

## 다중-극 전개 방법을 이용한 마이크로 구조 광섬유 설계

황성윤<sup>1</sup>, 이광조<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>경희대학교 응용물리학과, <sup>2</sup>경희대학교 자연과학종합연구원

### Design of micro-structured optical fibers based on multi-pole expansion method

Sungyoon Hwang<sup>1</sup> and Kwang Jo Lee<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Applied Physics, Kyung Hee University, Yongin 17104

<sup>2</sup>Institute of Natural Sciences, Kyung Hee University, Yongin 17104

**요 약** - 본 연구실에서 보유한 다중-극 전개 방법(multi-pole expansion method) 기반 광섬유 모델링 코드를 이용하여, 다양한 마이크로 구조 광섬유들의 모드와 그 분산 특성을 시뮬레이션 하였다. 대칭성이 큰 광섬유 구조에서 다중-극 전개 방법을 이용하면, 적은 메모리로 보다 빠른 시간에 시뮬레이션을 하는 것이 가능하다. 다중-극 전개 기반 시뮬레이션 방법과 기존에 상업화된 다른 시뮬레이션 방법들의 장단점을 비교하고, 본 연구실에서 보유한 시뮬레이션 코드로 계산한 다양한 형태의 광섬유 모드들의 예를 보일 것이다.

**ABSTRACT** - We theoretically analyzed the modal dispersion properties of several types of micro-structured optical fibers using the multi-pole expansion method. In optical fibers with a highly symmetrical structure, the multi-pole expansion simulation method has several advantages including low memory usage and fast simulation time. In this paper, we will compare the multi-pole expansion simulation method with other commercialized ones in use. Several examples (i.e., photonic crystal fiber, hollow core fiber, and polymer composite fiber) calculated using our simulation code will be also presented.

**주 제 어** - 다중-극 전개 방법, 도파로 광학, 광섬유 광학

**Keywords** - Multi-pole expansion method, waveguide optics, fiber optics

### 1. 서론

다중-극 전개 방법(Multi-pole expansion method)이란, 각도에 대해 다중 대칭성을 가지는 광섬유 구조를 그 대칭성에 맞게 여러 개의 극으로 전개하고, 나누어진 극에 대해 광섬유를 따라 진행하는 전자기파(빛)의 벡터 장 성분을 계산하는 방법이다.<sup>1</sup> 다중-극 전개 방법은, 광섬유를 따라 진행

하는 전자기파(빛)의 전기장, 자기장, 포인팅 벡터 등을 한 번에 계산할 수 있다는 장점을 가지며, 이 결과로부터 도파로 모드 분포 및 분산 특성을 바로 그래프로 그려서 얻을 수 있다. 이 방법은 각도 대칭성이 잘 정의된 구조, 예를 들어 일반적인 계단형 굴절률 분포 광섬유 (step-index fibers), 광자 결정 광섬유 (Photonic crystal fibers, PCFs), 텅 빈 코어 광섬유 (Hollow core fibers, HCFs)

등의 모드 계산에 매우 효율적이다.

마이크로 구조 광섬유를 모델링하고 시뮬레이션 하는 방법은 현재 여러 가지가 개발이 되어있는데, 그 중에 일부는 상업화되어 널리 사용이 되고 있다. 현재 여러 가지 형태의 도파로의 성능 디자인 및 특성 분석에 가장 많이 사용되고 있는 방법들에는 SMT (Source Model Technique), FEM (Finite Element Method), PWM (Plane Wave Expansion), LFM (localized function method) 등이 있다.<sup>2</sup> 각각의 방법들은 모델링을 하고자 하는 도파로의 구조에 따라 각각 장단점을 가진다. 광섬유는 일반적으로 코어와 클래딩을 가지는 원통형 구조를 가지는데, PCF와 HCF를 포함하는 거의 모든 마이크로 구조 광섬유의 경우 역시, 원통형 단면에서 코어를 중심으로 각도에 따라 반복되는 구조를 가진다. 이와 같은 반복 구조에서는, 반복이 되는 최소 단위에서만 시뮬레이션을 해도 전체 도파로 영역에 대한 시뮬레이션 결과를 얻어낼 수 있다. 즉 작은 크기의 최소 반복 구조에서 빛의 진행 모드를 계산하여 전체 도파로 구조에서의 모드를 예측할 수 있으므로, 시뮬레이션에 필요한 컴퓨터의 메모리 사용량을 줄이고 계산 시간을 단축할 수 있다는 의미가 된다.

본 논문에서는 2-ring 광자결정 광섬유 구조를 기준으로 하여, 다중-극 전개 기반 시뮬레이션 방법과 기존에 상업화된 다른 시뮬레이션 방법들의 장단점을 비교할 것이다. 또한, 본 연구실에서 보유한 시뮬레이션 코드로 계산한 다양한 형태의 광섬유 모드들의 예를 보일 것이다.

## 2. 마이크로 구조 광섬유 시뮬레이션 방법 성능 비교

도파로의 모델링을 위해 현재 흔히 사용되고 있는 방법들과 다중-극 전개 방법을 비교하기 위해, 그림 1과 같은 기준 구조를 정하였다. 그림 1(a)는 실리카 클래딩에 6각 대칭성을 가지는 에어 홀 구조가 분포하는 2-ring 광자 결정 광섬유이며, 계산에 사용한 홀의 지름과 분포 주기는 각각  $3.68 \mu\text{m}$ ,  $8 \mu\text{m}$  이다. 광통신에서 사용되는 파장  $1.55 \mu\text{m}$ 에서, 다중-극 전개 방법으로 계산된 기본 모드

(LP<sub>01</sub>)의 전기장 세기 분포는 그림 1(b)에 나타나 있다. 계산된 기본 모드의 넓이는 약  $80 \mu\text{m}^2$  이다. 다중-극 전개 방법 기반의 시뮬레이션 코드는 본 연구실이 보유한 것을 사용하였다.<sup>3</sup>

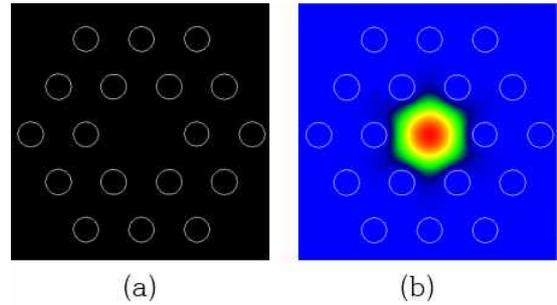


그림 1. 실리카 클래딩에 6각 대칭성을 가지는 에어 홀 구조가 분포하는 광자 결정 광섬유의 (a) 구조 설계, (b) 광통신 파장  $1.55 \mu\text{m}$ 에서 계산된 기본 모드 (LP<sub>01</sub>)의 전기장 세기 분포

다중-극 전개 방법과 비교를 위한 방법들은 앞서 언급한 SMT, FEM, PWM, LFM 이며, 비교를 위해 그림 1의 구조를 각각 시뮬레이션 하였다. 모드의 전기장 분포를 정확하고 효율적으로 계산하기 위해서는, 계산에 필요한 최소한의 포인트의 개수와 위치를 정하여야 하며, 이에 따라 계산에 소요되는 컴퓨터의 메모리와 계산 시간이 정해진다. 아래 표 1은 각각의 시뮬레이션 방법들에 대해, 계산된 모드의 유효 굴절률의 오차가 0.001% 이하가 되기 위해 필요한 포인트의 최소 개수, 소요 시간, 계산을 위해 소요되는 컴퓨터 메모리 등을 나타낸다. 계산에 사용된 구조는 광섬유 단면에서 각도 방향에 대해 6중 대칭성을 나타내는데, 즉 30도마다 같은 구조가 반복되는 구조라는 의미이다. 이와 같은 경우, 전체 구조의 1/6에 해당되는 영역만 계산하여 전체 구조에 대한 결과로 확장할 수 있다. 따라서 계산에 필요한 포인트의 개수가 적어지며, 시뮬레이션에 소요되는 시간 역시 적어지게 된다. 또한 시뮬레이션 코드의 전체 크기가 매우 작고 (약 2.5 MB), 계산에 사용되는 컴퓨터의 메모리 사용량이 적기 때문에 (약 6MB), 저사양의 개인 컴퓨터로도 충분히 양질의 결과를 얻어낼 수 있

### 다중-극 전개 방법을 이용한 마이크로 구조 광섬유 설계

다는 장점이 있다. 게다가 본 연구실이 보유한 시뮬레이션 코드를 사용하므로, 현재 상업화되어 수백만 원 상당의 기간 사용료를 지불해야하는 타 방법들에 비해 운영비가 적게 든다는 장점이 있다.

#### 3. 다중-극 방법으로 시뮬레이션한 다양한 마이크로 구조 광섬유 모드와 분산 특성

이제 다중-극 전개 방법으로 계산할 수 있는 다양한 마이크로 구조 광섬유, 즉 4-ring PCF, 광밴드 갭 효과로 빛이 전달되는 HCF, 그리고 바이오 센서용 폴리머 다중 코어 광섬유들의 모드 계산 결과와 분산 특성에 대해 논의할 것이다. 그림 2는 파장에 관계없이 단일 모드 특성을 보이는 4-ring PCF의 단일 모드 계산 결과를 나타낸다. 역시 계산에 사용한 홀의 지름과 분포 주기는 각각 3.68  $\mu\text{m}$ , 8  $\mu\text{m}$  이다. 그림 2(a)는 광통신 파장 1.55  $\mu\text{m}$ 에서 계산된 기본 모드(LP<sub>01</sub>)의 모양이며, 그림 2(b)의 화살표는 계산된 벡터 전기장 성분의 방향으로, 계산된 기본 모드의 수평 편광 모드를 나타낸다. 계산된 모드 굴절률은 1.4424 이다.

그림 3(a)는 중 적외선 레이저 및 센서에 응용이 가능한 텅 빈 코어 광섬유의 기본 모드 계산 결과를 나타낸다. 이 구조에서는 레이저 빛이 광 밴드 갭 효과를 통해 전달되며, 코어가 비어 있기 때문에 코어 물질에서의 흡수나 손실이 없이 강한 세기의 빛을 전달할 수 있다는 장점을 가진다.

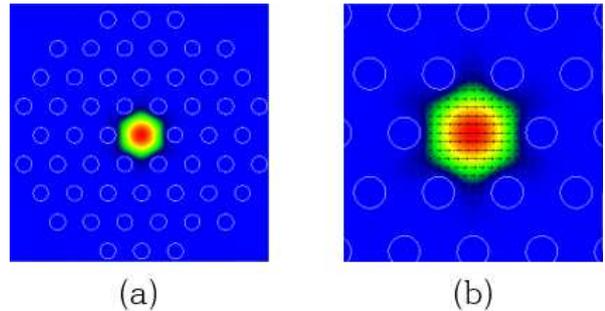


그림 2. 모든 파장 영역에서 단일 모드 특성을 보이는 4-ring PCF: (a) 광통신 파장 1.55  $\mu\text{m}$ 에서의 기본 모드(LP<sub>01</sub>) 계산 결과, (b) 계산된 기본 모드의 전기장 세기 분포, 수평 편광 모드.

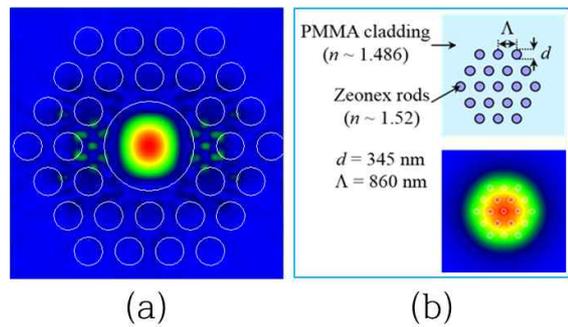


그림 3. (a) 중 적외선 레이저 및 센서에 응용이 가능한 실리카 기반 텅 빈 코어 밴드갭 광섬유의 기본 모드, (b) 바이오 센서용 폴리머 마이크로 광섬유의 기본 모드. 사용된 폴리머 물질은 PMMA와 Zeonex.<sup>4</sup>

시뮬레이션 방법	프로세서	모드의 전기장 분포를 나타내는데 사용하는 포인트 개수	시간 [초]	메모리 [MB]
SMT (Source Model Technique) <sup>2</sup>	Intel 3.2 GHz	500	15	5
		800	37	13
FEM (Finite Element Method) <sup>2</sup>	Intel 3.0 GHz	16000	9	40
		300000	244	1900
PWM (Plane Wave Expansion) <sup>2</sup>	AMD 1.8 GHz	1922	2	28
		7938	12	29
LFM (localized function method) <sup>2</sup>	AMD 1.8 GHz	200	4	7
		450	10	15
Multi-pole Expansion Method	Intel 2.8 GHz	100	6	6
		200	13	6

표 1. 2-ring 마이크로 구조 광섬유 시뮬레이션 방법 비교

현재 광섬유 제작에 흔히 사용되는 실리카를 기본 클래딩 물질로 고려하였으며, 계산에 사용한 중앙 홀의 지름, 작은 홀들의 지름, 그리고 주기는 각각 11  $\mu\text{m}$ , 3.5  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$  이다. 그림 3(a)의 기본 모드의 전기장 분포를 나타내기 위해 사용한 빛의 파장은 중 적외선 영역인 2.85  $\mu\text{m}$  이며, 이때 계산된 모드의 굴절률은 0.976 이다.

그림 3(b)는 가시광선 영역에서 바이오 센싱용으로 폴리머 마이크로 구조 광섬유의 구조와 계산된 기본 모드의 전기장 분포를 나타낸다. 클래딩 물질로는 PMMA, 육각 대칭으로 배열된 다중 코어는 Zeonex 막대들로 구성이 되어있다.<sup>4,5</sup> 코어를 이루는 막대들의 지름과 배열 주기는 각각 345 nm, 860 nm 이다. 디자인한 미세 구조의 크기는 가시광선 영역에서 흔히 사용되는 헬륨-네온 레이저의 파장 632.8 nm를 기준으로 정하였다. 바이오 센싱을 위해서는 가시광선 레이저를 사용하는 경우가 관찰에 보다 용이하다. Zeonex와 PMMA의 굴절률은 632.8 nm의 파장에서 각각 1.520과 1.486이며 약 2.2%의 큰 굴절률 차이를 가진다. 그림 4는 그림 3(b)에서 디자인한 마이크로 구조 폴리머 광섬유의 모드 분산 특성 계산 결과를 나타낸다. 파장에 따른 기본 모드의 굴절률을 다중-극 전개 방법을 이용하여 계산한 결과이며, Intel 2.8 GHz 프로세서를 장착한 개인 컴퓨터를 기준으로, 약 20초 이내의 빠른 계산 시간이 소요되었다.

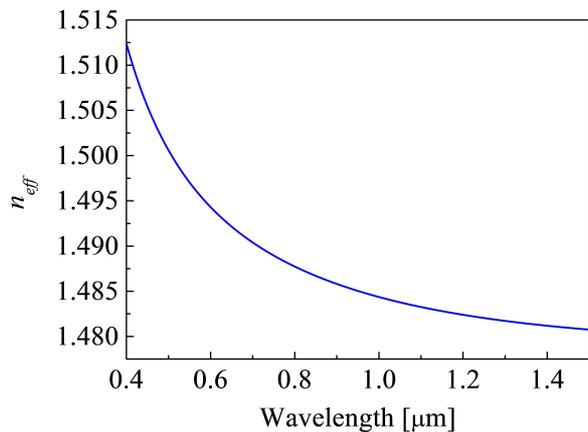


그림 4. 마이크로 구조 폴리머 광섬유의 모드 분산 특성 계산 결과

#### 4. 결론

본 연구에서는 다중-극 전개 방법을 이용한 마이크로 구조 광섬유의 모델링과 시뮬레이션 결과를 다루었다. 또한 2-ring 구조 PCF를 기준으로, 상업화된 시뮬레이션 방법들인 SMT, FEM, PWM, LFM과 다중-극 전개 방법을 비교하였으며, 그 결과 다중-극 전개 방법이 계산 시간, 메모리 사용량에 있어서 장점을 가짐을 보였다. 다중-극 방법으로 계산이 가능한 마이크로 광섬유들의 예를 보기 위해, 4-ring 단일 모드 PCF, 밴드 갭 HCF, 그리고 바이오 센서용 폴리머 다중 코어 광섬유의 단일 모드 전기장 분포와 모드 분산 특성을 시뮬레이션 하였다. 이와 같이 복잡한 구조를 가지는 마이크로 구조 광섬유들에 있어서도, 다중-극 전개 방법을 이용하여 모드의 전기장 분포와 분산 특성을 간단히 구할 수 있었다. 본 연구실에서 보유하고 있는 다중-극 전개 방법 기반 시뮬레이션 코드는 홈페이지로 제작된 것이고 본 연구실에서 성능 업데이트에 참여한 바가 있다. 상업화된 다른 높은 가격의 소프트웨어와 견주어도 성능에 대한 장점이 있으므로, 향후 광섬유 기반 소자 개발에 매우 유용할 것으로 기대된다.

#### 참고문헌

1. Kuhlmeiy, B. T.; White, T. P.; Renversez, G.; Maystre, D.; Botten, L. C.; Sterke, C. M.; McPhedran, R. C. *J. Opt. Soc. Am. B* **2002**, *19*, 2331.
2. Szpulak, M.; Urbanczyk, W.; Serebryannikov, E.; Zheltikov, A.; Hochman, A.; Leviatan, Y.; Kotynski, R.; Panajotov, K. *Opt. Express* **2006**, *14*, 5699.
3. Cudos MOF, <http://sydney.edu.au/science/physics/cudos/research/mofsoftware.shtml>
4. Lee, K. J.; Liu, X.; Vuillemin, N.; Lwin, R.; Leon-Saval, S. G.; Argyros, A.; Kuhlmeiy, B. T. *Opt. Express* **2014**, *22*, 17497.
5. Kim, J.; Lee, K. J., *Kyung Hee Journal of Natural Sciences*, **2014**, *20*, 5.