

가속도 및 각속도 데이터 융합 기반 유한요소모델 개선

Finite Element Model Updating Based on Data Fusion of Acceleration and Angular Velocity

김 현 준¹⁾ 조 수 진^{2)*} 심 성 한³⁾
Hyun-Jun Kim Soo-Jin Cho Sung-Han Sim

Abstract

The finite element (FE) model updating is a commonly used approach in civil engineering, enabling damage detection, design verification, and load capacity identification. In the FE model updating, acceleration responses are generally employed to determine modal properties of a structure, which are subsequently used to update the initial FE model. While the acceleration-based model updating has been successful in finding better approximations of the physical systems including material and sectional properties, the boundary conditions have been considered yet to be difficult to accurately estimate as the acceleration responses only correspond to translational degree-of-freedom (DOF). Recent advancement in the sensor technology has enabled low-cost, high-precision gyroscopes that can be adopted in the FE model updating to provide angular information of a structure. This study proposes a FE model updating strategy based on data fusion of acceleration and angular velocity. The usage of both acceleration and angular velocity gives richer information than the sole use of acceleration, allowing the enhanced performance particularly in determining the boundary conditions. A numerical simulation on a simply supported beam is presented to demonstrate the proposed FE model updating approach.

Keywords : Angular velocity, Data fusion, Finite element model updating, Gyroscope

1. 서론

대부분의 구조물들은 그 수명동안 지진, 파랑, 바람, 교통 등 여러 가지 하중에 지속적으로 노출된다. 특히 최근의 구조물들은 고층화, 대형화됨에 따라서, 지속적인 하중의 노출에 의하여 손상이 발생할 경우 심각한 인명피해와 사회적 문제를 초래할 수 있다. 이와 같이 국가의 주요 구조물들을 효과적으로 유지관리하고 그 안전성을 확보하기 위한 하나의 도구로서, 유한요소모델 (Finite Element Model)이 많이 활용되고 있다 (Mottershead et al., 1993; Friswell et al., 1995; Brownjohn et al., 2000).

유한요소모델은 유한한 요소들을 다수 연결함으로써 실제 구조물을 근사하는 모델링기법으로, 건축물, 원전, 교량, 터널 등 대형구조물의 거동을 예측하고 설계를 검증하는 목적

으로 많이 사용되고 있다 (Fritzen et al., 1998; Teughels et al., 2002; Brownjohn et al., 2003; Jaishi et al., 2005; Jaishi et al., 2006). 일반적으로 유한요소모델은 설계 기준 등에 맞춘 설계 도면을 바탕으로 제작된다. 그러나 실제 구조물은 시공오차 및 시간의 흐름에 따른 열화와 손상 등으로 인하여 설계 도면과 차이를 보이며, 이를 보정하기 위해 실제 구조물에서 계측한 데이터에 맞추어 초기 유한요소모델을 수정하는 작업을 수행한다. 이와 같은 과정을 유한요소모델 개선 (Finite Element Model Updating)이라 한다.

일반적으로 구조물의 유한요소모델을 개선할 때, 주로 가속도센서를 통해 측정된 가속도 응답 데이터를 이용한다. 그러나 가속도 응답은 구조물의 병진운동을 나타내므로 구조물의 물리적인 특성을 분석하는 관점에서는 적합하지만, 회전 자유도와 크게 관련이 있는 시스템의 경계조건을 판단하

1) 학생회원, 울산과학기술대학교 도시환경공학부 석사과정
2) 정회원, 울산과학기술대학교 도시환경공학부 연구조교수, 교신저자
3) 정회원, 울산과학기술대학교 도시환경공학부 조교수

* Corresponding author : soojin@unist.ac.kr

• 본 논문에 대한 토의를 2015년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 2015년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

기에는 한계점이 있다. 실제 구조물들은 지점부 접합부위의 불확실한 가정과 건설부재간 연결부위의 단순화와 같은 불확실한 요소들을 내포하고 있다. 따라서, 정확한 유한요소 모델 개선을 위해서는 구조물의 전체 거동에 큰 영향을 미치는 경계조건을 정확히 찾아낼 수 있는 응답을 사용하여야 한다.

회전자유도의 계측을 위해서는 기울기센서 (Tilt Sensor)나 자이로센서 (Gyroscope)를 주로 사용한다. 기울기센서는 회전변위를 계측하는 반면, 자이로센서는 각속도를 계측한다. 원래 자이로센서는 매우 고가였으나, 최근 MEMS 기술의 발전으로 인하여 가격이 저렴해지고 소형화되어 구조물의 회전운동을 계측하는데 활용되기 시작하고 있다 (Sung et al., 2014).

본 연구에서는 기존의 가속도 기반 유한요소모델 개선 기법을 개선하기 위하여, 병진자유도를 계측하는 가속도계와 회전운동의 계측이 가능한 자이로센서를 같이 이용하는 데이터 융합 기반의 유한요소모델 개선 기법을 제안하였다. 이 중 데이터의 융합이 구조물 특징 식별에 더 많은 정보를 제공할 수 있음을 Sim et al. (2011), Park et al. (2013)이 이미 보인 적 있다. 본 연구에서는 병진운동이 큰 곳에는 가속도계를 설치하고 회전운동의 영향이 큰 지점부 부근에는 자이로센서를 설치하여 이로부터 구조물의 모드특성을 얻고, 이를 기반으로 구조물의 물리적 변수 (재료특성, 형상특성 등)와 경계조건을 더 정확하게 추정할 수 있는 유한요소모델 개선을 수행한다. 제안기법의 검증을 위하여 구조물의 경계조건을 변화시킬 수 있는 단순보를 수치모델링하고, 이로부터 가속도와 각속도 응답을 얻었다. 3개의 가속도자료, 4개의 각속도자료를 이용한 모델개선 결과와 7개의 가속도 자료를 이용한 모델개선 결과를 비교함으로써 제안기법의 성능을 평가하였다.

2. 가속도와 각속도를 이용한 유한요소모델 개선

가속도센서와 자이로센서를 통해 얻은 응답데이터를 융합하여 유한요소모델을 개선하는 방법은 다음과 같다. 먼저 구조물로부터 가속도와 각속도를 계측하고, 모드해석을 통하여 구조물의 고유진동수 및 모드형상을 구한다. 얻어진 고유진동수와 모드형상을 기준으로 한 모델개선의 수행을 위하여, 실제 고유진동수와 모드형상의 잔여함수 (Residual)를 이용하여 다음과 같이 목적함수를 구성한다.

$$J = \sum_{i=1}^{N_m} (w_{1,i} J_{1,i} + w_{2,i} J_{2,i} + w_{3,i} J_{3,i}) \quad (1)$$

$$J_{1,i} = \left(\frac{f_{e,i} - f_{t,i}}{f_{e,i}} \right)^2 \quad (2)$$

$$J_{2,i} = \frac{(1 - \sqrt{M_{acc,i}})^2}{M_{acc,i}} \quad (3)$$

$$J_{3,i} = \frac{(1 - \sqrt{M_{gyro,i}})^2}{M_{gyro,i}} \quad (4)$$

여기에서 $J_{1,i}, J_{2,i}, J_{3,i}$ 는 i 번째 모드의 고유진동수, 가속도 모드형상, 각속도 모드형상의 정규화된 잔여함수이며, N_m 은 사용한 모드의 수, $w_{1,i}, w_{2,i}, w_{3,i}$ 는 각 i 번째 모드의 잔여함수들에 부여되는 가중치 (Weighting Factor)이다. 각 잔여함수에서 $f_{e,i}$ 와 $f_{t,i}$ 는 실제로 계측에 의하여 얻은 i 번째 고유진동수와 그에 대응하는 유한요소모델 모드의 고유진동수이다. $M_{acc,i}$ 와 $M_{gyro,i}$ 는 실제로 계측에 의하여 얻은 i 번째 모드의 가속도 모드형상과 각속도 모드형상과 대응되는 유한요소모델 모드형상 사이의 MAC (Modal Assurance Criterion)값이다.

모델 개선 과정은 위와 같이 제안된 목적함수를 최소화하는 최적화 (Optimization)과정을 수행함으로써 이루어진다. 본 연구에서는 병진운동과 회전운동을 모두 고려한 목적함수를 사용하였으므로, 구조물의 물리적 변수와 경계 조건을 모두 개선변수로 사용한다. 최적화를 수행하는 알고리즘에는 여러 가지가 있으나, 본 연구에서는 Downhill Simplex Method (Nelder and Mead, 1965)를 사용하였다. 본 연구에서의 최적화의 수행과 관련한 자세한 내용은 3.5장에 기술하였다.

유한요소모델 개선 시, 모델링은 SAP 이나 ANSYS 등의 상용 유한요소모델 소프트웨어를 사용하고 최적화 과정은 MATLAB이나 C 등의 언어를 사용하는 것이 가장 일반적이다 (Merce et al., 2007; Jin et al., 2011). 이러한 상용 유한요소모델 소프트웨어를 이용할 경우에는 더 쉽고 정확한 모델링이 가능하고 개선된 모델을 실무에 바로 적용할 수 있다는 이점을 가지고 있다. 그러나 본 연구에서는 단순한 모델을 사용하였기 때문에 모델링과 최적화 과정에 모두 MATLAB을 사용하였다.

3. 수치검증

3.1 수치 해석 모델

본 연구에서 제안 기법의 검증을 위하여 사용한 수치모델은 Fig. 1과 같은 2m 규모의 단순보 모델이다. 본 모델은 MATLAB을 이용하여 제작되었으며, Euler-Bernoulli Beam Element 20개로 이루어졌다. 보의 단면은 단순 직사각형으로, 보 모델의 재료 및 기하특성은 Table 1과 같다. 경계조건은 힌지-롤러이며 경계조건을 자유단에서 고정단까지 변화시킬 수 있도록 회전 스프링을 부착하였다. 회전 스프링의 회전강성이 0에 가까울수록 경계조건은 자유단에 가까우며, 회전강성이 점차 증가할수록 경계조건은 점점 고정단에 가까워진다. 이는 일반 교량에서 받침이 열화되어 그 성능이 감소할 경우 나타날 수 있는 상태를 모사한 것이다.

3.2 경계조건 케이스

스프링의 회전강성에 대한 경계조건의 민감도는 자유단과 고정단 사이에서 선형적인 관계를 이루지 않는다. 즉, 회전강성이 상대적으로 작은 경우에는 조그만 변화에도 경계조건이 민감하게 변화하며, 회전강성이 상대적으로 큰 경우에는 경계조건의 민감도가 매우 작은 비선형성을 나타낸다. 본 연구에서는 이를 고려하여 위 Fig. 1의 모델에서 양단 회전 스프링의 강성을 변화시켜가며, 모드 특성 (고유진동수와 모드형상)이 충분히 변화하는 9가지의 경계조건 케이스를 Table 2와 같이 마련하였다. 양단 스프링은 동일한 회전강성을 갖는 것으로 가정하였다.

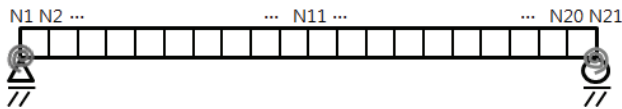


Fig. 1 Simply-supported Beam Model for Numerical Simulation

Table 1 Properties of Experiment Model

Item	Data
Number of elements	20
Length of beam element	0.1 m
Width of beam	0.08 m
Height of beam	0.01 m
Elastic Modulus	200 GPa
Mass density of unit volume	7850 kg/m ³

3.3 모드해석

지점부에서의 회전강성 증가가 시스템의 어떤 변화를 주는지 확인하기 위해서, 9가지 경계조건 케이스의 수치 모델의 모드 특성을 비교하여 보았다. 본 모드 특성은 수치 모델을 고유치 해석하여 얻은 양단 정해이며, 3차 모드까지만 비교하였다. 우선 Table 3은 9가지 경계조건을 갖는 모델로부터 얻은 고유진동수를 자유단과 고정단일 때 모델의 고유진동수와 함께 표로 나타낸 것이다. 회전스프링의 강성이 증가할수록 1~3차의 고유진동수가 모두 점차적으로 증가하며 고정단의 고유진동수에 가까워짐을 알 수 있다.

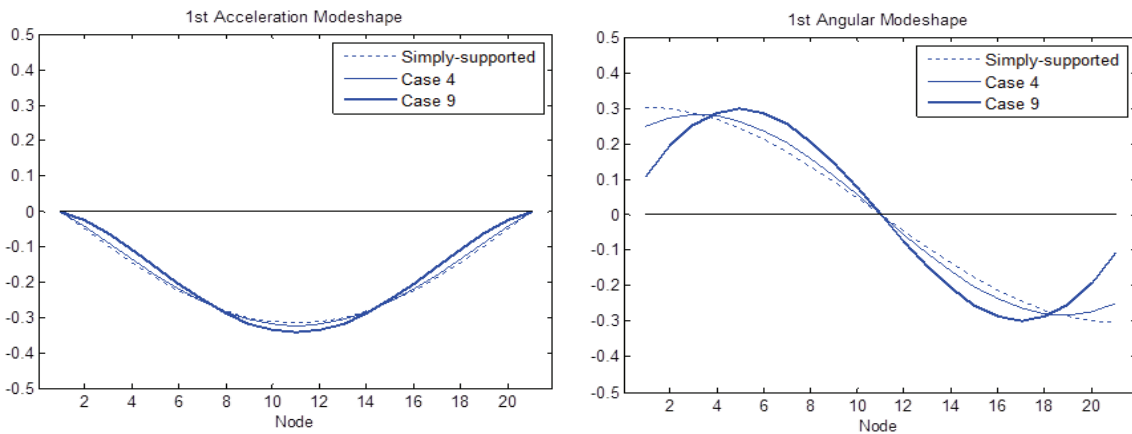
Fig. 2는 양단 자유단인 초기 모델과 Case 4, Case 9의 1~3차 모드형상, 각 모드형상을 비교한 것이다. 초기 모델에서 케이스 4와 케이스 9로 회전강성이 증가할 경우, 가속도 모드형상은 크게 차이가 없지만, 각속도 모드형상은 지점부 부근에서 큰 차이가 생긴다는 것을 모드해석을 통해서 확인할 수 있다. 이는 병진운동을 계측하는 가속도 계측이 경계조건 변화에 낮은 민감도를 가지고 있으며, 대신 지점부 부근의 회전 운동을 계측하는 자이로센서가 시스템 경계조건 판별에 효과적인 역할을 할 수 있음을 의미한다.

Table 2 Nine Cases with Varying Rotational Stiffness of Supports

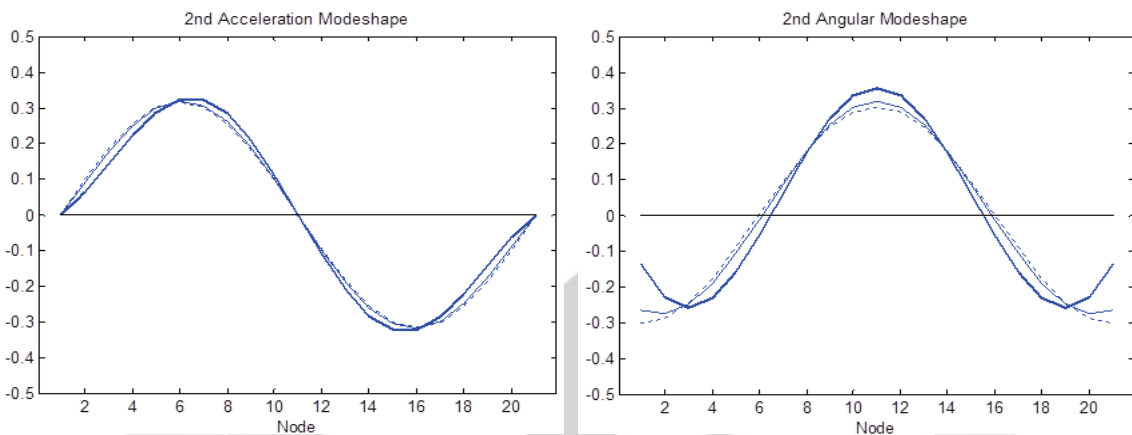
Case	Rotational Stiffness of Support (N·m/rad)	Case	Rotational Stiffness of Support (N·m/rad)
1	270	6	3100
2	600	7	4470
3	1000	8	6800
4	1510	9	12160
5	2180	-	-

Table 3 Natural Frequencies of Numerical Models (Simply-supported, Fixed-supported and 9 cases)

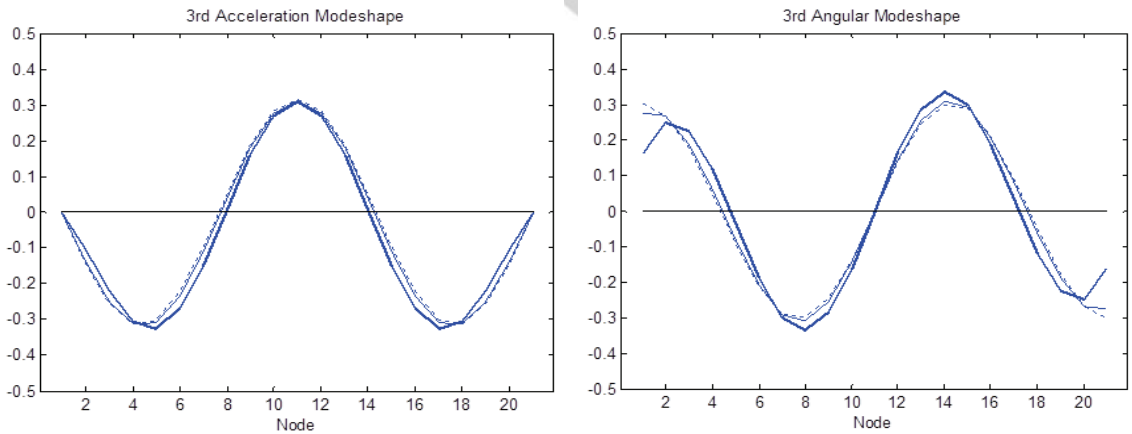
State	Natural Frequencies		
	1st	2nd	3rd
Simply-supported	5.74	23.17	52.92
Case 1	6.18	23.63	53.39
Case 2	6.63	24.14	53.94
Case 3	7.10	24.72	54.56
Case 4	7.60	25.37	55.30
Case 5	8.14	26.12	56.18
Case 6	8.71	27.00	57.26
Case 7	9.35	28.06	58.62
Case 8	10.08	29.39	60.46
Case 9	11.00	31.26	63.26
Fixed-supported	13.02	36.26	72.21



(a) 1st Acceleration and Angular Mode shapes



(b) 2nd Acceleration and Angular Mode shapes



(c) 3rd Acceleration and Angular Mode shapes

Fig. 2 Mode Shapes of Numerical Models (Initial Model, Case 4 and 9)

3.4 계측 시나리오

위 9가지 경계조건을 갖는 모델에 대하여, MATLAB Simulink를 이용하여 수치실험을 수행하였다. 제안된 데이터 융합 기반 유한요소모델 개선 기법의 검증을 위하여 가속도 기반 계

측 시나리오 2개와 가속도와 각속도 계측 시나리오 1개를 다음 Fig. 3과 같이 마련하였다. Fig. 3(a)는 일반적으로 통용되는 등분포된 가속도 계측 시나리오이며, Fig. 3(b)는 경계조건을 좀 더 정확히 얻기 위하여 경계조건 주위에 가속도계를 많이 설치한 계측 시나리오이다. Fig. 3(c)는 앞서 모드

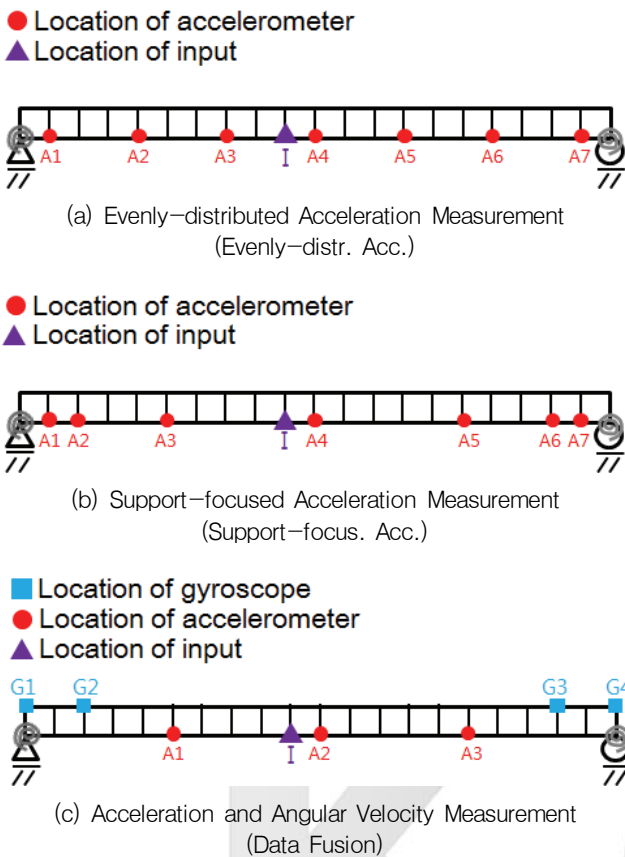


Fig. 3 Measurement Scenarios

해석에서 확인하였듯이 경계조건 주위에는 자이로센서를, 보의 중심부에는 가속도계를 설치한 계측 시나리오이다. Fig. 3(a)와 3(b)는 가속도 7채널을, Fig. 3(c)는 가속도 3채널, 각속도 4채널 (총 7채널)을 얻는다. 모든 시나리오에 대하여 N10에 백색잡음 (White Noise)을 이용하여 가진하였다. 측정된 가속도 및 각속도 데이터에는 RMS (Root-mean-square) 5%의 잡음을 추가하여 실제 계측 잡음을 모사하였다.

3.5 유한요소모델 개선

위의 3가지의 계측 시나리오에 따라 각각 9가지의 경계조건에 대한 유한요소모델 개선을 수행하였다. 먼저 계측 데이터를 시뮬레이션 하여 얻어낸 후 시스템 식별 방법 중의 하나인 NExT-ERA (Juang and Pappa 1985; James III et al., 1993)를 사용하여 구조물의 고유진동수와 모드형상을 추정하였다. 식별된 구조물의 고유진동수와 모드형상은 추가된 잡음의 영향으로 Table 3, Fig. 2와 매우 근사하게 추정되었으며, 그에 따라 다시 기술하지는 않았다. 본 연구에서의 개선변수는 대표적으로 구조물의 물리적인 특징을 나타내는

Table 4 Updating Parameters

Updating Parameters	Initial Values	Upper and Lower Bounds
Elastic Modulus (E)	180 GPa	150 GPa ≤ E ≤ 250 GPa
Rotational Stiffness at the Pin (S1)	0	0 ≤ S1 ≤ 20000 N·m/rad
Rotational Stiffness at the Roller (S2)	0	0 ≤ S2 ≤ 20000 N·m/rad

수치 모델의 탄성계수와 경계조건에 직접적인 영향을 미치는 양단 지점부에서의 회전강성으로 지정하였다. Table 4는 개선변수 각각의 초기 값과 상·하계 (Upper and Lower Bounds)를 나타낸 것이다. 탄성계수는 보 전체의 탄성계수 하나를 대표값으로 이용하였다.

탄성계수의 초기 값, 하계 및 상계 값은 일반적으로 쓰이고 있는 철의 탄성계수인 200GPa 부근으로 설정하였고, 양쪽 지점부 회전강성의 상계 값은 고정단 조건에 거의 근사하게 되는 20000 (N·m/rad)로 하였다. 참고로 본 유한요소모델 개선에서는 목적함수에 부여되는 모든 가중치요소 (식 (1)의 $w_{1,i}, w_{2,i}, w_{3,i}$)를 1로 동일하게 설정하였다.

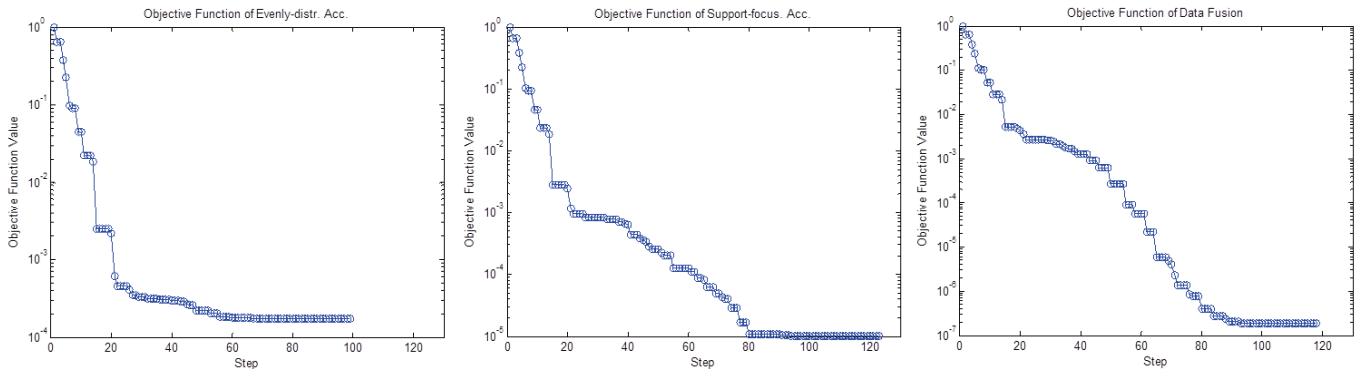
3.6 유한요소모델 개선 결과

Fig. 4는 3가지 계측시나리오 각각에 대하여 목적함수가 최적화되는 과정을 정규화 (Normalize)하여 각각 나타낸 것이다. 모든 목적함수가 최적화가 진행됨에 따라 작아져서 마지막 단계에서는 최소화된 목적함수 값으로 충분히 수렴하였음을 확인할 수 있으며, 그에 따라 3가지 계측 시나리오 모두 성공적으로 모델 개선이 수행되었다고 판단된다.

최종적으로 개선된 각각의 모델의 탄성계수와 양단 스프링의 회전강성을 실제 수치모델의 값과 비교하였다. 비교는 두 값의 차이를 백분율로 나타내는 오차율 (Error Percentage)을 이용하였으며, 이는 다음 식과 같다.

$$\text{Error Percentage (\%)} = \frac{t-a}{t} \times 100 \quad (5)$$

여기서, t 와 a 는 각각 실제 값과 모델 개선을 통해 얻은 개선변수의 값을 나타낸다. Fig. 5는 탄성계수의 오차율을 각 케이스 별로 나타낸 것이다. 가속도 기반의 계측 시나리오 2가지와 가속도·각속도 융합 기반 계측 시나리오 모두 오차율 2% 미만으로, 매우 근사한 값을 추정하였음을 알 수 있다. 특히 가속도와 각속도를 모두 활용할 경우는 그 오차율이 1% 미만으로 더 작게 나타났다.



(a) Objective Function of Evenly-distr. Acc. (b) Objective Function of Support-focus. Acc. (c) Objective Function of Data Fusion

Fig. 4 Conversions of Objective Functions for 3 Measurement Scenarios

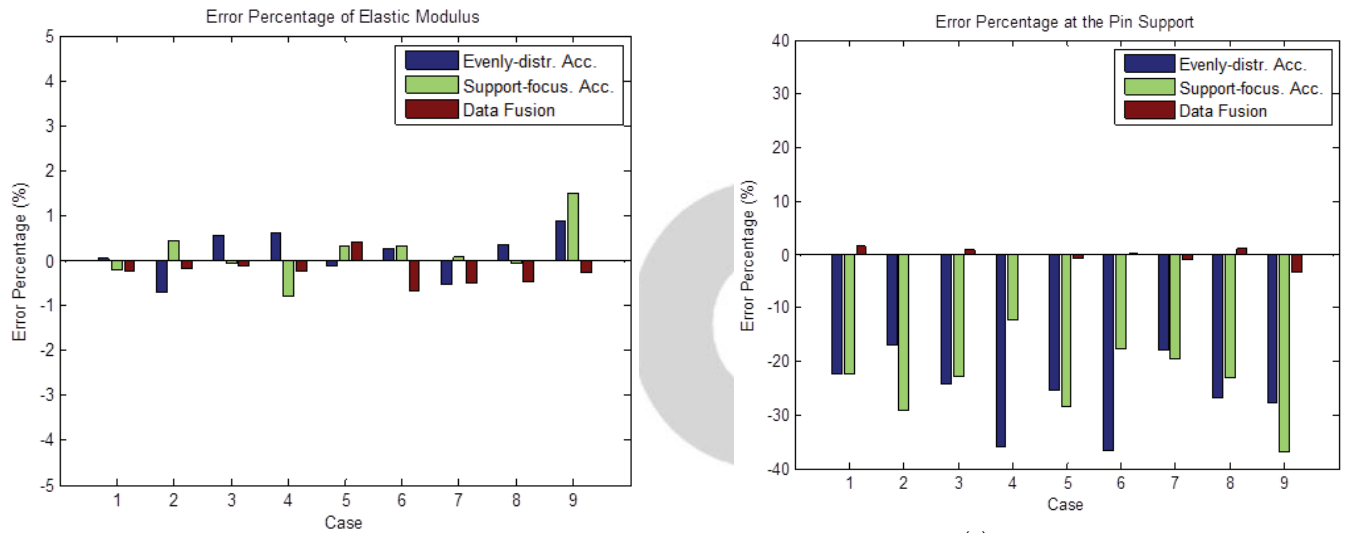
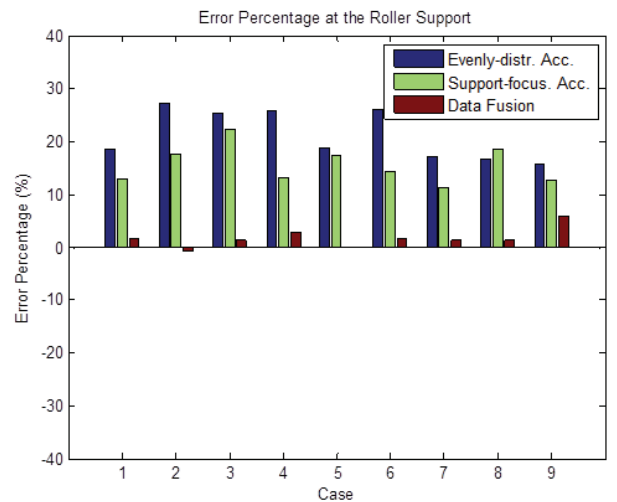


Fig. 5 Error Percentage of Updated Elastic Modulus

(a) Pin Support



(b) Roller Support

Fig. 6 Error Percentage of Updated Rotational Stiffness of Supports

Fig. 6은 두 지점부의 회전강성의 오차율을 나타낸 것이다. 가속도 데이터만을 이용한 유한요소모델 개선은 회전강성 값을 정확하게 추정하지 못하며, 오차율이 최대 40%에 근접하였다. 특히 한쪽 지점부로 회전강성이 물리는 현상이 일어나고 있는데, 이는 Fig. 2에서 확인하였듯이 가속도 모드형상은 회전강성의 변화에 대해서 민감도가 매우 작기 때문으로 보인다. 다시 말해서, 기존의 가속도기반 유한요소모델 개선은 구조물의 물리적인 특성을 분석하기에는 적합하지만 경계조건을 판단하기에는 한계가 있다는 것을 확인할 수 있다. 반면에 본 연구에서 제안한 가속도 데이터에 각속도 데이터를 융합하여 유한요소모델 개선을 한 경우에는 회전강성 오차율 또한 약 6% 미만으로 매우 낮게 나타나고 있다. 특히 회전강성이 상대적으로 클 경우 회전강성의 변화에

대하여 경계조건의 민감도가 낮음을 감안할 때, 회전강성이 가장 큰 Case 9에서의 6%에 근접한 오차율은 허용할만한 것이다. Case 9를 제외한 나머지 8가지 케이스의 오차율은 최대 3%로, 제안방법이 구조물의 물리적 특성과 경계조건을 정확하게 판별하는데 매우 유용함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 구조물의 물리적 특성과 경계조건을 효과적으로 추정하기 위한 가속도 및 각속도 데이터 융합 기반의 유한요소모델 개선 방법을 제안하였다. 기존의 가속도 기반 유한요소 모델 기법에 사용되는 목적함수에 각속도 모드형상의 잔여함수를 추가함으로써, 데이터 융합을 위한 목적함수를 제안하였다. 제안 기법의 검증에 위하여, 양단에 회전 스프링이 설치된 단순보모델에서 회전스프링의 강성을 9단계로 변화시켜가며 수치실험을 실시하였다. 가속도계만을 등분포한 경우, 가속도계를 경계조건 주위에 집중적으로 설치한 경우, 그리고 가속도와 각속도계를 함께 이용한 세 가지의 계측 시나리오를 이용하여 모델 개선을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 탄성계수의 경우, 3가지 계측 시나리오 모두에서 경계조건의 변화에 상관없이 실제와 근사하게 (2% 미만의 오차율) 추정되었다.
- (2) 가속도만을 이용한 두 가지 계측 시나리오에서는 회전강성 추정 오차율이 최대 40%에 달하였으며, 한쪽 지점부의 강성을 과다추정, 다른 쪽 지점부의 강성은 과소추정하는 경향을 보였다. 이는 기존의 가속도 기반 유한요소 모델 개선 기법이 경계조건을 판별하는데 상당한 한계가 있음을 나타낸다.
- (3) 가속도와 각속도를 모두 계측한 시나리오에서는 경계조건의 변화 9단계 모두에서 회전강성을 6% 미만으로 근사하게 추정하였으며, 이로써 제안 기법이 물리적 특성 중 하나인 탄성계수와 경계조건을 모두 효과적으로 판별할 수 있음을 검증하였다.

감사의 글

본 논문은 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 신진연구 지원을 받아 수행되었습니다. 이에 감사드립니다. [NRF-2008-220-D00117]

1. Brownjohn, J. M. W., and Xia, P. Q. (2000), Dynamic assessment of a curved cable-stayed bridge by model updating, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 126(2), 252-260.
2. 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.
3. Friswell, M. I., and Mottershead, J. E. (1995), Finite element model updating in structural dynamics, Kluwer Academic Publishers.
4. Fritzen, C. P., Jennewein, D., and Kiefer, T. (1998), Damage detection based on model updating methods, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 12(1), 163-186.
5. Jaishi, B., and Ren, W. X. (2005), Structural finite element model updating using ambient vibration test results, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 131(4), 617-628.
6. Jaishi, B., and Ren, W. X. (2006), Damage detection by finite element model updating using modal flexibility residual, *Journal of Sound and Vibration*, 290(1), 369-387.
7. James III, G. H., Carne, T. G., and Lauffer, J. P. (1993), The natural excitation technique (NEXt) for modal parameter extraction from operating wind turbines, *NASA STI/Recon Technical Report N*, 93.
8. Jin, S. S. (2011), Multi-objective based updating of finite element model of bridge using modal properties, M.S. Thesis, KAIST.
9. Juang, J. N., and Pappa, R. S. (1985), An eigensystem realization algorithm for modal parameter identification and model reduction, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 8(5), 620-627.
10. Merce, R. N., Macdonald, J. H. G., and Friswell, M. I. (2007), Finite element model updating of a suspension bridge using ANSYS software, *Design and Optimization Symposium*.
11. Mottershead, J. E., and Friswell, M. I. (1993), Model updating in structural dynamics: a survey, *Journal of Sound and Vibration*, 167(2), 347-375.
12. Nelder, J. A., and Mead, R. (1965), A simplex method for function minimization, *The Computer Journal*, 7(4), 308-313.
13. Park, J. W., Sim, S. H., and Jung, H. J. (2013), Wireless displacement sensing system for bridges using multi-sensor fusion, *Smart Materials and Structures*, 23(4).
14. Sim, S. H., Spencer Jr, B. F., and Nagayama, T. (2011), Multimetric sensing for structural damage detection, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 137(1), 22-30.
15. Sung, S. H., Park, J. W., Nagayama, T., and Jung, H. J. (2014), A multi-scale sensing and diagnosis system combining accelerometers and gyroscopes for bridge health monitoring, *Smart Materials and Structures*, 23(1).
16. Teughels, A., Maeck, J., and De Roeck, G. (2002), Damage assessment by FE model updating using damage functions, *Computers and Structures*, 80(25), 1869-1879.

KCS I

요 지

유한요소모델 개선은 구조물의 설계검증, 손상추적, 내하력 평가 등 다양하게 활용되고 있는 기법이다. 일반적인 유한요소모델 개선은 구조물에서 측정된 가속도응답으로부터 구조물의 고유진동수와 모드형상을 구하고, 이를 바탕으로 모델을 개선하게 된다. 이와 같은 가속도응답기반 유한요소모델 개선은 구조물의 병진 자유도를 고려하기 때문에 물리적인 체계를 추정하는데 있어서 매우 적합하지만, 회전 자유도 상에서 변화하는 구조물의 경계조건을 판별하기에는 어려움이 있다. 최근 센서 기술의 개발로 인하여 저렴한 가격, 높은 정확성의 자이로센서들이 개발되고 있으며, 그에 따라 구조물의 회전 자유도에 관한 정보 획득이 용이해지고 있다. 본 연구에서는 이를 바탕으로 가속도와 각속도 응답을 함께 이용하는 데이터 융합 기반 유한요소모델 개선 기법을 제안하였다. 가속도와 각속도를 모두 활용한 데이터융합 기법은, 가속도만 사용한 기존의 유한요소 모델 기법보다 구조물의 경계조건 판별에 정확한 정보를 제공한다. 본 논문에서는 단순보 모델을 이용한 수치 시뮬레이션을 통해서, 제안한 가속도와 각속도 데이터 융합기반의 유한요소모델 개선 기법의 성능을 검증하였다.

핵심 용어 : 각속도, 데이터융합, 유한요소모델 개선, 자이로센서