

## 2차원 삼각 격자 광결정 도파로의 군속도 분산

# Group Velocity Dispersions of Two-Dimensional Triangular Lattice Photonic Crystal Waveguides

김국현, 류한열, 이용희  
한국과학기술원 물리학과  
tan@mail.kaist.ac.kr

광결정(photonic crystal)에 선결함을 만들면 광도파로(optical waveguide)가 된다는 사실은 잘 알려져 있다<sup>(1)</sup>. 광결정의 광밴드갭(photonic band gap) 효과에 의해서 빛이 선결함을 따라 가이드 되는 것이다. 이는 기존의 유전체 광도파로에서의 굴절률 가이드(index guiding)과는 다른 새로운 가이드 원리이기 때문에 활발히 연구되고 있다<sup>(2)</sup>. 본 연구에서는 2차원 광결정 도파로에서 가이드 되는 모드(mode)의 군속도 분산(group velocity dispersion)에 대해 살펴 보았다.

연구에서 사용한 구조는 [그림1]과 같다. 여기서 유전체의 굴절률은 3.4이며, 반지름이 결정 상수  $a$ 의 0.35배인 공기 구멍을 삼각 격자(triangular lattice) 지점에 뚫어서 광결정을 형성했다. 그리고  $\Gamma$ -K 방향으로 공기 구멍을 메워서 도파로를 만들었다. 도파로의 너비는 편의상 양 벽면의 첫째 공기 구멍 중심간의 거리로 했다.

너비가 각각  $1.8a$ ,  $2.6a$ 인 도파로의 TE 모드의 밴드구조(band structure)를 평면파 전개 방법(plane wave expansion method)으로 [그림2]와 같이 구했다. 광결정 도파로는 축 방향으로 결정 상수의 주기성을 갖기 때문에, 모드는 그림과 같이 첫째 브릴루앙 존(1st Brillouin zone)에서 기술된다. 그림에서 회색 부분은 광결정의 모드여서 광결정에서 진행할 수 있기 때문에 효율적으로 가이드 되지 않는다. 흰색 부분이 바로 광밴드갭 효과에 의해 가이드 되는 부분이다. 참고로 이와 같은 그래프에서 밴드의 기울기에 광속을 곱하면 모드의 군속도(group velocity)가 된다. 따라서 밴드의 기울기는 모드의 군속도를 대변한다.

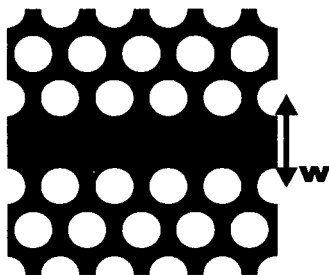
[그림2]에서 A로 표시한 밴드 시작점 부근을 보자. 밴드의 기울기가 아주 완만함을 볼 수 있다. 가이드 되는 밴드의 시작점 부근에서, 보통의 유전체 광도파로는 벌크(bulk)보다 큰 군속도를 갖는데 반해, 양 벽면에 거울로 이루어진 거울 광도파로는 거의 0에 가까운 군속도를 갖는다. 광밴드갭이 거울과 같은 작용을 하기 때문에, 광결정 도파로는 밴드 시작점 부근에서 군속도가 거의 0에 가까워진다. 이러한 군속도 특성을 통해 광결정 도파로가 특별한 군속도 분산을 갖으리라 예상했다. 결정 상수가 340nm일 때, A 부근의 군속도 분산은 [그림3a]와 같다. 군속도 분산이 1550nm에서  $10^6$ ps/nm km 정도 된다. 현재 가장 많이 깔려 있는 광섬유는 1550nm에서 15ps/nm km 정도의 군속도 분산을 가지고 있는데<sup>(3)</sup>, 이에 비하면 약 십만 배에 달한다.

광결정 도파로의 축 방향 주기성으로 인해,  $k=\pi/a$ 인 브릴루앙 존 경계에서 정상파가 형성된다. 정상파를 형성하면서 밴드의 기울기는 0이 되며, 밴드는 갈라진다. [그림2]의 B 부분을 보면 밴드가 갈라지고 군속도가 0에 가까움을 볼 수 있다. 결정 상수가 440nm일 때, B 부분 위쪽 밴드의 군속도 분산은 [그림3b]와 같다. 군속도 분산이  $-10^7$ 으로 광섬유의 음의 백 만 배에 이름을 알 수 있다. 이와 같은 군속도 분산이라면, 단 1mm의 광결정 도파로로 광섬유 1km의 분산을 보상할 수 있다.

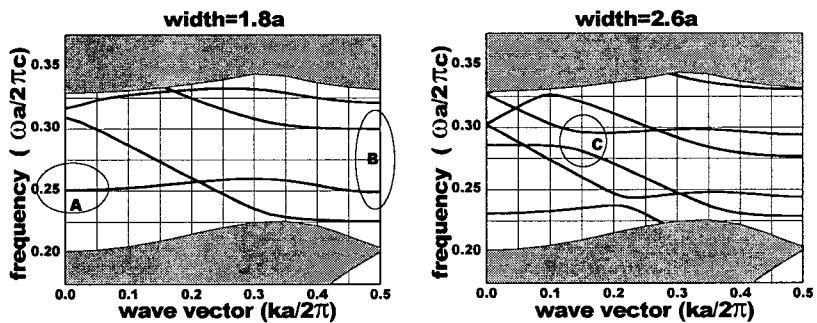
앞에서 언급했듯이, 광결정 도파로의 밴드는 첫째 브릴루앙 존에서 기술되므로 밴드 사이에 교차가 일어날 수 있다. 교차점은 주파수와  $k$ 가 같은 두 모드를 나타내는데, 보통 두 모드가 독립적이지 않으므로 서로 간섭을 하게 된다. 간섭의 결과로 [그림2]의 C 부분과 같이 밴드의 비교차(anti-crossing)가 나타난다<sup>(4)</sup>. 비교차에 의해서 다른 두 밴드가 연결되므로 모드의 군속도가 급격하게 변함을 볼 수 있다. 결정 상수를 442nm로 했을 때, C 부분 위쪽 밴드의 군속도 분산을 [그림3c]와 같이 구했다. 1550nm에서 군속도 분산이  $10^5$ ps/nmkm인데 이는 광섬유의 약 만 배에 달하는 값이다.

본 연구를 통해 2차원 광결정 도파로의 군속도 분산이 매우 크다는 것을 알 수 있었다. 이러한 특성을 통해 광결정 도파로가 군속도 분산을 제어하는 광장치에 유용하게 사용되리라 예상한다.

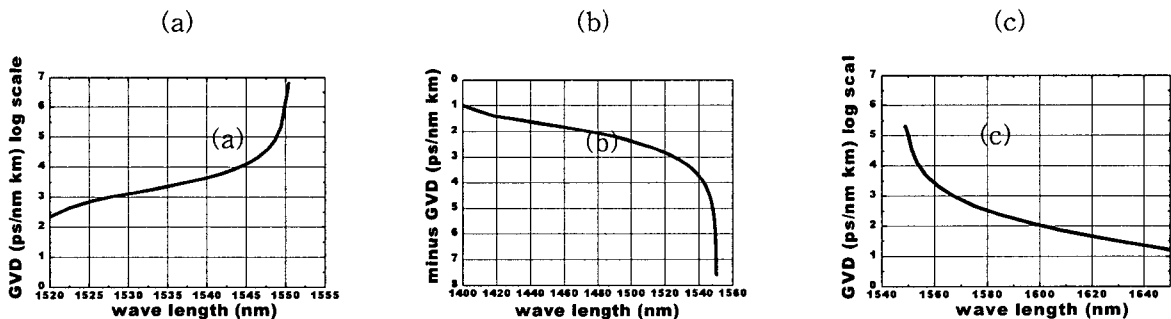
1. A. Mekis, J. C. Chen, I Kurland, S. Fan, P. R. Villeneuve & J. D. Joannopoulos, "High Transmission through sharp bends in photonic crystal waveguides", Phys. Rev. Lett. 77, 3787 (1996).
2. A. Mekis, S. Fan & J. D. Joannopoulos, "Bound states in photonic crystal waveguides and waveguide bends", Phys. Rev. B 58, 4809 (1998).
3. G. Keiser, "Optical Fiber Communications", McGraw-Hill, 126 (1983).
4. M. Qiu, K. Azizi, A. Karlsson, M. Swillo & B. Jaskorzynska, "Numerical studies of mode gaps and coupling efficiency for line-defect waveguides in two-dimensional photonic crystals", Phys. Rev. B 64, 155113 (2001).



[그림1] 광결정 도파로



[그림2] 너비가 각각 1.8a, 2.6a인 도파로의 밴드 구조



[그림3] 군속도 분산 그래프  
 (a) 밴드 시작점 부근,  $a=340$ nm, (b) 브릴루앙 존 경계 부근,  $a=440$ nm  
 (c) 비교차점 부근,  $a=442$ nm