

모바일 폰용 마이크로스피커의 음향 및 전기 해석

Acoustic and Electrical Analysis of Microspeaker for Mobile Phones

박 석 태*
Seok-Tae Park

(Received May 13, 2014 ; Revised June 13, 2014 ; Accepted July 1, 2014)

Key Words : Circular Microspeaker(원형 마이크로스피커), Closed Box(밀폐박스), Rectangular Microspeaker(사각형 마이크로스피커), Lowpass Filter(저역 통과 필터), Mass Correction Filter(질량 보정 필터), Mobile Phone's Microspeaker(모바일 폰용 마이크로스피커), Microspeaker System Simulation Program(MSSP, 마이크로스피커 시스템 시뮬레이션 프로그램), Pseudo Loudspeaker Model Concept(가상 스피커 모델 개념), Thiele Small Parameters(틸레 스몰 매개변수들), Vent Box(벤트박스), 6th Order Bandpass Box(6차 밴드패스 박스)

ABSTRACT

In this paper, GUI program for microspeaker system simulation program was developed and verified through closed box, vent box and 6th order bandpass enclosure system. By using the pseudo loudspeaker model concept, TS parameters and rear volume of microspeaker were identified. Their suitabilities were proved by comparing test results with simulations of electrical impedance and sound pressure response curves for the three box types; closed box, vent box and 6th order bandpass box. Also, MSSP was found to be effective regardless of the microspeaker's shape, either circular or rectangular shape. MSSP can be used for the microspeaker system simulation, and can give a general prediction of such as; sound pressure level curve, electrical impedance, diaphragm velocity and displacement curve according to multiple design parameters; diaphragm mass, compliance, force factor, front and rear volume, front and rear port's diameter and length.

1. 서 론

2014년도 1분기중에 세계 모든 휴대폰(모바일) 출하량은 4억 4천 860만에 이르고 이중에 스마트폰의 비중은 62.7%에 달하고 있다. 2014년 스마트폰 총 출하량은 약 12억 대에 달할 것으로 예측되고 있다. 이처럼 엄청난 수량의 모바일 폰이 공급되며 관련 기술인 모바일 폰에 대한 제조 기술, 통신 기술, 연산 기술, OS 기술, 화상 처리 기술, 음성

처리 기술 등은 혁신적으로 발달하고 있다.

이 논문에서는 음성 처리 부분의 끝단에 위치하는 마이크로스피커의 전기 및 음향 특성을 예측하는 모델링 및 효율적인 기법을 제시하고자 한다. 홈 오디오 시스템의 경우에는 음향 시스템 예측을 위해 상업용 소프트웨어인 LEAP(Loudspeaker Enclosure Analysis Program)을 사용할 수 있다. LEAP에서는 인클로저(박스) 설계와 전기 네트워크 설계를 수행할 수 있다. LMS(Loudspeaker Measurement System) 소프트웨어를 사용하여 음향 시스템에 사용되는 일

* Corresponding Author ; Member, Chungbuk Health & Science University
E-mail : stpark@chsu.ac.kr, stpark03@hanmail.net
Tel : +82-43-210-8246, Fax : +82-43-210-815

‡ Recommended by Editor SungSoo Na

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

반적인 라우드스피커들의 TS(Thiele Small) 매개변수들을 측정하고 규명할 수 있다. LEAP과 LMS를 사용하면 효율적으로 홈 오디오 스피커 시스템을 설계할 수도 있다.

이처럼, 일반적인 스피커 음향 시스템 시뮬레이션은 상업용 소프트웨어들을 사용할 수 있다⁽¹⁾. 그러나, 마이크로스피커의 경우에는 TS 매개변수 규명법이 없었고 또한 TS 매개변수를 알고 있다고 가정하여도 상업용 소프트웨어에 적용하였을 경우에 올바른 결과를 얻을 수 없었다.

저자는 2007년에 마이크로스피커의 TS 매개변수들을 규명하는 논문을 발표한 바 있다⁽²⁾. 그러나, 마이크로스피커의 음향 특성 예측은 제대로 수행되지 않았다. 전기전자공학자들은 아날로그와 디지털 전기회로 범용 해석 툴인 PSPICE(Professional Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)를 사용하여 전기회로를 시간 및 주파수 영역에서 해석해왔다. 저자는 마이크로스피커의 여러 모델들을 등가 전기회로로 구현하였고 PSPICE를 사용하여 전기 임피던스와 음향 응답특성들을 예측하였으나 논문으로 발표된 바는 없었다.

이 논문에서는 그동안 PSPICE를 기반으로 개발한 마이크로스피커 시스템 응답특성 예측 프로그램을 확장하고 보완한 내용을 기술하고자 한다. PSPICE 기반 프로그램은 PSPICE의 뛰어난 기능들과 장점들을 사용할 수 있음에도 불구하고 여러 가지 단점들이 있다. 첫째, 프로그램 코드가 노출되어 프로그램의 보안을 유지하는데 어려움이 있다. 둘째, 입력데이터를 프로그램에 넣기 위해서는 프로그램 코드를 계속적으로 수정해야 하는 등의 부가적인 작업등이 필요하다. 셋째, PSPICE로 시뮬레이션한 결과와 시험 데이터를 PSPICE에서 직접 비교할 수 없다. 넷째, 시뮬레이션 조건을 기록하기 위해서는 별도의 수작업으로 기록을 하여야 한다. 이러한 불편함을 개선해야 한다는 현장의 의견을 반영할 필요가 있었다.

이 문제를 해결하기 위해 PSPICE를 사용하는 회로도 방식에서 벗어나 MATLAB에서 실행할 수 있는 프로그램 코드를 개발하였다. 여기에 GUI(graphic user interface) 기능을 프로그램하여 사용자가 쉽게 사용할 수 있도록 하였다. 이렇게 개발한 프로그램을 MSSP(Microspeaker System Simulation Pro-

gram)라 명명하였다. MSSP가 모바일 폰에 사용되는 원형 마이크로스피커의 여러 모델들 뿐만 아니라 사각형 마이크로스피커 예측에도 유용함을 보이고자 한다.

정리하면, 모바일 폰에 장착되는 마이크로스피커의 전기 임피던스 및 음향 응답특성 예측에 대하여 (1) 기존의 홈 오디오 해석에 사용되는 상업용 소프트웨어인 LEAP 등으로 해석할 수 없었다. (2) 마이크로스피커의 가상 스피커 TS 매개변수 및 마이크로스피커 박스 모델을 사용하여 해석한 경우가 없었다. (3) 유한요소법이나 경계요소법을 사용하여 시도된 경우가 있으나 정확도가 크게 떨어진다.

이 논문에서는 마이크로스피커의 전기 임피던스 및 음향 응답특성, 다이아프램의 변위 및 속도 등을 예측하기 위하여 다음의 순서에 따라 기술하려고 한다. (1) 마이크로스피커의 가상 스피커 TS 매개변수를 규명한다. (2) 마이크로스피커의 여러 박스 모델들을 제시한다. 박스 모델들에 가상 스피커 모델을 결합한 등가 전기 회로도를 기술한다. (3) 여러 박스 모델들의 등가 전기 회로도에서 전기 회로 방정식들을 행렬 방정식 형태로 변환한다. 이들 방정식들을 MATABL 프로그램 코드로 프로그램을 작성한다. (4) 프로그램이 정확한 가를 검증하기 위하여 원형 마이크로스피커의 여러 가지 모델 형태들에 대하여 시뮬레이션을 수행한다. 예측한 전기 임피던스 및 음향 응답특성을 시험 결과들과 비교한다. (5) 사각형 마이크로스피커에서도 시험결과를 정확히 예측할 수 있는지를 비교한다.

Fig. 1에 MSSP의 흐름도를 나타냈다. MSSP 사용자는 총 43개 매개변수들을 컴퓨터 자판에서 직접 입력하거나 슬라이드 바를 이용하여 변경시킬 수 있다. 이러한 변경사항들을 반영한 시뮬레이션 결과를 주 작업공간에 나타나도록 프로그램 하였다. 주 작업공간에서 사용자는 시뮬레이션 결과인 음향응답, 전기 임피던스, 다이아프램의 변위, 속도 등을 콤보 스위치를 사용하여 선택할 수 있다. 그 결과가 주 작업공간 하단에 그림으로 나타난다.

MSSP를 실행하면 첫 번째 화면에서 pull down 메뉴를 사용하여 사용자가 마이크로스피커 박스형태를 선택한다. 두 번째 화면인 주 작업공간(main work space)에서는 pull down 메뉴를 사용하여 매개변수 제어패널 창을 나타낸다. 매개변수 제어패널

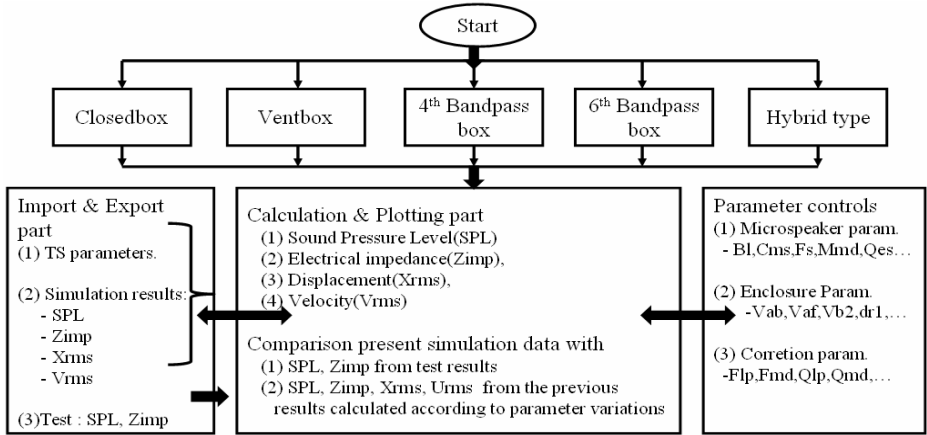


Fig. 1 Schematic diagram of MASP

(parameter control panel)은 3개의 제어 데이터 그룹들이 있으며 사용자는 총 43개의 매개변수들을 변경할 수 있다. 이 결과들은 주 작업공간 창에서 파일로 저장하고 읽어올 수도 있다. 첫 번째 제어 데이터 그룹은 마이크로스피커의 TS 매개변수들로 구성되었으며 17개의 매개변수들을 포함한다. 두 번째 데이터 그룹은 박스 매개변수들로 16개의 데이터로 이루어져 있으며 박스 형태에 따라 사용자가 입력할 수 있는 변수들이 제한된다. 세 번째 데이터 그룹은 교정 매개변수들로 10개의 데이터들로 구성되었다.

음향응답, 전기 임피던스, 다이어프램의 변위 및 속도 등을 MASP에서 계산하여 그래픽으로 컴퓨터 화면에 나타낼 수 있으며 결과 등을 컴퓨터에 저장할 수 있다. 이렇게 함으로써 박스 설계변수와 TS 매개변수 변경에 따라 변동하는 시스템 특성들을 비교해 볼 수 있다. 또한, 시험 데이터를 읽어 들여서 시뮬레이션 결과와 비교할 수도 있다.

2. 마이크로스피커의 TS 매개변수 규명 및 마이크로스피커 시스템 모델링

2.1 마이크로스피커의 TS 매개변수 규명

일반적으로 마이크로스피커는 다이어프램과 전면 그릴사이에 전면 체적(cavity)과 전면 기공이 있다. 그리고 다이어프램과 후면 그릴 사이에도 후면 체적과 후면 기공이 있다(Fig. 2(a))⁽²⁾.

마이크로스피커의 형태는 홈 오디오 시스템 설계자

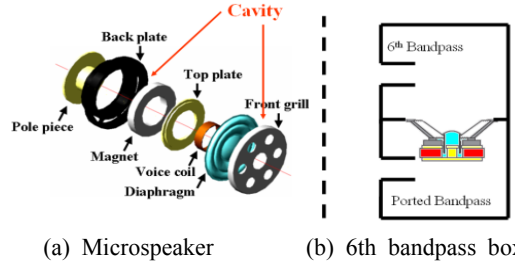


Fig. 2 Comparison microspeaker with 6th bandpass box system

입장에서는 6차 밴드패스 박스(또는 ported bandpass) 형태와 같은 형태를 나타낸다(Fig. 2(b)). 즉, 마이크로스피커 유닛 모습은 자유공기(free air) 상태의 가상 라우드스피커가 6차 밴드패스 박스안에 장착된 형상을 나타낸다. 그러나, Bai 등은 마이크로스피커를 6차 밴드패스 박스 형태로 보지 않고 free air 상태의 하나의 라우드스피커로 단순화한 모델(Fig. 3(a))을 사용하였다.

이 모델로 원형 마이크로스피커에 대하여 등가 TS 매개변수들을 규명하였다^(3,4). Bai 등 이 사용한 모델에서는 마이크로스피커 다이어프램과 후면사이의 후면 체적과 다이어프램과 전면사이의 전면 체적에 의한 컴플라이언스 및 다이어프램 자체의 컴플라이언스를 하나의 등가 컴플라이언스로 규명한다. 또한, 다이어프램부의 질량, 전면과 후면 공기 포트들에서의 동적 질량 및 방사 음향 질량 등을 하나의 등가 질량으로 모델링한다. 즉, 이 모델에서는 전기 임피던스 곡선에 하나의 공진 피크만 존재한다.

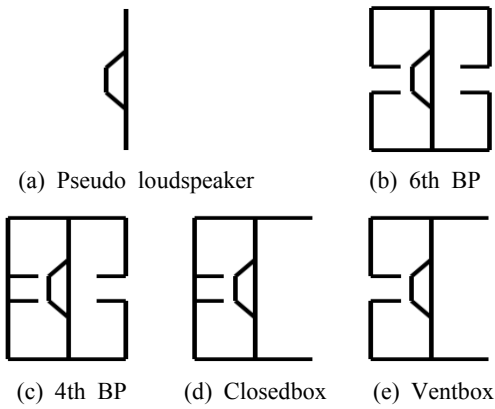


Fig. 3 Several types of microspeaker

그런데, Fig. 3(b)와 같은 일반적인 마이크로스피커에서는 전기 임피던스에 2개의 공진 피크가 나타난다. Bai 등은 마이크로스피커의 전기 임피던스 곡선에서 나타나는 2개의 공진피크를 설명할 수 없다고 밝혔다⁽⁴⁾. 마이크로스피커의 내부 구조가 바뀔 때마다, 예를 들면, 마이크로스피커의 박스 설계변수들인 후면 체적, 후면 기공의 직경, 포트 길이, 전면 체적, 전면 포트의 직경, 포트 길이 등이 변동될 때마다 등가 TS 매개변수들을 규명해야만 한다. 또한, 단품상태에서 1차 공진주파수와 2차 공진주파수가 충분히 떨어져 있어야만 비교적 의미있는 등가 TS 매개변수들을 규명할 수가 있다. 다시 말하면, Bai 등이 규명한 등가 TS 매개변수들로 구성된 마이크로스피커 모델은 Fig. 3(a)와 같은 형태이다.

따라서, Bai 등이 사용한 스피커 모델로는 Fig. 3(b)와 같은 마이크로스피커 유니트의 음향 및 전기 임피던스 특성들을 예측할 수 없다. 박스 설계변수들인 전면 및 후면 체적, 전면 및 후면 기공들의 단면적과 길이 등의 변동을 모델에서 고려할 수 없기 때문이다.

한편, Bai 등은 마이크로스피커가 모바일 폰에 장착된 상태를 Fig. 3(a) 같은 단순한 스피커 모델과 체적, 포트 등의 결합으로 보고 모델링하였고 시뮬레이션을 수행하였다. 즉, 마이크로스피커 유니트 자체를 해석 및 설계대상으로 본 것은 아니었다. 이 논문에서는 마이크로스피커 유니트 자체를 해석하고 설계함을 목적으로 한다. 이를 위해 마이크로스피커 내부에 가상 라우드스피커(Fig.3(a))가 존재하고 있다는 가상 라우드스피커 개념을 사용하여 TS 매개

변수를 규명하였다^(2,5).

이 방법으로 가상 라우드스피커의 TS 매개변수들과 마이크로스피커 다이어프램 후면의 박스 체적을 규명하였다. 시험에 사용한 원형 마이크로스피커는 모바일 폰에 사용되고 있는 유효 직경 11.18 mm인 10 mm급인 마이크로스피커이다. 규명된 TS 매개변수들은 힘요소 $Bl=0.446 Tm$, 컴플라이언스 $C_{ms}=0.995 mm/N$, 공진주파수 $F_s=975 Hz$, 다이어프램질량 $M_{md}=26.2 ukg$, $Q_{es}=5.97$, $Q_{ms}=2.46$, $Q_{ts}=1.74$, dc 저항 $R_e=7.25 Ohm$, 기계적 손실계수 $R_{ms}=6.8 mmkg/s$, $E_{rm}=1.695$, $E_{xm}=0.874$, $K_{rm}=1.014 n$, $K_{xm}=65.3 u$ 이었고 후면 체적은 0.145 cc였다.

2.2 마이크로스피커 시스템 모델링

마이크로스피커는 2.1절에서 규명된 TS 매개변수들로 모델링된 가상 라우드스피커가 6차 밴드패스 박스안에 장착된 상태(Fig. 3(b))와 등가이다. 이 모델을 사용하면 박스 설계 변수들인 전면과 후면 기공들의 단면적, 포트 길이 및 전면과 후면의 체적 변동에 따른 특성을 예측할 수 있다. 즉, 박스 설계 변수들에 대한 시스템 특성들인 전기 임피던스 특성과 음향 응답 특성, 다이어프램의 속도와 변위들을 예측할 수 있다. 또한, TS 매개변수 변동에 대한 스피커 시스템 특성들도 예측할 수 있다. 즉, 마이크로스피커 유니트 설계가 가능하게 된다는 것이다.

한편, 마이크로스피커는 4가지 형태로 모델링할 수 있다. 유니트 상태인 6차 밴드패스 박스(Fig. 3(b))와 후면 기공을 막은 상태인 4차 밴드패스 박스형태(Fig. 3(c))가 있다. 4차 밴드패스 형태에서 전면 그릴을 제거한 밀폐박스 형태(Fig. 3(d)) 그리고 밀폐박스 상태에서 후면 기공을 개방한 벤트박스 형태(Fig. 3(e)) 등 4가지 경우가 있다.

이 4가지 박스 모델이 완성되면 박스 설계변수들인 전면 및 후면 체적, 포트 길이 변동에 따른 시스템 특성을 파악할 수 있다. 또한, TS 매개변수들인 다이어프램 질량, 다이어프램의 컴플라이언스, 힘 요소 등의 변동에 대해서도 전기 임피던스와 음향 응답특성, 다이어프램의 속도 및 변위를 예측할 수 있다. 다이어프램의 변위를 예측할 수 있다면 가진 전력 변동에 따라 다이어프램이 전면 그릴에 닿게 되는지를 판별할 수 있다. 즉, 다이어프램의 최대한계 변위와 보이스 코일이 폴 피스 하단에 닿지 않게 할

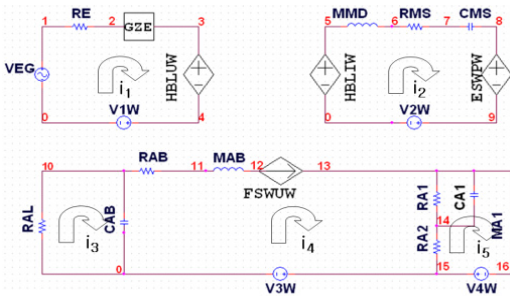


Fig. 4 PSPICE model of impedance type for microspeaker closed box system

최대 변위와 최대 가진 전력, 최대 음향 응답을 예측할 수 있다.

마이크로스피커를 밀폐박스 모델(Fig. 3(d))로 표현한 등가 전기회로도는 Fig. 4와 같다⁽⁵⁾. 이 회로도의 변수들은 2.1절에서 규명한 가상 라우드스피커의 TS 매개변수들과 후면 체적 그리고 참고문헌⁽⁵⁾의 관계식들을 사용하여 구할 수 있다.

마이크로스피커 밀폐박스 모델인 Fig. 4의 회로도를 PSPICE에서 실행시키면 시스템 특성을 시뮬레이션할 수 있다. 서론에서 기술한 프로그램 언어인 MATLAB, C언어나 Fortran 언어를 사용하여 시뮬레이션을 수행하려면 Fig. 4 회로도를 행렬방정식 형태로 변환시켜야 한다. Fig. 4의 PSPICE 회로도에서 폐회로들과 절점들에 대하여 Kirchoff의 전압 법칙을 적용하여 각 폐회로에서 독립변수들인 전류들에 대한 방정식들을 유도할 수 있다. 폐회로들에 대한 전류방정식을 사용하여 정리하면 임의의 주파수 f_i 에 대해 Fig. 4와 등가인 행렬방정식을 식 (1)로 표현할 수 있다.

$$[A]_i \{I\}_i = \{B\} \quad i = 1, n \tag{1}$$

여기서,

$$A_{1,1} = R_e + GZE_i \tag{2a}$$

$$A_{1,2} = BI \tag{2b}$$

$$A_{2,1} = -BI \tag{2c}$$

$$A_{2,2} = s_i M_{md} + R_{ms} + 1/(s_i C_{ms}) \tag{2d}$$

$$A_{2,3} = -S_d / (s_i C_{ab}) \tag{2e}$$

$$A_{2,4} = S_d (R_{ab} + s_i M_{ab} + 1/(s_i C_{ab})) \tag{2f}$$

$$A_{2,5} = s_i M_{a1} S_d \tag{2g}$$

$$A_{3,3} = R_{a1} + 1/(s_i C_{ab}) \tag{2h}$$

$$A_{3,4} = -1/(s_i C_{ab}) \tag{2i}$$

$$A_{4,2} = S_d \tag{2j}$$

$$A_{4,4} = -1 \tag{2k}$$

$$A_{5,4} = -R_{a2} + Zf_i + s_i M_{a1} \tag{2l}$$

$$A_{5,5} = R_{a2} + Zf_i + s_i M_{a1} \tag{2m}$$

$$A_{1,3} = A_{1,4} = A_{1,5} = A_{3,1} = A_{3,2} = 0 \tag{2n}$$

$$A_{3,5} = A_{4,1} = A_{4,3} = A_{4,5} = 0 \tag{2o}$$

$$A_{5,1} = A_{5,2} = A_{5,3} = 0 \tag{2p}$$

$$B_1 = Veg \tag{3a}$$

$$B_2 = B_3 = B_4 = B_5 = 0 \tag{3b}$$

$$\{I\}_i = \{i_1 \ i_2 \ i_3 \ i_4 \ i_5\} \tag{4}$$

$$GZE_i = K_{rm} \omega_i^{E_{rm}} + jK_{xm} \omega_i^{E_{xm}} \tag{5}$$

$$f_i = i2\pi \Delta f \tag{6}$$

$$s_i = 2\pi f_i \sqrt{-1} \tag{7}$$

$$\omega_i = 2\pi f_i \tag{8}$$

$$Zf_i = R_{a1} / (s_i C_{a1} + R_{a1} + 1) \tag{9}$$

식 (2)에서 S_d 는 다이어프램의 유효 단면적을 나타내고, 식 (4)는 주파수 f_i 에서 각각의 폐회로를 흐르는 전류를 푸리에 변환한 phasor를 나타낸다. 식 (5)는 스피커를 TSL로 모델링한 것을 나타낸다⁽⁶⁾. 식 (1)에서 각각의 주파수 f_i 에 대하여 풀면 전류 벡터 B 를 얻을 수 있다. 이 전류들을 이용하여 후속적인 결과들을 얻는다.

Fig. 4에서 전류 i_1 은 보이소 코일에 흐르는 전류이고 i_2 는 다이어프램의 속도를 i_4 는 다이어프램의 부피속도를 각각 나타낸다. 밀폐박스 시스템에서 다이어프램에서 1 m 거리에서 측정된 음향응답 $p(f)$ 와 전기 임피던스 $Z(f)$ 는 각각 식 (10)과 식 (11)로 나타낼 수 있다⁽⁷⁾.

$$p(f) = 20 \log_{10} \left(\frac{\rho f i_4(f)}{P_{ref}} \right) \tag{10}$$

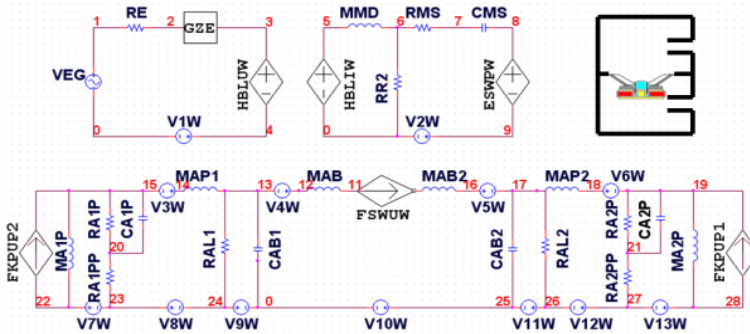


Fig. 5 PSPICE model of impedance type for 6th bandpass box system

$$Z(f) = \frac{VEG(f)}{i_1(f)} \tag{11}$$

여기서, ρ 는 공기밀도로 1.18 kg/m^3 , p_{ref} 는 기준음압으로 20 uPa 이며 f 는 주파수이고 $VEG(f)$ 는 마이크로스피커 양단에 걸린 전압의 주파수 특성을 나타낸다. 다이어프램의 변위는 다이어프램의 속도 $i_2(f)$ 를 적분한 결과로 $i_2(f)/(j2\pi f)$ 로 나타낼 수 있다. 음향 응답 특성의 경우에는 식 (12)와 같이 고주파수에서 다이어프램의 다이내믹 질량감소 효과를 보정해주는 질량 보정 필터 $H_{md}(ka)$ 를 정지상태 질량 $M_{md}(0)$ 에 적용한 수정 질량을 사용하여야 한다. 또한, 식 (13)과 같이 roll-off를 고려해주는 저주파 대역 통과 필터 $H_{lp}(ka)$ 를 음향 응답식 (10)에 적용하여야 고주파수 대역에서 시뮬레이션 결과와 실제 시험 결과와 잘 일치함을 알 수 있다^(1,2,8). 이를 수식으로 표현하면 식 (12)~식 (15)와 같다. 식 (13)과 식 (15)에서 ω 는 주파수 F_{md} 와 F_{lp} 는 다이어프램의 크기와 형상에 따라 시험적으로 결정된다⁽¹⁾.

$$M_{md}(\omega) = M_{md}(0) |H_{md}(\omega)| \tag{12}$$

$$|H_{md}(ka)| = \frac{1 + j/\sqrt{2}(ka/F_{md})^{Q_{md}}}{1 + j\sqrt{2}(ka/F_{md})^{Q_{md}}} \tag{13}$$

$$P'(\omega)_{axial} = P(\omega)_{axial} |H_{lp}(\omega)| \tag{14}$$

$$H_{lp}(ka) = \frac{1}{1 - (ka/F_{lp})^2 + jka/(F_{lp}Q_{lp})} \tag{15}$$

두 번째 모델로 마이크로스피커를 벤트박스 모델링한 경우를 해석하기 위해서 참고문헌에 기술한

벤트박스 스피커 시스템인 등가 전기회로도를 사용하였다⁽⁸⁾. 밀폐박스 모델의 경우처럼 MSSP에 포함될 프로그램 코드를 작성하기 위하여 회로도에서 각각의 폐회로들에 Kirchhoff의 전압법칙을 적용하여 회로 방정식들을 구하였다. 밀폐박스 모델의 경우와 같이 이 회로 방정식들을 행렬형태로 변환하여 벤트박스 모델의 경우에도 임의의 주파수 f_i 에서 폐회로들에 흐르는 전류 벡터를 구하였다. 각각의 전류들로부터 앞서 기술한 방법으로 음향 응답 특성, 전기 임피던스, 다이어프램의 변위와 속도들을 구하였다.

세 번째 모델로 6차 밴드패스 박스 모델로 마이크로스피커 유닛를 모델링 하였다. 마이크로스피커를 6차 밴드패스 박스로 모델링하면 Fig. 5처럼 표현할 수 있다. 우측 상단에는 일반적인 라우드스피커가 6차 밴드패스 박스에 설치된 모습으로 마이크로스피커와 같은 형태를 갖는다는 것을 나타냈다. 우측 하단의 FKPUP1은 마이크로스피커 후면기공에서의 부피속도가 전면 기공의 평면에 작용하는 반력을 나타낸다. 회로상으로 전류중속 전류소스원을 나타내며 좌측 끝단의 FKPUP2는 그 반대의 경우로 전면 기공에서 나온 부피속도가 후면기공의 평면에 작용하는 반력을 모델링한 것이다.

한편, 제안한 6차 밴드패스 박스 회로도 모델을 PSPICE에서 해석할 수도 있으나 PSPICE를 사용할 때에 생기는 단점들 때문에 MSSP에서 사용하도록 행렬방정식들을 유도하였다. Fig. 5의 각각의 폐회로에 흐르는 전류들에 대해 Kirchhoff의 전압법칙을 적용하고 정리하여 전류에 대한 방정식들을 구하였다. 이 방정식들의 해인 각각의 폐회로들에 흐르는 전류의 phasor들을 사용하여 마이크로스피커의 시스템 특성들인 전기 임피던스, 음향 응답특성, 다이어

프램의 변위와 속도들을 계산한다. 즉, 행렬 방정식에서 각 폐회로에 흐르는 전류들을 관심있는 주파수들에서 계산하였고 후속적인 연산을 통하여 음향응답, 전기 임피던스 등을 계산하고 그 결과들을 주 작업공간에 그래프로 출력한다.

3. 마이크로스피커 시스템 모델 검증

3.1 밀폐박스 모델 검증-원형 마이크로스피커

2장에서는 마이크로스피커의 4가지 박스 형태들 중에서 밀폐박스와 벤트박스와 6차 밴드패스 박스 형태인 3가지 경우에 대하여 각각의 박스 형태를 모델링한 내용을 기술하였다. PSPICE에서 해석이 가능한 회로도들에 Kirchhoff의 전압법칙을 적용하여 행렬방정식을 유도하였고, MATLAB 코드로 프로그램을 하였다. 이렇게 구한 프로그램 코드들을 사용하여 Fig. 1과 같은 MSSP 프로그램을 완성하였다. 개발한 MSSP 프로그램이 마이크로스피커의 시스템 특성을 잘 예측하는지를 검토하고자 한다. 3.1 절에서는 Fig. 1의 MSSP 프로그램의 밀폐박스(closedbox) 모델링 부분을 검증하고자 한다. 모바일 폰에 사용되고 있는 10 mm급 원형 마이크로스피커를 Fig. 6에 나타냈다.

마이크로스피커 밀폐박스(Fig. 3(d))형태는 마이크로스피커에서 전면 그릴을 제거하고 후면 기공들을 알루미늄 테이프 등을 이용하여 막은 상태를 말하며 이를 모델링한 PSPICE 회로도는 Fig. 4와 같다. 마이크로스피커 유니트의 후면 기공을 알루미늄 테이프를 이용하여 막고 전면 그릴은 제거한 상태인 유니트를 1,000 cc 정육면체 밀폐 시험박스의 한면의 중앙에 장착한 후에 시험을 수행하였다. 무향실을 사용하지 않고도 반사음의 영향을 줄이는 측정 방법으로 사용되는 GPM(ground plane method) 방법으로 연구실에서 음향응답 특성을 측정하였다⁽⁹⁾. Fig. 7에 GPM 방법으로 음향응답 측정을 하는 개략도를 나타냈다.

GPM 방법으로 측정된 음압은 마이크폰을 평면 바닥에 두고 측정하므로 바닥에서 음압반사로 인하여 무향실에서 측정된 것보다 6 dB 크게 측정되므로 이를 보정하였다. Liberty사의 Praxis Audio Measurement System(version 2.39g)을 사용하여 음향응답 특성과 전기 임피던스 데이터를 측정하였다.

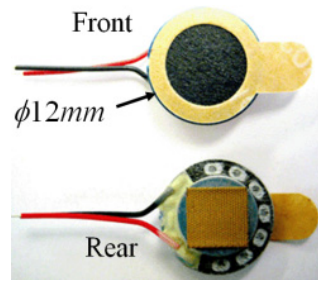


Fig. 6 Circular type 10 mm grade microspeaker

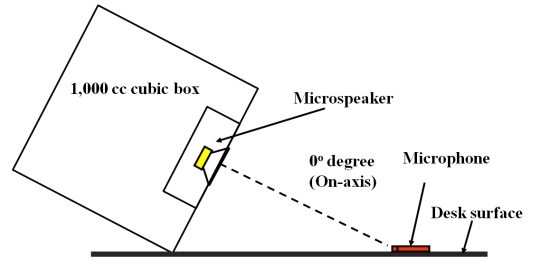


Fig. 7 Schematic diagram of measuring sound pressure level by ground plane method

MicroSpeaker Parameters	
[1] Bl, Nm	0.4462
[2] Cms,mm/N	0.9951
[3] d0, cm	1.118
[4] Fs, Hz	975.2463
[5] Mmd, g	0.0262
[6] Qes	5.9744
[7] Qms	2.4584
[8] Qts	1.7417
[9] Re, Ohm	7.253
[10] Rms, kg/s	0.0068
[11] Erm	1.695
[12] Exm	0.8744
[13] Krm	1.014e-009
[14] Kxm	7.96e-005
[15] K	6.53e-005
[16] Nn	0.936
[17] Ql	7

Fig. 8 Parts of microspeaker parameters in MSSP parameter controls panel

주파수 분해능은 $\Delta f=2.93$ Hz로 resynchronous chirp 신호를 사용하여 17.578 Hz에서 19,998 Hz까지 6,821개의 데이터를 20번 측정하고 평균하였다. MSSP 프로그램을 실행하고 밀폐박스를 선택한 다음에 매개변수 제어 패널(parameter control panel)을 열었을 때에 Fig. 8에서 Fig. 10의 데이터들을 볼 수 있다. Fig. 8은 10 mm급 원형 마이크로스피커 매개변수들로 가상 라우드스피커 TS 매개변수 규명법으로 구한 값들이다.

Fig. 8에서 가상 라우드스피커의 공진주파수 F_s 와 전기적 Q factor, Q_{es} , 기계적 Q factor, Q_{ms} 및 전체 Q factor, Q_{ts} 는 다른 매개변수들과 종속적인 관계에 있다^(1,5). Fig. 9에 마이크로스피커의 후면 체적 $V_{ab}=0.145$ cc가 첫 번째 행에 나타나 있다.

나머지, 흐릿한 데이터들은 밀폐박스 시뮬레이션에서는 사용되지 않음을 나타낸다. Fig. 10에서 관심 있는 음향응답특성의 주파수범위를 “[42]Freq_low”와 “[41]Freq_high”를 사용하여 정의하며 여기서는 500~20,000 Hz로 설정되어 있음을 나타냈다.

식 (15)에 나타낸 저주파 대역필터의 매개변수인 $F_{lp}=1.3$ 과 $Q_{lp}=2$ 그리고 식 (13)의 질량 보정필터의 매개변수인 $F_{md}=0.8$, $Q_{md}=0.5$ 가 나타나 있다. 이 값들은 마이크로스피커의 직경과 형상에 따라 결정하여 사용한다^(1,5,9). Fig. 11에 시뮬레이션과 시험으로 구한 원형 마이크로스피커의 밀폐박스 음향응답 특성을 비교하였다.

GPM 방법은 바닥이 평평하고 넓은 공간에서 측정하는 방법인데 방에서 측정하여 벽에 의한 반사음의 영향으로 음향응답 특성이 거칠게 나타남을 보였다. 3,116 Hz에서 음압이 시뮬레이션과 시험에서 각각 111.4 dB와 113.6 dB로 시험결과가 약 2.2 dB 크게 나타났다. 관심 주파수 범위인 500 Hz에서 10,000 Hz범위에서 경향을 잘 나타내고 있으며 음압 오차가 약 2 dB 정도로 밀폐박스 상태의 음압을 잘 예측함을 나타냈다. 12 kHz 이상에서의 피크와 딥 현상은 다이아프램의 분할 진동 현상 등에 의한 것으로 추정되며 이 논문에서 고려하지 못하는 유연체 모드에 의한 것으로 추정된다.

요약하면 (1) 원형 마이크로스피커의 TS 매개변수를 규명하였고, 이 데이터들을 MSSP 프로그램의 입력 데이터로 사용하였다. (2) 마이크로스피커를 밀폐박스 형태로 한 상태에서 측정한 음향응답 특성과 시뮬레이션 결과가 잘 일치함을 보였다.

따라서, 가상 라우드스피커의 TS 매개변수들과 후면 체적을 고려한 밀폐박스 모델이 타당함을 나타낸다. 한편, MSSP 프로그램은 GUI 기능을 사용할 수 있도록 프로그램 하였다. 따라서, 사용자가 매개변수 제어패널의 변수 값들을 직접 자판에서 입력하거나 슬라이드 바를 움직여 정할 수 있다. 제어 패널에 있는 변수 값들의 변동은 주 작업 공간에 반영되어 즉시 스피커 시스템 특성들을 계산하고 그 결과를 화면에 나타내므로 사용자가 쉽게 시스템 특성을 파악할 수 있다.

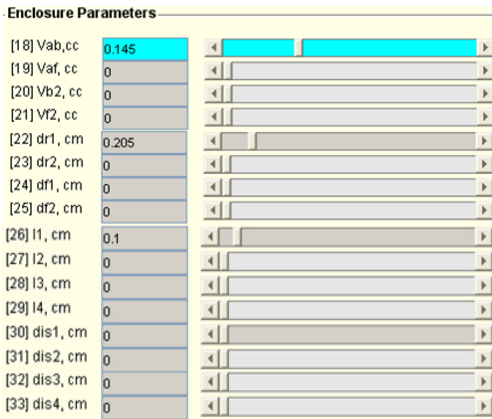


Fig. 9 Parts of enclosure parameters in MSSP parameter controls panel

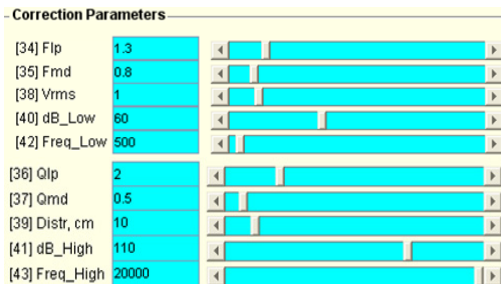


Fig. 10 Parts of correction parameters in MSSP parameter controls panel

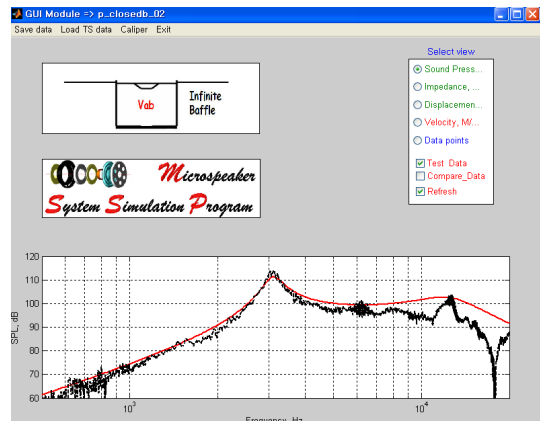


Fig. 11 Comparison test result with simulation one of sound pressure level for closed box system in main work space of MSSP

3.2 벤트박스 모델 검증-원형 마이크로스피커

2.1절에서 마이크로스피커 내부의 가상 라우드스피커의 TS 매개변수들을 규명하였다. 3.1절에서는 마이크로스피커 밀폐박스 모델에 대한 음향응답 특성 시뮬레이션 결과와 시험결과가 잘 일치함을 보여 TS 매개변수 규명값들과 밀폐박스 모델링의 타당성을 보여주었다. 3.2절에서는 2.1절에서 규명한 TS 매개변수들이 마이크로스피커를 벤트박스로 모델링하였을 때에도 타당한 지를 검토한다. 2.1절에서 규명한 TS 매개변수들과 벤트박스 설계인자들인 다이아프램 후면 체적, 후면 기공의 넓이와 포트의 길이를 고려한 벤트박스 모델을 MSSP를 이용하여 시뮬레이션하고 이를 시험결과와 비교한다.

한편, 3.1절에서 마이크로스피커 밀폐박스 모델은 후면이 막혀 있어서 후면에 연결된 시험 박스의 내부 공간이 영향을 주지 않는다. 그러나, 벤트박스 모델에서는 후면 기공이 열려 있어서 1,000 cc 정육면체 형상의 시험박스 안에서의 음향공진의 영향을 받을 수 있다. 음향공진을 억제하기 위하여 시험박스 안에 흡음재를 약 80%정도 충전하였다. 마이크로스피커를 Fig. 3(e)인 벤트박스 모델로 모델링하

였다. 벤트박스 모델의 회로도도 회로도에 나타나 있는 각각의 변수들은 참고문헌에 기술되어 있다⁽⁸⁾.

각각의 폐회로도 들에서 독립변수인 전류들에 대한 방정식을 구하였다. 이들을 행렬 방정식 형태로 만들고 행렬방정식에서 폐회로에 흐르는 전류 벡터들을 계산할 수 있다. 이렇게 프로그램된 프로그램 코드가 MSSP에 포함되었다(Fig. 1). MSSP의 첫 화면에서 벤트박스를 선택하면 MSSP는 자동적으로 Fig. 8의 데이터들을 TS 매개변수로 읽어들이고 벤트박스 모델에서 박스 매개변수는 Fig. 9에서 후면 박스 부피 V_{ab} 와 후면 등가 포트반경 dr_1 및 후면 등가 포트 길이 l_1 를 활성화하여 시뮬레이션을 수행한다. 벤트박스 모델(Fig.3(e))에 대하여 전기 임피던스와 음향 응답특성을 시험과 시뮬레이션한 결과를 각각 Fig. 12와 Fig. 13에 나타냈다.

벤트박스 모델에 대해 전기 임피던스 곡선에서 공진주파수가 분리되는 것을 잘 예측함을 보였다(Fig. 12). 벤트박스 모델이 음향응답 특성도 잘 예측함을 보였다(Fig. 13). Fig. 12의 1,632 Hz에서의 공진주파수는 다이아프램 후면에 있는 시험 박스내에서의 음향 공진현상으로 보여지며 이로 인해 음향응답 곡선인 Fig. 13에서는 1,541 Hz에서 딥과 1,685 Hz에서 피크가 나타났다. 벤트박스에 대해서도 시뮬레이션 결과가 시험 결과를 잘 예측함을 보여줬다. 따라서, 2.1절에서 규명한 TS 매개변수들이 타당하다는 것과 이 데이터들을 이용한 벤트박스 모델도 마이크로스피커를 잘 표현하고 있다고 볼 수 있다.

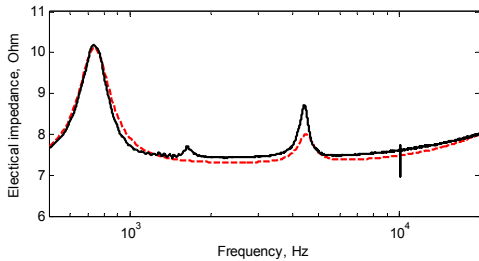


Fig. 12 Comparison test result(solid line) of electrical impedance with simulation one(dashed line) of vent box system

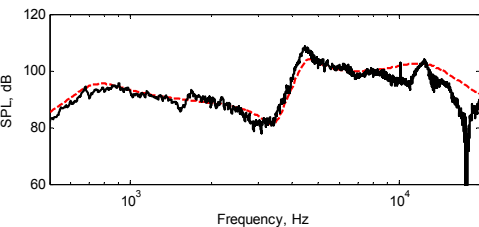


Fig. 13 Comparison test result(solid line) of sound pressure level with simulation one(dashed line) of vent box system

3.3 6차 밴드패스 모델 검증-원형 마이크로스피커

마이크로스피커 유닛 모습은 6차 밴드패스 박스 형태를 하고 있다. 2.1절에서 규명한 가상 라우드스피커의 TS 매개변수 값들과 6차 밴드패스 박스 설계변수들을 사용하여 6차 밴드패스 모델을 검증하고자 한다. 마이크로스피커의 경우에는 주로 500 Hz 이상부터 사용을 하므로 관심주파수 범위를 500 Hz에서 20,000 Hz까지 하였다. Fig. 14에 시뮬레이션과 시험으로 얻은 전기 임피던스 특성을 비교하였다.

1,644 Hz에서의 공진피크는 벤트박스 모델의 경우처럼 시험박스의 내부 음향공진 때문으로 보인다.

이로 인해 음향응답 특성곡선(Fig. 15)에서도 1,644 Hz 부근에서 음향 답과 피크가 나타났다.

Fig. 15에서 음향응답 특성의 시험결과를 보면 915 Hz 부근의 공진으로 인해 시뮬레이션 결과와 차이가 나타났다. 915 Hz 근처의 공진현상으로 750~1,400 Hz 사이에서 그리고 8,000 Hz 이상에서 시험결과와 시뮬레이션 결과에 차이가 있음을 나타냈다. 공진주파수 915 Hz 근처에서 시뮬레이션 결과가 시험 결과보다 작게 나타난 이유는 Fig. 8에 있는 TS 매개변수인 기계적 손실 계수 $R_{ms}=0.0068$ 이 실제보다 크게 규명되었기 때문이다. 따라서, 이 부근에서의 음향응답을 크게 감소시키도록 예측되었다. 즉, 공진주파수 부근에서의 음향 응답은 기계적 손실계수 크기에 민감함을 나타냈다. 6차 밴드패스 박스 모델도 실제 마이크로스피커를 잘 표현함을 알 수 있었다. 3장에서는 모바일 폰에 사용되고 있는 원형 마이크로스피커에 대한 3가지 모델들인, 밀폐 박스, 벤트박스 및 6차 밴드패스 박스들에 대해 프로그램을 작성하였고 이들을 포함하고 전체적으로 제어하는 MSSP 프로그램을 작성하였다. MSSP 프로그램으로 각각의 박스 모델들을 시뮬레이션하여

구한 전기 임피던스와 음향응답 특성 결과들을 시험 결과와 비교한 결과 서로가 잘 일치함을 보였다. 따라서, 모델들이 타당하다는 사실과 동시에 2.1절에서 규명한 TS 매개변수들이 마이크로스피커를 잘 나타냈음을 보였다. 한편, 이 논문에서 사용한 TS 매개변수 규명 방법과 개발한 MSSP 프로그램이 마이크로스피커의 형상에 독립적임을 보이기 위하여 4장에서는 임의의 사각형 형태의 마이크로스피커에 적용한 결과를 기술하고자 한다.

4. 6차 밴드패스 모델 검증-사각형 마이크로스피커

현재 모바일 폰에서 많이 사용하고 있는 사각형 마이크로스피커에 대해 2.1절에서 기술한 가상 라우드스피커 TS 매개변수 규명법으로 TS 매개변수를 규명하였다. Fig. 16에 모바일 폰에 사용되는 사각형 마이크로스피커를 나타냈다.

사각형 마이크로스피커의 경우에는 사정상 TS 매개변수와 제원을 표시할 수 없음을 밝힌다. 사각형 마이크로스피커의 복잡한 형상의 후면 체적도 원형

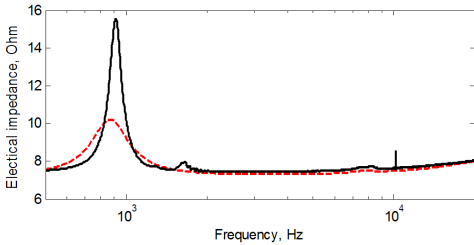


Fig. 14 Comparison test result(solid line) of electrical impedance with simulation one(dashed line) of 6th bandpass box system



(a) Front (b) Rear

Fig. 16 Rectangular type microspeaker attached to mobile phone

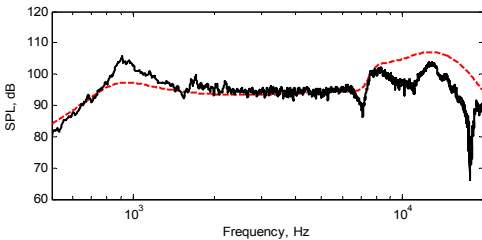


Fig. 15 Comparison test result(solid line) of sound pressure level with simulation one(dashed line) of 6th bandpass box system

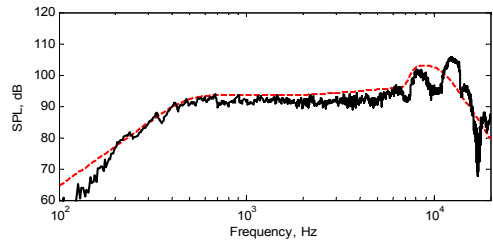


Fig. 17 Comparison test result(solid line) of sound pressure level with simulation one(dashed line) of 6th bandpass form of rectangular microspeaker

마이크로스피커와 동일한 방법으로 시험으로 동시에 규명하였다. 사각형 마이크로스피커 단품 상태를 3.3절의 경우와 같이 6차 밴드패스 박스 모델로 모델링 하였다. 6차 밴드패스 박스의 설계변수들인 후면 체적, 후면 포트 등가 길이와 등가 직경, 전면 체적 및 전면 포트의 등가 직경과 포트 등가 길이 등을 Fig. 9의 MSSP 프로그램의 입력 데이터로 입력 하였다. 제어 패널의 고정 계수들은 원형 마이크로스피커와 동일한 값들을 사용하였다. MSSP로 6차 밴드패스 모델에 대한 음향응답특성을 예측하였다. 시뮬레이션 결과와 시험결과와 비교한 결과(Fig. 17)를 보면 MSSP로 시뮬레이션한 음향응답 특성이 시험결과를 잘 예측함을 보였다.

따라서, 6차 밴드패스 모델은 사각형 마이크로스피커의 경우에도 잘 적용됨을 확인할 수 있었다. 100~20,000 Hz 범위에서 7 kHz 근처와 10 kHz 영역 부근에서의 딥 현상은 다이아프램의 고차 진동 모드에 의한 것으로 추정된다.

5. 결 론

이 논문은 모바일 폰에 장착되는 마이크로스피커 유니트 자체를 효율적으로 해석하고 설계하는 내용을 기술하였다.

이를 위해 (1) 가상 라우드스피커 개념을 이용한 TS 매개변수 규명법으로 모바일 폰에 사용되고 있는 원형 및 사각형 마이크로스피커의 TS 매개변수들과 후면 체적을 규명하였다. (2) 규명된 가상 스피커 TS 매개변수들로 가상 라우드스피커 모델을 구성하였다. 밀폐박스, 벤트박스 및 6차 밴드패스 박스의 모델들도 제시하였다. 이 박스 모델들과 가상 라우드스피커 모델을 결합하여 마이크로 스피커 밀폐박스 모델, 벤트박스 모델과 6차 밴드패스박스 모델들을 제시하였다. (3) 밀폐박스 모델과 벤트박스 모델은 이전에 발표된 논문의 내용을 응용한 것으로 마이크로스피커 음향응답 특성 예측에 처음 적용하였다. (4) 마이크로스피커 유니트 자체를 6차 밴드패스 박스로 모델링하였고 이 모델을 PSPICE로 해석할 수 있도록 회로도 형태로도 제시하였다. (5) PSIPCE 소프트웨어로 해석할 때의 한계성을 극복하기 위하여 MATLAB 코드로 마이크로스피커 박스 모델들을 프로그램하였다. 사용자가 쉽게 사용할

수 있도록 GUI 기능도 포함시켰다. (6) 규명된 TS 매개변수와 박스의 설계인자들 그리고 질량보정 필터와 저역통과 필터를 포함하는 설계인자들을 MSSP의 입력 데이터로 사용하였다. 원형 마이크로스피커에 대하여 여러 박스형태들인 밀폐박스, 벤트박스 및 6차 밴드패스 박스상태의 음향응답 특성 및 전기 임피던스 등을 예측하였고 이는 시험결과와 잘 일치함을 보였다. (7) 개발한 MSSP 프로그램은 원형 마이크로스피커 뿐만 아니라 사각형 마이크로스피커에서도 음향응답을 잘 예측함을 보였다. 따라서, MSSP 프로그램은 모바일 폰 용 마이크로스피커 유니트를 해석하고 설계할 수 있는 도구로 사용될 수 있음을 보였다. (8) 모바일 폰에 장착된 마이크로스피커 시스템 해석 방법으로 하이브리드 해석법을 제안한다. 마이크로스피커 유니트 뒤쪽에 형성된 모바일 폰의 복잡한 구조부분만을 전산음향 해석하여 음향 임피던스를 계산한다.

이 데이터들을 시험으로 규명된 마이크로스피커 모델에 결합하는 하이브리드 기법을 적용한다면 복잡한 실제의 모바일 폰의 음향해석도 비교적 간단하면서도 정확하게 수행할 수 있음을 제안한다.

References

- (1) 2002, LEAP Enclosure Shop Reference Manual, Release 5, LinearX Systems Inc.
- (2) Park, S. T., 2007, Thiele Small Parameters Estimation for Pseudo Loudspeaker within 10mm Grade Circular-type Microspeaker, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 17, No. 11, pp. 1112~1118.
- (3) Bai, M. R., 2005, Acoustic Analysis and Design of Miniature Loudspeakers for Mobile Phones, J. Audio Eng. Soc., Vol. 53, No. 11, pp. 1061~1076.
- (4) Bai, M. R., 2007, Optimal Design of Loudspeaker Systems Based on Sequential Quadratic Programming (SQP), J. Audio Eng. Soc., Vol. 55, No. 1/2, pp. 44~54.
- (5) 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.

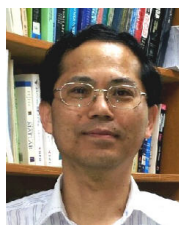
(6) Park, S. T., 2007, Derivation of Parameters for Loudspeaker with Frequency Dependent Terms and Discussion for Estimation Methods, Journal of the Acoustical Society of Korea, Vol. 26, No. 6, pp. 276~285.

(7) Leach Jr, W. M., 2003, Introduction to Electroacoustics & Audio Amplifier Design, 3rd edition, Kendall/Hunt Publishing Company.

(8) 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.

(9) LMS User Manual, 2000, Win32 Release 4.1, LinearX Systems Inc.

senior researcher. 1993~1999., IAE Automotive Technical Lab. principal researcher. 2000~Present, in Chungbuk Health & Science University Assistant Professor. His principal interest encompasses the fields of sound quality index development, noise control, and subjective evaluation, loudspeaker, horn and microspeaker system analysis and design, boundary integral analysis in Acoustics.



Seok-Tae Park, B.S. in Hanyang University, Mechanical Eng., 1984., M.S. in KAIST, Mechanical Eng., 1986., Ph.D. in Ajou University, Systems Eng., 1999. 1986~1989., KAIST Mechanical Eng., researcher. 1989~1992., Ssangyong Motor Co.,