

유전자 알고리즘을 이용한 구조물 손상 탐색기법에 관한 연구

A Study for Structural Damage Identification Method Using Genetic Algorithm

최 병 민* · 우 호 길*

Byoung Min Choi and Ho Kil Woo

(2006년 11월 23일 접수 ; 2006년 12월 29일 심사완료)

Key Words : Structural Damage(구조물 손상), Natural Frequency(고유진동수), Mode Shape(모드형상), Sensitivity(민감도), Residual Function(오류함수), Eigenvalue Problem(고유치문제), Element Stiffness Matrix Reduction Parameter(요소 강성행렬 감소계수), Genetic Algorithm(유전자 알고리즘)

ABSTRACT

In this paper, a method for identifying the location and extent of a damage in a structure using residual forces was presented. Element stiffness matrix reduction parameters in a finite element model were used to describe the damaged structure mathematically. The element stiffness matrix reduction parameters were determined by minimizing a global error derived from dynamic residual vectors, which were obtained by introducing a simulated experimental data into the eigenvalue problem. Genetic algorithm was used to get the solution set of element stiffness reduction parameters. The proposed scheme was verified using Euler-Bernoulli beam. The results were presented in the form of tables and charts.

1. 서 론

1.1 연구 필요성

항공기의 구조 결함에 의한 사고, 종종 발생하는 원자력 발전소 및 화력 발전소 증기 배관의 피로누적 노화로 인한 구조결함, 토목 건축분야의 교량 및 구조물 붕괴 사고 등 일련의 크고 작은 사고들로 인하여 각종 구조물들의 효율적인 구조 안전진단 및 평가 방법에 대한 관심이 최근 많이 일고 있으며, 많은 학자들이 이에 대한 연구를 활발히 진행하고 있다.

현재 일반 현장에서 실무자의 경험과 직관에 의존하여 부분적으로 취약 예상부위의 비파괴검사와 육안검사로 구조물의 안전진단이 수행된다. 일반적으로

로 많이 사용되는 비파괴검사는 X-레이나 초음파를 이용한 검사로 검사자의 경험에 의존하여 구조물 취약 예측부위를 부분적으로 검사한다. 구조물에 심각한 손상이 발생한 경우와 구조물에 접근성이 용이할 때에는 경험이 풍부한 검사자에 의한 외관 조사만으로도 손상부위를 쉽게 찾아낼 수 있지만, 조사범위가 복잡하고 넓어 검사자의 접근이 용이치 않은 구조물의 경우는 이러한 비파괴 검사기법의 적용이 쉽지 않다. 또한 구조물이 노후화된 경우 외관상 변화가 거의 없기 때문에 구조물 손상 탐지가 어렵다. 따라서 이러한 문제점들을 해결할 수 있는 현실적인 구조물의 안전성 진단기법이 요구된다.

많은 학자들이 구조물의 고유진동수와 모드형상의 민감도들로 구성된 민감도 행렬식을 Taylor 급수에 적용하여 역해석 기법(inverse problem)^(1,2)으로 구조물 손상 탐지를 위해 많은 연구를 시도하였으나 Taylor 급수의 1차항만을 고려하여 수학적으로 그

* 책임저자; 정회원, 국방과학연구소
E-mail : bmchoi2001@add.re.kr
Tel : (042)821-4489, Fax : (042)821-2224
* 충남대학교 기계공학과

자체에 오차를 내포하고 있으며 민감도 행렬식의 구성이 매우 복잡하여 계산을 위한 프로그램 작성에 많은 어려움이 있다.

또한 최근에는 오류함수⁽³⁾를 이용해 유전자 알고리즘이나 다른 최적화 기법을 이용하여 역해석 기법으로 구조물의 손상 탐색기법을 수행하려는 노력들을 많이 하고 있다. 유전자 알고리즘의 경우 글로벌 해(global solution)를 구할 수 있는 장점은 있으나 미지수가 많을 경우 다른 최적화 기법에 비해 해를 구하는데 많은 계산 시간을 요하며, 다른 최적화 기법들은 로컬 해(local solution)를 구할 가능성이 있기 때문에 실질적인 문제에 적용하기에는 조심스러운 점이 있다. 따라서 보다 실용적인 기법의 연구가 요구된다.

1.2 연구 동향

Jon D. Collins⁽¹⁾는 고유진동수와 모드형상의 민감도 행렬식을 Taylor급수에 적용하여 구조물 손상 탐색 기법을 수립하였으며, J. M. Ricles와 J. B. Kosmatka⁽²⁾는 진동잔류력(vibratory residual force)을 오류함수(residual function)로 표현한 식과 민감도⁽¹⁾를 이용한 구조물 손상 탐색기법을 제시하였다. M. Rao⁽³⁾는 손상된 구조물의 고유진동수, 모드형상들을 손상 전의 고유치문제(eigenvalue problem)에 대입하여 나타나는 오차들을 오류함수(residual function)로 만들고, 이들을 이용하여 최적화문제의 목적함수로 생성한 후 유전자 알고리즘으로 외팔보와 대문 구조(portal frame)에 대한 이론적 손상부위와 결함정도를 산출하였으며, Jung-Huai Chou⁽⁴⁾는 트럭의 이동 하중에 의해 반응하는 교량의 정적 거동을 유한요소 모델과 유전자 알고리즘을 적용하여 교량 손상부위와 손상정도를 산출하였다. M.I. Friswell⁽⁵⁾는 외팔 평판의 손상부위와 손상정도를 산출하기 위해 유전자 알고리즘을 적용하였으며, 구조물의 고유진동수와 모드형상에 대한 각각의 민감도를 산출하고 여기에 보정요소(weighting factor)를 고려하여 벌칙함수(penalty function)를 구성하고 이를 유전자 알고리즘의 적합도로 적용하였다. H.Y. Hwang⁽⁶⁾는 주파수 응답 함수(FRS) 데이터를 이용하여 계측과 해석치를 최소화하는 문제로 구성하여 단순 외팔보와 헬리콥터의 로터 블레이드에 대한 손상 부위와 정도를 산출하였고, R.L. Fox⁽⁷⁾는

구조물의 진동특성 민감도 산출에 기초가 되는 고유진동수의 변화율과 모드 변화율의 산출 방법을 제시하였다. 이들 외에도 여러 학자들이 다양한 측면에서 연구를 시도하였다.

1.3 연구 개요

구조물에 손상이 발생하게 되면 물리적으로 구조물 손상부위의 강성이 줄어들게 된다. 이를 수학적으로 표현하면 구조물 손상부위의 유한요소 강성행렬 변화로 나타나고, 강성행렬의 변화로 인해 구조물의 고유진동수와 모드형상 특성이 바뀌게 된다. 구조물 손상 이전의 강성행렬과 질량행렬이 적용된 고유치문제(eigenvalue problem) 행렬식에 손상된 구조물의 고유진동수와 모드형상을 대입하면 정상적인 고유치문제를 만족시키지 못한다. 이렇게 적용된 고유치문제를 풀어보면 손상된 구조물의 고유진동수와 모드형상은 오류의 원인이 되어 고유치문제의 특성을 만족시킬 수 없게 된다.

손상된 구조물의 고유치문제에서 구조물의 질량에는 변화가 없다고 가정하고, 고유치문제의 전체 행렬식을 전개하면 유한요소 모델의 각 요소강성행렬(element stiffness) 변화량을 미지수로 하는 요소강성행렬 감소계수(element stiffness reduction parameter)들만의 함수들이 형성된다. 이때 이 각각의 함수들은 오류함수(residual function)가 되며, 고유치문제의 특성상 오류함수들은 수학적으로 0이 되어야 하므로, 이론적으로는 오류함수들이 각각 0이 되는 요소강성행렬 감소계수를 산출하면 구조물의 손상위치(damage location) 및 손상정도 산출할 수 있다.

이때 이들 오류함수들은 요소강성행렬 감소계수들을 미지수로 하는 요소강성행렬 감소계수들만의 함수며, 이들 미지수의 수를 줄이기 위해 손상된 구조물의 고유치문제에 손상 전의 모드형상을 조합하여 오류함수들을 더 구하도록 노력하였다. 이들 각각의 오류함수들을 연립방정식으로 풀면 미지수의 수를 줄일 수 있다. 이러한 노력은 해를 구하기 위한 계산시간을 단축시키는데 많은 기여를 한다. 오류함수들이 각각 0이 되는 요소강성행렬 감소계수를 산출하기 위해 각 모드별 오류함수들을 제공하고 총합하여 적합도(fitness)를 생성하고 이를 최소화하는 글로벌 해(global solution)를 찾아 구조물의 손상위치 및 손상정도를 찾아내는 접근방법을 시도하였다. 해를 찾

기 위해 유전자 알고리즘(genetic algorithm)을 적용하였으며, 모드형상 자료의 수학적 직교성을 고려하지 않아도 되는 보다 실질적인 측면에서 접근을 시도하였다.

2. 적용 이론

2.1 수학적 배경

비감쇠 구조물의 진동특성 고유치문제는 식 (1)과 같이 정의 된다.

$$K\Phi_i = \lambda_i M\Phi_i \quad (1)$$

여기서 K 는 강성행렬, M 은 질량행렬, Φ_i 는 i 번째 모드형상, λ_i 는 i 번째 고유진동수이다. 구조물에 크랙과 같은 결함이 발생되어 진행된 경우 구조물의 질량은 변하지 않고 단지 구조 강성이 바뀌게 되며, 이에 따라 고유진동수와 모드형상이 바뀌게 된다. 같은 구조물에 손상(damage)이 발생된 경우 고유치문제는 식 (2)와 같이 정의할 수 있다. 식 (2)에서 손상된 구조물의 고유진동수와 모드형상은 모드시험(modal test)을 통해서 얻을 수 있다.

$$K_d\Phi_{dj} = \lambda_{dj}M\Phi_{dj} \quad (2)$$

여기서 K_d 는 손상구조물의 강성행렬, Φ_{dj} 는 손상구조물의 j 번째 모드형상, λ_{dj} 는 손상구조물의 j 번째 고유진동수를 의미한다. 손상된 구조물의 전체 강성행렬은 손상되지 않은 구조물의 강성행렬에 비해 강성이 줄어들게 된다. 따라서 손상된 구조물의 강성행렬식은 식 (3)과 같이 손상되지 않은 구조물의 강성행렬에서 강성이 줄어든 만큼의 강성변화행렬의 차이로 표시할 수 있다.

$$K_d = K - \delta K \quad (3)$$

여기서 δK 는 강성변화행렬이며, 식 (3)의 강성변화행렬은 이 연구에서 최종 결과물로 산출되는 구조물 유한요소 모델의 요소강성행렬 손상계수를 통하여 얻을 수 있다. 식 (2)의 양변에 Φ_i^T 를 곱하면 식 (4)와 같다.

$$\Phi_i^T K_d \Phi_{dj} = \lambda_{dj} \Phi_i^T M \Phi_{dj} \quad (4)$$

식 (4)에 식 (3)을 대입하고 다시 정리하면 식 (5)와 같다.

$$\Phi_i^T \delta K \Phi_{dj} = \Phi_i^T K \Phi_{dj} - \lambda_{dj} \Phi_i^T M \Phi_{dj} \quad (5)$$

강성행렬과 질량행렬은 각각 수학적으로 대칭(symmetric) 이므로 식 (5)를 전치(transpose)시키고 식 (1)을 대입하면 식 (6)을 얻을 수 있다.

$$\Phi_{dj}^T \delta K \Phi_i = (\lambda_i - \lambda_{dj}) \Phi_{dj}^T M \Phi_i \quad (6)$$

식 (3)의 강성변화행렬에 상응하는 유한요소에 대한 단위 요소의 강성변화행렬은 식 (7)과 같다.

$$\delta K_e = \delta b_e K_e \quad 0 \leq \delta b_e \leq 1 \quad (7)$$

여기서 δK_e 는 유한요소 모델의 요소강성변화행렬을 의미한다. 식 (7)을 이용하여 유한요소 모델에 적용하고 식 (6)을 다시 정리하면 식 (8)과 같이 얻을 수 있다. δb_e 는 요소강성행렬 손상계수로 0과 1사이의 값을 갖게 된다. δb_e 이 1인 경우는 유한요소 e 의 강성행렬 변화가 없는 것으로 구조물의 손상이 없는 것을 의미하며, 1보다 작은 경우는 구조물이 손상된 것을 의미한다. 식 (6)을 다시 정리하면 식 (8)과 같이 된다.

$$\sum_{e=1}^N (\Phi_{djc}^T K_e \Phi_{ie}) \delta b_e = (\lambda_i - \lambda_{dj}) \Phi_{dj}^T M \Phi_i \quad (8)$$

여기서 K_e 는 단위 유한요소의 강성행렬, Φ_{ie} 는 e 번째 유한요소의 i 번째 모드형상, Φ_{djc} 는 e 번째 유한요소의 j 번째 손상 구조물 모드형상을 의미한다. 식 (8)을 이용하여 시스템의 오류함수(residual function)를 정의하면 식 (9)와 같다.

$$R_{ij} = \sum_{e=1}^N (\Phi_{djc}^T K_e \Phi_{ie}) \delta b_e - (\lambda_i - \lambda_{dj}) \Phi_{dj}^T M \Phi_i \quad (9)$$

여기서 식 (9)의 R_{ij} 는 구조물의 고유치문제(eigenvalue problem)의 오류함수로 값이 0을 나타내면 오류가 없는 정상적인 고유치문제임을 의미한다. 또한 식 (9)의 오류함수는 데이터의 수학적 직교성(orthogonality)을 요구하지 않아 손상된 구조물의 모드시

험 데이터를 적용하는데 어려움이 없다.

일반적으로 많이 이용되는 기존의 오류함수⁽³⁾는 식 (4)의 과정이 적용되지 않은 식 (10)과 같다. 손상된 구조물의 모드시험 데이터로 얻을 수 있는 모드 수가 m 개라고 했을 때 식 (10)으로부터 얻을 수 있는 오류함수의 개수는 m 개이다. 실제 문제에서는 모드시험을 통하여 얻을 수 있는 모드의 수는 극히 제한적이기 때문에 많은 오류함수를 얻을 수는 없다. 손상되지 않은 구조물의 모드 수를 n 개라 하고 손상된 구조물의 모드 수를 m 개라고 했을 때 이 연구에서 제안하는 오류함수는 식 (9)를 이용하여 $n \times m$ 개의 오류함수(residual function)를 얻을 수 있다. 손상되지 않은 구조물의 모드 수는 이론적으로 계산하여 얻을 수 있으며, 그 수는 고유치문제의 행렬식 크기에 좌우된다. 따라서 이 연구에서 제안하는 식 (9)를 이용하면 기존⁽³⁾보다 훨씬 많은 오류함수를 얻을 수 있어 이들을 연립방정식으로 풀면 구하고자 하는 미지수인 요소강성행렬 손상계수의 숫자를 많이 줄일 수 있어 해를 구하는 계산시간을 단축시킬 수 있다.

$$R_j = -\lambda_{dj} M \Phi_{dj} + \sum_{e=1}^N (K_e \Phi_{dje}) \delta b_e \quad (10)$$

2.2 유전자 알고리즘

이 연구에서 적용한 유전자 알고리즘의 흐름도(flow chart)는 Fig. 1과 같다. 식 (9)의 오류함수들을 이용하여 각 요소강성행렬 손상계수를 구하기 위한 최적화문제로 만들면 목적함수는 식 (11)과 같으며, 이는 유전자 알고리즘에서 적합도(fitness)로 사용하게 된다. 적합도가 0에 접근할 때 프로그램을 종료하는 조건으로 이 연구를 수행하였다.

식 (11)은 식 (9)의 R_{ij} 오류함수들을 제곱하여 모두 더한 형태이다. 식 (11)은 식 (9) R_{ij} 의 각 오류함수들이 각각 제곱의 형태를 취하고 있어 양(plus)의 값을 갖기 때문에 각 오류함수들이 0이 되어야 적합도 f 가 0이 된다. 따라서 이 조건을 만족시키는 $\delta b_1, \delta b_2, \dots, \delta b_N$ 들이 이 연구에서 구하려고 하는 손상구조물의 요소강성행렬 손상계수가 된다. 이때 $\delta b_1, \delta b_2, \dots, \delta b_N$ 들의 값은 0과 1사이의 값을 갖게 된다. 식 (11)의 N 은 유한요소모델의 요소 수를 의미한다.

$$f(\delta b_1, \delta b_2, \dots, \delta b_N) = (R_{11}^2 + R_{12}^2 + \dots + R_{nm}^2) \approx 0 \quad (11)$$

선택(selection) 연산자는 잘 적응한 해들은 살아 남고 잘 적응하지 못한 해들은 도태되도록 유도한다. 선택의 기반이 되는 것은 적합도이며 여러 가지 선택 방법들이 존재하지만 그 기본 원리는 더 좋은 개체들에게 특권을 부여한다는 점이 공통적이다. 이 연구에서는 특별히 좋은 해가 소실되는 것을 막기 위하여 가장 좋은 해를 보존하여 다음 세대에 남기는 방법을 적용하는 엘리트 보존 선택법을 적용하였다.

교배는 개체군(population) 내에서의 진화의 한계가 존재한다. 다시 말해, 주어진 환경에 어느 한계까지는 진화하여 적용할 수 있지만, 개체군 내에서의 개체의 유전자 한계를 극복할 수 없다. 이를 보완하기 위해 돌연변이 연산자를 사용하였다. 돌연변이는 유전자 배열 중 유전자를 바꾸는 연산자이다. 그러나 돌연변이가 발생하는 확률을 너무 높게 잡으면 무작위 탐색이 될 수 있기에 적절한 돌연변이의 발생이 요구된다. 따라서 이 연구에서는 일반적으로 널리 적용되는 돌연변이 발생 확률을 0.01로 하였다.

개체의 진화는 확률적으로 적지만 돌연변이에 의해 발생할 수도 있으나 주로 개체들끼리의 교배에

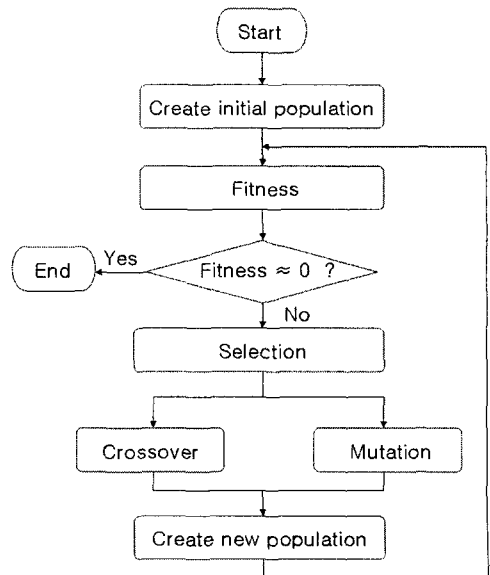


Fig. 1 Flow chart

의해 발생한다. 교배 연산자는 개체들끼리 유전자 배열을 섞는 과정이다. 2개의 개체 사이에 있는 각각의 염색체를 부분적으로 서로 바꿈으로써 새로운 개체를 생성하는 것이다. 이때 부모의 형질이 자손에게 적절히 계승되어야 한다. 이 연구에 적용된 교배방식은 단순교배 방식을 적용하였다.

3. 해석 예

3.1 1개 요소 손상모델 해석

알루미늄 소재의 15개 유한요소로 구성된 캔틸레버 빔을 이용하였다. 15개 요소 중 Fig. 2와 같이

12번째 요소만 60%의 강성 손상이 있는 모델을 적용하여 손상 탐색을 수행하였다.

식 (9)의 식들을 이용하여 연립방정식을 풀어 미지수를 줄인 후 유전자 알고리즘을 이용하여 해를 구하였다. 캔틸레버 빔이 손상되기 전과 손상 후의 모드 형상을 Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5에 각각 비교하였으며, 유전자 알고리즘을 이용한 해를 구하는데 수렴하기까지의 적합도 산출 내역(generation history)을 Fig. 6으로 정리하였다. 그래프들을 통해 알 수 있듯이 캔틸레버 빔이 손상되기 전과 손상된 후의 각각의 모드 형상은 차이가 있음을 할 수 있다. 수학적으로 유한요소 모델을 구성하고 식 (11)의 적합도 함수를

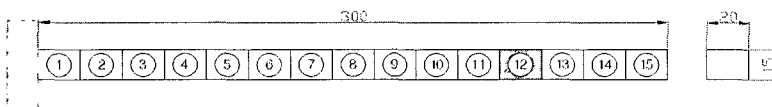


Fig. 2 One element damaged model

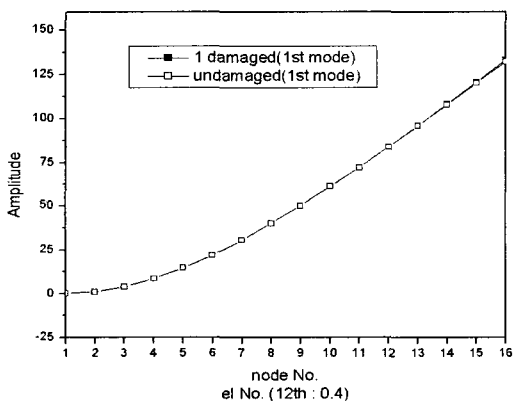


Fig. 3 1st mode shape(one element damaged)

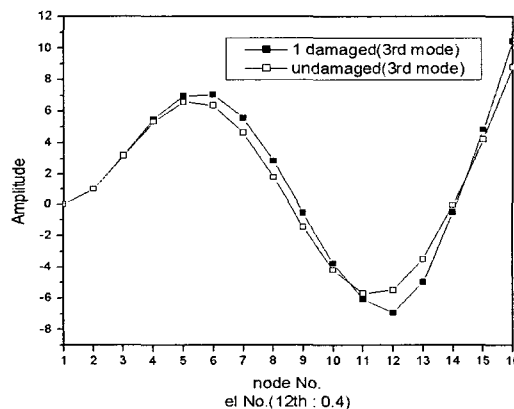


Fig. 5 3rd mode shape(one element damaged)

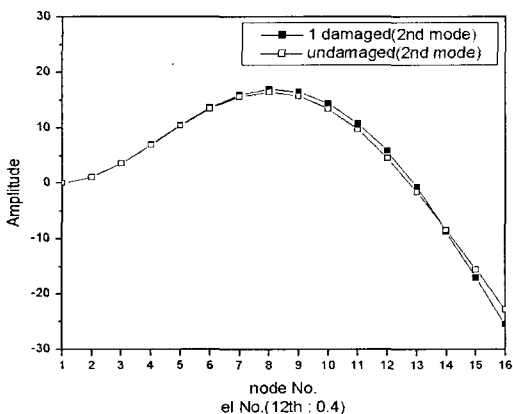


Fig. 4 2nd mode shape(one element damaged)

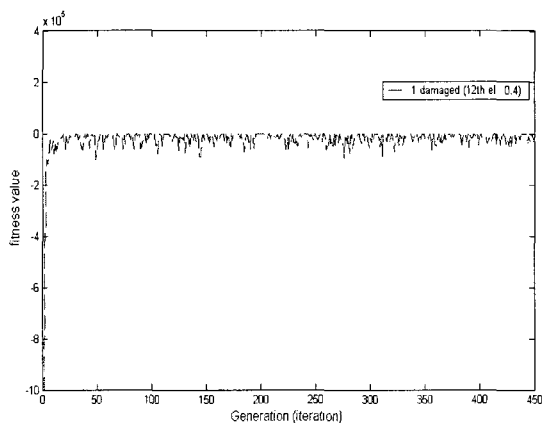


Fig. 6 Generation history(one element damaged)

구하여 해를 구하는 과정은 mathematica를 이용하였다.

3.2 2개 요소 손상모델 해석

알루미늄 소재의 15개 유한요소로 구성된 간단한 캔틸레버 빔에서 Fig. 7과 같이 5번째 요소에서 90%, 12번째 요소에서 60%의 강성 손상이 있는 모델을 적용하여 손상 탐색을 수행하였다. 손상되기 전과 손상 후의 모드형상을 Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10에 각각 비교하였다. 1개 요소 손상모델의 경우와 마찬가지로 그래프에서 알 수 있듯이 캔틸레버 빔이 손

상되기 전과 손상된 후의 각각의 모드 형상은 차이가 있음을 알 수 있다. Fig. 11에서 알 수 있듯이 초기부터 적합도가 수렴조건으로 접근하는 것을 알 수 있다.

3.3 해석 결과 비교

각 적용 모델들의 모드별 고유진동수를 Table 1에 정리하였다.

이 연구를 수행하는 과정에서 적용된 이론 및 프로그램들의 신뢰도를 확인하기 위하여 손상이 없는 정상적인 캔틸레버 빔의 요소강성행렬 감소계수를

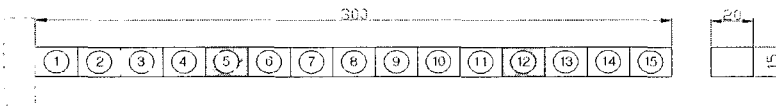


Fig. 7 Two elements damaged model

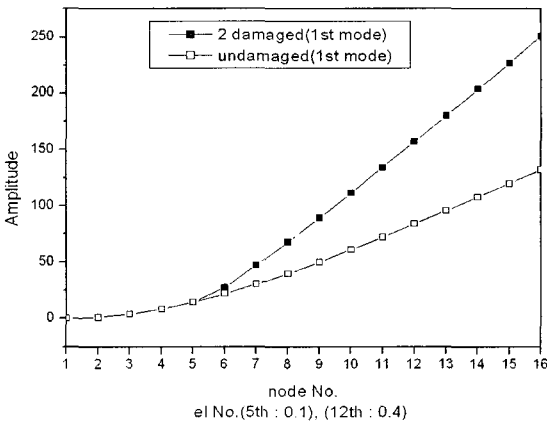


Fig. 8 1st mode shape(two elements damaged)

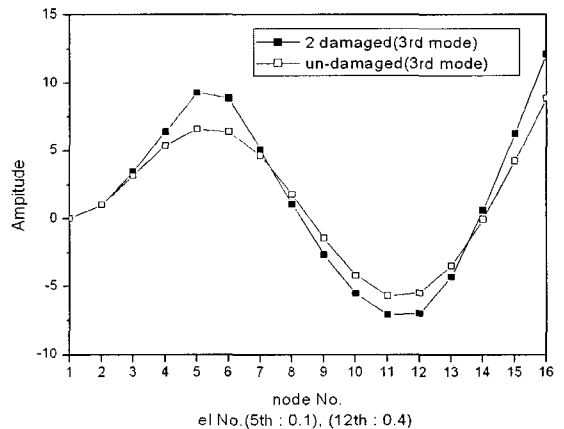


Fig. 10 3rd mode shape(two elements damaged)

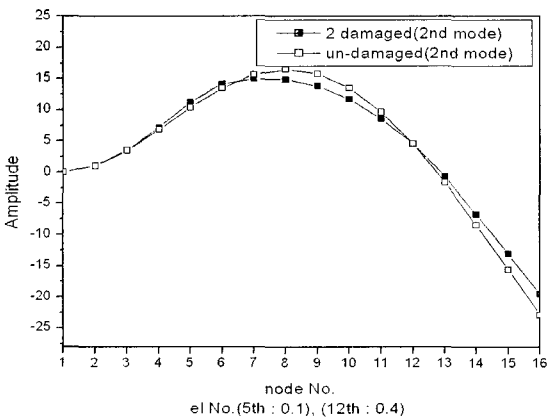


Fig. 9 2nd mode shape(two elements damaged)

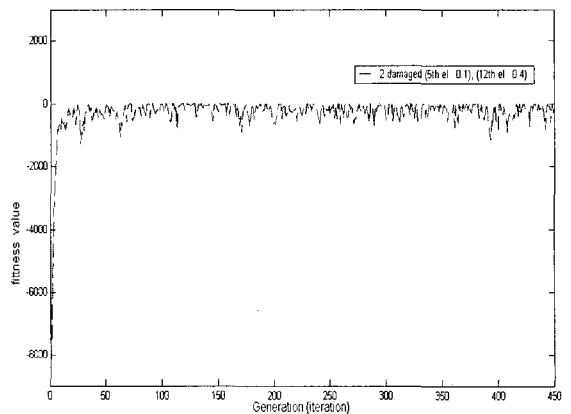


Fig. 11 Generation history(two elements damaged)

Table 1 Comparison of the natural frequencies

Mode No.	Natural frequency(Hz)		
	Undamaged model	One element damaged model	Two elements damaged model
1	137.2	137.0	100.9
2	859.9	835.3	785.8
3	2,408.0	2208.5	1,820.8

Table 2 Comparison of the results

Element No.	Undamaged model (δ be)		One element damaged model (δ be)		Two elements damaged model (δ be)	
	Ref.	Result	Ref.	Result	Ref.	Result
1	1	1	1	1	1	0.999
2	1	1	1	0.999	1	1
3	1	1	1	1	1	0.999
4	1	1	1	0.999	1	1
5	1	0.999	1	1	0.1	0.099
6	1	1.003	1	0.999	1	1
7	1	0.995	1	1	1	0.999
8	1	1.007	1	0.999	1	1
9	1	0.991	1	1	1	0.999
10	1	1.011	1	0.999	1	1
11	1	0.988	1	0.999	1	0.999
12	1	1.012	0.400	0.400	0.4	0.400
13	1	0.986	1	1	1	1
14	1	1.021	1	1	1	1
15	1	0.922	1	1	1	0.999

산출하여 이론치(reference)와 계산치(result)를 먼저 비교하였다. 구조 손상이 없는 정상적인 캔틸레버 빔의 이론 및 계산치를 Table 2에서 비교하여 보면 잘 맞는 것을 알 수 있다. 1개 요소 손상모델의 경우 12번째 유한요소에서 요소강성행렬 감소계수 값이 0.4를 갖는 이론치와 비교하여 보았을 때 계산치도 0.4로 아주 정확하게 맞는 것을 알 수 있다. 2개 요소 손상모델의 경우 5번째와 12번째 유한요소 모델의 요소강성행렬 감소계수 값이 각각 0.1, 0.4인 이론치와 비교하여 보았을 때 계산치의 값이 0.099와 0.4로 아주 정확히 일치 하는 것을 알 수 있었다.

유전자 알고리즘을 이용하여 해를 구하는 과정에서 식 (9)를 이용하여 연립방정식으로 풀어 미지수를 줄이지 않고 15개 요소에 대한 미지수를 모두 유전자 알고리즘에 적용하였을 경우 5×10^5 회의 진화과정을 수행하여도 적합도가 0에 접근하는 경향으

로 수렴하지 않고 계속 계산 중이었다. 이는 유전자 알고리즘이 미지수가 많을 경우 해를 구하는데 많은 시간이 소요는 한계성을 보여준다. 식 (9)를 이용하여 연립방정식을 풀어 미지수를 3개로 줄인 후 계산한 결과 Fig. 6, Fig. 11과 같이 빠른 수렴을 얻을 수 있었다.

4. 결 론

이 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 이 연구에서 제안한 오류함수식은 손상되지 않은 구조물의 모드형상이 조합되어 일반적으로 많이 알려진 오류함수식⁽³⁾보다 훨씬 많은 오류함수들을 만들 수 있었으며, 해를 구하는데 있어서 이들 오류함수들을 연립방정식으로 풀어 미지수를 많이 줄일 수 있었다. 고유치문제를 통하여 계산한 손상되지 않은 구조물의 모드형상의 조합은 오류함수들을 많이 생성하는데 크게 기여하였으며, 이는 대형 복합구조물과 같이 미지수가 많이 생성될 수 있는 문제들의 손상탐색에 적용 가능성을 보여주었다.

둘째, 실제 모드시험(modal test)을 통해 얻어지는 데이터들의 특성이 수학적 직교성(orthogonality)을 만족하지 않는다는 점을 고려해 볼 때, 이 연구에서는 손상 전과 손상 후 고유진동수와 모드형상들의 조합으로 초기 접근단계부터 수학적 직교성(orthogonality)을 고려하지 않아 실질적인 문제의 접근 가능성을 보여주었다.

셋째, 민감도행렬식과 Taylor-급수를 이용하는 방법^(1,2)은 수학적으로 복잡하여 민감도행렬식을 계산하기 위한 프로그램 구성에 어려움이 있으며, Taylor 급수의 1차항만을 고려하여 이론적으로 그 방법 자체에 오차를 내포하고 있는 단점이 있다. 이 연구에서 제한한 식들은 수학적으로 이론 그 자체에서도 오차를 내포하고 있지 않으며, 간단한 수학적 구성으로 계산을 위한 프로그램 구성에 어려움이 없었다. 또한 유전자 알고리즘을 통하여 캔틸레버 빔과 같은 간단한 모델에 적용하여 신뢰할 수 있는 손상탐색의 이론적 해를 구할 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) Jon D. Collins, Gary C. Hart, T.K.

Hasselmann, Bruce Kennedy, 1974, "Statistical Identification of Structures", AIAA Vol. 12, No. 2, pp. 185~190.

(2) Ricles, J. M., Kosmatka, J. B., 1992, "Damage Detection in Elastic Structures Using Vibratory Residual Forces and Weighted Sensitivity", AIAA Vol. 30, No. 9, pp. 2310~2316.

(3) Rao, M., Srinivas, J. and Murthy, B.S.N., 2004, "Damage Detection in Vibrating Bodies Using Genetic Algorithms", Computer & Structures 82 pp. 963~968.

(4) Chou, J.-H., Ghaboussi, J., 2001, "Genetic Algorithm in Structural Damage Detection", Computer & Structures 79 pp. 1335~1353.

(5) Friswell, M. I., Penny, J. E. T., Garvey, S. D. 1998, "A Combined Genetic and Eigensensitivity Algorithm for the Location of Damage in Structures", Computer & Structures 69, pp.

547~556.

(6) Hwang, H. Y. and Kim, C., 2004, "Damage Detection in Structures Using a Few Frequency Response Measurements", Journal of Sound & Vibration, Vol. 270, pp. 1~14.

(7) Fox, R. L., Kapoor, M. P. 1968, "Rate of Change of Eigenvalues and Eigenvectors", AIAA Journal, Vol. 6, No. 12, pp. 2426~2429.

(8) Ricles, J. M., 1991, "Non-destructive Structural Damage Detection in Flexible Space Structures Using Vibration Characterization", Final Report to NASA/ASEE Summer Faculty Fellowship Program at Johnson Space Center.

(9) Yang, C. H., Douglas E. Adams, 2005, "Structural Damage Detection for Metal Panel Using Embedded Sensitivity Functions", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 15, No. 6, pp. 697~705.