마하젠더 간섭계와 EDFA를 이용한 온도와 스트레인을 동시에 측정하는 광섬유 브래그 격자 센서

최민호 · 김부균†

숭실대학교 정보통신전자공학부

㉾ 156-743 서울시 동작구 상도5동 1-1번지

정재훈 · 이병호

서울대학교 전기공학부

㉾ 151-744 서울시 관악구 신림동 산56-1번지

(2001년 4월 20일 받음, 2001년 8월 9일 수정본 받음)

온도 변화에 민감한 1480 nm LD로 펌핑되는 erbium doped fiber와 단일 광섬유 브래그 격자를 사용하여 스트레인과 온도를 동시에 측정할 수 있는 센서 헤드를 구성하였고 optical spectrum analyzer (OSA) 대신에 마하젠더 간섭계를 demodulator로 사용하여 측정 정밀도와 속도를 향상 시켰다. 출력 신호의 진폭 변화로 측정한 온도의 최소 측정 단위는 0.05°C이고 위상 변화로 측정한 스트레인의 경우는 0.1 μstrain으로서 0.07 nm의 측정 해상도를 가지는 OSA를 demodulator로 사용하는 경우보다 측정 정밀도가 각각 140배 이상과 700배 이상 향상되었음을 볼 수 있었다.

분류코드 : FO.030.

I. 서 론

광섬유 브래그 격자를 사용하는 센서는 높은 감도를 제공하며 제작이 용이하기 때문에 많은 연구가 진행되고 있다.[1] 특히 온도와 스트레인을 동시에 측정하기 위하여 광섬유 브래그 격자를 사용한 여러 형태의 센서에 대하여 연구가 수행되어왔다. 또한 많은 센서 응용에 있어서 보다 정밀한 온도 측정과 스트레인 측정 등이 요구되어지고있다.[2]

최근에 1480 nm 파장의 LD를 펌프 광원으로 사용한 erbium doped fiber (EDF)의 amplified spontaneous emission (ASE) 파워 변화가 온도에 따라 선형적으로 달라진다는 사실에 주목하여 optical spectrum analyze (OSA)를 demodulator로 사용하여 온도와 스트레인을 동시에 측정하였다.[3] 광섬유 브래그 격자에 인접하게 놓은 EDF의 ASE 파워 변화로부터 스트레인과 무관한 온도 변화를 측정하고 온도와 스트레인의 변화에 의하여 발생되는 광섬유 브래그 격자의 브래그 파장 변화로부터 온도 변화 부분을 보상하여 스트레인을 측정한다. 이러한 센서의 최소 측정 단위는 약 ±0.24°C와 ±2.3 μstrain이다. 본 논문에서는 unbalanced 마하젠더 간섭계 와 lock in amplifier (LIA)를 demodulator로 사용하여 간섭 신호의 위상 차와 진폭의 크기 변화로 온도와 스트레인을 동시에 측정하고 0.07 nm의 측정 해상도를 가지는 OSA를 demodulator로 사용하는 경우보다 측정 정밀도가 온도와 스트레인의 경우에 각각 140배 이상과 700배 이상 향상된 결과를 보고한다.

†E-mail: bgkim@sunbee.soongsil.ac.kr

II. 이 론

2.1. EDF를 이용한 센서 헤드

온도와 스트레인이 가해졌을 때 브래그 격자를 이용한 센서에서 발생하는 현상은 브래그 파장의 변화이므로 단일 브래그 격자를 이용한 센서의 경우는 브래그 파장의 변화만을 가지고 온도와 스트레인을 구분하여 측정하는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 기존에는 서로 다른 브래그 파장을 가지는 광섬유 격자를 사용하거나, 다른 직경을 가지는 광섬유 내에 삽입된 광섬유 격자를 이용하여 온도에 대한 브래그 파장 변화는 유사하나 스트레인에 대한 광섬유 격자의 중심파장 변화는 광섬유의 직경 차이 때문에 브래그 파장의 변화가 서로 다르게 발생하는 현상을 이용하여 온도와 스트레인을 구분하여 측정하였다.[4] 또 다른 방법은 broadband source (BBS)로 사용되는 EDF의 ASE 파워 변화가 온도에 대하여 선형적으로 변화한다는 사실을 이용하여 센서 출력의 진폭 변화로 온도를 측정하고 브래그 파장의 변화로 스트레인을 측정하는 방법이다.[3]

EDFA의 소 신호 이득은 넓은 범위의 온도에 따라 선형적으로 변화한다. 또한 980 nm 파장으로 펌프된 EDFA보다 1480 nm 파장으로 펌프된 EDFA의 소 신호 이득의 온도 의존성이 크다고 알려져 있다.[5] EDFA의 ASE 파워 P_{ASE}와 소 신호 이득 G(T)와의 관계식은 다음과 같다.

$$P_{ASE} = n_{sp} h\nu \Delta\nu (G(T) - 1) \quad (1)$$

여기서 n_{sp}는 spontaneous emission factor, h는 Planck 상수, ν는 광의 주파수, $\Delta\nu$는 ASE의 선폭이다. $G(T)$는 소 신호 이득으로서 $\mathrm{Exp}[(N_2\sigma_e(T) - N_1\sigma_a(T))L]$에 비례한다. 여기서 N_2

는 여기된 상태의 전자 밀도, N_1은 바닥 상태의 전자 밀도, σ_e는 유효 방출 단면적이며 σ_a는 유효 흡수 단면적을 나타낸다. 1480 nm 파장으로 EDFA를 펌프할 때가 980 nm 파장으로 EDFA를 펌프 할 때 보다 방출 단면적과 흡수 단면적의 온도에 의한 변화가 더 크다. 따라서 980 nm 파장 보다 1480 nm 파장으로 EDFA를 펌프하는 경우가 온도에 따른 $G(T)$의 변화 폭이 커져서 ASE 파워의 온도에 대한 변화가 커진다. 위와 같은 성질을 이용하여 EDFA의 ASE 파워의 변화량으로부터 스트레인과 무관한 EDF에 가해진 온도를 직접 측정할 수 있다.

다음은 온도와 스트레인의 변화 ΔT와 $\Delta\varepsilon$에 대한 EDFA의 ASE 파워의 변화와 광섬유 브래그 격자의 브래그 파장의 변화에 관한 관계식이다.

$$\Delta P = A\Delta T \tag{2}$$

$$\Delta\lambda_B = B\Delta\varepsilon + C\Delta T \tag{3}$$

여기서 ΔP는 EDFA의 ASE 파워 변화이고, A는 EDFA의 온도 계수이며, B와 C는 각각 광섬유 브래그 격자의 스트레인과 온도 계수이다. 위의 식들을 이용하여 EDFA의 ASE 파워 변화로부터 스트레인과 무관한 온도에 관한 측정을 할 수 있고 광섬유 브래그 격자의 브래그 파장의 변화로부터 스트레인에 관한 측정을 할 수 있다.

2.2. 마하젠더 간섭계를 이용한 Demodulator

브래그 격자의 브래그 파장 변화는 일반적으로 온도에 대해서는 약 0.01 nm/°C 감도를 가지고 스트레인에 대해서는 약 0.001 nm/μstrain 감도를 가진다. OSA를 사용하여 파장의 변화를 측정하는 경우 측정 해상도는 0.05~0.1 nm에 불과하다. 따라서 측정 최소값은 온도의 경우 5~10°C 정도이고 스트레인은 80 μstrain 정도이다. 실제 구조물의 온도나 스트레인을 측정 할 경우 이보다 더 정밀한 측정이 요구된다. 또한 OSA는 파장을 측정하기 위하여 측정하는 파장영역에서 scanning을 해야하므로 그 응답 속도에 한계가 있어 빠르게 변화하는 동적인(dynamic) 물리량은 측정할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 좀더 정밀한 측정과 동적인 물리량을 측정하기 위하여 제안된 방법이 demodulator로 OSA대신에 unbalanced 마하젠더 간섭계를 이용하여 빠른 속도로 아주 작은 파장의 변화도 측정하는 방법이다.[6,7]

마하젠더 간섭계를 demodulator로 이용한 브래그 격자 센서의 기본 원리는 브래그 파장의 변화를 간섭계 출력 신호의 위상변화로 변환하는 것이다. 그림 1과 같이 50:50 광 커플러(coupler)를 사용하여 양쪽 팔(arm)에 입사하는 광의 강도가 같다면 간섭계의 출력신호의 광 강도는 다음과 같이 표현된다.

$$I_{det} = 2I[1 + \xi\cos(\Psi(\lambda) + \Phi_t)] \tag{4}$$

여기서 I는 한쪽 팔에 입사하는 광의 강도, ξ는 광원의 코히어런스(coherence) 함수가 상수화 된 값, $\Psi(\lambda)$는 간섭신호의 위상이고, Φ_t는 간섭계에 가해지는 불규칙한 온도 흐름(thermal drift)에 의한 양쪽 팔간 광 경로 변화에 따른 간섭

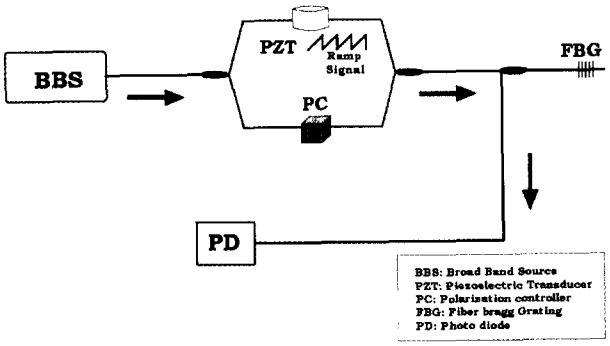

그림 1 마하젠더 간섭계의 개략도.

신호의 위상 변화량이다.

간섭 신호의 원활한 신호처리를 위하여 간섭 신호를 정현파 형태로 만들 필요가 있으므로 간섭계의 한쪽 팔에 원통형 piezoelectric transducer (PZT)를 감아 톱니파 형태의 램프 신호 (ramp signal)를 가하여 한쪽 팔의 광 경로를 주기적으로 변화시키면 양쪽 팔의 광 경로 차가 주기적으로 변하게 된다. 간섭 신호의 위상 $\Psi(\lambda)$의 변화량과 파장 변화량과의 관계는 다음 식으로 표현된다.

$$\Delta\Psi = \frac{-2\pi nd}{\lambda^2}\Delta\lambda \tag{5}$$

여기서 n은 광섬유 코어의 유효 굴절률이고 d는 PZT에 전압이 인가되지 않았을 경우의 간섭계 두 팔 사이의 광 경로 차이다. 온도 흐름에 의한 간섭신호의 위상 변화량 Φ_t에 대한 영향을 무시하고, 광 경로 차 d가 고정되어 있다면 위상 변화량 $\Delta\Psi$는 브래그 파장의 변화량 $\Delta\lambda$에 비례하여 변화한다. 따라서 간섭계에 인가되는 광의 파장이 광섬유 브래그 격자에 인가된 온도나 스트레인에 의하여 변화할 경우 간섭 신호의 위상이 변화한다.

위상 변화량 $\Delta\Psi$는 간섭계 두 팔 사이의 광 경로 차 d에 비례하므로 서로 다른 d를 가지는 간섭계를 사용하면 같은 브래그 파장 변화에 대해서도 서로 다른 크기의 위상 변화를 얻을 수 있다. 따라서 시스템의 측정 정밀도가 간섭계의 광 경로 차에 의해 조절될 수 있다. 일반적으로 측정 물리량을 위상으로 변환할 경우에는 위상의 변화 범위가 2π 이내인 경우만 구분하여 측정 할 수 있다. 따라서 센서의 측정 정밀도가 정해지면 그 측정 범위도 결정된다. 마하젠더 간섭계의 한 쪽 팔에 PZT나 광섬유에 스트레인을 가할 수 있는 장치로 광 경로 차를 조절할 수 있다면 센서의 측정 정밀도와 측정 범위를 조절할 수가 있다.

III. 실 험

그림 2는 EDF를 이용한 센서 헤드와 마하젠더 간섭계를 demodulator로 사용한 광섬유 브래그 격자 센서 실험 장치의 개념도 이다. 광섬유 브래그 격자는 131 μm의 클래딩 지름을 가지는 단일 모드 광섬유로 80 기압, 100°C에서 48시간 이상 수소 처리한 후 KrF 엑시머 레이저 (Lambda Physik, λ=

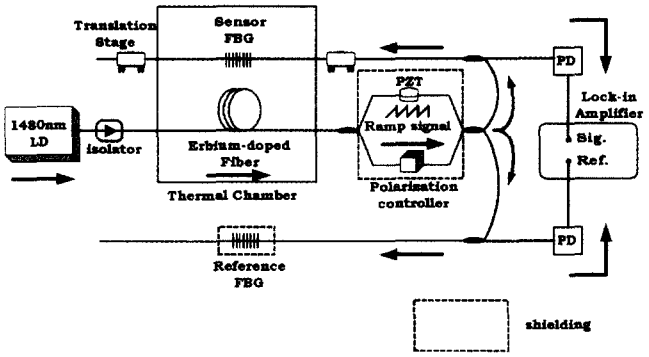

그림 2. 실험 장치 개략도.

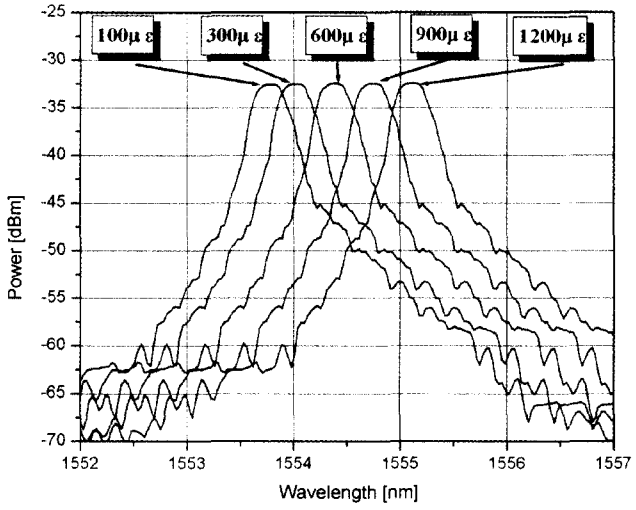

그림 3. 스트레인만 가했을 때의 파장변이.

248 nm)와 위상 마스크를 사용하여 제작하였다. 제작된 광섬유 브래그 격자의 브래그 파장은 상온에서 1553.44 nm이다. 사용된 EDF 길이는 최적의 ASE파워 온도계수를 가지는 3 m로 설정하였다. 그리고 EDFA의 펌프 파워는 일정하게 놓았다. 그림 2의 센서 헤드 부분은 다음과 같이 구성하였다. EDF에 가해지는 온도가 센서로 사용되는 브래그 격자에 가해지는 온도와 같게 하기 위하여 thermal chamber안에 원형으로 작게 감은 EDF를 센서 브래그 격자 옆에 놓았으며 온도는 1°C 단위로 측정이 가능하였다. 스트레인은 센서 브래그 격자의 양쪽 끝단에 translation 스테이지를 고정시켜서 축 방향으로 인가하였다.

EDF를 사용한 센서 헤드의 온도와 스트레인을 각각 변화시켰을 때 OSA를 demoulator로 사용하여 브래그 파장 변이와 파워 변화를 살펴보았다. 그림 3은 센서 헤드의 온도를 일정하게 유지하고 스트레인을 100 $\mu\varepsilon$에서 1200 $\mu\varepsilon$까지 변화시켜가며 브래그 파장의 변화와 파워 변화를 측정한 그림이다. 온도가 일정하게 유지되므로 인가된 스트레인 값에 관계없이 파워가 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있었고 브래그 파장은 광섬유의 탄성변화로 인한 굴절률 변화로 장파장으로 이동함을 볼 수 있었다. 측정된 데이터로부터 스트레인에 대한 파장 변화는 0.001 nm/μstrain임을 알 수 있었다.

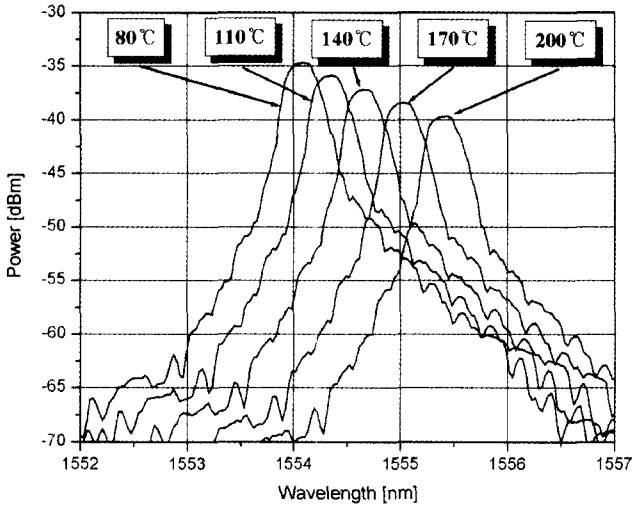

그림 4. 온도만 가했을 때의 파장변이.

그림 4는 센서 헤드에 스트레인을 인가하지 않고 온도만 80°C에서 200°C까지 변화시켜 브래그 파장 변화와 파워 변화를 측정한 그림이다. 온도가 증가함에 따라 EDF의 ASE 파워가 감소함과 동시에 브래그 파장이 장 파장으로 이동함을 볼 수 있었다. 측정된 데이터로부터 온도에 대한 브래그 파장 변화와 파워의 감소량은 각각 0.01 nm/°C이고 –0.047 dB/°C임을 알 수 있었다.

측정에 사용한 OSA (Anritsu MS9710B)의 해상도는 0.07 nm이기 때문에 OSA를 사용하여 측정할 수 있는 최소 단위는 온도의 경우는 약 7°C이고 스트레인의 경우는 약 70 μstrain이다. 따라서 측정할 수 있는 최소 단위를 향상시키며 동적 신호를 측정하기위하여 마하젠더 간섭계를 제작하여 demodulator로 사용하였다. 제작된 마하젠더 간섭계는 그림 2와 같이 한쪽 팔에 광섬유의 구부림에 의한 편광 특성을 보상하여 주기 위한 편광 조절기를, 다른 쪽 팔에는 간섭 신호를 정현파 형태로 만들어주기 위해 PZT를 감아서 약 20 Hz의 램프 신호를 가하였다. 제작된 마하젠더 간섭계의 간섭패턴 주기는 약 5 nm이고 진폭의 크기는 약 10 dBm이다.

온도 흐름에 의한 간섭신호의 위상 변화량 Φ_t를 안정화시키기 위해 그림 2에서 보는 것처럼 마하젠더 간섭계를 아크릴 박스안에 설치하여서 차폐하였으나 느리게 변화하는 위상 변이는 막을 수 없었다. 이러한 위상 변화량 Φ_t를 상쇄시키기 위해 그림 2와 같이 센서 광섬유 격자와 같은 온도 흐름을 느끼는 기준 광섬유 격자에서 나온 신호를 LIA의 기준 신호로 사용하여 센서 광섬유 격자에 나오는 신호를 동기화 시켰다.[7,8] 기준 광섬유 격자는 단지 간섭계 온도 흐름에 의한 신호 동기화를 위한 것이 때문에 온도와 스트레인에 관해서 영향을 받지 않도록 적절히 격리해 주었다.

Thermal chamber의 온도를 고정시키고 스트레인을 가해서 위상 측정을 하였고 또한 스트레인을 일정하게 주고 온도를 변화시켜 위상 측정을 하였다. 그림 5와 6은 각각 온도에 따른 위상 출력의 변화와 스트레인에 따른 위상 출력의 변화를 측정한 데이터이다. 최소 자승법을 이용하여 단위 물리량에 따

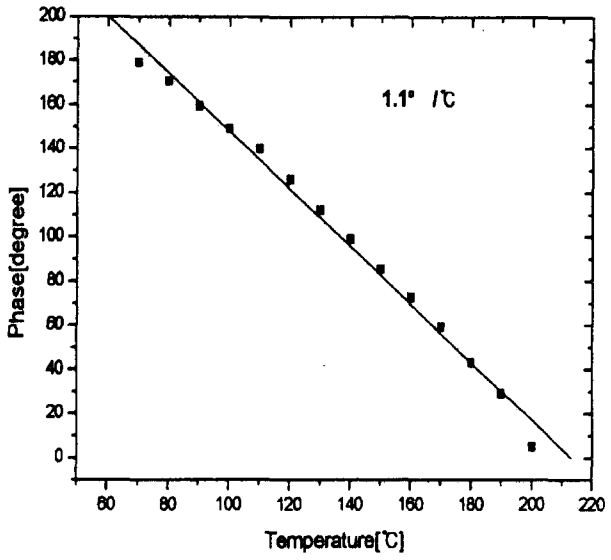

그림 5. 온도에 따른 위상 출력의 변화.

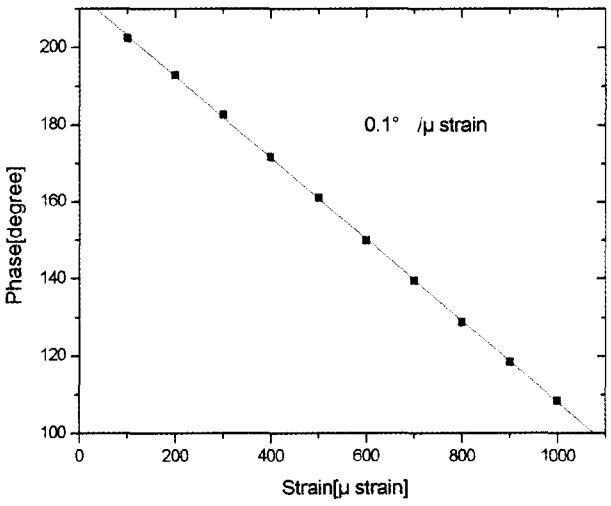

그림 6. 스트레인에 따른 위상 출력의 변화

른 위상 변화량을 계산한 결과 그림 5로부터 온도에 따른 위상 출력의 변화량은 1.1°/°C임을 알 수 있었고 그림 6으로부터 스트레인에 따른 위상 출력의 변화량은 0.1°/μstrain 값임을 알았다. 사용된 LIA의 위상변화 측정 최소단위가 0.01°이므로 측정 최소단위는 0.009°C와 0.1 μstrain이고 한 주기의 위상변화에 해당하는 측정범위는 약 320°C와 3600 μstrain임을 알 수 있었다.

그림 7은 온도와 스트레인을 동시에 가했을 때 온도의 함수로 측정한(3번 측정한 평균치) LIA 출력의 진폭과 위상을 보여준다. 예상대로 LIA 출력의 진폭은 온도에 따라 선형적으로 감소하나 위상은 온도와 스트레인의 영향을 받아 변화가 일정하지 않았다. 그림 7로부터 온도에 따른 LIA의 진폭 변화가 2 mV/°C임을 알 수 있었다. 실험에 사용한 LIA로 측정 할 수 있는 최소의 진폭변화가 0.1 mV이므로 온도 측정 최소단위는 0.05°C임을 알 수 있었다. 그림 8은 그림 7의 위상 결

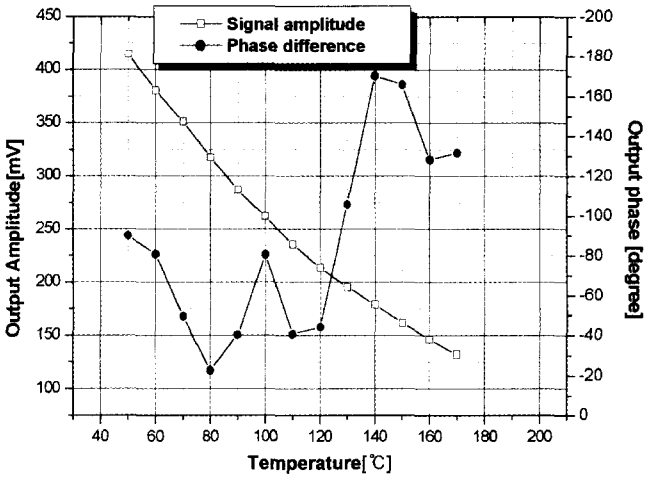

그림 7. 임의의 스트레인을 가했을 때의 온도의 함수로 측정한 LIA 출력의 위상과 진폭

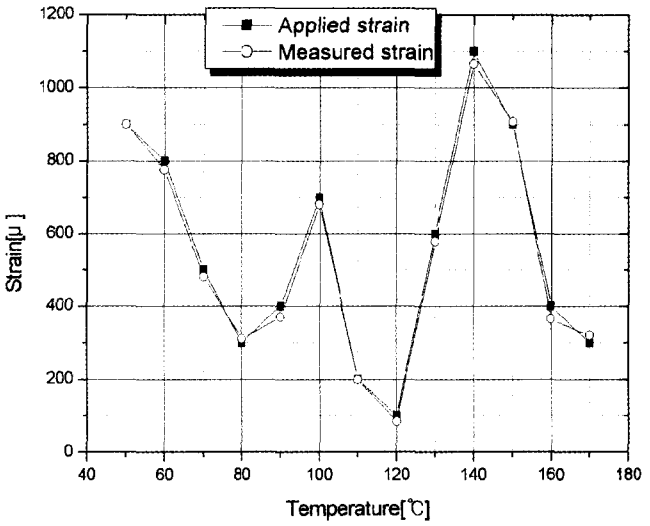

그림 8. 가해진 스트레인과 측정된 스트레인의 비교.

과에 온도에 따른 위상 변화를 보상한 위상으로부터 추출한 스트레인 값을 온도에 따라 도시한 그림이다. 스트레인을 임의로 인가하였어도 측정한 스트레인 값과 인가해준 스트레인의 값이 측정한 전 범위에 걸쳐 잘 일치함을 볼 수 있었다.

IV. 결 론

온도 변화에 민감한 1480 nm LD로 펌핑되는 EDFA의 EDF와 단일 브래그 격자로 스트레인과 온도를 동시에 측정할 수 있는 센서 헤드를 구성하였다. EDF의 ASE 파워가 온도가 증가함에 따라 선형적으로 감소하는 특성을 이용하여 스트레인과 무관한 온도 변화를 측정 할 수 있었다. 또한 demodulator로 OSA대신에 마하젠더 간섭계를 사용하고 위상 변화와 진폭 변화를 LIA를 사용하여 측정한 결과 온도와 스트레인의 측정 정밀도가 크게 향상됨을 보았다.

위상변화로 측정한 스트레인의 경우는 0.1 μstrain으로서

0.07 nm의 측정 해상도를 가지는 OSA를 demodulator로 사용하는 경우보다 700배 이상 측정 정밀도가 향상된 것을 알 수 있었다. 또한 마하젠더 간섭계의 진폭 변화로 측정한 온도의 최소측정 단위는 0.05°C로서 OSA를 demodulator로 사용하는 경우보다 140배 이상 측정 정밀도가 향상되었다. 또한 EDF의 길이를 조절하거나 EDFA의 펌프파워를 변화시켜 온도에 대한 측정 정밀도와 범위를 조절 할 수 있다는 장점이 있다.

참고문헌

[1] A. D. Kersey *et al.* "Fiber grating sensors," *J. Lightwave Technol.*, vol. 15, no. 8, pp. 1442-1462, 1997.

[2] A. Othonos and K. Kalli, *Fiber Bragg Gratings* (Artech House, Boston, 1999).

[3] J. Jung, H. Nam, J. H. Lee, N. Park, and B. Lee, "Simultaneous measurement of strain and temperature using a single fiber Bragg and an erbium-doped fiber amplifier," *Applied Optics*, vol. 38, no. 5, pp. 2749-2751, 1999.

[4] 송민호, 이상배, 최상삼, 이병호, "Mach-Zehnder 간섭계를 이용한 광섬유 격자쌍 스트레인 센서의 신호처리 방법," 한국광학회지, vol. 8, no. 4, pp. 333-339, 1997.

[5] J. H. Lee, W. J. Lee, and N. Park, "Comparative study on temperature-dependent multichannel gain and noise figure distortion for 1.48- and 0.98-/spl mu/m pumped EDFAs," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 10, no. 12, pp. 1721-1723, 1998.

[6] A. D. Kersey, T. A. Berkoff, and W. W. Morey, "High-resolution fibre-grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detection," *Electron. Lett.*, vol. 28, no. 3, pp. 236-238, 1992.

[7] 송민호, 이상배, 최상삼, 이병호, "Mach-Zehnder 간섭계를 이용한 광섬유 브래그 격자 센서," 대한 전자공학회 논문지, 제34권, D호, 제3호, pp. 105-113, 1997.

[8] A. D. Kersey, T. A. Berkoff, and W. W. Morey, "Fiber-optic Bragg grating strain sensor with drift-compensated high-resolution interferometric wavelength-shift detection," *Optics Letters*, vol. 18, no. 1, pp. 72-74, 1993.

Fiber Bragg grating sensor using a Mach-Zehnder interferometer and EDFA for simultaneous measuremnet of strain and temperature

Min-Ho Choi and Boo-Gyoun Kim†

School of Electronic Engineering, Soongsil University, Seoul 156-743, KOREA

†*E-mail: bgkim@sunbee.soongsil.ac.kr*

Jaehoon Jung and Byoungho Lee

School of Electrical Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, KOREA

(Received April 20, 2001 ; revised manuscript received August 9, 2001)

We have implemented a sensor head which consists of erbium doped fiber pumped by 1480 nm LD and single fiber Bragg grating for simultaneous measurement of strain and temperature. The measurement precision and speed are improved by using Mach-Zehnder interferometer instead of optical spectrum analyzer (OSA) as a demodulator. The measurement precision of temperature measured by the amplitude variation of output signal is 0.05°C and that of strain measured by the phase variation of output signal is 0.1 μstrain. The measurement precisions of temperature and strain are improved nearly 140 times and 700 times, respectively, compared to those using an OSA with wavelength resolution of 0.07 nm as a demodulator.

Classification code : FO.030.