

# 차실-트렁크 연성계의 연성경로 및 음향모드 특성에 관한 실험적 연구

김규범\* 이진우\* 이장무\*\* 김석현\*\*\* 박동철\*\*\*\*

## An Experimental Study on The Coupling Path and Acoustic Modal Characteristics of Passenger Compartment - Trunk Coupled System

Gyoo Beom Kim, Jin Woo Lee, Jang Moo Lee, Seock Hyun Kim, Dong Chul Park

**Key Words :** Passenger Compartment-Trunk Coupled System(차실-트렁크 연성계), Coupled Acoustic Modes(연성음향모드), Package Tray Holes(패키지 트레이 구멍)

### Abstract

Acoustic modal property of the vehicle passenger compartment is a very important factor which dominates vehicle interior noise in the low frequency range. In most real cars, trunk noise often transfers into the passenger compartment since the two cavities are acoustically coupled. This study identifies the major coupling path by examining the variation of the coupled acoustic modal frequencies and modes. An 1/2 size acryl compartment model is designed and manufactured for the measurement and analysis of coupled acoustic modes. Experimental result shows that package tray contributes to the coupling much more than the back seat and hole size of the package tray is an important design factor to control low frequency acoustic modes in the coupled system

### 1. 서 론

자동차의 실내 소음에서 200Hz 이하의 저주파 대역에서는 차체 진동이나 차실 음향 모드의 영향을 많이 받는 구조 기인 소음이 많은 기여를 한다. 부밍과 같은 저주파 대역 소음문제에서는 모드 음향 해석 방법에 근거하여, 차체 진동 모드와 차실 음향 모드 데이터를 사용하여 실내 소음을 예측하거나 문제의 해결방향을 찾는다.(1-3) 이에 관련하여 저자들은 구조-음향 주파수응답 해석모델을 이용하여 모형차 및 실차의 실내소음을 해석적으로 평가하고 소음문제를 해결하는 방안을 제시한 바 있다.(4,5) 많은 실차 모델에서 차실은 트렁크와 격리되어 있지 않고 패키지 트레이의 구멍이나 뒷좌석 다공성 재를 통하여 트렁크와 음향학적으로

연결된다. 그 결과, 트렁크의 소음이 차실 내로 유입되거나, 차실 공동과 트렁크 공동과의 연성으로 차실의 음향모드 특성이 복잡하게 변하여 해석적 방법에 의한 소음예측을 어렵게 한다. 실차의 차실 음향모드를 예측하는 유한요소해석이나 경계요소해석에서도 실험치와 계산치가 큰 차이를 보이는 경우가 자주 발생한다. 이에 관련하여, Osawa 등(6)은 뒷좌석을 차실과 트렁크 연성의 주경로로 보고, 좌석 재의 밀도를 조정하여 저주파 음향모드 특성을 예측하고 부밍소음 저감에 응용하는 해석 모델을 제시한 바 있다. 또한, 저자들은(7) 천정부 트림의 에어갭과의 연성에 의한 차실 음향모드 특성의 변화를 해석 및 실험적으로 규명한 바 있다. 본 연구에서는 승용차 모델에서 패키지 트레이 패널(Panel)의 공기 순환용 구멍이 차실과 트렁크 사이의 중요한 연성경로가 되는 것을 실험적으로 확인하고 연성으로 인한 차실 음향모드 특성의 변화를 실험적으로 규명한다.

실차 적용의 전단계로서, 내장재를 배제시킨 단순화된 1/2 크기의 모형 차실을 설계/제작하고,

\* 서울대학교 대학원

\*\* 서울대학교

\*\*\*강원대학교

\*\*\*\*현대자동차 기술연구소

차실 공동과 트렁크 공동의 연성경로를 규명하는 실험을 수행한다. 종래 제시되었던 뒷좌석을 통한 연성보다는 패키지 트레이의 구멍을 통한 연성이 보다 중요함을 확인할 수 있었고, 패키지 트레이 상의 공기순환용 구멍의 크기가 차실 음향모드를 결정하는 중요한 설계인자임을 확인할 수 있었다.

## 2. 차실 모델

실차의 경우 내부형상이 복잡하고 내장재의 영향으로 모드 연성 특성을 명확하게 관찰하기 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 Fig.1 에서와 같이, 12mm 두께의 아크릴판으로 1/2 크기의 모형차실을 제작하여 실험하였다. 실차에서 차실과 트렁크 사이의 연성경로는 뒷좌석과 패키지 트레이 패널(Panel)의 구멍이다. 실험 모델에서도 Fig.2 와 같이, 패키지 트레이 패널에 1/2 크기 구멍을 적용하여 탈착이 가능하도록 제작하였고 Fig.3 의 패키지 트레이 트림(Trim)을 덮었다. 실차의 뒷좌석에 해당하는 부분에도 Fig.3 의 실차 뒷좌석 재를 끼우고 기밀성을 유지할 수 있도록 설계/제작하였다.

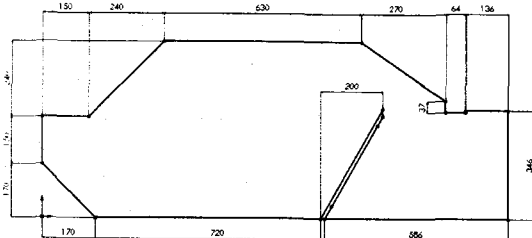


Fig.1 Dimensions of a 1/2 compartment model

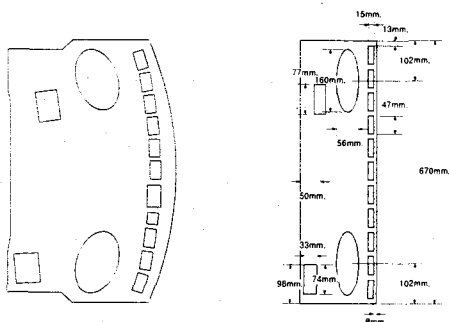


Fig.2 Real package tray and dimensions of model



Fig.3 Package tray trim and back seat sample

## 3. 실험 및 해석 방법

실험의 목적은 차실과 트렁크의 연성경로를 확인하고, 패키지 트레이의 구멍 면적에 따른 연성계의 음향모드 주파수의 변화를 파악하는 것이다. 이를 위하여 다음의 단계별 실험이 수행되었다.

1 단계 : 차실 및 트렁크의 독립적인 음향모드 특성을 파악하기 위하여, Fig.4 에서와 같이 차실과 트렁크를 격리시킨 상태에서 각각의 음향모드를 측정하고 유한요소 해석결과와 비교한다.

2 단계 : 연성경로를 확인하기 위해서 뒷좌석을 실차 뒷좌석 재료, 패키지 트레이 패널 부를 구멍 있는 아크릴판상에 패키지 트레이 트림(Trim)을 씌우고 음향모드를 확인한다.

3 단계 : 패키지 트레이 패널의 구멍 크기를 변화시키면서 음향모드의 변화를 측정한다.

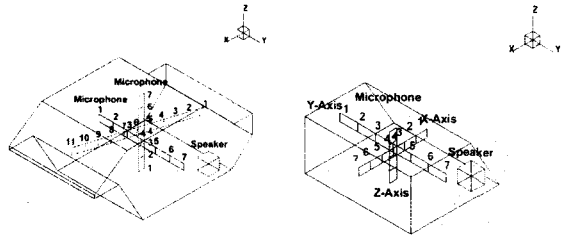


Fig.4 Excitation and measurement positions

저주파 대역용 스피커로 Fig.4 에 표시된 위치에 서 가진하고, 1/4 인치 어레이 마이크로폰을 사용하여, 길이방향 16 개, 폭 방향 7 개, 높이 방향 7 개 위치에서 실내 음압을 측정하였다. 트렁크 내 음압은 길이 방향으로 패키지 트레이 부분에서 5 개 지점, 뒷좌석 부분에서 7 개 지점을 측정하고, 폭 방향과 높이 방향으로 각각 7 개와 5 개의 어레이 마이크로폰을 사용해서 측정하였으며, 데이터 수집 및 음향모드 측정을 위해서는 LMS CADA-X 3.0 을 사용하였다. 차실 및 트렁크 모델에 대한 유한요소해석은 Fig.5 와 같이, Solid 72 를 사용하여 203 개 절점 9018 개 요소로, Solidworks 99 와 Cosmosworks 5.0 으로 모델링하고, Sysnoise 5.4 를 이용하여 음향모드해석을 수행하였다.

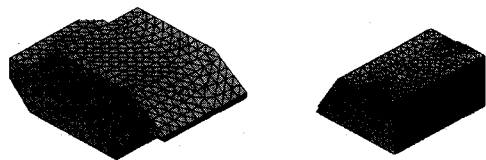


Fig.5 Finite element model (compartment and trunk)

## 4. 실험 및 해석 결과

### 4.1 차실 및 트렁크의 음향모드 특성

Fig.6 과 Fig.7 은 차실 및 트렁크 모델의 주파수 응답함수 측정 결과이고, Table 1 과 Table 2 는 음향 모드별 주파수 측정치를 유한요소 해석치와 비교한 결과이다. 실험 및 해석치는 모드별로 3%이내의 오차 범위 내에서 고유진동수 값과 동일한 음압 분포를 보인다. 이는 차실과 트렁크가 완전 격리되어 독립된 음향계를 이루는 경우에는 차실만의 유한요소해석 모델로도 차실 음향모드의 예측이 충분히 가능함을 의미한다. 물론 실차에서는 내장재 효과로 감쇠가 커져 피크의 첨예도가 상당히 둔화될 것이다.

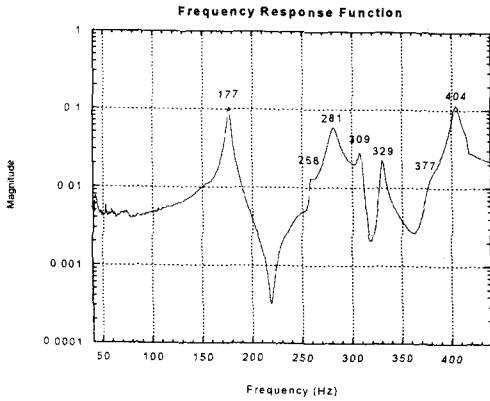


Fig.6 Frequency response function (compartment)

Table.1 Comparison of frequencies and modes (compartment)

Modes	Natural Freq (Hz)	FEM (Hz)	Mode Shape
1	177.33	175.45	(1,0,0)
2	258.43	256.19	(0,1,0)
3	281.59	290.02	(2,0,0)
4	309.56	311.54	(1,1,0)
5	329.25	334.59	(0,0,1)
6	377.86	388.89	(2,1,0)

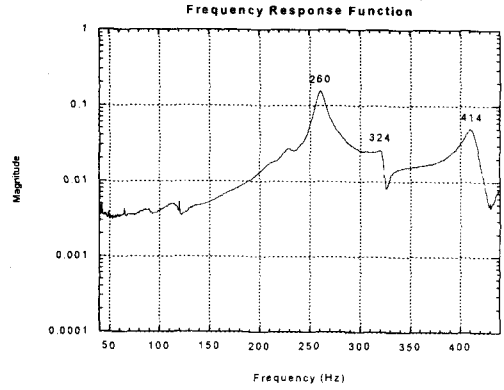


Fig.7 Frequency response function (trunk)

Table.2 Comparison of frequencies and modes(trunk)

Modes	Natural Freq (Hz)	FEM (Hz)	Mode Shape
1	260.87	255.57	(0,1,0)
2	324.65	332.32	(1,0,0)
3	414.31	420.55	(1,1,0)

### 4.2 차실-트렁크 연성경로

차실과 트렁크공동의 연성경로를 파악하기 위하여, 패키지 트레이 위치와 뒷좌석 위치에 실차의 시편을 장착한 후, 측정된 차실의 주파수응답 함수 측정결과를 Fig.8 에 보이고, 음향모드 주파수의 변화를 Table 3 에서 비교한다.

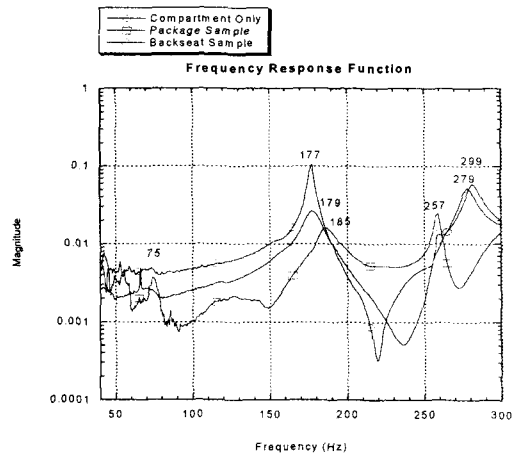


Fig.8 Frequency response function (sample conf.)

Table.3 Changes in acoustic natural frequencies

0	-	-	-
1	177.33	185.32	179.60
2	258.43	257.90	255.98
3	281.59	299.84	279.93

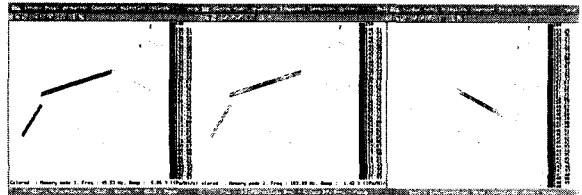
패키지트레이 시편을 통하여 차실과 트렁크가 연성되는 경우, 차실 길이방향으로 공기입자가 운동하여 정재파를 형성하는 1, 3 차 모드의 주파수가 크게 이동하는 반면, 뒷좌석 시편 장착시는 큰 변화를 보이지 않는다. 차실만의 1 차 모드 피크보다 훨씬 낮은 주파수 대역에서 새로운 피크가 출현하는 것도 연성계의 변화된 특성이다. 이에 대해서는 다음절의 구멍 크기 효과에서 기술한다. 한편, 2 차 모드는 차실 횡방향 입자운동하는 정재파 모드이므로, 트렁크연성에 영향을 받지 않으며, 두 경우 모두 주파수의 변화가 매우 작다. 결과적으로, 뒷좌석 시편이 장착된 경우는 아크릴 판으로 격리된 상태와 거의 비슷한 차실 음향 고유진동수를 가진다. 따라서, 뒷좌석을 통한 트렁크와의 모드연성 정도는 매우 작음을 알 수 있다.

4.3 패키지트레이 구멍 크기 효과

Fig.2 와 같이 실차의 구멍을 등가화시켜 적용한 패키지 트레이 모델을 장착하고, 열려진 구멍의 크기에 따른 고유진동수의 변화를 Table 4 에 보인다. 모드 번호는 차실 음향모드의 순서를 의미한다. 모드번호 영은 차실만에서는 보이지 않았던 새로운 음향 모드로, Fig.9 a)에서와 같이 길이 방향으로 패키지 트레이 위치에 절면을 갖고 트렁크 내부에서는 음압이 매우 큰 모드이다 하나의 절면을 갖는 음압 분포를 보인다. 1 차모드는 Fig.9 의 b)에서 처럼 운전자 귀 위치에서 음압이 작아지는 차실의 1 차 모드를 보인다. 두 모드는 주파수는 크게 차이가 나는 반면, 절면은 모두 하나이므로 실차 실험에서 종종 실험자에게 혼란을 주기도 한다. 0-모드의 주파수는 구멍의 크기와 함께 증가하는데, 실차의 1/2 모델에 대한 값이므로 실차에서는 절반의 주파수 값에서 발생할 가능성이 높다. 2 차 모드의 경우, Fig.9 c)에서와 같이 차실 횡방향 축상에서 절면을 갖는다. 따라서, 입자 운동에 트렁크와의 연성은 입자 운동에 거의 영향을 미치지 않으며, 구멍 크기에 무관하게 주파수의 변화를 보이지 않는다.

Table.4 Changes in natural frequencies by hole size

0	49.53	54.99	58.49	70.73
1	183.96	187.95	188.20	195.20
2	259.69	260.19	260.24	260.94
Area(mm <sup>2</sup> )	3315	5790	9865	18970



a)70.73 Hz b)195.20 Hz c)260.94 Hz

Fig.9 Natural frequency and mode shape

이와 같은 연성계의 구멍 크기에 따른 고유진동수의 변화는 차실모델의 주파수응답 특성에 그대로 반영된다. Fig.10 은 차실내 스피커위치와 길이방향 축상 1 번 위치에서 측정된 주파수응답함수를 보인다. 패키지 트레이의 구멍을 통한 차실과 트렁크와의 연성은 저주파수대역에서 새로운 저주파 음향모드를 발생시키고 차실은 이 대역에서의 주파수응답의 감도가 매우 커질 수 있으며 이는 아음역에서의 음질 형성에 영향을 미칠 수 있을 것이다.

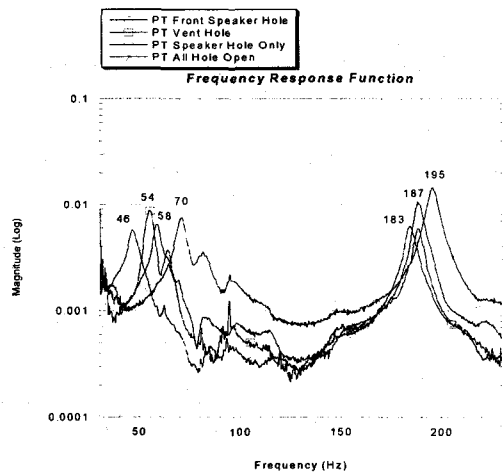


Fig.10 Frequency response functions by hole size effect

## 5. 결 론

본 연구에서는 저주파수 대역의 부밍 소음에 크게 관련되는 차실 음향모드가 차실과 트렁크의 연성에 따라 어떻게 변화되는지를 실험적으로 고찰하였다. 실차 차실의 1/2 크기로 모형 차실을 제작하여 음향모드 측정 실험 및 유한요소 해석을 수행한 결과, 다수의 구멍을 갖는 패키지 트레이가 주 연성 경로임을 밝히고, 패키지 트레이의 구멍 크기가 저주파수 대역에서 차실만에서는 존재하지 않았던 새로운 모드를 발생시키고, 차실의 음향모드 주파수를 변화시키는 것을 확인하였다. 축소 모형 차실의 실험결과를 이용하여 실차의 저주파 대역 음향특성을 개선하는데 적용하는 연구가 계속 진행중이다.

## 후기

본 연구는 현대자동차(주)의 지원과 BK21 과제의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계자들의 지원에 감사드립니다.

## 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) John C. Gagilardi, "Correlation of various Test Methodologies with vehicle Seat Acoustical Performance," SAE Paper 971927, 1997
- (3) Yang Qian and Jeff VanBuskirk, "Acoustic Modeling and Optimization of Seat for Boom Noise," SAE 971950, 1997
- (4) 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.
- (5) 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
- (6) Tatsuo Osawa and Akinori Iwama, "A Study of the Vehicle Acoustic Control for Booming Noise Utilizing the Vibration Characteristics of Trunk Lid," SAE 861410, 1986
- (7) 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.