

## 2 차원 광결정 선결함의 낮은 군속도

이명래\*, 홍진수, 김경래, 신원진

336-745 충남 아산시 순천향대학교 자연과학대학 물리학과

### Small group velocity in two dimensional photonic crystal line defect

Myoung-Rae Lee\*, Chin-Soo Hong, Kyoung-Rae Kim, Won-Chin Shin

Dept. of Physics, College of Natural Science, Soonchunhyang University,

Asan Chungnam 336-745, Korea

**Abstract :** Photonic crystal is a dielectric materials or a set of different dielectric materials with periodic structure of refractive index. Line defect obtained by leaving out a row of rod along the  $\Gamma$ -X direction. We showed the change of group velocity in waveguide mode and found a small group velocity. Characteristic of the small group velocity described by electric field distribution. As the phase variation, small group velocity confirmed from positive to negative.

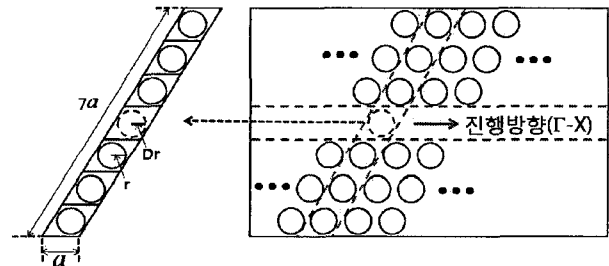
**Key Words :** photonic crystal, line defect, standing wave, small group velocity, phase

### 1. 서론

2차원 광결정은 최근에 활발히 연구가 진행되고 있다. 광결정(Photonic Crystals, PC)에 전자기파가 입사할 때 광밴드갭(Photonic Bandgap, PBG)이 형성된다. 광결정은 특정 파장의 빛을 반사시키지 않고 가둘 수 있다는 특성 때문에 광소자, 레이저, 광변조기 등 여러 분야로의 응용 가능성이 있다.[1,2] 전자기파의 파장과 광결정의 구조 사이에 상관관계를 만족한다. 이 전자기파의 진행 메카니즘은 기존 도파로와는 다른 방식으로 제한한다는 특이성을 가지고 있다. 광결정의 밴드갭이 크다면 광소자 설계의 오차를 줄일 수 있고 동작이 개선되어 양질의 광소자에 응용될 수 있다.[3,4]

광밴드갭 이외에 광결정의 중요한 특성 중 하나는 결함 모드(Defect mode)이다. 사실상 대부분의 광결정 응용은 이 결함 모드를 이용한 것으로 광결정 내 국소영역에 인위적으로 주기성을 깨뜨려 이 결함 주변에 강한 국소결함모드(localization of defect mode)가 발생한다. 이러한 결함모드의 주파수는 결함의 구조와 형태에 따라 달라진다. 이러한 결함모드의 특징은 공진기(resonator), 광도파로(waveguide), 광필터(filter)등의 분야에 응용되고 있다.[5,6,7]

본 논문에서는 평면파 전개 방법(plane wave expansion method; PWEM)[8]을 상업용 패키지 Mathematica로 코딩하였다. 이를 이용하여 무한 크기의 2차원 삼각형 격자의 선결함 밴드 구조를 구하였고 큰 밴드갭을 얻을 때 선결함 PC 구조를 최적화 하였다. 선 결함모드의 waveguide mode에서 낮은 군속도는 전파방향을 일직선상에 위치한 형태로서 확인을 하였다. 그리고 waveguide mode의 전기장의 변화를 통하여 정상파 형태와 군속도가 양의 값에서 음의 값으로 변할 때 위상변화를 확인하였다.



1x7 supercell  $a = \text{lattice constant} (=500\text{nm})$

그림 1. 1x7 supercell

그림1과 같이 x축을 따라 전자기파가 1x7 supercell로 진행할 때 선 결함 모드가 나타난다.[9] 7개의 원통 중 가운데 점선으로 되어 있는 원통이 결함을 나타낸다. 본 논문에서는 결함 원통의 비율을 DefectRatio라 하였다. DefectRatio는 원통에 대한 결함의 크기의 비율로서  $\text{DefectRatio}(Dr) = \frac{D_r \times r}{A_x}$  이다. PWEM으로 삼각형 2D PC 선 결함을 전산모사 하기 위해 3087개의 평면파를 사용하고 격자주기( $A_x = A_y = a$ )는 500nm, E-편광 그리고 원통의 굴절률( $N_2$ )은 3.4를 사용하였다. 선 결함 모드는 원통이 완전히 제거된 형태(DefectRatio=0)에서 밴드갭 내에서의 waveguide mode를 확인하였다.

그리고 결함모드에 적용된 밴드갭은 기본 PC구조에서 얻은 최대 밴드갭을 적용하였다. 그림2는 arRatio=0.2, DefectRatio=0일 때를 보여준다. 여기서 arRatio는 격자주기에 대한 원통의 비율을 나타낸다.

### 2. 본론

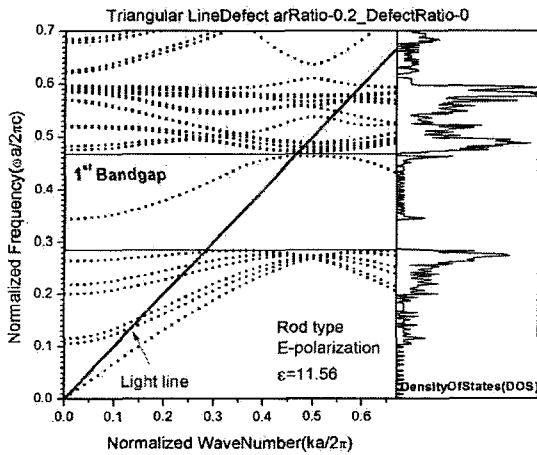


그림 2. 선 결함 모드의 밴드 구조.

그림2에서 light line 위쪽은 공진영역 (resonant states)으로서 파수(k)와 진동수의 함수 관계에서 기울기가 1 이상이 되어 (즉,  $v \geq c$ ; 전자기파의 속도가 빛 속도보다 크거나 같다.) 고려하지 않는다.[10] 그리고 밴드 구조의 우측 그림은 밴드의 상태 밀도(Density Of States; DOS)를 나타낸다.[11]

밴드갭 내에서는 전파되는 모드가 존재하지 않지만 결함을 뿔었을 때 밴드갭 내에서 waveguide mode가 존재한다. waveguide mode의 군속도( $V_g$ )를 구하여 전자기파의 흐름을 확인 할 수 있었다. 여기서 군속도는 빛의 속도(c)로 규격화 되었다.

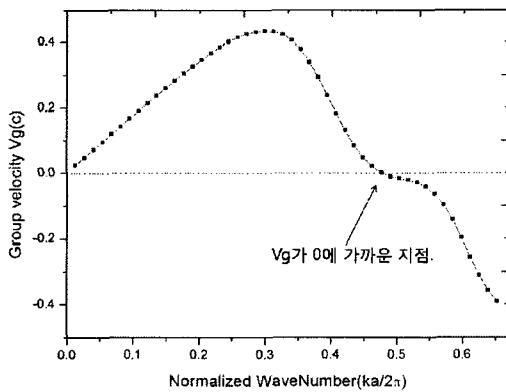


그림 3. waveguide mode의 군속도( $V_g$ ).

그림3은 waveguide mode에 대한 군속도( $V_g$ )를 나타낸 그림이다. 그림3을 보면  $k_x=0.5$  부근에서 군속도가 “0”에 가까운 것을 볼 수 있다. 군속도가 0을 보이는 것은 정상파(standing wave)형태로서 전자기파가 진행방향으로 나가 지 못하고 머물러 있는 형태이다. 즉, 에너지 흐름이 없이 정적 상태이다.[12] 그리고 군속도가 음을 나타내는 것은 전자기파의 진행에 반대 방향으로 에너지가 흐르는 것이다. 그림4는 군속도가 0을 보이는 부분을 세분화 하였다.

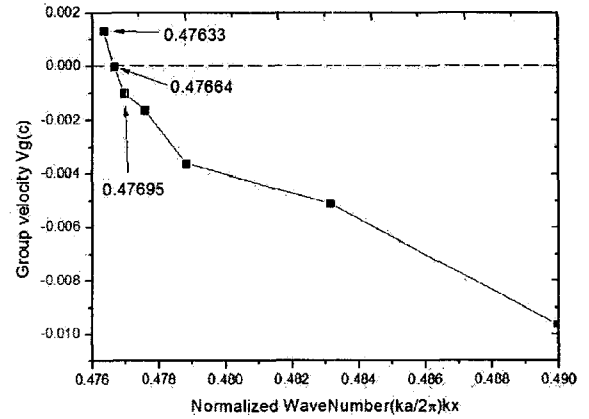
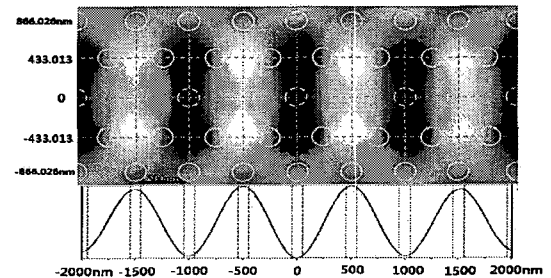
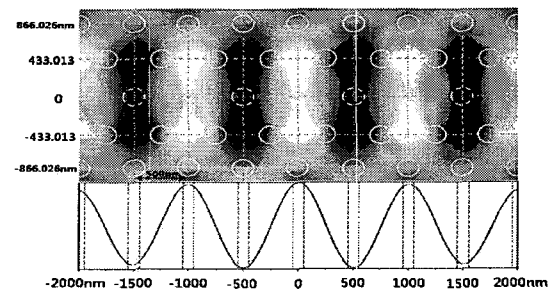


그림 4. 군속도가 “0”인 부근 확장.

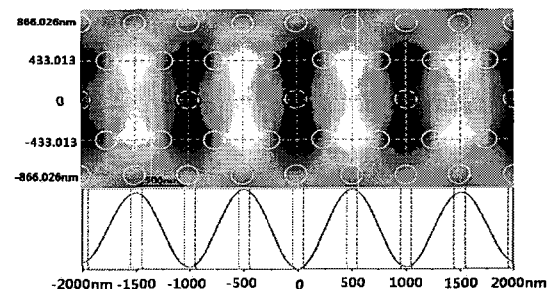
그림4에서  $k_x=0.47664$ 에서 군속도가 0을 보이며 전자기파의 에너지 흐름이 양에서 음로 바뀌게 된다. 다음으로 군속도가 양에서 음로 바뀔 때 각각의 파수(k)에 따른 전기장을 통하여 mode의 위상변화를 확인한다.



(a)  $k_x=0.47633$



(b)  $k_x=0.47664$



(c)  $k_x=0.47695$

그림 5. (a)  $k_x=0.47633$  (b)  $k_x=0.47664$  (c)  $k_x=0.47695$ 의 전기장.

그림5에서 각각의 그림 아래쪽에 삽입되어 있는 선형

그래프는 전기장의 x축 단면이고 점선으로 표시된 부분은 실제 원통의 사이즈를 표시한 것이다.

그림5 (a), (b), (c)를 비교해 보면 파장이 반 파장씩 바뀌는 것을 확인할 수 있다.[13] 즉, 위상이 180° 바뀌어 군속도가 변하는 것이다. 그리고 군속도가 “0”에 가까워 질수록 정상파 형태를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 또한, 그림 (a) 와 (c)를 비교해 보면 진폭이 한 파장이 변하는 것을 볼 수 있다. 이것은  $kx=0.47664$  이후로는 위상이 360°가 변하여 진행하는 방향의 반대로 전파되는 것을 의미한다. 그러므로 군속도가 양에서 음으로 변하는 것이다.

### 3.결 론

우리는 2차원 광결정에서 무한 크기의 삼각형 격자의 선결함에 대해 논의하였다. 밴드갭 내에서는 전파되는 mode가 존재하지 않지만 결함을 넣었을 경우 밴드갭내에 waveguide mode가 존재함을 볼 수 있었다.

waveguide mode가  $kx=0.47664$ 일 때 군속도가 “0”이고  $kx=0.47664$  이후로 전자기파의 에너지 흐름이 반대로 바뀌었다. 이것은 정상파 상태에서 위상이 반 파장씩 변하여 생긴 현상이라는 것을 확인하였다. 또한 군속도의 진행 방향이 바뀌는 것은 한 파장, 즉, 위상이 360° 변하여 생긴 현상이라는 것을 보았다.

광학(real space 사용)에서 전자기파가 작은 굴절률을 가지는 매질에서 큰 매질로 이동할 때 위상 변화가 일어난다. 광결정(reciprocal space 사용)에서  $kx=0.47664$ 일 때 real space와 같은 현상이 일어났다. 이 속성은  $kx=0.47664$ 가 real space에서 경계면 효과를 갖는 것과 동일하다. 마치 광학 현상과 유사하게 볼 수 있다. 위상이 180° 바뀌는 것은 광학에서 보강소멸간섭에 중요한 요인이다. 광결정에서도 빛의 소멸보강간섭으로 빛을 제어할 수 있을 것이다.

### 감사의 글

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

### 참고문헌

[1] N. Susa, Jpn. J. Appl. Phys, 39, 6288 (2000).  
 [2] G. Nikhil, Appl. Phys. Lett, 88, 071110 (2006).  
 [3] L. Chun-Hyung, Microelectric Engineering, 83, 1798-1804 (2006).  
 [4] M. Plihal, Phys. Rev. B, 44, 16 (1991).  
 [5] J. D. Joannopoulos, R. D. Meada, and J. N. Winn, *Photonic Crystal; Molding the Flow of light* (Princeton University Press, Princeton, NJ, 1995) pp. 43-44.  
 [6] C. S. Kee, J. E. Kim, Phy Rev E, 58, 6 (1998).  
 [7] Wei Lu, Solid State Communications, 138, 205-210 (2006).  
 [8] L. Shen, S. He, J. Opt. Soc. Am. A 19, 1021-1024

(2002).  
 [9] K. Sakoda, *Optical Properties of Photonic Crystals* (Springer-Verlag, Berlin, 2001) pp. 142-143.  
 [10] S. H. G. Teo, A. Q. Lui, J. Singh, Appl. Phys. A, 89, 417-422 (2007).  
 [11] Samuel S. M. Cheng, Lie-Ming Li, Phys. Rev. B, 59, 4091-4099 (1999-II).  
 [12] T. F. Krauss, J. Phys. D : Appl. Phys, 40, 2666-2670 (2007).  
 [13] Andrei V. Lavrinenko, Yuri S. Kivshar, J. Opt. Soc. Am. B, 25, C65-74 (2008).