

보조 반사체를 이용한 광섬유 패브리페로 간섭계형 온도센서의 성능향상

論 文
49C-7-8

Unambiguous Fiber Fabry-Perot Temperature Sensor by an Additional Partial Mirror

金光洙* · 李弘植**
(Kwang-Soo Kim and Hong-Sik Lee)

Abstract - The fiber Fabry-Perot interferometric (FFPI) sensor is well known in the field of industrial diagnosis due to its outstanding properties such as tiny size, simple and rugged structure, and easy interrogation. As other fiber interferometric sensors, it also suffers from ambiguous output caused by highly periodic feature in its optical transfer function. In most cases, the ambiguity leads to relatively short dynamic operating range and long processing time during power-on reset, which limits its application to some specific fields requiring very high resolution. In this paper a method based on double sensing scheme was proposed to overcome the above difficulty. By employing a fringe selection auxiliary FFPI sensor the original FFPI sensor can identify its true position on the phase domain. The performance test with 10mm FFPI sensor and a thermocouple temperature sensor for reference shows wide dynamic range 0-900°C keeping a reasonable resolution of 0.1°C over the entire range.

Key Words : Fiberoptic sensor, temperature sensor, fiber Fabry-Perot interferometry, phase modulation, TiO₂ coating

1. 서 론

광통신망이 보편화되어 광섬유 기술의 수요가 급증하고 광섬유 부품의 가격이 낮아짐에 따라 산업용기기의 감시진단, 환경감시 및 의료용 진단기기 등 상시종합감시망이 필요한 분야에 있어서 광섬유 통신기술과 더불어 광섬유 센서기술의 발전에 대한 기대가 커지고 있다. 광섬유 센서기술은 대개 진폭변조나 위상변조 또는 주파수변조를 통하여 측정하고자 하는 물리량을 읽어내는 것으로 반도체센서와 같은 다른 류의 센서에 비해 다음과 같은 두드러진 특징이 있다. 첫째 광을 캐리어로 쓰기 때문에 전자파장애(EMI) 문제가 없어서 전자파잡음이 심한 지역이나 전자파잡음에 대한 내성이 엄격하게 제한되는 지역에 적합하며, 둘째 포인트 센싱을 위한 초소형 센서가 가능하여 좁은 부위의 정밀측정용으로 적용될 수 있으며, 셋째 신호감쇄특성이 양호하여 측정된 신호의 원거리 전송이 유리하며, 넷째 수백 m 또는 수 km의 분포형 센서가 가능하기 때문에 저가의 광대역 감시용 시스템 구축이 보다 용이해 진다.

가간섭성이 좋은 레이저광을 광원으로 사용하는 대부분의 위상변조 광섬유 센서는 전달함수의 주기성으로 인하여 변조 신호를 복원할 때 해의 다중성 문제가 발생하며 이를 극복하기 위하여 센서신호의 지속적인 추적과 과거 데이터의 누적이 요구된다. 대부분 이런 문제를 해결하기 위해 가간섭성

이 낮은 광원 LED(light emitting diode)류나 LED보다는 광파워가 다소 큰 SLD(superluminescent laser diode)와 마흐젠더(Mach-Zehnder)형 보조 간섭계를 사용하여 주 센서의 위상 변화를 읽어내는 방법을 사용한다. 그러나 이 방법의 경우 가간섭성이 낮은 광원을 사용하면서 주 센서의 위상변화를 검출해야하는 원리상의 문제점 때문에 최신의 디지털 신호처리 기법을 사용하더라도 정밀도를 높이기가 힘들 뿐 아니라, 두 종류의 간섭계를 사용하므로 신뢰성 확보가 어렵다. 또한, 짧은 동작범위를 가진 고정도 센서로 주로 사용되는 싱글모드 레이저광 광섬유 패브리페로(Fabry-Perot) 간섭계형 센서의 경우, 공진기의 길이를 mm이하로 아주 짧게 구성하여 위상변화의 총 이동범위를 반 주기(half fringe)이내로 제한하면 이러한 해의 다중성 문제에서 벗어날 수 있다. 그러나, 패브리페로 간섭계의 특성상 공진기의 길이를 줄여 작동범위를 늘리면 공진기의 길이와 반비례하여 정밀도가 떨어지므로 특수한 상황 외에는 좋은 방법이 될 수 없다.

본 논문에서는 기존의 고정도 광섬유 패브리페로 온도센서를 보완하기 위한 이중센서 개념을 도입하여 센서의 성능을 향상시키고자 하였다. 즉, 패브리페로의 고유한 고정도 특성을 유지하면서 주기성의 결함을 극복하기 위해 기존의 패브리페로 공진기와는 별도로 마이크로 단위의 TiO₂ 코팅 반사체 하나로 구성된 보조 센서를 추가하여 주 센서 신호의 주기성을 극복하면서 패브리페로의 우수한 해상도를 유지하기 위한 이중화 광섬유센서의 고유모델을 제시하였다. 제안된 모델에 대한 검증실험을 통하여 모델의 타당성을 입증하였고, 범용으로 사용 가능한 주 센서의 공진기 길이와 보조 센서의 코팅 두께와의 관계 및 이중화 광섬유 센서의 신호처리방법에 대해서도 검토하였다.

* 正 會 員 : 韓 國 電 氣 研 究 所 電 氣 物 理 研 究 組 前 任 研 究 員

** 正 會 員 : 韓 國 電 氣 研 究 所 電 氣 物 理 研 究 組 責 任 研 究 員

接 受 日 字 : 1999 年 10 月 9 日

最 終 完 了 : 2000 年 6 月 8 日

2. 광섬유 패브리페로 센서

2.1 광섬유 패브리페로 온도센서

고정도 광학필터로 오랜 역사를 가진 패브리페로 공진기는 전형적인 다중 반사(multiple beam reflection)형 간섭계를 구성한다. 그림 1은 싱글모드(single mode) 광섬유로 구성된 패브리페로 공진기를 보여주고 있으며, 광섬유 단면 코팅으로 양쪽 반사체(mirror)를 만들고 용융접착(fusion splicing)방식으로 접속하여 일체화시켰다. 전달함수를 유도하기 위해 주어진 광섬유 패브리페로 간섭계를 손실이 없는 이상적인 패브리페로 공진기로 가정하고 반사 및 투과계수의 양방향 값이 같다면, 입사광에 대한 패브리페로 공진기의 다중 반사에 의한 반사광의 전기장은 식 (1)과 같이 주어진다.

$$E_r = E_i(r_1 + t_1 r_2 t_1 e^{j\phi} + t_1 r_2 r_1 r_2 t_1 e^{2j\phi} + t_1 r_2 r_1 r_2 r_1 r_2 t_1 e^{3j\phi} + \dots) \quad (1)$$

여기에서, E_r 과 E_i 는 각각 반사광과 입사광에 대한 전기장의 세기, r_1 과 r_2 는 제 1반사체와 제 2반사체에 대한 반사계수(reflection coefficient), t_1 은 제 1반사체에 대한 투과계수(transmission coefficient), ϕ 는 입사광이 공진기 내를 왕복할 때 발생하는 광로차(round-trip optical path difference)에 해당하는 위상차이다.

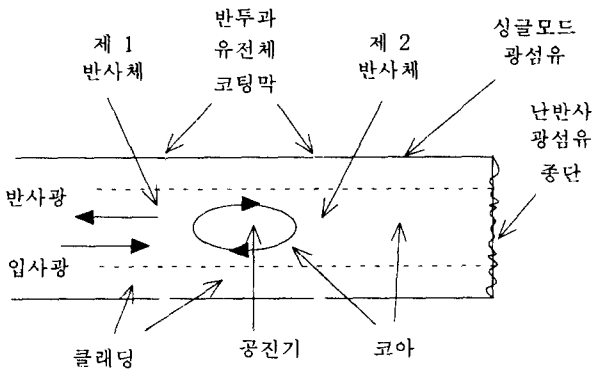


그림 1 광섬유 패브리페로 공진기
Fig. 1 Fiber optic Fabry-Perot Cavity

식 (1)은 입사광에 대한 반사광의 비를 나타내는 식으로서, 편위상 전기장의 세기 대신 광파위를 적용하고 반사계수대신 반사율(reflectance)을 적용하여 정리하면, 입사광 쪽으로 되돌아가는 광파위는 식 (2)와 같이 정규화된 값인 반사율로 표현된다.

$$R = \frac{R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \phi}{1 + R_1 R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \phi} \quad (2)$$

여기에서, R_1 과 R_2 는 공진기 양쪽 반사체의 반사율이고, ϕ 는

광이 공진기 내를 왕복할 때 발생하는 광로차로서 식 (3)과 같이 주어진다.

$$\phi = \frac{4\pi nL}{\lambda} \quad (3)$$

여기에서, n 은 광섬유 코어의 유효 굴절율, L 은 공진기 길이, λ 는 레이저광의 중심파장이다. 이 반사율 관계식이 결국 센서의 전달함수가 되므로 광섬유 패브리페로 공진기를 센서로 동작시키기 위해서는 전 위상영역에서 감도의 최대최소값의 범위를 조절할 필요가 있다. 그림 2는 패브리페로 공진기 내에 있는 반사체의 여러 가지 반사율에 대한 전달함수특성을 나타내고 있다. 그림에서처럼 반사율이 80%정도로 크면 특정 영역 즉, 매 2π 근처에서는 감도가 대단히 뛰어나나 대부분이 null영역이므로 quadrature point 운전이 힘들어 일반적인 센서로서는 적당하지 않다. 그러나 반사율이 5%정도로 작으면 전체적인 감도는 떨어지나 상대적으로 거의 null영역이나 다름없는 부분이 매 π 근처의 좁은 영역에서 발생하므로 일반 간섭계형 센서로서 적합하다. 전체적인 감도를 유지하면서 null영역의 폭을 줄여 한 주기 내의 동작범위를 늘이기 위해서는 양쪽 반사체의 반사율을 동일한 값으로 제작하고 10% 이내의 값을 취하도록 설계하여야 한다. 이 때 null영역을 제외하면 식 (2)는 식 (4)와 같이 단순화된다.

$$R \approx 2 R_0 (1 + \cos \phi) \quad (4)$$

여기서, R_0 는 R_1 과 R_2 가 동일한 반사율을 가졌을 때의 값이고, 위상차 ϕ 는 식(3)과 동일하게 주어진다.

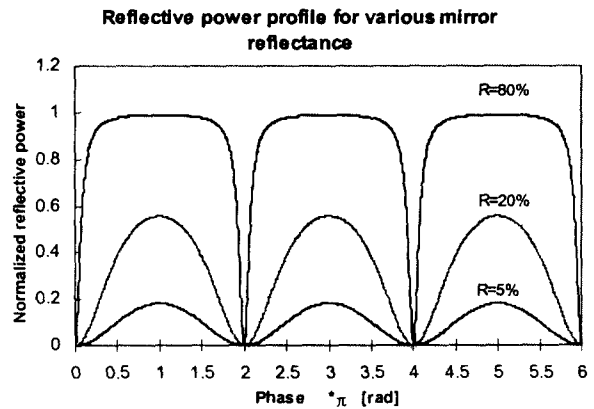


그림 2 패브리페로 간섭계의 반사율에 따른 전달함수특성
Fig. 2 Profile of transfer function of Fabry-Perot interferometer

광섬유내의 온도변화 ΔT 는 열수축팽창에 의한 길이변화 $\Delta L/\Delta T$ 및 온도에 의한 굴절율의 변화 $\Delta n/\Delta T$ 와 같이 광섬유 고유의 물리적 성질을 변화게 하여 광섬유 내의 광도파 조건을 바꾼다. 이 도파 조건의 변화가 결과적으로 통과하는 광의 위상을 변조시키며, 축방향 변화라든가 다른 스트레인효과를 무시하고 이를 수식화하면 식 (3)으로부터 다음과 같은

변화치를 얻을 수 있다[1].

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \left(n \frac{\Delta L}{\Delta T} + L \frac{\Delta n}{\Delta T} \right) \Delta T \quad (5)$$

용융실리카 광섬유의 경우 $dL/(LdT)$ 는 $5 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$, dn/dT 는 $10^{-5}/^\circ\text{C}$ 로 주어지므로 광섬유의 굴절율을 고려했을 때 첫 번째 항은 두 번째 항의 약 7~8% 정도이다. 따라서 첫째 항을 무시하면 식 (5)는 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta\phi = 2\pi \cdot \left(\frac{2L}{\lambda} \frac{dn}{dT} \right) \cdot \Delta T \quad (6)$$

실험에 사용될 패브리페로 간섭계의 특성을 알아보기 위해 실제 값 $\lambda=1.3\mu\text{m}$, $dn/dT=10^{-5}/^\circ\text{C}$, $L=10\text{mm}$ 를 적용하면 식 (6)으로부터 전 영역에서의 온도변화(ΔT) 1000 $^\circ\text{C}$ 에 대한 위상변화($\Delta\phi$)는 약 300π 라디안으로 주어짐을 간단하게 알 수 있다. 이 경우 위상영역에서 null영역을 포함하는 임의의 반주기(half fringe)가 평균적으로 온도변화 3.3 $^\circ\text{C}$ 에 해당되므로 10-비트의 ADC(analog-digital converter)를 90% 범위까지 사용하더라도 동작범위(0 $^\circ\text{C}$ -1000 $^\circ\text{C}$) 내에서 평균 0.004 $^\circ\text{C}$ 의 고해상도를 가질 수 있으며, 이것이 본 센서 시스템의 최종 목표사양이다.

2.2 단일 반사체 광섬유 패브리페로 온도센서

보조 센서로 사용될 광섬유 패브리페로 간섭계는 2 μm 정도의 TiO₂필름을 공진기 자체로 대체한 것으로서, 식 (6)으로부터 $\lambda=1.3\mu\text{m}$, $L=2\mu\text{m}$, $dn/dT \sim 5.0 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 를 적용하면 온도변화 1000 $^\circ\text{C}$ 에 대한 위상변화는 약 0.15 π (약 $\pi/6$) 라디안으로 quadrature point 운전시 visibility가 반 주기 경우의 50%로 떨어지기 때문에 분해능은 약 2 $^\circ\text{C}$ 정도이나 대단히 넓은 동작범위를 갖게된다. 그림 3은 TiO₂ 필름으로만 만들어진 초소형 광섬유 패브리페로 온도센서의 구조도를 나타내며 측정 공간의 매질로는 공기 중만 고려하였다.

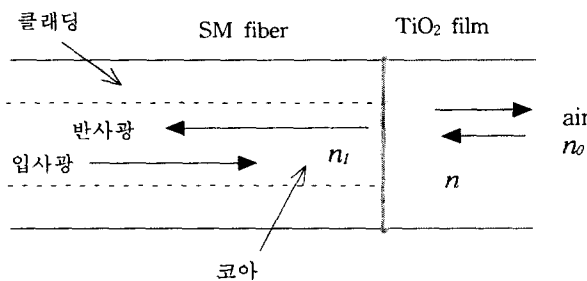


그림 3 단일반사체 광섬유 패브리페로 센서
Fig. 3 Thick film FFPI sensor

마이크론 단위의 단일층 TiO₂필름 반사체에 의한 반사율은 패브리페로 공진기의 기본식인 식 (1)로부터 그림 3과 같은 구조에 대해 식 (7)과 같이 주어진다[2-4].

$$R = \frac{\alpha - \beta + \gamma \cos \phi}{\alpha + \beta + \gamma \cos \phi} \quad (7)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \alpha &= (n_1^2 + n^2)(n^2 + n_0^2) \\ \beta &= 4n_1 n^2 n_0 \\ \gamma &= (n_1^2 - n^2)(n^2 - n_0^2) \end{aligned}$$

이고, 굴절률 n_1 , n , n_0 는 각각 광섬유 코어, TiO₂코팅, 공기에 대한 값이다. 이때 위상차 ϕ 는 식 (3)과 같이 주어지며, 식 (3)에서의 굴절률 n 과 공진기 길이 L 은 TiO₂ 코팅에 대한 값이다. 단일반사체 광섬유 패브리페로는 공진기 대응인 TiO₂ 필름의 양단 반사율이 다르다는 문제와 마이크로 단위의 두께를 코팅하는데 있어 곤란한 점이 많아 간섭계로 사용하기 위한 최소한의 신호 대 잡음비(SNR)를 확보하는 것이 용이하지 않았다. 그러나 광섬유 코팅의 반사율을 개략적으로 추정할 때 통상 사용하는 방식인 식 (7)을 기본으로 한 예측모델을 구하여 접근한 결과, 단독으로 사용하기는 해상도가 너무 낮아 어려움이 많으나 고정도 간섭계의 보조 센서로서의 역할은 충분한 것으로 입증되었다.

그림 4는 식 (7)로 표현된 반사율의 식에서 온도변화 또는 다른 물리량의 변화가 TiO₂ 코팅부의 굴절률 n 이나 두께 L 의 미세한 변화를 가져온다고 가정했을 때 위상변화에 따른 반사율의 특성곡선을 나타낸다. 이 경우 전달함수 패턴은 식 (7)에서 예측되는 바와 같이 식 (4)의 정현파에 가까운 전형적인 광섬유 패브리페로형 전달함수가 아닌 다소 복잡한 형태의 함수임을 알 수 있다. 즉, quadrature point를 중심으로 비대칭 감도(sensitivity)를 가지기 때문에 재연성(reproducibility)이 좋지 않아 센서로서 적합하다고 볼 수 없다. 그러나 이 필름형 광섬유 패브리페로 센서의 목적은 특정 위상영역만 지정할 수 있으면 되기 때문에 제안된 센서 시스템의 보조 센서로서는 충분한 성능을 가지고 있다.

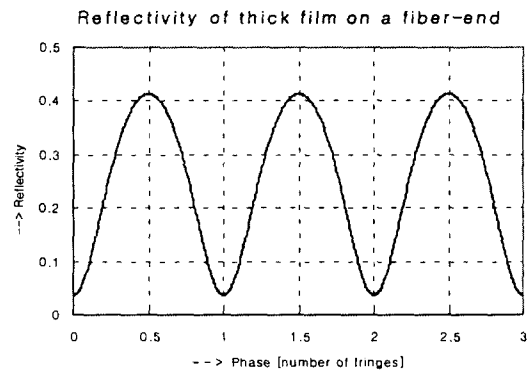


그림 4 단일반사체 광섬유 패브리페로 센서의 반사율
Fig. 4 Reflectivity of thick film on fiber-end

산화물 중 TiO₂는 강도와 내화확성이 좋으며 가시광과 근적외광을 잘 투과시키므로 광섬유 코팅에 사용하기 위해 TiO₂의 광학특성에 대한 많은 연구가 있었다[5,6]. 특성곡선은 TiO₂를 코팅하는 방법에 따라 차이가 있으며 특히 온도에

따른 굴절을 변화가 비선형이라는 것은 잘 알려진 사실이다 [6,7]. 본 실험에서는 RF스퍼터링 방식을 이용하여 아르곤과 산소분위기에서 티탄을 광섬유 단면에 증착시켰으며, 증착된 TiO₂ 필름의 굴절률 n 은 온도변화만 고려했을 때 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$n = n_s + \Delta n(T) \tag{8}$$

여기서 n_s 는 상온에서의 TiO₂ 기준굴절률을 0°C 온도로 환산한 것이며, $\Delta n(T)$ 는 TiO₂의 온도에 따른 굴절률 변화특성을 파장 1300nm에서 실험적으로 구한 것으로 절대오차 0.0001내에서 다음과 같은 식으로 표현된다[1].

$$\Delta n(T) = [-5 - 8T + 0.005T^2 - T^3/10^6] \times 10^{-5} \tag{9}$$

그림 5는 식 (9)를 그래프로 표시한 것으로서, 온도에 따른 TiO₂ 굴절률의 값이 비선형적으로 감소하고 있음을 잘 나타내고 있다.

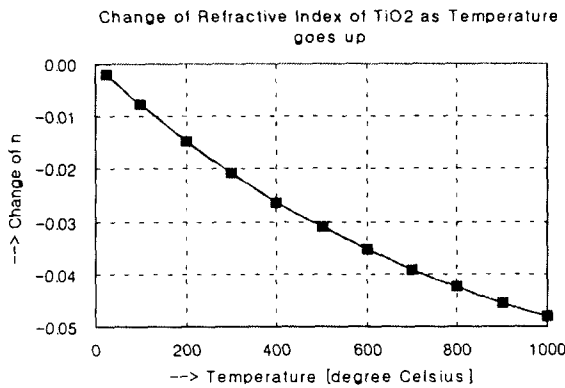


그림 5 TiO₂의 온도에 따른 굴절률 변화
Fig. 5 Reflectivity of TiO₂ as temperature varies

2.3 이중화 광섬유 패브리페로 센서

싱글모드 광섬유와 가간섭성이 좋은 레이저광을 광원으로 사용하는 광섬유 패브리페로 센서는 식 (4) 또는 그림 2와 같은 전달함수 특성을 가지며, 이 때 함수의 짧은 주기성으로 인하여 소속하고 있는 fringe를 잘못 판단하는 문제가 자주 발생한다. 이를 극복하기 위해 여러 가지 신호처리 기법이 제시되고 있지만, 그 중 온도센서로서 상용화된 방법인 Yeh 등[8]의 방법은 non-volatile 메모리류의 도움을 받지 않는 한 power-on reset시 초기화 문제를 안정적으로 해결하기 어렵고, 압력센서로서 상용화된 방법인 Sadkowski 등[9]의 방법은 레이저 성능에 대한 의존도가 지나치게 강해 채널당 가격이 높다는 약점이 있다. 이러한 문제는 위상변화로부터 물리량의 상대치만 측정할 수 있는 고정도 위상변조 간섭계의 고유한 성질에 그 원인이 있으므로 간섭계 자체의 신호만으로 문제해결에 접근하는 것은 광학적으로 상당히 안정된 광섬유

센서 시스템을 요구하게 되어 전체적인 시스템 단가가 높아진다.

본 연구에서 제안하는 해결방법은 센서를 이중화하여 연속적인 출력신호 추적을 통하지 않고 각 fringe의 위치를 인식할 수 있는 간단한 방법이다. 즉, 감도가 주 센서의 half fringe 이내인 보조 센서를 추가하여 이로부터 fringe의 절대 위치를 확보하고자 하는 것이다. 예를 들면, 본 실험에서와 같이 주 센서 및 보조 센서용 패브리페로 공진기의 길이를 각각 10mm와 2μm로 했을 때, 주 센서의 half fringe에 해당하는 온도변화 3.3°C는 보조 센서의 온도 분해능 2°C를 충분히 상회하므로 주 센서 출력신호로부터 현재 fringe의 절대 위치가 간단하게 결정된다. 그림 6은 본 실험에 사용된 센서 시스템의 구성도이며, 여기서 LD(laser diode)는 Rockwell사의 1.3μm DFB (distributed feedback) 통신용 반도체레이저이고, PD(photodiode)는 Ge계의 PIN타입을 사용하였다. 변조펄스폭은 frequency chirping 효과를 고려하여 500ns로 하였고, multiplexing을 위한 두 센서간의 time delay는 싱글모드 광섬유 100m로서 약 1μs정도가 되도록 설정하였다.

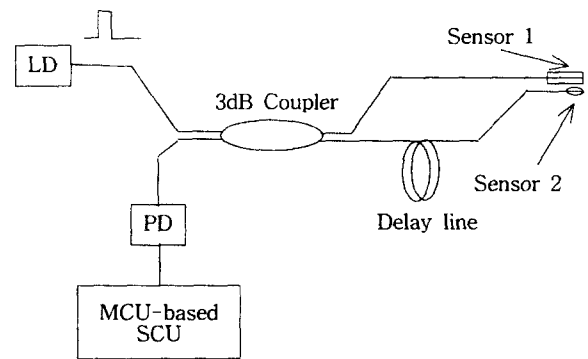


그림 6 이중화 광섬유 패브리페로 센서의 구성도
Fig. 6 Block diagram of double FFPI sensor

그림 7은 이중화 광섬유 패브리페로 센서의 전달함수를 개념적으로 표현한 것으로서, 주 센서가 10개의 fringe를 지나는데 동안 보조 센서는 half fringe만을 지나므로 보조 센서의 정보로부터 주 센서의 위상이 속하는 fringe를 쉽게 인식할 수 있음을 보여 주고 있다. 실제로는 두 센서의 visibility가 서로 다르므로 증폭부 설계시 어느 정도의 trade-off가 필요하며, 온도변화에 따라 잡음요인이 다르므로 look-up table 작성시 충분한 고려가 필요하다. 또한, 실제 주 사용영역을 보조 센서의 quadrature point 근처로 설정하는 작업이 용이하지 않다는 문제점도 가지고 있다. 본 실험에서는 보조 센서의 정밀한 quadrature point 제어를 위해 PZT를 이용한 간섭 광섬유 위상제어기를 구성하여 사용하였다. 스트레칭되는 광섬유는 광탄성 효과(photoelastic effect)로 인해 다음과 같은 위상변화를 겪는다[10].

$$\Delta\phi = \frac{2\pi n \Delta l}{\lambda} \left\{ 1 - \frac{n^2}{2} [(1-\sigma) p_{12} - \sigma p_{11}] \right\} \tag{10}$$

여기에서, l 는 광의 파장, n 은 광섬유 코어의 유효 굴절율, p_{11} 과 p_{12} 는 광탄성 계수(photoelastic coefficient), σ 는 포아송 비이다. 감도를 확인하기 위해 파장 1300nm에서의 용융실리카에 대한 값 $n=1.46$, $p_{11}=0.12$, $p_{12}=0.27$, $\sigma=0.16$ 을 식 (10)에 대입하여 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\Delta\phi = 2\pi \cdot (1.811\Delta l) \quad (11)$$

식 (11)로부터 광섬유 1 μ m의 스트레칭에 대한 위상 이동량을 구하면 1.623 π 로서, 이는 보조 센서의 이동 가능한 위상범위를 10배정도 상회하므로 용이하게 quadrature point를 제어할 수 있다.

Comparison of Normalized Reflectivity (Simplified)

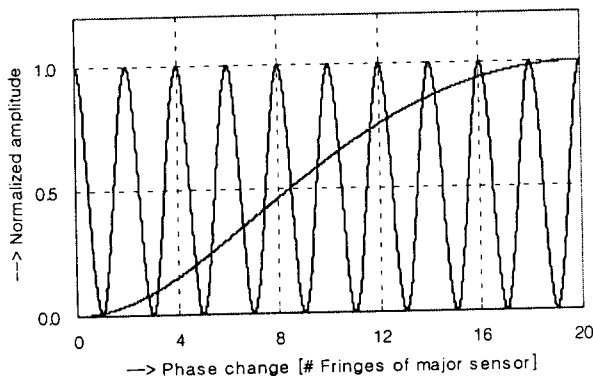


그림 7 이중화 광섬유 패브리페로 센서의 전달함수
Fig. 7 Transfer function of double FFPI sensor

이중화 패브리페로 온도센서의 검증실험을 위해 주 센서와 보조 센서의 두 가지 패브리페로 센서를 수 mm간격으로 근접시켜 상온에서 900 $^{\circ}$ C까지의 동작범위 시험과 각 구간 별 해상도 시험을 수행하였다. 동작범위 시험시 기준 온도센서인 오메가사의 보정용 K타입 정밀급 써모커플(precision K-type reference thermocouple)의 한계 해상도인 0.1 $^{\circ}$ C를 만족하였으며, 700 $^{\circ}$ C이상의 고온에서는 보조 센서에서의 비선형 현상이 심하게 일어났지만 위상 값이 소속하고 있는 fringe를 구별하는 역할은 할 수 있었다. 그림 8은 구간별 해상도 시험 중 비교적 시험이 용이한 영역인 25 $^{\circ}$ C-40 $^{\circ}$ C 영역 시험 결과를 나타내고 있다. 수치실험과의 비교를 위하여 실험 데이터는 고속신호처리기를 통하여 일정한 위상간격을 유지하도록 하였으며, 보조 센서의 낮은 sensitivity 때문에 12-비트의 ADC를 사용하여 fringe인식에 충분한 해상도를 갖도록 하였다. 그림 8이 수치실험의 결과인 그림 7과 다소 차이를 보이는 것은 검증실험에 사용된 보조 센서의 TiO₂ 코팅 두께의 차이와 코팅의 불균일성에 의한 반사율의 차이 때문일 것으로 여겨지며, 이는 사례연구(case study)를 통하여 보완할 수 있을 것으로 보인다. 즉, 수치실험과 비교했을 때, 주 센서보다 보조 센서가 더 많은 차이를 보이는 것은 주 센서 공진기

Transfer function of double FFPI

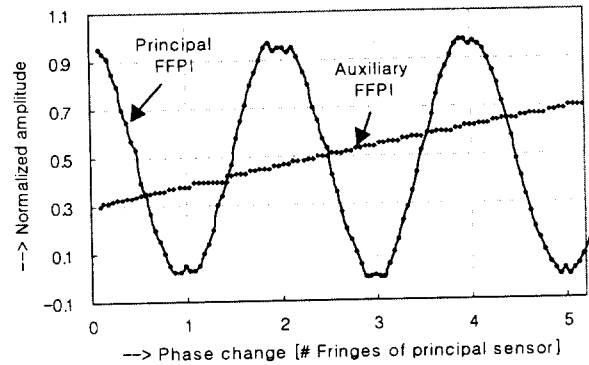


그림 8 이중화 광섬유 패브리페로 센서의 검증실험결과
Fig. 8 Verification test for double FFPI sensor

의 경우 목표길이가 10mm이므로 오차 $\pm 1\%$ (0.1mm) 이내로 제작이 가능하나, 보조 센서의 경우 코팅의 두께를 $2\mu\text{m} \pm 1\%$ (200 \AA)로 균일하게 제작하기 힘들기 때문이다. 그림 8에서 매 π 라디안 근처의 null영역에서 오차가 커 보이지만 이는 샘플링 시퀀스 중 특정펄스 하나에 대한 위상도메인에서의 변환 결과를 보여주는 표현상 문제이며, 실제 신호처리시에는 $\pi/2$ 라디안 정도의 간격으로 적어도 한번의 보조 샘플링을 수행하여 null영역에 대비하므로 위상도메인에서의 null 영역은 문제가 되지 않는다.

3. 결 론

레이저광을 광원으로 사용하는 싱글모드 광섬유 패브리페로 온도센서는 출력신호의 강한 주기성으로 인하여 변조된 신호로부터 온도에 대한 정보를 읽어 낼 때 fringe위치의 기준이 모호해지는 경우가 많다. 본 논문에서는 기존의 고정도 광섬유 패브리페로 온도센서를 보완하기 위해 이중센서 개념을 도입하였으며, 수치실험과 검증실험을 통해 지속적인 출력신호의 추적 없이 fringe의 절대위치를 판정할 수 있음을 보임으로서 제안된 방법의 타당성을 입증하였다. 수치실험과 비교하기 위하여 실제 검증실험시 주 센서 및 보조 센서용 패브리페로 공진기의 길이를 각각 10mm와 2 μ m로 제작하여 사용하였다. 광섬유 재질인 용융실리카의 녹는 점이 대략 1200 $^{\circ}$ C 이상이나 900 $^{\circ}$ C 이상에서는 광섬유 자체의 조직변형과 TiO₂ 반사체의 변형이 심하게 일어나 재사용이 어려워 반복 실험을 할 수 없었지만 1000 $^{\circ}$ C 근처에서도 전달함수를 잘 따르고 있었다. 전체적인 해상도는 오메가사의 써모커플과 비교하였을 때 최소 0.1 $^{\circ}$ C를 유지함을 확인하였으며, 구간별 해상도 실험을 통하여 광섬유 패브리페로 10mm길이의 고유한 해상도를 fringe 인식오류에 의한 오차 없이 유지할 수 있음도 확인되었다.

현재 문제가 되고 있는 점은 보조 센서의 제작에 있다. 즉, 마이크론 단위의 TiO₂ 코팅을 어떻게 안정적으로 처리할 수 있는냐와 TiO₂ 반사체의 온도특성을 보다 정량적으로 평가할 수 있는 간이실험방법의 구현, 그리고 외부의 위상제어

기(phase controller)없이 간편하게 quadrature point 운전을 가능하게 할 수 있는 방법의 구현이다.

참 고 문 헌

[1] C.E. Lee, R.A. Atkins and H.F. Taylor, "Performance of a fiber-optic temperature sensor from -200 to 1050°C", Optics Letters 13, pp1038 -1040, 1988

[2] M. Inci et al., "Fabrication of single-mode FFPIs using fusion spliced titanium dioxide optical coatings", Meas. Sci. Technol. 3, pp678-684, 1992

[3] R. Hughes and R. Priest, "Thermally induced optical phase effects in fiber optic sensors", Applied Optics Vol. 19 No. 9, pp1477-1483, 1980

[4] M. Tateda, S. Tanaka and Y. Sugawara, "Thermal characteristics of phase shift in jacketed optical fibers", Applied Optics Vol. 19 No. 5, pp770-773, 1980

[5] N. Lagakos, J.A. Bucaro and J. Jarzynski, "Temperature-induced optical phase shifts in fibers", Applied Optics Vol. 20 No. 13, pp2305-2308, 1981

[6] Roy M. Waxler and G.W. Cleek, "The effect of temperature and pressure on the refractive index of some oxide glasses", J. Res. NBS, Vol. 77A, No. 6, pp755-763, 1973

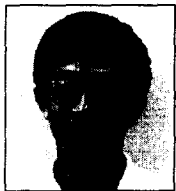
[7] J. Bennett et al., "Comparison of the properties of TiO₂ films prepared by various techniques", Applied Optics Vol. 28 No. 15, pp3303-3317, 1989

[8] Y. Yeh et al., "Fiber optic sensor for substrate temperature monitoring", J. Vac. Soc. Technol. A 8, pp3247-3250, 1990

[9] R. Sadkowski, et al., "Multiplexed interferometric fiberoptic sensors with digital signal processing", Applied Optics, Vol. 34, No. 25, pp5861-5866, 1995

[10] E. Udd, Fiber Optic Sensor, John Wiley & Sons, 1991

저 자 소 개



김 광 수 (金光洙)

1960년 1월 30일 생. 1983년 서울대 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 졸업(석사). 1998년 텍사스 A&M 대학 전기공학과 졸업(공학박사). 1986년~현재 한국전기연구소 전기물리연구그룹 재직. 관심분야: 고전압 응용 및 광섬유 응용

E-mail : kskim@keri.re.kr



이 홍 식 (李弘植)

1953년 9월 13일 생. 1975년 서울대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 한국전기연구소 전기물리연구그룹 재직. 관심분야: 고전압 응용 및 레이저&플라즈마 응용

E-mail : hslee@keri.re.kr