

## 동적응답신호를 이용한 전단형 건물의 손상추정

### Damage Detection of Shear Building Structures Using Dynamic Response

유 석 형<sup>1)\*</sup>

Suk-Hyeong Yoo

#### Abstract

Damage location and extent of structure could be detected by the inverse analysis on dynamic response properties such as frequencies and mode shapes. The dynamic response of building structures has many noise and affected by nonstructural members and, above all, the behavior of building structure is more complex than civil structure and this makes the damage detection difficult. In recent researches the damage is detected by the indirect index such as sensitivity or assumed values. However, for the more reasonable damage detection, it needs to use the damage index directly induced from dynamic equation.

The purpose of this study is to provide the damage detection method on shear building structures by the damage index directly induced from dynamic equation. The provided damage index could be estimated from measured mode shape of undamaged structure and frequency difference between undamaged and damaged structure. The damage detection method is applied to numerical analysis model such as MATLAB and MIDAS GENw for the verification. The damage index at damaged story represents (-) sign and 15 times than other undamaged stories.

Keywords : Damage detection, Mode shape, Modal analysis, Natural frequency, Shear building

#### 1. 연구배경 및 목적

구조물의 동적응답신호를 분석하여 손상위치와 정도를 파악하고자 하는 연구는 국·내외적으로 활발히 진행되어 왔으며, 최근 고시된 「지진가속도 계측기 설치 및 운영기준」(National Emergency Management Agency, 2010)에서는 국가주요시설물들에 대하여 지진가속도계 설치를 의무화함으로써 지진 등의 재해로 인한 구조물의 손상을 신속하게 평가하고 대응할 수 있는 제도적 기틀을 마련하였다. 그 중 건축구조물의 경우 동적응답신호로 구조물을 판별하기에는 토목구조물에 비하여 구조형식이 복잡하고 건축마감재 및 칸막이 벽 등의 비구조요소의 영향과 기계, 차량 및 주변 환경으로부터 발생한 진동 등이 응답신호에 포함되어 있어 구조물 판별에 어려움이 있다.

일반적으로 손상 추정은 구조물의 동적응답신호인 시간영

역의 가속도 데이터를 계측한 후 이를 FFT변환 (fast fourier transformation)하여 각 모드의 고유주기와 모드형상을 구한 후 역해석을 통하여 손상위치와 손상정도를 파악함으로써 이루어진다. 건축구조물의 동적응답신호를 이용한 손상추정에 관한 기초적인 연구가 다소 진행되어 왔다 (Yoon et al., 2001; Han et al., 2003; Yoo et al., 2013).

Yoon et al. (2001)은 손상된 골조 구조물의 1차 고유진동수와 모드형상을 이용한 손상 평가방법을 제시하였다. 먼저 손상 전·후의 모드강성의 변화를 이용하여 손상위치를 추정하고 손상이 추정된 층으로부터 각 층의 민감도 계수를 이용하여 손상정도를 평가하였다.

Han et al. (2003)은 진동계측이 수행된 층 사이에 손상이 위치한다고 가정하고 이 구간의 모드형상을 추정하여 손상위치와 정도를 파악할 수 있는 방안을 제시하였다.

Yoo et al. (2013)은 손상 전·후 전단형 건물의 모드형상

1) 정회원, 경남과학기술대학교 건축공학과 교수, 교신저자

\* Corresponding author : piter31@gntech.ac.kr

• 본 논문에 대한 토의를 2014년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 2014년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

과 손상전 구조물의 강성을 이용하여 손상위치를 추정할 수 있는 방안을 제시하고 이를 소형 진동대 실험을 통하여 검증하였다.

위의 연구들은 손상추정을 위하여 민감도 또는 추정치 등 간접적 지표를 사용하고 있으나, 좀 더 합리적이고 명확한 손상추정을 위하여 손상된 구조물에 대한 운동방정식으로부터 직접 유도된 변수를 손상지수로 활용할 필요가 있을 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 손상 구조물의 운동방정식으로부터 직접 유도된 변수를 손상지수로 하는 손상추정 방법을 제시하고자 한다. 먼저 손상된 전단형 건물에 대한 운동방정식으로부터 층강성 손상을 유도하고 이를 손상지수로 제안하였다. 제안된 손상지수는 손상전 모드형상 및 강성 그리고 손상 전·후 고유진동수 차이를 알면 구할 수 있다. 각 층강성의 손상비의 부호는 강성의 증감을 나타내며, 그 크기는 층강성의 증감 비율을 나타낸다.

제시된 손상추정 지수의 신뢰성을 검증하기 위하여 Matlab (Matlab 7, 2011)을 이용한 전단형 건물의 수치해석 모델과 MIDAS GENw (MIDAS GEN Analysis and Design, 2013)를 이용한 유한요소모델에 대한 모드해석을 수행하고 손상을 추정하였다.

## 2. 손상지수

### 2.1 전단형 건물의 강성 및 질량행렬

전단형 건물은 각 층 높이에서 수평 단면의 회전이 없는 구조물로 정의된다. 따라서 변형된 건물은 전단력에 의해서만 처짐이 발생하는 캔틸레버 보의 특성을 가지게 되며 Fig.

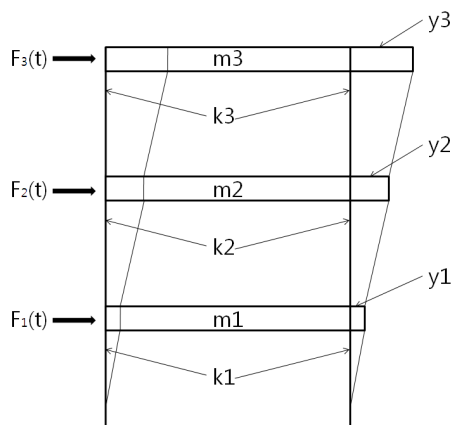


Fig. 1 3 DOF Shear Building

1과 같이 이상화 할 수 있다.

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 자유진동 운동방정식을 행렬식으로 표기하면 다음과 같다.

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

여기서  $[M]$  및  $[K]$ 는 각각 다음 식 (3)과 (4)로 주어지는 질량 매트릭스 및 강성도 매트릭스로서  $[M]$ 은 양정치의 대각행렬이고,  $[K]$ 는 양반정치의 대칭행렬이다.

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

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

### 2.2 고유진동수 변화량

강성행렬의 변화는 고유진동수를 변화시키므로 손상 전 후 변화된 고유진동수로부터 손상위치 및 정도를 추정할 수 있다. 비감쇠 자유진동 구조물의 운동방정식은 식 (2)와 같으며 구조체가 탄성이라고 가정하고 식 (2)의 해를 구하면 다음과 같다.

$$(-\omega_r^2 [M] + [K])\{\phi\}_r = \{0\} \quad (r = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

여기서  $r$ 는 모드차수이며  $\{\phi\}_r$ 는 식 (6)의 정규화조건을 만족한다.

$$\{\phi\}_r^T [M] \{\phi\}_r = 1 \quad (6)$$

강성행렬  $[K]$ 가 양반정치 (positive semi-definite)의 대칭행렬 (symmetric matrix)이므로  $r$ 는 구조물의 자유도수  $n$ 과 동일한 차수를 갖는다. 손상 구조물에 대하여 식 (5)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{-(w_r^2 + \Delta w_r^2)[M] + [K] + \Delta[K]\} \{\phi\}_r + \Delta\{\phi\}_r = \{0\} \quad (7)$$

식 (7)에서 모드형상변화량  $\Delta\{\phi\}_r$ 의 크기는 비교적 작을 뿐 아니라 향후 손상추정 시 이를 번거롭게 산출하지 않고 손상추정 식 (14) 및 식 (16)에서와 같이 손상 전 모드형상과 강성 그리고 손상 발생 시 진동수 변화량만으로 손상위치를 파악 할 수 있도록 하기 위하여  $\Delta\{\phi\}_r$ 를 0으로 하였다. 이로 인한 미소한 오차는 발생 할 수 있으나 손상추정 시 계측의 번거로움을 해소할 수 있는 실용적인 방법이라고 판단된다. 따라서 식 (7)에서  $\Delta\{\phi\}_r = 0$ 으로 하고 식 (5)를 적용하면

$$-\Delta w_r^2 [M] \{\phi\}_r + \Delta[K] \{\phi\}_r = \{0\} \quad (8)$$

여기에  $\{\phi\}_r^T$ 를 곱하고 식 (6)을 적용하면 고유진동수의 변화는 다음과 같다.

$$\Delta w_r^2 = \{\phi\}_r^T \Delta[K] \{\phi\}_r \quad (9)$$

여기서 전체 강성행렬의 변화량을 각 층 강성의 변화로 나타내면 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta[K] = \sum_{i=1}^n [K_i] \beta_i \quad (10)$$

여기서  $[K_i]$ 는  $i$ 번째 층에 대한 계수만 값이 있는 전체 강성행렬이며,  $\beta_i$ 는  $i$ 번째 층의 층강성 손상비를 나타낸다. 식 (10)을 식 (9)에 대입하면 다음과 같다.

$$\Delta w_r^2 = \sum_{i=1}^n \{\phi\}_r^T [K_i] \{\phi\}_r \beta_i \quad (11)$$

식 (11)에서 고유진동수 변화량  $\Delta w_r^2$ 과 모드형상  $\{\phi\}_r$ 은 손상 전후 구조물의 동적응답신호로부터 측정 할 수 있고, 손상전 구조물의 강성행렬  $[K_i]$ 는 구조도면 등으로부터 정보를 알 수 있으므로 층강성 손상비  $\beta_i$ 만 미지수로 남게 된다.

### 2.3 손상추정지수 제안

본 연구에서는 손상에 의한 동특성의 변화량  $\Delta w_r^2$ 을 나타내는 식 (11)을  $\beta_i$ 에 대한 식으로 정리하고 이를 손상지수로써 제안하였다.

먼저 식 (11)을 연립방정식의 형태로 정리하면 다음 식 (12)와 같다.

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \Delta w_1^2 \\ \Delta w_2^2 \\ \vdots \\ \Delta w_n^2 \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} \{\phi\}_1^T \sum_{i=1}^n \beta_i [K_i] \{\phi\}_1 \\ \{\phi\}_2^T \sum_{i=1}^n \beta_i [K_i] \{\phi\}_2 \\ \vdots \\ \{\phi\}_n^T \sum_{i=1}^n \beta_i [K_i] \{\phi\}_n \end{Bmatrix} \\ &= \begin{Bmatrix} \{\phi\}_1^T [K_1] \{\phi\}_1 \beta_1 + \cdots + \{\phi\}_1^T [K_n] \{\phi\}_1 \beta_n \\ \{\phi\}_2^T [K_1] \{\phi\}_2 \beta_1 + \cdots + \{\phi\}_2^T [K_n] \{\phi\}_2 \beta_n \\ \vdots \\ \{\phi\}_n^T [K_1] \{\phi\}_n \beta_1 + \cdots + \{\phi\}_n^T [K_n] \{\phi\}_n \beta_n \end{Bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \{\phi\}_1^T [K_1] \{\phi\}_1 & \cdots & \{\phi\}_1^T [K_n] \{\phi\}_1 \\ \{\phi\}_2^T [K_1] \{\phi\}_2 & \cdots & \{\phi\}_2^T [K_n] \{\phi\}_2 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \{\phi\}_n^T [K_1] \{\phi\}_n & \cdots & \{\phi\}_n^T [K_n] \{\phi\}_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_n \end{Bmatrix} \\ &=: [A]_{n \times n} \beta_{n \times 1} \end{aligned} \quad (12)$$

따라서

$$\beta = [A]^{-1} \Delta w^2 \quad (13)$$

여기서

$$A = \begin{bmatrix} \{\phi\}_1^T [K_1] \{\phi\}_1 & \cdots & \{\phi\}_1^T [K_n] \{\phi\}_1 \\ \{\phi\}_2^T [K_1] \{\phi\}_2 & \cdots & \{\phi\}_2^T [K_n] \{\phi\}_2 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \{\phi\}_n^T [K_1] \{\phi\}_n & \cdots & \{\phi\}_n^T [K_n] \{\phi\}_n \end{bmatrix} \quad (14)$$

또는 Cramer's Rule에 의해

$$\beta_i = \frac{1}{|A|} |[A_1 \cdots A_{i-1} \Delta w^2 A_{i+1} \cdots A_n]|, i = 1, 2, \dots, n. \quad (15)$$

즉,

$$\beta_1 = \frac{1}{|A|} \begin{vmatrix} \Delta w_1^2 & & & \\ \Delta w_2^2 & A_2 & & \\ \Delta w_3^2 & & A_3 & \\ & & & \end{vmatrix}$$

$$\beta_2 = \frac{1}{|A|} \begin{vmatrix} & \Delta w_1^2 & & \\ A_1 & \Delta w_2^2 & & \\ & & \Delta w_3^2 & \\ & & & \end{vmatrix}$$

$$\beta_3 = \frac{1}{|A|} \begin{vmatrix} & & \Delta w_1^2 & \\ & A_1 & \Delta w_2^2 & \\ & & \Delta w_3^2 & \\ A_1 & A_2 & \Delta w_3^2 & \end{vmatrix} \quad (16)$$

여기서  $A_i$ 는 행렬  $A$ 의  $i$ 번째 열벡터

**[Cramer's Rule]**

행렬  $[A]_{n \times n} = [A_1 A_2 \cdots A_n]_{n \times n}$  은  $|A| = \text{Det}(A) \neq 0$  을 만족할 때, 열벡터들  $X = \{x_1 x_2 \cdots x_n\}^T$  와  $B = \{b_1 b_2 \cdots b_n\}^T$  에 대한 연립방정식  $[A]X = B$  의 근은

$$x_i = \frac{|[A_1 A_2 \cdots A_{i-1} B A_{i+1} \cdots A_n]|}{|A|}, i = 1, 2, \dots, n.$$

식 (14)에서  $\beta_i$ 는 층강성의 감소비로써 (-)부호는 층강성의 감소를 나타내며 그 크기는 층강성의 감소율을 나타낸다. 따라서  $\beta_i$ 가 (-)부호이면서 상대적으로 큰 값을 나타내는 층에 손상이 발생하였음을 예측할 수 있다.

**3. 모드해석**

제안된 손상추정 지수를 수치해석 예제를 통하여 검증하고 또한 근사해석과 정밀해석의 차이에 따른 제안식의 신뢰성을 검토하기 위하여 Matlab과 MIDAS GENw를 이용하여 3층 전단형 건물에 대한 고유치 해석을 수행하였다.

수치해석 대상모델은 Fig. 2와 같이 높이 1,035mm의 축소된 3층 전단형 건물이며 각 층마다 1.2×34×340mm기둥 4와 슬래브는 두께 5mm의 철판으로써 다이어 프레임 역할을 하도록 하였다. 손상은 1층 기둥 1개를 제거함으로써 구현하였다. 대상모델의 재질은 Table 1과 같다.

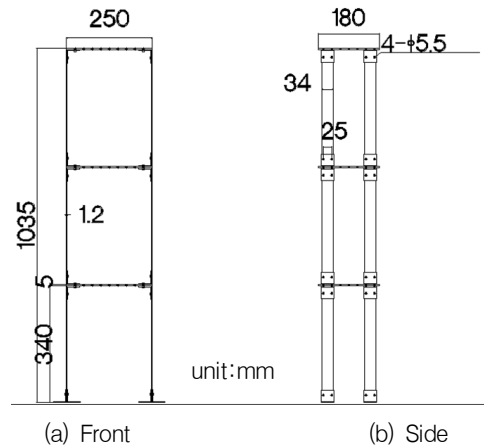


Fig. 2 Detail of Numerical Analysis Model

Table 1 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 elasticity		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

**3.1 Matlab**

Matlab의 수치해석 모델은 Fig. 2의 3층 전단형 구조체를 Fig. 1과 같이 이상화된 전단형 건물로써 단순화하여 고유치 해석을 수행하였다. 층강성, 전체강성행렬 및 질량행렬은 식 (1), (3) 및 식 (4)를 사용하였으며, 손상은 1층 기둥 1개를 감소시켰으므로 1층의 강성을 3/4로 감소시키고 손상에 의한 질량의 변화는 무시하여 고유치 해석 (eigenvalue analysis) 을 수행하였다. Matlab 수치해석 대상모델의 고유치해석 조건으로 적용된 층강성 및 질량은 Table 3과 같다. 본 연구에서 제시된 손상지수로 활용되는 층강성 감소비는 식 (14)에서와 같이 구조물의 자유도와 동일한 차수의 모드해석이 필요하므로 3차모드까지 고유치 해석을 수행하였으며, 그 결과는 Table 2와 같다.

Table 2에서 손상 전후 고유치해석결과로 구한 1, 2, 3차 모드의 진동수와 모드형상의 변화를 고찰하여 보면 손상 이후 진동수가 전 모드차수에서 감소함을 알 수 있다.

Table 2 Modal Analysis Result of Matlab

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

Table 3 Modal Analysis Condition of Matlab

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

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>	1.72	0.4525	1.57	0.5261
	2 <sup>nd</sup>		0.8111		0.8327
	3 <sup>rd</sup>		1		1
2	1 <sup>st</sup>	4.77	1	4.57	1
	2 <sup>nd</sup>		0.3874		0.2935
	3 <sup>rd</sup>		-0.8508		-0.8473
3	1 <sup>st</sup>	6.81	-0.7780	6.75	-0.7110
	2 <sup>nd</sup>		1		1
	3 <sup>rd</sup>		-0.5095		-0.5238

### 3.2 MIDAS GENw

MIDAS GENw의 수치해석 대상모델은 Matlab과 동일한 Fig. 2의 3층 전단형 구조체를 3차원으로 모델링하였으며, 기둥은 보요소를 슬래브는 플레이트요소를 사용하였으며, 재질은 Table 1을 고려하고 질량의 분포는 lumped mass로 고려하여 유한요소법에 의한 고유치해석을 수행하였다.

MIDAS GENw의 고유치 해석결과 각 모드별 고유진동수와 정규화된 모드형상은 Table 4와 같다. Matlab의 Modal Analysis 결과와 유사하게 손상 후 전 모드차수에서 진동수가 감소하며, 손상 있는 1층에서 모드형상이 비교적 크게 나타났다. 식 (16)의 증강성 감소비  $\beta_i$ 를 산출하기 위해서는

Table 5 Story Stiffness of GENw Model

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

Table 6 Difference of frequency

Story	$\Delta w_i^2 = w_i^{2\dagger} - w_i^{2\ddagger}$	
	Matlab	MIDAS GENw
1 <sup>st</sup> ( $\beta_1$ )	-20.85	-19.64
2 <sup>nd</sup> ( $\beta_2$ )	-95.45	-73.94
3 <sup>rd</sup> ( $\beta_3$ )	-52.97	-32.38

† : Undamaged frequency square, ‡ : Damaged frequency square

식 (14)에서와 같이 증강성이 필요하므로 유한요소모델인 MIDAS GENw에서는 임의의 횡력을 주어 해석결과로 구한 층전단력을 층변위로 나누어 증강성을 구하였다. 이와 같이 구한 증강성은 Table 5와 같다.

### 4. 손상추정

손상 전 후 수치해석 모델에 대한 Modal Analysis로부터 구한 모드형상 및 진동수를 제안된 손상추정 지수에 대입하여 손상추정을 수행하였다. Table 2 및 Table 4의 모드해석 결과 중 손상 전 모드형상과 고유진동수 변화량을 식 (16)에 대입하여 손상추정 지수를 구하였다. Table 2와 Table 4의 진동수를 각 진동수로 변환 ( $w = 2\pi f$ )하여 손상 전·후 제곱의 차  $\Delta w_i^2$ 를 구하여 정리하면 Table 6과 같다.

Matlab으로 구한 손상전후 진동수 제곱의 차이를 증강성 손상비 산출식 (16)에 대입하면 다음과 같다.

$$\beta_1 = \frac{1}{|A|} \begin{vmatrix} -20.85 & & \\ -95.45 & A_2 & A_3 \\ -52.97 & & \end{vmatrix}$$

$$\beta_2 = \frac{1}{|A|} \begin{vmatrix} & -20.85 & \\ A_1 & -95.45 & A_3 \\ & -52.97 & \end{vmatrix}$$

$$\beta_3 = \frac{1}{|A|} \begin{vmatrix} & & -20.85 \\ A_1 & A_2 & -95.45 \\ & & -52.97 \end{vmatrix} \quad (17)$$

여기서 A행렬은 식 (14)와 같이 손상전 모드행렬 및 강성

Table 7 Damage Detection Index

Story	Damage Detection Index	
	Matlab	MIDAS GENw
1 <sup>st</sup> ( $\beta_1$ )	-89.28	-85.97
2 <sup>nd</sup> ( $\beta_2$ )	0.1397	4.19
3 <sup>rd</sup> ( $\beta_3$ )	6.0604	16.77

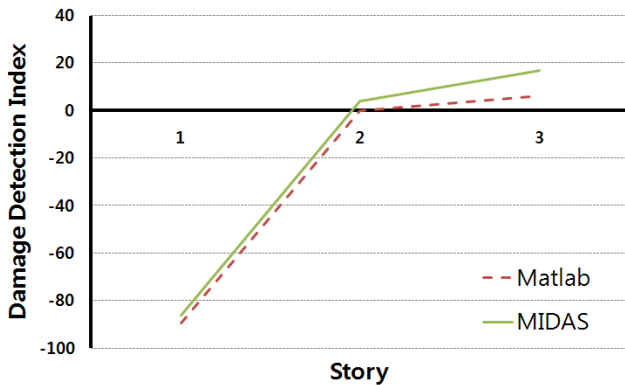


Fig. 3 Damage Detection Index

행렬로부터 구할 수 있으며 Matlab에 의한 모드행렬은 Table 2의 손상 전의 1, 2, 3차 모드형상 값을 사용 하였으며, 강성 행렬은 식 (4)에서 해당 층의 층 강성만 대입하여 다음과 같이 구하였다.

$$\begin{aligned}
 [K_1] &= \begin{bmatrix} 1.196 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 [K_2] &= \begin{bmatrix} 1.196 & -1.196 & 0 \\ -1.196 & 1.196 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 [K_3] &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.196 & -1.196 \\ 0 & -1.196 & 1.196 \end{bmatrix} \quad (18)
 \end{aligned}$$

이와 같이 손상 전 모드형상 및 강성 그리고 손상 전·후 진동수 변화량을 이용하여 구한 손상지수는 Table 7과 같다.

본 연구의 층강성 감소비 식 (15)의  $\beta_i$ 는 유도과정에서 근사화와 정규화를 거침으로써 물리적인 층 강성 감소비와는 차이가 있다. 즉, 식 (8)에서 고유진동수 변화량 산출 시  $\Delta\{\phi\}_r$  항을 제거하였고, 또한 식 (6)에서 처럼 변위량 대신 정규화된 모드형상을 사용하였다. 본 예제건물은 1층에서 기둥 4개 중 1개가 감소하였으므로 물리적인 층강성 감소비는 약  $\beta_1=0.25$ ,  $\beta_2=0$  및  $\beta_3=0$ 을 물리적인 층강성 감소비로서

기대할 수 있으나, Table 7의 결과 값은 이와 큰 차이를 보여주고 있다. 그러나 손상위치를 파악하기에는 충분히 신뢰할 수 있는 결과를 보여주고 있다. 손상추정 지수 값이 손상이 발생한 1층 ( $\beta_1$ )에서 (-)부호를 나타내고 또한 층강성 감소비의 크기가 Matlab은 -89.28, MIDAS GENw에서는 -85.97로서 다른 층에 비하여 15배 정도로 크게 나타나 1층에 손상이 집중되어 있음을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서 제시한 층강성 감소비를 이용한 손상 추정지수는 전단형 건물의 층 수준의 손상 위치를 추정하기에 적합한 것으로 판단된다.

### 5. 결론

- (1) 손상된 전단형 건물의 운동방정식으로부터 직접 층강성 감소비를 이용한 손상 추정지수 산출식을 도출하였다.
- (2) 제안된 손상 추정지수식을 Matlab 및 MIDAS GENw 등의 수치해석예제에 적용한 결과 손상이 발생한 층에서 (-)부호를 나타내었으며, 크기가 다른 층에 비하여 15배 정도 크게 나타났다.
- (3) 제안된 손상추정 지수는 식의 유도과정에서 적용된 간략화 및 정규화로 인하여 물리적인 층강성 감소비와 다소 차이가 발생하였으나, 손상위치를 추정하기에는 충분히 신뢰성 있게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.
- (4) 수치해석모델의 탄성거동 시 강성감소를 고찰하여 손상위치를 추정할 수 있는 방안을 마련하였으나, 향후 실구조물에 적용하기 위하여 실험 및 비선형거동 등을 고려한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 경남과학기술대학교 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

### References

1. Choi, Y. S., and Yoon, S. K. (2001), The study of Damage Assessment for Frame Structure Using Sensitivity Analysis, Architectural Institute of Korea, 17(11), 35-42 (in Korean).
2. Han, D. H., Kim, J. W., and Yoon, S. K. (2003), A study on the Damage Assessment Using Modal Data Estimation Method, Architectural Institute of Korea, 19(2), 97-104 (in Korean).
3. Hong, K. S., Yun., C. B., and Ryu, C. S. (1992), Damage Estimation of Structure by Second Order Modal Perturbation,

- 
- COSEIK, 5(3) (in Korean).
4. MATLAB (2011), User's Guide, ver. 7.0.
5. MIDAS GEN ANALYSIS AND DESIGN (2013), ver. 800.
6. National Emergency Management Agency (2010), No. 2010-30, Seismic Acceleration Instrument Instalation and Operating Standards (in Korean).
7. Yoo, S. H., and Lee, H. K. (2013), Damage Location Detection of Shear Building Structures Using Mode Shape, *Journal of the Korea Institute for Structural maintenance Inspection*, 17(1), 124-131 (in Korean).
8. Zhao, J., and DeWolf, J. T. (1999), Sensitivity Study for Vibrational Parameters UIsed In Damage Detection, *J. Struct. Engineering*, ASCE, 125(4), 410-416.
- Received : 09/06/2013  
Revised : 01/14/2014  
Accepted : 02/18/2014

---

## 요 지

구조물의 손상 추정은 동적응답신호로부터 고유주기와 모드형상을 구한 후 이를 역해석하여 손상위치와 손상정도를 파악함으로써 이루어진다. 건축구조물의 경우 토목구조물에 비하여 구조형식이 복잡하고 비구조요소 및 노이즈 등의 영향으로 인하여 구조물 판별에 어려움이 있다. 동적응답신호를 이용한 건물의 손상추정에 관한 최근의 연구들은 손상추정을 위하여 민감도 또는 추정치 등 간접적 지표를 사용하고 있으나, 좀 더 합리적이고 명확한 손상추정을 위하여 운동방정식으로부터 직접 유도된 변수를 손상지수로 활용할 필요가 있을 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 전단형 건물의 운동방정식으로부터 직접 유도된 층강성 감소비를 손상지수로 하는 손상추정 방법을 제안하였다. 제안된 손상지수는 손상 전 모드형상과 손상 전·후 고유진동수 차이를 알면 구할 수 있다. 제안된 손상 추정방법을 수치해석예제에 적용한 결과 손상이 발생한 층에서 층강성 변화율이 (-)부호를 나타내었으며, 크기가 다른 층에 비하여 15배 정도 크게 나타나 전단형 건물의 손상 추정지수로서 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

**핵심 용어** : 손상추정, 모드형상, 모드해석, 고유진동수, 전단형 건물

---