

# 압전 세라믹을 이용한 초음파 스피커의 제작

## Fabrication of an Ultrasonic Speaker with Piezoelectric Ceramics

문창호\*, 안도현\*\*, 노용래\*\*\*

(Chang Ho Moon\*, Do Hyun Ahn\*\*, Yong Rae Roh\*\*\*)

### 요약

본 논문에서는 일반적인 loudspeaker에 비해 지향성이 높고, 광대역 특성을 가지는 초음파 스피커를 개발하고자 하였다. 스피커의 최적 구조를 위해 스피커 소자에서 압전 세라믹과 금속진동판의 재질 및 크기, 그리고 스피커 소자의 지지방식과 외장 케이스를 설계하였다. 설계결과를 바탕으로 초음파 스피커를 제작하고, 그 성능을 분석하여 설계이론의 타당성을 검증하였다. 제작에서는 큰 음압을 구현하기 위하여 초음파 배열 스피커를 설계, 제작하여 성능을 분석하였다. 본 연구에서 수립되어진 초음파 스피커의 설계 및 제작방법은 향후, 좋은 지향성과 넓은 대역폭을 가지는 스피커 개발에 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

### ABSTRACT

In this paper, we have investigated on the development of ultrasonic speakers that have higher directivity and much wider bandwidth than those of conventional loudspeakers. For optimal structure of speaker, we have analyzed material properties and dimension of the piezoelectric element and the vibrating metal plate, and their support type as well as the housing case. Based on the design, we have fabricated ultrasonic speaker prototypes, measured their performance, and verified validity of the design theory. For higher sound pressure level, the ultrasonic array speaker prototype has been fabricated in the form of an array. The design and fabrication method worked in this paper can be utilized in development of various ultrasonic speakers with higher directivity and broader bandwidth.

## I. 서론

사람이 들을 수 있는 가청 주파수대역은 20 ~ 20,000 Hz이다. 절대적인 주파수 값으로 보면 그다지 넓은 대역은 아니지만, 상대적인 음역은 약 10 옥타브에 이르는 넓은 대역이다.<sup>1)</sup> 따라서 통상의 moving coil형 loudspeaker는 Woofer, Mid-Range, Tweeter 등 별도의 주파수대역을 담당하는 몇 개의 트랜스듀서를 동시에 사용하여 전체 대역을 구현하고 있다. 또한 moving coil형 트랜스듀서의 비효율성과 더불어 주파수 분할에 따른 복잡한 구조 및 상호작용으로 인해 전체적 효율은 아무리 좋은 loudspeaker인 경우에도 1%를 넘기 힘든 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 어려움을 해결하고 효율면이나 스피커에 의한 음장의 제어면에서 탁월한 장점을 가진 초음파 스피커를 개발하고자 하며, 이를 구현하기 위하여 압전 스피커를 이용하고자 한다.

압전 스피커 자체에 관한 연구는 오래전부터 이루어져 왔고, 이미 상품화된 지도 오래되었다. 그러나, 이를 이용

해 초음파 스피커로 사용한다는 개념은 상당히 최근에만 개발이 되었고, 이를 상용화하기 위해서는 압전 세라믹에 관한 재료공학 기술, 음향학, 그리고 구동회로의 개발에 필요한 전자공학 기술 등 여러 분야에 걸친 다양한 기술들이 필요하므로 어느 한 그룹이 단독으로 개발하기는 매우 어려운 제품이다. 그러다보니 세계적으로 초음파 스피커를 개발하고 있는 연구사례 자체가 적고, 개발된 실적 또한 비교적 초기 단계에 머물러 있다. 현재 세계적으로 이 분야에 가장 앞서 있다는 American Technology Coporation에서도 아직은 연구 단계에 머물러 있을 뿐, 양산을 통한 상품화에 이르지 못한 것으로 알려져 있다.<sup>2)</sup> 세계적으로도 초음파 스피커에 관한 연구가 초기 단계인 만큼, 국내에서는 관련 연구사례가 전무하다.

본 논문에서는 압전 세라믹을 이용한 초음파 스피커를 이론적으로 설계하고, 설계 결과를 토대로 시제품을 제작하여 구동회로와 연결하여 음압을 측정함으로써 그 성능을 분석하였고, 설계이론의 타당성을 검증하였다.

## II. 초음파 스피커의 동작원리

음향파란 동적 신호로서 인근하는 두 개의 주파수 성

\* 대원전자 주식회사 연구소

\*\* LG CND 주식회사 음향연구소

\*\*\* 경북대학교 전자전기공학부/센서공학과  
접수일자: 1998년 9월 3일

분이 만나면 그 상호작용에 의하여 본래의 값과는 다른 새로운 주파수 값을 나타내는 특성을 가진다. 인근하는 두개의 신호  $S_1(t)$ ,  $S_2(t)$ 가 주어지고,

$$\begin{aligned} S_1(t) &= \sin[2\pi f_1 t] \\ S_2(t) &= \sin[2\pi f_2 t] \end{aligned} \quad (1)$$

이 두 개의 신호가 상호작용을 하면 식 (2)에 나타난 바와 같이 서로 다른 2개의 주파수  $f_1$ 과  $f_2$ 가 동적 결합을 이루게 되어, 이들과는 완전히 다른 새로운 주파수 성분인  $f_2 + f_1$ 과  $f_2 - f_1$ 이 발생한다.

$$S_1(t) * S_2(t) = \frac{1}{2} \{ \cos[2\pi(f_2 - f_1)t] - \cos[2\pi(f_2 + f_1)t] \} \quad (2)$$

각각의 주파수의 합과 차이에 의해 두 주파수 값을 만들어 내는 이러한 특성은 이미 오래전부터 알려져 왔는 것으로서, 실제로는 식 (2)에 나타난 것 이외의 고차항들, 즉  $f_2 - 2f_1$ ,  $2f_2 - f_1$  등의 신호들도 함께 생성되나, 본 논문에서 직접 이용하고자 하는 것은 식 (2)중에서도 특히  $f_2 - f_1$  주파수 성분이고, 또한 고차항들은 식 (2)의 합들에 비해 상대적으로 영향력이 작으므로, 본 논문에서는 이들 고차항들은 무시하기로 한다.<sup>3)</sup> 이런 특성은 각종 기계류의 상태 진단이나 음향 효과를 만들어내는데 유용하게 이용되어져 왔고, 앞장에서 설명한 본 연구의 목표를 구현하는데 유용하게 이용할 수 있는 것이다. 즉, 식 (1)에 나타난 2개의 주파수 값을 설정함에 있어 적절한 구동회로에 의해  $f_1$ 이라는 임의의 주파수를 가지는 초음파 신호를 설정하고,  $f_2$ 는  $f_1$ 에 비해 가청영역만큼 더 변하는 신호인  $f_2 = f_1 + \Delta f$ 로 둔다면, 이들 두 신호는 초음파 스피커에 의한 동적 결합을 통해  $2f_1 + \Delta f$ 와  $\Delta f$ 라는 신호를 만들어낸다. 이때  $\Delta f$ 가 통상의 가청영역인 20 ~ 20,000 Hz를 망라한다면, 스피커로서의 기능을 수행할 수 있다.

이러한 작동원리는 기존의 loudspeaker에 비해 여러 가지 장단점을 가지고 있는데, 우선 가장 큰 장점으로는 loudspeaker에 비해 광대역 특성을 쉽게 구현할 수 있다는 것이다. 서두에서도 설명하였지만, loudspeaker는 10 옥타브에 걸친 가청영역을 한번에 구현하기가 어려워 몇 개의 구간으로 분할하여 각 구간을 별개의 unit가 담당을 하지만, 본 연구에서의 방법을 이용하면 예를 들어서  $f_1$ 로 200 kHz를 사용할 경우  $f_2$ 대비 구현하여야 할 대역폭 20 kHz는 불과 10%밖에 되지 않으므로, 한 개의 압전 초음파 스피커로서도 상대적으로 쉽게 구현이 가능하다는 점이다. 또한 가청 신호를 만들어내는 신호(carrier wave)의 주파수가 높고 따라서 파장이 짧아 초음파 스피커의 지향성은 크게 향상된다. 간략식으로 초음파 스피커의 지향성(D)은  $ka \gg 1$ 인 조건하에서 식 (3)에 의해 얻어질 수 있다.<sup>4)</sup>

$$D = \frac{(ka)^2}{1 - J_1(2ka)/ka} \approx (ka)^2 \quad (3)$$

여기서  $k$ 는 파수(wavenumber),  $a$ 는 스피커의 유효 반경, 그리고  $J_1$ 은 1차 제1종 Bessel 함수이다. 즉 주파수가 높아지면, 그에 따라 파수가 높아지고, 따라서 지향성이 커지므로 이는 스피커의 방향성을 의미하는 지향성이 커짐을 뜻한다. 지향성이 커진다는 것이 항상 장점일 수만은 없겠지만, 일반적인 loudspeaker는 지향성이 매우 낮다는 점을 들면 상대적으로 특이한 면이 될 수 있다. 또 높은 지향성은 사용자가 원함에 따라 특정 방향으로 음압을 집중시킬 수도 있고, 별도의 음향 Lens를 사용하면 확산을 시켜서 loudspeaker처럼 무지향화도 가능하므로, 다양한 선택권을 제공할 수 있다. 또한 지향성이 초음파 스피커의 크기에 관계하지 않으므로 소형경량화가 가능하다.

### III. 압전 초음파 스피커의 설계 및 제작

본 절에서는 앞절의 스피커의 동작원리를 바탕으로 Fig. 1과 같이 압전 스피커를 이루는 각 구성요소의 특성을 해석하고, 초음파 영역의 공진주파수를 가지도록 설계하였다. 높은 지향성과 음압을 고려하여 스피커의 공진주파수가 200 kHz이고, 그 때 최대 음압을 가지면서 대역폭은 20 kHz정도가 되도록 하였다. 공진주파수를 200 kHz로 설정한 이유는 200 kHz보다 높은 주파수에서는 20 kHz 대역폭을 구현하기가 쉽지만 감쇠가 커지고, 200 kHz보다 낮은 주파수에서는 음압은 커지지만 대역폭의 구현에 어려움이 있기 때문이다. 설계의 주요 사항으로는 압전 세라믹과 금속진동판으로 이루어진 스피커 소자의 동작원리와 스피커 소자에서 지지 방식에 따른 공진주파수, 그에 따른 대역폭과 감도지수, 케이스의 공진주파수, 그리고 앞절의 초음파 스피커의 동작원리를 구현할 수 있는 구동회로 등이다.

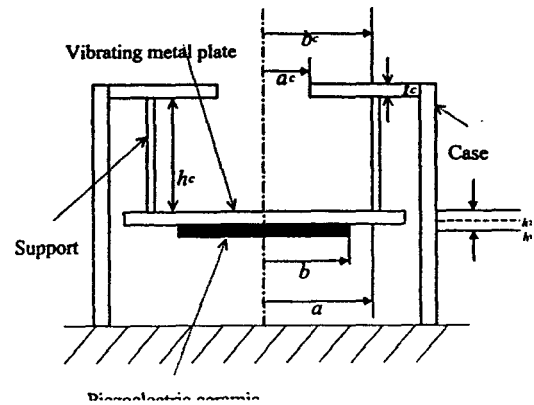


그림 1. 마디지지 경계조건을 가지는 압전 스피커 구조의 개략도  
Fig. 1. Schematic structure of the piezoelectric speaker with point support boundaries.

1. 스피커 소자

스피커 소자는 양면전극이 형성된 압전 세라믹을 얇은 금속진동판에 접합시킨 복합진동자로 구성되며 압전 세라믹은 초음파를 발생하는 능동소자로서 스피커 소자에서 가장 중요한 요소이다.

본 연구에서 개발하고자 하는 초음파 스피커는 압전 세라믹의 경방향(radial mode)진동을 이용한다. 압전 세라믹의 경방향진동의 공진을 이용하는데 있어서 고려해야 할 사항으로는 두께(thickness mode)진동의 공진과의 차이를 크게 두어, 그 영향이 미치지 못하게 해야 한다는 것으로 일반적으로 10배 이상의 충분한 크기의 차이를 둔다. 본 연구에서는 스피커 소자에서 초음파를 발생시키는 소자로 우수한 압전 특성과 시효 특성을 가지고 있으며, 주로 액추에이터에 많이 사용되는 hard계열의 PZT-4를 택하였다. 그리고 압전 세라믹인 PZT의 크기를 지름 10 mm, 두께 0.95 mm로 택하여 압전 세라믹의 두께진동 공진의 영향이 미치지 못하게 하였다.<sup>9), 10)</sup>

그러나, PZT계열의 압전 세라믹만으로는 공기중으로 음향에너지의 전달이 거의 되지 않는다. 이것은 압전 세라믹의 음향 임피던스와 공기와의 큰 음향 임피던스 차이로 인하여 음향에너지 전달의 어려움으로부터 기인된다. 그러나, 압전 스피커에서는 이러한 큰 임피던스의 차이를 금속진동판을 이용하여 해결하고 있다. 스피커 소자에서 두께방향으로 분극(poling)된 압전 세라믹 박판에 전압을 인가하면 분극방향이나 분극의 수직방향으로 신축을 하게 된다. 접합된 금속진동판도 따라서 신축하여 교류신호를 인가하면 휨진동을 되풀이하여 스피커 소자 전면의 공기를 진동시켜 음을 발생한다. 본 연구에서는 금속진동판으로 널리 이용되는 황동, 알루미늄, 철, 티타늄, 스테인레스, 각각의 경우에 대하여 대역폭과 감도지수를 시뮬레이션을 통하여 알아보고, 그중 최대 대역폭과 감도지수를 가지는 금속판을 이용하여 실제 스피커 소자 시제품을 제작하고자 하였다.

2. 지지와 케이스

스피커 소자에 구속 경계조건을 인가하지 않고 진동시키면 음은 대단히 작다. 이는 진동된 음의 위상을 생각할 때 스피커 소자의 중앙부와 외주부, 및 전면과 이면에서 180° 다르므로 공기의 진동이 상쇄되어 음이 작게 된다. 따라서 음을 크게 하기 위해서는 스피커 소자를 적당한 케이스에 넣고, 위상이 180° 다른 음을 음향적으로 차폐함으로써 위상에 의한 상대편을 감소시키고 케이스에 음향공동을 만들어 특정 주파수의 음압을 높이는 방법을 취하고 있다.<sup>9), 10)</sup>

위상에 의한 영향을 제거하는 구체적인 방법으로는 자유로 진동시킨 스피커 소자의 진동 절부를 지지 고정하고, 또 스피커 소자의 중앙부와 외주부를 음향적으로 격리하고, 중앙부의 동위상 성분만을 공중으로 끌어내는 방식과 스피커 소자의 외주부를 지지 고정함으로써 진동의 절부를 외주부로 이동시켜 진동면에서의 음파를 동위상으로 하는 방법이 있다.

일반적으로 스피커 소자의 진동 절부를 지지 고정을 하는 방식으로는 마디지지, 주변지지, 주변고정등의 3가지가 주로 이용되고 있다. 이 가운데 마디지지가 가장 넓은 대역폭을 구현할 수 있다고 알려져 있다.

스피커 소자는 압전 소자와 진동판의 재질과 크기, 그리고 지지방식에 따라 공진주파수를 가지고, 그에 따라서 대역폭과 감도지수를 가진다. 먼저, 스피커 소자의 공진주파수는 지지방식에 의한 상수를 보상에 주어야 한다. 이렇게 구해진 스피커 소자의 공진주파수( $f_{rs}$ )는<sup>9), 10)</sup>

$$f_n = \frac{a_m^2 h_1}{2\pi b^2 \beta} \sqrt{\frac{E_2}{3\rho_2(1-\sigma_2^2)} \left(1 - \frac{3}{2}\zeta + \frac{3}{4}\zeta^2\right)} \quad \text{[Hz]} \quad (4)$$

$$\zeta = (1 - a\beta^2)/(1 + a\beta)$$

$$a = E_1/E_2$$

$$\beta = h_1/h_2$$

$$m = 1, 2, 3, \dots$$

으로 주어지고, 사용된 기호는 Fig. 1과 같이

$b$ : 압전 소자의 반경

$h_1, E_1$ : 압전 소자의 두께와 영률

$h_2, E_2, \sigma_2, \rho_2$ : 금속진동판의 두께와 영률, poisson비, 밀도

$a_m$ :  $m$ 차 공진에 대한 지지방식 기준정수로서,  $m=1$ 일 때 마디지지는 2.20, 주변 지지는 3.00, 주변 고정은 3.20를 가진다.

이다. 그리고, 지지된 스피커 소자의 공진주파수가 결정될 때, 임계 감쇠상태(critical damping)의 조건을 만족한다는 가정하에서 대역폭(BW)은 아래의 식 (5)와 같이 주어진다.<sup>10)</sup>

$$BW = 2\sqrt{\frac{K_e}{M_e}} \quad \text{[Hz]} \quad (5)$$

$K_e$ : 스피커 소자의 등가 스티프니스 [N/m<sup>2</sup>kg/s<sup>2</sup>]

$M_e$ : 스피커 소자의 등가 질량 [kg]

마지막으로 압전 세라믹의 poisson 비( $\sigma_1$ )는 대체로 0.33으로 주어지고 금속진동판과의 poisson 비( $\sigma_2$ )가 같다( $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$ )고 가정할 수 있고, 이때 감도지수(S)는 입력전압에 대한 스피커 소자의 음압으로서 아래의 식 (6)으로 주어진다.<sup>9), 10)</sup>

$$S = \frac{a(1+\beta)^{5/2}\sqrt{\beta}}{1+a\beta} \times \frac{\eta[3+\sigma-\eta^2(1+\sigma)]}{(1+\sigma)P_s + \eta[(1-\sigma)P_s + 2(1-\sigma^2)(1-\frac{3}{2}\zeta + \frac{3}{4}\zeta^2)]} \quad [\text{no unit}] \quad (6)$$

여기서

$$P_s = (1-\sigma^2)(\beta^2 + \frac{3}{2}\beta\zeta + \frac{3}{4}\zeta^2)a\beta + 2\sigma(1-\sigma)(1 + \frac{3}{2}\zeta + \frac{3}{4}\zeta^2) \quad [\text{no unit}]$$

$$\eta = b/a$$

$a$  : 금속진동판의 반경 [mm]

$b$  : 압전 소자의 반경 [mm]

이다.

이상의 식을 바탕으로 스피커 소자에서 최적의 금속진동판을 결정하기 위하여 앞절에서 언급한 종류를 모두 택하여서, 지지방식들 중 일레로 마디지지의 방식으로 200 kHz를 만족할 때의 각 진동판의 크기와 두께, 그리고 그 때의 감도지수와 대역폭을 설계하였다. 그 결과를 Table 1에 나타내었다. Table 1에 따르면 대역폭은 알루미늄이 가장 우수하고, 감도지수는 황동판이 가장 우수하였고, 공진주파수 200 kHz를 만족하는 두께는 식 (4)에 의해 황동판은 2 mm, 알루미늄은 0.25 mm이다. 이 결과로부터 스피커 소자의 진동판으로 넓은 대역폭과 얇은 두께를 가지면서 제작성이 우수한 알루미늄판을 선택하였다. 알루미늄 진동판에 따른 감도지수의 저하는 후에 다수의 스피커 소자들을 배열화함으로써 해결하고자 하였다. 그리고 지름은 감도지수에 의해서 결정되는데, 식 (6)에 의해 최적의 감도지수를 가지는 금속진동판의 지름은 23 mm로 결정되었다.

표 1. 200 kHz의 공진주파수를 가지는 금속진동판의 두께와 반경  
Table 1. Thickness and radius of the vibrating metal plate at resonant frequency of 200 kHz.

Metal plate	Thickness ratio ( $\beta$ )	Radius ratio ( $\eta$ )	Resonant frequency (f <sub>rs</sub> : kHz)	Bandwidth (BW : kHz)	Sensitivity factor (S)
Aluminum	3.655	0.490	200.03	22.0	0.16
Brass	0.540	0.693	200.50	9.5	1.84
Titanium	1.795	0.624	200.01	16.3	0.81
Stainless steel	0.735	0.720	200.05	10.4	1.64
Iron	0.770	0.724	200.01	10.5	1.62

\* piezoelectric ceramic (radius : 5 mm, thickness : 0.95 mm)

또한 음압을 개선할 수 있는 방법으로 케이스의 공진주파수를 고려하여 보상할 수 있다. Fig. 1과 같은 케이스의 공진주파수( $f_{case}$ )는<sup>9), 10)</sup>

$$f_{case} = \frac{C_a a_c}{2\pi b_c} \frac{1}{\sqrt{h_c(t_c + 1.42a_c)}} \quad [\text{Hz}] \quad (7)$$

으로 주어진다. 여기서

$C_a$  : 공기중의 음속 [m/s]

$a_c$  : 케이스 구멍의 반경 [mm]

$b_c$  : 케이스의 반경 [mm]

$h_c$  : 케이스의 높이 [mm]

$t_c$  : 케이스의 두께 [mm]

이다. 식 (7)을 이용하여 전 가청주파수 영역을 고려할 수 있는 10 kHz 공진 주파수를 가질 때 케이스의 반경에 따른 높이를 Table 2에 나타내었다.

표 2. 10 kHz의 공진주파수를 가지는 케이스의 구멍 반경과 지지대 높이

Table 2. Radius of the hole and support height of the case with its resonant frequency of 10 kHz.

Resonant frequency (f <sub>case</sub> )	Radius of case hole (a <sub>c</sub> : mm)	Support height (h <sub>c</sub> : mm)
10 kHz	2	1.1
	3	1.8
	4	2.6
	5	3.4
	6	4.1
	7	4.9
	8	5.7
	9	6.5
	10	7.3

\*case thickness = 1 mm.

이 때 케이스의 두께는 1 mm이다. 본 연구에서는 크기와 제작상의 이점을 고려하여 케이스 구멍의 반경은 5 mm, 지지의 높이는 3.4 mm로 설계하였다. 이렇게 함으로써 가청주파수 대역의 가운데인 10 kHz 부근에서 음압을 개선할 수 있다. 이런 설계 결과를 바탕으로 제작된 단일 초음파 스피커를 Fig. 2에 나타내었다.



그림 2. 압전 스피커 시작품의 사진  
Fig. 2. Photograph of an ultrasonic speaker prototype.

3. 배열(Array)

기존 loudspeaker에 준하는 높은 음압을 구현하기 위해 앞절에서 제작한 스피커 소자들을 배열(Array)화하여 충분한 음압을 얻고자 하였다. 넓은 대역폭을 가지는 마디지지의 형태로 스피커 60개의 배열과 방사패턴을 설계하였다. 많은 스피커를 배열할수록 음압은 커지지만, 시제작 작업의 편의상 60개를 선정하였다. 이를 설계함에 있어서 중요한 사항은 전체 배열 모양이 대칭적인 구조를 가지게 하여서 음압의 측정위치에 따라 특성이 변하지 않게 하였다. 배열의 설계에 이용된 방법은 일반적인 circular source를 point source로 대체하여 전체 음압을 계산한 결과에 circular source를 곱함으로써 쉽게 방사패턴을 구하는 Product theorem을 이용하였다.<sup>1)</sup> 배열을 하기 위해서 먼저 대칭적인 배열의 모양을 결정하고, 배열에서 초음파 배열 스피커의 방사패턴을 알기 위하여 Product theorem을 이용하여 시뮬레이션하였고, 각도 360°에 따른 음압 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

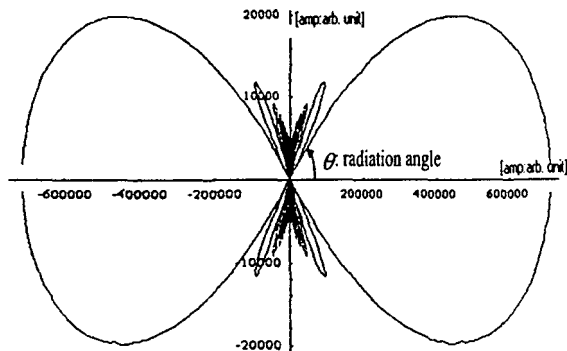


그림 3. 초음파 배열스피커의 방사 패턴  
Fig. 3. Radiation pattern of the ultrasonic array speaker.

여기에서 나타난 음압은 절대치가 아니라, 방사각을 비교하기 위하여 상대적인 값을 나타낸 것이다. x와 y축, 모두는 크기를 나타내고, 이때 방사각  $\theta$ 는 5°에 이른다.

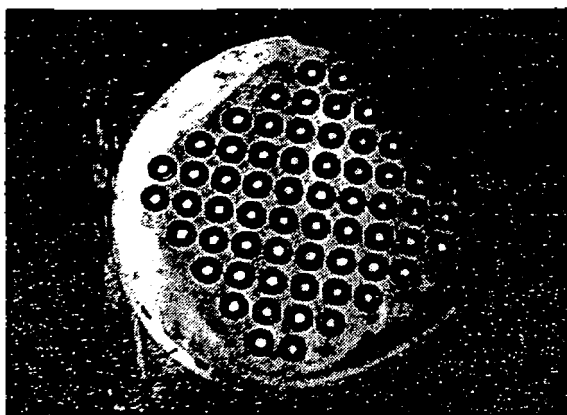


그림 4. 초음파 배열스피커 시제품의 사진  
Fig. 4. Photograph of an ultrasonic array speaker prototype.

그리고, 임피던스 특성이 같으며 200 ~ 210 kHz의 공진 주파수를 가지는 마디지지의 스피커 소자 60개를 제작하여 배열트랜스듀서를 제작하였다. 이렇게 제작된 배열 스피커의 사진을 Fig. 4에 나타내었고, 주파수에 따른 임피던스 특성을 Fig. 5에 나타내었다. 배열된 스피커의 공진주파수는 202 kHz였고, 그 때의 임피던스는 4.5  $\Omega$ 이었다.

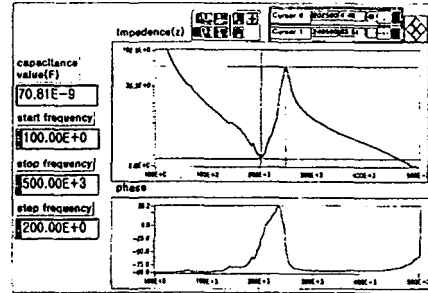
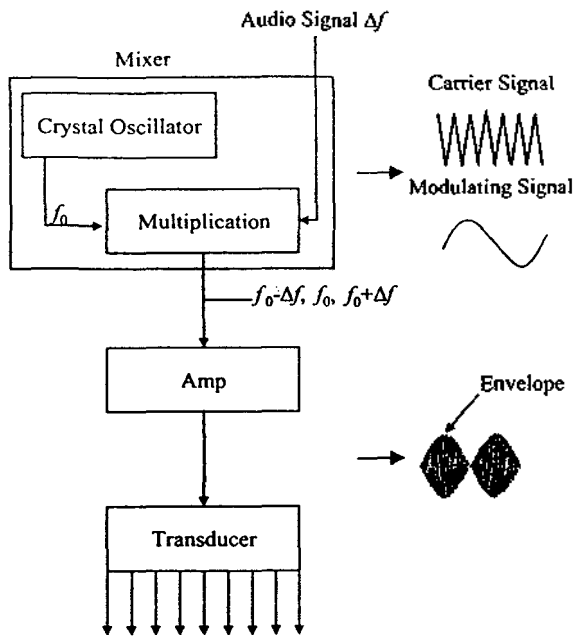


그림 5. 초음파 배열스피커의 임피던스 특성  
Fig. 5. Impedance characteristic of the ultrasonic array speaker.

4. 구동회로

구동회로는 내부에서 고유의 초음파 신호를 발생시키고, 더불어 입력 신호를 회로내의 발생 신호에 실어 스피커를 통하여 출력하면 초음파 신호간의 간섭작용에 의해 원래의 입력 신호를 발생시켜야 한다. 그러므로 구동회로의 발생주파수는 초음파 스피커의 공진주파수에 의해서 결정되고, 회로에서 출력되는 초음파 신호는 스피커 공진주파수의 초음파 신호와 입력주파수를 더하고 뺀 초음파 신호를 발생시키는 구조로 되어 있다.

초음파 스피커 시스템의 Block Diagram을 Fig. 6에 나타내었다. 이 시스템은 내장된 crystal oscillator에 의해 중심주파수  $f_0$ 인 초음파 고정 신호를 우선 발생시키고, 여기에 외부로부터 음악 신호( $\Delta f$ )가 입력되면, 입력 음악 신호와 고정 신호를 믹스(mix)시켜 중심주파수가 각각  $f_0 - \Delta f$ ,  $f_0$ ,  $f_0 + \Delta f$ 인 세 개의 신호들을 만들어 낸다. 일반적인 신호 믹서기라면  $f_0 - \Delta f$ 와  $f_0 + \Delta f$ 의 두 개의 신호밖에 발생을 못시키나, Fig. 6에 나타난 믹서는 초음파 스피커용으로 적합하도록 원래의 신호  $f_0$ 도 계속 유지하도록 하였다. 이렇게 발생된 세 개의 초음파 신호는 앰프를 통하여 증폭된 후, 트랜스듀서를 통하여 출력되면서, 식 (2)에 나타낸 상호작용에 의해 원래의 음악 신호  $\Delta f$ 를 만들어 내게 된다. 트랜스듀서, 즉 본 논문에서 개발하고자 하는 초음파 스피커 소자에 의해 음악 신호로 변환되는 과정에서 II절에서 언급한 바와 같이 본래 신호들의 고차 합주파수와 차주파수를 가지는 항들도 동시에 생성이 되나, 앞에서 밝힌 이유들에 의하여 본 논문에서는 무시하기로 하였다.



$\Delta f$  : audio signal frequency  
 $f_0$  : carrier signal frequency

그림 6. 초음파 스피커 시스템의 개략도  
 Fig. 6. Block diagram of the ultrasonic speaker system.

IV. 성능평가

본 연구에서 사용한 음압 측정 시스템의 개략도를 Fig. 7에 나타내었다. 오디오 신호 발생기에서 입력 오디오 신호를 초음파 스피커의 구동회로에 내보내고, 그 출력단자

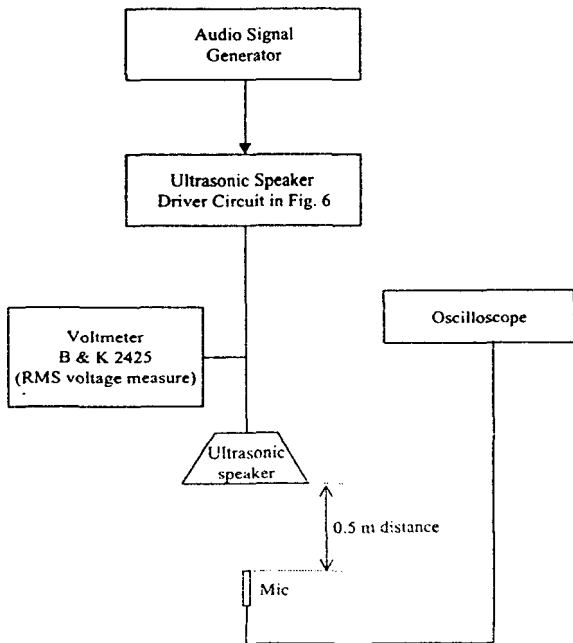


그림 7. 초음파 배열스피커의 음압 레벨 측정 장치의 개략도  
 Fig. 7. Schematic measurement system of the sound pressure level of the ultrasonic speaker.

에 초음파 스피커를 연결하여 스피커를 통하여 생성된 입력신호를 스피커의 정면에 설치된 마이크로 잡아 오실로스코프로 보내면 그 때의 음압을 알 수 있고, 그 때의 측정조건을 볼트미터를 통해 알게되는 구조로 되어 있다. 음압 측정거리는 0.5 m로서 최종 출력되는 결과 음압은 1 m로 보상되어 나타나게 된다.

본 연구에서 개발된 스피커가 지향성이 높고, 가청 주파수 대역에서 넓은 대역폭을 가지는 것을 알기 위하여 주파수에 따른 음압을 측정하였다. 배열 스피커 제작에 앞서 단일 초음파 스피커 소자에 구동회로를 연결하여 가청 주파수 영역에서 음압을 측정하였다. 앞에서 설계한 대로 중심주파수가 10 kHz인 가청신호를 입력하였을 때, 주변고정인 스피커 소자의 최고 음압은 65 dB, -3 dB 대역폭은 7.5 kHz에 이르고, 주변저지의 최고 음압은 67 dB, -3 dB 대역폭은 7.5 kHz에 이른다. 그리고, 마디지지의 최고 음압은 65.5 dB이고, -3 dB 대역폭은 12 kHz에 이른다. 공진주파수는 지지의 방식에 따라 스피커 소자에 지지되는 치수를 다르게 하여 구현할 수 있고, 또한 음압도 적절히 구현이 가능하지만, 대역폭은 큰 차이를 가진다. 이러한 결과로 최대 대역폭을 가지면서 균일한 음압을 가지는 마디지지의 형태가 초음파 스피커 소자로서 적당하다는 것을 알 수 있다.

그리고, 구동회로와 스피커 소자 60개를 병렬로 연결하여 제작한 초음파 배열 스피커를 연결하여 주파수에 따른 음압을 측정하여 그 결과를 Fig. 8에 나타내었으며, 주파수에 따른 평균 음압은 103 dB, 대역폭은 17.5 kHz에 이르는 것으로 나타났다. 이때의 측정조건은 배열 스피커에 걸리는 전압은 2 V, 전류는 0.5 A로써 총 파워는 1 W이다. 이것은 일반적인 loudspeaker보다 저 파워를 소모하면서 높은 음압을 나타내므로 고효율임을 알 수 있다.

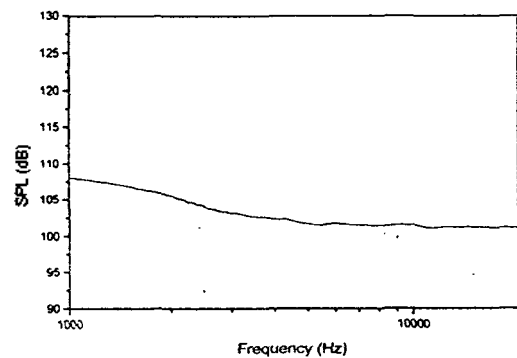


그림 8. 초음파 배열스피커의 음압 레벨  
 Fig. 8. Sound pressure level of the ultrasonic array speaker.

이상의 과정을 거쳐 압전 세라믹을 이용한 초음파 스피커가 개발되었는데, 개발된 배열 스피커는 가청주파수 영역에서 평탄한 대역을 가지고, 음압도 loudspeaker에 준하는 크기까지 구현 가능한 것으로 확인되었다. 배열 스피커 제작시 스피커 소자의 개수를 늘리면 더 큰 음압을

구현할 수 있을 것이다. 스피커의 지향성은 실험장치의 부족으로 정량적인 평가는 어려웠지만, 시청결과 Fig. 3에서 보는바와 같은 높은 지향성을 확인할 수 있었다.

V. 결 론

본 연구에서는 압전 세라믹을 이용한 스피커의 최적 구조를 설계하였고, 이를 바탕으로 중심주파수 200 kHz 인 초음파 스피커의 시제품을 제작하였으며, 제작된 스피커의 성능을 측정하여 그 가능성을 확인하였다. 제작된 스피커는 설계된대로 넓은 대역폭과 높은 지향성을 가지고 있었으며, 전압 2 V와 전류 0.5 A의 구동조건에서 103 dB에 이르는 평균 음압으로 고효율을 나타내었다. 본 연구에서 개발한 초음파 스피커는 기존 loudspeaker와는 전혀 다른 새로운 개념에 바탕을 두고 있고, 이상의 결과에 의해 통상의 loudspeaker와는 성능면에서도 많은 상이한 특성을 보이고 있다. 따라서 기존 loudspeaker와 상호 보완 혹은 특정 목적의 용도로 그 효용성을 기대할 수 있다. 향후, 계속되어야 할 연구내용으로는 초음파 스피커 소자와 구동회로의 지속적인 성능 향상, 그리고 구동회로와 배열 스피커의 크기 축소, 다양한 모양의 설계 등을 들 수 있다.

참 고 문 헌

1. Allan D. Pierce, Acoustics, (Acoustical Society of America, New York, 1989), Chap.2, pp.54-60.
2. Report of American Technology Coporation, "Introduction to Hypersonic Sound Technology", American Technology Coporation, 1997.
3. B. K. Novikov, O. V. Rudenko, V. I. Timoshenko, Nonlinear Underwater Acoustics, (Acoustical Society of America, New York, 1987), Chap.11, pp.173-183.
4. Kinsler, Frey, Coppens, Sanders, Fundamentals of Acoustics. (John Wiley & Sons, New York, 1982), Chap.8, pp.182-185.
5. "IEEE Standard on Piezoelectricity", IEEE Std. p.176, 1978.
6. O. T. Von Ramm and S. W. Smith, "Beam Steering with Linear Array", IEEE Trans. Son. Ultrason., Vol. SU-30(8), 1983.
7. 西山 浩司, 加賀 公衛, 壓電發音部品と その應用, (綜合技術總販, 東京, 1985), Chap.4, pp.41-45.
8. ニューケラスシリーズ編輯委員會 編, 壓電セラミックスの應用, (學聲社, 東京, 1989), Chap.5, pp.150-154.
9. 當田, 山口, "壓電形 受話器の檢討", 通研實報, 第14卷, 第4号, 1965.
10. ニューケラスシリーズ編輯委員會 編, 壓電セラミックスの應用, (學聲社, 東京, 1989), Chap.5, pp.155-160.

11. Kinsler, Frey, Coppens, Sanders, Fundamentals of Acoustics. (John Wiley & Sons, New York, 1982), Chap.8, p.197.

▲문 창 호(Changho Moon)



1997년 2월 : 대구대학교 전자공학과 졸업(학사)  
 1999년 2월 : 경북대학교 대학원 센서공학과 졸업(공학석사)  
 1999년 2월~현재 : 대원전자 주식회사 연구원

▲안 도 현(Dohyun Ahn)



1993년 2월 : 부산대학교 물리학과 졸업(학사)  
 1996년 2월 : 부산대학교 대학원 물리학과 석사과정 수료  
 1996년 2월~현재 : LG CND 주식회사 음향연구소 연구원

▲노 용 래(Yongrae Roh)

한국음향학회지 제17권3호 참조