

FBG를 이용한 변형률 기반 건물의 횡방향 구조반응 모니터링 기법에 관한 해석적 연구

최 세 운¹ · 박 근 형¹ · 김 유 석¹ · 박 효 선^{1*}

¹연세대학교 건축공학과

A Numerical Study on the Strain Based Monitoring Method for Lateral Structural Response of Buildings using FBG Sensors

Se Woon Choi¹, Keunhyoung Park¹, Yousok Kim¹ and Hyo Seon Park^{1*}

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

Abstract

In this study, the strain based monitoring method to evaluate the lateral structural response of buildings is presented and an applicability of the proposed method is confirmed through the numerical study. It is assumed that the fiber Bragg grating(FBG) strain sensor is employed to measure the strain response of members due to the excellent properties such as multiplexing, and higher sampling frequency. These properties of FBG sensors is proper for buildings the a lot of sensors are required to monitor the reponses of those. FBG sensors measure the strain response of vertical members and are employed to calculate the curvatures of members using the measured strain responses. Then the lateral displacement, and lateral acceleration is evaluated based on the curvatures of vertical members. Additionally, these dynamic responses of buildings are used to evaluate the dynamic properties of buildings such as the natural frequencies and mode shapes using the frequency domain decomposition(FDD) method. Through the application of nine-story steel moment frame example structure, it is confirmed that the proposed method is appropriate to evaluate the lateral structural responses and dynamic properties of buildings.

Keywords : Strain, lateral structural response of buildings, fiber Bragg grating, numerical study

1. 서 론

건물의 구조 모니터링은 모니터링 목적에 따라 안전도 모니터링과 사용성 모니터링으로 구분될 수 있다. 구조물의 안전도 모니터링에서는 일반적으로 변형률계가 널리 사용되고 있으며, 사용성 모니터링에서는 가속도계, 변위계 등이 사용되고 있다.

한편, 건설기술의 발달과 생활수준의 향상으로 인해 건물의 안전성 뿐만 아니라 사용성에 관한 중요성이 점점 증가하고 있다. 따라서 건물의 안전성과 사용성을 동시에 모니터링하기 위해서는 다양한 타입의 센서가 요구된다.

현재 구조물의 변위를 예측하기 위해 카메라, 레이저 스캐

너와 같은 영상 기반 센서를 사용하거나, 가속도계를 이용한 방법이 활용되고 있다(Lee, 2010; Park *et al.*, 2005; 2010). 그러나 영상 기반 센서는 시야를 확보해야 하며, 상대적으로 고가이기 때문에 상시로 활용하기에는 한계를 가진다. 또한 가속도계를 이용해 변위를 예측하는 방법은 정적 변위를 예측하는데 부적합하며, 이중 적분에 따른 수치에러가 발생하게 된다.

이와 같은 이유로 구조물의 안전성과 사용성을 동시에 모니터링하기 위해 요구되는 센서 종류의 수를 줄일 수 있는 변형률 기반의 모니터링 기법이 제시되었다. Kim 등(2002)은 보 이론을 응용하여 측정된 변형률로부터 단순보의 정적 변위 응답을 추정하는 기법을 제시하였다. Choi 등(2006)은 계측된

* Corresponding author:

Tel: +82-2-2123-2794; E-mail: hspark@yonsei.ac.kr

Received July 1 2013; Revised July 28 2013;

Accepted July 30 2013

©2013 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.

변형률을 이용하여 단순보의 동적 변위응답을 추정하는 기법을 제시하였다. Kang 등(2007)은 변형률-변위 변환함수를 이용하여 캔틸레버 보 구조물의 동적 변위응답을 추정하는 기법을 제시하였다. Chang 등(2008)은 모드분해기법을 이용한 동적 변형률신로부터 캔틸레버 보 구조물의 변위응답을 추정하는 기법을 제시하였다. 그러나 기존 연구들(Kim *et al.*, 2002; Choi *et al.*, 2006; Kang *et al.*, 2007; Chang *et al.*, 2008)은 모두 보 구조물의 변위응답을 추정하는데 한정되었다.

본 연구에서는 건물의 횡방향 변위와 가속도를 모니터링하기 위한 변형률 기반 추정기법을 제시하고, 이를 구조해석을 통해 제안하는 기법의 적용성을 검토한다. 본 연구에서는 변형률 센서로서 광섬유 센서(fiber Bragg grating, FBG)를 사용한다고 가정한다. FBG 센서는 일반적인 전기저항식 변형률 센서와 비교하여 내구성이 뛰어나며, 전자기의 영향이 적어 높은 신뢰성으로 변형률 응답값을 측정할 수 있다. 또한, 높은 sampling rate가 가능해서 정적응답 뿐만 아니라 동적응답을 측정할 수 있다. 한편, 기동과 같은 부재의 거동을 모니터링하거나 건물과 같이 다수의 부재로 이루어진 구조물을 모니터링하기 위해서는 다수의 센서가 설치되어야 하는데(Lee *et al.*, 2009; 2010), 이는 설치 비용의 증가와 관리의 어려움을 초래한다. FBG 센서는 다중 측정이 가능한 multiplexing 기능을 가지고 있어서 건물과 같이 다수의 부재로 이루어진 구조물의 모니터링에 적합하다. FBG의 이러한 특징들 때문에 FBG는 건물 및 사회기반시설물의 모니터링 분야에 활발히 적용되어 왔다(Li *et al.*, 2004; Majumder *et al.*, 2008).

본 연구에서는 건물의 횡방향 변위와 가속도를 추정하기 위해 기동열에 FBG센서가 설치된다고 가정한다. FBG 센서를 통해 측정되는 변형률을 이용하여 해당 기동의 곡률과 변형 분포를 구한다. 이를 통해 기동열의 횡변위 응답을 추정한다. 추정

된 변위응답을 이중미분하여 횡방향 가속도 응답을 구한다. 그리고 추정된 가속도 응답은 frequency domain decomposition(FDD) 기법을 이용하여 구조물의 고유진동수와 모드형상을 추정하는데 사용된다. 제시된 변형률 기반 건물의 횡방향 구조 응답 모니터링 기법은 9층 철골모멘트골조 예제의 지진 해석을 통해 검증한다.

2. 광섬유 센서(Fiber Bragg Grating, FBG)

FBG 센서는 하나의 광섬유에 여러 개의 브래그 격자를 새기고, 이를 측정하고자 하는 구조물의 위치에 부착시킨다. 브래그의 격자는 구조물의 변형에 비례하여 변형하게 되는데, 이러한 물리적 변화는 각 격자에서 반사되는 빛의 파장의 특성이 달라지는 원인이 된다. 따라서 이러한 달라진 반사파의 파장을 이용하여 부착 위치에서의 변형률 값을 계산할 수 있다(Majumder *et al.*, 2008). FBG는 광섬유 코어에 형성된 굴절률 변화가 주기적이고 연속적인 격자 구조를 가지는데 광섬유에 광대역 광원이 입사될 경우 식 (1)과 같이 브래그 조건에 해당되는 파장 성분만을 반사시키는 특성을 보인다(Lee, 2010).

$$\lambda = 2n_c \Lambda \tag{1}$$

여기서, λ , n_c , Λ 는 각각 브래그 파장, 유효굴절률, 격자 간격을 의미한다. Fig. 1과 같이 광섬유에 광원을 입사시킬 경우, 브래그 조건에 의한 파장성분은 FBG에서 반사되고 나머지 파장성분은 그대로 통과하기 때문에 하나의 광섬유 케이블에서 여러 개소의 측정이 가능하다. FBG 센서는 광섬유를 사용하기 때문에 전자기의 영향이 없으며, 내구성이 뛰어나다. 또한 높은 sampling rate을 가지면서 $1\mu\epsilon$ 정밀도를 가진다.

3. 변형률 기반 건물의 횡방향 변위 및 가속도 추정기법

본 연구에서는 건물의 횡방향 변위와 가속도를 추정하기 위해 기동열에 FBG센서가 설치된다고 가정한다. FBG 센서는 Fig. 2와 같이 총 4개의 센서가 각 기동의 양 단부에 대칭으로 설치된다고 가정한다. 이는 평면은 휨 변형 후에서도 평면을 형성한다는 Bernoulli 가정에 근거한 식 (2)를 이용하여 센서가 설치된 양 단부에서의 곡률을 계산할 수 있다. 한편, 지진하중, 풍하중과 같은 횡하중에 의해 건물은 횡변형을 경험하게 되는데, 이때 각 기동의 모멘트 분포는 Fig. 3과 같은 1차 직선으로 표현할 수 있는데, 이는 식 (3)를 통해 해당 기동의 곡률 분포 역시 1차식으로 표현할 수 있음을 알 수 있다.

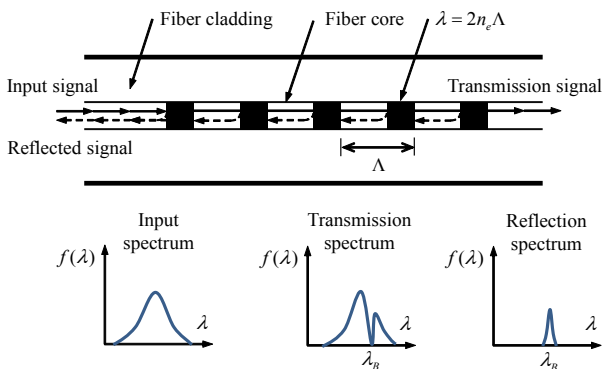


Fig. 1 Measuring principle of FBG sensor (Li *et al.*, 2004)

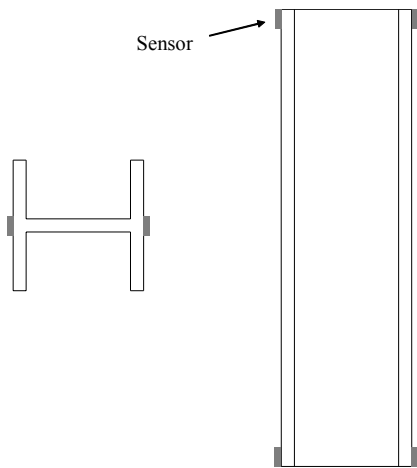


Fig. 2 Locations of sensors

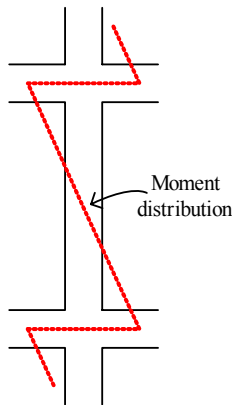


Fig. 3 Typical moment distribution of a column subjected to the lateral load

$$\kappa(x) = \frac{\varepsilon_b(x) - \varepsilon_t(x)}{h} \quad (2)$$

$$\kappa(x) = \frac{M(x)}{EI} \quad (3)$$

여기서, κ 는 곡률이며, ε_t 와 ε_b 는 단면에서 상부 FBG 센서와 하부 FBG 센서에서 측정되는 변형률 값을 의미한다. h 는 상부와 하부 FBG 센서 사이 거리이다. M , E 과 I 는 각각 모멘트, 탄성계수, 단면2차모멘트를 의미한다. x 는 부재 내의 임의의 위치를 나타낸다.

식 (2)와 (3)을 통해 각 기둥의 곡률 분포를 구할 수 있으며, 이를 통해 각 기둥의 횡변형 혹은 횡변위를 예측할 수 있다. 본 연구에서는 전단변형에 의한 횡변형 요소를 고려하지 않고, 휨변형에 의한 횡변위 요소만 고려하는 탄성곡선법인 식 (4)을 이용하여 기둥 내에서의 횡변위 분포를 추정한다.

$$y(x) = \iint -\kappa(x) dx dx \quad (4)$$

여기서, y 는 기둥 내의 임의의 x 위치에서의 횡변위를 의미한다. 식 (4)를 이용하여 각 기둥의 횡변위 분포 $y(x)$ 를 구하기 과정에서는 두 개의 적분상수의 값을 경계조건을 이용하여 구해야 한다. 이를 위해, 본 연구에서는 건물의 최하층에 위치한 기둥의 지점 조건은 고정단이라 가정하고, 최하층 기둥의 횡변위 분포를 구한다. 이는 최하층 기둥의 상단부의 횡변위와 회전각을 예측할 수 있다는 것을 의미하며, 이를 최하층에 수직으로 연속한 상부층 기둥의 하단부 경계조건 값으로 이용한다. 이와 같이 최하층 기둥의 횡변위 분포를 추정하고, 동일한 과정을 수직으로 연속한 기둥열에 대하여 연속적으로 적용하여 해당 기둥열의 횡변위 분포를 추정한다.

이를 통해 추정된 각 층의 횡변위는 이중미분을 통해 각 층의 횡가속도를 추정할 수 있다. 본 연구에서는 식 (5)와 같은 이중미분 방법을 사용한다(Gilat and Subramaniam, 2013).

$$y''(x_i) = \frac{-y(x_{i-3}) + 4y(x_{i-2}) - 5y(x_{i-1}) + 2y(x_i)}{\Delta t^2} \quad (5)$$

한편, 식 (5)를 통해 추정된 가속도 응답은 구조물의 동특성을 추정하는데 활용될 수 있다. 본 연구에서는 Frequency Domain Decomposition(FDD) 기법을 이용하여 구조물의 고유주기 및 모드형상을 추정하도록 한다(Brincker *et al.*, 2001).

4. 예제 적용

본 연구에서는 제시하는 추정 기법의 적용성을 검토하기 위해 Fig. 4와 같은 9층 철골모멘트 골조 예제를 사용한다(Choi *et al.*, 2012). 이 구조물의 1차와 2차 고유주기는 각각 2.08초와 0.78초이며, 2차모드까지의 질량참여율은 92.85%이다.

구조물의 변형률 값을 얻기 위해 Fig. 4에 나타난 것처럼 왼쪽 첫 번째 기둥열에 FBG 센서(층당 4개 × 9개층 = 총 36개)가 설치되었다고 가정하고, 구조해석을 통해 해당 위치에서의 변형률 값을 얻는다.

본 연구에서는 구조물의 지진해석을 위해 OpenSees를 사용한다. 다이어프램 효과와 P-delta 효과가 고려되었다. 패널존의 강성 및 강도 효과는 고려되지 않았다. 기둥과 보의 접합부는 강점으로 연결되었다고 가정하였다. 부재의 재료는 탄성 재료를 사용하였으며, 선형 시간이력 해석을 수행하였다. 본 연구에서 사용한 지진파는 Fig. 5과 같다.

구조해석을 통해 가정된 센서의 위치에서 변형률 값을 얻을

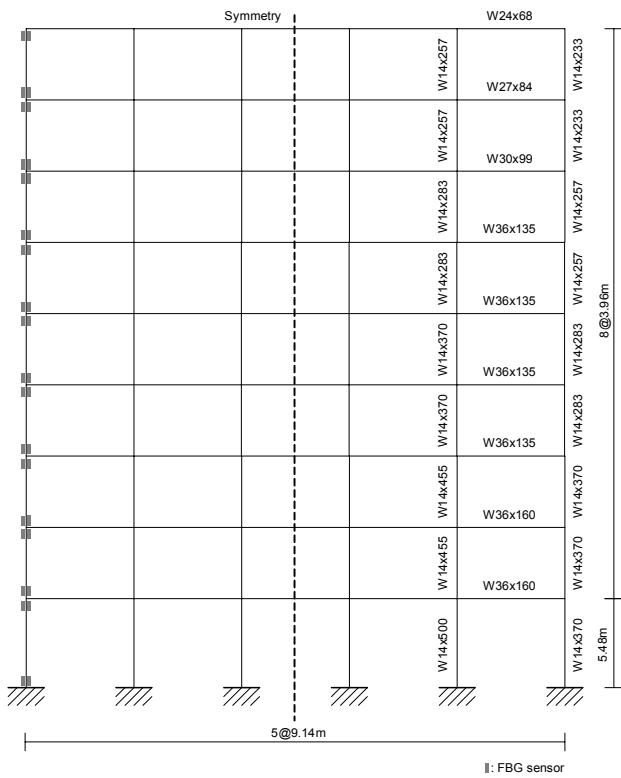


Fig. 4 Example structure

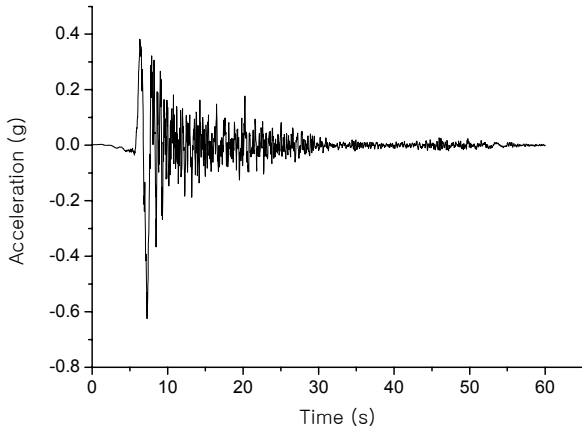


Fig. 5 Ground motion used in this study

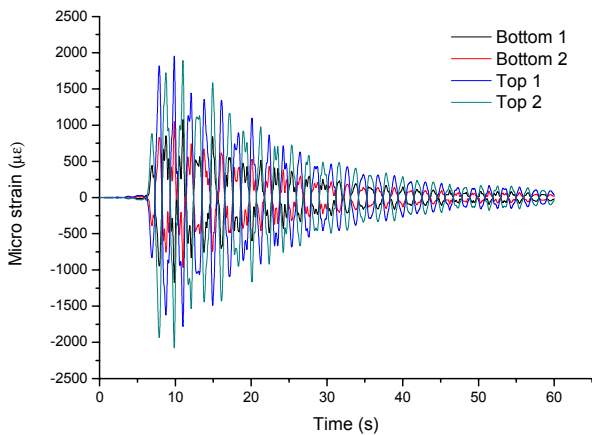


Fig. 6 Strain history(9th floor)

수 있는데, 이 중에서 9층에 설치된 상부, 하부 FBG 센서에서 얻은 변형률 분포는 Fig. 6과 같다. 이를 식 (2)~(4)에 적용하면 횡변위 분포를 구할 수 있다. Fig. 7은 9층의 횡변위 이력곡선을 나타낸다. 구조해석의 결과와 비교하였을 경우, 최소, 최대 오차는 각각 -0.0038cm, 0.0041cm으로 나타났다.

추정된 횡방향 변위를 식 (5)를 이용하여 횡방향 가속도를 추정하였다. Fig. 8은 추정된 9층의 횡방향 가속도를 나타낸다. Fig. 8(a)에 나타난 것처럼 단순히 이중미분만 적용할

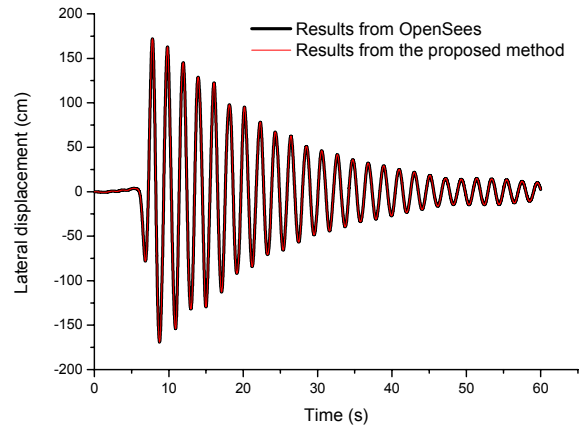
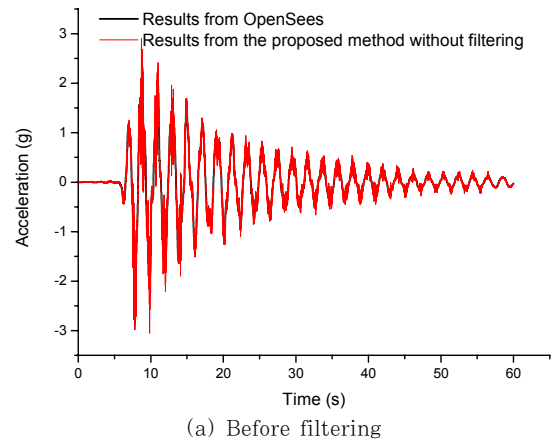
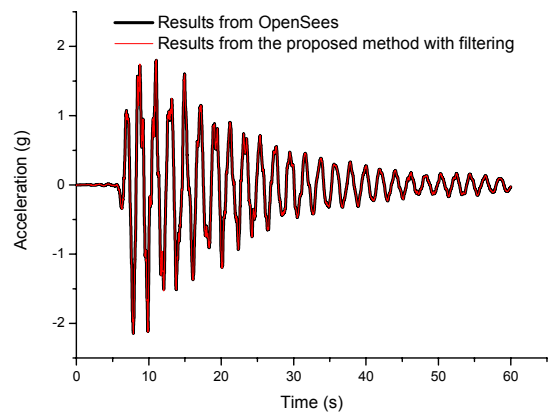


Fig. 7 Lateral displacement(9th floor)

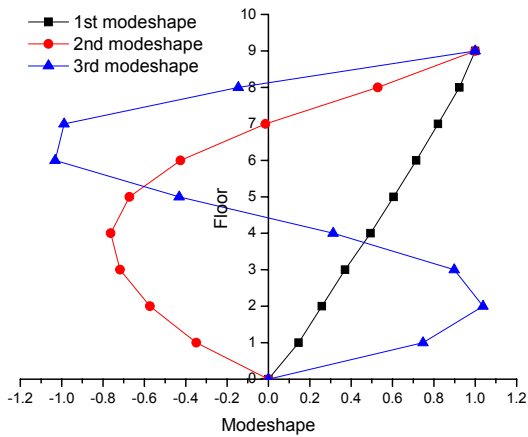


(a) Before filtering

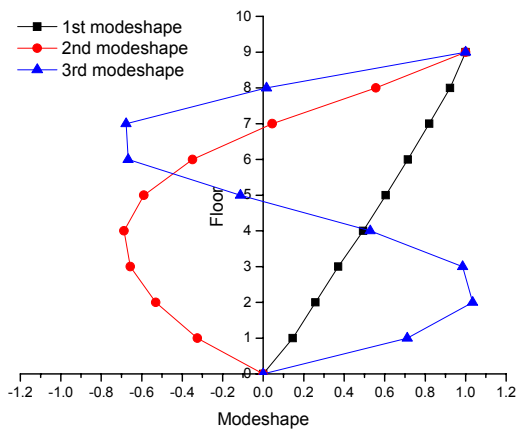


(b) After filtering

Fig. 8 Lateral acceleration(9th floor)



(a) OpenSees



(b) FDD

Fig. 9 Comparison of modeshapes from OpenSees and FDD

Table 1 Comparison of natural frequency and MAC value

	OpenSees	FDD
1st frequency	0.48	0.48
2nd frequency	1.28	1.27
3rd frequency	2.20	2.29
MAC(1st)	1.00	
MAC(2nd)	0.99	
MAC(3rd)	0.93	

경우, 구조해석의 결과값과 비슷한 경향을 나타내지만, 미분으로 인한 잡음이 많이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 그래서 이중미분 후 Cutoff frequency 25Hz인 Low-pass filter를 적용하였으며, 그 결과 Fig. 8(b)에 나타난 것처럼 구조해석의 결과값과 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.

구조물의 손상 평가에서는 일반적으로 고유진동수 및 모드형상 등과 같은 구조물의 동특성 값을 이용한다(Kim *et al.*, 2003; Lee *et al.*, 2010). 따라서 본 연구에서는 변형률을

통해 추정된 층별 가속도를 이용하여 구조물의 동특성을 추정해 보았다. 이를 위해 FDD 기법을 사용하였으며, 그 결과는 Fig. 9와 Table 1과 같다. 모드형상의 유사성을 파악하기 위해 Modal Assurance Criteria(MAC)를 사용하였다(Chang *et al.*, 2008). MAC 값은 식 (6)을 이용하여 구한다.

$$MAC_{ij} = \frac{[\{x_i\}^T\{\phi_j\}]^2}{[\{x_i\}^T\{x_j\}][\{\phi_j\}^T\{\phi_j\}]} \quad (6)$$

여기서, x_i 는 i 번째 기준모드형상을 의미하여, ϕ_j 는 j 번째 비교모드형상을 의미한다. MAC값은 0과 1사이의 값을 가지며, 1에 가까울수록 높은 상관관계를 의미한다. Table 1에 나타난 것과 같이 1차와 2차의 고유진동수와 모드형상은 OpenSees의 결과와 매우 유사한 것으로 나타났지만, 3차 고유진동수와 모드형상에서는 차이가 증가하였다. 그러나 본 예제는 2차모드까지의 질량참여율이 90%이상이기 때문에 구조물의 반응 및 특성을 모니터링하는데 적합하다고 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 구조물의 안전성과 사용성을 동시에 모니터링하기 위해 요구되는 센서 종류의 수를 줄이면서, 기존 횡방향 구조 응답 모니터링 기법의 문제를 극복할 수 있는 변형률 기반 건물의 횡방향 구조응답 예측 기법을 제안하였다. 제안하는 기법은 FBG 센서를 통해 계측되는 변형률을 이용하여 해당 기둥의 곡률과 변형 분포를 구한다. 이를 통해 기둥의 횡변위 응답을 추정한다. 그리고 추정된 변위 응답을 이중미분하여 횡방향 가속도 응답을 추정하고, 이를 Frequency Domain Decomposition(FDD) 기법에 적용하여 구조물의 고유진동수와 모드형상을 추정한다. 제시된 변형률 기반 건물의 횡방향 구조 응답 모니터링 기법은 9층 철골모멘트골조 예제의 지진 해석을 통해 검증되었다.

제시된 기법은 횡방향 변위 및 가속도에 관련된 구조물의 사용성 모니터링 뿐만 아니라, 변형률 값을 이용하기 때문에 센서가 설치된 부재의 안전성을 동시에 모니터링할 수 있다. 또한 이는 구조물의 정적 및 동적 구조 응답을 모니터링할 수 있으며, 구조물의 동특성을 평가할 수 있다.

본 연구에서는 변형률 기반 건물의 횡방향 구조응답 예측 기법을 제시하였으며, 구조해석을 이용하여 검증하였다. 따라서 실험을 통해 추가 검증이 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국 연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0018360).

참고 문헌

- Brincker, R., Zhang, L., Andersen, P.** (2001) Modal Identification of Output-only Systems Using Frequency Domain Decomposition, *Smart Materials and Structures*, 10, pp.441~445.
- Chang, S.J., Kim, N.S.** (2008) Estimation of Displacement Response from the Measured Dynamic Strain Signals Using Mode Decomposition Technique, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 28(4A), pp.507~515.
- Choi, E.S., Kang, D.H., Chung, W.S., Kim, H.S.** (2006) Estimation of Dynamic Displacement and Characteristics of A Simple Beam from FBG Sensor Signals, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, 18(4), pp.503~514.
- Choi, S.W., Park, H.S.** (2012) Multi-objective Seismic Design Method for Ensuring Beam-hinging Mechanism in Steel Frames, *Journal of Constructional Steel Research*, 74, pp.17~25.
- Gilat, A., Subramaniam, V.** (2013) Numerical Methods for Engineers and Scientists, John Wiley.
- Kang, L.H., Kim, D.K, Han, J.H.** (2007) Estimation of Dynamic Structural Displacements Using Fiber Bragg Grating Strain Sensors, *Journal of Sound and Vibration*, 305, pp.534~542.
- Kim, J.T., Ryu, Y.S., Cho, H.M., Stubbs, N.** (2003) Damage Identification in Beam-type Structures: Frequency-based Method vs Mode-shape-based Method, *Engineering Structures*, 25, pp.57~67.
- Kim, N.S., Cho, N.S.** (2002) Estimation of Bridge Deflection Using Fiber Optic Bragg-grating Sensors, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(6A), pp.1357~1366.
- Lee, H.M.** (2010) Development of An Integrated Structural Health Monitoring System to Ensure the Safety and Serviceability of High-rise Buildings, Ph.D. Thesis, Department of Architectural Engineering, Yonsei University.
- Lee, H.M., Kim, J.M., Sho, K., Park, H.S.** (2010) A Wireless Vibrating Wire Sensor Node for Continuous Structural Health Monitoring, *Smart Materials and Structures*, doi:10.1088/0964-1726/19/5/055004.
- Lee, H.M., Park, H.S.** (2009) Estimation of the Maximum Stress of a Beam-Column Based on Average Strains from Vibrating Wire Strain Gages, *Proceeding of Architectural Institute of Korea*, 29(1), pp.17~20.
- Lee, S.Y., Noh, M.H.** (2010) Performance Assessment Using the Inverse Analysis Based a Function Approach of Bridges Repaired by ACM from Incomplete Dynamic Data, *Journal of Korean Society for Advanced Composite Structures*, 1(2), 51~58.
- Li H.N., Li, D.S., Song, G.B.** (2004) Recent Application of Fiber Optic Sensors to Health Monitoring in Civil Engineering, *Engineering Structures*, 26, pp.1647~1657.
- Majumder, M., Gangopadhyay, T.K., Chakraborty, A.K., Dasgupta, K., Bhattacharya, D.K.** (2008) Fibre Bragg Gratings in Structural Health Monitoring-Present Status and Applications, *Sensors and Actuators A: Physical*, 147, pp.150~164.
- Mazzoni, S., McKenna, F., Fenves, G.L.** (2006) OpenSees Command Language Manual(<http://opensees.berkeley.edu/index.php>).
- Park, J.W., Lee, J.J., Jung, H.J., Myung, H.** (2010) Vision-based Displacement Measurement Method for High-rise Building Structures Using Partitioning Approach, *NDT&E International*, 43, pp.642~647.
- Park, K.T., Kim, S.H., Park, H.S., Lee, K.W.** (2005) The Determination of Bridge Displacement Using Measured Acceleration, *Engineering Structures*, 27, pp.371~378.

요 지

본 논문에서는 건물의 횡방향 구조반응을 평가하기 위한 변형률 기반의 모니터링 기법이 제시되고, 이에 대한 기초 연구로써, 구조해석을 통해 제안된 기법을 검증한다. 광섬유 격자 센서(fiber Bragg grating, FBG)는 일반 변형률 센서와 비교하여 내구성이 뛰어나고 높은 샘플링 수와 여러 지점을 동시에 측정할 수 있는 장점이 있다. 이러한 특성 때문에 FBG 센서는 구조 모니터링을 위해 많은 센서가 요구되는 건물의 모니터링에 적합하다. 본 연구에서 FBG 센서는 수직 부재의 변형률을 측정하며, 이는 해당 부재의 곡률을 평가한다. 이러한 곡률은 횡변위와 횡가속도를 평가하는데 사용된다. 추가적으로 횡방향 가속도는 frequency domain decomposition(FDD) 기법을 이용하여 구조물의 고유진동수와 모드형상을 추정하는데 사용된다. 9층 철골모멘트 골조 예제의 적용을 통해, 제시된 기법이 건물의 다양한 횡방향 구조 반응과 동적 특성을 평가하는데 적절함을 확인하였다.

핵심용어 : 변형률, 건물의 횡방향 구조반응, 광섬유 센서, 구조해석