유전체 내의 구멍에 유전체 기둥을 넣은 이차원 광자결정의 절대 띠간격

Absolute band gaps of two-dimensional hexagonal photonic crystals with dielectric cylinders in air holes

이선구, 한해욱
포항공과대학교 전자전기공학과 테라헤르츠 포토닉스 연구단
isun@postech.ac.kr

광자결정이란 굴절률이 다른 두 유전체가 주기적으로 배열된 구조를 말한다.[1] 이 주기적인 구조 때문에 광자결정 내로 전자기파가 진행하지 못하는 광자 띠간격이 나타날 수 있는데 이는 흔히 반도체의 띠간격과 비교된다. 광자결정으로 진행하는 전자기파의 모든 방향에 대해서 띠간격이 존재하는 경우 그 띠간격을 특히 절대 띠간격 혹은 완전 띠간격이라 한다. 이 띠간격은 광자결정의 가장 중요한 성질로 절대 띠간격이 클수록 응용에 유리하기 때문에 큰 띠간격을 갖는 구조를 찾는 일은 매우 중요하다.[2] 이차원 광자결정의 경우 두 가지 편광이 서로 독립적으로 완전히 다른 띠구조를 갖기 때문에 이 두 편광이 구별되지 않는 삼차원 다이아몬드 구조[3]보다 일반적으로 절대 띠간격의 크기가 훨씬 작다. 한편 이차원 광자결정에 허용되는 두 가지 편광 중에서 TE 편광된 빛은 유전체가 서로 연결된 구조에서 띠간격이 크게 나타나고 TM 편광된 빛은 유전체가 고립되어 존재하는 상태에서 띠간격이 크게 나타나는 것으로 알려져 있다.[1] 따라서 보통의 이차원 광자결정은 유전체에 구멍을 뚫거나 유전체 기둥을 배열한 형태이기 때문에 TE 띠간격과 TM 띠간격은 각각 크게 나타나지만 그 두 띠간격이 겹치는 절대 띠간격이 나타나는 범위도 제한되고 그 크기도 그리 크지 않다. 본 연구에서는 이러한 두 가지 편광의 띠간격의 성질을 이용해 유전체에 구멍을 뚫고 다시 그 구멍에 유전체 기둥을 넣은 구조에 대해 계산하였다. 그 결과 보통의 이차원 광자결정의 경우보다 다양한 주파수 범위에서 큰 절대 띠간격이 나타나는 것을 확인하였다.

그림 1은 본 연구에서 제안하는 2차원 광자결정의 개략도이다. 유전체에 육방구조로 반경 r_a인 구멍을 뚫고 다시 그 중심에 반경 r_d인 유전체 기둥을 세운다. 광자 띠구조 계산은 평면파 전개방법[3]을 이용하였으며 계산에 이용된 평면파의 수는 841개였다. 1849개의 평면파를 사용했을 때와 최대 1% 이내의 오차가 나는 것을 확인할 수 있었다. 유전상수는 11.4로 가정하였다.

그림 2의 (c)는 이 구조의 gap map을 보인 것이다. 이 gap map은 먼저 유전체에 반경 0.47a인 구멍을 뚫은 후 그 중심에 세운 유전체 기둥의 반경을 늘려 가면서 띠간격의 주파수를 계산해 표시한 것이다. 잘 알려진 보통의 광자결정과 비교하기 위해 그림 (a)와 (b)에 각각 유전체에 구멍을 뚫은 경우와 유전체 기둥을 배열한 경우도 함께 보였다. 앞서 설명한 바와 같이 그림 2(a)에서는 TE 편광의 띠간격이, 2(b)에서는 TM 편광의 띠간격이 각각 두드러지게 나타나지만 본 연구의 구조인 그림 2(c)에서는 TE, TM 편광의 띠간격이 거의 비슷한 넓이로 gap map 내에 존재하는 것을 볼 수 있다. 그림 2(c)에서 r_d=0일 때는 그림 2(a)에서 r_a=0.47a일 때와 동일한 구조이므로 2(c)에서 r_d=0 부근의 띠간격은 2(a)와 직

접적으로 관련이 있고, 마찬가지로 그림 2(b)와의 관련성도 찾아 볼 수 있다. 그림 2(c)에서 r_d=0부근의 절대 띠간격도 2(a)와 관련이 있지만 그림 2(c)에서 r_d=0.2a 주변의 절대 띠간격은 이 구조에서 나타나는 새로운 것이다. 이 절대 띠간격은 공기 구멍의 반경이 r_a=0.46a이고 유전체 기둥의 반경이 0.21a 일 때 $\Delta\omega = 0.057(2\pi c/a)$로 최대가 된다. 이 값은 공기 구멍만 뚫은 구조의 최대값 $\Delta\omega = 0.074(2\pi c/a)$보다 다소 작지만 중심 주파수가 두 배정도 높은 1.1 $(2\pi c/a)$에서 띠간격이 나타나므로 실제 응용면에서는 유리한 점이 있다. 즉 띠간격이 나타나는 주파수가 두 배가 높으면 광자결정의 전체적인 크기도 두 배가 되어 공정에 유리한 것이다.

구멍의 반경 r_a가 커지게 되면 TE와 TM 편광의 띠간격은 높은 주파수대로, 또 gap map 상에서 왼쪽으로 이동하게 된다. 이동하는 정도가 서로 다르기 때문에 절대 띠간격의 크기와 위치가 변하게 된다. 이렇게 나타나는 또 다른 절대 띠간격은 r_a=0.475a, r_d=0.29a 일 때 중심 주파수 1.46 $(2\pi c/a)$에서 최대 띠간격 $\Delta\omega = 0.060(2\pi c/a)$의 값을 가지는 것을 확인하였다. 이것은 중심 주파수는 공기 구멍만 있는 구조보다 3배 가량 높으면서 띠간격의 크기도 그리 작지 않은 값이다. 본 연구는 과학기술부 창의적연구진흥사업의 지원으로 이루어졌다.

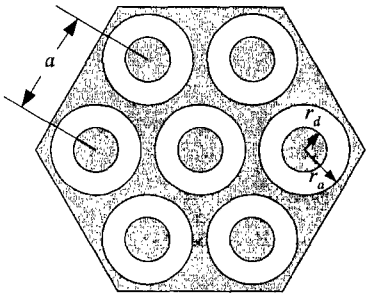

그림 1. 이차원 육방(hexagonal) 광자결정의 개략도. 유전체에 반경 r_a인 구멍을 내고 그 중심에 반경 r_d인 유전체 기둥을 넣은 구조이다. 그림에서 a는 격자 상수이다.

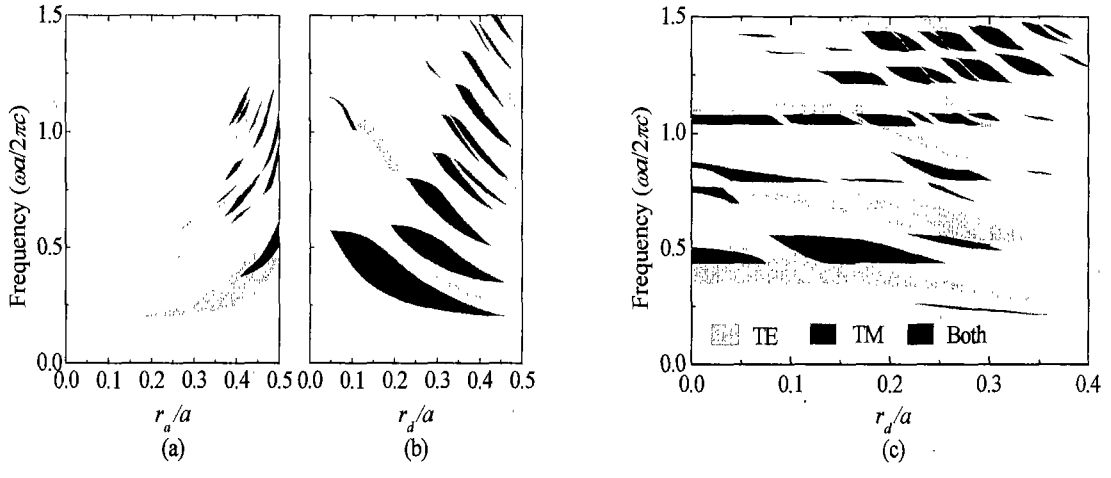

그림 2. 이차원 육방 광자결정의 gap map. (a) 유전체에 구멍을 뚫은 구조 (b) 유전체 기둥을 배열한 구조 (c) 그림 1과 같이 유전체에 구멍을 낸 후 그 중심에 유전체 기둥을 세운 구조의 gap map이다.

[참고문헌]

1. John D. Joannopoulos, Robert D. Meade, and Joshua N. Winn, *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*, (Princeton University Press, Princeton, 1995).
2. C. M. Anderson and K. P. Giapis, Phys. Rev. Lett. **77**, 2949 (1996).
3. K. M. Ho, C. T. Chan, and C. M. Soukoulis, Phys. Rev. Lett. **65**. 3152 (1990).