

진동-음향 상반성을 이용한 차실-트렁크 연성계의 소음평가

이진우* • 이장무** • 김석현*** • 박동철****

Noise Estimation in a Passenger Compartment and Trunk Coupled System by Using the Vibro-Acoustic Reciprocity

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

Key Words : Passenger compartment noise(차실소음), Trunk lid vibration(트렁크 리드진동), Vibro-Acoustic reciprocity(진동-음향 상반 정리), Linearity(선형성), Acoustic-structural transfer function(음향-구조 전달함수), Structural-acoustic transfer function(구조-음향 전달함수)

Abstract

This paper describes the correlation between the interior noise and the trunk wall vibration. Using the vibro-acoustic reciprocity, effect of the trunk wall vibration on the compartment noise is investigated on a medium size car. In the low frequency range, vehicle interior noise is dominated by several acoustic modes of the passenger compartment and the vibration modes of the surrounding shell parts. Especially, vibration of the trunk wall radiates sound and it is transferred through holes on the package tray into the passenger compartment. This paper experimentally reveals that sound can be well produced at some particular vibration modes of the trunk lid and it strongly influences the compartment noise through package tray holes. Contributions of the trunk walls to the interior noise are estimated by measuring the acoustic-structural transfer function, based on the vibro-acoustical reciprocity theorem.

기호설명

$p_{j\mu}$: i 점 가진에 의해 j 점에 발생하는 음압

p_j : j 점의 총 음압

$H_{j\mu}^a$: 진동-음향전달함수

q_j : j 점에 위치한 음원의 체적 속도

x_i : 구조계 i 점의 진동변위

f_i : i 점에 작용하는 힘

1. 서 론

승용차의 실내소음은 다양한 소음/진동원과 경로를 통하여 실내로 유입되는데, 200Hz 이하의 저주파수 대역에서는 구조전달 소음이 실내소음의 많은 부분을 차지하게 되며, 차실의 공명모드나 차체의 진동모드가 구조-음향 주파수응답 함수에 큰 영향을 미친다(1). 엔진, 동력전달계통의 가진이 마운트를 통하여 차체나 차실을 진동시키거나, 노면에 의한 진동이 현가계를 통하여 차체에 전달되고 차실 내 소음을 발생시키게 된다. 이 경우, 차실과 트렁크 공동은 패키지 트레이와 뒷좌석을 통하여 음향학적으로 연결된다. Osawa 등(2)은 뒷좌석밀도를 조정하는 방식으로 차실-트렁크 사이의 연성모델을 제시한 바 있으며, 저자들은(3) 뒷좌석의 진동모드를 고려한 연성모델을 제시하였다. 그러나, 뒷좌석의 차음성이 우수한 승용차의 경우, 패키지 트레이가 중요한 연성경로가 된다. 이 부분은 내부 공기 순환용 구멍이나 전장케이블 구멍을 가지게 되므로 기밀처리가 어렵고 결과적으로

* 서울대학교 대학원

** 서울대학교

*** 강원대학교

**** 현대자동차 남양만 연구소

두꺼운 흡차음재로 구성된 뒷좌석에 비하여 두 공동의 연성에 크게 기여할 수가 있다. 그러나, 이를 통한 연성계 해석 모델링은 매우 복잡하므로, 아직까지 이에 대한 연구가 이루어지지 않는 실정이다. 본 연구에서는 패키지 트레이를 통하여 트렁크 소음이 어느 정도 차실 내로 전달되는지에 대하여, 실차를 대상으로 실험적으로 평가하고자 한다. 평가 결과는 별도의 연구에서 차실-트렁크 연성 해석 모델링의 기본 자료로 사용될 것이다. 트렁크 진동으로부터 방사되는 소음이 차실 내로 전달되는 특성은 진동-음향 상반정리(vibro-acoustic reciprocity theorem)를 이용하여 효과적으로 평가된다. 즉, 트렁크 진동에 의한 차실 소음의 구조-음향 전달 특성을, 차실 내 음원과 트렁크 진동사이의 음향-구조 전달함수를 측정함으로써 구한다. 상반정리를 이용함으로써, 측정이 불편한 구조-음향 전달함수 대신 음향-구조 전달함수를 쉽게 구함으로써, 실내 소음에 크게 기여하는 트렁크 진동 모드를 확인할 수가 있었다.

2. 이론적인 배경

2.1 구조-음향 전달 함수

N 개의 전달경로를 통하여, 음장 내 j 지점에서 발생하는 총 음압은 각각의 전달경로에 의한 구조기인 소음의 합으로 다음과 같이 결정된다(4).

$$p_j = \sum_{i=1}^N p_{ji} \quad (1)$$

여기서, p_{ji} 는 구조계 i 점에서의 가진력에 의한 j 점 발생소음으로, 가진력과 구조-음향 전달함수(vibro-acoustic transfer function)의 곱으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_{ji} = H_{ji}^a \cdot f_i \quad (2)$$

식(2)를 식(1)에 적용하면, 음장 내 j 점에서의 구조기인 소음의 총합은 다음과 같다.

$$p_j = \sum_{i=1}^N H_{ji}^a \cdot f_i \quad (3)$$

2.2 진동-음향 상반 원리

구조계의 i 점 가진으로 발생하는 진동에 의한 j 점 음압과, j 점 음원에 의한 i 점 진동 가속도는 다음의 상반관계를 갖는다(5)

$$\left. \frac{p_j}{f_i} \right|_{\dot{q}_j=0} = - \left. \frac{\ddot{x}_i}{\dot{q}_j} \right|_{f_i=0} \quad (4)$$

여기서 \dot{q}_j 는 음원의 체적가속도(volume acceleration)이다. 그러므로, 상반정리를 이용하면, 구조-음향 전달함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H_{ji}^a = - \left. \frac{\ddot{x}_i}{\dot{q}_j} \right|_{f_i=0} \quad (5)$$

그러므로, j 점 구조기인 소음의 총합은 다음과 같이 표현된다.

$$p_j = - \sum_{i=1}^N \left(\left. \frac{\ddot{x}_i}{\dot{q}_j} \right|_{f_i=0} \right) \cdot f_i \quad (6)$$

따라서, 구조-음향 상반 정리는 공간적 제한이나 기하학적인 형상의 복잡성으로 가진이 어려운 지점과 공동내 지점 사이의 주파수 응답함수를 구할 때, 스피커 입력신호와 가속도 측정 신호를 사용하여 주파수 응답함수를 편리하게 구할 수 있는 이론적 근거가 된다. 본 연구에서 사용한 중형차의 경우, 트렁크가 닫혀진 상태에서 트렁크 벽 내면의 가진이 어려우므로, 해머 가진에 의한 음압 응답을 표시하는 구조-음향 전달함수 대신에 스피커 가진과 진동 가속도 사이의 음향-구조 전달함수를 측정함으로써, 트렁크 벽면의 차실 소음에 대한 기여도를 평가하였다.

3. 시스템의 선형성 파악

상반정리를 적용하기 위해서는 시스템의 선형성이 충족되어야 한다. 따라서, 본 연구에서는 다음 두 가지 방법을 이용하여 시스템의 선형성을 확인하였다.

3.1 입력신호의 크기에 따른 주파수응답함수

Fig.1은 스피커와 가속도계의 위치를 나타내고 있다. 트렁크 벽면 각 부분의 진동이 운전자 귀 위치에서 측정된 음압 또는 승객 귀 위치에서의 음압에 기여하는 정도를 평가하였다. 상반 정리에 근거하여, 스피커를 운전자 귀 위치에 놓고, 트렁크 벽면 5개 위치에서의 가속도 신호를 측정하였다. Fig.2에 보이는 시험차량을 대상으로, LMS Cada-X를 이용하여 입력 신호를 발생시키고,

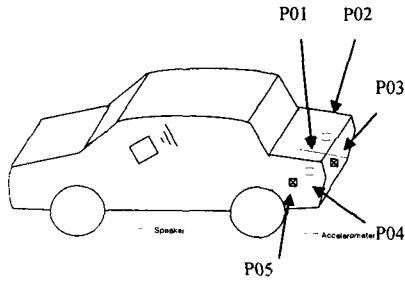
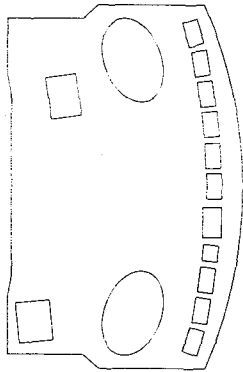


Fig. 1 the position of a speaker and an accelerometer



a) holes on the package tray



b) Sound source setup

Fig. 2 A test vehicle

5 개 지점의 가속도 신호사이의 음향-구조 전달 함수를 한꺼번에 측정하였다.

구조-음향계의 선형성을 확인하기 위하여, 스피커 입력 신호의 크기를 1V, 2V, 3V 세가지로 주고 전달함수를 측정하였다. 스피커 공급 전압의 크기에 따른 스피커 콘에서의 가속도 응답의 변화를 Fig.3 에 보인다. 콘에서의 가속도 측정치와 스피커의 면적 고려하여 체적 가속도를 구하였고, 트렁크 벽면상 5 개의 위치에서 가속도를 측정하여 음향-구조 전달함수를 구하였다. Fig.4 는 스피커 입력신호의 크기에 따른 주파수응답 측정치를 보인다.

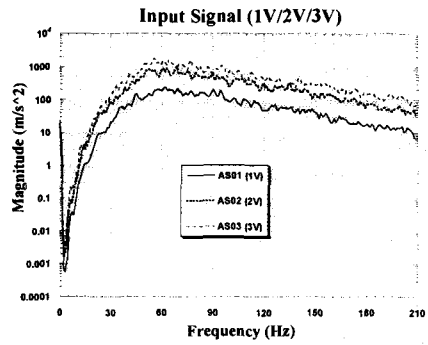
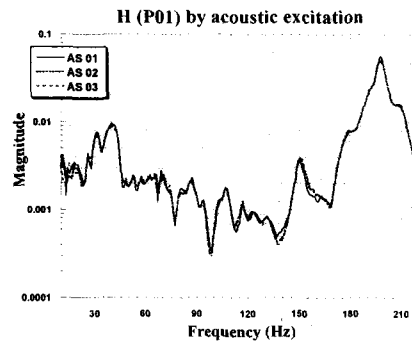
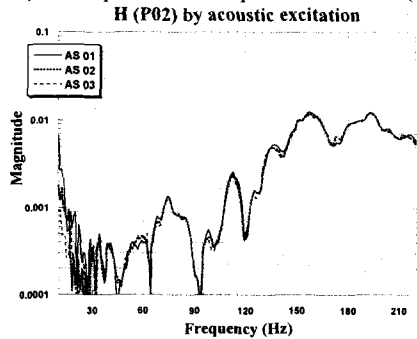


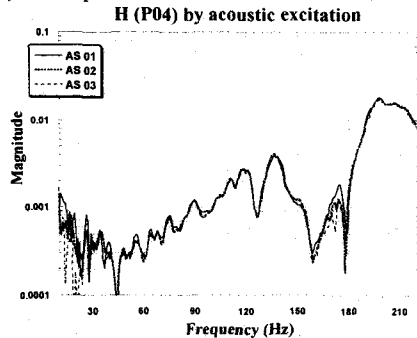
Fig. 3 A signal of accelerometer on the speaker



a) the response at the top of the trunk lid (P01)



b) the response at the R.H.S. wall of the trunk(P02)



c) the response at the bottom of the trunk(P04)

Fig. 4 Acoustic-structural response function by the speaker at the front seat at approximately ear height

Fig.4 에 표시된 주파수응답 측정치로부터, 입력 신호의 크기가 변하더라도 주파수응답 측정치는 거의 변화가 없음을 확인할 수 있으며, 이는 차실 트렁크계가 선형성을 가짐을 의미한다.

3.2 음향-구조 전달함수와 구조-음향 전달함수

여기서는 차실 트렁크계의 구조-음향 주파수 응답함수와 음향-구조 주파수 응답함수를 직접 비교함으로써 시스템의 선형성을 확인한다.

앞에서 수행한 바와 같이, 음향-구조 주파수 응답함수는 운전자 귀 위치에서 스피커로 가진하여 스피커의 체적 가속도를 구하고, 트렁크 벽면상의 가속도를 측정하여 구하였다. 구조-음향 주파수 응답함수는 Fig.1 에 표시된 트렁크 벽 상의 위치 P01 에서 외면을 충격해머로 가진하고 운전자 귀 위치에서 음압을 측정하여 구한다. 두 가지 주파수 응답함수의 크기를 Fig.5 에서 비교한다.

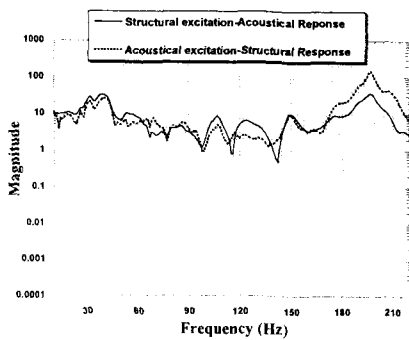


Fig. 5 Comparison between structural excitation-acoustical response and acoustical excitation-structural response

대체로, 두 주파수응답함수 측정치는 일치하는 경향을 보이지만, 주파수가 증가하면서 차이가 발생한다. 진동-음향 상반정리의 전제 조건중 하나로서, 음원은 방향성을 갖지 않는 무지향성을 가져야 하는데, 실제 사용되는 스피커는 고주파수 대역으로 갈수록 방향성이 증가하며, 또한, 주파수 대역이 높아짐에 따라 스피커의 등가 면적상의 오차도 증가하므로 두개의 전달함수 사이 차이가 발생하는 것으로 보인다.

4. 트렁크 벽면의 소음 기여도 평가

음향-구조 주파수응답 함수를 사용하여 트렁크 벽의 각 패널부 진동이 차실 음압에 어떻게 기여하는지를 평가한다. 조수석에서 스피커로 가진하고 트렁크 벽면 5 개 지점의 가속도를 측정하여,

음향-구조 주파수 응답함수를 구한 결과를 Fig.6 에 보인다. 그림에서 50Hz 이하와 200Hz 부근에서 트렁크 리드(P01)의 주파수 응답함수의 크기가 다른 주파수 응답함수보다 상대적으로 매우 크게 나오는 것을 볼 수 있다. 이는 저 주파수 대역의 구조기인 소음에서, 트렁크 벽면 중에서는 트렁크 리드부의 진동이 가장 크게 기여할 수 있음을 의미한다. 모드시험을 통해서 50Hz 아래에서의 트렁크 벽면 진동모드를 확인해본 결과, Fig.7a)에서와 같이 42Hz 에서 리드 상부패널의 상하 방향으로 진동하는 모드로 확인되었다. b)의 195Hz 진동모드는 차실 소음에 미치는 영향이 특히 크다. 최종적으로 이러한 진동 모드가 문제가 되는 지는, 주행시 노면 가진이나 엔진계통의 가진력에 의하여 어느 정도 크게 발생하는가에 따라 결정된다. 구조-음향계의 주파수 응답함수 상에서 매우 큰 기여를 하는 것으로 파악된 만큼, 추후 실차의 주행소음 평가시에 이에 관련되는 주파수 성분에 관심을 가지 필요가 있다. 문제가 되는 경우, 효과적인 댐핑 처리를 통해서 이 부분의 진동감쇠를 증가시킬 필요가 있다. 구조적인 보강을 시도하는 경우, 트렁크 리드의 굽힘 진동모드 진동수가 차실의 음향모드 주파수에 가까이 오지 않도록 주의를 요한다. 식(4)에 의거하면, 차실의 음향모드와 트렁크 벽을 포함한 차체의 진동모드 주파수가 일치하게 될 때, 심각한 구조기인 소음을 발생할 가능성이 있기 때문이다.

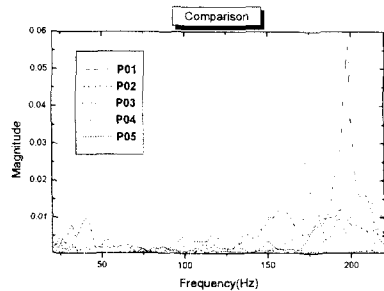


Fig. 6 Frequency response function of the parts of the trunk

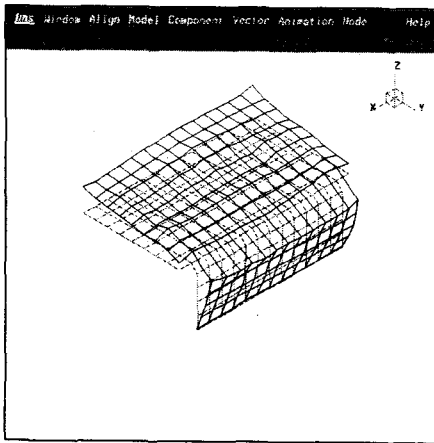
5. 결론

본 연구에서는 패키지트레이의 구멍을 통하여 차실과 트렁크가 연성되는 실차 모델을 대상으로, 트렁크 벽면의 진동과 차실소음 사이의 관계를 실험적으로 평가하였다. 진동-음향 상반정리에 근거하여, 음향-구조 주파수응답 함수를 측정된 결과,

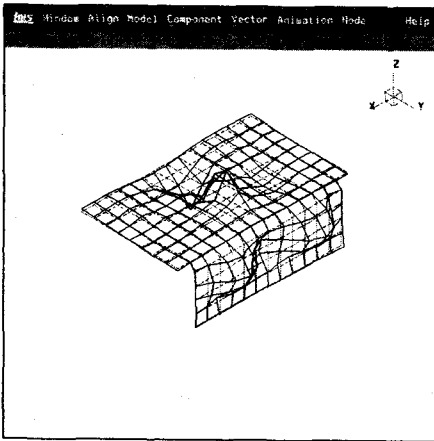
트렁크 리드 상부가 상하 방향으로 진동하는 42Hz 의 진동모드와 트렁크 벽면의 굽힘 변형이 심한 195Hz 의 진동모드가 저주파수 대역의 차실 소음에 크게 영향을 줄 수 있음을 밝혔다.

후 기

본 연구는 현대자동차㈜의 지원과 BK21 사업의 일부로 수행되었으며, 관계자 여러분의 지원에 감사 드립니다.



a) the structural mode shape of the trunk at 42 Hz



b) the structural mode shape of the trunk at 195 Hz

Fig. 7 the bending mode shape of the trunk wall

참고문헌

(1) 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.
- (2) 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
- (3) 강상욱, 이장무, 김석현, 1994, "트렁크 연성효과를 고려한 차실 음향모델링에 관한 연구", 한국소음진동공학회 추계학술대회 초록집, pp300-305.
- (4) P.W.SMITH, JR., 1962, "Response and Radiation of Structural Modes Excited by Sound", *Journal of The Acoustical Society of America*, Vol.34, No5, pp 640-647
- (5) Katrien Wyckaert, 1996, "Vibro-acoustical modal analysis: Reciprocity, model symmetry, and model validity", *Journal of The Acoustical Society of America*, Vol.100, No5, pp 3172-3181
- (6) Shininci Maruyama, Akihiko Hasegawa and Yoshihiko Hyoudou, 1999, "Interior Noise Analysis Based on Acoustic Excitation Tests at Low-Frequency Range", SAE 1991-01-1806
- (7) 고강호, 1999, "진동-음향 상반 원리에 이용되는 음원의 유효 면적 측정", 한국소음진동공학회지 제 9 권, 제 5 호, pp943-948
- (8) P.J.G.van der Linden and J.K.Fun, 1993, "Using Mechanical-Acoustic Reciprocity for Diagnosis of Structure Borne Sound in Vehicles", SAE 931340