

## 압전형 음향변환기의 음향소자 및 케이스의 설계

### Design of the acoustic element and case for the piezoelectric acoustic transducer

김현철\*, 고영준\*, 남효덕\*\*, 장호경\*\*\*

(Hyun-chool kim\*, Young-Jun Go\*, Hyo-duk Nam\*\*, Ho-gyeong Chang\*\*\*)

#### 요 약

본 연구에서는 압전형 음향변환기를 제작하기 위한 금속과 세라믹스로 적층된 원형의 압전음향소자와 음향변환기 케이스를 설계하였다. 먼저 음향소자인 복합원형평판의 진동운동 방정식을 세우고 그 진동모드를 알아보았다. 음향소자의 세라믹스는 두께 1 mm, 지름 10 mm의 PZT(IV)를 사용하였고, 금속판의 지름과 두께를 다양하게 변화시키면서 음향소자의 공진주파수를 계산하고, 각각의 금속판에 따른 감도지수의 변화를 계산하였다. 설계하고자 하는 음향소자의 공진주파수를 200 kHz로 정하고, 위의 계산을 통하여 음향변환소자에 가장 적합한 금속진동판을 찾아보았다. 음향변환기의 케이스는 헤름홀즈 공진기를 기초로 케이스의 공진주파수를 계산하였다. 본 연구에서는 금속과 세라믹스 복합원형평판으로 이루어진 음향소자의 물리적 변화에 따른 공진주파수와 감도지수를 구하고 음향변환기 케이스의 공진주파수를 계산하여 압전형 음향변환기에 알맞은 금속진동판과 음향변환기 케이스를 알아보았다.

**Key Words(중요용어)** : acoustic element, acoustic transducer, sensitivity factor

#### 1. 서 론

압전세라믹스는 1947년 티탄산바륨 ( $BaTiO_3$ )의 압전성의 발견이래 연구가 진행되어, 2성분의 PZT계, 또는 3성분의 PCM등과 같은 새로운 압전재료가 많이 개발되고 있다. 압전세라믹스와 금속의 접합물은 이미 많은 곳에 사용되고 있으며, 특히 초음파 및 각종 진동체의 재료로 광범위 한 부분에 사용되고 있다. 금속-압전세라믹스 복합평판 형태의 구조물은 해군이나 해양공학장치의 전기음향 변환기나 압전진동효과에 의한 초음파 모터에 적용된다.

압전세라믹스의 각종 전기음향 변환소자로 사용은 초기에는 공중 및 수중에서의 초음파영역에서 응용을 시작을 하였으나 곧이어 가청 주파수 영역에도 연구가 진행되어 가청음을 발생시키는 응용으로 전기 잡음이 없고 저소비전력에서 작동하는 등의 이점으로 압전스피커의 재료로써도 사용되고 있다. 압전세라믹스는 그 자체로만은 음향소자로서의

이용이 힘들지만 압전세라믹스와 금속의 접착물은 음향소자로서 많은 곳에 사용되고 있다.

압전세라믹스를 이용한 압전음향소자에 관한 연구는 1960년대부터 활발히 이루어졌는데, 처음에는 양산성이나 경제성, 제조성 등에서 다소 어려운 점이 있었으나 최근에는 압전재료의 가공기술 및 제조공정이 크게 향상되어 압전음향소자가 더욱 주목을 받게되었다. 이러한 압전음향소자는 분극화된 원형상의 얇은 압전세라믹스재료에 금속의 진동판을 부착시킨 진동기 구조로써 전기음향변환효율이 우수해서 맑고 깨끗한 음의 발생이 가능하고 소형경량이며, 낮은 소비 전력으로도 구동이 가능하기 때문에 최근에는 sounder, 압전부자, 전화기의 송·수화기, 압전 스피커 등의 넓은 분야에 응용되고 있다.<sup>1)</sup>

본 연구에서는 압전세라믹스와 금속판의 접합으로 이루어진 원형의 음향소자를 고려하였다. 이 음향소자의 진동운동방정식을 세우고 진동원형평판의 공진모드를 알아보고 접합시킨 금속판의 종류를 Aluminum, Stainless Steel, Brass로 변화시켜가며 지름 및 두께의 변화에 따른 공진주파수의 변화를 알아보고 감도지수를 구하였다. 헤름홀즈 공진기를 기초로 음향변환기 케이스의 주파수 방정식을 세우

\* : 영남대학교 대학원 센터 및 시스템공학과

\*\* : 영남대학교 전기전자공학부

(경북 경산시 대동 214-1, Tel: 053-810-2433, Fax: 053-813-8230)

E-Mail : hdnam@yunncc.yeungnam.ac.kr)

\*\*\* : 경상대학교 자연과학부

고 케이스의 높이와 케이스 구멍의 반경에 따른 공진 주파수를 알아보았다.

## 2. 이론 및 수치해석

### 2.1 원판의 운동방정식

압전형 음향변화기에 사용되는 금속과 압전세라믹스의 접합의 음향소자는 그림 (1)과 같다.

금속과 세라믹이 접합된 원판의 운동방정식은 접합부의 운동 방정식 ( $0 \leq r \leq b$ )

$$(\nabla^4 - k^4)\xi = 0 \quad (1)$$

외곽금속판의 운동 방정식 ( $b \leq r \leq a$ )

$$(\nabla^4 - k^4)\xi = 0 \quad (2)$$

이다. 여기서  $\xi$  는 접합부의 변위이고,  $\xi$  는 외곽 금속부의 변위이다.

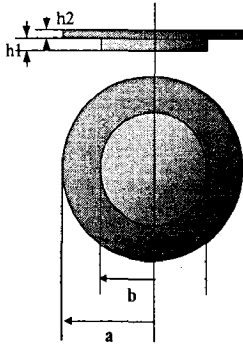


그림 1. 음향소자

Fig. 1. The acoustic element

운동 방정식에서

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r}$$

$$k^4 = \frac{\rho_1 h_1 + \rho_2 h_2}{D_1 + D_2} \omega^2 \quad k^4 = \frac{\rho_2 h_2}{D_2} \omega^2$$

$$D_1 = \frac{Y_1 h_1^3}{3(1-\sigma_1^2)} \alpha \beta (\beta^2 + \frac{3}{2} \beta \zeta + \frac{3}{4} \zeta^2)$$

$$D_2 = \frac{Y_2 h_2^3}{3(1-\sigma_2^2)} (1 + \frac{3}{2} \zeta + \frac{3}{4} \zeta^2)$$

$$D_2 = \frac{Y_2 h_2^3}{12(1-\sigma_2^2)} \quad \zeta = \frac{1-\alpha\beta^2}{1+\alpha\beta}$$

$$\alpha = \frac{Y_1}{Y_2}, \quad \beta = \frac{h_1}{h_2}, \quad \eta = \frac{b}{a}$$

이다. 여기서  $\omega$ 는 각 진동수이고,  $h_1$ 는 판의 두께,

$b$ 는 압전세라믹스의 반경,  $Y_i$ 는 영(Young)률이다. 또한  $a$ 는 금속판의 반경,  $\rho_i$ 는 밀도,  $\sigma_i$ 는 포아손비를 각각 나타낸다. (단  $i=1$ 은 압전 세라믹스 판을  $i=2$ 는 금속판이다.)

식 (1), (2)의 일반해는 식 (3), (4)로 주어진다.

$$\xi = A_1 J_0(k' r) + A_2 I_0(k' r) \quad (3)$$

$$\xi = A_3 J_0(kr) + A_4 Q_0(kr) + A_5 I_0(kr) + A_6 K_0(kr) \quad (4)$$

여기서,  $J_0, I_0, Q_0, K_0$ 는 모두 0차 Bessel함수이고

$A_i$  ( $i = 1 \sim 6$ )는 적분정수이다. 판을 지지하는 방법에 있어서 판의 중심과 지지점과의 거리를  $c$ 라 하면 금속과 세라믹스접합부의 변위,  $r = b \sim c$  일때의 변위, 그리고, 외곽금속부의 변위는 각각 식 (5), (6), (7)과 같다.

$$\xi = A_1 J_0(k' r) + A_2 I_0(k' r) \quad (5)$$

$$\xi = A_3 J_0(k' r) + A_4 Q_0(k' r) + A_5 I_0(k' r) + A_6 (k' \cdot r) \quad (6)$$

$$\xi = A_7 J_0(kr) + A_8 Q_0(kr) + A_9 I_0(kr) + A_{10} (kr) \quad (7)$$

여기서  $\xi$  는  $r = b \sim c$ 부분의 변위이고,  $k'$  는  $k$  ( $c < b$ )일때  $k$  ( $b < c$ )일때의 값이다.

### 2.2 공진주파수

압전 세라믹스의 진동은 여러 가지의 진동이 있으나, 본 연구에서는 경방향 진동의 진동모드를 가지는 압전 세라믹스를 고려한다.

원형 평판의 압전 세라믹스의 경방향 진동의 공진 주파수 공식은 다음과 같다.<sup>2)</sup>

$$f_r^{(n)} = \frac{n_n}{\pi D} \sqrt{\frac{Y_{11}^E}{\rho(1-\sigma^2)}} \quad [\text{Hz}] \quad (8)$$

여기서  $D$ 는 압전체의 지름이다.  $n_n$ 은 포아손비를 포함하는 Bessel함수의 근이다. 그리고, 경방향진동 압전세라믹스에 금속판이 접합되면 위의 공진주파수식은 tir (9)로 나타낸다.<sup>3),5)</sup>

$$f = \frac{a_m^2 h_1}{2\pi b^2 \beta} \sqrt{\frac{E_1}{3\rho_{21}(1-\sigma_2^2)} \left(1 - \frac{3}{2} \zeta + \frac{3}{4} \zeta^2\right)} \quad [\text{Hz}] \quad (9)$$

여기서,  $a_m$ 은  $m$ 차 공진에 대한 지지방식의 기준정수이다.

표 1. 금속판과 압전체의 물성

Table 1. Properties of metal plates and piezoceramic

	Density (Kg/m <sup>3</sup> )	Young's modulus (N/m <sup>2</sup> ×10 <sup>10</sup> )	Poisson
Piezoceramic	7,700	8.2	0.32
Aluminum	2,690	7.0	0.34
Stainless steel	7,900	19.0	0.30
Brass	8,390	10.1	0.35

표 2. 지지방식에 의한 주파수 정수

Table 2. The value of frequency with respect to support type

Frequency constant	Nodal mount	Circumferential support	Circumferential fix
a <sub>1</sub>	2.22	3.00	3.20
a <sub>2</sub>	5.45	6.20	6.31
a <sub>3</sub>	8.61	12.52	9.43

### 2.3 감도지수

감도지수는 입력전압에 대한 음향소자의 음압으로 나타난다. 압전세라믹스의 포아손비( $\sigma_1$ )는 0.32이고, 금속진동판의 포아손비도 이와 차이가 거의 없으므로 압전세라믹스와 금속진동판의 포아손비를 같다( $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$ )고 가정할 수 있다. 이때의 음압은 다음식으로 나타난다.

$$P_s = (1 - \sigma^2) \left( \beta^2 + \frac{3}{2} \beta \zeta + \frac{3}{4} \zeta^2 \right) \alpha \beta + 2\sigma(1 - \sigma) \left( 1 + \frac{3}{2} \zeta + \frac{3}{4} \zeta^2 \right) \quad (10)$$

그리고, 감도지수는 다음과 같이 주어진다.<sup>3),4)</sup>

$$S \cong \frac{\alpha(1 + \beta)^{1/2} \sqrt{\beta}}{1 + \alpha \beta} \times \left[ \frac{\eta[3 + \sigma - \eta^2(1 + \sigma)]}{(1 + \sigma)P_s + \eta[(1 - \sigma)P_s + 2(1 - \sigma^2)(1 - \frac{3}{2}\zeta + \frac{3}{4}\zeta^2)]} \right] \quad (11)$$

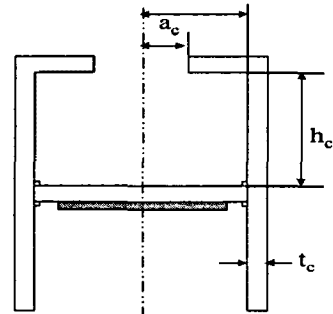
### 2.4 음향변환기 케이스

압전음향소자만으로는 음압이 대단히 적으므로 이를 보상하기 위하여 케이스에 음향공동을 만들어 특정주파수의 음압을 높여줄 필요가 있다.

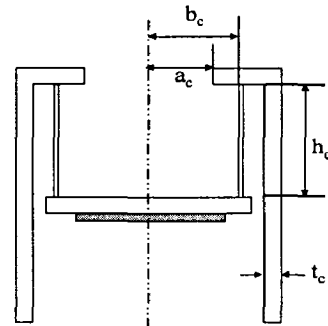
헤름홀츠공진기의 공진주파수와 음향변환기 케이스의 공진주파수는 식 (12)와 (13)으로 나타난다.<sup>3),4)</sup>

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \times \sqrt{\frac{A_0}{Vl}} \quad (12)$$

$$f_{case} = \frac{C_a}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi a^2}{(16a/2\pi + l)b^2 \pi h}} \quad (13)$$



(a) 주변고정



(b) 마디지지

그림 2. 음향변환기 케이스의 구조

Fig. 2. The structure of acoustic transducer cases

### 3. 결과 및 고찰

음향변환소자의 금속판을 알루미늄, 황동, 스테인리스로 다양하게 변화시키면서 금속판의 두께에 따른 공진주파수를 계산한 결과 금속판의 두께가 증가할수록 공진주파수가 증가함을 알 수 있으며, 금속판 중 알루미늄이 가장 얇은 두께에서 200kHz를 나타남을 확인할 수 있다.

감도지수는 지름의 증가에 따라 급속히 증가하다가 서서히 감소하는 모양이 나타났다.

변환기 케이스의 주파수는 높이가 높아짐에 따라서는 감소하나, 공동의 반지름이 증가함에 따라서는 같이 증가함을 알 수 있다.

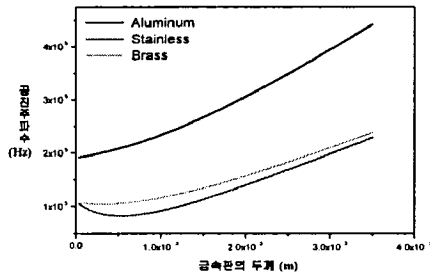


그림 3. 음향소자의 주파수변화  
Fig. 3. The frequency of acoustic element

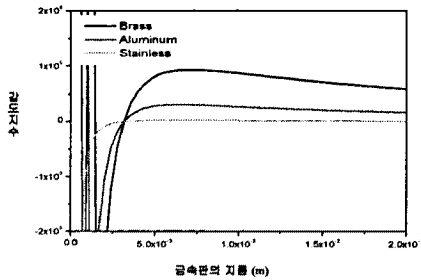


그림 4. 감도지수  
Fig. 4. The sensitivity factor

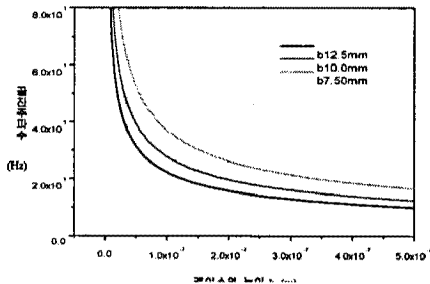


그림 5. 높이에 따른 케이스의 공진주파수  
Fig. 5. The resonant frequency for the various height of the case

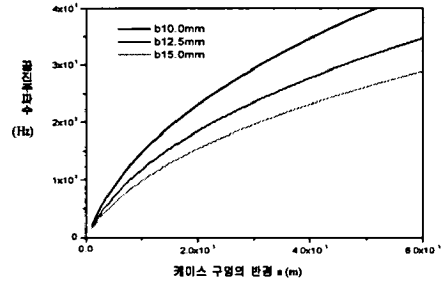


그림 6. 공동의 반지름에 따른 케이스의 공진주파수  
Fig. 5. The resonant frequency for the various radius of case hole

#### 4. 결 론

본 연구에서는 압전형 음향변환기의 음향소자용 금속판을 알루미늄, 황동, 스테인리스로 변화시켜 각각의 금속에 따른 공진주파수와 금속판 두께에 따른 공진주파수의 변화를 알아보았다.

압전형 음향소자가 공진주파수 200kHz를 만족할 때 알루미늄, 황동, 스테인리스의 세 가지 금속 중 감도지수는 황동이 가장 우수하게 나타났지만, 얇은 두께를 가지고 제작특성이 우수한 알루미늄이 가장 적합한 음향소자로 나타났다.

또한 본 연구에서는 음향변환기 케이스의 높이와 공동의 반지름에 따른 공진주파수를 해석했다. 음향변환기의 케이스설계를 위해 공진주파수를 계산해 본 결과 케이스의 높이가 증가함에 따라 공진주파수는 감소함을 알 수 있다. 그리고, 케이스 구멍 반경의 증가에 따라 공진주파수가 증가함을 알 수가 있다.

#### 참고문헌

- [1] Report of America Technology Coporation, "Introduction to Hypersonic Sound Technology", America Technology Coporation, 1997
- [2] 박창업, "전기전자용 압전세라믹스", 반도체판사, 1995
- [3] 당출, 山口, "壓電形 受話器의 檢討", 通研實報, 第 14卷, 第 4号, 1965
- [4] ニューケラスシリーズ編輯委員會 編, 壓電セラミックス의 應用, pp.150-154學敎社, 1989
- [5] 당출, 山口, "壓電形 受話器", 通研實報, 第 8卷, 第 7号, 1959