

진동/음향 일방연성해석에 의한 스피커의 음향특성 연구

°김 준 태*, 김 정 호*, 김 진 오*, 민 진 기**

Acoustic Characteristics of a Loudspeaker Obtained by Vibroacoustic Analysis

Jun Tai Kim, Jung Ho Kim, Jin Oh Kim, Jin Ki Min

ABSTRACT

The acoustic characteristics of a direct radiator type loudspeaker has been studied in this paper. The vibration displacement of the speaker cone paper obtained by the finite element analysis has been converted into the vibration velocity and used as a boundary condition for the acoustic analysis. The frequency characteristics and the sound pressure distribution of the loudspeaker resulted from the radiation of the cone vibration have been calculated by the boundary element analysis. The numerical results have been verified by experiments carried out in an anechoic chamber. The variations of the acoustic characteristics due to the changes of some design parameters have been examined using the numerical model.

1. 서 론

스피커는 전기 에너지를 음향 에너지로 바꾸는 전기음향 변환기의 일종이며, 일반적으로 두가지 유형으로 분류된다. 하나는 직접 방사(direct radiator)형으로서 큰 진동막(diaphragm)이 공기와 직접 결합되어 있는 것이고, 다른 하나는 나팔(horn)형으로서 작은 진동막이 나팔 모양의 목 부분에 결합되어 있는 것이다⁽¹⁾. 거의 대부분의 스피커는 직접 방사형으로서 원뿔형의 진동막 ('콘'이라 칭함)을 구동하는 것이며, 본 연구에서는 직접방사형 스피커를 해석대상으로 한다. 이러한 직접방사형 스피커의 음향성능은 그 콘의 진동특성과 직접적인 관련이 있기 때문에 스피커의 성능을 향상시키기 위한 방안으로서 콘 재질의 개발이나 콘 형상의 설계에 많은 노력을 하고 있다.

그러나, 현재까지의 스피커 개발과정을 보면, 사용되는 소재의 물성, 소리로 변환된 후 전달하는 매체인 공기, 그리고 음질을 평가하는 사람의 관계에서 주관적 평가가 많고 상관관계가 객관화되어있지 않아서 주로 설계자의 경험으로 설계되어 왔다. 이러한 이유로 설계시 제품의 음향특성을 정확히 파악하기가 매우 어렵고, 문제발생시에도 정확한 측정 및 해석을 통한 개선보다는 경험에 의존하여 감각적 개선에 의해 불량률의 요인을 찾고 있는 상황이다. 따라서 스피커의 음향 특성에 영향을 주는 설계변수를 찾아내거나 실물을 제작하기 전에 그 음향 특성을 예측하는 것이 매우 중요하다고 하겠다.

스피커를 통해 소리가 발생되어 사람에게 전달되는 과정을 살펴보면 전기적 신호가 스피커 유닛의 보이스코일에 의해 기계적 운동으로 변환되어 콘 페이퍼에 진동을 가해주고 그 진동이 인접 공기에 전달되어 소리로 전파하는 것이다. 이때, 콘 페이퍼의 진동과 인접 공기의 진동(즉, 음향)은 상호작용을 한다.

* 삼성종합기술원 수퍼컴응용실

** 삼성전기(주) CAD/CAM연구실

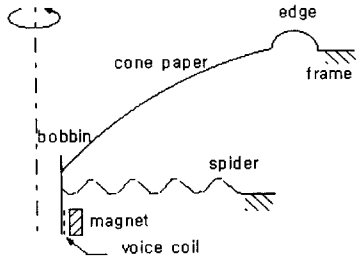


Fig.1 A cross-sectional diagram of a loudspeaker cone.

스피커 콘 형상은 축대칭으로서 그 단면은 Fig.1 과 같으며 곡률을 갖는 곡선형상이며, 콘페이퍼는 펄프를 금형으로하여 프레스공정을 통해 만든 종이로서 두께는 약 0.4 mm이고, 본 연구대상 모델의 외측원의 반지름크기는 57 mm이다. 바빈(bobbin)은 알루미늄으로 이루어진 원통 셀로서 반경이 약 13 mm 이고, 하단부분에 보이즈 코일(voice coil)이 감겨 있어 전기 신호에 의해 콘 페이퍼에 진동을 가해준다.

본 연구에서는 수치해석을 하는 유용한 방법의 하나인 유한요소법을 사용하여 스피커 콘의 진동을 계산하였다^(2,3). 이 방법으로 보이즈 코일의 가진에 따른 진동응답을 구하고나서, 스피커로부터 방사되는 음향특성을 경계요소법을 이용한 진동/음향 일방연성 해석에 의해 구하였으며, 무향실에서 음향측정 실험을 수행하여 비교검토함으로써 해석결과를 검증하였다. 이와같은 과정을 통하여 얻어진 진동/음향 해석모델을 가지고 설계변수값들의 변경에 따른 주파수특성의 변화를 산출하여, 각 변수들이 스피커의 음향특성에 미치는 영향을 예측하였다.

2. 스피커 콘의 진동특성

스피커 콘의 고유진동을 유한요소법을 이용하여 해석하고 그 결과를 레이저간섭계를 이용한 실험에 의해 비교함으로써 진동해석 모델을 검증한 바 있다^(2,3). 스피커의 실제 사용 상황에서의 진동을 해석하기 위하여 보이즈 코일의 가진에 대한 스피커 콘의 진동 응답을 해석하였다. 실제로는 코일이 감긴 면적에서 바빈의 축방향으로 힘이 분포하는데, 해석시에는 이부분의 절점들에 힘이 분할되도록 하였다. 보이즈 코일에는 공급되는 음성전류에 의해 보이즈 코일을 끌거나 당기는 힘이 발생한다. 공극에서의 교류자속(Φ_{ac})과 가진력(F)의 관계를 보면 다음식과 같다⁽⁴⁾.

$$\begin{aligned}
 F &= B_{gap} \cdot l \cdot i \\
 &= \{ B_{dc} + (|\Phi_{ac}| / A) \cdot \sin(\omega t + \alpha) \} \cdot l \cdot \sin(\omega t) \\
 &= B_{dc} \cdot l \cdot i_m \sin(\omega t) - \frac{1}{2} \cdot (|\Phi_{ac}| / A) \cdot l \cdot i_m \cos(2\omega t + \alpha) \\
 &\quad + \frac{1}{2} (|\Phi_{ac}| / A) \cdot l \cdot i_m \cos(\alpha)
 \end{aligned} \tag{1}$$

- 여기에서 F : 가진력
 B_{dc} : 공극의 직류자속 밀도
A : 공극의 면적
 $|\Phi_{ac}|$: Φ_{ac} 의 양의 최대값
 ω : 음성전류의 각주파수
 α : 음성전류와 그에 의해 발생한 교류자계와의 위상차
 $i = i_m \sin(\omega t)$: 음성전류
l : 공극내에 영향받는 유효한 코일의 길이이다.

주파수별 가진력 결과는 Fig.2와 같으며, 대략 250 Hz 부근에서 가진력이 최대가 되는 2차 함수 형태의 분포를 보이고 있다. 단일 주파수의 가진에 따른 스피커 콘의 진동 응답을 계산하여, 125 Hz부터 4 kHz 까지 옥타브 밴드 중심주파수에서 나타낸 것은 Fig.3과 같다. 이 결과들로부터 진동응답이 축대칭 피스톤 운동형태로 나타남을 알 수 있으며, 이것은 축대칭 구조의 콘이 축대칭 가진력을 받을 때에 나타나는 이상적인 진동형태이다.

3. 음향해석 방법

3.1 일방 연성해석

구조물의 진동에 의해 소리가 방사될때, 구조물의 진동특성과 음향특성을 각각 구분하여 해석함을 일방연성(one-way coupling)해석이라 한다⁽⁵⁾. 즉, 구조물에 발생하는 진동의 변위, 속도, 가속도 등이 소리의 방사에 직접적으로 영향을 준다고 생각하며

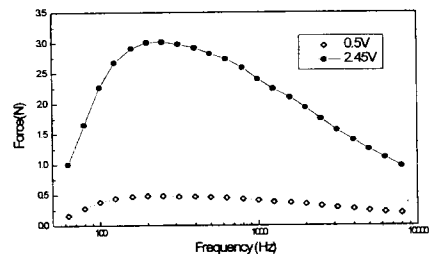


Fig.2 The exciting force in the voice coil of the bobbin.

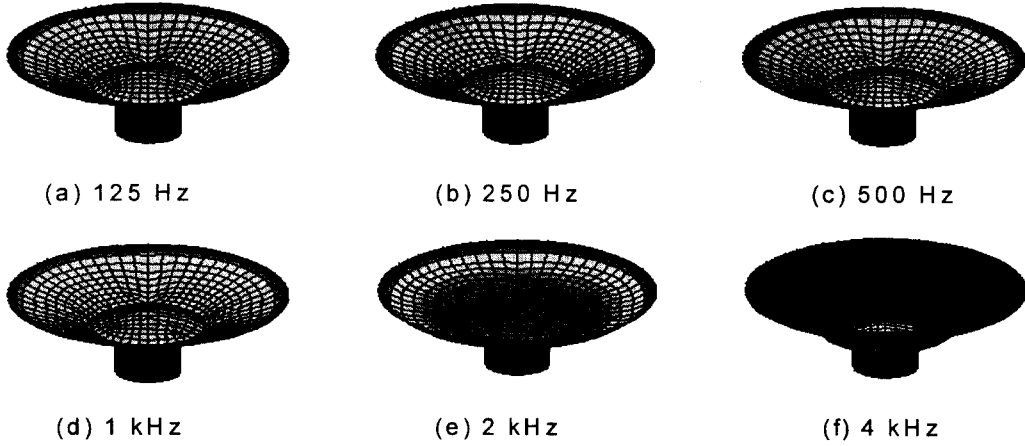


Fig.3 The vibration response of the loudspeaker cone excited by the voice coil.

, 이때 발생된 소리가 거꾸로 구조물의 진동에 미치는 영향은 무시한다. 일방 연성해석 기법은 진동방사면의 면적이 크지 않거나 공기와 같이 음향임피던스가 진동구조물에 비하여 상대적으로 작은 상황에서 해석의 용이함을 준다. 이때에, 진동해석 결과는 음향해석의 경계조건으로 변환되어 입력된다.

본 연구에서는 NASTRAN을 사용한 진동해석을 수행하여 Octave Band 주파수에서의 스피커 콘 페이퍼 진동변위를 산출하였고, 이 결과를 콘 페이퍼의 수직 입자속도(normal velocity)로 환산하여 음향해석모델의 경계조건으로 설정하였다. 또한, 음향해석 기법에 있어서는 내/외부의 동시해석과 연결점부위를 고려할 수 있는 간접 경계요소법(indirect boundary element method)을 사용하였으며 SYSNOISE를 이용하였다.

2절의 강제진동 해석결과 얻어진 변위응답 \vec{u} 는 다음식에 의해서 음향해석모델의 진동속도 경계조건으로 변환되어진다.

$$v_n = j\omega \vec{u} \cdot \vec{n} \quad (2)$$

여기에서 \vec{n} 은 콘 페이퍼에 수직인 방향벡터이다. 식(2)의 속도경계조건을 이용한 음향행렬방정식은 다음과 같다⁽⁵⁾.

$$\begin{bmatrix} B & C^T \\ C & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma \\ \mu \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f \\ g \end{Bmatrix} \quad (3)$$

여기에서 B, C, D : 형상함수와 그린함수의 적분항

σ : 단일층 포텐셜 벡터, $(p^+ - p^-)$

μ : 이단층 포텐셜 벡터, $(\frac{\partial p^+}{\partial n} - \frac{\partial p^-}{\partial n})$

f, g : 가진력 벡터이다.

식(3)으로부터 음압의 차와 음압변화율의 차를 알 수 가 있고, 입자속도는 음압과 다음과 같은 관계가 있으므로 음압과 입자속도를 구할 수 가 있다.

$$\nabla p = -j\omega p v \quad (4)$$

3.2 음향해석 모델

스피커에서 방사된 소리가 외부공간으로 전파될때의 주파수특성과 음압분포를 계산하기 위하여 경계요소법을 사용하였다. 특히, 스피커 박스 내/외부가 에어홀(air hole)로 연결되어 있고, 스피커 바빈 등의 자유 모서리(free edge)와 연결부위(junction)가 존재하는 경우에는 변분법(variational method)을 사용한 간접 경계요소법을 사용하여야 한다. 이러한 경계요소법은 유한요소법으로는 해를 구할 수 없는 외부음장의 음향해석에 대해서 매우 유용하게 사용된다. 한 스피커 제품에 대하여 설정한 경계요소 모델은 Fig.4와 같으며, 좌측 하단부에 에어홀이 있기때문에 좌우 비대칭이다. 박스를 포함한 전체모델의 절점수와 요소수는 각각 1680개, 1678개이며, 8개의 TRIA3 type과 1670개의 QUAD 4 type의 경계요소형상을 갖는다. 또한, 진동과 음압특성이 중요한 콘 페이퍼를 관심주파수 범위내에서 경계요소의 크기가 최소과장의 1/6배(약0.007m)보다 작게되도록 요소분할하였다. 스피커 박스는 강체경계조건으로 가정하여 약 0.052m의 크기로 요소분할하였고, 가로/세로 각 2m인 외부공간을 40

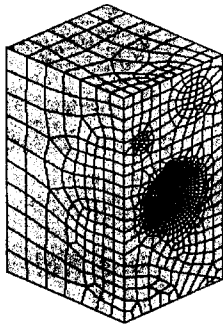


Fig.4 The boundary element model of the loudspeaker cone and box.

0개의 공간점(field point)으로 분할하였다. 관심 주파수범위는 30 - 8000 Hz 이고, 스피커 박스로부터 전방으로 1m 떨어진 지점을 해석과 음압측정의 기준점으로 선정하였다.

본 연구에서 사용한 공기의 물성치는 상온(18°C)에서 음속 (C_a) 은 343 m/s, 밀도 (ρ_a) 는 1.21 kg/m³ 이다. 경계조건으로는 스피커박스는 강제조건(rigid condition)이고, 콘 페이퍼의 질점은 진동 응답면위로부터 환산된 수직입자속도(normal particle velocity) 조건으로 하였다.

4. 음향해석 결과

4.1 주파수특성

Fig.4와 같은 스피커 모델에 대하여 주파수음향특성을 계산하였다. 해석절차로는NASTRAN을 사용하여 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Hz와 같은 Octave frequency에서 스피커 유닛구조물의 강제진동해석을 수행하고, 그 결과인 스피커 콘 페이퍼의 진동면위를 수직 입자속도 경계조건으로 변환하여 SYSNOISE에서 1/6 interpolation 기법을 사용하여 세부 주파수에 대한 특성해석을 수행하였다. 이와같은 방법을 사용하면 세부 주파수에 대하여 강제진동해석을 할 필요가 없고, 단지 8개의 중심주파수에 대해서만 강제진동해석을 수행함으로써 계산시간이 대폭적으로 줄어드는 잇점이 있다. 해석대상점은 스피커박스로부터 전방(+Y)으로 1m 떨어진 지점이며, 그 주파수특성 그래프는 Fig.5와 같다. 주파수특성 해석결과, 전체적으로 약 92 - 107 dB의 값을 보이고 있다. 또한, 250,1000,2000 Hz 등에서 최소값을 보이고 있는데, 그 이유는 스피커 박스 내부공간의 공진으로 인하여 이 주파수대역에서 방사 임피던스(radiation impedance)가 매우 크기때문이다. 본 연구에서 이용한 일방 연성해석기법은 63

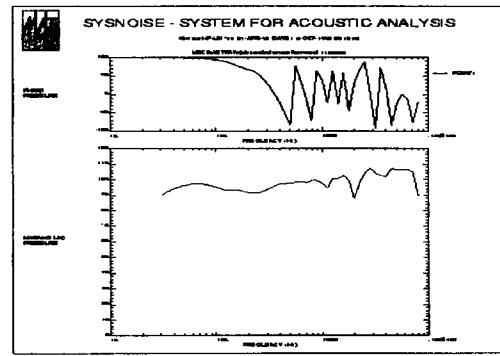


Fig.5 The frequency characteristics curve calculated for the BEM model.

Hz 이상의 주파수영역에서 신뢰할 수 있는 결과를 보여주고 있다.

4.2 음압분포

외부공간내에서의 음압분포특성을 알기위하여 가로/세로 각 2m 인 무한공간을 그 대상으로하였으며, 이 공간내에 총 400개의 공간점을 생성하여 각 점에서의 음압크기를 데시벨(dB)단위로 계산하였다. 해석결과는 Fig.6과 같고, Octave band 중심주파수인 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Hz에서의 음압분포결과를 나타내고있다. 음압의 크기는 약 80 - 150 dB 범위이며, 이때의 기준음압의 크기는 2×10^{-5} Pa 이다. 63 Hz의 음압분포는 스피커 박스의 전면방향(+Y)으로 원형형상의 전파형태를 보이고 있으며, 후면방향(-Y)으로도 넓은 반사회절형태를 나타내고 있다. 또한, 스피커 유닛 최근접위치에서 발생하는 매우 큰 음압은 국부적인 것이며, 댐핑효과를 고려하면 대폭적으로 줄어든 것으로 생각된다. 125 Hz에서의 음압형태는 넓은 전후방분포를 보이고있고, X방향에 대하여 좌우대칭의 결과를 나타낸다. 250 Hz 대역의 분포형태는 동심원을 그리며 각 방향 균일한 형상을 나타내고, 500 Hz에서는 전면방향으로의 음압의 크기가 후면방향보다 상대적으로 높게 나타난다. 1000 Hz 대역에서는 다소 균일한 분포형태를 나타내며, 2000, 4000, 8000 Hz로 주파수가 증가함에 따라 방향에 따른 음압의 굴곡이 심해짐을 알 수 있다.

5. 음향 실험

상업용 박스 스피커의 주파수별 특성을 규명하고, 음향해석모델의 이론해석결과 얻어지는 값들과의 비교검토를 위하여 Fig.7과 같은 장비와 방법으

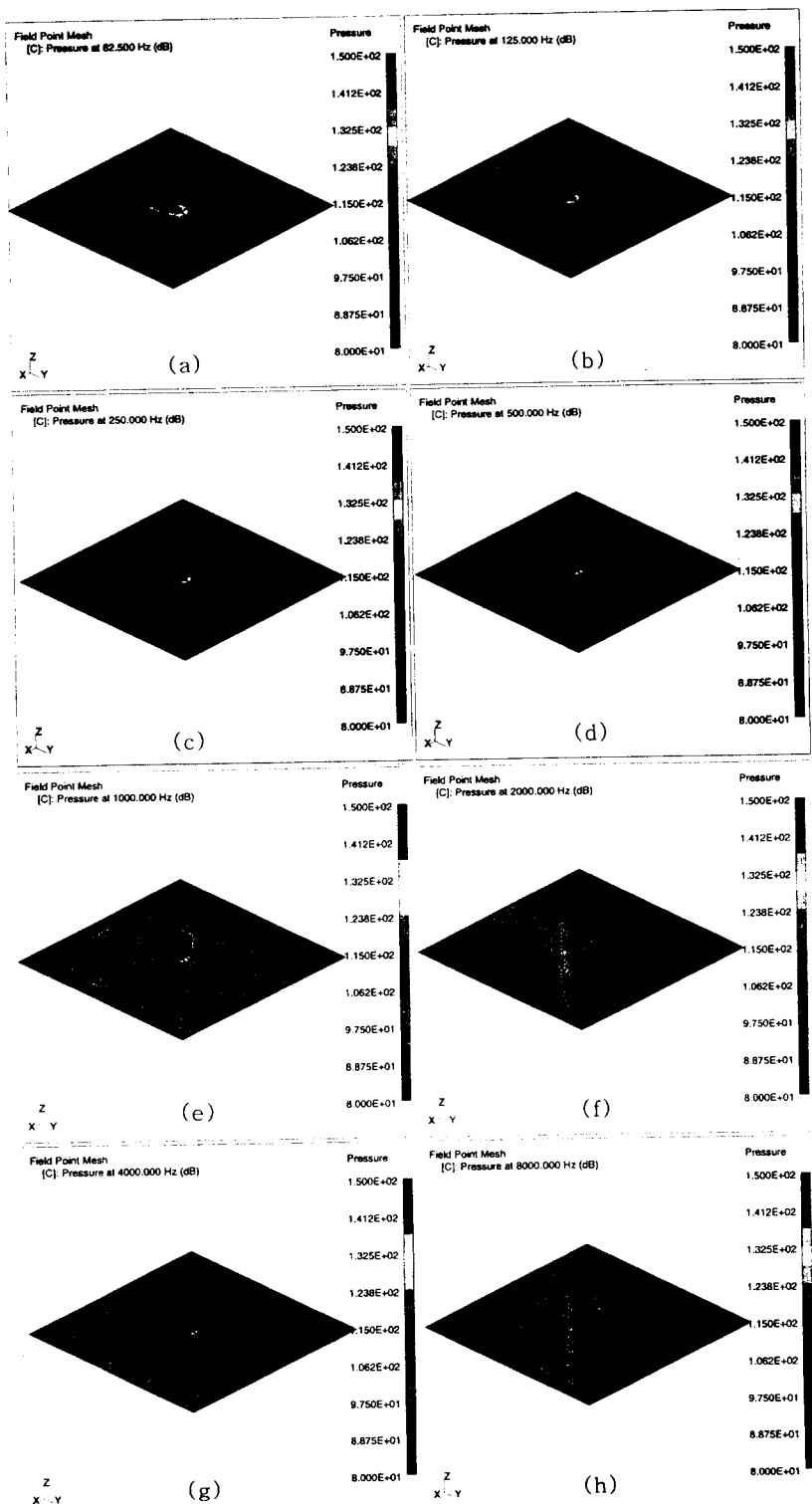


Fig.6 The sound pressure distribution calculated for the exterior of the speaker system

- (a) 63 Hz (b) 125 Hz (c) 250 Hz (d) 500 Hz
 (e) 1 kHz (f) 2 kHz (g) 4 kHz (h) 8 kHz

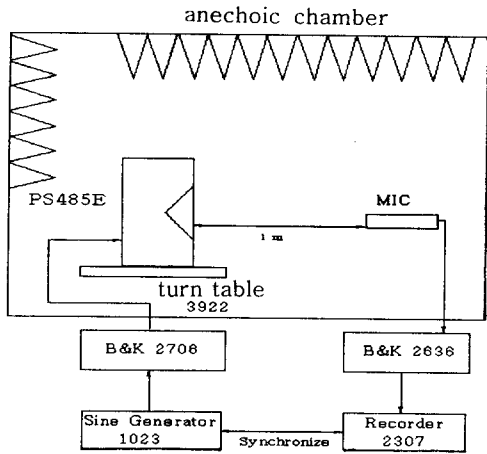


Fig.7 The experimental diagram for acoustics.

로 주파수특성을 측정하였다. 상업용 박스 스피커인 경우에 전면에서 1m 떨어진 곳을 측정점으로 하였으며, 한국공업규격(KS C 6027)의 절차에 따라 측정 주파수범위는 0 - 8000 Hz 까지로 설정하였으며, 스피커의 비선형 주파수특성의 영향을 고려하기 위하여 정현파를 이용한 주파수이동 측정방법(sine swept method)을 택하였다. 측정결과는 Fig.8과 같고, 90 - 100 dB 범위의 평균 음압크기를 나타내며, 90 Hz 이하의 주파수대역에서 급격히 그 크기가 감소하는 저주파 한계주파수(low cut-off frequency) 특성을 보이고 있다. 또한, 7000 Hz 대역의 고주파 한계주파수를 나타내고 있고, 방사임피던스가 작을 때에 음압의 최대값들인 피크가 나타 나며 구조물과의 공진발생시에는 최소값을 보이고 있음을 알 수 있다.

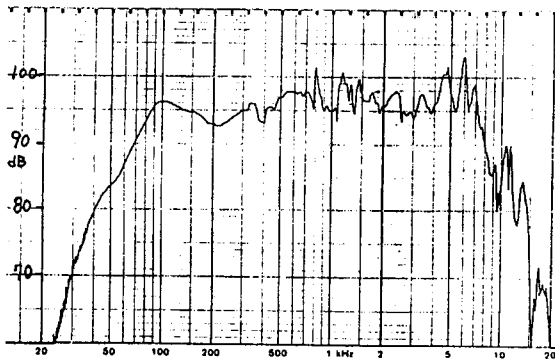


Fig.8 The frequency characteristics curve measured for the speaker system.

6. 설계변수 변경에 따른 특성변화

스피커를 설계할 때에는 음의 특성에 영향을 미치는 재료의 물리적인 성질, 기하형상요인등의 여러 인자들을 고려하여야 한다. 본 연구에서는 음향모델의 정확성이 검증된 상업용 스피커 박스모델에 대하여 콘 페이퍼 물성치와 형상두께변화에 따른 음의 주파수특성 변화를 분석하여보았다. 이러한 설계변수해석을 수행하면, 여러 설계변수 중의 특정 인자의 주파수별 영향도를 알 수 있으며 원하는 주파수특성을 갖도록 각 요소의 음향재설계를 할 수 있다.

6.1 콘 페이퍼 물성치 변경

기본모델의 콘 페이퍼 탄성계수를 변화시켜가면서 주파수특성을 계산하였다. 계산지점은 스피커 박스로부터 전면방향으로 1m 떨어진 곳을 택하였으며, 각 변화에 따른 해석결과를 표준모델과 비교도 시한 것이 Fig.9와 같다. 해석결과를 살펴보면, 표준탄성계수에 비하여 약 75% 정도 큰값을 입력한 것이 "PENINC1" 그래프이고, 작은값을 입력한 결과가 "PENDEC1" 그래프이며, "POINT1" 그래프가 기준값의 결과이다. 해석결과, 1000 Hz 이하의 중/저주파수 대역에서는 스피커 콘 페이퍼의 탄성계수 변화에 따른 음향특성변화가 거의 없으나, 1000 Hz 이상의 고주파수 대역에서는 두드러진 변화를 보이고 있다. 특히, 1000 - 2000 Hz 영역에서 탄성계수가 작을 경우에 기준결과값보다 약 4 dB 정도 큰 음압을 나타내며, 3000 Hz 이상의 영역에서는 약 8 dB 정도의 음압감소를 보이고 있다. 그 이유는 탄성계수의 감소로인한 스피커 콘 페이퍼의 강성저하로

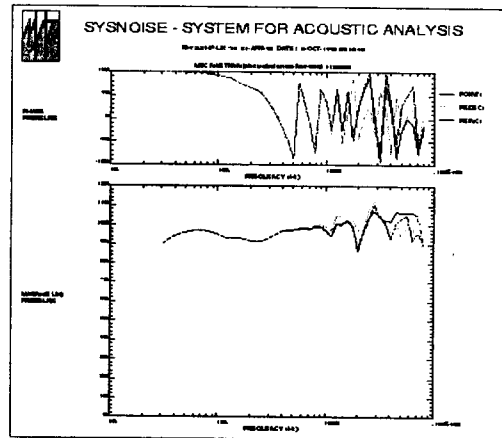


Fig.9 The frequency characteristics curve calculated for the modified model(I).

인하여 진동변위의 크기가 증가하고, 콘 페이퍼의 고유 진동수가 저주파쪽으로 이동하여 1000 - 2000 Hz 영역에서 방사효율이 증가하는 코인시던스 주파수(coincidence frequency)에 가까워지기 때문이며, 3000 Hz 이상의 고주파수영역에서는 코인시던스주파수에서 멀어져 방사효율이 감소하는 것으로 분석된다. 또한, 탄성계수가 증가한 경우는 3000 Hz 이하의 주파수영역에서는 기준값과 거의 동일한 값을 보이며, 이 이상의 고주파수 영역에서 방사효율이 감소하는 경향을 알 수 있다. 따라서 원하는 주파수특성 설계를 하기 위해서는 스피커 콘 페이퍼의 물성값이 매우 중요하며, 특히 1000 Hz 이상의 중/고주파수 대역에서 주파수특성에 커다란 영향을 주는 설계인자임을 알 수 있다.

6.2 콘 페이퍼 두께변경

스피커 콘 페이퍼의 두께를 기본모델의 두께에 비하여 12mm 만큼 증가, 감소시켜 가면서 주파수특성을 분석하였다. 이때의 두께변화량은 기본 모델의 스피커 콘 페이퍼와 더스트캡의 두께차이인 12mm 로 설정하였다. 그 해석결과는 Fig.10과 같으며, 두께 감소/기준모델/두께증가일때의 결과그래프는 "PTDEC1", "POINT1", "PTINC1"이다. 해석결과로부터, 두께가 감소할수록 2000 Hz 이하의 주파수영역에서 음압이 상승하며, 2000 Hz 이상의 고주파수영역에서는 두께감소에 따라 급격히 음압이 커짐을 알 수 있다. 그 이유는 두께감소모델인 경우에 2000 Hz 이상에서 코인시던스 주파수특성이 나타나기때문으로 분석된다. 이상의 결과를 종합해볼때, 스피커 콘 페이퍼의 두께를 조절하면 전체의 주파수영역에서 커다란 음압의 변화를 발생시킬수가 있고, 스피커의 방사

효율과 임피던스, 코인시던스 주파수등의 특성을 이용하면 설계자가 원하는 주파수특성을 갖는 음향설계를 할 수 가 있다.

7. 결론

직접방사형 스피커의 음향특성에 영향을 주는 설계변수를 찾아내거나 설계단계에서 음향특성을 예측하는 기술을 확립하기 위하여, 박스 스피커 제품 한 모델을 대상으로 스피커 콘의 진동과 스피커의 음향특성을 해석하였다. 해석대상의 스피커 콘에 대하여 유한요소법에 의한 3차원 진동해석을 하였고, 스피커 박스를 포함하는 음향모델을 구성하고 진동해석 결과를 적용하여 경계요소법에 의한 음향해석을 행하였다. 해석 결과로 콘 페이퍼의 진동특성, 스피커의 음향주파수특성 및 음압분포등을 구하였다. 해석된 음향 특성을 무향실에서의 음향실험을 통하여 검증하였다. 이와같이 확인된 이론모델에 대하여 설계변수 변경에 따른 해석을 수행함으로써 실제 스피커 설계시에 필요한 음향특성 예측을 하였다.

스피커 콘 설계변수 변경에 따른 해석을 통하여 확인한 바에 의하면, 스피커 콘 페이퍼의 물성치는 1000 Hz 이상의 중/고주파수 대역에서 주파수특성에 커다란 영향을 주고, 형상두께는 전체의 주파수영역에서 음압에 큰 변화를 준다. 이상과 같은 음향특성 해석절차는 스피커 설계시에 활용될 수 있다.

참고문헌

- (1) Olson, H. F., 1967, Music, Physics, and Engineering, 2nd Ed., Dover, New York, pp.33-6-342.
- (2) 김정호, 김진오, 김준태, 민진기, 1996, "스피커 콘의 진동해석", 대한기계학회 96춘계학술대회 논문집, pp.313-320.
- (3) Kim, J.H., Kim, J.O., Kim, J.T., and Min, J. K., 1996, "Mechanical Vibration of a Loudspeaker Cone", Proceedings of the 4th International Congress on Sound and Vibration, pp.2025-2032.
- (4) Constantine, A. B., 1989, Advanced Engineering Electromagnetics, John Wiley & Sons, New York.
- (5) Coyette, J.P., 1989, "Solution of Elasto-Acoustic Problems using a Variational FE/BE Technique", ASME winter annual meeting.

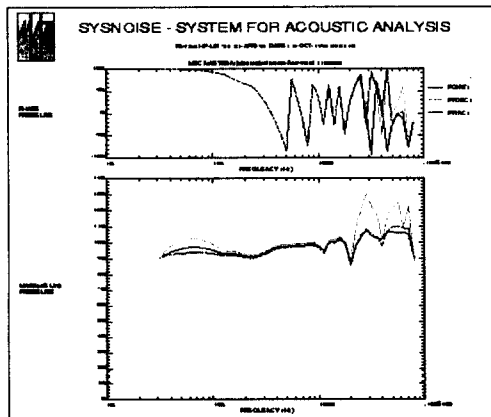


Fig.10 The frequency characteristics curve calculated for the modified model(II).