

# 스피커 드라이브 특성 예측 기법

## Prediction Method of Loudspeaker Driver Characteristics

박 순 종\*, 노 성 택\*

(Soon-Jong Park\*, Sung-Tak Rho\*)

\*에스텍(주) 음향연구소

(접수일자: 2008년 6월 15일; 채택일자: 2008년 10월 3일)

스피커 드라이브 설계에 있어 부품 단계의 물리적 특성과 자기회로부의 전자장 유한요소 해석 결과를 적용하여 드라이브의 TS 파라미터, 주파수 응답 특성 및 전기 입력 임피던스 특성을 예측할 수 있는 기법을 제안한다. 중량 감소 및 비대칭 자속 밀도 분포를 개선하기 위한 설계에 있어서 주파수 응답 특성과 전기 입력 임피던스 특성의 예측 결과는 신축치와 잘 일치하였으며, 비대칭 자속 밀도 분포의 해석을 통하여 2차 고조파 왜곡 특성의 향상 등에 응용될 수 있을 것이다. 제안된 기법은 자기회로부 설계에 있어서 시행 착오의 과정을 줄이는데 이용되어 질 것으로 기대되며, 또한 설계 초기 단계에서 목적의 드라이브 구성 부품을 선택하는 지침을 제공하는데 이용될 수 있을 것이다.

**핵심용어:** 스피커, 전자장 유한요소 해석, TS 파라미터, 주파수 응답, 전기 입력 임피던스, 고조파 왜곡

**투고분야:** 전기음향 분야 (3,1)

The prediction method of TS parameters, frequency response, and electrical input impedance is proposed with physical properties of parts and results of electromagnetic FEA(Finite Element Analysis) in a loudspeaker driver design. In design for weight reduction and improvement of flux density asymmetry, the prediction results are well coincided with measurement ones. As the applications, it can be applied in design for improvement of the 2<sup>nd</sup> harmonic distortion with flux density distribution analysis. The proposed method is expected to be utilized for reducing trial-and-error process in electromagnetic parts design. It can also be used for providing guidelines for parts selection in the early stages.

**Keywords:** Loudspeaker, Electromagnetic FEA, TS Parameter, Frequency response, Electrical input impedance, Harmonic distortion

**ASK subject classification:** Electro-Acoustic (3,1)

### I. 서론

스피커 시스템의 설계와 해석에 있어서 이론적인 접근은 등가회로를 이용하는 것이 일반적인 기법이며, H. F. Olson을 시작으로 I. L. Beranek와 J. F. Novak등에 의하여 제안된 이후, 1960년대 말부터 1970년대 초 A. N. Thiele과 R. Small에 의하여 현재까지도 설계와 해석의 근간이 되고 있는 스피커 특성 파라미터들이 규정되었고, 많은 연구자들에 의하여 연구 개발되어 지고 있다 [1][2].

TS 파라미터 (Thiele-Small Parameter)는 스피커 드라이브 (driver)의 특성을 나타내기 위한 기본적인 요소

로서, 드라이브 설계자의 관점에서는 추후의 설계 방향을 판단할 수 있게 하는데 이용되고 있다. 또한, 드라이브를 이용하는 사용자의 관점에서는 오디오 시스템의 사양에 적합한 드라이브를 선택하는 기준이 되고, 스피커 시스템의 구성에 요구되는 인클로저 (enclosure)의 크기나 형태를 결정하는데 이용되고 있다. 한편, TS 파라미터를 산출하는 알고리즘은 몇가지 상용 소프트웨어를 포함하여 델타 질량법 (Delta Mass Method)과 델타 컴플라이언스법 (Delta Compliance Method)에 의하여 전기 입력 임피던스를 측정 후 파라미터를 구하는 방법으로 구성되어 있다 [3].

본 연구에서는 제작된 드라이브를 측정하여 TS 파라미터를 산출하는 기존의 방법과 달리 드라이브를 구성하는 부품의 준비 단계에서 부품의 물리적 특성과 자기회로부의 전자장 유한요소 해석 결과를 대입하여 TS 파라

책임저자: 박 순 종 (sjpark@estec.co.kr)  
626-230 경남 양산시 유산동 85-12 에스텍(주) 음향연구소  
(전화: 055-370-2367; 팩스: 055-386-0782)

미터를 산출하고, 드라이브만의 조건과 실제 현장에서의 측정 조건을 고려하여 밀폐형 상자에 드라이브가 장착된 조건에서 주파수 특성과 전기 입력 임피던스 특성을 예측할 수 있는 기법을 제안하고자 한다. 나아가 설계자에게 구성 부품간의 연관성을 이해할 수 있는 수단을 제공함으로써 설계의 완성도를 높이고 시행착오를 줄이는 것을 목적으로 하고 있다.

## II. TS 파라미터 및 스피커 특성 예측

### 2.1. TS 파라미터

일반적으로 TS 파라미터는 제작된 드라이브나 스피커 시스템을 전기적 등가회로로 표현하기 위한 매개 변수로서 소신호 (small signal)를 입력하여 측정되어지는 전기 입력 임피던스로부터 구해지며, 공진주파수 부근에서의 전기 입력 임피던스 및 주파수 응답 특성 등의 등가회로 해석 결과는 스피커 드라이브의 특성을 잘 나타내는 것으로 알려져 있다. 여기에서는 드라이브만의 TS 파라미터를 산출하는 과정과 실제 현장에서의 주파수 응답과 전기 입력 임피던스 특성을 측정하는 조건에 부합되도록 밀폐형 상자에 드라이브가 부착되는 경우에서의 TS 파라미터를 산출하는 과정을 설명한다.

드라이브의 동작 원리는 가동 코일형 (moving-coil)을 기본으로 하고 있으며, 신호원에서 발생된 교류 전류가 요크 (yoke), 마그넷 (magnet) 및 플레이트 (plate)로 구성된 자기회로부의 자기 공극에 설치된 전기계로 표현되는 음성코일 (voice-coil)을 흐르게 되면 기계적인 구동력으로 변환되고, 기계계로 표현되는 진동판 (diaphragm), 스파이더 (spider) 및 서라운드 (surround)로 구성된 진동부가 진동을 발생시켜 음향계로 전달되어 음파를 발생시키는 일련의 변환 과정이고, 그림 1과 같은 전기-기계-음향 등가회로로 표현된다 [1][2]. 여기에서  $E_g$ ,  $R_g$ ,  $i$ ,  $R_e$ ,  $L_e$ ,  $B$  및  $I$ 는 각각 전원 전압, 전원의 내부 저항, 전류,

음성 코일의 저항, 음성 코일의 인덕턴스 (inductance), 음성 코일이 위치하는 자기 공극에서의 자속밀도 및 자장 속에 위치한 음성 코일의 길이이다. 또한,  $f$ ,  $u$ ,  $R_{md}$ ,  $M_{md}$ ,  $C_{ms}$  및  $S_d$ 는 각각 구동력, 진동부의 진동 속도, 서스펜션 (suspension)의 기계 저항, 진동부의 질량, 서스펜션의 컴플라이언스 및 진동판의 유효면적이며,  $p$ ,  $U$  및  $Z_{ar}$ 는 각각 공기중의 음압, 공기의 체적속도 및 공기중의 방사 임피던스 (radiation impedance)이다.

그림 2는 드라이브의 전기-기계-음향 등가회로를  $BI$  과  $S_d$ 를 매개로 음향계로 변환하고, 밀폐형 상자가 추가된 음향계 등가회로이다. 여기에서  $R_{ms}$ ,  $M_{as}$  및  $C_{as}$ 는 각각 기계계의  $R_{md}$ ,  $M_{md}$  및  $C_{ms}$ 를 음향계로 변환하여 나타낸 음향 저항, 음향 질량 및 음향 컴플라이언스이고,  $R_w$ ,  $M_{ar}$ ,  $R_{ab}$  및  $C_{ab} = V_{ab}/\rho_0 c^2$ 는 각각 음향 방사 저항, 음향 방사 질량, 밀폐형 상자의 음향 저항 및 밀폐형 상자의 음향 컴플라이언스이다. 한편, 드라이브만의 특성을 해석할 경우에는  $R_{ab}$ 와  $C_{ab}$ 를 단락 상태로 간주하게 된다.

$$\left. \begin{aligned} R_{ms} &= (R_{ms} + R_{ar})S_d^2 = R_{md} + R_{ar}S_d^2 \\ M_{ms} &= (M_{ms} + M_{ar})S_d^2 = M_{md} + M_{ar}S_d^2 \\ C_{ms} &= C_{ms} / S_d^2 = V_{ms} / (\rho_0 c^2 S_d^2) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

식 (1)은 음향 방사 저항과 서스펜션의 기계 저항이 합쳐진 기계 저항  $R_{ms}$ , 음향 방사 질량과 진동부의 질량이 합쳐진 기계 질량  $M_{ms}$  및 서스펜션의 컴플라이언스  $C_{ms}$ 를 나타낸 것으로,  $R_e$ ,  $L_e$ ,  $S_d$  및  $BI$ 과 함께 기계적 TS 파라미터로 알려져 있다 [1][2][4].

위의 밀폐형 스피커 시스템을 전기계 등가회로로 변환하면 그림 3과 같이 나타낼 수 있으며,  $R_g$ ,  $C_{ms}$  및  $L_{eas}$ 는 각각 전기계로 변환된 저항, 캐패시턴스 (capacitance), 인덕턴스를 나타낸다. 이것으로부터 나머지 TS 파라미터는 식 (2)~(4)와 같이 나타내며, 밀폐형 상자가 없는 드라이브만의 경우에는 식 (5)~(7)과 같이 나타낸다.

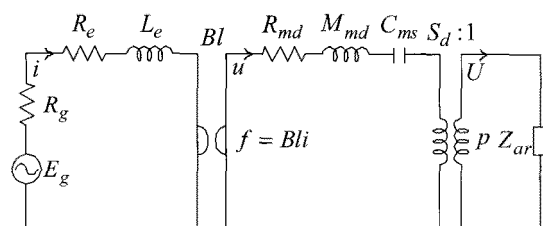


그림 1. 가동 코일형 스피커의 전기-기계-음향 등가회로  
Fig. 1. Electro-mechano-acoustical equivalent circuit of a moving-coil loudspeaker.

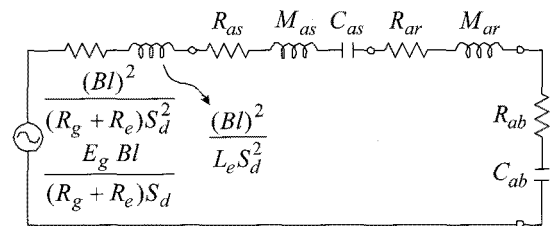


그림 2. 밀폐형 스피커 시스템의 음향계 등가회로  
Fig. 2. Acoustical equivalent circuit of closed-box loudspeaker system.

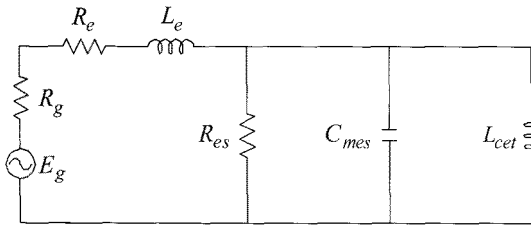


그림 3. 밀폐형 스피커 시스템의 전기계 등가회로  
Fig. 3. Electrical equivalent circuit of closed-box loudspeaker system.

$$\left. \begin{aligned} R_{cs} &= (Bl)^2 / (R_{ms} + R_{rs}) S_d^2 \\ C_{mes} &= (M_{ms} + M_{rs}) S_d^2 / (Bl)^2 \\ L_{cet} &= (Bl)^2 (C_{ms} // C_{cb}) / S_d^2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$f_c = 1 / \sqrt{L_{cet} C_{mes}} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} Q_{mc} &= 2\pi f_c C_{mes} R_{rs} \\ Q_{ec} &= 2\pi f_c C_{mes} R_e \\ Q_{cs} &= Q_{mc} Q_{ec} / (Q_{mc} + Q_{ec}) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} R_{cs} &= (Bl)^2 / (R_{ms} + R_{rs}) S_d^2 \\ C_{mes} &= (M_{ms} + M_{rs}) S_d^2 / (Bl)^2 \\ L_{cet} &= (Bl)^2 C_{ms} / S_d^2 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$f_s = 1 / \sqrt{L_{cet} C_{mes}} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} Q_{ms} &= 2\pi f_s C_{mes} R_{es} \\ Q_{rs} &= 2\pi f_s C_{mes} R_r \\ Q_{cs} &= Q_{ms} Q_{rs} / (Q_{ms} + Q_{rs}) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

여기에서  $f_c$ ,  $Q_{mc}$ ,  $Q_{ec}$  및  $Q_{cs}$ 는 각각 밀폐형 상자 내부의 압축 공기에 의한 컴플라이언스  $C_{cb}$ 가 고려된 공진주파수 (resonance frequency), 기계적 댐핑 (damping), 전기적 댐핑 및 시스템 전체의 댐핑을 나타낸다. 또한,  $f_s$ ,  $Q_{ms}$ ,  $Q_{rs}$  및  $Q_{cs}$ 는 각각 드라이브의 공진주파수, 드라이브의 기계적 댐핑, 전기적 댐핑 및 드라이브 전체의 댐핑을 나타내고 있다 [1][2][4].

그리고, 위와 같이 산출된 파라미터들을 이용하여 스피커의 기준 변환 효율 (reference efficiency)  $\eta_0$ 와 1m 거리에서 1W의 출력일 때의 감도 (sensitivity) 또한 식 (8)과 (9)와 같이 표현된다 [1-5]. 여기에서  $\rho_0$  및  $c$ 는 각각 음향 매질의 밀도와 음속이다.

$$\eta_0 = \frac{\rho_0 (Bl)^2 S_d^2}{2\pi c R_r M_{ms}^2} \quad (8)$$

$$dB L_p = 10 \cdot \log_{10} (\eta_0 / (1.0 \times 10^{-12})) - 11 \text{ dB} \quad (9)$$

### 2.2. 주파수 응답 특성

스피커의 음향 특성을 대표하는 주파수 응답 특성은 부향살 또는 반부향살 환경하에서 방사면의 전후 상호 음압 간섭을 피하기 위하여 표준화된 배플 (baffle) 또는 밀폐 상자에 스피커 드라이브를 취부한 후 사인 소인 (sine sweep) 신호를 입력하거나 노이즈 신호를 입력하여 측정된 신호를 분석하는 것에 의하여 측정되고 있다.

여기에서는 이러한 주파수 응답 특성을 상기 그림 2의 음향 등가회로를 사용하여 예측하고자 하며, 실제 측정 조건과 같이 드라이브를 밀폐 상자에 취부하는 조건이 되도록 밀폐형 스피커 시스템의 음향계 등가회로를 적용한다. 주파수 응답 특성은 관심 주파수 대역에 대하여 각각의 주파수에서의 음압을 구하여 도시하는 것으로서, 음압은 식 (10)의 체적속도 (volume velocity)를 구한 후 배플상에 위치한 음원 조건으로 식 (13)에 의하여 구하게 된다 [4]. 여기에서  $\rho$ ,  $\omega$ ,  $k$  및  $r$ 는 각각 음향 매질의 밀도, 각주파수, 파수 및 음원과 거리이다.

$$U = \frac{P_g}{Z_{we} + Z_{cs} + Z_{or} + Z_{cb}} \quad (10)$$

$$P_c = E_g Bl / (R_g + R_e) S_d \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} Z_{we} &= (Bl)^2 / \{(R_g + R_e) + j\omega L_e\} S_d^2 \\ Z_{cs} &= R_{cs} + j(\omega M_{cs} - 1/\omega C_{cs}) \\ Z_{or} &= R_{or} + j\omega M_{or} \\ Z_{cb} &= R_{cb} + 1/j\omega C_{cb} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$p(r) = \frac{j\rho\omega U}{2\pi r} e^{-jk r} \quad (13)$$

### 2.3. 전기 입력 임피던스

드라이브 또는 스피커 시스템의 전기적 특성을 나타내는 전기 입력 임피던스는 그림 3의 전기계 등가회로로부터 식 (14)와 같이 표현할 수 있으며 [4], 주파수에 대하여 절대값을 취하여 구하게 되고, 이를 이용하여 공진주파수 및 공칭 임피던스 (nominal impedance) 등의 특성을 확인할 수가 있다. 여기에서  $Z_{cs}$ 는 동-임피던스 (motional impedance)로서 식 (15)와 같이 나타낸다.

$$Z_w = \{(R_g + R_e) + j\omega L_e\} + Z_{cs} \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned} Z_{cs} &= 1/Y_{cs} = 1/(G_{cs} + jB_{cs}) \\ G_{cs} &= 1/R_{cs} \\ B_{cs} &= \omega C_{mes} - 1/\omega L_{cet} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

### III. 드라이브 특성 예측 및 드라이브 설계

#### 3.1. TS 파라미터 및 드라이브 특성 예측

부품 준비 단계에서 제작되어질 드라이브의 TS 파라미터 및 실제 현장에서 밀폐형 상자에 취부된 상태의 드라이브의 주파수 응답 특성 및 전기 입력 임피던스 특성의 예측을 하기 위하여 전절에서 설명한 식 (13)과 식 (14)를 이용하여 그림 4와 같이 예측 프로그램을 작성하였다. 그림 4의 예측 프로그램은 크게 3부분으로 구성되며, 설계하고자 하는 구성 부품의 물리적 특성과 음성 코일의 구동력을 입력하는 기본 정보 입력부, TS 파라미터 산출부 및 스피커 특성 예측 결과 출력부로 이루어진다.

기본 정보 입력부에는 그림의 좌측에 나타낸 바와 같이 음성 코일의 규격과 중량 및 전기적 특성인 DCR, 1 kHz에서 측정된 인덕턴스를 입력한다. 또한, 진동계-지지계(콘, 스파이더, 서라운드 등)에 관한 정보는 규격, 중량, 공진주파수 및 변위 등의 물리적 특성을 입력하게 되며, 측정에서 사용되는 밀폐형 상자의 용적과 측정 인가 전압 등을 입력한다. 음성 코일의 구동력 BI는 일반적으로 이용되는 최대 자속 밀도와 유효 자속내에 위치한 음성 코일의 길이를 곱한 값을 적용하는 경우보다 정확성을 높이기 위하여 전자장 유한 요소 해석틀 (PEMM Ver. 4.0) [6]에 의한 자속 밀도 해석 결과를 적용한다.

TS 파라미터 산출부는 식 (1)~식 (7)을 이용하여 밀폐

형 상자에 취부된 상태를 가정한 TS 파라미터와 드라이브만의 TS 파라미터를 별도로 산출하도록 한다. 스피커 특성 예측 결과 출력부는 식 (8)과 식 (9)에 나타낸 드라이브의 기준 변환 효율과 감도를 계산하여 표시하고, 20 Hz~20 kHz의 각각의 주파수에 대하여 음압과 전기 입력 임피던스를 계산하여 주파수 응답 특성과 전기 입력 임피던스 특성 (절대값)을 도시하도록 한다. 또한, 드라이브의 사양으로 제출되게 되는 평균 음압의 경우도 밀폐형 상자에 취부된 상태를 가정하여 계산한 후 표시한다.

그림 5에는 상기 기본 정보 입력부에 입력되는 음성 코일의 구동력 BI값을 산출하기 위한 자기회로부의 유한 요소 해석의 기본 모델을 나타낸다. 자기회로부는 현재 양산중인 우퍼용 스피커 드라이브에 적용되고 있는 것으로, 페라이트 (ferrite) 마그넷, 요크 (플 및 후면 플레이트) 및 전면 플레이트로 구성되는 전형적인 외자형 구조이다. 유한 요소 해석은 상기의 기본 모델에 대하여 2차원 축대칭 요소 (axi-symmetric element)를 적용하고, 구성 부품의 재료정수를 해석틀에서 제공하는 값과 마그넷 공급 업체의 자료를 토대로 지정한 후 [6][7], 자속 밀도를 계산하는 과정으로 수행된다. 한편, 음성 코일이 받는 자속 밀도는 플과 전면 플레이트 사이의 자기 공극내에 음성 코일이 설치되는 부분에서의 자속 밀도로서, 전면 플레이트 두께 중심을 기준으로 일정 길이에 대한 해석 결과를 사용하게 된다.

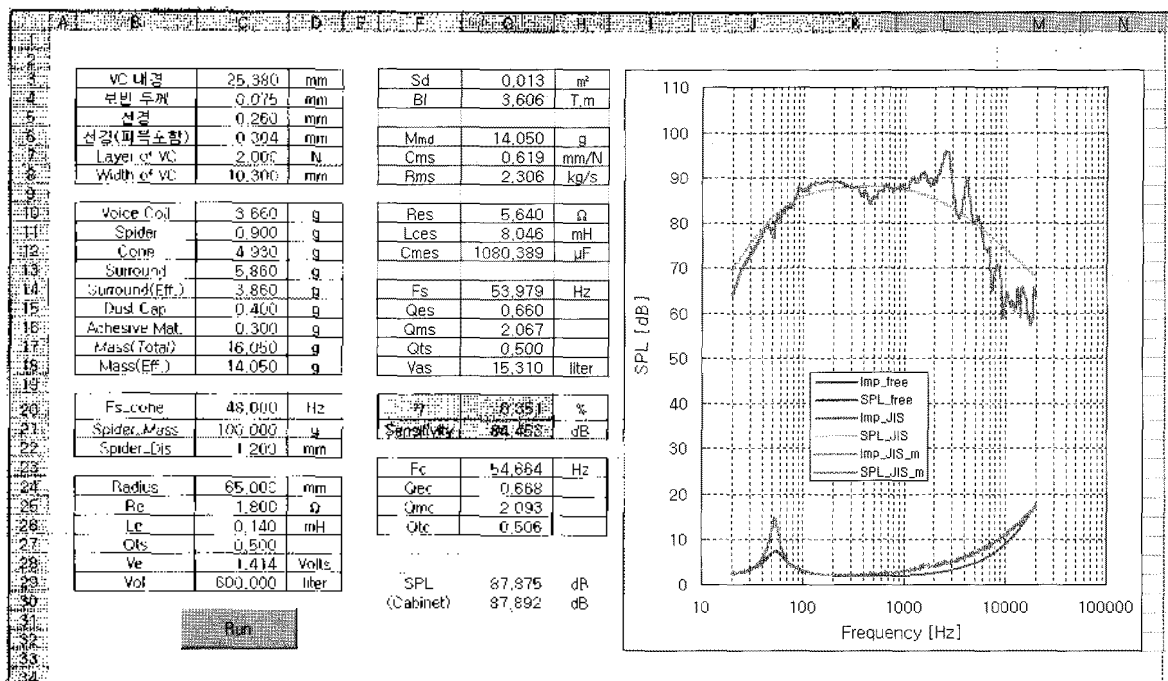


그림 4. 드라이브 특성 예측 프로그램 (Excel VBA)  
Fig. 4. Prediction program for driver characteristics (Excel VBA).

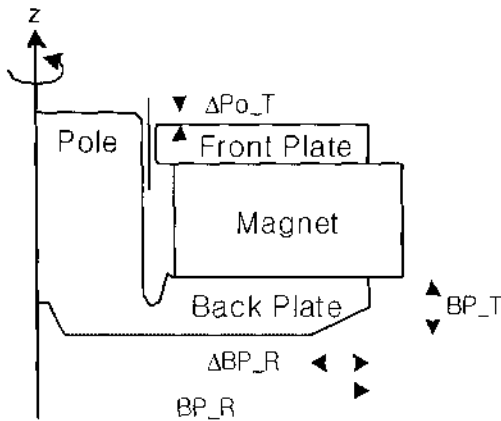


그림 5. 자기회로부의 유한 요소 해석 모델  
Fig. 5. Finite element model of magnetic circuit.

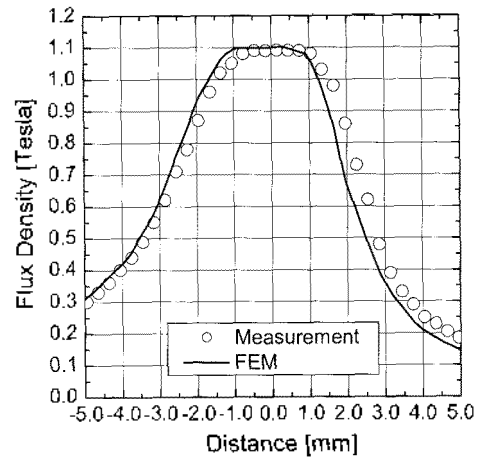


그림 6. 자기 공극내에서의 자속 밀도  
Fig. 6. Magnetic flux density in voice coil gap.

그림 6은 자기 공극내에서의 자속밀도를 해석치와 실측치로 비교하여 나타내었으며, 측정 프로브 (probe)가 공극내에서 위치 오차를 발생한다는 것을 감안한다면 매우 잘 일치하고 있다고 볼 수 있으며, 해석치를 음성코일이 감긴 위치에 따라 출력하고, 위의 예측 프로그램에 입력하여 계산을 수행한다. 한편, 발생하는 자속밀도는 상하 대칭적으로 분포되지 않고 있다는 것을 관찰할 수 있으며, 드라이브의 성능 향상을 위하여 자속 밀도의 비대칭 분포에 관한 검토도 이루어져야 함을 확인할 수 있다.

유한 요소 해석에 의한 구동력  $B\ell$ 은 3.61 [T·m]이었으며, 예측 프로그램에 대입하여 TS 파라미터를 계산한 후 주파수 응답 및 입력 임피던스 특성을 예측한 결과를 측정치와 비교하여 그림 7에 나타낸다. 측정치는 무향실 환경하에서 사인 소인 신호를 방사한 후 기준 거리에서 수음된 음향 신호를 분석하여 주파수 응답, 전기 입력 임피던스 및 고조파 왜곡 (harmonic distortion) 등의 특성들을 표현하는 RTAN社 S-265 음향분석장치(Audio Analysis System)에 의하여 구해진 것이다.

식 (10)~식 (13)을 이용하여 계산하는 주파수 응답의 예측치는 측정치가 측정 조건에 의하여 다소간의 함락 부분이 발생할 수 있다는 것을 감안한다면 공진주파수 부근인 저주파수 대역에서 드라이브의 경향을 매우 잘 나타내고 있다고 할 수 있다. 그리고, 한국 공업 규격의 콘 스피커 시험 방법에 규정된 관심 주파수들 (200, 250, 300, 400 Hz)에서의 평균 음압의 경우 예측치는 87.9 dB, 측정치는 88.1 dB로 0.2 dB의 차이가 있음이 확인되었고, 측정 조건 등에 의한 편차를 고려한다면 유사한 결과를 할 수 있을 것이다

전기 입력 임피던스 특성의 예측 결과는 역기전력 (Back-EMF)에 의한 임피던스 상승의 정도에는 차이가 있으나

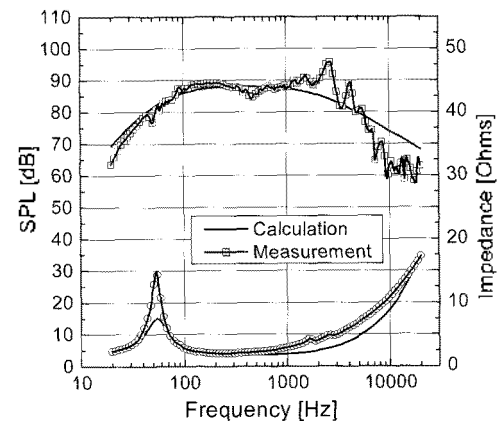


그림 7. 주파수 응답 및 전기 입력 임피던스  
Fig. 7. Frequency response and electrical input impedance.

공진주파수의 예측, 공칭 임피던스의 예측 및 저주파수 대역에서 드라이브의 전기 입력 임피던스 경향을 예측하기에 충분하다고 할 수 있다.

### 3.2. 드라이브 설계에의 응용

드라이브의 설계 초기 먼저 고려되어야 할 사항으로는 자기회로부의 구성에 관한 설정이며, 과거의 설계 데이터 및 설계자의 경험적인 부분에 의존하여 설정되고 있다. 근간에는 전자장 해석 소프트웨어를 이용하여 자기회로부를 구성하는 방법들도 이용되고 있다. 여기에서는 전절에서의 결과에서와 같은 자기 공극내에서 비대칭 자속 분포를 개선함과 동시에 드라이브 특성 예측 프로그램을 이용한 특성 예측을 통하여 성능 향상을 목적으로 한 드라이브 설계 예를 들고 그 결과를 나타내고자 한다.

드라이브 설계 예의 모델은 그림 5에 나타난 해석 모델과 같으나, 후면 플레이트의 두께 BP\_T, 마그네틱과의 접촉 면적에 해당하는 전·후면 플레이트의 외경 BP\_R, 전면

플레이트 상단과 폴 상단간의 높이  $\Delta Po_T$  및 중량 감소를 고려한 후면 플레이트의 대각 방향 삭제 차수  $\Delta BP_R$  을 변경하는 것으로 설정한다. 그리고, 설계 예의 모델에 대한 자속 밀도의 변화 및 비대칭 자속 분포의 개선 결과를 그림 8에 나타낸다.

그림 8 (a)의 후면 플레이트 두께  $BP_T$ 의 변화에 대한 자속 밀도 특성의 결과에서는 일정 두께에 도달하게 되면 자속 밀도는 포화되어 더 이상 증가의 효과를 가져 오지 못한다는 것이 해석되었으며, 예측 프로토타입과 연계하여 목적으로 하는  $BP$ 값이 되도록 두께를 6.5 mm로 선택하였다.

그림 8 (b)는 드라이브의 성능에 변화를 주지 않고 드라이브의 중량을 감소시키기 위한 목적으로 전면 및 후면 플레이트의 외경을 줄이는 것에 대한 자속 밀도 특성의 결과를 나타낸 것이며, 마그넷과 플레이트간의 접촉면이 마그넷의 면적 대비 약 80%가 되는 외경을 가진 경우가 완전히 접한 경우보다 최대치에서 3%정도 증가된다는 것

이 해석되었고, 이것은 외부로의 누설 자속을 줄이는 것에 의한 결과로 판단된다.

그림 8 (c)는 비대칭 자속 분포를 개선하기 위하여 폴의 높이를 증가시켰을 때의 자속 밀도 특성의 결과 변화를 나타낸 것으로 드라이브의 최대 전폭을 나타내는  $x_{max} = (VC_h - FP_h)/2$  영역까지 대칭성을 만족하는 조건으로  $\Delta Po_T$ 가 2.0 mm인 경우가 적절하다는 것으로 해석되었다. 여기에서  $VC_h$  및  $FP_h$ 는 각각 음성 코일의 높이와 전면 플레이트의 높이를 나타낸다.

다음으로 후면 플레이트의 하면을 대각선 방향으로 삭제하여 그림 8 (b)에서와 마찬가지로 중량 감소를 목적으로 해석한 자속 밀도 특성의 결과를 그림 8 (d)에 나타내었다. 그 결과  $\Delta BP_R$ 을 증가시켜 마그넷 내경 부근까지 삭제하는 것에 의하여 후면 플레이트의 중량을 감소시켜도 최대 자속 밀도의 값은 변화가 없으며 마그넷 내경보다 작게 되면 자속 밀도는 급격히 감소하게 됨이 해석되

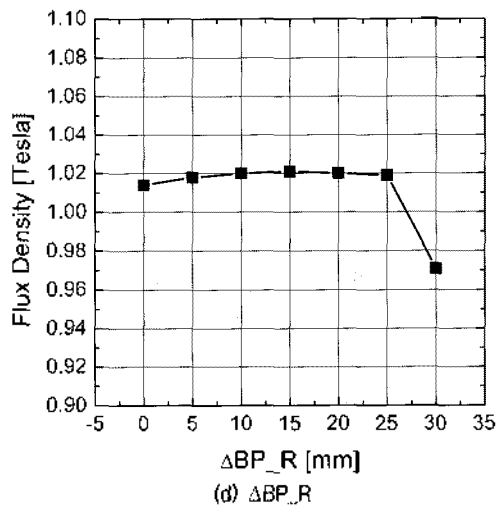
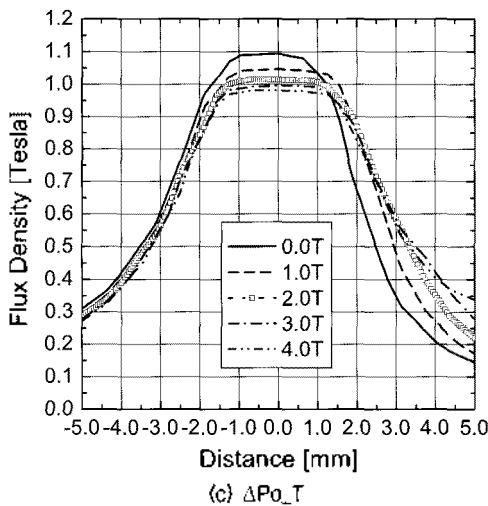
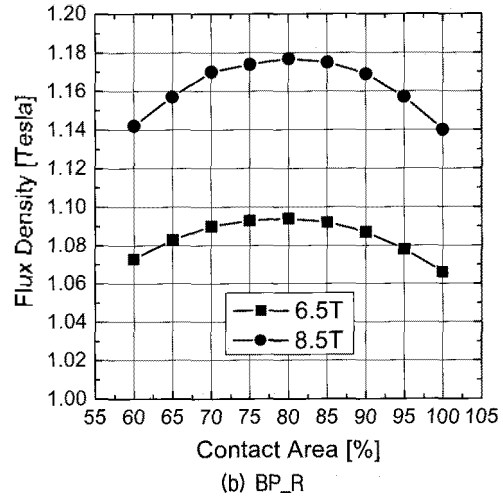
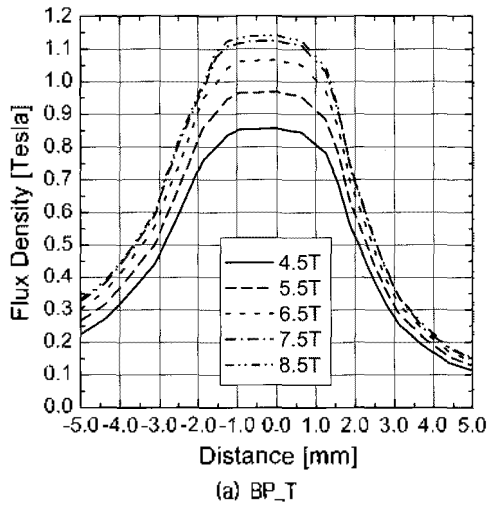


그림 8. 자속 밀도의 변화  
Fig. 8. Variation of magnetic flux density.

있다. 따라서, 최대 자속 밀도의 변화가 없는 영역내에서 지지 구조와 제석시 회전판과의 결합을 고려하여 후면 플레이트에서의  $\Delta BPR$  값을 적절히 선택하여 할 것이며, 여기에서는 20 mm로 선택하였다.

대칭 자속 분포 및 중량 감소를 목적으로 설계된 보편의 자속 밀도 분포를 그림 9에 측정치와 함께 나타내었다. 해석치와 측정치는 앞선 그림 6의 결과에서도 보인 바와 같이 매우 잘 일치하고 있으며, 자속 밀도의 최대값은 기존 모델의 결과보다 감소하지만 목적으로 한  $x_{max}$  영역인  $-3 \text{ mm} \sim 3 \text{ mm}$  구간내에서 대칭 분포를 잘 이루고 있다는 것이 확인되었다.

음성 코일의 구동력  $BI$ 의 해석치는 기존 모델보다 4.4% 증가한  $3.77 \text{ [T}\cdot\text{m]}$ 이었으며, 식 (13)와 식 (14)를 이용하여 계산한 주파수 응답 및 전기 입력 임피던스 특성을 측정치와 비교하여 그림 10에 나타낸다. 주파수 응답과 전기 입력 임피던스는 기존 모델에서와 마찬가지로

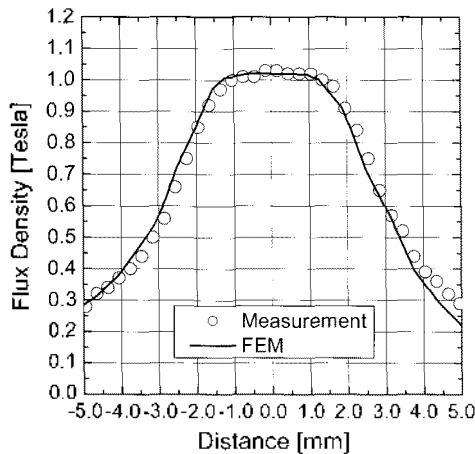


그림 9. 설계 예 모델의 자속 밀도  
Fig. 9. Magnetic flux density of the model for design example.

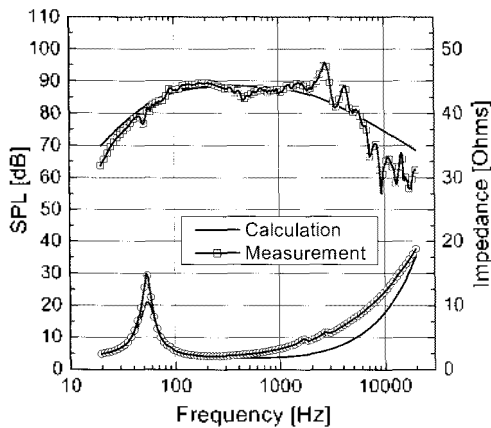
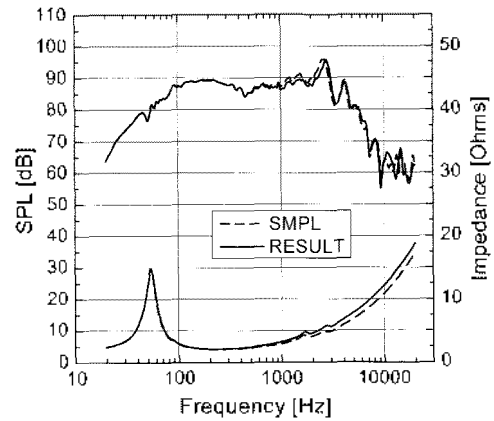
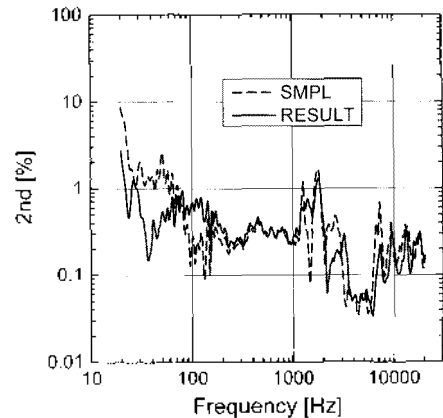


그림 10. 설계 예 모델의 주파수 응답 및 전기 입력 임피던스  
Fig. 10. Frequency response and electrical input impedance of the model for design example.

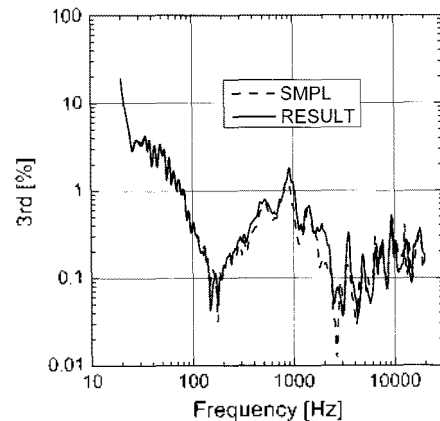
측정치와 유사한 경향을 나타내고 있으며, 평균 음압의 경우 계산치는 88.3 dB, 측정치는 88.15 dB로 0.15 dB의 근소한 오차로 일치하고 있음이 확인되었다. 따라서, 기존 모델 보다 중량을 감소시키면서도 한편으로는 자기 공극에서 자속 밀도의 최대값은 감소하더라도 대칭 자속 밀도 분포를 형성하면서 평탄 구간이 증가하도록 자기회로부를 설계하는 것에 의하여 음성 코일이 받는 구동력  $BI$ 은 증가됨이 확인되었고, 이로 인하여 평균 음압의 경



(a) Frequency response and electrical input impedance



(b) 2<sup>nd</sup> harmonic distortion



(c) 3<sup>rd</sup> harmonic distortion

그림 11. 고조파 왜곡 특성의 개선  
Fig. 11. Improvement of harmonic distortion.

우 계산치에서는 0.4 dB의 증가가 예측되었고, 측정치에서는 0.04 dB의 증가가 확인되었다. 측정치에서의 증가 폭이 작은 것은 배플에의 장착, 마이크로폰 거리 및 높이 등 측정 조건의 차이에 의한 편차라고 판단되며, 설계에 있어서는 계산치의 검토를 통하여 평균 음압이 상승할 것이라 예측하는 것이 타당하리라 생각된다.

그림 11은 상기의 과정을 통하여 설계된 모델과 기존 모델의 주파수 응답, 전기 입력 임피던스, 2차 고조파 왜곡 및 3차 고조파 왜곡 특성의 측정치를 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 RESULT와 SMPL은 각각 설계 예의 과정을 통하여 설계된 드라이브의 측정치와 그림 5의 기존 모델로 제작된 드라이브의 측정치를 나타내고 있다.

그림 11 (a)의 주파수 응답 및 전기 입력 임피던스 특성에서는 뚜렷한 차이점이 관찰되지 않았으며, 그림 11 (b), (c)의 2차 고조파 왜곡 및 3차 고조파 왜곡 특성은 두가지 모델 모두 5% 이하의 특성을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 한편, 2차 고조파 왜곡 특성에 있어서 기존 모델의 경우 공진주파수 부근에서 2% 정도의 왜곡을 나타내지만 설계 예의 모델의 경우 1% 이하로 감소됨을 확인할 수 있다. 일반적으로 2차 고조파 왜곡은 지지계의 기계적 비선형성, 음성 코일에서의 구동력의 비선형성 혹은 대진 폭에서 공기의 흐름에 기인하는 작용과 반작용의 비대칭성에 원인이 있는 것으로 알려져 있지만 [8], 여기에서는 음성 코일의 비대칭 자속 분포를 개선한 것에 의하여 나타나는 영향으로 음성 코일에서의 구동력의 비선형성을 개선하는 것에 의한 효과라고 볼 수 있을 것이다.

#### IV. 결론

드라이브의 설계 전 부품 준비 단계에서 구성 부품의 기본적인 물리적 특성과 규격 등을 입력하고, 전자장 유한 요소 해석 결과를 대입하여 드라이브의 TS 파라미터, 주파수 응답 및 전기 입력 임피던스 특성의 예측이 가능한 기법을 제안하였으며, 기존 모델을 적용한 결과 측정치와 유사한 경향을 가진 예측이 가능함을 확인하였다.

그리고, 중량 감소 및 비대칭 자속 밀도 분포 개선을 위한 모델의 전자장 해석 결과를 대입한 경우 설계의 파라미터들이 반영된 향상된 결과의 예측이 가능하다는 것이 확인되었고, 향후 최적화 설계 과정에도 제안된 기법이 유용하게 적용될 수 있음이 검토되었다. 또한, 비대칭 자속 밀도 분포의 개선을 통하여 2차 고조파 왜곡 특성의

향상을 달성할 수 있음이 확인되었다.

따라서, 개발된 드라이브 특성 예측 기법은 드라이브 설계에 있어서 시행 착오를 줄이고, 시제품 제작 비용 절감 등에 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

#### 참고 문헌

1. R. H. Small, "Direct-Radiator Loudspeaker System Analysis," *Journal of The Audio Engineering Society* 20(5), 383-395, 1972.
2. R. H. Small, "Closed-Box Loudspeaker Systems - Part I: Analysis," *Journal of The Audio Engineering Society* 20(10), 798-808, 1972.
3. 오세진, *스피커 개론* (스피커음향기술혁신센터, 2004).
4. L. E. Kinsler, A. R. Frey, *Fundamentals of acoustics* (John Wiley & Sons, New York, 1982).
5. J. M. Eargle, *Loudspeaker Handbook* (Chapman & Hall, New York, 1997).
6. David Meeker, *Finite Element Method Magnetics Ver. 4.2-User's Manual* (2006).
7. Dongyang Jinma Magnet Co., Ltd., *Product Catalogue* (2007).
8. 左伯多門, *新版スピーカー-&エンクロージャ-百科* (誠文堂新光社, 東京, 1999).

#### 저자 약력

##### •박 순 중 (Soon-Jong Park)

1992년 2월: 부경대학교 전자공학대(공학사)  
1994년 2월: 부경대학교 전자통신공학과(공학석사)  
2003년 2월: 부경대학교 전자공학대(공학박사)  
2004년~현재: 에스텍(주) 음향연구소

##### •노 성 택 (Sung-Tak Rho)

1980년 2월: 부산대학교 화학공학대(공학사)  
1980년~2004년: 에스텍(주) 음향연구소  
현재: 에스텍(주) 상무이사