전역적/국부 응답을 이용한 철골조의 모델 업데이트 기법 제안

오 병 관¹ · 최 세 운² · 김 유 석³ · 박 효 선^{1*}

¹연세대학교 건축공학과, ²대구카톨릭대학교 건축학부, ³연세대학교 건축구조헬스케어연구단

A Proposal of Model Updating Method for Steel Frame Using Global/Local Responses

Byung-Kwan Oh¹, Se-Woon Choi², Yousok Kim³ and Hyo-Seon Park^{1*}

¹Department of Architectural Engineering, Yonsei Univ., Seoul, 120-749, Korea

²Department of Architecture, Catholic Univ. of Daegu, Gyeongsan, 712-702, Korea

³Center for Structural Health Care Technology in Buildings, Yonsei Univ., Seoul, 120-749, Korea

Abstract

Conventional model updating methods for the structures have used global structural responses which are modal parameters obtained through vibration measurements. Although models updated by modal parameters estimate global structural responses accurately, they have difficulties to predict local responses for safety assesment of structural members. The safety of structural members in the structures has been evaluated through the stress estimation based on strain measurements. Thus, this study additionally uses measured strain responses of structural members to perform model updating besides modal parameters. In the proposed method, the objective functions are set to the differences of the global and local responses obtained from updated model and measurement and those functions are minimized by NSGA-II, one of the multi-objective optimization techniques. The strain responses predicted from updated model are used for safety assessment of the steel frame structures. The proposed method are verified by numerical and experimental studies through the impact hammer tests for a steel frame specimen.

Keywords : structural health monitoring, system identification, model updating, NSGA-II

1. 서 론

건물 구조물의 상태를 파악하고 안전성을 평가하기 위한 구조 건전도 모니터링(Structural Health Monitoring) 연구가 활발히 진행(Choi *et al.*, 2013; Park *et al.*, 2013; Xia *et al.*, 2014; Roussel *et al.*, 2014)되어 왔다. 건물에 설치된 센서로부터 측정한 응답을 이용하여 건물 내 구조 부재들의 안전성을 평가하거나 시스템 식별(system identification)을 통해 시스템 레벨의 상태를 평가한다(Lamarche *et al.*, 2007; Zimmerman *et al.*, 2009; Chen *et al.*, 2011; Ye *et al.*, 2012).

건물은 수많은 구조 부재들로 구성되어 있으며 이를 통해 다양한 하중전달 경로가 만들어진다. 이 구조 부재들 중, 시

스템 레벨의 안전성에 대한 기여가 비교적 적은 구조 부재의 손상은 건물 전체적인 안전성과 붕괴에 큰 영향을 미치지 않는다. 하지만, 주요 구조 부재의 노후화 및 손상은 건물 안전성 측면에서 중요하며, 해당 부재의 보수, 보강이 요구된다. 이에 구조 부재의 안전성 평가를 위해 많은 연구가 수행되어 왔다. 부재의 응력 평가를 위해 변형률을 계측하고 최대 변형률 혹은 변형률 분포를 예측(Lee and Park, 2011; Lee *et al.*, 2013)하거나 손상을 탐지(Zhang and Yang, 2013)하는 기술들이 개발되어 왔다. 하지만, 구조물이 대형화/고층화에 따라 대상 부재의 수가 늘어나게 되면서 직접적인 변형률 계측을 위한 센서 계획 상에 한계가 지적되고 있다. 이에 시스템 식별에 기반한 모델 업데이트를 통해 건물의 안전성을 평가하는 연구가 시도되어 왔다.

* Corresponding author:

Tel: +82-2-2123-7786; E-mail: hspark@yonsei.ac.kr

Received June 23 2015; Revised July 20 2015;

Accepted July 21 2015

©2015 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

시스템 식별은 건물에서 측정한 진동을 이용하여 고유주파수, 모드형상, 감쇠와 같은 동특성을 추출하기 위해 수행된다. 시스템 식별은 동특성 변화 감지, 손상 탐지, 구조 응답 예측 등을 위해 모델 업데이트(Jafarkhani and Masri, 2011; Arslan and Durmus, 2013; Foti *et al.*, 2014; Butt and Omenzetter, 2014)을 수반한다. 대부분의 기존 모델 업데이트 연구는 주로 계측을 통해 얻어진 모달 파라미터를 이용하여 실제에 보다 가까운 모델을 만든다. 따라서, 이렇게 업데이트된 모델은 전역적 구조 응답인 모달 파라미터를 이용했기 때문에 시스템 레벨의 건물 상태 파악에 이용된다.

이런 모달 파라미터를 이용한 모델 업데이트 연구 중에는 건물 상태 파악뿐만 아니라 건물 내에 구조 부재의 안전성을 평가하기 위한 손상위치 및 손상도를 탐지하는 연구들이 수행(Wu and Li, 2006; Li and Hao, 2014)되어 왔다. 이 연구들은 손상 구조물의 모달 파라미터 변화를 통해 손상된 구조 부재의 손상 위치를 탐색하고, 해석적 혹은 실험적으로 가정한 손상 정도를 파악한다.

기존의 연구들은 손상 위치를 정확히 파악하지 못하는 경우(Wu and Li, 2006), 손상 위치는 비교적 잘 식별했지만, 손상도 식별에서는 오차가 큰 경우(Li and Hao, 2014) 등이 대부분이다. 또한, 대부분의 연구들이 변위, 변형률 등의 구조 부재의 국부 응답 예측에는 한계를 보이고 있다. 기존 연구들이 모델 업데이트에 이용하는 응답이 전역적 응답인 모달 파라미터를 이용하기 때문에 국부 응답 예측 및 이를 이용한 안전성 평가가 힘든 것이다. 구조물의 국부 손상 탐지 혹은 응답 예측을 위한 모델 업데이트를 위해서는 국부 응답 계측이 요구된다. Kurata 등(2013)은 철골 프레임의 국부 손상 탐지를 위해 동적 변형률 계측을 이용하였다. 철골 보-기둥 접합부의 파단과 같은 국부 손상 위치와 손상도를 동적 변형률 계측에 의해 구한 휨 모멘트 변화로부터 찾아낸다. Wang 등(2013)은 장스팬 교량의 전역적 그리고 국부적 응답을 이용하여 모델 업데이트를 수행하였다. 모달 파라미터, 변위 응답, 변형률 응답에 대해 각각 목적함수를 구성하였다. 업데이트 모델은 교량의 모달 파라미터뿐만 아니라 변위, 변형률 응답을 비교적 정확히 예측하였다.

본 연구에서는 건물 구조물의 전역적, 국부적 응답 예측을 통한 안전성 평가를 위한 모델 업데이트 기법을 제시하고자 한다. 진동 계측으로부터 얻은 건물의 모달 파라미터와 기둥과 같은 주요 구조부재에 대한 임팩트 해밍을 통해 얻은 변형률 응답을 모델 업데이트에 모두 활용한다. 모델 업데이트에서 오차함수는 계측과 모델의 모달 파라미터와 변형률 응답간의 차이로 설정된다. 고려하는 모드 차수 개수만큼의 모달 파라미터

에 대한 오차함수가 설정되고, 변형률 응답에 대한 오차함수가 추가로 설정된다. 다수의 오차함수는 NSGA-II(Deb *et al.*, 2002)에 의해 최소화되며 업데이트 모델의 변수를 탐색한다. 변수는 대상 구조물의 강성과 질량과 관련된 요소로 설정한다. 생산된 다수의 Pareto 해 선별을 위해 모드 참여 질량비를 이용한 해 선별 방법에 의해 최종 해가 결정된다. 제시한 기법은 평면 철골 프레임에 대한 해석적, 실험적 연구를 통해 검증하였다.

2. 모델 업데이트 기법

2.1 전역적/국부 응답 획득 방법

건물 구조물의 모달 파라미터는 주로 가속도계를 이용한 진동 계측데이터의 시스템식별을 통해 추출된다. 건물은 가진 어렵고 가진을 하더라도 많은 비용과 노력이 들기 때문에 주로 상시 미진동 계측을 통해 진동을 계측한다. 계측 데이터는 입력 신호를 모르기 때문에 output only SI 기법(Brincker *et al.*, 2001)을 통해 모달 파라미터를 추출하게 된다. 본 연구에서 모델 업데이트에 이용되는 모달 파라미터 또한 건물에서 계측한 진동 데이터의 시스템 식별에 의해 얻는다고 가정한다. 하지만, 본 연구에서 이용한 철골 프레임 실험체의 경우, 상시 미진동을 구현하기 어렵기 때문에 Impact hammer 가력 시 얻은 힘과 가속도 값을 이용하여 시스템 식별을 수행한다. 계측한 입력 신호와 출력 신호를 이용하여 frequency response function(FRF)을 구하여 고유주파수 및 모드형상을 추출한다.

본 연구의 모델 업데이트에는 국부 응답에 대한 정식화가 추가적으로 이루어진다. 주요 구조 부재에서 계측한 변형률 값을 본 연구의 국부 응답으로 선택한다. 본 연구에서는 변형률 센서가 설치된 구조 부재에 Impact hammer를 인력으로 가력하여 변형률 계측 데이터를 얻는다고 가정한다. 모델 업데이트의 최소화 과정에서 가력 시 입력 신호인 힘값과 출력 신호인 변형률 값이 모두 요구된다. 국부 응답에 대한 오차함수는 계측 변형률 값과 모델에서 추출한 변형률 값의 차로 정식화된다. 오차함수 내의 계측 변형률 값은 해머 가력 시 계측한 변형률 값이 된다. 모델의 변형률 값은 finite element(FE) 모델에 대한 운동방정식을 풀어 구하는데 이때 모델에 입력할 힘 값이 필요하다. 계측한 시간 이력 힘 데이터가 FE 모델의 운동방정식으로 입력되고 이 때 변형률 계측 위치에서의 변형률 시간 이력 데이터를 얻게 된다. 정식화에 사용되는 변형률 값은 부재의 안전성 평가 기준으로 볼 수 있는 시간 이력 변형률 데이터 중 최대값이다.

2.2 정식화

제시하는 모델 업데이트에서 변수는 대상 구조물의 강성을 결정하는 값들로 설정한다. 모델 업데이트 과정에서 오차 함수는 전역적 응답인 모달 파라미터에 대한 것과 국부적 응답인 변형률 응답에 관한 것으로 각각 설정된다. 모달 파라미터에 대한 오차 함수는 고려하는 모드 차수만큼 형성하여 구조물의 모드에 참여하는 정도를 고려한다. 모달 파라미터에 대한 오차 함수는 다음과 같다.

$$F_i = \sum_{i=1}^n \left[\left| \frac{f_i^{me} - f_i^{up}}{f_i^{me}} \right| + (1 - MAC_i) \right] \quad (1)$$

여기서, f_i^{me} 와 f_i^{up} 은 각각 i 번째 모드의 계측 고유주파수와 i 번째 모드의 모델의 고유주파수이다. MAC_i 는 i 번째 모드의 모드 형상 유사도이고, n 은 모델 업데이트에서 고려하는 모드 차수이다.

국부적 안전성 평가를 위한 모델 형성을 위해 모달 파라미터에 대한 오차함수 이외에 대상 구조물의 주요 부재의 국부 응답 중 하나인 변형률에 대한 오차함수를 추가로 설정한다. 변형률 오차함수는 다음 식과 같다.

$$F_{n+1} = \left| \frac{\varepsilon^{me} - \varepsilon^{up}}{\varepsilon^{me}} \right| \quad (2)$$

여기서, ε^{me} 와 ε^{up} 는 각각 계측한 변형률과 모델에서 추출한 변형률이다. 위에서 설정한 다수의 목적함수는 다목적 최적화 기법 중 하나인 NSGA-II에 의해 동시에 최소화하며 변수를 탐색해 나간다. NSGA-II에 기반한 모델 업데이트 과정에서 각 개체별로 적합도 평가를 하게 되는데, 오차함수의 값이 작은 개체, 즉 하나의 후보해, 가 높은 적합도를 얻는다. 오차함수 계산을 위해 해 탐색과정에서 각 개체에 대해 모드 해석과 계측한 임팩트 힘에 대한 변형률 응답 계산이 이루어진다. 모드 해석은 모델의 모달 파라미터를 계산하기 위함으로, 변수에 의해 만들어진 질량과 강성 행렬에 의해 이루어진다. 임팩트 힘에 대한 변형률 응답은 마찬가지로 변수에 의해 만들어진 모델의 시간 이력 임팩트 힘을 입력하중으로 한 다자유도 운동방정식을 풀어 얻어진다. 본 연구는 운동방정식 계산을 위해 Newmark beta방법을 사용하였고, 각 개체에 대해 매번 운동방정식 계산이 이루어진다. 계산을 통해 얻어진 응답을 통해 시간 이력 변형률값이 나오고 이중 최대값을 이용하여 식 (2)를 계산한다.

3. 해석적 검증

제안한 기법을 검증하기 위해 해석적 연구를 수행하였다. 평면 철골 프레임을 선정하고 FE 모델을 생성하여 가력 모의 실험을 수행하였다. 이 때 얻어진 응답들을 제안한 기법에 적용하였다.

3.1 대상 구조물의 시스템 식별

대상 구조물은 2층 1경간의 평면 철골 프레임으로 SS400 재질의 강재로 만들어졌다고 가정하였다. 높이는 2m, 폭은 1.5m이고 보와 기둥에 사용된 부재는 H-100×100×6/8이다. 보와 기둥은 모두 강절로 접합되었다고 가정하였다. 모의 실험 대상 구조물은 FE 모델로 만들었고, 이 모델은 업데이트 모델의 reference 모델이 되며, 이때 적용된 강성 및 질량 관련 값들이 변수의 reference값이 된다. 구조물의 모달 파라미터 획득을 위한 임팩트 해머 가력 시험이 수행되었다. Fig. 1과 같이 가속도계를 설치하고 Impact 위치에 해머로 수차례(12회) 가력하는 모의 실험을 수행하였다. 이때 얻어진 가속도 응답과 힘 데이터는 각각 Fig. 2의 (a) 및 (b)와 같고 이 입력 및 출력 신호를 이용하여 FRF 함수를 구하였다(Fig. 3(a)). FRF 함수를 통해 횡방향 변형 모드에 대한 1, 2차 동특성을 얻을 수 있었다. 1, 2차 고유주파수는 각각 43.87, 150.68Hz이고 감쇠비는 2.61, 0.60%이다. 모드형상은 Fig. 3(b)와 같다.

국부 응답 계측을 위해 실험체 기둥 중 하나에 변형률 계측 센서인 fiber bragg grating(FBG) sensor를 설치했다

Fig. 1 Experimental specimen

Fig. 2 Measurements in experimental tests

Fig. 3 Measurements in experimental tests

고 가정하고 임팩트 해머로 1회 가력하는 모의 실험을 수행하였다. 이때 상부 기둥에서 얻은 변형률 시간 응답을 모델 업데이트에 이용한다. 업데이트 모델에 대한 검증을 위해 기둥 하부 변형률과 실험체 최상단에 변위도 측정했다고 가정하였다.

3.2 모델 업데이트 결과

2장에서 제시한 방법을 통해 모델 업데이트를 수행하였다. NSGA-II에 의해 탐색되어 선정된 최종해는 reference 모델에 입력된 변수값과 정확히 일치하였다. 변수 값이 입력되어 생성된 업데이트드 모델에서 추출한 동특성 또한 3.1장의 모의 실험에서 얻은 동특성과 좋은 일치를 보였다. 업데이트 모델의 검증을 위해 하부 기둥의 변형률 응답 및 골조 최상

층 변위 응답에 대한 모델의 예측값과 계측값을 비교해 보았다. Fig. 4(a)의 변형률 응답 및 Fig. 4(b)의 최상층 변위 응답이 매우 정확히 일치하는 것을 보였다. Fig. 4(c)와 (d)는 변형률 및 변위 응답 비교의 확대 그림이다. 추가적으로 동일한 예제에 대해 기존의 전역적 응답만을 이용한 모델 업데이트를 수행하였다. 동일한 검증 방법으로 응답을 비교해 본 결과 Fig. 5와 같이 큰 오차와 함께 모델이 응답을 과소 예측하는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 5의 (a)는 기둥의 변형률 응답을, Fig. 5의 (b)는 최상층 변위 응답을 각각 비교하였다.

4. 실험적 검증

4.1 실험체 및 실험

Fig. 4 Comparison of responses from updated model by the proposed model updating method and measurements

Fig. 5 Comparison of responses from updated model by the conventional model updating method and measurements

제안한 모델 업데이트 기법을 실험적으로 검증하기 위해 평면 철골 프레임의 충격 가력 실험을 수행하였다. 실험체는

재질, 형상, 단면 등이 해석적 검증에 이용된 구조물과 동일하다. 진동 계측을 통한 시스템 식별을 위해 2개의 가속도계

가 설치되었고, 변형률 계측을 위해 FBG센서가 설치되었다. 골조 자중에 의한 응력이 발생한 이후, FBG센서를 설치하였고, 이때의 변형률 응답값을 0으로 측정하도록 설정하였다. 가력 실험은 총 2회 수행되었다. 첫번째 가력 실험은 모달 파라미터 획득을 위한 가속도 계측과 모델 업데이트에 이용될 1층 FBG의 변형률을 계측하기 위함이다. 이때 얻어진 2층 FBG의 변형률은 업데이트 모델의 검증에 이용하였다. 가력 시 얻은 임팩트 하중 값을 업데이트 모델에 입력해서 나온 2층 기둥 변형률값과 가력 시 FBG에서 계측한 변형률값의 비교를 통해 검증을 하기 위함이다.

4.2 실험체의 시스템 식별

실험체의 모달 파라미터 획득을 위해 임팩트 해머 가력 및 가속도 계측 실험을 수행하였다. 실험에서 얻은 입력 신호인 가력 힘 데이터와 출력 신호인 가속도 데이터를 이용하여 FRF를 구성하였다. FRF로부터 고유주파수와 모드형상을 추출하였고 모드형상은 Fig. 6에 나타내었다. 실험을 통해 2차원 골조의 횡방향 변형 모드에 대한 모달 파라미터를 획득하고 이를 이용하여 모델 업데이트를 수행하였다. 비틀림이나 수직 변형 모드에 대한 고려는 무시한다.

Table 1 Model updating results

	1st mode	2nd mode
Differences of natural frequencies(%)	-0.48	11.38
MAC	0.9998	0.9609

Fig. 6 Mode shapes from impact hammer loading tests

4.3 모델 업데이트 결과

시스템 식별을 통해 얻어진 횡방향 총 2개 모드에 대한 모달 파라미터와 실험에서 계측한 대상 프레임의 1층 기둥에

설치된 FBG에서 얻어진 최대 변형률값을 이용하여 모델 업데이트를 수행하였다. 본 실험적 연구가 대상 구조물의 면의 방향, 수직 방향 dof에 대한 고려를 무시하고 있는 바, 2차원 골조 프레임의 모델을 생성하였다. 총 36개의 요소로 실험체와 닮은 모델을 생성하였고, 각 요소의 노드는 3개의 dof(수직, 수평 병진, 회전)를 갖는다. 보와 기둥이 만나는 접합부 부분과 기둥과 지점이 만나는 부분, 기둥과 접합부가 만나는 부분은 회전 강성값을 입력할 수 있도록 요소 강성 행렬을 수정하였다(McGuire, 2001). 모델의 변수는 탄성계수, 보-기둥 접합부 및 지점 회전 강성, 2개 모드에 대한 감쇠비로 설정하였다. 개체수 100, 종료 세대수 1000으로 NSGA-II의 해탐색을 수행하였다. 총 100개의 Pareto 해가 생성되었고, 모드 참여 질량비를 이용하여 1차 및 2차 모드에 대한 가중치를 82.7, 11.5%로 부여하여 최종해를 선정하였다.

최종해의 고유주파수는 1차 모드와 2차 모드에 대해 각각 -0.48%와 11.38%의 상대오차를 보이며 계측 고유주파수와 비교적 잘 일치하였다. 1, 2차 모드 형상 유사도(modal assurance criteria, MAC) 또한 각각 0.9998, 0.9609로 잘 일치하고 있다. 구조물의 안전성 평가에도 최대변형률이 주요 인자로 이용되는 바, 예측한 최대변형률과 계측 최대변형률 값의 일치를 통해 업데이트 모델의 예측 응답의 정확성을 판단해 볼 수 있다. 업데이트 모델의 검증을 위해 계측한 최대변형률과 모델로부터 예측한 최대변형률 응답 비교 결과, 10% 이내의 상대오차를 보이며 최대변형률을 잘 예측하는 것을 확인할 수 있었다. 기존에 주로 적용되던 모달 파라미터만 이용한 모델 업데이트를 동일 실험체와 동일한 조건에서 수행해 보았다. 모델 업데이트 결과, 업데이트 모델의 모달 파라미터는 계측과 매우 유사하였다. 국부 응답인 기둥의 변형률을 이용하여 검증해 본 결과, 계측과 예측 변형률 응답이 상당한 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. 최대 54.48%의 최대변형률 오차를 보였다. 전역적 응답으로만 모델 업데이트를 수행한 결과, 국부 응답 예측에는 실패하는 것을 확인할 수 있었다. 이 경우, 국부 부재 안전성 평가가 어려울 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 철골 구조물의 전역적 응답, 모달 파라미터와 부재의 국부 응답 중 변형률을 모두 고려한 모델 업데이트 기법을 제시하였다. 진동 계측을 통해 얻은 모달 파라미터와 주요 구조 부재의 임팩트 해머 가력을 통해 얻은 최대 변형률을 이용하여 계측과 모델의 차이를 오차함수를 설정하

였다. 고려하는 모드 차수와 모델 업데이트에 이용되는 변형률 계측 개소만큼의 다수의 오차함수가 생성되며 다목적 최적화 기법을 통해 이를 최소화시키며 모델의 변수를 탐색한다. 제시한 기법을 검증하기 위해 철골 평면 프레임에 대한 임팩트 해머 가력 실험을 수행하고 가속도계와 FBG센서를 이용하여 실험체의 응답을 계측하였다. 실험을 통해 얻은 모달 파라미터와 실험체 기둥의 국부 최대 변형률을 이용하여 모델 업데이트를 수행한 결과, 모달 파라미터 뿐만 아니라 부재의 변형률도 잘 예측하는 모델을 얻을 수 있었다. 기존의 모달 파라미터만을 이용한 모델 업데이트 기법을 동일한 계측 데이터와 조건에서 수행한 결과, 전역적 응답은 잘 예측하지만, 국부 응답을 제대로 예측하지 못하는 것을 확인할 수 있었다. 건물 시스템 레벨의 상태 평가 및 안전성 평가뿐만 아니라 국부 응답 예측 및 부재 레벨의 안전성 평가를 위해서는 본 연구가 제시한 기법과 같이 국부적 응답을 이용한 모델 업데이트가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2011년 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0018360).

References

- Arslan, M.E., Durmus, A. (2014) Modal Testing and Finite Element Model Calibration of in-filled Reinforce Concrete Frames, *J. Vib. & Control*, 20, pp.1946~1959.
- Brincker, R., Zhang, L., Andersen, P. (2001) Modal Identification of Output-only Systems using Frequency Domain Decomposition, *Smart Mater. & Struct.*, 10, pp.441~445.
- Butt, F., Oenzetter, P. (2014) Seismic Response Trends Evaluation and Finite Element Model Calibration of an Instrumented RC Building Considering Soil-Structure Interaction and Non-structural Components, *Eng. Struct.*, 65, pp.111~123.
- Chen, W.H., Lu, Z.R., Lin, W., Chen, S.H., Ni, Y.Q., Xia, Y., Liao, W.Y. (2011) Theoretical and Experimental Modal Analysis of the Guangzhou New TV Tower, *Eng. Struct.*, 33, pp.3628~3646.
- Choi, S.W., Kim, I.S., Park, J.H., Kim, Y., Sohn, H.G., Park, H.S. (2013) Evaluation of Stiffness Changes in a High-rise Building by Measurements of Lateral Displacements using GPS Technology, *Sensors*, 13, pp.15489~15503.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., Meyarivan, T. (2002) A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6, pp.182~197.
- Foti, D., Gattulli, V. (2014) Output-only Identification and Model Updating by Dynamic Testing in Unfavorable Conditions for a Seismically Damaged Building, *Computer-Aided Civil & Infrastruct. Eng.*, 29, pp.659~675.
- Jafarkhani, R., Masri, S.F. (2011) Finite Element Model Updating using Evolutionary Strategy for Damage Detection, *Computer-Aided Civil & Infrastruct. Eng.*, 26, pp.207~224.
- Kurata, M., Li, X., Fujita, K., Yamaguchi, M. (2013) Piezoelectric Dynamic Strain Monitoring for Detecting Local Seismic Damage in Steel Buildings, *Smart Mater. & Struct.*, 22, 115002.
- Lamarche, C.P., Paultre, P., Proulx, J., Mousseau, S. (2007) Assessment of the Frequency Domain Decomposition Technique by Forced-vibration Tests of a Full-Scale Structure, *Earthq. Eng. Struct. & Dyn.*, 37, pp.487~494.
- Lee, H.M., Choi, S.W., Jung, D.J., Park, H.S. (2013) Analytical Model for Estimation of Maximum Normal Stress in Steel Beam-columns based on Wireless Measurement of Average Strains from Vibrating Wire Strain Gages, *Computer-Aided Civil & Infrastruct. Eng.*, 28, pp.717~717.
- Lee, H.M., Park, H.S. (2011) Gage-free Stress Estimation of a Beam-like Structure based on Terrestrial Laser Scanning, *Computer-Aided Civil & Infrastruct. Eng.*, 26, pp.647~658.
- Li, J., Hao, H. (2014) Substructure Damage Identification based on Wavelet-Domain Response Reconstruction, *Struct. Health Monit.*, 13, pp.389~405.
- Park, H.S., Shin, Y., Choi, S.W., Kim, Y. (2013) An Integrated Structural Health Monitoring System for the Local/global Response of a Large-scale Irregular Building under Construction, *Sensors*, 13, pp.9085~9103.
- Roussel, M., Glisic, B., Lau, J.M., Fong, C.C. (2014) Long-term Monitoring of High-rise Buildings Connected by Link Bridges, *J. Civil Struct. Health Monit.*, 4, pp.57~67.
- Wang, Y., Li, Z., Wang, C., Wang, H. (2013)

- Concurrent Multi-scale Modeling and Updating of Long-span Bridges using a Multi-objective Optimization Technique, *Struct. & Infrastruct. Eng.*, 9, pp.1251~1266.
- Wu, J. R., Li, Q.S.** (2006) Structural Parameter Identification and Damage Detection for a Steel Structure using a Two-stage Finite Element Model Updating Method, *J. Construct. Steel Research*, 62, pp.231~239.
- Xia, Y., Zhang, P., Ni, Y., Zhu, H.** (2014) Deformation Monitoring of a Super-tall Structure using Real-time Strain Data, *Eng. Struct.*, 67, pp.29~38.
- Zhang, Y., Yang, W.** (2013) Bayesian Strain Modal Analysis under Ambient Vibration and Damage Identification using Distributed Fiber Bragg Grating Sensors, *Sensors & Actuators A: Physical*, 201, pp.434~449.
- Zimmerman, A.T., Shiraishi, M., Swartz, R.A., Lynch, J.P.** (2008) Automated Modal Parameter Estimation by Parallel Processing within Wireless Monitoring Systems, *J. Infrastruct. Sys.*, 14, pp.102~113.

요 지

기존 구조물의 모델 업데이트 기법은 주로 진동 계측을 통해 얻은 전역적 구조 응답-모달 파라미터-를 이용한다. 모달 파라미터를 이용하여 업데이트된 모델은 전역적 구조 응답을 잘 추정할 수 있지만, 부재 레벨의 안전성 평가를 위한 국부적 응답 예측에는 어려움이 있다. 구조물 내 구조 부재들의 변형률 계측을 통해 응력을 추정하고, 안전성 평가가 이루어진다. 따라서, 본 연구는 모달 파라미터 이외에 로컬 구조 부재들에 가하는 해머 가력을 통해 계측한 변형률을 추가적으로 모델 업데이트에 이용한다. 본 연구가 제안하는 모델 업데이트에서 목적함수는 전역적/국부적 계측 응답과 모델의 응답간의 차로 설정되며 NSGA-II를 이용하여 이를 최소화된다. 업데이트 모델에서 예측하는 변형률 응답은 철골조의 안전성 평가에 활용된다. 제안한 기법은 철골 프레임에 대한 시뮬레이션과 해머 가력 실험을 통해 검증된다.

핵심용어 : 구조 건전도 모니터링, 시스템 식별, 모델 업데이트, NSGA-II