

절대 광밴드갭을 가지는 2차원 광결정 구조의 비균일성이 광밴드갭에 미치는 영향 분석

Effect of size nonuniformities on the absolute photonic bandgap of two-dimensional photonic crystals

류한열, 황정기, 이용희
한국과학기술원 물리학과
rhy@cais.kaist.ac.kr

광결정(photonic crystal)은 빛의 파장 크기 정도의 격자 상수를 지닌 1차원, 2차원, 또는 3차원의 주기적인 구조이다.⁽¹⁾ 광결정에는 광밴드갭(photonic bandgap)이라는 진동수의 영역이 존재하는데, 이 진동수 영역에 해당하는 빛은 광결정에 존재할 수 없다. 즉, 광결정의 외부에서 들어오는 빛은 모두 반사하게 되고, 내부에서는 빛의 자발 방출(spontaneous emission)이 일어날 수 없다. 따라서, 광결정은 빛의 자발 방출을 제어할 수 있다⁽²⁾는 점에서 많은 관심을 받아왔다. 2차원 광결정은 평면상에서, 그리고 3차원 광결정은 모든 방향에서 자발 방출을 제어할 수 있는데, 3차원 광결정 구조는 제작하기가 매우 어려워서 현재는 2차원 광결정 구조의 제작과 연구가 주로 진행 중에 있다.

2차원 광결정 구조를 제작하는 방법으로는 Si나 GaAs와 같은 반도체를 전자선 리소그래피(electron-beam lithography)와 건식 식각(dry etching) 하는 것이 많이 이용되고 있다. 이러한 방법으로 제작된 구조는 공기 구멍(hole)이나 반도체 기둥(rod)이 평면상에서 주기적으로 배열된 형태인데, 반도체와 공기의 굴절률 차이가 매우 크므로 넓은 광밴드갭이 존재할 수 있다. 그런데, 가시광이나 근적외선에서 동작하는 광결정 구조를 형성하는 공기 구멍이나 반도체 기둥의 크기는 수백nm 정도로 매우 작아서 실제로 제작된 구조에서 이들의 크기는 균일하지 않다. 이러한 비균일성은 이론적인 예측과 다른 결과를 보일 것이고, 따라서 제작된 광결정 구조의 특성에 영향을 미칠 수 있을 것이다.

본 연구에서는 2차원 광결정 구조의 제작 과정에서 일어날 수 있는 비균일성이 광밴드갭에 미치는 영향을 분석하였다. 일반적으로 완전히 주기적이고 균일한 구조에 비균일성이 존재하게 되면 밴드갭이 줄어드는 효과가 나타나게 된다. 따라서, 광결정에 존재하는 비균일성이 광밴드갭에 미치는 영향으로서 광밴드갭이 줄어드는 정도를 계산하였다.

2차원 광결정 구조에서 광모드(optical mode)는 2차원 평면상에 존재하는 편광(H-pol.)과 평면에 수직인 편광(E-pol.)으로 나눌 수 있는데, 평면상에서 완전한 자발 방출 제어를 위해서는 두 편광 모두에 공통인 광밴드갭, 즉 절대 광밴드갭(absolute photonic bandgap)이 존재해야 한다. 이러한 절대 광밴드갭이 존재하는 대표적인 구조로 공기 구멍이 삼각형 격자(triangular lattice)를 이루는 경우와 유전체 기둥이 벌집 격자(honeycomb lattice)를 이루는 경우가 있다.⁽³⁾ 본 연구에서는 절대 광밴드갭을 가지는 이 두 구조에서 비균일성이 존재할 때의 광밴드갭 수축을 계산한다. 그림 1에 두 구조의 형태를 나타내었다. 이 그림에서 반경의 평균은 격자 상수의 0.25배이고, 표준편차는 격자 상수의 2%이다.

그림 2에 두 격자 구조에서 절대 광밴드갭의 크기를 나타내었다. 이때에는 비균일성이 없는 상태를 계산하였다. 계산 방법으로는 평면파전개(plane-wave expansion)방법을 이용하였다.⁽⁴⁾ 이 방법은 전자의 밴드구조(electronic band structure) 계산에 이용되는 방법과 비슷한 방법이다. 그림 2의 위쪽 그림은 공기 구멍이 주기적으로 배열된 삼각형 구조의 경우이고, 아래쪽 그림은 유전체 기둥이 주기적으로 배열된 벌집 구조의 경우이다. 유전체의 유전 상수는 12.0으로 하였다. 광밴드갭의 크기를 나타내는 척도는

광밴드갭 가운데의 진동수에 대한 광밴드갭의 폭으로 정의되는 gap-midgap ratio ($\equiv \omega_{\text{gap}}/\omega_{\text{mid}}$)이다. 그림에서 볼 수 있듯이 삼각형 구조에서 큰 절대 광밴드갭이 얻어지고, 벌집 구조에서 절대 광밴드갭의 크기는 상대적으로 작다. 그런데, 실제 응용에 있어서는 광밴드갭의 크기도 중요하지만, 제작상에서 나타날 수 있는 비균일성에 광밴드갭이 얼마나 안정적으로 유지되는지도 상당히 중요하다.

비균일성이 존재할 때 절대 광밴드갭이 줄어드는 정도를 삼각형 구조와 벌집 구조의 몇 가지 경우에 대해서 계산하였다. 이때, 광밴드갭의 크기는 무작위적으로 선택한 10개의 비균일한 구조에서 광밴드갭의 크기를 계산하고 그 값들을 평균한 것으로 정하였다. 계산 결과 벌집 구조에서 유전체의 반경이 격자 상수의 0.25배일 때, 상당한 정도의 비균일성에서도 광밴드갭이 어느 정도 크게 유지되는 것을 확인했다. 삼각형 구조는 반경의 비균일성에 의해 광밴드갭이 큰 폭으로 줄어들었다. 그림 3에 벌집 구조에서 유전체 반경이 격자 상수의 0.25배일 때, 비균일한 반경의 표준편차(δr)에 따른 광밴드갭의 변화를 나타내었다. 실제적으로 광결정을 제작할 때 δr 이 격자 상수의 2%이내로 유지되는 것은 가능할 것으로 생각되는데, 이 경우에도 광밴드갭의 크기는 8%정도로서 충분한 값을 가진다. 그리고, 이 구조에서는 다른 구조에 비해 상대적으로 큰 격자 상수에서 절대 광밴드갭이 형성된다는 장점도 있다. 따라서, 이러한 점들을 고려할 때, 유전체 반경이 격자 상수의 0.25배인 벌집 구조가 절대 광밴드갭을 가지는 광결정 구조의 실현에 가장 적합하다는 결론을 내릴 수 있다.

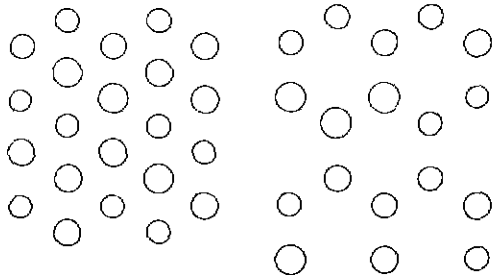
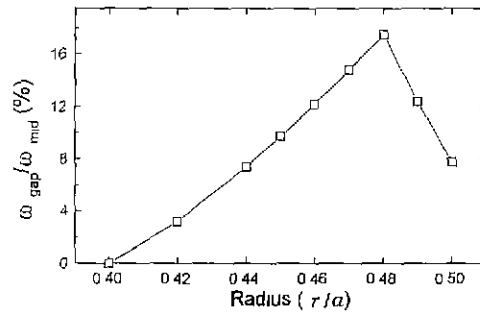


그림 1. 비균일한 기둥이 주기적으로 배열된 삼각형 구조(왼쪽)와 벌집 구조(오른쪽)



(a) 공기 구멍의 삼각형 격자 구조

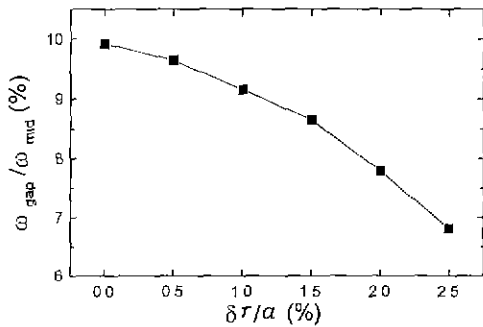
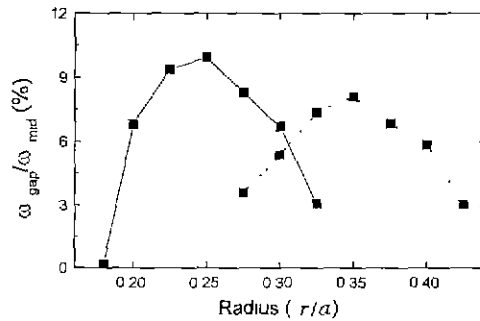


그림 3. 유전체 기둥 반경의 비균일성에 따른 절대 광밴드갭의 변화 (벌집 구조, $r = 0.25a$)



(b) 유전체 기둥의 벌집 격자 구조

그림 2. 비균일성이 없는 구조에서 반경에 따른 절대 광밴드갭의 크기

[참고 문헌]

1. J. D. Joannopoulos, P. R. Villeneuve, and S. Fan, "Photonic crystals : Putting a new twist on light", Nature 386, 143-149 (1997).
2. E. Yablonovitch, "Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics", Phys. Rev. Lett. 58, 1059-1062 (1987).
3. A. Barra, D. Cassagne, and C. Jouanin, "Existence of two-dimensional absolute photonic band gaps in the visible", Appl. Phys. Lett. 72, 627-629 (1998).
4. R. D. Meade, K. D. Brommer, A. M. Rappe, J. D. Joannopoulos, and O. L. Alerhand, "Accurate theoretical analysis of photonic band gap materials", Phys. Rev. B 48, 8434-8437 (1993).

