 가로 (x)와 세로 (y)를 각각 10 mm, 높이 (z)를 1 mm크기로 하여 압전복합재료의 부피분율을 0.8~0.2로 변화시켰다. 이 모델은 8,405개의 절점과 6,400개의 육면체요소 (hexa element)로 형성되어 있다. 이때 경계조건으로는 압전복합재료의 x, y축을 고정하였다. 그림

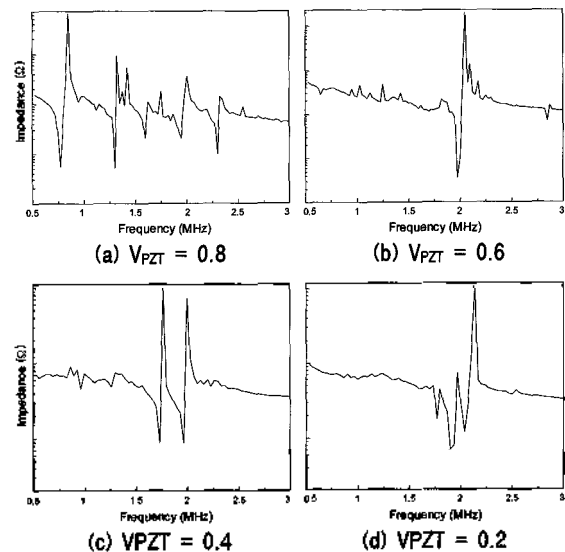


그림 3. 유한요소해석에 의한 2-2형 압전복합재료의 공진특성  
Fig. 3. The calculated by FEA impedance response for 2-2 type piezocomposites.

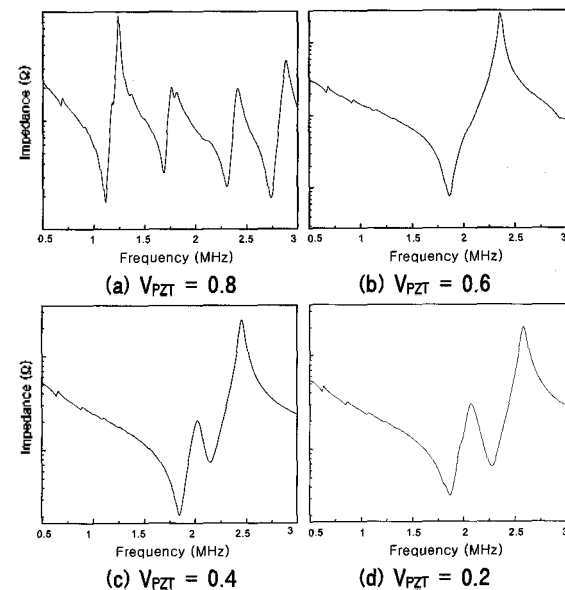


그림 4. 측정된 2-2형 압전복합재료의 공진특성  
Fig. 4. The measured impedance response for 2-2 type piezocomposites.

표 1. PZT (PZT-5A)와 Epofix의 물성  
Table 1. Material parameter of PZT (PZT-5A) and Epofix.

	Material property	Value
PZT (PZT-5A)	$C_{11}^{C,E}$ ( $10^{10}$ N/m <sup>2</sup> )	12.10
	$C_{12}^{C,E}$ ( $10^{10}$ N/m <sup>2</sup> )	7.54
	$C_{13}^{C,E}$ ( $10^{10}$ N/m <sup>2</sup> )	7.52
	$C_{23}^{C,E}$ ( $10^{10}$ N/m <sup>2</sup> )	11.10
	$S_{11}^{C,E}$ ( $10^{-12}$ m/N)	16.40
	$S_{12}^{C,E}$ ( $10^{-12}$ m/N)	-5.74
	$S_{13}^{C,E}$ ( $10^{-12}$ m/N)	-7.22
	$S_{23}^{C,E}$ ( $10^{-12}$ m/N)	18.80
	$e_{33}$ (C/m <sup>2</sup> )	15.80
	$e_{31}$ (C/m <sup>2</sup> )	-5.40
	$d_{31}$ ( $10^{-12}$ C/N)	-171
	$d_{33}$ ( $10^{-12}$ C/N)	374
	$\epsilon_{33}^{C,S}/\epsilon_0$	830
	$\epsilon_{33}^{C,T}/\epsilon_0$	1,860
Epofix	density ( $\rho^C$ , kg/m <sup>3</sup> )	7,750
	$C_{11}^P$ ( $10^{10}$ N/m <sup>2</sup> )	0.69
	$C_{12}^P$ ( $10^{10}$ N/m <sup>2</sup> )	0.46
	$S_{11}^P$ ( $10^{-10}$ m/N)	3.15
	$S_{12}^P$ ( $10^{-10}$ m/N)	-1.27
	$\rho^P$ (kg/m <sup>3</sup> )	1,170

4에는 유한요소해석 결과와 비교하기 위하여 실제 제작된 2-2형 압전복합재료의 공진 및 반공진 특성을 임피던스 분석기 (HP4194A)를 이용하여 측정한 결과를 나타내었다. 그림 3과 4에서 보는 바와 같이 시뮬레이션 해석결과와 실제 측정 결과 PZT의 부피분율이 0.6에서는 1개의 공진 피크 (peak)가 나타나지만, 0.8인 경우 여러 개의 횡방향 모드 공진 피크가 나타나는 경향을 보였다. 이러한 현상은 2-2형 압전복합재료 내에서 PZT와 고분자재료의 배열에 따른 주변 고분자재료와의 상호작용에 따른 현상으로 PZT가 두께방향으로 진동하면 고분자재료 내로 횡파 (shear wave)가 전파되어 인접한 PZT와의 상호작용에 의해 두께방향 공진과 횡방향 공진이 겹쳐져 발생하는 현상으로 해석된다 [16]. PZT 부피분율이 0.2

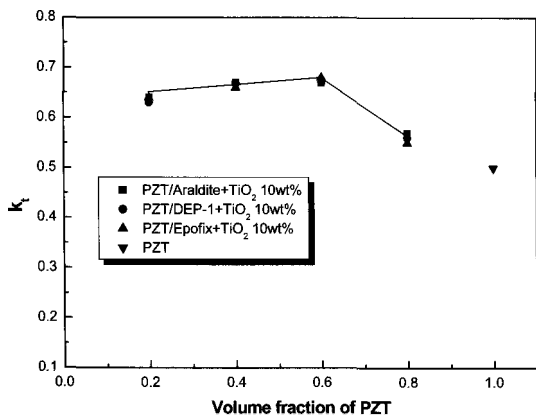


그림 5. PZT 부피분율 변화에 따른  $k_t$  변화  
Fig. 5. Variation of  $k_t$  with PZT volume fraction.

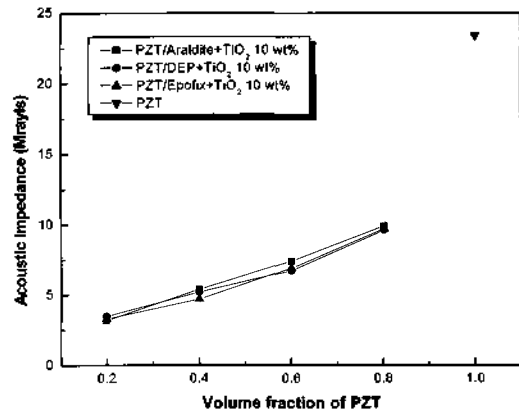


그림 6. PZT 부피분율 변화에 따른 고유음향 임피던스 변화  
Fig. 6. Variation of specific acoustic impedance with PZT volume fraction.

와 0.4의 경우 1.5 MHz~2.5 MHz 범위에서 2개의 공진 피크가 나타나는 현상을 보였다. 이는 압전복합재료 외부에서 가해진 응력 (stress)중 많은 부분이 PZT보다 폭이 넓은 고분자재료에 가해져 압전 전하상수  $d_h$ 의 값이 감소하여 발생하는 현상이다. 이러한 현상들은 압전복합재료 제작시 PZT와 고분자재료의 폭을 적절히 조절하여 개선할 수 있다.

실제 제작된 2-2형 압전복합재료의 PZT 부피분율에 따른 두께방향 전기기계결합계수는 그림 5에 나타내었다. 이것은 그림 3에서 횡방향 공진 주파수를 제외한 두께방향의 공진 주파수와 반공진 주파수를 측정한 결과로부터 두께방향 전기기계결합계수 ( $k_t$ )를 식 (3)에 의해 계산한 결과이다.

$$k_t^2 = \frac{\pi f_r}{2 f_a} \tan\left(\frac{\pi f_a - f_r}{2 f_a}\right) \quad (3)$$

PZT의 부피분율이 0.2~0.6에서는  $k_t$  값이 0.64~0.68로 거의 일정한 값을 유지하였지만 그 이상에서는 고분자재료 상에 의한 PZT상의 클램핑 (clamping)효과에 의하여 두께방향 전기기계결합계수가 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 현상은 일반적인 압전세라믹의 종횡비가 0.4~0.6인 경우 전기기계결합계수와 공진모드의 명확성이 가장 우수하다는 선행의 연구결과와 잘 일치한다 [17][18].

2-2형 압전복합재료의 PZT 부피분율 변화에 따른 고유음향 임피던스는 펄스-에코 (Pulse-echo)법으로 반사파의 속도를 측정하여 계산하였는데, 그 결과를 그림 6에 나타내었다. 음속과 밀도 곱으로 주어지는 압전복합재료 트랜스듀서의 고유음향 임피던스는 측정 대상 매질의 경계면에서 일어나는 초음파의 반사 및 투과를 결정

짓는 중요한 요소로 복합재료의 두께가 일정한 경우 고유음향 임피던스는 재료의 밀도에 의존하게 된다. 단일 PZT의 고유음향 임피던스는 23.4 Mrayls로 매우 높은 값을 나타내었다. 반면, 압전복합재료의 고유음향 임피던스는 PZT 부피분율 감소에 따른 밀도의 감소로 인하여 PZT 부피분율이 0.6~0.2 일때 고유음향 임피던스는 7~3 Mrayls로 현저하게 감소함을 보여 주고 있다. 이것은 물이나 인체의 고유음향 임피던스에 상당히 근접한 값을 나타내어 2-2형 압전복합재료가 수중 및 의료용의 초음파 트랜스듀서로 사용 가능성을 확인 할 수 있다.

실제 제작된 2-2 압전복합재료 트랜스듀서의 송수신 특성을 알아보기 위하여 펄스-리시버 (Pulse-Receiver, Panametrics 5072PR)와 오실로스코프 (Agilent 54624A)를 사용하여 음향특성을 측정하였다. 그림 7과 8은 각각 2-2형 압전복합재료 트랜스듀서의 시간영역 특성과 주

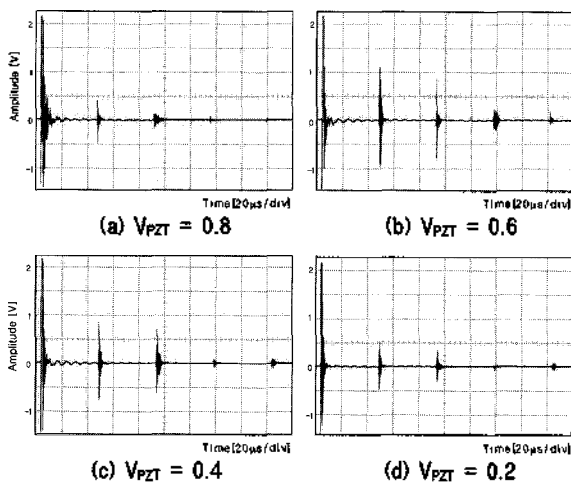


그림 7. 2-2형 압전복합재료 트랜스듀서의 시간 응답특성  
Fig. 7. Time domain response of 2-2 type piezocomposites sensor.

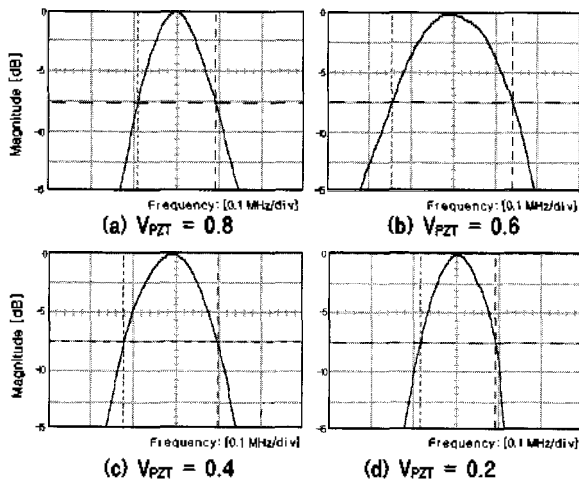


그림 8. 2-2형 압전복합재료 트랜스듀서의 주파수 응답특성  
Fig. 8. Frequency domain response of 2-2 type piezocomposites sensor.

파수 영역 특성을 나타낸 것이다. 그림 7에서 보는 바와 같이 압전복합재료 트랜스듀서의 송수신 특성을 나타내는 반사파의 진폭은 PZT 부피분율이 0.8에서 차츰 감소함에 따라 진폭은 점점 증가하여 0.6일 때 최대치를 나타내고, 다시 감소함을 알 수 있다. 즉, PZT 부피분율이 0.6일 때 진폭이 최대치를 보이고 있다. 이 진폭의 크기는 트랜스듀서의 감도와 관계되는 것으로 어때가 가장 우수한 감도를 나타낸다고 할 수 있다.

그림 8은 압전복합재료 트랜스듀서의 주파수 응답특성을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 주파수 대역폭은 PZT 부피분율이 0.6일 때 가장 넓게 나타났다. 이 대역폭은 트랜스듀서의 해상도와 관계되는 것으로 역시 부피분율이 0.6일 때가 최상의 해상도를 나타낸다. 이러한 것들로 미루어 볼 때 PZT의 부피분율이 0.6인 2-2형 압전복합재료 트랜스듀서의 음향특성이 가장 우수하다. 또한 반사파 소멸시간 (ring down time)은 그림 7과 관계되므로 단일 PZT에 비하여 본 연구에서 제작한 압전복합재료가 양호하게 나타났다 [19]. 이는 압전복합재료의 압전상수  $g_h$ 가 단일상의 PZT보다 높아져 특성이 개선된 것으로 사료된다. PZT 부피분율이 0.8인 경우 압전복합재료의 높은 유전율에 따른  $g_h (= d_h / \epsilon_r \epsilon_0)$ 의 감소로 인하여 울림 (ring)현상이 계속 발생하고 있으며, 낮은 주파수 및 진폭 특성을 나타내고 있다 [20]. PZT 부피분율이 0.6이 되면 적절한  $g_h$  값과 높은 전기기계결합계수를 나타내어 높은 대역폭과 진폭 특성을 나타내었으며, 0.4와 0.2에서는 다시 감소하였다. 이는 PZT 부피분율의 감소에 따른 압전상수  $d_h$ 의 감소로 나타나는 현상으로 송수신 특성이 낮아지게 된다. 하지만 고분자재료의 부피가 증가하면 압전복합재료의 유전율이 감소에 따른  $g_h$  값이 높아져 단일 PZT로 구성된 트랜스듀서에 비하여 우수한 송·수신 특성을 나타내었다.

#### IV. 결 론

고분자재료와 PZT를 이용하여 제작한 2-2형 압전복합재료 트랜스듀서의 음향 특성을 조사한 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

2-2형 압전복합재료의 비유전율은 PZT의 부피분율에 의존하며, 부피분율이 감소함에 따라 1,600~230 정도로 초음파 트랜스듀서에 사용 가능한 값을 나타내었다. 공

진특성은 유한요소해석 결과와 실제로 제작한 시편을 실험으로 측정결과 유사하게 나타났다. 두께방향 전기기계 결합계수는 PZT 부피분율이 0.2~0.6에서 거의 일정한 값을 가지나 그 이상에서는 감소하는 경향을 보였다. 압전복합재료 트랜스듀서의 고유음향 임피던스는 고분자 재료의 종류에는 크게 영향을 받지 않으며, 대체적으로 PZT의 부피분율에 영향을 받는다. 그 값은 0.2~0.6의 범위에서 3~7 Mrayls로 단일의 PZT에 비하여 현저히 낮게 나타났다. 음향특성을 측정한 결과 PZT의 부피분율이 0.6일 때 가장 높은 진폭과 넓은 주파수 대역폭을 가지므로 우수한 감도 및 해상도를 가진다. 이것은 정합층을 가지는 일반적인 초음파 트랜스듀서와 대등한 성능을 가진다. 따라서 본 연구에서 제작한 2-2형 압전복합재료 트랜스듀서는 일반적인 압전 트랜스듀서에서 사용하는 까다로운 정합층 부착공정을 해결할 수 있을 것으로 사료된다.

### 감사의 글

“이 논문은 2005학년도 대구대학교 학술연구비지원(혹은 일부지원)에 의한 논문임”

### 참고 문헌

1. T. R. Gururaja, A. Safari, R. E. Newnham and L. E. Cross, "Piezoelectric ceramic-polymer composites for transducer applications," in *Electronic Ceramics*, L. M. Levinson, Ed. New York: Marcel Dekker, 92-128, 1987.
2. Jeffrey H. Goll, "The design of broad-band fluid-loaded ultrasonic transducers," *IEEE Trans. on Ultrason., Ferroelect. and Freq. Control*, SU-26, 6, 386-393, 1979.
3. 노용래, "초음파센서용 압전 재료," *전기전자재료학회지*, 14 (4), 16-22, 2001.
4. R. E. Newnham, D. P. Skinner, and L. E. Cross, "Connectivity and piezoelectric-pyroelectric composites," *Mat. Res. Bull.*, 13, (5) 525-536, 1978.
5. Y. Shui and Q. Xue, "Dynamic characteristics of 2-2 piezoelectric composite transducers," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, 44 (5) 1110-1119, 1997.
6. N. Lamberti, "Optimization of acoustic matching layer for piezocomposite transducers," *Proc. IEEE Ultrasonic Symp.*, 2, 1105-1108, 2000.
7. T. R. Gururaja, W. A. Schulze, L. E. Cross, R. E. Newnham, B. A. Auld and Y. J. Wang, "Piezoelectric composite materials for ultrasonic transducer applications. Part I: Resonant Modes of Vibration of PZT Rod-polymer Composites," *IEEE Trans. on Ultrason., Ferroelect. and Freq. Control*, SU-32, 4, 499-513,

- 1985.
8. G. Hayward and M. Jackson, "Lattice model of the thickness-mode piezoelectric transducer," *IEEE Trans. on Ultrason., Ferroelect., Freq. Control*, SU-33, 1, 41-50, 1986.
9. W. Qi and W. Cao, "Finite element analysis and experimental studies on the thickness resonance of piezocomposite transducers," *Ultrasonic Imaging* 18, 1-9, 1996.
10. G. Lous, I. Cornejo, T. McNulty and A. Safari, "Fabrication of piezoelectric ceramic/polymer composite transducers using fused deposition of ceramics," *J. Am. Ceram. Soc.*, 83 (1), 124-128, 2000.
11. X. Geng, "Ceramic/polymer 2-2 composites for high frequency transducers by tape casting," *Proc. IEEE Ultrasonic Symp.*, 1, 366-369, 2003.
12. J. W. Sliwa, J. S. Ayter and J. P. Mohr III, *Method for making piezoelectric composites*, (U.S. Pat. 1993) chap. 5, pp. 236-240
13. H. J. C. Williams, *In ceramic fabrication process*, (E. by F. Y. Wang Academic Press, New York, 1976) pp. 173-198
14. K. Uchino and S. Nomura, "New electromechanical materials and their applications," *Jap. J. Appl. Phys.*, 20 (2), 225-228, 1981.
15. M. J. Haun and R. E. Newnham, "Experimental and theoretical study of 1-3 and 1-3-0 piezoelectric PZT-Polymer composites for hydrophone applications," *Ferroelectrics*, 68, 123-139, 1986.
16. R. Lerch, "Simulation of piezoelectric devices by two and three dimensional finite elements," *IEEE Trans. on Ultrason., Ferroelect. Freq. Control*, SU-37, 2, 233-247, 1990.
17. A. Fufumoto, "The application of piezoelectric ceramics in diagnostic ultrasound transducers," *Ferroelectrics*, 40, 212-230, 1982.
18. H. Takeuchi and C. Nakaya, "PZT/Polymer composites for medical ultrasonic probe," *Ferroelectrics*, 68 (1) 53-62, 1986.
19. W. R. Scott, "Durable lead attachment techniques for PVDF polymer transducers with application to high voltage pulsed ultrasonics," *Ferroelectrics*, 32, 79-83, 1981.
20. G. Sagong, A. Safari, S. J. Jang and R. E. Newnham, "Poling flexible piezoelectric composites," *Ferroelectrics*, 5 (5) 131-138, 1985.

### 저자 약력

#### • 이 상 욱 (Sang-Wook Lee)



1999년 2월: 가야대학교 전자세라믹과 (공학사)  
2001년 2월: 영남대학교 전자공학과 (공학석사)  
2001년 3월~현재: 영남대학교 전자공학과 (박사과정)

#### • 김 연 보 (Yeon-Bo Kim)



1979년 2월: 영남대학교 전자공학과 (공학사)  
1981년 2월: 영남대학교 전자공학과 (공학석사)  
1996년 2월: 영남대학교 전자공학과 (공학박사)  
1993년~현재: 대구대학교 전자공학부 교수

• 류정탁 (Jeong-Tag Ryu)



1992년 2월: 영남대학교 전자공학과 (공학사)  
 1996년 2월: 오사카(대판)대학교 전자공학과 (공학석사)  
 1999년 2월: 오사카(대판)대학교 전자공학과 (공학박사)  
 2000년 3월~현재: 대구대학교 전자공학부 부교수

• 남효덕 (Hyo-Duk Nam)



1970년 2월: 경북대학교 물리교육과 (이학사)  
 1977년 2월: 영남대학교 전자공학과 (공학석사)  
 1984년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학박사)  
 1984년~현재: 영남대학교 전자정보 공학부 교수