

# 주파수 응답함수 합성법을 이용한 차량 실내 소음 저감에 관한 연구

## A Study On Vehicle Interior Noise Reduction Applying FRF Based Substructuring

오상훈† · 강연준\* · 선종천\* · 송문성\* · 김성구\*\*

Sanghoon Oh, Yeonjune Kang, Jongcheon Sun, Moonsung Song and Seonggoo Kim

**Key Words :** Substructure(부분구조), GRC(Generalized Receptance Coupling method, GRC 방법), FBS(FRF based substructuring, 주파수 응답함수 합성법), Vehicle Interior Noise(차량 실내 소음)

### ABSTRACT

The Substructure Synthesis means the technology to predict the dynamic properties of an assembly from the properties of its components, or to predict the effect of a modification on a structure. The FRF Based Substructuring method is a kind of the Substructure Synthesis and very useful to predict the efficiency of the product in the early stage of development. Especially, the Hybrid FBS method is very useful to predict the vehicle NVH characteristics after modifying some components of the vehicle. Target components can be established on the basis of test models and FE models of the prototype constructed in the early stage of development. In this study, the Hybrid FBS method was applied to vehicle subframe and car-body in order to reduce vehicle interior noise induced by engine exciting force.

### 1. 서론

전체 시스템을 구성하고 있는 하위 부품들의 동특성으로부터 전체 시스템의 동특성을 예측하거나, 하위 부품의 설계 변경 시 전체 시스템의 동특성에 미치는 영향을 예측할 수 있는 기술을 부분 구조 합성법(Substructure Synthesis)라 한다. 주파수 응답함수 합성법(FRF Based Substructuring, FBS)은 부분 구조 합성법의 일종으로 제품 개발 초기 단계에서 제품의 성능을 미리 예측하기에 용이하다. Hybrid FBS 방법을 이용하여 단일 부품의 유한요소 해석 결과와 복잡한 구조물에서 실험적으로 측정된 주파수 응답함수와의 합성을 통해 결합된 전체 시스템의 주파수 응답함수를 예측할 수 있다. 따라서 주요 부품의 유한요소 해석 모델의 변경만으로 전체 시스템의 동특성을 예측할 수 있어 목표 성능을 달성하는 데 필요한 설계 변수를 시제품 제작 없이 최적화 할 수 있는 장점이 있다.<sup>1)</sup>

본 연구에서는 Hybrid FBS 방법을 자동차 차체와 전륜 서브프레임에 적용하여 엔진 가진력에 의한 실내 소음 저감을 위한 연구를 수행하였다.

### 2. FBS 알고리즘

부분 구조 합성법의 여러 알고리즘 가운데 GRC(Generalized Receptance Coupling) 방법을 이용하여 연구를 수행하였다.<sup>2)</sup>

#### (1) GRC 방법

부분 구조 시스템의 리셉턴스 행렬은 가진점과 응답점에 대해서 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{Bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{aa} & H_{ab} & H_{ac} \\ H_{ba} & H_{bb} & H_{bc} \\ H_{ca} & H_{cb} & H_{cc} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{Bmatrix} \quad (1)$$

부분 구조 시스템이 강체 결합된 어셈블리 시스템에 대해서 가진점과 응답점의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} x_n \\ x_j \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{nn} & H_{nj} \\ H_{jn} & H_{jj} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} f_n \\ f_j \end{Bmatrix} \quad (2)$$

여기서  $x$  는 변위,  $f$  는 힘,  $H$  는 리셉턴스 행렬을 각각 나타낸다. 그리고 첨자  $a$  와  $n$  은 각각 부분구조와 구조물의 내부 좌표이고, 첨자  $b, c$  그리고  $j$  는 연결점 좌표를 나타낸다. 부분구조의 연결점 좌표  $x_b$  와  $x_c$  에서는 평형(equilibrium)과 일치성(compatibility) 조건을 만족해야 하므로

† 서울대학교 기계항공공학부, 현대모비스  
E-mail : shoh76@mobis.co.kr  
Tel : (02880-1692, Fax : (02) 888-5950

\* 서울대학교 기계항공공학부

\*\* 현대모비스

다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\{f_b\} + \{f_c\} = \{f_j\} \quad (3)$$

$$\{x_b\} = \{x_c\} = \{x_j\} \quad (4)$$

비 연결점 좌표는 결합 과정을 거처도 변하지 않으므로, 다음과 같다.

$$\{f_a\} \equiv \{f_n\} \quad (5)$$

$$\{x_a\} \equiv \{x_n\} \quad (6)$$

식 (1)~(6)을 종합하면 다음과 같은 결과식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} H_{nn} & H_{nj} \\ H_{jn} & H_{jj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{aa} & H_{ac} \\ H_{ca} & H_{cc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} (H_{ab} - H_{ac}) \\ (H_{cb} - H_{cc}) \end{bmatrix} [H_{bb} + H_{cc} - H_{bc} - H_{cb}]^{-1} \begin{bmatrix} (H_{ab} - H_{ac}) \\ (H_{cb} - H_{cc}) \end{bmatrix}^T$$

$$= \begin{bmatrix} H_{aa} & H_{ab} \\ H_{ba} & H_{bb} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} (H_{ac} - H_{ab}) \\ (H_{bc} - H_{cc}) \end{bmatrix} [H_{bb} + H_{cc} - H_{bc} - H_{cb}]^{-1} \begin{bmatrix} (H_{ac} - H_{ab}) \\ (H_{bc} - H_{cc}) \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

식(7)에서 좌변의 어셈블리 시스템의 리셉턴스 행렬이 우변의 부분 구조 시스템의 리셉턴스 행렬로 표현된 것을 볼 수 있다.

### 3. FBS 이용한 차량 실내 소음 저감

#### 3-1 FBS 모델 구성

FBS 모델 구성을 위해 차량을 두 개의 부분 구조로 나누었다. 부분 구조 A는 파워 트레인 및 전륜 현가계를 제외한 차체 및 음향 공동으로 정의하고 부분 구조 B는 전륜 서브프레임으로 정의하였다. 전륜 서브프레임은 파워 트레인 및 현가계를 지지하고 실차의 충돌 성능에도 중요한 역할을 하는 구조물이다. 뿐만 아니라 차량의 NVH 특성에도 큰 영향을 미친다.

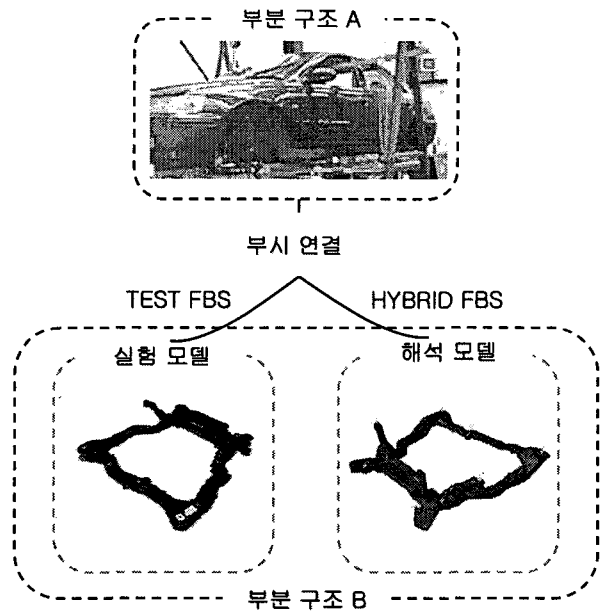


Fig.1 Applying FBS to passenger vehicle

Fig.1은 FBS 적용의 개념도이다. 본 연구에서는 서브프레임의 앞쪽 엔진 롤 마운트부(front engine roll mount)에 엔진에 의한 가진력이 가해질 때 실내 소음 저감을 목표로 하였다. 서브프레임 실험 모델에 의한 Test FBS 결과와 서브프레임 유한요소 해석 모델에 의한 Hybrid FBS 결과를 기준 값과 함께 비교하였다.

#### (1) Test FBS 모델 구성

부분 구조 A인 차체는 6개의 서브프레임 차체 마운팅 점에서 x,y,z 3축 가속도 신호와 차량 실내 응답점(운전자의 왼쪽 귀)에서 1개의 음향 신호를 측정하여, 18×18 크기의 진동 주파수 응답 함수 행렬과 18×1 크기의 음향 주파수 응답 함수 행렬을 구하여 전체적으로 19×18 크기의 진동-음향 행렬(Vibro-Acoustic Matrix)를 구성하였다. 부분 구조 B인 서브프레임은 차체와 연결되는 6점에서 18개의 가속도 신호를 측정하여 18×18 크기의 진동 주파수 응답 함수 행렬과, 앞쪽 엔진 롤 마운트를 입력점으로 가진하여 6점에서 구한 가속도 신호로 전체적으로 18×21 크기의 주파수 응답 함수 행렬을 구성하였다. 또한 부분 구조 A,B의 연결 특성으로는 서브프레임 부시의 동강성(Dynamic Stiffness) 측정값을 사용하였다.

#### (2) Hybrid FBS 모델 구성

서브프레임의 실험 모델을 유한 요소 해석 모델로 대체하기 위하여 실험 모델과 해석 모델의 동기화(correlation) 작업을 수행하였다.<sup>3)</sup> Fig.2에

서 실험 모델과 해석 모델의 고유 진동수를 비교해 볼 수 있다. 300Hz 이하 범위에선 실험 모델과 해석 모델의 고유 진동수 값의 오차가 그리 크지 않은 것을 볼 수 있다.

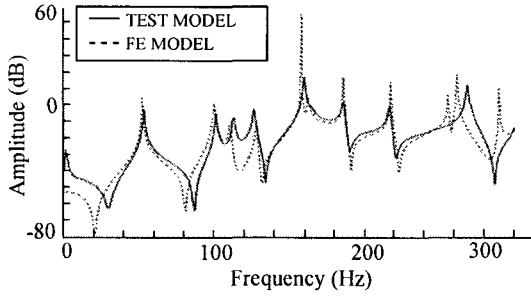


Fig.2 Natural frequency of Subframe Test model and FE model

(3) FBS 합성 결과

Fig.3 은 Test FBS 및 Hybrid FBS 를 통해 예측한 소음 전달 함수(Noise Transfer Function)와 두 부분 구조가 결합된 상태에서 측정된 기준값을 비교한 것이다. Test FBS 의 경우 500Hz 부근까지 예측값과 기준값의 경향이 일치하는 것을 볼 수 있고, Hybrid FBS 의 경우 300Hz 부근까지 일치하는 것을 알 수 있다.

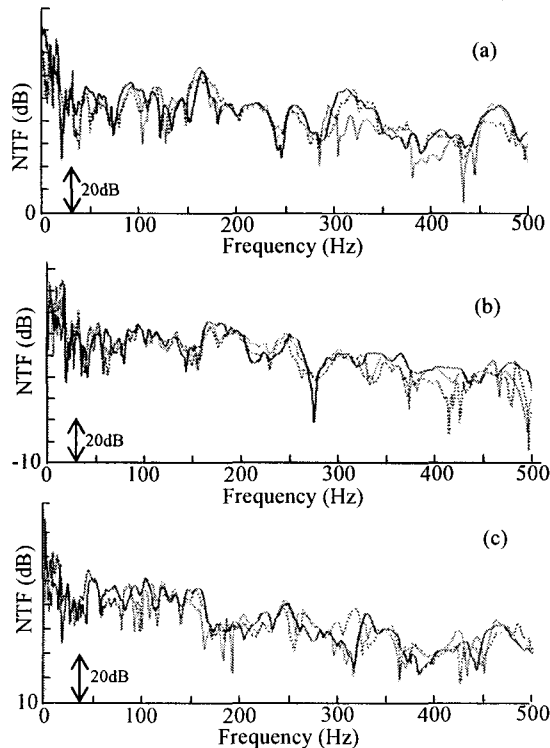


Fig.3 FBS results (solid : reference, dashed : Test FBS result, dotted : Hybrid FBS result). (a) +X direction, (b) +Y direction, (c) +Z direction

3-2 주행 중 실내 소음 예측

실험 차량의 파워트레인은 총 4 점으로 마운트 되어 있으며 이중 2 점은 서브프레임에, 나머지 2 점은 차체에 마운트 된다. TPA(Transfer Path Analysis) 이론에 의하면 각 마운트 부위에 작용하는 가진력에 의한 실내 음압은 식(8)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_i = F_{oper,i} \times \left( \frac{P}{F} \right)_i \quad (8)$$

여기서  $P_i$  는  $i$  번째 마운트에 작용하는 가진력에 의한 실내 음압 레벨,  $F_{oper,i}$  는  $i$  번째 마운트에 작용하는 가진력,  $(P/F)_i$  는  $i$  번째 마운트와 음향 공동 간의 소음 전달 함수를 각각 나타낸다.

앞쪽 엔진 롤 마운트에 작용하는 가진력은 역행렬 방법(Matrix Inversion Method)에 의해 구했고, 앞서 Hybrid FBS 를 이용하여 구한 소음 전달함수를 이용하여 2 단 완가속, 1000 ~ 5500rpm 으로 주행 중 차량 실내 소음을 예측하였다.

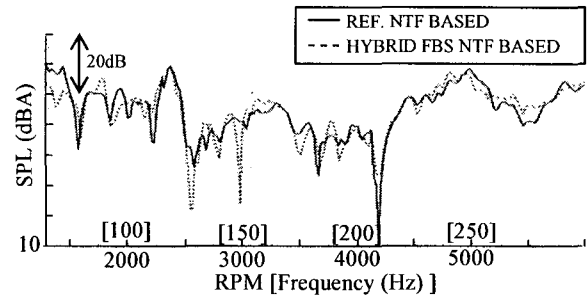


Fig.4 Predicted vehicle interior noise induced by front engine roll mount excitation force, 3<sup>rd</sup> order

Fig.4 는 앞쪽 엔진 롤 마운트부 가진에 의한 3<sup>rd</sup> 오더(50~275Hz) 성분의 주행중 실내 소음 예측결과를 보여준다. 상대적으로 큰 음압 레벨을 나타내는 116~120Hz 영역과 240~250Hz 영역은 일치하는 서브프레임의 공진 주파수는 존재하지 않았다.

3-3 실내 소음 저감을 위한 서브프레임 개선

실내 소음 저감의 목표 주파수는 상대적으로 큰음압 레벨을 보이는 116~120Hz, 240~250Hz 영역으로 선정하고 서브프레임의 모드 분석 후 실내 소음 저감에 가장 적합할 것으로 판단되는 설계 변수를 설정한 후 유한 요소 모델의 변경을 통해 실내 소음을 예측하였다. 설정된 설계 변수는 1) 서브프레임의 하중 입력점과 마운트부 간의 강성 2) 서브프레임의 차체 마운트부의 강성 3) 서브프레임 차체 마운트부 부위의 강성이다.

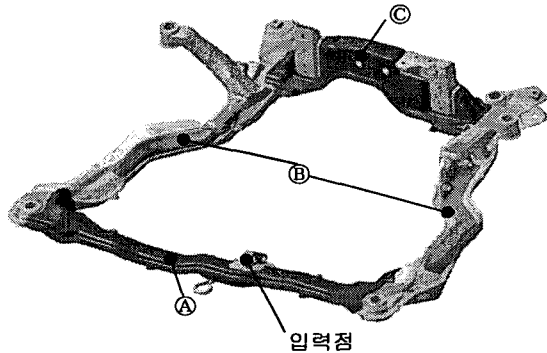


Fig.5 Subframe Structure

CASE	Modification of Subframe
I	- A 부 단면 높이 증대 - B 부 두께 1mm 증대 - C 부 두께 0.5mm 감소 - 중량 변경 전후 동등 수준
II	CASE I + 일부 부시 강성 50% 감소

Table 1 Modification of subframe

Fig.5 는 서브프레임의 구조를 나타내고 설정된 설계 변수를 고려하여 Table 1 과 같이 서브프레임 변경 후 실내 음압을 예측하였다. Fig.6 은 서브프레임 변경 후 실내 소음 예측 결과를 보여준다. CASE1 의 경우 116 ~ 120Hz 영역에서 1dB, 240 ~ 250Hz 영역에서 4.6dB 소음 저감 효과가 있는 것으로 예측되었다. 또한 CASE2 는 116 ~ 120Hz 영역에서 3.5dB, 240~250Hz 영역에서 6.5dB 의 소음 저감 효과가 있는 것으로 예측되었다.

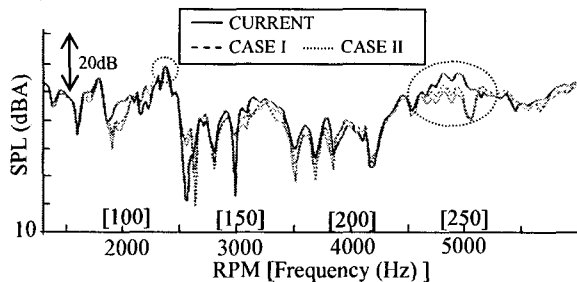


Figure 6. Vehicle interior noise reduction by modifying front subframe

#### 4. 결론

Hybrid FBS 방법을 차량에 적용해 주행 중 실내소음 저감을 위한 연구를 수행하였다. 파워 트레인과 전륜 현가계를 제외한 차체와 음향 공동을 부분구조 A, 전륜 서브프레임을 부분구조 B 로 정의한 후 Test FBS 및 Hybrid FBS 를 통하여 소음 전달 함수를 예측하였다. Test FBS 를 통해 구한 소음 전달 함수는 0~500Hz 구간에서, Hybrid FBS 를 통해 구한 소음 전달 함수는 0~300Hz 구간에서 기준값과 잘 맞는 것을 알 수 있었다. 가속 주행 시험을 실시하여 입력점에서의 가진력을 구해 3<sup>rd</sup> 오더 성분의 실내 소음을 예측하였다. 실내 소음 개선을 위한 목표 주파수를 설정하고, 서브프레임의 모드 분석 후 적합한 설계 변수를 설정하였다. 서브프레임 개선안을 Hybrid FBS 에 적용하여 실내 소음 저감 여부를 예측하였고 개선안이 실내 소음 저감에 효과적임을 파악하였다.

#### 참고문헌

- (1) Urgueira, A. P. V., "Dynamic Analysis of Coupled Structures Using Experimental Data," Ph.D. Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of Lod, 1989.
- (2) Ren, Y. and Beards, C. F., "On Substructure Synthesis with FRF Data," J. of Sound and Vibration, Vol.185, No.5, pp.845-86, 1994
- (3) Sakai, T. and Sakamoto, A., "Improvement of Engine Noise for the 2003 Accord Using Hybrid CAE Technology," SAE 2003-01-1427, 2003
- (4) Tasi, J. S. and Chou, Y. F., 1988, "The identification of Dynamic Characteristics of a Single Bolt Joint." J. of Sound and Vibration. Vol.125, pp.487-50
- (5) LMS Application Note, Vibro-acoustic Transfer Path, LMS International