

건물 모니터링을 위한 FBG센서 보강재의 감지성능에 대한 온도의 영향

Effect of Temperature on the Sensing Capability of FBG-FRP for Monitoring of Building Structure

박 정 훈* 신 혜 수** 이 주 석** 서 수 연***
Park, Jeon-Hun Shin Hye-Su Lee, Ju-Seok Seo, Soo-Yeo

Abstract

The importance of repair and retrofit for maintenance has emerged as many buildings in Korea are aging. Strengthening with Fiber Reinforced Polymer (FRP), which is actively applied among many reinforcing techniques, requires measurement to ensure that the reinforcing effect is maintained continuously. Previous studies have determined that Fiber Bragg Grating (FBG) fiber optic sensors with proven performance are suitable for instrumentation devices. In this study, experimental work was performed to find the effect of temperature on the FBG sensor of FBG-FRP and evaluate the sensing capability of the FBG sensor embedded in FRP. From the test, it was found that the effects of temperature were small. The performance of the FBG sensor is similar to that of the electric strain gauge, and the measurement performance against attachment deformation has been verified.

키워드 : 섬유보강폴리머, 섬유 브래그 격자 광섬유 센서, 온도, 감지성능

Keywords : Fiber Reinforce Polymer, Fiber Bragg Grating Optical fiber Sensor, Temperature, Sensing capability

1. 서 론

철근 콘크리트 구조물은 사용 시간이 지남에 따라 여러 외부 환경에 노출되어 성능이 저하되고 안전성 확보에 어려움이 있다. 우리나라의 경우 2018년 기준 건축물 현황 통계 (MOLIT, 2019)에 따르면 2018년 12월 기준으로 30년 이상된 건물이 37.1%이고 또한 1990년대 초반에 주택 200만호 사업에 의해 준공된 많은 건물이 몇 년내에 30년 이상이 되어 건축물의 적절한 보강과 유지관리의 중요성이 증대되고 있다.

철근 콘크리트 보강 공법으로서, 최근 인장에 저항하는 섬유와 결합체인 수지를 인발 성형하여 만들어낸 FRP(Fiber Reinforced Polymer) 복합 부재가 질량대비 강도

가 우수하고 내식성이 뛰어나다는 장점으로 여러 나라에서 보강재로서 적용이 활발히 이루어지고 있다(Kim, 2019). 하지만 FRP로 보강한 경우, 구조부재에 FRP를 부착하기 위해 사용한 에폭시의 부착성능 저하로 인하여 보강효과가 유지되지 못하는 경우가 종종 발생한다. 따라서 FRP가 구조부재와 일체로 거동하여 보강효과가 지속적으로 유지되는지를 계측 관리할 필요가 있다.

계측관리를 위한 장치로서, FBG 광섬유 센서(Fiber Bragg Grating Optical fiber Sensor)는 여러 지점을 동시에 계측 가능하고 전자기파에 대한 영향을 받지 않아 정밀한 측정이 가능하며 응용성, 시공성이 우수하다. 반면 기존의 전기식 변형 게이지는 다중 측정이 어렵고 전자기파에 영향을 받는다. 따라서 FRP로 부재를 보강한 후 보강효과 지속성을 파악하기 위한 계측에는 FBG 광섬유 센서를 적용하는 것이 바람직 할 수 있다. 이와 관련해서는, FBG 광섬유 센서가 내장된 다양한 형태의 FRP 보강재에 대한 기존 연구들 (Woo, 2015; Song, 2019)을 통하여 FBG 광섬유 센서의 활용도와 계측 성능을 확인하였다. Woo et al. (2015)은 피로시험을 통하여 FRP-FBG 센서의 내구성에 대한 신뢰를 확인하고 우리나라와 일본 두 곳의 터널 현장에 전기식 게이지와 FRP-FBG 센서를 매립하여 각각 22개월, 15개월 동안 계측을 진행하였다. 두 사례 모두 계측

* 한국교통대학교 대학원 석사과정

** 한국교통대학교 대학원 학사과정

*** 한국교통대학교 건축학부 교수, 공학박사

(Corresponding author : School of Architecture, Korea National University of Transportation, syseo@ut.ac.kr)

이 연구는 2018년도 한국연구재단의 기초연구사업 (과제번호: 2018R1A4A1025953)의 지원과 2019년 한국교통대학교 지원을 받아 수행되었음.

결과 전기식 게이지의 값에서 이상 계측 값이 관찰되었으며 원인은 용수 접촉 및 습기에 의한 절연 불량으로 판단하였다. 반면 FRP-FBG 센서는 재질 특성상 절연에 의한 영향을 받지 않아 정밀한 계측 값을 보였다. 이는 유지관리를 위한 지속적인 계측에는 FRP-FBG 센서가 전기식 게이지보다 적합하다는 것을 나타낸다. Song et al. (2019)은 FRP 판 사이에 에폭시로 FBG 광섬유 센서를 부착한 FRP 보강재의 인장실험을 통하여 인장강도를 산정하여 그 상한값의 강도가 발현되기 위하여 광섬유와 에폭시 사이에서 미끄러짐이 발생하지 않는 적절한 부착 강도를 갖는 최소 부착 길이를 규명하였다. 또한, FBG-FRP의 부착 방식을 변수로 두고 인장실험을 진행하여 전기식 게이지와 가장 유사한 계측 값을 나타내는 부착 방식을 제안하였다.

본 연구의 목적은 FBG-FRP의 온도에 따른 영향을 규명하고 실제 콘크리트에 보강재로 사용되었을 때의 계측 성능을 규명하는 것이다. 이를 위하여, FBG-FRP의 온도 실험을 진행하고 온도에 따른 영향을 파악하였다.

2. FBG 광섬유 센서 계측 원리

FBG 광섬유 센서는 Figure 1과 같은 구조로 광섬유 코어 부분에 브래그 격자가 내장되어 있다. 코어에 빛이 입사하면 높은 굴절률을 갖는 코어와 낮은 굴절률을 갖는 클래딩의 굴절률 차이로 인해 전반사가 일어난다. 전반사된 빛이 간격이 일정한 브래그 격자를 지나면서 격자마다 특정 파장 조건에 만족하는 빛이 반사되고 이외의 빛은 통과된다. 이때 계측에는 반사된 빛만이 고려된다. 부재에 변형이 일어나면 브래그 격자 사이의 간격이 변화하기 때문에 반사되는 빛의 파장 길이 또한 달라져 즉각적으로 부재 변형을 계측이 가능하다(Choi, 2006).

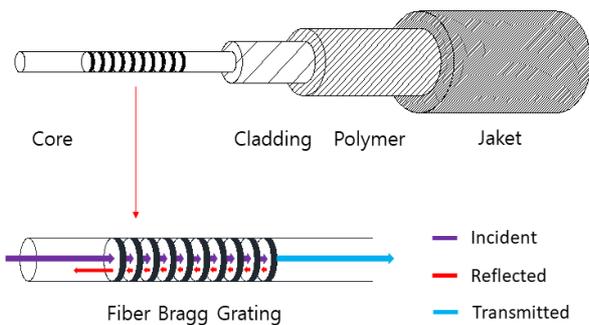


Figure 1. FBG optical fiber sensor composite

광섬유 센서의 구성은 게르마늄이 첨가된 광섬유 코어에 많은 브래그 격자가 새겨져 있는 형태이다. 측정원리는 온도나 강도 등의 외부 조건변화에 따라 각 격자에서 반사되는 빛의 파장이 달라지는 특성을 이용한다. Figure 2에 나타난 바와 같이, 광폭 스펙트럼이 입사되면 브래그 격자는 특정 파장만을 반사하고, 그 외의 파장은 그대로 투과시키는 특징을 갖는다. 격자의 주변 온도가 바뀌거나 격자에 인장이 가해지면, 광섬유의 굴절률이나 길이가 변화하

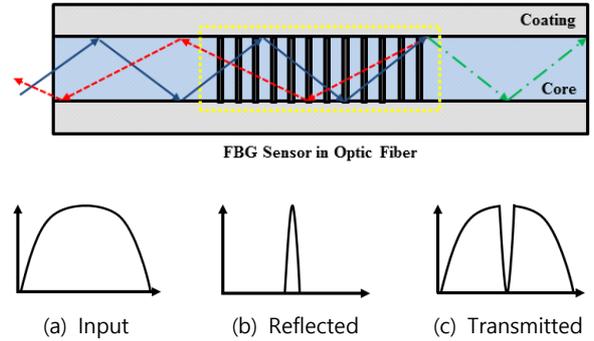


Figure 2. Measuring principle of single FBG

여 반사되는 특정 파장이 바뀐다. 따라서 광섬유 브래그 격자에서 반사되는 빛의 파장을 측정하여 온도나 인장, 압력, 구부림 등을 감지할 수 있다. 광폭 스펙트럼을 광섬유에 입사시킬 경우, Equation 1과 같이 반사되는 파장성분(Reflected Signal)은 간섭을 일으켜 광섬유 격자 부위에서 반사되며 나머지 파장성분은 통과하여 계측에 관여하지 않는다.

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

여기서 λ_B 는 반사된 파장길이(μm), n 은 유효 반사 지표, Λ 는 격자의 주기(μm)

격자에서 반사되는 브래그 파장은 유효 굴절률과 격자 간격의 함수이다. 유효 굴절률과 격자의 주된 의미는 온도와 변형률의 함수이므로 광섬유 브래그 격자에 온도나 변형이 주어지면 반사되는 파장이 달라진다. 브래그 조건식에서 브래그 파장을 전미분한 후 온도, 변형률과 유효 굴절률, 격자간격을 대입하면 Equation 2를 얻을 수 있다.

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B[(\alpha + \xi)\Delta T + (1 - P_e)\Delta\epsilon] = K_T\Delta T + K_\epsilon\Delta\epsilon \quad (2)$$

여기서, $\Delta\lambda_B$ 는 파장길이 변화(μm), α 는 온도에 따른 팽창계수, ξ 는 온도에 따른 굴절률변화를 고려한 계수, ΔT 는 온도변화, P_e 는 광탄성 상수, $\Delta\epsilon$ 는 FBG의 변형률 변화, K_T , K_ϵ 는 온도효과와 굴절률변화를 고려한 계수임.

Equation 2에서 파장의 변화는 온도와 변형률 변화에 의한 영향을 모두 포함하고 있으며 광섬유로 측정 가능한 범위 내에서는 대체로 선형적이다. 온도 차이가 없는 상태에서 구조물의 변형만 측정한다면 Equation 3과 같이 간단하게 변형률과 파장의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\epsilon = \frac{1}{1 - P_e} \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \quad (3)$$

변형률은 브래그 반사 파장의 변화량만 측정하면 쉽게 구할 수 있다. 또한 광섬유 브래그 격자의 중심 파장을 서로 구분해서 격자를 제작하면, 광섬유에 두 개 이상 브래그 격자를 배열하여 다점측정이 가능해진다. FBG 센서는

변형이 생기면 측정되는 파장값이 바뀌어 시공 후 초기 파장값만 확보되면 파장변화량으로 변형률을 계산할 수 있어 모니터링에 최적화된 센서이다.

3. 온도에 따른 FBG센서의 감지성능 평가 실험

3.1 실험체 상세

FBG-FRP의 계측에 온도가 영향을 주는지를 알아보기 위하여 Table 1과 같이 3개의 실험체로 실험을 진행하였다. B-Sensor 실험체는 Figure 3(a)와 같이 FRP에 부착하지 않은 순수 FBG 센서이다. FRP에 FBG 센서를 완전부착한 FB 실험체와 센서부를 비부착한 DAF 실험체는 FBG-FRP를 제작할 때 길이 500mm FRP 판 사이에 약 2mm의 일정한 두께로 에폭시를 도포하여 중심에 위치한 FBG 센서는 격자로부터 양쪽 100mm까지만 부착하고 챔버 내부 온도를 측정하기 위하여 FBG 센서와 동일한 위치에 열전대를 같이 삽입한 실험체이다. 이때 FRP 판 사이 브래그 격자 부분은 Figure 3(d)와 같이 부착하였다. 완전 부착 방식은 에폭시가 FBG 센서의 브래그 격자를 완전히 감싸는 간단한 방식이며 센서부 비부착 방식은 완전부착방식과 비슷하게 부착하지만, FBG 센서의 브래그 격자 부분을 코팅하여 에폭시와 비부착하는 방식이다.

Table 1. Test specimen list for temperature test

| Specimen name | Bonding type | Length (mm) | Bonded length (mm) | No. |
|---------------|----------------------------------|-------------|--------------------|-----|
| B-Sensor | Bare sensor | - | - | 1 |
| FB | Full bonding | 500 | 210 | 1 |
| DAF | Debonding around FBG sensor part | | 200 | 1 |

3.2 사용 재료

본 연구에서의 FBG-FRP를 구성하는 재료는 FBG 센서, FRP 그리고 FBG 센서를 FRP에 부착하기 위한 에폭시 이다. 각 재료의 재료적 특성은 Table 2 ~ 4에 나타난 바와 같다.

Table 2. Material properties of fiber optic sensor

| Product Name | Nominal diameter of core(mm) | Nominal diameter of Product(mm) | Tensile strength (N/mm^2) |
|----------------|------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| ITU-T G.657.B3 | 0.125 | 0.250 | 690 |

Table 3. Mechanical Properties of epoxy

| Product Name | Compressive strength (N/mm^2) | Tensile shear bond strength (N/mm^2) | Bond strength to concrete (N/mm^2) |
|--------------|-----------------------------------|--|--|
| SK-CPA10 | 90 | 10 | 1.5 |

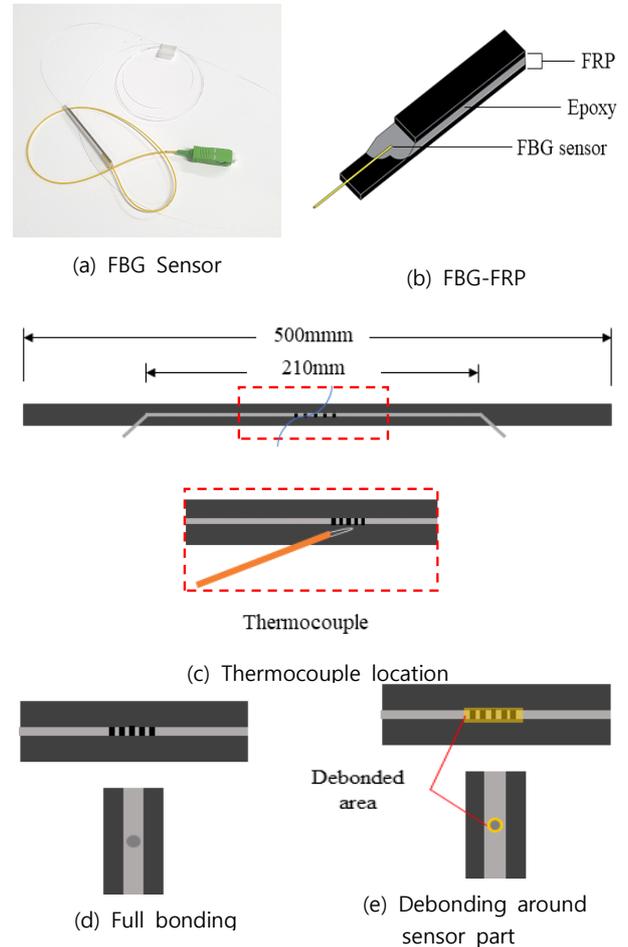


Figure 3. Specimen detail for temperature test

Table 4. Mechanical Properties of FRP

| Product Name | Nominal thickness (mm) | Width (mm) | Tensile strength (N/mm^2) | Elastic module (N/mm^2) |
|--------------|------------------------|------------|-------------------------------|-----------------------------|
| SK-CPS 0512 | 1.2 | 50 | 2.942 | 165,000 |

3.3 실험 방법

실험은 Figure 4와 같이 온도 실험기 챔버 내부에 B-sensor, FB, DAF 실험체를 위치시키고, 내부 온도는 폭시의 유리전이온도를 고려하여 -10℃에서 최대 50℃까지 가열하였다. 각 시편별로 실험은 총 2회씩 실시하였다. 챔버 내부의 온도를 측정하기 위하여 열전대를 넣어 챔버 내부온도를 측정하였다.

3.4 실험 결과

Figure 5는 실험 결과를 보여준다. (a), (b) 그래프에서 B-Sensor의 경우, 0℃ 이하에서 비선형적인 모습을 보이고, 0℃ 이상부터는 선형적인 모습을 보인다. 에폭시가 FBG 센서를 감싸고 있는 FB와 DAF 실험체는 전 구간에서 선형적인 모습을 보이며, 두 실험체가 유사한 양상을 보여준다. 그래프 (c)는 그래프 (a), (b)의 평균을 나타낸 것이다. (c)의 온도 그래프를 온도에 대한 함수로 나타내면

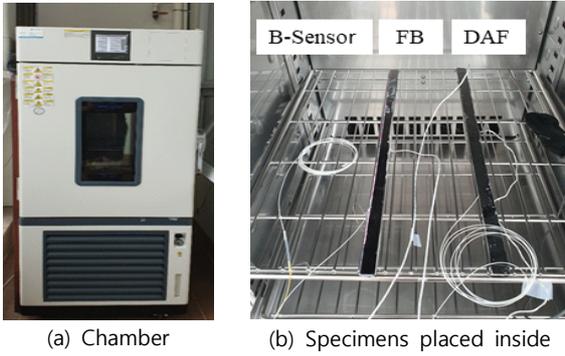


Figure 4. Test set up

Equation 1과 같다.

$$\epsilon = 0.0008T \quad (1)$$

여기서, ϵ 은 온도 영향에 의한 변형률, T는 온도(°C)
 2회 실험의 평균 값을 FBG 센서의 최대 변형률에 대한
 비로 나타내면 Figure 4의 (d)와 같다. 전체적으로 온도의
 변화는 아주 작은 영향을 미치는 것으로 나타났다.

6. 결론

본 연구에서 FRP, 에폭시, FBG 광섬유 센서의 결합물
 인 FBG-FRP 보강재의 주변온도에 따른 감지성능의 연구
 를 진행하였다. 온도 실험을 통하여, FBG 센서에 영향을
 주는 인자인 온도에 따른 영향을 파악한 결과, FBG-FRP
 의 부착 방식에 따른 차이는 크지 않는 것으로 나타났다.
 완전부착한 FB 실험체와 센서 비부착한 DAF 실험체는

전 구간에 대하여 선형적인 모습을 보였다. 반면에 FRP에
 매립되어 있지 않은 B-Sensor는 -10~0°C 사이의 온도에서
 비선형적인 모습을 보였으며 온도증가에 대하여 다소 급
 격한 변화양상을 보였다.

이로부터, FBG 센서를 FRP와 결합시킴으로써 온도에
 의한 영향이 저감되는 것으로 나타났다.

REFERENCES

1. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2019). *Press release*, Feb. 1
2. Kim, K., & Jung, S. (2019). State-of-the-art of FRP Reinforcement for Concrete Structure, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, 31(2), 29-33.
3. Woo, J., Kim, Y., & Park, Y. (2015). Durability Verification of FRP-type FBG Sensors used for Tunnel Maintenance Measurements, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 63(9), 52-56.
4. Song, S., Seo, S., & Kim, K. (2019). Self Sensing Reinforcement Combined with Fiber-Optic Sensor and FRP Strip for Structural Reinforcement, *Journal of the Architectural Institute of Korea - Structure & Construction*, 35(8), 123-130.
5. Choi, J., Lee, K., Kang, T., & Park, K. (2006). The Design of the Rebar-FBG sensor system for infra-structure monitoring, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 2367-2370.

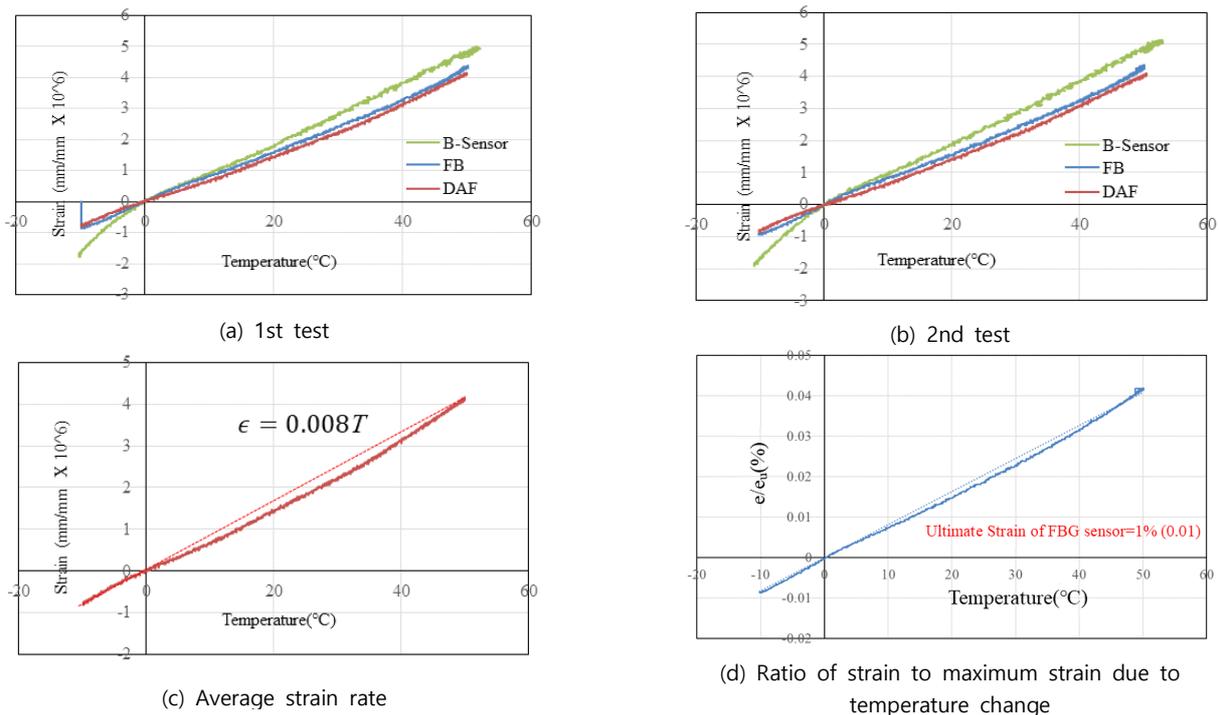


Figure 5. temperature test result