



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

굽힘과 온도를 동시 측정하기 위해 CO₂
Laser를 이용해 새긴 편광 유지 장 주기
광섬유 격자 센서에 관한 연구



2018년 8월

부 경 대 학 교 대 학 원

의생명융합공학협동과정

정 선 재

공학석사학위논문

굽힘과 온도를 동시 측정하기 위해 CO₂
Laser를 이용해 새긴 편광 유지 장 주기
광섬유 격자 센서에 관한 연구



지도교수 이 용 욱

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2018년 8월

부 경 대 학 교 대 학 원

의생명융합공학협동과정

정 선 재

정선재의 공학석사 학위논문을 인준함.

2018년 8월



위원장	이학박사	강현욱	(인)
위원	이학박사	김용현	(인)
위원	이학박사	이용욱	(인)

목 차

목차	i
그림 목차	ii
Abstract	iii
1. 서론	1
2. 관련이론	5
가. 장 주기 격자 (LPFG)	5
나. 편광유지 광섬유 (PMF)	6
3. 온도와 곡률의 동시 측정을 위해 제안된 광섬유 센서	7
가. PM-LPFG의 제작	7
나. 제안된 센서 시스템	10
다. 실험결과 및 고찰	12
4. 결론	19
참고문헌	21

그림 목 차

그림 2.1. LPFG가 새겨진 광섬유의 단면도와 빛의 도파 경로	7
그림 2.2. 각 종류별 PMF의 단면도	8
그림 3.1. 제안된 PM-LPFG 제작 시스템 모식도	10
그림 3.2. (a) 제작된 PM-LPFG의 모습과 (b) 입력편광에 의존하는 PM-LPFG의 스펙트럼	12
그림 3.3. (a) 온도와 (b) 굽힘을 측정하기 위해 제안된 동시 측정 센서 시스템의 모식도	14
그림 3.4. 제안된 센서에 $1.408\text{--}2.299\text{ m}^{-1}$ 범위의 곡률이 가해질 때 (a) 0° 의 입력편광에서의 파장이동 스펙트럼과 (b) 90° 의 입력편광에서의 파장이동 스펙트럼	17
그림 3.5. 제안된 센서에 $30\text{--}90\text{ }^\circ\text{C}$ 범위의 온도 변화가 생길 때 (a) 0° 의 입력편광에서의 파장이동 스펙트럼과 (b) 90° 의 입력편광에서의 파장이동 스펙트럼	19
그림 3.6. 서로 직교하는 입력편광에 따른 (a) $1.408\text{--}2.299\text{ m}^{-1}$ 의 곡률 범위와 (b) $30\text{--}90\text{ }^\circ\text{C}$ 의 온도 범위에서 나타나는 공진 파장의 변화	22

Simultaneous Measurement of Curvature and Temperature Using Long-Period
Fiber Grating Inscribed on Polarization-Maintaining Fiber with CO₂ Laser

Jeong Sun Jae

Department of Electrical Engineering,
Interdisciplinary Program of Marine-Bio, Electrical & Mechanical Engineering,
The Graduate School, Pukyong National University

Abstract

Many optical sensors have been proposed due to advantage of optical fiber such as small size, light weight, independence of electromagnetic interference, and corrosion resistance. Optical sensors can be used to measure variation of curvature, which is an important variable in the mechanical manufacturing industry and large-scale construction industries. To do this, sensors are constructed using various types of optical fibers. Accordingly, we constructed sensor system that can measure bending and temperature simultaneously using a polarization-maintaining long period fiber grating (PM-LPG) as a sensor head with a long-period fiber grating (LPG) inscribed on polarization maintaining fiber (PMF). The PM-LPG is written using a CO₂ laser with $\sim 10.6 \mu\text{m}$, and has a grating period of $\sim 505 \mu\text{m}$ and a total length of PM-LPG of $\sim 14.65 \text{ mm}$. When bending is applied to the fabricated PM-LPG, compressive stress is applied to the LPFG and the dip of the resonant wavelength shifts. Likewise, when the changed temperature is applied to the PM-LPG, the dip of the resonant wavelength shifts due to the thermal expansion of the optical fiber. In this system, the input polarization is adjustable using the polarization controller included the sensor system, and it is possible to simultaneously measure bending and temperature using the two dips of resonant wavelengths that input polarizations are perpendicular to each other and that have the largest ER. As a result, the bending sensitivity obtained at the two polarized light state is $\sim 22.232 \text{ nm/m}^{-1}$ and $\sim 33.378 \text{ nm/m}^{-1}$, also, the temperature sensitivity is $\sim 131.7 \text{ pm/}^\circ\text{C}$ and $\sim 39 \text{ pm/}^\circ\text{C}$. Furthermore, the R^2 values obtained at the two polarized light state for bending and temperature are ~ 0.9916 , ~ 0.981 and ~ 0.9929 , ~ 0.998 , respectively.

1. 서론

최근에 작은 크기와 가벼운 무게를 가지며, 제작이 용이한 광섬유를 이용한 센서들이 제작되었다. 또한, 이 광섬유 센서는 부식에 강하고 전자기 간섭에 무관하다는 장점을 가지고 있어 광범위한 산업 및 연구 분야에 적용되어 온도, 압력, 굽힘, 진동, 장력과 같은 다양한 물리량을 측정하는데 사용될 수 있다. 광섬유 센서를 이용해 측정 가능한 물리량인 굽힘을 나타내는 단위, 곡률은 항공 우주 산업, 대규모 건축 산업, 발전소 등에서 주요하게 사용되는 매개 변수이다. 많은 광섬유 곡률 센서들은 센서 부(sensor head)가 구부러진 정도와 구부러진 방향을 측정할 수 있으며, 장 주기 광섬유 격자(long-period fiber grating; 이하 LPFG), 광자결정 광섬유(photonic crystal fiber; 이하 PCF), 광섬유의 변형 등을 통해 개발 되었다.

과거에 구부러짐을 측정할 수 있는 LPFG 기반인 다수의 광섬유 곡률 센서가 제안되었다[1]-[7]. 그러나 LPFG의 위상 정합 조건(phase matching condition)이 온도에 큰 영향을 받기 때문에 곡률과 온도의 교차 민감도의 단점을 가진다. 이 문제를 해결하기 위해 온도에 둔감한 PCF가 굽힘 측정에 사용되었지만 곡률의 변화에 대해 뛰어난 민감도를 가지지 못했다[8]-[13]. 곡률에 대한 민감도를 높이기 위해 광섬유의 코어(core)의 수를 늘리거나, 광섬유의 테이퍼링(tapering), 광섬유 코어의 어긋난 접합(core-offset) 또는 다양한 종류의 광섬유의 접합을 통해 마하-젠더 간섭계(Mach-Zehnder interferometer)를 형성한 곡률 센서들이 제안되었다. 마하-젠더 간섭계는 곡률의 변화에 대해 높은 민감도를 가지지만 온도에 대한 보상이 이루어지지 못했다. 이런 온도 의존성을 극복하기 위해 광섬유의 core-offset과 광섬유의 부풀린 구형 구조를

접합시켜 마하-젠더 간섭계를 형성한 센서를 제안하였으며 4.420-5.500 m^{-1} 의 곡률 범위에서 $-22.227 \text{ nm}/m^{-1}$ 의 곡률 민감도와 60.1-99.9 $^{\circ}C$ 의 온도 범위에서 $\sim 84.7 \text{ pm}/^{\circ}C$ 의 온도 민감도를 보였다[28]. 그러나, 광섬유 센서부의 제작 과정에서 발생한 15dB 이상의 높은 삽입 손실 (insertion loss; 이하 IL)은 센서 출력 신호의 신호 잡음비(signal noise ratio)에 악영향을 미칠 수 있다. 2017년, C자형 마이크로 테이퍼드 광섬유를 기반으로 한 마하-젠더 간섭계를 사용하여 곡률과 온도를 동시에 측정하는 센서가 제안되었다[29]. 그들은 0-0.132 m^{-1} 의 곡률 범위에서 $\sim 46.030 \text{ nm}/m^{-1}$ 의 곡률 민감도와 25.0-50.0 $^{\circ}C$ 의 온도 범위에서 34.0 $\text{pm}/^{\circ}C$ 의 온도 민감도를 보였다. 그러나, 제안된 C자형 마이크로 테이퍼드 광섬유는 수십 마이크로 미터 직경의 매우 가는 구조로 인해 횡단 응력에 매우 취약하여 좁은 곡률 범위를 초래한다. 최근에는 굽힘 또는 온도 센서로 두 개의 다중 모드 광섬유 (multi-mode fiber; 이하 MMF) 사이에 7코어 광섬유 (seven-core fiber; 이하 SCF)를 융착하여 마하-젠더 간섭계를 형성한 센서가 제안되었다[30]. 제안된 MMF-SCF-MMF 구조는 곡률에 대해 높은 민감도를 가지며 넓은 곡률 측정 범위를 가진다. 측정 가능한 곡률 범위는 0.094-0.567 m^{-1} 이었으며 $\sim 41.464 \text{ nm}/m^{-1}$ 의 뛰어난 곡률 민감도를 보인다. 온도 측정 범위와 온도 민감도는 각각 20.0-55.0 $^{\circ}C$, $\sim 59.02 \text{ pm}/^{\circ}C$ 으로 [29]에서 제시된 것보다 각각 10 $^{\circ}C$, 15.02 $\text{pm}/^{\circ}C$ 만큼씩 더 크다. 그러나 결정적으로 제안된 센서는 굽힘과 온도의 동시 측정이 불가능하였다. 더욱이, 곡률의 변화에 대한 반응의 선형성이 좋지 않으며, $\sim 12 \text{ dB}$ 의 IL을 가져 상대적으로 큰 값이기 때문에 센서 출력 신호의 SNR을 저하시킬 수 있다. 또한 인파이버(in-fiber) 마하-젠더 간섭계를 기반으로 하는 곡률 센서는 센싱 인디케이터 (sensing-indicator)로서 간섭무늬의 골(dip) 중 하나를 사용하지만 출력 간섭 스펙트럼에서 인접한

두 개의 골 사이의 간격이 좁기 때문에 곡률 측정의 범위가 제한된다.

따라서 본 논문에서는 고주파 CO₂레이저 펄스에 의해 편광 유지 장주기 광섬유 격자(polarization-maintaining long-period fiber grating; 이하 PM-LPFG)라고 불리는 PMF (Polarization-maintaining fiber)에 새겨진 LPFG를 사용하여, 온도를 동시에 측정 할 수 있는 광섬유 곡률 센서를 제안한다. 위상 정합 조건으로 인해, PM-LPFG는 입력 편광에 의존하는 공진 파장 골과 직교하는 입력 편광에 따라 두 개의 분리된 손실 스펙트럼을 갖는다. 이러한 PM-LPFG의 두 개의 공진 파장 (예컨대, λ_A 및 λ_B)에서, 코어 모드(core mode)는 곡률과 온도에 대해 다른 민감도를 갖는 두 개의 상이한 클래딩 모드(cladding mode)와 결합된다. 격자 주기와 총 길이가 각각 505 μm 와 ~14.65 mm 인 PM-LPFG는 직교하는 두 개의 입력 편광에 대한 공진 파장값 $\lambda_A = \sim 1479.98$ 및 $\lambda_B = \sim 1568.78$ nm를 갖는다. 이 PM-LPFG의 곡률 민감도는 1.408-2.299m의 곡률 범위에서 각각 ~22.232와 ~33.378 nm/m^{-1} (R^2 값: ~0.9916와 ~0.9810)으로 측정되었다. PM-LPFG의 온도 민감도는 각각 30-90 °C의 온도 범위에서 ~131.7와 ~39.0 $\text{pm}/\text{°C}$ (R^2 값: ~0.9929와 ~0.9980)로 측정되었다. 두 개의 서로 다른 공진 파장에서 PM-LPFG의 이러한 선형적인 굽힘 및 온도에 대한 응답은 PM-LPFG에 적용되는 굽힘 및 온도 변화의 동시 측정을 가능하게 한다. 넓은 범위에서 측정된 곡률 민감도 및 선형성은 충분히 높고 이는 PM-LPFG 클래딩(cladding)에 비대칭적으로 홈(groove)을 새겨진 주기적인 격자 때문이다. 실제로, 본 논문에서 제작된 PM-LPFG는 CO₂레이저를 사용해 홈이 없이 새겨진 LPFG보다 훨씬 높은 곡률 민감도를 보여준다. 특히 본 논문에서 제작된 PM-LPFG는 인-파이버 마하-젠더 간섭계에 비해 상대적으로 IL이 ~5dB 정도로 낮아 센서의 SNR 및 측정 정확도를 향상시킨다. 또한 제안된 센서는 굽힘과 온도를 동시에

측정 할 수 있고 온도 민감도를 비교 가능한 광섬유 센서 중 가장 큰 온도 측정 범위를 가진다.



2. 관련 이론

가. 장 주기 광섬유 격자 (LPFG)

LPFG는 자외선 및 적외선 레이저 또는 전기적 아크를 사용하여, 잔류 응력의 완화 또는 광섬유의 구조적 변화 및 물리적인 힘에 의한 변형으로 인해 주기적으로 형성된 격자에서 주기적인 굴절률의 변화를 가진다. 광섬유의 코어를 통해 전파되는 빛이, LPFG의 첫 번째 격자에서 변한 굴절률에 의해 클래딩으로 도파되어 다른 위상을 느끼고 기본 코어 모드와 재결합하게 된다. 따라서 LPFG 격자의 수만큼 반복되며 이 때 코어 모드와 클래딩 모드 사이의 동방향 모드 결합 (co-direction core-cladding mode coupling)의 위상 정합 조건에 의해 결정되는 공진 파장 영역에서 손실 대역 스펙트럼을 가지며, 이에 따른 LPFG의 공진 파장에 대한 식은 다음과 같다.

$$\lambda_0 = (n_{core,eff} - n_{clad,eff})\Lambda \quad (1)$$

$n_{core,eff}$ 와 $n_{clad,eff}$ 는 각각 코어와 클래딩의 유효 굴절률(effective refractive index)을 나타내고 Λ 는 격자의 주기를 나타낸다. 주어진 식에서 보는 것과 같이 LPFG에 외부 물리적인 힘이 가해지게 되면 LPFG의 주기 변화나 내부 굴절률 변화로 인한 코어와 클래딩의 유효 굴절률의 변화 때문에 공진 파장이 다른 값을 가지게 된다.

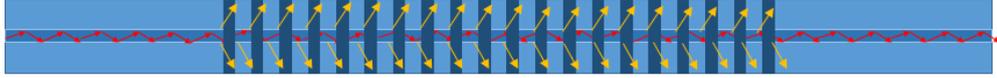


그림 2.1. LPFG가 새겨진 광섬유의 단면도와 빛의 도파 경로

나. 편광 유지 광섬유 (PMF)

코어와 클래딩의 굴절률 차이에 의해 입사된 빛이 전반사를 일으키며 진행되는 광섬유 중 일반적으로 단일모드 광섬유(single mode fiber; 이하 SMF)가 많이 사용된다. SMF에 편광이 입사되게 되면 내부의 불균질성이 불규칙해져 위상 차이가 크게 발생하여 편광이 유지되기 어렵다. PMF는 이런 SMF의 단점을 보완하기 위해 광섬유 코어에 불균질성이 크고 일정하게 작용하도록 하여 입력된 편광의 상태를 광섬유 끝단까지 유지시켜준다. 이러한 방법은 코어의 모양을 원형이 아닌 타원형으로 변화시키거나 클래딩 내부에 팽창률이 다른 요소를 넣어 스트레스 로드(stress rod)를 제작해 코어에 스트레스를 가함으로써 사용할 수 있다. PMF의 단면 모양은 그림 2.1에서 보여주며 왼쪽부터 코어의 모양이 타원형인 타원클래딩(elliptical cladding)형, 스트레스 로드(rod)의 모양에 따라 차례로 보우-타이(bow-tie)형, 판다(panda)형으로 나뉘게 된다. 응력이나 팽창으로 인해 PMF 내부의 굴절률이 바뀌게 되면서 스트레스 로드에도 영향을 미쳐 다양한 물리적 변화를 측정할 수 있다.

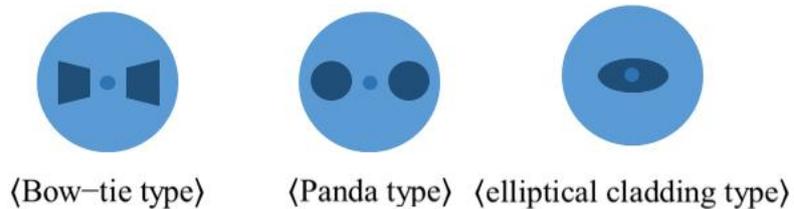


그림 2.2. 각 종류별 PMF의 단면도

3. 온도와 곡률의 동시 측정을 위해 제안된 광섬유 센서

가. PM-LPFG의 제작

그림 3.1은 CO₂레이저를 이용해 PMF에 LPFG를 새기기 위해 제작된 시스템의 구조이다. 시스템에 사용된 CO₂레이저는 최대 파워 30 W, 20 kHz의 펄스폭 변조 주파수, 10.6 μm 의 파장을 가졌다. 듀티 사이클(duty cycle)이 5.5 %가 되도록 설정한 뒤 출력된 빔(beam)이 빔 익스팬더(beam expander)를 통과해 빔의 직경이 확장되고, 확장된 빔은 2-D 스캐닝 헤드(2-D scanning head)에 의해 z축 방향으로 향하게 된다. 빔은 F- θ 렌즈(F-theta lens)를 통과하여 $\sim 68 \mu\text{m}$ 크기의 빔으로 모이며 2-D 스캐닝 헤드를 이용해 $50 \times 50 \text{ mm}^2$ 의 영역 내에서 집속되는 빔의 위치를 조정할 수 있다. 이 때 레이저의 출력은 약 2.78 W이고 F- θ 렌즈를 통과해 집속되는 빔은 약 15.294 J/mm^2 의 에너지를 가진다. 집속된 빔으로 한 쪽 끝이 광섬유 홀더(fiber holder)에 고정되어 있는 PMF (bow-tie형)에 505 μm 의 주기로 총 30개의 격자를 새겨 $\sim 14.65 \text{ mm}$ 의 길이를 가지는 PM-LPFG를 제작할 수 있었고, PM-LPFG의 측면도는 그림 3.2 (a)과 같다.

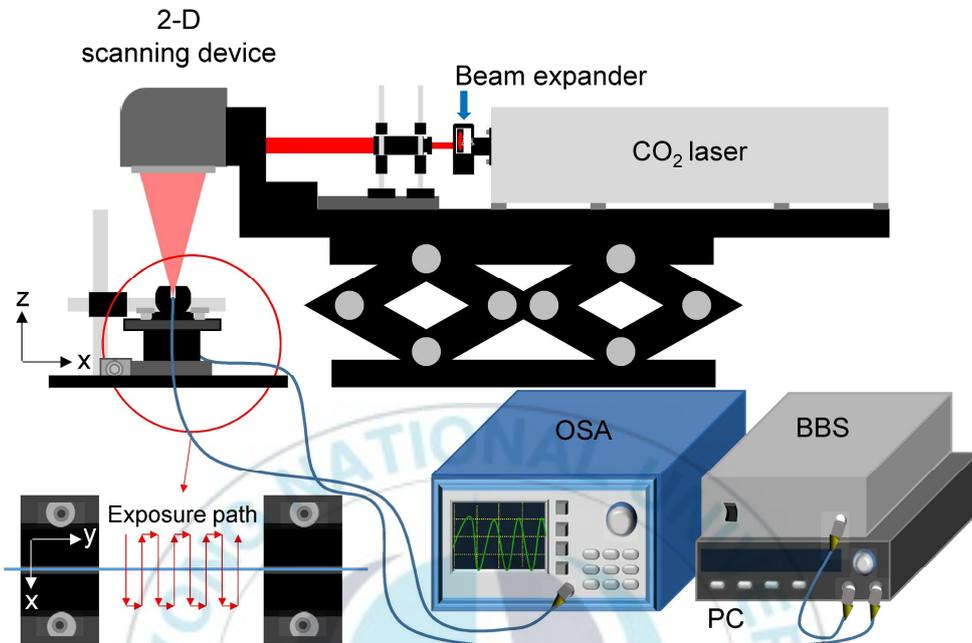


그림 3.1. 제안된 PM-LPFG 제작 시스템 모식도

광대역 광원(broad band source; 이하 BBS)에서 나온 빛이 편광 조절기(polarization controller; 이하 PC)를 통과하며 조절 가능한 입력편광으로 바뀌고, PM-LPFG를 통과한 편광은 광 스펙트럼 분석기(optical spectrum analyzer; 이하 OSA)에 그림 3.2 (b)의 출력 스펙트럼을 보여준다. 제작된 PM-LPFG의 입력편광을 조절해 스펙트럼의 공진파장 골이 가장 깊을 때와 그로부터 편광이 90°만큼 차이 날 때의 파장은 각각 1479.98 nm와 1568.78 nm이고 ~31.05 dB, ~34.21 dB의 소광비(extinction ratio)를 갖는다. 따라서 입력편광에 따라 다르게 출력되는 스펙트럼을 이용해 외부적 물리 변화의 동시 측정이 가능하게 된다.

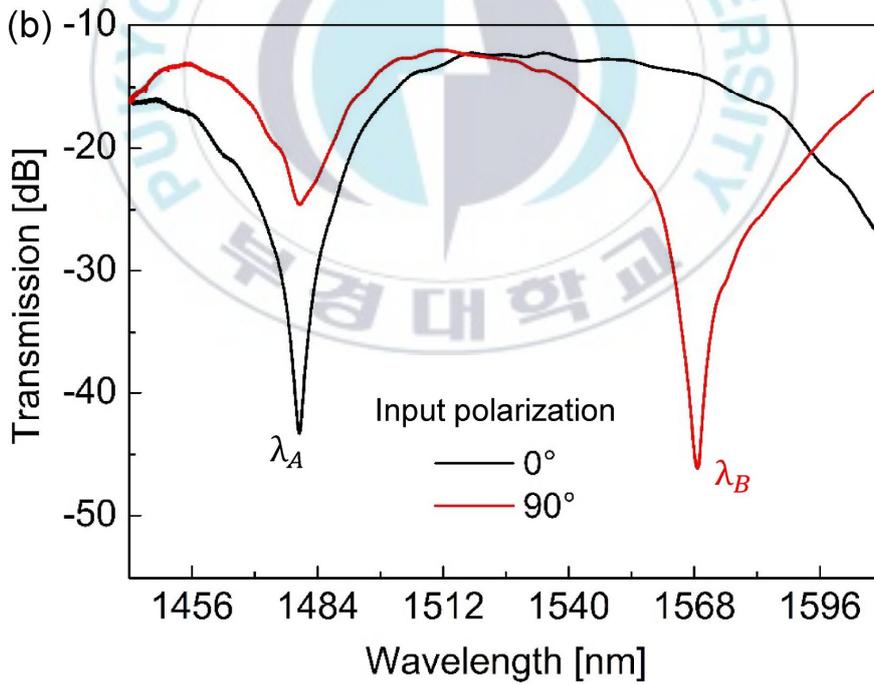


그림 3.2. (a) 제작된 PM-LPFG의 모습과 (b) 입력편광에 의존하는 PM-LPFG의 스펙트럼

나. 제안된 센서 시스템

그림 3.3은 굽힘 및 온도를 동시에 측정하도록 설계된 시스템의 개략도이다. 제안된 시스템은 BBS에서 나온 빛이 PC를 통해 센서부로 전파되는 입력편광의 상태를 바꿀 수 있도록 한다. PC는 polarizer, HWP, QWP로 구성되어 있으며, 각 요소의 값을 변화시키며 입력편광의 출력을 달리할 수 있다. 이를 통해 그림 3.2 (b)와 같은 투과 스펙트럼의 공진파장 골과 같이 가장 소광비가 큰 부분을 선택할 수 있으며, 그 편광 상태에서 polarizer의 값을 90° 만큼 바꿔 다른 파장 영역에서의 공진 파장 골을 확인할 수 있다. 이렇게 PC를 통해 조절된 입력편광은 PM-LPFG를 통해 전파되고, 외부 물리적 힘에 의한 변화의 특성은 OSA로 출력된다. 온도의 변화를 측정하기 위한 시스템은 그림 3.3 (a)와 같이 구성되며, 센서 부인 PM-LPFG는 가열판(hot plate)에 부착되고 가열판의 온도 변화에 따라 OSA에 그 특성이 나타나게 된다. 마찬가지로, 굽힘의 변화를 측정하기 위한 시스템은 그림 3.3 (b)와 같으며 x축 이동 스테이지를 이용해 굽힘을 주었다. 마주보는 두 개의 x축 스테이지들에 광섬유 홀더를 이용해 PM-LPFG를 고정시켰으며, 한 쪽 방향으로 스테이지를 이동시켜 이동량에 따른 곡률 값의 변화를 계산하고 OSA를 통해 출력 스펙트럼을 확인하였다.

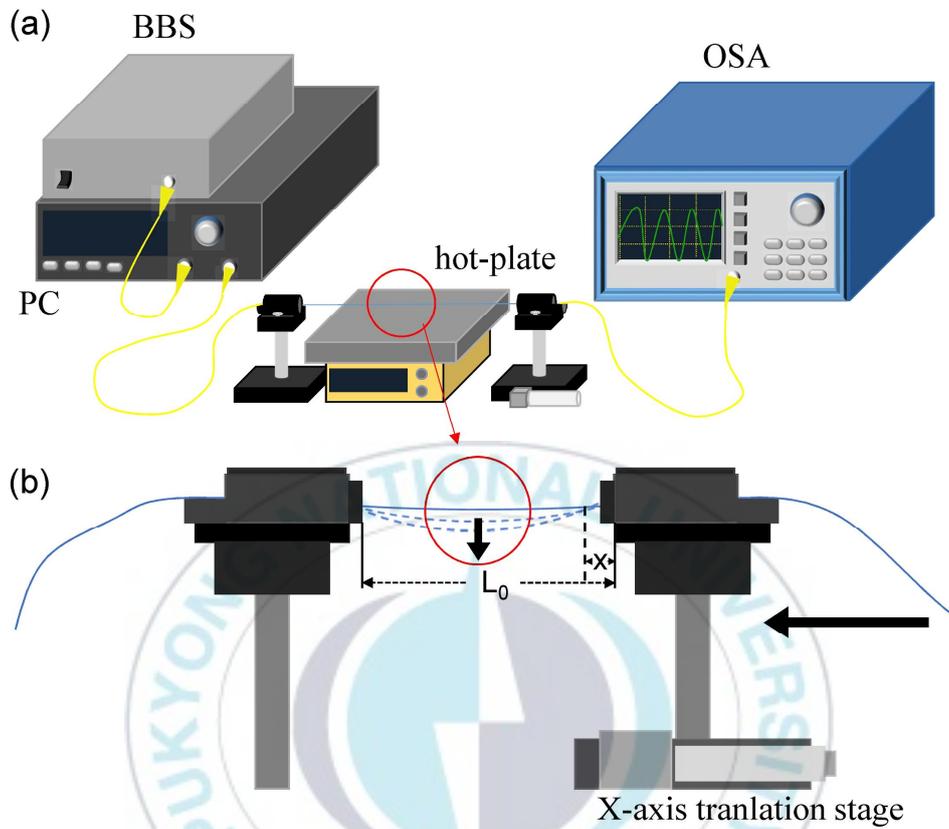


그림 3.3. (a) 온도와 (b) 굽힘을 측정하기 위해 제안된 동시 측정 센서 시스템의 모식도

다. 실험결과 및 고찰

굽힘, 온도와 같은 외부 물리적인 힘은 PM-LPFG에 압축 응력과 온도 변화를 가져 왔으며, 변화에 따라 출력되는 공진 파장 영역도 달라졌다. 먼저, 제안된 센서 시스템의 곡률에 대한 민감도를 측정하기 위해 정확한 곡률 반경의 계산이 실시되었다. 본 실험에서는 곡률을 측정하기 위해 LPFG가 새겨진 PMF의 양쪽 끝을 광섬유 홀더에 고정시키고, 광섬유 홀더가 있는 x축 이동 스테이지를 다른 한 쪽에 고정되어있는 방향(x축)으로 이동 시켰다. 양쪽 끝이 고정되어 이동한 양만큼 점점 거리가 좁혀질 때, 광섬유가 굽혀지게 되어 점점 큰 곡률을 가지게 된다. 이때, 굽힘이 가해지며 광섬유에 발생하는 압축 응력에 의한 광섬유의 곡률은 다음과 같이 표현된다.

$$C = \frac{1}{R} \approx \sqrt{\frac{24x}{L_0^3}} \quad (2)$$

여기서, R 은 구부러진 광섬유의 곡률 반경이고 x 는 x축 이동 스테이지에 의해 이동된 거리이며, L_0 는 두 개의 광섬유 홀더 사이에 고정된 광섬유가 구부러지지 않은 초기 상태의 길이이다. 여기서, 굽힘의 정도가 커짐에 따라 곡률이 더 작은 값을 갖는 것이 자연스럽지 않기 때문에, 곡률은 곡률 반경의 역수로 표현된다. 실험을 위해 x축 스테이지의 광섬유 홀더에 고정된 센서 부를 50 μm 씩 다른 한 쪽에 고정된 광섬유 홀더의 방향으로 이동시킬 때, 그림 3.4. (a)와 같이 OSA에서 장파장 이동하는 스펙트럼을 확인할 수 있다. 이렇게 x축

스테이지를 100-400 μm 의 범위만큼 이동 시켰을 때, 위에서 제시된 식 (2)로부터 계산된 곡률 범위는 1.408-2.299 m^{-1} 이었다. 계산된 곡률 범위에 따라 압축 응력이 PM-LPFG에 점점 가해질 때, 투과 스펙트럼의 공진파장의 골은 ~20.7 nm만큼 이동한다. 또한 그림 3.4. (b)와 같이, 입력 편광을 90°만큼 회전 시켰을 때, 같은 곡률 범위에서 투과 스펙트럼의 공진파장 골의 이동량은 ~29.74 nm로 측정된다. LPFG의 공진 파장을 나타내는 식 (1)에서 유도하여 굽힘에 대한 민감도는 다음 식으로 계산된다[32-33].

$$\frac{1}{\lambda_0^{(P)}} \frac{\partial \lambda_0^{(P)}}{\partial \kappa} = \frac{1}{\Delta n_{eff(P)}} \frac{\partial \Delta n_{eff(P)}}{\partial \kappa} + \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial \kappa} \quad (3)$$

다음 식은 식 (1)을 굽힘에 대한 변수 κ 로 편미분 하였으며, $\Delta n_{eff(P)}$ 는 유효 굴절률의 차이 $n_{core,eff(P)} - n_{clad,eff(P)}$ 를 나타낸다. 곡률은 제안된 센서가 50 μm 씩 이동할 때 변화되며, 굴절률의 변화와 굽힘으로 인한 주기의 변화는 공진 파장 골의 이동을 초래한다. 따라서 주어진 곡률 범위에서 입력 편광이 0°일 때와 90°일 때, 곡률에 대한 민감도는 각각 ~22.232와 ~33.378 nm/m^{-1} 로 측정되었다.

다음으로, 양면 고정 된 PMF의 센서 부를 가열판에 부착하고 온도를 10 °C씩 증가하도록 변화시켰다. 온도가 점점 증가하게 되면, 굽힘을 적용한 경우와 마찬가지로 공진 파장 골의 장파장 이동이 관찰되었지만, 온도에 대한 공진 파장의 이동량은 굽힘에 대한 공진 파장의 이동량보다 현저히 적었다. 굽힘에 대한 민감도의 계산과 마찬가지로, 식 (1)을 온도에 대한 변수 T 로 변형 시켰을 때 온도 민감도는 다음과 같이 표현된다[32-33].

$$\frac{1}{\lambda_0^{(P)}} \frac{\partial \lambda_0^{(P)}}{\partial T} = \frac{1}{\Delta n_{eff(P)}} \frac{\partial \Delta n_{eff(P)}}{\partial T} + \frac{1}{L} \frac{\partial L}{\partial T} \quad (3)$$

온도가 점차 증가하게 되면 광섬유의 고유한 열팽창 계수에 의해 내부 굴절률이 변화되고, 공진 파장의 위치가 변화함에 따라 파장이 이동하게 된다. 온도에 대한 스펙트럼은 그림 3.5. (b)에 나와 있으며 ~131.7 pm/°C와 ~39 pm/°C의 온도 민감도로 나타난다.



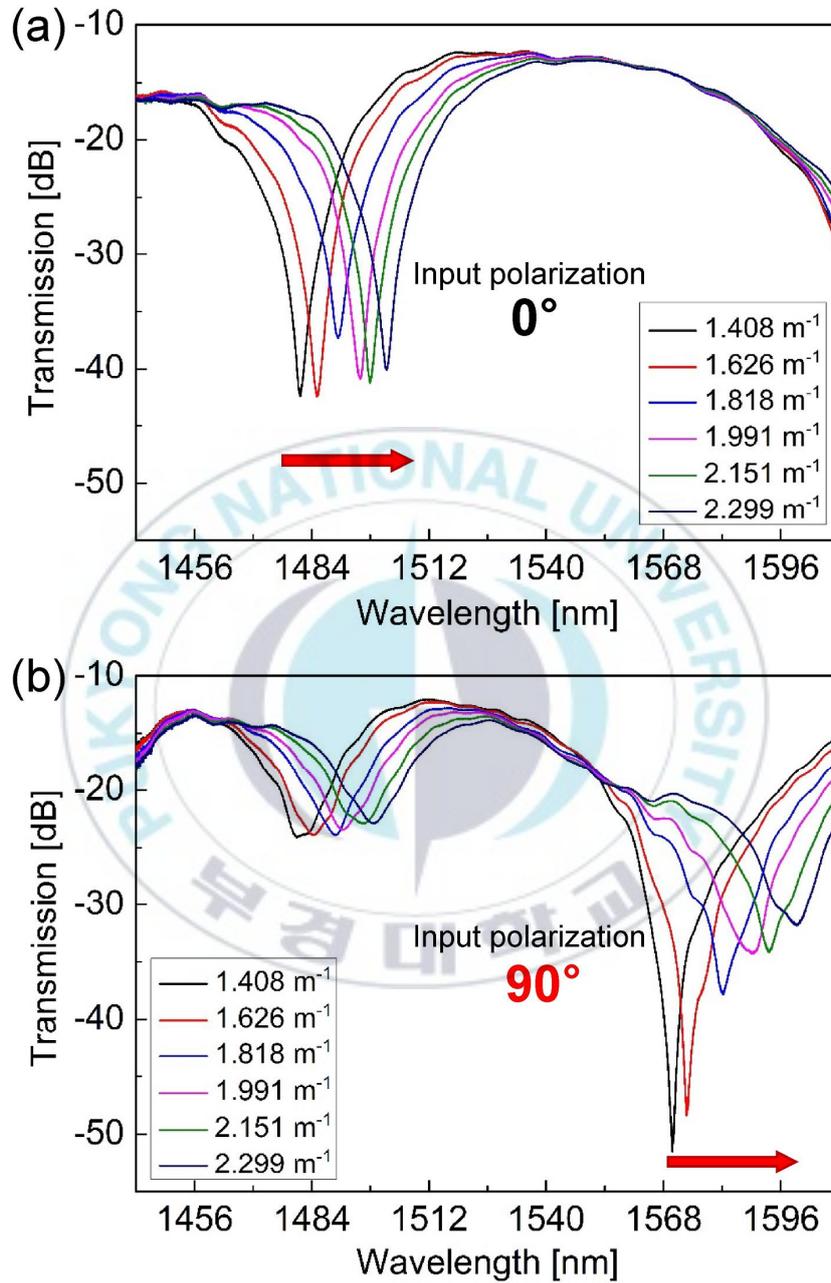


그림 3.4. 제안된 센서에 1.408-2.299 m^{-1} 범위의 곡률이 가해질 때
 (a) 0° 의 입력편광에서의 파장이동 스펙트럼과 (b) 90° 의
 입력편광에서의 파장이동 스펙트럼

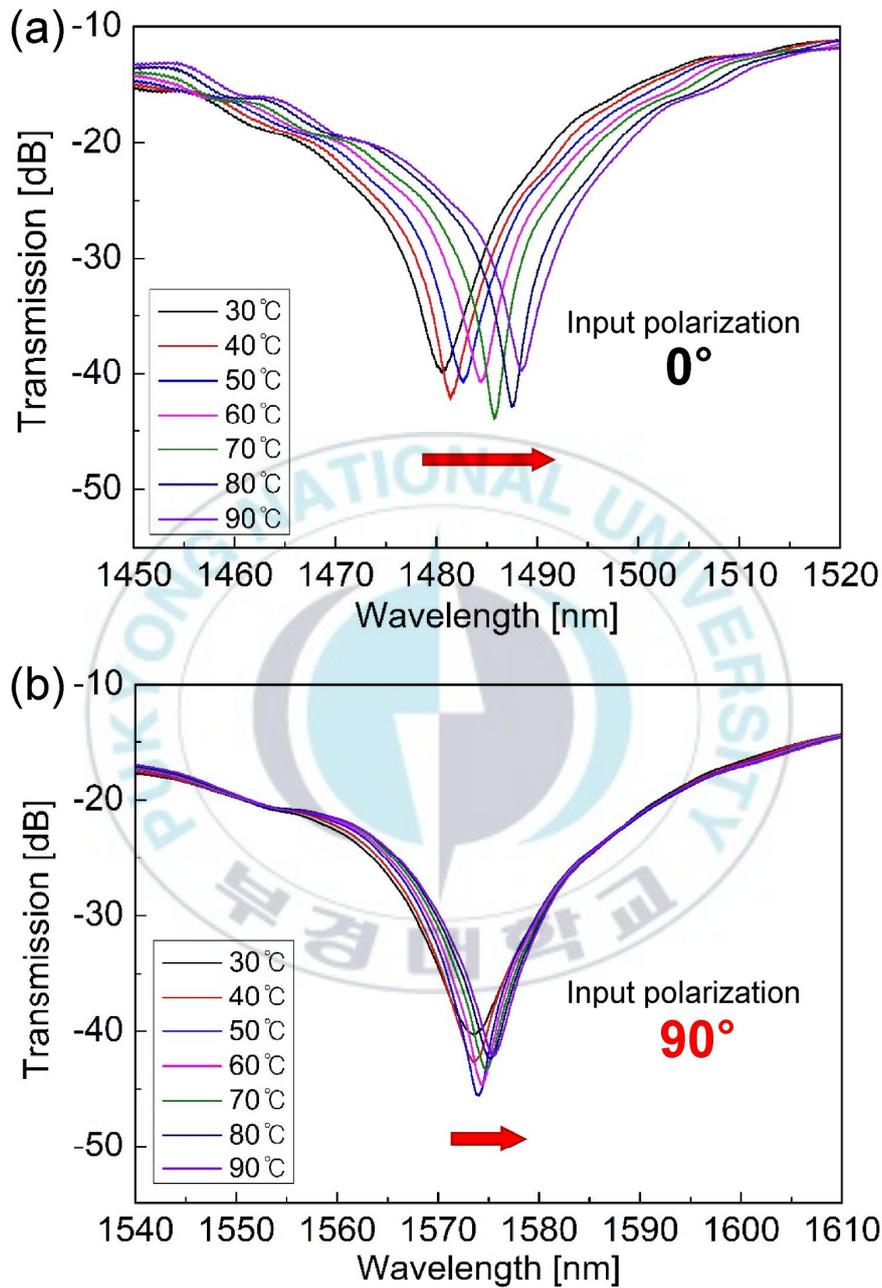


그림 3.5. 제안된 센서에 30-90 °C 범위의 온도 변화가 생길 때 (a) 0° 의 입력편광에서의 파장이동 스펙트럼과 (b) 90° 의 입력편광에서의 파장이동 스펙트럼

그림 3.6.은 두 개의 파장 영역에서 굽힘과 온도에 대한 선형성을 보여준다. 굽힘을 점차적으로 증가시킬 때 얻어지는 곡률 값에 대한 공진 파장 이동의 관계가 나타나있고, 온도가 점차적으로 증가 될 때 온도에 대한 공진 파장 이동의 관계가 나타난다. 곡률 변화에 대한 공진 파장 골의 이동의 선형성은 각각 ~0.9916과 ~0.981이었고 온도에 따른 공진 파장 골 이동의 선형성은 각각 ~0.9929과 ~0.998이었다.

입력편광에 따라 선택된 두 개의 파장 영역에서 공진 파장 골의 이동에 의해 측정된 곡률과 온도에 대한 계수를 주어진 매트릭스에 대입하여 굽힘과 온도 변화를 구별하는 것이 가능하다[34].

$$\begin{bmatrix} \Delta\kappa \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_A \\ \Delta\lambda_B \end{bmatrix} \quad (5)$$

앞선 실험에서 입력 편광이 서로 직교하는 두 편광 상태에서 얻은 굽힘에 대한 민감도와 온도에 대한 민감도를 각각 굽힘 계수 및 온도 계수로 두고 식 (5)의 변수 A, B, C, D에 각각 대입하였을 때,

$$\begin{bmatrix} \Delta\kappa \\ \Delta T \end{bmatrix} = \frac{1}{-0.131} \begin{bmatrix} 0.039 & -0.132 \\ -33.378 & 22.232 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_A \\ \Delta\lambda_B \end{bmatrix} \quad (6)$$

와 같이 유도될 수 있다. $\Delta\lambda_A$ 와 $\Delta\lambda_B$ 는 굽힘과 온도의 변화 측정을 위해 선택된 공진 파장과 그 때의 입력 편광이 90°만큼 회전했을 때의 공진 파장을 나타낸다. 유도된 다음 식 (6)을 통해 굽힘과 온도에 대한 변화량을 알 수 있으며, 두 가지 변수에 대해 구별이 가능하다.

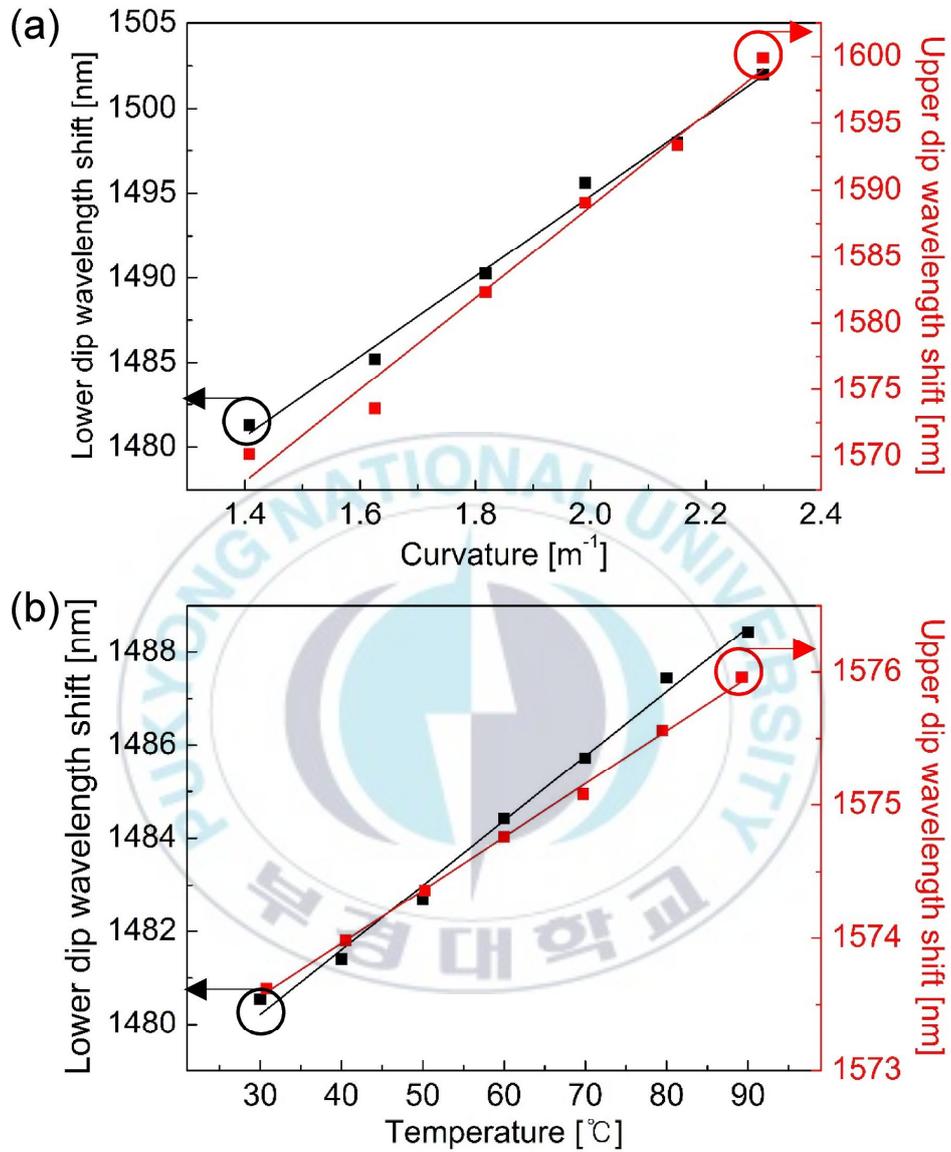


그림 3.6. 서로 직교하는 입력편광에 따른 (a) $1.408\text{-}2.299\text{ m}^{-1}$ 의 곡률 범위와 (b) $30\text{-}90\text{ }^{\circ}C$ 의 온도 범위에서 나타나는 공진 파장의 변화

4. 결론

본 논문에서는 CO₂ 레이저를 이용하여 굽힘과 온도를 동시에 측정 할 수 있는 센서 시스템을 제안한다. 센서 부를 제작하기 위해 PMF에 새긴 LPFG는 격자 주기가 505 μm 이고 격자의 총 길이는 ~ 14.65 mm이다. 굽힘과 온도의 변화가 각각 $1.408\text{--}2.299$ m^{-1} 및 $30\text{--}90$ $^{\circ}\text{C}$ 의 범위에서 적용될 때, PM-LPG의 투과 스펙트럼의 공진파장 골은 ~ 20.7 nm, ~ 7.9 nm만큼씩 이동하였다. 또한, 편광이 90° 만큼 회전 되었을 때, 상이한 파장 대역에서의 투과 스펙트럼의 공진 파장의 골은 각각 동일한 굽힘과 온도 범위에서 ~ 29.74 nm, ~ 2.34 nm만큼 이동한다. 제안된 센서의 민감도가 주어진 곡률과 온도 변화 값에 의해 계산 될 때, 곡률에 대한 민감도는 ~ 22.232 nm/m^{-1} , ~ 33.378 nm/m^{-1} 로 나타났고, 온도에 대한 민감도는 ~ 131.7 $\text{pm}/^{\circ}\text{C}$, ~ 39 $\text{pm}/^{\circ}\text{C}$ 로 나타났다. 측정된 값의 정확성을 확인하기 위해 선형성을 계산할 경우, 굽힘의 경우 ~ 0.9916 , ~ 0.981 , 온도의 경우 ~ 0.9929 , ~ 0.998 인 것으로 나타났다.

본 논문에서 제안한 센서 부인 PM-LPFG는 이전에 제안된 다른 센서들과 비교하여 비슷한 범위에서 굽힘에 대해 뛰어난 곡률 민감도를 보였다. 또한 넓은 온도 측정 범위를 가졌고 온도에 대해서도 낮은 민감도를 보였다. 다른 논문들과 비교하여 입력 편광을 조절해 다양한 파장 대역에서 물리량의 변화를 측정 할 수 있었고, 입력 편광에 따라 개별적인 측정이 가능해 마하-젠더 간섭계를 이용한 센서 시스템보다 상대적으로 측정 범위가 제한 적이지 않았다. 그리고, 굽힘에 대한 변화를 측정함에 있어 영향을 미칠 수 있는 온도 변화를 매트릭스의 계산을 통해 구별할 수 있었으며, 이를 통해 온도에 대한 보상이 가능하였다. 제안된 굽힘 및 온도 동

시측정이 가능한 PM-LPFG 센서 시스템을 이용해 항공 우주 산업, 높은 건물이나 큰 다리 같은 대규모 건축 산업, 발전소 등에서 다양하게 응용될 수 있을 것이다.



참 고 문 헌

- [1] Y. Liu, L. Zhang, J. A. R. Williams, and I. Bennion, "Optical bend sensor based on measurement of resonance mode splitting of long-period fiber grating," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 12, pp. 531-533, 2000.
- [2] Y.-J. Rao, Y.-P. Wang, Z.-L. Ran, T. Zhu, "Novel fiber-optic sensors based on long-period fiber gratings written by high-frequency CO₂ laser pulses," *J. Lightwave Technol.*, vol. 21, pp. 1320-1327, 2003.
- [3] T. Allsop, A. Gillooly, V. Mezentsev, T. Earthgrowl-Gould, R. Neal, D. J. Webb, and I. Bennion, "Bending and orientational characteristics of long period gratings written in D-shaped optical fiber," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 53, pp. 130-135, 2004.
- [4] Y. P. Wang, Y. J. Rao, "A novel long period fiber grating sensor measuring curvature and determining bend-direction simultaneously" *IEEE Sens. J.*, vol. 5, pp. 839-843, 2005.
- [5] T. Allsop, M. Dubov, A. Martinez, F. Floreani, I. Khrushchev, D. J. Webb, and I. Bennion, "Bending characteristics of fiber long-period gratings with cladding index modified by femtosecond laser," *J. Lightw. Technol.*, vol. 24, pp. 3147-3154, 2006.
- [6] J. Sun, C. C. Chan, K. M. Tan, X. Y. Dong, P. Shum, "Application of an artificial neural network for simultaneous measurement of bending curvature and temperature with long period fiber gratings," *Sens. Act. A: Phys.*, vol. 137, pp. 262-267, 2007.
- [7] Y. G. Han, G. Kim, K. Lee, S. B. Lee, C. H. Jeong, C. H. Oh, H. J. Kang, "Bending sensitivity of long-period fiber gratings inscribed in holey

- fibers depending on an axial rotation angle," *Opt. Express*, vol. 15, pp. 12866-12871, 2007.
- [8] O. Frazo, J. M. Baptista, J. L. Santos, P. Roy, "Curvature sensor using a highly birefringent photonic crystal fiber with two asymmetric hole regions in a Sagnac interferometer," *Appl. Opt.*, vol. 47, pp. 2520-2523, 2008.
- [9] H. P. Gong, C. C. Chan, P. Zu, L. H. Chen, X. Y. Dong, "Curvature measurement by using low-birefringence photonic crystal fiber based Sagnac loop," *Opt. Commun.*, vol. 283, pp. 3142-3144, 2010.
- [10] W. Shin, Y. L. Lee, B.-A. Yu, Y.-C. Noh, 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.*, vol. 283, pp. 2097-2101, 2010.
- [11] H. Zhang, B. Liu, Z. Wang, J. Luo, S. Wang, "Temperature-insensitive displacement sensor based on high-birefringence photonic crystal fiber loop mirror," *Opt. Appl.*, vol. 40, pp. 209-209, 2010.
- [12] K. J. Hwang, G. H. Kim, S. D. Lim, K. Lee, J. W. Park, S. B. Lee, "A novel birefringent photonic crystal fiber and its application to curvature measurement," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 50, pp. 032202-1-032202-4, 2011.
- [13] H. Gong, H. Song, S. Zhang, Y. Jin, X. Dong, "Curvature sensor based on hollow-core photonic crystal fiber Sagnac interferometer," *IEEE Sens. J.*, vol. 14, pp. 777-780, 2014.
- [14] G. L. Yin, S. Q. Lou, W. L. Lu, and X. Wang, "A high-sensitive fiber curvature sensor using twin core fiber-based filter," *Appl. Phys. B*, vol. 115, pp. 99-104, 2014.

- [15] L. Ma, Y. Qi, Z. Kang, S. Jian, "All-fiber strain and curvature sensor based on no-core fiber," *IEEE Sensors J.*, vol. 14, pp. 1514-1517, 2014.
- [16] G. Salceda-Delgado, A. Van Newkirk, J. E. Antonio-Lopez, A. Martinez-Rios, A. Schülzgen, and R. Amezcua Correa, "Compact fiber-optic curvature sensor based on super-mode interference in a seven-core fiber," *Opt. Lett.*, vol. 40, pp. 1468-1471, 2015.
- [17] M. Cano-Contreras et al., "All-fiber curvature sensor based on an abrupt tapered fiber and a Fabry-Pérot interferometer," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 26, pp. 2213-2216, 2014.
- [18] L. Niu, C. L. Zhao, H. P. Gong, Y. Li, S. J. Jin, "Curvature sensor based on two cascading abrupt-tapers modal interferometer in single mode fiber," *Opt. Commun.*, vol. 333, pp. 11-15, 2014.
- [19] L. Mao, P. Lu, Z. Lao, D. Liu, "In-fiber Mach-Zehnder interferometer based on multi-mode fiber and up-taper for curvature sensing," *Optik- Int. J. Light Electron Opt.*, vol. 125, pp. 5108-5111, 2014.
- [20] W. Cui, J. Si, T. Chen, X. Hou, "Compact bending sensor based on a fiber Bragg grating in an abrupt biconical taper," *Opt. Lett.*, vol. 23, pp. 11031-11036, 2015.
- [21] Y. M. Raji, H. S. Lin, S. A. Ibrahim, M. R. Mokhtar, Z. Yusoff, "Intensity-modulated abrupt tapered fiber Mach-Zehnder interferometer for the simultaneous sensing of temperature and curvature," *Opt. Laser Technol.*, vol. 86, pp. 8-13, 2016.
- [22] F. Xia, Y. Zhao, and M.-Q. Chen, "Optimization of Mach-Zehnder interferometer with cascaded up-tapers and application for curvature sensing," *Sens. Actuators A, Phys.*, vol. 263, pp. 140-146, 2017.

- [23] L. Mao, P. Lu, Z. Lao, D. Liu, J. Zhang, "Highly sensitive curvature sensor based on single-mode fiber using core-offset splicing," *Opt. Laser Technol.*, vol. 57, pp. 39-43, 2014.
- [24] Y. Qi, L. Ma, J. Sun, Z.Kang, Y.Bai, S.Jian , "Highly sensitive bending sensor based on multi mode–multi mode–core offset fiber structure," *Optics & Laser Technology*, vol. 75, pp. 52-56, 2015.
- [25] Huang et al., "Micro-bending vector sensor based on six-air-hole grapefruit microstructure fiber using lateral offset splicing," *Opt. Express.*, vol. 23, pp. 3010-3019, 2015.
- [26] H. Sun, S. Yang, X. Zhang, L. Yuan, Z. Yang, M. Hu, "Simultaneous measurement of temperature and strain or temperature and curvature based on an optical fiber Mach–Zehnder interferometer," *Opt. Commun.*, vol. 340, pp. 39-43, 2015.
- [27] Y. Zhao, L. Cai, and X.-G. Li, "Temperature-insensitive optical fiber curvature sensor based on SMF-MMF-TCSMF-MMF-SMF structure," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 66, pp. 141–147, 2017.
- [28] H. Gong, M. Xiong, Z. Qian, C. L. Zhao, X. Dong, "Simultaneous measurement of curvature and temperature based on Mach–Zehnder interferometer comprising core-offset and spherical-shape structures," *IEEE Photon. J.*, vol. 8, 2015.
- [29] H. Luo, L. Su, J. Zhang, W. Yuan, S. Liu, Y. Wang, C. Wang, and X. Wang, "C-shape microfiber taper interferometer for simultaneous measurement of curvature and temperature," *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 145, pp. 181-187, 2017.

- [30] Q. Wang, and Y. Liu, "Optical fiber curvature sensor based on MMF-SCF-MMF structure." *Optical Fiber Technology*, vol. 43, pp. 1-5, 2018.
- [31] A. M. Vengsarkar, P. J. Lemaire, J. B. Judkins, V. Bhatia, T. Erdogan, J. E. Sipe, "Long-period fiber gratings as band-rejection filters" *J. Lightwave Technol.*, vol. 14, pp. 58-65, 1996.
- [32] V. Bhatia, "Applications of long-period gratings to single and multi-parameter sensing," *Opt. Express*, vol. 4, pp. 457-466, 1999.
- [33] R. Ranjan, F. Esposito, S. Campopiano, A. Iadicicco, "Sensing Characteristics of Arc-Induced Long Period Gratings in Polarization-Maintaining Panda Fiber," *IEEE Sensors Journal*, vol. 17.21, pp. 6953-6959, 2017.
- [34] Y. Zhou, W. Zhou, C. C. Chan, W.C.Wong, L. Y. Shao, J. Cheng, X. Dong, "Simultaneous measurement of curvature and temperature based on PCF-based interferometer and fiber Bragg grating," *Opt. Commun.*, vol. 284, pp. 5669-5672, 2011.