

정사각형살창으로 만든 공기-길잡이 광결정 섬유에 대한 해석

Analysis of air-guiding photonic crystal fibers with square lattice

한장희, 한해욱

포항공과대학교 전자전기공학과 테라헤르츠 포토닉스 연구단

jhhan@anyon.postech.ac.kr

광결정섬유(photonic crystal fiber: PCF)는 클래딩(cladding)을 이차원 광결정으로 만든 광섬유이며, 광밴드갭(photonic band gap: PBG) 효과를 이용하여 특정 영역의 진동수를 갖는 빛을 클래딩을 통하여 빠져나가지 못하게 하는 방법으로 광신호를 길잡이(guiding)한다. PBG 효과는 굴절률이 다른 물질을 주기적으로 배열하는 경우, 빛의 분산 관계(photonic dispersion relation)에서 빛이 어떠한 방향으로도 진행할 수 없는 진동수 영역이 생기는 것이다. PCF의 클래딩에는 광신호의 진행방향에 수직인 평면상에 주기적인 배열이 만들어진다. 주기적으로 배열된 구조상에 결함(defect)이 있는 경우 PBG 안에 결함 모드(defect mode)를 만들 수 있는데, PCF에서는 이 결함이 코어(core) 역할을 하게 되고, 이 결함 모드를 이용하여 광신호를 전송할 수 있다. 광결정에서의 결함은 주기적으로 배열된 구조를 인위적으로 깨뜨리는 것이다. 결함은 주위보다 높은 굴절률을 가지도록 할 수도 있고⁽¹⁾ 낮은 굴절률을 가지도록 할 수도 있다⁽²⁾. 길잡이 현상은 전자의 경우 유효굴절률 효과로, 후자의 경우는 PBG 효과로 설명될 수 있다⁽³⁾.

현재까지 PCF의 클래딩을 이루는 이차원 광결정에 대한 연구는 거의 대부분 육방살창(hexagonal lattice)에 근간을 둔 벌집살창(honeycomb lattice)⁽¹⁾과 삼각형살창(triangular lattice)^(2,3)에 국한 되어왔다. 정사각형살창(square lattice)의 경우 주기적 배열평면에서 TE와 TM 모드에 대해 동시에 만족하는 절대(absolute) PBG가 존재하지 않는다고 알려져 왔기 때문에 정사각형 살창을 이용한 PCF에 대한 연구는 보고된 바 없다. 본 연구에서는 실리카와 공기로 구성된 정사각형살창의 경우 주기적 평면에서 벗어난 경우 상당히 큰 절대 PBG가 존재할 수 있다는 새로운 결과를 보이고, 이를 이용한 공기-길잡이(air-guiding) PCF에 대한 수치해석 결과를 보고하고자 한다.

[그림 1]은 평면상에 정사각형 광결정을 구성한 모습을 보여주고 있다. 코어를 공기로 하기 위해서 전체 광결정 구조에서 일부를 빼내는 방법을 사용하였으며, [그림 2]는 그 중 한가지 예를 보여주고 있다. 공기 길잡이 PCF를 해석하려면 PBG에 대한 정보가 필요하므로 완전한 벡터 방법(full-vectorial method)을 이용하여야 하는데, 여기에서는 평면파 전개(plane wave expansion)에 기초한 구간 반복 주파수 영역 방법(block-iterative frequency-domain method)을 이용하였다⁽⁴⁾. 이 방법은 우선 광신호의 진행 방향 파동 벡터 성분(out-of-plane wave-vector component) β 를 고정시키고 모드가 형성될 수 있는 파동 진동수를 찾는다.

[그림 3]은 틀맞춘 진동수(normalized frequency) ka 가 12 근처일 때의 광 분산 관계를 보이고 있다. 여기서 a 는 살창 상수이다. 8번째와 9번째 밴드 사이의 모드가 형성되지 않는 구역에 해당하는 진동수를 갖는 빛은 광결정으로 만들어진 클래딩을 통과할 수 없다. [그림 4]는 β 의 변화에 따른 절대 PBG의 모양을 보이고 있다. 여기에서 관심을 가져야 할 영역은 $k/\beta > 1$ 인 부분이다. $k/\beta=1$ 인 선(air

line)은 공기 중에서 진행하는 평면파에 해당하는데, k 가 β 보다 작은 경우는 evanescent 모드가 되어 빛은 진행하지 못한다.

길잡이 모드의 개수는 절대 PBG의 특성과 결합의 크기에 따라 정해진다⁽²⁾. 여기에서 제안된 구조에 길잡이 모드가 생기기 위해서는 구멍 하나 크기의 결합으로는 부족하고 [그림 2]와 같이 큰 구멍 다섯 개에 해당하는 크기가 필요하다. [그림 2]는 이렇게 만들어진 광섬유의 수직 단면에 형성된 빛의 세기가 분포되는 모양을 보이고 있다. 결합 안쪽에는 길잡이 모드가 형성됨을 알 수 있고, 주기적인 부분, 즉 클래딩 부분에는 진행할 수 있는 모드가 존재하지 않음을 알 수 있다. 따라서 정사각형살창으로 만든 공기-길잡이 PCF를 이용하여 빛을 전송하는 것이 가능하다는 것을 알 수 있다.

본 연구는 과학기술부 창의적연구진흥사업의 지원으로 이루어졌다.

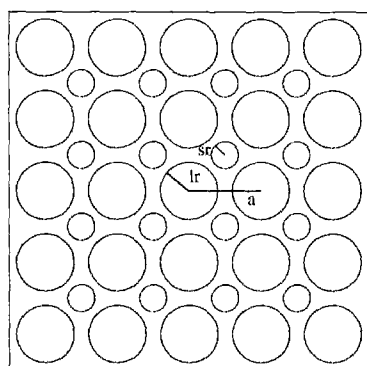


그림 1. 2차원 정사각형살창, 원 안쪽은 공기이고 바깥쪽은 실리카이다.

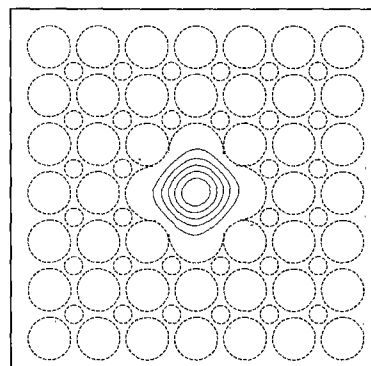


그림 2. 빛의 진행방향에 직한 평면상의 코어와 클래딩, 빛의 세기 분포

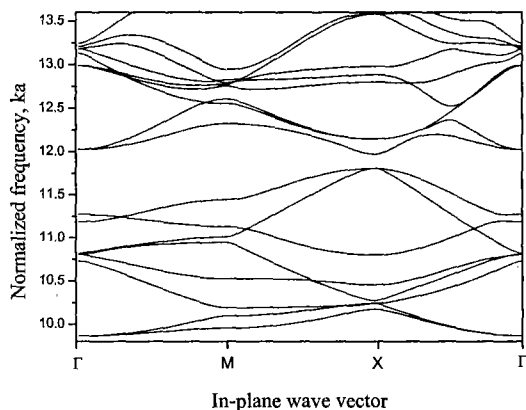


그림 3. 광 밴드 구조

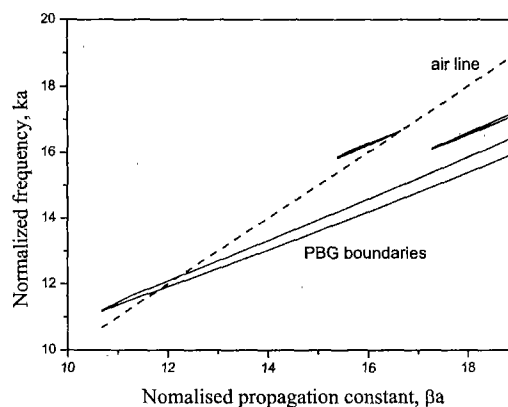


그림 4. PBG와 air line

<참고 문헌>

1. J. C. Knight, J. Broeng, T. A. Birks, and P. St. J. Russell, Science 282, 1476 (1998).
2. R. F. Cregan, B. J. Mangan, J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell, and P. J. Roberts, D. C. Allan, Science 285, 1537 (1999).
3. J. Broeng, S. E. Barkou, T. Sondergaard, and A. Bjarklev, Optics Letters 25, 96 (2000).
4. S. G. Johnson and J. D. Joannopoulos, Optics Express 8, 173 (2001);
<http://ab-initio.mit.edu/mpb/>.

