



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2022-0102916
(43) 공개일자 2022년07월21일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01K 11/32 (2021.01) G01D 21/02 (2006.01)
G01D 5/353 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G01K 11/32 (2021.01)
G01D 21/02 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2021-0005420
(22) 출원일자 2021년01월14일
심사청구일자 2021년01월14일

(71) 출원인
부경대학교 산학협력단
부산광역시 남구 용소로 45, 부경대학교내 (대연동)
(72) 발명자
이용욱
부산광역시 남구 분포로 113, 220동 2502호(용호동, 엘지메트로시티)
(74) 대리인
김정수

전체 청구항 수 : 총 9 항

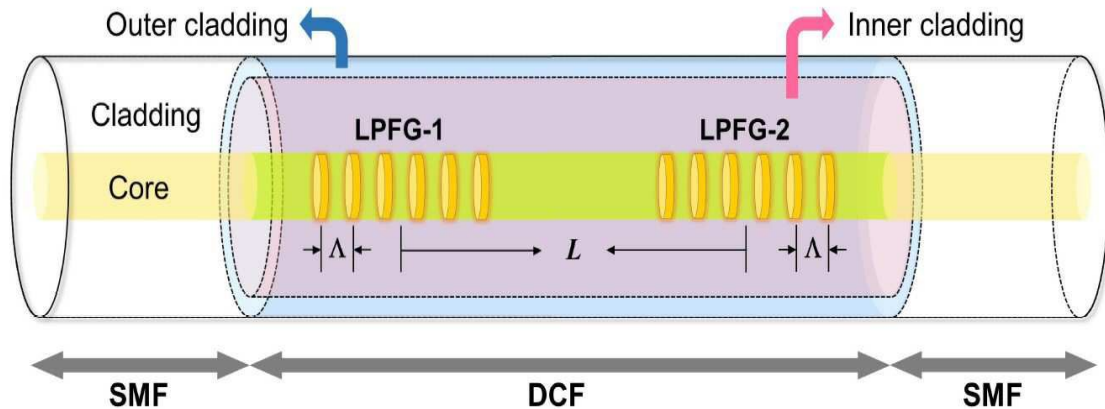
(54) 발명의 명칭 장주기 광섬유 격자 기반 이중 클래딩 광섬유 마하젠더 간섭계 및 이를 이용한 스트레인에 무관한 굽힘 및 온도 동시 측정장치 및 방법

(57) 요약

본 발명은 광섬유를 이용하여 굽힘 및 온도를 동시에 측정하기 위한 장치 및 방법에 관한 것으로, 본 발명에 따르면, 온도와 굽힘 사이의 교차 민감도로 인해 센서의 감지성능이 제한되며, 특히, 센서부에 굽힘이 인가될 때 스트레인(strain)이 동시에 가해지는 것에 의해 측정결과가 부정확해지는 한계가 있었던 종래 기술의 광섬유 브

(뒷면에 계속)

대표도 - 도1



래그 격자(FBG) 및 장주기 광섬유 격자(LPFG) 기반 측정장치 및 방법들의 문제점을 해결하기 위해, 이중 클래딩 광섬유(DCF)에 일정한 주기로 이산화탄소(CO_2) 레이저 펄스를 조사하여 DCF의 코어 굴절률을 주기적으로 변조시켜 제작되는 LPFG 2개를 일정한 간격을 두고 직렬로 연결하여 구성됨으로써, 단일 센서부를 이용하여 굽힘과 온도를 동시에 측정할 수 있는 동시에, 측정 중 센서부에 스트레인이 인가되더라도 스트레인에 무관하게 동시측정을 수행할 수 있도록 구성되는 장주기 광섬유 격자(LPFG) 기반 이중 클래딩 광섬유(DCF) 마하젠더 간섭계(MZI) 및 이를 이용한 스트레인에 무관한 굽힘 및 온도 동시 측정장치 및 방법이 제공된다.

(52) CPC특허분류

G01D 5/353 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1345312845
과제번호	2019R1I1A3A01046232
부처명	교육부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	지역대학우수과학자지원사업
연구과제명	초고대비 특수 광섬유 격자 저단가 제작 및 격자 기반 다물리량 측정 기법 개발
기 여 율	1/1
과제수행기관명	부경대학교
연구기간	2020.03.01 ~ 2021.02.28

명세서

청구범위

청구항 1

센서부에 인가되는 스트레인(strain)에 무관하게 굽힘과 온도를 동시에 측정할 수 있도록 구성되는 장주기 광섬유 격자(Long-Period Fiber Grating ; LPFG) 기반 이중 클래딩 광섬유(Double-Clad Fiber ; DCF) 마하젠더 간섭계(Mach-Zehnder interferometer ; MZI)에 있어서,

상기 이중 클래딩 광섬유(DCF)의 코어(core)에 미리 정해진 일정 간격을 두고 직렬로 연결된 2개의 장주기 광섬유 격자(LPFG)를 포함하여 구성되는 것을 특징으로 하는 장주기 광섬유 격자(LPFG) 기반 이중 클래딩 광섬유(DCF) 마하젠더 간섭계(MZI).

청구항 2

제 1항에 있어서,

상기 LPFG는,

상기 DCF에 미리 정해진 일정 주기로 이산화탄소(CO₂) 레이저 펄스를 조사(illumination)하여 상기 DCF의 코어(core) 굴절률을 주기적으로 변조(modulation)시키는 것에 의해 각각 형성되는 것을 특징으로 하는 장주기 광섬유 격자(LPFG) 기반 이중 클래딩 광섬유(DCF) 마하젠더 간섭계(MZI).

청구항 3

제 2항에 있어서,

상기 장주기 광섬유 격자(LPFG) 기반 이중 클래딩 광섬유(DCF) 마하젠더 간섭계(MZI)는,

상기 DCF MZI의 투과 스펙트럼에서 클래딩 모드 차수(cladding-mode order)가 서로 다른 두 골(dip)을 각각 굽힘과 온도의 측정을 위한 센서 표지자(indicator dip)로 선택하고,

상기 센서 표지자의 굽힘 및 온도에 의한 파장 이동량을 측정하는 것에 의해 굽힘과 온도를 동시에 측정할 수 있도록 구성되는 것을 특징으로 하는 장주기 광섬유 격자(LPFG) 기반 이중 클래딩 광섬유(DCF) 마하젠더 간섭계(MZI).

청구항 4

제 3항에 있어서,

상기 장주기 광섬유 격자(LPFG) 기반 이중 클래딩 광섬유(DCF) 마하젠더 간섭계(MZI)는,

상기 DCF의 내부클래딩(inner cladding) 지름이 미리 정해진 기준보다 크게 형성되는 것에 의해 측정 중 스트레인(strain)이 인가되더라도 스트레인에 무관하게 굽힘과 온도의 동시측정이 가능하도록 구성되는 것을 특징으로 하는 장주기 광섬유 격자(LPFG) 기반 이중 클래딩 광섬유(DCF) 마하젠더 간섭계(MZI).

청구항 5

제 4항에 있어서,

상기 장주기 광섬유 격자(LPFG) 기반 이중 클래딩 광섬유(DCF) 마하젠더 간섭계(MZI)는,

상기 DCF의 내부클래딩 지름이 외부 클래딩(outer cladding) 지름의 80% 이상으로 형성되는 것을 특징으로 하는 장주기 광섬유 격자(LPGF) 기반 이중 클래딩 광섬유(DCF) 마하젠더 간섭계(MZI).

청구항 6

제 5항에 있어서,

상기 장주기 광섬유 격자(LPGF) 기반 이중 클래딩 광섬유(DCF) 마하젠더 간섭계(MZI)는,

상기 DCF의 내부클래딩(inner cladding) 지름이 100 μ m 이상으로 형성되는 것을 특징으로 하는 장주기 광섬유 격자(LPGF) 기반 이중 클래딩 광섬유(DCF) 마하젠더 간섭계(MZI).

청구항 7

제 6항에 있어서,

상기 장주기 광섬유 격자(LPGF) 기반 이중 클래딩 광섬유(DCF) 마하젠더 간섭계(MZI)는,

상기 DCF의 코어에 상기 장주기 광섬유 격자(LPGF)를 3개 이상 포함하여 구성되는 것을 특징으로 하는 장주기 광섬유 격자(LPGF) 기반 이중 클래딩 광섬유(DCF) 마하젠더 간섭계(MZI).

청구항 8

센서부에 인가되는 스트레인(strain)에 무관하게 굽힘 및 온도를 동시에 측정 가능하도록 구성되는 굽힘 및 온도 동시 측정장치에 있어서,

상기 센서부는,

청구항 1항 내지 청구항 7항 중 어느 한 항에 기재된 장주기 광섬유 격자(LPGF) 기반 이중 클래딩 광섬유(DCF) 마하젠더 간섭계(MZI)를 포함하여 구성되는 것을 특징으로 하는 굽힘 및 온도 동시 측정장치.

청구항 9

센서부에 인가되는 스트레인(strain)에 무관하게 굽힘 및 온도를 동시에 측정 가능하도록 구성되는 굽힘 및 온도 동시 측정방법에 있어서,

청구항 1항 내지 청구항 7항 중 어느 한 항에 기재된 장주기 광섬유 격자(LPGF) 기반 이중 클래딩 광섬유(DCF) 마하젠더 간섭계(MZI)를 이용하여 상기 센서부를 구현하는 단계; 및

상기 센서부를 통하여 굽힘 및 온도의 동시측정을 수행하는 단계를 포함하여 구성되는 것을 특징으로 하는 굽힘 및 온도 동시 측정방법.

발명의 설명

기술 분야

본 발명은 광섬유(optical fiber)를 이용하여 굽힘(bending) 및 온도(temperature)를 동시에 측정하기 위한 장치 및 방법에 관한 것으로, 더 상세하게는, 광섬유 브래그 격자(Fiber Bragg Grating ; FBG) 및 장주기 광섬유 격자(Long-Period Fiber Grating ; LPGF) 등을 이용하여 특정한 물리량을 측정하는 기존의 광섬유 격자 기반 센서들은 온도와 굽힘 사이의 교차 민감도로 인해 센서의 감지능력이 제한되며, 특히, 센서부에 굽힘이 인가될 때 스트레인(strain)이 동시에 가해지는 것에 의해 측정결과가 부정확해지는 한계가 있었던 종래 기술의 광섬유 격자 기반 측정장치 및 방법들의 문제점을 해결하기 위해, 센서부에 인가되는 굽힘과 온도를 동시에 측정할 수 있는 동시에, 측정 중 센서부에 스트레인이 인가되더라도 스트레인에 무관하게 동시측정을 수행할 수 있도록 구성

[0001]

되는 장주기 광섬유 격자(LPFG) 기반 이중 클래딩 광섬유(Double-Clad Fiber ; DCF) 마하젠더 간섭계(Mach-Zehnder interferometer ; MZI) 및 이를 이용한 스트레인에 무관한 굽힘 및 온도 동시 측정장치 및 방법에 관한 것이다.

[0003] 또한, 본 발명은, 상기한 바와 같이 측정 중 센서부에 스트레인이 인가되더라도 스트레인에 무관하게 굽힘 및 온도를 동시에 측정할 수 있도록 하기 위해, 이중 클래딩 광섬유(DCF)에 일정한 주기로 이산화탄소(CO_2) 레이저 펄스를 조사(illumination)하여 DCF의 코어(core) 굴절률을 주기적으로 변조(modulation)시켜 제작되는 LPFG 2개를 일정한 간격을 두고 직렬로 연결하여 구성됨으로써, 복수의 센서부를 사용할 필요 없이 단일 센서부를 이용하여 두 가지 물리량의 동시측정이 가능하고, 기존의 FBG에 비해 제작공정의 편의성 향상 및 제작비용 절감이 가능하며, 이산화탄소 레이저를 사용함으로써 마스크 없이 제작이 가능하여 저단가 LPFG 제작이 가능한 데 더하여, 굽힘이 인가될 때 인장/압축 스트레인이 인가되더라도 LPFG의 스펙트럼에 변화가 없으므로 굽힘 및 온도 동시측정의 정확도를 향상시킬 수 있도록 구성되는 장주기 광섬유 격자(LPFG) 기반 이중 클래딩 광섬유(DCF) 마하젠더 간섭계(MZI) 및 이를 이용한 스트레인에 무관한 굽힘 및 온도 동시 측정장치 및 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0005] 최근, 광섬유를 이용하여 특정한 물리량을 측정하는 광섬유 센서가 상용화되어 다양한 분야에 걸쳐 많이 사용되고 있다.

[0007] 더 상세하게는, 광섬유 센서를 이용하여 물리량을 측정하는 원리는, 광섬유를 통해 전파되는 빛이 외부 물리량 변화에 의해 그 세기(intensity), 파장, 위상(phase), 편광(polarization) 등의 변화를 겪게 되면 이를 광전변환기(optoelectronic transducer) 등을 통해 전기신호로 바꾸어 광섬유에 인가된 외부 물리량을 분석하는 것에 의해 특정 물리량을 측정하는 것이다.

[0009] 또한, 이러한 광섬유 센서의 대표적인 예로 광섬유 격자 기반 센서가 있으며, 이는 광섬유에서 실제로 빛이 전파되는 코어 영역에 주기적인 굴절률 변화를 주어 격자를 형성하면, 외부의 물리량 변화에 따라 격자 부분의 굴절률이나 격자 주기가 변하여 광섬유 격자를 통과하는 빛의 특성도 변화하게 되는 원리를 이용한 것이다.

[0011] 여기서, 상기한 바와 같이 광섬유를 이용하여 특정 물리량을 측정하기 위한 측정장치 및 방법에 관한 종래 기술의 예로는, 예를 들면, 한국 공개특허공보 제10-2010-0095252호에 제시된 바와 같은 "마하젠더 간섭계형 광섬유, 그의 제조방법 및 이를 포함하는 센서"가 있다.

[0013] 더 상세하게는, 상기한 한국 공개특허공보 제10-2010-0095252호는, 코어부 및 코어부를 둘러싸는 클래딩부를 포함하는 광섬유에 있어서, 광섬유로 입사되는 광선을 분할하여 위상차를 가지는 두 개 이상의 광경로를 생성할 수 있는 공동부를 내부에 포함하도록 구성됨으로써, 단일 가닥에 기반하면서도 온도, 스트레인 및 가속 등의 물리량 변화에 민감한 마하젠더 간섭특성을 나타내는 광섬유를 제공할 수 있으므로 각종 물리량 변화를 효율적으로 감지할 수 있는 동시에, 간단한 공정 및 낮은 비용으로 제작 가능한 마하젠더 간섭계형 광섬유, 그의 제조방법 및 이를 포함하는 센서에 관한 것이다.

[0015] 아울러, 상기한 바와 같이 광섬유를 이용하여 특정 물리량을 측정하기 위한 측정장치 및 방법에 관한 종래 기술의 다른 예로는, 예를 들면, 한국등록특허 제10-0367297호에 제시된 바와 같은 "광섬유 패브리페로(Fabry-Perot) 간섭계형 온도 측정 장치"가 있다.

[0017] 더 상세하게는, 상기한 한국등록특허 제10-0367297호는, 측정 대상물의 온도변화에 따른 광위상 변화를 상호 차

등적으로 일으키는 주센서 및 보조센서를 갖춘 센싱수단과, 주센서 및 보조센서로 변조된 광이 입사되고 주센서 및 보조센서에서의 반사광을 각각 전기신호로 변환하여 출력하는 광학수단 및 광학수단으로부터의 각 전기신호를 위상으로 변환하고 그 위상값을 근거로 측정 대상물의 온도를 산출하는 신호처리수단을 포함하여, 측정대상물의 온도변화에 상응하는 광위상의 변화를 검출할 때 주센서의 위상변화분이 소속하는 주기의 위치에 대한 정보를 상대적으로 주기가 수십배 내지 수백배 느린 보조센서로부터 받아들여 주센서의 정밀도를 안정적으로 유지하도록 구성됨으로써, 주센서용 고정도 광섬유 간섭계형 온도센서의 정밀도를 그대로 유지하면서 적용영역을 확장시킬 수 있도록 구성되는 광섬유 패브리페로(Fabry-Perot) 간섭계형 온도측정장치에 관한 것이다.

[0019] 상기한 바와 같이, 종래, 특정한 물리량을 측정하기 위해 광섬유 센서를 이용하는 다양한 측정장치 및 방법들이 제시된 바 있으나, 상기한 바와 같은 종래 기술의 광섬유 기반 측정장치 및 방법들은 다음과 같은 문제가 있다.

[0021] 더 상세하게는, 광섬유 센서를 구성하는 광섬유 격자의 대표적인 예로서 일반 단일 모드 광섬유(Single Mode Fiber ; SMF)의 코어에 $1\mu\text{m}$ 이하의 주기로 굴절률 변화를 주어 제작되는 광섬유 브래그 격자(Fiber Bragg Grating ; FBG)가 있으며, 이러한 FBG는 특정한 공진 파장에 해당하는 빛을 통과시키지 않고 반사시키는 특성을 가지고 있고, 이러한 공진 파장은 광섬유 코어의 유효 굴절률과 격자의 주기에 의해 결정된다.

[0023] 따라서 FBG에 외부 물리량이 인가되어 광섬유 코어의 유효 굴절률 또는 격자의 주기가 변화되면 FBG의 공진 파장에 천이(shift)가 일어나며, 이를 여러 가지 복조 방식을 통해 측정하면 FBG에 인가된 물리량 변화를 계산할 수 있다.

[0025] 아울러, 상기한 FBG 이외에도, FBG에 비해 훨씬 큰 격자 주기를 가지는 장주기 광섬유 격자(Long-Period Fiber Grating ; LPFG)가 FBG와 함께 꾸준히 연구되어 광통신 및 광센서 분야에서 중요한 광 수동소자로 많은 관심을 받고 있다.

[0027] 이러한 LPFG는 광섬유 코어에 $100 \sim 1000\mu\text{m}$ 범위의 주기로 굴절률을 주기적으로 변조하여 제작될 수 있으며, 격자 주기, 격자 강도 및 위상 천이와 같은 격자의 매개변수(parameter)를 변경하여 원하는 민감도와 투과(transmission) 성능을 달성할 수 있는 유연성을 가지고 있고, UV 레이저 노출(exposure), 전기 아크(arc) 방전 및 이산화탄소 레이저 방사(irradiation) 등의 방법들을 통해 제작이 가능하다.

[0029] 더욱이, LPFG는 전자기 간섭(electromagnetic interference) 내성, 절연성, 방수성, 경량, 다중화 기능 및 빠른 응답 등의 장점을 가짐으로 인해 다양한 격자 조건에서 제작된 LPFG들이 온도, 굽힘, 스트레인(길이 방향 장력), 비틀림(torsion/twist) 및 굴절률과 같은 기계적 및 물리적 변수들을 측정하기 위한 센서부로 사용되어 왔다.

[0031] 특히, 이러한 측정 변수들 중 굽힘은 필수적이고 핵심적인 측정변수 중의 하나로, 광섬유 굽힘 센서는 자율주행, 항공우주, 건축 및 토목, 풍력 및 수력 발전 등과 같은 여러 응용 분야에서 구조물 안전진단에 유용하게 활용될 수 있다.

[0033] 그러나 FBG 뿐만 아니라 LPFG 기반 센서에서도 온도와 굽힘 사이의 교차 민감도가 센서의 감지성능을 제한할 수 있는 문제점이 있으므로, 정확한 굽힘 측정을 위해서는 센서의 온도 교차 의존성이 반드시 해결되어야 하며, 이러한 LPFG의 온도 교차 의존성 문제를 해결하기 위해 현재까지 스트레인과 온도, 비틀림과 온도 그리고 굴절률과 온도와 같은 변수를 동시 측정하는 연구들이 수행되어 왔고, 특히, 센서부에 굽힘이 인가될 때 스트레인이 동시에 가해지는 상황이 많이 발생하기 때문에 굽힘 센서의 경우 굽힘 인가 시 수반되는 스트레인에 의한 영향을 최소화하는 것이 요구된다.

[0035] 즉, 상기한 바와 같이, 광섬유 브래그 격자(FBG)나 장주기 광섬유 격자(LPFG) 등을 이용하여 특정한 물리량을 측정하는 종래 기술들의 광섬유 격자 기반 측정장치 및 방법들은 온도와 굽힘 사이의 교차 민감도로 인해 센서의 감지성능이 제한되는 문제가 있으며, 일반적으로 하나의 센서로 하나의 물리량만이 측정 가능한 것이 대부분으로 복수의 물리량을 측정하기 위하여는 그만큼 센서의 수를 늘려야 하는 문제가 있었다.

[0037] 또한, 상기한 FBG나 LPFG 등과 같은 종래 기술의 광섬유 격자 기반 측정장치 및 방법들은, 특히, 센서부에 굽힘이 인가될 때 스트레인(strain)이 동시에 가해지는 것에 의해 측정결과가 부정확해지는 문제도 있었다.

[0039] 이에, 상기한 바와 같은 종래 기술의 광섬유 격자 기반 측정장치 및 방법들의 문제점을 해결하기 위하여는, 예를 들면, 굽힘 및 온도와 같이, 단일의 센서로 센서부에 인가되는 복수의 물리량을 동시에 측정할 수 있는 동시에, 측정 중에 센서부에 스트레인이 인가되더라도 스트레인에 무관하게 동시측정을 수행할 수 있도록 구성되는 새로운 구성의 광섬유 격자 기반 굽힘 및 온도 동시 측정장치 및 방법을 제시하는 것이 바람직하나, 아직까지 그러한 요구를 모두 만족시키는 장치나 방법은 제시되지 못하고 있는 실정이다.

선행기술문헌

특허문헌

- [0041] (특허문헌 0001) 한국 공개특허공보 제10-2010-0095252호 (2010.08.30.)
(특허문헌 0002) 한국 등록특허공보 제10-0367297호 (2002.12.23.)

발명의 내용

해결하려는 과제

[0042] 본 발명은 상기한 바와 같은 종래 기술의 문제점을 해결하고자 하는 것으로, 따라서 본 발명의 목적은, 온도와 굽힘 사이의 교차 민감도로 인해 감지성능이 제한되고, 특히, 센서부에 굽힘이 인가될 때 스트레인(strain)이 동시에 가해지는 것에 의해 측정결과가 부정확해지는 한계가 있었던 종래 기술의 광섬유 격자 기반 측정장치 및 방법들의 문제점을 해결하기 위해, 센서부에 인가되는 굽힘과 온도를 동시에 측정할 수 있는 동시에, 측정 중 센서부에 스트레인이 인가되더라도 스트레인에 무관하게 동시측정을 수행할 수 있도록 구성되는 장주기 광섬유 격자(LPFG) 기반 이중 클래딩 광섬유(DCF) 마하젠더 간섭계(MZI) 및 이를 이용한 스트레인에 무관한 굽힘 및 온도 동시 측정장치 및 방법을 제공하고자 하는 것이다.

[0044] 또한, 본 발명의 다른 목적은, 상기한 바와 같이 측정 중 센서부에 스트레인이 인가되더라도 스트레인에 무관하게 굽힘과 온도를 동시에 측정할 수 있도록 하기 위해, 이중 클래딩 광섬유(DCF)에 일정한 주기로 이산화탄소(CO₂) 레이저 펄스를 조사하여 DCF의 코어(core) 굴절률을 주기적으로 변조시켜 제작되는 LPFG 2개를 일정한 간격을 두고 직렬로 연결하여 구성됨으로써, 복수의 센서부를 사용할 필요 없이 단일 센서부를 이용하여 두 가지 물리량의 동시측정이 가능하고, 기존의 FBG에 비해 제작공정의 편의성 향상 및 제작비용 절감이 가능하며, 이산화탄소 레이저를 사용함으로써 마스크 없이 제작이 가능하여 저단가 LPFG 제작이 가능한 데 더하여, 굽힘이 인가될 때 인장/압축 스트레인이 인가되더라도 LPFG의 스펙트럼에 변화가 없으므로 굽힘 및 온도 동시측정의 정확도를 향상시킬 수 있도록 구성되는 장주기 광섬유 격자(LPFG) 기반 이중 클래딩 광섬유(DCF) 마하젠더 간섭계(MZI) 및 이를 이용한 스트레인에 무관한 굽힘 및 온도 동시 측정장치 및 방법을 제공하고자 하는 것이다.

과제의 해결 수단

- [0046] 상기한 바와 같은 목적을 달성하기 위해, 본 발명에 따르면, 센서부에 인가되는 스트레인(strain)에 무관하게 굽힘과 온도를 동시에 측정할 수 있도록 구성되는 장주기 광섬유 격자(Long-Period Fiber Grating ; LPFG) 기반 이중 클래딩 광섬유(Double-Clad Fiber ; DCF) 마하젠더 간섭계(Mach-Zehnder interferometer ; MZI)에 있어서, 상기 이중 클래딩 광섬유(DCF)의 코어(core)에 미리 정해진 일정 간격을 두고 직렬로 연결된 2개의 장주기 광섬유 격자(LPFG)를 포함하여 구성되는 것을 특징으로 하는 장주기 광섬유 격자(LPFG) 기반 이중 클래딩 광섬유(DCF) 마하젠더 간섭계(MZI)가 제공된다.
- [0048] 여기서, 상기 LPFG는, 상기 DCF에 미리 정해진 일정 주기로 이산화탄소(CO₂) 레이저 펄스를 조사(illumination)하여 상기 DCF의 코어(core) 굴절률을 주기적으로 변조(modulation)시키는 것에 의해 각각 형성되는 것을 특징으로 한다.
- [0050] 또한, 상기 장주기 광섬유 격자(LPFG) 기반 이중 클래딩 광섬유(DCF) 마하젠더 간섭계(MZI)는, 상기 DCF MZI의 투과 스펙트럼에서 클래딩 모드 차수(cladding-mode order)가 서로 다른 두 골(dip)을 각각 굽힘과 온도의 측정을 위한 센서 표지자(indicator dip)로 선택하고, 상기 센서 표지자의 굽힘 및 온도에 의한 파장 이동량을 측정하는 것에 의해 굽힘과 온도를 동시에 측정할 수 있도록 구성되는 것을 특징으로 한다.
- [0052] 아울러, 상기 장주기 광섬유 격자(LPFG) 기반 이중 클래딩 광섬유(DCF) 마하젠더 간섭계(MZI)는, 상기 DCF의 내부클래딩(inner cladding) 지름이 미리 정해진 기준보다 크게 형성되는 것에 의해 측정 중 스트레인(strain)이 인가되더라도 스트레인에 무관하게 굽힘과 온도의 동시측정이 가능하도록 구성되는 것을 특징으로 한다.
- [0054] 여기서, 상기 장주기 광섬유 격자(LPFG) 기반 이중 클래딩 광섬유(DCF) 마하젠더 간섭계(MZI)는, 상기 DCF의 내부클래딩 지름이 외부 클래딩(outer cladding) 지름의 80% 이상으로 형성되는 것을 특징으로 한다.
- [0056] 또는, 상기 장주기 광섬유 격자(LPFG) 기반 이중 클래딩 광섬유(DCF) 마하젠더 간섭계(MZI)는, 상기 DCF의 내부클래딩 지름이 100 μ m 이상으로 형성되는 것을 특징으로 한다.
- [0058] 더욱이, 상기 장주기 광섬유 격자(LPFG) 기반 이중 클래딩 광섬유(DCF) 마하젠더 간섭계(MZI)는, 상기 DCF의 코어에 상기 장주기 광섬유 격자(LPFG)를 3개 이상 포함하여 구성되는 것을 특징으로 한다.
- [0060] 또한, 본 발명에 따르면, 센서부에 인가되는 스트레인(strain)에 무관하게 굽힘 및 온도를 동시에 측정 가능하도록 구성되는 굽힘 및 온도 동시 측정장치에 있어서, 상기 센서부는, 상기에 기재된 장주기 광섬유 격자(LPFG) 기반 이중 클래딩 광섬유(DCF) 마하젠더 간섭계(MZI)를 포함하여 구성되는 것을 특징으로 하는 굽힘 및 온도 동시 측정장치가 제공된다.
- [0062] 아울러, 본 발명에 따르면, 센서부에 인가되는 스트레인(strain)에 무관하게 굽힘 및 온도를 동시에 측정 가능하도록 구성되는 굽힘 및 온도 동시 측정방법에 있어서, 상기에 기재된 장주기 광섬유 격자(LPFG) 기반 이중 클래딩 광섬유(DCF) 마하젠더 간섭계(MZI)를 이용하여 상기 센서부를 구현하는 단계; 및 상기 센서부를 통하여 굽힘 및 온도의 동시측정을 수행하는 단계를 포함하여 구성되는 것을 특징으로 하는 굽힘 및 온도 동시 측정방법이 제공된다.

발명의 효과

- [0064] 상기한 바와 같이, 본 발명에 따르면, 이중 클래딩 광섬유(DCF)에 일정한 주기로 이산화탄소(CO₂) 레이저 펄스

를 조사하여 DCF의 코어(core) 굴절률을 주기적으로 변조시켜 제작되는 LPFG 2개를 일정한 간격을 두고 직렬로 연결하여 이루어지는 것에 의해 스트레인에 무관하게 굽힘 및 온도의 동시측정이 가능하도록 구성되는 장주기 광섬유 격자(LPFG) 기반 이중 클래딩 광섬유(DCF) 마하젠더 간섭계(MZI) 및 이를 이용한 스트레인에 무관한 굽힘 및 온도 동시 측정장치 및 방법이 제공됨으로써, 온도와 굽힘 사이의 교차 민감도로 인해 감지성능이 제한되고, 특히, 센서부에 굽힘이 인가될 때 스트레인(strain)이 동시에 가해지는 것에 의해 측정결과가 부정확해지는 한계가 있었던 종래 기술의 광섬유 브래그 격자(FBG) 및 장주기 광섬유 격자(LPFG) 기반 측정장치 및 방법들의 문제점을 해결할 수 있다.

[0066]

또한, 본 발명에 따르면, 상기한 바와 같이 측정 중 센서부에 스트레인이 인가되더라도 스트레인에 무관하게 굽힘과 온도를 동시에 측정할 수 있도록 구성되는 장주기 광섬유 격자(LPFG) 기반 이중 클래딩 광섬유(DCF) 마하젠더 간섭계(MZI) 및 이를 이용한 스트레인에 무관한 굽힘 및 온도 동시 측정장치 및 방법이 제공됨으로써, 복수의 센서부를 사용할 필요 없이 단일 센서부를 이용하여 두 가지 물리량의 동시측정이 가능하고, 기존의 FBG에 비해 제작공정의 편의성 향상 및 제작비용 절감이 가능하며, 이산화탄소 레이저를 사용함으로써 마스크 없이 제작이 가능하여 저단가 LPFG 제작이 가능한 데 더하여, 굽힘이 인가될 때 인장/압축 스트레인이 인가되더라도 LPFG의 스펙트럼에 변화가 없으므로 굽힘 및 온도 동시측정의 정확도를 향상시킬 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0068]

도 1은 본 발명의 실시예에 따른 장주기 광섬유 격자(LPFG) 기반 이중 클래딩 광섬유(DCF) 마하젠더 간섭계(MZI)의 전체적인 구성을 개략적으로 나타내는 도면이다.

도 2는 도 1에 나타난 DCF MZI의 투과 스펙트럼을 측정한 결과를 나타낸 도면이다

도 3은 도 1에 나타난 DCF MZI에 대하여 굽힘 반응과 온도 반응 및 스트레인 반응을 각각 측정하기 위한 실험장치의 전체적인 구성을 개략적으로 나타내는 도면이다.

도 4는 선택된 센서 표지자들에 대하여 굽힘 반응에 대한 측정결과를 나타내는 도면이다

도 5는 선택된 센서 표지자들에 대하여 온도 반응에 대한 측정결과를 나타내는 도면이다.

도 6은 선택된 센서 표지자들에 대하여 스트레인 반응에 대한 측정결과를 나타내는 도면이다.

도 7은 외부 섭동 없이 실온에서 측정한 제작된 DCF MZI의 투과 스펙트럼을 나타내는 도면이다.

도 8은 상온에서 $1.484 \sim 4.451\text{m}^{-1}$ 의 곡률 범위에 대해 측정된 DA, DB 및 DC의 굽힘으로 인한 스펙트럼 변화를 각각 나타내는 도면이다.

도 10은 $1.484 \sim 4.451\text{m}^{-1}$ 의 곡률 범위와 $30 \sim 100^\circ\text{C}$ 의 주변 온도 범위에서 측정된 DA, DB 및 DC의 굽힘 및 온도에 의한 파장 이동을 각각 나타내는 도면이다.

도 11은 DA, DB 및 DC의 스트레인에 의한 스펙트럼 변화를 나타내는 도면이다.

도 12는 2개의 표지자 골(DA 및 DB)을 이용하여 적용된 ΔC , ΔT 의 값에 대하여 본 발명의 실시예에 따른 광섬유 센서에 의해 측정된 ΔC , ΔT 값을 나타내는 도면이다.

도 13은 본 발명의 실시예에 따른 광섬유 센서와 종래 기술에 제안된 광섬유 센서들의 굽힘, 온도, 변형에 대한 민감도 및 동시측정 기능을 포함하는 센서특성을 비교한 결과를 표로 정리하여 나타낸 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0069]

이하, 첨부된 도면을 참조하여, 본 발명에 따른 장주기 광섬유 격자(LPFG) 기반 이중 클래딩 광섬유(DCF) 마하젠더 간섭계(MZI) 및 이를 이용한 스트레인에 무관한 굽힘 및 온도 동시 측정장치 및 방법의 구체적인 실시예에 대하여 설명한다.

[0071]

여기서, 이하에 설명하는 내용은 본 발명을 실시하기 위한 하나의 실시예일 뿐이며, 본 발명은 이하에 설명하는

실시예의 내용으로만 한정되는 것은 아니라는 사실에 유념해야 한다.

- [0073] 또한, 이하의 본 발명의 실시예에 대한 설명에 있어서, 종래 기술의 내용과 동일 또는 유사하거나 당업자의 수준에서 용이하게 이해하고 실시할 수 있다고 판단되는 부분에 대하여는, 설명을 간략히 하기 위해 그 상세한 설명을 생략하였음에 유념해야 한다.
- [0075] 즉, 본 발명은, 후술하는 바와 같이, 온도와 굽힘 사이의 교차 민감도로 인해 감지성능이 제한되고, 특히, 센서부에 굽힘이 인가될 때 스트레인(strain)이 동시에 가해지는 것에 의해 측정결과가 부정확해지는 한계가 있었던 종래 기술의 광섬유 격자기반 측정장치 및 방법들의 문제점을 해결하기 위해, 센서부에 인가되는 굽힘과 온도를 동시에 측정할 수 있는 동시에, 측정 중 센서부에 스트레인이 인가되더라도 스트레인에 무관하게 동시측정을 수행할 수 있도록 구성되는 장주기 광섬유 격자(LPFG) 기반 이중 클래딩 광섬유(DCF) 마하젠더 간섭계(MZI) 및 이를 이용한 스트레인에 무관한 굽힘 및 온도 동시 측정장치 및 방법에 관한 것이다.
- [0077] 아울러, 본 발명은, 후술하는 바와 같이, 이중 클래딩 광섬유(DCF)에 일정한 주기로 이산화탄소(CO_2) 레이저 펄스를 조사하여 DCF의 코어(core) 굴절률을 주기적으로 변조시켜 제작되는 LPFG 2개를 일정한 간격을 두고 직렬로 연결하여 구성됨으로써, 복수의 센서부를 사용할 필요 없이 단일 센서부를 이용하여 두 가지 물리량의 동시 측정이 가능하고, 기존의 FBG에 비해 제작공정의 편의성 향상 및 제작비용 절감이 가능하며, 이산화탄소 레이저를 사용함으로써 마스크 없이 제작이 가능하여 저단가 LPFG 제작이 가능한 데 더하여, 굽힘이 인가될 때 인장/압축 스트레인이 인가되더라도 LPFG의 스펙트럼에 변화가 없으므로 굽힘 및 온도 동시측정의 정확도를 향상시킬 수 있도록 구성되는 장주기 광섬유 격자(LPFG) 기반 이중 클래딩 광섬유(DCF) 마하젠더 간섭계(MZI) 및 이를 이용한 스트레인에 무관한 굽힘 및 온도 동시 측정장치 및 방법에 관한 것이다.
- [0079] 계속해서, 도면을 참조하여, 본 발명에 따른 장주기 광섬유 격자(LPFG) 기반 이중 클래딩 광섬유(DCF) 마하젠더 간섭계(MZI) 및 이를 이용한 스트레인에 무관한 굽힘 및 온도 동시 측정장치 및 방법의 구체적인 내용에 대하여 설명한다.
- [0081] 먼저, 도 1을 참조하면, 도 1은 본 발명의 실시예에 따른 장주기 광섬유 격자(LPFG) 기반 이중 클래딩 광섬유(DCF) 마하젠더 간섭계(MZI)의 전체적인 구성을 개략적으로 나타내는 도면이다.
- [0083] 즉, 본 발명의 실시예에 따른 장주기 광섬유 격자(LPFG) 기반 이중 클래딩 광섬유(DCF) 마하젠더 간섭계(MZI) 및 이를 이용한 굽힘 및 온도 동시 측정장치는, 도 1에 나타난 바와 같이, 외부클래딩(outer cladding)과 내부클래딩(inner cladding)으로 구성되는 DCF의 코어(core)에 LPFG 2개가 일정 간격(L)을 두고 직렬로 연결된 형태로 형성되는 DCF MZI를 센서부(sensor head)로 이용하여, 센서부에 인가되는 굽힘과 온도를 동시에 측정할 수 있는데 더하여 측정 중 센서부에 스트레인(strain), 즉, 길이 방향의 장력이 인가되더라도 그에 무관하게 동시 측정을 수행할 수 있도록 구성되는 것이다.
- [0085] 여기서, 상기한 센서부의 핵심요소인 LPFG는 DCF에 일정한 주기로 이산화탄소(CO_2) 레이저 펄스를 조사(illumination)하여 DCF의 코어(core) 굴절률을 주기적으로 변조(modulation)시켜 제작되며, 이러한 LPFG를 일정한 간격을 두고 2개를 제작하여 두 LPFG를 직렬로 연결하는 것으로 DCF MZI를 구현할 수 있다.
- [0087] 더 상세하게는, 일반적으로 LPFG는 동일방향 모드 결합(co-directional mode coupling)에 의해 수백 나노미터의 파장(wavelength) 대역에 걸쳐 여러 개의 불연속적인 손실 골(dip)을 가지며, DCF MZI는 두 LPFG가 직렬로 연결되어 있기 때문에 첫번째 LPFG에서 코어로부터 클래딩으로 결합된 모드가 LPFG가 없는 영역의 클래딩으로 일정

거리를 도파한 뒤, 두번째 LPFG를 만나면 다시 코어 모드로 재결합될 수 있다.

- [0089] 이때, 재결합된 클래딩 모드와 첫번째 LPFG에서 모드 결합되지 않고 그대로 진행하여 두번째 LPFG에 도달된 코어 모드는 두번째 LPFG의 코어 영역에서 서로 만나게 되어 간섭을 발생시킨다.
- [0091] 이러한 DCF MZI의 간섭 스펙트럼에서 클래딩 모드 차수(cladding-mode order)가 다른 두 골을 굽힘과 온도의 동시측정을 위한 센서 표지자(indicator dip)로 선택할 수 있으며, 이와 같이 하여 선택된 두 센서 표지자 골에 대해 굽힘 및 온도 반응을 독립적으로 측정하는 것이 가능하다.
- [0093] 즉, 도 2를 참조하면, 도 2는 도 1에 나타난 본 발명의 실시예에 따른 DCF MZI의 투과(transmission) 스펙트럼을 측정한 결과를 나타낸 도면이다.
- [0095] 도 2에 나타난 바와 같이, 상기한 바와 같이 하여 이산화탄소 레이저를 이용하여 제작된 본 발명의 실시예에 따른 DCF MZI의 투과 스펙트럼은 1522.8 nm 및 1590.4 nm에서 투과 극소값을 나타내고 있으며, 본 실시예에서는 이러한 손실 골들을 각각 DA와 DB로 지정하여 센서 표지자로 사용하였다.
- [0097] 다음으로, 도 3 내지 도 6을 참조하면, 먼저, 도 3은 도 1에 나타난 본 발명의 실시예에 따른 DCF MZI에 대하여 굽힘 반응과 온도 반응 및 스트레인 반응을 각각 측정하기 위한 실험장치의 전체적인 구성을 개략적으로 나타내는 도면이다.
- [0099] 또한, 도 4 내지 도 6은 상기한 바와 같이 하여 선택된 센서 표지자들에 대한 굽힘 반응과 온도 반응 및 스트레인 반응을 도 3에 나타난 바와 같은 실험장치를 통하여 각각 측정한 결과를 그래프로 나타내는 도면이다.
- [0101] 여기서, 도 4 내지 도 6에 있어서, 도 4는 굽힘 반응에 대한 측정결과이고, 도 5는 온도 반응에 대한 측정결과이며, 도 6은 스트레인 반응에 대한 측정결과를 각각 나타내고 있다.
- [0103] 즉, 본 발명자들은, 도 1 및 도 2를 참조하여 상기한 바와 같이 하여 본 발명의 실시예에 따른 DCF MZI를 제작하고 센서 표지자(DA, DB)를 각각 선정하여 도 3에 나타난 바와 같은 실험장치를 통해 1.48 ~ 4.45 m⁻¹의 곡률 범위와 30 ~ 110 °C의 온도 범위에 대하여 굽힘, 온도, 스트레인 반응을 각각 측정하였다.
- [0105] 측정결과, 먼저, 도 4에 나타난 바와 같이, 상온에서 DCF MZI에 인가되는 굽힘이 증가함에 따라 DA와 DB는 각각 청색 천이와 적색 천이를 나타내었으며, 측정된 굽힘 반응으로부터 DA와 DB의 굽힘 민감도는 각각 -911.3 pm/m⁻¹와 233.3 pm/m⁻¹로 주어진다.
- [0107] 또한, 도 5에 나타난 바와 같이, 굽힘 반응과는 달리 DA와 DB는 주변 온도가 증가함에 따라 서로 다른 양의 적색 천이를 나타내었으며, 이때, 센서부는 굽힘이 인가되지 않도록 평평하게 유지되었고, 측정된 온도 반응으로부터 DA와 DB의 온도 민감도는 각각 56.4 pm/°C와 74.6 pm/°C로 주어진다.
- [0109] 도 4 및 도 5의 측정결과로부터 알 수 있듯이, 두 센서 표지자들은 굽힘과 온도에 대해 선형적이고 서로 독립적인 반응을 나타내며, 따라서 도 4 및 도 5로부터 결정되는 두 센서 표지자들의 굽힘 및 온도 민감도를 이용하면

두 센서 표지자들의 굽힘 및 온도에 의한 파장 이동량을 측정하여 DCF MZI에 인가되는 굽힘과 온도 변화량을 동시에 측정하는 것이 가능하다.

- [0111] 특히, 도 6에 나타난 바와 같이, $0 \sim 1136 \mu\epsilon$ 의 스트레인 범위에서 센서 표지자들의 스트레인 인가에 따른 파장 변화를 측정한 결과, DA와 DB의 스트레인 민감도는 각각 $-0.048 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 과 $0.045 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 으로 측정되었고, 이러한 스트레인 인가에 따른 파장 천이량은 너무 작아서 굽힘과 온도의 동시측정 결과에 거의 영향을 미치지 않는다.
- [0113] 따라서 상기한 바와 같이 하여 구성되는 본 발명의 실시예에 따른 DCF MZI는 외부 스트레인에 영향받지 않고 굽힘과 온도를 동시에 정확히 측정할 수 있는 센서부로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.
- [0115] 상기한 바와 같이, 본 발명의 실시예에 따른 장주기 광섬유 격자(LPGF) 기반 이중 클래딩 광섬유(DCF) 마하젠더 간섭계(MZI) 및 이를 이용한 굽힘 및 온도 동시 측정장치는, 이중 클래딩 광섬유(DCF)의 코어에 장주기 광섬유 격자(LPGF)가 직렬로 연결된 형태로 구현되는 DCF MZI를 센서부(sensor head)로 이용하여 센서부에 인가되는 굽힘과 온도를 동시에 측정할 수 있도록 구성되는 것으로, 이때, 동시측정 중 센서부에 스트레인(strain), 즉, 길이 방향의 장력이 인가되더라도 그에 무관하게 동시측정을 수행할 수 있는 장점을 가지는 것이다.
- [0117] 이를 위해, DCF에 일정한 주기로 이산화탄소 레이저 펄스를 조사(illumination)하여 DCF의 코어(core) 굴절률을 주기적으로 변조(modulation)시키는 것에 의해 센서부의 핵심 요소인 LPGF를 제작하며, 이러한 LPGF를 일정한 간격을 두고 2개를 제작하고 직렬로 연결하여 DCF MZI를 구현한다.
- [0119] 또한, 일반적으로 LPGF는 동일방향 모드 결합(co-directional mode coupling)에 의해 수백 나노미터의 파장(wavelength) 대역에 걸쳐 여러 개의 불연속적인 손실 골(dip)을 가지며, 본 발명의 실시예에 따른 DCF MZI는 2개의 LPGF가 직렬로 연결되어 있으므로 첫번째 LPGF의 코어에서 클래딩으로 결합된 모드가 LPGF가 없는 영역의 클래딩으로 일정 거리를 도파한 뒤, 두번째 LPGF를 만나면 다시 코어 모드로 재결합될 수 있다.
- [0121] 이때, 재결합된 클래딩 모드와 첫번째 LPGF에서 모드 결합되지 않고 그대로 진행하여 두번째 LPGF에 도달된 코어 모드는 두번째 LPGF의 코어 영역에서 서로 만나게 되어 간섭을 발생시킨다.
- [0123] 이러한 DCF MZI의 투과 스펙트럼에서 클래딩 모드 차수(cladding-mode order)가 다른 두 골(dip)을 굽힘과 온도의 동시측정을 위한 센서 표지자(indicator dip)로 선택할 수 있으며, 이와 같이 하여 선택된 두 센서 표지자 골을 골 I 및 골 II라고 하면, 두 표지자 골에 대해 굽힘 및 온도 반응을 독립적으로 측정하는 것이 가능하다.
- [0125] 여기서, 측정된 굽힘 반응이 선형적이면 골 I과 골 II의 굽힘 민감도($S_{B,I}$ 및 $S_{B,II}$)를 구할 수 있고, 마찬가지로 측정된 온도 반응이 선형적이면 골 I과 골 II의 온도 민감도($S_{T,I}$ 및 $S_{T,II}$)를 구할 수 있다.
- [0127] 즉, 상기한 두 골(골 I 및 II)의 굽힘 반응 및 온도 반응이 각각 독립적이라면, 다시 말해, $S_{B,I}/S_{T,I}$ 이 $S_{B,II}/S_{T,II}$ 와 같지 않다면, 센서부에 인가되는 굽힘 및 온도 변화를 2원 1차 연립방정식을 통해 동시에 구할 수 있다.
- [0129] 특히, DCF에 제작된 LPGF는 DCF의 내부클래딩(inner cladding) 지름이 클수록 외부에서 인가되는 스트레인에 대해 둔감한 특성을 가지므로, 예를 들면, 내부클래딩 지름이 $100\mu\text{m}$ 이상, 또는, 내부클래딩 지름이 외부클래딩(outer cladding) 지름의 80% 이상인 DCF를 사용할 경우, 스트레인 민감도가 일반 단일 모드 광섬유(single-

mode fiber ; SMF)에 제작된 LPFG에 비해 20배 이상 감소된 LPFG를 제작할 수 있다.

- [0131] 이와 같이 스트레인에 둔감한 DCF에 제작된 LPFG를 기반으로 하는 DCF MZI는 추가적으로 인가되는 스트레인에 의한 파장 이동량이 매우 작으므로 스트레인이 굽힘과 온도의 측정결과에 큰 영향을 미치지 않는다.
- [0133] 따라서 내부클래딩 지름이 큰 DCF를 이용하여 제작된 본 발명의 실시예에 따른 장주기 광섬유 격자(LPFG) 기반 이중 클래딩 광섬유(DCF) 마하젠더 간섭계(MZI) 및 이를 이용한 굽힘 및 온도 동시 측정장치 및 방법은 스트레인에 무관하게 굽힘과 온도의 동시측정을 수행할 수 있다.
- [0135] 즉, 상기한 바와 같이 하여 구성되는 본 발명의 실시예에 따른 장주기 광섬유 격자(LPFG) 기반 이중 클래딩 광섬유(DCF) 마하젠더 간섭계(MZI)를 이용하여 센서부를 구성함으로써, 스트레인에 무관하게 굽힘과 온도의 동시 측정을 수행할 수 있는 굽힘 및 온도 동시 측정장치를 용이하게 구현할 수 있으며, 아울러, 그러한 굽힘 및 온도 동시 측정장치를 구현하고 굽힘 및 온도의 동시측정을 수행함으로써, 본 발명의 실시예에 따른 굽힘 및 온도 동시 측정방법을 용이하게 구현할 수 있다.
- [0137] 여기서, 도 1 내지 도 4를 참조하여 상기한 실시예에서는 본 발명의 장주기 광섬유 격자(LPFG) 기반 이중 클래딩 광섬유(DCF) 마하젠더 간섭계(MZI)가 직렬로 연결된 2개의 장주기 광섬유 격자(LPFG)를 포함하여 구성되는 경우를 예로 하여 본 발명을 설명하였으나, 본 발명은 반드시 상기한 실시예의 내용으로만 한정되는 것은 아니며, 즉, 본 발명은, 예를 들면, DCF의 코어에 3개 이상 복수의 LPFG를 포함하여 구성될 수도 있는 등, 본 발명의 취지 및 본질을 벗어나지 않는 범위 내에서 당업자에 의해 필요에 따라 다양한 형태로 수정 및 변경하여 구성될 수 있는 것임에 유념해야 한다.
- [0139] 계속해서, 상기한 바와 같이 하여 구성되는 본 발명의 실시예에 따른 장주기 광섬유 격자(LPFG) 기반 이중 클래딩 광섬유(DCF) 마하젠더 간섭계(MZI)를 실제로 구현하여 실험을 수행한 내용 및 결과에 대하여 설명한다.
- [0141] 즉, 본 발명자들은 도 1에 나타낸 바와 같이 구성되는 본 발명의 실시예에 따른 장주기 광섬유 격자(LPFG) 기반 이중 클래딩 광섬유(DCF) 마하젠더 간섭계(MZI)를 실제 구현하고 실험을 통해 그 성능을 증명하였다.
- [0143] 더 상세하게는, 도 1에 나타낸 DCF MZI의 구성을 구현함에 있어서, DCF의 양쪽 끝은 단일 모드 광섬유(SMF)와 융합 접속되었고, DCF의 3개층(즉, 코어, 내부 클래딩 및 외부 클래딩)의 직경은 각각 9, 105 및 125 μm 로 형성되었다.
- [0145] 2개의 동일한 LPFG로 구성된 센서부는 라인별 기술(line-by-line technique)에 의해 10.6 μm CO₂ 레이저(SYNRAD FSVI30SAC)로 DCF를 조사하여 제조되었으며, 평균출력이 ~ 2.78 W인 집속 레이저빔의 스폿(spot) 크기를 2D 광학스캐너(MINI SCAN)에 설치된 F- θ 렌즈를 사용하여 ~ 70 μm 로 조정하였다.
- [0147] 또한, LPFG의 제조 시, 굽힘 및 온도의 동시측정을 위하여, 굽힘 및 온도 반응에서 서로 다른 섭동 반응(perturbation response)을 얻기 위해, 서로 다른 클래딩 모드를 가지고 파장 영역(wavelength domain)에 널리 퍼진 공진 파장(resonance wavelength)에서 약 5dB의 대역소거비(Band Rejection Ratio ; BRR)를 가지는 감쇠 골(attenuation dip)을 가능한 많이 얻도록 하였으며, 이는, 동일하게 형성된 2개의 LPFG로 구성된 DCF MZI의 제조를 위한 첫 번째 전제조건이다.

- [0149] 각각의 LPFG의 제조에 있어서, 관찰 가능한 파장 범위(1460 ~ 1600 nm)에서 뚜렷한 공진 골(resonance dip)이 생성되는 격자의 수를 찾기 위해, 격자 피치(grating pitch), 새김 속도(mark speed) 및 스캔 주기(scanning cycle)의 수 등과 같은 다른 격자 제작 조건을 고정된 상태로 유지하고 격자의 수를 변경해 가면서 LPFG를 제작하여 최적의 격자 수를 결정하였고, 격자 수를 결정한 후, 상기한 첫번째 요구사항을 가장 잘 충족하는 격자 피치를 조정하고 선택하였다.
- [0151] 이러한 격자 제작 조건의 최적화 과정을 통해 첫번째 LPFG의 격자 피치, 격자 수(격자 길이), 새김 속도 및 레이저 스캔 주기 수는 각각 ~ 551.02 μm , 40(~ 21.49 mm), 40.0 mm/s 및 1로 결정되었다.
- [0153] 한 번의 레이저 스캔 주기 동안, CO₂ 레이저 빔은 각각의 굴절률 변조된(index-modulated) 층을 만들기 위해 광섬유의 종(longitudinal) 방향에 수직인 양방향(즉, 수평 이동(lateral movement) 없이 위에서 아래로 그리고 아래에서 위로)으로 스캔되었다.
- [0155] 센서부(sensor head)의 광섬유 내 MZ 간섭(in-fiber MZ interference)의 선명하고 높은 대조비를 가지는 간섭 스펙트럼을 위해 센서부를 구성하는 두 LPFG의 스펙트럼 특성은 가능한 한 유사해야 하므로, 이에, 두번째 LPFG는 동일한 제작 조건에서 ~ 86.20 mm 길이의 격자 없는 영역(즉, 두 LPFG 간의 분리)을 사이에 두고 형성되었다.
- [0157] DCF MZI의 전체 제작 과정 동안, DCF의 한쪽 끝을 전동 선형 스테이지(motorized linear stage)에 장착된 광섬유 홀더(holder)에 고정한 뒤 광섬유에 약간의 길이 방향 장력을 인가하고 정확한 격자 주기(grating period)를 확보하기 위해 다른 쪽 끝에 10g의 추를 매달았다.
- [0159] 또한, 광대역 광원(Fiberlabs FL7701)과 광학 스펙트럼 분석기(OSA, Yokogawa AQ6370C)를 사용하여 DCF MZI의 투과 스펙트럼(transmission spectrum)에 대한 현장 모니터링(in-situ monitoring)을 수행하였다.
- [0161] LPFG에서 유도되는 코어 모드(guided core mode)는 기본 코어 모드(fundamental core mode)와 전방 전파 클래딩 모드(forward propagating cladding mode) 사이의 상호작용에 의해 다중 방사 클래딩 모드(multiple radiative cladding mode)로 결합된다(coupled).
- [0163] 이러한 모드 결합은 파장에 따라 다르므로 파장에 따라 다른 손실을 얻을 수 있으며, 종래 LPFG의 위상정합 조건(phase-matching condition)은 이하의 [수학식 1]과 같이 나타낼 수 있다.
- [0165] [수학식 1]
- $$\lambda_{res} = (n_{co,eff} - n_{cl,eff}^i) \Lambda$$
- [0166]
- [0168] 여기서, λ_{res} 는 공진 파장(resonance wavelength)이고, Λ 는 격자 주기(grating period)이며, $n_{co,eff}$ 및 $n_{cl,eff}^i$ 는 각각 LPFG의 유도 코어 모드(guided core mode) 및 i 번째 클래딩 모드의 유효굴절률(effective refractive index)을 각각 나타낸다.
- [0170] 종래의 LPFG의 공진 골(resonance dip)은 특정 곡률(curvature) 또는 온도 범위 내에서 매우 선형적인 굽힘

(bending) 또는 온도 응답을 나타내고, 서로 다른 클래딩 모드 차수(cladding-mode order)를 가지는 이러한 다중 감쇠 골(multiple attenuation dip)은 굽힘 또는 온도 민감도(sensitivity)가 동일하지 않다.

[0172] 직렬 연결된 2개의 LPFG에 있어서, 각각의 LPFG가 λ_{res} 에서 3dB의 BRR을 가지는 경우 λ_{res} 에서의 코어 모드는 첫번째 LPFG를 통과하는 동안 50%가 클래딩 모드와 결합되고(coupled), 결합된 클래딩 모드가 격자 없는 영역(grating-free-region)의 클래딩을 통해 유도되는(guided) 동안, 결합되지 않은 코어 모드(즉, 초기 코어 모드의 나머지 50%)는 코어를 따라 계속 전파된다.

[0174] 결합된 클래딩 모드가 두번째 LPFG를 만나면, 코어 모드로 다시 결합되고 첫번째 LPFG에서 코어를 따라 유도된 비결합(uncoupled) 코어 모드와 간섭되며(interfere), 격자 없는 영역의 코어와 클래딩은 광섬유 내 MZ 간섭계의 두 광 경로(optical path)를 형성한다.

[0176] 이와 같이 두 광 경로를 따라 유도되는 2개의 전방 전파 모드 사이의 위상차 $\Delta\Psi$ 는 이하의 [수학식 2]와 같이 나타낼 수 있다.

[0178] [수학식 2]

$$\Delta\Psi = -\frac{2\pi}{\lambda}\Delta n_{eff}L - \frac{2\pi}{\lambda}(\Delta n_{g,eff} - \Delta n_{eff})L_g$$

[0179]

[0181] 여기서, λ , L_g 및 L 은 각각 자유공간 파장(free-space wavelength), 격자 길이(grating length) 및 두 격자 중심 간 거리(center-to-center separation)를 각각 나타내고, $\Delta n_{g,eff} = n_{g,eff,co} - n_{g,eff,cl}$ 이며, 이때, $n_{g,eff,co}$ 및 $n_{g,eff,cl}$ 은 각각 격자 영역 내에서 코어 및 클래딩 모드의 유효 굴절률을 나타낸다.

[0183] 또한, $\Delta n_{eff} = n_{eff,co} - n_{eff,cl}$ 이고, 여기서, $n_{eff,co}$ 및 $n_{eff,cl}$ 은 각각 격자 없는 영역(격자 영역 외부)에서 코어 및 클래딩 모드의 유효 굴절률을 나타낸다.

[0185] 아울러, $\Delta\Psi$ 는 LPFG 직렬 쌍에 의해 생성되는 간섭 프린지(interference fringe)를 결정하며, 제작된 DCF MZI에서는 각 LPFG의 격자 강도(grating strength)를 1460 ~ 1600 nm의 파장 범위에서 평균 ~ 3.60 dB로 조정하였다.

[0187] 격자 강도가 높지 않으므로, 굴절률 차 변동(differential index variation)(예를 들면, $|\Delta n_{g,eff} - \Delta n_{eff}|$)은 5% 미만으로 예상되며, 간섭 패턴 간격(fringe spacing)은 이하의 [수학식 3]과 같이 근사할 수 있다.

[0189] [수학식 3]

$$\frac{\lambda^2}{L\Delta m} = \lambda^2 / \left[L \left(\Delta n_{eff} - \lambda \frac{d\Delta n_{eff}}{d\lambda} \right) \right]$$

[0190]

- [0192] 여기서, Δm 은 유효 군굴절률(effective group refractive index)을 나타낸다.
- [0194] 섭동(perturbation)으로 인한 Δm 의 변화는 간섭 패턴 파장 간격을 변화시킬 수 있고 따라서 간섭 스펙트럼의 파장을 이동(shift)시킬 수도 있다.
- [0196] 즉, 도 7을 참조하면, 도 7은 외부 섭동 없이(예 : $\Delta C = 0$ 및 $\Delta \varepsilon = 0$) 실온(예 : $\Delta T = 0$)에서 측정된 제작된 DCF MZI의 투과 스펙트럼(transmission spectrum)(검은색 실선으로 표시)을 나타내는 도면이다.
- [0198] 여기서, $\Delta \varepsilon$ 는 DCF MZI에 인가되는 스트레인의 변화를 나타내며, 비교를 위해, DCF에 제작된 첫번째 LPFG의 투과 스펙트럼도 함께 자주색 실선으로 표시하였다.
- [0200] 간섭 스펙트럼의 측정된 파장 간격은 ~ 5.1 nm이었고, L을 변화시키면 이러한 파장 간격을 조정할 수 있으며, 제작된 DCF MZI의 측정된 삽입손실(insertion loss)은 ~ 1.88 dB이었는데, 이는 주로 SMF와 DCF 간의 용착 접합 손실(fusion splicing loss)로 인해 발생하였다.
- [0202] 첫번째 LPFG의 투과 스펙트럼의 경우 1470, 1520 및 1590 nm 근처의 3 개의 공진 골은 LP_{03} 및 LP_{04} 클래딩 모드와 모두 연관되며, 이러한 세 골 중에서 스펙트럼 상 가장 왼쪽 및 가장 오른쪽 골은 각각 LP_{03} 및 LP_{04} 클래딩 모드의 영향을 주로 받는다.
- [0204] 따라서 마찬가지로 DCF MZI에 있어서, LP_{03} 및 LP_{04} 클래딩 모드와 비결합 코어 모드 사이의 광섬유 내 MZ 간섭이 간섭 스펙트럼을 주로 결정하며, LP_{03} 클래딩 모드는 1470 nm 근처의 간섭 스펙트럼에 주로 영향을 주는 반면, 1590 nm 근처의 간섭 스펙트럼은 주로 LP_{04} 클래딩 모드로부터 발생되는데, 다시 말해, 짧은 파장 영역일수록 간섭 스펙트럼은 LP_{03} 클래딩 모드의 영향을 더 많이 받으며, LP_{04} 클래딩 모드의 영향을 덜 받는다.
- [0206] 이에, 도 7에 나타난 바와 같이, 각각 $\lambda_{DA} = \sim 1462.3$ nm, $\lambda_{DB} = \sim 1522.8$ nm, $\lambda_{DC} = \sim 1589.4$ nm의 공진 파장을 가지는 세 감쇠 골이 센서 표지자로 선택되어 각각 DA, DB 및 DC로 지정되었고, λ_{DA} , λ_{DB} 및 λ_{DC} 에서 세 표지자 골(DA, DB 및 DC)의 측정된 BRR은 각각 ~ 7.40 , ~ 15.53 및 ~ 10.28 dB이었다.
- [0208] 또한, 본 발명자들은, 각 표지자에 영향을 미치는 클래딩 모드를 구별하기 위해 서로 가능한 한 스펙트럼 상에서 먼 거리를 유지할 수 있도록 이러한 세 표지자를 선택하였다.
- [0210] 여기서, LP_{03} 및 LP_{04} 클래딩 모드는 각각 DA 및 DC에 강한 영향을 미칠 것으로 예상되며, 따라서 각 센서 표지자에 대한 2가지 클래딩 모드의 효과가 다르므로, 센서 표지자에 따라 굽힘 또는 온도 민감도가 다를 것으로 예상된다.
- [0212] 세 표지자 골(DA, DB 및 DC) 중에서 선택된 두 골(D1 및 D2)에 대하여, D1의 굽힘 및 온도 응답이 D2의 굽힘 및 온도 응답에 독립적이고, 굽힘 및 온도 응답이 선형이라고 가정하면, 이하의 [수학식 4]에 나타난 바와 같은 민감도 계수 행렬(sensitivity coefficient matrix)을 이용하여 굽힘 및 온도 변화(즉, ΔC 및 ΔT)를 동시에 측정할 수 있다.

[0214] [수학식 4]

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{D1} \\ \Delta\lambda_{D2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{C,D1} & S_{T,D1} \\ S_{C,D2} & S_{T,D2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta C \\ \Delta T \end{bmatrix}$$

[0215]

[0217] 여기서, $\Delta\lambda_{D1}$ 및 $\Delta\lambda_{D2}$ 는 각각 D1 및 D2의 파장 이동(wavelength shift)을 나타낸다.

[0219] $S_{C,D1} = \Delta\lambda_{D1} / \Delta C|_{\Delta T=0}$ 및 $S_{C,D2} = \Delta\lambda_{D2} / \Delta C|_{\Delta T=0}$ 은 D1 및 D2의 굽힘 민감도 계수(bending sensitivity coefficient)이고 $S_{T,D1} = \Delta\lambda_{D1} / \Delta T|_{\Delta C=0}$ 및 $S_{T,D2} = \Delta\lambda_{D2} / \Delta T|_{\Delta C=0}$ 은 D1 및 D2의 온도 민감도 계수(temperature sensitivity coefficient)를 각각 나타낸다.

[0221] 따라서 선택된 각 표지자 끝에 대하여 측정된 독립적인 굽힘 및 온도 응답으로부터 이 네가지 민감도 계수를 결정할 수 있으며, 이하의 [수학식 5]에 나타낸 바와 같은 민감도 계수 행렬의 역행렬과 측정된 파장 이동($\Delta\lambda_{D1}$ 및 $\Delta\lambda_{D2}$)을 이용하여 ΔC 및 ΔT 의 동시측정이 이루어질 수 있다.

[0223] [수학식 5]

$$\begin{bmatrix} \Delta C \\ \Delta T \end{bmatrix} = \frac{1}{Det} \begin{bmatrix} S_{T,D2} & -S_{T,D1} \\ -S_{C,D2} & S_{C,D1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{D1} \\ \Delta\lambda_{D2} \end{bmatrix}$$

[0224]

[0226] 여기서, $Det = S_{C,D1}S_{T,D2} - S_{T,D1}S_{C,D2}$ 는 민감도 계수 행렬의 행렬식(determinant)이다.

[0228] 계속해서, 상기한 바와 같이 하여 제작된 DCF MZI를 이용하여 실험을 진행한 내용 및 결과에 대하여 설명한다.

[0230] 즉, 본 발명자들은, 상기한 바와 같이 하여 제작된 DCF MZI의 굽힘, 온도 및 스트레인 응답을 측정하기 위해 도 3에 나타낸 바와 같은 실험장치를 이용하여 실험을 진행하였으며, DCF MZI의 투과 스펙트럼을 측정하기 위해 광대역 광원과 OSA를 사용하여 투과 스펙트럼에서 섭동으로 인한 스펙트럼 변화를 다시 모니터링하였다.

[0232] 이때, OSA의 분해능 대역폭(resolution bandwidth)과 샘플링 포인트는 각각 0.02nm와 7501이었고, 먼저, 굽힘 응답을 조사하기 위해, 센서부의 한쪽 끝을 고정 스테이지(fixed stage)에 부착하고 이동 스테이지(translation stage)에 고정된 다른 쪽 끝에 10g의 추를 매달아 측정 중에 센싱 광섬유가 곧게 유지되도록 하였다.

[0234] 또한, 굽힘을 인가하기 위해 이동 스테이지를 도 3에서 우측 화살표 방향으로 미세하게 이동하였으며, 두 스테이지의 홀더 사이 거리 D는 굽힘이 인가되지 않았을 때 ~ 17.6 cm이었다.

[0236] 아울러, 굽힘으로 인한 곡률(curvature) C 는 $C = R^{-1} = (24\Delta D/D^3)^{1/2}$ 로 주어지며, 여기서 R 및 ΔD 는 각각 센서부의 곡률 반경(curvature radius)과 이동 스테이지의 변위(displacement)를 나타낸다.

[0238] 격자 없는 영역과 2개의 LPFG 및 DCF MZI의 양쪽 끝에 접합된(spliced) SMF 가닥(segment)의 길이의 합으로 결정되는 길이 D 는 센서의 측정 정확도와 분해능(resolution)을 고려하여 선택되었다.

[0240] 다음으로, 도 8을 참조하면, 도 8은 상온에서 $1.484 \sim 4.451 \text{ m}^{-1}$ 의 곡률 범위에 대해 측정된 DA, DB 및 DC의 굽힘으로 인한 스펙트럼 변화를 각각 나타내는 도면이다.

[0242] 도 8에 나타난 바와 같이, DA와 DB는 곡률이 증가함에 따라 더 짧은 파장 영역으로 이동하여, λ_{DA} 의 경우 1462.30에서 1461.08nm로, λ_{DB} 의 경우 1522.84에서 1520.06 nm로 청색천이(blueshift)를 나타내었으며, 반대로, DC는 곡률이 증가함에 따라 더 긴 파장 영역으로 이동하여, λ_{DC} 의 경우 1589.44에서 1590.12 nm로 적색천이(redshift)를 나타내었다.

[0244] λ_{DA} , λ_{DB} 또는 λ_{DC} 의 굽힘에 의한 변화는 유효 굴절률 차(effective refractive index difference)(Δn_{eff})와 격자 없는 영역의 길이($L - L_g$)의 굽힘에 의한 변화에 기인하는 것으로, DCF MZI의 표지자 골 λ_{dip} 의 굽힘 민감도는 상기한 [수학식 2]로부터 유도될 수 있고, $\Delta n_{g,eff}$ 및 그 온도 의존성($d\Delta n_{g,eff}/dT$)이 Δn_{eff} 및 $d\Delta n_{eff}/dT$ 와 유사한 경우 이하의 [수학식 6]과 같이 근사될 수 있다.

[0246] [수학식 6]

$$\frac{\partial \lambda_{dip}}{\partial C} \approx \lambda_{dip} \left(\frac{1}{\Delta n_{eff}} \frac{\partial \Delta n_{eff}}{\partial C} + \frac{1}{L - L_g} \frac{\partial (L - L_g)}{\partial C} \right)$$

[0247]

[0249] 다음으로, DA, DB 및 DC의 온도 반응을 조사하기 위해 센서부를 온도 챔버(thermal chamber)에 위치시키고 세 표지자 골의 스펙트럼 변화를 $30 \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$ ($5 \text{ }^\circ\text{C}$ 씩 증가)의 주변 온도 범위(ambient temperature range)에서 모니터링하였으며, 온도 반응을 관찰하는 동안 센서부가 똑바로 유지되고 온도로 인한 굽힘의 영향을 받지 않도록 DCF MZI에 약간의 장력이 인가되도록 하였다.

[0251] 즉, 도 9를 참조하면, 도 9는 굽힘을 인가하지 않고 상기한 주변 온도 범위에 대하여 측정된 DA, DB 및 DC의 온도에 의한 스펙트럼 변화를 각각 나타내는 도면이다.

[0253] 도 9에 나타난 바와 같이, λ_{DA} , λ_{DB} 및 λ_{DC} 는 각각 1462.00에서 1466.24 nm, 1523.76에서 1527.80 nm, 1587.58에서 1592.84 nm로 증가하였고, 굽힘 반응과 달리 모든 표지자 골이 온도가 증가함에 따라 더 긴 파장 영역으로 이동하여 적색천이를 나타내었으며, λ_{DA} , λ_{DB} 또는 λ_{DC} 의 이러한 온도에 의한 변화는 Δn_{eff} 및 $(L - L_g)$ 의 온도에 의한 변화로 인해 발생한다.

[0255] 또한, 굽힘 민감도의 경우와 마찬가지로, 표지자 골 λ_{dip} 의 온도 민감도는 이하의 [수학식 7]과 같이 근사할 수

있다.

[0257] [수학식 7]

$$\frac{\partial \lambda_{dip}}{\partial T} = \lambda_{dip} \left(\frac{1}{\Delta n_{eff}} \frac{\partial \Delta n_{eff}}{\partial T} + \frac{1}{L - L_g} \frac{\partial (L - L_g)}{\partial T} \right)$$

[0258]

[0260] 다음으로, 도 10을 참조하면, 도 10은 각각 1.484 ~ 4.451 μm 의 곡률 범위와 30 ~ 100 $^{\circ}\text{C}$ 의 주변 온도 범위에서 측정된 세 표지자의 굽힘 및 온도에 의한 파장 이동(wavelength shift)을 각각 나타내는 도면이다.

[0262] 도 10에 있어서, 적색, 청색, 녹색 직사각형 또는 원형 기호는 각각 λ_{DA} , λ_{DB} , λ_{DC} 의 측정값을 나타내며, 적색, 청색, 녹색 실선은 각각 DA, DB 및 DC에 대하여 측정된 데이터의 선형 회귀분석 결과를 나타내고, 측정점(measured point)의 오차 막대(error bar)는 각 센서 표지자의 측정된 파장 변화를 나타내고 있다.

[0264] 도 10에 나타난 바와 같이, DA, DB 및 DC는 각각 ~ 0.9901, ~ 0.9912 및 ~ 0.9915의 조정된 R^2 값으로 상기한 곡률 범위에서 충분히 선형적인 굽힘 응답을 나타내고 있으며, 추정된(evaluated) DA, DB, DC의 굽힘 민감도는 각각 $S_{C,DA} = -427.63 \text{ pm/m}^{-1}$, $S_{C,DB} = -911.29 \text{ pm/m}^{-1}$, $S_{C,DC} = 233.33 \text{ pm/m}^{-1}$ 이었고, 이로부터 세 굽힘 민감도가 각기 다른 것을 확인할 수 있으며, DA, DB 및 DC의 평균 변동(mean variation)은 각각 ~ 0.102, ~ 0.12 및 ~ 0.082 nm이었다.

[0266] 마찬가지로, 도 10에 나타난 바와 같이, 세 표지자 골은 각각 ~ 0.9991, ~ 0.9983 및 ~ 0.9994의 조정된 R^2 값으로 상기한 온도 범위에서 매우 선형적인 온도 응답을 나타내었고, DA, DB, DC의 추정된 온도 민감도는 각각 $S_{T,DA} = 60.49 \text{ pm/}^{\circ}\text{C}$, $S_{T,DB} = 56.44 \text{ pm/}^{\circ}\text{C}$, $S_{T,DC} = 74.61 \text{ pm/}^{\circ}\text{C}$ 이며, 이는 세 표지자 골의 온도 민감도 또한 서로 다른 것을 나타내고, DA, DB 및 DC의 평균 변동은 각각 ~ 0.095, ~ 0.061 및 ~ 0.047 nm이었다.

[0268] 또한, 온도 민감도와 굽힘 민감도의 비(ratio)를 고려하면, $S_{C,DA}/S_{T,DA}$, $S_{C,DB}/S_{T,DB}$ 및 $S_{C,DC}/S_{T,DC}$ 는 대략 -7.07, -16.15 및 3.13 $^{\circ}\text{C/m}^{-1}$ 로 각각 계산되었고, 이러한 비율 간의 명백한 차이는 세 표지자 골, 즉, $\lambda_{DA}(\Delta C, \Delta T)$, $\lambda_{DB}(\Delta C, \Delta T)$ 및 $\lambda_{DC}(\Delta C)$ 의 굽힘 및 온도 응답은 골 간에 서로 상관관계가 없음(uncorrelated)을 재확인시켜 준다.

[0270] 상기한 바와 같이, 실험적으로 확인된 굽힘 및 온도에 대한 센서 응답의 선형성과 독립성은 DA, DB 및 DC 중에서 선택된 두 센서 표지자의 섭동에 의한(perturbation-induced) 파장 이동(wavelength shift)을 이용하여 DCF MZI에 인가된 굽힘 및 온도 변화(ΔC 및 ΔT)를 동시에 측정할 수 있도록 해준다.

[0272] 아울러, 3개의 표지자 골이 있으므로 그 중 2개를 선택하여 3가지 경우의 민감도 계수 행렬을 얻을 수 있으며, 특히, 센서 표지자의 3가지 가능한 조합으로, "DA 및 DB", "DB 및 DC" 및 "DA 및 DC"를 선택하면, 상기한 바와 같이 하여 얻어진 민감도 계수(sensitivity coefficient)를 $S_{C,DA}$, $S_{C,DB}$, $S_{C,DC}$, $S_{T,DA}$, $S_{T,DB}$ 및 $S_{T,DC}$ 로 각각 대체하는(substitute) 것에 의해 상기한 [수학식 5]를 이하의 [수학식 8] 내지 [수학식 10]으로 변경할 수 있다.

[0274] [수학식 8]

$$\begin{bmatrix} \Delta C \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.82 & -1.95 \\ 29.41 & -13.80 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_{DA} \\ \Delta \lambda_{DB} \end{bmatrix}$$

[0275]

[0277] [수학식 9]

$$\begin{bmatrix} \Delta C \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.92 & 0.70 \\ 2.87 & 11.23 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_{DB} \\ \Delta \lambda_{DC} \end{bmatrix}$$

[0278]

[0280] [수학식 10]

$$\begin{bmatrix} \Delta C \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.62 & 1.31 \\ 5.07 & 9.29 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_{DA} \\ \Delta \lambda_{DC} \end{bmatrix}$$

[0281]

[0283] 더욱이, 본 발명의 실시예에 따른 광섬유 센서의 원치 않는 섭동에 대한 안정성을 확인하기 위해, 조건수(condition number) $\kappa = \|M\| \cdot \|M^{-1}\|$ 가 각각의 민감도 계수 행렬에 대하여 평가되었다.

[0285] 여기서, $\|M\|$ 은 행렬 M의 놈(norm)이고, 상기한 [수학식 8] 내지 [수학식 10]에서 민감도 계수 행렬의 계산된 조건수는 각각 ~ 32.89 , ~ 10.92 및 ~ 5.16 이었으며, 이러한 조건수는 기존의 종래 기술들에서 제시된 경우보다 훨씬 낮은 것으로, 즉, 조건수가 크면 조건이 나쁜(안정성이 낮은) 행렬을 의미하므로 본 발명의 실시예에 따른 광섬유 센서의 민감도 계수 행렬은 조건이 좋은(안정성이 높은) 것으로 볼 수 있다.

[0287] 또한, 본 발명자들은, 도 3에 나타난 바와 같은 굽힘 및 온도 반응의 면밀한 조사에 사용된 것과 동일한 실험 설정을 이용하여 스트레인 반응도 조사하였다.

[0289] 더 상세하게는, 스트레인이 인가된 광섬유 길이는 굽힘 응답에 사용된 것과 동일하게 $D(= \sim 17.6 \text{ cm})$ 와 같고, DCF MZI에 축방향 스트레인(axial strain)을 인가하기 위해 이동 스테이지를 도 3의 우측 화살표 방향으로 이동하여, 실온에서 0에서 $1136 \mu\epsilon$ ($114 \mu\epsilon$ 씩 증가)까지 스트레인을 인가하였다.

[0291] 즉, 도 11을 참조하면, 도 11은 DA, DB 및 DC의 스트레인에 의한 스펙트럼 변화를 나타내는 도면이다.

[0293] 도 11에 나타난 바와 같이, 이동 스테이지의 길이 방향 변위(longitudinal displacement)가 ΔD 이면 DCF MZI에 인가되는 길이 방향 스트레인(longitudinal strain)은 $\Delta D/D_0$ 가 되고, 인가되는 스트레인이 점진적으로(gradually) 증가하면 세 표지자 골을 포함하는 DCF MZI의 간섭 스펙트럼에서 매우 작은 변화를 관찰할 수 있다.

- [0295] 또한, $1136 \mu \varepsilon$ 의 인가된 스트레인에 대하여 세 표지자는 0.06 nm 의 최대 파장 이동을 나타내었고, 측정된 파장 이동에 대한 선형회귀 분석을 기반으로 평가된 DA, DB 및 DC의 스트레인 민감도(strain sensitivity)는 각각 -0.019 , -0.048 및 $0.045 \text{ pm}/\mu \varepsilon$ 로, 종래 기술의 LPFG의 스트레인 민감도($\sim 1.2 \text{ pm}/\mu \varepsilon$)와 비교할 때 우수한 스트레인 둔감성($< 0.05 \text{ pm}/\mu \varepsilon$)을 나타내었다.
- [0297] 즉, 이러한 스트레인에 의한 파장 이동은 너무 작아서 굽힘 및 온도 측정결과에 거의 영향을 미치지 않으며, 예를 들면, 단순히 개별 측정량(예 : 굽힘 또는 온도)을 고려하면, $100 \mu \varepsilon$ 의 스트레인 변화는 DC 및 DB를 사용한 굽힘 및 온도 측정에서 $(0.045 \text{ pm}/\mu \varepsilon) \times (100 \mu \varepsilon) / (233.33 \text{ pm}/\text{m}^{-1}) = \sim 0.019 \text{ m}^{-1}$ 및 $(-0.048 \text{ pm}/\mu \varepsilon) \times (100 \mu \varepsilon) / (56.44 \text{ pm}/^\circ\text{C}) = \sim 0.085 \text{ }^\circ\text{C}$ 의 불확실성을 각각 야기할 수 있다(최악의 상황(worst-case)을 가정한 경우).
- [0299] 이와 같이 종래 기술의 LPFG에 비해 낮은 스트레인 민감도는 DCF의 외부클래딩 치수와 관련이 있는 것으로 판단되며, 특히, 외부 변형이 직접 인가되는 외부클래딩이 광섬유에서 차지하는 규모가 클수록 코어에 전달되는 스트레인이 커지는 것으로 추정된다.
- [0301] 이러한 추정은 LPFG가 본 실시예에 사용된 DCF보다 약 2배 더 작은 내부클래딩 직경을 가지는 다른 DCF에 형성된 이전의 연구에서 $\sim 0.8 \text{ pm}/\mu \varepsilon$ 의 스트레인 민감도를 나타내었던 것에 의해 뒷받침되며, 본 실시예의 DCF MZI에 있어서 DCF의 큰 내부클래딩 직경과 그로 인해 외부클래딩이 차지하는 규모가 작은 것이 낮은 스트레인 민감도의 원인인 것으로 판단된다.
- [0303] 마지막으로, 본 발명자들은, $1.484 \sim 3.925 \text{ m}^{-1}$ 의 인가 곡률(ΔC) 범위 및 $15 \sim 75 \text{ }^\circ\text{C}$ 의 인가 온도(ΔT) 범위 내에서 임의의 16개(ΔC , ΔT) 지점에 대해 동시측정을 수행하였다.
- [0305] 이를 위해, 4가지의 서로 다른 ΔC ($= 1.484, 2.570, 3.317, 3.925 \text{ m}^{-1}$)의 값과 4 가지의 ΔT ($= 15, 35, 55, 75 \text{ }^\circ\text{C}$)의 값에 대하여 10회 동시측정을 수행하였고, 그 결과를 도 12에 나타내었다.
- [0307] 즉, 도 12를 참조하면, 도 12는 2개의 표지자 골(DA 및 DB)을 이용하여 인가된 ΔC , ΔT 의 값에 대하여 본 발명의 실시예에 따른 광섬유 센서에 의해 측정된 ΔC , ΔT 값을 나타내는 도면이다.
- [0309] 여기서, 도 12에 있어서, 측정된 지점의 오차막대(error bar)는 적용된 파라미터 값의 평균편차(mean deviation)를 나타낸다.
- [0311] 또한, 상기한 측정 범위 내에서 측정된 (ΔC , ΔT) 값의 표준편차(standard deviation)는, DA 및 DB의 경우 각각 $\sim 0.059 \text{ m}^{-1}$ 및 $\sim 0.85 \text{ }^\circ\text{C}$ 이고, DB 및 DC의 경우 각각 $\sim 0.075 \text{ m}^{-1}$ 및 $\sim 1.31 \text{ }^\circ\text{C}$ 이며, DA 및 DC의 경우 각각 $\sim 0.086 \text{ m}^{-1}$ 및 $\sim 0.64 \text{ }^\circ\text{C}$ 이다.
- [0313] 이러한 측정결과를 통해, 본 발명의 실시예에 따른 광섬유 센서는 충분한 측정 정확도로 굽힘과 온도의 분리 측정(separate measurement)을 수행할 수 있음을 알 수 있다.

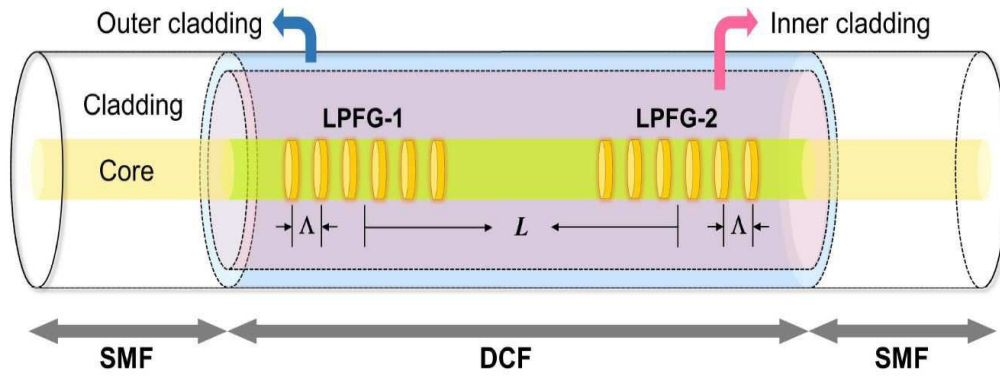
- [0315] 더욱이, 동시측정의 표준편차, 굽힘 민감도(bending sensitivity), 변형 둔감도(strain insensitivity) 등을 고려하는 것에 의해, 선택된 3가지 경우의 표지자 중 DA와 DB가 최적의 센서 표지자로 결정될 수 있다.
- [0317] 감지 가능한 최소 수준(detectable minimum level)(C 또는 T)과 관련하여, 본 발명자들은, ΔC 또는 ΔT 의 감지를 위해 $|\Delta \lambda_{DA}| \geq 20 \text{ pm}$, $|\Delta \lambda_{DB}| \geq 20 \text{ pm}$ 및 $|\Delta \lambda_{DC}| \geq 20 \text{ pm}$ 의 세 부등식 중 적어도 하나가 만족되어야 함을 확인하였으며, 이는 OSA의 분해능 대역폭(resolution bandwidth)에 의해 감지될 수 있는 최소 감지 가능 파장 이동(minimum detectable wavelength shift)이 20 pm이기 때문이다.
- [0319] 또한, 본 실시예의 센서 시스템에 있어서, 최소 감지 가능 굽힘 및 온도는 고정된 값을 가지지 않는 ΔC 및 ΔT 의 함수이고, 여기서, ΔC 또는 ΔT 가 0인 것으로 가정하면, 최소 감지 가능 굽힘 또는 온도는 최적 표지자(즉, DA 및 DB)를 이용할 경우 각각 $\sim 0.022 \text{ m}^{-1}$ 또는 $\sim 0.331 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 추정된다.
- [0321] 아울러, 본 발명자들은, 상기한 [수학식 8] 내지 [수학식 10]에 근거하여, 감지 가능 파장 이동(20 pm)의 정수 배수(예를 들면, $\delta \lambda_{DA}$, $\delta \lambda_{DB}$ 및 $\delta \lambda_{DC} = 20 \text{ N}$, N은 정수)로 정의된 세 표지자 골의 몇 가지 이산 파장 이동(discrete wavelength shift)에 대하여 본 발명의 실시예에 따른 광섬유 센서의 굽힘 및 온도 분해능을 도출하였다.
- [0323] 계산 결과로부터, 추정된 본 발명의 실시예에 따른 광섬유 센서의 굽힘 및 온도 분해능은 각각 최적의 센서 표지자를 이용할 경우 약 -0.0026 m^{-1} 및 $0.312 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 나타났으며, 특히, 1 pm의 파장 정확도(wavelength accuracy)를 가지는 광센서 복조기(optical sensing interrogator)(Micron Optics HYPERION si155)를 사용할 경우 이러한 분해능을 각각 약 -0.0001 m^{-1} 및 $\sim 0.016 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 향상시킬 수 있다.
- [0325] 즉, 도 13을 참조하면, 도 13은 본 발명의 실시예에 따른 광섬유 센서와 종래 기술에 제안된 광섬유 센서들의 굽힘, 온도, 변형에 대한 민감도 및 동시측정 기능을 포함하는 센서특성(sensor characteristics)을 비교한 결과를 표로 정리하여 나타낸 도면이다.
- [0327] 여기서, 도 13에 나타난 비교결과에 있어서, PCF는 광자 결정 광섬유(photonic crystal fiber), HST는 험프형 테이퍼(hump-shaped taper), PSS는 땅콩형 구조(peanut-shaped structure)이며, 본 발명의 실시예에 따른 광섬유 센서는 하단의 Cascaded LPFG's on DCF 항목에 나타나 있고, 나머지는 종래 기술에 제시된 광섬유 센서이며, 3가지 측정량(굽힘, 온도, 변형)에 대한 각각의 민감도는 실험에서 얻어진 민감도 중 최고값을 적용하였다.
- [0329] 도 13의 표에 나타난 바와 같이, 본 발명의 실시예에 따른 광섬유 센서는 굽힘 민감도 측면에서 종래 기술의 광섬유 센서들보다 우수하지는 않지만 이것이 동시측정 정확도에 영향을 미치지 않으며, 이는 센서 표지자의 섭동에 의한 응답(perturbation-induced response)의 독립성과 낮은 조건수(condition number)에 의해 충분히 보장되고, 또한, 본 발명의 실시예에 따른 광섬유 센서의 고유한 특징인 변형 둔감도(strain insensitivity)는 측정 정확도와 안정성을 향상시킬 수 있다.
- [0331] 상기한 바와 같이, 본 발명에서는, DCF에 CO₂ 레이저로 제작된 LPFG를 이용하여 스트레인에 무관하게(strain-insensitive) 굽힘과 온도의 동시측정을 수행할 수 있는 광섬유 센서를 제시하였으며, 이를 위해, 굽힘 및 온도를 동시에 측정하기 위한 센서 표지자로서 본 발명의 실시예에 따라 제작된 DCF MZI의 간섭 스펙트럼의 다중 투과 골에서 3가지(즉, DA, DB 및 DC)를 선택하였다.

- [0333] 또한, 측정된 DA, DB, DC의 굽힘 민감도는 $1.484 \sim 4.451 \text{ m}^{-1}$ 의 곡률 범위에서 -427.53 , -911.29 및 233.33 pm/m^{-1} 이었고, 측정된 온도 민감도는 $30 \sim 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 온도 범위에서 각각 60.49 , 56.44 및 $74.61 \text{ pm/}^{\circ}\text{C}$ 이었으며, 따라서 굽힘 및 온도에 대한 선형 및 독립적 응답으로 인해, 미리 결정된 굽힘 및 온도 민감도로 측정된 파장 이동을 변환함으로써 3가지 골 중 2개(총 3가지 경우)로 센서부에 인가된 굽힘 및 온도 변화를 동시에 추정할 수 있다.
- [0335] 특히, 본 발명에서는, $0 \sim 1136 \mu \varepsilon$ 의 스트레인 범위에서 세 표지자 골의 변형에 의한(strain-induced) 스펙트럼 변화도 조사하였고, 평가된 스트레인 민감도는 -0.019 , -0.048 및 $0.045 \text{ pm/} \mu \varepsilon$ 이었으며, 이러한 민감도는 기존의 LPFG보다 25배 이상 낮은 것으로 굽힘 및 온도 측정결과에 미치는 스트레인의 영향을 크게 감소시킨다.
- [0337] 마지막으로, 인가된 곡률 범위 $1.484 \sim 3.925 \text{ m}^{-1}$ 및 인가된 온도 범위 $15 \sim 75 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 내에서 임의의 16 개 지점에 대하여 굽힘과 온도의 동시측정을 수행한 결과, 세 표지자 골 중에서 선택된 2개의 최적 표지자(DA 및 DB)의 경우 측정된 굽힘 및 온도 값의 표준편차는 각각 $\sim 0.059 \text{ m}^{-1}$ 및 $\sim 0.85 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 나타났다.
- [0339] 이러한 실험결과로부터, 본 발명의 실시예에 따른 DCF MZI는, 실질적으로 스트레인에 둔감하고(strain-insensitive) 비용면에서 효율적인(cost-effective) 센서부로서 다양한 산업분야에서 구조 건전성 진단(structure health monitoring)을 위한 굽힘 및 온도의 구별(discrimination)에 유익하게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.
- [0341] 따라서 상기한 바와 같이 하여 본 발명의 실시예에 따른 장주기 광섬유 격자(LPFG) 기반 이중 클래딩 광섬유(DCF) 마하젠더 간섭계(MZI) 및 이를 이용한 스트레인에 무관한 굽힘 및 온도 동시 측정장치 및 방법을 구현할 수 있으며, 그것에 의해, 본 발명에 따르면, 이중 클래딩 광섬유(DCF)에 일정한 주기로 이산화탄소(CO_2) 레이저 펄스를 조사하여 DCF의 코어(core) 굴절률을 주기적으로 변조시켜 제작되는 LPFG 2개를 일정한 간격을 두고 직렬로 연결하여 이루어지는 것에 의해 스트레인에 무관하게 굽힘 및 온도의 동시측정이 가능하도록 구성되는 장주기 광섬유 격자(LPFG) 기반 이중 클래딩 광섬유(DCF) 마하젠더 간섭계(MZI) 및 이를 이용한 스트레인에 무관한 굽힘 및 온도 동시 측정장치 및 방법이 제공됨으로써, 온도와 굽힘 사이의 교차 민감도로 인해 감지 성능이 제한되고, 특히, 센서부에 굽힘이 인가될 때 스트레인(strain)이 동시에 가해지는 것에 의해 측정결과가 부정확해지는 한계가 있었던 종래 기술의 광섬유 브래그 격자(FBG) 및 장주기 광섬유 격자(LPFG) 기반 측정장치 및 방법들의 문제점을 해결할 수 있다.
- [0343] 또한, 본 발명에 따르면, 상기한 바와 같이 측정 중 센서부에 스트레인이 인가되더라도 스트레인에 무관하게 굽힘과 온도를 동시에 측정할 수 있도록 구성되는 장주기 광섬유 격자(LPFG) 기반 이중 클래딩 광섬유(DCF) 마하젠더 간섭계(MZI) 및 이를 이용한 스트레인에 무관한 굽힘 및 온도 동시 측정장치 및 방법이 제공됨으로써, 복수의 센서부를 사용할 필요 없이 단일 센서부를 이용하여 두 가지 물리량의 동시측정이 가능하고, 기존의 FBG에 비해 제작공정의 편의성 향상 및 제작비용 절감이 가능하며, 이산화탄소 레이저를 사용함으로써 마스크 없이 제작이 가능하여 저단가 LPFG 제작이 가능한 데 더하여, 굽힘이 인가될 때 인장/압축 스트레인이 인가되더라도 LPFG의 스펙트럼에 변화가 없으므로 굽힘 및 온도 동시측정의 정확도를 향상시킬 수 있다.
- [0345] 이상, 상기한 바와 같은 본 발명의 실시예를 통하여 본 발명에 따른 장주기 광섬유 격자(LPFG) 기반 이중 클래딩 광섬유(DCF) 마하젠더 간섭계(MZI) 및 이를 이용한 스트레인에 무관한 굽힘 및 온도 동시 측정장치 및 방법의 상세한 내용에 대하여 설명하였으나, 본 발명은 상기한 실시예에 기재된 내용으로만 한정되는 것은 아니며, 따라서 본 발명은, 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 설계상의 필요 및 기타 다양

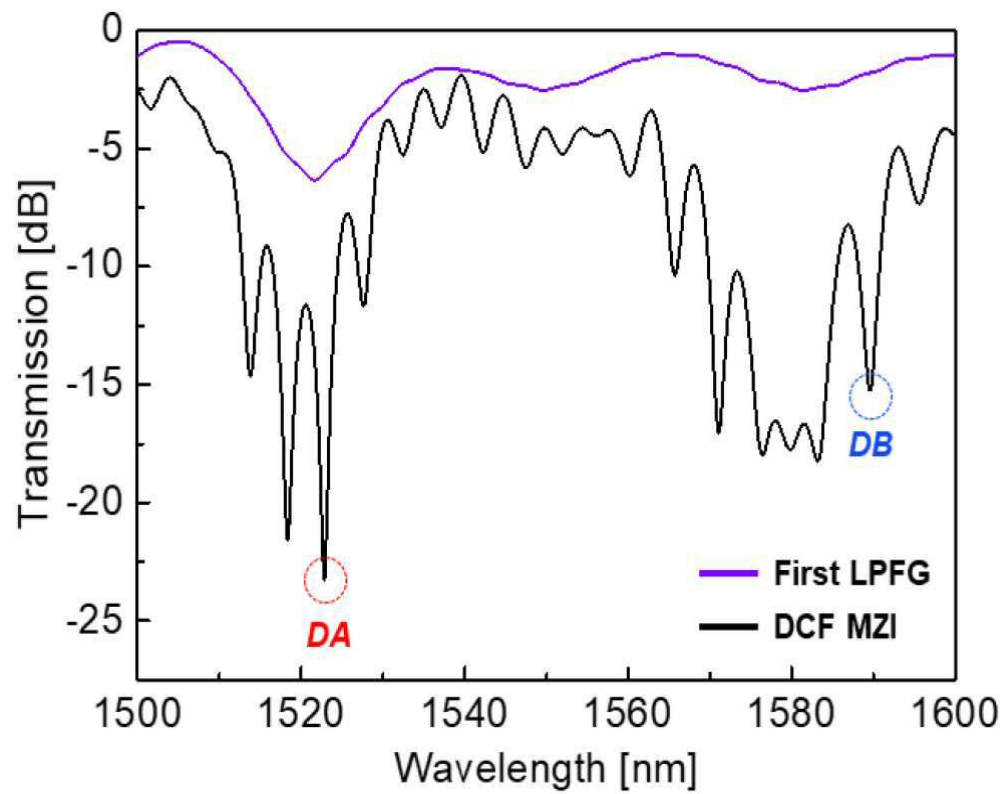
한 요인에 따라 여러 가지 수정, 변경, 결합 및 대체 등이 가능한 것임은 당연한 일이라 하겠다.

도면

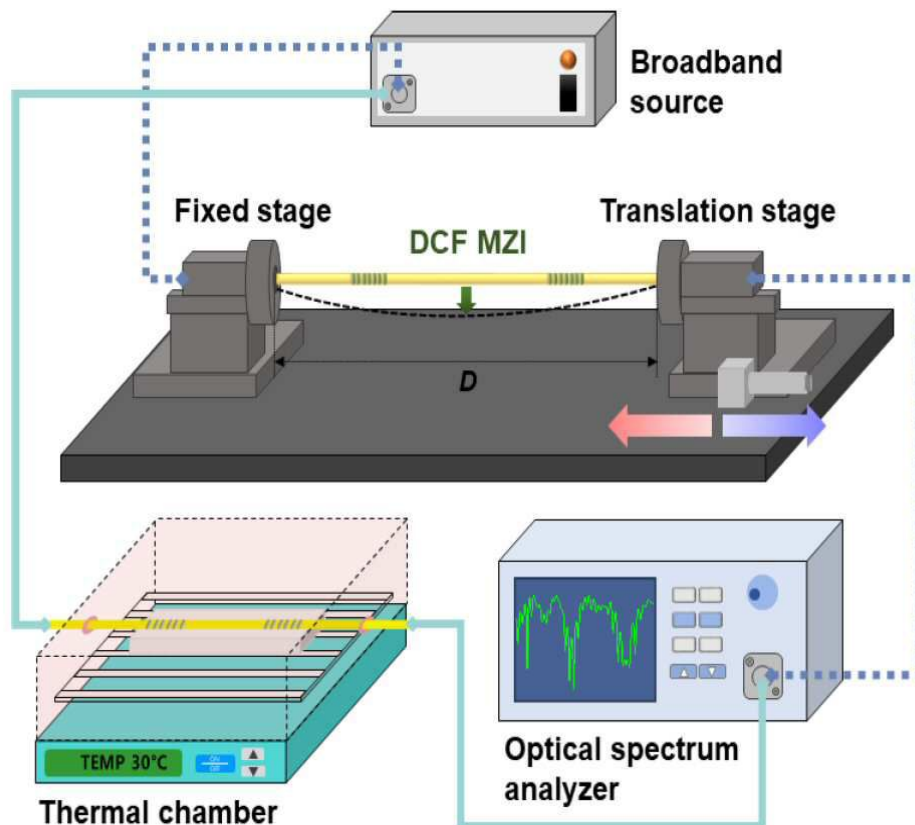
도면1



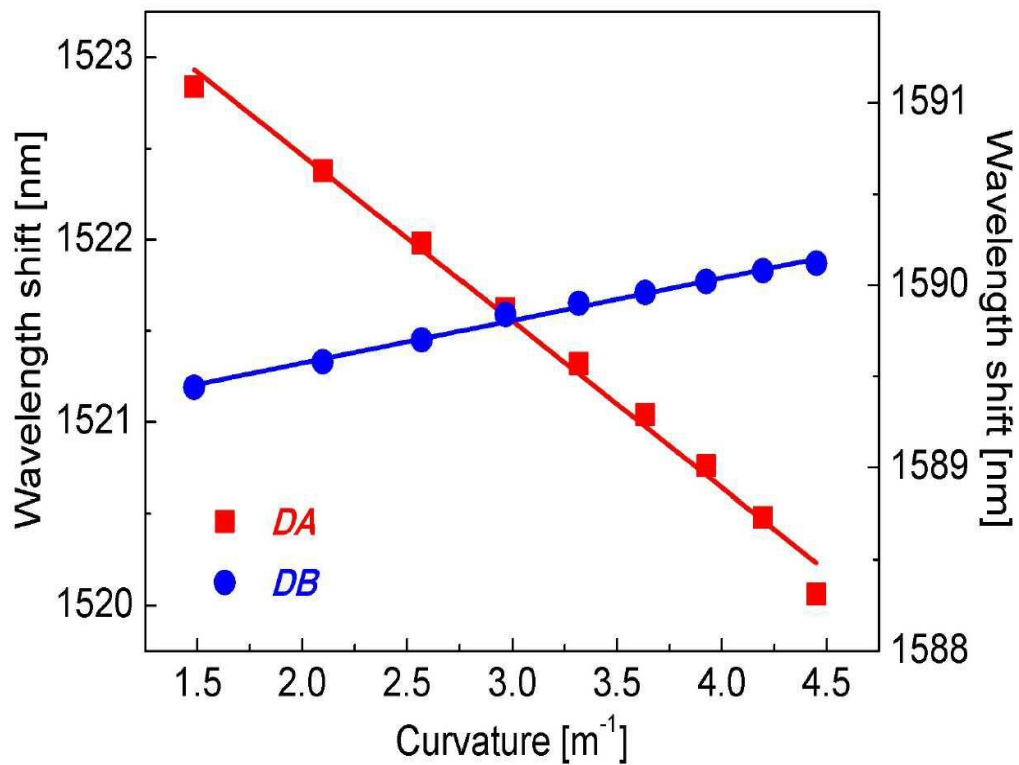
도면2



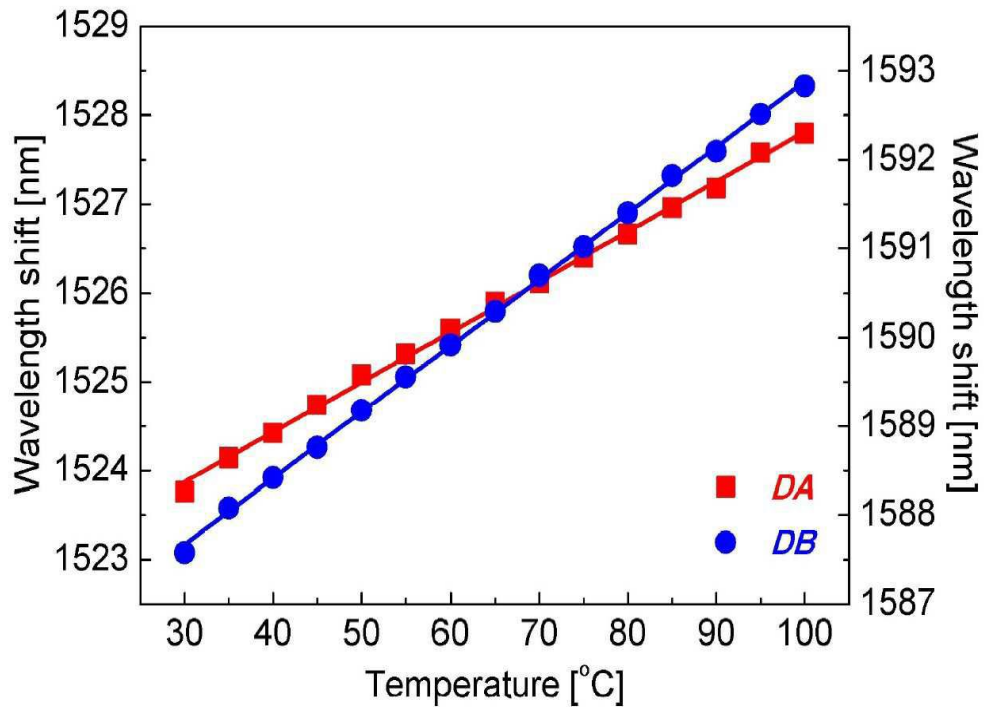
도면3



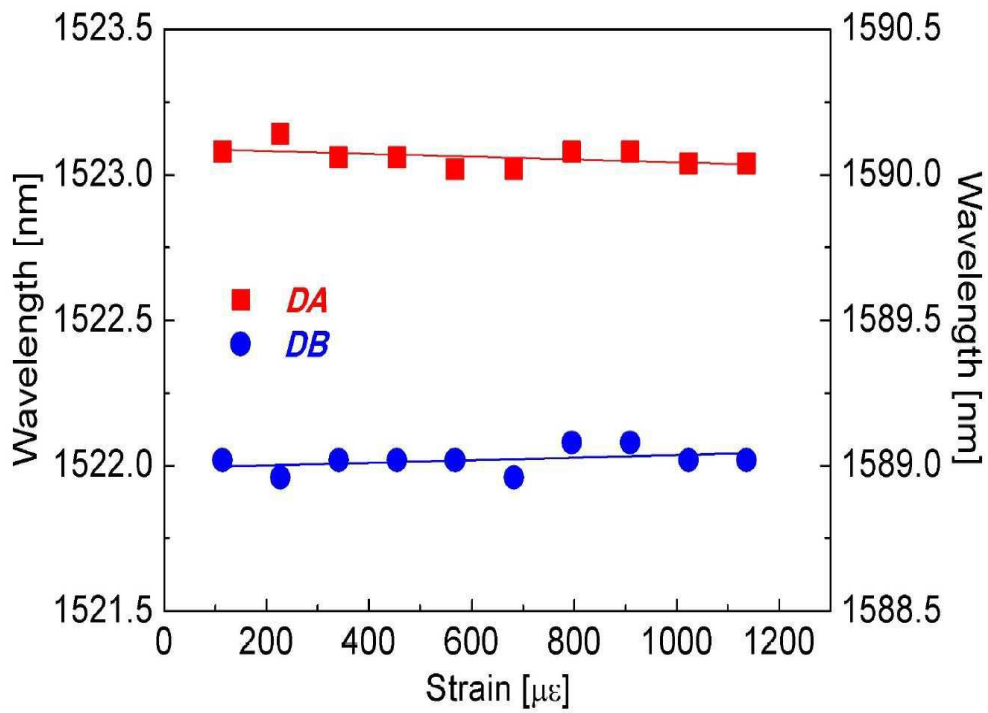
도면4



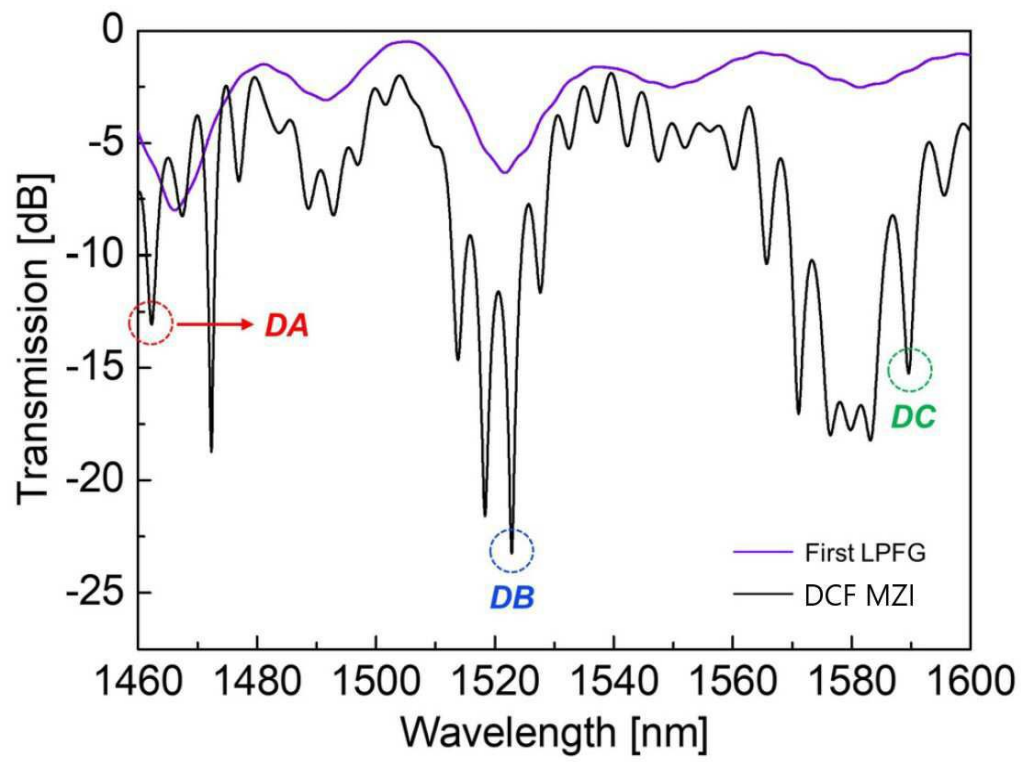
도면5



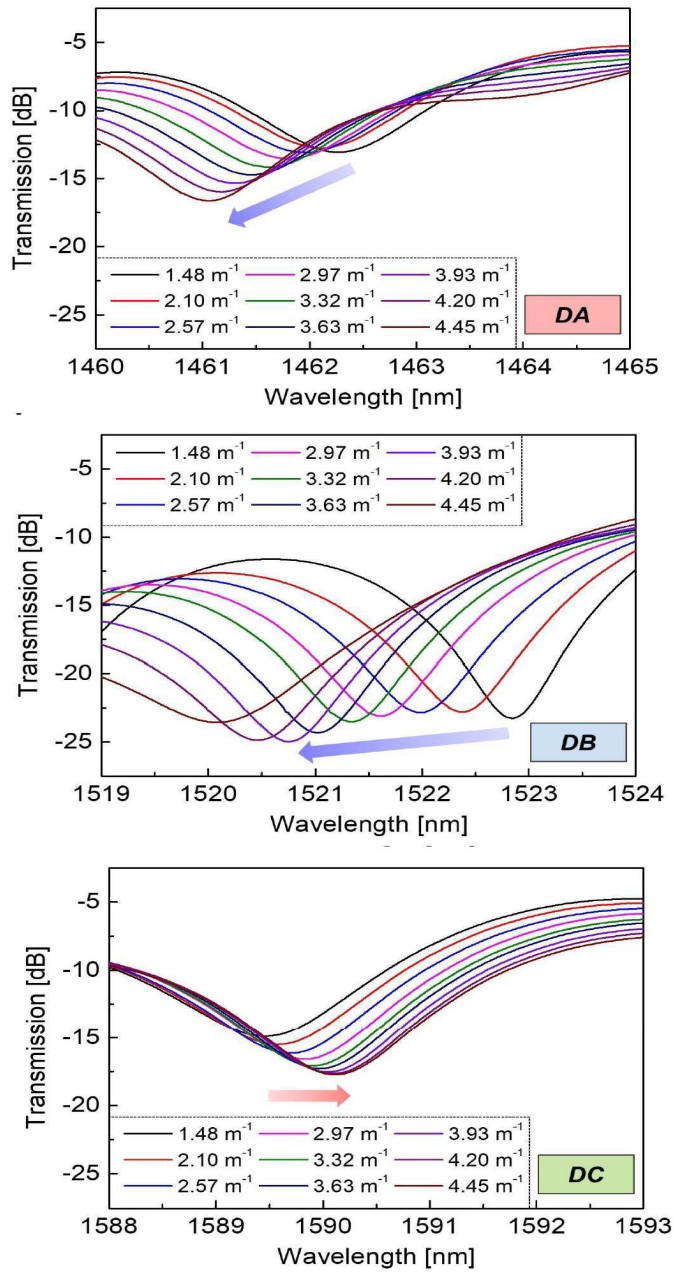
도면6



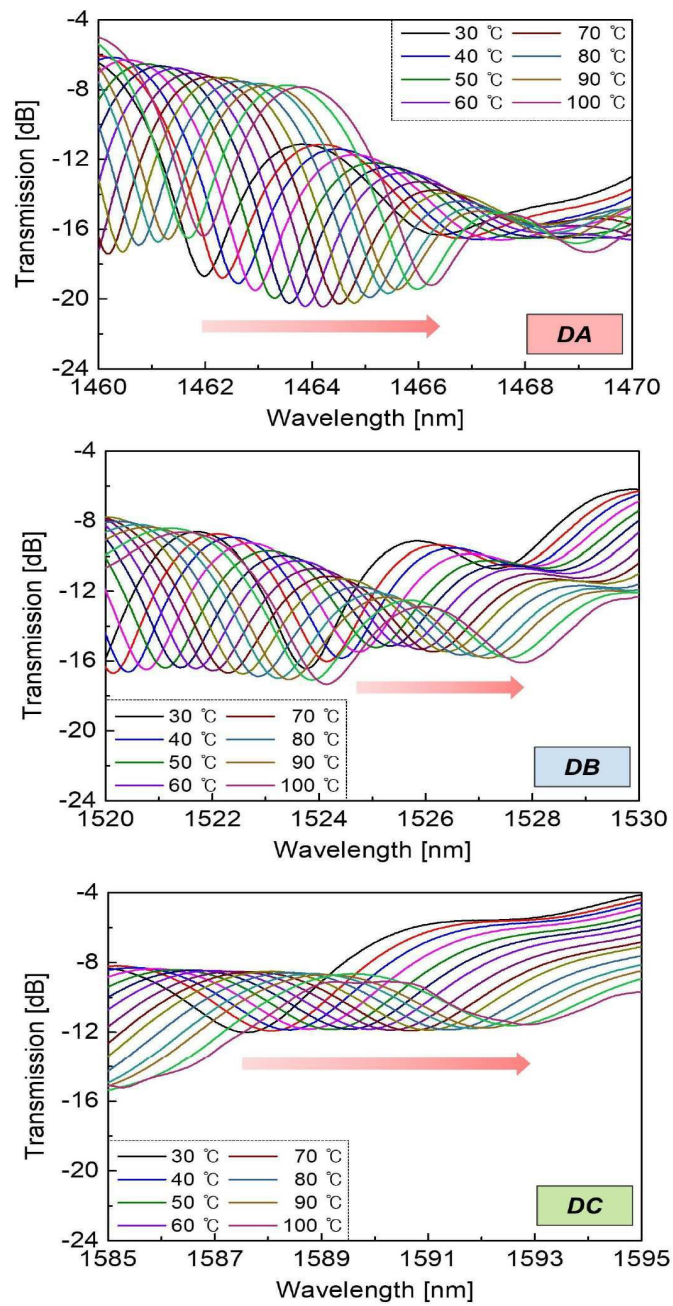
도면7



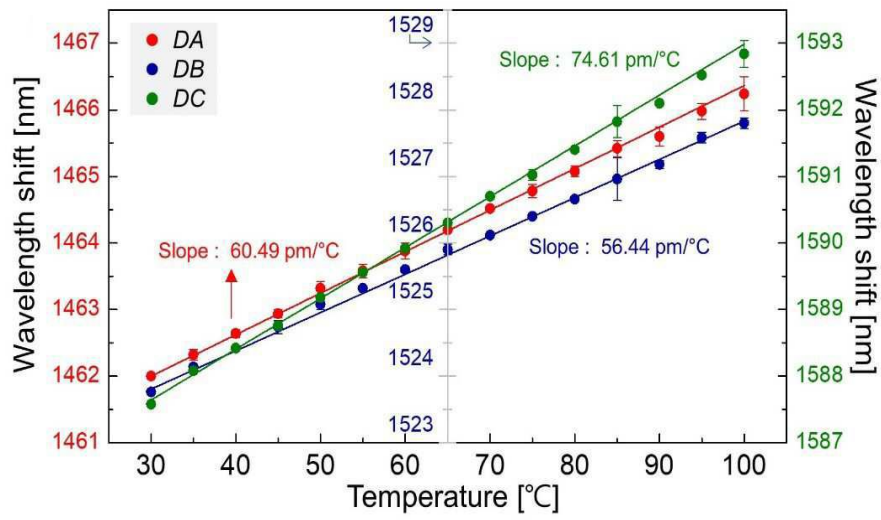
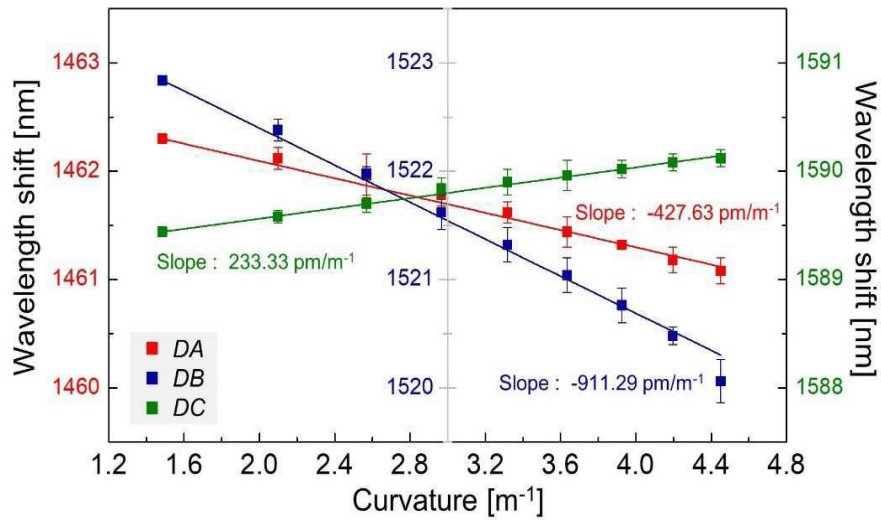
도면8



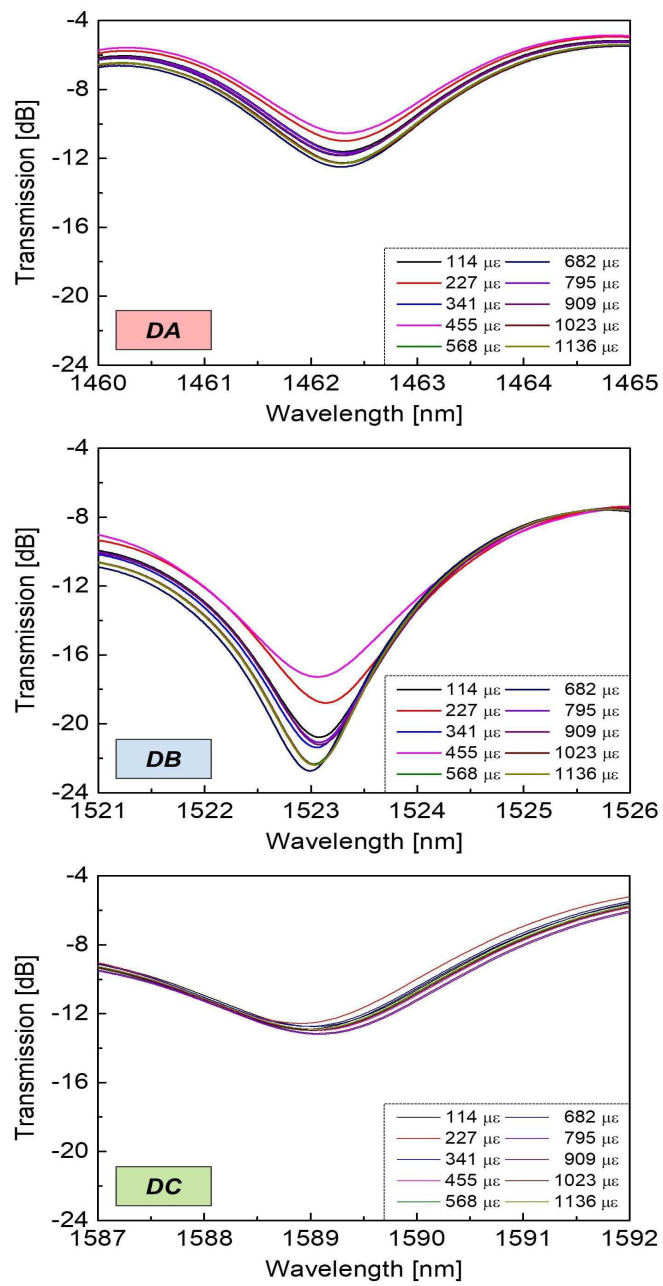
도면9



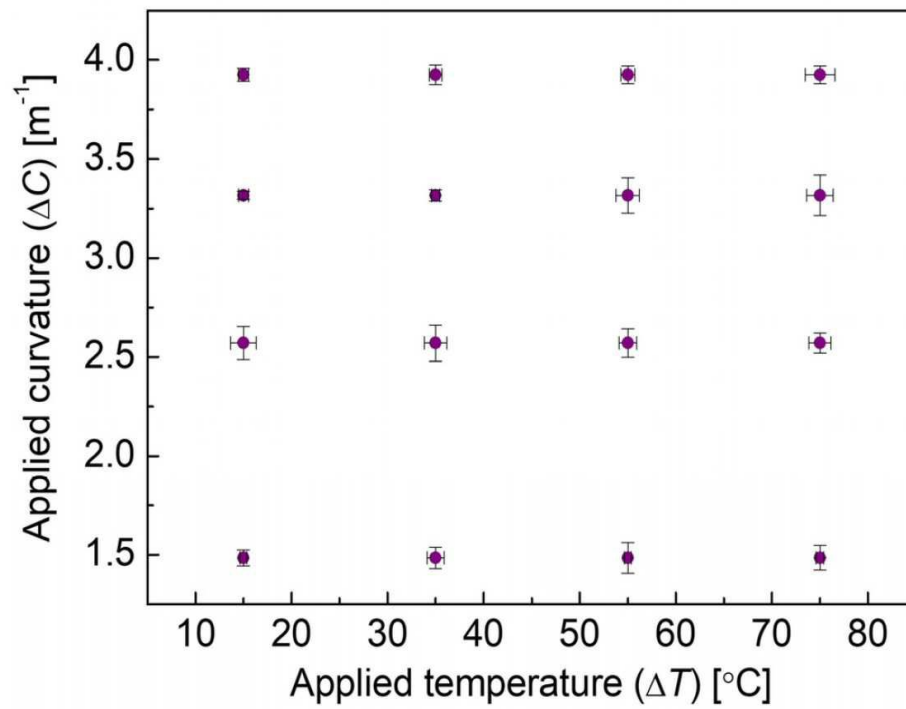
도면10



도면11



도면12



도면13

COMPARISON OF SENSOR CHARACTERISTICS

Sensor structure	Bending sensitivity [nm/m ⁻¹]	Temperature sensitivity [pm/°C]	Strain sensitivity [pm/με]	Simultaneous measurement capability (C & T)
Cascaded LPFG's on PCF	36.16	4.6	-3.0	No
Tilted LPFG's on SMF	-4.59	40.6	N.A.	No
Cascaded LPFG and HST on SMF	-6.59	52.0	N.A.	No
LPFG on SMF	-14.00	-164	N.A.	Yes
Cascaded PSS's on SMF	-21.87	N.A.	N.A.	No
Cascaded LPFG's on DCF	-0.91	74.61	-0.048	Yes