

Polarization-Maintaining Photonic-Crystal-Fiber-based Polarimetric Strain Sensor with a Short Sensing Head

Tae Kyu Noh^{1,2} and Yong Wook Lee^{1,2†}

¹Department of Electrical Engineering, Pukyong National University, Yongso-ro 45, Nam-gu, Busan 608-737, Korea

²Interdisciplinary Program of Marine-Bio, Electrical & Mechanical Engineering, Pukyong National University, Yongso-ro 45, Nam-gu, Busan 608-737, Korea

(Received November 20, 2013; Revised manuscript April 22, 2014; Accepted April 23, 2014)

In this paper we have implemented a temperature-insensitive polarimetric fiber strain sensor based on a Sagnac birefringence interferometer composed of a short polarization-maintaining photonic crystal fiber (PM-PCF), a 3-dB fiber coupler, and polarization controllers. The PM-PCF used as a sensor head was 2 cm long, which is the shortest length for a sensing element compared to other polarimetric fiber strain sensors using a PM-PCF. The proposed sensor showed a strain sensitivity of ~ 0.87 pm/ $\mu\epsilon$ with a strain measurement range from 0 to 8 m ϵ . The temperature sensitivity was also investigated and measured as approximately -12 pm/ $^{\circ}\text{C}$, when ambient temperature changed from 30 to 100 $^{\circ}\text{C}$. This temperature sensitivity is about 82 times smaller than that of conventional polarization-maintaining fiber (approximately -990 pm/ $^{\circ}\text{C}$). In particular, from a practical perspective we have experimentally and theoretically confirmed that the wavelength selected for the indicator dip location does not make a significant difference in the strain sensitivity.

Keywords: Optical fiber sensor, Strain sensor, Polarization-maintaining photonic crystal fiber, Sagnac birefringence interferometer
OCIS codes: (060.2370) Fiber optics sensors; (060.2420) Fibers, polarization-maintaining; (060.5295) Photonic crystal fibers; (350.2460) Filters, interference

짧은 센서부를 가진 편광유지 광자결정 광섬유 기반 편광 간섭형 스트레인 센서

노태규^{1,2} · 이용욱^{1,2†}

¹부경대학교 전기공학과

☎ 608-737 부산시 남구 용소로 45

²부경대학교 해양바이오·기계시스템 융복합 협동과정

☎ 608-737 부산시 남구 용소로 45

(2013년 11월 20일 받음, 2014년 4월 22일 수정본 받음, 2014년 4월 23일 게재 확정)

본 논문에서는 짧은 길이의 편광유지 광자결정 광섬유(polarization-maintaining photonic crystal fiber : 이하 PM-PCF) 와 3 dB 광섬유 결합기(fiber coupler), 그리고 편광 조절기(polarization controller) 로 구성된 사냥(Sagnac) 복굴절 간섭계(birefringence interferometer) 를 이용하여 온도에 둔감한 편광 간섭형 스트레인 센서(polarimetric strain sensor) 를 구현하였다. 센서부(sensor head) 로 사용된 PM-PCF의 길이는 2 cm이었고, 이는 기존의 PM-PCF 기반 편광 간섭형 스트레인 센서들과 비교할 때 가장 짧은 센서부 길이이다. 제안된 센서는 0~8 m ϵ 의 범위에 대해서 스트레인 측정을 수행하였으며, ~ 0.87 pm/ $\mu\epsilon$ 에 해당하는 스트레인 민감도를 얻을 수 있었다. 또한, 외부 온도를 30 $^{\circ}\text{C}$ 에서 100 $^{\circ}\text{C}$ 까지 변화시키며 제안된 센서의 온도 의존성을 조사한 결과, 약 -12 pm/ $^{\circ}\text{C}$ 의 온도 민감도를 얻을 수 있었으며, 이는 기존의 편광 유지 광섬유의 온도 민감도(약 -990 pm/ $^{\circ}\text{C}$) 에 비해 약 82배 정도 작은 값이다. 특히, 실용적인 관점에서 센서 표지자(indicator) 로 사용되는 파장이 스트레인 민감도에 큰 영향을 주지 않는다는 것을 실험 및 이론적으로 확인하였다.

Keywords: 광섬유 센서, 스트레인 센서, 편광유지 광자결정 광섬유, 사냥 복굴절 간섭계
OCIS codes: (060.2370) Fiber optics sensors; (060.2420) Fibers, polarization-maintaining; (060.5295) Photonic crystal fibers; (350.2460) Filters, interference

†E-mail: yongwook@pknu.ac.kr

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

I. 서 론

광자 결정 광섬유(photonic crystal fiber: 이하 PCF)가 개발된 이후로 PCF의 고유한 도파 특성을 이용한 새로운 방식의 다양한 광섬유 센서들이 제안되어왔다^{1, 2}. PCF 내부의 공기 구멍(air hole)이 입력광원의 파장과 비슷한 크기를 갖게 되면 PCF는 광 밴드갭(photonic bandgap) 효과에 의해 빛을 도파시킬 수 있고, 이 경우 코어(core)와 클래딩(cladding)을 단일 물질(SiO₂)로 구성할 수 있기 때문에 PCF는 기존의 굴절률 유도(index guiding) 방식의 광섬유에 비해 현저히 낮은 온도 민감도를 갖는다. 따라서, PCF 기반 광섬유 센서들은 기존의 광섬유 센서들에 비해 상대적으로 온도에 둔감한 장점을 갖고, 이로 인해 마하-젠더(Mach-Zehnder) 또는 페브리-페로(Fabry-Perot) 간섭계 구조를 이용하여 기존 광섬유 센서들에 비해 상대적으로 온도에 둔감한 스트레인(strain) 센서들이 다수 제안되어왔다³⁻⁵. 특히, 편광 유지 PCF(polarization-maintaining PCF: 이하 PM-PCF) 기반의 사냥 복굴절 간섭계(Sagnac birefringence interferometer)⁶는 구조가 간단하고, 스트레인에 대한 복굴절 변화 민감도가 높으며, 입력 편광에 의존하지 않는 특성을 가지기 때문에 스트레인 센서부(sensor head)나 센서 복조용 필터(demodulation filter)로 널리 사용되고 있다⁷⁻¹².

이러한 PM-PCF 기반 사냥 복굴절 간섭계를 사용한 편광 간섭형 스트레인 센서(polarimetric strain sensor)들을 간략히 살펴보면, 8.6 cm 길이의 PM-PCF가 센서부로 사용된 스트레인 센서가 2007년에 처음으로 발표되었고, 스트레인 측정 범위는 0~32 mε, 스트레인 민감도는 ~0.23 pm/με이었다⁷. 동일한 해에 38 cm 길이의 PM-PCF로 구성된 스트레인 센서가 제안되었고, 스트레인 측정 범위와 스트레인 민감도는 각각 0~1.4 mε과 ~1.21 pm/με이었다⁸. 2009년에는 사냥 복굴절 간섭계 대신 두 개의 선형 편광자(linear polarizer) 사이에 13.6 cm 길이의 PM-PCF를 삽입한 편광 간섭(polarization interference) 구조를 이용한 스트레인 센서가 제안되었고, 측정 범위와 스트레인 민감도는 각각 0~1.6 mε과 ~1.30 pm/με이었다⁹. 최근에는 본 저자들도 3.9 cm 길이의 PM-PCF로 구성된 사냥 복굴절 간섭계를 이용하여 0~10 mε의 측정 범위에서 ~2.34 pm/με의 민감도를 갖는 스트레인 센서를 제안하였다¹⁰. 이외에도 13.6 cm 길이의 PM-PCF가 복굴절 요소로 사용된 세기 기반의 편광 간섭형 스트레인 센서¹¹와 9.2 cm 길이의 PCF로 구성된 마하-젠더 간섭계 기반 스트레인 센서 등도 보고되었다¹².

이러한 PM-PCF 기반의 스트레인 센서는 광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating: 이하 FBG) 기반 스트레인 센서¹³⁻¹⁵와 비교할 때, 측정 범위가 훨씬 넓다는 장점이 있지만, 센서부의 길이가 길어 센서 응용 범위에 한계를 가진다는 단점이 있다. 센서부의 길이가 길 경우, 센서를 소형화시킬 수 없을 뿐 아니라 국소부 측정에도 한계가 있고, 온도나 압력 변화와 같은 외란에 의한 영향을 쉽게 받을 수 있다. 본 논문에서는 이러한 센서부의 소형화를 더욱 진행시키기 위해 기존

의 FBG의 길이와 비슷한 길이의 PM-PCF를 사용하여 구성된 사냥 복굴절 간섭계 기반 편광 간섭형 스트레인 센서를 제안하였다. 센서부로 사용된 PM-PCF의 길이는 2.0 cm이었으며, 이는 센서부로 사용되는 FBG 길이(1~3 cm)와 비슷한 수준이고, 기존의 연구 결과들에서 사용된 PM-PCF 중 가장 짧은 것에 비해 약 2배 정도 짧아진 길이이다. 특히, 제안된 센서가 현장에서 사용될 때의 실용적인 관점에서 센서 표지자(indicator)로 사용되는 투과 스펙트럼 골(transmission spectrum dip)의 파장을 달리 선택할 경우, 이러한 센서 표지자의 파장 변화가 센서의 스트레인 민감도에 주는 영향을 실험적 및 이론적으로 조사하였다.

II. 실험 결과 및 토의

그림 1은 본 논문에서 제안된 광섬유 스트레인 센서의 구조를 나타내고 있으며, 내부 그림은 센서 시스템의 블록 다이어그램(block diagram)을 보여주고 있다. 제안된 센서 시스템은 광대역 광원(broadband source, Fiberlabs FL7004), 광 스펙트럼 분석기(optical spectrum analyzer, Yokogawa AQ 6370C), 3 dB 광섬유 결합기(fiber coupler), 1/2 파장판(half-wave plate: 이하 HWP), 1/4 파장판(quarter-wave plate: 이하 QWP), XYZ 이동 스테이지(translation stage), 그리고 2 cm 길이의 PM-PCF로 구성되어 있다. 실험에 사용된 PCF는 큰 공기구멍과 작은 공기구멍의 지름이 평균적으로 각각 4.5 μm와 2.2 μm이고, 공기구멍들 간 간격은 4.4 μm인, 코어가 실리카(silica)로 이루어진 PM-PCF(Thorlabs, PM-1550-01)이며, 그 단면도를 그림 2(b)의 내부그림에 나타내었다. 또한, 공기구멍들의 지름이 입력광원의 파장(~1.55 μm)과 큰 차이가 나지 않으므로 실험에 사용된 PM-PCF는 광 밴드갭 효과에 의해 광을 도파시킨다고 볼 수 있다. PM-PCF 양단은 광섬유 용착 접속기(fiber fusion splicer, Fujikura FSM-60S)를 이용해 단일 모드 광섬유(single-mode fiber: 이하 SMF)와 접

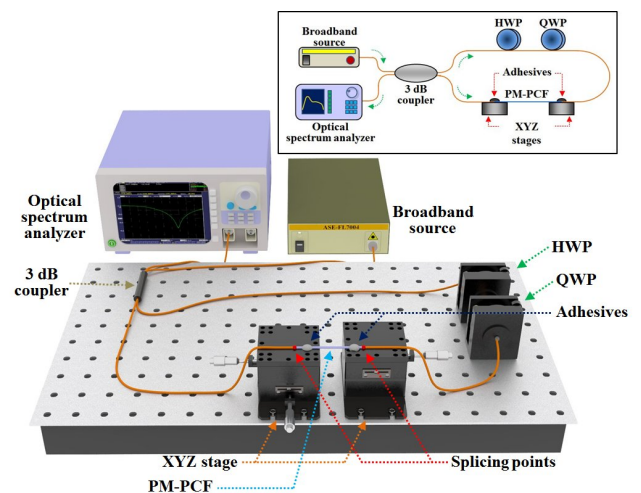


FIG. 1. Experimental setup of proposed polarimetric fiber strain sensor. The inset shows the block diagram of the proposed sensor.

속되어 있고, 접속 손실은 두 접속지점을 합쳐 ~5.5 dB로 측정되었다. 접속손실이 일반적인 광섬유보다 상대적으로 큰 이유는 PM-PCF와 SMF간의 모드 필드 직경(mode field diameter)의 부정합과 개구율(numerical aperture) 차이, 그리고 접속 과정에서 발생된 PM-PCF의 공기구멍 붕괴현상으로 인한 손실 때문으로 사료된다. 모드 필드 직경 부정합에 의한 접속 손실은 이론적으로 유도되며 피할 수 없는 손실이지만^[16], 용착 접속 시 PM-PCF에 발생하는 공기구멍 붕괴현상은 시행착오에 의해 줄일 수 있으며 이러한 공기구멍 붕괴현상을 최소화하기 위해 광섬유 용착 접속기의 접속변수를 변경해가면서 접속 손실을 최소화하였다. 상대적으로 큰 접속 손실은 사냥 복굴절 간섭계의 최대 투과도를 감소시키지만, 제안된 센서는 복조 시 파장의 이동량을 이용해 인가된 스트레인을 측정하므로 투과도의 변화는 인가된 스트레인 측정

의 정확도에는 영향을 미치지 않는다. 그림 1에서와 같이 PM-PCF 양단의 두 접속지점은 접착제를 이용해 XYZ이동 스테이지 위에 고정시켰고, 하나의 스테이지만을 이동시키면서 PM-PCF에 스트레인을 인가하였다.

그림 2(a)는 센서부로 사용된 PM-PCF에 0에서 8 mε까지 스트레인이 인가될 때 투과 스펙트럼의 변화를 보여주고 있다. HWP와 QWP의 방위각(azimuth angle)을 조절함으로써 최대 소거율(extinction ratio)을 갖는 스펙트럼을 얻었고, 스트레인이 인가되지 않았을 때의 소거율은 ~25.5 dB로 측정되었다. 스트레인 인가 시 스펙트럼은 장파장 쪽으로 이동하였고, 센서 표지자로 사용된 1543.24 nm에 위치한 투과 골의 총 이동거리는 ~7.00 nm로 측정되었다. 이동된 골의 파장 변화량은 선형 회귀 분석(linear regression analysis)을 통해 그 선형성을 조사하였고, 그 결과를 내부그림에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이, 제안된 센서는 0~8 mε의 범위에서 선형적인 반응을 보였고, 측정된 스트레인 민감도는 ~0.87 pm/με이었으며, 선형성을 나타내는 R²값은 ~0.998이었다. 측정 결과들을 살펴볼 때, 센서부의 길이를 FBG 수준으로 감소시켰음에도 센서 민감도는 FBG의 스트레인 민감도(~1 pm/με)와 비슷한 수준이고, 측정 범위는 FBG(~3 mε)에 비해 2배 이상 넓은 것을 알 수 있다.

이론적으로 사냥 간섭계 기반 편광 간섭형 센서의 스트레인 민감도는 센서부의 길이와는 무관하고, PM-PCF 복굴절 대비 스트레인에 의한 복굴절 변화량에 비례한다^[10]. 그러나, 실제 PM-PCF 제작 시 광섬유 인출 과정에서 불균일한 압력에 의해 광섬유 내 공기구멍의 지름 및 공기 구멍들 간 간격이 완벽히 동일하게 유지되지 못할 수 있고, 이러한 국소 부분의 복굴절은 PM-PCF 전체 길이에 대한 평균 복굴절과 달라질 수 있다. 따라서, 이러한 국소 복굴절 변화는 그 변화가 크지 않고 변화량에 대한 예측이 불가능하지만, PM-PCF의 길이가 달라질 경우 PM-PCF의 평균적인 복굴절을 변화시킬 수 있고, 결과적으로 스트레인 민감도를 변화시킬 수 있다. 물론, PM-PCF의 길이가 길어질수록 평균 효과에 의해 국소 복굴절 변화가 PM-PCF의 평균적인 복굴절에 미치는 영향은 줄어들게 된다. 본 논문에서는 국소부의 스트레인 측정과 외란에 의한 영향을 최소화하기 위해, 이전 연구들에서 사용된 센서부의 길이보다 훨씬 짧은 2 cm의 센서부를 사용하였고, 센서부의 길이가 감소하면서 발생된 복굴절의 변화에 의해 스트레인 민감도가 변화(감소)된 것으로 판단된다.

센서부의 길이를 더욱 감소시키기 위해 1 cm의 센서부를 이용하여 추가적인 실험을 진행하였으나, 출력 간섭 스펙트럼에서 파장 간격이 ~213.28 nm로 증가되었으며, 이는 광대역 광원의 출력 파장 대역폭인 ~80 nm의 약 2.6배에 해당한다. 따라서, 기존의 광대역 광원으로 실험을 진행할 경우 센서 표지자를 광원의 출력 파장 대역 내에 위치시키는 것이 쉽지 않아 스트레인에 의한 파장변화를 정밀하게 분석하는 것이 어렵고, 넓은 대역폭의 새로운 광대역 광원을 사용할 경우 센서 표지자의 거동을 측정하는 것은 용이하나 전체 센서 시스템의 구성 가격이 증가하게 된다. 따라서, 본 논문

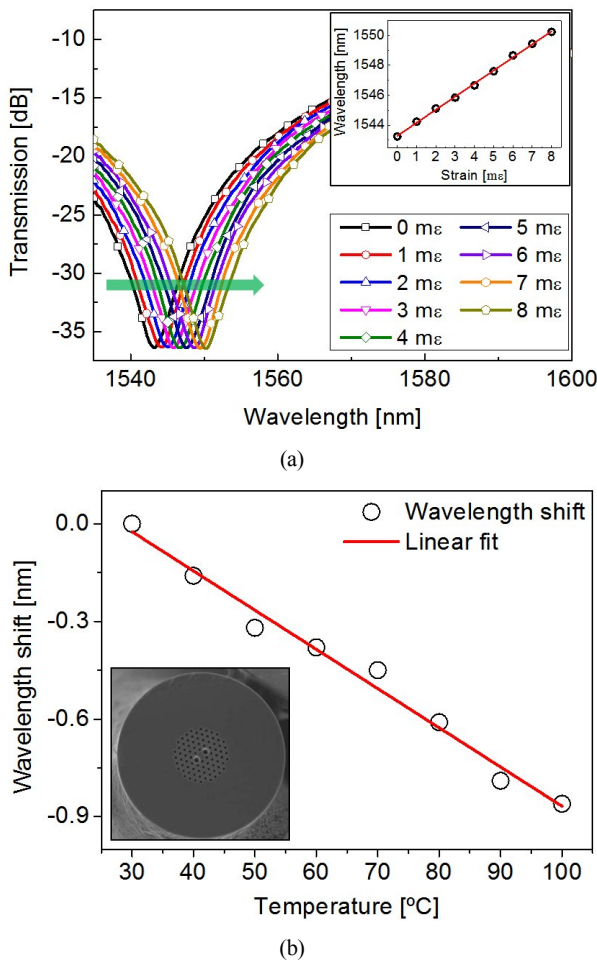


FIG. 2. (a) Measured transmission spectra of proposed sensor under various applied strains ranging from 0 to 8 mε and (b) temperature dependence of proposed sensor when ambient temperature increases from 30 to 100°C. The inset of Fig. 2(a) shows the wavelength shift of the transmission dip with respect to the applied strain, indicating the linearity of the strain response, and the inset of Fig. 2(b) shows the cross-sectional SEM image of the PM-PCF used in the experiments.

서는 센서부의 최소 길이를 2 cm로 제한하였다.

그림 2(b)는 제안된 센서의 온도 의존성을 나타내고 있으며, 센서부를 열판(hot plate) 위에 올리고 온도를 점점 증가시키면서 투과 스펙트럼의 변화를 관찰하였다. 온도를 30°C에서 100°C까지 변화시킨 결과, 투과 스펙트럼의 총 이동거리 는 ~0.86 nm로 측정되었다. 제안된 센서의 온도 민감도는 약 -12 pm/°C로서, 이는 일반적인 PMF(약 -990 pm/°C)에 비해 약 82배 정도 외부 온도 변화에 둔감한 결과이다^{17, 18}. 하지만, 측정된 온도 민감도는 기존의 다른 연구 결과에서 온도 챔버(chamber)를 사용하여 측정된 PM-PCF의 온도 민감도⁶⁻⁹)에 비해서는 큰 값이며, 이러한 차이는 열판을 사용하여 실험을 하는 경우 PM-PCF의 한쪽 면이 외부 공기와 접촉되기 때문에, PM-PCF 전체적으로 온도 분포가 심한 구배를 가져 광섬유의 온도가 일정하게 유지되지 않아 발생하는 것으로 사료된다. 제안된 센서에서는 이전 연구결과들에 비해 더욱 짧은 길이의 센서부를 사용해 실험하였으나, 온도 민감도는 센서부의 길이에 영향을 받지 않는다고 보고된 바 있다⁶. 전술했듯이, 센서부로 사용된 PM-PCF의 코어와 클래딩은 낮은 온도 팽창계수를 가지는 순수 실리카(pure silica)로만 이루어져있으므로 PM-PCF 복굴절의 온도에 대한 민감도는 기존의 PMF에 비해 상대적으로 작게 된다¹⁹. 따라서, 제안된 센서는 기존의 PMF 기반 스트레인 센서에 비해 외부 온도 변화에 의한 광학적 특성 변화가 크게 감소된다는 것을 확인하였고, 차후 PM-PCF의 온도 민감도가 더욱 개선된다면 온도에 무관한 스트레인 센서로의 활용도 가능할 것으로 사료된다.

특히, 제안된 센서가 현장에서 사용될 경우, 온도 및 압력 등의 외부 조건에 의해 센서 표지자로 사용되는 투과 스펙트럼 골의 파장이 달라질 수 있다. 따라서, 이러한 센서 표지자의 파장 변화가 제안된 센서의 스트레인 민감도에 주는 영향에 대한 조사가 필요하다. 센서 민감도의 센서 표지자 파장의 의존성을 조사하기 위해 HWP와 QWP의 방위각을 조절하여 센서 표지자의 파장 위치를 1548.16, 1553.92, 1584.52 nm로 각각 고정시킨 후 각각의 경우에 대해 순서대로 스트레인 민감도 측정을 수행하였다. 각각의 실험에서는 0~8 mε 범위의 동일한 스트레인을 센서부에 인가하였고, 측정된 결과를 그림 3(a), 3(b), 3(c)에 나타내었다. 스트레인 인가 시 투과 스펙트럼은 모두 장파장 쪽으로 이동하였고, 센서 표지자의 총 이동거리 는 각각 ~7.02, ~7.08, ~6.48 nm이었다. 그림 3(a), 3(b), 3(c)에서 센서 표지자들의 스트레인 민감도는 각각 ~0.86, ~0.86, ~0.82 pm/με으로 측정되었으며, 결과를 보면 알 수 있듯이 제안된 센서의 스트레인 민감도는 센서 표지자들의 파장 위치에 대한 의존도가 매우 낮음을 알 수 있다. 이러한 실험 결과는 아래의 수식을 통해 이론적으로 검증될 수 있다. 사냥 복굴절 간섭계를 구성하는 광학 요소들이 이상적이라고 가정하면, 사냥 복굴절 간섭계의 투과도는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다¹⁰.

$$T = \frac{1 + \cos(2\pi BL/\lambda_0)}{2} \tag{1}$$

여기서 λ_0 는 진공 중 파장을 의미하고, L 은 PM-PCF의 길이

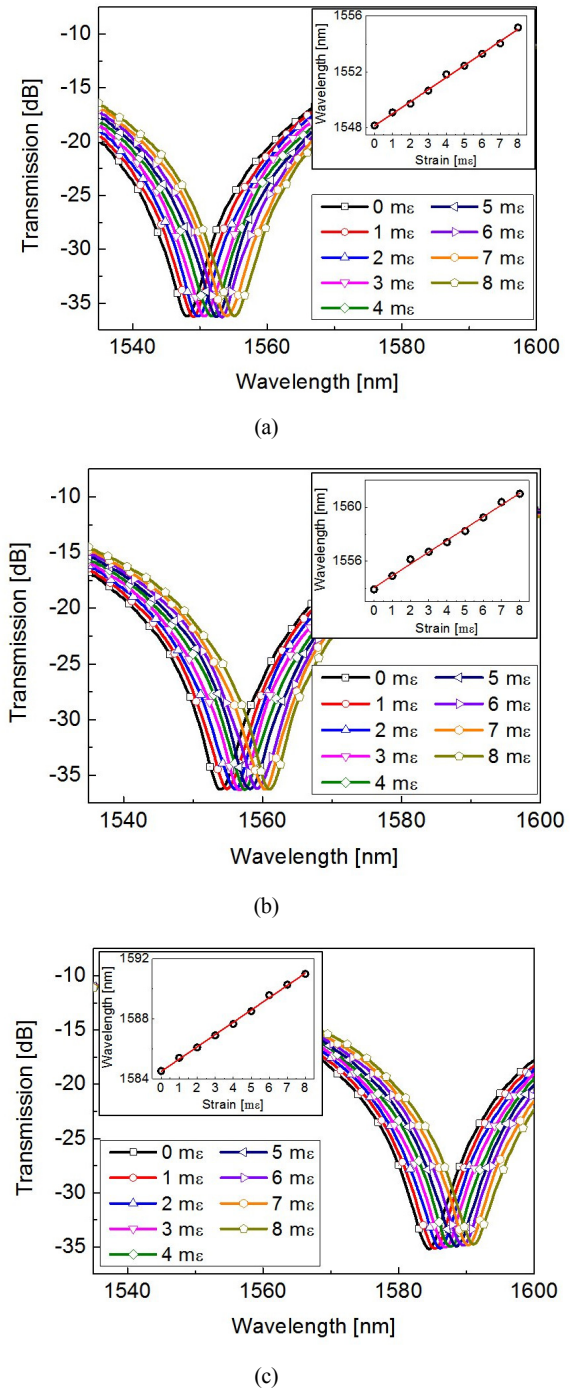


FIG. 3. Measured strain response of transmission dip at different wavelengths: (a) ~1548.16, (b) ~1553.92, and (c) ~1584.52 nm (applied strain: 0~8 mε). Insets of Figs. 3(a), 3(b), and 3(c) show the wavelength shifts of transmission minima at ~1548.16, ~1553.92, and ~1584.52 nm with respect to the applied strain ranging from 0 to 8 mε.

를 의미한다. $B(=n_s - n_f)$ 는 PM-PCF의 복굴절로서 n_s 와 n_f 는 각각 PM-PCF의 저속축(slow axis)과 고속축(fast axis)의 유효 굴절률(effective refractive index)을 나타낸다. 스트레인 인가에 의해 늘어난 길이를 ΔL 이라고 하면, PM-PCF에 인가된 스트레인 $\epsilon = \Delta L/L$ 에 의한 투과 스펙트럼의 골의 이동은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다^[10].

$$\Delta\lambda_0 = \lambda_0 \left(\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta L \Delta B}{LB} \right) = \lambda_0 \left(\epsilon + [1 + \epsilon] \frac{\Delta B}{B} \right) \quad (2)$$

그림 2(a)를 통해 얻어진 λ_0 , $\Delta\lambda_0$, ϵ 은 각각 1543.24 nm, 7.00 nm, 8 mε이었고, 이를 식 (2)에 대입하면 $\Delta B/B$ 가 -3.4366×10^{-3} 임을 알 수 있다. 이 값을 이용하면 센서 표지자의 파장 λ_0 가 1548.16, 1553.92, 1584.52 nm일 때, $\Delta\lambda_0$ 는 각각 7.02, 7.05, 7.18 nm로 계산된다. 이 결과를 바탕으로 3개의 센서 표지자들의 파장에 대해 스트레인 민감도 $S(= \Delta\lambda_0/\epsilon)$ 를 구해보면 각각 0.878, 0.881, 0.898 pm/με을 얻을 수 있다. 결과적으로 센서 표지자의 파장이 1 nm 변할 때, 스트레인 민감도는 ~ 0.00055 pm/με 만큼 변한다는 것을 알 수 있으며, 이는 0.878 pm/με의 민감도를 기준으로 볼 때 $\sim 0.063\%$ 에 해당하는 양이다. 이와 같은 이론적인 분석을 통해서도 센서 표지자의 파장이 스트레인 민감도에는 큰 영향을 주지 않는다는 것을 알 수 있다.

III. 결 론

본 논문에서는 2.0 cm 길이의 PM-PCF로 구성된 사냥 복굴절 간섭계를 기반으로 하는 스트레인 센서를 구현하였고, 스트레인 민감도의 센서 표지자 파장 의존성을 조사하였다. 구현된 센서에 인가된 스트레인의 범위는 0~8 mε이었고, 스트레인 민감도는 ~ 0.87 pm/με으로 측정되었다. 제안된 센서는 PM-PCF를 사용한 기존의 스트레인 센서들과 비교할 때 가장 짧은 센서부를 사용하였고, 또한, 일반적인 FBG 스트레인 센서와 비교할 때 유사한 스트레인 민감도를 가지면서 2배 이상의 측정 범위를 갖는다. 또한, 센서의 온도 민감도는 30~100°C의 온도 변화에 대해 약 -12 pm/με로 측정되었다. 3개의 서로 다른 센서 표지자 파장에 대한 스트레인 민감도 측정을 통해 센서 표지자로 사용되는 투과 골의 파장이 스트레인 민감도에는 거의 영향을 주지 않는다는 것을 확인하였고, 이론적인 분석을 통해 이를 검증하였다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업지원을 받아 수행된 것임(2010-0022872).

References

1. J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell, and D. M. Atkin, "All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding," *Opt. Lett.* **21**, 1547-1549 (1996).
2. J. C. Knight, "Photonic crystal fibres," *Nature (London)* **424**, 847-851 (2003).
3. J. Villatoro, V. Finazzi, V. P. Minkovich, V. Pruneri, and G. Badenes, "Temperature-insensitive photonic crystal fiber interferometer for absolute strain sensing," *Appl. Phys. Lett.* **91**, 091109 (2007).
4. Q. Shi, F. Lv, Z. Wang, L. Jin, J. J. Hu, Z. Liu, G. Kai, and X. Dong, "Environmentally stable Fabry-Pérot-type strain sensor based on hollow-core photonic bandgap fiber," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **20**, 237-239 (2008).
5. W. Shin, Y. L. Lee, B.-A. Yu, Y.-C. Noh, and T. J. Ahn, "Highly sensitive strain and bending sensor based on in-line fiber Mach-Zehnder interferometer in solid core large mode area photonic crystal fiber," *Opt. Commun.* **283**, 2097-2101 (2010).
6. D.-H. Kim and J. U. Kang, "Sagnac loop interferometer based on polarization maintaining photonic crystal fiber with reduced temperature sensitivity," *Opt. Express* **12**, 4490-4495 (2004).
7. X. Dong, H. Y. Tam, and P. Shum, "Temperature-insensitive strain sensor with polarization-maintaining photonic crystal fiber based Sagnac interferometer," *Appl. Phys. Lett.* **90**, 151113 (2007).
8. O. Frazao, J. M. Baptista, and J. L. Santos, "Temperature-independent strain sensor based on a Hi-Bi photonic crystal fiber loop mirror," *IEEE Sens. J.* **7**, 1451-1455 (2007).
9. Y.-G. Han, "Temperature-insensitive strain measurement using a birefringent interferometer based on a polarization-maintaining photonic crystal fiber," *Appl. Phys. B* **95**, 383-387 (2009).
10. T. K. Noh and Y. W. Lee, "Temperature-insensitive polarimetric fiber strain sensor with short polarization-maintaining photonic crystal fiber," *Appl. Phys. Express* **5**, 112502 (2012).
11. G. Rajan, M. Ramakrishnan, Y. Semenova, K. Milenko, P. Lesiak, A. W. Domanski, T. R. Wolinski, and G. Farrell, "A photonic crystal fiber and fiber Bragg grating-based hybrid fiber-optic sensor system," *IEEE Sens. J.* **12**, 39-43 (2012).
12. L. M. Hu, C. C. Chan, X. Y. Dong, Y. P. Wang, P. Zu, W. C. Wong, W. W. Qian, and T. Li, "Photonic crystal fiber strain sensor based on modified Mach-Zehnder interferometer," *IEEE Photonics J.* **4**, 114-118 (2012).
13. A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick, M. LeBlanc, K. P. Koo, C. G. Askins, M. A. Putnam, and E. J. Friebele, "Fiber grating sensors," *J. Lightwave Technol.* **15**, 1442-1463 (1997).
14. O. Frazao, J. P. Carvalho, L. A. Ferreira, F. M. Araujo, and J. L. Santos, "Discrimination of strain and temperature using Bragg gratings in microstructured and standard optical

- fibres,” *Meas. Sci. Technol.* **16**, 2109-2113 (2005).
15. C. Martelli, J. Canning, N. Groothoff, and K. Lyytikainen, “Strain and temperature characterization of photonic crystal fiber Bragg gratings,” *Opt. Lett.* **30**, 1785-1787 (2005).
16. J. S. Ahn, K. N. Park, G. H. Kim, S. B. Lee, and K. S. Lee, “Low loss fusion splicing of photonic crystal fiber and single-mode fiber,” *Journal of the Institute of Electronics of Engineers of Korea-SD* **46**, 529-535 (2009).
17. D. Choi and Y. W. Lee, “Current-controlled tunable fiber multiwavelength filter based on polarization-diversity loop structure,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **50**, 062502 (2011).
18. E. De la Rosa, L. A. Zenteno, A. N. Starodumov, and D. Monzon, “All-fiber absolute temperature sensor using an unbalanced high-birefringence Sagnac loop,” *Opt. Lett.* **22**, 481-483 (1997).
19. D.-H. Kim and J. U. Kang, “Analysis of temperature-dependent birefringence of a polarization-maintaining photonic crystal fiber,” *Opt. Eng.* **46**, 075003 (2007).