

## 회절위상현미경을 이용한 광섬유의 굴절률 프로파일 측정

Mohammad R. Jafar-Fard<sup>1</sup> · 문석배<sup>2†</sup>

<sup>1</sup>연세대학교 물리학과

Ⓣ 120-749 서울특별시 서대문구 연세로 50번지

<sup>2</sup>국민대학교 나노전자물리학과

Ⓣ 136-702 서울특별시 성북구 정릉로 77번지

(2012년 6월 4일 받음, 2012년 7월 5일 수정본 받음, 2012년 7월 20일 게재 확정)

본 연구에서는 공동경로간섭계(common-path interferometer)에 기반한 회절위상현미경(diffraction phase microscopy)을 이용한 광섬유의 굴절률 프로파일(refractive index profile) 측정기술을 개발하였다. 투과형 회절격자를 이용하여 광섬유 시료를 통과한 빛으로부터 편광을 이용하여 영의 공간주파수 성분만을 갖는 기준광을 생성하고, 기준광을 다시 시료의 위상정보를 갖는 시료광과 간섭시키는 방법을 통해 시료의 위상정보를 가진 간섭무늬를 형성시켰다. 이렇게 얻어진 간섭 이미지로부터 수치적 처리과정을 거쳐 공간적 위상정보 곧, 위상 이미지를 획득하고 이 데이터를 역아벨변환(inverse Abel transform)을 통해 굴절률 프로파일로 변환할 수 있었다. 이때 클래딩과 광섬유 주변의 매질 사이의 굴절률차로 인해 발생하는 배경위상을 이론적으로 얻어진 함수형태에 맞춰 예측하고 이를 측정된 위상에서 제거하는 배경위상제거 방법을 개발하여 사용하였다. 이를 통해 광섬유 코어 부근의 위상정보만으로도 굴절률 프로파일을 성공적으로 이뤄질 수 있음이 입증되었다. 본 연구를 통하여 회절위상현미경 특유의 측정안정성과 편의성을 가진 광섬유 굴절률 프로파일 측정장치를 개발하였고 광섬유 및 도파로의 굴절률 분포를 비파괴적으로 분석할 수 있어 광섬유 및 광섬유소자 개발에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## Measurement of Refractive Index Profile of Optical Fiber Using the Diffraction Phase Microscope

Mohammad R. Jafar-Fard<sup>1</sup> and Sucbei Moon<sup>2†</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, Yonsei University, 50 Yonsei-ro, Seoul 120-749, Korea

<sup>2</sup>Department of Physics, Kookmin University, 77 Jeongneung-ro, Seoul 136-702, Korea

(Received June 4, 2012; Revised manuscript July 5, 2012; Accepted July 20, 2012)

We have developed a measurement method of the refractive index profile of an optical fiber by using diffraction phase microscopy. In the microscope system, the reference light was extracted directly from the probe light that passed through the sample by means of pinhole filtering with a diffraction grating. The spatial interference pattern produced by the probe light and the reference light was processed to generate the phase image of the sample fiber. The index profile was obtained by the inverse Abel transform of the phase profile. In order to remove the background phase that originated from the index difference between the cladding and the surrounding medium, the background phase was calculated from the phase data of the cladding to make a core phase profile that can be directly transformed to the index profile of the core without the full phase image that includes the entire cladding part.

Keywords: Optical fiber characterization, Refractive index profile, Quantitative phase microscopy, Abel transform

OCIS codes: (060.2270) Fiber characterization; (110.3175) Interferometric imaging; (180.3170) Interference microscopy

### I. 서 론

광섬유는 코어(core)와 클래딩(cladding)이 원통형 도파로

구조를 이루고 상대적으로 굴절률이 높은 코어에 의해 빛이 도파되는 것을 원리로 한다. 개념적으로 단순화한 광섬유는 코어와 클래딩이 각각 일정한 굴절률을 가지지만 실제 광섬

†E-mail: [moons@kookmin.ac.kr](mailto:moons@kookmin.ac.kr)

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

유는 제작공정의 특성에 의해서나 목표로 하는 도파특성을 얻기 위해 공간적으로 변화하는 굴절률 분포를 가진다. 광섬유의 굴절률 분포는 몇가지 예외적인 경우를 제외하면 광섬유 특유의 회전대칭성을 가지고, 간단히 반경축(radial axis)에 따른 굴절률 프로파일(refractive index profile)로 간단히 묘사될 수 있다. 이러한 굴절률 프로파일은 광섬유의 광신호 전달특성을 결정하는 광섬유 디자인의 핵심요소로 굴절률 분포의 정확한 측정은 광섬유 및 광섬유 소자의 연구에 유용한 정보를 제공한다<sup>[1]</sup>.

광섬유의 개발에서 광섬유의 굴절률 분포는 전통적으로 광섬유 드로잉 이전 모재(fiber preform)의 굴절률 분포를 측정하여 가능되어 왔다. 모재의 경우 그 직경이 1 cm 이상으로 다양한 측정기법들을 이용하여 정확한 굴절률 분포를 얻어내는 것이 용이하다. 반면 광섬유의 굴절률 분포는 코어의 직경이 10  $\mu\text{m}$  이내로 충분한 공간분해능과 측정정확성을 확보하기 어렵고 모재의 굴절률분포로부터의 변화량이 크기 않아 실제 광섬유 개발과정에서는 잘 활용되지 않고 있다. 그러나 광섬유 격자나 커플러 (fused fiber coupler), 테이퍼(tapered fiber), TEC 광섬유 (thermally expanded core fiber)와 같은 광섬유소자의 경우에는 제작공정상 상당한 굴절률 분포의 변화를 동반하며 이 경우 광섬유 굴절률을 직접적으로 측정하여 소자제작과 관련된 여러 정보를 얻어낼 필요가 있다. 또한 광섬유의 굴절률프로파일 정보는 특성이 불분명한 광섬유의 타입과 특성을 알아낼 수 있는 직접적인 방법으로 광섬유 포설상황 관리나 재고관리 등에 유용하게 활용될 수 있을 것이고, 이를 위해서는 용이하게 굴절률프로파일을 측정할 수 있는 기술이 요구된다.

높은 공간분해능(spatial resolution)과 정확도로 광섬유 굴절률분포를 측정하기 위하여 현재까지 다양한 현미경기반 측정기법이 개발되었다<sup>[1-5]</sup>. 이 가운데 잘 알려진 공초점현미경 방법(confocal microscopy method)<sup>[2, 3]</sup>과 굴절근접장 방법(refractive near-field method: RNF method)<sup>[4]</sup> 수평하게 절단된 광섬유 단면의 효과를 이용한 방법으로 용이하게 굴절률분포를 측정할 수 있는 이점이 있으나 비파괴적으로 굴절률 변화를 측정할 수 없는 단점을 지닌다. 반면, 간섭현미경 방법(interferometric microscopy method)은 광섬유를 수평하게 통과하는 빛의 위상변화를 측정하여 굴절률분포의 정보를 얻는 방법으로 광섬유 길이축 굴절률 변화를 직접 측정할 수 있어 광섬유 뿐 아니라 광섬유 소자의 특성평가에도 활용성이 높은 장점을 가진다<sup>[1, 5]</sup>. 그러나 위상정보를 정량적으로 측정하기 위한 간섭현미경은 시료를 통과하는 시료광(probe light)과 기준위상을 제공하는 기준광(reference light)이 공간적으로 분리된 경로를 가지는 특성 때문에 측정 시스템의 구성이 복잡하고 진동이나 온도변화 등에 민감한 문제점이 있어 실용화에는 부적합한 것으로 생각되어왔다. 특히, 기존의 간섭현미경은 주로 Mach-Zehnder형의 간섭계를 기본 구조로 채택하여 기준광은 시료광과 완전히 구분된 경로를 가지며 광원의 제한된 가간섭길이(coherence length)와 파장 불안정성으로 인해 두 빔의 경로차가 거의 없도록 정밀하게

조정되어야 하는 불편함이 있다. 한편, 비간섭형 위상현미경 기법으로서 위상 그레디언트(phase gradient)에 의한 회절효과를 이용한 정량적 위상현미경 (QPM; quantitative phase microscopy) 기법을 이용한 광섬유 굴절률 프로파일 측정기법도 소개되었다.<sup>[9, 10]</sup> 이 방법은 비간섭형이라는 점에서 구조적 장점을 가지나 위상측정의 정밀도를 확보하기 위해서 공간 분해능의 일부가 저하될 수 있는 단점이 있다. 또한, 초점을 정밀하게 조정하기 위한 기계적 구동파트를 요구되며, 두 장 이상의 이미지를 얻는 과정에서 기계적 진동 등과 같은 변화가 억제되어야 된다는 점에서 비용과 응용상의 한계를 지닌다.

본 연구에서는 기존의 간섭현미경을 이용한 광섬유 굴절률 프로파일 측정방법이 갖는 이러한 기술적 난점을 극복할 수 있는 방법으로 회절위상현미경(diffraction phase microscopy)을 이용한 광섬유 굴절률프로파일 측정방법을 제시하여 간단하고 안정적인 광섬유 굴절률분포 측정의 기술을 확립하려 한다. 이를 위해 본 연구는 공통경로간섭계(common-path interferometer) 형태의 구성을 가진 회절위상현미경(diffraction phase microscope)을 측정 시스템으로 채택하여 광섬유의 미세한 굴절률 분포를 측정하는데 응용한다. 회절위상현미경은 그 구현상의 단순성과 사용상의 편리성 및 외부환경에 대한 둔감성으로 인해 굴절률프로파일 측정에 매우 적합함이 본 연구결과 입증되었다. 이와 더불어, 본 연구는 획득된 위상 이미지 정보로부터 대칭적인 굴절률프로파일을 얻기 위한 위상신호처리 과정을 개발하여 기존의 신호처리 방법이 가진 단점을 보완할 수 있었다.

## II. 회절위상현미경

전통적인 간섭현미경은 두 가간섭광이 조정가능한 서로 다른 경로를 겪고 결합하는 Mach-Zehnder 및 Michaelson 타입의 간섭계를 기본 형태로 하여 한 쪽의 경로에 현미경 구성을 위한 대물렌즈와 시료 스테이지를 두는 것을 기본구조로 한다. 전술한 바와 같이 이런 간섭계 구조는 시료광과 기준광이 공간적으로 분리되어 서로 다른 광부품을 통과하는 특성을 가지며, 이에 따라 진동과 온도변화 등과 같은 환경변화에 의해 두 빔의 상대적 위상이 변화하는 단점을 가진다. 특히, 광섬유의 굴절률프로파일 측정시에는 광섬유 클래딩 고유의 굴절률과 곡률에 의한 굴절효과를 최소화하기 위해 광섬유를 굴절률이 유사한 액체나 젤에 잠기도록 시료단을 준비하여야 하고, 이때 시료단의 광학적 경로길이가 시료마다 달라지는 문제점이 있다. 때문에 사용하는 레이저 광원의 가간섭길이(coherence length)가 매우 길고 출력파장이 매우 안정적이거나 혹은, 기준빔의 경로길이를 매측정시마다 정밀하게 재조정해야 한다. 전자는 측정 시스템의 비용을 증대시키고 후자의 경우 사용상의 편의성이 저하된다.

회절위상현미경(diffraction phase microscopy)은 간섭현미경이 가진 이런 기술적 난점을 극복할 수 있는 새로운 정량적 위상현미경 (quantitative phase microscopy) 기술로 2006

년 Michael S. Feld 그룹에 의해 처음 소개되었다<sup>[6]</sup>. 본래 본 현미경기술의 개발목적은 세포와 같은 작은 생물학적 시료의 안정적인 위상 측정에 있으나 본 연구가 목표로 하는 광섬유 굴절률프로파일 측정에도 매우 적합한 특성을 지닌다고 할 수 있다. 그림 1은 회절위상현미경의 기본구조를 보여준다. 레이저광원에서 나온 평행광은 준비된 시료를 통과하고 대물렌즈에 입사된다. 본 연구에서 시료는 광섬유로써 두 장의 유리판 사이에 적절한 굴절률 매질(index-matched medium)과 함께 충전되어 있다. 대물렌즈를 통과한 빛은 전달렌즈(relay lens)에 의해 광섬유의 실상이 초점거리만큼 거리를 두고 맺히게 된다. 이때 실상면에 투과형 회절격자(diffraction grating)가 놓여 여러 차수의 회절광을 형성하게 된다. 두 볼록렌즈 L1, L2와 공간필터(spatial filter)로 기능하는 마스크에 의해 여러 회절광 가운데 0차와 +1차의 회절광을 걸러내고 합하여 디지털 이미지센서에 의해 최종적으로 실상이 획득된다. 이때 공간필터는 0차 회절광 가운데 중심축 성분(DC component)만을 통과시키는 핀홀(pinhole)이고 반면, +1차 회절광은 충분한 대역폭을 가지고 오직 0차와 +2차 회절광을 차단하도록 한다.

회절위상현미경의 기본원리는 시료를 통과한 시료광으로부터 직접 기준광을 추출하여 시료광과 기준광이 적절한 각을 가지고 결합하도록 설계하여 이미지센서에 공간적 간섭무늬를 형성하는 것이다. 기존의 간섭현미경이 시료를 통과하기 이전에 광선을 분리하여 기준광을 생성하고 별도의 경로를 통해 전달하는 것과는 달리 회절위상현미경은 기준광을 시료광에서 추출하는 공통경로구조(common-path configuration)를 가지므로 공간적으로 분리된 경로의 간섭계가 가지는 단점을 피할 수 있다. 구체적으로 회절위상현미경은 시료광의 여러 공간주파수 성분가운데 공간주파수가 0인 DC성

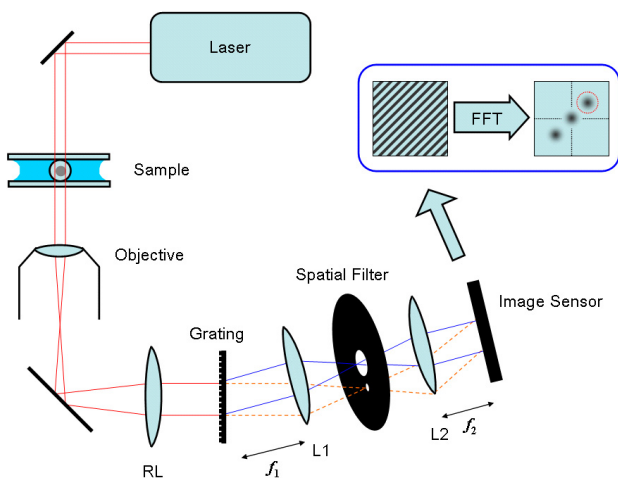
분을 기준광으로 사용하며 이는 시료 전체의 평균적 위상에 대응된다. 한편, 회절격자 특성상 시료광과 기준광은 각각 +1차와 0차 회절광으로 서로 일정한 각을 가지므로 광세기를 감지하는 이미지센서는 +1차 회절광에 실린 공간적 정보가 기준광과의 간섭무늬에 의해 변조된 신호를 획득하게 된다. 즉, 획득된 광세기  $I(x, y)$ 는 이미지센서의 2차원 좌표를  $x$ 와  $y$ 라 할 때, 기준광의 세기  $I_R(x, y)$ 와 시료광의 세기  $I_S(x, y)$ 에 대한 함수로

$$I(x, y) = I_R + I_S + 2\sqrt{I_R I_S} \cos(q_x x + q_y y + \varphi(x, y)) \quad (1)$$

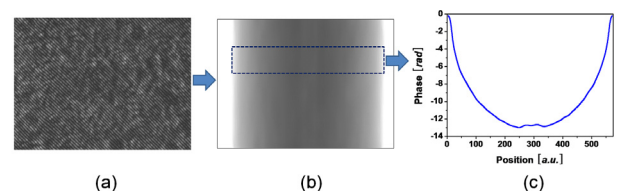
와 같이 나타난다. 이때,  $q_x$ 와  $q_y$ 는 각각  $x$ 축과  $y$ 축 방향의 공간주파수로 0차 회절광과 +1차 회절광이 이미지센서에 입사하는 각도에 의해 결정되는 상수로서 줄무늬의 회절패턴 이미지를 정의한다. 한편,  $\varphi(x, y)$ 는 측정하고자 하는 시료광의 공간적 위상분포로써 회절위상현미경에서 위상정보는 간섭패턴  $I(x, y)$ 로부터  $\varphi(x, y)$ 를 얻어내는 일종의 힐버트변환(Hilbert transform)에 의해 추출된다.

구체적으로, 식 (1)의 형태를 가진 획득된 이미지로부터 위상을 추출하는 과정은 FFT(fast Fourier transform)에 의해 구현되는 푸리에 변환(Fourier transform)을 이용할 수 있다. 2차원 FFT에 의해 획득된 이미지를 2차원 주파수영역으로 변환시키면 식 (1)의 우변 각 항들은 서로 다른 주파수영역으로 분리된다. 첫번째 항과 두번째 항은 ( $I_R$ 과  $I_S$ ) 모두 주파수 0점을 중심으로 한 베이스밴드(base band)에 배치되지만 세번째 항의 경우 코사인 함수에 의해 변조된 형태로  $q_x$ 와  $q_y$ 을 중심 공간주파수로 컨볼루션(convolution)된 형태로 나타난다. 단, 푸리에 변환의 특성상  $+q_x$ 와  $+q_y$  주파수를 중심으로 한 영역과  $-q_x$ 와  $-q_y$ 을 중심으로 한 영역이 헤르미트 대칭성(hermitian symmetry)를 보이며, 두 영역 중 한 영역만으로도 모든 위상정보가 얻어진다. 간단히  $+q_x$ 와  $+q_y$  주파수를 중심으로 한 변조밴드의 신호만을 대역통과시키고 다시 역변환하면 공간적인 복소수분포함수를 이미지로 획득할 수 있다. 위상신호는 단순히 각 픽셀의 복소수의 극좌표 표현값의 위상으로 허수부를 실수로 나눈 값의 역탄젠트(arctangent) 함수값으로 구해진다.

그림 2는 간섭무늬 이미지, 위상 이미지 및 위상프로파일



**FIG. 1.** Schematic of the diffraction phase microscope setup for the index profile measurement. The pinhole of the spatial filter produces the reference light from the zeroth-order diffraction beam of the grating while the first-order diffraction beam contains the phase information of the sample to be interfered with the reference light on the image sensor.



**FIG. 2.** Raw interference pattern captured by the image sensor (a), phase image (b) and the phase profile (c). Only a quarter of the full interference image was displayed here in (a) for better visibility of the fringe pattern.

(phase profile)를 보여준다. 본 연구의 실험에서는 가로와 세로가 각각 640과 480 픽셀의 위상 이미지로부터 광섬유 축에 수직한 방향의 위상분포 정보를 가진 위상프로파일을 얻어 추후 굴절률프로파일 계산에 이용하였다. 이때 랜덤한 잡음의 효과를 최소화하기 위해 그림 2의 위상이미지에서 점선으로 표시한 영역의 100개 라인을 수직 축으로 평균을 취하여 640개의 데이터 포인트를 가진 위상 프로파일을 얻었다. 본 실험에서는 NA 0.25의 현미경 대물렌즈가 사용되었으며 시료광과 기준광이 서로 0.8도의 각을 갖고 이미지센서에 입사하여 그림과 같이 이미지 프레임에 대해 45도 각을 갖는 줄무늬의 간섭패턴을 형성하도록 하였다. 실험에서 광원은 635 nm 파장의 레이저를 이용하였고 110/mm 주기의 격자상수를 갖는 투과형 회절격자가 사용되었다. 레이저광 특유의 스펙클에 의해 간섭무늬 및 잡음의 효과를 최소화하기 위해 시료가 제거된 상태에서 배경이미지를 얻고 추후에 이 배경이미지를 실제 측정값에서 제거하는 방법으로 위상 측정의 정확도를 향상시켰다. 회절위상현미경의 위상측정 정밀도는 반복적으로 획득된 위상 이미지에서 한 픽셀에 대해 측정된 위상의 통계적 편차로 평가되었고 500개의 표본 데이터에 대해 0.007 라디안의 낮은 표준편차를 얻을 수 있었다.

### III. 위상신호의 처리 및 배경위상예측

본 절에서는 획득된 위상이미지로부터 광섬유의 굴절률프로파일을 추출하기 위한 알고리즘을 소개한다. 광섬유 굴절률프로파일 측정을 위한 기존 이론을 회절위상현미경에 맞게 접목시켰으며 다만, 본 연구가 목표로 하는 간단한 측정 방법의 개발을 위하여 클래딩에 의한 배경위상을 예측하여 제거하는 알고리즘을 새롭게 개발하여 추가하였다.

광섬유의 굴절률 분포는 PMF(polarization maintaining fiber)와 같은 비대칭적 특수광섬유를 제외하고는 거의 완벽한 회전대칭성을 가지고 있고, 이에 따라 굴절률 프로파일은 광섬유 중심축으로부터의 거리  $r$ 에 대한 함수로 간단히 나타낼 수 있다. 한편, 측정되는 위상의 프로파일은 2차원 위상 이미지에서 광섬유 중심축으로부터의 거리  $x$ 에 대한 함수로 주어지며, 광섬유가 광섬유 굴절률과 유사한 액체에 담겨져 있을 때 측정하는 위상,  $\varphi(x)$ 는 액체의 굴절률에 의한 위상 지연과의 상대적 값으로 아래 공식과 같이 나타난다<sup>[7, 8]</sup>.

$$\varphi(x) = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \int_x^R \Delta n(r) \frac{rdr}{\sqrt{r^2 - x^2}} \quad (2)$$

여기서  $\lambda$ 는 측정파장,  $R$ 은 전체 광섬유의 반경,  $\Delta n(r)$ 은 광섬유 굴절률 프로파일로 주변액체의 굴절률 값에 대한 상대적 값이다. 이는 회전대칭을 가진 대상을 통과하는 광선에 측정값이 누적되는 경우에 적용되는 아벨변환(Abel transform)의 전형적 예로 광섬유 내부 및 외부와의 굴절률 차이가 작아서 광선의 경로가 직선에서 크게 벗어나지 않는다고 가정

할 수 있을 때 성립한다.

한편, 광섬유는 순수한 실리카 유리로 구성된 클래딩과 광섬유 고유의 특징적인 굴절률 분포를 가지고 있는 코어로 구성되어 있으며 클래딩의 굴절률은 일정한 상수로 주어진다. 측정된 위상 프로파일  $\varphi(x)$ 는 클래딩에 의한 위상만큼 위에 코어의 위상 프로파일이 더해진 형태를 띠게 되고 우리가 측정하고자 하는 부분은 코어 고유의 위상 프로파일이다. 코어의 굴절률 프로파일은 클래딩의 굴절률  $\Delta n_0$ 에 대해  $\Delta n(r) = \Delta n'(r) + \Delta n_0$ 와 같이 표현할 수 있고 이때, 식 (2)는 아래 식과 같이 분리할 수 있다.

$$\varphi(x) = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \int_x^a \Delta n'(r) \frac{rdr}{\sqrt{r^2 - x^2}} + \frac{4\pi \cdot \Delta n_0}{\lambda} \cdot \int_x^R \frac{rdr}{\sqrt{r^2 - x^2}} \quad (3)$$

이때  $a$ 는 코어의 반경으로 코어는  $r < a$ 에 의해 공간적으로 제한된다. 위 식의 우변에서 두번째 항은 코어의 굴절률 분포와 무관한 함수로 광섬유의 원통형 형상과 주변 액체와의 굴절률 차에 의해 얻어진다. 광섬유 코어의 굴절률 프로파일 정보는 우변의 첫번째 항에 있으며 이때 굴절률 분포함수  $\Delta n'(r)$ 은 클래딩의 굴절률에 대한 상대적인 값으로 주어진다. 이와 같이 측정된 위상 프로파일을  $\varphi(x) = \varphi'(x) + \varphi_0(x)$ 의 형태로 코어위상함수 (core phase function),  $\varphi'(x)$ 와 클래딩에 의한 배경위상함수 (background phase function),  $\varphi_0(x)$ 로 구분할 수 있고, 각각 식 (3)의 우변 첫번째 항과 두번째 항으로 정의된다.

굴절률프로파일 측정에서는 원통 경계를 갖는 클래딩의 계면굴절효과를 최소화하기 위해 실리카의 굴절률과 거의 같은 굴절률 매질(index-matched medium)이 액체나 젤 형태로 사용된다. 그러나 실제의 경우 약간의 굴절률차가 존재하며 이에 따라 배경위상함수는 0이 아닌 값을 가지게 된다. 이러한 배경위상함수로부터 클래딩의 굴절률정보를 복원하기 위해서는 식 (2)와 같이 아벨변환은 전영역에 대한 적분으로 나타나며 그 역변환과정도 클래딩 전영역의 정보로부터 추출되는 형태가 되어야 한다. 이것은 두 가지 점에서 비효율적이다. 첫째, 클래딩 전체의 위상이미지를 획득하려면 제한된 이미지센서 화소수에 대해 공간분해능이 희생될 수 있다. 이는 특히 클래딩의 직경이 125  $\mu\text{m}$  이상인 특수광섬유의 경우에 심각한 문제일 수 있다. 회절위상현미경의 경우 회절한계 분해능보다 5배 이상 수준의 공간주파수로 샘플링되는 것이 요구된다. 높은 NA(numerical aperture)의 대물렌즈를 사용하고 짧은 파장의 빛을 이용하여 공간분해능을 향상시키면 샘플링 주파수는 시료단에서 환산된 값으로 25  $\mu\text{m}^{-1}$  이상일 수 있고, 광섬유 전체영역을 획득하기 위해서는 수평 픽셀수가 3000개 이상이어야 하므로 고가의 이미지센서가 필수적이다. 둘째, 광섬유 중심부의 굴절률 값을 얻기 위해 클래딩 영역 전체의 위상정보가 활용되면 클래딩부의 위상 정보에 담긴 에러중 일부는 누적되어 나타날 수 있고 측정된 코어의 굴절률의 정확성이 떨어질 우려가 있다. 이러한 문제

점을 극복하기 위해 본 연구에서는 배경위상함수를 직접 처리하지 않고 클래딩의 크기와 굴절률을 예측하기 위한 지표로만 활용하는 배경위상함수 제거방법을 소개한다.

전술한 바와 같이 배경위상함수는 그 특성상 단순한 형태의 함수로 나타나며 식 (3)의 우변, 두번째 항을 적분하여

$$\varphi_0(x) = \frac{4\pi \cdot \Delta n_0}{\lambda} \cdot \int_x^R \frac{rdr}{\sqrt{r^2 - x^2}} = \frac{4\pi \cdot \Delta n_0}{\lambda} \cdot \sqrt{R^2 - x^2} \quad (4)$$

와 같이 간단히 나타낼 수 있다. 이 함수는 굴절률차  $\Delta n_0$ 와 클래딩 반경  $R$ 을 패라미터로 갖는 함수로 적절한 커브피팅 방법(curve fitting method)을 통해 예측할 수 있다. 이때 측정된 위상 프로파일에서 코어부분을 제외한 나머지 부분( $r > a$ )의 데이터를 이용하여 코어 프로파일의 효과를 제거해야 하고, 만약 코어의 크기가 알려져 있지 않은 경우 식 (4)의 곡선특성을 통해 코어를 예측하는 것도 가능하다. 본 연구에서는 코어부분을 제외한 위상프로파일로부터 최소자승법(least square method)에 의한 커브피팅으로 배경위상함수를 예측하고 측정된 위상에서 제거하여 순수한 코어위상함수를 구하였다. 이렇게 얻어진 코어위상함수는 식 (3)으로부터

$$\varphi'(x) = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \int_x^a \Delta n'(r) \frac{rdr}{\sqrt{r^2 - x^2}} \quad (5)$$

으로 정리할 수 있고 상대적 코어 굴절률 프로파일의 아벨 변환으로 주어진다.

코어의 굴절률 프로파일  $\Delta n'(r)$ 은 클래딩 굴절률에 대한 상대적 굴절률 값으로 배경위상이 제거된 코어위상함수  $\varphi'(x)$ 의 역아벨변환(inverse Abel Transform)을 통해 구할 수 있다. 고전적인 역아벨변환의 식은 아래와 같이 주어진다.

$$\Delta n'(r) = -\frac{\lambda}{2\pi^2} \cdot \int_r^a \frac{d\varphi'}{dx} \cdot \frac{dx}{\sqrt{x^2 - r^2}} \quad (6)$$

그러나 이러한 형태의 역변환은 측정오류에 민감한 특성을 가지고 있고 특히  $r=0, x=0$ 의 점 부근에서 피적분함수가 발산하기 쉬운 특성이 있어 프로파일의 중심부에서 심각한 수준의 에러가 발생할 수 있다. 때문에 직접 적분하는 방법보다는 다른 계산 전략이 실제 역아벨변환 계산법으로 흔히 이용된다<sup>7, 8)</sup>. 본 연구에서는 푸리에급수(Fourier series)를 이용한 계산 방법을 사용하였고, 위상 프로파일을 푸리에급수에 의해 전개하고 코사인 함수형태의 각 기저 위상함수의 변환계수를 구하여 최종적인 굴절률 프로파일을 추출한다<sup>8)</sup>. 즉, 측정된 코어위상함수를 푸리에급수로 전개하면,

$$\varphi'(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n \cos\left(\frac{n\pi x}{a}\right) \quad (7)$$

와 같이 나타낼 수 있고 이때, 정수  $n$ 에 대해서  $\alpha_n$ 은 푸리에 계수이다. 식 (7)은  $x$ 가 0에서  $a$  사이의 범위 내일 때 정의되며, 이때  $a$ 는 코어의 범위이나 코어의 굴절률프로파일  $\Delta n'(r)$ 가  $r < a$ 인 구간 내에서 정의된다면 역변환을 수행하는 범위로 자유롭게 선택할 수 있다. 계산상의 편리와 코어영역의 적절한 공간적 마진을 부여하기 위해  $a$ 는 실제 코어반경의 두 배정도 수준의 값으로 선택하는 것이 바람직할 것이다. 한편, 각 푸리에 기저함수에 대한 아벨변환 특성을 분석하여 역아벨변환식은

$$\Delta n'(r) = \frac{\lambda}{4a} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} n\alpha_n g_n\left(\frac{r}{a}\right) \quad (8)$$

와 같이 간단한 급수식으로 나타난다. 이때  $g_n(\rho)$ 은 적분변수  $t$ 에 대해 다음과 같이 정의되는 함수이다.

$$g_n(\rho) = \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^{\sqrt{1-\rho^2}} (t^2 + \rho^2)^{-1/2} \cdot \sin n\pi(t^2 + \rho^2)^{1/2} dt \quad (9)$$

위 함수  $g_n(\rho)$ 은 차원이 없는 값으로 굴절률프로파일과 무관하여 미리 계산된 값을 테이블 형태로 저장하여 활용할 수도 있을 것이다. 실제 계산에서 급수의 차수  $n$ 의 최대값은 20이상이면 충분한 것으로 확인되었고 다음 절의 실험결과 처리에서는 40까지 고려하여 계산하였다.

본 연구에서 제시된 배경위상 예측에 의한 역아벨변환 방법은 예측된 배경위상이 시스템적 에러나 시료의 비대칭성을 포함한 문제로 인해 실제 배경위상에 대해 에러를 포함할 수 있다는 점에서 굴절률 프로파일에 추가적인 에러를 야기할 수 있다. 클래딩이 실리카로 구성되어 일정한 굴절률을 가지고 있고 그 외벽이 광섬유 제조의 특성상 원통에 가까운 곡면이라면 실제 배경위상은 클래딩과 외부 사이의 계면 부근의 영역을 제외하고는 광섬유 중심부에서 공간적으로 부드러운 함수 형태(slowly varying function)로 나타날 것이다. 한편, 식 (4)에서 주어진 예측된 배경위상 역시 클래딩 경계영역을 제외하면 부드러운 함수 형태를 가지므로 배경위상 추정의 에러는 중심부에서 부드러운 함수 형태로만 나타나며 이에 따라 굴절률 프로파일의 에러는 저주파의 곡선 성분만을 가질 것이다. 그러므로 배경위상 예측상의 에러는 측정된 굴절률의 절대적 수치에는 상당한 영향을 줄 수는 있지만 코어영역 굴절률 분포의 섬세한 형태를 변형시키지는 않을 것으로 기대된다.

#### IV. 실험결과 및 토의

본 연구에서는 이전 절에서 설명한 바와 같이 굴절률프로파일 측정을 위하여 회절위상현미경 시스템과 위상신호처리 알고리즘을 개발하였고 이를 이용하여 실제 광섬유의 굴절률프로파일을 측정하여 성능을 평가하였다. 본 실험에서 사

용된 광섬유는 정밀한 굴절률프로파일 측정력을 시험하기 위하여 코어와 클래딩의 굴절률차가 작고 굴절률프로파일의 형태가 단순하지 않은 광섬유를 선택하였다. 사용된 시료 광섬유의 코어 직경은 18  $\mu\text{m}$ , 클래딩 직경은 125  $\mu\text{m}$ 이고 굴절률차는 0.003로 상대적 굴절률차는 0.2%이다. 이는 통상적인 단일모드광섬유(SMF)의 굴절률차의 절반수준으로 굴절률프로파일 측정의 정밀도를 가늠하기에 적합한 시료이다. 본 광섬유 시료는 모재상태에서 굴절률 프로파일이 측정되었으며 본 실험에서 광섬유 굴절률프로파일을 측정된 후에 모재의 프로파일과 비교할 수 있었다.

시료 광섬유는 두 장의 유리판 사이에 젤 형태의 굴절률 매질(index-matching medium)과 함께 충전되어 회절위상현미경의 시료단에 설치되었다. 굴절률 매질로는 글리세롤을 사용하였으며 글리세롤의 굴절률은 633nm에서 1.471로 실리카 유리의 굴절률 1.457과 0.014만큼의 차이를 갖는다. 이러한 굴절률차는 통상적인 굴절률 매질보다 훨씬 큰 것으로 본 실험에서는 극한적 조건으로 상당한 수준의 배경위상을 도입하여 본 연구에서 개발된 배경위상 예측과 제거의 효과를 가늠하였다.

그림 3은 회절위상현미경을 통해 획득된 원본 데이터(raw data)로부터 최종적인 굴절률프로파일(index profile)을 얻는 수치적 처리과정을 보여준다. 회절위상현미경의 원본 이미지는 2차원 FFT와 역FFT과정을 통해 위상 이미지로 전환되고

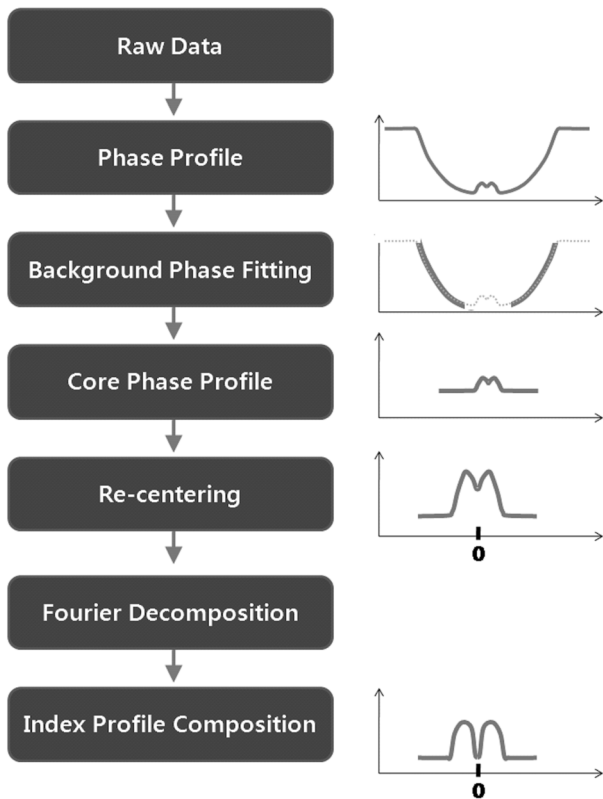


FIG. 3. Procedure of the signal processing for converting the phase data to the desired refractive index profile.

이렇게 얻은 위상 이미지 데이터에서 선택된 영역에 대해 평균화하여 위상프로파일을 얻었다. 전체 640개의 데이터포인트 가운데 양쪽 클래딩 경계 너머의 값은 계산편의상 제거하였다. 한편, 코어 영역을 제외한 순수한 클래딩 영역의 데이터를 이용하여 식 (4)의 함수로 커브피팅을 수행하여 배경위상함수(background phase)를 예측하였다. 이때 클래딩 양쪽 종단의 경계에서 광섬유 안쪽으로 클래딩 반경의 15%의 폭(실제 거리로 각각 9  $\mu\text{m}$  폭)을 갖는 클래딩의 양쪽 가장자리 영역은 커브피팅시 고려하지 않았다. 이는 이 영역을 통과한 광선이 굴절률차와 계면각에 의해 무시할 수 없는 각으로 휘 수 있고 이에 의한 위상 오차가 무시할 수 없는 영역인 점을 감안한 것이다. 이렇게 예측된 배경위상을 측정된 위상프로파일에서 제거하여 코어위상함수(core phase profile)을 얻을 수 있었다.

그림 4는 측정된 광섬유의 위상프로파일(회색 실선)과 측정치로부터 예측된 배경위상함수(검은색 실선)를 보여준다. 커브피팅의 결과 배경위상함수는 식 (4)를 이용하여 성공적으로 예측되고 제거될 수 있었다. 예측된 배경위상의 크기는 광섬유 중심부( $x=0$ )의 위상 크기로부터 굴절률차  $\Delta n_0$ 가 0.011인 상황과 일치했다. 이는 통상적인 글리세롤과 실리카의 굴절률차 0.014와 잘 일치하는 값이다. 이렇게 구해진 코어위상프로파일은 정확한 계산을 위해 좌표의 원점이 실제 코어의 중심과 일치하도록 재조정(re-centering)되었다. 이때 코어의 중심은 코어위상프로파일을 가중치로 하는 위치( $x$ )의 기대값 즉, 평균위치로 계산되었다. 이렇게 재조정된 코어위상함수를 역아벨변환하기 위해 푸리에 계수를 구하고 식 (8)을 이용하여 굴절률프로파일을 구성하였다.

그림 5는 이렇게 추출된 광섬유의 굴절률프로파일(검은색 실선)과 드로잉 이전에 측정된 광섬유 모재의 굴절률프로파일(회색 실선)을 보여준다. 식 (8)을 통해 얻어진 광섬유의 굴절률프로파일은 원통 회전대칭을 가정하여 코싸인함수를 기저함수로 사용하여 얻어진 것이므로 중심점을 기준으로

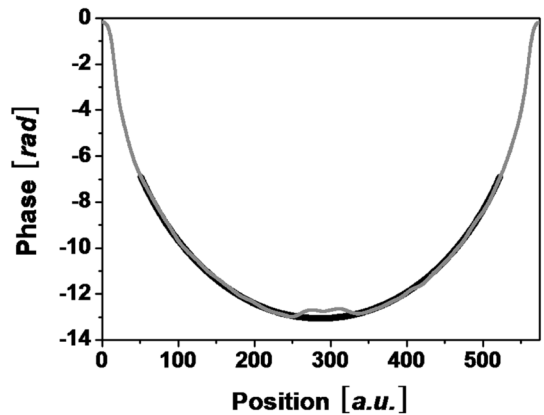


FIG. 4. Measured phase profile of the sample fiber (gray line) and the fitted curve of the background phase function (solid line) to be subtracted from the measured phase for the core phase profile.

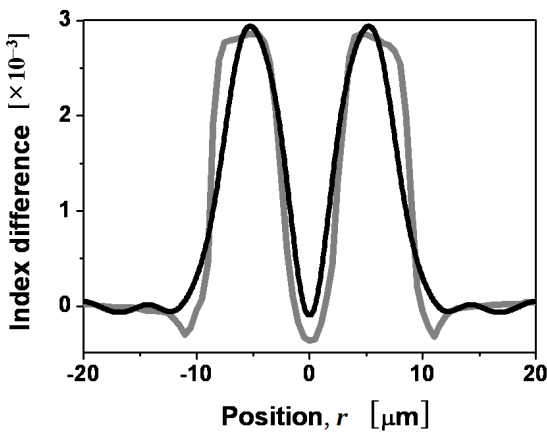


FIG. 5. Measured index profile of the sample fiber (black line) and the index profile of the preform (gray line), which had been measured by a preform analyzer before the sample fiber being fabricated from the preform.

완전한 대칭을 보인다. 추출된 굴절률프로파일은 전체적 분포와 굴절차의 크기에서 모재의 굴절률프로파일과 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 측정된 굴절률프로파일은 광섬유의 첨두 굴절률차(peak index difference)가 매우 낮은 값( $3 \times 10^{-3}$ )임에도 불구하고 낮은 오차로 굴절률차를 정확히 측정하였으며, 코어 중심부에 형성된 굴절률 침하(dip) 구조를 잘 드러내고 또한, 코어의 전체적인 크기를 잘 예측하고 있다.

그러나 코어와 클래딩 사이의 경계점( $r = \pm 8 \mu\text{m}$ )에서 상당한 측정오차가 관찰되었고 이는 회절위상현미경의 제한된 공간분해능이 원인으로 파악된다. 코어와 클래딩 경계점에서 모재의 급격한 굴절률변화에 비해 측정된 광섬유의 굴절률 프로파일에서는 상당히 완만한 형태의 굴절률 변화로 나타난다. 이러한 차이는 회절위상현미경의 제한된 공간분해능에서 기인하는 것으로 이해할 수 있다. 위상현미경의 경우 측정값이 빛의 세기가 아닌 위상이므로 제1종의 베셀함수  $J_1(x)$ 에 대해 위상현미경의 PSF(point spread function)는  $J_1(x)/x$ 의 형태를 갖는 것으로 이해할 수 있다. 이런 특성으로 인해 고전적인 분해능에 관한 Rayleigh 기준보다 1.16배가량 큰 분해가능 거리를 가지며 대략적으로 위상현미경의 분해능은  $0.71 \times \lambda/NA$ 로 가능할 수 있다. 본 실험의 경우 파장과  $NA$ 를 고려할 때 회절한계 분해능은  $1.8 \mu\text{m}$ 로 추산되고 그림 5의 코어-클래딩 경계부에서 발생하는 프로파일의 오차를 잘 설명해준다. 이런 결과는 단일모드광섬유와 같이 코어의 크기가 작은 광섬유의 굴절률프로파일을 정확히 측정하기 위해서는 보다 높은  $NA$ 의 대물렌즈와 단파장의 광원을 이용해야 함을 함축한다. 이머전 타입의 렌즈(immersion-type objective lens)가 아닌 경우  $NA$ 의 실용적 최대값은 0.7 정도의 수준이고 파장의 경우 가시광선 영역에서 최저값은  $400 \text{ nm}$  수준이다. 고로 회절한계 분해능은  $0.4 \mu\text{m}$  수준까지 낮추는 것이 가능하며 이 경우 보다 정확한 굴절률프로파일의 평가가 가능할 것으로 기대된다.

본 연구의 실험결과는 비록 공간분해능 측면에서 추가적인

개선이 요구되지만 종합적인 성능 면에서 회절위상현미경이 광섬유 굴절률프로파일 측정을 위해 적합한 특성을 가짐을 보여준다. 또한 본 연구에서 도입된 배경위상의 제거방법이 실제 광섬유의 굴절률프로파일 측정에서 효과적으로 작동함을 확인할 수 있었고 이러한 신호처리상의 개선 덕분에 보다 높은  $NA$ 를 갖는 고배율 대물렌즈를 이용하더라도 좁은 이미징영역의 한계에 의해 굴절률프로파일의 측정이 영향을 받지 않을 수 있게 되었다. 전술한 바와 같이 회절위상현미경은 공통경로를 이용한 간섭 이미징 시스템으로써 시료를 준비하기 위한 특별한 과정이나 혹은 작동상에서 경로차를 조정하기 위한 번거로운 과정이 필요하지 않고 준비된 시료를 바로 삽입하고 간섭 이미지를 획득하는 방식으로 작동할 수 있다. 이러한 장점 때문에 회절위상현미경을 소형화할 수 있다면 실제 현장에서 간단히 활용할 수 있는 장비로 발전할 수도 있을 것으로 기대된다.

## V. 결 론

본 연구에서는 간섭현미경 기술을 이용하여 광섬유의 굴절률 분포를 비파괴적으로 측정하기 위한 굴절률 프로파일 측정기술을 개발하였다. 이를 위해 안정적 간섭 이미징 시스템인 회절위상현미경을 이용하여 광섬유의 굴절률 분포로부터 야기되는 투과광의 위상분포를 측정하였다. 그리고 획득된 위상 이미지로부터 효과적으로 굴절률 프로파일을 얻기 위한 위상신호처리 기법을 개발하여 광섬유 굴절률 프로파일 측정에 적용하여 보았다. 실험결과  $3 \times 10^{-3}$ 의 비교적 낮은 굴절률차를 가진 광섬유의 굴절률 분포정보를 성공적으로 획득할 수 있었다. 이는 광섬유의 시료 준비과정이나 현미경 동작에서 별다른 조정을 거치지 않고 획득된 결과로 이러한 방식의 광섬유 굴절률 프로파일 측정법이 가지는 측정상의 편의성과 신뢰성을 입증해준다. 본 연구의 결과를 토대로 현미경의 공간분해능상의 추가적인 개선이 이뤄진다면 광섬유 및 광섬유소자 연구 등의 응용에서 효과적인 측정방법으로 기여할 것으로 기대된다.

## 감사의 글

The authors would like to thank Linh Viet Nguyen, Ph. D. (University of Adelaide) for providing the sample fiber used in this research. This research was supported by research program of Kookmin University, Korea.

## References

1. D. Marcuse, *Principles of Optical Fiber Measurements* (Academic Press, New York, USA, 1981).
2. Y. Youk and D. Y. Kim, "Reflection-type optical waveguide index profiling technique," *J. Opt. Soc. Korea* **9**, 49-53 (2005).

3. Y. Youk and D. Y. Kim, "Tightly focused epimicroscope technique for submicrometer-resolved highly sensitive refractive index measurement of an optical waveguide," *Appl. Opt.* **46**, 2949-2953 (2007).
4. K. W. Raine, J. G. N. Baines, and D. E. Putland, "Refractive index profiling-state of the art," *J. Lightwave Technol.* **7**, 1162-1169 (1989).
5. H. H. Wahba and T. Kreis, "Characterization of graded index optical fibers by digital holographic interferometry," *Appl. Opt.* **48**, 1573-1582 (2009).
6. G. Popescu, T. Ikeda, R. R. Dasari, and M. S. Feld, "Diffraction phase microscopy for quantifying cell structure and dynamics," *Opt. Lett.* **31**, 775-777 (2006).
7. K. Tatekura, "Determination of the index profile of optical fibers from transverse interferograms using Fourier theory," *Appl. Opt.* **22**, 460-463 (1983).
8. M. Kalal and K. A. Nugent, "Abel inversion using fast Fourier transforms," *Appl. Opt.* **27**, 1956-1959 (1988).
9. A. Roberts, E. Ampem-Lassen, A. Barty, K. A. Nugent, G. W. Baxter, N. M. Dragomir, and S. T. Huntington, "Refractive-index profiling of optical fibers with axial symmetry by use of quantitative phase microscopy," *Opt. Lett.* **27**, 2061-2063 (2002).
10. E. Ampem-Lassen, S. T. Huntington, N. M. Dragomir, K. A. Nugent, and A. Roberts, "Refractive index profiling of axially symmetric optical fibers: a new technique," *Opt. Express* **13**, 3277-3282 (2005).