

# 1-3형 압전복합체를 이용한 초음파 탐촉자 설계 및 시작품 제작

한교훈\*, 노용래\*\*

\* 경북대학교 센서공학과

\*\* 경북대학교 전자전기공학부/센서공학과

## Design of an Ultrasonic Transducer with 1-3 Mode Piezocomposites and Fabrication of its Prototype

Kyohoon Han\*, Yongrae Roh\*\*

\* Department of Sensor Engineering, Kyungpook National University

\*\* Department of Electronics / Sensor Engineering, Kyungpook National University

### 요 약

본 논문에서는 순수 압전세라믹에 비해 동등이상의 압전특성을 가지면서도 음향임피던스가 월등히 낮은 1-3형 압전복합체를 이용한 탐촉자의 개발에 관해 연구하였다. 압전 복합재료 탐촉자는 그 자체만으로 측정대상체와의 음향임피던스 차를 최소화하여 별도의 정합층을 필요로 하지 않는 특징을 가진다. 이를 위하여 본 연구에서는 복합재료에 사용되는 고분자재료의 물성값 설계와, 압전세라믹과의 적절한 배합구조와 형상의 결정에 설계의 주요점을 두었다. 그 결과를 바탕으로 압전복합체 초음파 트랜스듀서 시작품을 제작하고 그 성능을 분석하였으며, 이론적인 시뮬레이션 결과와의 비교를 통해 설계이론에 대한 타당성을 검증하였다.

### I. 서 론

전형적인 초음파 탐촉자에서 가장 중요한 요소는 초음파를 발생하고 수신하는 압전소자이고, 통상의 경우 전기-기계 결합계수가 큰 PZT계열의 압전세라믹을 사용하고 있다. 그러나 압전세라믹은 음향임피던스가 너무 커서 측정대상체와의 임피던스정합이 어려워 전연의 정합층을 이용하여 이러한 문제를 해결하고 있다. 하지만 정합층의 설계는 상당히 복잡한 설계과정을 거쳐야하며, 그 제작과정 또한 정확히 제어하기 어려운 많은 변수들이 존재하는 실정이다. 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 압전성이 큰 세라믹과 음향임피던스가 낮은 고분자 매질을 복합화한 압전복합체가 개발되고 있다. 하지만 세라믹-고분자 압전복합체에 관해 재료적인 측면에서의 성능과 음향학적인 특성들에 대한 연구사례는 많이 있으나, 실제 사용 가능한 트랜스듀서에 적합한 음향학적인 특성 및 물성값을 가지는 세라믹-고분자 압전복합재료의 설계에서부터 압전체의 제

작 및 이물 이용한 탐촉자의 개발까지를 연구한 사례는 그리 많지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 고분자재료와 압전세라믹을 이용, 제작성과 재현성이 뛰어나고 우수한 압전특성을 비교적 용이하게 구현할 수 있는 압전 복합체의 최적구조와 물성을 압전복합재료 관계식을 이용하여 설계하고, 이를 바탕으로 압전복합체 시편을 제작하고자 한다. 또한 이 압전복합체를 이용한 탐촉자의 시작품을 제작하여 실제 성능측정을 통해 설계이론에 대한 타당성을 검증하고자 한다.

### II. 압전복합체의 최적구조 설계

탐촉자의 최적성능구현을 위한 설계변수로는 복합재료 구성재료인 고분자 재료와 압전세라믹의 각각의 물성과 구성부피비, 배열형태, 압전세라믹의 단면형태, 크기, 길이 등이 될 것이다. 본 연구에서는 이상의 성능평가지수들을 위한 설계변수의 최적값을 구하여 보았다.

먼저, 저음향임피던스와 높은 결합계수의 구현을 위한 고분자재료의 최적물성 결정을 위하여, 참고문헌 [1]에 나타나 있는 압전복합재료 관계식을 이용하였고, 분석을 위하여 사용된 삽입재료는 PZT를, 고분자재료로는 silicon rubber를 가정하였다. 분석결과, 음향 임피던스는 모재의 밀도가 낮을수록 압전복합재료 전체의 음향임피던스가 저하되었고, 두께모드 전기-기계 결합계수는 모재의 밀도와 무관한 것으로 나타났다. 또한 모재의 강성계수의 값이 낮을수록 음향임피던스는 저하되었고 두께모드 전기-기계 결합계수는 증가하였다.

다음으로는, 복합재료에서 PZT의 부피분율에 따른 음향특성의 변화경향을 살펴보았다. 경향분석을 위하여 적용된 모재

의 밀도( $\rho^0$ )와 강성계수( $c_{11}^0$ )의 값은 고분자 불성결정시 사용된 값을 적용하였고, PZT의 부피분율을 0에서 1까지 변화시키면서 그 때의 압전복합체의 음향임피던스와 결합계수의 변화 경향을 관찰하였다. 한편 본 연구에서는 음향임피던스가 낮고 동시에 결합계수가 동상적인 PZT대비 동등이상의 값을 갖는 압전복합체를 개발하는 것이 목적이다. 이 두가지 관점에서 볼 때 PZT부피분율 0.2 이상에서는 음향임피던스가 의도용 탐촉자나 수중청음기가 통상 가져야 할 음향임피던스값 보다 지나치게 높아진다. 따라서 본 연구에서는 압전복합체 시편이 통상적인 PZT 대비 동등이상의 결합계수 값을 가지면서 음향임피던스를 최대한 낮출수 있도록 PZT 부피분율을 0.1로 결정하였다.

일반적으로 압전복합체의 삽입재로 사용되는 PZT의 단면형상은 크게 원형, 사각형, 삼각형형태를 들 수 있다. 참고문헌 [2]에 따르면 삽입재의 단면형상이 사각형일 때, 변화시킬수 있는 삽입재의 부피분율 범위가 가장 넓고 가공성이 용이한 것으로 나타났다.

### III. 세라믹, 고분자 시험편 제작 및 음향특성 측정

앞장에서 검토된 최적설계변수에 부합되는 고분자재료의 선정을 위해, 상용화된 고분자재료중 저밀도 값을 가지는 고분자재료 수중용 임의로 선정하여 그 시험편을 제작하고 물성을 분석하였으며 분석결과를 바탕으로 압전복합재료의 모재로서 불포화폴리에스테르와 Epoxy-Lite를 결정하였다. 또한 결정된 불포화폴리에스테르수지와 Epoxy-Lite의 밀도를 조절하고 압전복합재료 제조과정중 생길 수 있는 모재내의 기포발생을 억제하여 전체 모재의 균일성을 얻기 위해 텅스텐 분말을 혼합하였다.

나아가 향후 제작된 압전복합재료 초음파 탐촉자의 성능을 비교분석하기 위해 고분자재료와 삽입재인 PZT에 대해 물성 및 음향특성 측정하였다. 물성측정에 사용된 PZT는 40mm×20mm×2.5mm의 규격을 가지는 시험편을 사용하였다. 측정된 PZT 시험편의 음파속도는 4545.5m/s, 밀도는 7711.1 kg/m<sup>3</sup>, 비유전율은 939.4였다. 또한 압전계수  $d_{33}$ 은  $d_{33}$  meter를 이용하였으며, 측정의 타당성을 확보하기 위하여 임의의 9 지점을 선정하여 측정된 값의 평균을 취하였다.  $\epsilon_1$  값은  $250 \times 10^{-12}$  [C/N]이었다. 측정된  $d_{33}$ 값은 상용화된 Veritron 사의 PZT4 계열 값과 비슷한 값을 가졌다. 따라서  $d_{31}$ 과  $d_{15}$ 값은 PZT4의 압전계수 "d" 값을 기준하여 결정하였다. 재료의 속도와 밀도와 관계식(1)에 의해 강성계수 또한 구하였는데 그 값은  $15.9 \times 10^{10}$  [N/m]이었다.

$$C_{33}^{C,D} = \rho V_3^2 \quad (1)$$

이외의 압전복합재료 관계식에 필요한 재료의 물성은 많이 있으나, 실험실에서 이 물성값을 모두 측정하기는 현실적으로 어려우므로 참고문헌 [3]에 나타나 있는 PZT의 물성행렬에 대한 관계식을 이용하여 나머지 물성들을 모두 유도하고, 모간법에 의해 보정하였다. 유도된 물성 행렬은 (2)와 같다.

$$[\epsilon^{T,T}] = \begin{bmatrix} 6.8 \times 10^{-12} & 0 & 0 \\ 0 & 6.8 \times 10^{-12} & 0 \\ 0 & 0 & 5.3 \times 10^{-12} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$[e] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 12.4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 12.4 & 0 \\ 0.015 & -0.015 & 11.9 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[c^{T,T}] = \begin{bmatrix} 1.5 \times 10^{11} & 8.9 \times 10^{10} & 9.9 \times 10^{10} & 0 & 0 & 0 \\ 8.9 \times 10^{10} & 1.5 \times 10^{11} & 9.9 \times 10^{10} & 0 & 0 & 0 \\ 9.9 \times 10^{10} & 9.9 \times 10^{10} & 1.3 \times 10^{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2.9 \times 10^{10} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.9 \times 10^{10} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3.1 \times 10^{10} \end{bmatrix}$$

#### 1. 시험편 제작

다음으로 앞에서 결정된 합성고분자재료(불포화폴리에스테르수지, Epoxy-Lite + 텅스텐 분말) 및 PZT를 이용하여 PZT 부피분율(volume fraction)이 10%인 압전복합재료 구조체 시험편을 제작하였다. Fig. 1에 제작된 압전복합체 시편의 사진을 나타내었다.

#### 2. 음향특성 측정

측정은 pulse-echo법과, 모재와 삽입재의 음향특성을 구하기 위해 사용하였던 방법을 동일하게 적용하였다. 더불어 압전복합체 시편의 공진특성을 알아보기 위해 impedance analyzer(4192A, HP)를 이용하여 주파수 해석을 실시하였다. 사용된 시편은 15mm×15mm×6mm의 규격을 가지고 있으며 이때의 공진은 약 238.5 kHz에서 나타났다. 복합체의 모재가 불포화폴리에스테르수지이고 텅스텐 분말 혼합으로 밀도를 10% 증가시킨 경우 #1C, 모재가 Epoxy-Lite이고 텅스텐 분말 혼합으로 밀도를 10% 증가시킨 경우 #1E로 표기하였다 이후 동일한 표기법이 적용될 것이다. 임피던스 측정결과로부터 시편의 공진주파수와 반공진주파수를 이용하여 식(3)에 의해 두께모드 결합계수를 구하였다.

$$k_T^2 = \frac{\pi}{2} \frac{f_R}{f_A} \tan\left(-\frac{\pi}{2} \frac{f_A - f_R}{f_A}\right) \quad (3)$$

Table 1에 압전복합재료 구조체 시편의 물성 및 음향특성값에 대해 이론적인 계산 값과 실험 측정값을 나타내었다.

#### IV. 압전복합재료 초음파 탐촉자 시작품 제작

##### 1. 시작품 제작

본 연구에서 제작된 탐촉자 시작품은 복합재료판을 이용하여 정합층을 필요로 하지 않는 저음향임피던스를 구현하였으므로 전면 정합층을 사용하지 않았고, 복합재료만의 특성을 관찰하기 위해 후면층 또한 사용하지 않았다. 시 제작된 압전 복합재료 구조체 시권의 두께는 인의로 2mm로 가공하였다. 탐촉자의 외장은 알루미늄을 사용하였으며, 전극이 형성된 탐촉자의 양쪽에서 전계를 인가하기 위한 cable을 연결하였다. 진동자 주위는 실리콘을 이용하여 밀폐시킴으로서 수중에서의 각종 초음파 특성을 조사할 수 있는 구조를 갖고 있다. Fig. 2에 실제 제작된 초음파 탐촉자 시작품의 사진을 나타내었다.

##### 2. 성능평가

###### 1) 컴퓨터 시뮬레이션 해석

컴퓨터 모의실험은 총 5 경우 14개의 모델에 대해 실시되었다. 가정된 전형적인 탐촉자의 경우에는 PZT로는 앞절에서 구한 PZT물성을 사용하였고, 정합층의 물성은 DeSilets의 정합층에 의한 임피던스 정합이론에 따른 물성값을 적용하였다<sup>14)</sup>. 그리고 실제 제작된 탐촉자의 경우에는 그 탐촉자의 실제 물성을 적용하였다. 실제 제작된 두 개의 정합층과 후면층을 가지는 탐촉자를 제외한 13개의 모델에 대해 후면층은 모두 공봉적으로 공기(air backed)로 가정하였다.

비교되어진 성능지수는 송, 수신감도, 주파수대역폭, 반사파 소멸시간이다. 해석은 참고문헌 [5]에 나타난 바와 같은 임피던스 반복해석법을 이용하였다. 해석에 따른 결과( Table 2에 나타내었다. Table 2의 비교치에서 감도는 송수신 파형의 양의 최대값으로 하였고, 사용주파수 대역폭은 -3dB 감쇠대역폭을 취한 값이며, 소멸시간은 최대감도를 나타내는 진폭으로부터 -20dB 감소될 때까지의 시간을 취한 것이다. 비교를 위해 단일상 PZT의 감도, 대역폭, 소멸시간을 각각 1로 보았을 때의 상대적인 값으로 표준화한 값을 나타내었다.

###### 2) 실험 및 고찰

제작된 시작품에 대해 실제 측정을 통한 성능평가를 실시하였다. 비교대상으로는 자체 제작한, 두 개의 정합층을 가지며 후면층을 가지는 중심주파수 1.8MHz의 탐촉자와 단일 압전소자만으로 구성된 탐촉자를 취하였으며, 성능은 pulse-echo 시험을 통해 평가하였다. 그 결과는 Fig. 3과 Table 3에 나타내었다. 실험을 통해 얻어진 결과를 컴퓨터 모의실험 결과와 비교해 보면 그 경향은 거의 일치하나 약간의 오차를 보인다. 이는 제작 공정상의 오차와 실험과정에서 발생한 외부잡음의 영향 때문으로 판단된다.

#### VI. 결 론

본 연구에서 제작된 압전복합재료 탐촉자와 정합층과 후면층을 가지는 전형적인 탐촉자의 성능을 비교한 결과, 복합재료 탐촉자의 성능이 단일 압전세라믹으로 구성된 탐촉자에 비해서는 월등히 우수하였고 정합층과 후면층을 가진 전형적인 탐촉자에 비해 감도면에서는 대등한 성능을 나타내었으나 대역폭과 반사파의 소멸시간의 단축면에서는 낮은 값을 나타내었다. 이는 비교적 정밀하게 제작된 실 제작 탐촉자에 비해 외부진계 인가를 위해 연결된 도선 및 외장 케이스 품질의 상대적인 열악성으로 인해 실험과정에서 발생할 수 있는 외부잡음 및 실험오차가 다소 과다하게 영향을 미친 것으로 생각된다. 그러나 그 제작방법상으로 볼 때, 전형적인 탐촉자는 압전세라믹의 음향임피던스와 매질의 음향임피던스간의 부정합을 해소하기 위한 정합층을 별도로 설계, 제작하여야 함에 따라 그 설계의 복잡성과 제작시의 공정오차를 줄이는 것에 한계가 있고, 또한 제작자와 제작환경에 따른 오차변수가 커 동일한 성능을 가지는 탐촉자의 대량생산이 매우 어렵다. 반면 복합재료 압전체를 이용한 탐촉자는 최종적으로 구현하고자 하는 음향임피던스값이 정해지면 본 연구의 압전 복합재료 조성관계식을 이용, 동일한 물성을 가지는 고분자 모재를 쉽게 제조할 수 있어 탐촉자의 재현성을 구현하기가 월등히 용이하고, 그 제작오차 또한 전형적인 탐촉자 대비 줄어 들 수 있다는 장점이 본 연구에서 수행된 시작품 제작과정을 통하여 확인되었다.

#### 참 고 문 헌

1. Helen Lai Wah Chan, Joseph Unsworth, "Simple Model for Piezoelectric Ceramic/Polymer 1-3 Composites Used in Ultrasonic Transducer Applications", IEEE Trans. on Ultrason., Ferroelect. and Freq. Control, Vol.36, No.4, pp.434-441, 1989.
2. Gordon Hayward, Jeremy Bennett, "Assessing the Influence of Pillar Aspect Ratio on the Behavior of 1-3 Connectivity Composite Transducers", IEEE Trans. on Ultrason., Ferroelect. and Freq. Control, Vol.43, No.1, pp.98-108, 1996.
3. Velimir M. Ristic, "Principles of Acoustic Devices", A Wiley-Interscience Publication, pp. 174-211, 1983.
4. Charles S. Desilets, John D. Fraser, Gordon S. Kino, "The Design of Efficient Broad-Band Piezoelectric Transducers", IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, Vol. SU-25, No.3, pp. 115-125, 1978.
5. Yeonbo Kim, Yongrae Roh, "Design of Matching Layers for High Efficiency-Wide Band Ultrasonic Transducers", The Journal of the Acoustical Society of Korea, Vol.15, No.5, pp.82-89, 1996.

Table 1. Material properties and acoustic characteristics of the fabricated piezocomposites.

	density (kg/m <sup>3</sup> )	wave velocity (m/s)	impedance (Mrayl)	f <sub>r</sub> (kHz)	f <sub>c</sub> (kHz)	ε <sub>r</sub>	k	d <sub>33</sub> (pC/N)
#1C	1962.6	2494.8	4.90	238	247	105	0.46	152
#2C	2093.5	2438.0	5.10	235	246	109	0.44	166
#3C	2129.3	2390.4	5.09	230	239	104	0.44	134
#4C	2266.3	2331.9	5.28	236	247	108	0.44	148
#5C	2306.7	2303.3	5.31	222	233	111	0.43	132
#1E	1947.5	2688.9	5.24	243	255	120	0.43	155
#2E	1955.0	2536.4	4.96	229	256	123	0.43	119
#3E	2166.7	2316.6	5.02	224	240	118	0.43	156
#4E	2140.7	2500.0	5.35	226	252	146	0.43	157
#5E	2255.5	2326.5	5.25	212	233	123	0.45	128

Table 2. Simulation results of pulse echo responses of the piezocomposite ultrasonic transducers and conventional ultrasonic transducers.

	transducer	sensitivity	bandwidth	ringdown time	remark
c o m p o s i t e	#1C	1.029	6.5	0.125	no matching layer
	#2C	1.006	6.0	0.136	
	#3C	1.074	6.0	0.136	
	#4C	0.953	5.5	0.137	
	#5C	0.987	5.5	0.137	
	#1E	1.075	5.5	0.136	
	#2E	0.965	6.0	0.126	
	#3E	1.108	6.0	0.126	
	#4E	1.108	5.5	0.137	
	#5E	1.054	5.5	0.137	
c o n v e n t i o n a l	with PZT only	1.000	1.0	1.000	ideal matching layers
	with one ml	1.827	11.0	0.071	
	with two ml	1.761	18.5	0.072	
	with two ml	1.314	22.0	0.047	

Table 3. Performance of the piezocomposite ultrasonic transducers and conventional ultrasonic transducer

	transducer	sensitivity	bandwidth	ringdown time	remark
c o m p o s i t e	#2C	1.757	8.8	0.217	air backed
	#3C	1.730	5.2	0.209	
	#4C	1.649	5.0	0.243	
	#2E	1.135	4.9	0.148	
	#3E	1.324	6.6	0.148	
	#4E	1.486	5.2	0.148	
	#5E	1.703	5.2	0.191	
c o n v e n t i o n a l	with PZT only	1.000	1.0	1.000	epoxy backed
	with two ml	1.703	10.2	0.108	

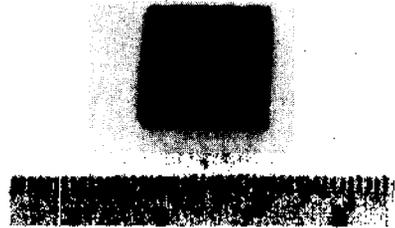


Fig. 1. Photograph of the 1-3 composite prototype.

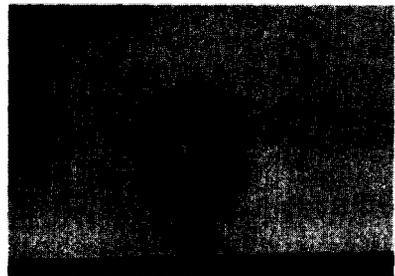
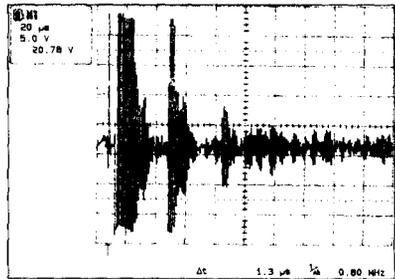
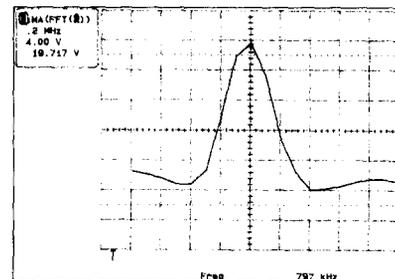


Fig. 2. Photograph of the 1-3 composite transducer prototype.



Time domain response



Frequency domain response

Fig. 3. Pulse-echo response of fabricated representative 1-3 mode piezocomposite(#1C) transducer.