

# 편광유지 광자결정 광섬유 기반 편광 간섭형 스트레인 센서의 센싱 광섬유 길이 의존성 연구

(Study on Dependence of Polarization-Maintaining Photonic Crystal Fiber-Based  
Polarimetric Strain Sensor on Sensing Fiber Length)

노태규\* · 이용욱\*\*

(Tae-Kyu Noh · Yong-Wook Lee)

## Abstract

In this paper, we implemented a polarimetric strain sensor using a Sagnac birefringence interferometer composed of a polarization-maintaining photonic crystal fiber (PM-PCF). By changing the length of the PM-PCF employed as the sensor head of the proposed sensor, the length dependence of the strain sensitivity was investigated. With respect to 5.0-, 7.5-, and 10.0-cm-long PM-PCFs, strain measurements were done in a measurement range of 0~6mε, and strain sensitivities of ~2.04, ~1.92, and ~1.73pm/με were obtained, respectively. If an ideal PM-PCF with no length dependence of a modal birefringence is used for the proposed sensor, the strain sensitivity is independent of the length of the sensor head (PM-PCF). In the practical PM-PCF used in experiments, however, a shorter PM-PCF has a higher length dependence of the modal birefringence due to its imperfectness and nonuniformity of the internal structure, resulting in a higher length dependence of the strain sensitivity.

Key Words : Photonic Crystal Fiber, Strain Sensor, Sagnac Birefringence Interferometer

## 1. 서 론

새로운 광 도파로(optical waveguide) 개념을 제시한 광자결정 광섬유(photonic crystal fiber : 이하 PCF)는 광섬유 센서 연구에 상당한 변화를 가져왔으며, PCF의 고유한 도파 특성을 이용하여 새로운 방식의 광섬유 센서들이 제안되고 있다. 특히 PCF는 코어(core)와 클래딩(cladding)이 순수 실리카(pure silica)로 구성되어 있으며, 이러한 단일 물질로 이루어진 광섬유 구조에 의해 PCF는 매우 낮은 온도 민감도를 갖는다. 이러한 특성을 이용하여 마하-젠더

---

\* 주저자 : 부경대학교 전기공학과  
\*\* 교신저자 : 부경대학교 전기공학과 부교수  
\* Main author : School of Electrical Engineering,  
Pukyong National University  
\*\* Corresponding author : School of Electrical  
Engineering, Pukyong National  
University, Associate Professor  
Tel : 051-629-6323, Fax : 051-629-6305  
E-mail : yongwook@pknu.ac.kr  
접수일자 : 2012년 10월 19일  
1차심사 : 2012년 10월 24일  
심사완료 : 2013년 1월 25일

(Mach-Zehnder) 혹은 페브리-페로(Fabry-Perot) 간섭계 구조를 기반으로 매우 낮은 온도 민감도를 갖는 여러 스트레인 센서들이 제안되었다[1,2]. 이러한 PCF 중 특히, 편광유지 광자결정 광섬유(polarization-maintaining photonic crystal fiber : 이하 PM-PCF)는 간단한 구조와 제작의 용이성, 그리고 낮은 온도 민감도를 갖는 Sagnac 복굴절 간섭계(birefringence interferometer)를 구성할 수 있으므로, 온도에 무관한 PM-PCF 기반 광섬유 스트레인 센서의 연구를 촉진시켰다.

이전의 연구결과들을 살펴보면 2007년에 8.6cm 길이의 PM-PCF로 구성된 Sagnac 복굴절 간섭계 구조의 광섬유 스트레인 센서가 처음으로 제안되었고, 스트레인 측정 범위와 스트레인 민감도는 각각 0~32mε 과 ~0.23pm/με이었다[4]. 반년 후 동일한 Sagnac 복굴절 간섭계 구조에서 PM-PCF의 길이를 38cm로 증가시켜 0~1.4mε의 측정범위와 ~1.21pm/με의 민감도를 가지는 스트레인 센서가 제안되었다[5]. 2009년에는 두 개의 선형 편광자(linear polarizer) 사이에 13.6cm 길이의 PM-PCF를 넣은 편광 간섭 구조(polarization interference structure)를 이용한 스트레인 센서가 제안되었다. 이 논문에서의 스트레인 측정 범위는 0~1.6mε이었고, 스트레인 민감도는 ~1.30pm/με이었다[6]. 최근에는 0~1.6mε의 측정 범위와 ~0.00119dB/με의 민감도를 가지는 광 파워 기반의 스트레인 센서가 제안되기도 하였다[7]. 상기 언급된 이전의 스트레인 센서 연구들을 살펴보면 센서부(sensor head)로 사용된 PM-PCF들 중 가장 짧은 길이는 8.6cm이었다. 이처럼 센서부의 길이가 길면 외부의 온도나 압력 변화와 같은 외란에 의한 영향을 더 많이 받게 되어 스트레인 측정의 정확도가 감소하게 되고, 센서 적용 범위 또한 제한적이게 된다. 따라서 본 논문에서는 국소부의 스트레인 측정과 센서의 소형화를 위해 센서부 길이를 5cm까지 감소시킨 Sagnac 복굴절 간섭계 기반 스트레인 센서를 제안하고자 한다. 또한 센서부 길이를 5.0, 7.5, 10.0cm로 변형시켜가며 각각의 경우에서 스트레인 민감도를 측정하고, 센서부 길이에 따른 스트레인 민감도의 변화를 조사하였다. 0에서 6mε까지 스트레인을 인가한 결과,

센서부 길이가 5.0, 7.5, 10.0cm인 센서들의 스트레인 민감도들은 각각 ~2.03, ~1.92, ~1.74pm/με으로 측정되었고, 센서부 길이에 따라 스트레인 민감도가 변화되는 것을 확인하였다.

## 2. 실험 결과 및 토의

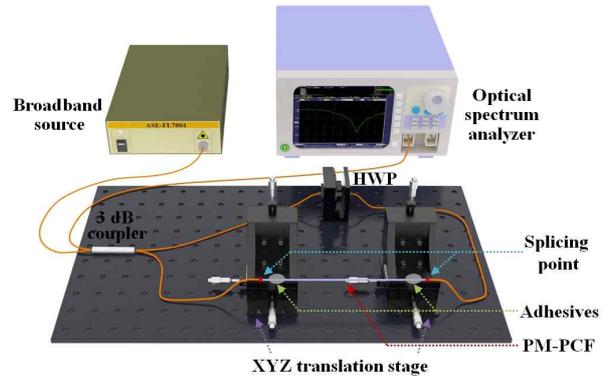


그림 1. 제안된 광섬유 스트레인 센서의 개략도  
Fig. 1. Schematic diagram of proposed optical fiber strain sensor

그림 1은 본 논문에서 제안된 광섬유 스트레인 센서의 구조를 나타낸 그림이다. 이 스트레인 센서는 광 대역 광원(broadband source, Fiberlabs FL7004)과 광 스펙트럼 분석기(optical spectrum analyzer, Yokogawa AQ6370C), 3dB 광섬유 결합기(coupler), 1/2 파장판(half-wave plate : 이하 HWP), XYZ 이동 스테이지(translation stage), 그리고 PM-PCF로 구성되어 있다. PM-PCF의 양단은 광섬유 용착 접속기(fiber fusion splicer, Fitel S-177A)를 이용해 SMF와 접속되어있고, 접속 손실(splicing loss)은 두 접속 지점(splicing point)을 합쳐 ~7dB로 측정되었다. 일반 광섬유에 비해 접속 손실이 상대적으로 큰 이유는 PM-PCF와 SMF 간의 모드 필드 직경(mode field diameter) 부정합과 개구율(numerical aperture) 차이, 그리고 PM-PCF의 공기 구멍 붕괴현상으로 인한 손실 때문이다. 두 광섬유의 모드 필드 직경 부정합에 의한 접속 손실은 이론적으로 유도되며 피할 수 없으나[8], 용착 접속 시 PM-PCF의 공기 구멍 붕괴현상을 최소화시키면 전체 접속 손실을 줄일 수 있다. 따라서

본 논문에서는 공기 구멍 붕괴현상을 최소화하기 위하여 광섬유 용착 접속기의 접속 변수를 조정함으로써 경험적인 방법으로 접속 손실을 줄였다. 상대적으로 큰 접속 손실은 Sagnac 복굴절 간섭계의 최대 투과도(transmittance)를 감소시키지만, 본 논문에서는 스트레인에 대한 민감도를 측정하기 위해 스펙트럼의 골의 파장변화를 이용하였기 때문에 투과도의 변화가 스트레인 측정 시 민감도의 정확도에는 영향을 주지 않는다. PM-PCF 양단의 두 접속 지점은 그림 1에서 보이는 것과 같이 XYZ 이동 스테이지 위에 접착체를 이용해 고정시켰고, 스트레인 인가 시에는 하나의 XYZ 이동 스테이지만을 이동시키며 스트레인을 인가하였다. 본 논문에서는 5.0, 7.5, 10.0cm 길이의 PM-PCF를 사용해 센서를 구성하고, 각 센서의 스트레인 민감도를 측정하였다.

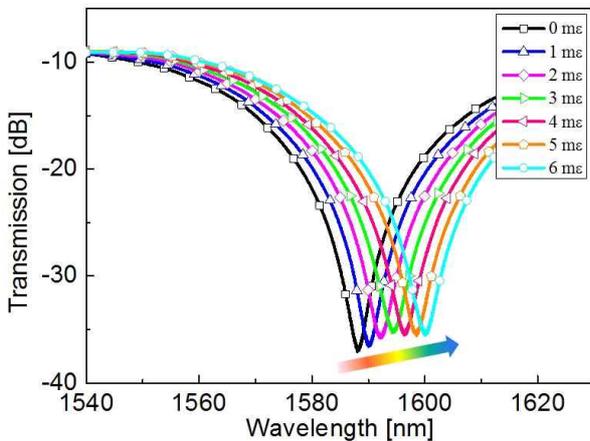


그림 2. 5.0cm 길이의 PM-PCF를 사용한 센서에 스트레인을 0에서 6mε까지 인가하였을 때의 투과 스펙트럼

Fig. 2. Measured transmission spectra of sensor composed 5.0-cm-long PM-PCF under various applied strains ranging from 0 to 6mε

먼저 5.0cm 길이의 PM-PCF로 구성된 스트레인 센서의 스트레인 민감도를 측정하였다. 센서부로 사용된 PM-PCF에 0에서 6mε까지의 스트레인이 인가될 때, Sagnac 복굴절 간섭계의 투과 스펙트럼의 변화를 그림 2에 나타내었다. 가장 높은 소거율(extinction

ratio)을 가지는 스펙트럼을 얻기 위해 HWP의 방위각을 조정하였고, 그 결과 스트레인을 인가하지 않았을 때의 소거율은 ~28.1dB로 측정되었다. 스트레인 인가 시 투과 스펙트럼은 장파장 쪽으로 이동하였고, 센서 표지자로 사용된 1588.18nm에 위치한 투과 골(transmission dip)의 총 이동거리는 ~11.92nm로 측정되었다. 이동된 스펙트럼은 선형 회귀분석에 의해 그 선형성을 조사하고, 그 결과를 실선으로 그림 3 (a)에 나타내었다. 5.0cm 길이의 PM-PCF로 구성된 센서의 스트레인 민감도는 ~2.04pm/με으로 측정되었고, 선형성을 나타내는 R<sup>2</sup>값은 ~0.998이었다. 이전의 연구결과와 비교해볼 때, 센서부의 길이는 감소되었지만, 스트레인 민감도는 증가한 것을 알 수 있다.

다음으로 7.5cm 길이의 PM-PCF로 구성된 스트레인 센서의 스트레인 민감도를 측정하였으며, 실험 셋업은 이전과 동일하였다. 마찬가지로 PM-PCF에 0에서 6mε까지 스트레인이 인가될 때, 스펙트럼은 장파장 쪽으로 이동하였고, 센서 표지자의 총 파장 이동량은 ~11.28nm로 측정되었다. 선형 회귀분석에 의해 선형성을 조사한 결과는 그림 3 (b)에 나타내었으며, R<sup>2</sup>값은 ~0.998이었다. 7.5cm 길이의 PM-PCF로 구성된 센서의 스트레인 민감도는 ~1.92pm/με으로 측정되었고, 이는 5.0cm 길이의 PM-PCF를 갖는 센서에 비해 저하된 값을 알 수 있다.

마지막으로 10.0cm 길이의 PM-PCF로 구성된 스트레인 센서의 스트레인 민감도를 측정하였으며, 본 측정 또한 이전 실험들과 동일한 셋업에서 실험을 수행하였다. 이전 결과와 마찬가지로 PM-PCF에 0에서 6mε까지 스트레인이 인가될 때, 스펙트럼이 장파장 쪽으로 이동한다는 것을 알 수 있었고, 총 이동거리는 앞서 실험하였던 5.0cm와 7.5cm 길이의 PM-PCF를 가지는 센서들에 비해 더 적은 ~10.18nm로 측정되었다. 선형성을 조사한 결과는 그림 3 (c)에 나타내었으며, R<sup>2</sup>값은 ~0.993이었다. PM-PCF로 구성된 센서의 스트레인 민감도는 ~1.73pm/με으로 측정되었고, 세 종류의 센서 중 가장 낮은 민감도를 보였다. 결과적으로 센서부로 사용된 PM-PCF의 길이가 서로 다를 경우, 스트레인 센서의 민감도가 달라지고 특히, 본 실험에서는 PM-PCF의 길이가 짧아질 때 더 높은 민감도

를 얻을 수 있었다.

이러한 실험 결과에 대해 다음과 같은 수식적인 논의를 해 볼 수 있다. Sagnac 복굴절 간섭계에서 복굴절 및 길이가 B와 L인 PM-PCF에 스트레인  $\epsilon$  ( $=\Delta L/L$ ) 이 인가될 때, 스트레인에 의한 위상차(phase difference)의 변화  $\Delta\psi$ 에 따른 투과 골의 파장 변위  $\Delta\lambda$ 는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다[4].

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2 \Delta\psi}{2\pi BL} \quad (1)$$

여기서  $\lambda$ 는 진공 중 파장을 의미하고, 인가된 스트레인에 의한 위상차의 변화  $\Delta\psi$ 는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\Delta\psi = \frac{2\pi}{\lambda} [\Delta LB + L\Delta B] \quad (2)$$

여기서  $\Delta B = \Delta n_s - \Delta n_f$ 이고, 광 탄성 효과(photoelastic effect)에 따른 PM-PCF의 복굴절 변화량이다. 광섬유 코어 내부에서의 유효 굴절률(effective refractive index)의 변화는 스트레인에 따른 광 탄성 상수와 관련이 있고,  $\Delta n_s$ 와  $\Delta n_f$ 는 식 (3)과 같이 서로 다른 광 탄성 상수를 갖는다.

$$\Delta n_s = p_s n_s \epsilon \quad (3a)$$

$$\Delta n_f = p_f n_f \epsilon \quad (3b)$$

여기서  $p_s$ 와  $p_f$ 는 각각 저속축(slow axis)과 고속축(fast axis)의 광 탄성 상수이다.

식 (3a)와 (3b), 그리고 식 (2)를 식 (1)에 대입하여 정리하면, 투과 골의 파장 변위  $\Delta\lambda$ 는 다음과 같이 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$\Delta\lambda = \lambda \left( 1 + \frac{p_s n_s - p_f n_f}{n_s - n_f} \right) \epsilon \quad (4)$$

식 (4)를 통해 PM-PCF의 복굴절이 길이 의존성이

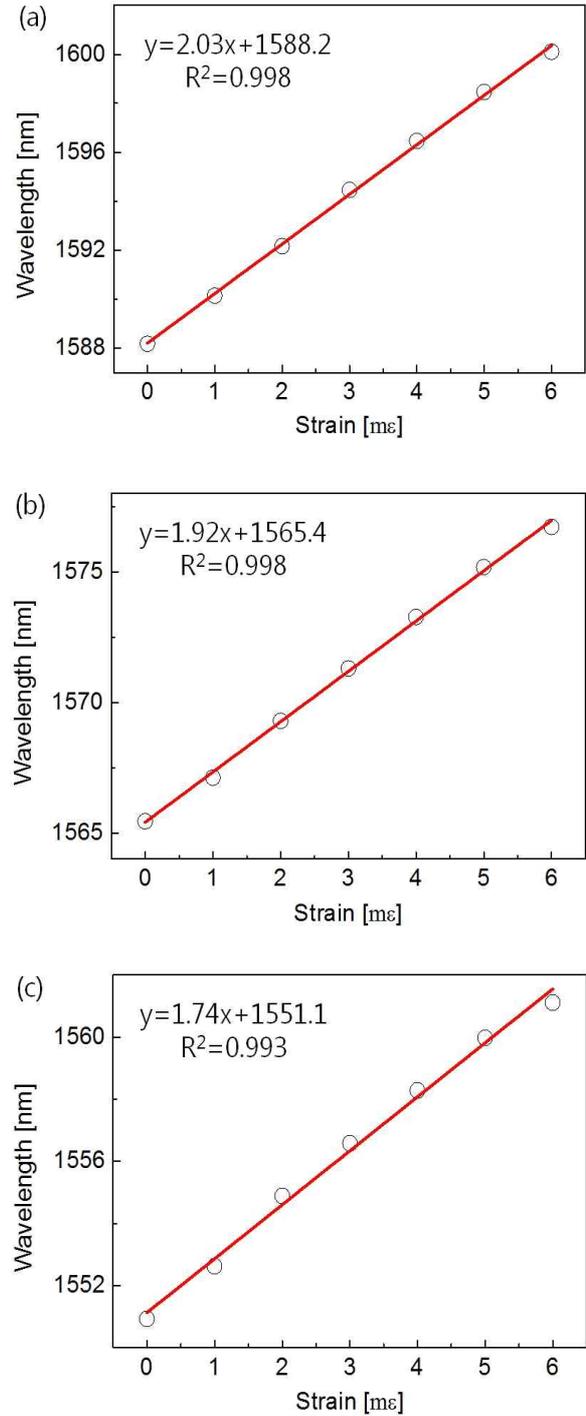


그림 3. 스트레인 인가 시 (a) 5.0cm, (b) 7.5cm 그리고 (c) 10.0cm 길이의 PM-PCF를 포함한 센서 골의 파장변화

Fig. 3. Wavelength shift of proposed sensor composed (a) 5.0-cm (b) 7.5-cm (c) 10.0-cm-long PM-PCF

없다면 인가된 스트레인에 의한 투과 골의 파장 변위는 센서부의 길이와는 상관없이 인가된 스트레인에 비례하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 본 실험에서는 센서부로 사용된 PM-PCF의 길이에 따라 스트레인 민감도에 변화가 발생하고 특히, 센서부의 길이가 짧아질수록 스트레인 민감도가 증가되는 결과를 얻었다.

일반적으로 PCF는 코어와 클래딩이 모두 동일한 물질인 순수 실리카로 구성되어 있고, 광 도파 시 클래딩 효과를 주기 위해 광섬유의 길이 방향으로 그림 4와 같이 다수의 공기 구멍(air hole)들이 일정한 간격을 갖고 주기적으로 배열되어 있다. 실험에서 사용된 PM-PCF에서 큰 공기 구멍과 작은 공기 구멍의 지름은 평균적으로 각각 4.5 $\mu\text{m}$ 와 2.2 $\mu\text{m}$ 이고, 공기 구멍 간격은 4.4 $\mu\text{m}$ 이다. 그러나 그림 4에서 확인할 수 있듯이 PCF 제작 시 광섬유 인출 과정에서 불균일한 압력이 가해지게 되면 공기 구멍의 지름이나 공기 구멍들 간의 간격이 광섬유의 길이 방향으로 일정하게 유지되지 못하게 된다. 만약 PCF 공기 구멍의 지름과 구멍 간 간격이 광섬유의 길이 방향으로 균일하게 유지된다면, 이러한 이상적인 PCF의 복굴절은 광섬유의 길이에 따라 변하지 않을 것이다. 하지만 PCF의 특정한 부분에서 공기 구멍의 지름과 간격에 불균일성이 존재한다면, 그 부분의 복굴절은 광섬유 전체의 복굴절에 비해 달라질 수 있다. 이러한 국소적인 복굴절의 변화는 광섬유의 길이가 길어질수록 평균 효과에 의해 광섬유 전체 복굴절에 미치는 영향은 줄어들게 되나, 광섬유의 길이가 줄어들게 되면 그 영향을 무시할 수 없다. 따라서 본 논문에서 확인된 스트레인 민감도의 센서부 광섬유 길이 의존성은 PM-PCF의 길이가 줄어들수록 국소부 복굴절의 변화가 전체 광섬유의 복굴절에 미치는 영향이 증가하여 발생하는 것으로 사료된다.

특히 제안된 센서의 온도 의존성도 조사하였는데, 열판(hot plate)을 이용해 센서부인 PM-PCF에 열을 가하면서 변화되는 Sagnac 복굴절 간섭계의 투과 스펙트럼을 측정하고, 측정 결과에서 투과 골의 파장 변위를 구해 그림 5에 나타내었다. 그림 5에서 알 수 있듯이, PM-PCF에 인가되는 온도는 30 $^{\circ}\text{C}$ 에서 90 $^{\circ}\text{C}$ 까지 변화시켰으며, 온도에 대한 투과 골의 파장 이동

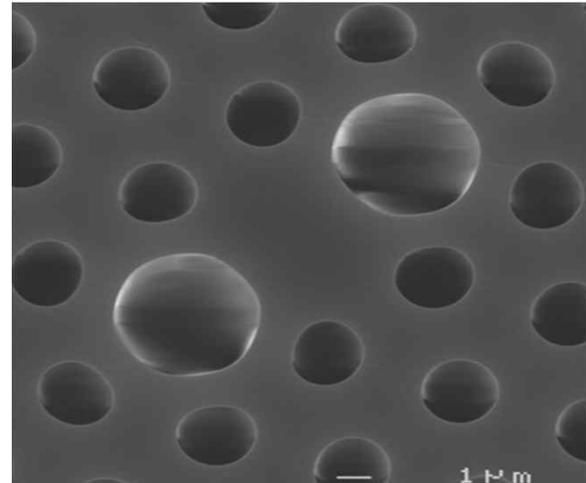


그림 4. 실험에 사용된 PM-PCF의 확대된 단면도  
Fig. 4. Zoomed cross-section of PM-PCF used in experiments

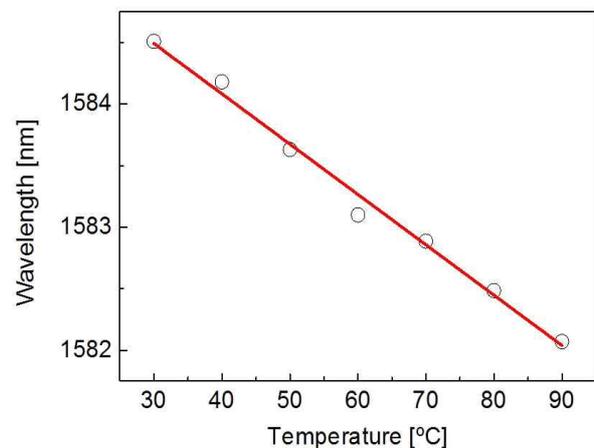


그림 5. 제안된 센서의 온도 의존성  
Fig. 5. Temperature dependence of proposed sensor

민감도는 약 -40pm/ $^{\circ}\text{C}$ 로 측정되었다. 이러한 결과는 기존의 팬더(panda) 형태의 편광유지 광섬유(약 -990pm/ $^{\circ}\text{C}$ )에 비해 약 25배 정도 외부 온도에 둔감한 결과이다. 전술했듯이, PM-PCF는 코어와 클래딩이 순수한 실리카 한 가지 매질로 제작되어 있기 때문에 온도를 변화시키더라도 코어와 클래딩 영역에서 열팽창의 차이가 나타나지 않는다. 게다가 순수한 실리카는 매우 낮은 온도 팽창 계수를 가지므로, PM-PCF

복굴절의 온도에 대한 민감도는 일반 편광유지 광섬유에 비해 크게 감소하게 된다. 따라서 PM-PCF로 구성된 제안된 스트레인 센서는 주변 온도의 변화에 대해 광학적 특성 변화가 매우 작다는 것을 확인할 수 있었고, 향후 PM-PCF의 온도 민감도가 더욱 향상된다면 제안된 센서는 온도에 무관한 스트레인 센서로서의 활용 가능성도 높아질 것으로 기대된다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 5.0, 7.5, 10.0cm 길이의 PM-PCF를 포함한 Sagnac 복굴절 간섭계를 이용하여 세 종류의 스트레인 센서를 구현하고, 스트레인 민감도의 센서부 길이 의존성을 조사하였다. 구현된 센서에 인가된 스트레인의 범위는 0~6mε이었고, 5.0, 7.5, 10.0cm 길이의 PM-PCF로 구성된 세 종류의 스트레인 센서들의 스트레인 민감도는 각각 ~2.03, ~1.92, ~1.74pm/με으로 측정되었다. 실험을 통해 스트레인 민감도는 센서부 길이에 의존성을 가지는 것을 확인하였고, 특히 본 논문에서는 센서부의 길이가 감소할수록 스트레인 민감도가 증가하는 결과를 얻었다. 이는 센서부의 길이가 감소할수록 국소적인 복굴절의 변화가 전체 광섬유의 복굴절에 미치는 영향이 커지기 때문으로 사료된다. 센서부로 사용되는 PM-PCF의 길이 변화에 의해 얻어지는 전체 광섬유의 복굴절 변화량을 쉽게 예측하긴 어렵지만, 센서부 광섬유의 길이는 스트레인 센서의 스트레인 민감도를 변화시킬 수 있는 하나의 매개 변수가 될 수 있다.

#### 감사의 글

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

### References

[1] 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.*, vol. 91, p. 091109, 2007.

[2] 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.*, vol. 20, pp. 237-239, 2008.

[3] D. H. Kim and J. U. Kang, "Sagnac loop interferometer based on polarization-maintaining photonic crystal fiber with reduced temperature sensitivity," *Opt. Express*, vol. 12, pp. 4490-4495, 2004.

[4] X. Dong, H. Y. Tam, and P. Shum, "Temperature-insensitive strain sensor with polarization-maintaining photonic crystal fiber based Sagnac interferometer," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90, p. 151113, 2007.

[5] 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.*, vol. 7, pp. 1453-1455, 2007.

[6] Y.-G. Han, "Temperature-insensitive strain measurement using a birefringent interferometer based on a polarization-maintaining photonic crystal fiber," *Appl. Phys. B*, vol. 95, pp. 383-387, 2009.

[7] 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.*, vol. 12, pp. 39-43, 2012.

[8] 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*, vol. 46, pp. 529-535, 2009.

### ◇ 저자소개 ◇



#### 노태규 (盧泰奎)

1988년 9월 28일생. 2012년 8월 부경대학교 전기공학과 졸업. 2012년 9월 부경대학교 대학원 전기공학과 입학. 현재 부경대학교 전기공학과 대학원 재학(석사과정).



#### 이용욱 (李鎔旭)

1975년 4월 25일생. 1998년 서울대학교 전기컴퓨터공학부 졸업. 2000년 서울대학교 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(석사). 2004년 서울대학교 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(박사). 현재 부경대학교 전기공학과 부교수.