

## 2차원 광자 밴드갭 구조의 디펙트 모드 특성

서영술 · 정교방

홍익대학교 전파통신공학과

(2000년 3월 21일 받음, 2000년 6월 2일 수정본 받음)

본 논문에서는 Finite-Difference Time-Domain 방법을 이용해서 2차원 광자 밴드갭 구조 중 정삼각형 격자 구조, 정사각형 격자 구조, 그리고 정육각형 격자 구조의 전파의 투과 특성과 디펙트 모드의 특성 변화를 고찰하였다. 디펙트 모드는 디펙트의 위치, 모양, 유전율 등에 따라 다양하게 변화하는데, 본 논문에서는 특히 유전율 변화를 중심으로 특성을 고찰하였다.

OCIS codes : 230.0230, 250.0250.

### I. 서 론

최근 들어 광자 격자(Photonic Lattices)나 광자 크리스탈(Photonic Crystals)이라 불리는 주기적인 유전체 배열 구조가 많은 연구자들의 관심을 끌고 있다.<sup>[1-13,16-18]</sup> 유전체가 적당한 유전율을 가지며 주기적인 구조로 배열되었을 때 전자파가 특정 주파수 범위에서 통과하지 못하는 차단 영역이 발생하게 되는데, 이를 광자 밴드갭(Photonic Bandgap, PBG)이라 한다. 그 동안 여러 가지 2차원 주기적 배열 구조에 대해서 많은 투과 특성 연구가 진행되었다. 정사각형 구조의 유전체 원형봉,<sup>[6]</sup> 공기 원형봉,<sup>[6]</sup> 정삼각형 구조의 유전체 원형봉,<sup>[7]</sup> 공기 원형봉,<sup>[8]</sup> 정육각형 구조의 유전체 원형봉,<sup>[9]</sup> 공기 원형봉,<sup>[10]</sup> 등을 광자 밴드갭의 대표적인 해석 방법인 plane wave expansion을 이용해서 특성을 계산하였다. 그러나 이 방법은 다양한 디펙트의 모양에 대해서 다루기 어렵다는 단점이 있다.

현재 광자 밴드갭 구조는 특정 주파수 대역을 차단하는 특징을 이용한 유전체 반사 거울, 디펙트의 지역화 모드를 이용한 공진 캐버티 및 직렬 디펙트로 구성된 도파로 또는 채널 드롭 필터 등에 응용될 것으로 생각된다.<sup>[12]</sup> 또 초기 제안은 광 파장 영역에서 시작되었으나 제작의 용이성 등의 이유로 마이크로파 영역에서도 많은 응용이 나오고 있다.<sup>[13]</sup>

주기적 구조에 디펙트가 존재하게 되면 지역화된 디펙트 모드가 존재하게 되는데, 이는 디펙트가 반사체에 둘러싸인 마이크로 캐버티의 형성을 가능하게 하기 때문이다.<sup>[16]</sup> 또한 디펙트의 크기나 위치, 또는 유전율을 조정함으로써 광자 밴드갭 내부에 극히 좁은 대역의 통과 피크를 만들어 낼 수 있다.

본 논문에서는 유한한 크기의 2차원 정삼각형, 정사각형, 정육각형 격자 구조의 광자 밴드갭 크리스탈에서 광자 밴드갭의 존재를 확인하고 유전율의 변화에 따른 디펙트 모드의 투과 특성에 대해 고찰하였다. 본 논문에서는 전자파 해석의 대표적인 방법인 Finite-Difference Time-Domain(FDTD) 방법을 이용해서 광자 밴드갭 내의 디펙트 모드의 투과 특성을 계산하였다.

### II. 모델링 방법

Yee에 의해 처음 소개된 FDTD 방법<sup>[14]</sup>이란 미분 방정식인 맥스웰 방정식을 시간 영역에서 차분 방정식으로 바꿔 계산하는 방법이다. 이 방법은 시간 영역에서 맥스웰 방정식을 해석하기 때문에 시간 영역의 계산값을 가지고 Fourier 변환을 하면, 한 번의 시뮬레이션을 통해 넓은 범위의 주파수 특성을 구할 수 있다는 장점이 있다.

그림 1에 정삼각형 격자 구조를 갖는 크리스탈의 배열과 FDTD 방법의 계산 영역 및 투과파의 관찰점이 표시되어 있다. 계산 영역은 total-field 영역과 scattered-field 영역으로 나뉘어져 있고, total-field 내부에 광자 크리스탈이 존재하게 되며, 두 영역의 접면에서 Gaussian 주파수 분포의 입사파를 주입하게 된다(total-field/scattered-field formulation).<sup>[14]</sup> scattered-field 영역 외부에서 산란파의 반사를 제거하기 위해 흡수 경계 조건중 perfectly matched layer (PML)<sup>[15]</sup>를 사용하였다. Berenger에 의해 제안된 PML은 해석 공간 외부에, 내부와의 impedance matching을 이루면서 conductivity가 점진적으로 증가하는 몇 개의 격자를 더 두어, 그 격자에 들어오는 전자파의 크기를 점차적으로 줄이는 방식이다. 다음 식은 두 경계면 사이의 impedance matching을 나타내는 조건이다.

$$\frac{\sigma^*}{\mu_0} = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

위 식에서  $\sigma$ 와  $\sigma^*$ 는 각각 전계와 자계의 conductivity를 나타내고  $\mu_0$ 와  $\epsilon_0$ 는 자유 공간 상의 투자율과 유전율을 의미한다.

본 논문의 시뮬레이션은 2차원 TM(z 방향으로 무한 길이, 전계가 z 방향)의 경우에 대해서 수행하였다. 따라서 본 논문에서 구한 광자 밴드갭은 완전 밴드갭이 아니고 특정한 전파 방향과 전계에 대한 밴드갭이다.

### III. 정삼각형 격자 구조의 투과 특성

먼저 정삼각형 격자 구조로 원형봉이 배열되어 있을 때 광

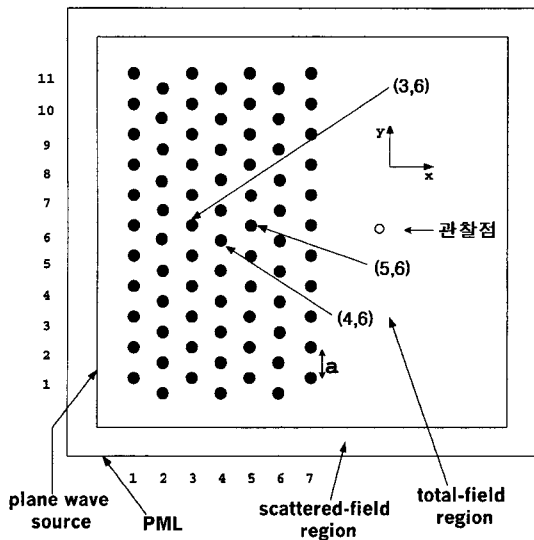


그림 1. 2차원 계산 영역 및 광자 밴드갭 크리스탈.

자 밴드갭 및 디펙트 모드의 특징을 조사하였다. 투과파 관찰점의 위치 및 배열 구조가 그림 1에 나타나 있다. 여기서 관찰점의 위치가 크리스탈에서 수배의 격자 주기만큼 떨어져 있으면 관찰점 위치가 변화하여도 투과파가 거의 변하지 않음이 관찰되었다. 원형 봉의 반지름은  $0.2a$  ( $a$ 는 격자 상수, 본 논문에서는  $10^{-6}$ )이고 유전율은  $11.56\epsilon_0$ 이다. 그림 1 구조의 투과 특성의 그래프가 그림 2에 나타나 있다. 그림 2에서 보듯이 주파수가 약  $0.27(c/a)$  부터  $0.45(c/a)$  사이에서 광자 밴드갭이 나타남을 알 수 있다 ( $c$ 는 자유 공간 상의 광속도). 이것은 완전 밴드갭이 아니고  $z$  방향 전계를 가진 입사파가  $x$  방향으로 전파할 때의 밴드갭이다. 그리고  $0.25(c/a)$  이하나  $0.5(c/a)$  이상에서의 피크나 계곡들은 밴드갭과 관련이 없는 노이즈 성분들이다. 이들은 Gaussian 입사파의 중심 주파수에서 멀리 떨어져 있어 신호 대 잡음비가 작기 때문에 생긴다.

이런 광자 밴드갭을 가지는 배열 구조에 디펙트가 존재하면 디펙트 모드가 밴드갭 내부에 존재하게 된다. 그림 3은 그림 1에서 (3,6)와 (5,6) (그림 1에서 가로로  $x$ 번째, 세로로  $y$ 번째

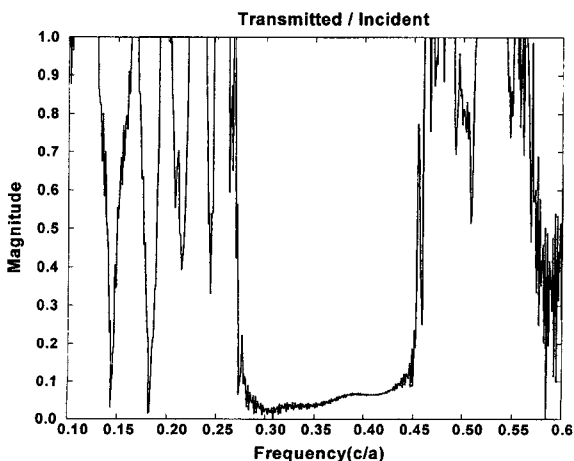


그림 2. 정삼각형 격자 구조에서의 광자 밴드갭.

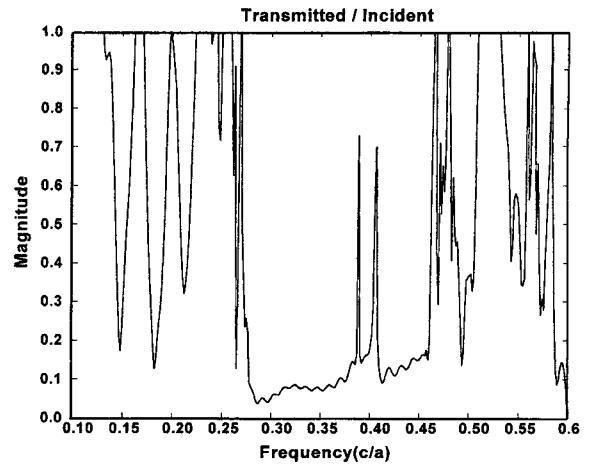


그림 3. 그림 1에서 (3,6)과 (5,6) 위치의 원형봉을 제거했을 때의 디펙트 모드.

봉을  $(x,y)$ 로 표시)의 위치에 두 개의 원형봉을 제거했을 때 나타나는 투과파의 주파수 특성을 나타낸다. 그림 3의 밴드갭은 그림 2와 같고, 이 밴드갭 내부에  $0.38(c/a)$ 과  $0.41(c/a)$  부근에 날카로운 피크가 나타난다. 이는 주기성이 깨져 디펙트 주위에 지역화된 공진 모드가 형성되었고, 또 두 개의 캐비티가 서로 결합하여 다른 공진 주파수를 갖는 또 다른 캐비티를 형성하여<sup>[17]</sup> 두 개의 피크가 형성된 것으로 이해할 수 있다.

디펙트 모드의 주파수를 제어하기 위해 디펙트의 반지름이나 유전율을 변화시키는 방법이 있다. 본 논문에서는 디펙트의 유전율을 변화시키면서 디펙트 모드의 주파수 변화 특성을 살펴보았다. 그림 4는 (4,6) 위치의 디펙트의 유전율 값을  $1.0\epsilon_0$ 에서  $0.5\epsilon_0$ 씩 변화시키며 디펙트 모드의 주파수 위치를 관찰해서 얻은 결과이다 ( $\text{index contrast} = \sqrt{11.56} - \sqrt{\epsilon_r}$ ). 디펙트의 유전율이  $7.5\epsilon_0$  이상에서는 디펙트 모드가 나타나지 않고,

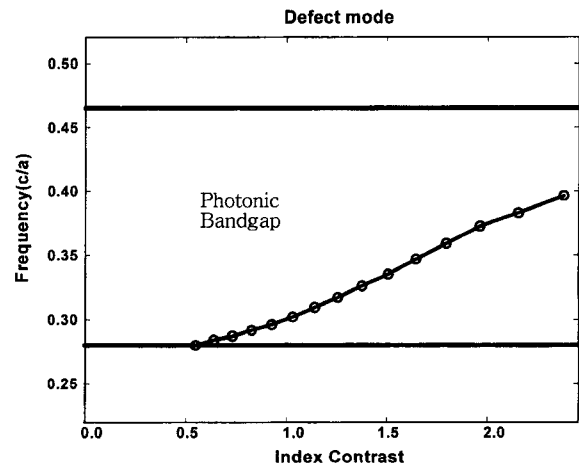


그림 4. 정삼각형 배열에서 중앙에 위치한 한 디펙트의 유전율 값의 변화에 따른 광자 밴드갭 내의 디펙트 모드 변화 ( $\text{Index Contrast} = \sqrt{11.56} - \sqrt{\epsilon_r}$ ,  $\epsilon_r$ 은 디펙트의 상대 유전율).

유전율이 클수록 낮은 주파수에서 디펙트 모드가 형성됨을 알 수 있다.

#### IV. 정사각형 격자 구조의 투과 특성

이번에는 정사각형 격자 구조에 대해서 광자 밴드갭과 디펙트 모드를 조사하였다. 그림 5에서 격자 구조가 정사각형이고 (x축으로 7개, y축으로 11개의 원형 봉 배열. a는 가장 가까운 봉-간의 거리.) 그림 5의 내부 그림과 같이 입사파가 진행하며, 계산 조건이 그림 2에서와 같을 때의 주파수 영역의 투과 특성을 보여준다. 정사각형 격자 구조일 때 광자 밴드갭이 약 0.28(c/a)에서 0.425(c/a) 사이에 존재함을 알 수 있다. 이는 참고 문헌 [18]에서 계산한 결과와 정확하게 일치하는 값이다. 정삼각형 격자구조에 비해 정사각형일 때가 좀 더 좁은 주파수 영역에서 광자 밴드갭이 존재하는 것을 알 수 있다. III 장에서와 마찬가지로 배열의 중앙봉을 디펙트로 잡아 유전율

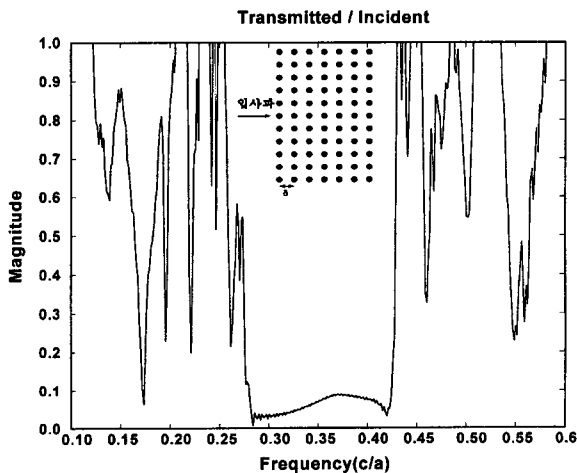


그림 5. 정사각형 격자 구조에서의 광자 밴드갭, 내부에 정사각형 격자 구조와 입사파의 진행 방향이 표시되어 있음.

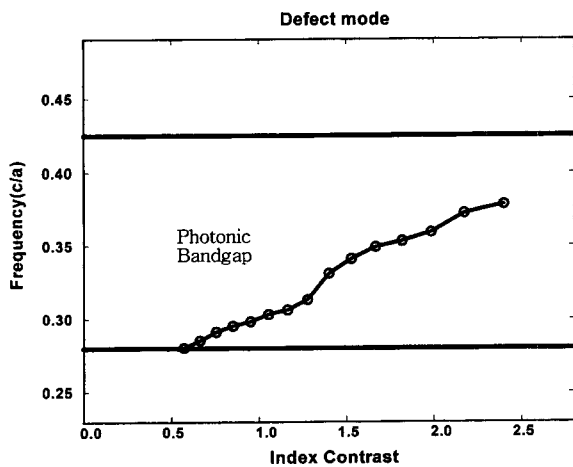


그림 6. 정사각형 배열에서 중앙에 위치한 한 디펙트의 유전율 값의 변화에 따른 광자 밴드갭 내의 디펙트 모드 변화 (Index Contrast =  $\sqrt{11.56 - \epsilon_r}$ ,  $\epsilon_r$  은 디펙트의 상대 유전율).

을 1.0 $\epsilon_0$ 에서 0.5 $\epsilon_0$ 씩 증가시키면서 디펙트 모드의 주파수 특성을 나타낸 것이 그림 6이다. 정삼각형 격자 구조의 디펙트 모드와 비슷한 주파수 특성이 나타남을 알 수 있다. 여기서 주파수 특성이 직선이 아닌 약간의 곡선을 이루는 이유는 현재 확실치 않고, 추후의 연구가 필요하다고 판단된다.

#### V. 정육각형 격자 구조의 투과 특성

주기적 형태를 가질 수 있는 또 다른 구조로는 정육각형 (honeycomb)의 격자 구조를 들 수 있다. 계산 조건은 원형봉의 유전율은 10이고 반지름은 격자 상수 a의 0.26배이며, 벌집의 형태로 서로 연결되어 있다. 그림 7은 이런 격자 구조에서 입사파가 그림 내부에 표시된 것과 같이 왼쪽에서 오른쪽으로 진행할 때 나타난 광자 밴드갭을 보여준다. FDTD의 Stability 특성 때문에 광 대역의 입사파를 만들기가 쉽지 않아 중심 주파수를 달리하여 두 번 계산을 수행하였다. 그림에서 보듯이 0.25(c/a)-0.34(c/a)와 0.54(c/a)-0.64(c/a)에서 첫 번째와 두 번째의 광자 밴드갭이 나타났다. 이번에도 주기적 배열 구조의 중앙에 디펙트를 넣었을 때 (원형봉을 하나 제거)의 특성이 그림 8에 나타나 있다. 첫 번째 밴드갭에서는 디펙트 모

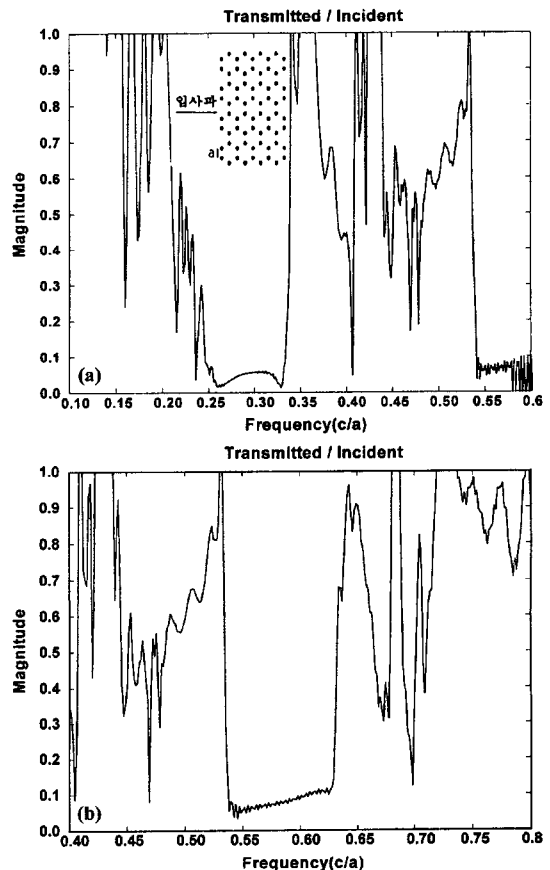


그림 7. (a) 정육각형 격자 구조에서의 광자 밴드갭. 내부에 정육각형 격자 구조와 입사파의 진행 방향이 표시되어 있음, (b) 그림 (a)와 같은 구조에서의 광자 밴드갭. 주파수 축의 범위가 다르고, 그림 7(a)의 우측 끝의 밴드갭이 선명하게 나타남.

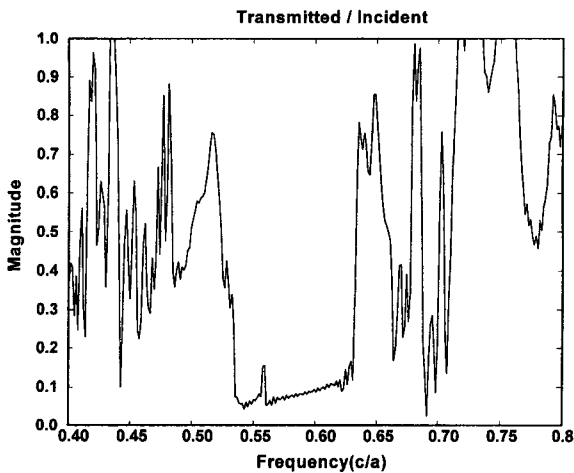


그림 8. 정육각형 배열에서 중앙의 한 원형 봉을 제거했을 때의 0.56(c/a) 부근의 디펙트 모드.

드가 나타나지 않았고 두 번째 밴드갭 내부의 약 0.56(c/a)에서 날카로운 피크가 생성되었음을 볼 수 있다. 정육각형 구조에서도 디펙트 유전을 값을 변화시키며 디펙트 모드를 관찰해보았으나 유전율이 조금만 커져도 금방 디펙트 모드가 사라짐을 볼 수 있었다.

### VI. 결 론

본 논문에서는 FDTD 방법을 이용해서 2차원 TM 경우에 대해 정삼각형, 정사각형, 정육각형 격자 구조의 광자 크리스탈에서 광자 밴드갭을 관찰했고, 디펙트 유전을 변화를 중심으로 디펙트 모드의 주파수 특성을 고찰하였다. 정삼각형 격자 구조와 정사각형 격자 구조의 유전을 변화에 따른 디펙트 모드의 변화는 유사한 특성을 보였고, 정육각형 격자 구조에서는 유전을 차이가 클 때만 디펙트 모드가 관찰되었다.

### 감사의 글

본 연구는 중점국가 연구개발사업 차세대 포토닉스 사업단

의 지원에 의해 수행되었습니다.

### 참고문헌

- [1] E. Yablonovitch, Phys. Rev. Lett. **58**, 2059 (1987).
- [2] J. D. Joannopolous, R. D. Meade, and J. N. Winn, *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light* (Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1995).
- [3] E. Yablonovitch, T. J. Gmitter, R. D. Meade, A. M. Rappe, K. D. Brommer, and J. D. Joannopolous, Phys. Rev. Lett. **67**, 3380 (1991).
- [4] S. Fan, P. R. Villeneuve, and J. D. Joannopolous, Phys. Rev. B **54**, 11245 (1996).
- [5] W. M. Robertson, G. Arjavalingam, R. D. Meade, K. D. Brommer, A. M. Rappe, and J. D. Joannopolous, Phys. Rev. Lett. **68**, 2023 (1992).
- [6] M. Plihal, A. Shambrook, A. A. Maradudin, and P. Sheng, Opt. Comm. **80**, 199(1991).
- [7] M. Plihal and A. A. Maradudin, Phys. Rev. B **44**, 8565 (1991).
- [8] K. Sakoda, Phys. Rev. B **51**, 4672 (1995).
- [9] D. Cassagne, C. Jouanin, and D. Bertho, Appl. Phys. Lett. **70**, 289 (1997).
- [10] D. Cassagne, C. Jouanin, and D. Bertho, Phys. Rev. B **52**, 2217 (1995).
- [11] K. B. Chung, *Integrated Photonics Research '99*, Paper RMH10, Santa Barbara, July 19-21, 1999.
- [12] S. Fan, P. R. Villeneuve, J. D. Joannopolous, and H. A. Haus, Optics Express **3**, 4 (1998).
- [13] Y. Horii and M. Tsutsumi, IEEE Microwave Guided Wave Lett. **9**, 13 (1999).
- [14] A. Taflove, *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method* (Artech House, Boston, 1995).
- [15] J. P. Berenger, J. Comput. Phys. **114**, 185 (1994).
- [16] 정교방, 제7회 광전자공학 학술회의, 논문 ThD2-8, 광주과학기술원, 1999. 5. 13-14.
- [17] 서영술, 정교방, Photonics Conference '99, 논문 IVe16, 설악한화리조트, 1999. 11. 3-4.
- [18] P. R. Villeneuve, S. Fan, and J. D. Joannopolous, Phys. Rev. B **54**, 7837 (1996).

## Characteristics of defect modes in two-dimensional photonic bandgap structures

Yeong-Sool Seo and Kyo-Bang Chung

Department of Radio and Communication Engineering, Hong Ik University, Seoul 122-791, Korea

(Received March 21, 2000, Revised manuscript received June 2, 2000)

Using the Finite-Difference Time-Domain (FDTD) method that analyzes the Maxwell equations in time domain, we simulated the characteristics of optical wave propagation and defect modes in two-dimensional photonic crystals composed of dielectric cylinders located on triangular, square, and honeycomb lattices. In particular, we investigated the properties of defect modes as the permittivity of the defects is varied.

OCIS codes : 230.0230, 250.0250.