

디지털 홀로그래피 단층촬영을 이용한 광섬유의 3차원 굴절률 분포의 측정

3-Dimensional measurement of refractive index distribution of optical fiber using digital holographic tomography

전윤성, 홍정기

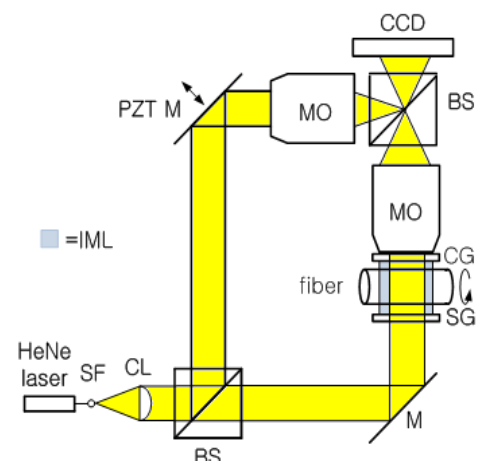
포항공과대학교 물리학과 응용 광학 실험실

artemis@postech.ac.kr

디지털 홀로그래피는 필름에 홀로그램을 기록한 후 기준광을 조사해서 상을 재생하는 고전적 홀로그래피와 달리 CCD 를 이용해 홀로그램을 기록하고 계산을 통해 파면을 재생한다.⁽¹⁾ 이런 계산을 이용한 재생은 물체파의 위상 정보를 제공하며, 위상 정보에는 상대적인 광학 경로 차이를 포함한다. 광학 경로 차이의 원인은 굴절률과 길이이며, 주로 우리는 이 두 가지 정보 중 하나에 대한 사전 정보나 가정을 통해 알고자 하는 나머지 정보를 획득한다.⁽²⁾ 특히 길이와 굴절률의 상관 관계에 대한 고찰은 현재 생명 과학 분야에 대한 응용 가능성 때문에 많은 연구가 진행되고 있으며, 광학 시스템이 가진 회절 한계의 횡방향 분해능과 파장 이하의 축방향의 위상 정확도를 지니고 있다.⁽³⁾ 그러나, 이러한 2 차원의 위상 정보는 두께를 지닌 투명한 샘플을 투과한 후의 정보이기 때문에, 광학 축 방향에 대한 위상 분포가 모두 합산된 결과이다. 예를 들어 세포를 투과한 위상을 통해 길이 정보를 획득할 경우 그것은 세포의 모양이 아니라 두께의 분포로 그 한계를 지닌다.⁽³⁾ 이에 조사 각도에 따른 위상도를 디지털 홀로그래피를 이용하여 획득하고 inverse Radon 변환을 이용한 재생을 적용하여 시료의 3 차원 굴절률 분포를 획득한다.

그림 1. 은 Mach-Zender 타입의 홀로그래피 현미경의 set-up 이다. 광원으로 파장이 632 nm인 10 mW의 He-Ne

그림 1. 단층 촬영용 투과형 위상 이동 홀로그래피 현미경. SF, spatial filter; CL, colimating lens; BS, beam splitter; M, mirror; PZT M, piezo-translator mirror; SG, slide glass; MO, micro objective; IML, index matching liquid.



laser 를 사용한다. 레이저로부터 나온 광선은 spatial filter 와 plano-convex 렌즈를 지나 평행광이 된다. 기준광은 piezo-translator 가 부착된 거울에서 반사되며, 물체광은 측정 대상을 투과 후 대물 렌즈를 통과한다. 기준광과 물체광은 beam splitter 에서 합쳐져 CCD 에 조사된다. 다른 조사 방향에서의 정보가 필요하므로 측정 대상이 부착된 x-y stage 는 모터에 연결되어 180° 회전한다, 약 2° 의 차이를 가진 각도에서마다 위상 이동된 영상을 기록하며 이는 3 차원 분포를 재생하기에 충분하다.

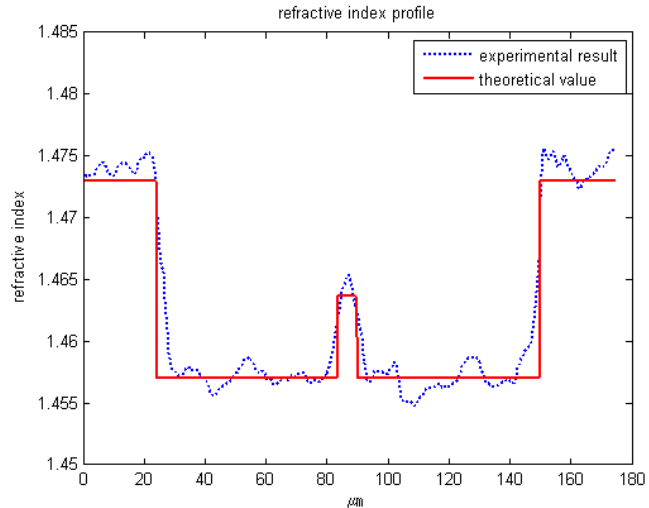
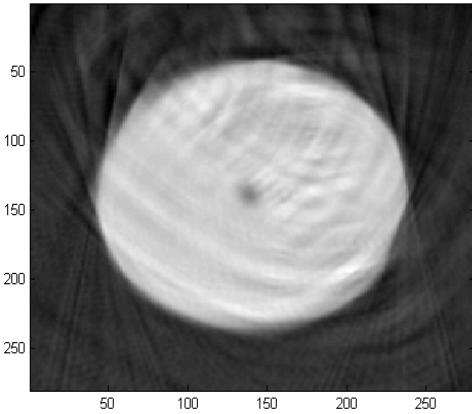


그림 2. 광섬유의 재생된 단층 영상. (1) 2 차원 굴절률의 분포와 (2) 이론값과 실험값의 비교.

측정 대상의 3 차원 굴절률 분포를 결정하기 위해 측정 대상을 제외한 나머지 투과 물질의 굴절률이 공간적으로 일정함을 가정한다. 이러한 가정과 관계식 $\phi(x, y) = \int \frac{2\pi}{\lambda} n_o(x, y, z) dz$ 을 통해 측정 대상의 굴절률 평면 분포를 결정할 수 있다. $\phi(x, y)$ 는 홀로그래프의 재생을 통해 획득한 측정 대상으로 인한 2 차원 위상 분포이며, $n_o(x, y, z)$ 는 측정 대상의 3 차원 굴절률 분포이다. 이러한 각기 다른 조사 각도에서의 2 차원 굴절률 평면 분포를 inverse Radon transform 을 이용하여 $n_o(x, y, z)$ 을 결정한다.

1. U Schnars and W. Jüptner, "Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction", Applied Optics Vol. 33, 179-181(1994).
2. Benjamin Rappaz, Pierre Marquet, Etienne Cuche, Yves Emery, Christian Depeursinge and Pierre J. Magistretti, "Measurement of the integral refractive index and dynamic cell morphometry of living cells with digital holographic microscopy", Optics Express Vol. 13, 9361-9373 (2005)
3. Pierre Marquet, Benjamin Rappaz, Pierre J. Magistretti, Etienne Cuche, Yves Emery, Tristan Colomb and Christian Depeursinge, "Digital holographic microscopy: a noninvasive contrast imaging technique allowing quantitative visualization of living cells with subwavelength axial accuracy", Optics Letters Vol. 30, 468-470 (2005)