

최소 분산법을 이용한 GRIN 렌즈의 굴절률 측정에 관한 연구

Reconstruction of refractive-index profile of radial GRIN rods using minimum variance algorithm

김대근, 김대규, 김경환, 윤기혁, 박승한
 연세대학교 물리학과
 dgkim@yonsei.ac.kr; shpark@yonsei.ac.kr

굴절률의 분포가 식 (1)과 같이 반경에 따라 연속적으로 변하는 GRIN(Gradient refractive-index) 렌즈 및 광섬유는 이미징 장치 및 광통신 분야에서 널리 사용되어 왔으며 현재까지 활발한 연구가 이루어지고 있다.

$$n(r) = n_0 \left(1 - \frac{Ar^2}{2} \right), \quad n_0: \text{중심에서의 굴절률} \tag{1}$$

GRIN rods의 여러 가지 특성 중 굴절률 분포는 집광 특성 및 광전송 특성을 결정하는 중요한 요소이므로 이를 측정하기 위해 microscopic method, reflection method, near-field technique, far-field profiling technique, axial interferometry, transverse interferometry, light scattering method, deflection function method, focusing method 등과 같은 방법이 이미 다양하게 개발되었으며, 각 방법의 단점을 보완하기 위한 새로운 방법들이 연구되고 있다.⁽¹⁾ 특히, transverse interferometry 방법 중 위상천이 모아레 방식을 이용하는 방법은 별도의 시료 준비 과정이 필요 없을 뿐만 아니라 incoherent 광원을 사용하므로 굴절률 분포를 측정하는 효과적인 방법이다.⁽²⁾

그러나 일반적으로 사용되는 굴절률 복원 알고리즘을 사용할 경우, 근축 근사 및 GRIN rods의 core까지 빛이 굴절되지 않는다는 가정으로 인하여 GRIN rods의 core와 cladding의 굴절률 차이가 커짐에 따라 그 예러가 무시할 수 없을 정도로 증가한다. 따라서 본 연구에서는 Bouguer's theory를 적용한 ray-tracing 결과와 ASAP simulation으로 얻은 위상값을 이용한 최소 분산 알고리즘을 이용하여 이러한 한계를 극복하는 효과적인 굴절률 복원 알고리즘을 제안하였다.

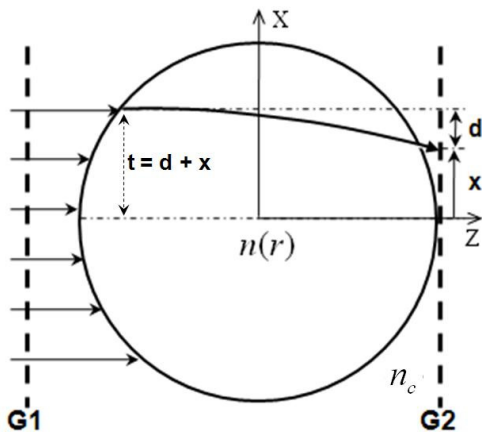
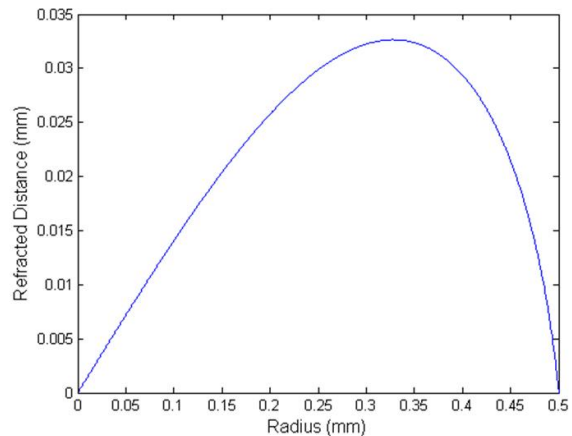


그림 1. (a) GRIN rod를 통과하여 굴절된 광경로



(b) 관측면에서의 광 굴절 거리 그래프

그림 1.(a)에서 입사된 평행광이 grating G1을 지나 형성한 fringe는 GRIN rods를 통과하면서 광경로가 굴절되어, 관측면인 grating G2에서는 원래의 위치에서 d 만큼 벗어난 지점에 이르게 된다. 이 위상이동된 fringe가 grating G2와 형성하는 모아레 무늬의 위상을 분석하면 그림 1(b)와 같은 GRIN rods의 반지름에 따른 굴절거리의 그래프를 얻게 되고 식 (2)를 이용하여 굴절률을 알 수 있다.⁽³⁾

$$n(r) = n_c + \frac{n_c}{\pi a} \int_r^a \frac{d(t)}{\sqrt{(t^2 - r^2)}} dt \quad (2)$$

위 식(2)로 계산한 굴절률 복원 결과와 본 연구에서 제안한 방법으로 계산한 결과는 그림2와 같다. GRIN rods의 core와 cladding의 굴절률 차이에 따른 굴절률 분포 비교를 위해 반지름 $0.5mm$, core의 굴절률 $n_0 = 1.564$ 로 고정시킨 후, cladding의 굴절률 n_c 를 변화시킴으로써 $\Delta n = n_{core} - n_{cladding}$ 이 각각 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25 일 경우의 굴절률 분포를 비교하였다.

기존 굴절률 복원 방법으로는 Δn 이 증가할수록 GRIN rods의 중심부에서 굴절률의 오차가 증가하는 것을 알 수 있으며, $\Delta n = 0.25$ 인 경우 그 오차는 0.0328이지만, 본 연구에서 제안한 방법을 사용하면 그 오차가 0.015임을 알 수 있다. 따라서 core와 cladding의 굴절률 차이가 큰 GRIN rods의 굴절률 분포를 복원하는 경우, 본 연구에서 제안한 방법을 적용하는 것이 매우 효과적임을 알 수 있다.

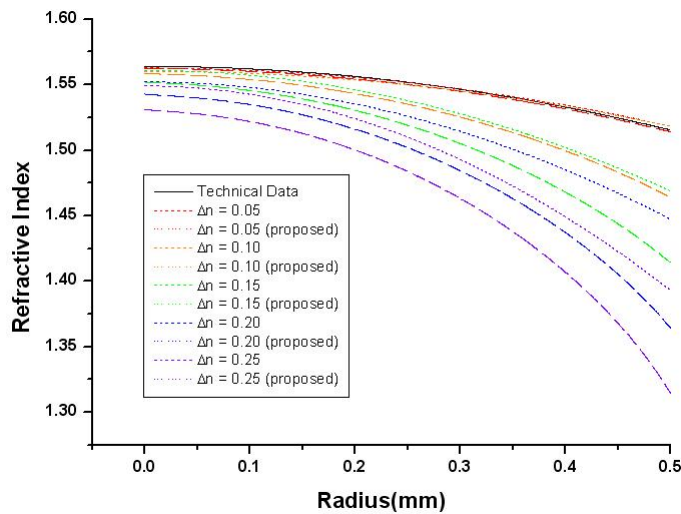


그림 2. 복원된 굴절률 profile

참고문헌

[1] W. J. Stewart, "Optical fiber and preform profiling technology," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-18**, 1451-1466 (1982).
 [2] S. Ranjbar, H. R. Khalesifard, and S. Rasouli, "Nondestructive measurement of refractive index profile of optical fiber preforms usign moire technique and phase shift method," *Proc. of SPIE*, **6025**, 602520 (2006).
 [3] D. Marcuse, "Refractive index determination by the focusing method," *Appl. Opt.*, **18**, 9-13 (1979).