

광섬유 센서를 이용한 복합 섬유 재료로 보강된 철근 콘크리트 보의 모니터링

Monitoring of Retrofitted Reinforced Concrete Beams with Hybrid Fiber Reinforced Polymer

이 옥 기* 신 영 수** 김 기 수*** 김 종 우****
Lee, Ok Ki Shin, Yeong Soo Kim, Ki Su Kim, Jong Woo

ABSTRACT

The Fibre-optic Bragg grating (FBG) sensor is broadly accepted as a structural health monitoring device for Fibre reinforced plastic (FRP) materials by either embedding into or bonding onto the structures. The accuracy of the strain measured by using the FBG sensor is highly dependent on the bonding characteristics among the bare optical fibre, protective coating, adhesive layer and host material. In general, the signal extracted from the embedded FBG sensor should reflect the straining condition of the host structure. This paper presents a theoretical model to evaluate the differential strains between the bare fibre and host material with different adhesive thickness and modulus of the protective coating of the embedded FBG sensor.

1. 서론

토목 및 건축 구조물은 시공 후 안전 점검, 보수 보강 등의 적절한 유지 관리는 구조물의 사용성을 최적의 상태로 유지하고 수명을 연장시키는데 있어 매우 중요하다. 일반적인 구조물은 구조적 문제가 발생하였을 경우 콘크리트 면에 나타나는 균열이나 변형 등을 통해 문제점을 사전에 감지 할 수 있다. 그러나 외부 접착식 공법으로 보강된 구조체의 경우에는 표면이 싸여있기 때문에 균열 등의 외형상 발생하는 현상을 파악하기 어려운 점이 많다. 따라서 보강 후 구조체의 거동을 파악하고 적절한 유지 관리를 하기 위해서는 구조물을 상시 모니터링하여 초기에 기대했던 효과를 발현하지 못할 경우 적절한 조치를 취할 수 있도록 하여야 한다.

보강 후의 거동의 계측에 있어서 전기 저항식 계측 장비류를 사용하고 있는데 실험실에서의 안정성과 광범위한 시장성은 확보되었으나, 실제 구조물의 거동을 계속적으로 모니터링 하기 위해서는 내구성과 장기적인 안정성 그리고 작업성 등에서 적지 않은 문제점을 갖고 있다고 평가되었다. 선진국에서는 1980년대부터 광섬유를 이용한 계측 기술에 대한 연구를 활발히 진행하여 왔는데, 현재의 전기 저항식 계측 시스템을 보완 또는 대체 가능하다는 전망을 내놓고 있다. 즉, 기존의 계측 기술에 비해, 장기적인 안정성이 탁월하고, 전자기적인 영향을 받지 않아 노이즈의 문제가 없으며, 경량이어서 설치가 쉽

* 정회원, 이화여자대학교 건축학과 석사과정
** 정회원, 이화여자대학교 건축학과 교수
*** 정회원, 호서대학교 벤처전문대학원 교수
**** 정회원, (주) 아이세스 개발팀장

고, 가격이 저렴하다는 장점을 지니고 있으며, 다중 측정 및 네트워크가 가능하여 대상 구조의 전체적인 거동 파악이 용이한 것으로 평가하고 있다.

본 연구에서는 광섬유 센서를 이용한 유지 관리 시스템에 대한 기초 자료로서, 광섬유 센서의 적용성을 위해 축소보 실험과 구조체 레벨에서의 실험을 통해 광섬유 센서를 통한 모니터링을 통하여 가능성을 파악한 후 철근 콘크리트 휨 부재에 대해 적용하여 광섬유 센서를 이용한 보강된 휨재에 대한 적용성을 평가하고자 한다. 이를 위해 먼저 광섬유 센서에 대해 파악하고 광섬유 센서를 축소보, 철근 콘크리트 보에 적용하는 순서로 전기식 게이지와 광섬유 센서 계측 결과를 비교하는 방법으로 연구를 진행하고자 한다.

2. 광섬유 센서의 적용 원리

변형률을 측정하는 대표적인 광섬유 센서에는 Fiber Bragg Grating(이하 FBG)센서와 Fabry-Perot 센서가 있다. Fabry-Perot 센서는 수작업을 거쳐야 하므로 대량생산이 불가능하고, 정밀도는 높지만 가격이 비싸고 외부 환경에 민감하다. 이에 반해 FBG센서는 대량생산이 가능하므로 가격이 저렴하고 Fabry-Perot와 비교하여 외부 환경에 덜 민감하여 구조물 계측용 센서로 많이 쓰이고 있다. 따라서 본 연구에서는 구조물 계측에 적합한 FBG 센서를 사용하였다.

2.1 Fiber Bragg Grating 센서의 스트레인 측정 원리

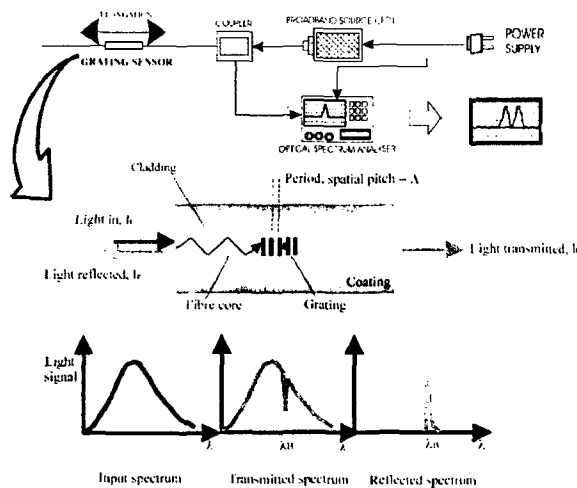


그림 1 FBG 흐름도

FBG는 Ge가 첨가된 광섬유 코아에 자외선 영역의 레이저를 주기적으로 조사함으로써 굴절률 변화를 유도하여 grating의 주기에 의해 결정되는 특정 파장의 빛을 반사시키는 광섬유 격자 소자이다. 그림 1은 FBG 센서의 구조를 나타낸 것이다. 빛이 입사되었을 때 Bragg 조건식에 만족하는 파장 성분이 광섬유 grating에서 반사되며 나머지 성분은 그대로 통과하여 광 스펙트럼 분석기에 나타나게 된다.

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

n : 유효 굴절률, Λ : grating period

grating에서 반사되는 Bragg 파장은 유효 굴절률과 grating 간격의 함수이며 FBG에 온도나 압력 등의 외부 물리량이 가해질 경우 Bragg 파장이 달라진다. 그러므로 Bragg 파장의 변화를

측정하여 가해진 물리량을 구할 수 있는 것이다. 스트레인 변화에 대한 Bragg 중심 파장의 변화는 아래 식과 같다.

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - P_e)\epsilon \quad (2)$$

P_e : 광탄성 상수, ϵ : 광섬유 grating에 가해진 스트레인

3. 광섬유 센서의 적용성 검토

3.1 축소보 실험

3.1.1 실험 개요



그림 2 CC-OA

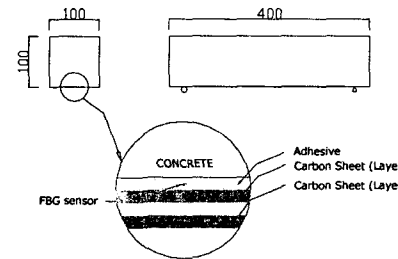


그림 3 CC-OE

축소보 실험을 통하여 광섬유 센서에 의한 변형률과 전자식 게이지에 의한 변형률의 상관성을 파악하기 위해 같은 위치에 두 게이지를 모두 설치하였다. 광섬유 센서 부착 방법에 따른 변화를 파악하기 위해 광섬유 센서를 보강면에 매립하는 방법과 그림을 이용한 방법 2가지로 실험체에 부착하여 각각 전자식 게이지와의 상관성을 파악하고자 하였다.

실험체는 콘크리트 재료로 단면 사이즈 10cm×10cm에 길이 40cm의 축소보이며, 각각 탄소 섬유 2장으로 보강하였고 보 중앙을 가력하여 3점 재하를 실시하였다.

CC-OA는 그림 2와 같이 콘크리트 옆면과 측면에 게이지 길이 6cm의 광섬유 게이지를 그림 약세서리를 이용하여 표면에 닿지 않도록 부착하였다. 또 같은 위치의 전자식 게이지를 매설하여 광섬유 계측 값과 비교 할 수 있도록 하였다. CC-OE는 그림 3

과 같이 탄소섬유와 콘크리트 사이에 광섬유 센서를 매설하였고 각 층마다 전자식 게이지를 매설하였다. 광섬유 센서는 센서를 보호하기 위해 매우 얇은 강관에 광섬유 센서를 삽입하여 매설하였다.

표 1 축소보 실험체

구분	시험체치수 (cm)	보강매수	보강재	실험 변수
CC-OA	10×10×40	2	탄소섬유	광섬유 센서를 약세사리를 이용하여 측면과 밀면에 부착
CC-OE	10×10×40	2	탄소섬유	광섬유 센서를 콘크리트와 슈트 사이에 매설

3.1.2 실험 결과

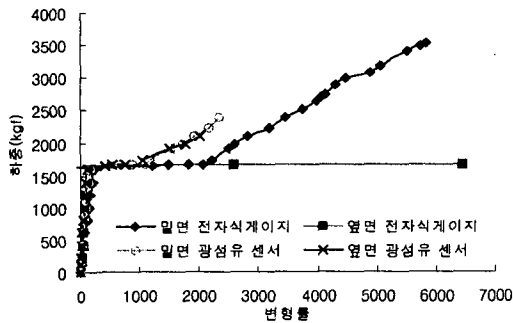


그림 4 CC-OA

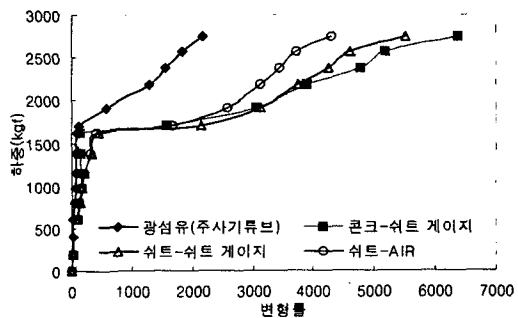


그림 5 CC-OE

CC-OA는 광섬유에 의한 변형률값과 전자식 게이지의 변형률이 일정한 약 1.5tf까지는 비슷한 경향을 보이다가 2tf이후부터는 약간씩 차이를 보이나 밀면 게이지는 유사한 변형률을 나타낸다.

CC-OE도 역시 1.6tf까지는 광섬유 센서에 의한 변형률과 전자식 게이지에 의한 변형률이 일정한 경향을 보이다가 2tf이후부터 차이를 보이다가 파괴에 가까워지기 시작하면서는 차이를 보인다.

두 실험 결과 모두 광섬유에 의한 게이지 값이 동일 하중에 대해 다소 차이는 있으나 전자식 게이지와 유사한 경향을 보이므로 모니터링에 적용 가능하므로 섬유재료로 보강된 철근콘크리트 보에서 적용 가능성을 평가하고자 한다.

3.2 섬유 보강된 철근 콘크리트 보 실험

3.2.1 실험 개요

시험체는 단면치수 15cm×25cm, 철근량은 최대 철근비($\rho_{max} = 0.75\rho_b = 0.01466$)을 기준으로 압축철근 2-D10, 인장철근 2-D13, 길이 2.4m, 순 지간길이 2.1m인 장방향 복근보이며 전단파괴를 방지하기 위하여 전단보장은 D10 철근을 10cm 간격으로 하였으며 재하점과 지지점의 간격(80cm)이 a/d가 4 이상이 되도록 하여 4점 재하 하였다.

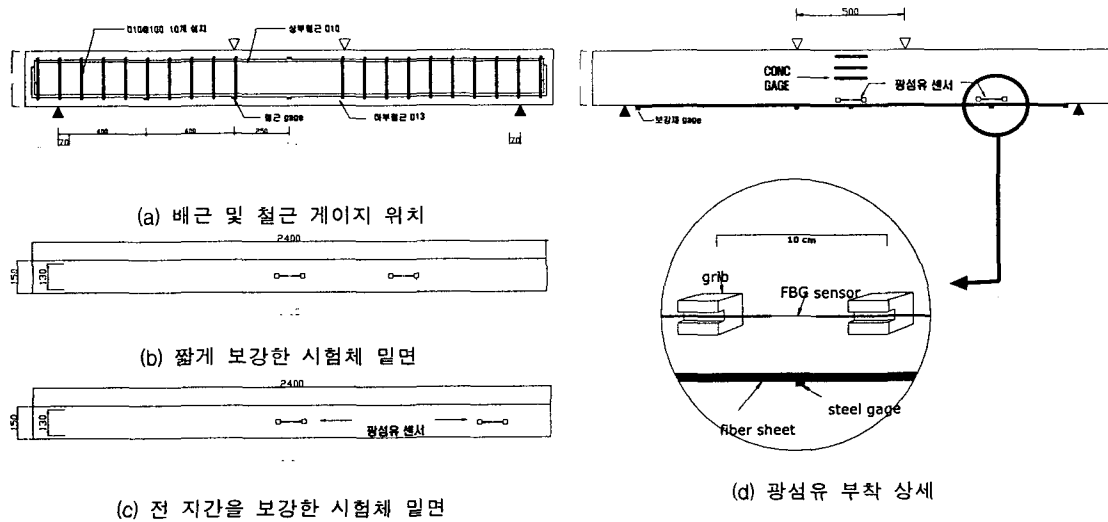


그림 5 실험체 형상 및 보강 상세

각각의 시험체는 탄소 섬유와 유리섬유를 2장씩 혹은 각 1장씩 조합하여 보강하였다. 광섬유 센서 부착 방법은 앞에서 축소보 시험체 CC-OA와 같이 약세서리를 이용하여 표면에 닿지 않게 인장 철근 위치에 부착되었으며 게이지 길이는 10cm로 하였다. 시험체 형상 및 보강 상세는 그림 5와 같고 보강한 시험체에 대한 내용은 표2와 같다.

표 2 복합 섬유 보강 시험체 개요

구분	시험체치수 (cm)	배근			보강 매수	실험 변수
		인장 철근	압축 철근	스터럽		
CCLS-O	15×25×240	2-D13	2-D10	D10@100	2	보강재 길이변화
GGLS-O	15×25×240	2-D13	2-D10	D10@100	2	보강재 길이변화
CC-O	15×25×240	2-D13	2-D10	D10@100	2	보강재조합
GG-O	15×25×240	2-D13	2-D10	D10@100	2	보강재조합
CG-O	15×25×240	2-D13	2-D10	D10@100	2	보강재조합
GC-O	15×25×240	2-D13	2-D10	D10@100	2	보강재조합

3.2.2 실험 결과

(1) 보강재 길이 변화에 따른 적용성 검토

CCLS-O의 경우 하중이 1t때까지는 같은 경향을 보이다가 보강재의 변형률이 2t부터 급작스럽게 늘어나면서 차이를 보이기 시작하였다. 이 경우 내부 철근에 매설되어 있는 게이지 측정값과는 거의 유사한 경향을 보이며 보강재의 단부 탈락(peeling)시 변형률을 상태가 감소되는 현상이 나타나 광섬유 센서로 단부 탈락 예측이 가능해진다. GGLS-O의 경우는 2t까지 광섬유 센서가 변형률을 표시하지 않다가 2t 이후에 변형률이 증가하기 시작하였다. 이 실험체의 경우 게이지가 설치되어있는 위치에 균열이 발생하면서 변화하기 시작하였다. 그러나 전체적인 경향성은 유사한 것으로 나타내고 있다. 이상에서 보강길이에 따른 단부 탈락 현상 등을 모니터링 할 수 있다.

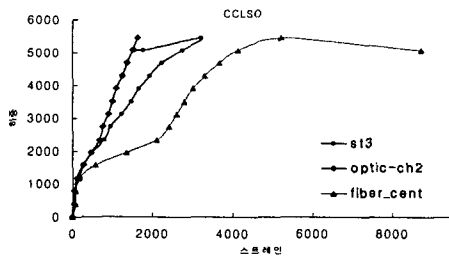


그림 6 CCLS-O

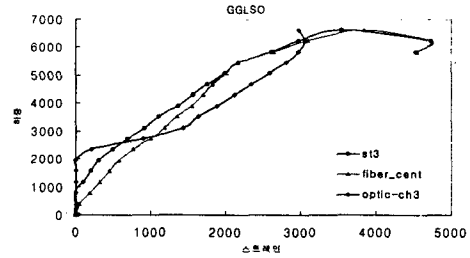


그림 7 GGLS-O

(2) 섬유 종류에 따른 적용성 검토

GGO는 2t에서 값이 차이가 나기 시작했지만 파괴에 이르기까지 거의 유사한 경향을 보였다. CCO는 3t까지는 유사한 거동을 보이다가 그 이후부터 차이가 나기 시작하였으며 이 이후에 광섬유 센서에 의한 변형률은 측정 결과 섬유 종류와 무관하게 적용될 수 있다.

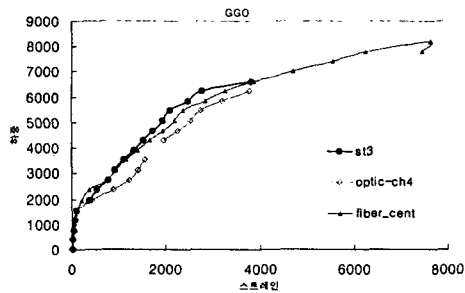


그림 8 GGO

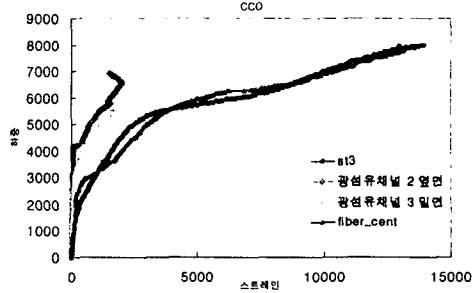


그림 9 CCO

(3) 섬유재료 조합에 따른 적용성 검토

CGO는 역시 2t까지는 게이지 값이 모두 유사한 값을 보이다가 이후부터 약간씩 차이가 나기 시작하다가 4t에서부터 광섬유에 의한 측정값이 변화를 보이지 않았다. GCO는 3t까지 거의 유사한 값을 보이다가 약간 차이가 나지만 5t까지 그 차는 근소하며 두 센서에 의한 값이 가장 근사한 것으로 측정되었다.

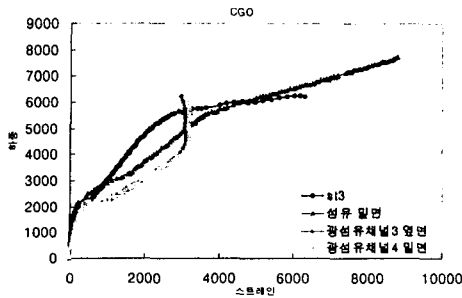


그림 10 CGO

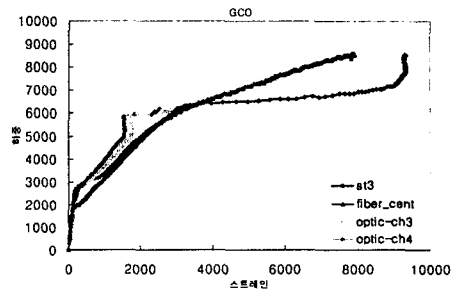


그림 11 GCO

3.2.2 실험 결과 분석

섬유 측면에 광섬유 게이지를 붙일 경우의 측정 데이터 값은 초기 하중까지는 거의 같은 값을 보이다가 균열이 발생하기 시작하면서 차이를 보이는 경우가 많았다. 그 위치 또한 중앙부의 경우에는 균열이 가장 먼저 발생하고 스트레인 값이 크기 때문에 게이지가 파괴에 이르기 전에 끊어지는 경우가 많았다. 비교적 낮은 하중에서 파괴가 발생한 CCLS-O와 GGLS-O의 경우는 파괴까지 광섬유에 의한 데이터를 얻을 수 있었으나 나머지 시험체의 경우 파괴되기 전에 광섬유 센서가 절단되었다. 따라서 최종 파괴에 이르기까지 절단되지 않을 수 있는 인장력을 갖춘 광섬유 센서를 선택하여야 파괴시까지 정확한 값을 측정할 수 있을 것이다.

시험체 밀면에 부착한 게이지의 경우에는 가장 외부에 있는 섬유 재료가 무엇이었는지에 따라서도 측정값이 다르게 나온 것을 알 수 있다. 탄소섬유가 바깥에 있는 경우에는 광섬유 센서에 의한 데이터가 전기식 게이지에 의한 측정값보다 동일 하중에서 더 작은 변형률 값을 갖고, 유리섬유가 외부에 위치한 경우는 더 큰 값을 갖는다.

4. 결론

- (1) 일정 하중까지에서 전자식 게이지로 측정한 변형률 값과 광섬유 센서로 측정된 변형률이 거의 같은 값을 가지므로 광섬유 센서를 이용한 스트레인 측정이 가능하다.
- (2) 하중이 가해질수록 스트레인 값은 다소 차이를 보이는데 이는 광섬유 센서 주위에 크랙이 발생하면서 생기 현상이므로 광섬유 센서로 모니터링을 할 경우는 균열의 위치를 고려해야 한다.
- (3) 최종 파괴 시점 전에 광섬유가 끊어져 데이터를 얻지 못하는 경우가 발생하므로 인장강도가 어느 정도 확보된 광섬유 센서를 선택할 필요가 있다.

5. 참고문헌

- 1) 김기수, 이호준, 김종우, "광섬유 센서를 이용한 유지 관리 모니터링 기술", 콘크리트학회지, 제 12 권 3호, 2000년 5월, pp 16-24
- 2) Kin-tak Lau, Chi-chiu Chan, Li-min Zhou, Wei Jin, "Strain monitoring in composite-strengthened concrete structures using optical fiber sensors", ELSEVIER, Composite Part B, August 2000, pp 33-45
- 3) Kin-tak Lau, Libo Yuan, Li-min Zhou, Jingshen Wu, Chung-ho Woo, "Strain monitoring in FRP laminates and concrete beam using FBG", ELSEVIER, Composite Structure, 2001, pp 9-20