

1-3형 압전복합체를 이용한 초음파 탐촉자 설계 및 시작품 제작

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

한 교 훈*, 노 용 래**
(Kyo Hoon Han*, Yong Rae Roh**)

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 고분자 재료의 물성값 설계와, 압전세라믹과의 적절한 배합구조와 형상의 결정에 설계의 주안점을 두었다. 그 결과를 바탕으로 압전복합체 초음파 트랜스듀서 시작품을 제작하고 그 성능을 분석하였으며, 이론적인 시뮬레이션 결과와의 비교를 통해 설계이론의 타당성을 검증하였다.

본 연구에서 수립되어진 압전복합체 트랜스듀서의 설계 및 제작기법은 향후, 측정대상체와의 임피던스 정합을 위해 정합층에 대해 복잡한 설계 및 제작공정을 거쳐야하는 다양한 탐촉자 개발에 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

ABSTRACT

In this paper, we have investigated on the development of ultrasonic transducers with 1-3 mode piezocomposites that have better piezoelectric activity and lower acoustic impedance than those of conventional piezoceramics. The piezocomposite ultrasonic transducer can solve the traditional acoustic impedance mismatching problems without the help of matching layers. In this study we have designed optimal material properties of the piezocomposite, and volume fraction and geometric shape of the piezoceramic.

Based on the results, we have fabricated piezocomposite ultrasonic transducer prototypes, measured their performance, and verified validity of the design theory through comparison with theoretical simulation results.

The design and fabrication method for piezocomposite transducers worked in this paper can be utilized in development of various ultrasonic transducers, while eliminating such complicated design and fabrication process for the matching layers in conventional sensors.

I. 서 론

초음파 탐촉자의 일반적인 구조는 탐촉자의 중심에 압전소자를 두고 그 전면에 1-2개의 정합층과 후면에 음향 흡수층(backing load)을 두는 형태를 취하고 있다. 이러한 구조의 탐촉자에서 가장 중요한 요소는 초음파를 발생하고 수신하는 압전소자이고, 통상의 경우 전기-기계 결합 계수가 큰 PZT 계열의 압전세라믹을 사용하고 있다. 그러나 압전세라믹은 음향임피던스가 매우 커서 의료용의 경우 측정대상인 인체와의 음향임피던스값의 차이가 매우 크고, 따라서 그 부정합(mismatching)으로 인한 어려움이 많다. 이러한 음향임피던스의 부정합은 압전세라믹과 인체

사이의 정합층을 사용하여 해소하고 있다. 그러나 이러한 정합층의 물성은 매우 복잡하고 어려운 설계 및 제작공정을 필요로 할 뿐만 아니라, 설사 물성값이 설계된다 하더라도 이를 제작하는데는 정확히 제어하기 어려운 많은 변수들이 존재하고 있다. 따라서, 이러한 어려움을 극복할 수 있는 새로운 형태의 압전소자가 개발될 필요가 절실하다. 이상과 같은 요구에 부응하기 위해 압전성이 큰 세라믹과 음향임피던스가 낮은 고분자매질(polymer matrix)을 복합화한 압전복합체(ceramic-polymer composites)가 개발되고 있다. 대표적인 연구사례로 Robert E. Montgomery^[1]등은 1-3형 압전 복합재료의 수중 정압(hydrostatic pressure)하에서의 기계적인 응답특성(mechanical response)을 얻기 위한 해석적인 모델에 대해 유한요소 해석법을 통해 연구하였고, Gordon Hayward^[2]등은 1-3형 압전 복합재료의 세라믹 삽입시편(pillar)의 형상비(aspect ratio)가

* 경북대학교 센서공학과

** 경북대학교 전자전기공학부/센서공학과

접수일자 : 1998년 7월 16일

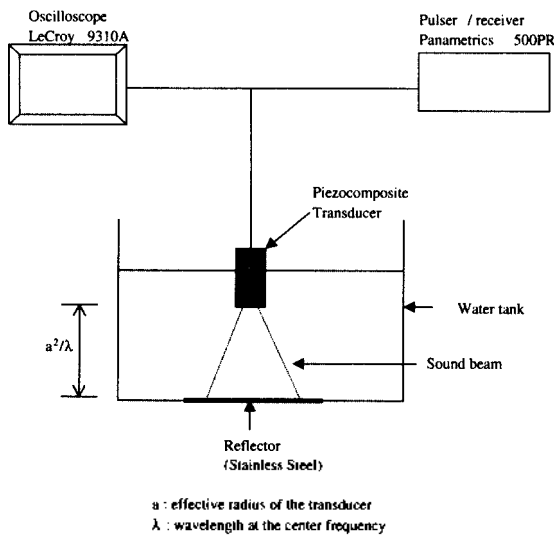


그림 10. 펄스-에코 실험의 개략도
Fig. 10. Block diagram of the pulse-echo experiment.

표 5. PZT 소자만의 성능과 비교한 압전 복합재료 탐촉자와 통상적인 초음파 탐촉자의 실험적 성능

Table 5. Performance of the piezocomposite ultrasonic transducers and conventional ultrasonic transducers with reference the performance of a bare PZT element.

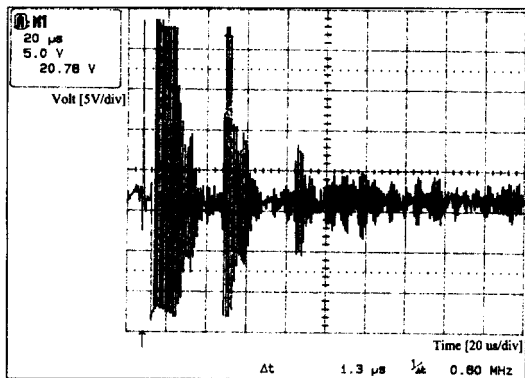
transducer type	sensitivity	bandwidth	ringdown time	remark
composite #2	1.757	8.8	0.217	air backed
composite #3	1.730	5.2	0.209	
composite #4	1.649	5.0	0.243	
conventional with PZT only	1.000	1.0	1.000	epoxy backed
conventional with two matching layers	1.703	10.2	0.108	

과 후면충을 모두 가지는 탐촉자에 비해서는 감도면에서 대등한 성능을 나타내었으며 대역폭과 반사파 감쇄시간에서는 근소하게 그 성능이 낮게 나타났다. 이는 비교적 정밀하게 제작된 실제 탐촉자에 비해 도선 및 외장 케이스 품질의 상대적인 열악성으로 인해 실험과정에서 발생할 수 있는 외부잡음 및 실험오차가 다소 과다하게 영향을 미친 것으로 생각된다.

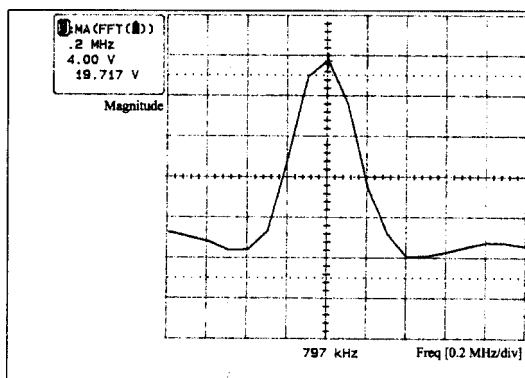
VI. 결론

본 연구에서는 음향임피던스가 단일 압전세라믹에 비해 월등히 낮아 일반적인 측정매질인 물과의 정합이 필요치 않은 1-3형 압전 복합재료를 개발하고, 그를 이용한 탐촉자를 설계, 제작하였다.

제작된 압전복합재료 탐촉자와 정합층과 후면충을 가지는 전형적인 탐촉자의 성능을 비교한 결과, 복합재료 탐촉자의 성능이 단일 압전세라믹으로 구성된 탐촉자에 비해서는 월등히 우수하였고 정합층과 후면충을 가진 전형적인 탐촉자에 비해 감도면에서는 대등한 성능을 나타내었으나 대역폭과 반사파의 소멸시간의 단축면에서는 낮은 값을 나타내었다. 이는 비교적 정밀하게 제작된 실제 탐촉자에 비해 도선 및 외장 케이스 품질의 상대적인 열악성으로 인해 실험과정에서 발생할 수 있는 외부잡음 및 실험오차가 다소 과다하게 영향을 미친 것으로 생각된다. 그러나 그 제작기법상으로 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 시제품 제작과정을 통하여 확인되었다.



<시간 영역 반응>
<Time domain response>



<주파수 영역 반응>
<Frequency domain response>

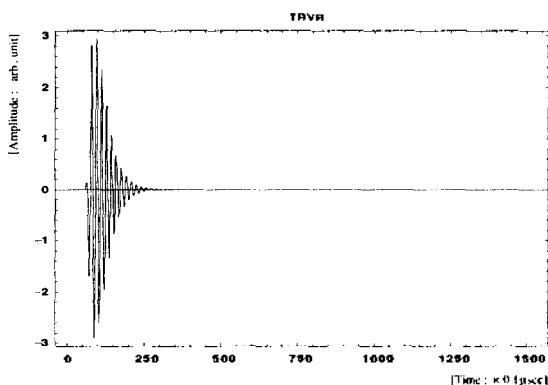
그림 11. 제작된 대표적인 1-3형 압전 복합체 탐촉자의 펄스-에코 반응 특성
Fig. 11. Pulse-echo response of fabricated representative 1-3 mode piezocomposite(composite #2) transducer.

Table 4의 결과로부터, 먼저 모재의 밀도변화에 따른 복합체로 탐촉자의 성능을 비교해 보았다. Table 4에 의하면, 모재의 밀도가 높아질수록 감도와 주파수 대역폭은 저하되었고, 소멸시간은 길어지는 경향을 보였다. 이는, 물을 매체로 한 측정대상체에 대해 정합과 송수신 성능개선을 위해서는 모재의 밀도가 낮아야 한다는 앞절의 이론적 배경에 부합되는 결과라 하겠다. 또한 Table 4와 Fig. 9로부터, 단일 PZT를 이용한 탐촉자의 성능에 대비해 본 연구에서 설계된 압전복합체료를 이용한 탐촉자의 경우, 감도는 약 10% 정도가 높았으며, 사용 주파수 대역폭은 5.5~6.5 배정도로 광대역특성을 나타내었다. 그리고 반사신호의 소멸시간 또한 단일 PZT에 비해 열 배 정도 짧게 나타났다.

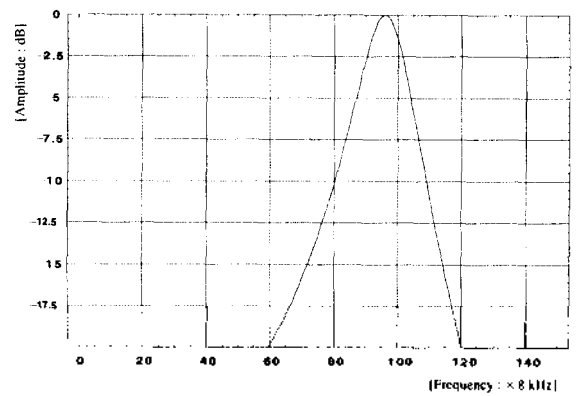
다음으로 정합층과 후면층을 사용한 일반적인 탐촉자와 압전복합체로 탐촉자의 성능을 비교해 보았다. 결과는 Desilets의 이론에 의한 정합층을 사용한 경우가 압전복합

표 4. PZT 소자만의 성능과 비교한 압전 복합체로 탐촉자와 통상적인 초음파 탐촉자의 펄스-에코 반응 시뮬레이션 결과
Table 4. Simulation results of pulse-echo responses of the piezocomposite ultrasonic transducers and conventional ultrasonic transducers with reference the performance of a bare PZT element.

transducer type	sensitivity	bandwidth	ringdown time	remark	
composite #1	1.029	6.5	0.125	no matching layer	air backing
composite #2	1.006	6.0	0.136		
composite #3	1.074	6.0	0.136		
composite #4	0.953	5.5	0.137		
composite #5	0.987	5.5	0.137		
conventional with PZT only	1.000	1.0	1.000	ideal matching layers	
conventional with one matching layer	1.827	11.0	0.071		
conventional with two matching layers	1.761	18.5	0.072		
conventional with two matching layers	1.314	22.0	0.047		



<시간 영역>
<Time Domain Response>



<주파수 영역>
<Frequency Domain Response>

그림 9. 대표적인 1-3형 압전 복합체의 펄스-에코 반응 시뮬레이션 결과 (시편 #2)

Fig. 9. Pulse-echo response of the representative 1-3 piezocomposite(composite #2) simulated by calculation.

재료 탐촉자 대비 송, 수신 감도, 대역폭, 반사파의 소멸 시간에서 모두 약간의 우수한 성능을 나타내었다. 이러한 경향은 모의실험에 적용된 압전복합체로 탐촉자의 물성으로 압전복합체로 관계식을 통해 얻은 이론적인 값을 사용한 것이 아니고 실제 측정을 통해서 얻어진, 즉 모체로 사용된 고분자물질의 감쇠의 영향이 고려된 물성값을 사용함에 따른 것이라 추정된다. 따라서 정합층을 사용한 탐촉자의 경우에서 각 정합층의 감쇠영향을 보다 실제적으로 고려하게 되면 정합층을 사용한 일반적인 탐촉자 대비 압전복합체로 탐촉자의 성능지수는 보다 개선된 결과가 나타날 것으로 예상된다. 결론적으로 압전복합체 탐촉자는 정합층을 사용하지 않았음에도 불구하고 그 성능면에서 전형적인 탐촉자와 대동소이하게 나타났다. 따라서 제작과정을 감안한다면 향후 초음파 탐촉자의 제작시 압전복합체를 이용하는 것이 더 유리할 것이다.

2) 실험 및 고찰

제작된 시작품에 대해 실제 측정을 통한 성능평가를 실시하였다. 비교대상으로는 자체 제작한, 두 개의 정합층을 가지며 후면층을 가지는 중심주파수 1.8 MHz의 탐촉자와 단일 압전소자만으로 구성된 탐촉자를 취하였으며, 성능은 Fig. 10에 나타난 바와 같은 pulse-echo 시험을 통해 평가하였다. 그 결과는 Fig. 11과 Table 5에 나타내었다. Table 5의 값은 Table 4에서와 같은 기준으로 평가한 성능 값으로서 단일 PZT를 사용한 트랜스듀서의 감도, 대역폭, 소멸시간을 각각 1로 보았을때의 상대적인 값으로 규준화한 것이다.

Table 5와 Fig. 11로부터 압전복합체를 사용한 탐촉자를 단일 압전세라믹으로 구성된 탐촉자와 두 개의 정합층과 후면층을 사용한 탐촉자의 성능과 비교해 보면, 단일 압전세라믹으로 구성된 탐촉자에 비해 모든 성능지수에서 복합재료 탐촉자의 성능이 훨씬 우수하였고, 정합층

$$k_t^2 = \frac{\pi}{2} \frac{f_R}{f_A} \tan\left(\frac{\pi}{2} \frac{f_A - f_R}{f_A}\right) \quad (13)$$

여기서, f_A 는 반공진 주파수, f_R 은 공진주파수이다. Table 3에 압전복합재료 구조체 시편의 물성 및 음향특성 값에 대해 이론적인 계산 값과 실험 측정값을 나타내었다. Table 3으로부터 밀도, 파의 속도, 음향임피던스등의 시편에 대한 음향특성은 이론치와 측정치에서 상당히 근사한 성능을 보이고 있다. 약간의 오차는 실제 제작과정에서 발생한 공정오차 및 실험오차로부터 기인된 것으로 판단된다.

V. 압전복합재료 초음파 탐촉자 시작품 제작

1. 시작품 제작

IV절에서 제작된 압전 복합재료 시편을 이용하여 실제 작동되는 탐촉자 시작품을 제작하였다. 본 연구에서 제작된 탐촉자 시작품은 복합재료를 이용하여 정합층을 필요로 하지 않는 서음향임피던스를 구현하였으므로 전면 정합층을 사용하지 않았고, 복합재료만의 특성을 관찰하기 위해 후면층 또한 사용하지 않았다. 시 제작된 압전 복합재료 구조체 시편의 두께는 임의로 2mm로 가공하였다. 탐촉자의 외장은 알루미늄을 사용하였다. 진동자 주위는 실리콘을 이용하여 밀폐시킴으로써 수중에서의 각종 초음파 특성을 조사할 수 있는 구조를 갖고 있다. Fig. 8에 실제 제작된 초음파 탐촉자 시작품의 사진을 나타내었다.



그림 8. 1-3형 복합체 탐촉자 시편의 사진
Fig. 8. Photograph of the 1-3 composite transducer prototype.

2. 성능평가

1) 컴퓨터 시뮬레이션 해석

컴퓨터 모의실험을 위하여, 본 연구에서 설계, 제작된 압전복합체를 이용한 탐촉자 5개, 정합층을 가지지 않는 PZT만으로 구성된 탐촉자 1개, 전형적인 초음파 탐촉자로서 단일 정합층을 가지는 탐촉자 1개, 두 개층의 정합층을 가지는 탐촉자 1개, 그리고 실제 측정을 통한 성능 비교시 그 대상이 될 후면층을 가지는 실제 제작된 탐촉자 1개 등 총 5 경우 9개의 모델을 설정하였다. 송, 수신 특성 해석을 위하여 각각의 모델에 적용된 물성은 압전복합체의 경우, III절에서 측정된 물성과 규격을 그대로 적용하였다. 가정된 전형적인 탐촉자의 경우에는 PZT로는 IV-2절에서 구한 PZT물성을 사용하였고, 정합층의 물성은 DeSilets의 정합층에 의한 임피던스 정합이론에 따른 물성값을 적용하였다¹²⁾. 그리고 또 하나의 설정 모델인 실제 제작된 탐촉자의 경우에는 그 탐촉자의 실제 물성을 적용하였는데, 이 또한 가정된 탐촉자의 경우와 마찬가지로 물성 배개로 DeSilets의 이론값에 해당하는 음향임피던스를 가지는 정합층과 후면층 물성을 가지고 있다. 실제 제작된 두 개의 정합층과 후면층을 가지는 탐촉자를 제외한 8개의 모델에 대해 후면층은 모두 공통적으로 공기 (air backed)로 가정하였다.

비교되어야 할 성능지수는 송, 수신감도, 주파수대역폭, 반사파 소멸시간이다. 해석은 참고문헌 [13]에 나타난 바와 같은 임피던스 반복해석법을 이용, 시간영역에서의 파형을 직접 구하고 그 결과를 Fourier 변환하여 주파수 특성을 구현하는 방법으로 탐촉자의 성능을 평가하였다. 해석에 따른 결과를 Table 4와 Fig. 9에 나타내었다. Table 4의 비교치에서 감도는 송수신 파형의 최대 진폭으로 하였고, 사용주파수 대역폭은 3dB 감쇠대역값을 취한 값이며, 소멸시간은 최대감도를 나타내는 진폭으로부터 -20dB 감소될 때까지의 시간을 취한 것이다. 비교를 위해 단일 상 PZT의 감도, 대역폭, 소멸시간을 각각 1로 보았을 때의 상대적인 값으로 규준화한 값을 나타내었다. 그리고 본 모의시험 과정에서 각 탐촉자의 정합회로와 외장의 영향은 무시하였으며, 압전소자 및 각 정합층의 유한 단면적의 영향은 각 매질의 임피던스 값에 포함하였다. 모델에서 정합층의 두께는 압전소자에서 발생하는 초음파의 중심 주파수 파장의 1/4로 하였다. 모의시험에서는 각 정합층의 감쇠도는 고려하지 않았다.

표 3. 제작된 압전 복합체의 물성과 음향 특성

Table 3. Material properties and acoustic characteristics of the fabricated piezocomposites.

		density (kg/m ³)			acoustic impedance (Mrayl)			acoustic wave velocity (m/s)			f _r (kHz)	f _c (kHz)	ε _r	k	d ₃₁ (pC/N)
		measured	calculated	deviation (%)	measured	calculated	deviation (%)	measured	calculated	deviation (%)	measured	measured	measured	measured	measured
composite	#1	1962.6	1938.6	1.0	4.90	4.84	1.0	2494.8	2497.4	0.0	238	247	105	0.46	152
	#2	2093.5	2028.7	3.0	5.10	5.22	2.0	2438.0	2572.5	5.0	235	246	109	0.44	166
	#3	2129.3	2097.8	2.0	5.09	5.23	3.0	2390.4	2491.0	4.0	230	239	104	0.44	134
	#4	2266.3	2206.5	3.0	5.28	5.46	3.0	2331.9	2475.9	6.0	236	247	108	0.44	148
	#5	2306.7	2235.2	3.0	5.31	5.50	3.0	2303.3	2462.3	6.0	222	233	111	0.43	132

한 재료의 물성은 많이 있으나, 실험적으로 이 물성값을 모두 측정하기는 현실적으로 어려우므로 참고문헌 [11]에 나타나 있는 PZT의 물성행렬에 대한 관계식을 이용하여 나머지 물성들을 유도하고, 보간법에 의해 보정하였다. 유도된 물성 행렬은 (12)와 같다.

$$[\epsilon^{C,S}] = \begin{bmatrix} 6.77703 \times 10^{-9} & 0 & 0 \\ 0 & 6.77703 \times 10^{-9} & 0 \\ 0 & 0 & 5.33178 \times 10^{-9} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$[e^C] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 12.4179 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 12.4179 & 0 & 0 \\ -0.0150639 & -0.0150639 & 11.9308 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[z^{C,S}] = \begin{bmatrix} 1.45 \times 10^{11} & 8.9 \times 10^{10} & 9.96237 \times 10^{10} & 0 & 0 & 0 \\ 8.9 \times 10^{10} & 1.45 \times 10^{11} & 9.96237 \times 10^{10} & 0 & 0 & 0 \\ 9.96237 \times 10^{10} & 9.96237 \times 10^{10} & 1.32603 \times 10^{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2.89461 \times 10^{10} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.89461 \times 10^{10} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3.06 \times 10^{10} \end{bmatrix}$$

식 (12)의 물성들은 식 (1)~(10)에 의해 복합재료의 물성값들을 도출함과 동시에, 다음 장에서 탐촉자 성능을 시뮬레이션 하는데 이용될 것이다.

3. 압전복합체 시험편 제작 및 음향특성 측정

1) 시험편 제작

다음으로 앞에서 결정된 합성고분자재료(불포화폴리에스테르수지+팅스텐 분말) 및 PZT를 이용하여 PZT 부피 분율(volume fraction)이 10%인 압전복합체료 구조체 시험편을 제작하였다. 압전 복합체를 제작하기 위한 공정도를 Fig. 5에 표시하였다. Fig. 6에 제작된 압전복합체 시험편의 사진을 나타내었다.

2) 음향특성 측정

앞에서 측정된 모재와 삽입재의 물성값과 압전복합체료 관계식을 이용하여 압전복합체가 가지는 이론적인 물

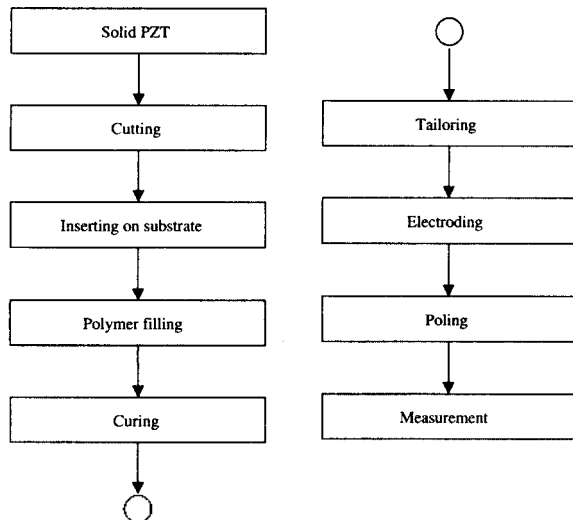


그림 5. 1-3형 복합체의 제작 공정도
Fig. 5. Flow chart for the 1-3 composite fabrication.

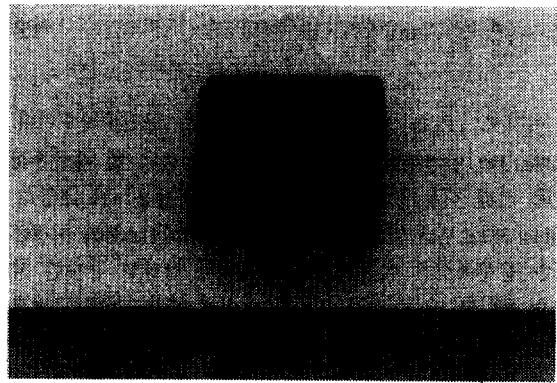


그림 6. 1-3형 복합체 시험편의 사진
Fig. 6. Photograph of the 1-3 composite prototype.

성 및 음향특성값을 계산하였고, 또한 압전복합체에 대해 실제 물성 및 음향특성값을 측정하였다. 측정은 앞절에서 사용된 pulse-echo법과, 모재와 삽입재의 음향특성을 구하기 위해 사용하였던 방법을 동일하게 적용하였다. 더불어 압전복합체 시험편의 공진특성을 알아보기 위해 impedance analyzer(4192A, HP)를 이용하여 주파수 해석을 실시하였다. 사용된 시험편은 15mm×15mm×6mm의 규격을 가지고 있으며 이때의 공진은 약 238.5 kHz에서 나타났다. 해석을 통하여 나타난 결과를 Fig. 7에서 보였으며 명확한 공진 특성을 얻을 수 있었다. 그리고 텅스텐 분말 혼합으로 압전복합체 모재의 밀도를 10% 증가시킨 경우 composite #1, 밀도를 20% 증가시킨 경우 composite #2와 같이 표기하였다. 이후 동일한 표기법이 적용될 것이다. 실제 측정은 composite #1~composite #5, 5종류의 시험편에 대해 모두 측정하였으나, 나타난 공진특성이 유사하여, Fig. 7에서는 대표적으로 composite #1만 보였다. 또한 Fig. 7의 측정 결과로부터 시험편의 공진주파수(resonance frequency)와 반공진주파수(antiresonance frequency)를 이용하여 식(13)에 의해 두께모드 결합계수를 구하였다.

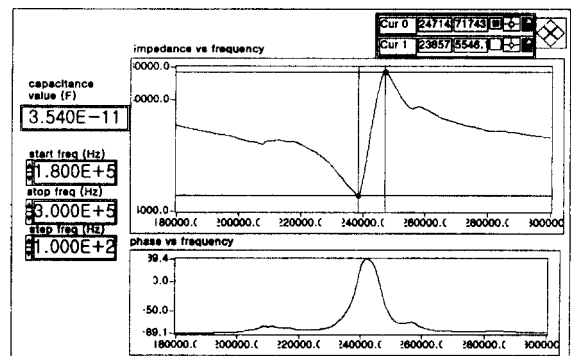


그림 7. 1-3형 압전 복합체의 공진 특성 (시험 #1)
Fig. 7. The resonant characteristics of the 1-3 mode piezo-composite material. (composite #1)

선정을 위해, 상용화된 고분자재료중 저밀도 값을 가지며 가공성이 좋은 고분자재료 수종중 임의로 선정하여 음향 특성을 측정한 후 본 연구의 목적에 가장 적합한 재료를 채택하고자 하였다. 먼저, 모재의 선정을 위해 채택된 수종의 고분자재료를 시편제작용 볼드에 부어넣고 경화시켜 적정한 크기의 시편으로 가공하여 물성을 측정하였다. 가공된 고분자재료 시편에 대한 음향속도 측정은 상용 초음파 탐촉자 (Panametrics, A309S, 5MHz)를 이용한 pulse-echo법에 의해 이루어졌다. Table 1은 고분자재료의 물성 분석 결과를 나타낸다.

표 1. 고분자재료의 물성 측정값
Table 1. Measured material properties of the polymer.

	wave velocity (m/s)	density (kg/m ³)	stiffness (N/m ²)
불포화폴리에스테르수지	2002.41	1182.01	4.74 × 10 ⁹
Epoxy-Lite	1710.94	1172.88	3.43 × 10 ⁹
다우코닝732	911.83	1172.49	0.97 × 10 ⁹
다우코닝738	992.05	1150.22	1.13 × 10 ⁹
다우코닝739	960.42	1502.57	1.39 × 10 ⁹
다우코닝1753	1015.37	866.78	0.89 × 10 ⁹
다우코닝1765	958.73	951.21	0.87 × 10 ⁹

본 연구에 사용될 고분자 재료의 요구조건으로서, 물성은 앞에서 설계된 대로 낮은 밀도값과 저 강성계수를 가져야 한다. 나아가, 제작될 압전복합체의 구조는 PZT 삽입체의 주위를 고분자재료가 둘러싼 형태를 취하게 된다. 이때 PZT 삽입체와 고분자재료 사이에 접착성이 약화되어 박리될 경우, 두 재료상간에 또다른 경계면이 생겨 PZT 삽입체의 경방향 응력을 적절히 흡수하지 못하게 된다. 따라서 모재로 사용될 고분자재료는 앞서 결정된 물성조건과 더불어 PZT와의 강한 접착력이 요구되며, 경화과정에서 내부에 기포가 생기지 않아야 한다. 또한, 분극은 100℃ 정도의 실리온 오일조에 30분 정도 넣어 실시해야하므로 이 온도범위에서 고분자재료와 PZT와의 접착성이 약화되지 않아야 한다. 이밖에 경화된 압전복합체를 이용하여 탐촉자 제작시 가공성이 좋아야 한다. 이러한 요구조건과 Table 1의 측정결과를 바탕으로 압전복합체의 모재로 사용할 고분자 재료로서 불포화폴리에스테르수지 (고려화학, PT380)를 결정하였다.

다음으로는, 결정된 불포화폴리에스테르수지의 밀도를 조절하고 압전복합체 제조과정중 생길 수 있는 모재내의 기포발생을 억제하여 전체 모재의 균일성을 얻기 위해 텅스텐 분말을 혼합하였다. 텅스텐 분말의 혼합은 모재의 밀도를 조절함에 따라 압전복합체의 음파속도를 조절할 수 있으며, 감쇄가 큰 고분자 재료를 사용함에 따라 단일상 PZT를 이용한 탐촉자에 비해 감도가 저하될 수 있는 영향을 줄여서 적절한 감도와 해상도를 가질수 있도록 한다.^{16,10)} 텅스텐 분말은 불포화폴리에스테르수지의 당초 밀도를 10%, 20%, 30%, 40%, 50%까지 증가시킬 수 있도록 식 (11)에 의해 혼합무게비를 계산하여 혼합하였다.

$$\frac{m_P}{\rho_P} + \frac{m_W}{\rho_W} = \frac{m_P + m_W}{\rho_{TW}} \tag{11}$$

이거서 m 은 재료의 질량, 아래첨자 P, W, Pt 는 각각 고분자재료, 텅스텐분말, 텅스텐분말이 혼합된 고분자재료를 의미한다. 텅스텐 분말 혼합전의 불포화폴리에스테르수지의 밀도는 1,182 kg/m³이고 텅스텐분말의 밀도는 19,300 kg/m³이다. 이렇게 제작된 시편들의 음향임피던스와 1 MHz에서의 비유전율(relative permittivity) ϵ_r 을 구하여 측정결과를 Table 2에 나타내었다. 제작된 고분자재료 시편에 대해 측정된 밀도와 계산된 밀도사이의 약간의 오차는 텅스텐 분말과 고분자재료의 혼합후 경화과정에서 비중이 큰 텅스텐 분말이 시편제작용 주형(mold)의 하부로 침전됨에 따라 텅스텐 분말이 균일하게 분포되지 않아 발생된 오차이다. 그러나 텅스텐 분말의 혼합무게비가 증가됨에 따라 밀도도 당초의 고분자재료 밀도대비 점차 증가되는 것이 확인되었다. 또한 텅스텐 분말의 혼합비가 증가됨에 따라 음향임피던스의 증가현상도 확인되었다.

표 2. 모재의 물성
Table 2. Material properties of the matrix.

matrix		density (kg/m ³)			wave velocity (m/s)	acoustic impedance (Mrayl)	relative permittivity
		measured	calculated	deviation (%)	measured	measured	measured
불포화 폴리에스테르 수지	density 10% increase	1287.3	1300.2	1.0	2276.1	2.9	3.7
	density 20% increase	1380.4	1418.4	3.0	2479.3	3.4	3.9
	density 30% increase	1466.9	1536.6	5.0	2341.8	3.4	4.0
	density 40% increase	1578.5	1654.8	5.0	2344.0	3.7	4.8
	density 50% increase	1610.5	1773.0	9.0	2325.8	3.7	4.8

2. PZT 물성

다음으로는 복합재료의 삽입체로 사용될 PZT의 물성과 음향특성을 측정하였다. 측정은 앞절의 모재에 대한 물성측정시 사용되었던 것과 동일한 방법을 이용하여 음파속도와 밀도, 그리고 비유전율을 측정하였다. 측정된 PZT 시편의 음파속도는 4,545 m/s였고 밀도는 7,711 kg/m³, 그리고 비유전율은 939였다. 또한 압전계수 d_{31} 은 d_{33} meter (Pennebaker Model 8000 Piezo d_{33} Tester)를 이용하여 표준 PZT 시편에 대한 상대비교로 그 값을 측정하였는데, 그 값은 250×10^{-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 값을 기준하여 결정하였다. 이외에도 압전복합재료 관계식에 필요

스의 경우, 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. 이로서 본 연구의 목표인, 낮은 음향임피던스와 높은 두께모드 전기-기계 결합계수를 구현하기 위해서는 모재의 밀도와 강성계수 값이 낮을수록 유리한 것으로 나타났다.

2. 혼합 부피비

다음으로는 복합재료에서 PZT의 부피분율(volume fraction)에 따른 음향특성의 변화경향을 살펴보았다. 경향분석을 위하여 적용된 모재의 밀도(ρ^m)와 강성계수(c_{11}^m)의 값은 앞 절의 고분자 물성결정시 사용된 값을 적용하였고, PZT의 부피분율(volume fraction)을 0에서 1까지 변화시키면서 그 때의 압전복합체의 음향임피던스와 두께모드 전기-기계 결합계수의 변화경향을 관찰하였으며, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4로부터, 전체 압전복

합체에서 차지하는 PZT의 부피분율이 낮을수록 압전복합체의 음향임피던스값이 낮아지는 경향을 나타내었다. 결합계수의 측면에서는 PZT 부피분율 0.1 이상에서 동상적인 PZT의 두께모드 전기-기계 결합계수와 동등이상의 값을 나타내었으며, PZT 부피분율이 0.6정도일 때가 가장 우수하였다. 그러나 본 연구에서는 음향임피던스가 낮고 동시에 두께모드 전기-기계 결합계수가 동상적인 PZT대비 동등이상의 값을 갖는 압전복합체를 개발하는 것이 목적이다. 이 두가지 관점에서 볼때 PZT부피분율 0.2 이상에서는 음향임피던스가 의료용 탐촉자나 수중청유기가 통상 가져야 할 음향임피던스값(7 Mray)이하)보다 지나치게 높아진다. 따라서 본 연구에서는 압전복합체 시편이 통상적인 PZT 대비 동등이상의 결합계수 값을 가지면서 음향임피던스를 최대한 낮출수 있도록 PZT 부피분율을 0.1로 결정하였다.

3. 삼입재의 단면형상

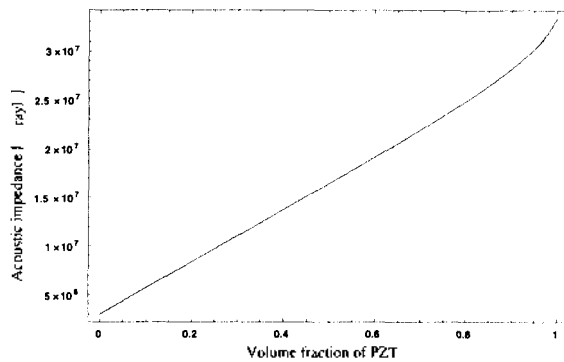
다음으로는 압전복합체의 삼입재로 사용될 PZT의 단면형상에 대해 검토하였다. 일반적으로 압전복합체의 삼입재로 사용되는 PZT의 단면형상은 크게 원형(cylindrical pillar), 사각형(square pillar), 삼각형(triangular pillar)형태를 들 수 있다. 참고문헌 [8]에 따르면 PZT 단면형상이 사각형(square pillar)인 경우 PZT 부피분율 0~90%의 범위에 걸쳐 거의 일정한 두께모드 전기-기계 결합계수값을 얻을 수 있으나, 원형(cylindrical pillar) 또는 삼각형(triangular pillar)의 단면형상에 대해서는 적절한 두께모드 결합계수 값을 얻을 수 있는 PZT 부피분율의 범위가 상당히 제한적인 것으로 나타나 있다. 게다가 단면형상이 삼각형(triangular pillar)인 경우는 삼입재의 평행성이 확보되지 않기 때문에 삼입재간 또는 삼입재 내부에서의 공진현상을 감쇠시킬 뿐만 아니라, 압전복합체의 성능 또한 삼입재의 물성에 의해 많은 영향을 받는다. 따라서 본 연구에서는 변화시킬수 있는 삼입재의 부피분율 범위가 가장 넓고 가공성이 용이한 사각형(square pillar)으로 단면형상을 결정하였다.

이로써 압전복합체의 구조를 최적화 하기위해 설정한 기본적인 설계변수인 결합형태, 모재의 물성, PZT 부피분율(volume fraction), PZT 단면형상이 모두 결정 되었다. 이에 따라, 압전세라믹과 고분자재료의 결합형태는 압전특성이 가장 우수하며 탐촉자의 기능성에 따른 최적화가 비교적 쉬운 1-3형으로 하고, 모재로 사용되는 고분자 물질은 밀도와 강성계수가 낮을수록 좋으며, PZT 혼합부피분율은 0.1, PZT 단면형상은 사각형(square pillar)으로 결정하였다.

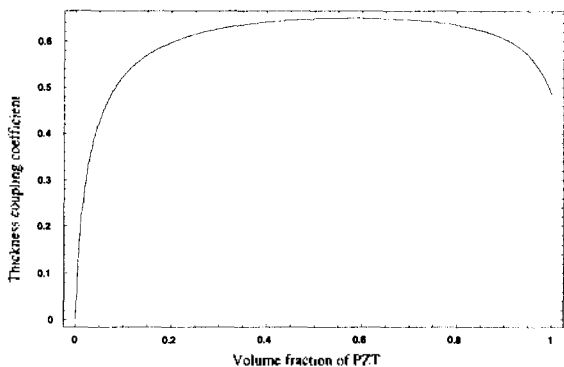
IV. 세라믹-고분자 압전복합체 시험편 제작 및 음향 특성 측정

1. 모 재

III절에서 검토된 압전복합재료 모재로서의 적합한 물성조건을 바탕으로 저밀도, 저강성계수를 가지는 모재의



(a) 음향 임피던스
(a) acoustic impedance



(b) 결합 계수
(b) coupling factor

그림 4. PZT의 부피 분율 변화에 따른 1-3형 압전 복합체의 음향 특성 변화

Fig. 4. Variation of acoustic properties of the 1-3 mode piezo-composite with respect to the change in volume fraction of PZT.

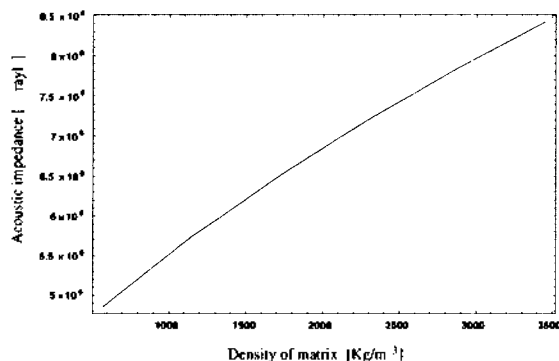
는 일정한 D에서의 압전복합체의 종속도, 식 (10)의 \bar{Z} 는 압전복합체의 음향임피던스를 표시한다.

일반적으로 탐촉자의 성능평가지수들로는 중심주파수, 최대감도, 반사파 소멸시간(ringdown time), 진동모드의 명확성, 최대 음향 품질계수(Q factor), 최저 삽입손실, 사용주파수 대역폭등이 있다. 본 연구에서는 이들 성능평가지수들 중 초음파 탐촉자의 가장 기본적인 성능평가 지수로서 고려되고 있는 송, 수신감도와 응답신호의 해상도에 대한 평가만을 고려하여 최대감도, 반사파 소멸시간, 사용주파수 대역폭에 대한 성능평가를 실시할 것이며, 이와 같은 성능지수의 최적구현을 위한 압전복합체재료의 설계변수는 위의 식들에 나타난 바와 같이 구성재료인 고분자 재료와 압전세라믹의 각각의 물성과 구성부피비, 배열형태, 압전세라믹의 단면형태, 크기, 길이 등이 될 것이다. 본 연구에서는 이상의 성능평가지수들을 위한 설계변수의 최적값을 구하여 보았다.

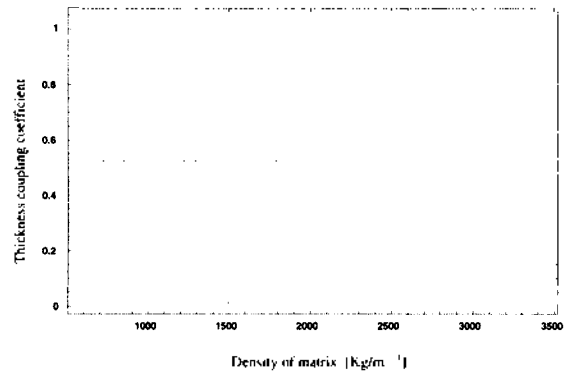
III. 압전복합체의 최적구조 설계

1. 모재의 물성

참고문헌 [7]에 의하면, 압전복합재료에서의 음향임피던스는 복합재료의 밀도와 재료 내에서의 음파의 속도와와의 곱으로 나타나며, 이중 밀도는 결합되는 두 재료의 부피분율에 따른 각각의 밀도의 합으로 나타난다. 따라서 모재의 밀도가 낮은 재료를 선정하는 것이 전체 밀도를 낮추는 것이 되며 전체 음향임피던스를 저하시키는 방법이 된다. 또한 두께모드 전기-기계 결합계수는 전계가 일정한 때의 강성계수 \bar{c}_{33}^E 와 전기적 변위가 일정할 때의 강성계수 \bar{c}_{33}^D 와의 비에 의해 결정된다. 따라서 본 연구에서는 고분자 물질의 물성에 따른 전체 복합재료에서의 음향임피던스와 두께모드 전기-기계 결합계수의 변화경향을 분석하기 위하여 삽입재로는 PZT를, 모재로는 silicon rubber를 가정하고, 고분자 물질의 밀도와 강성계수를 50%~300%로 변화시키면서 복합재료전체의 음향임피던스와 두께모드 전기-기계 결합계수의 변화경향을 분석하였다. 이 때의 PZT의 부피분율은 임의로 10%로 설정하였다. 분석결과를 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다. 이에 따르면 음향 임피던



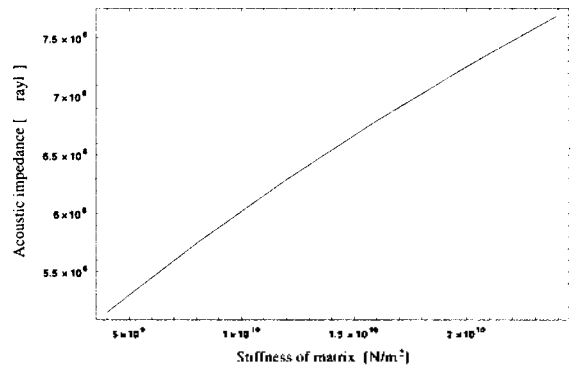
(a) 음향 임피던스
(a) acoustic impedance



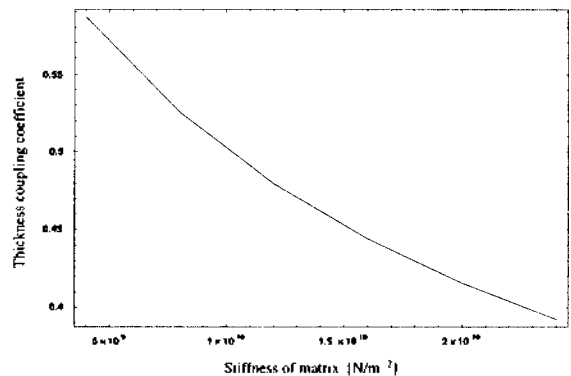
(b) 결합 계수
(b) coupling factor

그림 2. 모재의 밀도 변화에 따른 1-3형 압전 복합체의 음향 특성 변화

Fig. 2. Variation of acoustic properties of the 1-3 mode piezo-composite with respect to the change in density of the matrix material.



(a) 음향 임피던스
(a) acoustic impedance



(b) 결합 계수
(b) coupling factor

그림 3. 모재의 탄성 계수 변화에 따른 1-3형 압전 복합체의 음향 특성 변화

Fig. 3. Variation of acoustic properties of the 1-3 mode piezo-composite with respect to the change in stiffness of the matrix material.

전체 압전 복합재료의 성능에 미치는 영향에 대해 이론적으로 해석하였다. 또한 John A. Hossack^[13] 등은 1-3형 압전 복합재료 트랜스듀서에 대해 세라믹 삽입체(filler)의 기하학적 구조, 세라믹의 부피분율등에 의한 트랜스듀서의 진동특성과 전기 기계적 특성을 유한요소 해석을 통해 제시한바 있고, Wallace Arden Smith^[14] 등은 두께방향 진동모드를 이용한 1-3형 의료용 압전 복합재료 진동사용 구성재료의 최적물성과 특성에 대해 이론적인 연구결과를 발표한 바도 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 제작 및 이를 이용한 탐촉자의 개발까지를 연구한 사례는 그리 많지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 고분자재료와 압전세라믹을 이용, 단일 압전세라믹 대비 음향임피던스가 월등히 낮고 동등이상의 압전특성을 구현할 수 있는 압전 복합체의 최적구조와 물성을 압전 복합재료 관계식을 이용하여 설계하고, 이를 바탕으로 압전복합 구조체 시편을 제작하고자 한다. 나아가 제작된 시편과 단일 압전세라믹과의 물성 및 음향특성을 비교하여 그 성능을 평가하고자 한다. 또한 이 압전 복합체를 이용한 탐촉자의 컴퓨터 모델과 정합율을 가지는 전형적인 탐촉자의 컴퓨터 모델을 각각 설정하여 송수신 특성을 비교, 검토하고 압전복합재료 탐촉자의 제작품을 제작하여 실제 성능측정을 통해 설계이론에 대한 타당성을 검증하고자 한다.

II. 이론적 배경

압전복합재료란 일반적인 복합재료의 형태에서 고분자 재료를 모재(matrix)로 하고 압전세라믹을 삽입체로 하는 복합재료를 말한다. 복합재료의 유전율은 압전세라믹에 비해 상대적으로 낮기 때문에 높은 압전상수 g_{33} 값이 나타난다. 그러나 적절한 특성을 가지는 압전복합재료를 만들어내는 것은 재료의 단순한 혼합으로 되는 것이 아니고 대단히 복잡한 설계 및 제작기술을 필요로 한다. 이 복합재료의 서로 다른 상(phase)들간의 결합형태는 재료의 전체특성을 결정하는 주요인이 된다. 간단한 두 상(phase)들에 대해 그 결합형태에는 열 가지의 서로 다른 형태의 결합패턴이 있다.^[15] 참고문헌 [6]에서는 결합형태에 따른 복합재료의 성능을 실험을 통해 비교, 분석하였는데, 이에 따르면 1-3형 결합형태가 압전특성이 가장 우수하며 세라믹 삽입체의 두께변화에 대한 수산감도의 변화가 선형적으로 변화하는 것을 알수 있다. 즉, 세라믹 막대의 길이를 변화시킴으로써 요구되는 기능성에 따라 최적화 시키기가 쉽다고 알려져 있다. 이와같은 장점 때문에 1-3형 압전 복합체는 트랜스듀서에 광범위하게 응용되고 있다.^[17] Fig. 1은 1-3형 결합형태를 가지는 복합재료의 구조를 나타낸 것이다. 압전복합재료 탐촉자의 최적구조는 결합되는 두 재료들간의 적절한 결합형태, 결합비율, 물성등에

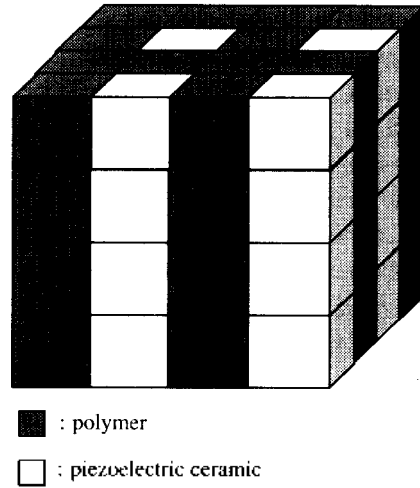


그림 1. 2상 고체의 1-3형 연결 형상
Fig. 1. The 1-3 connectivity pattern in a diphasic solid.

의해 결정되어진다. 먼저 탐촉자용 압전복합재료의 최적 물성 및 구조를 결정하기 위하여 식 (1)~(10)과 같은 1-3형 압전복합재료에 대한 관계식을 사용하였다.^[17]

$$\alpha(v) = c_{11}^{C,E} + c_{12}^{C,E} + v(c_{11}^P + c_{12}^P)/(1-v) \quad (1)$$

$$\bar{c}_{33}^E = v[c_{33}^{C,E} - 2(c_{13}^{C,E} - c_{12}^P)/\alpha(v)] + (1-v)c_{11}^P \quad (2)$$

$$\bar{e}_{33} = v[e_{33} - 2e_{31}(c_{13}^{C,E} - c_{12}^P)/\alpha(v)] \quad (3)$$

$$\bar{\epsilon}_{33}^S = v[\epsilon_{33}^S + 2(e_{21})^2/\alpha(v)] + (1-v)\epsilon_{11}^P \quad (4)$$

$$\bar{\rho} = v\rho^C + (1-v)\rho^P \quad (5)$$

$$\bar{\beta}_{33}^S = 1/\bar{\epsilon}_{33}^S \quad (6)$$

$$\bar{c}_{33}^D = \bar{c}_{33}^E + e_{33}^2 \bar{\beta}_{33}^S \quad (7)$$

$$\bar{k}_l = (1 - \bar{c}_{33}^E / \bar{c}_{33}^D)^{1/2} \quad (8)$$

$$\bar{V}_3^D = (\bar{c}_{33}^D / \bar{\rho})^{1/2} \quad (9)$$

$$\bar{Z} = \bar{\rho} \bar{V}_3^D \quad (10)$$

여기서, 윗줄 $\bar{\quad}$ 는 복합재료(piezocomposite), 윗첨자 C는 세라믹상, P는 폴리머상을 나타낸다. 또한 윗첨자 E, T, S, D는 각각 전계, 응력, 변형, 전기적 변위가 일정한 때의 값을 의미하고, 아래첨자 1, 2, 3은 각각 직각좌표축에서 x축, y축, z축을 나타낸다. 그리고 v는 복합재료내에서의 PZT의 부피분율을 나타낸다. 예를 들면 $c_{11}^{C,E}$ 는 전계가 일정한 때의 세라믹의 1방향 탄성 강성계수를 의미한다. 특히, 식 (1)은 압전복합체에서의 세라믹의 체적비에 따른 강성도(stiffness)를 나타내는 지수이고, 식 (5)는 재료의 밀도를 나타내며, 식 (8)은 압전복합체의 두께 모드 진기-기계 결합계수를 나타낸다. 그리고 식 (9)의 \bar{V}_3^D

향후 계속 이루어져야 할 연구내용으로는 보다 정밀한 제작공정 및 기술의 개발을 이루어 본 논문에서 설계한 이론과의 일치정도를 높여나가는 것이 될 수 있겠다.

▲한 교 훈(Kyohoon Han): 한국음향학회지 제16권 7호 참조

▲노 용 래(Yongrae Roh): 한국음향학회지 제17권 3호 참조

참 고 문 헌

1. Robert E. Montgomery and Claude Richard, "A Model for the Hydrostatic Pressure Response of a 1-3 Composite", IEEE Trans. on Ultrason., Ferroelect. and Freq. Control, Vol.43, No.3, pp.457-466, 1996.
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. John A. Hossack, Gordon Hayward, "Finite-Element Analysis of 1-3 Composite Transducers", IEEE Trans. on Ultrason., Ferroelect. and Freq. Control, Vol.38, No.6, pp.618-629, 1991.
4. Wallace Arden Smith, Bertram A. Auld, "Modeling 1-3 Composite Piezoelectrics: Thickness-Mode Oscillations", IEEE Trans. on Ultrason., Ferroelect. and Freq. Control, Vol.38, No.1, pp.40-47, 1991.
5. R. E. Newnham, "Composite Electroceramics", Ann. Rev. Mater. Sci., Vol.16, pp.47-68, 1986.
6. T. R. Gururaja, W. A. Schulze, T. R. Shrout, L. Webster, L. E. Cross, "High Frequency Application of PZT/Polymer Composite Materials", Ferroelectrics, Vol.39, pp.1245-1248, 1981.
7. 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.
8. T. R. Gururaja et al, "Composite Piezoelectric Transducer", IEEE, Ultrasonic Symp., pp.576-581, 1980.
9. M. G. Silk, "Ultrasonic Transducers for Nondestructive Testing", Adam Hilger Ltd., Bristol, pp.15-75, 1984.
10. Martha G. Grewc, T. R. Gururaja, Thomas R. Shrout, Robert E. Newnham, "Acoustic Properties of particle/Polymer Composites for Ultrasonic Transducer Backing Applications", IEEE Trans. on Ultrason., Ferroelect. and Freq. Control, Vol.37, No.6, pp.506-514, 1990.
11. Velimir M. Ristic, "Principles of Acoustic Devices", A Wiley-Interscience Publication, pp. 174-211, 1983.
12. Charles S. Desillets, 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.
13. 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.