《연구논문》 Korean Journal of Optics and Photonics, Volume 21, Number 1, February 2010 DOI: 10.3807/KJOP.2010.21.1.012

열확장 코어 광섬유의 구부림 손실을 이용한 광섬유형 온도 센서

김광택† · 강지훈 · 조규정 · 문남일

호남대학교 광전자공학과
㉾ 506-714 광주광역시 광산구 서봉동 59-1

(2009년 11월 30일 받음, 2010년 1월 25일 수정본 받음, 2010년 2월 16일 게재 확정)

본 논문은 바이메탈(bi-metal)에 부착된 열확장 코어 광섬유의 높은 구부림 손실 효과를 이용한 광섬유 온도 센서를 제안 및 구현하였다. 바이메탈(bi-metal plate)의 온도 변화에 의한 변형은 열확장 코어 광섬유의 구부림 손실을 발생시킨다. 실험결과 소자의 감도와 측정범위는 열확장 코어 광섬유의 구조를 조절하여 제어 될 수 있음을 보였다. 소자의 제조공정이 상세하게 기술되었다.

Fiber-optic Temperature Sensor Based on Bending Loss of Thermally Expanded Core Fiber

Kwang Taek Kim†, Ji Hoon Kang, Kyu Jung Cho, and Nam Il Moon

Department of Optoelectronics, Honam University 59-1 Sebong-dong, Gwangsan-gu, Gwangju 506-714, Korea

(Received November 30, 2009; Revised manuscript January 25, 2010; Accepted February 16, 2010)

In this paper, we have proposed and demonstrated a simple fiber-optic temperature sensor based on the bending loss of a TEC(thermally expended core) fiber attached to a bi-metal. The deformation of the bi-metal caused by the change in its temperature induces the bending loss of the TEC fiber. The experimental result shows that the temperature sensitivity and operation temperature range of the device are controllable through the adjustment of the structure of the expanded core fiber. The fabrication procedure of the device is described in detail.

Keywords: Fiber-optic temperature sensor, Bending loss, Thermally expanded core fiber, Bi-metal
OCIS codes: (060.2330) Fiber optics communications; (060.2340) Fiber optics components; (060.2370) Fiber optics sensors

I. 서 론

광섬유 센서는 높은 감도에 의한 정밀측정, 원거리 측정, 다중분포 측정, 및 전자파 무간섭 특성 등 많은 장점으로 인하여 그 응용이 매우 다양하다. 광섬유를 이용한 센서로 광섬유 고유의 특성을 이용하는 내부형 센서와 광섬유는 광전송 매체로서만 역할을 하고 외부의 센서소자가 광섬유와 결합된 외부형 센서가 있다[1]. 광섬유의 코어가 절단되지 않고 그 특성이나 구조가 광센서에 적합하도록 여러 가지 기술이 개발되어 있다. 측면 연마 광섬유나[2] 광섬유 테이퍼[3]를 이용한 인라인 광섬유 센서 기술이 이러한 범주에 속한다.

본 논문에서는 열확장 코어 광섬유를 이용한 온도 센서를 제안하고 실험으로 검증하였다. 열확장 코어 광섬유의 높은 구부림 손실특성과 바이메탈이 온도 변화에 구조적 변형을 일으키는 특성이 결합된 기술이 이용된다. 고압의 전기설비나 기존의 전자 센서가 적용되기 힘든 험한 환경에서는 광섬유 온도 센서가 필요하다. 광섬유 온도 센서로 광섬유 격자를 활용하기 위한 연구는 많이 보고 되었다[4-6]. 광섬유 격자를 이용하면 브래그 파장의 이동을 감시하는 방법으로 온도를 감지할 수 있기 때문에 다중화가 가능하다는 장점이 있지만 센서 검출을 위한 고가의 장비가 요구되며 일반적으로 250℃ 이상의 고온에서 동작하지 못하는 단점이 있다. 제안된 센서는 광섬유 격자 온도 센서의 단점을 보완할 수 있는 영역에 적용이 가능하다.

일반 단일모드 광섬유의 일부분에 고열이 가해지면 코어에 도핑된 불순물의 확산으로 코어가 확장되며 이 부분은 구부림에 민감한 전송특성을 가진다. 열확장 코어 광섬유는 코어가 확장되는 반면 개구수(numerical aperture) 가 감소하여 작은 구부림에도 광에너지가 코어 밖으로 누설되는 특성을 가진다[7]. 제안된 센서는 광섬유에 열을 가해 구부림 손실기능

†E-mail: ktkim@honam.ac.kr
Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

이 추가된 열확장 코어 광섬유를 이용하는 것으로 광섬유자체를 센서로 이용하기 때문에 구조가 매우 간단하여 제작이 용이하다. 실험을 통해 제안된 소자의 실용화 가능성을 검증하였다.

II. 센서 구조 및 동작 원리

제안된 열확장 코어 광섬유를 이용한 온도 센서 구조는 그림 1과 같이 바이메탈에 일부분의 코어가 확장된 광섬유가 부착된 형태이다. 바이메탈은 열팽창계수가 다른 두 금속판이 붙어 있어 주위 온도가 변하면 구부림 변형이 발생한다. 바이메탈의 구부림에 의해 광섬유의 구부림 손실이 증가하며 이러한 특성을 이용하여 간단하게 바이메탈에 전해진 온도를 측정할 수 있다.

도입된 열확장 코어 광섬유는 국부적으로 제한된 영역에만 코어가 확장되어 있기 때문에 감지 영역 밖에서 혹시 발생할 수 있는 구부림 손실을 억제 할 수 있는 장점을 가지고 있다. 바이메탈에 열이 전달되면 그림 1과 같이 바이메탈이 구부려지기 시작하며 열확장 코어 광섬유는 구부림 손실이 발생한다. 주위 온도에 따른 바이메탈의 구부림 반경은 다음과 같이 변하게 된다.

$$\frac{1}{R}=\frac{2K\triangle T}{t} \tag{1}$$

여기서 K는 바이메탈 고유 상수, t는 바이메탈 판의 두께 그리고 $\triangle T$는 온도 변화를 의미한다. 열에 의한 변형률은 바이메탈의 두께가 얇을수록 그리고 K값이 클수록 크다.

한편 단일모드 광섬유에 1300℃ 이상의 고열을 가하면 코어에 도핑된 불순물이 클래딩으로 확산되면서 코어가 확장되고 코어-클래딩간의 굴절률 차이가 감소한다. 코어와 클래딩의 굴절률 차이가 감소함에 따라 개구수(numerical aperture)가 감소한다. 하지만 모드의 진행 방향으로 정규화 주파수는 일정하다. 코어가 점차적으로 확장되며 모드 진화 현상에 의해 큰 손실 없이 모드가 확장된다[8-9]. 계단형 단일모드 광섬유의 구부림 손실은 다음과 같이 표현된다[10].

$$\alpha=\frac{1}{2}\left(\frac{\pi}{aW^3}\right)^{1/2}\left(\frac{U}{VK_1(W)}\right)^2\mathrm{Exp}(D\circ R)R^{-1/2} \tag{2}$$

$$D=\frac{4\Delta W^3}{3aV^2}$$

여기서, a, R, K_1 그리고 Δ는 코어의 반경, 광섬유의 구부림 반경, 2종 수정 베셀(Bessel) 함수 그리고 광섬유의 비 굴절률차이를 의미한다. 그리고 U 와 W는 코어와 클래딩에서 횡방향 전파상수를 각각 의미하며 V는 정규화 주파수를 나타낸다. 식 (2)를 이용하여 다양한 열확장 코어 광섬유의 구조에 대하여 구부림 손실을 계한한 결과가 그림 2에 제시되어 있다.

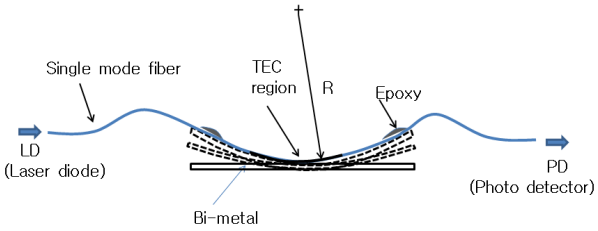

FIG. 1. The structure of proposed fiber-optic temperature sensor using TEC fiber.

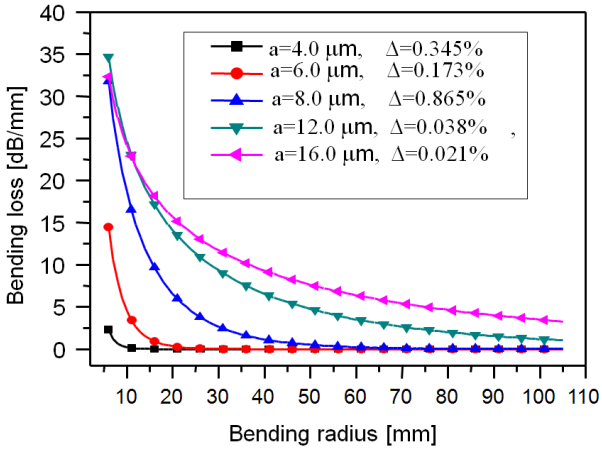

FIG. 2. The calculated bending loss for the various TEC fiber structure.

그림 2에서 각 그래프가 나타내는 코어의 크기와 비 굴절률차는 모두 다르지만 정규화 주파수(V)는 일정한 것으로 가정하고 계산하였다. 일반 통신용 광섬유의 코어가 확장된 계단형 굴절률 분포를 가지는 것으로 가정하였다. 곡률 반경이 감소함에 따라 구부림 손실량은 지수함수로 증가한다. 또한 코어가 크게 확장 될수록 더 큰 구부림 손실을 가짐을 알 수 있다. 열확장이 안된 통신용 단일모드 광섬유와 코어가 2배, 혹은 3배로 확장된 광섬유의 구부림을 비교해 보면 그 차이가 매우 크다는 사실을 알 수 있다. 이러한 열확장 코어 광섬유가 구부림에 민감하게 손실이 변하는 성질을 이용 하면 원하는 측정위치에 열확장 코어 광섬유를 바이메탈에 부착하여 온도의 측정이 가능하다. 측정 위치 밖에서는 일반 단일 모드 광섬유 구조를 가지기 때문에 구부림 손실을 억제할 수 있다.

III. 실험 및 분석

본 실험에서 열확장 코어 광섬유를 제작하기 위해 코어의 지름은 8.2 ㎛, 클래딩의 지름은 125 ㎛ 그리고 비굴절률 차이가 0.36%인 광통신용 단일모드(SMF-28) 광섬유가 이용되었다. 그림 3과 같이 두 개의 작은 토치에서 나오는 산소-LPG 혼합가스 불꽃을 왕복 주행하는 방식으로 광섬유에 열을 가하였다. 일반적인 융착 광섬유 커플러 제조 장치를 이용하여 열확장 코어 광섬유를 제작하였다. 그림 3에서 코어

가 확산된 부분의 길이는 10 mm이다.

불꽃이 주행한 양쪽 끝단에서 코어의 크기가 연속적으로 천천히 변하며 따라서 모드의 크기가 서서히 진화하며 경계 영역에서 큰 결합손실은 발생하지 않는다. 제작 과정에서 열확장 시간으로 코어의 확산 정도를 제어하였다. 제작과정에서 광섬유가 열에 노출 후 15분과 30분 후 측정된 흡수 스펙트럼을 그림 4가 보여주고 있다.

열확장 후 광섬유는 1390 nm 파장 부근에서 0.4 dB 정도의 추가 적인 흡수 손실을 보였다. 이는 열확장이 이루어지는 동안 O-H기의 추가적인 흡수[11]에 의해 발생하는 것으로 사려 된다. 파장 1550 nm에서는 코어 확장으로 인하여 추가적으로 발생하는 손실은 0.2 dB 이하로 나타났다.

제작된 열확장 코어 광섬유의 확장된 코어 크기를 측정하기 위하여 광섬유를 절단하고 연마한 후 광섬유의 단면을 확대하여 촬영한 사진이 그림 5에 제시되어 있다. 실험에 사용한 열확장 코어 광섬유는 마이크로토치의 불꽃에 각각 15분과 30분 씩 노출 되었다. 두 소자의 코어의 크기는 확장 전의 광섬유의 코어의 2배와 3배 정도로 관측되었다.

제작된 열확장 코어 광섬유는 에폭시에 의해서 바이메탈판의 양 끝에 부착되었다. 실험에 사용된 바이메탈은 스미토모사의 BL-2 모델이다. 열확장계수가 높은 쪽의 금속은 Ni-Mn-Fe 합금이며, 열확장 계수가 낮은 쪽 금속은 Ni-Fe 합금이다. 바이메탈의 두께는 0.2 mm이고 식 (1)에 표시된 계수(K) 는 $15.0\times10^{-6}/K$이다. 식 (1)을 이용하여 곡률 반경을 계산해본 결과 100℃, 200℃, 300℃에서 약 71 mm, 29 mm, 18 mm 로 나타났다. 이 정도의 곡률 반경이면 일반 광섬유는 거의 구부림 손실을 가지지 않지만 열확장 코어 광섬유는 의미 있는 구부림 손실을 가질 수 있는 것으로 판단되었다.

제작된 소자는 핫플레이트(hot plate) 위에 장착되며 핫플레이트 표면 온도를 증가 시키면서 광 굽힘 손실을 측정하였다. 실험에 사용한 광원은 매우 안정적인 특성을 가지며 1550 nm 파장을 가지는 DFB(distributed feedback) 레이저 다이오드이다. 그림 6에서 보이듯 열확장이 안 된 일반 광섬유는 온도 센서 기능을 전혀 나타내지 못하였다. 즉 바이메탈의 굽힘에 의하여 최대 0.1 dB의 손실만 보였다. 8분간 열에 노출된 TEC 광섬유는 225℃ 까지 굽힘 손실이 천천히 증가하여 2.7 dB의 손실을 보였다. 15분간 열에 노출된 TEC 광섬유는 150℃ 까지는 굽힘 손실이 연속적으로 증가하는 경향을 보인다. 굽힘 손실이 150℃ 후 약간 감소하는 경향을 보인 후 다시 증가하였다. 30분간 열에 노출된 TEC 광섬유의 굽힘 손실 그래프는 100℃ 근처에서 첫 변곡점을 보여며 여러 번의 변곡점이 보였다. 바이메탈의 굽힘에 의한 열확장 광섬유의 구부림 손실이 일정하게 증가하지 않고 증가와 감소가 반복되는 현상이 관측되었다. 모든 소자들이 온도가 증가함에 따라 손실이 연속적으로 증가하는 현상을 보이지 않고 변곡점을 보였다. 이러한 현상은 식 (2)에 고려하지 않은

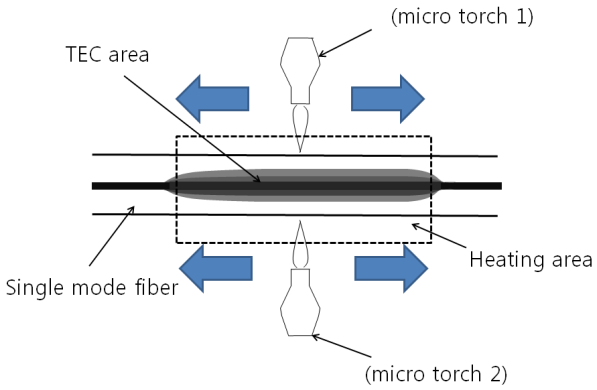

FIG. 3. Concept of fabrication process of TEC fiber and core structure after thermal expanding.

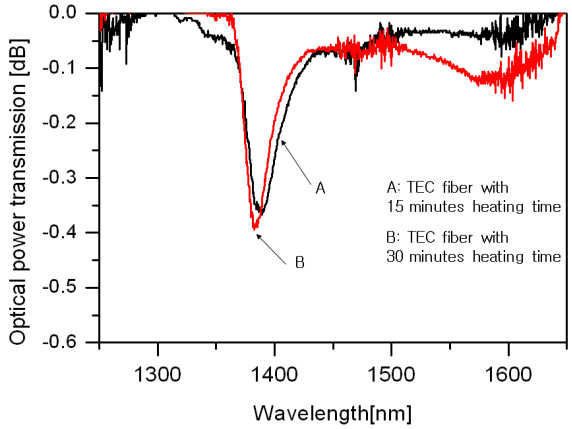

FIG. 4. Transmission spectrum of TEC fibers.

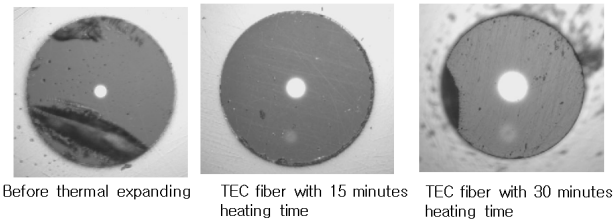

FIG 5. Cross section view of fiber before and after thermal expanding.

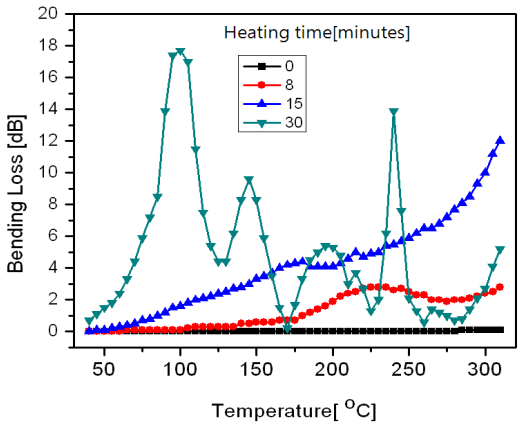

FIG. 6. The bending loss of the TEC fiber in accordance with temperature of the bi-metal plate.

사항이 있기 때문으로 분석되었다. 식 (2)는 클래딩의 두께를 무한대로 가정한 계산식이지만 실제 실험에 사용한 광섬유는 유한한 클래딩 두께를 가지고 있다. 확장된 코어로부터 누설된 광이 공기와 클래딩 경계에서 반사되어 일부 광이 코어로 재결합된 현상에 기인하는 것으로 판단된다. 일반 테이퍼 된 단일모드 광섬유의 경우도 굽힘 손실이 이와 유사한 현상을 나타낸 연구 결과가 보고되었다[12,13]. 그림 6을 통해 알 수 있듯이 코어가 많이 확장될수록 감도는 증가하지만 측정범위는 오히려 감소하는 현상을 보였다. 측정온도 범위에 따라 코어의 확산정도를 제어할 필요가 있다. 목적에 따라 감도가 중요할 수도 있고 측정 범위가 더 중요 할 수 있다. 이러한 변곡점이 생기는 현상은 열확산 된 부위의 광섬유 클래딩에 광섬유 클래딩의 굴절률과 같거나 약간 더 큰 굴절률을 가진 물질을 코팅하거나 클래딩이 더 굵은 광섬유를 이용하는 방법으로 해결 할 수 있을 것으로 사려된다. 실제로 열확장 코어 광섬유의 클래딩의 외부가 광섬유의 클래딩과 굴절률이 유사한 용액으로 둘러쌓이게 한 후 광섬유를 구부리면 변곡점 없이 연속적으로 구부림 손실이 증가하는 현상을 확인하였다.

제안된 열확장 광섬유를 실제로 온도 센서에 이용하기 위해서는 광원의 출력 흔들림을 보상하기 위한 기준 포터가 필요할 것으로 사려된다. 간단한 광섬유 온도 센서 시스템을 구성하는 방법으로, 하나의 레이저 다이오드의 광출력을 3 dB 커플러를 통해 두 가닥을 광섬유로 분기하고, 하나의 광섬유는 온도 센서로 또 다른 하나는 광원의 흔들림을 보상하는 기준단으로 활용하여 두 광섬유 출력단의 광출력의 세기를 광검출기로 비교하는 방식이 적절할 것으로 판단된다. 이러한 방식은 저 비용으로 시스템을 구성 할 수 있는 장점을 가지고 있다.

IV. 결 론

본 논문은 바이메탈의 온도에 따른 구조적 변형 특성과 열확장 코어 광섬유의 굽힘 손실을 이용한 광섬유 온도 센서를 제안하고 실험을 통해서 그 가능성을 보여 주었다. 열확장 코어 광섬유는 온도 센서에 적용될 수 있을 정도로 민감한 광굽힘 손실 특성을 보였다. 바이메탈 판에 열확장 코어 광섬유가 부착되었고 바이메탈이 온도에 따라 휘어짐에 따라 광섬유의 굽힘 손실이 발생한다. 제안된 소자는 온도가 증가함에 따라 굽힘 손실량이 일정 범위 까지는 꾸준히 증가하다 다시 감소하는 현상을 보였다. 이러한 현상은 클래딩 모드와 코어 모드간의 재결합에 의한 현상으로서 이를 피하기 위해서는 클래딩 외부에 굴절률이 정합되며 고온에 견딜 수 있는 물질을 코팅하거나, 클래딩의 두께가 파장에 비해 큰 광섬유를 이용하는 방법이 고려될 수 있다. 제안된 온도센서는 단순히 일반 광섬유의 중간에 코어가 확장된 광섬유가 이용되기 때문에 센서 구조가 간단하다. 또한 제안된 센서 시스템은 광의 세기 검출을 이용하는 방식으로 레이저 다이오드와 광검출기로 간단하게 시스템 구성이 가능하다. 제안된 광섬유 온도 센서는 고압하에서 전자 센서가 적용되기 어려운 전기 설비 장비의 고온 감지 시스템이나 위험 지역이나 열악한 환경에서 원거리 화재 경보 시스템에 적용이 될 수 있을 것으로 생각된다.

References

1. K. T. V. Grattan and B. T. Meggitt, *Optical Fiber Sensor Technology* (Chapman & Hall, UK, 1995), Chapter 3.
2. K. T. Kim, H. S. Song, J. P. Mah, K. B. Hong, K. Im, S. J. Baik, and Y. I. Yoon, “Hydrogn sensors based on palladium coated side-polished single mode fiber,” IEEE Sensor Journal **7**, 1767-1771 (2006).
3. A. C. Boucouvalas and G. Georgiou, “Tapering of single-mode optical fibers,” IEE proceedings J. Optoelectronics **133**, 385-392 (1986).
4. C. Fernández-Valdivielso, I. R. Matías, and F. J. Arregui, “Simultaneous measurement of strain and temperature using a fiber Bragg grating and a thermochromic material,” Sens. Actuators **101**, 107-116 (2002).
5. Z. J. Wang, Y. Zhou, X. W. Wang, and W. Jin, “A fiber-optic Bragg grating sensor for simultaneous static and dynamic temperature measurement on a heated cylinder in cross-flow,” International Journal of Heat and Mass Transfer **46**, 2983-2992 (2003).
6. R.-S. Shen, J. Zhang, Y. Wang, R. Teng, B.-Y. Wang, Y.-S. Zhang, W.-P. Yan, J. Zheng, and G.-T. Du, “Study on high-temperature and high-pressure measurement by using metal-coated FBG,” Microwave and Optical Technology Lett. **50**, 1138-1140 (2008).
7. K. T. Kim , K. H. Lee, E. S. Shin, H. S. Song, K. B. Hong, S. Hwangbo, and K. R. Sohn, “Characteristics of side-polished thermally expanded core fiber and its application as a band-edge filter with a high cut-off property,” Opt. Comm. **261**, 51-55 (2006).
8. K. Shiraishi, Y. Aizawa, and S. Kawakami, “Beam expending fiber using thermal diffusion of the dopant,” J. Lightwave Technol. **8**, 1151-1161 (1990).
9. K. Shiraishi, T. Yanagi, and S. Kawakami, “Light propagation characteristics in thermally diffused expanded core fibers,” J. Lightwave Technol. **11**, 1584-1591 (1993).
10. W. A. Gambling, H. Matsumura, and C. M. Ragdale, “Curvature and microbending losses in single mode optical fibers,” Optical and Quantum Electronics **11**, 43-59 (1979).
11. M. Kihara, S. Tomita, and M. Matsumoto, “Loss characteristics of thermally diffused expanded core fiber,” IEEE Photon. Technol. Lett. **4,** 1390-1391 (1992).
12. K. T. Kim and K. H. Park, “Fiber-optic temperature sensor based on single mode fused fiber coupler,” J. Opt. Soc. Korea **12,** 152-156 (2008).
13. L. C. Bobb, P. M. Shanker, and H. D. Krumboltz, “Bending effects in biconically tapered single mode fibers,” J. Lightwave Technol. **8**, 1084-1090 (1990).