

SLD 광원을 이용한 광섬유 페브리페로 센서

김 광수, 이 병윤, 이 홍식, 임 근희
한국전기연구소

Fiber Fabry-Perot Sensor using SLD Light Source

Kwang-Soo Kim, Byong-Yoon Lee, Hong-Sik Lee, Geun-Hie Rim
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - A fiberoptic sensor using an SLD as a light source has been studied. The sensor system employs an intrinsic fiber Fabry-Perot interferometer as a sensing tip and a fiber Mach-Zehnder interferometer as a processing one. A free loading test for temperature application shows that the fiberoptic sensor has a wide-dynamic range as well as high resolution. Due to the inherent property of the optical fiber itself and the intrinsic Fabry-Perot interferometer, the fiberoptic sensor gives obvious benefits when it is applied to harsh environments to monitor some physical parameters such as temperature, strain, pressure and vibration.

1. 서론

반투과경(partial mirror)을 내장한 광섬유 페브리페로 간섭계형(fiber Fabry-Perot interferometric) 센서가 소형경량, 무유도성 등 광섬유 고유의 장점과 더불어 제작이 용이하고 구조가 간단하다는 부가적인 장점 때문에 여러 분야에서 실용적인 센서로 적용해 보고자하는 연구가 십 여년 전부터 진행되어 왔었다. 1988년 텍사스의 Taylor 연구실에서 처음으로 내장형 광섬유 페브리페로 간섭계를 이용한 온도센서로서 전자파 잡음이 심한 RF스피터링 챔버 내부의 온도를 측정하여 그 우수성을 선보인 이래 그 동안 여러 형태의 외장형 광섬유 페브리페로 간섭계와 더불어 온도센서와 스트레인센서를 중심으로 지속적인 연구가 이루어져 왔었다[1-4].

그러나 광섬유 페브리페로 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 페브리페로 간섭계를 주센서 및 보조센서로 사용하는 방법이나 샘플링을 다중화하여 위상을 정확하게 추적하는 방법 등이 연구되었으나, 최근 가간섭성이 낮은 광원을 이용하여 위상변화에 해당하는 프린지(fringe)의 이동을 검출하므로써 주기성에 의한 해의 다중성 문제를 자연스럽게 극복할 뿐 아니라 광섬유 센서의 최대 관심사인 절대치의 측정이 원리적으로 가능한 방식이므로 광섬유 페브리페로 간섭계를 이용한 광섬유 센서를 연구하는 그룹에서 지대한 관심을 보여주고 있다[4-6].

이러한 가간섭성이 낮은 광원을 이용하는 방식 중 본 연구에서는 광섬유 자이로 광원으로 개발되었지만 다른 종류의 광섬유 센서 광원으로도 널리 사용되는 SLD(superluminescent diode)를 이용하여 간섭계형 광섬유 센서를 구현하였으며, 프린지 프로세싱용으

로 광섬유 마하젠더를 전반부에 설치하고 센싱용과 참조용 광섬유 페브리페로 간섭계를 후반부에 설치하여 일체를 광섬유형으로 제작하였다. 이 센서 시스템은 백색광 간섭계(white-light interferometer)로 잘 알려진 센서와 유사한 형태로 동작원리와 신호처리 방식은 이와 매우 유사하다.

2. 본론

2.1 센서의 동작원리

가간섭성이 낮은 광원을 이용한 광섬유 간섭계는 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 방식으론 해상도가 너무 떨어져 적용의 어려움이 있어서 대부분 프로세싱 간섭계라 불리는 위상스캔을 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.

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

여기서, λ 는 광원의 중심파장, L_c 는 광원의 가간섭 길이, $\Delta\phi$ 는 프로세싱 마하젠더 간섭계와 센싱용 페브리페로 간섭계 사이의 위상차이고, $I(\Delta\phi)$ 는 스케일된 포토다이오우드 출력이다. 이 방식에서는 중심 프린지(0-th 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

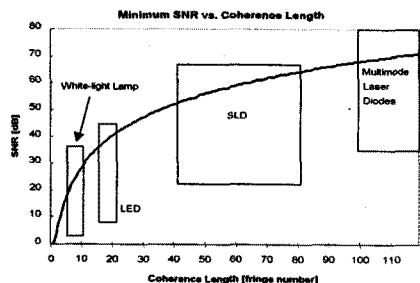


그림 1. 직접비교를 위한 최소 SNR과 가간섭성

길이보다 충분히 길게 설정해 주면 필요한 동작범위를 확보할 수 있다. 그러나, 그림 1에서처럼 본 연구에서 사용된 SLD의 가간섭성은 멀티모드 반도체 레이저 (multimode laser diode) 보다는 낮지만 중심 프린지와 인접한 이웃 프린지(± 1 -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 신호 대 잡음비(SNR)를 어느 수준(SLD의 경우 50dB) 이상 확보하는 문제가 가장 중요하고 확실한 방법이지만 이는 제품의 단가를 지나치게 높게 되어 경쟁력이 없어진다. 따라서, 제품의 가격을 낮추기 위해서는 SNR이 충분히 높지 않더라도 즉, 여러 비슷한 선명도를 가진 후보 프린지들이 발생하더라도 단순히 디지털 신호처리만으로 중심 프린지를 신뢰성 있게 추정할 수 있는 정교한 디지털 신호처리 알고리즘이 필요하다[5-6].

2.2 광학계의 구성

일반적인 고정도 광섬유 간섭계는 마하젠더, 마이켈슨, 새낙, 패브리페로형이 주류를 이루고 있으며 이에 대해서는 광섬유 센서관련 책자에서 잘 표현되어 있다 [7]. 다양한 종류의 광원을 사용할 수 있고 고가의 싱글 모드 반도체 레이저를 사용하지 않고서도 간섭계를 구성할 수 있는 저 가간섭성 광원 간섭계(low coherence light interferometry)는 위에서 언급한 바와 같이 센싱부의 위상변조분을 해석하기 위해 프로세싱용 간섭계가 또 하나 더 필요하다. 이러한 필요성은 다소 광학계를 복잡하게 만드는 단점은 있으나 위상변화의 절대값을 읽어낼 수 있으므로 반도체 레이저를 사용하는 간섭계보다 적용범위가 넓다고 할 수 있다.

본 연구에서는 프로세싱 간섭계로는 각 광로(arm)의 길이가 대략 30m 정도인 광섬유 마하젠더, 센싱용과 참조용으론 공진기 길이가 약 1cm 정도인 광섬유 패브리페로 간섭계를 사용하였다. 그림 2에서처럼 SLD 광원으로부터 발진한 광대역 광은 3dB 커플러를 통하여 분기되어 마하젠더 간섭계의 각 광로로 들어가고, 서로 다른 광로를 겪은 광신호는 다시 3dB 커플러를 통하여 합쳐진 후 분기되어 각각 센싱 패브리페로와 참조 패브리페로 간섭계로 들어간다. 이 때, 센싱 광섬유 패브리페로는 측정 대상에 위치하여 측정 물리량에 따른 위상변화를 겪게하고, 참조 광섬유 패브리페로는 정밀하게 항온제어가 되는 항온조에 넣은 후 외부환경과 격리시켜 광신호 위상의 기준이 되게 한다.

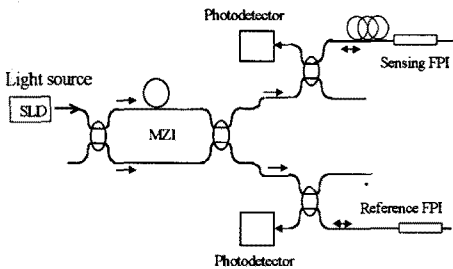


그림 2. 광학계의 구성도

마하젠더 프로세싱 간섭계의 한 쪽 광로를 형성하는 광섬유는 원통형 PZT위에 균일한 힘으로 고르게 잡아 PZT에 가해지는 전압에 따라 선형적으로 신축이 일어나도록 하여 최고 사용전압에서 약 1mm 정도의 스트레칭이 얻어지도록 PZT와 광섬유의 길이를 설정하였다. 광원인 SLD는 FWHM(Full-width half maximum)

이 30nm, 중심파장이 1.3 μ m, 광섬유에 커플링된 파워의 최고치가 300 μ W이고, 가간섭 길이가 약 31 μ m인 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 μ m에서 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 입력 전압 파형과 최종 간섭결과 파형이다. 그림 3의 중하단

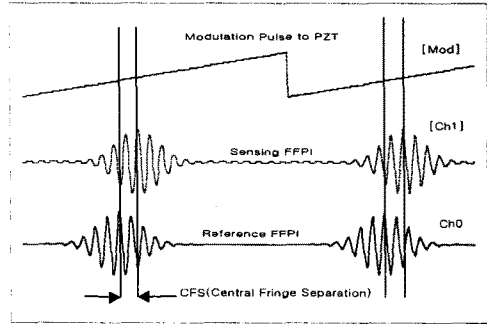


그림 3. 변조펄스와 광출력 파형

은 최종 간섭파형으로서 시간에 따른 출력이지만, 이는 곧 두 간섭계 간의 위상차로 해석될 수 있으므로 하단의 CFS(central fringe separation)가 구하고자하는 최종 위상차이다. 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 구성없이 이를 해결해야 하는 문제점이 남아 있다.

2.3 신호처리

본 연구에서 사용된 저 가간섭성 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 파워분기비는 50-50이다. 둘째, 패브리페로 간섭계의 전달함수는 정현파이다. 셋째, x-y 편광비는 광섬유 전체에서 동일하여 편광변화에 의한 광파워의 혼란은 없다. 이러한 가정 하에서 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 중심파장이고, 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.

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

$$\phi_{FP} = \frac{2\pi n L_{FP}}{\lambda} \quad (4)$$

여기서, L_{MZ} 와 L_{FP} 는 각각 마하젠더 간섭계의 광로차와 패브리페로 간섭계의 왕복광로차이다. 식 (2)는 ϕ_{MZ} 와 ϕ_{FP} 가 정확히 일치할 때 즉 $\phi_{MZ} - \phi_{FP} = 0$ 일 때 중심 프린지의 최대값이 발생하며, 이 때의 광출력이 프린지 패턴 전체의 최대값을 이룬다. 이상적인 경우로 가정했으므로 중심 프린지에서의 선명도는 50%가 된다. 저가간섭형 간섭계의 원리상 광섬유 패브리페로에서 발생된 위상 변화치의 절대값은 이 중심 프린지의 위치가 알려져야만 해독 가능하다.

그림 4는 중심 프린지를 찾기 위한 신호처리 개념도를 나타낸다. 그림에서 표현한 ΔI 는 이상적인 경우이고 실제로는 이렇게 선명하게 나타나지 않는다.

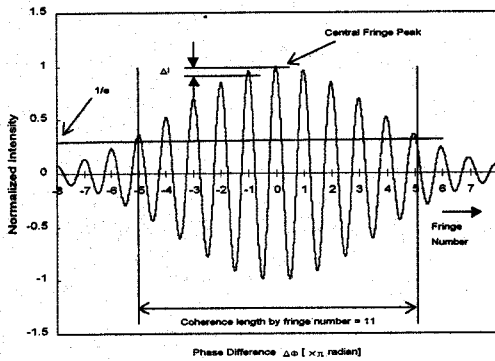


그림 4. 프린지 패턴의 개념도

신호처리의 가장 주된 목적은 가간섭 길이 즉 최대 파위의 $1/e$ ($\approx 37\%$)내에 있는 프린지 정보로부터 가장 가능성이 높은 중심 프린지를 찾아내는 것이다. 그림 5는 온도변화에 따른 저가간섭형 간섭계의 출력파형을 보여

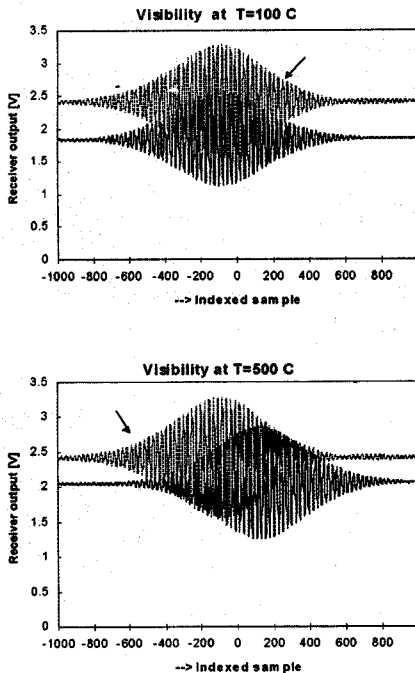


그림 5. 온도변화에 따른 프린지 패턴의 이동

주고 있으며, 여기서 외형상 프린지 패턴이 잘 정의된 것처럼 보이지만 실제로는 중심 프린지 근처에서 평탄한 현상이 발생하기 때문에 디지털 신호처리시 세심한 주의가 필요하다.

3. 결 론

본 연구에서는 가간섭성이 낮은 광원인 SLD를 사용하여 광섬유 패브리페로 간섭계의 요철적인 문제인 주기성에 의한 해의 다중성 문제를 해결하려 하였다. PZT로 구동되는 마하젠더 프로세싱 간섭계와 측정용 및 참조용 광섬유 패브리페로 간섭계로 구성된 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 위상제어기를 설치해야 할 필요성이 발생하였다. 그러나 고도의 디지털 신호처리기법을 적용하면 시스템이 50 dB 보다 훨씬 낮은 SNR을 갖더라도 일반적인 광섬유 간섭계보다는 다소 낮은 해상도의 센서 시스템을 구현할 수 있으며, 위상제어기나 프로세싱 마하젠더를 좀 더 정교하게 구성하여 광학계를 안정시키면 고 해상도의 저가간섭형 간섭계의 실현도 가능할 것으로 전망된다.

(참 고 문 헌)

- [1] C. Lee et al., Interferometric optical fiber sensors using internal mirrors, *Elec. Lett.*, 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. Lett.*, 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] Eric Udd, *Fiber Optic Sensors*, New York, Wiley, 1991
- [8] H. LeFerve, White-light interferometry in optical fibre sensors, *Proc 7th Optical Fibre Sensors Conf.*, pp345-352, 1990