

구멍에 의하여 연성 된 차실-트렁크 계의 음향모드 특성

이진우*, 김규범*, 이장무**, 김석현***

Acoustic Modal Characteristics of The Passenger Compartment-Trunk Coupled by Holes

Jin Woo Lee, Gyoo Beom Kim, Jang Moo Lee and Seock Hyun Kim

ABSTRACT

Acoustic modal characteristics are investigated on the passenger compartment and trunk coupled system. One-dimensional theoretical model is proposed and the validity of the model is verified by experiment on a simplified compartment model. The theoretical model identifies the occurrence of a new low frequency compartment mode, which does not exist in the uncoupled passenger compartment. The effect of the hole size on the compartment modes is analytically and experimentally examined.

1. 서론

차실의 음향모드 특성은 저주파대역의 실내 소음을 지배하는 중요한 인자이다. 구조 또는 공기 전달에 의하여 실내로 유입되는 진동 음향 에너지가 자체나 차실의 특정 음향모드를 진동 시켜서 심각한 부밍 소음(booming noise)을 발생시킬 수가 있기 때문이다(1,2). 현장에서는 차체나 차실을 대상으로 유한요소 법에 근거한 수치적 방법으로 모드 특성치를 계산하여 소음특성을 예측하고, 시차 제작 후에는 해석 결과와 함께 진동 및 음향 모드시험 데이터를 사용하여 문제의 해결 방향을 찾는다(3,4). 음향모드는 차실의 크기에 따라 거의 결정되므로, 설계상의 제약이 있으나, 천정부의 에어 갭이나 트렁크 공동과의 연성에 의하여 모드 특성이 변화된다는 사실이 밝혀졌다(5,6). 특히, 패키지 트레이 패널상의 각종 구멍은 차실과 트렁크를 연결시키는 중요한 음향학적 경로가 된다. 이성우, 차실과 트렁크 공동이 연성 됨으로써, 저주파수 대역에서는 차실만의 음향모드 특성과는 전

혀 다른 연성계의 모드 특성을 보이며, 예측과 해결 방향의 설정에 혼란을 야기시킨다. 패키지 트레이 패널은 실내 공기 순환용 구멍이나 전장 케이블 구멍을 가지게 되므로 완전한 기밀처리가 어렵고 결과적으로 두꺼운 흡/차음재로 구성된 뒷좌석에 비하여 음향에너지의 연결 통로가 된다. 그러나, 그 연성계의 해석 모델링은 매우 복잡하므로, 아직까지 이에 대한 연구가 이루어지지 못하고 있다. 본 연구에서는 패키지 트레이 구멍에 의하여 차실과 트렁크 연성계의 음향모드 특성이 어떠한 영향을 받게 되는지를 규명하기 위하여 저주파 대역에 적합한 단순화된 이론 모델을 제시하고, 부밍 소음에 관련되는 차실 음향 모드 특성을 파악하고자 한다.

2. 차실-트렁크 연성계의 주파수응답특성

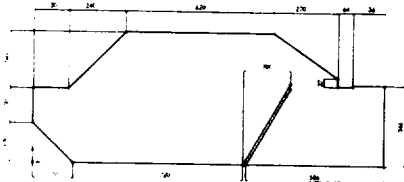
이론 모델을 결정하기에 앞서, 실험을 통하여 차실의 주파수응답 특성을 파악한다. 실차의 경우 내부 형상이 복잡하고 내장재의 영향으로 댐핑이 커서, 모드의 연성특성을 뚜렷하게 관찰하기가 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 Fig.1 에서와 같이, 12mm 두께의 아크릴판으로 실차 크기의 1/2 모형

* 서울대학교 대학원

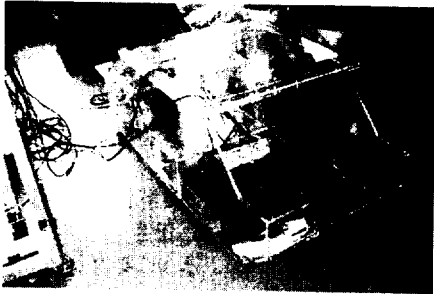
** 서울대학교

*** 강원대학교

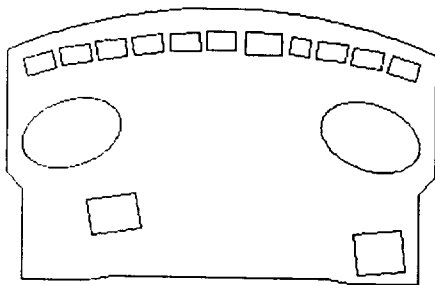
차실을 제작하여 실험하였다. 차실의 패키지 트레이 패널은 Fig.2 (a)와 같이 많은 구멍을 갖는 이중 강판으로 구성되어 있다. 실험 모델에서는 Fig.2 (b)와 같이, 실제 패키지 트레이에 존재하는 구멍 크기의 1/2 정도 되는 구멍을 12mm 두께의 아크릴판에 내어 해당 위치에 장착시켰다.



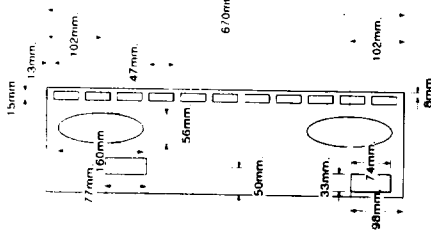
(a) Dimensions of compartment model



(b) 1/2 acrylic compartment model
Fig. 1 1/2 Vehicle compartment model



(a) Simplified real package tray



(b) Hole dimensions of package tray used
Fig. 2 Package tray model

공동내의 주파수응답 특성과 모드별 음압 분포

를 확인하기 위하여, Fig.3 에서 명시된 위치(A or B)에서 스피커로 가진하고 마이크로폰으로 음압을 측정하였다. 먼저 구멍 크기에 따른 효과를 보기 위하여, 구멍을 완전히 막은 상태에서 구멍 크기를 점차 증가시키면서 5 가지 경우에 대하여 주파수응답 함수의 변화를 보았다. Fig.3 의 A 지점에 스피커를 놓고 가진 할 때, 차실 공동 안의 1 번 위치에서 측정한 각 경우의 주파수응답함수를 Fig.4 (a)에서 비교한다. 구멍이 있는 경우, 막힌 상태에서는 없었던 저주파대역의 피크 성분이 출현하는 것을 볼 수 있다. 이 고유주파수를 좀더 명확히 파악하기 위해서 B 지점에 스피커를 놓고, 앞서와 같은 패키지 트레이 장착 조건에 대한 음장 시험을 수행한 결과를 Fig.4 (b)에 나타내었다. Table 1 의 측정결과에서, 0 차 모드로 표기된 새로운 음향 공진 피크는 구멍의 크기 증가에 따라 주파수도 증가함을 알 수 있다.

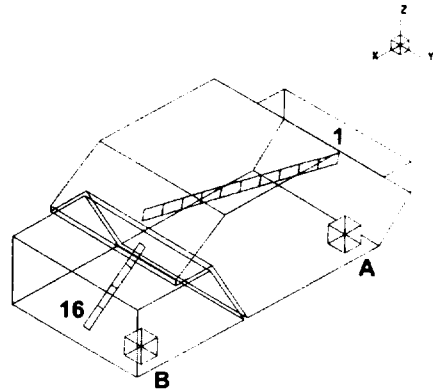


Fig. 3 Excitation and measurement positions

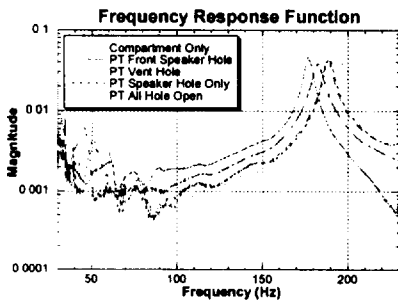
Table 1 Changes in frequencies by hole size

1	Compartment Only	-	-	177.33	258.43
2	Front Speak. Hole	3315	46.49	183.96	259.69
3	Vent. Hole	5790	54.99	187.95	260.19
4	Speaker Hole	9865	58.59	188.20	260.24
5	All Hole	18970	70.73	195.20	260.94

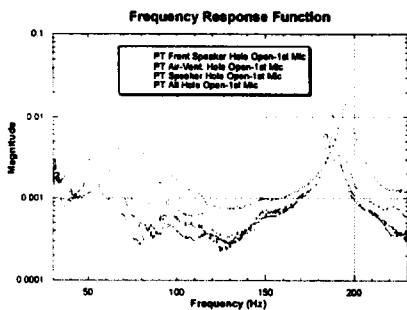
(Total area of the package tray used: 130651.6)

그리고, 이와 함께 차실의 1 차 공진 주파수 (177.3Hz)역시 구멍 크기와 함께 증가함을 알 수 있다. 이러한 변화는 차실만을 대상으로 하는 유

한요소 해석결과와는 크게 다르며, 저주파대역의 실내 주파수 응답 특성에 영향을 미칠 것이다. 스피커 앞에 존재하는 구멍을 통하여 연성된 공동계(case2)의 모드별 음압 분포 측정 결과를 Fig.5에 보인다. 0 차 모드는 Fig.5 (a)에서와 같이 길이 축상으로 음압 분포가 형성되는 모드로서 패키지 트레이 앞에서 절면을 지나 트렁크 내부의 음압이 차실 내부에 비해 상당히 크다. 1 차 모드는 Fig.5 (b)와 같이 운전자 귀 위치에서 음압이 매우 작은 통상적인 차실 1 차 모드를 보인다. 두 모드는 주파수 차이는 큰 반면, 절면은 모두 하나이므로 실차 시험시 가끔 혼란을 주기도 한다. 모형 차실의 크기가 실차의 1/2 정도이므로, 모형 차량의 고유주파수의 1/2 배 정도되는 주파수에서 실차의 고유음향모드가 발생할 가능성이 있다. 2 차 모드의 경우, Fig.5 (c)에서와 같이 차실 폭 방향 축상에서 절면을 갖는다. 따라서, 트렁크와의 연성은 2 차 모드의 입자 운동에 거의 영향을 미치지 않으며, Table 1에서 처럼 고유주파수는 구멍 크기에 거의 무관하게 측정된다.



(a) Frequency response function at the point 1 by a speaker excitation at the position A



(b) Frequency response function at the point 1 by a speaker excitation at the position B

Fig. 4 Frequency response functions by hole size effect

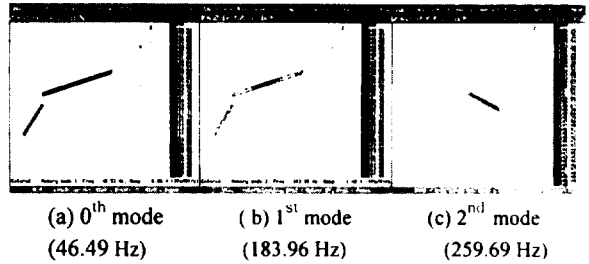


Fig. 5 Acoustic pressure distribution in each mode

3. 연성계 이론모델

3.1 차실-트렁크 공동 연성 모델

본 연구에서는 평면파 이론에 근거하여, 연성계의 음향모드 예측 및 연성계 설계를 위한 이론 모델을 제시한다. 1 차원 단순 모델이지만, 길이 방향으로 입자운동을 하는 저주파 음향모드의 거동에 적합하다. 이론 모델에서 고려하는 연성계의 설계 변수는 Fig.6에서 표시된다. 공동 1은 차실을, 공동 3은 트렁크를, 그리고 2번 통로는 패키지 트레이 패널에 존재하는 구멍을 등가적으로 표시한다.

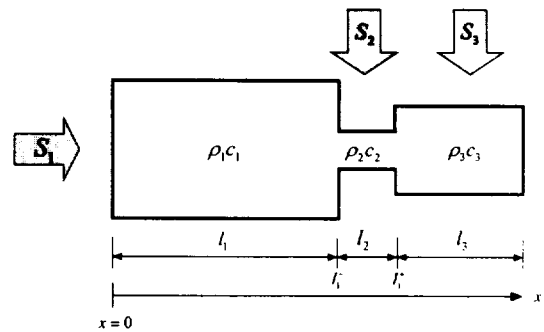


Fig. 6 1-Dimensional analysis model for coupled cavities

두 공동 내 음압은 다음의 파동 방정식에 의하여 지배된다.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad p = p(x, t) \quad (1)$$

여기서, 음압은 다음 형태로 표시 가능하다.

$$0 \leq x \leq l_1: p_1(x) = A \cdot e^{-jk_1 x} + B \cdot e^{+jk_1 x} \quad (2)$$

$$l_1 \leq x \leq l_1 + l_3: p_3(x) = E \cdot e^{-jk_3(x-l_1)} + F \cdot e^{+jk_3(x-l_1)}$$

연성계 양단에는 다음의 강체 경계조건을 적용시킨다.

$$u_1(0) = 0 \quad (3)$$

$$u_3(l_1 + l_3) = 0 \quad (4)$$

목의 좌우에서 체적속도 연속조건을 적용하고, 목 부분 공기 질량요소에 대한 운동 방정식을 적용하면 다음과 같다.

$$S_1 \cdot u_1(l_1^-) = S_2 \cdot u_2 = S_3 \cdot u_3(l_1^+) \quad (5)$$

$$\rho_2 l_2 S_2 \dot{u}_2 = S_2 p_1(l_1^-) - S_2 p_3(l_1^+) \quad (6)$$

식(3) ~ 식(5)를 식(6)에 대입하고, 파동방정식(1)을 고려하면 다음의 주파수 방정식을 얻을 수 있다.

$$2\pi \cdot f \cdot l_2 = S_2 \cdot c \left(\frac{\cot(2\pi \cdot f/c \cdot l_1)}{S_1} + \frac{\cot(2\pi \cdot f/c \cdot l_3)}{S_3} \right) \quad (7)$$

또한, 식(2)로부터 각 공동내의 음압을 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$p_1(x) = -\frac{S_2}{S_1} \frac{\sin kl_3}{\sin kl_1} \cdot \cos kx \quad (8)$$

$$p_3(x) = \cos(k(x - l_1 - l_3)) \quad (9)$$

3.2 등가 연성계의 제원 결정

단순화된 차실과 트렁크 공동의 제원은 Fig.7 과 같이, 두 공동 유효길이를 독립적으로 구하여 적용하였다. 차실 공동의 등가 길이는 그림에서 x-축 방향 입자운동을 하는 1 차 공동 모드로부터 다음식을 이용하여 결정하였다.

$$l = \frac{c}{2f} \quad (10)$$

여기서, f 는 차실만의 1 차 공동주파수로, Fig.8 과 같이, 유한요소해석으로 예측이 가능한 값이다. 트렁크 공동의 등가 길이는 그림에서와 같이 z-축 방향 입자운동을 하는 1 차 모드 주파수 측정치를 사용하여 동일한 방법으로 결정하였다. S₁ 과 S₃ 는 각각, 차실과 트렁크에서 나머지 두 방향(y,z; x,y)의 1 차 고유모드에 해당하는 주파수 값으로부터 동일한 방법으로 각 방향의 등가 길이를 구하여 결정하였다. l₂는 l₁과 l₃에 비해서 매우 작으므로, 동일한 입자속도를 갖는 질량요소로 고려하였으며, 다음과 같이 구멍의 유효 길이를 적용하였다.

$$l_2 = l_2 + a \times \sqrt{S_2} \quad (11)$$

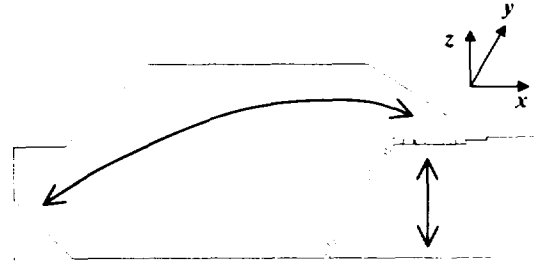


Fig. 7 Coupling path in the compartment model

여기서, a 는 목의 유효길이를 구하는데 사용되는 보정치이다.(7) 1/2 모형 차실에 대한 각 부분의 등가 치수를 Table 2 에 보인다.

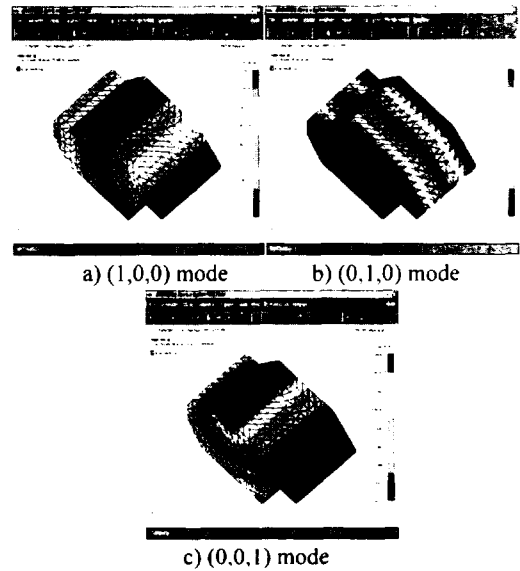


Fig.8 Acoustic modes of passenger compartment model by finite element analysis

Table 2 Dimensions in analytical model

	Mode	f _n (Hz)	l _{eq} (m)
Compartment	(1,0,0)	177	0.9802
	(0,1,0)	258	0.6725
	(0,0,1)	329	0.5274
Trunk	(1,0,0)	324	0.5355
	(0,1,0)	258	0.6725
	(0,0,1)	528	0.3286

4. 해석 결과

식(7)을 다시 정리하면, 식(12)가 된다.

$$\frac{2\pi \cdot f \cdot l_2}{S_2 \cdot c} - \frac{\cot(2\pi \cdot f/c \cdot l_3)}{S_3} = \frac{\cot(2\pi \cdot f/c \cdot l_1)}{S_1} \quad (12)$$

위식에서 우변은 차실만의 제원으로 결정되는 특성 곡선이고, 좌변은 트렁크 및 패키지 트레이 구멍의 제원에 의해서 결정되는 특성 곡선이다. 따라서, 연성계의 음향고유진동수는 Fig.9 에서 보는 바와 같이, 차실 특성곡선과 구멍-트렁크 특성곡선의 교점으로 결정된다.

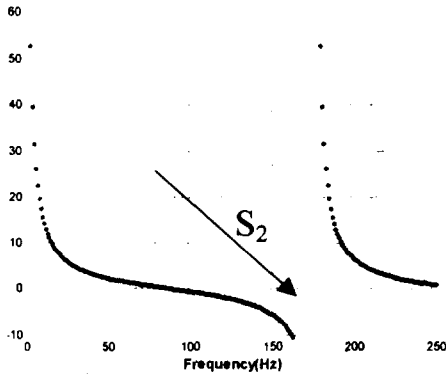


Fig.9 Characteristic curves of the coupled system

그림에서 구멍 면적 S_2 가 증가할수록 연성계의 고유주파수도 증가하는 것을 알 수 있다. Table 3 은 전술한 4 가지 구멍 크기에 대하여 연성계의 0, 1 차 고유주파수 계산치를 실험 결과, 유한요소 해석결과와 비교한다. 구멍 면적이 커짐에 따라 고유주파수의 이동량이 커지며, $a=0.66$ 을 사용할 때, 실험값에 가장 근접한 값을 보였다.

Table.3 Comparison of acoustic frequencies

Case		2	3	4	5
0 th mode	음향시험	48	52	55	60
	이론모델 (오차율)	45.96 (0.08%)	53.5 (2.7%)	61.37 (3.7%)	71.43 (0.61%)
	F.E.M.	53	62	67	80
1 st mode	음향시험	184	188	190	198
	이론모델 (오차율)	180.3 (2%)	181.6 (3.4%)	183.4 (2.9%)	186 (4.6%)
	F.E.M.	182	187	189	196

식(8), (9)를 사용하여 계산한 공동 내 음압 분포를 Fig.10 에 보인다. 네가지 경우 모두, 0 차 모드는 트렁크에서 음압이 높고 차실 내에서 음압이 낮은 형태를 보인다. 이는 측정 결과 Fig.5 (a)에 해당하는 음압 분포에 잘 맞는다. 1 차 모드는 길이 방향 축상에서 1 개의 절면을 갖는 음압 분포를 보이는데, 구멍의 크기에 따른 절면 위치의 변화는 거의 없다. Fig.5 (b)에 해당하는 모드로 역시 이론과 실험 결과는 유사한 음압 분포를 보인다.

유한요소해석을 위해서는 Fig.11 에서와 같이 차실과 트렁크 공동을 구멍으로 단순히 연결시킨 모델을 사용하였다. 유한요소해석으로도 Fig.11 과 같이 두 모드의 음압 분포는 이론 및 실험치와 유사하나, 0 차 모드의 주파수가 상당한 오차를 보이고 있다. 이는 유한요소 해석법이 구멍 부분의 음향거동에서 두 공동의 연성을 기술하는데 한계가 있음을 의미한다. 결과적으로 저주파대역에서 차실과 트렁크의 독립된 공동계에 대해서는 유한요소해석으로 음향 모드를 예측이 충분히 가능하나, 두 공동이 구멍으로 연성된 계에서는 길이 방향모드의 예측에 어려움이 있다. 제시된 이론 방법과 유한 요소해석을 병행할 때, 저주파대역의 모드 예측이 가능하다.

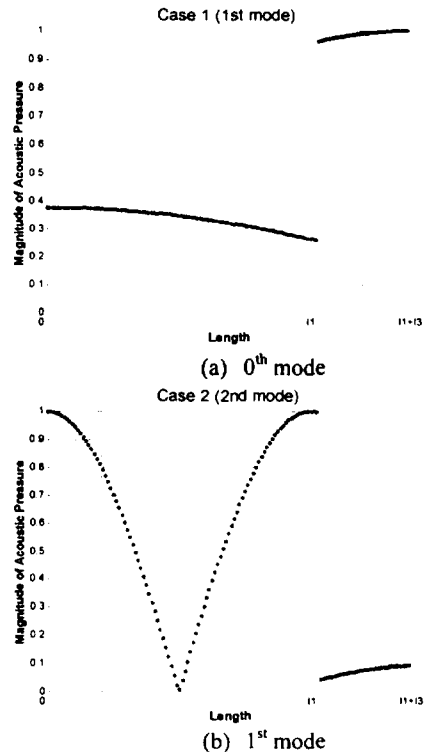


Fig.10 Acoustic pressure modes by theoretical analysis

5. 결론

단순화된 차실 모델을 대상으로 차실과 트렁크 공동이 구멍으로 연결된 음향 연성계의 저주파 음향모드를 구하는 이론 모델을 제시하였다. 제시된 이론 모델은 모형 차실을 대상으로 하는 실험 결과에 매우 근접한 음향모드 특성치를 계산하였다.

이론 모델은, 차실만의 독립된 계에서는 존재하지 않았던 새로운 저주파 모드가 구멍을 통하여 연성된 차실-트렁크계에서 출현하는 현상과, 구멍의 크기에 따른 연성 모드의 변화를 규명하였다. 본 연구 방법은 유한요소 해석법만으로는 예측이 어려운 연성계의 저주파 음향 모드를 결정할 수 있었으며, 추후 실차의 저주파 대역 주파수 응답함수의 예측과 개선에 적용하는 연구로 이어질 것이다.

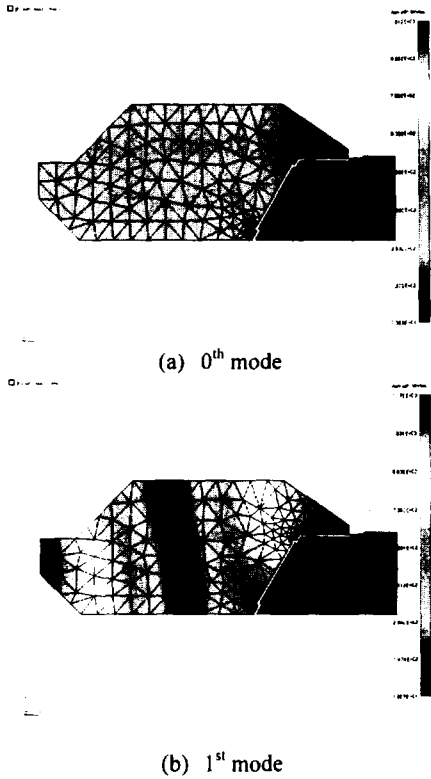


Fig.11 Acoustic pressure modes by FEA

후 기

본 연구는 BK21 과제의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계자들의 지원에 감사 드린다

참고문헌

- (1) S. H. Sung and D. J. Nefske, "A Coupled Structural-Acoustic Finite Element Model for Vehicle Interior Noise Analysis," ASME, Vol. 106, April 1984
- (2) Yang Qian and Jeff VanBuskirk, "Acoustic Modeling and Optimization of Seat for Boom Noise," SAE 971950, 1997
- (3) S.H.Kim and J.M.Lee, "A Practical method for noise

reduction in a vehicle passenger compartment", ASME Trans. Journal of Vibration and Acoustics Vol.120, pp199-205, 1998.

- (4) S.H.Kim, J.M.Lee and M.H.Sung, 1999, "Structural-acoustic modal coupling analysis and application to noise reduction in a vehicle passenger compartment", Journal of Sound and Vibration, Vol.225 (5), pp989-999.
- (5) Tausuo Osawa and Akinori Iwama, 1986, "A Study of the Vehicle Acoustic Control for Booming Noise Utilizing the Vibration Characteristics of Trunk Lid", SAE 861410
- (6) S.W.Kang, J.M.Lee and S.H.Kim, "Structural acoustic coupling analysis on the vehicle passenger compartment with the roof-air gap-trim boundary", ASME Trans. Journal of Vibration and Acoustics, accepted and in press.
- (7) A.D. Pierce, Acoustics McGraw-Hill, 1981