

다중화된 광섬유센서를 이용한 강철도교의 가속도 유추

Acceleration Estimation of a Steel Plate Girder Bridge using Multiplexed FBG Sensors

정원석* 강동훈** 김현민***
Chung, Wonseok Kang, Donghoon Kim, Hyunmin

ABSTRACT

This study presents an experimental technique to monitor the dynamic behavior of the railway bridge system simultaneously using multiplexed fiber Bragg grating (FBG) sensors. The measuring quantities include strains, curvatures, vertical deflections, and vertical accelerations. The strains are directly measured from multiplexed FBG sensors at various locations of the test bridge followed by curvature calculations based on the plane section assumption. Vertical deflections are then estimated using the Bernoulli beam theory and regression analysis. Finally, vertical accelerations are obtained from the numerical differentiation in time domain. In order to verify the proposed method, several conventional electric strain gauges, displacement transducers, and accelerometers are installed at the mid-span of the bridge for comparisons. A test train is passed over the bridge to monitor the dynamic response of the bridge. The monitoring results show that the multiplexed FBG sensing system is able to capture the essential behavior of the test bridge while resolving wiring problem in practice.

1. 서론

광섬유 센서는 구조물의 장기계측을 위해 필수적인 내구성 및 온도변화와 전자기파에 대한 면역성으로 기존의 전기식 센서를 대체할 수 있는 차세대 센서로 부각되고 있다. 특히 철도교 전철화 구간과 신철도교통 수단인 경전철, 자기부상열차 등은 고압 전류에 의해 구동되므로 전자기파 간섭(electro-magnetic interference, EMI)으로 인해 전기식 센서를 이용한 교량 모니터링에 어려움을 겪고 있다. 이러한 철도환경 변화로 인해 광섬유 센서를 이용한 철도교 모니터링 기법에 대한 관심이 점차 증가되고 있다. 본 연구에서는 하나의 광섬유에 여러 개의 센서를 배치할 수 있는 다중화(multiplexing)가 가능한 광섬유 브래그격자(fiber Bragg grating, FBG)를 이용하여 강철도교의 변형률, 처짐, 가속도를 포함한 모니터링시스템을 구축하기 위한 타당성을 검토하는데 목적이 있다.

타당성 검토 및 검증을 위해 경북선에 위치한 관형교를 대상으로 다중화된 FBG 센서를 거더의 상하면에 표면 설치하고 변형률을 측정하고, Bernoulli 보 이론을 이용하여 관형교의 수직 처짐을 유추하였다. 이러한 처짐 산정법은 형하공간에 변위계를 설치하기 위한 고정점을 확보할 필요가 없으며 구조물의 변형률과 처짐을 동시에 측정할 수 있다는 장점이 있다. 이렇게 얻은 교량의 수직처짐을 시간영역에서 수치미분을 통해 가속도를 유추하였다. 즉, 다중화 FBG 센서의 배열을 이용하여 철도교 모니터링 및 사용성 평가에 필요한 물리량인 변형률, 처짐, 가속도 등을 통합 계측할 수 있는 방법을 제시한다.

2. FBG 센서의 측정원리

광섬유 브래그 격자(FBG)는 GeO_2 가 첨가된 광섬유 코어에 자외선 레이저를 조사시켜 레이저 간섭 무늬의 에너지 분포에 따라 코어 굴절률이 주기적으로 변하는 연속적인 층을 만든 것이다. 브래그 격자에 광대역 스펙트럼을 갖는 광원을 광섬유에 입사시키면 식(1)과 같은 브래그 조건(Bragg condition)에 해당하는 파장의 빛은 보강간섭을 일으켜 브래그 격자를 통과하지 못하고 반사되며 다른 파장의 빛은 통과하게 된다. 여기서, n_e 는 광섬유 격자의 유효 굴절률이고 Λ 는 광섬유 코어에 새겨진 격자의 간격이다.

$$\lambda_B = 2n_e\Lambda \quad (1)$$

격자에서 반사되는 브래그 파장(Bragg wavelength)은 유효 굴절률과 격자 간격의 함수이며 광섬유 격자에 온도나 변형률 등의 외란이 가해지면 이들 값이 변하여 브래그 파장은 달라진다. 변화된 브래그 파장을 정밀하게 측정한다면 광섬유 격자에 가해진 온도나 변형률 등의 물리량을 식(2)를 통하여 계산할 수 있으며, 이것이 광섬유 브래그 격자가 센서로 사용될 수 있는 기본 원리이다.

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B[(\alpha_f + \xi_f)\Delta T + (1 - p_e)\epsilon] \quad (2)$$

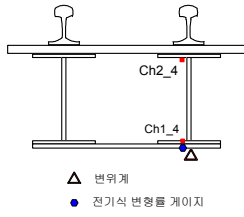
여기서, α_f 는 광섬유의 열팽창 계수(thermal expansion coefficient)이고 ξ_f 는 온도에 의한 광섬유의 굴절률 변화를 나타내는 열광학 계수(thermo-optic coefficient)이다. p_e 는 광탄성 상수(photoelastic constant)이다.

3. 통합 다중화 FBG 모니터링

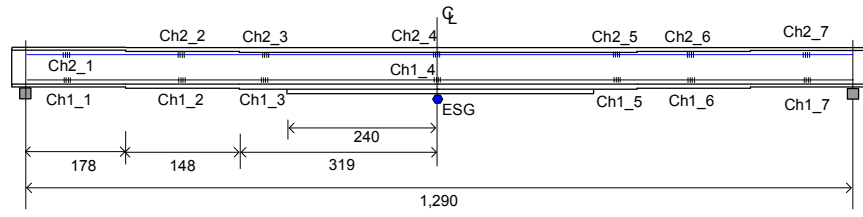
3.1 변형률

실험이 실시된 교량의 지간은 12.9 m인 단선교량이다. 교량은 그림 1(a)과 같이 2개의 주형으로 이루어져 있으며, 상관은 도로교와는 달리 대부분 도상이 없이 주형에 침목이 직접 연결되어 레일이 설치되어 있는 전형적인 철도 판형교이다. 7개의 FBG 센서가 단일 광섬유에 다중화 되어 교량 길이 방향으로 그림 1(b)와 같이 한 개의 광섬유로 측정 채널(채널 1)을 구성하였다. 또한 상부 플랜지에는 하부 플랜지의 센서 부착위치와 동일한 종방향 위치에 FBG 센서를 같은 방법으로 다중화하여 측정 채널(채널 2)을 구성함으로써 구조물의 변형률을 측정하였다. 전기식 센서(electrical strain gauge)와의 직접 비교를 위해 전기식 센서가 부착된 동일 위치에 FBG 센서(Ch1_4)가 위치하도록 하였다.

그림 2는 시험차량인 디젤 기관차가 90km/hr로 대상교량을 통과할 시의 FBG 센서의 응답을 나타내며 그림 3은 FBG 센서와 전기식 센서와의 비교를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 FBG 센서가 교량의 국부 변형률을 정밀하게 측정하고 있으며 변형률 게이지와의 상관관계가 우수함을 알 수 있다.



(a) 단면도



(b) 센서배치도

그림 1. 실험대상 교량 및 센서 배치도

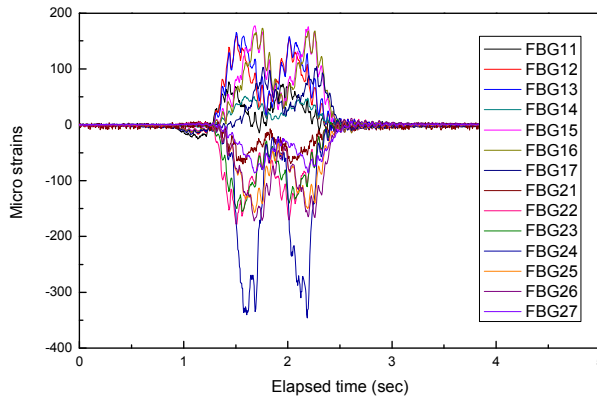


그림 2. FBG 센서의 변형률 응답

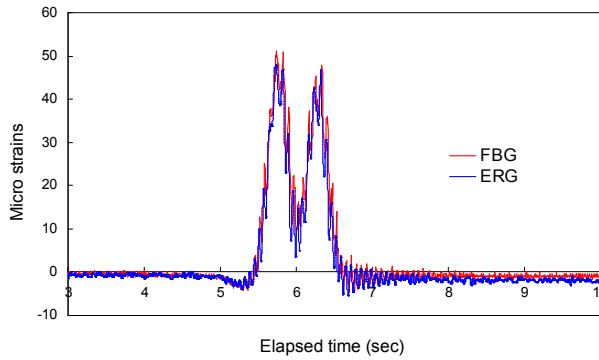


그림 3. FBG 센서와 전기식 센서의 변형률 비교

3.2 수직처짐

일반적인 구조물의 수직처짐은 보의 휨 변형 하에서 기하학적 비선형을 고려하여 식(3)과 같은 관계로 표현될 수 있다. 이는 “평면은 휨 변형 후에서도 평면을 이룬다”는 Bernoulli 가정에 근거한 식이다.

$$\kappa(x) = \frac{\frac{d^2w(x)}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dw}{dx}\right)^2\right]^{3/2}} \quad (3)$$

여기서, $\kappa(x)$ 는 임의의 종단면 x 에서의 곡률, $w(x)$ 는 임의의 종단면 x 에서의 수직처짐이다. 한편, 교량의 종방향 곡률은 식(4)과 같은 n 차 다항식의 형태로 표현할 수 있다.

$$\kappa(x) = c_0 + c_1x + c_2x^2 + \dots + c_nx^n \quad (4)$$

여기서, $c_0 \dots c_n$ 는 곡률함수의 상수이다. 앞서 설명한 바와 같이 본 연구의 실험 교량은 7 개의 종방향 위치에서 곡률을 측정하였으므로 곡률함수식은 6차 다항식을 사용하였다. 즉, 6차 다항식은 7 개의 미지 상수를 가지게 되므로 실험에서 측정한 7개의 곡률 값으로 회귀분석을 통해 곡률함수의 상수를 결정할 수 있다. 미소변형 문제를 고려하여 식(3)을 단순화시키고 구조물의 처짐과 곡률관계로부터 이 중적분을 취하면 식(5)과 같이 수직처짐을 결정할 수 있으며 적분에서 발생하는 2 개의 적분상수는 대 상교량이 단순교임을 고려하여 경계조건을 $w_{(x=0)} = 0$ 와 $w_{(x=L)} = 0$ 로 결정할 수 있다.

$$w(x) = \iint \kappa(x) dx dx \quad (5)$$

본 연구의 방법은 기존의 하부에 변형률을 측정하여 곡률을 유추하는 방법에 비해 직접 곡률을 측정하므로 실제 구조물의 중립축 위치를 파악할 필요가 없다는 장점이 있다. FBG 센서를 이용한 처짐 산정법의 검증을 위해 지간 중앙부의 주형 하부에 변위계를 설치하여 처짐을 직접 측정하였다. 그림 4는 열차 주행 시 FBG 센서로 유추된 수직처짐과 교량 중앙지점에 설치된 처짐계를 통해 직접 계측된 결과를 비교한 것으로 본 연구에서의 처짐 측정법이 변위계의 응답과 우수한 상관관계를 보이고 있음을 알 수 있다.

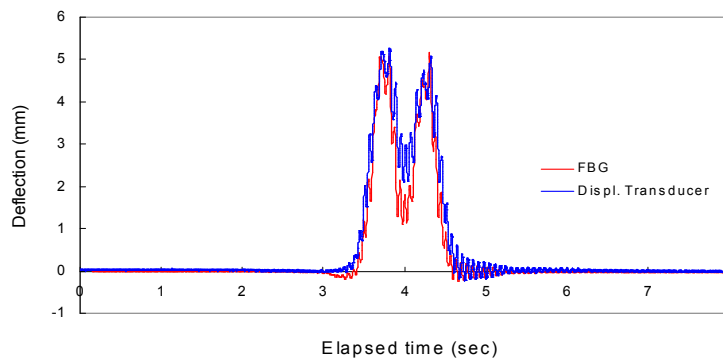


그림 4. FBG 센서와 전기식 센서의 수직처짐 비교

3.3 수직가속도

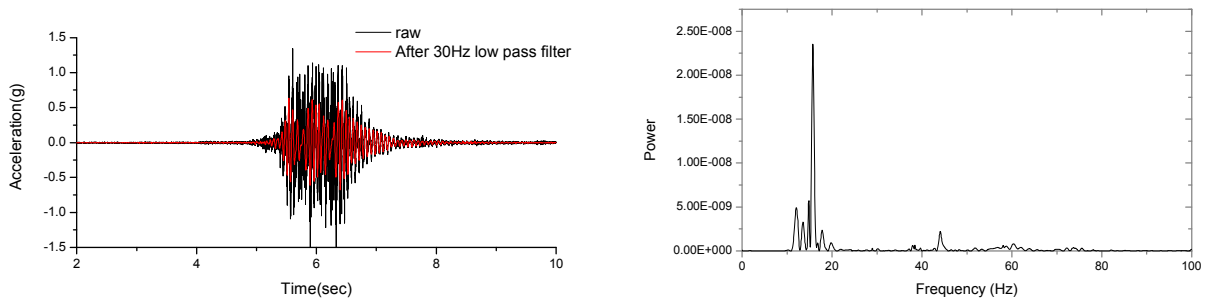
FBG 센서를 이용한 통합계측을 위해 앞서 설명한 변형률, 곡률, 수직처짐 뿐만 아니라 철도교의 사용성 평가 시 중요한 물리량인 가속도의 측정도 필요하다. 가속도의 유추를 위해 다중화된 FBG 센서

를 이용하여 얻은 수직처짐을 시간영역에서 식(6)과 식(7)과 같이 3점 수치미분을 수행하여 가속도를 산정한다.

$$v(t) = \frac{1}{2} \left(\frac{w_{t+\Delta t} - w_t}{\Delta t} + \frac{w_t - w_{t-\Delta t}}{\Delta t} \right) \quad (6)$$

$$a(t) = \frac{1}{2} \left(\frac{v_{t+\Delta t} - v_t}{\Delta t} + \frac{v_t - v_{t-\Delta t}}{\Delta t} \right) \quad (7)$$

그림 5는 가속도계에서 측정된 수직가속도의 시간이력 및 주파수 대역에서의 응답이다. 그림 5(a)와 같이 30Hz low pass 필터링을 실시하여 철도교량 사용성 평가 시 사용되는 주요 횡모드 고유진동수 성분을 고려하고, 여러 가지 외부요인으로 인한 고주파 성분을 제거하면 측정가속도의 최대치가 1.1g에서 0.65g로 크게 줄어들고 있음을 확인할 수 있다. FBG 센서를 이용한 가속도 시간이력은 그림 6에 나타나 있다. 필터링을 실시한 가속도계의 결과와 우수한 상관관계를 나타내고 있음을 알 수 있으며 최대 가속도 차이는 약 2%를 보였다. 그림 7은 30Hz로 필터링한 가속도계 결과와 FBG 센서를 이용한 가속도 결과를 각각 FFT를 통해 주파수 대역에서 표현한 그림이다. 각각의 진폭(Amplitude)를 최대치로 정규화(Normalize)하여 비교한 결과 그림 7과 같이 매우 우수한 결과를 나타내었다. FBG를 이용한 가속도 값은 기존 가속도계와는 달리 고주파 대역 성분은 감지되고 있지 않으나 이는 FBG 센서의 측정주파수가 200Hz로 전기식 센서의 1kHz보다 5배 작기 때문으로 사료된다. 그러나 FBG 센서를 이용한 가속도 값은 본 연구에서 중점을 두고 있는 철도교량의 사용성 평가를 위한 주요 모드 성분을 측정에는 우수한 결과를 보이고 있음을 확인할 수 있었다.



(a) 시간이력

(b) FFT

그림 5. 수직가속도 응답 (가속도계)

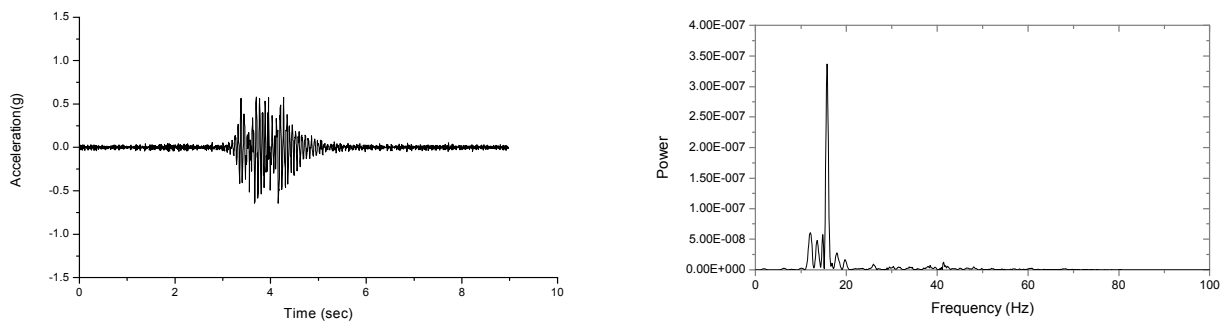


그림 6. 수직가속도 시간이력 응답(FBG 유추)

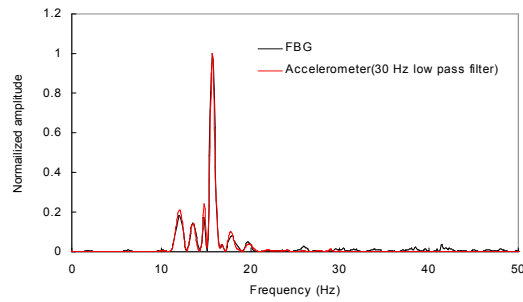


그림 7. 주파수 영역에서의 측정가속도 비교

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 다중화된 FBG 센서를 이용하여 철도관형교의 변형률, 곡률, 수직처짐, 가속도를 동시에 측정하는 기법을 제안하였다. FBG 센서 2쌍을 철도 관형교의 상부와 하부 플랜지의 표면부착한 후 FBG 센서로부터 직접 변형률을 측정하고 이로부터 Bernoulli 보 이론의 평면가정으로부터 곡률을 측정한 후, 기하학적인 처짐-곡률관계와 회귀분석을 통해 교량의 처짐을 유추하였다. 또한 처짐이력을 시간영역에서 수치미분을 통해 교량의 가속도를 유추하였다. 제안된 방법의 정확도를 검증하기 위해 실제 강철도교의 중앙 지점에 기존의 전기식 변형률 센서, 처짐계, 가속도계를 설치하고 열차 증속실험을 실시하여 결과를 비교 검증하였다. 그 결과 모든 계측 결과에서 우수한 상관관계를 보였으며 효율적인 모니터링이 가능함을 보였다. 유추된 가속도는 고주파 성분을 포함하지는 못하고 있으나 철도교량의 주요 휨 모드 성분을 충분히 포함할 수 있을 것으로 사료된다. 따라서 제안된 방법은 다중화 기법을 통해 실제 현장의 측정선을 최소화 시킬 수 있으며 이를 통해 대상교량과 같은 철도교의 모니터링을 위한 주요한 물리량을 일괄 측정할 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

1. 정원석, 강동훈, 최은수, 김현민(2005), “광섬유 격자센서를 이용한 철도 관형교의 증속 시험” 한국강구조학회 논문집, 제 17권 제6호, pp. 681-688.
2. 정원석, 김성일, 김남식, 이희엽(2006). “간접형 long-gage 광섬유 센서를 이용한 콘크리트 구조물의 모니터링” 한국철도학회논문집. 제9권, 제 4호, pp. 467-472.
3. E. Udd(1995), "Fiber Optic Smart Structures", John Wiley and Sons, New York.