

초소형 광파이버 패브리페로 간섭계의 디지털 신호처리

김 광수, 이 홍식, 임 근희  
한국전기연구원

Digital Signal Processing for a Fiberoptic Fabry-Perot Interferometry

K.S. Kim, H.S. Lee, and G.H. Rim  
Korea Electrotechnology Research Institute

**Abstract** - 광파이버 패브리페로 간섭계에서 동작영역을 넓히기 위해 공진기의 길이를 1mm보다 짧은 초소형 간섭계를 구성하고자 하였을 경우, 광출력의 위상변화에 대한 감도가 낮아 전달함수로부터 변화된 위상을 복원하는 과정이 까다로워진다. 이러한 신호복원 과정에는 대부분 신호잡음비를 높여주는 신호처리 수단을 포함하게 되므로 간섭계가 겪은 위상변화를 보다 높은 신뢰성으로 검출하고자 할 때 어떠한 신호처리 방법이 적절한가하는 선택의 문제가 발생된다. 이는 각각의 신호처리방법이 장단점을 가지므로 응용목적에 따른 trade-off가 필요하기 때문이다. 본 연구에서는 참조 간섭계와 센서 간섭계 간의 correlation으로부터 위상을 검출하여 시스템의 잡음을 common mode 잡음으로 처리할 수 있었으며, 디지털 신호처리방법을 응용하여 짧은 공진기로 구성된 센서 간섭계의 위상변화분을 보다 안정적으로 검출하게 되었다.

1. 서 론

광파이버 간섭계에서 이용되는 대부분의 광원은 가간섭성(coherence)이 큰 단색광 레이저(주로 반도체 레이저)를 사용하므로 위상영역(phase domain)에서의 전달함수로부터 측정량을 환산할 때 전달함수의 주기성 때문에 해의 모호함이 발생한다. 이러한 모호함은 광원의 큰 가간섭성 때문에 동일한 프린지 패턴이 반복적으로 나타나는 문제이므로 프린지를 정확하게 지속적으로 추적하거나 현재 위상이 속해 있는 프린지를 구분해 내는 부가적인 장치가 필요하게 된다. 이러한 부가적인 장치는 시스템을 지나치게 복잡하게 만들어 가격 상승을 초래하거나 시스템의 전체적인 신뢰도를 떨어뜨릴 위험이 있기 때문에 수년 전부터 이러한 문제를 극복하기 위해 간섭계 구성에 있어서 근본적으로 새로운 방법이 시도되어져 왔다. 즉, 위상이 변함에 따라 동일한 형태의 프린지가 반복되는 것은 광원의 높은 가간섭성에서 비롯되는 것이므로 가간섭성이 낮은 광원으로 광파이버 간섭계를 구성하여 동형반복의 전달함수로부터 신호복원의 어려움을 해결해 보고자하는 연구가 진행되어 왔었다. 그러나 가간섭성이 낮은 광원을 사용한다는 것은 곧 전달함수에서의 낮은 해상도를 의미하므로 신호처리시 상당한 주의를 요하는 문제가 발생되게 되었다. 다른 해결책으로는 공진기 길이가 서로 다른 광파이버 패브리페로 간섭계를 주센서 및 보조센서로 사용하는 방법이나 샘플링을 다중화하여 위상을 정확하게 추적하는 방법 등이 제안되었지만 이는 모두 가간섭성이 높은 광원을 이용하여야 하는 반면, 가간섭성이 낮은 광원은 궁극적으로 저가의 LED를 사용할 수 있다는 가능성을 보여 줄 수 있으므로 상용화를 목표로 하는 업체에서 많은 관심을 보여주고 있다[1-3].

가간섭성이 낮은 광원을 이용한 광파이버 간섭계의 경우 낮은 감도 때문에 여러 가지 신호처리 방식이 제안되었으나, 본 연구에서는 참조 간섭계와 센서 간섭계의 신호의 correlation을 통하여 두 간섭계에서 공통

적으로 발생하는 잡음을 상쇄시킴으로서 시스템의 신호잡음비를 향상시키고자 하였다. 시스템의 구성은 프린지 프로세싱용으로 광파이버 마하젠더를 전반부에 설치하고 센서용과 참조용 광파이버 패브리페로 간섭계를 후반부에 설치하여 패브리페로 간섭계의 위상이동을 마하젠더에서 검출하도록 설계하였으며, 일체를 광파이버 형태로 제작하였다.

2. 본 론

2.1 간섭계의 구성

일반적인 고정도 광파이버 간섭계는 마하젠더, 마이켈슨, 새낙, 패브리페로형이 주류를 이루고 있으며 이에 대해서는 광파이버 센서관련 책자에서 잘 표현되어 있다. 다양한 종류의 광원을 사용할 수 있고 고가의 싱글모드 반도체 레이저를 사용하지 않고서도 간섭계를 구성할 수 있는 저가간섭성 광원 간섭계는 센서부의 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 광로의 길이가 30m 정도인 광파이버 마하젠더, 센서용과 참조용은 공진기 길이가 약 1mm 정도인 초소형 광파이버 패브리페로 간섭계를 사용하였다. 그림 1에서처럼 가간섭성이 낮은 광원으로부터 발진한 광대역 광은 50:50 커플러를 통하여 분기되어 마하젠더 간섭계의 각 광로로 들어가고, 서로 다른 경로를 겪은 광신호는 다시 50:50 커플러를 통하여 합쳐진 후 분기되어 각각 센서 패브리페로와 참조 패브리페로 간섭계로 들어간다. 이 때, 센서 광파이버 패브리페로는 광파이버 시간지연 회로를 거쳐 측정 대상에 위치하여 측정 물리량에 따른 위상 변화를 겪게 하고, 참조 광파이버 패브리페로는 정밀하게 항온제어가 되는 항온조에 넣은 후 외부환경과 격리시켜 광신호 위상의 기준이 되게 한다[4].

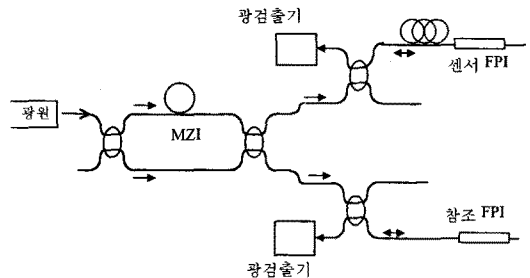


그림 1. 광학계의 구성도

## 2.2 센서의 동작원리

가간섭성이 낮은 광원을 이용한 광파이버 간섭계는 기존의 고감도 광파이버 간섭계의 주기성에 의한 위상 판별의 애로점을 극복하고 절대치를 측정할 수 있는 새로운 방식으로 알려져 그 동안 수많은 연구가 되어져 왔다. 이 방식은 광원의 짧은 가간섭 길이 때문에 보편적인 위상검출 방식이론 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 함수형태이며, 프린지 형상은 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,  $\lambda$ 는 광원의 중심파장,  $L_c$ 는 광원의 가간섭 길이,  $\Delta\phi$ 는 프로세싱 마하젠더 간섭계와 센싱용 패브리페로 간섭계 사이의 위상차이고,  $I(\Delta\phi)$ 는 스케일된 광검출기 출력이다. 이 방식에서는 중심 프린지(central fringe)가 당연히 최대 선명도를 갖게 되고, 이 중심 프린지의 위치를 어떠한 방법으로 정확하게 읽어내게 되면 센서 간섭계의 변조된 위상 값을 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 2는 위에서부터 그림 1의 구성도에 따른 마하젠더 간섭계의 변조를 위한 PZT구동 입력전압 파형, 참조 간섭계와 센서 간섭계의 출력파형을 보여주고 있다.

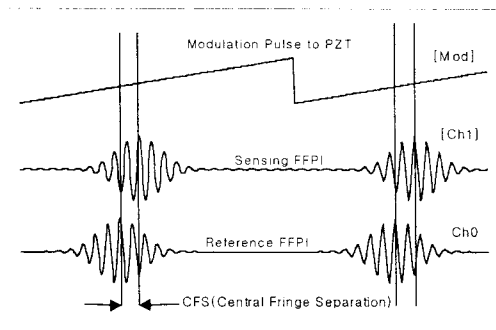


그림 2. 변조펄스와 광출력 파형

그림 2의 간섭계 출력파형은 시간에 따른 출력이지만, 이는 곧 두 간섭계간의 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[4].

## 2.3 신호처리

본 연구에서 사용된 저 가간섭형 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 통

한 파워분기비는 50-50이다. 둘째, 패브리페로간섭계의 전달함수는 정현파이다. 셋째, x-y 편광비는 광파이버 전체에서 동일하여 편광변화에 의한 광파위의 혼란은 없다. 이러한 가정 하에서 그림 1 시스템의 전달함수 즉, 식 (1)을 참조 및 센서 간섭계에 대해 다시 쓰면, 식 (2)와 같다[6].

$$y_0(n) = \frac{1}{2} \exp[-a^2 b^2 (n - n_0)] \cos[b(n - n_0)] \quad (2)$$

$$y_1(n) = \frac{1}{2} \exp[-a^2 b^2 (n - n_1)] \cos[b(n - n_1)] \quad (3)$$

여기서,  $a$ 와  $b$ 는 상수이고,  $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$ , 이며, 첨자 0 과 1은 각각 참조 간섭계 및 센서 간섭계를 나타낸다. 식 (2)와 (3)으로부터 두 개의 패브리페로 간섭계간의 광로차는 중심프린지 피크간의 샘플 거리  $n_1 - n_0$ 로 정의되고, 이를  $n_d$ 로 표현하면, 신호처리란  $n_d$ 를 어떻게 정확하게 구할 것인가 하는 것으로 함축된다. 샘플링 속도가 요구하는 해상도를 상회할 만큼 충분히 고속이면  $n_d$ 가 정수로 표현될 수 있지만 대개의 경우 그 만큼 충분한 속도의 샘플링은 시스템 가격을 지나치게 상승시키므로 선택할 수 있는 방법이 아니다. 가장 경제적인 방법은 적당한 샘플링 속도를 유지하면서 디지털 신호처리 기법을 사용하여  $n_d$ 를 실수 영역으로 확장하고  $n_d$ 를 보다 정확하게 추정하는 것이다.

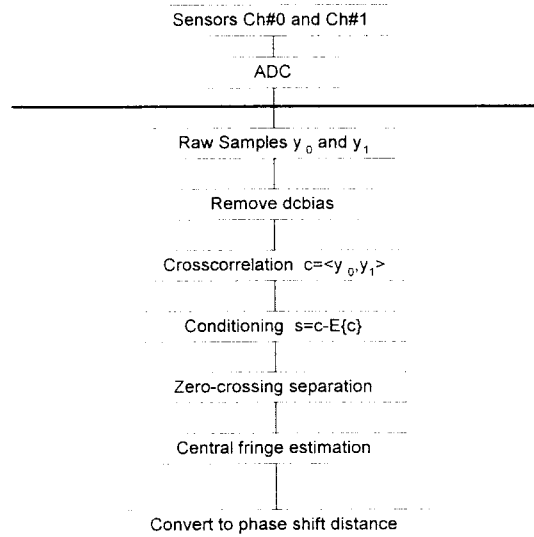


그림 3. 신호처리 흐름도

그림 3은 신호처리 과정을 개략적인 흐름도로 표현한 것이며, PZT구동 속도가 빠르면 전처리 과정으로 디지털 필터를 사용해야 하는 경우도 있다. 비록 식 (2)와 식 (3)이 수식적으로는 동일한 형태의 파형을 표현하더라도 실제로는 동일한 파형이 아니라 서로 유사한 즉, 상사성(similarity)을 갖는 파형이므로, 상사성의 정도에 따라 crosscorrelation의 효율에 차이가 생길 가능성이 있다. 그러나, 본 연구에서 사용된 참조 간섭계와 센서 간섭계의 출력파형은 대체적으로 상사성이 높은 편이기 때문에, 여기에서 제안된 상관관계를 이용하는 방법이, 다른 신호처리 방법 즉, centroid방식, 피크검출방식, 가상패턴이용방식 등에 비해 보다 안정적으로  $n_d$ 를 구할 수 있다[5].

Crosscorrelation을 이용하는 방식의 원리는 샘플을 하나씩 옮겨가면서 두 파형간의 상사성을 비교하는 것이므로 두 파형의 샘플 거리만큼 옮겨갔을 때가 상사성이

가장 높고, 신호처리는 곧, 상사성이 최고일 때 이동된 샘플 수를 구하는 것이 된다. 따라서,  $n_d$ 를 구하는 과정은 식 (4)의 이산화 crosscorrelation에서  $c(n)$ 이 최고 값을 가졌을 때의 샘플  $n$ 의 값이다.

$$c(n) = \sum_{k=0}^{N-1} y_0(k) y_1(n+k) \quad (4)$$

여기서,  $n$ 와  $k$ 는 모두 샘플번호이고,  $N$ 은 총 샘플 수이다.

#### 2.4 성능 시험

저가간섭형 간섭계에 적용되는 대부분의 신호처리방법은 이상적인 경우나 광출력 신호의 질이 우수할 경우 상당히 높은 해상도를 갖게 된다는 것은 식(2)와 식(3)으로부터 알 수 있다. 그러나 실제 상황에서는 신호처리방법을 무력화시킬 여러 가지 피할 수 없는 문제에 부딪치게 될 가능성이 있으므로 신호처리방법이 정리된 후 이를 시스템에 이식하기 전에 이 기법이 어느 정도의 해상도를 유지할 수 있을 지를 시험해 볼 필요가 있다. 가장 주된 이유 중 하나는 저가간섭형 간섭계의 프린지 형태가 항상 대칭적인 것도 아니며 항상 싱글 가우시안 형태인 것도 아니라는 사실이다. 이러한 현실은 광파이버를 사용하는 한 하드웨어적으로는 피하기 대단히 어려운 문제로서 신호처리방법으로 보완하여 해결하는 것이 가장 합리적이라고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 실제 시스템에서 발생할 가능성이 있는 여러 가지 프린지 형태를 설정한 시뮬레이터를 통하여 디지털 시스템의 성능을 확인해 보았다.

그림 1의 시스템에서 광원으로부터 출발한 광은 센서 간섭계와 참조 간섭계로 오는 동안 어느 정도의 편광을 겪게되어, 식 (1)은 식 (5)와 식 (6)과 같이  $x, y$  두 모드의 성분함수(orthogonal function)로 나누어진다.

$$y_{p,x}(\phi) = 1 + \frac{1}{2} \exp(-a^2 \phi^2) \cos(\phi) \quad (5)$$

$$y_{p,y}(\phi) = 1 + \frac{1}{2} \exp(-a^2 (\phi - \theta)^2) \cos(\phi - \theta) \quad (6)$$

여기서,  $a$ 는 상수,  $\phi$ 는 마하젠더와 패브리페로간의 광로 차이,  $\theta$ 는 광파이버 두 축간의 위상차이다.

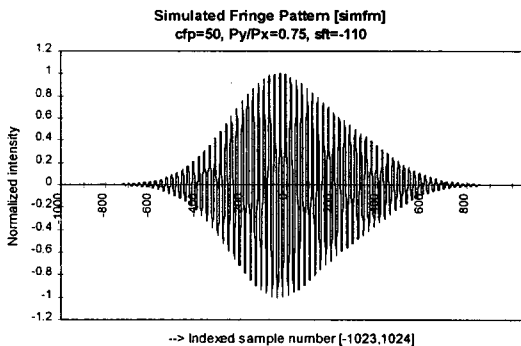


그림 4. 전형적인 프린지 형태

식 (1)의 광출력은 식 (7)과 같이 모드간 결합계수  $k$ 를 통하여 식 (5)와 식 (6)에서 주어진 두 성분의 합으로 표현된다.

$$y_p(\phi) = ky_{p,x}(\phi) + (1-k)y_{p,y}(\phi) \quad (7)$$

식 (7)에서  $k$ 와  $\theta$ 를 변화시키면 성능시험에 필요한 모든 형태의 프린지를 만들 수 있으며, 그림 4는 실제로 가장 흔하게 나타나는 프린지의 비대칭 형태로  $k=0.57, \theta=4.6 \times 2\pi$ 인 경우이다.

그림 5는 성능시험 결과를 나타내는 것으로 점선부분의 사각형은 제안된 신호처리방법 사용시 간섭계의 동작 영역을 나타내며, 절대오차가 0.01 샘플을 넘지 않는 경우만을 인정하면 동작영역의 최대가 42 프린지에 해당하는 약 1000 샘플임을 보여 주고 있다.

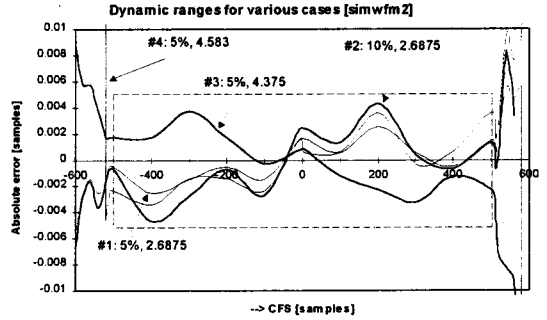


그림 5. 성능시험 결과

### 3. 결 론

본 연구에서 제안된 신호처리방법은 두 간섭계간의 상관관계를 이용하기 때문에 광파이버 시스템의 시스템 잡음을 최소화하여, 가간섭성이 낮은 광원을 사용하는 광파이버 간섭계의 낮은 신호잡음비와 1mm이하의 초소형 패브리페로 공진기의 낮은 해상도 문제를 해결할 수 있는 가능성을 보여 주었다. 제안된 신호처리 방법은 시스템에 이식되기 전, 프린지 패턴 시뮬레이터를 통해 해상도 0.01 샘플로 광원의 가간섭 길이의 두배 정도에 해당하는 약 42 프린지의 동작범위를 가질 수 있음을 보여주어 그 성능이 검증되었다. 제안된 신호처리방법은 많은 량의 디지털 데이터 처리를 요하므로 실제 시스템에서 응답시간 문제가 예상되나, 최근 DSP(Digital Signal Processor)의 팔목할 만한 발전으로 디지털 데이터의 계산시간은 전혀 문제시 될 수 없으므로, 본 연구에서 사용된 광파이버 간섭계와 제안된 신호처리방법을 적용할 경우 저가격의 실시간 광파이버 센서의 실현이 가능할 것으로 전망된다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] Yunjiang Rao and David Jackson, "Recent progress in fibre optic low-coherence interferometry", Meas. Sci. Technol., vol. 7, pp. 981-999, 1993
- [2] S. Chen, A. W. Palmer, K. T. V. Grattan, and B. T. Meggitt, "Digital signal processing techniques for electronically scanned optical-fiber white-light interferometry", Applied Optics, vol. 31, no. 28, pp. 6003-6010, 1992
- [3] 김광수의, "보조 반사체를 이용한 광섬유 패브리페로 간섭계형 온도센서의 성능향상", 전기학회 논문지 49C, pp418-423, 2000
- [4] 김광수의, "가간섭성이 낮은 광원을 이용한 광섬유 온도센서", 전기학회 논문지 49C, pp691-697, 2000
- [5] Charles H. Knapp and G. Clifford Carter, "The generalized correlation method for estimation of time delay", IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. 24, no. 4, pp. 320-327, 1976