

유전 알고리즘을 이용한 트러스 구조물 손상탐지

김형민¹⁾ · 이재홍^{2)*}

¹⁾ 석사과정, 세종대학교, 건축공학과

²⁾ 교수, 세종대학교, 건축공학과 FREE FORM 건축연구소 공학박사

Damage Detection of Truss Structures Using Genetic Algorithm

Kim, Hyung Min¹⁾ Lee, Jae Hong^{2)*}

¹⁾ Graduate Student, Dept. of Architecture Engineering, Sejong University, Seoul, 143-747, Korea

²⁾ Professor, Dept. of Architecture Engineering, Sejong University, Seoul, 143-747, Korea

ABSTRACT : This study identifies the damage detection of truss structures by using genetic algorithm(GA) from changed elements properties. To model the damaged truss structures, the modulus of elasticity of some specific elements is reduced. The analysis of truss structures is performed with static analysis by applying uniform load, and the location and extent of structural damage is detected by comparing the stain of each element of healthy truss structures with damaged truss structures using genetic algorithm. In this study, some numerical examples are presented to detect the location and extent of damage using genetic algorithm.

KEYWORDS : damage detection, genetic algorithm, truss structures, static analysis, strain

1. 서론

건축물에서 구조물의 성능 보호와 안전성 유지는 기본적인 요구사항이다. 그러나 구조물은 사용됨에 있어서 예상치 못한 하중 혹은 특별한 환경 등의 요인들에 의해 구조적인 손상이 발생하게 된다. 이러한 구조적 손상은 구조물 자체의 안전성 저하라는 결과를 발생시키며 경미한 균열발생으로부터 구조물의 붕괴를 발생시킬 수 있는 중대한 손실까지 다양하게 나타날 수 있으며 계속되는 건축물의 초고층화, 대형화에 의해 구조물의 손상에 따른 사고 피해 정도는 시간이 지남에 따라 더욱 커지게 된다. 근래에는 대형 구조물의 노후화 및 일부 구조물의 붕괴 등으로 인해 구조물 안전성 저하에 관해 관심이 집중되고 있으며, 특히 국내의 경우 창선대교(1992년), 성

수대교(1994년), 삼풍백화점(1995년) 사고와 일본의 송전탑 붕괴사고(1998년), 미국 샌프란시스코 오클랜드만 교량붕괴(1984년) 등의 대형 구조물 붕괴와 관련한 안전사고가 연속적으로 발생한 후 도시의 시설물의 점검 및 진단을 의무화하는 특별법을 1995년에 170회 정기국회에서 제정하였다. 이러한 상황에 따라 안전성 확보를 위한 연구가 진행되고 있으며 이는 구조물의 안전성 확보와 효율증진 뿐만 아니라 시대적 요구 사항이기도하다. 구조물의 안전성 확보를 위한 여러 연구들 가운데 구조물의 손상 위치와 정도를 탐지하여 해당 손상 구조물을 복구하는 방법은 구조물의 안전성 향상에 상당히 효과적인방법이다. 이를 위해 구조물 모니터링 방법, 손상탐지 방법, 손상된 구조물의 성능 평가 방법 등에 관한 연구가 활발히 진행 중이며, 이러한 연구들 가운데 손상탐지 방법에 관한 연구는 Kalman filter법, 손상지수(DI, Damage Index)법, 유전 알고리즘(GA, Genetic Algorithm)기법, 인공신경망(ANN, Artificial Neural Network)기법 등을 통하여 진행되고 있다.^{(1),(2),(3),(4)}

본 연구에서는 트러스 구조물의 탄성계수 변화에 따른 손상탐지를 유전 알고리즘을 기반으로 수행하였다. 유전 알고리즘 기반 구조물 손상탐지 방법은 기존의 탐지 기법에 비해

Note.-Discussion open until April 30, 2013. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on August 22, 2011; revised June 12, 2012; approved on September 25, 2012.
© KSSC 2012

* Corresponding author

Tel. +82-2-3408-3331; Fax. +82-2-3408-4331
E-mail: jhlee@sejong.ac.kr

목적함수의 미분 정보가 불필요하다는 장점과 확률적 다점 선택을 이용함으로써 손상탐지의 정확도가 높다는 장점을 가지고 있으며 근래에 활발한 연구^{(5),(6)}가 진행 중이며 국내에서도 연구^{(7),(8)}가 진행 중이다. 구조물의 손상탐지를 수행하기 위하여 수치 해석 모델로 간단한 트러스 구조물을 설계하여 손상되기 전의 트러스 구조물의 구조 해석을 수행하고, 동일 모델에서 특정 부재를 인위적으로 손상을 가한 손상된 트러스 구조물을 구조 해석하여 두 구조물 사이의 물리적 특성 변화를 유전 알고리즘을 기반으로 손상탐지를 수행하여 구조물의 손상 위치와 정도를 예측·확인하였다. 구조물의 특정 부재에 손상이 발생할 경우 해당 부재의 강성에 변화가 생기게 되며 그에 따라 응력·변형률 선도 역시 변화가 발생한다. 이러한 변화는 손상된 구조물의 탄성계수의 변화를 가져오며, 따라서 본 연구에서 트러스 구조물의 손상은 특정 부재의 탄성계수를 인위적으로 감소시키는 방법을 통하여 모델링하였다.

2. 유전 알고리즘 기반의 손상탐지

구조물에 손상이 발생하게 되면 측정된 데이터는 손상 이전 데이터와 차이가 존재하며, 측정된 데이터를 통해 손상된 구조물에 대한 변화를 예측할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 예측 값을 마이크로 유전 알고리즘을 기반으로 구조물의 손상 위치와 정도를 확인하였다.

유전 알고리즘은 Darwin이 주장한 자연 진화의 원리인 적자생존의 원리를 이용하여 진화와 도태를 구현한 알고리즘이다. 따라서 유전 알고리즘은 세대가 지남에 따라 우월한 유전자를 찾아 선택하게 되어있다. 유전 알고리즘 기반의 구조물 손상탐지는 이러한 유전적 최적화 과정과 구조물의 실제 측정결과와 해석모델의 계산 결과를 일치시키는 구조식별(SID, System Identification)과정을 수행하여 구조물 내의 손상 위치와 손상 정도를 탐색하게 된다. 유전 알고리즘은 많은 개체를 운용할수록 원하는 최적의 결과 값을 안정적으로 얻을 수 있으나 개체 수만큼의 시뮬레이션 횟수가 필요하므로 개체 수 증가는 계산 량의 증가로 인하여 원하는 결과를 얻기까지의 시뮬레이션에 상당한 시간이 소요되는 단점을 가지고 있다. 본 연구에서는 이를 보완하기 위하여 Krishnakumar (1989)⁽⁹⁾가 사용한 적은 개체군을 운용하고 설계 변수가 적은 문제에 높은 효율성을 보여주는 마이크로 유전 알고리즘(μ -GA, Micro Genetic Algorithm)을 사용하였다. 일반적인 유전 알고리즘에 비해 마이크로 유전 알고리즘은 비교적 단순한 유전 연산을 사용하여 일반적인 유전 알고리즘에서의 까다로운 매개변수 설정을 피할 수 있으며 적은 수의 개체를 사용함으로써 인하여 개체 증가에 따른 시뮬레이션 시간 감소

의 이점을 얻을 수 있다. 유전 알고리즘을 통해 생성되는 각 세대는 전 세대에서 얻은 엘리트 개체를 보존하며 이 엘리트 개체는 전 세대의 진화의 결과를 나타낸다. 이러한 과정을 반복하며 세대가 넘어가면서 이전보다 우수한 값을 찾게 된다. 또한 본 연구에서는 탐색 유도 방법 중 하나인 무작위 탐색법(Random Search Method)⁽¹⁰⁾을 이용하였다.

본 연구는 일반적으로 구조물 손상탐지에서 구조물의 동적 해석의 결과를 이용하는 연구^{(11),(12),(13)}와 달리 임의의 하중에 의한 구조물의 정적해석의 결과를 통하여 손상탐지를 수행하였다. 부재의 손상은 부재의 축강성의 감소를 표현하기 위하여 각 부재의 탄성계수를 설계변수로 설정하였다. 자체적으로 개발된 트러스 구조물의 구조 해석 프로그램을 통하여 특정 부재에 손상을 입은 트러스 구조물의 구조 해석을 수행하였으며 자체 개발 프로그램의 구조 해석 결과의 검증을 위하여 상용 프로그램인 Midas Gen v6.3.2의 구조 해석 결과와 비교하였다. 구조 해석을 통해 얻은 손상을 입은 트러스 구조물의 변형률을 손상을 입기 전의 트러스 구조물의 데이터에 추가하여 마이크로 유전 알고리즘을 이용하여 손상탐지를 수행하였다. 손상을 입은 트러스 구조물의 변형률과 마이크로 유전 알고리즘을 통하여 시뮬레이션 되는 변형률의 차를 마이크로 유전 알고리즘 내부의 목적함수로 설정하고 목적함수를 최소화하여 변화를 예측하였다. 따라서 마이크로 유전 알고리즘을 이용하여 각 세대가 지남에 따라 손상을 입은 트러스 구조물의 변형률과 동일한 변형률을 갖는 트러스 구조물의 최적 값을 도출하게 된다. 식 (1)로 정의된 목적함수에서 ϵ_i^d 는 손상된 구조물의 i 번 부재에 해당하는 변형률을 나타내며 $\epsilon_i(X)$ 는 유전 알고리즘을 통해 시뮬레이션 되는 i 번 부재에서의 변형률을 나타낸다.

Minimize

$$f(X) = \| (\epsilon_i^d - \epsilon_i(X)) \| \tag{1}$$

트러스 구조물의 구조 해석을 수행할 경우 하중의 위치 혹은 트러스 구조물의 형태 등에 따라 특정 부재의 부재력이 타 부재들에 비해 매우 적은 값을 갖는 경우가 존재하게 되며 따라서 해당 부재의 변형률은 타 부재의 변형률에 비해 매우 적은 값 나타낸다. 마이크로 유전 알고리즘을 통하여 트러스 구조물의 손상탐지를 수행 할 때 트러스 구조물이 해당 경우와 동일할 경우 상대적으로 작은 변형률을 손상된 구조물로 인식하게 되어 구조물 손상탐지가 원활히 이루어지지 않는 경우가 생김을 확인하였으며, 따라서 본 연구에서는 이와 같은 변형률의 차이에 의한 오류를 최소화하기 위하여 트러스 구조물 각 부재의 변형률을 최소의 부재력을 받는 부재

의 변형률로 나눈 뒤 그 역수를 통한 각 부재의 변형률의 비를 목적함수에 추가하였다. 추가된 식은 식 (2)와 같으며 식 (3)과 같이 목적함수를 수정하였다.

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{\epsilon_i}{\epsilon_{\min}}} \quad (2)$$

Minimize

$$f(X) = \| \lambda_i(\epsilon_i^d - \epsilon_i(X)) \| \quad (3)$$

초기의 목적함수인 식 (1)을 식 (3)과 같이 변형시켜 구조물 손상탐지를 수행하였을 경우 이전의 수행 결과에 비하여 오차가 줄어들었음을 확인하였다. 기존의 연구⁽¹⁴⁾에서도 목적함수의 변화에 의한 손상탐지의 정확도의 향상과 시간의 단축이 이루어졌으며, 본 연구에서도 목적함수의 변화를 통하여 트러스 구조물 손상탐지의 정확도가 향상되는 것을 확인하였다.

3. 수치 해석 예제

유전 알고리즘을 이용한 트러스 구조물의 손상탐지를 위하여 본 연구에서는 11-bar 캔틸레버형 트러스 보와 21-bar 단순 지지 트러스 보를 각각 모델링하여 절점에 하중을 부과하여 대조군에서의 탄성계수 변화에 따른 구조물의 정적해석 결과를 바탕으로 구조물의 손상 탐지를 수행하였다. 두 가지의 기본 트러스 구조물 모델은 수치 해석을 위하여 동일한 물성을 가진 부재들을 이용하여 설계하였다. 트러스 구조물의 손상탐지는 손상을 입은 부재에 따른 각각의 손상 시나리오를 설정하여 손상탐지를 수행하여 예측한 손상의 위치와 정도를 마이크로 유전 알고리즘을 기반으로 하여 시뮬레이션 된 결과 값과 비교하였다. 수치 해석 예제에서 목적함수로 식 (1)을 사용한 경우는 $\lambda=1$ 로 설정하여 변형률의 비를 고려하지 않았으며, 목적함수로 식 (3)을 사용한 경우는 λ_i 를 사용하여 변형률의 비를 고려하여 트러스 구조물의 손상탐지를 수행하였다. 각 수치 해석 예제의 결과는 손상의 비율로 나타나도록 설정하였으며 그에 따라 부재에 손상이 없는 경우 그 결과는 0으로 완전히 손상된 경우는 1로 나타나도록 설정하였다.

3.1 11-bar Cantilever Truss

수치 해석 예제로 모델링 된 11-bar 트러스 구조물은 Fig. 1과 같다. 11개의 부재로 이루어진 캔틸레버형 트러스 보의 최외각 상부 절점에 단위 하중 P를 가하여 수치 해석 예제

모델을 설계 하였으며, 손상이 없는 상태의 트러스 구조물은 모든 부재가 동일한 물성을 지니고 있다. 11-bar 캔틸레버형 트러스 보의 수치 해석 예제에서는 최대 인장력을 받는 부재에서의 손상과 최소 부재력을 받는 부재에서의 손상, 최대 인장력과 최대 압축력을 받는 두 부재에서의 동시 손상, 그리고 압축력을 받는 가새 부재에서의 동시 손상을 각각의 손상 시나리오로 설정하여 트러스 구조물의 손상탐지를 수행하였다. 각 부재의 탄성계수 및 Midas Gen 프로그램과 본 연구에서 사용 된 프로그램에서의 변형률의 비교는 Table 1과 같다. 구조 해석 결과 최대 인장력을 받는 부재는 부재 ②이며, 최대 압축력을 받는 부재는 부재 ①, 최소의 부재력을 받는 부재는 부재 ④임을 확인하였다. 설계변수의 범위는 식 (4)와 같다.

$$1 \leq E \leq 100 \text{ Deviation } 1 \quad (4)$$

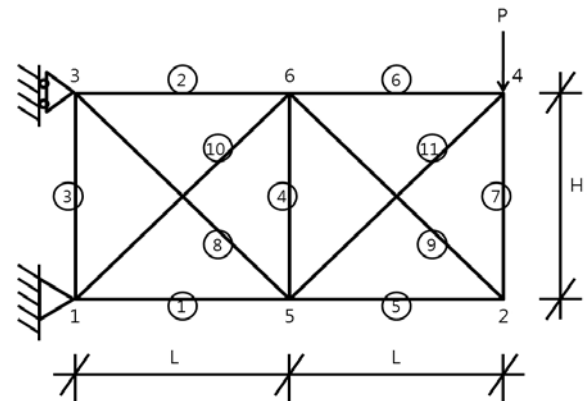


Fig. 1 11-bar Cantilever Truss Model

Table 1. Strain and Modulus of Elasticity at Each Element

부재	탄성계수	Midas Gen	본 연구
1	100	-1.45.E-03	-1.45E-03
2	100	1.55.E-03	1.55E-03
3	100	-4.53.E-04	-4.53E-04
4	100	9.38.E-05	9.84E-05
5	100	-4.53.E-04	-4.42E-04
6	100	5.47.E-04	5.61E-04
7	100	-4.53.E-04	-4.45E-04
8	100	6.41.E-04	6.44E-04
9	100	6.41.E-04	6.50E-04
10	100	-7.73.E-04	-7.70E-04
11	100	-7.73.E-04	-7.63E-04

Table 2. Damage Ratio of Scenario 1

Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ratio식 (1)	0.04	0.49	0.06	0.78	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0	0.04
ratio식 (3)	0.04	0.53	0.02	0.22	0.06	0.04	0.05	0.04	0.05	0.04	0.04
Exact	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Table 3. Damage Ratio of Scenario 2

Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ratio식 (1)	0.04	0.04	0.04	0.32	0	0.04	0	0.04	0.04	0.04	0.04
ratio식 (3)	0.04	0.04	0.04	0.27	0.04	0	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
Exact	0	0	0	0.3	0	0	0	0	0	0	0

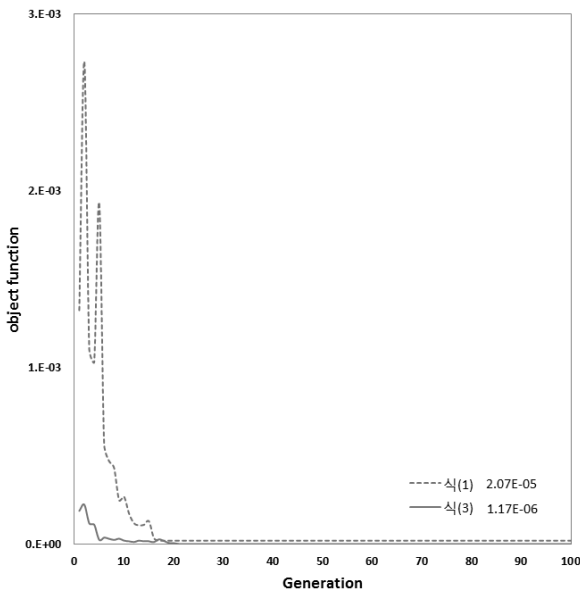


Fig. 2 Convergence Curve of Scenario 1

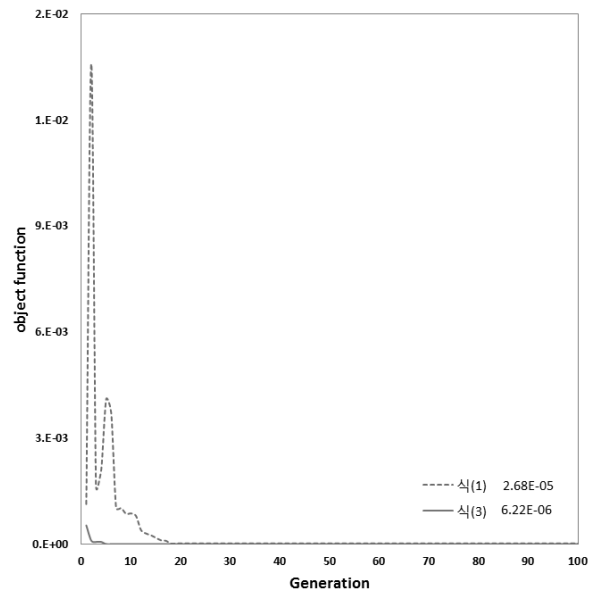


Fig. 3 Convergence Curve of Scenario 2

손상 시나리오 1은 최대 인장력을 받는 부재 ②의 탄성계수를 50% 감소하여 트러스 구조물의 손상탐지를 수행하였으며 손상탐지 결과는 Table 2와 같다. Table의 Exact는 예측된 손상의 정도와 위치이다. 탐지 결과 부재 ②에서 손상을 확인하였다. 또한 앞서 언급했던 것과 동일하게 부재력이 매우 작은 부재 ④로 인하여 손상탐지의 결과에 오차가 존재하는 것이 확인되었다. 이러한 오차는 목적함수를 식 (1)에서 λ_i 를 사용하여 식 (3)로 수정함으로 인하여 이전의 결과를 보완하였으며 수정된 목적함수를 사용함으로 인한 결과의 비교는 부재 ④에서의 손상 정도가 0.78에서 0.22로 확연한 차이가 생긴 것으로 확인할 수 있다. 각 결과의 수렴곡선은 Fig. 2와 같다.

마이크로 유전 알고리즘 내부의 목적함수가 최소화되도록 설정됨에 따라 세대수가 지나면서 0에 가깝게 수렴되고 있으며 λ_i 를 사용한 식 (3)의 수렴정도가 1.17E-06으로 식 (1)의 2.07E-05에 비해 0에 더 가깝게 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

손상 시나리오 2는 최소 부재력을 받는 부재 ④의 탄성계수를 30% 감소하여 트러스 구조물의 손상탐지를 수행하였

다. 최소 부재력을 받는 부재의 경우 손상이 발생할 확률은 적으나 손상이 발생할 경우 타 부재에 비하여 손상으로 인한 변형이 작아 손상 탐지에 어려움이 생길 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 최소 부재력을 받는 부재가 손상된 경우에도 손상 탐지의 정확성을 표현하고자 예제를 수행하였다. 손상탐지 결과는 Table 3과 같다. 부재 ④의 탄성계수를 30% 감소하여 손상탐지를 수행한 결과 30%의 손상 위치와 정도가 부재 ④에서 탐지되는 것을 확인하였다. 손상 시나리오 2의 경우 최소의 부재력을 받는 부재 자체에 손상을 주었기 때문에 λ_i 에 의한 수정 전과 수정 후의 손상탐지 결과가 유사함을 확인하였다. 그러나 Fig. 3과 같이 목적함수를 식 (1)에서 식 (3)으로 수정함으로 인하여 각 결과의 수렴 정도는 식 (1)에서는 4.95E-06, 식 (3)에서는 4.42E-07로 0에 더 근사한 수렴 값을 얻을 수 있었으며 수렴에 걸리는 시간도 단축되는 것을 확인하였다.

손상 시나리오 3은 최대 압축력을 받는 부재 ①의 탄성계수를 30% 감소시켰으며 이와 동시에 최대 인장력을 받는 부재 ②의 탄성계수도 50% 감소시켜 트러스 구조물의 손상탐지를 수행하였다. 손상탐지 결과 Table 4와 같은 결과를

Table 4. Damage Ratio of Scenario 3

Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ratio 식(1)	0.36	0.67	0.14	0.77	0.09	0.04	0.08	0.11	0.04	0.04	0.04
ratio 식(3)	0.36	0.72	0.04	0.19	0.09	0.04	0.08	0.04	0.04	0.05	0.07
Exact	0.3	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Table 5. Damage Ratio of Scenario 4

Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ratio 식(1)	0.04	0	0.06	0.36	0.05	0.04	0.05	0.06	0.05	0.26	0.67
ratio 식(3)	0	0	0	0	0	0	0	0	0.04	0.4	0.69
Exact	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0.5

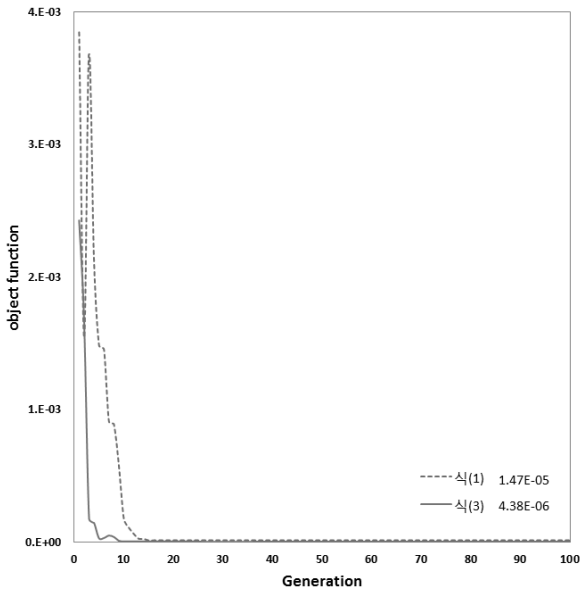


Fig. 4 Convergence Curve of Scenario 3

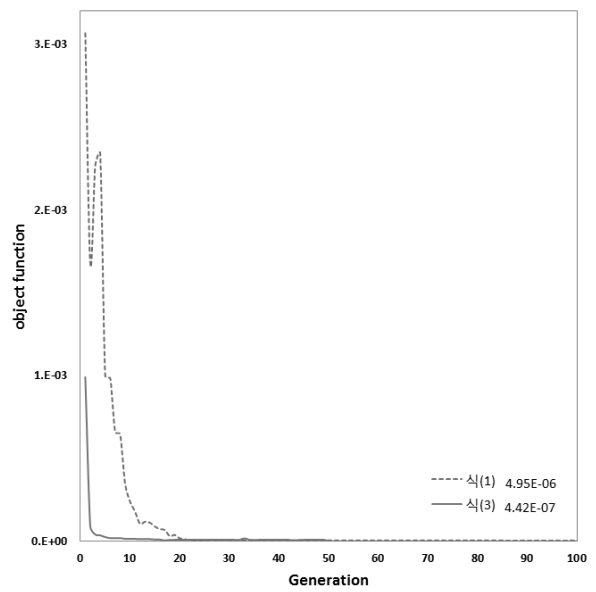


Fig. 5 Convergence Curve of Scenario 4

얻었으며 30%의 손상 위치와 정도가 부재 ①에서 탐지되는 것과 50%의 손상 위치와 정도가 부재 ②에서 탐지되는 것을 확인하였다. 손상 시나리오 3의 경우에도 손상 시나리오 1과 동일하게 최소의 부재력을 받는 부재 ④로 인한 오차가 식 (3)의 λ_i 를 통하여 부재 ④의 손상 정도가 0.77에서 0.19로 이전의 결과를 보완하였음을 확인하였다. 손상 시나리오 3의 수렴 곡선은 Fig. 4와 같으며 수렴 정도가 식 (1)을 사용했을 경우의 $1.47E-05$ 에서 식 (3)을 사용하여 $4.38E-06$ 으로 보완되었음을 확인하였다.

손상 시나리오 4는 트러스 구조물에서 압축력을 받는 두 가새 부재 ⑩과 부재 ⑪의 탄성계수를 각각 30%와 50%로 감소하여 트러스 구조물의 손상탐지를 수행하였다. 손상탐지결과 Table 5의 결과를 얻었으며 30%의 손상 위치와 정도가 부재 ⑩에서 탐지되는 것과 50%의 손상 위치와 정도가 부재 ⑪에서 탐지되는 것을 확인하였다. 손상 시나리오 4의 경우는 λ_i 를 통하여 부재 ⑩과 부재 ⑪을 제외한 대부분의 부재들에서의 결과가 보완된 것을 확인하였으며 최소의 부재력을 받는 부재 ④로 인한 오차 역시 식 (3)의 λ_i 를 통하여 부재 손

상 정도가 0.36에서 0으로 보완되는 것을 확인하였다. 반면 부재 ⑩과 부재 ⑪ 자체의 부재력이 비교적 작은 값을 갖기 때문에 두 부재의 손상 위치의 탐지는 분명하나 손상 정도의 탐지에 약간의 오차가 존재함을 확인하였다. 손상 시나리오 4의 수렴 곡선은 Fig. 5와 같으며 수렴의 정도가 목적함수의 수정에 따라 $4.95E-06$ 에서 $4.42E-07$ 로 보완되는 것을 확인하였다.

3.2 21-bar Simply Supported Truss

수치 해석 예제로 모델링 된 21-bar 단순지지 트러스 보 구조물은 Fig. 6과 같으며 트러스 구조물의 중앙 상부 절점에 단위 하중 P를 가하여 수치 해석 예제 모델을 설계 하였다. 손상이 없는 상태의 트러스 구조물은 11-bar 쉐넬레버형 트러스 보의 수치 해석 예제와 동일하게 모든 부재가 동일한 물성을 지니고 있다. 21-bar 트러스 수치 해석 예제에서는 최대 인장력을 받는 부재에서의 손상과 최대 압축력을 받는 부재에서의 손상, 최소 부재력을 받는 부재에서의 손상, 그리고

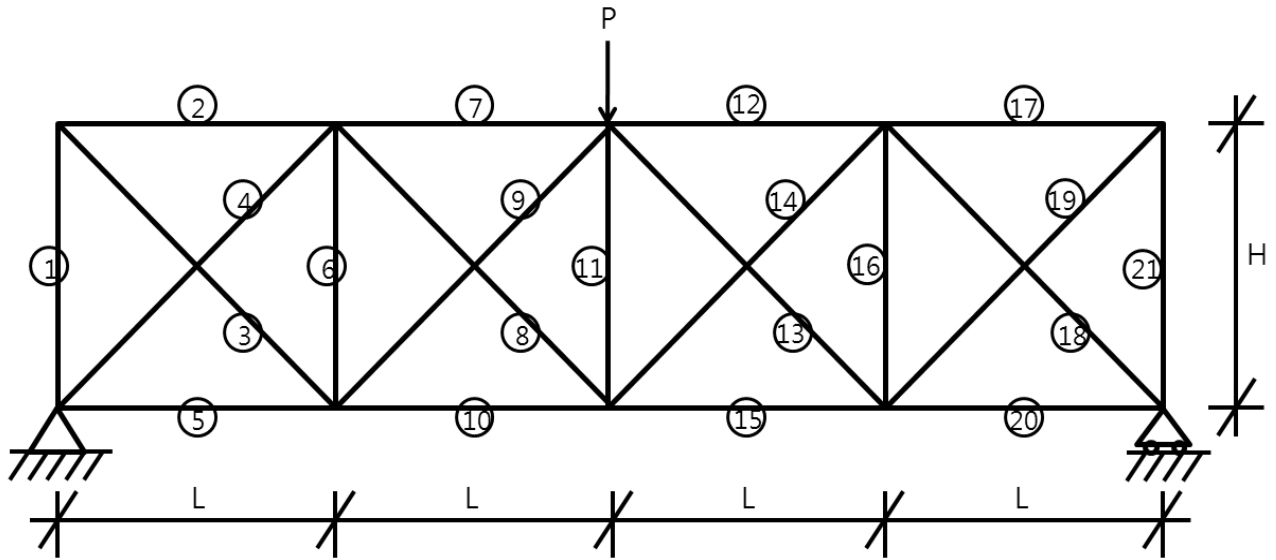


Fig. 6 21-bar Simply Supported Truss Model

최대 인장력과 최대 압축력을 받는 두 부재가 동시에 손상을 받는 경우를 각각의 손상 시나리오로 설정하여 트러스 구조물의 손상탐지를 수행하였다. 트러스 구조물의 형태가 좌우 대칭이며 하중이 중앙부에 가해지므로 구조 해석의 결과 양쪽이 같은 값을 가지게 된다. 이로 인해 본 수치 해석 예제에서는 동일한 부재력을 받는 두 부재에 관하여 좌측에 위치한 부재에만 손상을 가하여 트러스 구조물의 손상탐지를 수행하였다. 11-bar 캔틸레버형 트러스 보의 수치 해석 예제에서 목적함수로 식 (1)과 식 (3)을 사용하여 비교한 것과 달리 21-bar 단순지지 트러스 보의 수치 해석 예제에서는 보완된 결과를 보여주었던 λ_i 를 고려한 식 (3)만을 목적함수로 사용하여 트러스 구조물의 손상탐지를 수행하였다. 각 부재의 탄성계수 및 Midas Gen 프로그램과 본 연구에서 사용된 프로그램에서의 변형률의 비교는 Table 6과 같다. 구조 해석 결과 최대 인장력을 받는 부재는 부재 ⑩과 부재 ⑮이며, 최대 압축력을 받는 부재는 부재 ⑦과 부재 ⑫, 최소의 부재력을 받는 부재는 부재 ⑥과 부재 ⑯임을 확인하였다. 설계변수의 범위는 식 (5)와 동일하다.

$$30 \leq E \leq 100 \quad (5)$$

Deviation 5

손상 시나리오 5는 최대 인장력을 받는 부재 ⑩의 탄성계수를 50% 감소하여 트러스 구조물의 손상탐지를 수행하였으며 손상탐지 결과는 Fig. 7과 같다. Fig. 7의 Exact는 11-bar 캔틸레버형 트러스 보의 수치 해석 예제와 동일하게 예측된

Table 6. Strain and Modulus of Elasticity at Each Element

부재	탄성계수	Midas Gen	본 연구
1	100	-2.29.E-03	-2.30E-03
2	100	-2.29.E-03	-2.27E-03
3	100	3.24.E-03	3.23E-03
4	100	-3.84.E-03	-3.76E-03
5	100	2.71.E-03	2.84E-03
6	100	6.62.E-04	6.38E-04
7	100	-7.05.E-03	-7.02E-03
8	100	2.90.E-03	2.83E-03
9	100	-4.17.E-03	-4.34E-03
10	100	7.95.E-03	8.08E-03
11	100	-4.10.E-03	-4.50E-03
12	100	-7.05.E-03	-7.02E-03
13	100	-4.17.E-03	-4.34E-03
14	100	2.90.E-03	2.83E-03
15	100	7.95.E-03	8.08E-03
16	100	6.62.E-04	6.38E-04
17	100	-2.29.E-03	-2.27E-03
18	100	-3.84.E-03	-3.76E-03
19	100	3.24.E-03	3.23E-03
20	100	2.71.E-03	2.84E-03
21	100	-2.29.E-03	-2.30E-03

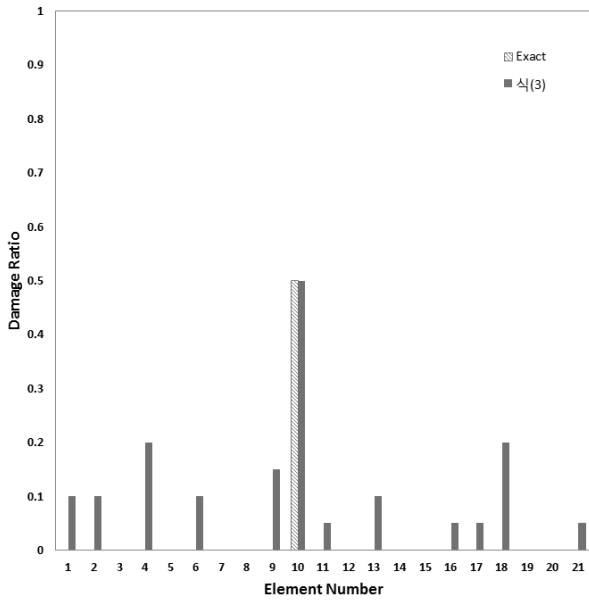


Fig. 7 Damage Ratio of Scenario 5

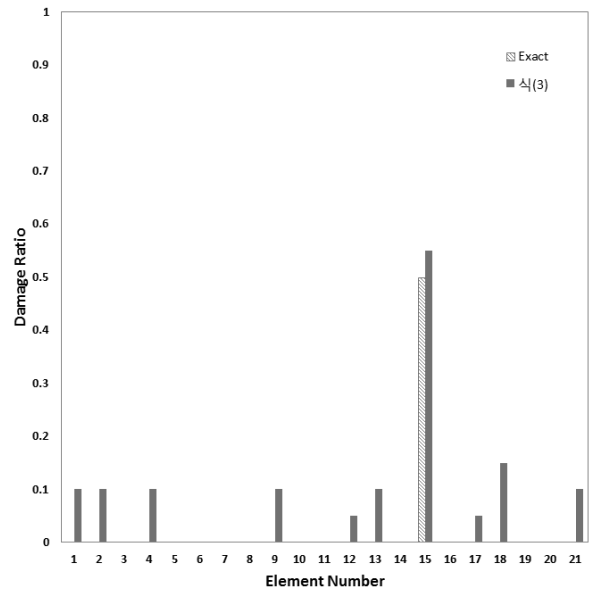


Fig. 9 Damage Ratio of Scenario 6

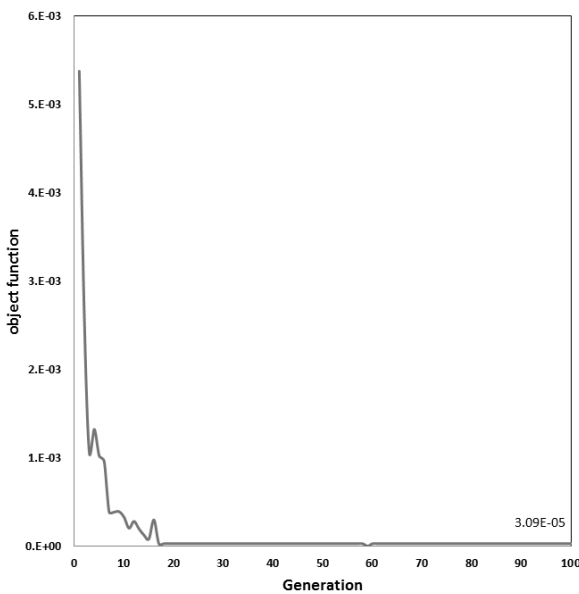


Fig. 8 Convergence Curve of Scenario 5

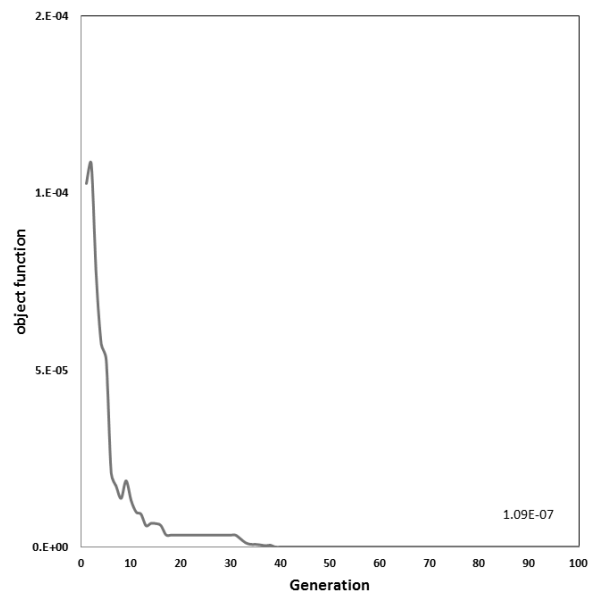


Fig. 10 Convergence Curve of Scenario 6

손상의 정도와 위치를 의미한다. 손상탐지 결과 50%의 손상 위치와 정도가 부재 ⑩에서 탐지되는 것을 확인하였다. 수렴 곡선은 Fig. 8과 동일하며 3.09E-05에서 수렴하는 것을 확인하였다.

손상 시나리오 6은 최대 인장력을 받는 또 다른 부재인 부재 ⑮의 탄성계수를 50% 감소하여 트러스 구조물의 손상탐지를 수행하였다. 손상탐지 결과는 Fig. 9와 같으며 손상탐지 결과 50%의 손상 위치와 정도가 부재 ⑮에서 탐지되는 것을 확인하였다. 수렴곡선은 Fig. 10과 같으며 1.09E-07에서 수렴하는 것을 확인하였다. 손상 시나리오 2를 통하여 좌우

대칭 형태의 21-bar 단순지지 트러스 보 수치 해석 예제에서 좌우에 무관하게 동일하게 손상탐지를 수행하는 것을 확인하였다.

손상 시나리오 7은 최대 압축력을 받는 부재 ⑦의 탄성계수를 50% 감소하여 트러스 구조물의 손상탐지를 수행하였으며 손상탐지 결과는 Fig. 11과 같다. 손상탐지 결과 50%의 손상 위치와 정도가 부재 ⑦에서 탐지되는 것을 확인하였으며 수렴곡선은 Fig. 12와 같으며 2.04E-05에서 수렴하는 것을 확인하였다.

손상 시나리오 8은 최소의 부재력을 받는 부재 ⑥의 탄성

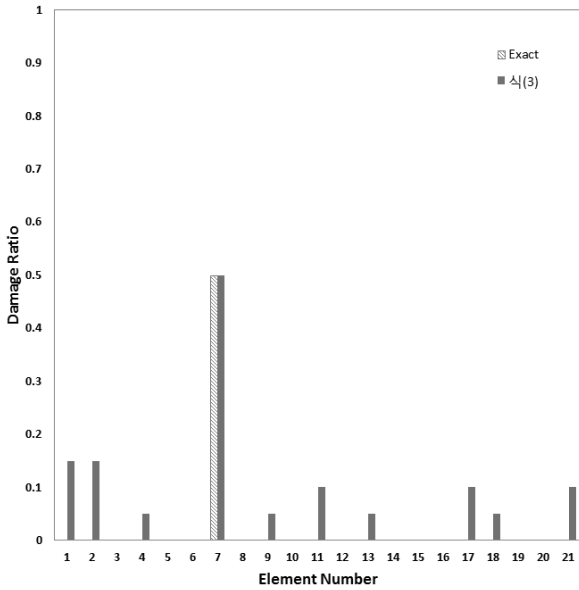


Fig. 11 Damage Ratio of Scenario 7

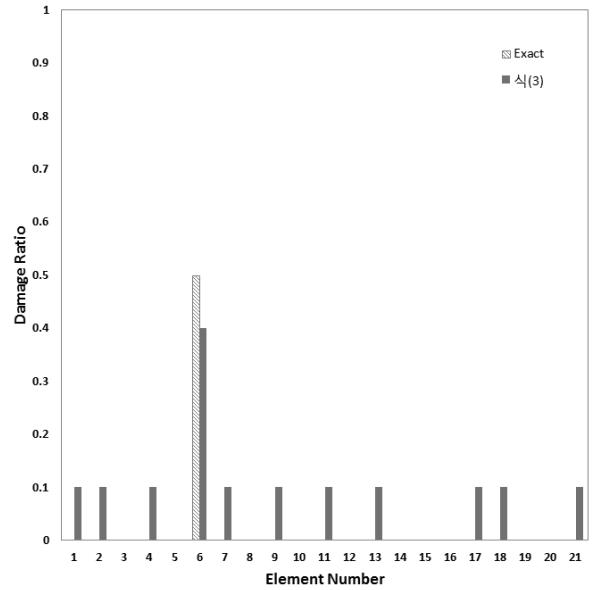


Fig. 13 Damage Ratio of Scenario 8

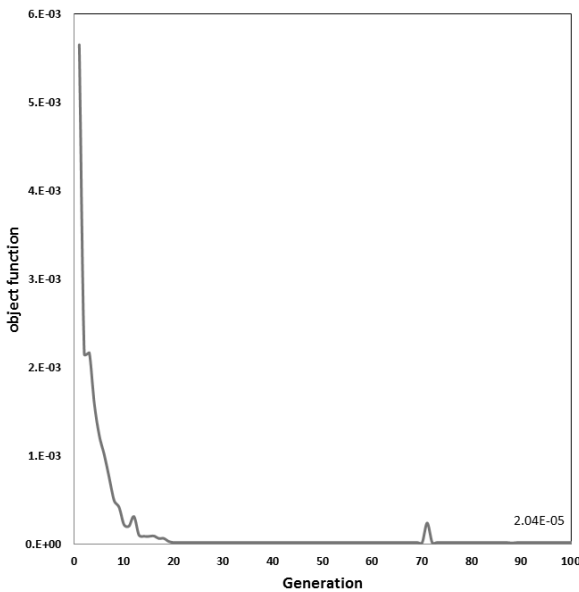


Fig. 12 Convergence Curve of Scenario 7

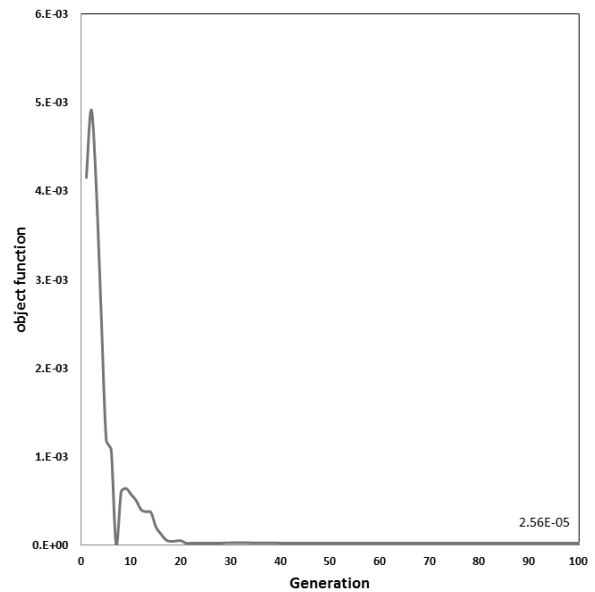


Fig. 14 Convergence Curve of Scenario 8

계수를 50% 감소하여 트러스 구조물의 손상탐지를 수행하였다. 손상탐지 결과는 Fig. 13과 같으며 손상탐지 결과 50%의 손상 위치와 정도가 부재 ⑥에서 탐지되는 것을 확인하였다. 손상 시나리오 8의 수렴곡선은 Fig. 14로 나타나며 2.56E-05에서 수렴하는 것을 확인하였다.

손상 시나리오 9는 최대 압축력을 받는 부재 ⑦과 최대 인장력을 받는 부재 ⑩의 탄성계수를 각각 50% 감소하여 트러스 구조물의 손상탐지를 수행하였으며 손상탐지 결과는 Fig. 15와 같다. 손상탐지 결과 50%의 손상 위치와 정도가 부재 ⑦과 부재 ⑩에서 탐지되는 것을 확인하였다. 수렴곡선은

Fig. 16과 같으며 9.73E-06에서 수렴하는 것을 확인하였다.

4. 결론

건축물의 안전성은 건축 분야의 다른 여러 분야보다도 가장 기본이 되어야 할 사항이며 지속적으로 유지해야 할 가장 중요한 부분이기도 하다. 이러한 건축물의 안전성을 위하여 구조물의 손상 확인과 그에 대해 예측은 지속적으로 연구되어야 할 부분이다. 본 연구에서 진행하고 있는 손상탐지 역시 이러한 건축물의 안전성을 위함이며 현재 국내외에서 활발히

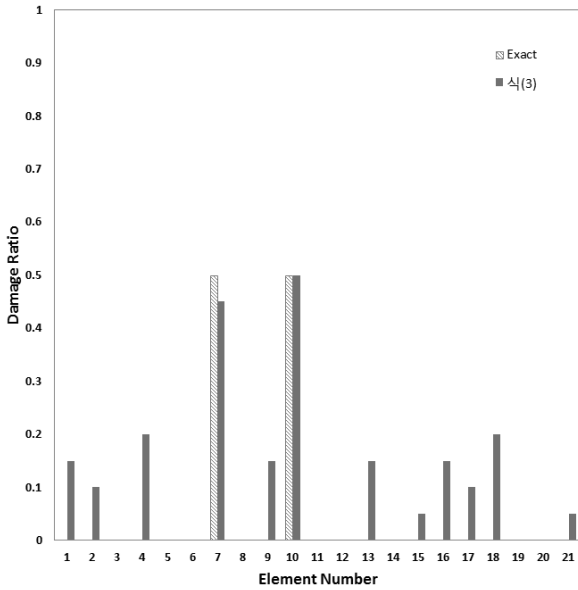


Fig. 15 Damage Ratio of Scenario 9

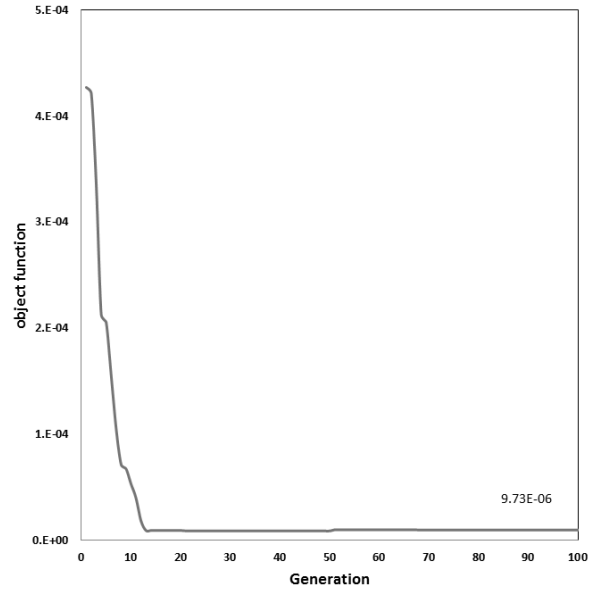


Fig. 16 Convergence Curve of Scenario 9

진행되고 있는 부분이다. 본 연구에서는 구조물 손상탐지 기법 중 확률적 다점탐색을 통하여 최적의 결과를 도출하는 유전 알고리즘을 기반으로 트러스 구조물의 손상탐지를 수행하였으며 일반적인 유전 알고리즘에서 보완된 마이크로 유전 알고리즘을 사용하여 구조물의 손상 위치와 정도를 탐지하였다. 본 연구를 위하여 수치 해석 예제로 11-bar 켄틸레버형 트러스 보와 21-bar 단순지지 트러스 보를 각각 모델링하여 특정 절점에 가해지는 하중에 관한 정적 해석을 기반으로 손상 전의 트러스 구조물과 특정 부재의 탄성계수의 감소로 인한 인위적인 손상을 가한 트러스 구조물의 각 부재의 변형률의 차이를 통하여 트러스 구조물의 손상탐지를 수행하였다. 손상이 가해지는 부재에 따라 각각의 손상 시나리오를 설정하여 트러스 구조물의 손상탐지를 수행하였고, 목적함수를 수정하여 각각의 손상탐지 결과를 비교 분석하였다. 본 연구의 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 연구에서는 11-bar 켄틸레버형 트러스 보와 21-bar 단순지지 트러스 보를 수치 해석 예제로 각각 모델링 하여 임의의 부재의 탄성계수를 감소시킨 후 마이크로 유전 알고리즘을 통해 트러스 구조물의 손상탐지를 수행 하였을 때 예측 값과 유사한 손상의 위치와 정도가 탐지되었음을 확인하였다.

(2) 특정 하중에 대한 트러스 구조물의 정적 해석 결과 특정 부재의 변형률이 타 부재들에 비해 매우 적은 값을 갖는 경우 손상 탐지에 영향을 미치게 되어 구조물 손상탐지가 원활히 이루어지지 않는 경우가 나타남을 확인하였다. 본 연구에서는 이와 같은 변형률의 차이에 의한 오류를 목적함수의

수정을 통하여 트러스 구조물의 손상탐지 정확도를 향상시켰으며, 0에 더 근접한 결과를 보다 이른 시간에 수렴하는 것을 확인하였다.

(3) 본 연구는 구조물의 정적해석만을 고려하여 구조물의 손상탐지를 수행하였으나 정적해석의 경우 동적해석에 비하여 세밀한 손상탐지에 한계가 있음을 확인하였다. 또한 트러스 구조물의 부재 수가 늘어나며 복잡한 형태의 구조물일수록 손상탐지의 정확도가 낮아지는 것을 확인하였다.

(4) 추후 연구에는 동적해석을 고려한 트러스 구조물의 손상탐지와 목적함수의 수정을 통하여 보다 정확한 손상탐지를 위한 연구와 복잡한 형태의 구조물에 대한 연구가 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 논문은 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 IT융합 고급인력과정 지원 사업(NIPA-2011-C6150-1101-0003)과 교육과학기술부 재원으로 한국연구재단의 기초연구실 육성사업(BRL, NRF2011-0027949)의 지원으로 이루어졌습니다.

참고 문헌

[1] Wang, X., Hu, N., Fukunaga, H., and Yao, Z.H. (2001) Structural damage identification using static test data and changes in frequencies, *Engineering Structures*, Vol. 23, Issue. 6, pp.610-621.

- [2] Yan, Y.J., Cheng, L., Wu, Z.Y., and Yam, L.H. (2007) Development in vibration-based structural damage detection technique, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 21, Issue. 5, pp.2198-2211.
- [3] Mehrjoo, M., Khaji, N., Moharrami, H., and A. Bahreininejad (2008) Damage detection of truss bridge joints using artificial neural networks, *Expert Systems with Applications*, Vol. 35, Issue. 3, pp.1122-1131.
- [4] 은희창, 정창용(2010) 추정된 물리적 특성변화에 의한 구조물의 손상탐지에 관한 연구, *대한건축학회 논문집*, 대한건축학회, 제26권, 제4호, pp.13-20.
Eun, H.C. and Chung, C.Y. (2010) Damage detection of structures based on estimated physical characteristic changes, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 26, No. 4, pp.13-20 (in Korean).
- [5] Chou, J.H. and Ghaboussi, J. (2001) Genetic algorithm in structural damage detection, *Computers & Structures*, Vol. 79, Issue. 14, pp.1335-1353.
- [6] Gomes, H.M. and Silva, N.R.S. (2008) Some comparisons for damage detection on structures using genetic algorithms and modal sensitivity method, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 32, Issue. 11, pp.2216-2232.
- [7] 최일윤, 조효남(2002) 정적변위를 이용한 교량의 손상도 평가기법, *한국강구조학회 논문집*, 한국강구조학회, 제14권, 제5호, pp.641-646.
Choi, I.Y. and Cho, H.N. (2002) A damage assessment technique for bridges using static displacements, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 14, No. 5, pp.641-646, (in Korean).
- [8] 박재형, 류연선, 이진학(2006) 고유진동수와 모드변형에
너지를 이용한 향상된 유전알고리즘 기반 손상검색기법, *한국전산구조공학회논문집*, 한국전산구조공학회, 제19권, 제723호, pp.313-322.
Park, J.H., Kim, J.T., Ryu, Y.S., and Yi, J.H. (2006) Improved genetic algorithm-based damage detection technique using natural frequency and modal strain energy, *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol. 19, No. 723, pp.313-322 (in Korean).
- [9] Krishnakumar, K. (1989) Micro-genetic algorithm for stationary and non-stationary function optimization, *SPIE, Intelligent Control and Adaptive Systems*, Vol. 11, No. 96, pp.282-296.
- [10] 진강규(2004) 유전 알고리즘과 그 응용, 교우사.
Jin, G.G. (2004) *Genetic algorithms and their applications*. Kyowoosa (in Korean).
- [11] Rao, M.A., Srinivas, J., and Murthy, B.S.N. (2004) Damage detection in vibrating bodies using genetic algorithms, *Computers & Structures*, Vol. 82, Issue. 11-12, pp.963-968.
- [12] Ge, M. and Lui, E.H. (2005) Structural damage identification using system dynamic properties, *Computers & Structures*, Vol. 83, Issue. 27, pp.2185-2196.
- [13] Marano, G.C. (2011) Modified genetic algorithm for the dynamic identification of structural systems using incomplete measurements, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 26, pp.92-110.
- [14] Nobahari, M. and Seyedpoor, S.M. (2010) Structural damage detection using an efficient correlation-based index and a modified genetic algorithm, *Mathematical and Computer Modelling*, Vol. 53, Issues. 9-10, pp.1798-1809.

요 약 : 본 연구에서는 유전 알고리즘(GA, Genetic Algorithm)을 이용하여 트러스 구조물에서 부재의 특성변화에 의한 손상탐지를 확인하였다. 구조물의 손상 탐지를 위하여 트러스 구조물을 모델링하여 특정 부재의 탄성계수를 감소시킴으로써 구조물의 손상을 결정하였다. 트러스 구조물의 해석은 특정 하중이 가하여졌을 경우의 정적 해석을 통하여 수행하였으며, 구조물의 손상 위치와 정도는 손상을 입기 전의 구조물과 손상을 입은 구조물의 각 부재 변형률의 차이를 마이크로 유전 알고리즘을 통하여 비교·분석하여 탐지하였다. 본 연구에서는 트러스 구조물의 수치 해석 예제를 모델링하여 마이크로 유전 알고리즘을 이용하여 손상 탐지를 수행하였으며, 이를 통하여 구조물의 손상 위치와 정도가 탐지되는 것을 확인하였다.

핵심용어 : 손상탐지, 유전 알고리즘, 트러스 구조물, 정적해석, 변형률