

논문 2011-481E-2-7

유한요소해석법을 이용한 2-2형 압전복합재료 초음파 트랜스듀서의 설계 및 압전특성

(Design and Piezoelectric properties of 2-2 piezocomposite Ultrasonic Transducers by means of the Finite Element Methode)

박재성*, 이상욱**

(Jae-Sung Park and Sang-Wook Lee)

요약

본 연구에서는 테이프-캐스팅 방법을 이용하여 제작한 PZT-5A의 소결온도 변화에 따른 압전특성을 조사한 후 유한요소 해석법을 이용하여 2-2형 압전복합재료를 초음파 트랜스듀서를 설계하고 압전특성을 해석하였다. 2-2형 압전복합재료의 음향임피던스와 압전전하상수(d_{33})는 PZT 부피분율이 감소함에 따라 밀도의 감소로 감소하여 0.6~0.2의 범위에서 14~3 MRayl로 초음파 트랜스듀서로 사용가능한 특성을 나타내었다. 공진특성과 전기기계결합계수는 PZT부피분율이 0.6일 때 가장 우수한 특성을 나타내었으며, PZT의 부피분율이 0.2~0.6에서는 k_t 값이 0.64~0.68로 거의 일정한 값을 유지하였지만 그 이상에서는 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이상의 실험결과로부터 2-2형 압전복합재료는 초음파 트랜스듀서 재료로 응용 가능성을 확인할 수 있었다.

Abstract

In this study, PZT-5A green sheet were prepared by using tape casting technique, and the piezoelectric properties of PZT-5A by variation of sintering temperature was investigated. After, design and piezoelectric properties of 2-2 piezocomposite ultrasonic transducers by means of the FEA. The acoustic impedance and piezoelectric charge constant of the 2-2 type piezocomposite transducer decreased proportionally due to the density decrease caused by the PZT volume fraction decrease. The piezocomposite acoustic impedance were 7~3 MRayl between 0.6 and 0.2 allowing it to be used for a ultrasonic transducer. The resonance characteristics and the electro-mechanical coupling factor were the best when the volume fraction PZT was 0.6. The PZT volume fraction shows the fixed value, 0.6~0.65, approximately within the range between 0.2 and 0.6 while it is increased to decreased over the range. The result of the experiment above confirmed that the 2-2 piezoelectric composites could be used as the ultrasonic transducers.

Keywords : Piezocomposite, Acoustic impedance, Electro-mechanical coupling factor, Finite element methode.

I. 서론

기존의 수중 통신 및 의료용 초음파 트랜스듀서는 PZT계 압전세라믹의 전면에 초음파 파장의 1/4이 되는 두께의 정합층(matching layer)을 부착하여 제작하게

된다. 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^[1]. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 R. E. Newnham^[2] 등은 상접속도(phase connectivity) 개념을 이용한 압전복합재료를 이용하여 해결방안을 제시하였다. 특히 1-3형, 2-2형 등의 압전복합재료는 높은 두께방향 전기기계결합계수와 낮은 비유전율 및 고유 음향임피던스를 가지고 있으며, 유전 및 기계적 손실이 적고 광대역 주파수 특성을 얻을 수 있어 고주파용 트

* 정회원, 영남이공대학 전자정보계열
(Dept. of Electronic & Information Engineering, YNC)

** 정회원, (주) 포디컬처
(4D Culture, Co., Ltd.)

접수일자: 2011년5월3일, 수정완료일: 2011년6월15일

랜스듀서 및 초음파 트랜스듀서 등에 응용이 기대되고 있다.

초음파 트랜스듀서는 실제 제작에 앞서 사용용도와 기능에 따라 성능의 최적화를 이룰 수 있도록 이론적인 모델 및 설계과정을 거치게 된다. 초음파 트랜스듀서의 해석에는 일반적으로 3차원적 특성이나 비선형적 특성을 해석하기 위해서 유한요소 해석법, 경계요소 해석법 등을 사용한다^[3].

본 연구에서는 초음파 트랜스듀서의 실제 제작에 앞서 MPB 근처의 조성이면서 soft계 압전재료 중의 하나인 PZT-5A를 선정하여 소결 온도에 따른 압전특성을 조사한 후 유한요소 해석법(finite element method, FEM)을 이용하여 PZT의 부피분을 변화에 따른 밀도와 음향 임피던스 및 압전특성에 대한 해석을 수행하여 높은 두께방향 전기기계결합계수(k_t)와 압전전하상수(d_{33}) 값을 가지는 2-2형 압전복합재료 초음파 트랜스듀서의 제작 가능성을 조사하였다.

II. PZT-5A 시편 제작 및 압전복합재료 설계

1. PZT-5A 시편 제작

본 연구에서 균일한 두께의 PZT 시편 제작을 위하여 복잡한 기계장치를 필요로 하지 않으며 균일한 두께의 성형체를 대량으로 생산할 수 있는 테이프 캐스팅(tape casting)공정을 이용하여 PZT-5A 그린시트(green sheet)를 제조하였다. 그린시트는 PZT 분말(Morgan Electro Ceramics Co., PZT-5A)에 유기첨가제를 첨가하여 적절한 점도의 슬러리(slurry)를 제조하여 건조시켜 75×60×2.5 mm 크기의 시트(sheet)를 제작하였다. 제작된 시트(sheet)는 상온에서 48시간 건조 후 물성을 측정하기 위하여 15×15×2.3 mm의 크기로 절단하여 600℃에서 4시간 바인더를 태우고, 1050~1180℃에서 2시간 소결 하였다. 소결된 시편은 다이아몬드 톱날(diamond saw)을 이용하여 10×10×1.5 mm의 크기로 절단하여 1 mm 두께로 연마 후, 스크린 인쇄방법을 이용하여 전도성 은전극(Dupont #7095)을 도포하여 120℃ 실리콘 오일에서 2 kV/mm의 전압으로 30분간 분극을 실시하였다. 분극 처리된 시편은 24시간 동안 공기 중에서 상온 방치 후 압전특성을 조사하였다.

2. PZT-5A 유전 및 압전특성

소결 온도에 따른 소결성 및 2차상의 존재를 관찰하

기 위해 회절각 2θ 를 20~80° 범위에서 X-선 회절분석을 하였다. X-선 주사시 인가한 전압 및 전류는 각각 40 kV와 100 mA이며, 스캔 스텝폭은 0.02°, 스텝 시간은 5 sec로 하였다. 시편의 소결 온도에 따른 상온에서의 유전상수 및 유전 손실은 임피던스 분석기(Impedance Analyzer, HP4194A)를 사용하여 1 kHz에서 정전용량(C)를 측정하여, 다음의 식 (1)을 이용하여 계산하였다.

$$\epsilon_r = \frac{C d}{\epsilon_0 S} \tag{1}$$

여기서, d 는 시편의 두께(m), S 는 시편의 단면적(m²), ϵ_0 는 진공에서의 유전율 8.854×10⁻¹² F/m이다.

압전전하상수(d_{33})는 d_{33} -meter(YE2730 APCC Int., Ltd.)로 측정하였다.

2. FEM을 이용한 2-2형압전복합재료의 설계

2-2형 압전복합재료의 두께 진동모드를 분석하기 위하여 PZT 부피분을 변화에 따른 해석모델을 Fig. 1에 나타내었다. 2-2형 압전복합재료 모델은 기계-전기-자기-열의 커플 요소(couple element)인 solid 5를 사용하여 직육면체로 가로(x)와 세로(y)를 각각 10 mm, 높이(z)를 1 mm 크기로 하였으며 압전복합재료의 부피분을 0.8~0.2로 변화시켰다. 이 모델은 8,405개의 절점(node)과 6,400개의 육면체요소(hexa element)로 유한요소 모델링(finite element modeling)하였다. 이때 경계 조건으로는 압전복합재료의 x, y 축을 고정하였다.

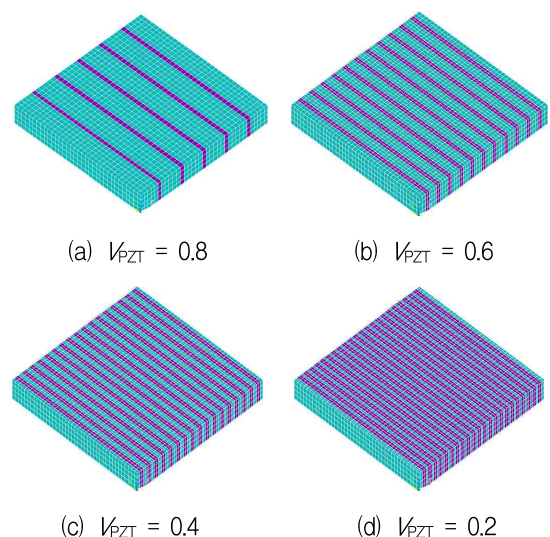


그림 1. 2-2형 압전복합재료 해석 모델
Fig. 1. Finite element model of the 2-2 type piezocomposites.

III. 결과 및 고찰

1. PZT-5A의 압전특성

테입캐스팅공정을 이용하여 제작한 PZT-5A의 소결 온도변화에 따른 X-선 회절 분석 패턴을 Fig. 2에 나타내었다. $2\theta = 42\sim 46^\circ$ 범위에서 (002)면과 (200)면이 존재하는 것을 알 수 있다. 이것은 정방정(teragonal) 혹은 능면정(rhombohedral)과 정방정(tetragonal)이 공존하는 것을 나타내어 두가지 결정구조가 한 화합물에 동시에 존재하는 조성영역인 상경계(MPB) 영역임을 의미한다. 따라서 소결온도 변화에 따라 모두 (002)면과 (200)면이 공존하므로 상경계 영역의 조성임을 확인할 수 있다. 소결온도변화에 따른 X-선 회절분석 결과 페로브스카이트 상 이외의 다른 피크는 나타나지 않는 것으로 보아 상합성이 잘 이루어졌음을 알 수 있었다.

Table 1에는 소결온도변화에 따른 밀도의 변화와 비유전율 및 압전상수 변화를 나타내었다. 소결밀도(ρ)는 소결온도가 높아짐에 따라 소결성이 향상되어 증가하였으며, 1180°C 에서 소결한 시편의 밀도는 $7,747 \text{ kg/m}^3$ 를 나타내었다. 소결온도가 높아짐에 따라 입자크기의 증가에 따른 기공을 감소와 밀도의 증가에 의하여 비유전율(ϵ_r)도 증가하였다. 기계적품질계수(Q_m)는 밀도와 서로 비례하여 1180°C 에서 최대값을 나타내었다. 유전손실은 소결온도의 증가에 따른 결정립 내부의 기공 및 미반응 물질 등의 이동도 증가에 따른 결정립 내부의 균질한 조성으로 인하여 유전율의 증가와 함께 유전손실은 감소하였다. 일반적으로 초음파 트랜스듀서는 초음파의 진동에 의하여 내부에서 열이 발생하므로 유전손실 값이 작은 재료가 요구된다^[4].

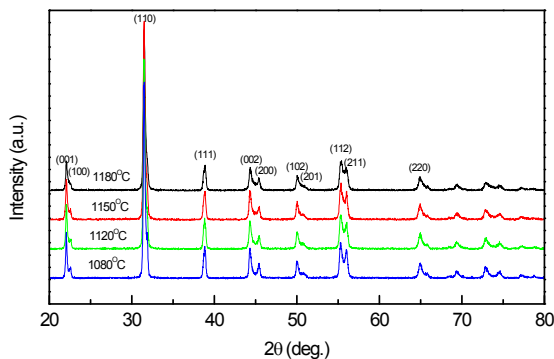


그림 2. 소결온도 변화에 따른 PZT-5A의 XRD 특성
Fig. 2. X-ray diffraction patterns of the PZT-5A sintered at various temperature for 2 hrs.

표 1. 소결온도 변화에 따른 PZT-5A의 압전 및 유전 특성

Table 1. Dielectric and piezoelectric properties of the PZT-5A specimens.

SinteringT emp.	ρ (kg/m ³)	ϵ_r	$\tan\delta$	Q_m	d_{33} (pC/N)	g_{33} ($\times 10^{-3}$ Vm/N)
1080 °C	7,564	1,859	0.056	78.5	432	26.2
1120 °C	7,564	1,862	0.052	78.7	465	28.2
1150 °C	7,690	1,996	0.032	80.4	474	26.8
1180 °C	7,747	2,091	0.023	83	488	26.3

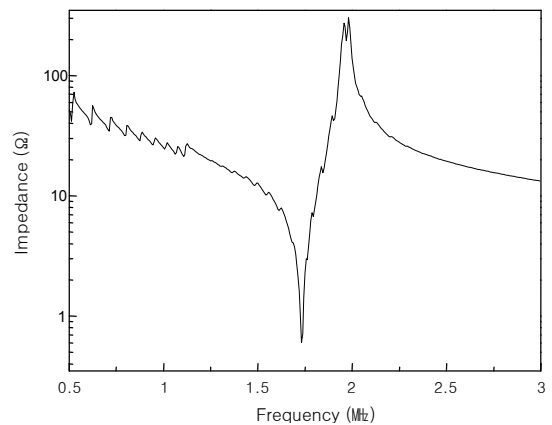


그림 3. PZT-5A의 공진특성
Fig. 3. Impedance characteristic of the manufactured PZT-5A.

PZT-5A의 비유전율(ϵ_r)과 압전전하상수(d_{33})는 소결성 향상에 따른 기공률 감소로 인하여 증가한 반면 압전전하상수(g_{33})는 소결성에 관계없이 거의 일정한 값을 나타내었다. 임피던스분석기(HP4194A)를 이용하여 1180°C 에서 소결한 PZT-5A 시편의 임피던스 측정결과를 Fig. 3에 나타내었다. 공진주파수는 1.7 MHz이며 두께 방향 전기기계결합계수 k_t 는 0.49를 나타내었다.

2. FEM을 이용한 2-2형압전복합재료의 압전특성

상용의 구조해석 프로그램인 ANSYS(Swanson analysis systems, Inc., U.S.A.)를 이용하여 유한요소해석법(FEA)에 의한 공진특성을 Fig. 4에 나타내었다. 해석에 사용된 압전재료와 고분자재료는 각각 PZT-5A와 Epofix였으며, 각 재료의 물성은 Table 2의 물성값을 이용하여 적용하였다.

2-2형 압전복합재료는 재료내에 발생되는 램 웨이브(lamb wave)가 주기적인 배열을 갖는 PZT 상과 고분

표 2. PZT-5A와 Epofix의 재료특성
Table 2. Material properties of the PZT-5A and Epofix.

Material	Material property	Value
PZT (PZT-5A)	$c_{11}^{C,E}$ (10^{10} N/m ²)	12.10
	$c_{12}^{C,E}$ (10^{10} N/m ²)	7.54
	$c_{13}^{C,E}$ (10^{10} N/m ²)	7.52
	$c_{33}^{C,E}$ (10^{10} N/m ²)	11.10
	$s_{11}^{C,E}$ (10^{-12} m ² /N)	16.40
	$s_{12}^{C,E}$ (10^{-12} m ² /N)	-5.74
	$s_{13}^{C,E}$ (10^{-12} m ² /N)	-7.22
	$s_{33}^{C,E}$ (10^{-12} m ² /N)	18.80
	e_{33} (C/m ²)	15.80
	e_{31} (C/m ²)	-5.40
	d_{31} (10^{-12} C/N)	-171
	d_{33} (10^{-12} C/N)	488
	$\epsilon_{33}^{C,S}/\epsilon_0$	830
	$\epsilon_{33}^{C,T}/\epsilon_0$	2,091
	density (ρ^C , kg/m ³)	7,747
	Epofix	c_{11}^P (10^{10} N/m ²)
c_{12}^P (10^{10} N/m ²)		0.46
s_{11}^P (10^{-10} m ² /N)		3.15
s_{12}^P (10^{-10} m ² /N)		-1.27
ϵ_r^P		4.1
density (ρ^P , kg/m ³)		1,107

자 상과의 브래그(Bragg) 회절에 의한 횡방향모드 공진 현상이 발생된다. 이러한 공진주파수는 고분자 상과 PZT 상의 가로 방향 주기성에 의하여 발생되므로 고주파 초음파 트랜스듀서 응용에 제한이 된다. 그림에서 보는 바와 같이 PZT의 부피분율이 0.6에서는 1개의 공진 피크(peak)가 나타나지만, 0.8인 경우 고분자 상의 폭에 비해 PZT 상의 폭이 넓어 여러개의 횡방향 공진이 일어나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 PZT 부피분율의 감소는 PZT상과 고분자상의 주기성을 감소시켜 횡방향 공진의 감소로 이어지며, 횡방향 공진주파수는 고주파 쪽으로 이동하는 것을 알 수 있다^[5]. 이때 두께방향 공진주파수는 1.7 MHz 부근에서 나타났다.

PZT 부피분율이 0.2와 0.4의 경우 1.5 MHz~2.5 MHz 범위에서 2개의 공진 피크가 나타나는 현상을 보였다. 이는 압전복합재료 외부에서 가해진 응력 중 많은 부분이 PZT보다 폭이 넓은 고분자 상에 가해져 압전전하상수 d_{33} 의 값이 감소하여 발생하는 현상이다^[6]. 이러한 현상들은 압전복합재료 제작시 PZT 상과 고분자 상의 폭을 적절히 조절하여 개선할 수 있다.

Fig. 5는 2-2형 압전복합재료 초음파 트랜스듀서의 PZT 부피분율 변화에 따른 밀도와 음향 임피던스 및 두께방향 전기기계결합계수의 유한요소 해석 결과를 나

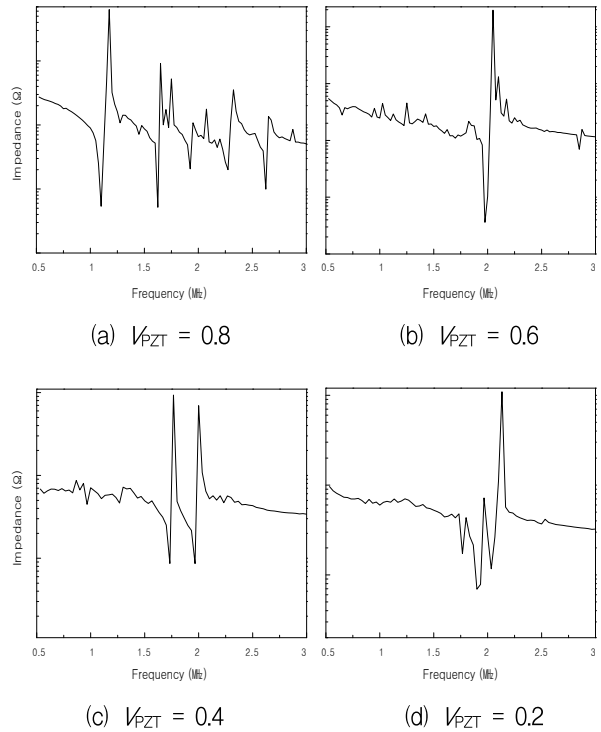


그림 4. 2-2형 압전복합재료의 부피분율에 따른 공진특성

Fig. 4. Impedance response calculated by FEA for the 2-2 type piezocomposite.

타내었다. 압전복합재료의 밀도와 음향 임피던스는 고분자재료의 밀도에 비해 PZT의 밀도가 매우 높은 값을 가지므로 PZT 부피분율이 증가함에 따라 밀도는 선형적으로 증가하였다. 음속과 밀도의 곱으로 표현되는 압전복합재료의 음향 임피던스는 밀도의 증가로 인하여 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있으며, 두께방향 전기기계결합계수는 그림에서 보는 바와 같이 PZT 부피분율이 0.6인 경우 가장 높게 나타났으며 그 이상에서는 고분자 상에 의한 PZT 상의 클램핑(clamping) 효과에 의하여 두께방향 전기기계결합계수가 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 현상은 일반적인 압전재료의 종횡비가 0.4~0.6인 경우 전기기계결합계수와 공진모드의 명확성이 가장 우수하다는 선행의 연구결과와 잘 일치한다^[7-8].

일정 응력을 인가시 발생하는 전하량의 크기 혹은 역으로 일정한 전계를 가했을 때 발생하는 변형율을 나타내는 압전전하상수(d_{33})는 2-2형 압전복합재료가 단순히 병렬구조로 되어 있다는 가정하에서 2-2형 압전복합재료의 평균 $\overline{d_{33}}$ 값은 다음 식 (2)와 같이 주어진다.

$$\overline{d_{33}} = \frac{(V_{PZT}/s_{33}^E)}{\overline{s_{33}^E}} d_{33} \quad (2)$$

여기서, V_{PZT} 는 PZT의 부피비이며, $\overline{s_{33}^E}$ 는 PZT의 탄성계수로 재료의 음속으로부터 구할수 있다.

압전복합재료의 에너지 변환량 성능평가는 기계적응력에 대한 발생전압의 크기로 결정되며 이때의 성능지수로써 압전전압상수(g_{33})가 사용된다. 2-2형 압전복합재료의 g_{33} 는 식 (3)을 이용하여 계산 할 수 있다.

$$\overline{g_{33}} = \frac{\overline{d_{33}}}{\epsilon_{33}^T} (Vm/N) \quad (3)$$

Fig. 5에는 2-2형 압전복합재료의 PZT 부피분을 변화에 따른 압전전하상수(d_{33})값과 압전전압상수(g_{33}) 값

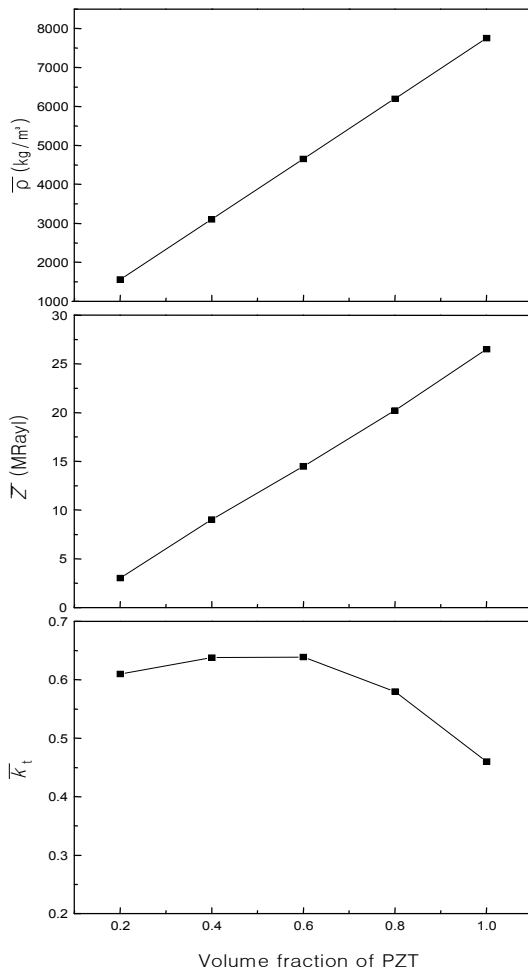


그림 5. FEM을 이용한 2-2형 압전복합재료의 부피분을 변화에 따른 특성 변화

Fig. 5. Characteristics of the 2-2 type piezocomposite for various volume fraction of PZT using FEA.

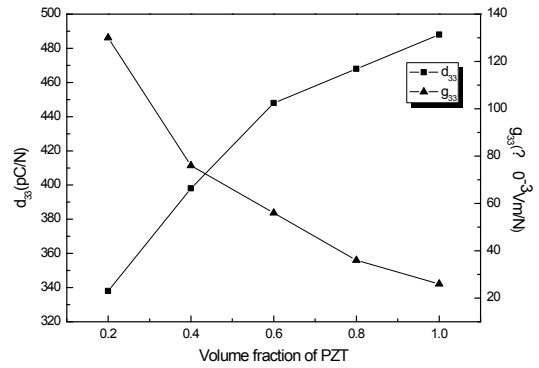


그림 6. FEM을 이용한 2-2형 압전복합재료의 압전 특성

Fig. 6. Piezoelectric constant of the 2-2 type piezo-composite for various volume fraction of PZT.

을 나타내었다. 단일상 PZT의 압전전하상수 d_{33} 는 488 pC/N 이며, 고분자재료는 압전특성이 나타나지 않으므로 압전복합재료의 d_{33} 는 PZT상에 의존하게 된다. PZT 부피분율이 0.8에서 0.2로 감소함에 따라 고분자재료의 부피분율 증가로 인하여 발생 전하량이 감소하므로 PZT 상의 변형은 감소하고 고분자 상의 변형은 증가하여 복합재료의 평균 변형은 감소하므로 압전전하상수 (d_{33})가 감소하는 것으로 Robertson 등^[9]의 연구 결과와 유사한 특성을 나타내었다.

PZT의 부피분율이 감소함에 따라 압전복합재료의 압전전압상수(g_{33})는 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 압전복합재료의 PZT 부피분율이 감소하여도 d_{33} 는 크게 변화가 없는 반면에 PZT 부피분율 감소에 따른 비유전율 감소에 기인한 것이며, 단일상의 PZT 보다 음파의 수신감도가 개선됨을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 2-2형 압전복합재료는 수중 및 의료용 초음파 트랜스듀서의 요구조건을 비교적 잘 만족하고 있음을 알 수 있다.

IV. 결론

테이프 캐스팅 방법을 이용하여 제작한 PZT-5A의 소결 온도변화에 따른 압전특성과 이를 물성값으로부터 유한요소 해석법을 이용하여 2-2형 압전복합재료 초음파 트랜스듀서의 압전특성과 음향 특성을 조사한 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1180℃에서 소결한 PZT-5A는 입자크기의 증가에 따

른 기공율 감소와 밀도의 증가로 인하여 비유전율(ϵ_r), 압전전하상수(d_{33}), 기계적품질계수(Q_m)는 증가하였으며, 낮은 유전손실 값을 나타내었다.

유한요소법을 이용한 해석결과 2-2형 압전복합재료의 PZT 부피분율이 감소함에 따라 음향임피던스는 감소하였으며, 두께방향 전기기계결합계수는 PZT 부피분율이 0.2~0.6에서 거의 일정한 값을 가지나 그 이상에서는 감소하는 경향을 보였다.

이상의 결과로부터 본 연구에서 해석한 2-2형 압전복합재료로서는 초음파 트랜스듀서로 사용 가능성을 확인할 수 있었다. 향후 2-2형 압전복합재료를 이용한 초음파 트랜스듀서를 실제로 제작하여 이것의 초음파의 송수신 특성을 조사하여 단일상의 트랜스듀서 보다 성능이 뛰어난 초음파 트랜스듀서를 개발 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 노용래, “초음파센서용 압전 재료”, 전기전자재료 학회지, 14권, 4호, pp. 16-22, 2001.
- [2] R. E. Newnham, D. P. Skinner & R. E. Cross, “Connectivity and Piezoelectric -Pyroelectric Composites”, Mat. Res. Bull., 13, pp.525-536, 1978.
- [3] Y. R. Roh and B. T. Khuri-Yakub, “Finite element analysis of underwater capacitor micromachined ultrasonic transducers”, IEEE Trans. Ultrason, Ferroelectr. Freq. Contr., Vol. 49, pp. 293-298, 2002.
- [4] S. Takahashi, S. Hirose, K. Uchino and K. Y. Oh, “Electro-mechanical characteristics of lead-zirconate-titanate ceramics under vibration-level change”, Proc. of IEEE, pp. 377-382, 1995.
- [5] R. Lerch, “Simulation of piezoelectric devices by two and three dimensional finite elements”, IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr., Vol. 37, No. 2, p. 233, 1990.
- [6] 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, Vol. 68, pp. 123-139. 1986.
- [7] A. Fufumoto, “The application of piezoelectric ceramics in diagnostic ultrasound transducers”, Ferroelectrics, Vol. 40, pp. 212-230, 1982.
- [8] H. Takeuchi and C. Nakaya, “PZT/Polymer composites for medical ultrasonic probe”, Ferroelectrics, Vol. 68, No. 1, p. 53-61, 1986.
- [9] D. Robertson, G. Hayward and A. Gachagan, “Comparison of the frequency and pyhsical nature of the lowest order parasitic mode in single crystal and ceramic 2-2 and 1-3 piezoelectric composite transducers”, IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr., Vol. 53, No. 8, pp. 1503-1512, 2006.

— 저 자 소 개 —



박재성(정회원)

1986년 영남대학교 전자공학과
학사.

1990년 영남대학교 전자공학과
석사.

2000년 영남대학교 전자공학과
박사.

2002년~현재 영남이공대학 전자정보계열 부교수
<주관심분야 : 반도체 설계, 센서 및 시스템>



이상욱(정회원)

1999년 가야대학교 전자세라믹과
학사.

2001년 영남대학교 전자공학과
석사.

2008년 영남대학교 전자공학과
박사.

2007년~현재 (주) 포디컬처 책임연구원
<주관심분야 : 센서 및 시스템, 센서 어레이, 센서
계측>