

구조물 동특성 변경 관련 연구 분야 및 동향 (V)

박 윤 식 · 박 용 화

(한국과학기술원 · 한국표준과학연구원)

지난 호에 이어 구조물의 설계에 관한 역 방향 문제를 서술하고자 한다. 지난 호에서는 모드 영역의 방법을 다루었고 이번 호에는 주파수 응답 함수를 사용한 응답 영역의 방법, 모드 영역과 응답 영역을 혼합한 방법, 그리고 기타의 방법을 중점적으로 다루고자 한다.

Problem 9 :

Given $K, M, \bar{H}(\omega) \Rightarrow$ Find $\Delta K, \Delta M$

이 방법은 기존 구조물의 질량 및 강성 행렬을 유한요소방법 등을 통해서 수립한 후 구조물의 주파수 응답 함수를 개선하기 위해 구조 변경을 수행하는 것이 목적이다. 유한요소해석을 기반으로 한 최적설계와 유한요소모델 보정, 그리고 구조변수 규명의 문제로 나눌 수 있다. 각각의 방법론은 서로 유사하며 적용상의 목적에 따라 약간의 차이점을 가지고 있다. 주파수 응답 함수는 모드 누락 오차가 없으므로 IV편에서 설명한 모드 영역 방법과 비교해 상대적으로 측정을 통해 구조변경을 수행하는데 필요한 정보를 충분히 얻을 수 있다는 기본적인 장점이 있다.

9.1 주파수 응답 함수 개선을 위한 최적 설계

이 방법은 유한요소해석을 바탕으로 하는 최적설계 문제이다. 이 문제는 기본적으로 다음과 같은 최적화 문제를 만족하는 설계변수를 얻는 것이 목적이다.

$$\text{Minimize } \|\bar{H}(\omega) - H(\omega, b)\| \quad (9-1)$$

Subject to $W^{low} \leq W(b) \leq W^{high}$

여기서 $\bar{H}(\omega)$ 는 얻고자 하는 구조물의 주파수 응답 함수, $H(\omega, b)$ 는 유한요소해석을 통해 구한 주파수 응답 함수, b 는 설계변수, W^{low} 는 구조물 중량의 하한값, W^{high} 는 구조물 중량의 상한값, 그리고 $W(b)$ 는 구조물의 중량을 나타낸다. 식 (9-1)의 최적화 문제를 풀기 위해 III편의 6.2절에서 설명한 주파수 응답 함수의 설계변수에 대한 민감도 해석을 주로 사용한다. 주파수 응답 함수 민감도는 다음과 같다.

$$\frac{\partial H(\omega)}{\partial b} = -H(\omega) \left[\frac{\partial K(b)}{\partial b} - \omega^2 \frac{\partial M(b)}{\partial b} \right] H(\omega) \quad (9-2)$$

이때 다수의 주파수를 고려하면 식 (9-1)의 최적화 문제는 고려된 주파수 개수 만큼의 다중 목적 함수(multi-objective function) 최적화 문제가 된다. 이 최적화 문제의 풀이를 위해서 IV편 8.1절에서 설명된 여러 가지의 비선형 프로그래밍 기법이 사용된다. Ting⁽⁹⁻¹⁻¹⁾과 Choi⁽⁹⁻¹⁻²⁾는 이 민감도를 수식화 했으며 특히 Choi는 변분 법칙(variational principle)을 사용해 연속체 구조물의 민감도 해석 및 최적화를 수행했다. Roy⁽⁹⁻¹⁻³⁾, Jingshou⁽⁹⁻¹⁻⁴⁾ 그리고 Watts⁽⁹⁻¹⁻⁵⁾ 등은 주파수 응답 함수 민감도를 구조 변경에 적용하였다.

이 방법은 고려하는 주파수의 개수를 설계변수의 개수보다 충분히 많이 잡아주면 최적 설계변수가 유일하게 결정되는 장점이 있다. 한편 최적 설계의 결과로서 원하는 구조물의 동특성을 얻을 수 있도록 목적 함수에서 고려하는 주파수를 적절히 선정할 필요가 있다.

9.2 주파수 응답 함수를 이용한 유한요소모델 보정

이 방법은 위의 최적화 문제를 유한요소모델 보정에 적용한 방법이다. 즉 식 (9-1)에서 주파수 응답 함수 $\bar{H}(\omega, b)$ 를 실험으로부터 측정된 주파수 응답 함수를 사용하고 유한요소해석을 통해 얻어지는 주파수 응답 함수 $H(\omega, b)$ 와의 차이를 최소화 함으로써 설계변수를 보정한다. Schulz등이 9.1절의 민감도 해석을 사용하는 수치적 최적화 기법을 사용하여 보정계수를 구하였다^(9-2-1~5). 몇몇의 연구에서는 위의 민감도를 이용한 수치적 방법 대신에 대수방정식을 이용하기도 하였다^(9-2-6~9). 수학적인 해를 구하는 다른 방법으로서 III편 6.1절에서 설명한 리셉턴스 방법을 응용하는 방법이 제시 되었다. 식 (6-2)를 행렬 연산을 통하여 재구성하면 다음과 같은 방정식을 얻을 수 있다.

$$H(\omega) \left[\Delta K(b) - \omega^2 \Delta M(b) \right] \bar{H}(\omega) = \bar{H}(\omega) - H(\omega) \quad (9-3)$$

위의 식을 보정계수 b 에 대해서 정리하고 풀면 다음과 같이 보정계수를 구할 수 있다.

$$A(\omega) \begin{Bmatrix} -\omega^2 \Delta m_1 \\ \Delta k_1 \\ \vdots \\ -\omega^2 \Delta m_n \\ \Delta k_n \end{Bmatrix} = b(\omega) \quad (9-4)$$

Lin은 식 (9-4)에서 다수의 주파수를 고려하여 설계변수에 대한 선형 대수 방정식을 구성하고 최소 오차 자승 방법으로 보정계수를 구하여 유한요소 모델 보정을 하였다⁽⁹⁻²⁻⁹⁾. 그 밖에 다양한 유한요소모델 개선법이 소개되고 있으며^(9-2-10~15) 민감도 방법과 다른 응답 영역 방법들과의 비교연구도 수행되었다⁽⁹⁻²⁻¹⁶⁾.

이 방법은 측정된 주파수 응답 함수로부터 설계변수의 개수보다 많은 양의 정보를 알 수 있으므로 물리적으로 의미 있는 설계변수의 보정이 가능하다는 장점이 있다. 또한 수치 반복 없이 단번에 계산이 가능하다. 한편 최적설계 시와 마찬가지로 고려하는 주파수를 적절히 선정하는 추가 연구가 필요하며 주파수 응답함수의 오차에 대한 영향을 분석할 필요가 있다.

9.3 주파수 응답 함수를 이용한 구조변수 규명

이 방법은 9.1절과 9.2절의 주파수 응답 함수를 이용하는 방법과 그 방법론이 동일하며 그 적용에 있어서 구조물의 조인트, 손상부위, 국부 비선형성 등, 국부적인 구조 변수 규명에 주로 적용되고 있다^(9-3-1~9). 그 중에 주파수 응답 함수의 행렬 특성을 이용하는 방법은 9.2절의 Lin의 방법과 유사한 수식을 갖는다. 위의 식 (9-3)에서 테일러 급수의 1차항을 고려하면 다음과 같은 오차 행렬을 얻는다.

$$E(\omega) = \Delta K - \omega^2 \Delta M \quad (9-5) \\ = (K - \omega^2 M) [\bar{H}(\omega) - H(\omega)] (K - \omega^2 M)$$

여기서 $E(\omega)$ 는 오차행렬, $\bar{H}(\omega)$ 는 손상 후 측정된 주파수 응답 함수, $H(\omega)$ 는 손상 전 계산된 주파수 응답 함수이다. 식 (9-5)의 오차행렬을 충분한 개수의 주파수를 고려하여 구성하고 손상된 양을 나타내는 강성행렬과 질량행렬을 얻는다. Maia등은 와 유사한 방법을 사용하여 구조물의 손상 색출에 적용하였다⁽⁹⁻³⁻³⁾.

구조변수가 물리적으로 의미 있는 값이 되기 위해서는 측정되는 주파수 응답 함수의 개수를 충분히 잡아줄 필요가 있으며 측정 자유도는 해석적 모델의 자유도와 동일하게 잡아줄 필요가 있다. 구조 변수 규명 결과의 정확도는 고려하는 측정위치, 사용주파수 등에 영향을 받으므로 주파수 응답 함수 오차에 둔감한 결과를 얻기 위해서는 이러한 실험 변수를 적절히 선정할 필요가 있다.

Problem 10 :

Given $\Lambda, \Phi, \bar{\Lambda}, \bar{\Phi} \Rightarrow$ Find $\Delta K, \Delta M$

이 방법은 기존 구조물과 변경 구조물의 모드 정보 변화를 사용하여 구조 변경, 구조변수 규명 등의 다양한 역문제를 다루는 방법이다.

10. 구조변경 / 구조변수규명

이 문제는 II편 2절에서 설명된 정방향 문제인 미소 구조 변경법에 대응하는 역방향 문제라고 볼 수 있으며 사용되는 정보는 구조변경 전후의 모드 특성으로서 미소 구조

변경법과 동일하다. 2절의 정방향 문제의 결과는 핵심적으로 섭동법을 사용한 식 (2-7)으로 나타낼 수 있다. 이 식에 원하는 i 번째 고유치 변화 $\Delta\lambda_i$ 을 대입하면 다음과 같은 대수 방정식을 얻는다.

$$\Delta\lambda_i = \phi_i^T (\Delta K - \lambda \Delta M) \phi_i \quad (10-1)$$

이와 같이 하여 k 개의 모드를 고려하고 $2n$ 개의 설계변수에 대해서 정리하면 다음과 같이 설계변수에 대한 선형 대수 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \\ \vdots \\ \Delta\lambda_k \end{Bmatrix} = [f(\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_k)] \begin{Bmatrix} \Delta m_1 \\ \Delta k_1 \\ \vdots \\ \Delta m_n \\ \Delta k_n \end{Bmatrix} \quad (10-2)$$

이때 설계변수의 개수 $2n$ 보다 충분히 많은 모드 개수, k 를 선정해주면 위의 선형대수 방정식이 Over-determined 문제가 되어 물리적으로 의미 있는 설계변수를 얻을 수 있다. Zang은 이 방법을 사용해 비행기의 고유진동수 변경을 위해 여러 개의 단순 점 질량을 배치시키는 문제를 다루었다⁽¹⁰⁻¹⁾. 이 방법은 단순 계산으로 구조변경을 얻을 수 있다는 장점이 있으나 식 (10-1)은 근사식이므로 큰 양의 구조 변경을 고려할 때에는 정확한 구조변경을 얻기 어려운 단점이 있으며 식 (10-2)의 선형대수 방정식을 얻기 위해서는 점질량과 선강성 등의 단순 구조 변경에 대해서 제한적으로 적용될 수 밖에 없다. 따라서 이 방법은 국부적인 설계 변수의 규명에 많이 적용되어 왔다. 즉, 모드 형상의 유사성을 고려하여 유한요소 모델의 오차를 정성적으로 고려하는 방법⁽¹⁰⁻²⁻³⁾, 구조물 손상 색출 방법⁽¹⁰⁻⁴⁻⁷⁾, 조인트 변수 규명⁽¹⁰⁻⁸⁾, 구조변경⁽¹⁰⁻⁹⁻¹⁰⁾, 그리고 구조변수규명의 정확도를 높이기 위한 센서 위치 선정법⁽¹⁰⁻¹¹⁾ 등에 관한 연구가 있었다.

Problem 11 :

Given $H(\omega)$, $\bar{H}(\omega) \Rightarrow$ Find $\Delta K, \Delta M$

이 방법은 기존 구조물과 변경 구조물의 주파수 응답 함수 변화를 사용하여 구조 변

경과 구조변수규명 등의 다양한 역문제를 다루는 방법이다.

11. 구조변경 / 구조변수규명

행렬식을 사용하는 방법은 기본적으로 9.2절에서 설명한 Lin의 방법과 동일한 방법 또는 이를 변형한 방법을 사용한다. 차이점은 기존 구조물의 주파수 응답 함수 $H(\omega, b)$ 를 유한요소해석 결과대신 측정치를 사용한다. 주파수 응답 함수 $\bar{H}(\omega, b)$ 를 정하는 방법은 두 가지가 있는데, 구조변경 문제에 있어서는 설계자가 설계 목적치로 선정해주고 구조변수 규명 문제에 있어서는 대상 구조물의 측정치를 사용한다. Gordis는 이 방법을 사용하여 유한요소모델 오차 위치 추적 등의 다양한 문제에 적용하였다^(11-1~2) 한편 유사한 방법론을 토대로, 구조물 손상 색출 방법^(11-3~5), 구조변경^(11-6~10), 진동 절연(vibration isolation)^(11-11~12), 조인트 변수 및 경계조건 규명^(11-13~17), 그리고 동흡진기 설계^(11-18~23) 등이 소개 되었다. 한편 센서 동특성이 측정치에 미치는 영향에 관한 연구⁽¹¹⁻²⁴⁾도 있었다.

Problem 12 :

Given $H(\omega)$, \bar{A} , $\bar{\phi} \Rightarrow$ Find $\Delta K, \Delta M$

이 문제는 고유치 최적화 문제의 특별한 경우로 기존 구조물의 주파수 응답 함수를 사용하여 고유진동수, 모드 형상을 개선하기 위한 구조변경을 얻는 것이 목적이다.

12.1 국부 구조변경

이 방법은 III편 3절에서 설명된 정방향 문제인 Exact Reanalysis Method에 대응하는 역방향 문제이다. 식 (3-2)에 변경하기 원하는 고유진동수 $\bar{\omega}$ 를 대입하면 다음과 같이 구조변경 $\Delta K, \Delta M$ 에 대한 대수 방정식을 얻는다.

$$[I + H(\bar{\omega})(\Delta K - \bar{\omega}^2 \Delta M)] \bar{\phi} = 0 \quad (12-1)$$

점질량 변경을 고려하는 경우에 식 (12-1)을 에 대해서 풀면 다음과 같이 질량이 정해진다.

$$\Delta m_i = \frac{1}{\bar{\omega}_i^2 h(\omega)_{ii}} \quad (12-2)$$

기획연재 (V)

여기서 i 는 점질량이 부착되는 절점을 나타낸다. 두 절점 i 와 j 를 잇는 단순 선강성 Δk 의 구조변경은 다음과 같이 식 (12-1)로부터 Δk 에 대한 고유치 문제를 구성하고 이를 풀어 결정한다.

$$\begin{Bmatrix} \bar{\phi}_i \\ \bar{\phi}_j \end{Bmatrix} = -\Delta k \begin{bmatrix} h(\bar{\omega})_{ii} & h(\bar{\omega})_{ij} \\ h(\bar{\omega})_{ji} & h(\bar{\omega})_{jj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{\phi}_i \\ \bar{\phi}_j \end{Bmatrix} \quad (12-3)$$

구한 Δk 를 다시 식 (12-3)에 대입하여 모드 형상을 구한다. 식 (12-2)와 식 (12-3)으로 구해지는 점질량과 선강성은 구조변경의 양이 크더라도 근사해가 아닌 정확한 값을 가진다. 이 방법은 Yee등에 의해 제안되었으며 감쇠의 영향 등도 추가로 고려하였다^(12-1-1~2). 최근에 Li는 한 개의 점질량만이 아닌 여러 개의 질량과 강성을 동시에 고려하는 방법을 제안하였다⁽¹²⁻¹⁻³⁾. 이 방법은 별도의 가정이 필요치 않고 간단한 수식으로부터 정확한 구조변경을 구한다는 장점이 있다. 그러나 이제까지의 연구는 단순 점질량과 선강성을 사용하는 구조변경 문제에 제한적으로 적용되고 있으며 복잡한 형상을 갖는 일반적 구조물의 변경을 위해서는 별도의 방법론이 추가될 필요가 있다.

12.2 모드-힘 방법 (Modal Force Method)

이 방법은 III장 4절의 모드-힘 방법에 대응하는 역문제의 풀이법이다. 이 방법은 Park에 의해서 제안되었으며 다른 방법과는 달리 질량과 강성의 변경을 동시에 고려하고 고유진동수 뿐만이 아니라 모드 형상도 동시에 개선해줄 수 있다는 장점이 있다⁽¹²⁻²⁻¹⁾. 얻고자 하는 고유진동수 $\bar{\omega}$ 와 모드 형상 $\bar{\phi}$ 에 대한 모드-힘 벡터 \bar{f} 는 다음과 같이 변위-힘 관계식에 의해서 정해진다.

$$\bar{\phi} = H(\bar{\omega})\bar{f} \quad (12-4)$$

위의 선형방정식을 풀어서 모드-힘 벡터 \bar{f} 를 구하고 4절의 식 (4-3)에 대입하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\Delta H(\bar{\omega})\bar{f} = -H(\bar{\omega})\bar{f} \quad (12-5)$$

점질량과 선강성 구조 변경인 경우를 고려하

여 식 (12-5)를 풀면 부착되는 구조물의 주파수 응답 함수 $\Delta H(\bar{\omega})$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta h_i(\bar{\omega}) = -\frac{[H(\bar{\omega})]_{ij}}{f_j} \quad (12-6)$$

식 (12-6)으로부터 절점 i 에 부착되는 선강성과 점질량을 구하면 다음과 같다.

$$\Delta m_i = -\frac{1}{\bar{\omega}_i^2 \Delta h(\bar{\omega})_i}, \quad \Delta k_i = \frac{1}{\Delta h(\bar{\omega})_i} \quad (12-7)$$

이 방법의 장점은 비교적 손쉬운 계산으로 정확한 선강성과 점질량을 동시에 선정해 줄 수 있으며 모드 형상도 선정해 줄 수 있다는 장점이 있다. 따라서 구조물의 진동 응답의 크기를 효율적으로 개선해 줄 수 있다. 또한 기존 구조물에 대한 별도의 수치모델이 필요 없이 주파수 응답 함수의 측정치만으로 구조변경이 가능하므로 수치 모델을 세우기 복잡한 구조물에 대해서도 정확한 결과를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 그러나 단순한 점질량과 선강성의 구조 변경에 그 적용이 제한된다는 단점이 있다. 또한 측정된 주파수 응답 함수의 오차에 대한 영향에 둔감한 결과를 얻기 위한 추가 연구가 필요하다.

Problem 13 :

Given $H(\omega)$, \bar{A} , $\bar{\phi} \Rightarrow$ Find $\Delta H(\omega)$

이 문제는 고유치 최적화 문제의 특별한 경우로 기존 구조물의 주파수 응답 함수를 사용하여 부가되는 구조물의 주파수 응답 함수를 구하는 것이 목적이다.

13. Kron's Method/Energy Method Using FRF

이 방법은 III편 4절의 모드-힘 방법을 활용한 방법으로서 Kron⁽¹³⁻¹⁾에 의해서 제안되었으며 Simpson⁽¹³⁻²⁾, Park⁽¹³⁻³⁾등에 의해서 Kron의 방법을 개선한 다양한 구조 변경법이 연구되었으며 고유진동수의 민감도 해석을 바탕으로 보, 트러스 및 일반 구조물의 최적설계에 적용되었다. 모드-힘 방정식인 4절의 식 (4-5)를 이용하여 설계변수에 대한 고유진동수의 민감도 해석을 하면 다음과 같은 결과를 얻는다.

$$\frac{\partial \omega_n}{\partial b} = f^T \frac{\partial H(\omega, b)}{\partial b} f \quad (13-1)$$

위의 고유진동수 민감도와 III편의 식 (4-4)의 고유치 재해석 법을 반복적으로 사용하여 위한 구조물의 최적 설계를 수행한다. 이때 최적 설계 기법으로 다른 최적 설계 방법과 마찬가지로 비선형 프로그래밍 기법을 사용한다. Park은 주파수 응답 함수와 설계변수의 비례 관계를 활용했으며 민감도 식 (13-1)과 고유치 방정식 (4-4)을 단순화하여 보, 트러스 등의 구조변경에 적용하였다⁽¹³⁻³⁾. 한편 구조물의 수가 많은 경우에는 식 (13-1)의 민감도 대신에 다음과 같이 구조 요소의 내부 에너지를 사용하여 에너지가 작은 요소를 순차적으로 삭제 함으로써 트러스 구조 등의 형상설계에 적용하였다⁽¹³⁻⁴⁾.

$$\Delta \omega_n \approx \Delta E = f^T \Delta H(\omega, b) f \quad (13-2)$$

여기서 $\Delta \omega_n$ 는 요소구조를 삭제한 후 감소하는 전체 구조물의 고유 진동수이고 ΔE 는 삭제되는 에너지이다. 이 방법은 기존 구조물의 주파수 응답함수를 사용하므로 수치모델 과정의 오차 및 계산량을 줄 일수 있다는 장점이 있다. 그러나 응답 모델을 사용하므로 고려하는 모든 자유도에서의 주파수 응답 함수를 측정해야 하므로 측정 노력이 많이 필요하다. 또한 측정 주파수 응답 함수의 오차에 대한 해석과 오차에 둔감한 방법을 추가로 연구할 필요가 있다.

참 고 문 헌

Problem 9

9.1 주파수 응답 함수 개선을 위한 최적 설계

(9-1-1) Ting, T., "Design Sensitivity Analysis of Structural Frequency Response," AIAA Journal, Vol. 31, No. 10, pp. 1965~1967.

(9-1-2) Choi, K. K. and Lee, J. H., 1992, "Sizing Design Sensitivity Analysis of Dynamic Frequency Response of Vibrating Structures," Trans. of the ASME, Journal of Mechanical Design, Vol. 114, March, pp. 166~173.

(9-1-3) Roy, N. A., Girard A., and Bugeat, L. P., 1992, "Sensitivity Analysis of Structural Random Response Functions," IMAC 10th, pp. 954~960.

(9-1-4) Jingshuo, Z. and Yaodong, C. and Jin Q., 1990, "Design Sensitivity Analysis for Vibration Reduction of Machine Structure," IMAC 8th, pp. 1462~1468.

(9-1-5) Watts D., Starkey J., 1990, "Design Optimization of Response Amplitudes in Viscously Damped Structures," Trans. of the ASME, Journal of Sound and Acoustics, Vol. 112, pp. 275~280.

9-2 주파수 응답 함수를 이용한 유한요소모델 보정

(9-2-1) Schulz, M. J., Thyagarajan, S. K., and Slater, J. C., 1995, "Inverse Dynamics Design Technique for Model Correction and Optimization," AIAA Journal, Vol. 33, No. 8, pp. 1486~1491.

(9-2-2) He, J., 1993, "Sensitivity Analysis and Error Matrix Method Using Measured Frequency Response Function(FRF) Data," IMAC 11th, pp. 1079~1082.

(9-2-3) Friswell, M. I., and Penny, J. E. T., 1992, "The Effect of Closed Repeated Eigenvalues on the Updating of Model Parameters from FRF Data," Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 114, pp. 514~520.

(9-2-4) Bretl, J., 1993, "Use of Response Sensitivities for Correlation and Optimization of Dynamic Models," IMAC 11th, pp. 499~505.

(9-2-5) Abraham, S. R., Teichert, W., and Brunner, O., 1998, "Frequency Response Function FE Model Updating Using Multi-Perturbed Analytical Models and Information Density Matrix," IMAC 16th, pp. 1068~1074.

(9-2-6) Nalitolela, N., Penny, J. E. T., and Friswell, M. I., 1993, "Updating Model Parameters by Adding An Imagined Stiffness to the Structure," Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 7, No. 2, pp. 161~172.

(9-2-7) Gladwell, G. M. L., 1994, "Updating Model Parameters by Adding An Imagined Stiffness to the Structure," Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 8, No. 3, pp. 357~359.

(9-2-8) Mottershead, J.E., 1998, "On the zeros of Structural Frequency Response Functions and Their Application to Model Assessment and Updating," IMAC 16th, pp. 500~503.

(9-2-9) Lin, R. M., and Ewins, D. J., 1994, "Analytical Model Improvement Using Frequency Response Functions," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 4, No. 4, pp. 437~458.

(9-2-10) Nalittlea, N. G., 1992, "A New Approach to Update Model Parameters Using the frequency response Data," *IMAC 10th*, pp. 1267~1273.

(9-2-11) Haselman, T. K., 1998, "Lining FEA and SEA by Principal Components Analysis," *IMAC 16th*, pp. 1285~1291.

(9-2-12) Pascual, R., Golinval, J. C., and Razeto, M., 1998, "Model Updating Using Operating Deflection Shapes," *IMAC 16th*, pp. 12~18.

(9-2-13) Forster, C. D., and Mottershead, J. E., 1990, "A Method for Improving Finite Element Models by Using Experimental Data: Application and Implications for Vibrations Monitoring," *Int. J. Mech. Sci.* Vol. 32, No. 3, pp. 191~230.

(9-2-14) Mottershead, J. E., 1990, "Theory for the Estimation of Structural Vibration Parameters from Incomplete Data," *AIAA Journal*, Vol. 28, No. 7, pp. 1326~1328.

(9-2-15) Berger, H., Ohayon, R., Barthe, L., and Chaquin, J. P., 1990, "Parametric Updating of Finite Element Model Using Experimental Simulation - A Dynamic Reaction Approach," *IMAC 8th*, pp. 180~186.

(9-2-16) Imregun, M., Ewins, D. J., Hagiwara I., and Ichikawa T., 1994, "A Comparison of Sensitivity and Response Function Based Updating Techniques," *IMAC 12th*, pp. 1390~1400.

9.3 주파수 응답 함수를 이용한 구조변수 규명

(9-3-1) Ookuma, M. and Nagamatsu, A., 1985, "Experimental Identification of Mechanical Structure with Characteristic Matrices," *Bulletin of JSME*, Vol. 28, No. 246, pp. 2974~2977.

(9-3-2) Ookuma, M. and Nagamatsu, A., 1987, "Experimental Identification of a Mechanical Structure with Characteristic Matrices (Proposed Method with Input Data in Which Noise is Included)," *JSME International Journal*, Vol. 30, No. 264, pp. 970~975.

(9-3-3) Maia, N. M. M., Reynier, M., and

Ladeveze, P., 1994 "Error Localization for Updating Finite Element Models Using Frequency- Response- Functions," *IMAC 12th*, pp. 1299~1308.

(9-3-4) Masri, S. F., Miller, R. K., and Saud, A. F., 1987, "Identification of Nonlinear Vibrating Structures: Part 1-formulation," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 54, pp. 918~922.

(9-3-5) Masri, S. F., Miller, R. K., and Saud, A. F., 1987, "Identification of Nonlinear Vibrating Structures: Part 2-Applications," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 54, pp. 923~929.

(9-3-6) Kim, W. J., and Park, Y. -s., 1993, "Non-Linearity Identification and Quantification Using An Inverse Fourier Transform," *Mechanical systems and Signal Processing*, Vol. 7, No. 3, pp. 239~255.

(9-3-7) Goyder, H. G. D., 1980, "Methods and Application of Structural Modeling from Measured Structural Frequency Response Data," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 68, No. 2, pp. 209~230.

(9-3-8) Carfagni, M., 1991, "Sub-structuring as A Modal Analysis Design Tool," *The International Journal of Analytical and Experiment Modal Analysis*, Vol. 6, No. 4, pp. 251~270.

(9-3-9) James, G. H., Zimmerman, D. C., and Mayes, R. L., 1998, "An Experimental Study of Frequency Response Function (FRF) Based Damage Assessment Tools," *IMAC 16th*, pp. 151~157.

Problem 10

10. 구조변경 / 구조변수규명

(10-1) Zhang, Q., Wang, W., Allemang, R. J., and Brown, D. L., 1989, "Prediction of Mass Modification For Desired Natural Frequencies," *Journal of Modal Analysis*, pp. 39~44.

(10-2) Lieven, N. A. J., and Waters, T. P., "Error Location Using Normalized Orthogonality," pp. 761~764.

(10-3) Shepard, G. D. and Milani, J., 1990, "Frequency Based Location of Structural Discrepancies," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 4, No. 2, pp. 173~184.

(10-4) Ko, J. M., Wong, C. W., and Lam, H.

F., 1994, "Damage Detection in Steel Framed Structures by Vibration Measurement Approach," IMAC 12th, pp. 280~286.

(10-5) Salawu, O. S., Williams, C., 1994, "Damage Location Using Vibration Mode Shapes," IMAC 12th, pp. 933~939.

(10-6) Springer, T. W., and Reznicek, A., 1994, "The Prediction of The Natural Frequency Shifts For A Cantilevered L-Section Beam Due To The Presence of A Crack," IMAC 12th, pp. 880~897.

(10-7) Dong, C., Zhang, P. Q., Feng, W. Q., and Huang, T. C., 1994, "The Sensitivity Study of the Modal Parameters of a Cracked Beam," IMAC 12th, pp. 98~104.

(10-8) Wang, J., and Sas, P., 1990, "A Method for Identifying Parameters of Mechanical Joints," Trans. Of the ASME, Journal of Applied Mechanics, Vol. 57, pp. 337~342.

(10-9) To., W. M., Lin, R. M., and Ewins, D. J., 1990, "A Criterion for the Localization of Structural Modification Sites Using Modal Data," IMAC 8th, pp. 961~967.

(10-10) Liangping, S., Jun, D., and Debao, L., 1992, "Modal Analysis and Structural Dynamic Modification of a Parcel Sorting Machine Frame," IMAC 10th, pp. 1173~1178.

(10-11) Hemez, F. M., and Farhat, C., 1994, "An Energy Based Optimum Sensor Placement Criterion and its Application to Structures Damage Detection," IMAC 12th, pp. 1568~1575.

Problem 11

11. 구조변경 / 구조변수규명

(11-1) Gordis, J. H., 1995, "An Exact Formulation For Structural Dynamic Model Error Localization," The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis, Vol. 10, No. 1, pp. 19~33.

(11-2) Gordis, J. H., 1997, "Artificial Boundary Conditions for Model Updating and Damage Detection," IMAC 16th, pp. 1256~1262.

(11-3) Zimmerman, D. C., Simmermacher, T., and Kaouk, M., 1995, "Structural Damage Detection Using Frequency Response Functions,"

IMAC 13th, pp. 179~184.

(11-4) Tranxuan, D., He, J., and Choudhury, R., 1997, "Damage Detection of Truss Structures Using Measured Frequency Function Data," IMAC 15th, pp. 961~257.

(11-5) Silva, J. M. M., Maia, N. M. M., Sampaio, R. P. C., and Ribeiro, A. M. R., 1998, "Can We Identify Cracks By Considering Them As Structural Components?" IMAC 16th, pp. 1338~1345.

(11-6) He, J., and Li, Y. Q., 1995, "Relocation of Anti-Resonances of a Vibratory System by Local Structures Changes," The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis, Vol. 10, No. 4, pp. 224~235.

(11-7) Li, Y., He, J., and Lieonart, G., 1993, "Relocation of Responses and Anti-Responses Via Local Structural Modification," ASIA-PACIFIC VIBRATION CONFERENCE '93, pp. 1300~1306.

(11-8) Silva, J. M. M., Maia, N. M. M., and Ribeiro, A. M. R., 1997, "Some Applications of Coupling/Uncoupling Techniques In Structural Dynamics," IMAC 15th, pp. 1431~1439.

(11-9) Jones, D. I. G., and Muszynska, A., 1988, "Structural Modification of Advanced Turbomachine Blading by Dynamic Stiffness Matrix Operations," Trans. of the ASME, Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design, Vol. 110, pp. 450~455.

(11-10) Jingshuo, Z., Jin, Q., and Zongfang, T., 1987 "Structures Dynamics Modification Using Transfer Functions," IMAC 5th, pp. 944~949.

(11-11) Wangming, L., and Qixiang, Y., 1997, "Applying A Combined Substructure-Transfer Matrix Method to the Optimization Isolation System," IMAC 15th, pp. 1476~1482.

(11-12) Tanaka, N., and Kikushima, Y., 1989, "On the Hybrid Vibration Isolation Method," Trans. Of the ASME, Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design, Vol. 111, pp. 61~70.

(11-13) Maia, N. M. M., Silva, J. M., Ribeiro, A. M., and Silva, P. L., 1998, "On the Dynamic Characterization of Joints Using Uncoupling Techniques," IMAC 16th, pp. 1132~1138.

(11-14) Hwang, H. Y., 1998, "Identification Techniques of Structure Connection Parameters Using Frequency Response Functions," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 212, No. 3, pp. 469~479.

(11-15) Chang, K. J., and Park, Y. P., 1998, "Substructure Model Updating Techniques Using Component Receptance Sensitivity (CRS)," *IMAC 16th*, pp. 1668~1674.

(11-16) Wang, J. H., and Liou, C. M., 1991, "Experimental Identification of Mechanical Joint Parameters," *Trans. of the ASME, Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 113, pp. 28~36.

(11-17) Pandit, S. M., Yao, Y. X., and Hu, Z. Q., 1994, "Dynamic Properties of the Rigid Body and Supports from Vibration Measurements," *Trans. Of the ASME, Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 116, pp. 269~274.

(11-18) Wang, B. P., Kitis, L., Pilkey, W. D., and Palazzolo, A., 1985, "Synthesis of Dynamic Vibration Absorbers," *Trans. Of the ASME, Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design*, Vol. 107, pp. 161~166.

(11-19) Kwak, B. M., and Arora, J. S., 1975, "Optimum Design of Damped Vibration Absorbers Over a Finite Frequency Range," *AIAA Journal*, Vol. 13, No. 4, pp. 540~542.

(11-20) Caravani, P., and Thomson, W. T., 1974, "Identification of Damping Coefficients in Multidimensional Linear Systems," *Trans. Of the ASME, Journal of Applied Mechanics*, pp. 379~382.

(11-21) Lee, J. K., and Park, Y. -s., 1994, "Response Selection and Dynamic Damper Application to Improve the Identification of Multiple Input Forces of Narrow Frequency Band," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 8, No. 6, pp. 649~664.

(11-22) Soom, A., and Lee, M. S., 1983, "Optimal Design of Linear and Nonlinear Vibration Absorbers for Damped Systems," *Trans. Of the ASME, Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design*, Vol. 105, pp. 112~119.

(11-23) Ebrahim, N. D., 1987 "On Optimum Design of Vibration Absorbers," *Trans. of the ASME, Journal of Vibration, Acoustics, Stress,*

and Reliability in Design, Vol. 109, pp. 214~215.

(11-24) Ashory, M. R., 1998, "Correction of Mass-Loading Effects of Transducers and Suspension Effects in Modal Testing," *IMAC 16th*, pp. 815~828.

Problem 12

12.1 국부 구조변경

(12-1-1) Yee, E. K. L., and Tsuei, T. H., 1991, "Method for shifting Natural Frequencies of Damped Mechanical Systems," *AIAA Journal*, Vol. 29, No. 11, pp. 1973~1977.

(12-1-2) Tsuei, Y. G., and Yee, E. K. L., 1989, "A Method for Modifying Dynamic Properties of Undamped Mechanical Systems," *Trans. of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 111, pp. 403~408.

(12-1-3) Li, T., and He, J., 1987, "Optimization of Dynamic Characteristics of a MDOF Systems by Mass and Stiffness Modification," *IMAC 15th*, pp. 1270~1276

12.2 모드-힘 방법 (Modal Force Method)

(12-2-1) Park, Y. H. and Park, Y. -s., 2000, "Structural Modification Based on Measured Frequency Response Functions: Exact Eigen Properties Reallocation," *Journal of Sound and Vibration*, in Revision.

Problem 13

13. Kron's Method/Energy Method Using FRF

(13-1) Simpson, A., and Tabarrok, B., 1968, "On Kron's Eigenvalue Procedure and Related Methods of Frequency Analysis," *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, Vol. XXI, pp. 1~39.

(13-2) Simpson, A., 1973, "Eigenvalue and Vector Sensitivity in Kron's Method," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 31, No. 1, pp. 73~87.

(13-3) Park, Y. H., 1999, "Structure Optimization to Enhance Its Natural Frequencies Based on Measured Frequency Response Functions," *Journal of Sound and Vibration*, in Printing.

(13-4) 박용화, 1999, "주파수 응답 함수 결함을 이용한 최적 구조 변경법 및 응용," 한국과학기술원 기계공학과 박사학위논문.