

하이브리드 유전자 알고리즘과 다중목적함수를 적용한 플레이트 거더교의 격자모델에 대한 유한요소 모델개선

FE Model Updating on the Grillage Model for Plate Girder Bridge Using the Hybrid Genetic Algorithm and the Multi-objective Function

정대성¹⁾ · 김철영²⁾

Jung, Dae-Sung · Kim, Chul-Young

국문 요약 >> 본 논문에서는 거더교 형식을 갖는 교량구조물의 격자 유한요소모델에 대한 모델개선을 위해 하이브리드 유전자 알고리즘에 기초한 유한요소 모델개선기법을 제안하였다. 하이브리드 유전자 알고리즘은 유전자 알고리즘과 심플렉스 최적화방법에 기초한 직접탐색기법으로 구성하였다. 제안된 기법에 적용할 수 있도록 고유진동수, 모드형상 및 정적 처짐에 대한 계측값과 유한요소해석 결과를 사용한 적합함수를 제시하고, 강성과 질량을 동시에 개선할 수 있도록 이들 세 가지 적합함수의 선형 조합 형태를 갖는 다중목적함수를 제시하였다. 제안된 방법은 2경간 연속 격자 유한요소모델의 수치예제와 단경간 플레이트 거더교에 대하여 검증하였다. 수치예제의 경우, 랜덤 노이즈를 고려한 계측오차의 영향을 수치해석적으로 평가하였다. 수치해석과 실험적 검증을 통해, 제안된 방법이 거더교 형식의 교량에 대한 유한요소 모델개선에 적합하고 효과적임을 검증하였다.

주요어 유한요소 모델개선, 하이브리드 유전자 알고리즘, 심플렉스기법, 격자모델

ABSTRACT >> In this study, a finite element (FE) model updating method based on the hybrid genetic algorithm (HGA) is proposed to improve the grillage FE model for plate girder bridges. HGA consists of a genetic algorithm (GA) and direct search method (DS) based on a modification of Nelder & Mead's simplex optimization method (NMS). Fitness functions based on natural frequencies, mode shapes, and static deflections making use of the measurements and analytical results are also presented to apply in the proposed method. In addition, a multi-objective function has been formulated as a linear combination of fitness functions in order to simultaneously improve both stiffness and mass. The applicability of the proposed method to girder bridge structures has been verified through a numerical example on a two-span continuous grillage FE model, as well as through an experimental test on a simply supported plate girder skew bridge. In addition, the effect of measuring error is considered as random noise, and its effect is investigated by numerical simulation. Through numerical and experimental verification, it has been proven that the proposed method is feasible and effective for FE model updating on plate girder bridges.

Key words finite element model updating, hybrid genetic algorithm, simplex method, grillage model

1. 서론

교량구조물의 시스템규명, 손상탐지, 건전도 모니터링, 그리고 내하력 평가 등에 있어서 실제 구조물의 응답특성을 정확히 표현해 줄 수 있는 해석모델의 작성이 매우 중요하다. 일반적으로, 설계도면에 근거하여 작성된 초기 유한요소

모델은 실제 측정결과와 차이가 있을 수밖에 없다. 특히 공용중 교량의 경우에는 시공오차뿐만 아니라, 노후화 및 구조적 손상 등으로 그 차이는 더 클 수밖에 없다. 따라서 실제 구조물의 거동 특성을 정확히 표현할 수 있는 해석모델을 작성하기 위해서는 실험자료를 기초로 한 유한요소모델의 보정 과정이 필요하다.

모델개선기법에는 최적행렬개선기법(Optimal Matrix Updating), 민감도기법(Sensitivity-based Parameter Estimation)과 같은 고전적인 모델개선기법에서부터 최근에 주로 연구되고 있는 인공신경망기법(Artificial Neural Network)과 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)에 기초한 방법 등

¹⁾ 명지대학교 토목환경공학과, BK21 연구교수
(대표저자: dsjung@mju.ac.kr)

²⁾ 정희원·명지대학교 토목환경공학과 교수

본 논문에 대한 토의를 2009년 2월 28일까지 학회로 보내 주시기 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2008. 7. 3 / 수정일 : 2008. 10. 17 / 게재확정일 : 2008. 10. 17)

이 있다. Imregun and Visser(1991) 및 Mottershead and Friswell(1993)은 문헌연구를 통해 최적행렬개선기법과 같은 직접법(Direct Method) 및 민감도기법과 같은 반복법(Iterative Method)에 대해서 자세히 정리하였다.⁽¹⁻²⁾ 직접법은 질량 및 강성행렬과 같은 시스템 행렬을 직접적으로 개선하기 때문에 개선된 시스템 행렬이 물리적인 의미를 지니지 못할 뿐만 아니라, 대칭성과 양정치성을 갖지 못한다. 반복법은 강성과 질량의 구조적인 변화를 찾기 위해 매개변수의 민감도 행렬을 주로 사용한다. 대부분의 연구자들이 매개변수로서 고유치와 고유치벡터를 사용하였다(Farhat and Hemez(1993), Friswell and Mottershead(1995), Maia and Silva(1997), Levin and Lieven(1998), Fritzen et al.(1998)). Imregun et al.(1995)은 모델개선을 위한 매개변수로 실험과 해석에 의한 주파수응답함수를 고려하였다.⁽³⁻⁹⁾ 민감도행렬을 사용한 반복법의 경우에는 재료, 기하특성과 경계조건 등 구조물의 동적 특성에 직접적으로 영향을 주는 변수들을 규명하는데 효과적이지만 개선 변수들에 대해 모두 민감도 행렬을 작성하여야만 한다. 또한 복잡한 역해석 알고리즘을 사용하여야 하기 때문에 기존 유한요소해석 프로그램을 쉽게 사용하기가 어렵다. 따라서 대부분의 기법들이 매우 간단한 구조물에만 적용되었고 측정 자유도에 맞게 시스템 행렬의 축약과 확장 과정이 요구된다.

최근, 유전자 알고리즘과 같은 매개변수 최적기법과 신경망 기법과 같은 비매개변수 최적기법을 사용한 향상된 유한요소 모델개선기법이 제안되고 있다. Levin and Lieven(1998)⁽¹⁰⁾은 평판 날개구조물에 대한 모델개선에 유전자 알고리즘과 시뮬레이티드 어닐링(Simulated Annealing)을 독립적으로 사용하였다. Modak and Kundra(2000)⁽¹¹⁾은 제약조건을 갖는 비선형 최적화문제를 위한 모델개선기법을 제안하고 단순 보 수치해석모델과 보강콘크리트 보에 대한 실내실험에 적용하였다. Jaishi and Ren(2006)⁽¹²⁾은 민감도기법에 기초한 Trust Region Newton법을 적용한 유한요소 모델개선기법과 모달잔류유연도를 사용한 손상탐지방법을 제안하였다. 또한 Rafiq et al.(2005)⁽¹³⁾은 조적식 벽체에 대해 두 개의 최적화기법으로 유전자알고리즘과 회귀분석을 사용한 하이브리드 기법을 적용한 모델개선을 연구하였다. Zhu and Hao(2006)⁽¹⁴⁾는 5층 강프레임 구조물의 실험으로부터 제한된 모달데이터를 사용하여 전통적인 민감도기법, 신경망기법 및 유전자 알고리즘에 대한 모델개선에 의한 수치해석 결과와 비교하고 각 기법의 장단점을 평가하였다. 이들은 대부분 목적함수로 동적 응답자료만을 사용하였다. 국내에서도 관련 연구에 대한 다양한 접근이 있었으며, 윤정방 등(2000)⁽¹⁵⁾과 이종재 등(2005)⁽¹⁶⁾은 상시진동계측 자료로부터 교량의 모드

특성을 추정하고 추정된 모드특성을 바탕으로 신경망기법을 적용하여 유한요소모델을 개선하였다. 조효남 등(2003)⁽¹⁷⁾은 단순보 형태의 관형교 수치해석모델에 대해 최적화기법에 의한 모델개선을 이용하여 손상평가를 수행하였다. 목적함수로는 손상 전후의 구조물의 모드형상 차의 절대값을 사용하였고 부재의 강성을 미지변수로 사용하였다. 조수진 등(2007)⁽¹⁸⁾은 상시진동계측을 이용한 공용내하력 평가방법을 제안하였는데, 처짐 보정계수 산정 시 개선된 유한요소모델을 사용하였다. 유한요소 모델개선방법으로는 다운힐 심플렉스기법을 적용하였다.

본 연구에서는 유전자 알고리즘과 직접탐색기법을 연속적으로 사용한 하이브리드 유전자 알고리즘을 적용한 유한요소 모델개선기법을 제안하였다. 일반적으로 유전자알고리즘은 전체 영역에서 최적값을 줄 수 있으나 해석 시간이 너무 오래 걸리고, 직접탐색기법은 국부최적화 기법이기 때문에 국부적인 최적점에 수렴하여 전체 최적점을 찾지 못할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 이들 두 방법을 차례대로 적용함으로써 해석시간을 단축시키면서 전체 최적점을 보다 쉽게 찾을 수 있도록 하였고, 이를 유한요소 모델개선에 적용하였다. 직접탐색기법으로는 개선된 심플렉스기법이 사용되었고, 주어진 업데이트 변수의 상·하한값 내에서 해를 수렴할 수 있도록 전통적인 심플렉스기법에 경계조건과 중지조건을 추가하였다. 제안된 유한요소 모델개선기법은 복잡한 역해석 방법을 사용하지 않으며 개선 변수에 대한 미분함수를 필요로 하지 않는다. 또한 다양하고 복잡한 구조물에 적용할 수 있도록 기존 상용 유한요소해석 툴을 적용하여 개발된 요소 라이브러리와 해석 알고리즘을 쉽게 사용할 수 있도록 하였다. 고유진동수, 모드형상 및 정적 처짐 성분에 대한 적합함수로 다중목적함수를 구성하여 강성과 질량을 동시에 개선할 수 있도록 제시하였다. 제안된 기법을 2경간 연속 격자해석 모델과 단경간 플레이트 거더교에 적용하여 해석적 및 실험적으로 검증하였다. 또한 수치예제를 통해 계측오차에 대한 영향을 해석적 방법으로 검토하였다.

2. 이론적 배경

2.1 하이브리드 유전자 알고리즘

본 논문에서 제안된 유한요소 모델개선기법은 유전자 알고리즘과 직접탐색방법으로 구성되었다. 유전자 알고리즘은 Holland(1975)⁽¹⁹⁾에 의해 최초로 개발되어 전체최적화 문제에 다양하게 적용되어 왔으며, Nelder and Mead(1965)⁽²⁰⁾에 의해 제안된 심플렉스기법은 직접탐색방법으로서 국부최적

화 문제에 주로 사용되어 왔다. 본 논문에서는 서로 다른 특성을 갖는 두 최적화 알고리즘을 순차적으로 사용하여 초기 작성된 유한요소모델의 모델링 오차를 효과적으로 개선하도록 개발되었다. 먼저, 유전자알고리즘을 사용하여 각 개선 변수의 주어진 영역 내에서 목적함수 값이 최소가 되는 근사적인 전체 최소점을 찾고, 이 때의 각 개선 변수값을 시작점으로 심플렉스기법을 적용함으로써 보다 정확한 개선모델을 직접 탐색하게 된다. 하이브리드 유전자 알고리즘에 기초한 유한요소 모델개선 과정은 그림 1과 같다. 알고리즘은 MatLAB의 Gads Toolbox를 사용하여 작성하였고, 유한요소해석 프로그램은 ABAQUS를 사용하였다.⁽²¹⁻²³⁾

2.2 다중목적함수의 정식화

유한요소 모델개선을 위한 목적함수는 해석모델의 강성과 질량을 모두 고려할 수 있으며 측정 가능한 응답특성으로 고려되어야 한다. 따라서, 본 논문에서는 강성과 질량을 동시에 개선할 수 있도록 다중목적함수를 식 1과 같이 제시하였다. 목적함수는 구조물의 동일한 위치에서 측정된 계측

결과와 유한요소모델의 해석결과가 1:1로 대응되도록 하고, 정·동적 응답자료로서 고유진동수, 모드형상 및 처짐에 대한 적합함수의 선형 조합 형태로 작성하였다. 여기서, 모드형상에 대한 적합함수는 정규화된 모드형상의 차를 나타내는 NMD(Normalized Modal Difference) 값을 사용하였다.⁽²³⁾

$$f_{\min} = fitness_1(f) + fitness_2(\phi) + fitness_3(u) \quad (1)$$

여기서,

$$fitness_1(f) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \alpha_i \cdot \left| \frac{f_i^e - f_i^a}{f_i^e} \right|, i=1, \dots, m \text{ (모드 수)} \quad (2a)$$

$$fitness_2(\phi) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \beta_i \cdot NMD_i, i=1, \dots, m \text{ (모드 수)} \quad (2b)$$

$$fitness_3(u) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \gamma_j \cdot \left| \frac{u_j^e - u_j^a}{u_j^e} \right|, j=1, \dots, n \text{ (측정점 수)} \quad (2c)$$

위 식에서 $fitness_1(f)$, $fitness_2(\phi)$ 및 $fitness_3(u)$ 는 각각 고유진동수, 모드형상 및 정적 처짐에 대한 적합함수이다. 위 첨자 e 와 a 는 각각 실험과 해석 결과를 의미한다. 또한 α_i , β_i , 그리고 γ_j 는 각각 i 번째 모드와 j 번째 측정점에 대한 가중치 계수로서, 본 논문에서는 모두 1.0을 사용하였다. NMD 값과 MAC 값은 각각 식 (3)과 식 (4)로 계산된다.

$$NMD = \sqrt{\frac{1 - MAC}{MAC}} \quad (3)$$

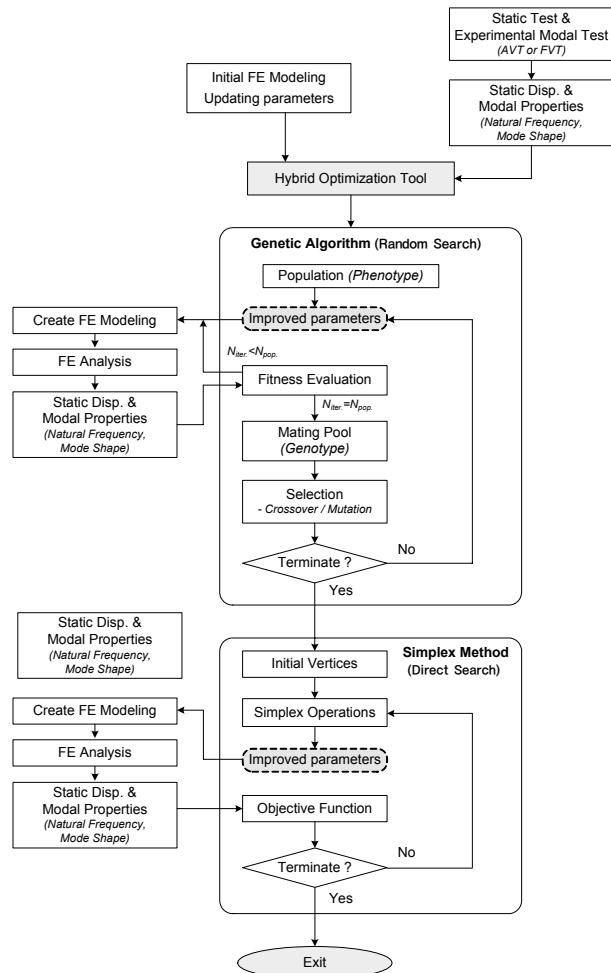
$$MAC_i = \frac{\left| \{f_i^e\}^T \{f_i^a\} \right|^2}{\left(\{f_i^e\}^T \{f_i^e\} \right) \left(\{f_i^a\}^T \{f_i^a\} \right)} \quad (4)$$

여기서, $\{f_i^e\}$ 과 $\{f_i^a\}$ 는 각각 실험과 해석에 의한 i 번째 모드형상 벡터이다.

3. 수치모델에 의한 검증

3.1 유한요소 모델개선

제안된 유한요소 모델개선기법의 검증을 위해 그림 2와 같은 2경간 연속 거더교를 이상화한 격자해석모델⁽²⁴⁾에 대한 모델개선을 수행하였다. 해석모델은 전체 58개의 요소로 작성되었다. 수치해석모델에 대한 각 응답의 계측자료는 기준모델의 해석결과로 가정하였다. 모드형상벡터는 지점을 제외한 전체 절점에서 측정된 것으로 가정하였고, 모델개선 시에는 z방향에 대한 모드형상벡터만을 사용하였다. 정적 처짐은 절점 1에서 절점 13까지 20kN의 이동하중을 재하하고 각 거더의 경간 중앙 6개 절점에서의 응답만을 고



〈그림 1〉 하이브리드 유전자 알고리즘에 기초한 유한요소 모델개선 과정

결과를 표 2에 비교하였다. 또한 초기모델과 개선모델의 MAC, NMD 및 CoMAC에 대한 모드상관성을 표 3에 나타내었다.

표 2로부터, 고유진동수 오차가 초기모델의 경우 최대 15% 내외에서 모델개선 후 0.02%로 정확히 개선되었다. 특히 고려된 6차 모드까지 모든 모드에서 기준모델에 정확히 개선된 것을 확인할 수 있다. 모드상관성을 나타내는 MAC과 CoMAC값은 수치해석모델을 사용하였기 때문에 고유진동수 오차와는 달리 초기모델 자체가 기준모델과 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있다. 개선모델의 경우에 큰 차이가 없으나 6차 모드의 경우에는 초기모델의 모드형상이 기준모델과 달라 MAC 값이 0.51로 상관성이 매우 낮게 평가되었으나 모델개선을 통해 모드형상이 동일하게 개선됨으로써 MAC값이 1.0으로 개선된 결과를 보였다. 그림 2에서 모델개선시 적합함수와 목적함수의 값이 매우 불연속적으로 튀는 현상이 나타나는데 이는 모드형상에 대한 적합함수의 오차가 크게 증가하는 것으로써, 업데이트 변수의 미소한 변화에 해석모델의 모드형상의 순서가 바뀌면서 적합함수의 오차가 불연속적으로 바뀌는 과정이다. 결과적으로 모델개선으로부터 해석모델의 모드형상의 순서가 기준모델에 맞게 개선됨을 의미한다.

표 1에서 단면2차모멘트는 오차가 0.8%이내로 기준모델에 정확히 개선되었으나, 단면적의 경우에는 기준모델과 상

당한 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 이는 해석모델의 격자 가로보를 2-절점을 갖는 한 개의 보 요소로만 모델링 하였기 때문에 전체 질량행렬에서는 격자 가로보의 질량이 모두 거더의 절점에만 존재하는 것으로 반영되었다. 전체 질량행렬을 검토한 결과, 개선모델의 질량행렬이 기준모델의 질량행렬과 동일함을 확인하였다. 따라서 제안된 기법의 모델개선 효과가 뛰어난 것을 알 수 있다. 실제 구조물의 경우보다 정확한 모델개선을 위해서는 가로보의 응답자료를 고려하여야 하며, 해석모델의 모델링에 있어서도 가로보를 최소한 2개 이상의 요소로 고려할 필요가 있다.

결과적으로, 제안된 기법을 사용함으로써 해석모델의 모드형상의 차수까지 실제 모드와 일치하는 개선된 결과를 보였다. 구조물의 모드형상은 고유진동수와 달리 국부적인 강성감소와 같은 손상평가에 매우 중요하고, 구조물의 동적 거동에 대한 에너지 분포와도 매우 밀접한 관계가 있기 때문에 그 차수와 거동 형상을 보다 정확히 개선할 수 있다는 점에서 제안된 기법은 유한요소 모델개선에 매우 효과적인 방법임을 알 수 있다.

3.2 계측오차의 영향 평가

교량구조물의 실측 응답자료에 기초한 유한요소모델의 모델개선 시에는 노이즈 또는 측정오차와 같은 계측오차가

〈표 2〉 각 모델별 고유진동수 비교

모드 번호	고유진동수 (Hz)			오차 (%)		모드형상		
	기준모델 ^a	초기모델 ^b	개선모델 ^c	초기모델 ^d	개선모델 ^e	기준모델	초기모델	개선모델
1	6.3006	5.3701	6.2999	-14.77	-0.01	B1	B1	B1
2	9.9001	8.4331	9.9001	-14.82	0.00	B2	B2	B2
3	10.439	9.6986	10.437	-7.09	-0.02	T1	T1	T1
4	13.079	12.028	13.080	-8.04	0.01	T2	T2	T2
5	25.342	21.493	25.344	-15.19	0.01	B3	B3	B3
6	31.835	27.338	31.840	-14.13	0.02	T3	B4	T3

d=(b-a)/a×100 (%), e=(c-a)/a×100 (%)

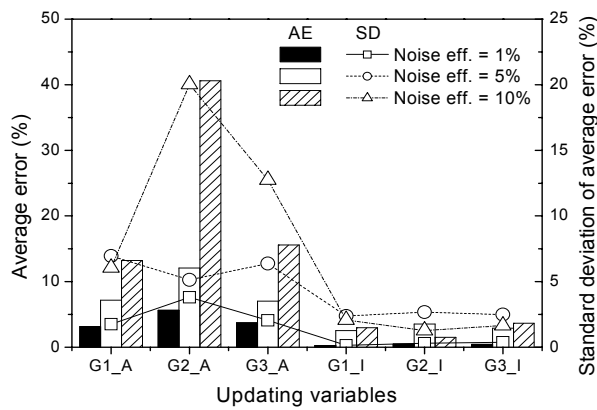
B: 횡모드, T: 비틀림모드

〈표 3〉 모드 상관성 비교

모드 번호	MAC		NMD		절점 번호	CoMAC	
	초기모델	개선모델	초기모델	개선모델		초기모델	개선모델
1	1.000	1.000	7.0E-4	2.0E-4	2	0.9997	1.000
2	1.000	1.000	1.7E-3	3.0E-4	3	0.9997	1.000
3	1.000	1.000	5.9E-3	1.1E-3	4	0.9998	1.000
4	1.000	1.000	3.3E-3	1.0E-3	5	0.9998	1.000
5	0.9999	1.000	1.1E-2	4.0E-4	6	0.9998	1.000
6	0.5148	1.000	9.7E-1	8.0E-4	10	0.9998	1.000

포함된 자료를 기초로 모델개선이 수행되기 때문에 모델개선의 성능은 초기 작성된 해석모델의 모델링오차뿐만 아니라 실측 응답자료의 계측오차의 크기에 민감할 수밖에 없다. 따라서 본 논문에서는 계측오차의 영향을 해석적으로 검토하기 위해 기준모델의 해석 결과로서 고유진동수, 모드형상 및 정적 처짐에 대하여 각각 1%, 5%, 그리고 10%의 랜덤 노이즈를 추가하여 계측오차를 생성하였다. 각각에 대해 총 5회의 유한요소 모델개선을 수행하여 계측오차의 영향을 평가하였다. 그 결과를 표 4와 그림 4에 나타내었다.

단면적(질량) 변수에 대한 모델개선 오차의 평균은 노이



〈그림 4〉 계측오차에 따른 모델개선 결과 비교

〈표 4〉 계측오차에 대한 영향 비교

업데이팅 변수		단면적(A)			단면2차모멘트(I ₃₃)			목적함수
		G1	G2	G3	G1	G2	G3	
기준값		1.100	0.800	1.100	1.100	1.250	1.100	0.000
노이즈 1%	AE (%)	3.156	5.633	3.741	0.249	0.511	0.435	0.023
	SD (%)	1.754	3.801	2.045	0.143	0.314	0.382	0.003
노이즈 5%	AE (%)	7.179	12.079	7.016	2.534	3.554	2.893	0.108
	SD (%)	6.952	5.137	6.379	2.388	2.672	2.494	0.029
노이즈 10%	AE (%)	13.231	40.610	15.584	2.981	1.507	3.650	0.244
	SD (%)	6.059	20.029	12.756	2.073	1.275	1.656	0.029

AE = Average Error, SD = Standard Deviation

즈 효과가 10%인 경우에 최대 40.6%, 5%인 경우에는 12.1%, 그리고 1%인 경우에는 5.6%로 나타났다. 반면, 강성에 대한 모델개선 오차의 평균은 각각의 노이즈 효과에 대해 최대 3.7%, 3.6% 및 0.5%로 나타났다. 질량의 경우에는 측정오차가 증가함에 따라 모델개선 효과가 다소 떨어지지만 강성의 경우에는 개선 효과가 매우 뛰어난 것을 알 수 있다. 최근 계측장비의 발달로 신뢰성 있는 측정과 분석이 가능하고 교량과 같은 구조물의 경우 강성에 비해 질량의 변동이 매우 미소하기 때문에, 본 논문에서 제안된 하이브리드 유전자 알고리즘을 적용한 유한요소 모델개선기법은 측정오차를 포함한 경우에도 그 적용성이 매우 뛰어난 것으로 판단된다.

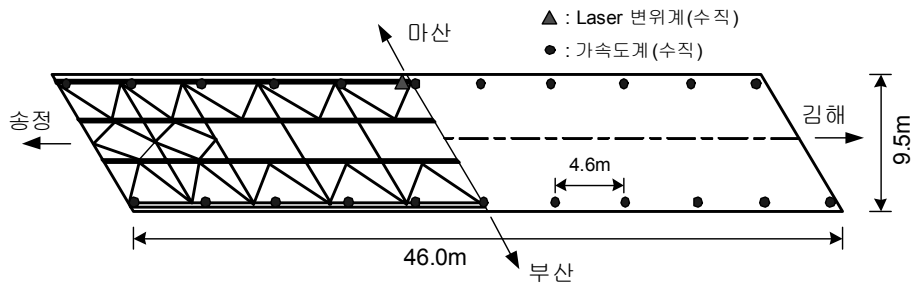
4. 단경간 플레이트 거더교의 적용

4.1 대상교량

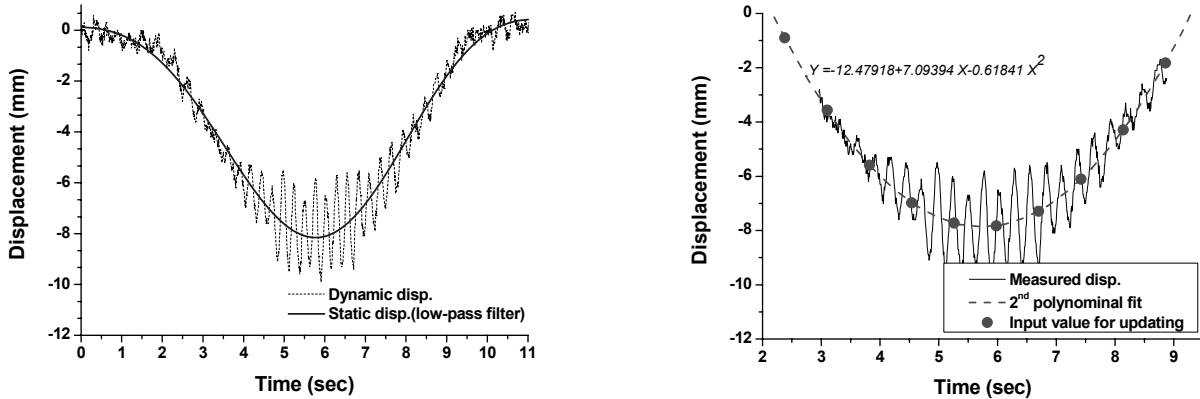
단경간 강합성 플레이트 거더교를 대상으로 제안된 유한요소 모델개선기법의 실교량 적용성 검토를 수행하였다. 대상교량(농로육교)은 경상남도 김해에 위치한 남해 지선 고속도로의 램프구간의 연장도로상에 위치한 3경간 단순교이다. 시험구간은 중앙경간으로 경간장이 46m이며 양방향 2



〈그림 5〉 농로육교 전경



〈그림 6〉 센서 설치위치



〈그림 7〉 주행차량에 대한 동적 변위이력(좌) 및 정적 처짐(우)

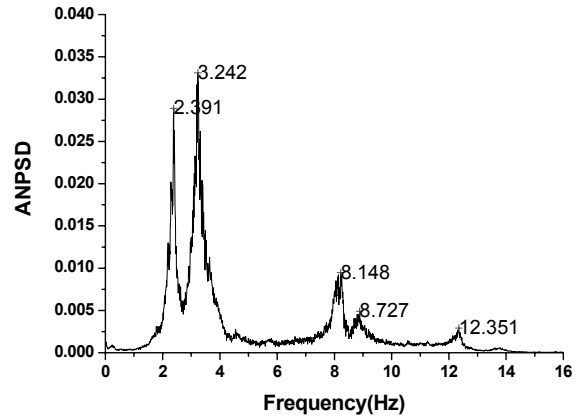
차선 교각으로 사교(skew=30도)이다.

4.2 차량 주행시험 및 동특성 평가

정·동적 응답자료를 얻기 위해 총 중량이 241.6kN인 3축 덤프트럭을 이용한 차량주행시험을 수행하였다. 시험차량의 주행은 중앙선을 따라 이루어졌으며 변위 응답은 그림 6과 같이 경간 중앙의 G4 거더 노면에 설치한 레이저 변위계를 사용하여 측정하였다. 동적변위 응답은 100Hz의 샘플링으로 측정하였다. 주행속도 20km/h로 주행한 경우에 대하여 경간 중앙에서 측정한 동적처짐 성분을 저대역 필터를 사용하여 동적효과를 제거한 후 정적처짐을 구하였다.

고유진동수와 모드형상에 대한 동특성은 상시 통행차량으로부터 얻어진 각 측정점에서의 가속도응답을 분석한 상시진동분석기법을 통해 구하였다. 가속도 응답은 지점부를 포함한 전체 11개 단면에 대해 G1과 G4 위치에서 수직성분만을 측정하였다. 가속도 응답은 32Hz의 샘플링으로 측정하였다. 이때 분석에 사용한 가속도응답은 대상교량이 단경간 교각이므로 중차량에 의한 추가 질량의 영향을 최소화하기 위해 승용차와 같이 경량의 차량에 의한 응답성분만을 고려하였다. 대부분 경차량의 중량은 30kN 이내로 교량의 전체 중량(약 3,000kN)에 비해 매우 작기 때문에 동특성 분석시 차량의 추가질량에 의한 영향은 무시하였다.

주행차량에 대한 대상교량의 동적응답과 정적응답에 대

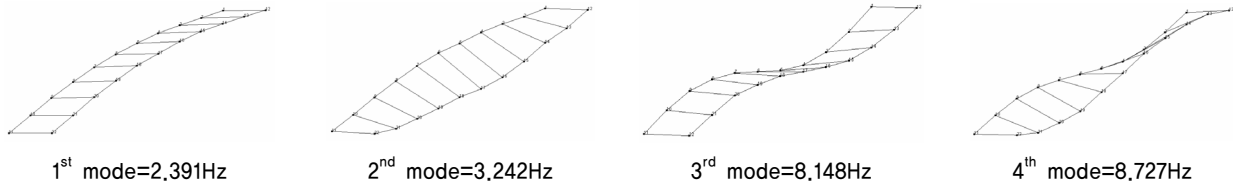


〈그림 8〉 ANPSD 함수

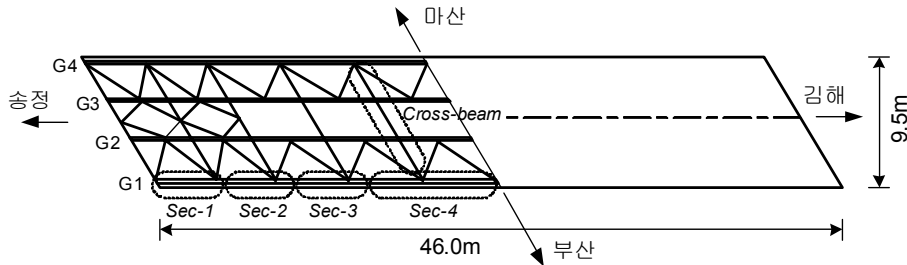
한 변위이력을 그림 7에 나타내었다. 동특성은 그림 8과 같이 각 가속도 성분을 주파수 분석하여 얻어진 PSD(Power Spectral Density)값을 평균하고, 전체 가속도에 대하여 정규화하여 얻어진 ANPSD(Averaged Normalized Power Spectral Density)값으로부터 구하였다. 고유진동수는 ANPSD 값의 첨두점에 해당하는 진동수로부터 결정되었다. ANPSD 함수와 모드형상을 그림 8과 그림 9에 나타내었다.

4.3 유한요소 모델개선 결과

대상교량은 철거된 지 오래된 교각으로, 자세한 설계자료를 구할 수 없어 일반도만을 참조하여 해석모델을 작성하였다. 유한요소해석 모델은 거더와 가로보만을 고려한 격자모



〈그림 9〉 모드형상 및 고유진동수



〈그림 10〉 해석모델에 대한 부재그룹

델로 모델링하고, 각 거더에 대해서는 그림 10과 같이 단면 변화와 바닥판의 유효폭을 고려하여 Sec-1~Sec-4까지 4개의 단면으로 부재 그룹을 나누었다. 브레이싱에 대해서는 고려하지 않았다. 또한 해석모델의 개선시 정적 및 동적의 수직 성분에 대한 응답의 개선만을 고려하였기 때문에 개선 변수로는 각 부재그룹에 대해 단면적과 휨에 대한 단면2차 모멘트만을 사용하였다. 모델개선 전·후의 개선 변수값을 표 5에 비교하였고, 각 적합함수의 수렴과정과 정적 처짐 결과를 각각 그림 11과 그림 12에 나타내었다. 표 6에는 모델 개선에 의한 각 적합함수와 최종 목적함수 값을 비교하였다.

표 5에서 보듯이 모델개선 결과, 개선모델의 질량과 강성이 초기 해석모델과 차이가 크게 발생하는데 이는 초기모델의 모델링 오차와 계측오차에 의한 영향 때문으로 판단된다.

표 6에서 측정값에 대한 해석값의 오차비로 표현된 고유진동수, 모드형상, 그리고 정적 처짐에 대한 적합함수 결과

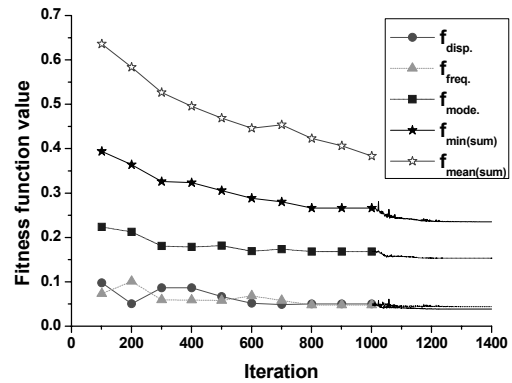
가 초기모델의 경우 6.7%, 27%, 41.5%에서 각각 4.4%, 15.3%, 3.8%로 개선된 결과를 보였다. 고유진동수의 경우 약 35%, 모드형상의 경우 43%, 그리고 처짐에 대해서는 91% 정도의 개선효과를 보였으며, 정적 처짐에 대한 개선 효과가 보다 뛰어난 것으로 나타났다. 표 7에서, 고유진동수의 경우 고려한 4개의 모드 모두가 실제 실험치에 매우 가깝게 개선된 결과를 보였으나, 모드형상의 경우에는 개선된 모델에서 3차와 4차 모드형상이 2차 비틀림모드와 2차 휨

〈표 5〉 모델개선 전·후에 대한 개선 변수값 비교

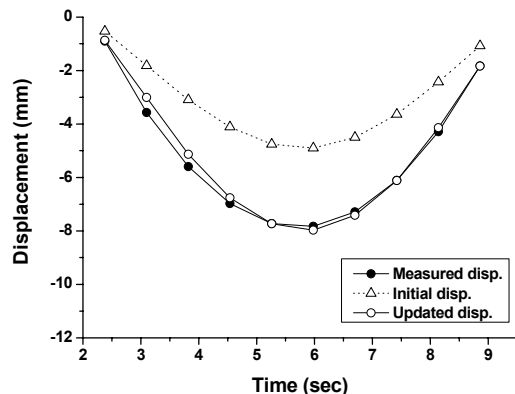
부재 그룹		A(mm ²)		I _{yy} (×10 ¹⁰ mm ⁴)	
		개선전	개선후	개선전	개선후
거더 (G1~G4)	Sec-1	209326	83730	4.058	6.4928
	Sec-2	220626	156820	6.904	8.7432
	Sec-3	227826	91130	8.833	3.6633
	Sec-4	231086	196320	9.258	6.6016
가로보		9200	3680	0.6842	0.5481

〈표 6〉 적합함수 및 목적함수의 수렴값 비교

해석모델	적합함수			목적함수 (f _{min})
	fitness ₁ (f)	fitness ₂ (Φ)	fitness ₃ (u)	
초기모델	0.06692	0.26993	0.41484	0.75169
개선모델	0.04366	0.15323	0.03827	0.23516



〈그림 11〉 각 적합함수의 수렴과정



〈그림 12〉 모델개선 전·후의 정적 처짐

〈표 7〉 모델개선 전·후 모델에 대한 고유진동수 및 모드형상 비교

모드	실험		초기모델		개선모델	
	고유진동수(Hz)	모드형상	고유진동수(Hz)	모드형상	고유진동수(Hz)	모드형상
1	2.391	1차 휨	2.642	1차 휨	2.392	1차 휨
2	3.242	1차 비틀림	2.880	1차 비틀림	2.694	1차 비틀림
3	8.148	2차 휨	8.485	2차 휨	8.105	2차 비틀림
4	8.727	2차 비틀림	8.642	2차 비틀림	8.727	2차 휨

〈표 8〉 모델개선 전·후 모델에 대한 MAC 및 NMD값 비교

모드	MAC		NMD	
	초기모델	개선모델	초기모델	개선모델
1	0.99650	0.99662	0.05925	0.05821
2	0.97737	0.98003	0.15217	0.14274
3	0.77991	-	0.53122	-
4	0.89797	-	0.33708	-

주) 개선모델의 3차, 4차 모드형상이 실험결과와 달라 비교에서 제외함

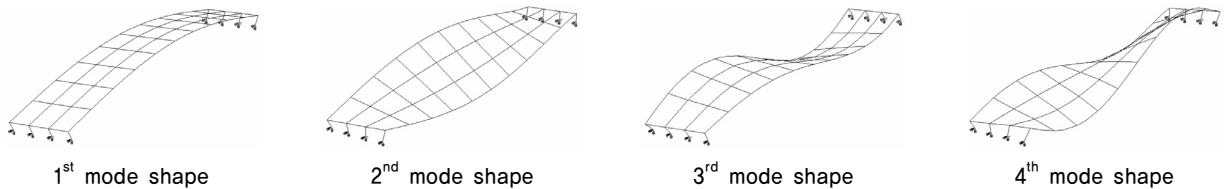
〈표 9〉 모델개선 전·후 모델에 대한 CoMAC값 비교

절점	CoMAC		절점	CoMAC	
	초기모델	개선모델		초기모델	개선모델
1	0.95066	0.89388	12	0.82002	0.92329
2	0.76851	0.91722	13	0.82118	0.92170
3	0.78594	0.92822	14	0.82548	0.92394
4	0.79609	0.92437	15	0.83261	0.92835
5	0.80155	0.91256	16	0.83405	0.93093
6	0.81535	0.91343	17	0.83670	0.93012
7	0.81631	0.92136	18	0.84100	0.92811
8	0.81833	0.93088	19	0.84678	0.92618
9	0.82177	0.93209	20	0.85127	0.92844
10	0.82378	0.92752	21	0.84771	0.92687
11	0.82095	0.92434	22	0.84738	0.92651

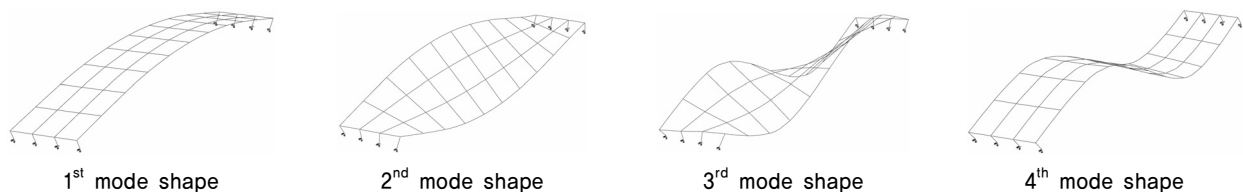
모드로 나타나 실제 실험결과와 바뀐 결과를 보였다. 대상 교량이 사교이기 때문에 2차 휨모드와 비틀림모드가 상대적으로 매우 근접모드로 나타났고, 모델개선시 목적함수를 최소화하는데 모드형상의 기여도가 다소 낮았기 때문에 개선 모델에서 모드형상의 순서가 바뀐 결과를 보였던 것으로 판단된다. 초기 유한요소모델과 개선모델에 대한 모드형상 결

과를 그림 13과 그림 14에 각각 나타내었다.

표 8과 표 9에서, 구조물의 고유모드에 대한 모드와 자유도별 상관성을 나타내는 MAC값과 CoMAC값에 있어서도 크게 개선된 것을 확인할 수 있다. 개선모델에 있어서 3차와 4차 모드형상이 바뀌어 나타난 것을 제외하고는 전체적으로 개선된 모델이 실제 대상교량의 정·동적 특성을 잘 반영하



〈그림 13〉 초기모델의 모드형상



〈그림 14〉 개선모델의 모드형상

는 것으로 볼 때, 본 논문에서 제안된 모델개선기법이 실측 자료에 기초한 초기 유한요소모델의 모델개선에 매우 효과적인 것으로 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 유전자 알고리즘과 직접탐색기법을 적용한 하이브리드 유전자 알고리즘에 기초한 유한요소 모델개선기법을 제안하였다. 거더교 형식의 교량구조물에 대한 모델개선을 위해 수치해석 격자모델과 실험교량에 제안된 기법을 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 하이브리드 유전자 알고리즘을 위한 다중목적함수로서 고유진동수, 모드형상, 그리고 정적 처짐에 대한 적합함수의 선형조합 형태를 제시하고, 강성과 질량을 동시에 개선할 수 있는 유한요소 모델개선기법을 제시하였다.
2. 수치해석 격자모델에 대한 검토 결과, 응답결과와 강성은 정확히 개선되었으나 질량에 있어서는 큰 오차를 보였다. 따라서 거더교 형식의 교량구조물에 제안된 기법을 보다 효과적으로 적용하기 위해서는 가로보에서의 계측치를 고려할 필요가 있겠다.
3. 계측오차의 영향을 수치해석적으로 검토한 결과, 질량에 있어서는 다소 오차가 발생하였으나 강성에 있어서는 최대 10%의 오차에 대해 3.6%의 개선 오차를 보여 신뢰할 수 있을 정도의 모델개선 효과를 보였다. 실제 교량의 경우, 시공오차 등에 의한 질량의 변동성은 매우 적기 때문에 충분히 적용 가능할 것으로 판단된다.
4. 실제 교량에 적용한 결과, 개선된 모델의 해석결과가 대상교량의 정·동적 계측에 의한 거동 특성을 잘 반영하는 것으로 나타나 실험교량에 있어도 모델개선 효과가 뛰어난 것이 검증되었다.
5. 따라서 격자모델로 작성 가능한 거더교 등에 대하여 제안된 방법을 통해 개선된 유한요소모델은 교량의 내하력 평가뿐만 아니라, 시스템규명, 손상평가 등 다양한 분야의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원(KICTEP)에서 위탁 시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호: 04핵심기술C02)과 명지대학교 산업기술연구소의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Imregun, M. and Visser, W.J., "A review of model updating techniques," *The Shock Vib Dig*, Vol. 23, No. 1, 1991, pp. 9-20.
2. Mottershead, J.E. and Friswell, M.I., "Model updating in structural dynamics: a survey," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 167, No. 2, 1993, pp. 347-375.
3. Farhat, C. and Hemez, F.M., "Updating finite element dynamic models using an element-by-element sensitivity methodology," *AIAA Journal*, Vol. 31, 1993, pp. 1702-1711.
4. Friswell, M.I. and Mottershead, J.E., *Finite Element Model Updating in Structural Dynamics*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1995.
5. Maia, N.M.M. and Silva, J.M.M., *Theoretical and Experimental Modal Analysis*, Research Studies Press, Baldock, UK, 1997.
6. Levin, R.I. and Lieven, N.A.J., "Dynamic Finite Element Model Updating Using Neural Networks," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 210, No. 5, 1998, pp. 593-607.
7. Fritzen, C.P., Jennewein, D., and Kiefer, T., "Damage detection based on model updating methods," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 12, 1998, pp. 163-186.
8. Imregun, M., Visser, W.J., and Ewins, D.J., "Finite element model updating using frequency response function data—I: theory and initial investigation," *Mech Syst Signal Process*, Vol. 9, No. 2, 1995, pp. 187-202.
9. Imregun, M., Sanliturk, K.Y., and Ewins, D.J., "Finite element model updating using frequency response function data—II: case study on a medium size finite element model," *Mech Syst Signal Process*, Vol. 9, No. 2, 1995, pp. 203-213.
10. Levin, R.I. and Lieven, N.A.J., "Dynamic Finite Element Model Updating Using Simulated Annealing and Genetic Algorithms," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 12, Issue 1, 1998, pp. 91-120.
11. Modak, S.V. and Kundra, T.K., "Model updating using constrained optimization," *Mech Res Commun*, Vol. 27, 2000, pp. 543-551.
12. Jaishi, B. and Ren, W.X., "Damage detection by finite element model updating using modal flexibility residual," *Journal of Sound Vibration*, Vol. 290, 2006, pp. 369-387.
13. Rafiq, M.Y., Sui, C., Zhou, G.C., Easterbrook, D.J., and Bugmann, G., "Using Artificial Intelligence Techniques to Predict the Behavior of Masonry Panels," *Proceedings of the Eighth International Conference on the Application of Artificial Intelligence to Civil, Structural and Environmental Engineering*, Civil-Comp Press, Scotland, 2005.
14. Zhu, H. and Hao, X., "Comparison of Analytical Approaches to Structural Model Updating Using Modal Test Data," *Earth & Space 2006: Engineering, Construction, and Operation in Challenging*, ASCE Conference Proceedings, 2006, pp.1-8.

15. 윤정방, 이종원, 박동욱, 김재동, “교량하중에 의한 상시미진동을 이용한 교량 모드특성 추정기법,” 대한토목학회 논문집, 제20권 제4-A호, 2000, pp. 597-605.
16. 이종재, 이종원, 윤정방, “상시진동 데이터를 이용한 교량의 손상추정기법,” 대한토목학회 논문집, 제25권 제2-A호, 2005, pp. 375-385.
17. 조효남, 최영민, 이성철, 이광민, “신경망 및 모델업데이팅에 기초한 구조물 손상평가,” 구조물진단학회논문집, 제7권 제4호, 2003, pp. 121-128.
18. 조수진, 이진학, 이창근, 윤정방, “상시진동계측에 의한 교량의 공용내하력 평가,” 대한토목학회 논문집, 제27권 제1-A호, 2007, pp. 79-89.
19. Holland, J.H., *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975.
20. Nelder, J.A and Mead, R., “A simplex method for function minimization,” *Computer Journal*, Vol. 7, 1965, pp. 308-311.
21. The Mathworks, *MATLAB&SIMULINK User's Guide*, The Mathworks, Inc., 2006.
22. ABAQUS, *ABAQUS User's Manual*, ABAQUS, Inc., 2007.
23. 정대성, 김철영, “유한요소모델개선을 위한 하이브리드 최적화기법의 수치해석 검증,” 한국지진공학회 논문집, 제10권 제6호, 2006, pp. 19-18.
24. 권순정, “주파수영역과 시간영역에서의 가속도계 최적위치 결정 및 SI기법에 의한 검증,” 박사학위논문, 인하대학교, 2006.