

# 임의의 손상형태를 갖는 박판의 강제진동 기반 강성저하 분포 규명

## Forced-Vibration-Based Identification of Stiffness Reduction Distribution in Thin Plates with an Arbitrary Damage Shape

송 유 섭\*      이 상 열\*\*      박 대 호\*\*\*  
Song, Yoo-Seob    Lee, Sang-Youl    Park, Tae-Hyo

### Abstract

This study deals with a method to identify structural damage using the combined finite element method (FEM) and the advanced damage search technique. The novelty of this study is the application of plates with arbitrary damage shapes and their response due to the anomalies in a structure subjected to impact loading. The technique described in this paper may allow us not only to detect the stiffness distribution of the damaged areas but also to find locations and the extent of damage. To demonstrate the feasibility of the method, the algorithm is applied to a steel thin plate structures with an arbitrary damage shape. The results demonstrate the excellencies of the method from the standpoints of computation efficiency as well as its ability to investigate the arbitrary stiffness reductions.

### 요 지

본 연구에서는 유한 요소법과 고도화된 손상 탐지 기법을 결합하여 구조적 손상을 규명하는 방법을 다룬다. 본 연구의 특징은 충격하중을 받는 구조물의 동적 거동 특성을 분석하여 이를 임의의 손상 형태를 갖는 판에 적용한다는 것이다. 이러한 방법은 손상된 부위의 강성 분포를 추정할 뿐만 아니라 손상의 정도도 파악할 수 있는 장점을 갖으며 분할 요소수의 제한을 두지 않는다. 제안된 방법을 검증하기 위하여 본 알고리즘은 임의의 손상을 갖는 박판에 대하여 적용하기 한다. 수치해석 결과로부터 제안된 알고리즘은 수치적 효율성과 함께 임의의 손상 분포를 규명할 수 있음을 보여준다.

**Keywords** : Arbitrary damage shapes, Damage identification, Damage search technique, Finite element method, Forced vibration,

**핵심 용어** : 임의의 손상 형태, 손상 규명, 손상 탐지 기법, 유한요소법, 강제진동

\* 학생회원, 한양대학교 토목공학과 석사과정

\*\* 정회원, 한양대학교 토목공학과 BK계약교수, 공학박사

\*\*\* 정회원, 교신저자, 한양대학교 토목공학과 부교수, 공학박사

E-mail : cepark@hanyang.ac.kr 02-2220-0321

● 본 논문에 대한 토의를 2008년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 2008년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서론

사회 기반 시설물에 발생하고 있는 다양한 손상에 대한 효과적인 규명 및 대책은 안전성과 경제적 유지관리 측면에서 매우 중요한 문제가 되어 왔다. 노후화 등으로 인한 구조물의 손상 자체는 불가피하다고 할 수 있으나 고도화된 비파괴 상태평가기술의 개발은 구조물의 치명적인 결함으로 발생하는 막대한 보수·보강 비용이 소요되기 이전에 이를 탐지하고 효과적으로 관리할 수 있으므로 공공의 안전성을 확보할 수 있을 것이다.

구조물에서 획득할 수 있는 다양한 응답을 이용하여 손상을 역으로 탐지하는 역문제(Inverse problem)에 관한 다양한 이론적 연구는 지난 20여년 동안 꾸준히 발전되어 왔다.<sup>(6)(15)(18)</sup> 그러나 이에 관한 대부분의 해석적인 연구는 구조물의 정적 처짐 혹은 고유진동수로부터 손상의 위치 혹은 상태를 추정하는 기법이며, 단순보 혹은 간단한 뼈대구조물의 해석에 시험적으로 적용되었다. 또한 하중 및 경계조건이 제한적일 수 밖에 없다. 최근 다양한 수치해석방법에 의한 최적화 기법이 구조물의 손상을 감지하는 방법으로 적용되어 시도되고 있다.<sup>(7)(14)(17)</sup> 이러한 기법들 중에 생물학적 진화원리를 수치적으로 모사한 유전알고리즘 기법은 역문제를 해결하는 데 있어서 비교적 적은 사전정보를 필요로 하며 국지해로 빠질 수 있는 위험성이 적은 장점을 갖는다. 따라서 유전알고리즘은 여러 연구자들에 의하여 다양한 공학문제에 적용하고 있으며 토목 구조물의 손상추정 등에도 적용이 시도되고 있는 추세이다.<sup>(1)</sup> 그러나 기존의 단순 유전알고리즘(Simple genetic algorithm)은 각세대 당 30개 이상의 개체수를 사용함으로써 그에 따르는 수많은 반복계산으로 인하여 컴퓨터 계산시간이 상당히 소요될 수 밖에 없다. 반면, 본 연구에서 적용하는 마이크로 유전알고리즘(Micro-genetic algorithm)은 단순유전알고리즘보다 훨씬 적은 개수의 개체를 사용하면서 동시에 더 빠른 수렴성을 갖게 된다.<sup>(3)</sup> 따라서 본 연구에서는 기존의 단순유전알고리즘의 몇 가지 단점들을 극복한 마이크로 유전알고리즘을 손상추정기법으로 적용하기로 한다. 마이크로 유전알고리즘을 적용한 구조물의 손상추

정은 Lee and Wooh<sup>(11)(12)</sup>에 의하여 박판 및 복합재료 판구조물에 적용하였으나 이는 사전에 결정된 정확한 사각형 형태의 분할 요소에 대하여 추정한 것이므로 임의의 손상 형태에 대한 탐지를 위한 방법으로 적용하기에는 손상 분포 모델의 한계를 가지고 있다. 또한 16개의 제한된 분할 요소수를 사용해야 하는 단점을 갖는다. 본 연구에서는 이러한 분할 요소수의 한계를 극복하고, 임의의 손상 형태를 갖는 박판 구조물에 대하여 가정된 강성저하 분포식을 수립하며 충격하중으로부터 서로 다른 위치에서 측정한 동적 데이터를 사용하여 강성저하 분포를 마이크로 유전알고리즘을 적용하여 역추정한다. 최종적으로 동적데이터의 불확실성(노이즈 효과)를 고려한 경우에 대하여 제안한 방법의 타당성을 확인하기로 한다.

## 2. 박판의 강성저하 분포식

유한요소법을 이용한 구조물의 모델링에서 강성은 재료적 물성, 기하학적 특성, 그리고 경계조건 등으로 표현된다. 구조물에 손상이 발생하였을 때, 손상에 의한 구조물의 특정요소의 저하된 강성은 강성의 감소를 나타내는 감소계수와 요소강성행렬의 곱으로 표현할 수 있다.<sup>(9)</sup>

본 연구에서는 강도감소계수를 사용하여 박판의 손상 정도를 정의하였다. 전술한 바와 같이 판의 분할 요소에 대한 손상 추정 방법은 삼각형 혹은 사각형 형태로서 실제로 발생하는 손상의 형태와는 다를 수 있다. 본 연구에서는 임의의 손상분포를 다음과 같은 Bivariate Gaussian 분포식을 적용하였다.

$$M(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho^2}} \times \exp\left[\frac{-\left\{\left(\frac{x-x_1}{\sigma_x}\right)^2 + \left(\frac{y-y_1}{\sigma_y}\right)^2 - \frac{2\rho xy}{\sigma_x\sigma_y}\right\}}{2(1-\rho^2)}\right] \quad (1)$$

여기서,  $\sigma_x, \sigma_y$ 는 판의  $x, y$  방향에 대한 손상(저하된 강성)의 분포의 표준편차 (Standard derivation)를

의미하며,  $\rho = \frac{xy - y_1}{\sigma_x \sigma_y}$ 는 상관계수 (Correlation coefficient), 그리고  $x_1, y_1$ 는 평균값 (Mean)을 각각 의미한다.

식(1)을 박판의 손상 분포식으로 적용하는 경우, 좌표  $x$ 와  $y$ 는 서로 독립적이므로  $\rho=0$ 이 된다. 또한  $\beta = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y}$ 로 놓고 지수함수 부분의 분모 2는 결과적으로 영향을 미치지 않아 생략하면 식(1)은 다음과 같이 다시 표현된다.

$$M(x, y) = \beta \cdot \exp\left[-\left\{\left(\frac{x-x_1}{\sigma_x}\right)^2 + \left(\frac{y-y_1}{\sigma_y}\right)^2\right\}\right] \quad (2)$$

여기서,  $\beta$ 는 손상 부위에 대한 강성 저하의 최대 크기를 나타내는 계수 (최대 강도 저하계수)로 정의할 수 있으며  $0.0 \leq \beta < 1.0$  범위의 값을 갖는다. 한편, 임의의 방향  $\theta$ 에 대하여 축을 갖는 손상 분포 형상을 표현하기 위하여 다음과 같은 좌표변환 관계를 적용한다.

$$\begin{pmatrix} x - x_1 \\ y - y_1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \bar{x} - \bar{x}_1 \\ \bar{y} - \bar{y}_1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

식(2)에 식(3)을 대입하면 식(4)와 같은 일반화 된 형태의 분포식으로 변환하여 정리할 수 있다.

$$\beta \cdot \exp\left\{-\left(\frac{((\bar{x} - \bar{x}_1)\cos\theta + (\bar{y} - \bar{y}_1)\sin\theta)}{\sigma_x}\right)^2\right\} \cdot \exp\left\{-\left(\frac{(-(\bar{x} - \bar{x}_1)\sin\theta + (\bar{y} - \bar{y}_1)\cos\theta)}{\sigma_y}\right)^2\right\} \quad (4)$$

식(4)로부터 입력되는 미지수는  $\beta, \bar{x}_1, \bar{y}_1, \sigma_x, \sigma_y$ , 그리고  $\theta$ 로 6개가 된다. Fig. 1은 식(4)에

적당한 6개의 미지 값을 가정한 다음 구해진 판의 손상에 따른 국부 강성 변화 분포 형상의 예를 보여준다. 손상의 형태와 크기를 결정하는 미지수들은 3장에 기술되는 역문제 해법을 통하여 추정하게 된다.

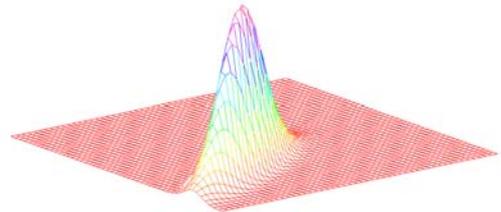


Fig. 1 박판구조물의 국부 강성 변화 예

### 3. 유한요소법과 마이크로 유전 알고리즘을 결합한 역문제 해결

박판의 유한요소 모델에 대하여 각 분할요소의 손상을 갖는  $k$ 번째 요소 강성 매트릭스  $\overline{K}^{(k)}$ 는 손상이 없는 원래의 강성에 식(4)의 강성 분포식을 곱으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\overline{K}_{ij}^{(k)} = M^{(k)} \cdot \int_V B^{(e)T} D^{(k)} B^{(e)} d\Omega, \quad (5)$$

여기서  $B^{(e)}$ 은 손상정도와는 무관한 변형률-변위 관계 행렬이며, 윗 첨자 T는 행렬의 전치(Transpose)를 의미한다. 따라서  $B^{(e)}$ 는 판의 모든 요소  $e$ 에 대하여 적용할 수 있다. 절점당 3개의 자유도를 갖고 요소당 4개의 절점을 갖는 판의 경우 요소강성 매트릭스  $\overline{K}$ 의 크기는  $12 \times 12$ 가 되며 식(4)에 의하여 계산된 분포값에 따라 각 국부강성 행렬에 곱하여 손상된 강성행렬을 구성한다. 한편, 식(5)의 강성행렬을 사용하 구조시스템의 동적 평형방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$M \ddot{u} + Ku = f(t)$$

(6)

여기서  $u$ 와  $\ddot{u}$ 는 변위 및 가속도 벡터,  $M$ 과  $K$ 는 시스템 질량 및 강성 행렬,  $t$ 는 시간  $t$ 에 따른 동적하중을 각각 의미하며 본 연구의 제한된 해석 범위 내에서 감쇠비의 영향은 고려하지 않았다. 식(6)은 Newmark 시간적분 방법을 통하여 변위 및 질량을 구할 수 있다.<sup>(4)</sup>

한편, 측정된 동적응답치로부터 손상의 위치 및 정도를 찾아내는 역문제는  $k$ 번째 세대,  $N$ 개의 분할 시간에서 원래의 측정치  $\bar{u}[n]$ 와 각각의 단계에서의 계산치  $u_k[n]$ 를 비교하여 오차  $\varepsilon_k$ 를 계산하고 그 오차를 미리 결정된 값 이하로 최소화시키는 과정을 통하여 구하고자 하는 손상을 역추정하게 된다. 본 연구에 손상 탐지 기법으로 적용하는 마이크로 유전알고리즘은 식(7)에 의하여 각 세대(Generation)에서의 대표 오차 값 (적합도)을 결정하였다.

$$\varepsilon_k = \sum_{n=1}^N (\bar{u}[n] - u_k[n])^2, n=1,2,\dots,N. \quad (7)$$

식(7)에 의하여 계산된 각 세대에서의 대표값, 즉 최적 적합도로 판정되는 최소값 및 그 특성은 살아남아 다음 세대로 전달되고 나머지 개체에 의해 계산된 값들은 소멸된다. 이러한 대표값들은 각 세대를 지나면서 특성이 유지되는 환경에서 진화하고 발전하여 원래 가정된 참값으로 수렴하게 되며 이러한 과정은 식(8)과 같이 간략식으로 나타낼 수 있다.

$$\Psi = \min \{\varepsilon_k\}, k=1,2,\dots,M. \quad (8)$$

식(8)에서 구한  $\Psi$ 가 미리 결정된 오차보다 작거나 미리 정한 제한된 세대가 지나면 계산은 종료되며, 최종적으로 추정된 6개의 미지수에 의하여 최종 손상의 위치 및 상태를 결정하게 된다. 이러한 역문제 해결에 적용되는 유전자 알고리즘은 Goldberg<sup>(8)</sup>에 의하여 개발되었으며 Krishnakumar<sup>(10)</sup>와 Carroll<sup>(5)</sup> 등에 의하여

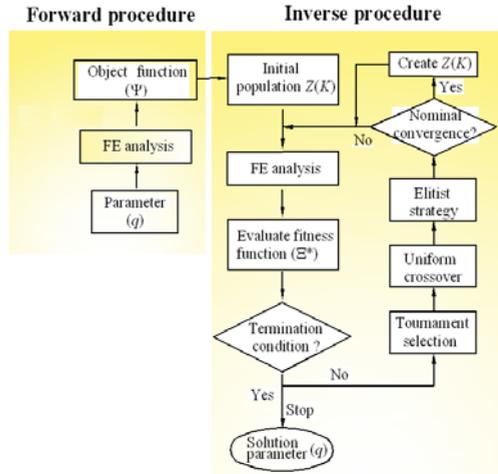


Fig. 2 손상 추정을 위한 알고리즘 흐름도

기존의 단순 유전알고리즘의 수치적 단점들을 개선한 고도화된 마이크로 유전알고리즘 기법으로 발전하였다.

마이크로 유전알고리즘은 기존의 단순 유전알고리즘에서 30~50개의 초기 개체로 출발하는 것에 비하여 5~6개의 적은 개체로 출발한다. 동적해석과 같이 큰 계산량이 요구되는 경우 반복 계산 시간을 줄일 수 있다는 점에서 마이크로 유전알고리즘은 매우 탁월한 장점을 갖는다고 할 수 있다. 그러나 이러한 적은 수의 개체는 유전자의 정보 결핍으로 인하여 세대 간 반복 계산 과정에서 잘못된 국지해로 빠질 우려가 있다. 따라서 마이크로 유전알고리즘은 국지적인 특정한 목적값에 수렴된 후에는 가장 강한 유전자 개체의 정보만이 살아남아 다음 세대로 전달되고 일정한 세대가 지나면 내부의 루프 안에서 다시 처음부터 가정된 개체로 재출발하는 방법을 사용함으로써 유전자 개체의 결핍 현상을 극복할 수 있다. Fig. 2는 손상 추정을 위하여 본 연구에서 제안하는 알고리즘의 흐름도를 보여준다. 일반적인 유전자 알고리즘에 대한 상세한 내용은 지면상 생략하기로 하며 전문한 참고문헌을 참조하기로 한다.

## 4. 수치예제 및 결과 분석

### 4.1 수치해석 모델

수치해석 모델은 길이 1.0m를 두께 0.02m 정사각형 박판 구조물에 대하여 Fig. 3와 같은 하중 및 측정 위치를 결정하였다. 하중 위치와 변위 측정위치의 변화에 따라 Case I~IV를 결정하였으며 경계조건은 캔틸레버와 같이 한 변은 고정이고 나머지 세변은 자유단인 경우이다. 충격하중(100N)은 초기 20 $\mu$ sec 동안 가해졌으며, 0.004sec까지 20 $\mu$ sec의 분할 시간에 대하여 계측한 데이터를 사용하였다. 만약, 계측데이터로 고유진동수를 사용하는 경우는 계측 위치 변화에 따른 손상 추정치에 한해하므로 본 연구에서 적용하는 동적 응답 계측치의 사용은 국부적 손상을 추정하는데 유리한 장점을 갖는다. 한편, 본 연구에서 제안한 판의 강성 저하 분포 형상의 정확도는 판의 분할 요소수에 의해 좌우된다.

그 이유는 분할 요소수가 많을수록 판의 각 분할 요소에 분배되는 강도 감소 계수의 정도가 높아지기 때

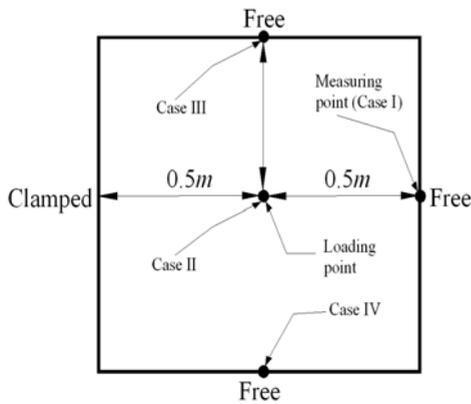


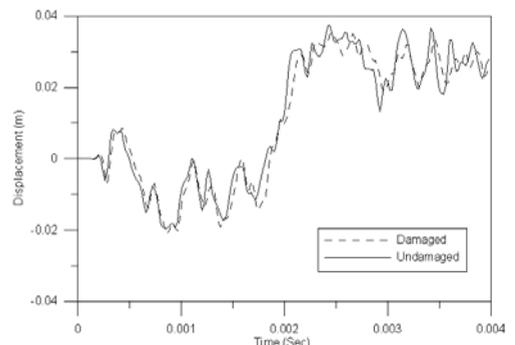
Fig. 3 판의 경계조건, 하중 및 측정 위치

Table 1 손상분포식의 미지수 및 마이크로 유전알고리즘의 입력값

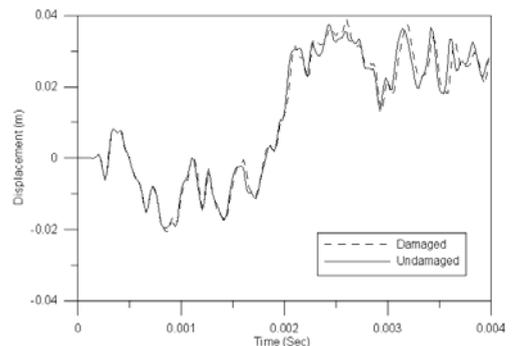
Properties	$\bar{x}_1$	$\bar{y}_1$	$\sigma_{\bar{x}}$	$\sigma_{\bar{y}}$	$\beta$	$\Theta$
Exampe I	0.7	0.6	0.05	0.2	0.7	30.0
Example II	0.3	0.4	0.2	0.05	0.5	55.0
Search range	0.0~1.0	0.0~1.0	0.01~1.0	0.01~1.0	0.0~1.0	0.0~90.0
Possibilities	2048	2048	2048	2048	2048	8192
Binary digits	11	11	11	11	11	13

문이다. 그러나 과도한 분할 요소는 수치적으로 비효율적이므로 적절한 분할 요소수의 결정이 중요하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 점들을 고려하여 판의 분할 요소는 400(20 $\times$ 20)개를 사용하였으며 손상의 크기 및 위치에 따라 Table 1과 같이 Example I과 Example II로 분류하였다. 또한 0.004sec 동안 측정된 데이터 200개를 사용하였다. 마이크로 유전 알고리즘은 각 세대간 6개의 개체로 출발하였으며, Table 1에서 보는 바와 같이 총 68개의 염색체 길이를 가진다. Table 1에서  $\Theta$ 의 탐색 범위를 0~180 $^\circ$ 가 아닌 0~90 $^\circ$ 로 놓은 이유는 판의  $x$  및  $y$  방향으로의 강성 저하의 표준편차 비율에 따라 0~180 $^\circ$ 인 경우에 대하여 동일한 손상 분포 형상을 갖는 경우가 발생할 수 있기 때문이다.

Fig. 4는 손상을 갖는 경우와 손상을 갖지 않는 판에 대하여 동적거동을 비교한 것이다. 동적 변위 측정



(a) Example I, Case I



(b) Example II, Case II

Fig. 4 무손상 및 손상을 갖는 박판의 동적 거동 비교

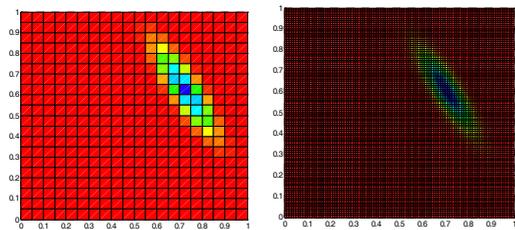
위치는 Case I이다. Fig. 4(a)와 같은 경우 손상의 유무에 따라 동적 변위는 비교적 큰 차이를 보인다.

따라서 이러한 경우는 손상의 탐지가 비교적 용이하다고 할 수 있다. 반면, Fig. 4(b)와 같은 경우는 손상의 유무에 따라 동적 변위가 근소한 차이를 보이고 있음에 유의한다. 그러나 이러한 경우에도 Fig. 6(c)에서 보는 바와 같이 손상 분포를 비교적 정확하게 탐지하고 있음을 관찰할 수 있다. 실험적인 관점에서 Fig. 4와 같은 손상 전후에 대한 거동 비교는 동일한 충격하중을 가해야 하는 난해함을 가지고 있다. 이러한 문제는 동일한 높이에서 동일한 크기의 충격을 가

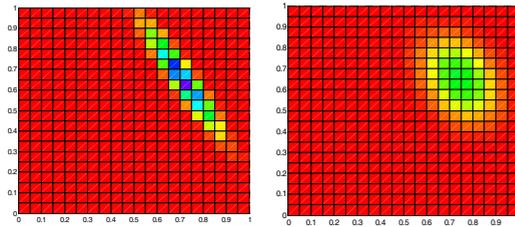
할 수 있도록 하는 간단한 보조 장치를 제작하여 해결할 수 있다.<sup>(13)</sup>

## 4.2 손상분포 추정

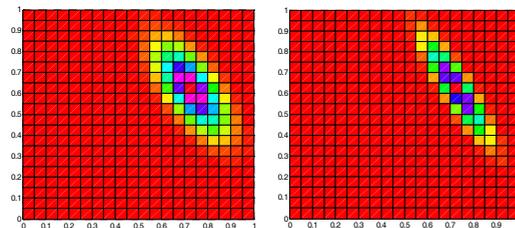
Fig. 5는 Example I에 대하여 Case I~IV의 경우에 대한 강성 분포 추정 결과를 나타낸다. 적용한 마이크로 유전알고리즘은 1500~2000세대에서 실제와 가까운 분포를 역탐지하였으며 Case에 따라 3000세대 이상에서 정확한 손상 부위가 탐지되기도 하였다. Case에 따라 수렴되는 세대수가 다른 이유는 측



(a) 원래 강성저하 분포 (b) 해상도 5배로 확대한 강성저하분포

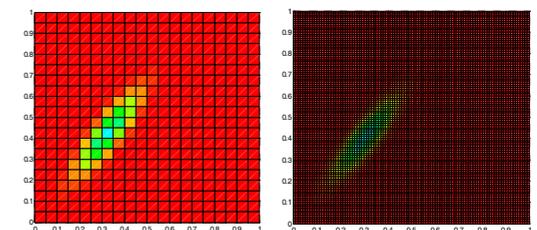


(c) 추정된 강성저하 분포 (Case I) (d) 추정된 강성저하 분포 (Case II)

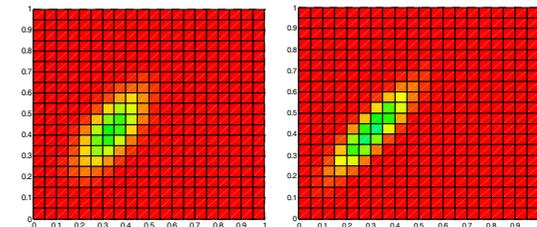


(e) 추정된 강성저하 분포 (Case III) (f) 추정된 강성저하 분포 (Case IV)

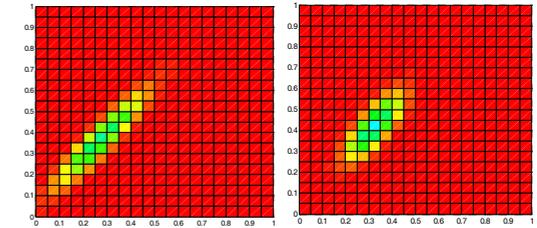
Fig. 5 마이크로 유전알고리즘에 의한 강성저하 분포 추정 (Example I)



(a) 원래 강성저하 분포 (b) 해상도 5배로 확대한 강성저하분포



(c) 추정된 강성저하 분포 (Case I) (d) 추정된 강성저하 분포 (Case II)



(e) 추정된 강성저하 분포 (Case III) (f) 추정된 강성저하 분포 (Case IV)

Fig. 6 마이크로 유전알고리즘에 의한 강성저하 분포 추정 (Example II)

정 위치의 변화에 따라 해의 정확도가 각각 다르기 때문이다.

Fig. 5(b)는  $100 \times 100$ 의 분할 요소를 사용하여 손상분포의 해상도를 5배 향상시켜서 도시한 것이다. 실제의 손상분포는 Fig. 5(b)와 같으나 Fig. 5(a)와 같이 분할 요소수에 따라  $20 \times 20$ 을 사용하였으므로 그에 따르는 오차는 발생할 수 있음에 유의해야 한다. Fig. 5(c)~(e)에서 보는 바와 같이 손상의 위치는 거의 정확히 탐지하고 있으며 분포 및 손상 정도는 각 Case에 따라서 약간의 차이를 보이고 있다. 이것은 Fig. 4에서 설명한 바와 같이 계측 위치에 따라 손상이 발생한 경우와 그렇지 않은 경우에 대한 계측값이 서로 상이하므로 경우에 따라서 손상 추정 정확성에서 차이를 보일 수 있다. 그러나 최종적인 손상 분포의 추정은 수렴도의 차이는 있으나 가능하다고 사료된다. Fig. 6(c)~(e)는 Fig. 6(a)과 같이 가정한 손상(Example 2)에 대하여 Fig. 5와 동일한 과정에 의한 손상 탐색 결과를 보여준다. Example 1의 경우와 유사하게 손상에 의한 강성 저하 분포를 정확하게 추정하고 있음을 관찰할 수 있다.

### 4.3 손상탐지 최적 적합도 분석

Fig. 8은 4.2절의 Example에 대하여 Case I 과 II에 대한 마이크로 유전알고리즘을 실행한 결과 세대 증가별 최적 적합도(Fitness)를 분석한 것이다. 알고리즘은 허용오차내에서 종료하거나 세대 실행 횟수를 지정할 수 있도록 하였다. 여기서는 전반적인 수렴성을 관찰하기 위하여 1600 세대까지 알고리즘을 실행하였다. Fig. 8(a)는 Example 1에 대하여 Case I 과 II를 분석한 것이다. Case I은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 하중의 위치와 측정위치가 서로 다른 경우이다. 이러한 경우 측정 위치와 하중의 위치가 같은 경우에 비하여 초기 수렴도는 떨어지나 세대가 증가할수록 수렴성이 지속적으로 증가함을 알 수 있다. Fig. 8(b)에서도 유사한 현상을 관찰할 수 있다. 마이크로 유전알고리즘을 실행하는 경우 대부분 1000 세대 이상에서도 지속적으로 적합도가 상승하는 것으로 나타났다. 이것은 전술한 바와 같이 마이크로 유전알고

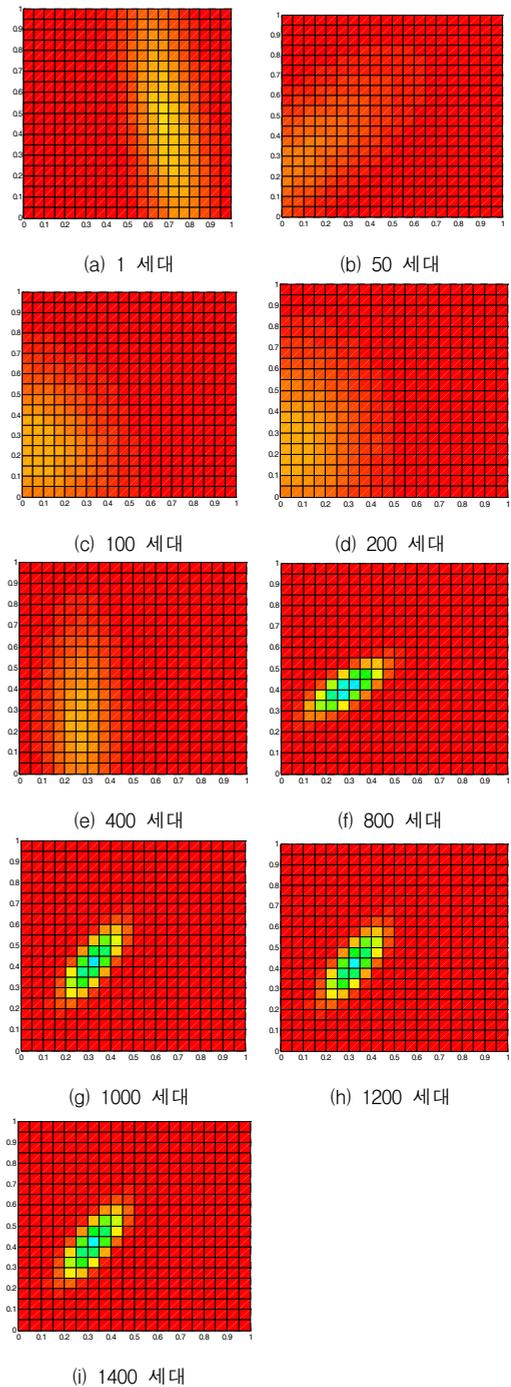
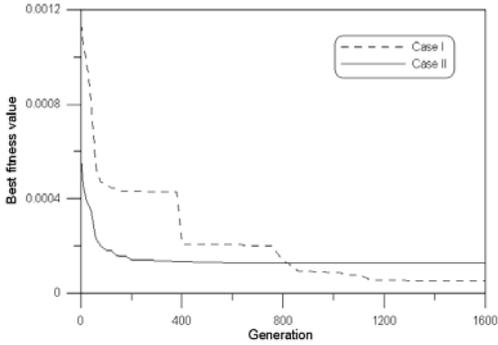
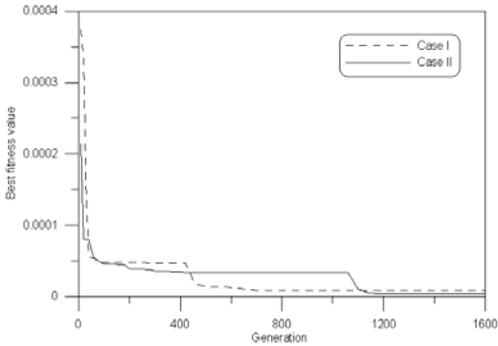


Fig. 7 마이크로 유전 알고리즘에 의한 각 세대별 강성 저하 분포 추정 과정 (Example II, Case II)

리즘은 기존의 단순 유전알고리즘에 비하여 일정한 세대가 지난 후에 국지해로 빠질 가능성이 있는 경우 최적값만 남겨두고 새로운 개체를 다시 받아들이는



(a) Example I

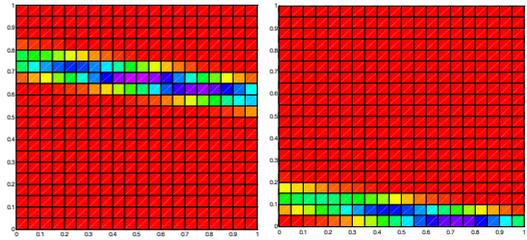


(b) Example II

Fig. 8 각 세대별 최적 적합도 (Case I, II)

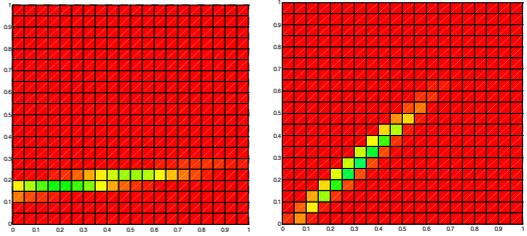
내부 순환알고리즘을 가동시키기 때문이다. 이러한 방식은 적은 개체를 사용하면서도 수렴성은 지속적으로 높일 수 있기 때문에 동적해석과 같은 긴 시간을 요하는 해석을 수행하는 경우 더욱 효과적인 것으로 판단된다.

Fig. 9는 동적추정치의 불확실성(5% 노이즈 효과)를 고려한 경우에 대한 각 세대별 손상 분포 추정과정을 보여준다. 노이즈 효과는 가우스 난수 발생기(Gaussian random generator)를 이용하여 일정 비율의 난수를 발생시킨 후 계측 데이터가 합산하여 데이터에 일정한 오차가 발생하도록 하였다. 그림에서 보는 바와 같이 5%의 데이터 오차가 발생한 경우에



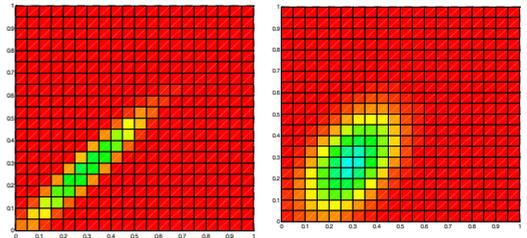
(a) 1 세대

(b) 100 세대



(c) 500 세대

(d) 1000 세대



(e) 1500 세대

(f) 2000 세대

Fig. 9 추정치의 불확실성(노이즈효과)를 고려한 각 세대별 강성저하 분포 추정 과정 (Example II, Case I, 5% 노이즈)

대하여 오차가 없는 경우보다는 수렴 속도나 정확도는 다소 떨어지나 손상 발생 위치와 분포가 비교적 정확히 탐지되었다.

## 5. 결론

본 연구의 특징은 다양한 원인으로 인하여 손상되어 강성이 저하된 박판 구조물에 대하여 수치해석 기법을 적용하는 경우, 보다 현실에 가까운 손상형태를 모사하기 위하여 임의의 형태를 갖는 강성저하 분포

식을 수립하였다는 점이다. 본 연구에서 정식화한 Gaussian 2차원 강성저하 분포식은 유한요소법과 고도화된 마이크로 유전알고리즘과 결합하였으며, 판의 강성저하 분포를 역추정하는 새로운 알고리즘을 제안하였다. 또한 역추정을 위한 사전 데이터로는 구조시스템의 사전정보로서 좀 더 다양한 정보로서 활용할 수 있도록 하기 위하여 기존의 정적 처짐 혹은 고유진동수 대신 동적하중에 의한 변위 응답치를 사용하였다. 몇 가지 수치해석 예제로부터 유한요소법과 마이크로 유전알고리즘을 결합한 본 연구에서 제안한 기법은 임의의 형태의 손상을 갖는 박판에 대한 강성저하 분포를 효과적으로 추정하고 있음을 알 수 있다. 또한 동적 변위의 측정 위치 변화에 따라 계측값의 차이로 인하여 손상의 추정 결과의 정확성은 약간의 차이를 보이고 있으나 최종적으로 손상의 위치를 정확히 탐지하였다. 데이터에 임의의 노이즈를 발생시킨 경우에도 정확성은 노이즈가 없는 경우에 비하여 약간 떨어지나 손상의 위치와 분포를 비교적 정확하게 탐지함을 확인하였다. 그러나 손상 추정의 효율성을 더욱 높이기 위하여 손상 탐지를 위한 최적화된 계측 위치 배열에 대한 알고리즘이 요구되며 실제 실험을 통하여 제안된 방법의 다양한 검증도 필요하다. 또한 보다 복잡하고 다양한 손상 분포에 대한 상세 강성저하식의 수립과 측정치와 계산치의 오차값을 더욱 효과적으로 최소화시키는 다양한 역문제 해결 기법의 연구가 지속적으로 필요할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 건설교통부 건설기술기반구축사업(05기반구축 D04) 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

1. 이상열, "마이크로 유전알고리즘을 이용한 자유진동 박판구조물의 비파괴 손상규명", 한국구조공학회는문집, Vol. 17, 2권, 2005, pp. 173-181.
2. 이상열, 송유섭, 박대효, "임의의 손상형태를 갖는 박판구조물의 동적 데이터로부터 강성저하 분포 추정",

한국구조물진단학회 학술발표대회, 2006.

3. Abu-Lebedh, G. & Benekothal, R. F., "Convergence variability and population sizing in micro-genetic algorithms," *Comp.-Aided Civil and Infra. Eng.*, 14, 1999, pp. 321-334.
4. Bathe.K.J, "The finite element procedures in engineering analysis), Prentice Hall, Englewood Cliffs," NJ, 1996, pp. 768-785.
5. Carroll. D.L, "Chemical laser modeling with genetic algorithms," *AIAA J.*, 34(2), 1996, pp. 338-346.
6. Doebing. S.W & Farrar. C.R & Prime.M.B, "A summary review of vibration-based damage identification methods," *Shock Vib. Digest*, 30, 1998, pp. 91-105.
7. Friswell, M.I & Penny. J.E.T & Garvey. S.D, "A combined genetic and eigensensitivity algorithm for the location of damage in structures," *Comput. Struct.*, 69, 1998, pp. 547-556.
8. Goldberg.D.E, "Sizing populations for serial and parallel genetic algorithms," *Proc.*, 3rd Conf. Genetic Algori., Fairfax, VA, 5, 1989, pp. 29-37.
9. Gudmudson. P., "The dynamic behaviors of slender structures with cross section Cracks," *J. Mech. and Phys. of Solids*, 31(4), 1982, pp. 329-345.
10. Krishnakumar. K, "Microgenetic algorithms for stationary and nonstationary function optimization", *Proc. SPIE*, 1196, pp. 289-296.
11. Lee S. Y. and Wooh S. C., "Detection of Stiffness Reductions in Laminated Composite Plates From Their Dynamic Response Using the Microgenetic Algorithms," *Comp. Mech.*, 36, 2005, pp. 320-330.
12. Lee S. Y. and Wooh S. C., "Waveform-Based Identification of Structural Damage Using the Combined Finite Element Method and Microgenetic Algorithms" *J. Struct. Eng. ASCE*, 31(9), 2005, pp. 1464-1472.
13. Lee S. Y., G. Rus and Park T., "QNDE of Thin Plate Structures Using the Complete Frequency Information from Impact Testing", *J. of Structural Engineering and Mechanics*, 2007, submitted.

- 
14. Mares C. & Surace C, "An application of genetic algorithms to identify damage in elastic structures," J. Sound Vib., 195, 1996, pp. 195-215.
  15. Morassi. A & Rollo. M, "Identification of two cracks in a simply supported beam from minimal frequency measurements", Journal of vibration and control, 7(5), 2001, pp. 729-740.
  16. Ruotolo.R & Shifrin.E.I., "Natural frequencies of a beam with arbitrary number of cracks," J. Sound Vib., 223(3), 1999, pp. 409-423.
  17. Suh.M.W & Shim.M.B & Kim.M.Y, "Crack identification using hybrid neuro-genetic technique," J. Sound Vib., 238(4), 2000, pp. 617-635.
  18. Yang. J.C.S & Tsai.T & Pavlin.V & Chen.J & Tsai.W.H, "Structural damage detection by the system identification technique," Shock Vib., 55, 1985, pp. 57-68.

(접수일자 : 2007년 4월 9일)