

트러스 구조물의 2단계 손상탐지 기법

Two-Stage Optimization for Damage Detection of Trusses



김수민*
Kim, Sumin



김남일**
Kim, Nam-il



이재홍***
Lee, Jaehong

1. 서론

대부분의 건축, 토목, 기계 및 항공우주 공학 분야의 구조 시스템은 그 수명이 다할 때까지 부재손상을 경험한다. 구조물의 중요 부재에 발생하는 손상은 구조물의 성능 저하라는 결과를 야기하며, 손상 정도에 따라 구조물의 균열, 붕괴 등의 중대한 손실까지 발생할 수 있다. 구조물의 안전성과 수명을 향상시키기 위해서 손상 부위와 그 범위를 정확히 파악한 후 이를 복원하는 것이 매우 중요하다. 따라서 현재 구조물의 안전성 확보를 목표로 한 연구들이 진행되고 있으며, 구조물 모니터링 방법, 손상된 구조물의 성능평가 방법, 손상탐지 방법 등 다

양한 방법의 연구가 활발히 진행되고 있다.

Messina 등¹⁾은 1개 또는 그 이상의 손상 위치와 손상 크기를 이용하여 신뢰할 수 있는 정보를 보여 줄 수 있는 Multiple Damage Location Assurance Criterion(MDLAC)이라는 새로운 상관계수를 제안하였다. Gomes와 Silva²⁾는 손상된 구조물의 고유진동수를 알고리즘에 의해 얻어진 진동수와 일치시키기 위하여 유전 알고리즘을 최적화 도구로 사용하여 수정된 MDLAC 지수를 개발하였다. Shi 등³⁾은 민감도 및 통계 기반 방법으로 MDLAC 기법을 개선하였다.

그러나 최적화 기법은 구조물의 손상을 식별할 수 있지만 많은 손상 변수로 인하여 그 과정에 상당한 계산 작업을 요구하는 것으로 알려져 있다. 최적화 과정의 계산 비용을 줄이기 위하여 여러 연구자들은 구조물 손상 탐지에 대한 2단계 최적화 방법을 수행하였다. Guo와 Li⁴⁾는 정보 융합 기술과 유전 알고리즘을 이용하여 켄틸레버 보에 대한 다중 손상의 위치와 범위를 결정하는 2단계 방법을 개발하였다. Fallahian과 Seyedpoor⁵⁾는 구조적 손상의

* 세종대학교 건축공학과 석사과정
Department of Architectural Engineering, Sejong University

** 세종대학교 건축공학과 조교수
Department of Architectural Engineering, Sejong University

*** 세종대학교 건축공학과 교수
Department of Architectural Engineering, Sejong University

위치와 범위를 결정하기 위해 적응형 Neuro-fuzzy 추론 시스템과 입자 무리 최적화를 결합한 2단계 방법을 제시했다. 구조물 손상 탐지는 Wang 등⁶⁾에 의해 정적 테스트 데이터와 고유 진동수의 변화로부터 발전되었다. 손상 위치를 효과적으로 감지하기 위해 손상 특징의 매칭 기술이 향상되었다. 그 후, 반복적인 최적화 알고리즘이 손상 범위를 평가하기 위해 제안되었다.

본 기사에서는 탐색 공간의 크기를 효과적으로 줄이기 위한 손상 탐지 기법으로 2단계 최적화 기법을 기술한다. 첫 번째 단계에서는 최적화된 하중 조합을 찾기 위해 수행되는 가중 합 방법(Weighted sum method)과 결합된 Anti-Optimization(AO) 과정이 다중 손상의 가능성이 더 높은 부재를 결정하는데 사용된다. 두 번째 단계에서는 실제 손상된 부재의 위치와 범위를 적절하게 결정하기 위하여 감소된 손상 문제는 유전 알고리즘(GA)을 통해 해결된다.



〈Fig. 1〉 Damage of member



〈Fig. 2〉 Collapse of structure

2. 수학적 모델링

2.1 Anti-Optimization(AO) 알고리즘

AO 알고리즘은 손상된 트러스 구조물과 비손상 트러스 구조물 간의 차이를 최대화 하는 조건을 찾으며 다음과 같은 평형 방정식으로 나타난다.

$$Ku = F = Hf \tag{1}$$

여기서 K 는 손상된 트러스의 강성행렬이며 u 와 F 는 각각 변위 벡터와 힘 벡터이다. H 와 f 는 각각 단위 실수 행렬과 입력한 힘 벡터이다.

비손상 트러스와 손상된 트러스의 변형 에너지를 비교하기 위하여 부재의 손상도와 심각성을 평가하기 위한 효율적인 지표는 다음과 같은 변형 에너지 기반 지수 R 로 정의한다.

$$R = \frac{u^T K u}{u_0^T K_0 u_0} \tag{2}$$

여기서 R 은 레일리 지수(Rayleigh quotient)이고, K_0 와 u_0 는 각각 비손상 트러스의 강성행렬과 변위벡터이며 식 (2)를 변형하여 다음과 같은 고유치 문제로 나타낼 수 있다.

$$(\hat{K} - R\hat{K}_0)f = 0 \tag{3}$$

AO 과정의 고유치 문제로부터 고유값 $R = 1$ 은 손상된 부재가 존재하지 않음을 의미한다. 다중 손상을 입은 트러스에서 식 (2)의 0이 아닌 고유값의 수는 손상된 부재의 수와 같으며 0이 아닌 고유값에 해당하는 최적의 하중 분포를 얻을 수 있다. 다음으로 모든 최적의 하중 분포를 고려하기 위해 가중 합 방법(Weighted sum method)을 제안하며 변형 에너지의 손실은 다음과 같은 가중치 계수(Weight factor)로 정의할 수 있다.

$$W = (1 - R) \tag{4}$$

여기서 W 는 가중치 계수이며 모든 최적의 하중 분포를 고려한 최적의 하중 조합을 얻기 위해 다음의 방정식을 제안한다.

$$\bar{p} = \sum_{i=1}^{dn} \sum_{j=1}^{dn} (1 - R_i) \psi_j \tag{5}$$

여기서 \bar{p} 는 최적의 하중조합이며 R_i 와 ψ_j 는 각각 i 번째 고유값과 하중 분포를 의미한다.

2.2 하중법 (Force method)

먼저 하중법 기반의 일반적인 평형 방정식은 다음과 같다.

$$\bar{A} \bar{f} = \bar{p} \tag{6}$$

여기서 \bar{A} 는 모든 절점의 일반화된 평형행렬이며 \bar{f} 와 \bar{p} 는 각각 부재력 벡터와 외부하중 벡터이다. 식 (1)로부터 다음과 같은 운동학적 관계를 정의할 수 있다.

$$e = \bar{A}^T d \tag{7}$$

여기서 e 와 d 는 각각 부재 변형과 변위 벡터이다. \bar{A} 행렬을 특이값 분해(Singular value decomposition)를 활용하여 확장하면 $[(m + c) \times (m + c)]$ 의 크기를 갖는 행렬 \tilde{A} 로 나타낼 수 있다⁶⁾. 행렬 \tilde{A} 를 이용하여 운동방정식을 표현하면 다음과 같다.

$$\bar{M} \ddot{d} + \tilde{A} \bar{f} = 0 \tag{8}$$

여기서 \ddot{d} 는 각 절점의 가속벡터이고, 확장한 질량행렬 \bar{M} 은 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{M} = \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{9}$$

3. 손상 탐지 방법

손상 탐지 방법은 하중법에서 얻어진 부재력을 매개 변수로 사용하여 손상된 위치와 정도를 탐지하게 되며 목적 함수(Objective function)는 다음과 같다.

$$obj(X) = \sum_{i=1}^m \frac{\|\Phi_{di} - \Phi_i(X)\|}{\|\Phi_{di}\|} \tag{10}$$

여기서 Φ_{di} 와 $\Phi_i(X)$ 는 각각 손상된 구조물의 i 번째 부재의 부재력과 알고리즘을 통하여 도출되는 i 번째 부재의 부재력이며 더 정확한 결과를 얻기 위하여 다음과 같은 패널티 함수가 고려된다.

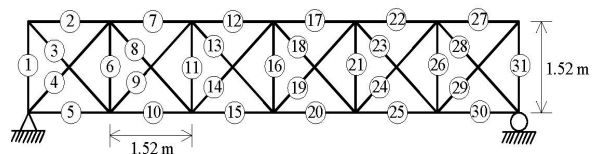
$$penalty(X) = (n_h - n_d)^2 \tag{11}$$

여기서 n_h 와 n_d 는 각각 비손상 부재의 개수와 손상 부재의 개수이다. 결과적으로 최종 목적함수는 다음과 같이 적용되었다.

$$F(X) = N_0 - [obj(X) + penalty(X)] \tag{12}$$

여기서 N_0 는 목적 함수를 양수로 만들기 위하여 선택되는 매개 변수이다.

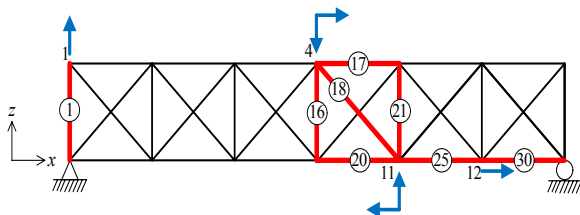
4. 수치 예제 및 결과



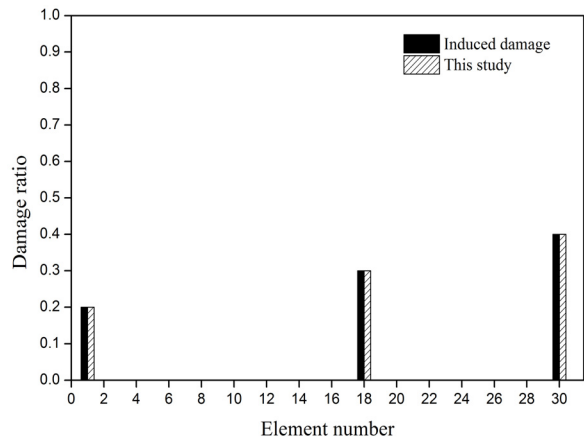
〈Fig. 3〉 Truss model

본 기사에서 제시한 손상탐지법의 정확성을 입증하기 위해 〈Fig. 3〉과 같은 트러스를 고려하였다.

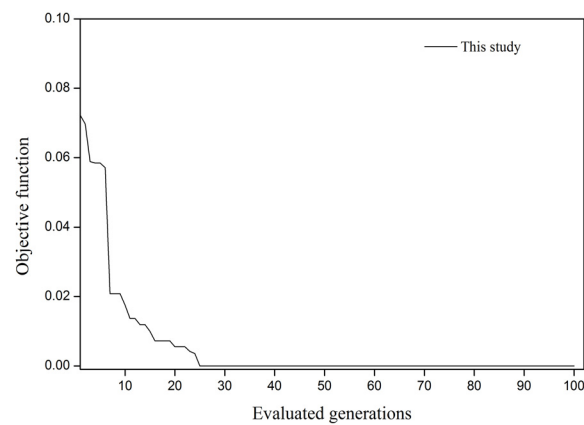
31bar 트러스의 경우, 부재의 단면적은 $A = 0.01 \text{ m}^2$, 밀도는 $\rho = 2770 \text{ kg/m}^3$, 탄성계수는 70 GPa 이다. 본 예제에서는 탄성계수를 설계변수로 설정하였으며, 손상 상태의 구조물은 특정 부재의 탄성계수의 감소를 통하여 설계하였다. 손상된 부재가 명시된 손상 시나리오와 그에 상응하는 손상률이 <Table 1>에 제시되었으며 가장 작은 3개의 고유값과 해당 고유 벡터는 <Table 2>와 같다. <Table 2>로부터, 절점 1, 4, 11 및 12가 x 및 z 방향을 따라 하중을 받으며 다른 절점에 작용하는 하중 값은 0에 가깝다. 가중 합법 과정을 거친 후 트러스에 가해진 최적의 하중 조합은 <Table 3>에 나타내었다. 최적의 하중 조합을 통해 부재 1, 16, 17, 18, 20, 21, 25 및 30은 손상 가능성이 높은 부재로 고려되었다. 최적의 하중 조합과 선택된 부재는 <Fig. 3>과 같다. 부재 손상 가능성에 따라, 손상 위치와 정도의 탐지는 GA를 통해 더 효율적일 수 있다. <Fig. 4>는 탄성계수 감소율로 나타낸 손상 탐지 결과이다. 여기서 볼 수 있듯이 하중법 기반의 GA를 결합시킨 본 방법은 손상 위치와 정도의 탐지가 가능하다. 0이 아닌 고유값에 해당하는 하중 분포를 통해 확인된 손상은 <Table 4>에 나타내었으며 가중 합법을 사용한 방법이 손상 탐지의 정확도를 향상시킬 수 있음을 알 수 있다. 목적 함수의 수렴 이력은 <Fig. 5>와 같으며 2단계 최적화 알고리즘을 기반으로 한 현재의 과정은 실제 손상에 수렴하는 것을 볼 수 있다.



<Fig. 4> Selected elements from the first stage



<Fig. 5> Identified damages



<Fig. 6> Convergence history

<Table 1> Damage ratios

| Element number | Damage ratio |
|----------------|--------------|
| 1 | 0.2 |
| 18 | 0.3 |
| 30 | 0.4 |

<Table 2> The lowest three eigenvalues and corresponding eigenvalues

| Node | Direction | Eigenvalue | | |
|------|-----------|------------|---------|---------|
| | | 0.7010 | 0.7916 | 0.8215 |
| 1 | x | - | - | - |
| | z | -0.0257 | -0.0215 | 0.9977 |
| 4 | x | -0.0433 | 0.4983 | 0.0205 |
| | z | 0.0433 | -0.4983 | -0.0205 |
| 11 | x | 0.0433 | -0.4983 | -0.0205 |
| | z | -0.0433 | 0.4983 | 0.0205 |
| 12 | x | 0.9959 | 0.0806 | 0.0549 |
| | z | - | - | - |

〈Table 3〉 Optimal load combination and its node locations

| Direction | Node | | | |
|-----------|--------|---------|---------|--------|
| | 1 | 4 | 11 | 12 |
| <i>x</i> | - | 0.0946 | -0.0946 | 0.3244 |
| <i>z</i> | 0.1659 | -0.0946 | 0.0946 | - |

〈Table 4〉 Identified damages via load distributions corresponding non-zero eigenvalues

| Element number | Damage ratio | ϕ_1 | ϕ_2 | ϕ_3 | $\sum_{i=1}^3 \phi_i$ | This study |
|----------------|--------------|----------|----------|----------|-----------------------|------------|
| 1 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.20 |
| 16 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 17 | 0.00 | 0.40 | 0.50 | 0.20 | 0.80 | 0.00 |
| 18 | 0.30 | 0.40 | 0.40 | 0.30 | 0.60 | 0.30 |
| 20 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 21 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 25 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 30 | 0.40 | 0.40 | 0.40 | 0.40 | 0.40 | 0.40 |
| Error | | 0.17 | 0.26 | 0.04 | 0.73 | 0.00 |

5. 결론

본 기사에서는 트러스 구조물의 다중 손상을 위치와 크기를 결정하기 위하여 가중 합법과 GA를 결합한 AO 기반의 효율적인 2단계 수치적 알고리즘을 제시하였다. 첫 번째 단계에서는 손상된 트러스 구조물에서 손상 확률이 높은 부재를 결정하기 위해 AO 방법이 사용되었다. 또한 최적의 하중 조합은 가중치 계수를 사용하여 모든 손상 케이스를 고려할 수 있는 가중 합법 과정에서 얻을 수 있다. 두 번째 단계에서는 손상된 트러스 부재의 위치와 정도를 탐지하기 위한 최적화 도구로 GA가 사용되었다. 수치 예제의 결과는 제안된 2단계 방법이 다중 손상을 적절하게 탐지하기 위한 효율적인 도구임을 보여준다. 특히, 이 방법은 탐지 공간의 크기를 크게 줄일 수 있다는 장점이 있다.

References

- Messina, A., Williams, E.J. and Contursi, T. (1998). "Structural damage detection by a sensitivity and statistical-based method." *Journal of Sound and Vibration*, 216, pp. 791-808.
- Gomes, H. M. and Silva, N. R. S. (2008). "Some comparisons for damage detection on structures using genetic algorithms and modal sensitivity method." *Applied Mathematical Modelling*, 32, pp. 2216-2232.
- Shi, Z. Y., Law, S. S. and Zhang, L. M. (2000). "Damage localization by directly using incomplete mode shapes." *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 126, pp. 656-660.
- Guo, H. Y. and Li, Z. L. (2009). "A two-stage method to identify structural damage sites and extents by using evidence theory and micro-search genetic algorithm." *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23, pp. 769-782.
- Fallahian, S. and Seyedpoor, S. M. (2010). "A two stage method for structural damage identification using an adaptive neuro-fuzzy inference system and particle swarm optimization." *Asian Journal of Civil Engineering*, 11, pp. 795-808.
- Wang, X. J., Zhou, X. Q., Xia, Y. and Weng, S. (2013). "Comparisons between modal-parameter-based and flexibility-based damage identification methods." *Advances in Structural Engineering*, 16, pp. 1611-1619.