

## 압전세라믹스를 이용한 음향트랜스듀서의 음향방사특성 해석

### An Analysis of the Acoustic Radiation Characteristics from the Acoustic Transducer

노현택\*, 고영준\*, 박재성\*\*, 남효덕\*\*, 장호경\*\*\*

Hyun-Taek Noh\*, Young-Jun Go\*, Jae-Sung Park\*\*, Hyo-duk Nam\*\*, Ho-gyeong Chang\*\*\*

#### Abstract

The acoustic characteristics radiated from the acoustic transducer with metal-piezoceramic laminated circular plate were simulated. The Vibrational modes of metal-piezoceramic laminated circular plates were calculated by using the finite element method. After meshing the inside closed boundary of the acoustic transducer, the pressure gradients and the isobaric lines were calculated for the various frequencies. It has been observed that the characteristics of the sound pressure calculated for the various frequencies. Also, the directivity patterns and the sound pressure radiated from the acoustic transducer were calculated by 2-dimensional analysis.

**Key Word** : metal-piezoceramic(금속-세라믹), acoustic transducer(음향트랜스듀서), sound pressure (음압), directivity pattern (방사패턴), isobaric lines(등압선),

#### 1. 서론

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 높아지게 된다. 여기서 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.<sup>1),2)</sup>

유한요소법에 의한 이론적 연구는 R. W. Julian은 비감쇠조화진동하는 진동판 앞의 임의의 가상경

계면 내부를 요소분할(mesh)하여 요소의 수에 대한 음향임피던스와 해의 오차를 구하였고, P. O. Mattei<sup>3)</sup>는 베플에 고정된 얇은 판의 진동에 따른 임의의 가상경계면 내의 음의 전파를 수치 해석하였다. 그리고 Arie J. M. Kaizer<sup>4)</sup> 등은 진동판에서 방사된 음장을 유한요소법을 이용하여 해석함으로써 유한요소법의 응용범위를 넓히고 정확성을 입증하였다.

본 연구에서는 음장 및 구조물의 해석방법으로 많이 활용되고, 기하학적 형상을 정확하게 해석할 수 있는 유한요소 프로그램인 ANSYS<sup>5)</sup>를 이용하여 금속판과 세라믹으로 적층된 압전소자의 진동을 해석하고, 기계, 음향계가 결합된 음향트랜스듀서의 외부 음장에 대한 출력음압특성을 분석하였다. 연구대상으로 사용한 유한매질 내의 음향트랜스듀서에서 방사된 음장은 트랜스듀서의 직경에 따라 변화가 다양하게 나타난다. 음향트랜스듀서의 구경을 고정시키고 직경에 대한 변화에서 구한 출력음압특성을 그래프로 나타내었다.

#### 2. 이 론

어떠한 구조물 진동해석 문제에 있어서도 가장

\* : 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

먼저 해야 할 일은 운동방정식을 세우는 것이다. 운동방정식을 세우는 데는 여러 방법이 있지만 여기서는 Hamilton의 원리를 적용하여 운동방정식을 세우기로 한다. 이 원리는 다음과 같은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} (T - U + W) dt = 0 \quad (1)$$

여기서  $\delta$ 는 적분의 1차 변분량(first variation)을 나타낸다. 이 원리는 연속계뿐만 아니라 이산계에도 적용되고,  $n$ 개의 독립좌표  $q_1, q_2, \dots, q_n$ 을 사용해서 운동을 나타낼 수 있는 이산계의 경우에는 Hamilton 적분이 정체상태가 된다는 조건은 다음과 같은 Lagrange 운동방정식을 주게 된다.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} \right) + \frac{\partial D}{\partial q_j} + \frac{\partial D}{\partial q_j} = f_j; \quad j=1, 2, \dots, n \quad (2)$$

이 방정식에서 소산함수  $D$ 는 마찰력에 의하여 에너지가 소산되는 율을 나타낸다. 일반화 힘  $f_j$ 는 해당변위  $q_j$ 가 단위변위를 일으키는 동안에 작용력이 한 일과 같다. 유한요소 전개로써 근사해를 나타내는 방법이다.

$$u(x, t) = \sum_{j=1}^n \phi_j(x) q_j(t) \quad (3)$$

여기서,  $\phi_j(x)$ 는  $x$ 의 함수로서 미리 지정된 것이며  $q_j(t)$ 는  $t$ 의 함수로서 구해야 할 미지함수이다. 에너지 표현  $T, D, U, W$ 에 대입하면 연속 구조물 문제가  $q_1, q_2, \dots, q_n$ 의 자유도를 가진 다자유도계 문제로 바뀌게 된다. 이 에너지 표현들을 식(2)에 대입하면 운동방정식(4)를 얻을 수 있다.

$$[M]\{\dot{q}\} + [C]\{\dot{q}\} + [K]\{q\} = 0 \quad (4)$$

여기서  $[M]$ ,  $[C]$ ,  $[K]$ 는 각각 관성행렬, 감쇠행렬, 상행렬을 나타낸다. 유체와 구조물의 상호작용에서 구조물의 운동방정식은 유체의 연속방정식과 유체운동식(Navier-Stokes)<sup>6),7)</sup>이 고려되어야 한다.

### 3. 수치해석 방법

본 연구는 유한요소법을 이용하여 금속과 세라믹으로 적층된 압전소자가 진동할 때 공진주파수를 구하고, 유한요소 프로그램인 ANSYS를 사용하여 진동 모드를 2차원적으로 구하였다. 그리고 음향트랜스듀서 외부로 방사되는 출력음압특성을 수치해석 하였으며, 어느 한 절점의 위치에 따른 출력음압특성과 대칭축 상의 한 절점에 대한 출력음압특성

을 계산하였다. 무한한 배플에 장치된 음향트랜스듀서 유니트에서 방사된 음장을 비교하기 위하여 음향트랜스듀서의 구경은 고정시키고 직경에 변화에 따른 출력음압을 비교하였다. 그리고 밀폐함의 경계 조건은 음압이 완전히 반사되므로 흡수계수를 0으로 두었다.

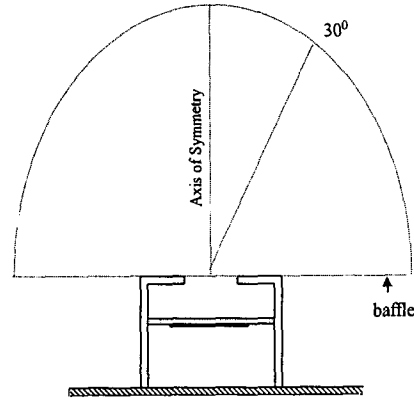


그림 1. 음향트랜스듀서의 모델  
Fig.1. Geometry of acoustic transducer unit

그림 1은 음향트랜스듀서 내부의 금속과 세라믹으로 적층된 압전소자와 음향트랜스듀서 외부로 방사되는 음장을 구속하는 계산구를 설정한 실험모델이다. 경계면 밖의 배플(baffle)은 무한한 것으로 가정한다.

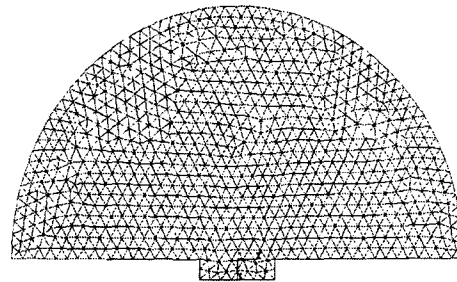


그림 2. 유한메쉬내의 요소 분할된 음향트랜스듀서의 외부 계산구

Fig. 2. Calculation mesh for acoustic transducer unit in finite baffle

Fig. 2는 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.

#### 4. 수치해석 결과

본 연구에서 해석모델은 Z-방향으로 향하는 수직면이 주변지지된 원형평판과 그 원형평판의 진동에 의해 음압을 발생시키는 음향트랜스듀서이다. 평판의 해석과 외부음장의 해석은 유한요소법으로 해석하였다. 요소의 형태는 8노드 사각형 요소를 사용하였고, 공기의 밀도는  $1.2\text{Kg/m}^3$ , 공기속도는  $343\text{m/s}$  그리고, 세라믹두께는  $0.95\text{mm}$ 이며 지름은  $10\text{mm}$ , 금속의 두께는  $0.23\text{mm}$ 이고 지름은  $23\text{mm}$ 이며 프와송의 비는 각각  $0.34$ ,  $0.32$  이다.

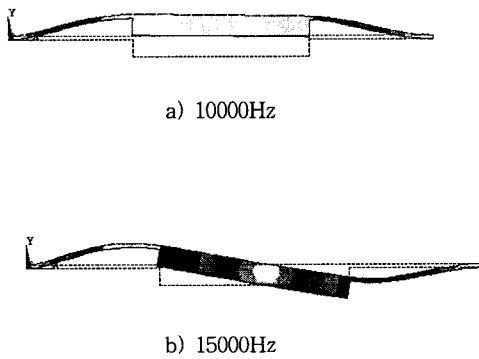
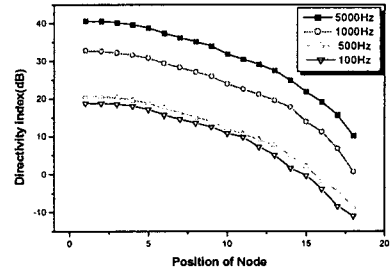


Fig.3. Mode shapes of metal-piezoceramic plate by th finite element method

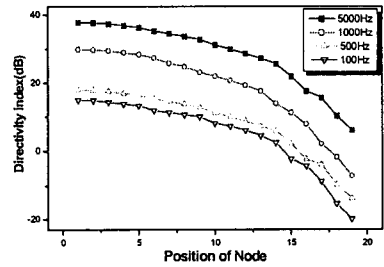
그림 3. 유한요소법에 의한 금속-PZT 원형평판의 진동모드

그림 3은 음향트랜스듀서의 내부에 있는 금속-세라믹으로 적층된 압전소자를 주변지지하여 유한요소프로그램인 ANSYS를 이용하여 모의실험하여 1차 진동모드, 그리고 2차 진동모드를 수치 해석하였다. 각각의 공진주파수는 1차 진동모드에서  $10000\text{Hz}$ , 2차 진동모드에서  $15000\text{Hz}$ 로 나타났다. a)는 금속-세라믹으로 적층된 압전소자가 공진주파수가  $10000\text{Hz}$ 일 때 발생하는 진동모드를 수치 해석한 결과이다. 진동이 모두 양의 Z-방향으로 향하고 있는 것을 가시적으로 볼 수 있다. 그림 3의 b)는 압전소자의 공진주파수가  $15000\text{Hz}$ 일 때 발생하는 진동모드이며 2차 진동모드이다. 여기서 진동모드가 양의 Z-방향과 음의 Z-방향으로 나누어지는 것을

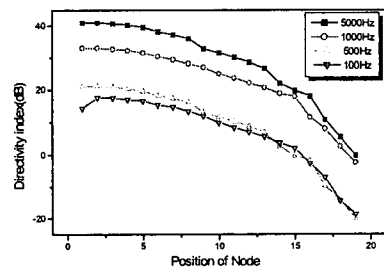
볼 수 있다.



a) Depth(0.005mm), Radius(0.02mm)



b) Depth(0.003mm), Radius(0.02mm)



b) Depth(0.005mm), Radius(0.03mm)

Fig. 4. The Calculated sound pressure in node positions at about  $\theta = 30^\circ$

그림 4. 절점  $\theta = 30^\circ$ 에서의 음압 계산값

그림 4는 음향트랜스듀서의 구경의 지름과 깊이의 변화를 절점에서 음향트랜스듀서의 외부음압출력을 구한 그래프이다. 음압이 깊이를 고정시키고 지름을 변화시켰을 때는 음압이 일정하게 감소하지 않고 많이 일그러지는 것을 볼 수 있다. 지름을

고정시키고 깊이를 변화하였을 때는 음압의 크기가 거의 변화가 없는 것을 알 수 있었다. 음향트랜스듀서에서 방사되는 음압이 구경의 직경의 변화가 지금의 변화보다 음향특성에 더 많은 기여를 한다는 것을 알 수 있다.

음압값은 1차 진동모드 일 때 보다 크지만. 양의 방향으로 나오는 음압과 음의 방향으로 발행하는 음압값이 충돌하면서면서 발생하는 음압치가 1차 진동모드 일 때 보다 많이 감소하는 것을 알 수 있다. 음압값은 1차 진동모드 일 때의 공진주파수에서 음압값을 구할 수 있다. 진동모드가 증가할 때 마다 공진주파수가 증가하는 것을 볼 수 있다. 공진주파수가 증가할수록 음압의 크기도 같이 증가하는 것을 볼 수 있다. 음향트랜스듀서를 설계 제작 할 때는 구경의 직경에 영향을 많이 받는 것을 알 수 있다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 음향트랜스듀서 내부의 금속-세라믹으로 적층된 압전소자를 유한요소법을 이용하여 진동모드와 방사패턴을 수치 해석하여 발생하는 공진주파수를 측정하였고, 출력음압특성을 구경의 지름과 깊이의 변화에 대하여 측정 분석하였다.

음향트랜스듀서의 음장을 예측하기 위해 임의의 공간에서의 음압을 지배하는 Hamilton 방정식을 적분방정식으로 변환한 후 유한요소법을 이용하여 진동모드로 수치 해석하였으며, 음향트랜스듀서의 외부로 방사되는 출력음압분포와 지향특성을 음향트랜스듀서의 깊이와 직경의 변화와 다양한 주파수에 대하여 수치 해석하였다. 압전소자의 공진주파수는 모드가 증가할수록 현저하게 증가하였고, 음향트랜스듀서의 구경의 깊이와 지름에 변화에 따른 음압특성을 고려할 때 지름보다는 깊이에 의한 영향을 더 많이 받는 것을 알 수 있었다. 유한요소법으로 계산된 음향트랜스듀서의 외부 음장과 등압선 결과는 낮은 주파수에서는 고르고 일정한 무지향적인 분포를 가졌으며 높은 주파수에서는 높은 음압을 가지고 더스트 캡 부분으로 집중되는 것을 알 수 있었다. 이 결과들은 다른 방법으로 예측하기는 어렵지만 유한요소법은 요소 분할에 의해 각각의 요소에서의 음압변화량과 음향트랜스듀서의 외부의 음장을 등압선으로 가시화될 수 있는 장점을 가지고 있기 때문에 가능하였다.

### 참고 문헌

[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] P. O. Mattei, "Sound radiation b baffled and constrained plates", J. Sound Vib., Vol 154 , 125, 1994.

[4] Arie J. M. Kaizer and Ad Leeuwstein, "Calcu-lation of the Sound Radiation of a Nonrigid Loudspeaker Diaphragm Uing the Finite-Element Method", J. Audio Eng. Soc., Vol 36(7) pp.539-551, 1988.

[5] Swanson Ansys System, Ansys user's Manual, 4, 7-1, 1993.

[6] Jung Keun,An, "FEM/BEM Coupling Analysis The Structure-Acoustic System", Pusan National National University, 1999.

[7] 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.