

금속-압전세라믹스로 구성된 음향소자의 설계 및 음향특성

고영준^{*}, 이상욱^{**}, 남효덕^{**}, 장호경^{***}

^{*}영남대학교 센서 및 시스템공학과, ^{**}영남대학교 전기전자공학부, ^{***}경산대학교 전자물리학과

Design and Acoustic Properties of Acoustic Device with Metal-Piezoceramic Circular Plate

Young-Jun Go^{*}, Sang-Wook Lee^{**}, Hyo-Duk Nam^{**}, Ho-Gyeong Chang^{***}

^{*}Department of Sensor and System Engineering, Yeungnam University

^{**}School of Electrical & Electronic Eng., Yeungnam University

^{***}Department of Electrophysics, Kyungsan University

E-mail : p9829701@dreamx.net

ABSTRACT

In this study, the acoustic transducer of a thin circular disc-type with PZT/Metal was designed. 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 vibration characteristics for the laminated circular plate was analyzed for the various thickness and diameter of the piezoceramic layer and metal layer. The acoustic characteristics which is radiated from the acoustic transducer within the finite space was simulated using the finite element method. It has been observed that the characteristics of the sound pressure and impedance response calculated for the various models of the size and geometry of acoustic transducer.

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 이루어 질 수 있다. 세라믹으로 제조된 압전소자는 그 대표적인 실례라고 할 수 있다. 강유전체 세라믹스에서 나타나는 압전효과는 전기기계 결합에너지의 상호변환을 가능하게 한다.¹⁾ 이러한 압전효과의 응용에는 부저(buzzer), 필터(filter), 공진기(resonator), 스피커(speaker) 등 저전력 소자와 초음파 모터(ultrasonic motor), 전동기(actuator), 변압기(transformer) 및 소나(sonar) 등 고전력 소자까지 폭 넓게 응용되고 있다.¹⁾

실용화가 가능한 우수한 압전세라믹스에 대한 요구는 페로브스카이트(perovskite) 구조에 대한 연구를 활발하게 하였다. 일본 Matsushita 전기연구소의 Ouchi는 1960년대 중반에 PZT의 성능을 증가하는 3성분계의 PCM 세라믹을 개발하였다. 이 PMN-PT-PZ 조성

대하여는 각종 원소를 치환한 조성변화와 압전특성에 대하여 연구가 많이 되고 있으며, 특별한 목적의 용도에 따라 조성을 바꾸거나 치환 및 첨가함으로써 각종 용도에 맞는 재료를 만들고 있다. 압전세라믹스에 관한 연구와 더불어 최근에는 압전체를 이용한 센서와 진동기에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 연구는 고유진율을 가지며 유전손실($\tan \delta$) 값이 작고, 기계적 품질계수(Q_m) 값이 크며, 전기기계결합의 에너지 변환효율(k_p)이 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 조성으로 MnO_2 와 NiO 를 각각 0.5wt% 첨가하였다. 제조된 시편의 공진주파수와 반공진주파수를 측정하고 주파수 변화에 따른 유전율과 유전손실의 온도 의존성을 조사한 후, 금속진동판과 부착시킨 음향소자의 특성을 조사하기 위하여 금속진동판의 물성변화에 따른 공진주파수의 변화를 수치해석을 통하여 조사하였다. 그리고, 유한요소 프로그램인 ANSYS를 이용하여 금속판과 압전세라믹스로 적층된 압전소자의 진동을 해석하고, 기계, 음향계가 결합된 음향트랜스듀서의 외부 음장에 대한 출력음압특성을 분석하였다.

II. 실험 및 수치해석

음향소자로 사용되는 압전세라믹스에는 고유진율, 높은 전기기계 결합계수, 적절한 전기회로의 임피던스 정합, 그리고 안정된 물질특성을 가진 PZT계열을 사용하였다. 조합한 원료를 지르코니아 불(zirconia ball)과 함께 플라스틱 용기에 넣고 24시간 습식혼합한 후에 건조된 분말을 알루미늄(alumina) 도가니를 사용하여 800°C 에서 2시간 하소하였다. 하소한 분말을 2차 볼밀링(ball milling)하고 10wt% 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 은전극(silver paste)을 스크린 인쇄한 후에 600°C 에서 열처리하여 전극을 부착하였다. 측정에 사용된 시편은 직경이 10mm, 두께는 1mm이다.

경방향의 공진-반공진 주파수를 측정하기 위하여 임피던스 분석기(Impedance Analyzer ; HP4194A)를

사용하였고, 측정값으로부터 전기기계 결합계수를 식(1)에서 구하고 공진저항값을 측정하여 기계적 품질계수를 식(2)에서 구하였다.

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

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

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, 멀티주파수 LCR메타를 사용하였다.

음향소자는 그림 1과 같이 양면 전극이 형성된 압전 세라믹을 얇은 금속진동판에 접합시킨 복합 진동자로 구성되며, 압전세라믹스는 초음파를 발생하는 능동소자로서, 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.¹⁾ 음향소자는 압전소자 및 진동판의 재질과 크기에 따라 공진주파수가 결정되고, 그에 따라서 대역폭과 감도지수가 결정된다.

본 연구에서는 금속진동판으로 널리 이용되는 황동, 알루미늄, 스테인레스 각각의 경우에 대하여 압전세라믹스와 부착된 음향소자의 공진주파수를 시뮬레이션을 통하여 해석하였다

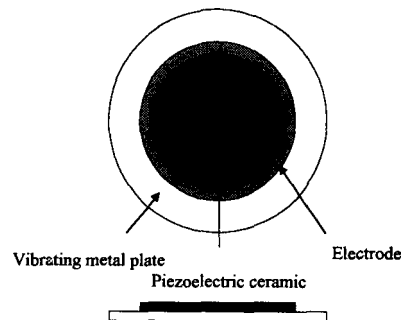


그림 1. 압전 음향소자

Fig. 1. Piezoelectric device

경방향진동 압전세라믹스에 금속판이 접합된 공진 주파수는 다음식에서 구할 수 있다.¹⁾

$$f = \frac{a_m^2 h_1}{2\pi b^2 \beta} \sqrt{\frac{E_1}{3\rho_{21}(1-\sigma_1^2)} \left(1 - \frac{3}{2}\zeta + \frac{3}{4}\zeta^2\right)} \quad [\text{Hz}] \quad (3)$$

여기서, a_m 은 m 차 공진에 대한 지지방식의 기준정수이다. ζ 는 $\frac{1-a\beta^2}{1+a\beta}$ 이고, a 는 금속판과 압전세라믹스의 영률비로써 E_1/E_2 이며, β 는 금속판과 압전세라믹스의 두께비로써 h_1/h_2 이다. 감도지수는 입력진압에 대한 음향소자의 음압으로 나타낸 식(4)와 같다.

$$S \cong \frac{\alpha(1+\beta)^{3/2}\sqrt{\beta}}{1+a\beta} \times \left(\frac{\eta[3+\sigma-\eta^2(1+\sigma)]}{(1+\sigma)^2 P_1 + \eta[(1-\sigma)^2 P_2 + 2(1-\sigma^2)] \left(1 - \frac{3}{2}\zeta + \frac{3}{4}\zeta^2\right)} \right) \quad (4)$$

유한요소 프로그램인 ANSYS를 이용하여 금속과 압전세라믹스로 적층된 압전소자의 진동모드를 2차원적으로 구하였다.²⁾ 그리고 음향트랜스듀서 외부로 방사되는 출력음압특성을 수치해석 하였으며, 어느 한 절점의 위치에 따른 출력음압특성과 대칭축 상의 한 절점에 대한 출력음압특성을 계산하였다.

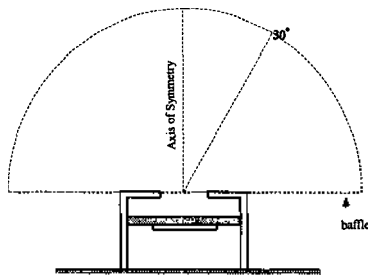


그림 2. 음향트랜스듀서의 모델
Fig. 2. Geometry of acoustic transducer unit

그림 2는 음향트랜스듀서 내부의 적층된 압전소자와 음향트랜스듀서 외부로 방사되는 음장을 구속하는 계산구를 설정한 실험모델이다. 경계면 밖의 배플(baffle)은 무한한 것으로 가정한다. 그림 3은 계산구 내의 자유음장을 격자 생성한 결과로 음향트랜스듀서의 절점은 음압의 경계조건이 적용된 지점이며, 요소(element)의 총수는 1020개이다. 음향트랜스듀서에서 방사되는 음압을 다양하게 측정하기 위하여 음향트랜스듀서의 외부로 방사되는 음장을 가상경계면으로 설정하였다.

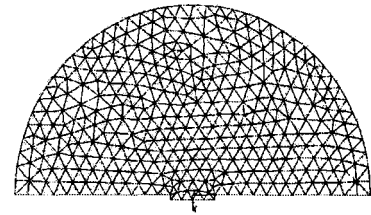


그림 3. 유한매질내의 요소 분할된 음향트랜스듀서의 외부 계산구
Fig. 3. Calculation mesh for acoustic transducer unit in finite baffle

III. 실험 및 수치해석 결과

음향소자에 사용되는 압전세라믹스의 크기를 직경 10mm, 두께 1mm로 택하여 압전세라믹스의 두께진동의 영향이 미치지 못하게 하였다. 제작된 압전세라믹스의 유전상수와 유전손실의 온도 의존성을 측정하기 위하여 온도조절기, 멀티주파수 LCR메타를 사용하였으며 측정주파수는 5, 16, 54, 180, 600kHz로 하였다. 시편의 측정 온도 상승률은 2°C/min로 하여 400~600° K 범위에서 측정한 결과를 그림 4에 나타내었다.

0.1PMN-0.45PT-0.45PZ 세라믹스에 MnO₂와 NiO를 각각 0.5wt% 첨가하여 제조된 압전세라믹스의 유전 및 압전특성은 그림 4와 같이 주파수 의존성이 약한 유전 완화현상을 보이며 유전손실(tan δ) 값이 작고 기계적 품질계수(Q_m)와 전기기계 결합계수(k_p)는 각각 1000, 0.6이었다.

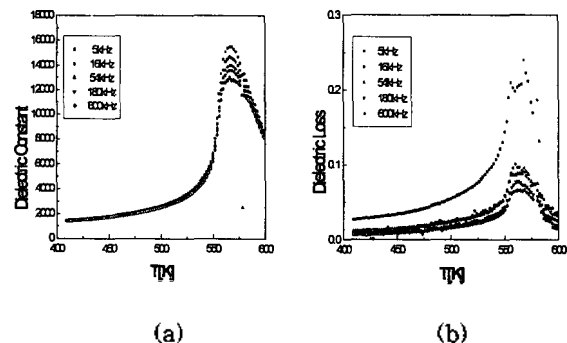


그림 4. 주파수 변화에 따른 (a)유전상수와 (b)유전손실의 온도의존성
Fig. 4. Temperature dependence of the dielectric constant(a) and dielectric loss(b) as a function of frequency

압전특성이 우수한 압전세라믹스 분말을 이용하여 박막의 압전판을 제조하여 전기적인 기본특성을 측정 한 후, 원판상의 금속판에 압전소자를 부착시킨 금속-압전 세라믹스의 음향특성을 수치해석하였다. 제조된 압전세 라믹스의 물성값과 표 1의 금속진동판의 물성값을 이용 하여 두께와 지름을 다양하게 변화시키면서 변화에 따 른 고유진동수의 변화를 해석하였다.

표 1. 금속진동판의 재료정수

Table 1. The Properties of the metal plates

Properties Materials	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 5는 압전세라믹스는 직경 10mm, 두께 1mm 로 일정하게 두고 금속진동판의 재료를 변화시켰을때의 고유진동수 변화를 나타내었다. 알루미늄이 얇은 두께 를 가진 제작특성이 우수한 금속임을 알 수 있다.

그림 6은 음향트랜스듀서의 내부에 있는 금속-압 전세라믹스로 적층된 압전소자를 주변지지하여 유 한요소프로그램인 ANSYS를 이용하여 모의 실험하여 1차 진동모드, 그리고 2차 진동모드를 수치 해석한 결 과이다. 각각의 공진주파수는 1차 진동모드에서 200 kHz, 2차 진동모드에서 330kHz로 나타났다.

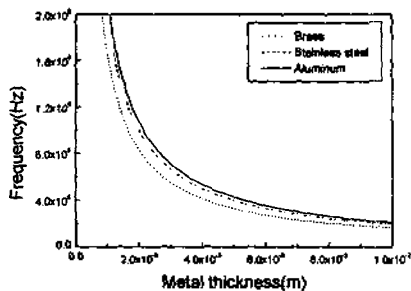


그림 5. 금속진동판의 두께에 따른 고유진동수 분석

Fig. 5. Natural frequency vs. metal thickness for the various metal

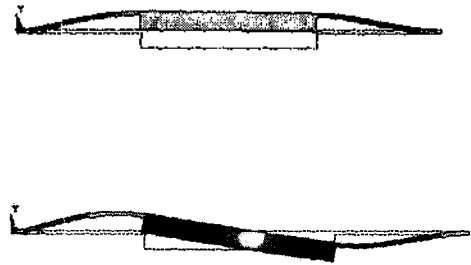


Fig. 6. Mode shapes of metal-piezoceramic plate by th finite element method

그림 6. 유한요소법에 의한 금속-PZT 원형평판의 진동모드

IV. 결 론

본 연구에서는 금속과 압전세라믹스로 적층된 음향 소자를 설계하고 음향특성을 해석하였다.

0.1Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃-0.45PbTiO₃-0.45PbZrO₃의 조 성에 MnO₂와 NiO를 각각 0.5wt% 첨가하여 제조된 압 전세라믹스의 유전 및 압전특성은 주파수 의존성이 약 한 유전 완화현상을 보이며, 유전손실 값이 작고 기계 적 품질계수와 전기기계 결합계수는 각각 1000, 0.6이었 다. 압전형 음향소자가 공진주파수 200kHz를 만족할 때 알루미늄, 황동, 스테인리스의 세 가지 금속 중 감도 지수는 황동이 가장 우수하게 나타났으며, 알루미늄은 얇은 두께를 가지고 제작특성이 우수함을 알 수 있다. 유한요소법으로 계산된 음향트랜스듀서의 외부 음장과 등압전 결과는 낮은 주파수에서는 고르고 일정한 무지 향적인 분포를 가졌으며, 높은 주파수에서는 높은 음압 을 가지고 더스트 캡 부분으로 집중되는 것을 알 수 있 었다.

참 고 문 헌

1. ニューケラスシリーズ編輯委員會 編, "壓電セラミクスの應用", 學販社, 1989
2. Arie J. M. Kaizer, "Calculation of the Sound Radiation of a Nonrigid Loudspeaker Diaphragm Using the FEM", J. Audio Eng. Soc., Vol 36(7) pp.539-551, 1988.