

영점검출을 이용한 광섬유형 레이저 간섭계의 위상추출

(Phase-extraction using Zero-Crossing detection in fiber-optic laser interferometry)

박형준* · 이준호* · 송민호

(Hyoung-jun Park · Junho Lee · Minho Song)

전북대학교 전자정보공학부, 호서대학교 전기공학과*

Abstract

The fiber-optic interferometer which is a powerful application for nondestructive measurement techniques has many advantages such as capability of making portable system, easy optical arrangement, low optical loss. In spite of these advantages, this system has an environmental sensitivity of thermal drifts and vibrations. Against environmental perturbations and nonlinear characteristic of phase modulator, the accurate and fast $\pi/2$ phase stepping has been achieved by using zero-crossing detection. CCD camera trigger signal is generated at the 4 zero-crossing points. Our System has achieved up to 100 Hz of image capture speed and 0.6 mrad of accuracy of phase stepping, accuracy.

1. 서 론

건축 구조물이나 산업현장의 기계 구조체들은 환경적인 진동, 온도, 설계상의 구조적인 문제로 인한 변위들로 인해 치명적인 결과를 초래하기도 한다. 균열이나, 크랙 같은 변형요인을 분석하여 적절한 설계를 하거나, 보호용 검사 장비를 사용하여 사고를 미연에 방지하여야 한다. 대부분의 비파괴 검사는 접촉식 방법을 사용한다. 접촉식 방법의 경우, 검사 대상의 형상과 크기에 따라 제한을 받고, 화학약품처리로 인해 검사 대상에 손상을 가할 수 있기 때문에, 검사의 신뢰성이 문제가 되기도 한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서, 최근에는 레이저 간섭법을 이용한 비파괴 검사법이 개발되어 이용되고 있다.

레이저 간섭법이 가지는 장점은 넓은 영역의 미소변위나 진동 모드의 실시간 계측을 위한 공간적 분해능이 높고, 비 접촉식이므로 시험대상체의 형태에 제한을 받지 않는다.[1] 레이저 간섭법은 측정 대상과 계측환경에 따라서 크게 ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry)와 shearography 등으로 나눌 수 있다. 또한 사용하는 광소자의 형태에 따라 광섬유(fiber-optic)형과 벌크(bluk)형으로 나뉘어 진다. 벌크형 소자를 이용하여 시스템을 구성할 경우 부피가 커지고 기계적인 정밀도가 떨어지며, 광학적 손실이 커서 신호취득이

어려운 큰 단점이 있는 반면에, 광섬유형 시스템은 정렬하기 쉽고, 크기가 작고 가벼워서 휴대가 가능하게 시스템을 제작하기 용이하고, 광손실이 적어 신호취득이 쉬운 장점을 가진다. 기존의 개회로시스템을 적용한 광섬유 간섭계에서 위상이동을 위해, 위상변조기가 필수적인데, 위상변조기의 비선형 동작 구조로 인해, 측정할 때 마다, 광학 시스템의 정렬이 흐트러지고, 위상측정 에러를 발생한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해, 최근에는 self-calibration 알고리즘을 적용한 폐회로 시스템을 이용하여, 위상 변조기의 비선형 동작특성에 의한 시스템 에러를 줄이는 방법이 제안되었다.[2][3] 또한, 환경적인 변화 즉, 온도나 진동과 같은 외란을 극복하기 위해서 서보, PI제어기를 이용한 피드백 제어기법이 제안되기도 하였다.[4][5] 하지만, 레이저 간섭시스템은 비선형 시스템이므로 선형 제어기로 환경적인 외란을 효과적으로 제어하기는 적합하지 않고, 선형제어기가 감당할 수 없는 순간적인 진동이나 온도변화에는 제대로 대응하지 못하는 관계로 실험실 환경이 아닌, 실제 현장에서 적용하기에는 무리가 있다. 본 논문에서는 영점 검출을 이용하여 위상이동시 위상변조기의 비선형 특성에 무관하고, 환경적 영향에 따른 간섭출력의 변화에도 신속하고 정확한 위상변위를 가하였고, 측정 대상체의 위상추출에 필요한 CCD 카메라와 동기신호인 100 Hz속도의 위상계단을 생성하는 시스템 개발하였고, 그

에 대한 기초 연구결과를 보고한다.

2. 본 론

2-1. 레이저 간섭계

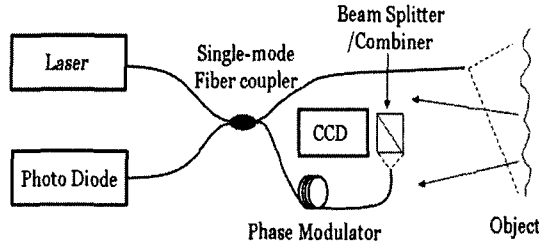


그림 1. 광섬유형 레이저 간섭계 시스템

그림 1은 광섬유형 레이저 간섭계 시스템의 구성도이다. 레이저의 광원은 50:50의 분리비율을 갖는 광섬유 커플러에 의해서 기준광과 대상체에 조사되는 광으로 나뉜다. 광섬유 양 끝단에서 반사된 빛은 광분할기에 의해, 다시 결합한다. 결합된 광신호는 PD에서 간섭신호를 생성하며, 광신호간의 위상차가 2π 의 정수배가 될 경우 보강간섭이 발생하여 PD출력은 최대가 되고, 위상차가 반파장의 홀수배가 되면, 상쇄 간섭이 발생하여 PD출력은 최소화 된다. 따라서 위상변조기인 PZT를 조절하여 위상을 조절할 수가 있다. CCD 촬상소자에서 간섭패턴을 위상변조기를 사용하여 패턴간의 위상차를 $\pi/2$ 가 되도록 조절할 경우 위상추출 알고리즘을 이용하여 측정대상체의 표면정보를 담고 있는 간섭신호의 위상정보를 추출할 수 있다.[6] 간섭신호의 위상변조는 광섬유 마이켈슨 간섭계의 한쪽 팔에 원통형의 PZT(Piezoelectric Transducer)를 감고 위상 이동 신호를 PZT에 가하여 CCD 카메라를 통한 영상신호 처리를 통해 위상추출을 한다.

2-2. 위상 변형의 추출원리

CCD 카메라를 이용하여 얻은 간섭패턴에서 각 픽셀의 출력은 간섭이론으로부터 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

$$I_i = I_0 [1 + V_i \cos(\delta\phi + \phi_i)] \quad (1)$$

(I_i : DC, V_i : 간섭패턴의 가시도, $\delta\phi$: 대상체의 위상정보, ϕ_i : 간섭위상 이동)

$\delta\phi$ 는 간섭위상의 차이로 측정 대상체의 표면정보를 가지는 위상성분이며 ϕ_i 는 위상변조기로 이동시킨 간섭신호의 위상성분을 나타낸다. 식(1)과 같이 CCD 출력은 코사인 함수 형태이므로 표면정보에 해당하는 간섭신호의 위상을 얻기 위해서는 간섭무늬를 형성하는 두 간섭광 사이에 위상변화를 주어 변화된 간섭무늬를 원래의 간섭무늬와 비교하여 위상차를 구할 수 있는 위상추출과정이 필요하다.

취득하는 영상 수에 따라 위상정보를 추출하기 위한 많은 알고리즘이 있으며, 본 논문에서는 기준 위상을 조절하여 얻은 4개의 간섭패턴을 연산하여 위상을 얻는 기술을 사용하였다. 위상 변조 장치인 PZT를 사용하여 ϕ_i 를 $\pi/2$ 의 배수에 해당하는 위상변조를 가하면서 4개의 간섭패턴을 얻으면 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{cases} I_1 = I_0 [1 + V \cos(\delta\phi)] \\ I_2 = I_0 [1 - V \sin(\delta\phi)] \\ I_3 = I_0 [1 - V \cos(\delta\phi)] \\ I_4 = I_0 [1 + V \sin(\delta\phi)] \end{cases} \quad (2)$$

얻어진 4개의 간섭출력을 아래의 연산과정에 대입하여 측정 대상체의 위상 변형값과 간섭패턴의 가시도를 추출하게 된다.

$$\delta\phi = \tan^{-1} \left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right) \quad (3)$$

$$V = \frac{\sqrt{(I_4 - I_2)^2 + (I_1 - I_3)^2}}{2I_0} \quad (4)$$

2-3. 영점 검출

그림 1에서 레이저 간섭계의 양 끝단에서 반사된 광신호는 마이켈슨 간섭계의 팔길이 차의 2배에 해당하는 광경로차에 해당하는 동일한 경로를 왕복한 후 PD에서 간섭을 일으키기 때문에, PD출력신호의 위상은 CCD 카메라에서 간섭하는 광신호의 위상의 2배가 된다. 따라서, PD에서 얻은 간섭 출력으로 CCD카메라의 간섭무늬의 위상변화를 감시 할 수 있고, π 배 위상이동점에 동기된 신호를 생성하여, $\pi/2$ 의 정수배에 해당하는 위상차를 가지는 CCD 카메라 영상 취득 신호로 사용할

수 있다.

CCD 카메라에서 $\pi/2$ 배에 해당하는 위상이동에 따른 식 (2)의 PD출력신호를 AC 커플링하면, 식(5)로 표현할 수 있다.

$$(5) \quad \begin{cases} I_{p1} = +V_p \cos(2\delta\phi) \\ I_{p2} = -V_p \cos(2\delta\phi) \\ I_{p3} = +V_p \cos(2\delta\phi) \\ I_{p4} = -V_p \sin(2\delta\phi) \end{cases}$$

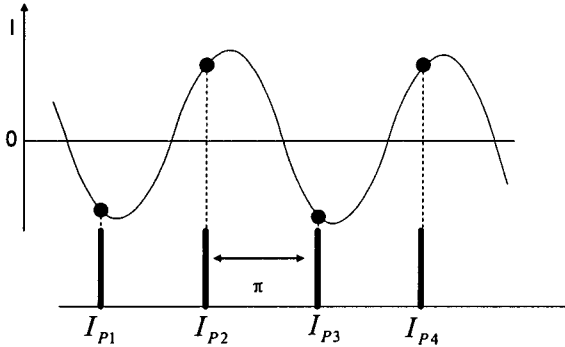


그림 2. π 배 위상이동

그림 2와 같이 I_{p1} 와 I_{p2} 를 기준으로 하여 π 위상만큼 이동한 I_{p2} 의 관계식은 식(6)으로 나타낼 수 있다.

$$(6) \quad I_{p(2n-1)} + I_{p(2n)} = 0$$

따라서 식(6)을 만족하는 두 점의 위상신호는, PD간 접출력간의 위상차가 π 배수에 해당하고, 이때, CCD에서 간섭무늬의 위상차는 $\pi/2$ 의 배수에 해당하게 된다. 그림 2는 AC 커플링한 PD 출력신호이다. PD에서 I_{p1} 부터 식 (5)를 만족하는 연속하는 4개의 간섭신호를 모니터 하여, 그때에 CCD 카메라의 4개의 간섭패턴으로부터 대상체의 위상정보를 추출할 수 있다. 하지만, 연산값에 따른 위상 이동점을 찾는 방법은 환경적인 온도나 진동에 따른 불규칙적인 간섭위상 변화와 레이저 다이오드의 미세한 출력변화에 따른 간섭위상의 오차가 발생하기 때문에 연산에 의한 정확한 위상이동점 찾을 수 없는 문제점이 발생한다.

그림 3은 영점검출의 개념도이다. 신호 a는 PD출력신호를 저대역 필터를 거친 후 AC커플링을 하였다. b는 위상변조기의 PZT의 구동전압신호이다. 4π 의 주기를 가지는 톱니파로 위상변조기를 동작하는 동안, 영점검출을 통해 4개의 정점의 위치를 찾을 수 있다.

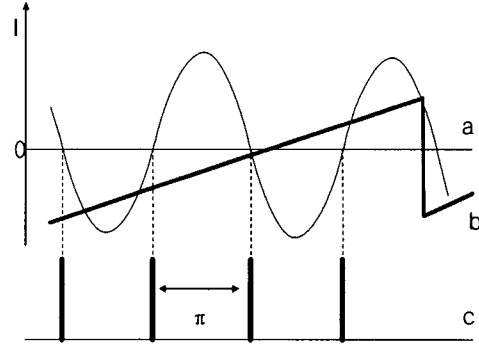


그림 3. 영점검출 개념도

연속하는 4개의 영점의 위치는 식(6)을 항상 만족하므로, π 배에 해당하는 위상이동점을 알 수 있다. 영점검출로 취득한 영점위치에서 신호를 생성하여 CCD카메라와 동기 시키면, 연속적인 $\pi/2$ 배에 해당하는 위상이동에 따른 화상이미지를 얻을 수 있다.

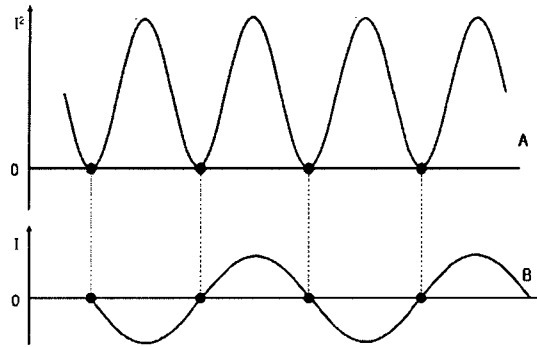


그림 4. 영점검출 알고리즘 개념도

그림 4는 영점검출 알고리즘을 그림으로 표현한 것이다. B는 PD에서 얻어진 간섭신호가 사인파의 형태이므로, 간섭신호를 제공한 신호A의 영점은 PD간섭신호가 영점이 교차되는 지점과 일치한다. 따라서 A신호의 영점을 검출하면 간섭신호의 영점교차 점을 검출할 수 있다.

2-4. 위상 이동 실험

그림 5는 실험에 사용된 레이저 간섭계의 실험 구조도이다. 광원은 중심파장이 1310 nm 캔 타입의 Fabry-Perot 레이저 다이오드를 사용하였다. 그림5와 같이 2×2 광섬유 커플러를 이용하여 Michelson 간섭계를 구성하고, 한쪽 팔에 PZT위상 변조기를 감아 두었다.

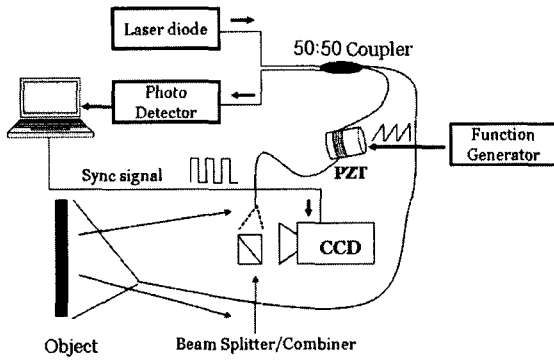


그림 5. 광섬유 레이저 간섭계 실험 구조도

위상 변조기로 사용된 PZT의 직경과 지름은 각각 38 mm 이고, 1 V에 해당하는 위상 이동은 0.628 rad/V 이다. PZT는 4 μ s의 주기를 가지는 위상변조를 일수 킬 수 있도록 신호의 크기를 조절한 25 Hz(20 V_{p-p})의 톱니파를 신호발생기로 생성하여 구동하였다. 그림 4에서 입사된 광원은 50:50 2x2 광섬유 커플러로 나뉘고, 각각의 광섬유 끝단에서 반사된 광신호는 다시, 광섬유 커플러에서 결합하여 PD(PIN 타입 InGaAs)에서 PZT의 위상변조에 따라 간섭을 일으키게 된다. PD에서 검출되는 간섭신호는 저대역 필터를 거치고, DAQ(Data-Aquisition)보드를 이용하여 디지털화한 후 컴퓨터로 읽어 들이며, AC커플링을 통하여 DC 성분을 제거한다. 프로그램을 통해서, 취득한 신호와 톱니파와 동기화된 TTL 신호 주기동안 영점 검출을 이용하여 4개의 영점 위치를 얻는다. 컴퓨터로 DAQ보드를 통해, 4개의 영점 위치에 해당하는 시간에 연속하는 위상계단 신호를 생성하여, CCD 카메라의 영상취득 신호로 사용한다.

그림 6은 25 Hz의 톱니파(20 V_{p-p})로 PZT를 위상변조 후 PD신호의 파형이다. PZT의 주기적인 위상변조 신호 때문에 불연속적인 온도나 진동에 의한 변화에도 항상, 4 μ s의 주기를 가지며 좌우로 흔들린다. 이때, 영점 검출을 사용하면, 환경변화에 따른 외란에도, π 위상 이동점을 찾을 수 있다.

영점 검출을 통하여 π 배의 해당하는 위상이동점을 알 수 있으나, PZT 구동신호의 시작점을 알 수 없기 때문에 순차적인 위상이동을 할 수 없게 된다. 따라서, 함수 발생기에서 PZT 구동 신호인 톱니파에 동기된 TTL 신호를 시스템의 시작 신호로 사용하여, 순차적으로 위상이동점을 찾을 수 있게 된다. 위상변조기를 구동하는 시간부터 영점 검출을 통하여 순차적으로 π 배수에 해당하는 4개의 영점을 연속적으로 취득할 수 있다.

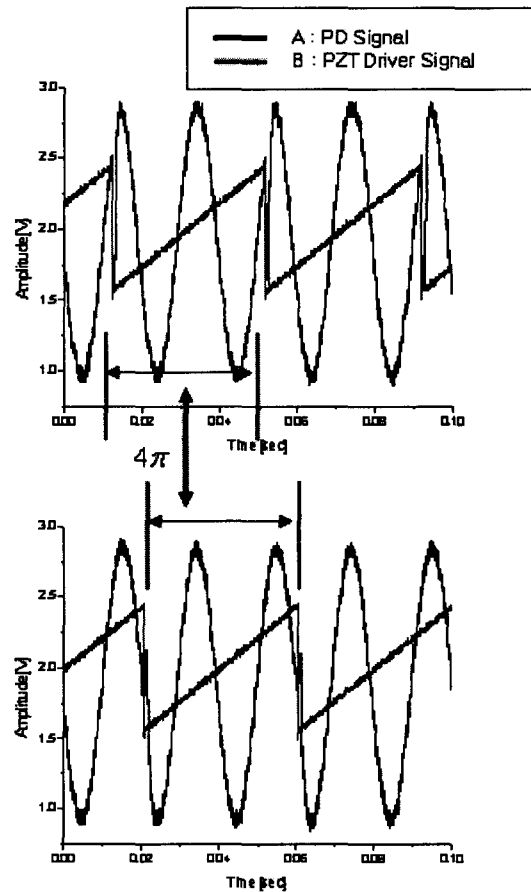


그림 6. PD신호와 PZT 구동신호

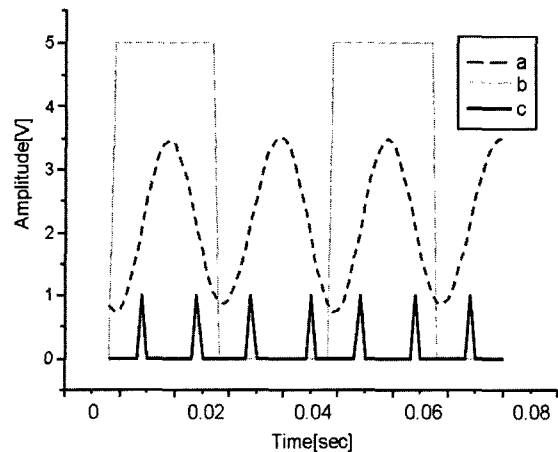


그림 7. 영점검출 실험 결과

그림 7은 영점 검출 실험 결과 파형이다. a신호는 저대역(120 Hz)필터를 거친 PD간섭신호의 파형이고, b신호는 PZT를 구동하는 톱니파의 동기 TTL신호로 레이

저간섭계 시스템의 동작 신호이다. c는 PD간섭신호를 AC 커플링한 후 영점 검출의 결과 파형이다. 위상변조기가 25 Hz의 속도로 동작하므로, 영점 검출은 100 Hz의 속도로 이루어지며 위상 π 의 배수에 해당하는 영점을 찾게 된다.

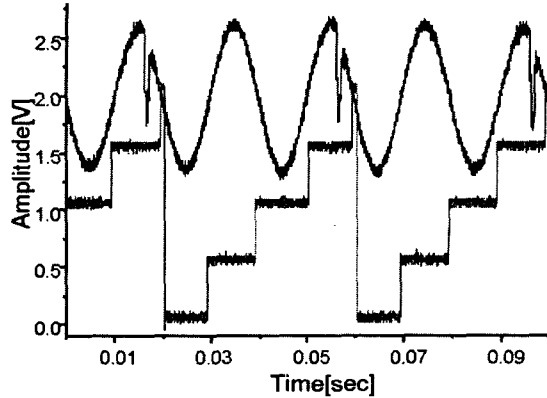


그림 8. 간섭신호와 위상계단 신호

그림 8은 시스템 동작 신호인 함수발생기의 TTL 신호와 영점 검출을 통한 영점위치에 따라 CCD 카메라 동기 신호를 생성하여, 오실로스코프를 통해 얻은 그림이다. π 정수배 만큼 연속적으로 이동한 위상 계단신호를 생성하였다. 동기 신호의 속도 100 Hz 따라 CCD 카메라 화상이미지를 취득할 수 있으며, 취득된 4장의 이미지를 연산 하면, 측정 대상체의 표면정보를 얻을 수 있다. Bandwidth 1000 Hz 동안, 영점과 카메라 동기 신호의 오차는 약 6 mr 이다. 그림 8과 같이 연속하는 동기 신호로부터 대상체의 표면정보를 25 Hz의 속도로 실시간으로 연속적으로 측정할 수 있을 것으로 예상된다.

3. 결론

광섬유형 ESPI는 벌크형에 비해서 구성하기 간단하고 취급하기 편하고, 광손실이 적은 장점이 있지만, 환경적인 외란(진동, 온도)에 민감하고 위상이동을 위해서 사용되는 위상 변조기의 비선형성 오차를 가진다. 이러한 단점을 극복하기 위해서 영점검출을 이용하면 환경 변화에도 효과적으로 빠르고 정확한 위상출력을 얻을 수 있으며, 광섬유형 레이저 간섭계의 성능개선에 효과적으로 적용될 수 있을 것이다. 실험을 통하여 CCD 카메라의 동기 신호를 100 Hz 속도로 생성하였으며, 25 Hz 속도로 대상체의 표면위상정보를 취득할 수 있을 것으로 예상된다. Bandwidth 1000 Hz 동안, 영점과 CCD

동기 신호의 오차는 6 mr이고, 위상계단의 π 위상차이 정확도는 0.6 mr 으로 분석 되었다.

본 실험에서 구성된 영점검출 방법은 미소변위 측정, 구조물의 내부결합, 크랙검출 및 미소 대상체의 형상 측정 등 레이저 간섭계를 이용하는 다양한 응용의 성능개선에 효과적으로 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] T. P. Newson, J. L. Santos and D. A. Jackso, "Electronic speckle pattern interferometry compensated for environmentally induced phase noise", SPIE vol. 1267, pp. 173-179, 1990.
- [2] Joeathan, Charles, Khorana, Brij M., "Phase-measuring fiber optic ESPI system: phase-step calibration and error sources." Proc. SPIE Vol. 1554B pp. 56-63, 1991
- [3] J. D. Valera, D. Harvey, and J. D. C. Jones, "Fiber optic electronic speckle pattern interferometry: Path length stabilised automatic phase stepping," Holographic Systems, Components and Applications, Third International Conference on vol. 342, pp. 180-184, 1991.
- [4] C. R. Mercer and G. Beheim, "Fiber optic phase stepping system for interferometry," Appl. Opt., vol. 30, pp. 729-734, 1991.
- [5] D. Parisi, M. Facchini, and G. Martini, "Automatic Phase Stepping in Fiber-Optic ESPI by Closed-Loop Gain Switching," Transaction on instrumentation and measurement, vol. 49, pp. 823-828, 2000
- [6] Y. Ishii and R. Onodera, "Phase-extraction algorithm in laser-diode phase-shifting interferometry," Opt. Lett., vol. 20, pp. 1883-1885, 1995.