

마이크로 유전 알고리즘을 이용한 자유진동 박판구조물의 비파괴 손상 규명

Nondestructive Damage Identification of Free Vibrating Thin Plate Structures Using Micro-Genetic Algorithms

이 상 열¹⁾

Lee, Sang Youl

요 약 : 본 연구는 유한요소법과 고도화된 마이크로 유전알고리즘을 조합하여 자유 진동하는 박판 구조물에 대한 손상 규명을 다룬다. 조합된 방법에 의해 역 문제를 해결하기 위하여, 본 연구는 측정 데이터로서 구조물의 모드 형상 대신 몇 개의 고유진동수를 사용한다. 본 연구에서 제안한 방법은 손상된 요소를 탐지할 수 있을 뿐만 아니라 손상의 개수, 위치 그리고 정도를 추정할 수 있다. 제안된 방법의 타당성을 검증하기 위하여 알고리즘은 임의의 손상을 갖는 강으로 된 자유진동 박판 구조물을 대상으로 적용하였다. 기존의 단순 유전알고리즘에 비하여 본 연구에서 제안한 알고리즘은 수치적 효율성에서 큰 장점을 갖는다. 수치해석 예제들은 고유모드 대신 단지 몇 개의 고유진동수 값만으로도 마이크로 유전알고리즘은 박판의 손상을 정확히 규명할 수 있음을 보여준다.

ABSTRACT : This study deals with a method to identify damages of free vibrating thin plate structures using the combined finite element method (FEM) and the advanced uniform micro-genetic algorithm. To solve the inverse problem using the combined method, this study uses several natural frequencies instead of mode shapes in a structure as the measured data. The technique described in this paper allows us not only to detect the damaged elements but also to find their numbers, locations, and the extent of damage. To demonstrate the feasibility of the proposed method, the algorithm is applied to a free vibrating steel thin plate structures with arbitrary damages. From the standpoint of computation efficiency, the proposed method in this study has advantages when compared with the existing simple genetic algorithms. The numerical examples demonstrate that the method using micro-genetic algorithms can possibly detect correctly the damages of thin plates from only several natural frequencies instead of their natural modes.

핵심용어 : 역문제, 마이크로 유전알고리즘, 고유진동수, 유한요소법, 손상 평가

KEYWORDS : inverse problem, micro genetic algorithms, natural frequencies, finite element method, damage assesment

1. 서론

손상이 발생한 구조 부재의 동적 특성은 중요한 연구주제로서 활발한 연구가 진행되어 왔다. 보와 같은 구조 부재에 발생한 손상은 부재의 고유진동수를 감소시킴으로서 강성을 약화시키는 작용을 하게 된다. 따라서 부재의 고유진동수 변화는 부재에 발생하는 균열 특성을 파악하는 중요한 요인이 되며, 고유진동수 측정치로부터 균열 및 손상의 위치 혹은 크기를 찾아내는 역문제(Inverse problem)를 해결하는 다양한 해석적 연구가 진행되었다(Krawczuk, 2002). Yang 등(1985)은

동적 응답치로부터 구조물의 동적 방정식을 규명하기 위한 기법을 도입하였으며, Rizos 등(1990)은 다양한 경계조건을 갖는 보에 대하여 손상과 고유진동수와의 함수식 관계를 유도하였다. Ostachowicz 등(1991)은 캔틸레버 보의 고유진동수변화가 두 개의 균열이 미치는 영향을 분석하였다. 이 밖에도 근사 해석적 방법으로 고유진동수와 균열과의 역문제를 풀기 위한 다양한 연구가 진행되었다(Morassi and Rollo, 2001; Ruotolo and Shifrin, 1999; Salawu, 1997). 이러한 역문제를 효과적으로 해결하기 위하여 이상열(2004)은 경계요소법과 기존의 해석적 방법을 결합한 방식을 사용하여

1) 정회원, 스페인 국립그라나다대학교 구조공학과 연구교수
(Tel: +34-958-249-482, Fax: +34-959-249-959, E-mail: leesangyoul@hanmail.net)

본 논문에 대한 토의를 2005년 10월 31일까지 학회에 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

2차원 복합재료 탄성체의 결함을 역추정하였다. 그러나 이러한 연구들은 역문제를 수학적 해석적으로 해결하기 위한 방법들을 제시한 것으로서 해석 모델 및 물성 조건 등에 대하여 일정한 제한성을 가지게 된다. 따라서 본 연구에서는 수치해석을 이용한 역문제 해결을 위하여 유전 알고리즘(Genetic algorithm) 기법을 도입하였다. 유전 알고리즘은 자연선택과 유전학에서 발견된 몇몇 중요한 특징과 컴퓨터 알고리즘을 접목한 확률적 탐색도구로서 Holland(1975, 1991)에 의하여 처음 개발된 후 다양한 개발연구가 진행되었다. 유전 알고리즘은 기존의 알고리즘들이 해결하기 어려웠던 복잡한 문제를 성공적으로 해결할 수 있으며 근래에는 다양한 공학 문제에 응용되고 있다(Chou and Ghaboussi, 2001; Friswell et al, 1998; Mares and Surace, 1996).

다양한 분야에서 여러 형태의 유전알고리즘이 개발되었으나 재생산을 알고리즘으로 구현하는 룰렛 휠선택(Roulette wheel selection)기법은 수치적 효율성을 좌우하는 요인이 되고 있다. 따라서 본 논문에서는 한번 실행하는데 많은 시간이 걸리는 동적 문제를 유전알고리즘으로 접근하는 경우 초기 집단(Initial population)의 크기 및 선택을 최적화 할 수 있는 개선된 마이크로 유전알고리즘(Micro genetic algorithm)을 도입한다. 이 방법은 기존의 단순 유전알고리즘(Simple genetic algorithm)에 비하여 매우 작은 집단을 취급함으로써 기존의 단순 유전알고리즘의 단점으로 알려진 수치계산 속도를 크게 향상시켰다(Krishnakumar, 1989; Carroll, 1996). 본 연구에서는 이러한 마이크로 유전알고리즘을 자유 진동하는 박판 구조물을 대상으로 역문제의 해결기법으로서 확대 적용한다.

한편, 기존의 알고리즘들은 구조물의 손상을 탐지하기 위한 계측 자료로서 각 진동 모드 형상을 이용한 경우가 대부분이었다. 이는 구조물의 고유진동수만으로는 역추정을 위한 기본 자료가 부족하여 민감도가 저하되기 때문이다. 그러나 수치해석적 관점에서 가능한 적은 양의 자료를 사용할 수 있다면 바람직할 것이다. 최근 마이크로 알고리즘이나 신경망-유전 하이브리드 알고리즘 등의 개선된 기법은 고유진동수만으로부터 보 혹은 뼈대구조물의 손상을 추정하기 위하여 개발되었다(Au 등, 2003; Suh 등, 2000). 따라서 본 연구에서는 박판 구조물로 확장하여 모드형상이 아닌 몇 개의 고유진동수 만을 가지고 수치해석 관점에서 손상을 역추정하는 방법을 사용하기로 하며 실무적으로 발생할 수 있는 측정 데이터나 구조물의 환경적 불확실성은 본 연구의 범위 상 고려되지 않았다. 본 연구는 적은 수의 계측 자료임에도 불구하고 제안한 마이크로 유전알고리즘을 적용하여 자유 진동하는 박판의 손상의 위치 및 정도를 수치적 효율성 관점에서 효과적으로

추정할 수 있음을 입증하고자 한다.

2. 마이크로 유전 알고리즘

내용의 반복을 피하기 위하여 본 연구에서는 일반적 유전 알고리즘의 상세한 과정에 관한 설명은 참고문헌으로 대체하여 생략하기로 한다(Goldberg, 1989).

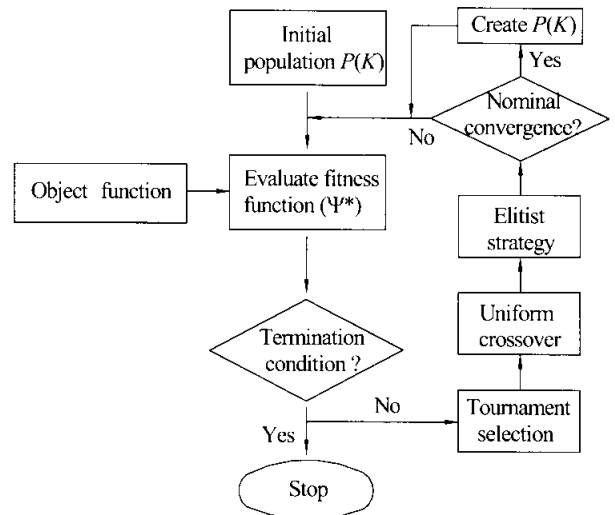


그림 1. 마이크로 유전알고리즘의 연산 흐름도

유전 알고리즘 과정에서 만약 작은 개체집단을 이루고 초기 세대에 초우량 개체(Individual)가 출현하면 룰렛 휠 선택(Roulette wheel selection)은 이 개체를 여러 번 복제하게 되고, 이들이 집단을 지배하게 됨으로서 유전자의 다양성을 잃게 될 가능성이 크다(Holland, 1975; Goldberg, 1989). 즉, 비록 상대적 적합도(Fitness)의 크기는 작아 해에 근접할 확률이 높은 개체라 하더라도 해의 인사를 보유하고 있는 약한 개체가 초기에 제거됨으로써 유전의 중요한 정보를 잃을 수도 있게 된다. 이러한 문제를 보완하기 위하여 고전적인 단순 유전알고리즘은 집단의 크기를 30개에서 최고 200개까지 사용한다. 그러나 이러한 경우 고려되어야 할 중요한 사항 중 하나는 연산에 대한 부담 문제이다. 실제로 많은 공학적 문제들은 최적함수의 평가에 대부분의 연산시간을 소비하고 있다는 사실을 고려한다면, 만일 하나의 함수평가에 소요되는 시간이 1.0 CPU sec 이하라면 중대한 문제가 되지 않을 수 있으나 그 이상이라면 이에 대한 계산부담의 증가는 불가피하게 될 것이다.

따라서 이러한 연산에 대한 부담 문제를 최소화하는 것은 유전알고리즘의 효율성을 좌우하는 중요한 문제로 부각되었으며 최근 여러 형태의 수정된 유전알고리즘이 개발되었다. Goldberg(1989)는 단순유전 알고리즘에 비하여 직렬 유전알고

리즘(Serial GA)안에서 매우 작은 초기집단을 효율적으로 다루는 한 방법을 제안하였으며 이는 Krishnakumar(1989)와 Carroll(1996)에 의하여 더욱 구체화되고 검증되어 마이크로 유전알고리즘이라는 이름으로 발전하였다. 여기서 매우 작은 초기집단을 사용한다는 것은 토목구조물을 예를 든다면, 그만큼의 유한요소법 등에 의한 수치해석 실행시간의 단축을 의미한다. 그림 1은 마이크로 유전 알고리즘의 전반적인 연산 흐름도를 보여준다. 마이크로 유전 알고리즘의 주요한 특징은 별도의 내부 루프(Inner loops)를 갖는다는 점이다. 마이크로 유전알고리즘은 5~6개의 매우 작은 초기집단을 가지고 출발하기 때문에 세대가 증가될수록 유전자의 결핍 현상으로 인하여 원하지 않는 국지해로 수렴할 가능성이 존재한다. 따라서 내부 루프안에서 미리 정한 값에 수렴하게 되면 가장 강한 유전자 개체 한 개만이 살아남아 다음 세대로 전달되고 나머지 개체는 무작위로 초기화하여 구성된 새로운 집단을 가지고 재가동하는 과정을 거치게 됨으로 유전자 결핍 현상을 방지할 수 있다(Abu-Lebedh and Benekothal, 1999). 본 연구에서 적용한 마이크로 유전알고리즘은 토너먼트선택(Tournament selection)을 재생산 연산자로 채택하고 있으며, 일점 교배(One point crossover), 돌연변이(Mutation) 연산 및 엘리트 전략(Elitism)을 사용한다(Goldberg, 1989).

3. 역문제의 정식화

3.1 유한요소법에 의한 손상 모델

유한요소법을 비롯한 다양한 수치해석적 접근방법에서 구조시스템의 강성행렬은 재료적 특성, 기하학적 형상 그리고 경계조건 등의 조합으로 표현되며 손상의 정의는 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 임의의 분할요소에서의 탄성계수, 프로와송비 등의 재료적 물성저하이다. 예를 들면, 임의의 분할요소에서 20% 손상은 탄성계수 혹은 프로와송비의 20% 감소로 정의할 수 있다. 이러한 정의는 Gudmundson (1982) 그리고 Christdes 등(1984)에 의하여 손상을 갖는 등방성 보의 유한요소 해석에서 적용되었다. 그러나 이 방법은 탄성계수 등의 저하이외의 예측할 수 없는 기타 손상 발생조건 등이 고려되지 않는다. 두 번째는 수치적 관점에서 최근 정의하여 사용하고 있는 손상의 정도를 반영하는 강도감소계수(stiffness reduction factor)이다. 구조물에 손상이 발생되었을 경우, 손상된 부위의 강성행렬은 강도저하인자와 모든 구조물의 강도 특성을 포함하는 국부강성행렬의 곱으로 표현할 수 있으며 이러한 개념은 Mares 등(1996) 그리고 Au 등(2003)에 의하여 손상을 갖는 2차원 구조물의 유한요소 해석에 적용되었다. 본

연구에서는 이와 같은 강도저하계수를 도입하여 손상정도를 정의하도록 한다.

손상부위를 갖는 박판의 유한요소 모델은 그림 2와 같이 나타낼 수 있으며, k 번째 분할 요소에서 임의의 손상을 포함하는 경우, 손상을 포함하는 요소의 강성 $\bar{D}^{(k)}$ 은 강도저하계수를 사용하여 식(1)과 같이 표시할 수 있다.

$$\bar{D}^{(k)} = \eta^{(k)} D^{(k)} \tag{1}$$

여기서 $\eta^{(k)}$ 는 k 번째 요소에서의 강도저하계수, 그리고 $D^{(k)}$ 는 k 번째 요소에서의 손상되지 않은 원래의 휨 강성을 각각 의미한다. 한편, 손상을 포함하는 k 번째 요소에서의 국부강성 행렬 $\bar{K}^{(k)}$ 은 다음과 같은 부피적분으로 표현된다.

$$\bar{K}^{(k)} = \eta^{(k)} \int_V B^{(e)T} \bar{D}^{(k)} B^{(e)} d\Omega \tag{2}$$

여기서 $B^{(e)}$ 은 손상 정도와는 무관한 판의 변형률-변위 관계 행렬이며, 윗 첨자 T 는 행렬의 전치(Transpose)를 의미한다. 따라서 $B^{(e)}$ 는 판의 모든 요소 e 에 대하여 적용할 수 있다.

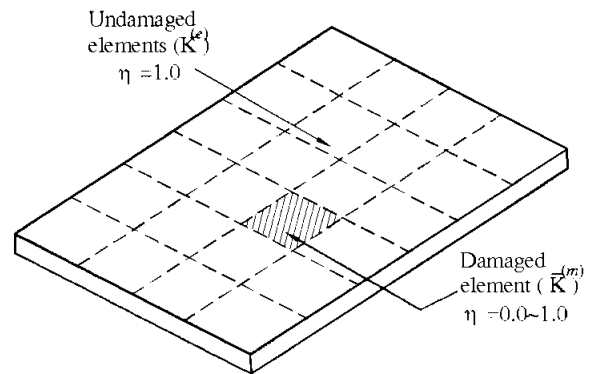


그림 2. 임의의 손상요소를 포함하는 박판의 유한요소 모델

한편, 자유 진동하는 박판에 대하여 질량행렬 $[\bar{M}]$ 을 사용한 고유치 문제(Eigenvalue problem)는 다음과 같은 일반식으로 표현된다.

$$\{([\bar{M}] - \omega^2[\bar{K}])\} = \{0\} \tag{3}$$

본 연구에서는 부공간 반복법(Subspace iteration method)을 사용하여 식 (3)과 같은 형태의 고유치 문제를 해결하였다(Bathe, 1996; 백한술 등, 2000; Lee and

Wooh, 2004). 이 방법은 구하고자 하는 고유치의 개수를 부영역으로 설정하여 전체 행렬의 크기를 결정한 후, Jacobi 반복 방법을 Ritz의 기본벡터를 사용한 선택된 행렬에 대하여 적용된다. 이 방법은 효율적 메모리관리가 가능하므로 전체행렬을 다루는 고전적 방법에 비하여 수치적으로 효율적이며, 특히 유전 알고리즘의 적용과정에서 각 집단 및 세대에 대하여 최적 함수값 평가를 위해 수많은 반복 계산을 하게 되는 역문제 해결과정의 컴퓨터 연산시간을 단축시키는 역할을 하기 때문에 특히 유용하다고 할 수 있다.

3.2 적합도 평가 및 종료 조건

전술한 바와 같이 손상을 규명하는 역문제의 목적은 각 분할 요소에 대한 다음 식으로 표현되는 강도 감소 계수들을 계산하는 것이다.

$$\{\eta^{(k)}\} = \{\eta^{(1)}, \eta^{(2)}, \eta^{(3)}, \dots, \eta^{(K)}\} \quad (4)$$

여기서 K 는 박판의 분할 요소의 총 개수이며, 손상 개수를 사전에 알 수 있는 경우에는 손상된 요소의 총 개수를 의미한다. 역문제를 이용한 손상 규명에서 신중하게 고려되는 과정 중의 하나는 측정된 고유진동수와 역문제 과정에서 가정되어 계산된 고유진동수를 비교하여 최적 함수값(Fitness function value)을 효과적으로 계산하고 이를 평가하는 것이다. 이러한 과정은 초기 세대에서의 측정치와 계산치 사이에서의 오차 ϵ_k 계산에 영향을 미치게 되어 수치해석상의 수렴성을 크게 좌우하므로 매우 중요하다. 본 연구에서는 다음과 같이 각 세대(Generation)에서의 최적 함수값(최적오차, 대표오차) 값을 결정하였다.

$$\epsilon_k = \sum_{n=1}^N (\bar{\omega}[n] - \omega[n])^2, \quad n=1,2,\dots,N. \quad (5)$$

여기서, $\bar{\omega}[n]$ 및 $\omega[n]$ 는 측정 및 계산된 n 번째 모드의 고유진동수를 각각 의미하며, N 은 전체 고유진동수의 개수를 의미한다. 한편, 식 (5)에 의하여 계산된 각 세대에서의 최적 값은 살아남아 다음 세대로 전달되고 나머지 개체에 의해 계산된 값들은 소멸된다. 이러한 최적 값들은 각 세대를 지나면서 발전하여 참값과의 오차 ϵ_k 를 감소시켜 수렴하게 되며 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Psi = \text{Min}\{\epsilon_k\}, \quad k=1,2,\dots,L.. \quad (6)$$

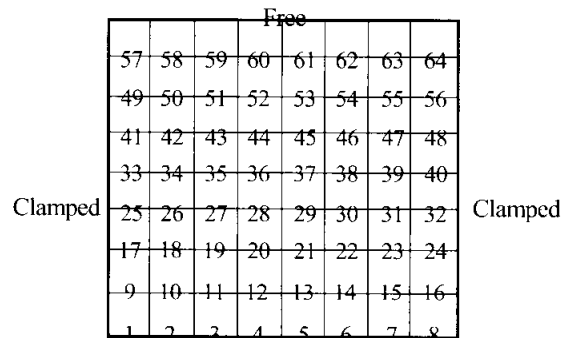
여기서 L 은 각 세대에서의 가정되는 집단의 개수를 의미한

다. 식 (6)에서 구한 최종 적합도 Ψ 가 세대의 증가에 따라 미리 결정한 허용 오차보다 작으면 계산은 종료되며, 최종적으로 알고리즘은 주어진 조건에 대한 최적 손상의 위치 및 상태를 결정하게 된다.

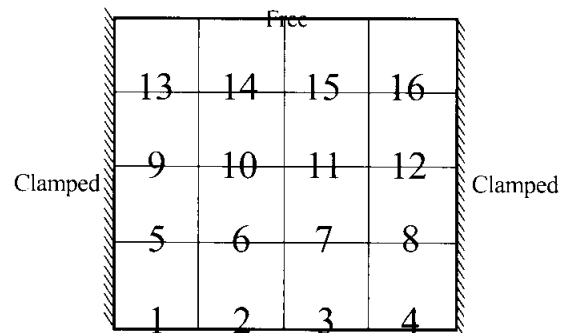
4. 해석 모델 및 수치 예제

4.1 해석 모델

그림 3은 박판의 자유진동 해석을 위한 유한요소 모델을 나타낸다. 모델 I은 손상된 요소의 개수를 사전에 알 수 있는 경우에 대한 것이고, 모델 II는 사전에 손상된 요소의 개수를 알 수 없는 경우에 해당한다. 모델 II의 경우, 손상된 요소의 개수를 알 수 없기 때문에 분할 요소 전체 개수를 미지수로 놓아야 하므로 유전알고리즘을 이용한 역문제 해결 과정에서 탐색체 길이가 매우 길어져 수많은 경우의 수가 존재하게 된다. 따라서 본 연구에서는 그림과 같이 16개의 분할 요소로 시작하였으며, 요소 크기의 세분화가 더 필요한 경우 국부적으로 분할 요소를 증가시킬 수 있도록 하였다. 박판의 경계조건은 그림 3에서 보는 바와 같이 마주 보는 두 변은 고정이고 나머지 두 변은 각각 자유 및 단순지지이다.



(a) 모델 I



(b) 모델 II

그림 3. 자유 진동하는 박판의 수치해석 모델

4.2 재료 물성치 역추정

유전 알고리즘을 이용한 역문제 해결의 타당성을 검증하기 위하여 본 논문에서는 6개 모드에 대한 고유진동수 데이터를 이용하여 Steel로 이루어진 자유진동 박판의 탄성 물성치를 역추정하였다. 표 1은 박판의 물성치와 탐사 범위, 각 물성에 할당된 경우의 수(염색체 길이) 등을 보여준다. 이러한 매개 변수들은 연산의 정확성 및 속도에 다소 영향을 줄 수 있기 때문에 경험적으로 최적 값을 결정하는 과정은 매우 중요하다. 박판은 모델 I과 같은 경계조건이 사용되었으나 19×19의 좁다 세분화된 분할 요소를 사용되었으며, 가로 및 세로의 길이가 1.0m, 두께는 0.05m이다. 표에서 보는 바와 같이 500 세대에서 추정된 물성치는 박판의 원래 물성치에 높은 정확도를 가지고 근접하고 있음을 보여준다.

표 1. 마이크로 유전알고리즘에 의한 탄성 물성치의 역추정 (최종 500세대, M=6)

Properties	True data	Search range	Possibilities	Binary digits	Result	Error (%)
E(GPa)	210.0	50.0~350.0	4096	12	213.35	1.58
G(GPa)	80.0	20.0~150.0	1024	10	82.90	3.49
ν	0.3	0.0~0.50	128	7	0.280	6.67

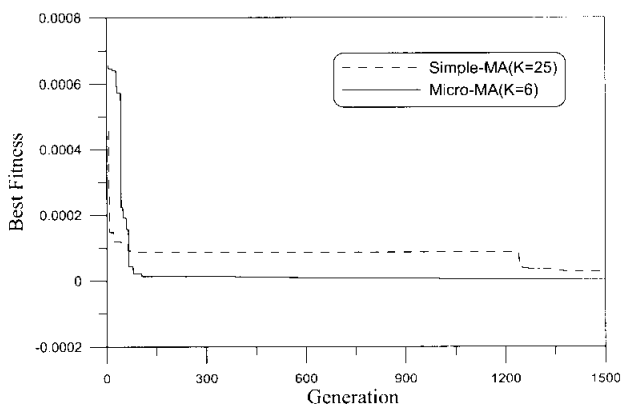


그림 4. 단순(Simple-MA) 및 마이크로(Micro-MA) 유전 알고리즘의 비교 (K=초기 개체 개수)

그림 4는 단순유전 알고리즘과 본 연구에서 제안한 마이크로 유전알고리즘에 의한 탄성물성치의 역추정 과정에서의 각 세대별 최적 함수값(대표오차, 최적오차)을 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 단순유전알고리즘은 25개의 매우 많은 수의 집단을 다루기 때문에 초기 단계의 세대에서는 마이크로 유전 알고리즘에 의한 결과보다 수렴성이 높으나 세대가 증가될수록 마이크로 유전알고리즘보다 큰 최적 함수값을 보임을 알 수 있다. 여기서 큰 최적 함수값을 보인다는 것은 상대

적으로 큰 대표 오차를 갖음을 의미한다. 이러한 현상은 정해로 수렴하는 유전자를 갖는 개체의 새로운 영입이 세대가 지날수록 불가능해지기 때문으로 설명할 수 있다. 뿐만 아니라 25개의 집단에 대하여 각각 고유진동수를 구하여 비교하는 반복 과정을 거쳐야 하므로 수치해석적으로 비효율적이다. 한편 마이크로 유전알고리즘은 K=6으로 매우 적은 수의 집단으로 출발하므로 각 세대별 최적함수 평가를 위한 고유진동수 계산의 컴퓨터 실행속도를 단순유전알고리즘의 경우보다 4배 이상 단축시킬 수 있을 뿐만 아니라 전술한 바와 같이 수렴성도 더욱 우수한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 항공기 구조 분야에서 단순 및 마이크로 유전알고리즘의 적용에 대한 수치해석적 우수성을 비교한 Krishnakumar(1989)의 연구결과와도 유사한 것으로 나타나 마이크로 유전알고리즘의 우수한 적용성을 보여준다.

4.3 정해진 개수의 손상에 대한 역추정

4.3.1 단일 손상

그림 5~6은 마이크로 유전알고리즘을 이용하여 6개의 고유진동수로부터 한 개의 손상 부위를 갖는 박판의 손상 위치 및 정도를 추정하는 것이다. 이 경우는 손상의 개수가 사전에 정해져 있는 경우에 해당한다(모델 I). 17번째 요소에서의 손상 정도를 0.7로 가정하였으며, 다음으로 42번째 요소에서의 손상을 0.6으로 가정하여 각각 실행하였다. 유전알고리즘의 적용을 위하여 각 세대별 6개의 집단을 사용하며, 염색체 길이는 손상의 위치에 대하여 256(2^8), 손상 정도에 대하여 1024(2^{10})를 각각 사용하였으며 300세대까지 증가시키며 추정하였다. 또한 단일 손상의 경우는 손상 위치 및 정도에 대하여 각 집단별 2개의 개체 수를 갖게 된다.

본 연구의 박판에 대한 수치해석 모델은 경계조건에 대하여 좌우 대칭형태를 갖기 때문에 하나의 손상 위치를 가정한 경우, 그 요소의 대칭에 해당하는 위치의 요소를 손상된 곳으로 추정할 가능성이 있다. 그림으로부터 초기세대에서는 대칭 위치의 요소를 손상 위치로 추정하는 시행착오가 발생할 수 있으나, 세대가 증가됨에 따라 원래의 손상의 위치와 정도를 정확하게 추적하고 있음을 관찰 할 수 있다. 이는 6개의 고유진동수를 사용함에 따라 두 번째 모드 이상의 고유진동수부터는 대칭된 위치의 요소에 대하여 고유진동수가 미소한 차이를 보이게 됨에 따라 세대가 증가될수록 그 차이에 근거하여 정확한 위치를 찾는 것으로 수렴해 가기 때문으로 판단된다. 그러나 이러한 수렴성은 그림에서 보는 바와 같이 손상된 요소의 위치 변화에 따라 다소 차이가 있음을 관찰 할 수 있다.

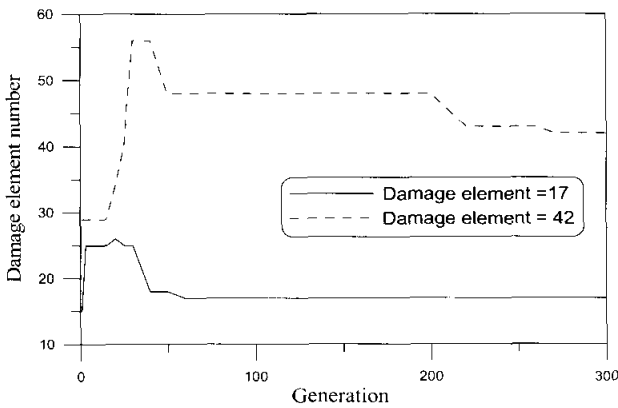


그림 5. 단일 손상 요소를 갖는 박판에 대한 손상 위치의 역추정 (모델 I, 6개의 고유진동수)

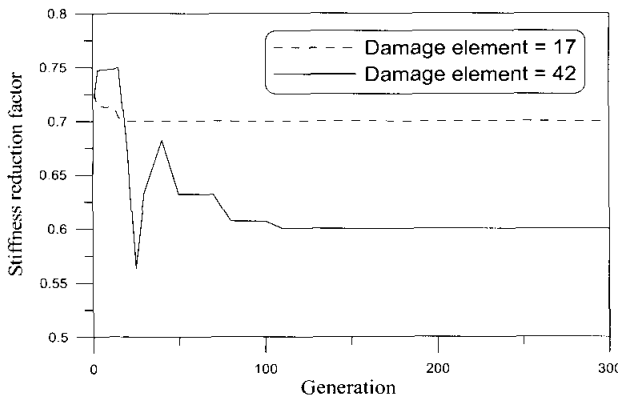


그림 6. 단일 손상 요소에 대한 강도감소계수의 역추정 (모델 I, $\eta^{(17)} = 0.7$, $\eta^{(42)} = 0.6$)

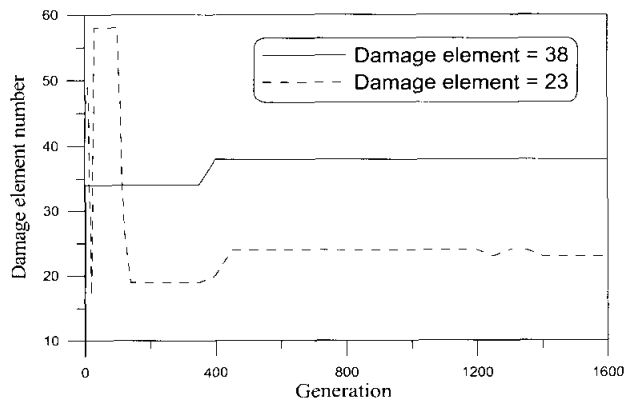


그림 7. 두 개의 손상 부위를 갖는 박판에 대한 손상 위치의 역추정 (모델 I, 6개의 고유진동수)

4.3.2 다중 손상

그림 7~8은 2개의 손상 부위를 갖는 박판에 대한 손상위치 및 손상 정도의 추정 과정을 보여준다. 박판의 물성, 집단 크기 및 염색체의 길이는 단일 손상의 경우와 동일하다. 2개의 손상이 발생하였다고 가정할 경우, 손상위치와 그에 따른 손상 정도가 각각 2개로서 각 집단 별 4개의 파라미터를 갖게

된다. 전술한 단일 손상의 경우에 비하여 개체수가 두 배로 증가함에 따라 그림에서 보는 바와 같이 수렴성이 다소 떨어 짐을 보여준다. 그러나 세대가 증가함에 따라 원래의 손상의 위치 및 정도를 정확하게 추정하고 있음을 관찰할 수 있다.

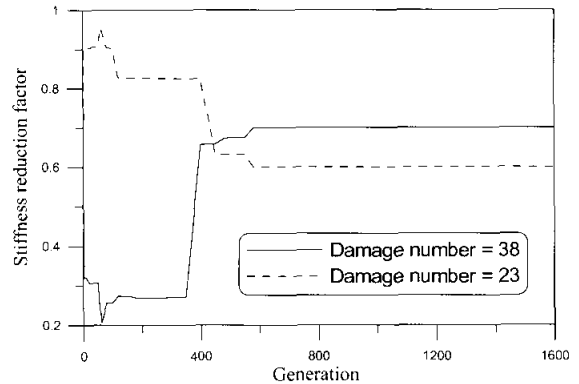


그림 8. 두 개의 손상 부위를 갖는 박판에 대한 손상 정도(강도감소계수)에 대한 역추정(모델 I, $\eta^{(38)} = 0.7$, $\eta^{(23)} = 0.6$)

4.4 정해지지 않은 손상에 대한 역추정

4.4.1 단일 손상

실용적인 관점에서 구조물의 손상 부위의 개수를 사전에 알 수 없는 경우가 일반적이라고 할 수 있다. 이러한 경우는 분할된 요소 전체 개수를 미지수로 놓고 강도감소계수를 추정하는 방법을 사용해야한다. 따라서, 분할 요소 수는 각 집단 별 개체수가 되며, 염색체의 길이는 매우 길어지게 된다. 너무 많은 분할 요소 수를 갖는 경우, 강도감소계수를 추정하는 과정에서 수치적 비효율성을 유발시키게 되므로 본 연구에서는 16개의 분할 요소(Model II)를 사용하였다. 그러나 필요에 따라 국부적으로 더욱 분할된 요소를 적용할 수 있다.

표 2는 단일 손상(8번째 요소)인 경우에 대한 16개의 강도 감소계수를 역추정한 결과를 보여준다. 모델 II를 사용한 것을 제외하고 박판의 물성과 집단 크기 및 염색체의 길이 등은 앞의 경우와 동일하다. 전술한 바와 같이 16개의 모든 요소를 파라미터로 간주하기 때문에 경우의 수는 크게 증가한다. 따라서 본 연구에서는 두 가지 절차로 나누어 알고리즘을 실행하였다. 먼저 16개의 요소에 대한 강도감소계수를 모두 추정하고, 손상이 없다고 판단되는 요소를 제외한 나머지 요소만을 대상으로 알고리즘을 재실행하여 최종적인 손상 위치와 정도를 추정하였다. 일반적으로 비손상 요소에서의 강도감소계수는 알고리즘 실행과정에서 16개의 파라미터에 대하여 엄청나게 많은 경우의 수를 가지고 접근하기 때문에 정확하게 1.0으로 계산되는 경우는 매우 드물다(Au 등, 2003). 따라서 본 연구에서는 편의상 강도감소계수 0.95를 초과하는 값을 갖

는 요소에 대하여 손상이 미미하거나 없는 상태로 간주하였다. 표 2의 첫 번째 시도에서는 8, 12번 요소가 0.95 미만의 값을 나타냄으로서 손상 발생이 예상되는 요소로, 나머지 요소들은 손상이 없는 상태로 간주되었다. 또한, 표에서 괄호 안의 기호 ○은 손상이 발생하였거나 발생할 가능성이 있는 것으로 추정되는 경우이고 기호 ×는 0.95이상으로 손상이 발생할 가능성이 극히 희박한 경우를 각각 의미한다.

표 2. 단일 손상 요소에 대한 강도감소계수 역추정 (모델 II, $\eta^{(8)} = 0.6$)

Element No.	First attempt	Second attempt(Final)
	강도감소계수 $\eta^{(k)}$	
1	0.999 (×)	-
2	0.955 (×)	-
3	0.959 (×)	-
4	0.998 (×)	-
5	0.968 (×)	-
6	0.998 (×)	-
7	1.000 (×)	-
8	0.801 (○)	0.600 (○)
9	0.995 (×)	-
10	0.999 (×)	-
11	1.000 (×)	-
12	0.939 (○)	0.999 (×)
13	0.978 (×)	-
14	0.990 (×)	-
15	0.992 (×)	-
16	0.998 (×)	-

표 3. 다중 손상 요소에 대한 강도감소계수 역추정 (모델 II, $\eta^{(3)} = 0.5$, $\eta^{(12)} = 0.6$)

Element No.	First attempt	Second attempt (Final)
	강도감소계수 $\eta^{(k)}$	
1	0.998 (×)	-
2	0.955 (×)	-
3	0.601 (○)	0.501(○)
4	0.961 (×)	-
5	0.950 (×)	-
6	0.993 (×)	-
7	0.993 (×)	-
8	0.930 (○)	0.998(×)
9	0.714 (○)	0.991(×)
10	1.000 (×)	-
11	0.998 (×)	-
12	0.948 (○)	0.607(○)
13	0.997 (×)	-
14	0.972 (×)	-
15	0.994 (×)	-
16	0.999 (×)	-

한편, 두 번째 시도에서는 손상이 예상되는 8 및 12번 요소

를 가지고 알고리즘을 실행하였으며 최종적으로 8번째 요소에서의 강도감소계수 0.6이 정확하게 추정됨을 관찰할 수 있다. 이와 같이 본 연구에서는 두 단계로 나누어 알고리즘을 실행하여 손상 가능성 범위를 좁히는 방법을 사용하였다. 이러한 접근 방법은 불필요한 수치해석상의 낭비를 미연에 방지할 뿐만 아니라 최종적으로 정확한 손상을 규명할 수 있을 것으로 사료된다.

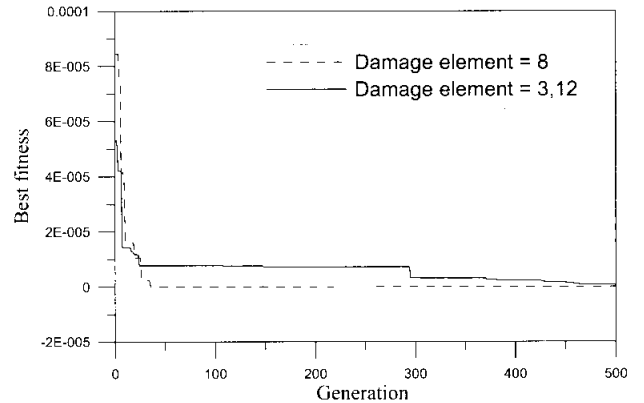


그림 9. 단일 및 두 개의 손상에 대한 각 세대별 대표 오차(ϵ_k) (모델 II)

4.4.2 다중 손상

표 3은 두 개의 손상요소(3 및 12번째 요소)에 대한 강도감소계수를 역추정한 결과를 보여준다. 박판의 물성과 집단 크기 및 염색체의 길이 등은 앞의 경우와 동일하다. 그러나 두 개의 손상을 추정해야 하기 때문에 앞서 한 개의 손상을 추정하는 경우보다 손상을 추정하기에 다소 난해한 초기 조건이라고 볼 수 있다. 표 3에서 보는 바와 같이 첫 번째 시도에서는 3, 8, 9, 그리고 12번째 요소가 0.95미만의 강도감소계수를 나타내어 손상이 유발 될 수 있는 요소로 간주되었으며, 나머지 요소들은 손상이 없는 상태로 간주되었다. 두 번째 시도에서는 이러한 4개의 요소만을 대상으로 알고리즘을 실행하였으며 표에서 보는 바와 같이 최종적으로 0.5% 미만의 오차로 3 및 12번째 요소의 강도감소계수가 정확하게 추정됨을 관찰할 수 있다. 그림 9는 단일 및 두 개의 손상에 대한 각 세대별 최적 함수값(대표오차)을 그래프로 비교하여 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 손상의 개수가 많은 경우 최적 함수값은 상대적으로 크다는 것을 알 수 있다. 이는 알고리즘이 추정해야할 매개변수가 증가하였기 때문으로 예측 가능한 결과로 볼 수 있다. 그러나 세대가 증가됨에 따라 수렴성이 증가하여 두 가지 경우에 대한 최적 함수값의 차이는 점차 감소하게 되며 최종적으로는 두 가지 경우에 대하여 유사한 최적 함수값을 갖는다는 것을 관찰할 수 있다. 이러한

결과들로부터 고유진동수 데이터로부터의 마이크로 유전알고리즘을 이용한 역문제 해결 과정은 박판 구조물의 손상 위치 및 정도 규명에 매우 효과적이라고 판단된다.

4.4.3 3개의 고유진동수로부터의 손상 추정

실무적 관점에서 구조물에서 6개의 고유진동수를 실제로 정확하게 얻어내는 것이 난해한 사항임을 고려하여 3번 및 8번째 요소에 20%의 손상을 가정한 박판에 대하여 3개의 고유진동수만을 사용하여 마이크로 유전 알고리즘을 실행하였다. 3개의 고유진동수를 사용하는 경우 6개를 사용하는 경우에 비하여 민감도가 더욱 저하되므로 역문제에 의한 손상 추정의 정확성이 떨어질 우려가 있다. 표 4의 결과에서 보는 바와 같이 6개의 고유진동수를 사용한 경우에 비하여 손상의 정도에 대한 값의 오차는 다소 발생하였으나 손상의 최종 위치를 정확히 추정하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 제안한 마이크로 알고리즘은 민감도가 낮은 이러한 경우에 대하여 수치적 효율성과 함께 적용 가능한 것으로 판단된다.

표 4. 3개의 고유진동수로부터 강도감소계수의 역추정 (모델 II, $\eta^{(3)} = 0.8$, $\eta^{(8)} = 0.8$)

Element No.	First attempt	Second attempt (Final)
	강도감소계수 $\eta^{(k)}$	
1	1.000 (x)	-
2	0.985 (x)	-
3	0.919 (○)	0.814(○)
4	1.000 (x)	-
5	0.989 (x)	-
6	1.000 (x)	-
7	1.000 (x)	-
8	0.879 (○)	0.842(○)
9	0.992 (x)	-
10	1.000 (x)	-
11	0.999 (x)	-
12	0.910 (○)	0.953(x)
13	1.000 (x)	-
14	0.982 (x)	-
15	0.944 (○)	0.985(x)
16	0.997 (x)	-

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 자유 진동하는 박판 구조물에 대하여 마이크로 유전알고리즘에 근거한 손상 탐지 기법을 개발하였다. 본 논문의 특징은 구조물의 계측 데이터로서 기존의 진동 모드 형상이 아닌 고유진동수 값만을 사용하였다는 점이다. 본 연구에서 최적 함수값의 평가로 사용한 고유진동수는 실용적

관점에서 각 모드 형상 데이터의 양보다 매우 적기 때문에 연산의 효율성을 증대시킬 수 있다. 또한, 기존의 단순 유전 알고리즘과 비교하였을 때, 본 연구에서 제안한 마이크로 유전알고리즘에 의한 접근 방법은 초기의 국지해에 빠질 가능성을 피할 수 있을 뿐 아니라 상대적으로 적은 반복계산을 수행하므로 수치해석적으로 매우 효율적이라 할 수 있다. 본 연구는 박판의 물성치를 역추정함에 있어서 두 알고리즘을 비교하는 해석 예제를 통하여 마이크로 유전알고리즘의 효율성을 입증하였다.

본 연구에서는 유한요소법을 사용하여 모델링한 박판구조물에 대하여 임의의 분할 요소 번호 및 강도감소계수를 추정함으로써 손상의 위치 및 정도를 표현하였으며, 두 가지 형태의 박판 모델에 대한 수치해석 예제를 통하여 입증하였다. 한 개 또는 한 개 이상의 손상을 갖는 박판의 경우 수렴성의 차이는 있으나 본 연구에서 제시한 방법은 손상의 위치와 정도를 정확하게 추정하였다. 손상된 부위의 개수를 알 수 없는 경우는 모든 요소에 대하여 손상감소계수를 추정해야 하므로 수치해석 상 많은 연산시간이 소요될 가능성이 높다. 따라서 본 연구에서는 손상 발생 가능성이 높은 요소를 첫 번째 알고리즘 실행으로 잠정 결정하고 그 요소만을 대상으로 다시 두 번째 실행하는 방법을 사용함으로써 컴퓨터 연산시간을 단축하고 최종적인 손상 위치 및 정도를 정확히 추정할 수 있었다.

결론적으로 유한요소법과 마이크로 유전알고리즘을 접목한 본 연구의 해석 결과는 상대적으로 매우 적은 개수의 데이터로부터 박판 구조물의 손상을 규명하는 데 적용 가능하다는 사실을 입증한다고 판단된다. 그러나 향후 고유진동수 뿐만 아니라 다양한 구조물의 응답치와 계산치 사이의 최적 함수 값의 평가에 관한 더욱 효율적인 세부 알고리즘이 개발되어야 할 것이다. 또한 본 연구의 범위는 제안한 알고리즘의 수치해석적 효율성의 입증에 우선적으로 초점을 두고 있으므로 향후 측정 데이터의 노이즈 현상 등과 같은 실무적 관점에서 고려해야할 다양한 경우에 대한 마이크로 유전 알고리즘의 적용성에 관한 연구가 지속적으로 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

이상열(2004) 경계 요소법을 이용한 2차원 비등방성 복합재료 탄성체의 비파괴 결함 추정, 한국전산구조공학회 논문집 제17권 No. 1, pp.72-80.
 장석윤, 이상열, 백한술(2000) 비등방성 복합 적층판의 고유진동 및 모드특성에 대한 수치비교 연구, 대한토목학회 논문집 제20권 3-A, pp.357-366.

- 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, *J. Sound and Vibration*, Vol. 259(5), pp.1081-1094.
- Abu-Lebedh, G., Benekothal, R. F.(1999) Convergence variability and population sizing in micro-genetic algorithms, *Comp.-Aided Civil and Infra. Eng.*, Vol. 14, pp.321-334.
- Bathe K. J.(1996) *Finite element procedures in engineering analysis*, Prentice-Hall.
- Carroll, D. L.(1996) Chemical laser modeling with genetic algorithms, *AIAA* Vol. 34(2), pp.338-346.
- Carroll, D. L.(1996) Genetic algorithms and optimizing chemical oxygen-iodine lasers developments in theoretical and applied mechanics, School of Engineering, The University of Alabama, 9, pp. 411-424.
- Chou, J. H., Ghaboussi, J.(2001) Genetic algorithm in structural damage detection, *Comput. Struct.*, Vol. 79, pp.1335-1353.
- Christides, S., Barr, A. D. S.(1984) One-dimensional theory of cracked Bernulli-Euler beams, *I. J. Mechanics and Science*, Vol. 26(11/12), pp.639-648.
- Friswell, M. I., Penny, J. E. T., Garvey, S. D.(1998) A combined genetic and eigensensitivity algorithm for the location of damage in structures, *Comput. Struct.*, Vol. 69, pp.547-556.
- Goldberg, D. E.(1989) Sizing populations for serial and parallel genetic algorithms, *Proc., 3rd Conf. Genetic Algori.*, Fairfax, VA, 5, pp.29-37.
- Goldberg, D. E.(1989) *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*, Addison-Wesley, MA.
- Gudmundson, P.(1982) The dynamic behaviors of slender structures with cross section cracks, *J. Mech. and Phys. Of Solids*, Vol. 31(4), pp.329-345.
- Holland (1975, 1991) *Adaptation in natural and artificial systems*, Bradford Book, The MIT Press, Cambridge, MA.
- Krawczuk, M.(2002) Application of spectral beam finite element with a crack and iterative search technique for damage detection, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 38, pp.537-548.
- Krishnakumar, K.(1989) Micro-genetic algorithms for stationary and non-stationary function optimization, *SPIE*, Vol. 1196, pp.289-296.
- Lee, S.-Y. and Wooh, S.-C.(2004) Finite Element vibration analysis of composite box structures using high order theory, *J. Sound and Vibration*, Vol. 277, pp.801-814.
- Mares, C., Surace, C.(1996) An application of genetic algorithms to identify damage in elastic structures, *J. Sound and Vibration*, Vol. 195, pp.195-215.
- Morassi, A., and Rollo, M.(2001), Identification of two cracks in a simply supported beam from minimal frequency measurements, *J. Sound and Vibration.*, Vol. 7, pp.729-739.
- Ostachowicz, W. M., and Krawczuk, M.(1991) Analysis of the effect of cracks on the natural frequencies of a cantilever beam, *J. Sound and Vibration.*, Vol. 150, pp.191-201.
- Rizos, P. F., Aspragathos, N., Dimarogonas, A. D. (1990) Identification of crack location and magnitude in a cantilever beam from the vibration modes, *J. Sound and Vibration.*, Vol. 138, pp. 381-388.
- Ruotolo, R., Shifrin, E. I.(1999) Natural frequencies of a beam with arbitrary number of cracks, *J. Sound and Vibration.*, Vol. 222(3), pp.409-423.
- Salawu, O. S. (1997) Detection of structural damage through change in frequency: A review, *Engng. Struct.*, Vol. 19(9), pp.718-723.
- Suh, M. W., Shim, M. B., and Kim, M. Y.(2000) Crack identification using hybrid neuro-genetic technique, *J. Sound and Vibration* Vol. 238(4), pp.617-635.
- Yang, J. C. S., Tsai, T., Pavlin, V., Chen, J., Tsai, W. H. (1985) Structural damage detection by the system identification technique, *Shock and Vibration*, Vol. 55, pp.57-68.

(접수일자 : 2004. 12. 29 / 심사일 2005. 1. 24 /
 심사완료일 2005. 3. 23)