

## 2차원 광결정의 군속도의 특징

김경래\*, 홍진수, 이명래, 신원진  
순천향대학교

### Properties of zero group velocity in 2-Dimensional photonic crystal

Kyoung-Rae Kim\*, Chin-Soo Hong, Myoung-Rae Lee, Won-Jin Shin  
Dept. of Physics\*, College of Natural Science,  
Soonchunhyang University, Asan, Chungnam 336-745, Korea.

**Abstract :** A plane wave expansion method(PWEM) was applied for photonic band structure calculation. We examined zero group velocity modes in photonic crystals. The zero group velocity was obtained in second band along G-K direction. We expanded Brillouin zone, and investigated on zero group velocity.

**Key Words :** Photonic Crystal, Zero Group Velocity, Brillouin Zone Edge.

#### 1. 서론

현재 빛을 다루는 광기술은 과학분야에서 큰 주목을 받고 있다. 특히 주목을 받고 있는 기술이 광 결정(Photonic crystal)을 이용한 빛의 조절이다[1].

광 결정은 유전체 혹은 금속을 나노미터 크기의 주기성을 갖도록 배열한 것으로, 유전물질간의 간격, 유전물질의 굴절율, 배열의 형태 등을 변화시켜 빛을 쉽게 조절할 수 있다[2].

광 결정의 특징 중 하나는 군속도(Group Velocity)가 0인 지점이 나타난다는 것이다[3-5]. 이 특징을 이용하여 밴드 엣지 레이저(Band Edge Laser)의 제작에 응용할 수 있다 [6,7]. 또한 광결정 속에서 일정한 방향으로 진행하는 빛을 광결정 밖으로 내보낼 수 있으므로 고효율의 디스플레이 제작에 응용 할 수 있다.

#### 2. 본론

2차원 광결정의 밴드구조는 상업용 프로그램인 매스메티카(Mathematica)를 코딩하여 얻었다(그림 1).

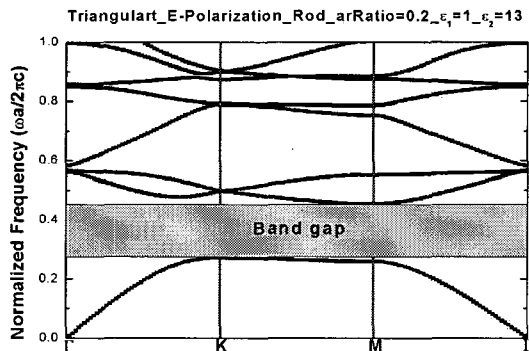


그림 1. 2차원 삼각형 격자구조의 밴드 구조.

그림 1은 원기둥을 2차원 삼각형 구조로 배열한 광결정의 분산관계(photonic dispersion relation)를 평면파 전개방법(plane wave expansion method)으로 구하였다[8,9]. 편광은 E-편광을 사용하였고, 원기둥과 외부(공기)의  $\epsilon_1$ 과  $\epsilon_2$ 은 각각 1, 13으로 놓았다. 평면파 개수(plane wave number)는 441개를 사용하였다. 그림 1의 회색부분은 밴드갭(band gap)이며 전자기파가 진행하지 못하는 영역이고,  $\Gamma$ -K 방향의 두 번째 밴드(그림 1의 파란색 밴드)는 군속도가 0이 되는 지점으로 앞으로 주목 할 밴드이다.

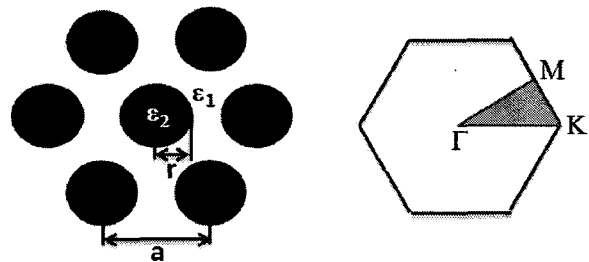


그림 2. (a) 격자 구조, (b) First Brillouin Zone.

그림 2는 격자구조( $a$ 는 격자상수,  $r$ 은 원기둥의 반지름)와 First Brillouin Zone(이하 BZ)이다. 역격자 공간에서 First BZ의 밴드구조를 나누는 3개의 점은  $\Gamma$ , K, M 이다(그림 2 (b)). 밴드구조를  $\Gamma$ , K, M으로 구분 짓는 이유는 광결정의 대칭성 때문이다.  $\Gamma$ -K, K-M,  $\Gamma$ -M 방향으로 진행하는 전자기파의 분산을 high order BZ(Second BZ, Third BZ, ...)로 확장시키면 대칭에 의해 겹친다. 각진동수와 파수는 각각  $\omega a/2\pi c$ 와  $ka/2\pi$ 로 규격화 시켰다.  $\Gamma$ -K 방향의 연장선에 있는 M을 기준으로 각진동수가 0~2(그림 3 (a))에서는 대칭을 보이는 반면 각진동수가 2 이상이 되는 영역의 경우 완전대칭이 아니다(그림 3 (b)). 따라서 각진동수가 2 이하인 경우만 살펴보기로 하자.

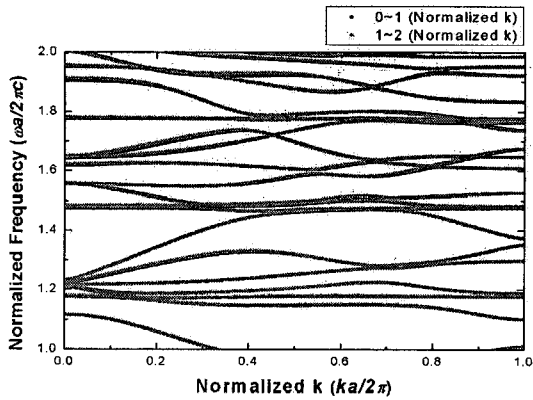


그림 3. (a)  $\Gamma$ -K 방향의 밴드구조를 규격화  $k=1$ 을 기준으로 0~1, 1~2를 대칭(규격화 주파수는 0~2).

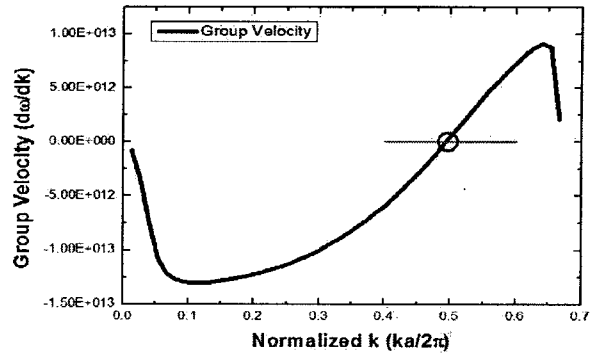


그림 4. (b).  $\Gamma$ -K 방향의 두 번째 밴드의 군속도.

군속도가 0이면 에너지 전달이 되지 않는다는 의미이다. 따라서 군속도가 0이 되는 지점에서 광자들이 모여 에너지 밀도가 높아진다.

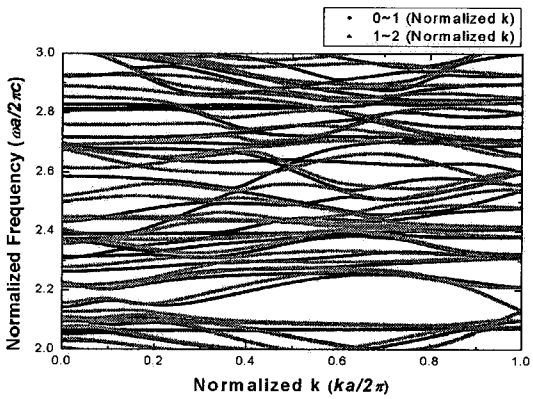


그림 3. (b)  $\Gamma$ -K 방향의 밴드구조를 규격화  $k=1$ 을 기준으로 0~1, 1~2를 대칭(규격화 주파수는 2~3).

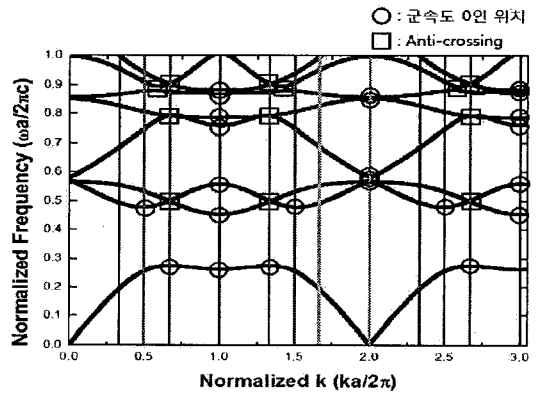


그림 5. 규격화 파수를  $6\pi/a$ 까지 확장한 밴드구조.

군속도란 전자기파의 에너지가 전달되는 속도이며 분산곡선에서 기울기로 정의된다.  $\Gamma$ -K 방향의 두 번째 밴드를 살펴보면 군속도가 0인 지점을 볼 수 있다. 그림 4 (a)는 그림 1의  $\Gamma$ -K 방향의 두 번째 밴드를 확대한 것이며 이 때 규격화된 파수가 0.5 근처에서 군속도가 음에서 양으로 바뀌는 것을 볼 수 있다. 군속도가 0이 되는 것을 자세히 살펴 보기위해 그림 4 (b)를 보자.

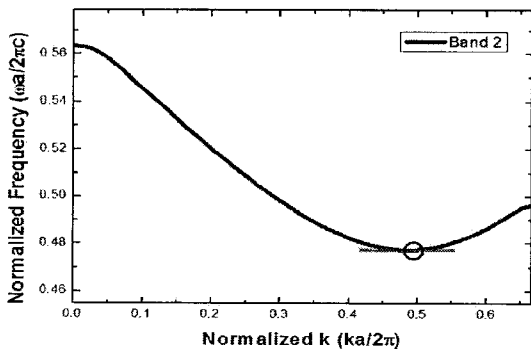


그림 4. (a).  $\Gamma$ -K 방향의 두 번째 밴드.

그림5는  $\Gamma$ -K 방향으로 파수를  $6\pi/a$ 까지 확장시킨 밴드 구조이다. 이 그림의 여러 가지 색으로 구성된 세로 선은 High order BZ의 엣지를  $\Gamma$ -K 방향으로 투사(projection)시킨 것이다. 원은 군속도가 0인 지점이고, 네모는 밴드가 교차해야 되지만 그룹이론(group theory)에 의해서 동일 모드는 겹쳐지지 않으므로 비교차(anti-crossing) 된다[10]. 그림 1의  $\Gamma$ -K 방향의 두 번째 밴드에서 군속도가 0이 되는 위치는 첫 번째 BZ 엣지의 M점을  $\Gamma$ -K 방향으로 투사시킨 값 근처에서 나타난다. 또한 잘 알려진 대로 BZ 엣지에서 군속도는 항상 0이 됨을 확인할 수 있었다.

그림 6은 두 번째 BZ이고,  $\Gamma$ -H 방향(그림 6의 빨간 화살표 방향)으로 전자기파를 진행시켜 보자. 그림 7은  $\Gamma$ -H 방향으로 전자기파를 진행시켜 얻은 밴드구조이다. M, M'의 규격화 파수는 각각 0.5, 1이다.  $\Gamma$ -H 방향 밴드구조의 M, M'과 같은 규격화 파수 0.5와 1에서 군속도가 항상 0이 된다(그림 7). 따라서 그림 6의 빨간점(규격화 파수가 0.5인 점)은 BZ 엣지가 아님에도 BZ 엣지와 같은 특성을 보이고, 이와 같은 특성의 점이 대칭성에 의해 첫 번째 BZ에 12개가 존재하는 것을 발견하였다.

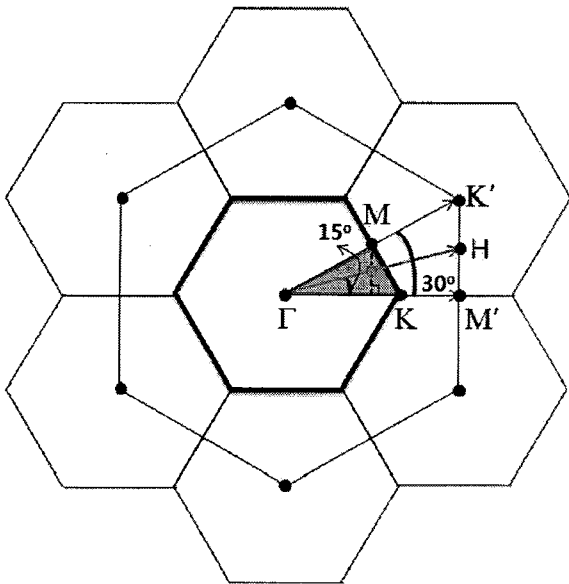


그림 6. 첫 번째 BZ와 두 번째 BZ.

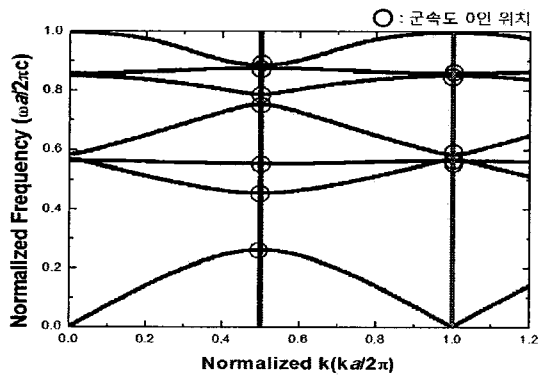


그림 7.  $\Gamma$ -H 방향의 밴드구조.

### 3. 결론

평면파 전개방법을 이용하여 2차원 삼각형 격자구조인 광결정의 밴드구조를 구했다. 이 밴드구조에서 군속도가 0이 되는 지점을 살펴 보았다. 첫 번째 BZ의  $\Gamma$ -K 방향의 2번째 밴드의 군속도는 음에서 양으로 바뀌었다. 군속도가 0이 되는 지점은 에너지 전달이 되지 않아 광자의 에너지 밀도가 높아진다. 이것을 이용하면 전자기파를 구속시키는 효과를 얻을 수 있게 된다.

BZ를 확장하면 각진동수 2이상의 높은 영역에서는 완전 대칭이 되지 않고 각진동수 2 이하의 영역에서 대칭성을 보인다.

군속도가 0이 되는 현상은 BZ의 X, M 점에서 일어나고, M점을  $\Gamma$ -X방향으로 투사시킨 위치 근처에서 이 현상이 일어날 수 있다.

$\Gamma$ -H 방향의 밴드구조에서 규격화파수가 0.5, 1에서 군속도가 항상 0이다. 규격화파수가 0.5인 점은 BZ 엣지가 아님에도 엣지와 같은 특성을 보였다. 이와 같은 특성의 점 12개가 대칭성에 의해 첫 번째 BZ에 존재한다.

### 감사의 글

본 연구는 지식경제부 지방기술혁신사업(RTI04-01-02) 지원으로 수행되었음.

### 참고 문헌

- [1] News & Information For Chemical Engineers, Vol. 23, No. 4, (2005).
- [2] Kazuaki Sakoda, "Optical Properties of Photonic crystal", Springer (2001).
- [3] M. Ghebrebrhan, M. Ibanescu, Steven G. Johnson, M. Soljačić, and J. D. Joannopoulos, Phys. Rev. A Vol 76, 063810 (2007).
- [4] Han-Youl Ryu\* and Masaya Notomi, Phys. Rev. B Vol 68 p. 045209 (2003).
- [5] K. Sakoda and K. Ohtaka, Phys. Rev. B Vol 54, p. 5742 (1996).
- [6] Soon-Hong Kwon, Han-Youl Ryu, Guk-Hyun Kim, and Yong-Hee Lee, APL. Vol 83, No. 19 p. 3870 (2003).
- [7] H.Y. Ryu, S.H. Kwon, Y.J. Lee, Y.H. Lee, and J.S. Kim, Appl. Phys. Lett. 80, 3476 (2002).
- [8] H.T. Zhang, D.S. Wang, M.L. Gong, D.Z. Zhao, Optics Communications. 237, p. 179 (2004).
- [9] Sanshui Xiao, Linfang Shena, Sailing He, Phys. Lett. A. 313, p. 132 (2003).
- [10] K. Sakoda, Phys. Rev. B Vol 52, No. 11 p. 7982, (1995).