

# 유한요소 해석법을 이용한 1-3형 압전복합체 초음파 트랜스듀서의 개발

## Development of 1-3 Piezocomposite Ultrasonic Transducers by means of the Finite Element Method

이 수 성\*, 김 동 현\*\*, 한 진 호\*\*, 노 용 래\*\*\*  
(Susung Lee\*, Dong-Hyun Kim\*\*, Jin-Ho Han\*\*, Yongrae Roh\*\*\*)

\*경북대학교 센서공학과, \*\* (주)프로소닉 R&D center, \*\*\*경북대학교 기계공학부  
(접수일자: 2003년 10월 10일; 채택일자: 2004년 5월 19일)

본 연구에서는 상용 유한 요소 해석 프로그램인 PZflex를 이용하여 1-3형 압전 복합체를 설계하고 이를 바탕으로 단일 소자 의료용 초음파 트랜스듀서를 개발하였다. 유한요소 해석법을 이용하면 기존의 이론적 방법에 의한 압전 복합체 설계의 여러 제약 사항을 극복하고, 실용적인 해석이 가능함을 확인하였다. 또한 유한요소법에 의한 설계 결과를 바탕으로 실제 제작된 압전 복합체와 탐촉자의 성능을 비교함으로써 그 설계법의 타당성을 검증하였으며, 이론적 방법에 의한 특성값과 비교함으로써 유한요소 해석법의 우수성도 확인하였다.

**핵심용어:** 1-3형 압전 복합체, 초음파 탐촉자, 유한요소해석

**투고분야:** 초음파 및 탄성파 분야 (4.1)

In this study, a 1-3 piezo-composite single element ultrasonic transducer was designed with a commercial finite element analysis (FEA) code, PZflex and developed based on this design. Design with FEA could be performed overcoming many constraints of the typical theoretical method, and also was very practical. Validity of the design with the FEA was illustrated through experimental characterization of fabricated 1-3 piezo-composites and ultrasonic transducers. Through comparison with the result of the theoretical method, we confirmed the superiority of the design method using FEA.

**Keywords:** 1-3 piezocomposite, ultrasonic probe, finite element analysis

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

### I. 서론

초음파 탐촉자는 초음파를 발생 및 수신 하기 위해 압전 소자를 사용하며, 통상의 경우 전기기계 결합계수가 크고, 비교적 가공이 용이한 PZT 계열의 압전세라믹을 이용한다. 그러나, 압전 세라믹은 음향임피던스가 커서 수중용 및 인체용으로 초음파 트랜스듀서가 사용될 경우, 임피던스 부정합으로 인한 에너지 손실이 크다. 지난 이십 여년 간 이와 같은 압전 세라믹의 임피던스

부정합에 의한 에너지 손실을 극복하기 위해, 압전 세라믹과 폴리머 상이 적절하게 결합되어 있는 압전 복합체에 대한 연구가 이루어 졌다[1,2]. 압전 복합체는 압전세라믹과 폴리머의 결합형태에 따라 대략 10가지 정도로 분류되며, 이중 의료용 이나 수중용 초음파 트랜스듀서에는 2-2형 압전 복합체와 1-3형 압전 복합체가 많이 사용되고 있다[3-6]. 이중에서도 전기기계 결합계수, 기계품질계수(Q), 음향임피던스의 특성을 비교해 볼 때, 1-3형 압전 복합체의 특성이 가장 우수한 것으로 알려져 있다[1]. 또한 1-3형 복합체를 이용하면 초음파 트랜스듀서의 직경이 작을 때 발생하는 횡방향 모드와 두께 모드의 커플링에 의한 트랜스듀서의 성능 열화도 줄일 수 있다는 장점을 가진다[7]. 본 연구에서

책임저자: 노 용 래 (vryong@knu.ac.kr)  
702-701 대구광역시 북구 산격동 1370  
경북대학교 기계공학부  
(전화: 053-950-6828; 팩스: 053-956-9914)

표 1. 고분자 재료의 물성.

Table 1. Material properties of the polymer.

material properties of polymer phase	value
$v_l$ (m/s)	2506.0
$v_s$ (m/s)	1170.0
$a_l$ (dB/mm at 1MHz)	5.6
$a_s$ (dB/mm at 1MHz)	22.6
density (kg/m <sup>3</sup> )	1237.0

는 이와 같이 우수한 특성을 가진 1-3형 압전복합체를 이용한 의료용 초음파 트랜스듀서를 개발하고자 한다.

1-3형 압전복합체를 설계하기 위한 방법에는 여러 선행 연구사례가 있었으며, 주로 이론적 모델[5, 8-10]에 의존해 왔다. 그러나, 이론적인 접근법의 경우 해석의 타당성을 확보하기 위해 여러 가정을 사용한다. 첫째로, 압전 세라믹과 폴리머 상이 동일한 변형율을 보인다고 가정하는 등변형율 (isostrain) 조건을 만족해야 한다. 이는 압전 복합체가 매우 조밀하여 두께 모드와 횡방향 모드의 간섭이 완전히 배제되어야 함을 의미하며 이것은 압전 세라믹 막대의 두께 대비 폭 비 즉, 종횡비가 약 0.1 이하의 충분히 작은 값을 가져야 한다는 것을 의미한다. 그리고 두께 방향으로 변형율이 같다는 가정을 만족시키기 위해 강성이 매우 높은 폴리머를 사용하여야 하며, 세라믹 막대의 폭은 폴리머의 횡파성분에 대한 파장보다 작아야 한다[9]. 또한 이론적 접근법은 압전 세라믹의 기하학적 형상에 의한 영향을 전혀 고려할 수 없다는 단점도 가진다. 그러나, 압전 복합체를 일반적인 방법인 dice and fill 법을 이용하여 제작할 때, 압전 세라믹 막대의 작은 종횡비를 얻으면서, 낮은 음향임피던스를 얻기 위해 세라믹 부피 분율을 줄이는 데는 세라믹 막대의 무너짐과 같은 제작 공정상 한

계가 있다. 실제 세라믹 막대의 종횡비에 따른 제작성을 살펴본 결과, 0.15 이하로 줄이기에는 무리가 따름을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 이론적 접근법의 한계를 극복하고, 실용적인 해석을 위하여 유한요소 해석법을 이용하여 1-3형 압전 복합체를 설계하고자 한다. 유한요소 해석법은 압전 복합체의 기하학적 형상을 그대로 모델링할 수 있을 뿐만 아니라, 이론적 접근법에서의 여러 가정을 두지 않고 실제적인 상황을 해석할 수 있다는 장점을 가진다. 도구로는 상용 유한요소 해석 프로그램인 PZflex을 이용한다. 나아가 유한요소 해석법을 이용한 초음파 센서의 설계 기법[11]을 기반으로 하여, 설계된 압전 복합체를 진동자로 하는 단일 소자형 초음파 트랜스듀서를 설계 제작하고 그 특성을 평가함으로써 본 연구 결과의 타당성을 밝히고자 한다.

## II. 1-3형 압전 복합체의 설계 및 제작

1-3형 압전복합체는 고분자 재료를 모재로 하고 압전 세라믹을 삽입재로 하는 복합재료를 말한다. 본 연구에서 개발하고자 하는 초음파 트랜스듀서는 직경이 1인치인 디스크 형태의 압전 진동자를 이용하고자 하며, 중심 주파수는 500 kHz의 사양을 만족하여야 한다. 이 경우, 1-3형 압전 복합체의 개략적인 형태는 그림 1과 같다. 압전복합체를 구성하는 물질로는 PZT-5A 압전 세라믹[12]과 에폭시 계열의 고분자 물질을 이용하였다. 표 1에 본 연구에 사용된 에폭시의 물성을 나타내었다. 표 1의 물성에서  $v_l$ ,  $v_s$ 는 각각 종파와 횡파의 속도를  $a_l$ ,  $a_s$ 는 종파와 횡파의 감쇄도를 나타낸다.

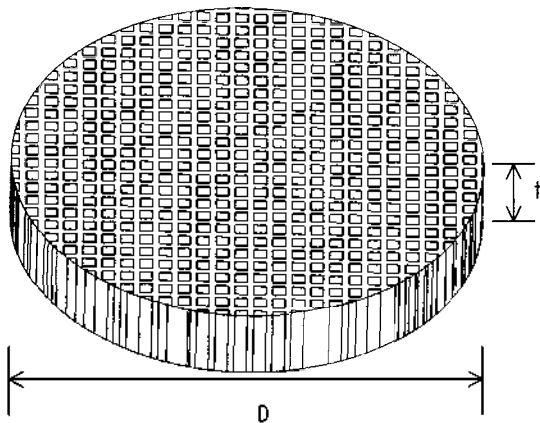


그림 1. 디스크형 1-3형 압전 복합체의 개략도.  
Fig 1. Schematic structure of the disk type 1-3 piezocomposite.

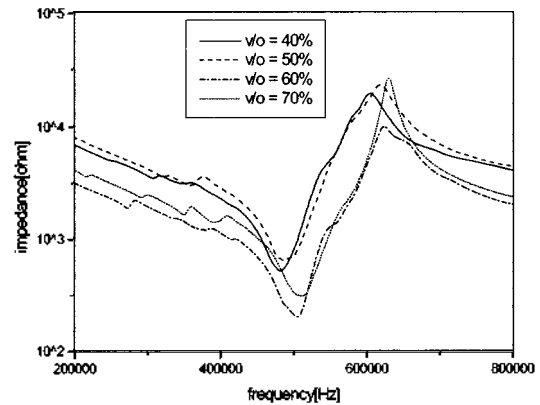


그림 2. 세라믹 부피분율에 따른 공진주파수 변화.  
Fig. 2. Change of the resonant frequency with ceramic volume fraction.

표 2. 세라믹 부피 분율에 따른 1-3형 압전 복합체의 공진주파수.  
Table 2. Resonance frequency of the 1-3 piezocomposite with ceramic volume fraction.

ceramic volume fraction [%]	pitch (mm)	aspect ratio	$f_r$ (kHz)	$f_a$ (kHz)
35	0.490	0.097	480.00	587.15
40	0.544	0.115	481.76	604.81
45	0.608	0.136	486.35	613.89
50	0.683	0.161	485.37	618.65
55	0.774	0.191	499.82	615.55
60	0.887	0.229	505.33	623.73
65	1.032	0.277	505.51	619.39
70	1.224	0.341	509.91	629.67
75	1.493	0.431	511.45	610.13

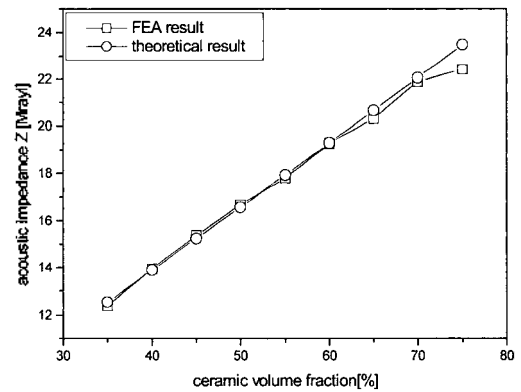
압전 복합체의 설계를 위해 그림 1과 같은 구조의 3차원 유한요소 모델을 PZflex를 사용하여 구성하였다. 모델은 약 1,700,000개의 요소로 구성된다.

유한요소 모델을 이용하여 1-3형 압전 복합체의 두께가 3.0 mm인 경우에 대하여 세라믹 부피 분율에 따른 특성 변화를 살펴보았으며, 각 경우에 대한 공진주파수 변화를 표 2에 나타내었고, 그림 2에는 공진 주파수 근방에서의 임피던스 특성 변화를 나타내었다. 이때, 세라믹 막대와 막대사이래 있는 폴리머 상의 폭은 0.2 mm로 동일하다. 이 경우, 세라믹 부피 분율의 변화는 세라믹 막대와 막대사이래의 간격인 피치 (pitch)를 변화시켜 구현하였다. 즉, 복합체의 두께와 폴리머 상의 폭을 고정시킨 상태에서 세라믹 막대의 피치를 변화시켰다는 것은 곧 세라믹 막대의 종횡비를 변화시켰다는 뜻이며, 이는 통상의 이론적 해석에서는 고려하기 어려운 구조적 변화이다. 표 2에서  $f_r$ 과  $f_a$ 는 각각 공진주파수와 반공진주파수를 나타낸다. 그리고, 그림 3과 같이 세라믹 부피 분율 변화에 따른 1-3형 압전 복합체의 음향임피던스와 전기기계결합계수 ( $k_t$ )의 변화 경향을 살펴보았으며, 세라믹 막대의 종횡비가 매우 작다고 가정할 이론적 해석[9]에 의한 변화 경향도 같이 나타내었다. 그림 2의 결과에서 세라믹 부피 분율이 증가하면 공진주파수와 기계적 품질계수가 증가함을 알 수 있다. 이는 세라믹의 부피 분율이 커짐에 따라 점점 압전 세라믹의 특성에 가까워지기 때문인 것으로 판단된다. 그리고 그림 3의 이론적 모델과 유한요소 모델에 의한 해석 결과 비교를 보면, 그 경향이 일치하지 않음을 알 수 있다. 이러한 불일치는 세라믹 부피 분율 50% 이상에서 더욱 두드러지게 나타난다. 이는 해석된 시편이

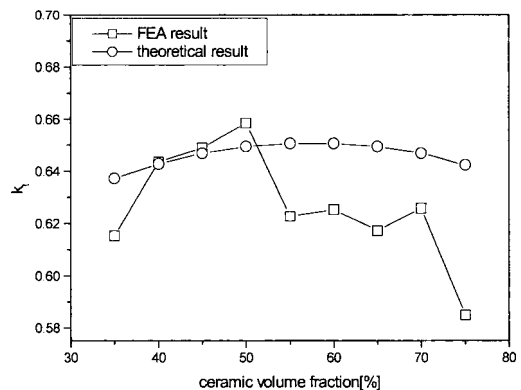
표 3. 세라믹 막대의 종횡비에 따른 1-3형 압전 복합체의 공진 주파수.  
Table 3. Resonance frequency of the 1-3 piezocomposite with the aspect ratio of the ceramic rod.

aspect ratio	thickness (mm)	$f_r$ (kHz)	$f_a$ (kHz)
0.10	6.873	217.45	271.53
0.15	4.582	328.46	403.35
0.20	3.437	438.41	539.70
0.25	2.749	544.47	672.67
0.30	2.291	648.67	804.45
0.35	1.964	748.77	930.09
0.40	1.718	853.48	1056.30
0.45	1.527	947.46	1173.20
0.50	1.375	1047.60	1286.60

이 영역의 부피 분율에서 이론적 해석에서의 세라믹 종횡비가 충분히 작아야 한다는 조건을 만족시키지 못하기 때문이다. 실제 dice and fill 법에 의한 1-3형 압전 복합체의 제조에 있어 세라믹 종횡비를 0.15 이하로 하였을 때, 세라믹 막대의 무너짐과 같은 문제로 인하여 재현성을 확보하기가 매우 어렵다. 따라서 표 2의 세라믹 부피 분율중 50% 이하의 시편은 실험성에 문제가 있



(a) acoustic impedance



(b) electro-mechanical coupling coef.

그림 3. 세라믹 부피분율에 따른 특성 변화.  
Fig. 3. Change of the characteristics of the 1-3 piezocomposite with ceramic volume fraction.

으며, 반면에 그 이상에서는 세라믹 막대의 종횡비에 대한 이론적 모델의 제약 사항 때문에 유한요소 해석 모델에 의한 결과치가 더 타당하다 할 것이다. 또한 그림 3의 유한요소 해석 결과에서 세라믹 부피 분율에 따른 전기기계 결합계수의 변화가 불규칙적인 것은 세라믹 부피 분율의 변화만 있는 것이 아니고 세라믹 막대의 종횡비에 의한 영향이 복합적으로 작용되어 나타난 결과로 판단된다.

표 2와 그림 2, 3의 결과를 바탕으로 이미 확보되어진 물질을 이용하여 초음파 트랜스듀서의 정합층을 구성하기 용이하게 하며, 기존 dice and fill 법을 이용하여 재현성 있는 압전 복합체를 제조하기 위해, 음향임피던스가 약 19 Mrayl 정도를 가지도록 세라믹 부피 분율을 60%로 결정하였다. 다음으로는 세라믹 부피 분율을 60%로 고정시킨 상태에서 세라믹 막대의 종횡비의 변화에 따른 압전 복합체의 특성 변화를 보다 구체적으로 해석하였으며, 그 결과를 표 3과 그림 4에 나타내었다. 이때, 폴리머 상의 폭은 0.2 mm로 동일하며, 두께의 변화로 종횡비를 변화시켰다. 그림 4의 결과에서와 같이 종횡비의 변화에 따라 음향임피던스의 변화는 크지 않음을 알 수 있고, 전기기계 결합계수는 종횡비 0.1에서 최대값을 가지나, 압전 복합체의 제작성과 최종적으로 만들어질 초음파 트랜스듀서의 중심주파수를 500 kHz 에 맞추기 위해 종횡비를 0.2로 설정 하였다. 이때, 압전 복합체의 두께는 3.4 mm이다.

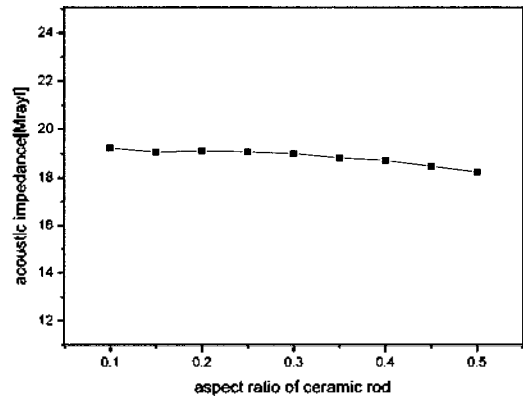
### III. 1-3형 압전 복합체를 이용한 초음파 센서의 설계

이상과 같이 설정된 1-3형 압전 복합체를 이용한 초음파 트랜스듀서를 유한요소해석법을 이용하여 설계하였다. 우선, 압전 복합체는 그림 1과 같이 3차원의 형상을 취하고 있으며, 이를 이용한 트랜스듀서를 해석하기 위해서는 역시 3차원 해석이 이루어져야 한다. 그러나 트랜스듀서의 세부적인 구성 부분과 방사매질을 모두 3차원으로 구현한다는 것은 시간적, 비용적으로 매우 어려운 일이다. 따라서, 유한요소 모델링의 편의를 위해 본 연구에서는 앞서 설계된 1-3형 압전 복합체를 균질한 단일상의 재료로 등가화시켰을 때의 등가 물성을 도출하였다. 등가물성이 찾아지면 2차원 유한요소 모델만

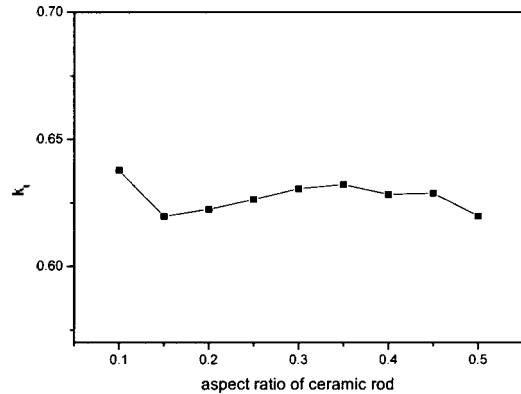
표 4. 1-3형 압전 복합체의 등가 물성  
Table 4. Equivalent material properties of the 1-3 piezocomposite.

material properties	theoretical equivalent value	FEA equivalent value
c11E (1010 N/m <sup>2</sup> )	1.04	0.53
c12E (1010 N/m <sup>2</sup> )	-	0.01
c13E (1010 N/m <sup>2</sup> )	-	0.01
c33E (1010 N/m <sup>2</sup> )	4.17	4.30
c44E (1010 N/m <sup>2</sup> )	-	0.02
c66E (1010 N/m <sup>2</sup> )	-	0.26
e15 (C/m <sup>2</sup> )	-	0.02
e31 (C/m <sup>2</sup> )	-0.46	-0.43
e33 (C/m <sup>2</sup> )	11.62	10
ε11S /ε <sub>0</sub>	-	0.01
ε33S /ε <sub>0</sub>	498.40	354
density (kg/m <sup>3</sup> )	5144.80	5144.80

으로도 트랜스듀서의 특성을 충분히 해석할 수 있다. 등가 물성은 참고문헌 [9]의 이론적 모델에서 탄성계수와 압전상수 등의 물성을 변화시켰을 때 세라믹 및 폴리머상이 다 있는 3차원 압전 복합체 모델의 해석 결과와 일치하는 물성값들을 찾아내는 보간법으로 도출하였



(a) acoustic impedance



(b) electric-mechanical coupling coef.

그림 4. 세라믹 종횡비에 따른 특성 변화.  
Fig. 4. Change of the characteristics of the 1-3 piezocomposite with aspect ratio of the ceramic rod.

표 5. 정합층과 후면층의 물성

Table 5. material properties of the acoustic matching layers and backing material.

	density (kg/m <sup>3</sup> )	$v_l$ (m/s)	$v_s$ (m/s)	$a_l$ (dB/mm)	$a_s$ (dB/mm)
1st matching layer	2860	2224	1112	1.02	4.50
2nd matching layer	1150	2199	1100	1.10	5.10
backing	5769	1602	-	4.70	-

다. 표 4에 이론적 방법에 의한 등가 물성과 유한요소 해석법을 이용해 보간법으로 찾아낸 등가 물성을 나타내었다. 이론적 방법에 의한 등가 물성은 두께방향에 대한 1차원적 문제에서 시작되었으므로 표 4에서와 같이 두께 방향(3방향)에 대한 등가 물성 외에는 도출하기가 어렵다. 그러나, 유한요소 해석법을 이용한 보간법으로는 그 외의 물성들도 찾아낼 수 있다. 유한요소법을 이용해 도출한 등가물성에서도 두께 방향 물성 이외의 물성 값이 작음을 알 수 있으며, 이는 1-3형 압전 복합체 자체가 횡방향 진동모드에 의한 변위가 작은데서 기인하는 것이라 판단된다. 따라서, 본 연구에서 찾아낸 등가 물성은 두께 방향 모드 뿐만 아니라 다른 모드들의 영향도 잘 반영하는 것이라 생각된다. 그림 5에서 3차원 전체 모델에 대한 해석 결과와 이상에서 도출한 등가물성을 유한요소 모델에 대입하였을 때 두께 공진 모드에서의 임피던스 해석 결과를 비교하였다. 그림 5의 결과로부터 유한요소 해석법을 이용해 도출된 등가 물성의 타당성을 확인할 수 있었으며, 설계된 1-3형 압전 복합체는 음향임피던스가 19 Mrayl 이다.

본 연구에서는 이상에서 수행한 압전 복합체의 설계

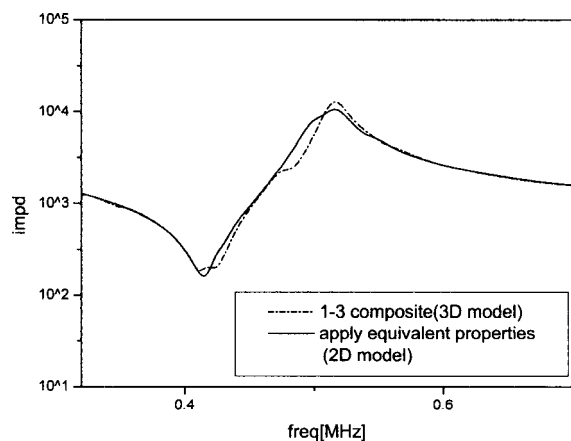


그림 5. 등가 물성에 의한 임피던스 특성.  
Fig. 5. Impedance curve with the equivalent material properties.

결과와 타당성을 검증하기 위하여 설계된 압전 복합체를 이용한 초음파 트랜스듀서를 설계/제작하였으며, 트랜스듀서는 두층의 음향 정합층과 후면층으로 구성된다. 두층의 정합층과 후면층의 물성은 DeSilet[13]의 이론에 근거하여 결정하였으며, 표 5에 각각의 물성을 나타내었다. 이때, 정합층들의 두께는 파장의 1/4이 되도록 하였다. 초음파 트랜스듀서의 설계를 위해 그림 6과 같은 구조의 유한요소 모델을 제작하였으며, 모델은 도출된 1-3형 압전 복합체의 등가 물성을 이용하여 2차원의 축대칭 모델로 구현하였다. 모델은 약 451,400 개의 요소로 구성되었다. 이렇게 해석한 결과를 그림 7에 나타내었다. 모의실험 결과 중심주파수는 502 kHz, -6dB 평탄대역폭은 78.2 %이다.

#### IV. 1-3형 압전 복합체를 이용한 초음파 센서의 제작

앞서 설계된 결과를 토대로 1-3형 압전 복합체를 이용한 초음파 센서를 제작하였다. 우선 1-3형 압전 복합체는 dice and fill 방법을 이용하여 제작하였으며, 제작에 사용된 모재는 표 1에 나타낸 물성을 가지는 에폭시를 사용했고, 세라믹은 PZT-5A를 사용했다. 목표 두께 보다 조금 두꺼운 판형의 압전 세라믹을 준비하고, 이를 설계사양과 동일하게 절단하였다. 절단이 완료된 압전 세라믹을 크기가 맞게 제작된 틀에 고정시키고, 폴리머를 부어 절단된 사이사이에 모재로서 형성되도록 하였다. 폴리머의 경화가 완료되면 이를 양면 연

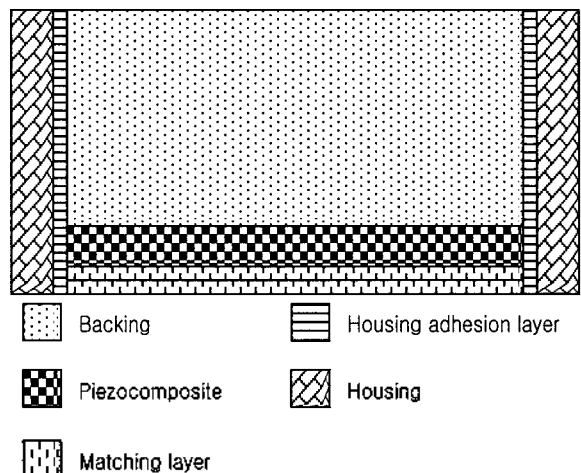


그림 6. 초음파 트랜스듀서의 구조.  
Fig. 6. Structure the ultrasonic transducer.properties.

마하여 정치수의 두께를 가지도록 하여 전극을 형성시키고, 원형의 디스크 모양을 가지도록 측면을 연마하여 직경 25.4 mm의 1-3형 압전 복합체를 완성하였다. 완성된 1-3형 압전 복합체의 임피던스 특성을 그림 8에 나타내었으며, 동시에 직경이 동일하면서 유사한 공진 주파수를 가지는 압전 세라믹 (PZT 5A)의 특성도 비교하여 나타내었다. 그림 8에서 제작된 압전 복합체의 특성이 압전 세라믹에 비하여 공진 특성이 매우 깨끗함을 확인할 수 있으며, 압전 세라믹의 두께 모드 공진은 횡방향 진동 모드가 커플링되어 명확하지 않게 나타났다. 이는 압전 세라믹의 횡방향 치수 (직경)가 두께에 비하여 충분히 크지 못한데 기인한다. 즉, 낮은 중심주파수로 인해 진동자의 두께가 커져야 함에도 불구하고 횡방향 치수에 제약을 받는 트랜스듀서를 개발하고자 할 때, 1-3형 압전 복합체를 이용하면 일반 압전 세라믹에 비하여 모드의 명확성 측면에서 월등한 특성을 가진다는 것을 알 수 있다. 또한 그림 9에는 제작된 1-3형 압전 복합체의 임피던스 스펙트럼과 유한요소법에 의한 해석 결과를 비교하였다. 두 그래프가 두께 모드 공진

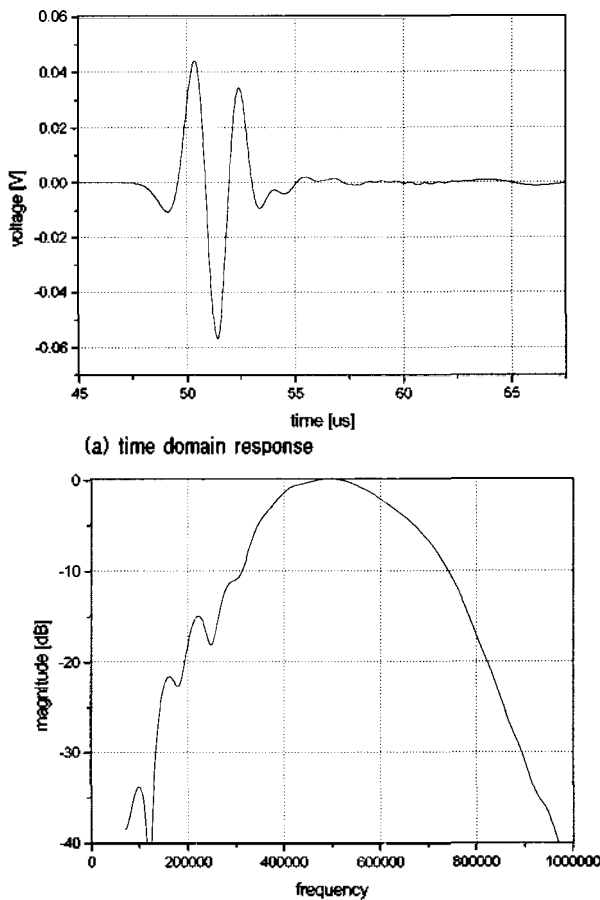


그림 7. 임펄스 응답(유한요소 해석 결과).  
Fig. 7. Impulse response(finite element analysis result).

부분에서 잘 일치하는 것을 알 수 있으며, 따라서 제작된 압전 복합체는 설계사양이 잘 반영되었다고 할 수 있다.

제작된 1-3형 압전 복합체를 이용하여 3장에서 설계된 사양대로 초음파 트랜스듀서를 제작하였으며, 제작된 트랜스듀서를 그림 10에 나타내었다. 제작된 트랜스듀서의 특성을 그림 11과 같은 장치도를 이용하여 측정하였으며, 펄서-리시버는 PANAMETRICS사의 5800PR을, 오실로스코프는 LeCroy LT322를 사용하였다. 측정된 특성을 그림 12에 나타내었으며, 중심주파수는 512 kHz, -6dB 평탄대역폭은 82.0 %이다. 그림 7의 유한요소해석 결과와 비교하여 중심주파수는 2 %의 오차를 -6dB 평탄 대역폭은 5 %의 오차를 나타낸다. 제작상의 오차를 고려하면 두 결과는 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 이 결과와 그림 9는 1-3형 압전 복합체와 이를 이용한 초음파 트랜스듀서의 설계에서 유한요소 해석법의 우수

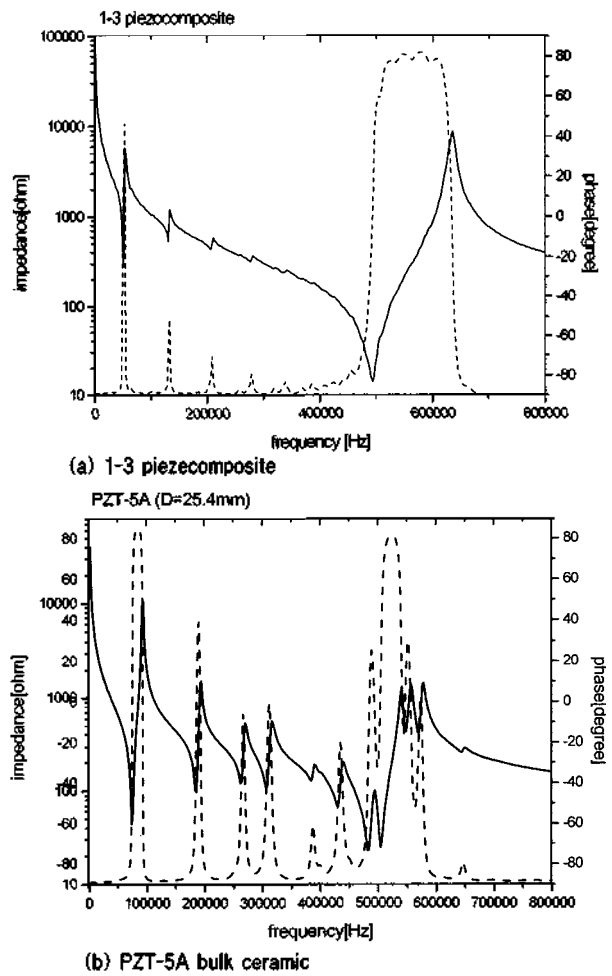


그림 8. 제작된 1-3 압전 복합체의 특성과 PZT-5A 압전 세라믹의 특성.

Fig. 8. Characteristics of the fabricated 1-3 piezocomposite and PZT-5A bulk ceramic.

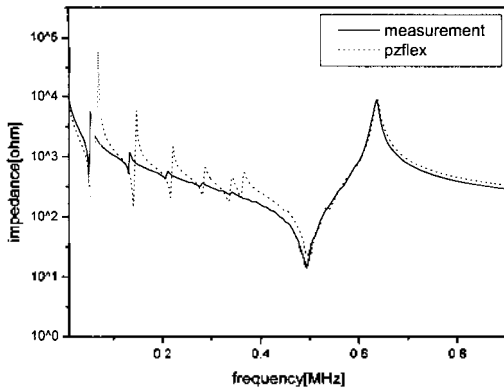


그림 9. 제작된 압전 복합체의 측정값과 해석값.  
 Fig. 9. Measurement and simulation results of the fabricated 1-3 piezocomposite.

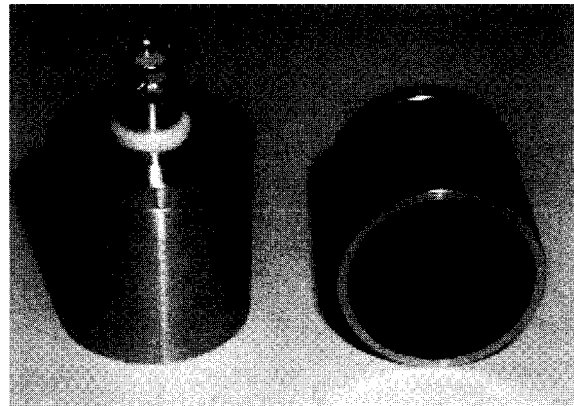


그림 10. 제작된 초음파 트랜스듀서 사진.  
 Fig. 10. Photograph of the fabricated ultrasonic transducers.

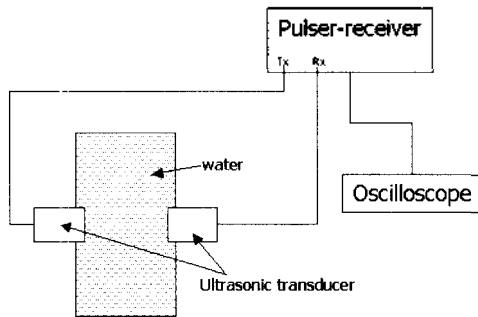


그림 11. 측정 장치도의 개략도.  
 Fig. 11. Schematic diagram of the measurement system.

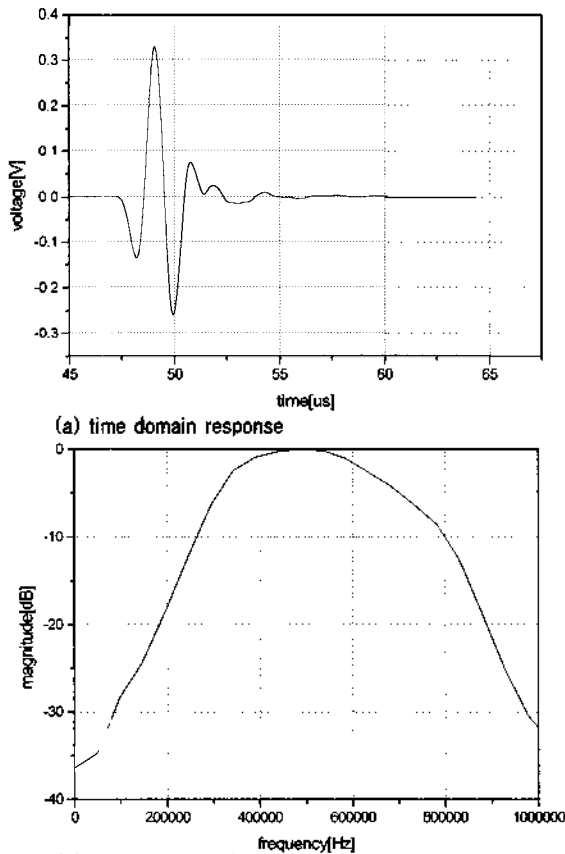


그림 12. 제작된 초음파 트랜스듀서의 특성 측정 결과.  
 Fig. 12. Measurement result of the fabricated ultrasonic transducer.

성을 입증해 주는 것이다.

## V. 결론

통상의 이론적 방법에 의한 압전 복합체의 설계법은 1차원 해석을 함으로 세라믹 막대의 종횡비가 충분히 작아야 한다는 등의 여러 제약 사항을 가진다. 그러나, 실제 압전 복합체를 제작함에 있어 이론적 방법의 여러 가정에 부합하기 위해서는 세라믹 막대가 무너지는 등의 제작성에 문제가 발생하기 쉽다. 그러므로 이론적 방법에 의한 설계법은 실제 적용성에 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 다차원 해석이 가능하고 치수 및 형상 등에 대한 여러 가정을 두지 않고도 해석이 가능한 유한요소 해석법을 이용하여 압전 복합체를 설계하고, 제작하여 임피던스 특성을 비교함으로써 유한요소법에 의한 설계법이 실제 상황을 보다 정확히 반영할 수 있음을 검증하였다. 또한 이론적 방법에 의한 특성 해석 결과는 유한요소 해석법에 의한 결과와 많은 차이를 가짐을 그림 3에서 확인하였다. 또한 이를 이용한 초음파 트랜스듀서를 설계하기 위해 압전 복합체의 등가 물성을 도출하였으며, 유한요소법에 의한 보간법을 이용하면 이론적 방법에 의해 찾을 수 없는 두께 방향(3방향) 물성 외에 다른 여러 물성들도 찾을 수 있음을 알 수 있었다.

나아가 1-3형 압전 복합체를 진동자로 하는 중심주파수 500 kHz의 초음파 트랜스듀서를 설계/제작하여 그 특성을 모의실험 결과와 비교함으로써 유한요소법에 의한 압전 복합체 초음파 트랜스듀서 설계법의 타당성을

또한 확인하였다. 따라서 본 연구의 결과와 같이 유한 요소법에 의해 1-3형 압전 복합체 및 그를 이용한 초음파 트랜스듀서를 설계한다면 통상의 이론적 모델이 가지는 한계를 극복하고, 실제 제작상황을 고려한 보다 정확한 설계 결과를 도출 할 수 있음을 확인하였다.

### 참고 문헌

1. T. R. Gururaja, W. A. Schulze, T. R. Shrout, L. Webster, and L. E. Cross, "High frequency application of PZT/Polymer composite materials," *Ferroelectrics*, **39**, 1245-1248, 1981.
2. R. E. Newham, L. J. Bowen, K. A. Klinker, and L. E. Cross, "Composite piezoelectric transducer," *Materials in Engineering*, **2**, 93-106, 1980.
3. W. Qi and W. Cao, "Finite element study on random design of 2-2 composite transducer," *SPIE Medical imaging 1997* **3037**, 176-180, 1997.
4. H. Takeuchi, C. Nakaya and K. Katakura, "Medical ultrasonic probe using pzt polymer composite," *IEEE Ultrasonic Symp.*, 507-510, 1984.
5. W. Smith, "Modeling 1-3 composite piezoelectrics: Hydrostatic response," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.*, **40**(1) 41-49, 1993.
6. G. L. Wojcik, D. K. Vaughan, V. Murray, and J. Mould, Jr. "Time-domain modeling of composite arrays for underwater imaging," *IEEE Ultrasonic Symp.*, 1027-1032, 1994.
7. J. Hossack and B. Auld, "Techniques for suppressing spurious resonant modes in 1-3 composite transducers," *IEEE Ultrasonic Symp.*, 651-656, 1991.
8. B. Auld and Y. Wang, "Acoustic wave vibrations in periodic composite plates," *IEEE Ultrasonic Symp.*, 528-532, 1985.
9. H. L. W. Chan, and J. Unsworth. "Simple model for piezoelectric ceramic/polymer 1-3 composite used in ultrasonic transducer application," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.*, **36**(4), 434-441, 1989.
10. G. Hayward and J. Hossack, "Unidimensional modeling of 1-3 composite transducers," *J. Acoust. Soc. Amer.*, **88**(2), 599-608, 1990.
11. 이수성, 권재화, 은홍, 노용래, "유한요소 해석법을 이용한 컨벡스 배열형 초음파 탐촉자의 설계," *한국음향학회지*, **21**(7) 592-599, 2002.
12. K. H. Han and Y. R. Roh, "The performance of a 1-3 mode piezocomposite ultrasonic transducer in relation to the properties of its polymer matrix," *Sensors and Actuators A*, **75**, 176, 1999.
13. C. S. DeSillets, H. D. Fraser, and G. S. Kino, "The design efficient broad-band piezoelectric transducers", *IEEE Trans. Son. Ultrason.*, **25**, 115-125, 1978.

### 저자 약력

● 이수성 (Susung Lee)

1999년 2월: 인제대학교 의용공학과 (공학사)  
 2001년 2월: 경북대학교 센서공학과 (공학 석사)  
 2004년 5월현재: 경북대학교 센서공학과 박사과정  
 \*주관심분야: 초음파 트랜스듀서, 의료용 초음파

● 김동현 (Dong-Hyun Kim)

한국음향학회지 제 21권 제8호 참조

● 한진호 (Jin-Ho Han)

1990년~현재: (주)프로소닉 부설연구소장  
 \*주관심분야: 초음파 트랜스듀서, 의료용 초음파

● 노용래 (Yongrae Roh)

한국음향학회지 제 20권 제4호 참조