

〈논 문〉 SAE NO. 97370050

## 스피커 구멍을 통한 차실과 트렁크 공간과의 음향 연성에 대한 간접경계요소해석

### Acoustic Coupling Between Passenger and Luggage Compartments Through Loudspeaker Holes Using Indirect BEM

정 지 훈\*, 이 정 권\*\*  
J. H. Jeong, J. G. Ih

#### ABSTRACT

Sound transmission from the luggage compartment into the car cabin is important in the view-point of exhaust and road noises of passenger cars. In this paper, acoustic modal coupling between passenger and luggage compartments through loudspeaker holes at parcel shelf is dealt with for a sedan type passenger car with rigid rear seat. For these purposes, a half-scaled model car is tested and computed by the indirect BEM. Predicted acoustic transfer functions are compared with experimental ones and they agree reasonably well. It is found that the fore-aft resonance frequencies of the passenger cavity in the absence of coupling holes are tend to shift to higher frequencies when the luggage compartment is coupled to the passenger cavity.

주요기술용어 : Acoustic Modal Coupling(음향 모드 연성), Indirect Boundary Element Method(간접 경계 요소법), Passenger Car(승용차), Cavity Resonance(공동 공명)

#### 기 호 설 명

$B$  : 내삼함수의 미분함수  
 $C, D$  : 계수 행렬  
 $c$  : 음속  
 $c_i$  : 방향 표시자  
 $E_1, E_2$  : 구속 계수 행렬  
 $G(X, Y)$  : 그린함수

$k$  : 파수  
 $N$  : 내삼함수  
 $p$  : 음압  
 $R$  : 두 점 사이의 거리  
 $\vec{v}_n$  : 법선 방향 속도  
 $V_n$  : 절점에서의 법선 방향 속도 벡터  
 $X, Y, Y'$  : 3차원 공간상의 위치 벡터  
 $\underline{\mu}$  : 중층 포텐셜  
 $\mu$  : 절점에서의 중층 포텐셜 벡터  
 $\sigma$  : 단층 포텐셜  
 $\delta_s$  : S면상의 다이라크 분포

\* 한국과학기술원 기계공학과

\*\* 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

$\rho$	: 매질 밀도
$\omega$	: 각 주파수
$\Delta$	: 라그랑지 승수
$\psi$	: 임의의 함수
$\otimes$	: 승적

## 1. 서 론

자동차의 실내 음장은 자동차의 부속 구성 및 주행 조건에 따른 많은 요인들에 의해서 영향을 받고 있으며, 이로 인해 여러가지 특성의 소음이 유발된다. 따라서, 실내 소음을 줄이기 위해서는 관련된 모든 요인들에 대한 면밀한 연구가 수행되어야 한다. 복잡한 형상을 가진 차실 내부의 음장을 예측하기 위해서는 궁극적으로 수치해석적인 방법이 필요하게 되며, 근래에 들어 경계요소법이 많이 이용되고 있다.

경계요소법(Boundary Element Method; BEM)은 경계 적분방정식을 이용하여 경계면에서의 물리량의 값을 가지고 내부 또는 외부의 값을 구하는 수치적인 방법이다. 이러한 경계요소법은 경계면만 모델링을 하기 때문에 유한요소법(Finite Element Method; FEM)보다 모델링이 간단하여 시스템의 크기와 문제의 차수를 줄일 수 있다. 경계요소법은 접근 방식에 있어서 크게 직접경계요소법(Direct Boundary Element Method; DBEM)과 간접경계요소법(Indirect Boundary Element Method; IBEM)으로 나눌 수 있다.<sup>1)</sup> 직접경계요소법은 경계에서의 음압, 표면속도 또는 임피던스 중 두 개의 물리량을 이용하여 계산을 수행하는 방법으로서 병치법(Collocation Method)을 이용한다.<sup>2,3,4)</sup> 간접경계요소법은 경계면에 가상의 음원을 분포시킨 후 이들의 세기를 구하여 음장을 해석하는 방법으로서 변분법(Variational Method)을 이용한다.<sup>2,5,6)</sup> 간접경계요소법은 영역의 내부/외부/경계 구분없이 수식화가 되기 때문에, 단일 영역으로 정의되는 문제만을 해결할 수 있는 직접경계요소법에 비해서 연성 해석에 더 유리하다. 물론, 직접경계요소법도 다중영역 경계요소법(Multi-Domain BEM) 등의 방법을 통해서 영역의 내부와 외부가 연성

되어 있는 문제를 해결할 수는 있지만, 내부와 외부가 연결된 면의 추가적인 모델링이 필요하기 때문에 시스템의 크기가 커지게 된다. 본 연구에서는 연성된 음장을 해석하기 위하여 간접경계요소법을 이용하였으며, IBEM 프로그램의 개발과 더불어 다중 연결된 영역의 음장을 해석하기 위하여 접합부 제한기법(Junction Constraint Technique)과 층제한기법(Layer Constraint Technique)을 이용하였다.

배기 및 도로 소음 등은 트렁크 공간으로부터 차실 내부로 침투해 들어갈 수 있다. 이러한 류의 소음들을 제어하기 위해서 트렁크 공간의 차실 공간과의 연성 정도를 예측하는 것이 필요하게 된다. 본 연구에서는 차실과 트렁크 공간이 후방 스피커 구멍을 통하여 음향 연성을 갖는지를 해석하기 위하여 1/2 크기의 모형차를 만들었다. 이때, 자동차의 차실과 트렁크 공간은 두 개의 구멍을 가지고 있는 강체 격벽에 의해서 막혀 있는 것으로 고려하였다.

## 2. 두 공간의 음향 연성 해석을 위한 간접경계요소법 수식화

간접경계요소법은 Huygens 원리를 이용하고 있는 점에서 직접경계요소법과 대별된다. 즉, 영역을 구별짓고 있는 경계면 상에 가상적인 음원(Fictitious Source)들을 분포시켜서, 이들로부터의 음향 방사가 음장을 형성시킨다는 개념이 요체라고 할 수 있다. Fig.1에서 보이는 바와 같이 경계표면의 안쪽 및 바깥쪽 모두가 음장에 영향을 미치고 있는 일반적인 상황을 생각할 수 있는데, 이때 다음과 같은 물리량들이 정의된다.

$$\mu = p^+ - p^-, \quad (1-a)$$

$$\sigma = \frac{\partial p^+}{\partial n} - \frac{\partial p^-}{\partial n} \quad (1-b)$$

여기서,  $\mu$ 는 경계면에서의 음압의 불연속을 나타내는 중층 포텐셜(Double Layer Potential)이고,  $\sigma$ 는 경계면에서의 법선 방향 음압 미분치

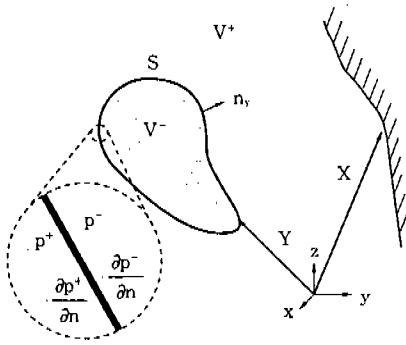


Fig.1 Geometrical Description of Conventions

의 불연속을 나타내는 단층 포텐셜(Single Layer Potential)이다. 음파는 균일하고 비점성의 이상적인 유체 매질 내에서 Helmholtz 방정식을 만족하며, 이를 만족하는 음압 \$p\$와 임의의 함수 \$\psi\$에 대해, Green의 제2정리를 사용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\int_V (\nabla^2 \psi + k^2 \psi) p dV = \int_S \left( \sigma \psi - \mu \frac{\partial \psi}{\partial n} \right) dS, \quad (2)$$

또는

$$(\nabla^2 + k^2)p = \sigma \delta_s + \frac{\partial}{\partial n}(\mu \delta_s). \quad (3)$$

여기서, \$k\$는 파수(Wave Number)이고, \$\delta\_s\$는 다음을 만족하는 이차원 영역 \$S\$면상의 Dirac 분포이다.

$$\delta_s(r-r') = 0, \quad r \neq r', \quad r \in S$$

$$\int_V f(r') \delta_s(r-r') dV(r') = \int_S f(r) dS(r) \quad (4)$$

한편, 다음과 같은 무한대에서의 Sommerfeld 방사조건을 만족하는 자유 공간 Green 함수, \$G\$를 생각할 수 있다.

$$\lim_{R \rightarrow \infty} R \left( \frac{\partial G}{\partial R} + ikG \right) = 0, \quad (5)$$

$$\nabla^2 G + k^2 G = -\delta \quad (6)$$

여기서, \$\delta\$는 삼차원 영역에서 다음과 같이 정의된 Dirac Delta 함수이다.

$$\delta(r-r') = 0, \quad r \neq r',$$

$$\int_V f(r') \delta(r-r') dV = f(r) \quad (7)$$

또한, \$G\$는 \$R\$이 3차원상의 두 점간의 거리일 때, 다음과 같이 구해진다.

$$G = \frac{\exp(-ikR)}{4\pi R} \quad (8)$$

식 (8)은 점음원과 3차원 공간상의 임의의 수음점 사이의 관계를 나타내는데, 식 (3)과 \$G\$와의 승적(Convolution Product)을 이용하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$G \otimes (\nabla^2 + k^2)p = G \otimes \left( \sigma \delta_s + \frac{\partial}{\partial n}(\mu \delta_s) \right) \quad (9)$$

식 (9)의 좌변은 식 (6)과 승적의 정의에 의해 다음과 같이 바꿀 수 있다.

$$G \otimes (\nabla^2 + k^2)p = p \otimes (\nabla^2 + k^2)G = -p \otimes \delta \quad (10)$$

식 (10)의 우변은 다음과 같다.

$$-p \otimes \delta = \int_V p(Y) \delta(X-Y) dV(Y) = -p(X) \quad (11)$$

그리고, 식 (9)의 우변의 승적은 \$\delta\_s\$의 성질을

이용하여 간단히 할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & G \otimes \left( \sigma \delta_s + \frac{\partial}{\partial n} (\mu \delta_s) \right) \\
 &= \int_V G(X, Y) \left[ \sigma(Y-Y) \delta_s(Y-Y) \right. \\
 & \quad \left. + \frac{\partial}{\partial n} (\mu(Y-Y) \delta_s(Y-Y)) \right] dV(Y) \\
 &= \int_V G(X, Y) \sigma(Y-Y) \delta_s(Y-Y) dV(Y) \\
 & \quad + \{ G(X, Y) \mu(Y-Y) \delta_s(Y-Y) \} = \\
 & \int_V \frac{\partial G(Y-Y)}{\partial n} \mu(Y-Y) \delta_s(Y-Y) dV(Y) \\
 &= \int_V \left( G(X, Y) \sigma(Y) \right. \\
 & \quad \left. - \frac{\partial G(X, Y)}{\partial n} \mu(Y) \right) dS(Y) \quad (12)
 \end{aligned}$$

이상의 결과로부터 최종적으로 식 (13)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 p(X) = \int_S \left( \mu(Y) \frac{\partial G(X, Y)}{\partial n} \right. \\
 \left. - \sigma(Y) G(X, Y) \right) dS(Y) \quad (13)
 \end{aligned}$$

이때  $X$ 는 영역의 내부/외부/경계에서의 임의의 점이고  $Y$ 는 경계면 위의 임의의 점이다. 즉, 먼저 표면에서의  $\sigma$ 와  $\mu$ 를 구하고 나면, 영역의 내부/외부/경계에서의 어떤 점에서도 음압을 구할 수가 있다.<sup>2)</sup>

간접경계요소법에서 법선 방향 속도,  $\tilde{v}_n$ , 이 주어진 경우, 경계조건은 다음과 같이 포텐셜들의 표현식으로 바꿀 수 있다.

$$\sigma = 0, \quad \mu \neq 0 \quad (14)$$

이 경우 경계면 위의 중층 포텐셜을 구하기 위

하여, 식 (13)을 법선 방향으로 한 번 미분을 하고, 공간의 한 점  $X$ 를 경계면에 위치시키면서, Cauchy 적분을 한 후, 식 (14)를 대입하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$FP \int_S \mu(Y) \frac{\partial^2 G(X, Y)}{\partial n_x \partial n_y} dS(Y) = i \rho \omega \tilde{v}_n(X) \quad (15)$$

여기서, FP는 유한 부분 적분(Finite Part Integral)을 수행해야 함을 뜻한다. 이러한 난점 때문에 간접경계요소법에서는 직접경계요소법에서와 같이 단순한 병치법은 적용하기 어려우며, 초강특이성(Hyper Singularity)을 가지는 항은 변분법을 이용하여 약특이성(Weak Singularity)을 가지는 형태로 바꾸어 계산을 수행한다. 최강특이성을 없애기 위해서  $\delta J = 0$ 일때, 식 (15)와 같게 되는 변분함수(Functional),  $J(\mu)$ 를 생각한다.

$$\begin{aligned}
 J(\mu) = \frac{1}{2} \int_S \int_S \mu(X) \mu(Y) \frac{\partial^2 G(X, Y)}{\partial n_x \partial n_y} \\
 dS(X) dS(Y) + i \rho \omega \int_S \mu(X) \tilde{v}_n(X) dS(X) \quad (16)
 \end{aligned}$$

식 (16)의 초강특이성을 갖는 첫번째 적분항은 함수의 연속성과 Green의 정리에 의해서, 다음과 같이 정규화 될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & \int_S \int_S \mu(X) \mu(Y) \frac{\partial^2 G(X, Y)}{\partial n_x \partial n_y} dS(X) dS(Y) \\
 &= \int_S \int_S G(X, Y) \left[ k^2 \mu(X) \mu(Y) (n_x \cdot n_y) \right. \\
 & \quad \left. n_x \times \nabla \mu(X) \cdot (n_y \times \nabla \mu(Y)) \right] dS(X) dS(Y) \quad (17)
 \end{aligned}$$

여기서,  $(a \cdot b)$ 는 벡터  $a$ 와 벡터  $b$  사이의 내적을 나타내며,  $a \times b$ 는 외적을 나타낸다. 식 (16)을 수치적으로 적분하기 위해서, 경계에서의 유한요소 개념을 이용한 이산화를 수행하면 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\mu = N \cdot \mu, \quad \nabla \mu = B \cdot \mu \tag{18}$$

$$J(\tilde{\mu}) = \frac{1}{2} \tilde{\mu}^T \cdot D \cdot \tilde{\mu} + i\alpha\omega \tilde{\mu}^T \cdot C \tag{19}$$

$$D = \sum_i \sum_j \int \int_{S_i, S_j} \{ (N^T(X)N(Y)K(n_x, n_y) - (B(X) \times n_x) \cdot (B(Y) \times n_y)) \} G(X, Y) dS_i(X) dS_j(Y), \tag{20}$$

$$C = \sum_i \int_{S_i} N(Y) V_n(Y) dS_i(Y) \tag{21}$$

여기서,  $\tilde{\mu}$ 는 중층 포텐셜의 절점 벡터(nodal vector)를 나타내고,  $n$ 은 법선 벡터,  $N$ 은 요소의 내삽함수(Interpolation Function),  $B$ 는 내삽함수의 미분함수를 나타낸다. 그리고,  $D$ 는 계수 행렬로서 주파수의 함수이며, 복소 대칭이다. 또,  $C$ 는 연성 행렬을 나타내며,  $V_n$ 은 법선 방향 속도의 절점 벡터이다.<sup>5)</sup>

일반적으로 공간들이 연성된 문제를 풀기 위해서는, 다중영역 경계요소법(multi-domain BEM)<sup>7)</sup>과 같이 두 공간 사이의 경계면을 모델링하고 각각의 영역을 독립적으로 풀고 난 후, 두공간 사이의 경계면에서 물리량의 연속성을 고려하여 해석한다. 그러나, 이 경우 부가적인 계산량이 대단히 많아지게 되는데, 간접경계요소법은 경계면의 내부와 외부를 동시에 고려하므로 개방된 면에 대한 고려를 할 필요가 없으며, 구조물이 교차하고 있는 곳의 모델링은 접합부 제한기법을 사용하여 해결할 수 있다. 이러한 연성 해석에서 시스템의 크기가 부가적인 계산에 의해서 필연적으로 커지게 되지만, 간접경계요소법은 항상 대

칭 행렬식을 유지하기 때문에, 비대칭 행렬식을 가지는 직접경계요소법보다 시스템의 크기가 커질수록 유리해짐은 잘 알려진 사실이다.

다중 연결된 면의 처리를 위해서 절점과 요소 사이의 관계를 조정해 주는 방법은 Fig.2의 간단한 2차원 모델을 이용하여 그 개념을 설명할 수 있다. 먼저 Fig.2에서 각각의 영역을 하첨자  $r$ ,  $l$ ,  $b$ 로써 구분을 하여 각 경계면의 접합부에서  $\mu$ 를 나타낼 수 있다. 또, 상수  $c$ 는 절점을 중심으로 한 법선 벡터가 시계방향이면 +1, 반시계 방향이면 -1을 부여한다.

$$\begin{aligned} \mu_l &= p_l^+ - p_l^-, & c_l &= +1, \\ \mu_r &= p_r^+ - p_r^-, & c_r &= -1, \\ \mu_b &= p_b^+ - p_b^-, & c_b &= -1. \end{aligned} \tag{22}$$

한편, 이 접합부 주위에서는 음압의 차이가 없으므로, 다음의 구속식이 성립한다.

$$c_l \mu_l + c_r \mu_r + c_b \mu_b = 0 \tag{23}$$

식 (23)은 접합부 절점수 만큼의 식을 갖게 되고, 이것을 행렬식으로 나타낼 수 있다.

$$E_l \cdot \tilde{\mu} = 0 \tag{24}$$

여기서,  $E_l$ 은  $n \times m$ 의 크기를 갖는 실수행렬이다.  $n$ 은 접합부 제한식의 갯수이고,  $m$ 은 절점 중층 포텐셜의 갯수이다. 또한, 열린 면을 표현

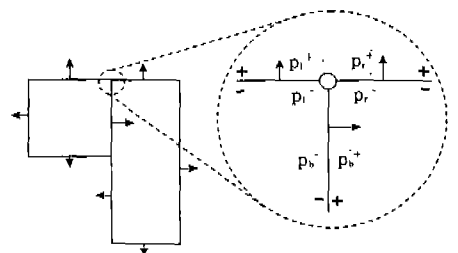


Fig.2 Basic Concept of Junction Constraint

하는 절점에서는 면의 내외부 음압이 같기 때문에, 아래의 층 구속식(Layer Constraint Equation)이 주어진다.

$$\mu_i = 0 \quad (25)$$

이때, 하첨자  $i$ 는 열린 부위의 절점 번호이다. 식 (25) 역시 행렬식으로 나타낼 수 있다.

$$E_2 \cdot \tilde{\mu} = 0 \quad (26)$$

여기서,  $E_2$ 는  $l \times m$ 의 크기를 갖는 실수행렬이고,  $l$ 은 열린 절점(Open Node)의 갯수이다. 식 (24)와 식 (26)을 고려하면, 식 (19)는 다음과 같이 승수법을 이용하여 구속식을 포함한 변분함수로 바꿔 쓸 수 있다.

$$J_c(\tilde{\mu}, \Lambda_1, \Lambda_2) = \frac{1}{2} \tilde{\mu}^T \cdot D \cdot \tilde{\mu} + i\rho\omega \tilde{\mu}^T \cdot C \quad (27)$$

$$+ \Lambda_1 \cdot E_1 \cdot \tilde{\mu} + \Lambda_2 \cdot E_2 \cdot \tilde{\mu}$$

이때,  $\Lambda_1, \Lambda_2$ 는 Lagrange 승수 벡터들이다. 식 (27)의  $J_c$ 를 최소화시키기 위해서  $\tilde{\mu}$  와  $\Lambda_1, \Lambda_2$ 에 대해서 미분하면, 다음의 식들을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial J_c(\tilde{\mu}, \Lambda_1, \Lambda_2)}{\partial \tilde{\mu}} = 0$$

$$\Rightarrow D \cdot \tilde{\mu} + E_1^T \Lambda_1 + E_2^T \Lambda_2 = -i\rho\omega C \quad (28)$$

$$\frac{\partial J_c(\tilde{\mu}, \Lambda_1, \Lambda_2)}{\partial \Lambda_1} = 0 \Rightarrow E_1 \cdot \tilde{\mu} = 0 \quad (29)$$

$$\frac{\partial J_c(\tilde{\mu}, \Lambda_1, \Lambda_2)}{\partial \Lambda_2} = 0 \Rightarrow E_2 \cdot \tilde{\mu} = 0 \quad (30)$$

식 (28~30)은 다음과 같은 최종적인 행렬식으로 표현되어 동시에 풀 수 있다.

$$\begin{bmatrix} D & E_1^T & E_2^T \\ E_1 & 0 & 0 \\ E_2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{\mu} \\ \Lambda_1 \\ \Lambda_2 \end{pmatrix} = -i\rho\omega \begin{pmatrix} C \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (31)$$

식 (31)에서 계수행렬의 역 행렬을 구하여  $\tilde{\mu}$ 를 구하면, 식 (13)의 이산화된 식 (32)를 이용하여 임의의 위치에서 음압을 구할 수 있다.

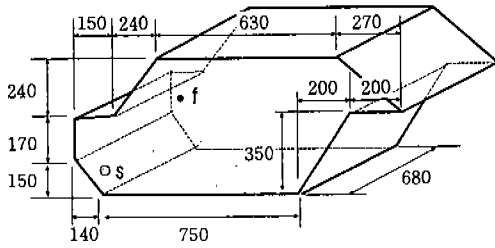
$$p(X) = \sum_i \int_{s_i} N(X) \tilde{\mu}(Y) \frac{\partial G(X, Y)}{\partial n_Y} dS_i(Y) \quad (32)$$

### 3. 시뮬레이션 및 실험

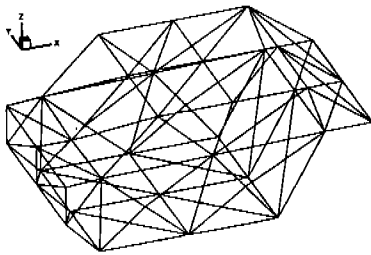
자동차의 트렁크 공간과 차실 공간이 스피커 구멍을 통해 음향 연성을 갖는지를 해석하기 위하여, 실차의 1/2크기의 모형차를 만들었다. 3 mm 두께의 철판으로 벽면을 구성하였으며, 스피커 구멍은 IBEM 모델링의 편의를 위해서 원형 면적에 상당하는 두개의 정사각형으로 변형하여 제작하였다. 차실 내부는 Horn Driver를 이용하여 음장을 형성시켰고, 운전자의 귀 위치에 마이크로폰을 위치시켜서 소음 레벨을 구했다. IBEM 모델은 2차 삼각형 요소를 사용하였고, 음원은 정속 강체 피스톤으로 모델링하였으며, 나머지 경계는 모두 강체 조건을 가지도록 하였다. 주파수 하한값은 음원의 주파수 특성상 155Hz이고, 상한 값은 요소의 크기에 따른 오차값의 제한상 350Hz이다.

#### 차실 공간만 있는 경우

먼저 트렁크 공간과 연성이 없는 차실 공간만의 음향 특성을 확인하기 위하여 차실 공간만을 모델링 하였다. Fig.3은 차실만을 고려한 모형의 크기와 IBEM 모델이다. 이 모델은 84개의 요소(2차 삼각형 요소), 170개의 절점을 가지고 있다. 이때,  $s$ 는 음원의 위치를,  $f$ 는 운전자의 귀 위치를 나타낸다. Fig.4는 관측점  $f$ 에서 실험과 시뮬레이션에 의한 결과를 비교하고 있는데, 두 결과가 대체적으로 잘 맞고 있음을 볼 수 있다. 최대값의 크기가 정확히 일치하지 않는 이유는, 내부의 감쇠를 고려하지 못하였기 때문이며, 고주파수로 갈수록 요소의 크기에 기인한 오차의 증가를 볼 수 있다. 차실 공간만의 공명 모드는



(a) Dimensions of Model Car(Unit : mm)



(b) Mesh for IBEM  
(84 Elements, 170 Nodes)

Fig.3 1/2-Scale Model of Passenger Compartment

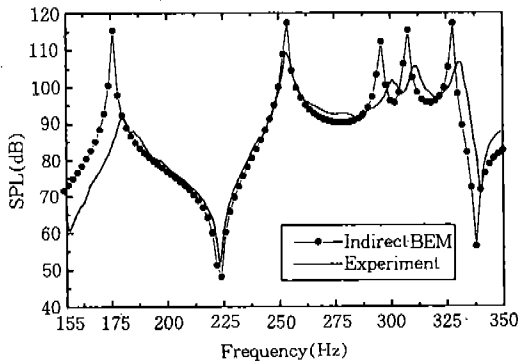


Fig.4 Acoustic Response of Passenger Cavity

관심있는 주파수 영역(155~350Hz)에 5개가 있으며, Fig.5는 해당하는 각각의 음향모드 형상을 보여주고 있다.

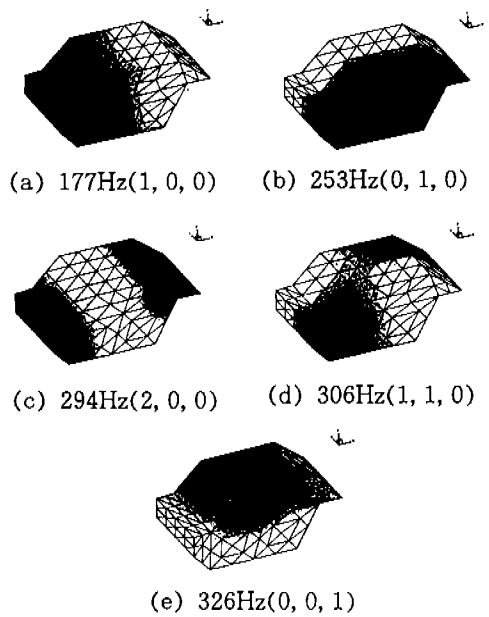


Fig.5 Acoustic Mode Shapes of Passenger Cavity

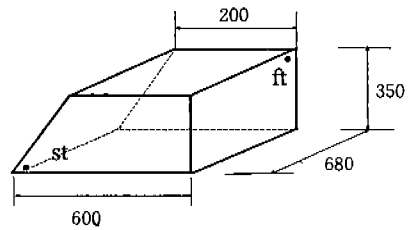


Fig.6 Dimensions of Trunk Cavity(Unit : mm)

트렁크 공간의 음향 특성

Fig.6은 트렁크 공간만을 모델링한 것인데, 이 모델은 40개의 2차 삼각형 요소, 82개의 절점을 가지고 있으며, 또한, 모든 경계에서 강체 경계 조건을 만족한다. Fig.7은 st 위치에 점음원을 두고, 관측점 ft에서의 시뮬레이션에 의한 결과를 보여주고 있는데, 관심있는 주파수 영역(155~350Hz)에서 2개의 모드가 있음을 알 수 있다. 각각의 공명 모드 형상들은 Fig.8과 같다. 트렁크 공간의 첫 번째 모드는 트렁크의 좌우 방향으로 253Hz에서 발생하고, 두 번째 모드는 트

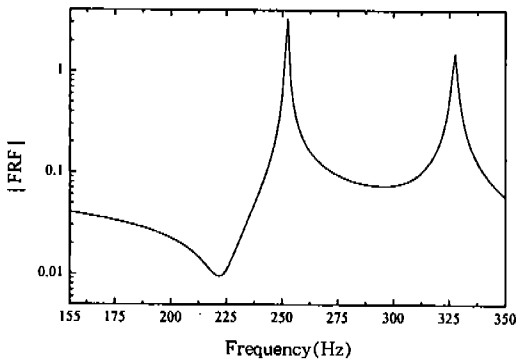
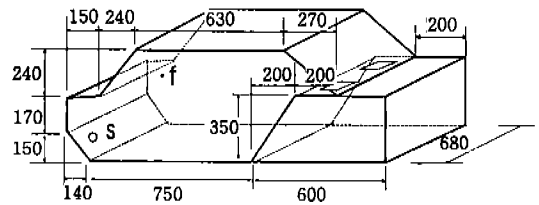
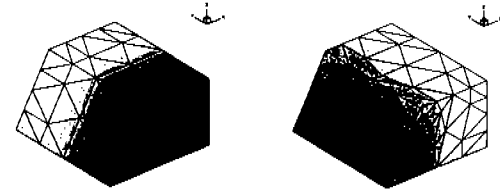


Fig.7 Acoustic Response of Trunk Cavity

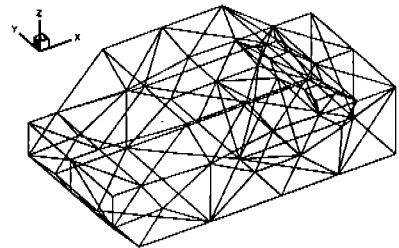


(a) Dimensions of Assembled Model Car (Unit : mm)



(a) 252.5Hz(0, 1, 0) (b) 327.5Hz(1, 0, 0)

Fig.8 Acoustic Mode Shapes of Trunk Cavity



(b) Mesh for IBEM(130 Elements, 259 Nodes)

Fig.9 1/2-Scale Model of Passenger Car with Trunk Room Attached

링크의 전후 방향으로 327.5Hz에서 발생한다.

차실 공간과 트렁크 공간이 연성된 경우

앞에서 구한 차실만의 고유한 음향 특성이 트렁크 공간의 부착과 스피커 구멍에 의해서 영향을 받는 것을 확인하기 위하여, Fig.9와 같이 기존의 차실 공간에 트렁크 공간을 연결하였다. 이때, 차실 공간과 트렁크 공간은 뒷좌석 선반 (Parcel Shelf) 상의 두 개의 스피커 구멍으로 연결되어 있다. IBEM모델은 130개의 2차 삼각형 요소와 259개의 절점, 20개의 접합부 제한조건, 16개의 층 제한조건들로 구성되어 있다. 차실만의 경우와 같은 조건에서 실험 및 시뮬레이션을 수행하였는데, Fig.10은 수음점에서의 소음 레벨 값으로서 실험과 예측의 결과가 대체로 잘 일치하는 것을 볼 수 있고, Fig.11에 각 공명 주파수에서의 모드 형상을 보여주고 있다. Fig.4와 Fig.10을 비교해 보고, 또 Fig.5와 Fig.11의 모

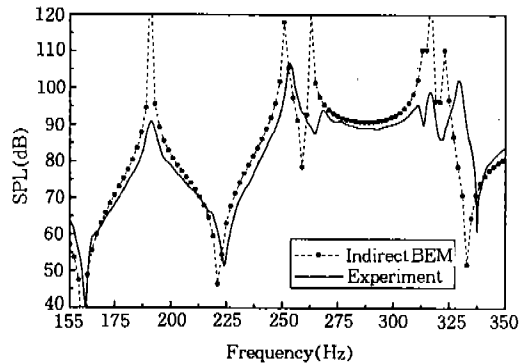


Fig.10 Acoustic Response of Coupled Compartment

드 형상들의 비교로부터 차실 내 같은 모드 형상을 갖는 공명 주파수의 이동을 예측할 수 있다. 즉, 전후 방향의 첫번째 공명 주파수는 연성 전에는 177Hz였던 것이 연성에 의해 191Hz로 이동을 했으며, 다른 나머지 전후 방향 모드의 공명 주파수들도 높아짐을 관찰할 수 있다. 그러



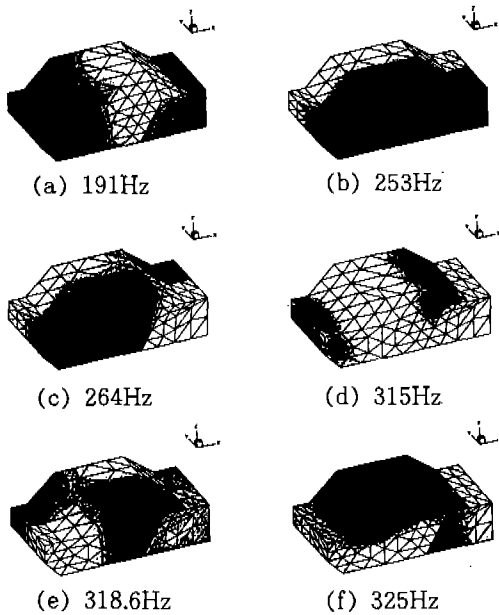


Fig.11 Acoustic Mode Shapes of Coupled Compartment

나, 좌우 방향 모드인 두 번째 공명 주파수 253Hz는 대칭의 특성상 연성에 아무런 영향을 받지 않았다. 이는 차실 내부만의 두번째 모드와 트렁크 공간의 첫번째 모드가 같은 위상으로 연성된 결과이다. 또한, 연성된 경우의 3번째 모드인 264Hz는 차실 내부만의 두번째 모드와 트렁크 공간의 첫번째 모드가 반대 위상으로 연성되고, 동시에 차실 내부만의 네번째 모드와 트렁크 공간의 첫번째 모드가 같은 위상으로 연성된 결과로 나타나는 모드이다. 트렁크 모드와 연성이 되지 않은 모드들은 191, 315, 318.6Hz들인데, 이런 주파수들에서는 트렁크 공간과 스피커 구멍이 단지 음향 시스템의 유효 강성(Effective Stiffness)만을 증가시키기 때문에 발생한다. 또한, 이러한 현상들은 하나의 공간에 불완전하게 막혀 있는 격벽이 존재한다거나, 구멍이 있는 격벽이 존재하는 경우의 모드 변화로 생각할 수 있다.<sup>6,9,10)</sup> 즉, 차실 공간과 트렁크 공간을 막고 있는 구멍 뚫린 격벽이 차실과 트렁크 공간이 일체된 공간을 가로막고 놓여져 있을 때, 경계 조건의 변화에 의해서 공명 주파수의 이동이 일어난

다. 이때, 격벽이 놓여진 위치에 따라서 주파수 이동의 여부가 결정된다. 연성된 경우의 여섯번째 공명 주파수인 325Hz의 모드 형상은, 차실 공간의 상하 모드인 326Hz 모드 형상과 트렁크 공간의 전후 방향 모드인 327.5Hz 모드 형상이 연성되어 생기고 있음을 볼 수 있는데, 연성 후는 연성 전보다 운전자 귀 위치의 소음 레벨 값이 작아진다. 이는 트렁크 공간과 스피커 구멍이 마치 Helmholtz 공명기처럼 작동하여, 차실 내 음장에 영향을 미치고 있다고 고려될 수 있는데, 이때, 스피커 구멍은 마치 강제 피스톤처럼 작용하게 된다.

#### 4. 결 론

불규칙한 형상의 차실 음장 해석을 위하여 간접경계요소 프로그램을 개발하였고, 공간 연성 해석을 위해서 접합부 제한기법과 층 제한기법 등을 연구하였다. 시뮬레이션과 실험을 차실 공간과 트렁크 공간의 스피커 구멍을 통한 연성 해석에 대해 수행한 결과, 전체적으로 전후 방향 모드들의 공명 주파수들이 차실만 있을 때와 비교하여 연성 된 경우에 더 높아졌다. 또한, 차실 내부만의 공명 모드와 트렁크 공간의 공명 모드가 여러가지 형태로 연성되어짐을 확인할 수 있었다. 한편, 특정 주파수에서는 트렁크 공간과 스피커 구멍들이 마치 헬름홀츠 공명기처럼 차실 내의 음장에 영향을 미치는 것을 관찰할 수 있었다. 본 연구는 차실 공간과 트렁크 공간의 음향 연성에 관한 기초적 연구라고 사료되며, 추후로 내부의 임피던스 경계조건 및 뒷좌석을 통한 음향 연성 등까지 고려하여 해석을 수행한다면, 차실 내 공간의 소음제어에 큰 기여를 하리라고 사료된다.

#### 참 고 문 헌

1. P. K. Banerjee, *The Boundary Element Methods in Engineering*, McGraw-Hill, pp. 9~10, 1994.
2. SYSNOISE Revision 5.0 *Theoretical manu-*

- al.* Numerical integration Technologies, Belgium, 1993.
3. H. A. Schenck, "Improved Integral Formulation for Acoustic Radiation Problem", *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 44, pp. 41~58, 1968.
  4. A. F. Seybert, B. Soenarko, F. J. Rizzo and D. J. Shippy, "An Advanced Computational Method for Radiation and Scattering of Acoustic Waves in Three Dimensions", *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 77, pp.326~368, 1985.
  5. J. P. Coyette, "A Refined Boundary Element Technique for Modeling Acoustic Radiation from Complex Structure Models", *ISAAC 4, Int. Seminar on Applied Acoustics*, Leuven, Belgium, 1993.
  6. M. A. Hamdi and J. M. Ville, "Sound Radiation from Ducts : Theory and Experiment", *J. Sound. Vib.* v. 107, pp. 231~242, 1986.
  7. 배정용, 이정권, "연성경계요소법에 의한 개방된 관의 음향해석", *한국음향학회지*, v. 12, pp. 231~242, 1986.
  8. M. Petyt, G. H. Koopmann and R. J. Pinnington, "The Acoustic Modes of a Rectangular Cavity Containing a Rigid, Incomplete Partition", *J. Sound. Vib.*, v. 53, pp. 71~82, 1977.
  9. S. Kopuz and N. Lalor, "Analysis of Interior Acoustic Fields Using the Finite Element Method and the Boundary Element Method", *Applied Acoustics*, v. 45, pp. 193~210, 1995.
  10. 정지훈, "간접 음향경계요소법을 이용한 연결된 공간의 음향해석", *한국과학기술원 기계공학과 석사학위 논문*, 1996.