광섬유 격자 센서를 이용한 모르타르시편의 온도구배 및 열 변형 측정

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

임 홍 철* 이 은 주** 전 흥 재*** 박 동 녘****

Rhim, Hong-Chul Lee, Eun-Joo Chun, Heung-Jae Park, Dong-Nyuck.

Abstract

As concrete structures are heated, thermal strain can be developed. Because of the boundary conditions, the thermal stress may be arisen. Thermal strain and temperature were measured simultaneously using an optical fiber sensor. Fiber Bragg Grating Sensor(FBG sensor) was used in the measurement. 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 compare data measured by FBG sensor, strain and temperature were measured using strain gauge and thermocouple. The FBG sensor could measure the strain under the temperature greater than 60℃ but strain gauge couldn't. Both the FBG temperature sensor and thermocouple could measure the temperature and the results are related each other linearly.

요 지

FBG sensor의 다중 측정성을 이용하여 모르타르 시편의 열 변형률과 온도 변화를 동시에 측정하였다. 또한, 광섬유 격자 센서를 이용하여, 열 변화에 따른 모르타르 시편의 내부 온도 구배를 측정하였다. 열 변형률을 기존 strain gauge와 함께 측정하였을 때, strain gauge는 섭씨 60도 이상의 온도에서 오차를 보이는 반면, FBG 센서는 안정된 측정값을 나타냈다. FBG 온도 sensor로 측정한 온도 변화량은 thermocouple로 측정한 값과 비교하였으며, 선형적인 대응관계를 보였다.

Keywords : FBG sensor, temperature, thermal strain, thermal gradient concrete

* 정회원, 연세대 건축공학과 교수, 공학박사

** 정회원, 연세대 대학원 석사과정

*** 연세대 기계공학부 교수, 공학박사

**** 연세대 대학원 석사과정

E-mail : hcrhim@yonsei.ac.kr 02-2123-2792

• 본 논문에 대한 토의를 2003년 9월 30일까지 학회로 보내주시면 2004년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 연구 배경

콘크리트 구조물에 화재나 가열 등의 온도하중이 가해지면 콘크리트강도에 손실을 가져올 수 있다. 강도 손실은 구조물이 받은 최고온도와 그 온도의 지속시간 등에 영향을 받는다. 온도 상승에 콘크리트가 노출되었을 때, 내부 상승 온도와 구조물 내부의 온도 분포가 어떻게 변화하는지 알아보기 위한 온도분포 및 열응력 분포 해석에 관한 연구가 이루어져 왔다(Sanad 등, 2000; Gillie 등, 2001). 온도하중으로 인한 구조물 내부의 온도변화 및 열변형을 Modelling을 통한 해석뿐 아니라 실제로 상시 계측할 수 있다면 구조체의 손상평가 및 보수보강에 있어서 중요한 근거자료의 역할을 할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 구조물에 내장하여도 구조체에 손상을 주지 않고, 전기적 노이즈가 적으며 민감도가 우수한 광섬유 센서 중 Fiber Bragg Grating Sensor의 다중측정원리를 이용하여 온도하중을 받는 콘크리트 구조물 내부의 온도변화와 그로 인한 열변형 측정을 동시에 수행하였다. FBG sensor는 건축, 토목분야의 모니터링 시스템의 감지소재로 주목받고 있는 신소재로서 수직, 수평하중에 의한 변형률의 측정에 활용되어 오고 있다. 하지만 열변형과 온도의 측정에 관한 사례는 없으며, 본 연구에서 그 활용방안의 검증을 목적으로 한다.

2. Fiber Bragg Grating sensor

FBG sensor는 Fig. 1과 같이 광섬유에 특정 파장값(λB)만을 반사해 내는 회절격자를 새겨 넣어 센서의 길이 변화에 따라 반사되어 돌아오는 빛의 파장 값이 달라지는 원리를 이용한다.(Merzbachert 등, 1996; Davis 등, 1997; Nawy 등, 1998). 기본식은 다음 식과 같다.

$$\lambda_B = 2nP \qquad (1)$$

λ_B : 반사되는 파장(nm)
n : 광섬유 코어의 유효 굴절률
P : 회절 격자 간격(nm)

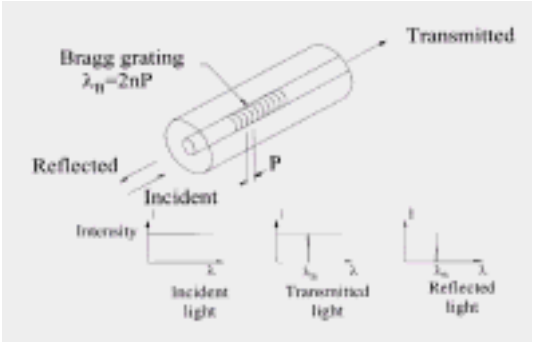

Fig. 1 FBG sensor 원리

FBG sensor의 축 방향 변형과 파장이동의 관계식은 다음과 같다(Maaskant 등, 1997).

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1-P_e)\varepsilon_{ax} + (\alpha_s+\xi_s)\Delta T + (1-P_e)\varepsilon_{thermal} \qquad (2)$$

P_e : 광 탄성 계수 (0.22)
ε_{ax} : 시편의 축 방향 변형률
$\varepsilon_{thermal}$: 시편의 축 방향 열 변형률
α_s : 광섬유의 열 팽창 계수 (0.55×10^{-6} /℃)
ξ_s : 광섬유의 열 광학 계수 (8.3×10^{-6} /℃)
ΔT : 온도변화

온도를 제외한 기타 하중의 효과로 인한 변형(ε_{ax})은 없다고 가정하면 식 (2)는 다음과 같은 열변형 공식으로 유도된다.

$$\varepsilon_{thermal} = [\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} - (\alpha_s+\xi_s)\Delta T]/(1-P_e) \qquad (3)$$

실험에서 측정된 파장 이동값을 식 (3)에 대입하여 열변형을 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 측정한다. 그 외에 FBG sensor는 광섬유 그 자체이기도 하므로 신호를 전달하는데 문제가 없으며 내구성, 저렴한 대중 생산의 가능성, 연속적 다중송신의

가능성, 장기간 측정가능, 절대값 측정, 응답의 선형성, 등의 이점이 있다(Merzbachert 등, 1996).

3. 시편 제작

재료는 굵은 골재없이 잔 골재만 사용한 모르타르를 이용하였으며, 모르타르의 재료강도와 열팽창계수 측정실험을 선행하였다. 모르타르의 배합 및 재료의 품질은 "KS L 5220 건조모르타르규준"을 따르고 실험은 KS L 5105를 따랐으며, 물 : 시멘트 : 모래 = 1 : 1.67 : 5 (중량비)로 하였으며, 물/시멘트 비는 0.6으로 하였다. 28일 압축강도의 평균값은 143.3 kgf/㎠이다.

3.1 열팽창계수 측정시편

모르타르의 열팽창 계수를 측정하기 위해서 4×4×16 cm 시편에 스트레인 게이지를 부착하여 실험하였다. 이때 시편의 워핑(warping)을 보정하기 위해 스트레인 게이지를 시편 양면에 각각 하나씩 붙인다. Strain Indicator의 스트레인 게이지를 이용한 변형률 측정 원리는 다음 식을 따른다.

$$(\frac{\Delta R}{R})_{\Delta T} = (\beta-\alpha)S_g\Delta T+\gamma\Delta T = S_g\varepsilon \quad (4)$$

$(\frac{\Delta R}{R})_{\Delta T}$: 온도에 따른 게이지 저항의 변화
β : 재료의 열팽창 계수
α : 게이지의 열팽창 계수
S_g : 게이지 인자(여기서는 2.11)
r : 게이지 저항의 온도 계수

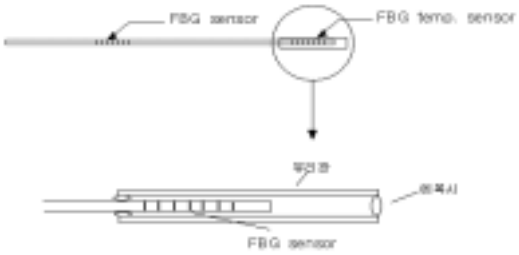

Fig. 2 FBG sensor & FBG temp. sensor

Strain Indicator가 출력하는 값은 ε이며 이 값은 스트레인 게이지의 온도 보정을 통한 값이므로 게이지 자체의 온도 효과(β, α, γ)를 보상하기 위해 참조 재료 (티타늄 실리케이트)를 사용하였다.

측정 시편 : $S_g\varepsilon_{as}=(\beta_s-\alpha)S_g\Delta T+\gamma\Delta T$
참조 재료 : $S_g\varepsilon_{ar}=(\beta_r-\alpha)S_g\Delta T+\gamma\Delta T$
(β_r = 0.03×10^{-6} /℃)

두 식을 종합하면, $\varepsilon_{as}-\varepsilon_{ar}+\beta_r\Delta T = \beta_s\Delta T$ 가 되고 β_s는 측정하고자 하는 시편의 열팽창계수로 계산을 통해 구해낼 수 있다. 그리고 $\beta_s\Delta T = \varepsilon_{thermal}$ 로 이 값은 온도 증가에 따른 재료의 열 변형률이라고 할 수 있다. 그 결과 모르타르의 열팽창률 12.08×10^{-6}/℃값을 얻었다.

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.

FBG sensor를 안전하게 실험 시편 내에 매립하기 위해서 Fig. 3과 같이 FBG sensor를 매립한 모르타르 Bar 1 (2×2×18cm)을 제작하여 실험하였다.

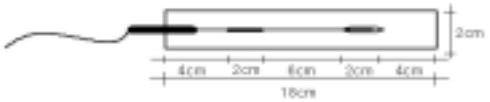

Fig. 3 모르타르 Bar1

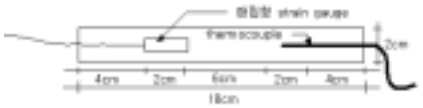

Fig. 4 모르타르 Bar2

이는 철근과 같은 이질 재료에 광섬유 센서를 부착하여 실험에 왔던 기존의 연구와 달리 본 연구의 경우 열 특성이 다른 이질재료에 광섬유 센서를 부착하여 사용하면 결과를 신뢰할 수 없다는 가정 아래 고안되었다.

Bar 1의 측정값을 비교하기 위해 이와 동일한 방법으로 Fig. 4와 같이 strain gauge와 thermocouple을 매립한 모르타르 Bar2를 제작하여 상온 25℃에서 90℃까지 온도를 증가시켜가며 실험하였다.

3.3 온도구배 및 열변형 측정 시편

Bar1을 Fig. 5와 같은 최종 실험 시편(18×18×18 cm)의 깊이가 다른 3군데에 매립하고 실온 25℃에서 90℃까지 온도를 높여가며 실험하였다. 온도 구배 및 열변형을 측정하였다. 이 때 측정값의 검증을 위해 매립형 strain gauge와 thermocouple를 같이 매립하였다.

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 ε=0으로 두어 온도 변화를 구하는 식 (5)에 FBG temp. sensor로부터 구한 파장변화값을 대입하여 온도변화를 구할수 있다.

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

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.

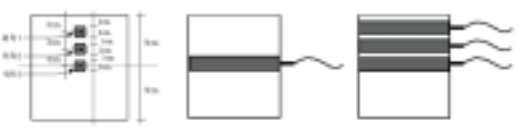

Fig. 5 최종 모르타르 시편(18×18×18cm)

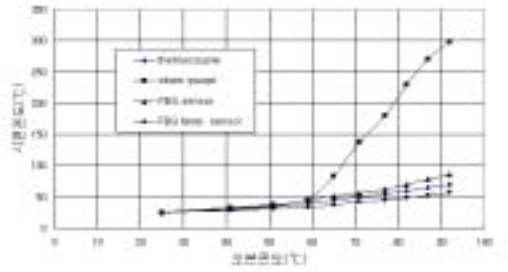

Fig. 6 온도측정 결과

하지만 FBG sensor의 경우 silica재질로 구성되어 고온에서도 작동이 가능하며 본 실험에서도 정상적으로 작동하며 신뢰할 수 있는 값을 보여주고 있다.

4.2 열변형 측정결과

FBG sensor의 파장 변화값을 식 (3)에 대입하여 구한 열변형과 strain gauge로부터 얻은 변형을 보정하여 구한 열변형을 비교하였다. Fig. 7에서 보듯이 FBG sensor는 가해진 온도 하중아래 안정적인 거동을 하는 반면 -10℃~70℃인 strain gauge는 시편의 온도가 50℃에 이르렀을 때부터 이미 작동에 이상이 생기기 시작했다고 판단되었다.

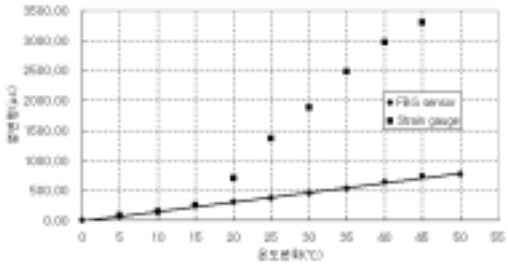

Fig. 7 온도변화에 따른 열변형 측정
(FBG sensor vs strain gauge)

4.3 온도구배 측정결과

모르타르 바를 깊이가 다른 위치 3곳에 묻어 (18×18×18 cm 정육면체 모르타르 시편) 위치에 따른 온도구배를 측정하였다. 위치1~3의 온도구배는 시간에 따라 thermocouple과 FBG temp. sensor로 측정되어 Fig. 8~11에서와 같이 측정되었다. 따라서 위치에 따른 미세한 온도구배 측정이 가능함을 알 수 있다.

thermocouple과 FBG temp. sensor는 정확히 같은 온도를 나타내지는 않았다. 하지만 Fig. 12에서 알 수 있듯이 두 값 사이에 선형적인 규칙성을 보이므로 실제 온도변화의 추정은 가능하다.

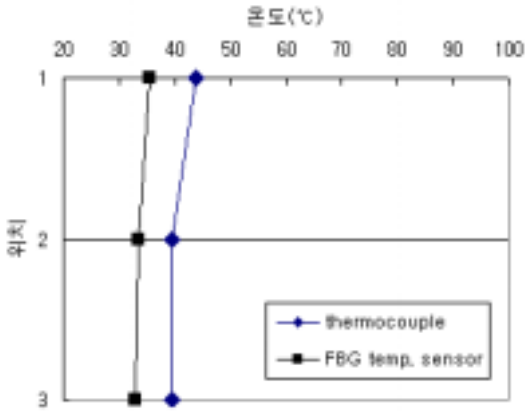

Fig. 8 1시간 후 온도구배

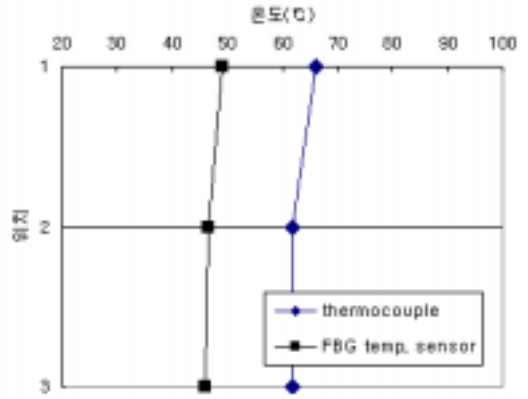

Fig. 9 2시간 후 온도구배

이는 FBG temp. sensor 제작에 이용된 유리튜브의 열전도율이 모르타르에 비해 작아 열을 차단하는 효과를 나타냈기 때문으로 판단된다.

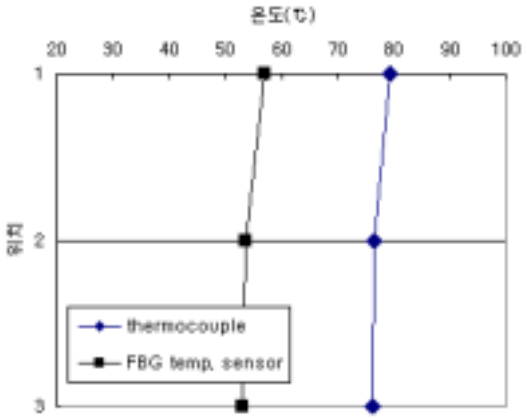

Fig. 10 3시간 후 온도구배

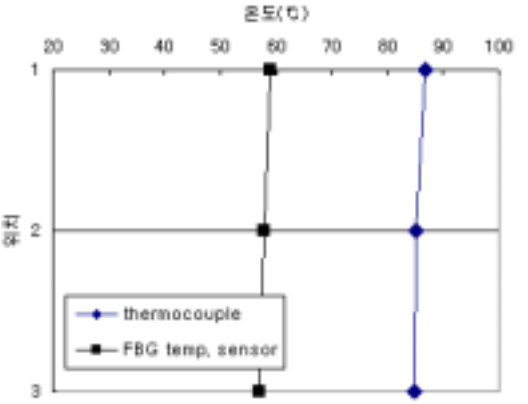

Fig. 11 4시간 후 온도구배

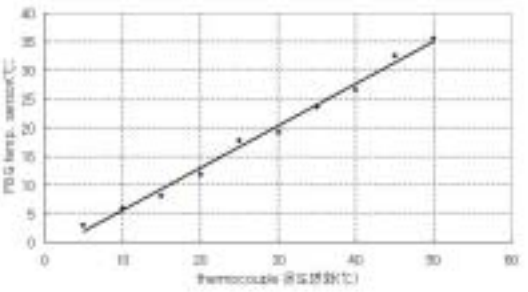

Fig. 12 FBG temp. sensor vs thermocouple

5. 결 론

본 연구에서는 FBG sensor의 다중 측정성을 이용하여 열변형률과 온도변화의 동시측정을 수행하였다. 또한 시편내 위치가 다른 내부 3지점의 열변형과 온도변화를 각각 측정함으로써 FBG sensor를 매립한 모르타르 Bar의 사용가능성을 검토하였다.

첫째, FBG sensor의 출력신호의 선형성을 통해 출력 data의 신뢰성을 증명할 수 있었다.

둘째, strain gauge와 thermocouple을 통해 측정한 온도변화와 FBG sensor를 이용해 측정한 온도변화를 비교해 볼 때 FBG sensor의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

셋째, 온도하중에서도 FBG sensor의 경우 매립형 strain gauge와는 달리 안정성을 보이며 작동하였으며 그 값은 모르타르의 열팽창계수를 고려해 볼 때 신뢰할 수 있었다.

넷째, FBG temp. sensor로 측정한 온도변화량은 thermocouple로 측정한 값과 비교하여 선형적인 대응관계를 보였으며 이는 모르타르와 유리의 열전도률의 차이에 기인하는 것으로 판단되었다. 따라서 선형관계에 의한 추정식을 통해 실제 온도변화량을 추정해 낼 수 있으며 미세한 온도 구배 역시 측정할 수 있어, 구조물의 내부 온도변화 측정을 위해 FBG temp. sensor의 사용이 가능함을 보여주었다.

이 연구는 2001년 산업자원부 시행 전력산업 연구개발사업으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

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 시험방법(Testing method for compressive strength of hydraulic cement mortar) 1963 제정, 1987 개정, 1997 확인.

(접수일자 : 2002년 11월 25일)