한국소음진동공학회 05추계학술대회(수송기계편), pp. 140~143.

실차 소음 최적화를 위한 주파수 응답 함수 합성법의 적용

Application of FRF-Based Substructuring to Optimization of Interior Noise in Vehicle

정원태* · 강연준† · 김상훈**

Wontae Jung, Yeonjune Kang and Sanghoon Kim

Key Words : FRF(Frequency Response Function, 주파수 응답 함수), Substructure(부분구조), GRC(Generalized Receptance Coupling method, GRC 방법), FBS(FRF based substructuring, 주파수 응답함수 합성법), FE Model(Finite Element Model, 유한 요소 모델)

ABSTRACT

The hybrid CAE/CAT methods are widely applied to product development in various fields because this method can predict the response of the whole system when a part of the system is changed. Especially, the hybrid CAE/CAT method is very useful to predict the vehicle NVH characteristics after changing some parts of the vehicle. Target parts can be established on the basis of test models and FE models of the prototype constructed in the planning stage of car development. In this study, the topic was focused on the proper test-based FBS application process to predict vehicle NVH characteristic. First, the test-based FBS method was applied to vehicle substructure and car-body. And then the test-based model was replaced with FE model to apply hybrid CAE/CAT method. The replaced FE model was modified through the optimization process. The interior noise in vehicle during the drive was predicted with Modified FE moel, then the predicted results were verified by experimenting with actual modified model.

1. 서 론

해석 기술의 발달에 따라 자동차, 선박, 비행기 등의 복잡한 구조물도 수치적 해석이 가능해졌다. 하지만 여전히 복잡한 구조물들은 각 부분구조(Substructure)들 간의 결합부를 정확히 모델링 하기가 힘들기 때문에 전체 구조물의 모델링이 어렵고 결과적으로 시스템의 정확한 동특성을 예측하기가 쉽지 않다. 반면 간단한 구조물의 동특성은 유한요소법등과 같은 수치적 해석 기술에 의해 비교적 정확한 예측이 가능하다. 이 점을 이용해 복잡한 구조물을 좀 더 정확하게 해석하기 위해 고안된 방법으로서 부분구조합성법이 있다. 이것은 복잡한 구조물의 동특성을 간단한 부분 구조들로 나누어 해석한 후 종합하여 전체 시스템의 동특성을 예측하는 방법으로 실험적 방법이나 유한요소해석 방법 혹은 그혼용도 가능하다.[1)]

† 서울대학교 기계항공공학부
E-mail : yeonjune@snu.ac.kr
Tel : (02) 880-1691, Fax : (02) 888-5960

* 서울대학교 대학원 기계항공공학부

** 서울대학교 대학원 기계항공공학부

Hybrid FBS(FRF-Based Substructuring, 전달함수를 이용한 부분구조합성법) 기술은 부분구조합성법의 일종으로 유한요소해석 방법과 실험적 방법을 융합한 기술이다. 기본 개념은 전체 구조물을 비교적 해석이 간단한 부분구조들로 분해하여 유한요소 모델을 구성하고 그로부터 얻은 주파수응답함수와 합성하여 전체 시스템의 응답을 구하는 것이다.

Hybrid CAE/CAT 방법은 제품 디자인 초기 단계에서 제품의 성능을 미리 예측하기 위해 사용되는 여러 방법들 중에서도 상당히 용이하고 정확도가 높은 방법으로 평가되고 있다. 또한 이 방법은 단일 부품의 유한요소해석 결과와 복잡한 구조물에서 실험적으로 측정된 주파수응답함수(FRF)와의 합성을 통하여 결합된 구조물의 주파수응답함수를 예측해 내므로, 주요 부품의 형상을 실제로 제작해 보지 않더라도 유한요소모델의 변경만으로 전체 시스템의 동특성을 예측할 수 있는 장점을 지니고 있으며 기존의 민감도 해석 방법, TPA(Transfer Path Analysis), PCA (Principal Component Analysis) 방법 등을 적용하여 디자인 초기 단계에서 어느 설계 변수를 변화시키는 것이 NVH 관점에서 효율적인지 예측하는 것도 가능하다.

Hybrid FBS 기술은 그 특성상 자동차 업계에서 가장 활발하게 연구되고 있고 적용되고 있다. 현재 세계 유수의 완성차 업체에서는 1990년대 초부터 본 기술을 도입, 적용하고 있다. 일본의 도요타와 혼다, 북미의 GM, 크라이슬러, 포드, 유럽의 르노 등 Global Top으로 불리 우는 대부분의 완성차 업체가 본 기술을 도입하고 있으며 주로 현가계와 엔진 서브프레임에 적용하여 소음· 진동 성능 개선에 상당한 효과를 보고 있다.[2)]

특히 혼다의 경우, 2003년 형 Accord 모델에 Hybrid FBS 기술을 도입하여 차실 내 소음 저감을 실현하였고, 이에 대한 연구 결과 및 과정을 SAE(미국자동차공학회)에 논문으로 정리하여 발표하기도 하였다.

본 연구에서는 자동차에 대한 Hybrid FBS NVH모델을 구성하기 위한 선행 연구로 실험에 기반한 FBS모델을 구성하는 절차 및 방법에 대해 연구 하였다. 형상이 변경된 FE model에 대해서 Hybrid FBS를 수행한 결과를 기반으로 가속 주행시 실내 소음을 예측 하였다. 주행소음 예측시 실차 내부 소음에 가장 큰 영향을 미치는 3개의 경로에 대해서만 고려하였다. 예측의 타당성은 3개의 경로만을 통해서 전달되는 실차 주행 소음 계산값과 Test-Based FBS결과와 Hybrid FBS결과를 비교하였다. 형상이 변경된 FE model을 실제로 제작하여 실차 주행 소음을 측정하였고 이 결과가 예측된 결과와 어느 정도 일치하는지 확인하였다.

2. FBS 알고리즘

FBS 알고리즘에는 IC method(임피던스 합성방법, Impedance Coupling Method), RC method (Receptance Coupling Method) 그리고 GRC method(Generalized Receptance Coupling method) 의 3가지가 있다 . 이 중에서 IC method는 계산의 비효율성 때문에, RC method는 적용 범위의 제한성 때문에 일반적으로 GRC method를 많이 쓰고 있다.

2.1 GRC방법[3)]

GRC 방법 RC 방법의 수학적 효율성을 유지하면서 적용 범위가 작은 문제점을 개선한 알고리즘이다. GRC 방법에서는 모든 부분구조를 부분구조 시스템으로 간주한다.

부분구조 시스템의 리셉턴스 행렬은 가진점과 응답점에 대해서 다음과 같이 나누어 진다.

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

결합된 구조물에 대해서 가진점과 응답점의 관계는 다음과 같다.

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

여기서 첨자 a와 n은 각각 부분구조와 구조물의 내부 좌표이고, 첨자 b, c 그리고 j는 연결점 좌표를 나타낸다. 부분구조의 연결점 좌표 x_b와 x_c에서는 평형(equilibrium)과 일치(compatibility) 조건을 만족하므로 다음과 같이 된다.

$$\{f_b\} + \{f_c\} = \{f_j\} \quad \text{and} \quad \{x_b\} = \{x_c\} = \{x_j\} \tag{3), (4}$$

비연결점 좌표는 결합 과정을 거쳐도 변하지 않으므로, 다음과 같다.

$$\{f_a\} \equiv \{f_n\} \quad \text{and} \quad \{x_a\} \equiv \{x_n\} \tag{5), (6}$$

식 (1)과 (4)에서,

$$\begin{aligned}\{x_a\} &= [H_{ab}]\{f_a\} + [H_{bb}]\{f_b\} + [H_{bc}]\{f_c\} \\ &= [H_{ca}]\{f_a\} + [H_{cb}]\{f_b\} + [H_{cc}]\{f_c\}\end{aligned} \tag{7}$$

식 (3)과 (4)를 식 (7)에 대입하면,

$$\begin{aligned}([H_{bb}]+[H_{cc}]-[H_{cb}]-[H_{bc}])\{f_b\} = \{&([H_{ca}]-[H_{ba}])\{f_n\} \\ &+([H_{cc}]-[H_{bc}])\{f_j\}\}\end{aligned} \tag{8}$$

만약 행렬

$$([H_{bb}]+[H_{cc}]-[H_{cb}]-[H_{bc}])\{f_b\}$$

이 non-singular면,

$$\begin{aligned}\{f_b\} = ([H_{bb}]+[H_{cc}]-[H_{cb}]-[H_{bc}])^{-1}\{&([H_{ca}]-[H_{ba}])\{f_n\} \\ &+([H_{cc}]-[H_{bc}])\{f_j\}\}\end{aligned} \tag{9}$$

그리고,

$$\{f_c\} = \{f_j\} - \{f_b\} \tag{10}$$

식 (8)과 식 (9)을 식 (1)에 대입하고 이를 식 (2)와 비교하면,

$$[H_{nn}]=[H_{aa}]-([H_{ab}]-[H_{ac}])([H_{bb}]+[H_{cc}]-[H_{bc}]-[H_{cb}])^{-1}([H_{ba}]-[H_{ca}]) \tag{11}$$

$$[H_{nj}]=[H_{ac}]-([H_{ab}]-[H_{ac}])([H_{bb}]+[H_{cc}]-[H_{bc}]-[H_{cb}])^{-1}([H_{bc}]-[H_{cc}]) \tag{12a}$$

$$=[H_{ab}]-([H_{ac}]-[H_{ab}])([H_{bb}]+[H_{cc}]-[H_{bc}]-[H_{cb}])^{-1}([H_{cb}]-[H_{bb}]) \tag{12b}$$

$$[H_{jn}] = [H_{nj}]^T \tag{13}$$

$$[H_{jj}]=[H_{cc}]-([H_{cb}]-[H_{cc}])([H_{bb}]+[H_{cc}]-[H_{bc}]-[H_{cb}])^{-1}([H_{bc}]-[H_{cc}]) \tag{14a}$$

$$=[H_{bb}]-([H_{bc}]-[H_{bb}])([H_{bb}]+[H_{cc}]-[H_{bc}]-[H_{cb}])^{-1}([H_{cb}]-[H_{bb}]) \tag{14b}$$

식(10)-(14)를 간결하게 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} H_{nn} & H_{nj} \\ H_{jn} & H_{jj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{aa} & H_{ac} \\ H_{ca} & H_{cc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} (H_{ab}-H_{ac}) \\ (H_{cb}-H_{cc}) \end{bmatrix} H_{bb}+H_{cc}-H_{bc}-H_{cb}]^{-1} \begin{bmatrix} (H_{ab}-H_{ac}) \\ (H_{cb}-H_{cc}) \end{bmatrix}^T \tag{15a}$$

$$= \begin{bmatrix} H_{aa} & H_{ab} \\ H_{ba} & H_{bb} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} (H_{ac}-H_{ab}) \\ (H_{bc}-H_{cc}) \end{bmatrix} H_{bb}+H_{cc}-H_{bc}-H_{cb}]^{-1} \begin{bmatrix} (H_{ac}-H_{ab}) \\ (H_{bc}-H_{bb}) \end{bmatrix}^T \tag{15b}$$

GRC 방법은 수식에 있어서는 RC 방법과 매우 유사하다. 이는 RC 방법이 GRC 방법의 한 경우이기 때문이다. GRC 방법은 RC 방법의 모든 장점을 그대로 유지하고 이에 더해서 물리적 일반성을 확보하여 적용 가능 범위를 넓혔다고 할 수 있다. GRC 방법은 여러 개의 부분구조를 연결하는 경우뿐 아니라 하나의 부분구조에서 두 점을 연결하는 데에도 적용할 수 있다. 또한 경계 조건을 부여하는 것도 자유롭게 할 수 있다.

3. 자동차의 부분구조에 적용

자동차의 부분 구조에 대해서 FBS 합성법을 적용하였다. 적용 대상 부분 구조물은 자동차의 트랜스미션으로부터 동력을 전달하는 회전축을 고정시키는 역할을 하는 구조물로서 차체와 총 6 점에서 연결된다. 부분 구조물상의 4 점에서 동력을 전달하는 축과 연결되며, 동력 전달 축의 회전을 통해서 발생하는 진동과 소음은 차체에 전달되게 된다. 이러한 이유로 이번에 적용 대상인 된 자동차의 부분 구조물은 소음·진동이 최소한으로 차체에 전달되게 하기 위해서 많은 설계 변경 및 시험이 이루어지는 부품이다.

3. 1 실험 개요

동력 전달 축을 받치는 부품을 하나의 부분구조로 정의하고 그 부품을 제외한 자동차 차체와 차 실내의 음향 공동을 다른 부분구조로 정의하여 FBS 합성법을 정의하였다.

일반적으로 두 구조물이 결합될 때에는 점 결합이 아닌 면결합 혹은 선결합이 이루어지게 된다. 하지만 FBS 합성법 이론의 기본 가정이 두 구조물이 점결합을 하는 것이고 구조물의 주파수응답함수를 측정할 때에도 항상 점에서 이루어지기 때문에 FBS 합성법을 이용하여 두 구조물을 합성할 때에는 두 부분구조의 물리적 결합 상태를 가장 적절하게 표현할 수 있는 점들을 찾아내야 한다.

측정된 데이터는 정의된 입력점과 응답점 사이의 주파수응답함수를 측정하였다. 측정 자유도는 x, y, z 세 방향으로 하였다. 차체 부분구조에서는 6점이 각각 3자유도를 가지므로 18x18 크기의 진동 주파수응답함수 행렬을 구성하였고, 18x1 크기의 진동-음향 주파수응답함수를 측정하였다. 동력을 전달하는 회전 축을 받치는 부분 구조에 대해서는 차체와 연결되는 6개점에서 18x18 크기의 진동 주파수응답함수 행렬과 1점의 입력점을 가진하여 6 점의 응답점에서 측정된 진동 주파수전달함수 행렬을 측정하였다.

가속 주행시 실내 소음 측정시에는 지정한 3개의 경로에 대해서 가속도 신호를 측정하고 실차 내부의 하나의 지점에 음압을 측정한다. 이로부터 각 지점에 대해서 전달되는 힘을 구할 수 있게 되고 가속 주행시 실내 소음을 예측할 수 있게 된다.

3. 2 부분 구조 합성 결과

동력 전달 회전축을 받치는 부분 구조물과 차체 및 음향 공동에 대해 FBS 합성법을 적용하여 차 실내 진동-음향 주파수응답함수를 예측해 보았다. 예측 결과 관심 주파수 대역 중 일부 구간을 제외하고는 현실적으로 의미 있는 예측 결과를 얻을 수 있었다. 여러 번의 실험을 통해 내린 결론은 정확한 예측 결과에 가장 주요하게 영향을 끼치는 요인이 센서의 부착 위치 및 가진 위치라는 것을 알 수 있었다.

동력 전달 회전축을 받치는 부분 구조물에 대해서 Test-Based FBS 결과를 기반으로 FE model을 구성하고 이를 실험 모델과 대체하여 FBS 합성법을 적용하여 Hybrid FBS 합성 결과를 얻었다.

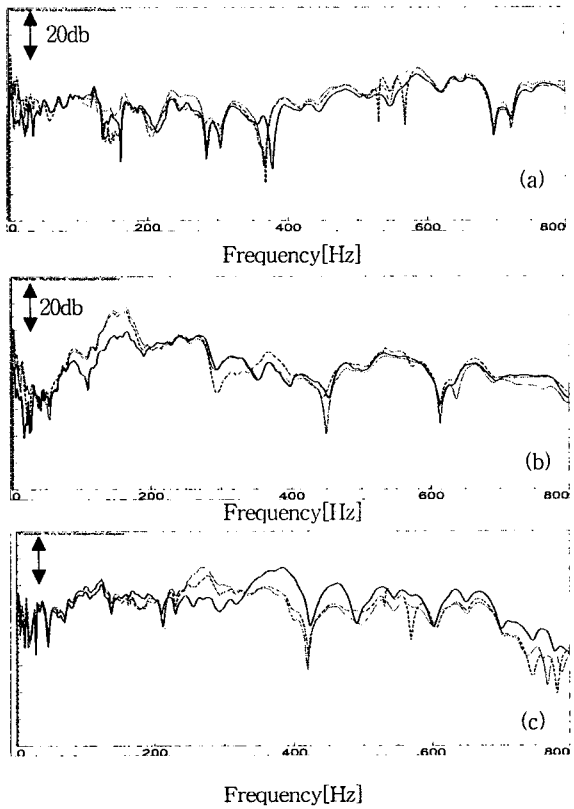

Fig. 1 FBS results (solid : measured, dashed : Test Based FBS solution, dotted : Hybrid FBS solution). (a) +X direction excitation, (b) +Y direction excitation, (c) +Z direction excitation

3.3 가속 주행시 실내 소음 예측 및 최적화

Test-Based FBS 결과와 Hybrid FBS 결과를 이용해서 가속 주행시 실내 소음을 예측할 수 있었고 3개의 경로만을 고려한 실내 소음 계산값과 비교함으로써 예측의 타당성을 검증하였다. 부분 구조의 형상이 변경된 후의 가속 주행시 실내 소음을 예측 하고 이 부품을 실제로 제작하여 예측 결과를 검증하였다.[5)]

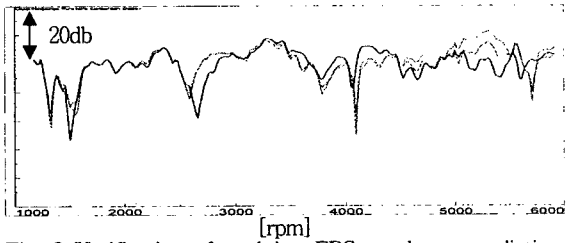

Fig. 2 Verification of applying FBS results to predicting noise in driving vehicle (solid : calculated, dashed : Test-Based FBS, dotted : Hybrid FBS)

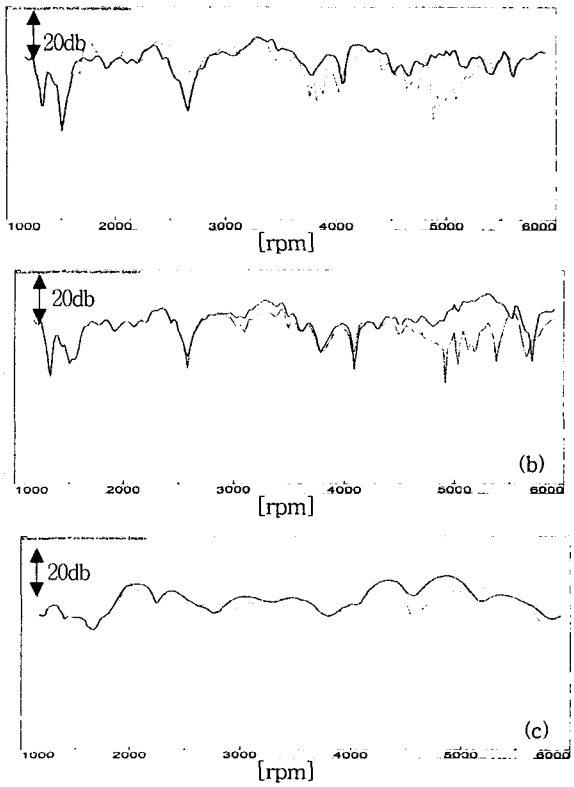

Fig. 3 Optimization noise in driving vehicle by modifying the substructure, 3rd order(solid : base, dotted : modified), (a) predicted, (b) calculated, (c) measured

4. 결 론

FBS 기술의 실험 모델 구성 시 가장 중요한 것은 주파수 응답함수의 정확한 측정이다. 이를 위해서는 가진점의 위치, 센서의 부착 위치, 좌표계의 정확한 설정 등이 중요하다는 것을 알게 되었다.

본 연구에서의 부분 구조 합성 결과는 어느 정도 실제 실험 결과의 경향은 따라가지만 정교하게 예측하지는 못하였다. 이는 연결부의 특성을 적용하지 않았기 때문으로 추측된다. 본 연구에서는 연결부의 특성을 강체 결합으로 정의 하였지만 실제로는 강체 결합이 아닌 볼트 결합으로써 회전 자유도나 강성, 조임 토크 등을 고려하였을때 고주파 대역까지 더욱 정밀한 결과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.[4)]

가속 주행시 실내 소음 예측 및 최적화 과정에서 부분 구조물의 형상 변경은 기존의 제작되어 있는 두 개의 단품을 비교함으로써 수행하였고, 이로써 FBS 기술을 적용한 실차 실내 소음 최적화 과정을 수행 할 수 있었다.

참 고 문 헌

(1) Urgueira, A. P. V, 1989, "Dynamic Analysis of coupled Structures Using Experimental Data," Ph.D. Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of Load

(2) Sakai, T., Gielen, L. and etc. 2001, "Development Procedure for Interior Noise Performance by Virtual Vehicle Refinement, Combining Experimental and Numerical Component Models," SAE 2000-01-1538,

(3) Ren. Y. and Beards, C. F., 1994, " On Substructure Synthesis with FRF Data," J. of Sound and Vibration, Vol.185, No.5, pp.845-86

(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 Internerional, www.lmsns.com