

2차원 단일 셀 삼각형 광결정 공진기에서의

비축퇴된 홀극 모드에 관한 연구

Nondegenerate Monopole Mode of Single Cell

Two-dimensional Triangular Photonic Band Gap Cavity

허 준, 황정기*, 이용희*

국방과학연구소, *한국과학기술원 물리학과

jinhuh@sunam.kreonet.re.kr

광결정(photonic crystal)은 서로 다른 유전체가 규칙적으로 배열되어 있는 구조로서, 빛이 진행할 수 없는 진동수 영역인 광밴드갭(photonic bandgap)이 존재한다. 광밴드갭 특성으로 빛의 자발 방출⁽¹⁾과 진행 방향이 조절될 수 있기 때문에, 광결정은 나노 레이저, 광도파관, LED(Light Emitting Diode) 등의 광소자 개발에 응용되고 있다. 지금까지 2차원, 3차원의 광결정에 대한 많은 연구가 수행되어 왔으며, 현재에는 2차원의 슬랩(slab) 구조에 대해 활발하게 연구되고 있다. 이 구조에서는 수직 방향으로의 전 반사를 이용하고, 수평 방향으로의 공기 기둥의 삼각형 격자 배열에 의한 광밴드갭을 이용하여 모드를 3차원적으로 가둘 수 있는 효과가 있다. 최근에 가운데 한개의 공기 기둥을 막은 광결정 슬랩의 단일 셀(single cell) 공진기 구조에서 쌍극자 모드 레이저를 구현⁽²⁾하는데 성공하였다. 이와 같은 파장 크기의 광결정 공진기에서는 레이저의 문턱⁽³⁾을 크게 낮출 수 있기 때문에, 광통신에 적합한 고속 변조 능력이 만족될 수 있다. 본 연구에서는 2차원 광결정 공진기 구조로서 축퇴된 쌍극자(dipole) 모드 대신에 비축퇴된 홀극(monopole) 모드를 제안하고, 이에 대한 특성을 이론적으로 분석하였다.

본 분석에 적용된 광결정 구조는 수평 방향으로 공기 기둥이 삼각형 격자 형태로 배열되어 있고, 수직 방향으로 무한한 2차원 구조의 단일 셀 공진기이다. 공기 기둥의 반경은 $0.35a$, 굴절율은 슬랩과 동일한 효과를 갖도록 유효 굴절율인 $2.65^{(4)}$ 로 놓고, 결합 근방의 가장 이웃한 기둥의 반경과 위치는 변화시킨다. 광결정 공진기에서 공진 모드를 조사하기 위하여 FDTD(Finite Difference Time Domain) 방법을 사용하였으며, 경계 조건으로는 PML(Perfectly Matched Layer)를 적용하였다. 결합에 이웃한 기둥 반경 r' 이 $0.35a$ 에서 점차적으로 감소될 때 여러 가지 공진 모드가 형성되기 시작한다. $r'=0.2a$ 일 때 쌍극자와 홀극 모드의 전기장 분포를 (그림 1)에 나타내었다. 홀극 모드는 결합 중심에 대해 진동하며 비축퇴되어 있다. 반면에 쌍극자 모드는 2가지 형태로 축퇴되어 있는데, 하나는 Γ -K 방향으로 진동하고 다른 하나는 Γ -M 방향으로 진동한다. 또한 각각의 모드도 120° 대칭성의 3가지 형태로 축퇴되어 있기 때문에, 쌍극자 모드는 모두 6가지 모드로 축퇴되어 있다. 따라서 축퇴된 쌍극자 모드의 경우, 광자가 공진 모드로 커플링되는 확률이 비축퇴된 홀극 모드보다 작아진다. 그러므로 홀극 모드는 쌍극자 모드보다도 자발방출인자 β 값⁽⁵⁾이 커지며 레이저의 문턱을 낮추는데 유리할 수 있다. 광결정이 비대칭 구조일 때 축퇴된 모드가 분리되는데, 홀극 모드는 비대칭 광결정에서도 모드의 분리가 일어나지 않으며 항상 비축퇴된 모드 상태로 존재한다.

홀극 모드를 레이저 모드로 이용하기 위해선, 모드의 공진 진동수를 광결정 밴드갭 중심 근처에 존재하도록 하여 모드의 Q값을 크게 해야 한다. 이를 위해 결합에 가장 이웃한 공기 기둥의 반경 r' 를 축

소시킴으로써 공진 진동수를 계산한 결과가 (그림 2(a))와 같다. 여기서 공기 기둥은 반경 r' 이 감소되는 동시에 셀의 중심 바깥으로 이동된다.(그림 2(b)) 반경 r' 이 $0.2a$ 로 조절될 때 홀극 모드의 공진 진동수는 광결정 밴드갭의 중심 근처에 존재하게 된다. 실제적으로는 슬랩 구조로 제작되기 때문에, 수평 방향의 빛이 거의 완전히 반사될 때, 모드의 Q값은 수직 방향으로 손실되는 에너지 크기에 따라 결정된다. 따라서 슬랩 구조에 대한 3차원 FDTD 계산을 수행해야 하며, 현재 연구중에 있다.

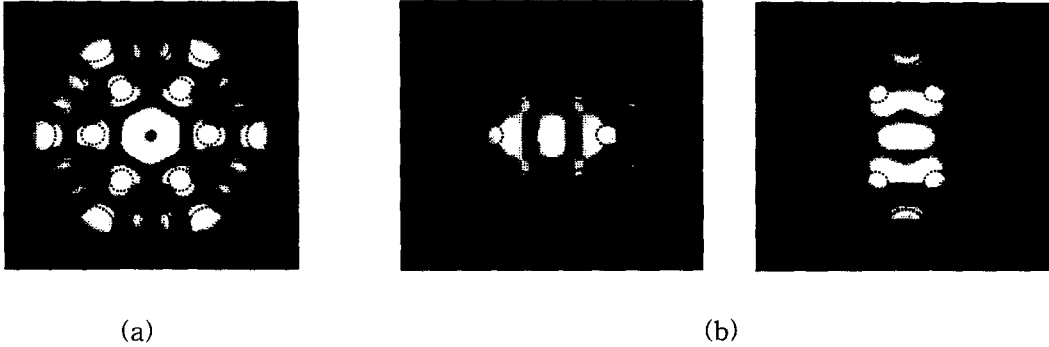


그림 1. 공기 기둥의 반경이 $0.35a$ 이고 셀에 가장 이웃한 기둥 반경이 $0.2a$ 일때 단일 셀 삼각형 광결정 공진기에서의 전기장 세기 분포 (a) 비축퇴된 홀극 모드 (b) 축퇴된 쌍극자 모드

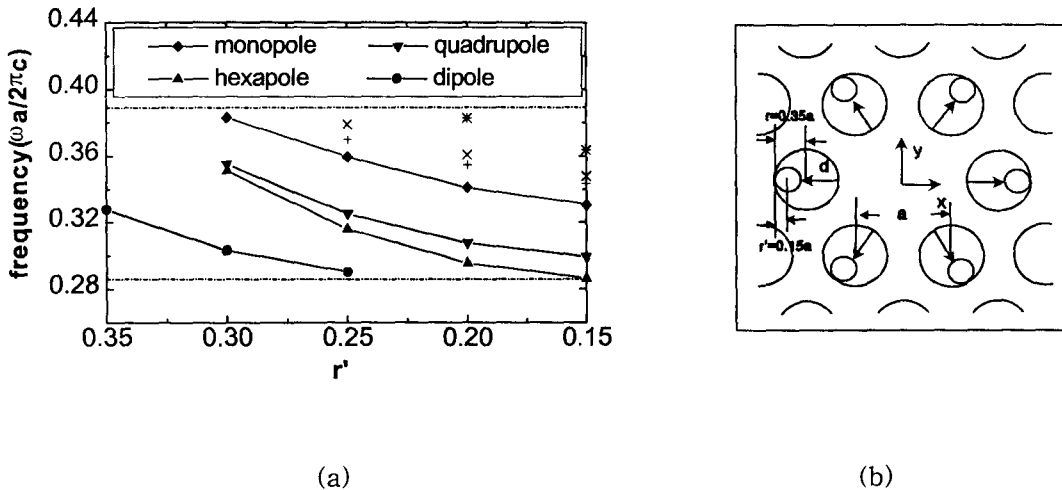


그림 2. (a) 셀에 이웃한 기둥 반경 r' 이 감소되면서 거리 d 만큼 이동시킬 때 공진 진동수의 변화 (b) (a)에 대한 광결정 도식도

[참고 문헌]

[1] J. K. Hwang, H. Y. Ryu, and Y. H. Lee, Phys. Rev. B 60, 4688~4695(1999)
 [2] O. Painter, R. K. Lee, A. Scherer, A. Yariv, J. D. O'Brien, P. D. Dapkus, and I. Kim, Science 284, 1819~1821(1999)
 [3] T. Baba, IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron, 3, 808~830(1997)
 [4] O. Painter, J. Vuckovic, and A. Scherer, J. Opt. Soc. Am. B 16, 276~285(1999)
 [5] J. Vuckovic, O. Painter, Y. Xu, A. Yariv, and A. Scherer, IEEE J. Quantum Electron 35, 1168~1175(1999)