

# Hybrid 복합재료 보강 철근콘크리트 보의 광섬유센서를 이용한 부착파괴 모니터링

## Monitoring of Debonding Failure of Reinforced Concrete(RC) Beams Retrofitted with Hybrid Composites by Optical FBG Sensor

김기수\* 김종우\*\* 조윤범\*\*\* 민정현\*\*\*\* 신영수\*\*\*\*\* 정철\*\*\*\*\*  
Ki-Soo Kim Jong-Woo Kim Yoon-Bum Jho Jung-Hyun Min Yeong-Soo Shin Chul Jung

### ABSTRACT

In RC beams strengthened with Epoxy-Bonded Fiber, debonding failure happens frequently. Moreover, through the life cycle, it is difficult to recognize cracks and deflections on the surface of concrete members strengthened with Epoxy-Bonded Fiber. For these reasons, we must always monitor the state of RC beams. The Optical FBG sensor is broadly accepted as a structural health monitoring device.

The main objective of this paper is that it's possible to monitoring the debonding failure of R.C. beams strengthened with Epoxy-Bonded Fiber. For that, we fixed two Optical FBG sensors at the center of the beam and another two sensors in the end of Epoxy-Bonded Fiber. According to the comparison micro-strain between embeded sensor in concrete and that on the fiber surface, we can find the point which debonding failure occurs

### 1. 서론

섬유보강공법은 부식 가능성이 없고 시공성이 뛰어나다는 장점이 있는 반면, 슈트의 정착길이가 충분하지 않고 보강량이 지나치게 과도한 경우에는 슈트의 단부에서 발생하는 부착파괴로 인해 휨 내력을 충분히 발휘하지 못한다는 단점을 안고 있다. 즉, 콘크리트와 섬유 슈트가 종국 하중에 이를 때까지 복합재료로써 충분한 일체 거동을 하지 못하므로 보강재가 설계시 의도한 인장재로서 구조물의 휨내력 향상에 기여하지 못하는 것이다. 또한 외부 접촉식 공법으로 보강된 구조체의 경우에는 표면이 보강재로 싸여있기 때문에 균열 등의 외관에서 발견할 수 있는 문제점을 찾기 어려운 점이 많다. 따라서 보강 후 구조체의 거동을 파악하고 적절한 유지 관리를 하기 위해서는 구조물을 상시 모니터링 하여 초기에 기대했던 효과를 발현하지 못할 경우, 적절한 조치를 취할 수 있도록 하여야 한다.

본 연구에서는 섬유 보강 시 발생하는 위의 두 가지 문제점을 해결하기 위하여 광섬유격자 센서를 섬유 슈트가 부착된 콘크리트 단부의 내, 외부에 매설,

부착하여 부착파괴의 모니터링 가능성을 검토하였다. 광섬유 격자 센서는 섬유 슈트가 부착된 콘크리트면 내부와 섬유 슈트 표면, 두 곳에 설치하였으며 보강재로는 유리섬유와 FRP를 사용하였다.

### 2. 광섬유 격자 센서의 적용 원리

변형률을 측정하는 대표적인 광섬유 격자 센서에는 Fiber Bragg Grating(이하 FBG)센서와 Fabry-Perot 센서가 있다. Fabry-Perot 센서는 수 작업을 거쳐야 하므로 대량생산이 불가능하고, 정밀도는 높지만 가격이 비싸고 외부 환경에 민감하다. 이에 반해 FBG 센서는 대량생산이 가능하므로 가격이 저렴하고 Fabry-Perot에 비해 외부 환경에 덜 민감하여 구조물 계측용 센서로 많이 쓰이고 있다. 따라서 본 연구에서는 최근 들어 구조물 계측에 널리 쓰이는 직경 250  $\mu\text{m}$ 의 Optical FBG 센서를 사용하였다.

#### 2.1 Fiber Bragg Grating 센서의 스트레인 측정 원리

FBG는 Ge가 첨가된 광섬유 코어에 자외선 영역의 레이저를 주기적으로 조사함으로써 굴절률 변화를 유

\* 정회원, 호서대학교 벤처전문대학원 교수

\*\* (주) 아이세스 이사

\*\*\* (주) 아이세스 대리

\*\*\*\* 이화여자대학교 건축학과 석사과정

\*\*\*\*\* 이화여자대학교 건축학과 부교수

\*\*\*\*\* (주) 아이세스 과장

도하여 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.

$$\lambda_B = 2n\Lambda$$

$n$  : 유효 굴절률,  $\Lambda$  : 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.

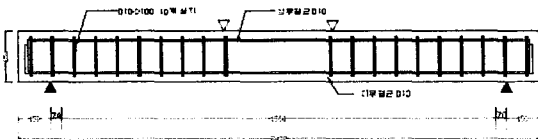
$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - Pe) \varepsilon$$

$Pe$  : 팽탄성 상수,  $\varepsilon$  : 광섬유 grating에 가해진 스트레인

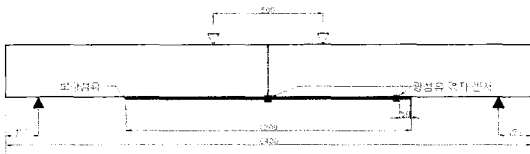
### 3. 실험계획 및 방법

#### 3.1 실험 개요

철근 콘크리트 보의 단면치수 15cm×25cm, 유효축(d = 21cm)이고, 철근량은 최대철근비( $\rho_{max} = 0.75\rho_b = 0.01466$ )을 기준으로 압축철근 2-D10, 인장철근 2-D13, 길이 2.4m, 순 지간길이 2.1m인 장방향 복근 보이며 하부에 로드셀(Load Cell)을 설치하여 재하하중 값을 기록하였다. 재하점과 지지점의 간격(80cm)이 a/d가 4 이상이 되도록 하여 4점 재하 하였으며 그림 1 (a)와 같다.



(a) 시험체 형상



(b) 광섬유 격자 센서 위치

그림 1. 시험체와 광섬유 격자 센서

변형률은 광섬유 격자 센서(FBG)으로 측정하였으며 센서는 중앙과 단부에 각각 2 개씩 설치하였다. 보강 섬유와 맞닿는 콘크리트 밀면 중앙과 보강 섬유 끝단에서 5cm 들어간 콘크리트 밀면에 흡을 파고 센서를 매립하였고 나머지 2개는 보강 섬유 외부 표면에 중앙과 끝단에서 5cm들어간 부분에 설치하였으며 그림 1(b)와 같다. 실제 실험에 사용된 콘크리트와 철근의 물성치는 표1에 나타냈으며 그림2는 광섬유 격자 센서의 부착 상세도이다.

표 1. 콘크리트와 철근의 물성치

		항목	탄성계수 (kgf/cm <sup>2</sup> )	강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )
콘크리트		설계	2.40×10 <sup>5</sup>	240
		압축		256.8
		인장		21.69
철근	D10	항복	2.08×10 <sup>6</sup>	3692
		인장		6047
	D13	항복	2.31×10 <sup>6</sup>	3918
		인장		6253

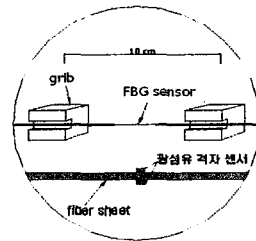


그림 2. 광섬유 격자 센서 부착도

#### 3.2. 보강섬유

실험체에 보강한 섬유는 탄소, 유리섬유, 그리고 이 두 가지를 일정 비율로 혼합한 신섬유이다. 이번에 제작한 신섬유는 기존 섬유인 탄소섬유와 유리섬유의 장·단점을 이용하여 탄소섬유보다 탄성계수는 낮고 유리섬유보다 두께가 얇아 단부 탈락이 적고 보다 연성거동을 하도록 제작되었다. 그 결과 사전에 재료물성 실험자료를 기초로 상용해석 프로그램인 DIANA를 이용해 탄소 섬유와 유리섬유를 40:60의 무게비로 혼합 직조한 섬유를 선택하였다. 보강할 섬유의 양은 각 섬유의 중국강도로부터 비교, 계산하여 정하였으며 섬유 보강재의 재료적 성능은 표 2와 같다.

표 2. 섬유의 비교 물성 DATA

	탄소섬유	유리섬유	신섬유
1ply당 설계두께(mm)	0.11	0.34	0.09164
섬유밀도(g/cm <sup>3</sup> )	1.8	2.54	-
설계신율(%)	2.0	3.0	3.6
설계인장강도(kgf/cm <sup>2</sup> )	35,500	5,550	-
설계인장탄성률(kgf/cm <sup>2</sup> )	2.35×10 <sup>6</sup>	7.2×10 <sup>6</sup>	-
중국강도(kgf/cm <sup>2</sup> )	512.03	569.297	271

### 3.3. 보강 시험체 개요

보강 시험체는 외부 밀면에 폭 130mm로 보강하였으며 보강길이에 따라 전 지간 보강한 길이 1960mm의 L 시리즈와 부착 파괴를 유도하기 위해 1300mm로 짧게 보강한 S 시리즈로 제작하였다. 광섬유 센서는 콘크리트 단면과 보강섬유 표면에 각각 2개씩 매설, 부착하여 총 4개를 설치하였으며 보강량을 달리하기 위해 보강섬유 접수는 2장과 3장으로 계획하였으며, 여기서 보강 접수는 신섬유와의 동일한 보강량을 기준으로 한 것으로 탄소섬유와 유리섬유의 경우 실제의 접수와는 다르다

표 3. 보강 시험체 개요

구분	섬유 종류	섬유 길이 (mm)	섬유 접수	섬유 폭	부착방법	광섬유 센서
SG-3	유리 (Glass)	1300	3	13+9.8mm	휨 보강	4
SN-2	신섬유		2	13+13mm		
SN-3	IFRP		3	13+13+13mm		
LN-2		2	13+13mm			

## 4. 실험 결과 및 분석

### 4.1 균열의 진행

일반적으로 부착파괴를 유발하는 횡방향 Shear Stress는 보강 섬유의 단부에서 5-10cm정도 떨어진 지점에서 최대 값을 가지는 것으로 알려져 있으며 사인장 균열은 그림 3 (a)와 같이 보통 보강재의 끝단에서 시작된다. 따라서 광섬유 격자센서 또한 보강섬유 단부에서 5cm 이격 된 지점에 콘크리트와 섬유 외부, 두 곳에 설치하였으며 콘크리트와 보강재가 일체 거동을 할 경우 두 센서는 같은 변형률을 보이게 된다

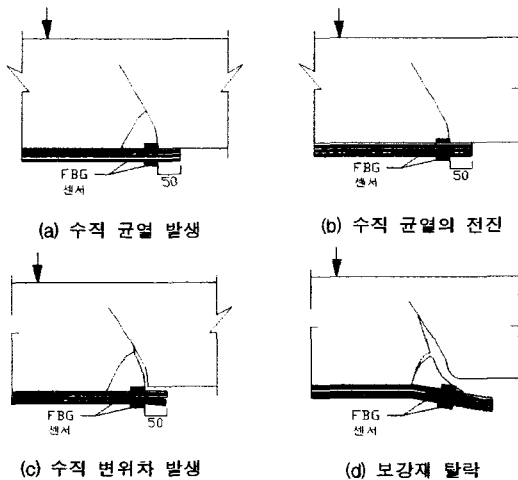


그림 3. 균열 전파 모식도

다. 그러나 하중이 증가함에 따라 콘크리트에 균열이 발생하면서 내부에 매설된 센서와 보강 섬유 외부표면에 설치된 센서는 다른 변형률을 보이기 시작한다.

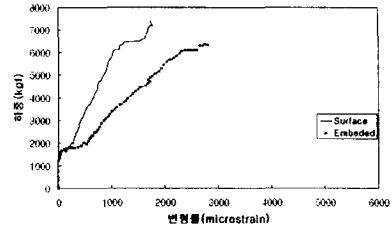


그림 4. SG-3의 중앙

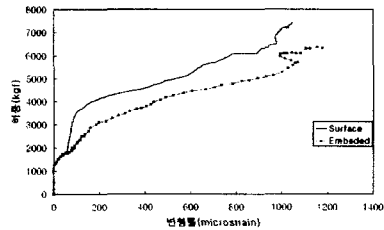


그림 5. SG-3의 단부

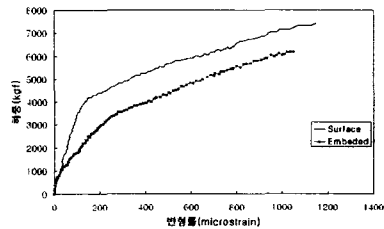


그림 6. SN-3의 단부

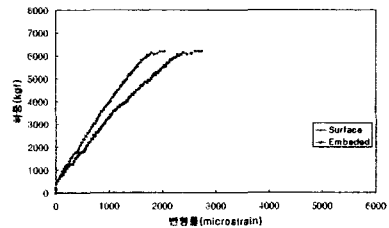


그림 7. SN-3의 중앙

그림 4-6 에서와 같이 하중이 증가하여 균열이 발생함에 따라 두 지점에서의 변형률 기울기는 달라지며 대략 4000kgf를 기점으로 보강재 외부 표면의 센서의 변형률 증가율이 눈에 띄게 커지는데, 이는 서서히 섬유 보강재의 끝단이 박리 되기 시작해 콘크리트와 일체 거동을 하지 않기 때문인 것으로 추정된다. 그러나 중앙 부분의 하중-변형률 곡선에는 이런 변화를 알기 힘들어 4000kgf 이상에서도 두 재료의 분

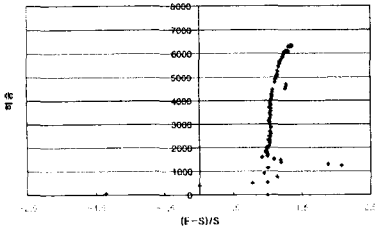


그림 8. SG-3의 중앙

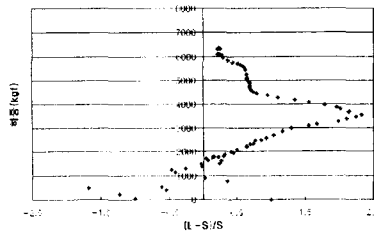


그림 9. SG-3의 단부

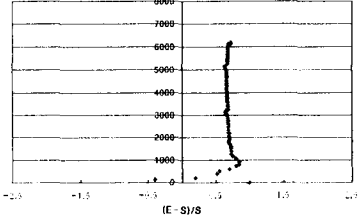


그림 10. SN-3의 중앙

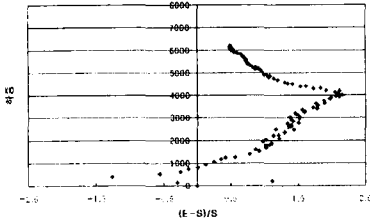


그림 11. SN-3의 단부

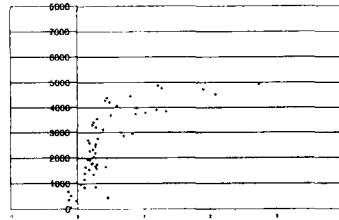


그림 12. LN-2의 단부

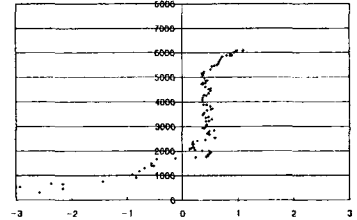


그림 13. SN-2의 단부

리징후는 나타나지 않는 것으로 판단된다. 하지만 부착 파괴가 일어난 단부 부분의 하중-변형률 곡선에서는 이 변화가 비교적 선명하다.

#### 4.2 콘크리트 내부와 섬유외부의 하중- 변형률 곡선의 비교

부착파괴의 뚜렷한 징후를 알기 위해 콘크리트 내부에 매설된 센서의 변형률과 보강 섬유 외부 표면에 정착된 센서의 변형률을 비교하였다. 두 변형률의 차이를 비교하여 단부에서의 (E-S)/S의 그래프를 그림 9, 11 와 같이 그려보면 4000kgf에서의 확연한 변환점이 있음을 알 수 있다. 하지만 단부 탈락이 일어나지 않는 보의 중앙 부분(그림8,10)에선 이러한 변환점을 찾기 힘들며 충분한 정착길이를 가지는 LN-2와 과대 보강되지 않은 SN-2에서도 이 점을 찾기 힘들다.(그림 12,13)

### 5. 결론

광섬유센서를 이용한 섬유보강구조물의 부착파괴를 모니터링의 실험적 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 광섬유 FBG센서를 섬유보강재의 동일한 위치의 내, 외부에 설치하여 하중재하시 각각의 변형률 값을 측정함으로써 일체거동의 여부를 모니터링 할 수 있었다.
- (2) 동일위치의 내·외부에서 발생한 변형률 값의 차이를 비교하여, 부착파괴가 일어나는 보의 단부에서의 하중과 (내부변형률-외부변형률)/외부변형률의 그래프를 그려보면 부착 파괴 시 확연한 변곡점이 생김

을 알 수 있다.

(3) 보강 섬유의 정착길이가 짧거나 과대 보강이 되었을 경우, 발생될 가능성이 큰 단부에서의 부착 파괴는 광섬유 FBG센서를 이용하여 모니터링 하는 것이 가능하다.

(4) 섬유보강공법은 보강공사의 시공품질검사, 보강 후 보강효과의 검증 및 보강구조물의 내부콘크리트의 열화 유무의 감시를 통해 지속적인 유지관리계획이 수립되어야 하므로 보강 후 지속적인 모니터링 활동이 필요하다.

#### 감사의글

본 연구는 산업자원부 산업기반기술개발사업의 지원으로 수행되었으므로 이에 감사 드립니다.

#### 참고문헌

- 1) 김기수, 이호준, 김중우, "광섬유 센서를 이용한 유지 관리 모니터링 기술", 콘크리트학회지, 제 12권 3호, 2000년 5월, pp 16-24
- 2) H.N.Garden, R.J. Quantrill, L.C. Hollaway, A.M. Thorone, G.A.R. Parke, "An experimental study of the anchorage length of carbon fibre composite plates used to strengthen reinforced concrete beams", Construction and Building Materials 12, 1998, pp 203-219
- 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