

## 광섬유 센서를 이용한 경량전철 교량의 사용성 평가

### Serviceability Assessment of a K-AGT Test Bed Bridge Using FBG Sensors

강동훈\*, 정원석\*\*<sup>†</sup>, 김현민\*\*, 여인호\*\*

Donghoon Kang\*, Wonseok Chung\*\*<sup>†</sup>, Hyunmin Kim\*\* and Inho Yeo\*\*

초 록 여러 종류의 경량전철 중에서, 고무차륜 경량전철은 가·감속 성능과 등판능력이 우수하고 소음과 진동이 적어 많은 국가에서 활발히 채택되고 있다. 하지만, 경량전철 시스템은 일반적으로 고전압의 급전시스템을 이용하기 때문에 높은 수준의 전자기파를 유발한다. 반면, 광섬유 센서는 전자기파의 영향을 받지 않는 장점으로 인해 최근 교량과 같은 토목 구조물에 적용이 확대되고 있으며 특히, 광섬유 브래그 격자 센서는 다중화가 용이하다는 장점으로 가장 활발히 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 한국형 경량전철의 시험선 구간에 설치된 콘크리트 교량에서 차량이 진행할 때 교량의 동적응답을 측정하였다. 측정센서로는 기존의 전기식 센서와 광섬유 브래그 격자 기반의 센서를 이용하였으며 변형률과 가속도를 측정하였다. 이를 바탕으로, 교량의 사용성 평가를 수행하였으며 실험 결과 전기식 센서의 경우 EMI의 영향을 받는 반면, 광섬유 브래그 격자 기반의 센서들은 EMI의 영향을 받지 않아 EMI의 영향이 극심한 경량전철 교량에서 교량의 사용성 평가를 위한 계측 센서로 광섬유 센서가 효과적으로 적용될 수 있음을 확인하였다.

**주요용어:** 광섬유 브래그 격자, 철도교량, 경량전철, 전자기파, 사용성

**Abstract** Among many types of light rail transits (LRT), the rubber-tired automated guide-way transit (AGT) is prevalent in many countries due to its advantages such as good acceleration/deceleration performance, high climb capacity, and reduction of noise and vibration. However, AGT is generally powered by high-voltage electric power feeding system and it may cause electromagnetic interference (EMI) to measurement sensors. The fiber optic sensor system is free from EMI and has been successfully applied in many applications of civil engineering. Especially, fiber Bragg grating (FBG) sensors are the most widely used because of their excellent multiplexing capabilities. This paper investigates a prestressed concrete girder bridge in the Korean AGT test track using FBG based sensors to monitor the dynamic response at various vehicle speeds. The serviceability requirements provided in the specification are also compared against the measured results. The results show that the measured data from FBG based sensors are free from EMI though electric sensors are not, especially in the case of electric strain gauge. It is expected that the FBG sensing system can be effectively applied to the LRT railway bridges that suffered from EMI.

**Keywords:** FBG, Railway Bridge, Light Weight Transit(LRT), EMI, Serviceability

#### 1. 서론

경량전철(light rail transit, LRT)은 지하철에 비해 건설비와 운영비가 저렴하고 버스나 승용차와

같은 타 교통수단에 비해 정시성, 환경친화성 등이 우수하여 차세대 도시철도 시스템으로 주목받고 있다. 경량전철시스템은 급전설비, 신호, 통신 등 고전압시스템과 궤도, 역사 등의 구조물시스템, 그

(접수일: 2007. 3. 7, 심사완료일: 2007. 4. 13) \* 한국철도기술연구원 미래기술실용화센터, \*\* 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부, <sup>†</sup> Corresponding author: Korea Railroad Research Institute, 360-1, Woram-dong, Uiwang-si, Gyeonggi-do 437-757, (E-mail: wschung@krii.re.kr)

리고 차량시스템으로 구성된다. 일반적으로 현대의 경량전철시스템은 완전 자동 무인운전을 지원하는 (automated guideway transit) AGT 시스템을 의미하며 차량의 방식에 따라 철계차륜, 고무차륜, 그리고 LIM 방식으로 구분한다[1].

여러 가지 형태의 경량전철 중에서, 고무차륜 경량전철은 가·감속 성능과 등판능력이 우수하고 소음과 진동이 적어 보다 널리 채택되고 있다. 기존 철계차륜의 철도차량과 달리 고무차륜 경량전철은 고무타이어로 된 주행륜과 대차의 안내프레임에 설치된 안내륜을 이용해 도로와 유사한 주행 궤도면을 주행한다. 또한, 주로 도심지에서 고가궤도로 건설 및 운영되기 때문에 차량의 측면 아래 방향에 강제 급전선을 설치하는 제3궤조 급전방식을 주로 사용한다. 최근 한국철도기술연구원의 주관으로 한국형 고무차륜 경량 전철(Korean-standardized rubber-tired AGT, K-AGT) 차량을 Fig. 1과 같이 성공적으로 개발한 바 있다.

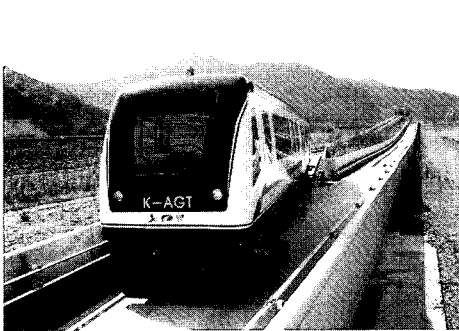


Fig. 1 Korean-standardized rubber-tired AGT

특히 경량전철은 주행궤도 측벽에 설치된 안내레일을 따라 주행하면서 차량의 안내 및 조향을 수행한다. 이로 인해 안내레일 및 측벽에 외력이 발생해 차량 및 궤도에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 경량전철의 실제 주행 시, 교량 모니터링의 수행 및 결과를 이용한 대상 구조물의 사용성 (serviceability) 평가가 요구된다. 또한 일반적으로 고압의 급전시스템에 의해 구동되는 경량전철은 급전선의 위치가 가공선 방식에 비해 철도구조물에 더욱 가까이 위치하고 있어 주행 중에 발생하는 전자기파의 영향이 상대적으로 크게 작용할 수 있다. 이로 인해 발생하는 계측 잡음의 영향으로 인해 모니터링 결과의 신뢰성에 큰 문제를 야기시킬 수 있을 것으로 판단된다.

최근에는 전자기파의 간섭이 없는 광섬유 센서 (fiber optic sensor, FOS)를 이용한 철도교량의 모니터링이 성공적으로 이루어지고 있다[2,3]. 광섬유 센서는 기존의 전기식 센서에 비해 크기가 작아 구조물 내부에 삽입이 가능하고 부식에 강하며 넓은 사용 온도범위 등의 장점으로 인해 기존의 센서를 대체하며 기계, 재료, 토목 등 다양한 분야에서 적용되고 있다. 특히, 빛을 신호의 매개체로 하여 측정을 하기 때문에 전자기파의 영향을 받지 않아 전철화된 철도시스템에의 적용성은 타 센서에 비해 매우 높다 할 수 있다. 광섬유 센서는 세기, 간섭 등의 기본적인 빛의 특성을 이용하여 여러 물리량을 측정하며 이에 따라 센서의 종류도 나뉘게 된다. 여러 광섬유 센서 중에서, 광섬유 브래그 격자 (fiber Bragg grating, FBG) 센서는 기존 광섬유 센서의 장점 이외에 다중화가 매우 용이하다는 특성으로 인해 최근 전 세계적으로 널리 활용되고 있는 추세이다.

본 연구에서는 경량전철 시험선 구간에 FBG 센서를 설치하고 실제 모니터링 결과로부터 전자기파의 간섭을 확인하였다. 2량으로 이루어진 경전철 차량의 속도를 10 km/h에서 50 km/h까지 변화시키는 증속시험을 통해 시험선 교량의 각종 동적 응답을 분석하고 FBG 센서와 전기식 센서의 결과를 비교 검토하였다. 또한 동적 모니터링 결과치와 시방서에서 제시된 사용성 관련 한계치와의 비교를 통해 대상교량의 사용성을 검토하였다.

## 2. FBG 센서

광섬유 브래그 격자는 광대역 스펙트럼을 갖는 광원을 광섬유에 입사시킬 경우 식 (1)과 같이 브래그 조건(Bragg condition)에 의해 결정된 파장 성분만이 브래그 격자 부분에서 반사되며 나머지 파장 부분은 그냥 통과하게 된다[4].

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

식 (1)에서  $n_e$ 는 광섬유 격자의 유효 굴절률이고  $\Lambda$ 는 광섬유 코어에 새겨진 격자의 간격이다. 따라서 격자에서 반사되는 브래그 파장은 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 변형

를 등의 물리량을 식 (2)를 통하여 계산해 낼 수 있으며, 이것이 바로 광섬유 브래그 격자가 센서로 사용될 수 있는 기본 원리이다. Fig. 2는 이 과정을 나타내고 있다.

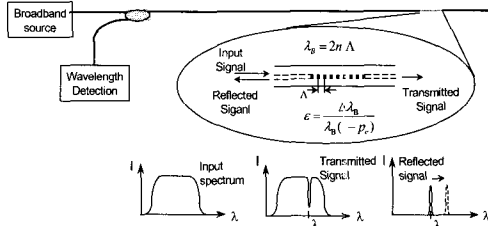


Fig. 2 Demodulation principle of FBG sensors

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

$$p_e = \left(\frac{n^2}{2}\right) [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \quad (3)$$

여기서,  $p_e$ 는 광탄성 상수 (photo-elastic constant)이고  $p_{11}$ 과  $p_{12}$ 는 변형률 광학 텐서 (strain-optic tensor)의 성분이며  $n$ 은 코어의 굴절률,  $\nu$ 는 광섬유의 프와송 비이다. 본 연구에서와 같이 주위 온도의 급격한 변화가 없고 센서들 간의 온도차가 없는 상태에서 구조물의 변형을 측정한다면 (즉,  $\Delta T = 0$ ) 식 (2)는 식 (4)와 같이 간략화 되어 구조물의 변형률은 브래그 반사 파장의 변화량만 측정하면 쉽게 구해진다.

$$\epsilon = \frac{1}{(1 - p_e)} \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \quad (4)$$

또한 브래그 반사파장이 서로 다른 광섬유 격자들은 서로 영향을 미치지 않는 파장 분할 다중화 (wavelength division multiplexing, WDM)의 특성으로 인해 하나의 광섬유 선에 여러 개의 브래그 격자 센서를 배열할 수 있으므로 한 가닥의 광섬유로 동시에 여러 지점의 변형을 측정이 가능하다.

### 3. 현장실험 프로그램

실험이 실시된 대상교량은 경상북도 경산의 경량 전철 시험선에 설치된 경간 30 m의 2주형 프리스트레스 콘크리트 교량이다. 주행 높이는 2 m이며 상판두께는 250 mm로 설계되었다. 상세한 실험 대상교량의 제원과 현장사진은 Fig. 3에 나타나 있다.

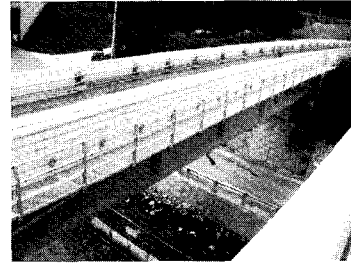
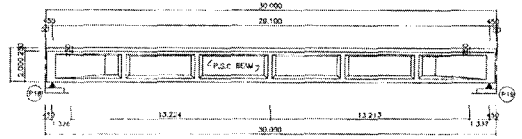


Fig. 3 PSC test bridge

FBG 센서와 전기식 센서의 비교를 위해 동일한 위치에 센서를 표면 부착하였다. Fig. 4와 같이 지간 중앙하부에 변형률 센서와 가속도 센서를 각각 설치하였으며, 차량이 주행케도 측벽에 설치된 안내레일을 따라 주행하므로 발생할 수 있는 외력에 의한 거동을 모니터링하기 위해 측벽의 상부에도 변형률 센서와 가속도 센서를 각각 설치하였다. 또한 지간 중앙부의 주형 하부에 처짐계를 설치하여 하중 대역별 수직 처짐을 측정할 수 있도록 하였다. 본 연구에서 사용한 FBG 가속도 센서는 Fig. 5와 같이 FBG 센서를 단자유도 캔틸레버 보 형태로 구성[5]하여 제작된 것이다.

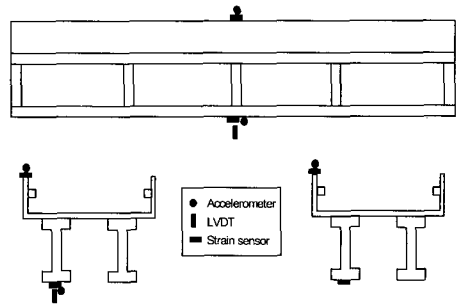


Fig. 4 Sensor positions

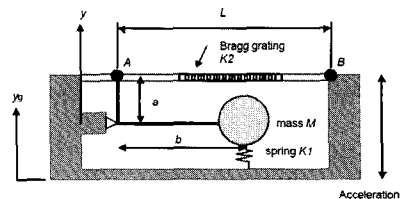


Fig. 5 FBG accelerometer

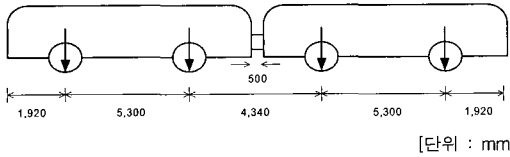
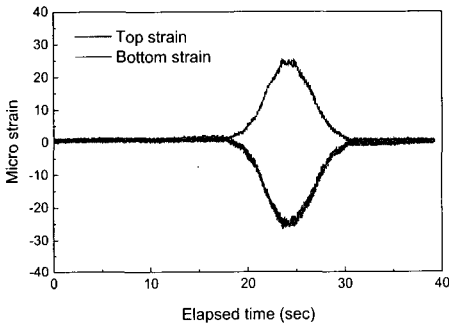
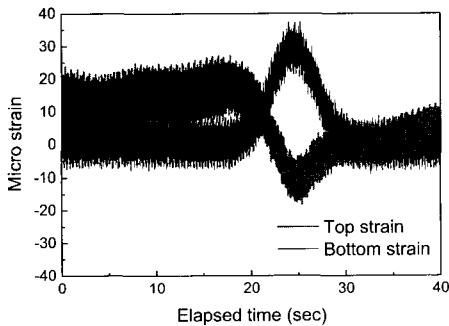


Fig. 6 Axle-load model for K-AGT

재하차량은 앞서 설명한 경량전철 공차(차체중량 115.8 kN)를 이용하였다. 시험에 사용된 경전철 차량의 축하중 모형은 Fig. 6에 제시되어 있다. 실제 시험운행 중인 경량전철 2량을 10 km/h에서 50 km/h 까지 10 km/h 간격으로 증속시키며 각 속도대역별로 가속도, 변형률, 처짐 등의 동적응답을 측정하였다. 또한 충격하중을 가하여 교량의 고유진동수를 추출하여 공진가능 속도를 유추하였다.



(a) FBG sensor



(b) strain gauge

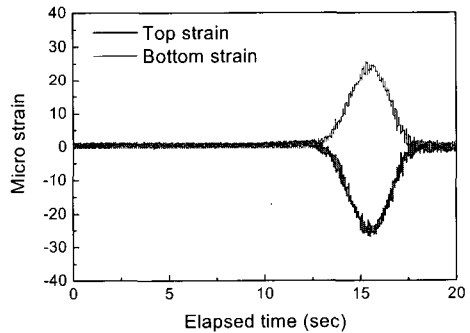
Fig. 7 Strain results (at 10 km/hr)

4. 현장실험 결과

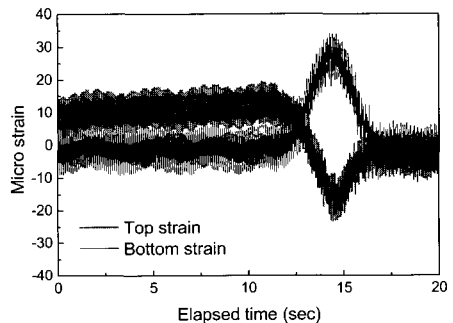
Fig. 7은 경량전철이 10 km/hr로 주행할 시에 하부 플래지와 상부 측벽에 설치된 FBG 센서와 스트레인 게이지의 측정 변형률 값을 나타낸 것이다.

그림에서와 같이 전기식 센서는 차량의 측면 아래쪽에 존재하는 강체 급전선을 통과하는 고압전류의 영향으로 인해 심한 간섭현상을 보이고 있는 반면 FBG 센서의 응답은 전자기파의 간섭을 배제한 선명한 변형률 값을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 FBG 센서가 전기 간섭을 이용한 형태의 센서가 아닌 빛의 성질인 파장을 이용한 센서이기 때문이다.

Fig. 8과 Fig. 9는 차량이 30 km/hr와 50 km/hr로 대상교량을 통과할 시의 변형률 시간이력 거동을 나타낸 것이다. 그림 8에서와 같이 FBG 센서의 측정결과가 기존의 전기식 센서보다 우수한 응답을 나타냄을 알 수 있다. 전기식 센서의 잡음 제거를 위해 각종 필터링을 수행할 수 있으나 이는 실제 구조물의 정보를 알 수 없는 실시간 모니터링에서 중요한 정보를 잃을 수 있는 가능성을 배제할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 EMI에 대한 영향을 확인하기 위해 필터링 등의 신호처리 과정의 수행 없이 계측을 수행하였다.

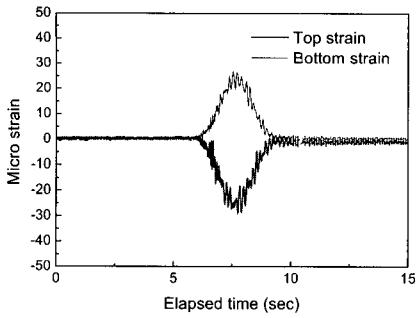


(a) FBG sensor

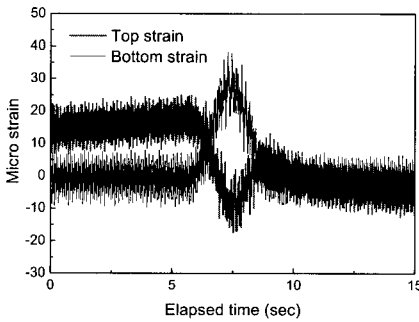


(b) strain gauge

Fig. 8 Strain results (30 km/hr)

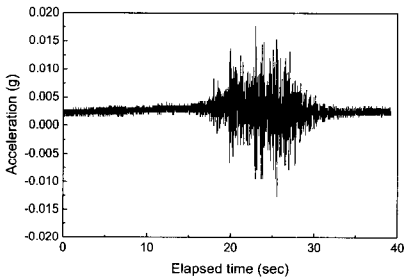


(a) FBG sensor

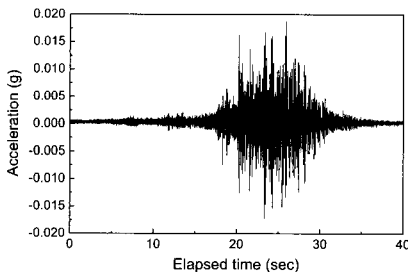


(b) strain gauge

Fig. 9 Strain results (at 50 km/hr)



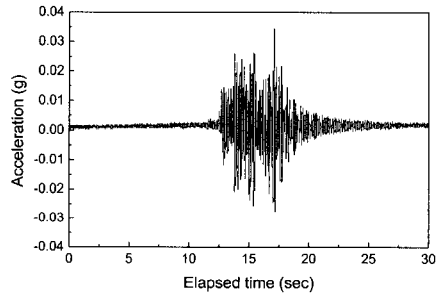
(a) FBG sensor



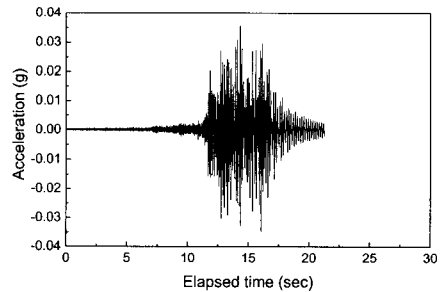
(b) electric type sensor

Fig. 10 Accerleration results (at 10 km/hr)

Fig. 10은 차량이 10 km/hr로 대상교량을 통과할 시의 FBG 가속도 센서와 전기식 가속도 센서에서 얻은 가속도를 비교한 것이다. 변형률 센서와는 달리 전기식 가속도계는 비교적 전자기파의 간섭에 면역성을 보이고 있음을 확인할 수 있었다. 전반적인 가속도 파형은 일치하고 있으나 최대치는 차이를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 본 연구에서 사용된 FBG 측정시스템의 측정주파수는 200 Hz임에 비해 전기식 센서의 측정주파수는 500 Hz로 측정하였음에 영향이 있는 것으로 보인다. Fig. 11과 Fig. 12는 차량이 30 km/hr와 50 km/hr로 교량을 통과할 시의 가속도 시간이력 응답으로 Fig. 11에서와 같은 경향을 보이고 있다.



(a) FBG sensor



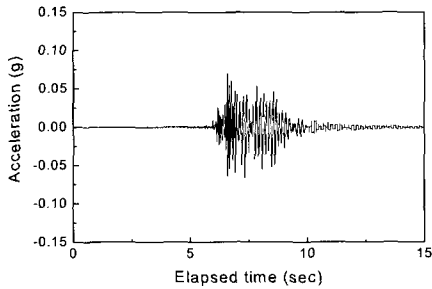
(b) electric type sensor

Fig. 11 Accerleration results (at 30 km/hr)

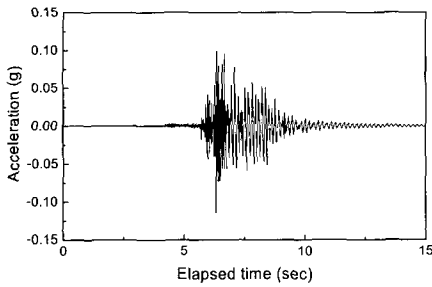
Fig. 13은 차량이 50 km/hr로 대상교량을 통과할 시의 주형 하부에 설치된 처짐계의 시간이력 응답을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 차량이 교량을 통과한 후에서 교량에서 자유진동에 의한 진동이 발생하며 감쇠에 의해 소멸되는 것을 확인할 수 있다.

차량속도 대역 별 처짐, 변형률, 가속도에 대한 최대 응답치는 Table 1에 정리되어 있다. 교량의 처짐은 10 km/hr에서 50 km/hr로 증가함에 따라

1.23 mm에서 1.36 mm로 약 11% 정도의 증폭효과가 나타났다. 전기식 센서의 최대 변형률 값은 전자기파 간섭의 영향으로 크게 왜곡되어 나타나고 있으나, FBG 센서는 하부변형률은 약  $25 \mu\epsilon$ 에서  $27 \mu\epsilon$ , 상부변형률은  $26 \mu\epsilon$ 에서  $28 \mu\epsilon$ 의 범위에서 속도 증속에 민감하지 않게 거의 일정하게 측정되고 있음을 확인하였다. 이는 시험속도 대역에서 공진현상 등의 동적증폭이 크게 발생하지 않음에 기인한 것으로 판단된다. 또한 상부가속도를 측정된 결과에서는 FBG 기반의 가속도계와 전기식 가속도계가 최대오차 16% 정도의 범위에서 발생하고 있음을 알 수 있었는데 이는 앞서 언급한 바와 같이 측정주파수의 차이에서 기인한 것으로 사료된다.



(a) FBG sensor



(b) electric type sensor

Fig. 12 Acceleration results (at 50 km/hr)

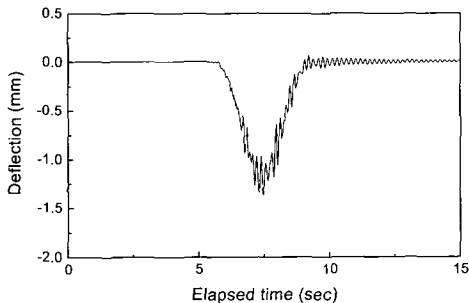
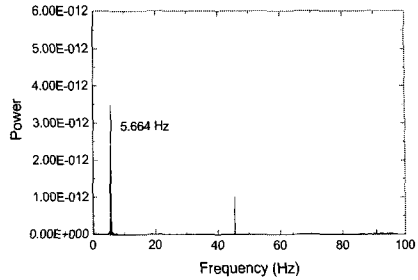
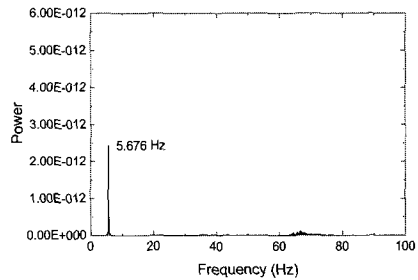


Fig. 13 Deflection at Mid. section (at 50 km/hr)



(a) FBG accelerometer



(b) electric type accelerometer

Fig. 14 Natural frequency analysis

Fig. 14는 충격해머(impact hammer)를 이용하여 교량에 진동을 가한 후 측정된 가속도 응답을 주파수 대역에서 분석한 결과이다. 1차 휨모드 고유진동수는 FBG 가속도계를 이용할 경우에는 5.664 Hz, 전기식 가속도계를 이용할 경우에는 5.676 Hz가 측정되어 약 0.2% 정도의 오차를 나타내고 있음을 확인하였다.

측정된 교량의 고유진동수를 이용하여 열차의 임계속도(critical speed)를 추정하였다. 교량의 임의 지점에 대해 열차가 일정한 속도로 주행하는 경우 일정한 타격주기로 교량을 가진하게 된다. 만약 가진주파수와 교량 고유진동수가 일치할 경우 공진현상이 발생하여 교량에 불안정한 진동을 유발하여 열차주행에 영향을 미치게 된다. 이러한 현상을 나타내는 차량의 속도를 임계속도라고 하며 식 (5)와 같이 계산할 수 있다.

$$v_{cr} = 3.6\omega_0 d_{eff} \tag{5}$$

여기서,  $d_{eff}$  는 유효타격거리로 경량전철의 열차중심간 거리(9.64m)이며,  $\omega_0$  는 구조물의 고유진동수이다. 또한 임계속도의 정수비를 부임계속도(sub-critical speed)라고 하며 다음의 식으로 계산된다.

$$v_2 = \frac{v_{cr}}{i}, i = 1, 2, \dots \quad (6)$$

검토대상 교량을 경량전철이 일정한 유효타격거리로 주행할 시 임계속도를 식 (5)와 같이 추정하면 약 197 km/hr로 주행가능 대역에 포함되지 않는다. 실제 주행 가능한 속도대역에서는 차량속도 49 km/hr에서 4차 부임계속도가 발생하나, Table 1의 실험결과와 같이 증속에 대한 계측치의 증폭이 크지 않음을 확인할 수 있다.

Table 1 Maximum values with velocities

차량 속도 (km/hr)	처짐 (mm)	하부 변형률 ( $\mu\epsilon$ )		상부 변형률 ( $\mu\epsilon$ )		상부 가속도 (g)		하부 가속도 (g)
		전기식	FBG	전기식	FBG	전기식	FBG	
10	1.23	36	26	-18	-26	0.016	0.015	0.010
20	1.25	35	25	-26	-28	0.026	0.031	0.020
30	1.31	32	26	-22	-26	0.032	0.031	0.022
40	1.28	31	25	-24	-27	0.056	0.048	0.025
50	1.36	38	27	-16	-28	0.077	0.067	0.046

### 5. 사용성 기준평가

대상교량의 구조안전성 및 사용성 평가를 위해 각종 철도관련 시방서에서 제시된 수직처짐, 충격계수, 고유진동수, 연직가속도 등의 한계치와 비교 검토하였다. 교량의 중앙 수직처짐은 국내의 철도교설 설계기준[6]에서 제시하고 있는 바와 같이 콘크리트 교량의 경우 사용성 및 내구성을 고려하여 L/1,600을 따르도록 되어 있다. 교량의 충격계수는 정적처짐에 대한 최대 동적처짐의 비율로 계산하였으며 국내 철도설계기준에 제시된 한계치와 비교하였다. 또한 구조물의 과도한 진동을 피하기 위해 국내철도설계기준과 UIC 776-1R Appendix 102[7]에서는 고유진동수의 한계를 제시하고 있다. 마지막으로 상판의 가속도는 ERRI D 214 RP9 보고서[8]에서 제시한 바와 같이 동적성능과 관련된 항목에 여러 가지 형태로 영향을 줄 수 있으므로 무도상의 경우 0.35g로 제한하고 있다. Table 2는 앞서 설명한 한계치를 대상교량의 모니터링 결과와 비교한 것으로 모든 항목을 충분히 만족하는 것으로 나타나고 있다. 본 연구에서는 공차 하중으로 증속실험을 수행하였으나 각종 한계치와의 여유치(redundancy)가 충분한 것으로 파악되었으므로 향후 최적화된 경량전철 교량 단면에 대한 추가 연구가 요구된다.

Table 2 Serviceability assessment of a test bridge

	한계치	대상교량
중앙 수직처짐	L/1600=18.8 mm	1.36 mm
충격계수	$i(\%) = 24 + \frac{240}{L-0.6} = 32.2\%$	10.6%
고유 진동수	상한치: $94.76 \times L - 0.748 = 7.44$ Hz 하한치: $23.58 \times L - 0.592 = 3.15$ Hz	5.68 Hz (EDX) 5.66 Hz (FBG)
상판연직 가속도	0.35g	0.08g (EDX) 0.07g (FBG)

### 6. 결론

여러 가지 형태의 경량전철 중에서, 고무차륜 경량전철은 가·감속 성능과 등판능력이 우수하고 소음과 진동이 적어 널리 채택되고 있다. 하지만, 일반적으로 경량전철은 고압의 급전시스템에 의해 구동되므로 교량이나 터널 등과 같은 철도 구조물에 부착된 각종 센서들에 전자기파를 유발한다. 반면, 광섬유 센서는 전자기파의 영향을 받지 않으며, 특히 광섬유 브래그 격자(FBG) 센서의 경우 다중화가 용이하다는 장점으로 인해 토목분야에 널리 적용되고 있다. 본 연구에서는 FBG센서를 이용하여 철도 교량의 동적응답 모니터링을 수행하였다. 차량의 속도를 10 km/h에서 50 km/h까지 변화시키면서 측정을 수행하였으며 측정값은 변형률계이지나 가속도계와 같은 전기식 센서로부터 측정된 결과와 비교하였다. 측정 결과로부터, 전기식 센서와 달리 FBG 센서는 전자기파의 영향 없이 보다 안정적인 측정이 가능함을 확인하였다. 또한 FBG 센서를 이용한 모니터링 결과를 각종 시방서의 한계치와의 비교 검토한 결과, 최대처짐, 충격계수, 상판연직가속도, 고유진동수 등의 규정을 모두 만족하는 것으로 나타났다.

본 연구에서 검토한 바와 같이 경량전철 구조물의 모니터링을 위한 장비 선정 시 급전형태로 인한 전자기파의 간섭을 배제할 수 있는 시스템으로 광섬유 기반 모니터링 시스템이 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

### 참고문헌

[1] 이덕영, 이안호, 송달호, "경량전철 개론", 노해출판사, (2006)

- [2] 정원석, 강동훈, 최은수, 김현민, "광섬유 격자 센서를 이용한 철도 판형교의 증속 시험", 한국 강구조학회 논문집, 제17권 제6호, pp. 681-688, (2005)
- [3] 정원석, 김성일, 김남식, 이희엽, "간섭형 long-gage 광섬유 센서를 이용한 콘크리트 구조물의 모니터링", 한국철도학회논문집, 제9권, 제4호, pp. 467-472, (2006)
- [4] E. Udd, "Fiber optic smart structures," John Wiley and Sons, New York, (1995)
- [5] A. Mita and I. Yokoi, "Fiber Bragg grating accelerometer for structural health monitoring," Fifth International Conference on Motion and Vibration Control 2000, Sydney, Australia, (2000)
- [6] 한국철도시설공단, "철도설계기준(철도교편)", (2004)
- [7] UIC Code 776-1R, "Loads to be considered in railway bridge design," 4th Edition, International Union of Railway, (1994)
- [8] ERRI D 214 RP9, "Rail bridges for speeds  $v > 200 \text{ km/h}$ ," European Rail Research Institute, (1999)