

論文97-34D-3-12

Mach-Zehnder 간섭계를 이용한 광섬유 브래그 격자 센서 (Fiber Bragg grating sensor using a Mach-Zehnder interferometer)

宋民鎬*, 李相培**, 崔相三**, 李竝浩*

(Minho Song, Sang Bae Lee, Sang Sam Choi, and ByoungHo Lee)

요 약

일정한 광경로차를 갖는 마하-젠더 간섭계를 이용하여 광섬유 브래그 격자에서 반사되는 광 파장의 변화를 간섭 신호의 위상변화로 변환시켜, 브래그 파장의 변화를 정밀하게 측정할 수 있는 센서 시스템을 구성하고 실험하였다. 격리된 기준 광섬유 격자를 이용하여 간섭계의 온도 흐름에 의한 출력 위상의 변화를 보정하였으며, 구성한 센서 시스템의 온도 및 스트레인의 측정 정밀도는 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$ 와 $0.26\text{ }\mu\text{strain}$ 이었고, 0.1 nm 의 파장 해상도를 갖는 분광 분석기를 이용하는 경우에 비하여 300배 이상 향상된 정밀도를 보였다.

Abstract

We constructed a very accurate fiber Bragg grating sensor system using an unbalanced Mach-Zehnder interferometer which converts the measurand-induced Bragg wavelength shift to phase change of the interference signal. With a shielded reference grating, output phase drift which originates from the thermal drift on the interferometer was compensated. Measured accuracy of the constructed system was $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $0.26\text{ }\mu\text{strain}$ for temperature and strain measurement, respectively. It is over 300 times better resolution compared to the conventional optical spectrum analyzer which has 0.1 nm wavelength resolution capability.

I. 서 론

1978년 K.O. Hill^[1] 등은 Ge이 많이 첨가된 광섬유 (germanosilicate fiber)에 488 nm 파장의 아르곤 (Ar^+) 레이저 빔을 입사시킨 후 광섬유 양단의 반사에 의해 형성된 정상파(standing wave)가 광섬유 내에 브래그 격자(Bragg grating)를 형성함을 관측하였다. 이와 같은 방법은 광섬유 격자의 크기나 브래그 파장,

반사율등을 자유롭게 조절할 수 없기 때문에 그 응용이 활발히 연구되지 못하다가, 1989년 G. Meltz^[2] 등이 자외선 레이저를 광섬유 측면에 조사하여 광섬유의 특정 부위에 원하는 파장에 대해서 반사 특성을 보이는 브래그 격자를 새김으로써, 실제 여러 분야에 응용할 수 있는 길을 마련하였다. 또한 1993년, K. O. Hill^[3]과 D. Z. Anderson^[4] 등에 의해 고안된 위상 마스크(phase mask)를 이용한 광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating, FBG) 제조 방법은 저렴한 장비로 손쉽게 광섬유 격자를 생산할 수 있게 함으로써 광섬유 격자의 폭 넓은 연구를 가속화하였다. 광섬유 격자의 응용은 개발 이후 다양한 분야에 대해서 활발히 연구되기 시작하여 광섬유 레이저^[5], 센서^[6], 필터(filter)^[7], 펄스 압축(pulse compression)^[8], EDFA 이득 평탄화(erbium-doped fiber amplifier

* 正會員, 서울大學校 電氣工學部

(School of Electrical Engineering, Seoul National University)

** 正會員, 韓國科學技術研究院 應用物理研究室

(Applied Physics Group, Korea Institute of Science and Technology)

接受日字:1996年12月4日, 수정완료일:1997年2月24日

gain flattening)¹⁹¹ 등의 많은 연구 결과가 발표되었다. 특히 센서의 경우, 광섬유 격자의 파장 인코딩(wavelength encoding) 특성으로, 기존 광섬유 센서의 장점과 더불어 측정 편이성과 다중점(multi point) 센서로의 확장에 있어서 더욱 향상된 특성을 가지고 있으므로 특별히 관심이 집중되고 있는 분야이다.

광섬유 브래그 격자는 그림 1과 같은 구조 및 동작 특성을 가진다. Germanosilicate 광섬유의 측면에 244 nm 근처 파장의 자외선 레이저를 이용하여 간섭 무늬를 형성하면, 광섬유 코어의 굴절률은 간섭 무늬의 에너지 분포에 따라 주기적으로 변화한다. Germanosilicate 광섬유가 자외선에 대해서 광감응성(photo-sensitivity)을 가지는 과정은 완전하게 밝혀지지 않았으나, 광섬유 코어 내의 GeO 분자의 산소 결손에 의한 것으로 추측하는 것이 일반적인 경향이다¹¹⁰¹.

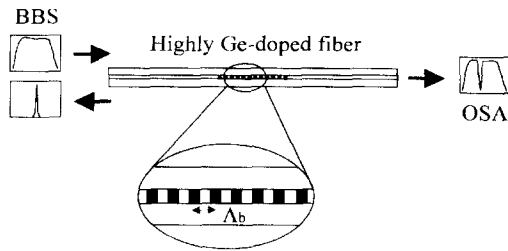


그림 1. 광섬유 브래그 격자의 형태와 동작 특성 (BBS: 광폭 광원, OSA: 분광 분석기)

Fig. 1. Fiber Bragg grating and its reflection characteristic. (BBS: broadband source, OSA: optical spectrum analyzer)

빛이 진행하는 광섬유의 코어내에 주기적인 굴절률 변화가 새겨진 것은 잘 알려진 브래그 격자(Bragg grating)의 역할을 하게 되며 그림 1과 같이 광폭 스펙트럼(broadband spectrum)을 광섬유에 입사시킬 경우, 아래 식과 같은 브래그 조건(Bragg condition)에 의해서 결정된 파장 성분이 광섬유 격자 부위에서 반사되며 나머지 파장 성분은 그냥 통과한다.

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda_b \quad (1)$$

윗 식에서 n_{eff} 은 광섬유 격자의 유효 굴절률(effective refractive index)이고 Λ_b 는 광섬유 코어에 새겨진 격자의 간격(grating period)이다. 따라서 격자에서 반사되는 브래그 파장(Bragg wavelength)은 유효 굴절률과 격자 간격의 함수이며 광섬유 격자에 온도나 스

트레인 등의 외부 물리량을 가할 경우 이들 값이 변하여 브래그 파장은 달라진다. 브래그 파장의 변화를 정밀하게 측정한다면 광섬유 격자에 가해진 미지의 물리량(온도, 스트레인)을 식 (2)를 통하여 역으로 계산할 수 있으며, 이것이 광섬유 격자가 센서로 사용될 수 있는 기본 원리이다.

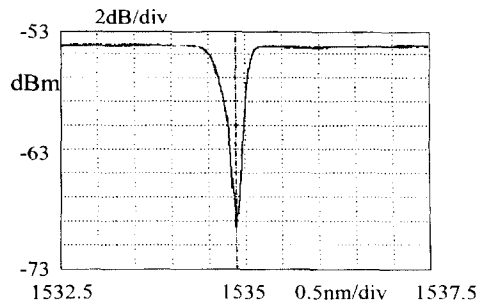
$$\Delta\lambda_B = \lambda_B [(\alpha + \xi)\Delta T + (1 - \nu_e)\Delta\epsilon] = K_T\Delta T + K_\epsilon\Delta\epsilon \quad (2)$$

여기에서

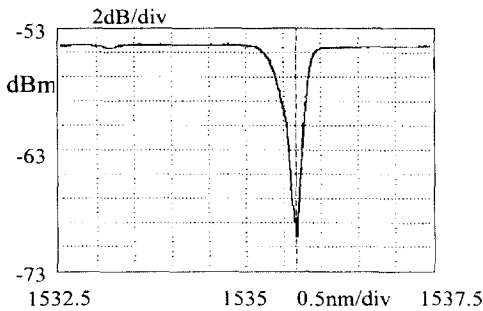
$$p_e = \left(\frac{n^2}{2}\right)[p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \quad (3)$$

이며, 식 (2)에서 α 는 광섬유의 온도에 따른 팽창계수(thermal expansion coefficient)이고 ξ 는 온도에 의한 광섬유의 굴절률 변화를 나타내는 열광학 계수(thermo-optic coefficient)로서 실리카(silica)의 경우 $\alpha \sim 0.510^{-6}$, $\xi \sim 8.310^{-6}$ 정도의 값을 가지므로¹¹¹, 온도에 의한 브래그 파장 변화는 대부분 굴절률 변화에 기인한다. 또한 p_e 는 광탄성 상수(photo elastic constant)이고 p_{11} 과 p_{12} 는 스트레인 광학 텐서(strain-optic tensor)의 성분이며 n 은 코어의 굴절률, ν 는 Poisson's ratio이다. 광탄성 상수 p_e 는 germanosilicate glass의 경우 대략 0.22의 값을 가진다.¹¹² 광섬유 격자의 온도 및 스트레인의 변화(ΔT , $\Delta\epsilon$)에 대한 브래그 파장의 변화는 광섬유로 측정가능한 범위내에서는 대체로 선형적이며 단순화된 선형 계수 K_T 와 K_ϵ 만으로도 센서 특성을 표현할 수 있다. K_T 와 K_ϵ 는 간단한 실험 장치를 이용하여 구할 수 있다. 그림 1과 같이 LED(light emitting diode)를 이용하여 광섬유 격자의 파장 가변 범위를 모두 포함하는 광폭 스펙트럼을 광섬유에 입사시켜 광섬유 격자를 통과한 투과 스펙트럼을 분광 분석기(optical spectrum analyzer)로 관측한다. 상용화된 LED의 광출력이 작아서(대략 10 ~ 15 μW) 반사 스펙트럼을 광섬유 커플러(fiber coupler)등을 이용하여 직접 관측하는 것은 매우 어렵기 때문이다. 투과 스펙트럼의 골은 FBG가 반사시킨 파장 부분을 그대로 표현하므로 반사된 스펙트럼을 보지 않고서도 같은 효과를 볼 수 있다. 그림 2는 이와 같은 방법으로 온도 변화에 따라 광섬유 격자의 투과 스펙트럼이 변한 것을 실측한 예이다. 25 °C의 경우에 비하여 100 °C로 가열했을 경우, 브래그 파장이 0.8 nm 정도 장파장쪽으로 이동한 것을 알

수 있다. 그림 3은 가해지는 온도와 스트레인에 대한 브래그 파장의 변화를 분광 분석기를 이용하여 자세히 측정한 결과이다. 두 가지 물리량에 대해서 모두 선형적인 결과를 보여주고 있으며 최소 자승법을 이용하여 직선화(linear fitting)해서 얻은 K_T , K_ϵ 의 값은 $10.60 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, $1.26 \text{ pm}/\mu\text{strain}$ 이다. $1 \mu\text{strain}$ 이란 1 m 길이의 광섬유가 $1 \mu\text{m}$ 늘어난 경우의 축방향 스트레인을 뜻한다.



(a)



(b)

그림 2. 온도가 가해진 경우의 브래그 파장의 변화
(a) 25°C 인 경우, (b) 100°C 인 경우

Fig. 2. Spectra of the temperature characteristics.
(a) at 25°C , (b) at 100°C

식 (2)에 K_T , K_ϵ 와 미지의 온도 또는 스트레인에 의한 브래그 파장 변화량($\Delta\lambda_B$)을 대입하여 그 미지의 물리량을 계산해낼 수 있다. 그러나 분광 분석기를 이용하여 브래그 파장의 변화를 측정하는 경우, 보통 상용화된 분광 분석기의 파장 해상도(wavelength resolution)는 $0.05 \sim 0.1 \text{ nm}$ 에 불과하므로, 광섬유 격자의 K_T , K_ϵ 값을 고려할 때, 측정가능 최소 단위는 $5 \sim 10^\circ\text{C}$, $40 \sim 80 \mu\text{strain}$ 정도임을 알 수 있다. 따라서 분광 분석기를 이용한 측정의 경우, 정밀한 측정은 불가능하다.

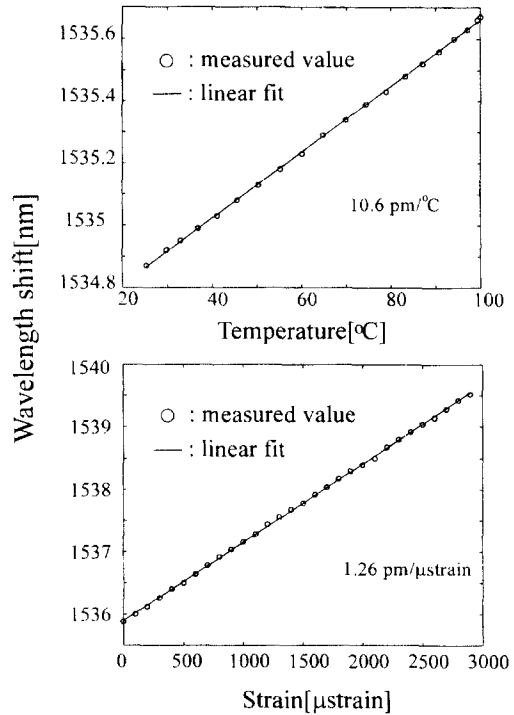


그림 3. 광섬유 브래그 격자 센서의 온도와 스트레인에 대한 응답 특성

Fig. 3. Temperature and strain response of fiber Bragg grating sensor.

또한 분광 분석기는 측정하는 파장 영역의 주사(scanning)가 따라야 하므로 응답 속도에 한계가 있기 때문에, 빠르게 변화하는 동적(dynamic) 물리량은 측정할 수가 없다. 이 외에도 가격이 비싸고 부피가 크며 기계적으로 안정하지 못하다는 등의 단점이 있으므로 이런 단점들을 극복하고 보다 정밀하게 브래그 파장의 변화량을 측정할 수 있는 센서 시스템의 개발이 요구된다. 본 논문에서는 이와 같은 문제점들을 해결할 수 있는 방법으로, 일정한 광경로 차이(optical path difference)를 가지는 마하-젠더 간섭계(Mach Zehnder interferometer)를 이용하여 빠른 속도로 아주 작은 파장의 변화도 감지할 수 있는 광섬유 브래그 격자 센서 시스템에 대해서 논하고자 한다.

II. 이론

마하-젠더 간섭계를 이용한 광섬유 브래그 격자 센서의 기본 원리는 브래그 파장(Bragg wavelength)의 변화를 간섭 신호의 위상 변화로 변환시켜서 그 변화

량을 측정하는 것이다.

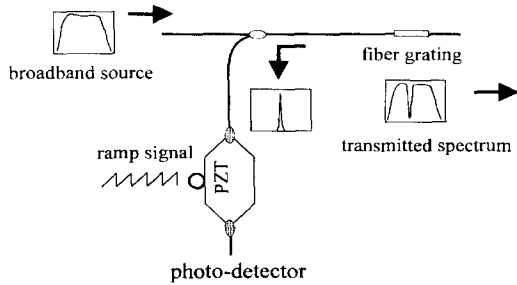


그림 4. 마하-젠더 간섭계를 이용한 광섬유 브래그 격자 센서의 개략도

Fig. 4. Schematic of the Mach-Zehnder interferometric fiber Bragg grating sensor.

그림 4와 같이, 광섬유 격자에서 반사된 브래그 파장 성분은 간섭계를 거친 후, 광 검출기에서 간섭 신호를 발생한다¹⁶⁾. 50 : 50 광섬유 커플러(fiber coupler)를 사용하여 간섭계 양쪽 팔의 광량이 같다면 간섭계의 기본 원리로부터 광 검출기에서의 간섭 신호는 아래 식과 같이 표현된다.

$$I_{det} = 2I [1 + \exp[-(\pi\Delta\nu\tau)^2] \cos(2\pi\bar{\nu}\tau)] \quad (4)$$

I 는 양쪽 팔을 통과하는 광량이고 τ 는 간섭계의 광경로차에 의한 양쪽 팔 사이의 시간 지연이며 $\bar{\nu}$ 는 빛의 중심 주파수(center frequency), $\Delta\nu$ 는 밴드폭(frequency bandwidth)이다. 지수 함수항은 가우시안 스펙트럼(Gaussian spectrum)의 코히어런스 정도(coherence degree)를 나타내는 양이며 간섭을 일으키는 빛의 파장과 폭(bandwidth), 간섭계의 광경로차 등에 의해서 결정되는 값이다¹³⁾. 광섬유 격자에서 반사되는 스펙트럼의 폭(spectral bandwidth)은 광섬유 격자의 제작 조건에 따라 다르지만 대개 0.1 ~ 0.5 nm 정도이므로, 1500 nm 정도의 브래그 파장을 가지는 광섬유 격자라면 이로부터 반사되어 간섭계에 입사하는 빛은 코히어런스 길이(coherence length)가 1 cm 정도인 저간섭성(low coherence) 광원이다¹⁴⁾. PZT (piezoelectric transducer)에 의한 광경로 변조(optical pathlength modulation)의 크기가 충분히 작아서 코히어런스 함수의 크기에 미치는 영향이 무시할 수 있는 정도라면, 식 (4)의 지수항은 시스템의 상황(간섭계의 광경로차, 광섬유 격자의 반사 스펙트럼 폭, 브래그 파장 등)에 맞게 상수화할 수 있다. 간섭계 출력의

효과적인 신호처리(signal processing)를 위하여 간섭 신호를 사인파(sinusoidal wave) 형태로 만들기 위하여 간섭계의 한쪽 팔에 PZT를 감고 톱니파(saw-tooth wave) 신호를 인가하여 이 팔의 광경로를 주기적으로 변조한다. 톱니파 신호의 크기를 적절히 조절하여 간섭계를 통과하는 광신호의 한 파장 주기 만큼의 위상 변조(phase modulation)를 가한다면 광 검출기에서의 간섭 신호는 아래 식과 같다.

$$I_{det} = 2I \left[1 + \exp[-(\pi\Delta\nu\tau)^2] \cos\left(\omega t + \frac{2\pi nd}{\lambda} + \phi_i\right) \right] \quad (5) \\ = 2I \left[1 + \xi \cos(\omega t + \Psi(\lambda) + \phi_i) \right]$$

위 식에서 ξ 는 코히어런스 함수(coherence function)가 상수화된 값이고 ϕ_i 는 간섭계에 가해지는 불규칙한 온도 흐름(random thermal drift)에 의해서 발생하는 간섭 신호의 위상 변화이다. n 은 광섬유 코어의 굴절률이며, d 는 간섭계의 두 팔 사이의 광경로차이다. ωt 는 PZT의 광경로 변조에 의해서 발생하는 항이며 각 주파수(angular frequency) ω 는 2π 위상 변조의 경우 PZT 구동 함수의 주파수와 같다. 온도 흐름에 의한 위상 변화를 무시할 경우, 사인파 형태인 간섭신호의 위상은 $\Psi(\lambda)$ 에 의해서 결정되며 광경로차 d 가 고정되었다면, 출력 위상의 변화는 파장 λ 에만 의존한다. 따라서 광섬유 격자에 주어진 온도나 스트레인 등에 의하여 간섭계에 입사하는 빛의 파장이 변할 경우, 그 영향은 간섭 신호의 위상 변화로 나타나며 브래그 파장이 $\Delta\lambda$ 만큼 변할 경우 $\Psi(\lambda)$ 의 변화량은 아래 식과 같다.

$$\Delta\Psi = -\frac{2\pi nd}{\lambda^2} \Delta\lambda = -\frac{2\pi nd}{\lambda^2} K_T \Delta T, \text{ or } -\frac{2\pi nd}{\lambda^2} K_\epsilon \Delta\epsilon \quad (6)$$

주목할 점은 간섭 신호의 위상 변화량은 PZT에 전압이 인가되지 않았을 때의 광경로차 d 에 비례한다는 것이다. 다시 말하면, 광경로차 d 를 변화시켜 동일한 크기의 파장 변화에 대해서도 서로 다른 위상 변화량을 얻을 수 있으며, 이것은 시스템의 측정 정밀도(measurement sensitivity)가 조절될 수 있다는 것을 뜻한다. 일반적으로 측정 물리량을 출력 신호의 위상으로 변환하는 센서 시스템의 경우, 위상 변화의 주기적인 반복성함에 의하여, 한 주기(2π) 이내의 범위에 대해서만 모호하지 않은 측정을 할 수 있다. 따라서, 시스템의 측정 정밀도에 따라서 그 측정 범위도 결정되

며, 본 논문에서 다루는 마하-젠더 간섭계 센서 또한 이 제약을 벗어나지는 못한다. 그러나 기술한 바와 같이 광경로차 d 에 의해서 측정 정밀도가 조절될 수 있으므로 간섭계의 한 쪽 팔에 광섬유의 길이를 늘일 수 있는 장치를 함으로써 광경로차를 변화시킨다면 손쉽게 측정 정밀도와 범위를 조절할 수 있다.

정리하자면, 광섬유 격자에 온도 및 스트레인의 물리량을 가할 경우, 가해진 물리량은 브래그 파장을 변화시키고, 브래그 파장의 변화는 간섭계 출력 신호의 위상 변화로 변환된다. 간섭신호의 출력 위상을 측정하는 것은 브래그 파장의 변화를 분광 분석기 등을 이용하여 직접 측정하는 것에 비하여 훨씬 정밀한 정도의 측정이 가능하며 앞서 언급하였던 분광 분석기의 여러 문제점(속도, 비용, 크기...)등을 해결할 수 있는 방법이 다.

III. 실험

그림 5는 마하-젠더 간섭계를 이용한 광섬유 브래그 격자 센서 실험 장치의 개략도이다.

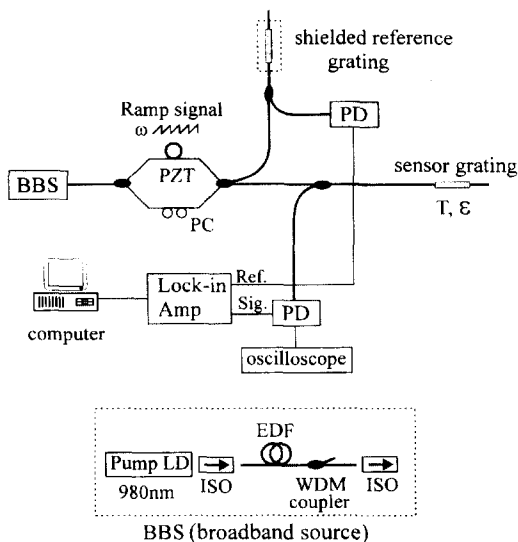


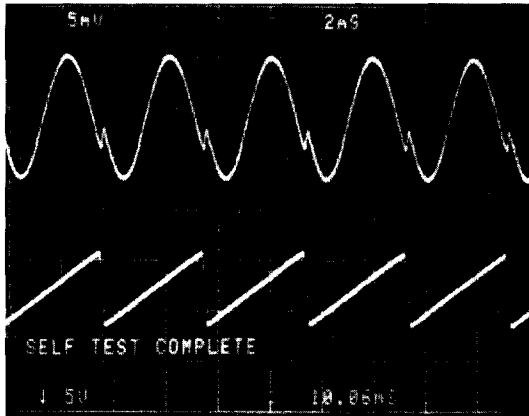
그림 5. 실험장치 개략도

Fig. 5. Schematic diagram of the experimental setup.

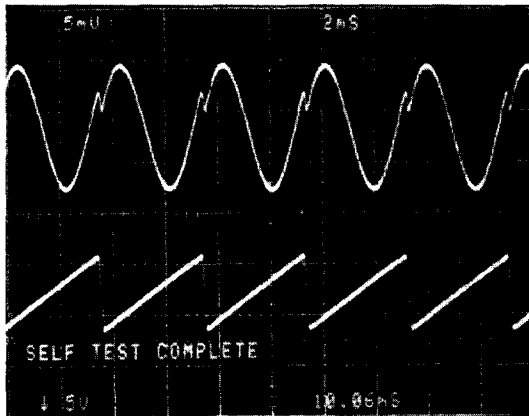
광섬유 브래그 격자는 KrF 엑시머 레이저(Lambda Physik, $\lambda=248$ nm, 400 mJ/pulse)와 위상 마스크 ($\lambda_B=1535$ nm)를 이용하여 제작되었다. 브래그 격자용 광섬유(germanosilicate fiber)는 한국과학기술연

구원(KIST)에서 제조한 것으로, Ge 농도가 18 mol% 이고 클래딩(cladding)의 지름이 135 μm 이다. 앞서 언급했듯이 LED로는 간섭 신호를 측정할 만큼 충분한 광량을 얻기 힘들기 때문에, 광폭 광원(broadband source)으로는 어븀이 첨가된 광섬유(erbium-doped fiber, AT&T, 10m)를 980 nm 레이저 다이오드로 펌핑하여 사용하였으며 최종적으로 간섭계에 입사 시킨 광량은 300 μW 정도이다. 어븀 광섬유의 ASE (amplified spontaneous emission)와 광섬유 격자의 반사 특성은 일반적으로 편광(polarization)과는 무관하지만, PZT에 감은 광섬유의 구부림 효과(bending effect)에 의한 편광 특성이 관측되어 다른 쪽 팔에 편광 조절기(polarization controller)를 두었다. 간섭계를 이루는 두 광섬유 커플러를 용융접착(fusion splicing)할 때 결정되는 광경로차에 의해서 센서 시스템의 민감도(sensitivity)가 결정된다. 광경로차(d)가 클수록 민감도는 향상되겠지만, 간섭을 이루는 빛이 저간섭성(low coherence) 광원이므로 광경로차가 증가함에 따라 간섭신호는 작아져서 신호치러가 용이하지 않게 된다. 이론적으로 1535 nm 중심파장에 0.2 nm의 폭을 가진 스펙트럼의 코히어런스 길이(coherence length)는 1 cm 정도에 불과하며¹³¹, 광섬유의 굴절률을 고려하면 두 팔 사이의 길이가 1 cm 이상 차이 날 경우 간섭신호 자체를 관측할 수 없게 된다. 따라서 어느 정도 두 팔의 길이를 맞춘 상태에서 오실로스코프 상의 간섭신호를 관측하면서 한쪽 팔의 광섬유를 cut-back method를 이용하여 길이를 맞추어 나갔다. 이것은 매우 어려운 과정이어서 사실 정확히 1 mm 단위로 광경로차를 조절할 수는 없었기 때문에, 구성된 간섭계의 광경로차이는 간섭신호의 visibility나 물리량에 대한 위상 변화량으로부터 계산할 수 밖에 없다. 0.7 정도인 간섭신호의 visibility나 2π 위상범위에 해당하는 스트레인 변화량이 약 900 μstrain 임을 감안할 때, 광경로차는 1.5 ~ 2 mm 정도로 추정되며, 다양한 센서 민감도와 측정 범위를 얻기 위해서는 광경로차를 가변할 수 있는 장치를 하는 것이 바람직하였다. 광 검출기를 통하여 오실로스코프로 관측되는 간섭신호는 그림 6과 같다.

그림 6의 (a)는 상온에서 스트레인이 가해지지 않은 상태이며, (b)는 450 μstrain 의 스트레인을 가한 경우의 간섭 신호로 (a)에 비해서 180° 변이된 위상을 보여준다.



(a)



(b)

그림 6. 광 검출기에서의 간섭 신호
(a) 0 μ strain, (b) 450 μ strain이 가해진 경우

Fig. 6. Interference signal at the photo detector.
(a) at 0 μ strain, (b) at 450 μ strain

그림 아래 쪽의 톱니 파형은 PZT에 가해진 변조 신호(modulation signal, 250 Hz)이다. 함수 발생기(signal generator)와 오실로스코프를 동기화시켜서 오실로스코프상의 간섭신호가 안정화될 때까지 함수 발생기의 출력을 조절하여 2π 위상 변조를 줄 수 있도록 변조 크기를 결정하였다. 간섭 신호의 위상 변화량 측정에는 Lock In Amplifier(이하 LIA)를 사용하였다. 처음에는 PZT에 가해주는 변조 신호를 LIA의 기준 신호(reference signal)로 사용했으나 식 (5)의 온도 흐름(thermal drift)에 의한 위상 변화 ϕ 에 의해서 출력 값이 안정화되지 않았다. 이것은 광섬유 격자의 브래그 파장 변화와는 무관한 것으로, 간섭계의 온도 흐름을 아크릴 박스를 씌워서 차단하려 했으나

긴 시간에 걸쳐 느리게 변하는 것은 막을 수 없었다. 이 온도 흐름에 의한 위상 변화를 보정하기 위해서 그림 5와 같이 기준 광섬유 격자를 두어 이로부터 발생하는 간섭 신호를 LIA의 기준 신호로 사용하였다¹⁵⁾. 이 경우, 기준 격자(reference grating)와 센서 격자는 동일한 간섭계에서 빛을 공급 받으므로, 두 간섭 신호는 같은 크기의 ϕ 를 가지게 된다. 따라서 두 신호의 위상차를 LIA를 이용하여 측정하면 브래그 파장 변화에 의한 위상 변화량만을 얻을 수 있다. 기준 광섬유 격자는 마하 켄더 간섭계의 온도 흐름에 의한 효과를 보상해 주는 것이 목적이므로 온도나 스트레인등 외부 물리량의 영향으로 그 브래그 파장이 변하지 않도록 적절히 격리되어야 한다. 그림 7은 신호 발생기(signal generator)의 PZT 변조 신호와 기준 광섬유 격자의 간섭 신호를 각각 LIA의 기준 신호(reference signal)로 이용한 경우의 위상 출력이다.

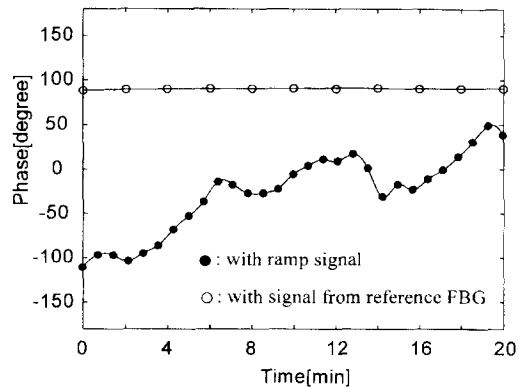


그림 7. 격리된 기준 브래그 격자를 이용한 출력 위상의 안정화

Fig. 7. Output phase stabilization using a shielded reference grating.

기준 광섬유 격자를 사용할 경우, 센서의 출력 위상이 매우 안정화되는 것을 관측할 수 있다. 20분 동안의 출력 위상의 변화는 1° 에 불과하며 이 정도의 변화는 0.1°C 이내의 온도 변화를 센서 광섬유 격자에 가할 때 발생할 수 있는 양이므로, 온도 흐름에 따른 영향이 완전히 보정되었다고 할 수 있다.

구성된 간섭계 센서의 성능을 측정하기 위하여 광섬유 격자에 스트레인과 온도를 가하며 LIA 출력을 관측하였다. 실험의 편의를 위하여 1 m 간격으로 마이크로 스테이지(micro-stage)를 배치하여 광섬유를 고정시키고 마이크로 미터(micro-meter)를 이용하여 광섬유

에 축방향 스트레인을 가하였다. 온도는 적외선 관(infrared tube)에 열선을 감고 관 내부에 광섬유 격자를 삽입하여 격자 부위에 균일한 열 전달이 되도록 하였으며, 관 내부의 온도는 디지털 온도계를 이용하여 0.1 °C 단위까지 관측하여 기준값으로 삼았다. 그림 8은 각각의 스트레인과 온도에 따른 위상 출력의 변화량이다.

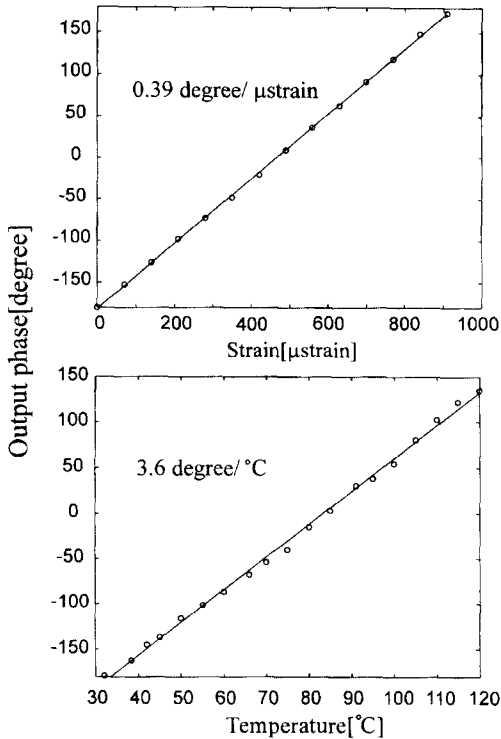


그림 8. 온도와 스트레인에 따른 위상 출력의 변화
Fig. 8. Output phase variation vs. applied temperature and strain.

온도변화에 대한 출력 위상의 변화가 다소 직선에서 벗어나는 경향을 띠는 것은 기준 온도계의 probe와 광섬유 격자간의 온도차이에 의한 오차로 추측된다. 측정 결과로부터 최소 자승법을 이용하여 단위 물리량에 따른 위상 변화량을 계산한 결과로 3.6° / $^{\circ}\text{C}$, 0.4° / μstrain 의 값을 얻었다. 사용된 LIA(Princeton)의 측정 최소 단위가 0.1°이므로 측정할 수 있는 온도와 스트레인의 최소 단위는 약 0.03 °C, 0.25 μstrain 이다. 0.1 nm의 해상도를 가지는 분광 분석기를 사용하는 경우에 비하여 300배 이상의 정밀도 향상이 있었으며, 한 주기의 위상변화에 해당하는 측정범위는 약 100 °C,

900 μstrain 이다.

IV. 결 론

광섬유 브래그 격자를 제작하여 스트레인과 온도 센서로의 응용을 시도하였다. 일정한 광경로차를 갖는 광섬유 마하-젠더 간섭계를 이용한, 높은 정밀도와 안정성을 갖는 센서 시스템을 구축하였고 분광 분석기를 사용하는 경우에 비해서 300배 이상의 측정 정밀도 향상을 얻을 수 있었다. 이 간섭계 센서 시스템의 응답 속도는 사용되는 위상 측정회로의 속도에 의존하며 이러한 전자회로는 시스템의 요구에 따라 충분한 속도를 낼 수 있도록 설계가 가능할 것이므로, 항공기의 복합소재나 토목 구조물 등의 'Smart Structure'에 광섬유 격자 센서를 삽입할 경우, 상기한 온도나 스트레인의 측정 외에 구조물 내의 진동 측정에도 그 응용의 여지가 있을 것으로 생각된다. 또한 간섭계의 광경로차를 변화시켜 측정의 정밀도와 범위를 손쉽게 변화시킬 수 있는 점이 특징이라 할 것이다.

현재 동적인 신호에 대한 주파수 영역에서의 해석과, 광섬유 레이저 센서를 구성하여 출력 신호의 신호대 잡음 비율(signal-to-noise ratio)을 개선하는 연구를 진행중이며, 온도와 스트레인이 동시에 가해지는 경우에 이를 분리하여 측정할 수 있는 방법에 대한 연구¹⁶⁾도 수행하고 있다.

참 고 문 헌

- [1] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson, and B. S. Kawasaki, "Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication," *Appl. Phys. Lett.* **32**, 647-649 (1978).
- [2] G. Meltz, W. W. Morey, and W. H. Glenn, "Formation of Bragg gratings in optical fiber by a transverse holographic method," *Opt. Lett.* **14**, 823-825 (1989).
- [3] K. O. Hill, B. Malo, F. Bilodeau, D. C. Johnson, and J. Albert, "Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask," *Appl. Phys. Lett.* **62**, 1035-1037 (1993).

- [4] D. Z. Anderson, V. Mizrahi, T. Erdogan, and A. E. White, "Production of in-fibre gratings using a diffractive optical element," *Electron. Lett.* **29**, 566-568 (1993).
- [5] G. A. Ball and W. W. Morey, "Continuously tunable single-mode erbium fiber laser," *Opt. Lett.* **17**, 420-422 (1992).
- [6] A. D. Kersey, T. A. Berkoff, and W. W. Morey, "High-resolution fiber-grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detection," *Electron. Lett.* **28**, 236-238 (1992).
- [7] F. Bilodean, K. O. Hill, B. Malo, D. C. Johnson, and J. Albert, "High-return-loss narrowband all-fiber bandpass Bragg transmission filter," *IEEE Photon. Tech. Lett.* **6**, 80-82 (1994).
- [8] H. G. Winful, "Pulse compression in optical fiber filters," *Appl. Phys. Lett.* **46**, 527-529 (1995).
- [9] A. M. Vengsarkar, J. R. Pedrazzani, J. B. Judkins, P. J. Lemaire, N. S. Bergano, and C. R. Davidson, "Long-period fiber-grating-based gain equalizers," *Opt. Lett.* **21**, 336-338 (1996).
- [10] D. L. Willeams, S. T. Davey, R. Kashyap, J. R. Armitage, and B. J. Ainslie, "Ultraviolet absorption studies on photosensitive germanosilicate preforms and fibers," *Appl. Phys. Lett.* **59**, 762-764 (1991).
- [11] A. Othonos, A. T. Alavie, S. Melle, S. E. Karr, R. M. Measures, "Fiber Bragg grating laser sensor," *Opt. Eng.* **32**, 2841-2845 (1993).
- [12] E. Udd, *Fiber Optic Smart Structures*, John Wiley & Sons, p. 187 (1995).
- [13] Minh Song and Byoung-ho Lee, "An effective optical evaluation technique using visible low-coherence interferometry," *Optics & Lasers in Eng.*, in press.
- [14] 송민호, 이병호, "가시광 영역의 저간섭성 광원을 이용한 마이켈슨 간섭계," 전자공학회 논문지 제 33권 A편 제 10호, 2102-2109 (1996)
- [15] A. D. Kersey, T. A. Berkoff, and W. W. Morey, "Fiber-optic Bragg grating strain sensor with drift-compensated high-resolution interferometric wavelength-shift detection," *Opt. Lett.* **18**, 72-74 (1993).
- [16] Minh Song, Sang Bae Lee, Sang Sam Choi, and Byoung-ho Lee, "Interferometric temperature-insensitive strain measurement using different-diameter fiber Bragg gratings," *CLEO'97 Technical Digest*, CThQ3, to be presented.

저 자 소 개

宋 民 鎬(正會員) 第 33卷 A編 第 10號 參照

현재 서울대학교 전기공학부 박사과정



崔 相 三(正會員)

1940년 5월생. 1966년 Univ. of North Carolina 물리학과 졸업(B.S.). 1968년 Michigan State Univ., East Lansing, 물리학과 졸업(M.S.). 1971년 The Ohio State Univ., 물리학과 졸업(Ph.D.). 1971년 ~ 1974년 Research Associate at U.V. Photoelectron Analysis Lab., Dept. of Chemistry, Univ. of North Carolina. 1974년 9월 ~ 1975년 8월 Visiting Research Scientist at Group des Transitions de Phases, CNRS, Grenoble, France. 1996년 1월 ~ 1997년 12월 STEPI 연구기획단장. 1974년 ~ 현재 한국과학기술연구원(KIST) 정보전자부 근무(책임연구원). 주관심분야는 광통신, 레이저 광학, 광도로파, 상온 초전도체, 광전자 Spectroscopy 등



李 相 培(正會員)

1956년 8월생. 1983년 2월 서강대학교 물리학과 졸업(이학사). 1985년 2월 동대학원 졸업(이학석사). 1993년 8월 동대학원 졸업(이학박사). 1985년 7월 ~ 현재 한국과학기술연구원(KIST) 정보전자부 근무(선임연구원). 주관심분야는 특수 광섬유 개발, 광섬유 레이저, 광섬유 격자 소자, 광섬유 격자 소자 센서 등

李 竝 浩(正會員) 第 33卷 A編 第 10號 參照

현재 서울대학교 전기공학부 조교수