

모세관 적층 방법에 의한 광자결정 광섬유의 제작

조형수[†] · 정해양

경희대학교 물리학과

Ⓣ 446-701 경기도 용인시 기흥구 서천동 1번지

김길환 · 고동연 · 이상배

한국과학기술연구원 광기술 연구센터

Ⓣ 136-791 서울특별시 성북구 하월곡동 39-1번지

(2007년 1월 3일 받음, 2007년 2월 20일 수정본 받음)

실리카 코어 주변에 주기적인 공기층을 가지는 광자결정 광섬유는 넓은 파장 영역을 통한 단일모드의 구현 또는 1옥타브 이상의 광대역 연속광 발생과 같은 기존의 광섬유로는 불가능한 독특한 특성을 갖도록 유연하게 설계할 수 있다. 광자결정 광섬유의 설계에 사용되는 변수로는 공기층의 직경과 간격이 있으며 이러한 변수의 조절을 위한 공정을 도입하여 넓은 파장영역을 통한 단일모드 구현과 높은 비선형 특성을 가지는 광자결정 광섬유를 각각 제작 하였고 수치적 계산과 실험을 통해 그 특성을 살펴보았다.

주제어 : Photonic crystal fiber, Nonlinear pcf, Fiber fabrication, MPB

I 서 론

광자결정 광섬유는 도파원리에 따라 전반사 원리를 따르는 형태와 광 밴드갭 효과에 의한 형태 둘로 구분된다. 그 중 전반사 원리에 의해 빛이 도파되는 광자결정 광섬유의 구조는 실리카 코어 주변에 공기층이 주기적으로 분포되어 있거나 혼재해 있는 형태가 일반적이며 고출력 광전송, OCT(optical coherence tomography)^[1] 등 다양한 분야에 적용되고 있다. 코어 주변에 분포된 원형의 공기층이 주기적인 경우 공기층의 직경(d)과 공기층 간의 거리(Λ), 두 가지 변수를 통해 공기층이 차지하는 비율을 수치화 할 수 있다. 공기층이 차지하는 비율(air filling fraction)은 공기층의 직경을 공기층 간의 거리로 나눈 값(d/Λ)으로 수치화 되며 이 값을 통해 클래딩의 유효 굴절률 및 정규화 주파수 등을 결정할 수 있다^[2]. 기존의 광섬유는 코어와 클래딩의 굴절률 차이가 2% 이내 이지만 광자결정 광섬유는 공기층과 실리카의 굴절률이 각각 1과 1.45로 굴절률 차이가 훨씬 크다. 따라서 공기층의 분포를 조절하여 얻을 수 있는 클래딩의 유효 굴절률의 변화 폭이 넓어 기존의 광섬유로는 구현하기 힘든 특성들을 쉽게 얻을 수 있으며^[3,4] 공기층 분포의 조절을 통해 구현 가능하다. 클래딩 영역의 공기층이 차지하는 비율을 낮추면 유효 굴절률의 차이가 작아지고 넓은 단일모드 동작 파장 또는 큰 면적의 코어를 얻을 수 있다.^[7,8] 넓은 코어 면적을 가질 경우 결합 효율을 높일 수 있고 큰 비선형 문턱 값을 갖게 되어 비선형 현상에 의한 신호의 왜곡을 줄일 수 있는 장점이 있다. 반대로 공기층의 비율을 높이면 유효 굴절률의 차

이가 커져 개구수가 증가하고^[5], 이로 인해 광자결정 광섬유는 기존의 광섬유 보다 작은 영역을 통해 높은 파워 밀도의 빛이 집속 되는 것이 가능하다. 단위 면적당 빛의 세기와 비례하는 비선형 효과와 작은 코어 면적을 갖는 광자결정 광섬유의 특이한 도파로 분산특성이 결합되면 추가적인 비선형 현상을 더할 수 있다. 일반적으로 광섬유가 갖는 영 분산 파장은 광통신 밴드에 존재하나 작은 코어 면적을 갖는 광자결정 광섬유의 영 분산 파장은 그 보다 짧은 파장 영역으로 천이될 수 있다.^[6] 광섬유의 영 분산 파장과 레이저 광원의 중심파장이 일치 하는 Ti:Sapphire 펄드 초 레이저를 이용하면 가장 효과적인 초 광대역 연속광(supercontinuum)을 얻을 수 있다.

광자결정 광섬유의 제작 방법으로는 모세관 적층, 사출, 천공 등이 있으며 본 논문에서는 많은 수의 균일한 공기층을 형성하기에 용이한 모세관 적층 방법을 이용하여 광자결정 광섬유가 제작된 과정을 기술 하였다.^[9,10] 또한 작은 코어 면적을 갖도록 하기 위해 추가적인 공정을 도입 하였다. 제작 과정에 따른 광자결정 광섬유는 각각 넓은 코어 면적을 가지며 넓은 파장영역에서 단일모드로 동작하는 형태와 작은 코어 면적을 갖고 큰 비선형 계수 값을 갖는 형태 두 가지 이다. 실험적으로 근접장 이미지를 통해 간접적인 확인을 하였고 측정된 데이터를 수치계산에 의한 결과와 비교 하였다.

II. 광자결정 광섬유의 제작

광자결정 광섬유의 제작에 사용된 매질은 가시광선부터 근적외선 영역까지 우수한 투과 특성이 있어 낮은 전송 손실로 장거리 전송이 가능한 실리카 유리를 사용하였다. 실리카 유

[†] E-mail: chohyungsu@gmail.com

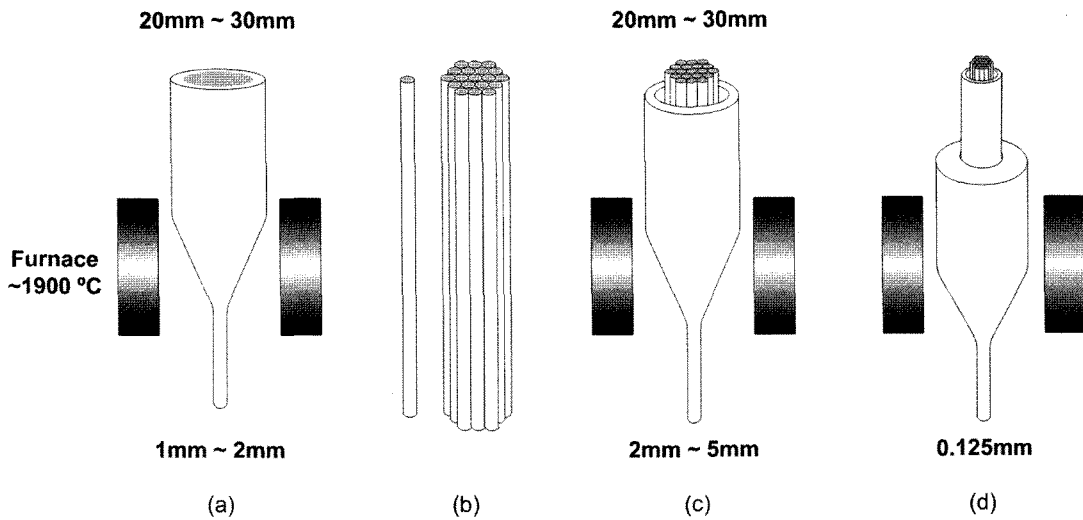


그림 1. 광자결정 광섬유의 제작 공정 순서도.

리는 비선형 효과가 작은 매질로 알려져 있지만 낮은 손실 특성으로 인해 높은 파워 밀도를 유지할 수 있어 큰 비선형 효과를 갖게 할 수 있다.^[6] 실리카 튜브와 봉(rod)을 사용한 모세관 적층 방법에 의한 광자결정 광섬유의 제작 순서는 그림 1과 같다.

외경이 20mm-30mm인 석영 튜브를 1800°C 정도로 가열된 전기로를 사용하여 1-2mm의 외경을 갖도록 인장한 후(a) 인장된 수십 또는 수백 개의 모세관을 제작하고자 하는 광자결정 광섬유의 공기층 형태로 적층한다(b). 적층된 공기층의 구조는 삼각형의 단위구조가 반복되는 형태이며 공기층의 밀도를 나타내는 변수는 공기층의 직경을 공기층 간의 간격으로 나눈 값(air filling fraction)으로 (a)과정을 통해 인장된 모세관의 두께에 의해 결정된다. 광섬유의 코어를 형성하기 위해 모세관을 실리카 또는 도핑된 실리카 봉으로 대체하였다. 적층된 모세관은 다시 석영 튜브에 삽입하여 전기로를 통해 인장하면 최종의 광섬유 형태를 얻을 수 있다(c). 더 작은 구조의 공기층을 얻기 위해서는 모세관 외곽을 둘러싸는 튜브의 외경이 더 큰 것을 사용하거나 매우 작은 외경을 갖는 모세관을 적층해야 하지만 전기로의 한계 또는 작은 모세관을 손으로 다루기 어려운 단점이 있다. 이때 (c) 단계에서 최종적인 광섬유의 외경을 갖도록 인장하기 전에 2-5mm 정도로 사전 인장하고 튜브에 삽입하여 최종 광섬유의 형태로 인장하면 공기층의 비율은 그대로 유지한 채 작은 크기의 공기층을 얻을 수 있다. 여러 단계의 공정을 거치면서 공기층은 예측하기 힘들게 변화하며 균일하지 못한 형태를 띠는데 모재의 형태별로 그에 적합한 전기로의 온도 및 인장속도에 차이가 있으며 최적의 인장 조건을 찾기 위해서는 미세한 조절이 필요하다. 특히 적층된 모세관과 외곽의 튜브 사이의 틈새는 실리카가 용융되어 채워지기 어려우며 그림 2(a)와 같이 나타난다. 그림 2(b)는 약 2000°C의 인장 온도로부터 약 1800°C 까지 점차 온도를 낮추며 그에 따른 적합한

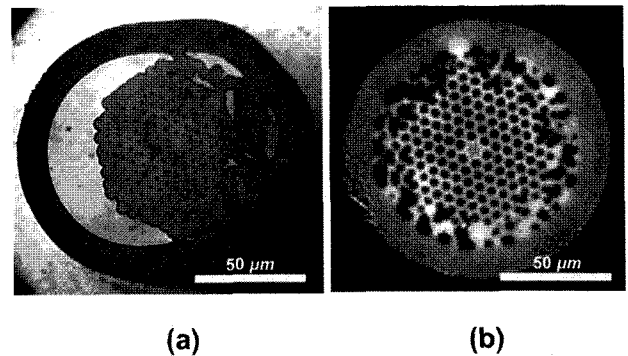


그림 2. 온도 및 속도 조건에 의한 광자결정 광섬유 단면의 변화.

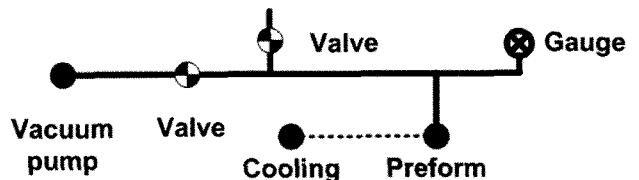


그림 3. 내부 기압 조절을 위한 장치의 구성.

인장 속도를 통해 변화된 광섬유의 단면을 나타낸다.

전기로의 온도와 인장속도를 조절하여 주기적인 공기층 형태는 얻을 수 있었지만 외곽의 튜브와 모세관 사이의 틈새는 여전히 불균일한데, 이러한 불균일한 틈새는 모재 내부에 적절한 진공도를 갖도록 하면 제거할 수 있으며, 진공도 조절을 위한 내부기압 조절장치의 구성은 다음 그림 3과 같다. 이 장치를 사용하여 인장된 광섬유 및 사전 인장된 모재는 그림 4와 같다. 본 실험에서는 5%미만의 진공도에서 쉽게 불균일한 틈새가 제거되었으며 진공도가 너무 클 경우 그림 4(b)와 같이 광섬유의 외곽이 심하게 변형될 수 있다. 또한 모세관의 상부를 밀폐시켜 모재 내부의 기압과 모세관 내부의 기압을 다르게 하는 선택적인 방법을 통해 튜브와 모세관

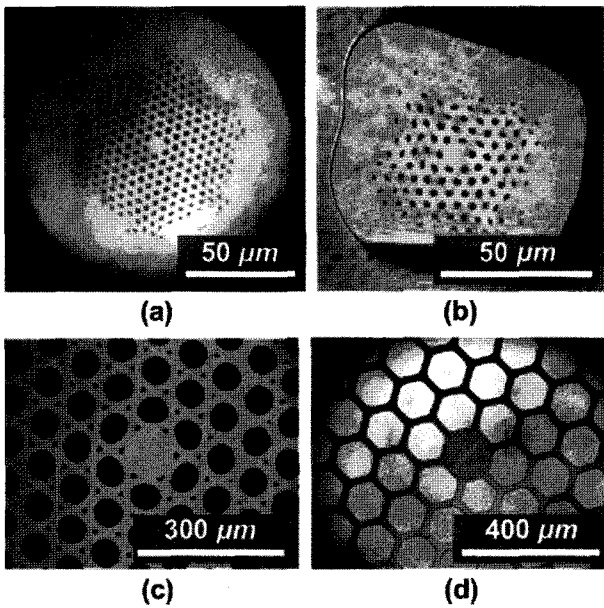


그림 4. 내부 기압 조절을 통한 광자결정 광섬유의 단면(a),(b)과 사전 인장된 모재의 단면(c),(d)사진.

의 사이의 틈새를 제거하고 모세관 내부의 공기층을 확장할 수 있었다. 모재 내부의 낮은 기압이 각 공기틈새에 고르게 영향을 미치도록 모세관 고정을 위한 열 용융 접착은 최소화 하였다. 그림 4(c)와 그림 4(d)는 그림 1의 (c)단계에서 작은 코어를 갖도록 하기 위해 최종의 광섬유로 인장하지 않고 각각 모세관 상부를 개방한 경우와 밀폐시킨 경우 3mm 직경으로 사전 인장된 각 모재의 단면 사진이다. 이렇게 사전 인장된 모재를 그림 1의 (d) 과정을 통해 15mm 정도의 외경과 3mm 보다 조금 큰 내경을 갖는 자켓 튜브에 삽입하여 최종의 광섬유의 형태로 인장한다.

III. 제작된 광자결정 광섬유의 특성

본 연구 그룹에서 제작된 두 가지 형태의 광자결정 광섬유의 전자 현미경 사진은 그림 5(광섬유1), 그림 6(광섬유2)와 같다.

그림 5의 광섬유1은 $125 \pm 2 \mu\text{m}$ 의 외경을 가지며 공기층의 직경(d)과 공기층 간의 거리(Λ)는 중심으로부터 멀어질수록 점차 작아지는데 각각의 평균값은 $1.43 \mu\text{m}$ 와 $5.08 \mu\text{m}$ 이다. 이 평균값을 이용하여 계산된 도파 모드의 분산 곡선과 정규화 된 광세기 분포는 그림 7과 같다. 계산은 MIT 대학의 Photonic Crystal 연구 그룹에서 배포한 MPB(MIT Photonic Band)라는 UNIX 기반의 병렬 컴퓨팅이 가능한 소프트웨어이며, 이 프로그램은 푸리에 변환관계에 가장 충실한 평면파 전개 방법을 기반으로 제작되었다는 특징을 갖고 있다.^[11]

계산된 모델의 분산곡선은 400nm부터 1800nm의 파장 영역에서 단일 모드로 나타나고 있으며 광섬유의 단일 모드 여부를 간접적으로 확인하기 위한 실험으로 근접장 이미지를

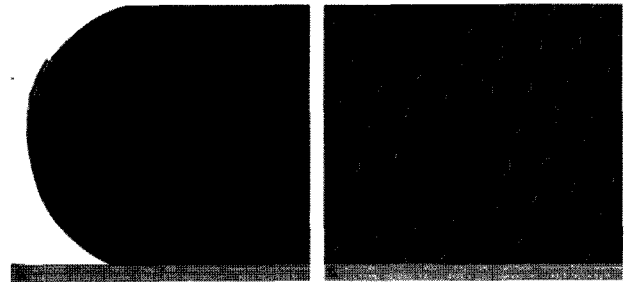


그림 5. 광섬유 1의 전자 현미경 사진.
($d = 1.43 \mu\text{m}$, $\Lambda = 5.08 \mu\text{m}$)

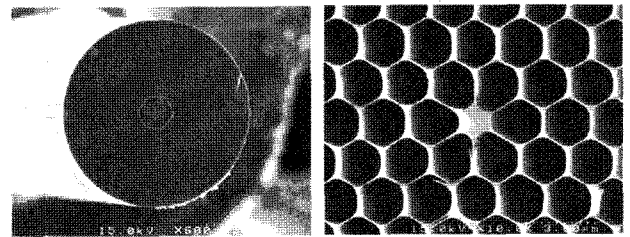


그림 6. 광섬유 2의 전자 현미경 사진.
($d = 1.18 \mu\text{m}$, $\Lambda = 1.21 \mu\text{m}$)

얻었다. 광원은 532nm와 1550nm의 중심파장을 가지는 레이저 광원을 사용하였으며 각 광원에 대한 출력 단에서의 근접장 이미지는 silicon CCD 카메라와 vidicon 카메라를 사용하여 촬영하였다. 촬영된 이미지를 통해 볼 때 코어 영역에 가우시안에 가까운 분포를 띠고 있으며 각각 그림 8(a),(b)와 같다. 또한 계산을 통해 얻어낸 각 파장에 대한 모드필드 직경은 그림 9와 같이 나타난다.

광섬유1과 같은 삼각형 단위구조의 공기층의 형태를 유지하며 작은 코어 크기를 갖도록 하면 큰 비선형 효과를 얻을 수 있다. 그러나 빛의 파장에 버금가는 직경 1~2 μm 가량의 코어를 갖도록 하려면 그에 따른 공기층의 직경은 1 μm 미만의 크기를 갖게 되며 길이 방향을 따라 균일한 공기층 분포를 얻기 어려운 단점이 있다. 게다가 코어를 따라 도파되는 모드는 단일 모드이나 손실이 커지게 된다.^[12] 반면 공기층간의 간격은 일정하고 공기층의 직경이 커지도록 하면 코어에 고차 모드가 존재할 개연성이 커지지만 빛을 효과적으로 가두어 파워 밀도를 증가시킬 수 있는 장점이 있다. 공기층의 직경을 확장하기 위해 모세관 상부를 밀폐시키고 인장한 경우 광섬유의 단면은 그림 6와 같다. 그림 6의 광섬유 2는 125 μm 의 외경을 가지며 공기층의 직경(d)과 공기층 간의 거리(Λ)는 각각 평균 $1.18 \mu\text{m}$ 와 $1.21 \mu\text{m}$ 로 측정 되었다. 계산을 통해 얻어낸 도파 모드의 분산 곡선과 광세기 분포는 그림 10과 같으며 계산된 파장 영역에서 고차모드가 존재하는 것으로 나타났다.

도파로에 의한 분산 분산의 영향이 기존의 광섬유 보다 큰 광자결정 광섬유의 영 분산 파장은 가시광선 영역으로 천이되며 광섬유의 영 분산 파장과 고출력 펄스 광원의 중심 파장은 초 광대역 연속광 발생에 중요한 요소로 작용한다.^[13]

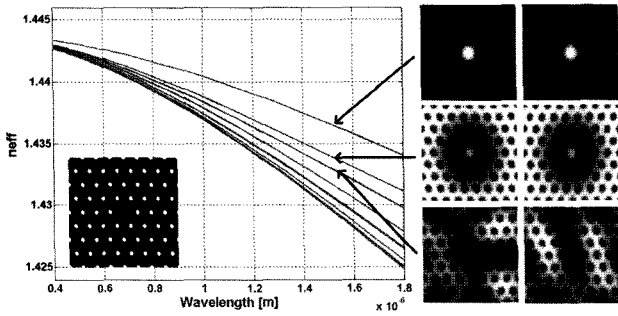


그림 7. 광섬유 1의 계산된 도파 모드의 분산 곡선과 정규화 된 광세기 분포.

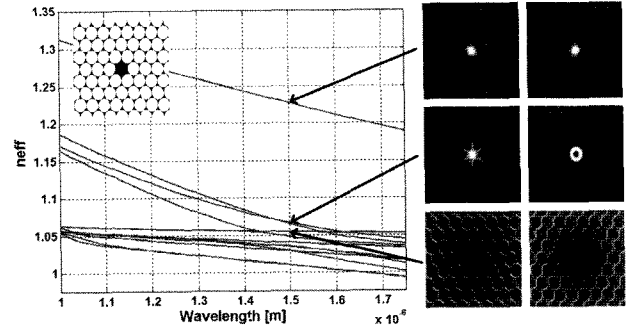


그림 10. 광섬유 2의 계산된 도파 모드의 분산 곡선과 정규화 된 광세기 분포.

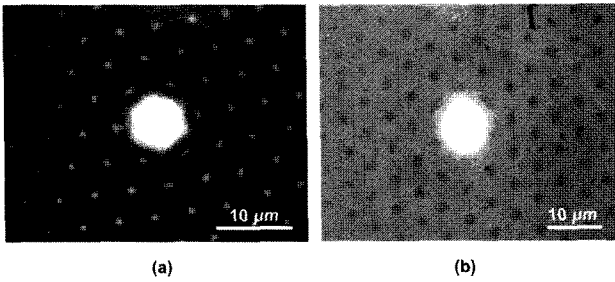


그림 8. 532nm 파장(a)과 1550nm 파장(b)의 근접장 이미지.

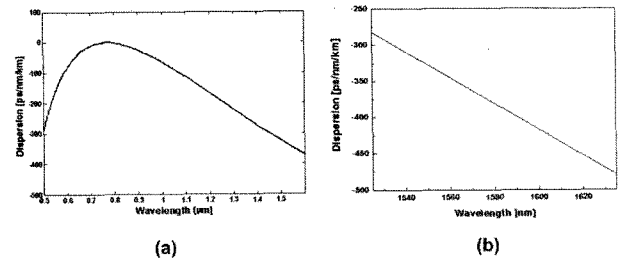


그림 11. 계산된 기본모드의 분산(a)과 측정을 통한 분산(b) 그래프.

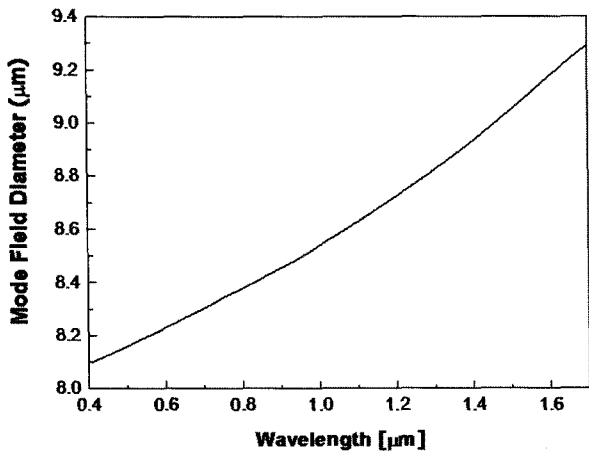


그림 9. 계산에 의한 파장별 모드 필드 직경.

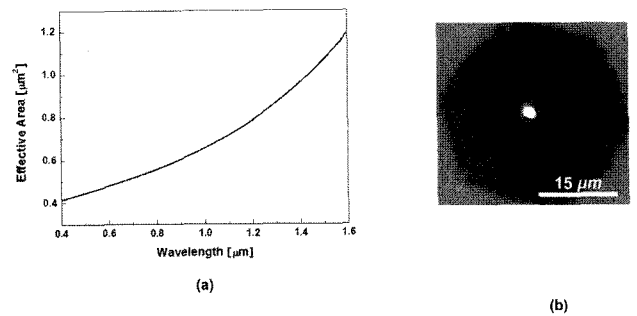


그림 12. 계산에 의한 기본모드의 유효 면적(a)과 633nm 광원의 근접장 이미지(b).

그림 11(a)는 광섬유 2의 기본모드의 분산을 계산한 것이며 그림 11(b)는 측정된 분산 값을 나타내고 있다. 계산을 통해 얻은 영 분산 파장은 770nm 부근이다.

코어의 유효면적에 반비례하는 비선형 계수 값은 계산을 통해 얻어 냈다. MPB의 계산 결과 중 기본모드의 광세기 분포를 통해 유효면적을 구하고 이를 사용하여 비선형 계수를 계산하였으며 파장에 따른 유효면적은 그림 12(a)와 같다. 그림 12(b)는 633nm의 근접장 이미지이다. 이때의 영 분산 파장인 770nm에서의 유효면적을 통해 구한 비선형 계수 값은 $380 W^{-1} km^{-1}$ 이다.

IV. 결 론

모세관 적층 방법에 의한 광자결정 광섬유의 인장은 다수의 공기층을 형성하기에 용이하며 온도, 인장 속도, 내부 기압 조절 등의 조건을 조절함으로써 균일한 형태의 광섬유를 얻을 수 있었다. 공기층이 열에 의해 응축되거나 변형 되지 않도록 일반적인 인장 온도보다 낮은 1800°C 부근에서 비교적 높은 장력으로 인장하였으며 이때 내부 기압은 약 5%미만의 진공도를 갖도록 하였다. 제작된 두 가지의 광자결정 광섬유 가운데 광섬유 1은 내부 기압의 조절을 통해 튜브와 모세관 사이의 공기층을 제거하였고 광섬유 2는 모세관 상부를 밀폐시켜 공기층을 확장 시켰다. 광섬유 1은 수치 계산에 의해 400nm부터 1800nm까지의 파장 영역에서 단일모드로 동작하는 것으로 나타났으며 실험적인 방법으로는

532nm와 1550nm 광원을 광섬유의 후면에서 조명하여 근접장 이미지를 얻었고 가우시안에 가까운 필드 분포를 통해 단일모드 여부를 간접적으로 확인 하였다. 광섬유 2의 경우 633nm 광원의 근접장 이미지를 얻어 고차 모드가 존재하는 영역이지만 작은 코어 면적을 통해 빛이 도파 되는 것을 확인할 수 있었다. 수치 계산을 통해서도 기본모드의 유효 면적과 분산 값을 얻었고 770nm 부근의 영 분산 파장에서의 유효 면적을 이용하여 $380 W^{-1}km^{-1}$ 라는 비선형 계수 값을 구하였다. 1550 nm에서 수치 계산을 통한 분산 값과 실제 측정을 통한 분산 값은 각각 -348ps/nm/km와 -327ps/nm/km으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 정보통신부 IT 원천기술개발사업(과제번호: 2005-S-099-02)으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] I. Hartl, X. D. Li, C. Chudoba, R. K. Ghanta, T. H. Ko, J. G. Fujimoto, J. K. Ranka, and R. S. Windeler, "Ultra-high-resolution optical coherence tomography using continuum generation in an air-silica microstructure optical fiber," *Opt. Lett.*, vol. 26, 608-610, 2001.
- [2] N. A. Mortensen, "Effective area of photonic crystal fibers," *Opt. Express* 10, 341-348, 2002.
- [3] R.E. Slusher, B.J. Eggleton, *Nonlinear photonic crystals*, (Berlin, New York, Springer, 2003)
- [4] Frederic Zolla, Gilles Renversez, Andre Nicolet, Boris Kuhlmeiy, Sebastien Guenneau, Didier Felbacq, *Fundamentals of photonic crystal fibers*, (Imperial College, 2005)
- [5] A. B. Fedotov, A. M. Zheltikov, A. P. Tarasevitch, and D. von der Linde, "Enhanced spectral broadening of short laser pulses in high-numerical-aperture holey fibers," *Appl. Phys. B* 73, 181-184, 2001.
- [6] Jinendra K. Ranka, Robert S. Windeler, and Andrew J. Stentz, "Visible continuum generation in air silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm," *Opt. Lett.*, vol. 25, no. 1, 25-27, 2000.
- [7] T. A. Birks, J. C. Knight, and P. St. J. Russell, "Endlessly single-mode photonic crystal fiber," *Opt. Lett.*, vol. 22, no. 13, 961-963, 1997.
- [8] Niels Asger Mortensen, "Effective area of photonic crystal fibers," *Opt. Express*, vol. 10, no. 7, 341-348, 2002.
- [9] P. Russell, "Photonic crystal fibers," *Science* 299, 358-362 (2003).
- [10] Jonathan C. Knight, "Photonic crystal fibres," *Nature* 424, 847-851 (2003).
- [11] S. G. Johnson, et al., "Photonic Crystals - The Road from Theory to Practice", *Kluwer Academic Pub.*, 2002.
- [12] T. P. White, R. C. McPhedran, C. M. de Sterke, M. J. Steel, "Confinement losses in microstructured optical fibers," *Opt. Lett.*, 26, 1660-1662, 2001.
- [13] S. Coen et al., "Supercontinuum generation by stimulated Raman scattering and parametric four-wave mixing in photonic crystal fibers," *J. Opt. Soc. Am. B* Vol. 19, No 4, 753-764, 2002.

Fabrication of Photonic Crystal Fiber using a Capillary Layer Method

Hyung Su Cho[†] and Hae Yang Chung

²⁾Department of Physics, KyungHee University, Suwon, 446-701, Korea.

Gil Hwan Kim, Dong Yean Koh and Sang Bae Lee

¹⁾Photonics Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 130-791, Korea

[†]E-mail: chohyungso@gmail.com

(Received January 3, 2007, Revised manuscript February 20, 2007)

Photonic crystal fibers(PCFs) with silica cores within an array of air holes have unique properties. Broad band single-mode and the octave-spanning supercontinuum generation, impossible to achieve in classical fibers, can be realized. The design of PCFs is very flexible. There are two parameters to manipulate: air hole diameter, and lattice pitch. We introduced a fabrication process for control of the parameters to obtain endlessly single mode PCF, which is single mode in a large wavelength range, and highly nonlinear PCF. The numerical analysis and experiments are included.