

# Horn의 음향 모델링 연구 - 음향 혼의 해석 및 설계 -

## A Study on the Acoustic Modeling of Horn - Analysis and Design of Acoustic Horn -

사 종 성\*·박 석 태†

Jong Sung Sa and Seok-Tae Park

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

**Key Words** : Finite Element Method Magnetics(전자기장 유한요소 해석법), Horn Loudspeaker Modeling(혼 라우드스피커 모델), Input Acoustic Impedance(입력 음향 임피던스), Piezo Driven Disk(피에조 구동 디스크), Pseudo Loudspeaker Model Concept(가상 스피커 모델 개념)

### ABSTRACT

In this paper, horn loudspeaker modeling was suggested, investigated and verified through comparison of test results and simulation ones based on input electrical impedance curves and acoustic sensitivity ones. First, Thiele Small parameters of horn driver were identified by using pseudo loudspeaker model concept and verified in case of both closed and open horn driver. Second, cone-shaped horn models were investigated and compared with input acoustic impedance curves for real horn (cone angle 6.6°) and short horn (cone angle 27.9°). It showed that Leach model for cone horn was well described to test results, which were electrical impedance and acoustic sensitivity, compared to Lemaitre one. To represent horn system model good approximation in wide frequency range, mass correction filter and lowpass filter were adopted and consequently showed good fitted to test results.

### 1. 서 론

음향기기에 사용되는 혼 드라이버 스피커 시스템(혼 시스템)은 혼(horn)을 혼 드라이버에 부착하여 사용한다. 자동차에서 경적음 등을 발생시킬 목적으로 사용하는 전기식 혼은 코일에 직류 전기를 흘려서 발생한 자기력에 의해 폴과 아마추어가 서로 당기는 원리를 사용한다(Fig. 1).

아마추어는 금속 다이어프램과 함께 움직이는데

정해진 변위보다 크게 움직일 때에는 코일에 공급되는 전류가 끊어져 다이어프램의 탄성으로 원위치로 돌아간다. 이 때 코일에 전류가 다시 공급되어 다이어프램을 잡아당기는 현상이 반복되면서 다이어프램과 커버사이의 공기를 압축 팽창시켜 압력을 발생시킨다(Fig. 2)<sup>(1)</sup>.

전기식 혼은 이 압력으로 혼을 이용하여 소리를 증폭시키는 구조이며 다이어프램 탄성부의 공진주파수와 같은 순음과 순음의 하모닉 성분들로 합성된 경적음을 발생시킨다. 전기식 혼의 음색은 순음의

† 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  
\* Dept. of Automotive Engineering, Seoul University

‡ Recommended by Editor SungSoo Na

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

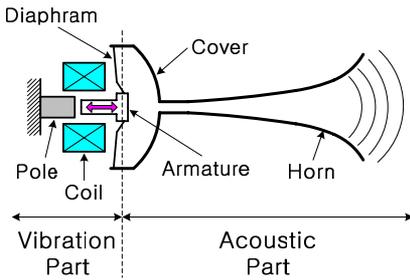


Fig. 1 Structure of electromagnetic type horn system

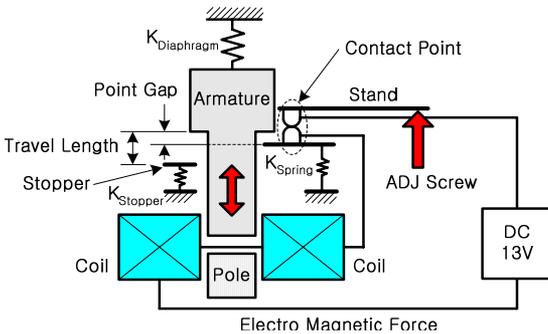


Fig. 2 Structure of electromagnetic exciter

주파수와 하모닉 성분들의 크기에 따라 결정된다.

한편, 재생 주파수 범위가 좁은 전기식 혼으로는 자동차 음향 엔지니어가 원하는 차종별로 다양한 경적음 음색을 구현할 수가 없으므로 광대역 음을 발생시킬 수 있는 electrodynamic 형태의 exciter를 사용하는 moving coil 혼 드라이버가 필요하다. 전기식 가진기가 단일음 또는 그 배음들을 재생하는 협대역인데 비하여 moving coil형은 광대역 주파수 범위를 재생할 수 있기 때문에 자동차 회사들에서 음향 혼 드라이버 시스템 개발이 점차 활발하게 연구되고 있다. 또한, 혼 시스템에 DSP(digital signal processor)를 연계시켜서 필요한 음을 설계하거나 인공적인 소리를 발생시킬 수 있다. 이러한 혼 시스템 제품을 개발한다면 차량 혼 시스템에 필요한 음향을 나타낼 수 있으므로 차량의 브랜드 가치를 높이는 데 크게 기여할 수 있다.

혼 시스템의 활용성 증대를 위하여 다양한 연구가 이루어져 왔으나 혼 시스템을 규명하는 방법 등에 어려움이 있어서 실제 현장에서는 정량적인 접근보다는 설계자들의 경험을 바탕으로 정성적인 혼 시스템 설계가 주로 행해져 왔다. 그러나, 음질(sound

quality)에 대한 소비자들의 요구를 수용하려면 혼 시스템의 특성을 정량적으로 정확하게 파악하는 것이 매우 중요해지고 있다. 이 논문에서는 혼 시스템을 일반적인 라우드스피커 시스템처럼 정량적으로 표현하여 혼 시스템의 특성을 쉽고도 빠르게 파악하면서 동시에 혼 시스템의 설계 변수 변동에 따른 혼 시스템의 특성을 정확하게 분석할 수 있는 혼 시스템 모델링 방법을 제시하고자 한다.

전기식 혼은 이 압력으로 혼을 이용하여 소리를 증폭시키는 구조이며 다이어프램 탄성부의 공진주파수와 같은 순음과 순음의 하모닉 성분들로 합성된 경적음을 발생시킨다. 전기식 혼의 음색은 순음의 주파수와 하모닉 성분들의 크기에 따라 결정된다.

한편, 재생 주파수 범위가 좁은 전기식 혼으로는 자동차 음향 엔지니어가 원하는 차종별로 다양한 경적음 음색을 구현할 수가 없으므로 광대역 음을 발생시킬 수 있는 electrodynamic 형태의 exciter를 사용하는 moving coil 혼 드라이버가 필요하다. 전기식 가진기가 단일음 또는 그 배음들을 재생하는 협대역인데 비하여 moving coil형은 광대역 주파수 범위를 재생할 수 있기 때문에 자동차 회사들에서 음향 혼 드라이버 시스템 개발이 점차 활발하게 연구되고 있다.

또한, 혼 시스템에 DSP를 연계시켜서 필요한 음을 설계하거나 인공적인 소리를 발생시킬 수 있다. 이러한 혼 시스템 제품을 개발한다면 차량 혼 시스템에 필요한 음향을 나타낼 수 있으므로 차량의 브랜드 가치를 높이는 데 크게 기여할 수 있다. 혼 시스템의 활용성 증대를 위하여 다양한 연구가 이루어져 왔으나 혼 시스템을 규명하는 방법 등에 어려움이 있어서 실제 현장에서는 정량적인 접근보다는 설계자들의 경험을 바탕으로 정성적인 혼 시스템 설계가 주로 행해져 왔다. 그러나, 음질(sound quality)에 대한 소비자들의 요구를 수용하려면 혼 시스템의 특성을 정량적으로 정확하게 파악하는 것이 매우 중요해지고 있다.

이 논문에서는 혼 시스템을 일반적인 라우드스피커 시스템처럼 정량적으로 표현하여 혼 시스템의 특성을 쉽고도 빠르게 파악하면서 동시에 혼 시스템의 설계 변수 변동에 따른 혼 시스템의 특성을 정확하게 분석할 수 있는 혼 시스템 모델링 방법을 제시하고자 한다.

## 2. 혼 드라이버 시스템 모델링

### 2.1 혼 드라이버 매개변수 규명 이론 및 규명

혼 시스템을 개략적으로 표시하면 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다. Fig. 3에서  $S_d$ 는 혼 드라이버 다이어프램의 유효 단면적을 나타내며  $P_d$ 는 다이어프램과 phase correction plug(PCP) 사이에서의 음압을 나타낸다.  $Z_{al}$ 은 다이어프램에 부하되는 음향 임피던스를 나타낸다.  $L_{cl}$ 은  $\Sigma$ (PCP의 통로의 실제 길이  $i \times$ 통로의 단면적  $i$ )= $S_t \times L_{cl}$ 의 관계에서 구할 수 있다.  $S_t$ 는 혼의 목(throat) 단면적을 나타내며  $V_{c0}$ 는 다이어프램과 PCP 사이의 체적을 나타낸다.  $P_t$ 는 혼의 목에서의 음압을 나타내며  $Z_t$ 는 혼의 목에 부하되는 음향 임피던스를 나타낸다.

$S_m$ 과  $P_m$ 은 각각 혼의 입(mouth)에서의 단면적과 음압을 나타내며  $Z_{ar}$ 은 혼의 입에서의 음향 방사 임피던스를 나타낸다. 이를 등가 전기회로로 표시하면 Fig. 4와 같다.

PCP전까지의 혼 드라이버의 구성 방정식은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다<sup>(2)</sup>.

$$\begin{Bmatrix} E \\ I \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_d \\ U_d \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{S_d Z_e}{Bl} & \frac{Bl}{S_d} (1 + Bl^2 Z_e Z_m) \\ \frac{S_d}{Bl} & \frac{Z_m}{Bl S_d} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_d \\ U_d \end{Bmatrix}$$

식 (1)에서  $E$ 와  $I$ 는 각각 혼 드라이버 전극에서 측정된 전압과 전류를 푸리에 변환한 결과이며,  $U_d$ 는 다이어프램에 의한 체적속도로 다이어프램의 속도 $\times$ 다이어프램의 유효단면적을 나타낸다.  $Z_e$ 는 Fig. 4의 좌측의 전기부의 전기 임피던스를 의미하며  $Z_m$ 은 Fig. 4의 중앙의 기계 임피던스를 나타낸다.  $Bl$ 은 혼 드라이버의 자기장 밀도 $\times$ 보이스 코일의 길이인 힘 요소( $T \times m$ )이다. 혼 드라이버의 다이어프램에 부하되는 다이어프램의 뒷 체적과 앞 체적에 의한 컵플라이언스와 음향 질량 및 음향 손실, 길이  $L_{cl}$ 에 의한 pipe 부분 전달함수  $T_{pipe}$  그리고 연결된 혼의 음향 특성 전달함수  $T_{horn}$ 들을 모두 포함하는 입력 음향 임피던스  $Z_{al}$ 은  $P_d/U_d$ 로 표현된다. 이 관계식

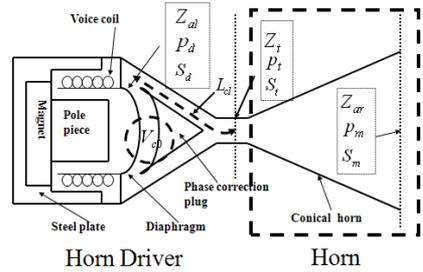


Fig. 3 Horn driver speaker system

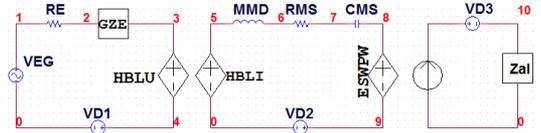


Fig. 4 Representation of equivalent electrical circuit of horn-driver speaker system

들을 식 (2)에서 식 (4)까지 나타냈다.

$$Z_{al} = \frac{P_d}{U_d} \quad (2)$$

$$T_{pipe} = \frac{P_t}{P_d} \quad (3)$$

$$T_{horn} = \frac{P_m}{P_t} \quad (4)$$

한편, 혼의 입에서의 음향 민감도(sensitivity)는 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{P_m}{E} = \frac{P_d}{E} T_{pipe} T_{horn} = \frac{Z_{al}}{B + AZ_{al}} T_{pipe} T_{horn} \quad (5)$$

또한, 혼 시스템의 전체 등가 전기 임피던스  $Z_{total}$ 은 식 (6)과 같다.

$$Z_{total} = \frac{E}{I} = \frac{B + AZ_{al}}{D + CZ_{al}} \quad (6)$$

Lemaitre는  $Z_{al}$ 을 식 (7)과 같이 표현하였으나<sup>(2)</sup>, 이것은 혼 드라이버의 다이어프램부의 음향질량과 음향 손실 및 다이어프램 후면의 음향 컵플라이언스를 고려하지 않은 것이다. 이 논문에서는 이러한 항목들을 모두 고려하여 모델링하였다. 이렇게 수정한

식은 식 (8)과 같이 표현할 수 있다. 식 (8)에서  $C_{abr}$ ,  $M_{abr}$ 와  $R_{abr}$ 는 혼 드라이버 다이어프램 후면에서의 부피에 의한 음향 컴플라이언스, 음향 질량 및 음향 손실을 각각 나타내며  $C_{ac0}$ ,  $M_{abf}$ 와  $R_{abf}$ 는 다이어프램 전면에서의 부피에 의한 음향 컴플라이언스, 음향 질량 및 음향손실을 각각 나타낸다.

$$Z_{al} = \left( j\omega C_{ac0} + \frac{\tanh(jkL_{cl} + \tan^{-1}(\zeta_r / Z_{al}))}{\zeta_r} \right)^{-1} \quad (7)$$

$$Z_{al} = \left( j\omega(C_{ac0} + C_{abr}) + \frac{\tanh(jkL_{cl} + \tan^{-1}(\zeta_r / Z_{al}))}{\zeta_r} \right)^{-1} + j\omega(M_{abr} + M_{abf}) + R_{abr} + R_{abf} \quad (8)$$

혼 드라이버의 TS(Thiele Small) 매개변수는 기존에 알려진 일반적인 라우드스피커 TS 매개변수 규명법으로는 규명할 수가 없다. 왜냐하면 혼 드라이버 다이어프램이 compression chamber안에 있으므로 free air 상태에서의 전기 임피던스를 측정할 수가 없어서 이 데이터들을 사용하는 일반적인 TS 매개변수 규명법을 사용할 수 없기 때문이다<sup>(3)</sup>. 혼 드라이버는 다이어프램 앞에 포트가 있는 마이크로스피커와 유사한 구조이므로 가상 스피커개념<sup>(3,4)</sup>을 이용한 규명법을 사용할 수도 있을 것 같으나 엄밀하게는 이 방법의 적용도 불가능하다. 마이크로스피커의 경우에는 전면그릴을 제거한 후에 후면을 밀폐박스 또는 벤트박스 구조로 하여 전기 임피던스를 측정 후, 그 데이터들을 이용하여 가상 라우드스피커의 TS 매개변수를 규명할 수 있다<sup>(4)</sup>. 그러나, 혼 드라이버의 경우에는 compression chamber에 다이어프램이 부착되어 있고 compression chamber를 제거한다면 다이어프램도 함께 제거되어 혼 드라이버 형태를 일반적인 밀폐 박스 또는 벤트 박스 상태로 구현할 수 없기 때문이다. 혼 드라이버 입구를 막으면 밀폐 박스 안쪽에 다이어프램을 경계로 두 군데의 밀폐된 방이 형성되므로 이를 밀폐 박스라 여길 수 있다. 또한, 혼 드라이버 자체는 다이어프램 뒤에 밀폐 공간이 있고 앞쪽에 박스 체적 및 포트를 갖는 4차 밴드패스 시스템이므로 이는 포트박스로 근사화 할 수 있다.

따라서, 이 논문에서는 이와 같은 사실에 근거하

여 TS 매개변수를 규명하였다<sup>(3-10)</sup>. 혼 드라이버의 도면을 이용하거나 또는 측정으로  $L_{cl}$ 과  $V_{c0}$ 을 구할 수 있다. PCP의 등가 길이  $L_{cl}$ 은 compression chamber에서 PCP를 분해한 후, 직접 길이와 단면적을 측정하여 계산할 수 있다. 다른 방법으로는 혼 드라이버에 길이  $L_p$ 를 알고 있는 파이프를 연결한 후, 파이프 입구에서 입력 음향 임피던스  $Z_p$ 를 측정하며 이것의 역수인 음향 어드미턴스 이론식인 식 (9)의 데이터에서 local maxima를 비교하여 등가 길이  $L_{cl}$ 를 식 (10)에서 구할 수 있다<sup>(2,11)</sup>. 또한, 다이어프램과 PCP사이의 부피  $V_{c0}$ 는 저주파수에서의  $Y^p$ 의 관계식인 식 (11)에서도 구할 수 있다.

$$Y^p = \frac{1}{Z^p} = j\omega C_{ac0} + \frac{1}{\zeta_r} j \tan\{k(L_{cl} + L_p)\} \quad (9)$$

$$L_{cl} = (2n - 1)/(4f_{an}) - L_p \quad (10)$$

$$C_{ac0} = V_{c0} / (\rho c^2) = \min(Y^p) / f \quad (11)$$

여기서,  $f_{an}$ 은 input admittance  $|Y^p|$ 의 maxima의  $n$  번째(또는  $(2n-1)$ 차,  $n$ 은 자연수) 공진주파수를 나타낸다. 음향 임피던스 측정을 하기 위하여 Fig. 5와 같은 음향 임피던스 측정장치를 직접 제작하여 음향 임피던스를 측정하였다. 이 데이터들로부터 힘 요소  $Bl$ 은 식(12)로 표현할 수 있다.

$$Bl = S_d \sqrt{\rho c^2 \frac{L^p L^c}{(L^p - L^c)} \frac{(V_{eq}^p - V_{eq})}{V_{eq}^p V_{eq}}} \quad (12)$$

여기서,  $L^c = \frac{R_{ec}}{\omega_0^c Q_e^c}$ ,  $L^p = \frac{R_{ec}}{\omega_0^p Q_e^p}$  로 등가 기계 컴플라이언스(compliance)이다.  $R_{ec}$ 는 혼 드라이버의 입구를 막은 상태에서  $dc$ 에서 측정한 전기 저항값을 나타낸다.  $Q_e^c$ 와  $\omega_0^c$ 는 혼 드라이버의 입구를 막은 상태에서 측정한 전기적인  $Q$ 값과 circular 공진주파수를 각각 나타내고,  $Q_e^p$ 와  $\omega_0^p$ 는 혼 드라이버에 길이가  $L_p$ 인 막힌 파이프를 연결한 상태에서 측정한 전기적인  $Q$ 값과 circular 공진주파수를 각각 나타낸다.  $L^c$ 는 혼 드라이버의 목을 막은 상태에서 그리고  $L^p$ 는 혼 드라이버에 길이  $L_p$ 인 막힌 파이프를 연결한 후에 측정한 전기 임피던스 곡선 데이터로

부터 TS 매개변수 규명법으로 구한 매개변수들로부터 각각 규명할 수 있다.

또한,  $V_{eq} = V_{c0} + S_r \times L_{cl}$ 로 다이어프램과 목 입구사이의 부피를 나타내며  $V_{eq}^p = V_{eq} + S_r \times L_p$ 는  $V_{eq}$ 에 파이프 추가로 늘어난 부피를 더한 결과이다. Fig. 5와 같이 혼 드라이버에 길이가 71 mm, 직경이 18 mm인 파이프를 연결하여 측정된 입력 음향 임피던스를 구하였고 이것의 역수인 음향 어드미턴스 결과를 Fig. 6에 나타냈다. 이론에 따르면 Fig. 6에서 저주파수 영역에서 파선처럼 주파수가 작아짐에 따라 음향 어드미턴스도 작아져야 하는데 오히려 커지는 경향을 나타냈다.

따라서, 식 (11)을 사용하여 다이어프램 앞 부분의 체적  $V_{c0}$ 에 의한 음향 컴플라이언스  $C_{ac0}$ 를 구할 수 없었다. 시험 결과가 이러한 경향을 나타낸 이유는 Fig. 5에 사용된 피에조 가진기가 저주파수 영역에서 동작을 거의 하지 않은 결과로, 이러한 방법으로  $C_{ac0}$ 를 구하는 것은 불가능 하였다. 따라서, 이 연구

에서는 compression chamber를 분해하여  $C_{ac0}$ 를 구하였다.

Fig. 7은 혼 드라이버의 compression chamber를 나타내고 오른쪽은 PCP를 제거한 상태를 나타낸다. PCP를 분해하여 측정한 다이어프램과 PCP 사이의 간격은 약 1.0 mm이었고 이 값에 다이어프램의 유효단면적을 곱한 것이  $V_{c0}$ 이다. 이 결과로부터  $C_{ac0}$ 를 구하였으며, PCP 사이의 간격은 TS 매개변수를 규명하는 과정에서 검증되었다.

또한, PCP를 제거한 후, 측정된 compression chamber의 6개 통로의 단면적×통로의 길이는 목 단면적× $L_{cl}$ 과 같다는 공식을 사용하여 구한  $L_{cl}$ 은 53 mm였다. 시험에 사용한 혼 드라이버 다이어프램의 유효직경은 84 mm이고 질량은 7.335 g이다. 이 논문에서는 Lemaitre<sup>(2)</sup>가 제안한 방법과는 다른 방법으로 혼 드라이버의 TS 매개변수를 규명하였다. 혼 드라이버의 TS 매개변수들을 규명하기 위하여 두 번의 전기 임피던스 시험을 하였다. Fig. 8에서 실선은

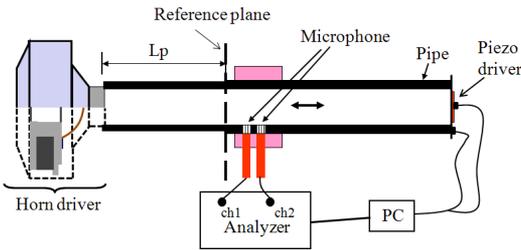


Fig. 5 Schematic diagram of the input acoustic impedance measurement for horn driver with elongated pipe

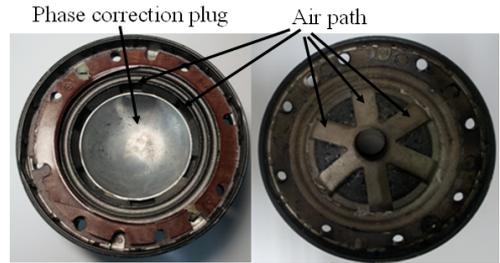


Fig. 7 Photograph of compression chamber of horn driver, with(left) and without phase correction plug(right)

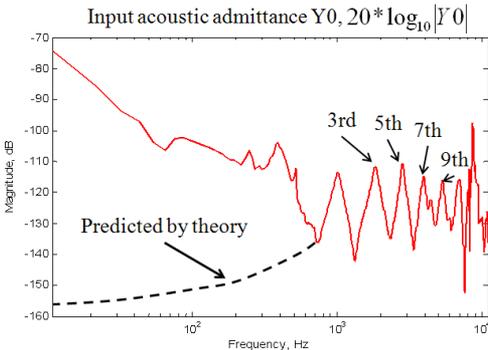


Fig. 6 Measured input acoustic admittance(solid line) of the compression chamber loaded with 71 mm closed pipe

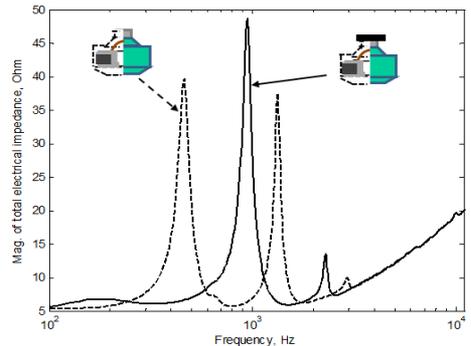


Fig. 8 Comparison electrical impedance magnitude with horn driver; closed(solid) and open horn driver(dashed)

혼 드라이버의 목 입구를 동전으로 막은 상태에서 그리고 파선은 목 입구가 열린 상태에서 각각 측정 한 전기 임피던스의 크기를 나타냈다. 2차 공진주파수가 1차 공진주파수에 미치는 영향이 작다는 가정 하에 참고문헌<sup>(3,4,6,12-15)</sup>의 방법을 사용하였다.

혼 드라이버 입구를 막은 상태는 밀폐박스 상태와 등가이고 혼 드라이버 입구를 개방한 상태는 포트 박스와 등가인 상태를 나타내므로 이러한 관계를 이용하여 혼 드라이버의 TS 매개변수를 규명하였다. 규명된 혼 드라이버의 TS 매개변수는  $Bl=13.1\text{ Tm}$ ,  $f_0=583\text{ Hz}$ ,  $Q_{ms}=7.23$ ,  $Q_{es}=0.72$ ,  $M_{md}=7.3\text{ g}$ ,  $R_{ms}=3.84\text{ Ns/m}$ ,  $C_{ms}=9.84\text{ }\mu\text{m/N}$ ,  $M_{abr}=5.81\text{ kg/m}^4$ ,  $C_{abr}=0.053\text{ nm}^5/\text{N}$ ,  $K_{rm}=0.00053$ ,  $E_{rm}=0.87$ ,  $K_{xm}=0.0035$ ,  $E_{xm}=0.76$  이었다. 규명된 데이터를 이용하여 혼 드라이버의 입을 막은 상태로 전기 임피던스를 시뮬레이션한 결과와 시험결과를 Fig. 9에 비교하였다.

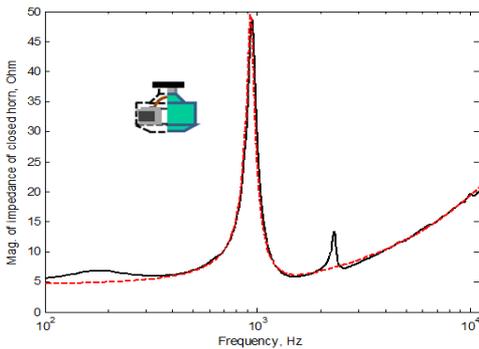


Fig. 9 Comparison electrical impedance magnitude for closed horn driver; test(solid) and identified(dash-dot)

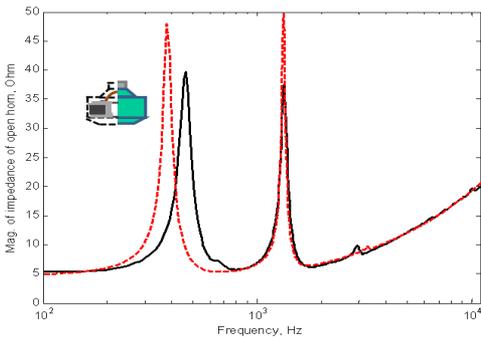


Fig. 10 Comparison electrical impedance magnitude for open horn driver; test(solid) and identified(dashed)

2차 공진을 무시한 모델이었으므로 2차 공진주파수를 제외하고는 시험결과와 시뮬레이션 결과가 잘 일치함을 나타냈다. 1차 공진주파수는 948 Hz이고 2차 공진주파수는 2,293 Hz였다. Fig. 10은 목을 개방한 혼 드라이버의 전기 임피던스를 시뮬레이션으로 구한 결과와 비교하였다.

시험에서 1차 공진주파수는 463 Hz이고 2차 공진주파수는 1,335 Hz, 그리고 3차 공진주파수는 2,929 Hz였다. 시뮬레이션에서는 각각 377 Hz와 1,324 Hz 및 3,284 Hz로 오차는 -18.6%와 0.8%와 12.1%를 나타냈다. 규명된 TS 매개변수의 정확도를 검증하기 위하여 힘 요소  $Bl$ 을 직접 측정하여 비교하기로 하였다.

혼 드라이버의 자기장 밀도를 측정하기 위하여 0.1 mT까지 측정할 수 있는 Kanetec사의 모델 TM-601 가우스 미터로 혼 드라이버의 앞판(front plate)과 바닥판(bottom plate) 사이의 갭 가우스를 측정하였다. 갭 간격이 좁기 때문에 탐침이 충분히 들어가지 않아서 표면 근처에서 여러 번 측정한 결과들로부터 얻은 평균 자기장 밀도  $B$ 는 1.15T이었으며 여기에 음성 코일의 길이를 곱한  $Bl$ 값은 11.13 Tm였다.

비교를 위하여 유한요소 해석법으로 혼 드라이버의 자기장을 해석하였다. FEMM(Finite Element Method Magnetics) 소프트웨어를 사용하여 최대칭 2차원 유한요소법을 이용한 전자기장 해석으로 장(field) 문제 해석을 수행하였다. 유한한 공간을 해석하는 유한요소법으로 무한 공간에 대한 영향을 고려하는 장 문제를 해결하기 위하여 다음과 같은 경계조건을 사용하였다. 경계조건은 반지름이 10 cm인 반원에 asymptotic 경계조건을 갖는 mixed type 경계조건을 사용하였다. 이렇게 함으로써 무한 공간에 대한 영향이 반원의 경계에서 연속성을 갖도록 하여 근사해를 구하는 방법을 사용하였다<sup>(16)</sup>. 혼 드라이버의 보이스 코일은 AWG 30번으로 직경 0.22 mm이었고 보빈에 46회 감겨 있었다. 자석은 NdFeB 32GOe를 사용하였다. 보이스 코일부는 삼각형 유한요소로 모델링하였으며, 한번의 최대길이는 0.1 mm로 하였다.

혼 드라이버의 다른 부분들은 삼각형 요소의 한번의 길이가 최대 1 mm 이내로 자동으로 모델링하여 해석을 수행하였다. 총 6,266개의 삼각형 요소를

사용하여 자기장 해석으로 구한 자기 플럭스 밀도 B 곡선을 Fig. 11 상부에 나타냈고 하부에는 보이스코일을 통과하는 선분 AB 위치에서의 자기장 밀도 곡선을 나타냈다. 이 때 A점과 B점은 각각 보이스코일의 상단과 하단을 각각 나타낸다. 보이스코일부의 자기 플럭스 평균 밀도는 약 1.32 T로 힘 요소는 12.75 Tm였다. TS 매개변수로 규명된 Bl값인 13.1 Tm와는 -2.7%의 오차를 나타냈다.

### 2.2 혼 음향특성 해석 및 측정

Fig. 12는 혼 시스템에 사용되는 콘 혼의 형태를 보여준다.

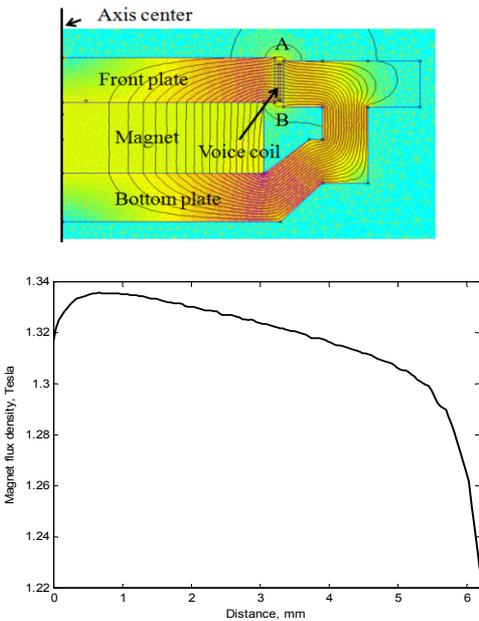


Fig. 11 Upper: Magnetic flux density flow pattern of 100 watt horn driver, lower: magnetic flux density through voice coil between point A and B

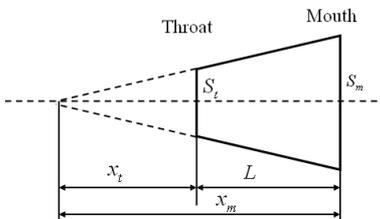


Fig. 12 Conical horn dimensions

콘(cone) 형태를 가진 콘 혼의 음향 모델링은 다음과 같이 2가지 방법으로 구분할 수 있다.

첫 번째는 해석적인 한 가지 방법으로 wave propagation model을 이용한 모델링 방법이다. 혼 mouth의 음향방사 임피던스를  $Z_{ar}$ 라 할 때에 혼의 목에서의 음향 임피던스  $Z_{at}$ 는 식 (13)과 같다<sup>(2)</sup>.

$$Z_{at} = \frac{\zeta_t}{1/(jkx_t) + \tanh\left\{ jkL + \tanh^{-1}\left(\frac{\zeta_m}{Z_{ar}} - \frac{1}{jkx_m}\right)\right\}} \quad (13)$$

여기서,

$$k = \frac{\omega}{c} \left( 1 + 3 \cdot 10^{-5} \frac{1-j}{2\pi r_t \sqrt{f}} - 3 \cdot 10^{-8} \frac{j}{2\pi r_t^2 f} \right) \quad (14)$$

$$\zeta_t = \frac{\rho c}{S_t} \left( 1 + \frac{7.61 \cdot 10^{-4}}{r_t \sqrt{f}} - j \frac{4.89 \cdot 10^{-6}}{r_t^2 f} \right) \quad (15)$$

$$\zeta_m = \frac{\rho c}{S_m} \left( 1 + \frac{7.61 \cdot 10^{-4}}{r_m \sqrt{f}} - j \frac{4.89 \cdot 10^{-6}}{r_m^2 f} \right) \quad (16)$$

Lemaitre<sup>(2)</sup>에 따르면 혼 드라이버의 다이어프램과 혼 목에서의 음압비인  $T_{pipe}$ 와 혼 목에서의 음압과 혼 입에서의 음압비인  $T_{horn}$ 은 각각 식 (17)과 식 (18)로 표현할 수 있다.

$$T_{pipe} = \frac{1}{\cos(kL_{cl}) + j\zeta_t / Z_{at} \sin(kL_{cl})} \quad (17)$$

$$T_{horn} = \frac{x_t}{x_m} \frac{1}{\cos(kL) + j\sin(kL) \left( \frac{\zeta_m}{Z_{ar}} - \frac{1}{jkx_m} \right)} \quad (18)$$

한편, 해석적인 두 번째 방법은 Leach<sup>(17,18)</sup>가 사용한 방법으로 혼 형태가 Salmon계의 혼 형태라면 혼 내에서의 음압은 quasi one dimensional Webster 혼 방정식을 만족한다고 가정하여 two port 네트워크 이론을 사용하여 혼을 모델링하였다. 이 방법으로 혼을 모델링하면 PSPICE 소프트웨어를 사용하여 시간과 주파수 영역에서 혼의 특성을 예측할 수 있다. 그러나, Leach 방법은 콘 혼 모델이 Lemaitre<sup>(2)</sup>방법과 같이 explicit 형태로 나타나지 않고 two port

시스템으로 PSPICE에서 구현할 수 있으므로 시물레이션 데이터와 시험 데이터를 비교 검토한다든지 시물레이션 데이터를 저장하는 작업 등의 불편함이 있다.

두 번째는 실험적인 방법으로 콘 혼의 목에서의 입력 음향 임피던스를 측정 한 후, 이를 혼 시스템에 사용하는 하이브리드 시스템을 구성하는데 사용할 수 있다. 혼의 형태가 특이하여 해석적으로 혼 모델을 구하기 어려운 경우에 유용하게 사용할 수 있다.

입력 음향 임피던스를 측정하는 장치로 Benade<sup>(19)</sup>는 piezo disk driven(피에조 디스크 구동) 방식의 임피던스 헤드를 제안하였다. 피에조 드라이버의 경우에는 드라이버 피스톤의 음향 임피던스가 입력 음향 임피던스보다 매우 크다고 할 수 있다. 드라이버 가진 신호로는 적분된 신호를 사용하여 임피던스 헤드 근처에서 음압을 측정하면 임피던스 헤드의 근처에서 측정된 음압이 입력 임피던스에 비례하므로 입력 임피던스를 측정할 수 있다고 제안하였다.

Salava<sup>(20)</sup>는 드라이버에 가진되는 입력을 제어하여 임피던스 헤드에서 일정한 부피 속도를 발생시키고 임피던스 헤드 근처에서 flush 마운트된 마이크로 폰으로 음압을 측정하여 혼의 입력 음향 임피던스를 측정하는 방법을 제안하였다.

또 다른 방법으로는 긴 튜브의 한쪽 끝에 드라이버를 설치하고 반대 쪽 끝에 혼을 설치한다. 그 사이에 마이크로 폰을 설치하고 드라이버에 단일 펄스 입력을 가진 후 마이크로 폰을 지나가는 입력 음압과 시간차를 두고 나타나는 반향 파를 측정하여 혼의 입력 음향 임피던스를 측정하는 방법도 제안하였다.

Dalmont 등은 임피던스 헤드의 가진기로 정전형 마이크로 폰을 사용하고 동일 평면상의 대각 위치에 2개의 측정 마이크로 폰을 사용하여<sup>(21)</sup> 넓은 주파수 범위까지 입력 음향 임피던스를 측정하는 방법을 제안하였다.

이 논문에서는 Benade 등이 제안한 피에조 디스크를 가진기로 사용하는 음향 임피던스 헤드를 제작하였다. 이 장치를 사용하여 Seybert 등이 제안한 음파분리 이론(wave decomposition theory)을 이용하여 입력 음향 임피던스를 two micro phone법을 사용하여 측정하였다<sup>(22,23)</sup>.

제작된 입력 음향 임피던스 측정 장비는(Fig. 5)

관내 직경이 18 mm로 혼의 목 직경과 같게 하였다. 음파 분리 이론에 따른 관 직경에 따른 관내 평면파 조건은  $f_{cut\ off}$ 는 9,528 Hz 이었고 음파 분리 이론에 따른 2개의 마이크로 폰 사이의 거리에 따른 2차 임계 주파수  $f_{2nd\ critical}$ 은 9,270 Hz였다. 이를 고려하여 피에조 드라이버를 가진 시키는 데에 사용할 가진 신호로 백색잡음을 차단 주파수가 10 kHz인 디지털 저역 통과 필터링을 한 band limited 백색 잡음을 사용하여 관심 있는 주파수 범위에서 가진 에너지가 집중되도록 하였다.

샘플링 주파수는 44.1 kHz이었고, LinearX사의 1/4인치 마이크로폰(모델 M31) 2개를 사용하여 약 10초 동안 데이터들을 취득하였다. 취득한 데이터들을 블록당 4,096개의 데이터로 블록화하고 여기에 hanning 윈도우를 적용하였다. 블록 데이터들을 25% 오버랩 되게하여 구한 스펙트럴 밀도 함수들을 약 400회 이상의 평균을 실시하여 랜덤 오차를 줄

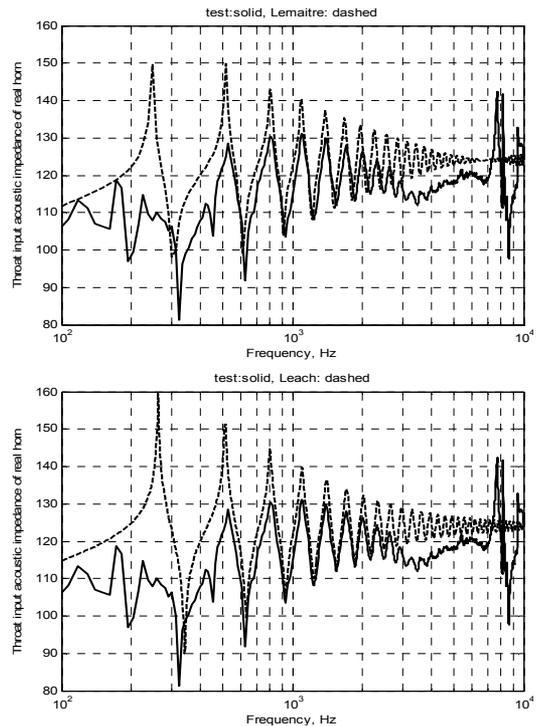


Fig. 13 Comparison input acoustic impedance of real horn(length 535 mm, throat diameter 18 mm, mouth diameter 80 mm, cone angle 6.6°) with test(solid) and upper: Lemaitre method, lower: Leach method(dashed)

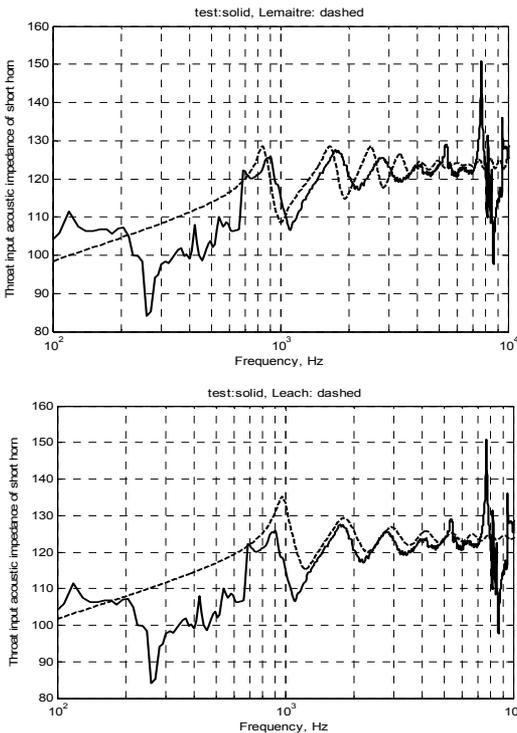
었다. 이들 데이터들로부터 입력 음향 임피던스를 계산하였다. 또한, 측정장비에서 채널간 그리고 마이크로 폰 간의 응답크기 및 위상차를 Seybert가 제안한 방법으로 교정하여 데이터를 분석하였다<sup>(22)</sup>. Fig. 13에는 two microphone법으로 구한 실제 혼의 입력 음향 임피던스 크기를 Lemaitre(식 (13)) 방법과 Leach 방법을 상호 비교하였다.

혼 길이가 535 mm, 목 직경은 18 mm, 혼의 입 직경은 80 mm로 콘 각도는 6.6°였다. 6번째 피크부터 공진주파수에 차이가 나타났다. 시험결과, Lemaitre 방법과 Leach 방법이 각각 1,712 Hz, 1,680 Hz와 1,718 Hz를 나타냈다. Leach 방법이 시험 결과에 잘 일치함을 보였으며 후속 피크들에서도 Leach 방법이 Lemaitre 방법보다 시험 결과와 잘 일치함을 보였다. Fig. 14에는 혼 길이가 136 mm, 혼 목 직경은 18 mm, 혼의 입 직경은 90 mm로 콘 각도는 27.9°였다. 콘 각도가 큰 경우에는 Lemaitre

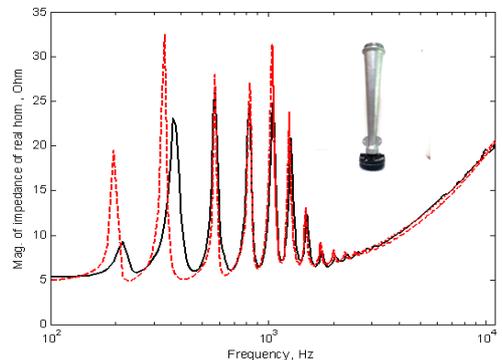
방법은 첫 번째 피크부터 시험결과와 잘 일치하지 않았으며, Leach 방법은 다섯 번째 피크까지도 피크 공진주파수가 시험 결과와 잘 일치함을 보였다. 따라서, 콘 각도가 큰 콘 혼을 모델링 할 경우에는 Leach 방법을 사용하는 것이 타당하다고 여겨진다.

### 2.3 혼 시스템 실험 및 토의

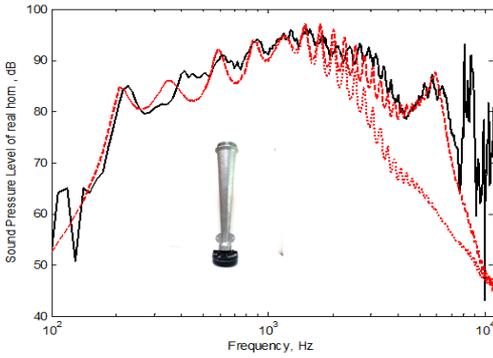
정확한 혼 시스템 예측을 위해서 혼 모델을 Leach 방법으로 적용하고 PSPICE에서 혼 모델을 사용하여 혼 또는 파이프의 입력 임피던스를 계산하여 이를 출력한다. 이 데이터를 Lemaitre 방법인 식 (13)의  $Z_{in}$  대신에 식 (5)에 대입하여 음향 민감도를 예측하고, 식 (6)에 대입하여 전체 등가 임피던스를 예측하는데 사용할 수 있다. 이와 같은 방식으로 복잡한 형태의 혼에 대해 해석적인 방식 대신에 대상 혼의 목에서의 입력 음향 임피던스를 측정하고 이 데이터를  $Z_{in}$  대신에 식 (5)와 식 (6)에 대입하여 하이브리드 방식의 혼 시스템 예측을 할 수 있음을 제안한다. 이제 규명된 혼 드라이버의 TS 매개변수와 Lemaitre가 사용한 혼의 모델인 식 (13)을 이용한 시뮬레이션과 시험결과를 비교하여 혼 시스템 모델을 검증하고자 한다. 첫 번째로 길이가 535 mm인 real cone horn을 혼 드라이버에 장착한 혼 시스템의 전기 임피던스를 시험결과와 시뮬레이션 결과(식 (6))를 상호 비교하였다. Fig. 15를 살펴보면, 시험 데이터(실선)와 보정을 안한 결과(점선) 및 질량보정과 저역통과 필터 보정을 한 결과(파선)가 500 Hz



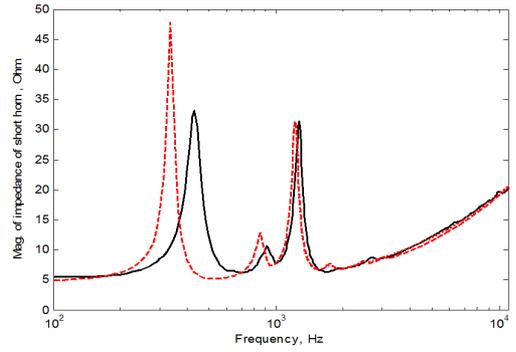
**Fig. 14** Comparison input acoustic impedance of short horn(length 136 mm, throat diameter 18 mm, mouth diameter 90 mm, cone angle 27.9°) with test(solid) and upper: Lemaitre method, lower: Leach method(dashed)



**Fig. 15** Comparison input electrical impedance of real horn(length 535 mm, throat diameter 18 mm, mouth diameter 80 mm, cone angle 6.6°) system with test(solid), dotted(no correction) and dashed(correction  $H_{md}(2,3)$  &  $H_{lp}(4.6,8)$ )



**Fig. 16** Comparison acoustic sensitivity of real horn (length 535 mm, throat diameter 18 mm, mouth diameter 80 mm, cone angle 6.6°) system with test(solid), dotted(no correction) and dashed(correction  $H_{md}(2,3)$  &  $H_{lp}(4.6,8)$ )

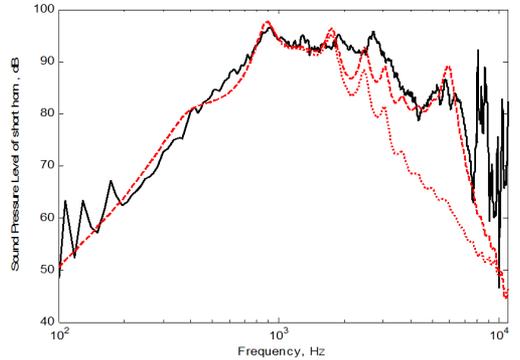


**Fig. 17** Comparison of input electrical impedance of short horn(length 136 mm, throat diameter 18 mm, mouth diameter 90 mm, cone angle 27.9°) system with test(solidline), dotted(no correction) and dashed(correction  $H_{md}(2,3)$  &  $H_{lp}(4.6,8)$ )

이상에서 잘 일치함을 보여준다.

저주파수 대역에서의 부정확성은 혼 드라이버 내부의 누설 또는 다이어프램의 2차 공진 영향으로 추정되었다. 음향 민감도 결과를 Fig. 16에 나타냈다. 실선은 시험결과이며 점선은 Lemaitre가 사용한 음향 민감도 식 (5)에 수정된  $Z_{al}$ (식 (8))을 적용하여 예측한 음향 민감도이다.

2,000 Hz까지는 시험결과와 잘 일치하지만 Lemaitre 논문에서와 같이 고주파수에서는 민감도가 낮아지는 현상이 나타났다. 이것은 고주파수에서 다이어프램의 다이내믹 질량 감소 효과를 고려하지 않은 결과이다. 따라서, 이를 보정할 질량 보정 필터  $H_{md}$  ( $F_{md}, Q_{md}$ )를 적용할 필요가 있다<sup>(3,14)</sup>. 여기서, 천이 주파수  $F_{md}$ 는  $F_{md}=ka$ 의 배수를 의미하며 이 값은 Fig. 9의 혼 드라이버가 밀폐되었을 때에 2차 공진 주파수를 기준하면  $F_{md}=1.77$ 이다. 혼 드라이버 목을 개방한 상태에서의 Fig. 10의 3차 공진주파수가 다이어프램의 질량 감소 효과인 것으로 추정하면  $F_{md}=2.25$ 를 나타내므로, 중간값인  $F_{md}=2$ 를 사용하였다. 또한, 다이어프램의 2차 공진주파수 이후의 급격한 음향 민감도 감소를 고려할 저역 통과 필터  $H_{lp}(F_{lp}, Q_{lp})$ 도 적용하여야 넓은 주파수 범위에서 혼 시스템을 예측할 수 있다. 질량보정 필터와 저역 통과 필터를 적용한 예측(파선)이 시험 결과와 잘 일치함을 나타냈다. 임의의 짧은 혼(길이 136 mm, 목 직경 18 mm, 입 직경 90 mm, 콘 각도 27.9°)을 장착한 혼 시스템에 대하여 시험과 시뮬레이션을 수행



**Fig. 18** Comparison acoustic sensitivity of short horn (length 136 mm, throat diameter 18 mm, mouth diameter 80 mm, cone angle 27.9°) system with test(solidline), dotted(no correction) and dashed(correction  $H_{md}(2,3)$  &  $H_{lp}(4.6,8)$ )

하여 얻은 입력 전기 임피던스와 음향 민감도를 각각 Fig. 17과 Fig. 18에 나타냈다. Fig. 15와 Fig. 17을 살펴보면 질량 보정 필터의 영향이 전기 임피던스에서는 크지 않음을 보인다. 큰 각도가 큰 혼에 대해서도 비교적 음향 민감도가 시험 결과를 잘 예측함을 나타냈다.

### 3. 결론

이 연구에서는 혼 시스템을 모델링하였고 이를

예측하기 위하여 혼 드라이버의 TS 매개변수를 규명하였다. Lemaitre 등의 연구에 사용한 혼 드라이버는 혼 목을 닫은 상태에서 2차 공진주파수와 1차 공진주파수가 서로 멀리 떨어져 있으며, 2차 공진이 현저하게 나타나지 않았다. 따라서, 혼 드라이버를 1차 모델로 고려하여 혼의 TS 매개변수 일부를 규명하여 혼 시스템 해석을 수행하였다. 이 논문에서 사용한 혼 드라이버는 혼의 목을 닫은 상태에서 2차 공진주파수가 비교적 1차 공진주파수와 근접한 상태였으나 1차 모델로 모델링하여 TS 매개변수를 규명하였다.

이러한 현상은 다이어프램이 2차 공진을 일으키거나 또는 다이어프램부의 공기 누설이 원인일 것으로 추정되었다. 이 논문에서는 Lemaitre 등이 규명하지 않은 혼 드라이버의 TS 매개변수들을 규명하였고 혼 드라이버 매개변수의 변동에 따른 혼 시스템 특성을 예측할 수 있는 모델을 완성하였다.

이 논문에서는 (1) 규명된 혼 드라이버의 힘 요소인  $BI$ 를 검증하기 위하여 혼 드라이버를 분해하여 혼 드라이버의 갭 가우스를 측정하였으며 또한 유한 요소법을 사용한 전자기장 해석법으로도  $BI$ 를 계산하였다. 세 가지 방법으로 규명한 힘 요소가 모두 잘 일치함을 보여주기 때문에, 혼 드라이버의 TS 매개변수 규명이 정확하게 수행되었음을 알 수 있었다. (2) PCP 내의 공기 통로의 길이와 내부 부피를 입력 음향 임피던스를 측정하여 규명하려는 시도를 하였으나, 음향 임피던스 측정장치의 가진기로 사용한 피에조 드라이버가 저주파수 대역을 충분히 가진 하지 못하여 측정된 음향 임피던스로부터 이들을 규명할 수 없었다. 내부 부피와 공기 통로의 길이는 PCP를 분해하여 측정한 결과를 사용하여 시스템 예측을 하는데 사용하였다. (3) 혼의 음향 임피던스를 측정하기 위하여 음향 임피던스 측정장치를 제작하여 음향 임피던스를 측정하는 데 사용하였다. (4) 콘 형태의 혼의 음향 임피던스 특성을 Lemaitre와 Leach가 각각 제안한 이론적 방법으로 예측하였고 이 결과들을 시험으로 구한 음향 임피던스를 비교한 결과 Leach 방법이 시험 결과와 잘 일치함을 보였다. 특히, 콘 각도가 큰 경우에도 Leach 모델은 시험결과를 잘 예측함을 알 수 있었다. (5) 혼 드라이버에 콘 혼이 장착된 혼 시스템을 콘 각도가  $6.6^\circ$ 인 실제 혼과 콘 각도가  $27.9^\circ$ 인 임의의 콘 혼을 장착

한 2가지 시스템에 대하여 예측하였다. 전기 임피던스와 음향 응답특성은  $500\text{ Hz}$  이상에서 시험 결과와 잘 일치함을 보여 혼 시스템 모델의 타당성을 보였다. (6) 고주파수 영역에서의 음향특성을 정확히 예측하기 위하여 혼 드라이버의 질량 보정함수와 저역 통과 필터 특성을 적용한 결과 시험결과와 예측 결과가 잘 일치함을 보였다.

## 후 기

이 논문은 2013년도 서일대학교 학술연구비에 의해 연구되었음.

## References

- (1) Rim, K. Y. Park, S. T., An, C. H., Choi, S. K. and Yoo, D. W., 2009, Analysis of Vibration and Acoustic Characteristics for a Shell Horn in a Car, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 573~574.
- (2) Guillaume, L., Boris, L. and Bruno, G., 2008, Model and Estimation Method for Predicting the Sound Radiated by a Horn Loudspeaker - With Application to a Car Horn, Applied Acoustics, Vol. 69, pp. 47~59.
- (3) 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.
- (4) Park, S. T., 2007, Thiele Small Parameters Estimation for Pseudo Loudspeaker within 10 mm Grade Circular-type Microspeaker, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 17, No. 11, pp. 1112~1118.
- (5) 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.
- (6) Park, S. T., 2001, Study on Linear Parameters Identification of Loudspeaker, Journal of the Acoustical Society of Korea, Vol. 21, No. 4, pp. 415~420.
- (7) Thiele, A. N., 1971, Loudspeakers in Vented

Boxes, J. Audio Eng. Soc., Vol. 19, No. 7, pp. 382~392.

(8) Small, R. H., 1972, Direct Radiator Loudspeakers Systems Analysis, J. Audio Eng. Soc., Vol. 20, No. 6, pp. 271~283.

(9) Small, R. H., 1972, Simplified Loudspeaker Measurements at Low Frequencies, J. Audio Eng. Soc., Vol. 20, No. 1 pp. 275~286.

(10) Wright, J. R., 1990, An Empirical Model for Loudspeaker Motor Impedance., J. Audio Eng. Soc., Vol. 38, No. 10, pp. 749~754.

(11) Causse', R., Kergomard, J. and Lurton, X., 1984, Input Impedance of Brass Musical Instruments, Comparison between Experiment and Numerical Method, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 75, No. 1, pp. 241~254.

(12) Bai, M. R. and Chen, R. L., 2007, Optimal Dewsign of Loudspeaker Systems Based on Sequential Quadratic Programming(SQP), J. Audio Eng. Soc., Vol. 55, No. 1/2, 45~54

(13) Bai, M. R. and Liao, J. W., 2005, Acoustic Analysis and Design of Miniature Loudspeakers for Mobile Phones, J. Audio Eng. Soc., Vol. 53, No. 11, pp. 1061~1076.

(14) LEAP Enclosure Shop Reference Manual, 2002, Release 5, LinearX Systems Inc.

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

(16) Meeker, D., 2004, Finite Element Method Magnetics Version 4.0 User's Manual.

(17) Leach Jr, W. M., 1996, A Two-port Analogous Circuit and SPICE Model for Salmon's Family of Acoustic Horns, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 99, No. 3, pp. 1459~1464.

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

(19) Benade, A. H. and Ibisi, M. I., 1987, Survey of Impedance Methods and a New Piezo-disk-driven Impedance Head for Air Columns, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 81, No. 4, pp. 1152~1167.

(20) Salava, T., 1981, Measurement of the Input Impedance of Loudspeaker Horns, J. Audio Eng. Soc., Vol. 29, No. 6, pp. 416~420.

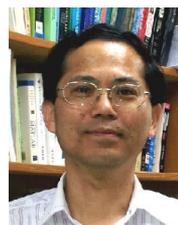
(21) Dalmont, J.-P., 1992, Acoustic Impedance Measurement: Plane-wave Mode and First Helical Mode Contributions, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 91, No. 5, pp. 3026~3033.

(22) Seybert, A. F. and Ross, D. F., 1977, Experimental Determination of Acoustic Properties Using a Two-microphne Random-excitation Technique, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 61, No. 5, pp. 1362~1370.

(23) Kang, S.-W. and Kim, Y.-H., 1992, Transmission Loss Measurement of Silencer with Two Microphones and Its Error Analysis, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 2, No. 3, pp. 181~192.



**Jong Sung Sa**, B.S. in Hanyang University, Precision Mechanical Eng., 1984, M.S. in Hanyang University, Precision Mechanical Eng., 1986, Ph.D. in Hanyang University, 1994. 1990~1997, Ssangyong Motor Co., chief research engineer. 1997~Present, in Seoil University Professor. His principal interest encompasses the fields of driveshaft, constant velocity joint, vehicle noise/vibration reduction and subjective evaluation.



**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., 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.