

〈논 문〉

# 부분구조 기반 민감도 해석을 이용한 볼트결합 구조물의 결합강성 추정

## Identification of Connection Stiffnesses of Bolted Structures Using a Substructural Sensitivity Analysis

서 세 영\* · 방 극 호\*\* · 김 찬 목\* · 이 두 호\*\*\*

Se-Young Seo, Keuk-Ho Bahng, Chan-Mook Kim and Doo-Ho Lee

(2001년 8월 22일 접수 : 2001년 9월 19일 심사완료)

**Key Words** : Identification of Connection Stiffness(결합강성 추정), FBS Method(전달함수합성법), Vibration System(진동시스템), Sensitivity Analysis (민감도해석).

### ABSTRACT

The identification of connection stiffnesses of bolted structures is presented using an FRF-based substructural sensitivity analysis. The substructural design sensitivity formula is derived and plugged into the optimization module of MATLAB, to identify connection stiffnesses of an air-conditioner compressor of passenger car. The air-conditioner, composed of a compressor and a bracket, is analyzed by using the FRF-based substructural(FBS) method. To obtain the FRFs, an FE model is generated for the bracket, and the impact hammer test is performed for the compressor. Obtained FRFs are combined to calculate the reaction force at the connection points and the system response. By minimizing the difference between a target FRF and calculated one, the connection element properties of the air-conditioner system are identified. It is shown that the proposed identification method is effective for a real problem.

|| || : 벡터의 크기

#### 기호설명

- $F$  : 외력
- $H$  : 주파수응답함수
- $K^l$  : 연결요소의 리셉턴스(receptance)
- $K$  : 부분구조합성법 시스템 행렬
- $R_j$  :  $j$ 번째 연결점에서의 반력
- $x_r$  :  $r$ 점에서의 응답
- $b$  : 설계 변수

### 1. 서 론

해석 기술의 진보와 더불어 컴퓨터의 발달로 인해 대형 구조물 및 복잡한 구조물도 해석이 가능해졌다. 그러나, 이러한 대형, 복잡 구조물을 전체로서 해석하는 것은 많은 비용을 수반하는 일이다. 이를 좀더 효율적으로 해석하기 위해 고안된 방법으로서 부분구조합성법이 있는데 이는 대형, 복잡 구조물을 좀 더 해석이 용이한 여러 개의 부분구조로 분할하고 각각에 대해서 따로 해석을 수행한 후 합성하여 전체구조물을 해석하는 방법이다.<sup>(1)</sup> 해석 방법은 실험이나 유한요소해석 혹은 그 둘의 혼용도 가능하다. 이러한 부분구조합성법의 가장 큰 장점은 동적 구조물을 설계하는 경우 전체계를 모두 해석하지 않고 설계 변경이

\* 정희원, 국민대학교 자동차공학전문대학원  
E-mail : crnkim@kookmin.ac.kr  
Tel : (02) 910-4683, Fax : (02) 910-4718

\*\* 정희원, 대림대학 건축설비과

\*\*\* 정희원, 동의대학교 기계/산업시스템공학부

이루어진 부분구조만을 해석한 뒤 합성하여 전체계의 응답을 구할 수 있다는 것이다. 특히 차량의 경우 경량화와 더불어 개발기간이 점차 단축됨에 따라 해석 시간 또한 점차 짧아 지고 있는 추세에 있으므로 그 장점은 크다 하겠다. 이러한 부분구조합성법의 적용 예로서 부분구조합성법 중 전달함수합성법을 실제 차량에 적용하여 차량의 소음 등을 해석한 사례<sup>(2,3)</sup>와 실험으로 취득한 주파수 응답함수를 이용한 경우<sup>(4)</sup>가 있다. 부분구조합성법은 많은 장점을 가지고 있지만 설계 시 어느 설계 변수를 변화시키는 것이 효율적인지는 알 수 없기 때문에 시행오차에 의해 재해석을 수행하는 단점이 있으므로 보다 효율적으로 설계를 하기 위해서는 민감도 해석이 필요하다. 이러한 예로 Santos 등<sup>(5)</sup>이 모드합성법에 기초해서 민감도 해석을 수행하여 유한요소모델을 개선하였고, 차량의 실내소음에 대한 엔진마운트와 부쉬의 강성 및 감쇠의 민감도 해석을 수행한 연구<sup>(6)</sup> 등이 있다.

본 논문에서는 전달함수합성법을 기반으로하는 민감도 해석법을 이용하여 차량에 장착되는 에어컨 컴프레서 브라켓 구조물에 대하여 브라켓과 컴프레서를 연결하는 연결부의 특성을 추정하는 방법을 제시하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 전달함수 합성법

Fig. 1과 같이 A, B 두 개의 부분구조물이 n개의 연결요소에 의해 연결되어 있는 구조물을 고려해 보자. 부분구조물 A, B를 연결하는 연결요소는 강성  $k_i$ 와 감쇠  $c_i$ 를 가지고 있으며, 외력 F가 부분구조 A의 f점에 작용하고 있고 부분구조 B의 r점에서 응답 x를 구하고자 할 때 각 부분구조의 전달 함수와 연결부의 정보만 알면 전체 구조물의 응답을 구할 수 있다. 먼저 부분구조 A에서 외력 F가 f점에 작용할 때 부분구조 A의 연결부의 변위 응답은 다음과 같다.

$$x_i^A = H_{ij}^A F + H_{ij}^A R_j \quad i=1, \dots, n \quad j=1, \dots, n \quad (1)$$

여기서 H는 주파수응답함수를 나타내며, 식에서 상첨자는 부분구조를 나타내고,  $x_i$ 는 연결점 i에서의 변위를 의미하며  $H_{ij}$ 에서 j는 가진점을 i는 응답점

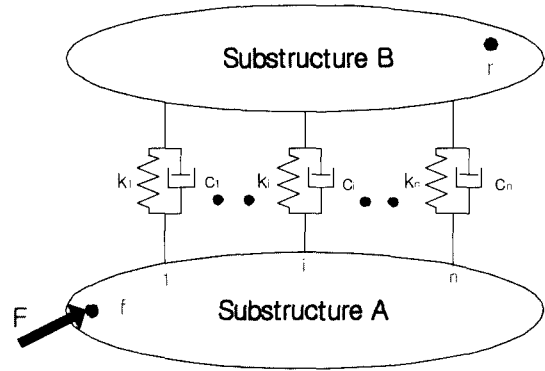


Fig. 1 A substructure system model

을 의미하고  $R_j$ 는 연결점 j에서의 반력을 의미한다. 부분구조 B의 연결부분에서의 변위는 반력만이 작용하므로 다음과 같다.

$$x_i^B = -H_{ij}^B R_j, \quad i=1, \dots, n \quad j=1, \dots, n \quad (2)$$

여기서 -부호는 A부분구조물과 B부분구조물 사이의 작용/반작용 관계에 따른 것이다. 부분구조 B의 응답점 r에서의 변위는 다음과 같다.

$$x_r^B = -H_{ri}^B R_i, \quad i=1, \dots, n \quad r=1, 2, 3 \quad (3)$$

식 (3)에서 알 수 있듯이 부분구조 B의 r점에서 응답은 부분구조 B에 작용하는 반력을 구하면 바로 구할 수 있다. 부분구조 A와 B가 탄성결합 되어 있다고 가정하면 다음과 같은 식이 성립한다.

$$K_{ij}^I R_j = x_i^B - x_i^A, \quad i=1, \dots, n \quad j=1, \dots, n \quad (4)$$

$$K_{ij}^I = 1/(k_i + \sqrt{-1}\omega c_i), \quad \text{if } i=j$$

$$= 0, \quad \text{if } i \neq j$$

여기서, 식 (1), (2)를 식 (4)에 대입하여 정리하면 다음과 같이 각 연결점에서의 반력을 구할 수 있다.

$$R_i = -K_{ij}^{-1} H_{ij}^A F, \quad i=1, \dots, n \quad (5)$$

여기서,

$$K_{ij} = K_{ij}^I + H_{ij}^A + H_{ij}^B \quad (6)$$

식 (5)에서 구한 각 연결점에서의 반력을 식 (3)에 대입해서 관심부분인 부분구조 B의 응답점 r에서의 응답을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$x_r^B = H_n^B K_{ij}^{-1} H_{ij}^A F \quad (7)$$

식 (7)에 의해서 임의의 가진력을 부분구조 A에 가하고, 부분구조 B에서 응답을 구하고자 하는 곳에서 응답을 구할 수 있다.

### 2.2 부분구조 기반 민감도 해석

민감도 해석은 설계변수 변화량에 따른 응답함수의 변화량 즉, 설계변수에 대한 응답함수의 기울기 함수 (gradient function)를 구하는 것이다. b를 설계변수 하면 설계변수에 대한 응답함수의 기울기는 식 (3)을 미분하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dx_r^B}{db} = -\frac{\partial H_n^B}{\partial b} \cdot R_i - H_n^B \cdot \frac{\partial R_i}{\partial b} \quad (8)$$

식 (8)의 우변 첫째 항에서 반력과 부분구조 B의 연결점과 응답점 사이의 주파수 응답함수의 설계변수 b에 대한 미분은 계산에 의해 구할 수 있지만, 두 번째 항의 설계변수에 대한 반력의 미분은 직접적으로 구할 수 없으며<sup>(6)</sup> 따라서 설계변수에 대한 반력에 대한 미분을 구하기 위하여 간접적으로 식 (5)를 미분하고 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial R_i}{\partial b} = -K_{ij}^{-1} \left\{ \frac{\partial K_{ij}}{\partial b} \cdot R_i + \frac{\partial H_{ij}^A}{\partial b} F + H_{ij}^A \frac{\partial F}{\partial b} \right\} \quad (9)$$

식 (9) 중 설계변수에 대한 외력의 미분 값은 0이 되며, 식 (9)를 식 (8)에 대입하여 기울기 함수를 구해 보면 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{dx_r^B}{db} = -\frac{\partial H_n^B}{\partial b} \cdot R_i + H_n^B \cdot K_{ij}^{-1} \left\{ \frac{\partial K_{jk}}{\partial b} \cdot R_k + \frac{\partial H_{ij}^A}{\partial b} F \right\} \quad (10)$$

식 (10)의 우변의 모든 항들은 계산 가능하므로 이제 설계 변수들의 민감도를 계산할 수 있다. 부분구조합성법 기반 민감도 해석은 수식상 어느 한 분계를 변경한 경우 다른 분계에는 영향을 미치지 않기 때문에 즉, 변경되지 않은 분계의 설계변수에 대한 미분 값은 0이 되므로 보다 효율적으로 계산을 할 수 있다는 장점이 있다. 식 (10)에서 민감도 해석을 수행하기 위해 새로이 계산해야 할 항은 분계 A와 B의 주파수 응답함수의 설계변수에 대한 미분  $\frac{\partial H_{ij}^B}{\partial b}$ ,  $\frac{\partial H_{ij}^A}{\partial b}$

과  $\frac{\partial K_{jk}}{\partial b}$ 이다. 나머지 항들은 이미 전달함수 합성법을 이용한 응답의 계산과정에서 이미 계산되므로 민감도 해석만을 위한 계산량은 대폭 줄어들게 된다. 본 연구에서는 두 구조물 사이의 연결부의 특성을 추정하기 위하여 식 (10)의 민감도 공식을 사용하므로 두 부분구조를 연결하는 연결요소의 강성이나 감쇠와 같이 연결요소의 특성을 설계변수로 선정하게 된다. 이 경우 각 분계 주파수응답함수의 설계변수에 대한

미분은 0이 되며,  $\frac{\partial K_{jk}}{\partial b}$  항의 계산도 식 (6)을 보면

알 수 있듯이  $\frac{\partial K_{jk}^I}{\partial b}$  항만이 남게 되므로 많은 계산량이 줄어들게 된다.

## 3. 컴프레서 시스템의 연결부 특성 추정

본 장에서는 전달함수합성법에 기반한 민감도 해석법을 진동시스템의 연결부 특성값 추정에 응용하는 방법을 차량용 에어컨 컴프레서 어셈블리 시스템에 적용하여 설명한다.

### 3.1 브라켓 구조물의 부분구조 해석

Fig. 2에는 차량에 장착되는 에어컨 컴프레서 브라켓 구조물(이하 브라켓 구조물)을 나타내었다. 브라켓 구조물의 응답을 전달함수합성법으로 해석하기 위하여 Fig. 1과 같이 브라켓, 컴프레서 2개의 부분구조로 분할하였다.

컴프레서와 브라켓은 4개의 볼트로 연결되어 있다. 두 부분구조는 탄성결합 되어 있다고 가정하고 연결요소의 특성값 중 감쇠는 무시한다. 컴프레서와 브라

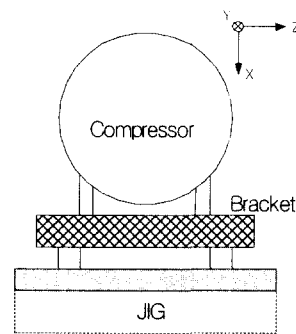


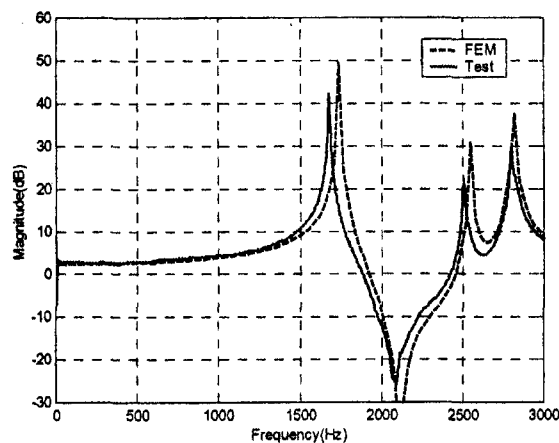
Fig. 2 Air-conditioner compressor system

켓의 어셈블리는 단단히 고정된 지그에 강결합으로 연결되어 있다. 전달함수합성법을 이용하여 브라켓 구조물의 응답을 해석하기 위하여, 컴프레서는 충격시험(impact test)을 통해서 주파수응답함수를 구하였으며, 브라켓에 대하여는 유한요소해석을 통하여 주파수응답함수를 구하였다. 충격시험 시 컴프레서는 자유상태(free-free)의 경계조건에서 시험을 하였다. 응답은 3축 가속도계를 사용하여 3방향의 가속도를 측정하였다. 부분구조물의 가진은 충격망치(impact hammer)를 사용하여 한 가진점 마다 3방향으로 가진을 하였다. 그리고, 시스템의 응답을 비교하기 위하여 브라켓을 가진하고 컴프레서에서의 응답을 측정하는 충격시험을 수행하여 전체 시스템의 주파수응답함수를 취득하였다. 브라켓의 주파수응답함수를 취득하기 위한 유한요소 해석은 상용 소프트웨어인 MSC/NASTRAN을 사용하였다. 브라켓 유한요소 모델은 솔리드 요소 중 하나인 사면체 요소(tet 10)를 사용하였으며 요소수는 36,032개 절점수는 60,426개 였다.

브라켓의 유한요소 모델의 검증을 위하여 1차적으

**Table 1** Comparison of natural frequencies of the bracket

Method Mode	Modal test [Hz]	FEM [Hz]	Error [%]
1st	1,680	1,740	3.57
2nd	2,500	2,550	2.0
3rd	2,800	2,810	0.36



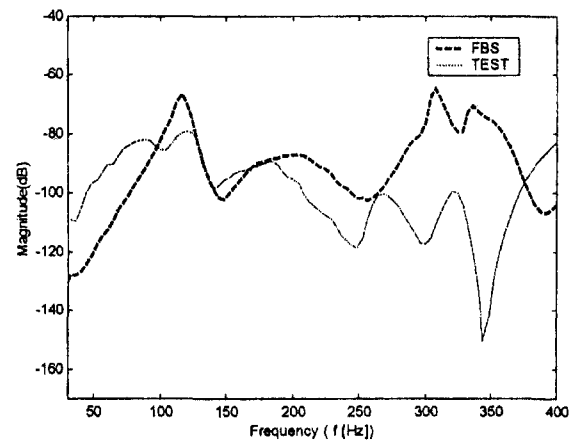
**Fig. 3** Comparison of FRFs of the bracket between modal test and FE analysis

로 고유치 해석을 수행하여 브라켓의 고유 진동수와 고유 진동형을 실험값과 비교하였고, 2차적으로 조화해석(harmonic analysis)을 수행하여 주파수응답함수를 비교, 데이터의 타당성을 검증하였다. 그 뒤 검증된 브라켓 모델을 사용하여 주파수응답함수를 취득하였다. Table 1과 Fig. 3에 브라켓 단품 모델에 대한 고유진동수와 주파수응답함수를 나타내었다.

전달함수합성법을 사용하여 계산된 결과는 식 (7)에서도 알 수 있듯이 주어진 힘에 대한 정상상태(steady-state)에 있어서 강제진동 응답이다. 이 경우 가진하는 힘을 단위 힘이라 가정하여 식 (7)의 가진력 항에 단위 힘을 가하여 계산하면 전달함수합성법에 근거한 전체시스템의 주파수응답함수를 구하게 된다.

주파수 응답함수를 구하기 위하여는 컴프레서와 브라켓을 연결하는 연결볼트의 특성값을 알아야 한다. 그러나 연결부의 특성은 볼트의 토크, 접촉면적, 접촉면의 상태 등에 따라 달라지며 많은 불확실성을 내포하고 있어 정확한 특성값을 알기는 어렵다. 일반적으로는 연결부의 특성값을 상수로 가정하고 토크와 인장력과의 관계를 이용하여 볼트의 탄성계수를 추정한다. 이러한 방법으로 연결부의 특성을 추정하고 전체시스템의 주파수 응답함수를 전달함수 합성법으로부터 구하여 전체시스템의 실험으로부터 얻어진 주파수응답함수와 Fig. 4에 비교하였다.

Fig. 4에서 알 수 있듯이 전달함수합성법을 이용하여 계산한 주파수응답함수는 실제 실험에서 얻은 주파수응답함수와 관심 주파수 대역에서 그 경향이 일



**Fig. 4** Comparison of an FRF measured by impact test with that of FBS method (X-direction)

치하고 있으나 300 Hz 대역에서 레벨의 차이가 큰 것을 볼 수 있다.

### 3.2 민감도법을 이용한 연결부 특성 추정

전달함수합성법을 이용하여 계산한 주파수응답함수와 실험으로 구한 주파수응답함수는 관심주파수 대역에서 그 경향이 잘 일치하지만 식 (7)에서 볼 수 있듯이 두 부분구조를 연결하는 연결요소의 정확한 특성값(여기에서는 볼트의 강성값)을 알아야만 보다 정확한 응답을 계산해 낼 수 있다. 그렇지만 연결요소의 정확한 특성값을 직접적인 방법으로 측정하는 것은 매우 어려운 일이지만 간접적으로 전달함수합성법으로 구한 주파수응답함수와 실험으로 구한 주파수응답함수를 비교하여 강성값을 추정하는 일은 가능하다. 즉, 컴프레서의 모델은 시험모델이고 브라켓의 유한요소모델은 시험값과 검증은 거쳤으므로 전체 시스템의 불확실성은 연결부의 특성만이라 가정하여, 두 주파수응답함수의 차를 가장 최소로 하는 각 연결부의 강성을 실제의 강성값으로 추정하는 것이다.

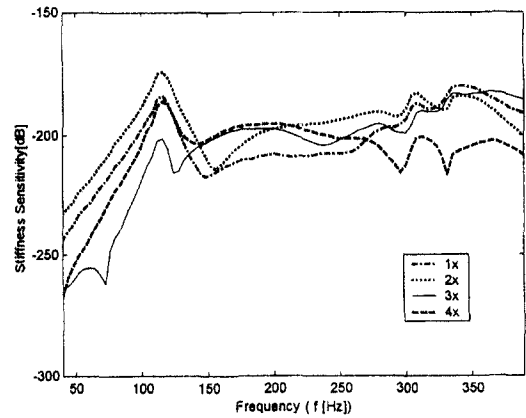
이를 위해 앞의 Fig. 4에서 두 주파수응답함수가 이루는 면적을 목적함수로 해서 이 목적함수를 최소로 하는 강성값을 추정하기 위해 이를 수식화 하였다. 주파수 대역은 40~400 Hz로 하였으며 목적함수를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$f(b) = \int_{\omega_1}^{\omega_2} h(\omega) \cdot |p_1 - p_2| d\omega \quad (11)$$

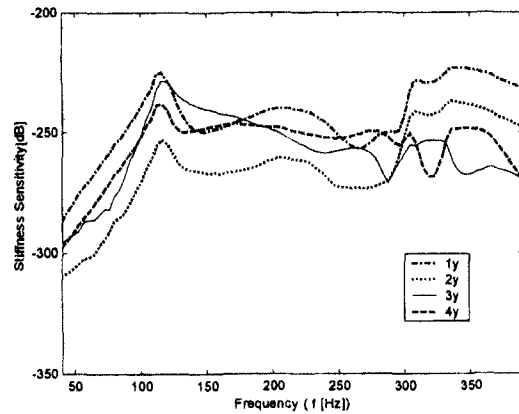
여기서,  $P_1 = 20 \cdot \log_{10} \|p_{FS}\|$ ,  $P_2 = 20 \cdot \log_{10} \|p_{EXP}\|$ ,  $b$ 는 설계변수이고,  $f$ 는 목적함수이다.  $\omega$ 는 주파수이고  $P_1$ 은 전달함수합성법으로 구한 주파수응답함수이고,  $P_2$ 는 실험으로 구한 주파수응답함수이며,  $\| \cdot \|$ 는 벡터의 크기를 의미하고 주파수응답은 모두 dB 스케일을 사용한다. 그리고  $h(\omega)$ 는 임의의 가중함수이다.

가중함수는 중요하다고 판단되는 주파수 영역의 응답을 가중하기 위해 사용하나 여기서는 관심주파수 대역에서 모두 동일한 가중함수를 사용하였다. 즉 모든 주파수 대역에서 1로 놓고 최소화를 수행하였다. 설계변수는 연결요소의 강성값으로 하였으며, 연결점은 4점이고 각각 3방향의 강성을 가지므로 총 설계변수는 모두 12개이다.

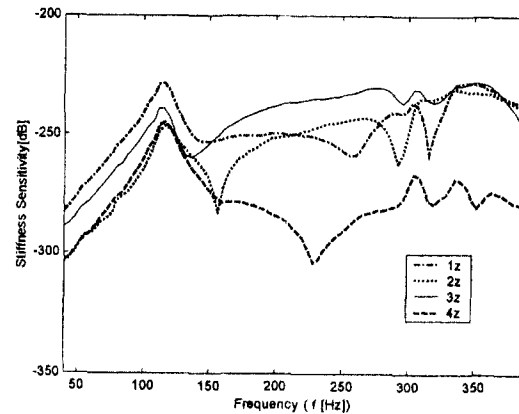
그리고,  $y$ 와  $z$  방향의 강성값은 동일하다고 가정하여 4개의 등식제한조건이 존재한다. 현재의 강성값



(a) X-direction



(b) Y-direction



(c) Z-direction

Fig. 5 Response sensitivities w.r.t the stiffnesses

을 1로 보고 이 강성은 0.7 ~ 1.3의 하한과 상한값을 갖는다고 보고 이 사이에서 특성값을 추정 하였다.

이 최적화 문제를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{minimize } f(b) \\ & \text{subject to } b(I(k))=b(J(k)) \quad k=1, \dots, n \quad (12) \\ & \quad \quad \quad b_L \leq b(i) \leq b_U, \quad i=1, \dots, m \end{aligned}$$

여기서  $n$ 과  $m$ 은 각각 4와 12이고,  $b_L$ 과  $b_U$ 는 각각 0.7과 1.3이다. 그리고  $I=\{2 \ 5 \ 8 \ 11\}$ 이고  $J=\{3 \ 6 \ 9 \ 12\}$ 이다. 식 (12)로 나타난 문제를 최소화 하기 위해서는 목적함수 및 제한조건에 대한 기울기 함수를 구해야 하며 이 기울기 정보를 이용한 최적화 알고리즘이 필요하다. 목적함수에 대한 기울기 함수는 전달함수합성법에 기반한 민감도 해석법을 사용하여 구할 수 있으며 최적화 알고리즘은 상용 S/W인 MATLAB의 최적화 모듈을 이용하였다.

먼저 전달함수합성법에 의한 민감도 해석법의 정확성을 검증하기 위하여 식 (10)을 이용하여 주파수 응답에 대한 민감도 해석을 수행하고 이를 유한차분법의 결과와 비교하였다.

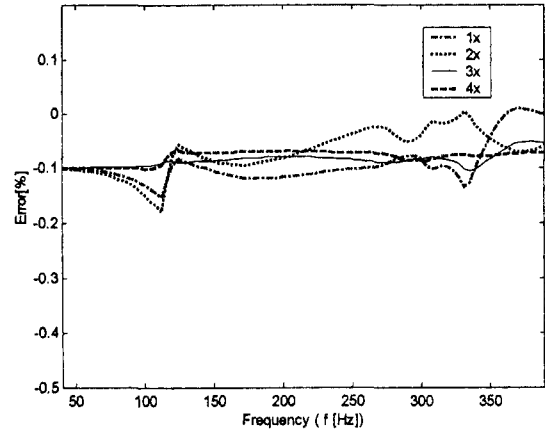
Fig. 5에 민감도 해석 결과를 그렸고 Fig. 6에 유한차분법과의 비교 결과를 그렸다. 관심 주파수 대역인 40 Hz에서 400 Hz 사이의 강성 민감도 해석결과를 보면  $x$ 방향에서 2번 연결점의 강성이 큰 민감도를 가지며  $y$ 방향에서는 1번이 그리고  $z$ 방향에서는 1번과 3번의 강성값이 응답에 많은 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

민감도 해석 결과 비교를 위한 유한차분법은 전진차분법을 이용하였으며 섭동량은 각 설계변수의 0.1%로 하였다. 오차 백분율은 다음과 같이 계산하였다.

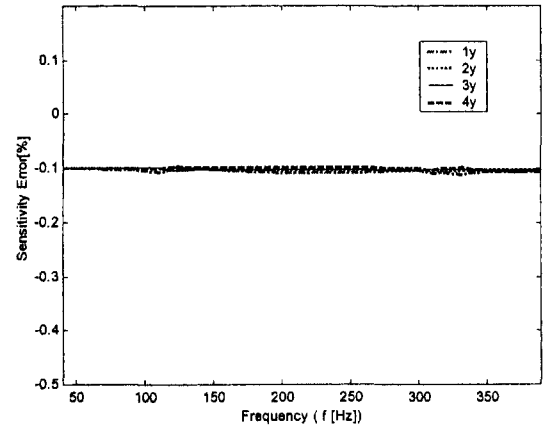
$$\text{Error} [\%] = \frac{\| (x'_r)_{FDM} \| - \| (x'_r)_{FBS} \|}{\| (x'_r)_{FDM} \|} \times 100 \quad (13)$$

여기서  $x'_r$ 는  $dx_r/db$ 를 의미하며  $(x'_r)_{FBS}$ ,  $(x'_r)_{FDM}$ 는 각각 부분구조기반 민감도공식과 유한차분법으로 구한 민감도를 의미한다. 실제 설계변수에 따른 민감도는 실수부와 허수부를 가지나 편위를 위해 단지 크기만을 가지고 비교하였다.

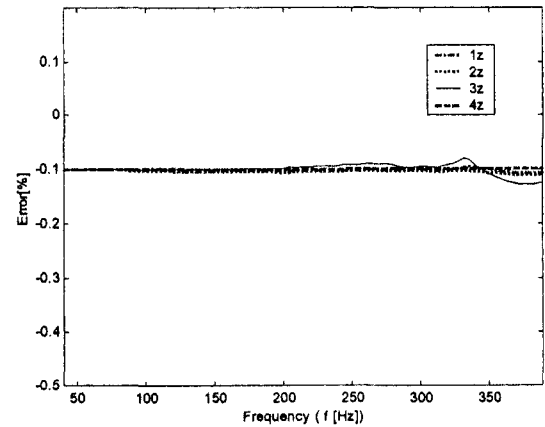
그림에서 보는 바와 같이 두 가지 방법에 의한 민감도 해석 결과의 차가 0.2% 이내의 오차 범위에서 잘 일치하고 있는 것을 볼 수 있어 민감도 공식의 정확성을 확인할 수 있다.



(a) X-direction



(b) Y-direction



(c) Z-direction

Fig. 6 Errors of response sensitivity w.r.t. the stiffnesses compared with those of the finite difference method

다음으로 이러한 검증을 거친 부분구조기반 민감도 공식을 사용하여 목적함수의 설계변수에 따른 민감도를 수행하고 그 결과를 유한차분법으로 구한 결과와 비교하였다. 목적함수의 설계변수에 따른 미분은 식 (11)을 미분하면 응답의 미분에 관한 함수로 나타나므로 2장에서 설명한 민감도 해석법으로 계산이 가능하다. 그리고 제한조건식들은 바로 해석적으로 미분하여 사용하였다. Table 2에 설계변수 변화량에 따른 목적함수의 변화량을 식 (14)와 유한차분법으로 비교한 결과를 나타내었다. 유한차분법은 역시 전진차분법을 사용하였으며, 섭동량은 각 설계변수의 0.1 %로 하였다.

결과에서 알 수 있듯이 최적해를 찾아 가는 탐색방향 및 변동량이 잘 일치하는 것을 알 수 있으며 부분구조 민감도 공식이 매우 정확함을 확인하였다.

앞에서 검증된 민감도 정보를 MATLAB의 최적화 알고리즘을 이용하여 볼트강성을 추정하였다.

추정된 볼트의 강성값은 Table 3에 나타내었다.

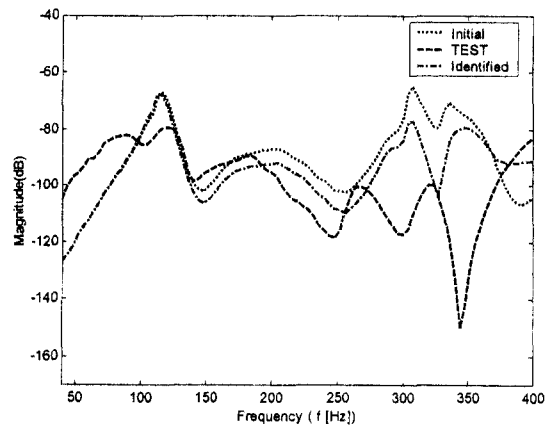
그리고, 추정된 볼트 강성값을 사용하여 응답을 해석한 결과를 Fig. 7에 보였다. 그림과 같이 전체적으로 주파수응답함수의 차이가 줄어들었으며, 면적으로 비교하면 19.8 %가 감소하였고 특히 차이가 많이 나던 300~400 Hz 대역에서 차이가 많이 줄어든 것을 알 수 있다. 하지만 전체 어셈블리의 실험 FRF를 완

**Table 2** Design sensitivity result of the object function at the initial design ( $f = 2.7134E+03$ )

Design Var. No	Present method $f'$	FDM $\delta f = \Delta f / \Delta b$	Ratio [%] $(f' / \delta f) \times 100$
1	-2.040E-05	-2.040E-05	100.00
2	-0.011E-05	-0.011E-05	100.00
3	0.002E-05	0.002E-05	100.00
4	1.858E-05	1.856E-05	100.11
5	-0.006E-05	-0.006E-05	100.00
6	-0.006E-05	-0.006E-05	100.00
7	1.289E-05	1.287E-05	100.16
8	0.001E-05	0.001E-05	100.00
9	0.006E-05	0.006E-05	100.00
10	0.866E-05	0.866E-05	100.00
11	0.003E-05	0.003E-05	100.00
12	-0.000E-05	-0.000E-05	100.00

**Table 3** Identified result of connection stiffnesses (unit : N/mm)

Design Var. No	Initial stiffness	Identified stiffness
1	3225E+04	41925E+03
2	9206E+05	64442E+04
3	9206E+05	64442E+04
4	3225E+04	22575E+03
5	9206E+05	119678E+04
6	9206E+05	119678E+04
7	3225E+04	23584425
8	9206E+05	64442E+04
9	9206E+05	64442E+04
10	3225E+04	22575E+03
11	9206E+05	119678E+04
12	9206E+05	119678E+04



**Fig. 7** The FRF using the identified connection stiffnesses compared with the measured one

전하게 제한하지는 못하고 있음을 볼 수 있는데 이는 연결부 강성의 비선형성, 부분구조 모델의 부정확성, 연결부 추정 시 초기치 대비 변화의 제약 등 여러 가지 원인이 있을 수 있으며 이의 개선이 향후의 과제라 할 수 있다

#### 4. 결 론

부분구조합성법 기반 민감도해석을 이용하여 연결부의 특성을 추정함에 있어 다음과 같은 결론을 얻었다. 전달함수합성법을 기반으로 하는 민감도 해석법을 도입하여 진동 시스템의 연결부 동특성 값을 효과적으로 추정하는 방법을 제안하였다.

이 방법으로 체계적이며 효율적으로 시스템 연결부 특성을 추정할 수 있으며, 실제 차량용 에어컨 컴프레서 시스템에 적용하여 컴프레서와 브라켓을 연결하는 볼트의 동특성을 추정하는데 사용하였고 공학적으로 의미 있는 추정결과를 얻을 수 있음을 보였다.

향후의 과제로 연결부 동특성의 비선형성 등을 고려하여 보다 완벽한 연결부의 동특성을 추정하는 연구가 필요하다.

### 참 고 문 헌

(1) 長昭男, 大態政明, 1991, 部分構造合成法, 培風館.  
 (2) 황우석, 이두호, 2000, "전달함수를 이용한 차실 소음의 부분구조 해석", 한국소음진동공학회지, 제 10 권 제 3 호, pp. 480~485.  
 (3) 허덕재, 박태원, 2001, "주파수 응답함수의 부분구조합성법을 이용한 차 실내소음 예측", 한국소음진동공학회지, 제 11 권 제 4 호, pp. 5~12.

(4) Ochsner S.D. and Bernhard, R.J. 1995, "Application of a Component Mobility Technique to Automotive Suspension Systems", Noise Control Engineering Journal, Vol. 43, pp. 73~82.  
 (5) Santos J.M.C. and Arruda, J.R.F. 1990, "Finite Element Model Updating Using Frequency Response Functions and Component Mode Synthesis", Proceedings of the International Modal Analysis Conference, pp. 1195~1201.  
 (6) 이두호, 황우석, 김찬목, 2001, "전달함수합성법을 이용한 엔진마운트계의 민감도 해석", 대한기계학회논문집A, Vol. 25, pp. 153~160.  
 (7) Lim T.C. and Li, J. 2000, "A theoretical and Computational Study of the FRF-based Substructuring Technique Applying Enhanced Least Square and TSVD Approaches", Journal of Sound and Vibration, 234(4), pp. 1135~1157.  
 (8) 정홍석, 2000, "전달함수합성법을 이용한 차량용 에어컨 컴프레서 브라켓의 동특성 해석", 석사학위논문, 국민대학교.