

# 새로운 음향 변환기와 이를 응용한 음향발생기

문 원 규, 김 용 구  
포항공과대학교 기계공학과

## A Study on a New Acoustic Transformer Using a Piezoelectric Actuator

Wonkyu Moon and Yonggu Kim  
Department of Mechanical Engineering, POSTECH  
(e-mail: wkmooon@postech.ac.kr)

### 요 약

본 연구에서는 1000Hz 미만의 저주파 대역에서 음향 방사 특성을 향상시키기 위한 새로운 형태의 음향 변환기를 연구하였다. 이 음향 변환기는 세 개의 혼을 직렬의 조합으로 연결한 형태를 띄고 있고 설계상에 필요한 계산을 위해 혼 방정식에 근거해 간단한 모델을 개발했다. 음향 발생을 위한 변환기로써 원형판에 얇은 압전체를 붙인 작동기를 사용하였다. 제안된 음향 변환기는 개발된 모델을 통해 설계되었고 실험을 위해 제작되었다. 제안된 음향 변환기의 성능은 실험과 수치해석을 통해 검증하였다. 음향 해석 프로그램인 SYSNOISE를 이용한 수치해석과 실험에 근거한 결과는 제안된 음향 변환기가 600Hz 미만의 주파수 대역에서 5 ~ 30 dB의 음압을 발생시키는 것을 보여준다.

### 1. Introduction

이론적으로 고체의 진동으로부터 음향을 효과적으로 발생시키기 위해서는 소리의 파장과 진동체의 크기가 거의 같아야 한다. 하지만 상당히 높은 주파수를 제외하고는 우리가 관심 있는 주파수의 파장은 매우 커서 이보다 큰 음향 발생기를 만드는 것이 현실적으로 불가능한 경우가 많다. 또한 발생된 음향은 모야주지 않으면 모든 방향으로 전달되어 나가기 때문에 효과적으로 전달되지 못한다. 이와 같은 이유로 예전부터 먼 거리로 소리를 보내기 위해 사용된 것이 혼(horn)이다.

혼은 음향학적으로 acoustic waveguide의 일종으로 단면적을 점차 변화 시켜서 매질의 임피던스(impedance)의 최대치에 가까운 부하가 진동체에 작용하도록 하여 음향 출력 효율을 높이는 역할을 한다. 또한 모든 방향으로 음파가 방사하는 것을 방지하여 방향성을 제공한다. 저주파의 경우 혼의 목 부분에 설치된 진동체의 음향 발생 효과는 실제 진동체보다 더 큰 면적을 가진, baffle 위에 설치된 진동체의 음향 발생 효과에 가깝게 된다. 이러한 혼의 특성으로 인하여 혼을 때로 음향 변환기(acoustic transformer)라 부르기도 한다.

혼 시스템의 효율은 일반적으로 20% 정도로 혼을 사용하지 않은 일반 음향 시스템의 0.1 ~ 1% 정도에 비해서 상당히 큰 장점이 있어 기계적인 증폭만 가능하던 초기 혼 연구에서는 출력 효율과 같은 부하 증폭에 초

점이 맞춰졌었다.[Ref 1-4] 그러나 전기적 증폭이 가능해짐에 따라 음향의 발생보다 방향성 제어(directionality control)와 같은 효과적인 음향 전달에 좀더 많은 연구와 관심이 집중되고 있다.[Ref 3, 5]

어느 응용 사례를 위해서도 혼의 응답 특성에 대한 모델은 중요하고 그 중에서도 혼의 방향성 응답 특성을 정확하게 예측하기 위해서는 정확한 파면의 모양이 요구되어 평면파(plane wave)를 가정한 Webster's horn equation의 적용 타당성이 의심스럽다고 판단되고 있어 혼의 정확한 모델 작성을 위한 새로운 시도와 접근이 이루어지고 있다.[Ref 7] Geddes [Ref 5-7]는 좀더 정확한 방향성 예측을 위해 기존의 평면파 가정에서 벗어나 acoustic waveguide의 개념을 도입하여 새로운 이론을 제시하였다. Waveguide는 음향 방정식의 직접해로 Webster's equation의 평면파 가정에서 벗어난 완전해(exact solution)가 될 수 있었다. 간단히 Geddes의 논문을 요약하면 파면과 waveguide의 모양을 적절히 조절하면 일정한 방향성 제어를 위한 최적의 혼의 형상을 만들 수 있다는 것이다.

그러나 Putland[Ref 8-9]는 Geddes의 입장에 반하여 모든 1P(One parameter) 파동이 Webster's horn equation임을 만족함을 증명하였다. 그는 1P 파동의 성질들을 자세히 밝힘과 동시에 1P 파동을 만족하는 새로운 혼 형상을 찾으려는 Geddes의 노력이 무의미하다고 주장하였다.

Putland의 주장대로 새로운 형상의 혼을 찾음으로 혼의 음향학적 성능 향상이 불가능하다면 기본적인 혼의 형태에서 벗어나 새로운 음향 변환기를 연구·개발할 필요가 있다. 혼의 기능은 음향 변환기로서 만족스러운 수준이라 할 수 없다. 그 이유는 혼에 의한 트랜스듀서(transducer) 부하 증폭 효과가 있는 저주파 영역이 지수 혼(exponential horn)의 경우는 cutoff frequency에 의해 한정 받는 등 매우 제한적인 영역에서 그 기능을 발휘하고 또한 혼 사용 시 음향 파형의 변환을 야기할 수 있기 때문에 음향 발생 효과 증대와 더불어 음질의 저하 측면도 있기 때문이다.

본 논문에서는 혼이 크게 효과를 보이지 않는 저음부에서의 음향 발생 효율을 높일 수 있는 음향 변환기를 연구하였다. 저음부에서 조금 더 고른 주파수 특성을 얻을 수 있을 뿐 아니라 저주파 SONAR와 같이 저주파의 효율적 발생이 중요한 경우의 응용 가능성을 타

진하였다.

## 2. Modeling of an acoustic transformer

이론적으로 잘 알려진 혼의 성질을 이용하여 새로운 음향 변환기를 설계하였다. 본 논문에서 제안하는 음향 변환기의 구조는 서로 다른 형태의 혼을 접합한 형태로 크게 세 부분으로 구성되었다. 첫 번째는 지수혼을 거꾸로 부착시킨 부분으로 트랜스듀서 부분에서 발생한 음향의 속도를 증폭시켜주는 역할을 한다. 두 번째는 지수혼 부분으로 일반적인 혼이 음압 발생부의 부하를 증가시키는 역할을 수행한다. 마지막 부분은 원추혼 부분으로 지수혼의 입 부분과 접합되어 급격한 단면적 증가를 완화시켜 혼 내부 음파의 균질성을 유지시켜 음향 성능을 향상시킨다. 이렇게 서로 다른 형태의 혼을 접합하는 것은 방향성 제어와 함께 좋은 부하 효과를 위해 Keele 가 설계한 지수혼 - 원추혼의 직렬 연결 복합 혼과 유사하다. [Ref 10]

앞서 기술한 바와 같이 세 부분이 직렬로 연결된 음향 변환기에 대해 각 혼들의 요소 모델을 결합하는 방식으로 radiation impedance(방사 임피던스)를 Mathematica 를 이용하여 계산하였다.

각 부분의 크기는 Fig. 3 에 나타낸바와 같은 형상이며 실제 실험에 사용된 음향 변환기의 형태이다. 입 부분(거꾸로 된 지수혼은 목 부분)의 임피던스는 무한 baffle 위에 있는 원형 피스톤의 방사 임피던스를 적용하였다.[Ref 11] 혼을 통해 방사되는 음향 출력은 임피던스의 실수부에만 비례하므로 계산 결과는 임피던스의 실수부만 나타내었다.

거꾸로 된 지수혼, 지수혼, 원추혼 이 세 가지가 모두 직렬로 연결된 음향 변환기의 방사 임피던스를 살펴보자. 유한한 길이를 가진 혼의 결합이고 거꾸로 된 지수혼의 영향으로 굴곡이 심하고 많은 편이

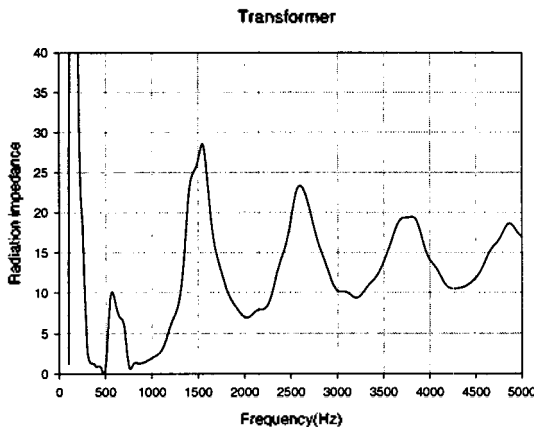


Fig.1 음향 변환기의 Radiation impedance

다.(Fig.1) 특히 170 Hz 부분에서 커다란 돌출부를 가진다. Fig.1 을 잘 살펴보면 두 가지의 특이한 점을 발견할 수 있다. 하나는 지수혼의 cutoff frequency 보다 낮은 저음부에서의 방사 효과 향상이다. 잘 알려져 있는 바와 같이 혼은 저주파 영역에서 음향을 효과적으로 발생시킬 수 있게 한다. 그러나 그것은 Baffle 위에서

진동하는 piston 에 의하여 음향을 방사하는 것보다 방사 효율이 최대 한계값에 빨리 도달하게 할뿐 보통 어떠한 frequency 이하에서는 전혀 효과를 볼 수 없다. 그러나 새로 작성한 음향변환기의 경우 구성된 지수혼의 cutoff frequency 이하에서 비록 좁은 주파수 영역이지만 음향 방사 효율의 커다란 향상을 기대할 수 있다는 것을 Fig.1 을 통해 알 수 있다. 두 번째로, 주목할 만한 점은 peak 가 일어나는 주파수이다. Peak 가 일어나는 주파수는 연구되는 음향 변환기를 구성하는 세가지 혼의 peak 들과 다른 주파수에서 일어난다는 점이다. 기본적으로 역지수혼의 peak 들의 위치와 가깝긴 하나, 직렬로 연결된 다른 혼들의 그것에 영향을 받은 것으로 판단된다. 따라서 이 peak 들의 위치를 잘 활용한다면 음향 방사 효율이 상당히 평평한 음향 변환기를 설계할 수 있을 것으로 예상된다.

## 3. Experiment and simulation

### 3.1 Experiment and simulation setup

음향 변환 발생기는 크게 트랜스듀서와 음향변환기, 두 부분으로 구성되었다. 음향을 발생시키는 트랜스듀서 부분은 전기적 에너지를 기계적 에너지로 전환시키는 압전 세라믹을 원형의 알루미늄 평판에 부착시켜 제작하였다. 실험에 사용된 압전 세라믹은 일본 FUJI CERAMICS C-82 로 크기는 20×20×0.5mm 이며, 기본 물성치는 Table 3-1 과 같다.

Property	Symbol	Value
Young's modulus	$E_{11}$	$59 \times 10^9 \text{ Pa}$
Young's modulus	$E_{33}$	$52 \times 10^9 \text{ Pa}$
Young's modulus	$E_{55}$	$21 \times 10^9 \text{ Pa}$
Piezoelectric charge constants	$d_{31}$	$-260 \times 10^{-12} \text{ C/N}$
Piezoelectric charge constants	$d_{33}$	$540 \times 10^{-12} \text{ C/N}$
Piezoelectric charge constants	$d_{15}$	$750 \times 10^{-12} \text{ C/N}$
Piezoelectric voltage constants	$g_{31}$	$-8.7 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{C}$
Piezoelectric voltage constants	$g_{33}$	$18 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{C}$
Piezoelectric voltage constants	$g_{15}$	$27.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{C}$
Relative Dielectric constants	$\epsilon_{11} / \epsilon_0$	3100
Relative Dielectric constants	$\epsilon_{33} / \epsilon_0$	3400

Table 3-1 FUJI CERAMICS C-82 의 기본 물성치

음향 변환기의 실험을 위해 음향 발생 조건을 크게 두 가지로 나누었다. 하나는 일정한 전압 60V 로 압전 작동기를 작동시키는 것이고 다른 하나는 원형 평판 전체가 균일한 속도로 가진 되는 것이다. 정확한 실험을 위해서는 평판 전체가 균일한 진동을 해야 하지만 고정된 평판의 실제 진동은 주파수에 따라 다양한 모드로 움직이게 된다. 따라서 대략적이나마 관심 있는 주파수 영역에서 원형 평판 중심 속도의 진폭만 0.00228 m/s 가

되도록 조건을 맞추었다.

음향 변환기의 전반적인 실험장치의 구성은 Fig. 2 에 나타내었다. 실험은 울산대학교 무향실에서 수행하였다.

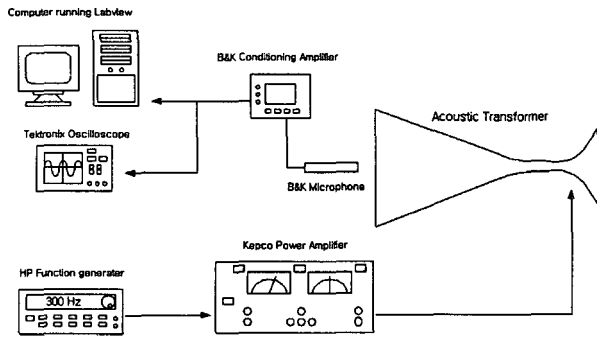


Fig. 2 음향변환기의 실험장치의 구성

측정된 주파수 영역은 100-1000 Hz 이고 20 Hz 간격으로 측정하였다. 이것은 음향 변환기가 효과적으로 음향을 발생시키는 영역이 저음부이고 원형 평판의 복잡한 모드 영향을 덜 받는 주파수 영역에 집중하여 실험이 이루어져야 하므로 선택된 주파수 영역이다. 음향 압력 측정위치는 음향 변환기 입 부분의 중심, 즉 트랜스듀서로부터 65cm 떨어진 지점이다.

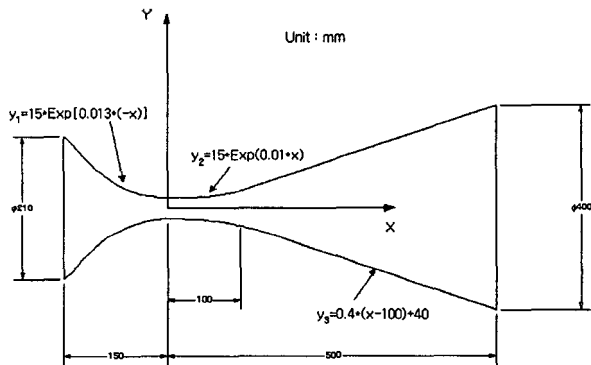


Fig. 3 음향변환기의 대략적인 설계도

음향 변환기의 성능을 예측하고 실험 결과와 비교하기 위해 선형 음향 방정식을 수치 해석하는 SYSNOISE 를 사용하였다. I-DEAS 를 이용하여 트랜스듀서와 음향 변환기의 3 차원 mesh 를 각각 제작하고 SYSNOISE 에서 경계조건을 주어 전체적으로 해석하였다.

먼저 강제 진동하는 원형 평판을 구조 해석하여 트랜스듀서를 시뮬레이션하였고 음향 변환기 부분은 공기 mesh 에 적절한 음향 경계 조건을 준 음향 모드를 구해 두 부분을 연결하여 수치 해석하였다.

### 3.2 Results and discussions

Fig. 4 은 방사판 속도의 진폭을 일정하게 유지하면서 주파수 변화에 따른 발생하는 소리 크기의 변화를 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 4 에는 음향 변환기의 성능 비교를 위해 음향 변환기 없이 원형 평판이 직접 방사하는 경우와 음향 변환기가 아닌 지수혼으로 Fig. 3 의 왼쪽과 오른쪽을 연결한 경우의 음향 입력을 표시하였다. Fig. 4 을 살펴보면 평판이 직접 방사를 하는 경우

보다 음향 변환기를 이용하여 방사하는 경우가 모든 주파수 영역에서 크기는 35 dB 까지 더 큰 소리를 발생시키는 것을 발견할 수 있다.

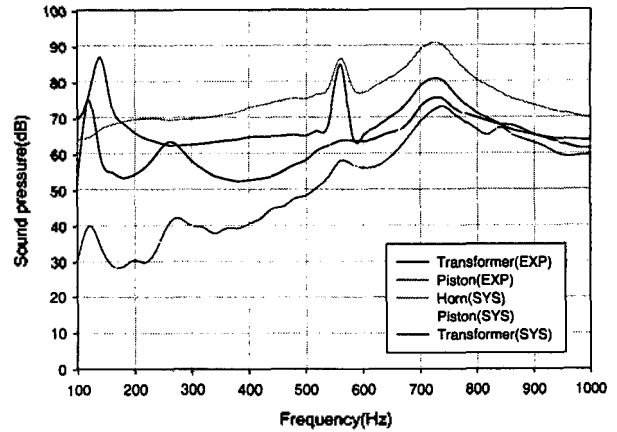


Fig. 4 일정한 속도의 진폭 하에서 음압의 변화

그런데 음향 변환기를 이용한 경우와 지수혼을 이용한 경우를 비교하면 고주파 영역에서 후자가 크기는 10dB 까지 더 큰 소리를 발생시키는 것을 볼 수 있다. 이는 세가지 혼을 이어서 만든 음향 변환기가 하나의 혼보다 방사 효율 향상에 더 큰 효과를 주지 못한다는 것을 의미한다. 넓은 주파수 영역에서는 효율 향상이 없다는 결론이 옳다 하더라도 매우 좁은 주파수 구간 특히 200Hz 미만의 저주파 영역에서 많게는 20dB 정도의 SPL 향상을 관찰할 수 있다. 이는 매우 고무적인 결과이다. 왜냐하면 음향 변환기를 저주파 음향 발생에 효과적으로 응용할 수 있는 가능성을 시사하는 것이기 때문이다. 이 결과를 저주파 SONAR 등에 응용한다면 커다란 효과를 기대할 수 있을 것으로 예상된다.

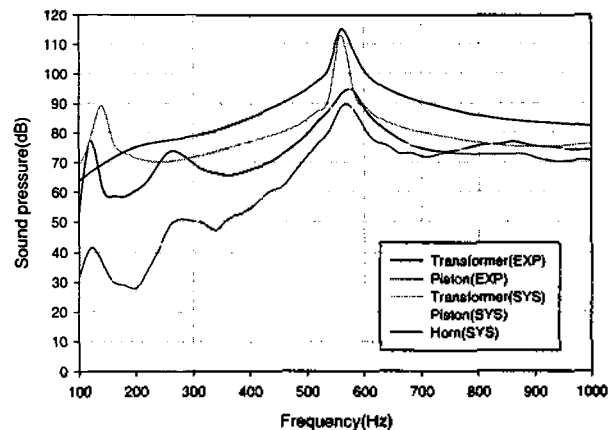


Fig. 5 일정한 전압의 진폭 하에서 음압의 변화

Fig. 5 은 진동판을 구동하기 위하여 사용된 압전체에 부가하는 전압의 진폭이 일정하도록 유지하여 수치 해석하고 실험한 결과를 보여준다. 각 경우들의 주파수 특성과 상대적인 장단점은 Fig. 4 에 표시한 동일 속도 조건과 같으나 저주파에서 방사 음향이 고주파의 그것보다 상대적으로 더 작아진다는 점이 Fig. 4 과 면밀히 비교했을 때 얻을 수 있는 결론이다. 이는 압전체를

transducer 로 썼기 때문에 생기는 특징으로 판단된다. Fig. 4 와 5 에 표시한 두 가지 조건 모두에서 실험과 수치해석 결과는 비교적 비슷한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4 와 5 에 공통적으로 나타나는 560Hz 부근 peak 는 설계 모델에서도 예측되었던 (Fig. 1 참조) 것이나 설계 모델에서 예측할 수 있었던 것보다 훨씬 더 큰 영향력을 가졌다는 것을 확인할 수 있었다.

550Hz 이상의 주파수 영역에서는 트랜스듀서 부분인 원형 평판의 첫번 고유 진동수보다 큰 주파수 영역이므로 평판은 더 이상 circular mode 로 진동하지 아니하여 원형 중심에서의 속도가 급격히 줄어들게 된다. 그런데 수치 해석에서는 원형 평판 전체가 균일한 속도 분포를 가정하므로 저주파 영역보다 수치해석 결과가 부정확해진다. Fig. 4 에서 이러한 경향을 볼 수 있다. Fig. 4 와 5 에 나타낸 실험 결과를 수치 해석등과 비교하면 실험에서 얻은 음향 변환기의 주파수 곡선이 수치 해석 결과보다 훨씬 평탄한 것을 알 수 있다. 이는 음향 변환기의 활용 범위를 넓힐 수 있는 가능성을 시사하는 것이라 하겠다.

#### 4. Conclusions and recommendations

본 논문에서는 세가지 혼을 직렬로 연결하여 새로운 종류의 음향 변환기를 설계 제작하고 해석하여 이의 성능을 평가하였다. 일반적으로 음향 방사 특성이 좋지 않은 저주파 영역에서 음향 변환기는 기대했던 효과를 나타냈으며 특히 아주 좁은 주파수 영역에서는 단순 혼을 쓰는 것 보다 최대 20dB 의 이득을 볼 수 있음이 확인되었다. 이는 저주파 SONAR Transducer 에 효과적으로 이용할 수 있는 가능성을 말해주는 사실이다. 실험 결과 예상보다 평탄한 주파수 특성 곡선을 얻을 수 있었다. 이는 다양한 혼을 조합하여 만든 음향 변환기가 좁은 주파수 영역의 음향을 효과적으로 발생시키기 위하여 사용되는 외의 용도로 사용될 수 있다는 것을 시사한다.

본 논문에서 살펴본 음향 변환기를 발전시키기 위하여 이루어져야 할 향후 연구 방향으로는 다음의 사항들이 있다.

1. 저음부의 음향 방사 특성이 향상되는 특성을 충분히 이용하기 위해서는 현재 매우 좁은 주파수 영역에서만 이루어지는 음향 방사 효율 향상을 조금 더 넓은 주파수 영역에 확대할 수 있는 방안을 연구해야 한다. 그리고 효율 증대가 일어나는 주파수 대역을 결정하는 설계인지를 정확하게 확인하여야 할 것이다. 이를 위해서는 음향 변환기 모델의 최적화가 필요하다.

2. Cutoff frequency 이하의 저음부에서 복합적인 요인으로 음향 변환기가 높은 방사 특성을 보이는데 이의 원인에 대한 철저한 규명이 필요하다.

#### 후 기

본 연구는 포항공과대학교 자체 연구비 지원 사업으로 수행하였음. 본 연구 실험을 위하여 도와주신 김성수, 최성준님 및 무향실을 사용할 수 있게 배려해 주신 울산대학교 이장명 교수님께 감사 드립니다.

#### 참고문헌

- (1) S. Ballantine, "On the Propagation of Sound in the General Bessel Horn of Infinite Length," *J. Franklin Inst.*, pp. 85-103(1927)
- (2) H. F. Olsen, *Acoustical Engineering* (Van Nostrand, New York, 1957), pp. 100-115.
- (3) J. E. Freehafer, "An Acoustical Impedance of an Infinite Hyperbolic Horn," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 11, pp. 467-476(1940 Apr.).
- (4) J. Hilliard, "Historical Review of Horns Used for Audience Type Sound Reproduction," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 59(1), pp 1-8(1976 Jan.)
- (5) E. R. Geddes, "Acoustic Waveguide Theory," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 37, pp. 554-569(1989 July/Aug.)
- (6) E. R. Geddes, "Acoustic Waveguide Theory Revisited", *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 41, pp. 452-461
- (7) E. R. Geddes, "Source Radiation Characteristics," *J. Audio Eng. Soc. (Engineering Report)*, vol. 34, pp. 464-478(1986 June).
- (8) G. R. Putland, "Every One-Parameter Acoustic Field Obeys Webster's Horn Equation," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 41, p. 435-451
- (9) G. R. Putland and E. R. Geddes, "Comments on 'Acoustic Waveguide Theory'," *J. Audio Eng. Soc.*(Letters on the Editor), vol. 39, pp. 469-472 (1991 June)
- (10) D. B. Keele, Jr., "What's So Sacred about Exponential Horns," presented at the 51<sup>st</sup> Convention of the Audio Engineering Society, *J. Audio Eng. Soc.* (Abstracts), vol. 23, p. 492(1975 July Aug.) preprint 1038.
- (11) L. E. Kinsler, *Fundamentals of Acoustics*, 3<sup>rd</sup> ed. (Wiley)
- (12) A. G. Webster, "Acoustical Impedance and the Theory of Horns and of the Phonograph," *Proc. Natl. Acad. Sci.*, no. 5, pp. 275-282(1919)
- (13) G. W. Stewart and R. B. Lindsay, *Acoustics* (Van Nostrand, Princeton, NJ, 1940), p. 212
- (14) L. L. Beranek, *Acoustics* (Acoust. Soc. Am./Am. Inst. Physics, New York, 1996)
- (15) P. M. Morse, *Vibration and Sound* (Acoust. Soc. Am./Am. Inst. Physics, New York, 1976), pp. 265-288
- (16) J. Hilliard, "Historical Review of Horns Used for Audience Type Sound Reproduction," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 59(1), pp. 1-8(1976 Jan.)
- (17) 이동수, "혼이 부착된 스피커 시스템의 음향학적 연구," 석사논문, 성균관대학교, 1988
- (18) A. H. Benade, "Equivalent Circuits for Conical Waveguides," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 83(5), pp. 1764-1769(1988 May)
- (19) Robert L. Clark, Chris R. Fuller, and Al Wicks, "Characterization of Multiple Piezoelectric Actuators for Structural Excitation," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 90(1), pp. 346-357(1991 July)
- (20) Bor-Tsuen Wang, "Optimal Placement of Microphones and Piezoelectric Transducer Actuators for Far-field Sound Radiation Control," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 99(5), pp. 2975-2984(1996 May)