

# 광섬유 격자센서를 이용한 철도 판형교의 증속 실험

## Monitoring of a Steel Plate Girder Railroad Bridge with Fiber Bragg Grating Sensors

정 원 석<sup>1)</sup> · 강 동 훈<sup>2)</sup> · 최 은 수<sup>3)</sup> · 김 현 민<sup>4)</sup>

Chung, Wonseok · Kang, Dong Hoon · Choi, Eun Soo · Kim, Hyun Min

요 약 : 본 연구는 광섬유 브래그 격자 (fiber Bragg grating, FBG) 센서를 이용하여 보강이 실시된 철도판형교의 수직처짐을 산정하고 이를 통해 교량의 정적 및 동적 거동을 모니터링 하는데 목적이 있다. 7개의 센서로 다중화(multiplexing)된 FBG 센서 2쌍을 지간 12.9 m인 철도 판형교의 상부와 하부 플랜지의 표면에 부착하였다. 이렇게 수평 배치된 FBG 센서로부터 직접 곡률을 측정하고 기하학적인 처짐-곡률관계와 회귀분석을 통해 교량의 처짐을 유추하였다. FBG 센서의 정확도를 검증하기 위해 교량의 중앙 지점에 기존의 전기식 변형률 센서와 처짐계를 설치하였다. 교량의 거동을 측정하기 위해 열차 재하실험과 증속실험을 실시하였다. 증속실험은 열차의 속도를 10 km/h 에서 90 km/h까지 10 km/h 씩 증가시키며 교량의 동적 거동을 분석하였다. 측정 변형률을 비교한 결과 FBG 센서와 전기식 센서가 최대오차 7%이내의 우수한 상관관계를 보였으며, 본 연구에서 제안된 실험법으로 유추된 최대처짐을 처짐계를 이용한 결과와 비교하였을 때 5% 이내의 오차를 보였다. 따라서 철도판형교의 안전성 평가를 위한 처짐 모니터링 시 FBG 센서의 적용성이 우수하다고 판단된다.

ABSTRACT : This study investigates an existing steel plate girder railroad bridge after superstructure rehabilitation to monitor static and dynamic responses using Fiber Bragg Grating (FBG) sensors. This paper also presents an experimental technique to estimate the vertical deflection of the bridge using FBG sensors. Seven FBG sensors are multiplexed in a single optical fiber and installed in parallel pairs along the length of the bridge, with one set at the top flange and the other at the bottom flange. In addition to FBG sensors, a conventional electric strain gauge and anLVDT are installed at the mid-span of the bridge for comparison. A test train consisting of one locomotive is placed at the center of the bridge to produce the maximum static effect. The train is also made to pass over the bridge at different speeds ranging from 10 km/h to 90 km/h to monitor the dynamic response of the bridge. This study demonstrates that the measured strains using the FBG sensor compared well with the readings from the electric strain gauge. The results show that the proposed instrumentation technique is capable of estimating the vertical deflection of the bridge for various loading conditions, which is crucial in structural health monitoring. Several dynamic characteristics of the bridge were also identified.

핵심용어 : 광섬유 브래그 격자 센서, 다중화, 철도교, 판형교, 증속실험, 처짐

KEYWORDS : Fiber Bragg grating(FBG), multiplexing, railroad bridge, steel plate girder, dynamic test, deflection

### 1. 서론

광섬유 센서는 구조물의 장기계측을 위해 필수적인 내구성 및 온도변화와 전자기파에 대한 면역성으로 기존의 전기식 센서를 대체할 수 있는 스마트 센서로 대두되고 있다. 특히 철도교의

경우에는 전철화 구간에서 전자기파 간섭 (electrical or magnetic interference, EMI)으로 인해 전기식 센서를 이용한 교량 모니터링에 어려움을 겪고 있다. 또한 현재 계획 중인 자기부상열차의 경우에도 전자기파의 영향이 심할 것으로 예상된다. 이러한 철도환경 변화 하에서 스마트 센서인 광섬유 센서를 이용한 철도교 모니터링 기법의 관심이 증가되고 있다.

1) 정희원, 한국철도기술연구원 선임연구원, 공학박사  
(Tel. 031-460-5353, Fax. 031-460-5359, E-mail : wschung@krii.re.kr)

2) 한국철도기술연구원 선임연구원, 공학박사

3) 정희원, 한국철도기술연구원 선임연구원, 공학박사(eunsoochoi@krii.re.kr)

4) 정희원, 한국철도기술연구원 주임연구원(hmkim@krii.re.kr)

본 논문에 대한 토의를 2006년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

최근에는 광섬유 센서 중에서 광섬유에 브래그 격자를 형성시키고 광폭 스펙트럼을 광섬유에 입사시켜 굴절률의 변화로 물리량을 측정하는 광섬유 브래그격자 (fiber Bragg grating, FBG) 센서 시스템의 연구가 항공우주공학 분야를 중심(홍창선 등, 2000)으로 활발히 진행되고 있다.

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 계측장비를 간단하게 구성할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 철도교량과 같은 대형 토목구조물에서 유용하게 적용될 수 있다.

1990년대 중반부터 FBG 센서를 중심으로 한 광섬유 센서를 이용한 구조물의 모니터링 기법에 관한 연구(Ansari, 1997)(Davis 등, 1997)(Maaskant 등, 1997)(Tennyson 등, 2001)가 활발히 수행되어지고 있다. 국내 토목분야에서도 FBG 센서의 검증과 적용성에 대한 연구(곽계환 등, 2003)(장기태 등, 2000)가 주로 수행되어지고 있다. 또한 FBG 센서의 변형률을 이용하여 처짐을 유추하는 연구(조남소 등, 2001)도 수행되었다.

본 연구에서는 FBG 센서를 적용한 철도교의 동적 모니터링에 대한 타당성을 검토하기 위해 가장 많은 형식의 철도교인 판형교에 FBG 센서를 부착하였다. 기존의 변형률을 이용한 처짐 유추법(Kim 등, 2004)과는 달리 센서를 수평 배치하여 이로부터 교량의 곡률을 직접 유추하고 Bernoulli 보 이론을 이용하여 판형교의 수직 처짐을 유추하였다. 이러한 처짐 유추법은 형하공간에 변위계를 설치하기 위한 고정점을 확보할 필요가 없으며 구조물의 변형률과 처짐을 동시에 측정할 수 있다는 장점이 있다.

검증 실험을 위해 경북선 옥산-청리 구간에 위치하고 있는 판형교인 소천교에 FBG 센서를 부착하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 재하 차량은 디젤 기관차 1량으로 정적 재하와 동적 증속실험을 실시하였다. 실험교량의 동적 모니터링을 위해 속도를 10 km/h부터 90 km/h까지 10 km/h씩 증가시키며 각 속도별 응답을 측정하였다. FBG 센서와 기존 전기식 센서와의 상관관계를 살펴보기 위해 변형률 게이지도 부착하여 측정된 변형률을 비교하였다. 또한 본 연구에서 제시된 처짐 유추법을 통하여 산정한 교량의 처짐을 직접 처짐계인 LVDT(linear variable differential transformers)를 이용하여 계측한 처짐치와 비교하였다.

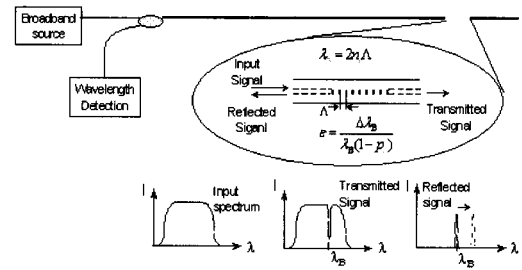


그림 1. FBG 센서의 작동원리

## 2. FBG 센서의 이론과 원리

광섬유 브래그 격자(FBG)는 GeO<sub>2</sub>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 그림 1과 같이 보강간섭을 일으켜 브래그 격자를 통과하지 못하고 반사되며 다른 파장의 빛은 통과하게 된다. (Udd, 1995)

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

여기서,  $n_e$ 는 광섬유 격자의 유효 굴절률(effective refractive index)이고  $\Lambda$ 는 광섬유 코어에 새겨진 격자의 간격(grating period)이다.

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.

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

여기서,  $a_f$ 는 광섬유의 열팽창 계수(thermal expansion coefficient)이고  $\xi_p$ 는 온도에 의한 광섬유의 굴절률 변화를 나타내는 열광학 계수(thermo-optic coefficient)이다.  $p_e$ 는 광탄성 상수(photoelastic constant)이며 식(3)과 같이 표현된다.

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

여기서,  $p_{11}$ 과  $p_{12}$ 는 스트레인 광학 텐서(strain-optic constant)의 성분이며  $n_e$ 은 코어의 유효 굴절률,  $\nu$ 는 광섬유의 프와송 비이다.

본 연구에서와 같이 주위 온도의 급격한 변화가 없고 센서들 간의 온도차가 없는 상태에서 구조물의 변형을 측정한다면  $\Delta T=0$ 으로 가정할 수 있으므로 식(2)는 식(4)와 같이 구조물의 변형률을 브래그 반사 파장의 변화량만을 이용하여 산정할 수 있다

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

또한 브래그 반사파장이 서로 다른 광섬유 격자들은 서로 영향을 받지 않는 파장 분할 다중화의 특성으로 인해 하나의 광섬유 선에 여러 개의 FBG 센서를 배열할 수 있으므로 동시에 여러 지점의 변형을 측정이 가능하다.

### 3. 철도판형교 증속실험

본 연구에서는 한국철도기술연구원에서 수행 중인 연구과제의 일환으로 실시된 판형교 주형 개량기법 적용에 따른 동적 안정성 향상을 위한 현장 검증실험에 FBG 센서를 부착하여 기존 전기식 센서와의 응답을 비교하고 치짐을 유추하였다. 측정 대상교량은 경북선 옥산-청리 구간에 위치한 설계하중 L-22의 판형교인 소천교이다.

실험이 실시된 교량의 지간은 12.9 m이고 그림 2와 같은 단선교량이다. 교량은 그림 3과 같이 2개의 주형으로 이루어져 있으며, 상판은 도로교와는 달리 대부분 도상이 없이 주형에 침목이 직접 연결되어 레일이 설치되어 있는 전형적인 철도 판



그림 2. 경북선 소천교 전경

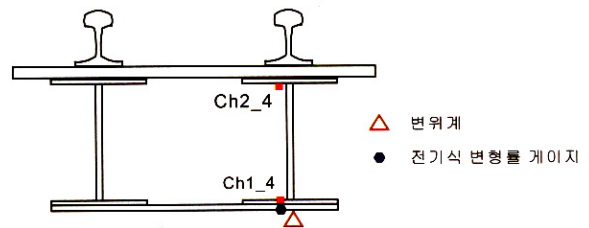


그림 3. 지간 중앙에서의 단면

형교이다. 부설 전 주형의 높이는 130 cm에서 132 cm, 플랜지의 폭은 32.1 cm에서 32.4 cm로 변한다. 플랜지의 두께는 그림 4에 나타난 바와 같이 3개의 변단면(17.4 mm, 26.3 mm, 34.9 mm)으로 구성되어 있었으며, 부설 후에는 교량 길이방향의 중앙부 480 cm 구간을 두께 35mm의 강판으로 그림 3과 같이 2개의 주형을 일체화시켜 종방향 및 횡방향 진동을 최소화시켰다. 따라서 주형 개량기법 부설 후의 하부플랜지는 4개의 다른 두께를 보인다. 따라서 본 연구에서 채택된 실험교량은 주형의 두께가 변하는 부분에서 곡률의 변화가 심하게 일어나는 교량이다.

FBG 센서를 이용한 모니터링은 동적 안전성 향상을 위한 부설과정 후에 실시되었다. 부설 후 교량 주형은 앞서 설명한 바와 같이 4개의 각기 다른 단면을 형성하므로 하부플랜지의 두께가 일정한 구간의 중앙점에 FBG 센서를 설치하였다. 따라서

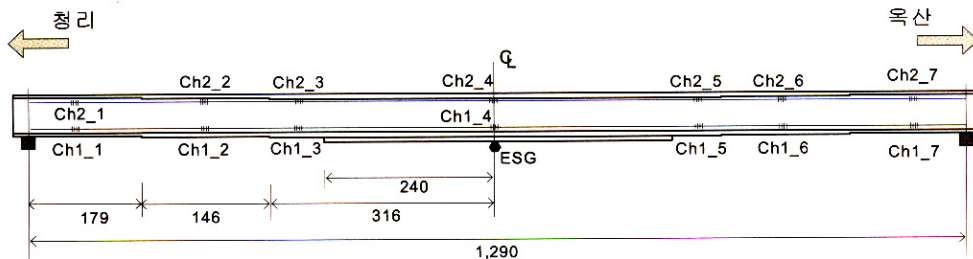


그림 4. 센서 부착위치

교량 길이방향으로 그림 4와 같이 7개씩의 센서가 다중화 되어 한 개의 광섬유로 측정 채널(채널 1)을 구성하였다. 또한 상부 플랜지에는 하부 플랜지의 센서 부착위치와 동일한 종방향 위치에 FBG 센서를 역시 다중화하여 측정 채널(채널 2)을 구성함으로써 구조물의 곡률을 측정하였다. 전기식 센서(electrical strain gauge, ESG)와의 직접 비교를 위해 그림 3과 같이 동일 위치에 FBG 센서(Ch1\_4)를 부착하였으며, FBG 센서를 이용한 처짐 산정법의 검증을 위해 시간 중앙부의 주형 하부에 LVDT를 설치하여 처짐을 직접 측정하였다. 전기식 센서와 FBG 센서의 부착모습은 그림 5와 같다. 머리카락 형태의 일반 단일 모드 광섬유(single mode fiber)에 피복을 제거한 후 코어부분에 격자를 형성하여 약 1 cm 정도의 FBG 센서부를 형성하고 이를 에폭시 접착을 통해 구조물과 일체화 시켰다. 실험은 에폭시 완전경화를 위해 센서가 설치된 후 12시간 이상이 경과한 후에 실시하였다.

재하차량은 기존선 화물 및 무궁화 열차 견인에 사용되는 디젤 기관차로 재하차량에 대한 제원은 그림 6과 같다. 운행하중에 의한 관형교의 동적응답 측정은 속도대역이 한정되어 있어 속도변화에 따른 동적응답의 특성을 분석하기 어려운 측면이 있다. 따라서 실제 운행 중인 디젤기관차 1량을 10 km/h에서 90 km/h 까지 10 km/h 간격으로 증속하여 각 속도대역별로 동적응답을 측정하였다. 또한 실험 교량의 정적 응답 측정을 위한 열차 재하실험을 병행하였다.

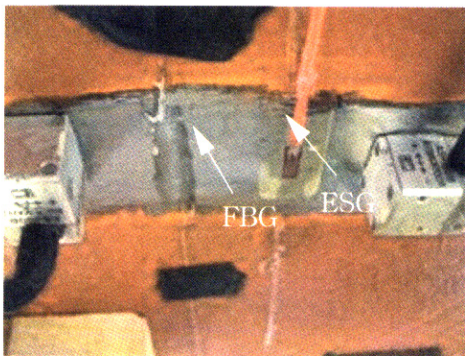


그림 5. 센서 부착모습

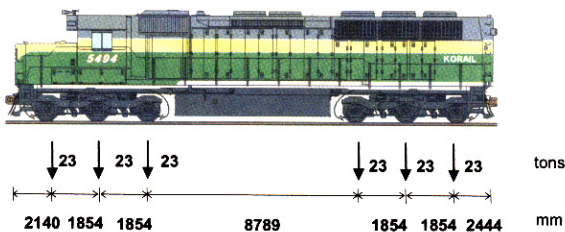


그림 6. 실험기관차의 제원

#### 4. 처짐 산정

일반적인 구조물의 수직처짐은 그림 7과 같은 보의 휨 변형 하에서 기하학적 비선형을 고려하여 식(5)와 같은 관계로 표현될 수 있다. 이는 “평면은 휨 변형 후에서도 평면을 이룬다”는 Bernoulli 가정에 근거한 식이다.

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

여기서,  $\kappa(x)$ 는 임의의 종단면  $x$ 에서의 곡률,  $w(x)$ 는 임의의 종단면  $x$ 에서의 수직처짐이다.

식(5)의 비선형 곡률-수직처짐 관계는 미소변형 문제에서 분모의 차승식을 무시할 수 있으므로 식(6)과 같이 단순화될 수 있다.

$$\kappa(x) = \frac{1}{\rho(x)} = \frac{d^2w(x)}{dx^2} \quad (6)$$

여기서,  $\rho$ 는 곡률반경이다. 식(6)은 보의 기하학적인 변형에 근거하여 유도된 식이므로 재료 물성치와의 상관관계는 존재하지 않는다.

다중화 되어 설치된 FBG 센서가 임의의 종단면에서 중립축과 평행하게 상하면에 설치되어 있다면 곡률은 식(7)와 같이 결정된다. (Vurpillot 등, 1998)

$$\kappa_i = \frac{\varepsilon_i^b - \varepsilon_i^t}{h} \quad (7)$$

여기서,  $\varepsilon_i^b$ 와  $\varepsilon_i^t$ 는  $i$ 번째 센서의 하부 변형률과 상부 변형률,  $h$ 는 센서간의 수직 거리이다.

한편 교량의 종방향 곡률은 식(8)과 같은  $n$ 차 다항식의 형태로 표현할 수 있다.

$$\kappa(x) = c_0 + c_1x + c_2x^2 + \dots + c_nx^n \quad (8)$$

여기서,  $c_0 \dots c_n$ 는 곡률함수의 상수이다. 앞서 설명한 바와 같이 본 연구의 실험 교량은 7개의 종방향 위치에서 곡률을 측정하였으므로 곡률함수식은 6차 다항식을 사용하였다. 즉, 6차 다항식은 7개의 미지 상수를 가지게 되므로 실험에서 측정한 7

개의 곡률 값으로 회귀분석을 통해 곡률함수의 상수를 결정할 수 있다.

식(6)의 구조물의 처짐과 곡률관계로부터 이중적분을 취하면 식(9)와 같이 수직처짐을 결정할 수 있다.

$$w(x) = \iint \kappa(x) dx dx \tag{9}$$

적분에서 발생하는 2개의 적분상수는 경계조건인  $w(x=0) = 0$ 와  $w(x=L) = 0$ 을 고려하면 결정할 수 있다.

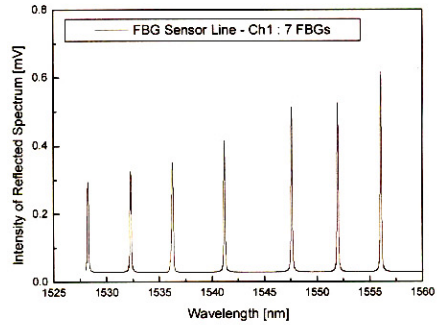
따라서 본 연구에서는 FBG 센서를 동일 종방향의 상부 플랜지와 하부 플랜지에 수평 배치하여 곡률을 측정하고, 회귀분석으로 곡률 함수를 결정한 후 길이방향으로 이중적분을 통해 교량의 수직처짐을 유추하였다. 특히 교량 종방향으로 침묵의 유무가 일정하지 않은 판형교의 경우에는 중립축 위치가 종방향 위치에 따라 달라질 수 있다. 따라서 곡률측정법은 중립축 위치를 계산하고 변형률의 선형회귀분석을 통해 보의 처짐을 유추하는 방법(Kim 등, 2004)보다 철도교의 적용성이 우수하다고 할 수 있다.

### 5. 실험 결과

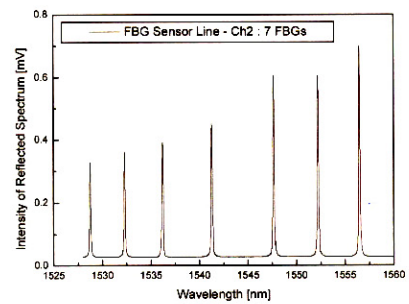
FBG 계측 시스템을 이용하면 앞서 설명한 바와 같이 브래그 파장의 천이(shift)를 측정하게 된다. 본 연구에서는 상부 플랜지와 하부 플랜지에 각각 7개씩의 FBG 센서를 구성하였으며, 하부 측정채널(채널 1)과 상부 측정채널(채널 2)에 부착된 FBG 센서의 신호형상은 그림 7과 같다. 계측이 실시되면 파장이 천이되고 이를 브래그 조건을 이용하여 변형률로 환산할 수 있다.

그림 8과 그림 9는 각 FBG 센서에 정적 최대하중 작용 시와 열차가 50 km/h로 주행할 때의 변형률 결과를 나타낸 것이다. 그림 8에서 나타나는 바와 같이 기관차가 교량에 진입하면서 채널 1의 7개의 센서에서는 인장변형률이 발생하고 채널 2에서는 압축 변형률이 발생하는 것을 알 수 있다. 기관차가 교량 상에서 약 20 초 정도 머무르는 동안 일정한 변형률을 보였으며, 정지와 출발 시에 충격으로 인해 변형률이 일시적으로 소폭 증가함을 보인다. 그림 9는 기관차가 50 km/h로 동적 주행할 시의 채널 1과 채널 2의 변형률 결과를 나타낸 것이다. 각각의 FBG 센서가 부착된 위치에 그림 6과 같은 기관차가 통과 할 때, 짧은 시간동안 대차의 위치에 따라 두 번의 동일한 크기의 최대 변형률이 발생하고 있음을 확인할 수 있다.

그림 10은 하부 플랜지의 중앙에 설치된 FBG 센서와 동일 위치에 부착된 변형률 게이지(ESG)를 속도 대역별로 비교한

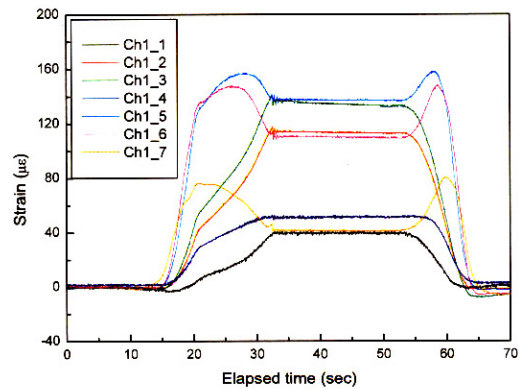


(a) 하부채널

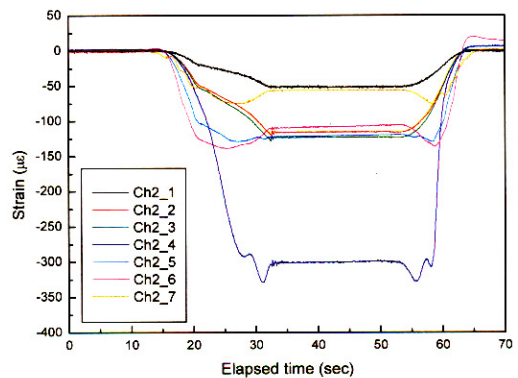


(b) 상부채널

그림 7. 측정 파장

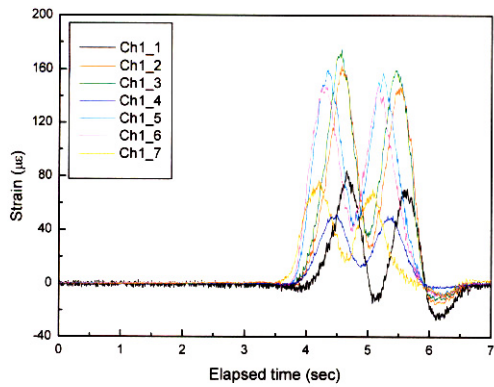


(a) 하부채널

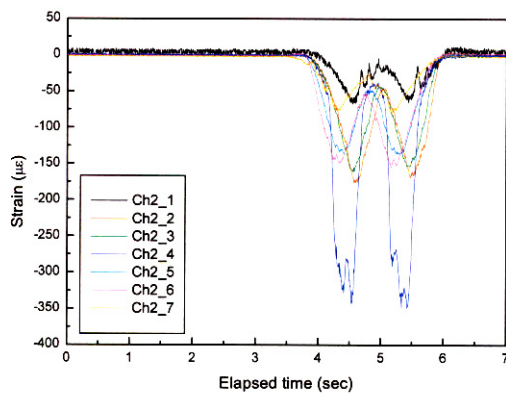


(h) 상부채널

그림 8. 측정변형률 (정적 재하실험)



(a) 하부채널



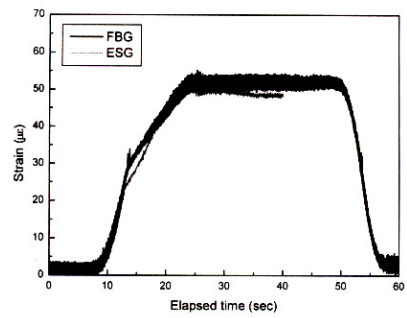
(b) 상부채널

그림 9. 측정변형률 (속도 50 km/h)

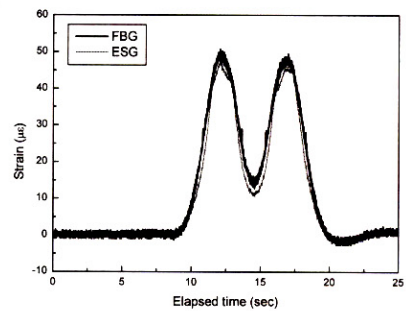
그래프이다. 그림 10(a)에 보이는 바와 같이 정적 재하일 경우에는 기관차가 정지한 후 전기식 센서의 변형률이 FBG 센서의 결과와 비슷한 결과를 보이다가 약간 감소하는 응답을 보였다. 그림 10(b)(c)(d)와 같이 각기 다른 속도 대역별로 기관차를 주행시켰을 때, FBG 센서와 전기식 센서가 매우 비슷한 변형률 결과를 보임을 알 수 있다. 각 센서간의 최대변형률 오차를 비교한 결과, 속도 10 km/h에서는 3%, 50 km/hr에서는 7%, 속도 90 km/h에서는 5%의 오차를 보였다.

그림 11은 FBG 센서를 이용하여 곡률을 구하고 이를 앞서 기술한 수직처짐과 곡률의 관계를 이용하여 교량 중앙점에서의 처짐을 산정한 결과이다. 또한 하부플랜지 하면에 설치된 LVDT에서 측정된 처짐을 FBG 센서로 산정한 처짐과 비교하였다. 두 센서의 최대 처짐 오차는 정재하 시에는 약 5%이며, 증속 실험에서는 속도대역별로 3% 이내의 우수한 측정오차를 보였다.

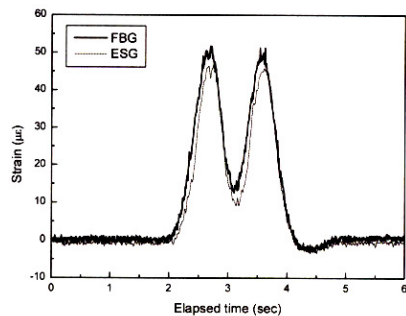
그림 11(b)(c)(d)에서 보는 바와 같이 증속실험 시에는 기관차의 2개의 대차 중 첫 번째 대차에 의한 최대변위와 두 번째 대차에 의한 최대변위 사이에서 큰 변위의 오차를 보인다. 또한



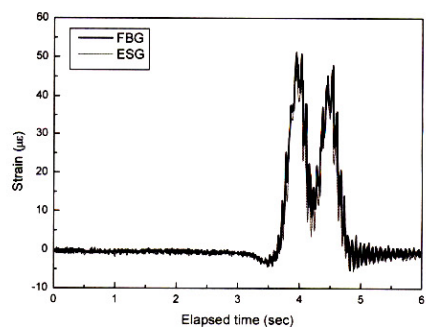
(a) 정적 재하



(b) 열차속도 = 10 km/h



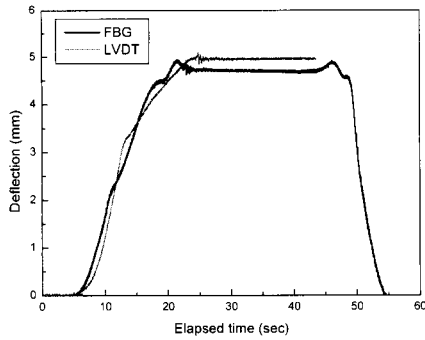
(c) 열차속도 = 50 km/h



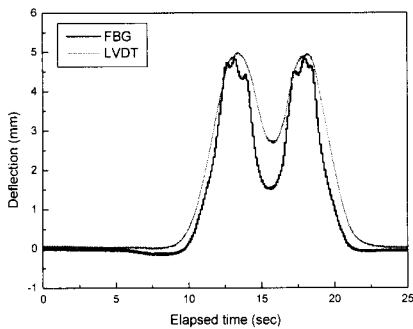
(d) 열차속도 = 90 km/h

그림 10. 변형률 결과

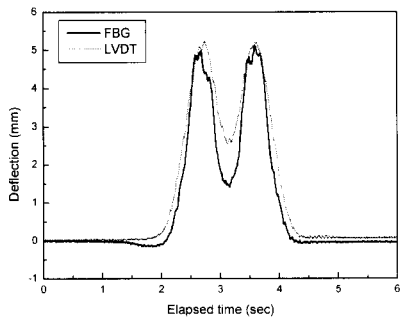
기관차의 대차가 중앙점을 통과할 시에 각 대차별로 3개의 국부 최대점을 보인다. 이는 FBG 센서를 이용하는 변위산정법의 특징에 기인하는 것으로 판단된다. 즉, 변위계는 주형의 하부에



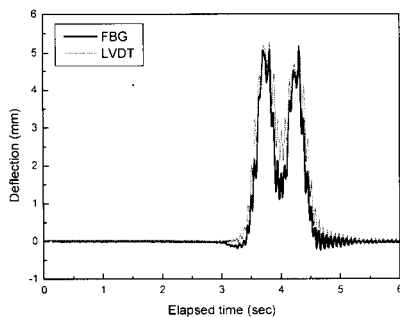
(a) 정적 재하



(b) 열차속도 = 10 km/h



(c) 열차속도 = 50 km/h



(d) 열차속도 = 90 km/h

그림 11. 처짐 결과

었기 때문에 판단된다. 이러한 경향은 그림 9(b)에서 보이는 바와 같이 상부채널에서 극부최대점이 발생하는 것으로 확인할 수 있다.

그림 12는 증속에 따른 최대 수직처짐의 변화를 나타낸 것이다. 기관차의 속도가 10 km/h에서 90 km/h로 900% 증가함에 따라 FBG 센서를 이용한 최대처짐은 약 5.6%정도 증가하였으며, 처짐계에 의한 최대처짐은 약 4.7%정도 증가하였다. 따라서 철도판형교 거시거동의 주요한 지표 중 하나인 수직처짐을 모니터링한 결과, 실험이 수행된 속도대역에서는 판형교의 처짐이 열차의 주행 속도에 민감하지 않은 것으로 나타났으며, 이는 실험이 수행된 속도대역에서 판형교의 공진응답이 발생하지 않았기 때문에 판단된다.

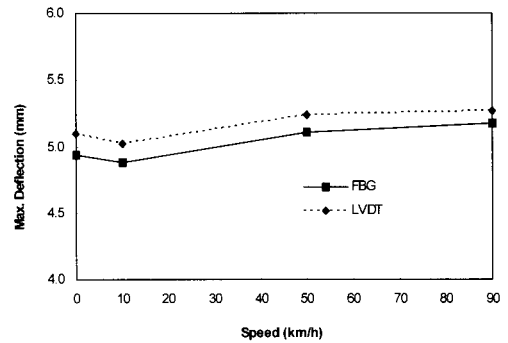


그림 12. 속도 대역별 최대처짐

## 6. 결론

본 연구에서는 FBG 센서를 이용하여 철도 판형교의 모니터링을 실시하였다. 판형교의 수직처짐을 유추하기 위해서 FBG 센서를 교량의 전체 길이에 걸쳐 다중화하여 수평배치하고 이로부터 곡률을 측정하였다. 측정된 곡률의 회귀분석을 통해 교량의 곡률함수를 찾아낸 후 Bernoulli 보 이론에 의해 처짐을 결정하였다. FBG 센서를 이용한 구조물의 모니터링 결과의 신뢰성 검증을 위해 기존의 전기식 센서를 부착하여 계측결과를 비교하였다. 동적 응답의 모니터링을 위해 기존선의 기관차를 이용하여 90 km/h 까지 증속실험을 실시하였다. FBG 센서를 이용한 최대 변형률과 전기식 센서를 이용한 최대변형률을 비교하여 본 결과, FBG가 우수한 내구성을 보이면서 전기식 센서와 최대오차 7% 이하의 결과를 보였다. 또한 본 연구의 처짐 유추법은 LVDT를 이용하여 직접 계측한 처짐 결과와 최대처짐 오차 3% 이내의 우수한 연관성을 보였다. 또한 국부적인 처짐의 형상은 LVDT를 이용한 결과보다 실제에 가까운 결과를 제공함을 확인하였다. 따라서 형상공간이 높아 처짐계의 설치를

설치된 반면, FBG 센서를 이용한 처짐유추법은 하부 플랜지뿐만 아니라 상부 플랜지에도 센서를 설치하여야 하므로 기관차의 3개의 축중 하중이 직접 채널 2에 설치된 FBG 센서에 전달되

위한 고정점을 찾기 어렵거나 전차선 구간과 같이 전자기파의 간섭이 심한 철도교 모니터링에 FBG 센서가 유용하게 이용될 수 있으리라 판단된다.

### 참 고 문 헌

- 곽계환, 조선정, 안철욱, 김기순 (2003) 광섬유 브래그격자 센서를 이용한 3경간 연속 PSC 교량의 계측. 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp. 1392-1397.
- 장기태, 한상목, 김경태, 유원위 (2000) FBG 센서를 이용한 철근콘크리트 보의 휨거동 실험. 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp. 469-472.
- 조남소, 김남식, 이상배 (2001) 광섬유 격자 센서를 이용한 남해대교의 처짐 추정. 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp. 1-4.
- 홍창선, 김천곤 (2000) 광섬유 센서를 이용한 대형구조물 모니터링 연구동향 분석, 연구보고서 SHI-KAIST-2000, 한국과학기술원, 기계공학과 항공우주전공.
- Ansari, F. (1997) State-of-the-art in the applications of fiber-optic sensors to cementitious composites. Cement and Concrete Composite, Vol. 19, pp. 3-19.
- Davis, M.A., Bellemore, D.G., Kersey, A.D. (1997) Distributed fiber Bragg grating strain sensing in reinforced concrete structural components. Cement and Concrete Composite, Vol. 19, pp. 45-57.
- Kim, N.S., Cho, N.S.(2004) Estimating deflection of a simple beam model using fiber Optic Bragg-grating sensors. Experimental Mechanics, Vol.44, No.4, 2004, pp. 433-439.
- Maaskant R., Alavie T, Measures R.M., Tadros G., Rizkalla S.H., and Guha-Thakurta A. (1997) Fiber-optic Bragg grating sensors for bridge monitoring, Cement and Concrete Composites, Vol. 19, No. 1, pp. 21-33.
- Tennyson R.C., Mufti A.A., Rizkalla S., Tadros G., and Benmokrane B. (2001) Structural health monitoring of innovative bridges in Canada with fiber optic sensors. Smart Mater. Struct., Vol. 10, pp. 560-573.
- Udd E. (1995) Fiber Optic Smart Structures, John Wiley and Sons, New York.
- Vurpillot S, Kreuger, G., Benouaich D, Clement D, and Inaudi D (1998) Vertical deflection of a pre-stressed concrete bridges obtained using deformation sensors and inclinometer measurements, ACI Structural Journal, Vol. 95, No. 5, pp. 518-26.
- (접수일자 : 2005. 7. 25 / 심사일 2005. 9. 2 / 심사완료일 2005. 11. 8)