

보조 반사체를 이용한 광섬유 패브리페로 간섭계형 온도센서의 성능 향상

김 광 수
한국전기연구소

Improvement Method of a Fiber Fabry-Perot Temperature Sensor by an Additional Partial Mirror

Kim, Kwang-Soo
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - 광섬유 패브리페로 간섭계의 위상변조를 이용한 센서의 경우 위상변조 특성상 정밀도는 보장 받지만 전달함수의 강한 주기성으로 인해 동작범위가 제한을 받아 실 사용시 어려움을 겪고 있다. 고정밀도와 넓은 동작범위를 동시에 만족시킬 수 없기 때문에 대부분 실사용 상태 때 패브리페로의 고유한 고정도 특성을 포기하는 경우가 많다. 본 논문은 센서의 다중화 개념을 도입하여 기존의 패브리페로 공진기와는 별도로 반사체 하나로 구성된 간단한 보조센서를 추가로 사용하여 주센서신호의 주기성을 극복하면서 패브리페로의 우수한 해상도를 유지하기 위한 모델을 제시하고 수치해석을 통한 타당성 검증과 신호처리방법에 대해 기술하였다.

1. 서 론

광섬유 통신망이 보편화되어 광섬유 부품의 가격이 낮아짐에 따라 산업용기기 및 의료용기기의 감시진단에 광섬유 기술을 이용한 센서 개발에 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 가능하며 좁은 부위의 정밀측정으로 적용될 수 있으며, 셋째 수백 m 또는 수 km의 분포형 센서가 가능하기 때문에 저가의 광대역 감시용 시스템 구축이 보다 용이해진다.

가간섭성이 좋은 레이저광을 광원으로 사용하는 대부분의 위상변조 광섬유 센서는 전달함수의 주기성으로 인하여 변조신호를 복원할 때 해의 다중성 문제가 발생하며 이를 극복하기 위하여 센서신호의 지속적인 추적이 요구된다. 광섬유 패브리페로(Fabry-Perot) 간섭계를 이용한 센서의 경우 정밀도 확보를 위해 공진기 길이를 늘이면 출력신호의 강한 주기성으로 인해 동작범위가 줄어드는 현상이 일어나고, 동작범위를 늘이기 위해 공진기 길이를 줄이면 정밀도가 떨어지므로 용도에 따라 공진기 길이를 결정해야 하는 문제가 발생한다. 본 논문에서는 기존의 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 보조센서를 추가하여 주센서신호의 주기성을 극복하면서 패브리페로의 우수한 해상도를 유지하기 위한 이중화 광섬유센서의 고유모델을 제시하였다. 또한, 수치해석을 통하여 제시한 모델의 타당성을 검증하였고, 범용으로 사용가능한 주 센서의 공진기 길이와 보조센서의 코팅 두께와의 관계 및 이중화 광섬유 센서의 신호처리방법에 대해 기술하였다.

2. 광섬유 패브리페로 센서

2.1 광섬유 패브리페로 온도센서

그림 1과 같은 패브리페로 공진기를 가상하고 손실이 없다고 가정했을 때 입사광 쪽으로 되돌아 가는 광파워는 식 (1)과 같이 정규화된 값인 반사율로 표현된다.

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

여기에서 R₁, R₂는 공진기 양쪽 반사체의 반사율, φ는 입사광이 공진기내를 왕복하는 데 해당하는 위상차로서 식 (2)와 같이 주어진다.

$$\phi = \frac{4\pi nL}{\lambda} \quad (2)$$

여기에서 n은 파이버 코어의 굴절율, L은 공진기 길이, λ는 레이저 광의 파장이다. 이 반사율 관계식이 결국 신호처리부 입력신호가 되므로 센서로 동작시키기 위해

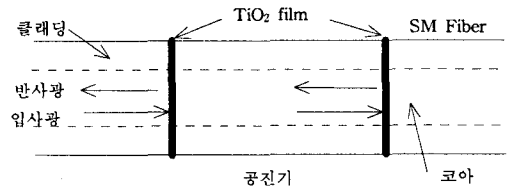


그림 1. 광섬유 패브리페로 공진기.

서는 전 위상영역에서 감도의 최대최소값의 범위를 조절할 필요가 있다. 전달함수를 단순화시키고 동작범위를 늘이기 위해 양쪽 반사체의 반사율을 동일한 값(R₀)으로 제작하고 10% 이내의 값을 취하도록 설계하면 식 (1)은 식 (3)과 같이 단순화 된다.

$$R = 2 R_0 (1 + \cos \phi) \quad (3)$$

광섬유내의 온도변화 ΔT는 열수축팽창에 의한 길이 변화 ΔL/ΔT 및 온도에 의한 굴절율의 변화 Δn/ΔT와 같이 광섬유 고유의 물리적 성질을 변화게 하여 결과적으로 지나가는 광의 위상을 변조시키며, 축방향 변화라든가 다른 스트레인효과는 무시하고 이를 수식화하면 식 (2)로부터 다음과 같은 변화치를 얻을 수 있다[1].

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

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 번째항의 약 7~8% 정도이다. 따라서 첫 번째항을 무시하면 식 (2)는 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta\phi = 2\pi \cdot \left(\frac{2L}{\lambda} \frac{dn}{dT} \right) \cdot \Delta T \quad (5)$$

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 온도변화(ΔT) 1000°C 에 대해 위상변화($\Delta\phi$)는 약 300π 라디안으로 위상영역에서의 반 주기(half fringe)가 온도변화 3.3°C에 해당되므로 10 비트의 ADC(Analog-digital converter)를 90% 범위까지 사용하더라도 0.004°C의 해상도를 가질 수 있다.

2.2 단일 반사체 광섬유 패브리페로 온도센서

보조센서로 사용될 광섬유 패브리페로 간섭계는 $2\mu\text{m}$ 정도의 TiO_2 필름을 공진기 자체로 대체한 것으로서, 식 (5)로부터 $\lambda = 1.3\mu\text{m}$, $L = 2\mu\text{m}$, $dn/dT \sim 5.0 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 를 적용하면 온도변화 1000°C 에 대한 위상변화는 약 0.31π (약 $\pi/3$)라디안으로 quadrature point operation시 visibility가 half fringe 경우의 50%로 떨어지기 때문에 분해능은 약 2°C 정도이나 대단히 넓은 동작 범위를 갖게 된다. 그림 2는 TiO_2 필름으로 만들어진 초소형 온도센서의 구조도를 나타내며 적용영역으로 공기 중만 고려하였다.

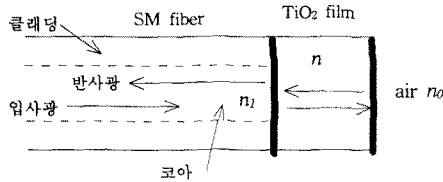


그림 2. 단일반사체 광섬유 패브리페로 센서.

단일층의 TiO_2 필름에 의한 반사율은 패브리페로 공진기의 기본식으로부터 그림 2와 같은 구조에 대해 식 (6)과 같이 주어진다[2]-(6).

$$R = \frac{\alpha - \beta + \gamma \cos \phi}{\alpha + \beta + \gamma \cos \phi} \quad (6)$$

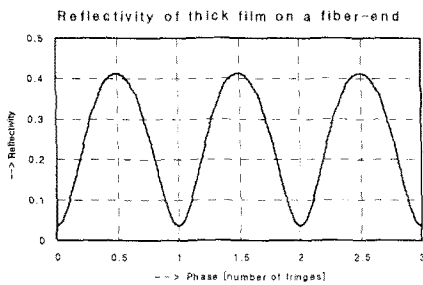


그림 3. 단일반사체 광섬유 패브리페로 센서의 반사율.

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, ϕ 는 식 (2)와 같이 주어지며 이때 L 은 TiO_2 코팅의 두께이다[x2].

그림 3은 식 (6)으로 표현된 반사율의 표현식에서 온도변화 또는 다른 물리량의 변화가 TiO_2 코팅부의 굴절율 n 이나 두께 L 의 미세한 변화를 가져온다고 가정했을 때 위상변화에 따른 반사율의 특성곡선을 나타낸다.

산화물 중 TiO_2 가 광섬유 코팅에 많이 사용되므로 TiO_2 의 광학특성에 대한 많은 연구가 있었으며, 특히 온도에 따른 굴절율 변화가 비선형이라는 것은 잘 알려진 사실이다. 특성곡선은 TiO_2 를 코팅하는 방법에 따라 다소 차이가 있을 수 있으므로 정량적으로 명시할 필요가 있다. 식 (7)은 본 실험에서 사용한 TiO_2 의 온도에 따른 굴절율 변화특성을 실험적으로 구한 것이며, 그림 4는 이를 그래프로 표시한 것이다[1].

$$n = n_s + \Delta n(T) \quad (7)$$

여기서,

$$n_s = n @ T_0$$

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

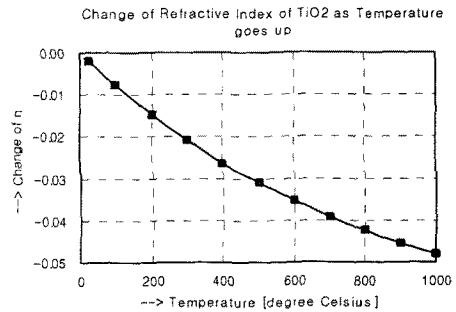


그림 4. TiO_2 의 온도에 따른 굴절율 변화.

2.3 이중화 광섬유 패브리페로 센서

단모드 광섬유와 가간섭성이 좋은 레이저광을 광원으로 사용하는 광섬유 패브리페로 센서는 식 (2) 또는 그림 3과 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[7] nonvolatile 메모리류의 도움을 받지 않는 한 power-on reset시 초기화문제를 안정적으로 해결하기 어렵다. 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 제시하는 해결방법은 센서를 이중화하여 연속적인 출력신호 추적에 통하지 않고 각 fringe의 위치를 인식할 수 있는 간단한 방법이다. 즉 감도가 주 센서의 half fringe 이내인 보조센서를 추가하여 이로부터 fringe의 절대위치를 확보하고자 하는 것이다. 예를 들면, 본 실험에서와 같이 주센서 및 보조센서 패브리페로 공진기의 길이를 각각 10mm와 $2\mu\text{m}$ 로 했을 때, 주센서의

half fringe에 해당하는 온도변화 3.3°C는 보조센서의 온도 분해능 2°C를 충분히 상회하므로 주센서 출력신호로부터 현재 fringe의 절대위치가 간단하게 결정된다. 그림 5는 본 실험에 사용된 센서시스템의 구성도이며,

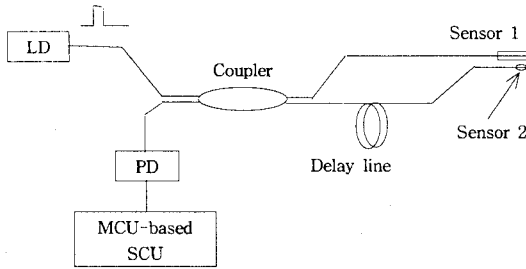


그림 5. 이중화 광섬유 패브리페로 센서의 구성도.

여기서 LD(Laser diode)는 1.3 μm 의 DFB(Distributed feedback) 반도체레이저이고, PD(Photodiode)는 Ge계의 PIN타입을 사용하였다. 변조펄스는 frequency chirping효과를 고려하여 500ns로 하였고, multiplexing을 위한 두 센서간의 time delay는 1 μs 로 설정하였다. 그림 6은 이중화 광섬유 패브리페로 센서의 전달함수를 개념적으로 표현한 것이다. 실제로는 두 센서의 visibility가 서로 다르므로 증폭부 설계시 어느 정도의 trade-off가 필요하며, 온도변화에 따라 잡음요인이 다르므로 look-up table작성시 충분한 고려가 필요하다.

Comparison of Normalized Reflectivity (Simplified)

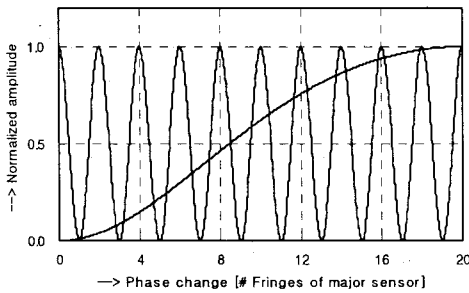


그림 6. 이중화 광섬유 패브리페로 센서의 전달함수.

3. 결 론

레이저광을 광원으로 사용하는 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 몇 가지 수치실험을 통해 지속적인 출력신호 추적없이 fringe의 절대위치를 판정할 수 있음을 보임으로서 제안된 방법의 타당성을 입증하였다. 현재 문제가 되고 있는 것은 마이크로 단위의 TiO₂ 코팅을 어떻게 안정적으로 처리할 수 있는지와 TiO₂ 반사체의 온도특성을 보다 정량적으로 평가할 수 있는 간이실험방법의 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.N. Inci et al., "Fabrication of single-mode fiber optic Fabry-Perot interferometers 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] G.B. Hocker, "Fiber-optic sensing of pressure and temperature", Applied Optics Vol. 18 No. 9, pp1445-8, 1979
- [7] Y.H. Yeh et al., "Fiber optic sensor for substrate temperature monitoring", J. Vac. Soc. Technol. A 8, pp3247-3250, 1990