큰 복굴절 특성을 가지는 광자결정 광섬유를 이용한 스트레인, 구부림 및 온도 특성

엄성훈^{1,2†} · 김길환¹ · 황규진¹ · 마경식^{1,2} · 이관일¹ · 정제명² · 이상배¹

¹한국과학기술연구원 포토닉스센서시스템센터
Ⓢ 136-791 서울특별시 성북구 하월곡동 39-1

²한양대학교 광통신연구실
Ⓢ 137-724 서울특별시 성동구 행당동 17

(2010년 11월 1일 받음, 2010년 12월 6일 수정본 받음, 2010년 12월 7일 게재 확정)

큰 복굴절 값을 갖는 광자결정광섬유는 실리카 단일 물질로 구성되어 온도 민감성이 매우 낮다. 이를 이용하여 온도변화에 영향을 받지 않는 스트레인 및 구부림 센서를 구현하였다. 이때, 스트레인 변화에 따른 민감도는 $1.41 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 이고, 구부림에 대한 민감도는 타원코어 장축 방향과 단축 방향으로의 구부렸을 때 각각 $0.93 \text{ nm}/\text{m}^{-1}$, $-1.6 \text{ nm}/\text{m}^{-1}$ 로 차이가 있었다.

Highly-birefringent Photonic Crystal Fiber with Squeezed Lattice for Strain, Curvature and Temperature Sensing

Sung-Hoon Eom^{1,2†}, Gil-Hwan Kim¹, Hyu-Jin Hwang¹, Kyung-sik Ma^{1,2}, Kwanil Lee¹,

Je-Myung Jeong², and Sang-Bae Lee¹

¹Photonics Sensor System Center, Korea Institute of Science and Technology (KIST), Seoul 130-791, Korea

²Optical Communication Laboratory, Division of Electrical Engineering, Hanyang University, Seoul 137-724, Korea

(Received November 1, 2010; Revised manuscript December 6, 2010; Accepted December 7, 2010)

Highly-Birefringent Photonic Crystal Fiber (Hi-Bi PCF) is composed of a single material, silica, so that its temperature sensitivity is extremely low. Therefore, we propose a fiber based Sagnac interferometer for measurement of strain and curvature independent of temperature variation. The sensitivities of strain and curvature (both axes) are measured to be $1.41 \text{ pm}/\mu\epsilon$ and $0.93 \text{ nm}/\text{m}^{-1}$ (slow axis Y), $-1.6 \text{ nm}/\text{m}^{-1}$ (fast axis X), respectively.

Keywords: Highly birefringence, Photonic crystal fiber, Optical fiber sensor

OCIS codes: (060.0060) Fiber optics and optical communications; (060.2300) Fiber measurements; (060.2310) Fiber optics; (060.2370) Fiber optics sensors; (130.6010) Sensors

I. 서 론

1990년대 중반부터 광자결정 광섬유(PCF, Photonic Crystal Fiber)의 연구가 시작되면서 기존의 광섬유 연구에 상당한 변화를 주었다. PCF는 클래딩 영역에 주기적으로 공기구멍들이 배열된 구조로, 기존의 복굴절 광섬유와 다르게 그 공기구멍의 크기와 간격, 위치를 조정해 코어와 클래딩의 유효 굴절률 차이를 조절 할 수 있다. 이로 인해 기존의 복굴절 광섬유로는 구현하기 어려운 복굴절 특성을 비교적 쉽게 얻을 수 있다.^[1]

큰 복굴절을 갖는 광자결정 광섬유(Hi-Bi PCF, Highly-Birefringent Photonic Crystal Fiber)는 PCF 구조에서 두 개의 큰 공기구멍을 추가하여 제작된다. 두 개의 큰 공기구멍은 광섬유 인출 과정 중에 코어와 공기층 클래딩 영역에 비대칭적인 압력을 가해지도록 하여 코어가 타원형이 되면서 큰 복굴절 특성을 갖는다. 그리고 공기구멍의 크기와 간격, 위치를 조절해 코어와 클래딩의 유효 굴절률 차이를 조절함으로써 복굴절 특성을 조절 할 수 있다.^[2, 3]

광섬유 센서들은 크게 간섭계형 센서, 광세기형 센서로 나누어지는데, 본 실험에서는 장비도 많이 필요하지 않고 비교

[†]E-mail: esh0907@kist.re.kr

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

적 제작이 쉬운 간섭계형 센서를 이용하여 실험을 하였다. 간섭계형 센서에는 Michelson, Mach-Zehnder, Fabry-Perot, Sagnac 간섭계가 있는데, 이 중 복굴절 측정에는 Sagnac 간섭계가 많이 이용된다.^[4]

간섭계에 복굴절 특성을 가지는 Hi-Bi PCF를 이용한 광센서로 스트레인, 구부림의 정도 등 다양한 물리량을 측정하는 연구가 활발히 진행되어 왔다.^[5] 기존에 보고된 논문을 보면, 스트레인 센서는 광섬유 양쪽을 팽팽하게 고정시키고 힘이 지면과 평행하게 가해지기 때문에 X축과 Y축의 굴절률 변화가 동시에 일어나 복굴절의 변화에 영향을 주지 않는다. 그러나 구부림의 정도를 측정하는 센서는 축에 따른 복굴절의 변화가 다르게 나타나는데, 기존의 논문에서 사용한 Hi-Bi PCF는 복굴절을 인가하는 두 개의 큰 홀이 코어 주변의 첫 번째 공기구멍 층에 위치하고 있는 구조를 가지고 있다. 이 구조는 복굴절을 가지기는 하나, 주위의 작은 홀들 때문에 축의 방향에 따라 달라지는 구부림 특성을 측정하는데 어려움이 있어 민감하게 측정해야 하는 곳에는 적합하지 않다.^[4] 그래서 기존의 Hi-Bi PCF의 장점을 유지하면서, X축과 Y축을 쉽게 찾을 수 없었던 단점을 보완할 수 있는 구조의 Hi-Bi PCF가 제안되었고,^[4] 이 Hi-Bi PCF를 이용한 실험을 통해 축에 따른 복굴절 변화값을 측정하였다.

본 논문에서는 Sagnac 간섭계를 이용해 센서 실험을 수행하였고, 실험에 사용한 Hi-Bi PCF는 공기층 클래딩 범위 밖의 클래딩 영역에 두 개의 큰 공기구멍을 추가하여 제작된 광섬유를 사용하였다. 이 Hi-Bi PCF는 큰 공기구멍이 공기층 클래딩 범위 밖에 있으므로 용융 용착 접속기의 현미경을 이용해 기존의 Hi-Bi PCF보다 축의 방향을 쉽게 확인할 수 있다. Hi-Bi PCF를 이용해 스트레인, 축에 따른 구부림 실험과 온도 측정 실험을 통해 기존의 Hi-Bi PCF의 특성을 가지면서 센서로 활용 가능성을 확인해 보았다.

II. Hi-Bi PCF의 구조 및 특성

2.1. 제안된 구조의 Hi-Bi PCF

본 논문에서 제안된 Hi-Bi PCF의 구조(Fig. 1)는 공기층 클래딩 영역밖에 두 개의 큰 공기구멍이 위치하고 있다.

실리카 클래딩 영역에 위치하고 있는 큰 공기구멍들은 광섬유 인출 시 부풀면서 큰 공기구멍에 근접해 있는 공기층 면으로 압력을 가하게 된다. 따라서 큰 공기구멍이 위치하고 있는 면과 없는 면의 코어와 공기층 클래딩 영역은 비대칭적인 압력을 받게 되고, 이로 인해 상대적으로 압력을 적게 받은 Y축 방향으로 타원형의 코어를 형성 시킨다. 이 광섬유의 물리적 특성은 직경이 $119.81 \pm 1 \mu\text{m}$ 이고, $d_1=0.73 \mu\text{m}$, $d_2=11.7 \mu\text{m}$, $d_x=3.31 \mu\text{m}$, $d_y=4.87 \mu\text{m}$, $\Lambda=2.41 \mu\text{m}$ 인 것을 알 수 있다.

복굴절은 편광 모드 X축과 Y축의 유효 굴절률의 차이이므로 타원형의 코어는 자연히 두 축의 유효 굴절률이 다르게 되어 광섬유는 복굴절 특성을 갖게 된다.

FIG. 1. (a) Proposed structure of the Hi-Bi Photonic Crystal Fiber and (b) SEM image.

FIG. 2. Images of the Hi-Bi PCF from the side view of a fusion splicer (a) X-axis and (b) Y-axis.

2.2. Hi-Bi PCF의 특성

기존의 Hi-Bi PCF는 물리적으로 축을 찾기 어렵지만, 새로운 구조의 Hi-Bi PCF는 큰 공기구멍이 클래딩 영역에 위치하고 있으므로 Fig. 2와 같이 상용용 용융 용착 접속기의 현미경을 이용하여 비교적 쉽게 축을 찾을 수 있다.

FIG. 3. Transmission spectrum of Hi-Bi PCF based Sagnac loop interferometer.

그리고 식 (1)을 이용해 Hi-Bi PCF의 복굴절 값을 구할 수 있다.

$$B = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda \cdot L} \quad (1)$$

$\Delta\lambda$ 는 SLI(Sagnac Loop Interferometer)를 이용한 간섭무늬 간의 간격이고, λ 는 중심파장 L 은 복굴절 광섬유의 길이이다.

Fig. 3은 SLI를 이용한 간섭 스펙트럼을 나타낸 것이다. Hi-Bi PCF 길이는 3.5 m이고, $\Delta\lambda$ 는 중심파장 1550 nm에서 3 nm이다. 식 (1)을 이용해 복굴절 값을 구하면 중심파장 1550 nm에서 약 2.29×10^{-4} 이다. 복굴절 광섬유의 광학적 특성 중 코어 축 간의 균일도를 확인할 수 있는 Polarization Dependent Loss(PDL)은 0.105 dB이고 코어 축 간의 굴절률 차이를 확인할 수 있는 Differential Group Delay(DGD)는 2.18 ps/m이다.

III. Hi-Bi PCF 이용한 센서 실험

3.1. 스트레인(strain) 실험

본 논문에서는 새로운 구조의 Hi-Bi PCF를 15cm의 길이로 잘라 광센서 분야에서 가장 많이 연구되고 있는 물리적 요소인 스트레인에 대한 민감도를 측정 하였다. 스트레인 실험은 Fig. 4와 같이 SLI(Sagnac Loop Interferometer)에 스트레인을 가할 수 있는 장비를 추가하여 수행하였다. 스트레인은 7.5 me까지 가하였다. ($\epsilon = \Delta L/L$, ΔL : 잡아당긴 길이, L : 광섬유의 길이)

복굴절 광섬유에 스트레인을 가했을 때 식 (2)에 의해서 위상차 변화에 따른 peak 파장 이동정도를 알 수 있다. 위상차($\Delta\psi$)의 변화는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2 \Delta\psi}{2\pi B L} \quad (2)$$

$$\Delta\psi = \frac{2\pi}{\lambda} [\Delta L B + L \Delta B] \quad (3)$$

FIG. 4. Experimental setup for the strain measurement with a Hi-Bi PCF based Sagnac loop interferometer.

FIG. 5. Spectral response of Sagnac loop interferometer for strain changes.

여기서 $\Delta B = \Delta n_s + \Delta n_r$ 이고 $\Delta n_s = n_s P_e^s \epsilon$, $\Delta n_r = n_r P_e^r \epsilon$ 이다. 식 (2)에 식 (3)을 대입하면 다음과 같이 식 (4)로 정리 할 수 있다.

$$\Delta\lambda = \lambda \left(1 + \frac{n_s P_e^s n_r P_e^r}{B} \right) \epsilon \quad (4)$$

$n_s P_e^s - n_r P_e^r$ 는 각 축의 스트레인에 따른 photoelastic 상수이고, B 는 스트레인이 인가되었을 때의 복굴절 값이다. 식 (4)를 통해 peak 파장 이동은 스트레인이 증가함에 따라 비례하는 것을 알 수 있다. Fig. 5는 스트레인에 따른 peak 파장의 이동 스펙트럼을 나타낸것이다.

스트레인은 복굴절 광섬유 양 쪽을 팽팽하게 고정시키고 한 방향으로 지면과 평행하게 인가하였다. 이때, X축과 Y축의 굴절률 변화는 매우적으며, 스트레인이 광섬유에 인가될 경우 광경로의 길이(optical path length)의 변화가 주요인으로 작용하여 peak 파장이 이동하게 된다.^[6, 7]

따라서 스트레인에 대한 민감도는 ϵ 의 변화($\Delta L/L$)에 따라 peak 파장이 얼마나 이동하는지를 측정하여 구하게 된다. 스트레인을 7.5 me 가했을 때 peak 파장은 약 10.45nm 이동하였고, 각 스트레인에 따른 파장 이동 정도를 분석한 결과, 약 1.41 pm/ $\mu\epsilon$ 민감도를 가지는 것을 확인할 수 있었다. 이 결과 값은 기존에 보고된 Hi-Bi PCF의 스트레인에 대한 민감도(1.21 pm/ $\mu\epsilon$) 보다 좋은 결과이다.^[6, 7]

3.2. 구부림(Curvature) 실험

스트레인에 대한 실험 외에도 새로운 구조의 Hi-Bi PCF를 이용해 굴절률 변화를 감지하는 구부림 센서를 축에 따라 실험하였다. 새로운 구조의 Hi-Bi PCF는 Y축의 굴절률이 X축의 굴절률보다 큰 특성으로 인해 외부의 물리적 변화에 대해 축에 따라 다른 특성을 보인다. 특히 구부림에 따른 굴절률의 변화는 구부림이 가해지는 축에 따라 다른 경향성을 띄며 나타난다. 구부림 실험 역시 SLI에 복굴절 광섬유에 스트레인을 가하는 장비 대신 구부림을 가할 수 있는 장비(Fig. 6)를 추가하여 수행하였다.^[6, 7]

구부림 정도(곡률)는 식 (5)로 근사화 할 수 있다.

$$\frac{1}{r} = \frac{2h}{h^2 + L^2} \quad (5)$$

여기서 h 는 구부림을 가하는 변수이고, L 은 실험에 사용한 광섬유 길이의 1/2 을 나타낸다. r 은 구부림 정도가 변하는 원의 반지름을 의미한다. 따라서 구부림을 가하는 변수 h 값이 커질수록 r 값은 작아지고 구부림의 정도는 커지게 된다.^[8, 9]

Y축 방향으로 구부렸을 때의 변화 민감도를 확인하기 위해 인접한 peak 파장의 파장 이동 정도를 측정하였다. Fig. 7은 Y축 방향으로 구부렸을 때 peak 파장의 이동 정도를 보여주는 스펙트럼이다. 측정한 스펙트럼에서 peak 파장 간격의 변화 정도를 측정한 결과, Y축으로 구부림의 변화가 4.487 m⁻¹까지 일 때 peak 파장은 0.93 nm/m⁻¹만큼 장파장으로 이동하는 것을 알 수 있었다.

다음은 X축 방향으로 구부렸을 때의 peak 파장의 변화 민감도를 확인하였다. Fig. 8은 X축 방향으로 구부렸을 때의 결과를 보여주고 있다.

이 실험 역시 인접한 peak 파장의 파장 이동한 정도를 측정하였다. 구부림의 정도에 따른 복굴절 값을 분석한 결과, X축으로 구부림의 변화가 4.487m⁻¹까지 일 때 peak 파장은 -1.6nm/m⁻¹만큼 단파장으로 이동하는 것을 알 수 있었다.

위 실험 결과를 통해 구부림을 가했을 때 peak 파장의 이동이 광섬유의 축 방향에 따라 다르다는 것을 확인 할 수 있었다. 이러한 현상은 복굴절 광섬유의 복굴절 특성으로 설명할 수 있는데, 일반적으로 복굴절은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$B = |n_x - n_y| \quad (6)$$

n_x 는 X축에 대한 굴절률, n_y 는 Y축에 대한 굴절률을 나타내며, 여기서 X축은 fast axis이고, Y축은 slow axis이다. 굴

FIG. 6. Equipment composition for measurement of the curvature.

절률의 변화는 탄성효과(elastic effect)에 의해서 굴곡에 생기면 굴절률이 축에 따라 변하게 된다.

Fig. 9에서 보듯이 광섬유의 Y축에 구부림이 가해졌을 때는 상대적으로 n_x 에 비해 n_y 의 변화가 상대적으로 커져 복굴절이 증가하고, X축에 구부림이 가해졌을 때는 상대적으로

FIG. 7. Spectral response of Sagnac loop interferometer when the curvature is applied along with the Y axis.

FIG. 8. Spectral response of Sagnac loop interferometer when the curvature is applied along with the X axis.

FIG. 9. Interference peak shift dependence on curvature with each axes.

FIG. 10. Spectral response of Sagnac loop interferometer for temperature changes.

n_y 에 비해 n_x 의 변화가 상대적으로 커져 복굴절이 감소하게 된다.^[10, 11]

이러한 원리에 따라 식 (1)에 대입해보면 복굴절이 증가하는 경우에는 peak 파장의 간격($\Delta\lambda$)이 좁아지며 장파장 쪽으로 이동하게 되고, 복굴절이 감소하는 경우에는 peak 파장의 간격($\Delta\lambda$)이 넓어지며 단파장 쪽으로 이동하게 된다는 것을 알 수 있다.^[11]

3.3. 온도(Temperature) 실험

광자결정 광섬유는 기본적으로 실리카 한 가지 매질로 제작되기 때문에 온도변화에 영향을 받지 않으면서, 외부의 물리적인 변화정도를 측정하는 센서로서 활용 가능성을 알아보기 위해 hot plate를 이용해 열을 가하며 간섭 스펙트럼이 어떻게 변하는지 측정해 보았다.

그림 10과 같이 온도 변화에 따른 peak 파장 이동 정도를 분석한 결과, peak 파장이 거의 변하지 않음을 알 수 있다. 전체 peak의 이동 변화에 전체 온도 변화를 나누어 온도에 대한 민감도를 계산 해보았는데, 이는 약 $-0.96 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 의 peak 파장 이동 민감도를 가지는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 기존의 PANDA 형태의 복굴절 광섬유($-0.99 \text{ nm}/^\circ\text{C}$)보다 약 1000배 이상 둔감한 것이다.^[8]

따라서 온도 변화에 따라 광학적 특성변화가 작다는 것을 알 수 있었고, 스트레인 센서 및 축에 따른 구부림 센서로 활용가능성이 있다는 것을 알 수 있다.

IV. 결 론

새로운 구조의 Hi-Bi PCF를 이용해 기존의 복굴절 광섬유의 장점들을 가지면서 단점을 보완할 수 있는 광섬유 센서로 사용하였다.^[12] 우선 스트레인 실험을 하여 스트레인에 대한 민감도를 측정하였다. 그리고 용융 용착 접속기의 현미경을 이용해 광섬유의 축을 찾아, 축에 따른 구부림 실험을 진행

하고, 축에 따른 복굴절 변화율을 확인 할 수 있었다. 그리고 온도에 대한 센서 실험을 추가로 진행하여 온도 변화에 따라 광학적 특성변화가 작다는 것을 알 수 있었고, 스트레인 및 축에 따른 구부림 센서로 활용가능성이 있음을 확인 할 수 있었다.

스트레인에 대한 민감도는 $1.41 \text{ pm}/\mu\epsilon$, 구부림의 정도에 따른 복굴절의 민감도는 $0.93 \text{ nm}/\text{m}^{-1}$ (Y축), $-1.62 \text{ nm}/\text{m}^{-1}$ (X축) 이었고, 온도에 대한 민감도는 $-0.96 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 이었다.

References

1. T. Y. Cho, G. H. Kim, K. Lee, S. B. Lee, and J. M. Jeong, "Study on the fabrication process of polarization maintaining photonic crystal fibers and their optical properties," J. Opt. Soc. Korea **12**, 19-24 (2008).
2. G. H. Kim, T. Y. Cho, K. J. Hwang, K. Lee, K. S. Lee, and S. B. Lee, "Control of hollow-core photonic bandgap fiber ellipticity by induced lateral tension," Opt. Express **17**, 1268-1273 (2009).
3. N. A. Mortensen, "Effective area of photonic crystal fibers," Opt. Express **10**, 341-348 (2002).
4. F. Yu and S. Yin, *Fiber Optic Sensors* (Marcel Dekker, New York, USA, 2002).
5. R. E. Slusher and B. J. Eggleton, "Nonlinear photonic crystals," IEEE WCNC **2007**, 4435-4440 (2007).
6. W. Dong and H. Y. Tam, "Temperature-insensitive strain sensor with polarization-maintaining photonic crystal fiber based Sagnac interferometer," Appl. Phys. Lett. **90**, 151113 (2007).
7. K. Hwang, G. Kin, S. Lim, K. Lee, J. Park, and S. Lee, "A novel birefringent photonic crystal fiber and its application to curvature measurement," JJAP to be published.
8. J. Villatoro, V. Finazzi, V. P. Minkovich, V. Pruneri, and G. Badenes, "Temperature-insensitive photonic crystal fiber interferometer for absolute strain sensing," Appl. Phys. Lett. **91**, 091109 (2007).
9. O. Frazao, J. M. Baptista, J. L. Santos, and P. Roy, "Curvature sensor using a highly birefringent photonic crystal fiber with two asymmetric hole regions in a Sagnac interferometer," Appl. Opt. **47**, 2520-2523 (2008).
10. E. Suhir, "Elastic stability, free vibrations, and bending of optical glass fibers: effect of the nonlinear stress-strain relationship," Appl. Opt. **31**, 5080-5085 (1992).
11. T. G. Giallolenzi, J. A. Bucaro, A. Dandridge, G. H. Sigel, J. H. Cole, S. C. Rashleigh, and R. G. Priest, "Optical fiber sensor technology," IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques **MITT-30**, 626-665 (1982).
12. A. Ferrando, E. Silvestre, J. Mirret, J. Monsoriu, M. Andres, and P. Russell, "Designing a photonic crystal fiber with flattened chromatic dispersion," Electron. Lett. **35**, 325-327 (1999).