

PMN-PT-PZ계를 이용한 압전소자의 설계 및 음향특성

Design and Acoustic Properties of Piezoelectric Device with the PMN-PT-PZ System

고영준*, 서희돈**, 남효덕**, 장호경**
(Young-Jun Go, Hee-Don Seo, Hyo-Duk Nam, Ho-Gyeong Chang)

Abstract

In this study, the acoustic transducer of a thin circular disc-type with PZT/Metal was manufactured. The piezoelectric transducer with 200kHz resonance frequency was designed by considering the sharp directivity and the sound pressure. The dielectric and piezoelectric properties of 0.5 weight percent 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. Also, the acoustic characteristics of a thin circular disc-type with metal-piezoceramics have been investigated.

Key Words(중요용어) : metal-piezoceramic, acoustic transducer, thin circular disc-type

1. 서 론

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 결합 에너지의 상호변환을 가능하게 한다. 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.

1940년대 초부터는 전기-음향 변환기에 적합한 합성 압전재료의 개발에 집중적으로 연구가 진행되어 ADP 또는 KDP 등의 인공 압전재료가 등장하였다. 1947년에는 분극처리된 BaTiO₃ 세라믹스에서 압전효과가 발견되었으나, 실용화의 측면에서 우수한 압전특성을 가진 재료의 개발이 요구되었다.¹⁾ 따라서 실용화가 가능한 우수한 압전세라믹스에 대한 요구는 페로브스카이트(perovskite) 구조에 대한 연구를 활발하게 하였다. 1959년에 Smolenskii에 의해 복합 페로브스카이트 구조가 나온 이후, 일본 Matsushita 전기연구소의 Ouchi는 1960년대 중반에 PZT의 성능을 증가하는 3성분계의 PCM 세라믹을 개발하였다. 이 PMN-PT-PZ 조성에 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 전동기에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 연구는 고유전율을 가지며 유전손실(tan δ) 값이 작고, 기계적 품질계수(Q_m) 값이 크며, 전기기계

* : 영남대학교 대학원 센서 및 시스템공학과

** : 영남대학교 전기전자공학부

(경북 경산시 대동 214-1, Tel: 053-810-2493, Fax: 053-813-8230,

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

*** : 경상대학교 자연과학부

결합의 에너지 변환효율(k_p)이 높은 압전세라믹스를 제조하기 위하여 0.1Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃-0.45PbTiO₃-0.45PbZrO₃의 조성에 MnO₂와 NiO를 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. 음향소자의 지향특성을 향상시키기 위하여 초음파를 반송파로 이용하는 AM 변조방식의 구동회로를 제작하였다. 효율면이나 대역폭면에서 우수한 장점을 가지는 새로운 형태의 음향 트랜스듀서를 개발하기 위하여 압전소자를 이용하였다.

2. 실험 및 수치해석

음향소자로 사용되는 압전세라믹스에는 고유진동, 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(Alumina) 도가니를 사용하여 800°C에서 2시간 하소하였다. 하소한 분말을 2차 볼밀링(ball milling)하고 10wt% PVA(PolyVinyl Alcohol #2000)를 사용하여 과립으로 제조한 다음 1 ton/cm² 압력을 가하여 원판형으로 성형하였다. 소결시에 탈지(binder burnout)를 위하여 500°C에서 3시간 유지하고, 1200°C까지 승온한 후에 2시간 정도 유지하였다. 소결된 시편을 연마, 세척하고 양면에 은전극(silver paste)을 스크린 인쇄한 후에 600°C에서 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.

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

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

여기서 Δf 는 $f_a - f_r$, 즉 반공진주파수와 공진주파수

의 차, R_1 은 공진주파수에서의 저항값이고, C_A 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 복합진동자로 구성되며, 압전세라믹스는 초음파를 발생하는 능동소자로서,²⁾ 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.²⁾ 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 때문인데, 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.

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

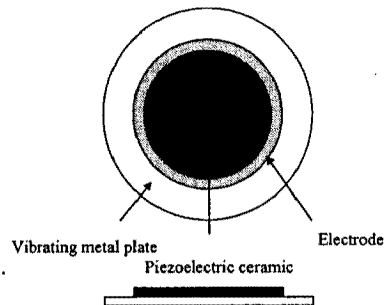


그림 1. 압전 음향소자

Fig. 1. Piezoelectric device

내부에서 고유의 초음파 신호를 발생시키고, 입력신호를 회로내의 발생신호에 실어 음향소자를 통

하여 출력하면 초음파 신호간의 간섭작용에 의해서 원래의 입력신호를 발생시키기 위한 구동회로를 설계하였다. 구동회로의 발생주파수는 음향소자의 공진주파수에 의해서 결정되고, 회로에서 출력되는 초음파 신호는 음향소자 공진주파수의 초음파 신호와 입력주파수를 더하고 뺀 초음파 신호를 발생시키는 구조로 되어있다. AM 변조방식을 이용한 음향시스템의 개략도를 그림 2에 나타내었다.

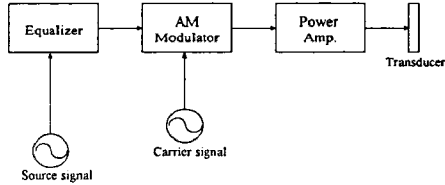


그림 2. AM 변조방식을 이용한 음향시스템의 개략도

Fig. 2. The block diagram of the acoustic system using the AM system

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 넓은 대역폭을 구현하고 지향성이 우수한 음향소자를 개발하기 위하여 전기기계 결합 계수가 높은 압전세라믹스를 제조하고, 대역폭과 공진주파수를 고려한 금속진동판을 설계하며 AM 변조방식의 구동회로를 설계 제작하였다.

음향소자에 사용되는 압전세라믹스의 크기를 직경 10mm, 두께 1mm로 택하여 압전세라믹스의 두께진동의 영향이 미치지 못하게 하였다. 임피던스 분석기를 사용하여 제조된 압전세라믹스의 경방향 공진-반공진 주파수를 측정하였다. 경방향진동의 공진주파수(f_m)는 식(3)으로 주어진다.

$$f_m = \frac{n_n}{\pi D} \sqrt{\frac{E_1}{\rho_1(1-\sigma_1)^2}} \quad (3)$$

여기서 σ_1 , E_1 , ρ_1 , D 는 각각 압전세라믹스의 포아손비, 영률, 밀도 및 직경을 의미한다. 그리고 n_n 은 포아손비를 포함하는 배선험수의 근이다. 제조된 압전세라믹스는 포아손비는 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 3에 나타내었

다. 압전세라믹스의 경방향 공진주파수는 204kHz이고 임피던스는 3.8Ω 으로 측정되었다.

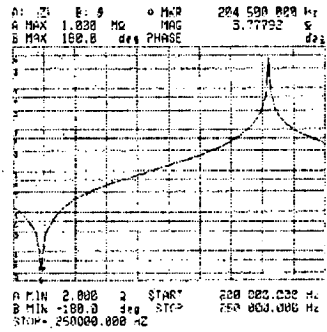


그림 3. 압전소자의 임피던스 특성

Fig. 3. Impedance characteristic of the piezoelectric ceramics

본 연구에서는 압전특성이 우수한 압전세라믹스 분말을 이용하여 박막의 압전판을 제조하여 전기적인 기본물성을 측정한 후, 원판상의 금속판에 압전소자를 부착시킨 금속-압전세라믹스의 음향특성을 수치해석하였다. 제조된 압전세라믹스의 물성값과 표 1의 금속진동판의 물성값을 이용하여 두께와 지름을 다양하게 변화시키면서 변화에 따른 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

적층된 원형평판의 고유진동수는 식(4)와 같다 [8]. 여기서 ζ 는 $\frac{1-a\beta^2}{1+a\beta}$ 이고, α 는 금속판과 압전세라믹스의 영률(Young's modulus)비로써 E_1/E_2 이며, β 는 금속판과 압전세라믹스의 두께비로써 h_1/h_2 이다.

$$f = \frac{n_z^2}{\pi D} \sqrt{\frac{E_z}{\rho_z(1-\sigma_z^2)}} \left(1 - \frac{3}{2}\zeta + \frac{3}{4}\zeta^2\right) \quad (4)$$

그림 4와 그림 5는 각각 제조된 압전세라믹스에 금속진동판으로 널리 이용되는 황동, 스테인레스, 알루미늄판을 부착했을 때, 압전세라믹스의 지름, 두께 그리고 금속판의 두께에 따른 고유진동수의 변화를 나타낸다.

그림 4는 압전세라믹스는 직경 10mm, 두께 1mm로 일정하게 두고 금속진동판의 재료를 변화시켰을 때의 고유진동수 변화를 나타내었다. 고유진동수가 금속진동판에 따라 약간씩 차이가 나는 것은 표 1의 금속재료정수를 식(4)에 대입하여 계산하여 보면 황동, 스테인레스, 알루미늄의 순으로 약간씩 증가되기 때문이다.

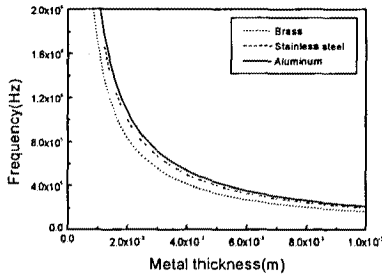


그림 4. 금속진동판의 두께에 따른 고유진동수 분석

Fig. 4. Natural frequency vs. metal thickness for the various metal

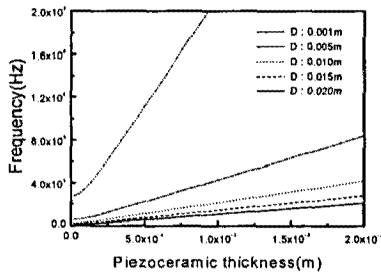


그림 5. 압전세라믹스의 직경에 따른 고유진동수 분석

Fig. 5. Natural frequency vs. piezoceramic thickness for the various diameter of piezoceramics

그림 5는 금속진동판을 알루미늄으로 두고 압전세라믹스의 직경을 변화시켰을 때의 공진주파수 변화를 나타낸 결과이다. 압전세라믹스의 직경(D)이 클수록 기본공진 주파수는 낮아지며, 그림 4와 그림 5에서 압전세라믹스 두께가 증가하고 금속판의 두께가 감소함에 따라 식(4)와 같이 기본 공진주파수가 증가하였다.

4. 결론

본 연구에서는 금속과 압전세라믹스로 적층된 음향소자의 특성을 해석하였다.

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 주파수의존성이 약한 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 황동, 스테인레스, 알루미늄의 순으로 약간씩 증가되었다. 압전세라믹스의 직경이 클수록 기본 공진주파수는 낮아짐을 알 수 있으며, 압전세라믹스 두께가 증가하고 금속판의 두께가 감소함에 따라 기본 공진주파수가 증가하였다.

본 연구에서 제조된 압전세라믹스는 전기기계 결합계수가 높으므로 전동기 재료로 적합하며, Curie 온도가 높으므로 전기기계 트랜스듀서로 사용할 때 훨씬 높은 온도범위까지 사용이 가능하다³⁾. 금속진동판과 압전세라믹스 적층판의 고유진동수에 대한 연구는 적층 음향소자의 설계시 유용하게 응용될 수 있으며,³⁾ AM 변조방식의 음향시스템은 높은 지향성을 얻을 수 있으므로 음의 집속화에 사용될 수 있다.

참고 문헌

1. S. Roberts, "Dielectric and Piezoelectric Properties of Barium Titanate," Phys. Rev., Vol.71(12), pp.890-895 (1945)
2. Satoru Fujishima, "Piezoelectric Materials and Applications for Audio Frequency," EA 84-1 (1984)
3. Jin O. Kim, "Vibroacoustic characteristics of ultrasonic cleaners," Applied Acoustics, Vol.58, pp. 211-228 (1999)