

철도교량 모니터링을 위한 FBG 센서의 적용

Application of FBG Sensors for Monitoring of Railroad Bridge

정원석 Wonseok Chung
경희대학교 토목공학과 교수

강동훈 Donghoon Kang
한국철도기술연구원 고속철도연구본부
첨단인프라연구단 선임연구원

1. 머리말

광섬유 센서는 빛의 다양한 성질을 이용하여 물리량을 측정하므로 기존 전기식 센서와는 달리 전자기파에 대한 면역성을 확보할 수 있는 큰 장점을 가지고 있다. 광섬유 센서 중에서 광섬유에 브래그 격자를 형성시키고 광폭 스펙트럼을 광섬유에 입사시켜 굴절률의 변화로 물리량을 측정하는 FBG(Fiber Bragg Grating) 센서에 대한 적용이 활발히 진행되고 있다. 이러한 FBG 센서의 주요 장점은 3가지로 구분할 수 있다. 첫 번째는 하나의 광섬유에 여러 개의 센서를 배치할 수 있는 다중화(multiplexing)가 가능하여 대규모 토목구조물의 계측에 활용이 우수하다는 점이다. 두 번째 장점은 센서의 직경이 매우 작아 기존구조물 내부로 매립이 용이하다는 점이다. 다수의 연구자들이 소형 콘크리트 시편을 대상으로 내부 변형을 측정을 기반으로 균열을 검지하는 연구를 수행한 바 있으나 대부분의 연구는 실험실에서 시편 단위로 이루어졌다. 마지막 세 번째 FBG 센서의 장점은 절대측정(absolute measurement)이 가능하다는 것이다. FBG 센서는 빛의 고유한 특성인 파장을 기반으로 물리량의 변화를 측정하므로 계측시스템에 센서를 연결한 후 보정(calibration) 과정을 거쳐야 하는 다른 센서와 달리 언제든 물리량 변화에 대한 절대값의 측정이 가능하다. 즉, 데이터의 획득이 필요할 시에만 계측기를 연결하여 측정할 수 있어 특히 장기계측에 매우 유리한 장점을 가진다. 본 고에서는 FBG 센서의 기본원리 및

관련제품에 대해 기술하고, 앞서 기술한 장점들을 기반으로 철도교량에 적용한 사례를 소개하고자 한다.

2. FBG 센서의 원리 및 기술현황

2.1 FBG 센서의 원리

FBG 센서를 이해하기 위해서는 먼저 브래그 격자에 대한 이해가 필요하다. 광섬유 브래그 격자는 게르마늄(Ge)이 첨가된 일반 통신용 광섬유에 강한 아르곤(Ar^+) 레이저 빛을 입사시킬 때 브래그 격자가 광섬유 내에 형성됨을 관찰함으로써 세상에 알려지게 되었다. 이후 현재 가장 많이 활용되는 위상마스크(phase mask)에 의한 브래그 격자 제작 방법이 개발되었다. 이 방법은 광섬유의 측면에 위치시킨 위상마스크에 248nm 근방 파장의 자외선 레이저를 조사해 형성된 간섭무늬를 통해 광섬유 코어에 주기적인 굴절률 변화를 형성하는 방법이다. 다른 제작 방법에 비해 비교적 간편하고 대량생산에 유리한 장점으로 현재 널리 사용되고 있다.

이러한 브래그 격자는 입사된 광폭 스펙트럼의 빛 중에서 브래그 조건에 의해 결정된 특정 파장 성분을 격자 부위에서 반사시키며 나머지 파장 성분을 통과시키게 된다. 이 때, 반사 파장은 온도와 변형률에 함수관계를 가지는데 이것이 브래그 격자를 이용한 FBG 센서의 기본 원리이다. 여기서, 브래그 조건이 각각 다른 여러 개의

브래그 격자를 하나의 광섬유로 연결할 경우 반사된 신호는 파장영역에서 각각 독립적인 여러 개의 피크 형상을 가지게 되는데 이것이 FBG 센서의 가장 큰 장점인 다중화의 기본 원리가 된다. 이러한 다중화 방법을 파장분할다중화(WDM)라 하며, 이 외에도 TDM, FDM, CDM 등 여러 기법을 통해 다중화가 가능하다. 또한, strain free 조건을 부여하면 반사 파장이 온도만의 함수가 되므로 이를 이용해 온도 센서 제작이 가능하며, 이 외에도 센서 헤드 부분에 변형을 줌으로써 변위나 가속도 등과 같은 다른 물리량도 측정이 가능하게 된다.

2.2 FBG 센서 기술현황

2.1절에서 기술한 바와 같이, 현재 FBG 센서는 주로 변형률, 온도, 변위, 가속도 등 여러 물리량의 측정에 사용되고 있다. 본 절에서는 세계적으로 널리 통용되고 있는 상용 FBG 센서의 종류와 성능에 대해 간략히 알아보려고 한다. 변형률 센서는 대략 1~1.5 $\mu\epsilon$ 의 해상도, $\pm 1,500 \sim \pm 2,500 \mu\epsilon$ 의 사용범위를 가지며, 적용 방법에 따라 본드나 에폭시에 의한 부착이나 용접 등에 적합하도록 <사진 1>과 같이 다양하게 패키징되어 판매되고 있다. 온도 센서는 대략 0.1~1 $^{\circ}\text{C}$ 의 해상

도, -60~300 $^{\circ}\text{C}$ 의 사용범위를 가지며, 패키징 형태는 대체로 금속 튜브 형태를 가진다. 제품에 따라 다중화가 불가능한 형태로 패키징 된 제품도 있으므로 주의가 필요하다. 변위 센서는 대략 0.03~0.05 mm의 해상도, 0~80 mm의 사용범위를 가지며 변위 측정을 위해 프로브 암이 노출되어 있는 형태를 가지므로 타 센서에 비해 상대적으로 큰 편이다. 가속도 센서는 대략 0.002~0.06 g의 해상도, 16~600 pm/g의 민감도, DC~300 Hz의 주파수 범위를 가진다. 일반적으로 캔틸레버와 매스 방식으로 1축 가속도계 형태로 제작되므로 다축 측정 시 여러 개를 동시에 활용해야 하며, 타 센서에 비해 상대적으로 가격이 비싼 편이다<사진 2>. 이 외에도 브래그 격자를 활용한 FBG 센서는 다양한 물리량의 측정이 가능하도록 계속 개발되고 있으며, 최근에는 MEMS, Nano 기술과의 접목도 시도되고 있어 향후에도 지속적인 발전이 기대된다.

3. 철도교량 적용 사례

3.1 자기부상열차 가이드웨이

최근 개발 중인 자기부상열차 가이드웨이는 열차에



사진 1. 다양한 형태의 변형률 센서



사진 2. 온도 센서, 변위 센서, 가속도센서

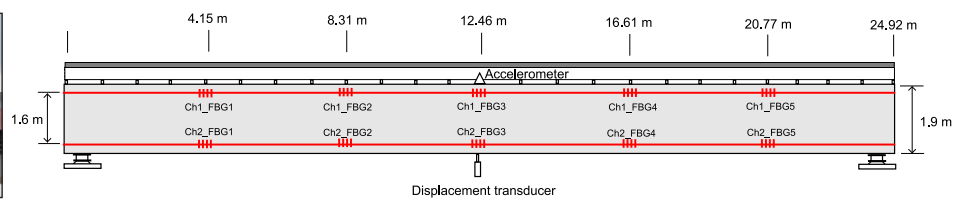


그림 1. FBG 센서의 자기부상열차 적용 사례

동력을 공급하기 위한 장치가 가이드 웨이의 측면에 설치되어 있으며, 열차 대차가 궤도의 부상레일을 감싸고 상호 전자기력을 이용하여 부상하므로 기존의 센서를 이용하여 모니터링을 실시하면 전자기파의 간섭을 받게 된다. 이러한 상황에서는 FBG 센서의 적용이 적절하므로 자기부상열차 시험선 가이드웨이에 다중화된 FBG 센서를 <그림 1>과 같이 설치하여 모니터링을 실시하였다.

<그림 2>와 같이 다중화된 위치에서 노이즈가 없는 깨끗한 변형을 응답을 측정할 수 있으며, 이로부터 유추한 변위값이 직접 변위계를 이용한 측정치와 유사함을 확인할 수 있다. 또한 동일 지점에서 FBG 센서를 이용하여 측정한 주파수 응답과 가속도계를 통해 얻은 주파수 응답은 <그림 3>과 같이 amplitude에는 차이가 있으나 주파수 성분은 일치하는 것으로 분석되었다¹⁾. 자기부상열차 뿐만 아니라 최근 개발되는 다양한 경전철 시스템은 열차에 동력을 공급하기 위한 전기장치가 구조물에 설치되는 제3궤조 방식이 대부분이다. 이러한 현대적인 철도교량의 궤도 및 부속구조물에는 고압의 동력장치가 설치되게 되므로 이러한 구조물의 모니터링 시에는 FBG 센서의 활용성과 효율성이 우수하다.

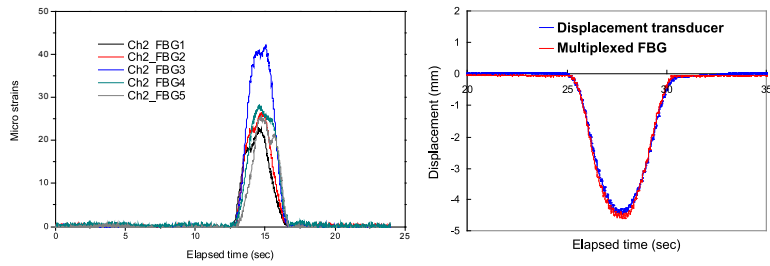


그림 2. 변형을 및 처짐 응답

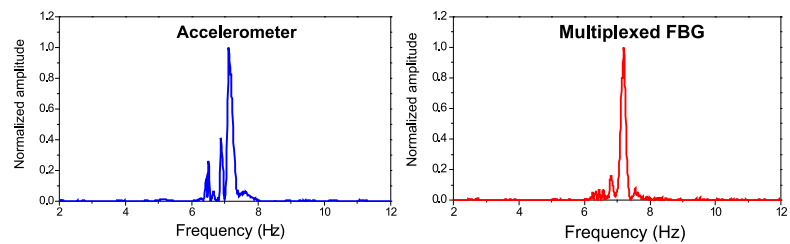


그림 3. 주파수 응답

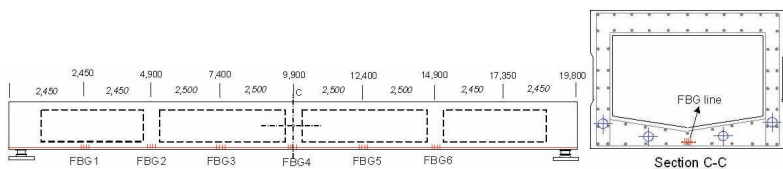


그림 4. FBG 센서 매립 철근의 설치 및 시험

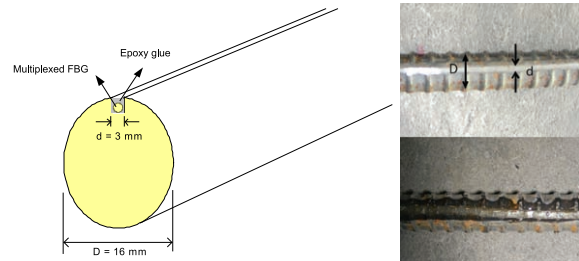


그림 5. 철근에 매립된 FBG 센서

3.2 센서 매립 철도교량용 PSC거더

FBG 센서는 머리카락과 비슷한 크기의 직경(125 μ m)으로 매립성이 우수하다. 철도교량용 실물거더 제작 시에 내부변형을 측정하기 위해서 거더의 제작단계에서 FBG 센서를 매립하여 하중재하시험을 실시하였다. 고려된 실물교량은 <그림 4>와 같이 지간이 20 m이고, 2,050 mm \times 1,400 mm의 박스 단면을 갖는 PSC 거더이다. FBG 센서는 포인트 센서(point sensor)이므로 재하시험 시 구조물의 거시적 거동을 정확히 측정하기에는 한계가 있다. 즉, 하중재하에 따른 균열 발생 시에 미세 균열이 발생한 부분의 센서는 균열로 인한 응력집중 효

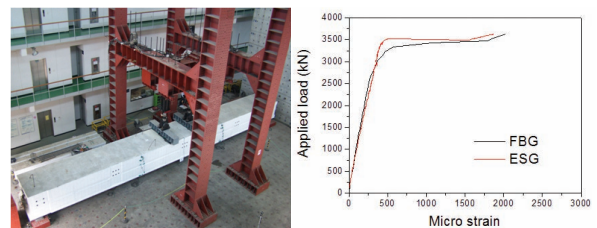
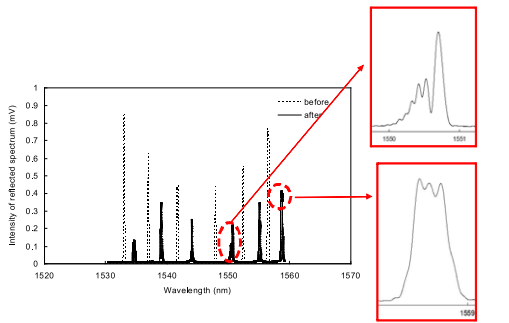


그림 6. 실험체 set-up 및 하중-변형을 측정결과

과 등으로 FBG 센서의 신호 특성에 영향을 미치게 되어 구조물의 거시적 거동이 아닌 콘크리트의 국부적인 거동에 대한 측정값을 전달하게 된다. 따라서 이러한 측정오류를 예방하기 위해 거더에 설치되는 20 m 종방향 철근에 6개의 FBG 센서를 다중화한 후 <그림 5>와 같이 에



- Birefringence: split peak signal in wavelength spectrum
 - Local transverse stress of the grating part which is induced by microcracking of the epoxy glue under the severe load condition

그림 7. 복굴절에 의한 FBG 센서의 파괴

폭시를 이용하여 매립 적용함으로써 구조물의 거동과 동일한 거시적 거동에 FBG 센서가 노출될 수 있도록 조치하였다. 이러한 철근은 보강재로서의 역할 뿐만 아니라 센서로서의 역할을 수행하게 된다.

앞서 준비된 거더의 성능평가를 위해서 대형구조실험동에서 <그림 6>과 같이 하중재하시험을 실시하였다. FBG 센서의 하중-변형률 측정결과는 철근표면에 부착한 전기식 센서와 유사한 측정치를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 즉, 철근으로의 매립과정, 콘크리트 타설에 따른 가혹한 조건, 최종 재하하중인 3,700 kN 하에서도 매립된 FBG 센서가 성능을 발휘하고 있음을 알 수 있다²⁾. 앞서 언급한 바와 같이 매립된 FBG 센서에서 발생하는 변형은 계측기에서 <그림 7>과 같은 파장변화로 나타난다. 이 때, 재하시험 전·후의 FBG 센서 신호 형상을 보면 4번째 센서와 6번째 센서에서 피크 갈라짐 현상, 즉 복굴절(birefringence)이 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 이는 하중 재하과정 중 FBG 센서 위에 도포된 에폭시에 발생한 미세균열 등에 의해 FBG 센서의 격자부분에 횡방향 응력이 작용한 때문으로 분석되며, 이러한 복굴절 효과를 감소시키기 위해서는 현재 10 mm인 격자부분의 크기를 줄이거나 격자부분을 패키징하여 횡방향 응력에 노출되지 않도록 하는 방법 등이 있다³⁾.

4. 맺음말

FBG 센서는 앞서 기술한 여러가지 장점으로 인해 활발히 기술개발이 진행되고 있으며, 철도분야의 적용사례도 점차 증가하고 있다. 또한, 광학기반으로 비교적 고가였던 센서 계측기의 가격이 보급 확대 등에 힘입어 최근 기존 전기식 센서 계측기 수준으로 저렴해져 향후 다양한

영역에서 많은 활용이 기대된다. 특히, 기존 전기식 센서의 적용이 어려운 환경에 FBG 센서가 장점이 극대화 된 형태로 적용된다면 구조물 모니터링 등과 같은 관련 분야에 상당한 파급 효과를 기대할 수 있을 것이다.

담당 편집위원 : 양근혁(경기대학교) yangkh@kyonggi.ac.kr

참고문헌

1. Kang, D. and Chung, W., "Integrated Monitoring Scheme for a Maglev Guideway Using Multiplexed FBG Sensor Arrays", NDT&E International, Vol. 42, No. 4, 2009, pp. 260 ~ 266.
2. Chung, W. and Kang, D., "A Full Scale Test of Precast Concrete Box Girder Using an FBG Sensing System", Engineering Structures, Vol. 30, No. 3, 2008, pp. 643 ~ 652.
3. Kang, D., Park, S., Hong, C. and Kim, C., "The Signal Characteristics of Reflected Spectra of Fiber Bragg Grating Sensors with Strain Gradients and Grating Lengths", NDT&E International, 2005, Vol. 38, No. 8, pp. 712 ~ 718.



정원석 교수는 Purdue University 토목공학과에서 콘크리트 비선형 해석에 관한 연구로 박사학위를 취득한 후 동 기관에서 박사후연구원 과정을 거쳐 2004년부터 4년간 한국철도기술연구원에서 선임연구원으로 근무하였으며, 2008년부터는 경희대학교 토목공학과 교수로 재직하고 있다. 주 관심 연구 분야는 FRP/콘크리트 하이브리드 구조, PSC 구조, 철도교량의 동적거동, 광섬유센서의 활용이며 우리학회 영문논문집 위원으로 활동하고 있다.
 wschung@khu.ac.kr



강동훈 박사는 한국과학기술원 기계공학과(항공우주공학전공)에서 FBG 센서의 복합재료 삽입적용에 관한 연구로 2004년 8월 박사학위를 취득한 후 동년 11월부터 현재까지 한국철도기술연구원에서 선임연구원으로 재직하고 있다. 주 관심 연구 분야는 철도시스템 건전성 모니터링을 위한 광센서 적용 및 비접촉 측정기술과 복합재료의 철도분야 적용이며 미국 광학회 정회원으로 활동하고 있다.
 dhkang@krri.re.kr