

승용차의 도로면 소음 평가를 위한 시험절차 고찰

A Test Procedure for Road Noise Evaluation

조영호*·고강호*·허승진*·국형석*·김찬목*·기지현**·최윤봉**

Young-Ho Cho, Kang-Ho Ko, Seung-Jin Heo, Hyoungeok Kook, Chan-Mook Kim, Ji-Hyeon Ki,
Youn-Bong Choi

Key Words : Road Noise(노면소음), Transfer Path Analysis(전달경로 분석법), Noise Transfer Function(소음 전달함수)

ABSTRACT

Several tests are performed to evaluate road booming noise. Baseline test delivers the information of road noise characteristics. Coupling effect between structure and acoustics is obtained from the mode shapes and the natural frequencies by the modal test. Equivalent stiffness at joint areas between chassis and car-body system can be determined by the input point inertance test. Noise sensitivity of body mounting point of a chassis part can be obtained from the noise transfer function test with input point inertance test. Operational deflection shape makes us analyze the actual vibration modes of the chassis system under actual loading and find noise sources very easily. Finally, the transfer function analysis is used to identify noise paths through the chassis system. However, all of the tests above mentioned must be performed to evaluate road booming noise. The objectives and the procedures of the tests are described in this paper. Also, the guideline for efficient road noise evaluation test can be found.

1. 서론

구동 계통에서의 소음이 작아짐에 따라 노면 가진 소음이 실내 소음의 주된 성분으로 등장한다. 그러나, 자동차의 속도, 노면 상황 등에 따라 노면 가진력이 달라지고, 진동 에너지가 여러 가지의 경로를 통해 전달되기 때문에 노면 부밍 소음을 줄이기가 쉽지 않다. 일반적으로 차체에 전달되는 전달력은 국부적인 강성과 샤시와의 연결부위의 감쇠에 의해 결정되어 진다. 이 가진력은 실내 음장과 차체의 연성에 의해 공진을

유발하여 실내소음의 증가의 원인이 된다. 따라서, 노면 가진 소음의 평가에는 여러 가지 시험이 수반되어야 한다. 예를 들어 베이스라인 시험(Baseline test)을 통해서 실내소음의 특성을 파악하고, 각종의 모달 시험, 경로분석시험, ODS (Operational Deflection Analysis), 타이어 불균일 시험 등을 수행하여야 한다. 경로에 따른 소음의 영향을 파악하기 위해서는 소음전달함수 (NTF, Noise Transfer Function) 시험, 전달경로 분석(TPA, Transfer path Analysis)가 수행되어야 한다. NTF는 샤시와 차체의 연결부위의 소음 민감도의 평가기준이 되며, TPA는 각 연결부위의 기여도에 관한 중요한 정보를 제공한다. IPI(Input Point Inertance) 시험을 통하여 국부강성을 측정하며, 서스펜션의 소음원 파악을 위해 ODS를 측정하고자 한다.

이러한 시험들을 성격별로 신호분석시험(Signal Analysis Test)과 시스템분석시험(System Analysis

* 국민대학교 자동차공학전문대학원
E-mail : yhcho@kookmin.ac.kr
Tel : (02)910-4805, Fax : (02)910-4718

** 현대기아자동차 연구개발본부

Test)의 두 가지로 분류할 수 있으며, 신호분석에는 Baseline 시험, TPA, 소음원 분석 시험과 같은 부류가 있으며, 시스템분석에는 모달 시험, 실내음장시험, TPA가 필요하다.

본 논문에서는 위에 언급된 각종 시험의 장단점을 고려하여 효과적으로 시험을 조합하고, 이상적인 시험절차에 대한 방향제시를 하고자 한다.

2. 시험절차의 분석 및 응용

2.1 Baseline 시험

Baseline Data를 얻기 위해 도로 주행시험을 실시해야 한다. 구동계라든가 바람 등 노면가진 이외의 요인을 최소화하기 위해서는 상대적으로 낮은 속도로 주행 시험을 하여야 한다. 특히 타행시에는 기어를 중립에 놓아 구동계에 의한 실내소음을 최소화 하는 것이 바람직하다.

2.2 차실 음향모드 시험

노면가진 소음의 평가를 위해서는 반드시 차실 음향 모드 시험이 수반되어야 한다. 이는 중간 크기의 자동차에서는 200 Hz 아래에서 실내 공명이 6 내지는 8 개가 존재하기 때문이다. 실내음장 모드와 공명 주파수 검출을 위해 3차원 공간 상에서 모달 시험을 수행하여야 하며, 측정 격자간의 간격은 최대 관심주파수에 의해 결정되어 지므로 수백개의 격자가 필요하게 된다. 그러나, 격자 수는 차치하고라도 실내공간 모두를 3차원 격자로 나누는 것은 불가능하므로 몇 개의 대표평면에 대한 실내음장 수행으로 대처 가능하다.

2.3 차체 및 현가계 모드시험

차체 모달시험은 차체와 실내소음간의 동특성 관계를 보고자 함이다. 그리고, 차체의 모드가 서스펜션과 연동되는지를 파악하기 위해 서스펜션 모달시험이 함께 수반되어야 한다. 차체모달시험에서는 주로 차체 굽힘, 비틀림, 성냥곽 모드 들이 35Hz 이하의 저주파수에서 발생하므로, 실내소음에는 직접적으로 영향을 주지는 않으나, 패널의 경계조건 등에 영향을 주어 실내소음에도 간접적인 영향을 미친다. 한편 서스펜션 현가계는 스프링 스트러트와 lower control arm등이 대변위 운동을 하고 있으므로 탄성 한계 내에서 해석은 의미를 갖지 못할 수도 있다. 그러나 이들 구성 부품 각각의 고유주파수가 관심 주파수 영역보다 상당히

높은 곳에 위치하고 있다면 측정을 하는 순간에 있어서는 시스템이 정적인 상태를 유지하고 있다고 가정할 수 있다. 그러므로 관심 주파수 영역이 각 구성부품의 고유 주파수보다 낮은 경우 현가계는 준정적인 해석에 해당하므로 탄성한계 내에서 해석한 결과를 대신할 수 있다.

현가계 모달시험에 있어서 고려해야 할 사항은 타이어를 포함한 부싱 등의 재질에 의한 비선형성과 연결부의 결합 특성이나 마찰 등에 의한 비선형성 등이다. 만일 가진력이 너무 크게 작용하게 되면 이러한 비선형성이 함께 가진되어 선형 한계의 범위를 넘어서게 된다. 그러나 가진력이 너무 작게 되면 현가계 전체를 충분히 가진할 수 없는 상태가 되므로 적당한 가진력을 선정하는 것이 이 시험에 있어서 매우 중요하다. 일반적으로 재질의 비선형성이 예상되는 경우에는 sine sweeping 방법을 사용하는 random 가진보다 효과적이다.

2.4 Input Point Inertance 시험

구조물의 강성은 inertance 혹은 accelerance로 평가되어지며, 이는 다음의 식과 같이 가진력에 대한 구조물 진동의 주파수 응답함수로 표현된다. 특히, 국부적인 강성을 파악하기 위해서는 입력과 응답점을 같이 하여 IPI를 측정하는 것이 가장 좋다.

$$H_{ii}^s(\omega) = \dot{x}_i / f_i \quad (1)$$

2.5 소음전달함수 시험

차량에 있어서 진동 에너지의 전달 경로가 N개 일 때, 특정 지점에서의 전체 구조 기인 소음(structure borne noise) $p(\omega)$ 은 각각의 전달 경로를 통하여 유입된 진동 에너지에 의하여 발생된 구조 기인 소음($p_i(\omega)$)의 합으로 나타낼 수 있으며, 전달경로 i 에 작용된 기진력 F_i 에 소음전달함수 $H_{pi}(\omega)$ 를 곱한 것과 같으며, 복소수의 성질을 갖는다.

$$H_{pi}(\omega) = p_i / F_i \quad (2)$$

차량에서 발생하는 구조 기인 소음 가운데 가장 대표적인 현상중의 하나인 road noise를 예측하고 소음의 전달 경로를 규명하기 위해서는 위의 식(2)에 나타나 있는 소음전달함수와 경로를 통하여 전달되는 기진력을 알아야 한다. 이 중 소음전달함수는 진동 에너지가 전달되는 경로라고 생각되는 차체 부위를 가진할

때의 가진력과 차실 음압을 측정하여 구하게 된다.

가진은 보통 시험의 편의성을 위하여 가진 해머를 사용하게 되지만, x,y,z 세 방향을 모두 가진 할 수 없다는 것과 타격할 때 충격음이 발생하는 문제점을 가지고 있다. 이를 해결하기 위해서는 진동-음향 상반 원리를 이용하는 음향가진법이 사용된다.

$$H_{pi}(\omega) = -\tilde{v}_i / \tilde{Q} \quad (3)$$

여기서, \tilde{Q} 는 특정 지점에 위치한 음원의 체적속도를, $\tilde{v}_i(\tilde{r}_i)$ 는 음향가진에 의한 구조물의 i 지점에 발생한 진동 속도를 나타낸다. 이 방법은 다음과 같은 장점을 지니고 있다.

- 패널접선 방향을 포함한 모든방향의 FRF가 가능하다.
- 해머의 타격음에 의한 영향을 배제할 수 있다.
- 해머 가진이 어려운 위치의 FRF도 측정할 수 있다.

2.6 ODS(Operational Deflection Shape) 시험

사시 모달 시험은 시스템의 동특성 만을 나타낼 뿐이므로 실제 주행 조건에서의 진동양상을 나타내 주지는 못한다. 따라서, 모달시험에서의 모드형상은 실제 진동 현상과 다르다. 진정한 진동양상은 ODS를 통해 측정할 수 있으며, 이는 모달시험과 비슷하게 실제 주행 중에 진동 모드를 추출해 내는 것이다. 보통 다수의 채널을 동시에 측정하여야 하므로, 채널 수에 제한이 있을 경우 시험을 몇번에 걸쳐 수행해야 하며 특정 부위들을 매번 측정하여 래퍼런스로서 설정한 후 위상 동기화를 하면 모든 채널을 동시에 측정한 것과 같은 결과를 도출할 수 있다.

2.7 전달경로 분석(Transfer Path Analysis)시험

TPA는 차량에서 powertrain mount나 suspension mount 등의 소음 전달경로에 대한 실내소음 기여도를 분석하기 위하여 개발된 방법이다. PCA(Principal Component Analysis)와 IPI가 먼저 수행되어 저야 한다. PCA는 실제 동작상태에서의 진동 양상을 분석하고자 복잡한 구조의 입력을 측정하는 방법이다. 자동차의 경우에는 좁은 주파수 대역에서 여러 개의 모드가 연성되어 있다. 이 경우에는 모드분해가 곤란하므로 그 상태에서 Singular Value Decomposition을 이용하여 Principal Component만을 추출하고, 이를 가상의 가진력으로 사용한다. 예를 들어

Principal component j 에 의한 i 지점의 referenced virtual spectra Y_{ij} 는 식 (4)와 같다.

$$Y_{ij} = S'_{ij} / \sqrt{S'_{jj}} \quad (4)$$

여기에 각지점의 IPI, H_{vi} 를 고려하여, i 지점의 Referenced Operating Force, F_{ij} 를 구할 수 있다.

$$F_{ij} = Y_{ij} / H^v \quad (5)$$

여기에 소음전달함수(식 (2))를 곱하면 실제주행상태에서의 경로 i 의 소음에 대한 기여도를 파악하는 것이 가능해진다.

3 차량 주행시험 및 결과

차량의 주관적인 평가에 의해 저주파 소음이 매우 불쾌하게 느껴지는 모드를 대략적으로 파악한 후, 200 Hz이하에서의 노면 부밍 소음을 정량적으로 평가하기 위해 앞 장에 기술한 시험 항목들을 수행하였다.

3.1 Baseline 시험

시험 차량의 전석과 후석 2군데에서 소음을 측정하였다. 각 시험을 3차례 수행하여 평균을 취했다. 시험 모드는 구동계통의 영향을 줄이기 위해 비교적 저속 구간인 정속 40, 60, 80 km/h와 타행 80→30 km/h로 설정했다.

Figure 1에서 보는 바와 같이 35~40, 45~50, 87~90 Hz 구간에서 소음수준이 큼을 알 수 있었다. 타행시에도 비슷한 경향을 나타내었으며, 부드러운 노면 상에서도 비슷한 주파수 대역에서 peak를 보여 경향 파악에는 속도나 노면 상태가 그다지 문제가 되지 않음을 알 수 있었다.

3.2 차실 음향 모드 시험

차실 음향시험은 3차원 공간 전체를 측정하는 것이 곤란하므로 Figure 2와 같이 수직평면과 수평면을 하나씩 선정하여 FRF를 측정하였다. 이 후 SYSNOISE에 의해 공명 주파수와 모드 형상을 확인하여 잘 일치함을 확인한 후 측정하지 않은 나머지 부분은 수치해석 결과를 그대로 사용하였다. 해석에 의해 51Hz, 87Hz에서 공명현상을 계산하였으며, 이는 시험 결과인 50.5 Hz, 90Hz와 매우 유사하였다. 또, Baseline 시험의 결과와

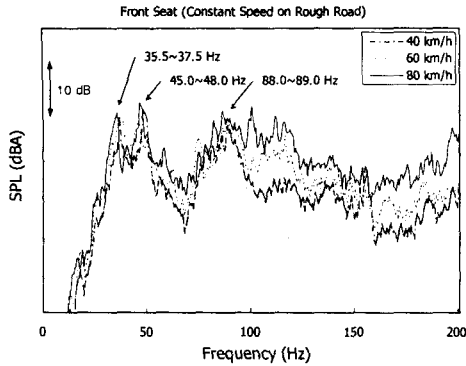


Figure 1 Sound pressure levels measured inside of a test vehicle at the three different vehicle speeds on a rough road

비교하여 보면, 앞서 언급한 45~50Hz, 87~90Hz 구간의 소음이 실내음장 모드와 깊은 관련이 있는 것으로 판단된다.

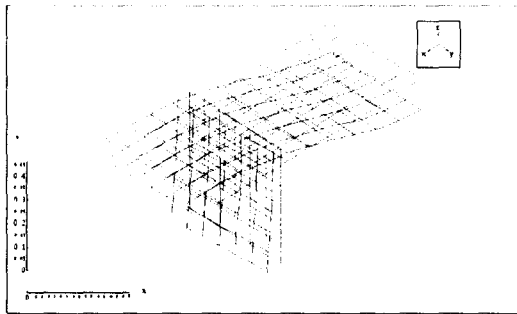


Figure 2 The acoustic modeshape of a cavity measured on two planes (50.5 Hz)

3.3 모달 시험

차체의 모달 시험으로는 110군데를 선정하여 global 모드를 보고자 했으며, 관심 주파수 구간에서 12개의 모드를 추출하였고, 이중 지붕의 국부 모드인 39 Hz와 49Hz 모드가 부밍소음과 관련이 있는 것으로 보였다.

또한, 샤시 모달 시험은 차량을 지지대 위에 올려 놓은 후 타이어의 밑부분을 가진하는 방법으로 시험하였으며, 전 샤시, 후 샤시에서 각각 55, 62 지점을 선정하여 가속도를 측정하였다. 특히 35~40 Hz, 45~50 Hz, 88~89 Hz에서 진동 모드를 발견하였으며 이는 서스펜션의 바운싱 모드, 크로스멤버의 굽힘, 타이어의 탄성모드로 노면 부밍 소음과 밀접한 관계가 있는 것으로 추정된다



Figure 3 A modeshape of the chassis system

3.4 Input Point Inertance 시험

Input Point Inertance 시험을 위해 측정된 지점들은 샤시 부와 차체부가 연결되는 지점을 선정하였으며, 본 시험 차량의 경우 16개의 지점을 선정하였다. 차체 부위에 수직 입력을 가하고, 가속도계로 3방향의 가속도를 측정함으로써, 차체부위의 IPI를 측정하였으며, Figure 4에 뒤 서브 프레임이 장착되는 지점의 IPI 곡선을 등강성 곡선 5×10^5 N/m, 1×10^6 N/m, 5×10^6 N/m과 비교하였다. 또, 각 부위의 국부 강성을 Figure 5에서 보인 바와 같이 비교한 결과 15, 16번 지점의 강성이 모든 방향에서 매우 약함을 알 수 있었다. 따라서, 이 부위가 차체민감도 측면에서 가장 불리하다고 할 수 있었다.

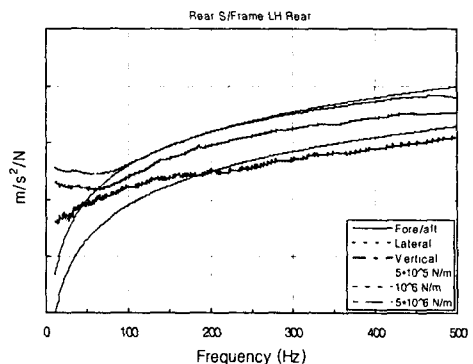


Figure 4. The constant stiffness curves and IPI's measured at the mounting point of a rear sub-frame in 3 directions

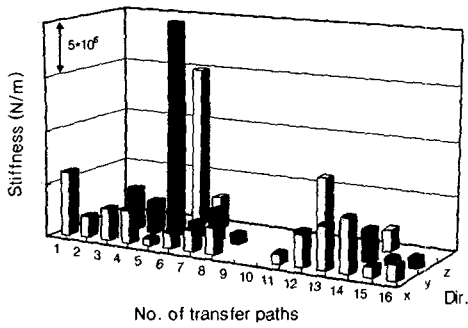


Figure 5 Local stiffness of the mounting points of the chassis systems on the body

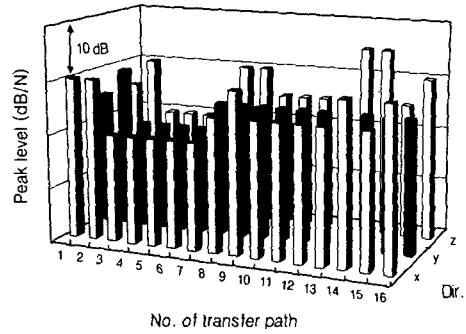


Figure 7 Noise sensitivities of 16 transfer paths to driver's ear position in 35~40 Hz frequency range

3.5 소음전달함수

소음전달함수는 IPI 시험과 동일한 부분을 대상으로 측정하였으며, 공간 제약이 많아 충격망치 보다는 음향 가진법을 활용하였다. Figure 6에는 운전석에서의 소음과 뒤 서브 프레임 장착 위치간의 주파수응답함수를 구한 것으로, A-weight된 등소음 전달함수 곡선 (NTF-45 dB/N, NTF-50 dB/N, NTF-55 dB/N)과 비교하였다. 100 Hz 이하의 주파수 범위에서 3개의 peak가 55 dB/N에 근접하는 것을 알 수가 있으며, 이는 Baseline 시험에서 제기되었던 주파수 범위와 일치한다.

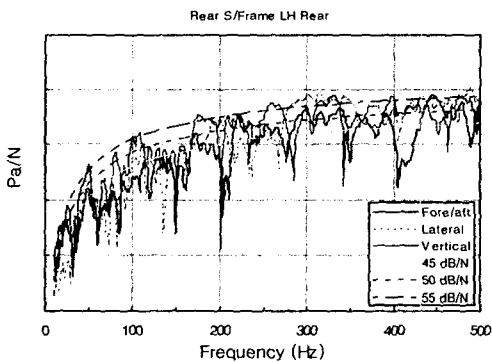


Figure 6 A-weighted constant curves and FRF's measured at the mounting point of a rear sub-frame in 3 directions

Figure 7에는 문제 주파수 영역 35~40 Hz 주파수 영역에서의 각 부위의 FRF peak를 비교한 것으로 13:z와 14:z 부위가 높은 민감도를 보이고 있어 부밍 소음의 요인이 되는 것으로 여겨진다.

3.6 전달경로함수 분석

사시 장착 부위에서의 실제 가진력을 측정하기 위해 FRF의 역을 이용한 간접적인 방법을 사용하였다. 이를 위해 주행 중 가속도를 17개소에서 측정하였고, 주행속도는 60km/h 정속을 유지하였다. 여기에 reference 신호로 네개의 바퀴에서 수직방향 가속도를 함께 측정하였다. 바퀴에서의 가속도는 서로 무관하다고 할 수 있으므로, Principal Component를 4개로 하였고, 이는 Figure 8에서 보는 바와 같이 기여도가 모두 비슷하여, 하나도 감소시킬 수 없음을 알 수 있다.

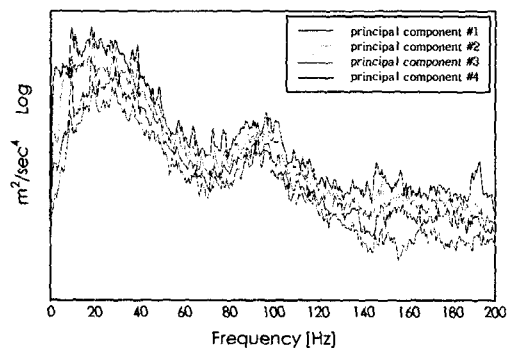


Figure 8 Principal components of four reference signals

따라서, 4 조합의referenced 가진력을 강성 행렬과 referenced 실가속도에 의해 구했으며, 이를 NTF와 결부시켜 전체 소음을 합성할 수가 있었다. 이를 실제 소음수준과 비교한 결과 20 ~70 Hz구간에서 잘 일치함을 알 수 있었다. 이를 근거로 각 경로의 기여도를 분석하였으며, 37.5 Hz에서의 기여도를

Figure 9에 예시하였다. 그 결과 8, 10, 11, 12, 16 지점의 기여도가 높음을 알 수 있었다.

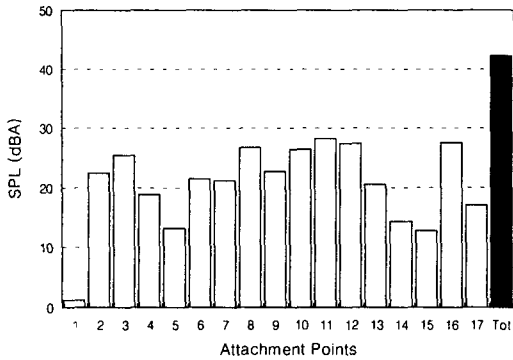


Figure 9 Path contributions to interior sound pressure level at the front seat (37.5 Hz)

3.7 종합

위의 시험 결과를 종합한 결과 공통적으로 16번 경로가 지적되었다. 이는 16번 지점의 국부강성이 취약하여, 노면에 의한 샤프시의 공진이 쉽게 차체로 전달된다는 것을 의미하므로, 주된 소음 경로라 할 수 있다.

4. 결론

노면 소음과 관련된 모든 시험을 수행하였다. 시험들이 서로 관련이 깊어 주요 경로를 파악하기 위해 시험의 전 과정을 거칠 필요가 없다는 것을 발견하였으며, 특히 신속하게 소음의 경로를 파악하는 데는 IPI와 NTF만을 가지고도 충분히 소기의 목적을 달성할 수 있다는 것을 발견했다.

시험의 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 소음전달 경로 파악을 위해서는 충분히 Baseline 시험, TPA, ODS가 반드시 수행되어야 한다.
- 차체 개조에 관한 정보를 위해서는 Baseline 시험, IPI, NTF가 필요하다.
- TPA를 거치면 정확한 경로 분석이 가능하다.

후 기

본 연구는 현대기아 자동차의 도움과 2001년도 두뇌한국 21 사업에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) M. Akiho, "Virtual Reference Signals for Active Road Noise Cancellation in a Vehicle Cabin", SAE Paper No. 951325.
- (2) W. Hendrix and D. Vandenbroeck, "Suspension Analysis in View of Road Noise Optimization", SAE Paper No. 931343.
- (3) K. Wyckaert, H. Van der Auweraer, "Operational Analysis, Transfer Path Analysis, Modal Analysis: Tools to Understand Road Noise Problems in Cars", SAE Paper No. 951251.
- (4) P. Perry Gu and J. Juan, "Application of Noise Path Analysis Technique to Transient Excitation", SAE Paper No. 972034.