

## 더블패스 마하젠더 간섭계를 이용한 광섬유 격자 센서의 파장복조

### FBG Sensor Demodulation Using a Double-Pass Mach-Zehnder Interferometer

박형준\*, 송민호\*<sup>†</sup>

Hyoung Jun Park\* and Minho Song\*<sup>†</sup>

**초 록** 마하젠더 간섭계를 왕복한 간섭신호를 영점검출하여 광섬유 격자 센서의 신호처리를 위한 기준 트리거로 사용하는 방법을 제안하였다. 영점 트리거에 의해서 얻은 센서신호로부터 측정 물리량에 선형적으로 비례하는 위상성분을 추출하여 간단한 구조로도 정밀하게 광섬유격자의 파장변화를 감지할 수 있는 복조방식을 구현하였다. 제안한 복조방식을 적용하면 위상변조의 속도나 비선형성, 또는 환경적 외란에 관계없이 광섬유 격자 센서에 가해지는 동적, 정적 변형률과 온도변화를 효율적으로 측정할 수 있음을 실험적으로 증명하였으며, 실험결과로부터 계산된 센서시스템의 파장측정 분해능은 8 pm이었다.

**주요용어:** 광섬유 격자, 광섬유 센서, 마하젠더 간섭계, 변형률, 온도 측정

**Abstract** A wavelength-demodulation algorithm for FBG sensor is proposed by using a double-pass Mach-Zehnder interferometer. Zero-crossing points of double-passed interference signal are used to trigger the accurate 90° phase difference positions in the sensor signal, which is an essential condition in the subsequent arctangent and phase unwrapping signal processing. With the proposed method, we could efficiently measure various measurands, such as dynamic-, static-strain, and temperature, and ~8pm of wavelength resolution was obtained.

**Keywords:** Fiber Bragg Grating, Fiber-Optic Sensor, Mach-Zehnder Interferometer, Strain Sensor, Temperature Sensor

#### 1. 서 론

광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating, FBG)는 1989년 그 효과적인 제조방법[1]이 발표된 이후 광통신 소자 및 광섬유 센서로의 연구와 상업적인 응용이 활발히 이루어져 왔다. 특히 센서로의 응용에서는, 기존 다른 방식의 센서와는 달리 하나의 광섬유 라인에 여러 개의 FBG를 직렬로 연결할 수 있으며 물리량의 검출 부위가 대략 1 cm 길이의 FBG에 한정되므로 넓은 범위에서 높은 공간적 정밀도를 가지는 다중점 센서 네트워크의 구현이 가능하다는 장점을 가진다. FBG 센서는 파장인코딩

(wavelength encoding) 특성을 가지는데, 이는 센서에 가해진 물리량이 FBG 반사파장의 변화로 바뀌는 것을 뜻한다. 즉 FBG의 반사파장 변화를 측정하여 센서에 가해진 물리량의 정보를 파악하는데, 파장은 노이즈나 환경적인 외란 등에 의해서 거의 영향을 받지 않으므로 센서의 출력이 매우 안전하게 유지된다. 또한 FBG의 반사파장은 온도와 변형률(strain)의 변화에 거의 선형적으로 반응하며 트랜스듀서를 조합하여 압력, 가속도 등 다양한 형태의 물리량을 검출할 수 있는 센서를 쉽게 구성할 수 있다. 이러한 장점들로부터 FBG는 구조물의 건전성 감시(structural health monitoring, SHM)에

가장 적합한 센서형태로 손꼽혀 왔다[2].

FBG 센서는 반사파장 변화를 읽어내어 물리량을 측정하는 것이므로, 파장의 변화를 효율적으로 복조(demodulation)하기 위한 연구가 FBG 개발의 초기부터 매우 활발하게 이루어졌다. 다수의 FBG 센서출력을 처리하기 위해서는, 파장가변필터를 스캔하여 FBG 반사 스펙트럼의 피크위치 변화를 검출하는 방식과[3], 회절격자와 라인 CCD를 이용하는 방식 두 가지가 현재까지 상업적으로도 널리 사용되는 대표적인 복조방식이다[4]. 한편 적은 수의 FBG 센서를 보다 간단한 구조나 높은 정밀도로 복조하기 위해서는 에지(edge) 필터나 간섭계 등이 주로 사용되는데, 광섬유 커플러를 이용하여 쉽게 제작할 수 있는 마하젠더 간섭계는 구조가 매우 간단하면서 동시에 고정밀도 측정이 가능하다. 그러나 간섭계의 전달함수(transfer function)가 사인함수이므로 선형적인 일부분만을 필터곡선으로 이용하거나 파장변화에 비례하는 위상정보를 사인함수로부터 추출하는 계산 절차가 필요하다[5].

본 논문에서는 최근 발표된 마하젠더 간섭계 신호의 영점검출을 이용한 광섬유 ESPI (electronic speckle pattern interferometry)의 위상스테핑(phase stepping) 기법[6]을 FBG 센서의 신호처리에 적용할 것을 제안한다. 위상스테핑 기법을 이용하여 FBG 센서신호의 위상을 추출하는데 필요한 90° 위상차를 위상변조 신호의 형태나 속도, 또는 환경적인 노이즈에 무관하게 정확히 얻을 수 있었으며, 이를 적용하여 FBG 센서에 가해지는 다양한 변형률 파형을 정밀하게 복조할 수 있음을 보였다.

## 2. 본 론

### 2.1. 광섬유 격자 (FBG)

FBG는 광섬유의 측면에 자외선 레이저의 간섭패턴을 조사하여 주기적으로 코어의 굴절률을 변화시킨 광섬유소자이다[1]. 주기적으로 변조된 굴절률의 경계면에서는 다중반사가 일어나며 그에 따른 간섭현상으로 Fig. 1과 같이 브래그 파장  $\lambda_B$ 만이 FBG에서 반사되고 나머지는 통과된다.

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

위 식에서  $\Lambda$ 는 변조된 굴절률의 공간적 주기이며  $n$ 은 광섬유 코어의 유효굴절률이다. FBG에 물리량

이 가해져서 굴절률과 물리적인 길이가 변화하면 반사되는 브래그 파장도 변화되는데, 변형률과 온도에 의한 파장변화의 정도를 광섬유의 주재료인 실리카(SiO<sub>2</sub>)의 여러 물질적 특성을 대입하여 구하여 보면 다음과 같이 얻을 수 있다[4].

$$\frac{1}{\lambda_B} \frac{d\lambda_B}{d\epsilon} = 0.78 \times 10^{-6} \mu\epsilon^{-1} \quad (2)$$

$$\frac{1}{\lambda_B} \frac{d\lambda_B}{dT} = 6.67 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \quad (3)$$

예를 들어, 1300 nm의  $\lambda_B$ 를 가지는 FBG라면  $1 \mu\epsilon$ 이나  $0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$ 가 가해질 경우 대략 1 pm 정도의 파장변화가 발생하며  $\lambda_B$ 가 1550 nm인 FBG라면 더 큰 파장변화를 겪게 될 것이므로 이로부터 파장복조 시스템이 가져야하는 정밀도를 가늠할 수 있다.

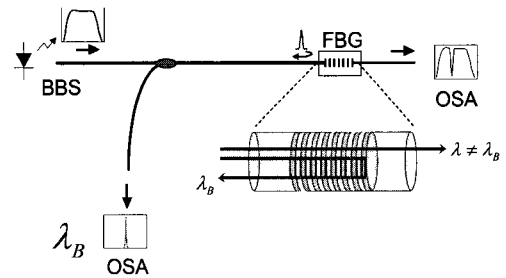


Fig. 1 Reflection characteristic of a FBG. (BBS: broad band source, OSA: optical spectrum analyzer)

### 2.2. 간섭계를 이용한 FBG의 파장복조

$\lambda_B$ 의 중심파장을 가지는 광신호가 Fig. 2의 마하젠더 간섭계를 통과한 후 얻게 되는 간섭 신호는 다음 식으로 표현된다.

$$I = I_0(1 + V\cos[\Delta\Phi_B + \phi(t)]) \quad (4)$$

위 식에서  $I_0$ ,  $V$ ,  $\phi(t)$ 는 각각 광신호의 세기, 간섭신호의 가시도, 그리고 환경적 외란에 의한 위상흐름(phase drift) 성분을 표시한다. 간섭계의 입사파장이  $\Delta\lambda_B$ 만큼 변한다면 그에 따른 간섭신호의 위상 변화량  $\Delta\Phi_B$ 는,

$$\Delta\Phi_B = -\frac{2\pi\Delta L}{\lambda_B^2} \Delta\lambda_B \quad (5)$$

와 같다[5]. 위 식에서  $\Delta L$ 은 간섭계의 광경로차이며 이 크기를 조절하여 복조 시스템의 파장분해능을 조절할 수 있다.  $\Delta\phi_B$ 는 브래그파장의 변화량, 즉 온도나 변형률의 변화에 비례하는 양이므로 그 변화를 측정하면 센서에 가해진 물리량을 알 수 있게 된다. 코사인 함수의 위상을 추출하는 대표적인 방법은 phase generated carrier 방법[8], passive arctangent 복조법[9], quadrature 샘플링 기법[5] 등이 있는데, 본 논문에서는 quadrature 샘플링 기법을 이용한 파장복조 방식을 이용하였다. Quadrature 샘플링 기법은 간섭계에 위상변조를 가한 후  $90^\circ$  위상차이를 가지는 2개의 간섭신호를 샘플링을 통해서 얻는다. 동일한 위상성분에  $90^\circ$  위상차만을 가지는 간섭신호는 사인과 코사인 함수로 표현할 수 있으므로, 사인을 코사인으로 나눈 뒤 탄젠트의 역함수를 가하여 위상정보를 추출하는 것이다[9].

Fig. 2는 본 논문에서 제안한 더블패스 마하젠더 간섭계의 구조와 신호처리과정을 보인다. 간섭계에 입사되는 광신호는 간섭계를 통과한 후 거울에 의

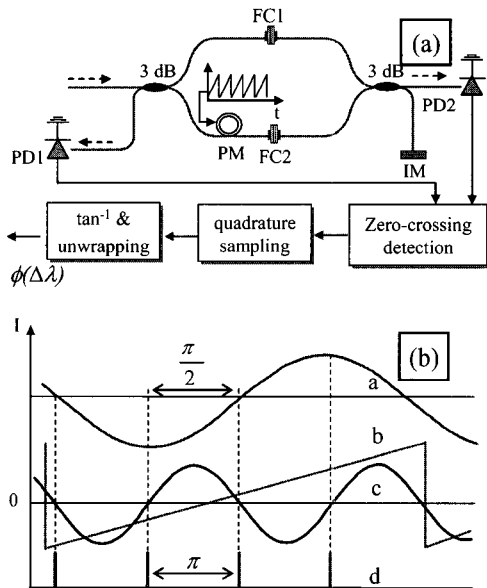


Fig. 2 Schematic diagram of the proposed quadrature signal processing and timing sequence. (PM: phase modulator, a: PD2 signal, b: phase modulation signal, c: ac-coupled PD1 signal, d: zero-crossing triggers)

해 반사되어 다시 간섭계를 통과한다. 간섭계를 왕복함에 따라 PD1 신호는 PD2 신호가 가지는 위상의 정확히 2배 크기의 위상을 가지게 되므로, PD1 간섭신호를 영점검출하면 PD2 신호가  $\pi/2$  위상차를 갖도록 샘플링할 수 있는 트리거 신호로 사용할 수 있다. 이 과정은 Fig. 2(b)를 이용하여 쉽게 이해할 수 있다. AC 커플링된 c의 영점주기는 항상  $\pi$  위상을 만족하므로 d와 같이 트리거 신호를 발생하여, PD2신호 a를 샘플링하면,  $\pi/2$  위상차를 가지는 간섭신호를 얻을 수 있는 것이다.

Fig. 3은 PD2의 신호가 2배의 위상변화를 가지는 과정을 광파장분석기(optical spectrum analyzer, OSA)를 이용하여 광학적 스펙트럼으로 직접 보인 것이다. 그림의 a는 PD1에서 얻게 되는 간섭계의 투과 스펙트럼으로 FSR(free spectral range)이 2.52 nm이고, b는 PD2에서 얻은 스펙트럼이며 예측한대로 a의 절반에 해당하는 1.26 nm의 FSR을 보인다(파장변화에 따른 간섭신호의 위상변화 크기는 FSR에 반비례한다.) 스펙트럼 c는 센서로 사용된 광섬유 격자의 반사파장이다.

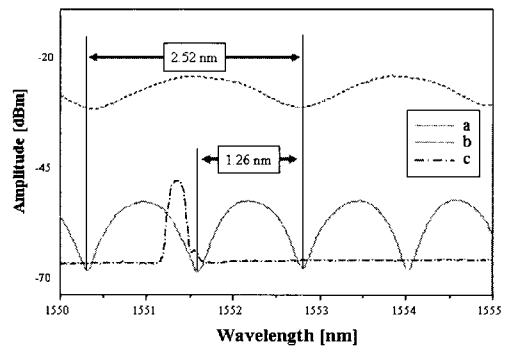


Fig. 3 Transmission spectrum of M/Z interferometer (a: single-pass at PD1, b: double-pass at PD2, c: reflection of FBG sensor)

### 2.3. 센서 실험 및 결과

Fig. 4는 제안한 복조방식으로 구성된 FBG 센서 시스템의 개략도이다. 광원은 에르븀(Erbium) 첨가 광섬유를 이용하여 구성된 중심파장 1567 nm, 대역폭 70 nm을 가지는 광폭광원을 사용하였고, 마하젠더 간섭계의 한 쪽 팔을 원통형 압전소자에 감은 후 함수발생기로 구동신호를 가하였다. 구동신호의 크기는 PD2에서  $2\pi$ 의 위상변조를 얻을 수 있

도록 조절하였다. 한편 광폭 광원은 간섭 길이 (coherence length)가 매우 짧아서 간섭계의 작은 광경로차에 의해서도 간섭신호를 형성하지 못하므로 Fig. 2에서 기술한 동작이 이루어지지 못한다. 따라서 PD2에서 간섭신호를 얻기 위해서 Fig. 2의 거울 대신 ~0.2 nm 폭의 파장성분만을 반사시키는 기준 격자(중심 파장: 1550.7 nm, 온도 민감도: 0.74 pm/°C)를 사용하였다. 광차단기(isolator)는 FBG 센서의 반사파장이 기준격자의 반사파장과 섞여서 신호가 왜곡되는 것을 방지하기 위해 사용하였다. PD2의 간섭신호는 위상변조를 2번 겪게 되므로, PD1 신호 2배 크기의 위상을 가진다. 따라서 PD2 신호를 AC 커플링 하면, 영점의 위치마다 항상  $\pi$  위상차를 만족하게 되므로 이를 PD1 출력에 대한 기준 트리거로 이용하면, 주기적으로 90° 위상차를 가지는 2개의 샘플을 얻는다.

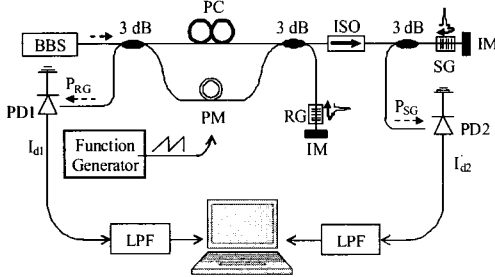


Fig. 4 FBG sensor system (BBS: broadband source, PC: polarization controller, ISO: isolator, RG: reference grating, SG: sensor grating, IM: index matching)

Fig. 5는 트리거 신호에 따라 PD1에서 주기적으로 얻어지는 2개의 샘플을 이용하여 Lissajous 그래프를 그리고, 원형모델로 least square fitting을 수행한 것이다. 두 신호가 90° 위상차를 가진다면 Lissajous 그래프는 정확한 원을 이룰 것이다. 그림 a는 25 Hz의 램프(ramp) 신호로 위상변조를 하며 샘플링을 수행한 결과로 이상적인 원과 비교한 MSE(mean squared error) 오차는 0.0019이며 이는 2.09 mrad의 평균 위상오차에 해당하여 90° 위상차 샘플링이 충실하게 이루어지고 있음을 알 수 있다. 압전소자와 같이 기계적인 움직임을 이용하여 위상을 변조하는 경우에는 압전소자의 기계적인 진동특성에 의하여 램프신호를 이용한 위상변조에 어려움이 있고 또 달성할 수 있는 최대 변조주파수가 제

한되는 경우가 많다. 따라서 램프 이외의 구동 신호를 이용하여 높은 속도로 위상변조를 할 수 있다면 효율적인 시스템을 구성할 수 있는데, 제안하는 방법은 구동신호의 형태와 속도에 관계없이 90° 위상차를 유지할 수 있음을 그림 b~d에 보였다. 그림 b는 25 Hz의 비선형 램프신호, 그림 c, d는 100 Hz 속도의 사인파, 삼각파를 적용한 경우로 각각 MSE가 0.0029, 0.0037, 0.0032를 얻어 그림 a의 저속 램프신호를 사용한 경우와 비교하여 큰 위상오차의 변화를 관측할 수 없었다.

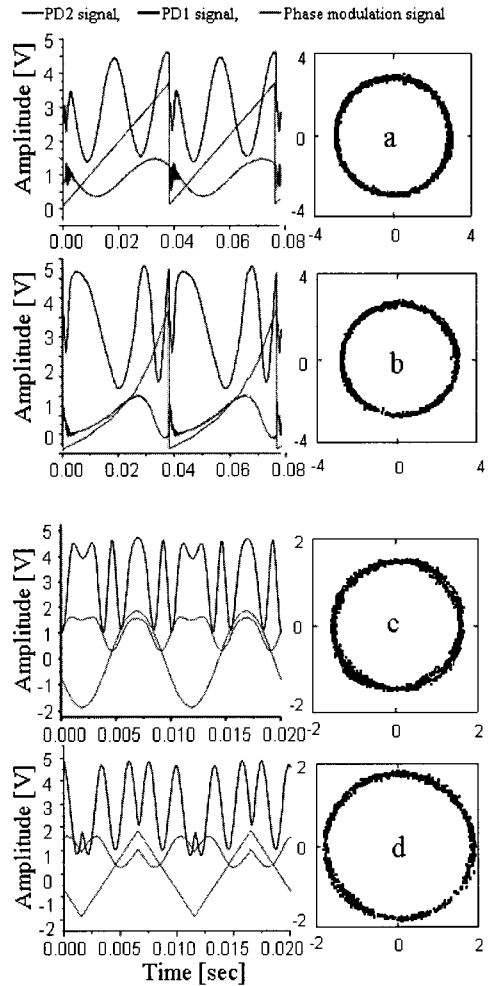


Fig. 5 Interference signals by different waveforms and their Lissajous plots (a: ramp modulation(25 Hz), b: distorted ramp modulation (25 Hz), c: sinusoidal modulation(100 Hz), d: triangular modulation(100 Hz))

더블패스 간섭계에 의한 트리거를 이용하여 얻어진 두 신호를 이용한 후처리는 Labview 프로그래밍을 이용하여 이루어졌으며 자세한 내용은 이전에 발표된 문헌에 소개되어 있다[5,9].

제안한 복조방식의 효용성을 증명하기 위하여 알루미늄 빔에 FBG 센서를 에폭시로 고정시킨 뒤, 다양한 형태의 변형을 가하면서 광섬유 격자의 반사파장 변화를 복조한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. (a)는 FBG 센서 양끝을 알루미늄 빔에 에폭시로 고정시킨 뒤, 알루미늄 빔에 압력을 가한 경우의 출력파형이고, (b)는 FBG 센서 전체를 고정시킨 뒤, 알루미늄 빔의 한쪽 끝을 진동시켰을 때 얻은 출력이다. (c)는 FBG 센서가 부착된, 알루미늄 빔을 위, 아래로 변형을 가한 결과 파형이다. 실험 결과로부터, 센서에 가해진 변형의 형태와 속도에 관계없이 충실하게 변형률 정보를 재현하고 있음을 알 수 있다.

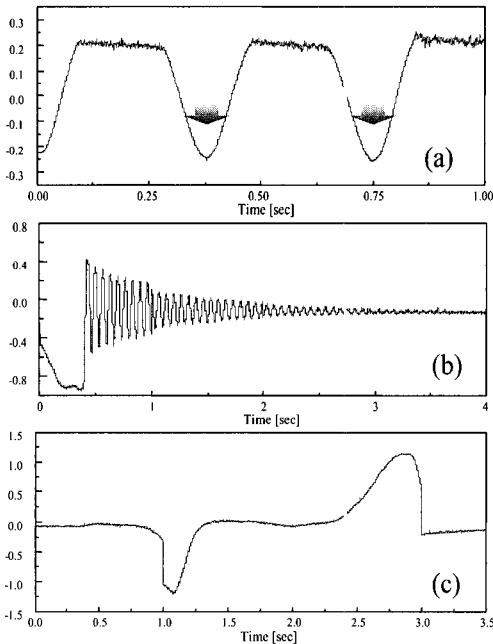


Fig. 6 Reconstructed output profiles

Fig. 7은 빠른 속도의 물리량에 대한 출력특성을 파악하기 위하여 FBG 센서를 막대형 압전소자에 고정시킨 후, 400 Hz의 사인파와 구동신호를 가하면서 센서 출력을 복조한 결과이며, 이 때 간섭계의 위상변조 속도는 10 kHz이었다. PD1과 PD2의 간섭신호를 푸리에 변환(FFT)한 것으로부터 변형률과 위상변조 신호 성분을 확인할 수 있다. 제안한 복

조시스템의 변형률 측정능력을 보다 정량적으로 평가하기 위하여, FBG 센서에 함수발생기를 이용하여 정현파, 구형파, 램프, 삼각함수 형태의 변형률을 가하고 그 복원된 출력을 Fig. 8에 나타내었다. 막대형 압전소자에 40 Hz, 24  $\mu\text{e}$ 의 변형률이 가해지도록 구동전압을 인가하였으며 U자형 변조기를 사용하여 FBG 센서에 가해지는 변형률을 증폭하였다. 구형파와 램프파형의 경우에는 변조기의 진동특성을 과도적인 진동파형까지 세밀하게 복원하고 있음을 확인할 수 있다.

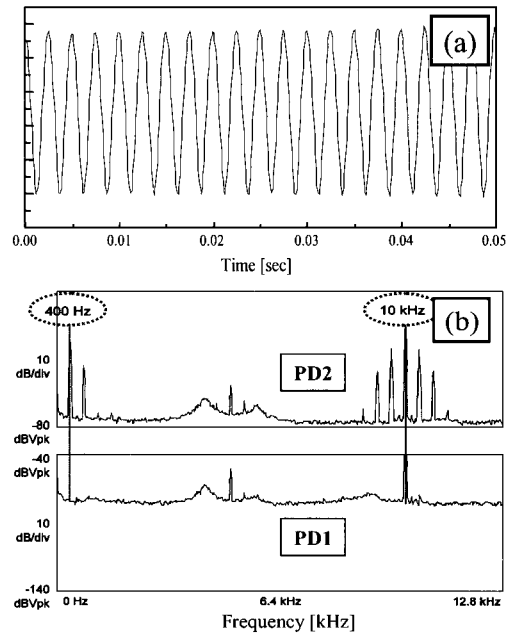


Fig. 7 Reconstructed output(a) and power spectrum(b) when a 12  $\mu\text{strain}$  rms, 400 Hz sine waveform was applied

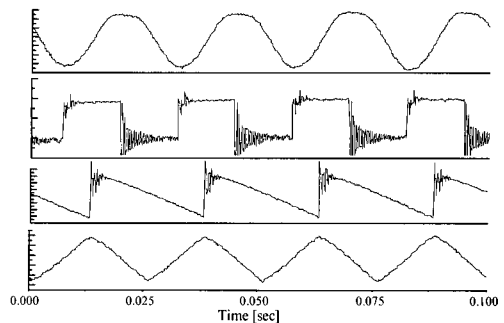


Fig. 8 Reconstructed profiles with different strain waveforms

구조물의 건전성 감시는 많은 경우 구조물 내부의 온도변화에 대한 감시기능을 요구한다. 제안한 방법으로 온도의 변화를 측정할 수 있음을 보이기 위하여 FBG 센서를 기준 써머커플(thermocouple) 온도계와 함께 수조에 넣고 출력의 변화를 관찰하였다. 상온의 수조에 75 °C의 온수를 부은 후, 얻어진 온도의 변화를 기준 온도계와 비교하여 Fig. 9에 나타내었다. 위상변조는 2 kHz의 삼각함수로 이루어 졌으며, 실험결과로부터 FBG 센서의 온도에 대한 반응성은 써머커플보다 0.17초 빠른 것으로 측정되었고, 온도측정의 오차는 약 0.8 °C이었고, 이로부터, 파장 분해능이 8 pm임을 확인 하였다. 이는 구성한 간섭계 센서의 이론적인 정밀도에 크게 뒤지는 결과인데, 간섭계를 보다 작게 구성하고 온도변화에 둔감하도록 패키징한다면 쉽게 개선이 가능할 것으로 판단된다.

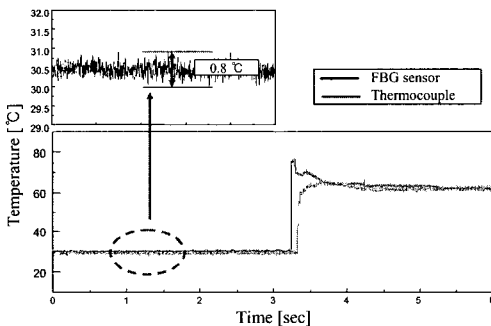


Fig. 9 Temperature measurement outputs of the FBG sensor and a thermocouple

### 3. 결론

더블패스 마하젠더 간섭계를 이용하여, 정밀한 FBG 센서의 파장복조 시스템을 구현하였다. 더블패스 마하젠더 간섭계를 통과한 신호를 영점검출한 트리거를 이용함으로써 정확한 90° 위상샘플링이 가능하였으며, 이 기법은 위상변조 신호의 형태와 속도, 환경적 외란의 영향에도 거의 영향을 받지 않음을 실험적으로 입증하였다.

초기실험을 통하여 FBG 센서에 가해지는 정적, 동적 변형률을 효율적으로 재현할 수 있음을 보였다. 제안한 복조 방식은 간단하면서도 적은 비용으로 고정밀도의 FBG 센서 복조시스템을 구성할 수 있으므로 적은 수의 센서점을 가지는 구조물 건전성 감시기술의 연구와 응용에 많은 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

### 참고문헌

- [1] G. Meltz, W.W. Morey and W. H. Glenn, "Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method," *Opt. Lett.*, Vol. 14, pp. 823-825, (1989)
- [2] Proceedings in SHM Workshop, Tech. Digest, 18th International Conference on Optical Fiber Sensors (OFS), Oct. 23-27, Cancun, Mexico, (2006)
- [3] A. D. Kersey, T. A. Berkoff and W. W. Morey, "Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter," *Opt. Lett.*, Vol. 18, No. 16, pp. 1370-1372, (1993)
- [4] A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick, M. LeBlanc, K. P. Koo, C. G. Askins, M. A. Putnam and E. J. Friebele, "Fiber grating sensors," *J. Lightwave Technol.* Vol 15, No. 8, pp. 1442-1462, (1997)
- [5] 송민호, 이상배, 최상삼, 이병호, "Mach-Zehnder 간섭계를 이용한 광섬유 브래그 격자 센서", *전자공학회논문지*, Vol. 34D, No. 3, pp. 105-113, (1997)
- [6] H. Park and M. Song, "A quarter-wave phase-stepping algorithm for fiber optic ESPI using zero-crossing triggers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 18, No. 16 pp. 1732-1734, (2006)
- [7] M. Song, S. Yin and P. B. Ruffin, "Fiber Bragg grating strain sensor demodulation with quadrature sampling of Mach-Zehnder interferometer," *Appl. Opt.*, Vol. 39, No. 7, pp. 1106-1111, (2000)
- [8] A. Dandridge, A. B. Tveten and T. G. Giallorenzi, "Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensors using phase generated carrier," *IEEE J. Quantum Electron.*, JQE-18, pp. 1647-1653, (1982)
- [9] Y. L. Lo, J. S. Sirkis and C. C. Chang, "Passive signal processing of in-line fiber etalon sensors for high strain-rate loading," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 15, pp. 1578-1585, (1997)