

폴리머 코팅된 측면 연마 단주기 격자 기반 외부 굴절률 및 온도 동시 측정 센서 연구

김현주¹ · 전나람¹ · 이상배² · 한영근^{1†}

¹한양대학교 물리학과

Ⓞ 133-791 서울특별시 성동구 행당동 산 17

²한국과학기술연구원

Ⓞ 136-791 서울특별시 성북구 하월곡동 39-1

(2010년 8월 26일 받음, 2010년 9월 30일 수정본 받음, 2010년 10월 1일 게재 확정)

본 연구에서는 측면연마 된 광섬유 브래그 격자를 측면 연마하고 폴리머 상부층(overlay)을 형성시켜 외부 굴절률과 온도를 동시 측정할 수 있는 광섬유 센서 소자를 제안하였다. 외부굴절률 변화에 민감하지 않는 광섬유 브래그 격자를 이용하여 온도를 측정하고 격자를 측면 연마한 후 폴리머 코팅에 의해 소산장 결합을 유도하여 외부 굴절률 변화를 측정하게 된다. 측면 연마된 광섬유 브래그 격자의 온도 민감도는 0.01 nm/oC로 측정되었고 폴리머 상부층의 온도 민감도는 -0.58 nm/oC로 측정되었고 선형 구간 별(1.33-1.39, 1.39-1.42, 1.42-1.44) 굴절률 민감도는 498.8 nm/RIU, 694.9 nm/RIU, 1312 nm/RIU로 측정되었다.

Simultaneous Measurement of External Refractive Index and Temperature by Using a Side-polished Fiber Bragg Grating with a Polymer Overlay

Hyun-Joo Kim¹, Na-Ram Jun¹, Sang Bae Lee², and Young-Geun Han^{1†}

¹Department of Physics, Hanyang University, 17 Haengdang-dong, Seoungdong-gu, Seoul 133-791, Korea

²Korea Institute of Science and Technology, 39-1 Hawolgok-dong, Seongbuk-gu, Seoul 136-791, Korea

(Received August 26, 2010; Revised manuscript September 30, 2010; Accepted October 1, 2010)

A hybrid grating sensing device based on a side-polished fiber Bragg grating (FBG) with a polymer overlay is proposed for simultaneous measurement of external refractive index and temperature. The side-polished FBG, which is insensitive to ambient index change, is utilized for detecting temperature variation, and the polymer overlay is coated on the side-polished FBG for measurement of ambient index change. The temperature sensitivities of the side-polished FBG and the polymer overlay were measured to be 0.01 nm/°C and -0.58 nm/°C, respectively, in a temperature range from 30°C to 100°C. The ambient index sensitivities of the polymer overlay were measured to be 498.8 nm/RIU in an ambient index range from 1.33 to 1.39, 694.9 nm/RIU from 1.39 to 1.42, and 1312 nm/RIU from 1.42 to 1.44.

Keywords: Simultaneous measurement, Side-polished fiber Bragg grating, Polymer overlay, Chemical sensor, Temperature sensor

OCIS codes: (060.0060) Optics and optical communications; (060.2370) Fiber optics sensors; (160.3900) Metals; (050.2770) Gratings

I. 서 론

광섬유 격자 기반의 광 센서 소자들은 외부의 굴절률, 온도, 인장력, 하중, 구부림, 진동, 압력 등 다양한 물리량에 높은 민감성을 가지고 있어 센서 응용 분야에 상당한 관심을 받아왔다^[1-3]. 광섬유 격자들은 여러 물리량들로부터 복합적으로 영향을 받기 때문에, 광섬유 격자들의 파장특성을 이용

하여 두 개 이상의 물리적 변수를 동시에 측정하는 다수의 방법들이 소개되었다^[4-6]. 여러 물리량 중에 굴절률과 온도를 동시 측정할 수 있는 센서 개발은 바이오 및 화학 센서 시스템에서 각광받고 있는 분야로서 활발한 연구가 진행되어 왔고 민감도 향상 연구도 함께 수행되어왔다^[7-10]. 이는 바이오 및 화학 물질의 농도를 측정하는 경우 이 물질들의 굴절률이 온도에 의존하기 때문에 정확한 측정을 위한 온도 보정이 필

†E-mail: yghan@hanyang.ac.kr

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

수적이었고 극소량의 굴절률 변화를 감지하기 위해 센서의 민감도 향상 또한 중요한 과제였다. 광섬유 브래그 격자(Fiber Bragg grating: FBG)와 장주기 격자(Long-period grating: LPG)를 이용한 소자, 굴절률 측정을 위해 클래딩이 식각된 FBG와 온도측정을 위해 식각되지 않은 광섬유 브래그 격자를 직렬 연결한 소자, 장주기 격자와 광섬유 브래그 격자를 직렬 연결하고 민감도 향상을 위해 클래딩을 식각한 소자 등이 한 예이다^[7-10]. 하지만 코어 모드간 결합을 유도하는 광섬유 브래그 격자의 경우는 모드가 코어영역에만 분포되어 있고 클래딩 외부로 퍼져있지 않기 때문에 식각 및 측면 연마법을 통하여 소산장 결합(evanescent field coupling)을 유도하더라도 민감도가 매우 낮아 실용성이 떨어진다. 또한 클래딩 모드 결합을 유도하는 장주기 격자는 외부 굴절률에 높은 민감성을 갖는 반면 굴절률 외의 다른 물리량에도 민감한 특성을 가지고 있기 때문에 굴절률 및 온도 측정 시 온도와 굴절률 외의 다른 물리량을 차단시켜야 하는 부수적인 노력이 필요하였다. 본 연구에서는 측면 연마된 광섬유 브래그 격자에 폴리머 코팅을 하여 외부 굴절률과 온도를 동시 측정할 수 있는 광섬유 센서 소자를 제안하였고 실험적으로 구현해보았다.

II. 제안된 소자의 설계

그림 1은 외부 굴절률과 온도를 동시에 측정할 수 있는 측면 연마된 광섬유 브래그 격자와 폴리머 상부층 기반의 광섬유 센서 소자의 구조를 나타내고 있다.

광섬유 브래그 격자가 새겨진 단일모드 광섬유의 측면을 코어 가까이 연마하면 진행되는 코어 모드의 소산장(evanescent field)에 직접적으로 섭동을 가할 수 있게 된다. 연마된 측면 위에 여러 모드를 가질 수 있는 폴리머 상부층을 형성하게 되면 광섬유 코어 모드와 폴리머 상부층 사이에서 소산장 결합이 일어나게 되고 이 중 광섬유 코어 모드와 위상정합조건(phase matching condition)을 만족하는 폴리머 상부층의 모드들이 광 결합을 하게 되어 공진 파장을 형성한다. 결합을 일으키는 공진 파장(λ_m)은 다음 식으로 표현된다.

$$\lambda_m = \frac{2\pi d(n_p^2 - n_{ep}^2)^{\frac{1}{2}}}{m\pi + \phi_1 + \phi_2}, \quad (1)$$

여기서 m 은 공진 모드의 차수를 나타내는 정수이고, d 는

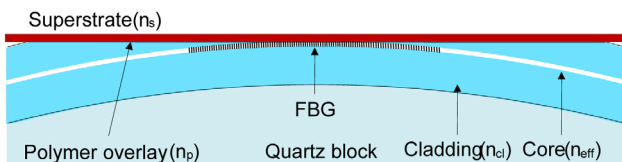


FIG. 1. Structure of the proposed sensor based on a side polished FBG with a polymer overlay.

폴리머 상부층의 두께, n_p 는 폴리머 상부층의 굴절률, n_{ep} 는 m 번째 고차모드의 유효굴절률이다. 식 (1)에 $n_{ep}=n_{eff}$ 를 대입하면 광섬유 코어모드와 폴리머 상부층의 m 차 모드에서 공진하는 파장을 구할 수 있다. ϕ_1 과 ϕ_2 는 폴리머 상부층 층과 광섬유 클래딩 층의 경계에서 발생하는 모드의 위상편이를 나타내고 있고 다음과 같이 주어진다.

$$\phi_i (i=1 \text{ or } 2) = \tan^{-1} \xi \frac{(n_{ep}^2 - n_s^2)^{\frac{1}{2}}}{(n_p^2 - n_{ep}^2)^{\frac{1}{2}}}, \quad (2)$$

ξ 는 편광의존 상수로서 1인 경우에는 TE 편광, n_p^2/n_s^2 인 경우에는 TM 편광을 고려하면 된다. n_s 는 폴리머 상부층의 윗 부분, 즉 외부 굴절률에 해당한다. 따라서 식 (1), (2)에서 알 수 있듯이 n_s 가 증가함에 따라 ϕ 값은 감소하게 되어 공진 파장은 장파장으로 이동됨을 알 수가 있다. 본 연구에 사용된 폴리머의 열광학 계수를 $K = \Delta\lambda_m / \Delta n_p$ 라고 정의한다면 온도 변화에 대한 공진파장의 변화, 즉 온도 민감도를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\Delta\lambda_m}{\Delta T} = K \frac{2d}{m(1 - n_{eff}^2/n_p^2)^{1/2}}, \quad (3)$$

폴리머의 열광학 효과는 열팽창 효과에 비해 훨씬 크다고 알려져 있기 때문에 부피 팽창에 의한 폴리머 상부층 두께의 변화는 고려하지 않았다. 광섬유 브래그 격자의 경우 공진 파장(λ_B)은 잘 알려진 다음의 식으로 표현된다.

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (4)$$

여기서 Λ 는 브래그 격자 주기이다. 측면 연마된 광섬유 브래그 격자의 경우 외부 굴절률이 증가하게 되면 코어모드의 유효굴절률 또한 증가하게 되어 공진 파장이 장파장으로 이동하게 된다. 온도변화에 대한 공진파장 이동 변화, 즉 온도 민감도를 식 (4)를 온도에 대하여 미분하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = \lambda_B \left(\frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \quad (5)$$

온도 민감도는 열팽창계수와 열광학 계수와 관련이 있고 열팽창 효과는 열광학 효과에 비해 무시할 만큼 작아서 식 (5)에서 두 번째 항은 무시될 수 있다. 동시 측정을 위한 광섬유 센서의 외부 굴절률 및 온도 변화의 관계를 다음과 같은 선형 행렬식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \Delta\lambda_m \\ \Delta\lambda_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta T \\ \Delta n_s \end{pmatrix} \quad (6)$$

여기서 A와 B는 개별적으로 측정되는 폴리머 상부층 공진 파장의 온도 민감도와 굴절률 민감도이고 C와 D 또한 개별적으로 측정되는 광섬유 브래그 격자 공진 파장의 온도 민감도와 굴절률 민감도이다. 우리가 제안한 소자의 경우 $D=0$ 으로 표현된다. 이는 광섬유 브래그 격자의 공진 모드가 외부 환경으로부터 폴리머 상부층에 의해 차단되어 외부 굴절률 변화를 감지하지 못하기 때문이다. 결국, 다음 식을 통하여 온도와 굴절률에 의해 이동된 공진파장 신호를 처리하여 온도와 외부굴절률 변화량을 쉽게 예측할 수 있게 된다.

$$\begin{pmatrix} \Delta T \\ \Delta n_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \Delta \lambda_m \\ \Delta \lambda_B \end{pmatrix} \quad (7)$$

III. 소자 제작 및 특성 측정

광섬유 브래그 격자는 게르마늄이 첨가된 광섬유에 주기가 1.07 μm 인 위상마스크와 244 nm의 파장을 가지는 Frequency doubled 아르곤 레이저를 사용하여 제작되었다. 쿼츠 블록 (Quartz block) 기반 측면 연마법을 이용하여 측면 연마된 광섬유 브래그 격자를 제작하였다^[11]. 폭 200 μm 의 홈(groove)이 새겨진 쿼츠 블록 중심에 광섬유 브래그 격자의 중심을 정렬한 후 자외선 경화 에폭시와 자외선 램프를 사용하여 부착시켰다. 광대역(Amplified spontaneous emission: ASE) 광원, 광출력 측정기를 이용하여 클래딩을 연마하면서 발생하는 투과손실을 실시간 측정하면서 클래딩을 연마하였다. 알루미늄(Al_2O_3) 연마제를 이용하여 1차 연마를 하고 탈이온수 (deionized water)와 초음파세척기를 사용하여 세척을 한 후 오븐에 건조시켰다. 그리고 CeO_2 연마제를 사용하여 표면 거칠기를 줄이기 위한 2차 연마를 실시하고 탈이온수를 이용하여 초음파세척 과정을 거치고 오븐에서 건조하였다. 폴리머 상부층 제작을 위해 스핀 코팅기를 이용하여 감광성 수지 (Az4210)을 측면 연마된 광섬유 브래그 격자 표면 위에 코팅하고(두께: 2.1 μm) 오븐에 90 $^\circ\text{C}$, 30분 동안 soft baking을 한 후에 최종적으로 오븐에 120 $^\circ\text{C}$, 30분 동안 hard baking을 하였다.

그림 2은 광대역 광원과 광스펙트럼 분석기(Optical spectrum analyzer: OSA)를 이용하여 광섬유 브래그 격자의 (a)연마전과 (b)연마 후 그리고 (c)폴리머 상부층 제작 후의 투과 스펙트럼을 나타낸다. 그림 2(c)에서와 같이 폴리머 상부층 형성 이후 발생하는 광섬유 코어 모드와 폴리머 상부층 사이의 소산장 결합(evanescent field coupling)에 의해 발생된 공진 파장(λ_m)과 광섬유 브래그 격자 공진파장(λ_B) 스펙트럼이 동시에 나타나며 광스펙트럼 분석기의 넓은 대역폭에 대한 분해능 한계 때문에 광섬유 브래그 격자의 소광비는 낮게 측정되었다. 분해능을 향상시켜 폴리머 상부층이 형성된 후의 광섬유 브래그 격자에 대한 투과 스펙트럼이 그림 2(d)에 나타나 있다. 측면 연마 후 광섬유 브래그 격자 소광비는 15.77 dB에서 10.93 dB로 줄어들었고 FWHM(Full Width at Half Max-

imum)는 0.11 nm에서 0.21 nm로 증가하였다. 단일모드 광섬유와 측면 연마된 광섬유의 코어 모드에 대한 profile을 비교하면 그림 3에서 보는 것과 같이 측면 연마된 경우 모드 세기가 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 광섬유 격자에서 코어 모드 세기가 감소하면 결합 세기(coupling strength)가 감소하기 때문에 측면 연마된 경우에 공진 파장에서 소광비가 감소하고 FWHM은 증가한다. 반면, 폴리머 상부층 제작 후에는 광섬유 브래그 격자 소광비가 11.62 dB로 증가하였으며, FWHM은 0.19 nm로 감소하였다. 폴리머 상부층은 광섬유 코어모드의 유효굴절률보다 큰 1.6의 굴절률을 가지고 있어 공진파장이 1549.3 nm에서 1549.7 nm로 이동한 것을 볼

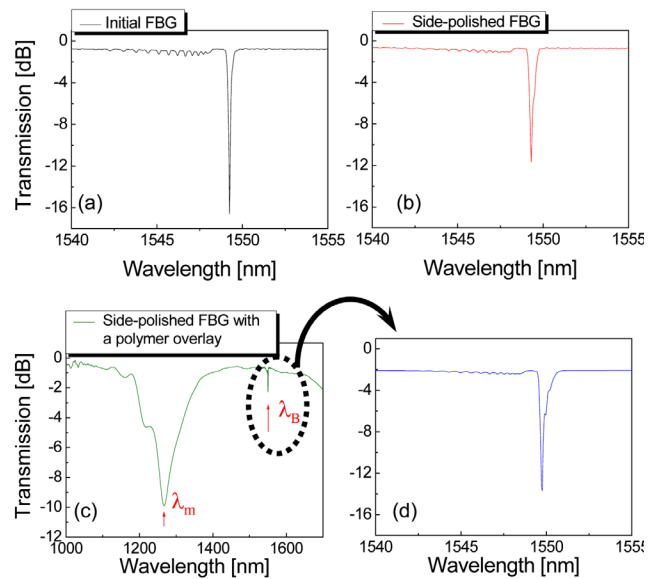


FIG. 2. Transmission spectra of (a) the FBG, (b) the side polished-FBG, and (c) the side-polished FBG with a polymer overlay, and (d) the side-polished FBG with the planar waveguide.

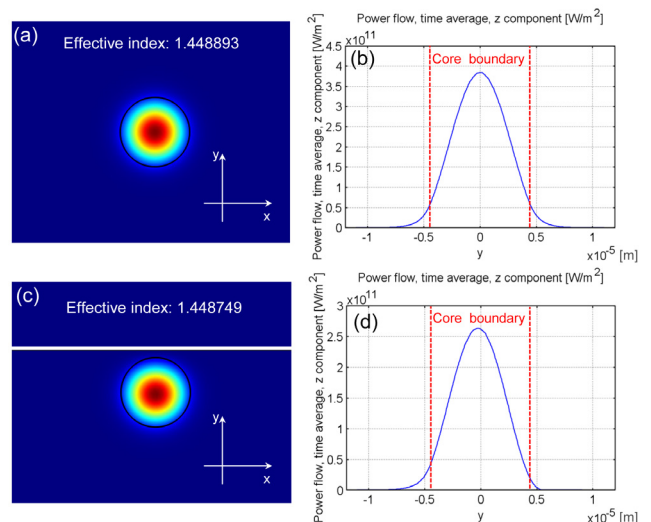


FIG. 3. Core mode confinements and profiles: (a), (b) for a single mode fiber and (c), (d) for side-polished fiber.

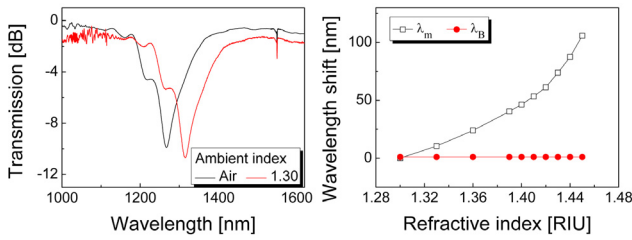


FIG. 4. (a) Transmission spectra of the side-polished FBG with the planar waveguide measured at refractive index of 1 (black line) and 1.30 (red line) and (b) Wavelength shift versus external refractive index change from 1.30 to 1.45 for the planar waveguide (open symbols) and the side-polished FBG (filled symbols).

수가 있다.

측면 연마된 광섬유 브래그 격자에 폴리머 상부층을 형성시킨 후 외부 굴절률 변화에 대한 공진 파장 이동을 측정하였다. 그림 4(a)는 외부 굴절률이 1(공기) 일 때와 1.30(굴절률 정합 용액) 일 때 투과 스펙트럼을 보여주고 있다. 폴리머 상부층의 공진 파장(λ_m)은 장파장으로 이동하며 소광비도 증가한 반면, 광섬유 브래그 격자의 공진파장(λ_B)은 변화가 없음을 확인하였다. 폴리머 상부층 공진 파장은 외부 굴절률이 증가할수록 위상 값이 증가하여 장파장으로 증가하게 되지만 광섬유 브래그 격자의 공진 파장은 코어 모드가 외부 환경으로부터 폴리머 상부층에 의해 차단되어 외부 굴절률 변화를 감지하지 못하기 때문에 파장 변화가 일어나지 않는다. 그림 4(b)는 굴절률 정합 용액을 이용하여 외부 굴절률을 변화시키며 측정한 두 공진 파장들의(λ_m , λ_B)의 변화를 나타낸다. 외부 굴절률이 증가할수록 폴리머 상부층에 의한 공진 파장(λ_m)은 장파장으로 이동하였고 광섬유 브래그 격자의 공진 파장(λ_B)은 변화가 없음을 확인할 수 있었다. 외부 굴절률을 1.30에서 1.45까지 변화시켰을 때 공진파장(λ_m)은 105.78 nm 이동하였다. 굴절률 민감도에 대한 비선형성을 고려한다면, 선형구간에 근접한 외부굴절률 영역을 세분화하여 보다 정확하게 측정할 수 있다. 선형 구간(1.33-1.39, 1.39-1.42, 1.42-1.44) 별 굴절률 민감도는 498.8 nm/RIU, 694.9 nm/RIU, 1312 nm/RIU로 측정되었다. 공진파장(λ_m)을 이용한 외부 굴절률 변화 측정 시 분할된 선형 구간(1.33-1.39, 1.39-1.42, 1.42-1.44)에서 측정할 수 있는 분해능은 각각 2.2×10^{-3} , 9.5×10^{-4} , 2.8×10^{-4} 이었다.

그림 5(a)와 5(b)는 각각 온도변화에 대한 폴리머 상부층에 의한 공진파장(λ_m)과 광섬유 브래그 격자에 의한 공진파장(λ_B)의 변화를 나타낸다. 폴리머 상부층 매질로 사용된 갑광성 수지의 열 팽창계수가 음의 값을 가지기 때문에 공진파장(λ_m)은 단파장으로 이동하였고 온도 민감도는 $-0.58 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 로 측정되었다. 반면, 광섬유 브래그 격자의 경우에는 광섬유의 코어를 구성하는 게르마늄의 양수의 열팽창 효과에 의해 공진파장(λ_B)이 장파장으로 이동함을 확인하였고 온도 민감도는 $0.01 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 로 측정되었다. 실험 결과를 이용하여 광섬유 센서의 외부 굴절률 및 온도 변화의 관계를 수치적으로

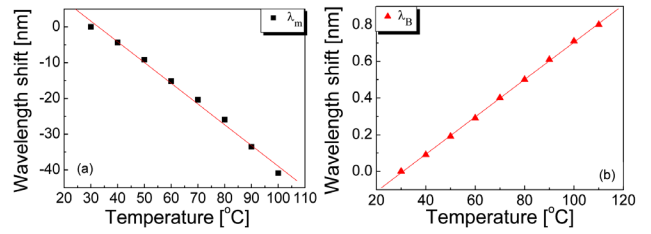


FIG. 5. Resonant wavelength shifts of (a) polymer overlay and (b) the side-polished FBG as a function of temperature, respectively.

유도하였으며 이를 통해 외부 굴절률의 각 선형 구간(1.33-1.39, 1.39-1.42, 1.42-1.44)에 대한 센서의 행렬식을 다음과 같이 각각 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \Delta T \\ \Delta n_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.58 \text{ nm}/^\circ\text{C} & 498.8 \text{ nm}/\text{RIU} \\ 0.01 \text{ nm}/^\circ\text{C} & 0 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \Delta \lambda_m \\ \Delta \lambda_B \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{pmatrix} \Delta T \\ \Delta n_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.58 \text{ nm}/^\circ\text{C} & 694.9 \text{ nm}/\text{RIU} \\ 0.01 \text{ nm}/^\circ\text{C} & 0 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \Delta \lambda_m \\ \Delta \lambda_B \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{pmatrix} \Delta T \\ \Delta n_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.58 \text{ nm}/^\circ\text{C} & 1312 \text{ nm}/\text{RIU} \\ 0.01 \text{ nm}/^\circ\text{C} & 0 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \Delta \lambda_m \\ \Delta \lambda_B \end{pmatrix} \quad (10)$$

식 (8)-(10)을 이용하여 제안된 광섬유 센서로 온도와 굴절률에 의해 이동된 공진파장 신호 처리를 하게 된다면 우리가 알고자 하는 온도와 외부굴절률 변화량을 동시에 예측할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 측면 연마된 광섬유 브래그 격자에 폴리머 상부층을 형성시켜 외부 굴절률 및 온도를 동시 측정할 수 있는 고민감도 광섬유 센서 소자를 제작하였고 외부 굴절률 및 온도 변화에 대한 민감도를 측정하였다. 외부 굴절률이 증가함에 따라 폴리머 상부층에 의해 형성된 공진파장(λ_m)은 장파장으로 이동하였고 각 구간 별(1.33-1.39, 1.39-1.42, 1.42-1.44) 굴절률 민감도는 498.8 nm/RIU, 694.9 nm/RIU, 1312 nm/RIU로 측정되었다. 온도 민감도는 $-0.58 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 로 측정되었다. 반면, 광섬유 브래그 격자의 공진파장(λ_B)는 외부 굴절률 변화에 반응이 없었고 온도 민감도는 $0.01 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 로 측정되었다. 측정결과를 이용하여 광섬유 센서의 외부 굴절률 및 온도 변화의 관계를 수치적으로 유도하였으며 이를 통해 센서의 행렬식을 구하였다. 제안된 광섬유 센서 소자는 외부 굴절률과 온도 변화를 동시에 측정할 수 있는 센서로 응용에 유용할 것으로 사료되며 특히 바이오 및 화학 센서 시스템으로의 활용 등 넓은 범위의 응용이 기대된다.

감사의 글

이 논문은 교육과학기술부와 한국연구재단의 원자력연구 개발사업으로 연구 지원한 (2010-0025914호)의 결과물입니다.

References

1. V. Bhatia and A. M. Vengsarkar, "Optical fiber long-period grating sensors," *Opt. Lett.* **21**, 692-694 (1996).
2. Y. G. Han, X. Dong, J. H. Lee, and S. B. Lee, "Simultaneous measurement of bending and temperature based on a single sampled chirped fiber Bragg grating embedded on a flexible cantilever beam," *Opt. Lett.* **31**, 2839-2841 (2006).
3. J. N. Jang, S. Y. Kim, S. W. Kim, and M. S. Kim, "Temperature insensitive long-period fiber gratings," *Electron. Lett.* **35**, 2134-2136 (1999).
4. M. N. Ng, Z. H. Chen, and K. S. Chiang, "Temperature compensation of long-period fiber grating for refractive-index sensing with bending effect," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **14**, 361-362 (2002).
5. H. J. Patrick, G. M. Williams, A. D. Kersey, J. R. Pedrazzani, and A. M. Vengsarkar, "Hybrid fiber Bragg grating/long period fiber grating sensor for strain/temperature discrimination," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **8**, 1223-1225 (1996).
6. M. Yang, J. Dai, X. Li, and J. Wang, "Side-polished fiber Bragg grating refractive index sensor with TbFeCo magnetoptic thin film," *J. Appl. Phys.* **108**, 033102-4 (2010).
7. X. W. Shu, B. A. L. Gwandu, Y. Liu, L. Zhang, and I. Bennion, "Sampled fiber Bragg grating for simultaneous refractiveindex and temperature measurement," *Opt. Lett.* **26**, 774-776 (2001).
8. D. A. Pereira, O. Frazão, and J. L. Santos, "Fiber Bragg grating sensing system for simultaneous measurement of salinity and temperature," *Opt. Eng.* **43**, 299-304 (2004).
9. X. Chen, K. Zhou, L. Zhang, and I. Bennion, "Simultaneous measurement of temperature and external refractive index by use of a hybrid grating in D fiber with enhanced sensitivity by HF etching," *Appl. Opt.* **44**, 178-182 (2005).
10. H. J. Patrick, A. D. Kersey, and F. Bucholtz, "Analysis of the response of long period fiber gratings to external index of refraction," *IEEE J. Lightwave Technol.* **16**, 1606-1612 (1998).
11. H. J. Kim, O. J. Kwon, and Y. G. Han, "Effect of an ambient index change on transmission characteristics of versatile D-shaped fibers depending on coupling strength of the evanescent field," *J. Korean Phys. Soc.* **55**, 1286-1289 (2009).