

헤드라이너를 포함한 승용차의 차실의 음향모드 특성

Acoustic Modal Property of a Vehicle Passenger Compartment including Head Liner

김 석 현* 이 진 우**
Kim, Seock-Hyun Lee, Jin-Woo

Abstract

Acoustic modes of a vehicle compartment dominate the noise characteristics of the vehicle system in the low frequency range. Vehicle compartments have head liner and air gap of proper thickness to mount an interior lamp, as well as to have a good sound insulation and absorption performance. This study estimates the acoustic modal property of the medium size passenger car by experiment and by finite element analysis and also, investigates the effect of the head liner on the acoustic mode of the passenger compartment to obtain useful information for low noise compartment design.

키워드 헤드라이너, 차실 음향모드

Keywords : Head liner, Acoustic Modes of a Vehicle Passenger Compartment

1. 서론

모든 자동차는 차실내 천장부에 헤드라이너(head liner)를 장착한다. 실내등을 설치하고 실내의 미관을 좋게하는 것이 주 목적이거나, 바깥쪽 강판과의 사이에 공기층을 적절히 두게되면 천장부를 투과하는 외부소음을 차단하고 실내의 흡음력을 높여 정숙성 향상에 크게 기여하게 된다. 이러한 효과는 고주파수 대역에서 크다. 약 200Hz 아래의 저주파수 대역에서의 실내소음은 차실의 음향모드와 차체의 진동모드등에 의하여 크게 영향을 받는다.[1] 특히, 각종 소음원으로부터의 가진 주파수가 차실의 음향모드 주파수에 접근할 때는 부밍과 같은 심각한 소음이 문제가 되기도 한

다.[2] 이러한 소음은 주로 차체의 구조를 변경시키므로써 해결하였는데[3,4], 이는 일단 차종이 결정되면 차실의 크기가 제한되어 그 음향 모드특성을 변화시키는 것이 매우 어렵기 때문이다. 그러나, 최근의 연구에 의하면, 외강판과 헤드라이너 사이의 공기층 두께를 조절하여 차실의 특정 음향모드를 설계할 수 있는 가능성이 모형 공동에 대하여 확인 된 바 있다 [5] 또한, 트렁크와 차실 공동을 패키지 트레이 구멍을 통하여 적절히 연성시킴으로써 차실의 음향 모드를 크게 변경시키는 방안도 보고되고 있다.[6]

본 연구의 목적은 공기층(Airgap)과 헤드라이너(Headliner)를 포함하는 천장부의 구조가 승용차의 실내 음향모드 특성에 미치는 효과를 검토하여, 저주파수 대역 실내소음 저감을 위한 헤드라이너의 설계정보를 얻는데 있다. 본 연구에서는 배기량 1800cc급 국산 승용차를 대상으로 헤드라이너 장착 유무에 따른 차실의 음향모드를 비교하였다. 차실의 음향 모드는 스피커로 랜덤가진하여 주파수

* 강원대학교 기계메카트로닉스공학부 교수, 공학박사
** 서울대학교 정밀기계설계공동연구소 연구원

응답을 구하고 공진상태에서 어레이 마이크로폰(array microphone)을 사용하여 음압모드를 구하였고 유한요소해석으로 구한 결과와 비교하였다.

2. 시험 차량 차실 및 헤드라이너 구조

본 연구에서 사용한 시험차량의 상부는 그림 1에서와 같이 두께 0.7mm 강판의 천정(roof)과 3cm의 공기층(air gap), 그리고 헤드라이너(head liner or trim)로 구성된다. Fig. 2는 차실 천정에서 분리된 헤드라이너를 보인다.

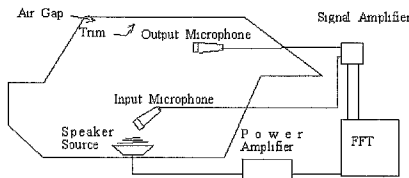


Fig.1 Vehicle compartment and roof system.

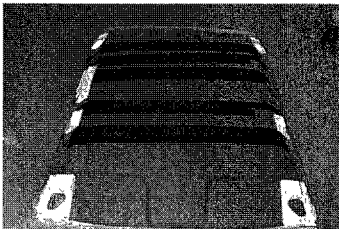


Fig.2 Head liner specimen.

3. 차실 음향모드의 측정 원리 및 방법

3.1 측정원리

밀폐된 공간내에서 일부 경계면의 진동에 의하여 차실내에 음장이 형성될 때, 저주파수대역의 실내 음압은 다음의 이론 모델로 표시 가능하다.[7]

$$p(r) = \rho \omega^2 c^2 \sum_n \frac{\phi_n(r)}{\omega_n^2 - \omega^2} \int_S \phi_n(r_0) X(r_0) ds_0 \quad (1)$$

여기서 r, r_0 은 실내 위치와 진동하는 경계면상의 지점을, ρ, c 는 공기밀도와 공기층 음속이다. ϕ_n 과 ω_n 은 차실의 음향모드와 고유진동수이고, ω 는 가진주파수를, 그리고 X 는 진동면의 변위를 표시한다. 본실험에서 진동면은 스피커를 의미하고 오메가는 스피커의 가진주파수가 된다. 식(1)에 근거하면, 스피커의 가진 주파수가 차실의 음향 고유진동수에 근접하면 매우 큰 음압이 발생하게 된다. 이

경우, 음압은 하나의 공명 모드에 의하여 지배되는 것으로 볼 수 있다. 따라서, 공명 상태에서의 음압 분포를 어레이 마이크로폰으로 측정하면 모드별로 음압 분포를 확인할 수가 있다.

3.2 측정방법

시험 차량의 음향특성을 파악하기 위해서, Fig.3의 음향모드시험을 수행하였다. Fig.4 (a)와 같이 조수석 발아래에 위치한 스피커로 랜덤신호를 발생시켜 실내의 주파수응답함수를 측정하여 공진 주파수를 확인하였다. 각각의 공진 주파수로 정현파를 발생시켜 실내에 공명상태를 유지한 가운데, Fig.4의 어레이 마이크로폰으로 실내의 음압분포를 측정하여 음향 모드를 확인하였다 20-200Hz의 주파수 범위에서 저주파수용 스피커를 사용하였고, 가속도계를 스피커 콘에 장착하고 입력 신호를 측정하여 가진음압이 항상 일정하도록 하였다. Table 1은 시험에 사용한 측정 및 분석기기를 보인다. 음압 측정을 위하여 Fig.5에서와 같이 전/후 길이 방향 축(X), 좌우 폭방향 축(Y)과 높이방향 축(Z)을 설정하고, 각 축은 그림에서와 같이 다시 3경우로 하여 어레이 마이크로폰을 배치시켜 음압을 측정하였다. 헤드라이너를 장착 및 탈착한 상태에서 동일한 시험을 반복하여 그 차이를 확인하였다.

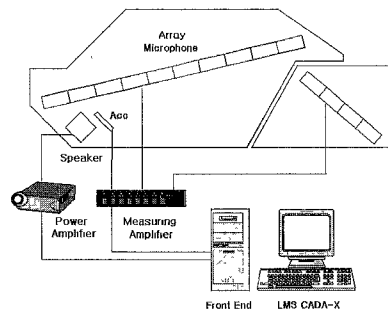


Fig.3 Experimental set-up.

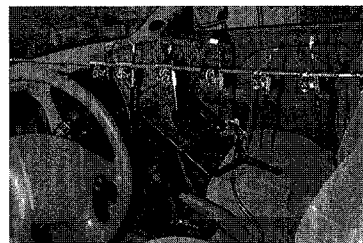


Fig.4 Excitation and measurement devices.

Table 3.1 Measuring instrument.

Function	Instrument Type
Data Analysis	LMS Cada-X V3.5
Data Acquisition	Dynamic Signal Analyzer Hp35670a
Acoustic Excitation	Speaker/Speaker Amplifier
Acoustic Measurement	1/4" Condenser Microphone Array, Conditioning Amplifier(B&K Nexus)
Vibration Measurement	Accelerometer and amplifier

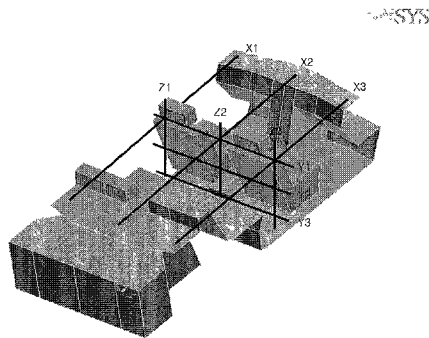
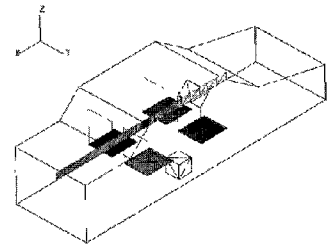


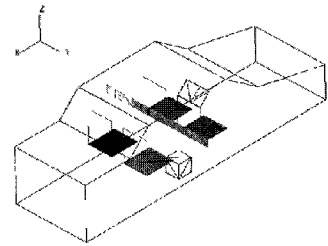
Fig.5 Measurement position.

4. 측정결과

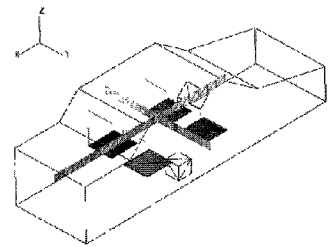
Table 2는 헤드라이너를 장/탈착한 경우의 차실 공명주파수를 보인다. 유한요소해석에 관해서는 다음 절에서 설명된다. 모드 (m,n,l)은 각각 x,y,z축상에서 절점(음압이 영인 지점)의 수를 의미한다. 즉, (1,0,0) 모드는 Fig.6 (a)와 같이, x축상에서 음압이 영인 절점(node)을 하나 가지며, (0,1,0)모드는 Fig.6 (b)와 같이 y축상에서 하나의 절점을 갖는다. 여기서, 음압의 절점은 측정 축상에서 어둡게 표시된 지점을 의미한다. Table 1에서 알 수 있듯이, 헤드라이너의 존재는 x,y 축상에서 절점을 갖는 음향 모드에서는 고유진동수를 거의 변화시키지 않는다. 그러나 (0,0,1)모드와 같이 z축상에서 절점을 가지면서 상하 방향으로 입자 운동하는 음향모드는 헤드라이너-공기층계와 연성되므로 약간의 고유진동수의 이동이 일어난다. 이러한 현상은 피스톤-튜브의 1차원 연성계에 대한 이론적인 연구에서 그 메커니즘이 보고된 바 있다.[8]



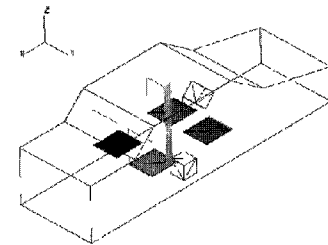
(a) (1,0,0) mode



(b) (0,1,0) mode



(c) (1,1,0) mode



(d) (0,0,1) mode

Fig.6 Acoustic pressure modes by measurement(with head liner).

Table 2 Mode and natural frequency[Hz].

mode	with headliner		without headliner	
	measurement	FEM	measurement	FEM
(1,0,0)	86.4	87.8	86.6	87.9
(0,1,0)	103.2	105.3	103.5	105.3
(1,1,0)	133.7	136.4	133.9	136.5
(2,0,0)	140.3	141.2	140.4	141.0
(0,0,1)	147.2	149.1	149.4	149.0

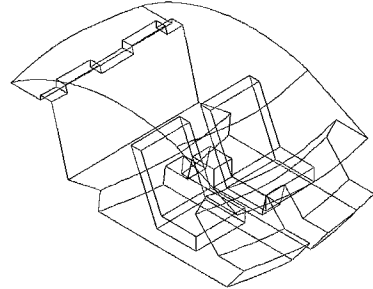
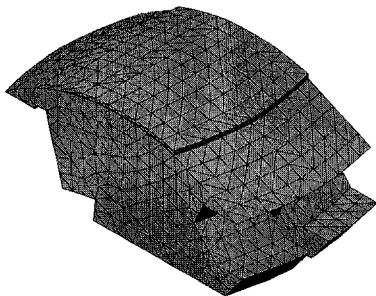


Fig.7 FEM Model (with head liner).

5. 유한요소해석

5.1 유한요소모델링

음향모드의 유한요소해석에는 Sysnoise5.4를 사용하였다. 시트, 유리창 및 카펫등 모든 실내 경계면으로 둘러싸인 차실 공동을 1,963개의 절점과 8,825개의 사면체 요소로 Fig.7과 같이 모델링하였다. 물성치로는 공기밀도(1.21kg/m³)와 음속(340m/s)을 사용하였다. 헤드라이너에는 공기의 10배 밀도(12kg/m³)를 적용하였고, 외피와의 사이에 3cm의 공기층을 부여하였다. 경계조건으로는 실내 경계면의 임피던스 조건을 적용하는 대신 모든 면을 강체 경계로(영의 입자속도 조건) 처리하였다. 임피던스 경계로 처리하는 경우, 강체 경계에 비하여 고유진동수의 차이는 거의 없으면서도 복소주파수(complex eigen frequency)와 복소모드(complex mode)를 계산하여야 하므로 대형 시스템에서는 비효율적이다. 헤드라이너와 공기층을 포함하는 모델과, 헤드라이너를 제거한 2개의 모델을 대상으로 음향모드 해석을 수행하였다.



5.2 해석결과

유한요소해석으로 구한 모드별 고유진동수를 Table 2에서 실험치와 비교한다. 모든 음향모드에서 유한요소해석 결과와 실험치는 거의 일치한다. 헤드라이너 장착시는 탈착시에 비해서 길이(x축) 및 좌우(y축) 방향으로 입자운동하는 모드의 고유진동수는 변화가 없으나, 높이 방향(z축)모드에서 진동수가 약간 증가하는 것으로 나타났다. 이는 헤드라이너 때문에 차실 높이가 낮아지고, 그결과, 이 방향의 음향학적 길이가 짧아지는 효과를 가져옴을 의미한다. 음향모드에서는 헤드라이너를 장/탈착한 두 경우가 거의 동일한 것으로 확인되었다. Fig.8은 헤드라이너를 장착한 경우, 유한요소해석에 의한 모드별 음압분포를 보인다. 어두울수록 음압이 작아, 절면(음압이 영인 면)에 가깝다. 중요한 1차 음향모드의 음압분포는 운전자 귀 위치에 절면이 지난다. 이는 차실구조가 이 모드의 부밍이 발생하더라도 운전자에게 미치는 악영향을 최소화 시키는 효과적인 방식으로 설계되어 있음을 반영한다. 어레이 마이크로폰으로 측정된 Fig.6의 결과와 비교할 때, 절면의 위치가 거의 일치하는 것으로 보아 음압분포 역시 해석과 실험치가 잘 맞는 것을 알 수 있다. 결과적으로, 실내면의 임피던스를 무시하고 강체 경계로 처리하여도 유한요소해석치와 측정결과는 고유진동수 및 모드에서 모두 매우 잘 맞고 있다. 이는 임피던스 경계조건이 차실 음향계의 음향감쇠만을 발생시키고 이터 인한 고유진동수나 모드상의 변화는 거의 유발시키지 않음을 의미한다.

헤드라이너를 포함한 승용차의 차실의 음향모드 특성

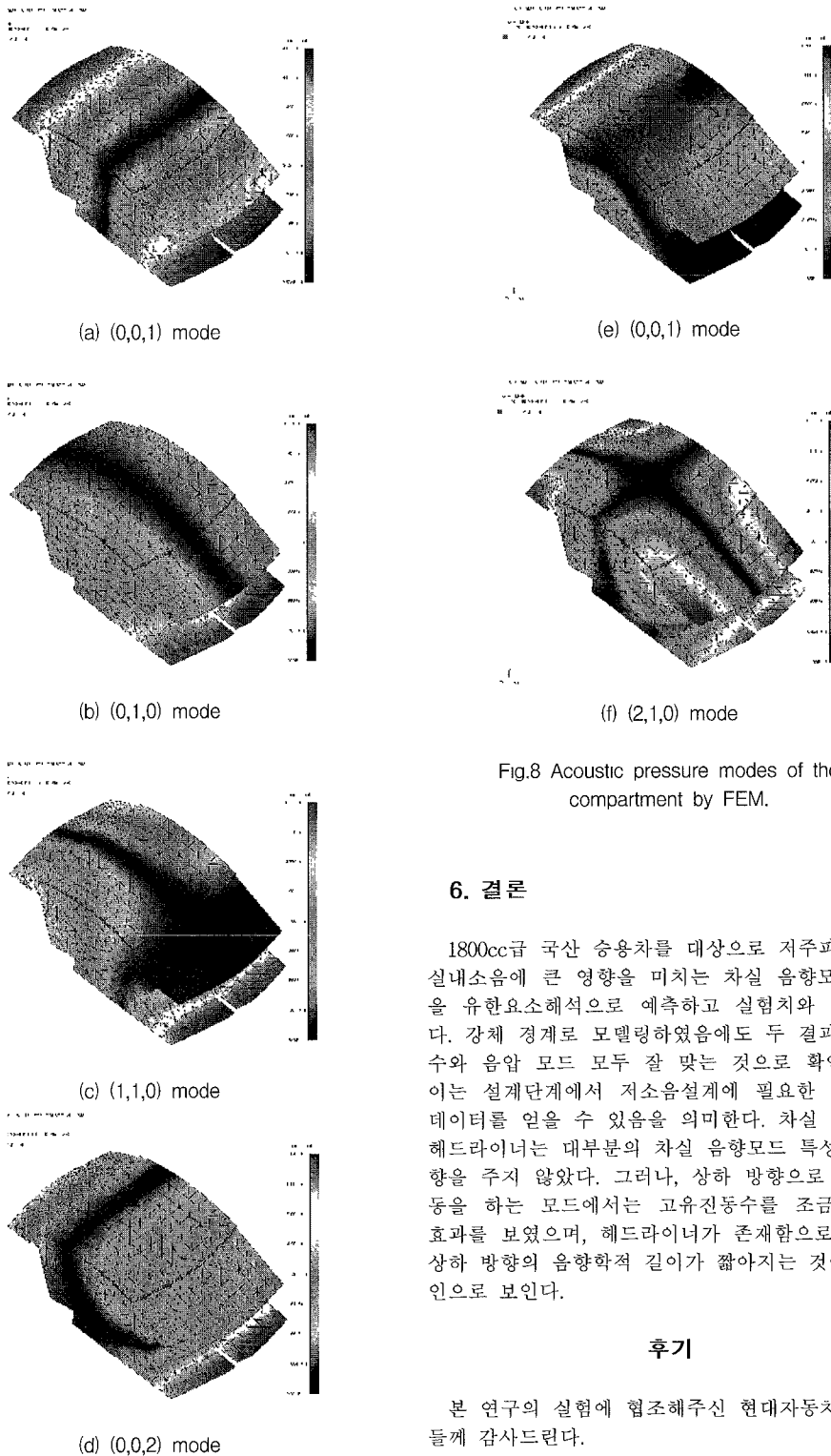


Fig.8 Acoustic pressure modes of the compartment by FEM.

6. 결론

1800cc급 국산 승용차를 대상으로 저주파수 대역 실내소음에 큰 영향을 미치는 차실 음향모드 특성을 유한요소해석으로 예측하고 실험치와 비교하였다. 강제 경계로 모델링하였음에도 두 결과는 진동수와 음압 모드 모두 잘 맞는 것으로 확인되었다. 이는 설계단계에서 저소음설계에 필요한 음향모드 데이터를 얻을 수 있음을 의미한다. 차실 천장부의 헤드라이너는 대부분의 차실 음향모드 특성에는 영향을 주지 않았다. 그러나, 상하 방향으로 입자 운동을 하는 모드에서는 고유진동수를 조금 높이는 효과를 보였으며, 헤드라이너가 존재함으로써, 차실 상하 방향의 음향학적 길이가 짧아지는 것이 그 원인으로 보인다.

후기

본 연구의 실험에 협조해주신 현대자동차 관계자 분들께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] D.J.Nefske, J.A.Wolf, Jr. and L.J. Howell, "Structural-acoustic finite element analysis of the automobile passenger compartment : a review of current practice", Journal of Sound and Vibration, Vol. 80, No.2, pp.247-pp266, 1982
- [2] 김석현, 김중희, 이장무, 조선휘, "승용차의 차실 음향 및 차체진동에 관한 연구(I)", 대한기계학회 논문집, 10권 4호, pp.529-534, 1987
- [3] S.H.Kim and J.M. Lee, "A Practical method for noise reduction in a vehicle passenger compartment", ASME Transactions, Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 120, No.1, pp.199-205, 1998
- [4] S.H.Kim, J.M.Lee and M.H.Sung, "Structural-acoustic modal coupling analysis and application to noise reduction in a vehicle passenger compartment", Journal of Sound and Vibration, Vol.225, No.5, pp.989-999, 1999
- [5] S.W.Kang, J.M.Lee and S.H.Kim, "Structural-acoustic coupling analysis of the vehicle passenger compartment with the roof, air-gap and trim boundary", ASME Transactions, Journal of Vibration and Acoustics, Vol.122, No.3, pp.196-202, 2000
- [6] 이진우, 김규범, 이장무, 김석현, 박동철, "차실-트렁크 연성계의 연성경로 및 음향모드 특성에 관한 실험적 연구", 대한기계학회논문집 A, 25권 8호, pp.1302-1307, 2001
- [7] T.L.Richards, "The Reduction of structural acoustic coupling in car bodies", Ph.D. Thesis, Cranfield Institute of Technology, 1982
- [8] S.H.Kim, S.W.Kang and J.M.Lee, "Analysis on the Vibro-acoustical characteristics of a panel-cavity coupled system", Journal of Theoretical and Applied Mechanics, Vol.3, No.1, pp.34-44, 2000