한국전기전자재료학회
'00 영호남 학술대회논문집

# 유한요소법과 경계요소법을 이용한 음향트랜스듀서의 음향특성 해석

# An Analysis of Acoustic Characteristics from the Acoustic Trancdurcer with Finite Element Method and Boundary Element Method

노현택*, 고영준*, 남효덕**, 서희돈,** 장호경***
Hyun-Taek Noh, Young-Jun Go, Hyo-duk Nam, Hee-Don Seo, Ho-gyeong Chang

요 약

본 연구에서는 압전세라믹스와 금속판으로 구성된 음향트랜스듀서를 모델로 설정하고, 원형평판으로부터 방사되는 내부음장과 트랜스듀서의 외부로 방사되는 음향특성을 수치 해석하였다. 음향트랜스듀서의 내부 유니트를 요소 분할하여 경계조건을 적용시키고, 유한요소법을 이용하여 내부의 음장 분포와 음압 변화량을 가시화하였다. 그리고 트랜스듀서 외부로 방사되는 음압은 가상경계면 외부를 요소 분할한 후 다양한 주파수에서 음압 기울기와 등압선을 수치해석하였다.

**Key Words(중요용어)** : acoustic transducer , finite element method , boundary element method

## 1. 서 론

최근에 음향측정 기술의 발달과 고속 컴퓨터의 등장으로 음향해석 및 물성의 정량분석을 통해 우수한 특성과 높은 효율을 갖는 소재의 선택으로 인해 음향트랜스듀서의 음질이 향상되고 있다. 소재로는 압전재료가 각광을 많이 받고 있다. 압전재료를 이용한 음향트랜스듀서는 초소형화, 초고주파화 및 고신뢰성이 가능하고 효율이 높아 지게 된다. 여기선 압전재료를 이용한 음향트랜스듀서의 음향특성에 대한 연구를 하고자 한다. 음장 및 구조물의 해석방법으로는 유한요소법을 많이 활용하고 있다. 유한요소법은 기하학적으로 복잡한 형상을 해석하는데 적절한 도구로서 강체 또는 탄성구조로 둘러싸여 있는 공간의 음압분포를 해석하는데 유용하게 사용되고 있다.[1),2)]

R. W. Julian[3)]는 비감쇠조화진동하는 진동관 앞의 임의의 가상경계면 내부를 요소분할(mesh)하여 요소의 수에 대한 음향임피던스와 해의 오차를 구하였고, P. O. Mattei[4)]는 배플에 고정된 얇은 관의 진동에 따른 임의의 가상경계면 내의 음의 전파를 수치해석하였다. 그리고 Arie J. M. Kaizer[5)] 등은 진동판에서 방사된 음장을 유한요소법을 이용하여 해석함으로서 유한요소법의 응용범위를 넓히고 정확성을 입증하였다. 본 연구에서는 유한요소 프로그램인 ANSYS[6)]를 이용하여 금속판과 PZT로 적층된 압전소자의 진동을 해석하여 기계, 음향계가 결합된 음향트랜스듀서의 내부 음장을 출력음압특성을 분석하였고, 가상경계면을 설정하여 요소분할한 후 압력기울기(pressure gradient)를 2차원적으로 가시화하였다.

## 2. 이론 및 수치해석 방법

음장내 임의의 위치에서의 음압 $P$와 속도 $V$의 변화가 시간에 대한 조화함수라고 가정하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.[7)]

$$P(x,y,z,t) = p(x,y,z)e^{i\omega t}$$
$$V(x,y,z,t) = v(x,y,z)e^{i\omega t} \quad (1)$$

* : 영남대학교 대학원 센서 및 시스템공학과
** : 영남대학교 전기전자공학부
(경북 경산시 대동 214-1, Tel: 053-810-2493, Fax :053-813-8230
E-Mail : hdnam@ynucc.yu.ac.kr)
*** : 경산대학교 자연과학부

여기서 $\omega$는 각진동수이고, $i=\sqrt{-1}$이다.

음향문제는 음압(Sound pressure) $P$와 음파의 입자속도(Sound particle velocity) $V$를 변수로 하는 다음과 같은 파동방정식에 의해 지배된다.

$$\nabla^2 P(x,y,z,t)=\frac{1}{C}\frac{d^2}{dt^2}P(x,y,z,t) \qquad (2)$$

여기서, $\nabla^2$는 *Laplace* 연산자이다. 음압과 속도에 관한 식을 파동방정식(2)에 대입하면 아래와 같은 식(3)과 같아진다.

$$\nabla^2 P(x,y,z,t)+k^2 P(x,y,z,t)=0 \qquad (3)$$

여기서, $k=\frac{\omega}{c}$로 표현하며, $\omega$는 각속도, $c$는 음속, $k$는 파수(Wave number)이다. 헬름홀쯔식은 체적 V와 경계 S간의 관계를 연결하여 주는 그린정리(Green's theorem)에 의해 나타낼 수 있고, 아래 식(4)와 같다.

$$\int_V [\phi\nabla^2\psi-\psi\nabla^2\phi]dV=\int_S [\phi\frac{\partial\psi}{\partial n}-\psi\frac{\partial\phi}{\partial n}]dS \quad (4)$$

여기서, $\psi(P,Q)$는 $\frac{e^{-ikR(P,Q)}}{R(P,Q)}$ 이다. 그리고, 내부 음향문제를 다룰 때는 임의의 형상을 가진 3차원 구조물의 내부엔 이상기체가 채워져 있는 것으로 가정한다. 본 연구는 유한요소법을 이용하여 금속과 PZT로 적층된 압전소자의 공진주파수를 구하고, 유한 음장 매질 내의 음향트랜스듀서에서 방사된 음향특성을 모의실험하여 해석하였다. 밀폐된 경계면 내부를 요소분할 한 후 압력 기울기와 등압선을 수치해석 하였으며, 어느 한 절점의 위치에 따른 출력음압특성과 대칭축 상의 한 절점에 대한 출력음압특성을 계산하였다. 무한한 배플에 장치된 음향트랜스듀서 유니트에서 방사된 음장을 해석하기 위하여 유한요소법을 이용하여 출력음압특성 및 지향특성을 계산하였다

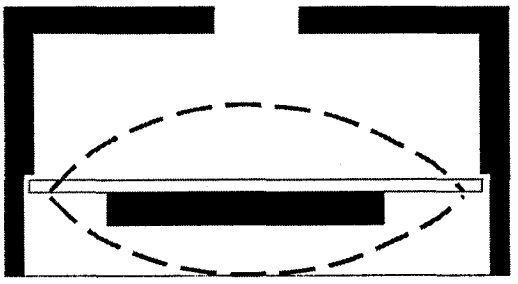


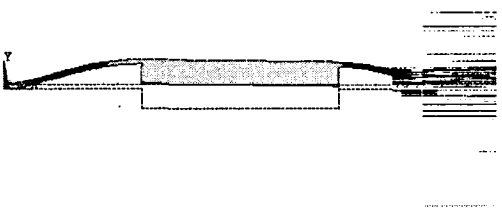
**Fig. 1.** Geometry of acoustic transducer unit

**그림 1.** 음향트랜스듀서의 개략도

그림 1은 음향트랜스듀서 내부의 금속과 PZT로 적층된 압전소자와 음향트랜스듀서 내부를 설정한 실험모델이다.경계면 밖의 배플(baffle)은 제거한것으로 가정하였다.그리고 밀폐함의 경계조건은 음압이 완전히 반사되므로 흡수계수를 0으로 두었다. 유한요소 프래그램인 ANSYS의 흡수계수 범위는 0에서 1까지이이다.

### 3. 수치해석 결과

본 연구에서 해석모델은 그림 1에서 보는 것과 같이 양의 z-방향으로 향하는 수직면이 주변지지된 원형평판이다. 평판의 해석과 내부 음장의 해석은 유한요소법으로 해석하였다. 요소의 형태는 8노드 사각형 요소를 사용하였고, 공기의 밀도는 1.2Kg/㎥, 공기속도는 343m/s 그리고 PZT 두께는 0.95mm이며 지름은 10mm, 금속의 두께는 0.23mm 이고 지름은 23mm이며 프와송의비는 각각 0.34 , 0.32 이다. 음향트랜스듀서의 내부에 있는 금속-PZT로 적층된 압전소자를 주변지지하여 유한요소프로그램인 ANSYS를 이용하여 모의실험하여 1차 진동모드와 방사패턴, 그리고 2차 진동모드와 방사패턴을 아래의 그림 2, 그림 3, 그림 4, 그림 5와 같이 해석하였다. 각각의 공진주파수는 1차 진동모드에서 1200Hz , 2차 진동모드에서 7800Hz로 나타났다.

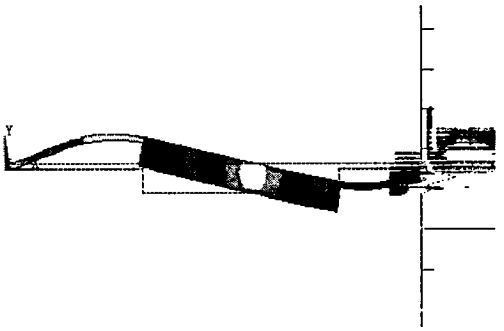


1200Hz

**Fig. 2.** Mode shapes of metal-piezoceramic plate by th finite element method

**그림 2.** 유한요소법에 의한 금속-PZT 원형평판의 진동 모드

그림 2는 금속-PZT로 적층된 압전소자가 공진주파수가 1200Hz일 때 발생하는 진동모드를 수치해석한 결과이다. 진동모드가 모두 양의 z-방향으로 향하고 있는 것을 가시적으로 볼 수 있다. 그러므로 음압의 결과들이 양의 z-방향으로 향하는 것을 알수 있다.

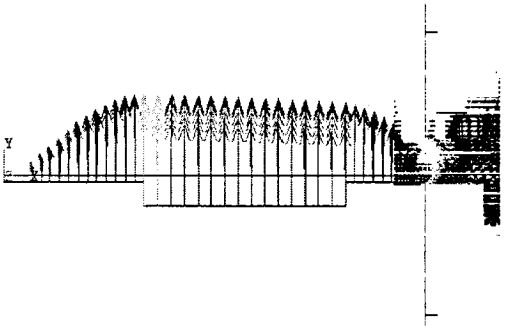


7900Hz

**Fig. 3.** Mode shapes of metal-piezoceramic plate by th finite element method

**그림 3.** 유한요소법에 의한 금속-PZT 원형평판의 진동 모드

그림 3은 압전소자의 공진주파수가 7800Hz일 때 발생하는 진동모드이며 2차 진동모드이다. 여기선 진동모드가 양의 z-방향과 음의 z-방향으로 나누어지는 것을 알수 있다. 압력 값은 1차 진동모드 일 때 보다 증가하지만, 양의 방향으로 나오는 음압과 음의 방향으로 발행하는 음압 값이 상충되면서 발생하는 음압치가 1차 진동모드 일 때 보다 많이 찌그러 지는 것을 알수 있다. 음압치는 1차 진동모드 일 때 그 음압치를 구할수 있다.

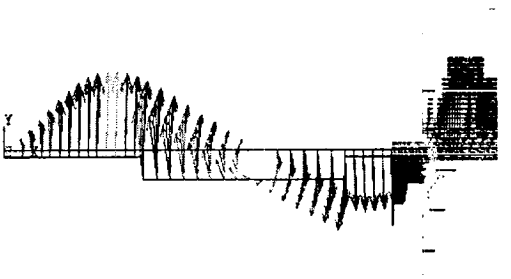


1200Hz

**Fig. 4.** Pressure gradient of Metal-piezoceramic plate by th finite element method

**그림 4.** 유한요소법에 의한 금속-PZT 원형평판의 압력 기울기

그림 4는 1차 진동모드의 음압 패턴을 구한 것이다. 공진주파수는 1200Hz이고 방사되는 패턴이 양의 z-방향으로 향하는 것을 볼 수 있다.



7800Hz

**Fig. 5.** Pressure gradient of metal-piezoceramic plate by th finite element method

**그림 5.** 유한요소법에 의한 금속-PZT 원형평판의 압력 기울기

그림 5는 2차 진동모드일때의 음압패턴이며, 공진주파수는 7800Hz이다. 위 결과들에서 구한 공진주파수를 그래프로 나타내면 그림 6과 같아진다.

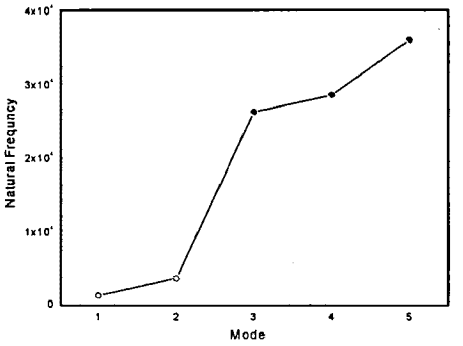



**Fig. 6.** Calculated responses frequency for mode

**그림 6.** 모드에 대한 공진주파수 계산 그래프

그림 6은 금속-PZT로 적층된 압전소자의 진동모드에서 발생하는 공진주파수를 각각의 모드에 따라 측정된 공진주파수를 해석하였다. 진동모드가 증가할 때 마다 공진주파수가 증가하는 것을 볼 수 있다. 음압의 크기는 압전소자의 공진주파수와 두께에 중요한 영향을 받는 것을 알고 있다. 공진주파수에 대하여 알아 보면 공진주파수가 증가할수록 음압의 크기도 같이 증가하는 것을 볼 수 있는데 일반적으로 음향해석에서는 1차 진동모드에서 발생하는 음압치를 주로 많이 사용하고 있다.

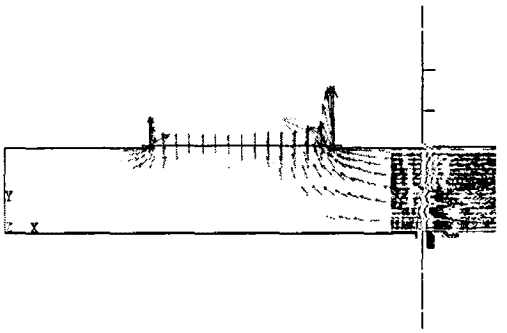


**Fig. 7.** The calculated results at 1200Hz in an transducer

**그림 7.** 1200Hz에서 트랜스듀서 내부를 해석한 결과

## 4. 결 론

본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 음향트랜스듀서 내부의 금속-PZT로 적층된 압전소자를 유한요소법을 이용하여 진동모드와 방사패턴을 도식화하였으며, 그때 발생하는 공진주파수를 측정하였다. 구조물과 연성된 트랜스듀서의 음장을 예측하기 위해 임의의 공간에서의 음압을 지배하는 헬름홀쯔 방정식을 그린정리를 이용하여 적분방정식으로 변환한후 유한요소법을 이용하여 음장패턴을 수치해석하였다.

압전소자의 공진주파수가 모드가 증가할수록 확연하게 증가하는 것을 알수 있다. 공진주파수가 증가할수록 음압도 같이 증가하는 것을 볼 수 있다. 유한요소법으로 계산된 음향트랜스듀서의 내부 음압패턴 결과는 낮은 주파수에서는 고르고 일정한 무지향적인 분포를 가졌으며 높은 주파수에서는 높은 음압을 가지고 에지 부분으로 집중되는 것을 알 수 있었다. 이 결과들은 다른 방법으로 예측하기는 어렵지만 유한요소법은 요소 분할에 의해 각각의 요소에서의 음압변화량과 음향트랜스듀서의 내부의 음장을 음압패턴으로 가시화될 수 있는 장점을 가지고 있기 때문에 가능하였다.

음향트랜스듀서의 설계나 제작시 이 방법이 유용하게 응용될 수 있으며, 스피커 시스템의 개발은 물론 소음 억제를 다루는 건축 및 여러 분야에서도 많이 사용되어 지고 있다.[8),9)]

## 참 고 문 헌


1. John. Borwick, "Loudspeaker and Hand Book", (Butterworths, London, 1988)
2. George. Chertock , "Sound Radiation From Vibrating Surfaces", J. Acoustics. Soc. Am., Vol 36(7) pp.1305-1313 (1964)
3. Julian R. Wright, "Radiation impedance calculation by inite elemnt analysis", Acoutic Bulluetin, Vol 19(11), (1994)
4. P. O. Mattei, "Sound radiation b baffled and constrained plates", J. Sound Vib., Vol 154 , 125 (1994)
5. Arie J. M. Kaizer and Ad Leeuwestein, "Calculation of the Sound Radiation of a Nonrigid Loudspeaker Diaphragm Uing the Finite-Elemet Method" , J. Audio Eng.Soc., Vol 36(7) pp.539-551 (1988)
6. Swanson Ansys System, Ansys user's Manual, 4, 7-1 (1993)
7. Jung Keun,An, "FEM/BEM Coupling Analysis The Structure-Acoustic System", Pusan National National University (1999)
8. N. S. Badell, R. S. langley, J. M. Dunsdon and G.S. Aglieth ,"An h-p finite element vibration analysis of open conical sandwich panels and conical sandwich frusta", J. Sound. Vib, Vol 226 (2) , pp345-377 (1999)
9. R. J. Astley and G. J. Macaulay, "Three-dimensional wave-envelope elements of variable order for acoustic radiation and scattering", J. Acoust. Soc. Am , Vol 103(1) pp.49-63 (1998)