

# PZT /Metal로 구성된 음향변환기의 음향특성에 관한 연구

## A Study on the Acoustic Properties of Acoustic Transducer with PZT /Metal

김진수\*, 강대하\*\*, 김소정\*\*\* 김호기\*\*\* 이덕출\*

(Jin-Soo Kim\*, Dae-Ha Kang\*\*, So-Jung Kim\*\*\* Ho-Gi Kim\*\*\* Deok-Chool Lee\*)

### 요 약

본 연구에서는 압전 특성이 우수한 PZT계 압전세라믹스를 원판상으로 박편화하여 금속 진동판에 부착시킨 PZT /Metal 음향변환기를 제작하였다. 이 때 압전 세라믹스를 박편화하기 위해 'tape casting 방법'을 사용했으며, 제작된 PZT /Metal 음향 변환기를 압전 부자, 압전 스피커등의 소자에 응용 시키기 위해 음향특성을 연구하였다.

연구 결과, 세라믹스의 압전 계수( $d_{31}$ )이 증가함에 따라 음압 레벨(dB)이 -6dB에서 -14dB로 증가된다. 음향 변환기의 직경비( $\eta$ )가 0.7-0.8이고, 두께비( $\beta$ )가 1 일때 최적 음압 특성을 나타냈으며, 음압은 -15~-16dB정도이었다.

### Abstract

In the study, the acoustic transducer of a thin circular disc-type with PZT /Metal was manufactured. The 'tape casting method' was introduced to prepare the thin disc-type of piezoelectric ceramics. The acoustic characteristics of PZT /Metal acoustic transducer for piezoelectric buzzer and piezoelectric speaker etc. have been studied and analyzed. As a result, the sound pressure level(dB), in the range from -6dB to -14dB, increased with increasing the piezoelectric coefficient ( $d_{31}$ ) of ceramics. The optimal conditions of the sound pressure characteristics of acoustic transducer were that the radius ratio( $\eta$ ) of ceramics and metal plate is 0.7-0.8 and the thickness ratio( $\beta$ ) is 1.0, and the value were -15~-16dB.

### I. 서 론

1947년, 티탄산바륨( $BaTiO_3$ )의 압전성이 발견된 이래, 압전 세라믹스의 연구가 진행되어, 2성분의 PZT계, 또는 3성분의 PCM등과 같이 새로운 압전 세라믹스 재료가 많이 개발되고 있다<sup>1)</sup>.

이 압전 세라믹스를 사용한 응용 상품은 음향기기, 초음파기기, 영상기기, 통신기기, 센서 등의 광범위한 분야로 전개되고 있다.

압전세라믹스는 전기음향변환 재료로서 우수한 재료이고, 원래는 어군 탐지기나 수중 탐지기 등 수중 통신 등의 초음파 영역으로부터 응용이 시작되었지만, 가청 주파수의 영역에도 연구가 행하여지고 있다<sup>2)</sup>.

특히, 압전 음향 소자에 관한 연구는 1960년대 부터 활발히 이루어졌는데, 이 때는 압전 세라믹스의 얇은 판이 요구되기 때문에, 처음에는 양산성이나 경제성, 제조성 등에서 다소 어려운 점이 있었으나, 최근에는 압전재료의 가공기술 및 제조공정이 크게 향상되면서 압전음향소자가 더욱 주목을 받게되었다.

이러한 압전 음향 소자는 분극화된 원형상의 얇은

\*인하대학교 전기공학과  
\*\*부산공업대학 전기공학과  
\*\*\*KAIST 재료공학과  
접수일자: 1992. 1. 29.

압전세라믹 재료를 제조한 후 금속 진동판에 부착시킨 진동자 구조로서, 전기음향변환 효율이 우수해져서 뒤고 개선한 음의 발생이 가능하고, 소형, 소형이며, 낮은 소비전력으로 음향 소자의 구동이 가능하기 때문에, 최근에 sounder, 압전 부자, 전화기의 송·수화기, 압전 스피커 등의 넓은 분야에 응용되고 있다<sup>4)</sup>

따라서, 본 연구에서는 압전 특성이 우수한 상용의 PZT세라믹스 분말로서, 박막의 PZT압전판을 제조하여 전기적인 기본 물성을 측정후, 원판상의 금속판에 PZT 소자를 부착시켜 PZT/Metal의 음향 변환기를 제작하여, 음향 특성을 조사하였다.

## II. 공명기 구조

고유 음향 임피던스(specific acoustic impedance)는 매질의 입자속도에 대한 음압의 비로 정의되며, 각 매질에 따라 결정되는 정수로서, 한 매질의 음향 에너지가 다른 매질로 손실어 없이 이상적으로 전달되기 위해서는 음향 임피던스간에  $\rho_1 c_1 = \rho_2 c_2$ 의 조건이 요구된다.

공기와 압전 세라믹스와의 음향 임피던스는 약 5000배 정도의 차이가 나므로, 큰 음압 레벨을 얻기 위해서는 공명기(resonator)가 필요하다.

이 공명기는 PZT/Metal로 구성된 음향 변환기와 공기층과의 진동 경계면상에서 음향 임피던스의 정합(matching)을 실현 시킴으로써 음압을 증대시켜, 결국 음향 변환기의 전기음향변환 효율을 배가시키는 목적으로 사용된다.

본 연구에서는 단순한 Helmholtz resonator를 고려하기로 하며, 이를 그림 1에 나타낸다<sup>5)</sup>.

이때의 공명 조건은 다음과 같이 된다.

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{MC}} = C \sqrt{\frac{\pi a^2}{d^2 h (1 + ka)}} \quad (1)$$

여기서, M : 동가 질량(equivalent mass)

c : 음속(=344×10<sup>3</sup> cm/sec)

a : 출구의 반경

d : 진동자의 지지 직경

h : 공공(cavity)의 높이

l : 공공(cavity)의 두께

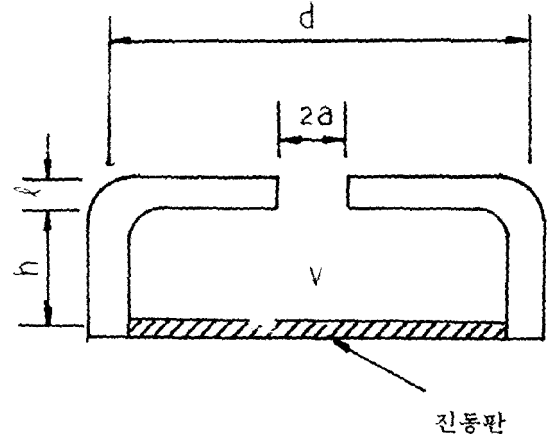


그림 1. 공명기의 구조  
Fig 1. The structure of resonator.

k : 상수(=1.3)

이다.

## III. 실험

### 3.1 사용 재료

음향 특성이 우수한 음향 변환기를 제작하기 위하여는 압전 특성이 우수한 세라믹스 재료를 선택하여야 한다.

본 연구에서는 상용의 미국 UPI사 제품인 piezoelectric ceramic 분말을 구입하였는데, 이들 각각 다른 종류의 세가지 분말의 물성을 표 1에 나타낸다.

### 3.2 PZT 압전체의 제조

압전 음향 소자의 진동자로 사용되는 PZT 압전체는 얇은 원판형이 요구되므로, 본 실험에서는 Dr. blade 장치를 사용한 'tape casting method'를 도입하였다. 이 방법으로는 PZT 압전체의 두께를 200  $\mu$ m 정도로 제조할 수가 있는 것이다.

제조 공정을 간단히 설명하기로 한다.

준비된 PZT 분말과 polyvinyl butyral제인 MSI사의 B-73210 결합제 및 증류수를 전자 저울로 중량 비로 평량한 후, 통에 넣고 ball mill 방법에 의하여 2시간 정도 혼합한다.

이렇게 혼합된 slurry를 용기내에 넣고 진공 펌프로 air성분을 빼낸 후, 박판화 공정에 들어간다. Dr.

표1. 사용된 PZT 분말의 재료정수

Table 1. The physical properties of used commercial PZT powders.

powders		PZT-1 (UPI 501A)	PZT-2 (UPI 401)	PZT-3 (UPI 601)
dielectric constant $\epsilon_r$		1850	1350	1050
coupling factor $k_p(\%)$		63	62	48
piezoelectric coefficient(pC/N)	$d_{31}$	400	290	205
	$d_{33}$	-175	-125	-89
Young's modulus $Y_{11}(N/m^2 \times 10^{10})$		6.3	8	8.6
density(g/cm <sup>3</sup> )		7.7	7.6	7.5

blade 장치를 사용하여 50 cm/min.의 속도로 넓은 면적, 박판상의 green sheet를 제조하여 건조 시킨다. 원형의 puncher로써 punching을 한 후, 전기로에 넣고 1300°C로써 소결을 한 후, 냉각시킨다. 이렇게 제조된 PZT 압전판의 양면에 은전극을 도포한 후, 2 KV/mm의 직류 고전압을 가하여 분극을 한 후, 기본적인 공진 및 압전 특성 등을 측정하였다.

사진을 그림 2에 나타낸다.

3.3 PZT/ Metal 음향 변환기의 제작

PZT 압전판을 부착하기 위한 금속 진동판을 준비하였다.

금속 진동판은 재질, 종류에 관계없이 직경 3I mm로 통일시켰으며, 두께별로 여러가지를 준비하였는데 이를 표 2에 나타낸다.

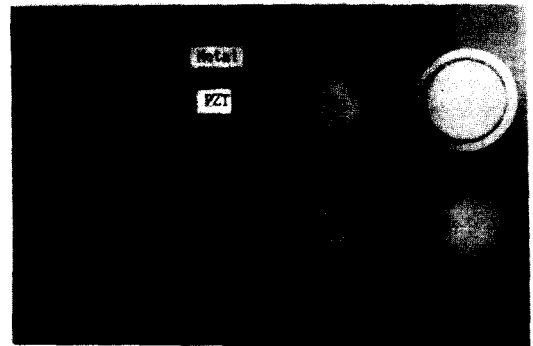


그림2. 제작된 PZT/metal 음향변환기

Fig 2. Fabricated PZT/metal acoustic transducer.

표2. 금속진동판의 재료정수

Table 2. The properties of metal plates.

properties materials	Brass	Stainless steel	Aluminum
density (kg/m <sup>3</sup> )	8600	7910	2700
Young's modulus (N/m <sup>2</sup> * 10 <sup>10</sup> )	10.0	19.7	7.0
sound velocity(m/s)	3400	5000	5100
poission's ratio	0.35	0.30	0.34

다음은 점착성이 우수한 열경화성 epoxy 수지를 PZT 압전판에 바른 후, 표 2의 금속 진동판에 부착시켰다. 이렇게 제작된 PZT/Metal 음향 변환기의

3.4 음압 특성 측정

음향 변환기는 전기음향변환 효율을 이용한 압전 음향소자로서, 변환 효율의 척도를 살펴보기 위하여 주파수 변화에 따른 음압 특성(sound pressure characteristics)을 측정하였다.

음압특성을 증대시키기 위해서 설계 제작된 공명기(helmholtz resonator)를 이용했으며, 측정은 그림 3의 측정 시스템을 구성하였다.

측정은 signal generator(BK type 1027)와 power amplifier(M.C.2125)로써 random signal 1 V<sub>rms</sub>를 PZT/Metal 변환기의 시편에 가하고, 이때 발생하는 신호를 microphone을 통하여 pre amplifier(G.R. 1560-P4)로써 검출 증폭한 후, spectral dynamics

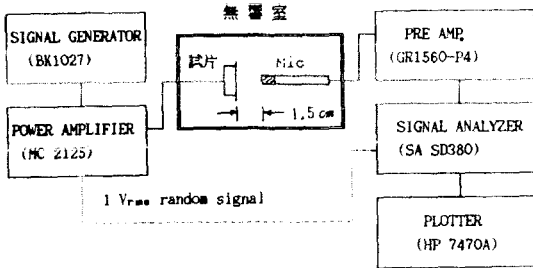


그림3. 음압특성 측정 시스템

Fig 3. Block diagram for measuring the sound pressure characteristics.

signal analyzer (S.A.SD380)로 분석하였다. 분석은 1KHz부터 10KHz까지 각 주파수에 대한 gain(dB)을 측정하였으며, 이를 plotter(HP7470A)로 출력시켰다. 그리고 plot된 Y축의 음압은 최고 -20dB을 기준으로 하였을때의 상대적인 음압크기를 나타낸다. 측정값의 신뢰성을 위하여 외부 noise의 영향을 제거한 무향실에서 5회씩 측정했으며, 측정 거리는 1.5cm로 했다.

무향실 내의 시편과 마이크 사진을 그림 4에 나타낸다.

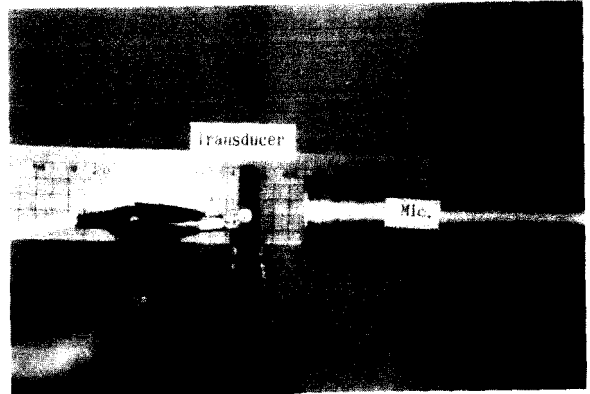


그림4. 마이크와 제작된 변환기

Fig 4. The microphone and manufactured transducer.

#### IV. 실험 결과 및 고찰

제작된 PZT/Metal 음향변환기에서, 음향특성에 미치는 PZT 변화와 metal 변화의 영향으로 나누어 고찰하고자 한다.

##### 4.1 PZT의 변화

##### 1. PZT 물성의 변화

우선 PZT 압전 재료들의 물성변화(표1참조)에 따른 스펙트럼분석을 그림 5에 나타낸다.

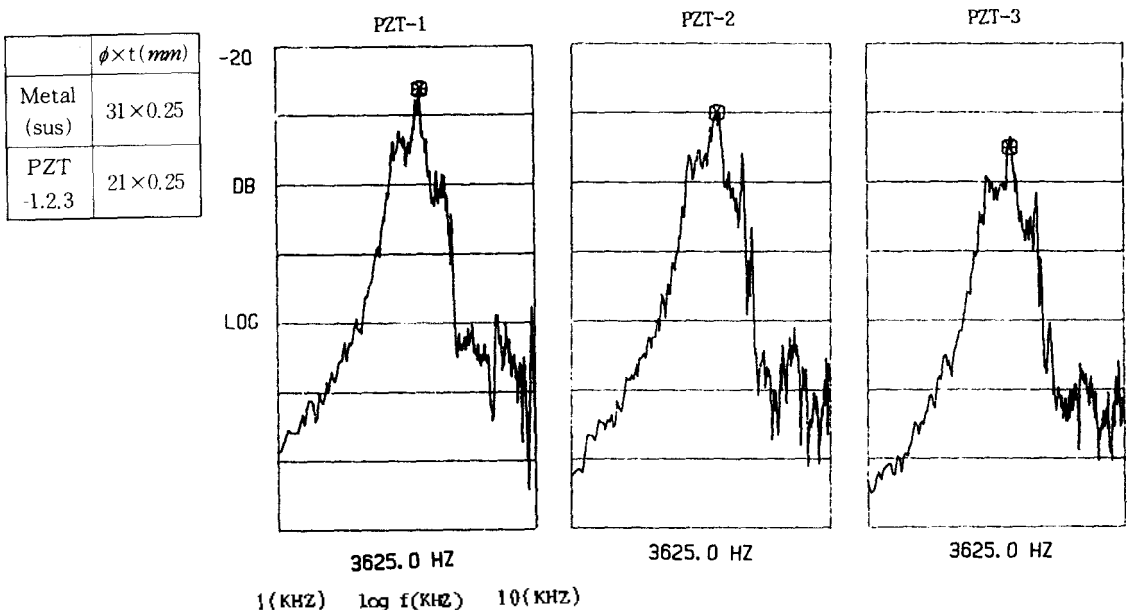


그림5. PZT 세라믹스 재료에 따른 스펙트럼분석

Fig 5. Spectrum analysis to the PZT ceramics materials.

금속 진동판의 재료는 SUS로서, 직경 31mm, 두께 0.25mm이며, PZT-1, PZT-2, PZT-3의 압전판은 직경 21mm, 두께 0.25mm인 것을 사용했다. 그림 5를 다시 고찰하여 보면, 그림 6과같이 나타낼 수 있는데, PZT의 압전계수가 큰 것일수록 음압이 크게 나타났고, 기본공진주파수  $f_1$ 은 변화가 없이 나타남을 알 수 있다. 이는 압전계수가 가장 큰 PZT-1의 전기임피던스 값이 가장 작게 나타나기 때문으로 생각된다.

또한, 이때 PZT/Metal 음향변환기의 기본공진주파수는 3625 Hz로 일정하게 나타났는데, 이는 음향변환기의 n차 자연 주파수(natural frequency)를 나타내는 다음식에서 연유한다<sup>6)</sup>.

$$f_1 = \frac{\lambda^2}{2\pi a^2} \sqrt{\frac{E h^3}{12\gamma(1-\nu^2)}} \quad (2)$$

여기서,  $\lambda$  : wave length,  $a$  : radius of plate,  $h$  : thickness of plate,  $E$  : modulus of elasticity,  $\gamma$  : mass per unit area of plate,  $\nu$  : poisson's ratio 이며, 즉 뒷식에서의와 같이 금속 진동판의 물성(SUS 재료) 및 dimension(직경 31mm, 두께 0.25mm)이 일정하기 때문으로 생각된다.

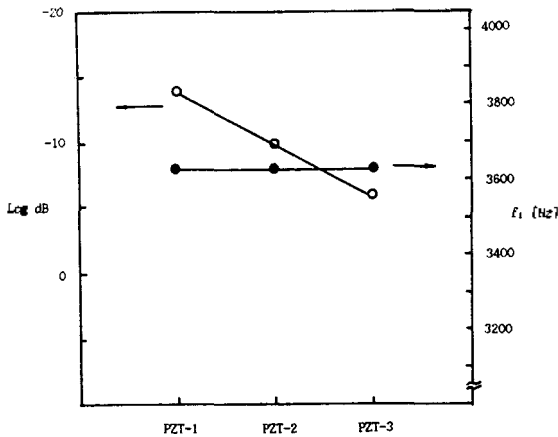


그림 6. PZT세라믹스 재료에 따른 음압특성  
Fig 6. Sound pressure characteristics to the PZT ceramics materials.

②PZT 두께의 변화

그림 7은 PZT 압전판의 두께 변화에 따른 스펙트럼분석을 나타낸 것이다.

압전 재료는 PZT-2를 사용하였고 금속판은 직경

31mm, 두께 0.25mm의 SUS판을 사용한 것이다.

그림 7을 다시 고찰하여 보면, 그림 8과 같이 나타낼 수가 있는데, PZT의 두께가 증가할수록 음압 레벨(dB)이 감소하고, 기본 공진 주파수는 증가함을 알 수 있다. 이는 식 (2)에서 PZT/Metal 음향변환기의 두께  $h$ 가 증가하므로 기본공진주파수  $f_1$ 도 증가하는 것으로 생각된다.

PZT-2

		#1	#2
$\phi \times t$ (mm)	Metal (sus)	31× 0.25	31× 0.25
	Ceramic (PZT-2)	21× 0.225	21× 0.4

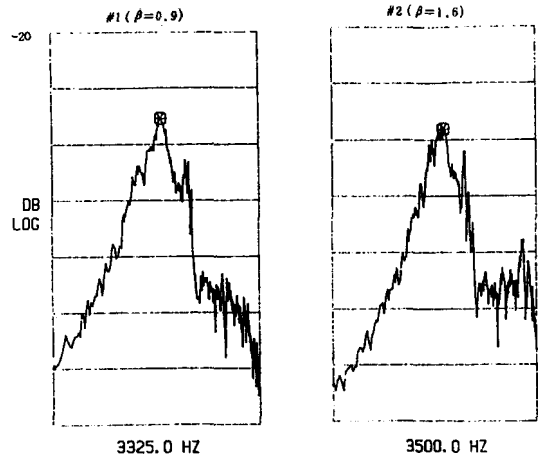


그림 7. PZT 세라믹 두께에 따른 스펙트럼분석  
Fig 7. Spectrum analysis to the PZT ceramics thickness.

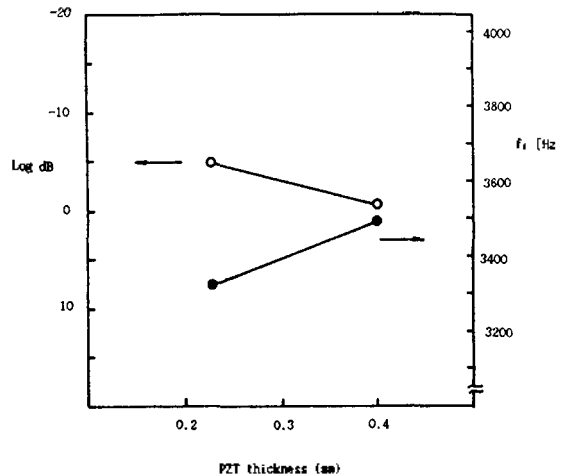


그림 8. PZT 세라믹 두께에 따른 음압특성  
Fig 8. Sound pressure characteristics to the PZT ceramics thickness.

PZT-1

		#1	#2	#3
$\phi \times t$ (mm)	Metal (sus)	31 × 0.25	31 × 0.25	31 × 0.25
	Cera mics	12 × 0.25	16 × 0.25	24 × 0.25

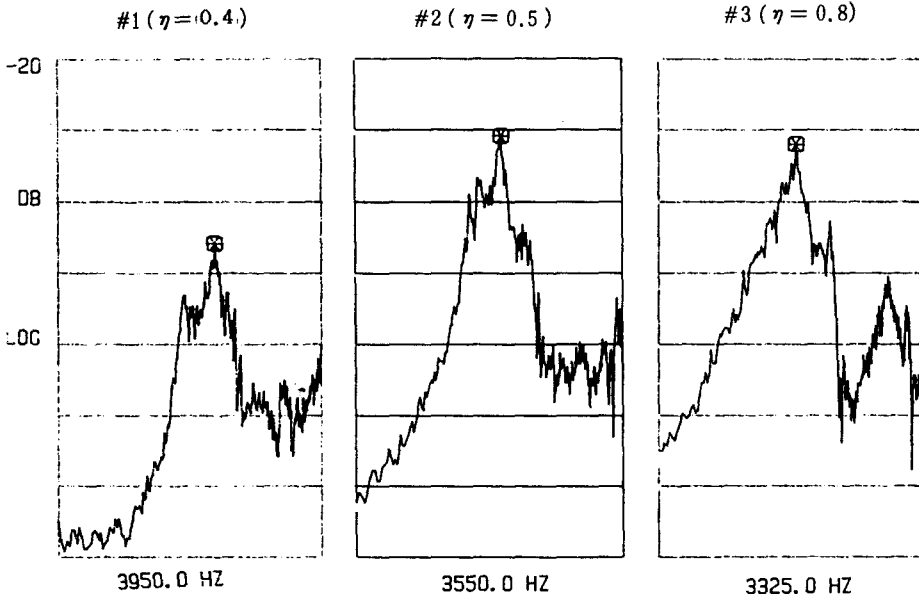


그림9. PZT 세라믹의 전극면적에 따른 스펙트럼분석  
Fig 9. Spectrum analysis to the electroding area of PZT ceramics.

③PZT 전극 면적의 변화

그림 9는 PZT 압전판의 전극 면적에 따른 스펙트럼분석을 나타낸 것이다.

즉 PZT 압전판의 전극 면적을 변화시킨 것인데, 전극의 직경을 12mm(#1), 16mm(#2) 그리고 24mm(#3)의 3가지로 변화시켰다.

그림 9를 다시 고찰하여 보면, 그림 10과 같이 나타낼 수가 있다.

그림 10에서 보는 바와 같이, 전극 면적이 증가될수록 음압 레벨은 증가하는 것을 알 수 있고, 전극 면적이 증가될수록 기본 공진 주파수  $f_1$ 은 크게 감소함을 알 수 있다. 이것은 식 (2)에서 판의 반경  $a$ 의 값이 증가할수록  $f_1$ 값은 감소하게 되기 때문으로 생각된다.

특히, 그림 5의 PZT-1( $\eta=0.7$ )과 그림 9의 시편 #3( $\eta=0.8$ )인 것을 비교해 보면, 주파수 1KHz에서

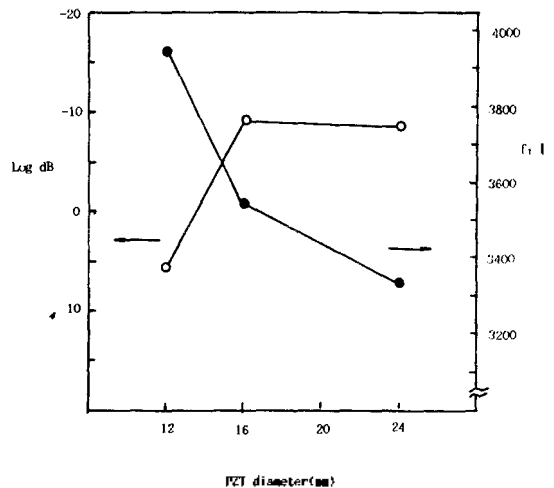


그림10. PZT 세라믹의 전극면적에 따른 음압특성  
Fig 10. Sound pressure characteristics to the electroding area of PZT ceramics.

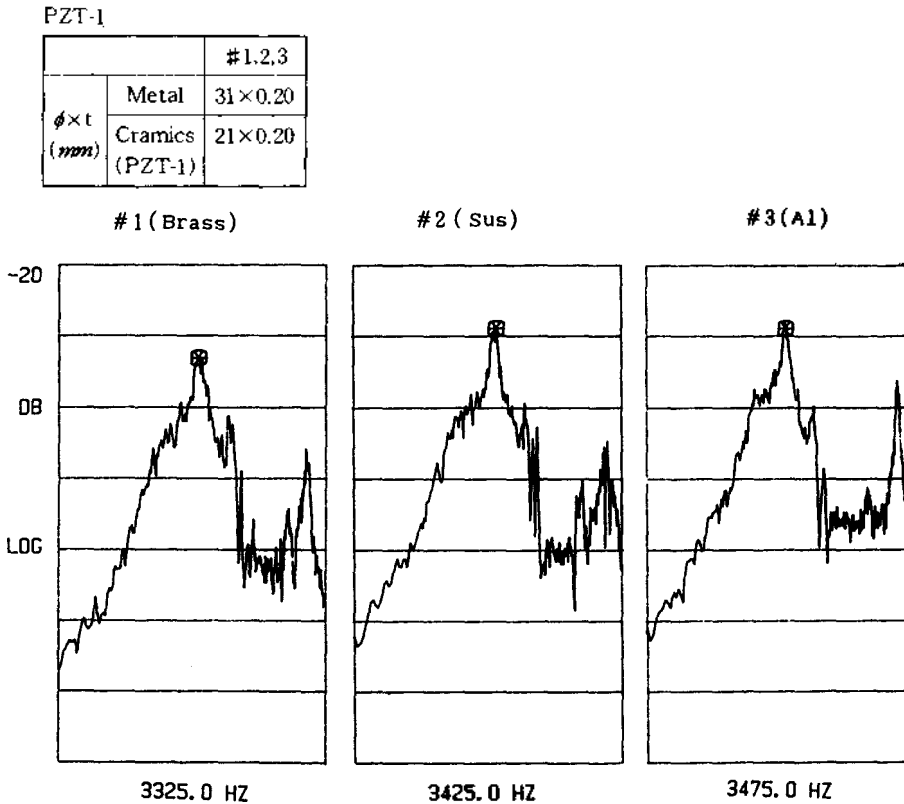


그림 11. 금속진동판의 재료에 따른 스펙트럼분석  
Fig 11. Spectrum analysis to the metal plate materials.

의 음압 레벨은  $\eta=0.8$ 인 것이 더 높는데 비하여, 기본 공진 주파수  $f_1$ 에서의 음압 레벨은  $\eta=0.7$ 인 것이 더 높음을 알 수 있다.

이 점을 미루어 보아, edge 지지법에서 PZT 압전 재료와 금속 진동판의 두께비( $\beta$ )가 일정할 때 즉  $\beta=1$ 인 경우와, 압전 재료와 금속 진동판의 직경비( $\eta$ )는 0.7-0.8일 때가 가장 이상적임을 제시할 수가 있다<sup>7)</sup>.

#### 4.2 금속 진동판의 변화

##### ① 금속판 재료의 변화

PZT 압전체는 일정한 것으로 하고, 이번에는 금속 진동판의 재료를 변화 시켰을때의 스펙트럼분석을 그림 11에 나타낸다.

PZT 압전체는 PZT-1으로서 직경 21mm, 두께 0.2mm인 것으로 고정하였고, 금속 진동판은 Brass (#1), SUS (#2), Al (#3)의 3가지로 변화시켰다.

그림 11을 다시 고찰하여보면, 그림 12와 같이 나

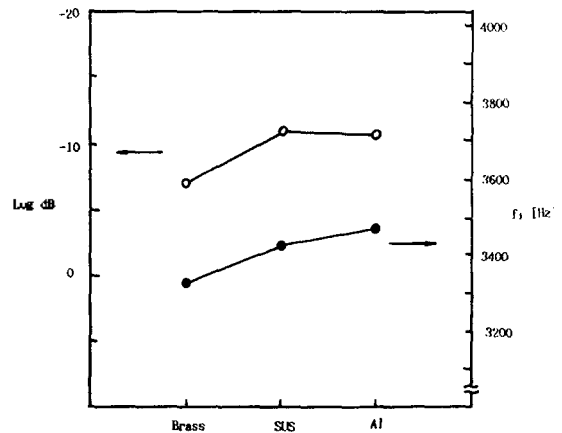


그림 12. 금속진동판의 재료에 따른 음압특성  
Fig 12. Sound pressure characteristics to the metal plate materials.

타낼 수가 있다.

우선 기본공진주파수  $f_1$ 이 금속 진동판에 따라 약간씩 차이가 나는 것은, 표 2의 금속재료정수들 식

(2)에 대입하여 계산하여 보면, Brass-SUS-Al 금속판의 순으로 약간씩 증가되기 때문으로 생각된다.

또한 음압 레벨은 Brass보다 SUS와 Al이 다소 높은 것을 알 수 있는데, 이 점으로 미루어 볼때 edge 지지법에서는 Brass보다 SUS나 Al 금속판이 유리함을 제시할 수가 있다.

②금속판 두께의 변화

PZT압전체는 일정한 것으로 하고, 금속판의 재료도 SUS로 일정한 것으로 하고, 단지 SUS 금속판의 두께만을 변화시켰을 때의 스펙트럼분석을 그림 13에 나타낸다.

PZT-2

		#1	#2
φ×t (mm)	metal (sus)	31× 0.12	31× 0.25
	Ceramics (PZT-2)	21× 0.25	21× 0.25

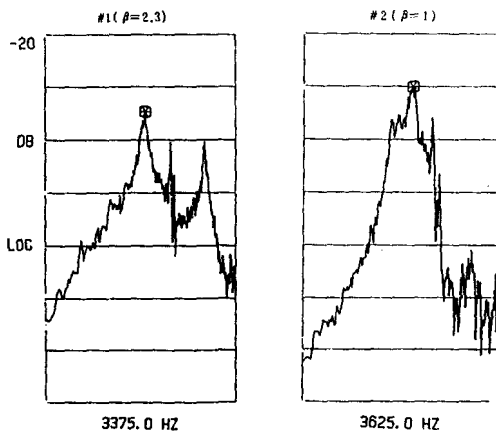


그림 13. 금속진동판의 두께에 따른 스펙트럼분석  
Fig 13. Spectrum analysis to the metal plate thickness.

PZT 압전체는 PZT-2로 직경 21mm, 두께 0.25mm인 것으로 고정하였고, SUS 금속판의 두께를 0.12mm(#1), 0.25mm(#2)로 변화시켰다.

그림 13을 다시 고찰하여 보면, 그림 14와 같이 나타낼 수가 있다.

우선 금속 진동판의 두께가 증가할 수록 기본공진 주파수가 증가하였는데, 이는 식 (2)에서 알 수 있는

바와 같이 h가 f와 비례 관계이기 때문으로 생각된다. 다음에 음압 레벨은 금속 진동판의 두께가 증가할 수록 약간씩 증가하였는데, 이는 PZT/Metal 변환기의 음압은 진동판의 체적 변위와 관계있는 것으로 생각되며, 따라서 금속 진동판의 두께는 0.12mm의 것이 유리함을 제시할 수 있었다.

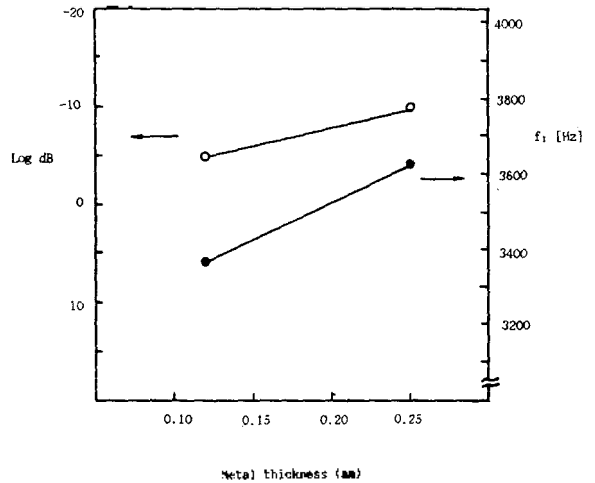


그림 14. 금속진동판의 두께에 따른 음압특성  
Fig 14. Sound pressure characteristics to the metal plate thickness.

V. 결 론

압전성이 우수한 상용의 PZT계 세라믹스 Dr. blade 장치를 사용하여 'tape casting method'로써 원형의 PZT 박판으로 제조하여, 여러가지 금속진동판에 부착시킨 구조인 PZT/Metal 음향 변환기를 제작하였고, edge 지지법 공명기를 이용하여 음향 변환기의 음향 특성을 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1)PZT의 변화시

①물성이 여러가지로 다른 세 가지의 PZT 분말을 사용한 결과, 그 중에서 압전 계수가 가장 높은 PZT-1의 재료가 음압 레벨(dB)이 가장 높았다.

②PZT 압전판의 두께가 감소할수록 음압 레벨은 증가하였다.

③PZT 압전판의 전극 면적이 증가할 수록 음압 레벨은 약간씩 증가하였다.



④그리고 압전 재료와 금속 진동판의 직경비( $\eta$ )는 0.7-0.8의 경우가 최적의 음향특성을 나타낸다.

(2) 금속 진동판의 변화시

①금속판은 Brass 보다는 SUS나 Al재료가 음압 특성이 약간 높게 나타났다.

②금속판의 두께가 증가할수록 음압이 약간씩 높게 나타났다.

이상의 결론으로부터 PZT/Metal로 구성된 음향 변환기를 제작하고자 할때, 최적의 제작조건은, PZT 압전체의 압전계수가 높은 경우, PZT 압전체의 두께가 얇은 경우, PZT와 금속판의 직경비는 0.7-0.8의 경우이며, 금속판은 SUS나 Al의 경우인 것으로 생각된다.

### References

1. S.Roberts : "Dielectric and Piezoelectric Properties

of Barium Titanate," Phys.Rev., 71,12, pp.890-896. (1947)

2. Satoru Fujishima et al : "Piezoelectric Materials and Applications for Audio Frequency," EA 84-1 (1984)

3. 田中哲郎 外 : 壓電セラミクスとその應用, 電波新聞社, 東京, (1974)

4. --ノ瀬 昇 外 : 壓電プザー 發音體最新技術, 總合技術出版, 東京, (1984)

5. Lawrence E.Kinsler and Austin R.Frey : "Fundamentals of Acoustics," John Wiley & Sons, NY, (1962)

6. Robert D.Blevins, : Formulas for Natural Frequency and Mode Shape, Van Nostrand Reinhold Co, NY, pp.240-250, (1979)

7. Yutaka Ichinose et al : "Telephone Sounder and Receiver using Piezoelectric Ceramic," EA 80-25, pp. 23-30, (1980)

8. Yutaka Ichinose et al : "Design of Piezoelectric Bimorph Diaphragm," EA84-3, pp.15-21, (1984)

### (감사의 글)

본 연구는 KAIST의 전자세라믹재료 연구센터의 지원으로 수행되었음을 알리고 이에 감사의 뜻을 표합니다.

▲김진수(정회원) 1960년 9월 6일생



1986년 2월 : 인하대학교 전기공학과 졸업(공학사)  
1988년 2월 : 인하대 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)  
1991년 2월 : 인하대 대학원 전기공학과 박사과정 수료

현재 : 경원전문대학 건축설비과 조교수

▲강대하(정회원) 1948년 12월 17일생



1978년 2월 : 부산대학교 전기공과과 졸업(공학사)  
1980년 2월 : 부산대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)  
1990년 2월 : 인하대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사)

현재 : 부산공업대학 전기공학과 부교수

▲김소정(金邵晶) 1959년 4월 6일생



1977년 2월 : 인천기체공고 전기공과 졸업  
1979년 3월 : 인하대학교 전기공학과 입학  
1986년 2월 : 인하대학교 졸업  
1989년 8월 : 인하대학원 전기공학과 입학  
1990년 8월 : 공학석사 학위 취득

1992년 3월 : 한국과학기술원 신소재공학과 박사과정 입학

1979년 10월 26일 : 육군입대(통신병)

1982년 7월 22일 : 군만기제대

1986년 2월 : 한국과학기술원 재료공학과 연구원

1992년~현재 : 한국과학기술원 재료공학과 연구원

▲김호기(정회원) 1945년 10월 11일생



1968년 2월 : 한양대학 요업공학과 졸업  
1974년 : Erlangen대(서독) 재료공학과, 석사  
1979년 : Erlangen대(서독) 재료공학과(공학박사)  
1979년 : Erlangen대(서독) 조교수

1983년~현재 : 한국과학기술원 재료공학과 교수

▲이덕출(李德出)(정회원) 1939년 1월 22일생



1963년 : 인하대 공대 전기공학과 졸업  
1966년 : 동 대학원 졸업  
1976년 : 일본 나고야 대학원 졸업(공학박사)  
1970년 : 단국대 공대 전기공학과 부교수  
1981년 : 일본 나고야대 초빙교수

현재 : 인하대 공대 전기공학과 교수, 대한전기학회 재무이사