Journal of the Korean Society of Civil Engineers
Vol. 40, No. 4: 363-370/ August, 2020
DOI: https://doi.org/10.12652/Ksce.2020.40.4.0363

ISSN 1015-6348 (Print)
ISSN 2287-934X (Online)
www.kscejournal.or.kr

Structural Engineering **구조공학**

광섬유 매립 CFRP 쉬트로 보강한 RC 보의 변형률 응답 분석

심원보* · 홍기남** · 연영모*** · 정규산****
Shim, Won-Bo*, Hong, Ki-Nam**, Yeon, Yeong-Mo***, Jung, Kyu-San****

Strain Response Analysis of RC Beams Strengthened with Optical Fiber-embedded CFRP Sheet

ABSTRACT

This paper reports the results of an experimental study using the BOTDR sensor to detect the unbonded location of attached CFRP sheet for structural rehabilitation. A specimens with the unattached CFRP sheet were fabricated for this study, on which BOTDR sensor was attached with a nylon net. During the flexural test of the specimens, the strain of the CFRP sheet was measured using the BOTDR sensor and electric resistance gauges. From the results, it was confirmed that the strain distribution obtained through the BOTDR sensor can be effectively used to visualize and detect the unbonded position of the CFRP sheet. In addition, In addition, the strain measured by the BOTDR sensor was found to be more effective in analyzing the overall structure behavior than the electric resistance strain gauge. The development of a BOTDR sensor with a measuring longth of less than 100 mm will enable accurate detection of the local unbonded position of the CFRP sheet.

Key words : BOTDR sensor, CFRP sheet, Unbonded position, Electric resistance strain gauge

초 록

본 논문은 구조물 보강을 위해 부착된 CFRP 쉬트의 박락 위치를 탐색하기 위해 BOTDR 센서를 적용한 실험적 연구 결과를 보고한다. CFRP 쉬트를 부분적으로 비부착한 실험체가 본 연구를 위해 제작되었으며, 그 위에 BOTDR 센서를 나일론 망을 이용하여 부착되었다. 보강된 RC 보의 휨실험 동안 CFRP 쉬트의 변형률은 BOTDR 센서와 전기저항식 게이지를 통해 계측되었다. 연구결과로부터 BOTDR 센서를 통해서 획득된 변형률 분포는 CFRP 보강재의 탈락 구간을 시각화하고, 탐지하는데 효과적으로 이용될 수 있음이 확인되었다. 또한 BOTDR 센서를 통해 계측된 변형률은 국부적인 변형률이 얻어지는 전기저항식 게이지보다 구조물 전체의 거동을 분석하는데 효과적임이 확인되었다. 100 mm 이하의 계측장을 갖는 BOTDR 센서의 개발은 CFRP 쉬트의 국부적인 탈락의 위치의 정확한 탐지를 가능하게 할 것으로 판단된다.

검색어 : BOTDR 센서, CFRP 쉬트, 비부착 위치, 전기저항 변형율 게이지

1. 서 론

철근콘크리트(Reinforced Concrete, RC) 구조물의 손상이 발생하는 경우 보강을 통하여 구조체의 안전성을 회복하고 내구연한을 연장한다(Kim, 2006; Kim, 2007). RC 구조물에 가장 선호되는 보강 공법은 탄소섬유(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)를 쉬트(Sheet) 형태로 가공하여 부착하는 CFRP쉬트 부착 공법이다. CFRP 쉬트는 가볍고 인장강도와 내구성이 우수하여 다양한 형상의

* 정회원 · 충북대학교 토목공학과 박사과정 (Chungbuk National University · firstice@cbnu.ac.kr)
** 종신회원 · 교신저자 · 충북대학교 토목공학과 교수 (**Corresponding Author** · Chungbuk National University · hong@cbnu.ac.kr)
*** 충북대학교 토목공학과 박사과정 (Chungbuk National University · yym235@cbnu.ac.kr)
**** 정회원 · 한국건설기술연구원 노후인프라센터 수석연구원 (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · jungkyusan@kict.re.kr)

Received March 10, 2020/ **revised** April 27, 2020/ **accepted** May 8, 2020

Copyright ⓒ 2020 by the Korean Society of Civil Engineers
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

구조물에 적용할 수 있다. 그러나 시공 후 계면부착 파괴로 인한 탄소섬유의 탈락 및 콘크리트 피복탈락으로 인하여 콘크리트 부재와의 합성거동이 유도되지 않는 문제가 제기되고 있다(Lim, 2013). 이러한 보강재의 탈락은 육안으로 확인되지 않아 인력을 이용한 검사에 의존하는 실정이며, 이것은 구조물의 안정에 잠재적 불안요소로 작용할 수 있다. 이러한 문제점의 개선을 위하여 광섬유 센서를 도입한 연구가 수행되었다. Hwang et al.(2007)은 광섬유 센서가 장착된 보강재를 구조물에 부착하여 구조물의 보강상태를 분석하는 방법을 제안하였다. 그러나 광섬유 센서의 배치와 계측된 신호의 처리방법 등 구체적인 활용방안은 제시하지 못하였다. Kim(2002)은 페브리-페롯(Fabry-Perot) 광섬유 센서와 전기저항식 변형률 센서의 비교를 통하여 광섬유 센서의 신뢰성을 확인하였다. 그러나 페브리-페롯 센서는 정밀도는 높으나 외부환경에 민감하고 대량생산이 힘들어 단가가 높은 단점이 있다. Kim(2003)은 FBG (Fiber Bragg Grating) 광섬유 센서를 이용한 RC 보의 실험을 통하여 모재와 보강재의 구조거동을 분석하였다. 또한 Park et al.(2011)은 FBG 센서를 활용하여 재킷식 해양구조물에 발생하는 손상을 탐색하는 연구를 수행하였다. FBG 방식은 대범위 변형을 연속적으로 계측할 수 있어 교량이나 댐과 같은 대형 구조물의 유지관리에 활용되고 있다. 그러나 계측 위치에 특수처리된 광섬유를 설치해야 하므로 한번 결정된 측점의 위치를 변경하기 어려워 활용범위가 좁다. 이러한 FBG 방식을 대체할 수 있는 광섬유 계측기술로서 BOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometer)을 이용한 방법이 있다. BOTDR은 FBG보다 계측된 데이터의 정밀도는 낮으나 측점의 위치 및 개수의 결정이 자유롭다. 또한 센서의 설치가 비교적 간단하여 대형 구조물의 변형 계측에 대한 활용범위가 넓다(Kim et al., 2018).

본 연구는 구조물에 보강된 CFRP 쉬트의 탈락 위치 및 손상의 계측에 BOTDR 센서의 활용 가능성을 평가하고자 한다. 이에 따라 광섬유 센서가 장착된 CFRP 쉬트 보강 RC 보의 4점 휨실험을 실시하고 BOTDR 센서를 이용한 변형률 응답을 분석하였다.

2. Brillouin-OTDR 센서

광섬유 내부에 빛이 진행되는 경우 매질의 특성에 따라 산란하여 일부분 후방으로 다시 반사된다. 이때 산란된 빛은 Fig. 1과 같이 레일레이 산란(Rayleigh Scattering), 라만 산란(Raman Scattering) 및 브릴루앙 산란(Brillouin Scattering)으로 분류할 수 있다. 레일레이 산란은 입사광과 반사광의 파장이 동일하여 간단한 장비로 계측이 가능하므로 주로 광섬유의 단선과 광손실량을 측정하는데 사용된다(Kim et al., 2018). 반면에 라만 산란과 브릴루앙 산란은 진행광과 산란광간 광주파수의 차이가 존재한다. 이러한 차이는 광섬유를 이루고 있는 물질의 성질과 외부환경에 의하여 결정된다. 라만 산란은 anti-stokes 범위에서 온도에 따라 진폭이 변화한다. 브릴루앙 산란은 광섬유의 압력, 변형률 또는 온도에 따라 거의 선형적으로 진폭이 변화한다. 또한 브릴루앙 산란은 라만 산란과 비교하여 상대적으로 낮은 광력(光力)에도 쉽게 일어난다. 이와 같은 특성 때문에 브릴루앙 산란은 광섬유를 이용하는 광통신과 광센서의 여러 응용 분야에서 연구대상으로 주목받고 있다(Horiguchi et al., 1990; He and Hotate, 2002). 이러한 광섬유 내의 브릴루앙 산란을 이용하여 광섬유의 길이에 따른 물리적 정보의 분포를 측정하는 광섬유 센서 기술로 BOTDR이 있다. BOTDR 방식은 펄스 형태의 펌프 레이저를 사용하여 광섬유 내에서 발생되는 브릴루앙 산란광을 시간 영역에서 관찰하는 방식이다. 이때 BOTDR의 공간 분해능은 펌프 광원 펄스의 폭에 의해 결정된다(Hong and Lee, 2007). 이러한 BOTDR은 유도 브릴루앙 산란을 이용하여 광섬유의 길이에 따른 온도, 압력, 변형률과 같은 물리적 정보를 측정할 수 있다. 또한 장거리에 걸쳐 분포형 계측이 용이한 장점을 갖고 있다. 따라서 BOTDR 센서를 토목 구조물에 사용하면 실시간으로 계측되는 구조물의 변형률 분석을 통하여 결함이 발생한 위치를 파악할 수 있다(Seo, 2006).

3. 실험 계획 및 방법

3.1 실험변수 및 실험체 제작

본 연구를 위하여 Table 1에 나타낸 바와 같이 실험변수를 설정하였다. 실험체는 보강이 용이하고 최대한 많은 변수의 설정이

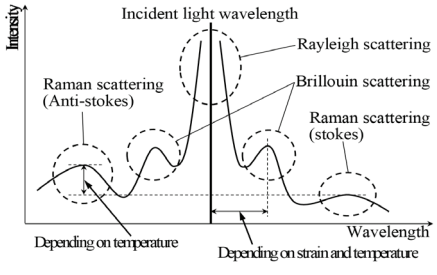


Fig. 1. Characteristics of BOTDR Scattered Light (Kim et al., 2018)

Table 1. Experimental Variable Details

Specimen Designation	Number of CFRP Sheet (Ply)	Bonded Level (%)	Unbonded Position Location
A-100	2	100	None
M-50		50	Midspan
M-30		30	Midspan
E-50		50	Both End
E-30		30	Both End
LE-50		50	Longitudinal Edge
LH-50		50	Longitudinal Half

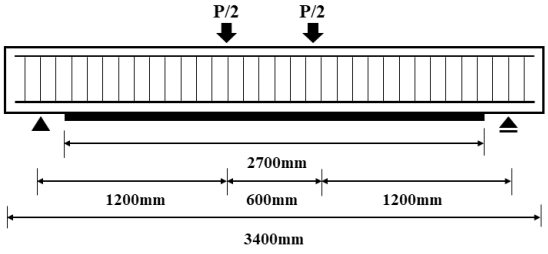


Fig. 2. Specimen Specification Specimen Dimensions and Load Setup

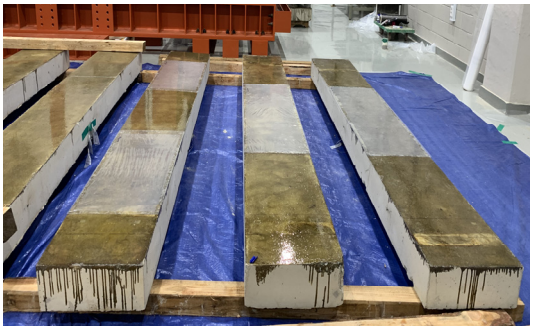


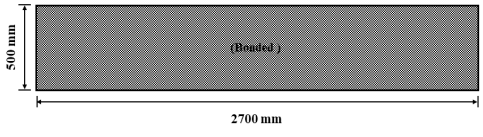
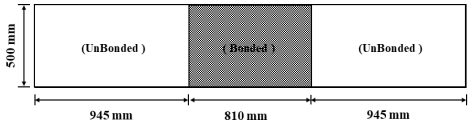
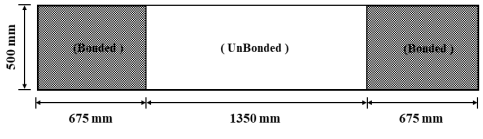
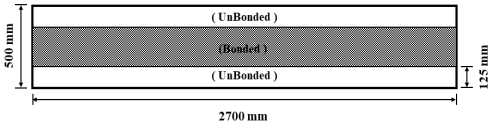
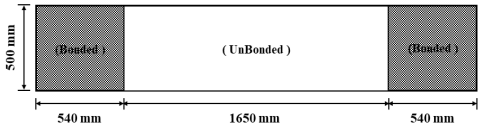
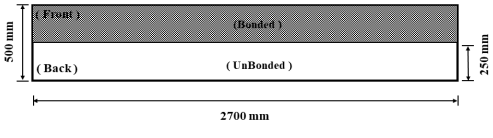
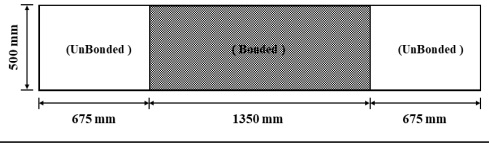
Fig. 3. Setting of Unbonded Area

가능하도록 폭이 넓은 슬래브 형태로 제작하였다. 실험체는 총 7개를 제작하였으며 크기는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 폭 500 mm, 높이 200 mm, 길이 3,400 mm, 순경간 3,000 mm이다. 인장철근은 SD400의 D16철근 5개를 사용하였고, 조립철근 및 전단스트럽은 SD400의 D10 철근을 사용하여 100 mm 간격으로 배근하였다. 피복두께는 30 mm로 하였다. 실험체의 내하력 및 파괴모드를 고려하여 모든 실험체의 인장부에 CFRP 쉬트 2겹을 동일하게 보강하였다. 이때 CFRP 쉬트의 폭은 실험체와 동일한 500 mm이며 길이는 양단의 지점부에 간섭이 없도록 2,700 mm로 하였다. 콘크리트는 타설 3일 후 거푸집을 탈형하고 약 28일간 습윤양생을 실시하였다. 콘크리트의 양생 후 CFRP의 보강을 위하여 실험체의 보강면을 정리하고 레이턴스를 제거하였다. 이후 에폭시 수지의 부착력을 높이기 위하여 프라이머를 도포하고 약 3일간 경화하였다. CFRP의 비부착을 모사하기 위하여 Fig. 3과 같이 비닐을 보강면에 부착하였다. 실험체 제작에 사용된 콘크리트 및 CFRP의 기본 재료특성은 Table 2와 같으며 실험체에 적용된 비부착 구간의 상세 위치는 Table 3과 같다.

Table 2. Properties of Materials Used

Concrete			CFRP Sheet		
Compressive Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Tensile Strength (MPa)	Thickness (mm)	Width (mm)	Young's Modulus (GPa)
27	26.4	2.5	0.11	500	240

Table 3. Detail of Unbonded Area of Specimens

Specimen	Unbonded Position	Specimen	Unbonded Position
A-100		E-30	
M-50		LE-50	
M-30		LH-50	
E-50			

3.2 BOTDR 센서 설치

CFRP 쉬트에 직접 BOTDR 센서를 설치할 경우 에폭시 수지의 함침을 위한 롤러의 사용으로 센서가 단선될 수 있다. 또한 일정하게 배치한 센서의 위치가 외부 충격으로 인하여 교란될 수 있다. 따라서 CFRP 쉬트와 동일한 크기의 BOTDR 센서보호망을 별도로 제작하여 실험체에 부착하였다. 센서 보호망의 모재는 에폭시 수지의 함침에 문제가 없는 나일론 소재의 섬유망으로 하였다. 센서는 Fig. 4와 같이 장방형으로 배치하였으며 총 길이 27,000 mm를 연속으로 배치하였다. BOTDR 센서의 고정은 양면테이프를 사용하였으며 고정된 센서위에는 외부로부터의 손상을 방지하기 위하여 Fig. 5와 같이 보호 필름을 씌웠다. 완성된 센서 보호망은 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 보호망 외단에 에폭시 수지를 함침하여 부착하였다. 보강이 끝난 실험체는 에폭시 수지의 경화를 위하여 일정한 습도와 온도가 유지되는 장소에서 약 7일 이상 충분히 양생하였다.

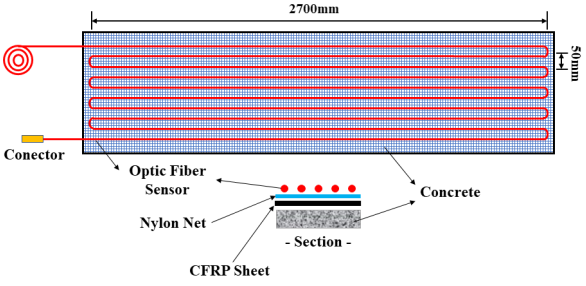


Fig. 4. Geometry of BOTDR Sensor Placement

Fig. 5. Nylon Net with BOTDR Sensor

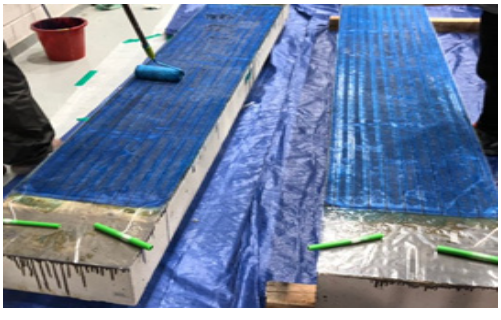


Fig. 6. Installation of Nylon Net with BOTDR Sensor

3.3 가력 및 데이터 측정 방법

4점 휨 실험을 수행하기 위하여 2,000 kN 용량의 액츄에이터를 사용하였으며, 변위 제어를 통하여 1.5 mm/min의 속도로 가력하였다. 하중 가력 시 BOTDR 센서를 이용한 CFRP의 변형률 측정은 20 kN을 시작으로 60 kN, 80 kN, 95 kIN, 110 kN, 125 kN, 140 kN의 하중에서 가력 장치를 일시 정지하고 측정되었다. 가력 이후 실험의 종료 시점은 CFRP 보강재의 탈락 또는 박리, 콘크리트 압축부 파괴 등으로 인한 하중감소가 극한하중의 80 % 이하로 내려간 시점으로 하였다. 하중 재하 시 실험체의 처짐량을 계측하기 위하여 Fig. 7과 같이 실험체 하단 중앙에 2개의 변위계를 설치하였다. 또한 실험체의 양쪽 단부에서 450 mm 떨어진 곳에 변위계를 각각 1개씩 추가 설치하여 CFRP의 조기 탈락 또는 처짐을 관찰하였다. CFRP 쉬트에 전기저항식 변형률 게이지를 Fig. 8과 같이 부착하여 BOTDR 센서로 계측된 결과와 비교하였다. 실험 중 측정된 가력 하중과 처짐, 변형률 값은 모두 데이터 로거(Data logger)를 이용하여 저장되었다. CFRP 쉬트의 변형에 따른 광신호의 변화를 계측하기 위한 BOTDR 계측은 Fig. 9의 장비를 사용하여 수행하였다. 이 장비를 통하여 계측되는 BOTDR 센서의 변형률은 계측장 500 mm의 평균값이다.

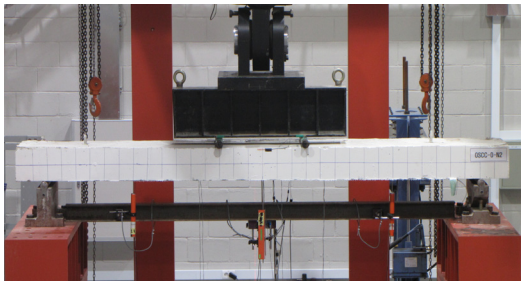


Fig. 7. Flexural Failure Experiment

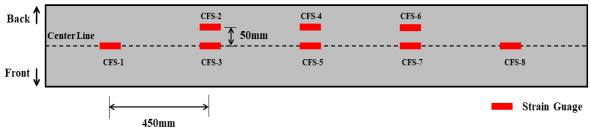


Fig. 8. Location of Electrical Resistance Strain Gauge

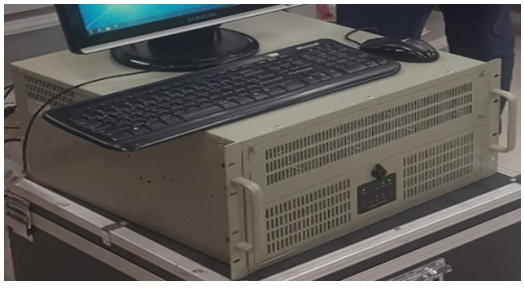


Fig. 9. BOTDR Sensing Equipment

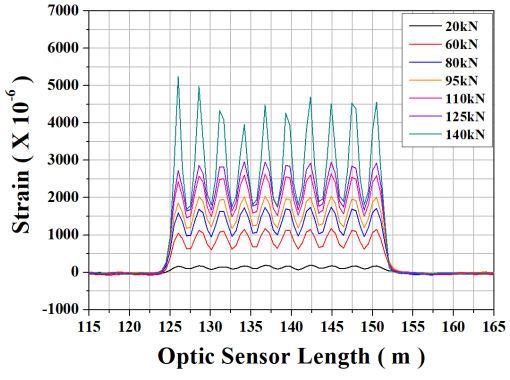
4. 실험 결과 및 분석

4.1 BOTDR 계측 결과

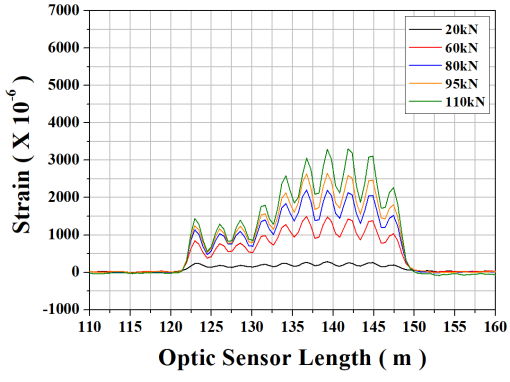
BOTDR 센서를 이용한 계측의 주요 목적은 사용중인 구조물의 성능을 예측하고 그 결과를 이용하여 대상 구조물의 관리계획을 수립하는 것이다. 따라서 실험 결과는 사용하중 단계와 극한하중 단계로 구분하여 평가하였다. BOTDR 센서를 이용하여 계측된 CFRP 쉬트의 하중단계별 최대 변형률을 Table 4에 나타내었다. 사용하중 단계에서 LE-50과 LH-50의 최대 변형률은 전체보강 실험체인 A-100보다 약 30 % 이상 높게 나타났다. 이것은 CFRP 보강면적의 감소로 인하여 응력이 상승한 것으로 판단된다. 이와 대조적으로 E-50과 E-30 실험체는 A-100보다 변형률이 각각 12 %와 76 % 작았다. 이것은 비부착 구간으로 인한 CFRP 쉬트의 정착길이가 부족하여 보강성능이 저하된 것으로 판단된다. M-50 및 M-30 실험체는 A-100보다 변형률이 약 10 % 증가하였다. 이와같이 CFRP 쉬트가 탈락된 위치 및 수준에 따라 보강재의 변형률 응답이 다르다는 것을 BOTDR 센서 계측 결과를 통하여 확인할 수 있었다. Fig. 10은 A-100과 LH-50의 모든 하중 단계별 CFRP 변형률을 도시한 것이다. 전체부착 실험체인 A-100은 총 10개의 변형률 최대점이 실험체의 중앙부 위치에서 잘 관찰된다. 반면에 LH-50은 비부착 구간의 변형률이 부착 구간보다 낮게 관찰되어 육안으로 확인할 수 있었다. 또한 계측된 결과에 따라 CFRP의 변형이 한쪽으로 편향되어 구조물 전체의 거동에 편심이 유발되고 있다고 판단된다. 따라서 BOTDR 센서로 획득된 변형률을 통하여 CFRP 탈락 구간의 위치를 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 4. Maximum Strain at Working and Ultimate Load Stage

Specimen	Working Load Stage	Ultimate Load Stage
	Maximum Strain ($\mu\epsilon$)	Maximum Strain ($\mu\epsilon$)
A-100	2040.63	5252.30
M-50	2333.66	3279.70
M-30	2259.86	4251.42
E-50	2007.48	2521.61
E-30	462.75	389.87
LE-50	2503.19	4115.72
LH-50	2651.88	3305.10



(a) A-100

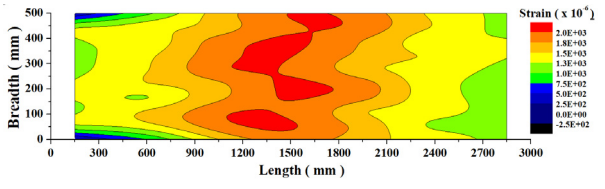


(b) LH-50

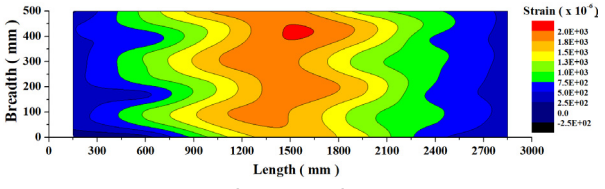
Fig. 10. CFRP Strain by BOTDR Sensor

4.2 사용하중 단계 변형률 분포

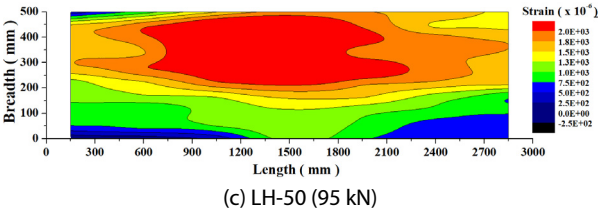
계측된 변형률 데이터를 시각화하기 위하여 상용 데이터 분석 프로그램인 Origin의 Contour 기능을 이용하여 변형률 분포도를 도시하였다. 사용하중 단계의 변형률 분포도는 데이터를 0~2000 $\mu\epsilon$까지 250 $\mu\epsilon$씩 8구간으로 분류하여 등고선을 작성하였다. 또한 TPS (Thin Plate Spline) 알고리즘을 이용한 데이터 보간을 실시하였다. 보간에 사용된 파라메터는 최대 절점 증가계수 10000, Smoothing 파라메터 0.0001이었다. Fig. 11은 사용하중 단계에서 CFRP의



(a) A-100 (95 kN)



(b) E-50 (95 kN)



(c) LH-50 (95 kN)

Fig. 11. Comparison of CFRP Strain Distribution at Working Load Stage

비부착 위치가 다른 대표적인 실험체들의 변형률 분포도를 비교한 것이다. 전체 부착 실험체인 A-100의 경우 중앙부에 변형이 집중되어 최소 1300 $\mu\epsilon$부터 최대 2040 $\mu\epsilon$까지 균일한 변형률 분포를 보였다. 반면에 E-50의 경우 중앙부에서는 약 2007 $\mu\epsilon$의 변형률이 계측되었으나 CFRP의 부착이 없는 양쪽 단부에서는 약 200 $\mu\epsilon$의 낮은 변형률이 계측되었다. LH-50의 경우에도 CFRP 쉬트의 부착구간과 비부착구간의 변형률 차이가 약 2000 $\mu\epsilon$으로 나타나 그 차이가 뚜렷하였다.

하중 재하 실험의 종료 후 실험체를 육안으로 관찰해본 결과 Fig. 12와 같이 E-50의 변형률 분포도에서 푸른색으로 표현되는 비부착구간의 위치와 동일한 위치에서 CFRP의 비부착이 확인되었다. Fig. 13은 M-30과 E-30 실험체의 변형률 분포도이다. 두 실험체는 CFRP의 부착 수준은 같으나 비부착 위치가 다른 실험체로 변형률 응답에 큰 차이를 보였다. M-30의 경우 중앙으로부터 넓은 변형률 변화 구간을 보인 반면에 E-30은 거의 변형이 일어나지 않아 분포도상에 큰 변화가 없다. 이것은 E-30에서 CFRP의 충분한 부착이 이루어지지 않아 실험체와 보강재가 일체로 거동을 하지 않고 있음을 의미한다.

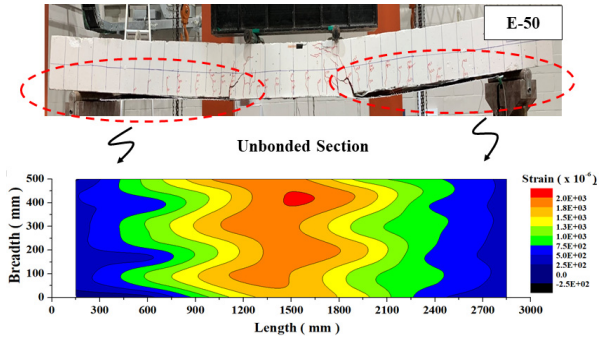
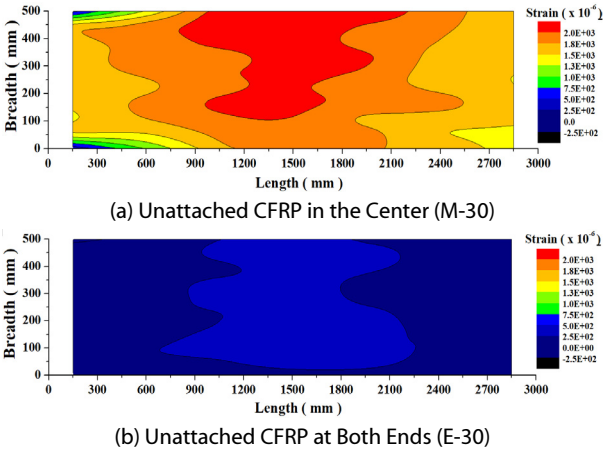


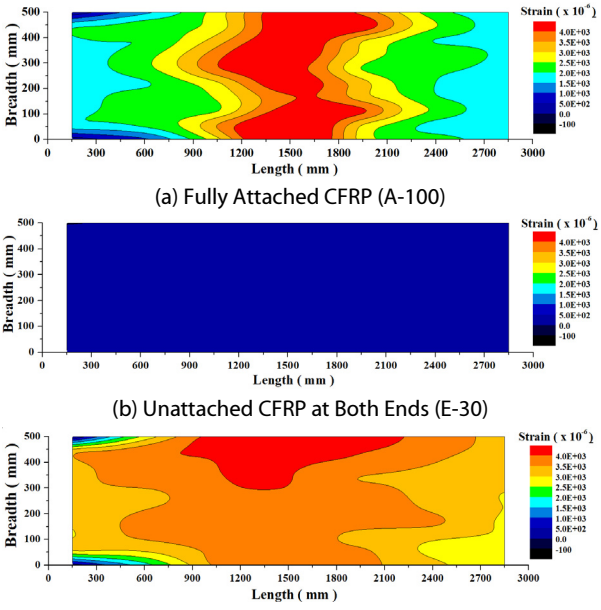
Fig. 12. Comparison of Unattached Area and CFRP Strain Distribution



(a) Unattached CFRP in the Center (M-30)

(b) Unattached CFRP at Both Ends (E-30)

Fig. 13. Comparison of CFRP Strain Distribution of Specimens with Center and End Unattached CFRP



(a) Fully Attached CFRP (A-100)

(b) Unattached CFRP at Both Ends (E-30)

(c) Unattached CFRP in the Center (M-30)

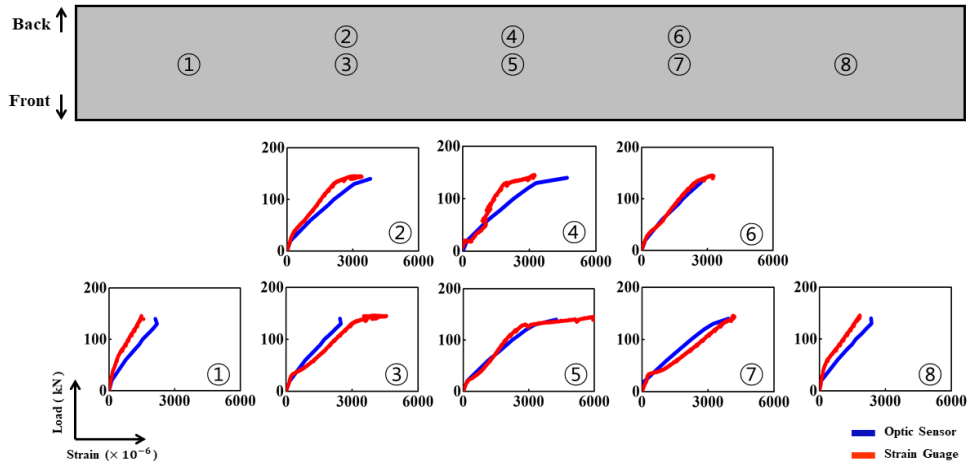
Fig. 14. Comparison of CFRP Strain Distribution at Ultimate Load Stage

4.3 극한하중 단계 변형률 분포

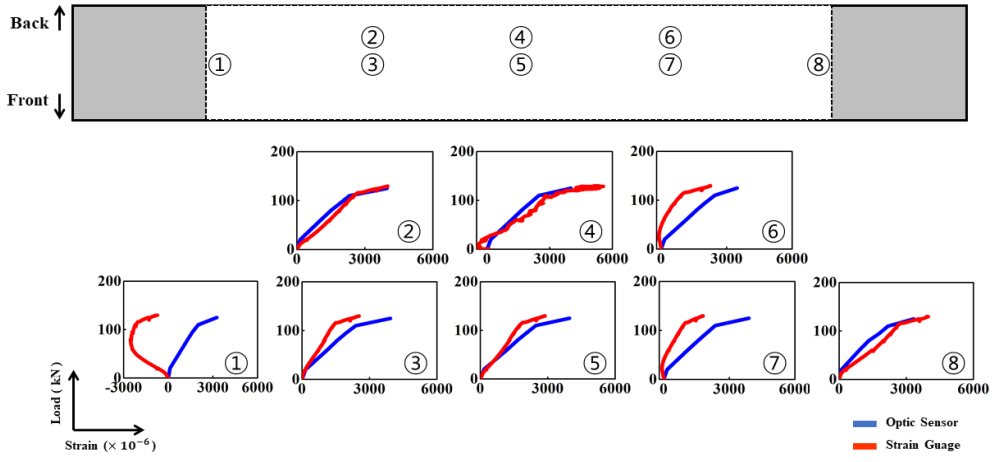
극한하중 단계의 변형률 분포도 작성을 위하여 데이터를 0~4000 $\mu\epsilon$까지 500 $\mu\epsilon$씩 8구간으로 분류하고 같은 구간의 값을 연결하여 도시하였다. 구간별 데이터의 보간은 사용하중 단계의 변형률 분포도와 동일한 방법을 사용하였다. Fig. 14는 CFRP의 비부착 위치가 다른 대표적인 실험체들의 극한하중 변형률 분포이다. A-100의 경우 실험체의 중앙부에 변형률이 가장 크게 계측된 것으로 미루어 보아 실험체와 보강재가 일체로 거동하고 있음을 알 수 있다. 그러나 E-30의 경우 계측된 변형률이 매우 작게 나타나 CFRP가 거의 변형하지 않고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 CFRP가 성능을 거의 발현하지 못하고 있음을 예상할 수 있다. M-30의 경우 중앙부에 변형이 집중되고는 있으나 실험체 중앙에 국부적으로 높은 변형이 보이는 A-100과는 달리 CFRP 전체에 걸쳐 고른 변형률 분포를 보인다. 이것은 CFRP가 부착된 양쪽 단부에서 부착되지 않은 중앙부로 인장력을 전달하고 있기 때문으로 판단된다. 따라서 구조물의 변형이 집중되어야 하는 위치에 넓게 퍼진 변형률 분포를 보인다면 비부착구간이 발생하였음을 간접적으로 유추할 수 있다고 판단된다.

4.4 센서 종류별 변형률 계측결과 비교

BOTDR 센서를 통한 변형률 계측의 신뢰성을 검증하기 위하여 전기저항식 변형률 게이지의 결과와 비교하여 Fig. 15에 나타내었다. A-100의 경우 양쪽 단부 부근 두 센서의 변형률 차이는 약



(a) A-100



(b) M-30

Fig. 15. Comparison of CFRP Strain Measured by BOTDR Sensor and Electrical Resistance Gauge

10 %로 나타났다. 그러나 중앙부와 가까워질수록 그 차이가 감소하여 중앙부에서는 약 2 % 내외의 적은 변형률 차이를 나타내었다. M-30의 경우 두 센서의 중앙부 계측값의 차이가 5 % 미만으로 A-100과 같이 차이가 크지 않았다. 그러나 양단부로 갈수록 차이가 크게 발생하여 거동이 일치하지 않았다. 실험결과 대체적으로 변형률의 차이가 비교적 큰 곳은 위치상으로 CFRP의 비부착 구간 및 경계 부분이었다. 이것은 하중 재하가 진행되는 동안 부착면의 부착력 감소로 CFRP의 박리가 진행되는 구간이다. 따라서 부착상태의 변화가 일어나는 위치에서는 두 센서의 계측값 차이가 크게 나타났다. 또한 전기저항 게이지의 경우 부착된 위치의 국부적인 영향을 계측결과에 반영하므로 취득 데이터가 불안정한 특성이 있다. 따라서 CFRP 쉬트와 콘크리트 계면에서의 슬립 또는 접착제의 파괴에 따른 국부적인 영향이 계측결과에 반영되어 두 센서의 결과값이 차이를 보였을 것으로 판단된다. 반면에 BOTDR 센서는 단일실험체에서 계측된 여러 지점의 변형률이 일정한 경향을 보이므로 더 안정된 계측결과를 도출한다고 판단된다. 추후 연구를 통하여 센서의 계측장이 500 mm 이하로 감소하면 국부적인 손상의 판단이 가능하여 그 활용 가치가 클 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구는 구조물에 보강된 CFRP 쉬트의 탈락 위치 및 손상의 계측에 BOTDR 센서의 활용 가능성을 평가하기 위하여 센서가 장착된 CFRP 쉬트 보강 RC 보의 4점 휨실험을 실시하고 변형률 응답을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) BOTDR 센서를 통해서 획득된 변형률 분포를 분석하여 CFRP 보강재의 탈락 구간을 시각화 하는 것이 가능하다는 것을 확인하였다.

(2) BOTDR 센서를 이용한 변형률 계측은 단일 실험체에서 계측된 여러 지점의 변형률 데이터가 일정한 경향을 보이므로 전기저항식 변형률 게이지보다 안정적인 계측이 가능한 것으로 확인되었다.

(3) 추후 연구를 통하여 BOTDR 센서의 계측장을 보다 작게하면 CFRP 쉬트의 국부적인 손상 및 탈락을 실무적으로 탐지하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 국토교통부 건설기술연구개발사업의 연구비지원(과제번호: 17SCIP-B128496-01)에 의해 수행되었습니다.

References

He, Z. and Hotate, K. (2002). "Distributed fiber-optic stress-location measurement by arbitrary shaping of optical coherence function." *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 20, No. 9, pp. 1715-1723.

Hong, Y. H. and Lee, H. J. (2007). "Theoretical study of Brillouin OTDA using two pulse lasers." *Korean Journal of Optics and Photonics*, Vol. 18, No. 3, pp. 196-201 (in Korean).

Horiguchi, T., Kurashima, T. and Tateda, M. (1990). "a technique to measure distributed dtrain in optical fibers." *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Photonics Technology Letters*, Vol. 2, No. 5, pp. 352-354.

Hwang, Y. K., Park, K. T. and Yoo, Y. J. (2007). *Diagnosis method for reinforcing state of adhesional reinforcing-member including FRP strip or sheet usnig optical fiber cable sensor*, Republic of Korea Patent No. 10-0789924, Korean Intellectctual Property Office (Registered).

Kim, B. C., Jung, K. S., Park, J. S. and Park, K. T. (2018). "Brillouin-OTDR strain response analysis of optical fiber-embedded carbon fiber sheet." *Korean Society for Advanced Composite Structure*, Vol. 9, No. 3, pp. 1-8 (in Korean).

Kim, C. Y. (2007). *Flexural behavior of RC beam strengthened with prestressed CFRP plates considering bond characteristics*, Master Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University, Seoul, Korea (in Korean).

Kim, K. S. (2003). "Self diagnosis technique of concrete structure repaired and strengthened by carbon fiber sheets using optical fiber sensors." *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 23, No. 2, pp. 133-139 (in Korean).

Kim, Y. H. (2006). *Analysis of influencing parameters on strengthening effect of CFRP sheets used to strengthen reinforced concrete beams*, Master Thesis, Department of Architectural Engineering, Ewha Womans University, Seoul, Korea (in Korean).

Kim, Y. T. (2002). "Strain measurement and cracks detection of concrete beams using fiber optic sensors." *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 22, No. 2, pp. 221-227 (in Korean).

Lim, D. H. (2013). "An experimental study of flexural strengthening method of reinforced concrete beams with near surface mounted CFRP strips." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 33, No. 1, pp. 131-136 (in Korean).

Park, H. J., Koo, K. Y., Yi, J. H. and Yun, C. B. (2011). "Development of a damage monitoring technique for jacket-type offshore structures using fiber bragg grating sensors." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 31, No. 6A, pp. 399-408 (in Korean).

Seo, M. S. (2006). *Distributed optical fiber sensor using spatially-selective brillouin scattering*, Master Thesis, Department of Physics and Technology, Chonbuk National University, Jeonju, Korea (in Korean).