

# 다이내믹 스피커에서 폴피스 구멍에 의한 음향특성연구

## The acoustical effect due to the hole of pole piece for by dynamic speaker

오세진<sup>†</sup>

(Sei-Jin Oh<sup>†</sup>)

<sup>1</sup>충북보건과학대학교

(Received Junly 12, 2018; accepted September 17, 2018)

**초 록:** 다이내믹 스피커에서 보이스 코일에 전류가 입력되면 Joule 효과에 의해 많은 열이 발생하게 된다. 이 열을 자기회로의 밖으로 방출하기 위하여 폴피스의 중앙에 구멍을 뚫기도 한다. 이 구멍은 열의 방출뿐만 아니라, 다이내믹 스피커의 음향특성도 변화시킬 수 있는 원인이 되기도 한다. 특히 공명주파수가 구멍의 지름과 정비례하여 증가하는 반면에, 구멍의 길이에 반비례하는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과들은 위상반전형 스피커시스템의 기계적 등가회로 해석에 따른 이론적 예측과 정확하게 일치하였다. 따라서 다이내믹 스피커의 폴피스에 존재하는 구멍은 위상반전형 스피커시스템에서의 덕트로 취급할 수 있다.

**핵심용어:** 다이내믹 스피커, 공명주파수, 위상반전형 스피커시스템, 폴피스

**ABSTRACT:** It has been generally known that a hole presenting on the center of pole piece for the loudspeaker can be very helpful for the heat, which is radiated by Joule Effect at the voice coil, to emit to the outside of the magnetic gap. The existence of hole can also become a cause of the changes of the acoustical properties about the loudspeaker. The resonance frequency of loudspeaker increased with the increase of hole radius. However, increasing the hole length resulted in the decrease of the resonance frequency. These results are in an excellent agreement with the theoretical predictions for the equivalent mechanical circuit of Bass-Reflex cabinet system. The acoustical property of the loudspeaker with hole can be also predicted by the theoretical interpretation of Bass-Reflex cabinet system.

**Keywords:** Dynamic speaker, Resonance frequency, Bass-Reflex cabinet system, Pole piece

**PACS numbers:** 43.38.Ja, 43.38.Dv

### 1. 서 론

다이내믹 스피커의 부품들은 크게 진동계, 지지계 그리고 자기계로 나눌 수 있다. 여기서 진동계와 지지계는 스피커의 공명주파수 뿐만 아니라 재생음의 음질에 주로 관여하는 반면에, 자기계는 출력에 중점적으로 관련된다. 다이내믹 스피커의 음질과 출력을 개선하기 위하여, 많은 연구자들이 재료, 자기회

로와 스피커의 구조에 대해 연구를 해오고 있다.<sup>[1-5]</sup>

보이스 코일에 입력된 소리신호의 전기에너지와 진동판에서 재생된 소리의 음향에너지 사이의 일반적인 효율은 3%~5% 정도로 매우 낮은 편이다. 나머지 95%~97%의 많은 열에너지는 다이내믹 스피커를 구성하는 부품들을 손상시킬 수 있는 주요한 요소이다. 따라서 스피커의 냉각효율을 높이기 위해 폴피스의 중앙에 구멍을 뚫기도 한다. 이 구멍은 보이스 코일에서 발생된 열을 자기 겹의 밖으로 방출하는 역할을 하지만, 스피커의 음향특성을 변화시키는 원인이 되기도 한다.

<sup>†</sup>Corresponding author: Sei-Jin Oh (seijin@chsu.ac.kr)  
Department of Speech Therapy/Hearing Aid, Chungbuk Health & Science University, 10 Deokam-gil Naesu-eup, Cheongwon-ku, Chungbuk 28150, Republic of Korea  
(Tel: 82-43-210-8334)

본 연구에서는 폴피스에 존재하는 구멍의 지름과 길이에 따른 공명주파수와 주파수특성의 변화를 조사하였고, 이들의 거동을 위상반전형 스피커시스템에 대한 등가회로를 이용하여 이론적으로 해석하였다.

## II. 이론적 배경

다이내믹 스피커에서 자기 갭의 내부온도를 감소시키기 위하여 폴피스의 중앙에 구멍을 제작하였다(Fig. 1). 본 연구에서는 이 구멍을 위상반전형 스피커시스템에 존재하는 덕트처럼 취급하였다. 다시 말하면, 폴피스에 구멍이 존재하는 경우를 위상반전형 스피커시스템으로 간주한 것이다. 왜냐 하면, 폴피스에 구멍이 존재하는 스피커의 전기임피던스 특성에 위상반전형 스피커시스템처럼 두 개의 피크가 나타나기 때문이다.

구멍의 형태에 따른 음향특성을 조사하기 위하여, 인클로저에 스피커가 장착되었을 경우에 대한 기계적 등가회로를 이용하였다(Fig. 2). 우선 인클로저의 후면이 열려있는 스피커시스템(open-back cabinet)에서의 기계적 등가회로를 Fig. 2의 ①에 나타내었다. 여기서  $F_{in}$ ,  $M_c$ ,  $C_{ms}$ ,  $R_{ms}$ ,  $M_a$ ,  $R_{ra}$ ,  $Z_{ml}$ 는 기계적 구동력, 진동계의 질량, 지지계의 컴플라이언스, 지지계의 기계저항, 실효공기의 질량, 실효공기의 기계저항, 진동판의 후면에 작용하는 기계임피던스를 각각 의미한다. 이 스피커시스템은 한쪽 끝이 닫혀 있는 파이프(open-end pipe)와 등가이며, 이때의 기계임피던스( $Z_{ml}$ )는 아래와 같다.

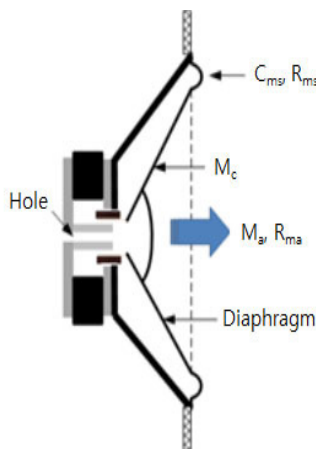
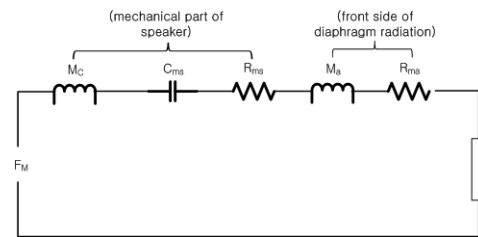


Fig. 1. The cross section of a dynamic speaker.

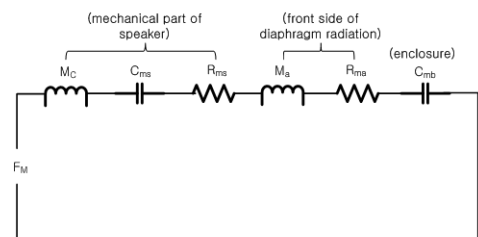
$$Z_{ml} = (\pi a^2)^2 \cdot Z_{ac}, \tag{1}$$

여기서  $a$ 와  $Z_{ac}$ 는 스피커의 반경과 진동판의 후면에 의한 음향임피던스이다.

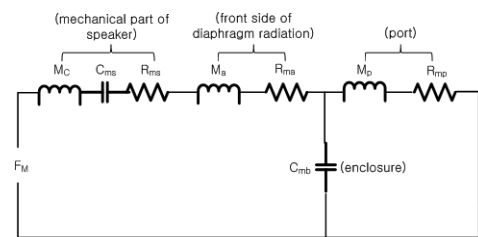
만약 열려 있는 후면을 막게 되면, 인클로저의 모든 면들이 밀폐된 스피커시스템(closed-box cabinet)이 된다. 이처럼 진동판의 전면으로부터 방사된 음향에너지만을 사용하는 밀폐형 스피커시스템에 대한 기계적 등가회로를 Fig. 2의 ②에 나타내었다. 여기서  $C_{mb}$ 는 인클로저의 내부에 존재하는 공기에 의한 컴플라이언스이다. 인클로저의 후면이 열려 있는 open-back 스피커시스템에 대한 등가회로와 비교하면, 밀폐형 스피커시스템에서 인클로저 내부의 공기에 의한 컴플라이언스( $C_{mb}$ )가 open-back 스피커시스템에서의 기계적 임피던스( $Z_{ml}$ )에 대응하게 될 것이다. 그리고 저음 영역에서 인클로저 내부의 공기에 의한 컴플라이언스의 역수인 강성( $S_c$ , stiffness)은 헬



① The equivalent circuit of open-back cabinet



② The equivalent circuit of closed-back cabinet



③ The equivalent circuit of Bass-reflex cabinet

Fig. 2. The equivalent circuits for three different cabinet system.

름홀츠 공명기(Helmholtz resonator)에서 내부공기에 의한 강성과 동일하게 된다.

밀폐형 스피커시스템의 전면에 덕트(duct)가 존재하는 위상반전형 스피커시스템(Bass-Reflex cabinet)에서의 기계적 등가회로가 Fig. 2의 ③에 나타나 있다.

이 등가회로를 보면, 위상반전형 스피커시스템에서의 기계적 임피던스( $Z_{m2}$ )는 크게 두 성분으로 나누어져 있다. 우선 덕트 내부에 있는 공기의 질량( $M_p$ )과 진동판처럼 덕트에 의한 공기의 기계저항( $R_{mp}$ )이 서로 직렬로 연결된 성분과 인클로저 내부의 공기에 의한 컴플라이언스( $C_{mb}$ ) 성분이다. 여기서, 공기의 질량과 기계저항이 서로 직렬로 연결되는 것은 덕트 내부에 있는 공기의 입자속도가 동일하기 때문이고, 이들과 컴플라이언스는 병렬로 연결된다. 이때의 음향임피던스는 덕트를 목(neck)으로 가정한 프렌지(flange) 헬름홀츠 공명기로부터 구할 수 있다. 이 음향임피던스에 ( $\pi a^2$ )<sup>2</sup>를 곱하여 기계적 임피던스를 얻을 수 있다.

위상반전형 스피커시스템에 부착된 스피커 진동판에서의 기계적 임피던스는 아래의 Eq.(2)에 의하여 구해진다.

$$\frac{1}{Z_{m2}} = \frac{j\omega}{S_c} + \frac{1}{(R_{m2} + j\omega M_{m2})}, \quad (2)$$

여기서  $\omega$ ,  $S_c$ ,  $R_{m2}$ 와  $M_{m2}$ 는 각진동수, 강성, 저항과 음향관성을 각각 의미한다. Eq. (2)에서의 강성, 저항과 음향관성은 아래와 같이 다시 쓸 수 있고,  $\rho$ ,  $c$ ,  $V$ ,  $k$ ,  $L_p$ 와  $a_p$ 는 공기밀도, 음속, 인클로저의 내부체적, 파수, 덕트 길이와 반경을 의미한다.

$$S_c = \frac{(\pi a^2)^2 \rho_o c^2}{V}. \quad (3)$$

$$R_{m2} = \frac{(\pi a^2)^2 \rho_o c k^2}{2\pi}. \quad (4)$$

$$M_{m2} = \frac{(\pi a^2)^2 \rho_o (l_p + 1.7a_p)}{\pi a_o^2}. \quad (5)$$

기계적 임피던스는 아래처럼 다시 쓸 수 있다.

$$Z_{m2} = R_{m2} + jX_{m2}, \quad (6)$$

여기서 리액턴스( $X_{m2}$ ) 성분은 용량성( $X_{L,m2}$ )과 유도성 리액턴스( $X_{C,m2}$ )들로 다시 나눌 수 있으며, Eq. (6)은 Eq. (7)로 바꾸어 쓸 수 있다.

$$Z_{m2} = R_{m2} + j(X_{L,m2} - X_{C,m2}). \quad (7)$$

만약 용량성 리액턴스와 유도성 리액턴스가 서로 같으면, 리액턴스 성분( $X_{m2}$ )이 0이 되어 Eq. (6)에는 직류저항에 해당하는 저항성분( $R_{m2}$ )만이 남게 된다. 따라서 리액턴스 성분이 0이 되는 특정한 주파수를 기계적 공명주파수( $f_0$ )라고 한다.

### III. 실험방법

본 연구에서는 8 inch의 직경을 갖는 다이내믹 스피커를 사용하였다. 이 스피커의 하판과 폴피스의 중앙에 한 개의 구멍을 뚫었다. 이 구멍은 스피커의 외부와 폴피스와 더스트 캡(dust cap) 사이에 있는 공간을 연결하였다. 구멍의 길이에 의한 공명주파수의 거동을 조사할 경우에는 구멍의 지름을 2.5 mm로 고정시킨 가운데 길이를 0 mm, 23 mm, 46 mm와 92 mm로 변화시켰다. 이 때 하판과 폴피스를 합친 두께가 23 mm이었기 때문에 46 mm와 92 mm의 경우에는 내경이 2.5 mm인 금속 파이프를 구멍을 연장하는 방식을 취하였다. 그리고 구멍의 길이를 23 mm로 고정시킨 가운데 직경을 2.5 mm, 5.0 mm 그리고 7.5 mm로 변화시키며 공명주파수의 거동을 조사하였다.

다이내믹 스피커를 배플박스의 중앙에 설치하였으며, 임피던스와 주파수특성을 무향실에서 측정하였다. 이때 1 W의 출력을 갖는 20 kHz ~ 20 kHz의 정현파를 스피커에 입력하였다. 그리고 스피커에서 나온 소리신호는 1/2 inch 마이크로폰(B&K 4191)으로 집음된 후에 프리앰프(B&K 2669)와 파워앰프(B&K 2716C)를 거쳐 IEC 60268-5의 규격에 따라 오디오 분석기(B&K 3560C)로 분석하였다. 이때 마이크로폰과 스피커의 거리는 1 m로 유지되었다.

### IV. 연구결과 및 논의

위상반전형 스피커시스템에서의 공명주파수를 이론적으로 구하기 위하여 기계적 임피던스( $Z_{mc}$ )를 나타내는 Eq. (2)를 이용하였다. 덕트의 길이를 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm 그리고 50 mm로 변화시켰을 경우의 리액턴스( $X_{mc}$ )를 주파수에 따라 Fig. 3에 나타내었다. 덕트의 길이가 증가함에 따라서 리액턴스가 0이 되는 공명주파수가 576 Hz, 512 Hz, 457 Hz, 442 Hz 그리고 420 Hz로 감소하는 것을 볼 수 있었다. 이는 덕트 길이를 증가시키게 되면 공명주파수가 감소하게 된다는 것을 이론적으로 보여주는 것이다.

Fig. 4는 구멍의 길이를 0 mm, 23 mm, 46 mm와 92 mm로 변화시켜가며 측정한 스피커의 전기임피던스 특성이다. 폴피스에 구멍을 뚫지 않았을 경우의 임피던스 곡선을 나타내는 a를 보면, 약 1,100 Hz 정

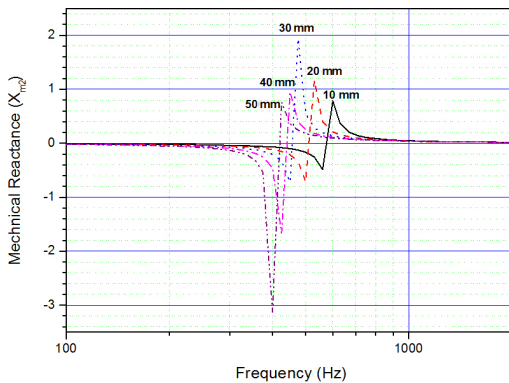


Fig. 3. The theoretical  $|Im(Z_{mc})|$  with five different hole length.

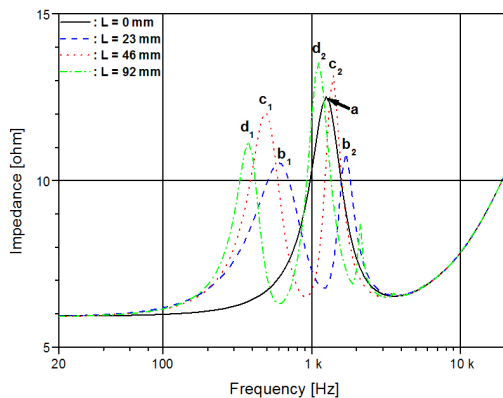


Fig. 4. The electrical impedance for four different hole lengths.

도의 주파수에 한 개의 피크만이 존재한다. 그러나 폴피스에 구멍이 있는 다른 3개의 임피던스 곡선들을 살펴보면, 피크가 한 쌍으로 존재함을 쉽게 알 수 있다. 이들에게서 두 개씩 피크가 나타나는 것은 인클로저에 장착된 스피커의 임피던스 특성에서 보여주는 것과 동일하다. 다시 말하면, 스피커가 인클로저에 장착되었을 때에 측정된 임피던스 특성에는 스피커에 의한 피크와 인클로저에 의해 만들어진 피크가 동시에 존재하게 된다. 따라서 스피커의 폴피스에 구멍을 뚫게 되면, 폴피스와 더스트 캡 사이에 존재하는 공간이 구멍을 통해 스피커의 외부와 연결되어 마치 인클로저와 같은 역할로 간주될 수 있는 것이다. 특히 이 구멍을 통하여 공기의 유출입이 가능하기 때문에, 밀폐형 스피커시스템보다는 덕트를 가진 위상반전형 스피커시스템으로의 가정이 가능하게 된다. 따라서 Eqs. (3)~(5)에서 인클로저의 내부체적( $V$ ), 덕트의 길이( $L_p$ ) 및 반경( $a_p$ )은 폴피스와 더스트 캡 사이의 공간 체적, 구멍의 길이와 반경으로 각각 대치될 수 있다.

Fig. 4에서 구멍을 가진 스피커들의 임피던스 곡선에서 두 개의 피크를 첨자 1 또는 2로 표시하였다. 여기서 첨자 1과 2는 스피커의 진동판에 의한 또는 인클로저에 의한 피크임을 의미하는 것이다. Fig. 4에서 a로 표시한 피크가 1,230 Hz 이상의 피크들에 더 가까운 것을 볼 수 있다. 따라서 첨자 1은 인클로저에 의한 피크인 반면에, 첨자 2는 진동판에 의한 피크로 분류하였다. 그리고 구멍의 길이가 23 mm, 46 mm 그리고 92 mm로 증가하는 가운데, 첨자 2로 표시된 진동판의 공명주파수는 1,690 Hz, 1,380 Hz와 1,100 Hz의 순서로 감소하고 있다. 이러한 특성은 Fig. 3에서 이론적으로 예측한 결과와 정확하게 일치하고 있다.

폴피스에 있는 구멍의 길이에 따른 주파수 특성이 Fig. 5에 나타나 있다. 1,100 Hz 이상에서의 주파수 특성을 살펴보면, 이들 모두의 특성이 대체로 동일하게 나타나고 있다. 그러나 1,100 Hz 이하의 주파수에서는 구멍이 존재하지 않는 경우보다 존재하는 경우들의 저음특성이 강한 것을 볼 수 있다. 이는 위상반전형 스피커시스템에서 덕트로 인해 저음이 보강되는 것과 마찬가지로 폴피스에 존재하는 구멍이 공명주파수를 감소시켜 저음을 증가시킨 것으로 판단된다. 따라서 위

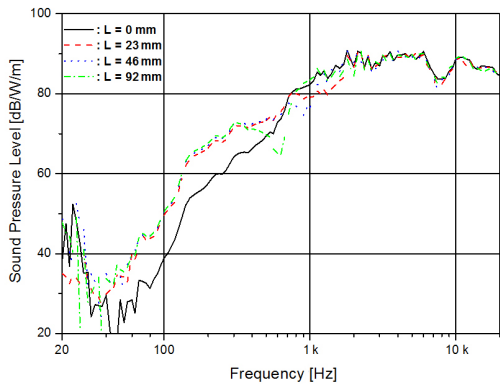


Fig. 5. The frequency responses for four different hole lengths.

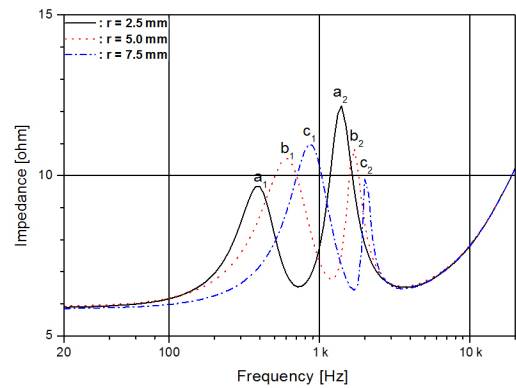


Fig. 7. The electrical impedance for three different hole radii.

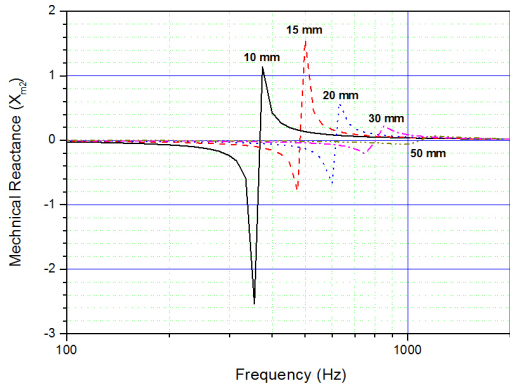


Fig. 6. The theoretical  $|Im(Z_{mc})|$  with five different hole radii.

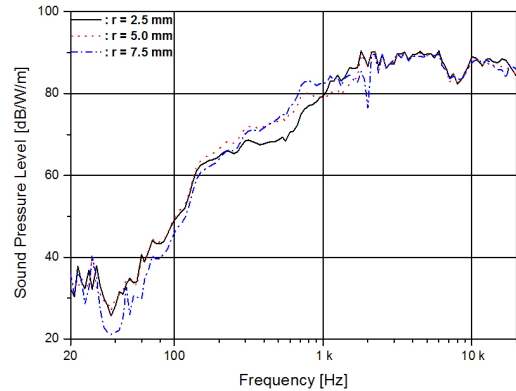


Fig. 8. The frequency responses for three different hole radii.

상반전형 스피커시스템에서의 덕트와 폴피스의 구멍이 서로 동일한 역할을 하는 것으로 판단된다. 구멍의 길이에 따른 공명주파수의 거동과 같이, 폴피스에서 구멍의 역할이 위상반전형 스피커시스템에서의 덕트처럼 해석될 수 있는 또 하나의 이유이다.

위상반전형 스피커시스템에서 덕트의 반경에 따른 기계적인 리액턴스의 변화를 Fig. 6에서 보여주고 있다. 덕트의 반경이 증가함에 따라서 리액턴스가 0이 되는 주파수가 점차 증가하는 것을 볼 수 있다. 다시 말하면, 덕트의 반경이 10 mm, 15 mm, 20 mm, 30 mm 그리고 50 mm로 증가함에 의해 리액턴스( $X_{m2}$ )가 0이 되는 공명주파수도 368 Hz, 484 Hz, 616 Hz, 804 Hz와 1,080 Hz로 증가하였다. 이는 덕트의 길이가 증가할 때에 공명주파수가 감소하는 Fig. 3에서의 결과와는 정반대로 평가된다.

Fig. 7에서는 폴피스에 존재하는 구멍의 반경에 따

른 전기임피던스의 변화를 보여준다. Fig. 4에서와 마찬가지로 구멍이 존재함에 의하여 임피던스 피크들이 두 개씩 나타나고 있음을 볼 수 있다. 어떤 첨자(1 또는 2)가 스피커 진동판의 운동 또는 구멍에 의한 피크인지 구분하지는 않았지만, 구멍의 크기가 2.5 mm, 5.0 mm와 7.5 mm로 증가함에 따라서 첨자에 관계없이 모두에서 공명주파수가 증가하고 있음을 볼 수 있다. 따라서 구멍의 반경이 증가하면 진동판뿐만 아니라 구멍에 의한 공명주파수가 증가한다는 것을 알 수 있었다. 이러한 특성은 위상반전형 스피커시스템의 덕트에서 이론적으로 예측한 결과와 정확하게 일치하고 있다(Fig. 6). Fig. 8은 구멍의 반경에 따른 주파수특성을 보여준다. 구멍의 반경이 증가하여도 주파수특성은 대체적으로 크게 변하지 않았다. 따라서 구멍의 반경은 주파수 특성에 큰 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

## V. 결 론

폴피스의 중앙에 제작된 구멍의 길이와 반경에 따른 공명주파수의 거동이 위상반전형 스피커시스템에서의 덕트에서와 동일하게 나타났다. 따라서 폴피스의 구멍을 위상반전형 스피커시스템에서의 덕트처럼 취급할 수 있었다. 구멍의 길이가 증가함에 따라 공명주파수가 감소하여 저음이 보강되었다. 그러나 구멍의 반경이 증가하게 되면 스피커의 공명주파수는 증가하는 반면에 주파수특성에는 큰 변화를 주지 않았다.

## References

1. M. R. Gander, "Dynamic linearity and power compression in moving-coil loudspeakers," *J. Audio Eng. Soc.* **34**, 627-646 (1986).
2. M. R. Gander, "Moving-coil loudspeaker topology as an indicator of linear excursion capability," *J. Audio Eng. Soc.* **29**, 10-26 (1981).
3. S. J. Oh and H. Y. Kim, "Correlation between tensile strength of diaphragm and resonance frequency for micro-speaker" (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **28**, 299-307 (2009).
4. C. A. Henricksen, "Heat-Transfer mechanisms in loudspeakers: analysis, measurement, and design," *J. Audio Eng. Soc.* **35**, 778-791 (1987).
5. L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppers, and J. V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics* (John Wiley & Sons Inc., New York, 4th Ed. 2000), pp. 371-374.

## 저자 약력

### ▶ 오 세 진 (Sei-Jin Oh)



1985년 2월: 성균관대학교 물리학과 이학사  
 1987년 8월: 성균관대학교 교육학과 교육학석사(물리교육전공)  
 1996년 12월 : Old Dominion Univ. 물리학과 이학석사  
 1997년 12월 : Old Dominion Univ. 물리학과 이학박사  
 1998년 1월 ~ 2000년 2월 : 포항공과대학교 재료공학과 Post Doc.  
 2000년 3월 ~ 현재 : 충북보건과학대학교 언어재활보청기과 교수  
 <관심분야> 전기음향 및 보청기