

## 자기복조 효과를 이용한 초지향성 음향트랜스듀서 제작

### Fabrication of Higher Directivity Acoustic Transducer Using the Self-demodulation Effect

고영준\*, 남효덕\*\*, 서희돈\*\*, 장호경\*\*\*

(Young-Jun Go\*, Hyo-Duk Nam\*\*, Hee-Don Seo\*\*, Ho-Gyeong Chang\*\*\*)

#### Abstract

Higher directivity acoustic transducer using the self-demodulation effect was fabricated. The structure of transducer was designed such as dimension and support type of the piezoelectric element, the vibrating metal plate, and the housing case. Based on the design, the transducer was fabricated and measured its acoustic characteristics. Also, AM modulated driving circuit was designed for using the self-demodulation effect. The piezoelectric sounder with 200kHz resonant frequency and 20kHz bandwidth was designed by considering the sharp directivity and the sound pressure. The design and fabrication method worked in this study can be utilized in development of various speakers with higher directivity and broader bandwidth.

**Key Words** : self-demodulation, higher directivity, acoustic transducer, broader bandwidth

#### 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 이루어질 수 있다. 그중 압전세라믹스는 전기음향 변환재료로서 우수한 특성을 가지며 어군탐지기나 수중통신 등의 초음파 영역에서 응용이 시작되어 최근에는 가청주파수의 영역에서 사용되는 제품에 대하여 연구 개발되고 있다.[1]

한편, 압전 발음체의 음압감도는 압전정수  $d_{31}$ 이 큰 재료일수록 좋기 때문에 이 값을 크게 하기 위해서 전기기계 결합계수가 크고 비유전율이 큰 재료를 개발 사용하고 있다.[2] 고유전율을 가지며 유전손실값이 작고, 기계적 품질계수값이 크며, 전기기계 결합계수가 큰 대표적인 재료로서는 PMN-PT-PZ계 압전세라믹스가 알려져 있고,[3] 효율면이나 대역폭면에서 우수한 장점을 가지는 새로운 형태의 음향트랜스듀서를 개발하기 위하여 최적 설계된 알루미늄 진동판을 부착하고, 대역폭과 공진주파수를 고려한 압전 발음체 소자와 케이스를 설계, 제작한 연구발표도 있다.[4,5]

본 연구에서는 종래의 moving coil형 음향트랜스듀서의 주파수분할에 따른 복잡한 구조를 해결하고 효율면이나 음장의 제어면에서 장점을 가지는 초음파를 이용한 음향트랜스듀서를 개발하고, 이를 구현

\* : 영남대학교 대학원 센서 및 시스템공학과

\*\* : 영남대학교 전자정보공학부

(경북 경산시 대동 214-1,

Fax : 053-813-8230

E-mail : hdnam@yucc.yeungnam.ac.kr)

\*\*\* : 경산대학교 자연과학부

2001년 7월 26일 접수, 2001년 8월 16일 1차심사완료

하기 위하여 초음파를 반송파로 이용하는 자기복조(self-demodulation) 효과를 가지는 AM변조 구동 회로를 제작하였다. 제작된 음향트랜스듀서와 구동 회로를 사용하여 출력되는 신호를 조사하였으며, 외부로 방사되는 음압과 지향특성을 측정하였다.

## 2. 설계 및 제작

### 2.1 음향소자 제작

음향소자는 압전소자 및 진동판의 재질과 크기에 따라 공진주파수가 결정되고, 그에 따라서 대역폭과 감도지수가 결정된다.[6] 따라서 본 연구에서 제작한 음향소자는 양면 전극이 형성된 PMN-PT-PZ 압전세라믹스를 얇은 금속진동판에 접합시킨 복합진동자로 구성되어 있다. 압전발음체 소자의 금속진동판은 가청주파수 영역을 포함하는 넓은 대역폭과 얇은 두께를 가지면서 제작성이 우수한 알루미늄을 사용하였다. 선행연구에서 최적조건을 가지는 알루미늄 진동판의 두께와 직경은 각각 0.23mm와 23mm이었다.[4] 그림 1은 제작된 음향소자의 사진이다.

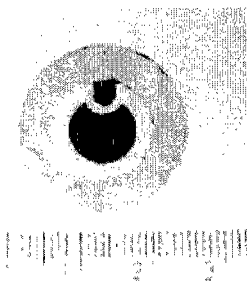


그림 1. 알루미늄 진동판을 이용하여 제작된 음향소자.

Fig. 1. Fabricated PZT/Aluminum acoustic device.

### 2.2 압전발음체 케이스 설계

공기와 압전세라믹스와의 음향임피던스는 약 5000배 정도의 차이가 나므로 큰 음압 레벨을 얻기 위해서는 공진기(resonator)가 필요하다. 이 공진기는 PZT/Metal로 구성된 압전 발음체소자와 공기층

과의 진동경계면상에서 음향임피던스의 정합(matching)을 실현시킴으로써 음압을 증대시켜, 결국 음향변환기의 전기음향변환효율을 배가시키는 목적으로 사용된다. 그림 2는 케이스의 지지방식이 주변지지일 때를 나타낸 그림이다. 주변지지는 압전 발음체 소자의 주변부를 케이스에 접착시키는 방법으로서 음압의 각 주파수에 대한 크기의 변화가 작으므로 광대역이 된다.[4,7] 가청주파수 대역의 가운데인 10kHz 부근의 음압을 개선하기 위하여 케이스의 두께( $t$ )는 1mm, 구멍의 반경( $a$ )는 5mm, 지지대의 높이( $h$ )는 3.5mm로 설계하였다.

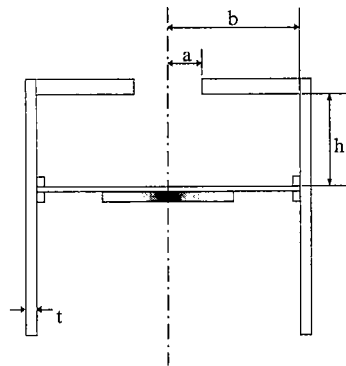


그림 2. 음향트랜스듀서 케이스의 구조.

Fig. 2. The structure of acoustic transducer case.

### 2.3 구동회로 설계

구동회로 내부에서 반송파로 사용되는 고유의 초음파 신호를 발생시키고, 입력신호인 오디오신호를 회로내의 발생신호에 실어 음향소자를 통하여 출력하면 초음파 신호간의 간섭작용에 의해서 원래의 입력신호를 발생시키는 구동회로를 설계하였다. 구동회로의 발생주파수는 음향소자의 공진주파수에 의해서 결정되고, 회로에서 출력되는 초음파 신호는 음향소자 공진주파수의 초음파 신호와 입력주파수를 더하고 뺀 초음파 신호를 발생시키는 구조로 되어 있다. 자기복조 효과를 이용한 음향시스템의 개략도를 그림 3에 나타내었다. 내장된 수정발진기에 의해 중심주파수  $f_0$ 인 초음파 신호를 발생시키고, 여기에 외부로부터 오디오신호( $\Delta f$ )가 입력되면 입력신호와 초음파 신호를 혼합시켜 중심주파수가 각각

$f_0 - \Delta f$ ,  $f_0$ ,  $f_0 + \Delta f$  인 세 개의 신호를 만들어 낸다. 이렇게 발생한 신호는 증폭기를 통하여 증폭된 후, 트랜스듀서에 의해 출력되면 자기복조에 의해 원래의 음악신호를 만들어 내게 된다[7]. 만약 오디오 신호  $g(t)$ 에 의해 변조된 유한진폭의 초음파 신호가 배열된 변환기에 의해 방사되면, 거리  $x$ 만큼 떨어진 곳에서의 초기음압 ( $P_1$ )은 식(1)과 같다.

$$P_1 = P_0 [1 + mg(t-x/c_0)] e^{-\alpha x} \sin \omega_0 (t-x/c_0) \quad (1)$$

여기서  $P_0$ 는 초음파의 초기음압,  $m$ 은 변조지수,  $\alpha$ 는 반송파 음의 흡수계수, 그리고  $c_0$ 는 음속이다. 공기중의 음향 상호간섭의 비선형성 때문에 새로운 가상 오디오 신호음원이 생성되며 이러한 신호음원은 식(2)와 같다.

$$q = \frac{\beta P_0^2}{\rho^2 c_0^4} e^{-2\alpha x} \frac{\partial}{\partial x} [mg(t - \frac{x}{c_0}) + \frac{1}{2} m^2 g^2(t - \frac{x}{c_0})] \quad (2)$$

식(2)의  $\frac{1}{2} m^2 g^2(t - \frac{x}{c_0})$  부분은 상측파대와 하측파대의 상호간섭에 의한 왜곡부이며,  $\beta$ 는 비선형 유체변수이다[8]. 이러한 방식으로 출력된 음은 초음파에 실려있으므로 지향성이 아주 우수하다.

그림 4는 위의 조건을 만족시켜주는 구동회로의 설계도면이다. 그리고 구동회로의 출력신호를 알아

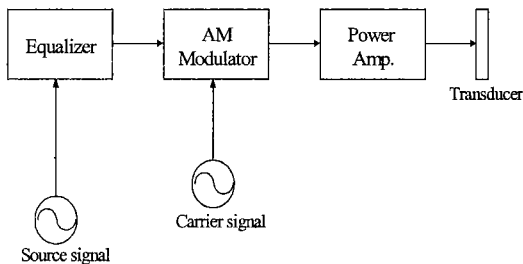


그림 3. 자기복조 효과를 이용한 음향시스템의 개략도.

Fig. 3. The block diagram of the acoustic system using the self-demodulation effect.

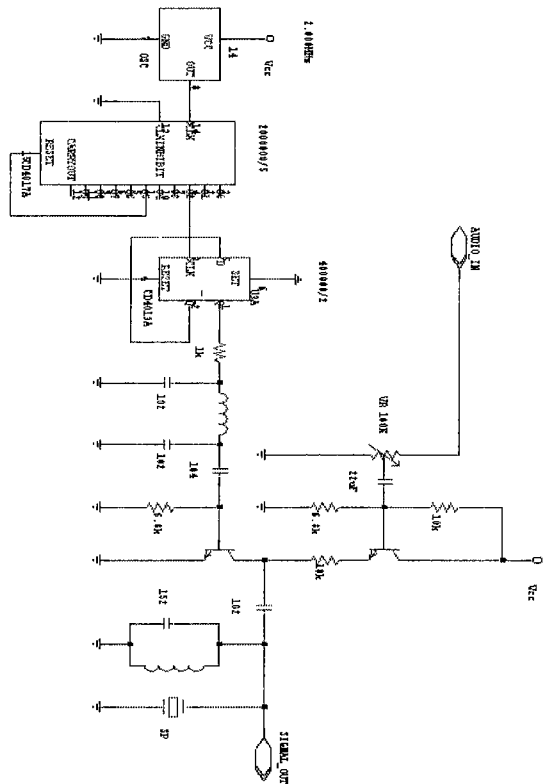


그림 4. 구동회로 설계도.

Fig. 4. The driving circuit diagram of the acoustic transducer.

보기 위하여 오실로스코프(LeCroy<sup>TM</sup> Digital Oscilloscopes)를 이용하여 시간과 주파수에 대한 신호를 관측하였다.

#### 2.4 음향특성 측정

음향트랜스듀서는 전기음향변환 효율을 이용한 압전 음향소자로서, 변환효율의 척도를 살펴보기 위하여 주파수 변화에 따른 음압특성을 측정하였다.

그림 5와 같이 설계된 구동회로를 이용하여 출력된 변조신호를 제작된 음향트랜스듀서에 가하고, 이때 발생하는 신호를 microphone(B&K Type 4165)을 통하여 signal analyzer unit(B&K Type 2035)로 1kHz부터 20kHz까지 각 주파수에 대한 음압(dB)을 측정하였다. 측정값의 신뢰성을 높이기 위하여 외부 잡음의 영향을 제거한 무향실에서 5회씩 측정하였으며, 측정거리는 1.5cm로 하였다. 또한 지향특성을

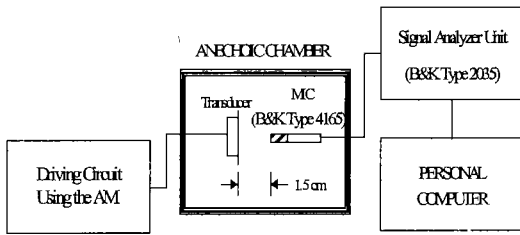


그림 5. 음압특성 측정 시스템.

Fig. 5. Block diagram for measuring the sound pressure characteristics.

측정하기 위하여 turntable(B&K Type 3922)을 이용하여 5° 씩 방향을 바꾸어가며 음압을 측정하였다.

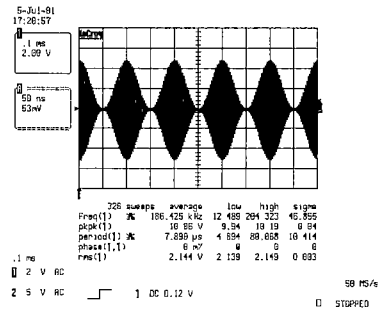
### 3. 결과 및 고찰

넓은 대역폭을 구현하고 지향성이 우수한 음향트랜스듀서를 개발하기 위하여 초음파를 반송파로 이용하는 자기복조 현상을 도입하였다. 음향소자의 공진주파수를 200kHz로 설정한 이유는 200kHz보다 큰 주파수에서는 20kHz 대역폭을 구현하기가 쉽지만 감쇠가 커지고, 200kHz보다 낮은 주파수에서는 음압은 커지지만 대역폭의 구현에 어려움이 있기 때문이다.[9]

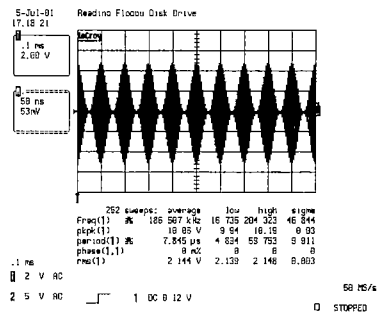
#### 3.1 구동회로 출력신호

본 연구의 음향 재생성의 원리는 공기와의 상호작용에 의한 비선형 음향에 기초를 두고 있다. 초음파가 어떤 오디오 신호를 AM방식으로 배열된 변환기를 통해 공기중으로 송출되면 오디오신호는 공기의 비선형특성에 의한 AM음파의 자기복조현상 때문에 오디오 신호가 생성된다. 구동회로의 발생주파수는 음향소자의 공진주파수에 의해서 결정되고, 회로에서 출력되는 초음파 신호는 식(3)과 같이 음향소자 공진주파수의 초음파 신호와 입력주파수를 더하고 뺀 초음파 신호를 발생시키는 구조로 되어있다.

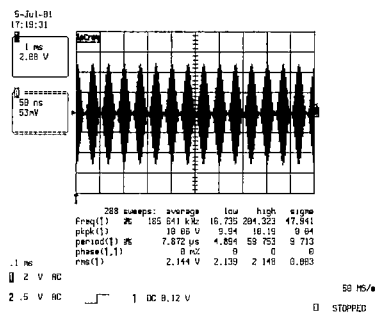
$$v = V_c \sin \omega_c t + \frac{mV_c}{2} \cos(\omega_c - \omega_m)t - \frac{mV_c}{2} \cos(\omega_c + \omega_m)t \quad (3)$$



(a) 5kHz



(b) 10kHz



(c) 15kHz

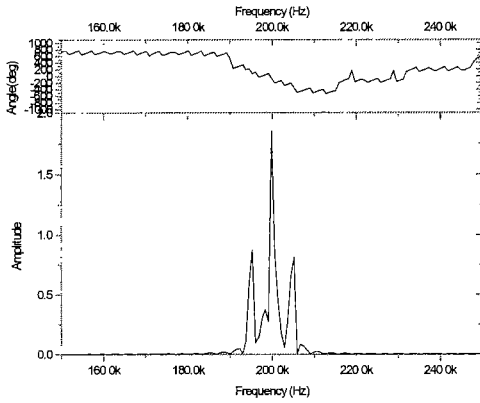
그림 6. 구동회로의 출력신호.

Fig. 6. Output signal of the driving circuit.

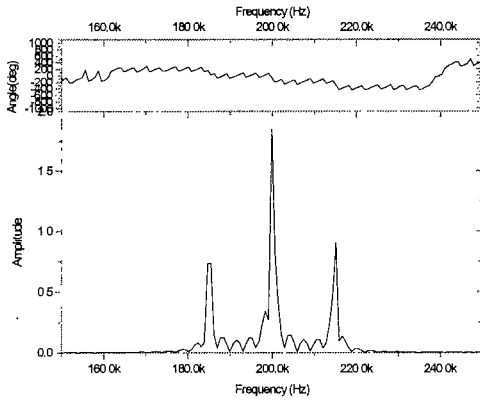
그림 6은 반송파로 사용되는 초음파 200kHz와 오디오신호 5kHz, 10kHz, 15kHz를 변조시킨 파형이다. 공기중으로 두 개의 정현파 음파(각진동수  $\omega_1, \omega_2$ )가 방사될 경우 각진동수가  $\omega_1 \pm \omega_2$ 인 새로운 파가 생성된다. 유한진폭을 가진 AM초음파가 공기중으로 방사될 때, 캐리어 초음파와 두 개의 측대파의 비선형적 상호작용에 의해 변조신호와 같은

두 번째 파를 예상할 수 있다. 이것이 비선형 상호 간섭에 의한 AM 초음파신호의 자기복조이다.

그림 7은 그림 6의 주파수 중 5kHz와 15kHz에 대하여 구동회로에서 출력되는 초음파 신호를 FFT (Fast Fourier Transform) 신호처리한 결과이다. 그림에서 식(3)과 같이 음향소자 공진주파수의 초음파 신호와 입력주파수를 더하고 뺀 초음파 신호를 발생시키는 구조로 되어있음을 알 수 있다.



(a) 5kHz



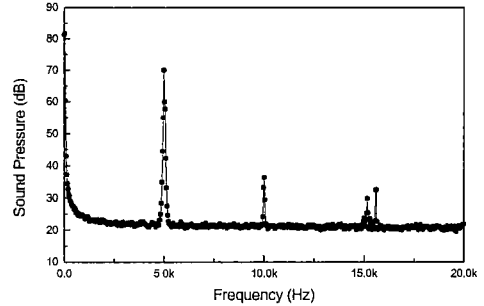
(b) 15kHz

그림 7. 구동회로의 출력신호 FFT.

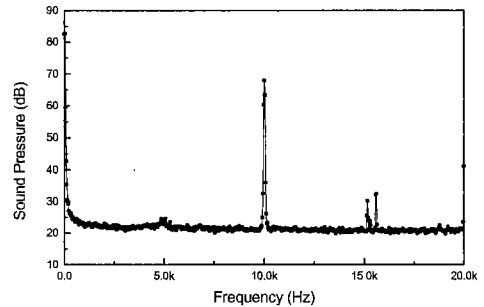
Fig. 7. Fast Fourier Transform in output signal of the driving circuit.

### 3.2 음압레벨 측정

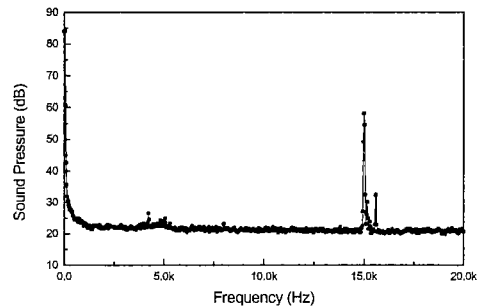
그림 8은 5V<sub>rms</sub>의 입력신호를 각각 5kHz, 10kHz, 15kHz로 가하였을 때 음향트랜스듀서에서 방사되는 음압을 측정된 결과이다. 그림에서와 같이 각각의 주파수에서 나타나는 음압이 거의 동일함으로 제작된 음향트랜스듀서의 대역폭이 넓다는 것을 알 수 있다.



(a) 5kHz



(b) 10kHz



(c) 15kHz

그림 8. 제작된 음향트랜스듀서의 음압.

Fig. 8. Sound pressure of the acoustic transducer.

### 3.3 지향성 측정

그림 9는 입력주파수가 2kHz, 5kHz, 10kHz 일 때 제작된 음향트랜스듀서의 지향성을 나타낸 그림이다. 입력주파수가 높을수록 지향성이 더 우수하게 나타남을 확인할 수 있으며, 초음파를 반송파로 사용하였으므로 초지향적인 패턴이 나타남을 알 수 있다.

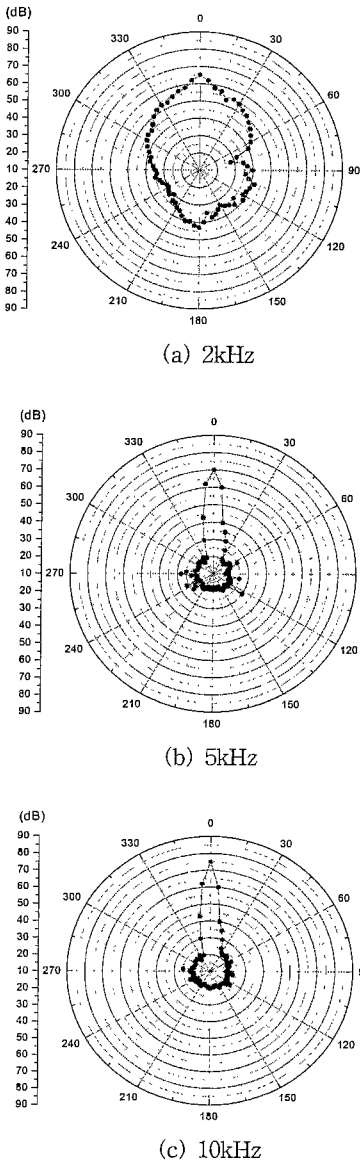


그림 9. 제작된 음향트랜스듀서의 지향성.  
Fig. 9. Measured directivity pattern of the acoustic transducer.

### 4. 결론

넓은 대역폭을 구현하고 지향성이 우수한 음향트랜스듀서를 개발하기 위하여 자기복조 현상을 이용한 초지향성 음향트랜스듀서를 설계, 제작하였다.

PMN-PT-PZ계 세라믹스를 사용한 압전발음체 소자의 급속진동판은 가청주파수 영역을 포함하는 넓은 대역폭과 얇은 두께를 가지면서 제작성이 우수한 알루미늄을 사용하였다. 압전 음향소자의 지지 방식은 음압의 각 주파수에 대한 크기의 변화가 작으므로 광대역이 가능한 주변지지방식을 사용하였다. 지향성을 좋게 하기 위하여 초음파를 반송파로 사용하는 AM변조방식의 구동회로를 설계하여 자기복조 현상이 가능하게 제작하였다. 제작된 음향트랜스듀서의 음향특성을 측정된 결과, 대역폭이 넓고 초지향성을 가지는 특성을 알 수 있었다. 이와같이 자기복조 현상을 이용한 AM 변조방식의 음향시스템은 높은 지향성을 얻을 수 있으므로 음의 집속화에 사용될 수 있겠다.

### 감사의 글

이 논문은 2000년도 영남대학교 교내연구비 지원으로 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

### 참고 문헌

- [1] Masahide Yoneyama and Junichiroh Fujimoto, "The audio spotlight: An application of nonlinear inter-action of sound waves to a new type of loudspeaker design," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 73(5), pp. 1532-1536, 1983.
- [2] Hiromu ouchi, Katsoo nagano and Shigeru hayakawa, "Piezoelectric properties of  $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ - $PbTiO_3$ - $PbZrO_3$  solid solution ceramics," J. Am. Ceram. Soc., Vol. 48(12), pp. 630-635, 1965.
- [3] 김만성, 이수호, 류주현, "Ba치환이  $Pb(Mn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ - $Pb(Zr, Ti)O_3$  세라믹의 전기적 특성에 미치는 영향," 전기전자재료학회논문지, 12권 2호 pp. 124-129, 1999.
- [4] 고영준, 김현철, 남효덕, 장호경, 우 홍, "PMN-PT-PZ계 세라믹스를 이용한 압전발음체 설계," 전기전자재료학회논문지, 14권1호, pp.12-19, 2001.

- [5] 고영준, 남효덕, 장호경, “등가화방법을 이용한 금속-압전세라믹 적층평판의 진동해석,” 전기전자재료학회논문지, 13권 1호, pp.39-46, 2000.
- [6] 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, 學廠社, 1989.
- [7] 當出, 山口, “壓電形 受話器の検討”, 通研實報, 第14卷, 第4号, 1965.
- [8] John. Borwick, "*Loudspeaker and HandBook*", Butterworths, London, pp.2-12, 1988.
- [9] Kagawa, Y., Yamabuchi, T. and Sugihara, K., "A finite element approach to a coupled structural-acoustic radiation system with application to loudspeaker characteristic calculation", J. Sound Vib., Vol.69(2), pp.229-243, 1980.