

일반화 자유경계 모드감도법을 이용한 차체구조물의 모델개선

장 경 진* · 박 영 필**

(1999년 3월 4일 접수)

Model Updating of a Car Body Structure Using a Generalized Free-Interface Mode Sensitivity Method

Kyoung-Jin Chang and Young-Pil Park

Key Words: Model Updating(모델개선), Component Mode Synthesis(구분모드합성), Free-Interface Method(자유경계법), Modal Sensitivity(모드감도)

Abstract

It is necessary to develop an efficient analysis method to identify the dynamic characteristics of a large mechanical structure and update its finite element model. That is because these processes need the huge computation of a large structure and iterative estimation due to the use of the first-order sensitivity. To efficiently carry out these processes, a new method, called the generalized free-interface mode sensitivity method, has been proposed in the authors' preceeding paper. This method is based on substructuring approach such as a free-interface method and a generalized synthesis algorithm. In this paper, the proposed method is applied to the model updating of a car body structure to verify its accuracy and reliability for a large mechanical structure.

1. 서론

기계 구조물의 동적인 특성을 파악하고 진동 현상 등을 이해하는 데 있어 유한요소해석 방법은 효율적인 접근 방법으로 이용될 수 있다. 이때, 실제 구조물의 정확한 유한요소모델을 확보하는 것이 필요한데, 이를 위해서는 구조물 동특성의 감도(sensitivity)를 계산한 후, 실험모델을 목표로 하여 유한요소모델의 개선변수(update parameter)를 추정하는 모델개선(model updating) 과정을 수행하여야 한다.^(1,2) 이 때, 동특성의 감

도로서는 모드 변수(modal parameter)의 감도^(3~5)와 함께 주파수응답 함수(frequency response function, FRF)의 감도^(6,7)가 많이 사용되고 있다. 모드 변수의 감도를 사용하면, 모드해석 과정을 거쳐야 하므로 해석시간이 더 오래 걸릴 수 있고, 실험데이터를 이용한 모드 변수 추정의 근사가 혼입된다는 단점도 있으나, 주파수응답 함수의 감도를 이용하는 경우에 생기는 비단조적 특성(non-monotonous character)이 없어서 변수 추정시 발산 가능성이 보다 적고, 주파수응답 함수의 감도를 이용할 때처럼 많은 주파수 점의 데이터를 사용할 필요가 없어 감도의 역행렬 계산의 크기가 보다 작아지는 등의 장점을 갖고 있다.^(5~7) 따라서, 본 논문에서는 주파수응답 함수의 감도가 아닌 모드 변수의 감도를 사용하는 방법에 초점을 맞추고자 한다. 한편, 감도해석 방법을 이용한 모델개선 과정에 있어 중요한 것은, 동특성의 감도를 효율적으로 계산할 수 있는 기술의 개

* 회원, 현대자동차(주) 남양연구소

** 회원, 연세대학교 기계공학과

E-mail : park2814@bubble.yonsei.ac.kr

TEL : (02)361-2814 FAX : (02)364-6769

발이다. 이것은, 일반적으로 개선변수에 대한 동특성의 감도가 비선형적임에도 불구하고, 계산의 효율성을 위해 1차 감도(1st-order sensitivity)가 주로 사용되기 때문에 반복적인 변수 추정이 불가피 하기 때문이다.⁽⁸⁾ 특히, 자동차와 같은 비교적 대형의 구조물을 대상으로 하는 경우에는, 방대한 계산을 피하기 위하여 효율적인 감도해석 방법을 개발하는 것이 더욱 필요하다고 할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 제안된 동특성 해석방법이 부분구조 합성법(substructure synthesis method)으로서, 이 방법을 사용하면, 대형구조물을 여러 분계(component)로 나누어 해석한 후 다시 합성함으로써, 전체적인 해석의 크기를 대폭 줄일 수 있고, 아울러 연속적인 설계변경이 있을 때에 이전에 계산된 분계 정보를 이용함으로써 계산의 효율성을 높일 수 있다.^(9,10) 저자의 지난 논문에서, 전체의 감도를 한꺼번에 계산한 후 변수를 추정하는 기존의 감도해석 방법은 많은 계산용량 및 계산시간을 요구하므로 비효율적인데 비해, 모드합성법을 감도해석에 적용하여 새로 제안한 일반화 자유경계 모드감도(generalized free-interface mode synthesis, GFIMS) 방법은 변경이 행해지지 않는 분계에 대한 불필요한 반복계산을 피할 수 있어 계산효율이 높다는 것을 확인하였다.⁽¹¹⁾ 아울러, 간단한 판구조물에 대하여 이 일반화 자유경계 모드감도 방법이 고정경계법(fixed-interface method)에 기초한 모드감도 방법에 비해서도 정확성이 높다는 것을 확인한 바 있다. 본 논문에서는 그 우수성이 입증된 일반화 자유경계 모드감도 방법을 차체 구조물의 모델개선에 적용함으로써, 본 방법이 대형 구조물에도 효율적으로 적용될 수 있음을 검증하여 보고자 한다.

2. 일반화 자유경계 모드감도 방법의 이론⁽¹¹⁾

자유경계법(free-interface method)에 기초하는 모드합성 이론을 감도해석에 적용하여 개발한 일반화 자유경계 모드감도 방법의 이론은 저자의 지난 논문⁽¹¹⁾에 상세히 서술되어 있으며, 본 절에서는 그 결과 식만을 간단히 서술하고자 한다. 본 방법은 각 분계에서 저차주파수대역에 해당하는 고유치 및 고유벡터의 감도와 이로부터 계산된

잉여 부가 모드(residual attachment modes)의 감도를 이용하여, 전체의 모드 질량 및 모드 강성행렬의 감도를 구하고, 이를 기존의 고유치 및 고유벡터 감도식에 대입함으로써 전체의 고유치 및 고유벡터의 감도를 구하는 방법으로서, Fig. 1에 본 방법을 이용한 모델개선의 이론 전개 과정을 간략히 도시하였다. 먼저, 전체구조물이 N_c 개의 분계로 구성되어 있고, 그 중 분계 j 에만 유한요소모델의 입력변수에 오차가 있다고 가정한다. 이때, 1차 근사⁽¹⁰⁾에 기초하는 일반화 합성법(generalized synthesis method)의 최종적인 합성식에 포함된 전체의 모드 질량행렬과 모드 강성행렬을 분계 j 의 개선변수 P 로 미분하면, 다음과 같이 합성된 전체의 모드 질량 및 모드 강성행렬의 감도를 구할 수 있다.

$$\frac{\partial[\bar{M}]}{\partial P} = \frac{\partial[\bar{I}]}{\partial P} = [0] \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial[\bar{K}]}{\partial P} &= \frac{\partial[\bar{A}_L]}{\partial P} + \frac{\partial[\bar{\Phi}_{BL}]^T}{\partial P} \\ &[A][\hat{h}][A]^T[\bar{\Phi}_{BL}] + [\bar{\Phi}_{BL}]^T[A] \\ \frac{\partial[\hat{h}]}{\partial P} &[A]^T[\bar{\Phi}_{BL}] + [\bar{\Phi}_{BL}]^T[A] \\ &[\hat{h}][A]^T \frac{\partial[\bar{\Phi}_{BL}]}{\partial P} \end{aligned} \tag{2}$$

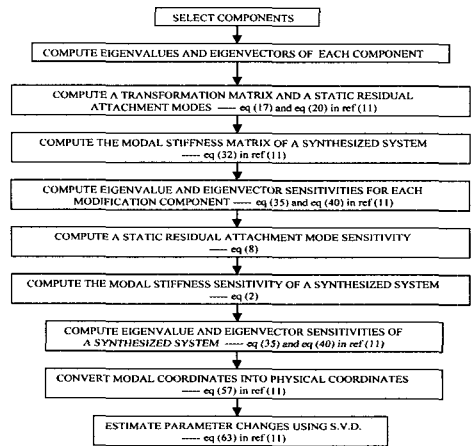


Fig. 1 Flow chart of a model updating theory

여기서,

$$\frac{\partial [\overline{\Lambda}_L]}{\partial P} = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \frac{\partial \lambda_L^j}{\partial P} & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\frac{\partial [\overline{\Phi}_{BL}]}{\partial P} = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \frac{\partial \Phi_{BL}^j}{\partial P} & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\frac{\partial [\overline{\Psi}_B]}{\partial P} = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \frac{\partial \Psi_B^j}{\partial P} & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$[\hat{h}] = ([A]^T [\overline{\Psi}_B] [A])^{-1} \quad (6)$$

$$\frac{\partial [\hat{h}]}{\partial P} = -[\hat{h}] \left([A]^T \frac{\partial [\overline{\Psi}_B]}{\partial P} [A] \right) [\hat{h}] \quad (7)$$

위 식들에서 $[\overline{\Psi}_B]$ 는, 결합영역에서의 정적 잉여 부가 모드 성분을 전체 분계에 대하여 조합한 값이고, $[\overline{\Lambda}_L]$ 는 각 분계에서 채용한 저차 모드의 고유치를 순차적으로 조합한 고유치 행렬이며, $[\overline{\Phi}_{BL}]$ 는 각 분계에서 채용한 저차모드의 고유벡터를 결합영역의 성분에 대하여 순차적으로 조합한 고유벡터 행렬이다. 또한, $[A]$ 는 일반화 합성 이론으로부터 유도되는 값으로서 각 분계의 기하학적인 결합형상에 따라 결정되는 변환행렬이다. 식 (3)~(5)는 해당하는 j 번째 변경분계의 위치에 각기 고유치, 고유벡터 및 정적 잉여 부가 모드의 감도를 계산하여 대입하고, 나머지 변경이 행해지지 않는 분계에는 0을 대입함으로써 얻을 수 있다. 이때, 식 (3) 및 식 (4)에 나오는 분계 j 의 설계변수에 대한 저차모드 고유치 감도행렬 및 결합영역에서의 고유벡터 감도행렬, 즉 $\frac{\partial [\lambda_L^j]}{\partial P}$, $\frac{\partial [\Phi_{BL}^j]}{\partial P}$ 은 기존의 고유치 및 고유벡터의 감도식을 변경분계 j 에 적용하여 구할 수 있다. 아울러 분계 j 의 설계변수에 대한 정적 잉여 부가 모드 감도의 결합영역에 해당

하는 행렬 $\frac{\partial [\widehat{\Psi}_B]}{\partial P}$ 은 일련의 과정을 거쳐서 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial [\widehat{\Psi}_B]}{\partial P} &= \frac{\partial [\widehat{G}_{Bs}^j]}{\partial P} [\beta] - \frac{\partial [\Phi_{Ble}^j]}{\partial P} [\lambda_{le}^j]^{-1} \\ &= [\Phi_{le}^j]^T [\beta] - [\Phi_{Ble}^j] \frac{\partial [\lambda_{le}^j]^{-1}}{\partial P} [\Phi_{le}^j]^T [\beta] \\ &\quad - [\Phi_{Ble}^j] [\lambda_{le}^j]^{-1} \frac{\partial [\Phi_{le}^j]^T}{\partial P} [\beta] \end{aligned} \quad (8)$$

여기서,

$$\frac{\partial [\lambda_{le}^j]^{-1}}{\partial P} = -[\lambda_{le}^j]^{-1} \frac{\partial [\lambda_{le}^j]}{\partial P} [\lambda_{le}^j]^{-1} \quad (9)$$

식 (8)에서, $[\beta]$ 는 결합영역의 좌표에서 전체 영역의 좌표로의 변환행렬이고, $\frac{\partial [\widehat{G}_{Bs}^j]}{\partial P}$ 은 j 번째 변경분계의 결합영역에서 정적 잉여 연성 행렬을 설계변수로 미분한 값으로서, 경계조건에 따라 다음과 같이 달리 유도할 수 있다. 먼저, 분계가 어딘가에 구속이 되어 강체모드가 없는 경우에는

$$\frac{\partial [\widehat{G}_{Bs}^j]}{\partial P} = -[K_B^j]^{-1} \frac{\partial [K^j]}{\partial P} [K^j]^{-1} \quad (10)$$

이고, 분계가 자유상태로서 강체모드가 존재하는 경우에는

$$\begin{aligned} \frac{\partial [\widehat{G}_{Bs}^j]}{\partial P} &= \frac{\partial [S_B^j]^T}{\partial P} [G_c^j] [S^j] + \\ &= [S_B^j]^T \frac{\partial [G_c^j]}{\partial P} [S^j] + [S_B^j]^T [G_c^j] \frac{\partial [S^j]}{\partial P} \end{aligned} \quad (11)$$

이며, $[G_c^j]$ 는 j 번째 변경분계에 대하여 임의의 정적구속으로 구한 정적 잉여 연성행렬을 나타낸다. 식 (11)의 $[S_B^j]$ 는 $[S^j]$ 의 결합영역에서의 성분으로서, 이 때

$$[S^j] = [I] - [M^j][\Phi_r^j][\Phi_r^j]^T \quad (12)$$

이고,

$$\begin{aligned} \frac{\partial [S_B^j]^T}{\partial P} = & - \frac{\partial [M^j]}{\partial P} [\Phi_r^j][\Phi_r^j]^T \\ & - [M^j] \frac{\partial [\Phi_r^j]}{\partial P} [\Phi_r^j]^T - [M^j][\Phi_r^j] \frac{\partial [\Phi_r^j]^T}{\partial P} \end{aligned} \quad (13)$$

이다. 위 식에서 $[\Phi_r^j]$ 은 j 번째 변경분계의 강체모드행렬을 나타낸다.

한편, 변경분계가 다수인 경우, 즉 설계변수가 j 번째 분계에만 있는 것이 아니라, 다수의 분계에 존재하는 경우에는 식 (3)~(5)의 행렬 안에 들어가는 분계감도를 모든 변경분계에 대하여 계산한 후, 식 (3)~(5)의 식에 순차적으로 대입하면, 위와 동일한 절차를 적용하여 다수의 변경분계에 대한 모드 질량 및 모드 강성행렬의 감도를 합성할 수 있다. 본 방법은 전체의 모드 질량 및 모드 강성행렬의 감도가 모드합성에서와 같이 채용모드 수에 해당하는 크기로 축소되므로, 최종적으로 전체 고유치 및 고유벡터의 감도를 계산할 때 이를 이용하여 축소된 크기의 행렬계산을 수행하게 되므로, 전체 감도해석을 효율적으로 수행할 수 있다.

3. 차체의 실험 및 유한요소해석

본 절에서는 모델개선에 앞서 실험모델과 초기 유한요소모델을 얻기 위하여 각기 실험모드해석 및 유한요소해석을 수행하였다.

3.1 BIW의 실험모델

모델개선을 위한 목표모델을 얻기 위하여, 먼저 차체 BIW(body-in-white)를 대상으로 임팩트해머(impact hammer)로 가진하고 단축 가속도계(accelerometer) 3개로 응답을 측정하는 모드실험(modal testing)을 수행하였다. 이때 가진점은 좌우 대칭으로 183점을 선정한 상태에서 각 지점마다 3축 방향 중 가장 적절한 방향을 택하여 가인을 하고, 응답점은 우측 뒷좌석근처의 한 지점을 선정한 후 3방향 모두의 응답을 받아 총 549개의 주파수응답 함수를 갖고 모드해석을 수행하였다. Fig. 2에는 BIW의 형상 및 모드실험장치를 도시하였고, Fig. 3에는 모드실험시 임팩트해머로 가인한 가진점들과 측정점을 표시하였다.

3.2 BIW의 유한요소모델

BIW의 설계자료를 토대로 ANSYS rev5.3 소프트웨어를 사용하여 유한요소모델링을 수행하였다. BIW는 연강을 소재로 하고 있고 차체에서 감쇠효과가 큰 내장재나 기계장치들이 제외된 구

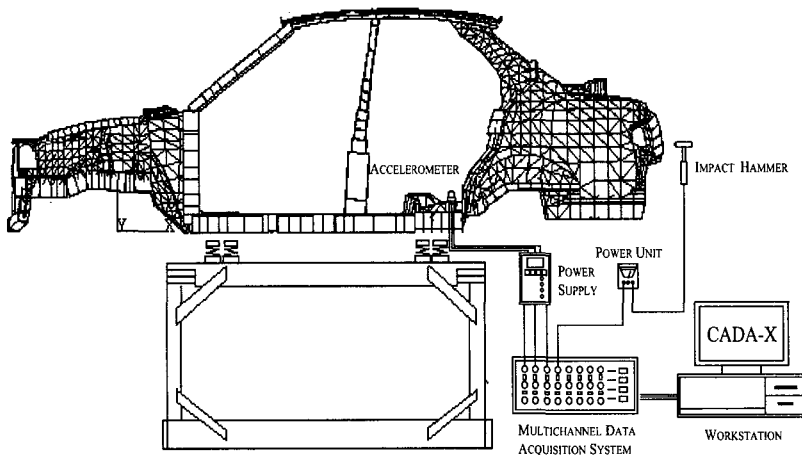


Fig. 2 Schematic view of the experimental set-up

조물이기 때문에, 본 연구에서는 비감쇠로 모델링하였다. BIW에서 윈드실드필라(windshield pillar)나 센터필라(center pillar), 로커패널(locker panel), 루프레일(roof rail)등 높은 강성을 필요로 하는 부분들은 여러 개의 판재를 덧붙여서 만든 박판보(thin-walled beam)들로 이루어져 있다.⁽¹²⁾ 이런 박판보들은 단면형상이 복잡하고 많은 판재가 들어가 있기 때문에 이들과 전부 쉘 요소(shell element)를 사용하여 모델링하는 것은, 결국 전체 자유도를 증가시켜서 모델링 및 해석시 많은 비용과 시간을 소요하게 만든다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 부분을 쉘 요소 보다 적은 자유도를 갖는 보 요소(beam element)로 모델링함으로써 모델링 및 해석의 효율을 높이고자 하였다. 그리하여, 이러한 부분들을 높이, 폭 및 두께에 의해 그 단면이 결정되는 박스보(box beam)형태로 모델링하였다. Fig. 4에는 쉘 요소 및 보 요소로 모델링한 유한요소모델의 전체 형상을 나타내었다.

3.3 실험 및 유한요소 해석결과

3.1절의 모드실험과 모드 변수 추정(modal parameter estimation)을 수행한 후, 70Hz이내의 저주파수대역만을 대상으로 탄성모드에 대한 고유진동수 및 모드형상을 Table 1에 나타내었다. 아울러, 3.2절의 유한요소모델에 대하여 모드해석을 수행한 후, 역시 저주파수대역의 탄성모드에 대한 고유진동수 및 모드형상을 Table 2에 나타내었다. 또한, Fig. 5에는 유한요소모드형상과 실험 모드형상을 비교한 MAC(mode assurance criterion) 값을 도시하였다. 유한요소모델의 모드형상을 보면, 먼저 1차 모드는 1차 비틀림(1st torsion) 형상, 2차 모드는 1차 굽힘(1st bending) 형상, 3차 모드는 2차 굽힘(2nd bending) 형상으로서, 각기 실험모드해석의 1차, 3차, 4차에서 나타난 모드들과 같은 것으로 나타났는데, 이들 3개 모드들은 저주파수대역에서 차체의 진동에 가장 큰 영향을 미치는 주요모드(principal modes)들이라 할 수 있다. 이외에 유한요소모델의 4차 모드는 2차 비틀림 형상이었고, 5차 모드는 차체의 앞부분의 굽힘(front body bending) 형상이었으며, 6차 모드는 차체 뒤쪽 플루어의 굽힘(rear floor bending) 형상이었고, 7차 모드는 루프의 굽힘(roof bending) 형상, 8차 모드는 뒷좌석 선반위치에 해

당하는 튜립 부분의 굽힘(tulip area bending) 형상이었다. 이들 유한요소모델의 모드형상을 실험모드형상과 비교하면, 저차의 3개 주요모드들은 비교적 잘 맞지만 이외에 일부 모드는 순서가 바뀌거나 누락이 되기도 하였는데, 이는 모델링 오차 및 실험 오차 등에 기인할 것으로 추측된다. 여기서, 3개 주요모드만을 비교하면, 고유진동수의 상대오차는 각기 22.2%, 5.6%, 4.28%였고, MAC값은 각기 0.90, 0.80, 0.64였다. 일반적으로 모델개선의 목표로서 광범위한 주파수대역의 많은 모드를 모두 선택하는 것은 현실적으로 어려움이 많다. 따라서, 본 연구에서는 다음 장에서 수행될 모델개선의 목표로서, 저주파수대역에서 차체의 진동에 가장 큰 영향을 미치는 3개 주요모드 즉, 1차 비틀림, 1차 굽힘 및 2차 굽힘 모드들만을 대상으로 삼고자 한다.

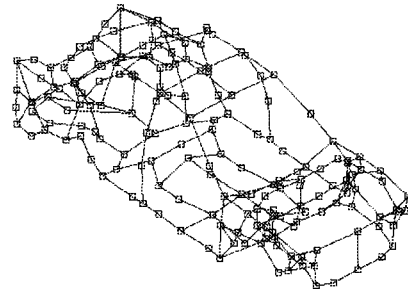


Fig. 3 Measuring points for the modal testing of a BIW

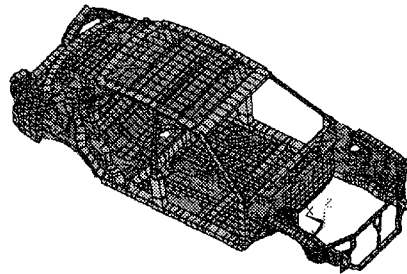


Fig. 4 Finite-element model of a BIW

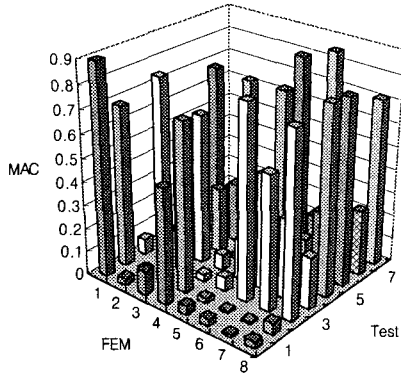


Fig. 5 MAC comparison between the initial FE and the test model

Table 1 Natural frequencies obtained from the modal testing of a BIW (unit: Hz)

Elastic mode	Natural frequency	Modeshape
1	27.24	1st torsion
2	29.99	1st torsion + B-pillar bending
3	42.33	1st bending
4	49.30	2nd bending
5	52.20	rear end bending
6	55.37	rear floor bending
7	59.37	roof + floor bending
8	65.48	roof + tulip area bending

Table 2 Natural frequencies obtained from the initial FE model of a BIW (unit: Hz)

Elastic mode	Natural frequency	Modeshape
1	33.29	1st torsion
2	39.95	1st bending
3	47.19	2nd bending
4	47.47	2nd torsion
5	56.30	front body bending
6	62.43	rear floor bending
7	64.19	roof bending
8	68.06	tulip area bending

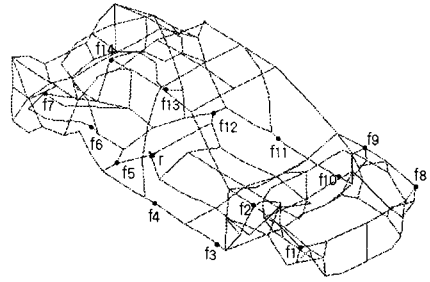


Fig. 6 Measuring points of the modevectors for model updating

4. 차체의 모델개선

본 연구에서는 비교적 크기가 대형인 구조물의 모델개선에 일반화 자유계계 모드감도(generalized free-interface mode sensitivity, GFIMS) 방법이 효율적으로 적용될 수 있는 지를 검증하기 위해 차체 구조물의 모델개선에 본 방법을 적용하여 보았다.

4.1 개선변수 및 목적변수의 선정

3.2절의 초기 유한요소모델은 여러 개의 판재로 구성된 박판부재들을 등가단면의 보 요소로 모델링하는 과정에서 적지 않은 오차가 포함되었을 것으로 추측된다. 따라서, 본 절에서는 이들 보 요소 중 관심 있는 저차의 주요모드가 가장 큰 영향을 미치는 보 요소를 먼저 선정환 후, 선정된 요소들을 개선변수로 하여 모델개선을 수행함으로써 실험모델에 보다 가까운 유한요소모델을 확보하고자 하였다. 이때, 초기 유한요소모델과 목표로 하는 실험모델사이에 비교하고자 하는 동적 특성, 즉 목적변수(object variable)로는 저차 주요모드인 1차 비틀림, 1차 굽힘 및 2차 굽힘모드의 고유진동수 및 고유벡터로 선정하였고, 아울러, 목적변수로 사용한 고유벡터의 측정점은, Fig. 6에 나타난 것과 같이 해당 모드들의 형상이 가장 잘 나타날 수 있는 위치들로 선정하였다. 여기서, r 은 임팩트해머로 가진하는 모드실험에 사용된 응답점을 표시하고, 좌우대칭인 $f_1 \sim f_{14}$ 는 가진점으로서 모델개선에 사용한 14개의 고유벡터 측정점을 나타낸다. 한편, 모델

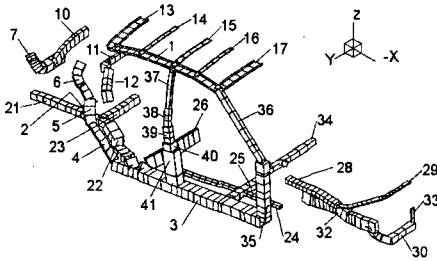
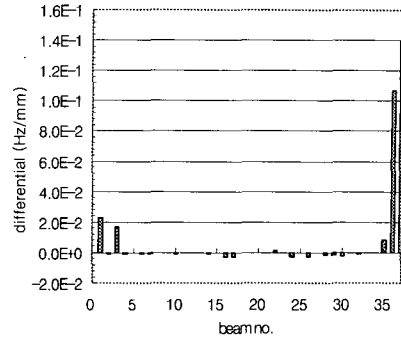
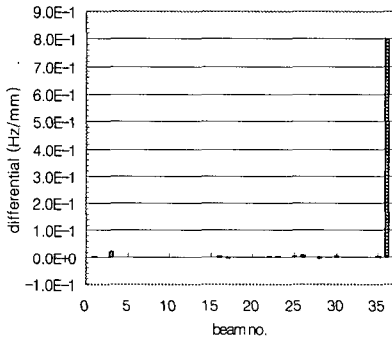


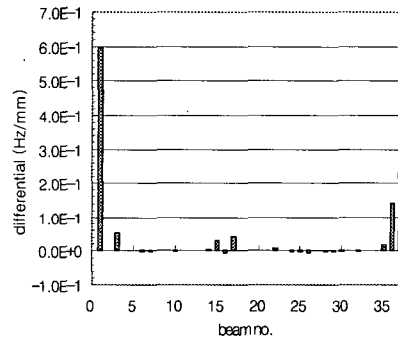
Fig. 7 Beam types used in the FE model



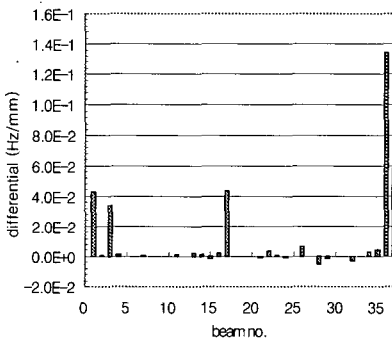
(a) Height



(a) Height



(b) Width



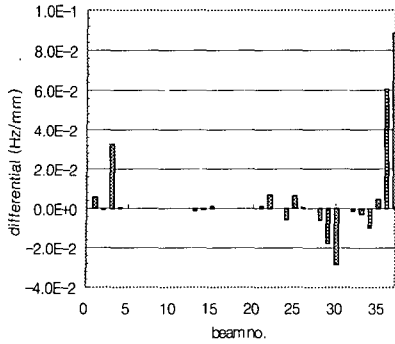
(b) Width

Fig. 9 The 2nd natural frequency sensitivity w.r.t the sectional property of each beam

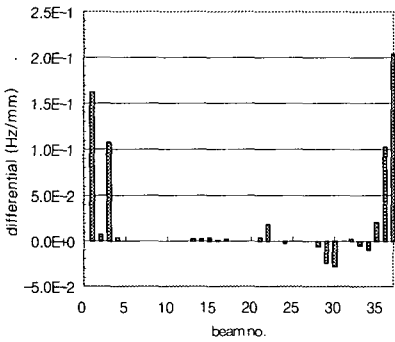
Fig. 8 The 1st natural frequency sensitivity w.r.t the sectional property of each beam

개선에 앞서 개선변수로 사용할 보 요소를 먼저 선정하기 위해, 유한요소모델에 사용된 모든 보 요소를 대상으로 단면 형상치에 대한 주요모드 고유진동수의 감도를 계산하고 이 중 가장 감

도가 큰, 즉 주요모드에 대한 영향이 가장 큰, 보 요소 4 종류를 개선변수로 선정하였다. 이때, 박스보의 두께에는 모델링 오차가 거의 없을 것으로 판단이 되어, 개선변수로 사용할 박스보의 단면치수로는 보의 높이 및 폭만을 선택하였다. Fig. 7에는 BIW의 유한요소모델에 사용된 모든 보 요소 종류의 번호를 표시하였고, Fig. 8~10에는 이들 각 보 요소의 높이 및 폭에 대한 3개 주요모드의 고유진동수 감도를 각기 도시하였다. 이들 감도는 각 단면치수의 초기값의 10% 변경에 대한 고유진동수 변경량을 유한차분(finite difference)법으로 계산한 감도이다. 그런데, Fig. 7에는 41개의 보 요소가 표시된 반면, Fig. 8~10에는 37개의 보 요소만 나타나 있는 것을 볼 수 있는데, 이는 37~41번 보 요소는 한 개의 그룹



(a) Height



(b) Width

Fig. 10 The 3rd natural frequency sensitivity w.r.t the sectional property of each beam

으로 간주할 수 있는 센터필라(center pillar)이기 때문에, 37번 보 요소의 감도 계산 시에 37~41번의 보 요소들을 모두 같은 비율로 변경한 상태에서 감도를 구하였기 때문이다. Fig. 8~10을 관찰한 결과, 가장 큰 감도를 나타낸 1번, 17번, 36번 및 37번~41번 보 요소의 단면 높이와 폭을 모델개선 변수로 선정하게 되었다.

4.2 분계의 선정

모델개선을 위해 4.1절의 감도 비교로부터 선정된 개선변수들, 즉 1번 보(좌우루프레일), 17번 보(앞쪽루프레일), 36번 보(윈드실드필라), 37~41번 보(센터필라)를 포함하는 분계를 Fig. 11과 같이 변경분계(modification component)로 선정하고, 이들을 제외한 나머지 차체를 비변경분계(non-modification component)로 선정하였다. 여기

Table 3 Natural frequencies of an initial FE model calculated in CMS (unit: Hz)

Mode	Full FEM	CMS
1	0.43	0.43
2	0.49	0.49
3	0.54	0.54
4	1.87	1.87
5	3.15	3.15
6	3.33	3.33
7	33.29	33.52
8	39.95	40.27
9	47.19	47.43
10	47.47	48.15
11	56.30	56.45
12	62.43	62.69
13	64.19	64.92
14	68.06	69.08
DOFs	19326	60

서, 변경분계에 포함된 4종류의 보 요소의 폭 및 높이인 $P_1 \sim P_8$ 은 8개의 개선변수를 표시한다. 이중 P_7, P_8 은 앞 절에서 설명한대로 37번 보 요소의 단면치수지만, 단면형상이 다섯 단계로 변하는 센터필라의 길이에 따른 단면증가율을 유지시키기 위하여, 모델개선 과정에서는 38~41번 보 요소의 높이 및 폭에도 P_7, P_8 에 각기 일정 비율을 곱한 값을 사용하였다.

4.3 분계의 모드감도계산을 위한 모드합성 결과 일반화 자유경계 모드감도법은 모드합성에 기초한 방법이므로 정확한 모델개선을 위해서는 모드합성의 정확도도 역시 중요하다고 할 수 있다. 따라서, 먼저 변경분계 및 비변경분계의 유한요소데이터를 사용하고 양 분계에서 30개씩의 모드를 채용하여 모드합성을 수행한 후, 그 고유진동수결과(CMS)를 Table 3에서 전계의 유한요소해석결과(full FEM)와 비교하였고, Fig. 12에선 전계의 모드형상과 MAC으로써 비교하였다. Table 3에서 DOFs는 전계 및 합성된 계의 자유도 개수를 나타낸다. 결과를 보면, 모드합성결과가 전계의 결과와 저차 주파수대역에서 잘 맞는 것을 확인할 수 있다. 한편, 모델개선의 대상인 1, 2, 3차

Table 4 Updating parameters estimated in a generalized free-interface mode sensitivity(GFIMS) method
(unit: m)

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
Initial	0.1470	0.0430	0.0940	0.0170	0.0210	0.0510	0.0130	0.0230
Estimated	0.0432	0.0283	0.1925	0.0192	0.0096	0.0499	0.0356	0.0224

탄성모드, 즉 Table 3의 7, 8, 9차 모드에 있어서, 상대오차는 각기 0.7%, 0.8%, 0.5%로서 약간씩 높게 나타났는데, 이는 잉여모드 근사에 따른 모드합성의 불가피한 오차이다. 따라서 다음절의 모델개선 과정에서는, 목표로 하는 실험모델의 고유진동수에 이 차이만큼 증가시킨 값을 실제 목표 고유진동수로 하여 모델개선을 수행하고자 하였다.

4.4 실험데이터를 이용한 모델개선

유한요소모델로부터 일반화 자유경계 모드감도법을 사용하여 고유진동수 및 고유벡터의 감도를 계산하고, 목적변수의 변화량이 수렴할 때까지 개선변수의 변경량을 반복적으로 추정하였다. 이때, 변수 추정을 위한 목적함수는 세 개의 모드의 고유진동수 오차와, 아울러 그 자승평균이 같도록 가중치를 둔 이들 모드의 고유벡터 오차의 합을 사용하였고, 최적화 과정 시에 역행렬 계산은 특이치 분해(singular value decomposition)방법⁽¹¹⁾을 사용하였다. 그런데, 본 연구에서 사용한 유한요소모델은 좌우대칭이므로 유한요소해석을 하면 3개 주요모드들이 대칭(symmetric) 또는 반대칭(anti-symmetric)형상으로 나오게 되는데, 실험모델에서는 그렇지 않을 뿐 아니라 많은 실험잡음이 혼입되어, 실험데이터를 그대로 목표값으로 사용하여서는 모델개선에 실패할 확률이 높다. 따라서, 본 연구에서는 먼저 실험잡음의 영향을 둔화시키기 위하여, 실험모델에서 3개 모드벡터의 14개 측정점에 대하여 실제구조물의 기하학적 좌표를 고려하여 3차 곡선으로 곡선적합(curve fitting)을 수행함으로써 모드벡터를 평활화(smoothing)한 후, 대칭구조인 유한요소모델의 감도를 사용하는 데 따른 안정적 추정을 위하여, 실험모드벡터의 대칭모드는 좌우지점의 평균을 취하고, 반대칭 모드는 좌우지점 절대값의 평균을 취한 값을 실제 모델개선시의 목표값으로 사용하였다. 또한, 일반화 자유경계 모드감도법을

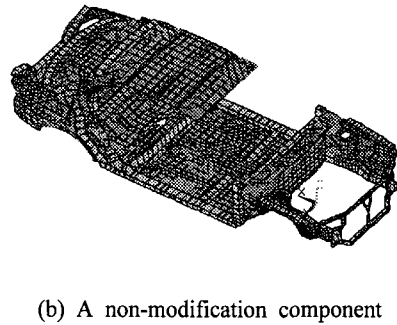
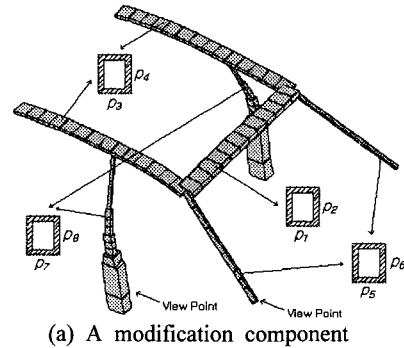


Fig. 11 Substructures and updating parameters of a BIW

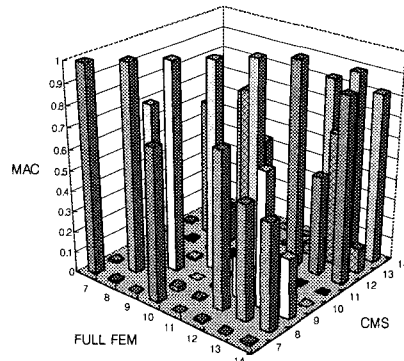
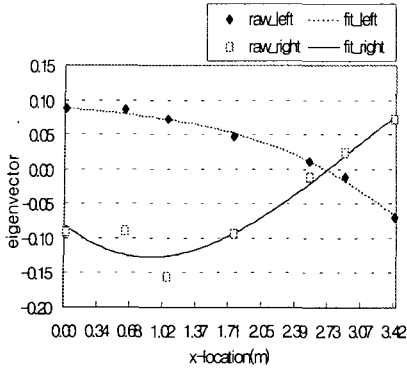
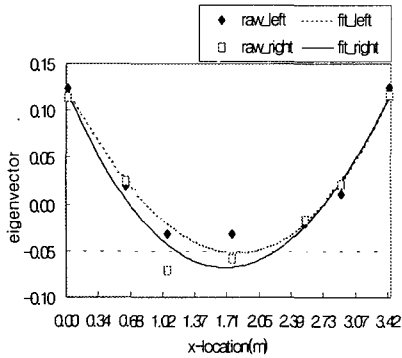


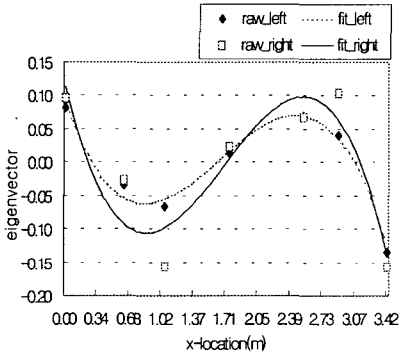
Fig. 12 MAC comparison between the full FE and the CMS results of an initial FE model



(a) The 1st torsion mode



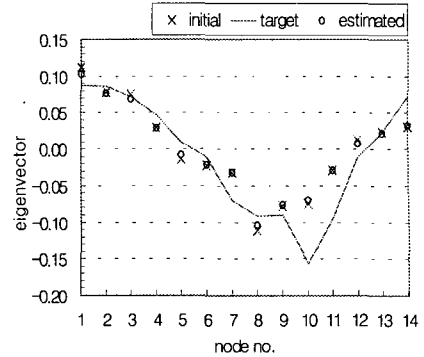
(b) The 1st bending mode



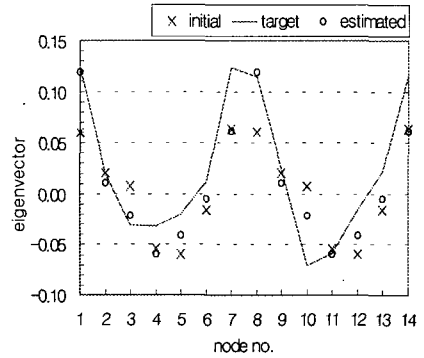
(c) The 2nd bending mode

Fig. 13 Curve-fitted modevectors on the x-axis

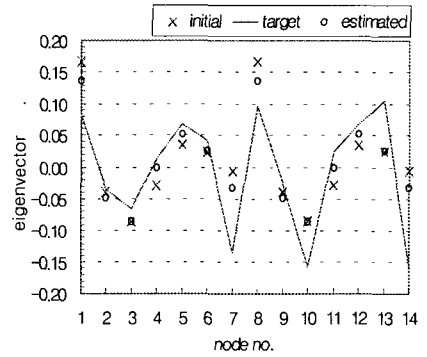
이용한 변수 추정의 정확도를 보다 높이기 위하여, Table 3에 나타난 모드합성의 오차를 실험 모델의 고유진동수에 더한 값을 실제 모델개선의 목표값으로 사용하였고, 각 추정단계마다 추정된 값으로부터 전계의 고유진동수 및 모드벡터를 계산하여 이 값과 목표값과의 차이가 최소가



(a) The 1st twist mode



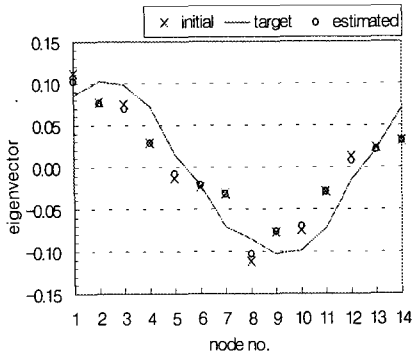
(b) The 1st bending mode



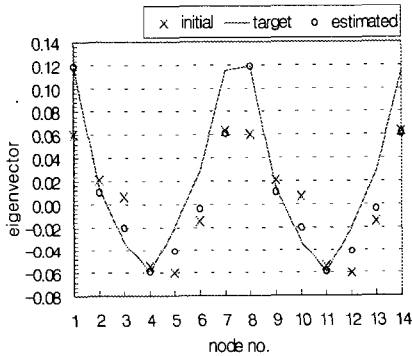
(c) The 2nd bending mode

Fig. 14 Modevector comparison between the initial, the raw target and the estimated values in a generalized free-interface mode sensitivity (GFIMS) method

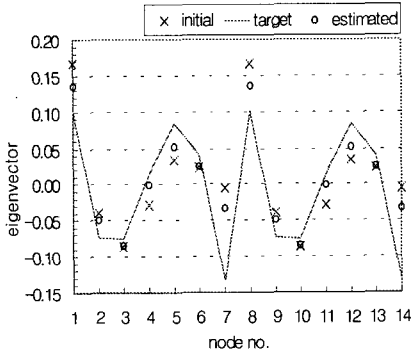
될 때까지 모델개선을 위한 변수 추정을 반복하였다.



(a) The 1st twist mode



(b) The 1st bending mode



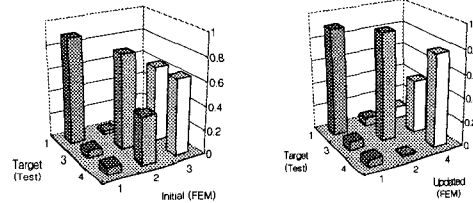
(c) The 2nd bending mode

Fig. 15 Modevector comparison between the initial, the curve-fitted target and the estimated values in a GFIMS method

Fig. 13에는 3개 모드에 대하여, 좌우 7개 측정점의 모드 벡터를 3차 곡선으로 곡선적합한 결과를 원래의 실험데이터와 BIW의 길이방향 좌표축 위에서 비교하였다. 또한, Fig. 14에는 3개의 모

Table 5 Error comparison of the natural frequencies estimated in a GFIMS method(unit: Hz)

	ω_1	ω_2	ω_3	$\ \Delta\omega\ _2$
Initial	33.29	39.95	47.19	6.8835
Target (test data)	27.24	42.33	49.30	0.4633
Modified target (test+assumed errors)	27.47	42.65	49.54	0
Estimated	27.19	42.31	49.27	0.5220



(a) Before model updating (b) After model updating

Fig. 16 MAC comparison of three principal modes between the target test and the FE model

드별로 최종 추정한 모드벡터를 초기모드벡터 및 목표실험모드벡터와 함께 비교하였고, Fig. 15에는 최종 추정한 모드벡터를 초기모드벡터 및 곡선적합한 목표실험모드벡터와 함께 비교하였다. Fig. 16에는 모델개선 전후의 유한요소모델에 대하여 목적변수로 택한 3개 주요모드의 형상을 실험모델과 MAC값으로 비교하여 도시하였다. 결과를 보면, 2차 및 3차 모드의 형상이 모델개선을 통하여 약간 개선된 것을 확인할 수 있다. Table 4에는 개선변수의 초기값 및 최종 추정값을 나타내었고, Table 5에는 목적변수인 각 모드의 고유진동수들과 그 자승평균오차 $\|\Delta\omega\|_2$ 에 대한 초기값, 목표값 및 최종 추정값을 비교하였으며, Table 6에는 목적변수 중 각 모드벡터의 자승평균오차에 대한 초기값, 목표값 및 최종 추정값을 비교하였다. 앞서 설명했듯이, Table 5에서 모델개전시 목표로 하는 3개 모드의 고유진동수에는, Table 3에 나타난 모드합성의 오차, 즉

Table 6 Error comparison of the modevectors estimated in a GFIMS method

	$\ \Delta\Phi_1\ _2$	$\ \Delta\Phi_2\ _2$	$\ \Delta\Phi_3\ _2$	$\ \Delta\Phi\ _2$	$\ \Delta\Phi\ _2^{FIT}$
Initial	0.1298	0.1643	0.2671	0.3394	0.2976
Target	0	0	0	0	0
Estimated	0.1286	0.1123	0.2112	0.2716	0.2195

0.23Hz, 0.32Hz, 0.24Hz를 실험모델의 고유진동수에 각기 더한 값을 사용하였고, 이를 "modified target"이라 표시하였다. Table 6에서 $\|\Delta\Phi_1\|_2$, $\|\Delta\Phi_2\|_2$, $\|\Delta\Phi_3\|_2$ 는 1차부터 3차까지 각 모드벡터에 대한 실험모델과의 자승평균오차를 나타내고, $\|\Delta\Phi\|_2$ 는 3개 모드벡터 전체에 대한 실험모델과의 자승평균오차를 나타내며, $\|\Delta\Phi\|_2^{FIT}$ 는 3개 모드벡터 전체에 대하여 곡선 적합한 실험모델과의 자승평균오차를 나타낸다. 결과를 보면, 추정모델의 고유진동수 및 고유벡터의 오차가 초기모델에 비하여 감소한 것을 확인할 수 있으며, 이는 곧 추정한 유한요소모델이 목표로 한 실험모델에 근접하였음을 의미한다.

5. 결 론

본 논문에서는 대형구조물의 효율적인 모델개선을 위해 개발한 일반화 자유경계 모드감도법을 차체 구조물에 적용함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 일반화 자유경계 모드감도법은 고유치 감도해석과 변경후의 고유치 재해석을 모드영역의 부분구조 합성법의 관점에서 통합적으로 다룬 방법으로서, 자유경계법에 기초하므로 고정경계법에 기초하는 기존의 방법보다 적용이 용이하고 정확하며, 또한, 일반화 합성 알고리즘을 사용하기 때문에 임의의 결합형태를 갖는 다수 분계의 합성에도 효과적으로 적용할 수 있다.

(2) 일반화 자유경계 모드감도법을 이용하여 차체 BIW의 모델개선을 수행한 결과, 3개의 저차 주요모드에 대한 초기 유한요소모델의 고유진동수 및 고유벡터를, 목표로 한 실험모델의 값에 근접시킬 수 있었다.

(3) 본 일반화 자유경계 모드감도법을 차체와

같은 대형구조물의 동특성 해석 및 모델개선에 적용하면, 전체 계를 작게 분할함으로써 고유치, 고유벡터 및 그 감도 계산 시에 작은 크기의 행렬계산을 수행할 수 있고, 또한 실험적 접근이 용이한 자유경계법에 기초하므로 분계별로 유한요소데이터와 실험데이터를 병행하여 사용할 수도 있으며, 아울러, 차체의 일부분만을 연속적으로 설계 변경할 경우, 기존에 계산된 분계의 모드를 재 사용함으로써 효율적인 계산을 수행할 수가 있다.

참고문헌

- (1) Janter, T., 1989, "Construction Oriented Updating of Dynamic Finite Element Models Using Experimental Modal Data," Ph.D. Thesis, U. of Leuven, pp. 30~39.
- (2) Visser, W. J., 1992, "Updating Structural Dynamic Models Using Frequency Response Data," Ph.D. Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, pp. 59~87.
- (3) Fox, R. L. and Kapoor, M. P., 1968, "Rates of Change of Eigenvalues and Eigenvectors," *AIAA Journal*, Vol. 6, No. 12, pp. 2426~2429.
- (4) Nelson, R. B., 1976, "Simplified Calculation of Eigenvector Derivatives," *AIAA Journal*, Vol. 14, No. 9, pp. 1201~1205.
- (5) Wang, B. P., 1991, "Improved Approximate Methods for Computing Eigenvector Derivatives in Structural Dynamics," *AIAA Journal*, Vol. 29, No. 6, pp. 1018~1020.
- (6) Lammens, S., Brughmans, M., Leuridan J., and Sas, P., 1995, "Application of a FRF Based Model Updating Technique for the Validation of Finite Element Models of Components of the

- Automotive Industry," *Society of Automotive Engineers Trans.*, Paper No. 951246, pp. 103~115.
- (7) Chang, K.-J., and Park, Y.-P., 1998, "Substructural Dynamic Modification Using Component Receptance Sensitivity(CRS)," *Journal of Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 12, No. 4, pp. 525~541.
- (8) Brandon, J. A., 1991, "Second-Order Design Sensitivities to Assess the Applicability of Sensitivity Analysis", *AIAA Journal*, Vol. 29, No. 1, pp. 135~139.
- (9) Craig, R. R. Jr. and Chang, C. J., 1976, "Free-Interface Methods of Substructure Coupling for Dynamic Analysis," *AIAA Journal*, Vol. 14, No. 11, pp. 1633~1635.
- (10) Smith, M. J. and Hutton, S. G., 1992, "A General Substructure Synthesis Method for a Free-Interface Component Mode Representation," *Proceedings of the 10th International Modal Analysis Conference*, pp. 900~906.
- (11) 장경진, 송영래, 박영필, 1998, "일반화 자유경계 모드감도법을 이용한 구조물의 동특성변경," *대한기계학회논문집(A)*, 제22권, 제7호, pp. 1216~1228.
- (12) Kamal, M. M. and Wolf, J. A. Jr., 1982, *Modern Automotive Structural Analysis*, Van Nostrand Reinhold Co, pp. 125~147.