

차실-트렁크 연성계의 연성경로 및 음향모드 특성에 관한 실험적 연구

이진우[†] · 김규범^{*} · 이장무^{**} · 김석현^{***} · 박동철^{****}
(2001년 3월 7일 접수, 2001년 6월 7일 심사완료)

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

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

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

Abstract

This study identifies the major coupling path by examining the variation of the coupled acoustic modal frequencies and modes. A 1/2-size acryl compartment model is designed and manufactured for the measurement and analysis of coupled acoustic modes. Due to acoustic coupling, a new acoustic mode appears in a low frequency range. This coupling affects only longitudinal acoustic modes of compartment. Experimental result shows that the package tray holes contribute to the coupling much more than the back seat and hole size is an important design factor to control low frequency acoustic modes in the coupled system

1. 서론

저주파수 대역(0~200Hz)의 자동차 실내 소음은 차체의 진동모드나 차실의 음향모드의 영향을 크게 받는다. 이에 따라, 부밍(booming)과 같은 저주파수 대역 소음문제에서는, 음향 모드 해석법(acoustic modal analysis)에 근거한 유한요소해석이나 경계요소해석 및 모드시험 등을 수행하고, 이렇게 얻은 차체 진동모드와 차실 음향모드 데이터를 사용하여 실내 소음을 예측하거나 그 저감 대책을 수립하는 연구가 많이 진행되어왔다.⁽¹⁻³⁾ 이에 관련하여 저자들은 차실 공동과 차체 구조의 반연성 구조-음향 주파수응답 해석모델을 이용하

여 저주파수 대역의 차실 소음을 예측하고 효과적 인 소음 저감 대책을 제시한 바 있다.^(4,5) 이러한 연구에서는 트렁크와 완전 격리되어 있는 차실 해석 모델에 대한 차실 공동과 차체 구조의 독립된 모드정보를 사용하여 실내소음을 평가하였다. 일반적으로, 차실 음향모드 특성은 차실의 크기에 의하여 거의 결정되는데, 설계 단계에서 차실의 사양이 일단 결정되면, 시험단계에서 문제가 발생 하더라도 그 구조를 변경하는 것이 쉽지 않다. 저자들은 천정부 공기 층(air-gap)과 같은 부수적인 공동과 차실 음향 모드의 연성을 적절하게 이용하여 주파수응답 특성을 효과적으로 개선하는 방법을 제시한 바 있다.⁽⁶⁾ 다른 한편으로는 차종에 따라 트렁크와 차실이 부분적으로 연결되어 있는 점을 이용하여 실내의 음향특성을 개선하려는 시도가 진행되어 왔다. Osawa,⁽⁷⁾ Quian⁽⁸⁾은 뒷좌석의 다공재를 통하여 음향학적으로 연결되어 있는 차실-트렁크 연성계로 구성된 새로운 해석 모델을 제시 하였다. 그들은 뒷좌석 다공재의 밀도를 조정함으로써, 연성계의 저주파 음향 모드를 예측할 수 있고, 이를 바탕으로 부밍 소음을 저감시킬 수 있

[†] 책임저자, 회원, 서울대학교 대학원 기계항공공학부
E-mail : jw062@email.com
TEL : (02)880-7152 FAX : (02)876-9493

^{*} 서울대학교 대학원 기계항공공학부

^{**} 회원, 서울대학교 기계항공공학부

^{***} 회원, 강원대학교 기계메카트로닉스공학부

^{****} 현대자동차 남양만 연구소

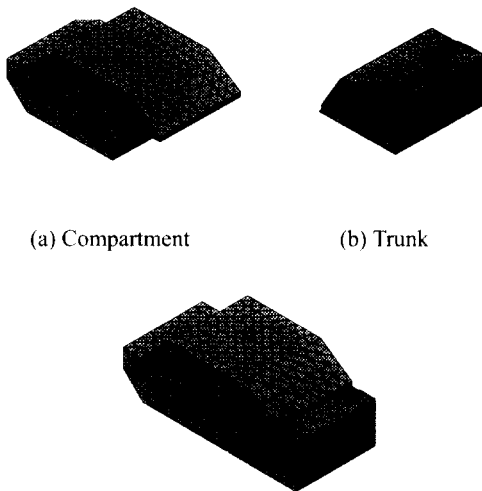
3. 실험 및 해석 방법

실험 및 해석에 의한 두 공동의 연성관계를 규명하는 연구는 3 단계로 진행된다. 1 단계에서는, 차실 공동 및 트렁크 공동의 독립적인 음향모드 특성을 측정한다.

Fig. 4 에서와 같이 차실과 트렁크를 완전 격리시킨 상태에서 각각의 음향 고유주파수를 측정하고 유한요소 해석치와 비교한다. 저주파수대역용 스피커로 표시된 위치에서 랜덤신호로 가진하고, 길이 방향 11 개, 폭 방향 7 개, 높이 방향 7 개 지점 차실의 음압을 측정하였다. 트렁크 내 음압은 높이 방향으로 5 개 지점, 뒷좌석에서 트렁크 끝까지 길이 방향 7 개 지점 및 폭 방향 7 개 지점을 각각 어레이 마이크로폰을 사용해서 측정하였으며, 데이터 수집 및 음향모드 측정을 위해서는 LMS CADA-X 3.5 을 사용하였다.

차실 및 트렁크 모델에 대한 유한요소해석은 Fig. 5 와 같이, Solid 72 를 사용하여 2003 개 절점 9018 개 요소로, Solidworks 99 와 Cosmos/works 5.0 으로 모델링하고, Sysnoise 5.4 를 이용하여 음향모드 해석을 수행하였다.

2 단계에서는 차실과 트렁크 공동이 뒷좌석과 패키지 트레이를 통하여 연성 될 때의 저주파수대역의 음향주파수응답 특성을 측정하여 비교하였다. 여기서는 Fig. 4 (c)의 차실-트렁크 연성계를 대상으로 길이 방향과 폭방향 총 23 개 지점에서 전술한 바와 같이 음압을 측정하였다. Fig. 5 에서 보



(c) A compartment with a trunk
Fig. 5 Finite element model

이는 바와 같이, 유한요소해석에서는 차실과 트렁크 사이 격벽의 구멍을 통하여 두 공동이 연결되도록 모델링 하였다.

3 단계에서는 패키지 트레이의 구멍을 차례로 개방 시키면서 주파수응답을 측정하여, 구멍의 면적이 음향모드 연성에 주는 효과를 평가하였다.

4. 실험 및 해석 결과

4.1 차실 및 트렁크의 음향 모드 특성

Fig. 6 과 Fig. 7 은 차실 및 트렁크 공동의 개별적인 주파수 응답함수 측정 결과이고, Table 1 과 Table 2 는 음향 모드별 주파수 측정치를 유한요소 해석치와 비교한 결과이다. 실험 및 해석으로 얻은 고유주파수는 오차율 3%이내에 존재하고 동일한 음압 분포를 보인다. 이는 차실과 트렁크, 각각의 독립된 음향계는 유한요소해석을 통하여 음향모드의 예측이 가능하다는 것을 의미한다. 다만, 실차의 경우, 내장재에 의한 감소로 고유주파수에 해당하는 피크가 뚜렷하지 않을 것이다

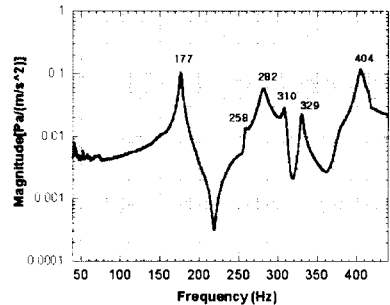


Fig. 6 Frequency response function (compartment)

Table 1 Comparison of frequencies and modes (compartment)

Mode	Natural Frequency (Hz)		Mode Shape
	Measurement	FEM	
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)

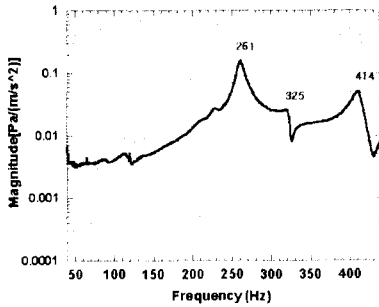


Fig. 7 Frequency response function (trunk)

Table 2 Comparison of frequencies and modes (trunk)

Mode	Natural Frequency (Hz)		Mode Shape
	Measurement	PEM	
1	260.87	255.57	(0,1,0)
2	324.65	332.32	(1,0,0)
3	414.31	420.55	(1,1,0)

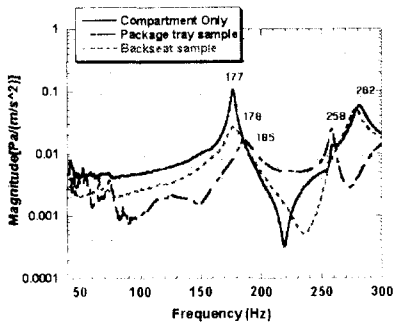


Fig. 8 Frequency response function

4.2 차실-트렁크 연성 경로 파악

차실 공동과 트렁크 공동의 연성경로를 파악하기 위하여, 패키지 트레이 위치와 뒷좌석 위치에 실차의 해당 시편을 장착한 후 주파수 응답함수를 측정한다. 먼저 뒷좌석을 통한 연성효과를 파악하기 위해서 패키지 트레이 부분(Fig. 1-A)은 아크릴 판으로 완전히 막고 실차의 뒷좌석 다공재를 장착한 상태(back seat sample)에서 주파수 응답함수를 측정하였다. 다음에 뒷좌석부분(Fig. 1-B)을 완전히 막고, 패키지 트레이 덮개(Fig. 3(a))를 장착한 상태에서 주파수 응답 함수를 측정하였다. 두 결과를 독립된 차실 공동만의 주파수 응답함수와 Fig. 8에서 비교하고, 주파수의 변화를 Table 3에서 보인다.

Table 3 Shift of acoustic natural frequencies

Mode	Natural Frequency (Hz)		
	Compartment Only	Package Tray Coupling	Backseat Coupling
1	177.33	185.32	178.40
2	258.43	257.90	255.98
3	281.59	299.84	279.93

뒷좌석을 통하여 연성된 모델의 주파수 응답함수는 감쇠가 커질 뿐 고유주파수의 변화는 거의 없다는 것을 알 수 있다. 반면에, 패키지 트레이를 통하여 두 공동이 연성된 경우, 1 차 및 3 차 모드와 고유주파수가 크게 증가하며, 2 차 고유주파수의 변화는 거의 없다. 이는 1, 3 차 모드가 차실 길이 방향으로 공기입자가 운동하여 정재파를 형성하는 음향 모드이므로, 두 공동의 연성효과가 많이 나타난다. 이에 반하여, 2 차 모드는 차실 폭 방향으로 입자가 운동하는 정재파 모드이므로, 길이 방향의 트렁크 연성에 거의 영향을 받지 않으며, 그 결과 고유진동수는 거의 변화가 없다. Fig. 8 에서 주목할 만한 사항은 180Hz 부근의 1 차 고유주파수에 해당하는 피크보다 훨씬 낮은 주파수 대역에서 새로운 피크가 출현한다는 것이다. 두 공동의 연성으로 음향학적 길이가 크게 증가하기 때문인 것으로 보인다. 이러한 특성도 뒷좌석보다는 패키지 트레이의 구멍을 통한 연성효과에 기인함을 알 수 있다.

4.3 패키지 트레이 구멍의 크기 영향

전술한 바와 같이 패키지 트레이 격판의 구멍은 차실과 트렁크를 연결시키는 주 경로가 되고있다. 이에 구멍의 크기에 따른 연성효과를 측정하였다. Table 4 는 구멍을 면적 순서대로 개방하는 경우의 음향 고유주파수 측정치를 보인다. 0 차 모드는 차실 만에서는 나타나지 않았으나, 연성으로 인하여 저주파수 대역에 새로이 출현하는 음향모드를 표시한다. 이 모드는 Fig. 9(a)에서와 같이, 길이 방향의 음압 변화를 측정할 때, 패키지 트레이 위치에 절면을 갖고 트렁크 내부에서 매우 큰 음압을 보인다. Fig. 9(b)에서, 1 차 모드는 운전자 귀 위치에서 음압이 작아지는 차실의 1 차 모드에 가깝다. 0 차 모드의 주파수는 구멍의 총 면적이 커지면서 함께 증가하는데, 실차의 1/2 크기 모델에 대해 수행된 것이므로, 실차에서는 이 값의 1/2 에 해당하는 고유주파수 부근에서 음향모드가 존재할 가능성이 높다. 2 차 모드의 경우, Fig. 9(c)에서와 같이 차실 폭 방향으로 음압 변화가 일어난다. 따라서, 트렁크와의 연성은 2 차 모드에 거의 영향을 미치지 않으며, 구멍 크기에 무관하게 주파수의 변화를 보이지 않는다.

Table 4 Shift of natural frequencies with hole size

Modes	Natural Frequency (Hz)			
	PT Front Speaker	PT Vent Hole	PT Speaker	PT All Hole
0	46.49	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 ²)	3315	5790	9865	18970

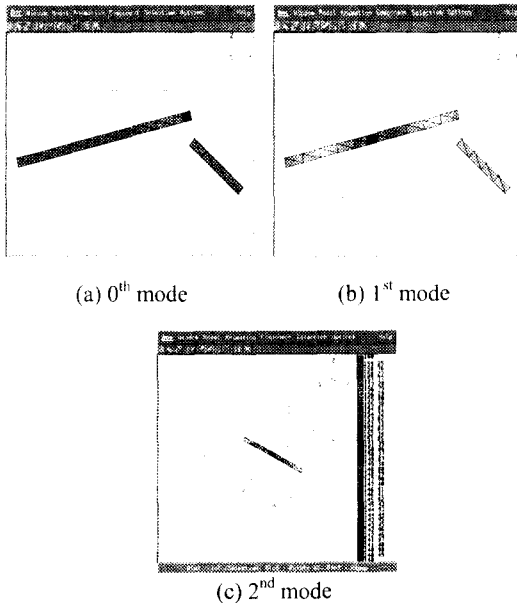


Fig. 9 Acoustic natural modes

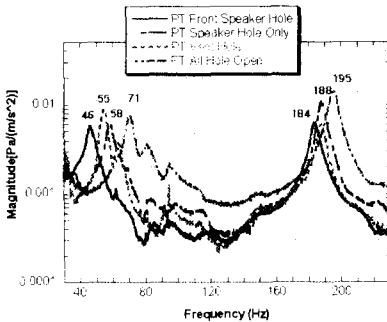


Fig. 10 Frequency response functions with hole size

이와 같은 연성계의 구멍 크기에 따른 고유주파수의 변화는 차실 모델의 주파수응답 특성에 그대로 반영된다. Fig. 5 에서와 같이, 스피커로 가진

하고 길이 방향 축상의 1 번 위치에서 측정한 주파수응답함수를 Fig. 10 에 보인다. 패키지 트레이의 구멍을 통한 차실과 트렁크와의 연성은 저주파수대역에서 차실만의 음향모드 주파수를 변화시킬 뿐만 아니라, 그림에서와 같이 새로운 저주파 음향모드를 발생시킴으로써, 이 대역에서의 주파수 응답의 감도를 매우 크게 만든다. 결과적으로 이는 아음파(infra sound) 대역에서의 음질 특성에 영향을 미치는 요인으로 작용할 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 저주파수 대역의 부밍 소음에 크게 관련되는 차실 음향모드가 차실과 트렁크의 연성에 따라 어떻게 변화되는지를 실험적으로 고찰하였다. 실차(real car)의 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 구멍이 차실 만에서는 존재하지 않았던 저주파수대역의 새로운 모드를 발생시키고, 길이 방향으로 입자 운동을 하는 음향모드의 주파수를 상당히 변화시킬 수 있음을 확인하였다. 이러한 실험결과는 차실의 크기로 거의 결정되어지는 실내의 음향 주파수응답 특성을 트렁크와의 연성을 이용함으로써 상당 부분 변화시킬 수가 있으며, 패키지 트레이의 구멍 사양이 저주파수 대역의 음향 특성에 영향을 주는 설계인자가 됨을 의미한다.

후기

본 연구는 현대자동차주 과제와 두뇌한국 21(BK21)사업 지원으로 수행되었으며, 관계자 여러분의 협조에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Sung, S. H. and Nefske, D. J., 1984, "A Coupled Structural-Acoustic Finite Element Model for Vehicle Interior Noise Analysis," *ASME Transactions Journal of Vibration, Acoustics, Stress and Reliability*, Vol. 106, pp. 314 ~318.
- (2) Suzuki, S., 1990, "Boundary Element Method for Vehicle Noise Problems," *Winter Annual meeting of JSME, NCA-Vol. 9*, pp. 17~24.
- (3) John, C. Gagilardi, 1997, "Correlation of Various Test Methodologies with Vehicle Seat Acoustical Performance," SAE Paper 971927.
- (4) Kim, S. H. and Lee, J. M., 1998, "A Practical Method for Noise Reduction in a Vehicle Passenger

- Compartment," *ASME Trans. Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 120, pp. 199~205.
- (5) Kim, S. H., Lee, J. M. and Sung, M. H., 1999, "Structural-acoustic Modal Coupling Analysis and Application to Noise Reduction in a Vehicle Passenger Compartment," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 225 (5), pp. 989~999.
- (6) Kang, S. W., Lee, J. M. and Kim, S. H., 2000, "Structural Acoustic Coupling Analysis on the Vehicle Passenger Compartment with the Roof-air gap-trim Boundary," *ASME Trans. Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 122 (3), pp. 196~202.
- (7) Tatsuo Osawa and Akinori Iwama, 1986, "A Study of the Vehicle Acoustic Control for Booming Noise Utilizing the Vibration Characteristics of Trunk Lid," SAE 861410.
- (8) Yang Qian and Jeff VanBuskirk, 1997, "Acoustic Modeling and Optimization of Seat for Boom Noise," SAE 971950.
- (9) 김규범, 이진우, 이장무, 김석현, 박동철, 2000, "차실-트렁크 연성계의 연성경로 및 음향모드 특성에 관한 실험적 연구," 대한기계학회 2000년 추계학술대회논문집, pp. 607~611.