

밀폐박스 상태의 가상 라우드스피커 매개변수 규명법 및 개선된 밀폐박스 모델링

Parameters Estimation for Pseudo Loudspeaker attached to Closed-Box and Enhanced Closed-Box Modeling

박 석 태*

Seok-Tae Park

(2007년 8월 6일 접수 ; 2007년 8월 30일 심사완료)

Key Words : Thiele Small Parameters(TS 매개변수), Pseudo Loudspeaker(가상 라우드스피커), Frequency Dependent Inductor(주파수 종속 인덕터), TSL Model(트랜스듀서 스피커 라이브러리 모델), Closed-Box Loudspeaker(밀폐박스 라우드스피커), VDVS(전압종속 전류소스), CDVS(전류종속 전압소스), VDVS(전압종속 전압소스), CDCS(전류종속 전류소스), PSPICE Circuit Model(PSPICE 회로모델), Compensation Filter(보정필터)

ABSTRACT

It was proposed to identify Thiele Small Parameters for loudspeaker attached to closed-box using known dynamic mass of moving parts. Also, enhanced PSPICE circuit model for closed-box loudspeaker system was proposed to more accurately simulate real closed-box loudspeaker system. Frequency dependent parameters were used to model voice coil inductor. Acoustic pressure response curves and electrical impedance curves were simulated and investigated by PSPICE circuit model according to compensation filter's parameters. Finally, proposed method is expected to be utilized for identification of pseudo Thiele Small parameters of microspeaker.

1. 서 론

마이크로스피커의 Thiele Small(TS) 매개변수를 어떻게 구할 수 있을까? 이 질문은 마이크로스피커 업체에서 가장 빈번히 듣는 질문들 중의 하나이다. 왜 TS 매개변수를 규명하려고 할까? 마이크로스피커 유닛 자체의 음향특성을 개선하려는 목적인지 마이크로스피커를 모바일 폰과 같은 밀폐 또는 벤트 박스에 장착하였을 때의 시스템의 음향특성을 개선하려는 목적인가에 따라 접근방법이 다를 수 있다. 후자의 경우에는 TS 매개변수를 규명하지 않고도

음향특성 개선이 가능하다. 그러나, 전자의 경우에는 문제가 복잡해지며 이 논문에서는 이러한 규명과정을 위한 기초 연구내용을 다룬다. 라우드스피커(스피커) 시스템을 해석하려면 스피커의 TS 매개변수가 필요하다. 이를 기초로 하여 밀폐박스, 벤트박스 또는 밴드패스박스 등을 설계하고 전체적인 시스템 특성인 전기 임피던스, 음향 응답특성, 군 지연, 충격 응답, 스텝 응답, 다이아프램의 변위, 속도 및 가속도 등 설계자들이 필요한 사항들을 예측할 수 있다. 이렇게 예측된 시스템의 음향특성 및 전기특성을 변동시키기 위하여 네트워크 또는 필터들을 설계하여 문제를 해결하기도 한다⁽¹⁻⁵⁾. TS 매개변수를 규명하는 방법은 크게 시간 영역 규명법과 주파수 영역 규명법으로 나눌 수 있다. 산업체에서는 주파수 영역법을 선호하며 이는 측정의 간편성과 이미 정립된

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

방법이 널리 사용되고 있기 때문이다. 주파수 영역에서 TS 매개변수를 규명하는 방법으로는 밀폐박스 법과 질량 추가법이 사용되고 있다. 이 방법들은 2개의 전기 임피던스 곡선 데이터를 사용하고 있다. 어느 경우이나 TS 매개변수 규명을 위해서는 반드시 자유공기 상태에서 측정된 스피커의 전기 임피던스 곡선 데이터가 필요하다. 이러한 TS 매개변수 규명법들은 계속적으로 개발되어 주파수 종속 보이스 코일 인덕터 모델을 사용하여 스피커를 더욱 정확히 모델링 할 수 있다⁽⁶⁻⁸⁾. 일반적인 라우드스피커의 경우에는 스피커의 동적질량을 알고 있다면 자유공기 상태에서 측정된 하나의 전기 임피던스 곡선 데이터만 있어도 TS 매개변수 규명이 가능하다⁽⁶⁾. 그런데, 이러한 정상적인 상황이 아닌 즉, 자유공기 상태에서는 전기 임피던스를 측정할 수 없는 상황에서도 TS 매개변수를 규명해야 하는 경우가 발생할 수 있다. 예를 들면, 일반적인 라우드스피커는 유니트가 dipole 형태의 음향방사를 하는 형상으로 자유공기 상태에서의 전기 임피던스 측정이 가능하지만 마이크로스피커는 유니트 자체가 6차 밴드패스 시스템 형태를 갖는다⁽⁹⁾. 따라서, 일반적인 라우드스피커와 같은 형태로 하려면 전면과 후면을 제거해야 하지만 이러한 상황은 존재할 수 없다. 이 논문은 마이크로스피커의 전면과 후면체적과 벤트들의 영향을 제거한 상태인 가상 스피커의 TS 매개변수를 규명하는 선행연구 부분을 다룬다. 즉, 우퍼를 사용하여 우퍼의 다이어프램부의 동적질량을 알고 있을 때에 밀폐박스에 장착된 우퍼의 전기 임피던스 곡선 데이터만을 사용하여 우퍼의 TS 매개변수를 규명하는 방법을 제안하였다. 또한, 개선된 밀폐박스 모델링 방법을 제안하였다.

2. 밀폐박스 라우드스피커 이론

스피커의 TS 매개변수가 F_s , R_e , Bl , C_{ms} , R_{ms} , M_{md} , Q_{ms} , Q_{es} , Q_{ts} 로 주어졌을 때에 자유 공기 상태에서는 다음의 관계식들이 성립한다^(10,11).

$$\omega_s = 2\pi F_s \tag{1}$$

$$Q_{ms} = 1/(\omega_s C_{ms} R_{ms}) \tag{2}$$

$$Q_{es} = \omega_s R_e M_{ms} / Bl^2 \tag{3}$$

$$M_a = 8\rho_0 a^3 / 3 \tag{4}$$

$$M_{ms} = M_{md} + M_a \tag{5}$$

$$R_{ms} = \omega_s M_{ms} / Q_{ms} \tag{6}$$

$$Bl = \sqrt{\omega_s R_e M_{ms} / Q_{es}} \tag{7}$$

여기서, ρ_0 와 a 는 각각 공기의 밀도와 다이어프램의 유효 반지름을 나타낸다. 밀폐박스에 대한 간략화된 이론은 Small이 1972년과 1973년에 발표한 논문에 잘 나타나 있다^(12,13). Small은 밀폐박스를 박스내부의 에너지 흡수에 의한 손실효과 R_{ab} 와 박스체적(부피)의 컴플라이언스 C_{ab} 및 방사질량 M_a 이 직렬로 연결된 음향 임피던스 회로로 표현하였다(Fig. 1).

Small은 보이스 코일 인덕터 효과를 무시하고 직류 저항 R_e 을 고려한 전기등가 회로를 제안하였으며, 기계 임피던스 회로에는 다이어프램부의 질량, 컴플라이언스 및 손실효과 등을 모델링 하였다. 따라서, Small의 모델은 저주파수 영역에서 성립하는 방법이 된다. 음향계에서의 방사질량은 음향 임피던스 등가에서 M_{ac} 에 포함되었다. 한편 전기, 기계 및 음향 임피던스를 각각 Z_e , Z_m 및 Z_a 로 나타내면

$$Z_e = Bl^2 / Z_m = (Bl/S)^2 / Z_a \tag{8}$$

가 된다. 여기서 Bl 은 자기장의 밀도*보이스 코일의 길이를 나타내는 힘요소이고 S 는 다이어프램의 유효 단면적이다. 따라서, 음향등가 임피던스로 표현한 Fig. 1에서 다음의 관계식들이 성립한다.

$$R_{as} = R_{ms} / S^2 \tag{9}$$

$$M_{ac} = (M_{md} + M_a) / S^2 + M_{a1} \tag{10}$$

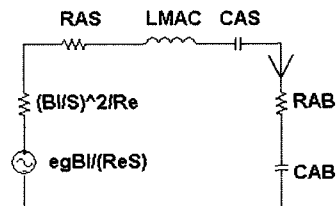


Fig.1 Acoustical impedance analogous circuit of simple closed-box loudspeaker system

$$C_{as} = C_{ms} S^2 \quad (11)$$

$$C_{ab} = V_{ab} / (\rho_0 c^2) \quad (12)$$

Fig. 1을 전기 임피던스 등가로 표시한 회로는 Fig. 2와 같으며 eg는 가진 전압을 나타낸다.

$$C_{mec} = M_{ac} (S/Bl)^2 \quad (13)$$

$$L_{cet} = C_{at} (Bl/S)^2 \quad (14)$$

$$R_{ec} = (Bl/S)^2 / (R_{ab} + R_{as}) \quad (15)$$

박스상태의 각(circular) 공진주파수를 ω_c 라 두면

$$\omega_c = 1/\sqrt{C_{mec} L_{cet}} \quad (16)$$

$$F_c = \omega_c / (2\pi) \quad (17)$$

이 되고 밀폐박스 Q값들은 식 (18)~ 식 (20)과 같다.

$$Q_{mc} = \omega_c C_{mec} R_{ec} \quad (18)$$

$$Q_{ec} = \omega_c C_{mec} R_e \quad (19)$$

$$Q_{tc} = Q_{ec} Q_{mc} / (Q_{ec} + Q_{mc}) \quad (20)$$

한편, 스피커의 컴플라이언스 대 밀폐박스의 컴플라이언스 비인 α 는 식 (21)과 같다.

$$\alpha = C_{as} / C_{ab} = F_c Q_{ec} / (F_s Q_{es}) - 1 \quad (21)$$

스피커의 등가 부피 V_{as} 는 식 (22)로 규명할 수 있다. 즉, 스피커의 등가부피는 자유공기 상태에서의 공진주파수 F_s 와 그때의 전기적 Q_{es} 값과 밀폐박스부피 V_{ab} 와 밀폐박스 상태에서의 공진주파수 F_{ct} 와 전기적 Q_{ect} 값을 알면 구할 수 있다.

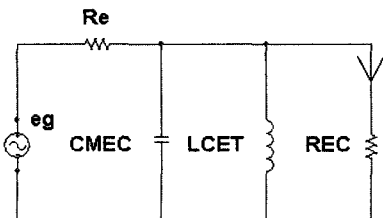


Fig. 2 Electrical impedance analogous circuit of simple closed-box loudspeaker system

$$V_{as} = V_{ab} \{ (F_{ct} Q_{ect}) / (F_s Q_{es}) - 1 \} \quad (22)$$

밀폐박스에 흡음재가 없는 경우에는 $F_{ct} = F_c$, $Q_{ect} = Q_{ec}$ 가 된다. 스피커의 다른 TS 매개변수는 식 (23)에서 식 (27)에서 규명할 수 있다⁽¹⁰⁾.

$$C_{ms} = V_{as} / (\rho_0 c^2 S^2) \quad (23)$$

$$M_{ms} = 1 / (C_{ms} \omega_s^2) \quad (24)$$

$$M_{md} = M_{ms} - M_a \quad (25)$$

$$R_{ms} = \omega_s M_{ms} / Q_{ms} \quad (26)$$

$$Bl = \sqrt{\omega_s R_e M_{ms} / Q_{es}} \quad (27)$$

그런데, 만일 자유공기 상태에서 스피커 유니트의 전기 임피던스 측정이 불가능하다면 밀폐박스 상태의 스피커의 매개변수를 규명할 방법이 있을까? 다음 장에서 이러한 문제들을 해결할 제안한 방법을 기술한다.

3. 가상 스피커 개념을 이용한 밀폐박스에서의 매개변수 규명법

이 절에서는 가상 스피커 개념을 이용하여 가상 스피커의 TS 매개변수 규명법을 기술하고자 한다. 자유공기 상태에서 스피커의 전기 임피던스 데이터는 측정할 수 없으나 다이어그램부의 동적질량은 알고 있다고 가정하였다. 이 경우에 밀폐박스 스피커 시스템에 장착된 우퍼의 매개변수를 규명 하는 방법을 기술한다.

3.1 시뮬레이션, 개선된 밀폐박스 모델링 및 제안된 TS 매개변수 규명법

2장에서 밀폐박스 모델링은 매우 단순한 형태이며 보다 정확한 모델은 PSPICE모델로 임피던스 형태로 나타낼 수 있다(Fig.3)⁽⁹⁾. Fig. 3에서 상단좌측은 전기계이고 상단우측은 기계계를 하단은 음향계의 임피던스 형태를 각각 나타냈다. 하단 우측 부분은 다이어그램에 의한 전방에 대한 방사 질량과 손실 등을 나타냈다^(5,6,9). Fig. 3에서 GZE는 보이스코일 인덕터를 라플라스 변환식으로 표현할 수 있도록 하며, 첫글자인 “G”는 VDCS(전압중속 전류소스)를 의미한다. HXXX, EXXX, FXXX의 첫 문자는

각각 CDVS(전류중속 전압소스), VDVS(전압중속 전압소스), CDCS(전류 중속 전류소스)를 나타내며 두 번째 문자부터는 판독을 쉽게하기 위해 사용자가 임의로 붙일 수 있다⁽⁶⁾. 예로 FSWUW는 전류중속 전류소스로 기계회로(Fig. 3의 우측)에 흐르는 다이어프램의 속도에 중속하여 음향회로에 흐르는 부피속도를 나타내며 물리적으로는 다이어프램 단면적*다이어프램 속도를 의미한다.

이 모델을 식(8)와 같이 변환기를 사용하면 전기 임피던스 등가 모델을 나타낸다(Fig. 4).

각 소자들은 식(28)에서 식(30)으로 표현된다.

$$Z_e = R_e + Z \tag{28}$$

$$Z_m = sM_{md} + R_{ms} + 1/(sC_{ms}) \tag{29}$$

$$Z_a = Z_r + R_{ab} + sM_{ab} + (Z_f + R_{a2})sM_{a1} / (Z_f + R_{a2} + sM_{a1}) \tag{30}$$

전체 전기 등가 임피던스 Z_{tot} 는 식(31)과 같다.

$$Z_{tot} = R_e + Z + B l^2 / (Z_m + S^2 Z_a) \tag{31}$$

밀폐박스 매개변수는⁽⁹⁾ 식(32)~(38)로 나타낸다.

$$R_{a1} = 128\rho_0 c / (9\pi^3 a^2) - \rho_0 c / S \tag{32}$$

$$R_{a2} = \rho_0 c / S \tag{33}$$

$$C_{a1} = 5.94 a^3 / (\rho_0 c^2) \tag{34}$$

$$C_{ab} = V_{ab} / (\rho_0 c^2) \tag{35}$$

$$M_{a1} = 8\rho_0 / (3\pi^2 a) \tag{36}$$

$$M_{ab} = B\rho / (\pi a) \tag{37}$$

$$R_{ab} = (\sqrt{1 + \alpha Q_{ms} / Q_{mc}} - 1) R_{as} \tag{38}$$

여기서 B 는 질량 하중계수(mass loading factor)로서 흡음재가 없는 경우에는 0.65이고 ρ 는 밀폐 박스내의 흡음재에 중속적이다. R_{ab} 를(식(38)) 제외하고는 밀폐박스 매개변수들이 스피커 TS 매개변수와 독립적임을 알 수 있다. R_{a1} 은 PSPICE 회로에서 open circuit를 방지할 목적으로 사용되는 것으로 0.1 Hz 이상에서 C_{ab} 가 작동하도록 식(39)로 표현된다⁽⁹⁾.

$$R_{a1} = 1 / (2\pi * 0.1 C_{ab}) \tag{39}$$

밀폐박스 상태에서의 전기 임피던스 곡선 데이터가 주어질 때 제안된 스피커의 TS 매개변수 규명법을 사용할 수 있다. 시험용 우퍼(직경, 11 cm)를 사

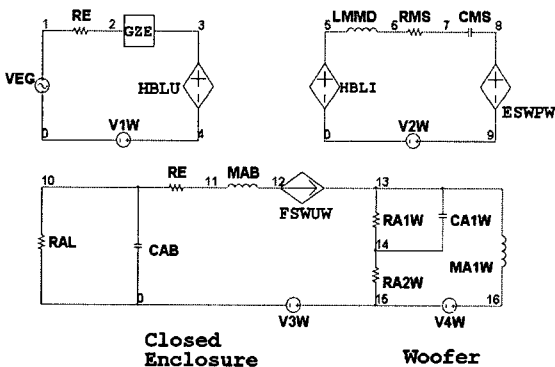


Fig. 3 PSPICE model of impedance type for closed-box system, upper left: electrical part, upper right: mechanical part, lower: acoustical part

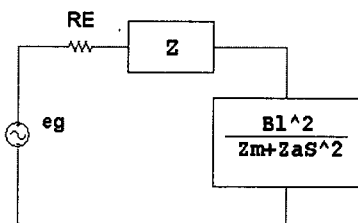


Fig. 4 Electrical impedance analogous circuit of closed-box loudspeaker system

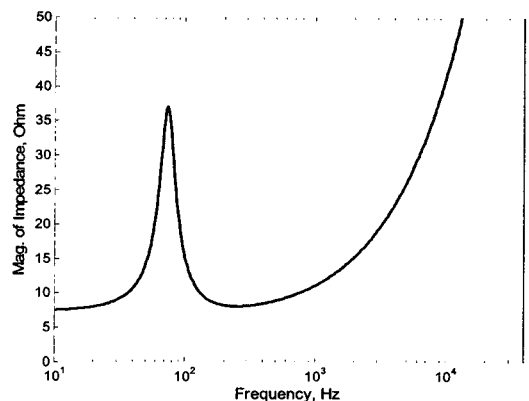


Fig. 5 Electrical impedance for closed-box loudspeaker system

용하였으며 TS 매개변수는 $f_s=66.33$ Hz, $R_e=7.37$ Ohm, $Q_{ms}=3.33$, $Q_{es}=0.82$, $M_{md}=11.21$ g, $C_{ms}=4.91 \times 10^{-4}$ m/N, $Bl=6.61$ Tm, $R_{ms}=1.47$ Ns/m, $K_{rm}=4.5943 \times 10^{-4}$, $E_{rm}=0.944$, $K_{xm}=0.0153$, $E_{xm}=0.7$ 이었고 밀폐박스의 내부체적은 22리터였다⁽⁵⁾. 해석주파수는 대수 스케일로 10~40,000 Hz 범위였고 전기 임피던스 데이터 개수는 400개로 하였다(Fig. 5).

참고문헌^(10,12)의 방법에 따르면 밀폐박스에 대해서 다음의 식들이 성립한다.

$$Q_{mc} = F_c \sqrt{r_0} / (f_2 - f_1) \quad (40)$$

$$Q_{ec} = Q_{mc} / (r_0 - 1) \quad (41)$$

$$Q_{ic} = Q_{mc} Q_{ec} / (Q_{mc} + Q_{ec}) \quad (42)$$

식 (40)에서 밀폐박스의 기계적 Q값인 Q_{mc} 는 밀폐박스상태에서 측정된 전기 임피던스 데이터에서 규명할 수 있고⁽¹⁰⁾ 이를 이용하여 Q_{ec} , Q_{ic} 를 계산한다. 등가 음향임피던스 M_{ac} 는

$$M_{ac} = M_{md} / S^2 + M_{ab} + M_{a1} \quad (43)$$

이고, 식 (43)에서 동적질량 M_{md} 를 안다면 M_{ab} 와 M_{a1} 는 이미 알고 있는 값이므로 M_{ac} 가 계산되며 이 결과를 이용하여 식 (44)~식 (47)을 적용하여 다른 매개변수들을 규명할 수 있다.

$$C_{a1} = 1 / (M_{ac} \omega_c^2) \quad (44)$$

$$C_{ab} = V_{ab} / (\rho_0 c^2) \quad (45)$$

$$C_{as} = C_{a1} C_{ab} / (C_{ab} - C_{a1}) \quad (46)$$

$$\alpha = C_{as} / C_{ab} \quad (47)$$

따라서, 가상 스피커 매개변수는 다음과 같이 식 (48)~식 (60)로 나타낼 수 있다.

$$C_{ms} = C_{as} / S^2 \quad (48)$$

$$Q_{es} = Q_{ec} / \sqrt{1 + \alpha} \quad (49)$$

$$M_{ms} = M_{md} + 8\rho_0 a^3 / 3 \quad (50)$$

$$F_s = 1 / \sqrt{M_{ms} C_{ms}} \quad (51)$$

$$\omega_s = 2\pi F_s \quad (52)$$

$$Bl = \sqrt{R_e / Q_{ec}} \sqrt{(M_{ms} / C_{ms})(1 + \alpha)} \quad (53)$$

$$Q_{is} = Q_{ic} / \sqrt{1 + \alpha} \quad (54)$$

$$Q_{ms} = Q_{is} Q_{es} / (Q_{es} - Q_{is}) \quad (55)$$

$$R_{ms} = \omega_s M_{ms} / Q_{ms} \quad (56)$$

$$R_{as} = R_{ms} / S^2 \quad (57)$$

$$C_{mec} = M_{ac} (S / Bl)^2 \quad (58)$$

$$R_{ec} = Q_{mc} / (2\pi F_c C_{mec}) \quad (59)$$

$$R_{ob} = (Bl / S)^2 / R_{ec} - R_{as} \quad (60)$$

즉, 동적질량 M_{md} 와 밀폐박스 상태의 전기 임피던스 데이터가 있으면 스피커의 TS 매개변수를 규명할 수 있다는 것이 제안한 방법이다. 이제, 이를 입증하기로 한다. 밀폐박스 상태에서의 전기 임피던스 데이터를 시뮬레이션하기 위하여 주어진 스피커 TS 매개변수로 F_s , R_e , C_{ms} , R_{ms} , Bl 및 알고 있는 M_{md} 와 보이스 코일 인덕터를 주파수 종속 매개변수 E_{rm} , K_{rm} , E_{xm} , K_{xm} 들을 사용하여 모델링한 스피커를 사용한다. 모델링된 스피커에 밀폐박스에 관계되는 식 (32)~식 (38)을 사용하면 밀폐박스 스피커 시스템의 전기 임피던스를 출력할 수 있다. 출력된 밀폐박스 상태의 전기 임피던스 데이터에 식 (40)~식 (42)를 적용하여 밀폐박스 매개변수 $F_c=73.58$ Hz, $Q_{mc}=3.57$, $Q_{ec}=0.914$, $Q_{ic}=0.073$ 을 규명하였다. 식 (48)~식 (60)을 사용하여 규명한 가상 스피커의 TS 매개변수는 $F_s=66.09$ Hz로 -0.4% 오차, $R_e=7.55$ Ohm으로 2.5% 오차, $C_{ms}=4.94 \times 10^{-4}$ m/N는 0.7% 오차, $R_{ms}=1.54$ Ns/m는 5.1% 오차, $Bl=6.75$ Tm은 2.1% 오차, $Q_{ms}=3.16$ 는 -5.1%, $Q_{es}=0.81$ 는 -2.0% 오차를 나타냈다. 규명된 TS 매개변수는 보이스 코일 인덕터를 무시한 기본 모델 상태⁽⁶⁾ 나타내며 규명한 매개변수들로 구성된 밀폐박스 상태의 전기 임피던스 데이터(점선)과 주어진 결과(실선)를 Fig. 6에 나타냈다.

보이스 코일 인덕터를 주파수 종속 모델로 하는 TSL 모델을^(6,7,14) 사용하여 밀폐박스 상태를 피팅한 결과를 Fig. 7에 나타냈다. 규명된 스피커의

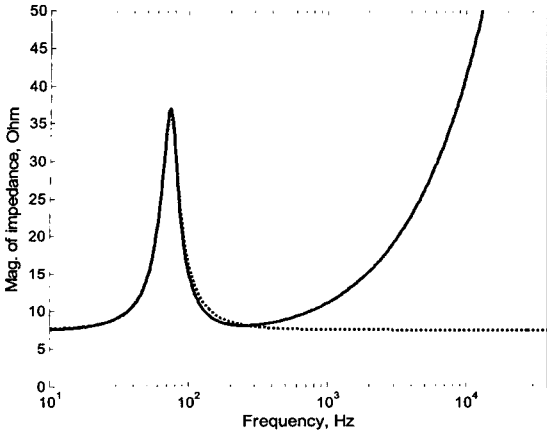


Fig. 6 Comparison of electrical impedances for closed-box loudspeaker system, solid line : given data, dotted line : predicted by basic loudspeaker model

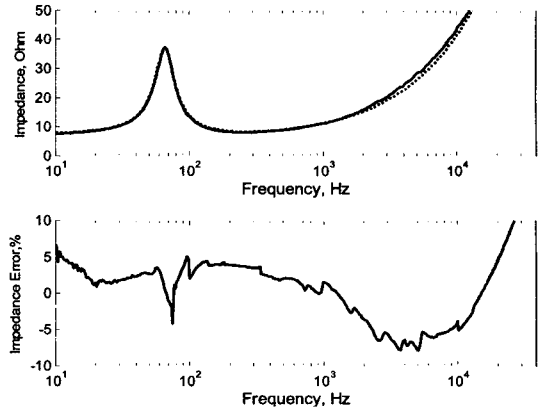


Fig. 8 Comparison of electrical impedances for loudspeaker at free air condition, upper : magnitude, lower : percent error, solid line : given simulated data, dot-ted line : predicted by TSL loudspeaker model

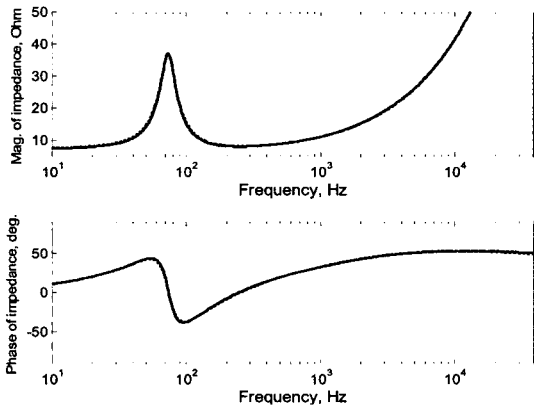


Fig. 7 Comparison of electrical impedances for closed-box loudspeaker system, upper : magnitude, lower : phase angle, solid line : given data, dotted line : predicted by TSL loudspeaker model

$K_{rm}=3.04 \cdot 10^{-4}$, $E_{rm}=0.991$, $K_{xm}=0.0147$, $E_{xm}=0.70$ 이었다. 즉, 제안한 방법을 사용하면 자유공기 상태의 전기 임피던스 곡선 데이터가 없어도 다이어램부의 동적질량 값과 밀폐박스 상태에서의 전기 임피던스 데이터를 사용하여 스피커 TS 매개변수를 정확하게 규명할 수 있음을 보였다. Fig. 8은 규명된 TS 매개변수를 사용하여 재구성한 자유공기 전기 임피던스 크기 데이터와 주어진 시뮬레이션 전기 임피던스 데이터를 비교한 것이다. 상단부는 전기 임피던스 크기를 비교하였고 하단부는 각각의 주파수에서의 크기 오차를 나타냈다. 10 Hz에서 20 kHz까

지 임피던스 크기의 예측 오차는 8% 이내로 스피커의 TS 매개변수가 잘 규명되었음을 보여주었다.

3.2 시험 및 분석

3.1절에서는 스피커의 TS 매개변수와 밀폐박스 데이터가 주어졌을 때 이를 이용하여 밀폐박스 상태에서의 전기 임피던스 데이터를 출력하였다. 스피커의 다이어램부의 동적질량을 알고 있다고 할 때에 출력된 전기 임피던스 데이터를 이용하여 3.1절의 식들로부터 밀폐박스에 장착된 스피커의 TS 매개변수를 규명하였다. 이 방법을 이용하면 마이크로스피커의 내부에 있는 가상 스피커, 즉 앞뒤의 벤트박스들의 영향을 배제한 다이어램부와 자기회로로 구성되는 가상 스피커부의 TS 매개변수를 규명하는데 이용될 수 있다. 여기서, 가상 스피커란 의미는 이 스피커 부를 분리해서는 시험을 수행할 수 없기 때문에 명명한 이름이다. 3.1절에서는 분리할 수 없는 스피커 유니트 자체가 밀폐박스 계의 부품인 것으로 가정하였으므로 가상 스피커라 하였다. 이 절에서는 실제 22리터 내부 체적을 갖는 밀폐박스에 3.1절에서의 시험용 우퍼를 장착하여 밀폐박스 상태에서 측정된 전기 임피던스 곡선 시험데이터와 다이어램부의 동적질량 11.21 g을 알고 있다고 할 때에 스피커의 TS 매개변수를 규명하는 것을 기술한다. 3.1절의 방법을 이용하여 규명된 TS 매개변수는 $F_s=67.7$ Hz로 2.1% 오차, $R_e=7.29$ Ohm으로 -1.0% 오차, $C_{ms}=4.71 \cdot 10^{-4}$ m/N은 -4.1% 오차,

$R_{ms}=1.45 \text{ Ns/m}$ 는 -1.0% 오차, $Bl=6.44 \text{ Tm}$ 는 3.2% 오차, $Q_{ms}=3.43$ 은 3.2% , $Q_{es}=0.89$ 는 8% 오차를 나타냈다. 밀폐박스 상태에서 측정된 전기 임피던스 시험데이터를 사용하여 스피커의 TS 매개변수를 잘 규명하였음을 보였다. 따라서, 제안한 방법을 사용하면 3.1절의 시뮬레이션 데이터를 이용한 경우와 이절에서의 실제 시험 데이터를 이용한 두 경우 모두에서 스피커의 TS 매개변수를 잘 규명할 수 있음을 보였다. 즉, 제안한 방법은 자유공기 상태에서

의 전기 임피던스 데이터를 구할 수 없는 경우에도 밀폐박스에 장착된 스피커의 TS 매개변수가 매우 잘 규명됨을 알 수 있었다. Fig. 9는 밀폐박스 상태의 시험데이터와 규명한 매개변수들로 구성된 결과를 비교한 것이다. 예측과 시험결과가 잘 일치함을 알 수 있다. Fig. 10은 규명된 우퍼의 TS 매개변수로 자유공기상태에서 예측한 우퍼의 전기 임피던스 데이터(점선)과 시험결과로서 53.9 Hz에서 최대 12.4% 임피던스 크기 오차를 나타냈으며 공진 주파수 이상에서 20 kHz까지는 10% 이내의 오차를 나타냈다.

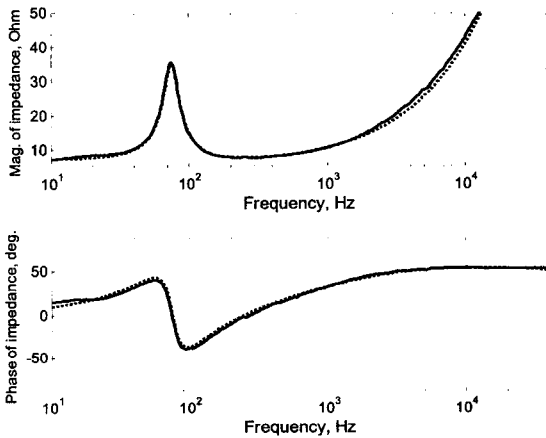


Fig. 9 Comparison of electrical impedances for closed-box loudspeaker system, upper: magnitude, lower: phase angle, solid line: test data, dotted line: predicted by TSL loudspeaker model

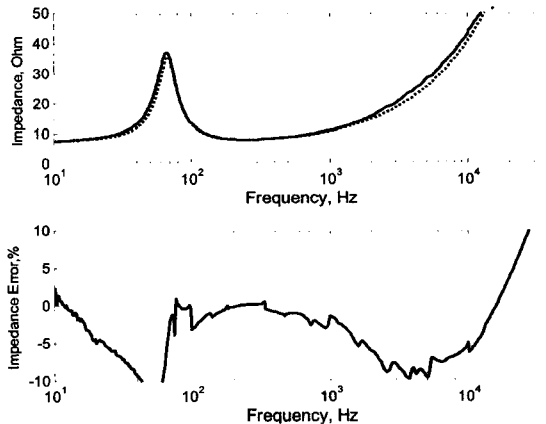


Fig. 10 Comparison of electrical impedances for loudspeaker at free air condition, upper: magnitude, lower: percent error, solid line: test data, dotted line: predicted by TSL loudspeaker model

4. 밀폐박스 시뮬레이션

4장에서는 밀폐박스상태에서의 음향 응답특성을 기술한다. Fig. 3의 PSPICE 회로도를 사용하면 밀폐박스 상태에서의 음향응답특성을 예측할 수 있다. 그러나, 참고문헌에서 기술하였듯이^(5,14) 이러한 모델은 저주파수에서 적합한 모델이므로 공진 주파수 근처의 음향특성을 잘 나타내지만 상대적으로 고주파수 영역에서의 음향 응답특성을 잘 나타내지 못한다. 따라서, 2가지 보정 필터를 Fig. 3에 적용해야 실제 음향응답특성을 잘 기술할 수 있다⁽⁵⁾. 이러한 보정필터는 다이아프램의 고주파 수에 따른 질량 감소 효과와 저역필터 효과를 나타낸다. 스피커의 다

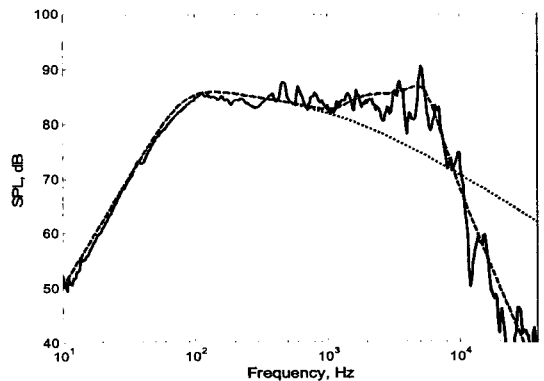


Fig. 11 Comparison of acoustic frequency responses for loudspeaker at closed-box, solid line: test data, dotted line: uncompensated result, dashed line: compensated result by TSL loudspeaker model with $F_{md}=1.5$, $Q_{md}=3$, $F_{tp}=5.5$, $Q_{tp}=2$

른 TS 매개변수와는 독립적이며 밀폐박스 매개변수와도 독립적이다. 고주파 수에서의 동적질량 감소를 보정하는 보정필터 H_{md} 는 식 (61)과 같다^(5,14).

$$H_{md}(ka) = \frac{1 + j\sqrt{2}(ka/F_{md})^{Q_{md}}}{1 + j\sqrt{2}(ka/F_{md})^{Q_{md}}} \quad (61)$$

밀폐박스에서의 음향응답특성을 시뮬레이션 결과와 일치시키기 위해 $F_{md}=1.5$, $Q_{md}=3$, $F_{lp}=5.5$, $Q_{lp}=2$ 를 사용하였다. 그때의 음향응답 곡선을 Fig. 11에 나타냈다.

이때의 보정필터의 전달함수의 크기를 Fig. 12에 나타냈다.

F_{md} 의 크기는 ka 의 배수를 나타내며, 이 값을 천이 주파수라 부르며, 이때의 곡선 기울기는 Q_{md} 로 조절한다. 동적질량은 식 (62)으로 나타낼 수 있다.

$$M_{md}(\omega) = M_{md}|H_{md}(\omega)| \quad (62)$$

저역통과 필터 특성을 갖는 H_{lp} 는 식 (63)으로 표현되며^(5,14)

$$H_{lp}(ka) = \frac{1}{1 - (ka/F_{lp})^2 + jka/(F_{lp}Q_{lp})} \quad (63)$$

밀폐박스에서의 우퍼의 방사 음압은 식 (64)와 같다.

$$P(\omega) = P_0(\omega)|H_{lp}(\omega)| \quad (64)$$

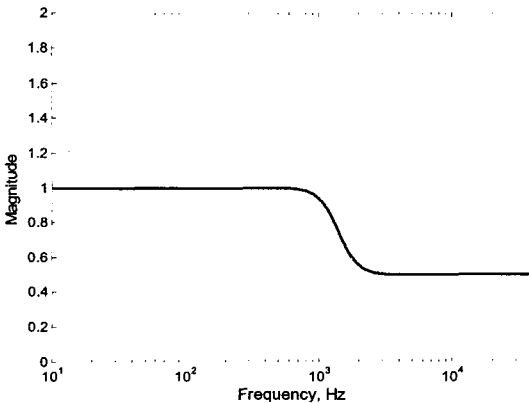


Fig. 12 Shape for compensation filter H_{md} with $F_{md}=1.5$, $Q_{md}=3$

저역통과 필터의 천이 주파수 F_{lp} 를 1.5에서 9.5까지 1씩 증가시켰을 때의 저역통과 필터의 특성을 Fig. 13에 나타냈다. 피크 주파수가 F_{lp} 값에 따라 증가하는 것을 보였다. Fig. 14는 그때의 밀폐박스의 우퍼에서 방사되는 음압의 변동을 나타냈으며 F_{lp} 크기 증가에 따라 주파수 대역이 넓어지지만 피크의 크기는 감소하는 모습을 나타냈다. Fig. 15는 밀폐박스 시스템의 전기 임피던스를 나타낸 것으로 F_{lp} 변동에 따라 전기 임피던스는 거의 변하지 않는 것을 나타냈다. 실선은 측정 데이터를 의미한다.

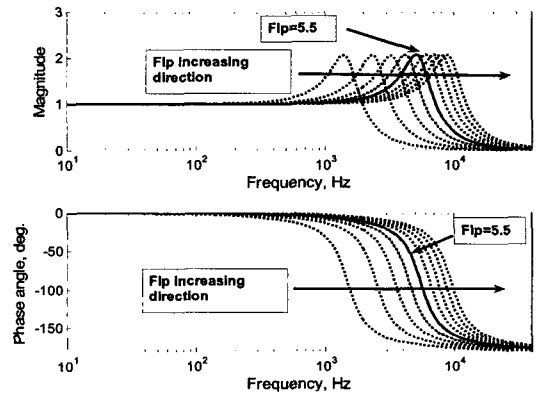


Fig. 13 Shape variation of compensation lowpass filter H_{lp} according to F_{lp} , $F_{lp}=1.5\sim 9.5$, stepsize : 1, with $F_{md}=1.5$

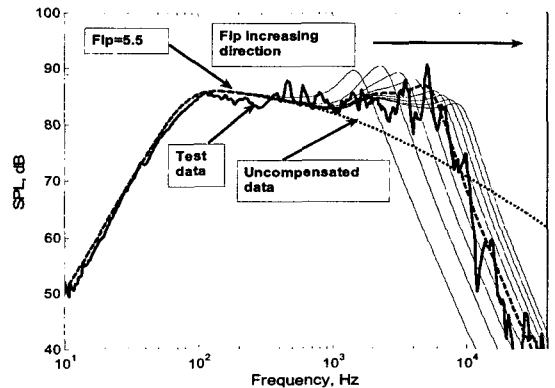


Fig. 14 Comparison of acoustic frequency responses for loudspeaker at closed-box, thick solid line: test data, dotted line: uncompensated, dashed: compensated of F_{lp} (5.5), thin solid line: predicted according to $F_{lp}=1.5, 2.5, 3.5, 4.5, 6.5, 7.5, 8.5, 9.5$ with $F_{md}=1.5$, $Q_{md}=3$, $Q_{lp}=2$ by TSL loudspeaker model

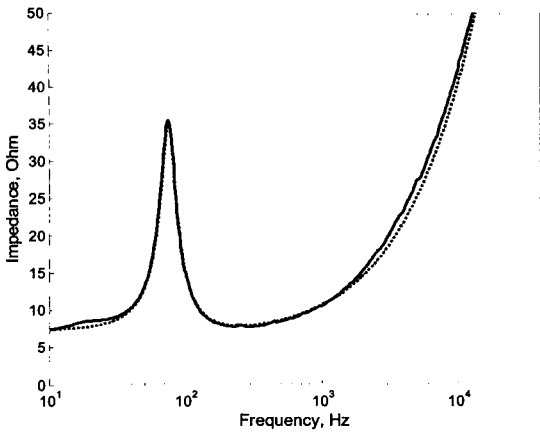


Fig. 15 Comparison of electrical impedances for loudspeaker at closed-box, solid line: test data, dotted line: predicted according to $F_{ip}=1.5\sim 9.5$, stepsize: 1, with $F_{md}=1.5$, $Q_{md}=3$, $Q_{ip}=2$ by TSL loudspeaker model

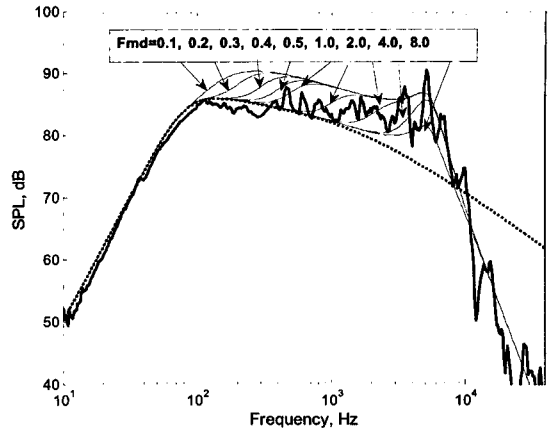


Fig. 17 Comparison of acoustic frequency responses for loudspeaker at closed-box, thick solid line: test data, dotted line: uncompensated, thin solid line: predicted according to $F_{md}=0.1, .2, .3, .4, .5, 1, 2, 4, 8$ with $Q_{md}=3$ by TSL model

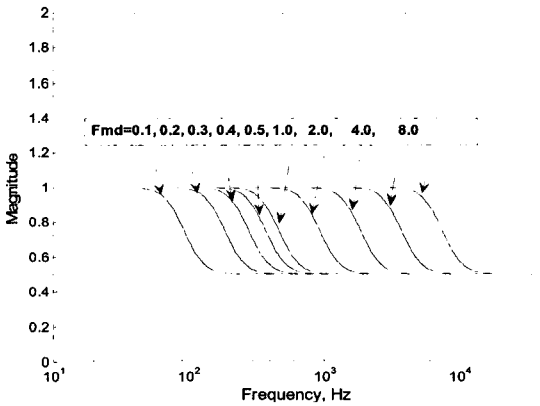


Fig. 16 Shape variations of compensation filter H_{md} according to $F_{md}=0.1, .2, .3, .4, .5, 1, 2, 4, 8$ with $Q_{md}=3$

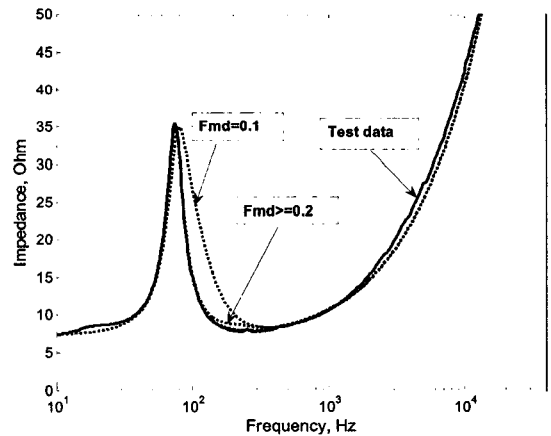


Fig. 18 Comparison of electrical impedances for loudspeaker at closed-box, solid line: test data, dotted line: predicted according to $F_{md}=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 1, 2, 4, 8$ with $Q_{md}=3$, $F_{ip}=5.5$, $Q_{ip}=2$ by TSL model

Fig. 16은 천이 주파수 F_{md} 변동을 0.1~0.5까지는 0.1간격으로 그리고 1에서 8까지는 배수 간격으로 시뮬레이션한 질량보정 필터 H_{md} 를 나타냈다. 천이 주파수 증가에 따라 전달함수 H_{md} 의 범위가 넓어짐을 보여주며 이에 상응하는 밀폐박스의 우퍼의 방사 음압특성을 Fig. 17에 나타냈다. Fig. 18은 이때의 밀폐박스 시스템의 전기 임피던스 특성을 나타냈다. 전기 임피던스는 F_{md} 가 0.2이상에서는 F_{md} 에 독립적임을 보여준다. 따라서, 개선된 밀폐박스 모델에 보정필터들을 적용한 모델은 우퍼의 컴플라이언스, 힘 요소등의 변동 및 밀폐박스 체원 변동에 대한 음향응답특성을 잘 기술할 수 있음을 알 수 있었다.

5. 결 론

밀폐박스 내부에 있는 가상 라우드스피커의 TS 매개 변수를 규명하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법을 이용하면 다이어램부의 동적질량을 알고 있을 때 밀폐박스 상태에서의 전기 임피던스 데이터를 이용하여 밀폐박스내에 장착된 다이어램부와 자기회로부로 이루어진 가상 라우드스피커의 TS

매개변수들을 잘 규명할 수 있음을 보였다. 시뮬레이션 또는 실측한 밀폐박스 상태의 전기 임피던스 데이터를 사용하여 스피커의 TS 매개 변수를 정확히 규명할 수 있음을 입증하였다. 제안한 방법은 마이크로스피커와 같은 스피커부를 따로 떼어서 측정할 수 없는 경우에 가상 라우드스피커의 TS 매개변수를 규명하는데 사용될 수 있다. 또한, 개선된 밀폐박스 모델링법을 제안하였다. 제안한 방법을 이용하면 중주파수 이상의 음향 응답 특성도 잘 예측할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- (1) Park, S. T., 2004, "Development of HiFi Speaker System for Home Audio", Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 317~322.
- (2) Dickason, V., 2000, The Loudspeaker Design Cookbook, 6th edition, AAP.
- (3) Dickason, V., 1994, Loudspeaker Recipes Book 1: Four Two-way Systems, 1st edition, AAP
- (4) Dell, E. T., 1992, Audio Amateur Loudspeaker Projects, AAP.
- (5) 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.
- (6) Park, S. T., 2007, "Derivation of Parameters for Loudspeaker with Frequency Dependent Terms and Discussion for Estimation Methods", Journal of the Acoustical Society of Korea, Vol. 26, No. 6, pp. 276~285.
- (7) Leach, Jr. M. M., 2002, "Loudspeaker Voice-coil Inductance Losses: Circuit Models, Parameter Estimation, and Effect on Frequency Response", Journal of Audio Eng. Soc., Vol. 50, No. 6, pp. 442~450.
- (8) LMS User Manual, 2000, Win32 Release 4.1, LinearX Systems inc.
- (9) Leach, Jr. M. M., 2003, Introduction to Electroacoustics & Audio Amplifier Design, 3rd edition, Kendall/Hunt Publishing Company.
- (10) 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.
- (11) Leo, L. B., 1986, Acoustics, the Acoustical Society of America.
- (12) Small, R. H., 1972, "Closed-box Loudspeaker Systems Part I: Analysis", J. Audio Eng. Soc., Vol. 20, No.10, pp. 798~808.
- (13) Small, R. H., 1973, "Closed-box Loudspeaker Systems Part II: Synthesis", J. Audio Eng. Soc., Vol. 21, No. 1, pp. 11~18.
- (14) LEAP Enclosure Shop Reference Manual, 2002, Release 5, LinearX Systems Inc.