

# 주기적 경계 조건의 FDTD 방법에 의해 계산된 광자 크리스탈의 특성

## Characteristics of Photonic Crystals Computed by the FDTD method with Periodic Boundary Conditions

홍수완, 김창모, 정교방  
홍익대학교 전파통신공학과  
dlgil@netian.com

광자 크리스탈(Photonic Crystals)은 적절한 유전율 비율을 가진 유전체를 주기적으로 배열한 구조이다. 이러한 광자 크리스탈의 특성으로는 빛이 특정 파장 범위에서 통과하지 못하는 광자 밴드갭(Photonic Bandgap, PBG), 주기적 구조에 약간의 주기를 깨트리는 디펙트에 의해 생성되는 지역화된 디펙트 모드, 그리고 PBG 근방에서 진행하는 빛의 비정상적인 광분산 현상등이 있다<sup>(1)</sup>. 이러한 광자 크리스탈의 특성을 연구하기 위해서 광자 크리스탈의 구조에 따른 밴드 구조(Band Structure)와 분산 곡선(Dispersion Surface)을 이용하게 되는데, 이는 특정 주파수와 파동벡터 사이의 관계를 알려 주어 광자 크리스탈 내에서 빛이 어떻게 진행되는지를 예상할 수 있게 한다. 지금까지 이러한 계산에는 주로 Plane Wave Expansion 방법이 사용되어 왔다. 이 방법은 맥스웰 방정식을 주파수 영역에서 해석하게 되고, 계산할 시스템의 크기가 N만큼 증가하면 계산하는 양과 시간은  $N^3$ 에 비례하여 증가하게 된다. 본 논문에서는 시간 영역에서 직접 맥스웰 방정식을 해석하는 FDTD(Finite-Difference Time-Domain) 방법을 이용하여 광자 크리스탈의 밴드 구조와 분산 곡선을 계산하였다<sup>(2)</sup>.

그림 1에서 주기적 경계 조건을 적용하여 원시세포(Primitive cell)만의 계산 영역을 만든 후 특정 파동벡터에 대해 주파수 영역에서 존재 가능한 모든 field를 인가하고, 적절한 time-step동안 field를 계산하여 이를 푸리에 변환을 하면 광자 크리스탈 내에서 특정 파동벡터에 해당하는 eigenmode 주파수를 얻을 수 있다. 이를 각각의 파동벡터에 대해 반복 계산하면 원하는 광자 크리스탈 구조에 대한 밴드 구조를 구할 수 있다. 이를 이용하면 시스템의 크기가 N 만큼 증가하여도 계산의 양과 시간은 N 만큼만 증가하게 된다. 초기 조건으로 인가한 field 값을 변화시킴으로써 TE 모드와 TM 모드의 각각의 값을 계산할 수 있다. 동일한 방법으로 계산한 후 특정 주파수에 해당하는 파동 벡터만을 2차원 공간상에 표시하게 되면 분산 곡선을 구할 수 있다.

디펙트를 포함하는 구조의 광자 크리스탈의 디펙트 모드를 해석하는 경우, 투과 계수를 이용하여 디펙트 모드가 존재하는 주파수를 얻는 방법과 디펙트 근처에서의 DOS(Density of States)를 구하는 방법이 있다<sup>(3)</sup>. 첫 번째로 투과 계수를 이용하는 방법은 그림 2의 (a)에서와 같이 광자 크리스탈 양쪽에 PML(Perfectly Matched Layer) 영역을 만들어 불필요한 반사광을 흡수시키고 광자 크리스탈을 통과한 빛의 스펙트럼을 통해 그림 3과 같이 광자 밴드갭과 디펙트 모드를 구한다. 그러나 이 방법은 파동벡터의  $\Gamma$ -X 한 방향에 대한 값이므로 모든 방향에 대한 밴드갭과 디펙트 모드를 관찰하기 어렵다. 두 번째로 DOS를 이용한 방법은 그림 2의 (b)에서와 같이 격자의 개수를 늘려준 다음 밴드 구조를 계산하는 방법과 유사하게 디펙트 근처에 delta 함수 형태의 field를 인가하여 주고 적절한 time-step후에 그 위치의 DOS를 계산하면 보다 일반적인 방향에 대한 디펙트 모드를 확인할 수 있다. 그림 3과 4는 각각 2차원 정사각형 기동구조 크리스탈에서 TM mode에 대한 투과 계수와 DOS 계산 결과이다.

본 논문에서는 주기적 경계조건을 적용한 FDTD 방법을 사용하여, 광자 크리스탈 구조에 따른 정확한 밴드 구조와 분산 곡선을 계산하였고, DOS에 의해 디펙트 모드를 명확하게 관찰하였다.

본 연구는 차세대 포토닉스 사업단과 차세대 광-무선 가입자망 연구 센터에 의해 지원되었음.

### [참고문헌]

- (1) J. D. Joannopoulos, R. D. Meade and J. N. Winn, *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*, (Princeton Univ. Press, Princeton, New Jersey, 1995).

- (2) 홍수완, 김창모, 정교방, "FDTD 방법을 이용한 광자 크리스탈의 밴드 구조와 분산 곡선 계산", 제8회 광전자 및 광통신 학술회의, FC2-25, 339-340, 2000.
- (3) M. Qiu and S. He, "Numerical method for computing defect modes in two-dimensional photonic crystals with dielectric or metallic inclusions." Phys. Rev. B 61, 12 871, 2000.

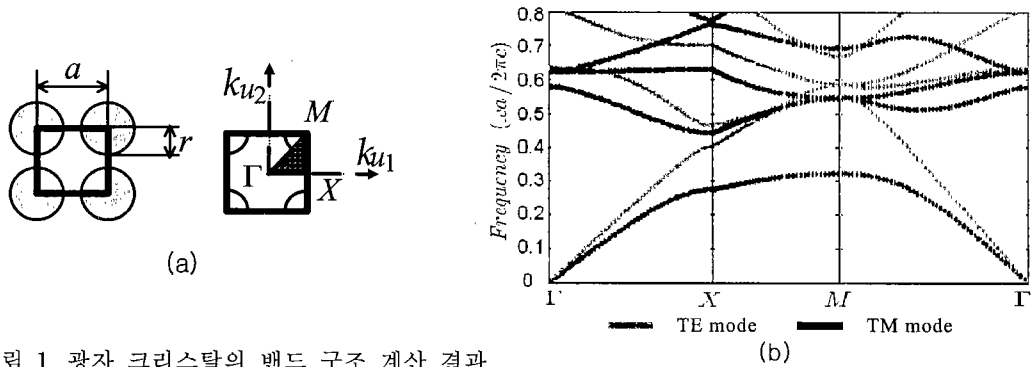


그림 1. 광자 크리스탈의 밴드 구조 계산 결과  
 (a) 정사각형 기둥 구조의 원시세포와 Brillouin 영역 (b) 밴드 구조 ( $\epsilon_r=8.9$   $r=0.2a$ )

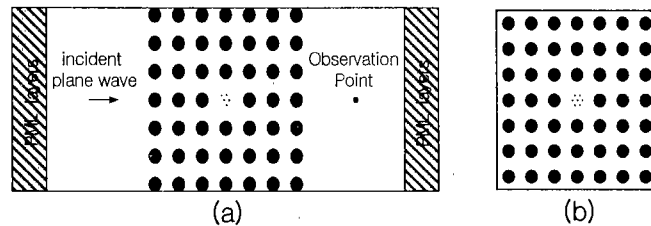


그림 2. 디펙트 모드 계산을 위한 계산 영역  
 (a) 투과 계수를 이용하는 경우 (b) DOS를 이용하는 경우

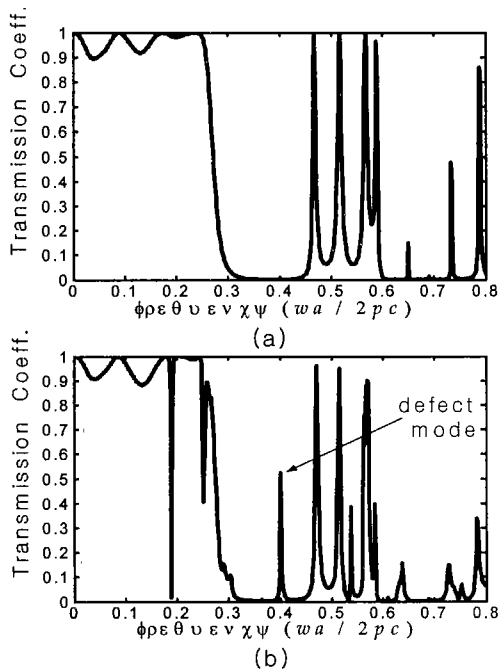


그림 3. TM mode에 대한 투과 계수 계산 결과 (정사각형 기둥구조,  $\epsilon_r=8.9$   $r=0.2a$ )  
 (a) 디펙트가 없는 경우  
 (b) 디펙트를 포함한 경우

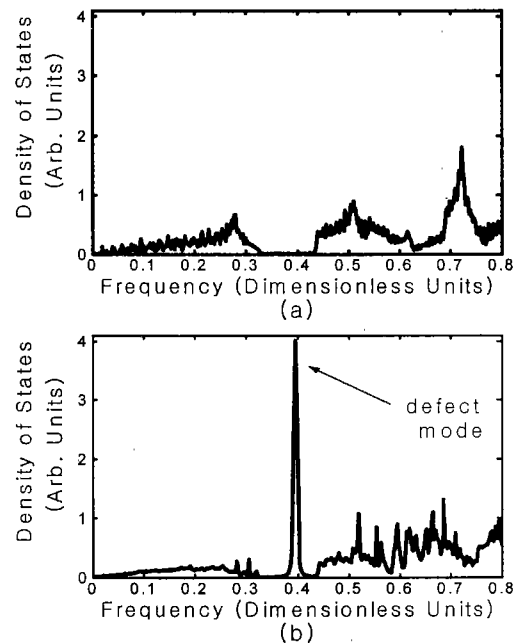


그림 4. 디펙트 근처에서의 TM mode에 대한 Density of states  
 (a) 디펙트가 없는 경우  
 (b) 디펙트를 포함한 경우