

## 모드형상을 이용한 전단형 건물의 손상 위치 추정

### Damage Location Detection of Shear Building Structures Using Mode Shape

유 석 형<sup>1)\*</sup>      이 홍 규<sup>2)</sup>  
Yoo, Suk Hyeong      Lee, Hong Kyu

#### Abstract

Damage location and extent could be detected by the inverse analysis on dynamic response of the damaged structure. In general, detection of damage location is possible by the observation of the mode shape difference between undamaged and damaged structure and assessment of stiffness reduction is possible by the observation of the natural frequency difference of them. The study on damage detection by the dynamic response in civil structures is reported enough and in practical use, but in building structures it is reported seldom due to several problems.

The purpose of this study is to present the damage detection method on shear building structures by mode shape. The damage location index using 1st mode shape is observed theoretically to find out damage location. The damage detection method is applied to numerical analysis model such as MATLAB and MIDAS GENw for the verification. Finally the shaking table test on 3 story shear building is performed for the examination of the damage detection method. In shaking table results, as the story stiffness decrease by 25% the 1st mode frequency increase by 12%, and the damage location index represents minus at damaged story.

**Keywords** : Damage detection, Mode shape, Modal analysis, Natural frequency, Shear building, Shaking table test

#### 1. 서론

구조물에 구조적 손상이 발생한 경우 육안조사로는 손상위치를 정확히 파악하기 어렵다. 특히, 오늘날과 같이 대형화, 초고층화 및 복합화 되어가는 현대건축물의 특성상 육안조사에 의한 손상위치 추적은 비효율적이며 거의 불가능하다. 그러나 구조물에 설치된 계측센서에서 취득한 동적신호로부터 전체 구조물의 손상유무, 손상위치 및 손상정도를 파악하기 위한 연구(Yoon. S. K., The Study of Damage Assessment for Frame Structure Using Sensitivity Analysis.)가 진행되어왔다.

2010년도 고시된 「지진가속도 계측기 설치 및 운영기준」에 따르면 전국 주요 건축·토목 시설물에 가속도계를 설치하고 유지관리 하도록 하고 있다. 지진발생시 구

조물의 동적응답신호를 분석하여 구조물의 건전도를 평가하고 축적된 자료를 활용하여 내진설계기법 개선에 활용하기 위함이다. 토목구조물의 경우 동적응답신호를 분석하여 구조물의 손상을 탐지하는 기술이 활발히 연구되어 왔으며(Hong. K. S., Damage Estimation of Structure by Second Order Modal Perturbation.), 이미 실용화 되어 사용되고 있다. 그러나 건축구조물의 경우 동적계측을 이용한 손상탐지에 몇 가지 어려움이 있어 기술개발이 미흡하다. 따라서 고시된 기준에 의한 건축구조물 동적응답신호를 활용할 방안 마련이 시급한 실정이다.

건축구조물은 구조형식과 그에 따른 구조적 거동이 토목 구조물보다 훨씬 복잡하고 다양하여 계측된 동적응답신호를 역해석하여 구조시스템을 규명하는데 상당한 어려움이 있다. 또한 계측된 동적응답신호에는 건축마감재 및 칸막

1) 정회원, 경남과학기술대학교 건축공학과 교수, 교신저자  
2) 학생회원, 경남과학기술대학교 건축공학과 석사과정

\* Corresponding author : piter31@gntech.ac.kr 055-751-3402

• 본 논문에 대한 토의를 2013년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 2013년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

이 벽 등의 비구조요소의 영향이 포함되어 있고, 기계, 차량 및 주변 환경으로부터 발생하는 진동 등이 포함되어 있어 계측신호의 신뢰성에도 많은 해결해야할 문제점이 있다.

토목구조물의 경우 건축구조물과 구조적 거동이 비교적 단순하여 구조물의 동적응답신호에 대한 modal analysis를 통하여 고유진동수를 파악하고 이를 통하여 전체구조물의 강성변화를 관찰 할 수 있고, 또한 모드형상을 통하여 손상위치를 파악할 수 있다. 그러나 건축구조물의 경우 구조물의 고유진동수 변화를 통하여 전체구조물의 강성변화를 추정하는데 크게 어려움이 없으나, 구조시스템이 복잡하여 모드형상을 이용하여 손상위치를 파악하기에는 상당한 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서는 모드형상을 이용한 건물의 손상위치의 파악을 위하여 전단형 건물의 동적응답신호로부터 도출된 모드형상을 이용하여 손상 층을 파악할 수 있는 이론적 방안을 고찰하고 이를 수치해석모델에 적용함으로써 손상위치추정기법의 타당성을 검증하였다. 또한 3층 축소모형 전단형 건물에 대한 진동대 실험 및 손상검출을 수행하고 이를 수치해석결과와 비교 검토함으로써 향후 실구조물 적용을 위한 기초자료를 제시하였다.

## 2. 전단형 건물의 강성행렬

전단 건물은 각 층 높이에서 수평 단면의 회전이 없는 구조물로 정의된다. 따라서 변형된 건물은 전단력에 의해서만 처짐이 발생하는 캔틸레버 보의 특성을 가지게 되며 Fig. 1과 같이 이상화 할 수 있다. 이러한 전단 변형을 고려하기 위해 다음과 같이 가정하여야 한다.

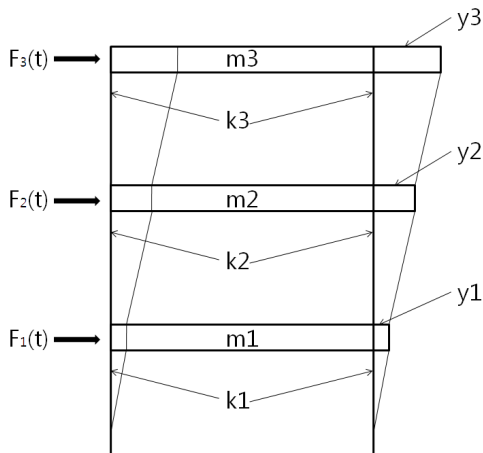


Fig. 1 3 DOF Shear building

- (1) 구조물의 총 질량은 각 층 높이에 집중되어 있다.
- (2) 각 층의 거더는 기둥에 비해 강성이 무한히 크다.
- (3) 구조물의 변형은 기둥에 발생하는 축력과는 무관하다.

Fig. 1과 같이 전단형 건물로 모델링 되는 구조물은 각 층 높이에서 자유도 즉 수평변위를 표현한다. 또한 거더와 기둥 사이의 연결부는 회전에 대해 고정되어야 하고 강성이 큰 거더는 운동 중 변형이 없이 수평을 유지한다. 각 층강성은 층간변위를 발생시키는데 필요한 힘으로써 다음 식 (1)과 같이 정의된다.

$$k_i = \sum_{k=1}^n \frac{12EI_k}{L_k^3} \quad (1)$$

여기서  $I_k$  및  $L_k$ 는  $i$ 층의  $k$ 번째 기둥의 단면2차모멘트와 길이를 나타낸다. 3층 전단형 건물의 비감쇠 운동방정식을 행렬식으로 표기하면 다음과 같다.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\} \quad (2)$$

여기서  $[M]$  및  $[K]$ 는 각각 다음 식으로 주어지는 질량 매트릭스 및 강성도 매트릭스이다.

$$[M_i] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[K] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

건물과 같이 감쇠력이 작을 경우 구조물의 고유진동수에 미치는 영향은 매우 적으므로 비감쇠 운동방정식을 동특성파악에 사용할 수 있다.

## 3. 손상위치 추정

### 3.1 모드형상 변화량

구조물이 가지고 있는 모드형상은 식 (5)와 같이 각 층의 질량과 강성의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\{\phi\}_r = \{\phi\}_r(k_{11}, k_{12}, \dots, m_{11}, m_{12}, \dots) \quad (5)$$

여기서,  $\{\phi\}_r$ 은  $r$ 번째 고유진동수에 대한 모드형상을 나타내며, 구조물에서 섭동이 한 개의 강성계수에서만 일어난다고 가정하면 강성행렬 계수  $k_{ij}$ 는 다음과 같다.

$$k_{ij} = k_{0ij} + \Delta k_{ij} \quad (6)$$

식 (6)의  $k_{ij}$ 는 전체 횡 강성행렬  $[K]$ 의  $i$ 행,  $j$ 열 계수를 의미하며,  $k_{0ij}$ 는 초기강성계수이고,  $\Delta k_{ij}$ 는 섭동 후 강성계수를 말한다.

모드형상의 변화량을 구하기 위해 식 (5)를 테일러 급수로 전개하여 1차항만을 나타내면 식 (7)로 표현할 수 있다.

$$\Delta\{\phi\}_r = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial\{\phi\}_r}{\partial k_{ij}} \Delta k_{ij} \quad (7)$$

즉, 모드형상의 변화량은 섭동으로 인한 각 계수들의 변화의 합으로 나타낼 수 있다.

### 3.2 손상구조물의 운동방정식

강성행렬의 변화는 모드형상을 변화시키므로 손상 전후 변화된 모드형상으로부터 손상위치를 추정할 수 있다. 비감쇠 자유진동 구조물의 운동방정식은 식 (2)와 같으며 구조체가 탄성이라고 가정하고 식 (2)의 해를 구하면 다음과 같다.

$$(-w_r^2[M] + [K])\{\phi\}_r = \{0\} \quad (r = 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

손상구조물에 대하여 식 (8)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{-(w_r^2 + \Delta w_r^2)[M] + [K] + \Delta[K]\}\{\phi\}_r + \Delta\{\phi\}_r = \{0\} \quad (9)$$

### 3.3 모드강성에 의한 손상 추정

식 (9)의 고차항을 제거하고  $\{\phi\}_r^T$ 를 곱하여 정리하면 고유진동수의 변화는 다음과 같다.

$$\Delta w_r^2 = \{\phi\}_r^T \Delta[K] \{\phi\}_r \quad (10)$$

여기서 전체 강성행렬의 변화를 각 층 강성의 변화로 나타내면 손상구조물의 강성은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta[K] = \sum_{i=1}^n [K_i] \beta_i \quad (11)$$

여기서  $[K_i]$ 는  $i$ 번째 층에 대한 계수만 값이 있는 전체 강성행렬이며,  $\beta_i$ 는 손상비를 나타낸다. 식 (11)을  $\Delta[K]$ 에 관하여 정리하여 식 (10)에 대입하면 다음과 같다.

$$\Delta w_r^2 = \sum_{i=1}^n \{\phi\}_r^T [K_i] \{\phi\}_r \beta_i \quad (12)$$

손상에 의한 동특성의 변화량  $\Delta w_r^2$ 은 식 (12)의 우변과 같은데 여기서  $\beta_i$ 는 미지수이므로 모드강성의 변화량으로 손상위치를 추적할 수 있다.

식 (6)과 같이 1차 모드형상에서 섭동이 한 개의 강성계수에서만 일어난다고 가정하면 Fig. 2에서와 같이 손상층의 층간 변위량이 증가하며 손상 전 후 층간변위의 차이는 손상층에서 (-)값이 된다. 식 (2) 및 Fig. 1에서  $i$ 층의 강성은 층간변위와의 곱으로써 평형조건을 만족한다. 따라서 식 (11)의  $[K_i]$ 와 모드형상의 곱은  $i$ 층의 층간변위를 표현한다. 식 (13)과같이  $i$ 층의 1차 모드강성을 정의하고 손상전후 모드강성의 차이를 구하면 손상위치를 파악할 수 있다.

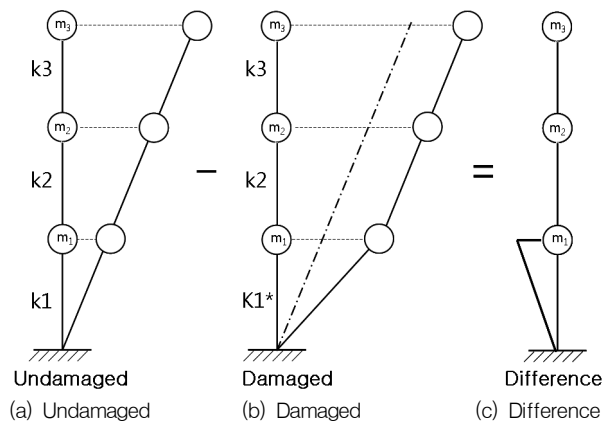


Fig. 2 Mode shape difference of undamaged and damaged structure

$$d_{i1} = \phi_1^T [K_i] \phi_1 \quad (13)$$

손상 구조물의 경우 손상된 부재의 강성을 알 수 없으므로, 손상 후의 모드 강성  $d_{i1}^*$ 는 근사적으로 손상 전의 강성행렬을 사용하여 구할 수 있다.

$$d_{i1}^* = \phi_1^{*T} [K_i^*] \phi_1^* \quad (14)$$

손상부위 지표  $x$ 는 손상 전 후의 1차 모드강성의 차로, 손상된 층에서는 그 값이 음수이다.

$$x = d_{i1} - d_{i1}^* < 0 \quad (15)$$

## 4. Modal Analysis

### 4.1 근사해석

근사해석은 Fig. 3의 진동 실험체를 대상으로 Fig. 1과 같이 평면상의 전단형 건물로 단순화하여 Matlab을 이용하여 Modal Analysis를 수행하였다. 층강성, 전체강성행렬 및 질량행렬은 식 (1), (3) 및 식 (4)를 사용하였으며, 손상은 1층 기둥 1개를 감소시켰으므로 1층의 강성을 3/4으로 감소시키고 손상에 의한 질량의 변화는 무시하여 고유치 해석을 수행하였다. 근사해석 대상모델의 고유치 해석 조건은 Table 1과 같다.

모드형상에 의한 손상위치추적 알고리즘을 이론적으로 검증하기 위하여 Matlab을 이용하여 Modal Analysis를 수행하였다. 수치해석은 5장의 진동대 실험은 Fig. 3의 실험체를 대상으로 수행하였다.

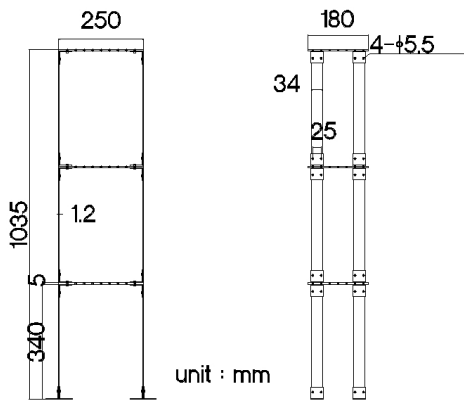


Fig. 3 Detail of specimen

Table 1 Modal analysis condition of Matlab

Story	Floor stiffness $k_i$ (kN/m)		Mass $m_i$ (kg)
	Undamaged	Damaged	
1 <sup>st</sup> floor	1.196	0.897	1.778
2 <sup>nd</sup> floor	1.196	1.196	1.778
3 <sup>rd</sup> floor	1.196	1.196	1.778

Table 2 Modal analysis condition of MIDAS GENw

Story	Floor stiffness (kN/m)	
	Undamaged	Damaged
1 <sup>st</sup> floor	1.22	0.91
2 <sup>nd</sup> floor	1.22	1.80
3 <sup>rd</sup> floor	1.22	1.21

Table 3 Modal analysis result of Matlab

Mode	Story	Undamaged		Damaged	
		$f$ (Hz)	Mode Shape	$f$ (Hz)	Mode Shape
1	1 <sup>st</sup> floor	1.84	0.4451	1.69	0.5261
	2 <sup>nd</sup> floor		0.8019		0.8327
	3 <sup>rd</sup> floor		1		1
2	1 <sup>st</sup> floor	5.15	1	4.91	1
	2 <sup>nd</sup> floor		0.4451		0.3345
	3 <sup>rd</sup> floor		-0.8019		-0.8046
3	1 <sup>st</sup> floor	7.44	-0.8019	7.35	-0.7056
	2 <sup>nd</sup> floor		1		1
	3 <sup>rd</sup> floor		-0.4451		-0.4615

Matlab에 의한 고유치해석결과 3차 모드까지 고유진동수를 구하고 각 모드별 모드형상을 구한 후 이를 정규화하였으며 고유치 해석결과는 Table 3과 같다. 손상 후 진동수는 1차 2차 3차 모드에서 각각 8%, 4.7% 및 1.2% 감소하였다. 손상 전·후 1차 모드 형상을 보면 손상이 있는 1층에서 변형이 비교적 크게 발생하였음을 알 수 있다.

### 4.2 정밀해석

정밀해석은 Fig. 3의 실험체를 대상으로 MIDAS GENw를 이용하여 3차원으로 모델링하였으며, 기둥은 보요소를 슬래브는 플레이트요소를 사용하였으며, 재질은 Table 5를 고려하고 질량의 분포는 lumped mass로 고려하여 유한요소법에 의한 고유치해석을 수행하였다.

GENw에 의한 고유치 해석결과 각 모드별 고유진동수와 정규화된 모드형상은 Table 4와 같으며, 층 강성은 층 전단력을 층간변위로 나누어 Table 2와 같이 구하였다.

Table 4 Modal analysis result of MIDAS GENw

Mode	Story	Undamaged		Damaged	
		$f(Hz)$	Mode Shape	$f(Hz)$	Mode Shape
1	1 <sup>st</sup> floor	1.72	0.4525	1.57	0.5261
	2 <sup>nd</sup> floor		0.8111		0.8327
	3 <sup>rd</sup> floor		1		1
2	1 <sup>st</sup> floor	4.77	1	4.57	1
	2 <sup>nd</sup> floor		0.3874		0.2935
	3 <sup>rd</sup> floor		-0.8508		-0.8473
3	1 <sup>st</sup> floor	6.81	-0.7780	6.75	-0.7110
	2 <sup>nd</sup> floor		1		1
	3 <sup>rd</sup> floor		-0.5095		-0.5238

Table 5 Material properties of specimen

Name		Value
Sectional secondary moment	Strong axis	3930.4 mm <sup>4</sup>
	Weak axis	4.896 mm <sup>4</sup>
modulus of elasticityM		2.0 × 10 <sup>11</sup> Pa
Poisson's ratio		0.31
Density		7900 kg/m <sup>3</sup>
Yield stress		9.86 × 10 <sup>8</sup> Pa
Ultimate strength		1.103 × 10 <sup>9</sup> Pa

Matlab에 의한 Modal Analysis 결과와 유사하게 손상 후 1차 2차 3차 모드에서 진동수가 각각 8.7% 4.1% 및 0.9% 감소하였으며, 손상 있는 1층에서 1차 모드형상이 비교적 크게 나타났다.

## 5. 소형 진동대 실험

### 5.1 실험체

모드강성을 이용한 손상위치추적 기법의 실용성을 검토하기 위하여 축소모형에 대한 진동대 실험을 수행하고 이를 수치해석 결과와 비교·분석 하였다. 실험체는 Fig. 3과 같이 높이 1,035mm의 축소된 3층 전단형 건물이며 각 층마다 1.2×34×340mm 기둥 4개와 슬래브는 두께 5mm의 철판으로써 다이어 프레임 역할을 하도록 하였다. 손상은 1층 기둥 1개를 제거함으로써 구현하였다. 실험체의 재질은 Table 5와 같다.

### 5.2 진동대실험

진동대 실험은 Fig. 5와 같이 크게 실험체를 가진하는

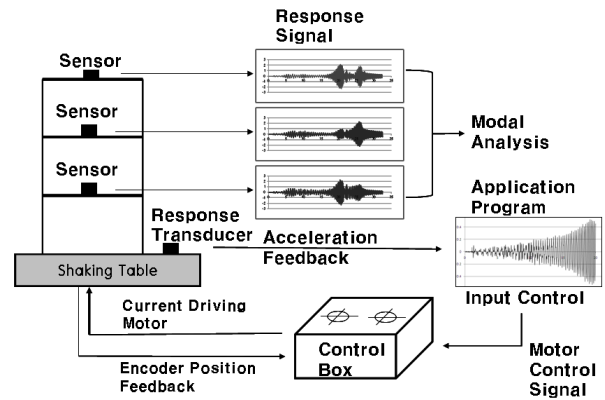


Fig. 4 Organization of shaking table test

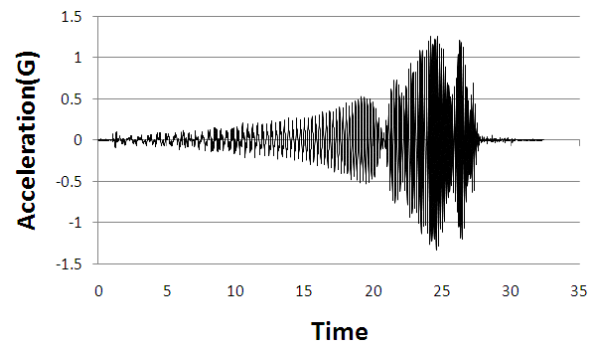
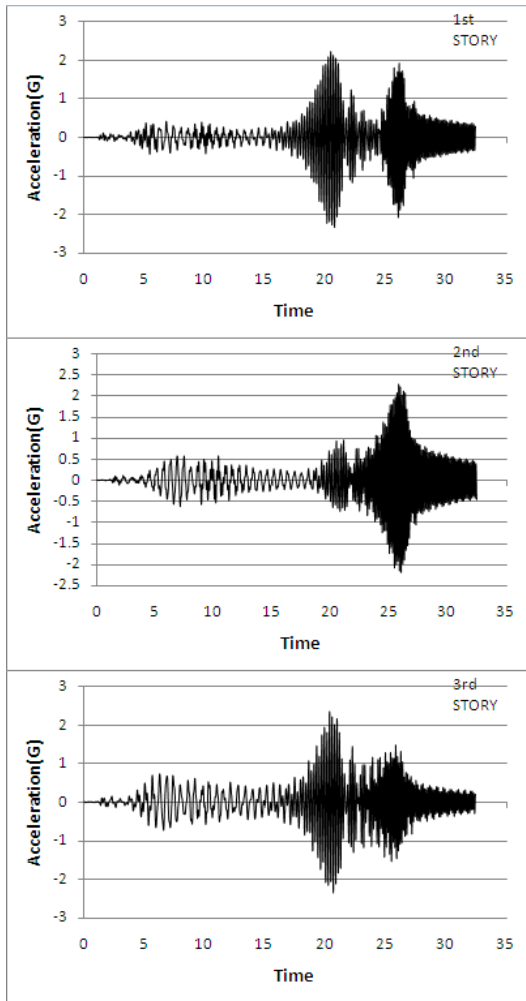


Fig. 5 Sine sweep wave

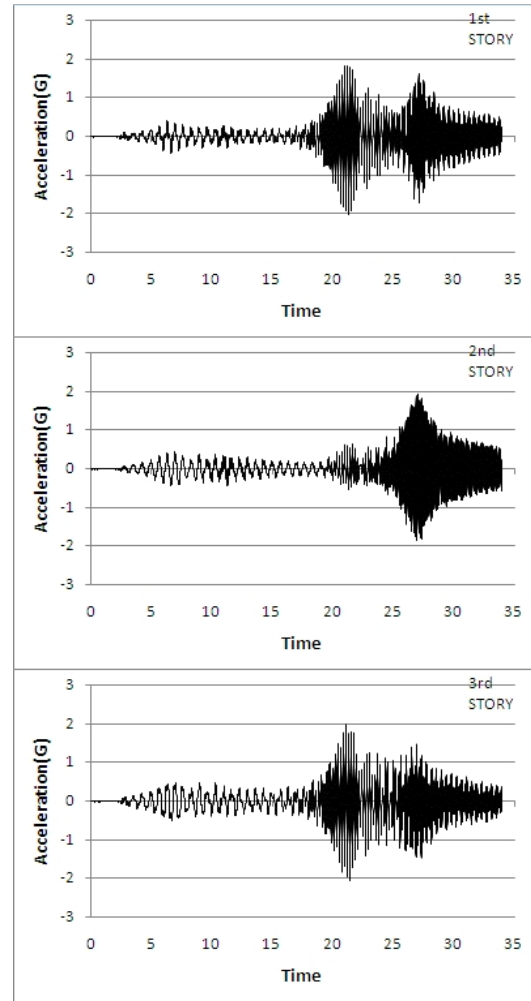
진동대, 진동대 모터를 직접 구동하고 제어하는 Control Box, 신호를 생성하여 Control Box를 원격제어 하는 프로그램 그리고 구조물의 응답신호를 취득하는 데이터 로거 등 4부분으로 구성된다.

실험체는 리니어 전기식 소형 진동대 (540×540mm)에 기둥을 가진 방향에 약축으로 설치하였다. 가진은 sine sweep파로서 주파수 0.5 - 8.5Hz 범위를 포함하고 최대 가속도 1g의 크기를 갖는 Fig. 6과 같은 파형이다. 진동대 바닥에서 가속도 센서로 바닥진동을 계측하고 이를 입력가진 신호와 비교하였으며, Fig. 6은 진동대 바닥에서 계측된 가속도 응답신호를 보여주고 있다. 구조물의 진동응답신호의 계측은 Photo 1에서와 같이 각층 바닥에서 압전형 가속도 센서를 이용하여 100Hz sampling rate으로 계측하였다. 손상 전 후 각 실험체의 시간영역에서동적응답신호는 Fig. 7(a) 및 (b)와 같다.

Fig. 7에서 보면 가력 후 5-10초, 20초 및 25초 부근에서 가속도 응답신호가 증가한 것을 볼 수 있는데 이는 가진 주파수 범위가 이들 3차 모드의 고유주파수 영역을 포함하고 있으며 가진 주파수가 이들 각 모드의 주파수범



(a) Undamaged



(b) Damaged

Fig. 6 Acceleration response of undamaged and damaged structure

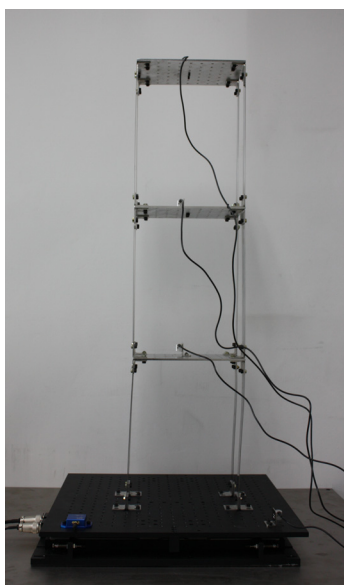


Photo 1 Shaking table test

위를 지날 때 공진이 일어난 것으로 판단된다. 또한 수치 해석상 나타난 3차 모드형상을 진동실험을 통하여 명확히 관찰할 수 있었다. 이는 랜덤진동을 받는 실구조물과 달리 본 실험에서는 Fig. 6에서와 같이 Sine Sweep Wave로 가진 하였기 때문인 것으로 판단된다. 본 연구의 목적은 모드형상으로부터 손상위치를 파악하기 위한 것으로 명확한 모드형상을 구하기 위하여 Sine Sweep Wave를 사용하였다. 향후 실구조물에 대한 적용성을 향상시키기 위하여 랜덤가진 진동대실험이 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

### 5.3 동특성 파악

Fig. 7의 시간영역의 가속도 응답신호를 FFT변환하여 Fig. 8과 같이 주파수 영역으로 나타내었다.

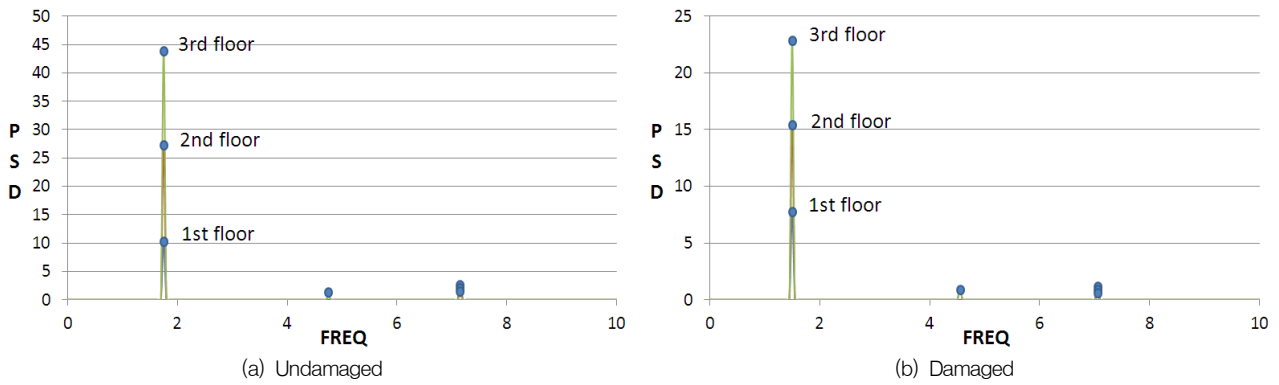


Fig. 7 Result of FFT

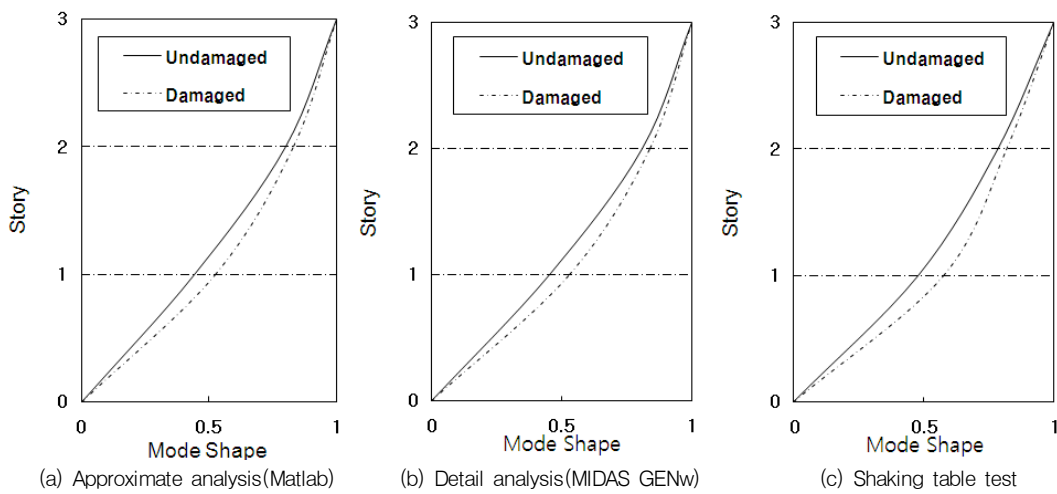


Fig. 8 Comparison of 1st mode shape of undamaged and damaged structure

Fig. 8에서와 같이 각층의 주파수응답신호가 모두 동일한 주파수에서 뚜렷한 성분을 나타내어 육안으로 쉽게 1,2,3차 모드를 구별할 수 있었다. 이는 실험체 기동을 진동방향에 약축으로 배치하여 연성능력을 충분히 높게 함으로써 크고 다양한 변형을 유발하였기 때문에 가능한 것으로 판단된다. 각 모드에서 구한 진동수로부터 peak picking method를 사용하여 모드형상을 구하고 이를 정규화 하였다. 진동대 실험을 통하여 계측된 진동응답신호에 대한 Modal Analysis 결과로 구한 3차모드별 고유진동수 및 모드형상은 Table 6과 같다. 손상 전에 비하여 손상 후 고유진동수가 1차 2차 3차 모드에서 각각 11.8% 4.2% 및 1.4%씩 감소하였으며, Fig. 8에서와 같이 손상이 발생한 1층에서 모드형상의 변화량이 가장 크게 나타났다.

Table 7에서와 같이 실험에서 관찰된 동적특성은 수치해석결과와 거의 유사한 결과를 나타내었다. 이는 실험체가 균질한 금속재로써 탄성범위에서 이론적 해석결과와

Table 6 Modal analysis result of specimen

Mode	Story	Undamaged		Damaged	
		$f(Hz)$	Mode Shape	$f(Hz)$	Mode Shape
1	1 <sup>st</sup> floor	1.7	0.4782	1.5	0.5751
	2 <sup>nd</sup> floor		0.7843		0.8180
	3 <sup>rd</sup> floor		1		1
2	1 <sup>st</sup> floor	4.75	1	4.55	1
	2 <sup>nd</sup> floor		0.2971		0.2147
	3 <sup>rd</sup> floor		-0.9666		-0.9942
3	1 <sup>st</sup> floor	7.15	-0.8149	7.05	-0.7112
	2 <sup>nd</sup> floor		1		1
	3 <sup>rd</sup> floor		-0.5603		-0.5924

매우 유사한 거동을 하며, 비감쇄운동방정식으로 유도된 수치해석모델과 감쇄력이 거의 없는 재료와 구조형식의 실험체가 유사한 동적특성을 나타냈기 때문인 것으로 판단된다.

Table 7 Comparison of natural frequency

Mode	Matlab		MIDAS		Test	
	before $f(Hz)$	after $f(Hz)$	before $f(Hz)$	after $f(Hz)$	before $f(Hz)$	after $f(Hz)$
1	1.84	1.69	1.72	1.57	1.7	1.5
2	5.15	4.91	4.77	4.57	4.75	4.55
3	7.44	7.35	6.81	6.75	7.15	7.05

Table 8 Damage location index by the difference of 1st mode shape stiffness

Story	Matlab			MIDAS			Test		
	before	after	difference	before	after	difference	before	after	difference
1 <sup>st</sup> floor	0.2369	0.3310	-0.0941	0.2491	0.4421	-0.1930	0.2735	0.3956	-0.1221
2 <sup>nd</sup> floor	0.1532	0.1124	0.0408	0.1575	0.0628	0.0947	0.1121	0.0415	0.0415
3 <sup>rd</sup> floor	0.0469	0.0335	0.0134	0.0435	0.0358	0.0077	0.0556	0.0160	0.0160

## 6. 손상위치 추정

손상위치의 파악은 손상전후의 모드강성의 차로부터 구할 수 있다. 수치해석 및 진동대 실험을 통하여 구한 손상전후 구조물의 1차 모드형상으로부터 식 (13), (14)을 이용하여 모드강성을 구한 후 이를 식 (15)와 같이 모드강성의 차를 구하였다. Table 8에서 보면 실험 및 수치해석결과 모두 손상이 발생한 1층의 모드강성차이가 마이너스로 나타나 손상위치 추정이 가능함을 보여주고 있다. 본 연구의 실험결과는 손상검출에 있어서 수치해석결과와 유사한 결과를 나타내고 있으나 향후 실구조물에 활용하기 위하여는 비 구조요소, 노이즈, 및 감쇠력의 영향을 고려하여야 할 것으로 판단된다.

## 7. 결론

이상과 같이 모드형상을 이용한 진단형 건물의 손상위치 추적을 위한 이론적 고찰, 수치해석 및 소형 진동대 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 진동대 실험 결과 층강성이 25% 감소할 경우 1차 모드의 진동수는 11.8% 감소하였으며, 모드형상은 손상 층에서 20% 증가하였다.
- (2) 모드강성을 이용한 손상위치추적방안을 수치해석 및 진동대 실험을 통하여 수행함으로써 타당성 및 실용성을 검토하였다.
- (3) 본 연구에서 실험적으로 검증한 결과를 실구조물에 적용하기 위하여 비 구조요소, 노이즈 및 감쇠

력 등의 영향을 고려한 추가적인 연구가 필요하다.

- (4) 모드형상을 이용하여 건물의 손상위치를 추적할 수 있는 방안을 제시함으로써 고시된 기준에 의한 건물의 동적응답신호에 대한 기초적 활용방안이 마련되었다.

## 참고문헌

1. Choi. Y. S., Yoon. S. K., "The Study of Damage Assessment for Frame Structure Using Sensitivity Analysis", Architectural Institute of Korea, vol. 17, No. 11, 2001, pp.35-42. (In Korea)
2. Han. D. H., Kim. J. W., Yoon. S. K., "A Study on the Damage Assessment Using Modal Data Estimation Method", Architectural Institute of Korea, vol. 19, No. 12, 2003, pp.97-104. (In Korea)
3. Hong. K. S., Yun. C. B., Ryu. C. S., "Damage Estimation of Structure by Second Order Modal Perturbation", COSEIK, vol. 5, No. 3, 1992. (In Korea)
4. Kim. H. S., Chang. D. I., "Damage Estimation of Simple Beams using Damage Index I. Theory and Numerical Analysis", KSSC, vol. 10, No. 2, 1998, pp.43-50. (In Korea)
5. National Emergency Management Agency No. 2010-30, "Seismic acceleration instrument installation and operating standards", 2010. (In Korea)
6. Zhao, J. and DeWolf, J. T., "Sensitivity Study for Vibrational Parameters Used In Damage Detection", J. Struct. Engineering, ASCE, vol. 125, No. 4, 1999, pp.410-416.

Received : 08/21/2012

Revised : 12/11/2012

Accepted : 12/14/2012



---

## 요 지

손상된 구조물의 동적응답신호를 역해석함으로써 손상위치와 정도를 파악할 수 있다. 일반적으로 손상 전 후 고유진동수의 변화로부터 강성의 감소량을 구하고, 모드형상의 변화로부터 손상위치를 파악할 수 있다. 토목구조물의 경우 동적 응답신호로부터 손상을 검출코자 하는 연구가 상당히 진행되었으며 실용화 되었다. 그러나 건축구조물의 경우 몇 가지 문제로 인하여 이에 대한 연구가 활발히 진행되지 못하고 있다.

본 연구에서는 모드형상을 이용한 전단형 건물의 손상위치 추적방안을 제시 하고자 한다. 전단형 건물의 손상 전·후 1차 모드강성의 차이를 이용한 손상위치 추적지수를 이론적으로 고찰하였으며, 이를 Matlab 또는 MIDAS GENw와 같은 수치해석모델에 적용함으로써 손상위치추적기법의 타당성을 검증하였다. 또한 소형 진동대 실험을 수행하고 실측된 동적응답신호를 이용하여 손상위치를 추적함으로써 실구조물에 대한 적용성을 검토하였다. 진동대 실험결과 층강성이 25% 감소할 때 1차 모드 진동수는 12%증가 하였으며, 손상위치 지수는 손상 층에서 마이너스 값을 나타내었다.

**핵심 용어** : 손상검출, 모드형상, 모드해석, 고유진동수, 전단형 건물, 진동대 실험

---