

## FBG 센서와 LTOF 를 이용한 온도측정시스템 개발

### Development of Temperature Measurement System Using Fiber Optics Linear Transmittance Filter with Fiber Bragg Grating Sensor

남광식<sup>1</sup>, 최진규<sup>1</sup>, 조상<sup>1</sup>, 김재기<sup>1</sup>, 최호민<sup>1</sup>, 이석순<sup>1,✉</sup>  
Kwang Sik Nam<sup>1</sup>, Jin Gyu Choi<sup>1</sup>, Shang Zhao<sup>1</sup>, Jea Ki Kim<sup>1</sup>, Ho Min Choi<sup>1</sup>, and Seok Soon Lee<sup>1,✉</sup>

<sup>1</sup> 경상대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, ERI, Gyeongsang National University)  
✉ Corresponding author: leess@gnu.ac.kr, Tel: +82-55-772-1622

Manuscript received: 2015.7.29. / Revised: 2015.12.29. / Accepted: 2016.1.20.

*The fiber optical temperature sensing device was developed by using a Fiber Bragg Grating (FBG) sensor and a linear transmittance optical filter. The temperature change causes change in the FBG sensor reflectance wavelength and the reflectance wavelength from FBG sensor is transmitted to a linear transmittance filter so that the optical signal value is determined by the wavelength. The temperature can be measured by the optical signal value by passing FBG reflectance wavelength to the linear transmittance filter. Using the developed system, temperature ranges from 10 °C to 50 °C were measured and the measured data were almost linear.*

KEYWORDS: Fiber optic (광섬유), Fiber bragg grating (광섬유 브래그 격자), Linear transmittance filter (선형 투과 필터)

#### 기호설명

$\lambda_B$  = Reflectance wavelengths of FBG  
 $n_{eff}$  = Effective refractive index of FBG  
 $\Lambda$  = Interval of refractive index variation  
 $\Delta T$  = Variation in temperature  
 $\Delta \lambda_B$  = Variation in reflectance wavelengths  
 $P_e$  = Photo-Elastic constant  
 $\alpha_f$  = The coefficient of thermal expansion of the optical fiber  
 $\zeta_f$  = The thermo-optic coefficient is the appearance of variation in refractive index of the optical fiber due to temperature variations  
 $P_{11}, P_{22}$  = Components of strain-optics tensor  
 $\nu$  = Poisson's ratio

#### 1. 서론

플랜트 내부의 다양한 설비는 고온, 고압의 증기와 같은 다양한 열에너지와 접촉하며 이를 전달하기 위한 구조물은 매우 복잡하게 구성되어 있다. 또한 플랜트의 고온 에너지와 관련된 구조물의 감시를 위해 온도의 급격한 변화 감지를 통한 구조물 건전성 평가 연구도 수행되고 있다.

임홍철<sup>1</sup>은 FBG 센서를 이용한 철근 콘크리트 역셀 구조물의 시공 중 건전성 관리를 위한 지붕 철골 트러스 변형률 계측을 연구 하였고 이근호<sup>2</sup>는 광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 복합재 외팔보의 형상 모니터링을 연구하였다. 그리고 정원석, 강동훈<sup>3</sup>은 철도교량 모니터링을 위한 FBG 센

서의 적용을 고려하였고 김현영<sup>4</sup>은 온도 측정을 위한 광섬유 브래그 격자 센서의 온도 계수 특성 평가를 연구하였다.

본 연구에서 사용한 광섬유 브래그 격자 센서는 빛을 신호로 사용하기 때문에 전자기장의 간섭으로부터 자유롭고, 섬유의 특성에 의해 장거리 전송에서의 신호의 왜곡과 손실이 적으며, 센서 부착시의 부재의 상태에 영향을 주지 않는 용이성 등의 장점이 기존의 센서의 단점을 보완하기 때문에 최근 구조 건전성평가 분야에서 가장 활발히 사용되는 지능형 센서 중 하나이다. 또한, 내부식성, 내화학성 등 전자기 간섭에 대한 내성, 원격 감지, 취급 용이성, 저렴한 비용 등 더 많은 장점을 가지고 있기 때문에 전력산업과 화학 플랜트, 가스 산업, 오일시설 등의 안정적인 운용을 위해 꼭 필요한 기술로 인식되고 있다.<sup>5</sup> 더욱이 하나의 광섬유선에 여러 개의 브래그 격자 센서를 배열함으로써 동시에 여러 부위의 온도측정이 가능하며 온도변화에 반응하는 부위가 광섬유의 길이에 한정되므로 넓은 범위의 다 중점 온도측정에 가장 적합하다.<sup>6,7</sup>

따라서 본 논문에서는 여러 가지 장점을 가진 광섬유 센서를 이용하여 실시간으로 온도를 측정할 수 있는 장치를 개발하는 것에 목적을 두었다.

**2. 광섬유 브래그 격자 센서**

광섬유 브래그 격자 센서 (Fiber Bragg Grating Sensor)는 한 가닥의 광섬유에 여러 개의 광섬유 브래그 격자를 일정한 길이에 따라 새긴 후 온도나 강도 등의 외부조건 변화에 따라 각 격자에서 반사되는 빛의 파장이 달라지는 특성을 이용한 센서이다. Bragg 이론에 따르면 위상조건을 만족하여 FBG에서 반사되는 파장은 다음 식(1)에 의해 결정된다.

$$\lambda_B = 2n_e \Lambda \tag{1}$$

위 식에서  $n_e$ 는 유효굴절률로서 빛이 광섬유 브래그 격자의 한 주기를 진행할 때의 평균 굴절률을 나타내며  $\Lambda$ 는 광섬유 코어에 새겨진 격자의 간격이다.<sup>8</sup>

식(1)에서 유효 굴절률과 격자의 주기는 온도와 변형률의 함수이며 광섬유 브래그 격자에 온도나 변형률 등 외란이 가해지면 파장이 바뀌게 된다. 변화된 브래그 파장  $\Delta\lambda$ 를 측정함으로써 광섬유 격자에 가해진 온도나 변형률을 식(2)와 같이 계산할 수 있다.

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B[(\alpha_f + \zeta_f)\Delta T + (1 - P_e)\epsilon] \tag{2}$$

식(2)에서  $\alpha_f$ 는 광섬유의 열팽창 계수이고  $\zeta_f$ 는 온도에 의한 광섬유의 굴절률 변화를 나타내는 열광학 계수이다. 여기서  $P_e$ 는 광탄성 상수이며 식(3)과 같다.

$$P_e = \left(\frac{n_e^2}{2}\right)[P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \tag{3}$$

식(3)에서  $P_e$ 는 광탄성 상수이며  $P_{11}$ 과  $P_{12}$ 는 변형률 광학 텐서의 성분이며,  $\nu$ 는 광섬유의 푸아송 비(Poisson's Ratio)이다.

식(2)에서 센서에 가해지는 변형률의 변화가 없다 ( $\epsilon = 0$ )고 가정하면 식(4)와 같이 간단하게 나타낼 수 있다.

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B[(\alpha_f + \zeta_f)\Delta T] \tag{4}$$

식(4)을 이용하면 FBG를 온도 센서로 사용할 수 있다.

**3. 온도측정장치 개발**

기존의 FBG 센서를 이용한 온도측정장치는 온도에 따른 반사 파장의 변화를 분광기를 이용하여 측정하였다. 하지만 본 연구에서는 FBG 센서에서 반사되는 파장을 선형 투과 필터에 투과하여 파장에 따른 광감지기의 값을 측정하여 온도를 측정할 수 있는 시스템을 구축함으로써 기존에 사용한 고가의 분광기를 사용하지 않음으로 저가이고 고속의 온도 측정 시스템을 구축하고자 한다. 따라서 본 논문에서는 측정 속도가 빠르고 부식이 없고 내구성이 높은 장점을 가진 광섬유 센서를 이용하여 기존의 장치와 차별화된 온도 측정 장치 개발에 목적을 두고 연구를 실시하였다.

**3.1 온도측정장치의 원리**

Fig. 1에서 SLD (Super Luminescent Diode)는 파장에 상관없이 평탄한 광량을 보이고 LTOF (Linear Transmittance Optical Filter)를 통과한 FBG 센서의 반사파는 반사 파장과 LTOF의 필터 선과 만나는 점인 파란 원안에 있는 점의 크기의 반사파를 통과 시킨다. SLD에 의한 FBG 센서의 반사파장의 크기는 일정하다고 가정하면 이 파장이 LTOF를 통과하게 되면 파장의 크기에 따라 다른 크기의

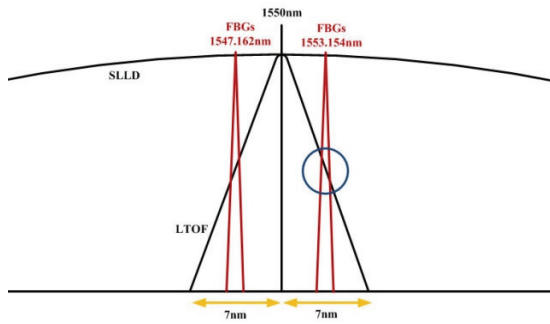


Fig. 1 Graph of linear transmittance optical filter

Table 1 Specification of FBGs

Wavelength	1547.162 nm	1553.154 nm
Bandwidth	0.201 nm	0.19 nm
SLSR	19.5 dB	21.5 dB
Reflectivity	90%	90.55%
FBG length	10 mm	10 mm

Table 2 The characteristic of linear transmittance optical filter

Linear transmittance optical filter	
Product	In-Line attenuator
Wavelength	1550 nm
Return loss	>50 dB
Type	SC/UPC/900 um/1 m

광량을 갖게 된다. 따라서 이 광량의 크기를 측정하게 되면 결과적으로 파장을 알 수 있고 이 파장 변화를 식(4)에 적용하면 온도의 변화로 변환할 수 있게 된다.

본 연구에서는 중심파장이 1550 nm이고 중심파장에서 ±7 nm에서 선형으로 필터링하는 LTOF를 적용하였다. 필터의 중심파장 1550 nm ±7 nm 범위에서 실험하기 위해 좌측은 1547.162 nm와 우측은 1553.154 nm의 파장을 갖는 FBG 센서를 사용했다. 센서에 관한 사항은 Tables 1과 2에 나타내었다.

### 3.2 온도측정장치의 구조

본 장치는 먼저 SLD에서 1550 nm 부근의 평탄한 크기의 광량을 갖는 광을 서큘레이터 (Circulator)를 통하여 FBG 센서로 향하게 되는데 이때 센서 부근의 온도에 따라 FBG 센서의 반사 파장은 변화하게 된다. 온도변화는 원통 안에 있는 유체를 이용하여 변화를 가하였다. 원통에 FBG 센서와 K-Type 열전대 (Thermocouple)를 부착하고 열전대

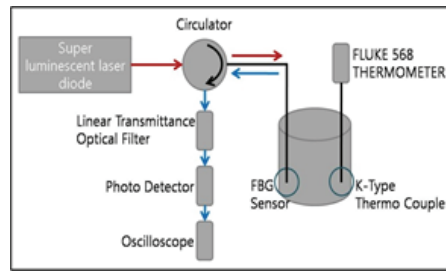


Fig. 2 Optical temperature measurement system



Fig. 3 Temperature measuring equipment

와 온도계를 연결하여 실시간으로 온도변화를 측정하였다. FBG 센서에서 온도에 의하여 변화된 파장은 반사되어 다시 서큘레이터와 LTOF를 통과하여 광감지기 (Photodetector)에 도달하여 전기신호로 광량을 측정하게 되고 오실로스코프에서 표시하고 저장할 수 있다. 본 장치의 개념도는 Fig. 2에 나타내었고, Fig. 3은 실제 구성한 온도 측정 장치의 모습이다.

### 3.3 온도측정장치의 잡음 확인

실험에 앞서 본 논문에서 제시한 온도측정장치 시스템의 잡음 레벨 (Noise Level)을 확인하고자 한다.

잡음 레벨을 확인하기 위해 1546.712 nm FBG를 30°C의 물에서 실험을 진행하였다. Fig. 4는 실험시 오실로스코프의 결과를 스캔하여 얻어낸 그래프이며, 우측중간 부분 값을 잃어서 256 mV 임을 확인 할 수 있다. 보다 구체적으로 잡음 레벨을 Table 3를 통해 확인 할 수 있다. Table 3는 Fig. 4의 수평 축과 수직 축의 값을 나타내고 있는데, 수평 축 -0.05-0.05까지 0.1초의 시간 동안 2500개의 샘플링포인트로 수직 값을 받아 들인다. 잃어 들인 수직 축 값들의 평균이 Fig. 4의 우측 중간 값으로 나타나게 된다. Table 3를 보면 알 수 있듯이 잡음은 적어도 소수점 3자리 이하의 값을 가짐을 알 수 있

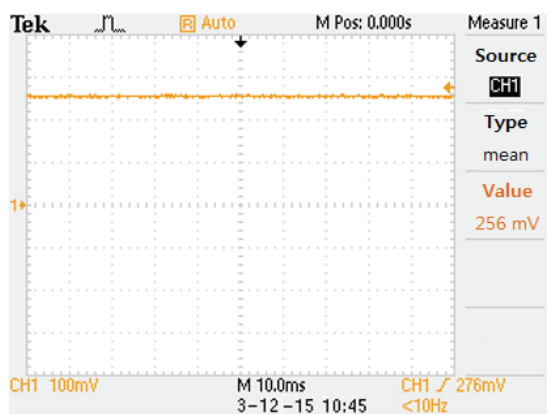


Fig. 4 Result graph of 1546.712 nm FBGs at 30°C

Table 3 Result date sheet of 1546.712 nm FBGs at 30°C

Horizontal axis values	Vertical axis values
-0.05	0.256
-0.04996	0.256
-0.04992	0.256
-0.04988	0.256
-0.04984	0.256
0.04980	0.256
0.04984	0.256
0.04988	0.256
0.04992	0.256
0.04996	0.256

다. 이는 본 측정장치에 영향을 미치지 않을 정도로 작은 값이라 판단되어 본 실험을 진행하였다.

#### 4. 실험결과

실험을 센서마다 5번 진행하고 결과값을 각각의 온도에서 평균값을 구하여 Table 4에 나타내고 Figs. 5와 6에 나타내었다. 1547.167 nm의 FBG 센서에서 온도가 상승하면 반사파의 파장이 증가하게 된다. 증가된 파장은 Fig. 1의 왼쪽 LTOF를 통과하게 되면서 광 감지기의 값이 증가하게 되어서 Fig. 5와 같이 된다. 또한 1553.154 nm의 FBG 센서에서 반사되는 파장은 온도가 올라 감에 따라 오른쪽 LTOF를 통과하면서 역으로 광 감지기 값이 감소하게 되어 Fig. 6과 같이 된다. 이들 값들은 Figs. 5와 6에 보였듯이 선형임을 보이고 있고 기울기의 절대값이 0.8064와 0.8121로 거의 같음을 보인다. 그리고 오차는 상온과 접촉으로 인한 급격한 온도

Table 4 Average value of FBGs results

	1547.162 nm	1553.154 nm
10°C	203.0	346.6
20°C	210.8	338.4
30°C	218.8	330.4
40°C	227.0	322.2
50°C	235.2	314.2
60°C	243.2	306.0
70°C	251.2	297.8

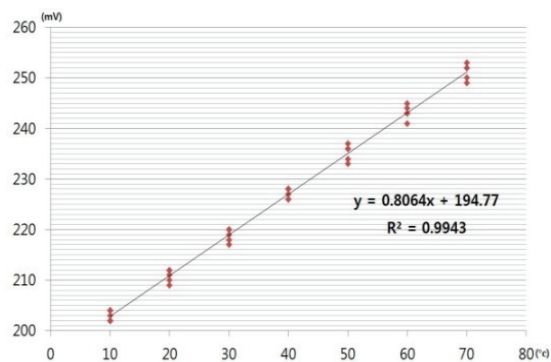


Fig. 5 Result graph of 1547.162 nm FBGs

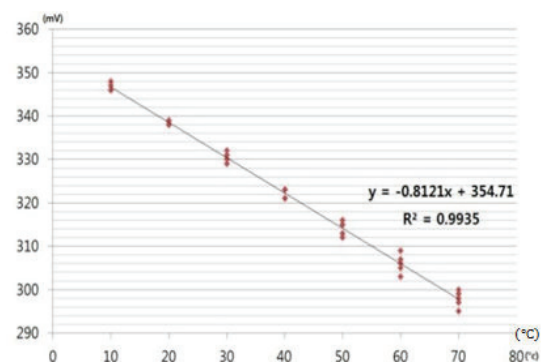


Fig. 6 Result graph of 1553.154 nm FBGs

변화 및 광 검출기의 떨림 등으로 파악된다. 또한, 물탱크 내부에서 좌측과 우측에 각각 센서와 열전대를 부착했으므로 온도차이도 배제할 수 없다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 FBG 센서와 LTOF를 이용하여 실시간으로 온도를 측정하는 시스템을 개발하였다. 반복적인 측정을 통한 결과값을 확인한 결과 온도 변화에 따라 선형적으로 비례하게 증가 또는 감소

되는 것을 확인 했다. 이 결과는 FBG 센서와 LTOF 를 이용하여 물리량을 측정할 수 있음을 보였다. 본 연구결과로부터 기존 사용하고 있던 FBG 센서와 분광기 혹은 가변 레이저 (Tunable Laser Source)를 이용한 물리량 측정을 FBG 센서와 LTOF 및 광 감지기를 이용하여 비교적 낮은 비용으로 구축할 수 있고 또한 고속의 광 감지기를 사용하여 측정속도를 쉽게 높일 수 있음을 의미한다.

## 후 기

본 연구는 차세대 기계항공 창의인재 양성사업인 BK Plus, 공학연구원 ERI 그리고 교육부 지방특성화 사업인 CK-I 사업의 지원을 받아 수행되었다.

## REFERENCES

1. Lee, K.-W., Rhim, H.-C., and Seo, T.-S., "Strain Measurement of Steel Roof Truss Using FBG Sensor during Construction of Reverse Shell Shaped Reinforced Concrete Structure," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 31, No. 4, pp. 335-342, 2011.
2. Lee, K. H. and Kim, D. H., "Shape Monitoring of Composite Cantilever Beam by Using Fiber Bragg Grating Sensors," *Transaction of the Korean Society of Mechanical Engineers: A*, Vol. 37, No. 7, pp. 833-839, 2013.
3. Chung, W. S. and Kang, D. H., "Application of FBG Sensors for Monitoring of Railroad Bridge," *Magazine of the Korean Concrete Institute*, Vol. 24, No. 3, pp. 25-25, 2012.
4. Kim, H.-Y., Kang, D., Lee, J.-H., and Kim, D.-H., "Characteristics of Thermal Coefficient of Fiber Bragg Grating for Temperature Measurement," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers: A*, Vol. 37, No. 8, pp. 999-1005, 2013.
5. Zhao, C.-L., Demokan, M., Jin, W., and Xiao, L., "A Cheap and Practical FBG Temperature Sensor Utilizing a Long-Period Grating in a Photonic Crystal Fiber," *Optics Communications*, Vol. 276, No. 2, pp. 242-245, 2007.
6. Kersey, A. D., Davis, M. A., Patrick, H. J., LeBlanc, M., Koo, K., et al., "Fiber Grating Sensors," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 15, No. 8, pp. 1442-1463, 1997.
7. Othonos, A. and Kalli, K., "Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing," Artech House, 1<sup>st</sup> Ed., pp. 28-50, 1999.
8. Park, H.-J., Lee, J.-H., and Song, M.-H., "Distributed Fiber-Optic Temperature Sensor Network for Protection of Electric Power Systems," *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, Vol. 20, No. 5, pp. 64-71, 2006.