

광결정 광섬유의 불규칙적인 구조로 인한 복굴절

Birefringence induced by irregular structure of photonic crystal fibers

황인각*, 이용재, 이용희

한국과학기술원 물리학과

e-mail: ikhwang@kaist.ac.kr

Abstract: Birefringence due to structural irregularities in photonic crystal fiber is numerically analyzed. The statistical correlations between the birefringence and the degree of the irregularities are presented, and their behaviors are explained using a perturbation theory.

광결정 광섬유(PCF)는 일반 광섬유에서는 얻을 수 없는 독특한 광학적 특성을 갖고 있는 새로운 종류의 광도파로로 인식되어 왔다. 이상적인 PCF는 6중 대칭구조를 갖고 있어 복굴절을 갖지 않는다. 하지만 실제 PCF는 구조적인 불규칙성으로 인해 상당한 크기의 복굴절을 나타낸다는 것이 보고되었다. 따라서 그러한 불규칙성의 양상과 그로 인한 복굴절 간의 상관관계를 이해하고 분석하는 것은 PCF의 복굴절을 다루는 데 매우 중요하다 할 수 있다.[1]

본 연구에서는 다양한 광섬유 구조 변수와 구조의 불규칙 정도에 대해 복굴절이 어떻게 달라지는가를 통계적으로 분석하였으며, 그 결과를 간단한 섭동 이론을 사용하여 이해하고자 하였다. PCF에서의 복굴절을 구하기 위해 평면파 전개 방법을 사용하였다.[2] 복굴절 분석에 앞서, 이 계산 자체의 오차를 상세히 조사하였으며, 본 연구에서 요구되는 정확도를 얻기 위해 계산 변수들을 최적화하였다.

그림 1 (a)는 구멍의 직경인 d 가 일정하지 않은 PCF의 한 예를 보여준다. 원래의 구멍 크기와 구멍 간격 간의 비율은 $d/\Lambda=0.46$ 이었다. 각 구멍의 직경은 가우시안 확률 분포에 의해 결정된다고 가정하였고, 이 때 이 분포의 표준편차를 평균으로 나눈 값($\delta d/d_0$)을 구멍 크기의 불규칙 정도를 나타내는 값으로 사용하였다. 각 불규칙 정도에 대해 20개의 PCF sample을 무작위로 발생시켜 각 sample의 복굴절을 수치적으로 계산하였다.

그림 1 (b)에 계산된 복굴절을 $\delta d/d_0$ 의 함수로 나타내었다. 그래프의 점과 막대는 20개 PCF의 복굴절 분포의 평균값과 표준편차를 나타낸다. 그래프의 log-log scale에서 복굴절의 크기는 불규칙 정도에 비례함을 알 수 있었으며, 또한 광섬유의 구조 크기가 파장과 비교하여 작아질 때 불규칙 정도에 더 민감하게 반응함을 발견하였다. 그림 1로부터, PCF의 복굴절의 크기를 10^{-6} 이하로 낮추기 위해서는 $\Lambda/\lambda=10.35, 6.21, 2.09$ 인 경우에 대해 구멍 크기의 오차를 각각 20%, 2%, <0.1% 이하로 낮추어야 함을 알 수 있다.

두 번째로, 그림 2 (a)에 보인 것과 같이 광섬유의 구멍의 위치가 불규칙한 경우의 복굴절을 조사하였다. 여기서도 각 구멍의 변위(q)가 가우시안 확률 분포를 갖는다고 가정하였으며, 변위의 표준편차를 구멍 간격으로 나눈 값($\delta q/\Lambda$)으로 구멍 위치의 불규칙 정도를 나타내었다. 각 구멍의 변위 방향은 무작위로 주어졌다. 위에서 사용한 것과 같은 방법을 통해 그림 2 (b)의 결과가 얻어졌다. 불규칙 정도나 파장에 따른 복굴절의 의존성은 그림 1 (b)의 경우와 비슷하게 나타났다.

복굴절이 Λ/λ 에 크게 의존한다는 점으로부터, 큰 구조의 광섬유가 복굴절을 줄이는데 유리하다는 사실을 알 수 있다. 광섬유 구조의 크기를 2배 만큼 증가시키면, 불규칙 정도를 10배 정도 줄인 효과가 복굴절에 나타난다.

복굴절이 불규칙 정도나 파장에 의존하는 양상은 섭동이론으로부터 이해될 수 있다. 구조적 불규칙성은 원래 구조의 굴절율이 국부적으로 섭동된 것으로 표현할 수 있으며, 이러한 섭동으로 인해 발생하는 복굴절은 다음과 같이 표현된다.[3]

$$\Delta n = n_y - n_x = \int (|\vec{E}_y|^2 - |\vec{E}_x|^2) \cdot \delta n(\vec{r}) d\vec{r} = (n_{silica} - n_{air}) \int_{perturbed\ region} (|\vec{E}_y|^2 - |\vec{E}_x|^2) \cdot sign(\delta n) d\vec{r}$$

여기서 \vec{E}_x, \vec{E}_y 는 두 편광 모드의 전기장 분포 함수이며, δn 은 굴절을 섭동 분포를 나타낸다. 광섬유의 각 구멍의 크기가 위치가 달라질때, 그로 인한 복굴절의 변화는 구멍 주위의 두 편광에 대한 광세기 차이와 굴절을 섭동의 면적에 비례함을 위 식으로부터 알 수 있다. 섭동 면적은 불규칙정도에 거의 선형으로 비례하므로, 따라서 복굴절도 이에 따라 증가한다. PCF를 진행하는 모드 분포를 구해보았을때, 편광에 따른 광세기 차이는 빛의 파장 또는 광섬유 구조 크기에 따라 크게 달라진다. 따라서 위 식의 적분값은 Λ/λ 이 증가함에 따라 크게 감소하게 되며 이는 앞의 결과들을 잘 설명해준다.

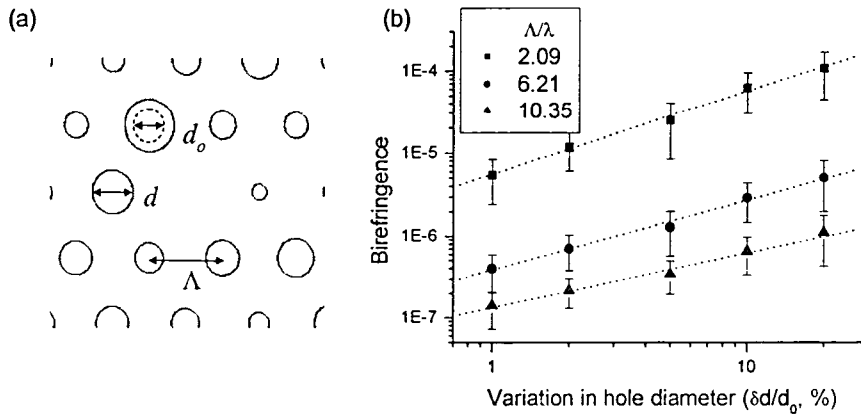


그림 1. (a) 구멍 크기가 불규칙한 PCF의 예 (b) 구멍 크기의 불규칙정도에 따른 복굴절의 크기

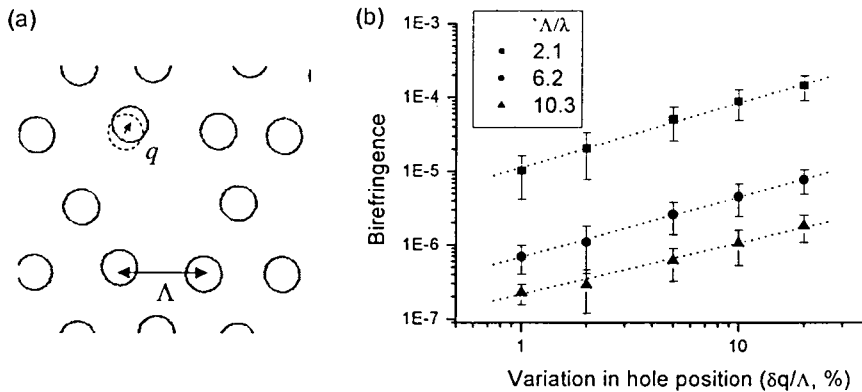


그림 2. (a) 구멍 위치가 불규칙한 PCF의 예 (b) 구멍 위치의 불규칙정도에 따른 복굴절의 크기

참고문헌

1. S. B. Libori, J. Broeng, E. Knudsen, A. Bjarklev, and H. R. Simonsen, "High-birefringent photonic crystal fiber," in *Proc. Optical Fiber Communication Conference 2001*, Vol. 54 of OSA Proceedings Series, pp. TuM2-1 -TuM2-3.
2. S. G. Johnson and J. D. Joannopoulos, "Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell's equations in a planewave basis," *Opt. Express* **8**, 173-190 (2001).
3. A. W. Snyder and J. D. Love, *Optical Waveguide Theory* (Chapman & Hall, New York, 1983), Chap. 18.

