2차원 광결정의 비정상적인 광분산에 대한 연구

Anomalous Dispersion in Two-Dimensional Photonic Crystals

강동열, 류한열 ,황정기, 이용희
한국과학기술원 물리학과
dyk@kaist.ac.kr

광결정(photonic crystals)은 유전체를 주기적으로 배치한 구조인데, 이런 구조에 의해 1차원, 2차원, 또는 3차원적으로 빛을 제어할 수 있다.[1] 이런 주기적인 구조로 인해 광결정 내에서는 특정에너지와 특정 방향을 가진 빛이 진행하지 못하는 광밴드 갭(photonic band gap)뿐만 아니라 밴드구조와 밀접한 관계가 있는 비정상적인 광분산이 나타나기도 한다. 이러한 비정상적인 광분산에는 입사빔의 미세한 파장변화에 따른 PC내에서의 급격한 빛의 꺾임이나, 단일 파장의 입사빔이 두갈래로 갈라지는 현상, 또는 negative나 1보다 작은 굴절효과 등이 있는데, 이러한 현상을 해석하기 위한 것으로 광결정내의 고정된 진동수에 해당하는 점들을 2차원 k공간에서 표시한 분산곡선(dispersion surface)이 도입되었다.[2]

본 연구에서는 이러한 광결정의 분산곡선을 이용하여, 광결정내에서의 비정상적인 광분산이 나타남을 보이는 것 외에도 특정 광결정의 밴드갭이 밴드구조에서 나타나는 것보다 더 넓어지는 'pseudo 밴드갭' 과 입사빔의 TE, TM 모드에 따라서 광결정에서 빛을 분리할 수 있는 것을 보이려고 한다.

그림 1은 광결정내에서 빛의 비정상적인 진행을 설명하였다. 입사빔은 공기중에서의 분산곡선을 나타내기 때문에 2차원 k공간에서 isotopic한 완전한 원으로 표시되는 반면 광결정내에서 분산곡선은 anisotropic하고 비정상적인 모양을 나타내게 된다. 여기서의 분산곡선은 그림 1(a)의 밴드구조에서 a/λ 값이 0.36에 해당하는 k값들을 나타낸 것이다. 광결정에 입사하는 빛의 방향이 그림 1에서처럼 θ의 각도로 입사한다면 입사면 방향의 운동량보존을 나타내는 직선과 광결정내에서의 분산곡선이 만나는 점이 생기게 되고, 이 점에서 빛의 진행방향, 즉 빛에너지는 군속도 분산식에 의해 분산곡선에 수직한 방향이 되기 때문에 그림에서처럼 진행하게 된다.

그림 2(a)는 그림 1의 triangular 구조와는 달리 square 구조의 밴드구조를 그린 것인데, 첫 번째 밴드 갭 아래쪽의 a/λ 값이 0.26인 분산곡선을 그려본 것이 그림 2(b)이다. 여기에서 살펴보면, 빛을 공기중에서 어떤 방향으로 입사하더라도 운동량 보존을 나타내는 직선과 광결정의 분산곡선이 만나지 않는 것을 알 수 있는데, 이렇게 되면 그림 2(a)에서 a/λ 값이 0.26인 곳이 밴드 갭이 아닐지라도 실제로는 마치 밴드 갭과 같은 작용을 하게 되는 'pseudo 밴드 갭'이 나타나게 된다. 이 현상을 좀더 물리적으로 설명한 것이 그림 3인데, 이 그림에서 보면 진공중에서 입사하는 빛의 wave front가, 이 빛을 거의 입사면에 평행하게 입사하더라도 광결정내의 ΓX방향으로의 wave front에 matching이 되지 않음을 알 수 있다. 참고로 이 구조에서 pseudo 밴드 갭의 아래쪽 최대값은 a/λ 값이 0.221까지 내려옴을 볼 수 있었다.

이러한 광결정내의 분산곡선을 이용하면 입사빔을 입사하는 각도나 입사 파장에 따라서 분리할 수 있을 뿐만 아니라 그림 4에서 처럼 TE, TM 모드에 따라서 분리할 수 있다. 그림에서 보이는 바대로 특정 조건의 광결정에 어떤 특정한 각도로 빛을 입사시키게 되면, 거의 90° 로 TE, TM모드의 빛이 분리되는 것을 볼 수 있다.

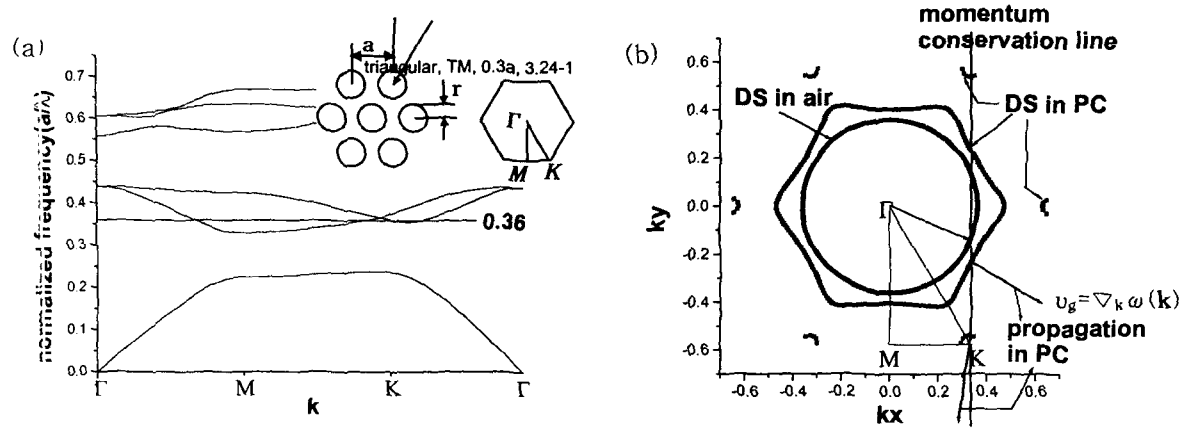

그림 1. Triangular, r=0.4a, 굴절률 3.24인 기둥구조에서 밴드구조와 a/λ=0.34인 분산곡선

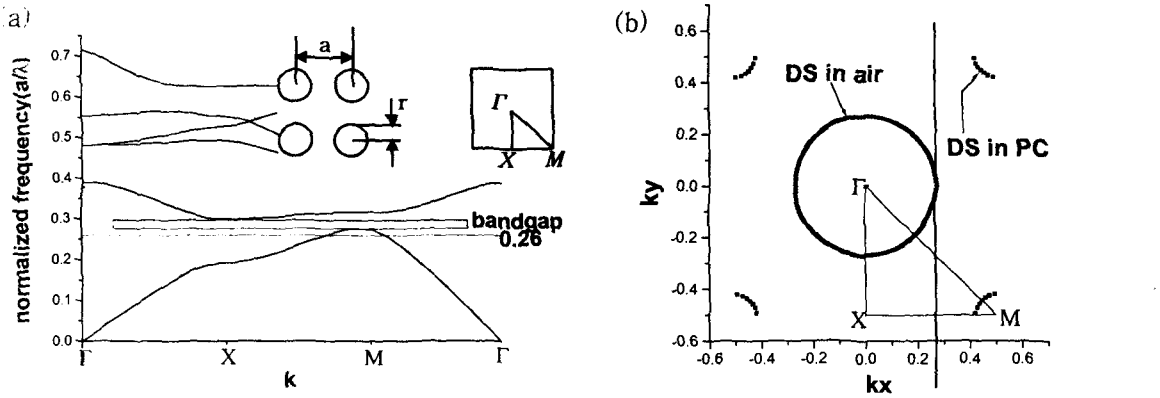

그림 2. Square, r=0.4a, 굴절률 3.24인 구멍구조에서 밴드구조와 a/λ=0.26인 분산곡선

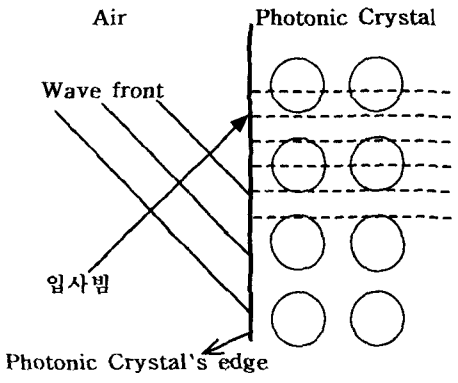

그림 3. Pseudo 밴드 갭의 물리적 해석

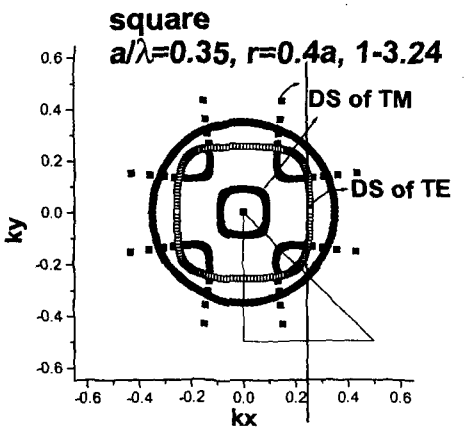

그림 4. TE, TM모드의 분리

[참고 문헌]

[1] J. D. Joannopoulos, P. R. Villeneuve, and S. Fan, Nature 386, 143 (1997).

[2] Hideo Kosaka, Takayki Kawashima, Akihisa Tomita, Masaya Notomi, Toshiaki Tamamura, Takashi Sato and Shojiro Kawakami, Phy. Rev. B 58, R10096, (1998)