

역 최적화 방법을 이용한 트러스 구조물의 손상탐지

이 승 혜¹⁾ · 이 재 홍^{2)*}

¹⁾ 박사과정, 세종대학교, 건축공학과 ²⁾ 교수, 세종대학교, 건축공학과

Damage Detection in Truss Structures using Anti-Optimization

Lee, Seung Hye¹⁾ Lee, Jae Hong^{2)*}

¹⁾ PhD student, Department of Architectural Engineering, Sejong University, Seoul, 143-747, Korea

²⁾ Professor, Department of Architectural Engineering, Sejong University, Seoul, 143-747, Korea

ABSTRACT : Damaged structures change the value of natural properties. The purpose of this study is to detect damage using the difference of natural properties between the healthy state and the damaged state. Anti-optimization method is used to find the conditions that maximize the difference in characteristics between the two contrasting models. In this paper, a algorithm for finding the loading conditions which can maximize the difference of strain energy between the healthy state and the damaged state of truss structures is developed. Numerical examples show that the proposed method is accurate and efficient for truss structures.

KEYWORDS : damage detection, anti-optimization, strain energy, truss structures

1. 서 론

환경적 영향에 따른 재료의 노화, 사용하중(피로, 부식 등), 혹은 예측할 수 없는 충격하중, 지진하중, 풍하중 등의 외부 하중에 의해 구조물은 손상을 입는다⁽¹⁾. 구조물의 손상을 탐지하고 그것의 경중, 영향, 진행 정도를 파악하기 위한 구조 건전성 모니터링(Structural Health Monitoring) 분야가 지속적으로 발전하였다. Aktan 등⁽²⁾은 논문에서 건전성 모니터링(Health Monitoring)이란 구조물의 운영 및 하중 환경을 측정하거나, 혹은 구조물의 원활한 작동, 사용성, 안전/신뢰성 등에 영향을 줄 수 있는 갑작스러운 사고, 이상, 노후 및 손상 등의 징후를 탐지하고 평가할 수 있는 중요한 응답을 측정하는 것이라고 정의하였다.

구조 건전성 모니터링은 구조물의 운영 상태 및 측정의 목

적과 범위를 설정, 측정할 매개 변수(parameter)와 센서의 종류·위치·개수 등을 결정, 구조물의 특성 값 추출 및 압축, 통계적 모델 구축의 4단계로 구분할 수 있다. 여기서 마지막 단계인 통계적 모델 구축이란, 세 번째 단계에서 추출 한 특성 값을 이용하여 손상 정도를 파악할 수 있는 알고리즘을 구축하는 것을 말한다. 통계적 모델 구축은 크게 지도학습(supervised learning)과 자율학습(unsupervised learning)으로 나눌 수 있다⁽³⁾. 자율학습의 경우는 손상을 입은 구조물의 특성 값만을 이용하기 때문에 손상의 정도를 단계별로 파악하는데 있어 한계가 있다. 만일 구조물의 건전상태 및 손상상태 모두의 특성 값을 알 수 있다면, 지도학습방법을 사용하여 더욱 고차원적인 알고리즘을 구축할 수 있다⁽³⁾.

본 연구의 최종 목적은 트러스 구조물의 손상탐지(damage detection)이다. 앞서 말한 구조 건전성 모니터링의 단계에서 통계적 모델 구축에 해당하며, 건전상태 및 손상상태 모두의 특성 값을 사용하는 지도학습방법으로 분류할 수 있다. 손상을 입은 구조물은 고유의 특성이 변화하는데, 건전상태와 손상상태의 이러한 특성 값을 비교하여 구조물의 손상 여부 및 그 정도를 파악하는 연구는 많은 연구자에 의해 진행되어 왔다^{(4),(5),(6)}.

구조물의 특성 값을 구하는 방법은 크게 두 가지로 나눌 수

Note.-Discussion open until February 28, 2014. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on July 16, 2012; revised March 11, 2013; approved on August 1, 2013. © KSSC 2013

* Corresponding author

Tel. +82-2-3408-3287 Fax. +82-2-3408-3331
E-mail: jhlee@sejong.ac.kr

있다. 동적하중에 대한 응답을 사용한 동적 추정 기법(dynamic identification methods)과 정적 추정 기법(static identification methods)이 그것이다^{[7],[8]}. 동적 추정 기법은 구조물의 질량(mass), 강성(stiffness), 제동장치의 특성(damping properties) 등을 요하지만 정적 추정 기법은 구조물의 강성만을 요하는 특징이 있다^{[8],[9]}. 다양한 매개 변수가 손상 탐지의 결과에 영향을 미치므로, 어떠한 매개 변수를 선택하느냐가 중요한 문제가 되었다^[10].

Doebbling 등^[11]은 동적 추정 기법에 사용하는 동적 매개 변수를 분류하여 각각의 문헌 검토를 수행하였다. 매개 변수는 고유 진동수(natural frequency), 모드 형상(mode shape), 모드 형상 곡률(mode shape curvature), 모드 유연도(modal flexibility), 동적 변형 에너지(modal strain energy) 등으로 구분하였다.

Bakhtiar 등^[8]은 동적 추정 기법을 사용하려면 동적 하중의 정확한 제어를 필요하기 때문에 현실적으로 어려움이 많다고 하면서, 정적 추정 기법이 이보다 더 정확하다고 언급하였다. 논문에서는 정적 변위의 변화를 측정하여 손상을 탐지하는 알고리즘을 개발하였다. 국내에서도 손상이 발생한 보의 처짐을 정적 변위곡률 개념에 대입하여 손상탐지에 적용한 논문을 살펴볼 수 있다^[12].

본 연구는 손상탐지 알고리즘 구축의 전 단계로 건전상태와 손상상태의 구조물 변형에너지의 차이를 극대화 시키는 하중조건을 찾는 알고리즘을 개발하였다. 이 때 사용한 기법은 역 최적화(anti-optimization) 기법으로 두 대비되는 모델간의 특성 차이를 극대화시키는 조건을 찾는 방법이다. J. Lee 등^[13]은 복합재료 보의 건전상태와 손상상태간의 변형 에너지(strain energy), 외력(external work), 표면 변형율(surface strain)의 차이를 극대화하는 조건을 찾아 손상을 탐지하는 기법을 제시하였다.

본 논문은 구조물에 정적하중을 가하고 얻을 수 있는 변형 에너지(strain energy)를 사용하여 건전상태와 손상상태의 차이를 식으로 구성하였다. 변형에너지는 하중에 대한 구조물의 반응을 결정하는데 널리 사용되는 것으로 구조물에 손상이 발생하였을 때 변화된 차이를 사용하여 그 정도를 파악할 수 있다. 본 논문에서 가정하는 손상이란 트러스 구조물의 건전상태에서 부재 일부가 임의로 손상을 입은 것으로, 다른 조건의 변화는 없다. 변형 에너지(strain energy)의 차이가 극대일 때의 하중 조건을 찾는 것이 본 알고리즘의 목적이며, 이러한 하중조건은 다음단계인 손상탐지 알고리즘에 대입하여 효과적으로 답을 얻을 수 있는 동시에, 하중조건 결과만으로 트러스 구조물의 손상된 위치를 일부 예측할 수 있다.

손상의 경중 및 위치 등의 추정 여부를 판단하기 위해 트

러스 구조물에 대한 예제를 수행하였다. 2차원 평면 트러스(plane truss)와 3차원 입체 트러스(space truss)를 다루었으며, 하중의 위치 및 그 개수를 달리하여 다양한 각도에서 해석을 수행하였다.

2. 알고리즘

2.1 변형에너지(strain energy)의 비교

첫 번째 단계로 역 최적화 기법을 도입하기 위해 건전상태와 손상상태의 변형에너지 비를 나타내는 식 (1)을 유도한다.

$$E_d = \frac{\text{손상상태의 변형에너지}}{\text{건전상태의 변형에너지}} \quad (1)$$

건전상태인 구조물의 정적 해석 모델은 식 (2)과 같다

$$K_0 u_0 = f \quad (2)$$

여기서, K_0 는 구조물의 강성 매트릭스(structural stiffness matrix)이며 u_0 와 f 는 각각 변위 벡터(displacement vector)와 정적하중 벡터(static load vector)를 뜻한다. 아래첨자 0는 건전상태를 뜻한다.

만일 구조체가 n 개의 자유도를 갖는다고 하면, 유한요소법(Finite Element Method)을 적용하여 식 (2)을 행렬로 표현할 수 있다. 이 때 0과 1로 이루어진 실수 행렬 H 를 사용하여 식 (3)와 같이 하중 f 의 가력지점을 표현할 수 있다. n 개의 자유도를 갖는 구조물에 m 개의 하중을 가했을 때 행렬 f 는 $[m \times 1]$ 의 크기를 갖는 열벡터이며, 장방형 행렬 H 는 $[n \times m]$ 의 크기를 갖는다.

$$K_0 u_0 = H f \quad (3)$$

식 (3)에 대응하여 손상상태인 구조물의 방정식을 표현하면 식 (4)와 같으며, 구조물의 강성과 변위가 변화하고 다른 조건은 동일하다.

$$K u = H f \quad (4)$$

식 (3)과 식 (4)의 양변에 변형벡터의 전치행렬(transposed matrix)을 곱하면 각각 다음과 같다.

$$u_0^T K_0 u_0 = u_0^T H f \quad (5)$$

$$u^T K u = u^T H f \quad (6)$$

이를 통해 식 (5)와 식 (6)의 좌·우변은 스칼라 값을 갖는다. 두 식을 식 (1)에 대입하면 다음과 같다.

$$E_d = \frac{u^T \hat{K} u}{u_0^T K_0 u_0} \quad (7)$$

식 (5)와 식 (6)의 좌·우변이 스칼라 값이므로, 결국 이를 대입한 식 (7) 또한 스칼라 값을 갖는다.

이제 식 (7)을 구조물의 강성과 하중으로 표현하기 위해 식 (3)과 식 (4)를 사용하여 각각의 변위와 그에 대응하는 전치행렬을 구한 뒤 식 (7)에 대입하면 다음의 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_d = \frac{f^T \hat{K} f}{f^T \hat{K}_0 f} \quad (8)$$

여기서,

$$\hat{K} = H^T (K^{-1})^T H \quad (9)$$

$$\hat{K}_0 = H^T (K_0^{-1})^T H \quad (10)$$

결국 식 (8)은 고유 값 문제(eigenvalue problem)가 되어 다음과 같이 표현된다.

$$(\hat{K} - E_d \hat{K}_0) f = 0 \quad (11)$$

2.2 고유 값 문제

구조물의 건전상태와 손상상태의 변형에너지 비교에 의해 식을 유도해 보면 결국 식 (11)과 같은 고유 값 문제로 귀결되고, 결국 고유 값(eigenvalue) $E_d (E_d^1 \sim E_d^n)$ 를 얻게 된다. 이 고유 값 E_d 는 앞에서 설명한 역 최적화 기법을 적용하여 얻은 건전상태와 손상상태의 구조물 변형에너지의 차이이다. 이 때, n개의 $E_d (E_d^1 \sim E_d^n)$ 값에 대응하는 n개의 고유 벡터(eigenvector) $f (f_1 \sim f_n)$ 의 값을 얻을 수 있다. E_d 값 중 최대 혹은 최소는 건전상태와 손상상태 사이의 변형에너지 편차가 크다는 것을 의미하며, 이때 대응되는 f 의 값이 본 연구에서 얻으려는 하중 값이다. f 는 지정된 가력지점의 하중의 크기이다.

결국 구조물에 손상을 가했을 때 손상을 찾기 위해 구조물의 응답을 사용하게 되는데, 하중을 어떻게 가하느냐에 따라 유효한 응답을 얻을 수 있는가 없는가의 문제인 것이다. 앞에서 구한 하중 값을 손상탐지 알고리즘에 적용한다면, 효과적으로 문제를 해결할 수 있다.

3. 평면 트러스(plane truss) 예제

3.1 29-Bar Plane Truss Structure

본 연구에서 제시한 알고리즘을 정확성을 입증하기 위해 2차원 평면 트러스를 고려해 보았다. Fig. 1은 트러스의 형태를 나타내고 있다. 트러스는 절점 16개와 부재 29개로 이루어져 있으며, 평면 트러스이므로 모든 y 방향의 변위는 고정되어 있다. 절점 1과 2는 x, z 방향으로 고정되어 있으며, 트러스는 x 방향으로 캔틸레버 형태를 띠고 있다. 모든 부재의 단면적은 $A = 1 \times 10^{-3} m^2$, 밀도는 $\rho = 1.6 \times 10^3 kg/m^3$, 탄성계수는 $E = 42.4 GPa$ 의 단면성능을 갖는다.

첫 번째의 경우로 수직재인 부재 9번의 손상을 고려해 본다. 부재에 손상이 발생하면 강성에 변화가 생기며, 그에 따라 응력-변형률 선도 역시 변화가 발생한다. 이러한 변화는 탄성계수(modulus of elasticity)의 변화를 가져오게 되는데, 이러한 점에 착안하여 본 논문에서는 탄성계수를 인위적으로 감소시킴으로써 손상상태를 설정하였다.

부재 9의 손상 후 탄성계수를 손상 전의 50%로 감소시켰다. 이 때 고려할 고유 벡터는 상현재 절점인 4, 6, 8, 10,

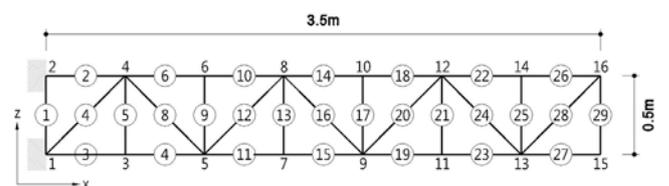


Fig. 1 29-bar plane truss structure model

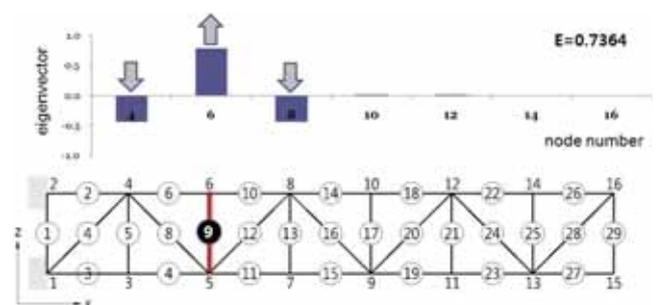


Fig. 2 29-bar plane truss structure for damage in element 9

12, 14, 16번이며, $-z$ 방향 하중으로 설정하였다. 이 7개 절점의 하중 비율이 구하고자 하는 고유 벡터이며, 이렇게 구한 하중 비율로 구조물에 하중을 가했을 때 손상상태와 건전상태의 구조물 변형에너지 차이가 극대화 된다.

Fig. 2는 부재 9번 손상경우의 해석결과를 나타내고 있다. 총 7개의 고유 값 E_d 중에 최소인 0.7364 값을 선택한 후 대응하는 7개의 고유벡터 값을 얻은 결과이다.

부재 9번의 상단 절점인 절점 6번에서 최대 고유벡터 값을 보이고 있으며 그 값은 0.7916이다. 고유벡터는 모두 z 방향으로 설정하였으므로, 양수 값을 보이는 절점 6번의 고유벡터 값은 상향 하중이고, 절점 4번과 8번은 음수 값으로 각각 -0.4297과 -0.4336이며 하향 하중이다. 나머지 고유벡터는 거의 0에 가까운 값을 보인다. 결국 이러한 벡터 값은 손상된 부재 9번의 변형에너지 값을 극대 혹은 극소화 할 수 있는 하중 조건임을 직관적으로 알 수 있다. 손상된 부재를 알 수 없다고 가정하였을 때, 1차적으로 이러한 결과 값을 분석하여 절점 4번, 6번, 8번과 연관되어있는 부재에 손상이 발생하였다고 개략적으로 그 손상 범위를 좁혀서 추정할 수 있다.

좀 더 자세한 경향을 살펴보기 위해 절점 6번과 접하고 있는 부재 6번, 부재 10번의 손상경우를 해석하였다.

Table 1은 부재 6번, 부재 9번, 부재 10번의 손상경우 각각에 대한 고유벡터 값을 나타낸 것이다. 절점 6번에 접하고 있는 세 부재의 고유벡터 값은 비슷한 경향을 보이고 있으며, 특히 상현재 6번과 상현재 10번의 손상경우 각각의 값은 동일하다. Table 1의 결과 값만으로는 손상된 부재를 추정할 수 없다. 이는 본 연구의 알고리즘은 손상탐지 알고리즘 구축의 전 단계로 최적의 하중탐색 알고리즘이며, 이 알고리즘의 해석 결과인 고유 벡터 값을 손상탐지 알고리즘에 넣어야 정확한 손상 위치를 탐색할 수 있는 것이다. 하지만 트러스가 더욱 복잡한 양상을 보일 때는 하중 결과 값만으로 손상된 부재의 위치를 대략적으로 가늠할 수 있을 것이며, 경우의 수를 줄여 손상탐지 단계를 최소화 할 수 있다.

이번에는 사재인 부재 12번의 손상을 고려해 보았다. 부재 12의 손상 후 탄성계수를 손상 전의 50%로 감소시켜 손상을 설정하였으며, 이 때 고려할 고유 벡터는 앞선 예제와 동일하다.

Fig. 3은 부재 12번 손상경우의 해석결과를 나타내고 있

다. Fig. 3을 살펴보면 절점 6번과 절점 8번에 크기는 같고 방향이 반대인 고유 벡터 값을 갖는 것을 알 수 있으며 그 값은 각각 -0.6234와 0.7742이다. 이는 사재인 부재 12번의 양단 절점이 6번과 8번이며 양단에서 반대방향으로 하중을 가하는 것이 사재의 건전상태와 손상상태의 고유 값 차이를 최소로 나타낸다는 것을 추정할 수 있다.

그렇다면 2개의 사재가 동시에 손상되었을 경우를 고려해 보자. 사재인 부재 12번과 부재 20번의 건전상태일 경우의 탄성계수가 손상 후 50% 저감 된 경우를 고려하였다. 다른 조건은 앞선 예제와 동일하다.

Fig. 4는 부재 12와 부재 20의 손상경우에 대한 고유벡터 값을 나타내고 있으며 사재 1개의 손상경우와 같은 경향을 보이고 있다. 두 부재 모두 양단 절점에서 고유 벡터 값을 보이고 있으며, 건전상태와 손상상태의 고유 값 차이를 최소로 하는 경우임을 알 수 있다. 이 예제 또한 이러한 고유 벡터 값으로 손상탐지 알고리즘에 대입하여 더욱 효과적인 결과를 얻을 수 있다.

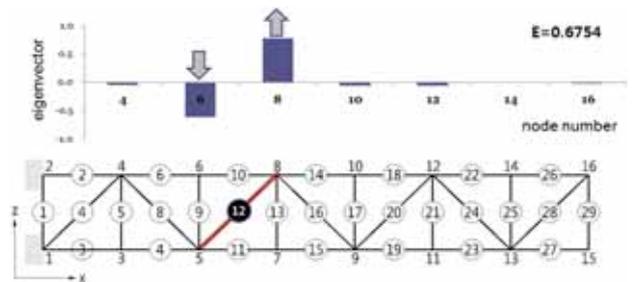


Fig. 3 29-bar plane truss structure for damage in element 12

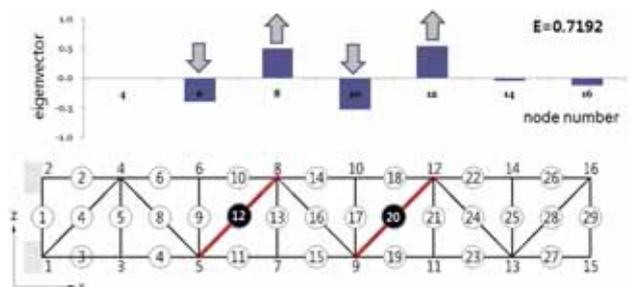


Fig. 4 29-bar plane truss structure for damage in element 12 and 20

Table 1. Comparison of eigenvector by damaged element

Node number / Damaged element	4	6	8	10	12	14	16
Element 6	-0.2135	0.9386	-0.1840	-0.1338	-0.1372	-0.0201	-0.0485
Element 9	-0.4297	0.7916	-0.4336	0.0178	0.0182	0.0027	0.0064
Element 10	-0.2135	0.9386	-0.1840	-0.1338	-0.1372	-0.0201	-0.0485

4. 입체 트러스(space truss) 예제

4.1 25-Bar Space Truss Structure

좀 더 정확한 입증을 위해 3차원 입체 트러스 예제를 고려해보았다. Fig. 5에서 볼 수 있는 25-bar 입체 트러스 예제는 트러스 형상 최적화 연구에서 주로 다루는 것으로 총 10개의 절점(node)과 25개의 부재(element)로 이루어져 있으며 7번부터 10번까지의 4개의 절점이 x , y , z 방향으로 고정되어 있다. 25-bar space truss의 모든 부재는 단면적이 $A = 0.01 \text{ m}^2$, 밀도는 $\rho = 0.1 \text{ kg/m}^3$, 탄성계수는 $E = 10 \text{ GPa}$ 의 단면성능을 갖는다.

첫 번째 경우로 부재 1의 손상 후에 탄성계수가 건전상태의 값보다 50% 저감된 값을 보유한다고 가정해 보자. 절점 7~10번까지의 하단 지점을 제외한 나머지 모든 절점을 구하고자 하는 고유 벡터로 설정하고 해석을 수행해 보았다. 해당 절점은 1번부터 6번까지 총 6개이며, 각각의 절점에 x ,

y , z 의 3방향 모두의 경우를 고려하여, 총 18개의 고유 벡터를 고려하였다.

해석 결과는 Table 2와 같다. 건전상태와 손상상태의 변형 에너지 차이가 극대가 되는 고유 값 $E_d = 0.5522$ 를 찾아 대응되는 고유 벡터를 나열해 보았다. Table 2를 살펴보면 1번 절점과 2번 절점의 x 방향만 고유 벡터 값을 보이며, 다른 값은 모두 0의 결과 값을 보인다. 이는 부재 1의 양단 절점이 1번과 2번이며, 또한 부재 1이 x 방향 수평재이기 때문임을 추정할 수 있다. 개념 적으로 1번 부재의 양단을 같은 값으로 압축을 주거나 인장을 주었을 때 1번 부재의 건전상태와 손상상태의 변형 에너지 값을 차이를 극대화 한다는 것을 알 수 있으며, 본 알고리즘이 그것을 입증하고 있다. 입체 트러스의 해석 결과는 평면 트러스 예제 보다 더욱 정확한 값을 보이고 있으며, 이는 25-bar space truss 예제가 각 부재의 거동들이 서로 간섭을 최소화 하도록 고려했기 때문이라고 생각된다.

좀 더 정확한 입증을 위해 입체 트러스의 또 다른 경우의 예제를 수행하였다. 앞서 수행한 예제와 비슷한 경우로 이번에는 y 방향으로 수평한 부재인 부재 10에 손상을 주었다. 부재 1의 경우와 마찬가지로 손상상태의 탄성계수가 건전상태의 50% 저감 된 값을 보인다고 가정한다. 해석결과는 Fig. 6과 같다.

부재 10에 손상을 주었을 경우도 부재 1의 손상경우와 마찬가지로 부재 10의 양단 절점 3번과 6번에만 고유 벡터 값을 보이고 있다. 또한 이번에는 부재10이 y 방향 수평재이므로 각 절점 3번과 6번의 y 방향에 고유 벡터 값을 보이고 있다.

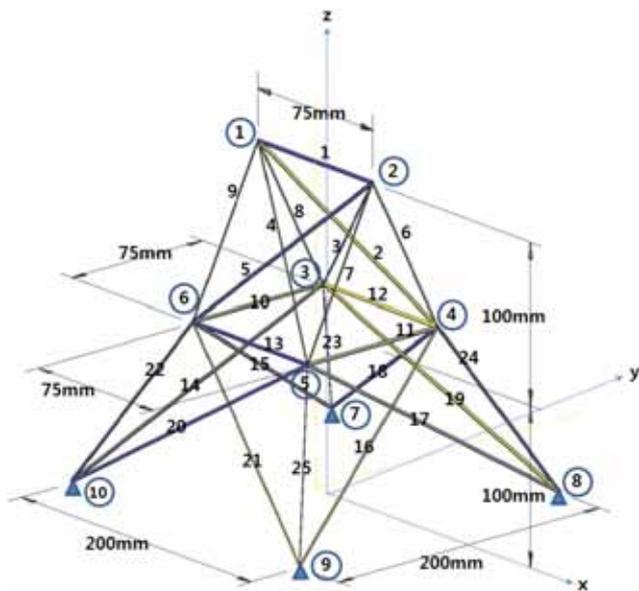


Fig. 5 25-bar space truss structure model

Table 2. Comparison of eigenvector by damaged element numerical analysis result for damage in element 1

Node number	x-dir.	y-dir.	z-dir.
1	0.707	0	0
2	-0.707	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0	0	0
6	0	0	0

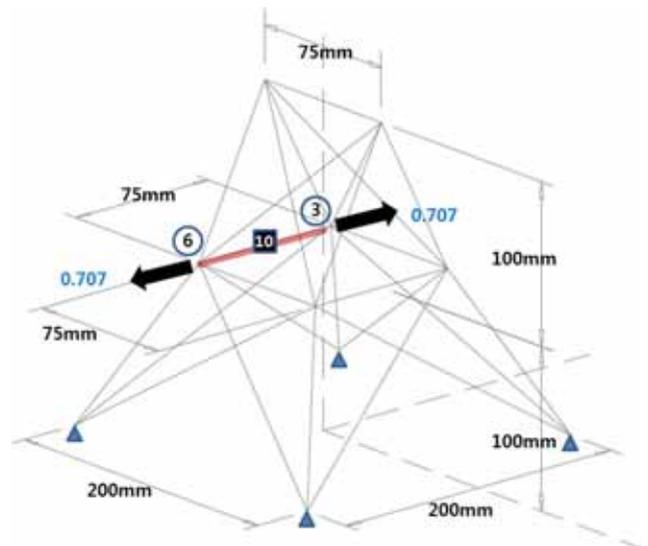


Fig. 6 25-bar space truss structure for damage in element 10

세 번째 경우는 부재 5의 손상을 고려해 보았다. 부재 5는 사재이므로 앞의 경우와는 다른 복잡한 양상을 보일 것이다. 해석 결과는 Table 3과 같다.

Table 3의 결과 또한 부재 1과 부재 10의 손상 경우와 마찬가지로 손상 부재 양단의 절점의 고유 벡터 값을 제외한 모든 절점의 값은 0이 된다. 부재 5는 절점 2와 절점 6을 양단으로 하고 있으며 고유 벡터 또한 절점 2와 절점 6에서만 결과 값을 보인다. 부재 5는 사재이므로 수평재의 경우와는 다르게 x, y, z 방향 모두의 값을 보이나 그 합력은 모두 0.707로 부재 5의 중심축 방향으로 서로 반대 방향을 가리킨다. 이 고유 벡터 값은 부재 1과 부재 10의 손상경우와 동일한 결과 값이다.

또 다른 경우로 고정단인 절점 10번과 연결되어 있는 부재

Table 3. 25-bar space truss structure - numerical analysis result for damage in element 5

Node number	x-dir.	y-dir.	z-dir.
1	0	0	0
2	0.406	0.203	0.542
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0	0	0
6	-0.406	-0.203	-0.542

Table 4. 25-bar space truss structure - numerical analysis result for damage in element 5

Modulus of elasticity after the damage	Eigenvalue	Node number	Eigenvector		
			x-dir.	y-dir.	z-dir.
10% of undamaged condition	0.1940	1	0.707	0	0
		2	-0.707	0	0
		3	0	0	0
		4	0	0	0
		5	0	0	0
		6	0	0	0
50% of undamaged condition	0.5522	1	0.707	0	0
		2	-0.707	0	0
		3	0	0	0
		4	0	0	0
		5	0	0	0
		6	0	0	0
80% of undamaged condition	0.8209	1	0.707	0	0
		2	-0.707	0	0
		3	0	0	0
		4	0	0	0
		5	0	0	0
		6	0	0	0

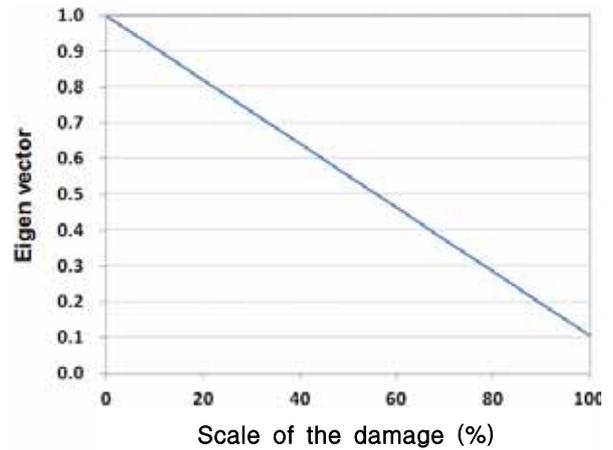


Fig. 7 A graph of eigenvalue by level of damage

22번의 손상경우를 구해보면 절점 6번의 고유 벡터만 x 방향 0.468, y 방향 0.468, z 방향 0.749의 값을 보이고 다른 모든 값은 0을 얻는다. 이 또한 다른 25-bar 입체 트러스 예제의 결과 값들과 동일한 양상이다.

마지막으로 부재 1에 각각 다른 손상의 경우를 고려해 보았다. 앞선 예제는 모두 부재의 손상 후 탄성계수를 건전상태의 50%로 고려하였다. 이와 비교를 위해 부재 1의 손상 후의 탄성계수가 건전상태의 10%, 80% 인 경우를 비교해 보았다. 결과 값은 Table 4와 같다.

Table 4를 살펴보면 손상 후의 탄성계수가 건전상태의 10%라는 것은 건전상태의 80% 경우보다 더 손상이 진행되었다는 것을 의미한다. 각각의 고유 값을 비교해 보면 손상이 많이 진행된 경우가 건전상태와 손상상태의 변형에너지 차이가 극대화 되며 결국 최소의 고유 값을 얻는다. 이 때 모든 경우의 고유 벡터 값은 동일한 값을 보인다. 이를 바탕으로 손상 정도에 따른 고유 값의 경향을 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 7을 살펴보면 손상의 정도가 심할수록 고유 값이 줄어들고 있다. 고유 값이 작다는 것은 그만큼 건전상태와 손상상태의 특성 값의 차이가 크다는 것을 의미하며 손상의 정도가 심하다는 것을 나타낸다. 이는 손상탐지 알고리즘의 해석 단계로 넘어가기 전에 손상의 경중을 고유 값을 통해 추정해 볼 수 있음을 의미한다.

4.2 72-Bar Space Truss Structure

실제 구조물과 비슷한 형태를 보이는 72-bar 입체 트러스에 대한 예제를 수행하였으며, 형태는 Fig. 8과 같다. 72-bar 입체 트러스는 4개 층 구조물을 형성화 하였으며, 외부와 접하는 모든 면은 2개의 대각선 가새(diagonal brace)로 지지하고 있다. Fig. 8에서의 길이 L 은 1.524m이며, 모든 부재

는 단면적이 $A = 0.0025m^2$, 밀도는 $\rho = 2770 kg/m^3$, 탄성계수는 $E = 68.9 GPa$ 의 단면성능을 갖는다.

첫 째로 부재 31의 손상경우를 살펴보았으며, 손상 후 탄성계수를 손상 전의 50%로 감소시켜 손상을 설정하였다. 고유 벡터의 경우는 절점 2, 6, 10, 14의 x 방향만 고려하였다. 이는 실제 이와 같은 구조물을 제작하여 실험하였을 때 하중을 가하기에 적합한 경우를 고려한 것이며 액추에이터 (actuator)를 사용하여 4개의 절점에 수평방향으로 하중을 가하는 것을 고려해 볼 수 있다.

Fig. 9는 해석결과를 그래프로 표현한 것이다. 손상상태인 부재 31번과 만나고 있는 절점 6번에서 x 방향으로 0.824의 고유 벡터 값을 얻을 수 있었다. 이 때 고유 값은 0.8673이다. 절점 6번과 위/아래에 위치하고 있는 절점 2번과 10번은 절점 6번의 고유 벡터 값과 반대방향의 값을 보이고 있으며, 그 값은 각각 -0.398과 -0.403이다. 이러한 경향은 앞선 29-bar 평면 트러스 예제와 같다.

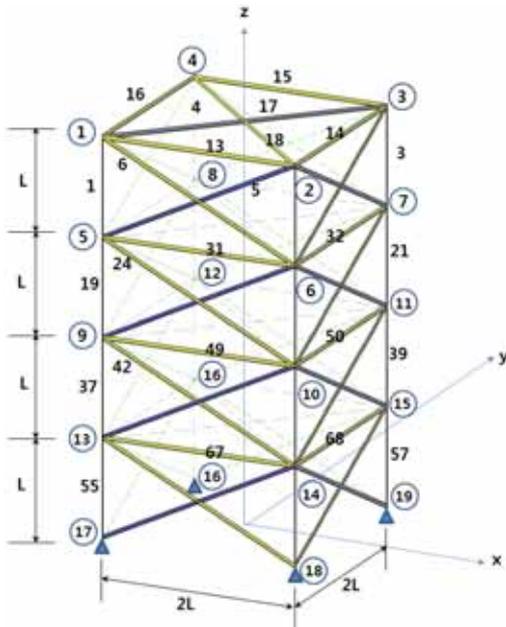


Fig. 8 72-bar space truss structure model

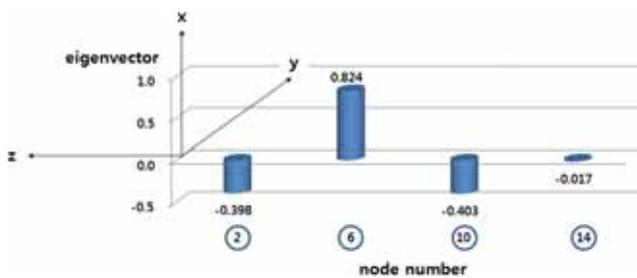


Fig. 9 72-bar space truss structure - result for damage in element 31

또 다른 경우로 y 방향과 수평 한 부재 32번의 손상경우를 살펴보았다. 모든 조건은 부재 31번의 손상경우와 동일하며, 고유 벡터의 경우만 절점 2번, 6번, 10번, 14번에서 x 와 y 방향을 모두 고려하였다. 해석결과는 Table 5와 같다.

Table 5를 살펴보면 x 방향의 고유 벡터 값은 y 방향의 값에 비해 매우 작은 것을 알 수 있으며 거의 0에 가깝다. 결국 최적의 하중 조건을 좌우하는 것은 Table 5에서 진한 색으로 표시한 절점 2번, 6번 10번 각각의 y 방향 고유 벡터 값이다. 이러한 경향은 x 방향에 수평 한 부재가 손상을 입었을 경우와 같으며, 또한 손상상태인 부재 32번과 만나는 절점 6번의 고유 벡터 값이 제일 큰 값을 보인다. 결국 평면 트러스와 입체 트러스 예제 모두 건전상태와 손상상태의 변형에너지의 차이가 극대인 경우로 고유 벡터 결과 값이 도출된다.

마지막으로 경사부재인 부재 24의 손상경우를 고려해보았다. 부재 24의 손상 후 탄성계수 값이 건전상태보다 50% 저감되었다고 고려하였다. 고유 벡터는 절점 2번, 6번, 10번,

Table 5. 72-bar space truss structure - numerical analysis result for damage in element 32

Node number	x-dir.	y-dir.
2	-0.023	-0.396
6	0.013	0.825
10	-0.017	-0.402
14	0.021	-0.021

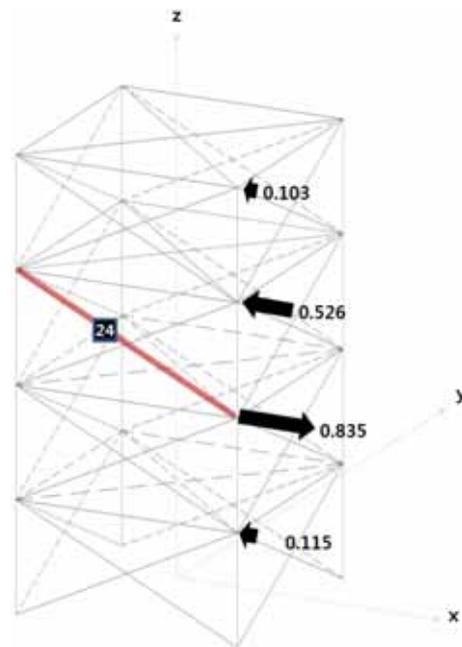


Fig. 10 72-bar space truss structure for damage in element 24

14번에서 x 와 y 방향을 모두 고려하였다.

Fig. 10에 해석결과를 나타내었다. y 방향의 고유 벡터 값은 x 방향의 고유 벡터 값에 비해 매우 작으며 거의 0에 가깝다. Fig. 10에는 x 방향 고유 벡터의 값만을 나타내었다. 절점 2번, 6번, 10번, 14번의 고유 벡터 값은 각각 -0.103, -0.526, 0.835, -0.115이다. 본 예제 또한 29-bar 평면 트러스 예제에서 경사재에 손상이 난 경우와 동일한 경향을 보이며, 그 결과 값은 건전상태와 손상상태의 변형에너지 차이를 극대화 한다.

모든 예제는 구조물의 변형에너지 차이를 극대화 하는 고유 값을 얻었으며, 이에 대응하는 고유 벡터 값은 구조물의 응답을 얻기 위해 가하는 하중이다. 이러한 최적의 하중 값은 추후 손상탐지 알고리즘에 대입하여 효율적인 데이터를 얻을 수 있다. 또한 이러한 하중조건 만으로 구조물의 손상위치를 추정할 수 있으며, 손상 부재의 추정 균을 최소화 할 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 건전상태와 손상상태의 구조물 변형에너지의 차이를 극대화 하는 하중조건을 찾는 알고리즘을 개발하였다. 연구의 최종 목적은 손상탐지 알고리즘 구축이며, 본 연구는 이러한 손상탐지의 전 단계로 역 최적화 기법을 도입하여 손상위치를 예측하였다. 건전상태와 손상상태의 차이를 식으로 구성하는 역 최적화 기법을 사용하였으며, 이 식은 결국 고유 값 문제로 귀결한다.

구조물의 손상 정도에 따라 고유 값을 비교해본 예제를 통해 본 알고리즘의 결과 값으로 손상 정도를 추정할 수 있음을 입증하였다. 손상의 정도가 심할수록 고유 값이 줄어들고 있음을 알 수 있는데, 고유 값이 작다는 것은 그만큼 건전상태와 손상상태의 특성 값의 차이가 크다는 것을 의미하며 손상의 정도가 심하다는 것을 나타낸다. 이렇게 손상의 경중 또한 고유 값을 통해 추정해 볼 수 있다.

본 연구는 향후 유전 알고리즘을 사용한 손상탐지 모델을 구축하는 것을 계획하고 있다. 이러한 연구는 많은 연구자들에 의해 진행되어왔으나, 결국 최소 시간으로 더욱 정확한 결과 값을 도출하는 것이 모든 손상탐지 알고리즘의 목적이므로, 그 알고리즘 구축 방법은 계속 발전할 가능성이 있다 하겠다.

감사의 글

본 논문은 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 IT융합 고급인력과정 지원 사업(NIPA-2013-H0401-13-1003)과 교

육 과학기술부 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(2010-0019373, 2012R1A2A1A01007405)의 지원으로 이루어졌습니다.

참 고 문 헌(References)

- [1] Achenbach, J.D. (2009) Structural health monitoring - What is the prescription, *Mechanics Research Communications*, Vol. 36, No. 2, pp.137-142. ASCE, Vol. 11, No. 1, pp.48-58.
- [2] Aktan, A.E., Catbas, F.N., Grimmelsman, K.A., and Tsikos, C.J. (2000) Issues in infrastructure health monitoring for management, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol 126, No.7, pp.771-724.
- [3] Shon, H., Farrar, C.R., Hemez, F.M., Shunk, D.D., Stinemates, D.W., Nadler, B.R., and Czarnecki, J.J. (1996) A Review of structural health monitoring literature: 1996-2001, *Los Alamos National Laboratory Report LA-13070-MS*.
- [4] 노삼영, 이상윤, 신은미 (2011) 에너지 원리를 이용한 손상 추정, *대한건축학회논문집 구조계*, 대한건축학회, 제27권, 제4호, pp.67-75.
Noh, S.Y., Lee, S.Y., Shin, E.M. (2012) On Damage detection of structures using energy principle, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 27, No. 4, pp.67-75 (in Korean).
- [5] 은희창, 정장용 (2010) 추정된 물리적 특성변화에 의한 구조물의 손상탐지에 관한 연구, *대한건축학회논문집 구조계*, 대한건축학회, 제26권, 제4호, pp.13-20.
Eun, H.C. and Chung, C.Y. (2010) Damage detection of structures based on estimated physical characteristic changes, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 26, No. 4, pp.13-20 (in Korean).
- [6] Wang, X., Hu, N., Fukunaga, H., and Yao, Z.H. (2001) Structural damage identification using static test data and changes in frequencies, *Engineering Structures*, Vol. 23, No. 6, pp.610-621.
- [7] Bakhtiari-Nejad, F., Rahai, A., and Esfandiari, A. (2005) A structural damage detection method using static noisy data, *Engineering Structures*, Vol. 27, No. 12, pp.1784-1793.
- [8] Yam, L.H., Li, Y.Y., and Wong, W.O. (2002) Sensitivity studies of parameters for damage detection of plate-like structures using static and dynamic approaches, *Engineering Structures*, Vol. 24, No. 11, pp.1465-1475.

- [9] Doebling Scott, W., Farrar Charles, R., Prime Michael, B., and Shevitz Daniel, W. (1996) Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: A Literature review, *Los Alamos National Laboratory report LA-13070-MS*.
- [10] 배충열, 은희창, 이민수, 광노현 (2007) 정적 변위곡률에 의한 손상된 보의 손상탐색, *대한건축학회논문집 구조계*, 대한건축학회, 제23권, 제8호, pp.59-66.
Bae, C.Y., Eun, H.C., Lee, M.S., and Gwak, N.H. (2007) Damage detection of damaged beam by static displacement curvature, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 23, No. 8, pp.59-66 (in Korean).
- [11] Lee, J., Haftka, R.T., Griffin, O.H., Watson, Jr., L.T., and Sensmeier, M.D. (1994) Detecting delaminations in a composite beam using anti-optimization, *Structural Optimization*, Vol. 8, No. 2-3, pp.93-100.
- [12] 김형민, 이재홍 (2012) 유전 알고리즘을 이용한 트러스 구조물 손상탐지, *한국강구조학회 논문집*, 한국강구조학회, 제24권, 제5호, pp.549-558.
Kim, H.M., Lee, J.H. (2012) Damage detection of truss structures using genetic algorithm, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 24, No. 5, pp.549-558 (in Korean).
- [13] 최일윤, 조효남 (2002) 정적변위를 이용한 교량의 손상도 평가기법, *한국강구조학회 논문집*, 한국강구조학회, 제14권, 제4호, pp.641-646.
Choi, I.Y. and Cho, H.N. (2002) A Damage assessment technique for bridge using static displacements, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 14, No. 4, pp. 641-646 (in Korean).

요 약: 손상을 입은 구조물은 고유 특성 값이 변한다. 본 연구는 건전상태의 고유 특성 값과 손상상태의 특성 값 차이를 사용하여 손상 탐지 하는 것을 목적으로 한다. 두 대비되는 모델간의 특성 차이를 극대화 시키는 조건을 찾는 역 최적화 기법이 사용되었다. 본 논문은 손상탐지 알고리즘 구축의 전 단계로 건전상태와 손상상태의 트러스 구조물 변형에너지의 차이를 극대화 할 수 있는 하중조건을 찾는 알고리즘을 개발하였다. 트러스 구조물에 대한 예제는 제안 기법의 정확성과 효과를 입증한다.

핵심 용어: 손상탐지, 변형에너지, 역 최적화, 트러스 구조물
