

광섬유 EFPI 센서를 이용한 실시간 고정밀 변위 측정

박상욱* · 김대현* · 김천곤** · 홍창선**

Real-time Measurement of Precision Displacement using Fiber Optic EFPI Sensor

S. W. Park*, D. H. Kim*, C. G. Kim** and C. S. Hong**

Key Words : fiber optic sensor, EFPI, precision measurement, real-time monitoring, nano-positioning

ABSTRACT

Precision displacement of less than a few nm resolution was measured in real-time using fiber optic EFPI sensor. The novel method for real-time processing of analyzing EFPI output signal was developed and verified. Linearity in the mean values of interferometric light intensity among adjacent fringes was shown, and the sinusoidal approximation algorithm that estimates past and coming fringe values was verified through the linearity. Real-time signal processing program was developed, and the intensity signal of the EFPI sensor was transformed to the phase shift with this program. The resolution below $0.4 \sim 10 \text{ nm}$ in the displacement range of $0 \sim 300 \mu m$ was obtained by reducing the photodetector noise using low-pass filter and signal averaging. The nano-translation stage with a Piezo-electric actuator and the EFPI sensor system was designed and tested. This stage successfully reached to the desired destination in $15 \mu m$ range within 1 nm accuracy.

1. 서론

스마트 구조물(smart structure)의 새로운 감지계로서 각광받고 있는 광섬유 센서는 광소자의 성능 향상과 가격 하락으로 인해 변형량, 압력, 가속도, 진동 및 음향과 센서 등의 기존의 센서 시스템을 성공적으로 대체하고 있다. 특히 광섬유 센서는 크기가 작고 민감도가 우수하며 전자기장의 영향을 받지 않는다는 장점으로 인해 여러 분야로의 적용 가능성이 높다[1]. 빛의 간섭을 이용한 센서는 민감도가 매우 우수하여 미소 변위의 측정에 많이 이용되어 왔으며 현존하는 센서들 중 가장 높은 해상도를 가진다[2-3]. 특히 EFPI(extrinsic

Fabry-Perot interferometer) 센서의 경우 게이지 길이 내에서 광 매질이 공기이므로 다른 간섭 센서와 달리 게이지 구간 내에서 편광축의 변화가 없으며, 유리관 안에서 간섭이 일어나므로 비교적 외란의 영향이 적고 기계적 특성이 우수하다.

그러나 이제까지 변위 측정을 위해 사용한 EFPI 센서는 마이켈슨 간섭 센서와 마찬가지로 가해진 변위에 대해 비선형적인 정현파 형태의 신호를 변위로 변환하기 위해 복잡한 간섭 무늬 계수 기법(fringe counting technique)을 사용해야 하므로 간섭 무늬 사이에서 일어나는 $\lambda/4$ 보다 작은 변형의 경우 측정이 불가능하여 해상도에 한계를 가졌다. 이러한 단점을 극복하기 위해서 여러 가지 시도가 있었지만 제작이 매우 어렵거나 특수한 상황에만 적용할 수 있어 실제 사용이 어려운 단점이 있었다[4-5]. 본 연구에서는 EFPI 센서의 간

* 한국과학기술원 기계공학과 항공우주전공 박사과정

** 한국과학기술원 기계공학과 항공우주전공 교수

극 변화에 따른 광 검출기의 출력 전압을 광 간섭의 위상차로 1:1 대응시켜 직접 위상차를 계산해 내는 파장 이동 측정방법(phase-shifting technique)을 사용하였다.

오늘날 정밀 측정 분야의 첨단에서 사용되고 있는 빛의 간섭을 이용한 변위 측정 방법은 외란에 약한 특성을 보이므로, 측정 장비의 크기가 크고 측정에 많은 제한 조건이 있으며 사용되는 장비가 대부분 매우 고가인 단점이 있다. 하지만 앞서 설명한 광섬유 EFPI 센서가 해상도의 한계를 극복하고 정밀 측정 분야에 사용이 가능한 높은 정밀도를 가지게 되면, 초소형의 광섬유 센서를 이용하여 레이저 간섭계의 성능을 낼 수 있어 많은 분야에 유용하게 쓰일 수 있게 된다.

2. 광섬유 EFPI 센서 시스템

2.1 위상차와 변위와의 관계

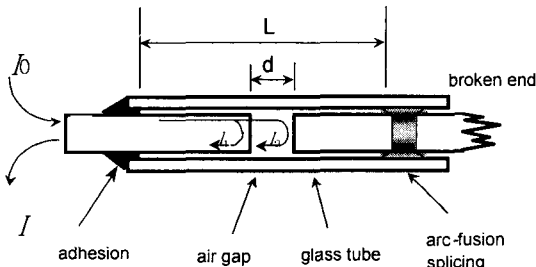


Fig. 1 Schematic diagram of EFPI sensor.

일반적인 간섭계에서 변형에 따른 간섭 신호의 세기는 다음과 같이 보강간섭과 상쇄간섭이 변위아 일어나는 정현파의 형태를 띠게 된다.

$$I = I_0 \{1 + \cos 2kd\} \quad (1)$$

그러나 Fig. 1 에 나타난 광섬유 EFPI 센서의 경우 간극의 크기 d 가 커짐에 따라 간섭시 손실되는 양 또한 달라지므로 식 (1)과 같은 정현파에서 비선형 항이 포함된 다음과 같이 변형된 식으로 표현되게 된다.

$$I_{nor} = A(1 + B \cos 2kd) \quad (2)$$

진폭을 고려하지 않을 경우, (1)과 (2) 식은 같은 주기를 갖는 식이 되며, 이 때 위상과 변위와의 관계는 다음과 같게 된다.

$$\phi = 2kd \quad (3)$$

$$\frac{\Delta\phi}{\Delta L} = \frac{4\pi}{\lambda} = \frac{4\pi n_c}{\lambda_0} \quad (4)$$

식 (4)에서 ΔL 은 기계적, 열적 변형에 의한 미소변형의 합으로 볼 수 있다. 변위의 시작 초기부터 생기는 위상의 변화를 누적시킨다면 누적된 변위의 크기 역시 식 (4)와 같은 방법으로 계산해낼 수 있다.

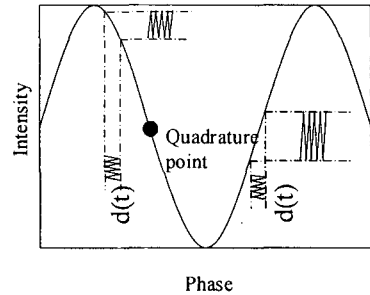


Fig. 2 Intensity variation from infinitesimal displacement as the path difference.

그러나 Fig. 2 에서 보이는 바와 같이 동일한 미소변형에 대해서도 출력값의 강도는 달라질 수 있다. 따라서, 위상을 누적하여 변위를 계산해내는 방법은 미소 변위의 최종 지점이 정현파의 프린지 부근인지 아니면 프린지 사이의 중간 부분인지에 따라 계산된 총 변위의 정밀도가 달라지게 된다.

2.2 EFPI 센서의 변위 계산 알고리즘

EFPI 센서의 경우 간극의 길이가 달라짐에 따라 광 강도의 최대값과 최소값이 바뀌게 되어 매 변위마다 서로 다른 상수를 대입하여야 정확한 위상 변화를 계산해낼 수 있게 된다. 이러한 광 강도의 평균값의 증가 혹은 감소는 전반적으로 비선형성을 띄지만 인접한 몇 개의 간섭 프린지 사이에서는 국소적으로 선형성(local linearity)을 가진다. 본 연구에서는 이를 이용하여 광섬유 EFPI 센서의 출력 광 강도를 정현파의 식으로 모사함으로써 위상의 변화를 측정할 수 있다는 가설을 세우고 실험을 통해 검증하였다.

광 검출기의 출력 전압은 다음과 같은 과정을 거쳐 변위로 계산된다. 우선 광 검출기에서 입력 받은 전압 중 처음 위치의 위상 계산을 위해 초기 전압값을 저장해 둔다. 그 다음으로 주어지는 EFPI 센서의 전압 변화를 최대값과 최소값을 비교하는 방법으로 peak 과 valley 를 찾고 그 값들을 기억한다. 연속적으로 입력받은 전압의 현 위치가

Fig. 3 에서 보이는 상승곡선 구간과 하강곡선 구간 중 어느 곳인지를 판별한다.

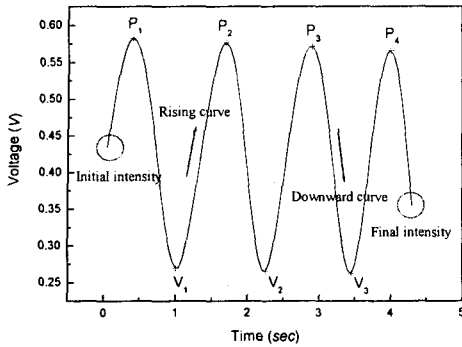


Fig. 3 Sections of EFPI output signal.

하강곡선 구간에서의 위상은 다음 식 (5)에서 구해지는 현 위치에서의 위상 ϕ 가 되고, 상승곡선 구간에서는 삼각함수의 대칭성 때문에 $\pi - \phi$ 가 된다.

$$\phi = \cos^{-1} \left\{ \left(V_{input} - \left(\frac{V_{peak} + V_{valley}}{2} \right) \right) / \left(\frac{V_{peak} - V_{valley}}{2} \right) \right\} \quad (5)$$

저장된 초기 출력 전압은 초기 위상값으로 환산하여 프린지 개수와 마지막 프린지로부터 최종 위치의 위상차와 함께 더해지게 된다. 프로그램은 변위의 프로파일과 최종 변위의 계산을 위해 순간 순간의 전압을 쫓아가며 직전 간섭 프린지로부터 현재 위치의 위상차로 환산하는 과정을 반복한다. 이렇게 peak 과 valley 의 전압이 정해지지 않은 구간 안에서의 위상, 다시 말해 Fig. 3 에서 원 안의 초기 전압과 최종 전압을 위상으로 계산하기 위해서 EFPI 센서의 간극의 길이 변화에 따른 평균 광 강도 변화의 선형성을 이용하였다.

이전 방법으로는 측정이 불가능했던 측정 초기 위상값의 경우, 정현파 모사에 필요한 초기값 직전의 간섭 프린지 값을 입력받지 못하고, 최종 위상값의 경우에도 현 위치의 직후에 나타날 간섭 프린지 값을 입력받지 못하게 된다. 계산에 꼭 필요한 이 두가지 프린지 값은 좁은 구간 내에서의 peak, valley 값들의 선형적인 변화를 통해 예측한다. 이를 위해서는 예측해야 하는 프린지와 같은 종류의 최소 2 개의 peak 또는 valley 값이 필요하다. 최종 이동 변위는 다음 식 (6)과 같으며 N 은 peak 과 valley 개수의 합을 의미한다.

$$\Delta\phi_{total} = \phi_{initial} + (N - 1)\pi + \phi_{final} \quad (6)$$

위 식을 식 (4)에 대입하여 간극의 변위 ΔL 을 구할 수 있다.

3. 실시간 신호 처리 시스템

3.1 실시간 신호 처리 프로그램

Fig. 4 는 실시간 신호처리 프로그램의 실행 순서와 내용을 나타내는 흐름도이다.

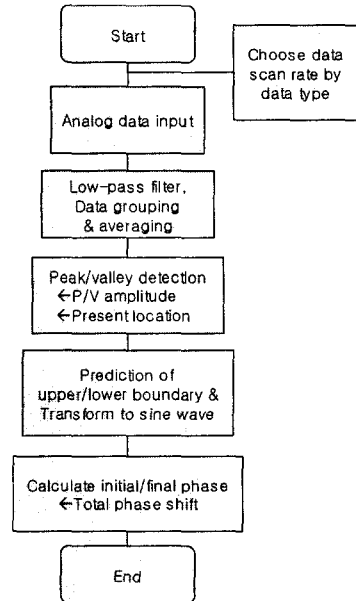


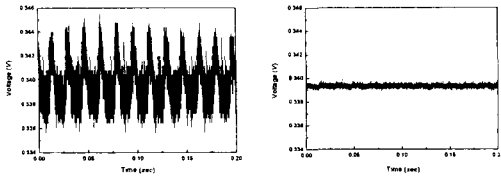
Fig. 4 Flowchart of the real-time signal processing program.

본 신호 처리 프로그램은 Intel Pentium-4 1.6 GHz 의 PC 에 장착된 데이터 취득 보드(data acquisition board, National Instruments PCI-6110E)를 통해 EFPI 센서 시스템의 광 검출기 출력 전압을 PC 로 읽어 들여 센서 간극의 변위로 환산한다. 프로그램이 작성된 LabView 의 특성상 EFPI 센서의 출력 전압을 입력받는 속도에는 한계가 있으며, 이는 NI 사의 아날로그 입력 장치가 가지는 하드웨어적 한계 뿐 아니라, 데이터 입력과 동시에 변위 계산을 위해 이루어지는 연산들의 속도에도 관계가 있다. 빠른 속도의 CPU 를 사용함으로써 고주파 신호의 해석에 필수적인 위상의 변위 환산 속도를 높일 수 있다.

3.2 센서 시스템의 해상도

측정 장비의 잡음 정도는 센서 시스템의 해상도를 결정하는 중요한 요소이다. 센서 간극의 변화는 간섭된 빛의 강도 변화를 가져오고, 이는 광검출기의 출력 전압 변화로 신호 처리부에 입력되

게 된다. 이 때 광 검출기에서 생기는 잡음의 형태를 Fig. 5 (a)에 나타내었다.



(a) raw (b) averaged
Fig. 5 Noise signal of photodetector at 0.580 V of EFPI amplitude.

해상도를 결정하는 잡음의 최대값과 최소값의 차는 약 0.01 V로서 변위로 환산하면 가장 영향을 많이 받는 프린지 부근에서 약 27 nm, 가장 영향이 적은 quadrature point에서 약 3.6 nm 크기가 된다. 그러나 실시간 신호처리 프로그램의 평균화 과정을 거치게 되면 잡음의 크기는 Fig. 5 (b)와 같이 약 1/10로 감소하게 되어 결국 프린지 부근에서 약 8.6 nm, quadrature point에서 약 0.36 nm의 크기가 된다. 즉 변형이 일어나는 때의 간극의 거리가 quadrature 부근인지 아닌지에 따라 해상도는 크게 달라지게 된다.

4. 나노 이송 장치

위의 실시간 신호 처리 프로그램을 이용하여 광섬유 EFPI 센서와 압전 구동장치로 구성된 고정밀 선형 이송장치(linear translation stage)를 고안하였다. 원하는 위치를 nm 단위로 입력하고 프로그램을 실행시키면 목표지점 이하의 범위에서는 구동 장치에 가해지는 전압이 약 0.1 nm 크기에 해당하는 미세한 전압만큼씩 더해지게 된다. 센서에서 측정되는 변위가 목표지점을 지나쳤을 경우 반대로 구동 장치에 가해지는 전압이 약 0.1 nm 크기에 해당하는 전압만큼 줄어들게 되고, 이 과정이 반복되면서 구동장치는 초기의 목표지점으로 수렴하게 된다. Fig. 6은 목표지점을 1600 ~ 2000 nm로 200 nm씩 바꿔가며 앞에서 제작한 실시간 신호 처리 프로그램을 이용하여 광섬유 EFPI 센서의 변위를 측정 한 결과이다.

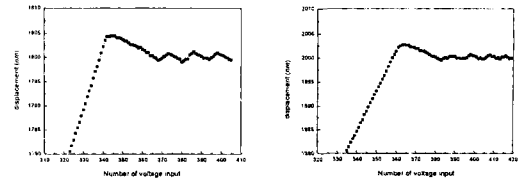
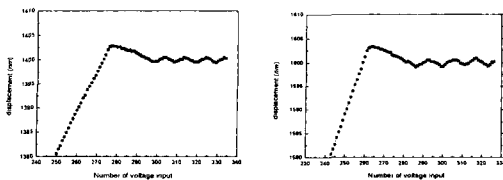


Fig. 6 Displacement results of EFPI nano-translation stage.

구동장치가 전진과 후진을 반복하는 범위는 참값의 약 ± 1 nm로 원하는 위치로 매우 정밀하게 움직임을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 광섬유 EFPI 센서를 이용하여 0.4 ~ 10 nm 정도의 정밀도를 갖는 실시간 고정밀 변위 센서 시스템을 구성하였다. 새로운 EFPI 센서 시스템은 공기 난류(air turbulence)의 영향을 거의 받지 않으며 구성 장비의 규모가 작은 기존 EFPI 센서의 장점과 간섭계 방식의 높은 민감도와 해상도를 갖는 간섭식 변위 센서의 장점을 모두 갖추고 있다. 또한 실시간으로 고정밀 변위의 측정이 필요한 이송 장치에 본 시스템을 적용하여 1 nm 이내의 정확도로 이송이 가능하였다. 이는 주로 항공기나 건축물 같은 대형 구조물에만 적용되었던 스마트 구조의 개념을 정밀 구동 분야에 적용할 수 있는 발판을 마련했다 할 수 있다.

참고문헌

- [1] R. M. Measures and K. Liu, "Fiber optic sensors focus on smart systems," *IEEE Circuits Devices Mag.*, vol. 8, no. 4, pp.37-46, July 1992.
- [2] S. Hosoe, "Highly precise and stable laser displacement measurement interferometer with differential optical passes in practical use," *Nanotechnology*, Vol. 4, No.2, 1993, pp. 81-85.
- [3] S. Hosoe, "Highly precise and stable displacement-measuring laser interferometer with differential optical paths," *Precision Engineering*, Vol. 17, No. 4, 1995, pp. 258-265.
- [4] 강현규, 박중완, 류치영, 홍창선, 김천곤, "광섬유 센서 신호의 실시간 디지털 처리에 의한 구조물의 동적 변형을 측정," *한국항공우주학회지*, 제 26 권, 제 2 호, 1998, pp.47-59.
- [5] K.A. Murphy, M.F. Gunther, A.M. Vengsarkar, and R.O. Claus, "Quadrature phase-shifted, extrinsic Fabry-Perot optical fiber sensors," *Optics Letters*, Vol. 16, No. 4, 1991, pp. 273-275.