

# 루프/에어갭/내장재 효과를 고려한 차실 음향-구조 연성해석

이장무\* 0강상욱\* 김석현\*\*

## The Acoustic-structural Coupling Analysis of the Passenger Cavity Considering the Characteristic of a Roof/Airgap/Trim

Lee, JangMoo Kang, SangWook Kim SeokHyun

### 1. 서론

일반적으로 차실 음향 공동과 차체 패널이 연성이 되는 계에 대한 소음 연성해석을 위한 해석 모델은 패널과 공동이 직접적으로 연성이 되는 것으로 모델링되었다. 그러나 루프와 같은 패널이 차실과 연성이 되는 경우, 루프의 진동은 차실에 직접적으로 전달되지 않고 루프 하단에 존재하는 갭과 내장판을 통하여 차실 소음에 영향을 미친다. 루프와 내장재 사이에 있는 갭의 매질은 주로 공기 또는 흡음재이다. 본 논문에서는 이러한 음향 구조 연성계를 이론적으로 해석 가능한 1차원 모델로 근사화하여 갭의 간격, 갭의 매질 특성, 내장재의 물성치 등의 변화에 따른 공동 내의 음향 응답 특성을 알아보고자 한다. 또한 위 결과를 에어갭을 고려한 3차원 차실 모델에 적용하고, 1/2 차실 모델에 대한 실험을 통하여 에어갭과 내장재의 효과를 검증한다.

### 2. 연성계 지배방정식의 유도

#### 2.1 연성계의 입력 임피던스

Fig.1에서 갭에는 파수(wave number)가  $k'$  (흡음재), 1차원 공동에는 파수가  $k$ (공기)인 매질로 이루어진 1차원 연성계에서의 특성을 알아보기 위해, 갭에서의 음압  $p_g$ , 공동에서의 음압  $p_p$ 를 식(1), (2)과 같이 가정한다.

$$p_g = (A e^{jk'x} + B e^{-jk'x}) e^{j\omega t} \quad (1)$$

$$p_p = (C e^{jkx} + D e^{-jkx}) e^{j\omega t} \quad (2)$$

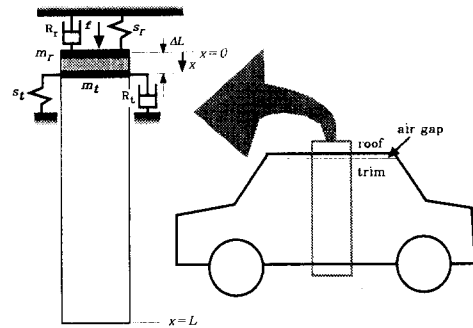


Fig. 1. One-dimensional model of the car cavity with the roof-gap-trim

여기서

$$k' = k \epsilon, \quad \epsilon = \frac{c}{c'} \quad (2-1)$$

일단, 연성계의 연성고유진동수를 구하기 위해 각 구조의 댐핑은 무시한다. 그러면 각 경계 지점에서의 경계 조건은 아래와 같다.

$$f(0, t) = S p_g(0, t) \quad \text{at } x = 0 \quad (3)$$

$$\frac{S(p_g(\Delta L, t) - p_p(\Delta L, t))}{u_p(\Delta L, t)} = j \left( m, \omega - \frac{s}{\omega} \right) \quad \text{at } x = \Delta L \quad (4)$$

$$u_g(\Delta L, t) = u_p(\Delta L, t) \quad \text{at } x = \Delta L \quad (5)$$

$$\left. \frac{\partial p_p}{\partial x} \right]_{x=L} = 0 \quad \text{at } x = L \quad (6)$$

식(1), (2)를 경계조건 식(3)~(6)에 대입하여 gap과 공동에서의 음압을 구하면 아래와 같다.

$$p_g = \frac{F \sin k'(\Delta L - x) + \{M - \alpha \cot k(\Delta L - x)\} \cos k'(\Delta L - x)}{S \sin k' \Delta L + (M - \alpha \cot k \Delta L) \cos k' \Delta L} e^{j\omega t} \quad (7)$$

\*서울대학교 기계설계학과

\*\*강원대학교 정밀기계공학과

$$p_p = -\alpha \frac{F}{S} \frac{\cos k(L-x)}{\sin k(L-\Delta L) [\sin k'\Delta L + \{M - \alpha \cot k(L-\Delta L)\} \cos k'\Delta L]} e^{j\omega t} \quad (8)$$

where  $\alpha = \frac{\rho c}{\rho' c'}$   $M = \frac{\pi \alpha}{\mu_r \Omega} (\Omega^2 - \Omega_r^2)$  전체

입력임피던스  $Z_{mt}$  는 식(9)와 같이 표현된다.

$$Z_{mt} = \frac{f}{u_g(0,t)} = j \left( m_r \omega - \frac{s_r}{\omega} \right) + \frac{S p_g(0,t)}{u_g(0,t)} \quad (9)$$

식(9)에 식(7), (8)을 대입하면 식(10)으로 정리된다.

$$Z_{mt} = j \frac{\rho c S}{\alpha} \left[ N - \frac{\{M - \alpha \cot k(L-\Delta L)\} \cos k'\Delta L + \sin k'\Delta L}{\{M - \alpha \cot k(L-\Delta L)\} \sin k'\Delta L - \cos k'\Delta L} \right] \quad (10)$$

where  $N = \frac{\pi \alpha}{\mu_r \Omega} (\Omega^2 - \Omega_r^2)$

식(10)을 공동의 첫번째 고유진동수( $\omega_p$ )로 무차원화 하면 식(11)로 정리된다.

$$Z'_{mt} = \frac{Z_{mt}}{\rho c S / \alpha} = j \left[ N - \frac{(M - \alpha \cot \pi \Omega) \cos(\pi \Omega \eta \varepsilon) + \sin(\pi \Omega \eta \varepsilon)}{(M - \alpha \cot \pi \Omega) \sin(\pi \Omega \eta \varepsilon) - \cos(\pi \Omega \eta \varepsilon)} \right] \quad (11)$$

where,

- $\Omega = \omega / \omega_p$  : nondimensionalized coupled frequency of the 1-D system
- $\Omega_r = \omega_r / \omega_p$  : nondimensionalized coupled frequency of 1-D roof
- $\Omega_t = \omega_t / \omega_p$  : nondimensionalized coupled frequency of 1-D trim
- $\mu_r = \rho L S / m_r$  : mass ratio of the cavity for the roof
- $\mu_t = \rho L S / m_t$  : mass ratio of the cavity for the trim
- $\eta = \Delta L / L$  : length ratio of the gap for the cavity

## 2.2 튜브에서의 강제진동 응답의 계산

다음으로 각 구조의 댐핑을 무시한 경우, 차실에서 강제진동 응답  $p_p(L,t)$ 는 식(12)와 같이 구해진다.

$$p_p(L,t) = \alpha \frac{F e^{j\omega t}}{S Z'_{mt}} \frac{1}{\sin \pi \Omega \{ (M - \alpha \cot \pi \Omega) \sin(\pi \Omega \eta \varepsilon) - \cos(\pi \Omega \eta \varepsilon) \}} \quad (12)$$

where

$$\alpha = \frac{(\rho c)}{(\rho' c')}, \quad \varepsilon = \frac{c}{c'}$$

그리고 각 구조의 댐핑을 고려한 경우의 차실에서 강제진동 응답  $p_{p,d}(L,t)$ 는 식(13)와 같이 구해진다.

$$P_{p,d} = \frac{\alpha F}{S} \frac{1}{\sin(\pi \Omega) \sqrt{X^2 + Y^2}} \quad (13)$$

where

$$\begin{aligned} X &= N \Phi_2 - R_r R_t \sin(\pi \Omega \eta \varepsilon) - \Phi_1 \\ Y &= R_r \{ \cos(\pi \Omega \eta \varepsilon) - N \sin(\pi \Omega \eta \varepsilon) \} - \Phi_2 R_r \\ \Phi_1 &= \{ M - \alpha \cot(\pi \Omega) \} \cos(\pi \Omega \eta \varepsilon) + \sin(\pi \Omega \eta \varepsilon) \\ \Phi_2 &= \{ M - \alpha \cot(\pi \Omega) \} \sin(\pi \Omega \eta \varepsilon) - \cos(\pi \Omega \eta \varepsilon) \\ R_r &= R_r / \rho c S, \quad R_t = R_t / \rho c S \end{aligned}$$

## 2.3 FE모델과의 비교를 통한 1차원 모델의 검증

연성계의 고유진동수는 식(11)로부터 구할 수 있다. 식(11)의 허수부, 즉 임피던스의 리액턴스(reactance)부분이 영(zero)이 될때 연성계가 공진하므로, 이로부터 연성계의 공진주파수를 구할 수 있다.

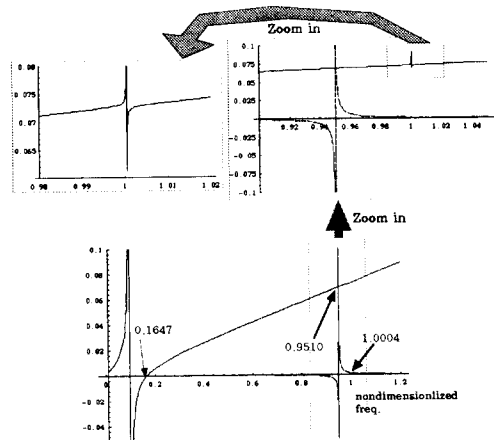


Fig. 2. The characteristic curve of the structural-acoustic model

그림2의 특성곡선으로부터 연성계의 고유진동수를 구하면 표1과 같다. 이때 각각의 구조의 물성치와 음향공동의 길이는 다음과 같다.

$$\Omega_r = \frac{\omega_r}{\omega_p} = 0.95, \quad \Omega_t = \frac{\omega_t}{\omega_p} = 0.095$$

$$\mu_r = \frac{\rho L S}{m_r} = 4.114e-4, \quad \mu_t = \frac{\rho L S}{m_t} = 4.114e-3$$

$$\eta = \frac{\Delta L}{L} = 0.02353, \quad \varepsilon = \alpha = 1$$

Table 1. Comparison of the theoretical analysis with FEM analysis

Hz	Theory			FEM
	No couple	Without gap	With gap	
ST(trim)	9.5		16.47	16.5
ST(roof)	95.0	94.960	95.10	95.1
AC(cavity)	100.0	100.042	102.41	102.6
AC(gap)	Higher		Higher	Higher

다음으로 유도되어진 이론식들의 검증을 위해 이론에 의한 강제응답곡선을 그림3에서 유한요소 해석과 비교하였다. 여기서 응답레벨의 차이는 유한요소 해석 모델이 완전한 1차원이 아닌 3차원 모델이기 때문에 야기되어졌다.

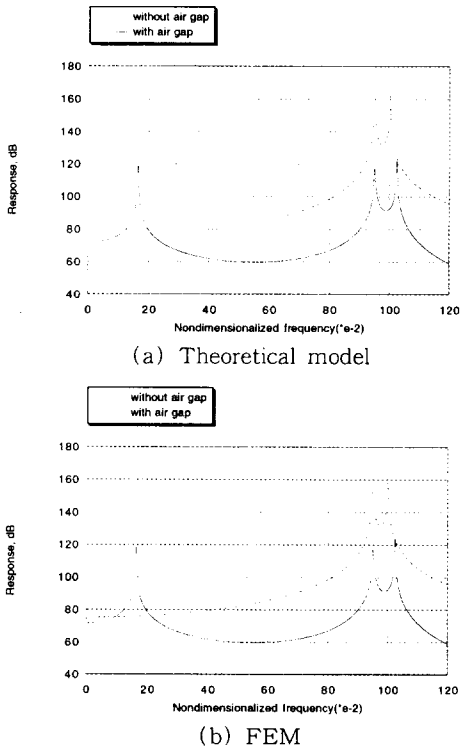


Fig. 3. Comparison of forced responses of the theoretical model and the FEM

### 3. 에어갭의 물성치 변화에 따른 강제진동응답 해석

#### 3.1 에어갭의 두께

본 해석에서는 차실의 길이에 대한 에어갭의 두께의 비를 무차원 변수로 사용한다. 해석 결과 그

림4와 같이 에어갭의 폭이 커질수록 응답레벨은 감소한다.

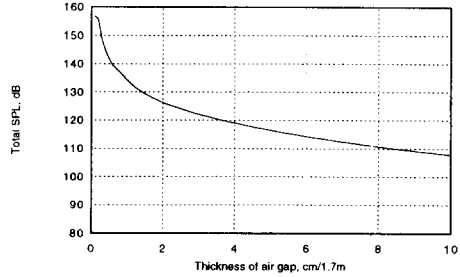


Fig. 4. Forced response versus the thickness of the air gap

#### 3.2 내장재(trim)의 고유진동수

루프의 고유진동수에 대한 내장판의 고유진동수 비를 무차원 변수로 설정하였다. 그림 5와 같이 내장재의 고유진동수가 음향공동의 고유진동수에 가까워짐에 따라 응답레벨이 커진다.

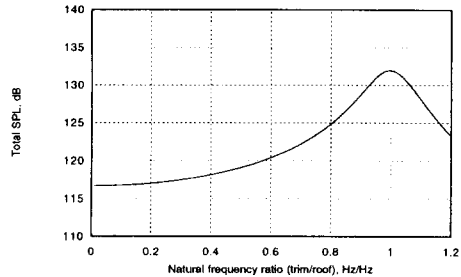


Fig. 5. Forced response versus the natural frequency of the trim

#### 3.3 내장재의 질량

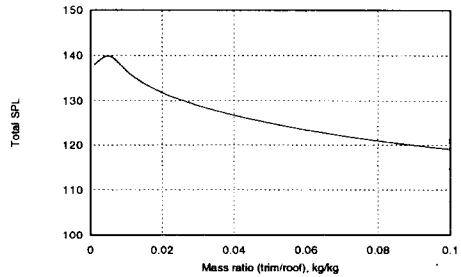


Fig. 6. Forced response versus the mass of the trim

루프의 질량에 대한 내장재의 질량을 무차원 변수로 설정하였다. 그림6과 같이 내장재의 질량이 커질수록 응답레벨은 감소한다.

#### 4. 흡음재의 물성치 변화에 따른 음향응답레벨의 비교

##### 4.1 흡음재의 밀도

공기 밀도에 대한 흡음재의 밀도를 무차원 변수로 사용하여 구한 음향응답레벨의 변화 경향은 그림7과 같이 흡음재의 밀도가 커질수록 응답레벨은 증가한다.

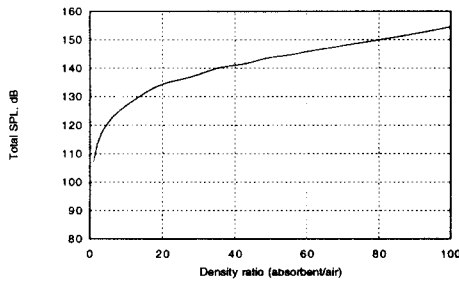


Fig. 7. Acoustic response versus the density of the absorbent material

##### 4.2 흡음재의 음속

공기 음속에 대한 흡음재의 음속 비를 무차원 변수로 설정하여 음향 응답레벨의 변화 경향을 그림8과 같이 알아보았다. 음향응답레벨을 최소로 하는 흡음재의 음속은 주기성을 가지고 있다. 음속비가 0.014, 0.033의 값을 가질때 응답이 최소가 되고, 0.022 근처에서 최대가 됨을 알 수 있다. 공기의 음속을 340m/s로 할 경우, 응답은 흡음재의 음속이 11m/s, 5m/s의 값을 가질때 최소, 7.6m/s의 값을 가질때 최대이다.

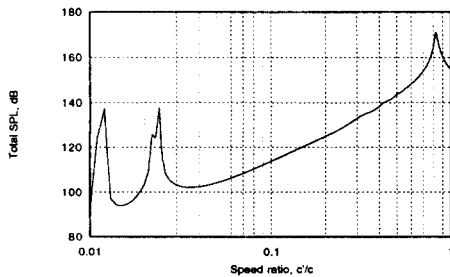


Fig. 8. Acoustic response versus the propagation speed of the absorbent material

#### 4.3 흡음재의 음향 임피던스

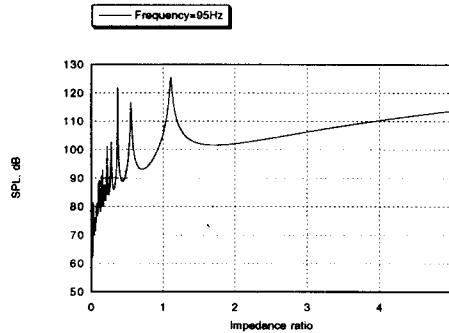


Fig. 9. The acoustic response versus the characteristic acoustic impedance

Table 2. Tendencies of the responses by the variations of the gap-trim parameters

Parameter			Response
Air gap	thickness	increase	decrease
	natural frequency	close to 1	increase
Trim	mass	increase	decrease
	density	increase	increase
Absorbent material	propagation speed	0.014, 0.033	min.
	characteristic acoustic impedance	0.4, 0.7	min.

실제로 실험적으로 결정할 수 있는 흡음재의 대표적인 물성치가 음향임피던스이다. 그림9는 흡음재의 음향임피던스 변화에 따른 음향응답레벨의 주기적인 변화 경향을 보여준다. 이때 무차원 변수는 공기의 음향임피던스에 대한 흡음재의 음향임피던스 비이다. 음향응답을 최소로 하는 비 값은 0.4, 0.7이다. 공기의 음향임피던스를 411로 할 경우, 흡음재의 음향임피던스는 164, 288이 된다. 이론적으로는 위와 같은 특성을 가지는 흡음재를 사용할 경우 상당한 음압레벨의 감소가 발생함을 확인할 수 있다. 표2에서 갭/내장재 관련 특성치의 변화에 따른 응답레벨의 변화 경향을 요약하였다.

#### 5. 루프/에어갭/내장재 연성계를 가진 차실 반 모델에 대한 실험 및 유한요소해석

5.1 에어갭의 유무에 따른 음향가진-음향응답 실험 루프를 강체벽으로 대체한 상태에서 에어갭의 유무와 에어갭의 두께에 따른 음향응답을 측정하였다. 실험 셋업은 그림10과 같다.

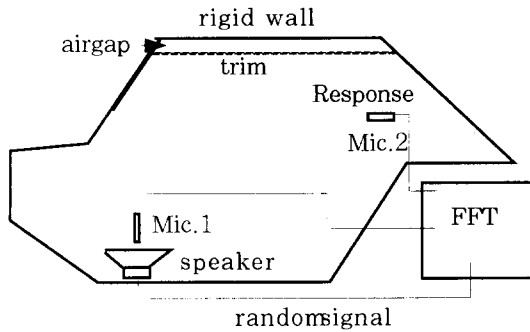


Fig. 10 set-up for the experiment of the half scale model with rigid wall/airgap/trim

그림11에서 알 수 있듯이 에어갭의 존재하면서 동시에 에어갭의 폭이 클수록 음향 응답레벨이 상대적으로 고주파수 대역에서 많이 줄어듦을 확인할 수 있다. 특히 에어갭 효과가 지대한 모드 피크는 차실의 높이 방향으로 절면을 갖는 모드의 피크들이다. 이는 에어갭과 내장재의 위치가 해당 모드들의 안티노드(anti-node)에 위치해 있기 때문이다. 동시에 에어갭의 간격이 클수록 연성체의 응답레벨의 감소 뿐만아니라 공진주파수 특성도 바뀌어 알 수 있다.

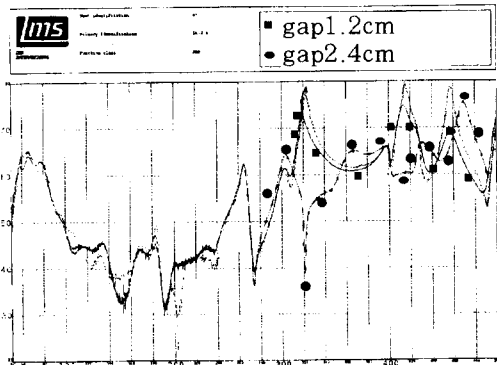


Fig. 11 Acoustic frequency response of the cavity with/without airgap-trim (resp. pt. : driver)

5.2 차실 반모델에 대한 구조가진-음향응답 실험

그림12와 같은 실험셋업 상태에서 음향-구조 연성 실험이 수행되어졌다. 루프를 가진하는 가진기의 가진소스는 랜덤신호이며, 루프에서의 진동 레벨과 차실에서의 음향응답레벨을 측정한다. 그림13은 에어갭/내장재 유무에 따른 음향응답특성을 보여준다. 음향응답의 측정점의 위치에 따라 음향주

파수 응답 특성은 상당히 다르다. 운전석의 위치에서 측정된 음향응답 레벨은 그림13a와 같다. 에어갭이 있을때, 58Hz 구조연성모드 피크를 제외하면 다른 음향 공진모드 연성 피크들에서는 대체로 응답레벨이 감소하고 동시에 공진 주파수도 많이 변화됨을 알 수 있다. 그리고 뒤승객의 위치에서의 음향응답은 그림13b와 같다. 에어갭의 유무에 따른 연성 모드들의 피크들의 응답레벨의 변화량은 모드의 특성에 따라 다름을 확인할 수 있다. 이는 루프 구조모드와 차실 음향모드간의 복합적인 연성 특성에 의해 기인한 것이다. 이는 다음 절에서 유한요소 해석을 통해 구체적으로 파악되어진다. 표3은 실험에 의한 루프와 내장재 그리고 차실의 비연성 고유진동수를 보여준다.

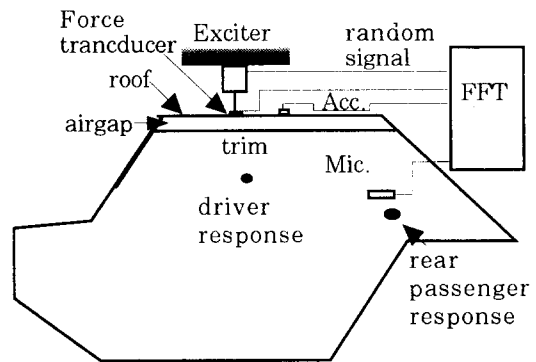


Fig. 12. set-up for the experiment of the half-scale model with roof/airgap/trim

Table 3 Natural frequencies of roof, trim, and cavity by test(Hz)

#	roof	trim	cavity
1	54.6 (0,0)	29 (0,0)	180.5(1,0,0)
2	119.1(1,0)	58 (1,0)	265.2(0,1,0)
3	123.3(0,1)	66 (0,1)	301.1(2,0,0)
4	185.1(1,1)	92 (1,1)	316.8(1,1,0)
5	209.8(2,0)	(2,0)	321.5(0,0,1)
6	237.0(0,2)	(0,2)	392.2(2,1,0)
7	274.8(2,1)	130(2,1)	410.2(0,1,1)
8	281.3(1,2)	140(1,2)	425.4(3,0,0)
9	331.8(3,0)	169(2,2)	457.8(2,0,1)
10	341.6(0,3)		494.9(3,1,0)
11	380.0(2,2)		

\* ()는 절면의 수를 나타냄.

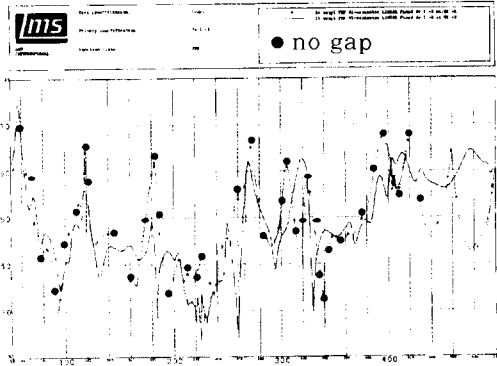


Fig. 13a Acoustic frequency response at driver point by test(solid line : with gap)

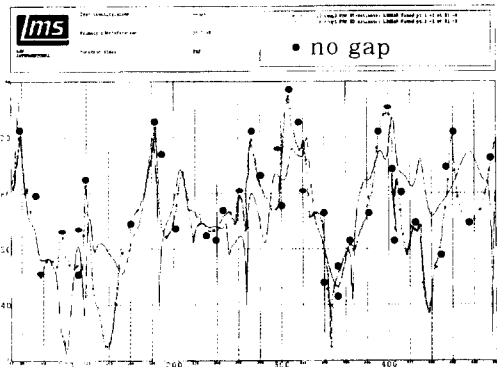


Fig. 13b Acoustic frequency response at rear passenger point by test(solid line : with gap)

### 5.3 유한요소해석을 통한 실험적 검증

그림14와 같은 루프, 에어갭, 내장재, 그리고 차실 공동을 가진 유한요소 모델에 대해 5.2절의 실험과 같은 가진/측정 위치에서의 음향주파수응답특성을 구한다. 그 결과는 그림15에 나타나 있다.

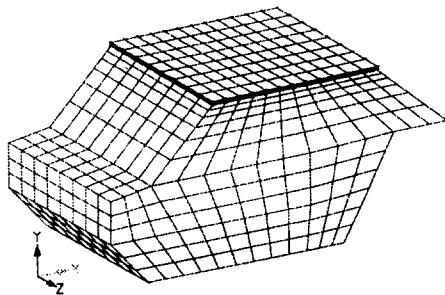


Fig. 14. FE model of the half-scaled car compartment with the roof/ air gap/trim

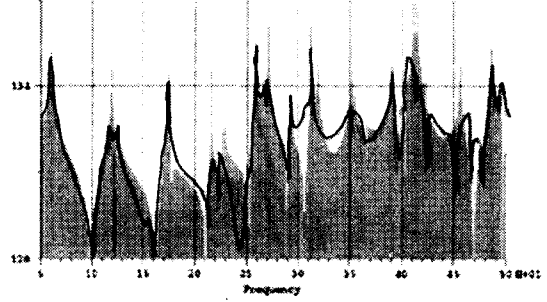


Fig. 15a Acoustic frequency response at driver point by FEA(solid line : with gap)

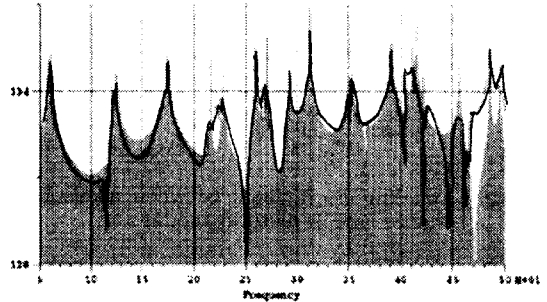


Fig. 15b Acoustic frequency response at rear passenger point by FEA(solid line : with gap)

주파수응답 특성을 보면, 피크 응답레벨의 변화량은 해당모드의 주파수와 모드 형상에 따라 다르다. 이를 위해 음향-구조 연성계 소음해석 전용 프로그램인 ACSTAP에 의해 연성계수(음향모드와 구조모드간의 연성도)를 그림16과 같이 구한다. 모드간의 연성도를 살펴보면 음향 첫번째 모드는 구조 세번째모드와, 음향 두번째 모드는 구조여덟번째모드와, 음향 여섯번째 모드는 구조 12, 13모드와, 그리고 음향모드 7은 구조모드 12, 13과 연성이 크다. 또한 음향 다섯번째 모드는 차실의 높이 방향으로 절면이 있는 모드이기 때문에 가진력 방향의 특성상 많은 구조 모드들과 연성을 이루고 있음을 알 수 있다. 응답함수에서도 이 모드의 피크는 큰 응답 레벨 강하가 발생하였다. 그리고 연성도가 큰 음향과 구조 모드들의 응답레벨도 큰 강하가 발생하였다. 특히 연성 음향모드에 비해 상대적으로 연성 구조모드가 주요한 응답레벨 강하를 보이며 연성이 작은 모드의 레벨은 오히려 커지는 경우도 발생함을 알 수 있다. 표4는 유한요소해석에 의한 루프, 내장재, 그리고 차실의 고유진동수를 보여준다. 표3의 실험 결과와 거의 일치함을 보여준다.

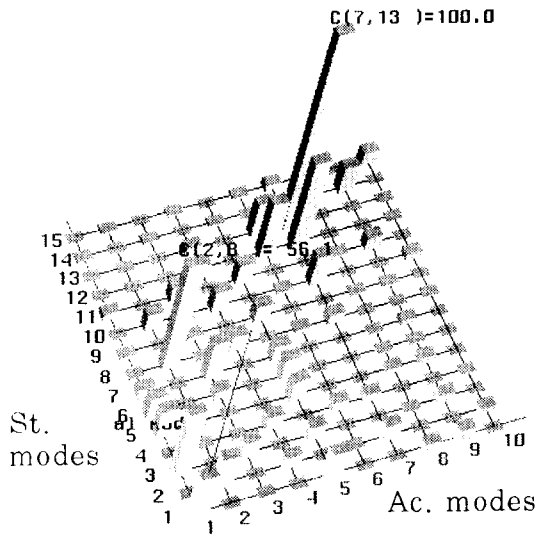


Fig. 16 Coupling coefficients between acoustic modes and structural modes

Table 4 Natural frequencies of roof, trim, and cavity by FEA(Hz)

#	roof	trim	cavity
1	59.8 (0,0)	30 (0,0)	174(1,0,0)
2	119.1(1,0)	60 (1,0)	259(0,1,0)
3	125.0(0,1)	64 (0,1)	294(2,0,0)
4	176.1(1,1)	89 (1,1)	312(1,1,0)
5	216.4(2,0)	108 (2,0)	319(0,0,1)
6	228.1(0,2)	116(0,2)	392(2,1,0)
7	268.8(2,1)	134(2,1)	411(0,1,1)
8	271.1(1,2)	139(1,2)	423(3,0,0)
9	350.5(2,2)	173(2,2)	457(2,0,1)
10	352.5(3,0)		495(3,1,0)
11	366.6(0,3)		
12	404.1(3,1)		
13	414.8(1,3)		

\* ( )는 절면의 수를 나타냄.

## 6. 결론

자동차에서 루프, 에어갭(흡음재 갭), 내장재, 그리고 차실로 이루어진 복잡한 연성계를 1차원 모델로 근사화하여, 음향응답레벨의 최소화를 위한 최적의 갭과 내장재의 특성을 파악하였다.

음향가진-음향응답 실험에서 에어갭은 차실의 음향모드들 중 상대적으로 고차모드의 응답레벨을 감소시키며, 특히 루프 근처에 안티노드가 위치하는 모드에 큰 효과를 발휘한다. 그리고 갭의 간격이 클수록 응답레벨의 변화에 미치는 효과가 크며 연성계의 공진 특성을 변화에 큰 영향을 미친다.

구조(루프)가진-음향응답 실험 및 해석에서 실험과 해석 결과의 경향은 대체로 근사하며, 해석에서 음향응답레벨의 감소가 발생하는 모드는 음향-구조 모드간의 연성도가 큰 모드들이며 연성도가 작은 경우의 피크들은 오히려 응답레벨이 커졌다. 특히, 루프 근처에 안티노드가 위치하는 모드의 경우 대부분의 구조모드와 연성이 되고 있으며, 이 결과 큰 응답레벨의 강하가 발생하였다. 그리고 연성이 큰 모드들의 피크의 경우 연성 음향모드 보다 연성 구조모드의 피크가 크게 응답레벨의 강하가 발생하였다. 이러한 현상은 실험과 해석에서 동시에 발생하였다. 아울러 에어갭과 내장재로 이루어진 연성계는 차실의 공진 특성 변경에 지대한 영향을 미침을 확인하였다.

## 후기

본 연구는 '차세대 자동차 안전도 공통 기반 기술/저소음진동 차체설계기술개발' 분야의 일부 과제로 수행되어졌다.