

## 저손실 융착접속을 이용한 광자결정 광섬유 간섭계

안진수<sup>1</sup> · 김길환<sup>1</sup> · 이관일<sup>1</sup> · 이경식<sup>2</sup> · 이상배<sup>1†</sup>

<sup>1</sup>한국과학기술연구원 포토닉스·센서시스템센터  
Ⓞ 136-791 서울특별시 성북구 하월곡동 39-1

<sup>2</sup>성균관대학교 정보통신공학부  
Ⓞ 440-746 경기도 수원시 장안구 천천동 300

(2010년 7월 28일 받음, 2010년 10월 15일 수정본 받음, 2010년 10월 15일 게재 확정)

본 논문에서는 포토닉 밴드갭 광섬유(Photonic Bandgap Fiber: PBGF) 사이에 중공광섬유(Hollow Optical Fiber: HOF)를 융착 접속시켜 만든 광섬유 간섭계와 넓은 모드 면적을 가지는 광자결정 광섬유(Large Mode Area-Photonic Crystal Fiber: LMA-PCF) 사이에 HOF를 융착접속시켜 만든 광섬유 간섭계의 온도 및 스트레인에 대한 광학적 특성을 분석하였다. PBGF 또는 LMA-PCF와 HOF의 융착접속시 광섬유내 공기구멍을 최대한 유지하도록 융착조건을 최적화하여 접속 손실을 줄였다. PBGF와 HOF로 구성된 광섬유 간섭계의 온도 및 스트레인에 대한 민감도는 각각 15.4 pm/°C와 0.24 pm/με으로 측정되었으며, LMA-PCF와 HOF로 구성된 광섬유 간섭계의 온도 및 스트레인에 대한 민감도는 각각 17.4 pm/°C와 0.2 pm/με으로 측정되었다.

## Fiber Interferometers Based on Low Loss Fusion Splicing of Photonic Crystal Fibers

Jin Soo Ahn<sup>1</sup>, Gil Hwan Kim<sup>1</sup>, Kwanil Lee<sup>1</sup>, Kyung Shik Lee<sup>2</sup>, and Sang Bae Lee<sup>1†</sup>

<sup>1</sup>Photonics Sensor System Center, Korea Institute of Science and Technology (KIST),  
39-1 Hawolgok-dong, Seongbuk-gu, Seoul 136-791, Korea

<sup>2</sup>School of Information & Communication Engineering, Sungkyunkwan University,  
300 Cheoncheon-dong, Jangan-gu, Suwon 440-746, Korea

(Received July 28, 2010; Revised manuscript October 15, 2010; Accepted October 15, 2010)

We report temperature and strain sensing characteristics of two kinds of in-line fiber interferometers. One interferometer consists of a section of Hollow Optical Fiber(HOF) spliced between two Photonic Bandgap Fibers(PBGF) and the other is built by splicing a section of HOF between two Large Mode Area-Photonic Crystal Fibers(LMA-PCF). To minimize the splice losses, we carefully optimized the heating time and arc current of the splicer so as not to collapse the air holes of the fiber. It is found that the first interferometer has a temperature sensitivity of 15.4 pm/°C and a strain sensitivity of 0.24 pm/με. The other interferometer exhibits a temperature sensitivity of 17.4 pm/°C and a strain sensitivity of 0.2 pm/με.

Keywords: Photonic bandgap fiber, Photonic crystal fiber, Interferometer, Splicing loss

OCIS codes: (060.5295) Photonic crystal fibers; (060.2310) Fiber optics; (060.2370) Fiber optics sensors

### I. 서 론

광자결정 광섬유(Photonic Crystal Fibers: PCFs)와 중공 광섬유(Hollow Optical Fiber: HOF)는 기존의 단일모드 광섬유

(Single-Mode Fiber: SMF)와는 다른 구조 때문에 다양한 특성과 장점을 가지고 있다<sup>[1]</sup>. 특히 포토닉 밴드갭 광섬유(Photonic Bandgap Fiber: PBGF)는 코어 영역과 클래딩 영역이 공기구멍(micro air-hole)으로 구성된 구조로써 포토닉 밴

<sup>†</sup>E-mail: sblee@kist.re.kr

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

드갭 효과에 의해서 특정 파장대역의 광신호가 코어로 도파되는 특성을 가지고 있다. 또한 solid 코어 PCF는 high index guiding에 의한 전반사 원리로 전파장대역의 광신호가 실리카 코어에서 단일모드로 도파된다. PCF는 클래딩 영역의 공기구멍의 직경(d)과 간격(Λ)의 차이에 따라 다른 도파특성을 지니고 있기 때문에 다양한 응용분야에 적용할 수 있다<sup>[2-6]</sup>. 그러나 일반적인 용착접속 방법을 사용할 경우 PCF 클래딩 영역에 위치한 공기구멍들이 붕괴되면서 접속손실이 커지는 문제점을 지니고 있다<sup>[7, 8]</sup>. 따라서 본 논문에서는 광섬유 용착접속기를 이용하여 SMF와 PBGF(한국과학기술연구원 제작: KIST080626)의 저손실 용착접속이 가능한 방법을 바탕으로 air-hole 코어 PCF인 PBGF와 HOF(한국과학기술연구원 제작: KIST090810), solid 코어 PCF인 넓은 모드 면적을 가지는 광자결정 광섬유(Large Mode Area-Photonic Crystal Fiber: LMA-PCF)와 HOF로 구성된 두 종류의 광섬유 간섭계를 구현하여 온도 및 스트레인에 대한 광학적 특성 변화를 측정하였다.

## II. SMF와 PBGF의 저손실 용착접속

그림 1은 본 논문의 실험에서 SMF와 용착접속에 사용된 PBGF의 절단면이다. 코어의 직경은 11 μm, 클래딩 영역에서 공기구멍 사이의 간격(Λ)은 4±0.3 μm이며, 코어에 도파되는 파장영역은 1550 nm대역이다. 또한 용착접속시 사용된 광섬유 용착접속기는 Ericsson의 FSU-995FA이다. 실험은 그림 2와 같이 구성하여 수행하였다. Tunable Laser Source(TLS)

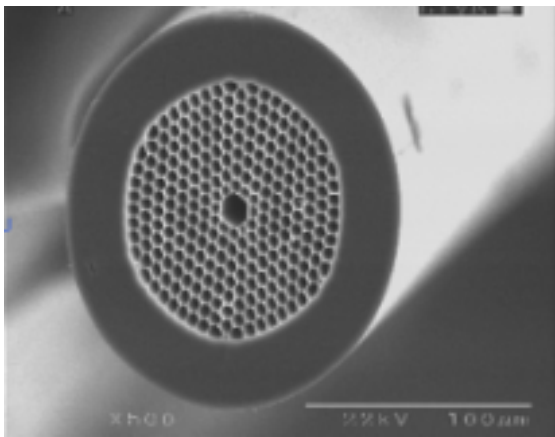


FIG. 1. SEM image of fabricated PBGF cross section.

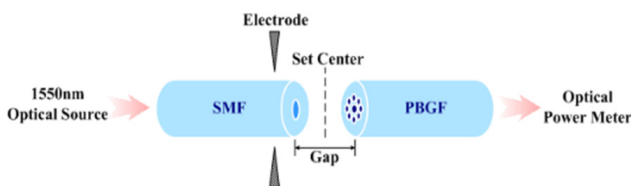


FIG. 2. Experiment setup for low loss fusion splicing of SMF and PBGF.

의 파장을 1550 nm로 조정하고 TLS의 파워를 SMF 출력단에서 출력을 측정하고, PBGF와 용착접속한 후 PBGF 출력단에서 출력을 측정함으로써 SMF에서 PBGF로의 접속손실을 측정하였다.

SMF와 PBGF의 용착접속시 발생하는 접속손실을 결정하는 요소는 SMF와 PBGF의 모드필드직경(MFD) 부정합과 PBGF의 공기구멍 붕괴현상으로 인한 손실이다. 두 광섬유 사이의 MFD 부정합에 의한 이론적인 접속손실은 식 (1)에서처럼 나타낼 수 있다<sup>[7, 8]</sup>.

$$Coupling Loss [dB] = -20 \log \left( \frac{2 \cdot MFD_{PBGF} \cdot MFD_{SMF}}{MFD_{PBGF}^2 + MFD_{SMF}^2} \right) \quad (1)$$

그러나 식 (1)은 용착접속하려는 두 광섬유 코어의 굴절률 차이 및 광섬유 용착접속기의 접속변수에 따른 PBGF의 공기구멍 붕괴현상으로 인한 접속손실을 고려할 수 없다. 또한 SMF와 PBGF의 MFD는 큰 차이가 없기 때문에 두 광섬유 사이의 접속손실은 아크 방전에 의한 PBGF의 공기구멍의 붕괴에 의해서 결정된다. 따라서 접속손실을 줄이기 위한 방법으로 PBGF의 공기구멍 붕괴현상을 최소화하기 위해 용착접속기의 접속변수(Parameter)를 조정하는 방법이 필요하다<sup>[8]</sup>. 표 1은 SMF와 PBGF의 용착접속 실험에서 사용된 광섬유 용착접속기의 접속변수이다. PBGF의 공기구멍은 고온에서 쉽게 붕괴되므로 전극봉의 위치를 SMF와 PBGF의 가운데 지점이 아닌 SMF 방향으로 이동하였다. 그리고 두 종류의 접속변수를 입력하여 용착접속하였다. 그 결과, 접속변수 1에서의 접속손실은 평균 1.22 dB였으며, 접속변수 2에서의 접속손실은 평균 2.14 dB로 증가하였다. 즉, 적은 방전량을 인가할 경우 작은 접속손실을 얻을 수 있었다.

TABLE 1. Splicing parameters and average splicing loss with fusion splicing SMF and PBGF

접속변수	1	2
Set center	+ 280	
Gap	10 μm	
Overlap	10 μm	
Prefuse time	0.2 s	
Prefuse current	10 mA	
Fusion time 1	0.2 s	
Fusion current 1	10 mA	
Fusion time 2	8 s	8 s
Fusion current 2	8 mA	10 mA
Fusion time 3	3 s	
Fusion current 3	3 mA	
평균 접속손실	1.22 dB	2.14 dB

\* Set center default : + 255

### III. 제안된 방법을 이용한 광섬유 간섭계

중공 광섬유(Hollow Optical Fiber: HOF)는 순수 실리카로 구성된 광섬유의 코어부분에 해당되는 영역에만 공기구멍으로 되어있는 광섬유로 광통신 및 광센서 등 다양한 분야에서 응용되고 있다<sup>[9]</sup>. 또한 HOF를 짧게 사용하여 간섭계를 구현하는 경우에는 벌크형태의 간섭계, Taper된 광섬유를 이용한 간섭계와는 다르게 제작이 간편할 뿐만 아니라, 간섭계의 부피가 작고 광신호가 광섬유내로 도파되기 때문에 광손실이 적어 미세한 신호의 변화량도 검출할 수 있다는 장점이 있다<sup>[10]</sup>. 일반적으로 광섬유 간섭계는 광섬유내 모드간 위상차가 발생하여 나타나는 두 모드간의 간섭을 이용한 것으로 온도, 스트레인, 구부림 등의 물리량 변화를 측정하는 센서로 이용할 수 있다<sup>[11]</sup>. 본 논문에서는 SMF와 PBGF와의 저손실 융착접속 방법을 이용하여 PBGF(NKT Photonics 제작: HC-1550-02)와 HOF, LMA-PCF(NKT Photonics 제작: LMA-10)와 HOF로 구성된 광섬유 간섭계를 구현하였고 이를 이용하여 온도 및 스트레인에 대한 광학적 특성을 실험하였다. 그림 3은 본 논문의 실험에서 LMA-PCF 및 PBGF와의 융착접속에 사용된 HOF의 절단면을 SEM을 이용하여 촬영한 사진이다. HOF내 코어부분에 해당되는 공기구멍의 직경은 21.1 μm이다. 또한, 그림 4는 본 실험에서 사용된 각각의 광섬유 간섭계의 구조

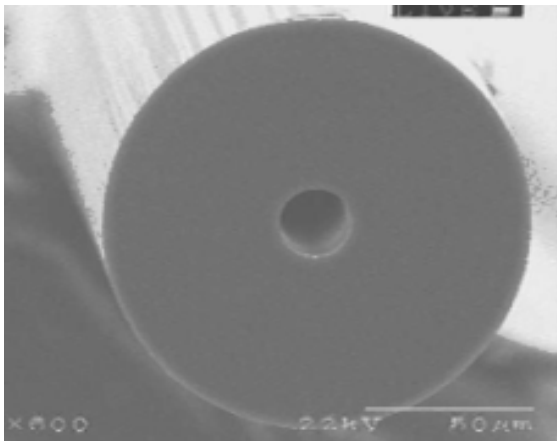


FIG. 3. SEM image of fabricated HOF cross section.

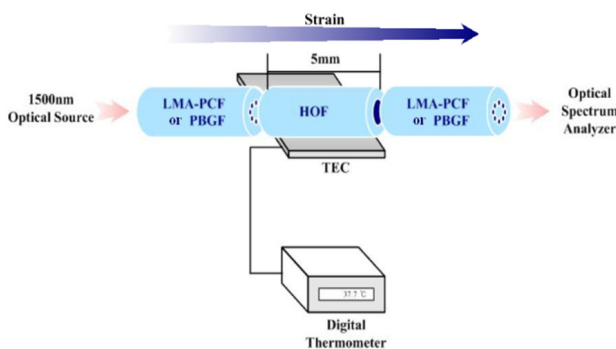


FIG. 4. Experiment setup for temperature and strain of in-line fiber interferometers.

를 개략적으로 나타낸 그림으로써, PBGF 및 LMA-PCF 사이에 HOF를 각각 정렬한 모습으로 HOF의 길이는 5 mm이다.

HOF에는 몇 개의 모드가 존재할 수 있기 때문에 PBGF 및 LMA-PCF에서 HOF로 도파되는 기본 코어 모드(Fundamental Core Mode)와 HOF내의 존재하는 몇 개의 모드(Other Modes)사이에서 간섭이 발생하게 되고 간섭 모드간 유효 굴절률의 차는 식 (2)에서처럼 나타낼 수 있다<sup>[12-15]</sup>. 또한, 식 (2)을 이용하여 본 실험에서 구현한 광섬유 간섭계의 온도 특성을 식 (3)으로 스트레인에 대한 특성을 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$|n_{eff}^{Fundamental\ Core\ Mode} - n_{eff}^{Other\ Modes}| = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{L(\lambda_1 - \lambda_2)} \quad (2)$$

$$(|n_{eff}^{Fundamental\ Core\ Mode} - n_{eff}^{Other\ Modes}|)[(\alpha + \delta) \cdot \Delta T] = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{L(\lambda_1 - \lambda_2)} \quad (3)$$

$$(|n_{eff}^{Fundamental\ Core\ Mode} - n_{eff}^{Other\ Modes}|)[(1 - Pe) \cdot \Delta \epsilon] = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{L(\lambda_1 - \lambda_2)} \quad (4)$$

첫 번째로 온도 특성에 대한 식 (3)에서 공기구멍(n=1)으로 도파되는 기본 코어 모드에 대한 유효 굴절률은 온도가 올라갈수록 변화가 거의 없지만 실리카(n=1.442)로 도파되는 모드와 중첩된 공기구멍으로 도파되는 모드(Other Modes)에 대한 유효 굴절률은 온도가 올라갈수록 커진다. 이는  $|n_{eff}^{Fundamental\ Core\ Mode} - n_{eff}^{Other\ Modes}|$ 의 값이 증가한다는 것이다. 따라서, 우변의 peak 파장들( $\lambda_1, \lambda_2$ )이 장파장 방향으로 이동한다는 것을 의미한다.  $\alpha$ 는 열광학 계수(silica:  $9.02 \times 10^{-6}$ )를  $\delta$ 는 열팽창 계수(silica:  $0.55 \times 10^{-6}$ )를  $\Delta T$ 는 온도의 변화량을 나타내고 있다. 두 번째로 스트레인 특성에 대한 식 (4)에서 공기구멍(n=1)으로 도파되는 기본 코어 모드에 대한 유효 굴절률은 스트레인에 대한 변화가 거의 없지만 실리카(n=1.442)로 도파되는 모드와 중첩된 공기구멍으로 도파되는 모드(Other Modes)에 대한 유효 굴절률은 스트레인이 인가될수록 작아진다. 이는  $|n_{eff}^{Fundamental\ Core\ Mode} - n_{eff}^{Other\ Modes}|$ 의 값이 감소한다는 것이고 따라서, 우변의 peak 파장들( $\lambda_1, \lambda_2$ )이 단파장 방향으로 이동한다는 것을 의미한다.  $Pe$ 는 광섬유의 광탄성 계수(0.22)를  $\Delta \epsilon$ 은 스트레인의 변화량을 나타낸다.

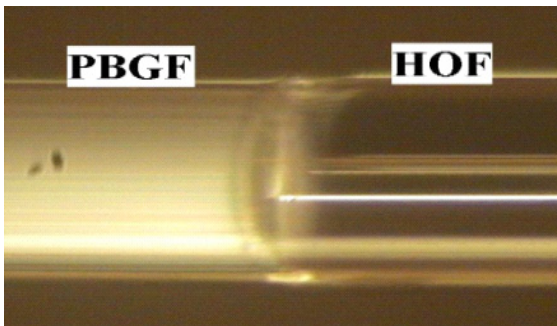
PBGF와 HOF(간섭계-1), LMA-PCF와 HOF(간섭계-2)로 구성된 광섬유 간섭계를 제작하기 위해서 광섬유 융착접속기를 이용하여 PBGF 및 LMA-PCF등 두 종류의 PCFs를 HOF와 융착접속하였다. PCFs와 HOF의 융착접속 역시 공기구멍 붕괴에 의해서 접속손실이 결정된다<sup>[7, 8]</sup>. 따라서 접속손실을 줄이기 위한 방법으로 공기구멍 붕괴현상을 최소화하기 위해 전극봉의 위치조정과 아크의 방전시간 및 방전량 조정이 필요하다.

표 2는 PBGF 또는 LMA-PCF와 HOF의 저손실 융착접속

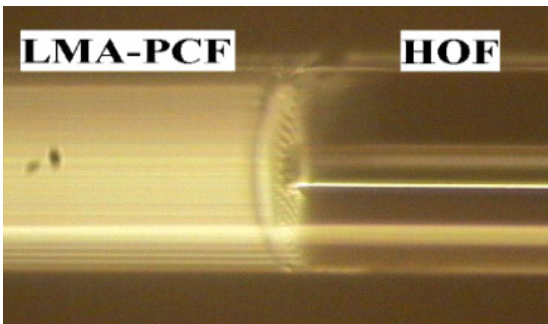
**TABLE 2.** Splicing parameters for low loss fusion splicing PCFs and HOF

접속변수	From PBGF/LMA-PCF to HOF	
Set center	+ 250	
Gap	10 $\mu\text{m}$	
Overlap	10 $\mu\text{m}$	
Prefuse time	0.2 s	
Prefuse current	10 mA	
Fusion time 1	0.2 s	
Fusion current 1	10 mA	
Fusion time 2	8 s	
Fusion current 2	8 mA	
Fusion time 3	3 s	
Fusion current 3	3 mA	
평균 접속손실	PBGF-HOF-PBGF	LMA-HOF-LMA
	2.2 dB	5 dB

\* Set center default : + 255



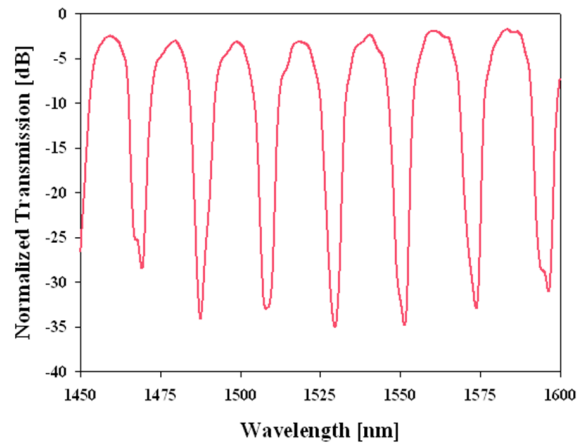
(a)



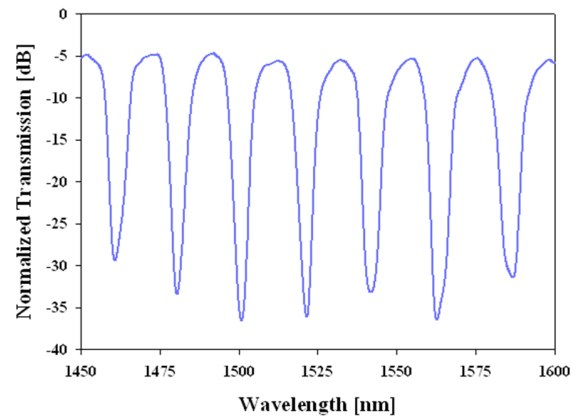
(b)

**FIG. 5.** Connection part between PCF and HOF. (a) PBGF and HOF (b) LMA-PCF and HOF.

하는 과정에서 사용된 광섬유 용착접속기의 접속변수이다. HOF의 공기구멍 역시 PBGF나 LMA-PCF처럼 고온에서 쉽게 붕괴되지만 공기구멍이 코어부분에만 국한되므로 PBGF나 LMA-PCF보다는 고온에 덜 민감하다고 할 수 있다. 따라서 전극봉의 위치를 HOF 방향으로 이동하였다. 그 결과, PBGF, LMA-PCF, HOF의 공기구멍이 붕괴되지 않고 완벽하게 용착접속 되었음을 그림 5에서처럼 확인할 수 있었고 제작된 간섭계-1과 간섭계-2의 간섭 스펙트럼이 그림 6과 같이



(a)



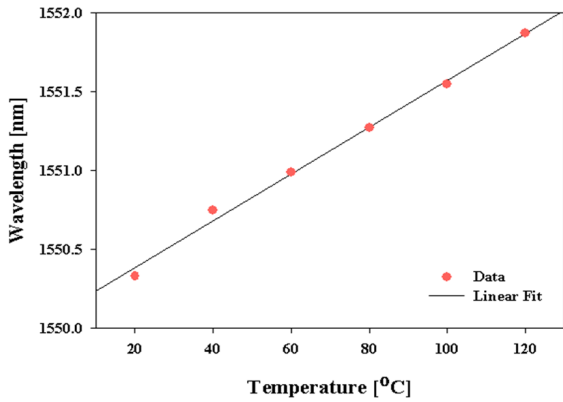
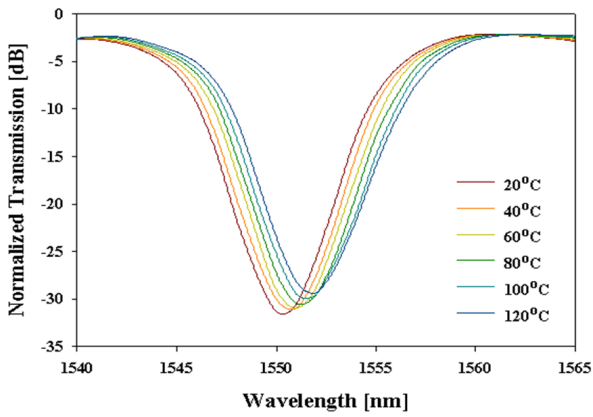
(b)

**FIG. 6.** Spectrum of two kinds of in-line fiber interferometers. (a) PBGF/HOF interferometer. (b) LMA-PCF/HOF interferometer.

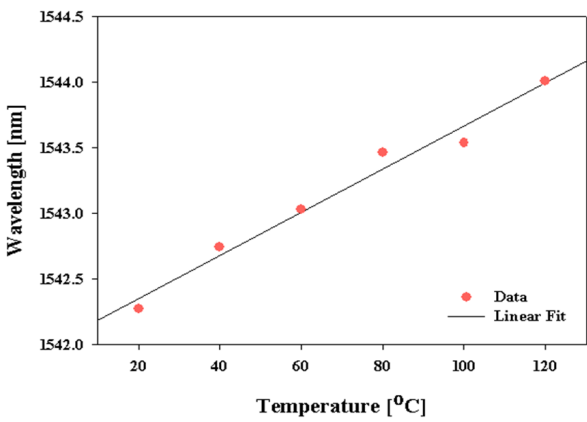
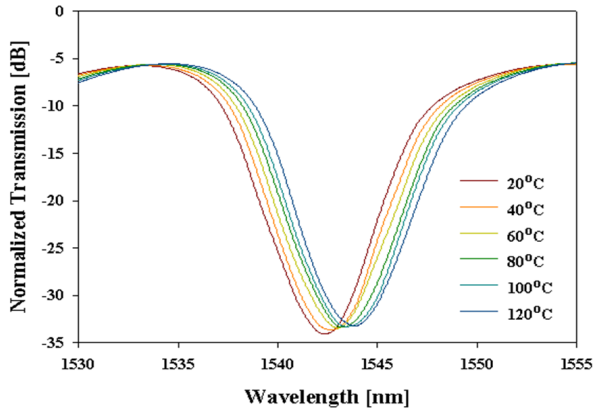
측정되었다.

첫 번째로 그림 7은 간섭계-1과 간섭계-2 두 광섬유 간섭계의 온도 변화에 대한 간섭 스펙트럼으로써 20°C ~ 120°C까지의 간섭 스펙트럼을 측정한 것이다. 두 개의 PCF 사이에 HOF를 삽입하여 용착접속한 후 Thermoelectric Cooler(TEC)에 전압을 인가하여 온도를 일정하게 상승시키면서 간섭 스펙트럼의 변화를 측정하였다. 그림 7(a)에서는 간섭계-1, 그림 7(b)에서는 간섭계-2의 온도 변화에 대한 간섭 스펙트럼 이동의 변화량을 측정한 것이다. 20°C에서 간섭 스펙트럼의 Peak 파장은 간섭계-1에서는 1550.33 nm 이고 간섭계-2에서는 1542.27 nm로 측정되었다. 온도를 상승시키에 따라 두 광섬유 간섭계의 간섭 스펙트럼이 장파장 방향으로 이동하여 120°C에서 간섭 스펙트럼의 Peak 파장은 각각 1551.87 nm, 1544.01 nm이었다. 즉, 온도가 1°C 상승함에 따라 간섭 스펙트럼이 장파장 방향으로 Sample 1은 15.4 pm를 Sample 2는 17.4 pm 이동되는 것을 알 수 있었다.

두 번째로 그림 8은 간섭계-1과 간섭계-2 두 광섬유 간섭계를 Linear Motor를 이용하여 스트레인을 0  $\mu\text{e}$  ~ 1,600  $\mu\text{e}$ 까지 일정하게 증가시키면서 간섭 스펙트럼의 변화를 측정하였다. 그림 8(a)에서는 간섭계-1, 그림 8(b)에서는 간섭계-2

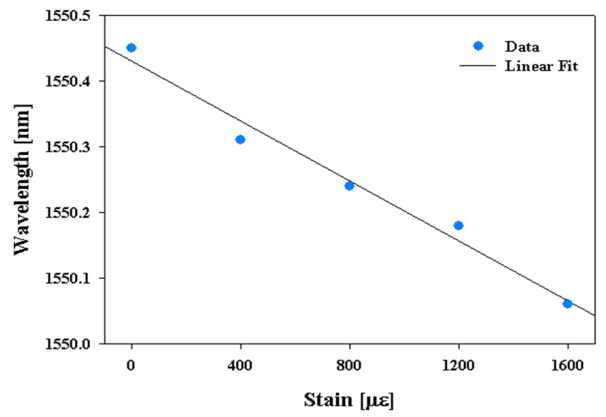
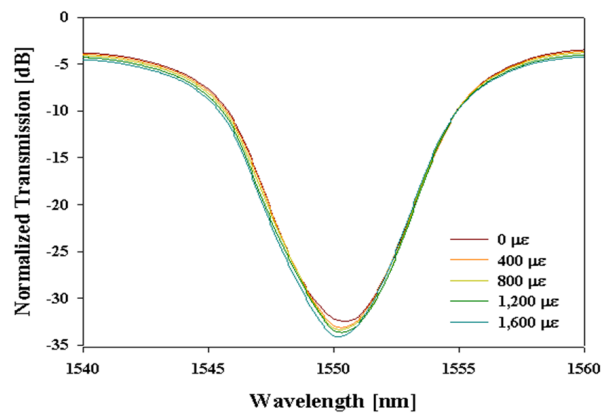


(a)

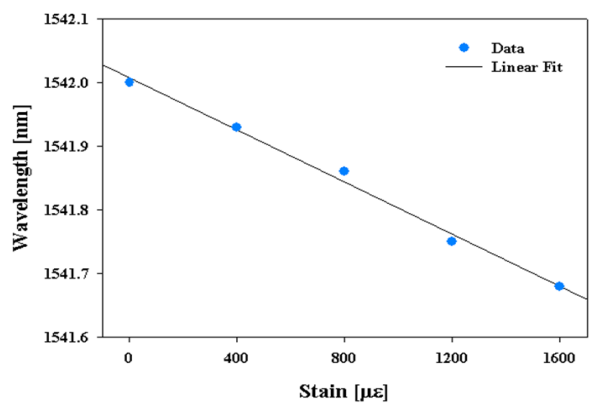
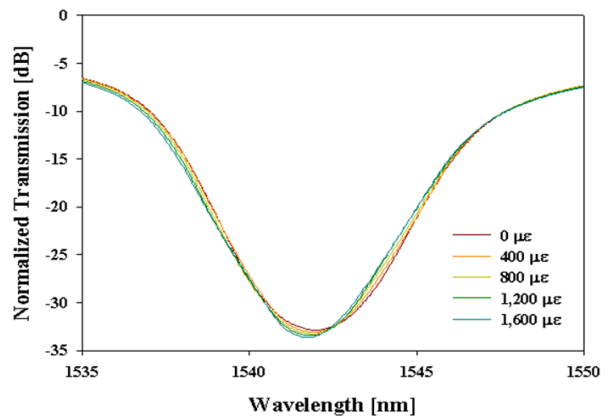


(b)

FIG. 7. Spectrum of interferometry about change of temperature. (a) PBGF/HOF interferometer. (b) LMA-PCF/HOF interferometer.



(a)



(b)

FIG. 8. Spectrum of interferometry about strain increase. (a) PBGF/HOF interferometer. (b) LMA-PCF/HOF interferometer.



의 스트레인 변화에 대한 간섭 스펙트럼 이동의 변화량을 측정하는 것이다. 0  $\mu\epsilon$ 에서 간섭 스펙트럼의 Peak 파장은 간섭계-1에서는 1550.45 nm이고 간섭계-2에서는 1542.00 nm로 측정되었다. 스트레인을 인가함에 따라 두 광섬유 간섭계의 간섭 스펙트럼이 단파장 방향으로 이동하여 1,600  $\mu\epsilon$ 에서 간섭 스펙트럼의 Peak 파장은 각각 1550.06 nm, 1541.68 nm이었다. 즉, 1  $\mu\epsilon$  증가함에 따라 간섭 스펙트럼이 단파장 방향으로 간섭계-1은 0.24 pm를 간섭계-2는 0.2 pm 이동되는 것을 확인하였다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 SMF와 PBGF의 융착접속은 두 광섬유의 MFD가 유사하여 MFD 부정합에 의한 접속손실은 크지 않았다. 따라서 아크를 방전하는 전극봉의 위치를 SMF방향으로 위치시켜 PBGF의 공기구멍이 붕괴되지 않을 정도의 방전량으로 융착접속하였다. 그 결과, SMF에서 PBGF로의 평균 접속손실은 1.22 dB로 측정되었다. 저손실 융착접속 방법을 이용하여 PBGF와 HOF로 구성된 광섬유 간섭계(간섭계-1)와 LMA-PCF와 HOF로 구성된 광섬유 간섭계(간섭계-2)를 구현하여 두 광섬유 간섭계의 온도 및 스트레인에 대한 광학적 특성을 측정, 분석하여 보았다. 그 결과, 간섭계-1의 온도 및 스트레인에 대한 민감도는 각각 15.4  $\text{pm}/^\circ\text{C}$ 와 0.24  $\text{pm}/\mu\epsilon$ 로 측정되었다. 그리고 간섭계-2의 온도 및 스트레인에 대한 민감도는 각각 17.4  $\text{pm}/^\circ\text{C}$ 와 0.2  $\text{pm}/\mu\epsilon$ 로 측정되었다. 이처럼 두 광섬유 간섭계의 온도와 스트레인에 대한 민감도는 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 LMA-PCF/HOF 광섬유 간섭계의 최소 접속손실은 5 dB이상 측정되었던 반면, PBGF/HOF 광섬유 간섭계의 최소 접속손실은 2.2 dB정도로 측정되어 두 광섬유 간섭계의 접속손실 차이는 3 dB정도였다. 이는 LMA-PCF가 HOF보다 코어의 굴절률이 더 높으므로 추가적으로 발생한 접속손실이라는 것을 확인하였다.

#### References

1. T. A. Birks, J. C. Knight, and P. St. J. Russell, "Endlessly single-mode photonic crystal fiber," *Opt. Lett.* **22**, 961-963 (1997).
2. J. C. Knight, "Photonic crystal fibres," *Nature* **424**, 847-851 (2003).
3. P. St. J. Russell, "Photonic-crystal fibers," *IEEE J. Lightwave Technol.* **24**, 4729-4749 (2006).
4. C. M. Smith, N. Venkataraman, M. T. Gallagher, D. Muller,

- J. A. West, N. F. Borrelli, D. C. Allan, and K. W. Koch, "Low-loss hollow-core silica/air photonic bandgap fibre," *Nature* **424**, 657-659 (2003).
5. P. Roberts, F. Couny, H. Sabert, B. Mangan, D. Williams, L. Farr, M. Mason, A. Tomlinson, T. Birks, J. Knight, and P. St. J. Russell, "Ultimate low loss of hollow-core photonic crystal fibres," *Opt. Express* **13**, 236-244 (2005).
6. T. Y. Cho, G. H. Kim, K. Lee, and S. B. Lee, "Study on the fabrication process of polarization maintaining photonic crystal fibers and their optical properties," *J. Opt. Soc. Korea* **12**, 19-24 (2008).
7. L. Xiao, M. S. Demokan, W. Jin, and Y. Wang, "Fusion splicing photonic crystal fibers and conventional single-mode fibers: microhole collapse effect," *IEEE J. Lightwave Technol.* **25**, 3563-3574 (2007).
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* **46**, 529-535 (2009).
9. K. Oh, S. Choi, Y. Jung, and J. W. Lee, "Novel hollow optical fibers and their applications in photonic devices for optical communications," *IEEE J. Lightwave Technol.* **23**, 524-532 (2005).
10. Z. Tian, S. S-H. Yam, and H.-P. Loock, "Refractive index sensor based on an abrupt taper Michelson interferometer in a single-mode fiber," *Opt. Lett.* **33**, 1105-1107 (2008).
11. J. H. Lim, H. S. Jang, K. S. Lee, J. C. Kim, and B. H. Lee, "Mach-Zehnder interferometer formed in a photonic crystal fiber based on a pair of long-period fiber gratings," *Opt. Lett.* **29**, 346-348 (2004).
12. G. Kim, T. Cho, K. Hwang, K. Lee, K. S. Lee, Y.-G. Han, and S. B. Lee, "Strain and temperature sensitivities of an elliptical hollow-core photonic bandgap fiber based on Sagnac interferometer," *Opt. Express* **17**, 2481-2486 (2009).
13. S. H. Aref, R. Amezcua-Correa, J. P. Carvalho, O. Frazao, P. Caldas, J. L. Santos, F. M. Araujo, H. Latifi, F. Farahio, L. A. Ferreira, and J. C. Knight, "Modal interferometer based on hollow-core photonic crystal fiber for strain and temperature measurement," *Opt. Express* **17**, 18669-18675 (2009).
14. A. Kumar, R. Jindal, R. K. Varshney, and S. K. Sharma, "A fiber-optic temperature sensor based on LP01-LP02 mode interference," *Optical Fiber Technology* **6**, 83-90 (2000).
15. S. Lee, J. Park, Y. Jeong, H. Jung, and K. Oh, "Guided wave analysis of hollow optical fiber for mode-coupling device applications," *IEEE J. Lightwave Technol.* **27**, 4919-4926 (2009).