

# 고유진동수와 모드변형에너지를 이용한 향상된 유전알고리즘 기반 손상검색기법

## Improved Genetic Algorithm-Based Damage Detection Technique Using Natural Frequency and Modal Strain Energy

박재형\*      김정태†      류연선\*\*      이진학\*\*\*  
Park, Jae-Hyung      Kim, Jeong-Tae      Ryu, Yeon-Sun      Yi, Jin-Hak  
(논문접수일 : 2006년 4월 18일 ; 심사종료일 : 2006년 8월 21일)

### 요 지

구조물의 진동 자료를 이용하는 유전알고리즘(GA) 기반 손상검색기법에 있어, 사용되는 모드 특징의 선택은 손상검색 결과의 정확도를 높이는 데 중요하다. 본 연구의 목적은 고유진동수와 모드변형에너지를 이용하여 손상검색의 정확도를 높이는 것이다. 이와 같은 연구 목적을 달성하기 위하여 다음과 같은 연구를 수행하였다. 먼저, 모드 변형에너지를 유도하고 고유진동수와 모드변형에너지를 이용하는 새로운 GA 기반 손상검색기법을 제안하였다. 다음으로 제안된 기법의 효율성을 검증하기 위하여 양단 자유보의 손상시나리오를 제시하고, 손상시나리오에 따른 진동모드 실험을 실시하였다. 마지막으로 실험 자료를 바탕으로 제안된 기법과 기존의 고유진동수와 모드형상을 이용하는 기법으로 손상검색을 실시하여 결과를 비교하였다.

**핵심용어** : 구조식별, 진동기반 손상검색, 모드변형에너지, 유전알고리즘

### Abstract

In the genetic algorithm (GA) based damage detection methods using vibration of structures, the selection of modal properties is important to improve the accuracy of damage detection. 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 formulated and a new GA-based damage detection technique using natural frequency and modal strain energy is proposed. Next, to verify the efficiency of proposed technique, damage scenarios for free-free beam are designed and vibration modal tests of the target structure are conducted. Finally, the feasibility of the proposed technique is verified in comparison with other GA-based damage detection technique using natural frequency and mode shape.

**Keywords** : system identification, vibration-based damage detection, modal strain energy, genetic algorithm

### 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(윤정방 등, 1997; 김정태 등 1999; Sohn 등, 2003).

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(Stubbs 등, 2000; Kim 등, 2003), 유전알고리즘(GA)기법(Mares 등, 1996), 인공신경망(ANN)기법(Wu 등, 1992) 등에 관하여 수행되고 있다. 이들 중 유전알고

† 책임저자, 정회원·부경대학교 해양공학과 교수

\* 학생회원·부경대학교 해양공학과 박사과정

전화: 051-620-6227 ; Fax: 051-628-8146

E-mail: idis@pknu.ac.kr

\*\* 정회원·부경대학교 해양공학과 교수

\*\*\* 정회원·한국해양연구원 연안개발연구본부 선임연구원

\* 이 논문에 대한 토론을 2006년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2007년 3월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

리즘을 이용하여 구조물의 손상을 평가하는 GA기반 손상검색 기법에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다(Friswell 등, 1998; Raich 등, 2003; Rao 등, 2004). GA기반 손상검색 기법은 유전적 최적화 과정을 통해 구조물의 실제 계측결과와 해석모델의 계산결과를 일치시키는 구조식별(system identification, SID)과정(윤정방 등, 1997)을 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(Goldberg, 1999; 진강규, 2000).

하지만 실제 구조물의 건전성 모니터링에 적용할 수 있는 GA기반 손상평가기법을 개발하기 위해서는 다음과 같은 문제점들을 극복할 수 있는 연구가 수행되어야 한다. 첫째, 유전알고리즘은 다점 탐색으로 인한 과도한 계산량으로 인해 타 방법(예를 들어 DI 기법, ANN 기법 등)에 비해 손상검색에 소요되는 계산시간이 오래 걸린다. 둘째, 손상검색을 위한 모드특징(modal features)의 선택과 그 조합 방법은 손상 검색의 정확도에 영향을 미치게 된다. 셋째, 기본 모델(baseline model)의 SID과정이 필수적으로 선행되어야 하며, 구조식별이 부정확한 기본 모델은 모델링 오차에 의해 구조 손상 평가의 오류로 이어진다. 이러한 문제점을 극복하기 위해, Au 등(2003)과 이상열(2005)은 손상검색 시간을 크게 단축시킬 수 있는 마이크로 유전알고리즘을 제안하였다. 또한 Routolo 등(1997)은 손상검색의 정확도를 높일 수 있는 모드특징으로서 고유진동수와 모드형상 및 모드곡률의 조합 방법을 제시하였다. 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 손상검색 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 모드변형에너지를 변화를 감지하여 구조물의 손상 상태를 정확히 평가할 수 있음이 나타났다. 또한, 모드변형에너지를 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 연구목적 달성을 위하여 다음과 같은 4가지 연구 내용을 수행하였다. 첫째, 모드변형에너지를 유도하고, 고유진동수와 모드변형에너지를 조합을 모드특징으로 이용하는 새로운 GA기반 손상검색 알고리즘을 유도하였다. 둘째, 제안된 기법의 손상검색 성능을 검증하기 위하여 양단 자유보를 대상으로 진동 모드실험을 수행하였다. 양단 자유보는 알루미늄 재질로, 지간 중앙과 양단부에 총 4단계의 손상을 도입하였다. 구조물의 손상 전·후의 각 단계에서 충격 가진에 대한 가속도 응답 신호를 취득하고, 주파수 영역의 분석을 통해 고유진동수와 모드형상을 추출하였다. 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 이루어 지고 있다. 이러한 기법들은 손상에 따른 진동신호 또는 그 신호로부터 추출된 고유진동수, 주파수응답함수, 모드형상, 모드변형에너지 등의 모드 특징 변화를 이용하여 손상을 평가하게 된다(Sohn 등, 2001). GA를 이용하는 손상검색기법 또한 손상에 의한 모드특징 변화를 이용하여 해석모델을 개선함으로써 손상을 평가하게 된다. 즉, GA 기반 손상검색기법은 그림 1과 같이 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.

$$\begin{aligned} & \text{Find } \alpha \\ & \text{Minimize } F(\alpha) = |A - B(\alpha)|, \\ & \text{Subject to } g(\alpha) < 0, h(\alpha) = 0 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서  $\alpha$ 는 부재의 강성변화를 나타내는 설계변수,  $F(\alpha)$ 는 목적함수,  $A$ 는 실제 구조물로부터 취득된 모드 특성치,  $B(\alpha)$ 는 해석모델로부터 계산된 모드 특성치를 나타내며,

$g(\alpha)$ 와  $h(\alpha)$ 는 각각 부등호 제약함수와 등호 제약함수이다. 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; 윤정방 등, 2004; 이상열 2005). 본 연구에서는 손상평가의 정확도를 높이기 위하여 고유진동수와 모드변형에너지를 조합한 모드 특성치를 이용하는 방법을 제시하였고, 모델링 오차를 줄이기 위한 목적함수를 구성하였다. 또한, 손상 평가 시간의 절약을 위해 마이크로 GA를 적용하였다.

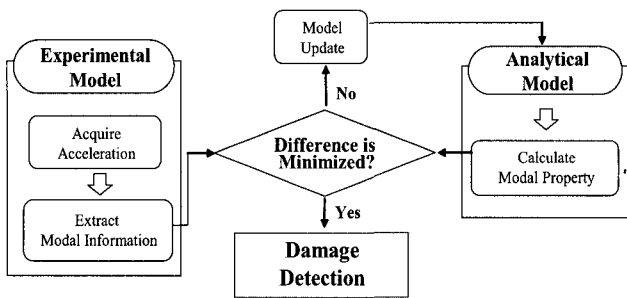


그림 1 GA기반 손상검색기법의 손상검색과정

## 2.2 손상검색을 위해 사용된 목적함수

### 2.2.1 고유진동수

일반적으로 손상검색을 위한 목적함수를 구성하는데 있어 고유진동수는 구조물로부터 한 점의 계측만으로 쉽게 추출할 수 있는 장점으로 인하여 많이 이용되어져 왔다. 실험으로부터 구한 고유진동수와 해석적으로 계산된 고유진동수가 일치할 때까지 해석 모델의 요소 강성을 수정해 줌으로써 손상을 식별할 수 있다. 실험구조물과 해석 모델에서의 고유진동수 차이를 나타내는 함수는 다음 식 (2)와 같이 쓸 수 있다.

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

여기서,  $NM$ 은 사용한 고유진동수의 개수, 즉 계측 모드의 수를 나타내며,  $\omega_{E_i}^*$ 와  $\omega_{A_i}^*$ 는 각각 손상상태에서의 실험 구조물과 해석모델의  $i$ 번째 고유진동수를 나타낸다. 그러나 손상 이후의 고유진동수 차이를 이용하는 경우에는 손상 전 실험 모델과 해석 모델의 동적 특성이 정확히 일치해야 하나, 실제 구조물의 경우 두 모델 사이의 동적 특성을 정확히 일치시키기 어렵기 때문에 모델링 오차를 가지게 된다.

이와 같은 경우 다음 식 (3)과 같이 실험모델과 해석모델의 손상 전후의 고유진동수 변화율을 일치시키기 위한 목적함수를 이용하게 된다(Hao 등, 2002).

$$f_{\omega}(\alpha) = \sum_{i=1}^{NM} \left( \frac{\delta\omega_{E_i} - \delta\omega_{A_i}(\alpha)}{\omega_{E_i}} \right)^2 \quad (3)$$

여기서  $\omega_{E_i}$ 와  $\omega_{A_i}$ 는 각각 비손상 상태의 실험모델과 해석모델의 고유진동수를 나타내고,  $\delta\omega_{E_i}$ 와  $\delta\omega_{A_i}$ 는 실험 모델과 해석모델에 대한 손상전후의 고유진동수의 변화량을 나타낸다.

### 2.2.2 모드변형에너지

고유진동수의 변화만으로는 모드특성상 대칭 구조거동 위치에서의 손상 위치를 판별하기 어렵고, 또한 고유진동수는 대형구조물에 있어서는 손상에 민감하지 않으며, 온도의 영향으로 인하여 손상 추정 결과가 왜곡될 수 있다(Routolo 등, 1996; Hao 등, 2002). 이러한 단점을 극복하기 위하여 모드형상과 같은 다른 모드 특성을 조합하여 이용하게 된다. 본 연구에서는 Kim 등(2003)이 손상지수법에 이용한 모드변형에너지를 조합하여 이용하였다.

모드변형에너지( $U_i$ )는 오일러-베르누이 보 이론에 따라 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_i = \int_0^L \frac{1}{2} k(x) \{\phi_i''(x)\}^2 dx \quad (4)$$

여기서,  $U_i$ 는  $i$ 번째 모드의 모드변형에너지이며,  $k(x)$ 와  $L$ 은 각각 보요소의 강성과 시간 길이를 나타내고,  $\phi_i''(x)$ 는  $i$ 번째 정규화 된 모드에 대한 모드곡률(mode curvature)을 나타낸다. 만약  $j$ 번째 요소 내에서의 강성이 길이에 따라 일정하다고 가정하면, 모드변형에너지  $U_i$ 에서  $j$ 번째 요소가 차지하는 모드변형에너지는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$U_{ij} = \frac{1}{2} k_j \int_{x_h}^{x_{h+1}} [\phi_i''(x)]^2 dx \quad (5)$$

여기서  $h$ 는 절점 번호를 나타낸다. 위의 식 (5)에서 계측 가능한  $\phi_i''(x)$  항을 제외한 나머지를 좌변으로 이항하면 식 (6)과 같이  $i$ 번째 모드에서  $j$ 번째 요소의 강성  $k_j$ 에 대한  $j$ 번째 요소의 상대적인 모드 변형에너지를 구할 수 있다.

$$2U_{ij}/k_j = \int_{x_h}^{x_{h+1}} [\phi_i''(x)]^2 dx \quad (6)$$

위의 식 (6)을  $NE$ 개의 요소를 가지는 전체 시간  $L$ 에 대

해서 나타내면, 식 (7)과 같이  $i$ 번째 모드의 강성  $k_j$ 에 대한 상대적인 모드변형에너지  $\theta_i$ 를 구할 수 있다.

$$2 \sum_{j=1}^{NE} U_{ij}/k_j = \sum_{h=1}^{NE} \int_{x_h}^{x_{h+1}} [\phi_i''(x)]^2 dx = \theta_i \quad (7)$$

따라서 실제 구조물과 해석모델 사이의 손상 전후 모드 변형에너지 변화량 차이를 이용하면 다음 식 (8)과 같은 목적함수를 도출할 수 있다.

$$f_{\theta}(\alpha) = \sum_{i=1}^{NM} \sum_{j=1}^{NE} ([\theta_{A_j} - \theta_{A_j}^*(\alpha)] - [\theta_{E_j} - \theta_{E_j}^*(\alpha)])^2 \quad (8)$$

여기서  $\theta_{A_j}$ 와  $\theta_{E_j}$ 는 각각 비손상 상태에서의 해석모델과 실험모델에서  $i$ 번째 모드에 대한  $j$ 번째 위치에서의 정규화된 상대적인 모드변형에너지를 나타내며, 뿔 첨자 "\*"는 손상 상태를 의미한다.

### 2.2.3 조합된 목적함수

#### (1) 고유진동수와 모드변형에너지의 조합

전술한 바와 같은 고유진동수와 모드변형에너지와 관련된 목적함수 식 (3)과 식 (8)이 모두 최소화되면, 그 때의 설계변수  $\alpha$ 로부터 구조물의 손상 상태를 평가할 수 있다. 일반적으로 최소화하기 위한 두 목적함수를 조합하기 위해서는 가중치를 이용한 선형 결합방법이나 한 함수는 목적함수로 다른 함수는 제약조건으로 하는 방법이 사용될 수 있으나(류연선 등, 1999), 본 연구에서는 식 (9)와 같이 전자의 방법을 이용하였다. 유전알고리즘은 최대화 문제를 풀기에 적합한 알고리즘이기 때문에 식 (9)를 식 (10)과 같은 최대화 문제로 변환하였다.

$$F_1(\alpha) = W_{\omega} f_{\omega}(\alpha) + W_{\theta} f_{\theta}(\alpha) \quad (9)$$

$$\bar{F}_1(\alpha) = \kappa_1 - F_1(\alpha) \quad (10)$$

여기서,  $W_{\omega}$ 와  $W_{\theta}$ 는 각각 함수  $f_{\omega}(\alpha)$ 와  $f_{\theta}(\alpha)$ 에 대한 가중치이고 경험에 의해 결정되는 상수이지만, 고유진동수가 손상에 따른 민감도가 크기 때문에 다른 모드 특성치에 비해 높게 주게 된다(Friswell 등, 1998).  $\kappa_1$ 는 함수  $\bar{F}_1(\alpha)$ 를 항상 양수로 하는 임의의 실수이다.

#### (2) 고유진동수와 모드형상의 조합

본 연구에서 제시한 목적함수를 이용한 손상검색 결과와 손상 추정 성능을 비교하기 위하여 기존에 제안되었던 고유

진동수와 모드형상을 조합하여 이용한 목적함수를 정식화하였다. 기존에 제안된 목적함수에서 손상 전후 모드형상 변화량 차이를 나타내는 목적함수는 식 (11)과 같이 나타낼 수 있고, 이를 고유진동수를 이용한 목적함수와 조합한 목적함수는 식 (12)와 같으며(Hao 등, 2002), 유전알고리즘에 적용하기 위한 적합도 함수는 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{\phi}(\alpha) = \sum_{i=1}^{NM} \sum_{j=1}^{NP} ([\phi_{A_{ij}} - \phi_{A_{ij}}^*(\alpha)] - [\phi_{E_{ij}} - \phi_{E_{ij}}^*(\alpha)])^2 \quad (11)$$

$$F_2(\alpha) = W_{\omega} f_{\omega}(\alpha) + W_{\phi} f_{\phi}(\alpha) \quad (12)$$

$$\bar{F}_2(\alpha) = \kappa_2 - F_2(\alpha) \quad (13)$$

여기서,  $NP$ 는 데이터 취득 센서 개수이며,  $\phi_{A_{ij}}$ 와  $\phi_{E_{ij}}$ 는 각각 비손상 상태에서의 해석모델과 실험모델에서  $i$ 번째 모드에 대한  $j$ 번째 계측위치의 정규화된 모드 벡터 값이며, 뿔 첨자 "\*"는 손상 상태를 의미한다.  $W_{\phi}$ 는  $f_{\phi}(\alpha)$ 에 대한 가중치이며,  $\kappa_2$ 는 함수  $\bar{F}_2(\alpha)$ 를 항상 양수로 하는 임의의 실수이다.

### 2.3 손상검색 알고리즘

앞서 손상검색을 위해 유도된 목적함수를 최소화하기 위하여 다양한 유전알고리즘 기법이 적용되어 왔다. 본 연구에서는 손상검색 시간의 효율성이 높은 마이크로 유전알고리즘을 이용하였다. 마이크로 유전알고리즘은 기존의 유전알고리즘이 유전 정보의 다양성을 유지하기 위하여 집단 크기를 크게 두게 되는데 따른 계산 부담을 줄이기 위해 매우 작은 집단을 사용하고, "재시동" 과정이 추가된 효율적인 최적해 탐색 알고리즘이다(Au 등, 2003; 이상열, 2005). 이러한 마이크로 유전알고리즘을 이용한 손상검색 과정은 그림 2와 같다. 이는 먼저 5가지의 손상된 해석모델을 임의로 가정하여 초기화(initialization)하고, 5가지 손상 모델에 대해서 목적함수의 최대화 정도, 즉 적합도(fitness)를 평가하게 된다. 다음으로 만약 5가지의 손상 모델이 거의 동일한 손상 상태를 나타낸다면, 재시동을 하여 다시 초기화하게 된다. 5가지의 손상 모델이 동일하지 않다면 종료조건을 확인하고, 종료조건을 만족하지 못하면 재생산(reproduction), 교배(crossover), 돌연변이(mutation)에 의하여 각각의 모델을 개선하게 된다. 재시동과 모델 개선과정에서 직전 세대(previous generation)의 가장 우수한 적합도를 가지는 개체(즉, 손상 모델)가 없어졌다면 다시 도입하는 엘리트 전략(elite strategy)을 이용한다. 이

와 같은 일련의 과정을 반복하여 최적화된 손상 모델(최대 적합도를 가지는 손상 모델)로부터 손상을 식별하게 된다.

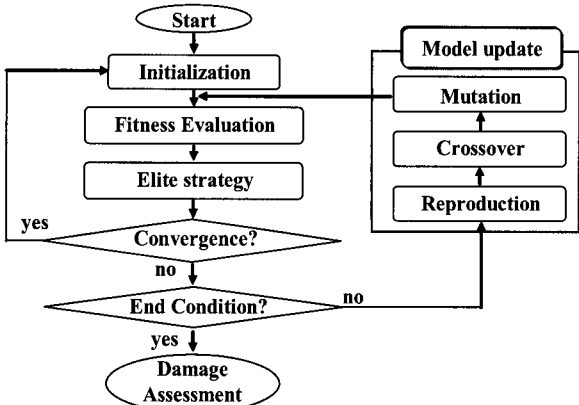


그림 2 마이크로 GA를 이용한 손상검색 알고리즘

### 3. 실험 예제

#### 3.1 실험 모델과 해석 모델의 구성

제안된 손상검색 기법의 유용성을 검증하기 위하여, 다

음의 그림 3과 같이 양단 자유보에 대하여 충격하중실험 (impact hammer test)을 실시하였다. 일반적으로 손상 검색 알고리즘의 유용성 검증을 위하여 단순보나 캔틸레버 보 또는 뼈대 구조물이 많이 이용되지만, 이러한 구조물의 경우 지점부에 의해 발생하는 불확실성이 존재하게 된다. 따라서 본 연구에서는 손상검색 성능의 평가에 있어 가능한 한 불확실성을 줄이기 위하여 양단 자유보를 대상 구조물로 선택하였다. 보의 치수는 폭 4cm, 높이 1cm, 길이 56cm이고, Y축에 대한 휨 모드를 고려하였다. 재료는 탄성계수 70GPa, 단위 질량 2,700kg/m<sup>3</sup>의 알루미늄을 사용하였으며, 대상구조물의 동특성을 추출하기 위하여 그림 3과 그림 4와 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, NI사의 PXI-4482 DAQ보드와 LabVIEW를 이용하였다. 시간 중앙의 가속도 센서(4번 센서)로부터 획득된 신호는 그림 4와 같다. 모드 특징을 추출하기 위하여 주파수영역분해법(frequency domain decomposition, FDD)을 이용하였다. FDD법은 각 위치

표 1 재료의 물성치

탄성계수	70GPa
단위질량	2,700kg/m <sup>3</sup>
단면2차모멘트	3.33×10 <sup>-9</sup> m <sup>4</sup>
단면적	0.0004m <sup>2</sup>

표 2 실험 및 해석모델에서 추출된 고유진동수(Hz)

	1차모드	2차모드	3차모드	4차모드
실험 모델	165.039	452.148	880.859	1445.31
수치 모델	166.900	460.110	902.271	1492.52

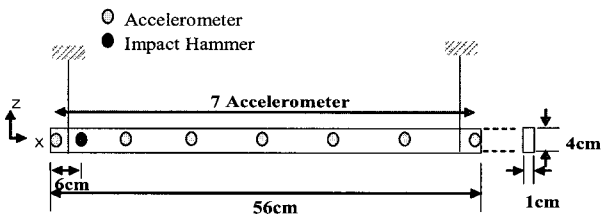


그림 3 양단자유보의 실험 계획

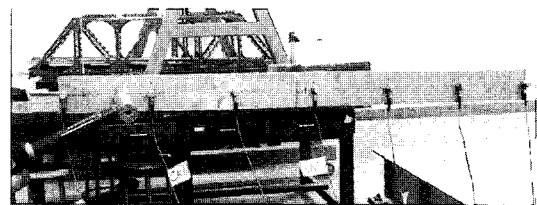


그림 4 가속도계 부착 모습

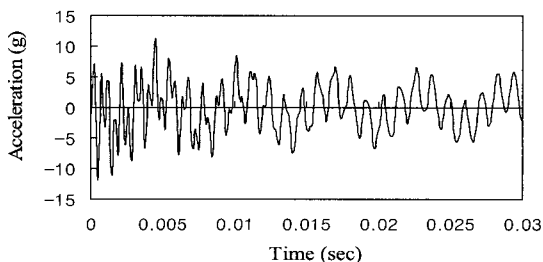


그림 5 획득된 가속도 신호(센서 4)

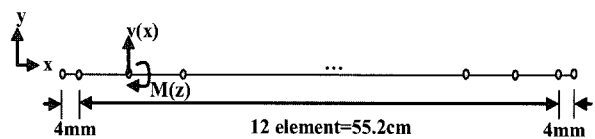


그림 6 1-D 유한요소해석 모델

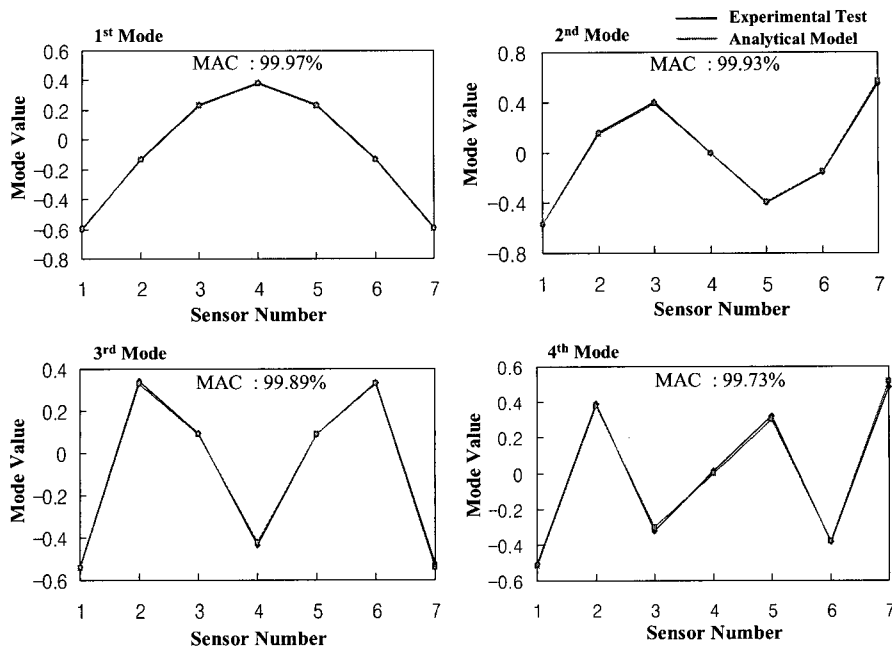


그림 7 실험 및 수치모델에서 추출된 모드형상

에서 측정된 신호에 대한 상호상관스펙트럼 밀도 행렬을 구하고, 이를 특이치 분해하여 고유진동수와 모드형상을 구하는 방법이다(Yi 등, 2004).

실험 모델과 동특성을 비교하기 위한 해석모델은 1차원 오일러-베르누이 보 요소를 이용한 유한요소 해석 모델로 그림 6과 같이 구성하였다. 해석 모델은 총 15개의 노드와 14개의 요소로 구성되어 있으며, 절점당 2개의 자유도를 가지고 있다. 양 끝 2개의 요소는 센서의 반지름에 해당하는 부

분(4mm)으로 본 연구에서 손상 검색 대상에는 포함되지 않는다. 유한요소모델에 사용된 재료의 물성치는 표 1과 같고, MATLAB을 이용한 고유치 해석을 통해 해석모델에 대한 고유진동수 및 모드 형상을 추출하였다(Kwon 등, 2000).

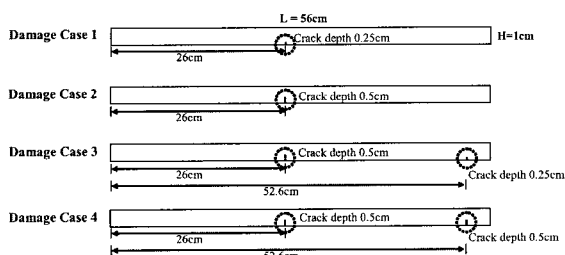
비 손상 상태에 있어 대상구조물의 강제진동실험을 통해 구한 처차 4개의 휨 모드에 대한 고유진동수와 모드형상, 그리고 해석모델로부터 계산된 고유진동수 및 모드형상을 각각 표 2와 그림 7에서 제시하였다. 표 2와 그림 7을 통

표 3 손상시나리오

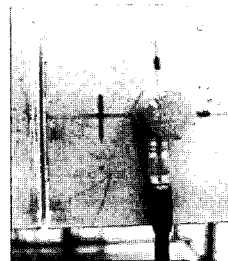
손상 경우	손상 위치 (x/L)	손상 크기 (a/H)
1	0.464	0.25
2	0.464	0.5
3	0.464, 0.939	0.5, 0.25
4	0.464, 0.939	0.5, 0.5

표 4 손상시나리오에 따라 추출된 고유진동수(Hz)

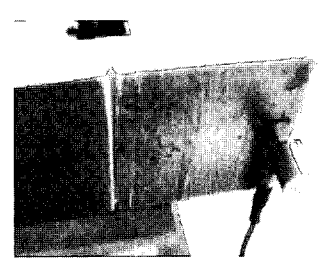
손상경우	모드 1	모드 2	모드 3	모드 4
1	163.086	451.172	873.047	1442.38
2	158.203	451.172	856.445	1436.53
3	158.203	450.195	885.469	1432.62
4	158.203	450.195	851.563	1416.02



(a) 손상시나리오



(b) 중앙부 손상



(c) 자유단 부위 손상

그림 8 손상시나리오 및 손상 상태

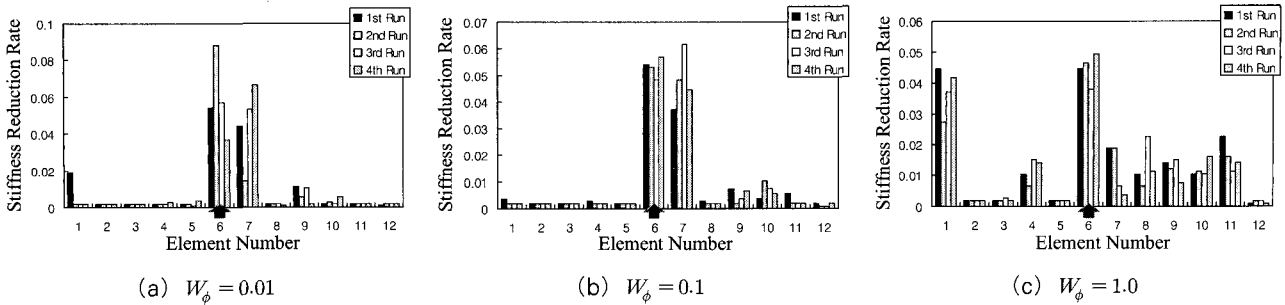


그림 9 모드형상의 가중치에 따른 손상검색 결과 (손상 경우 1)

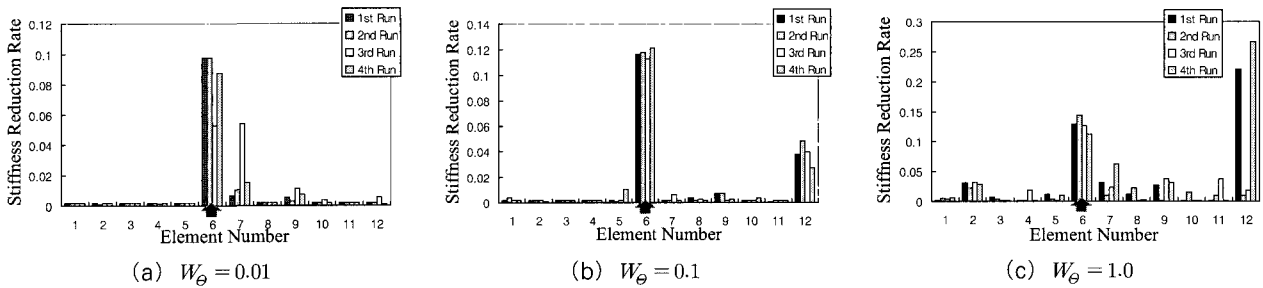


그림 10 모드변형에너지의 가중치에 따른 손상검색 결과 (손상 경우 1)

하여 실험모델과 해석모델로부터 구한 고유진동수와 모드 형상이 완전히 일치하지 않음을 알 수 있으며, 이는 모델링 오차에 기인한다고 할 수 있다.

### 3.2 손상시나리오

본 연구에서는 여러 형태의 휨 균열을 모사하여 손상시나

리오를 작성하였다. 손상은 2mm 두께의 가는 싹으로 표 3과 그림 8과 같이 지간의 중앙부( $x/L=0.464$ )에 손상 깊이를 보의 두께에 대하여 25%, 50%의 수준으로 순차적으로 절단하고, 추가적으로 오른쪽 단부( $x/L=0.939$ )에 손상 깊이가 25%, 50%를 절단하였다. 각 손상 경우 별로 충격하중 실험을 수행하여, 가속도 응답을 측정하였다. 취득된 가속도 데이터로부터 추출된 고유진동수는 표 4와 같다.

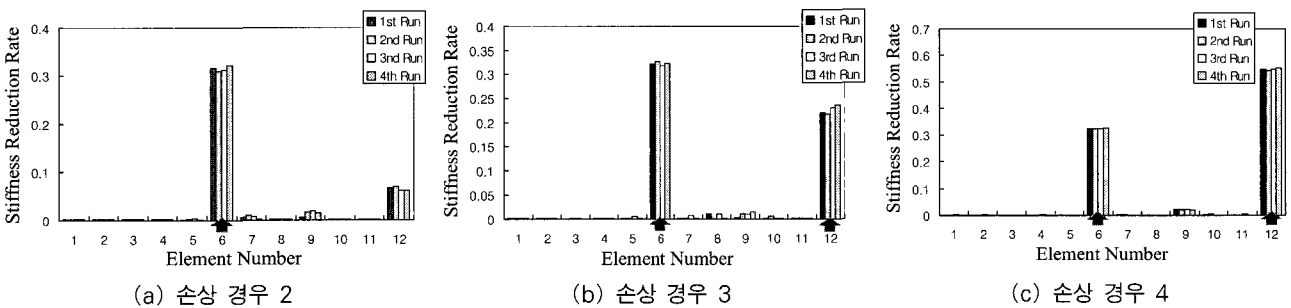


그림 11 고유진동수와 모드변형에너지를 이용하였을 경우 손상검색결과

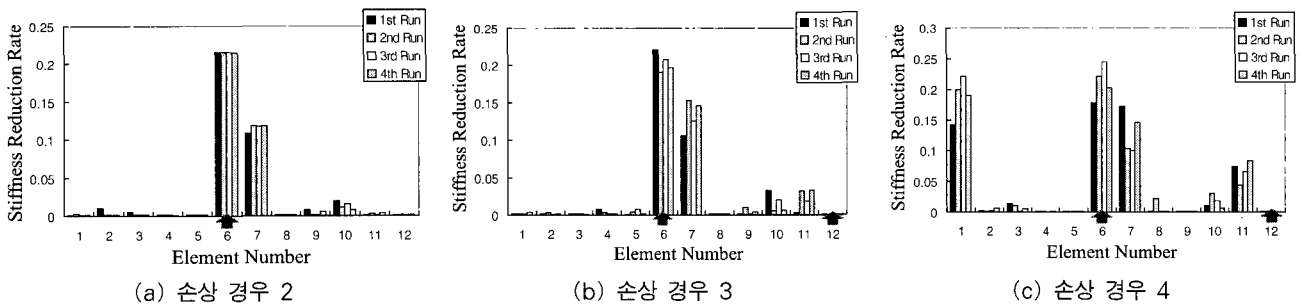


그림 12 고유진동수와 모드형상을 이용하였을 경우 손상검색결과

### 3.3 손상검색결과 및 분석

본 연구에서 제시한 손상검색기법과 기존에 개발된 손상 검색기법을 이용하여 각각의 손상시나리오에 따라서 손상 검색을 수행하였다. 유전알고리즘의 종료조건은 일반적으로 반복횟수(세대수)를 정하는 방법과 일정한 세대가 지난 후에도 해의 개선이 이루어 지지 않을 경우에 종료하는 방법이 있다(Goldberg, 1999). 본 연구의 목표는 마이크로 유전알고리즘에 의한 손상 탐색 성능을 살피는 것이 아니라, 모드변형에너지를 이용함에 따른 손상검색 성능의 향상을 목표로 하고 있다. 따라서 본 연구에서 전자의 방법을 이용하고, 충분한 최적해 탐색을 위하여 30,000세대를 종료조건으로 다소 크게 정하였다. 부재의 강성 변화를 나타내는 설계변수는 각각 13비트로 구성되어 있으며, 이 경우 해상도는 0.0001이고, 최소값과 최대값은 0에서 0.8192로 고려된다. 마이크로 유전알고리즘을 이용한 손상검색에 사용된 집단은 5개의 개체로 구성되고, 재생산 방법은 토너먼트 선택 방법을 이용하였다. 교배방법은 일점교배로 교배확률 1.0을 사용하였고, 돌연변이는 특별히 필요하지 않으나, 돌연변이가 최적해 부근에서 해의 개선에 용의하므로 단순 돌연변이를 사용하고, 돌연변이확률 0.02를 적용하였다(Fan 등, 2000). 손상 평가 결과의 신뢰성을 확인하기 위하여 본 연구에서는 알고리즘의 4회 수행, 즉 손상검색을 추가적으로 3회 더 실시하였다.

본 연구에서 손상검색을 위해 사용된 목적함수는 두 개의 최소화 함수를 가중치를 통해 선형 결합한 함수의 형태이기 때문에 적절한 가중치의 선택이 중요하다. 따라서, 제안한 목적 함수와 기존에 개발된 목적함수에 대한 적절한 가중치를 선정하기 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 대한 손상검색 결과가 그림 9와 그림 10과 같이 나타났다.

그림 9과 그림 10의 손상검색 결과에서 알 수 있듯이 모드형상과 모드변형에너지의 가중치가 0.01일 경우에는, 4회의 손상검색 결과가 비교적 일관적인 결과를 보여주지 못하는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 현상은 대칭 구조물의 손상검색에 있어 고유진동수만을 이용하였을 경우 실제 위치와 대칭 위치의 손상을 분별하지 못하기 때문에 발생하는 현상과 유사하다. 따라서 목적함수에 대한 모드변형에너지와 모드형상의 기여도가 고유진동수에 비하여 상대적으로 작게 평가되어 고유진동수만 이용한 결과와 유사한 결

과를 얻은 것으로 판단된다. 한편, 모드형상과 모드변형에너지의 가중치를 1.0으로 하였을 경우에도 정확한 손상 추정이 어려움을 알 수 있다. 이는 모드형상만을 고려하였을 경우의 손상검색 결과에서 볼 수 있는 현상과 유사하다(Routolo 등, 1997). 따라서 본 연구의 결과 역시 목적함수에 대한 모드변형에너지와 모드형상의 기여도가 높게 평가되기 때문으로 판단된다. 마지막으로 모드형상과, 모드변형에너지의 가중치를 0.1로 하였을 경우에는, 가중치를 0.01, 혹은 1.0으로 설정한 경우에 비하여, 손상 위치를 비교적 정확하고 일관되게 추정하고 있음을 알 수 있다. 따라서 이 연구에서는 모드형상과 모드변형에너지의 최적의 가중치를 0.1로 두는 것으로 결정하였다.

손상검색을 위해 본 연구에서 제안된 목적함수와 기존에 제안된 목적함수에 대하여 고유진동수에 대한 가중치를 1.0으로, 모드형상과 모드변형에너지에 대한 가중치를 0.1로 설정하고, 손상 경우 2, 3, 4에 대한 손상 검색을 수행한 결과가 그림 11와 그림 12에 제시되었다. 그림에서 실제 손상 위치는 x축 상에 화살표로 표시되었다. 기존 제안된 목적함수를 이용하였을 경우 손상 경우 2에 대해서 중앙부 손상은 어느 정도 손상 위치를 정확하게 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 본 연구에서 제안한 목적함수를 이용하였을 경우에는 해석 모델이 모델링 오차를 가지고 있는데도 불구하고, 중앙부 손상을 정확하게 예측하고 있으며, 또한 12번 요소 즉, 자유단 측의 손상 위치 역시 정확하게 추정하고 있음을 알 수 있다.

그림 9~12까지 살펴보면, 기존 개발된 목적함수를 이용하였을 경우 손상 경우 2에서 4회의 손상검색 결과가 비교적 일관된 값을 나타내었으나, 손상 경우 3, 4로 갈수록 변동이 심하게 나타났다. 이는 최적의 가중치를 선정하였던 그림 9, 10으로부터 모드형상의 가중치에 따른 문제로 생각해 볼 수 있다. 예를 들어 손상 경우 4의 경우 손상 경우 1(그림 9)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 본 연구에서 제안한 목적함수를 이용하였을 경우에는 비교적 일관되게 손상검색 결과를 보여주고 있다.

제안된 기법과 기존의 기법을 이용하였을 경우, 손상에 따른 손상도 평가 결과에 대해서도 비교하였다. 각 손상에 대한 손상도는 4회의 추정결과를 평균하여 실제 손상 위치에 대해서 표 5에서 정리하였다. 전술한 바와 같이 손상



경우 1, 2와 손상 경우 3, 4는 각각 중앙부와 자유단부 보 단면 높이의 25%, 50%로 2배 크게 손상을 가하였다. 이에 대해 제안된 기법을 이용한 손상도 추정 결과는 각각 약 2.7배, 2.4배 정도로 비교적 정확하게 추정하였다. 한편, 기존의 기법을 이용한 손상도 추정 결과는 정확한 위치를 찾은 손상 경우 1,2에 있어 약 4.1배 정도의 손상도를 추정하여 비교적 오차가 크게 나타났다.

표 5 손상도 평가결과

손상 경우	예측 손상도		예측 손상 증가율		실제손상증 가율	
	$F_1(\alpha)$	$F_2(\alpha)$	$F_1(\alpha)$	$F_2(\alpha)$		
중앙부 손상	1	0.117	0.053	2.7배	4.1배	2배
	2	0.314	0.215			
자유단 손상	3	0.226	-	2.4배	-	2배
	4	0.547	-			

※  $F_1(\alpha)$  : 제안된 기법,  $F_2(\alpha)$  : 기존의 기법

#### 4. 결 론

본 연구에서는 손상검색 정확도의 향상을 위해 구조물의 모드변형에너지와 고유진동수를 모드특징으로 조합하여 이용하는 향상된 GA기반 손상검색기법을 제안하였다. 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 진동 모드실험을 수행하였다. 양단 자유보는 알루미늄 재질로, 지간 중앙과 양단부에 총 4단계의 손상을 도입하였다. 구조물의 손상 전·후의 각 단계에서 충격 가진에 대한 가속도 응답 신호를 취득하고, 주파수 영역 분석을 통해 고유진동수와 모드형상을 추출하였다. 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. 또한 제안된 기법의 손상검색 성능을 비교하기 위하여 기존에 제안된 고유진동수와 모드형상을 이용하는 GA기반 손상검색기법을 이용하여 손상검색을 수행하였다. 그 결과를 비교, 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 고유진동수와 모드변형에너지를 조합한 목적함수를 구

성하기 위하여 본 연구에서는 가중치를 이용한 선형결합법을 이용하였다. 이 때 가중치는 경험적인 방법으로 정할 수 있는데, 본 연구에서는 양단 자유보에 대해서 고유진동수에 대한 가중치는 1.0, 모드변형에너지에 대한 가중치는 0.1인 것으로 나타났다.

- (2) 본 연구에서 사용된 유한요소해석모델이 모델링 오차를 가지고 있었는데도 불구하고 제안된 기법의 경우 손상 위치를 정확하게 추정하고 있음을 확인할 수 있었다.
- (3) 손상 위치 추정에 있어 제안된 기법이 모든 손상 위치를 정확하게 추정한데 비해, 기존의 기법은 자유단부 손상 위치를 추정하지 못하였다. 이를 통해 제안된 기법의 손상 위치 검색 성능의 우수성이 검증되었다.
- (4) 손상도 평가에 있어, 실제 중앙부 손상 및 자유단부 손상이 2배 증가한 것을 제안한 기법은 약 2.7배, 2.4배 증가한 것으로 예측하였으며, 기존의 기법은 손상 위치가 추정된 중앙부 손상에 대해 약 4.1배 손상이 증가한 것으로 나타났다. 따라서 제안된 기법이 손상도 평가 면에서도 우수한 것으로 나타났다.

#### 감사의 글

이 연구는 2003년도 부경대학교 기성회 학술연구비에 의해 이루어졌으며, 저자는 이에 감사사를 드립니다.

#### 참 고 문 헌

김정태, 노리스 스틱스 (1999), 개선된 진동기초 손상검색방법의 유도과 검증, 한국전산구조공학회 논문집, 12(3), pp.331~343.

류연선, 임오강, 박경진 (1999), 최적설계입문, 반도출판사, 서울, p.623.

윤정방, 이진학, 이종재, 이정석, 전귀현 (2004), 유전자 알고리즘을 이용한 모드기반 교량의 해석모델개선, 한국전산구조공학회 논문집, 17(4), pp.389~403.

윤정방, 이형진 (1997), System Identification 기법을 이용한 교량의 안전진단방법, 대한토목학회지, 45(2), pp.74~82.

이상열 (2005), 마이크로 유전 알고리즘을 이용한 자유진동 박판구조물의 비파괴 손상 규명, 한국강구조학회 논문집, 17(2), pp.173~181.

진강규 (2000), 유전알고리즘과 그 응용, 교우사, 서울, p.377.

Au, F.T.K., Cheng, Y.S., Tham, L.G., Bai, Z.Z.

- (2003), Structural Damage Detection based on a Micro-Genetic Algorithm using Incomplete and Noisy Modal Test Data, *Journal of Sound and Vibration*, 259(5), pp. 1081~1094.
- Choi, M.Y., Kwon, I.B.** (2000), Damage Detection System of a Real Steel Truss Bridge by Neural Networks, *Proceedings of SPIE*, 3988, pp.295~306.
- Chou, J.H., Ghaboussi, J.** (2001), Genetic algorithm in structural damage detection, *Computers and Structures*, 79, pp.1335~1353.
- Fan, H.Y., Lu, J.W.Z., Xu, Z.B.**(2000), An empirical comparison of three novel genetic algorithms, *Engineering Computations*, 17(8), pp.981~1002.
- Friswell, M.I., Penny, J.E.T., Garvey, S.D.** (1998), A Combined genetic and eigen-sensitivity algorithm for the location of damage in structures, *Computers and Structures*, 69(5), pp.547~556.
- Goladberg, D.E.** (1999), *Genetic algorithms in Search, Optimization & Machine Learning*, Addison-Wesley, New York, p.412.
- Hao, H., Xia, Y.** (2002), Vibration-based Damage Detection of Structures by Genetic Algorithm, *Journal of Computing in Civil Engineering*, 16(3), pp.222~229.
- Hoshiya, M., Saito, E.,** (1984), Structural identification by extended Kalman Filter, *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 110(12), pp. 1757~1770.
- Jang, J.H., Yeo, I.H., Shin, S.B., Chang, S.P.** (2002), Experimental Investigation of System-Identification-Based Damage Assessment on Structures, *Journal of Structural Engineering*, 128(5), pp.673~682.
- Kim, J.T.** (2001), Crack Detection Scheme for Steel Plate-Girder Bridges via Vibration-Based System Identification, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 5(1), pp.1~10.
- Kim, J.T., Ryu, Y.S., Cho, H.M., Stubbs, N.** (2003), Damage identification in beam-types: frequency-based method vs mode-shape-based method, *Engineering Structure*, 25(1), pp.57~67.
- Kwon, Y.W., Bang, H.** (2000), *The Finite Element Method Using MATLAB (2nd Edition)*, CRC Press, New York, p.607.
- Maia, N.M.M., Silva, J.M.M., Almas, 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.
- Mares, C., Surace C.** (1996), An application of genetic algorithms to identify damage in elastic structures, *Journal of Sound and Vibration*, 195(2), pp.195~215.
- Raich, A.M., Liskai, T.R.** (2003), Benefits of Applying an Implicit Redundant Representation Genetic Algorithm for Structural Damage Detection in Noisy Environments, *Genetic and Evolutionary Computation Conference*, 2724(2003), pp.2418~2419.
- Rao, M.A., Srinivas, J., Murthy, B.S.N.** (2004), Damage detection in vibrating bodies using genetic algorithms, *Computers & Structures*, 82(11), pp.963~968.
- Ruotolo, R., 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., Nadler, B.R.** (2003), A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996-2001, LA-13976-MS, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos. p.301.
- Stubbs N., Park, S., Sikorsky, C., Choi, S.** (2000), A global non-destructive damage assessment methodology for civil engineering structures, *International Journal of System Science*, 31(11), pp.1361~1373.
- Wu, X., Ghaboussi, J., Garrett, J.H.Jr.** (1992), Use of neural networks in detection of structural damage, *Computers & Structures*, 42(5), pp. 649~659.
- Yi, J.H., Yun, C.B.** (2004), Comparative study on modal identification methods using output-only information, *Structural Engineering and Mechanics*, 17(3), pp.445~466.