

정적하중입력/변위출력관계를 이용한 단경간 교량의 유한요소모델개선기법: 실내실험검증

김세훈¹, 구기영^{2*}, 이종재³

Laboratory Validation of Bridge Finite Model Updating Approach By Static Load Input/Deflection Output Measurements

Sehoon Kim¹, Ki Young Koo^{2*}, Jong-Jae Lee³

Abstract: This paper presents a laboratory validation of a new approach for Finite Element Model Updating(FEMU) on short-span bridges by combining ambient vibration measurements with static load input-deflection output measurements. The conventional FEMU approach based on modal parameters requires the assumption on the system mass matrix for the eigen-value analysis. The proposed approach doesn't require the assumption and even provides a way to update the mass matrix. The proposed approach consists of two steps: 1) updating the stiffness matrix using the static input-deflection output measurements, and 2) updating the mass matrix using a few lower natural frequencies. For a validation of the proposed approach, Young's modulus of the laboratory model was updated by the proposed approach and compared with the value obtained from strain-stress tests in a Universal Testing Machine. Result of the conventional FEMU was also compared with the result of the proposed approach. It was found that proposed approach successfully estimated the Young's modulus and the mass density reasonably while the conventional FEMU showed a large error when used with higher-modes. In addition, the FE modeling error was discussed.

Keywords: Short-span bridges, Finite element model updtng, Dynamic test, Static test, Data fusion

1. 서 론

교량의 유한요소모델개선은 교량의 구조적 안전성을 확보하고 비용-효율적인 유지관리를 실현하기 위해 매우 중요한 기술이다. 교량의 열화는 건설 직후부터 사용 하중 및 환경 하중 하에서 발생되는데, 현재 교량의 열화정도가 허용범위 안에 있고 교량의 기능을 수행하는데 문제가 없음을 확인하는 과정이 필요하다. 교량 유한요소모델개선은 교량의 열화를 정량적으로 평가할 수 있는 도구로써, 교량의 실측 구조응답이 교량 유한요소모델이 예측하는 구조응답과 유사하도록 유한요소모델의 구조계수를 조정하고, 가장 유사해지는 구조계수값을 추정치로 사용한다. 신뢰성 있는 유한요소모델개선 기술은 열화를 조기에 인지하고 대응함으로써 생애주기 유지관리 비용을 줄이고, 중대한 열화가 발생 된 교량에는 필요한

적절한 보수/보강 정도를 정하는 기본 자료로 활용될 수 있으며, 과소보강으로 발생할 수 있는 위험과 과다보강으로 발생하는 비용을 줄일 수 있다.

유한요소모델 개선을 수행한 초기의 연구들은 대부분 상시 진동으로부터 얻어진 고유진동수 및 모드형상을 사용하여 다양한 종류의 구조물에 대해서 수행되어왔다[현수교(Wang et al., 2010; Macdonald and Friswell, 2007), 사장교(Brownjohn and Xia, 2000; Park et al., 2014), PSC Box 거더교(Bayraktar and Can, 2010; Lin et al., 2009), PSC 거더교(Brownjohn et al., 2003), 아치교(Jaishi et al., 2007)]. 또한 모드계수로 부터 계산할 수 있는 모드 유연도행렬(Modal Flexibility)를 사용한 연구(Jaishi et al., 2007)와 가속도와 각속도로부터 얻어진 모드계수를 사용한 연구(Kim et al., 2015)도 있다.

모드계수기반의 모델개선방법의 제한점은 데이터의 개수가 적어서 많은 수의 구조 파라미터를 최적화변수로 설정할 경우 불량조건문제(III-conditioned Problem)에 봉착할 수 있다는 점과, 둘째 모드계수로 개선된 유한요소모델이 정적응답예측에 사용될 경우 결과의 정확성을 보장하기 어렵다는 점이다.

이를 극복하기 위해서, 최근에는 정적 변위 및 변형을 응답을 이용한 유한요소모델개선 연구(Ren et al., 2011; Sanayei et

¹정회원, 세종대학교 건설환경공학과, 박사과정

²정회원, University of Exeter (UK), 조교수, 공학박사, 교신저자

³정회원, 세종대학교 건설환경공학과, 부교수, 공학박사

*Corresponding author: k.y.koo@exeter.ac.uk

Univ. of Exeter, College of Engineering, Mathematics and Physical Sciences

•본 논문에 대한 토의를 2016년 6월 1일까지 학회로 보내주시면 2016년 7월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

al., 2012; Liao et al., 2012) 및 정적 응답과 동적응답을 동시에 사용하는 연구(Xiao et al., 2013; Jung and Kim, 2013)가 수행되었고, 모드계수로 유한요소모델개선을 수행하고 정적응답에 대하여 검증한 연구(Wang et al., 2010)도 있다.

유한요소 모델개선에서 중요한 이슈 중에 하나는 유한요소 모델의 모델링오차이다. 잘못된 유한요소모델구조는 모델개선 결과에 큰 오차를 유발할 수 있으므로 신중하게 선택되어야 한다. 유발가능한 모델링 오차는 (1)경계조건의 불확실성(Q. W. Zhang, T. Y. P. Chang, 2001), (2)구조부재간 연결상태의 불확실성, (3) 유한요소모델의 이산화에 따른 부정확성 등이 있다. 모델링 오차가 내재된 유한요소모델을 이용하여 모델 개선을 수행하면 구조계수 추정치가 편향될 수 있다(Sanayei et al., 2012; Schlune et al., 2009).

본 연구에서는 신뢰성 높은 유한요소모델 개선을 위하여 계측된 정적응답과 동적응답을 합리적으로 통합하는 방법을 제안하였으며, 이를 실내실험을 통하여 검증하였다.

2. 유한요소모델개선기법

2.1 기존의 모델개선기법

기존의 모델개선기법은 1) 상시진동시험으로 교량의 모드계수를 추정(Brincker et al., 2001; Peeters and De Roeck, 1999) 하고, 2) 교량 유한요소모델로부터 계산된 모드계수를 이용하여 아래 식 (1) (단, 기존의 방법은 $\gamma=0$)과 같이 최적화 목적함수(cost function)을 구성하고, 3) 목적함수가 최소화 되도록 구조계수를 최적화한다. 주로 사용되는 최적화 기법은 심플렉스방법(Nelder and Mead, 1964), 유전자알고리즘(McCall, 2005), 혹은 Hybrid방법(Jung and Kim, 2013)등이 있는데, 심플렉스방법은 그 알고리즘이 매우 간단하고 계산시간이 짧은 장점이 있지만, 경우에 따라 국부 해에 수렴하는 단점이 있고, 유전자알고리즘은 전역적 최적해를 주는 장점이 있지만, 계산 시간이 많이 걸리는 단점이 있다. Hybrid방법은 초기단계에는 유전자알고리즘을 사용하고, 일정정도 수렴한 뒤에는 심플렉스방법을 사용하여 수렴속도를 증가시키는 방법이다. 최근에는 모드계수에 더해 정적응답 항을 목적함수에 추가하여(식 (1), $\gamma \neq 1$) 유한요소모델을 개선하는 연구가 시도되었다(Xiao et al., 2013; Jung and Kim, 2013).

$$CostFun = \alpha \sum_{i=1}^N \omega_i^m \left(\frac{f_i^{EXP} - f_i^{FEM}}{f_i^{EXP}} \right)^2 + \beta \sum_{i=1}^N \omega_i^m (1 - MAC(\Phi_i^{EXP} - \Phi_i^{FEM})) + \gamma \sum_{j=1}^M \omega_j^d \left(\frac{y_j^{EXP} - y_j^{FEM}}{y_j^{EXP}} \right)^2 \quad (1)$$

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. $f_i^{FEM}, \Phi_i^{FEM}, f_i^{EXP}, \Phi_i^{EXP}$ 는 각각 유한요소모델로부터 계산된 i -번째 모드의 고유진동수, 모드형상, 실험으로부터 구한 i -번째 고유진동수, 모드형상이다. MAC 은 Modal Assurance Criterion이다. y_j^{FEM}, y_j^{EXP} 는 각각 j -번째 하중 경우에 대한 유한요소모델로부터 계산된 정적응답, 실험으로부터 구한 정적응답이다. N 은 사용된 모드의 개수, M 은 사용된 하중위치의 개수이다.

2.2 제안된 동적/정적응답의 통합기법

동적응답과 정적응답 계측값을 식 (1)과 같은 형태로 통합하는 기존의 방식은 구조물의 질량행렬을 정확하게 알고 있다는 가정에 기반을 둔다. 이는 질량행렬이 f_i^{FEM}, Φ_i^{FEM} 를 계산하는데 필요하기 때문이다. 만약 알고 있는 질량행렬이 부정확하다면, f_i^{FEM}, Φ_i^{FEM} 값에 오차가 발생하고, 따라서 f_i^{FEM}, Φ_i^{FEM} 이 오차 없이 계측되었다고 하더라도 목적함수의 동적응답 관련항을 0으로 만들지 못한다. 가정된 질량행렬이 가지는 오차는 강성행렬추정의 오차로 전파된다. 일반적으로 도면으로부터 추정된 질량행렬이 실제 구조물의 값과 큰 차이가 없다고 추측되지만, 이는 엄밀히 검증/보고된 바가 없다.

본 연구에서는 이러한 가정을 사용하지 않으면서 동적/정적응답을 통합 할 수 있고, 구조계의 질량행렬을 추정할 수 있는 방법을 Fig. 1과 같이 제안하였다.

제안된 기법은 두 가지 단계로 구성되는데, 첫째, 정적하중 입력-변위출력관계로 부터 구조물의 강성행렬개선을 수행하고, 둘째, 개선된 강성행렬과 계측된 저차의 몇 개의 고유진동수를 이용하여 질량행렬을 개선한다. 제안된 방법은 강성행렬개선프로세스에서 질량행렬에 대한 가정을 사용하지 않으므로써 위에서 설명한 에러전파의 가능성이 없고, 강성행렬과 질량행렬을 함께 개선할 수 있는 장점을 가진다.

제안된 기법을 실제 교량 구조물에 적용하기 위해서 정적하중입력/변위출력관계를 계측하는 것이 필요하다. 이러한 물리량의 계측은 현실적으로 거의 불가능한 것으로 인식되어 왔으나, 최근 계측장비의 발달과 대중화로 가능해졌다. 차량 하중 위치의 경우, 재하차량에 반사경을 부착하고 Robotic Total Station을 이용하여 반사경의 위치를 20Hz이상의 샘플링 주파수로 계측할 수 있다(Westgate et al., 2014). 혹은 GPS-RTK(Real Time Kinematic) 수신기를 재하차량 상부에 설치하면 재하 차량의 위치를 cm 레벨의 정확도로 계측할 수 있다(Kalooop and Li, 2009). 교량의 변위응답의 경우, 망원 렌즈/캠코더/노트북으로 구성된 Computer Vision 시스템을 이

	Conventional Method	Proposed Method
Outcomes	Updated K matrix based on assumed M matrix	Updated K matrix & M matrix
Procedure	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <div style="background-color: #4a7ebb; color: white; text-align: center; padding: 5px;">Modal Parameters ID</div> <div style="text-align: center;">↓</div> <div style="background-color: #e67e22; color: white; text-align: center; padding: 5px;">Eigen Update</div> <ul style="list-style-type: none"> Update K matrix with an assumption on M matrix </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <div style="background-color: #27ae60; color: white; text-align: center; padding: 5px;">Static IO Measurements</div> <div style="text-align: center;">↓</div> <div style="background-color: #27ae60; color: white; text-align: center; padding: 5px;">Static Update</div> <ul style="list-style-type: none"> Update K matrix without assumption on M matrix </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> <div style="background-color: #4a7ebb; color: white; text-align: center; padding: 5px;">Modal Parameters</div> <div style="text-align: center;">↓</div> <div style="background-color: #e67e22; color: white; text-align: center; padding: 5px;">Eigen Update</div> <ul style="list-style-type: none"> Update M matrix </div>

Fig. 1 Proposed FEMU approach by combining Dynamic and Static responses

용하면 비교적 용이하게 계측할 수 있다(Lee and Shinozuka, 2006).

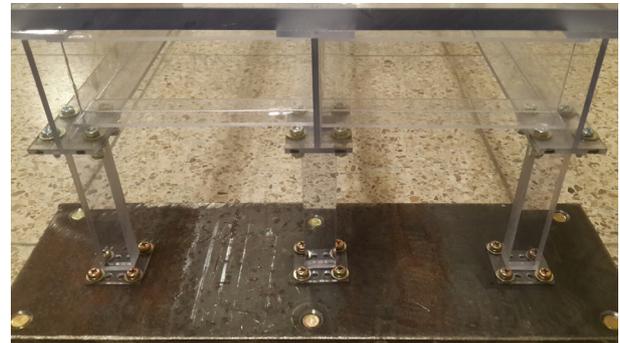
3. 모형교량 실내실험 검증

제안된 기법의 검증을 위하여, 축소모형교량을 제작하였다. 본 모형교량은 중부내륙고속도로 시험도로구간의 삼승교의 단순화된 모형이고, 변위계측의 용이성을 위하여 유연한 폴리카보네이트를 사용하였다. 모형교량은 삼승교의 1/20 축소모형으로서 길이 2 m, 폭 0.39 m 제작하였으며, 제작의 편의성을 위해서 5개의 중거더를 3개로 줄이고, 3가지 형식의 횡방향 부재(브레이싱, 다이아프램, 가로보)를 1가지 형식으로 단순화하였다. 교량의 지점부는 지점부 회전강성을 모사하기 위하여 폴리카보네이트 기둥으로 제작되었다(Fig. 2). 축소모형교량의 유한요소모델은 ANSYS를 이용하였다. 바닥판, 중거더, 횡거더는 얇은 판의 형태이므로, 판의 거동을 잘 모사할 수 있는 Shell181 요소로, 지점부 기둥은 길이가 상대적으로 긴 사각단면 부재이므로, Beam 188 요소로 모델링되었다(Fig. 3). 모형교량의 바닥판과 거더는 접착하여 일체 거동하도록 제작하였으며, 유한요소모델에서는 바닥판과 거더를 Rigid Link 요소로 연결하여 일체 거동하도록 모델링하였다. ANSYS는 APDL(Ansys Parametric Design Language)을 통해 일괄처리(Batch-run)하기 용이하므로 선택되었고, MATLAB 상에서 유한요소모델개선 최적화 루틴이 수행되면서, ANSYS 입력파일을 생성하고, ANSYS를 실행하고, 출력결과를 읽어 들이도록 설정되었다.

본 실험에서는 제안된 기법을 이용하여 모형교량의 재료 폴리카보네이트의 탄성계수를 추정하고, UTM(Universal Testing Machine)으로부터 얻어진 값과 비교하여 제안된 기법의 정확성을 검증하였다. 또한 기존의 동적응답기반 유한



(a) The front view



(b) Section of the girder and the support

Fig. 2 The Scale Model Bridge

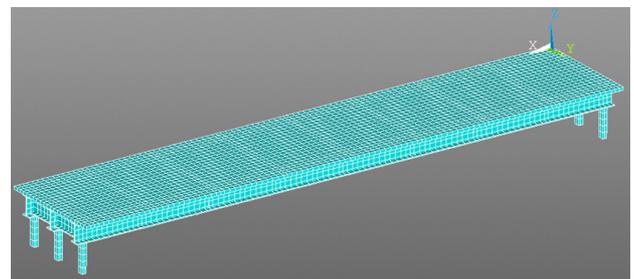
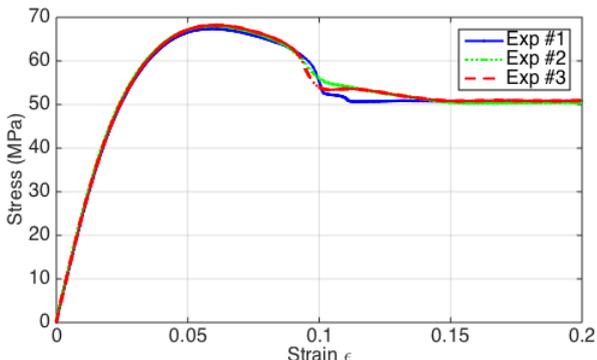


Fig. 3 Finite element model of the scale model bridge Finite element model of the scale model bridge

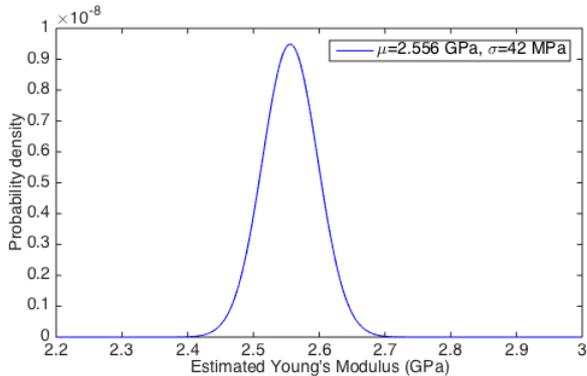
요소모델개선이 수행되었고, 제안된 기법과 비교되었다. 질량밀도에 대한 추정도 수행되었다.

3.1 폴리카보네이트의 탄성계수 측정

모형교량의 재료인 폴리카보네이트의 탄성계수(Young's



(a) Stress-Strain curve



(b) Distribution of Young's modulus

Fig. 4 Estimation of Young's modulus of the Polycarbonate using by UTM

Modulus)를 Universal Testing Machine을 이용하여 측정하였다. 모형교량 제작에 사용된 폴리카보네이트의 인장 시편 3개에 대하여 반복 실험하였고, 응력-변형률 곡선(Fig. 4(a))의 원점에서의 기울기를 곡선 맞춤(curve-fitting)하여 세 시편의 탄성계수를 각각 구하였다. 그 평균값은 2.56 GPa, 표준편차는 42 MPa였고, 그 분포를 정규분포로 가정했을 때의 확률밀도 함수는 Fig. 4(b)와 같다.

3.2 정적응답을 이용한 탄성계수 측정

Fig. 5에서 보는 바와 같이 11 kgf의 추 1개를 이용하여 내측 거더와 외측거더에서의 중앙경간 및 1/4 경간의 총 4개소에 하중을 각각 가했으며, 중앙경간 중앙거더와 외측거더의 수직처짐을 2개의 레이저 변위계(Optex CD4-350)를 이용하여 계측하였다. 계측 노이즈를 포함하여 제안된 기법의 불확실성을 관찰하기 위하여, 추를 올리고 처짐값을 계측하는 과정을 각 5회 반복하였다. Fig. 6은 내측거더-1/4 경간에 재하되었을 때의 수직처짐 시계열이다.

실측변위와 유한요소모델의 예측변위가 가장 유사하게 되는 탄성계수 값이 추정되었다. 유사성을 나타내는 기준으로 다음과 같은 적합도(Fitness)를 사용하였다.

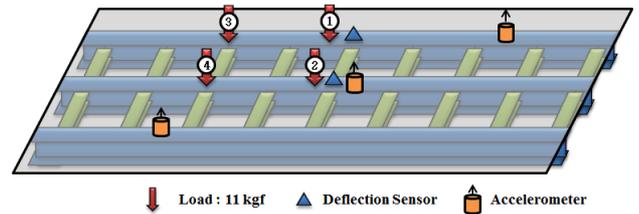


Fig. 5 Locations of loadings, displacement sensors and accelerometers

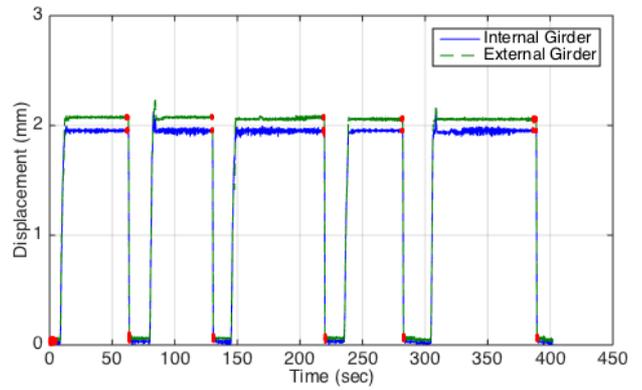
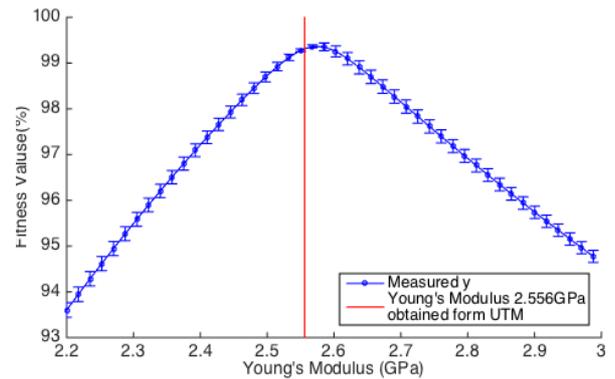
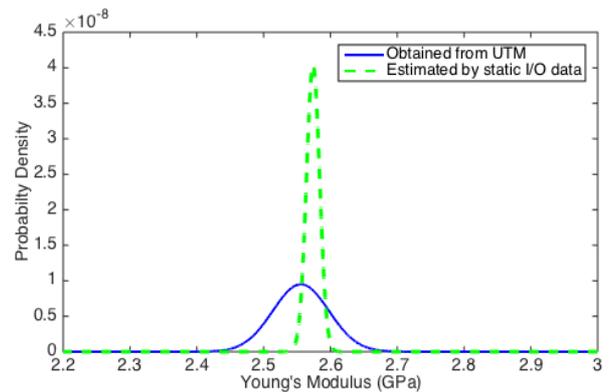


Fig. 6 Time history of displacement measurements when loaded at the quarter-point of the middle girder



(a) Fitness



(b) Distribution of Young's modulus

Fig. 7 Estimated Young's modulus using the static load input-deflection output

$$Fitness = \left(1 - \frac{\|y^{EXP} - y^{FEM}\|}{\|y^{EXP}\|}\right) \times 100(\%) \quad (2)$$

여기서, $y^{EXP} = \{y_{1c}^{EXP} \dots y_{4c}^{EXP} y_{1o}^{EXP} \dots y_{4o}^{EXP}\}$, y_{1c}^{EXP} , y_{1o}^{EXP} 는 각각 실험으로부터 얻은 i -번째 하중위치에서의 중앙거더에서의 처짐과 외측거더에서의 처짐이다. y^{FEM} 은 유한요소모델로부터 얻은 처짐으로 구성되고, y^{EXP} 와 동일한 형태를 가지는 열 벡터이다. $\|\cdot\|$ 는 2-norm이다.

Fig. 7(a)는 5회 반복실험에 대한 적합도 곡선들의 평균과 $+1\sigma$ 수준을 보여준다. 각 적합도 곡선의 극대점에서의 탄성계수 값이 추정치로 선택되었고, 이들이 정규 분포를 따른다고 가정했을 때의 확률밀도함수는 Fig. 7(b)와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 정적 처짐을 바탕으로 구한 탄성계수의 분포는 UTM 실험으로부터 구한 탄성계수값에 매우 근접함을 알 수 있다. UTM 결과의 평균값과 내측/외측거더 정적 처짐으로부터 추정된 결과 간의 오차는 1.2% 였다.

본 실내실험으로부터 정적입출력관계로부터 모형교량의 탄성계수를 합리적으로 추정함을 관찰하였다.

3.3 동적응답 데이터를 이용한 탄성계수 추정

동적실험은 Fig. 5와 같이 3개의 가속도센서(PCB 333B32)를 이용하여, 4분간의 상시진동 계측을 5회 반복하였다. 계측된 시계열과 에너지 스펙트럼 밀도(Power Spectral Density, PSD)는 Fig. 8에 나타나있다.

계측된 가속도응답에 대하여 추계론적 부공간 규명법(Stochastic Subspace Identification, SSI)을 이용하여 모드계수를 추정하였다. 추정된 고유진동수는 Table 1에 나타나 있고, 모드형상은 Fig. 9에 나타나있다.

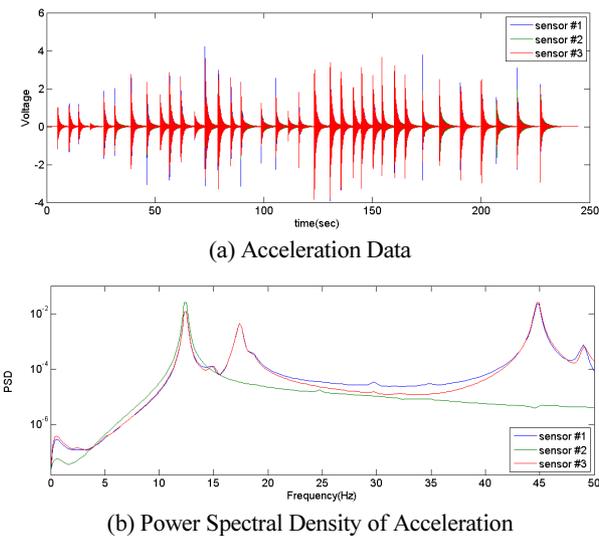


Fig. 8 Acceleration Measurements

Table 1 Estimated natural frequency using by SSI

Mode	1st mode	2nd mode	3rd mode
Average	12.40 Hz	17.40 Hz	44.82 Hz
Std.	0.002 6Hz	0.0089 Hz	0.0051 Hz

Table 2 Estimated Young's modulus using by natural frequency

Mode	Average(Std.)	Difference from UTM
1st mode	2.62 GPa(1 MPa)	2.3 %
2nd mode	2.90 GPa(3 MPa)	13.5 %
3rd mode	2.46 GPa(1 MPa)	-3.9 %

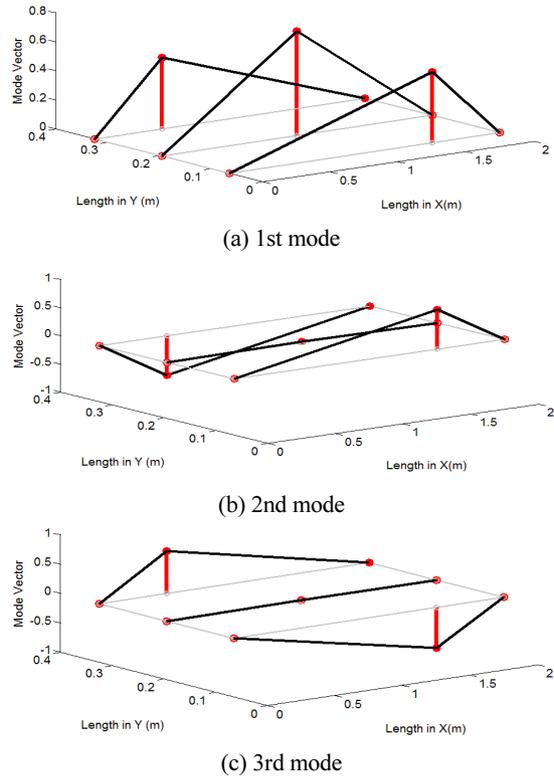


Fig. 9 Estimated mode shapes from ambient vibration measurements of the scale model bridge

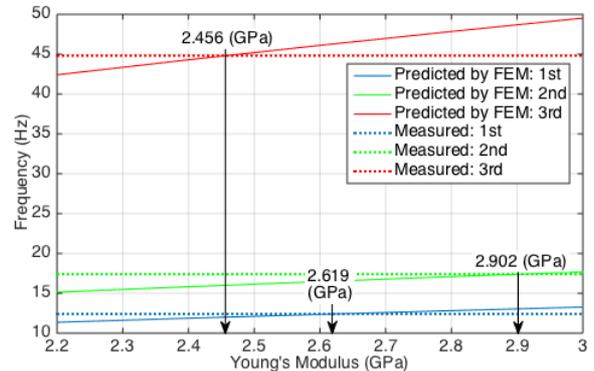


Fig. 10 Estimation of Young's modulus using by natural frequencies

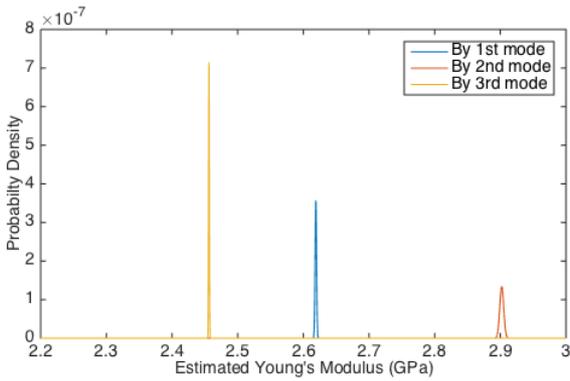


Fig. 11 Normal distribution curve of estimated Young's modulus using by natural frequencies

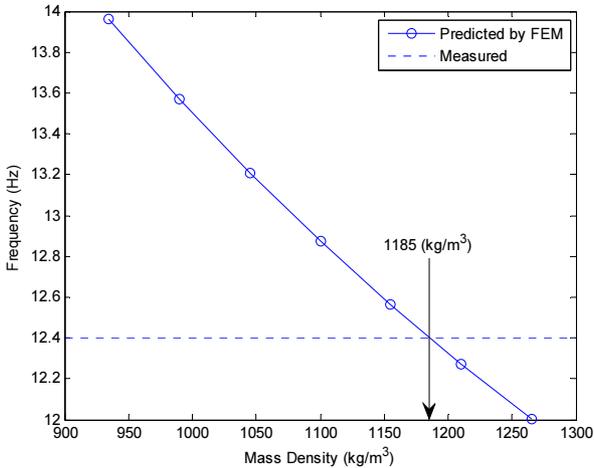


Fig. 12 Estimated Mass Density

유한요소모델로부터 탄성계수와 1차-3차 고유진동수와의 관계를 Fig. 10과 같이 구하였다. 실험으로부터 얻어진 고유진동수와 이 관계를 이용하여 탄성계수를 추정하였으며, 5개의 반복실험에 대해서 얻어진 탄성계수 값들의 분포를 정규분포로 가정했을 때의 확률밀도함수는 Fig. 11과 같다. 여기에서 보는 바와 같이, 각 모드의 고유진동수로부터 구한 탄성계수값에 모드별로 상당한 편차가 존재(Table 2)함을 알 수 있다. UTM으로 추정된 탄성계수 평균값과 비교하였을 때, 1차 모드는 유사하게(오차 2.5%) 추정되었으나, 2차 모드는 크게(13.5%), 3차 모드는 작게(오차 -3.9%) 추정되었다.

이러한 오차의 정확한 원인은 명확하지 않으나, 유한요소모델의 모델링에러가 원인일 수 있다. 이론적으로 모델링에러가 없다면 실측된 각각의 고유진동수는 모두 동일한 혹은 유사한 탄성계수 값을 주어야하지만, 모델링오차가 있다면 서로 다른 추정 값을 줄 수 있다.

3.4 정적응답과 동적응답을 이용한 질량밀도 추정

정적실험에서 추정된 강성행렬과 동적실험으로부터 얻어진 고유주파수를 이용하면 구조물의 질량밀도를 추정할 수 있다. 유한요소모델이 예측하는 고유진동수와 실측 고유진동수가 유사하도록 유한요소모델의 미지의 질량행렬을 조정할 수 있으며, 가장 근접한 질량행렬값을 유한요소모델의 질량행렬 추정치로 사용할 수 있다.

본 실험에서는 동적실험으로 얻어진 1차 고유진동수만을 이용하여 질량밀도를 추정하였다. 이전 절에서 토의한 것과 같이 계측된 2차 3차 고유진동수는 유한요소모델링 오차가 존재할 가능성이 있으므로 사용하지 않았고, 1차 고유진동수만을 이용하여 질량행렬을 추정하였다.

유한요소모델로부터 질량밀도와 1차 고유진동수의 관계를 Fig. 12와 같이 구하였고, 계측된 1차 고유진동수를 사용하여 질량밀도를 추정하였다. 추정된 질량밀도의 평균은 1185 kg/m^3 이었고, 표준편차는 0.506 kg/m^3 이었다. 이 평균값은 실제 폴리카보네이트의 질량밀도와 1.3%의 오차를 보였다.

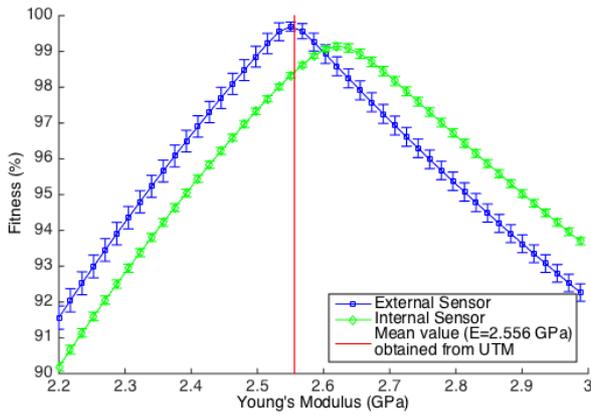
4. 모델링오차에 대한 토의

동적응답을 이용한 탄성계수추정결과로부터 본 연구에서 사용된 유한요소모델이 2차, 3차 모드를 예측하는데 있어서 모델링오차가 존재할 가능성을 보여주었다. 본 절에서는 정적거동에 대한 모델링오차에 대해서 토의하기 위하여, 계측된 정적입출력관계 데이터를 몇 개의 부분집합으로 나누어 적합도를 계산하고 각 부분집합에 대한 탄성계수 추정결과를 비교하였다.

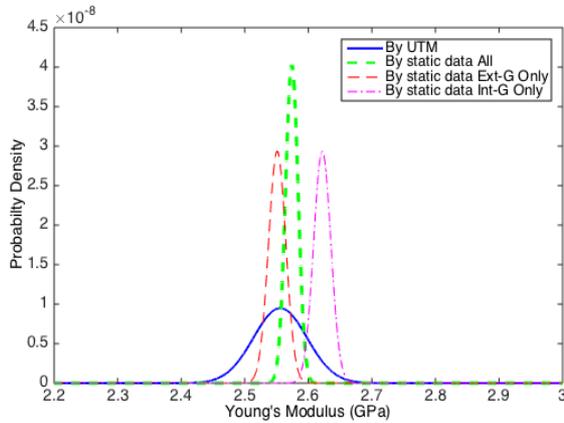
첫째, 4개의 하중입력경우를 모두 사용하지만 1개 센서의 변위응답만을 사용한 경우의 적합도를 Fig. 13에 나타내었다. 적합도의 극대점에서의 탄성계수 값이 외/내측거더변위에 대해서 서로 다른 값으로 존재하고, 따라서 Fig. 13(b)에서와 같이 탄성계수분포가 서로 분리됨을 관찰할 수 있다. 외측거더의 탄성계수분포는 UTM 결과와 매우 유사하나, 내측거더의 탄성계수분포는 UTM결과에 비해 500 MPa 정도 높아진 것을 알 수 있다.

둘째, 1개의 하중입력경우와 1개 센서의 변위응답만을 사용한 경우의 탄성계수의 분포는 Fig. 14와 같다. 탄성계수의 분포가 더 자세히 분리되는 것을 관찰할 수 있다. 동적응답을 이용한 탄성계수추정 결과가 모델링오차의 존재가능성을 보였듯이, 정적응답을 이용한 탄성계수추정 결과도 비슷한 경향을 보여주었다.

유한요소모델의 모델링 오차는 정확히 모델링하기 어려운



(a) Fitness Value and 1σ -level



(b) Distribution of Estimated Young's modulus

Fig. 13 Estimated Young's modulus when 4 load inputs and 1 deflection output were used

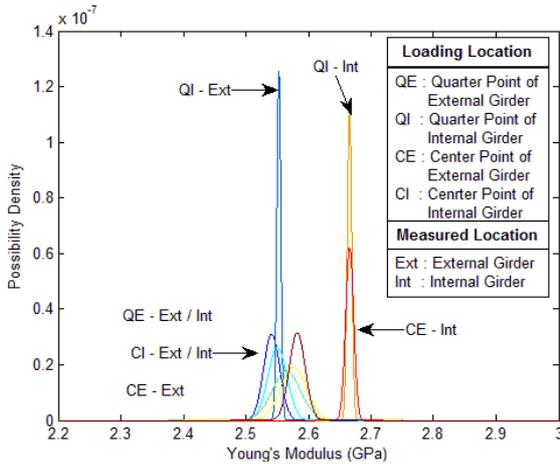


Fig. 14 Estimated Young's Modulus when 1 Load Input-1 Deflection Output were used

지점조건 불확실성과 부재간 연결상태의 불확실성으로 인해 정적/동적 거동을 막론하고 존재한다고 보는 것이 합리적이며, 위 실험결과로부터 확인할 수 있다. 이로 인한 강성추정의

부정확성을 최소화하기 위한 현실적인 방법은, 첫째, 되도록 고차의 동적응답을 사용하지 않고, 둘째, 많은 정적응답 계측값을 사용하여 평균적인 추정값을 얻는 것일 수 있다.

5. 결론

제안된 기법으로 실내실험 모형교량에 대하여 탄성계수와 질량밀도를 합리적으로 추정할 수 있음을 실험적으로 확인하였다. 모형교량의 정적응답 계측치로부터 탄성계수를 합리적으로 추정하였고(오차 1.2%). 추정된 탄성계수와 실측 1차 고유진동수를 이용하여 모형교량의 질량밀도를 합리적으로 추정하였다(오차 1.3%).

동적응답을 사용한 기존의 유한요소모델기법과의 비교로부터, 고유진동수만을 사용한 모델개선은 고차모드를 사용할 경우 큰 오차를 가짐을 관찰하였다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술 연구사업의 연구비지원(13건설기술A01)와 국토교통부/교통물류연구개발사업의 연구비지원(15TLRP-C099511-01)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Bayraktar, A. and Can, A. (2010), Finite Element Model Updating of Kömürhan Highway Bridge based on Experimental Measurements, *Smart Structures and Systems*, 6(4), 373-388.
2. Brincker, R., Zhang, L., and Zhang, P. (2001), Modal Identification of Output-only Systems Using Frequency Domain Decomposition, *Smart Materials and Structures*, IOP, 10(3), 441-445, ISSN 0964-1726.
3. Brownjohn, J. M. W. and Xia, P. Q. (2000), Dynamic Assessment of Curved Cable-stayed Bridge by Model Updating, *Journal of Structural Engineering*, 126, 252-260.
4. 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.
5. By Nelder, J. A. and Mead, R. (1965), A Simplex Method for Function Minimization, *The Computer Journal*, 7(4), 308-313.
6. Chang, C. C., Zhang, Q. W., Chang, T. Y. P. (2001), Finite-element Model Updating for the Kap Shui Mun Cable-stayed Bridge, *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, 6(4), 285-293.

7. 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.
8. 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.
9. Kaloop, M. R. and Li, H. (2009), Monitoring of Bridge Deformation Using GPS Technique, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 13(6), 423-431, ISSN 1226-7988.
10. Kim, H. J., Cho, S. J., 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.
11. Lee, J. J. and Shinozuka, M. (2006), A Vision-based System for Remote Sensing of Bridge Displacement, *NDT & E International*, 39(5), 425-431, ISSN 09638695.
12. 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.
13. Lin, X., Zhang, L., Guo, Q., and Zhang, Y. (2009), Dynamic Finite Element Model Updating of Prestressed Concrete Continuous Box-girder Bridge, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 8(3), 399-407, ISSN 16713664.
14. Macdonald, J. H. G. and Friswell, M. I. (2007), Finite Element Model Updating of a Suspension Bridge, In *Inverse Problems, Design and Optimization Symposium*.
15. McCall, J. (2005), Genetic Algorithms for Modelling and Optimisation, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 184(1), 205-222, ISSN 0377-0427.
16. Park, W. S., 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.
17. Peeters, B. and Roeck, G. D. (1999), Reference-based Stochastic Subspace Identification for Output-only Modal Analysis, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 13(6), 855-878, ISSN 08883270.
18. Ren, W. X., Fang, S.E., and Deng, M. Y. (2011), Response Surface- based Finite-element-model Updating Using Structural Static Responses, *J Eng Mech-ASCE*, 137, 248-257.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. Westgate, R., Koo, K. Y., Brownjohn, J. M. W., and List, D. (2014), Suspension bridge Response due to Extreme Vehicle Loads, *Structure and Infrastructure Engineering*, 10(6), 821-833.
23. 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, *J. Bridge Eng., ASCE*, 20(10), 1943-5592.

Received : 07/24/2015

Revised : 10/20/2015

Accepted : 03/25/2016

요 지 : 본 연구는 단경간 교량의 정적하중입력/변위출력관계를 이용한 새로운 교량 유한요소모델 개선 방법을 제안하였고, 실내 모형교량 실험을 통해 검증하였다. 기존의 유한요소모델개선기법은 실험으로부터 얻어진 모드계수와 유한요소모델로부터 예측된 모드계수가 유사해 지도록 유한요소모델을 개선하는데, 이 과정에서 구조계의 질량행렬에 대한 가정을 필요로 한다. 제안된 기법은 질량행렬을 가정하지 않고, 오히려 질량행렬 추정을 가능하게 하는 장점을 가진다. 제안된 기법은 두 단계로 구성된다. 첫째, 정적 하중입력-변위응답으로부터 강성행렬을 개선하고, 둘째, 실측된 고유진동수를 이용하여 질량행렬을 개선한다. 실험검증을 위하여 실내 모형교량을 제작하였고, 제안된 기법을 이용하여 모형교량의 탄성계수를 추정하였으며, Universal Testing Machine으로 부터 얻어진 탄성계수와 비교하였다. 또한 기존의 유한요소모델개선기법으로 추정된 탄성계수와 비교하였다. 실험의 결과들로부터 제안된 기법이 합리적으로 탄성계수와 질량밀도를 추정하는 것이 관찰되었고, 기존의 유한요소모델개선기법은 고차모드를 사용했을 때 상대적으로 큰 오차를 주는 것이 관찰되었다. 추가적으로 유한요소모델링 오차에 대하여 토의하였다.

핵심용어 : 단경간 교량, 유한요소모델개선, 동적실험, 정적실험, 데이터 통합
