

Tight binding법에 의한 이차원 coupled photonic crystal resonator array 구조의 해석

A tight binding analysis on the two-dimensional coupled photonic crystal resonator array structure

이일민, 김 휘, 김태수, 한승훈, 이병호*

서울대학교 공과대학 전기공학부

e-mail byoungcho@snu.ac.kr

광결정(photonic crystal)을 이용한 일차원 결합공진 광도파로(coupled resonator optical waveguide: CROW)는 도파 방향에 대해 매우 낮은 군속도를 갖고 있다는 특성 등으로 인해 많은 연구의 대상이 되어왔다.⁽¹⁾ 최근에는 이 CROW를 2차원으로 확장한 개념인 이차원 결합 광결정 배열(coupled photonic crystal resonator array: CPCRA)구조가 제안되었다.⁽²⁾ 이 구조는 모든 결정 방향에 대해 그리고 모든 파벡터 성분에 대해 거의 균일하게 작은 군속도를 갖는 특징을 가지고 있다. 한편, 고체 결정 구조의 해석법으로 개발된 TB(tight binding)법은 1차원 CROW구조에 있어 매우 효율적인 해석 방법임이 이미 알려져 있다.^(1,3,4) 본 논문에서는 1차원 CROW에서 사용되는 TB법을 2차원 CPCRA 구조에 대하여 확장하고 이를 이용하여 정방형 광결정 구조와 육각형 광결정 구조에서의 CPCRA 구조를 해석하고 이를 토대로 새로운 CPCRA 구조를 제안하는 한편, 제안된 구조에 대한 TB법을 통한 설계 방법을 제안하고자 한다.

이차원 CPCRA에 TB법을 적용함에 있어 개별 공진기의 공진모드간의 결합이 매우 약하다고 가정하고 광결정 방향에 대해 등간격으로 빈틈없이 배열된 구조를 생각하면 다음 식 (1)과 같이 표현 할 수 있다.

$$w_k \cong \Omega [1 - \Delta\alpha/2 + \sum_i \kappa_i^1 \cos(Rk_i)], dw_k/dk_i \cong -\Omega R \kappa_i^1 \sin(Rk_i) \quad (1)$$

위 식에서 Ω 는 단일 공진기 내의 모드의 각주파수이며, $\Delta\alpha$ 는 CPCRA 구조에 의존하는 상수이며, κ_i 는 결정 격자 상에서 가장 가까이 이웃하는 임의의 공진기에 대한 방향의 결합계수이다. 이와 같은 식을 이용하여 정방형 광결정 구조의 CPCRA와 육각형 광결정 구조의 CPCRA에 대하여 그 결합계수를 구한 모습을 그림 1에 나타내었다. 그림 1의 첫 번째 구조는 참고문헌 (1)에서 이미 발표된 것과 유사한 구조이며, 나머지 두 가지 구조는 육각형 광결정 구조에 대해 생각 할 수 있는 두 가지 유형의 CPCRA 구조를 나타내고 있다. 세 가지 경우 모두 TE mode에 대하여 계산하였으며, 광결정의 격자 상수를 a , 유전체의 반지름을 r , 굴절율을 n 이라 할 때, $r/a = 0.3$, $n = 3$ 인 경우에 대한 계산이다. 특별한 언급이 없는 한 이 논문의 다른 부분에서도 동일한 값이 사용되었다. 이 때, 그림 1의 공진기간의 거리는 각각 $4a$, $2\sqrt{3}a$, $2a$ 이다.

이러한 논의를 확장하여, 조금 더 복잡한 구조에 대한 분석을 하는 것도 가능하다. 예를 들어 아래의 그림 2 (a)와 같은 구조를 생각하면, 이제까지와 달리 공진기의 배열이 등간격으로 빈틈없이 배열되어 있지 않다. 이 경우에는 특정 방향에 대한 공진 모드의 공간적 분포와 그 방향으로의 공진기 간의 거리 모두를 고려해야 한다. 그림 2. (b)와 (c)는 각각 'x' 방향과 'd' 방향에 대한 공진 모드의 크기를 나타내고 있다. 이와 같이 'd' 방향으로 는 필드의 세기가 매우 작기 때문에, 비록 'd'방향이 공진기 간의 거리가 가깝다 해도 빛의 진행은 대부분 'x' 방향으로 일어나게 된다. 그림 2 (b)와 (c)의 하단에는 각 방향에 대한 결합계수가 계산되어 있다.

이제까지의 결과를 토대로 단일 공진기 내의 모드 분포를 변화시켜 특정 진행방향에 대한 군속도 차를 설계 하는 것도 가능하다. 그림 3 (a)는 그림 2 (a)의 이웃하는 다섯 개의 공진기에 대하여 실제 광결정 구조를 그린 것이다. 편의상 각 공진기간의 거리는 최대한 가깝게 놓았다. 그림 3 (a)에서 각 공진기의 모서리에 해당하는 유전체의 반지름(r)을 변화시키면, 공진기 내부의 모드 분포가 변화하게 된다. 이러한 모드 분포의 변화는 그림 3 (b)에서와 같이 'x' 방향과 'd' 방향에 대한 결합계수 값을 변화시킴을 알 수 있다. 모서리의 유전체의 반지름이

감소하면, 오히려 대각선 방향으로의 결합계수가 결정격자 방향의 결합계수보다 증가함을 알 수 있다. 이와 같은 방법으로 대각선 방향과 결정격자 방향의 군속도 차를 설계 할 수 있다.

이상과 같이 본 논문에서는 TB법을 확장하여 이차원 CPCRA 구조를 분석하는 방법과, 이를 토대로 새로운 CPCRA 구조를 제안하고 설계하는 방법을 고찰하였다.

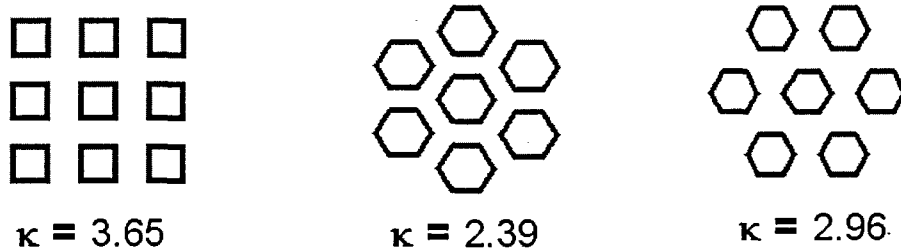


그림 1. 정방형 광결정 구조와 육각형 광결정 구조상의 이차원 CPCRA와 그에 대한 결합계수

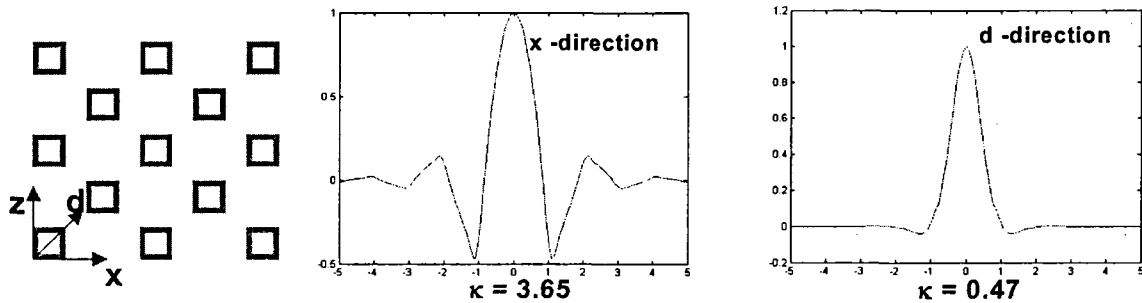


그림 2. (a) 성긴 CPCRA (b) 'x' 방향의 필드 분포 (c) 'd' 방향의 필드 분포

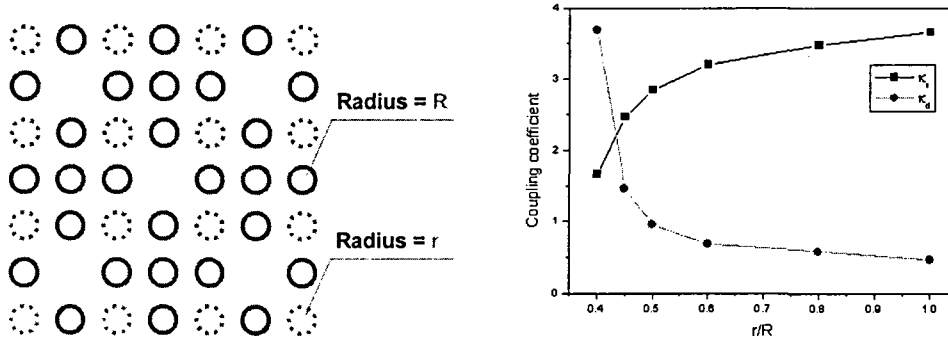


그림 3. (a) 군속도 설계를 위한 성긴 CPCRA 구조 (b) r 값의 변화에 따른 'x'와 'd' 방향 결합 계수 변화

1. A. Yariv, Y. Xu, R. K. Lee, and A. Scher, "Coupled-resonator optical waveguide: a proposal and analysis," *Optics Letters*, vol. 24, pp. 711-713, (1999).
2. H. Altug and J.Vuckovic, "Two-dimensional coupled photonic crystal resonator arrays," *Applied Physics Letters*, vol. 84, no. 2, pp. 161-163, (2004).
3. M. Bayindir, B. Temelkuran, and E. Ozbay, "Tight-binding description of the coupled defect modes in three-dimensional photonic crystals," *Physical Review Letters*, vol. 84, no. 10, pp. 2140-2143, (2000).
4. Y. Xu, R. K. Lee, and A. Yariv, "Propagation and second-harmonic generation of electromagnetic waves in a coupled-resonator waveguide," *Journal of Optical Society of America B*, vol. 17, no. 3, pp. 387-400, (2000).

T
F