

A Fiberoptic Temperature Sensor Using Low-Coherence Light Source

金光洙* · 李弘植** · 林根熙***
(Kwang-Soo Kim · Hong-Sik Lee · Geun-Hie Rim)

Abstract - A fiberoptic sensor using a low-coherence SLD as a light source has been studied. The sensor system employing an intrinsic fiber Fabry-Perot interferometer as a sensing tip and a fiber Mach-Zehnder interferometer as a processing one, overcomes the ambiguous reading caused by the highly periodic nature of conventional high-precision interferometric sensors and provides unambiguous identification of the desired phase among several candidates on the transfer function of an interferometric signal. A tentative application to the temperature sensor shows the potential that the fiberoptic sensor has a wide-dynamic range of 0-900°C as well as reasonable resolution higher than 0.1°C without ambiguity. Due to the inherent property of the optical fiber itself and the intrinsic fiber Fabry-Perot interferometer, the proposed fiberoptic sensor will give obvious benefits when it is applied to harsh environments to monitor some physical parameters such as temperature, strain, pressure and vibration.

Key Words : Fiberoptic sensor, SLD, low-coherence, temperature sensor, Fabry-Perot interferometry, Mach-Zehnder interferometry.

1. 서 론

일체형 광섬유 센서는 광섬유 고유의 특성인 소형·경량, 무유도성, 낮은 전송손실 등의 장점 외에 다양한 변조수단으로 인해 다중화가 편리하다는 점 때문에 최근 그 적용영역이 늘어가는 추세에 있다. 광섬유 위상변조 간섭계형 센서는 마이켈슨, 마하젠더, 패브리페로, 및 새낙으로 대별되며, 그 중 패브리페로 간섭계형 센서는 광섬유 고유의 장점을 그대로 유지하면서 구조가 간단하여 제작이 용이하다는 점과 센서당 광손실이 적어 다중화가 유리하다는 점 때문에 대량의 센서가 네트워크형을 구축해야하는 지능형 구조물(smart structure) 또는 지능형 외피(smart skin) 등의 핵심 센서로서 현재 주류를 이루는 브래그 격자(Bragg grating) 센서와 더불어 십 여년 전부터 꾸준히 연구되어 왔었다. 특히 1990년 텍사스의 Taylor 연구실에서 처음으로 유전체 반투과경(dielectric partial mirror)을 내장한 일체형 광섬유 패브리페로 간섭계(intrinsic fiber Fabry-Perot interferometer)로 구현한 고정도 광섬유 온도센서로서 전자파 잡음이 심한 RF 스퍼터링 챔버 내부의 온도를 측정하여 그 우수성을 선보인 이래, 그 동안 여러 형태의 외장형 광섬유 패브리페로 간섭계와 더불어 온도센서와 스트레인센서를 중심으로 지속적인 연구가 이루어져 왔었다[1-4].

그러나 광섬유 패브리페로 간섭계를 이용한 대부분의 센서는 광원으로 가간섭성(coherence)이 큰 레이저 다이오우드(또는 반도체 다이오우드)를 사용하므로 위상영역(phase domain)에서 측정량을 환산할 때 전달함수의 주기성 때문에 해의 모호함이 발생한다. 이러한 단점을 보완하기 위해 공진기 길이가 서로 다른 광섬유 패브리페로 간섭계를 주 센서 및 보조 센서로 사용하는 방법이나 샘플링을 다중화하여 위상을 정확하게 추적하는 방법 등이 연구되었으나, 최근 가간섭성이 낮은 광원을 이용하여 위상변화에 해당하는 프린지(fringe)의 이동을 검출함으로써 주기성에 의한 해의 다중성 문제를 자연스럽게 극복할 뿐 아니라 광섬유 센서의 최대 관심사인 절대치의 측정이 원리적으로 가능한 방식이므로 광섬유 패브리페로 간섭계를 이용한 광섬유 센서를 연구하는 그룹에서 지대한 관심을 보여주고 있다[4-6].

이러한 낮은 가간섭성의 광원을 이용하는 방식 중 본 연구에서는 광섬유 자이로의 광원으로 개발되었지만 다른 종류의 광섬유 센서 광원으로도 널리 사용되는 SLD(superluminescent diode)를 이용하여 간섭계형 광섬유 센서를 구현하였으며, 프린지 프로세싱용으로 광섬유 마하젠더를 전반부에 설치하고 센싱용과 참조용 광섬유 패브리페로 간섭계를 후반부에 설치하여 광섬유 일체형으로 제작하였다. 이 센서 시스템은 프로세싱 간섭계를 센싱 간섭계 후단에 설치하는 일반적인 백색광 간섭계(white-light interferometer)와 유사한 형태로 그 동작원리는 동일하나 신호처리 방식에서의 자유도가 많아 일반적인 백색광 간섭계에 비해 정밀도를 높일 수 있다는 장점이 있다. 센서 시스템의 성능을 알아보기 위하여 센싱 패브리페로 센서를 전기가열로 내부에 교정용 정밀급 서모커플과 같이 설치하여 상온에서 900°C까지 반복시험을 한

* 正 會 員 : 韓國電氣研究所 電氣物理研究그룹 前任研究員
 ** 正 會 員 : 韓國電氣研究所 電氣物理研究그룹 責任研究員
 *** 正 會 員 : 韓國電氣研究所 電氣物理研究그룹 責任研究員
 接受日字 : 2000年 8月 4日
 最終完了 : 2000年 11月 23日

결과 싸코커플의 한계 해상도인 0.1°C를 만족하여 고정도 온도센서로서의 가능성을 보여 주었다.

2. 저 가간섭성 광섬유 센서

2.1 센서의 동작원리

가간섭성이 낮은 광원을 이용한 광섬유 간섭계(저 가간섭성 광섬유 간섭계; low coherence light fiber interferometry)는 기존의 고감도 광섬유 간섭계의 주기성에 의한 위상 판별의 애로점을 극복하고 절대치를 측정할 수 있는 새로운 방식으로 알려져 그 동안 수 많은 연구가 되어져 왔다. 이 방식은 광원의 짧은 가간섭 길이 때문에 보편적인 위상검출 방식으로 해상도가 너무 떨어져 적용의 어려움이 있어서 대부분 프로세싱 간섭계라 불리는 위상 스캔을 위한 별도의 간섭계를 이용한다. 광출력 형태는 식 (1)과 같이 전형적인 코사인으로 변조된 가우시안 함수(cosine-modulated Gaussian function) 형태이며, 프린지 형태(fringe pattern or beam visibility profile)는 광원과 간섭계의 특성에 의해 결정된다 [4].

$$I(\Delta\phi) = 1 + \frac{1}{2} \exp\left[-\left(\frac{\lambda}{\pi L_c}\right)^2 \Delta\phi^2\right] \cos(\Delta\phi) \quad (1)$$

여기서, λ 는 광원의 중심파장, L_c 는 광원의 가간섭 길이, $\Delta\phi$ 는 프로세싱 마하젠더 간섭계와 센싱용 패브리페로 간섭계 사이의 위상차이고, $I(\Delta\phi)$ 는 정규화된 포토다이오우드 출력이다. 이 방식에서는 중심 프린지(0th order fringe or central fringe)가 당연히 최대 선명도(visibility)를 갖게 되고, 이 중심 프린지의 위치를 어떠한 방법으로 정확하게 읽어내게 되면 센싱 간섭계의 변조된 위상값을 구해낼 수 있다. 식 (1)로부터 중심 프린지의 최대점(maximum visibility point)은 두 간섭계간의 위상차가 없는 조건, 즉 $\Delta\phi=0$ 의 순간을 나타내므로 프로세싱 간섭계의 위상스캔 범위를 광원의 가간섭 길이보다 충분히 길게 설정해 주면 필요한 동작범위를 확보할 수 있다. 그림 1은 저 가간섭성 광섬유 간섭계에서 보편적으로 사용되는 네 종류 광원 즉, 백색광 램프, LED, SLD, 멀티모드 반도체 레이저(multimode laser diode)에 대해 특별한 신호처리기법을 적용하지 않고 신호의 직접비교가 가능하도록 해 주는 시스템의 최소 신호대잡음비(SNR)와 가간섭 길이와의 관계를 나타내고 있다. 백색광 램프의 경우 요구되는 신호대잡음비가 가장 낮아 외관상 시스템 설계에 유리해 보이지만 광원의 안정도와 광섬유 커플링효율이 낮아 시스템 성능을 향상시키기 힘들며, LED 경우 역시 광출력이 약해 적용이 제한되고, 멀티모드 반도체 레이저는 시스템에 요구되는 신호대잡음비가 대단히 높아 아날로그부에서 뿐만 아니라 디지털부에서 별도의 특별한 신호처리기법을 적용해야만 한다는 어려운 점이 있다. SLD는 가간섭 길이는 LED보다 다소 길지만 광출력이 LED보다 월등히 높으며 광원이 보다 안정되었다는 장점 때문에 신호처리 신뢰성이 보장되고 다중화 역시 가능하므로 본 연구에서의 광원으로 채택하게 되었다.

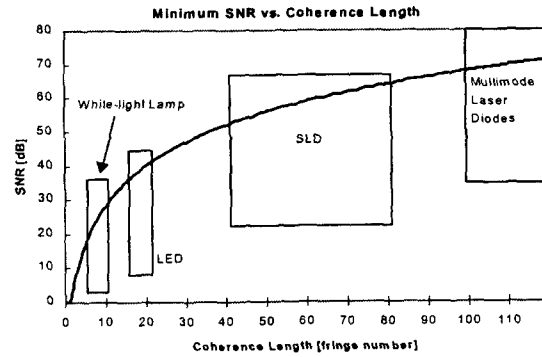


그림 1 직접비교를 위한 최소 SNR과 가간섭성

Fig 1 Minimum SNRs and coherence

그러나, 그림 1에서처럼 본 연구에서 사용된 SLD의 가간섭성은 멀티모드 반도체 레이저보다는 낮지만 중심 프린지와 인접한 이웃 프린지($\pm 1^{\text{th}}$ order fringe)의 선명도를 쉽게 구별해 줄 수 있을 정도로 충분히 낮지 않기 때문에 프린지 선명도의 직접 비교에 의한 중심 프린지의 구분은 용이하지 않다. 중심 프린지를 일관성 있게 식별하기 위해서는 광신호의 신호대잡음비를 어느 수준(SLD의 경우 50dB) 이상 확보하는 문제가 가장 중요하고 확실한 방법이지만 이는 제품의 단가를 지나치게 높게되어 경쟁력이 없어진다. 따라서, 제품의 가격을 낮추기 위해서는 신호대잡음비가 충분히 높지 않더라도, 여러 비슷한 선명도를 가진 후보 프린지들이 발생하더라도 단순히 디지털 신호처리만으로 중심 프린지를 신뢰성 있게 추정할 수 있는 정교한 디지털 신호처리 알고리즘이 필요하다[5-7].

2.2 광학계의 구성

일반적인 고정도 광섬유 간섭계는 마하젠더, 마이켈슨, 새낙, 패브리페로형이 주류를 이루고 있으며, 이에 대해서는 광섬유 센서관련 책자에서 잘 표현되어 있다[8]. 다양한 종류의 광원을 사용할 수 있고 고가의 싱글모드 반도체 레이저를 사용하지 않고서도 간섭계를 구성할 수 있는 저 가간섭성 간섭계는 위에서 언급한 바와 같이 센싱부의 위상변화분을 해석하기 위해 프로세싱용 간섭계가 또 하나 더 필요하다. 이러한 필요성은 다소 광학계를 복잡하게 만드는 단점은 있으나 위상변화의 상대값만 해석 가능한 간섭계의 약점을 극복하여 위상변화의 절대값을 읽어낼 수 있으므로 반도체 레이저를 사용하는 기존의 간섭계보다 적용범위가 넓다고 할 수 있다.

본 연구에서는 프로세싱 간섭계로는 각 광로(arm)의 길이가 대략 30m 정도인 광섬유 마하젠더, 센싱용과 참조용으로 공진기 길이가 1mm 인 광섬유 패브리페로 간섭계를 사용하였다. 그림 2에서처럼 SLD 광원으로부터 발진한 저 가간섭성 광은 3dB 커플러를 통하여 분기되어 마하젠더 간섭계의 각 광로로 들어가고, 서로 다른 광 경로를 겪은 광신호는 다시 3dB 커플러를 통하여 합쳐진 후 분기되어 각각 센싱 광섬유 패브리페로와 참조 광섬유 패브리페로 간섭계로 들어간

다. 이 때, 센싱 광섬유 패브리페로 간섭계는 측정 대상에 위치하여 측정 물리량에 따른 위상 변화를 겪게 하고, 참조 광섬유 패브리페로 간섭계는 정밀하게 항온제어가 되는 항온조에 넣은 후 외부환경과 격리시켜 광신호 위상의 기준이 되게 한다.

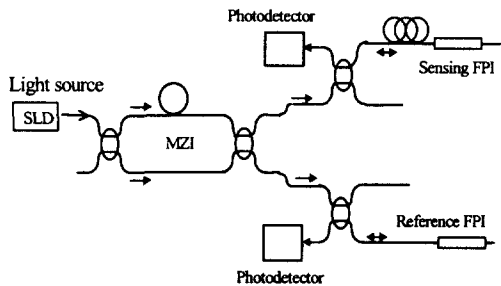


그림 2 광학계의 구성도

Fig. 2 Configuration of fiber optic system

마하젠더 프로세싱 간섭계의 한 쪽 광로를 형성하는 광섬유는 원통형 PZT 위에 균일한 힘으로 고르게 잡아 PZT에 가해지는 전압에 따라 가능한 한 선형적으로 신축이 일어나도록 하여 최고 사용전압에서 약 1mm 정도의 스트레칭이 얻어지도록 PZT와 광섬유의 길이를 설정하였다. 광원의 중심파장이 1.3 μm 일 때, 스트레칭되는 1mm 길이에 해당하는 마하젠더 간섭계의 위상이동은 770 프린지이므로, 이는 공진기 길이 1mm의 패브리페로 간섭계가 온도범위 1000 $^{\circ}\text{C}$ 에 대해 약 15 프린지의 위상이동이 있음을 고려하여 충분한 길이가 되도록 결정한 것이다. 광원인 SLD는 FWHM(Full-width half maximum)이 32nm, 중심파장이 1.3 μm , 광섬유에 커플링되는 파워의 최고치가 350 μW 이고, 가간섭 길이가 약 36 μm 인 OKI OE350을 사용하였으며, 각 간섭계에서의 광로차는 광원의 가간섭 길이보다 적어도 세 배 이상으로 설정하여 각각의 간섭계에 의한 간섭현상은 관측되지 않도록 하였다. 포토다이오드는 두 개 모두 1.3 μm 에서 양자효율이 75%인 후지츠의 FID모델 PIN타입을 사용하였다. 이 광학계의 출력은 두 간섭계간의 위상차이 즉, 마하젠더와 패브리페로 간섭계에서 발생하는 위상변화의 차이에 따른 간섭패턴의 선명도이다. 그림 3은 그림 2의 구성도에 따른 마하젠더 간섭계의 변조를 위한 PZT 입력전압 파형과 최종 간섭결과 파형이다. 그림 2의 구성도에서 마하젠더 간섭계의 한쪽 광로에 설치되어 있는 원통형 PZT에 톱니파(saw-tooth wave)의 전압을 인가하면, 마하젠더는 주기적으로 시간에 대해 선형적인 스트레칭을 겪는다. 이러한 스트레칭은 후단 패브리페로 간섭계의 이동 가능한 위상변화의 폭을 훨씬 상회하는 위상의 이동을 야기하여 매 주기 그림 3의 중하단과 같이 두 간섭계간의 위상일치 조건을 포함하는 독특한 프린지 패턴을 만들어낸다.

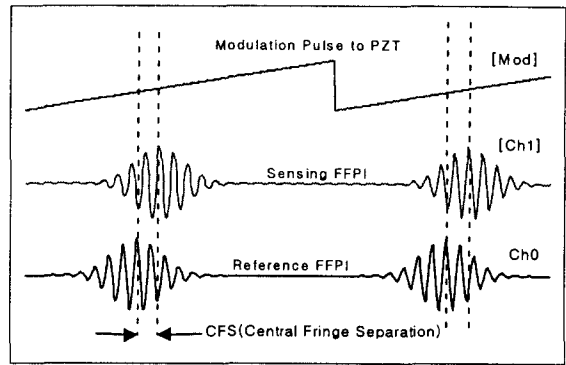


그림 3 변조펄스와 광출력 파형

Fig. 3 Modulation pulse and optical output power

그림 3의 중하단의 프린지 패턴은 최종 간섭파형으로서 시간에 따른 출력이지만, 참조 간섭계에 대한 센싱 간섭계의 상대적 위상변화는 프린지 패턴의 좌우 이동정도이므로 이는 하단의 CFS(central fringe separation)와 같이 두 패브리페로 간섭계와 마하젠더 간섭계에 의해 만들어진 프린지 패턴의 중심점(광출력의 최대점 또는 중심 프린지의 최대점)을 비교함으로써 해석 가능하며, 디지털 신호처리에 의해 구하고자 하는 최종 위상차를 샘플간격 보다 정밀한 CFS로 표현할 수 있다. 비록 이러한 간섭계가 이론적으로는 중심 프린지의 위치를 출력파형으로부터 정확하게 구할 수 있어서 간섭계로서는 유망하지만, 중심 프린지 부근에서의 각 프린지 최대점 추이도가 다소 평탄한 특성을 나타내므로 광학부의 추가 구성 없이 이를 해결해야 하는 문제점이 남아 있다. 다음 절에서 설명하는 바와 같이 단순히 광출력의 최대점을 직접 비교하는 것은 출력신호의 신호대잡음비에 지나치게 의존하는 방식이므로 시스템의 신호대잡음비를 높인데 비용이 많이 들어 실용적이라 할 수 없다.

2.3 신호처리

본 연구에서 사용된 저가간섭성 간섭계는 두 종류의 간섭계 즉, 마하젠더와 패브리페로 간섭계를 시리즈로 연결하여 사용하므로 간섭패턴을 악화시키는 요인이 존재할 가능성이 단일 간섭계의 경우보다 높다고 할 수 있다. 따라서, 신호처리를 위한 알고리즘 구축단계에서는 시스템을 이상적인 경우로 보기 위해 다음과 같이 몇 가지를 가정하여야 한다. 첫째, 마하젠더에서 커플러를 통한 광파워 분기비는 50-50이다. 둘째, 패브리페로 간섭계의 전달함수는 정현파이다. 셋째, x-y 편광비는 광섬유 전체에서 동일하여 편광변화에 의한 광파워의 혼란은 없다. 이러한 가정 하에서 식 (1)을 이용하여 그림 2 시스템의 전달함수를 다시 쓰면, 식 (2)와 같다[6].

$$I(\Phi_{MZ}, \Phi_{FP}) = 1 + \frac{1}{2} \exp \left\{ - \left[\frac{\Phi_{MZ} - \Phi_{FP}}{\pi l_c / \lambda} \right]^2 \right\} \cos(\Phi_{MZ} - \Phi_{FP}) \quad (2)$$

여기서 l_c 는 SLD의 가간섭 길이, λ 는 SLD의 중심 파장이고, ϕ_{MZ} 와 ϕ_{FP} 는 각각 마하젠더 간섭계의 광로차와 패브리페로 간섭계의 왕복광로차(round-trip phase shift)에 의한 위상차로서 식 (3)과 (4)로 주어진다.

$$\phi_{MZ} = \frac{2\pi n L_{MZ}}{\lambda} \quad (3)$$

$$\phi_{FP} = \frac{4\pi n L_{FP}}{\lambda} \quad (4)$$

여기서, L_{MZ} 는 마하젠더 간섭계에 있어서 광신호가 두 광로를 지나면서 겪는 거리의 차(optical path difference)이고, L_{FP} 는 패브리페로 간섭계의 공진기 길이이다. 식 (3)과 식 (4)는 전형적인 간섭계의 위상변조식으로서 어떤 시점의 센싱 패브리페로 간섭계의 위상변화가 식 (4)에 따라 결정되면, PZT구동에 의해 넓은 동작범위를 갖는 프로세싱 마하젠더 간섭계가 패브리페로 간섭계의 위상변화치를 포함하는 영역을 일주하여 식 (1)과 같은 저 가간섭성 간섭계의 독특한 프린지 패턴을 만들어낸다. 식 (2)는 형태상 식 (1)과 동일하지만 저 가간섭성 간섭계에 있어서 가장 중요한 사실을 단적으로 보여주고 있다. 서로 다른 목적으로 변조되는 두 간섭계의 위상 ϕ_{MZ} 와 ϕ_{FP} 가 정확히 일치할 때 즉, $\phi_{MZ} - \phi_{FP} = 0$ 일 때 중심 프린지의 최대점이 발생하며, 이 지점의 광출력이 프린지 패턴 전체의 최대값을 이루고 있다는 점이다. 이 사실은 신호처리시 샘플영역에서 프린지 패턴의 절대위치를 결정할 수 있는 중요한 단서로 작용함과 동시에 신호처리시 신호가 가지는 신호대잡음비 특성에 대한 의존도가 높아 신호처리 방법의 선정에 상당한 제약이 따를 것이라는 점을 예측할 수 있게 한다. 이러한 방법상 제약 때문에 원하는 해상도의 저 가간섭성 간섭계를 구성하려면 어느 수준 이상의 신호대잡음비를 요구하게 된다. 즉, 이상적인 경우로 가정하더라도 중심 프린지에서의 선명도는 50%를 넘지 못하므로 신호처리 가능한 수준의 신호대잡음비를 확보하는 문제가 시스템 전체의 성능을 좌우하게 된다. 저 가간섭성 간섭계의 원리상 광섬유 패브리페로에서 발생한 위상 변화치는 샘플영역에서 측정된 프린지 패턴의 이동거리로부터 결정되고 이 프린지 패턴의 위치는 중심프린지의 위치로 대표되므로, 결국 이 중심 프린지의 위치가 알려져야만 센싱 패브리페로 간섭계의 위상변화치가 산출 가능하다.

그림 4는 가간섭 길이가 10 프린지인 이상적인 광원을 모델로 했을 때, 중심 프린지를 찾기 위한 신호처리의 개념을 설명하는 그림이다. 그림 4의 ΔI 는 중심 프린지(0th order)의 최대값과 바로 다음 프린지($\pm 1^{\text{th}}$ order)의 최대값간의 광출력 차이를 나타내며, 이는 시스템의 신호대잡음비에 대단히 민감하므로 실제 프린지 패턴에서의 ΔI 는 그림 4에서의 이상적인 표현과 많은 차이가 있어서 명료하게 정의되지 않는 경우가 많다. 따라서, 신호처리의 대부분 노력이 중심프린지를 주변 프린지로부터 구분해 내는 곳에 집중되므로, 신호처리의 가장 주된 목적은 가간섭 길이 즉 최대 파워의 $1/e$ (=37%)내에 있는 프린지 정보로부터 가장 가능성이 높은(most probable) 중심 프린지를 찾아내는 것이라 할 수 있다. 그림 4의 ΔI 는 잡음이 없다고 가정할 경우 식 (2)로부터 다음의 식 (5)와 같이 간단하게 주어진다.

$$\Delta I = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{2}{l_c/\lambda}\right)^2\right\} \quad (5)$$

여기서 l_c 와 λ 는 식 (2)에서처럼 각각 SLD의 가간섭 길이와 중심 파장이므로, 본 연구에서 사용된 SLD를 적용할 경우 l_c/λ 의 값, 즉 프린지 수로 표현된 광원의 가간섭 길이는 28 정도이다. 따라서, 식 (5)는 광원이 결정되면 ΔI 가 바로 주어짐을 보여주고 있으며, 이는 주어진 광원에 대해 신호처리 방법을 선택할 때 중요한 척도가 된다. 샘플영역에서 샘플된 데이터의 직접비교에 의한 중심프린지 식별은 어느 정도의 신호대잡음비가 확보되어야만 가능하므로 그 신호대잡음비의 한계를 알아보는 것도 시스템 전체의 경제성 평가를 위해 필요한 과정이라 할 수 있다. 본 연구의 경우 ΔI 를 구해보면 식 (5)로부터 0.005이고, 이 값은 신호레벨 1에 대한 값이므로 직접비교를 위한 최소 신호대잡음비는 $-20\log(\Delta I)$ 로부터 46dB임을 알 수 있다. 그럼 1로부터 이 정도의 신호대잡음비는 샘플된 신호를 단순히 직접 비교하더라도 중심프린지의 식별이 가능하게 해주는 값이지만 실제 상황은 반드시 그렇지 않은 않다. 광섬유를 사용하는 한 피할 수 없는 문제인 편광 때문에 프린지 패턴 자체가 동요하는 경우가 발생하므로 시스템의 신호대잡음비가 양호하더라도 신뢰성을 높이기 위해 디지털 신호처리 기법의 적용을 통하여 시스템을 보완할 필요가 있다.

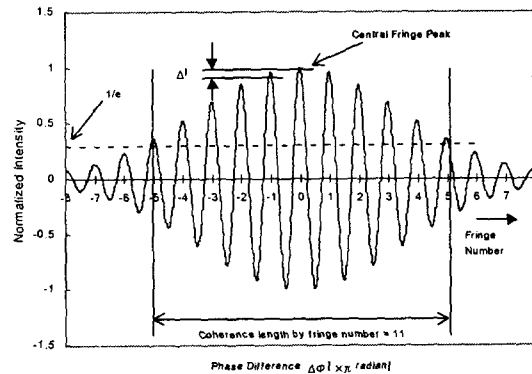


그림 4 프린지 패턴의 개념도
Fig. 4 Conceptual drawing of fringe pattern

2.4 온도센서로의 적용

실리카계 광섬유 내의 온도변화 ΔT 는 실리카의 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 스트레인이효과는 무시하고 이를 수식화하면 식 (3)이나 (4)로부터 다음과 같은 변화치를 얻을 수 있다[8].

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \left(n \frac{dL}{dT} + L \frac{dn}{dT} \right) \Delta T \quad (6)$$

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 무시하고, 실제 값 $\lambda=1.3\mu\text{m}$, $L=1\text{mm}$ 를 적용하면 식 (6)은 다음과 같이 표현된다.

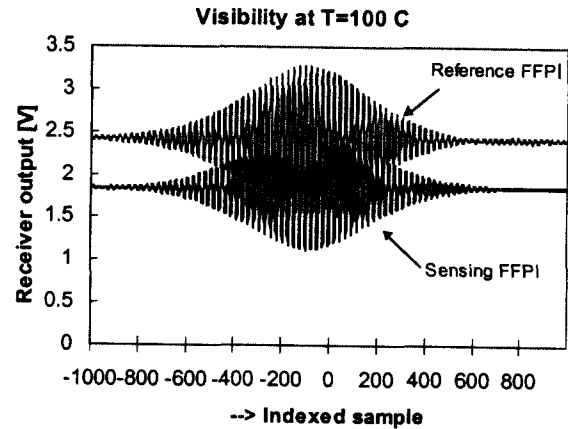
$$\Delta\phi = 2\pi \cdot \left(\frac{2}{130} \right) \cdot \Delta T \quad (7)$$

식 (7)은 패브리페로 간섭계 내의 온도변화와 이에 따른 위상변화와의 관계를 개념적으로 나타내는 것으로 온도에 따라 위상이 선형적으로 변한다고 가정했을 경우이므로, 국부적으로 온도가 65°C 마다 새로운 프린지가 형성됨을 보여 주고 있다. 그러나 실험의 결과는 상온에서 150°C 근처까지 한 프린지 이동에 해당하는 온도는 약 60°C 이고, 온도가 올라감에 따라 계속 감소하여 $800\text{--}900^\circ\text{C}$ 부근에서는 40°C 정도로 관측되었다. 이는 식 (6)에서 식 (7)로 단순화시키면서 무시했던 온도 변화에 의해 광섬유가 받는 스트레인이 $dL/(LdT)$ 항의 영향과 상수로 가정했던 dn/dT 의 온도에 대한 비선형 특성 때문인 것으로 예상된다. 따라서, 실제 시스템을 구성할 때, 좁은 온도범위에서도 온도에 대한 광위상의 반응이 어느 정도 비선형 특성을 나타낸다는 사실을 고려하여, 식 (7)을 바로 적용하지 않고 프로세싱 간섭계를 포함하는 시스템 전체에 대한 특성곡선을 구하여 적용한다.

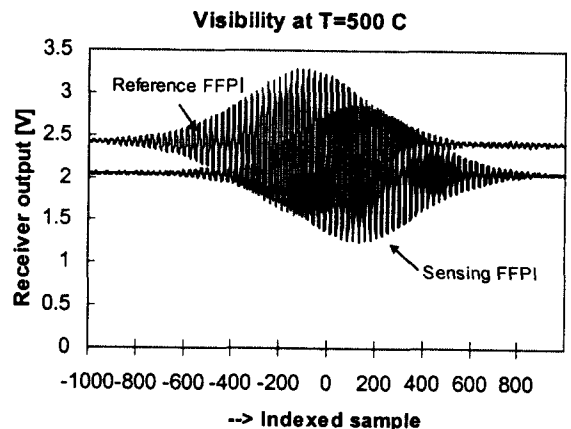
온도 센서의 성능 실험은 듀티 80%, 20kHz의 톱니파 펄스를 원통형 PZT에 인가하고 톱니파 펄스 한 주기에 대한 출력파형을 2048 데이터 포인트로 샘플링하여 수행하였다. 샘플링 윈도우를 설정하기 위해 마하젠더 간섭계의 변조용 광로가 최대 $260\mu\text{m}$ (200프린지) 정도 스트레칭되도록 PZT 구동전압의 상한을 조정하고, 프린지 패턴의 초기위치를 톱니파 상승 펄스의 중심에 위치하도록 마하젠더 간섭계의 참조 광로를 조절하였다. 초기 위치를 중심으로 좌우 50 프린지 정도의 샘플링 윈도우를 설정하면 온도변화의 최대치 1000°C 에 해당하는 프린지 패턴의 이동이 있다라도 샘플링 윈도우가 본 연구에서 사용된 SLD의 가간섭 거리(28프린지)를 충분히 포함하므로, 이 윈도우는 신호처리에 필요한 모든 유효 데이터를 가지고 있다고 볼 수 있다. 프린지 당 샘플 포인트는 약 20개로 오버샘플링(over-sampling)하여 간섭계 출력파형의 아날로그 형태(shape)를 디지털 영역에서 최대한 그대로 유지하고자 했으며, 디지털 신호처리시 오버샘플을 통해 확보된 원본 데이터(raw data)의 신뢰도를 높이고자 하였다.

그림 5는 저 가간섭성 간섭계를 온도 센서로 적용했을 때 성능실험 결과 중 하나로서 온도에 따른 프린지 패턴의 양상을 보여주고 있으며, 여기서 외형상 프린지 패턴이 그림 4의 경우와 같이 잘 정의된 것처럼 보이지만, 실제로는 중심 프린지 근처에서 특히 프린지 최대점 근처에서 평탄한 현상이 발생하기 때문에 디지털 신호처리시 세심한 주의를 요하는 부분이다. 그림 5-(a)는 온도가 100°C 일 때의 프린지 패턴으로서 CFS는 약 16 샘플 포인트이고, 그림 5-(b)는 온도가 500°C 일 때의 프린지 패턴으로서 CFS는 약 225 샘플 포인트이다.

온도가 100°C 에서 500°C 로 400°C 상승할 때 센싱용 프린지 패턴이 그래프상에서 수 프린지 오른쪽으로 이동하여 약 225 샘플 포인트의 CFS 이동을 잘 보여 주고 있으며, 이는 프린지 당 샘플 수가 약 24개임을 고려할 때 400°C 의 온도 상승에 따라 약 9.5 프린지 정도의 이동이 있었다고 할 수 있다.



(a) In case of 100°C



(b) In case of 500°C

그림 5 온도변화에 따른 프린지 패턴의 이동

Fig. 5 Shift of fringe patterns as temperature changes

보다 정밀한 접근을 위해 먼저 해상도를 고려해 보면, 프린지 당 샘플 수 24개와 프린지 당 온도변화 폭 50°C 로부터 샘플번호만으로 단순하게 온도를 추정할 경우 해상도가 2°C 를 넘지 못한다. 그러나 원본 데이터의 신뢰도가 높다고 가정하고 이로부터 참 값에 아주 근접한 중심 프린지의 최대값을 추정하면, 신호처리 방법에 따라 다소 차이는 있겠지만 0.1 샘플 정도의 해상도는 쉽게 얻을 수 있다. 따라서, 신호처리부에서 샘플영역으로부터 CFS를 구할 때, CFS는 위에서

기술한 것처럼 샘플단위의 정수로 표현되는 것이 아니고 해상도를 충분히 고려한 실수로 표현된다. 본 연구에서는 CFS를 0.001샘플까지 계산하지만 시스템의 광학부가 그렇게까지 정교하지 못하므로 0.001샘플의 해상도를 가질 수는 없었다. 그러나 상온에서 900°C까지의 수 회에 걸친 온도상승 및 온도하강 실험에서 해상도 0.1°C의 교정용 정밀급 써모커플과 비교했을 때 적어도 써모커플의 해상도 0.1°C를 상회함을 확인하였다. 그림 6은 수 회에 걸친 시스템 성능시험의 결과를 정리한 특성곡선이다. 시험에 사용된 전기가열기의 특성상 500°C 이상의 온도에서는 온도의 변화속도가 상대적으로 빠르기 때문에 매 실험마다 특성곡선 전체에 대한 충분한 데이터를 확보할 수 없어서 3-4회 실험의 결과를 모두 이용하였다. 지역적인 해상도는 전구간에서 최소한 0.1°C이나 500°C 이상의 고온부에서는 온도제어도 용이하지 않고, 기준센서인 써모커플과 광섬유 간섭계형 온도센서의 응답속도의 차이가 문제가 될 정도로 온도변화의 속도도 상대적으로 빨라서 특성곡선의 신뢰성을 확보하기가 어려웠다.

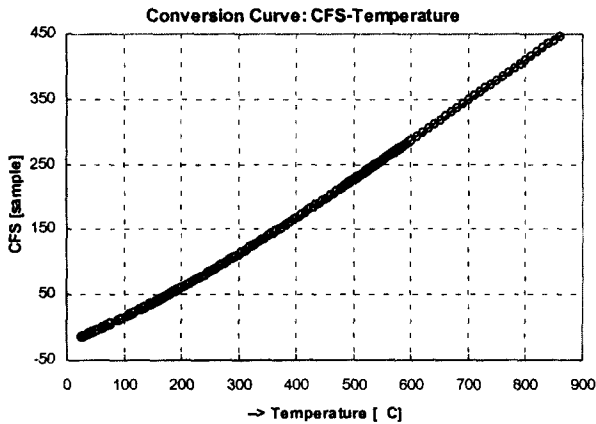


그림 6 온도변화에 따른 중심 프린지 이격거리(CFS)의 특성곡선

Fig. 6 Calibration curve of temperature vs CFS

3. 결 론

레이저광을 광원으로 사용하는 싱글모드 광섬유 패브리페로 온도센서는 출력신호의 강한 주기성으로 인하여 변조된 신호로부터 온도에 대한 정보를 읽어 낼 때 프린지 위치의 기준이 모호해지는 경우가 많다. 본 연구에서는 레이저광 대신 가간섭성이 낮은 광원인 SLD를 사용하여 광섬유 패브리페로 간섭계의 이러한 고질적인 문제를 해결함으로써 그 측정범위가 반 주기(half fringe)의 제약으로부터 완전히 벗어나게 하였다. 광섬유 패브리페로 간섭계의 미세한 위상변화는, 수 백 프린지의 위상이동이 가능한 마하젠더 간섭계와 완만

한 가우시안 형태의 빔을 발광하는 광대역 광원 SLD가 만들어내는 다소 복잡한 간섭패턴 전체를 위상영역에서 좌우로 이동시키기 때문에, 이 이동거리를 정확히 알기 위해서는 시스템의 출력과형인 프린지 패턴으로부터 선명도가 가장 높은 중심 프린지의 최대값의 위치, 즉 전달함수가 최대값을 가지는 샘플 포인트를 가능한 한 정확하게 구할 수 있어야 한다. 이러한 동작원리 때문에 여러 가지 신호처리 기법이 등장하게 되고 중심 프린지의 위치를 얼마나 정확하고 신뢰성 있게 산출하느냐가 시스템의 성능을 결정한다고 할 수 있다.

본 연구에서는 PZT로 변조되는 마하젠더 프로세싱 간섭계와 측정용 및 참조용 광섬유 패브리페로 간섭계로 구성된 저가간섭성 간섭계 시스템을 온도 측정용으로 적용해 본 결과, 중심 프린지로 예상되는 데이터 포인트 주변의 상황이 이상적인 경우와 많은 차이가 있었으며, 특히 편광에 의한 광파위의 혼란 때문에 별도의 편광제어기를 설치해야 할 필요성이 발생하였다. 그러나 고도의 디지털 신호처리기법을 적용하면 시스템이 50dB 보다 훨씬 낮은 신호대잡음비를 갖더라도 일반적인 광섬유 간섭계보다는 다소 낮은 해상도의 센서 시스템을 구현할 수 있으며, 편광제어기나 프로세싱 마하젠더를 좀 더 정교하게 구성하여 광학계를 안정시키면, 고 해상도의 저가간섭성간섭계의 실현도 가능할 것으로 전망된다.

참 고 문 헌

- [1] C. Lee et al., "Interferometric optical fiber sensors using internal mirrors", *Elec. Let.*, v24, n4, pp193-4, 1988.
- [2] Y. Yeh et al., "Fiber optic sensor for substrate temperature monitoring", *J. Vac. Sci. Technol.*, vA8, n4, pp3247-3250, 1990.
- [3] T. Kao et al., "High-sensitivity intrinsic fiber-optic Fabry-Perot pressure sensor", *Opt. Let.*, v21, n8, pp 615-7, 1996.
- [4] Y. Rao et al., "Recent progress in fibre optic low-coherence interferometry", *Meas. Sci. Technol.*, v7, pp981-999, 1993.
- [5] E. Berkcan et al., "Sensors with centroid based common sensing scheme and their multiplexing", *SPIE v1795 Fiber Optic and Laser Sensors X*, pp362-370, 1992.
- [6] S. Chen et al., "Digital signal processing techniques for electronically scanned optical-fiber white-light interferometry", *Appl. Opt.*, v31, n28, pp 6003-6010, 1992.
- [7] H. LeFerve, "White-light interferometry in optical fibre sensors", *Proc 7th Optical Fibre Sensors Conf.*, pp345-352, 1990.
- [8] Eric Udd, *Fiber Optic Sensors*, John Wiley & Sons, New York, 1991.

저 자 소 개



김 광 수 (金 光 洙)

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

응용 및 광섬유 응용

E-mail : kskim@keri.re.kr



임 근 희 (林 根 熙)

1955년 10월 7일생. 1978년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1988년 Virginia Polytechnic Institute and State University 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1978년~현재 한국전

기연구소 산업전기연구단 책임연구원

Tel : 055-280-1450, Fax : 055-280-1490



이 흥 식 (李 弘 植)

1953년 9월 13일 생. 1975년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 한국전기연구소 전기물리연구그룹 재직. 관심분야: 고전압 응용

및 레이저&플 라즈마 응용

E-mail : hslee@keri.re.kr