

# 온도 측정을 위한 광섬유 브래그 격자 센서의 온도 계수 특성 평가

김현영\* · 강동훈\*\* · 이진혁\*\*\* · 김대현\*\*\*\*†

\* 서울과학기술대학원 기계공학과, \*\* 한국철도기술연구원,

\*\*\* 서울과학기술대학교 에너지환경대학원, \*\*\*\* 서울과학기술대학교 기계·자동차공학과

## Characteristics of Thermal Coefficient of Fiber Bragg Grating for Temperature Measurement

Heon-Young Kim\*, Donghoon Kang\*\*, Jin-Hyuk Lee\*\*\* and Dae-Hyun Kim\*\*\*\*†

\* Dep. of Mechanical Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology

\*\* Korea Railroad Research Institute,

\*\*\* Graduate School of Energy and Environment, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology,

\*\*\*\* Dep. of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology

(Received April 12, 2013 ; Revised May 7, 2013 ; Accepted May 8, 2013)

**Key Words:** Fiber Optic Sensor(FOS 광섬유 센서), Fiber Bragg Grating(FBG 광섬유 브래그 격자), Thermal Coefficient(온도 계수), Structure Health Monitoring(SHM 구조 건전성 모니터링)

**초록:** 광섬유 브래그 격자 센서는 최근 구조건전성평가 분야에서 가장 활발히 사용되는 지능형 센서 중의 하나이다. 특히 본 센서는 다양한 물리량들을 여러 지점에서 한 가닥의 광섬유로 측정할 수 있다는 장점을 갖고 있다. 이중 온도 측정을 위해서는 열팽창계수 및 열광학 계수의 사용이 필요하다. 대부분의 기존 연구에서는 이러한 물리량들을 상수값으로 가정하고 온도를 측정하였다. 본 논문에서는 FBG 센서의 온도 측정 실험을 통해 온도 변화와 관련된 두 계수가 일반적으로 사용되는 상수가 아닌 온도에 따라 변하는 변수임을 확인하였다. 최종적으로 광섬유 브래그 격자 센서의 이론에서 온도계수를 온도에 따른 함수식으로 새롭게 제안하고, 이 함수식을 이용해 상온에서 100도까지의 범위에서 정확한 온도 측정이 가능함을 확인하였다.

**Abstract:** A fiber Bragg grating sensor is considered a smart sensor that shows outstanding performance in the field of structural health monitoring (SHM). It has a powerful advantage, especially that of multiplexing, which enables several parameters to be sensed at multiple points by using a single optical fiber line. Among several parameters, the thermal expansion coefficient and thermo-optic coefficient are required to measure temperature. In previous studies, these were considered constant variables. This study shows that two parameters vary with temperature and newly proposes a temperature function for these two parameters. Specifically, these two parameters were defined as a single variable, and then, it was experimentally verified that this variable is a function of temperature. Finally, it was shown that temperature from RT to 100 °C was precisely measured by using the temperature function that was defined through the experiment.

- 기호설명 -

- $\lambda_B$  : 브래그 파장(nm)
- $n_e$  : 유효 굴절률
- $\Lambda$  : 격자의 간격
- $p_e$  : 광탄성 상수
- $\alpha_f(T)$  : 열팽창 계수( $^{\circ}\text{C}$ )
- $\xi_f(T)$  : 열광학 계수( $^{\circ}\text{C}$ )
- $K_f(T)$  : 온도 계수( $^{\circ}\text{C}$ )

### 1. 서론

플랜트 내부의 다양한 설비는 고온, 고압의 증기(Vapor)와 같은 다양한 열에너지와 접촉하며 이를 전달하기 위한 구조물은 매우 복잡하게 구성되어 있다. 에너지 플랜트인 발전 설비의 경우 슈퍼히터, 최종가열기, 재가열기 등의 다양한 열교환기가 있으며 약 500~800°C 정도의 고온의 증기와 접하고 있다.<sup>(1)</sup> 뿐만 아니라 국내 전력소비는 2011년 말 기준으로 최근 10년간 63% 증가했으나,<sup>(2)</sup> 발전 설비의 증가는 상대적으로 적

† Corresponding Author, [dkim@seoultech.ac.kr](mailto:dkim@seoultech.ac.kr)

다. 이에 따라 전기 발전과 플랜트의 효율적인 가동을 위해서는 열에너지의 관리가 요구되며, 이를 위해서는 정확한 온도측정을 통한 제어가 필수적이다. 또한 다수의 발전 설비가 노후화 되고 있고, 사용량 증가에 따른 사고 또한 증가 추세이다. 즉, 에너지 설비의 구조물 건전성 감시를 위한 요구와 연구가 증가하고 있으며,<sup>(3)</sup> 플랜트의 고온 에너지와 관련된 구조물의 감시를 위해 온도의 급격한 변화 감시를 통한 구조물 건전성 평가 연구도 수행되고 있다.<sup>(4,5)</sup> 이와 같이 플랜트 설비의 효율적 운영과 구조 건전성 감시에 정확한 온도 측정 및 감시는 매우 중요하다.

플랜트 설비의 온도 측정에는 다양한 센서와 계측 시스템이 개발되어 적용되고 있다. 그러나 대부분의 센서가 전기 기반으로 작동하고 있어 고전압을 사용하는 구성요소로 인한 전자기 노이즈의 문제가 있으며, 고온 환경에서 적용성 및 장시간 사용 시 신뢰성 문제가 발생할 수 있다. 또한 대형 플랜트에서 광범위한 지점의 온도 측정에 한계가 있다. 이러한 문제점으로 인해 일부 발전설비 열교환기의 경우 센서를 이용한 직접 측정이 아닌 국부적으로 부착된 금속 전도체를 이용하여 외부에서 추정하는 방법도 적용되고 있다. 이러한 문제를 해결하고 정확한 온도측정을 위한 다양한 연구가 진행되고 있고, 특히 광섬유 센서를 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>(6,7)</sup>

광섬유 센서(Fiber Optic Sensor, FOS)는 크기가 매우 작고 사용 온도범위가 넓으며 장거리 신호 전달에 용이하다는 여러 장점을 가지고 있어 다양한 센서 개발 및 적용 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>(8-11)</sup> 특히 광섬유 브래그 격자(Fiber Bragg Grating, FBG) 센서는 서로 다른 브래그 반사파장들이 서로 영향을 받지 않아 파장분할기법을 이용하여 하나의 광섬유 선에 여러 개의 브래그 격자 센서를 배열할 수 있으므로 하나의 광섬유에서 여러 지점의 외부 변화를 측정할 수 있다는 장점이 있다. 그리고 파장 분할을 이용하면 온도 측정뿐만 아니라 변형률 등의 다변수를 동시에 측정할 수 있어 최근 플랜트 기계설비, 우주 항공, 토목, 건축 등 적용 분야가 점차 확대되고 있다. 특히, 구조 건전성 모니터링(Structure Health Monitoring, SHM) 분야에서는 실시간으로 구조물을 감시하는데 있어 FBG 센서를 활용하는 연구와 실제 적용 사례가 많다.<sup>(12-14)</sup>

FBG 센서를 이용한 온도측정 기법은 온도의 변화에 따른 브래그 파장의 변화를 일반화 시킨 함수 또는 상수를 이용하며 이에 대한 다양한 연구와 적용이 보고되었다. 그러나 많은 사례에서 온도 오차가 발생하고 이에 따라 실험적 결과를 이용한 보상을 통해 온도 측정을 수행하고 있다.<sup>(15,16)</sup> 이는 기존의 FBG 센서의 파장 변화와 온도계수의 관계에 오차가 있음을 나타낸다.

본 연구에서는 단순히 보상을 통한 온도측정이 아니라 온도변화와 FBG 센서의 파장변화에 직접적으로 관련된 새로운 온도계수의 함수를 도출하여 FBG 센서를 이용한 온도 측정에 적용할 수 있는 알고리즘을 제시 하였다. 또한 실험을 통해 제안된 방법으로 온도를 정확히 측정할 수 있음을 확인하였다.

## 2. 광섬유 브래그 격자 센서의 온도 측정 원리 및 온도 계수 정의

FBG 센서는 광섬유의 코어(Core)에 주기적인 격자를 만들고, 이에 따른 빛의 굴절률 변화를 이용하며 Fig. 1과 같은 구조와 특징을 보인다.<sup>(17)</sup> 즉, 브래그 격자에 광대역 광을 입사시키면 굴절률이 변하는 경계면에서 빛을 반사시키게 되는데 이들 중 식 (1)과 같은 브래그 조건(Bragg Condition)에 해당하는 브래그 파장  $\lambda_B$ 의 빛은 브래그 격자를 통과하지 못하고 반사되며 이 외에 다른 파장의 빛은 통과하게 된다. Fig. 2는 이 과정을 나타내고 있다.<sup>(18)</sup>

이 같은 원리를 이용하면 하나의 광섬유에 반사 파장이 다른 여러 개의 센서를 동시에 제작할 수 있다.

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

여기서  $n_e$ 는 광섬유 격자의 유효 굴절률로써 빛이 광섬유 브래그 격자의 한 주기를 진행할 때의 평균 굴절률을 나타내며,  $\Lambda$ 는 광섬유 코어에 새겨진 격자의 간격이다.

식 (1)에서 유효 굴절률과 격자의 주기는 온도와 변형률의 함수이며 광섬유 브래그 격자에 온도나 변형률 등 외란이 가해지면 브래그 파장  $\lambda_B$ 이 바뀐다.

변화된 브래그 파장  $\Delta\lambda_B$ 를 측정함으로써 광섬유 격자에 가해진 온도나 변형률을 식 (2)와 같

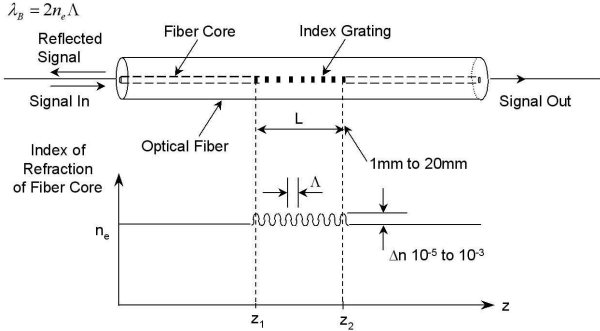


Fig. 1 Fiber Bragg Grating and refractive index change in the core

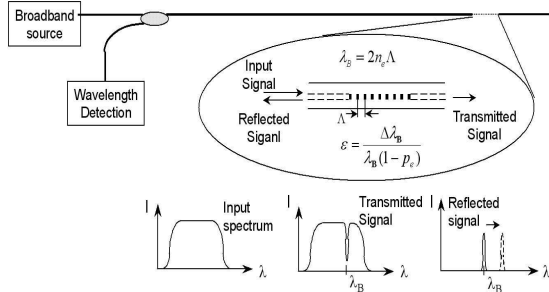


Fig. 2 Fiber Bragg Grating sensor wavelength-encoding operation

이 계산할 수 있다.

$$\Delta \lambda_B = \lambda_B [(\alpha_f + \xi_f) \Delta T + (1 - p_e) \epsilon] \quad (2)$$

식 (2)에서  $\alpha_f$ 는 온도에 의한 광섬유의 열팽창 계수로 통상  $0.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$  값의 상수가 사용되고 있다.<sup>(8,14)</sup> 그리고  $\xi_f$ 는 온도에 의한 광섬유의 굴절률 변화를 나타내는 열광학 계수로 통상  $6 \times 10^{-6} \sim 11 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$  값의 상수가 사용되고 있다.<sup>(12,19)</sup>

그러나 광섬유의 열팽창 계수와 열 광학계수가 온도에 따라 변화한다면, 다음과 같이 계수들을 새롭게 정의할 수 있다.

$$\alpha_f(T) = \frac{1}{\lambda} \frac{d\lambda}{dT}, \quad \xi_f(T) = \frac{1}{n_e} \frac{dn_e}{dT} \quad (3)$$

또한 식 (2)에 센서의 변형률( $\epsilon = 0$ )이 발생하지 않는다고 가정과 새롭게 정의된 열팽창계수와 열 광학계수를 적용한다면 식 (4)와 같은 새로운 수식을 정의할 수 있게 된다.

$$\frac{1}{\lambda_B} \frac{\Delta \lambda_B}{\Delta T} = \alpha_f(T) + \xi_f(T) \quad (4)$$

본 연구에서는 온도계수(Thermal Coefficient)라는 인자를 새롭게 도입하여  $\alpha_f(T) + \xi_f(T)$ 의 값을  $K_f(T)$ 로 정의한다. 그리고 브래그 파장의 온도에 따른 변화를 미분계수(Differential Coefficient)로 표현한다면 식 (4)는 다음의 식 (5)와 같이 온도에 따른 미분방정식으로 새롭게 정의될 수 있다.

$$\frac{1}{\lambda_B(T)} \frac{d\lambda_B(T)}{dT} = K_f(T) \quad (5)$$

그리고 수식의 단순화를 위해, 브래그 파장을 온도에 따라 변하는 임의의 함수 식 (6)과 같이  $f(T)$ 로 표현할 수 있다.

$$\lambda_B(T) = f(T) \quad (6)$$

이를 통해, 온도에 대한 브래그 파장의 미분계수를 아래와 같이  $f'(T)$ 로 다시 표현할 수 있다.

$$\frac{d\lambda_B(T)}{dT} = f'(T) \quad (7)$$

최종적으로, 온도에 따른 온도계수의 함수는 식 (8)과 같이 정의된다.

$$\frac{1}{\lambda_B(T)} \frac{d\lambda_B(T)}{dT} = \frac{f'(T)}{f(T)} = K_f(T) \quad (8)$$

결국, 식 (8)을 통해 온도계수가 일정한 상수 값이 아닌, 온도에 따라 변하는 변수임을 증명할 수 있게 된다. 즉 광섬유의 열팽창 계수와 열광학 계수는 단순한 상수가 아닌 온도 변화를 반영한 함수임을 확인할 수 있게 된다. 결과적으로 이렇게 도출된 함수식을 적용하여 온도를 측정하게 되면 보다 정확한 온도 측정이 가능해진다.

### 3. 광섬유 브래그 격자 센서의 온도 실험

본 장에서는 새롭게 제안된 온도계수 함수를 FBG 센서의 온도 측정 실험을 통해 정확한 함수식으로 도출하고 이를 검증해 보았다.

#### 3.1 온도 실험 구성

FBG 센서의 온도 측정 성능을 확인하기 위해 다음과 같은 기초 실험을 수행하였다. 실험은 항온챔버(TEMI-300, JEIO-TECH Co.)를 이용하여 온도 조건을 정밀하게 제어하며 측정을 수행하였

다. 챔버 내부에 FBG 센서와 측정의 정확도를 확인하기 위한 Table 1과 같은 열전쌍 (Thermocouple)을 추가로 배치하여 실험 장치를 구성하였다. Fig. 3은 실험 구성의 개략도이며, Fig. 4는 실험 구성 실제 사진이다.

실험에 사용된 FBG 센서는 외부 요인의 영향을 최소화하기 위해 리코팅을 하지 않은 센서 (ATGRTING Co.)를 사용하였다. 센서에 대한 자세한 사양은 Table 2와 같다. FBG 센서의 구동을 위해 FBG 인터로게이터 (IFIS 100, Fiberpro Co.)를 사용하였다. 챔버 내부의 온도 분포 양상을 고려하여 센서가 있는 위치에서의 온도를 정확히 측정하기 위해, T Type의 열전쌍을 Fig. 5와 같이 FBG 센서에 최대한 근접시켜 배치하였다. 열전쌍의 온도 신호는 DAQ 장치(NI-9211, National Instrument Co.)를 이용하여 수집하였다.

본 실험에서는 약 20°C의 실온(Room Temperature; RT)에서부터 100°C까지의 온도 구간에서 온도를 연속적으로 증가시키며 FBG 센서와 열전쌍의 데이터를 저장하였고 이들 데이터를 이용해 온도를 측정하였다.

Table 1 Specification of Thermocouple

Type	T
Temperature Range	-200°C~300°C
Resolution	0.07°C
Limits of Error	±1°C

3.2 온도 측정 결과

FBG 센서와 열전쌍의 데이터를 취득하여 다음과 같이 신호를 분석하였다. Fig. 6은 실온(약 20°C)에서 100°C까지 온도 구간에서 FBG 센서의 시간에 따른 파장 변화와 열전쌍의 온도 변화를 동시에 나타내고 있다. 그리고 FBG 센서의 브래그

Table 2 Specification of Fiber Bragg Grating Sensor

Wavelength(nm)	1571.833
Grating(mm)	10
3dB(nm)	0.2
SLSR(dB)	16.5
Reflectivity	95.53%

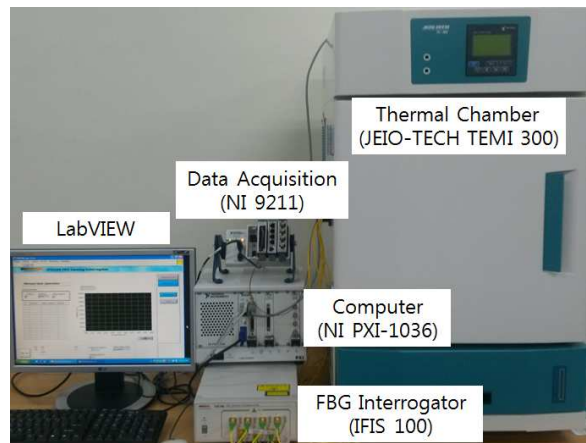


Fig. 4 Experimental setup for the bragg wavelength and temperature evaluation

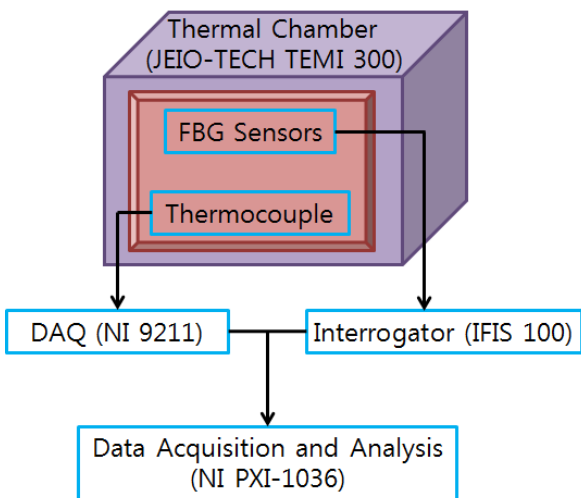


Fig. 3 Schematic diagram of experiment and data acquisition

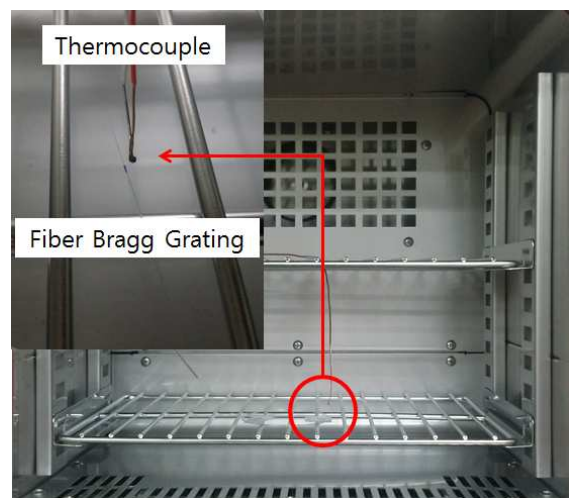


Fig. 5 Thermocouple and Fiber Bragg Grating Sensor

과장 변화를 온도 변화에 따라 나타내면 Fig. 7과 같다. Fig. 7 그래프에 Third Lagrange Polynomial Fitting을 적용하여 온도(T)에 따른 과장의 변화를 함수식으로 도출해 보았다. 이렇게 도출된 함수를 식 (6)을 사용하여 온도계수를 도출해 보았다. 도출된 3차 다항식은 Table 3과 같으며, 이 다항식을 그래프로 나타내면 Fig. 8과 같다.

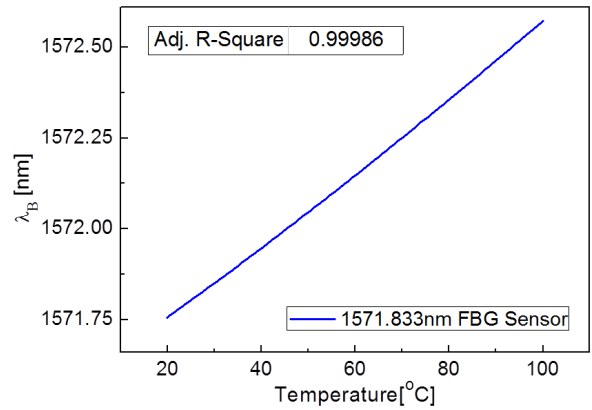
또한 Table 3에 표현된 다항식을 미분하여 앞서 표현된 식 (7)에 적용하면 최종적인 온도계수 식을 정의할 수 있게 된다. 결론적으로, 온도 변화에 따른 온도계수의 경향은 Fig. 9와 같이 나타나게 되며 그림과 같이, 온도계수가 일정한 상수 값이 아닌 변수 값을 확인할 수 있게 된다.

최종적으로 이 온도계수를 이용하여 계산된 FBG 센서의 온도와 열전쌍 온도 데이터와의 오차를 확인하였고 오차의 범위가  $10^{-12} \sim 10^{-11}$ 임을 확인할 수 있었다. 참고로 Fig. 10은 FBG 센서의 온도 데이터와 열전쌍의 온도 데이터를 보여주며 두 관계가 정확히 선형임 ( $R=1.0$ )을 확인할 수 있다.

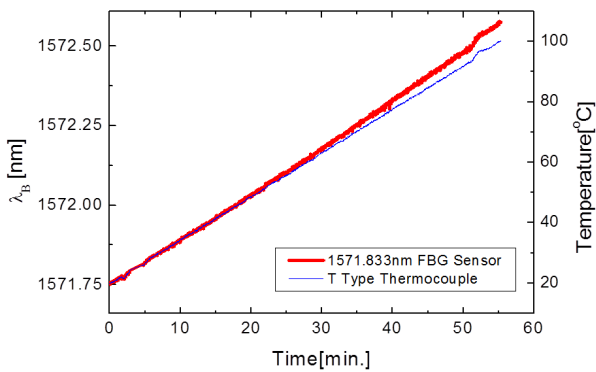
**Table 3** Coefficient of third order lagrange polynomial fitting

$$\lambda_B(T) = aT^3 + bT^2 + cT + d$$

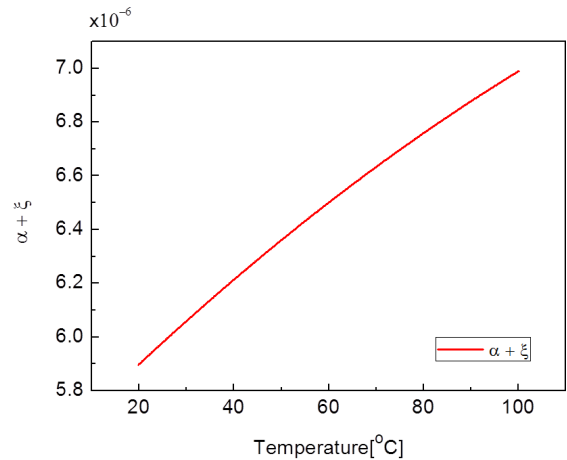
a	b	c	d
-1.84E-08	1.41E-05	0.00873	1571.57622



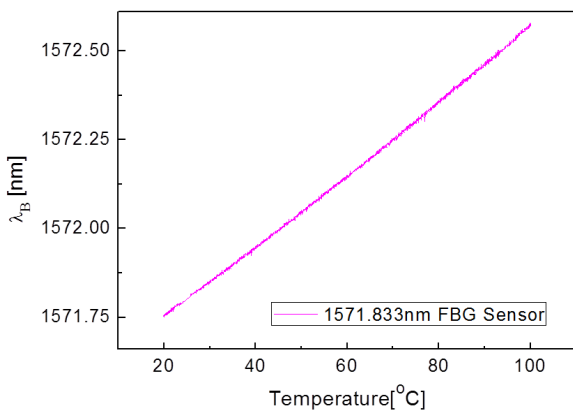
**Fig. 8** Third order lagrange polynomial fitting of bragg wavelength by the temperature



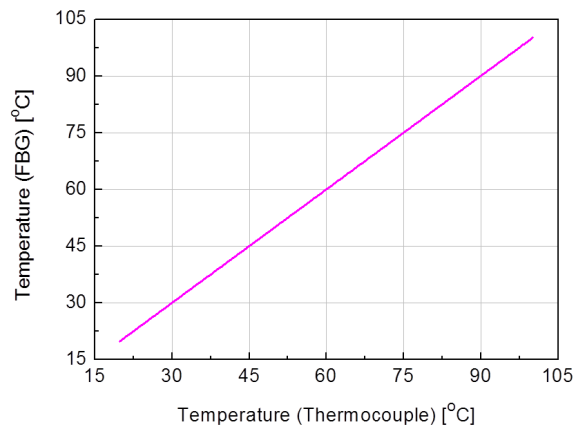
**Fig. 6** Results for the bragg wavelength and temperature shift by the time



**Fig. 9** Relation between the thermal coefficient and temperature



**Fig. 7** Plots of the bragg wavelength shift by the temperature



**Fig. 10** Comparison between temperature measured by thermocouple and fiber bragg grating

#### 4. 결 론

본 논문에서는 FBG 센서를 이용한 온도 측정에 관한 연구를 수행하였다. FBG 센서의 온도 측정은 파장의 변화를 온도의 변화로 변환하여 나타낸다. 온도 변환에 사용되는 중요 인자인 열팽창계수와 열팽창계수는 일반적으로 일정한 상수 값이 사용된다. 그러나 온도 실험을 통해 이러한 계수가 온도에 따라 변화하는 함수임을 확인할 수 있었다. 또한 기초 실험을 바탕으로 온도 계수 함수를 새롭게 제안하였다. 최종적으로 제안된 함수를 온도 측정에 적용한 결과, RT에서 100℃의 범위에서 FBG 센서를 이용한 정밀한 온도 측정이 가능함을 확인할 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- (1) Aquaro, D. and Pieve, M., 2007, "High Temperature Heat Exchangers for Power Plants: Performance of Advanced Metallic Recuperators," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 27, No. 2/3, pp. 389~400.
- (2) "The Sixth Basic Plan on Electricity Demand and Supply," 2013, Ministry of Knowledge Economy.
- (3) Lee, J.-H. and Kim, D.-H., 2012, "Flaw Detection in Pipe-Welded Zone by Using Wavelet Transform and SH-EMAT," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 36, No. 12, pp. 1511~1519.
- (4) Cegla, F. B., Cawley, P., Allin, J. and Davies, J., 2011, "High-Temperature (>500℃) Wall Thickness Monitoring Using Dry-Coupled Ultrasonic Waveguide Transducers," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 58, No. 1.
- (5) Patidar, L., Chitransh, C. S. and Rao, K.U., 2012, "Temperature Based Condition Monitoring of Rail and Structural Mill," *International Journal of Advancements in Research & Technology*, Vol. 1, Issue 2.
- (6) Her, S.-C. and Huang, C.-Y., 2013, "Thermal Strain Analysis of Optic Fiber Sensors," *Sensors*, Vol. 13, Issue 2, pp. 1846~1855.
- (7) Barrera, D., Finazzi, V. and Villatoro, J., 2012, "Packaged Optical Sensors Based on Regenerated Fiber Bragg Gratings for High Temperature Applications," *IEEE Sensors Journal*, Vol. 12, No. 1.
- (8) Kim, D.-H., 2009, "A Fiber-optic Tiltmeter System Based on the Moiré-Fringe Effect," *Measurement Science and Technology*, Vol. 20, No. 2.
- (9) Kim, D.-H., 2009, "Experimental Analysis on Vibration of Composite Plate by Using FBG Sensor System," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 29, No. 5, pp. 436~441.
- (10) Kim, D.-H., Lee, Y.-G. and Kim, C.-G., 2010, "Development of Multiplexing Model for Moiré-Fringe-Based Fiber Optic Sensor," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 30, No. 1, pp. 36~45.
- (11) Yoon, H.-J. and Kim, J.-S., 2009, "Research on the Mechanical Strength of Fiber Bragg Grating Sensor Adapting to Railway Structure," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 12, No. 1, pp. 104~109.
- (12) Dong, X., Liu, Y., Liu, Z. and Dong, X., 2001, "Simultaneous Displacement and Temperature Measurement with Cantilever-based Fiber Bragg Grating Sensor," *Optics Communications*, Vol. 192, issues 3-6, pp. 213~217.
- (13) Kahandawa, G. C., Epaarachchi, J., Wang, H. and Lau K. T., 2012, "Use of FBG Sensors for SHM in Aerospace Structures," *Photonic Sensors*, Vol. 2, No. 3, pp. 203~214.
- (14) Takeda S.-i., Aoki, Y. and Nagao, Y., 2012, "Damage Monitoring of CFRP Stiffened Panels under Compressive Load using FBG Sensors," *Composite Structures*, Vol. 94, pp. 813~819.
- (15) Xian, L. and Li, H., 2013, "Calibration of a Phase-Shift Formed in a Linearly Chirped Fiber Bragg Grating and Its Thermal Effect," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 31, No. 8.
- (16) Saccomanno, A., Laudati, A., Szillasi, Z., Beni,

- N., Cutolo, A., Irace, A., Giordano, M., Buontempo, S., Cusano, A. and Breglio, G., 2012, "Long-Term Temperature Monitoring in CMS Using Fiber Optic Sensors," *IEEE Sensors Journal*, Vol. 12, No. 12.
- (17) Udd, E., 1995, *Fiber Optic Smart Structures*, John Wiley and Sons, New York, pp. 271~285
- (18) Kang, D.-H. and Chung, W.-S., 2009, "Integrated Monitoring Scheme for a Maglev Guideway using Multiplexed FBG Sensor Arrays," *NDT&E International*, 42(4), pp. 361~368.
- (19) Rong, Q., Qiao, X., Guo, T., Wang, R., Zhang, J., Hu, M., Feng, Z., Weng, Y. and Ma, Y., 2012, "Temperature-calibrated Fiber-optic Refractometer Based on a Compact FBG-SMS Structure," *Chinese optics letters*, COL / Vol. 10, No. 3, pp. 030604.