

하이브리드 부분구조합성법을 이용한 승용차 차실소음의 예측 Interior Noise Prediction of Passenger Vehicle using Hybrid Substructure Synthesis Method

김희진† · 김효식* · 윤성호* · 김중희**

Hee Jin Kim, Hyo Sig Kim, Seong Ho Yoon and Joong Hee Kim

1. 서 론

본 연구에서는 하이브리드 부분구조합성법을 이용해 차축과 차체가 8 개의 부싱요소로 연결된 차량구조의 실내소음을 예측한다. 제작된 모델은 실험 결과와 비교하여 정확성을 검증하며, 연결부 회전자유도에 대한 주파수응답함수의 영향을 검토한다.

2. 차실소음의 하이브리드 부분구조합성

합성구조는 Fig. 1 과 같이 차체구조와 전륜 차축이 부싱요소들로 연결되며 식(1)을 이용 차실 소음을 예측 할 수 있다.

$$\mathbf{H}^C = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{ss}^A & \mathbf{H}_{sc}^A & 0 & 0 \\ \mathbf{H}_{cs}^A & \mathbf{H}_{cc}^A & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{H}_{cc}^B & \mathbf{H}_{cs}^B \\ 0 & 0 & \mathbf{H}_{sc}^B & \mathbf{H}_{ss}^B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{sc}^A \\ \mathbf{H}_{cc}^A \\ -\mathbf{H}_{cc}^B \\ -\mathbf{H}_{sc}^B \end{bmatrix} [\mathbf{H}_{cc}^A + \mathbf{H}_{cc}^B + \mathbf{K}^{-1}]^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{cs}^A \\ \mathbf{H}_{cc}^A \\ -\mathbf{H}_{cc}^B \\ -\mathbf{H}_{cs}^B \end{bmatrix} \quad (1)$$

부분구조 A 인 전륜 차축은 8 개의 연결점에서 차체구조에 장착되며 3 개의 입력점에 외력이 작용한다. 이경우 연결자유도는 병진 및 회전자유도에 대해서 모두 48 자유도 이며 입력자유도는 18 자유도 이다.

부분구조 B 는 후륜 차축이 연결된 차체구조이며, 전륜 차축과 8 개의 부싱요소를 통해서 연결된다. 따라서 연결자유도는 부분구조 A 와 같은 48 자유도이며, 응답자유도를 m 이라고 하면 응답과 연결자유도 간 주파수응답함수의 크기는 mx48 이 된다. 부분구조 A 의 주파수응답함수는 유한요소 해석방법을 이용하여 구하였으며, 부분구조 B 는 실험품을 계측하여 구하였다. 이때, 연결점의 회전자유도 주파수응답

함수는 T 형 블록과 두 개의 병진 가속도계를 이용해서 구하였다. 부싱요소의 강성행렬은 병진자유도의 주축 방향에 대해서 계측된 동강성 값들을 이용해서 부싱요소의 유한요소모델을 수정한 후, 정적축약법을 이용하여 병진 및 회전자유도에 대한 등가 동강성 행렬을 계산하였다.

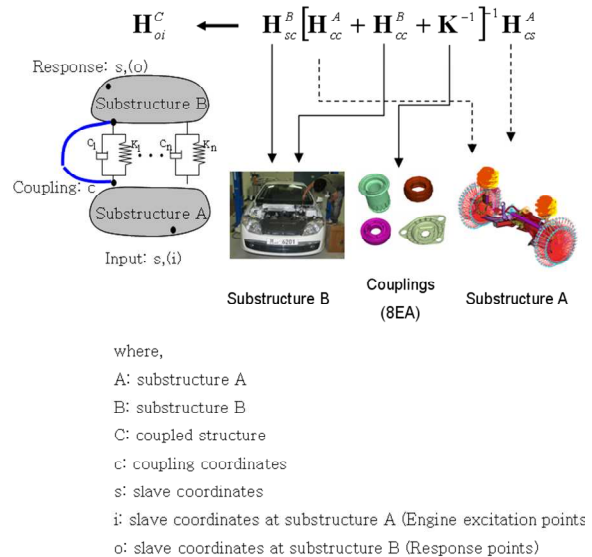
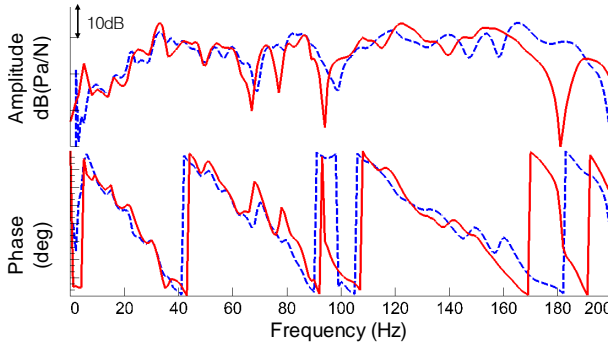


Fig. 1 Substructure synthesis analysis with frequency response functions of vehicle body and front axle

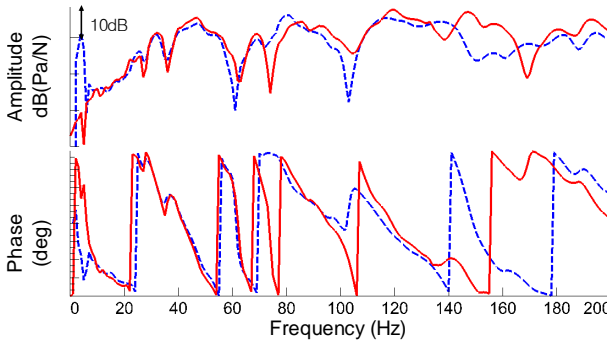
3. 실내 소음의 예측 및 검증

Fig. 2 의 예측 및 계측된 소음전달함수를 비교하면, 20 Hz ~ 40 Hz 까지의 아이들링 주파수 대역과 40 Hz ~ 140 Hz 까지의 중저속 주행 주파수 대역 에서는 계산된 크기(amplitude)와 위상(phase)이 계측된 값과 3 dB 내에서 유사하다. 반면, 140 Hz 이상의 고속 주행 주파수 대역에서는 주파수에 따라 오차가 3 dB 이상 증대되는 것을 볼 수 있다.

† 교신저자; 르노삼성자동차 소음진동팀
E-mail : heejin2.kim@renaultsamsungM.com
Tel : (031) 289-7963
* 르노삼성자동차 소음진동팀
** 르노삼성자동차 R&D 본부



(a) Noise Transfer Function from lower engine mount x-direction to driver's ear position



(b) Noise Transfer Function from lower engine mount z-direction to driver's ear position

Fig. 2 Comparison between measurement and calculation (solid line: measurement, dotted line: calculation)

4. 회전자유도 주파수응답함수의 영향

연결부의 회전자유도가 차실내 소음 또는 차체구조의 진동에 미치는 영향을 파악하기 위해서 각 주파수 별 오차를 식(2)과 같이 정의하였다.

$$\text{Error}(\%) = \frac{\|\mathbf{H}_{oi}^C - \hat{\mathbf{H}}_{oi}^C\|}{\|\mathbf{H}_{oi}^C\|} \times 100 = \frac{\|\mathbf{E}\|}{\|\mathbf{H}_{oi}^C\|} \times 100 \quad (2)$$

where, $\mathbf{E} = \mathbf{H}_{oi}^C - \hat{\mathbf{H}}_{oi}^C$,

$$\|\mathbf{A}\| = \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |a_{ij}|^2 \right)^{1/2}$$

여기서 \mathbf{H}_{oi}^C 는 병진 및 회전자유도 주파수응답함수를 모두 사용한 경우로서 부분구조 A의 입력자유도로부터 부분구조 B의 응답자유도까지 소음전달함수 행렬이다. $\hat{\mathbf{H}}_{oi}^C$ 는 병진자유도에 대한 주파수응답함수만을 사용해서 부분구조를 연결한 경우의 소음전달함수 행렬이다. 식 (2)을 이용해서 주파수 대역에 따른 총 27개의 소음전달함수에 대한 오차를 검토해 보면 Fig. 3와 같다. 200 Hz 까지 영역에서 병진자

유도 주파수응답함수만을 사용해서 실내소음을 예측하는 경우, 88 Hz 부근과 150 Hz 이상에서 40% 이상의 오차가 발생하는 것을 볼 수 있으며, 반면 차량 아이들링 주파수 영역인 40 Hz 미만에서는 최대 13% 정도의 오차가 발생되고 있음을 알 수 있다. 보(bean)와 판(plate)을 이용한 연구들에 따르면 회전자유도 주파수응답함수는 주파수에 비례해서 커진다. 따라서 부분구조합성 시 회전자유도의 효과도 주파수에 따라서 증가할 것으로 이해된다. 그러나 Fig. 3의 결과를 보면 오차가 주파수에 비례하지 않고 80 Hz 부근의 주파수 대역에서 크게 발생되고 있다. 이러한 현상은 합성구조에서 부분구조 A(전륜 차축)내 연결점의 회전자유도 고유모드 형상이 부분구조 B(차체구조)내 연결점의 회전자유도 고유모드 형상과 80 Hz 부근에서 크게 달라지기 때문이다. 따라서 부분구조 합성(Substructure synthesis)시, 회전자유도 주파수응답함수의 효과는 부분구조내 연결점의 회전자유도간 고유모드의 형상에 따라 그 중요성이 달라진다.

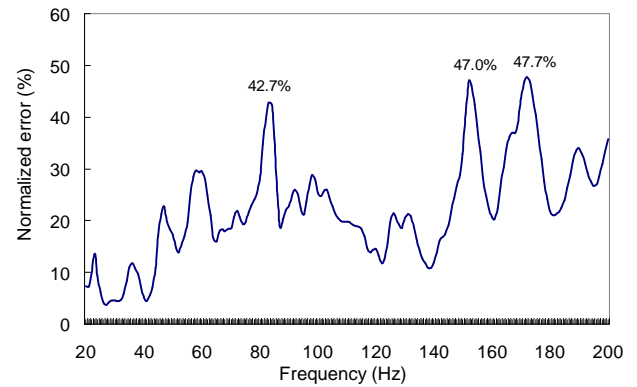


Fig. 9 Total error of noise transfer functions due to excluding rotational degrees of freedom frequency response functions

5. 결론

- 1) 예측 결과를 실험 결과와 비교해 보면 약 140 Hz 영역까지는 소음전달함수의 진폭과 위상이 매우 잘 일치한다.
- 2) 부분구조합성시 회전자유도 주파수응답함수의 생략에 따른 오차는 대상 차량의 경우 80 Hz 이상의 영역에서 최고 48% 정도의 오차를 보이고 있다.
- 3) 차량과 같이 복잡한 시스템의 경우, 하이브리드 부분구조 합성법의 효율적으로 적용하기 위해서는 최소 개수의 회전자유도에 대한 주파수응답함수의 측정이 요구된다. 따라서 관심 주파수 대역에 따라서 민감한 회전자유도를 선택하는 방법에 대한 연구가 향후 필요하다.