

論文99-36D-9-7

조절 가능한 온도감도를 지닌 광섬유격자 온도센서 (Controllable-Sensitivity Fiber Bragg Grating Temperature Sensor)

鄭載勳*, 南熙*, 李竝浩*

(Jaehoon Jung, Hui Nam, and Byoung-ho Lee)

요약

온도 팽창률이 다른 두 개의 금속을 광섬유 브래그 격자에 부착하여 그 온도감도를 조절할 수 있는 새로운 온도센서를 제안하였다. 이러한 방법으로 온도감도를 기존의 브래그격자에 비해 3.3까지 향상시켰으며 금속의 길이를 변화시켜 그 온도감도를 여러 가지로 조절할 수 있었다.

Abstract

By attaching two metals with different thermal expansion coefficients to a fiber Bragg grating, we show that the temperature sensitivity is successfully improved to 3.3 times that of bare fiber Bragg grating and controlled by changing the metal length.

I. 서론

1989년 Meltz에 의해 Holographic 방법에 의해 광섬유 브래그 격자가 제작되고 그 후 위상마스크를 사용한 방법에 의해 그 제작이 용이해지면서 이 광학소자에 대한 관심이 급증하였다^[1,2]. 광섬유 브래그 격자는 전자기 간섭에 강하고 높은 감도를 지니고 있으며 크기가 작고 제작하기가 쉽다는 장점이 있어 스트레인 및 온도등 여러 가지 물리량을 측정하는 센서로의 응용이 가능하며 이에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 그런데 대부분의 온도센서에 사용되는 광섬유 브래그 격자는 1550nm 근방에서 온도가 100°C 변할 때 브래그 파장은 1nm 변하게 된다. 이 특성은 센서의 온도분해능을 제한하게 된다. 즉, 우리가 일반적으로 사용하는 OSA는 최대 분해능이 대략 0.1 nm인데 이러한

OSA를 사용하면 광섬유 브래그 격자 센서를 이용하여서는 10°C이하의 온도변화는 측정할 수 없다. 이러한 문제를 해결하기 위해 간섭계를 이용한 센서시스템^[3]과 금속 클래드를 이용한 방법^[4]등이 제안되었다. 하지만, 간섭계는 안정화시키기가 매우 힘이 들며 금속 클래드를 이용한 방법에서는 온도감도가 고정되는 단점이 있다. 본 논문에서는 이 온도감도를 개선시키고 또한 조절하는 매우 간단한 방법을 제안하고 이를 실제로 구성하여 실험적으로 구현하였다. 우리는 광섬유 브래그 격자에 열팽창계수가 다른 2개의 금속을 붙여 온도감도를 개선시켰고 금속의 길이를 바꾸어 온도감도를 조절할 수 있었다.

II. 조절 가능한 온도감도를 지는 광섬유 브래그 격자 온도센서

광섬유 브래그 격자에서 브래그 파장은 다음의 식에 의해 주어진다.

$$\lambda_B = 2 n_{eff} \Lambda \quad (2.1)$$

* 正會員, 서울대학교 電氣工學部
(School of Electrical Engineering, Seoul National University)

接受日字: 1999年1月8日, 수정완료일: 1999年8月9日

여기서 n_{eff} 는 유효굴절률이고 Λ 는 브래그 격자의 주기이다. 이 브래그 파장은 스트레인이 가해지거나 주위의 온도가 변하면 그 값이 변하게 된다. 온도의 의한 브래그 파장의 변화는 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \xi) \Delta T \quad (2.2)$$

ΔT 는 온도변화량이고, α 는 광섬유의 온도에 따른 열팽창 계수(thermal expansion coefficient)이고 ξ 는 온도에 의한 광섬유의 굴절률 변화를 나타내는 열광학 계수(thermooptic coefficient)이다. 일반적인 실리카의 경우 $\alpha \sim 5 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$, $\xi \sim 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 이므로 온도에 의한 브래그 파장 변화는 대부분 굴절률 변화에 기인한다. 식 (2.2)에서 알 수 있듯이 온도에 의한 브래그 파장의 변화는 두 가지 부분으로 되어있다. 식 (2.2)의 첫째 부분에 해당하는 광섬유 자체의 길이 팽창에 의한 브래그 격자 주기의 변화효과와 식 (2.2)의 둘째 부분에 해당하는 굴절률변화 효과이다. 일반적으로 보통의 광섬유에서는 굴절률의 변화가 광섬유길이의 변화보다 20배 가량 크기 때문에 광섬유의 길이변화는 무시할 수 있다[2]. 본 논문에서는 이 부분을 증가시키고 그 값을 조절하기 위한 방법을 제시하였다. 그림 1에서 보듯이 열팽창계수가 다른 두 개의 금속을 광섬유 브래그 격자에 접착시켰다. 참고문헌 [4]와 같이 하나의 큰 열팽창 계수를 가진 물질을 부착시키면 온도감도를 증가시킬 수는 있으나 그 물질이 결정되면 그 온도감도도 결정된다. 하지만 본 논문에서 제시된 온도센서구조에서는 온도감도를 증가시키면서도 그 값을 조절할 수 있다. 그림 1에서 온도가 증가하게 되면 금속 1의 길이가 늘어나게 되는 데 그 양끝이 광섬유와 금속 2에 고정되어 있으므로 그 양끝사이 부분에 스트레인이 인가된다. 그런데 광섬유에 비해 금속이 훨씬 스트레인에 의한 길이팽창이 작으므로 그 끝을 양단에서 당기면 그 스트레인은 거의 광섬유 브래그 격자에 집중되게 된다. 따라서, 금속1의 길이 변화가 ΔL 이라 하면 그림 1에서 FBG1은 거의 $\Delta L/d$ 의 스트레인을 받게 될 것이다. 또한 브래그 격자 양단에 금속1만 붙였을 때를 고려하면 그 브래그 격자가 느끼는 스트레인은 $\Delta L/L$ 이 될 것이다. 두 금속을 붙였을 때 얻을 수 있는 스트레인 $\Delta L/d$ 는 이 값 $\Delta L/L$ 보다는 매우 큰 값이기 때문에 온도감도가 증가된다. 또한 그림 1과 같은 구조에서 금

속의 길이를 바꾸면 ΔL 값이 바뀌게 되는데 그러면 광섬유 브래그 격자가 느끼게 될 스트레인 $\Delta L/d$ 이 바뀌게 되므로 이를 통해 온도감도를 변화시킬 수 있다. 이러한 온도감도 향상을 뚜렷이 보기 위해 같은 브래그 파장을 가지고 투과 dip의 깊이는 약간 다른 하나의 광섬유격자(FBG2)를 더 새겼다. 즉 FBG2는 기존의 광섬유 격자 센서이고 FBG1은 향상된 온도감도를 가진 광섬유 격자 센서이다.

III. 실험결과 및 토의

본 실험에 앞서 광섬유 브래그 격자에 단일 물질을 부착하여 온도감도를 향상시키는 실험을 시행하였다. 만약 열 팽창 계수가 충분히 큰 물질을 광섬유 브래그 격자에 부착시키고 온도를 가하면 충분히 열팽창이 일어나기 때문에 온도에 의한 브래그 파장의 변화도 커지게 된다. 그림 2는 열팽창 계수가 큰 물질을 광섬유 격자에 부착한 모습이다. 이 실험에서 사용한 물질은 알루미늄과 납인데 알루미늄의 열팽창 계수는 $8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 이고, 납의 열팽창 계수는 $29.24 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 이다. 광섬유 격자의 길이 d 는 8mm이고 알루미늄과 납의 길이 L 은 20mm이다. 실험에서 가해진 온도는 31°C 에서 13°C 까지 5°C 간격으로 OSA를 통해 0.08 nm의 분해능으로 브래그 파장 변화를 측정하였다. 알루미늄과 납의 열팽창 계수가 SiO_2 에 비해서 각각 14.5, 53배 크지만 온도에 대한 감도는 각각 1.53, 2배를 얻을 수 있었다. 이는 식 (2.2)에서 열팽창에 의한 브래그 파장 변화가 매우 작기 때문에 온도 변화에 의해 광섬유가 많이 팽창하더라도 그 효과가 온도에 의한 굴절률 변화정도와 비슷해지기 때문이다.

다음으로 그림 1에 제시된 센서 실험을 시행하였다. 본 실험에서는 큰 열팽창계수를 가진 금속(금속 1)으로 납(Pb)을 사용하였고 작은 열팽창계수를 가진 금속(금속 2)으로 탄탈륨(Ta)을 사용하였다. 납의 열팽창계수는 $29.24 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 이고 탄탈륨의 열팽창계수는 $7 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 이다. 여기서 금속 1의 열팽창계수는 클수록 좋고 금속2의 열팽창계수는 작을수록 좋다. 납은 금속 중 가장 열팽창계수가 크기 때문에 선택하였고 탄탈륨은 몰리브덴(Mo)나 텅스텐(W)보다 열팽창계수는 크지만 이 두 금속은 가공성이 나빠 사용하기가 매우 어렵기 때문에 탄탈륨을 금속 2로 채택하였다. 그림 1에서처럼

금속 2를 광섬유에 붙이고 금속 1의 양끝을 금속 2와 광섬유에 각각 붙였다. 여기서 에폭시접착제는 100°C이상의 온도에서는 그 접착상태를 유지하기 못하기 때문에 알루미늄 접착제를 사용하였다. 접착을 공고히 하고 어닐링(annealing)을 위해서 150°C에서 2시간 동안 큐어링(curing)을 하였다.

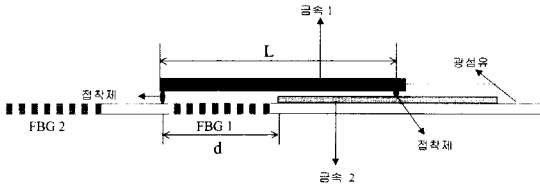


그림 1. 두 금속이 부착된 광섬유 브래그 격자 온도센서
Fig. 1. Two-metal-attached FBG temperature sensor.

그림 3은 온도가 각각 31°C, 51°C, 91°C일 때의 투과 스펙트럼이다. 센서에 열을 가하기 위해 센서를 석영관 속에 넣고 그 것의 표면에 코일을 감아 양단의 전압을 조절함으로써 온도를 조절하였다. 온도는 써모커플(thermocouple)을 이용하여 측정하였다. 그림 2에서 31°C에서는 두 개의 투과 스펙트럼이 겹쳐져 있었음을 알 수 있다. 하지만 온도가 증가함에 따라 이 2개의 투과 dip이 분리되고 그 중 FBG1의 투과 dip이 장파장 쪽으로 더 빨리 움직임을 볼 수 있다. 이것은 FBG2는 거의 굴절률의 변화에 의한 효과만을 느끼는데 비해 FBG1은 굴절률의 변화 효과와 광섬유 길이 팽창의 효과를 같이 느끼기 때문이다.

높은 열팽창계수의 물질

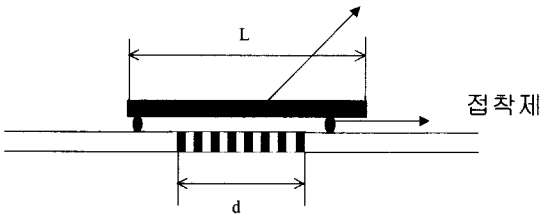


그림 2. 높은 열팽창 계수의 물질을 부착한 광섬유 브래그 격자
Fig. 2. FBG attached by large thermal expansion coefficient.

제한된 센서의 온도감도를 조절하기 위하여 납의 길이를 달리하며 FBG1의 브래그 파장 변화를 측정하였다. 온도는 31°C에서 271°C까지 10°C씩 변화시켰고 사

용한 OSA의 파장 분해능은 0.08nm이다. 그림 4는 여러 가지 길이의 납에 대한 브래그 파장의 변화를 나타낸 것이다. 납의 길이는 각각 20, 40, 60, 100mm이다. 광섬유 브래그격자의 길이는 4mm이고 그림1에서의 d는 상온에서 10mm로 고정되어 있다. 이러한 방법으로 납의 길이를 바꾸어서 우리는 기존의 광섬유 브래그 격자에 비해 3.3배나 향상된 온도감도를 얻을 수 있었고 또한 여러 가지의 온도감도 또한 실현시킬 수 있었다. 따라서 특정의 온도감도가 필요하면 적절한 금속의 길이를 실험 데이터로부터 얻을 수 있다. 납의 열팽창 계수가 실리카에 비해 53배나 큰데도 향상된 온도감도가 그 만큼 크지 않은 것은 식(2.2)의 우변의 첫째 항이 둘째 항에 비해 아주 작기 때문이다. 또한 광섬유와 금속을 더 강하게 접착할 수 있는 접착제 금속 1이 늘어난 길이에 의한 스트레인이 좀더 효과적으로 광섬유 브래그 격자에 전달될 수 있을 것이므로 더욱 높은 온도감도를 얻을 수 있을 것이다.

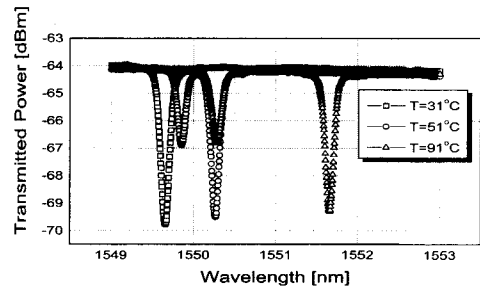


그림 3. 31°C, 51°C, 91°C일 때의 투과 스펙트럼
Fig. 3. Transmission spectrum at the temperatures 31°C, 51°C, and 91°C.

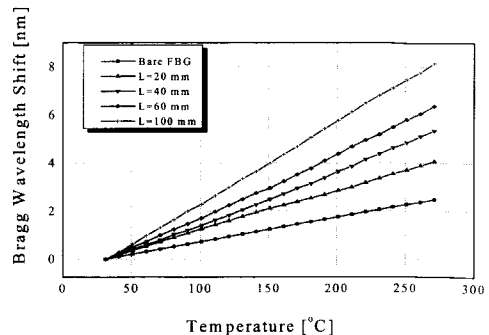


그림 4. 납의 여러 가지 길이에 대한 브래그 파장 변화
Fig. 4. Bragg wavelength shift versus temperature for different lengths of lead.

IV. 결 론

본 연구에서는 향상되고 조절 가능한 온도감도를 지닌 광섬유 브래그 격자 온도센서를 제안하고 구현하였다. 열팽창계수가 다른 두 금속을 광섬유 브래그 격자에 붙여서 온도감도를 증가시키고 그 금속의 길이를 변화 시킴으로써 그 온도감도를 조절하였다. 이러한 간단한 센서구조는 여러 가지 온도감도나 향상된 온도감도를 필요로 하는 곳에 응용이 가능할 것이라 사료된다.

감사의 글

※ 본 연구는 기초전력 공학공동연구소를 통한 한국전 력의 지원에 의해 수행되었습니다.

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] A. D. Kersey, T. A. Berkoff, and W. W. Morey, "High resolution fiber Bragg grating based strain sensor with interferometric wavelength shift detection," Electron. Lett. 28, 1992, pp.236-238.

[4] G. Lin, L. Wang, C. C. Yang, M. C. Shih, and T. J. Chuang, "Thermal performance of metal-clad fiber Bragg grating sensors," IEEE Photon. Technol. Lett. 10, 1998, pp.406-408.

저 자 소 개

鄭 載 勳(正會員)

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

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

南 熙(正會員)

1974년생. 1997년 서울대학교 전기공학부 졸업(공학사). 1999년 2월 서울대학교 대학원 전기공학부 졸업(공학석사)