FBG 센서 기반의 자기부상열차 통합 모니터링 시스템

Integrated Monitoring System of Maglev Guideway based on FBG Sensing System

정원석† · 강동훈* · 여인호**· 이준석***

Wonseok Chung, Donghoon Kang, Inho Yeo and Jun S. Lee

Key Words : FBG(FBG), Maglev(자기부상), Guideway(가이드웨이), Deflection(처짐), 계측(Monitoring)

ABSTRACT

This study presents an effective methodology on integrated monitoring system for a maglev guideway using WDM-based FBG sensors. The measuring quantities include both local and global quantities of the guideway response, such as stains, curvatures, and vertical deflections. 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. Frequency contents obtained from the proposed method are compared with those from a conventional accelerometer. Verification tests were conducted on the newly-developed Korean Maglev test track. It has been shown that good agreement between the measured deflection and the estimated deflection is achieved. The difference between the two peak displacements was only 3.5% in maximum and the correlations between data from two sensing systems are overall very good. This confirms that the proposed technique is capable of tracing the dynamic behavior of the maglev guideway with an acceptable accuracy. Furthermore, it is expected that the proposed scheme provides an effective tool for monitoring the behavior of the maglev guideway structures without electro magnetic interference.

1. 서 론

고압 전류로 구동되는 자기부상열차의 경우, 급전 시스템이 가이드웨이의 측면을 따라 설치되므로 기존 전기식 센서를 바탕으로 구조물 모니터링 시스템을 구축할 시에는 전자기파에 의한 간섭이 예상된다. 최근의 연구에는 이러한 전차선에 의해 구동되는 현대 철도 선로구조물을 대상으로 광섬유 센서를 성공적으로 적용한 예가 보고되고 있다. (Kang et al. 2007) (Chung and Kang 2008) (Chung et al. 2008).

본 연구는 파장분할 다중화 방식을 적용한 Fiber Bragg grating (FBG) 센서를 이용하여 자기부상열차 가이드웨이를 효율적으로 통합 모니터링하는 방법을 제안한다. FBG 센서배열을 종방향으로 평행배치하는 통합 모니터링 방법은 자기부상열차 가이드웨이의 균열발생에 의한 변형률 변화를 포함한 국부 거동뿐만 아니라 구조체의 곡률, 중립축 위치, 처짐, 주파수분석 등의 구조적 거동을 모니터링하는 것이 가능하다.

본 연구에서 제시하는 방법의 검증을 위해 대전과학관에 설치된 자기부상열차 시험선을 대상으로 열차의 속도를 중속해 가며 동적거동을 모니터링하였다. 또한 기존 계측기를 설치하여 FBG 통합 모니터링 시스템의 타당성을 검토하였다.

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

† 정원석; 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부
E-mail : wschung@krri.re.kr
Tel : (031) 460-5353, Fax : (031) 460-5359

* 한국철도기술연구원 미래기술실용화센터

** 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부

*** 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부장

(Bragg condition)에 해당하는 파장의 빛은 보강간섭을 일으켜 브래그 격자를 통과하지 못하고 반사되며 다른 파장의 빛은 통과하게 된다. 여기서, n_e는 광섬유 격자의 유효 굴절률이고 Λ는 광섬유 코어에 새겨진 격자의 간격이다.

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

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.

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

여기서, α_f는 광섬유의 열팽창 계수(thermal expansion coefficient)이고 ξ_f는 온도에 의한 광섬유의 굴절률 변화를 나타내는 열광학 계수(thermo-optic coefficient)이다. p_e는 광탄성 상수(photoelastic constant)이다.

3. 통합 모니터링 시스템

기존의 모니터링 시스템은 구조물 모니터링을 위해 변형률계, 처짐계, 가속도 센서 등을 독립적으로 배열하여야 하며 각각의 센서에서 측정기까지 다수의 측정선을 연결하여야 하므로 실제 시스템 구축 시 실무적인 어려움이 존재한다. 본 연구에서는 파장분할 다중화 FBG 센서 배열을 휨부재의 종방향으로 2라인으로 배열하여 모니터링 시스템을 구축하였다. 즉, 2개의 측정선을 이용하여 구조물의 국부적인 정보와 구조적인 거동 등의 주요 물리량을 동시에 모니터링할 수 있게 구성하였다. 국부적인변형률은 다중화된 구조물에 부착된 FBG 센서로부터 직접 측정이 가능하다. 만약, FBG 배열 중에 국부 균열 등이 발생한다면 배열 중 하나의 FBG 센서에서 신호를 감지가능하다. 휨부재에서 변형 후에도 평면을 이룬다고 가정하면 동일 종방향의 압축측과 인장측에 평행하게 설치된 FBG 센서로부터 중립축의 위치를 유추할 수 있으며 이로부터 구조적인 균열의 발생 등을 실시간으로 감지할 수 있다. 또한 식 (3)과 같이 구조물의 종방향에서 곡률(κ_i)을 실험적으로 유추할 수 있다.

$$\kappa_i = (\varepsilon_i^b - \varepsilon_i^t)/h \tag{3}$$

여기서 ε_i^b와 ε_i^t는 실험에서 사용된 i번째 종방향 FBG 위치에서의 상부 및 하부 변형률이며 h는 FBG 센서간의 수직 거리이다.

한편, 구조물의 곡률은 식(4)와 같이 수학적으로 고차 다항식의 형태의 함수로 표현할 수 있다.

$$\kappa(x) = c_0 + c_1x + c_2x^2 + \cdots\cdots + c_nx^n \tag{4}$$

여기서 c_0, c_1, - - -, c_n은 곡률함수 계수이며 x는 구조물의 종방향 위치이다. FBG 센서가 종방향으로 n개 배치되었을 때 다항식의 차수는 $(n-1)$차로 가정하였다. 곡률함수 계수는 실험에서 측정된 곡률값인 κ_i 을 이용하여 회귀분석을 수행하면 결정할 수 있다.

구조물의 수직처짐은 Euler-Bernoulli 이론에 근거하여 곡률과 식(5)와 같은 기하학적 관계를 가지고 있다.

$$\kappa(x) = \frac{\dfrac{d^2w(x)}{dx^2}}{\left[1+\left(\dfrac{dw}{dx}\right)^2\right]^{3/2}} \tag{5}$$

여기서 w는 수직처짐이다. 식(5)는 순수하게 변형체의 기하학적인 관계이므로 균열 등을 고려한 재료 비선형성과는 독립적인 관계를 갖는다. 만약 미소변형을 가정하면 식(5)는 식(6)과 같이 간략해 진다.

$$\kappa(x) \cong \frac{d^2w(x)}{dx^2} \tag{6}$$

식(4)의 곡률함수를 식(6)에 대입하면 수직처짐은 식(7)과 같이 정리된다.

$$w(x) = b_0 + b_1x + \iint k(x)dxdx \tag{7}$$

식 (7)에서의 적분상수 b_0과 b_1은 경계조건인 x = 0 과 x = L에서의 w = 0을 적용하여 산정한다. 그림 1은 특정 측정시간에서의 통합 모니터링 시스템을 순서도로 나타낸 것이다.

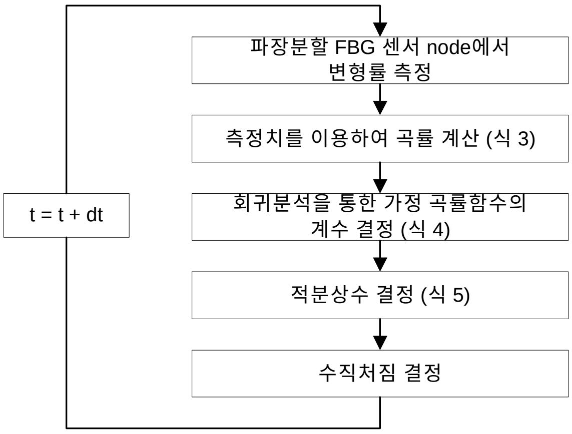


그림 1. 통합모니터링 방법의 순서도

4. 현장 검증시험

제안된 방법의 검증을 위해 자기부상열차 시험선 가이드웨이를 대상으로 검증시험을 실시하였다. 대상 가이드웨이는 단경간 25m의 프리스트레스 박스 교량으로 그림 2와 같은 단면을 가진다. 단면 제원은 폭이 1,410mm이며 높이가 1,900 mm이다.

5개의 FBG 센서가 하나의 광섬유 선에 다중화하여 가이드웨이의 상부 압축측(채널 1)과 하부 인장측(채널 2)에 종방향으로 평행하게 표면 부착하였다. 상하부 광섬유 선의 거리는 그림 3에 나타난 것과 같이 1,600 mm이다. FBG 센서는 가이드웨이 측면에 에폭시를 이용하여 표면부착하였다. FBG 센서를 이용한 결과를 비교하기 위해서 처짐계와 가속도계 등의 전기식 센서를 가이드웨이의 중앙지간에 그림 3과 같이 설치하였다.

그림 2. 대전 국립중앙과학관 자기부상열차 노선

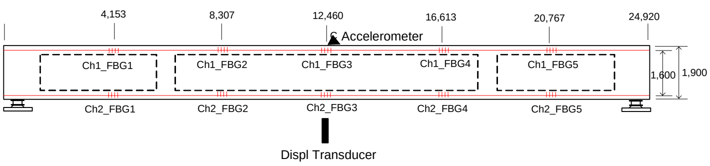


그림 3. 대상 가이드웨이 센서 배치도(측면도)

현재 도시형 자기부상열차 실용화 사업에서 개발 중인 자기부상열차는 차량의 전자석과 가이드웨이 강재 레일의 인력을 이용하여 부상시키는 방식이다. 따라서 일정한 부상 공극을 유지하기 위해 고압 전류의 사용이 불가피하며 이는 실제 전기식 센서를 이용한 모니터링 시스템에 어려움을 줄 수 있다. 이러한 배경에서 가이드웨이 구조에서 전자기파의 간섭이 가장 크게 예상되는 부상 레일의 종방향과 황방향 (채널 3) 및 침목(채널 4)에 FBG 센서를 그림 4와 같이 설치하였다.

그림 5는 채널 1과 채널 2의 FBG 격자부의 파장 스펙트럼을 나타낸다. 즉, 구조물이 인장을 받게 되면 파장 스펙트럼의 +방향으로 피크가 이동하며 압축의 경우는 반대 방향으로 이동하게 된다.

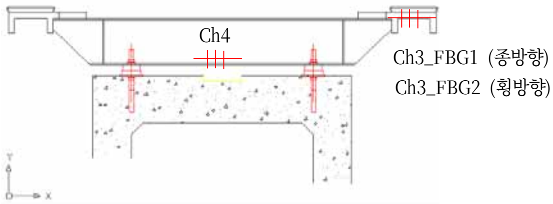
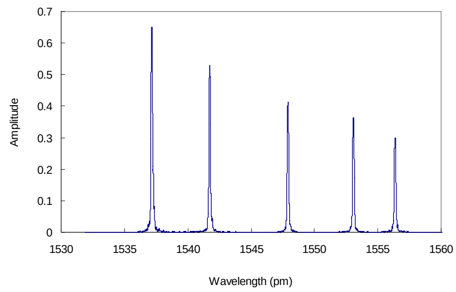
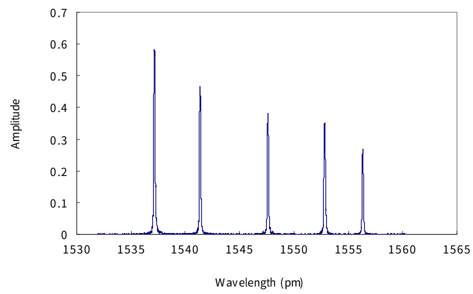


Figure 4. 대상 가이드웨이 궤도부의 센서배치(중앙 경간)



(a) 압축측 (채널 1)



(b) 인장측 (채널 2)

그림 5. FBG 센서의 파장 스펙트럼

5. 검증시험 결과

앞서 언급한 바와 같이 5개의 FBG 센서가 다중화 연결되어 2행 5열 형태로 배치되었다. 그림 6은 자기부상열차가 시속 30km로 통과할 시에 가이드웨이 인장부의 측정 변형률을 시계열로 나타낸 것이다. 열차의 통과에 의해 채널 2의 중앙경간 위치인 FBG 3에서 최대 인장 변형률이 측정되는 것을 알 수 있다. 그림 7은 열차가 시속 30km로 통과할 시에 가이드웨이 중앙경간의 부상레일과 침목에서 측정된 국부 변형률 시간이력이다. 강재 레일의 하부는 횡방향 및 종방향으로 압축을 나타내고 있다. 특히 횡방향 변형률 결과에서 피크당 3개의 국부 피크가 나타나는 것을 관찰할 수 있는데 이는 자기부상열차 1량이 각각 3개의 모듈로 구성된 2편성이기 때문으로 판단된다. 즉, 차량과 가까운 위치의 가이드레일에서 통과하는 차량 충격을 반영하고 있음을 의미한다.

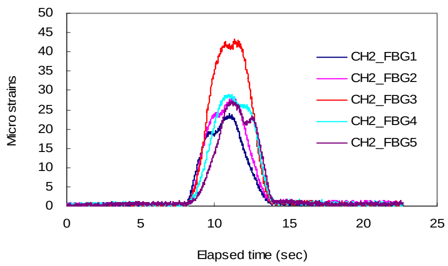


그림 6. 가이드웨이 변형률 시간이력(속도=시속 30 km)

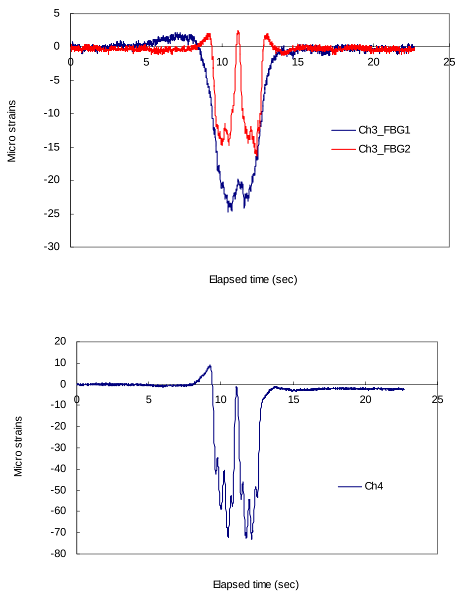


그림 7. 가이드웨이 궤도부의 변형률 시간이력(속도=시속 30 km)

임의 종방향 위치에서의 수직처짐은 앞서 설명한 통합모니터링 방법에 의해 결정될 수 있다. 그림 8은 자기부상열차가 각각 시속 20km, 30km, 40km로 대상 가이드웨이를 통과할 시에 FBG 센서를 이용하여 유추한 처짐과 변위계를 이용하여 측정한 처짐의 비교를 나타낸 그림이다. 직접 측정치와 본 연구에서 유추된 처짐이 우수한 상관관계를 보임을 확인할 수 있다. 최대 변위에서의 오차는 약 3.5%로 측정되었다.

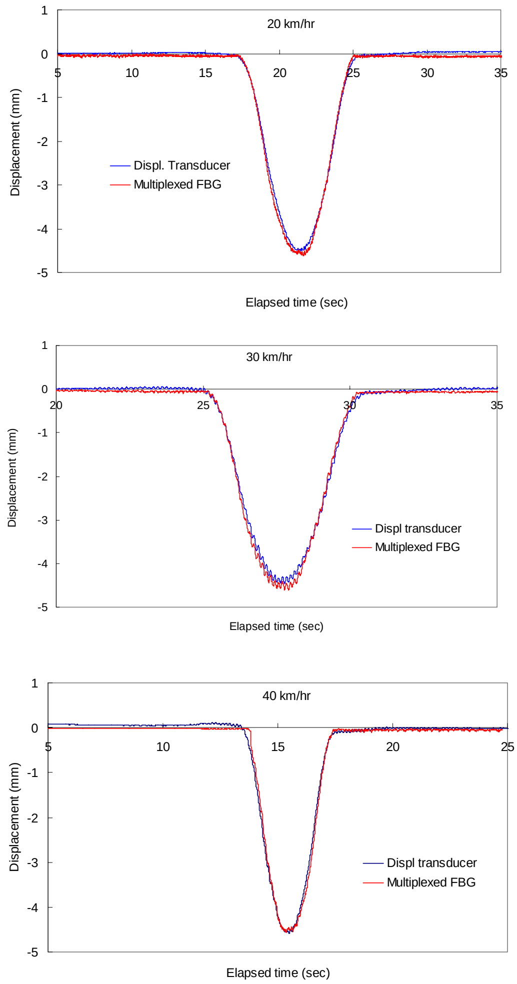


그림 8. 수직처짐 비교 (중앙경간)

그림 9에서 그림 11은 본 연구에서 유추된 변위의 주파수 분석 결과를 전통적인 가속도계에서 얻은 주파수 분석 결과와 비교 분석한 것이다. 주파수 분석결과 크기의 차이는 발생했으나 주파수 내용은 통과속도에 관계없이 두 시스템이 우수한 상관관계를 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 본 연구에서 제안한 방법이 자기부상열차 가이드웨이의 동적거동을 효율적으로 모니터링하고 있다고 사료된다.

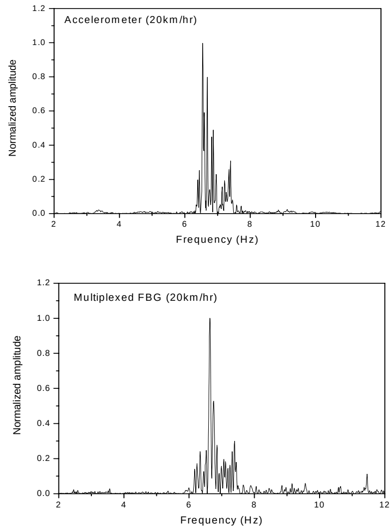


그림 9.주파수 분석 결과 비교 (열차속도=시속 20km)

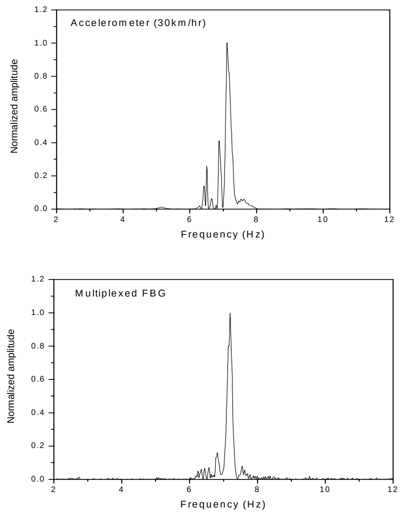


그림 10.주파수 분석 결과 비교 (열차속도=시속 30km)

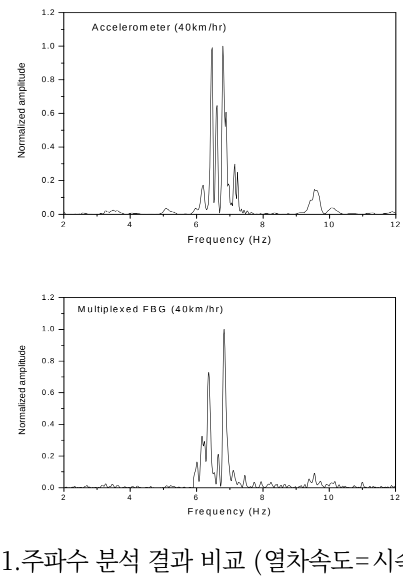


그림 11.주파수 분석 결과 비교 (열차속도=시속 40km)

6. 결 론

본 연구에서는 FBG 센서를 이용하여 자기부상열차의 모니터링을 실시하기 위해 구조물의 국부적인 응답에서부터 구조적인 응답을 통합 측정할 수 있는 모니터링 방법을 제안하였다. 국부적인 변형률 측정에서부터 곡률, 중립축 위치, 수직처짐, 주파수 등을 일괄적으로 다중화된 FBG 센서 배열을 통해 측정하였다. 즉, 전통적인 전기식 변형률계, 처짐계, 가속도계를 이용하여 독립적으로 측정하던 방식을 대신하여 FBG 배열을 이용하여 상기 사항을 일괄 모니터링하는 방법이다. 제안된 모니터링 방법의 검증을 위해 최대 시속 50km까지 자기부상열차 속도를 증속시키며 대상 가이드웨이 현장실험을 실시하였다. 그 결과 제안된 방법과 기존의 전통적인 센서를 이용한 방법 간에 우수한 상관관계를 보였다. 따라서 전자기파 간섭이 발생하는 자기부상열차 가이드웨이의 주요 측정 물리량을 FBG 센서를 이용한 통합 모니터링 방법을 이용하여 효율적으로 수행할 수 있으리라 판단된다.

참 고 문 헌

(1) Chung W., Kim, S., Kim, N., & Lee, H. 2008. Deflection estimation of a full scale PSC girder using long-gauge fiber optic sensors. Construction & Building Materials, Vol. 22, No. 3, pp 394-401.

(2) Chung, W. & Kang, D. 2008. A full scale test of precast concrete box girder using an FBG sensing system. Engineering Structures. Vol. 30, No. 3, pp 643-652.

(3) Kang, D., Chung, W., Kim, H., & Yeo, I. 2007. EMI-free monitoring of a railroad bridge for electric powered light weight transit. The 3rd International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, Vancouver, Canada.