

PSPICE를 이용한 개선된 벤트박스 스피커 시스템 모델링

Enhanced PSPICE Circuit Model for Vented-Box Loudspeaker System

박 석 태†
Seok-Tae Park

(2007년 7월 5일 접수 ; 2007년 7월 24일 심사완료)

Key Words : Frequency Dependent Inductor(주파수 종속 인덕터), TSL Model(트랜스듀서 스피커 라이브러리 모델), Leach Model(리치 모델), Vented-box Loudspeaker(벤트박스 라우드스피커), VDCS(전압 종속 전류소스), CDVS(전류종속 전압소스), VDVS(전압종속 전압소스), CDCS(전류종속 전류소스), PSPICE Circuit Model(PSPICE 회로모델), Monte Carlo Analysis(몬테 카를로 해석), Compensation Filter(보정필터)

ABSTRACT

Enhanced PSPICE circuit model for vented-box loudspeaker system with lumped parameters was proposed to more accurately simulate real vented-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 circuit parameters' variations. Finally, it was used to identify faults detection in woofers manufactured by unskilled persons.

1. 서 론

저자는 대학에서 학생들에게 “스피커 제작 및 측정” 과목을 강의하면서 재미있는 사실을 알게 되었다. 과제중에는 우퍼와 트위터를 학생들이 조립 제작하여 완성한 제품들의 특성들을 보고하는 것이 포함되어 있었다. 학생들에게 제공한 스피커 부품들은 공장에서 자동으로 생산된 균질한 것들이었다. 제작한 우퍼들을 벤트박스에 장착한 후에 학생들이 음향 응답특성과 전기 임피던스를 측정하였다. 측정된 전기 임피던스와 음향 응답특성의 분포가 매우 광범위한 사실에 놀라움을 가지고 이에 대한 논문을 제출한바 있다^(1,2,3). 그러나, 이러한 원인이 무엇인지에 대한 분석은 없었다. 다만, 비숙련 작업자인 학생들

이 조립 작업에서 보빈에 감긴 코일 중심 위치가 윗판의 중심 위치와 어긋나서 이로 인한 힘 요소의 감소가 주요 원인일 것으로 추정하였다. 또한 다이어그램의 중심이 편심되게 프레임에 접촉되어 컴플라이언스의 변동이 전기 임피던스와 음향 응답 특성 변동에 원인일 것이라는 심증만 갖고 있었다. 이 논문에서는 그때에 수행되지 못했던 검증 작업을 벤트박스 모델을 사용하여 검증하고자 하였다. 이 모델을 사용하여 질량, 강성 계수, 힘 요소 등의 변화에 대하여 전기 임피던스, 다이어그램의 변위, 음향 응답특성 등을 쉽게 예측할 수 있음을 기술하고자 한다.

2. 주파수 종속 매개변수를 갖는 라우드스피커, 벤트박스 라우드스피커 이론

라우드스피커가 장착된 벤트박스 시스템에 의한 음향방사에 대한 기본적인 방정식 및 표현법은 1950년

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

대에 이미 베라넥에 의해 정리되어 발표됐다⁽⁴⁾. 벤트 박스에서 포트와 우퍼사이의 상호 음향방사효과 등을 고려한 표현법 등도 여러 연구자들에 의해 발표되었다⁽⁵⁻¹⁹⁾. 리치는 전기회로 시뮬레이션 프로그램인 PSPICE를 이용하면 시스템의 특성인 음향응답 특성, 전기 임피던스, 다이어프램의 변위와 속도, 부피 속도 등을 쉽게 파악할 수 있음을 보였다^(6,7). 특히, 리치는 스피커 유니트를 모델링할 때에 보이스 코일 인덕터를 주파수 종속 모델로 가정하여 2개의 매개변수로 모델링하는 리치 모델을 제안하였다. 그러나, 이 모델을 사용하려면 스피커의 전기 임피던스를 리치 모델식으로 피팅하는 과정을 거쳐야 한다. 스피커 시스템을 설계할 때에 스피커 유니트를 직접 구매하지 않은 상태에서도 스피커 시스템의 특성을 파악할 필요가 많이 있다. 이 경우에 제조업체에서 제공하는 스피커의 Thiele Small(TS) 매개변수를 기반으로 시스템 설계를 하게 된다. 대부분의 경우에 TS 매개변수는 표준모델 또는 TSL 모델 형태로^(20,21) 데이터베이스화 되어 이러한 표현법을 PSPICE에 적용하는 것이 필요하다. 그러나, TSL 표현법은 PSPICE에 직접적으로 적용할 수가 없다. 따라서, PSPICE를 사용하여 TSL 모델을 벤트박스 시스템에 적용시키기 위한 변환 방법을 개발하였다⁽²²⁾. Fig. 1은 벤트박스 라우드스피커 모델링을 나타냈다^(4,5). 각 소자들에 대한 내용은 여러 문헌에 나와 있다^(5-7,16). Fig. 1에서 GXX, HXXX, EXXXX, FXXX의 첫 문자는 각각 VDCS(전압종속 전류소스), CDVS (전류종속 전압소스), VDV(전압종속 전압소스), CDCS(전류종속 전류소스)를 나타내며 두 번째 문자부터는 판독을 쉽게 하기 위해 사용자가 임의로 붙일 수 있다^(5,23). 예를 들면 HBLU는 전류종속 전압소스로 기계회로(Fig. 1의 우측)에 흐르는 다이어프램의 속도에 종속하여 전기회로에 발생하는 역기전력 전압을 나타내며 물리적으로는 힘 요소*다이어프램 속도를 의미한다. Fig. 1에서 좌측 상단은 스피커 유니트에서 전기계의 임피던스 회로를 나타내고 우측 상단은 스피커 기계계의 임피던스 등가 회로를 아래 부분은 벤트박스 음향계의 음향 임피던스 등가회로를 각각 나타낸다. 점선 원은 벤트박스의 음향질량 효과와 음향 손실 및 음향 컴플라이언스를 나타낸다. 아래 부분의 우측에는 우퍼의 후면이 벤트박스에 작용할 때에 발생하는 음향손실과 박스 효과(컴플라이언스)등이 직

렬과 병렬 회로로 표시되었다. 우퍼가 박스 바깥 방향으로 움직일 때에 주변의 공기를 밀어내는 음향 질량 효과도 표현하고 있다. 아래 부분에서 점선 원의 좌측 부분은 포트에 의한 질량효과와 음향 손실 및 컴플라이언스 등을 나타내고 있다^(4,5). 또한, 포트와 우퍼사이의 상호 음향 방사를 나타내는 FKPUW와 FKWUP도 표현되었다. Fig. 1에서 스피커 보이스 코일 인덕터를 주파수 종속 표현법으로 나타내기 위하여 절점2와 절점3 사이에 소자 GZE를 라플라스 표현법으로 표현할 수 있다. 그러나, PSPICE에서 라플라스 표현식의 계수는 실수이어야 한다. 리치 모델은 이러한 조건을 만족시키나 TSL 모델 형태인^(21,22) $K_{rm}\omega^{Erm} + jK_{xm}\omega^{Exm}$ 은 라플라스 영역에서 $K_{rms}^{Erm}(-j)^{Erm} + jK_{xms}^{Exm}(-j)^{Exm}$ 와 같은 형태이므로 계수에 허수가 존재하여 PSPICE에서 사용할 수가 없다. 리치 모델과^(6,22) 같은 형태인 $K_a(j\omega)^a + K_b(j\omega)^b$ 를 만족하는 계수 K_a, K_b, a, b 를 구해야 한다. 이 계수들을 구하는 과정은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 K_a s^a + K_b s^b &= K_a (j\omega)^a + K_b (j\omega)^b \\
 &= K_a \omega^a \cos(\pi a / 2) + K_b \omega^b \cos(\pi b / 2) \\
 &\quad + j(K_a \omega^a \sin(\pi a / 2) + K_b \omega^b \sin(\pi b / 2)) \\
 &\approx K_{rm} \omega^{Erm} + jK_{xm} \omega^{Exm}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

TSL모델과 PSPICE에서 사용할 모델과의 오차의 제곱을 ϵ 라 하면

$$\begin{aligned}
 \epsilon &= \sum \{K_a \omega_i^a \cos(\pi a / 2) + K_b \omega_i^b \cos(\pi b / 2) - K_{rm} \omega^{Erm}\}^2 \\
 &\quad + \sum \{K_a \omega_i^a \sin(\pi a / 2) + K_b \omega_i^b \sin(\pi b / 2) - K_{xm} \omega^{Exm}\}^2
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

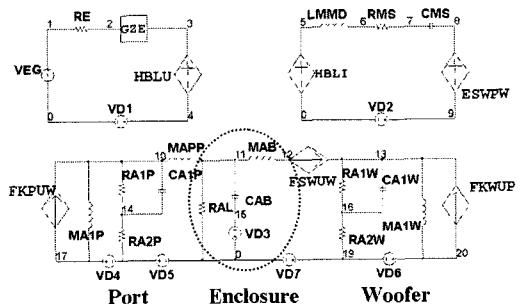


Fig. 1 PSPICE circuit for the vented-box loudspeaker

식 (2)에서 $\partial \varepsilon / \partial K_a = 0$ 와 $\partial \varepsilon / \partial K_b = 0$ 를 정리하고 간단화를 위해 $a = E_{rm}$, $b = E_{xm}$ 이라고 해도 일반성을 잃지 않는다. 이 관계식을 대입하여 정리할 때에 특정한 ω_i 에 대하여 각각 식 (3)과 식 (4)가 된다.

$$K_a \omega_i^{2a} + K_b \omega_i^{a+b} \cos((a-b)\pi/2) = K_{rm} \omega_i^{2a} \cos(\pi a/2) + K_{xm} \omega_i^{a+b} \sin(\pi a/2) \quad (3)$$

$$K_a \omega_i^{a+b} \cos((a-b)\pi/2) + K_b \omega_i^{2b} = K_{rm} \omega_i^{a+b} \cos(\pi b/2) + K_{xm} \omega_i^{2b} \sin(\pi b/2) \quad (4)$$

K_a , K_b , a , b 를 구하기 위한 방법 1은 식 (3)에서 모든 ω_i 에 대하여 항등적으로 성립하는 조건으로

$$K_a = K_{rm} \cos(\pi E_{rm} / 2) \quad (5)$$

$$K_b = K_{xm} \sin(\pi E_{rm} / 2) / \cos\{(E_{rm} - E_{xm})\pi / 2\} \quad (6)$$

K_a , K_b , a , b 를 구하기 위한 방법 2는 식 (4)에서

$$K_a = K_{rm} \cos(\pi E_{xm} / 2) / \cos\{(E_{rm} - E_{xm})\pi / 2\} \quad (7)$$

$$K_b = K_{xm} \sin(\pi E_{xm} / 2) \quad (8)$$

K_a , K_b , a , b 를 구하기 위한 방법 3은 식 (3)과 식 (4)에서 관심 있는 ω_i 범위에 대하여 최소오차승법을 적용하는 것이다.

$$K_a \sum \omega_i^{2a} + K_b \sum \omega_i^{a+b} \cos((a-b)\pi/2) = K_{rm} \sum \omega_i^{2a} \cos(\pi a/2) + K_{xm} \sum \omega_i^{a+b} \sin(\pi a/2) \quad (9)$$

$$K_a \sum \omega_i^{a+b} \cos((a-b)\pi/2) + K_b \sum \omega_i^{2b} = K_{rm} \sum \omega_i^{a+b} \cos(\pi b/2) + K_{xm} \sum \omega_i^{2b} \sin(\pi b/2) \quad (10)$$

식 (9)와 식 (10)에서 K_a 와 K_b 를 구하면 식 (11)과 식 (12)가 된다.

$$K_a = \left\{ \left[K_{rm} \cos(\pi E_{rm} / 2) \sum \omega_i^{2E_{rm}} + K_{xm} \sin(\pi E_{rm} / 2) \sum \omega_i^{E_{rm} + E_{xm}} \right] \sum \omega_i^{2E_{xm}} - \left\{ K_{rm} \cos(\pi E_{xm} / 2) \sum \omega_i^{E_{rm} + E_{xm}} + K_{xm} \sin(\pi E_{xm} / 2) \sum \omega_i^{2E_{xm}} \right\} \sum \omega_i^{E_{rm} + E_{xm}} \cos((E_{rm} - E_{xm})\pi / 2) \right\} / \text{den}_1 \quad (11)$$

$$K_b = \left[-K_a \sum \omega_i^{2E_{rm}} + \left\{ K_{rm} \cos(\pi E_{rm} / 2) \sum \omega_i^{2E_{rm}} + K_{xm} \sin(\pi E_{rm} / 2) \sum \omega_i^{E_{rm} + E_{xm}} \right\} / \left\{ \cos((E_{rm} - E_{xm})\pi / 2) \sum \omega_i^{E_{rm} + E_{xm}} \right\} \right] \quad (12)$$

$$\text{den}_1 = \sum \omega_i^{2E_{rm}} \sum \omega_i^{2E_{xm}} - \left\{ \cos((E_{rm} - E_{xm})\pi / 2) \sum \omega_i^{E_{rm} + E_{xm}} \right\}^2 \quad (13)$$

Fig. 2는 보이스 코일 인덕터의 영향만을 모델링 한 방법들을 비교하였다. 시험데이터(실선)와 TSL 모델, 방법 1에서 방법 3까지의 결과 및 리치 모델을 비교하였다. 20 kHz까지 거의 비슷한 결과를 나타냈다. 위상각을 비교한 결과(Fig. 3)를 보면 TSL 모델이 시험데이터(실선)를 가장 잘 기술하지만 PSPICE에 적용할 수 없다. 리치 모델(굵은 실선, 67도 직선)의 위상각은 주파수에 무관하게 일정한 값을 나타냈다. Fig. 2를 보면 방법 1이 시험데이터를 가장 잘 나타내며 또한 주어진 TSL 모델의 매개변수 K_{rm} , E_{rm} , K_{xm} , E_{xm} 을 이용하여 간단한 계산으로도 매개변수 K_a , K_b , a , b 를 찾을 수 있다. 즉, 현실적으로 적합한 것은 방법 1이며 이를 사용하면 업체에서 제공하는 TSL 모델 데이터에서 PSPICE에 적용 가능한 보이스 코일 인덕터에 대한 라플라스 표현식을 간단히 구할 수 있다. 시험용 우퍼를⁽¹⁾ 벤트박스(체적 22 리터, 포트 길이 6.3 cm, 포트 직경 5.5 cm, 포트와 우퍼 중심거리 13.9 cm)에 장착하여 전기 임피던스와 음향응답특성을 예측하였다. 사용한 우퍼의 TS 매개변수는 $f_s = 66.33$ Hz, $Q_{ms} = 3.33$,

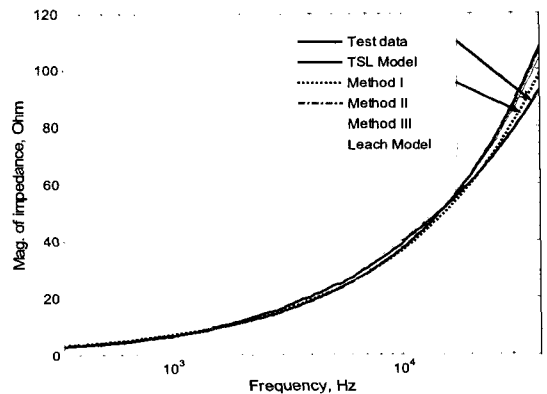


Fig. 2 Comparison of electrical impedance's magnitudes according to voice-coil inductor models

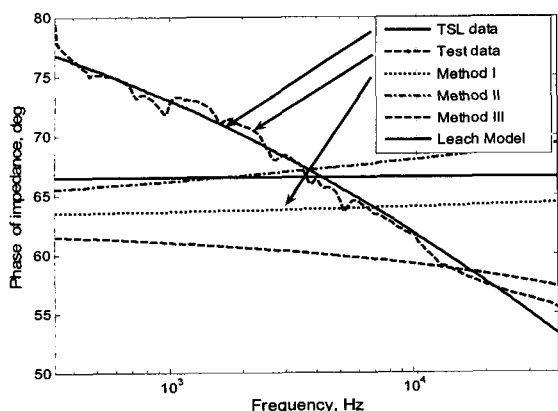


Fig. 3 Comparison of electrical impedance's phase angles according to voice-coil inductor models

$Q_{es}=0.82$, $M_{md}=11.21$ g, $C_{ms}=4.91 \times 10^{-4}$ m/N, $B_l=6.61$ Tm, $R_{ms}=1.47$ Ns/m, $K_a=4.5943 \times 10^{-5}$, $E_{rm}=0.944$, $K_b=0.0153$, $E_{xm}=0.701$ 이었다⁽²²⁾.

전기임피던스와 음향응답특성을 PSPICE 모델로 예측한 데이터를(Fig. 4에서 파선) LMS 소프트웨어에서 읽어 들여 시험결과와(실선) 비교하였다. 전기 임피던스의 시험결과와 예측결과가 잘 일치함을 알 수 있었다. 그러나, 음향응답특성은 100 Hz 이하에서는 시험과 예측이 일치하였으나 주파수가 커짐에 따라 다른 결과를 나타냈다. 이러한 현상은 집중질량계로 모델링한 Fig. 1의 벤트박스 모델링이 실제 음향응답특성을 잘 나타내지 못함을 의미한다. 실제 시스템에서는 주파수가 커짐에 따라 다이어프램은 더 이상 강체로 작용하지 않고 유연체로 작용하여 동적질량과 유효 방사면적이 변하게 된다. 우퍼의 다이어프램에서 반경이 다른 각 부분들이 더 이상 동일한 위상을 갖지 않게 되므로 방사음압 특성이 강체에 의한 결과와 다르게 된다. 이러한 유연체 모드는 다이어프램의 형상 및 여러 요인들에 따라 다르게 될 수 있다. 즉, 유효방사 직경 및 유효 동적질량은 서라운드 부에서의 곡률 반경이나 다이어프램의 콘 각도 및 보빈의 직경 등에 따라 주파수의 함수가 될 수 있다. 또한, 사용된 재료에 따라서도 변할 수 있다. 즉, 종이 재질, 폴리프로필렌 수지등에 따라 공진주파수가 변하며 유효 방사직경이 변할 수 있다. 유한요소법을 사용하면 유연체 모드에 따른 음향 방사를 어느 정도 예측할 수 있다. 그러나, 입력데이터를 정확히 입력해야 하며 많은 계산시간이 소요되며 또한 고주파수에서는 이러한 해석 방법도

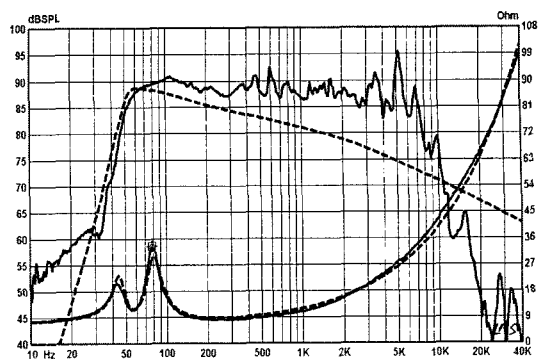


Fig. 4 Comparison of acoustic response curve (upper) and electrical impedance curve (lower) for vented-box loudspeaker system, solid line: measured by LMS system at room, dashed line: simulated by PSPICE model

정확한 예측을 할 수 없다. 집중질량 모델링에서는 주파수 증가에 따라 동적질량이 감소하는 것과 유효 방사면적의 변동을 예측하여 모델에 고려하여야 하며 이들을 3장에서 기술하였다.

3. 개선된 벤트박스 모델링

3장에서는 집중질량 모델링이 가지는 한계로 인하여 고주파수에서의 음향응답특성이 시험값과 예측값이 다르게 나오는 현상을 보정하는 2가지 방법들을 PSPICE 모델에 적용하는 방법을 기술 하고자 한다. 이러한 방법들은 일부 상용소프트웨어에서 사용하고 있다^(20,21). 첫 번째는 고주파수에서 다이어프램부의 동적질량의 감소를 표현하는 방법이다. 두 번째는 고주파수에서 다이어프램 유효 면적의 감소와 다이어프램 공진에 의한 고주파수에서 rolloff 현상을 표현하는 저역필터 특성을 고려하는 방법이다. 이러한 필터 보정방법은 필터가 가질 제한조건으로 전체 전기 임피던스에 영향을 주어서는 안된다는 조건을 만족하여야 한다. 첫 번째 보정필터는 동적질량 보정을 목적으로 한다. 동적질량 M_{md} 는 고주파수에서는 50% 정도의 감소가 있다고 보고된다⁽²¹⁾. 그러나, 감소되는 비율이 주파수 증가에 따라 일정하다고 볼 수는 없고 감소 패턴도 재료 특성과 형상에 따라 달라서 예측이 불가능하다. 다이어프램의 동적 질량은 공진주파수에 따라 급격하게 변할 수 있으며 어느 주파수에서 동적 질량이 50% 될지는 알 수 없다.

LEAP 소프트웨어에서는 동적질량 감소를 고려하기 위하여 2자유도 함수인 H_{md} 를 도입하여 사용하고 있다. 이 논문에서는 이러한 개념을 도입하여 PSPICE에서 적용 가능하도록 수정 작업을 하였다. 저주파수에서 동적질량은 다이어램 전체가 하나로 움직이므로 정적질량과 동적질량은 같다. 그러나, 주파수가 커짐에 따라 보빈쪽의 질량부와 서라운드쪽의 질량은 일체가 되지 않아 동적질량은 감소한다. 이를 정성적으로 기술하는 필터표현은 H_{md} 로 식 (14)와 같다⁽²¹⁾.

$$H_{md}(ka) = \frac{1 + j\sqrt{2}(ka/F_{md})^{Q_{md}}}{1 + j\sqrt{2}(ka/F_{md})^{Q_{md}}} \quad (14)$$

$$H_{md}(\omega) = \frac{1 + j\sqrt{2}(\omega\alpha/(cF_{md}))^{Q_{md}}}{1 + j\sqrt{2}(\omega\alpha/(cF_{md}))^{Q_{md}}} \quad (15)$$

$$M_{md}(\omega) = M_{md} |H_{md}(\omega)| \quad (16)$$

H_{md} 에서 천이주파수를 나타내는 매개변수 F_{md} 는 정규화된 주파수 ka 와 같은 단위를 가지며 또 다른 매개변수 Q_{md} 는 변화율을 조절할 수 있도록 한다. H_{md} 의 최소크기는 0.5이다. 고주파수에서 동적질량이 정적질량의 50%가 되도록 할 수 있으므로 음향 응답의 이득은 최대 6dB 커질 수 있다. 스피커의 동적질량은 M_{md} 에 방사질량을 더해야 하므로 최대 이득은 6dB 보다는 작다. 천이중심주파수 F_{md} 에서의 이득은 3dB가 된다. Q_{md} 는 보통 0.5에서 16사이의 값을 가지며 큰 값에서는 음압 상승 기울기가 큼을 나타낸다. 천이주파수 근처에서 급격한 변화를 주기 위해서는 Q_{md} 값이 커야만 한다. H_{md} 의 영향을 제거하려면 F_{md} 를 크게하면 된다. 저주파수인 공진주파수 근처에서는 동적 질량에 따른 역기전력으로 인한 전기임피던스 변화가 크게 된다. 동적질량 보정 필터의 크기는 저주파수에서는 동적질량의 변동이 거의 없으므로 1에 근접한다. 역기전력의 발생이 거의 없는 고주파수에서 필터 크기는 0.5가 되어 전기 임피던스에 영향을 거의 주지 않는다. 따라서, 동적질량 보정필터를 적용할 때 전기임피던스의 변동

은 무시할 만 하였다. PSPICE 모델에 동적질량 변동을 적용하기 위한 보정필터는 식 (15)에서 식 (17)과 같이 유도하였다.

유도된 보정필터를 사용하여 절점5와 절점6 사이의 질량요소를 $M_{md}(\omega) = M_{md} |H_{md}(\omega)|$ 로 나타내기 위한 Fig. 1의 PSPICE회로도 표현은 다음과 같다.

```
.PARAM A={AW/(C*FM)}
.PARAM S2={SQRT(2)}
GME 5 6 LAPLACE {V(5,6)=
+ {1/(MMD*PWR(S,1)*(SQRT((1-S2
+ *A^QM)*COS((-1-QM)*PI/2)
+ *PWR(S,QM)
+ + 0.5*A^(2*QM)* PWR(S,2*QM))
+ /(1-2*S2*A^QM*COS((-1-QM)
+ *PI/2)*PWR(S,QM)+2*A^(2*QM)
+ *PWR(S,2*QM))}}}
```

여기서, 첫 열의 “+”는 프로그램이 연속됨을 의미한다. 두 번째 보정필터의 역할은 다이어램의 break-up으로 인한 고주파수에서의 음압의 급격한 rolloff 현상을 표현하는 것이다. 시험결과를 보면 5kHz 이후에 20 dB/옥타브 이상의 급격한 음압 감소가 나타나고 있지만(Fig. 4) 전통적인 벤투박스 모델에서는 이러한 현상을 표현할 수가 없으므로 이를 표현해줄 보정필터가 필요하다. 이러한 급격한 음압 감소는 보이스 코일의 주파수 종속 인덕턴스 크기만으로는 설명할 수가 없다. 고주파수에서는 다이어램의 고차 공진 현상들이 발생하여 유효 방사면적은 저주파수에서의 값보다 작아진다. 유효 방사면적과 고차 공진주파수들을 집중질량 모델에서는 예측할 수가 없다. 이러한 현상은 스피커의 종류에 따라 다르므로 정확한 rolloff는 2차 저역필터를 도입하여 시행착오법으로 찾을 수밖에 없다. 제안한 2차 저역통과 필터는 일반적 형태로서 $H_{lp}(\omega)$ 를 식 (18)과 같이 정의하였다⁽²¹⁾. 2자유도 필터로서 종속 매개변수는 코너주파수 F_{lp} 와 코너주파수에서의 피크값을 조절할 수 있는 Q_{lp} 를 사용하였다. 코너주파수 F_{lp} 의 단위는 정규화된 주파수 ka 와 같다.

$$|H_{md}| = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{2}(a/(cF_{md}))^{Q_{md}} s^{Q_{md}} \cos((-1 - Q_{md})\pi/2) + 0.5(a/(cF_{md}))^{2Q_{md}} s^{2Q_{md}}}{1 - 2\sqrt{2}(a/(cF_{md}))^{Q_{md}} s^{Q_{md}} \cos((-1 - Q_{md})\pi/2) + 2(a/(cF_{md}))^{2Q_{md}} s^{2Q_{md}}}} \quad (17)$$

$$H_{lp}(ka) = \frac{1}{1 - (ka/F_{lp})^2 + jka/(F_{lp}Q_{lp})} \quad (18)$$

$$H_{lp}(\omega) = \frac{1}{1 - (\omega a / (cF_{lp}))^2 + j\omega a / (cF_{lp}Q_{lp})} \quad (19)$$

$$P(\omega) = P_o(\omega) |H_{lp}(\omega)| \quad (20)$$

보정함수를 PSPICE에 적용하기 위해 식 (19)에서 H_{lp} 를 식 (21)과 같이 유도하였다.

$$|H_{lp}| = 1 / \sqrt{1 + (a/(cF_{lp}))^2 s^2 + a/(cF_{lp}Q_{lp})s} \quad (21)$$

한편, 보정필터 H_{lp} 는 Fig. 1의 회로도에서 출력 음압에 적용되므로 회로도에 어떠한 영향도 주지 않는다. 순수하게 고주파수에서의 음압의 rolloff 현상만을 보정하는 역할을 한다. 식 (17)과 식 (21)의 4개의

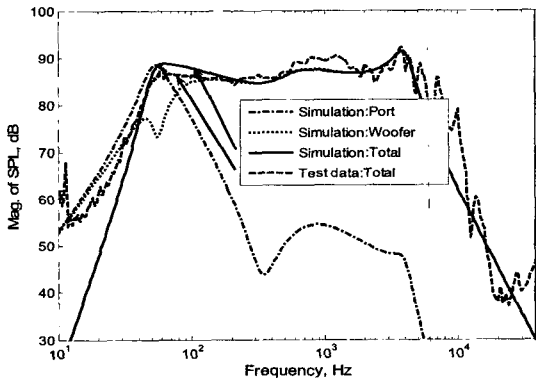


Fig. 5 Acoustic pressure response curves, measured by ground plane method

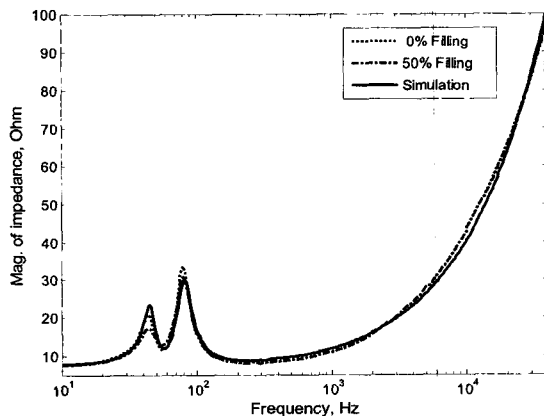


Fig. 6 Comparison of electrical impedance curves

매개변수를 시행착오법으로 조정하여 고주파수에서의 음향응답 형태를 시험값과 일치하도록 조정하였다. 매개변수들을 조정하여 구한 음향 응답특성은 (Fig. 5의 실선) 시험 결과와(파선) 매우 잘 일치하는 것을 나타냈다. 이렇게 개발된 모델을 사용하여 4장에서는 매개변수들의 변동에 따른 음향특성 예측을 하고자 한다. 동적질량 보정필터와 지역필터를 사용함으로써 정확한 예측이 불가능한 다이아프램의 고주파수에 따른 음향 응답 특성을 보정하는 모델링이 가능한 것이다. 한편, 다이아프램의 컴플라이언스와 힘요소 및 벤트박스 등의 효과가 음향응답에 미치는 영향은 이러한 보정필터에 독립적인 결과를 나타낸다. 결론적으로 초기상태에서 보정필터로 보정한 모델을 사용하면 다이아프램의 컴플라이언스, 힘요소, 박스 부피, 포트 직경과 길이 등을 임의로 변경하였을 때의 음향 응답특성을 시험결과와 비교적 정확히 일치하도록 예측할 수 있다.

한편, 전기임피던스 해석결과를 벤트박스 시험(흡음재 0%충진, 50%충진) 결과와 비교하였다 (Fig. 6). 임피던스의 공진 발생위치는 첫 번째 공진은 44.6 Hz이고 두 번째 공진은 81 Hz로 나타났다. 공진주파수 위치와 임피던스 양상이 고주파수에서도 잘 일치함을 나타냈으며 이것은 벤트박스 모델링이 잘 되었음을 나타낸다.

4. 시뮬레이션 및 비숙련 작업자가 제작한 스피커의 결함원 분석

4장에서는 3장에서 개발한 개선된 PSPICE 벤트박스 모델을 사용하여 비숙련 제작자들이 만든 스피커의 문제점들이 무엇인지를 파악하고자 하였다⁽¹⁻³⁾. 또한, 스피커 매개변수 변동에 따른 시스템 특성들을 예측하기로 하였다.

4.1 감성계수에 대한 Monte Carlo 시뮬레이션
시험용 우퍼에서 감성계수의 역수인 컴플라이언스 C_{ms} 는 4.91×10^{-4} m/N였다. 컴플라이언스의 변동이 50% 이내에 있을 때에 몬테카를로 시뮬레이션을 10회 실시하였다. 전기임피던스(Fig. 7에서 아래) 곡선의 경우를 보면 첫 번째 공진주파수는 41.6~50.0 Hz 범위에 있고 임피던스의 크기는 13.5~27.7오옴 사이에 나타났다. 두 번째 공진주파수는 75.5~

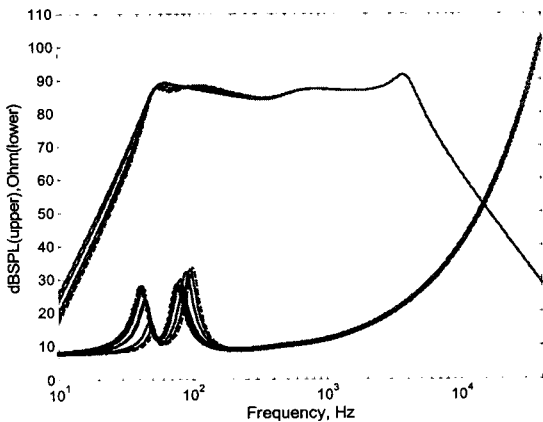


Fig. 7 Monte Carlo analysis for compliance variations, dev=50%, electrical impedance curves (lower), acoustic pressure response curves(upper)

100 Hz 범위에서 임피던스 크기는 28~33.6오옴 사이에 분포하였다. 두 번째 공진주파수는 첫 번째 공진주파수의 증가와 더불어 커지며 임피던스 크기도 커짐을 나타냈다. 그러나, 첫 번째 공진임피던스의 크기는 작아지는 경향을 나타냈다. 음향응답특성은 (Fig. 7에서 위) 300 Hz 이하에서 최대 3 dB 차이를 나타냈고 고주파수에서는 미미하여 강성계수가 50% 이내의 변동을 할 경우에 저주파수 특성에만 영향을 주는 것을 파악할 수 있었다.

4.2 힘 요소 변동에 대한 시스템 특성 분석

시험용 우퍼의 힘요소 B 는 6.61 Tm이므로 이 값을 기준으로 해석을 하였다. 힘요소의 범위를 1~6.5 Tm까지 1.1 Tm 간격으로 시뮬레이션을 하였다. 해석결과를 보면(Fig. 8) 힘요소의 크기가 커짐에 따라 공진주파수 위치는 변동이 없으나 공진주파수에서의 전기임피던스 크기는 커짐을 나타냈다. 이러한 현상은 힘요소가 클 때에는 보이스 코일에 작용하는 가진 힘이 커지게 된다. 이에 따라 공진주파수에서 다이아프램의 속도가 증가하게 되어 역기전력이 커져서 기계적인 공진현상이 커짐을 나타낸다. 음압의 경우에 2차 공진주파수 이상인 100 Hz 이상에서는 힘요소가 큰 경우가 큰 음압을 나타냈다. 따라서, 다른 매개변수들이 변동하지 않을 경우에 힘요소만을 증가시키면 높은 음압을 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 300 Hz에서 현 제품은 음압이 84 dB였고, 1.1 Tm인 경우에는 68 dB로 힘요소가 1/6로 되었을 때 음압이 16 dB 저감됨을 나타냈다.

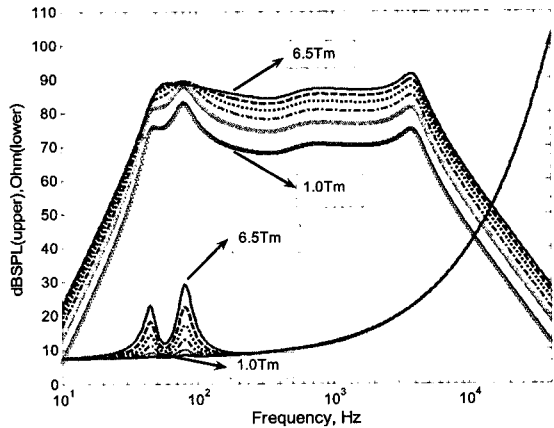


Fig. 8 Electrical impedance curves(lower) and acoustic pressure response curves(upper) simulated by enhanced PSPICE circuit model for vented-box loudspeaker system according to force factor variations (1.0, 2.1, 3.2, 4.3, 5.4, 6.5 Tm)

4.3 비속련 작업자가 제작한 우퍼 결합부 예측

비속련 작업자들인 학생들이 43개의 우퍼를 제작하였다. 제작한 우퍼를 3장에서 기술한 벤트 박스에 각각 장착하였다. 이 상태에서 측정한 음향응답특성과 전기임피던스 특성을 Fig. 9와 Fig. 10에 나타냈다^(1,2). 음향응답곡선은 300 Hz에서 65 dB에서 88 dB 분포를 나타냈다. 4.2절에서 기술한 바에 따르면 힘요소의 변동은 넓은 주파수 범위에서 음압에 영향을 미침을 알 수 있었고 전반적인 음압의 상승 또는 하강의 특성을 나타냈다. 이런 사실에 기초할 때에 Fig. 9는 힘요소의 변동에 따른 결과라 볼 수 있다. 제작된 우퍼에서 힘요소를 결정하는 매개변수는 윗판과 폴 사이의 간격, 자석의 세기, 보이스 코일의 윗판에 상대적 위치 등이다. 첫 번째 요인인 윗판과 폴 사이의 간격은 보빈을 조립할 때에 고정 지그를 사용하므로 간격이 일정하다고 볼 수 있어서 제품의 불량 원인에서 배제할 수 있다. 두 번째 요인인 자석의 세기도 동일한 착자기를 사용하였으므로 제외할 수가 있다. 세 번째 요인인 상대적 위치가 힘요소 변동의 원인이라 볼 수 있다. 학생들이 보빈에 감긴 보이스 코일의 중심 위치를 폴 피스의 중심 위치와 일치하도록 하여야 하지만 부주의로 인해 이 중심 위치들이 어긋나게 되어 결론적으로 힘요소의 감소를 가져왔다고 볼 수 있다. 극단적인 경우를 제외하고는 300 Hz에서 음압의 차이는 10 dB 이내에 있음을 나타냈다(Fig. 9). 4.2절에서

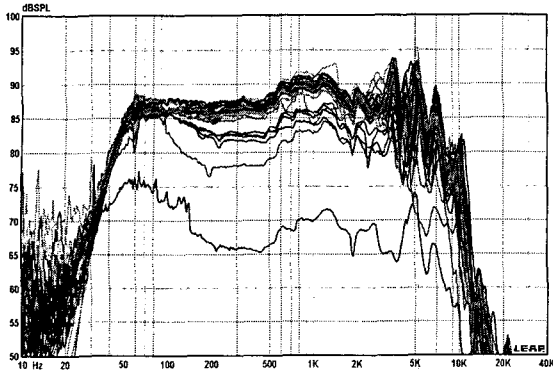


Fig. 9 Acoustic pressure response curves measured by LMS system for vented-box loudspeaker by ground plane method, box volume 22litre, port radius 5.5 cm, length 6.3 cm

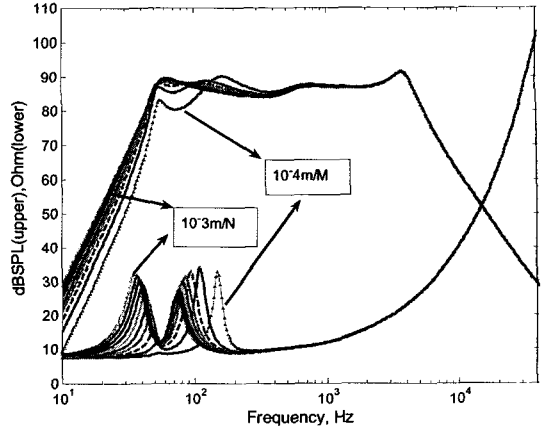


Fig. 11 Electrical impedance curves(lower) and acoustic pressure response curves(upper) simulated by improved PSPICE circuit model for vented-box loudspeaker according to compliance C_{ms} variations (10^{-4} m/N ~ 10^{-3} m/N, 10^{-4} m/N step)

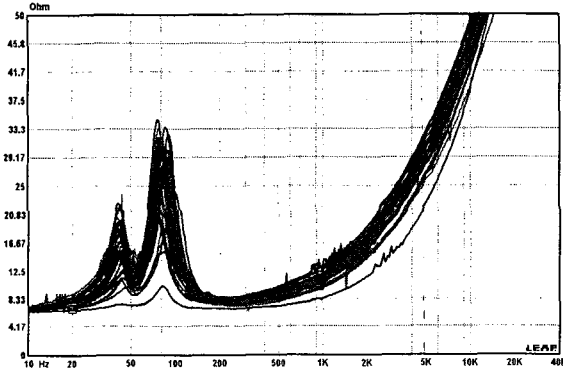


Fig. 10 Electrical impedance curves measured by LMS system for vented-box loudspeaker, box volume 22litre, port radius 5.5 cm, length 6.3 cm

힘요소가 1/6 이하인 경우에 음압차이가 16 dB를 나타냈으므로 제작한 우퍼에서 힘요소의 최소값은 기준값의 1/6 이상임을 알 수 있었다. 힘요소가 자기장 세기*코일의 길이인 관계를 이용하면 불량 우퍼가 평형위치에서 얼마만큼 벗어나 조립되었는지를 유추할 수도 있다. 전기 임피던스(Fig. 10) 보면 이러한 판단을 뒷받침한다. 대부분의 경우에 공진 주파수들의 위치변동은 크지 않지만 공진에서의 임피던스 크기가 정상적인 경우보다 작은 양상을 보여 제작된 우퍼들이 기준보다 힘 요소가 작게 되었음을 나타내고 있다.

한편, 다이어그램을 조립할 때에 중심이 폴 피스의 중심에서 약간 기울어지게 조립되면 컴플라이언스에 변동이 올 수 있다. 이러한 영향을 파악하기

위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시험용 우퍼의 컴플라이언스 값이 4×10^{-4} m/N일때에 컴플라이언스가 10^{-4} m/N에서 10^{-4} m/N간격으로 10^{-3} m/N까지 변동할 때의 특성을 Fig. 11에 나타냈다.

컴플라이언스가 커질수록, 즉 강성계수가 작아질수록 시스템의 공진주파수는 낮아지는 경향을 나타냈다. 또한, 1차 공진주파수에서의 임피던스 크기는 커지며 2차 공진주파수에서의 임피던스는 작아지는 현상을 나타냈다. 이 현상을 시험 결과와(Fig. 10) 비교하면 2차 공진주파수가 약간 커지게 나타난 제품들은 컴플라이언스가 작아진 즉 강성계수가 커졌음을 의미한다. 이러한 사실은 제품을 조립하면서 평형위치에서 벗어나 강성이 커졌음을 나타낸다.

5. 결 론

이 논문에서는 개선된 벤트박스 라우드스피커 시스템을 PSPICE를 이용하여 해석하는 방법을 제안하였다. 전통적인 벤트박스 모델에 스피커 유니트의 주파수 종속 매개변수를 도입하였고 음향응답특성의 보정을 위하여 2가지 필터를 적용하는 방법을 제시하였다. 완성된 벤트박스 모델을 사용하여 여러 스피커 매개변수들에 의한 전기임피던스와 음향응답특성을 예측할 수 있었다. 또한, 불량으로 조립된 우퍼를 벤트박스에 장착하여 측정된 전기임피던스와 음

향응답곡선으로부터 제작된 우퍼의 조립 불량 원인을 파악할 수 있음도 보였다.

참 고 문 헌

- (1) Park, S. T., 2003, "Analysis of Electric and Acoustic Variations for Loudspeaker due to Fabrication Processes", Journal of Juseong College, Vol. 12, pp. 83~96.
- (2) Park, S. T., 2004, "Effects of Electrical and Acoustical Variations for Loudspeaker due to Fabrication Processes", Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 155~159.
- (3) Park, S. T., "Effects for Characteristics of Loudspeaker due to Unknown Fabrication Mistakes by Unskilled Workers", Proceedings of the ASK Annual Autumn Conference, pp. 523~526.
- (4) Leo, L. B., 1986, Acoustics, the Acoustical Society of America.
- (5) Leach, Jr. M. M., 2003, Introduction to Electroacoustics & Audio Amplifier Design, 3rd Edition, Kendall/Hunt Publishing Company.
- (6) Leach, Jr. M. M., 2002, "Loudspeaker Voice-Coil Inductance Losses: Circuit Models, Parameter Estimation, and Effect on Frequency Response", J. Audio Eng. Soc., Vol. 50, No. 6, pp. 442~450.
- (7) Leach, Jr. M. M., 1991, "Computer-aided Electro-acoustic Design with SPICE", J. Audio Eng. Soc., Vol. 39, No. 7/8, pp. 551~563.
- (8) Jain, V. K. and Leach, Jr. M. M., 1983, "Time-domain Measurement of Vented-box Loudspeaker System Parameters", IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, Vol. ASSP-31, pp. 1~8.
- (9) Benson, J. E., 1996, Theory and Design of Loudspeaker Enclosures, Prompt Publications.
- (10) Thiele, A. N., 1971, "Loudspeakers in Vented Boxes: Part I", J. Audio Eng. Soc., Vol. 19, No. 5, pp. 382~392.
- (11) Small, R. H., 1973, "Vented-box Loudspeaker Systems-Part I: Small Signal Analysis", J. Audio Eng. Soc., Vol. 21, No. 5, pp. 363~372.
- (12) Small, R. H., 1973, "Vented-box Loudspeaker Systems-Part II: Large Signal Analysis", J. Audio Eng. Soc., Vol. 21, No. 6, pp. 438~444.
- (13) Small, R. H., 1973, "Vented-box Loudspeaker Systems-Part III: Synthesis", J. Audio Eng. Soc., Vol. 21, No. 7, pp. 549~554.
- (14) Strahm, C. N., 1986, "Complete Analysis of Single and Multiple Loudspeaker Enclosures", Presented at the 81st Convention of the Audio Engineering Society, J. Audio. Soc., Preprint 2419.
- (15) Geddes, E. R., 2001, "On Sound Radiation from Ported Enclosures", J. Audio Eng. Soc., Vol. 49, No. 3, pp. 117~124.
- (16) Murphy, D., 1993, "Simple SPICE Models for the Analysis of Moving Coil Loudspeakers", Presented at the 4th Australian Regional Convention of the Audio Engineering Society, J. Audio. Soc., Preprint 3690.
- (17) Ih, J. G., 1991, "Acoustic Wave Action Inside Rectangular Loudspeaker Cabinets", J. Audio Eng. Soc., Vol. 39, No. 12, pp. 945~955.
- (18) Suzuki, H., 1986, "Mutual Radiation Impedance of a Double-disk Source and Its Effect on the Radiated Power", J. Audio Eng. Soc., Vol. 34, No. 10, pp. 780~788.
- (19) Jacobsen, O., 1976, "Some Aspects of the Self and Mutual Radiation Impedance Concept with Respect to Loudspeakers", J. Audio Eng. Soc., Vol. 24, No. 2, pp. 82~92.
- (20) LMS User Manual, 2000, Win32 Release 4.1, LinearX systems inc.
- (21) LEAP Enclosure Shop Reference Manual, 2002, Release 5, LinearX systems inc.
- (22) Park, S. T., 2007, "Loudspeaker, Parameter Estimation with Frequency Dependent Terms", submitted to the Journal of the Acoustical Society of Korea.
- (23) Keown, J., 2001, OrCAD PSpice and Circuit Analysis, 4th Edition, Prentice Hall.