새로운 구조의 큰 복 굴절을 가진 광자결정 광섬유의 제작에 관한 연구

마경식^{1,2} · 김길환¹ · 황규진¹ · 엄성훈¹ · 이관일¹ · 정제명² · 이상배^{1†}

¹한국과학기술연구원 포토닉스 센서 시스템 센터
Ⓢ 130-791 서울특별시 성북구 하월곡동 39-1번지

²한양대학교 디지털 시스템 디자인 및 광통신 연구실
Ⓢ 133-791 서울특별시 성동구 행당동 17

(2010년 7월 28일 받음, 2010년 10월 25일 수정본 받음, 2010년 11월 1일 게재 확정)

Stack-and-draw 방법을 사용하여 새로운 구조의 높은 복굴절을 가진 광자 결정 광섬유(highly birefringent photonic crystal fiber, Hi-Bi PCF)를 제작하였다. 제작된 광섬유는 공기구멍으로 구성된 클래딩 외부에 큰 공기구멍을 추가함으로써 광섬유 인출 과정 중에 코어와 공기층 클래딩 영역에 비대칭적인 압력이 인가되어 코어가 타원형으로 변형되어 복굴절이 유도된다. 제작된 Hi-Bi PCF의 복굴절은 1550 nm에서 2.29×10^{-4} 로 측정되었다.

Study on the Novel Fabrication Method of Highly Birefringent Photonic Crystal Fiber

Kyung-Sik Ma^{1,2}, Gil-Hwan Kim¹, Kyu-Jin Hwang¹, Sung-Hoon Eom¹, Kwanil Lee¹, Je-Myung Jung²,
and Sang-Bae Lee^{1†}

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

²Digital System Design & Optical Communications Lab, Hanyang University,
17 Haengdang-dong, Seongbuk-gu, Seoul 133-791, Korea

(Received July 28, 2010; Revised manuscript October 25, 2010; Accepted November 1, 2010)

We fabricate highly birefringent photonic crystal fiber with new structure using a stack and draw method. Fabricated fiber has two big air holes, one at each side of the outside air cladding region, leading to core ellipticity during the drawing process. Birefringence of the fabricated Hi-Bi PCF is measured to be 2.29×10^{-4} (at 1550 nm).

Keywords: Photonic crystal Fiber, Birefringence, PDL, DGD

OCIS codes: (060.0060) Fiber optics and optical communications; (060.2370) Fiber optics sensors; (060.4005) Microstructured fibers

I. 서 론

광섬유 기술은 비약적인 발전을 거듭하였고, 센싱과 통신 시스템분야에서 편광유지를 위한 높은 복굴절 특성을 가진 광섬유 또한 발전을 거듭하였다. 특히 크기가 작고 가벼우며 거의 모든 종류의 물리량을 측정할 수 있고, fiber grating 소자, 복 굴절 특성을 갖는 광섬유는 전자파 장애에 영향을 받지 않으며, 광 손실이 적고 정보전송 대역폭이 넓어 많은 수

의 센서를 광섬유 한 가닥에 연결하여 측정할 수 있다는 점 등 많은 장점들이 있어 꾸준한 연구가 진행되고 있다^[1-2]. 복 굴절 특성을 갖는 구조의 광섬유는 코어의 축에 따라 굴절률이 다르므로 코어로 도파되는 빛의 편광 특성에 영향을 준다. 복굴절을 갖는 광섬유를 이용한 광 센서는 이러한 특성을 이용하며, 광자결정 광섬유(Photonic Crystal Fiber; PCF)가 보고되기 전에는 기존의 PANDA형태의 복굴절 광섬유를 이용한 광센서로 다양한 물리량을 측정하는 연구가 활발히

[†]E-mail: sblee@kist.re.kr

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

진행되어왔다. 하지만 기존의 복굴절을 갖는 광섬유는 온도 변화에 따른 굴절률 변화가 각기 다른 두 가지 이상의 매질을 이용해 제작되었기 때문에, 온도에 무관한 독립적인 물리량 하나만 측정 하는 데는 어려움이 있다. PCF 는 기존의 광섬유와 다른 구조로써 클래딩 영역에 공기구멍들이 주기적으로 배열되어 있는 구조로 클래딩 영역의 공기구멍 크기 등을 조절하여 코어와 클래딩의 유효 굴절률 차이를 조절 할 수 있어, 기존의 단일모드 광섬유로는 구현하기 어려운 Endless 단일 모드 전송^[3], 넓은 코어 면적^[4], 저 분산 및 큰 비 선형 효과^[5], 큰 복굴절^[6]과 같은 특성들을 쉽게 얻을 수 있다. 특히, 복굴절 특성을 기존의 광섬유 보다 쉽게 얻을 수 있다. 일반 편광유지 광섬유는 MCVD(Modified Chemical Vapor Deposition)법으로 모재를 제조할 경우, 클래딩 증착후 코어 양쪽으로 클래딩을 에칭(etching)한 후 콜랩스(collapse)하여 나비넥타이형 편광유지 광섬유를 제작할 수 있다. VAD(Vapor Axial Deposition)법의 경우, 모재를 제작하고 제작된 모재 코어 양쪽에 드릴링을 하여 응력 부여재를 삽입한 후 인출을 하는 방법을 이용하여 복굴절 특성을 갖도록 제작한다. 반면에 PCF에서는 MCVD 같은 위험한 화학반응과정이나 추가해야 하는 매질 없이 간단히 공기구멍의 직경을 조절하거나, 위치를 조정하여 복굴절 특성을 얻을 수 있다^[6]. 또한 여러가지 매질로 제작된 기존의 복굴절 광섬유에 비해 Hi-Bi PCF는 한가지 매질로 만들어졌기 때문에 온도변화에 따른 광학적 특성변화가 기존의 복굴절 광섬유보다 안정적이고 둔감한 특성을 가진다. 따라서 온도에 영향을 받지 않으면서 독립적으로 물리적 환경 변화 요소를 측정 할 수 있다는 장점이 있어 많은 연구가 진행되고 있다^[7]. 본 논문에서는 solid 코어 형태의 PCF가 복굴절 특성을 가질 수 있도록 새로운 방식의 구조를 제안하고, 제작하였다. Solid 코어 PCF는 공기층 범위 밖의 클래딩 부분에 큰 공기구멍을 추가함으로써 광섬유 인출 과정 중에 코어와 공기층 클래딩영역에 비대칭적인 압력을 가해지게 함으로써 결과적으로 타원형의 코어를 형성하게 되어 큰 복굴절을 갖도록 하는 방식으로 제작하였다.

II. 제안된 구조의 설계

PCF 구조에서 복굴절을 갖게 하기 위해서는 코어 두 축의 유효 굴절률 차이를 유도 해야 한다. 기존의 Hi-Bi PCF에서는 코어 주변의 공기구멍의 직경을 두 축에 따라 다르게 하여 코어가 느끼는 유효 굴절률이 축에 따라 다르게 하는 것과^[9] 공기구멍의 위치를 조정하여 타원형태의 코어를 갖게 하는 방식으로 제작되었다^[10]. 그림 1에서 제안한 Hi-Bi PCF는 두 축에 따라 공기구멍의 직경을 조절하거나 위치 조정을 이용한 기존 광섬유 보다 상대적으로 쉽게 복굴절 특성을 갖게 할 수 있는 구조의 모식도 이다.

실리카 클래딩 영역에 위치하고 있는 큰 공기구멍들은 광섬유 인출시 부풀면서 큰 공기구멍에 근접해 있는 공기층 면으로 압력을 가하게 된다. 이때 가해지는 압력의 정도에 따라 복굴절 인가 정도가 달라진다. 큰 공기구멍이 위치하고 있

FIG. 1. Desired cross section of Hi-Bi PCF.

는 면과 없는 면의 코어와 공기층 클래딩 영역은 비대칭적인 압력을 받게 된다. 이로 인해 상대적으로 압력을 덜 받은 Y축 방향으로 타원형의 코어를 형성 시킨다. 복굴절은 편광 모드 X축(Fast axis)과 Y(slow axis)축의 유효 굴절률의 차이이다. 타원형의 코어는 자연히 두 축의 유효 굴절률이 다르게 됨으로써 제작된 Hi-Bi PCF는 복굴절을 갖게 된다. 이로 인하여 광섬유 인출시 큰 공기구멍들이 코어에 가하는 압력 정도에 따라 코어의 타원형 비율이 결정되고, 복굴절 값을 결정할 수 있다.

III. 큰 복굴절을 가진 PCF의 제작

PCF는 공기층이 존재하는 구조이기 때문에 기존의 광섬유 인출과는 다른 방식으로 제작을 한다. PCF를 제작하는 방법으로는 stack-and-draw, 천공(drilling), 사출 성형 등이 있으며 본 논문에서는 stack-and-draw 방법을 이용하여 PCF 제작을 진행하였다^[8]. 그림 2는 Hi-Bi PCF의 제작과정을 간단하게 도식화 한 것이다. PCF 제작과정은 3단계로 나뉘어 설명할 수 있다. 첫 번째는 적층방법을 이용한 모재 제작 단계, 두 번째는 제작한 모재를 이용한 1차 인출 단계, 마지막으로 광섬유 2차 인출 단계로 나눌 수 있다.

첫 번째 단계인 모재 제작과정은 우선 실리카 막대를 1 mm로 인출하고, 실리카 튜브를 1 mm 와 2.6 mm로 인출을 한다. 2.6 mm 실리카 튜브는 큰 공기구멍을 위한 모세관(capillary)이다. 인출 한 1 mm 실리카 튜브를 이용하여 육각 구조로 3층로 적층을 한 후, 8층까지 실리카 막대로 쌓는다. 그리고 큰 공기구멍을 위한 2.6 mm. 실리카 튜브를 공기층 클래딩 영역의 육각 구조 면 방향으로 바로 옆에 위치하도록 실리카 막대와 교체하여 모재(1차 모재)를 완성한다. 완성된 모재는 19×25 mm 직경의 실리카 튜브에 삽입하여 제작과정의 2단계인 1차 인출을 실시한다. 바로 2차 광섬유 인출을 실시 할 경우에는 틈새 공기구멍(interstitial hole)들이 존재할 수 있기

FIG. 2. Fabrication process of Hi-Bi PCF.

때문에 틈새 공기구멍들을 제거하고 좀더 쉽게 d/λ 값을 조절하기 위해 2단계의 인출 과정을 거친다.

1차 인출은 적층된 모재가 삽입된 튜브를 약 2000℃의 전기로에서 녹여 약 2 mm의 모재(2차 모재)로 인출 하는 과정이다. 1차 인출의 목표는 디자인한 구조로 공기층을 살려 2차 인출을 위한 모재를 제작하기 위한 것이기 때문에 공기층이 존재 할 수 있는 조건을 만족하도록 전기로 온도와 튜브에 연결된 펌프의 압력 조절이 중요하다. 그림 3(a)는 설명한 적층방법으로 제작한 1차 모재의 단면사진이고, 3(b)는 1차 인출 한 2차 모재의 단면 사진이다.

1차 인출 된 모재는 다시 2×4 mm실리카 튜브에 삽입하여 마지막으로 광섬유 2차 인출을 실시한다. 1차 인출된 모재의 큰 공기구멍의 크기는 328.9 μm, 작은 공기구멍의 크기는 28.6 μm 이다. 광섬유 인출은 복굴절 특성을 가지면서 단일 모드 도파를 만족하기 위한 공기구멍의 직경, 간격 등을 확인하며 실시하여야 한다. 이러한 조건을 만족하기 위해서는 인출 과정 중에 전기로의 온도, 광섬유 인장 속도, 모재에 걸려있는 압력의 세밀한 조절이 필요하다. 2×4 mm의 실리카 튜브의 삽입과 인출 과정 중의 세밀한 조절로 인해 1차 인출에서의 공기구멍과 2차 인출에서의 공기구멍의 비율이 변하게 된다.

특히 본 논문에서 제안한 구조의 PCF는 큰 공기구멍의 팽창 정도에 따라 코어의 타원형 비율 즉 복굴절 값이 결정되기 때문에 온도, 압력 조절이 중요하다. 모재의 균일한 공기층을 유지하기 위하여 온도를 약 2000℃에서 약 1800℃까지 단계적으로 낮추고, feeding과 caption의 속도를 높인다. 그리고 공기층 클래딩 영역 밖에 위치하고 있는 공기구멍이 충분히 부풀어 올라 코어에 비대칭적인 압력을 가할 수 있도록 압력 조절을 해준다. 그림 4는 2차 인출 과정을 거쳐 제작한 Hi-Bi PCF의 SEM(Scanning Electron Microscope) 사진이고,

(a)

(b)

FIG. 3. Cross section of the stacked capillaries (a) and the first drawn perform (b).

표 1을 통해 코어의 X축과 Y축의 직경이 다른 것을 확인할 수 있다.

FIG. 4. SEM image of the fabricated Hi-Bi PCF.

TABLE 1. Physical properties of the fabricated Hi-Bi PCF

광섬유의 직경 [μm]	119.81 $\pm$ 1
코어의 직경(X축, Y축) [μm]	3.31/4.87
큰 공기구멍의 직경(d_1) [μm]	11.7
작은 공기구멍의 직경(d_2) [μm]	0.73
공기구멍간의 거리(λ) [μm]	2.41
공기층이 차지하는 비율 (d_1/λ)	0.302

FIG. 5. Normalized transmission spectrum of fabricated Hi-Bi PCF.

IV. 큰 복굴절을 가진 PCF의 특성

제작한 Hi-Bi PCF의 기본적인 광학적 특성, 광투과 특성, 복굴절 양을 측정하기 위한 DGD(Differential Group Delay) 측정 등을 하였다.

첫번째로 전송스펙트럼의 측정을 위해 Hi-Bi PCF 2 m 양단에 단일 모드 광섬유를 각각 용융 접속 하였고, supercontinuum 광원과 OSA에 연결하여 광투과 특성을 측정하였다. 그림 5는 측정된 그래프이다. 제작한 광섬유의 코어 직경이 작기 때문에 기존의 단일모드 광섬유와 용융 접속과정에서 생

는 MFD(Mode Field Diameter, 단일 모드 광섬유 약 10 μm) 오차에 의한 손실이 크기 때문에 전송 스펙트럼을 보면 전송 손실이 약 10 dB정도 측정되는 것을 확인할 수 있다. 그리고 1050 nm 대역의 리플들은 supercontinuum 광원 자체 펌핑에 의해 발생한 것이다.

그리고 PDL과 DGD는 Tunable 레이저(Ando AQ4321D)와 편광 측정기(Tektronix PAT 9000B)를 이용하여 1520 nm에서 1620 nm 파장까지 0.5 nm 간격으로 측정하였다. 복굴절이 인가된 PCF와 복굴절이 인가되지 않은 PCF를 비교하기 위해서 두가지 PCF의 PDL과 DGD를 각각 측정해 보았다. 그림 6은 복굴절이 인가되지 않은 상태의 PCF의 PDL과 DGD를 같은 길이로 측정하였다. 측정된 PDL은 1550 nm에서 0.098 dB이었고, DGD는 1550 nm에서 0.028 ps/nm 이었다. 반면에 복굴절이 인가된 상태의 PCF에서 측정된 PDL은 그림 7에서와 같이 1550 nm에서 0.105 dB이었고, DGD는 1550 nm에서 약 2.18 ps/nm 이었다.

그림 6의 복굴절이 인가되지 않은 광섬유와 그림 7의 제작한 Hi-Bi PCF를 비교했을 때 PDL의 차이는 거의 없고 DGD의 값이 커진 것으로 제작한 광섬유에 복굴절이 인가됨을 알 수 있다. 이 결과로써 공기구멍으로 이루어진 클래딩 영역 밖의 두 홀은 복굴절 발생에 영향을 주지 않으며, 단지 코어가 타원형이 됨으로써 복굴절이 인가됨을 확인할 수 있다. 그림 8의 기존의 상용화된 PANDA 광섬유도 같은 길이로 측정 하였을 때 PDL(약 0.06 dB), DGD(약 2.97 ps/nm)와 비교해 보았을 때 PDL은 약간 크고 DGD는 작은 것을 알 수 있다. PDL이 약간 큰 이유는 PCF 구조상 기존의 광섬유 보다 균일도가 떨어지기 때문이다. 그리고 DGD가 작은 것을 통해 기존 PANDA 광섬유 보다는 복굴절 값이 작을 것이라는 사실을 유추해 볼 수 있다.

제작한 Hi-Bi PCF의 복굴절 값을 구하기 위해 Sagnac Loop Interferometer(SLI)를 구성하였다.

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

FIG. 6. (a) PDL (b) DGD of fabricated PCF with no birefringence. The inset is the cross section of the measured PCF.

FIG. 7. (a) PDL (b) DGD of fabricated Hi-Bi PCF. The inset is the cross section of the measured Hi-Bi PCF.

FIG. 8. (a) PDL (b) DGD of conventional PANDA fiber. The inset is the cross section of the measured PANDA fiber.

복굴절 값은 수식 1을 통해 대략적인 값을 구할 수 있다^[7]. Δn 는 간섭무늬 간격이고, λ 는 중심파장 L 은 복 굴절 광섬유의 길이이다.

그림 9는 SLI를 통해 측정한 간섭 스펙트럼이다. 측정에 사용된 Hi-Bi PCF 길이는 3.5 m이고, 간섭 스펙트럼을 통해

측정한 간섭무늬 측정된 간섭무늬 간격 $\Delta \lambda$ 는 중심 파장 1550 nm 에서 3 nm 이었다. 수식 1을 통해 구한 복굴절 값은 중심파장 1550 nm 에서 약 2.29×10^{-4} 이었다. 그림 10은 제작한 Hi-Bi PCF의 파장에 따른 복굴절 값을 표시한 것이다. 그림을 통해 복굴절은 파장 의존성이 있다는 것을 알 수 있다.

FIG. 9. Interference spectrum of fabricated Hi-Bi PCF.

FIG. 10. Birefringence as function of the wavelength for fabricated Hi-Bi PCF.

그리고 DGD를 통해 예상한대로, 제작한 PCF의 복굴절 값은 기존 PANDA 광섬유 복굴절 값(1550 nm에서 4.45×10^{-4})보다는 작았다. 하지만, 일반 단일 모드 광섬유 복굴절 값($\sim 10^{-6}$)보다는 훨씬 크다는 것을 알 수 있다. 그러나, 본 논문에서의 Hi-Bi PCF는 모재 내부의 negative 압력 조절을 통하여 더 큰 복굴절을 인가하는 것이 가능하다.

V. 결 론

PCF형태의 단일모드 광섬유의 복굴절 광섬유의 장점들을 가지면서 단점을 보완할 수 있는 새로운 구조의 Hi-Bi PCF를 제안하고 제작하였다. 제안한 구조는 단면을 보았을 때 공기층 클래딩 영역 밖에 두 개의 큰 공기구멍이 위치하는 형태이며, 클래딩 영역에 위치한 큰 공기구멍을 광섬유 인출시 코어와 공기층 클래딩 영역에 비대칭적인 압력을 줌으로써 광섬유 코어가 타원이 되도록 하여 복굴절을 갖게 하였다. 제작한 광섬유의 편광 특성 및 간섭 전송 특성을 통해 제작한 광섬유는 2.29×10^{-4} 의 복굴절을 갖는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 두 개의 큰 홀에 액체^[11], 가스^[12], 금속^[13], 굴절

률이 다른 rod^[14] 등의 삽입을 통한 센서구현으로 많은 응용이 가능할 것으로 사료된다

References

1. T. G. Giallorenzi, J. A. Bucaro, A. Dandridge, and G. H. Sigel, "Optical fiber sensor technology," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* **MTT-30**, 4 (1982).
2. N. A. Mortensen, "Effective area of photonic crystal fibers," *Opt. Express* **10**, 341-348 (2002).
3. T. Birks, J. Knight, and P. Russell, "Endlessly single-mode photonic crystal fiber," *Opt. Lett.* **22**, 961-963 (1997).
4. J. C. Knight, T. A. Birks, R. F. Cregan, P. Russell, and J. P. Sandro, "Large mode area photonic crystal fiber," *Electron. Lett.* **34**, 1347-1348 (1998).
5. 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).
6. A. Ortigosa-Blanch, J. C. Knight, W. J. Wadsworth, J. Arriaga, B. J. Mangan, T. A. Birks, and P. Russell, "Highly birefringent photonic crystal fiber," *Opt. Lett.* **25**, 1325-1327 (2000).
7. D. H. Kim and J. U. Kang, "Sagnac loop interferometer based on polarization maintaining photonic crystal fiber with reduced temperature sensitivity," *Opt. Express* **12**, 4490-4495 (2004).
8. 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).
9. K. Suzuki, H. Kubota, S. Kawanishi, M. Tanaka, and M. Fujita, "Optical properties of a low-loss polarization-maintaining photonic crystal fiber," *Opt. Express* **9**, 676-680 (2001).
10. P. R. Chaudhuri, V. Paulose, C. Zhao, and C. Lu, "Near-elliptic core polarization-maintaining photonic crystal fiber: modeling birefringence characteristics and realization," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16**, 1301-1303 (2004).
11. T. R. Woliński, A. Czapla, S. Ertman, and M. Tefelska, "Tunable highly birefringent solid-core photonic liquid crystal fibers," *Opt. Quant. Electron.* **39**, 1021-1032 (2007).
12. S.-G. Li and S.-Y. Liu, "Study of the sensitivity of gas sensing by use of index-guiding photonic crystal fibers," *Appl. Opt.* **46**, 5183-5188 (2007).
13. G. Chesini, C. M. B. Cordeiro, C. J. S. de Matos, M. Fokine, I. C. S. Carvalho, and J. C. Knight, "All-fiber devices based on photonic crystal fibers with integrated electrodes," *Opt. Express* **17**, 1660-1665 (2009).
14. A. C. Sodre Jr., F. Luan, C. M. B. Cordeiro, A. K. George, and J. C. Knight, "Hybrid photonic crystal fiber," *Opt. Express* **14**, 926-931 (2006).