

측면 연마 광섬유를 이용한 용액의 광학 특성 측정

이현진¹, 김광택^{1,a}

¹ 호남대학교 전자공학과

Measurement of Optical Properties of a Liquid Based on a Side-polished Optical Fiber

Hyeon Jin Lee¹ and Kwang Taek Kim^{1,a}

¹ Department of Electronic Engineering, Honam University, Kwangju 506-714, Korea

(Received January 9, 2014; Revised January 27, 2014; Accepted February 18, 2014)

Abstract: In this paper, a measurement method to obtain the optical properties of a liquid base on a side-polished single mode fiber was proposed and demonstrated. The device showed periodic resonance coupling against wavelengths. The refractive index and dispersion characteristics of a liquid were calculated by use of the spacings of periodic resonance wavelengths of the device. The thermo-optic coefficient of the liquid was obtained by monitoring the shift of resonance wavelengths of the devices with change of environmental temperature.

Keywords: Side-polished fiber, Refractive index, Thermo-optic coefficient, Resonance coupling, Dispersion characteristics, Directional coupling, Planar waveguide

1. 서론

광섬유의 한쪽 측면을 거의 코어 가까이 연마한 후 그 위에 평면도파로를 결합하면 주기적인 광결합이 발생한다. 이러한 현상을 이용하여 광변조기, 광스위치 및 다양한 광센서로 응용하기 위한 연구 결과들이 많이 보고되었다 [1-3]. 특히 매질의 굴절률 센서로 응용될 수 있음은 이미 잘 알려져 있다. 광섬유를 이용하여 매질의 굴절률을 측정하는 방법으로 광섬유 커플러를 이용하는 방법 [4], 광섬유 브래그 격자를 이용하는 방법 [5], 장주기 격자를 이용하는 방법 [6]

등 다양한 방법이 알려져 있다. 이들 방법은 원하는 특정한 파장에서 굴절률을 측정하는 것은 가능하지만 파장에 따른 굴절률의 변화, 즉, 분산 특성을 동시에 측정할 수 없는 단점이 있다.

본 논문에는 측면 연마된 단일 모드를 이용하여 용액의 굴절률, 파장에 따른 굴절률의 변화, 즉, 분산 특성과 열광학 계수를 동시에 측정하기 위한 방법을 제안하고 실험으로 검증하였다. 광섬유 브래그 격자를 이용하여 굴절률과 열광학 계수를 동시에 측정하기 위한 방법으로 광섬유 격자 일부의 클래딩을 제거하여 주위 물질의 열에 의한 굴절률 변화를 측정하는 방법 [7]이 잘 알려져 있지만 이 경우 광섬유가 너무 가늘어 쉽게 손상될 위험이 있고, 식각 후 남은 클래딩의 두께에 대한 정확한 정보가 필요하다.

측면 연마된 광섬유 위에 측정하고자 하는 물질을 필름 형태로 결합시키면 이 소자는 광섬유-다중모드

a. Corresponding author; ktkim@honam.ac.kr

Copyright ©2014 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

평면도파로 결합기로 동작한다. 제안한 방법은 광대역 광원을 이용하여 파장에 따른 주기적인 공진현상 측정하고 공진파장의 차이를 이용하여 여러 파장에서 굴절률을 획득하는 방법을 이용한다. 용액이 측면 연마된 광섬유와 결합하는 평면도파로의 도파층 역할하며, 이를 위해 측면 연마된 광섬유 위에 빈 사각 공간이 만들어져 있고 그 속에 용액이 침투된다. 제안된 방법은 파장에 대해서 주기적인 공진현상을 이용하기 때문에 굴절률과 분산 특성을 동시에 측정할 수 있다. 매질의 중요한 특성 중에 하나인 열광학계수 (thermo-optic coefficient)는 주위 온도를 변화에 따른 굴절률의 변화를 측정하여 얻는다.

2. 실험 방법

2.1 소자 구조 및 측정 원리

측면 연마된 단일 모드 광섬유 위에 평면도파로가 코팅되면 소자는 방향성 결합기 역할을 한다. 그림 1과 같이 직각육면체 구조의 공간에 높은 굴절률을 가진 용액이 채워지면 이는 평면도파로 역할을 한다. 이 경우 제안된 구조는 광섬유-다중모드 평면도파로 결합기로 동작한다. 용액이 도파로 역할을 해서 특정 파장에서 공진이 일어난다. 그림 1과 같은 측면 연마 광섬유를 이용하여 매질의 굴절률을 측정하는 방법 [8]은 보고된 바 있다. 여기서 굴절률과 파장에 따른 굴절률의 변화 즉, 분산 특성까지 측정이 가능함을 제안한다.

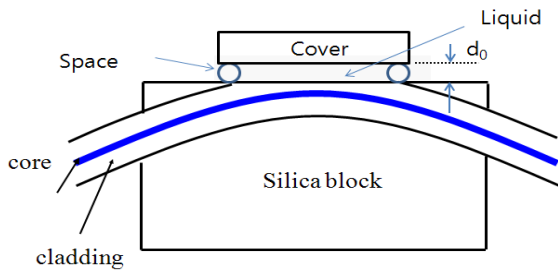


Fig. 1. Schematic structure of proposed sensor based on side-polished optical fiber.

제안된 소자에서 광섬유의 클래딩이 제거되어 광섬유와 평면도파로 사이에 소멸장 (evanescent field) 결합이 발생한다. 결합 모드 이론에 따르면 두 도파

로 사이에 위상정합 조건을 만족할 때 공진결합이 발생하며 이때 다음과 같은 평면도파로의 고유치 방정식이 주어진다 [3].

$$\frac{2\pi d_0}{\lambda} (n_o^2 - n_{em}^2)^{1/2} = m\pi + \psi_1 + \psi_2 \quad (1)$$

여기서 m 은 모드의 차수를 나타내는 정수, λ 는 광의 파장, d_0 는 평면도파로의 코어층 두께, n_o 는 평면도파로의 코어 굴절률, 즉 용액의 굴절률 n_{em} 은 m 번째 고차모드의 유효 굴절률이다. ψ_1 과 ψ_2 는 평면도파로의 코어층과 클래딩층의 경계에서 발생하는 모드의 위상천이로서 다음과 같이 주어진다.

$$\psi_i (i=1 \text{ or } 2) = \tan^{-1} \zeta \frac{(n_{em}^2 - n_i^2)^{1/2}}{(n_o^2 - n_{em}^2)^{1/2}} \quad (2)$$

여기서 ζ 는 편광상태에 의존하는 상수로서 TE편광에 대해서는 $\zeta=1$, TM편광에 대해서는 $\zeta=n_{o2}/n_{i2}$ 을 대입하면 된다. n_i 는 평면도파로 하부 및 상부 클래딩의 굴절률이다. 광섬유 모드와 평면도파로 모드 사이에 위상 정합 조건 ($n_{em}=n_{ef}$)을 대입하면 공진 파장을 구할 수 있다. 여기서 n_{ef} 는 광섬유의 유효굴절률을 의미한다.

$$\lambda_m = \frac{2\pi d_0 (n_o^2 - n_{ef}^2)^{1/2}}{m\pi + \psi_1 + \psi_2} \quad (3)$$

식 (3)에서 m 차 및 $m+1$ 차 공진 파장에서 n_o 와 n_{ef} 가 일정하다고 가정하면 다음과 같은 식이 유도된다.

$$\frac{\lambda_m \lambda_{m+1}}{\Delta \lambda} = 2d_0 (n_o^2 - n_{ef}^2)^{1/2} \quad (4)$$

$$n_o = \sqrt{\frac{(\lambda_m \lambda_{m+1})^2}{(2d_0 \Delta \lambda)^2} + n_{ef}^2} \quad (5)$$

여기서 $\Delta \lambda$ 는 두 공진파장의 간격을 의미한다. 광섬유의 유효굴절률은 코어와 클래딩의 굴절률의 분산 특성과 광원의 파장을 모두 고려해야 한다. 이러한 특성을 이용하면 용액의 굴절률뿐만 아니라 열광학계수와 분산 특성을 구할 수 있다. 제안된 소자 구조

는 그림 1에 제시되어 있다. 파장에 따른 분산 특성은 두 공진파장 간의 위치를 바꾸어 가면서 측정이 가능하며 이때 광섬유의 유효굴절률을 동시에 구해야 한다.

3. 결과 및 고찰

광섬유의 한쪽 클래딩을 연마로 제거하는 기법은 잘 알려져 있다. 길이 25 mm, 폭 10 mm, 높이 5 mm 인 실리카 블록에 곡률반경 25 cm로 홈을 새기고 광섬유를 에폭시로 고정시킨 후 코어 가까이 연마로 제거한다. 본 논문에서는 사용한 광섬유의 코어의 굴절률은 1.4485, 클래딩의 굴절률은 1.4440, 코어의 반지름은 4.1 μm 이다. 파장 1,550 nm에서 가졌했을 때 유효굴절률 (n_{eff})는 1.4457이다. 하지만 분산 특성을 구하기 위해서는 매질 고유의 분산 특성을 알아야 한다. 광섬유에 사용되는 실리카 분산 특성 [9]은 잘 알려져 있다. 용액이 채워질 공간을 형성하기 위해 스페이서 (spacer)로 두께 150 μm 이 현미경용 덮개 유리판을 적당한 크기로 절단하여 사용하였다. 최상부층 (cover 층)으로 광섬유 클래딩과 거의 동일한 굴절률을 가지는 실리카 (fused silica) 블록을 이용하였다.

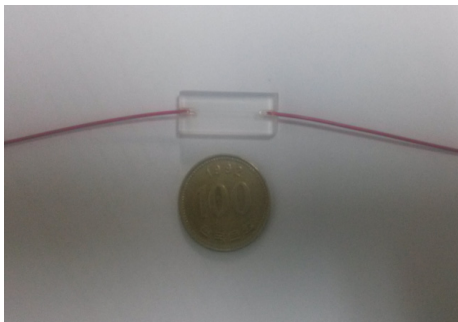


Fig. 2. Picture of fabricated single-mode side-polished fiber.

실험에 사용한 용액은 Cargille사에서 제공한 nD (파장 588 nm에서의 굴절률)가 1.5인 용액과 1.6인 기름용액을 실험에 사용하였다. 여기서 편의상 두 매질의 이름을 각각 ND150과 ND160으로 부르기로 한다. 광원으로 출력 파장 영역이 서로 다른 4개의 LED를 합성한 광대역 광원을 활용하였고, 소자의 파장에

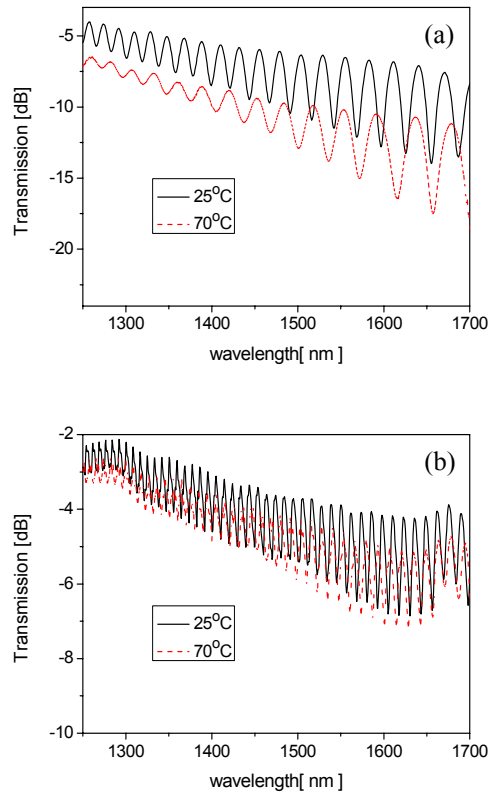


Fig. 3. Wavelength response for two liquid (a) ND150 and (b) ND160.

따른 전달비, 즉, 투과 스펙트럼을 광스펙트럼 분석기로 측정한 결과가 그림 3에 되어 있다. 측정 파장 영역은 1,250 nm에서 1,700 nm 영역이다.

그림 3에서 알 수 있듯이 굴절률이 1.6인 ND160을 소자에 적용했을 때 ND 150을 적용했을 때 보다 공진 파장 간의 간격이 더 좁다는 사실을 알 수 있다. 즉 공진파장 간의 폭이 굴절률과 반비례 관계에 있음을 나타낸다. 측정은 실온인 25°C에서 측정 후 센서를 핫플레이트에 올려놓고 75°C까지 가열 후 다시 측정하였다.

그림 3에서 알 수 있듯이 온도가 올라가면 용액의 굴절률의 감소로 공진 파장 간의 간격이 넓어짐을 알 수 있다. 공진파장들은 전달비의 최소 피크점에서의 파장을 의미한다. 공진파장 간의 간격이 매우 좁기 때문에 공진파장의 조그마한 측정 오차도 식 (5)를 이용한 굴절률을 계산하면 큰 오차로 나타난다. 광스펙트럼분석기의 파장 분해 능력의 한계에 따른 오차를

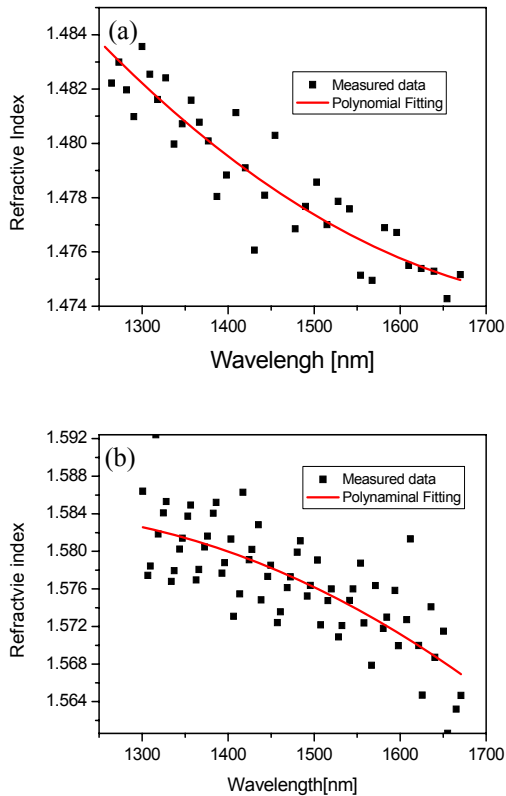


Fig. 4. Measured refractive index in accordance with wavelength and its polynomial fittings for (a) ND150 and (b) ND160.

줄이기 위해 인접한 두 공진파장을 이용하여 구한 굴절률 값들을 3차 다항식으로 피팅 (fitting)하여 그래프로 나타내었다.

그림 4는 측정된 공진파장들을 이용하여 계산한 파장별 굴절률과 이를 다항식으로 피팅한 두 용액의 분산 곡선을 보여주고 있다. 실험에 사용한 두 용액은 파장이 길어짐에 따라 굴절률이 감소하는 정상 분산 (normalized dispersion) 특성을 보였다. 온도에 따른 굴절률 변화, 즉 열광학 계수는 1,550 nm 파장 근처에서 ND150과 ND160의 열광학계수는 $-3.6 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ 과 $-5.4 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ 로 측정되었다.

실제로 제조사에서 제공한 두 물질, ND150과 ND160 열광학 계수인 $-3.8 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ 과 $-4.4 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ 값과 약간의 오차가 있었다. 이러한 오차는 열광학계수를 측정할 파장 대역이 다르기 때문인 것으로 분석된다.

4. 결론

측면 연마된 광섬유와 평면도파로의 공진 결합현상을 이용한 용액의 광학 특성을 측정하는 방법을 제안하고 실험으로 검증하였다. 제안된 방법으로 매질의 굴절률, 분산곡선 및 열광학계수를 구할 수 있음을 실험으로 증명하였다. 제안된 방법은 기존의 광섬유형 굴절계가 하나의 파장에서 굴절률을 측정하는 방식과 달리 넓은 파장에서 더 많은 광학 데이터를 얻기가 용이하다.

REFERENCES

- [1] J. Villaroro, D. M. Hernandez, and D. Talavera, *Electron. Lett.*, **40**, 106 (2004).
- [2] S. P. Ma and S. M. Tseng, *IEEE J. of Lightwave Tech.*, **15**, 864 (1997).
- [3] W. Johnstone, G. Fawcett, and L. W. K. Yim, *IEEE Proc. Optoelectron.*, **141**, 229 (1994).
- [4] K. T. Kim and K. H. Park, *Journal of the Optical Society of Korea*, **12**, 152 (2008).
- [5] X. Y. Dong, Y. Liu, Z. Liu, X. Y. Dong, *Opt. Commun.*, **192**, 213 (2001).
- [6] J. H. Chong, P. Shun, H. Haryono, A. Yohana, M. K. Rao, C. Lu, and Zhu, *Opt. Commun.*, **229**, 65 (2004).
- [7] R. C. Kamikawachi, I. Abe, A.S. Paterno, H. J. Kalinowski, M. Muller, J. L. Pinto, and J. L. Fabris, *Opt. Commun.*, **281**, 621 (2008).
- [8] K. T. Kim, K. Y. Lee, S. Hwangbo, and K. R. Sohn, *Sensors and Actuators: A. Physical*, **126**, 335 (2006).
- [9] T. Izawa and S. Sodo, *Optical Fibers: Materials and Fabrication* (KTK Scientific Publishers, Tokyo, 1987) p.39.