

# 동특성 변화를 이용하여 트리스 구조물의 손상 예측

## Damage Detection in the Truss Using Modified Dynamic Characteristics

이 정 윤<sup>†</sup>  
Jung Youn Lee<sup>†</sup>

(Received January 17, 2020 ; Revised February 7, 2020 ; Accepted February 7, 2020)

**Key Words :** Stiffness Matrix(강성 행렬), Sensitivity Coefficient Matrix(감도계수 행렬), Truss(트리스), Dynamic Characteristics(동특성), Damage(손상)

### ABSTRACT

In this paper, a method for accurately predicting truss damage from dynamic changes before and after the damage occurs is proposed. This method is used to analyze sensitivity coefficients based on changes in dynamic characteristics and detect the damage using a modified stiffness matrix. This matrix is obtained using an iterative method of the sensitivity coefficient matrix, and a method to estimate the location of the damage and the degree of truss damage is developed. The proposed method was applied to a seven-bar truss to predict the location and size of damage accurately.

### 1. 서 론

트리스는 일반적인 구조 유형이며 교량, 타워, 건물, 파이프 랙(pipe rack), 기계구조물에 많이 사용되는 중요한 구조물이다. 트리스의 손상은 부재의 부식이나 노화, 지진하중, 풍하중, 예기치 않은 충격하중에 이르기까지 다양한 환경 등의 이유로 발생한다. 따라서 트리스의 손상은 붕괴를 가져올 수 있기 때문에 정확하게 감지할 필요가 있다. 하지만 육안 검사를 통해 손상의 위치와 크기를 찾기는 현실적으로 매우 어렵기 때문에 수십 년 동안 트리스에 발생하는 손상을 효과적으로 찾아내기 위해 수많은 연구가 진행되어져 왔다. 이에 대한 연구로 Cawley et al.은<sup>(1)</sup> 구조적 손상 탐지를 위해 최초의 고유주파수를 사용하였으며 Hassiotis et al.은<sup>(2)</sup> 강성 감소를 감지하기 위해 국부 강성 감소에 대한 고유주파수의 민감도 관찰하였다. Lew et al.은<sup>(3)</sup> 전달함수의 변수 변화를 이

용해 구조물의 손상위치와 크기를 정의하였다. Vakil et al.은<sup>(4)</sup> 구조물의 손상 진단 방법을 손상된 구조물 모델 기반으로 개발하였다. Nikolakopoulos et al.은<sup>(5)</sup>은 균열 깊이와 위치에 대한 최초의 두 구조 고유주파수의 의존성을 보여주기 위해 등고선 형태를 사용하였고 Cerri et al.은<sup>(6)</sup> 손상된 영역에서 발생하는 강성의 감소를 사용하여 보 모델에서 손상된 영역을 찾는 문제를 조사했으며 이러한 강성 감소를 측정하기 위해 고유진동수를 사용했다. 또한 Liu et al.은<sup>(7)</sup> 구조물의 강성 분포를 식별하기 위해 계산 역 기법을 도입하여 주파수 영역의 문제를 탐색하였고 Maity et al.은<sup>(8)</sup> 고유진동수의 변화를 사용하여 구조적 손상을 탐지하는 유전자 알고리즘을 사용했으며 Sahoo et al.은<sup>(9)</sup> 고유주파수와 모드 형태를 모두 사용하여 트리스 브리지 조인트의 손상 감지를 위해 인공 신경망을 사용하였다.

그러나 그동안 트리스 손상을 탐지하기 위해 다양한 연구가 진행되어왔지만<sup>(10-13)</sup> 고유진동수와 고유모

<sup>†</sup> Corresponding Author; Member, Department of Mechanical System Engineering, Kyonggi University, Professor  
E-mail : jylee@kgu.ac.kr

<sup>‡</sup> Recommended by Editor Jun hong Park

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

드를 동시에 이용하여 트러스의 손상 위치와 크기를 예측하는 연구는 거의 없었다. 여기서는 트러스의 손상 전과 후의 고유진동수와 고유모드의 변화량을 이용해 감도계수 행렬을 정의하고 이를 이용하여 트러스에 발생한 손상의 위치와 손상정도를 정확히 예측하는 새로운 방법을 제안하고 평면 트러스에 적용하여 검증한다.

### 2. 평면 트러스의 유한요소법

평면 공간 트러스 구조는 각 끝단에서 2 자유도를 가진 2차원 막대 요소를 사용하여 모델링되며 유한요소 이론에서 요소 좌표계의 해당 강성 및 질량 매트릭스는 다음과 같이 표현된다<sup>(14)</sup>.

$$[k] = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$[m] = \frac{\rho AL}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서  $A, E, L$ 과  $\rho$ 는 각각 요소의 단면적, 세로탄성계수, 길이 및 요소의 밀도이다. 전체좌표계  $X$ 축과 요소사이의 각이  $\phi$ 일 때 평면트러스의 전환행렬  $[T]$ 는 식 (3)과 같다<sup>(14)</sup>.

$$[T] = \begin{bmatrix} c & s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c & s \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서  $c = \cos \phi, s = \sin \phi$ 이며  $[k]$ 을 전체 좌표계(global coordinate)로 나타내면 식 (4)와 같이 된다.

$$[K]_e = [T]^t [k] [T] = \frac{AE}{L} \begin{bmatrix} c^2 & cs - s^2 - cs \\ cs & s^2 - cs - s^2 \\ -c^2 - cs & s^2 & cs \\ -cs - s^2 & cs & s^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

질량행렬의 경우 해석을 간편하기 위해 집중질량(lumped method)을 사용하는 경우는 식 (5)와 같이 된다.

$$[M]_e = [T]^t [m] [T] = \frac{A\rho L}{6} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

각각의 절점에서 모든 요소의 강성행렬 및 질량행렬을 조합하고 경계조건을 고려하면 트러스의 자유진동방정식은 식 (6)과 같이 된다.

$$[M] \{\ddot{x}\} + [K] \{x\} = 0 \quad (6)$$

여기서  $[M], [K]$ 는 전체 트러스의 질량 및 강성행렬이며  $\{x\}$ 는 변위이다.

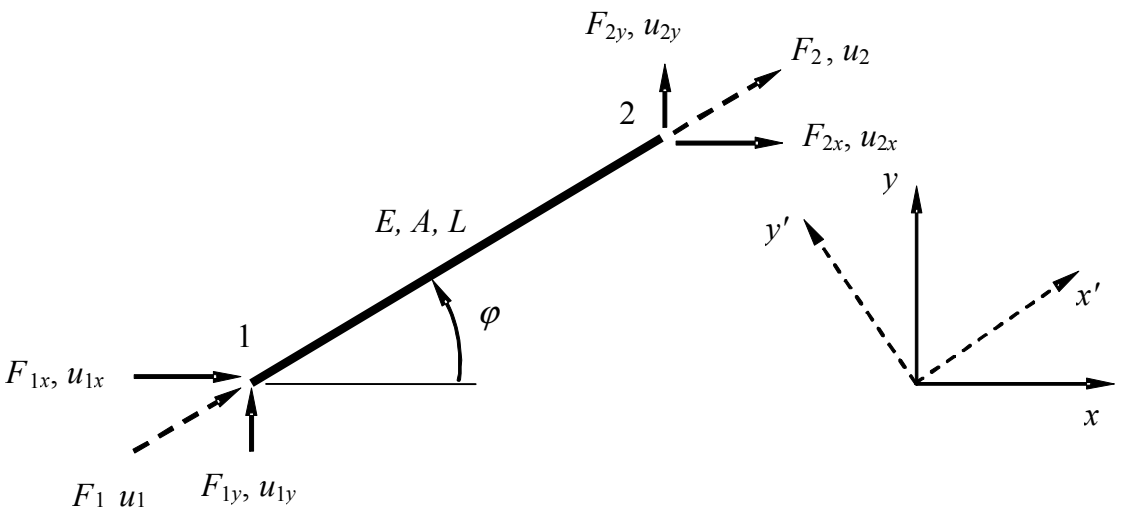


Fig. 1 Element model in truss

### 3. 트러스의 손상 탐지

트러스에 손상이 일어나면 강성이 감소되어 강성 행렬은 변하게 되지만 질량의 변화는 무시할 수 있으므로 질량행렬은 변하지 않는다고 가정한다. 트러스의 손상은 요소의 강성 감소(EA)로 가정하였다. 구조물에 강성이 변경되면 동특성이 변화되며 이때 손상 전과 후의 동특성은 다음과 같이 표현된다

$$([K_o] - \lambda_o [M_o])\{\phi_o\} = 0 \tag{7}$$

$$([K] - \lambda [M_o])\{\phi\} = [([K_o] + [\Delta K]) - (\lambda_o + \Delta \lambda)[M_o]] \times (\{\phi_o + \Delta \phi\}) = 0 \tag{8}$$

여기서  $[K_o]$ 와  $[M_o]$ ,  $[K]$ ,  $[\Delta K]$ 은 각각 트러스의 손상 전 강성행렬과 질량행렬, 트러스의 손상 후 강성행렬 및 강성행렬의 변경량이며  $\lambda_o$ ,  $\{\phi_o\}$ ,  $\lambda$ ,  $\{\phi\}$ ,  $\Delta \lambda$ ,  $\{\Delta \phi\}$ 는 각각 손상 전의 고유진동수와 고유벡터, 손상 후의 고유진동수와 고유벡터, 고유진동수 및 고유벡터 변화량이다.

#### 3.1 손상 발생 후 감도계수의 해석

손상 발생 후 고유벡터의 변화량은 변경 전 고유벡터의 선형 결합으로 나타낼 수 있다<sup>(15)</sup>.

$$\{\Delta \phi\}_i = \sum_{k=1}^n \alpha_{ki} \{\phi_o\}_k \tag{9}$$

여기서  $\{\Delta \phi\}_i$ 는 고유벡터 변화량의  $i$ 차 모드이고  $\alpha_{ki}$ 는  $k$ 차 모드에 대한  $i$ 차 모드의 감도계수로 고유벡터 변화량을 손상 전 고유벡터의 선형조합으로 나타내는 계수이다.  $\{\phi_o\}_k$ 는 손상 전 고유벡터의  $k$ 차 모드이고 식 (9)는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$[\Delta \phi] = [\alpha][\phi_o] \tag{10}$$

$$[\alpha] = [\Delta \phi][\phi_o]^{-1} \tag{11}$$

여기서  $[\Delta \phi]$ ,  $[\phi_o]$ 는 고유벡터 변화량 행렬과 손상 전 고유벡터 행렬이다.  $[\alpha]$ 식 (9)에서 구한 감도계수의 벡터를 전체 모드로 구한 감도계수행렬이다. 따라서 감도계수 행렬은 손상 전 고유벡터 행렬과 손상 후의 고유벡터 변화량 행렬로부터 구할 수 있다.

#### 3.2 손상 후 강성행렬의 변경량 해석

손상 후 변경된 강성행렬을 해석하기 위해 기존의 반복법 방법을<sup>(16)</sup> 사용하였다. 먼저 식 (11)에서 구한 감도계수와 손상 전 고유진동수들로부터 초기치  $\Delta K_{ii}^{(1)}$ ,  $\Delta K_{ij}^{(1)}$ 를 아래와 같이 구한다.

$$\Delta K_{ii}^{(1)} = \omega_i^2 - \omega_{oi}^2, \quad i = j \tag{12}$$

$$\Delta K_{ij}^{(1)} = \alpha_{ij}\omega_{oi}^2 + \alpha_{ji}\omega_{oj}^2, \quad i \neq j \tag{13}$$

여기서  $\omega_{oi}^2$ 와  $\omega_{oj}^2$ 는 손상 전  $i, j$ 의 고유진동수이고 식 (12), (13)으로부터 반복법을 사용하여 다음과 같이  $\Delta K_{ii}^{(m+1)}$ ,  $\Delta K_{ij}^{(m+1)}$ 을 구한다.

$$\begin{aligned} \Delta K_{ii}^{(m+1)} &= \omega_i^2 - \omega_{oi}^2 - 2\alpha_{ii}\omega_{oi}^2 - \sum_{k=1}^n \alpha_{ki} \Delta K_{ik}^{(m)} - \sum_{k=1}^n \alpha_{ki}^2 \\ &- \omega_{ok}^2 - \sum_{k=1}^n \alpha_{ki} \Delta K_{ki}^{(m)} - \sum_{q=1}^n \alpha_{qi} \sum_{k=1}^n \alpha_{ki} \Delta K_{qk}^{(m)} \end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned} \Delta K_{ij}^{(m+1)} &= \alpha_{ij}\omega_{oi}^2 + \alpha_{ji}\omega_{oj}^2 - \sum_{k=1}^n \alpha_{kj} \Delta K_{ik}^{(m)} \\ &- \sum_{k=1}^n \alpha_{ki} \alpha_{kj} \omega_{ok}^2 - \sum_{k=1}^n \alpha_{ki} \Delta K_{jk}^{(m)} \\ &- \sum_{q=1}^n \alpha_{qi} \sum_{k=1}^n \alpha_{kj} \Delta K_{qk}^{(m)}, \quad i \neq j \end{aligned} \tag{15}$$

여기서  $\Delta K_{ij}^{(m+1)}$ 은 반복법으로 구한  $(m+1)$ 번째  $\Delta K_{ij}$ 이다.

$$\Delta K_{ij} = \{\phi_o\}_i^T [\Delta K] \{\phi_o\}_j \tag{16}$$

여기서  $\Delta K_{ij}$ 를 일반화된 강성 변경량(generalized stiffness variation)이라고 정의하면 식 (16)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$[\phi_o]^T [\Delta K] [\phi_o] = [\Delta K_{ij}] \tag{17}$$

식 (18)에서 강성행렬 변경량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[\Delta K] = \{[\phi_o]^T\}^{-1} [\Delta K_{ij}] [\phi_o]^{-1} \tag{18}$$

여기서 식 (18)에서 구한  $[\Delta K]$  식 (7)에 있는 강성 행렬을 분석하면 각 요소에 대한 변경된  $\Delta K$ 를 구할 수 있다. 이  $\Delta K$ 를 식 (4)의 열과 행(row and column)을 비교하여 손상위치를 구하고  $\Delta K$  값을 비교하여 손상 정도를 예측한다.

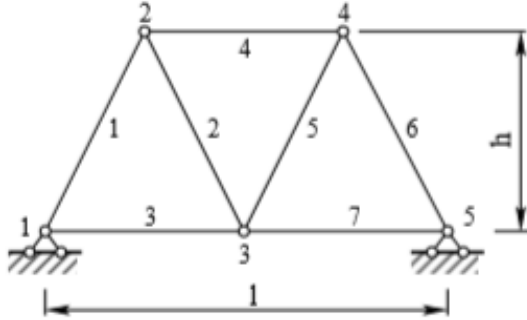


Fig. 2 Damage model in seven-bar truss

Table 1 Comparison of natural frequencies of truss before damage

Mode	Proposed $f_0$ (Hz)	Lahe <sup>(17)</sup> $f_0$ (Hz)	Midas /Gen $f_0$ (Hz)
1	193.02	193.02	193.02
2	200.81	200.81	200.81
3	455.67	455.67	455.67
4	589.33	589.33	589.33
5	603.91	603.91	603.91
6	686.98	686.98	686.98

Table 2 Comparison of natural frequencies of truss before and after damage

Mode	CASE 0 $f_0$ (Hz)	CASE 1 $f_1$ (Hz)	CASE 2 $f_2$ (Hz)
1	193.02	188.55	183.86
2	200.81	197.64	193.54
3	455.67	439.95	440.93
4	589.33	583.95	536.17
5	603.91	590.97	577.24
6	686.98	686.93	641.60

#### 4. 컴퓨터 모사 실험

Fig. 2에 손상에 사용된 트러스의 모델을 나타내었다<sup>(18)</sup>. 길이  $l=4.0$  m, 높이  $h=2.0$  m, 부재 단면적  $A=0.001$  m<sup>2</sup>, 세로탄성계수  $E=210$  GPa, 푸아송 비  $\nu=0.3$ , 밀도  $\rho=8000$  kg/m<sup>3</sup>이다. 경계조건은 1점, 5점 모두 x방향과 y방향의 이동을 구속시켰다. 시뮬레이션은 다음의 세 가지 경우를 하였다.

- 1) CASE 0: 손상 없는 경우
- 2) CASE 1: 1번 및 3번 요소의 세로탄성계수가 각각 10%, 20% 감소하는 경우
- 3) CASE 2: 2번, 4번 및 7번 요소의 세로탄성계수가 각각 10%, 15%, 25% 감소하는 경우

#### 5. 결과 및 고찰

##### 5.1 고유진동수 변화 검토

예제의 총자유도는 평면 트러스이고 절점이 5개이므로 10개이다. 총자유도는 1, 5번의 경계조건이 고정이므로 6개이며 고유진동수는 6개 존재하였다.

손상 전 트러스의 고유진동수를 Table 1에 비교하였다. 질량행렬 식 (5)를 사용하여 해석한 고유진동수를 기존논문<sup>(17)</sup>과 범용 구조해석 프로그램인 MIDAS/Gen을 사용해서 구한 논문을 비교하였다. 해석한 고유진동수가 기존논문과 MIDAS/Gen에서 구한 논문이 잘 일치하였다. 여기서  $f_0$ 는 손상 전 고유진동수이다.

Table 2은 질량행렬을 식 (5)를 사용하여 손상 전과 후의 고유진동수를 나타내 것으로 트러스에 손상이 발생하여 강성이 감소되었기 때문에 고유진동수가 낮아졌음을 알 수 있다. 여기서  $f_1$ 과  $f_2$ 는 각각 CASE 1과 CASE 2의 손상 후 고유진동수이다.

##### 5.2 고유벡터 검토

Fig. 3에 트러스의 손상이 발생하기 전 고유벡터를 1차에서 6차까지 나타내었으며 6개의 고유진동수가 존재하였다.

Table 3에 손상 전의 고유벡터를 나타내었다. 고유벡터는 식 (6)의 질량행렬을 단위행렬로 정규화하여 해석하였다. Table 4는 CASE 1일 때 고유진동수를 나타낸 표이며 Table 5는 CASE 2의 경우이다. 두 경우 모두 강성이 감소되어 고유벡터가 변경되었다.

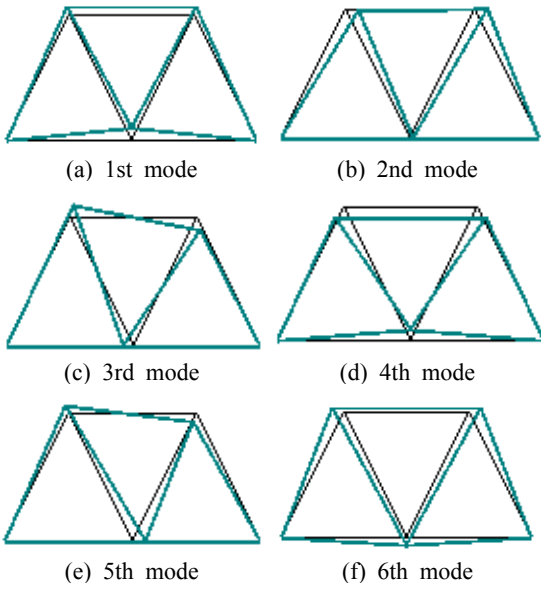


Fig. 3 Eigenvectors before damage of the truss

Table 3 Comparison of eigenvectors of 7 bar truss in CASE 0

Mode	Node					
	2		3		4	
	x	y	x	y	x	y
1	-0.0239	0.0944	0.0000	0.1436	0.0239	0.0944
2	0.1501	-0.0110	0.0373	0.0000	0.1501	0.0110
3	0.0420	0.1497	-0.1221	0.0000	0.0420	-0.1497
4	-0.0981	-0.1170	0.0000	0.1240	0.0981	-0.1170
5	0.0427	-0.1083	-0.1726	0.0000	0.0427	0.1083
6	0.1552	-0.0594	0.0000	0.1004	-0.1552	-0.0594

Table 4 Comparison of eigenvectors of 7 bar truss in CASE 1

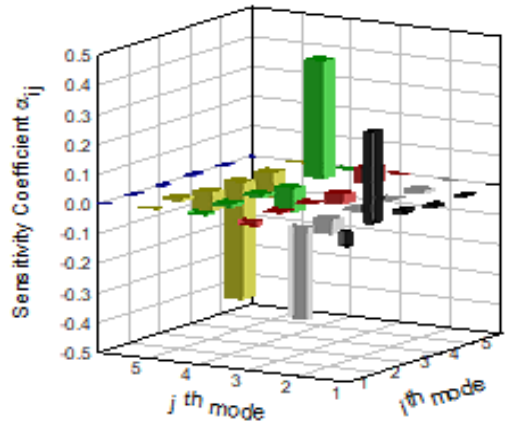
Mode	Node					
	2		3		4	
	x	y	x	y	x	y
1	0.0253	0.0907	0.0111	0.1353	0.0684	0.0912
2	0.1496	-0.0392	0.0386	-0.0450	0.1340	-0.0186
3	0.0489	0.1458	-0.1310	-0.0066	0.0405	-0.1411
4	-0.0718	-0.1476	-0.0693	0.1147	0.1102	-0.0648
5	0.0767	-0.0625	-0.1500	-0.0489	-0.0005	0.1552
6	0.1547	-0.0605	-0.0002	0.1009	-0.1548	-0.0594

### 5.3 감도계수의 해석

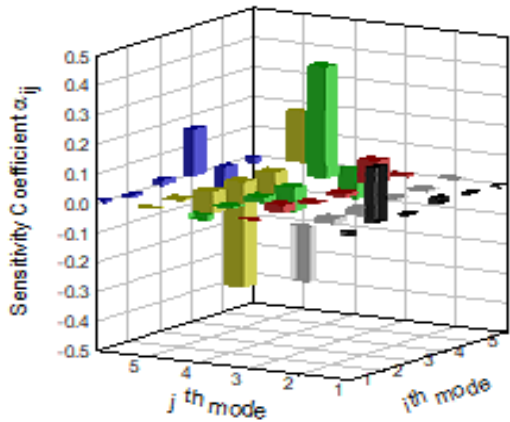
Fig. 4(a)에 CASE 1의 감도계수행렬을 나타내었다. 감도계수행렬은 트러스 손상 전 고유벡터 행렬  $[\phi_0]$  과 손상 후 고유벡터 변화량행렬  $[\Delta\phi]$  을 이용하여 구하였으며 식 (11)을 사용하였다. 최대값은  $\alpha_{54} = 0.3963$ 이고 최소값은  $\alpha_{45} = -0.3951$ 이었다. Fig. 7(b)는 CASE 2의 경우로 같은 방법으로 감도계수 행렬을 구하였으며 최대값은  $\alpha_{54} = 0.3769$ 이었고 최소값은  $\alpha_{45} = -0.3567$ 이었다.

### 5.4 손상위치와 손상정도 해석

손상위치와 손상정도를 해석하기 위해 먼저 식 (14), (15)와 Fig. 4의 감도계수행렬을 사용하여  $[\Delta K_{ij}]$  를 구하였으며 반복횟수는 강성의 변화량의 오차를 0.1% 이내로 예측하는 것을 기준으로 하였다. 해석 결과 CASE 1은 반복횟수가 27번 반복하였을 때 CASE 2



(a) Sensitivity coefficient of the CASE 1



(b) Sensitivity coefficient of the CASE 2

Fig. 4 Sensitivity coefficients after the damage

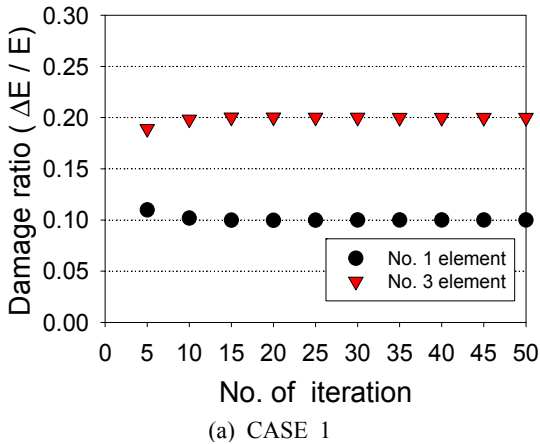
**Table 5** Comparison of eigenvectors of 7 bar truss in CASE 2

Mode	Node					
	2		3		4	
	x	y	x	y	x	y
1	0.0014	0.0874	0.0073	0.1424	0.0552	0.0946
2	0.1516	-0.0328	0.0407	-0.0257	0.1405	-0.0053
3	0.0489	0.1426	-0.1343	-0.0021	0.0492	-0.1382
4	-0.0912	-0.1470	-0.0630	0.1008	0.1202	-0.0598
5	0.0985	-0.0786	-0.1485	-0.0262	-0.0253	0.1421
6	0.1303	-0.0596	0.0182	0.1195	-0.1417	-0.0924

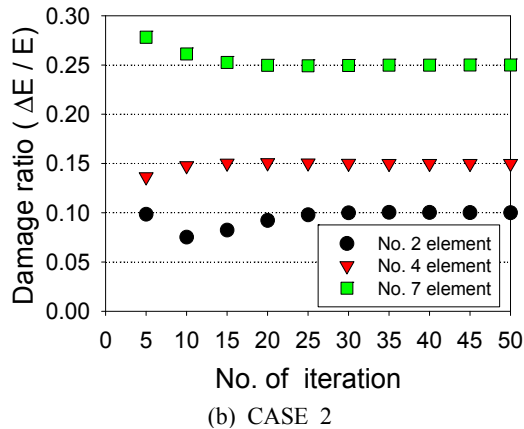
경우는 47번 반복하였을 때 오차가 0.1% 이내로 들어왔다. Fig. 5에 반복 횟수에 따라 손상 및 손상정도를 나타내었으며 반복횟수를 50회 하였다.

Fig. 5(a)는 CASE 1의 경우로 반복 횟수가 5회일 때 1번 요소의 손상비율을 0.109, 3번 요소의 손상비율을 0.189로 다소 오차가 있었으나 반복 횟수가 27회 이상에서 1번 요소는 0.100, 3번 요소는 0.200으로 정확히 예측하였다. Fig. 5(b)는 CASE 2의 경우로 반복 횟수가 5회일 때 2번, 4번, 7번 요소의 손상비율을 각각 0.098, 0.136, 0.278로 예측하여 오차가 있었으나 반복 횟수가 47회 이상에서는 각각 0.100, 0.150, 0.250로 예측하여 제안한 방법이 타당함을 알 수 있었다.

반복법으로 해석한  $\Delta K_{ij}$ 를 식 (17), (18)을 이용하여 강성변화량 행렬  $[\Delta K]$ 을 구하였다. 식 (8)과 비교하여 각 요소에 대한  $\Delta K$ 를 구하여 트러스의 손

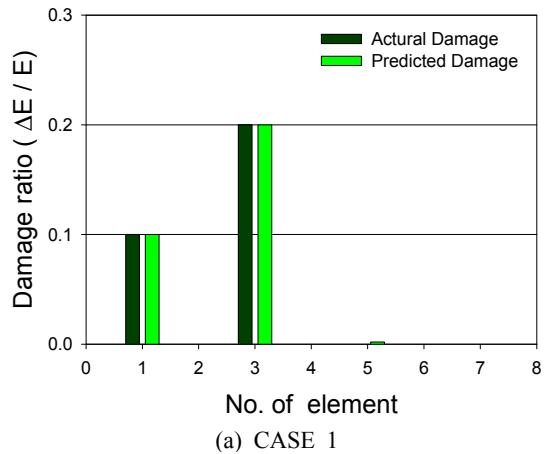


(a) CASE 1

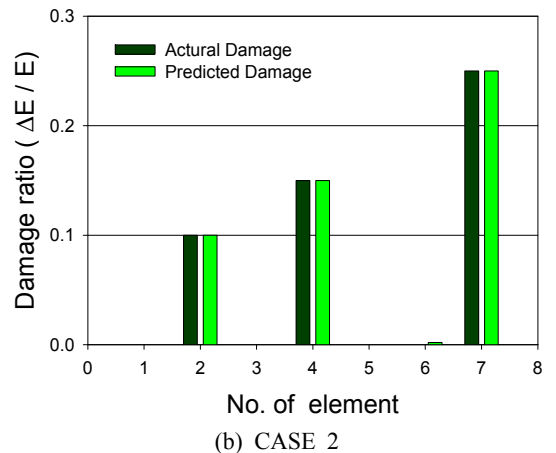


(b) CASE 2

**Fig. 5** Prediction of damage ratio according to the number of iteration



(a) CASE 1



(b) CASE 2

**Fig. 6** Comparison of actual and predicted damage

상의 위치와 손상 정도를 계산하였다. 손상비율(damage ratio)은  $\Delta E/E$ 로 정의하였으며  $\Delta E$ 와  $E$ 는 손상 후의 감소된 세로탄성계수 및 손상 전 세로탄성계수이다.

Fig. 6은 트러스 요소에 손상이 발생하였을 때 손상 정도를 예측한 그림이다. Fig. 6(a)는 CASE 1의 경우로 1번 요소의 손상정도를 10%, 3번 요소의 손상정도를 30%로 나머지 요소들은 손상정도가 없다고 예측하였다. Fig. 6(b)는 CASE 2의 경우로 2번 요소의 손상정도를 10%, 4번 요소의 손상정도를 15%, 7번 요소의 손상정도를 25%로 나머지 요소들은 손상정도가 없다고 예측하였다. 두 경우 모두 실제 주어진 트러스의 손상위치와 크기를 정확히 예측하였다.

## 6. 결 론

트러스에 손상발생 전과 후의 고유진동수와 고유벡터의 변화를 사용하여 손상을 탐지한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 트러스 손상 전과 후의 고유벡터와 고유벡터 변화량을 이용하여 감도계수 행렬을 구하는 방법을 제안하였다.

(2) 강성행렬 변화량을 감도계수 행렬의 반복법을 사용하여 구하고 이를 이용하여 트러스의 손상 위치와 손상정도를 예측하는 방안을 제안하였다.

(3) 제안한 방법을 트러스에 적용한 결과 손상위치와 손상정도를 정확히 예측하여 제안된 방법이 타당함을 알 수 있었다.

## 후 기

이 연구는 2017학년도 경기대학교 학술연구비(일반연구과제) 지원에 의하여 수행되었음.

## References

(1) Cawley, P. and Adams. R. D., 1979, The Location of Defects in Structures from Measurement of Natural Frequency, *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol. 14, No. 2, pp. 49~57.  
 (2) Hassiotis, S. and Jeong, G. D., 1995, Identification of Stiffness Reduction Using Natural frequencies, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 121, No. 10, pp. 1106~1113.

(3) Lew, J. S., 1995, Using Transfer Function Parameter Changes for Damage Detection of Structures, *AIAA Journal*, Vol. 33, No. 11, pp. 2189~2193.

(4) Valkil-Baghmisheh, M. T., Peimani, M. H., Sadeghi, M. H. and Eitffagh, M. M., 2008, Crack in Beam-like Structure Using Genetic Algorithms, *Applied Soft Computing*, Vol. 8, No. 2, pp. 1150~1160.

(5) Nikolakopoulos, P. G., Katsareas, D. E. and Papadopoulos, C. A., 1997, Crack Identification in Frame Structures, *Computers and Structures*, Vol. 64, No.1~4, pp. 389~406.

(6) Cerri, M. N. and Vestroni, F., 2000, Detection of Damage in Beams Subjected to Diffused Cracking, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 234, No. 2, pp. 259~276.

(7) Liu, G. R. and Chen, S. C., 2002, A Novel Technique for Inverse Identification of Distributed Stiffness Factor in Structures, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 254, No. 2, pp. 823~835.

(8) Maity, D. and Tripathy, R. R., 2005, Damage Assessment of Structure from Changes in Natural Frequencies Using Genetic Algorithm, *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 19, No. 1, pp. 21~42.

(9) Sahoo, B. and Maity, D., 2007, Damage Assessment of Structures Using Hybrid Neuro-genetic Algorithm, *Applied Soft Computing*, Vol. 7, No. 1, pp. 89~104.

(10) Mehrjoo, M., Khaji, N., Moharrami, H. and Bahreininejad, A., 2008, Damage Detection of Truss Bridge Joints using Artificial Neural Networks, *Expert Systems with Applications*, Vol. 35 pp. No. 3, 1122~1131.

(11) Lim, T. W. and Kashangaki, T. A., 1994, Structural Damage Detection of Space Truss Structures Using Best Achievable Eigenvectors, *AIAA Journal*, Vol. 32, No. 5, 1049~1057.

(12) Liu, P. L., 1995, Identification and Damage Detection of Trusses Using Modal Data, *Journal of Structural Engineering* Vol. 121, No. 4, pp. 599~608.

(13) Son, I. S., Ahn, S. J. and Yoon, H. I., 2009, Study on Detection of Crack and Damage for Cantilever Beams Using Vibration Characteristics, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 19, No. 9, pp. 935~942.

(14) Kaveh, A. and Zolghadr, A., 2012, Damage Detection of Truss Structures Using an Improved Charged System Search Algorithm, *Proceedings of the Eleventh*

International Conference on Computational Structures Technology, paper 82.

(15) Fox, R. L. and Kapoor, M. P., 1968, Rates of Change of Eigenvalues and Eigenvectors, AIAA Journal, Vol. 6, No. 12, pp. 2426-2429.

(16) Kim, J. H., Lee, J. W. and Lee, J. Y., 2015, Multi-crack Detection of Beam Using the Change of Dynamic Characteristics Prediction of Modified Structural Natural Frequencies and Modes Using Iterative Sensitivity Coefficient, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 25, No. 11, pp. 731-738.

(17) Lahe, A., Braunbruck, A. and Klauson, A., 2019, An Exact Solution of Truss Vibration Problems,

Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, Vol. 68, No. 3, pp. 244-263.

---



**Jung Youn Lee** is Professor of Dept. of Mechanical System Engineering at Kyonggi University, where he has been since 1996. He received a B.S., an M.S. and his Ph.D. from Hanyang University in 1979, 1989 and 1992 respectively. His research interests are in System Identification, Structural Modification, Inverse Problem, Modal Analysis and Sensitivity Analysis of Vibration.