

PMN-PT-PZ 계 세라믹스를 이용한 압전 발음체 설계

Design of the Piezoelectric Sounder Using the PMN-PT-PZ

고영준*, 김현철*, 남호덕**, 장호경***, 우 홍***

(Young-Jun Go*, Hyun-Chool Kim*, Hyo-Duk Nam**, Ho-Gyeong Chang***, Hong-Woo***)

Abstract

In this study, the physical properties of the piezoelectric sounder with metal-piezoelectric ceramics were analyzed. The dielectric and piezoelectric properties of 0.5 wt% MnO₂ and NiO doped 0.1Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃-0.45PbTiO₃-0.45PbZrO₃ ceramics were investigated aiming at acoustic transducer applications. The acoustic characteristics of a thin circular disc-type with metal-piezoceramics have been investigated. Also, the acoustic characteristics for the geometrical form of case were investigated. The piezoelectric sounder with 200kHz resonant frequency and 20kHz bandwidth was designed by considering the sharp directivity and the sound pressure.

Key Words : metal-piezoceramic, acoustic transducer, piezoelectric sounder

1. 서론

최근 전자산업이 급격히 발전됨에 따라 전자부품의 고성능화, 초소형화, 초고주파화 및 고신뢰성 등이 절실하게 요구된다. 전자부품에 대한 이러한 시대적 배경은 재료의 개발과 제조기술의 진보를 통해서 이루어질 수 있다. 강유전체 세라믹스에서 나타나는 압전효과는 전기기계 결합에너지의 상호변환을 가능하게 한다. 압전 세라믹스를 사용한 응용상품은 초음파기기, 영상기기, 음향기기 그리고 센서등 광범위한 분야에 걸쳐 있다[1]. 이렇듯 압전세라믹스는 전기음향 변환재료로서 우수한 특성을 가지며 어군탐지기나 수중통신 등의 초음파 영역에서

응용이 시작되어 최근에는 가청주파수의 영역에서 사용되는 제품에 대하여 연구 개발되고 있다[2]. 가청주파수대에서 음을 발생시키는 것으로는 단일음을 발생시키는 압전부저, 음성을발생시키는 압전스피커로 크게 나눌 수 있다.

이 압전 발음체들은 소형, 저소비전력형 등의 장점을 가지고 있어현 시대의 요구에 적합한 것들이라고 볼 수 있다. 압전 발음체용 재료로서는 2성분계 또는 3성분계의 PZT재료가 많이 사용되고 있는데 어느쪽이든 재료조성을 변화시키거나, 각종 첨가물을 가하여 압전 발음체에 적합한 특성을 만들어 사용하고 있다.[3] 압전 발음체 재료로서 공진계에서 사용할 경우에는 높은 기계적 품질계수를 가지는 재료를 사용하고, 비공진영역이나 광대역에서 사용할 경우는 낮은 기계적 품질계수 재료가 사용된다. 압전 발음체의 음압감도는 압전정수 d_{31} 이 큰 재료일수록 좋기 때문에 이 값을 크게 하기 위해서 전기기계 결합계수가 크고 비유전율이 큰 재료를 개발 사용하고 있다. 본 연구는 고유전율을 가지며

* : 영남대학교 대학원 센서 및 시스템공학과

** : 영남대학교 전자정보공학부 (경북 경산시 대동 214-1, Tel: 053-810-2493, Fax: 053-813-8230, E-Mail : hdnam@yucc.yeungnam.ac.kr)

*** : 경산대학교 자연과학부

2000년 10월 18일 접수, 2000년 12월 1일 심사완료

유전손실값이 작고, 기계적 품질계수값이 크며, 전기기계 결합의 에너지 변환효율이 높은 압전세라믹스를 제조하기 위하여 $0.1\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-0.45\text{PbTiO}_3-0.45\text{PbZrO}_3$ 의 조성에 MnO_2 와 NiO 를 각각 0.5wt% 첨가하였다. 제조된 시편의 공진주파수와 반공진주파수를 측정하고 주파수 변화에 따른 유전율과 유전손실의 온도 의존성을 조사하였다. 효율면이나 대역폭면에서 우수한 장점을 가지는 새로운 형태의 압전 발음체를 개발하기 위하여 금속진동판과 부착시킨 음향소자의 특성을 조사하였으며, 대역폭과 공진주파수를 고려한 압전 발음체 소자와 케이스를 설계하였다.

2. 실험 및 수치해석

2.1 시편제조 및 측정

음향소자로 사용되는 압전세라믹스에는 고유전율, 높은 전기기계 결합계수, 적절한 전기회로와의 임피던스 정합, 그리고 안정된 물질특성을 가진 PZT계열을 사용하였다. 조합한 원료를 지르코니아 볼(zirconia ball)과 함께 플라스틱 용기에 넣고 24시간 습식혼합한 후에 건조된 분말을 알루미늄 도가니를 사용하여 800°C 에서 2시간 하소하였다. 하소한 분말을 2차 볼밀링(ball milling)하고 10 wt% PVA(PolyVinyl Alcohol #2000)를 사용하여 과립으로 제조한 다음 1 ton/cm^2 압력을 가하여 원판형으로 성형하였다. 소결시에 탈지(binder burnout)를 위하여 500°C 에서 3시간 유지하고, 1200°C 까지 승온한 후에 2시간 정도 유지하였다. 소결된 시편을 연마, 세척하고 양면에 은전극을 스크린 인쇄한 후에 600°C 에서 열처리하여 전극을 부착하였다. 측정에 사용된 시편은 직경이 10mm, 두께는 1mm이며, 그림 1에 시편 제조과정을 나타내었다.

경방향의 공진-반공진 주파수를 측정하기 위하여 임피던스 분석기(Impedance Analyzer ; HP4194A)를 사용하였고, 측정값으로부터 전기기계 결합계수(k_p)를 식(1)에서 구하고 공진저항값을 측정하여 기계적 품질계수(Q_m)를 식(2)에서 구하였다.

$$k_p = \sqrt{\frac{\Delta f}{0.395f_r + 0.57\Delta f}} \quad (1)$$

$$Q_m = 1/2\pi f_r R_1 C_f [1 - (\frac{f_r}{f_a})^2] \quad (2)$$

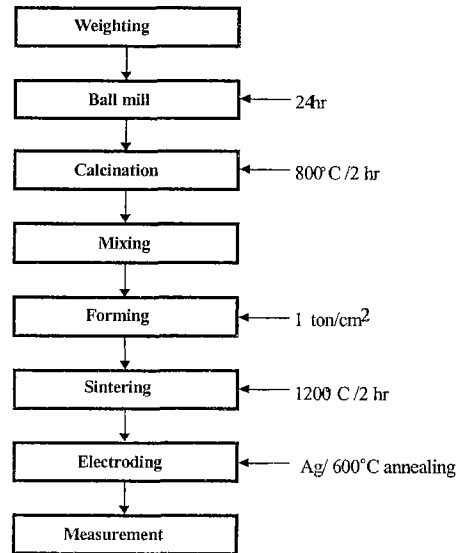


그림 1 압전세라믹스의 제조과정

Fig. 1 Manufacturing process of piezoelectric ceramics.

여기서 Δf 는 $f_a - f_r$, 즉 반공진주파수와 공진주파수의 차, R_1 은 공진주파수에서의 저항값이고,

C_f 는 1kHz에서 시편의 정전용량값이다. 또한, 시편의 유전상수와 유전손실의 온도 의존성을 측정하기 위하여 온도조절기, 임피던스 분석기를 사용하였으며 측정주파수는 5, 16, 54, 180, 600kHz로 하였다. 시편의 측정 온도 상승률은 2°C/min 로 하여 $400 \sim 600^\circ\text{K}$ 범위에서 측정하였다.

2.2 음향소자 설계

음향소자는 그림 2와 같이 양면 전극이 형성된 압전 세라믹을 얇은 금속진동판에 접합시킨 복합진동자로 구성되며, 압전세라믹스는 초음파를 발생하는 능동소자로서[4], 음향소자에서 가장 중요한 요소이다. 본 연구에서 개발하고자 하는 압전 음향소자는 압전세라믹의 경방향 진동을 이용하였다. 압전세라믹의 경방향 진동을 이용하는데 있어서 고려해야 할 사항으로는 두께진동의 공진주파수와 차이를 크게 두어, 그 영향이 미치지 못하게 해야 한다는 것으로 일반적으로 10배 이상의 충분한 공진주파수 차이를 두었다. PZT계열의 압전세라믹스는 높은 전기기계 결합계수를 가지므로 음향소자의 효율을 극대화시킬 수 있으나 공기중에는 음향에너지의

전달이 거의 되지 않는다. 이는 압전세라믹스의 음향 임피던스와 공기의 큰 음향 임피던스 차이로 인하여 음향 에너지의 전달에 어려움이 있기 때문이며, 압전세라믹스에 부착된 금속진동판은 압전세라믹스와 공기의 큰 임피던스 차이를 해결하여 주는 역할을 한다. 음향소자는 압전소자 및 진동판의 재질과 크기에 따라 공진주파수가 결정되고, 그에 따라서 대역폭과 감도지수가 결정된다.

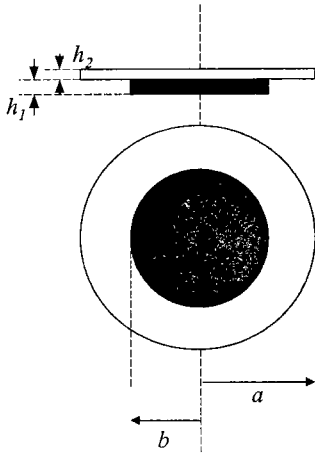


그림 2 압전발음체 소자
Fig. 2 The piezoelectric sounder element.

본 연구에서는 금속진동판으로 널리 이용되는 황동, 알루미늄, 스테인레스 각각의 경우에 대하여 압전세라믹스와 부착된 음향소자의 공진주파수를 시뮬레이션을 통하여 해석하였다. 원형평판형 압전세라믹스의 경방향 진동의 공진주파수(f_r)는 다음과 같이 나타난다.

$$f_r = \frac{n_n}{\pi D} \sqrt{\frac{Y_{11}^E}{\rho(1-\sigma^2)}} \quad [\text{Hz}] \quad (3)$$

여기서 D 는 압전체의 지름이며, n_n 은 포아손(Poisson)비를 포함하는 Bessel함수의 근이다. Y_{11}^E 은 압전체의 영(Young)률, ρ 는 압전체의 밀도 그리고 σ 는 압전체의 포아손비이다. 경방향진동 압전세라믹스에 금속판이 접합되면 (3)식의 공진주파수식은 (4)식으로 표현된다[4, 5].

$$f = \frac{a_m^2 h_1}{2\pi b^2 \beta} \sqrt{\frac{E_1}{3\rho_2(1-\sigma_2^2)} \left(1 - \frac{3}{2}\zeta + \frac{3}{4}\zeta^2\right)} \quad [\text{Hz}] \quad (4)$$

여기서, a_m 은 m 차 공진에 대한 지지방식의 기준정수이며, ζ 는 $(1-\alpha\beta^2)/(1+\alpha\beta)$ 이고, α 와 β 는 각각 압전체와 금속판의 영률의 비 E_1/E_2 과 압전체와 금속판의 두께 비 h_1/h_2 이다. h_1 는 판의 두께, b 는 압전세라믹스의 반경, E_i 는 영률을 말한다. 또한 a 는 금속판의 반경, ρ_i 는 밀도, σ_i 는 포아손비를 각각 나타낸다. $i=1$ 은 압전세라믹스판, $i=2$ 는 금속진동판을 의미한다.

감도지수는 입력전압에 대한 음향소자의 음압으로 나타낸다. 압전세라믹스의 포아손비(σ_1)는 0.32 이고, 금속진동판의 포아손비도 이와 차이가 거의 없으므로 압전세라믹스와 금속진동판의 포아손비와 같다고 가정할 수 있다. 이때의 음압(P_s)과 감도지수(S)는 각각 식(5), (6)과 같다[5].

$$P_s = (1-\sigma^2) \left(\beta^2 + \frac{3}{2}\beta\zeta + \frac{3}{4}\zeta^2 \right) \alpha\beta + 2\sigma(1-\sigma) \left(1 + \frac{3}{2}\zeta + \frac{3}{4}\zeta^2 \right) \quad (5)$$

$$S \cong \frac{\alpha(1+\beta)^{5/2}\sqrt{\beta}}{1+\alpha\beta} \times \left(\frac{\eta[3+\sigma-\eta^2(1+\sigma)]}{(1+\sigma)P_s + \eta[(1-\sigma)P_s + 2(1-\sigma^2)(1 - \frac{3}{2}\zeta + \frac{3}{4}\zeta^2)]} \right) \quad (6)$$

여기서, η 는 금속판의 반지름과 압전세라믹스 반지름의 비 b/a 를 나타낸다. 그리고, 지지된 압전발음체 소자의 공진주파수가 결정될 때, 임계 감쇠상태의 조건을 만족한다는 가정하에 대역폭(BW)은 식(7)과 같이 주어진다.

$$BW = 2\sqrt{\frac{K_e}{M_e}} \quad (7)$$

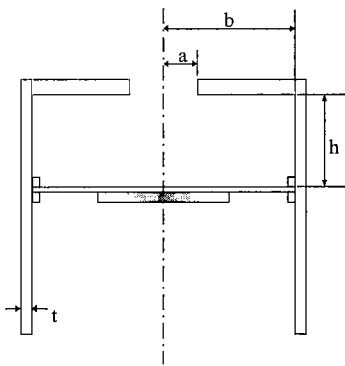
여기서 K_e 는 압전발음체 소자의 등가 탄성계수, M_e 는 압전발음체 소자의 등가질량을 나타낸다.[6]

2.3 압전발음체 케이스 설계

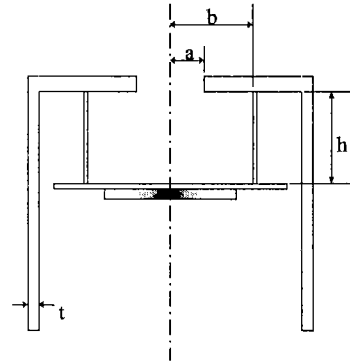
공기와 압전세라믹스와의 음향임피던스는 약 5000배 정도의 차이가 나므로 큰 음압 레벨을 얻기 위해서는 공진기(resonator)가 필요하다. 이 공진기는 PZT/Metal로 구성된 압전 발음체소자와 공기층과의 진동경계면상에서 음향임피던스의 정합(matching)을 실현시킴으로써 음압을 증대시켜, 결국 음향변환기의 전기음향변환효율을 배가시키는 목적으로 사용된다. 또한, 압전음향소자에 구속 경계조건을 인가하지 않고 진동시키면 음은 대단히 작게 나타나는데 이는 진동된 음의 위상을 생각할 때 스피커 소자의 중앙부와 외주부 및 전면과 이면에서 위상이 180° 다르므로 공기의 진동이 상쇄되어 음이 작게 나타나게 된다. 따라서 음을 크게 하기 위해서는 음향변환소자를 그림 3과 같은 케이스에 넣고 위상이 180° 다른 음을 음향적으로 제거함으로써 위상에 의한 상대성분을 감쇄시키고 케이스에 음향 공동(cavity)을 만들어 특정주파수의 음압을 높이는 방법을 취하고 있다. 헤름홀츠 공진기를 기초로 설계한 음향변환기 케이스의 공진주파수는 식 (8)과 같다[7].

$$f_{case} = \frac{C_a}{2\pi} \frac{a}{b} \sqrt{\frac{1}{h(t+1.42a)}} \quad (8)$$

여기서 C_a 는 공기중의 음속이고, a 는 케이스 내부구멍의 반경, b 는 지지환부(supporting ring)의 반경, 그리고 h 와 t 는 각각 지지환부의 높이와 케이스의 두께이다.



(a) Circumferential support



(b) Nodal mount

그림 3 압전발음체 케이스의 구조

Fig. 3 The structure of piezoelectric sounder case.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 전기기계 결합계수가 높은 압전세라믹스를 제조하고, 넓은 대역폭을 구현하고 지향성이 우수한 음향소자를 개발하기 위하여 압전발음체의 공진주파수를 200kHz, 대역폭은 20kHz정도를 가지도록 설계하였다. 공진주파수를 200kHz로 설정한 이유는 200kHz보다 큰 주파수에서는 20kHz 대역폭을 구현하기가 쉽지만 감쇠가 커지고, 200kHz보다 낮은 주파수에서는 음압은 커지지만 대역폭의 구현에 어려움이 있기 때문이다.

제조된 압전세라믹스는 포아슨비는 0.32, 영률은 $8.2 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, 밀도는 $7.7 \times 10^3 \text{ Kg/m}^3$ 이며, 이 값을 식(3)에 대입하여 계산하면, 직경에 의한 경방향 공진주파수는 약 200kHz이다. 설계된 규격에 따라 제작된 압전소자를 택하여 임피던스 분석기를 이용하여 소자의 임피던스 특성을 측정하여 그림 4에 나타내었다. 압전세라믹스의 경방향 공진주파수는 204kHz이고 임피던스는 3.8Ω 으로 측정되었다.

그림 5는 주파수 변화에 따른 유전상수와 유전손실의 온도의존성을 나타낸다. 그림 5(a)와 같이 시편의 Curie 온도는 567° K로 비교적 높게 나타났으며, 일반적인 압전재료와 마찬가지로 측정주파수가 증가함에 따라 유전상수의 최대값은 감소하고 있음을 알 수 있다.[3, 8] 그리고 그림 5(b)는 유전손실 값을 나타내고 있으며, 측정주파수가 증가함에 따라

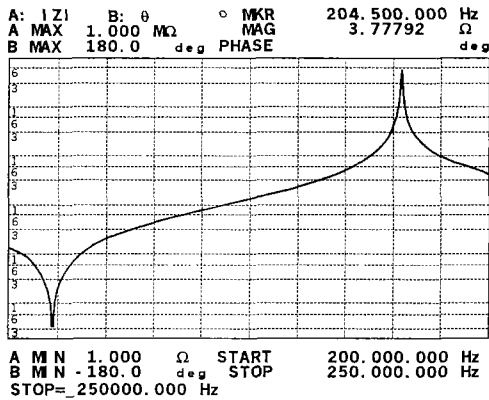
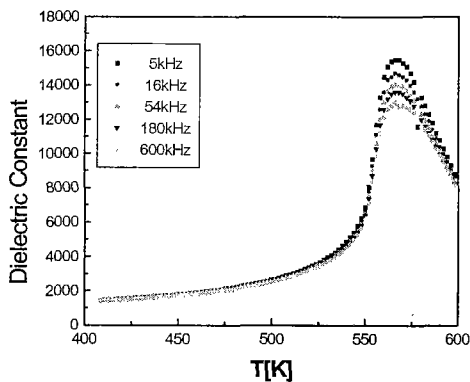


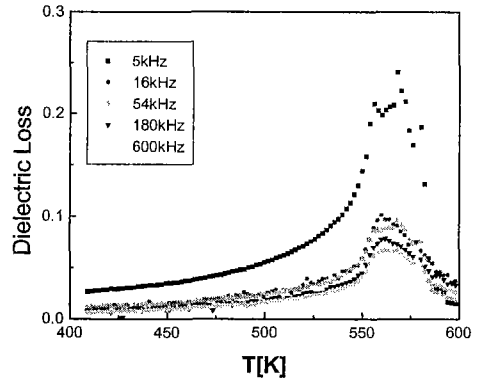
그림 4 제조된 압전세라믹스의 임피던스 특성
 Fig. 4 Impedance characteristic of the manufactured piezoelectric ceramics.

유전손실의 최대값은 감소하고 있음을 알 수 있다. 0.1PMN-0.45PT-0.45PZ 세라믹스에 MnO_2 와 NiO를 각각 0.5 wt% 첨가하여 제조된 압전세라믹스의 유전특성은 그림 5와 같이 주파수 의존성이 작은 유전완화현상을 보이며, 유전손실($\tan \delta$) 값이 작고 기계적 품질계수(Q_m)와 전기기계 결합계수(k_p)는 각각 1000, 0.6이었다.

압전특성이 우수한 압전세라믹스 분말을 이용하여 박막의 압전판을 제조하여 전기적인 기본물성을 측정 한 후, 원판형의 금속판에 압전소자를 부착시킨 금속-압전세라믹스의 음향특성을 수치해석하였다. 제조된 압전세라믹스의 물성값과 표 1의 금속진동판의 물성값을 이용하여 금속진동판의 두께를 다양



(a)



(b)

그림 5 주파수 변화에 따른 (a)유전상수와 (b)유전손실의 온도 의존성

Fig. 5 Temperature dependance of the dielectric constant and dielectric loss as a function of frequency.

하게 변화시키면서 변화에 따른 고유진동수의 변화를 해석하였다.

그림 6은 압전세라믹스는 반지름 5mm, 두께 1mm로 일정하게 두고 금속진동판의 재료를 변화시켰을 때의 고유진동수 변화를 나타내었다. 이때 지지방식은 마디지지방식이며 a_m 은 2.22이다. 음향변환소자의 금속판을 알루미늄, 스테인레스 그리고 황동으로 다양하게 변화시키면서 금속판의 두께에 따른 공진주파수를 계산하였다. 그 결과 각각의 금속판의 종류와는 관계없이 금속판의 두께가 증가할수록 공진주파수가 증가함을 알 수 있었다.

식 (4)에서 음향변환소자의 공진주파수는 금속판의 두께를 포함하고있는 금속진동판과 압전세라믹스의 두께의 비인 β 에 의해 결정된다. 두께비는 공진주파수와는 반비례의 관계에 있으므로 금속판의 두께가 증가할수록 공진주파수도 증가하게 된다. 세 종류의 금속판 중 알루미늄이 가장 얇은 두께에서 200kHz의 공진주파수를 나타냄을 알 수 있다.

그림 7은 금속판의 지름 변화에 따른 압전 음향소자의 감도지수의 변화를 나타낸 것이다. 감도지수는 식 (6)에서와 같이 금속진동판과 압전세라믹스의 반지름의 비인 η 값에 의해 정해진다. 따라서 압전

표 1 금속진동판의 재료정수

Table 1 Material properties of vibrating metal plates.

Material Properties	Brass	Stainless steel	Aluminum
density(kg/m ³)	8600	7910	2700
Young's modulus (N/m ² × 10 ¹⁰)	10.0	19.7	7.0
Poisson's ratio	0.35	0.30	0.34

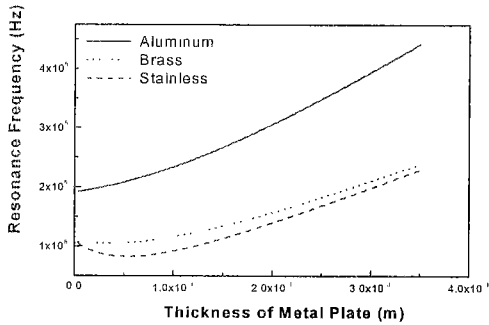


그림 6 금속진동판의 두께에 따른 고유진동수 분석

Fig. 6 Natural frequency vs. metal thickness for the different vibrating metal plates.

세라믹스의 반지름이 5mm일 때, 금속진동판의 종류에 따른 압전 음향소자의 감도지수는 그림 7과 같으며, 황동을 진동판으로 사용하였을 때 가장 좋은 감도지수를 나타내었다.

압전발음체 소자에서 최적의 금속진동판을 결정하기 위하여 표 1에서 언급한 종류를 모두 택하여 가장 넓은 대역폭을 가지는 마디지지의 방식으로 공진주파수 200kHz를 만족할 때의 각 진동판의 크기와 두께, 그리고 그 때의 감도지수와 대역폭을 수치해석하였다. 표 2에 따르면 대역폭은 알루미늄이 가장 우수하고 감도지수는 황동이 가장 우수하였다. 압전발음체 소자의 금속진동판은 가청주파수 영역

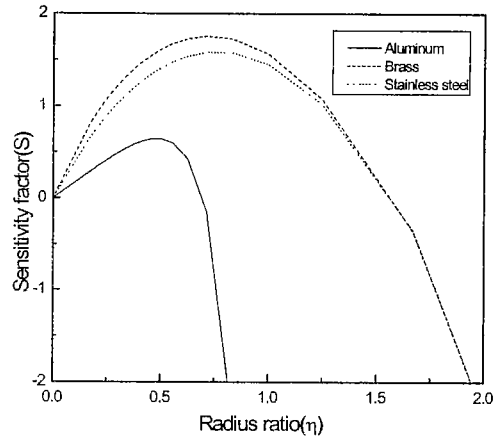


그림 7 압전발음체 소자의 반경비에 따른 감도지수

Fig. 7 Sensitivity factor of the piezoelectric sounder for the radius ratio.

을 포함하는 넓은 대역폭과 얇은 두께를 가지면서 제작성이 우수한 알루미늄이 적합한 것을 알 수 있다.

그림 8과 그림 9는 식 (8)를 이용하여 가청주파수 영역을 고려할 수 있는 10kHz 공진주파수를 가질 때 지지방식에 따른 지지환부의 반경과 높이를 나타낸 그림이다. 이 때 케이스의 두께는 1 mm이다. 지지방식에 따른 압전 발음체 케이스의 구조는 그림 3에 나타내었다[4, 5].

표 2 공진주파수 200kHz를 만족하는 금속진동판의 대역폭과 감도지수

Table 2 Bandwidth and sensitivity factor of vibrating metal plates with resonant frequency 200kHz.

	Thickness ratio (β)	Radius ratio (η)	Resonant frequency (f_{rs} : kHz)	Bandwidth (BW: kHz)	Sensitivity factor (S)
Aluminum	3.45	0.44	200.03	22.00	0.92
Brass	0.57	0.69	200.50	9.55	1.84
Stainless steel	0.76	0.72	200.05	10.40	1.64

그림 8은 주변지지 방식일 때 케이스의 반경에 따른 케이스 내부구멍의 반경과 지지환부의 높이를 나타낸 그림이다. 주변지지는 압전발음체 소자의 주변부를 케이스에 접촉시키는 방법으로서 이상적인 것은 아니지만, 마디지지에 비해 공진주파수가 낮아지고 음압의 각 주파수에 대한 크기의 변화가 작으므로 광대역이 된다.

그림 9는 마디지지 방식일 때 지지대 너비에 따른 케이스 내부구멍의 반경과 지지환부의 높이를 나타낸 그림이다. 마디지지는 압전발음체 소자를 1차 공진주파수로 자유로이 진동시킨 경우의 진동절부를 지지하는 방법으로 케이스에 지지용의 환상틀기를 만들어 진동지지부에 탄성접착제로 부착시킨 형태이다. 이 방식은 압전발음체 소자의 진동을 제어하는 것이 작으므로 공진주파수에서 발음 효율이 높아지며 음압도 커진다. 주변지지 방식은 케이스 반경을 크게하고 케이스 내부구멍의 반경을 작게 하면 지지환부 높이를 낮출 수 있으며, 마디지지 방식은 지지대 너비가 주변지지에 비해 좁으므로 케이스 반경은 작게 할 수 있지만 지지환부의 높이가 높아짐을 알 수 있다. 그러므로 일정한 압전 발음체 케이스의 공진주파수를 구현하고자 하면 적절한 케이스 내부구멍의 반경과 지지환부의 반경 및 지지대의 높이를 결정하여야 한다.

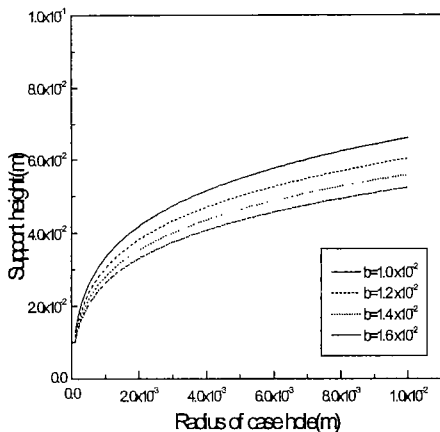


그림 8 주변지지일 때 지지환부의 반경에 따른 케이스 내부구멍의 반경과 지지대의 높이
 Fig. 8 Support height vs. radius of case hole for the various radius of supporting ring with circumferential support type.

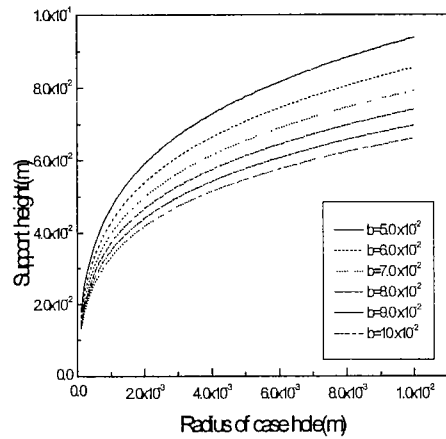


그림 9 마디지지일 때 지지환부의 반경에 따른 케이스 내부구멍의 반경과 지지대의 높이
 Fig. 9 Support height vs. radius of case hole for the various radius of supporting ring with nodal mount type.

4. 결 론

본 연구에서는 지향성이 우수하고, 대역폭이 넓은 압전 발음체를 설계, 제작하는 것을 목표로 하였다.

0.1Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃-0.45PbTiO₃-0.45PbZrO₃의 조성에 MnO₂와 NiO를 각각 0.5wt% 첨가하여 제조된 압전세라믹스의 유전 및 압전특성은 주파수 의존성이 작은 유전 완화현상을 보이며 유전손실 값이 작고 기계적 품질계수와 전기기계 결합계수는 각각 1000, 0.6이었다.

제조된 압전세라믹스와 금속진동판을 부착할 경우 고유진동수가 금속진동판에 따라 약간씩 차이가 났으며 스테인레스, 황동, 알루미늄의 순으로 약간씩 증가되었으며, 금속판의 두께가 증가할 수록 공진주파수가 증가함을 알 수 있었다. 압전발음체 소자가 공진주파수 200kHz를 만족할 때 감도지수는 황동이 가장 우수하게 나타났지만, 얇은 두께를 가지고 제작특성이 우수한 알루미늄이 가장 적합한 금속진동판으로 사료된다. 압전발음체 케이스 설계를 위해 공진주파수를 계산해 본 결과 지지환부의 높이가 증가함에 따라 공진주파수는 감소함을 확인할 수 있었다. 그리고, 케이스 내부구멍 반경의 증가에 따라 공진주파수가 증가함을 알 수가 있었다.

금속진동판과 압전세라믹스 적층판의 고유진동수에 대한 연구는 적층 음향소자의 설계시 유용하게 응용될 수 있으며, 케이스 설계에 관한 연구는 압전형 음향변환기의 설계시 참고자료로 널리 사용될 수 있다.

감사의 글

이 논문은 1996년도 경산대학교 기린연구비 지원으로 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] G. Caliano, N. Lamberti, A. Iula and M. Pappalardo, "A piezoelectric bimorph static pressure sensor," *Sensor and Actuators A*, vol. 46, pp. 176-178, 1995.
- [2] Masahide Yoneyama and Junichiroh Fujimoto, "The audio spotlight: An application of nonlinear interaction of sound waves to a new type of loudspeaker design," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 73(5), pp. 1532-1536, 1983.
- [3] Hiromu Ouchi, Katsoo Nagano and Shigeru Hayakawa, "Piezoelectric properties of $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3\text{-PbZrO}_3$ solid solution ceramics," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 48(12), pp. 630-635, 1965.
- [4] 뉴어케라스시리즈 편집위원회編, *壓電세라믹스의應用*, 學廠社, 1989.
- [5] 當出, 山口, "壓電形 受話器의 檢討", *通研實報*, 第14卷, 第4号, 1965.
- [6] 고영준, 남효덕, 장호경, "등가화방법을 이용한 금속-압전세라믹 적층평판의 진동해석," *한국전기전자재료학회지*, vol.13(1), pp.39-46, 2000.
- [7] M. Alster, "Improved calculation of resonant frequencies of Helmholtz resonators," *J. Sound Vib.*, vol. 24(1), pp. 63-85, 1972.
- [8] H. Ouchi and M. Nishida, "On the origin of piezoelectric active maximum in $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3\text{-PbZrO}_3$ ceramics," *Ferroelectrics*, vol. 169, pp. 309-315, 1995.