

천체 분광 신호 처리를 위한 중적외선 아스트로 포토닉스

Mid-infrared Astro-photonics for Stellar Spectroscopic Signal Processing:

Design of Micro-structured Silver Bromide Optical Fibers for Stellar Nulling Interferometers

백길호 (Nonlinear Optics and Photonic Device Lab.)

지도: 이광조 교수님

OUTLINE

새로운 연구 분야로 개척되고 있는 Mid-infrared (mid-IR, 4 μm - 20 μm) Astro-photonics의 연구 현황을 개관하고, 지구와 흡사한 외부 은하계 행성 관측에 적합한 마이크로 구조 도파로 소자를 디자인 및 모델링 하였다. 설계된 소자의 모드 및 분산 특성은 다중 극 전산 모사 방법을 통해 조사했다.

INTRODUCTION

❖ Nulling interferometry

매우 밝은 별 근처에 위치한 행성의 밝기를 측정하는 방법으로, 밝기가 큰 빛과 작은 빛의 입사각 차이를 이용하여, 측정에 방해가 되는 밝은 별빛은 상쇄 간섭시켜 제거한다. 지구와 흡사한 행성 관측에 사용되며, Nulling interferometer의 가장 간단한 형태가 Brucewell interferometer이다. 별을 두 개의 망원경과 일직선상에 놓이게 관측하고 두 망원경 사이의 거리를 $\lambda/20$ 로 설정하면, $\lambda/2$ 위상차에 의해 별빛은 상쇄간섭, 행성 빛은 보강간섭을 일으켜 보다 선명한 행성을 관측할 수 있다 (Figure1 참조).

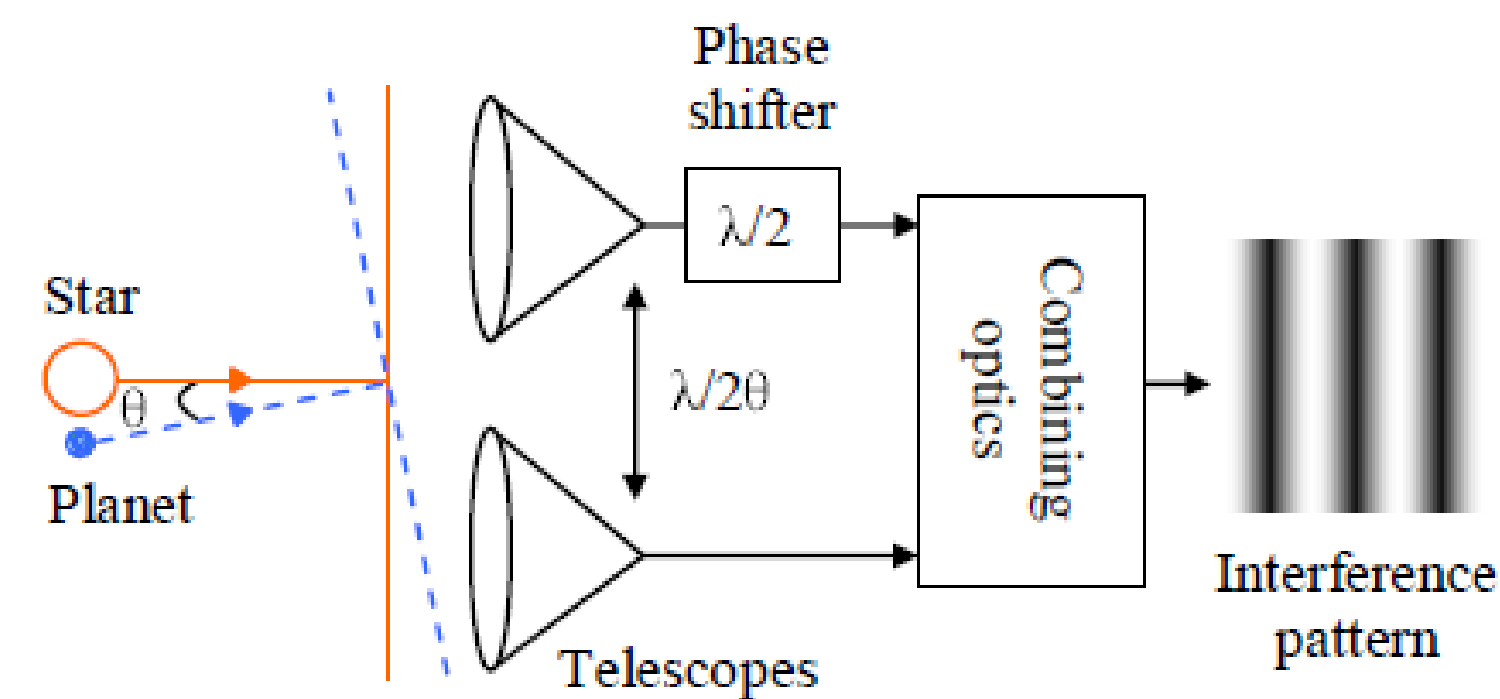


Fig. 1. Bruce nulling interferometer의 원리 [1].

❖ Wave-front filters

우주 공간으로부터 오는 빛들 중 눈으로 볼 수 없는 약한 빛의 경우, 렌즈를 이용하여 빛을 모아 관측하게 된다. 하지만 지구의 대기에 의해 왜곡된 빛을 깨끗하게 만들어 줄 장치가 필요하고, 그것이 Wave-front filter이다. 그 중 가장 훌륭한 해법이 Single-mode fiber (SMF) 이다 (Figure2 참조).

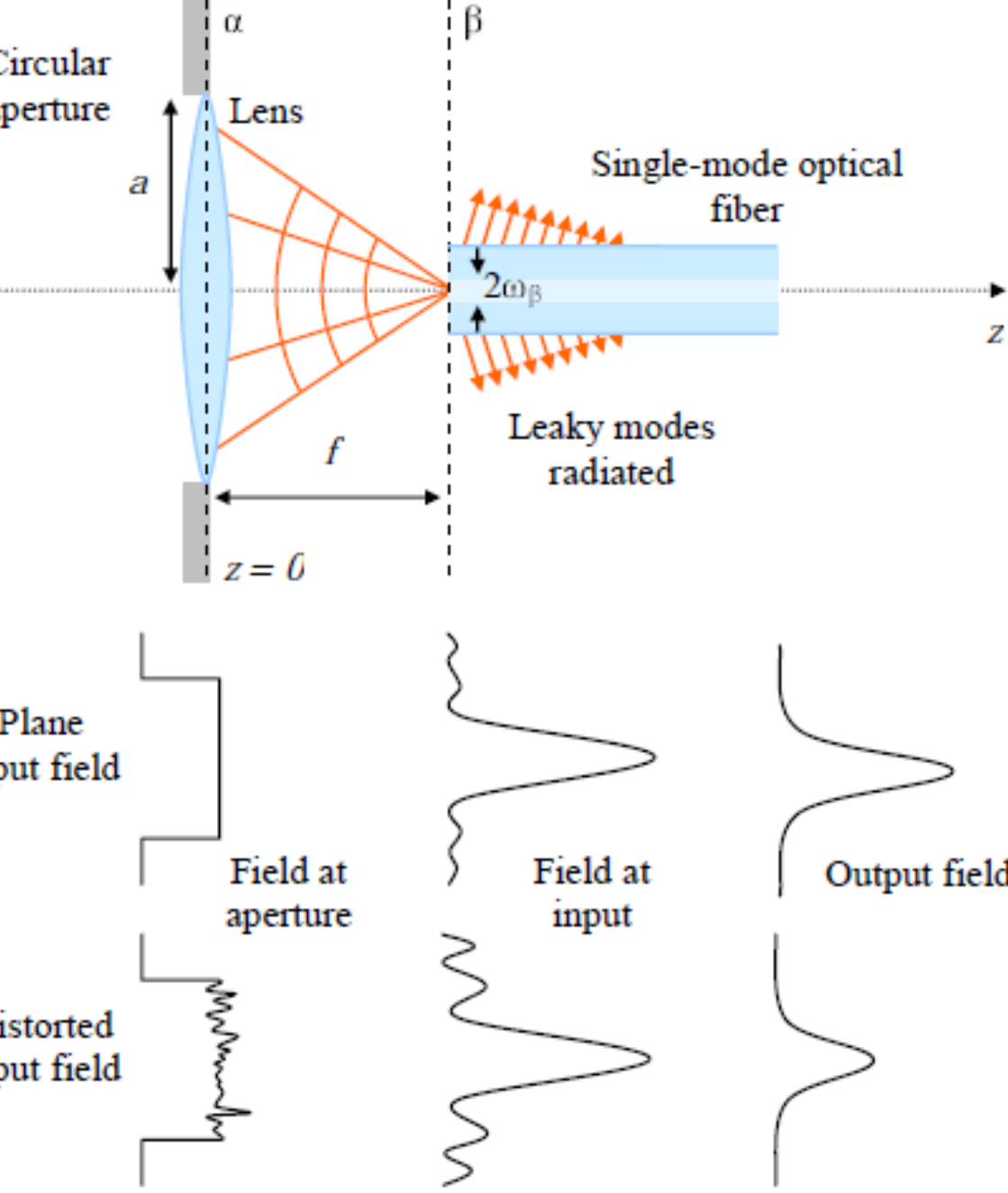


Fig. 2. Single-mode fiber를 이용한 wave-front filter 원리 [1]. 렌즈에 의해 모인 빛이 filter 역할을 하는 SMF를 통과하면서 Gaussian 형태의 빛이 된다. SMF에 따라서 Gaussian 형태가 결정되고, peak가 높고 spot size가 작은 형태일수록 정보를 잃지 않고 멀리 보낼 수 있어 좋은 성능을 가진 SMF가 된다.

OPTICAL FIBERS (as wave-front filters)

❖ Single Mode Fibers vs Micro-Structured Fibers

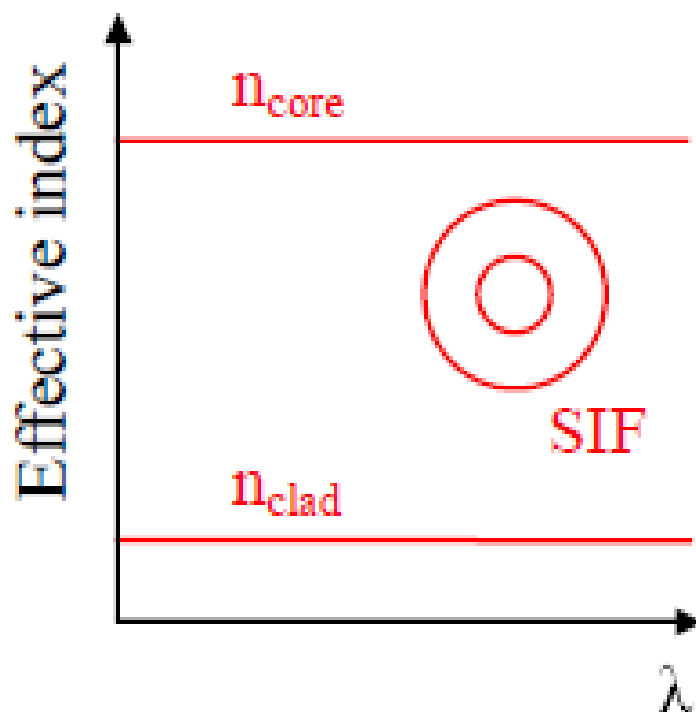


Fig. 3. SMF의 구조[1]

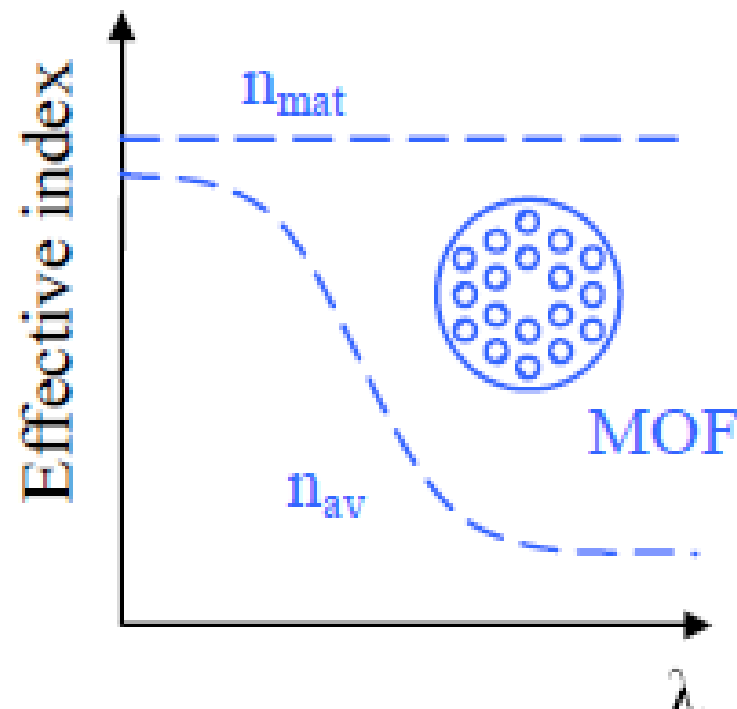


Fig. 4. MOF의 구조[1]

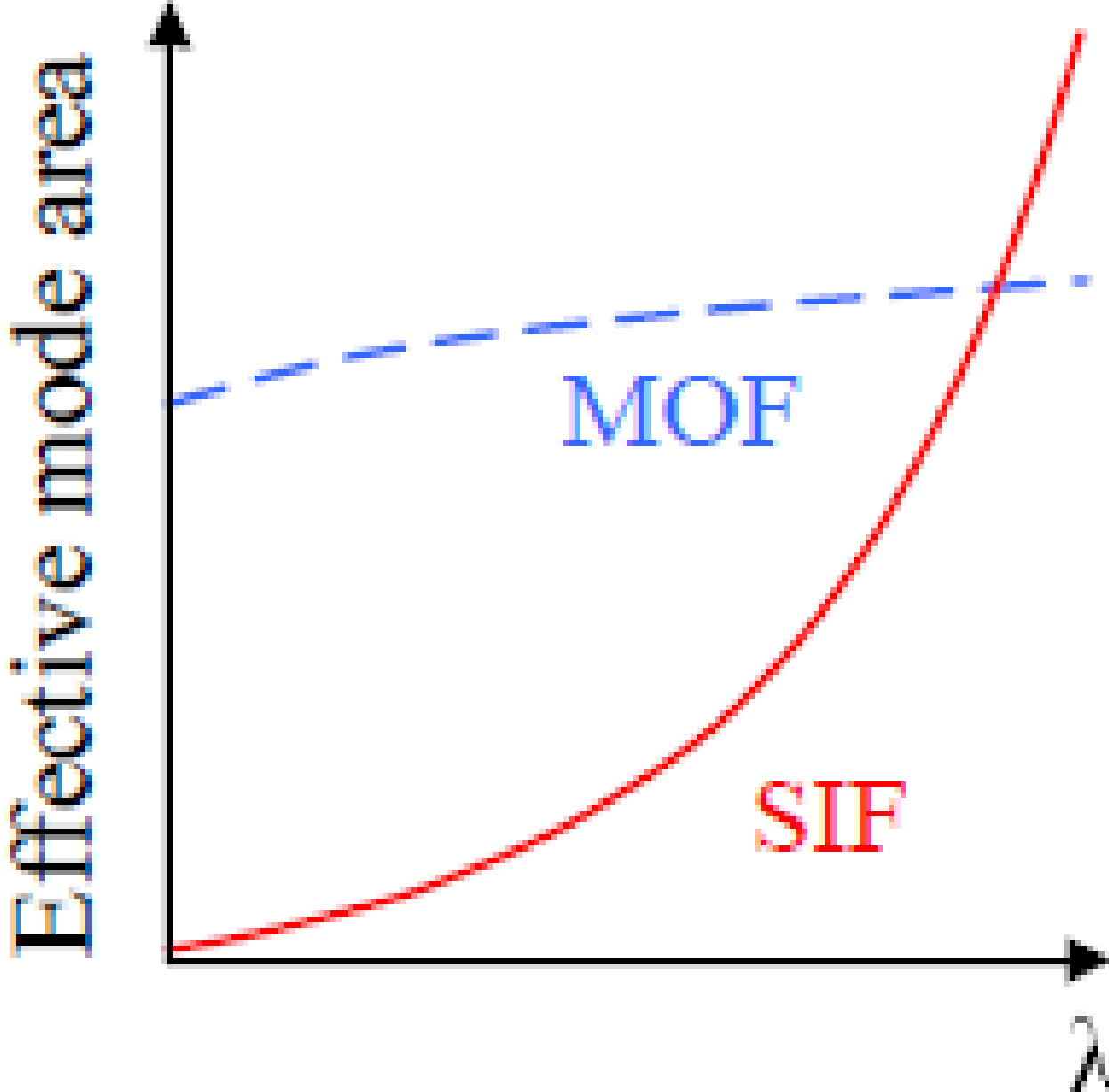


Fig. 5. SMF와 MOF의 차이. Effective mode area는 fiber의 비선형성을 나타내는 중요한 지표이다. 쉽게는 Gaussian beam의 spot size와 관련이 있고, 클수록 빛 손실이 크다 [1, 2].

RESULTS

❖ Micro-Structured Silver Bromide (AgBr) Fibers (for wave-

| λ (μm) | n_{eff} | A_{eff} | λ (μm) | n_{eff} | A_{eff} |
|-----------------------------|-----------|-----------|-----------------------------|-----------|-----------|
| 4.0017 | 2.164 | 1.306 | 9.0026 | 2.159 | 1.402 |
| 5.0025 | 2.165 | 1.321 | 9.9261 | 2.158 | 1.407 |
| 6.0012 | 2.163 | 1.337 | 10.551 | 2.157 | 1.419 |
| 7.0021 | 2.162 | 1.354 | 11.248 | 2.155 | 1.434 |
| 8.0068 | 2.161 | 1.371 | 12.660 | 2.152 | 1.465 |

Table1. Multi-pole expansion (다중극 전개) 방법을 이용하여 시뮬레이션한 결과.

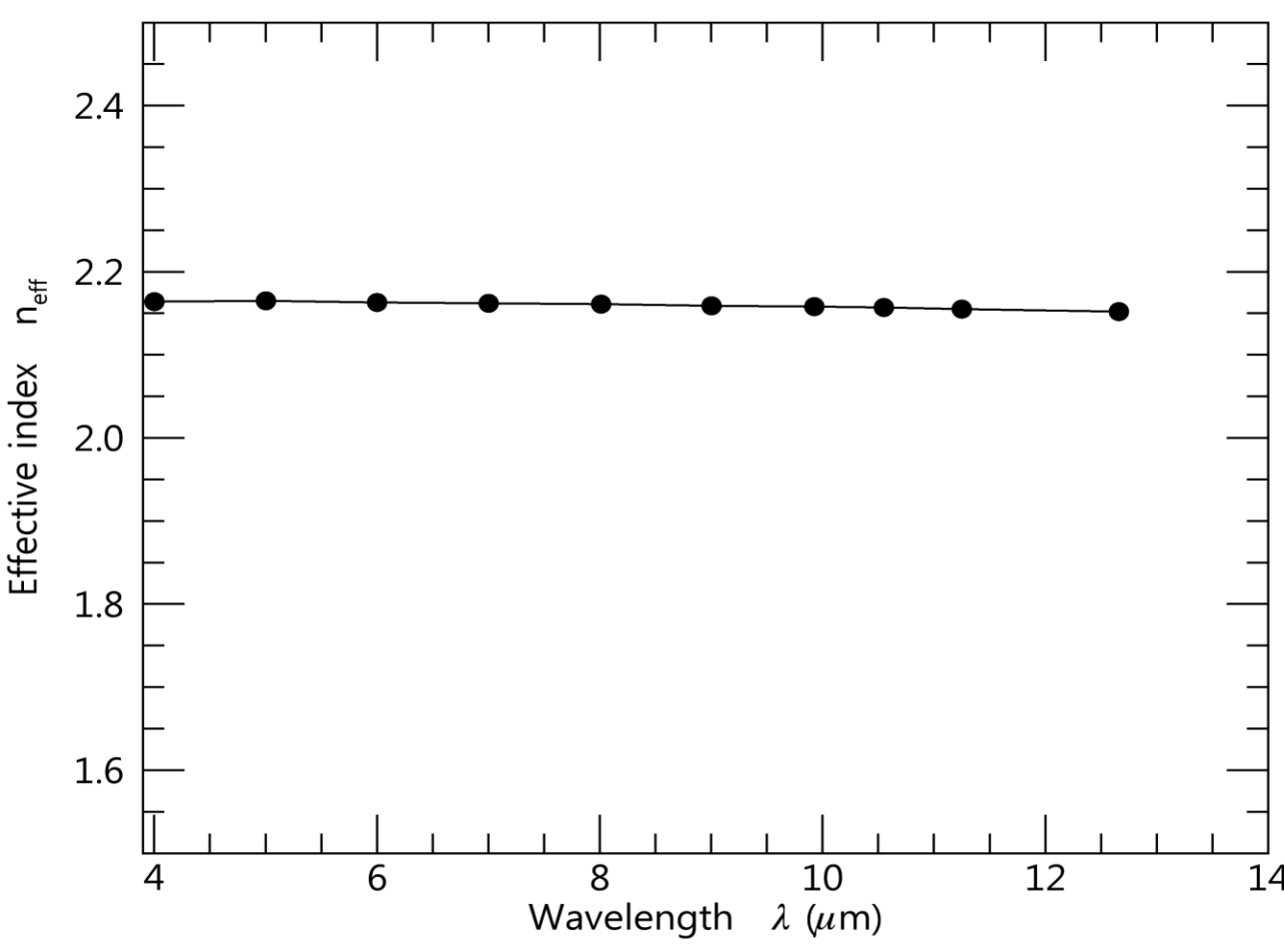


Fig. 6. mid-IR 영역 내 파장에 따른 모드의 유효 굴절률 변화. 특정 파장에 따라 다른 굴절률을 갖는 일반 물질들과 달리 AgBr은 넓은 영역에서 안정적인 성능을 보인다.

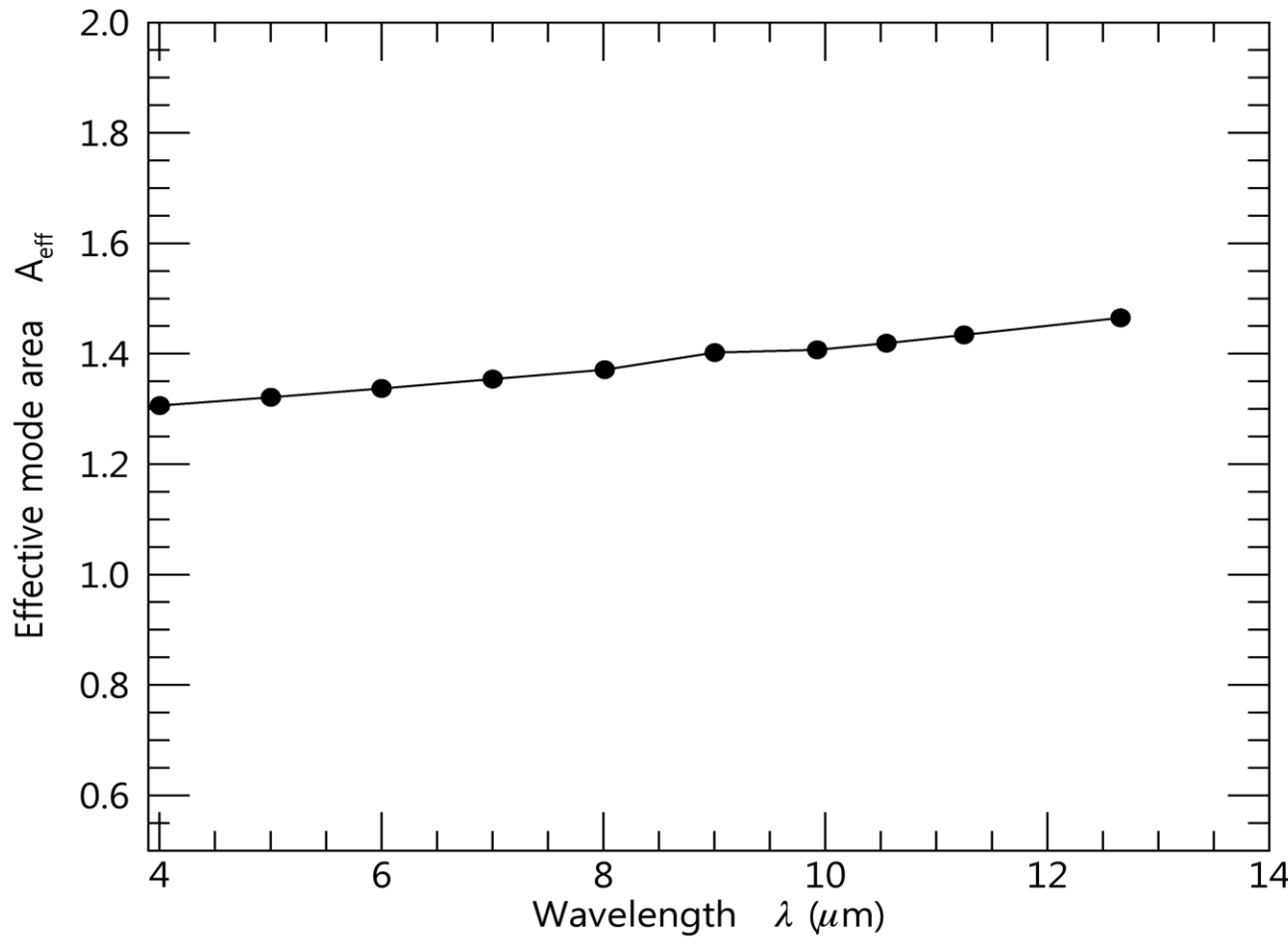


Fig. 7. mid-IR 영역 내 파장에 따른 모드의 유효 면적 변화. 9 μm 에 이르는 파장 변화에 대해 모드 면적 변화는 7.7% 미만이며, 단일 모드 특성이 유지되었다.

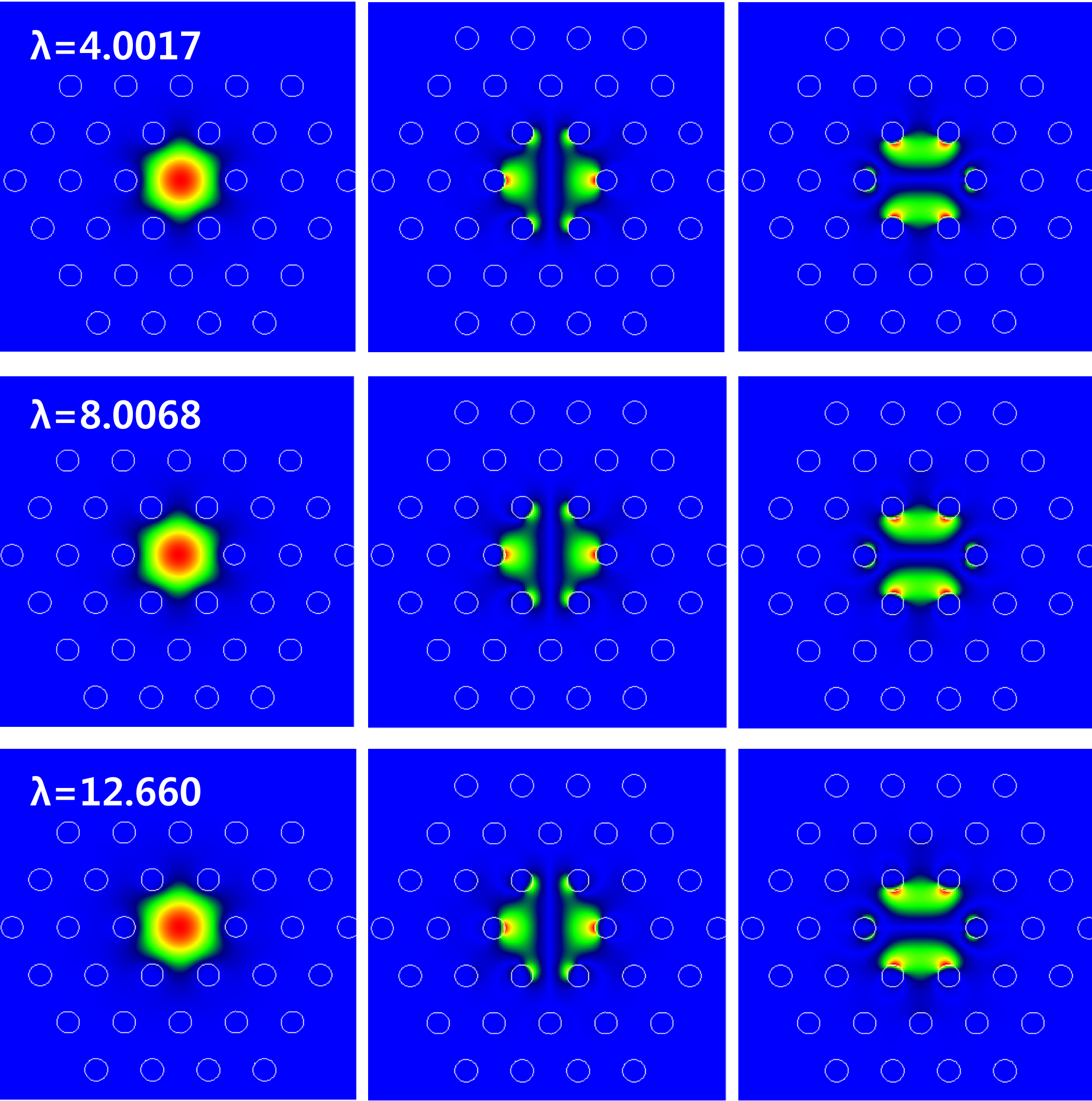


Fig. 8. AgBr에 육각 격자모양의 마이크로 구조를 디자인하여, 미세 구조 광섬유를 설계하였다. Air-hole 구조의 주기, 반지름, 그리고 AgBr의 굴절률은 각각 $\Lambda = 20 \mu\text{m}$, $r = 4 \mu\text{m}$, $n = 2.167$ 이다. Mid-IR 영역에서 Multi-pole method를 이용한 시뮬레이션 결과가 그림에 나타나 있다. 첫 번째 열은 모드의 세기를 나타내며, 해당 파장에서 Single mode가 잘 나타남을 보여준다. 두 번째 열과 세 번째 열은 해당 파장에서 나타나는 모드 전기장의 z 방향 성분으로, 각각 서로 수직인 고유 편광 모드를 나타낸다.

SUMMARY

- 흔히 광통신에 사용되는 silica 광섬유의 경우, 특정 파장인 1550 nm에서만 낮은 손실을 보이지만, AgBr를 이용한 미세구조 광섬유는 4 μm - 12 μm (Mid-IR)의 넓은 영역에서 SMF의 성질을 보였으며, 거의 일정한 n_{eff} (Effective index)와 A_{eff} (Effective mode area)를 가지며 안정적으로 동작하였다.
- AgBr은 광통신에 쓰이는 기존 물질과는 다른 특이성을 가진 물질로, mid-IR을 방출하는 지구와 흡사한 외계행성 또는 외계 생명체 관측에 아주 적합한 물질이다.
- AgBr과 같은 Silver Halide 계열 물질을 자세히 연구하여 mid-IR 영역에 최적화된 optical fiber가 개발된다면, 최근 천문학 영역에서 각광받기 시작하는 Astrobiology등에 응용이 기대되며, 관련 연구가 크게 진보할 것으로 예상된다.

REFERENCE

- C. Flanagan and D. J. Richardson, "Microstructured fibers for broadband wavefront filtering in the mid-IR", Opt. Express 14, 11773-11786 (2006).
- Mortensen, "Effective area of photonic crystal fibers", Opt. Express 10, 341-348 (2002).
- S. Bhadra and A. Ghatak, "Guided wave optics and photonic devices", CRC press, 13-24 (2013).

