

광섬유 패치코드를 이용한 Fabry-Perot 간섭계 온도센서

김주하^{1,2} · 정은주¹ · 김명진¹ · 황성환¹ · 이우진¹ · 김계원¹ · 안종배¹ · 최은서² · 노병섭^{1,+}

Temperature Sensor Based on Fabry-Perot Interferometer Using a Fiber Optic Patch Cord

Ju Ha Kim^{1,2}, Eun Joo Jung¹, Myoung Jin Kim¹, Sung Hwan Hwang¹, Woo Jin Lee¹,
Gye Won Kim¹, Jong Bae An¹, Eun Seo Choi², and Byung Sup Rho^{1,+}

Abstract

In this paper, we propose and demonstrate a Fabry-Perot interferometer (FPI) optical fiber tip sensor fabricated by a blade-sawing technique using a fiber optic patch cord for high-resolution temperature measurement. The sensor head consists of a short air FP cavity near the tip of a single-mode fiber patch cord tip. The temperature which we can measure is determined through a phase variation of the interference fringes in the reflective spectrum of the sensor. The fiber optic FPI sensor in this work can monitor the environmental temperature very accurately from 40 to 120°C. As a result, the temperature sensitivity is obtained as 38.2 pm/°C.

Keywords: Fiber optics sensors, Fabry-Perot interferometer, Optical temperature sensors

1. 서 론

온도센서는 기본적인 물리량 중 하나인 온도를 감지하여 기록하거나 제어하는 감지센서로써 산업체의 시스템 제어, 환경제어, 생체공학용 의료기기 등에 광범위하게 사용되고 있다.

최근에는 다양한 산업분야의 발전으로 인해 시설 및 기기의 이상징후를 판단하고, 원인 및 대책을 통해 화재사고를 방지하기 위해서는 원거리 측정이 가능한 고속, 고감도의 온도 센서가 요구되고 있다. 현재 주로 사용하고 있는 전기적 신호 방식의 온도 센서는 원격측정에 있어 전력공급이 어려울 뿐만 아니라 신호 전송 시 잡음의 영향을 심하게 받아 신호가 왜곡되는 경우가 발생한다.

이에 비해, 광섬유형 온도센서는 광섬유 자체가 절연성을 가지고 신호 전송로 역할을 겸할 수 있으며, 또한 주위의 전자기적 간섭에 영향을 받지 않을 뿐만 아니라 높은 정밀도와 빠른

응답을 나타내는 장점이 있다. 따라서 이러한 광섬유형 온도센서는 산업, 항공, 의료, 국방 등의 광범위한 응용분야에서 그 연구가 활발히 진행되고 있다.

최근에 많이 연구되고 있는 광섬유형 온도센서로는 광섬유 브래그 격자형 온도센서[1-3], 특수소재의 광섬유를 이용한 온도센서[4-7], 간섭계를 이용한 온도센서[8-10] 등이 있다.

광섬유 브래그 격자형 온도센서는 크기가 작고 제작이 용이하다는 장점이 있으나, 분해능에 제한이 있는 단점이 있다[11]. 그리고 특수한 소재의 광섬유를 이용한 온도센서는 감도가 고정되는 단점[12]이 있고, 간섭계형 온도센서는 높은 감도의 장점을 가지지만, 2차 코팅이 이루어지지 않은 광섬유 센서나 팁 기반 광섬유 센서는 일반적으로 클래드를 제거하여 용착(splicing)을 하기 때문에 취급상에 불편함과 파손되기 쉬운 단점을 가지고 있다.

최근에는 이러한 단점들을 보완하기 위해, 광섬유의 클래드를 제거하거나 용착하지 않고, 펄스 레이저를 이용하여 광섬유에 직접 조사한 Fabry-Perot 간섭계 센서가 연구되고 있다. 하지만, 펄스 레이저에 노출된 센서 헤드 주위의 강도가 약해지는 단점이 있다[13].

따라서, 본 연구에서는 온도 측정을 위해 취급하기 편리하고 외부 요인에 의해 깨질 위험이 적은 광섬유 패치를 기반의 Fabry-Perot 간섭계(FPI: Fabry-Perot Interferometer)를 제작하고 온도 측정 성능을 측정하였다. 이러한 광섬유 센서는 블레이드 소잉 공정을 통해 광패들의 끝단을 가공하여 제작하였으며, 제작된 센서를 온도 챔버 내부에 고정한 후, Fabry-Perot cavity로부터 반사된 빛과 코어층으로부터 반사된 빛의 간섭무늬의 파장변화

¹ 한국광기술원 나노광전연구센터(Nano-Photonics Research Center, Korea Photonics Technology Institute)

971-35 Wolchul-dong, Buk-gu, Gwangju 500-460, Korea

² 조선대학교 물리학과(Department of Physics, Chosun University)
309, Pilmun-daero, Dong-gu, Gwangju 501-759, Korea

⁺ Corresponding author: kalparho@hanmail.net

(Received: Dec. 9, 2013, Revised: Jan. 29, 2014, Accepted: Feb. 5, 2014)

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.

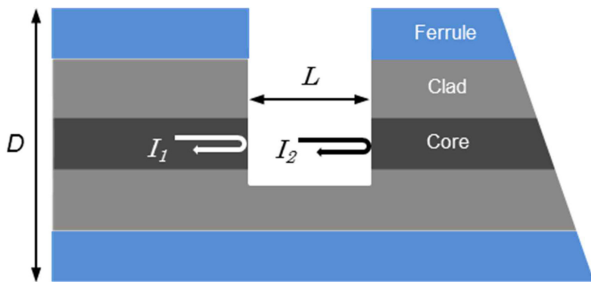


Fig. 1. Schematics of the FPI sensor head.

를 통해 온도 변화 정도를 측정할 수 있었다.

2. Fabry-Perot 간섭계 센서 설계 및 제작

Fabry-Perot 간섭계는 광섬유 안에서 반사되는 두 빛의 간섭을 이용하여 온도를 측정한다. 본 논문에서는 광섬유 패치코드를 사용하여 센서를 설계 및 제작하였다. Fig. 1은 설계 및 제작된 FPI 센서의 구조를 보여주고 있다.

FPI 센서는 주위의 온도 변화에 따라 cavity 길이인 L의 변화로 위상이 달라져 공기층인 cavity로부터 반사된 빛 I₁과 코어층으로부터 반사된 빛 I₂의 간섭 무늬의 변화를 유도하게 되는데, 이는 아래와 같은 수식으로 표현된다.

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{4\pi nL}{\lambda} + \phi\right) \quad (1)$$

여기서, I는 간섭무늬의 광세기, I₁은 공기층인 cavity로부터 반사된 빛, I₂는 코어층으로부터 반사된 빛, L은 Fabry-Perot 간섭계의cavity 길이로, 다이아몬드 블레이드로부터 코어층이 잘려나가진 틈의 폭, n은 반사면 사이의 굴절률, λ는 파장, φ는 간섭무늬의 초기 위상 값이다.

광섬유 패치코드의 직경인 D는 1.25 mm이고, 한쪽 끝단은 단단한 세라믹 페룰이 패키징되어 있어, 부서질 가능성이 매우 낮다는 장점을 가지고 있다. 그리고, 세라믹 페룰의 다른 끝단은 APC(Angled Physical Contact)를 사용하였다. APC 형태의 광섬유 패치코드는 끝에서 반사되는 빛이 거의 없어, Fabry-Perot 간섭계 안에서 반사되는 두 빛만을 가지고 간섭패턴을 볼 수 있는 장점을 가지고 있다. 이렇게 설계된 Fabry-Perot 간섭계의 cavity 길이인 L은 다이아몬드 블레이드의 두께에 의존한다.

FPI 센서는 Fig. 2(a)와 같은 방법을 통해 제작하였다. 광섬유 패치코드 끝단에 있는 세라믹 페룰의 절단면을 수직으로 자르기 위해 세라믹 페룰을 고정 시킬 수 있는 지그를 제작하였고, 임의의 지점에 U자형 다이아몬드 블레이드를 사용하여 광섬유 코어까지 완전히 절단되도록 소잉 공정을 수행하였다.

소잉 공정에 사용된 장비는 Fig. 2(b)에서 보이는 U자형 다이아몬드 블레이드가 장착된 SHP-20P 이며, 장비의 회전속도는

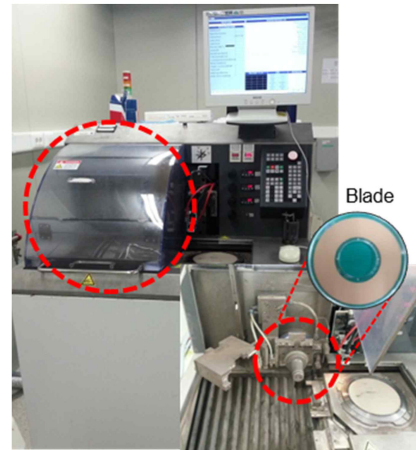
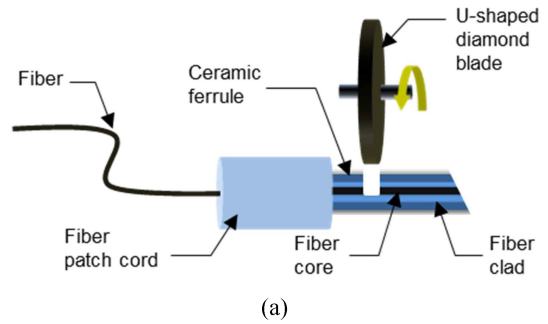


Fig. 2. (a) Fabrication of the FPI using a sawing processing and (b) photograph of the sawing machine.

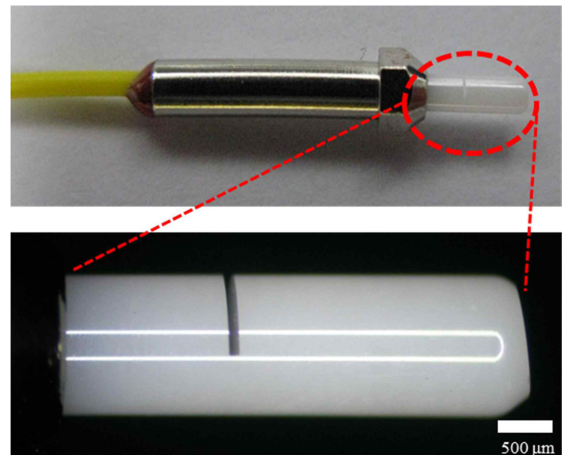


Fig. 3. Photographs of the fabricated FPI sensor head.

20,000 rpm, 블레이드의 두께는 100 μm 블레이드의 날은 3 μm 크기의 다이아몬드 알갱이로 이루어져 있다. 이에 따라 페룰 절단면의 표면 거칠기는 대략 200 nm(rms)정도로 측정되었으며, 이는 온도 측정에 사용되는 광원의 파장이 1550 nm임을 감안한다면 표면 거칠기에 따른 반사 스펙트럼의 손실은 무시할 정도로 생각된다.

Fig. 3은 제작된 FPI 센서 헤드의 사진이다. 첫 번째 그림은

소잉 공정을 통해 만들어진 광섬유 패치코드 사진이고, 두 번째 그림은 광섬유 패치코드 끝단의 세라믹 페룰 부분을 확대한 그림이다. 앞에서 언급한 것과 같이, 세라믹 페룰의 끝은 약간 각도가 진 APC형태이고, U자형 다이아몬드 블레이드에 의해 잘려진 세라믹 페룰의 깊이는 약 650 μm, cavity 길이인 폭은 약 110 μm이다. 다이아몬드 블레이드의 두께인 100 μm와 약간의 오차는 소잉 공정 중 블레이드의 회전에 의해 생긴 것으로 판단된다.

3. Fabry-perot 간섭계 센서를 이용한 온도 측정

제작된 FPI 센서를 온도 챔버 안에 고정하고, 온도를 40°C부터 120°C까지, 120°C부터 40°C까지 10°C 간격으로 변화시켜 각각의 온도 조건에서 안정화 될 때, 온도 챔버에 표시된 온도를 기준 온도로 설정하여 스펙트럼의 변화를 측정하였다.

Fig. 4는 제작된 FPI 센서의 온도를 측정하기 위한 실험 구성도이다. 광원에서 출사된 빛이 서큘레이터를 지나 온도 챔버 안의 FPI 센서에서 반사된 빛을 광 스펙트럼 분석기(OSA :Optical Spectrum Analyzer)를 이용하여 간섭무늬를 측정하였다. 실험에서 사용된 광원은 광대역 광원으로 중심파장은 1550 nm, 파장 반치폭은 50 nm, 중심 파장에서의 최대 출력은 -30 dBm 정도 이고, 출력단에서 사용된 OSA는 YOKOGAWA사의 AQ6331 모델로, 본 실험에서는 최대 분해능인 0.05 nm 로 측정하였다.

실험과정에서 온도의 범위는 실험실에서 사용한 챔버의 스펙인 40°C부터 120°C까지로 제한하였다. 그리고, 제작된 FPI 센서를 사용하여 특정 온도에서 시간에 따른 스펙트럼의 변화를 30분 이상 관찰한 결과, 스펙트럼의 차이가 거의 없기 때문에 충분히 실험 시간을 고려한 것이며, 반복 실험 결과 스펙트럼의 큰 차이가 없었다.

Fig. 5(a)는 온도 변화를 40°C부터 120°C까지 10°C만큼 증가시키면서 스펙트럼을 측정된 결과이고, Fig. 5(b)는 온도 변화를 120°C부터 40°C까지 10°C만큼 감소시키면서 스펙트럼을 측정된 결과이다. Fig. 5(a)의 측정된 스펙트럼을 보면 온도가 증가함에 따라 파장의 변화가 장파장으로 일정하게 이동함을 볼 수 있다. 이는 온도가 증가함에 따라 Fabry-Perot 간섭계의 cavity 길이인 L의 증가로 인해 공기층에서 반사된 빛과, 코어층에서 반사된 빛의 간섭무늬 위상 변화로 보인다.

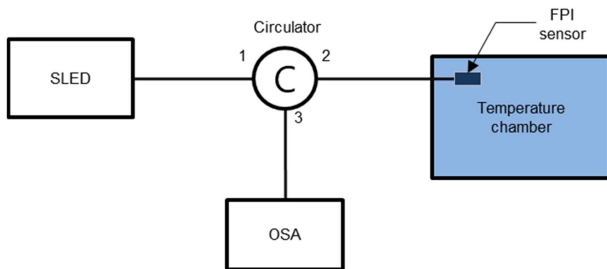


Fig. 4. Experimental setup of a FPI sensor.

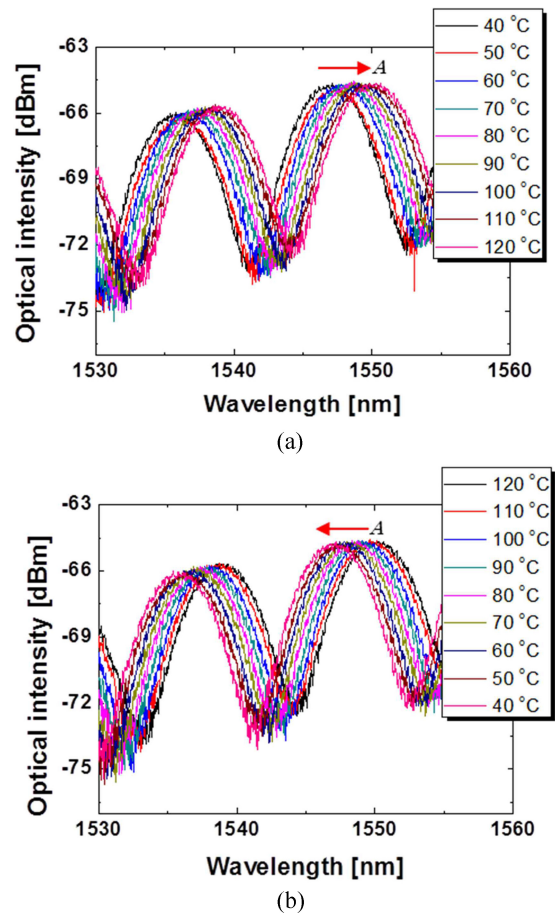


Fig. 5. Spectra of the FPI sensor under temperature conditions (a) from 40°C to 120°C and (b) from 120°C to 40°C.

Fig. 5(b)에서는 제작된 센서의 복원성을 보기 위해, Fig. 5(a)의 실험과 반대로 120°C부터 40°C까지 온도를 감소시키면서 스펙트럼을 측정해본 결과이다. 스펙트럼을 보면 온도가 감소함에 따라 단파장으로 이동함을 알 수 있는데, Fabry-Perot 간섭계의 cavity 길이인 L이 다시 감소하여 온도를 증가한 경우와는 반대의 스펙트럼의 변화를 확인할 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 5의 스펙트럼 peak A점(120°C)을 기준으로 연결하여 40°C부터 120°C까지, 120°C부터 40°C까지의 온도 변화에 따른 파장의 변이를 나타낸 그림이다. 그림에 나타난 것처럼 온도에 따른 파장변화 각각의 표시 점을 연결하여 관계식을 구하였을 때, 온도가 40°C부터 120°C 상승할 경우 파장-온도간 관계식의 기울기는 0.0382으로, 감도는 대략 ~38.2 pm/°C으로 계산되었고, 온도가 120°C부터 40°C까지 감소할 경우 파장-온도간 관계식의 기울기는 -0.0379으로, 감도는 ~37.9 pm/°C로 도출되었다. 도출된 기울기의 절대값 편차는 약 0.0003으로 승온과 감온 환경에서 편차가 크지 않는 정밀한 온도센서임을 알 수 있다.

실험결과, 기존의 브래그 격자형 온도센서의 민감성이 약 10 pm/°C임을 감안한다면, 본 연구에서 제작된 FPI 센서는 간단한 구조이면서 온도에 따른 파장의 변화량이 커서 우수한 성능을

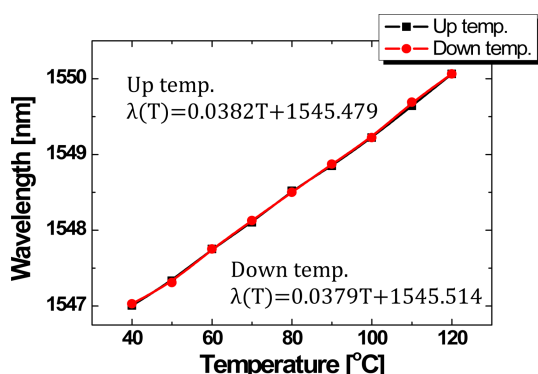


Fig. 6. Wavelength shift depending on up and down temperature.

가짐을 알 수 있다. 본 논문에서 사용된 계측기의 분해능이 0.05 nm이기 때문에 온도센서의 분해능은 약 1.3°C이지만, 계측기가 고분해능을 제공한다면(Micron optics사의 1 pm 분해능의 광 계측기), 훨씬 높은 분해능을 가지고 온도 측정이 가능하다. 또한 제작된 FPI 센서는 승온과 감온환경에서의 기울기 절대값 차이가 0.0003으로써, 온도 변화의 방향에 따른 편차가 크지 않은 정밀한 온도센서임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 광섬유 패치코드를 사용하여, Fabry-Perot 간섭계 기반 온도센서를 제작하였다. 광섬유 패치코드 끝단은 세라믹 페룰로 둘러 쌓여 있어, 외부 환경에 의해 깨질 위험성이 적으며, 다이아몬드 블레이드를 이용한 한번의 소잉 공정을 통해 간단하게 제작할 수 있다. 또한, 블레이드 두께에 따라 cavity 길이를 바꿀 수 있어, 간섭무늬 간격을 조절할 수 있는 장점이 있다.

제작된 FPI 센서는 온도가 변함에 따라 cavity 길이가 변화하여 반사되는 두 빛의 간섭무늬 위상 변화 때문에 파장 천이가 발생하였고, 이 결과를 통해서 온도 변화 정도를 측정할 수 있었다. 실험결과에 따르면, 주변 온도를 40°C부터 120°C까지 10°C만큼 증가시킨 경우에는 온도 민감성이 ~38.2 pm/°C로 측정되었고, 온도를 120°C부터 40°C까지 10°C만큼 감소시킨 경우에는 온도 민감성이 ~37.9 pm/°C로 측정되었다. 제안된 FPI 센서는 안정한 온도 특성을 보였으며, 온도를 120°C까지 증가한 후, 다시 감소 시켜도 온도센서로써 사용이 가능함을 보였다.

감사의 글

이 논문은 산업통상자원부에서 시행한 광산업 기술력 향상 사업의 일부 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] W. W. Morey, G. Meltz, and W. H. Glenn, "Fibre optic Bragg grating sensor", *Proc. SPIE*, 1169, pp. 98-107, 1994.
- [2] Y. Rao, Webb. D. J, Jackson. D. A, Lin. Zhang, and Ben-nion. I, "In fiber Bragg-grating temperature sensor system for medical applications", *Lightwave Tech.*, vol. 15, no. 5, pp. 779-785, 1997.
- [3] B. Zhang and M. Kahrizi, "High-temperature resistance fiber bragg grating temperature sensor fabrication", *Sensors Journal. IEEE*, vol. 7, no. 4, pp. 586-591, 2007.
- [4] J. H. Park and K. T. Kim, "Fiber-optic interferometric temperature sensor using a hollow fiber", *J. Sensor Sci. & Tech.*, vol. 16, no. 3, pp. 192-196, 2007.
- [5] C. L. Zhao, M. S. Demokan, W. Jin, and L. Xiao, "A cheap and practical FBG temperature sensor utilizing a long-period grating in a photonic crystal fiber", *Optics Communications*, vol. 276, no. 2, pp. 242-245, 2007.
- [6] W. Qian, C. L. Zhao, S. He, X. Dong, S. Zhang, Z. Zhang, S. Jin, J. Guo, and H. Wei, "High-sensitivity temperature sensor based on an alcohol-filled photonic crystal fiber loop mirror", *Optics Letters*, vol. 36, no. 9, pp. 1548-1550, 2011.
- [7] R. Yang, Y. S. Yu, Y. Xue, and C. Chen, "A highly sensitive temperature sensor based on a liquid-sealed S-tapered fiber", *Photonics Tech. IEEE*, vol. 25, no. 9, pp. 829-832, 2013.
- [8] L. Xuefeng, L. Shuo, L. Jinxing, O. Hiroshi, and U. Toshit-sugu, "High sensitivity fiber-optic Fabry-Perot interferometer temperature sensor", *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 51, no. 6, pp. 06FL10-06FL10-4, 2012.
- [9] T. Y. Hu, Y. Wang, C. R. Liao, and D. N. Wang, "Miniaturized fiber in-line Mach-Zehnder interferometer based on inner air cavity for high-temperature sensing", *Optics Letters*, vol. 37, no. 24, pp. 5082-5084, 2012.
- [10] L. Xu, L. Jiang, S. Wang, B. Li, and Y. Lu, "High-temperature sensor based on an abrupt-taper Michelson interferometer in single-mode fiber", *Applied Optics*, vol. 52, no. 10, pp. 2038-2031, 2013.
- [11] H. J. Park and M. H. Song, "Linear FBG temperature sensor interrogation with Fabry-Perot ITU multi-wavelength reference", *Journal of KIIEE*, vol. 21, no. 7, pp. 54-60, 2008.
- [12] D. H. Kim and J. U. Kang, "Sagnac loop interferometer based on polarization maintaining photonic crystal fiber with reduced temperature sensitivity", *Optics Express*, vol. 12, no. 19, pp. 4490-4495, 2004.
- [13] T. Wei, Y. Han, H. L. Tsai, and H. Xiao, "Miniaturized fiber inline Fabry-Perot interferometer fabricated with a femtosecond laser", *Optics Letters*, vol. 33, no. 6, pp. 536-538, 2008.