

# 광섬유 BRAGG GRATING SENSOR를 이용한 철근 콘크리트 보의 변형 측정

## Fiber Bragg Grating Strain Sensing in Reinforced Concrete Beams

김 지 상\*      이 상 배\*\*      김 남 식\*\*\*  
Kim, Jee-Sang      Lee, Sang Bae      Kim, Nam Sik

### ABSTRACT

Fiber Bragg Grating sensors currently attract a great deal of attentions, mainly due to their potentials in health monitoring for civil structures and composite materials. In this experimental study, the strains of reinforced concrete beams were measured to failure in order to verify the applicability of FBG(Fiber Bragg Grating) sensors. The FBG sensors were directly buried in concrete and attached to re-bars at the time of fabrication. In this experiment, the changes of strains in concrete and re-bars were successfully measured as the movement in wavelength of light signals. The FBG sensors may be a very effective tool to investigate the behavior inside of reinforced concrete structures.

### 1. 서 론

광섬유는 1960년대 초반 정보 통신 산업 분야에서 장거리 통신 및 데이터 전송을 위한 매체로 개발되어 급속도로 발전, 확산되어 왔으며, 광섬유의 센서 이용은 1970년대 후반 우주 항공산업 분야의 복합재료에 적용하면서 비롯되었다<sup>(1)</sup>. 광섬유 센서는 구조물 또는 재료에 발생하는 변형을, 응력, 온도 변화 등에 의하여 광섬유를 통과하는 빛의 위상, 강도, 파장 등의 성질이 변화하는 점을 이용하는 센서이다. 광섬유 센서류는 형상에 유연성이 많아 임의의 형태로 제작될 수 있으며, 소형, 경량이므로 적용되는 구조물에 영향을 거의 미치지 않고, 전자기 간섭을 받지 않아 기존의 센서류에 비하여 잡음의 영향을 받지 않는 신호를 얻을 수 있을 뿐만 아니라, 광섬유 자체가 센서의 역할과 데이터 전송 매체의 역할을 동시에 수행할 수 있는 등의 장점을 갖고 있어 최근 들어 국내외에서 광섬유 센서를 토목 구조물에 적용하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 교량 등 장대 구조물의 상시 건전도 모니터링 및 나아가서 스마트 구조물화에 광섬유 센서를 이용하려는 시도가 국내외 여러 연구진에 의하여 이루어지고 있다.<sup>(2), (3)</sup>

\* 정회원, 서경대학교 이공대학 토목공학과 교수

\*\* 정회원, 한국과학기술연구원 광기술연구센터 센터장

\*\*\* 정회원, 현대건설주식회사 기술연구소 책임연구원

본 연구에서는 현재 선진국에서 활발히 연구가 시작되고 있는 Fiber Bragg Grating 센서 시스템을 이용하여 정적 하중을 받는 철근 콘크리트 보의 변형을 측정하는 일련의 실험을 수행하여, 그 적용성을 확인하였다. 즉, 철근 콘크리트 보의 내부의 적절한 위치에 광섬유 센서를 매입하여 콘크리트 보 내부의 변형을 측정하여 매입형 센서로서 광섬유 센서의 적용성을 확인하였으며, 철근에 광섬유 센서를 직접 부착하여 파괴 시까지 철근의 변형을 측정하고 콘크리트 내부에서 광섬유 센서가 작용하는 상태를 점검하여 그 안정성을 확인하였다.

## 2. FBG 센서의 적용성 실험

### 2.1 FBG 센서 시스템의 측정 원리

본 연구에 사용된 센서 장치는 서로 다른 반사 파장을 갖는 광섬유 브래그 격자 4개를 직렬로 연결한 다중점 센서로서 광섬유 격자 센서 시스템의 성능을 좌우하는 복조기는 안정성과 다중화의 장점을 가진 협대역 투과필터(tunable narrow bandpass filter)를 사용하였는데 그림 1은 사용된 FBG 센서 시스템의 개요도이다.

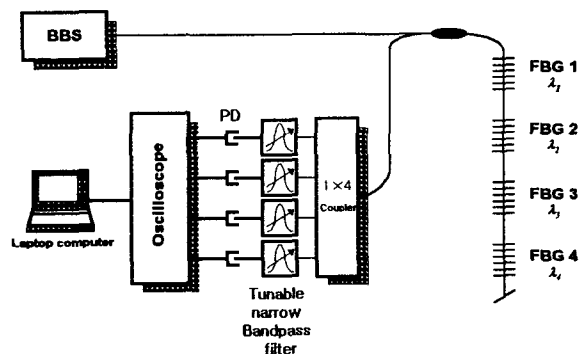


그림.1 FBG 센서 시스템의 개요도

EDFA(Erbium-doped Fiber Amplifier)를 사용한 광대역 광원(BBS)에서 나오는 빛은 콘크리트 구조물 내의 Bragg grating에서 철근 및 콘크리트의 재료 특성에 적합하게 이미 특정파장에 응답하도록 제작된 grating에 맞는 파장의 빛만이 반사된다. 외부에서 가해진 진동이나 압력 등에 의해 Bragg grating의 반사 파장이 변하게 되고 이는 복조 필터에 의해 광세기 변화로 나타나며, 이를 정밀하게 측정함으로써 하중 또는 온도 등 외부로부터 가해진 자극량에 의한 구조물 또는 재료의 응답을 산출해 낼 수 있다.

### 2.2 시편의 제작 및 실험

본 실험에서 제작된 시편은 200mm×300mm×2200mm 의 철근 콘크리트 보로 콘크리트의 설계 기준 강도는 240 Kg/cm<sup>2</sup>로 하였으며, 3개의 D16(SD40) 철근을 유효 길이 250mm 위치에 사용하여 공칭 휨강도가 5.26 ton-m가 되도록 제작하였다. 이 때 3개의 철근 중 가운데 철근에 FBG 센서 및 전기저항식 스트레인 게이지를 동시에 부착하여 FBG 센서의 적용성을 기존의 계측 방법과 비교할 수 있게 하였는데, 철근에 부착된 FBG 센서를 보호하기 위하여 철근에 0.5mm 정도의 홈을 파고 그 속에 광섬유를 넣고, 방수용 에폭시를 이용하여 홈을 매우는 방식으로 철근과의 부착을 이루었다. 콘크리트에 설치된 FBG 센서는 시편 상단으로부터 30mm 깊이의 위치에 길이 방향으로 4개를 설치하고

(좌측 지점으로부터 625mm, 1125mm, 1375mm 및 1875mm), 같은 위치에 70mm 및 250mm 깊이 되는 지점에 동일한 FBG 센서를 설치하여 모두 12개를 콘크리트 보 내부에 설치하였다. 센서의 설치는 콘크리트 타설 및 다짐에 따른 FBG 센서의 파손을 방지하기 위하여 적절한 장치를 사용하여 공간을 확보하는 방안을 사용하였다. 또, 하중 재하 시험을 실시하기 전에 콘크리트의 상면 및 하면, 그리고 철근에 FBG 센서와 같은 위치에 전기 저항식 스트레인 게이지를 부착하여 두 결과를 비교하였다. 그림 2는 시편의 형상과 FBG 센서 및 전기 저항식 스트레인 게이지의 부착 위치를 나타낸 것이다. 또한, 시편을 제작할 때 2개의 thermocouple을 콘크리트 보 내부에 설치하여 양생 중의 콘크리트의 온도 상승에 따른 FBG 센서 신호의 오차를 보정하도록 하였으며, 10cm×20cm의 실린더 시편을 만들 때 내부에 FBG 센서 및 thermocouple을 매입하여 FBG 센서의 온도 측정 성능을 평가하고 향후 다중센서로의 가능성을 확인하기 위하여 온도 변화 및 변형을 함께 측정하였다.<sup>(4)</sup>

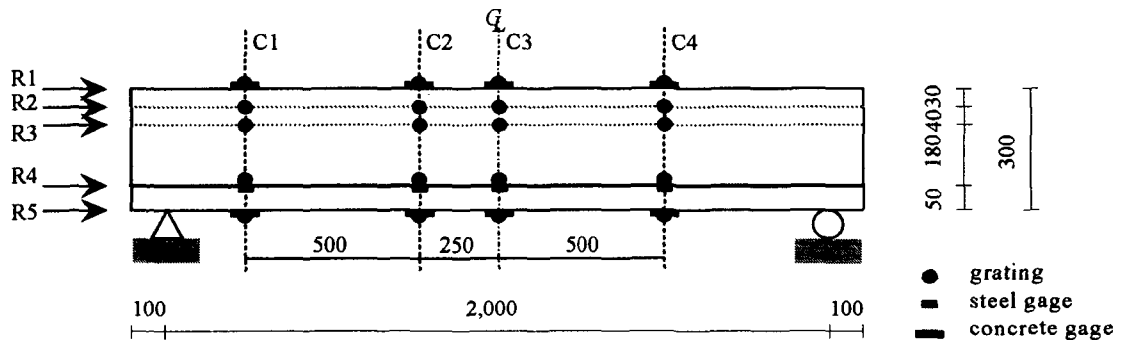


그림 2 센서 부착 위치

실험은 단순 지지된 보의 중앙점에 재하 하는 형식으로 수행하였는데, FBG 센서의 선형성을 관찰하기 위하여 초기에 계산으로 구한 균열모멘트(20kN)까지의 하중을 반복적으로 2회 가한 후 하중을 10 kN 씩 증가시키면서 파괴될 때까지의 거동을 관찰하였다. 그림 3은 전체 실험 장치와 파괴 시의 시편을 보이고 있다.



(a) 실험장치 전경



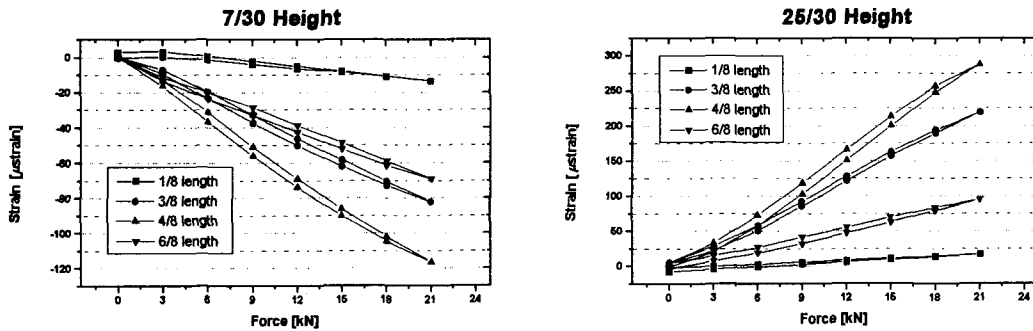
(b) 파괴 시의 시편

그림 3. 전체 실험장치 및 파괴 시의 시편

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 반복 하중 재하시의 FBG 센서의 응답

구조물의 계측에 사용되는 측정 센서에 있어 응답의 선형성은 매우 중요한 문제가 되므로 FBG 센서 응답의 선형성을 확인하기 위하여 탄성영역 내에서 반복하중을 재하하고 그 히스테리시스를 관찰하였다. 그림 4에서 알 수 있듯이 본 실험에 사용된 FBG 센서는 약간의 히스테리시스를 보였으나, 이는 지점부의 마찰에 의한 변위 등에 따른 영향으로 판단되며, 전기저항식 스트레인 게이지와 비교하여 큰 차이를 보이지 않았다. 따라서, FBG 센서의 선형성을 확인할 수 있었다.



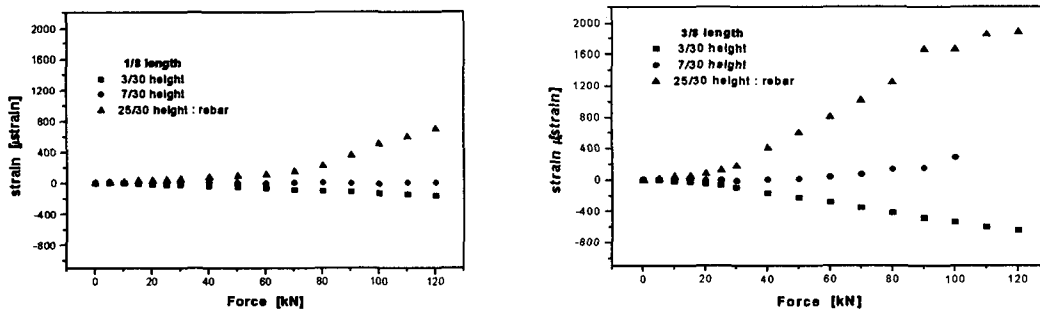
(a) R3 위치에서의 변형률

(b) R4 위치에서의 변형률

그림 4. R3 및 R4 위치에서의 광섬유 격자 신호의 히스테리시스

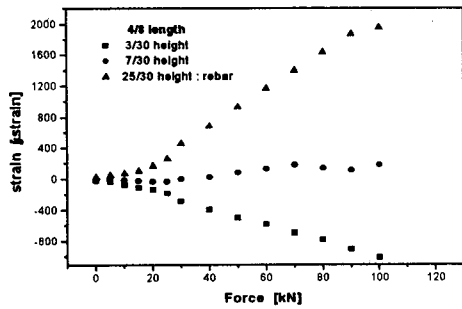
#### 3.2 증가 하중 재하시의 FBG 센서의 응답

반복하중 재하 후 10kN 씩 하중을 증가시켜가면서 보가 파괴될 때까지 하중을 재하하고 FBG 센서의 응답을 관찰하였다. 그림 5는 FBG 센서가 설치된 보의 각 점( 좌로부터 0.125L, 0.375L, 0.5L 및 0.75 L)에서 보의 단면 내(3/30h, 7/30 및 25/30h)의 변형률 변화를 나타낸 것으로 단면 내의 높이 변화에 따라 압축 측인 3/30h 위치에서는 압축 변형에 따른 신호를, 철근의 위치인 25/30h 위치에서는 인장변형에 따른 신호를 각각 보여주고 있으며, 중립축의 위치로 계산된 7/30h에서의 변형률은 거의 0에 가까운 값을 보인다. 보가 파괴된 하중인 120 kN에서 철근은 보의 중앙부 근처에서 2000 μ strain의 변형률을, 콘크리트는 3/30h 위치에서 1,050 μ strain의 변형률을 각각 보였다.

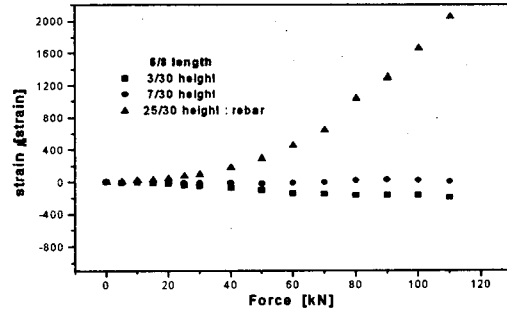


(a) 0.125L 지점의 변형률

(b) 0.375L 지점의 변형률



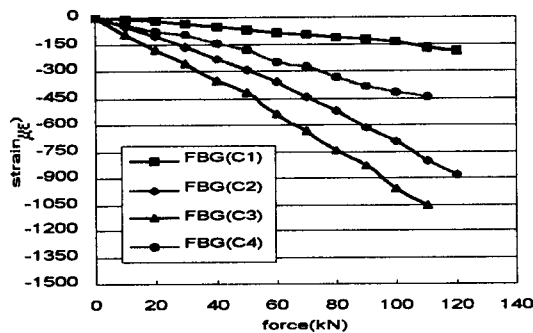
(c) 0.5L 지점의 변형률



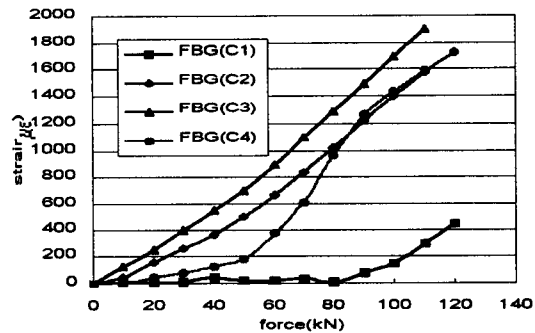
(d) 0.75L 지점의 변형률

그림 5. 보의 위치에 따른 보 단면 내의 변형률

또, 그림 6은 같은 높이에 있는 FBG 센서로부터 얻은 변형률을 보의 종방향 위치에 따라 정리하여 각 위치별 변형률의 추이를 알 수 있도록 한 것이다. 그림 6에서 알 수 있듯이 콘크리트의 압축변형률은 휨모멘트의 크기가 가장 큰 중앙점(C3)에서 가장 컸으며, 지점에 가까워질수록 모멘트의 감소에 따라 감소하였고, 철근의 변형률 또한 중앙점(C3)에서 가장 큰 값을 보였는데, 이 값들은 계산에 의한 예측과 거의 일치하였다.



(a) 콘크리트의 압축변형률(3/30h)



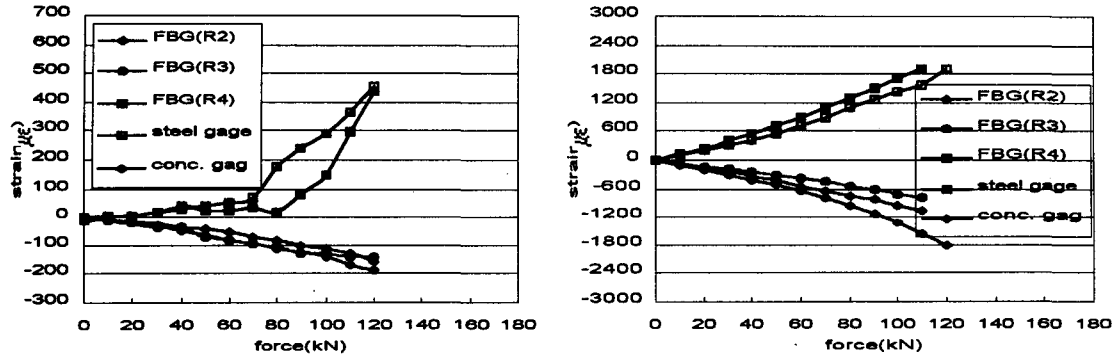
(b) 철근의 인장변형률(25/30h)

그림 6. FBG 센서를 이용하여 계측한 콘크리트 및 철근의 변형률

### 3.3 FBG 센서와 전기저항식 스트레인 게이지의 비교

본 연구의 주목적인 FBG 센서의 적용성을 평가하기 위하여 사용된 FBG 센서와 기존의 전기저항식 스트레인 게이지의 계측 결과를 비교하여 FBG 센서의 신뢰성을 확인하였다. 그림 7은 콘크리트의 압축연단에 부착된 콘크리트 게이지, 철근에 부착된 철근 게이지 및 보의 높이에 따라 4곳에 설치된 FBG 센서로부터 얻은 결과를 각각 0.125L 및 0.5L의 위치에서 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이

FBG 센서와 기존의 전기저항식 스트레인 게이지는 매우 유사한 결과를 보여주고 있어 FBG 센서의 활용성을 확인할 수 있었다.



(a) 0.125L 위치에서의 변형률

(b) 0.5L 위치에서의 변형률

그림 7. FBG 센서와 전기저항식 게이지의 계측 결과 비교

#### 4. 결론

본 연구에서는 광섬유 센서의 하나인 FBG(Fiber Bragg Grating) 센서를 이용하여 철근 콘크리트 보에 있어서 콘크리트 내부 및 철근의 변형을 측정하고 그 결과를 분석하여 콘크리트 구조물에 대한 FBG 센서의 적용성을 평가하였다.

실험결과 본 연구에 적용된  $5\mu$ strain 정도의 해상도를 갖는 FBG 센서를 이용하여 철근 콘크리트 보의 내부에서 콘크리트의 변형을 기존의 방법과 유사한 정도로 신뢰성을 갖고 계측할 수 있음을 확인하였다. 특히, 콘크리트 내부에 FBG 센서를 설치하여 보 단면 내의 변형 등의 물리량을 측정하는데 매우 유용함을 확인하였으며, 본 연구에 사용된 FBG 센서의 제작 방법에 대한 신뢰도 및 사용성을 확인할 수 있었다. 또한, 향후 지속적인 연구를 통하여 FBG 센서의 실용성 및 경제성을 확보하는 경우 더욱 활발한 적용이 가능할 것으로 기대된다.

#### 참 고 문 헌

1. Farhad Ansari, "State-of-the-art in the Applications of Fiber-optic Sensors to Cementitious Composites," Cement & Concrete Composites, Volume 19, No. 1, 1997.
2. Nam-Sik Kim, Nam-So Cho, Sang-Bae Lee and Sang-Sam Choi, "Multi-point Measurement of the Concrete Specimen Using Fiber Bragg Grating Sensors," SEM IX International Congress & Exposition on Experimental mechanics, Orlando, Florida, 2000.
3. 김기수, 이호준, 김종우, "광섬유 센서를 이용한 유지관리 모니터링 기술," 콘크리트학회지, 제12권 3호, 2000.5.
4. 김지상, 이상배, 김남식, "광섬유 GRATING SENSOR를 이용한 초기재령 콘크리트의 변형 측정," 한국콘크리트학회 2000년도 가을학술발표회 논문집(II), 제12권 2호, 2000.