

단신(Notes)

고분자 광학결정 섬유에서의 단일 모드 전파

최재호[†] · 차현수 · 이재순

단국대학교 전자물리학전공

(2003년 12월 10일 접수, 2004년 3월 26일 채택)

Single-Mode Propagation in Polymer Photonic-Crystal Fibers

J. Choi[†], H. Cha, and J. Lee

Department of Electronic Physics, Dankook University,
29 Anseo-dong, Cheonan, Chungcheongnam-do 330-714, Korea

[†]e-mail : choi@dku.edu

(Received December 10, 2003; accepted March 26, 2004)

1. 서론

활발한 연구 개발이 이루어지고 있는 고분자 광소자의 하나인 고분자 광섬유는 코어 직경이 크고 가볍다는 점에서 차세대 광가입자망, 주택 내 광통신망 (fiber to the home) 및 차량과 항공기내의 멀티미디어망 조성에 근간을 이룰 것으로 기대되고 있다.¹ 고분자 광섬유의 직경은 기존의 기간망에서 사용되고 있는 실리카 광섬유의 약 8배에 해당되는 980 μm 직경의 광섬유가 상용화되어 있지만 대구경으로 인하여 모드수가 증가하여 광통신 속도를 감소시키는 결과를 가져오므로 단일 모드 도파를 위한 언덕형 (graded index) 광섬유가 개발되고 있다.² 이 광섬유는 모재 제조 공정이 까다롭고 원하는 굴절률 분포로 연속적 공정이 어렵다는 단점이 있다. 광섬유의 광손실 요인 중 하나인 고유손실의 대부분은 적외선 영역에서 C-H 결합의 조화진동 흡수와 원자간 결합진동 흡수에 의해서 발생한다. 또한 외인적 손실은 불순물의 혼입과 미세 공동 및 광섬유 코어 직경의 불균일로 인하여 발생한다. 폴리(메틸 메타아크릴레이트) (PMMA)의 이론적인 손실은 650 nm에서 106 dB/km로 매우 높으나 PMMA 내의 수소를 중수소로 치환한 *d*-PMMA와 불소 치환된 고분자의 광손실이 1300 nm에서 40 dB/km로 보고되고 있다.^{3,4} 광통신용 고분자 광섬유에서 전송대역폭은 광신호 분산을 고려하여야 한다. 각각의 모드가 광섬유를 전파해 가는 광로차에 의해 생기는 모드분산과

굴절률이 파장에 따라 다르기 때문에 발생하는 색분산이 광신호 분산의 주요 원인이 된다. 코어의 굴절률 분포를 조절하여 언덕형 굴절률 분포를 가진 광섬유를 제조함으로써 고분자 광섬유의 특징 중의 하나인 대구경과 큰 개구수로 인하여 발생하는 모드분산에 의한 광분산을 최소화할 수 있다. 그러나 원하는 굴절률 분포를 가진 모재를 제조하기 위해서는 코어와 크래드를 이루는 물질이 광학적, 열역학적으로 유사성을 가져야 하므로 광섬유 재료 선택에 제한을 받는 단점이 있다. 이러한 단점과 제한을 극복하며 단일 모드 전파가 가능한 광섬유로써 광학결정 섬유가 제안되었고 실리카 광학결정 섬유가 최근 수년에 걸쳐 많은 관심과 연구력이 집중되고 있다.⁵ 이 광학결정 섬유는 특이한 광전파 특성을 가지고 있으며 하나의 물질만으로 제조가 가능한 새로운 개념의 광섬유로 광학결정 섬유 단면의 구조는 고체의 결정 구조에 상응하는 규칙적인 배열을 가진 공기 기둥이 크래드를 구성하고 있고 이 규칙적 배열의 중심부의 격자를 제거함으로써 코어를 만든다. 이러한 광학결정 섬유는 20 μm 이상의 대구경 코어 직경에서도 자외선 파장영역으로부터 적외선 파장대까지 단일 모드 전파 특성을 보이며 가시광선 영역에서 분산이 없는 특성을 보이는 등 기존의 광섬유에서는 볼 수 없는 광전파 특성이 보고되고 있다.⁶ 고분자 광학결정 섬유는 유리 광학결정 섬유와 비교하여 볼 때 다음과 같은 장점이 있다. 우선, PMMA 고분자 광학결정 섬유의 경우 재료의 표면장력이 실리카의 1/10로 크래드를 이루는 공기 기둥이 광섬유 인출시 함몰되는 현상이 적어 상대적으로 쉽게 광섬유를 인출할 수 있다.⁷ 또한 기능성 고분자의 합성이 비교적 용이하고 광학결정 형태의 변형에 유연성을 가지고 있어 광통신 소자 연구 개발에 유용할 것이다. 본 연구에서는 PMMA를 기반으로 한 고분자 광학결정 섬유를 제조하여 1550 nm에서 단일 모드 전파를 확인하고 유효굴절률 모델을 이용하여 광학결정 섬유에서의 단일 모드 전파 조건을 구하였다.

2. 실험 및 결과

광학결정 섬유 제조 및 특성. 고분자 광학결정 섬유의 모재는 메타크릴산 메틸 (MMA)을 열중합하여 제조하였다. 우선 MMA에 포함되어 있는 중합억제제를 제거하기 위하여 MMA를 5% NaOH 수용액에 희석한 후 분액하고 증류수로 세척하였다. MgSO_4 를 사용하여 MMA에 섞여 있는 물을 제거하고 MMA를 MgSO_4 로부터 분리하며 불순물을 제거하기 위하여 진공증류로 정제하였다. 정제된 단분자에 개시제로 0.04 wt%의 AIBN과 분자량 조절

을 위해 0.4 wt% *n*-butyl mercaptan을 혼합하여 단분자 용액을 준비하였다. 이 MMA 용액을 사용하여 80 °C에서 중합하여 얻어진 시편의 수 평균 분자량은 80000 g/mol으로 광섬유 모재로 사용이 가능함을 확인하였다. 광학결정 구조를 갖는 모재를 제조하기 위하여 삼사정계 결정 구조를 가진 케인을 내경이 50 mm인 유리관에 넣은 후 MMA 용액을 넣고 80 °C에서 중합하였다. 중합된 모재는 진공오븐의 온도를 100 °C, 진공도를 10⁻² Torr를 유지하여 10시간 열처리함으로써 물분자와 잔류 단분자를 제거하였다. Figure 1은 제조된 광자결정 광섬유의 모재를 보이고 있다. 제조된 모재의 직경은 50 mm이고 공기 기둥 단면의 직경 (*d*)은 2.5 mm이며 공기 기둥과 기둥 사이 거리 즉 격자간격 (*Λ*)은 4.5 mm이다. 이 모재의 공기 기둥 직경과 격자간격의 비 (*d/Λ*)는 0.56이었다. 모재 상태에서 공기충진률 (air-filling fraction: *A_{ff}*)은 식 (1)로 주어진다.

$$A_{ff} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}}(d/\Lambda)^2 \quad (1)$$

위 관계식으로부터 계산된 모재의 공기충진률, *A_{ff}*는 0.28이었다. 이 *A_{ff}*는 광학결정 섬유의 특성을 결정하는 중요한 인자로 기존 광섬유에서 크래딩의 굴절률에 해당하는 크래딩 유효굴절률을 결정하며 이 유효굴절률로부터 전파되는 모드수를 계산할 수 있게 되므로 단일 모드 조건을 결정한다. 제조된 광학결정 섬유 모재는 70 °C 진공 오븐에서 3시간 예열하므로써 광섬유 인출 시, 모재의 중심방향으로의 열 구배를 최소화하였으며 광섬유 인출시 전기로의 온도는 270 °C로 고정하고 2 m/min의 속도로 광섬유를 인출하였다. 인출된 고분자 광학결정 섬

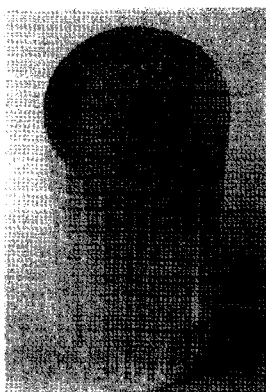


Figure 1. A preform of fabricated polymer photonic crystal fibers.

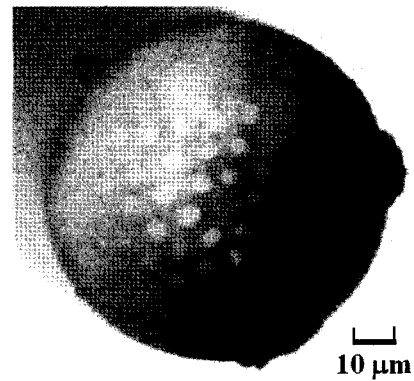


Figure 2. An optical microscopy image of polymer photonic crystal fibers.

유의 단면은 Figure 2에서 보이고 있다. Figure 2에서 보이고 있는 광학결정 섬유의 직경은 약 80 μm이며 *d* ≈ 5.0 μm이고 *Λ* ≈ 10.0 μm 평균값을 가지므로 *d/Λ* ≈ 0.5 이다. 모재와 광섬유에서의 *d/Λ* 값의 변화는 광섬유 인출시 표면장력에 의해 공기 기둥의 직경이 작아지는 것으로 추측되며 이러한 변화는 PPCF가 유리 광학결정 섬유에서 보다 적다. 그 이유는 녹는점에서의 PMMA의 표면장력은 3.2 × 10⁻² N/m로 실리카 유리의 1/10 정도이며 점성도 2배 정도 이기 때문에 공기 기둥의 수축 및 함몰이 상대적으로 작은 것으로 판단된다.⁸

전파특성 측정은 광원으로 50 μm의 멀티모드 실리카 광섬유가 연결된 1550 nm LD를 이용하여 길이 250 mm인 시료 광섬유에 butt-coupling하였다. 시료 광학결정 섬유의 끝단에는 현미경 대물렌즈를 위치시키고 CCD로 근거리 모드 패턴을 측정하였다. 얻어진 근거리 모드가 단일 모드 전파에 의한 것임을 확인하기 위하여 MATLAB[®] 프로그램을 이용하여 모드사진을 재구성하여 모드 패턴을 확인하였다. Figure 3의 (a)는 CCD를 이용한 광학결정 끝단에서 근거리 모드 패턴의 사진이며 (b)는 사진 (a)의 모드패턴을 디지털화한 모드 강도를 나타내고 있다. 이들 모드 패턴에서 보이고 있는 바와 같이 코어 직경이 20 μm이며 1550 nm 파장이 단일 모드로 도파하고 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 파장이 650 nm인 광원을 사용하여 전파를 시도하였으나 다중모드가 전파됨을 확인할 수 있었다. 이러한 현상을 설명하기 위하여 전산모사를 실시하였다. 전산모사는 유효굴절률 모델을 이용하여 광학결정 섬유의 격자상수 (*d/Λ*)에 따른 투과모드를 계산하였다.

광학결정 섬유에서의 단일 모드 도파 조건. 광학결정 섬유의 유효굴절률 값은 PMMA의 굴절률 값과 *n_m* 값의 사

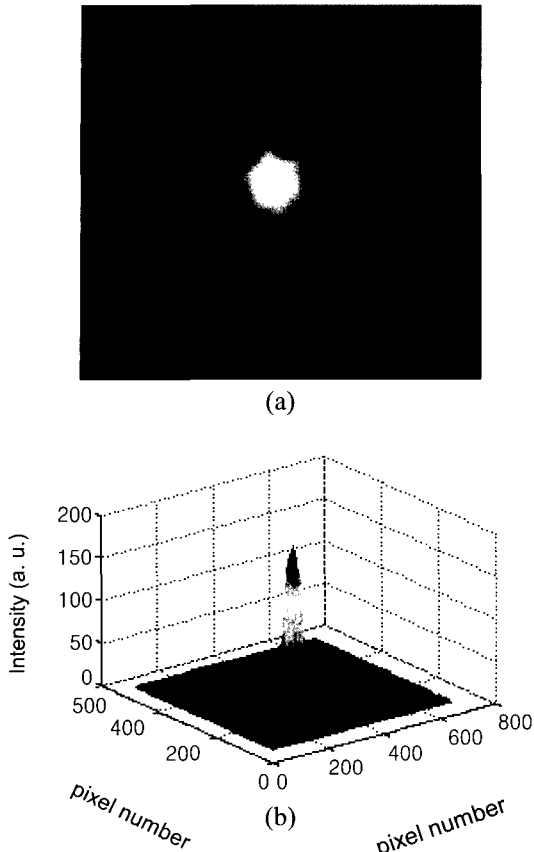


Figure 3. A image of near-field mode pattern of PPCF at 1550 nm. (a) A CCD image of mode. (b) A digitized mode pattern of the image (a).

이 값을 갖는다. n_{lm} 값은 다음과 같이 주어진다.⁹

$$n_{lm} = A_{ff}n_{air} + (1 - A_{ff})n_{PMMA} \quad (2)$$

여기서 삼사정계 결정 구조에서의 A_{ff} 는 공기충진률로 식 (1)에서 주어졌다. 또한 n_{PMMA} 는 PMMA의 굴절률로 1.49로 고정된 값을 갖지 않고 장파장에서 점차 감소하는 값을 사용하였다. 인출된 고분자 광학결정 섬유 격자의 크기 즉, 공기 기둥 단면의 직경과 격자간격의 비, 즉 격자상수에 대한 유효굴절률 (n_{eff})을 계산하였다. Figure 4는 격자상수 (d/Λ)가 0.5인 경우 각각의 격자간 거리 (Λ)에 대하여 입사광 파장의 함수로 고분자 광학결정 섬유가 갖는 크래딩의 유효굴절률을 보이고 있다. 삼사정계 결정 구조의 광학결정 섬유의 코어지름, d_{co} 는 $\Lambda = d_{co}/2$ 로 주어지므로 Figure 4의 결과는 코어지름이 5, 10, 20 그리고 40 μm 을 갖는 PPCF에서의 크래딩 유효굴절률을 의미한다. 격자 간격이 작은 경우 적외선 영역에서 그래딩 유효굴절률이 감소하지만 Λ 가 20 μm 이상으로 증가하

면 크래딩의 유효굴절률은 PMMA의 벌크굴절률의 파장에 따른 변화같이 적외선 영역에서 일정해지는 경향을 보이고 있다.

단일 모드 전파 조건은 유효 V 값, V_{eff} 가 2.405 이하에서 가능하며 V_{eff} 는 다음과 같다.⁶

$$V_{eff} = \left(\frac{2k\Lambda}{\lambda}\right)(n_{PMMA}^2 - n_{eff}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

제조된 PPCF의 결정구조 크기와 유사한 조건인 $d/\Lambda = 0.5$ 에서 단일 모드 전파를 확인하기 V_{eff} 값을 식 (3)에 의하여 계산하였다. Figure 5에서는 격자간격 (Λ)에 따른 유효 V 값 (V_{eff})을 나타내고 있다. 격자간격이 5 μm 이하 구조, 즉 코어지름이 10 μm 이하의 광학결정 섬유에서 400~2000 nm의 파장영역에서 단일 모드 전파가 가능하다. 그러나 격자간격이 10 μm 인 경우 즉, 광학결정의 코

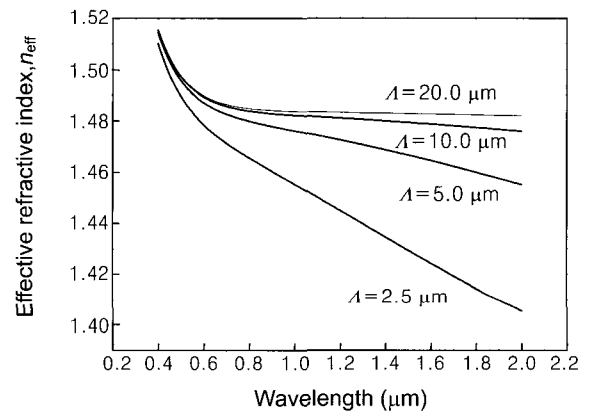


Figure 4. The calculated effective index of PMMA based PPCF.

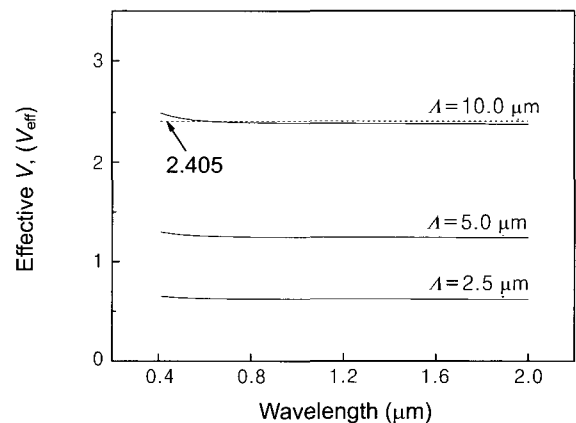


Figure 5. The effective V value of PPCF for $d/\Lambda = 0.5$ as function of wavelength.

어직경이 20 μm 인 조건에서는 620 nm 이하의 파장의 빔을 입사할 경우 단일 모드 전파가 가능하지 않음이 알 수 있었다. 이러한 결과는 650 nm 파장에서는 단일 모드 전파가 가능하지 않았던 실험 결과와는 차이를 보이니 이는 광학결정 섬유 인출시 외각 공기 기둥이 좁아지는 형상 등의 결정 구조의 변형이 두 결과의 차이를 가져온 것으로 판단된다.

3. 결론

MMA를 캐스팅 용기 안에서 열중합하여 새로운 개념의 광섬유인 광학결정 섬유 모재를 제조하였다. 인출된 PPCF는 외경이 80 μm 이며 격자간격이 10 μm 인 광학결정 섬유로 인출하였다. 공기 기둥 단면과 격자간격의 비율 (d/Λ)이 약 0.5 였으며, 광섬유는 코어의 직경 이 약 20 μm 로 1550 nm에서 단일 모드로 전파됨을 확인되었다. PMMA로 제조된 PPCF의 광학결정 크기와 전파모드 관계를 유효굴절률 모델을 이용하여 계산하였으며 인출된 광섬유와 같은 결정크기 조건, $d/\Lambda=0.5$ 에서 620~1550 nm 파장 영역에서 단일 모드 전파가 가능하다는 것을 알 수 있었다. 또한, 고분자 광학결정 섬유에서 도파하는 모드수는 결정상수의 변화에 따라 다른 값을 가지는 것을 확인하였다.

감사의 글 : 이 연구는 2003학년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음.

References

1. B. C. Kim, C.-G. Choi, S.-P. Han, K.-B. Yoon, M.-Y. Jeong, and D. S. Lee, *Polymer(Korea)*, **26**, 462 (2002).
2. Y. Koike and T. Ishigure, *IEICE Trans. Commun.*, **E82-B**, 1287 (1999).
3. Y. Koike, T. Ishigure, and E. Nihei, *IEEE J. Lightwave Technol.*, **13**, 1475 (1995).
4. Y. Koike, *Proc. European Conf. On Opt. Commun.*, **1**, 44 (1996).
5. J. C. Knight, T. A. Briks, P. St. J. Russell, and D. M. Atkin, *Optics Lett.*, **21**, 1575 (1996)
6. T. A. Briks, J. C. Knight, and P. S. Russell, *Optics Lett.*, **22**, 961 (1997).
7. Martijn A. van Eijkelenborg, Maryanne Large, 1st International Workshop for Microstructured Plastic Optical Fibers, p 4 (2002).
8. S. Wu, *Polymer Interface and Adhesion*, Marcel Dekker, New York, p 185 (1982).
9. N. A. Mortensen, M. D. Nielsen, J. R. Folkenberg, A. Petersson, and H. R. Simonsen, <http://arxiv.org/abs/physics>.(accessed October 2003).