

FBG센서를 이용한 콘크리트 충전 FRP 스트럿 보강 PSC 교량의 스트럿 거동 분석

Behavior of Strut in Concrete-filled FRP PSC Bridge using FBG Sensors

정원석* · 강동훈** · 안주옥***

Chung, Wonseok · Kang, Donghoon · An, Zu Og

Abstract

Recently, a new PSC (Prestressed Concrete) bridge system, which is supported by Concrete-filled fiber-reinforced polymer (CFFRP) strut, has been introduced. This bridge is able to reduce self-weight and increase the width of traditional PSC bridges. However, no relevant research has been reported on local behavior of CFRFP strut in the bridge system. The purpose of this study is to investigate local behavior of CFRFP struts using fiber Bragg grating (FBG) sensors. Field tests were performed to examine the hoop strains and longitudinal strains of the FRP strut under various lateral positions and velocities of a test truck. It has been observed that CFRFP strut is under compression regardless of vehicle speed and location. However, the CFRFP strut is sensitive to the lateral position of vehicles in terms of strain magnitude. Results also indicated that the FBG sensors can faithfully record the hoop and longitudinal strains of the FRP strut without electro-magnetic interference.

Key words : Bridge, FBG Sensor, Concrete-Filled FRP Strut, PSC Box Girder

요 지

최근 국내에서는 PSC(Prestressed Concrete) 박스 거더 교량의 교폭을 늘리고 자중을 줄이기 위한 목적으로 박스의 수를 줄이는 대신 콘크리트 충전 FRP(Concrete Filled FRP, CFRFP) 스트럿을 상판 캔틸레버 부분에 설치하는 공법이 시공되고 있다. 이러한 CFRFP 스트럿은 사례가 많지 않은 교량 구조물로서 설계 및 시공에서의 불확실성을 제거하기 위해 교량 시스템에서의 스트럿 거동을 실험적으로 분석할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 대상교량에 대해 현장시험을 실시하여 CFRFP 스트럿의 국부 거동을 분석하고자 한다. 특히 전자기파 간섭에 대해 면역이 우수한 광센서인 FBG(fiber Bragg grating) 센서를 기반으로 시험을 실시하여 잡음이 없는 우수한 응답을 성공적으로 획득하였다. 현장시험에서는 재하트럭의 속도와 횡방향 위치를 매개변수로 시험을 실시하였다. 그 결과 CFRFP 스트럿은 하중재하 위치와 속도에 관계없이 압축상태에 존재하고 있으며, 통과 차량의 횡방향 위치가 CFRFP 스트럿의 거동에 민감한 요소임을 확인하였다.

핵심용어 : 교량, FBG 센서, 콘크리트 충전 FRP 스트럿, PSC 박스 거더교

1. 서 론

국내 중지간 교량의 건설에 있어서 PSC(Prestressed Concrete) 박스거더 교량형식은 타 형식의 교량에 비해 미관적·경제적 측면에서 우수하여 상당히 선호되고 있다. 그러나 기존의 PSC 박스거더 교량은 상부 슬래브의 폭이 넓어지면 박스단면이 커지게 되므로 교각 단면 역시 커지거나, 상·하행선을 분리 시공해야하는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해서 콘크리트가 충전된 FRP(Fiber Reinforced Polymer) 스트럿으로 보강한 PSC 박스거더 교량을 적용하여 PSC 박스의 장점을 활용하면서 교폭을 확보하는 새로운 형

식의 교량이 일부 시공되고 있다. 이러한 합성 형식의 스트럿 지지 형식의 교량은 캔틸레버 부분을 스트럿으로 지지하는 구조형식이므로 캔틸레버 슬래브의 폭은 넓어지고 하부 바닥판의 폭은 작아져서 상부구조의 경량화가 가능하고 이로 인한 교각 단면적과 기초가 작아진다는 장점이 있다 (박종화 2007; 신우섭 2008).

기존의 연구에서는 주로 콘크리트 충전 FRP 튜브 단일 부재의 실험적 거동 분석(Davol 2001)이나 해석적 연구(Son 2008)가 주로 진행되었다. 교량 구조에 적용된 FRP 스트럿에 대한 연구는 국내에서 콘크리트 충전 FRP 스트럿을 가진 PSC 교량의 모형을 제작하여 구조안전성을 실험적으로 평가

*정회원 · 경희대학교 공과대학 토목공학과 조교수(E-mail: wschung@khu.ac.kr)

**한국철도기술연구원 선임연구원

***정회원 · 경희대학교 공과대학 토목공학과 교수(교신저자)

하는 연구(송재준 등 2008)가 수행된바 있으나 FRP 스트럿이 2쌍만 설치된 모형실험체로 전체 PSC 교량 시스템에서의 FRP 스트럿의 국부거동을 분석하는데는 한계가 있었다.

본 연구에서는 주요 목적은 기 시공된 해당형식 교량을 대상으로 현장시험을 실시하고, 교량시스템에서의 콘크리트 충전 FRP(Concrete-filled FRP, CFFRP) 스트럿의 국부 거동을 시험적으로 분석하는데 목적이 있다. 이를 위해 통과하중의 속도와 횡방향 위치를 변화시키며 CFFRP 스트럿의 종방향 변형률과 원주방향 변형률을 측정하여 교량시스템의 특성을 분석하고자 한다. 본 논문에서는 기존의 현장시험에서 노이즈의 영향으로 적용이 어려운 전기식 센서를 대체하여 첨단 광섬유 센서의 일종인 FBG(fiber Bragg grating) 센서를 적용하였다. FBG 센서는 전자기파의 간섭에 면역성과 다중화(Multiplexing) 성능이 우수하여 토목분야의 적용성이 우수하다. 이러한 FBG 센서에 대한 교량 구조물 적용에서의 전기적 잡음에 대한 면역성은 기 검증된 바 있다(강동훈 2007).

2. CFFRP 스트럿 보강 PSC 교량 시스템

현장 시험 대상 교량에 사용된 CFFRP 스트럿은 그림 1과 같이 FRP 셸 구조에 철근이 삽입되고 콘크리트가 충전된 하이브리드 구조물이다. 스트럿은 직경이 360 mm인 원형단면으로 길이는 4,500 mm이다. FRP 셸 구조의 강화섬유는 유리강화섬유로 필라멘트 와인딩 기법을 이용하여 제작되었다. FRP 셸은 ±45°의 적층각을 갖는 총 6개의 층으로 구성되었으며 두께는 5 mm로 제작되었다. 제작된 FRP 셸 내부에 6개의 종방향 철근을 삽입하고 충전 콘크리트를 주입하여 스트럿을 완성하였다. CFFRP 스트럿에서 사용된 재료의 물성치는 표 1과 같다.

CFFRP 스트럿에서의 원통형 FRP 셸은 콘크리트를 잡아주는 거푸집 역할을 하게 되므로 현장 적용 시에는 별도의 거

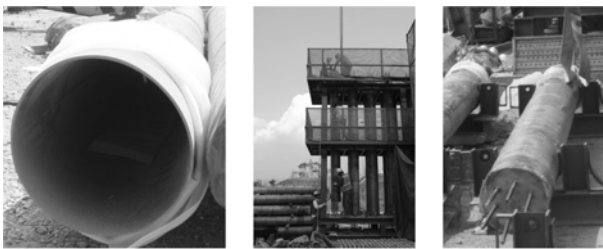


그림 1. 콘크리트 충전 FRP 스트럿 제작.

표 1. 사용재료의 물성치

| | 철근 | 콘크리트 | 유리섬유 |
|------|---------|--------|----------|
| 탄성계수 | 200 GPa | 28 GPa | 72 GPa |
| 항복응력 | 400 MPa | - | - |
| 압축강도 | - | 40 MPa | - |
| 인장강도 | - | - | 3450 MPa |

푸집 작업을 수행할 필요가 없어 시공성과 경제성을 동시에 확보할 수 있다. 또한 FRP 슈트를 이용한 외부보강의 경우와 같이 외부 FRP 셸 구조가 구속효과를 발현하게 되므로 보강효과도 기대할 수 있다. 충전 콘크리트와 철근은 응력전달 뿐만 아니라 충전재로서 박판인 복합소재 셸 구조의 좌굴을 방지하는 추가적인 역할을 수행한다. 즉, 전통적인 건설재료인 콘크리트 및 철근과 건설 신소재인 FRP 구조의 합성 하이브리드 시스템을 구성하여 각 재료의 장점을 살릴 수 있게 구성되었다.

3. FBG 센서의 원리 및 적용

FBG는 GeO₂가 첨가된 광섬유 코어에 자외선 레이저를 조사시켜 레이저 간섭 무늬의 에너지 분포에 따라 코어 굴절률이 주기적으로 변하는 연속적인 층을 만들어 센서를 제작한 것이다. Bragg 격자에 광대역 스펙트럼을 갖는 광원을 광섬유에 입사시키면 식(1)과 같이 브래그 조건(Bragg Condition)에 해당하는 파장의 빛은 보강간섭을 일으켜 브래그 격자를 통과하지 못하고 반사되며 다른 파장의 빛은 통과하게 된다. (Udd, 1995)

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

여기서, n_e 는 광섬유 격자의 유효 굴절률(Effective Refractive Index)이고 Λ 는 광섬유 코어에 새겨진 격자의 간격(Grating Period)이다. 격자에서 반사되는 브래그 파장(Bragg Wavelength)은 유효 굴절률과 격자 간격의 함수이다. 광섬유 격자에 온도나 변형률 등의 외란이 가해지면 이들 값이 변화하면서 브래그 파장도 함께 달라지게 된다. 변화된 브래그 파장의 천이를 정밀하게 측정한다면 광섬유 격자에 가해진 온도나 변형률 등의 물리량을 식(2)를 통하여 계산할 수 있다. 이것이 광섬유 브래그 격자가 센서로 사용될 수 있는 기본 원리이다.

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

여기서, α_f 는 광섬유의 열팽창 계수(Thermal Expansion Coefficient)이고 ξ_i 는 온도에 의한 광섬유의 굴절률 변화를 나타내는 열광학 계수(Thermo-optic Coefficient)이다. p_e 는 광탄성 상수(Photoelastic Constant)이다.

본 연구에서와 같이 주위 온도의 급격한 변화가 없고 센서들 간의 온도차가 없는 상태에서 구조물의 변형을 측정한다면 온도변화를 영으로 가정할 수 있다. 따라서 구조물의 변형률은 식(3)과 같이 브래그 반사 파장의 변화량만을 이용하여 산정할 수 있다

$$\epsilon = \frac{1}{1 - p_e} \cdot \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \quad (3)$$

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 변형률 측정이 가능하다. 본 연구에서 사

용된 FBG 센서의 측정시스템(IS-7000, FiberPro Co.)의 최대 측정주파수는 200 Hz이고 변형률 해상도는 $1\text{ pm}(\pm 1\ \mu\epsilon)$ 이다.

4. 현장시험 프로그램

현장시험 대상교량은 그림 2와 같이 경간이 60m이고 폭이 29.3m인 단경간 도로교이다. 대상교량은 CFFRP 스트럿이 4m 간격으로 바닥판의 캔틸레버부 하면에 보강된 형태이다. 본 연구에서는 앞서 언급한 바와 같이 CFFRP의 국부거동을 측정하기 위한 시스템으로 FBG 센서 시스템을 사용하였다. 광센서 중에서 빛의 파장변화를 이용하여 물리량을 측정하는 FBG 센서를 적용하여 주변 잡음 및 센서길이에 따른 신호문제 등을 해결하였다. 특히 하나의 광섬유 선에 다수의 센서를 배치할 수 있는 다중화 특성을 활용하여 실제 현장시험에서 문제를 일으키는 계측선의 수량을 최소화하였다. CFFRP 스트럿의 거동을 확인하기 위해서 그림 3과 같이 경간 중앙의 CFFRP 스트럿의 표면 상면(T1, T2, T3)과 하면(B1, B2, B3)에 3개의 FBG 센서를 다중화하여 스트럿

길이방향으로 설치하였으며 스트럿 중앙 단면에 원주방향으로 4개의 FBG 센서(FT, FB, FR, FL)를 다중화하여 설치하였다. 설치된 센서는 모두 반사율 90%(10dB)를 갖도록 제작되었다. FBG 센서의 설치는 그림 4(b)와 같이 CFFRP 스트럿의 표면에 에폭시를 이용하여 부착하였다.

현장시험에 사용된 차량은 토사를 만재한 15 ton급 덤프트럭으로 총중량은 276 kN(전륜 33.3 kN, 후륜 104.4 kN)이며 차량제원은 그림 5에 제시되어 있다. 이는 도로교설계기준의 DB-24 하중의 중량인 240 kN(전륜 24 kN, 후륜 96 kN)과 유사하다. 재하트럭의 주행은 6개의 왕복차선으로 구성된 대상교량에서 편도 1차선 및 3차선에서 주행하도록 하였다. 먼저 CFFRP 스트럿이 설치된 교량상판 캔틸레버에 직접적인 영향이 예상되는 3차선 연석부에 차량 속도를 시속 5 km부터 시속 80 km까지 증가시키며 등속 통과하였으며, 제동으로 인한 충격을 검토하기 위해 시속 40 km 등속 주행 후에 교량 경간 중앙에서 급정차 하도록 하였다. 또한 동일한 속도로 차량을 1차선 중앙부에서 주행하며 동일한 시험을 반복하였다. 표 2는 현장시험에서 실시된 총 12회의 하중 경우를 나타낸 것이다.

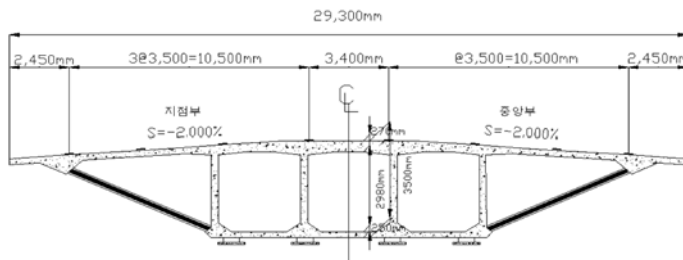


그림 2. 시험대상 교량 단면 및 시공후 모습.

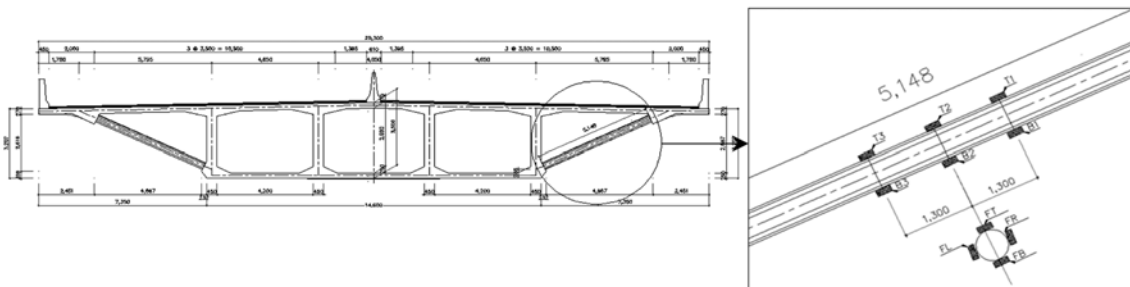
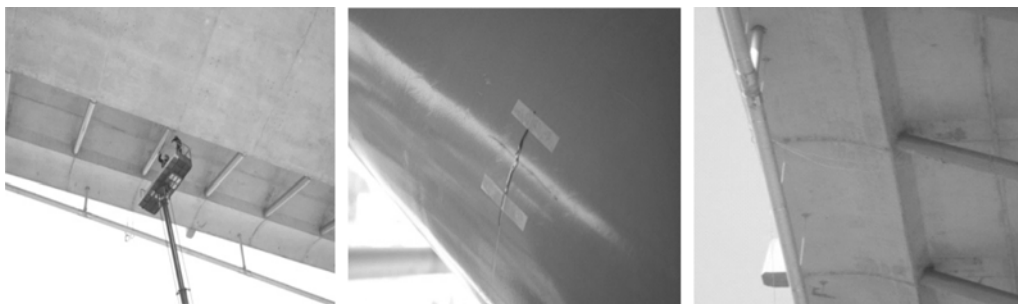


그림 3. FBG센서 배치도.



(a) FBG 센서 설치

(b) 원주방향 FBG 센서

(c) 다중화된 광섬유

그림 4. FBG 센서 설치 모습.

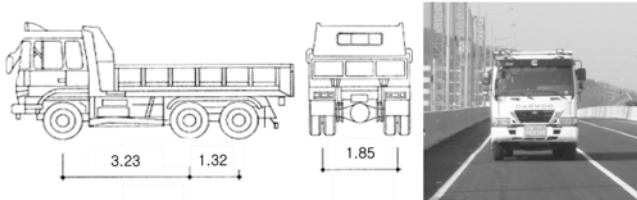


그림 5. 재하트럭.

표 2. 재하트럭 주행속도 및 주행 위치

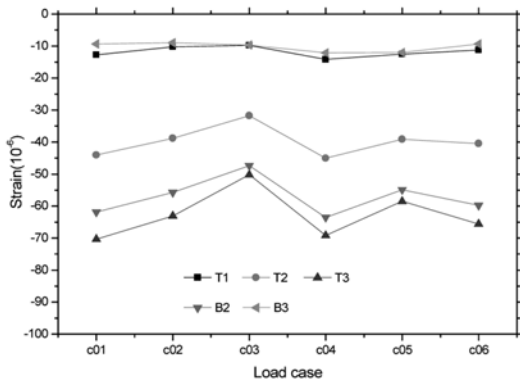
| 하중 경우 | 재하트럭 통과속도 | 주행차선 | 하중 경우 | 재하트럭 통과속도 | 주행차선 |
|----------|------------------|--------------|----------|------------------|--------------|
| 1 | 시속 5 km | 3차선 (연석부) | 7 | 시속 5 km | 1차선 (중앙부) |
| 2 | 시속 20 km | | 8 | 시속 20 km | |
| 3 | 시속 40 km | | 9 | 시속 40 km | |
| 4 | 시속 60 km | | 10 | 시속 60 km | |
| 5 | 시속 80 km | | 11 | 시속 80 km | |
| 6 | 시속 40 km 후 정지 | | 12 | 시속 40 km 후 정지 | |

5. 시험 결과

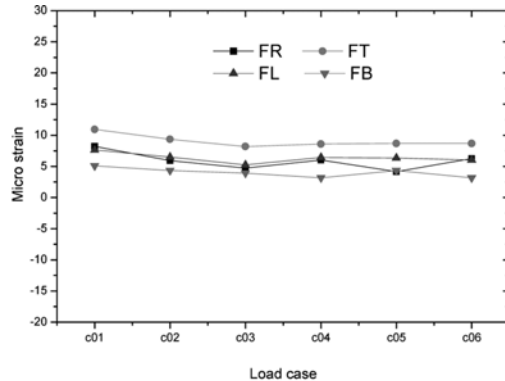
그림 6과 그림 7은 재하트럭이 각각의 하중경우에 따라 대 상 교량을 통과할 시에 획득한 시계열 변형률 응답에서 최대 값을 도시한 것이다. 재하트럭이 3차선(연석부)에 주행할 시

의 CFRP 스트럿의 최대 변형률 응답은 그림 6에 나타나 있다. 하중경우 1에서 하중경우 6까지 모든 통과하중에 대해서 CFRP 상면과 하면이 최대 $72 \mu\epsilon$ 의 압축 변형률을 나타 내고 있으며 원주방향으로는 인장 변형률을 나타내고 있다. 즉, CFRP 스트럿은 전체 압축상태에 존재함을 확인할 수 있다. 차량 속도에 따른 동적 증폭효과는 그림 6(a)와 같이 속도증가에 대해 일정한 경향을 나타내지 않았으며 그 효과 는 무시할 수 있을 것으로 판단된다. 그림 7은 재하트럭이 1 차선(중앙부)에 주행하는 경우의 CFRP 스트럿의 거동을 나 타낸다. 하중경우 7에서 하중 경우 12까지의 모든 하중경우 에 대해 CFRP 스트럿에 $+15 \mu\epsilon$ 에서 $-5 \mu\epsilon$ 이하의 종방향 변형률과 $+5 \mu\epsilon$ 에서 $-5 \mu\epsilon$ 이하의 원주방향 변형률이 측정되 어 노이즈 레벨의 응답을 획득하였다. 종방향 변형률은 재하 트럭이 중앙부를 통과할 때의 변형률과 비교하여 약 20% 수 준이며 원주방향 변형률은 약 40% 수준이다. 즉, 차량이 연 석부를 통과할 시에는 스트럿에 압축응력이 발생하나 중앙부 를 통과할 시에는 그 영향이 미미한 것으로 분석되었다. 따 라서 재하트럭의 횡방향 위치가 CFRP 스트럿 부재의 거동 에 민감한 변수임을 알 수 있다. 또한 하중경우 6과 하중경 우 12에서와 같이 차량의 급정차를 이용한 충격에 의한 스트 럿에서의 변형률 증폭은 발생하지 않는 것으로 분석되었다.

그림 8은 재하트럭이 시속 60km의 속도로 연석부를 통과 할 시에 FBG 센서에서 측정된 시계열 변형률 응답으로 주 변 지장물 및 전자기파 간섭에 의한 잡음이 발생하지 않고

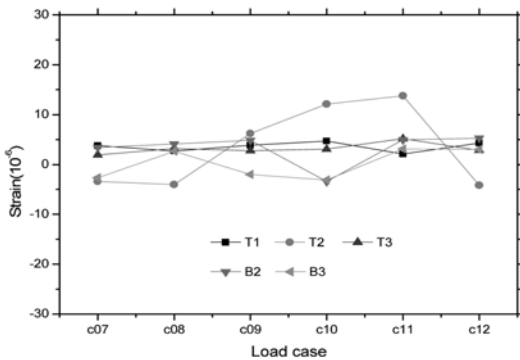


(a) 종방향 변형률

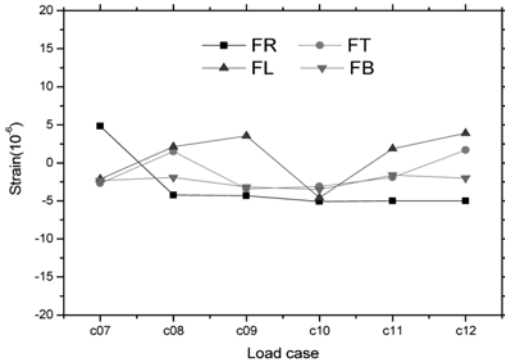


(b) 원주방향 변형률

그림 6. 3차선(연석부) 주행 시의 최대변형률.



(a) 종방향 변형률



(b) 원주방향 변형률

그림 7. 1차선(중앙부) 주행 시의 최대변형률.

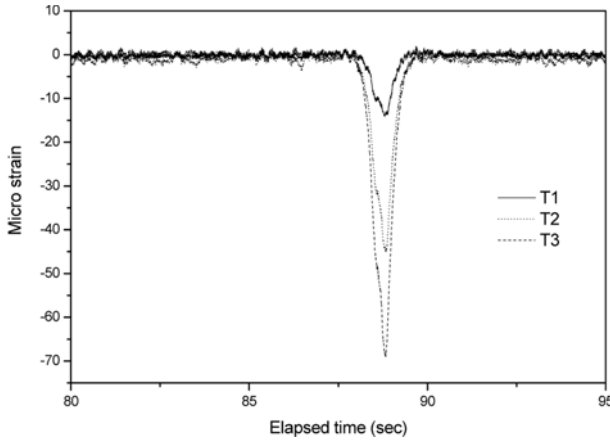


그림 8. 변형률 시간이력 응답 (시속 60 km 주행 시).

표 3. 하중재하 시간과 하중지속 시간과의 관계

| 하중경우 | 재하트럭 속도 | 하중재하시간 (T_L) | 하중지속시간 (T_m) | T_m/T_L |
|------|---------|------------------|------------------|-----------|
| 1 | 5 km/h | 43.5초 | 18초 | 0.41 |
| 2 | 20 km/h | 10.8초 | 5초 | 0.46 |
| 3 | 40 km/h | 5.4초 | 2.9초 | 0.54 |
| 4 | 60 km/h | 3.6초 | 1.9초 | 0.53 |
| 5 | 80 km/h | 2.7초 | 1.3초 | 0.48 |

우수한 신호를 획득하고 있음을 알 수 있다. 또한 그림 8에서의 변형률 시간이력 응답을 분석하면 약 1.9초 동안 FBG 센서에 신호가 측정되고 있음을 알 수 있다. 그러나 재하트럭이 교량을 시속 60 km로 등속 통과하였으므로 대상교량의 지간이 60 m임을 고려하면 재하트럭이 교량 상에 약 3.6초 동안 존재하여야 함을 산술적으로 계산할 수 있다. 여기서 재하트럭의 속도와 대상교량 경간 길이로부터 산술적으로 계산한 차량 통과시간을 “하중재하시간”으로 정의하고, FBG 센서의 시계열 변형률 응답에서 CFFRP 스트럿이 응력을 받았던 실제 시간을 “하중지속시간”으로 정의하면, 하중지속시간이 하중재하시간에 약 52% 수준임을 알 수 있다. 표 3은 재하트럭이 연석부를 주행 시에 각각의 하중경우 별로 하중재하시간과 실제 CFFRP 스트럿에서 측정된 하중지속시간을 비교한 것이다. 모든 경우에서 하중지속시간이 하중재하시간에 비해 41%에서 54% 정도임을 알 수 있다. 이러한 결과를 통해 CFFRP 스트럿이 전체 교량시스템에서 거동하기 보다는 횡방향으로 국부 거동에 의해 지배되고 있음을 유추할 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 CFFRP 스트럿으로 보강된 PSC 박스거더 교량시스템을 대상으로 FBG 센서를 다중화하여 CFFRP에 설치한 후 트럭하중을 이용하여 현장에서 증속시험을 실시하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 교량시스템의 CFFRP 스트럿은 통과하중의 횡방향 위치에 민감한 결과를 나타낸다. 재하트럭이 연석부로 주행 시에는 CFFRP 스트럿의 상부와 하부의 종방향 변형률이 최대 $70 \mu\epsilon$ 압축상태에 있었으며 원주방향 변형률은 인장상태에 존재하였다. 즉, 차량이 연석부 주행 시에는 CFFRP 스트럿 단면 전체가 압축상태에 있음을 의미한다. 반면, 차량이 중앙차선으로 주행 시에는 무시할 만큼 작은 노이즈 레벨의 변형률을 보였다. 따라서 CFFRP 스트럿은 통과차량의 횡방향 위치에 민감한 거동을 하고 있음을 알 수 있다.
- 2) 만재 트럭하중의 속도를 시속 20 km씩 증가시키며 시속 80km까지 시험을 실시한 결과, 차량 증속과 충격에 의한 CFFRP 스트럿 부재의 동적 증폭효과는 무시할 만큼 작은 것으로 분석되었다.
- 3) 교량 전체 시스템에 재하트럭 하중이 재하된 시간에 비해 실제 CFFRP 스트럿에 설치된 FBG 센서의 측정시간이 41%~54%인 것으로 측정되었다. 즉, CFFRP 스트럿은 교량 구조 전체의 거동에 지배되기 보다는 재하트럭이 위치에 따라 횡방향 국부거동에 의해 거동이 지배되고 있음을 알 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2009-0065990).

참고문헌

- 박종화, 김영민, 장인호 (2007) FRP피복 콘크리트 스트럿 부착 PSC 박스거더교의 실험 거동평가, *전산구조공학* 제20권 제1호.
- 신우섭(2008) 스트럿으로 지지된 PSC 박스거더 교량의 적응성에 관한 연구, 박사학위논문, 경희대학교.
- 송재준, 박종화, 박경훈, 조병완 (2008) FRP 스트럿을 가진 PSC 박스거더교의 구조안전성 평가를 위한 실험적 연구. *구조물진단학회지* 제12권 제6호, pp. 205-213.
- 강동훈, 정원석, 김현민, 여인호 (2007). 광섬유 센서를 이용한 경량전철 교량의 사용성 평가. *한국비파괴검사학회지*, 제27권, 제4호, pp. 305-312.
- Udd E. (1995) *Fiber optic smart structures*, John Wiley and Sons, New York, (1995)
- Davol A, Burgeno R, Sieble F (2001) Flexural Behavior of Circular Concrete Filled FRP Shells, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 127, No. 7, pp. 810-817.
- Son J, Fam A (2008) Finite Element Modeling of Hollow and Concrete-filled Fiber Composite Tubes in Flexure, *Engineering Structures*, Vol. 30, 2656-2666

- ◎ 논문접수일 : 09년 09월 01일
- ◎ 심사의뢰일 : 09년 09월 03일
- ◎ 심사완료일 : 09년 11월 17일