

경계조건을 고려한 단순보의 유한요소모델개선

김세훈¹, 박영수², 김남규³, 이종재^{4*}

Finite Element Model Updating of Simple Beam Considering Boundary Conditions

Se-Hoon Kim¹, Young-Soo Park², Nam-Gyu Kim³, Jong-Jae Lee^{4*}

Abstract: In this present study, in order to update the finite element model considering the boundary conditions, a method has been proposed. The conventional finite element model updating method, updates the finite element model by using the dynamic characteristics (natural frequency, mode shape) which can be estimated from the ambient vibration test. Therefore, prediction of the static response of an actual structure is difficult. Furthermore, accurate estimation of the physical properties is relatively hard. A novel method has been proposed to overcome the limitations of conventional method. Initially, the proposed method estimates the rotational spring constant of a finite element model using the deflection of structure and the rotational displacement of support measurements. The final updated finite element model is constructed by estimating the material properties of the structure using the finite element model with updated rotational spring constant and the dynamic characteristics of the structure. The proposed finite element model updating method is validated through numerical simulation and compared with the conventional finite element model updating method.

Keywords: Finite element model updating, Boundary condition, Neural network, Structural response

1. 서 론

유한요소모델개선(Finite Element Model Updating, FEMU)은 실제 구조물의 응답 예측이 가능한 유한요소모델(Finite Element Model, FE Model)을 구축하여 구조물의 구조적 안전성을 검토하고 비용-효율적인 유지관리에 활용 가능한 기술이다. 유한요소모델개선 방법은 구조물의 성능을 정량적으로 평가할 수 있는 도구로써, 구조물의 실측 응답과 구조물의 유한요소모델이 예측하는 구조응답과 유사해지도록 유한요소모델의 물성치를 조정하고, 가장 유사해지는 물성치를 추정치로 사용한다.

초기의 유한요소모델개선과 관련된 연구들은 대부분 상시 진동으로부터 얻어진 동특성을 사용하여 다양한 종류의 구조물에 대한 최적화를 수행하였다(Brownjohn et al., 2003; Jaishi et al., 2007; Bayraktar and Can, 2010; Wang et al., 2010; Park et al., 2015). 또한 구조물의 동특성으로부터 계산 가능한 모

드 유연도행렬(Modal Flexibility)를 사용한 연구(Jaishi et al., 2007)와 가속도와 각속도로부터 추정되는 동특성을 사용한 연구(Kim et al., 2015)도 있다.

구조물의 동특성에 기반을 둔 유한요소모델개선 방법의 제한점은 1) 적은 수의 고유모드를 사용하여 많은 수의 구조물의 물성치를 추정하는 경우 불량조건문제(III-posed Problem)에 봉착할 수 있다는 점, 2) 동특성만으로 개선된 유한요소모델을 사용하여 정적응답을 예측하는 경우 결과의 신뢰성을 보장하기 어렵다는 점, 3) 구조물의 휨 성능과 관련된 휨 강성과 경계조건을 모델개선변수로서 함께 포함하여 동특성만으로 유한요소모델을 개선하는 경우 모델개선변수 간의 동조(Coupling)와 경계조건의 불확실성이 중복되어 경계조건의 불확실성 규명이 어렵다는 점이다.

이를 극복하기 위하여, 최근에는 정적 변위와 변형률 응답과 같은 정적 응답을 이용한 유한요소모델개선 연구(Ren et al., 2011; Sanayei et al., 2012; Liao et al., 2012)가 수행되었으며, 정적 응답과 동적응답을 동시에 사용한 유한요소모델개선 연구(Jung and Kim, 2013; Xiao et al., 2014)가 수행되었다.

그러나 앞선 연구들은 경계조건의 불확실성에 대하여 규명하기 어려우며, 이러한 모델링 오차가 내재된 유한요소모델을 이용하여 모델 개선을 수행하면 추정된 구조물의 물성치가 편향될 수 있다(Schlune et al., 2009; Sanayei et al., 2012).

본 연구에서는 신뢰성 높은 교량의 유한요소모델개선을 위

¹정회원, 세종대학교 건설환경공학과 박사과정

²정회원, ㈜유신 대리

³정회원, 세종대학교 건설환경공학과 박사후연구원

⁴정회원, 세종대학교 건설환경공학과 부교수, 교신저자

*Corresponding author: jongjae@sejong.ac.kr

Sejong University, Seoul, 05006, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2018년 4월 1일까지 학회로 보내주시면 2018년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

하여 계측된 정적응답을 이용하여 경계조건의 불확실성을 제거한 후 동특성을 이용하여 구조물의 물성치를 추정하였다. 이를 수치해석을 통하여 검증하였다.

2. 유한요소모델개선 기법

2.1 기존 유한요소모델개선 기법

기존의 유한요소모델개선기법은 1) 상시진동시험을 수행하여 구조물의 동특성을 추정(Brincker et al., 2001)하고, 2) 유한요소모델의 동적해석으로 계산된 동특성을 이용하여 아래 식 (1)(단, 기존의 방법은 $\gamma=0$)과 같이 목적함수를 구성하고, 3) 목적함수가 최소로 평가되도록 물성치를 최적화한다. 유한요소모델개선의 최적화에 주로 사용되는 알고리즘은 심플렉스방법(Nelder-Mead Simplex Method)(Nelder and Mead, 1964), 유전자알고리즘(Genetic Algorithm, GA)(McCall, 2005) 등이 사용된다. 최근에는 동특성에 더해 정적응답 항을 목적함수에 추가하여(식 (1), $\gamma \neq 1$) 유한요소모델을 개선하는 연구가 시도되었다(Jung and Kim, 2013; Xiao et al., 2014).

$$\begin{aligned} \text{Objective Function} = & \alpha \sum_{i=1}^N \omega_i^m \left(\frac{f_i^{\text{EXP}} - f_i^{\text{FEM}}}{f_i^{\text{EXP}}} \right)^2 \\ & + \beta \sum_{i=1}^N \omega_i^m (1 - \text{MAC}(\Phi_i^{\text{EXP}}, \Phi_i^{\text{FEM}})) \\ & + \gamma \sum_{j=1}^M \omega_j^d \left(\frac{y_j^{\text{EXP}} - y_j^{\text{FEM}}}{y_j^{\text{EXP}}} \right)^2 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, α, β, γ 는 물리량별 가중치로써 $0 \leq \alpha, \beta, \gamma \leq 1$, $\alpha + \beta + \gamma = 1$ 이다. ω_i^m 와 ω_j^d 는 각각 i -번째 모드와 j -번째 계측 변위의 가중치로써 $\sum_{i=1}^N \omega_i^m = \sum_{j=1}^M \omega_j^d = 1$ 이다. $f_i^{\text{FEM}}, \Phi_i^{\text{FEM}}, f_i^{\text{EXP}}, \Phi_i^{\text{EXP}}$ 는 각각 유한요소모델로부터 계산된 i -번째 모드의 고유진동수, 모드형상, 실험으로부터 추정된 i -번째 고유진동수, 모드형상이다. MAC은 Modal Assurance Criterion이다. $y_j^{\text{FEM}}, y_j^{\text{EXP}}$ 는 각각 j -번째 하중 경우에 대한 유한요소모델로부터 계산된 정적응답, 실험으로부터 계측된 정적응답이다. N 은 사용된 모드의 개수, M 은 사용된 하중 재하 위치의 개수이다.

2.2 인공지능망을 이용한 구조물의 경계조건 추정

지점부의 구속효과는 경계조건의 열화와 축방유동 등이 원인이 될 수 있다. 지점부의 구속효과는 구조계를 변화시켜 처짐 감소, 지점부 회전변위 감소 등 구조물의 응답을 변화시킨다. 널리 사용되는 동특성 기반 유한요소모델개선 기법은 지

점부의 회전 스프링 강성과 고유진동수의 관계로부터 경계조건의 추정이 가능하다. 그러나 다른 개선변수와의 동조 때문에 경계조건의 정확한 추정이 어렵다.

이러한 한계를 개선하기 위하여 구조물의 응답비와 지점부 회전 스프링 강성의 관계를 이용하여 경계조건을 추정하는 방법이 사용되었다(Park et al., 2017). 지점부의 구속효과는 지점부의 회전 스프링을 모델링한 후 회전 스프링 강성의 증가로 모사가 가능하다. 임의의 하중이 구조물의 임의의 지점에 재하 되었을 때 발생하는 지점부의 회전변위(θ)와 처짐(δ)의 비(δ/θ)는 회전 스프링 강성(K_{rot})과 선형관계를 보인다. 단 순보의 경우 δ/θ 와 K_{rot} 가 완전한 선형관계를 보이지만, 복잡한 구조물의 경우 δ/θ 가 K_{rot} 가 대체적으로 선형관계를 보이지만 약간의 비선형성이 포함된다. 복잡한 구조물의 K_{rot} 추정에 선형보간법을 사용하는 경우 정확한 추정이 어렵다. 본 논문에서는 δ/θ 와 K_{rot} 의 비선형성을 고려할 수 있는 인공지능경망 기법을 이용하였다(Fig. 1).

2.3 경계조건을 고려한 유한요소모델개선 기법

인공지능경망으로 구조물의 경계조건을 추정하는 기법은 지점부 회전 스프링 강성만을 개선하므로 경계조건 이외의 구조물성치를 개선할 수 없는 한계가 있다. 이를 개선하기 위하여 경계조건이 추정된 유한요소모델을 구조물의 동특성으로 개선하는 방법을 제안하였다.

본 논문에서 제안하는 유한요소모델개선 기법은 1) 구조물

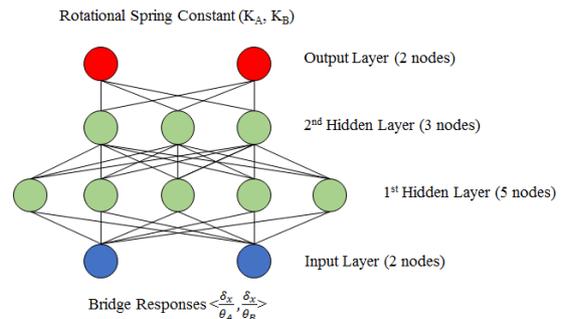


Fig. 1 Architecture of neural network

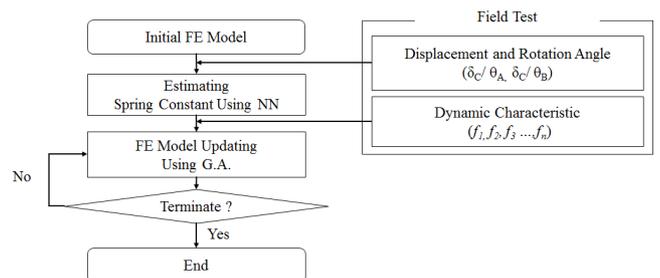


Fig. 2 Proposed FEMU method

의 실측 처짐과 회전변위의 비를 이용하여 지점부 회전 스프링 강성을 추정하고, 2) 지점부가 개선된 유한요소모델과 상시진동시험으로부터 추정된 동특성을 이용하여 구조 물성치를 최적화하여 유한요소모델을 개선하는 방법이다(Fig. 2).

3. 수치해석을 통한 검증

3.1 유한요소모델

제안된 유한요소모델개선 기법을 검증하기 위하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석 대상 구조물은 21개의 절점과 20개의 빔 요소로 이루어진 단순보이며, 단면의 폭과 높이는 각각 1 m이다.

목표 응답을 생성하기 위하여 초기 유한요소모델의 지점부 회전스프링 강성(K_A, K_B)과 보의 휨 강성(EI_{Beam})을 특정 값으로 조정하였다. 정적해석은 단순보의 경간 중앙에 100 tonf의 정적하중을 재하하고 응답을 계산하였으며, 동적해석은 고유치해석을 수행하여 단순보의 고유진동수를 계산하였다(Table 1).

3.2 모델개선 변수의 민감도 분석

유한요소모델개선 전 단순보의 모델개선변수들과 고유진동수 간의 관계를 파악하기 위하여 민감도 분석을 수행하였다. 양단 지점부의 회전 스프링 강성의 변화에 따른 고유진동

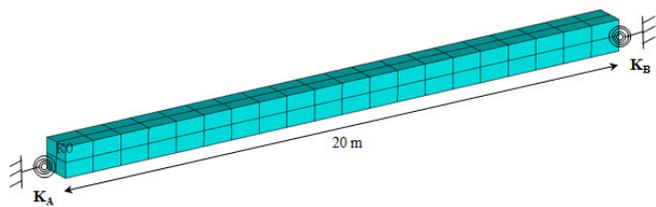


Fig. 3 FE model of simple beam

Table 1 Specific value of parameters and analysis result

Parameter	$K_A(N\text{-m/rad})$	3e9
	$K_B(N\text{-m/rad})$	8e9
	$EI_{Beam}(\text{Relative Stiffness Ratio})^*$	1.00
Dynamic Response	1st Bending(Hz)	8.76
	2nd Bending(Hz)	26.12
	3rd Bending(Hz)	53.50
Static Response	$\theta A(\text{rad})$	4.81e-4
	$\theta B(\text{rad})$	2.88e-4
	$\delta C(\text{mm})$	4.71

* The flexural stiffness of the beam before or after FEMU divided by the initial flexural stiffness

수의 변화는 Fig. 4에 나타내었다. 대상 구조물은 단순보이므로 양단의 지점부 스프링 회전 강성의 변화에 따른 고유진동수의 변화가 동일하다. Fig. 3의 Section A는 지점부 회전 스프링 강성이 1 N-m/rad ~ 1e7 N-m/rad 사이인 경우로 지점부가 롤러, 힌지와 같은 가동단으로 작동하며, 지점부 회전 스프링 강성이 10배씩 증가할 때 1차~3차 휨 모드의 고유진동수의 증가 비율은 1% 이하로 민감도가 매우 낮다. Section B는 지점부 회전 스프링 강성이 1e7 N-m/rad ~ 1e12 N-m/rad 사이이며 지점부 회전 스프링 강성이 증가함에 따라 지점부가 가동단에서 고정단으로 변화되는 단계이다. 지점부 회전 스프링 강성 10배씩 증가할 때 1차~3차 휨 모드의 고유진동수의 증가 비율은 최대 28%로 민감도가 매우 높다. Section C는 지점부 회전 스프링 강성이 1e12 N-m/rad ~ 1e15 N-m/rad 사이인 경우로 지점부가 고정단으로 작동하며, 지점부 회전 스프링 강성 10배씩 증가할 때 1차~3차 휨 모드의 고유진동수의 증가 비율이 1% 이하로써 민감도가 매우 낮다. 이러한 결과로부터 지점부 회전 스프링 강성의 개선 범위는 수렴성을 높이기 위하여 Section B 보다 좁은 1e8 N-m/rad 이상, 1e11 N-m/rad

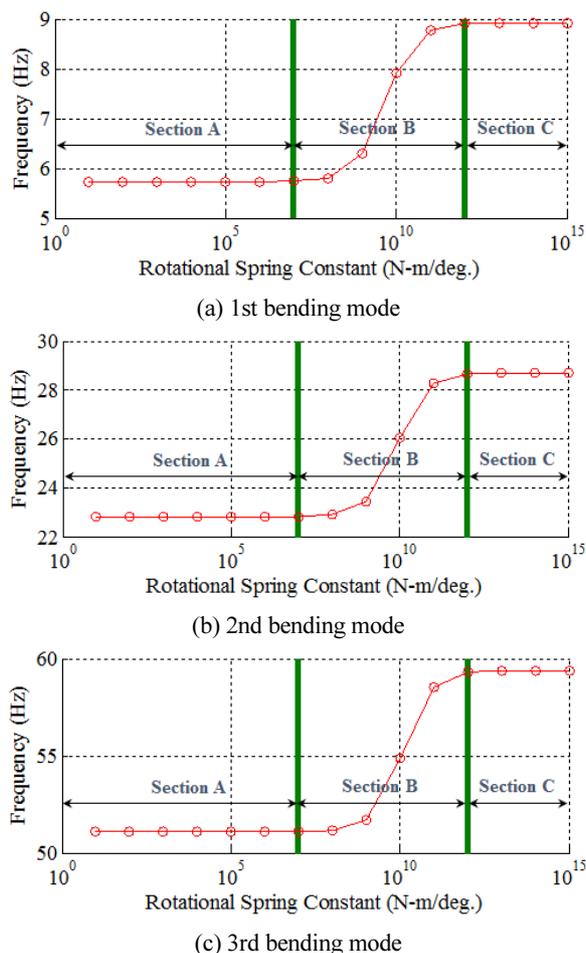


Fig. 4 Rotational spring constant vs. natural frequencies

이하로 결정하였다.

빔의 휨 강성의 경우, 강성이 10% 증가면 1차~3차 휨 모드의 고유진동수가 동일하게 4~5%씩 증가하였다. 빔의 휨 강성의 변화에 따른 고유진동수의 변화는 Fig. 5에 나타내었다.

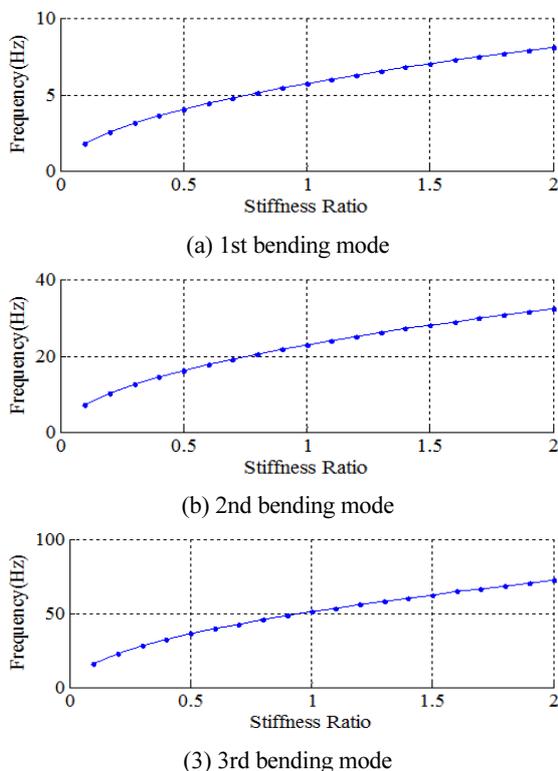


Fig. 5 Flexural rigidity of beam vs. natural frequencies

휨 강성의 개선 범위는 0.7 이상, 1.3 이하로 결정하였다.

3.3 유한요소모델개선

기존 기법과 제안된 기법의 비교를 위하여 유한요소모델개선을 수행하였다. 최적화 알고리즘은 유전자알고리즘이 사용되었으며 기존 기법과 제안된 기법 모두 동일한 조건을 설정하여 최적화를 수행하였다.

3.3.1 기존 유한요소모델개선 기법

먼저 기존 기법을 이용하여 유한요소모델개선을 수행하였다. 기존 기법은 고유진동수 기반 유한요소모델개선 방법이 사용되었다. 목표 응답으로서 동특성 기반 유한요소모델개선 방법은 3개 휨 모드의 고유진동수가 사용되었다. 두 가지 기존 기법의 모델개선변수로서 양단 지점부 회전 스프링 강성과 보의 휨 강성을 선정하였다. 식 (2)는 유한요소모델 개선에 사용된 목적함수이다.

$$Objective Function = \sum_{i=1}^m \omega_i^m \left(\frac{f_i^{EXP} - f_i^{FEM}}{f_i^{EXP}} \right)^2 \quad (2)$$

Table 2 Estimated rotational spring constant by N.N.

Rotational spring constant	K_A (N-m/rad)	K_B (N-m/rad)
Avg.(relative error)	2.89e9 (-3.67%)	8.31e9 (2.75%)
Std.	0.87e8	2.59e8
C.V.	0.03	0.03

Table 3 Comparison of calculated responses

Model	θ_A (rad)	θ_B (rad)	δ_C (mm)	1st Bending(Hz)	2nd Bending(Hz)	3rd Bending(Hz)
Target	4.81e-4	2.88e-4	4.71	8.76	26.12	53.50
Conventional	2.46e-4 (-48.85%)	4.94e-4 (71.51%)	4.68 (-0.69%)	8.80 (0.48%)	26.17 (0.20%)	53.47 (-0.05%)
Boundary condition updated by N.N.(relative error)	4.61e-4 (-4.17%)	2.67e-4 (-7.37%)	4.33 (-8.06%)	9.12 (4.11%)	27.36 (4.75%)	56.18 (5.01%)
Proposed(relative error)	4.89e-4 (1.65%)	2.81e-4 (-2.52%)	4.72 (0.22%)	8.75 (-0.13%)	26.09 (-0.10%)	53.45 (-0.10%)

Table 4 Comparison of model updating parameters

Model	K_A				K_B				EI_{Beam}			
	Best*	Avg.	Std.	C.V.	Best	Avg.	Std.	C.V.	Best	Avg.	Std.	C.V.
Target	3.00e9	-	-	-	8.00e9	-	-	-	1.00	-	-	-
Conventional (relative error)	9.96e9 (232.00%)	5.55e9	3.31e9	0.60	2.75e9 (-65.63%)	5.16e9	2.11e9	0.41	0.99 (-1.47%)	1.01	0.03	0.03
Proposed (relative error)	2.89e9 (-3.67%)	-	-	-	8.31e9 (2.75%)	-	-	-	1.00 (-0.32%)	1.00	0.04	0.04

여기서, m 은 사용된 고유진동수의 개수이며 3이 사용되었고, w 는 각 고유진동수에 대한 가중치이며 3개 모드에 대하여 모두 1/3을 사용하였다.

기존 기법으로 개선된 유한요소모델개선변수의 개선 결과는 Table 3에 나타내었다. 고유진동수 기반 유한요소모델개선 방법(Conventional)으로 개선된 개선변수 중 보의 휨 강성은 목표 값과 2% 이하의 오차를 보였지만 회전 스프링 강성은 목표 값과 최대 232%의 큰 오차를 보였다.

기존 기법으로 개선된 유한요소모델을 사용하여 정적, 동적 응답을 계산한 결과는 Table 4에 나타내었다. 고유진동수 기반 유한요소모델개선 방법으로 개선된 유한요소모델로 계산된 고유진동수 및 처짐과 목표 값 사이의 오차는 1% 이하였다. 그러나 계산된 회전변위와 목표 값 사이의 오차는 최대 71%의 큰 오차가 산정되었다.

개선 결과들로부터 기존 기법을 사용하는 경우, 고유진동수와 처짐의 추정은 가능하지만, 지점부 회전변위의 정확한 추정이 어려운 것으로 판단된다.

3.3.2 제안된 유한요소모델개선 기법

제안된 기법을 이용한 유한요소모델개선은 먼저 처짐, 양단 지점부 회전변위를 인공신경망의 입력 데이터로 사용하여 양단 지점부 회전 스프링 강성을 추정하고 초기 유한요소모델에 적용하였다. 다음 단계에서는 지점부가 개선된 유한요소모델의 보의 휨 강성만을 모델개선변수로 선정하여 3개의 고유진동수로 구성된 목적함수의 최적화를 수행하였다.

먼저 인공신경망을 이용한 지점부 회전 스프링 강성 추정을 위하여 정적해석을 수행하고 처짐과 회전변위를 계산하였다. 인공신경망 학습에 사용된 데이터 세트는 총 200개이며 그 중 70%는 훈련 데이터 세트, 15%는 검증 데이터 세트, 그리고 나머지 15%는 테스트 데이터 세트로 사용하였다. 데이터 세트는 시드(Seed) 값이 0인 메르센 트위스터(Merrenne Twister) 난수 생성기를 이용하여 생성된 200개의 양단의 지점부 회전 스프링 강성 값과, 이를 적용한 각각의 유한요소모델의 정적해석으로 계산된 응답으로 구성된다.

인공신경망을 이용한 회전 스프링 강성 추정 결과의 상세는 Table 2에 나타내었다. 10회 반복 추정된 회전 스프링 강성의 평균값과 목표 값의 오차는 4% 이하였다. 추정된 회전 스프링 강성의 변동계수는 0.03으로서 지점부 회전 스프링 강성을 균일하게 추정하는 것으로 판단된다. 추정된 회전 스프링 강성의 평균값들을 초기유한요소모델에 적용한 후, 정적해석과 동적해석을 수행하여 계산된 응답의 상세는 Table 4에 나타내었다. 계산된 응답과 목표 모델의 응답 간의 최대 오차는 8%이었다.

지점부가 개선된 유한요소모델을 3개의 휨 모드의 고유진

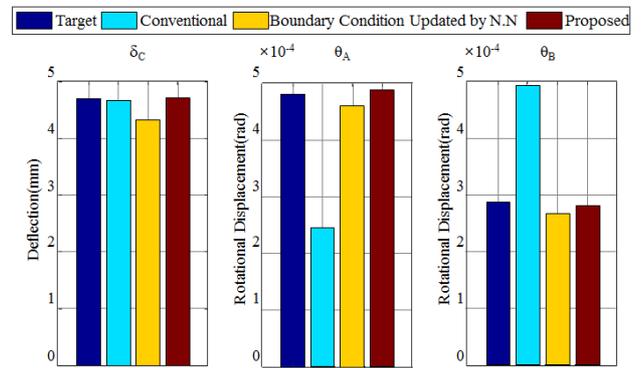


Fig. 6 Comparison of static responses

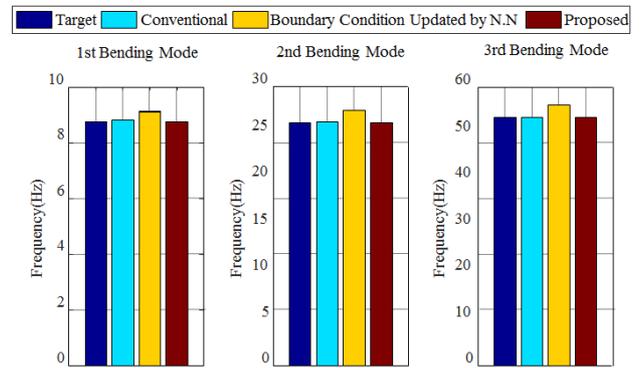


Fig. 7 Comparison of dynamic responses

동수로 구성된 목적함수를 최적화하여 유한요소모델개선을 수행하였다. 개선된 유한요소모델의 개선변수 개선결과는 Table 3에 나타내었다. 제안된 기법으로 추정된 모든 변수들과 목표 모델의 변수 간의 오차는 최대 4% 이하로 관찰되어 모든 개선변수가 목표 변수 값을 잘 추정하는 것으로 판단된다. 제안된 기법으로 개선된 유한요소모델의 정적해석과 동적해석의 결과는 Table 4, Figs. 6과 7에 나타내었다. 계산된 응답과 목표 모델의 응답 간의 최대 오차는 3% 이하로써 개선된 유한요소모델이 목표 유한요소모델의 거동을 잘 모사하는 것으로 판단된다.

기존 기법은 정확한 개선변수의 추정이 어려우므로 지점부 경계조건의 불확실성 규명과 정적응답의 정확한 추정이 어려운 것으로 판단된다. 반면 제안된 기법은 개선변수의 정확한 추정이 가능하여 경계조건의 불확실성 규명이 가능하고, 정적응답과 동적응답의 정확한 추정이 가능한 것으로 판단된다. 또한 기존 기법은 지점부 회전스프링 강성의 변동계수가 크게 산정되고, 균일한 결과를 산정하지 못하는 불량조건문제로 보인다. 제안된 기법은 지점부 경계조건의 불확실성을 제거함으로써 개선변수들이 균일하게 추정되고, 균일한 결과가 산정되었다.

4. 결 론

제안된 기법은 단순보 수치해석을 통하여 검증하였다. 1) 제안된 유한요소모델개선 기법은 모든 변수를 비교적 정확하게 추정하였으며(최대 오차 3.7%). 2) 동적응답뿐만 아니라 정적응답도 정확하게 추정하였다(최대 오차 2.5%).

기존 유한요소모델개선 기법은 보의 휨 거동과 관련된 지점부 회전 스프링 강성과 보 휨 강성의 동조(Coupling)를 제거하기 어려우므로 국부해(Local Minimum)에 빠질 가능성이 높다. 반면 제안된 유한요소모델개선 기법을 사용하면, 먼저 지점부의 불확실성 제거한 후 보의 휨 강성을 개선하므로 회전 스프링과 휨 강성의 동조를 제거하여 신뢰성 있는 유한요소모델 구축이 가능한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술지역특성화사업 연구개발사업의 연구비지원(16RDRPB076564-03)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

Alemdar Bayraktar and Ahmet Can (2010), Finite Element Model Updating of Kömürhan Highway Bridge Based on Experimental Measurements, *Smart Structures and Systems*, 6(4), 373-388.

Brincker, R., Zhang, L., and Andersen, P. (2001), Modal Identification of Output-only Systems Using Frequency Domain Decomposition, *Smart Materials and Structures*, IOP, 10(3), 441-445, ISSN 0964-1726.

Brownjohn, J. M. W., Moyo, P., Omenzetter, P., and Lu, Y. (2003), Assessment of Highway Bridge Upgrading by Dynamic Testing and Finite-Element Model Updating, *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, 8(3), 162-172, ISSN 1084-0702.

Jaishi, B., Kim, H. J., Kim, M. K., Ren, W. X., and Lee, S. H. (2007). Finite Element Model Updating of Concrete-filled Steel Tubular Arch Bridge Under Operational Condition Using Modal Flexibility, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21, 2406-2426, ISSN 08883270.

Jung, D. S., and Kim, C. Y. (2011), Finite Element Model Updating on

Small-scale Bridge Model Using the Hybrid Genetic Algorithm, *Structure and In-frastructure Engineering*, 9(5):481-495, 2013. ISSN 1573-2479.

Kim, H. J., Cho, S. J., and Sim, S. H. (2015), Finite Element Model Updating Based on Data Fusion of Acceleration and Angular Velocity, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 19(2), 60-67, ISSN 2234-6937.

Liao, J., Tang, G., Meng, L., Liu, H., and Zhang, Y. (2012). Finite Element Model Updating based on Field Quasi-static Generalized Influence Line and Its Bridge Engineering Application, *Procedia Engineering*, 31, 348-353, ISSN 18777058.

McCall, J. (2005). Genetic Algorithms for Modelling and Optimisation, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 184(1), 205-222, ISSN 0377-0427.

Nelder, B. J. and Mead, R. (1965), A Simplex Method for Function Minimization, *The Computer Journal*, 7(4), 308-313.

Park, W., Park, J. Y., and Kim, H. K. (2015). Candidate Model Construction of a Cable-stayed Bridge Using Parameterised Sensitivity-based Finite Element Model Updating, *Structure and Infrastructure Engineering*, 11(9), 1163-1177, ISSN 1573-2479.

Park, Y. S., Kim, S., Kim, N., and Lee, J. J. (2017). Finite Element Model Updating Considering Boundary Conditions Using Neural Networks, *Engineering Structures*, 150, 511-519.

Ren, W. X., Fang, S. E., and Deng, M. Y. (2011). Response Surface - based Finite-element-model Updating Using Structural Static Responses, *Journal Eng Mech-ASCE*, 137, 248-257.

Sanayei, M., Phelps, J. E., Sipple, J. D., and Bell, E. S. (2012), Instrumentation, Nondestructive Testing, and Finite-element Model Updating for Bridge Evaluation Using Strain Measurements, *Journal of Bridge Engineering*, 17, 130-138.

Schlune, H., Plos, M., and Gylltoft, K. (2009), Improved Bridge Evaluation Through Finite Element Model Updating Using Static and Dynamic Measurements, *Engineering Structures*, 31(7), 1477-1485, ISSN 01410296.

Wang, H., Li, A. Q., and Li, J. (2010). Progressive Finite Element Model Calibration of a Long-span Suspension Bridge based on Ambient Vibration and Static Measurements, *Engineering Structures*, 32(9), 2546-2556, ISSN 01410296.

Xiao, X., Xu, Y., and Zhu, Q. (2014), Multiscale Modeling and Model Updating of a Cable-stayed Bridge, II: Model Updating Using Modal Frequencies and Influence Lines, *Journal Bridge Eng.*, ASCE, 20(10), 1943-5592.

Received : 10/31/2017

Revised : 11/14/2017

Accepted : 11/20/2017

요 지 : 본 논문에서는 지점부 경계조건을 고려하여 단순보의 유한요소모델을 개선하는 기법을 제안하였다. 기존의 유한요소모델개선 기법은 주로 가속도 응답으로부터 추정된 동특성(고유진동수, 모드형상)을 이용하여 유한요소모델을 개선하였다. 이렇게 개선된 유한요소모델은 실제 구조물의 정적응답을 예측하기 어렵고, 잘못된 구조물의 물성치를 추정하는 문제가 발생한다. 제안된 기법은 먼저, 구조물의 처짐과 지점부 회전변위를 계측하여 지점부 경계조건을 간략화한 유한요소모델의 회전 스프링 강성을 정량적으로 추정한다. 회전 스프링 강성이 개선된 유한요소모델과 구조물의 동특성을 사용하여 구조물의 물성치를 추정함으로써 최종 개선된 유한요소모델을 구축된다. 제안된 유한요소모델 개선 기법과 기존 유한요소모델개선 기법을 수치해석 시뮬레이션을 통하여 비교 및 검증하였다.

핵심용어 : 유한요소모델 개선, 경계조건, 인공신경망, 구조 응답
