

10 mm급 원형 마이크로스피커의 가상 스피커 TS 매개변수 규명 Thiele Small Parameters Estimation for Pseudo Loudspeaker within 10 mm Grade Circular-type Microspeaker

박 석 태†

Seok-Tae Park

(2007년 9월 7일 접수 ; 2007년 10월 1일 심사완료)

Key Words : Circular-type Microspeaker(원형 마이크로스피커), Pseudo Loudspeaker(가상 라우드스피커), Thiele Small Parameters Estimation(틸레 스몰 매개변수 규명), Closed-box Loudspeaker(밀폐 박스 라우드스피커), Vented-box Loudspeaker(벤트박스 라우드스피커)

ABSTRACT

It was discussed to identify Thiele Small Parameters for Pseudo loudspeaker within 10mm grade microspeaker attached to closed-box using known dynamic mass of moving parts. Also, enhanced circuit model for vented-box microspeaker system was used to more accurately simulate electrical impedance curves for real vented-box microspeaker system and compared to test results. Consequently, it showed that microspeaker could be modeled by pseudo loudspeaker TS parameters similar to general loudspeaker. Vented-box microspeaker model with pseudo loudspeaker TS parameters was well suited to describe real microspeaker. Also, it was proposed to estimate volume of rear closed-box of microspeaker without design specifications.

1. 서 론

일반적으로 스피커 시스템 설계를 하기 위해서는 스피커의 thiele small(TS) 매개변수가 필수적으로 필요한 기초 데이터이다. Cellular or mobile phone(셀룰라 또는 모바일 폰) 등에 사용되고 있는 마이크로스피커는 일반적인 라우드스피커에 비교할 때에 구조와 크기가 매우 다르므로 TS 매개변수를 규명하는 것은 의미가 없고 또한 규명할 수도 없다고 하는 말들을 들곤 하였다. 그러나, 산업 현장에서의 요구는 일반적인 스피커 시스템을 해석하는 것처럼 마이크로스피커를 해석할 수 있는 방법을 찾는 것이었다. 마이크로스피커를 일반적인 스피커 해석방법으로 해석할 수 있는 방법은 없을

까? 이것이 이 논문을 기술하게 된 동기중의 하나이다. 이 논문은 마이크로스피커 유니트 내부의 가상 스피커의 TS 매개변수 규명⁽¹⁾에 대한 내용을 다룬다. 가상 스피커(pseudo loudspeaker)의 개념은 실체는 존재하지만 이 스피커 부분을 마이크로스피커에서 분리해서는 작동시킬 수도 시험해 볼 수도 없기 때문에 붙인 이름이다. 일반적인 라우드스피커의 TS 매개변수 규명에 대한 논문은 찾아볼 수 있으나⁽²⁻⁶⁾ 마이크로스피커의 TS 매개변수 규명이나 적용에 대한 논문은 거의 찾아볼 수가 없다. 일반적인 홈 오디오 및 PA(public address) 시스템의 경우에는 스피커의 TS 매개변수를 알고 있을 때에 스피커 전용 상용 소프트웨어를 사용하여 다양한 형태의 인클로저 시스템의 전기 임피던스와 음향 응답특성 등을 비교적 정확하게 예측할 수 있음을 알 수 있다⁽⁴⁻⁶⁾. 이러한 경험에 따라 마이크로스피커를 라우드스피커와 같은 dipole 방사체로 모

† 교신저자; 정회원, 주성대학 음향과
E-mail : stpark@jsc.ac.kr
Tel : (043) 219-1202, Fax : (043) 219-1224

델링하여 시스템 해석을 수행한 경험이 있다. 마이크로스피커를 dipole 방사체로 가정하여 TS 매개변수를 규명한 후에 마이크로스피커가 모바일 폰과 같이 매우 작은 밀폐박스 또는 포트박스에 장착된 경우를 LEAP과 같은 상용 소프트웨어를 이용하여 해석한 경험도 있다. 그러나, 예측된 전기 임피던스와 음향응답특성들은 밀폐박스의 크기에 독립적인 양상을 보이며 실제 현상을 잘 나타내지 못하였다. 이러한 원인은 마이크로스피커와 외부 인클로저동의 설계 제원이 너무 작아서 상용 소프트웨어 내부에서 무시되고 있다고 볼 수 있다. 따라서, 마이크로스피커를 모바일 폰 등에 장착하였을 때의 특성을 예측하려면 마이크로스피커의 정확한 TS 매개변수를 규명해야 함과 동시에 이를 이용한 시스템 해석 프로그램을 독자적으로 개발하여야 한다. 마이크로스피커 시스템에 대한 전기 임피던스와 음향응답특성을 예측할 수 있는 시스템 해석 프로그램에 대한 내용은 후속 논문에서 다룰 예정이다. 한편, 마이크로스피커의 후면기공의 면적에 따라 시스템의 공진 주파수가 변동하는 내용⁽⁷⁾을 기술한 실험논문은 있지만, 동적질량, 컴플라이언스, 감쇠 요소, 힘 요소 등의 TS 매개변수 규명에 대한 내용이 없어서 마이크로스피커 시스템의 전기 음향특성과 음향응답특성 등을 예측하고자 하는 경우에는 어떤 의미를 찾을 수가 없다. 산업계에서는 특정한 모바일 폰에 적합한 마이크로스피커 설계기술을 확립하고자 노력해오고 있으며 이에 대한 자문들을 요청받은 바 있다. 한편, 마이크로스피커 시스템 특성 예측을 위해 상업용 유한요소 해석 소프트웨어나 경계요소 해석 소프트웨어를 사용하여 전산해석을 수행한 경험에 비춰 볼 때에 이러한 해석방법은 스피커의 자기 회로 해석 및 응용에 대한 분야에서는 효율적이지만 음향 및 전기 특성 해석 측면에서는 비효율적인 방법이라 생각된다. 전산 해석방법은 많은 해석시간과 전산비용이 요구되므로 일반적인 중소기업에서는 도입하는데 어려움이 있다. 따라서, 마이크로스피커의 TS 매개변수의 변동에 따라 설계자가 전기 임피던스 특성 등을 쉽고 빠르게 또한 정확하게 예측할 방법이 필요하다. 이를 위해서는 마이크로스피커의 TS 매개변수 규명이 선결될 문제이며 이러한 문제들을 이 논문에서 다룬다.

2. 마이크로스피커의 경계조건에 따른 전기 임피던스 특성 비교

전형적인 원형 마이크로스피커는 Fig. 1과 같은 형태이며 Fig. 2(c)의 구조로 6차 밴드패스 필터형태로 나타낼 수 있다. 시험 대상 마이크로스피커는 무보빈형으로 다이어프램의 유효 직경 11.18 mm, 후판과 다이어프램사이의 후면 체적 V_{ab} 는 151 nm^3 이고, 후판에 5개의 기공과 전면 그릴에는 중앙에 직경 3 mm인 1개의 벤트와 주변에 직경 1.7 mm인 10개의 벤트가 있다. 다이어프램부의 동적 질량은 0.0265 g이다.

전면 그릴과 후면 판에는 감쇠를 제어하기 위하여 부직포 스크린이 부착되어 있다. Fig. 3에는 원제품(파선), 전면그릴과 후면 스크린을 제거한 벤트박스

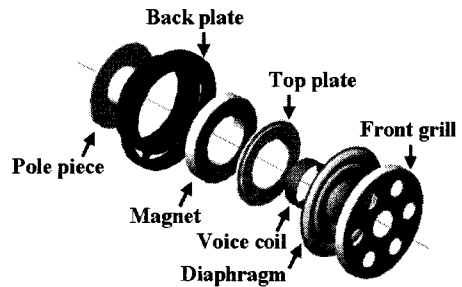


Fig. 1 Configuration of typical microspeaker

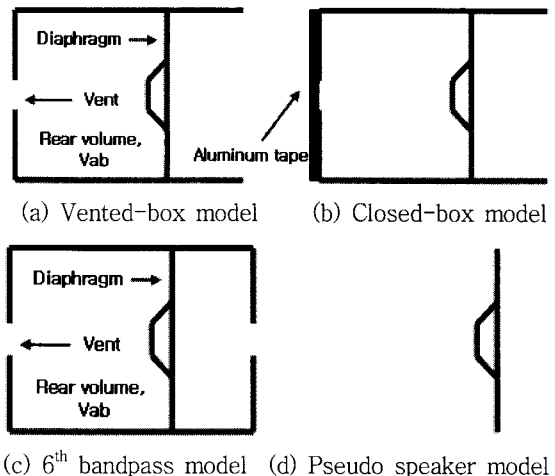


Fig. 2 Four schematic diagrams for microspeaker model

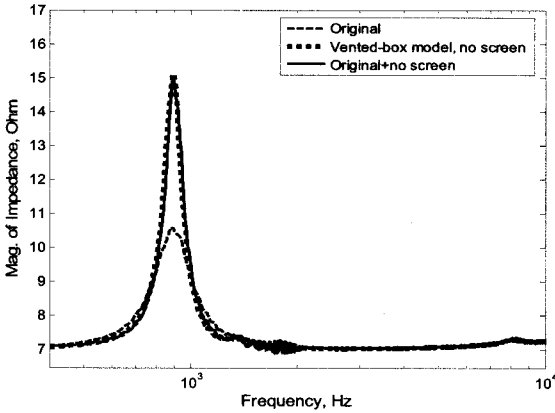


Fig. 3 Comparison of electrical impedances for microspeaker

(점선, Fig. 2(a)) 와 원제품에서 전면과 후면 스크린을 모두 제거한(실선, Fig. 2(c)) 3가지 경우의 전기 임피던스 크기를 비교하였다. Liberty사의 Praxis Audio Measurement System(version 2.39g)을 사용하여 resynchronous chirp신호를 가진 신호로 사용하여 전압 가진법으로 전기 임피던스를 측정하여 20번 평균하였다. 주파수 분해능은 2.93 Hz로 주파수 범위는 17.578 Hz에서 19,998 Hz까지 6,821개의 데이터들을 측정하였다. 측정된 공진 주파수는 각각 885 Hz, 894 Hz와 894 Hz이다. 시험용 마이크로스피커의 공진 주파수는 전면 그릴이 있느냐 없느냐에 관계없이 894 Hz로 동일하였으며 이는 시스템에서 질량 대 강성계수의 비가 전면그릴에 독립적으로 일정하다는 것을 의미한다. 따라서, 전면그릴의 존재는 공진 주파수 부근에서의 시스템의 전기 임피던스에 약간의 감소효과만을 주었다.

원제품에서 후면 스크린을 제거하였을 때에 공진 주파수는 885 Hz에서 899 Hz로 1.6% 증가하였으며 전기 임피던스 크기도 10.59 오옴에서 13.13 오옴으로 증가하였다(Fig. 4). 그런데, 이러한 단편적인 정보들로는 벤트박스 또는 6차 밴드패스 형태인 마이크로스피커의 체적 및 벤트크기에 따른 전기 임피던스와 음향응답특성을 정량적으로 예측할 수 없으며 설계상 의미 있는 정보를 얻은 것이라 볼 수 없다. 따라서, 마이크로스피커의 전기 임피던스와 음향특성에 대한 정량적 예측을 하려면 가상 스피커(Fig. 2(d))에 대한 TS 매개변수를 규명하고 규명된 TS 매개변수를 사용하여 Fig. 2(a) 또는 Fig. 2(c)와 같이 마이크로스피커를 모델링 하여야 시스템 예측이

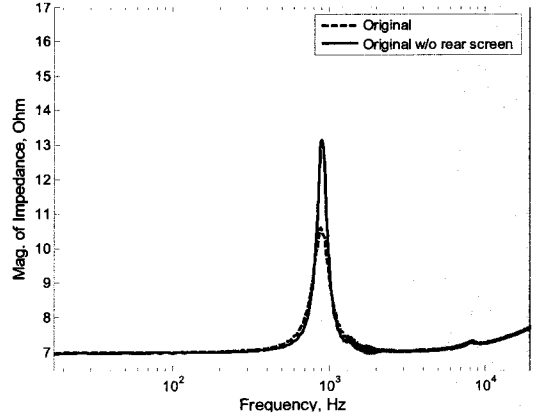


Fig. 4 Comparison of electrical impedances for microspeaker

가능하게 된다. 다음 장에서는 가상 스피커의 TS 매개변수를 규명하는 것을 기술한다.

3. 후면 밀폐체적을 가진 마이크로스피커의 가상 스피커 TS 매개변수 규명

Fig. 2(c)는 스크린을 제거한 마이크로스피커 모델을 나타냈다. 마이크로스피커의 TS 매개변수 규명을 위한 가상 스피커 모델(Fig. 2(d))과 밀폐박스 모델(Fig. 2(b))에서의 스피커의 공진 주파수는 각각 식 (1)과 식 (2)로 표현할 수 있다.

$$F_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{M_{ms}C_{ms}}} \quad (1)$$

$$F_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{M_{ms,b}C_t}} \quad (2)$$

$$C_t = C_{ms}C_{ab,m} / (C_{ms} + C_{ab,m}) \quad (3)$$

$$C_{ab,m} = V_{ab} / (\rho_0 c^2 S^2) \quad (4)$$

$$M_{ms,b} = M_{md} + (M_{ab} + M_{al})S^2 \quad (5)$$

$$M_{ms} = M_{md} + M_{al}S^2 \quad (6)$$

$$M_{ab} = B\rho_0 / (\pi a_d) \quad (7)$$

$$M_{al} = 8\rho_0 / (3\pi^2 a_d) \quad (8)$$

여기서, C_t 는 밀폐박스 시스템에서 등가 전체 기계적 컴플라이언스이고, $C_{ab,m}$ 은 밀폐박스에 의한 기계적 컴플라이언스를 C_{ms} 와 M_{md} 는 가상 스피커의 기계적 컴플라이언스와 동적질량을 나타낸다^(1,10). 마

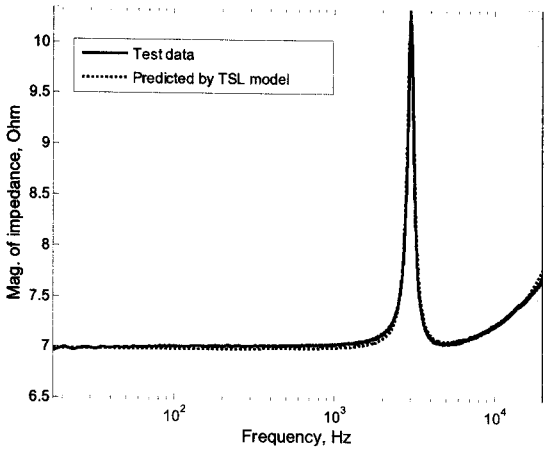


Fig. 5 Comparison of electrical impedances for microspeaker with rear closed-box, solid: test data, dotted: identified by pseudo loudspeaker estimation method

이크로스피커에 대해 가상 라우드스피커 TS매개변수 규명법⁽¹⁾을 이용하기 위하여 Fig. 1에서 전면 그릴을 제거하였고 후면에 부착된 스크린을 제거한 후에 후면기공을 알루미늄 테이프를 이용하여 밀봉하였다(Fig. 2(b)). 밀폐박스 상태의 전기 임피던스 시험데이터(실선)와 규명한 결과(점선)가 매우 잘 일치하였다(Fig. 5). 밀폐박스의 공진주파수 $F_c=3,006$ Hz 이고, 마이크로스피커 내부에 있는 가상 스피커의 규명된 TS매개변수는 $F_s=945$ Hz, $R_e=6.99$ Ohm, $Q_{ms}=2.81$, $Q_{es}=5.86$, $M_{md}=26.5$ ukg, $C_{ms}=1.048$ mm/N, $Bl=0.438$ Tm, $R_{ms}=57.2$ mNs/m, $K_{rm}=0.20$ n, $E_{rm}=1.85$, $K_{xm}=86.2$ u, $E_{xm}=0.86$ 이다.

4. 벤트박스 시스템에서 가상 스피커 매개변수 규명

3장에서는 밀폐박스를 이용한 가상 스피커 매개변수 규명법을 이용하여 마이크로스피커의 TS 매개변수를 규명하였다. 이 방법은 다이어프램 부의 동적 질량 M_{md} 와 후면체적 V_{ab} 를 미리 알고 있어야 적용할 수 있다. 시험 마이크로스피커의 동적질량 M_{md} 는 전자저울로 측정된 결과를 사용하였으며 후면체적은 설계 도면에서 근사적으로 추정하였다. 그러나, 마이크로스피커의 설계 도면이 주어지지 않았을 때 원제품에서 후면 체적을 추정하는 것은 신뢰할 수 없는 결과를 가져올 수도 있다. 벤트박스 모델링

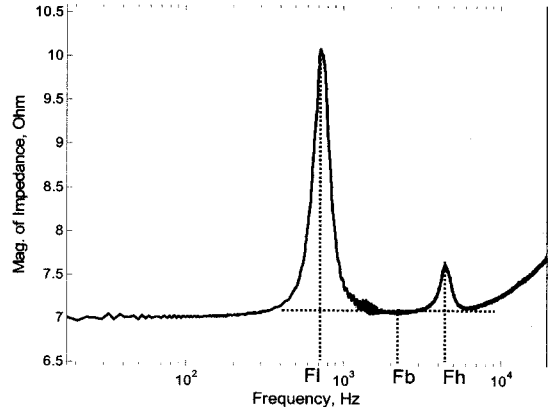


Fig. 6 Typical electrical impedance in vented-box loudspeaker system

법을 이용하면 가상 마이크로스피커의 공진주파수 F_s 를 추정할 수 있다^(5,8). Fig. 6은 전형적인 벤트박스 상태에서의 전기 임피던스 특성을 나타낸다. 벤트박스에서의 공진주파수는 식 (9)와 식 (10)의 관계가 성립한다.

$$F_b = \sqrt{F_l^2 + F_h^2 - F_c^2} \quad (9)$$

$$F_s = F_l F_h / F_b \quad (10)$$

Fig. 6에서 F_l , F_h 는 벤트박스 상태(Fig. 2(a))의 전기 임피던스 곡선에서 각각 1차와 2차 공진주파수를 나타내며, F_b 는 1차와 2차 공진 주파수 사이에서 최소의 전기 임피던스 크기를 나타내는 지점으로 박스 공진 주파수를 나타낸다. F_b 는 그림에서 추정하기가 어렵기 때문에 식 (10)을 이용하여 계산한 결과를 이용하였다. F_c 는 밀폐박스 상태(Fig. 2(b))에서의 공진주파수를 나타낸다(Fig. 5). 시험용 마이크로스피커에서 전면그릴을 제거하여 벤트박스 형태를 만들었다(Fig. 2(a)). 후면기공은 5개가 있으며 후면기공에 따른 벤트박스 모델을 Table 1에 나타냈다. 후면기공의 전체 면적은 다이어프램 면적의 약 20%였다.

모든 벤트를 밀봉한 상태인 밀폐박스에서 공진 주파수 $F_c=3,006$ Hz를 나타냈고, 벤트박스 경우에는 2개의 피크 공진주파수 F_l , F_h 와 1개의 박스 공진 주파수 F_b 를 나타냈다. 공진 주파수 F_s 는 식 (10)을 이용하면 953 Hz에서 976 Hz 범위에 있으므로 (Table 1) 평균값인 962 Hz 를 택했으며 이 값은 3

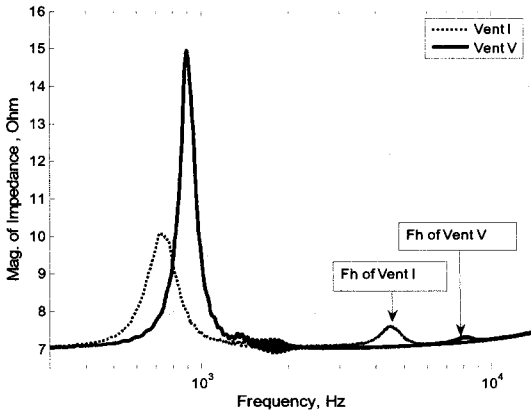


Fig. 7 Comparison of electrical impedances for microspeaker according to vent area, solid line : 3.3 μm^2 , dashedline : 19.4 μm^2

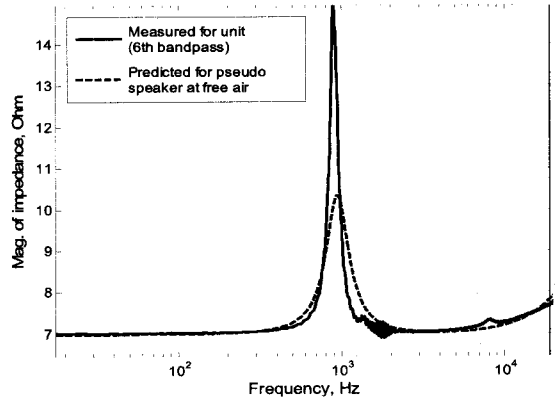


Fig. 8 Comparison of electrical impedances for microspeaker, solid : 6th bandpass (measured), dashed : pseudo speaker model(predicted) at free air

Table 1 Vent models for microspeaker according to vent area based on Fig. 2(a)

Model	Rear vent area, μm^2	F_i	F_h	F_b^*	F_s^*
Vent I	3.2987	723.6	4,471	3388	955
Vent II	7.5870	820.3	5,505	4,684	964
Vent III	11.7653	867.2	6,278	5,579	976
Vent IV	16.0536	881.8	7,160	6,558	963
Vent V	19.3523	893.5	8,191	7,672	953

* Means calculated results.

장에서의 $F_s=945$ Hz와 비슷한 결과를 나타냈다.

이제, 후면체적 V_{ab} 를 추정한다. 식 (1)과 식 (2)에서 C_{ms} 와 V_{ab} 를 구하면 각각 식 (11)과 식 (12)가 된다.

$$C_{ms} = 1/\{(2\pi F_s)^2 M_{ms}\} \tag{11}$$

$$V_{ab} = \rho_0 c^2 S^2 C_i C_{ms} / (C_{ms} - C_i) \tag{12}$$

이때, C_i 는 식 (2)에서

$$C_i = 1/\{(2\pi F_c)^2 M_{ms,b}\} \tag{13}$$

식 (11)에서 $C_{ms}=1.011$ mm/N는 3장에서 규명한 $C_{ms}=1.048$ mm/N와 거의 일치함을 알 수 있으며 식 (12)에서 $V_{ab}=152$ nm^3 로 도면에서 추정한 151 nm^3 와 거의 동일한 결과를 나타냈다. 따라서, 이 논문에서 제안한 방법인 설계 도면이 없을 경우에도

벤트박스 상태에서 측정한 전기 임피던스 데이터들에서 밀폐체적을 유추할 수 있다는 것이 타당함을 알았다. 이렇게 구한 밀폐체적과 측정한 다이아프램부의 동적 질량을 사용하여 3장에서 적용한 방법대로 밀폐박스 상태의 가상 스피커 TS 매개변수 규명 방법으로 가상 스피커의 TS 매개변수를 규명할 수 있다. 전면그릴과 후면 판에 부착된 스크린을 제거한 상태(6차 밴드패스 모델, Fig. 2(c))에서 측정한 전기 임피던스(실선)와 규명한 가상 스피커(Fig. 2(d))의 TS 매개변수로 예측한 자유공기 상태에서의 가상 스피커의 전기 임피던스(파선)를 Fig. 8에 비교하였다. 전자는 공진 피크가 894 Hz이고 후자는 943 Hz로 가상 스피커의 공진 주파수가 49 Hz 높게 나타났다. 공진 주파수 근처에서 전기 임피던스 크기는 후자가 작음을 알 수 있으나 2,500 Hz 이상에서는 큰 차이가 없음을 보였다. 전자는 8,200 Hz 부근에서 2차 공진이 있음을 보였다. Fig.8을 볼 때에 마이크로 스피커를 유니트 상태(Fig.2(c))에서 측정한 전기 임피던스에는 전면과 후면 체적과 벤트의 영향이 나타나므로 6차 밴드패스 형태를 일반적인 자유공기 상태인 dipole 방사체라 가정하여 TS 매개변수를 규명하는 것은 문제가 있음을 알 수 있다. 따라서, 이 논문과 같이 가상 스피커의 TS 매개변수를 규명하는 것이 타당함을 알 수 있다. 5장에서는 규명한 가상 스피커의 TS 매개변수를 이용하여 가상 스피커가 벤트박스에 장착되었을 때의 벤트박스 상태의 전기 임피던스 예측값과 실측값을 비교하여 TS 매개

변수 규명의 정확성을 기술한다.

5. 마이크로스피커 벤트박스 모델의 전기 임피던스 특성 예측

3장에서 규명한 가상 스피커의 TS 매개변수와 벤트박스 모델을 이용하여 마이크로스피커에서 전면그릴을 제거한 벤트박스 상태(Fig. 2(a))의 전기 임피던스를 예측하고자 한다. 3장에서 밀폐박스 상태에서 규명한 가상 TS 매개변수와 벤트박스 모델⁽⁹⁾을 이용하여 전기 임피던스의 예측 값과 실측 값을 비교하여 규명된 매개변수가 마이크로스피커 구조 변경에 따른 전기 임피던스 변동을 예측할 수 있는지를

검토한다. 벤트박스 모델링법^(9,10)을 이용하여 마이크로스피커를 모델링한 벤트박스 모델 I(Table 1)에서 1차 공진 주파수는 예측값과 시험데이터와 예측값이 둘다 724 Hz이었고 그때의 전기 임피던스 크기는 각각 10.09 Ohm과 10.18 Ohm으로 정확히 예측할 수 있음을 보인다(Fig. 9). 2차 공진 주파수는 시험데이터와 예측값이 각각 4,424 Hz와 4,471 Hz로 1.1 % 오차를 나타냈고 전기 임피던스 크기는 7.62 Ohm와 7.80 Ohm로 2.4 % 오차를 나타내서 규명한 TS 매개변수를 사용하여 마이크로스피커 벤트박스 시스템을 잘 예측하였다. 모든 후면벤트들을 개방하고 스크린을 제거한 벤트박스 모델 V(Table 1)의 경우에 1차 공진 주파수는 시험데이터와 예측값이 각각 894 Hz와 899 Hz를 나타내서 0.6 % 이내로 정확히 예측하였다(Fig. 10). 2차 공진 주파수도 시험데이터와 예측값이 각각 8,191 Hz와 8,209 Hz를 나타내서 0.2 % 이내로 정확히 일치함을 보여 벤트박스 모델의 예측을 신뢰할 수 있음을 보였다. 1차 공진 주파수에서 전기 임피던스 크기가 차이를 보이는 것은 시험의 경우에 벤트박스의 모든 벤트를 개방하여 기계적 손실이 저감되어 Q값이 커져서 나타난 현상으로 보인다. 그러나, 주요 관심사는 공진 주파수를 잘 예측하는 것과 공진 주파수 이상에서의 음향응답 특성이므로 이 문제는 중요치 않다고 본다.

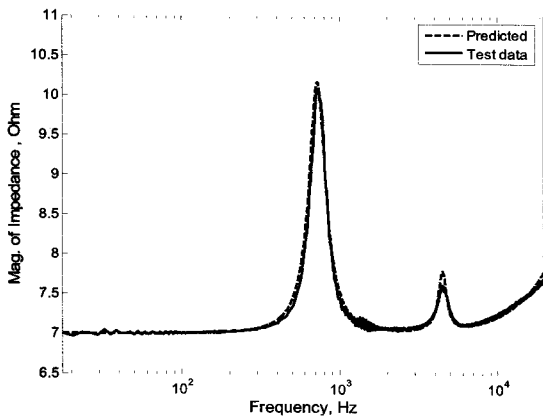


Fig. 9 Comparison of electrical impedances for microspeaker with rear vent area $3.3 \mu\text{m}^2$, solid : test data, dotted : predicted

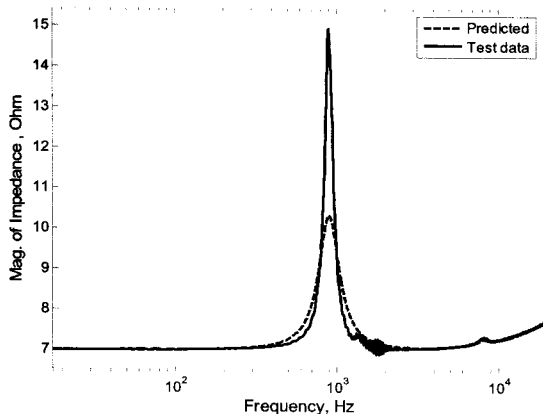


Fig. 10 Comparison of electrical impedances for microspeaker with rear vent area $19.4 \mu\text{m}^2$, solid : test data, dotted : predicted

6. 결 론

10 mm급 원형 마이크로스피커를 대상으로 내부의 가상 스피커의 TS 매개변수를 규명하였다. 규명된 데이터를 이용하여 마이크로스피커 벤트박스 모델에 적용 하였을 때에 전기 임피던스 곡선 시험결과를 매우 정확히 예측할 수 있었다. 따라서, 가상 스피커 개념을 도입하여 마이크로스피커를 일반적인 라우드 스피커처럼 TS매개 변수로 표현할 수 있음을 보였다. 또한, 설계도면이 없을 때에도 마이크로스피커의 후면 밀폐박스의 체적을 추정하는 방법을 제안하여 가상 스피커의 TS 매개변수를 용이하게 규명하는데 사용하도록 하였다. 규명된 가상 스피커의 TS 매개변수는 마이크로스피커의 임의의 구조변경에 따른 전기 임피던스 및 음향응답특성 예측을 쉽고도 정확하게 예측하는데 사용되어 좋은 품질의 마이크로 스피커 설계 및 개발에 사용될 수 있다고 기대된다.

또한, 이 논문에서 개발한 방법은 마이크로 스피커에 대한 일반적인 TS 매개변수 규명법이므로 직접 방사형 타입의 일반적인 마이크로스피커에 적용할 수 있다. 따라서, 모바일 폰 등에 많이 사용 되는 여러 크기와 형태를 갖는 타원형 마이크로스피커에도 적용이 가능하다고 본다.

참 고 문 헌

(1) Park, S. T., 2007, "Parameters Estimation for Pseudo Loudspeaker attached to Closed-box and Enhanced Closed-box Modeling", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 17, No. 10, pp. 983~992.

(2) Park, S. T., 2002, "Study on Linear Parameters Identification of Loudspeaker", Journal of the Acoustical Society of Korea, Vol. 21, No. 4, pp. 415~420.

(3) LMS User Manual, 2000, Win32 Release 4.1, LinearX systems inc.

(4) LEAP Enclosure Shop Reference Manual,

2002, Release 5, LinearX systems inc.

(5) Dickason, V., 2000, The Loudspeaker Design Cookbook, 6th edition, AAP.

(6) Dickason, V., 1994, Loudspeaker Recipes Book 1: Four Two-Way Systems, 1st edition, AAP.

(7) Oh, S.-J., Rhee, E., 2007, "Analysis of the Relation Between Micro-speaker with the Back Holes and the Ducted Speaker-system", Journal of the Acoustical Society of Korea, Vol.26, No.3, pp. 115~122.

(8) Small, R. H., 1973, "Vented-box Loudspeaker Systems Part II: Large-signal Analysis", J. Audio Eng. Soc., Vol. 21, No. 6, pp. 438~444.

(9) Park, S. T., 2007, "Enhanced PSPICE Circuit Model for Vented-box Loudspeaker System", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 17, No. 8, pp. 757~765.

(10) Leach, Jr. M. M., 2003, Introduction to Electroacoustics & Audio Amplifier Design, 3rd edition, Kendall/Hunt publishing company.