

후면기공을 갖는 마이크로스피커와 덕트형 스피커시스템사이의 연관성 해석

Analysis of the Relation Between Micro-Speaker with the Back Holes and the Ducted Speaker-System

오 세 진*, 이 에 스 더**
(Sei-Jin Oh*, Esther Rhee**)

*주성대학 음향공학과, **계명대학교 음악공연예술대학 뮤직프로덕션과

(접수일자: 2007년 2월 14일, 수정일자: 2007년 3월 22일, 채택일자: 2007년 4월 3일)

본 연구에서는 마이크로스피커의 구조와 특성을 유닛과 덕트형 인클로저로 구성되어 있는 일종의 덕트형 스피커시스템처럼 취급할 수 있음을 처음으로 보여주었다. 후면기공의 면적이 증가할수록 스티프니스는 감소하고 컴플라이언스는 증가하였다. 그 결과로써, 후면기공의 면적이 증가할수록 공명진동수가 컴플라이언스의 제곱근에 비례하여 증가하였다. 후면기공의 면적이 감소함에 의하여 중저음 영역에서의 기준음압레벨이 지수함수적으로 감소하였다.

핵심용어: 마이크로스피커, 후면기공, 임피던스, 공명진동수, 덕트형 스피커시스템

투고분야: 전기음향 분야 (3)

In this study, the property and the structure of micro-speaker had been firstly shown to be treated as a ducted speaker-system, which was consisted of the unit and the ducted enclosure. With the decrease of total hole area, the resonance frequency of micro-speaker was decreased due to increasing the stiffness or reducing the compliance. The behavior of resonance frequency relative to the total hole area was exactly agreed with that of the square root of compliance. With decreasing the total hole area, the effective chamber volume was increased, but the reference sound pressure level was exponentially reduced in the low and middle frequency range.

Key words: Micro-speaker, Back hole, Impedance, Resonance frequency, Ducted Speaker-system

ASK subject classification: Electro-Acoustic (3)

I. 서론

다이나믹 스피커는 크기에 따라서 크게 두 가지로 분류한다. 일반적으로 스피커의 직경이 50mm 이상인 스피커를 일반 스피커 (general speaker)라고 부르고, 50mm 이하의 크기를 갖는 스피커는 마이크로스피커 (micro-speaker)로 알려져 있다. 직경이 20mm 이하인 마이크로스피커의 경우에는 정보통신용 단말기에 가장 많이 사용되며, 20~50mm의 마이크로스피커는 유선용 전화기와 노트북 그리고 PMP와 MP3용으로 사용된다.

일반 스피커와 마이크로스피커에서 소리가 발생하는 기본적인 원리는 서로 동일하다 [1-2]. 그러나 이들 후면구조의 다른 점을 (그림1)에서 쉽게 찾아 볼 수 있다. 일반 스피커의 경우에는 진동판의 후면이 전혀 막혀 있지 않고 완전히 열려 있는 상태라고 할 수 있다. 그러나 마이크로스피커의 경우에는 일반 스피커와 달리 후면이 완전히 막혀 있는 상태에서 여러 개의 구멍만이 뚫려 있는 것을 볼 수 있다. 이들 후면의 기공들을 산업계에서는 마이크로스피커의 음질을 조정하기 위한 방법으로 활용하고 있다. 따라서 후면의 구조가 마이크로스피커의 음향특성에 미치는 영향을 정확히 분석하는 것은 매우 가치가 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 마이크로스피커의 구조를 유닛과 덕트형 인클로저로 구성되어 있는 덕트형 스피커시스템(ducted speaker-system)으로 처음으로 간주하였다. 그리고 덕트형 스피커시스템의 특성분석법을 활용하여, 후면기공의 면적이 마이크로스피커의 음향특성에 미치는 영향을 조사하였다.

II. 실험방법

본 연구를 위하여, 지름이 36mm이고 두께가 3.6mm이며 공칭 임피던스가 8Ω인 마이크로스피커가 사용되었다(그림1). 이들 마이크로스피커를 1,000cc의 정사각형 배플박스 전면면에 부착하였다. 그리고 주파수가 20Hz부터 20kHz의 사인파를 신호발생기로부터 발생시켰다. 이 음향신호는 B&K 2716C의 파워앰프를 거치면서 0.1W로 증폭된 후에 마이크로스피커로 입력되었다. 이때 32Ω의 저항을 연결한 후에, 오디오 분석기(B&K

2012)를 통해 IEC 60268-5의 규격에 따라서 임피던스를 측정하였다. 그리고 마이크로스피커와 마이크로폰(1/2인치, B&K 4191) 사이의 거리를 10cm로 유지하는 가운데, 마이크로폰으로부터 나온 음향신호를 오디오 분석프로그램(B&K)을 통해 주파수특성을 측정하였다. 여기서 마이크로스피커의 후면 프레임에 있는 구멍들을 하나 또는 두 개씩 막아가면서 음향특성의 변화를 조사하였다. 이러한 측정은 4개의 동일한 마이크로스피커 샘플들에서 반복적으로 이루어졌다. 이들로부터 얻어진 데이터들은 기공의 면적별로 평균값이 취해진 후에, 기공의 면적에 따른 마이크로스피커의 공명진동수와 출력의 변화를 고찰하였다. 이들 실험적 결과들에 대한 이론적인 설명도 시도되었다.

III. 연구결과 및 논의

만약 마이크로스피커에서 진동판과 요크 사이의 거리를 증가시킨다면, 이를 덕트가 후면에 위치한 덕트형 스피커시스템에서의 인클로저와 동일하게 취급할 수 있을 것이다 [3-6]. 일반적으로 덕트형 스피커시스템에서는 한 개 또는 두 개의 덕트를 사용하게 된다. 만약 두 개의 덕트를 사용할 경우에도 아래의 식(1)에 의하여 한 개의 덕트로 가정하여 해석하게 된다 [5-6].

$$D_t = (D_1^2 + D_2^2)^{1/2} \tag{1}$$

여기서, D_t , D_1 과 D_2 는 첫 번째와 두 번째 덕트들의 면적이 합쳐진 경우의 직경, 첫 번째와 두 번째 덕트의 직경들을 각각 의미한다. 따라서 본 연구에서 사용하고 있는 마이크로스피커의 후면에 있는 여러 개의 구멍들은 하나의 반지름을 갖는 덕트로(표1)과 같이 가정되었다.

본 연구에서는 후면기공의 면적에 따라 공명진동수의 변화를 분석하기 위하여 20-20,000Hz까지 측정된 임피던스 곡선을 활용하였다. 스피커에 입력된 오디오 신호의 주파수가 스피커의 공명진동수에 가까워지면서 최대 출력을 보이게 된다. 이처럼 공명주파수에서 스피커의 출력이 최대가 되는 것은 진동판의 운동진폭이 최대가 된다는 것을 의미한다. 그리고 진동판의 최대운동진폭은 결과적으로 진동판의 최대운동속도로 이어지게 된다. 따라서 진동판의 운동속도가 최대가 됨으로 인하여 보이스코일에 발생하는 역기전력(counter-EMF)이 최대가 되

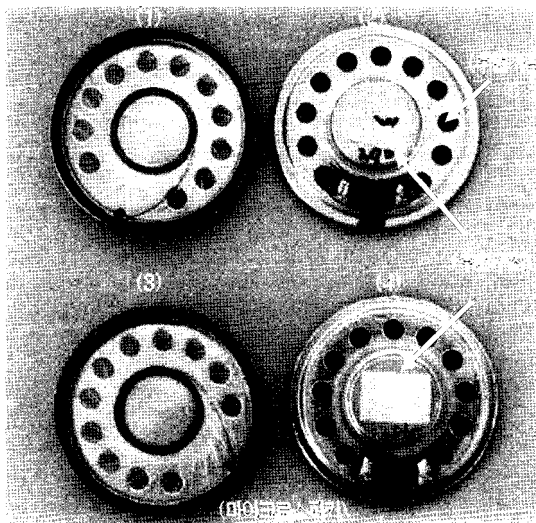
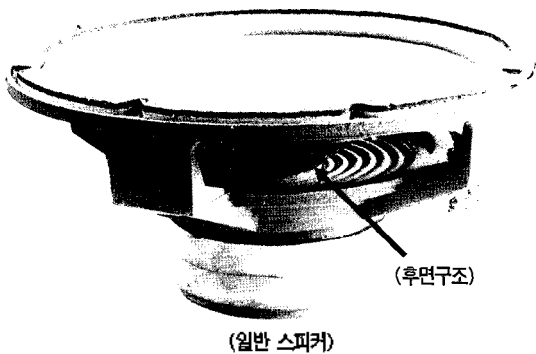


그림 1. 일반 스피커와 마이크로스피커 샘플들의 후면구조
Fig. 1. The back structures of general and micro-speaker samples.

표 1. 마이크로스피커에서 후면기공의 총 면적
Table 1. Total area of open halls for micro-speaker.

샘플	열린 홀의 개수	닫힌 홀의 개수	열린 홀의 총 면적 (mm ²)	열린 홀의 반지름 (1개의 홀로 가정) (mm)
Sample A	11	0	102.8	5.72
Sample B	10	1	93.4	5.45
Sample C	8	3	74.7	4.98
Sample D	6	5	56.1	4.23
Sample E	4	7	37.4	3.45
Sample F	2	9	18.7	2.44

어서, 공명주파수에서의 임피던스가 최대가 되는 것이다. 본 연구에서 측정된 20-20,000Hz 주파수대역에서의 임피던스 곡선을 (그림2)에 나타내었다. 위에서 설명한 바와 같이, 주파수가 증가하면서 임피던스가 높아지다가 공명주파수에서 최대가 된 후에 다시 주파수의 증가와 함께 급격히 감소하게 된다. 그리고 어느 정도의 주파수대역에서 대체로 일정한 임피던스 값 (스피커의 공칭임피던스)을 유지하다가, 고주파수 영역에서 보이스 코일의 인덕턴스 증가와 함께 임피던스 값이 다시 다소간 증가하는 것을 볼 수 있다. 본 연구에서 후면기공의 면적에 따른 공명진동수의 변화를 자세히 살펴보기 위하여, (그림2)에서 x축의 주파수 범위를 150-600Hz로 축소하여 (그림3)에 다시 나타내었다. (그림3)에서 보면, 후면기공의 면적에 따라서 공명진동수가 달라지는 것을 쉽게 볼 수 있다. 공명진동수의 변화를 (표2)와 (그림4)에 나타내었으며, 후면기공의 면적이 감소함에 따라서 공명진동수도 동시에 감소하는 것을 볼 수 있다. 다시 말하면, 기공의 면적이 93.4mm²일 때까지는 공명진동수가 변하지 않지만, 그 이하의 면적부터는 공명진동수가 감소하게 된다. 뿐만 아니라, 기공의 면적이 감소할수록 공명진동수가 감소하는 폭이 점차 증가하는 경향도 (그림4)에서 보여준다. 마이크로스피커의 후면기공이 지

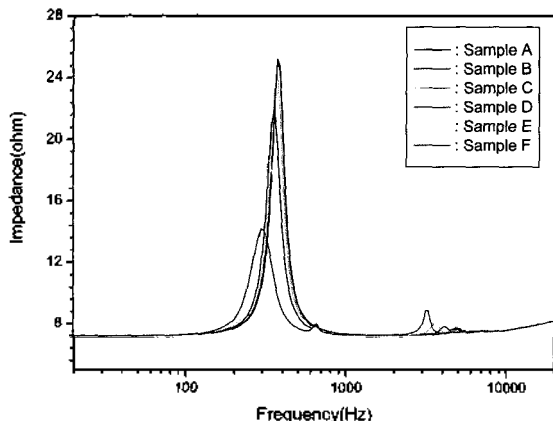


그림 2. 20-20,000Hz에서의 임피던스 특성곡선
Fig. 2. The impedance Curve for 20 - 20,000Hz.

의 막힌 상태를 의미하는 18.7mm²의 경우에는 102.8mm²의 공명진동수에 비하여 20%까지 감소하는 것을 볼 수 있었다.

마이크로스피커를 유닛과 덕트를 가진 인클로저의 기능들이 동시에 존재하는 덕트형 스피커시스템으로 이미 간주하였다. 만약 마이크로스피커의 후면에 있는 기공의 면적이 충분히 커서 후면이 완전히 열려있는 경우의 음향특성과 차이를 보이지 않는다면, 이는 일반 스피커에서와 같이 유닛만의 기능을 갖게 될 것이다. 다시 말하면, 후면기공의 면적이 충분히 클 경우에는 후면이 다소간 막혀 있다고 하여도 일반 스피커와 동일하게 취급할 수 있을 것이다. 그러나 기공이 면적이 점차 감소하여 음향특성이 변하게 된다면, 이는 유닛의 기능만이 아닌 덕트형 인클로저의 기능이 합쳐진 덕트형 스피커시스템으로 보아야 할 것이다. sample A에서부터 sample C까지의 공명진동수를 비교하여 보면, 기공의 면적이 93.4mm² 이상인 sample A와 B의 경우에는 동일하게 379Hz로 나타나지만 sample C의 경우에는 공명진동수가 370Hz로 약간 감소하게 된다 (표2). 그리고 sample

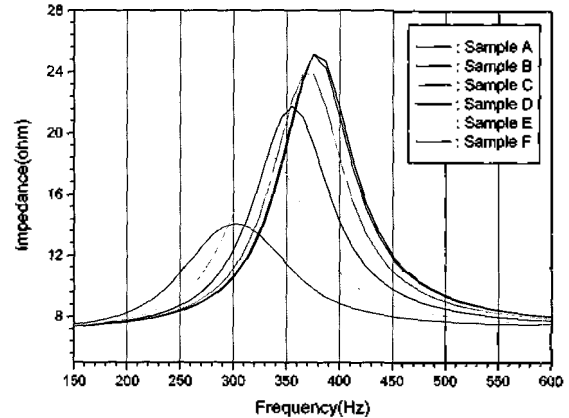


그림 3. 150-600Hz에서의 임피던스 특성곡선
Fig. 3. The impedance Curve for 150 - 600Hz.

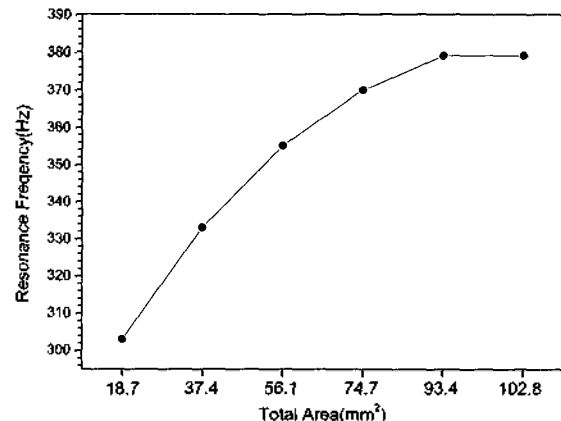


그림 4. 후면기공의 면적에 따른 공명진동수의 특성
Fig. 4. The property of resonance frequency as a function of hall area.

표 2. 후면기공의 면적에 따른 음향특성
Table 2. Acoustic property as a function of hall area.

샘플	열린 홀의 면적 (mm ²)	공명진동수 (Hz)	Q _{TS}	V _{AS} (m ³)	C (m/N)	S (N/m)	C ^{1/2} (N/m)
Sample A	102.8	379	0.74	6.53x10 ⁻⁴	6.02x10 ⁻⁶	1.66x10 ⁵	2.45x10 ⁻³
Sample B	93.4	379	0.74	6.53x10 ⁻⁴	6.02x10 ⁻⁶	1.66x10 ⁵	2.45x10 ⁻³
Sample C	74.7	370	0.75	6.38x10 ⁻⁴	5.88x10 ⁻⁶	1.70x10 ⁵	2.42x10 ⁻³
Sample D	56.1	355	0.76	6.12x10 ⁻⁴	5.64x10 ⁻⁶	1.77x10 ⁵	2.38x10 ⁻³
Sample E	37.4	333	0.78	5.75x10 ⁻⁴	5.30x10 ⁻⁶	1.89x10 ⁵	0.23x10 ⁻³
Sample F	18.7	303	0.80	5.23x10 ⁻⁴	4.82x10 ⁻⁶	2.07x10 ⁵	0.22x10 ⁻³

A와 B의 임피던스 곡선들도 서로 거의 동일함을 (그림3)에서 볼 수 있다. 이러한 특성들은 sample A와 B의 후면에 기공이 존재한다고 하여도 면적이 충분히 커서 일반 스피커처럼 후면이 완전히 열려 있는 경우로 간주할 수 있음을 의미한다. 특히 sample A에서의 기공면적은 sample B에서 보다 더 크기 때문에, sample A에서의 음향특성을 덕트형 스피커시스템에서의 유닛특성으로 간주하는데 무리가 없을 것으로 판단된다. 다시 말하면, sample A에서의 공명진동수를 덕트형 스피커시스템에 해당하는 sample C에서 Sample F까지의 음향특성을 분석하는 과정에서 유닛의 공명진동수 (f_o)처럼 취급할 수 있게 된다. 이들 샘플에서 유닛과 스피커시스템 사이의 공명진동수들에 대한 관계는 아래와 같다 [5].

$$f_B = 0.42 \times (f_o / Q_{TS})^{0.9} \tag{2}$$

여기서, f_B와 Q_{TS}는 스피커시스템에서의 공명진동수와 유닛에서 품질상수 (quality factor)를 의미하는 전체 Q

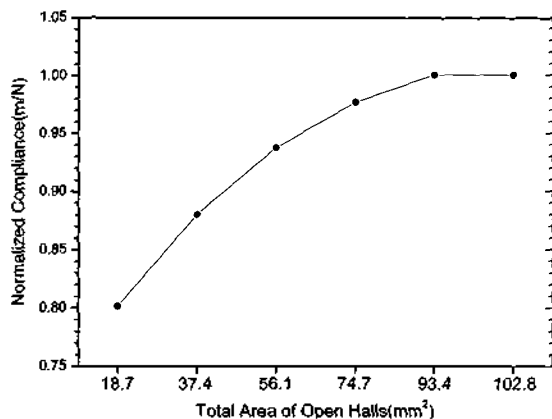


그림 5. 후면기공의 면적에 따른 컴플라이언스의 특성
Fig. 5. The property of compliance as a function of hall area.

값을 말한다. 따라서 (식2)를 이용하게 되면, Q_{TS}값을 아래의 식에 의하여 구할 수 있게 된다.

$$Q_{TS} = (0.42 \times f_o / f_B)^{1/0.9} \tag{3}$$

본 연구에 사용된 마이크로스피커에서 인클로저에 해당하는 체적 (V_B)은 1.176 x 10⁻⁴ m³으로써 설계도면으로부터 계산되었다. 본 연구에서는 후면기공의 면적만이 변할 뿐이지 마이크로스피커의 설계가 바뀌는 것이 아니기 때문에 이 체적은 모든 샘플에서 일정하게 된다. 따라서 인클로저의 고정된 체적을 이용하여 등가체적 (V_{AS})을 아래의 (식4)를 이용해 구한 후 (표2)에 나타내었다.

$$V_{AS} = V_B / (0.4248 \times Q_{TS}^{2.87}) \tag{4}$$

Q_{TS}값을 이용하여 (식4)로부터 등가체적이 구해지게 되면, 아래의 (식5)로부터 컴플라이언스 (compliance, C)를 다시 구할 수 있다.

$$C = V_{AS} / (1.42 \times 10^5 \times S_D^2) \tag{5}$$

여기서, S_D는 진동판의 유효면적으로써, 7.64 x 10⁻⁴ m² (반지름=1.56 x 10⁻² m)으로 계산하였다. 등가체적과 진동판의 유효면적에 의해 (식5)에서 구해진 컴플라이언스 값을 (표2)와 (그림5)에 나타내었다. 컴플라이언스와 스티프니스 (stiffness, S) 사이의 관계를 이용한 스티프니스 값이 (표2)와 (그림6)에서 보여진다.

$$S = 1 / C \tag{6}$$

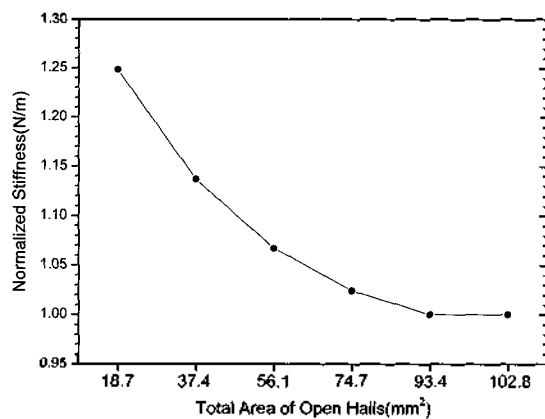


그림 6. 후면기공의 면적에 따른 스티프니스의 특성
Fig. 6. The property of stiffness as a function of hall area.

컴플라이언스가 공명진동수에 미치는 영향을 알아보기 위한 관계식은 아래의 (식7)과 같다 [5].

$$f_o = 1/2\pi \times (S_{unit}/M)^{1/2} = 1/2\pi \times (1/C_{unit} \times M)^{1/2} \quad (7)$$

여기서, S_{unit} , M 과 C_{unit} 은 유닛에서의 스티프니스, 진동계의 질량 (=0.115g, 진동판, 보이스코일, 접착제와 공기의 질량 등의 합) 그리고 유닛에서의 컴플라이언스를 각각 나타낸다. (식7)은 스피커 유닛에서의 공명진동수와 컴플라이언스 사이의 관계를 말하는 것이지, 스피커 시스템에서의 이들 관계를 의미하지는 않는다. 그러나 본 연구에서 후면기공의 면적변화에 따른 공명진동수와 컴플라이언스들의 특성을 (그림7)에서 보여준다. 이들 사이의 관계를 알아보기 위하여, 공명진동수와 컴플라이언스를 sample A에 기준하여 규격화 (normalization)시킨 후에 이들의 특성을 상대적으로 비교하였다. 그 결과로써, 마이크로스피커에서 후면기공의 면적에 따른 공명진동수의 특성이 (식7)에서와 같이 컴플라이언스의 제곱근 특성에 정확하게 일치하지 않고 있음을 볼 수 있다. 특히 후면기공의 면적이 가장 적은 sample F의 경우에 이들 사이에서 약 10%정도까지의 편차가 나타나고 있다. 이처럼 기공의 면적이 감소함에 따라서 이들 사이의 편차가 지속적으로 커지는 것을 볼 수 있다. 그러나 (식2)에서 Q_{rs} 의 지수를 0.9에서 2.9로 바꾸게 되면 이들이 정확히 일치하고 있음을 (그림7)에서 보여준다. 따라서 (식2)에서 Q_{rs} 의 지수를 2.9로 결정하였으며, (식3)이 아닌 (식8)로부터 Q_{rs} 값을 구하여 (표2)에 나타내었다.

$$Q_{rs} = (0.42 \times f_o/f_B)^{1/2.9} \quad (8)$$

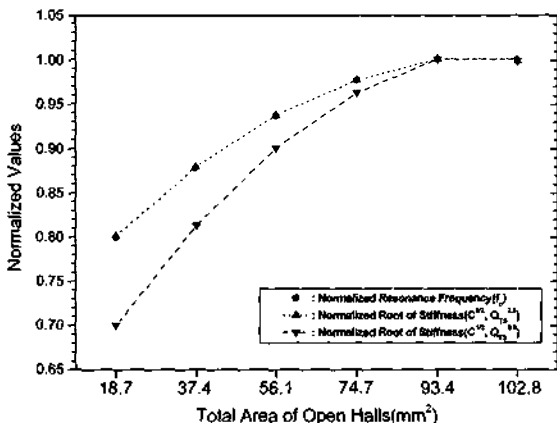


그림 7. 공명진동수와 컴플라이언스 사이의 관계
Fig. 7. The correlation between resonance and stiffness.

이와 같이 덕트형 스피커시스템에서의 공명진동수 (f_B) 개념을 도입하여 마이크로스피커에서 후면기공의 면적에 따른 공명진동수의 특성을 (그림7)와 같이 명확하게 설명할 수 있었다. 이는 본 연구의 목적인 마이크로스피커를 덕트형 스피커시스템으로 가정했던 것이 정당하였음을 처음으로 보여주는 결과이다.

스피커시스템에서의 전체 스티프니스는 크게 두 가지 성분으로 나누어진다. 첫 번째는 스피커 유닛에서의 에지와 댐퍼에 의한 스티프니스 (S_{unit})이고, 두 번째 성분은 인클로저가 존재함에 의하여 인클로저 내부의 공기에 의한 스티프니스 ($S_{enclosure}$)이다. 따라서 전체 스티프니스 (S)는 이들 성분의 합으로 아래의 (식9)과 같이 쓸 수 있다.

$$S = S_{unit} + S_{enclosure} \quad (9)$$

여기서, $S_{unit} = S_{edge} + S_{damper}$ 로써, S_{edge} 와 S_{damper} 는 에지와 댐퍼에 의한 스티프니스이다. 마이크로스피커에서는 에지와 댐퍼가 별도로 존재하지는 않는다. 그러나 진동판의 가장자리는 진동판의 기능보다도 에지로써의 기능이 더 강함을 이미 보고한 적이 있다 [7]. 따라서 에지 성분만이 존재하는 마이크로스피커의 스티프니스 (S)는 유닛과 인클로저의 측면에 따른 스티프니스들로 (식9)처럼 규정할 수 있게 된다. 실제적으로 마이크로스피커의 진동판 특성이 결정되면, 유닛의 측면에 따른 스티프니스 값은 변하지 않을 것이다. 그러나 (그림6)에서와 같이 후면기공의 면적이 증가함에 따라서 전체 스티프니스의 값이 감소하는 것은 마이크로스피커에서 인클로저 측면의 스티프니스 성분이 변하기 때문일 것으로 판단된다. 왜냐하면 진동판이 진동운동을 할 때에 후면기공의 면적에 따라서 그 내부에 있는 공기의 압력 (=인클로저 측면에서의 스티프니스)이 달라지기 때문이다. 따라서 (그림6)에서 보여주고 있는 후면기공의 면적에 따른 스티프니스의 변화는 실질적으로 인클로저 측면에서의 스티프니스의 변화로 판단된다.

(식6)과 (식9)를 이용하여, 스티프니스를 컴플라이언스를 표시하면 아래의 (식10)과 같다.

$$1 / C = 1 / C_{unit} + 1 / C_{enclosure} \quad (10)$$

여기서, $C_{enclosure}$ 는 인클로저의 컴플라이언스이고, 유닛의 컴플라이언스 (C_{unit})는 에지와 댐퍼에 의한 컴플라이

표 3. 후면기공의 면적에 따른 인클로저의 실효체적 및 출력음압
Table 3. Effective enclosure volume and sound pressure level as a function of hall area.

샘플	열린 홀의 총 면적 (mm ²)	최대 임피던스 (Ω)	인클로저의 실효체적 (mm ³)	출력음압 (1kHz) (dB)
Sample A	102.8	25.8	8.72 x 10 ⁴	93.4
Sample B	93.4	25.4	8.72 x 10 ⁴	93.3
Sample C	74.7	24.4	8.93 x 10 ⁴	92.9
Sample D	56.1	21.9	9.31 x 10 ⁴	91.9
Sample E	37.4	18.5	9.91 x 10 ⁴	90.3
Sample F	18.7	14.0	10.89 x 10 ⁴	87.5

언스 (C_{edge}와 C_{damp})들의 합으로 구해진다. 후면기공의 면적이 증가하게 되면, 인클로저 측면의 컴플라이언스 값이 증가하고 있음을 (그림7)에서 보여주고 있다. 따라서 후면기공의 면적을 증가시킨다고 하는 것은 진동판과 요크 사이에 존재하는 실 (chamber, 덕트형 스피커시스템의 인클로저에 대응)의 공기압력이 감소하여 유연성 (탄력)이 높아진다는 것을 의미하게 된다.

스피커시스템의 인클로저 내부에서 공기의 압력 (=인클로저 측면에서의 스티프니스)이 감소하는 원인들 중에 하나가 인클로저의 체적이 증가되는 것이다. 비록 마이크로스피커에서 인클로저에 해당하는 실의 체적이 실제적으로 달라지는 것은 아니지만, 후면기공의 면적이 증가할 때 스티프니스가 감소하는 것은 인클로저의 실효체적 (effective enclosure volume)이 증가하기 때문일 것이다. (식4)에서는 인클로저의 체적을 고정시킨 가운데, Q_{TS}값의 변화에 의하여 등가체적 (V_{AS})을 결정하였다. 유닛의 측면에서 에지 와 댐퍼의 컴플라이언스에 의한 등가체적은 변하는 값이 아니지만, 본 연구에서는 후면기공의 면적에 따라 인클로저 측면에 의한 스티프니스 (또는 컴플라이언스) 값이 달라지기 때문에 전체적인 등가체적도 동시에 변하게 되었다. 이처럼 마이크로스피커에

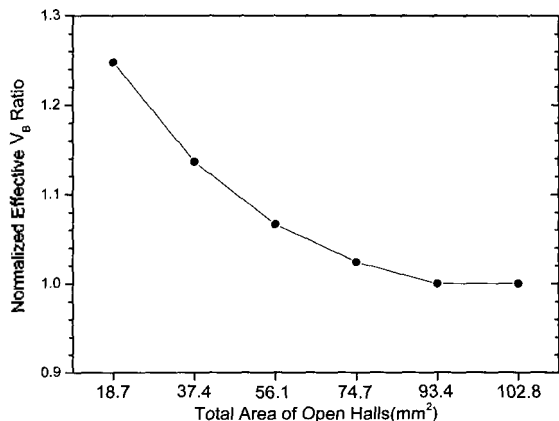


그림 8. 후면기공의 면적에 따른 인클로저의 실효체적특성
Fig. 8. The property of the effective enclosure volume as a function of hall area.

서 후면기공의 면적에 따라 등가체적이 변하는 것은 유닛만이 아닌 인클로저의 측면을 동시에 가지고 있기 때문이다. 다시 말하면, 유닛의 기능으로 인한 등가체적은 변하지 않겠지만, 인클로저 기능의 추가로 인하여 후면기공의 면적에 따라 인클로저의 실효체적이 변하기 때문일 것으로 판단된다. 유닛의 공명진동수 (f₀)를 상술한 바와 같이 결정할 때처럼, 유닛 측면에서의 일정한 등가체적을 후면기공의 면적이 가장 큰 sample A에서의 등가체적으로 간주하였다. 이런 경우에 있어서, 인클로저의 실효체적 (V_{EB}, effective enclosure volume)은 (식4)에 의하여 Q_{TS} 값에 의존하게 된다. 그 결과를 (표3)과 (그림8)에 나타내었으며, 인클로저의 실효체적은 후면기공의 면적이 증가함에 따라서 감소하고 있음을 볼 수 있다. 특히 후면기공의 면적이 5배로 증가함에 따라서 인클로저의 실효체적이 약 20%정도 감소함을 볼 수 있다.

일반 스피커에서의 기준효율 (η₀, free-air reference efficiency)은 아래의 식과 같이 쓸 수 있다 [4, 8].

$$\eta_0 = 9.6 \times 10^{-10} \times f_s^3 \times V_{AS} / Q_{ES} \quad (11)$$

여기서 Q_{ES}는 유닛 측면에서의 전기적 품질상수를 말하며, 아래의 세 관계식들로부터 구할 수 있게 된다.

$$Q_{TS} = Q_{MS} / R_0 \quad (12)$$

$$R_0 = R_{peak} / R_{DCR} \quad (13)$$

$$Q_{ES} = Q_{MS} / (R_0 - 1) \quad (14)$$

여기서, Q_{MS}, R_{peak}와 R_{DCR}들은 유닛 측면에서의 기계적 품질상수, 공명진동수에서의 최대임피던스 그리고 직류 저항 (=7.525Ω)들을 각각 의미한다 (표3). 만약 유닛이 스피커시스템에 장착된 경우에 대한 기준효율 (η_B)을 (식11)로부터 아래와 같이 다시 쓸 수 있다 [8].

$$\eta_B = 9.6 \times 10^{-10} \times f_B^3 \times V_{AS} \times V_B / [Q_{EC} \times (V_{AS} + V_B)] \quad (15)$$

여기서, Q_{EC}는 스피커시스템에서의 전기적 품질상수를 말한다. (식15)를 이용한 스피커시스템에서의 기준음압 (SPL, reference sound pressure level)을 데시벨(dB)로 표시하면 아래와 같다 [4].

$$\begin{aligned} \text{SPL(dB)} &= 10 \log \eta_0 + 10 \log \rho_0 c + 94 + 10 \log (1/4\pi r^2) \\ &= 10 \log \eta_0 + 26.2 + 94 + 9.0 \\ &= 129.2 + 10 \log \eta_0 \end{aligned} \quad (16)$$

여기서, ρ_{oc} 와 r 은 공기 중에서의 특성임피던스와 측정 거리 (0.1m)를 의미한다.

본 연구에 사용된 마이크로스피커들부터 측정된 기공 면적에 따른 주파수특성을 (그림9)에 나타내었다. 후면 기공의 면적이 감소하면서, 중저음 영역 (저음 : 20~750Hz, 중음 : 750~5,000Hz)에서의 기준음압레벨이 전반적으로 감소하고 있다. 특히 후면기공의 면적감소율이 커질수록, 기준음압이 감소하는 비율이 점차적으로 증가하고 있음을 쉽게 알 수 있다. 이처럼 후면기공의 면적이 감소한다는 것은 마이크로스피커의 인클로저 기능에서 공기압력의 증가로 인해 스티프니스가 증가하여 진동판의 운동진폭이 감소되는 것으로 판단된다. 여기서 덕트형 스피커시스템에서 진동판에 대한 최대진폭 (X_{peak})은 아래와 같이 쓸 수 있다 [9].

$$X_{peak} = 1.31 \times 10^5 \times (\eta_o W)^{1/2} / (f_B^2 \times S_d) \quad (17)$$

여기서, W 는 파워앰프에서 스피커에 입력되는 파워이다. (식17)에서 입력파워 (W)와 진동판의 면적 (S_d)들은 일정하다고 할 수 있다. 따라서 (식8)과 (식16)에 의해 얻은 스피커시스템의 공명진동수와 기준효율을 (식17)에 대입하여 얻은 결과를 (그림10)에 나타내었다. (그림10)에서 보면, 기공면적의 감소에 따라 진동판의 최대진폭이 감소하고 있음을 알 수 있다. 따라서 기공면적의 감소에 따른 스티프니스의 증가로 인한 진동판 운동의 진폭감소가 중저음영역에서의 기준음압레벨을 감소시키는 원인으로 판단된다. (식15)와 (식16)을 이용하여 이론적으로 얻어진 기준음압레벨들을 (그림11)에 나타내었다. 이 때 (식15)에서의 인클로저 체적 (V_B)은 마이크로스피커의 실효체적 (V_{EB})으로 사용하였다. (식14)에서의 전기

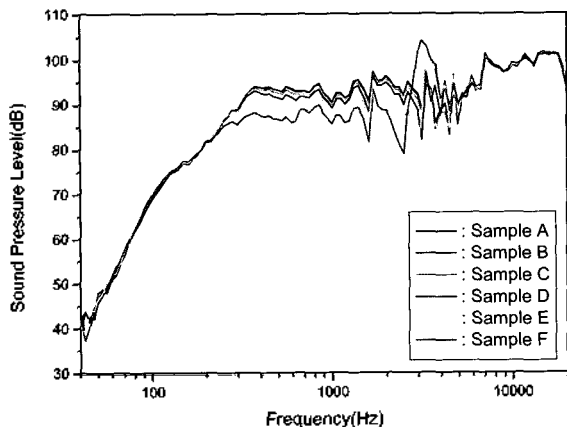


그림 9. 후면기공의 면적에 따른 주파수특성
Fig. 9. Frequency response as a function of hall area.

적 품질상수 (Q_{BS})를 (식15)에서 스피커시스템에서의 전기적 품질상수 (Q_{EC})로 대체하였다. 그 이유는 (식8)에서 유닛 측면의 공명진동수 (f_o)는 sample A에서 측정된 공명진동수로, sample C~F까지의 공명진동수들은 덕트형 스피커시스템에서의 공명진동수 (f_B)들로 앞에서 규정한 바 있기 때문이다. 그리고 마이크로스피커를 일종의 덕트형 스피커시스템으로 이미 간주하였기 때문에, (식13)에서의 최대임피던스와 직류저항들을 실제적으로 스피커시스템에서 측정된 값들로 취급할 수 있다. (그림9)에서 각각의 기공면적에 대해 1,000Hz에서 실제적으로 측정된 음압레벨을 (그림11)에 이론적 예측과 함께 나타내었다. (그림11)에서는 1,000Hz에서 실험적으로 측정된 음압레벨들과 이론적으로 예측된 기준음압레벨들이 서로 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 따라서 마이크로스피커에서 후면기공의 면적에 따른 공명진동수와 기준음압레벨들에 대한 위의 논의들에 의하여, 마이크로스피커를 일종의 덕트형 스피커시스템로 취급하여 음향특성들을 해석할 수 있었다.

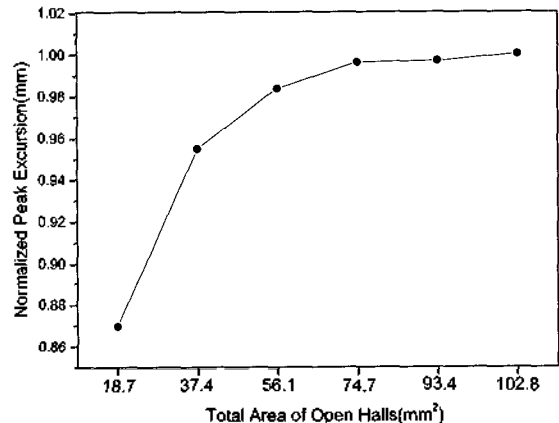


그림 10. 후면기공의 면적에 따른 진동판의 최대변위
Fig. 10. Peak excursion of diaphragm as a function of hall area.

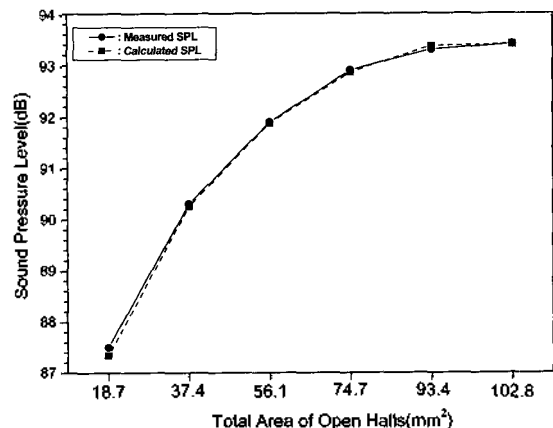


그림 11. 후면기공의 면적에 따른 1,000Hz에서의 출력특성
Fig. 11. Sound pressure level at 1,000Hz as a function of hall area.

IV. 결론

본 연구에서는 마이크로스피커의 구조와 특성을 유닛과 인클로저 성분들로 구성된 일종의 덕트형 스피커시스템처럼 해석할 수 있음을 처음으로 보여주었다. 특히 후면기공의 면적이 증가함에 따라서 아래와 같은 결과들이 나타났다.

- ① 마이크로스피커의 공명진동수는 컴플라이언스의 제곱근에 비례하여 증가함
- ② 인클로저 측면의 실효체적이 감소함
- ③ 중저음 영역에서의 기준음압레벨이 지수함수적으로 증가함

따라서 마이크로스피커의 공명진동수를 낮추기 위해서는 후면기공의 면적을 감소시켜야 하지만, 반면에 중저음에 대한 음압이 감소되는 결과를 가져오게 될 것이다.

참고 문헌

1. 오세진, *스피커 공학* (석학당, 2006), Chap.3, pp. 22-34.
2. Sang-Moon Hwang, Hong-Joo Lee, Ji-Hoon Kim, Gun-Yong Hwang, Won-Yeoul Lee and Beam-Soo Kang, "New Development of Integrated Microspeaker and Dynamic Receiver Used for Cellular Phones," *IEEE Transactions on Magnetics*, 39 (5), 3259-3261, 2003.
3. M. Colloms, *Performance Loudspeaker*, (John Wiley & Sons Ltd., West Sussex, 2005), 6th Ed., Chap.4, pp. 155-168.
4. J. Eargle, *Loudspeaker Handbook*, (Kluwer Academic Publishers, Boston, 2003), 2nd Ed., Chap.4, pp. 63-75.
5. R. Alden, *Advanced Speaker Designer*, (Prompt, Indiana, 1995), Chap.4, 37-46.
6. V. Dickason, *The Loudspeaker Design*, (Audio Amateur Press, Peterborough, 2000), Chap.2, pp. 55-78.
7. 오세진, "진동판의 재질에 따른 마이크로스피커의 음향특성연구," *한국음향학회지*, 25 (5), 72-77, 2006.
8. R.A. Greiner and M. Schoessow, "Electronic Equalization of Closed-Box Loudspeaker," *J. Audio Eng. Soc.*, 31 (3), 125-134, 1983.
9. A.N. Thiele, "Loudspeaker in Vented Boxes: Part II," *J. Audio Eng. Soc.*, 19 (6), 471-483, 1971.

저자 약력

• 오 세 진 (Sei-Jin Oh)

한국음향학회지 제25권 5호 참조

• 이 에 스 더 (Esther Rhee)



1991년 2월: 계명대학교 음악대학 졸업 (피아노전공학사)
 1993년 2월: 계명대학교 교육대학원 졸업 (음악교육석사)
 1997년 5월: 뉴욕대학 졸업 (뮤직테크놀로지전공, 음악석사)
 2001년 8월: 켈트주립대학교 음악교육과 졸업 (뮤직테크놀로지전공, 음악교육학 박사)
 2004년 3월~현재: 계명대학교 미디어아트대학 유작프로덕션과 조교수