

광시간영역 반사계를 이용한 분포형 광섬유 과열 감지 센서

김대현 · 김광택*

Fiber-Optic Distributed Overheating Detection Sensor Using an Optical Time Domain Refractometry

Dae Hyun Kim and Kwang Taek Kim*

Abstract

We proposed and demonstrated a distributed fiber-optic overheating detection sensor using optical time domain refractometry. With increased of temperature the optical fiber is bended by a bi-metal and it result in optical leaky loss of the fiber. The sensor structure is designed in such a way that the signal of overheating is happen when the temperature exceeding a threshold temperature and the optical fiber is protected from excess bending.

Keywords : Fiber-optic sensors, Overheating detection sensor, Optical time domain refractometry, Bi-metal, Bending loss

1. 서론

최근 터널 등 사회 기간 시설물에 대한 화재감지 시스템으로 라만(Raman) OTDR(Optical Time Domain Refractometry : 광시간영역 반사계) 시스템을 일반적으로 사용하고 있다. 라만 OTDR 시스템은, 레이저 펄스가 반사되어 되돌아오는 시간을 측정함으로써 반사 지점의 거리를 구하거나, 온도 변화에 대한 anti-stokes 산란광의 세기 변화, 즉 라만효과를 측정하거나, Stokes 광과 Anti-stokes광의 비로서 온도를 측정하는 시스템이다[1]. 이러한 라만 OTDR 시스템은 광섬유상의 모든 위치를 감지할 수 있는 장점은 있지만 고가이어서 경제성이 떨어지며, 데이터 분석에 필요한 시간(수십 초~수 분)으로 인해 신속한 화재 감지가 어려우며, 측정 거리가 10 km 내외로 측정 거리가 수십 km 정도 되는 레일리(Rayleigh) 후방 산란을 이용한 OTDR에 비해 매우 짧은 편이다[2].

본 논문에서는 상기와 같은 문제가 있는 라만 OTDR 시스템 대신,

과열 발생 여부와 과열 위치를 실시간으로 감지할 수 있고, 레일리 후방산란을 이용한 저가의 OTDR용 센서를 제안하고 구현하였다.

단일모드 광섬유에 바이메탈을 부착한 구부림 손실을 이용한 기존의 광온도 센서는 온도가 계속 올라가면 광손실이 급속히 증가하기 때문에 한 가닥의 광섬유에 바이메탈을 여러 개 부착한 다중포인더 과열 감지 센서로서는 활용하기 어렵다[3].

본 논문에서는 일정 온도 이상에서만 광손실이 발생하며 높은 온도에서도 과도한 광손실이 발생하지 않는 센서 시스템을 설계하였다. 제안된 센서를 이용하면 여러 개의 센서가 한 가닥의 광섬유에 연결되어 있고 하나의 OTDR로 측정이 가능하기 때문에 각 센서 별로 유무선 통신 장치 연결이 필요하지 않으며 설치 비용이 저렴하기 때문에 실용적인 화재 감지 시스템에 적용 될 수 있을 것으로 사료된다.

2. 소자 구조 및 원리

광섬유를 구부리면 빛의 누설에 의한 손실이 발생하며, 손실량은 구부림 곡률이 줄어 들수록 지수함수적으로 증가 하며 다음과 같은 식으로 주어진다[4].

$$\alpha = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{aW^3} \right)^{1/2} \left(\frac{U}{VK_1(W)} \right)^2 \exp(D \cdot R) \cdot R^{-1/2} \quad (1)$$

호남대학교 전자광공학과(Electronics and Photonics of Honam University)
59-1 Seobong-dong, Gwangsan-gu, Gwangju 506-714 Korea
*Corresponding author : ktkim@honam.ac.kr
(Received : Jul. 08, 2013, Accepted : Jul. 23, 2013)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

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

여기서 a, R, K , 및 Δ 광섬유 코어 반경, 구부림 곡률 반경, 수정 2중 1차 베셀함수, 코어와 클래딩의 상대적 굴절률 차를 의미한다. U 와 W 는 코어와 클래딩의 전파상수를 나타내고 V 는 광섬유의 정규화 전파상수를 의미한다.

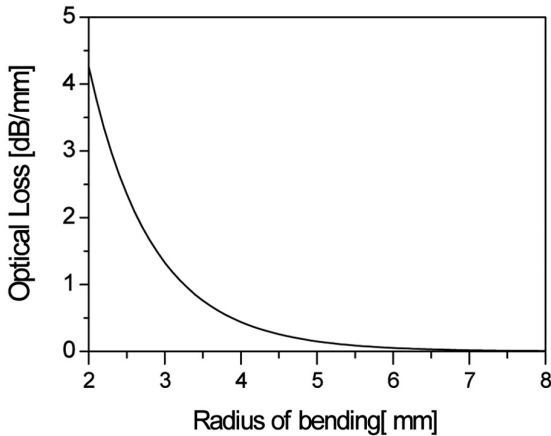


Fig 1. Optical bending loss in accordance with bending radius.

구부림 손실의 감도를 높이기 위한 방법으로 열확장 코어 광섬유 [5]와 테이퍼링된 광섬유[6]가 잘 알려져 있다. 하지만 일반 광섬유의 코어를 확장하거나 광섬유를 테이퍼링 하면 광섬유 기계적 강도가 약해지고 소자의 제조 공정이 복잡해진다.

본 논문에서는 통신용 단일모드 광섬유를 변형하지 않고 그대로 활용하는 방법을 선택하였다. Fig. 1은 코어 반경이 약 4.1 μm이며 코어와 클래딩의 상대적인 굴절률 차가 0.34% 인 광섬유에서 파장이 1310 nm일 때 곡률 반경에 따른 구부림 손실을 수식 (1)로 계산한 그래프이다.

Fig. 1을 참조하여 광섬유의 구부림 손실과 구부림 반경을 유추하여 소자를 설계 할 수 있다. 제안된 과열 감지 센서는 Fig. 2와 같이 바이메탈의 열 변형 특성과 광섬유의 구부림 손실 특성을 활용한 구조를 지닌다. 원형 바이메탈은 특정한 온도를 기점으로 형상이 오목과 볼록 두 가지 형상을 가진다. 이는 특정한 온도 이상에서만 구부림 손실을 유도하는 목적에 적합하다. Fig. 2에서 스틱(stick)은 바이메탈의 변형을 광섬유 구부림으로 전달하기 위함이고 스프링(Spring)은 고온에서는 광섬유와 접촉하여 구부림 손실을 유도하고 저온에서는 광섬유가 직선으로 퍼진 상태를 유지하도록 한다.

3. 소자 제작 및 특성 분석

실험에 통신용 단일모드 광섬유를 사용하였다. 코어의 지름은 약 8.2 μm, 클래딩의 지름은 125 μm 이다. 코어와 클래딩의 상대적인 굴절률 차는 0.34% 이다. 실험에 사용한 원형 바이메탈은 지름은 13 mm 이고 특정한 온도에서 오목과 볼록의 상변화가 발생한다. 상변화가 일어나는 온도는 바이메탈의 재질과 두께 등 여러 변수에 의해 결정된다. 상변화 온도가 서로 다른 여러 종류의 상용 원형 바이메탈을 구입하여 센서로 이용하였다. 실험에 사용한 바이메탈은 열팽창 계수가 높은 쪽 재질은 Ni-Cr-Fe합금이고 열 팽창 계수가 낮은 쪽은 Ni-Fe합금으로 구성되어 있다. 여러 종류의 바이메탈은 공통적으로 상변화시 1.2 mm의 변위를 보였다. 이는 스틱의 아래 위 변위를 1.2 mm 이상 유도 할 수 있음을 의미한다.

Fig. 3은 센서 구성도와 조립도 이다. 구부림이 발생하는 영역에서는 광섬유의 자켓(jacket)을 제거하였으며, 그 외의 영역은 자켓을 그대로 두어 광섬유를 보호 역할을 하도록 하였다. 바이메탈의 변위량에 따른 손실을 고려하여 광섬유 영역의 길이는 12 mm로 설계하였다. 자켓이 제거된 광섬유 양쪽 끝단은 센서 본체(body)에 에폭시로 고정하였다. 제작된 센서 사진은 Fig. 4에 제시되어 있다.

먼저 재료가 세라믹인 스틱의 길이를 조절하여 최대 구부림 손실을 조절할 수 있는지 조사하였다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 스틱이 길어 질수록 과열시 스프링에 의한 광섬유 구부림이 심하게 발생하여 더 큰 손실을 유도할 수 있도록 설계하였다.

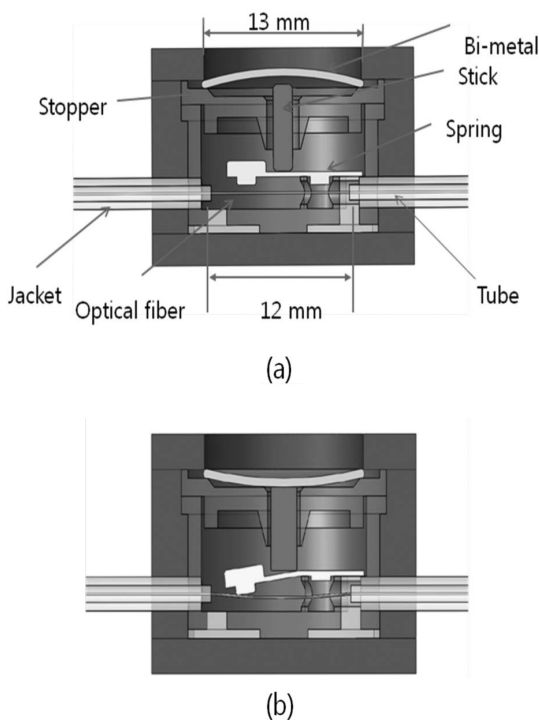


Fig. 2. Schematic structure of overheating detection sensor, (a) before overheating and (b) after overheating.

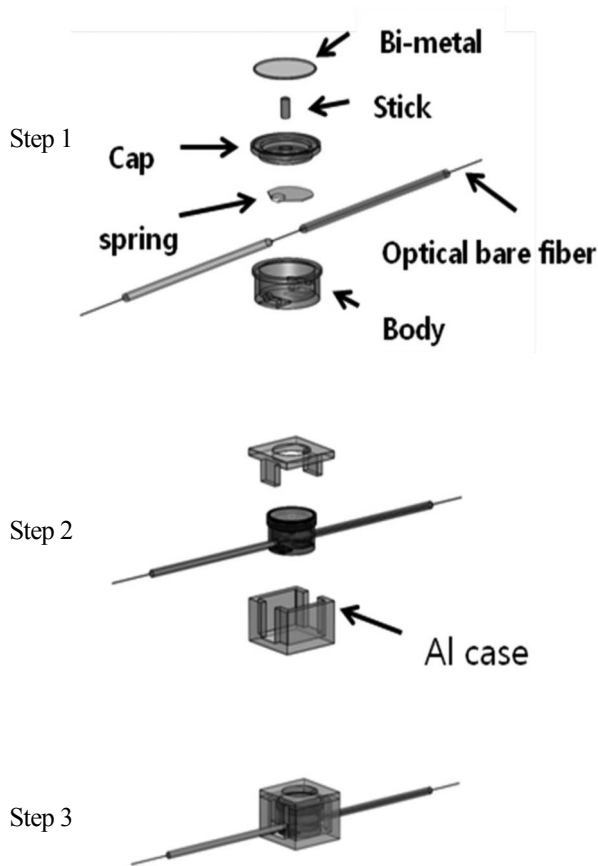


Fig. 3. Component of sensor and assembling process.

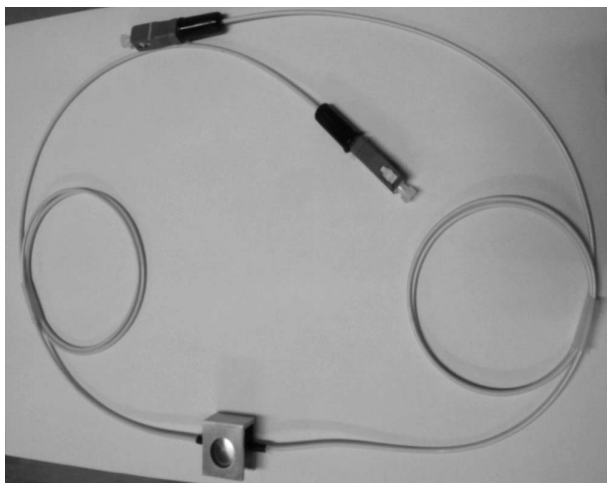


Fig. 4. Picture of fabricated sensor.

Fig. 5는 스틱의 길이 변화에 따른 센서의 과열시 최대 손실량을 측정된 결과이다. 스틱의 길이를 연마로 0.01 mm 씩 줄여가면서 측정된 결과이다. 실제 스프링이 광섬유에 힘을 가했을 때 구부러

지는 광섬유의 형상은 일정한 구부림 반경을 가진 형상이 아니며 구부림 모양에 따른 손실을 계산하는 과정은 매우 복잡한 수학적으로 계산이 필요하다.

본 논문에서는 이러한 구조에 따른 광손실량을 수학적 모델링 연구는 수행하지 않았다. 실험을 통해 스틱의 길이를 조절하여 센서가 과열되었을 때 발생하는 손실을 제어 할 수 있는 기능을 확인 할 수 있었다.

Fig. 5를 통해 알 수 있듯이 센서의 최대 구부림 손실은 스틱의 길이를 정밀하게 조절하여 제어 할 수 있음을 알 수 있다.

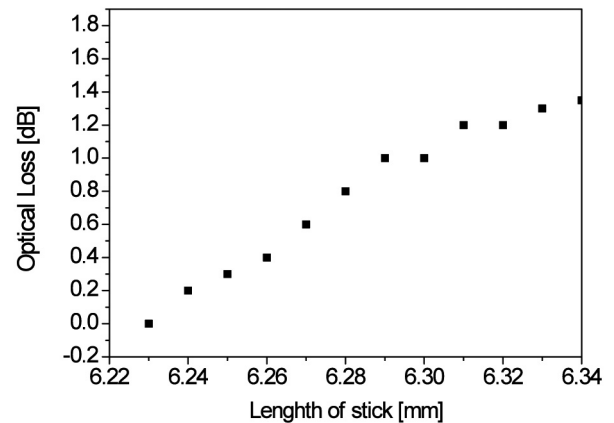


Fig. 5. Optical loss of the sensor in accordance with length of stick.

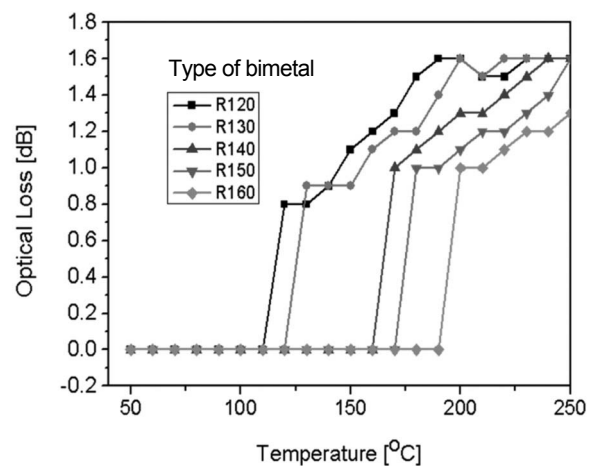
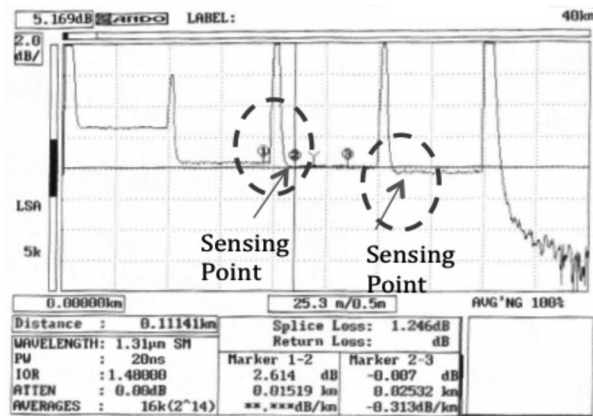


Fig. 6. Temperature characteristics of fabricated sensors for employing different bi-metals.

제작된 센서 구조에 상변화 온도가 서로 다른 여러 개의 원판 바이메탈을 도입하여 센서의 온도 특성을 분석하였다. 열원은 핫플레이트(hot plate)를 이용하였고 광원은 1330 nm 파장의 레이저 다이오드를 이용하였다. 열을 인가하기 전 센서의 광손실은 거의 발생하지 않았다. Fig. 6에 표기된 바이메탈 120R의 의미는 오목-볼록

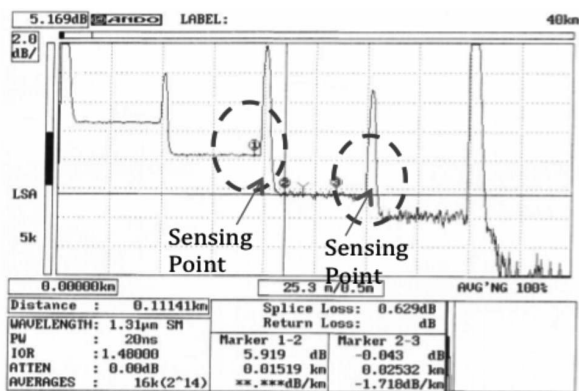
상변화가 120°C에 일어 나도록 제작된 바이메탈 이라는 의미이다.

제작된 과열 감지 센서는 예상과 마찬가지로 특정 온도 이상에서 만 광손실이 발생하였다. 바이메탈의 상변화가 예상되는 온도와 실제 광손실이 발생하는 온도는 약간의 불일치가 있었다. 이는 실제 센서 내부의 바이메탈의 온도와 핫플레이트 표면 온도의 불일치 때문으로 생각된다. 온도가 높아짐에 따라 손실이 꾸준히 증가하다가, 더 이상 손실이 증가하지 않는 온도에 도달하여 그 이상 온도가 높아지더라도 손실은 일정한 값으로 유지된다. 이는 바이메탈의 변위가 stopper에 의해 제한되어 더 이상 광섬유의 구부림 변화를 유도하지 못하기 때문이다. 온도가 내려가면 다시 소자는 원래 상태로 돌아가며 재사용이 가능함을 실험으로 확인 하였다. 제작된 소자는 동작온도에서 오차가 있었지만 당초 설계 목적에 부합하게 잘 동작함을 알 수 있다.



Before heating(25°C)

(a)



After heating (100°C)

(b)

Fig. 7. OTDR waveform of the fabricated sensor before(a) and after (b) overheating.

마지막으로 제안된 소자를 OTDR에 적용하여 과열 감지기 활용 할 수 있는지 실험하였다. 사용한 바이메탈은 60R 이며 두 개의 센서를 50 m 간격으로 배치하였다. Fig. 7(a)는 열을 인가하기 전에 측정된 OTDR 파형이며 Fig. 7(b)는 100°C 열을 인가하여 발생한 OTDR 파형이다. 광섬유와 광섬유는 FC-PC 광커넥터로 연결하였다. OTDR 파형을 관측하면 연결 지점에서 강한 반사 파형이 발생함을 알 수 있다. 커넥터 사이의 공기층에 의한 Fresnel 반사파형이다. 실제로 OTDR의 반사파형을 이용하여 센서 위치 정보로 활용할 수 있을 것으로 보인다. Fig. 7(a)와 (b)를 비교 분석해 보면 열을 가하기 전 반사 파형 양쪽으로 손실이 거의 발생하지 않지만, 열을 가하면 손실에 의한 계단 모양의 파형이 발생하며, 이 계단 모양 파형 발생 여부를 활용하여 과열 여부를 감지 할 수 있다. 제작된 소자는 온도가 내려가면 다시 원상태로 돌아가는 특성을 가지는 것을 확인 하였다. 일반적으로 OTDR은 수십 km 까지 신호 감지가 가능하기 때문에 제안된 센서를 직렬로 배치하여 넓은 지역을 감시하는 것이 가능하리라 생각된다.

4. 결론

본 논문에서는 광섬유 구부림 손실을 이용한 과열 감지 센서를 제안하고 구현하였다. 특정 온도 이상에서 광손실이 발생하고 온도가 올라가도 일정한 값 이상으로는 광손실이 커지지 않도록 설계하였다. 실험 결과 설계 목표과 일치하게 동작함을 알 수 있었다. 제안된 소자는 제조 방법이 간단하고 OTDR 장비를 활용하여 여러 개를 한 가닥의 광섬유에 연결하여 활용할 수 있기 때문에 화재 감지 시스템에 널리 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

REFERENCES

- [1] G. Bolognini, J. H. Park, M. A. Soto, N. K. Park, and F. D. Pasquale, "Analysis of distributed temperature sensing based on Raman scattering using OTDR coding and discrete Raman amplification" *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 18, pp. 3211-3218, 2007.
- [2] K. W. Lee, "Study on distance fire monitoring system using fiber optic cable", *Korea Concrete Institute 2012 Fall Convention*, pp. 427-428, 2012.
- [3] K. T. Kim, J. H. Kang, K. J. Cho, and N. I. Moon "Fiber-optic temperature sensor based on bending loss of thermally expanded core fiber", *Korean Journal of Optics and Photonics*, Vol. 21, No. 1, pp.

- 12-15, 2010.
- [4] W. A. Gambling, H. Matsumura, and C. M. Ragdale, "Curvature and microbending losses in single mode optical fibers", *Opt. Quantum Electron.*, Vol. 11, pp. 43-59, 1979.
- [5] H. W. Kwon, J. W. Song, and K. T. Kim, "Bending effects of thermally-expanded-core fiber and its application as variable optical attenuator" *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 50, pp. 022501-1- 022501-4, 2011.
- [6] K. T. Kim, J. H. Kang, H. B. Seung, and K. G. Im, "In-line variable optical attenuator based on the bending of the tapered single mode fiber", *J. Opt. Soc. Korea*. Vol. 13, pp. 349-353, 2009.