

철도교량 모니터링을 위한 FBG 센서의 응용

Application of FBG Sensors to the Monitoring of Railway Bridges

정 원 석* · 강 동 훈** · 최 은 수*** · 이 준 선****

Chung, Won-Seok · Kang, Dong-Hoon · Choi, Eun-Soo · Lee, Jun-Sun

ABSTRACT

FBG sensors are able to measure the strain of structures more easily and durable than electronic resistance gages and thus many researches are on the way to apply the FBG sensor for response monitoring of infrastructures. This study investigates the deflection estimation technique using FBG sensors. Several FBG sensors are multiplexed in single optical fiber and installed in parallel pairs along the length of the structure. The measured strains at the top and bottom of a cross section can be transferred to the curvature of the section which can be used to calculate its displacement. It has been demonstrated that the estimated deflections using the FBG sensor are compared well with the readings from displacement transducers. The results show that the proposed instrumentation technique is capable of estimating the vertical deflection of the structures for various loading conditions including impact and dynamic loads, which is crucial in the structural health monitoring.

Keywords: *FBG sensor, curvature, deflection, monitoring, railway bridge.*

1. 서 론

구조물의 장기 거동측정에서 이러한 문제들을 극복하기 위한 대안으로 선호되고 있는 센서가 Fiber Bragg Grating (FBG) 센서이다. FBG센서는 광섬유의 빛에 대한 반사와 굴절의 특성을 이용하여 변형 및 온도팽창에 의한 변형율을 측정할 수 있도록 고안되었다. FBG센서는 내구성면에서 전기저항식 게이지에 비해 월등하며, 간단한 수학적 계산을 통해서 구조물의 변위도 추정가능하다. 또한, 전철화된 철도교에서 발생 가능한 전자기파 간섭(electro-magnetic interference, EMI)으로부터 자유로워 전기식 센서에 비해 안정적인 사용이 가능하다.

이러한 FBG 센서의 가장 큰 장점은 하나의 광섬유에 여러 개의 센서를 배치할 수 있는 다중화(multiplexing)가 가능하다는 점이다. 이는 기존의 센서들이 하나의 센서에 하나의 측정 채널을 구성하여 센서의 수만큼 리드선을 배치하여야 하는 것에 비해 다중화를 이용하여 비교적 제작장비를 간단하게 구성할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 철도교량과 같은 대형 토목구조물에서 유용하게 적용될 수 있다.

* 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 선임연구원 E-mail: wschung@krri.re.kr

** 한국철도기술연구원 미래기술실용화사업단 선임연구원 E-mail: dhkang@krri.re.kr

*** 한국철도기술연구원 미래기술실용화사업단 선임연구원 E-mail: eunsoochoi@krri.re.kr

**** 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부장 E-mail: jslee@krri.re.kr

본 연구에서는 FBG 센서를 다중화하여 구조물의 곡률을 직접 측정한 후 Bernoulli 보 이론을 이용하여 수직 처짐을 유추하였다. 이러한 방법의 검증을 위해 강제 I형 보의 충격실험과 철도판형교의 동적 증속실험을 수행하여 직접 측정된 수직처짐과 비교하였다.

2. FBG 센서

광섬유 브래그 격자(FBG)는 GeO₂가 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. (Udd, 1995)

$$\lambda_B = 2n_e\Lambda \tag{1}$$

격자에서 반사되는 브래그 파장(Bragg wavelength)은 유효 굴절률과 격자 간격의 함수이며 광섬유 격자에 온도나 변형을 등의 외란이 가해지면 이들 값이 변하여 브래그 파장은 달라진다. 변화된 브래그 파장을 정밀하게 측정한다면 광섬유 격자에 가해진 온도나 변형을 등의 물리량을 식(2)를 통하여 계산할 수 있다. 그림 1은 FBG 센서의 기본 원리를 나타낸 그림이다.

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

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.

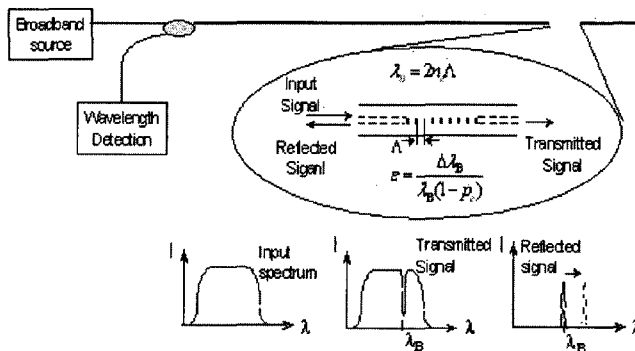


그림 1 FBG 센서의 작동원리

3. 처짐유추법

단순보의 수직처짐은 보의 휨 변형 하에서 기하학적 비선형을 고려하여 식(3)의 첫 번째 식과 같이 표현할 수 있으나 구조물의 미소변형을 고려하면 식(3)의 두 번째 식과 같이 표현된다. 이는 평면은 휨 변형 후에서도 평면을 형성한다는 Bernoulli 가정에 근거한 식이다.

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

여기서, $\kappa(x)$ 는 임의의 종단면 x 에서의 곡률, $w(x)$ 는 임의의 종단면 x 에서의 수직처짐이다. 한편, 단순보의 곡률은 식 (4)와 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.

위의 곡률은 변형율과 식(5)와 같은 선형관계를 가지므로, FBG 센서를 통해서 측정한 변형율을 통해서 단순보의 곡률추정이 가능하다.

$$\kappa_i = (e_i^b - e_i^t)/h \quad (5)$$

여기서, e_i^b 와 e_i^t 는 각각 단순보 상하부의 변형율을 나타내며, h 는 FBG센서 사이의 거리를 나타낸다. 만약 단순보에서는 n 개의 위치에서 변형율을 측정하였으므로 곡률함수식은 $(n-1)$ 차 다항식을 사용하였다. 즉, $(n-1)$ 차 다항식은 n 개의 미지 상수를 가지게 되므로 실험을 통해서 추정된 n 개의 곡률을 이용하여 회귀분석을 통해 곡률함수의 상수를 결정할 수 있다. 식(3)의 처짐-곡률 관계로부터 이중적분을 취하면 식(6)과 같이 수직처짐을 결정할 수 있으며 적분에서 발생하는 2 개의 적분상수는 단순보의 경계조건인 $w_{(x=0)} = 0$ 와 $w_{(x=L)} = 0$ 을 고려하면 결정할 수 있다. (Vurpillot, 1998)

$$w(x) = \iint \kappa(x) dx dx \quad (6)$$

4. 검증실험

4.1. 강제 I형 보 실험

그림 2는 길이 7.0m의 I형강의 충격실험을 위한 FBG 센서 위치와 직접 처짐 측정을 위한 LVDT의 위치를 나타낸다. FBG센서는 보의 상·하부에 각각 5개의 센서를 다중화하여 부착하였다. 작용하중은 햄머에 의

한 충격하중이다. 단부는 충격에 의한 처짐의 발생 및 회전이 원활히 이루어지도록 받침의 상하부에 두께 1.5 mm, 길이×넓이가 100 mm × 100 mm 인 고무패드를 그림 2와 같이 설치하였다

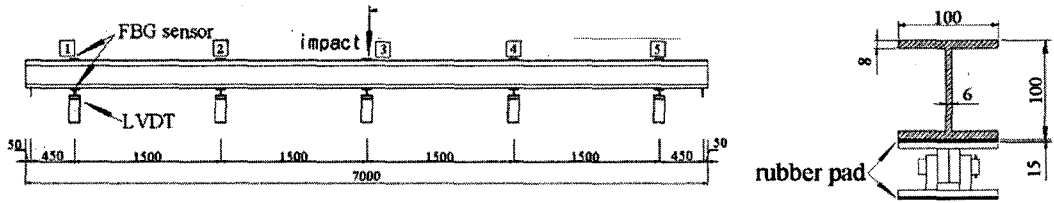


그림 2 실험체 상세도 및 단부현상

그림 3은 중앙지점에 충격을 가했을 경우의 상부 위치 3과 5에서의 변형을 시간이력 응답이다. 각 위치에 서 발생하는 최대변형률은 $56.5\mu\epsilon$ 과 $21.2\mu\epsilon$ 으로 지점부로 갈수록 작은 변형률이 발생함을 알 수 있다. 그림 4는 FBG센서를 통해서 추정된 단순보의 동적 처짐 시간이력과 변위계를 통해서 직접 측정된 처짐의 시간이 력을 비교한 그림이다. 추정된 변위 시간이력곡선은 측정된 시간이력 곡선과 위상은 정확히 일치하고 있 으나, 최대치 및 피크치에서는 약간의 차이를 보이고 있다. 특히, 그림 4(c)의 경우와 같이 고차모드 진동이 크 게 나타나는 부분에서는 추정변위가 거칠게 표현되며 최대치의 크기에서 차이가 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 다중화된 FBG 센서에 의한 처짐 추정치는 중앙지간에서 약 6%, 단부주변에서는 약 10% 정도의 최대 오차를 나타냈다. 이는 실험에 사용한 FBG 로거의 최대 샘플링 비율이 200 Hz로 고차모드를 정확하게 표현 하기에는 부족하다고 판단된다.

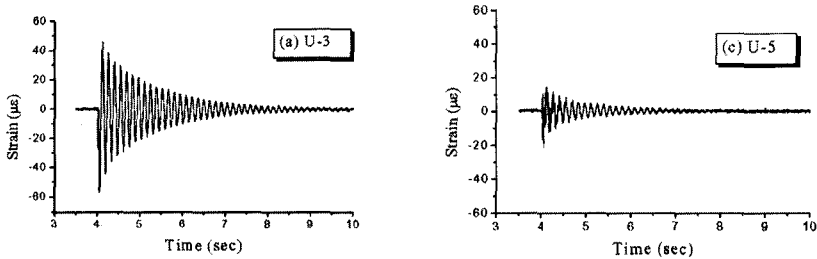


그림 3 충격하중에 의한 FBG 동적 변형률

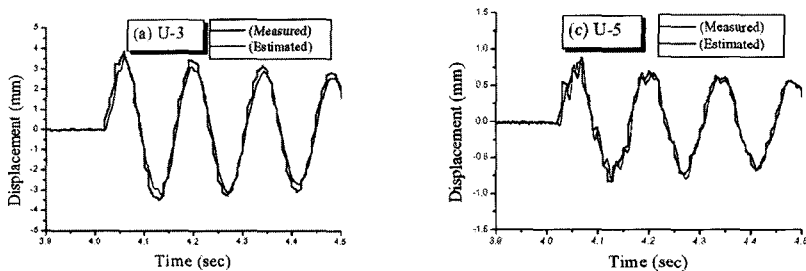


그림 4 충격하중에 의한 변위 시간이력

5. 결론

본 연구에서는 FBG 센서를 구조물 전체 수평방향으로 다중화하여 변형률을 측정하였다. 이로부터 측정된 곡률의 회귀분석을 통해 교량의 곡률함수를 찾아낸 후 Bernoulli 보 이론에 의해 구조물의 수직처짐을 결정하였다. 강재 I형 보의 충격실험 및 철도교의 동적 증속실험 결과 본 연구의 처짐 유추법이 LVDT를 이용하여 직접 측정한 처짐 결과와 우수한 연관성을 보였다. 따라서 향후 FBG 센서의 다양한 장점을 이용하여 전자기파의 간섭이 심하거나 처짐계의 직접 설치가 용이하지 않은 철도교의 모니터링에 유용하게 적용될 수 있다고 판단된다.

참고문헌

- Udd, E. (1995) *Fiber Optic Smart Structures*, John Wiley and Sons, New York.
- Vurpillot, S. (1998) Vertical Deflection of a Pre-stressed Concrete Bridges Obtained using Deformation Sensors and Inclinometer Measurements, *ACI Structural Journal*, 95(5), pp.518~526.