

論文99-36D-6-12

## 단일 광섬유 브래그 격자와 EDFA를 이용한 온도와 스트레인의 동시 측정

### (Discrimination of Temperature and Strain Using a Single Fiber Bragg Grating and an Erbium-doped Fiber Amplifier)

鄭 載 勳 \* , 南 熙 \* , 李 竝 浩 \*

(Jaehoon Jung, Hui Nam, and ByoungHo Lee)

#### 요 약

하나의 광섬유 브래그 격자와 EDFA를 이용하여 온도와 스트레인을 동시에 측정할 수 있는 센서를 제안하고 구현하였다. 온도에 따른 EDFA의 ASE파위의 선형적 변화를 이용하여 온도를 측정하고 전체 브래그 파장변화와 그 온도효과와 차로써 스트레인을 측정하였다. 측정값은 스트레인과 온도 각각에 대해서  $18.2\mu\epsilon$  과  $0.7^\circ\text{C}$ 의 rms 오차를 가진다.

#### Abstract

We propose and demonstrate a novel sensor which can simultaneously measure strain and temperature. The sensor is composed of a single fiber Bragg grating and an erbium-doped fiber amplifier. Using linear variation in the amplified spontaneous emission power of an erbium-doped fiber amplifier with temperature, we determine the temperature. By subtracting the temperature effect from the Bragg wavelength shift, we determine the strain. Experiments show rms deviations of  $18.2\mu\epsilon$  and  $0.7^\circ\text{C}$  for strain and temperature, respectively.

#### I. 서 론

최근 광섬유 브래그 격자(FBG; fiber Bragg grating)에 대한 관심이 높아지면서 광통신 소자와 광섬유 센서분야에 응용하는 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>[1,2]</sup>. 광섬유 브래그 격자는 EMI에 강하고 높은 감도를 지니며, 소형이며 제작하기가 용이하다는 장점

때문에 온도 및 스트레인등 여러 가지 물리량을 측정하는 센서에 응용될 수 있다. 이러한 물리량은 브래그 파장의 변화를 가지고 측정하게 되는데, 일반적으로 온도 및 스트레인에 의한 브래그 파장의 변화는 구별이 되지 않는다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 많은 연구가 진행되어 왔으며<sup>[3,4]</sup> 최근에 FBG/LPG의 혼합 센서<sup>[5]</sup> 및 하나의 LPG를 이용한 방법<sup>[6]</sup> 등이 제안되었다. FBG/LPG의 혼합 센서는 스펙트럼 면에서 두 FBG의 브래그 파장 가운데 LPG의 브래그 파장이 있는 형태로 되어있다. 이 센서에서는 FBG와 LPG의 서로 다른 온도와 스트레인에 대한 반응을 이용하여 스트레인과 온도를 측정한다. 그러나, 그 정확도를 높이기 위해서는 LPG의 스펙트럼이 아주 정밀하여 거의 완벽해야 하며, 2개의 FBG와 LPG의 스펙

\* 正會員, 서울大學校 電氣工學部

(School of Electrical Engineering, Seoul National University)

※ 본 연구는 기초전력공학공동연구소를 통한 한국전력의 지원에 의해 수행되었습니다.

接受日字:1999年1月8日, 수정완료일:1999年5月20日

트럼의 위치조정 또한 용이하지 않다. 그리고, LPG는 온도에 의한 브래그 파장의 변화가 매우 심한데, 이로 인하여 이 센서의 온도 측정범위가 매우 좁다. 하나의 LPG를 이용한 방법에서는, 일반적으로 LPG의 투과 스펙트럼이 매우 넓기 때문에 그것을 스캔하여 중심파장을 알아내는데 긴 시간이 소비되는데, 이로 인하여 정적과 준 동적 측정은 가능하나 빠른 동적 측정은 불가능하다. 또한, LPG의 브래그 파장을 찾기 위한 부가적인 소자도 필요하다.

본 논문에서는 하나의 광섬유 브래그 격자와 EDFA를 이용하여 온도와 스트레인을 동시에 측정할 수 있는 센서를 제안하고 구현하였다. EDFA의 ASE는 상당한 범위에서 온도에 따라 선형적으로 변한다<sup>[7]</sup>. 이러한 성질을 이용하여 펌프 레이저 다이오드의 RIN(relative intensity noise) 내에서 온도를 측정하고, 전체 브래그 파장변화와 그 온도효과의 차로써 스트레인을 측정하였다.

## II. 스트레인과 온도의 동시 측정

일반적으로 광섬유 브래그 격자의 브래그 파장의 변화는 온도와 스트레인에 대한 효과가 구분되지 않으므로 광섬유 브래그 격자를 이용하여 이 두 물리량을 동시 측정하려면 두 가지의 파라미터를 측정해야 한다. 즉 다른 브래그 파장을 가지면서 온도와 스트레인에 대한 반응이 다른 두 개의 브래그 격자를 쓰거나 장주기 격자와 단주기 격자의 다른 성질을 이용하는 연구가 발표되었다<sup>[3-6]</sup>. 본 논문에서는 EDFA와 광섬유 브래그 격자를 사용하여 브래그 파장의 변화와 ASE 파워의 변화를 측정하여 온도와 스트레인을 동시에 측정하였다. 최근 EDFA의 작은 신호 이득이 넓은 범위에서 온도에 의해 선형적으로 변하는 함수이고 또한 1480nm의 파장으로 펌프된 EDFA가 980nm의 파장으로 펌프된 EDFA보다 온도의존성이 더 크다는 것이 알려졌다<sup>[7]</sup>. 또, EDFA의 ASE파워  $P_{ASE}$ 는 작은 신호 이득  $G(T)$ 와 다음과 관계가 성립한다.

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

여기서  $n_{sp}$ 는 자발적 방출 계수(spontaneous emission factor)이고,  $h$ 는 Planck 상수이며,  $\nu$ 는 빛의 주파수이고,  $\Delta \nu$ 는 ASE의 선폭이다. 따라서 EDFA의 ASE파워 역시 온도에 따라 선형적으로 변

하게 된다. 한편, EDFA의 작은 신호 이득  $G(T)$ 는  $\exp[(N_2 \sigma_e(T) - N_1 \sigma_a(T))L]$ 에 비례한다. 여기서,  $N_2$ 는 여기된 상태의 전자 밀도이고,  $N_1$ 는 바닥 상태의 전자 밀도이고,  $\sigma_e$ 는 방출 단면적,  $\sigma_a$ 는 흡수 단면적이다. 여기서 방출 단면적  $\sigma_e$ 와 흡수 단면적  $\sigma_a$ 가 1480nm 파장으로 펌프할 때가 980nm 파장으로 펌프할 때보다 온도에 의한 변화가 더 많은 것이다. 따라서  $G(T)$ 의 변화폭이 커져 ASE가 980nm에 비해 1480nm로 펌프할 때 더욱 온도에 민감하게 된다. 이러한 성질을 이용하여 온도를 측정하는 충분한 분해능을 얻을 수 있었다. 스트레인  $\epsilon$ 과 온도변화  $\Delta T$ 는 다음의 식에 의해 결정된다.

$$\Delta P = A \Delta T \quad (2)$$

$$\Delta \lambda_B = B \epsilon + C \Delta T \quad (3)$$

여기서  $\Delta P$ 는 투과 파워의 변화이고  $A$ 는 EDFA의 온도 계수로서

$$A = n_{sp} h \nu \Delta \nu G(T) [(N_2 \sigma_e - N_1 \sigma_a)L] \quad (4)$$

와 같이 주어지며  $B$ 와  $C$ 는 각각 FBG의 스트레인 계수와 온도 계수이다.

## III. 실험결과 및 토의

우선 온도에 대한 EDFA의 ASE파워 변화를 측정하였다. 온도를 30°C에서 150°C까지 변화시키면서 1500-1600nm까지의 투과 파워를 측정하였다. 그림 1은 그 결과를 나타낸 것인데 온도에 따라 많은 변화를 나타내는 것을 알 수 있다.

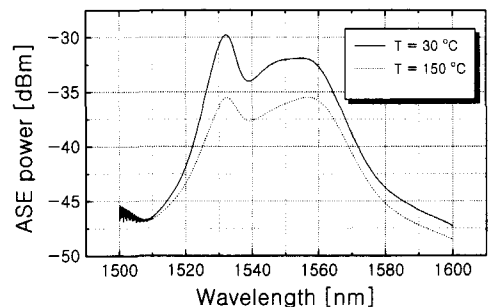


그림 1. 30°C와 150°C에서의 EDFA의 ASE 스펙트럼  
Fig. 1. The ASE spectra of EDFA at 30°C and 150°C.

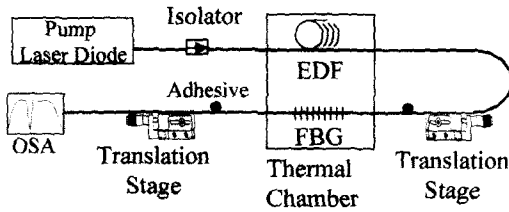


그림 2. 실험구성도

Fig. 2. Experimental setup for simultaneous measurement of strain and temperature using a single FBG and EDFA.

그림 2는 본 연구의 실험 setup을 나타낸 것인데, FBG에 스트레인을 가하기 위해 FBG의 양끝을 stage의 양끝에 붙였다. 또한 온도를 인가하기 위해 온도 chamber를 사용하였다. EDFA는 FBG 가까이 붙여서 두 개의 요소가 같은 온도를 느끼도록 했다. 이 실험에서는 EDFA의 ASE를 사용하기 때문에 또 다른 광원은 필요 없다. 그림 2에서와 같이 EDFA의 ASE가 FBG를 통과하게 되는데 그 투과 스펙트럼이 OSA에 의해서 측정된다. FBG는 QPS사의 게르마늄 도핑된 광섬유에 새겼으며, 그 길이는 8mm이다. 또한 상온에서 그 브래그 파장은 1549.4 nm이다. EDFA는 loop형으로 사용되었으며 그 길이는 7m이다. 그 펌프 파워는 13dBm이고 이것은 본 실험동안에 고정시켰다. 우선 식 (2)의 EDFA의 온도 계수  $A$ 를 45°C에서 150°C 사이에서 스트레인을 가하지 않고 측정하였다. OSA를 이용하여 브래그 파장에 해당되는 빛의 파장과 그 투과 파워를 측정하였다.  $A$ 값은 측정범위에서  $-0.042\text{dBm}/^\circ\text{C}$ 이다.

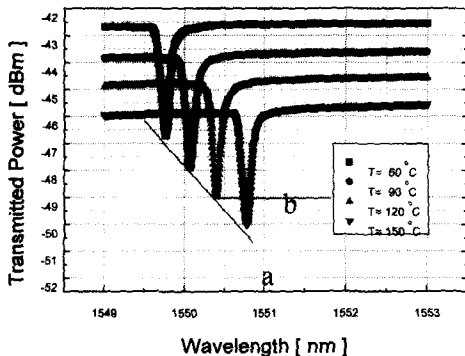
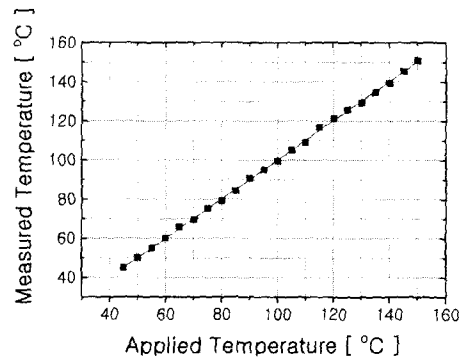


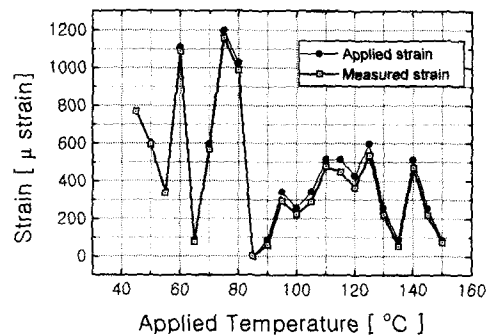
그림 3. 광섬유 브래그 격자의 투과 스펙트럼의 온도 의존성

Fig. 3. Temperature dependence of transmission spectrum through FBG with no strain.

그림 3은 각각 60, 90, 120, 150°C일 때의 투과 스펙트럼이다. 투과 스펙트럼의 dip의 깊이는 5dB인데, 이것은 제안된 센서실험을 하는데 충분하다. 투과 파워는 온도에 따라 거의 선형적으로 감소함을 확인할 수 있었는데 이를 온도측정에 이용하였다. 브래그 파장은 온도에 따라서도 변하고 가해진 스트레인에 의해서도 변하는데 투과 파워를 측정한다면 이를 분리할 수 있는 것이다. 즉, 그림 3의 a선을 따라 움직이는 브래그 파장 변화는 온도에 기인한 것이고, a선에서 벗어나는 브래그 파장 변화는 FBG에 가해진 스트레인에 의한 것이다. 예를 들어 온도가 120°C에 고정되고 FBG에 스트레인이 가해진다면 그 투과 스펙트럼은 선b를 따라 움직이게 될 것이다. 이런 식으로 브래그 파장과 그 투과 파워를 측정하여 스트레인과 온도를 동시에 측정할 수 있다. 레이저 다이오드의 ASE 파워는  $\pm 0.01\text{dB}$ 내에서 움직여서 이 센서의 측정 분해능은  $\pm 0.24^\circ\text{C}$ 와  $\pm 2.3\mu\epsilon$ 로 제한된다.



(a)



(b)

그림 4. (a) 인가된 온도와 측정된 온도의 비교 (b) 인가된 스트레인과 측정된 스트레인의 비교

Fig. 4. (a) Comparison between measured temperature and that applied (b) Comparison between measured strain and that applied.

그림 4(a)는 가해진 온도와 측정된 온도를 나타낸 것이고, 그림 4(b)는 가해진 스트레인과 측정된 스트레인을 나타낸 것이다. 스트레인과 온도를 동시에 측정하기 위해 온도를 150°C까지 올리면서 스트레인은 1200 $\mu\epsilon$ 까지 임의로 가하였다. 온도와 스트레인의 rms 오차는 45-150°C와 0-1200 $\mu\epsilon$ 에서 각각 0.7°C, 18.2 $\mu\epsilon$ 로 측정되었다. 이러한 결과는 25-45°C와 290-1270 $\mu\epsilon$ 의 범위에서 1.5°C, 10 $\mu\epsilon$ <sup>[5]</sup>, 25-150°C와 0-2000 $\mu\epsilon$ 의 범위에서 1°C, 58 $\mu\epsilon$ <sup>[6]</sup>과 비교하여 정확도에서 전혀 손색이 없고 그 방법면에서 훨씬 간단하며 실용성이 있다 하겠다. 더구나 온도계수의 비선형성까지 고려한다면 이 측정범위는 거의 제한 없이 확대가 가능하다. 또한 본 논문에서 제시한 센서 구조는 측정시간이 오래 걸리지 않기 때문에 동적 신호의 측정에도 적용할 수 있다. 한편, 더욱 향상된 온도 분해능을 얻으려면 EDFA의 펌프파워를 높여주면 되는데, 이는 펌프파워를 증가시키면 여기되는 전자 밀도가 높아져서 EDFA의 ASE의 온도 의존성이 더욱 커지기 때문이다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 단일의 FBG와 EDFA를 이용하여 온도와 스트레인을 동시에 측정할 수 있는 광섬유 브래그 격자 센서를 제안하고 구현하였다. 실험결과를 보면 본 센서는 넓은 측정범위에서 정확도가 높게 동적 스트레인과 온도를 측정할 수 있음을 알 수 있었다. 이러한 센서는 다리의 연결부위나 건축물의 바깥 부분처럼 EDF를 부착하기 쉬운 곳에 활용한다면 온도와 스트레인 효과를 구분할 수 있게 된다. 즉 FBG의 양끝을 크랙이나 손상이 가지 쉬운 곳에 부착하고 그 근방에 EDF를 붙여서 구조물의 손상을 알아낼 수 있는 것이다. 또한 본 센서는 단일 광섬유 브래그 격자밖에 사용하지 않으므로 FBG의 좁은 선폭을 이용하여 다중화 센서에서의 응용도 용이하다 할 것이다.

#### 참 고 문 헌

[1] K. O. Hill and G. Meltz, "Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview," *J. Lightwave Technol.* **15**, 1997, pp.1263-1276.

[2] 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.* **15**, 1997, pp.1442-1463.

[3] M. G. Xu, J. L. Archambault, L. Reekie, and J. P. Dakin, "Discrimination between strain and temperature effects using dual-wavelength fiber grating sensors," *Electron. Lett.* **30**, 1994, pp.1085-1087.

[4] M. Song, S. B. Lee, S. S. Choi, and B. Lee, "Simultaneous measurement of temperature and strain using two fiber Bragg gratings embedded in a glass tube," *Optical Fiber Technol.* **3**, 1997, pp.194-196.

[5] H. J. Patrick, G. M. Williams, A. D. Kersey, J. R. Pedrazzani, and A. M. Vengsarkar, "Hybrid fiber Bragg grating/long period fiber gratind sensor for strain/temperature discrimination," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **8**, 1996, pp.1223-1225.

[6] V. Bhatia, D. Campbell, R. O. Claus, and A. M. Vengsarkar, "Simultaneous strain and temperature measurement with long-period gratings," *Opt. Lett.* **22**, 1997, pp.648-650.

[7] J. H. Lee, W. J. Lee, and N. Park, "Comparative study on temperature dependent multi-channel gain and noise figure distortion for 1.48 $\mu\text{m}$  and 0.98 $\mu\text{m}$  pumped EDFAs," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **10**, 1998, pp.1721-1723.

## — 저 자 소 개 —

**鄭 載 勳(正會員) 第 34卷 D編 第 4號 參照**

1970년생. 1994년 서울대학교 전기공학과 졸업(공학사).  
1996년 2월 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사).  
1996년 3월 ~ 현재 서울대학교 대학원 전기공학부 박사과정. 주관심분야는 광통신 소자 및 광섬유 브래그 격자 소자 및 센서 등임

**南 熙(正會員)**

1974년생. 1997년 서울대학교 전기공학부 졸업(공학사).  
1999년 2월 서울대학교 대학원 전기공학부 졸업(공학석사).  
1999년 3월~현재 삼성 전관 기술 본부 기초기술 TF 근무. 주관심분야는 광통신 소자임

**李 竝 浩(正會員)**

1964년생. 1987년 서울대 공대 전자공학과 졸업(공학사).  
1989년 서울대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사).  
1993년 University of California at Berkeley, Department of Electrical Engineering and Computer Sciences 졸업(공학박사), 1994년 6월까지 동대학 Postdoc. 1994년 9월 ~ 현재 서울대학교 전기공학부 조교수. 주관심분야는 광섬유 격자, 홀로그래피, 양자소자 모델링 등임