

모드변형에너지를 이용한 향상된 유전알고리즘 기반 손상검색기법

Improved Genetic Algorithm-Based Damage Detection Technique Using Modal Strain Energy

박재형* · 이정미** · 김정태*** · 류연선****

Park, Jae-Hyung · Lee, Jung-Mi · Kim, Jeong-Tae · Ryu, Yeon-Sun

ABSTRACT

The objective of this study is to improve the accuracy of damage detection using natural frequency and modal strain energy. The following approaches are used to achieve the goal. First, modal strain energy is introduced and newly GA-based damage detection technique using natural frequency and modal strain energy is proposed. Next, to verify efficiency of the proposed technique, damage scenarios for free-free beams are designed and the vibration modal tests as damage cases are conducted. Finally, feasibility of proposed technique is verified in comparison with a GA-based damage detection technique using natural frequency and mode shape.

Keywords : damage detection, modal analysis, genetic algorithm, modal strain energy

1. 서 론

1980년대 이후 대형 구조물의 노후화, 공용기간 중 붕괴 등으로 인해 구조물의 안전성을 확보하기 위한 노력이 진행되었다. 이에 따라 구조물의 응답 변화를 이용하는 구조건전성 모니터링 기법에 관한 연구가 활발히 수행되어오고 있다. 구조건전성 모니터링에 대한 연구는 크게 예측과 모니터링 기법, 손상검색 기법, 손상된 구조물의 성능 평가 기법 등에 관한 연구로 구분된다. 그 중에서 손상검색 기법에 관한 연구는 Kalman filter법(Hoshiya 등, 1989), 손상지수(DI)법, 유전알고리즘(GA)기법, 인공신경망(ANN)기법 등에 관하여 수행되고 있다(Sohn 등, 2003). 이들 중 유전알고리즘을 이용하여 구조물의 손상을 평가하는 GA기반 손상검색 기법에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다. GA기반 손상검색 기법은 유전적 최적화 과정을 통해 구조물의 실제 예측결과와 해석모델의 계산결과를 일치시키는 구조식별(system identification, SID)과정을 통해 구조물 내의 손상 위치와 손상 정도를 검색하는 기법이다. GA기반 손상평가 기법의 장점은 기존의 전통적 최적화 탐색 기법에 비해 목적함수의 미분 정보를 필요로 하지 않는 것이며, 또한 확률적 다점 탐색을 통해 손상검색 정확도가 높다는 것이다.

GA기반 손상검색 기법에 관한 연구로서 Routolo 등(1997)은 손상검색의 정확도를 높일 수 있는 모드특징으로서 고유진동수와 모드형상 및 모드곡률의 조합 방법을 제시하였다. 또한 이상열(2005)은 손상검색 시간

*학생회원 · 부경대학교 해양공학과 박사과정

**학생회원 · 부경대학교 해양공학과 석사과정

***정회원 · 부경대학교 해양공학과 교수

****정회원 · 부경대학교 해양공학과 교수

을 크게 단축시킬 수 있는 마이크로 유전알고리즘을 제안하였다. 한편, Hao 등(2002)은 기본 모델의 모델링 오차에 의한 손상평가의 오류를 감소시키기 위하여 고유치의 손상 전·후 변화율과 모드형상의 손상 전·후 변화량을 사용하는 알고리즘을 제시하였다. 이와 같은 연구노력에도 불구하고 GA기반 손상평가 기법의 손상 검색 정확도를 개선하기 위해서는 다음과 같은 연구노력이 필요하다. 첫째, 기본 모델의 모델링 오차를 줄일 수 있는 손상검색 알고리즘이 필요하다. 둘째, 구조물의 손상 전·후 상태의 변화를 대표할 수 있는 모드특징 조합을 선정하는 것이 필요하다. 선정된 모드특징이 손상평가 정확도에 미치는 영향에 관한 Maia 등(2003)과 Kim 등(2003)의 연구에 따르면 구조물 손상 전·후의 모드변형에너지의 변화를 감지하여 구조물의 손상 상태를 정확히 평가할 수 있음이 나타났다. 또한, 모드변형에너지는 고유진동수나 모드형상에 비하여 다양한 구조물 형식(예를 들어 보 또는 트러스)의 모드거동 특성 및 손상에 의한 구조특성의 변화에 민감한 특징이 있다.

본 연구에서는 손상검색 정확도의 향상을 위해 구조물의 모드변형에너지와 고유진동수의 조합을 모드특징으로 이용하는 향상된 GA기반 손상검색기법을 제안하고자 한다. 이와 같은 연구목적을 달성하기 위하여 다음과 같은 4가지 연구 내용을 수행하였다. 첫째, 모드변형에너지를 유도하고, 고유진동수와 모드변형에너지의 조합을 모드특징으로 이용하는 새로운 GA기반 손상검색 알고리즘을 제안하였다. 둘째, 제안된 기법의 손상 검색 성능을 검증하기 위하여 양단 자유보를 대상으로 인위적인 손상에 따른 진동 모드실험을 수행하였다. 셋째, 실험대상 구조물의 기본 모델로서 오일러-베르누이 보 모델을 선정하였으며, 수치 모드해석으로부터 기본 모델의 고유진동수와 모드형상을 분석하였다. 마지막으로, 실제 구조물의 실험적 모드특성치와 기본 모델의 이론적 모드특성치 각각에 대한 모드변형에너지를 구하고 제안된 기법에 입력하여 손상검색을 수행하였다.

2. 유전알고리즘 기반 손상검색기법

2.1 손상검색문제의 정식화

현재까지 구조물의 진동 자료를 이용하여 손상을 비파괴적으로 평가하고자하는 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이러한 기법들은 손상에 따른 진동신호 또는 그 신호로부터 추출된 고유진동수, 주파수응답함수, 모드형상, 모드변형에너지 등의 모드 특징 변화를 이용하여 손상을 평가하게 된다(Sohn 등, 2003). 유전알고리즘을 이용하는 손상검색기법 또한 손상에 따른 모드특징 변화를 이용하고 있으며, 실제 구조물로부터 추출된 모드특징과 해석모델로부터 계산된 모드특징의 차이가 최소화 되도록 지속적으로 해석모델을 개선하여 손상을 평가할 수 있다. 이와 같은 과정은 다음 식(1)과 같은 최소화 문제로 정식화할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Find } \alpha \\
 & \text{Minimize } F(\alpha) = A - B(\alpha), \\
 & \text{Subject to } \alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max}
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 α 는 부재의 강성변화를 나타내는 설계변수, $F(\alpha)$ 는 목적함수, A 는 실제 구조물로부터 취득된 모드특성치, $B(\alpha)$ 는 해석모델로부터 계산된 모드 특성치를 나타낸다. 이 같은 손상검색문제는 목적함수에 사용되는 모드 특성치와 해석모델의 신뢰도에 따라 손상평가의 정확도가 좌우되며, 사용되는 최소화 기법에 따라 손상평가 시간을 줄일 수 있다(Routolo 등, 1997; 이상열, 2005).

2.2 손상검색을 위해 사용된 목적함수

적합도 함수는 구성하는데 있어 고유진동수는 구조물로부터 한 점의 계측만으로 쉽게 추출할 수 있는 장

점으로 인하여 많이 이용되어져 왔다. 실험으로부터 구한 고유진동수와 해석적으로 계산된 고유진동수가 일치할 때까지 해석 모델의 요소 강성을 수정해 줌으로써 손상을 식별할 수 있다. 그러나 두 모델간의 고유진동수의 차이를 이용하는 경우에는 모델링 오차로 인하여 손상평가의 정확성을 저하시키게 된다. 이와 같은 경우 다음 식(2)과 같이 실험모델과 해석모델의 손상 전후의 고유진동수 변화율을 일치시키기 위한 목적함수를 이용하게 된다(Hao 등, 2002).

$$f_{\omega}(\alpha) = \sum_{i=1}^{NM} \left(\frac{\delta\omega_{E_i}}{\omega_{E_i}} - \frac{\delta\omega_{A_i}(\alpha)}{\omega_{A_i}} \right)^2 \quad (2)$$

여기서 $\delta\omega_{E_i}$ 와 $\delta\omega_{A_i}$ 는 각각 실험 모델과 해석모델에 대한 손상전후의 고유진동수의 변화량을 나타낸다.

하지만 고유진동수의 변화만으로는 대형 구조물에서 손상의 위치를 판별하기 어렵고, 또한 고유진동수는 대형구조물에 있어서는 손상에 민감하지 않으며, 온도의 영향으로 인하여 손상 추정 결과가 왜곡될 수 있다. 이러한 단점을 극복하기 기존에는 모드형상이 고유진동수와 조합하여 이용되었으나, 본 연구에서는 다양한 구조물 형식의 모드거동 특성 및 손상에 의한 구조특성 변화에 민감한 모드변형에너지를 고유진동수와 조합한 목적함수를 제시하였다.

제시한 목적함수를 설명하기에 앞서, 먼저 모드변형에너지(U_i)는 오일러-베르누이 보 이론에 따라 다음과 같이 나타낼 수 있다(Kim 등, 2003).

$$U_i = \int_0^L \frac{1}{2} k(x) \{\phi_i''(x)\}^2 dx \quad (3)$$

여기서, U_i 는 i 번째 모드의 모드변형에너지이며, $k(x)$ 와 L 은 각각 보요소의 강성과 지간 길이를 나타내고, $\phi_i''(x)$ 는 i 번째 모드의 모드곡률(mode curvature)을 나타낸다. 식(4)를 NE 개의 요소를 가지는 이산계에서 표현하였을 때, 요소 내에서의 강성 k_j 는 일정하다고 가정하고, 계속 가능한 $\phi_i''(x)$ 를 제외하고 좌항으로 이항하면, i 번째 모드의 강성 k_j 에 대한 상대적인 모드변형에너지 θ_i 를 구할 수 있다.

$$2 \sum_{j=1}^{NE} U_{ij}/k_j = \sum_{h=1}^{NE} \int_{x_h}^{x_{h+1}} [\phi_i''(x)]^2 dx = \theta_i \quad (4)$$

따라서 실제 구조물과 해석모델 사이의 손상 전후 모드 변형에너지 변화량 차이를 이용하면 다음 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{\theta}(\alpha) = \sum_{i=1}^{NM} \sum_{j=1}^{NE} \left([\theta_{A_{ij}} - \theta_{A_{ij}}^*(\alpha)] - [\theta_{E_{ij}} - \theta_{E_{ij}}^*] \right)^2 \quad (5)$$

여기서 $\theta_{A_{ij}}$ 와 $\theta_{E_{ij}}$ 는 각각 비손상 상태에서의 해석모델과 실험모델에서 j 번째 모드에 대한 i 번째 위치에서의 상대적인 모드변형에너지를 나타내며, 뒀 첨자 "*"는 손상 상태를 의미한다.

이상과 같은 식(2)과 식(5)가 모두 최소화되었을 때, 구조물의 손상 상태를 평가하게 된다. 일반적으로 최소화하기 위한 두 함수를 조합하기 위해서는 가중치를 이용한 선형 결합방법이나 한 함수는 적합도 함수로 다른 함수는 제약조건으로 하는 방법이 사용될 수 있다(류연선 등, 1999). 본 연구에서는 식(6)과 같이 전자

의 방법을 이용하였다. 식(6)은 다시 유전알고리즘을 이용하기 위하여 식 (7)과 같이 최소화 문제를 최대화 문제로 변환한 적합도 함수로 나타낼 수 있다.

$$F_1(\alpha) = W_w f_{w_i}(\alpha) + W_\theta f_{\theta_i}(\alpha) \tag{6}$$

$$\overline{F}_1(\alpha) = \kappa_1 - F_1(\alpha) \tag{7}$$

여기서, W_w 는 $f_{w_i}(\alpha)$ 에 대한 가중치이고, W_θ 는 $f_{\theta_i}(\alpha)$ 에 대한 가중치이며, κ_1 는 함수 $\overline{F}_1(\alpha)$ 를 항상 양수로 하는 임의의 실수이다.

고유진동수와 모드변형에너지의 조합방법을 이용한 손상검색 결과와 손상 추정 성능을 비교하기 위하여 기존에 제안되었던 고유진동수와 모드형상을 조합한 목적함수를 정식화하였다(Hao 등, 2002).

$$F_2(\alpha) = W_w f_{w_i}(\alpha) + W_\phi \sum_{i=1}^{NM} \sum_{j=1}^{NP} \left(\left[\phi_{A_{ij}} - \phi_{A_{ij}}^*(\alpha) \right] - \left[\phi_{E_{ij}} - \phi_{E_{ij}}^* \right] \right)^2 \tag{8}$$

여기서, NP 는 데이터 취득 센서 개수이며, W_ϕ 는 $f_{\phi_i}(\alpha)$ 에 대한 가중치이고, $\phi_{A_{ij}}$ 와 $\phi_{E_{ij}}$ 는 각각 비손상 상태에서의 해석모델과 실험모델에서 i 번째 모드에 대한 j 번째 계측위치의 모드 벡터 값이며, 윗 첨자 "*"는 손상 상태를 의미한다.

2.3 손상검색 알고리즘

전술한 바와 같은 손상검색 문제를 풀기 위하여 다양한 최적화 기법이 적용될 수 있으나, 본 연구에서는 마이크로 유전알고리즘을 이용하였다. 마이크로 유전알고리즘은 기존의 유전알고리즘이 유전 정보의 다양성을 유지하기 위하여 집단의 크기를 크게 두게 되는데 따른 계산 부담을 줄이기 위해 매우 작은 집단을 사용하고, "재시동"과정이 추가된 효율적인 최적해 탐색 알고리즘이다(Goldberg, 1999; 이상열, 2005). 이는 먼저 5가지의 손상 경우를 임의로 가정하여 초기화(initialization)하고, 5가지 손상 경우에 대해서 목적함수의 최소화 정도, 즉 적합도(fitness)를 평가하게 된다. 이후 5가지의 손상 경우가 거의 동일한 손상을 나타낸다면, 재시동을 하여 다시 초기화하게 된다. 5가지의 손상 경우가 동일하지 않다면 종료조건을 확인하고, 종료조건을 만족하지 못하면 재생산(reproduction), 교배(crossover), 돌연변이(mutation)에 의하여 모델을 개선하게 된다. 이와 같은 일련의 과정을 반복하여 최적화된 손상 경우로부터 손상을 식별하게 된다.

3. 실험 예제

3.1 실험 모델과 해석 모델의 구성

제안된 알고리즘의 유용성을 검증하기 위하여, 다음의 그림 3과 같이 양단 자유보에 대하여 강제진동 실험을 실시하였다. 보의 치수는 폭 4cm, 높이 1cm, 길이 56cm이고, Y축에 대한 휨 모드를 고려하였다. 재료는 탄성계수 70GPa, 단위 질량 2,700kg/m³의 알루미늄을 사용하였으며, 대상구조물의 동특성을 추출하기 위하여 그림 1과 같이 7개의 가속도계(Dytran 3101BG)를 등간격으로 부착하였다. 가진력은 충격망치(impact hammer)를 이용하여 보의 왼쪽 끝에서 6cm 위치에 충격력을 가하였다. 가속도는 8kHz로 샘플링하여 총 8,450개의 데이터를 취득하였으며, NI 사의 PXI-4482 DAQ 보드와 LabVIEW를 이용하였다. 모드 특징을 추출하기 위하여 주파수영역분해법(frequency domain decomposition, FDD)을 이용하였다.

실험 모델과 동특성을 비교하기 위한 해석모델은 1차원 오일러-베르누이 보 요소를 이용한 유한요소 해석

모델로 그림 2와 같이 구성하였다. 해석 모델은 총 15개의 노드와 14개의 요소로 구성되어 있으며, 절점당 2개의 자유도를 가지고 있다. 양 끝 2개의 요소는 센서의 반지름에 해당하는 부분(4mm)으로 본 연구에서 손상 검색 대상에는 포함되지 않는다. 유한요소모델에 사용된 재료의 물성치는 표 1과 같고, 고유치 해석을 통해 해석모델에 대한 고유진동수 및 모드 형상을 추출하였다. 그 결과는 표 2와 그림 3과 같다.

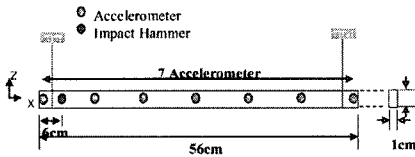


그림 1 양단자유보의 실험 계획

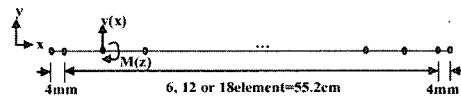


그림 2 1-D 유한요소해석 모델

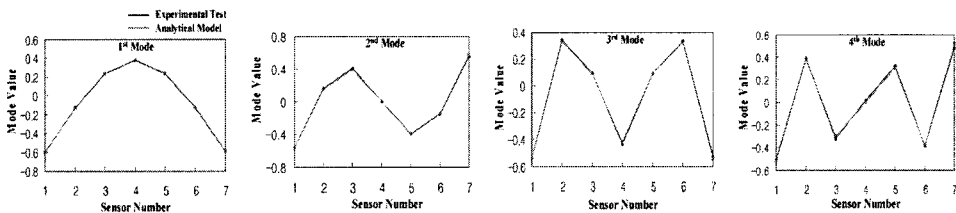


그림 3 실험 및 수치모델에서 추출된 모드형상

표 1 재료의 물성치

탄성계수	70GPa
단위질량	2,700kg/m ³
단면2차모멘트	3.33×10 ⁻⁴ m ⁴
단면적	0.0004m ²

표 2 실험 및 해석모델에서 추출된 고유진동수(Hz)

	1차모드	2차모드	3차모드	4차모드
실험 모델	165.039	452.148	800.859	1445.31
수치 모델	166.900	460.110	902.271	1492.52

3.2 손상시나리오

본 연구에서는 여러 형태의 휨 균열을 모사하여 손상시나리오를 작성하였다. 손상은 2mm 두께의 가는 실패대로 표 3과 같이 지간의 중간 부위(x/L=0.464)에 손상 깊이를 보의 두께에 대하여 25%, 50%의 수준으로 순차적으로 절단하고, 추가적으로 오른쪽 끝 부위(x/L=0.939)에 손상 깊이 25%, 50%를 절단하였다. 각 손상 경우 별로 충격하중 실험을 수행하여, 가속도 응답을 측정하였다. 취득된 가속도 데이터로부터 추출된 고유진동수는 표 4와 같다.

표 3 손상시나리오

손상 경우	손상 위치 (x/L)	손상 크기 (a/H)
1	0.464	0.25
2	0.464	0.5
3	0.464, 0.939	0.5, 0.25
4	0.464, 0.939	0.5, 0.5

표 4 손상시나리오에 따라 추출된 고유진동수(Hz)

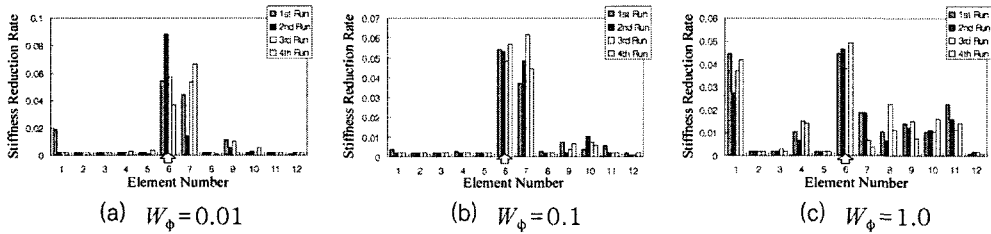
손상 경우	모드 1	모드 2	모드 3	모드 4
1	163.086	451.172	873.047	1442.38
2	158.203	451.172	856.445	1436.53
3	158.203	450.195	885.469	1432.62
4	158.203	450.195	851.563	1416.02

3.3 손상검색결과 및 분석

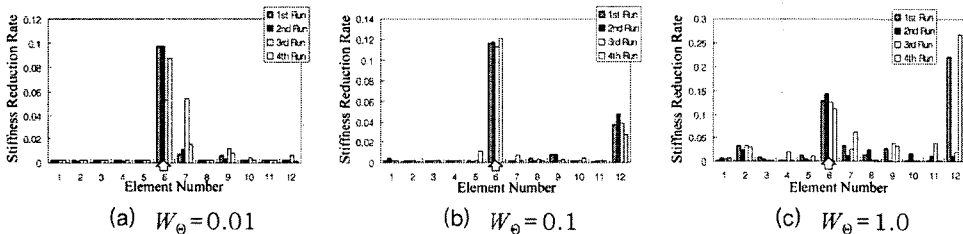
마이크로 유전알고리즘을 적용하여 대상 구조물의 모드특성치 변화량과 해석 모델의 모드특성치 변화량이 같아지도록 강성감소계수 α_i 를 추정함으로써 손상을 검색하였다. 유전알고리즘의 종료조건은 일반적으로 반복횟수(세대수)를 정하는 방법과 일정한 세대가 지난 후에도 해의 개선이 이루어 지지 않을 경우에 종료하는 방법이 있다. 이 연구에서 전자의 방법을 이용하였으며, 충분한 최적해 탐색을 위하여 30,000세대를 종료조건으로 하였다. 설계변수(강성감소계수)는 각각 13비트로 구성되어 있으며, 이 경우 해상도는 0.0001이고,

최소값과 최대값은 0에서 0.8192로 고려하였다. 기존 마이크로 유전알고리즘에서와 같이 집단은 5개의 개체로 구성되고, 재생산 방법은 토너먼트 선택을 이용하였다. 교배방법은 일점교배로 교배확률 1.0을 사용하였고, 돌연변이는 특별히 필요하지 않으나, 돌연변이가 최적해 부근에서 해의 개선에 용이하므로 돌연변이확률 0.02를 적용하였으며, 엘리트 전략을 이용하여 최적개체는 항상 유전되도록 고려하였다. 유전알고리즘은 일반적으로 전역적 최적해에 수렴했는가에 대한 판단은 종료조건과 관련되어 있으나, 이 연구에서는 알고리즘의 4회 수행, 즉 손상검색을 추가적으로 3회 더 실시함으로써 확인하였다.

먼저 적합도 함수에 대한 가중치의 영향을 살펴보기 위하여, 각각의 적합도 함수에 있어 고유진동수에 대한 가중치는 모두 1.0으로 두고, 모드 형상과 모드변형에너지에 대한 가중치를 0.01, 0.1, 1.0으로 변화시켜가며 손상검색결과를 비교하여 보았다. 그 결과들 가운데 손상 경우 1에 대하여 가중치에 따른 제안된 적합도 함수와 기존의 적합도 함수에 대한 손상검색 결과를 그림 4와 그림 5에서 제시하였다.



(a) $W_\phi = 0.01$ (b) $W_\phi = 0.1$ (c) $W_\phi = 1.0$
 그림 4 모드형상의 가중치에 따른 손상검색 결과 (손상 경우 1)



(a) $W_\epsilon = 0.01$ (b) $W_\epsilon = 0.1$ (c) $W_\epsilon = 1.0$
 그림 5 모드변형에너지의 가중치에 따른 손상검색 결과 (손상 경우 1)

그림 4, 5의 손상검색 결과에서 알 수 있듯이 모드형상과 모드변형에너지의 가중치가 0.01일 경우에는, 실제 손상이 6번 요소에 있는데 비하여 대칭 위치인 7번 요소에 손상이 있는 것으로 추정되었음을 알 수 있다. 이는 목적함수에 대한 모드형상의 기여도가 고유진동수에 비하여 상대적으로 작게 평가되어 고유진동수만 이용한 결과와 유사한 결과를 얻은 것으로 판단할 수 있다. 한편, 모드형상과 모드변형에너지의 가중치를 1.0으로 하였을 경우의 손상검색 결과로부터, 가중치를 크게 고려한 경우에도 합리적인 추정이 어려움을 알 수 있다. 마지막으로 모드형상과, 모드변형에너지의 가중치를 0.1로 하였을 경우에는, 가중치를 0.01, 혹은 1.0으로 설정한 경우에 비하여, 손상 위치 및 정도를 합리적으로 추정하고 있음을 알 수 있다. 따라서 이 연구에서는 모드형상과 모드변형에너지의 최적의 가중치를 0.1로 두는 것으로 결정하였다.

두 적합도 함수에 대하여 고유진동수의 가중치를 1.0으로, 모드형상과 모드변형에너지의 가중치를 0.1로 설정하고, 손상 경우 2,3,4에 대한 손상 검색 결과는 그림 6~8과 같다. 그림에서 실제 손상 위치는 x축 상에 화살표로 표시되었다. 고유진동수와 모드형상을 조합한 적합도함수를 이용하였을 경우 손상 경우 2에 대해서 중앙부 손상은 어느 정도 손상 위치를 예측할 수 있었으나 대칭 위치인 7번 요소에도 손상이 있는 것으로 예측되었다. 손상 경우 3,4에 대해서는 12번 요소의 손상을 검색하지 못하는 것을 볼 수 있다. 그러나 고유진동수와 모드변형에너지를 조합한 적합도함수를 이용하였을 경우에는 중앙부 손상을 정확하게 예측하고 있으며, 또한 12번 요소 즉, 자유단 측의 손상 역시 정확하게 추정하고 있음을 알 수 있다.

그림 4~8에서 살펴보면, 고유진동수와 모드형상을 조합한 적합도 함수를 이용하였을 경우 손상 경우 2에

서 4회의 손상검색 결과가 비교적 일괄된 값을 나타내었으나, 손상 경우 3, 4로 갈수록 변동이 심하게 나타났다. 이는 최적의 가중치를 선정하였던 그림 8, 9로부터 모드형상의 가중치에 따른 문제로 생각할 수 있다. 예를 들어 손상 경우 4의 경우 손상 경우 1(그림 8)에서 모드형상에 대한 가중치를 1.0으로 두었을 때와 매우 유사한 패턴을 보이고 있다는 것을 알 수 있다. 즉, 손상 정도에 따라서 모드형상의 가중치가 다소 조정되어야 한다고 판단되어진다. 이에 반해 고유진동수와 모드변형에너지를 병합한 적합도 함수의 경우에는 비교적 일정하게 손상검색 결과를 보여주고 있다. 따라서, 실제 구조물에서는 손상 위치와 그 정도를 파악하기 힘들기 때문에 제안된 방법이 더 유용하다고 할 수 있다.

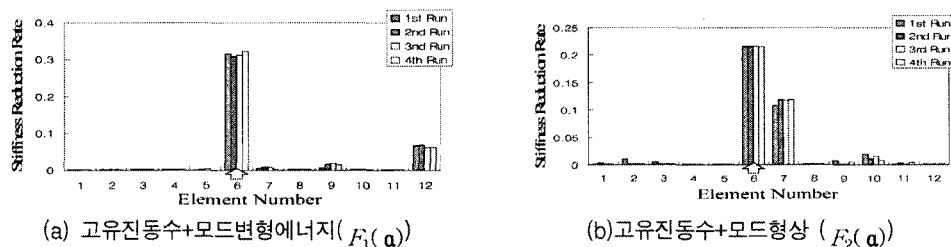


그림 6 손상검색결과 (손상 경우 2)

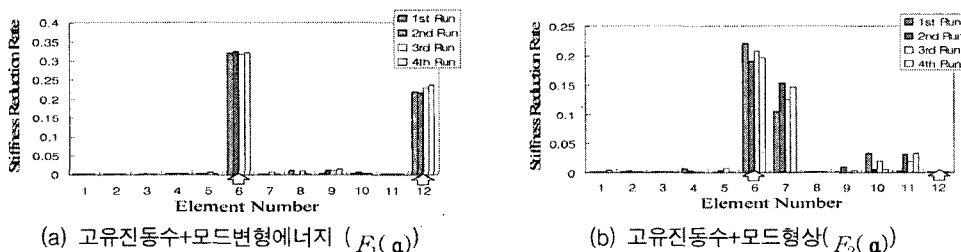


그림 7 손상검색결과 (손상 경우 3)

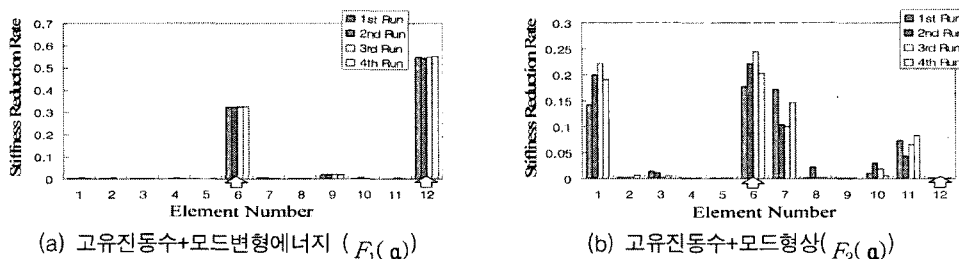


그림 8 손상검색결과 (손상 경우 4)

손상 정도에 있어서는 유한요소모델에 대하여 단순한 오일러-베르누이 보 이론을 적용하였기 때문에 정확한 손상도 평가 보다는 상대적인 손상의 평가만을 고려하였다. 4가지 손상경우에 대한 4회의 추정결과를 평균한 결과 손상 경우 1, 2와 손상 경우 3, 4는 각각 중앙부와 자유단부의 실제 손상을 2배 가량 크게 절단하였다. 이에 대해 제안된 기법을 이용한 손상추정 결과는 각각 약 2.7배, 2.4배 정도 손상 발생을 추정하였다. 한편, 기존의 기법을 이용한 손상추정 결과는 정확한 위치를 찾은 손상 경우 1,2에 있어 약 4.1배 정도 손상 발생을 추정하였다.

4. 결 론

본 연구의 목적은 고유진동수와 모드변형에너지를 이용하여 GA기반 손상검색기법의 손상검색 정확도를 향상시키는 것이다. 이 같은 목적을 달성하기 위하여 다음과 같은 연구가 수행되었다. 첫째, 모드변형에너지를 유도하고, 고유진동수와 모드변형에너지의 조합을 모드특징으로 이용하는 새로운 GA기반 손상검색 알고리즘을 유도하였다. 둘째, 제안된 기법의 손상검색 성능을 검증하기 위하여 양단 자유보를 대상으로 인위적인 손상에 따른 진동 모드실험을 수행하였다. 셋째, 실험대상 구조물의 기본 모델로서 오일러-베르누이 보 모델을 선정하였으며, 수치 모드해석으로부터 기본 모델의 고유진동수와 모드형상을 분석하였다. 마지막으로, 실제 구조물의 실험적 모드특성치와 기본 모델의 이론적 모드특성치 각각에 대한 모드변형에너지를 구하고 제안된 기법에 입력하여 손상검색을 수행하였다. 본 연구에서 제안된 기법과 기존의 고유진동수와 모드형상을 이용하는 GA기반 손상검색기법의 손상검색 성능을 비교·분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 목적 함수의 구성을 위하여 사용된 고유진동수, 모드형상, 모드변형에너지에 대한 가중치는 본 연구의 대상 구조물에 있어 고유진동수 1.0, 모드형상이나 모드변형에너지가 0.1으로 정하는 것이 적당하였다.
- (2) 양단 자유보 실험을 통해 제안된 기법의 손상 위치 추정 성능을 평가하였다. 중앙부의 손상은 기존의 방법과 제안 방법에 의하여 손상위치를 정확히 추정할 수 있었으나, 자유단부의 손상에 대해서 기존의 방법은 손상 위치를 찾지 못하였으며, 제안 방법은 손상 위치를 정확하게 추정할 수 있음을 알 수 있었다.
- (3) 손상 위치 추정 결과의 신뢰성을 살펴보기 위하여 총 4회의 손상검색을 반복 수행하였다. 기존의 방법을 이용하였을 경우 손상 경우 2를 제외하고 4회 손상검색 결과의 변동이 심하게 일어나는 것을 볼 수 있는데, 이는 손상도에 따라서 모드형상에 대한 가중치가 다소 조정 되어야 할 것으로 판단되었다. 한편, 제안된 방법을 이용하였을 경우에는 4회의 손상 검색 결과 모두 비교적 일괄적인 결과를 보였다.
- (4) 손상도 평가에 있어서는 제안 기법의 경우, 비교적 정확하게 손상도를 추정하였다. 반면에 기존 기법의 경우에는 손상도 추정 오차가 크게 나타남을 확인하였다.

감사의 글

이 연구는 한국과학재단지정 우수연구센터인 스마트 사회기반시설 연구센터의 연구비 지원(R11-2002-101-03002-0)으로 이루어졌으며, 저자는 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- 류연선, 임오강, 박경진 (1999) 최적설계입문, 반도출판사, 서울
- 이상열 (2005) 마이크로 유전 알고리즘을 이용한 자유진동 박판구조물의 비파괴 손상 규명, 한국강구조학회 논문집, 17(2), pp.173~181
- Goladberg, D.E. (1999) *Genetic algorithms in Search, Optimization & Machine Learning*, Addison-Wesley, New York
- Hao, H. and Xia, Y. (2002) Vibration-based Damage Detection of Structures by Genetic Algorithm, *Journal of Computing in Civil Engineering*, 16(3), pp.222~229
- Kim, J.T., Ryu, Y.S., Cho, H.M. and Stubbs, N. (2003) Damage identification in beam-types: frequency-based method vs mode-shape-based method, *Engineering Structure*, 25(1), pp.57~67
- Ruotolo, R. and Surace, C. (1997) Damage assessment of multiple cracked beams: numerical results and experimental validation, *Journal of Sound and Vibration*, 206(4), pp.567~588
- Sohn, H., Farrar, C.R., Hemez, F.M., Shucnk, D.D., Strnemates, D.W., and Nadler, B.R. (2003) A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996-2001, LA-13976-MS, *Los Alamos National Laboratory*, Los Alamos
- Maia, N.M.M., Silva, J.M.M., Almas, and E.A.M (2003) Damage detection in structures: from mode shape to frequency response function methods, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 17(3), pp.489~498