

# 테라헤르츠용 공기유도 광결정 도파로에 대한 수치 해석

## Numerical analysis of air-guiding photonic crystal waveguides for terahertz radiation

한연호, 조민수, 박홍규, 한해욱  
 포항공과대학교 전자전기공학과  
 E-mail: [bladeho@postech.ac.kr](mailto:bladeho@postech.ac.kr)

### I. 서론

최근 의학, 바이오, 우주 통신, 비파괴 검사 등 넓은 영역에서 테라헤르츠 (THz) 파의 응용 가능성이 높아지면서 THz 소자의 개발이 중요해지고 있다. 이에 따라 THz 소자의 기본이 되는 저손실, 광대역의 THz 도파로에 대한 관심이 높아지고 있다. 하지만 기존의 마이크로파나 광영역에서 사용하던 전통적인 도파로는 THz 주파수에서의 물질 특성과 분산 때문에 구속모드의 손실이 크고 대역폭이 작은 문제점이 있다. 따라서 저손실, 광대역의 THz 도파로 개발이 필수적이라고 할 수 있다.

이에 대한 해결책으로 최근 광밴드갭 효과를 이용한 THz 도파로에 관한 연구가 발표되고 있다<sup>(1)</sup>. 유전체 물질이나 금속을 주기적으로 배치한 광결정을 이용하면 특정 주파수 대역의 빛을 구속하거나 통과시킬 수 있는데 이것이 광밴드갭 효과이다. 이 광밴드갭 효과를 이용하여 효과적으로 빛을 구속시킴으로써 저손실, 광대역의 THz 광결정 도파로 (photonic crystal waveguide, PCW)를 만들 수 있을 것으로 기대된다.

본 논문의 일차원 광결정 도파로 (1-dimensional photonic crystal waveguide, 1D-PCW)는 공기유도를 위해서 광밴드갭 효과를 이용하였다. 공기유도 1D-PCW의 밴드구조와 구속모드를 정확히 구함으로써 1D-PCW가 손실이 아주 적은 광대역의 THz 도파로로 이용될 수 있음을 증명하였다.

### II. 전산모사 방법

1D-PCW의 구조는 공기와 실리콘 층을 한 쌍으로 해서 공기결합 양쪽에 각각 4주기를 만들었으며 공기와 실리콘의 두께는 각각 77nm와 76nm이며, 공기 결합 두께는 420nm이다. 실리콘과 공기의 굴절률은 각각 3.4176, 1로 계산하였다.

공기유도 1D-PCW의 밴드구조와 구속모드는 주기구조에 대한 전달행렬방법 (transfer matrix method, TMM)<sup>(2)</sup>을 사용하여 계산할 수 있다. 하지만 주기구조에 대한 TMM 방법은 무한한 주기의 구조를 가정하고 있기 때문에 정확한 구속모드의 손실을 구할 수 없다. 본 논문에서는 유한한 주기를 가지는 공기유도 1D-PCW의 구속모드의 손실을 정확히 구하기 위해서 다층구조 도파로에 대한 TMM 방법을 사용하였다<sup>(3)</sup>. 유한 주기의 공기유도 1D-PCW에서 구속모드의 손실은 클래딩에서의 반사율이 1이 되지 않아 빛이 클래딩 쪽으로 빠져 나가기 때문에 발생하며, 따라서 구속모드는 leaky mode<sup>(4)</sup>로 해석되어야 한다.

공기유도 1D-PCW 구속조건을 만족하는 해를 구하기 위해서 argument principle method (APM)<sup>(5)</sup>

을 사용하였다. APM 방법은 contour integral을 통해서 함수의 zero의 개수와 위치를 알 수 있게 해준다. APM 방법으로 대략적인 해의 위치를 알아낸 이후에 Newton-Rhapson method<sup>(6)</sup>를 사용함으로써 쉽게 해를 찾을 수 있었다. 복소평면에 존재하는 해의 위치를 정확하게 찾아내는데 APM 방법이 상당히 효과적임을 알 수 있었다.

### III. 전산모사 및 실험 결과

실험 방법은 일반적인 THz 도파로 실험<sup>(1)</sup>과 동일하게 진행되었다. 1D-PCW에 THz 펄스가 인가되면 그림 1에서 볼 수 있듯이 여러 개의 구속모드가 생긴다. 각 밴드의 두 번째 이상의 구속모드는 첫 번째 구속모드에 비해 결합효율이 낮고 손실이 크다. 따라서 각 밴드의 첫 번째 모드만 가지고 1D-PCW의 출력 신호를 계산해도 충분하다. 그림 2에서 단일 모드만으로 계산한 결과와 실험값이 상당히 잘 맞음을 확인할 수 있다. 전체 THz 스펙트럼에서 손실상수는  $0.1\text{cm}^{-1}$  이하로 측정되었다.

### IV. 결론

TMM 방법과 APM 방법을 사용하여 1D-PCW의 밴드구조와 구속모드에 대해서 효과적으로 분석할 수 있었으며 실험 결과와 계산 값이 상당히 잘 맞음을 확인하였다. 결론적으로 1D-PCW가 THz 영역에서 저손실의 광대역 도파로로 사용되어질 수 있음을 알 수 있었다.

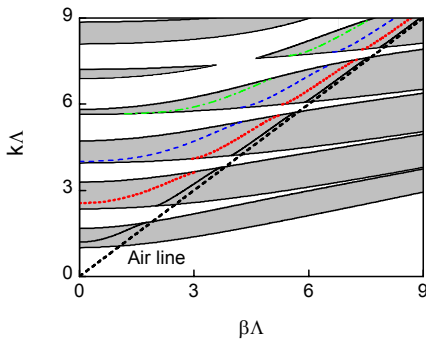


그림 1. 1D 광결정의 밴드 구조와 각 밴드에서 생성되는 구속모드의 분포도

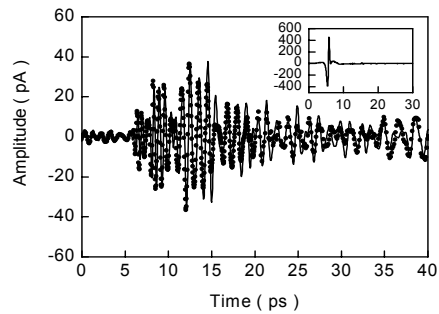


그림 2. 1cm 공기유도 PCW를 통과한 후 측정된 THz 신호 (점선), 계산된 THz 신호 (실선). 삽입 그림은 입력 신호

### 참고문헌

1. H. Han et al, "Terahertz pulse propagation in a plastic photonic crystal fiber.", Appl. Phys. Lett., vol. 80, 2634-2636 (2002).
2. A. Yariv and P. Yeh, "Optical Waves in Crystals" (John Wiley & Sons, Inc. New York 1984), chapter 6.
3. P. Yeh, "Optical Waves in Layered Media" (John Wiley & Sons, Inc. New York 1988), chapter 11.
4. San-Liang Lee et al, "On Leaky Mode Approximations for Modal Expansion in Multilayer Open Waveguides.", IEEE J. Quantum Electron. vol. 31, 1790-1802 (1995).
5. J. W. Brown and R. V. Churchill, "Complex Variables and Applications" (McGraw-Hill, Inc. 1996).
6. W. H. Press, S. A. Teukolsky, "Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing" (Cambridge University Press, 1992), pp.362-368