

구조물 동특성 변경을 이용한 실내 부밍 소음 개선 Improvement of Interior Booming Noise in the Vehicle Using the Structural Dynamic Modification

김영하† · 이재웅* · 김성기*
Young-Ha Kim, Jae-Woong Lee and Sung-Gi Kim

Key Words : Structure Born Noise(구조기인 소음), Dynamic Damper(동흡진기), Structural Dynamics Modification(구조물 동특성 변경), Booming Noise(부밍 소음), Input Point Inertance

ABSTRACT

Improvement of structure-borne noises in the vehicle compartments has been one of the primary concerns in the development of vehicles. The booming is an annoying low frequency interior noise and vibration in vehicle. But it is difficult to reduce the structure-born booming noise in traditional method – trial and error within the shorten development schedule. So in present, the structure dynamic modification (SDM) method helpful to predict the effect of the local mass, stiffness, and damping is introduced. So in order to reduce the interior booming noise, the SDM was performed, and verified with modal test result. It was shown that the interior booming noise was reduced as predicted.

1. 서 론

최근 제조업체의 기술 수준이 향상됨에 따라 차량을 구매하는 고객의 품질 기대지수도 높아지고 있으며, 이 중 중요한 요소인 소음/진동에 대한 품질 평가기준 역시 엄격해지고 있다. 그러나 근래에 차량의 연비개선 및 원가절감 등의 목적으로 이루어지는 차량 부품의 경량화는 구조물의 강성 취약을 수반하여 자동차의 진동, 소음 문제를 야기하고 있으며 이는 소비자의 불만요소로 작용하게 된다.

자동차의 여러 가지 NVH(Noise Vibration Harshness) 문제 중, 대표적인 소음으로 차량의 가속 시나 감속 시 또는 정속 주행 시 특정한 엔진 회전수에서 매우 큰 음압의 증가로 귀를 압박하는 소음이 발생하는 경우가 있는데 이를 부밍 소음이라

고 한다. 부밍 소음은 주로 200Hz 이하의 순음에 가까운 소리이다.

부밍 소음은 그 원인에 따라 크게 구조 기인 소음(Structure-borne noise)과 공기 기인 소음(Air-borne noise)으로 구분된다. 구조 기인 소음은 엔진 실린더 내부의 연소 기진력으로 인하여 파워트레인, 현가계, 배기계 등에서 발생하는 진동이 파워트레인을 지지하고 있는 마운트 및 서브프레임을 통하여 차체로 전달되어 발생한다. 공기 기인 소음은 파워트레인 등에서 방사되는 소음 및 배기계 또는 흡기계에서 발생하는 소음이 공기를 통하여 실내로 유입되는 것을 말한다.

이 중, 특히 구조 기인에 의한 저주파 성분의 부밍 소음은 탑승자에게 불쾌감을 유발하고 차체 진동까지 수반하기 때문에 반드시 개선되어야 할 부분이다.

구조기인에 의한 부밍 소음의 원인 분석 및 개선을 위해 음향 민감도 분석, 구조물 동특성 변경을 이용한 모드해석 등이 이용되는데, 우선 실차 주행 시험을 통하여 소음특성을 분석하고, 음향 전달 함수(NTF : Noise Transfer Function)를 측정하여 발생원 및 전달 경로를 파악하여야 한다. 음향 가진을

† 교신저자: 정희원, 김영하 쌍용자동차 NVH 개발팀

E-mail : NVHpedia_K@smotor.com

Tel : 031-610-3670, Fax : 031-610-3758

* 쌍용자동차 NVH 개발팀

이용한 민감도 분석을 통해 실내 부밍 소음을 유발하는 의심인자가 파악되면 그 구조물을 모달 시험을 이용하여 공진주파수 및 진동 모드 형상을 확인하고, 실내 부밍 소음을 유발하는 인자의 정확한 원인 분석을 하게 된다.

위 과정을 통해 파악된 부밍 소음의 개선을 위해 구조물 동특성 변경을 이용하여 실내 부밍 소음을 유발하는 인자의 주요 진동모드 및 공진을 저감시키는 모드변수 변경 과정을 수행하면 부밍 소음의 개선이 가능하다.

이에 본 연구에서는 4 기동 2.0L 디젤엔진이 적용된 차량에서 실차 주행 시험 후 부밍 소음의 특성을 분석하고, 음향 민감도 분석을 이용해 주요 전달경로를 분석한 결과, 구조기인 부밍 소음을 유발하는 인자를 찾아내어 모달 테스트를 통해 얻은 모드변수를 변경하여 개선효과를 예측하는 구조물 동특성 변경(SDM : Structure Dynamic Modification) 방법을 이용하여 단기간의 효율적인 개선 방안을 알아보았다.

2. 본 론

Fig.1 은 본 논문에서 적용된 분석기법 및 실내 부밍 소음 개선 절차를 나타내고 있으며, 기초 시험을 통한 소음원 확인, 음향민감도 분석을 이용한 주요 전달경로의 공진 및 진동모드 파악, 원인 인자 모드 변수 변경을 이용한 개선효과 예측기법 적용 및 이를 검증하는 단계로 이루어져 있다.

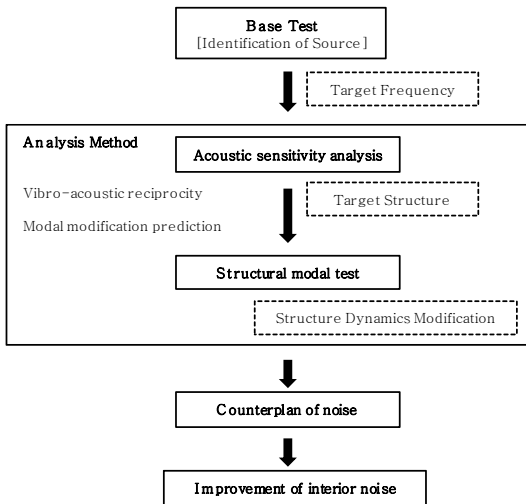


Figure 1. Process for improvement of interior noise

다음은 본 논문에 적용된 이론적 배경을 서술하였다.

2.1 모달 시험

모달 시험이란 구조물의 동적 특성을 알아내기 위해 모달 변수(Modal parameter)들을 시험에 의해 알아내는 과정을 말한다. 각각의 모드는 고유주파수(Natural frequency)와 감쇠비(Damping ratio), 모드 형상(Mode shape)을 가지고 있으며 이를 모달 변수라고 한다. 이러한 모달 변수는 가진기 또는 해머로 가진 시 구조 물의 여러 포인트에서 측정한다. 주파수 응답 함수(FRF : Frequency Response Function)로부터 구해지며, 이를 통해 동적 거동을 가장 잘 나타낼 수 있는 자유도(DOF : Degree of freedom)을 선정하여 최적의 모드를 구할 수 있다.

2.2 음향 전달 함수(NTF)

음향 전달 함수는 파워트레인 마운트, 서브프레임 마운트 등 주요 진동 경로상의 지점으로부터 실내 소음 측정점까지의 음향 전달 함수를 측정하는 방법이다.

음향 전달 함수를 측정하기 위해서는 구조물을 직접적으로 가진하는 방법과 구조-음향 상반 원리(Vibro-acoustic reciprocity)를 이용하여 음향 가진을 이용하는 방법¹⁾이 있는데 본 논문에서는 구조-음향 상반 원리를 이용하여 측정하였다.

(1) 음향 가진을 이용하는 방법

음향 가진을 이용하여 NTF 를 측정하는 방법은 실내 좌석의 귀 위치에 스피커를 설치하고, 이 음원으로 차체를 가진하고 구조물의 마운트 위치에 3축 방향의 가속도계를 부착하여, 음원(차량 실내)과 응답점(마운트 브라켓)의 전달함수를 측정하는 것이다.

$$H_{ki}(\omega) = \frac{v_i(\omega)}{q_k(\omega)} \quad (1)$$

2.3 구조 동특성 변경(SDM)

구조 동특성 변경(SDM)은 모달 시험에서 구한 모달 변수(고유진동수, 감쇠비, 진동 모드)를 이용하여 구조물의 국부적인 중량, 강성, 댐핑을 변경함으로써 구조물의 진동 특성에 미치는 영향을 예측하는 것이다.

구조물에 국부적으로 중량, 강성, 동흡진기를

적용하였을 때 구조물의 주파수 전달 함수 및 모드 형상 등 동적 거동에 미치는 영향성을 알 수 있다.

SDM 은 과거의 시행 오차적인 방법에서 벗어나 차량의 NVH 문제를 개선하기 위하여 구조물의 동특성을 변경하였을 때의 개선효과를 예측함으로써 구조물을 변경하기 위한 샘플 제작 비용 및 개선을 위한 시간을 절약할 수 있다.

전체 구조물의 운동방정식은 다음과 같이 나타낸다.

$$s^2M\{x\} + sC\{x\} + K\{x\} = \{f\} \quad (2)$$

여기서 행렬 M, C, K 는 mass, damping, stiffness 를 나타낸다

운동방정식을 각 부분 구조물로 분리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$s^2M_1\{x_1\} + sC_1\{x_1\} + K_1\{x_1\} = \{f_1\} \quad (3)$$

$$s^2M_2\{x_2\} + sC_2\{x_2\} + K_2\{x_2\} = \{f_2\} \quad (4)$$

이것을 모달 좌표 운동방정식으로 나타내면 다음과 같다

$$s(A + A_c + \Delta A)\{y\} + (B + B_c + \Delta B)\{y\} = \{p\} \quad (5)$$

$$A = \begin{bmatrix} A_1 & 0 \\ 0 & A_2 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} B_1 & 0 \\ 0 & B_2 \end{bmatrix}$$

$$\{y\} = \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{Bmatrix} \quad \{p\} = \begin{Bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{Bmatrix}$$

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_c & 0 & -C_c \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -C_c & 0 & C_c \end{bmatrix}$$

$$B_c = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_c & 0 & -K_c \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -K_c & 0 & K_c \end{bmatrix}$$

$$\Delta A = \begin{bmatrix} 0 & \Delta M_1 & 0 & 0 \\ \Delta M_1 & \Delta C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Delta M_2 \\ 0 & 0 & \Delta M_2 & \Delta C_2 \end{bmatrix}$$

$$\Delta B = \begin{bmatrix} \Delta M_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Delta K_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\Delta M_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Delta K_2 \end{bmatrix}$$

3. 차량 개선 시험

3.1 실내 부밍 소음 분석

4 기통 2.0L 디젤엔진이 적용된 시험 차량의 주행 시 Figure 2 와 같이 2100~2200rpm 부근에서 C4 성분 140Hz 를 중심으로 140~150Hz 구간에서 부밍 소음이 실내 1,2 열에서 높게 발생하고 있어 문제되는 수준이다

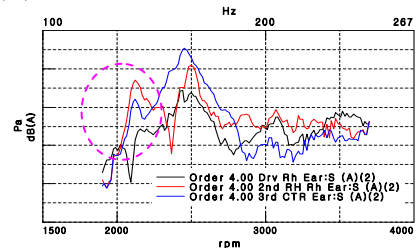


Figure 2. Interior booming noise at driving

3.2 음향 전달 함수(NTF)

시험 차량의 주행 시 2100rpm 부근의 실내 부밍 소음의 전달경로를 파악하기 위하여 음향 가진 방법을 이용하여 실차 상태에서 파워트레인의 음향 전달 함수를 측정된 결과, Figure 3 와 같이 리어 서브프레임 모듈의 기여도가 있음을 알 수 있었고, 특히 리어 액슬의 마운트 부위가 140Hz 부근에서 높은 음향 전달 특성을 나타내고 있다.

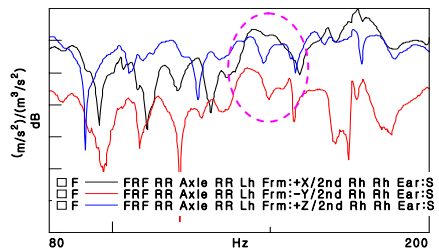


Figure 3. NTF for axle mount at interior seat ear position

3.3 모달 시험

리어 액슬, 서브프레임의 독립적인 모달 시험을 위해 액슬, 서브프레임, 서스펜션과 타이어로 구성된 리어 서브프레임 모듈을 실차에서와 동일한 조건으로 거치하고 모달 시험을 수행하였다. 실차에서의 FRF와 서브프레임 모듈에서의 FRF는 거의 동일하게 발생하는 것을 확인한 후 모달 시험을 수행하였다.



Photo 1. Rear subframe module modal test

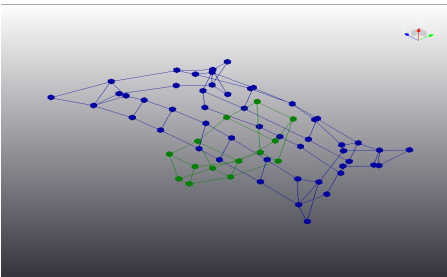


Figure 4. Subframe shape at modal test

Figure 5에서 보이는 바와 같이 모달 시험으로 얻은 각 포인트의 FRF 분석 결과, NTF 결과와 동일하게 140Hz 부근에서 리어 액슬 마운트 리어 부위의 진동 특성이 높게 나타나고 있다.

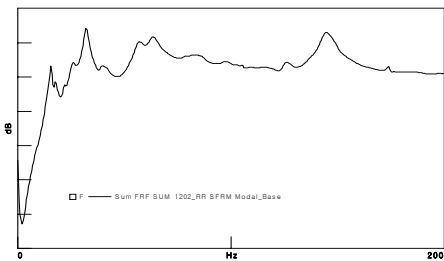


Figure 5. FRF for modal test at subframe

3.4 구조 동특성 변경(SDM)

140~150Hz의 부밍 소음을 저감하기 위해서 모달시험 결과를 가지고 관심 주파수 대역을 0~200Hz로 하고 SDM 방법을 이용하여 국부 중량 증대 시, 연결부위 강성 증대 시, 동흡진기 적용 시에 대한 영향성 파악을 하였다.

(1) 국부적인 중량 적용 효과

Figure 6와 같이 먼저 진동 특성이 높게 나타나는 리어 액슬 마운트 리어 부분에 국부적으로 중량을 적용하였을 때에는 Figure 7에서 보이는 바와 같이 중량을 증가할수록 140Hz 부근의 진동은 저감이 되나 60Hz 부근의 진동은 악화되는 경향을 보인다. SDM 결과로부터 국부적인 중량 증가는 문제 진동 개선효과는 있으나 다른 진동 피크가 악화되는 등 충분한 개선효과는 미흡하다

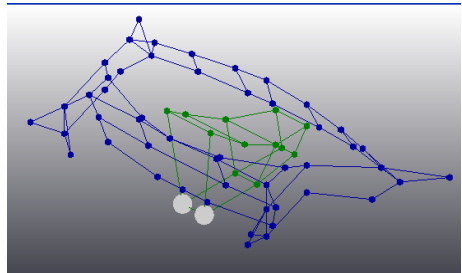


Figure 6. Subframe shape applied local mass

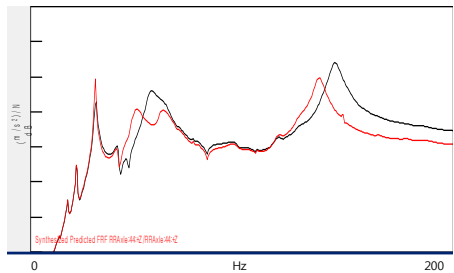


Figure 7. FRF for local mass effect at Rear axle mount

(2) 동흡진기 적용

서브프레임에서 진동이 가장 높게 나타나는 부위에 다음 Figure 8와 같이 동흡진기를 적용하였고, SDM 결과는 Figure 9에 나타내었다. 140Hz의 동흡진기의 중량을 변화시켜 본 결과, 동흡진기의 중량이 증가할수록 진동 저감 효과 및 구간은 많아지는 것을 알 수 있었다. 중량은 가급적

적게 하여야 하므로 SDM 결과를 참조하여 최종적으로 차량에 적용하여 부밍 소음이 문제없을 정도의 동흡진기 중량을 선택하였다.

동흡진기의 중량, 주파수를 변화시켜가며 SDM 방법을 이용하여 여러가지 케이스 스터디를 해 보면 적정 중량 및 주파수를 구할 수 있어 차량 적용 시험 시 시험 횟수를 줄일 수 있었다.

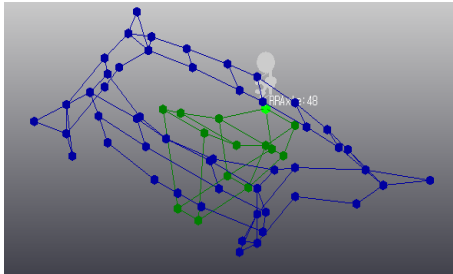


Figure 8. Subframe shape applied dynamic damper

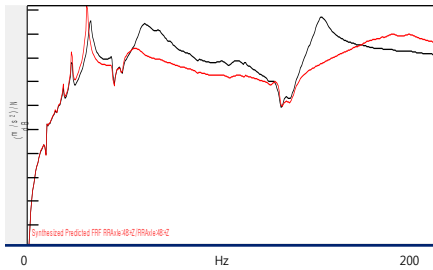


Figure 9. FRF for dynamic damper effect at subframe

(3) SDM 케이스 스터디에 의한 결론

리어 액슬 진동 문제를 개선하기 위해 SDM 방법을 이용하여 국부적인 중량 적용, 동흡진기를 적용하였을 때의 효과를 비교해보면 Table 1 에 나타난 바와 같이 동흡진기를 적용하는 것이 악화되는 부분 없이 가장 효과적인 개선방안임을 알 수 있다.

Table 1 Result of Case study (SDM)

Damper Type	Weight(kg)	Effective Level(dB)
Mass	3	2
	5	3
Dynamic	2	3
	4	5

(4) SDM 결과에 대한 모달 시험 확인

SDM 결과에 의거하여 가장 효과적인 동흡진기를 적용하였을 경우 리어 서브프레임 모듈에 대한 모달 시험을 다시 수행한 결과, Figure 10 과 같이 개선 효과를 볼 수 있다. 이는 Figure 11 의 SDM 에서 나타난 결과와 거의 유사하다.

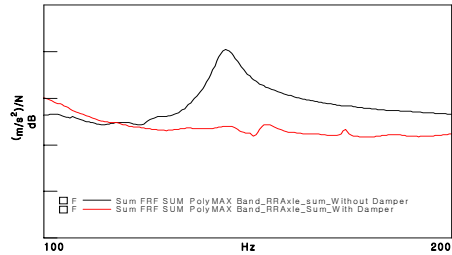


Figure 10. FRF for dynamic damper effect (modal test)

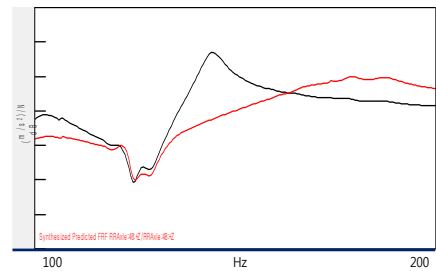


Figure 11. FRF for damper effect at subframe (SDM)

(5) 차량 검증 시험

Acoustic sensitivity analysis, Modal Test 를 이용하여 4 기통 2.0L 디젤엔진 차량의 주행 시 2100rpm 부근의 부밍소음에 리어 액슬 공진에 의한 서브프레임 모듈의 공진이 기여도가 있음을 확인하였고, SDM 방법을 이용하여 리어 액슬 의 중량을 증대하는 것보다는 동흡진기를 적용하는 것이 중량, 원가 측면 및 부밍 소음에 대하여 효율적인 개선방안임을 확인하였다.

실제 차량에 동흡진기를 적용하여 주행시 서브프레임과 차체진동 및 실내소음을 측정된 결과 Figure 12~14 와 같이 서브프레임 및 차체진동이 6~8dB 저감되었고, 그 영향으로 2100rpm 부근에서 발생하던 C4 140Hz 부밍 소음이 5dB(A) 이상 저감되어 문제없는 수준이 되었다.

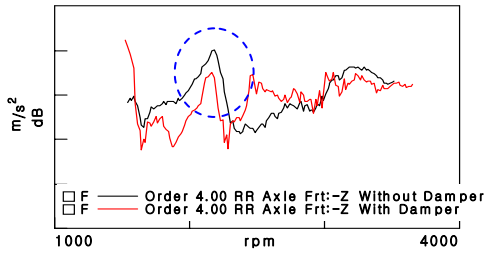


Figure 12. The effect of dynamic damper for rear axle vibration

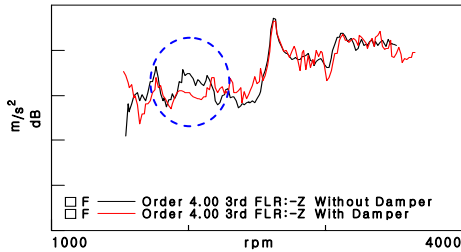


Figure 13. The effect of dynamic damper for body vibration

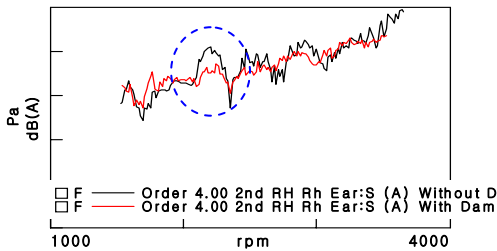


Figure 14. The effect of dynamic damper for booming

3. 결론

1) 4기통 2.0L 디젤 엔진 차량의 주행 시 C4 성분의 실내 부밍 소음에 대하여 음향 가진을 이용한 전달함수(NTF)측정 및 모달 시험을 수행한 결과, 리어 액슬의 공진이 기여도가 있음을 알 수 있었다.

2) 모달 시험을 이용한 구조 동특성 변경 방법(SDM)을 적용하여 리어 액슬 공진 문제를 개선하는 가장 효율적인 방안을 찾아 보았다.

3) SDM 적용 결과, 동흡진기 적용시가 부밍 소음 개선은 물론 원가 및 중량 측면에서도 효과적인

개선 방안을 알 수 있었다.

4) SDM 결과를 참조하여 차량에 동흡진기를 적용한 후 실차 시험한 결과 역시 실내 부밍 소음(C4)을 5dB(A) 이상 저감하여 문제없는 수준이 되었다.

5) 구조물의 공진으로 인한 부밍 소음을 개선하기 위하여 지금까지 해오던 구조물의 보강 등 시행 오차적인 방법보다는 모달 시험 및 SDM 방법을 이용하여 개선 효과를 예측하는 것이 개선과정의 시간과 자원을 상당히 단축시키므로 향후 차량 NVH 개발 시 많은 활용이 필요하겠다.

참고 문헌

(1) Lee, S. K and Kim, S. J, 2007, The Analysis of Vehicle Interior Noise by the Powertrain and Measurement of Noise Transfer Function using Vibro-Acoustic Reciprocity, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference.

(2) Jeong, M. S, Kook, H. S, Ko, K.. H, Heo, S. J, Kim, C. M, 2003, A Study on the Test Procedure to Identify the Noise Sources and the Design Improvements for the Reduction of the Interior Noise of Passenger Vehicles, Proceedings of KSAE Annual Autumn Conference, pp.786~791

(3) Lee, S. K, Hwang, W. S, Kim, J. H, Woo, J. H, Lee, S. H, Lee, H. J, 2000, Improvement of Sound Quality of Vehicle Through Reduction of Interior Noise Using Noise Transfer Path Analysis and Running Modal Analysis, Proceedings of the KSNVE-10, pp. 806~810.

(4) K.Wyckaert, 1988, Vibro-acoustic Modal Analysis :Reciprocity, Model Symmetry and Model Validity, ISMA 19-Tools for Noise and Vibration Analysis.

(5) Kim, K. C, Lee, J. H, 2002, Design Optimization Analysis of Body Attachments For NVH Performance Improvement, Proceeding of KSAE Annual Spring Conference, pp752~759.