

주파수 응답함수를 이용한 부분구조 합성에서 모드자름 오차 보정에 관한 수치적 연구

A Case Study on the Importance of Residual Compensation in FRF-based Substructuring

김 경 호[†] · 박 윤 식*

Gyeong-ho Kim and Youn-sik Park

(2002년 1월 17일 접수 : 2002년 3월 8일 심사완료)

Key Words : FRF(주파수 응답함수), Substructuring(부분구조 합성), Modal Truncation Error(모드자름 오차)

ABSTRACT

A FRF-based substructuring method attempts to predict the dynamic characteristics of a complex structure from predetermined FRFs of the comprising uncoupled substructures. Although this method has the advantage of being able to incorporate experimental component FRFs directly, it is prone to errors: measurement errors, coordinate incompleteness, modal incompleteness, etc. Among the various sources of errors, this paper deals with the problem of modal incompleteness (or residual problem) of which importance is underestimated compared to others. It is a well-known rule of thumb that such a problem can be overcome by including modes up to 2 or 3 times the upper frequency of interest. Using a simulated case study, it is demonstrated that even including modes up to 20 times the upper frequency of interest does not guarantee a satisfactory result. A method to compensate the residual errors is introduced. This method requires the whole FRF matrices of substructures which is practically impossible for a complex structure. An applicable alternative is suggested and applied successfully to the case study. Finally, the effects of measurement errors on the residual compensation are also discussed.

1. 서 론

부분구조 합성법은 구조물을 몇 개의 간단한 부분 구조로 나누고 부분구조의 해석결과를 사용하여 전체 구조물의 동특성을 파악하는 기술로서 구조물 동특성 변경(SDM, structural dynamics modification)에도 활용된다.⁽¹⁾ 즉 기저 구조물(base structure)의 동특성을 변경하기 위해서 부가 구조물(주로 FE모델)을 결합시켰을 때, 이의 효과를 예측할 수 있고 따라서

구조물을 최적화할 수 있게 한다.

부분구조 합성은 공간모델(spatial model), 모드모델(modal model), 그리고 응답모델(response model)에 대하여 모두 적용될 수 있으며, 이상적으로는 동일한 결과를 보인다. 그러나 실제로는 모델의 불완전성(incompleteness) 또는 여러 가지 오차로 인하여 합성결과에 차이가 발생된다. SDM을 목적으로 부분 구조 합성할 경우, 응답모델을 사용하면 다른 모델을 사용하는 것에 비해서 다음과 같은 장점이 있다. 첫째, 기저 구조물이 복잡한 경우에도 비교적 쉽게 적용할 수 있다. 기저 구조물 또는 이의 경계조건이 복잡한 경우, FE(finite element) 모델을 만들기가 쉽지 않다. 또 이렇게 만들어진 FE모델의 해석결과와 실험결과와 오차를 보이며, 이러한 경향은 고주파 영

[†] 책임저자, 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : gyeong@kaist.ac.kr

Tel : (042) 869-3060, Fax : (042) 869-8220

* 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

역으로 갈수록 더욱 커진다. 이에 반해, 기저 구조물의 FRF(frequency response function)는 실험을 통하여 비교적 쉽게 구할 수 있다. 둘째, 측정된 FRF에는 모드자름 오차(modal truncation errors)가 없다. 모드모델은 FE모델 또는 측정된 FRFs로부터 구한다. 복잡한 기저 구조물의 경우, FE모델에서 전체 모드 매개변수(modal parameters)를 계산하는 것은 불가능하며 현실적으로 저주파 영역의 일부 매개변수만 계산할 수 있다. 또, 실험으로 측정할 수 있는 FRFs의 주파수 범위는 제한적이다. 따라서, 이로부터 구한 모드모델에는 필연적으로 모드자름 오차가 발생된다. 이러한 장점 때문에 응답영역에서 SDM을 수행하게 된다. 실패로서 Fig. 1과 같은 하드디스크드라이브(HDD)를 살펴보자. 본 예제는 커버로부터 발산되는 구조기인 소음을 줄이기 위해서 커버의 형상을 변경하는 문제이다.⁽²⁾ 모델링 관점에서 HDD는 크게 커버(cover)와 베이스(base) 구조물로 나눌 수 있으며, 8개의 지점에서 나사로 결합되어 있다. 그림에서 볼 수 있듯이, 커버에 비해서 베이스 구조물은 매우 복잡하다. FEM을 적용하여 전체 HDD의 모델을 수립하기는 매우 어렵지만, 응답모델을 사용하면 비교적 용이하다. 구조변경 대상이 아닌 베이스 구조물은 실험을 통하여 FRFs를 측정하고, 구조가 비교적 간단한 커버에 대하여 FE모델을 수립하고 이로부터 FRFs를 구하면 응답영역에서 부분구조 합성법(FBS, FRF-based substructuring)을 적용할 수 있게 된다. 또 커버의 FE모델이 있으므로 이의 구조변경이 전체 HDD의 동특성에 미치는 영향을 쉽게 파악할 수 있다.

FBS와 관련된 이론은 명확하며 간단하다. 역행렬 계산과 같은 기본적인 행렬연산으로 FBS를 수행할 수 있다. 그러나, 여러 가지 요인으로 인하여 계산 결과는 실제로 결합된 전체 구조물의 동특성과는 차이를 보인다. 현실적인 이유로 고려하지 못하는 회전자유도와 실험에서 수반되는 측정 오차는 주요한 요인이며 이에 대한 연구 또한 많이 진행되었다.^(2,3) 본 연구에서는 이러한 요인 중, 상대적으로 덜 중요하게 평가된 모드자름 오차(modal truncation error)의 영향을 고려한다. 모드자름 오차는 측정과 관련된 오차를 줄이기 위해서 FRF를 재생성(regenerated FRF)하거나 FE모델로부터 구한 일부 모드 매개변수를 이용하여 FRF를 생성할 때 발생된다. 일반적으로 관심 주파수보다 2~3배 넓은 주파수 범위의 모드를 포함

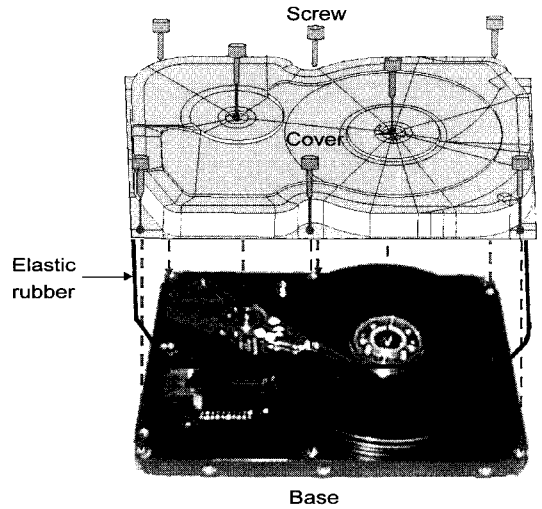


Fig. 1 Example of FRF-based substructuring-HDD

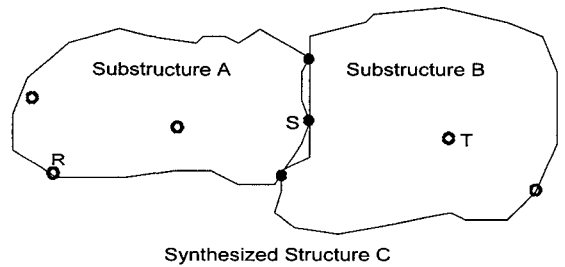


Fig. 2 Schematic illustration of substructure synthesis

하여 FRF를 생성하면 모드자름 오차의 영향은 줄어 든다고 알려져 있다. 본 연구에서는 단순한 HDD구조물 모델에 대하여 모의실험을 수행함으로써, 이러한 오차의 영향으로 완전히 잘못된 합성 결과가 나올 수 있다는 것을 보인다. 측정된 FRF를 이용하여 모드자름 오차를 보정(residual compensation)하는 방법을 소개하고 이를 대상 구조물에 적용하여 이의 영향을 상당히 줄일 수 있다는 것을 보인다. 이러한 보정 방법을 사용하기 위해서는 각 부분구조의 전체 FRF행렬(whole FRF matrix)을 측정해야 하는데, 이는 현실적으로 불가능하다. 본 연구에서는 이의 대안을 모색하고 마지막으로 측정 오차가 FRF 보정 결과에 미치는 영향을 파악한다.

2. 기본 이론

FBS를 위한 여러 가지 방법이 연구되었다. 이 중

Jetmundsen 등(4)이 개발한 방법(improved FRF coupling)이 가장 널리 쓰인다. 두 개의 부분구조를 합성하는 도식적인 예가 Fig. 2에 나타나 있다. R 과 T 는 부분구조 A 와 B 의 내부 자유도(internal DOFs)를 나타내고, S 는 경계면 자유도(coupling DOFs)를 나타낸다. 경계면에서 기하학적 접합조건과 힘의 평행조건을 적용하면, 아래와 같이 합성된 구조물 C 의 FRFs를 부분구조의 FRFs로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} [H_C]_{RR} & [H_C]_{RS} & [H_C]_{RT} \\ [H_C]_{SR} & [H_C]_{SS} & [H_C]_{ST} \\ [H_C]_{TR} & [H_C]_{TS} & [H_C]_{TT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [H_A]_{RR} & [H_A]_{RS} & 0 \\ [H_A]_{SR} & [H_A]_{SS} & 0 \\ 0 & 0 & [H_B]_{TT} \end{bmatrix}$$

$$- \begin{bmatrix} [H_A]_{RS} \\ [H_A]_{SS} \\ -[H_B]_{TS} \end{bmatrix} \left[[H_A]_{SS} + [H_B]_{SS} \right]^{-1} \begin{bmatrix} [H_A]_{RS} \\ [H_A]_{SS} \\ -[H_B]_{TS} \end{bmatrix}^T$$

FBS와 관련해서 수치적으로 가장 문제가 되는 연산은 역행렬 계산이다. FRFs 포함된 작은 오차는 역행렬 계산과정에서 크게 증폭된다. 위의 식을 사용하면 행렬의 역을 단 한 번 계산하므로 다른 방법에 비해서 수치적 문제점을 많이 완화시킬 수 있다. 또, 경계면 자유도 와 관련된 FRF행렬에 대하여 역을 구하므로 계산에 필요한 시간을 단축시킬 수 있다.

정확한 FBS 결과를 얻기 위해서 각 부분구조의 FRF 행렬은 다음과 같은 요구조건을 충족시켜야 한다.

(1) 측정 오차가 없어야 한다. 측정 오차에는 랜덤 오차(random error)와 inconsistent 시스템 오차(systematic error)가 있다. 시스템 오차는 센서의 질량효과, 구조물과 가진기의 상호작용 등으로 발생하는 오차로서 일관성 없는 오차를 일으킨다.

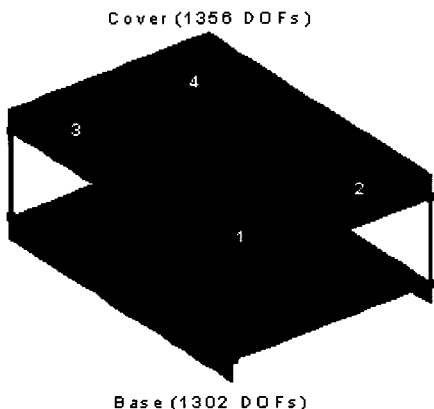


Fig. 3 Case study - simple HDD model

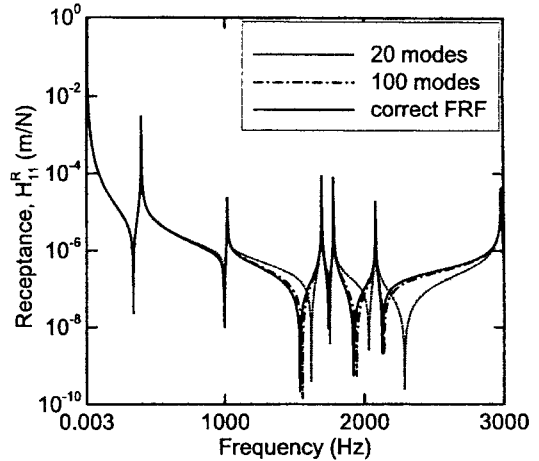


Fig. 4 FE-derived cover FRFs - residual effects

(2) 경계면 자유도와 관련된 모든 FRFs가 포함되어야 한다. 측정이 힘든 회전 자유도와 관련된 FRFs가 FBS에 오차를 유발하는데, 이러한 오차는 고주파 영역으로 갈수록 커진다.

(3) 모드자름 오차가 없거나 적절하게 보상되어야 한다.

FRFs에 포함된 측정 오차로 인한 문제를 줄이기 위해서 크게 두 가지 방법이 사용된다. 하나는 특이치 분리법(SVD)과 같이 역행렬 계산 과정에서 이러한 오차가 증폭되는 것을 방지하는 수치적 접근법⁽³⁾이고 나머지는 측정된 FRFs로부터 모드 매개변수를 추출하여 FRFs를 재생성하는 것이다. 일반적으로 회전 자유도는 직접적으로 측정하기 불가능한 경우가 많으므로 유한차분법과 같이 이를 근사적으로 계산하는 방법이 많이 사용된다.⁽⁴⁾ 마지막 요구조건은 나머지 두 요구조건에 비해서 덜 중요하게 평가되었는데, 본 연구에서는 이의 중요성에 대해서 살펴본다.

3. 사례 연구 - 모드자름 오차의 영향

모드자름 오차가 FBS 결과에 미치는 영향을 파악하기 위해서, Fig. 3과 같은 단순한 HDD 모델에 대하여 모의실험을 수행하였다. 단순한 모델의 물리적 치수는 Fig. 1의 실제 HDD와 근사하다. 커버와 베이스 구조물의 총 자유도 개수는 각각 1356 그리고 1302이다. 관심주파수 범위는 0~3 kHz이며 커버와 베이스는 6개의 지점에서 6 자유도(3T, 3R)가 모두 구속되었다고 가정한다. 커버와 베이스 FE모델에서

모드 매개변수를 계산하고 이로부터 FRFs를 구한다. FE모델로부터 FRFs를 생성하므로 앞 절에서 설명한 요구조건 (1)과 (2)를 만족시킬 수 있다. 본 모의 실험에서는 이들 요인을 제거하고 모드자름 오차가 FBS 결과에 미치는 영향을 파악하고자 한다.

자유도 또는 모드의 총 개수가 N 일 때, 모드 매개변수로부터 계산된 FRF는 다음과 같은 식을 만족시킨다.

$$H_{ij}^C(\omega) = H_{ij}^R(\omega) + R_{ij}(\omega) \\ = \sum_{r=1}^m \frac{r A_{ij}}{\lambda_r^2 - \omega^2} + \sum_{r=m+1}^N \frac{r A_{ij}}{\lambda_r^2 - \omega^2} \quad (1)$$

여기서, $H_{ij}^C(\omega)$ 와 $H_{ij}^R(\omega)$ 는 각각 N 과 m 개의 모드 매개변수로부터 생성된 FRF를 나타낸다. $M < N$ 이므로, $H_{ij}^R(\omega)$ 에는 모드자름 오차가 발생된다. 즉,

$$R_{ij}(\omega) = H_{ij}^C(\omega) - H_{ij}^R(\omega) = \sum_{r=m+1}^N \frac{r A_{ij}}{\lambda_r^2 - \omega^2} \quad (2)$$

하나의 예로서, Fig. 4에 모드자름 오차가 있는 커버의 FRFs가 도시되어 있다. 가진점과 측정점은 동일하게 절점 1이다(Fig. 3). 그림에서 볼 수 있듯이, 관심주파수 영역 안의 모드 개수는 6개이다. 20개의 모드 매개변수를 사용하여 계산된 FRF는 정확한 값과 약간의 차이를 보이지만, 100개 이상의 모드 매개변수로부터 계산된 FRF는 정확한 값과 차이가 거의 없다.

전체 모드 매개변수를 사용하여 베이스 구조물의

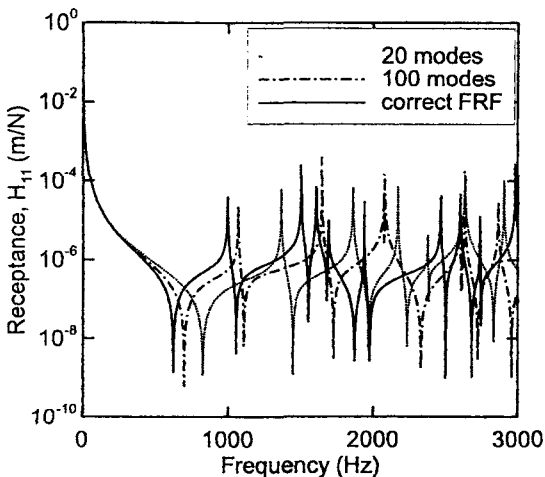


Fig. 5 FBS results-residual effects of cover FRFs

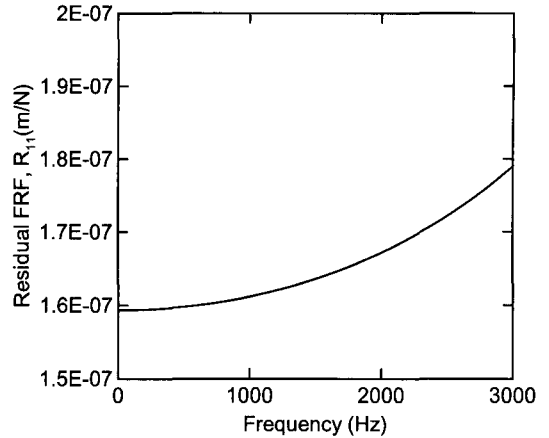


Fig. 6 Residual term of FE-derived cover FRF

FRFs를 생성하고 커버의 FRFs와 FBS를 수행하였다. 베이스의 FRFs에는 모드자름 오차가 없으므로, 커버의 FRFs에 있는 이러한 오차가 FBS 결과에 미치는 영향을 검토할 수 있다. 합성된 전체 구조물의 FRFs는 Fig. 5에 나타나 있다. 가진점과 측정점은 모두 절점 1이다(Fig. 3). 20개의 모드 매개변수로 생성된 커버의 FRFs를 사용하여 FBS를 수행한 경우, 관심주파수 전체 영역에서 정확한 결과와 완전히 다른 양상을 보인다. 100개의 모드 매개변수로 생성된 커버의 FRFs를 사용한 경우에도, FBS 결과는 첫 번째 고유진동수만 정확한 값과 비슷하며 앞의 경우와 마찬가지로 전체 관심주파수 영역에서 정확한 값과 큰 차이를 보인다. 따라서, 관심주파수 영역내의 모드 개수의 20배 정도의 모드 개수를 포함하여 FRFs를 생성해도 FBS결과에 모드자름 오차의 영향이 크게 나타난다는 것을 알 수 있다.

이러한 오차의 영향을 줄이기 위해서 FE모델로부터 충분히 많은 모드를 포함해서 FRFs를 생성하면 되겠지만 이는 현실적으로 불가능하다. 일단 몇 개의 모드가 충분한지 알 수 없고 또 FE모델의 자유도가 큰 경우, 저주파 영역의 몇 개의 모드만 효과적으로 계산할 수 있기 때문이다. 그리고, FE 모델은 고주파 영역으로 갈수록 부정확성이 커지기 때문에, 이렇게 생성된 FRFs가 정확한 값과 차이를 보일 수 있다.

4. 모드자름 오차의 보정

본 장에서는 모드자름 오차를 보정하기 위한 방법을 소개하고 이를 3장의 모의실험에 적용한다. 그리

고 보정에 필요한 많은 노력을 줄일 수 있는 현실적인 대안을 모색한다.

4.1 모드자름 오차의 보정 방법

실험으로 측정된 FRF에는 모드자름 오차가 없다. 따라서 대상구조물에 대하여 측정된 FRF가 있다면, 일부 모드 매개변수로부터 생성된 FRF에서 발생하는 모드자름 오차 $R_{ij}(\omega)$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R_{ij}(\omega) = \sum_{r=m+1}^{\infty} \frac{r A_{ij}}{\lambda_r^2 - \omega^2} = H_{ij}^C(\omega) - H_{ij}^R(\omega) \quad (3)$$

여기서, $H_{ij}^C(\omega)$ 는 실험을 통하여 측정된 FRF를 나타내고 $H_{ij}^R(\omega)$ 는 m 개의 모드 매개변수로부터 생성된

FRF를 나타낸다. Fig. 6은 커버 FE모델(Fig. 3)에서 20개의 모드 매개변수를 이용하여 FRF를 생성하였을 때, 발생하는 모드자름 오차를 나타낸 것이다. 여기서는 전체 모드 매개변수를 이용하여 생성한 FRF를 측정된 FRF라고 가정하였다. 이와 같이 실험적 방법으로 모드자름 오차를 구할 수 있게 되면 이를 보정할 수 있게 된다. 여기서는 대표적인 방법 하나를 소개한다.⁽⁶⁾

- Dynamic Residual Compensation
 $\lambda_l \gg \omega$ 이면, 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$\frac{1}{\lambda_h^2 - \omega^2} = \frac{1}{\lambda_h^2} \left(1 + \left(\frac{\omega^2}{\lambda_h^2} \right) + \left(\frac{\omega^2}{\lambda_h^2} \right)^2 + \dots \right) \quad (4)$$

따라서, 식 (3)의 모드자름 오차는 다음과 같이 2차항으로 근사화 할 수 있다.

$$R_{ij}(\omega) = \sum_{r=m+1}^{\infty} \frac{r A_{ij}}{\lambda_r^2 - \omega^2} \approx C_{ij} + \omega^2 D_{ij} \quad (5)$$

여기서, 상수 C_{ij} 와 D_{ij} 는 $R_{ij}(\omega)$ 와 오차가 최소화되도록 결정한다. Fig. 7은 모드자름 오차가 Fig. 6과 같을 때, 이 방법을 사용하여 FRF를 보정한 결과이다.

20개의 모드 매개변수로 생성된 커버의 FRF행렬에 대하여 Fig. 7과 같이 모드자름 오차를 보정하고 FBS를 수행하였다. 3장의 모의실험과 마찬가지로 베이스의 FRFs에는 모드자름 오차가 없다. 합성된 결과는 Fig. 8에 나타나 있다. 그림에서 볼 수 있듯이, 정확한 결과와 차이가 거의 없다. 모드자름 오차가

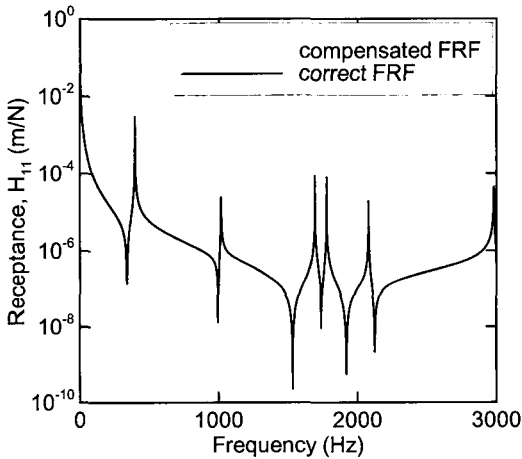


Fig. 7 Compensated cover FRF-dynamic residual compensation

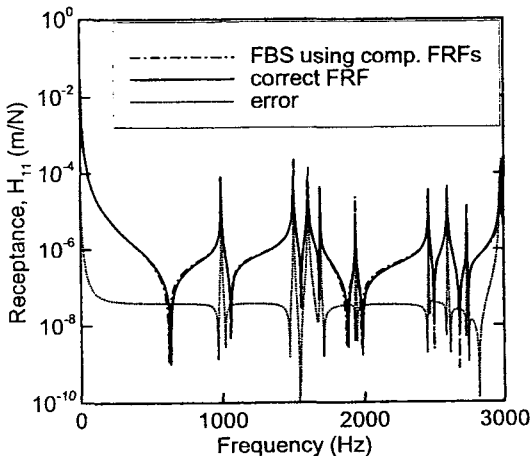


Fig. 8 FBS result using compensated cover FRFs

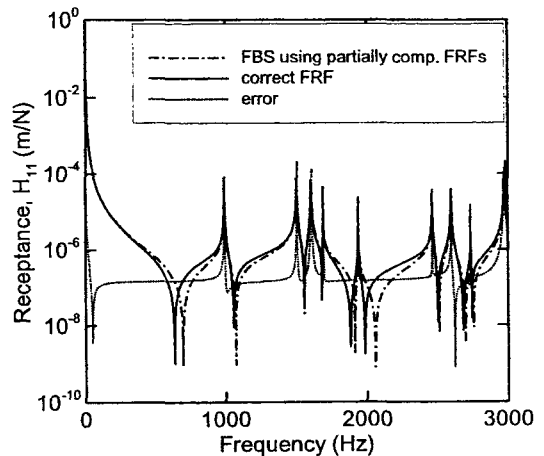


Fig. 9 FBS result using partially comp. cover FRFs

보정되지 않은 커버의 FRFs를 이용하여 FBS를 수행한 Fig. 5의 결과와 비교해 보면, FRF의 보정 효과는 매우 크다는 것을 알 수 있다. 그러나, 이렇게 보정하기 위해서는 전체 FRF 행렬을 실험으로 측정해야 한다. 구조물에서 관심의 대상이 되는 절점이 많은 경우, 이러한 보정 방법을 적용하기는 매우 힘들다.

4.2 부분적으로 보정된 FRFs를 이용한 FBS

FBS를 수행하기 위해서는 FRF 행렬의 역을 구하는 과정이 필요한데, 이 과정에서 모드자름 오차가 크게 증폭된다. 이러한 경향은 Fig. 5에 잘 나타나 있다. 따라서 전체 FRF 행렬에 대하여 보정하는 것이 현실적으로 불가능할 경우, 역 행렬 연산에 사용되는 FRFs만을 보정하고 FBS를 수행하면 모드자름 오차가 크게 증폭되는 것을 방지할 수 있다. 경계면 자유도와 관련된 커버의 FRFs만을 보정하고 FBS를 수행한 결과는 Fig. 9에 나타나 있다. 그림에서 볼 수 있듯이, 정확한 결과와 약간의 오차를 보인다. Fig. 5와 Fig. 8의 결과와 비교해보면, 일부 FRFs만 보정하여 FBS를 수행하였지만 이의 효과는 매우 크다는 것을 알 수 있다.

4.3 측정 오차의 영향

FRF의 측정 오차가 모드자름 오차의 보정에 미치는 영향에 대해 살펴본다.

(1) 측정 오차^[7]

앞에서 언급한 바와 같이 측정 오차에는 랜덤 오차와 시스템 오차가 있다. 센서의 질량효과, 가진기와 구조물의 상호작용 등으로 발생하는 시스템 오차는 구조물의 고유진동수, 모드형상, 감쇠 값에 영향을 미친다. 센서 또는 가진기의 부착 위치에 따라 이러한 오차의 영향이 달리 나타나므로 측정된 각각의 FRF에는 독립적인 오차가 포함된다. 따라서, 모의 실험을 위한 측정된 FRF는 아래와 같이 생성할 수 있다.

$$H_{ij} = \text{Re}(E(1, i, j, \omega)H'_{ij}) + i\text{Im}(E(2, i, j, \omega)H'_{ij}) \quad (6)$$

여기서,

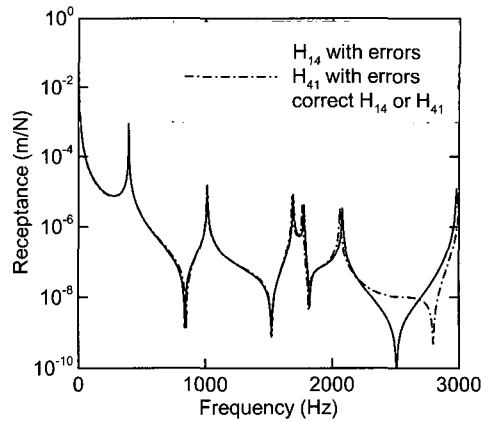


Fig. 10 Cover FRF with measurement errors: natural freq. 1 %, mode 5 %, damping 5 %, random 1 %

$$H'_{ij} = \sum_{r=1}^N \frac{r, \phi_r E(3, i, j, r), \phi_r E(3, j, i, r)}{(1 + i\eta_r E(5, i, j, r)) \omega_r^2 E^2(4, i, j, r) - \omega^2} \quad (7)$$

이다. E 는 괄호 안의 변수 값과 순서에 의해서 임의적으로 결정(random number)되고, $1 \pm e$ 범위 내의 값을 가진다(는 오차의 크기). 예를 들면, $E(3, i, j, r)$ 의 값은 자유도 i, j 와 모드번호 r 에 의해서 결정된다. 또, $E(3, i, j, r)$ 는 $E(3, j, i, r)$ 와 다른 값을 가진다. 식 (7)은 시스템 오차를 반영한 FRF이고 식 (6)은 부가적으로 랜덤 오차를 반영한 결과이다. Fig. 10은 이러한 측정오차가 포함된 커버의 FRFs를 도시한 것이다. 전체 모드에 대해서 구조감쇠는 0.2%로 가정하였다. 그림에서 볼 수 있듯이, 시스템 오차의 영향으로 H_{14} 와 H_{41} 사이에 상반관계가 성립되지 않는다.

측정된 FRFs 또는 FE모델로부터 구한 모드 매개변수를 이용하여 FRFs를 재생성할 경우에도 오차가 포함된다. 즉, 측정과 관련된 랜덤 오차는 없지만 고유진동수, 모드형상, 감쇠계수가 실제 값과 차이를 보이게 된다. 그러나 측정된 FRF와 달리 이러한 시스템 오차는 consistent하다. 따라서, 모의실험을 위한 합성된 FRF는 다음과 같이 생성할 수 있다.

$$H'_{ij} = \sum_{r=1}^m \frac{r, \phi_r E(6, i, r), \phi_r E(6, j, r)}{(1 + i\eta_r E(8, r)) \omega_r^2 E^2(7, r) - \omega^2} \quad (8)$$

식 (8)에서 측정된 FRF와는 달리 모드자름 오차가 발생된다($m < N$). Fig. 11은 15개의 모드 매개변수를

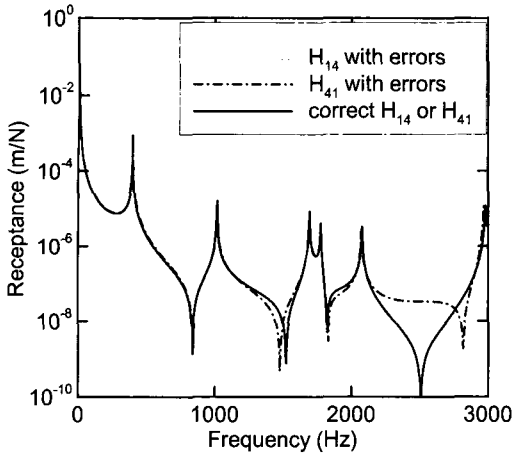


Fig. 11 Regenerated cover FRF with consistent systematic errors: natural freq. 1%, mode 5%, damping 5%

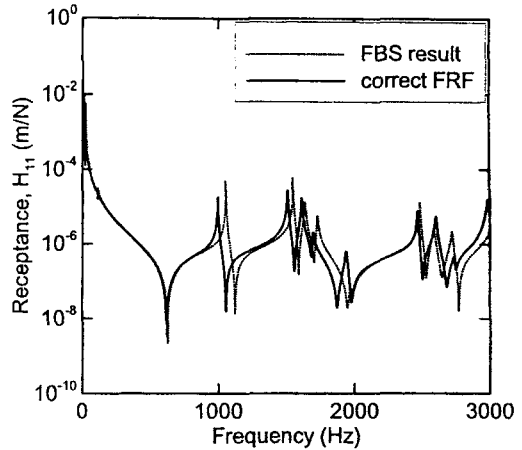


Fig. 13 FBS result using comp. cover and base FRFs

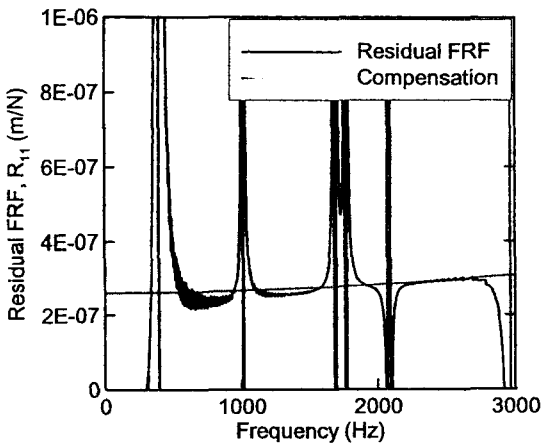


Fig. 12 Residual compensation of with measured cover FRF-dynamic residual compensation

이용하여 합성된 커버의 FRF를 나타낸다(구조감쇠 : 0.2%). 그림에서 볼 수 있듯이, consistent 시스템 오차의 영향으로 정확한 FRF와는 차이를 보이지만 상관관계는 성립한다는 것을 알 수 있다.

(2) 측정된 FRF를 이용한 모드자름 오차 보정

측정 오차가 포함된 FRF를 이용하여 모드자름 오차를 보정하고 FBS를 수행하였다. 식 (6)을 이용하여 커버와 베이스의 FRFs를 생성하였다. 전체 모드에 대하여 커버와 베이스의 구조감쇠는 각각 0.2%과 1%로 가정하였다. 고유진동수, 모드, 감쇠, 램덤 오차는 커버와 베이스 모두 동일하게 1%, 5%, 5%, 5%로 설정하였다. 모드자름 오차가 있는 커버와 베이스

스의 FRF를 생성하기 위해서 식 (8)을 사용하였다. 커버의 경우, 15개의 모드를 사용하였고 베이스의 경우, 12개의 모드를 사용하였다. 커버와 베이스의 구조감쇠는 각각 0.2%과 1%로 가정하였고 고유진동수, 모드, 감쇠 오차는 동일하게 1%, 5%, 5%로 설정하였다. Fig. 12에서 실선으로 나타난 그래프는 측정된 커버의 FRF와 재구성된 FRF의 차이를 나타낸다(식 (5)). 오차가 포함되지 않은 Fig. 6의 경우와 달리 복잡한 양상을 보인다. Fig. 12에서 점선으로 나타난 그래프는 이러한 오차를 보정한 결과이다. 이와 같이 커버와 베이스의 전체 FRFs를 보정하고 FBS를 수행하였다. 합성된 전체 구조물의 FRF는 Fig. 13에 나타나 있다. 측정 오차가 포함되었지만 합성된 FRF는 관심주파수 전체 영역에서 상당히 정확한 결과를 보인다고 할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 FBS를 수행할 때 발생하는 여러 가지 문제점 중, 모드자름 오차와 관련된 문제를 다루었다. 모드자름 오차는 측정과 관련된 오차를 줄이기 위해서 FRF를 재생성하거나, FE모델로부터 구한 일부 모드 매개변수를 이용하여 FRF를 생성할 때 발생된다. 이러한 모드자름 오차는 FBS 수행과정에서 크게 증폭된다. 많은 모드 매개변수를 이용하여 FRF를 생성함으로써 이의 영향을 줄일 수 있다고 알려져 있지만, 모의 실험을 통하여 만족되지 않을 수 있다는 것을 보였다.

본 논문에서 모드자름 오차의 영향을 줄일 수 있는 방법 하나를 소개하였다. 이 방법은 FRF를 보정하기 위해서 실험적으로 측정된 FRF를 사용한다. 모의 실험에서 보정된 FRF 행렬을 사용하여 FBS를 수행하면, 모드자름 오차의 영향을 크게 줄일 수 있다는 것을 보였다. 또 이의 영향을 줄이기 위해서 각 부분구조의 전체 FRF 행렬을 보정하는 것은 현실적으로 힘들기 때문에, 부분적으로 FRFs를 보정하는 방법을 제안하였다. 이는 역행렬 연산에 사용되는 경계면 자유도의 FRFs만을 보정함으로써, 오차가 크게 증폭되는 것을 방지하는 방법이다.

또 본 논문에서 측정 오차가 포함된 FRF를 생성하는 방법을 소개하였고, 모의실험에서 측정 오차가 포함된 FRF를 이용하여 FRF를 보정하였고 FBS를 수행하였다. 측정 오차는 FRF의 보정 및 FBS의 결과에 많은 영향을 미치며, 이러한 측정 오차를 줄이기 위한 세심한 노력이 필요하다.

후 기

본 연구는 국가지정연구사업 "진동저감을 위한 동특성 변경기술(M1-0001-00-0139)"의 지원에 의한 것이다.

참 고 문 헌

(1) 변성준, 박남규, 박윤식, 2001, "주파수 응답함수 결합법을 이용한 승용차 핸들지지 T빔의 진동저감 재설계," 한국소음진동공학회논문집, 제 11 권, 제 5 호, pp. 123~130.

(2) 김경호, 박미유, 박윤식, 2000, "HDD 소음제어를 위한 SDM 기술 개발," 한국소음진동공학회, 추계 학술대회논문집, pp. 765~770.

(3) Lim, T. C. and Li, J., 2000, "A Theoretical and Computation Study of the FRF-based Substructuring Technique Applying Enhanced Least Square and TSVD Approaches", Journal of Sound and Vibration, Vol. 231, No. 4, pp. 1135~1157.

(4) Liu, W., and Ewins, D. J., 1999, "The Importance Assessment of RDOF in FRF Coupling Analysis", Proceedings of the 17th International Modal Analysis Conference, pp. 1481~1487.

(5) Jetmundsen, B., Bielawa, R. L. and Flannelly, W. G., 1988, "Generalized Frequency Domain Substructure Synthesis, Journal of the American Helicopter Society", pp. 55~64.

(6) Duarte, M. L. M., 1996, "Experimentally-derived Structural Models for Use in Further Dynamic Analysis", Ph. D. Thesis, Imperial College, University of London.

(7) Ren, Y., and Beards, C. F., 1995, "On Substructure Synthesis with FRF Data", Journal of Sound and Vibration, Vol. 185, No. 5, pp. 845~866.

(8) 김경호, 박윤식, 2001, "주파수 응답함수를 이용한 부분구조 합성법의 문제점에 관한 수치적 연구", 한국소음진동공학회, 추계 학술대회논문집, pp. 173~178.