

광섬유 격자 센서를 이용한 모르타르 시편의 온도 및 열변형 측정

Measurements of Thermal Gradient and Thermal Strain of Mortar  
Specimens Using Fiber Bragg Grating Sensor

임홍철\*, 우상균\*\*, 송영철\*\*

\* 연세대학교

\*\* 전력연구원

서울시 서대문구 신촌동 134번지 대전시 유성구 문지동 103-16

요 약

콘크리트 구조물은 화재나 열을 받으면 내부에 열응력이 발생하며, 이것은 구조물의 경계조건 때문에 증가할 수 있다. 구조물에 발생하는 온도와 열변형은 광섬유 센서를 이용하여 측정할 수 있으며, 본 연구에서는 이를 위해 광섬유 격자 센서를 사용하였다. 광섬유 센서는 한 개의 선상에서 2개 이상의 측정점에서 변형을 측정할 수 있기 때문에 온도와 열변형을 동시에 측정하는 것이 가능하다. 본 연구에서는 광섬유 센서로 측정된 데이터의 신뢰성을 검증하기 위해 변형률 게이지와 온도센서를 이용하여 측정된 데이터와 비교하였다. 실험결과, 광섬유 센서는 콘크리트 내부의 온도와 열변형을 측정하는 것이 가능하며, 그 결과는 온도 센서에 의해 측정된 결과와 서로 선형적인 관계성을 가지고 있음을 알 수 있었다.

Abstract

As concrete structures are heated, the thermal stress can be developed. Because of the boundary conditions of structures, the thermal stress may be arisen. Thermal strain and temperature can be measured simultaneously using an optical fiber sensor. For the measurements, Fiber Bragg Grating Sensor(FBG sensor) was used in the this study. Because it can measure the strains more than two points with one line, it was possible to measure both thermal strain and temperature with one line. To prove the reliability of data measured by FBG sensor, thermal strain and temperature were measured using strain gauge and thermocouple. From this study, it was founded that both the FBG temperature sensor and thermocouple could measure the temperature and the results were related each other linearly.

## 1. 서 론

콘크리트 구조물에 화재나 가열 등에 의해 온도하중이 가해지면 그 강도에 손실을 가져올 수 있으며, 강도 손실은 구조물이 받은 최고온도와 그 온도의 지속시간 등에 영향을 받는다. 따라서 온도하중으로 인한 구조물 내부의 온도변화 및 열변형을 Modelling을 통해 분석하고 실제로 상시 계측할 수 있다면 구조체의 손상평가 및 보수보강에 있어서 매우 중요한 근거자료를 제공할 수 있을 것이다.

Sanad 및 Gillie 등은 Modelling을 통해 온도 상승에 콘크리트가 노출되었을 때 내부상승 온도와 구조물 내부의 온도 분포가 어떻게 형성되는지 알아보기 위한 온도분포 및 열응력 분포 해석에 관한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 구조물에 내장하여도 구조체에 손상을 주지 않고, 전기적 노이즈가 적으며 민감도가 우수한 광섬유 센서 중 Fiber Bragg Grating Sensor를 이용하여 온도하중을 받는 콘크리트 구조물 내부의 온도변화와 그로 인한 열변형 측정을 동시에 수행하였다.

FBG sensor는 토목, 건축분야의 모니터링 시스템의 감지소재로 주목받고 있는 신소재로서 수직, 수평하중에 의한 변형을 측정에 활용되어 오고 있으나, 열변형과 온도 측정에 관한 사례는 거의 없으므로, 본 연구에서는 그 활용방안의 도출과 결과를 검증을 연구목표로 정하였다.

## 2. Fiber Bragg Grating sensor

FBG sensor는 Fig. 1과 같이 광섬유에 특정 파장값( $\lambda_B$ )만을 반사해 내는 회절격자를 새겨 넣어 센서의 길이 변화에 따라 반사되어 돌아오는 빛의 파장 값이 달라지는 원리를 이용 [Merzbachert 등; Davis 등; Nawy 등]한 것으로, 그 기본식은 식(1)과 같다.

$$\lambda_B = 2nP \tag{1}$$

여기서,  $\lambda_B$  : 반사되는 파장(nm)

$n$  : 광섬유 코어의 유효 굴절률

$P$  : 회절 격자 간격(nm)

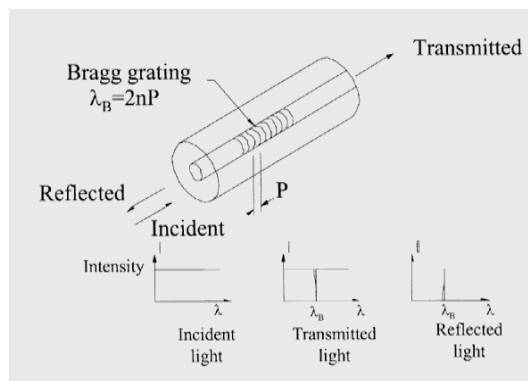


Fig. 1 FBG sensor 원리

FBG sensor의 축 방향 변형과 파장이동의 관계는 식(2)와 같다[Maaskant 등].

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\epsilon_{ax} + (\alpha_s + \xi_s)\Delta T + (1 - P_e)\epsilon_{thermal} \quad \text{식(2)}$$

여기서,  $P_e$  : 광 탄성 계수 (0.22)

$\epsilon_{ax}$  : 시편의 축 방향 변형률

$\epsilon_{thermal}$  : 시편의 축 방향 열 변형률

$\alpha_s$  : 광섬유의 열 팽창 계수 ( $0.55 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ )

$\xi_s$  : 광섬유의 열 광학 계수 ( $8.3 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ )

$\Delta T$  : temperature change

온도를 제외한 기타 하중의 효과로 인한 변형( $\epsilon_{ax}$ )은 없다고 가정하면 식(2)는 식(3)과 같은 열변형 공식으로 유도된다.

$$\epsilon_{thermal} = \left[ \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} - (\alpha_s + \xi_s)\Delta T \right] / (1 - P_e) \quad \text{식(3)}$$

이때 열변형은 실험에서 측정된 파장 이동값을 식(3)에 대입하여 구하게 된다. FBG sensor의 다중 측정성(하나의 광섬유에 여러 개의 격자를 이식하여 분포된 여러 지점의 변형을 측정)은 다른 광섬유 센서와 구별되는 장점으로 본 실험에서는 이를 이용하여 온도와 열변형을 동시에 측정하였다.

### 3. 시편 제작

시편은 잔 골재만 사용하여 제작한 모르타르를 이용하였으며, 강도 및 열팽창계수 측정실험을 선행하였다. 모르타르의 배합 및 재료의 품질은 “KS L 5220” 규준을 준용하였으며, 실험은 KS L 5105를 따라 수행하였다. 배합은 물 : 시멘트 : 모래 = 1 : 1.67 : 5 (중량비)로, 물/시멘트 비는 60%로 정하였다. 이때 28일 압축강도값은  $143.3 \text{ kgf/cm}^2$  이다.

#### 3.1 열팽창계수 측정시편

모르타르의 열팽창 계수를 측정하기 위해서  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$  시편에 strain gauge를 부착하여 실험하였다. 이때 시편의 warping을 보정하기 위해 strain gauge를 시편 양면에 각각 하나씩 붙였다. Strain gauge를 이용한 변형률 측정 원리는 식(4)와 같다.

$$\left( \frac{\Delta R}{R} \right)_{\Delta T} = (\beta - \alpha) S_g \Delta T + \gamma \Delta T = S_g \epsilon \quad \text{식(4)}$$

여기서,  $\left( \frac{\Delta R}{R} \right)_{\Delta T}$  : 온도에 따른 게이지 저항의 변화

$\beta$  : 재료의 열팽창 계수

$\alpha$  : 게이지의 열팽창 계수

$S_g$  : 게이지 인자(여기서는 2.11)

$r$  : 게이지 저항의 온도 계수

Strain Indicator가 출력하는 값은  $\epsilon$ 이며 이 값은 strain gauge의 온도 보정을 통한 값이므로 게이지 자체의 온도 효과( $\beta$ ,  $\alpha$ ,  $\gamma$ )를 보정하기 위해 참조 재료(티타늄 실리케이트)를 사용한다.

$$\begin{aligned} \text{측정 시편 : } S_g \epsilon_{as} &= (\beta_s - \alpha) S_g \Delta T + \gamma \Delta T \\ \text{참조 재료 : } S_g \epsilon_{ar} &= (\beta_r - \alpha) S_g \Delta T + \gamma \Delta T \\ &(\beta_r = 0.03 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}) \end{aligned}$$

두 식을 종합하면,  $\epsilon_{as} - \epsilon_{ar} + \beta_r \Delta T = \beta_s \Delta T$  가 되고  $\beta_s$ 는 측정하고자 하는 시편의 열팽창계수로서 계산을 통해 구해낼 수 있다. 그리고  $\beta_s \Delta T = \epsilon_{thermal}$  로 이 값은 온도 증가에 따른 재료의 열변형률이라고 할 수 있다. 그 결과 모르타르의 열팽창률은  $12.08 \times 10^{-6} \epsilon / ^\circ\text{C}$ 임을 알 수 있다.

### 3.2 모르타르 Bar

실험에 사용되는 FBG sensor는 Fig. 2에서와 같이 하나의 광섬유에 두 종류의 격자가 이식된 모델이다. 두 격자 중 하나는 시편에 부착되어 시편과 같이 거동할 수 있게 하여(FBG sensor) 시편의 열변형을 측정하고, 다른 하나는 라인의 끝에 위치시키고 유리튜브를 씌워 시편에 부착되지 않고 자유롭게 거동할 수 있게 두어(FBG temp. sensor) 온도변화를 측정한다.

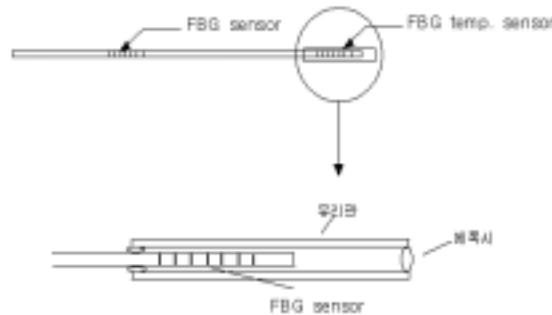


Fig. 2 FBG sensor & FBG temp. sensor

FBG sensor를 안전하게 실험 시편 내에 매립하기 위해서 Fig. 3과 같이 FBG sensor를 매립한 모르타르 Bar 1(2×2×18cm)을 제작하여 실험하였다. 이는 철근과 같은 이질 재료에 광섬유 센서를 부착하여 실험해 왔던 기존의 연구와는 달리, 본 연구의 경우 열 특성이 다른 이질재료에 광섬유 센서를 부착하여 사용하면 그 결과를 신뢰할 수 없다는 가정 아래 고안되었다.

Bar 1의 측정값을 비교하기 위해 이와 동일한 방법으로 Fig. 4와 같이 strain gauge와 thermocouple을 매립한 모르타르 Bar 2를 제작하여 상온(25°C)에서 90°C까지 온도를 증가시켜 가며 실험하였다.

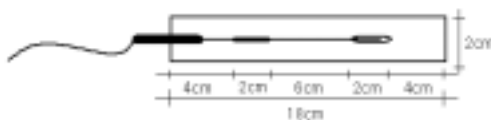


Fig. 3 모르타르 Bar 1

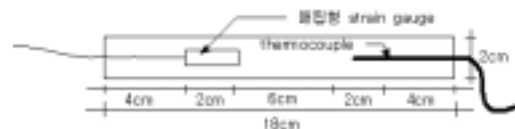


Fig. 4 모르타르 Bar 2

### 3.3 온도구배 및 열변형 측정 시편

Bar 1을 Fig. 5와 같은 최종 실험 시편(18×18×18 cm)의 깊이가 다른 3곳에 매립하고 실온(25℃)에서 90℃까지 온도를 높여가며 온도 구배 및 열변형을 측정하였다. 이 때 측정값의 검증을 위해 매립형 strain gauge와 thermocouple를 같이 매립하였다.

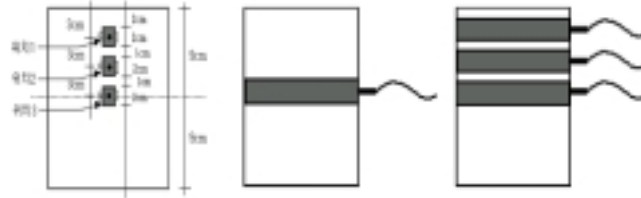


Fig. 5 최종 모르타르 시편(18×18×18cm)

## 4. 측정결과 및 분석

### 4.1 온도 측정 결과

모르타르 바 실험을 통해 FBG sensor와 strain gauge에 의해 측정된 열변형률을 모르타르의 열팽창계수를 이용하여 나누면 온도변화를 구할 수 있다.

또한 식(3)에서  $\varepsilon=0$ 으로 두어 온도 변화를 구하는 식(5)에 FBG temp. sensor로부터 구한 파장 변화값을 대입하여 온도변화를 구할수 있다.

$$\Delta T = \frac{1}{(\alpha_s + \xi_s)} \left( \frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} \right) \quad \text{식(5)}$$

각각의 측정값을 통한 온도변화를 비교해 보면 Fig. 6과 같은 결과를 얻을 수 있다. 작동가능 온도가 -10℃ ~70℃인 strain gauge는 오븐온도가 60℃일 때부터 작동에 이상을 일으켜 측정값을 신뢰할 수 없게 되었음을 알 수 있다.

하지만 FBG sensor의 경우 silica 재질로 구성되어 고온에서도 작동이 가능하며, 본 실험에서도 정상적으로 작동하여 데이터를 신뢰할 수 있다.

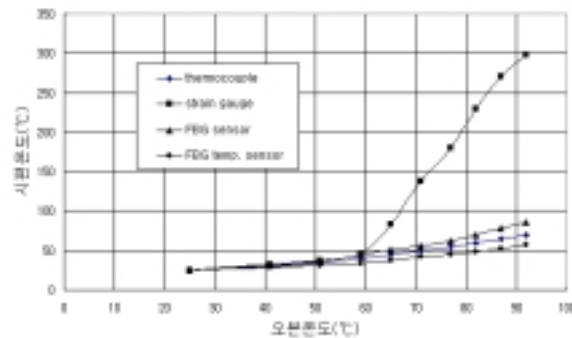


Fig. 6 온도측정 결과

#### 4.2 열변형 측정결과

FBG sensor의 파장 변화값을 식(3)에 대입하여 구한 열변형과 strain gauge로부터 얻은 변형을 비교하여 보았다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 FBG sensor는 가해진 온도 하중에서 안정적인 거동을 하는 반면, strain gauge는 시편의 온도가 20℃에 이르렀을 때 이미 작동에 이상이 생기기 시작한 것을 알 수 있다.

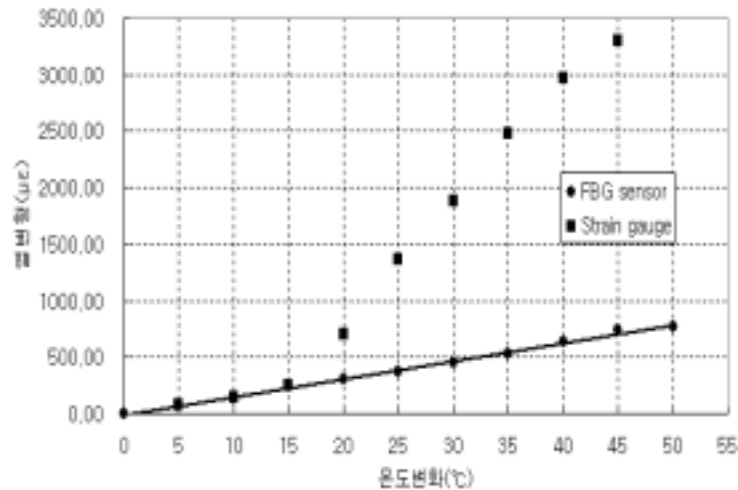


Fig. 7 온도변화에 따른 열변형 측정 (FBG sensor vs strain gauge)

#### 4.3 온도구배 측정결과

모르타르 바를 길이가 다른 3곳에 묻어(18×18×18 cm 정육면체 모르타르 시편) 위치에 따른 온도구배를 측정하였다. 위치 1~3의 온도구배는 시간에 따라 thermocouple과 FBG temp. sensor로 측정하여 Fig. 8~11에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 Thermocouple과 FBG temp. sensor는 정확히 같은 온도를 나타내지는 않았으나, Fig. 12에서 알 수 있듯이 두 값 사이에 선형적인 규칙성을 보이므로 실제 온도변화의 추정은 가능한 것으로 분석된다. 이는 FBG temp. sensor 제작에 이용된 유리튜브의 열전도율이 모르타르에 비해 작아 열을 차단하는 효과를 나타냈기 때문인 것으로 판단된다.

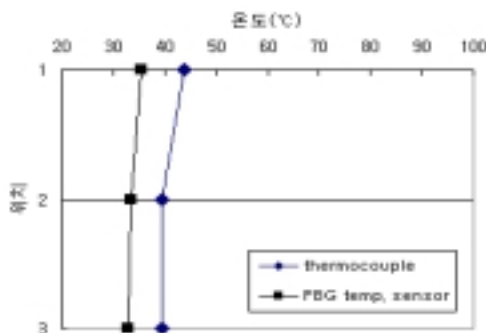


Fig. 8 1시간 후 온도구배

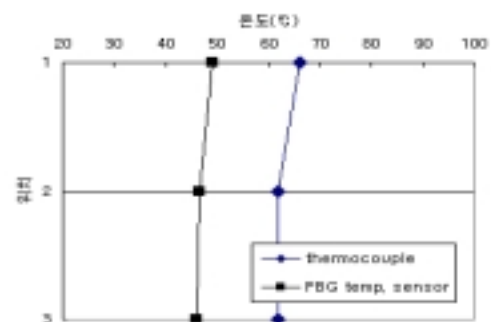


Fig. 9 2시간 후 온도구배

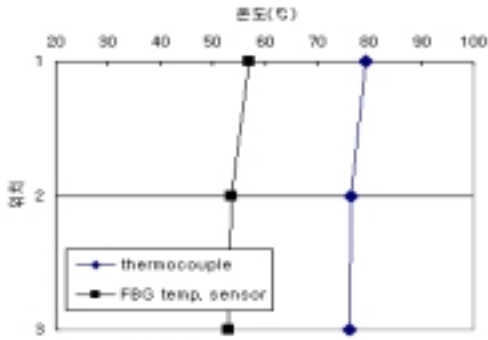


Fig. 10 3시간 후 온도구배

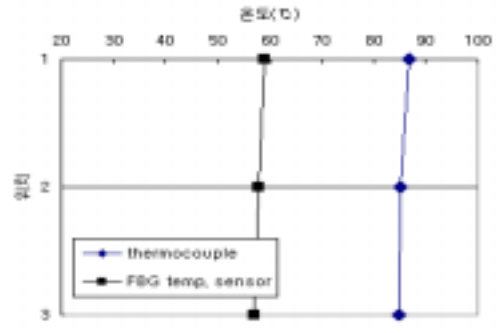


Fig. 11 4시간 후 온도구배

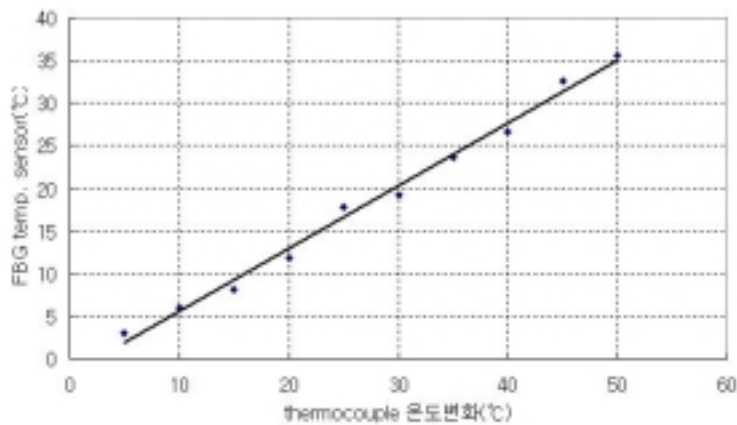


Fig. 12 FBG temp. sensor vs thermocouple

## 5. 결 론

본 연구에서는 FBG sensor의 다중 측정성을 이용하여 모르타르 시편을 이용하여 열변형률과 온도변화를 동시에 측정하였으며, 그 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) FBG sensor의 출력신호의 선형성을 통해 출력 data의 신뢰성을 증명할 수 있었다.
- 2) Strain gauge와 thermocouple을 통해 측정한 온도변화와 FBG sensor를 이용해 측정한 온도변화를 비교해 볼 때 FBG sensor의 신뢰성을 확인할 수 있었다.
- 3) 온도하중에 대해서도 FBG sensor의 경우 매립형 strain gauge와는 달리 안정성을 보이며 작동하였고, 그 값은 모르타르의 열팽창계수를 고려해 볼 때 신뢰할 수 있었다.
- 4) FBG temp. sensor로 측정한 온도변화량은 thermocouple로 측정한 값과 비교하여 선형적인 대응관계를 보였으며, 그 차이는 모르타르와 유리의 열전도률의 차이에 기인하는 것으로 판단된다.
- 5) 따라서 선형관계에 의한 추정식을 통해 실제 온도변화량을 계산할 수 있으며 미세한 온도구배 역시 측정할 수 있어, 구조물의 내부 온도변화 측정을 위해 FBG temp. sensor의 사용이 가능함을 알 수 있었다.

## 참고문헌

- 1) Davis, M. A., Bellemore, D. G. and Kersey, A. D., "Distributed Fiber Bragg Grating Strain Sensing in Reinforced Concrete Structural Components," *Cement and Concrete Composites* 19, pp. 45-57, 1997.
- 2) Gillie, M., Usmani, A., Rotter, M. and O'connor, M., "Modelling of heated composite floor slabs with reference to the Cardington experiments," *Fire Safety Journal* 36, pp. 745-767, 2001.
- 3) Kawasaki, B. S., Hill, K. O., Johnson, D. C. and Fujii, Y. "Narrow-band Bragg reflectors in optical fibers," *Optics Letters*, Vol. 3, No. 2, pp. 66-68, 1978.
- 4) Maaskant, R., Alavie, T., Measures, R. M., Tadros, G., Rizkalla, S. H. and Guha-Thakurta, A., "Fiber-Optic Bragg Grating Sensors for Bridge Monitoring," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 19, pp. 21-33, 1997.
- 5) Meltz, G., Morey, W. W. and Glenn, W. H., "Formation of Bragg Gratings in Optical Fibers by a Transverse Holographic Method," *Optics Letters*, Vol. 14, No. 15, pp. 823-825, 1989.
- 6) Merzbachert, C. I., Kersey, A. D. and Friebele, E. J., "Fiber Optic sensors in concrete structures: a review," *Smart Mater. Struct.* 5, pp. 196-208, 1996.
- 7) Nawy, E. and Chen, B., "Deformational Behavior of High Performance Concrete Continuous Composite Beams Reinforcement with Prestressed Prism and Instrumented with Bragg Grating Fiber Optic Sensors," *ACI Structural Journal*, January-February pp. 51~60, 1998.
- 8) Sanad, A. M., Lamont, S., Usmani, A. S. and Rotter, J. M., "Structural Behaviour in fire compartment under different heating regimes-Part 1(slab thermal gradients)," *Fire Safety Journal* 35, pp. 99-116, 2000.
- 9) KS L 5220 건조 시멘트 모르타르(Dry ready mixed cement mortar) 1993 제정.
- 10) KS L 5105 수경성 시멘트 모르타르의 압축 강도 시험 방법(Testing method for compressive strength of hydraulic cement mortar) 1963 제정, 1987 개정, 1997 확인.