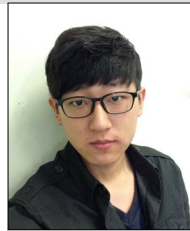


트러스 구조의 손상탐지를 위한 하중법 기반의 개선된 해석기법개발

Development of Damage Detection for
Trusses Based on Force Method



김 영 응*



김 남 일**



이 재 흥***

*세종대학교 건축공학과 석사과정
**세종대학교 건축공학과 연구교수
***세종대학교 건축공학과 교수

1. 서 론

모든 건축 및 토목 구조물들은 그 수명이 다할 때까지 수많은 부재손상을 경험한다. 구조물의 중요 부재에 발생하는 손상은 구조물의 성능 저하라는 결과를 야기하며, 손상 정도에 따라 구조물의 균열, 붕괴 등의 중대한 손실까지 발생할 수 있다. 또한 건축 및 토목 구조물의 초고층화, 대공간화 및 장경간화 등 구조물의 대형화는 구조적 안전성에 대한 수요를 더욱 높였으며 손상된 구조물의 관리 및 보수에 대한 관심도 발생시켰다. 이러한 수요와 추세에 따라 구조물의 안전성 확보를 목표로 한 연구들이 진행되고 있으며, 구조물 모니터링 방법, 손상된 구조물의 성능평가 방법, 손상탐지 방법 등 다양한 방법의 연구가 활발히 진행되고 있다.

Aktan⁽¹⁾ 등은 구조물의 건전성 모니터링(Health Monitoring)이란 구조물의 운영 및 하중 환경을 측정하거나, 혹은 구조물의 원활한 작동, 사용성, 안전/신뢰성 등에 영향을 줄 수 있는 갑작스러운 사고, 이상, 노후 및 손상 등의 징후를 탐지하고 평가할 수 있는 중요한 응답을 측정하는 것이라고 정의하였다. 구조 건전성 모니터링은 구조물의 운영 상태 및 측정의 목적과 범위를 설정, 측정할 매개 변수와 센서의

종류·위치·개수 등을 결정, 구조물의 특성 값 추출 및 압축, 통계적 모델 구축의 4단계로 구분할 수 있다. 여기서 마지막 단계인 통계적 모델 구축이란, 세 번째 단계에서 추출한 특성 값을 이용하여 손상 정도를 파악할 수 있는 알고리즘을 구축하는 것을 말한다. 통계적 모델 구축은 크게 지도학습(supervised learning)과 자율학습(unsupervised learning)으로 나눌 수 있다⁽²⁾. 자율학습의 경우는 손상을 입은 구조물의 특성 값만을 이용하기 때문에 손상의 정도를 단계별로 파악하는데 있어 한계가 있다. 만일 구조물의 건전상태 및 손상상태 모두의 특성 값을 알 수 있다면, 지도학습방법을 사용하여 더욱 고차원적인 알고리즘을 구축할 수 있다. 자율학습은 Control Chart Analysis, Outlier Detection, Neural Networks, Hypothesis Testing 등으로 구분할 수 있으며, 지도학습의 경우는 Response Surface Analysis, Fisher's Discriminant, Neural Networks, Genetic Algorithms, Support Vector Machines 등으로 구분할 수 있다⁽²⁾.

본 학술기사에서는 트러스 구조물의 손상탐지(damage detection)에 관한 개선된 해석기법을 제시하고자 한다. 앞서 말한 구조 건전성 모니터링의 단계에서 통계적 모델 구축에 해당하며, 건전상태 및 손상상태 모두의 특성 값을 사용하는 지도학습방법으로 분류할 수 있다. 손상을 입은 구

조물은 고유의 특성이 변화하는데, 건전상태와 손상상태의 이러한 특성 값을 비교하여 구조물의 손상 여부 및 그 정도를 파악하는 연구는 많은 연구자에 의해 진행되어 왔다. 구조물의 특성 값을 구하는 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 동적하중에 대한 응답을 사용한 동적 추정 기법(dynamic identification methods)과 정적 추정 기법(static identification methods)이 그것이다^(3,4). 동적 추정 기법은 구조물의 질량(mass), 강성(stiffness), 제동장치의 특성(damping properties) 등을 요하지만 정적 추정 기법은 구조물의 강성만을 요하는 특징이 있다. 다양한 매개 변수가 손상 탐지의 결과에 영향을 미치므로, 어떠한 매개 변수를 선택하느냐가 중요한 문제가 되었다. Doebling 등⁽⁵⁾은 동적 추정 기법에 사용하는 동적 매개 변수를 분류하여 각각의 문헌 검토를 수행하였다. 매개 변수는 고유 진동수, 모드 형상, 모드 형상 곡률, 모드 유연도, 동적 변형 에너지 등으로 구분하였다.

한 편 최적화법은 도함수에 기초한 방법(Derivative-Based Method)와 도함수에 기초하지 않는 방법(Derivative-Free Method)으로 분류될 수 있다. 전자의 대표적인 예가 구배법

(Gradient Method)이고, 뉴턴법(Newton's Method), 공역구배법(Conjugate Gradient Method) 등도 여기에 속한다. 실제 많은 응용문제에서는 해석적으로 도함수를 얻는 것이 어렵고, 수치적 계산이 가능하다해도 많은 연산시간을 필요로 하고 부정확성이 높아진다. 도함수에 기초한 방법을 제외한 나머지 방법들은 단체법(Simple Method), 무작위 탐색(Random Search), 유전 알고리즘(Genetic Algorithm) 등이 있다.

기존 변위법 기반의 동적해석을 통한 구조물의 손상탐지는 구조물의 각 고유진동수와 그에 상응하는 진동모드형상을 변수로 목적함수를 설정하였으나, 실제상황에서 구조물의 진동모드형상을 측정하는 것이 매우 어렵다는 단점이 있다. 이러한 문제점에 착안하여 진동모드형상보다 측정이 더 용이한 부재력을 변수로 하는 새로운 목적함수를 제시한다. 따라서 본 학술기사에서 유전 알고리즘(Genetic Algorithm)과 하중법기반의 자유진동해석을 통한 손상탐지 방법을 소개한다. 먼저 자유진동해석을 위한 하중법의 식을 도출하여 각 고유진동수와 그에 상응하는 각 부재의 부재력을 구한다. 이후 고유진동수와 부재력을 변수로 하는 유전 알고리즘의 목적함수를 각각 설정하고, 두 개의 목적함수를 다시 하나의 목적함수로 설정하였다.



그림 1 구조물의 부재 손상



그림 2 부재 손상에 따른 구조물의 붕괴

2. 하중법 기반의 자유진동해석

먼저 하중법 기반의 정적 해석 모델은 다음과 같다.

$$\bar{A}\bar{f} = \bar{p} \quad (1)$$

여기서 \bar{A} 는 구조물의 일반화된 평형행렬이며 \bar{f} 와 \bar{p} 는 각각 부재력 벡터와 외부하중 벡터이다. 구조물이 D 차원에서 n 개의 자유도를 가지고, m 개의 부재수와 c 개의 경계제약을 가질 때, \bar{f} 와 \bar{p} 는 각각 $[(m+c) \times 1]$ 와 $[D(n+c) \times 1]$ 의 크기를 갖는 열벡터가 된다. 또한 각 부재의 변형 벡터 e 와 각 자유절점의 변위 벡터 d 는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$e = Bd \quad (2)$$

다음으로 외부에서 한 일과 내부의 변형에너지가 같음을 이용하여 식 (3)과 같이 표현할 수 있으며 식 (1)을 식 (3)에 대입하여 식 (4)를 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{2} \bar{p}^T d = \frac{1}{2} \bar{f}^T e \quad (3)$$

$$\bar{f}^T \bar{A}^T d = \bar{f}^T B d \quad (4)$$

식 (4)에서 볼 수 있듯이 $B = \bar{A}^T$ 의 관계를 가지기 때문에 식 (2)는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$e = \bar{A}^T d \quad (5)$$

식 (5)에서 \bar{A} 행렬을 Singular Value Decomposition을 활용하여 정사각행렬로 확장하면 $[(m+c) \times (m+c)]$ 의 크기를 갖는 행렬 \tilde{A} 로 나타낼 수 있다⁽⁶⁾. 행렬 \tilde{A} 를 이용하여 자유진동해석을 위한 운동방정식을 표현하면 다음과 같다.

$$\bar{M} \ddot{d} + \tilde{A} \bar{f} = 0 \quad (6)$$

여기서 \ddot{d} 는 각 절점의 가속벡터이고, $[(m+c) \times (m+c)]$ 의 크기로 확장한 질량행렬 \bar{M} 은 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{M} = \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

식 (2), 식 (5), 식 (6)을 활용하여 고유치 문제를 만들면 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$(\tilde{A} - \omega^2 \bar{B}) \bar{F} = 0 \quad (8)$$

$$\bar{B} = \bar{M} \bar{A}^{-T} G \quad (9)$$

여기서 ω 와 \bar{F} 는 각각 고유진동수와 각 부재의 부재력을 나타내는 벡터이고, G 행렬은 유연도행렬이다.

3. 최적화 기법

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 계측결과와 해석모델의 계산 결과를 일치시키는 구조식별과정을 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 얻기까지

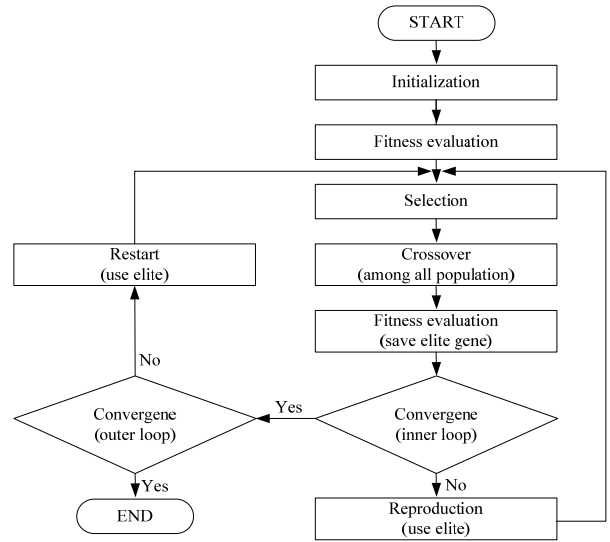


그림 3 마이크로 유전 알고리즘의 순서도

의 시뮬레이션에 상당한 시간이 소요되는 단점을 가지고 있다. 본 기사에서는 Krishnakumar⁽⁷⁾가 사용한 적은 개체군을 운용하고 설계 변수가 적은 문제에 높은 효율성을 보여주는 마이크로 유전 알고리즘을 소개한다. 일반적인 유전 알고리즘에 비해 마이크로 유전 알고리즘은 비교적 단순한 유전 연산을 사용하여 일반적인 유전 알고리즘에서의 까다로운 매개변수 설정을 피할 수 있으며 적은 수의 개체를 사용함으로 인하여 개체 증가에 따른 시뮬레이션 시간 감소의 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.

그림 3은 마이크로 유전 알고리즘의 순서도를 나타낸다. 먼저 구조물의 기하학적 형상 및 물성치를 입력한 후 설계 변수 및 후보군의 범위 등을 설정하며 다음과 같은 해석 절차를 따른다.

Step.1 : 설계변수로 이어진 이진 스트링에 랜덤함수를 이용하여 0과 1의 스트링을 생성하며 가용역의 해를 보장하기 위하여 가장 큰 부재만을 갖는 개체를 하나 삽입한다. 유전알고리즘의 계산량을 감소시키기 위해 10개 내외의 개체군을 생성한다.

Step.2 : 최초 생성된 개체들의 수렴성 여부를 검토하여 내부루프와 외부루프 중 수행할 루프를 결정한다. 수렴성 검토 결과, 해의 개선 없이 수렴조건을 만족하면 내부루프

를 종료하고 외부루프의 조건을 검토한다. 외부루프의 종료조건을 만족하지 못하면 재시동한다. 이 때 우수 개체 이외의 새로운 개체는 랜덤함수를 이용, 생성하여 개체의 탐색영역을 광범위하게 한다.

Step.3 : 개체의 적합도를 평가한다. 이 때, 유전알고리즘은 적응도가 높은 개체를 존속시킴으로 최소화 목적함수를 다음과 같은 최대화 함수로 변형시켜 적합도를 평가한다.

$$F(X) = N_0 - \{obj(X) + penalty(X)\} \quad (10)$$

일반적으로 구조물에서 손상되지 않은 부재의 수는 손상된 부재의 수보다 크다. 이 점을 이용하여 패널티 함수를 정의하면 다음과 같다.

$$penalty(X) = (n_{da} - n_{hc})^2 \quad (11)$$

여기서 n_{da} 와 n_{hc} 는 각각 손상된 부재의 수와 건전상태의 부재수이다.

Step.4 : 적합도 평가를 기반으로 교배할 개체를 선택하여 교배연산을 수행한다. Krishnakumar⁽⁷⁾가 최초로 제안한 마이크로 유전알고리즘에는 일점 교배를 수행하도록 되어 있으나, 본 학술기사에서는 이점 교배를 사용하여 보다 효율적인 디자인영역의 탐색효과를 얻을 수 있도록 하였다.

Step.5 : 교배를 통해 새롭게 생성된 개체에 엘리트 개체를 포함시켜 수렴성을 검사한다. 내부루프의 수렴 조건을 만족하지 못하면 동일한 내부 마이크로 유전알고리즘을 수행하고, 내부루프의 종료 조건을 만족하면 외부루프의 종료조건을 검사하여 이를 만족하면 알고리즘을 종료하고 그렇지 못하면 재시동한다.

Step.6 : 재시동 시에는 우수 개체를 제외한 나머지 개체들을 랜덤함수를 이용하여 새롭게 구성하게 되며 우수 개체는 지난 세대의 진화의 결과를 나타내며 새롭게 생성된 개체는 개체군에 새로운 형질을 부여하여 다양한 탐색을 가능하게 하는 작용을 한다.

본 기사에서는 손상된 구조물과 건전한 구조물 각각의 고유진동수와 그에 상응하는 부재력을 이용하여 목적함수를 구성하였으며 고유진동수를 이용한 첫 번째 목적함수는 다음과 같다.

$$obj1(X) = \sum_{i=1}^3 \frac{|\omega_{di} - \omega_i(X)|}{\omega_{di}} \quad (12)$$

여기서 ω_{di} 는 손상된 구조물의 i 번째 고유진동수를 나타내고 $\omega_i(X)$ 는 마이크로 유전알고리즘을 통하여 도출되는 구조물의 i 번째 고유진동수를 나타낸다. 각 부재의 부재력을 이용한 두 번째 목적함수는 다음과 같다.

$$obj2(X) = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^m \frac{\|\Phi_{dj}^i - \Phi_j^i(X)\|}{\|\Phi_{dj}^i\|} \quad (13)$$

여기서 Φ_{dj}^i 와 $\Phi_j^i(X)$ 는 각각 손상된 구조물의 i 번째 고유진동수에 대응하는 j 번째 부재의 부재력과 마이크로 유전알고리즘을 통해 도출되는 i 번째 고유진동수에 대응하는 j 번째 부재의 부재력이다. 구조물에서 1개 이상의 손상부재를 좀 더 효율적이고 정확하게 찾기 위해, $obj1$ 과 $obj2$ 를 결합하여 최종적인 목적함수를 도출하면 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$Minimize : obj(X) = obj1(X) + obj2(X) \quad (14)$$

4. 수치해석예제

본 기사에서 제시한 알고리즘 및 목적함수의 정확성을 입증하기 위해 그림 4와 같은 트러스를 고려하였다. 트러스는 14개의 절점과 31개의 부재로 이루어져 있으며, 모든 부재의 단면적은 $A = 0.01 \text{ m}^2$, 밀도는 $\rho = 2770 \text{ kg/m}^3$, 탄성계수는 70 GPa 이다. 본 예제에서는 각 부재의 탄성계수를 설계변수로 설정하였으며, 손상상태의 구조물은 특정 부재의

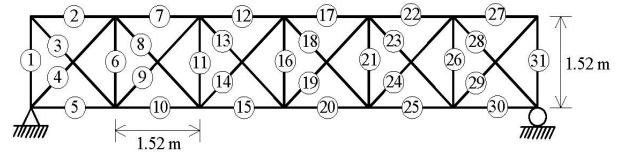


그림 4 트러스 형상

표 1 손상시나리오에 따른 손상 부재위치 및 손상 정도

시나리오 1		시나리오 2	
손상부재	손상비율	손상부재	손상비율
8	0.2	2	0.3
26	0.4	8	0.4
		19	0.2

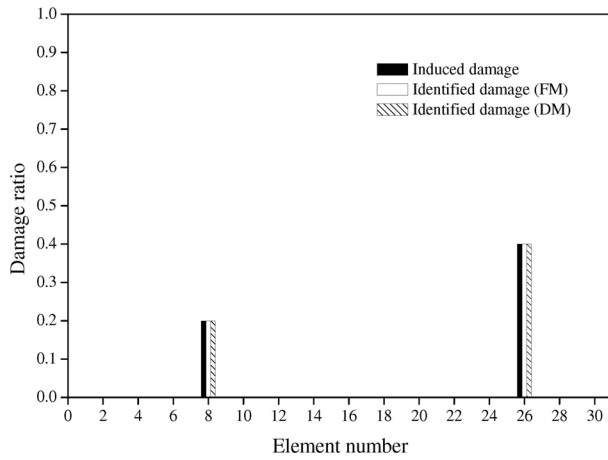


그림 5 시나리오 1의 손상탐지 결과

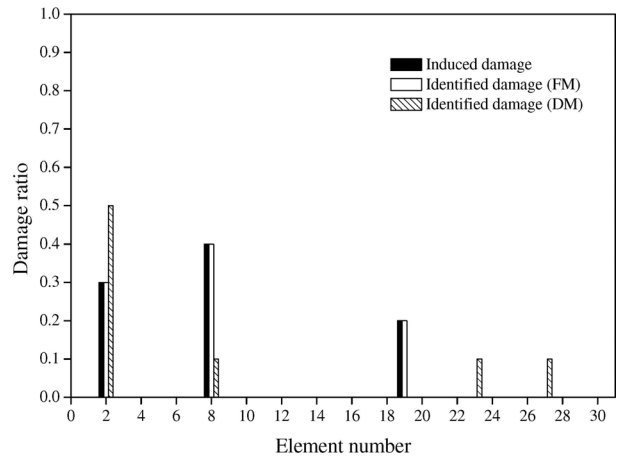


그림 7 시나리오 2의 손상탐지 결과

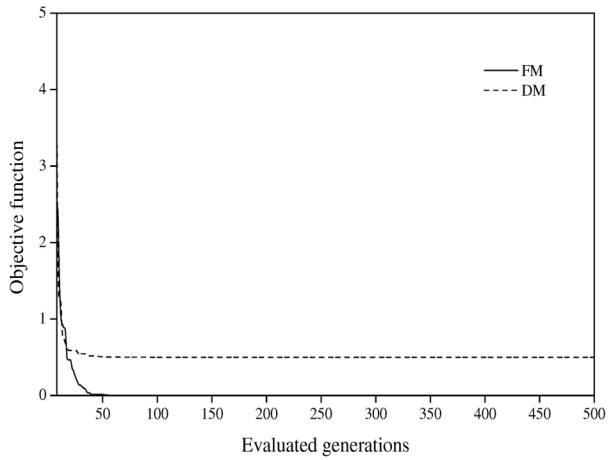


그림 6 시나리오 1의 손상탐지 수렴 곡선

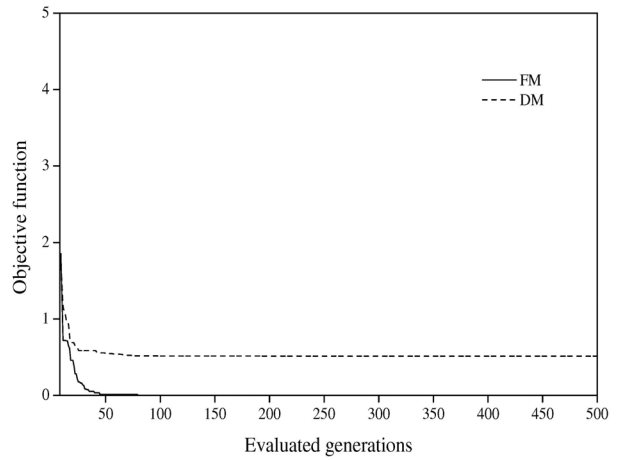


그림 8 시나리오 2의 손상탐지 수렴곡선

탄성계수의 인위적인 감소를 통하여 설계하였다. 또한 손상 비율은 0부터 1까지의 비로 나타내어 건전상태의 경우에는 0, 완전한 부재의 파괴 상태는 1로 표현하였다. 또한 마이크로 유전알고리즘에서의 개체수는 700, 세대수는 500으로 설정하였다. 손상시나리오 2는 2개의 손상부재와 3개의 손상부재 총 2가지의 경우를 가정하였으며, 손상부재의 위치와 그 정도는 표 1과 같다.

본 기사에서 제시하는 하중법(Force Method, FM) 기반 손상탐지의 효율성 및 정확성을 보여주기 위해서 변위법(Displacement Method, DM)과 비교를 하였다. 두 가지 방법 모두 같은 방법의 목적함수와 마이크로 유전알고리즘을 통해 손상탐지를 진행하였으며, 시나리오 1의 결과는 그림 5와 그림 6과 같다. 그림 5를 보면 하중법과 변위법 모두 손상된 부재의 위치를 찾는 것을 알 수 있다. 하지만 두 가지 방법의 수렴성은 그림 6에서 보이는 바와 같이 확연한 차

이가 있다는 것을 알 수 있다. 시나리오 2의 손상부재와 그 정도를 가지고 해석을 하면 그림 7-8과 같은 결과를 얻을 수 있다.

시나리오 1과 시나리오 2의 손상탐지 결과를 보면, 손상된 부재의 수가 다양해지면 하중법이 변위법보다 더 정확하고 수렴정도가 우수한 것을 확인할 수 있다. 또한 변위법을 통해 구해지는 진동모드형상은 실제 건축물에서 측정이 어렵고, 진동모드형상의 측정이 가능하다고 가정해도 하중법을 활용한 손상탐지보다 그 효율성과 정확성이 떨어짐을 알 수 있다.

5. 결론

본 학술기사에서는 하중법과 마이크로 유전알고리즘을 활용하여 트러스 구조물의 손상탐지를 수행하였으며, 변위

법과의 비교를 통하여 제시된 손상탐지 방법의 정확성 및 수렴성을 확인하였다. 또한, 실제 측정이 힘든 진동모드형상 대신 부재의 부재력 자체를 기반으로 진행하였기 때문에 변위법에 비해 현실 적용가능성이 높음을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. Aktan, A.E., Catbas, F.N., Grimmelman, K.A., Tsikos, C.J. (2000). "Issues in infrastructure health monitoring for management", *Journal of Engineering Mechanics, ASCE* 126, 771-774.
2. Shon, H., Farrar, C.R., Hemez, F.M., Shunk, D.D., Stinemas, D.W., Nadler, B.R., Czarnecki, J.J. (1996). "A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996-2001", Los Alamos National Laboratory report LA-13070-MS.
3. Wang, X., Hu, N., Fukunaga, H., Yao, Z.H. (2001). "Structural damage identification using static test data and changes in frequencies", *Engineering Structures* 23, 610-621.
4. Bakhtiari-Nejad, F., Rahai, A., Esfandiari, A. (2005). "A structural damage detection method using static noisy data", *Engineering Structures* 27, 1784-1793.
5. Doebling, S.W., Farrar, C.R., Prime, M.B., Shevitz, D.W. (1996). "Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review", Los Alamos National Laboratory report LA-13070-MS.
6. Tran, H.C., Lee, J. (2013), "Force methods for trusses with elastic boundary conditions", *International Journal of Mechanical Sciences* 66, 202-213.
7. Krishnakumar, K. (1989). "Micro-genetic Algorithm for Stationary and Non-stationary Function Optimization", *SPIE, Intelligent Control and Adaptive Systems* 11, 282-296. 