유한요소모델개선기법을 이용한 골조구조물의 손상탐지

Damage Detection of a Frame Structure Using Finite Element Model Updating

유 은 종† 김 승 남* 이 현 국** 최 항***
Yu, Eunjong Kim, Seung-Nam Lee, Hyun-Kook Choi, Hang
(논문접수일 : 2009년 6월 16일 ; 심사종료일 : 2009년 8월 19일)

요 지

본 논문에서는 유한요소모델개선기법을 이용하여 골조구조물의 손상탐지를 실시하였다. 유한요소모델개선기법은 계측된 동특성을 모사하는 구조해석모델을 구하는 방법으로서 손상탐지 및 구조건전도감시를 위해 효과적으로 이용될 수 있다. 유한요소모델개선기법에는 다양한 종류의 동특성데이터가 사용될 수 있는데, 본 연구에서는 고유진동수와 모드형상, 주파수응답함수를 사용한 모델 개선식을 유도한 후, 고유진동수와 모드형상, 고유진동수와 주파수응답함수식을 조합한 경우에 대해 실험실 규모의 구조물의 손상위치 및 손상정도를 추정하였다. 구조물은 4층 철골조 구조물로서 진동대를 이용하여 원구조물에 백색잡음 가진실험을 실시한 후 손상의 모사를 위해 1층 부분의 보 부재를 다양한 단면의 부재로 교체하고 동일한 실험을 반복하였다. 보 부재 교체 전·후에 계측된 데이터와 두 종류의 모델개선기법을 각각 적용하여 손상탐지를 실시한 후, 손상위치 및 손상정도에 대한 정확도를 분석하였다. 분석결과 고유진동수+모드형상을 사용한 경우보다 고유진동수+주파수응답함수를 사용한 경우 더욱 정확히 손상을 탐지할 수 있었다.

핵심용어 : 유한요소모델개선기법, 고유진동수, 모드형상, 주파수 응답함수

Abstract

In this paper, damage detection procedure using the finite element model updating was formulated and applied to a small-scale frame structure. FE model updating is the analytical method which finds the mathematical model that generates the measured dynamic properties similarly, and can be effectively used for the damage detection and SHM. For model updating, several kinds of dynamic properties, such as the natural frequencies, mode shapes, and frequency response functions, can be used as the inputs. In this paper, two kinds of model updating procedures using the natrual frequency and the frequency response function, and the natrual frequency and the mode shapes, respectively, were applied to identify the location and the severity of damage of the test structure, which is a four-story two bay steel structure. Results from the damage detection showed that more accurate identification results was obtained when the natrual frequency and the frequency response function were used than when the natrual frequency and the mode shapes were used.

Keywords *: finite element model updating, natural frequency, mode shape, frequency response function*

1. 서 론

지금까지 구조물에 발생한 손상을 탐지하는 방법으로는 주로 정기적인 육안검사나 초음파탐사, X선 투시 등의 비파괴 검사법이 사용되어 왔다. 이러한 방법들은 검사대상인 구조부재를 직접 확인해야 하므로 손상이 발생한 부분의 손상정도를 파악하는데는 효과적이지만 손상부위의 예측이나 전체적인 구조물의 손상정도 파악에는 한계가 있다. 즉, 구조물의 전체적인 건전도를 파악을 위해서는 구조물의 모든 부분에 대한 검사가 필요하여 많은 시간이 소요될 뿐만 아니라 검사를 위해서는 구조체를 둘러싸고 있는 내장재 혹은 외장재를 제거해야 하는 등 매우 번거로운 단점이 있다. 최근에는 이

† 책임저자, 종신회원 · 한양대학교 건축공학과 조교수
Tel: 02-2220-4311 ; Fax: 098-765-4321
E-mail: eunjongyu@hanyang.ac.kr
* 한양대학교 건축환경공학과 석사과정
** GS건설 기술연구소 전임연구원
*** GS건설 기술연구소 수석연구원

• 이 논문에 대한 토론을 2009년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2010년 2월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

러한 단점을 개선할 수 있는 방법으로서 각종 센서를 이용한 진동계측을 통해 구조물의 건전성을 감시하는 기법에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다(Doebling 등, 1996; 1988). 이러한 방법은 지속적인 진동계측을 통해 구조물의 동특성을 분석하여 그 변화를 통해 구조물의 상태변화를 감지하므로 손상발생을 빠르게 파악하고, 이에 대처하는 상태기반 유지관리(condition-based maintenance)가 가능하다는 장점을 가지고 있다(Carden 등, 2004).

이러한 동특성에 기반하는 손상탐지기법은 구조물의 상태변화(즉, 손상)가 동특성을 변화시킨다는 사실에 기초한다. 하지만 단순한 손상의 발생여부 이외에 손상의 발생위치 및 그 정도의 추정을 위해서는 구조계의 변화와 동특성의 변화를 연관시킬 수 있는 해석적인 방법이 필요하다. 유한요소모델개선기법은 계측된 동특성를 모사하는 구조해석모델을 구하는 방법으로서 손상탐지 및 구조건전도감시를 위해 효과적으로 이용될 수 있다(Mordini 등, 2007; Teughels 등, 2002). 즉, 손상 전과 후에 얻은 계측치로부터 동특성을 추출한 다음, 이로부터 유한요소모델개선기법을 사용하여 손상 전후의 동특성을 모사하는 해석모델을 각각 얻은 후, 두 해석모델을 비교하여 손상의 위치 및 손상정도를 추정한다.

유한요소모델개선기법에는 다양한 종류의 동특성데이터가 사용될 수 있는데 구조물식별등을 통해 얻은 고유진동수, 모드형상 등의 모드정보 혹은 구조물에 가해지는 입력과 출력의 주파수영역에서의 비율로 정의되는 주파수응답함수(Frequency Response Function, FRF) 등이 그 예이다(Friswell 등, 1995). 하지만 모델개선에 사용되는 입력의 종류 및 입력에 포함되어 있는 정보의 양에 따라 그 결과의 정확도는 큰 차이를 보인다(Doebling 등, 1996).

본 논문에서는 우선 고유진동수와 모드형상, 주파수응답함수를 이용할 경우의 모델개선식을 유도한 후, 이를 조합한 두 종류의 방법(고유진동수와 모드형상을 사용한 경우와 고유진동수와 주파수응답함수를 사용한 경우)을 각각 사용하여 실험실 규모의 구조물에서 실험을 통해 얻은 계측치로부터 손상 위치 및 손상정도를 구한 후 각 방법에 의한 결과의 정확도를 정해와 비교하였다. 대상구조물은 진동대위에 설치된 4층 철골조의 골조구조물로서 연구방법은 우선 진동대를 이용하여 원구조물에 백색잡음 가진실험을 실시한 후 원구조물의 모델개선을 통해 기본모델(reference model)을 구하였다. 이후 손상의 모사를 위해 1층 부분의 보 부재를 작은 단면의 부재로 교체하고 동일한 실험을 반복하여 얻어진 데이터로부터 손상된 구조물의 해석모델을 구한 후 기본모델과 비교하여 손상위치 및 정도를 구하고 이를 정해 즉, 교체전후 보의 단면2차모멘트의 비와 비교하여 각 방법의 정확도를 파악하였다.

2. 모델개선기법의 정식화

유한요소모델개선기법은 최적화기법을 통해 실험치와 해석모델의 동특성의 차이를 최소화하는 해석모델의 최적파라메터를 구하는 해석적인 방법이다. 본 연구에서 사용한 최적화기법은 뉴턴법을 사용하여 비선형함수인 목적함수를 선형화하고 반복계산을 통해 해를 구하는 방법으로서 기본적으로 민감도행렬과 잔차벡터를 사용하는 비선형최소자승법이다. 본 절에서는 모델개선을 위해 주파수응답함수, 고유진동수, 모드형상을 사용하는 각 경우의 모델개선식 즉, 민감도 행렬과 잔차벡터의 유도과정을 정리하였다.

먼저 주파수응답함수를 사용할 경우 민감도행렬은 다음과 같이 구할 수 있다. 주파수 영역에서 n개의 자유도를 가지는 시스템의 운동방정식은 식 (1)과 같이 표시된다.

$$\mathbf{B}(\omega)\mathbf{x}(\omega)=\mathbf{f}(\omega) \tag{1}$$

여기서, $\mathbf{B}(\omega)=-\omega^2\mathbf{M}+\omega\mathbf{C}+\mathbf{K}$ 는 질량행렬 $\mathbf{M}$, 감쇠행렬 $\mathbf{C}$, 강성행렬 $\mathbf{K}$로부터 계산되는 동적강성행렬이며, $\mathbf{x}(\omega)$는 응답벡터, $\mathbf{f}(\omega)=\mathbf{L}\cdot f(\omega)$는 외력벡터로서 하중함수 $f(\omega)$와 외력에 의해 가진되는 자유도를 나타내는 하중영향벡터 $\mathbf{L}$로부터 구해진다. 만일 이 시스템의 입력치인 $\mathbf{f}(\omega)$와 출력치인 $\mathbf{x}(\omega)$ 대신에 그 비인 전달함수 $\mathbf{H}(\omega)$가 사용된다면 식 (1)은 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{B}(\omega)\mathbf{H}(\omega)=\mathbf{L} \tag{2}$$

식 (2)의 $\mathbf{B}(\omega)$를 개선변수벡터 $\mathbf{p}$(본 연구에서는 각 층별 부재그룹의 휨 강성비)의 함수 $\mathbf{B}(\mathbf{p},\omega)$로 나타내고, 실험에서 구한 전달함수 $\tilde{\mathbf{H}}(\omega)$를 사용할 경우 오차벡터 $\boldsymbol{\epsilon}$는 다음 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 모델개선은 식 (4)와 같이 목적함수인 오차벡터 $\boldsymbol{\epsilon}$의 norm을 최소가 되게 하는 개선변수 $\mathbf{p}$를 구하는 최적화의 문제로 나타낼 수 있다.

$$\boldsymbol{\epsilon}(\mathbf{p},\omega)=\mathbf{L}-\mathbf{B}(\mathbf{p},\omega)\tilde{\mathbf{H}}(\omega) \tag{3}$$

$$\text{Minimize } \|\boldsymbol{\epsilon}\|^2=\|\mathbf{L}-\mathbf{B}(\mathbf{p},\omega)\tilde{\mathbf{H}}(\omega)\|^2 \tag{4}$$

$\mathbf{B}(\mathbf{p},\omega)$는 일반적으로 비선형 함수이므로 식 (5)와 같이 1차항까지 포함하는 테일러 급수를 사용하여 선형화한다.

$$\begin{aligned}\mathbf{B}(\mathbf{p})&=\mathbf{B}(\mathbf{p}_0)+\sum_{i=1}^{k}\Delta p_i\left.\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial p_i}\right|_{\mathbf{p}=\mathbf{p}_0}\\&=\mathbf{B}(\mathbf{p}_0)+\mathbf{B}_{,1}(\mathbf{p}_0)\Delta p_1+\mathbf{B}_{,2}(\mathbf{p}_0)\Delta p_2+\cdots+\mathbf{B}_{,k}(\mathbf{p}_0)\Delta p_k\end{aligned} \tag{5}$$

여기서,

$$\mathbf{B}_{,i}(\mathbf{p}_0) = \left.\frac{\partial \mathbf{B}(\mathbf{p})}{\partial p_i}\right|_{\mathbf{p}=\mathbf{p}_0} \quad (6)$$

는 개선변수에 대한 동적강성행렬의 gradient이다. 이를 식 (4)에 대입한 후 오차벡터의 노옴을 0으로 놓고 정리하면 식 (7)과 같은 최소자승식이 구해진다.

$$\sum_{i=1}^{k} \mathbf{B}_{,i}(\mathbf{p}_0,\omega)\tilde{\mathbf{H}}(\omega)\Delta\mathbf{p}_i = \mathbf{L} - \mathbf{B}(\mathbf{p}_0,\omega)\tilde{\mathbf{H}}(\omega) \quad (7)$$

따라서, 전달함수를 기반으로 할 경우 민감도행렬과 잔차벡터는 다음의 식 (8) 및 (9)와 같다.

$$\mathbf{A}_\mathbf{f} = \sum_{i=1}^{k} \mathbf{B}_{,i}(\mathbf{p}_0,\omega)\tilde{\mathbf{H}}(\omega) \quad (8)$$

$$\mathbf{b}_\mathbf{f} = \mathbf{L} - \mathbf{B}(\mathbf{p}_0,\omega)\tilde{\mathbf{H}}(\omega) \quad (9)$$

고유진동수를 사용할 경우 오차벡터, 민감도행렬 및 잔차벡터는 위와 유사한 방법으로 다음의 식을 구할 수 있다.

$$\mathbf{A}_\mathbf{n} = \sum_{i=1}^{k} \Omega_{,i}(\mathbf{p}_0) \quad (11)$$

$$\mathbf{b}_\mathbf{n} = \left[\tilde{\Omega} - \Omega(\mathbf{p}_0)\right]/\tilde{\Omega} \quad (12)$$

여기서, $\tilde{\Omega}$와 $\Omega(\mathbf{p}_0)$는 각각 실험에서 얻은 고유진동수와 개선 변수 $\mathbf{p}_0$를 통해 얻은 고유진동수 벡터를, 그리고 $\Omega_{,i}(\mathbf{p}_0)$는 $\mathrm{p_i}$ 변수의 고유진동수 민감도를 의미한다.

마찬가지로 모드형상을 이용한 민감도 행렬과 잔차벡터는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mathbf{A}_\phi = \sum_{i=1}^{k} \Phi_{,i}(\mathbf{p}_0) \quad (13)$$

$$\mathbf{b}_\phi = \left[\tilde{\Phi} - \Phi(\mathbf{p}_0)\right]/\tilde{\Phi} \quad (14)$$

여기서, $\tilde{\Phi}$와 $\Phi(\mathrm{p_0})$는 각각 실험에서 얻어진 모드형상과 개선 변수 $\mathbf{p}_0$를 통해 얻은 모드형상을 의미하고, $\Phi_{,i}(\mathbf{p}_0)$는 $\mathrm{p_i}$ 변수의 모드형상 민감도를 나타낸다.

위에서 설명한 최소자승식은 모델개선의 정확도를 높이기 위해 병합할 수 있고(각각 고유진동수와 주파수응답함수, 고유진동수와 모드형상) 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b} \quad (15)$$

여기서, 고유진동수와 주파수 응답함수의 경우에 $\mathbf{A}$와 $\mathbf{b}$는 식 (16)과 같고, 고유진동수와 모드형상을 사용했을 경우에는 식 (17)과 같다.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_\mathbf{n} \\ \mathrm{Re}(\mathbf{A}_\mathbf{f}) \\ \mathrm{Im}(\mathbf{A}_\mathbf{f}) \end{bmatrix},\ \mathbf{b} = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_\mathbf{n} \\ \mathrm{Re}(\mathbf{b}_\mathbf{f}) \\ \mathrm{Im}(\mathbf{b}_\mathbf{f}) \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_\mathbf{n} \\ \mathbf{A}_\phi \end{bmatrix},\ \mathbf{b} = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_\mathbf{n} \\ \mathbf{b}_\phi \end{bmatrix} \quad (17)$$

식 (15)는 비선형함수의 근을 구하기 위해 Newton법을 사용할 경우 각 반복단계의 증분치 $\Delta\mathbf{p}$를 구하는 식이다. 아무런 구속조건이 사용되지 않을 경우 각 단계의 증분치는 최소자승법과 같이 가상역행렬(pseudo inverse)을 통해 구한다. 하지만 이 경우 계수부족이나 불량조건과 같은 수치적인 문제 때문에 비현실적인 값이 얻어지는 경우가 많다. 계수부족이나 불량조건에 영향을 받을 경우, 일부 부재의 강성이나 질량이 음수가 얻어지는 등 물리적으로 불가능한 값이 나타나거나 서로 비슷한 영향을 주는 부재 중 일부 부재의 값만이 커지거나 작아지는 현상이 나타난다.

실제 본 연구에서 식 (15)를 이용하여 개선파라메터를 구할 경우 모든 경우 일정한 반복단계를 지나면 일부 파라메터에 음의 값이 나타나고, 이에 의해 발산하여 해를 구할 수 없었다.

본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 Yu 등에 의해 제안된 기법인 BVLSrc(Yu 등, 2006)를 사용하였다. 이 방법은 각 반복단계에서 다음의 식 (18)과 식 (19)같은 두 종류의 구속조건을 사용하여 불량조건에 의한 영향을 완화시키는 방법으로서 불량조건을 가진 최소자승문제를 위해 많이 사용되는 정규화(regularization)(Tikhonov 등, 1977; Hansen 등, 1993)와 유사한 정확도를 얻을 수 있는 기법이다.

$$\mathbf{p}_l \le \mathbf{p}_0 + \Delta\mathbf{p} \le \mathbf{p}_u \quad (18)$$

$$|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j| \le 1 - \mathbf{C}_{ij} \quad \text{if} \quad \mathbf{C}_{ij} > c_{\lim} \quad (19)$$

여기서, $\mathbf{C}_{ij}$는 민감도벡터 $\mathbf{S}_i$와 $\mathbf{S}_j$의 상관계수이다.

식 (18)은 개선변수가 비현실적인 값이 되는 것을 막기 위해 각 변수마다 상한치와 하한치를 주고, 그 사이의 값만을 얻을 수 있도록 최대범위를 제한한 식이며, 식 (19)는 구조물의 반응에 비슷한 영향을 주는 개선변수들 중 일부 값이 급격히 변화하는 것을 막기위해 각 개선변수에 해당하는 민감도 벡터들 사이의 상관계수(coefficient of correlation)를 조사하여, 만약 어떠한 두 변수 $\mathbf{p}_i$와 $\mathbf{p}_j$에 해당하는 민감도벡터 $\mathbf{S}_i$와 $\mathbf{S}_j$ 사이의 상관계수 $\mathbf{C}_{ij}$가 미리 정한 값인 $c_{\lim}$보다 클 경우 두 변수의 값의 차이를 $1-\mathbf{C}_{ij}$로 제한한다.

3. 가진실험

본 연구에 사용된 실험체는 가력방향으로 2경간을 가지는 4층 규모의 철골조 골조구조물로 전체높이는 160cm(4@40cm), 경간은 40cm이다. 실험체의 기둥단면은 30×20mm, 보의 단면은 15×20mm로 모든 층에서 동일하며, 각 층의 바닥에는 2.05kg의 철판을 깐 후 그 위에 7.8kg의 질량블록을 4개씩 설치하였다. 표 1은 손상 전 실험체에 사용된 부재의 기둥 및 보 치수이고 그림 1은 진동대위에 설치된 실험체의 형상이다. 진동대는 AC서보모터를 사용하여 구동되며, 서보모터의 컨트롤 및 데이터계측을 위해 Labview를 사용하였다. 진동대 및 실험체의 각 층별 가속도를 측정하기 위해 총 5개의 압전형 가속도계가 사용되었다. 진동대 시스템 및 실험체 구성은 그림 2

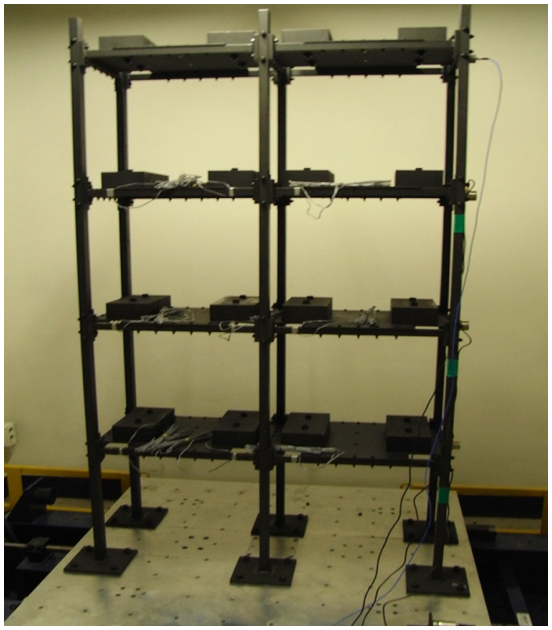

그림 1 실험체 형상

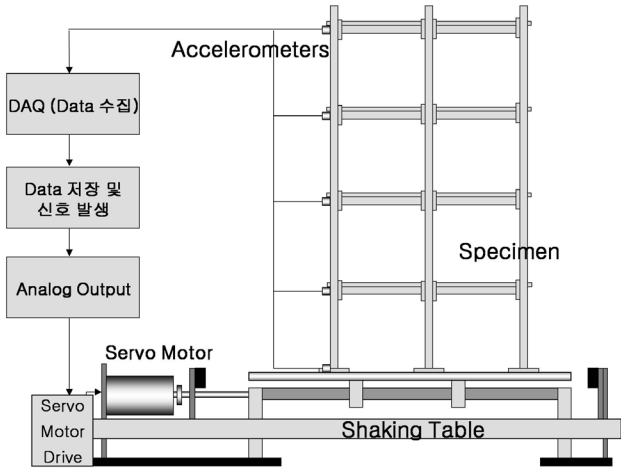

그림 2 진동대 시스템 및 실험체 구성

표 1 원구조물의 부재 단면치수(mmXmm)

부 재	단면 치수
기 둥	30 × 20
보	15 × 20

표 2 각 경우 손상위치(2층 보)의 부재 단면치수

Case	좌측 경간	우측 경간
손상 전	15 × 20	15 × 20
1	15 × 5	15 × 5
2	15 × 14	15 × 5
3	15 × 20	15 × 5
4	15 × 14	15 × 14
5	15 × 20	15 × 14

표 3 구조물식별을 통해 얻은 실험체의 고유진동수(Hz)

모 드	1차	2차	3차	4차
이론 모델	9.10	29.50	54.54	79.12
손상 전 실험체	9.13	32.04	59.14	91.06
Case 1	7.24	29.79	59.80	87.02
Case 2	7.88	30.44	59.54	87.80
Case 3	8.47	31.17	59.59	88.72
Case 4	8.29	30.90	59.14	90.50
Case 5	8.78	31.55	59.29	91.02

와 같다.

가진신호로는 백색잡음을 사용하였다. 앞서 언급한 바와 같이 원구조물의 실험이후 구조물의 손상을 모사하기 위해 2층 부분의 양 경간의 보 부재를 원구조물의 보단면보다 작은 단면을 가지는 보로 교체하고 동일한 절차에 의해 실험을 실시하였다. 손상부분은 서로 다른 두 개의 보단면 즉, 폭은 원구조물의 경우와 같으나 높이가 14mm인것과 5mm인 두 개의 부재를 조합하여 표 2와 같이 5단계로 손상정도가 달라질 때를 가정하였다.

부재 교체전후 구조물에 백색잡음을 가진하고, 이때 얻은 가속도데이터로부터 구조물식별기법을 이용하여 각 경우 구조물의 동적 특성을 추정하였다. 구조물 식별에는 시간영역기법의 일종인 N4SID를 사용하였다(Overschee 등, 1996). 구조물 식별을 통해 얻은 고유진동수는 표 3과 같다. 모드형상의 경우는 그림 7에 모델개선의 결과와 함께 표시하였다.

4. 모델개선기법을 통한 손상탐지

2절에서 유도한 민감도와 BVLSrc를 이용하여 고유진동수와 주파수응답함수를 사용한 경우(Freq+FRF), 고유진동수와 모드형상을 사용한 경우(Freq+Mode)의 두 종류의 입력을 사용하여 모델개선기법을 수행하고, 이로부터 얻어진 해석모델을 비교하여 구조체의 손상위치 및 손상정도를 추정하

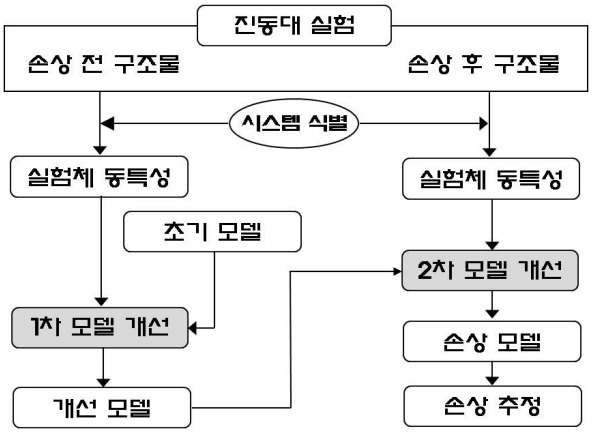

그림 3 모델 개선 기법을 통한 손상 추정 순서

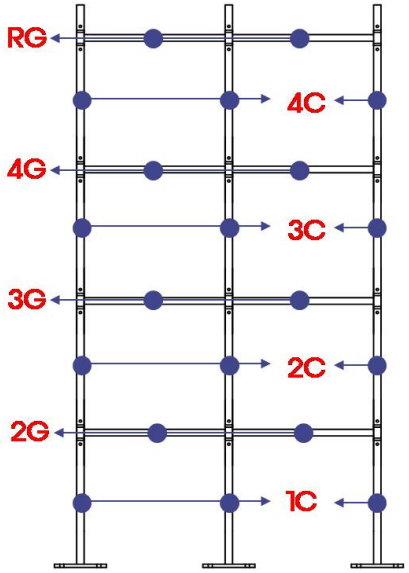

그림 4 개선 파라메터

였다. 그림 3은 손상추정방법을 나타낸 그림이다. 각 경우 최초 모델 즉, 손상 전 구조물의 이론적인 추정치(각 층의 질량, 부재단면치수, 재료의 탄성계수에 근거한 해석모델)를 구한 후, 이 초기모델로부터 손상 전 실험체의 계측치를 사용하여 모델개선을 수행하여 손상 전 실험체의 해석모델을 구하였다. 또한 이렇게 구해진 해석모델을 초기모델로 하여 손상 후 실험체에서 얻은 계측치를 사용하여 모델개선을 수행하여 손상 후 실험체의 해석모델을 구하였다.

모델개선에서는 각 층의 기둥과 보 부재를 그림 4와 같이 총 8개의 그룹으로 나누고 각 부재그룹의 휨 강성비를 개선변수로 선택하였다. 반복계산 시 개선 변수의 변화량이 허용치보다 작아지면 종료하도록 프로그램을 구성하였다. 모델개선에 필요한 민감도행렬 및 잔차벡터는 대상구조물의 강성행렬을 발생시키는 Matlab 루틴을 작성한 후 유한차분법을 통해 계산하였다.

4.1 손상 전 해석모델을 위한 모델개선

실험을 통해 얻은 구조물의 동특성은 재료, 부재치수, 접합방법 등 이론적인 해석모델 작성 시 고려할 수 없는 여러 가지 원인으로 인해 이론적인 예측치와 어느 정도의 오차를 가질 수밖에 없다. 손상 전 해석모델구축을 위한 모델개선을 이러한 오차를 보정하여 이후 손상 후 해석모델과 비교를 통해 손상을 추정하기 위한 비교모델(reference model)을 구축하는 단계이다.

이 단계의 모델개선에서 모든 변수의 초기치는 1.0(이론값)으로, 상한치($\mathbf{p}_u$)는 2.0, 하한치($\mathbf{p}_l$)는 0.01로 가정하였으며 $c_{\lim}$은 0.75로 설정하였다. 각 반복단계에서는 이전 단계 모델의 파라메터(휨강성비)에 대한 민감도 행렬과 잔차벡터(실험체 동특성과 전 단계 모델의 동특성 차)를 구한 후 BVLSrc 기법을 통해 파라메터 변화량($\Delta\mathbf{p}$)을 구한다. 그림 5는 모델개선 시 각 반복단계에서 잔차벡터의 노옴과 파라메터변화량의 노옴, 그리고 각 변수의 값을 나타낸 그래프다. Freq+FRF의 경우는 17번의 반복계산, Freq+Mode Shape의 경우는 8번의 반복계산 후 수렴하였다. 모델 개선 전후 고유진동수의 변화는 표 4에 나타내었는데, 두 경우 모두 3%이내의 오차를 보이고 있다. 그림 6과 그림 7은 고유진동수+FRF를 사용한 경우, 고유진동수+모드형상을 사용

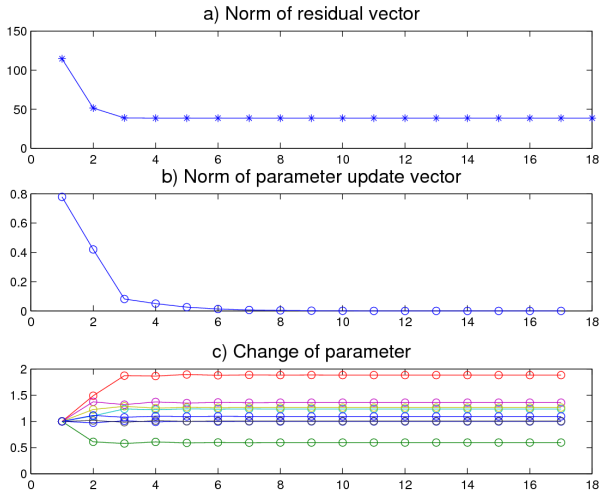

그림 5 수렴 그래프(Freq+FRF의 1차 모델 개선)

표 4 1차 수정 후 고유진동수 비교

구 분	1st	2nd	3rd	4th
초기 이론 모델(Hz)	9.10	29.50	54.54	79.12
계측치(Hz)	9.13	32.04	59.14	91.06
Freq+FRF(Hz)	9.24	31.26	59.04	91.66
오 차(%)	-1.20	2.43	0.17	-0.66
Freq+Mode(Hz)	9.12	32.06	59.50	90.50
오 차(%)	1.10	-0.06	-0.61	0.61

한 경우의 모델 개선 후 모드형상과 FRF를 초기 이론모델과 실험에서 얻은 계측치와 비교한 그래프이다. 그림에서 나타난 바와 같이 해석모델의 FRF는 계측된 FRF와 개선이전에는 고차 모드 영역과 Anti-resonance 부분들에서 비교적 큰 오차가 있었으나 개선이후 계측된 FRF와 거의 유사해짐을 볼 수 있다. 또한 Freq+FRF의 경우, Freq+Mode Shape의 두 경우 모두 모델개선이후 계측치와 거의 동일한 FRF와 모드형상을 나타내었다.

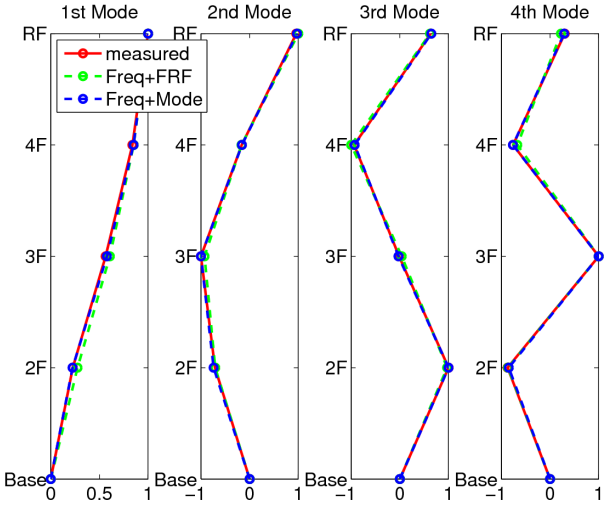

그림 6 1차 개선 후 각 경우에 대한 모드형상 비교

4.2 손상 후 해석모델을 위한 모델개선

손상 전 해석모델로부터 손상 후 실험체에서 얻은 계측치를 사용하여 모델개선을 수행하였다. 이때 해석모델의 초기치는 손상 전 모델개선을 통해 얻은 값을 직접 사용하지 않고, 이때의 휨 강성비가 1.0이 되도록 정규화(Normalize)한 후 모델개선에 사용하였다. 상한치와 하한치 및 $c_{\lim}$은 손상전의 경우와 같은 값을 사용했고, 반복계산에 따른 수렴과정은 손상전의 경우와 큰 차이점이 없어 본 논문에 나타내지 않고 그 결과만을 정리하였다.

표 5는 모델개선 후 얻은 고유진동수의 오차를 비교한 표로서, 두 경우 모두 모든 case에서 4%미만의 오차를 보여주

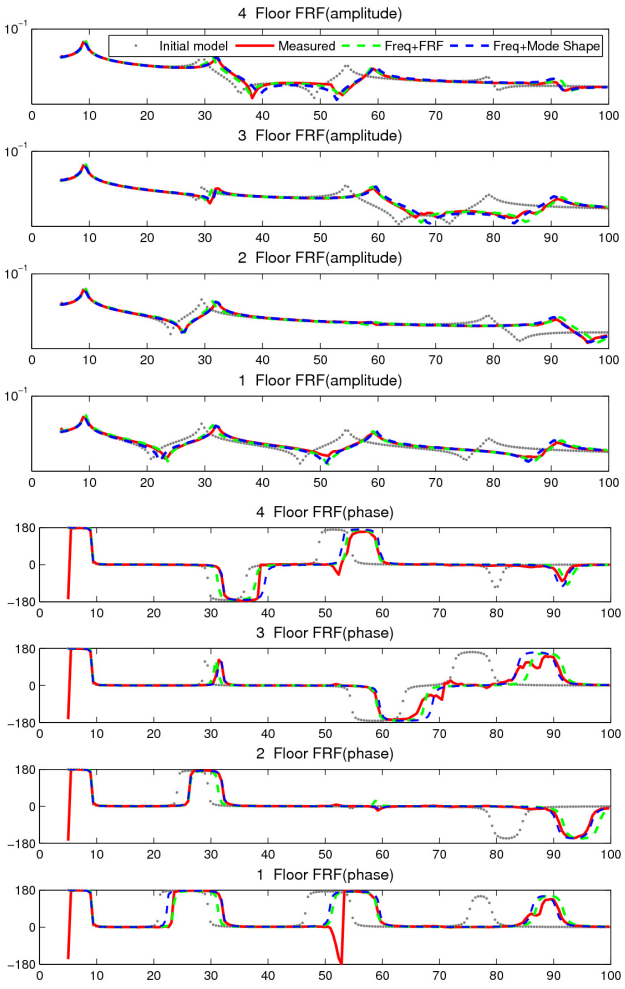

그림 7 1차 모델 개선 후 주파수 응답함수

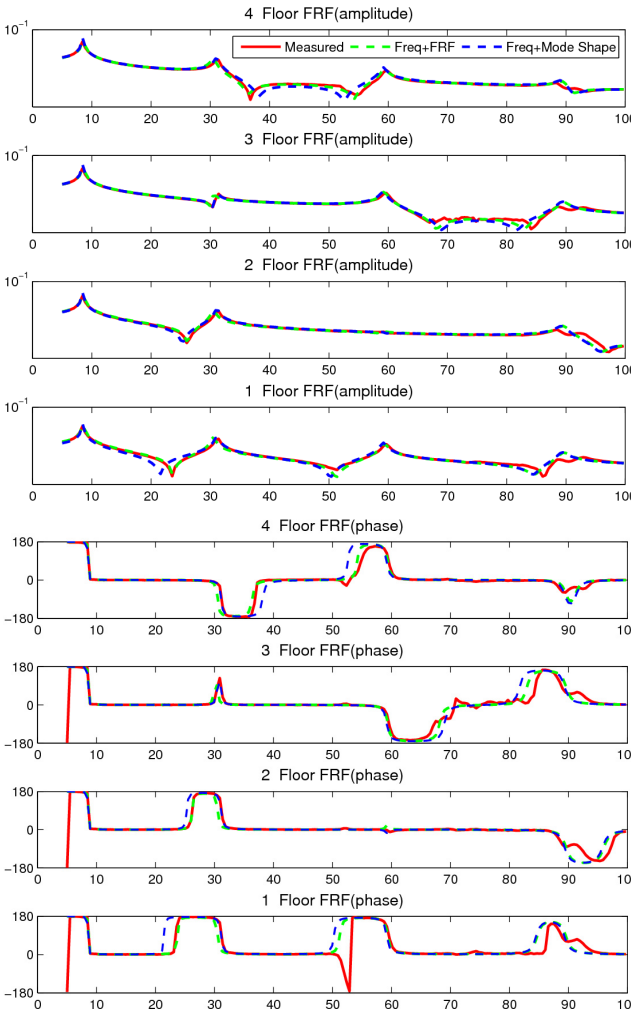

그림 8 주파수 응답함수 비교(Case 1)

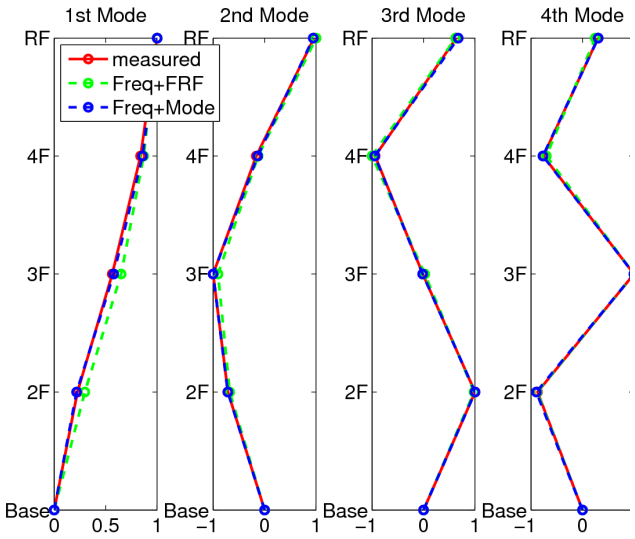

그림 9 모드 형상 비교(Case 1)

표 5 2차 수정 후 고유진동수 오차(%)

구 분		1차	2차	3차	4차
Case 1	Freq+FRF	-1.24	1.21	1.02	-0.61
	Freq+Mode	-0.55	0.44	3.41	-3.17
Case 2	Freq+FRF	-0.89	1.71	0.40	-0.90
	Freq+Mode	-0.38	0.13	1.63	-1.49
Case 3	Freq+FRF	-1.18	2.12	0.40	-0.96
	Freq+Mode	-0.24	0.22	0.72	-0.69
Case 4	Freq+FRF	-0.84	1.91	0.12	-0.66
	Freq+Mode	0	0	0.19	-0.13
Case 5	Freq+FRF	-1.03	2.03	0.08	-0.68
	Freq+Mode	-0.11	0.03	0.13	-0.10

고 있다.

그림 8과 그림 9는 각각 Case 1에 대한 각 경우의 모델개선 후 주파수 응답함수와 모드형상을 나타낸 것이다. 고유진동수+모드 형상을 사용한 모델개선의 경우 그림에서 보이듯이 전달함수의 Anti-resonance부분에서 계측치와 차이를 나타내고 있음을 볼 수 있다.

표 6과 7은 모델 개선을 통해 구한 부재그룹의 손상전 부재에 대한 휨강성비를 나타낸다. 따라서 부재의 손상정도는 (1-휨강성비)로 생각할 수 있다. 표에 나타낸 정해는 각 부재의 치수로부터 구한 단면2차모멘트의 원구조물 부재에 대한 비를 의미한다. 2층보부분의 부재만 교체되었으므로 이 부분을 제외한 나머지 부분의 정해는 1.0이다. 양 경간에 사용된 보 부재의 치수가 다른 경우는 두 부재 단면2차모멘트의 평균을 사용하였다.

표에 나타낸 바와 같이 전체적으로 기둥부분의 강성비는 크게 변화하지 않았으며, 보부재의 강성비예측은 고유진동수+주파수응답함수(Freq+FRF)의 경우가 고유진동수+모드형상(Freq+Mode)의 경우보다 훨씬 정확한 결과를 나타내

표 6 Freq+FRF의 경우 부재강성비

구분	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
1층 기둥	0.81	0.94	0.99	0.96	0.99
2층 기둥	0.78	0.94	0.93	0.99	0.99
3층 기둥	1.08	0.96	0.97	1.08	1.05
4층 기둥	1.14	0.99	1.00	0.95	0.97
2층 보	0.01 (0.016)	0.10 (0.18)	0.43 (0.51)	0.35 (0.35)	0.67 (0.67)
3층 보	1.26	1.28	1.16	1.09	1.05
4층 보	0.75	0.90	0.93	0.90	0.95
지붕 보	1.28	1.10	1.09	1.05	1.06

( )안의 숫자는 정해를 의미

표 7 Freq+Mode shape의 경우 부재강성비

구분	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
1층 기둥	1.05	1.05	1.04	1.05	1.03
2층 기둥	1.03	1.00	0.99	0.94	0.94
3층 기둥	0.93	0.88	0.90	1.15	1.15
4층 기둥	1.01	1.05	1.04	0.99	0.96
2층 보	0.36 (0.016)	0.53 (0.18)	0.72 (0.51)	0.64 (0.35)	0.81 (0.67)
3층 보	0.43	0.62	0.82	0.73	0.90
4층 보	0.70	0.75	0.84	0.81	0.94
지붕 보	1.01	1.06	1.04	1.01	0.94

( )안의 숫자는 정해를 의미

었다. Freq+FRF의 경우 손상이 발생한 위치에서 휨강성이 크게 저감된 것으로 나타났으나 다른 위치에는 손상이 아주 심한 경우(Case 1)를 제외하고는 큰 변동이 없었다. Freq+Mode의 경우 손상위치에서 휨강성이 가장 크게 저감되었지만 다른 층의 보에서도 상당한 강성저감이 나타났다. 전체적으로 손상의 정도가 낮을수록 손상탐지 결과가 정확하였으며, 손상이 심한 Case에서는 손상부위 뿐만 아니라 인접한 부재(주로 보)에서 강성의 변동이 심하게 나타난다.

5. 결 론

본 논문에서는 고유진동수와 주파수응답함수, 또한 고유진동수와 모드형상 데이터로부터 모델개선기법을 사용하여 실험실 규모의 구조물을 대상으로 손상탐지를 실시하고 그 결과를 비교하였다. 모델개선문제에서 흔히 나타나는 불량조건의 문제를 해결하기 위해 각 파라메터의 유사성에 근거한 구속조건을 사용하였으며, 이에 따라 모든 경우 발산없이 해를 구할 수 있었다.

두 종류의 입력치를 사용한 손상탐지의 결과를 서로 비교한 결과, 고유진동수+주파수응답함수를 사용할 경우가 고유진동수+모드형상의 경우보다 훨씬 정확한 결과를 나타내었다. 고유진동수+주파수응답함수를 사용한 경우 손상위치에

서 큰 강성의 저감이 나타나고, 이외의 부재에서는 강성비의 변화가 적었으며, 예측된 손상정도도 정해와 거의 일치한 반면, 고유진동수+모드형상의 경우 손상위치에서 가장 큰 강성의 저감이 나타났으나 이외의 부재에서도 상당한 강성저감이 나타나며 손상정도의 예측치도 정해와 상당한 차이를 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 GS건설의 지원에 의한 것으로 이에 대해 감사드립니다.

참 고 문 헌

Carden, E.P., Fanning, P. (2004) Vibration Based Condition Monitoring: A Review, *Structural Health Monitoring,* 3(4) pp.355~377.

Doebling, S.W., Farrar, C.R., Prime, M.B., Shevitz, D.W. (1996). Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review. *Technical Report LA-13070-MS*, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM.

Doebling, S.W., Farrar, C.R., Prime, M.B. (1988) A Summary Review of Vibration-Based Damage Identification Methods, *The Shock and Vibration Digest,* 30(2), pp.91~105.

Friswell, M.I., Mottershead, J.E. (1995). *Finite Element Model Updating in Structural Dynamics*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers. p.286

Mordini, A., Savov, K., Wenzel, H. (2007) The Finite Element Model Updating: A Powerful Tool for Structural Health Monitoring, *Structural Engineering International,* 4, pp.352~358.

Hansen, C., O'Leary, D.P. (1993) The Use of the L-Curve in the Regularization of Discrete Ill-Posed Problems, *SIAMJ.Sci.Comput* 14(6), pp.1487~1503.

Overschee, P., DeMoor, B. (2002) *Subspace Identification of Linear Systems : Theory, Implementation, Applications,* Kluwer Academic Publishers, p.272.

Teughels, A., Maeck, J., Roeck, G.D. (2002) Damage assessment by FE model updating using damage functions, *Computers and Structures*, 80(25) pp.1869~1879.

Tikhonov, A.V., Arsenin, V.Y. (1997) *Solutions of Ill-posed Problems*. Wiley, NewYork, p.258

Yu, E.J., Taciroglu, E., Wallace, J.W. (2006), Parameter identification of framed structures using an improved finite element model-updating method-Part I: formulation and verification. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 36(5), pp.619~636.