韓國精密工學會 2005 年度 秋季學術大會論文集

레이저 다이오드를 이용한 정현적 위상변조 간섭계에 대한 연구

표기영*, 박낙규, 이근영(전북대 대학원 기계설계학과),
강영준(전북대 기계설계학과), 김경석(조선대 기계설계공학과)

A study on Sinusoidal Phase Modulating interferometer using laser diode

K. Y. Pyo*, N. G. Park, G. Y. Lee(Mech. Design Eng. Dept., Chonbuk Univ. Graduate),
Y. J. Kang(Mech. Eng. Dept., Chonbuk Univ.), K. S. Kim(Mech. Design Eng. Dept., Chosun Univ.)

ABSTRACT

Recently, laser interferometer is widely used as a measuring system in many fields because of its high resolution and its ability to measure a board area in real-time all at once. In conventional laser interferometer, for examples Out of plane ESPI, In plane ESPI, Shearography and Holography, it uses PZT or other components as a phase shift instrumentation to extract 3-D deformation data, vibration mode and others. However, in most cases PZT has some disadvantages, which include non-linear errors and limited time of use. In present study, a new type of laser interferometer using a laser diode(LD) is proposed. Using Laser Diode Sinusoidal Phase Modulating(LD-SPM) interferometer, the phase modulation can be directly modulated by controlling the LD injection current thereby eliminating the need for PZT components.

Key Words : Laser diode(레이저 다이오드), Sinusoidal phase modulation(정현적 위상변조), Wavelength modulation(파장변조), Phase shift method(위상이동법), Vibration Mode shape(진동모드)

1. 서 론

광학식 계측 방법은 실시간에 가까운 빠른 측정 속도, 높은 정밀도, 비파괴/비접촉식 측정 방식 등의 차별성을 앞세워 산업 현장 전반에서 기존의 측정 방법을 대신해 나가고 있다.[1] 최근 들어 반도체, MEMS, LCD, Build-Up PCB 등 정밀 제조 산업분야가 각광을 받으면서, 광학식 계측 방법은 높은 정밀도로 기계의 미세한 움직임이나 미세 표면 형상 측정 등을 위한 많은 적용 사례를 보이고 있다. 이러한 광학식 계측 방법으로는 광삼각법(optical triangulation), Moire 방법, 위상측정방법(PMP; Phase Measuring Profilometer), 전자 스페클 간섭계(ESPI; Electronic Speckle Pattern Interferometer), 공초점 방법 등이 있다.

본 논문은 기존 전자 스페클 간섭계(ESPI)의 단점을 보완한 레이저 다이오드를 이용한 정현적 위상변조 간섭계(LD-SPM Interferometer; Laser Diode Sinusoidal Phase Modulating Interferometer)에 대하여 소개하고자 한다. 기존의 전자 스페클 간섭계에서 물체의 진동모드나 3 차원 형상 등을 얻고자 하면, 이들의 정보를 가진 위상도(phase map)를 구하기 위해야 하며, 이를 위해 대부분 PZT(Piezo-electronic Transducer)를 이용하여 위상이동을 하는데, PZT 는 자체 비선형 오차(hysteresis error)를 가지기 때문에 전압을 가하여 위상이동을 실시할 때 이상적인 PZT 의 이동량과 실제 이동량과의 차이가 발생하여 이 비선형성이 시스템 정밀도의 한계를 결정하게 된다. 기학학적으로 이동량의 이상적인 제어가 되도록 구성된 알고리즘에 이러한 오차 요소가 개입되면서 이를 감쇠하기 위하여 다양한 필터링을 적용해야하는 어려움이 있었다. 이를 보완하기 위해서 LD-SPM 간섭계에서는 레이저 다이오드의 특성을 이용하여 위상을 직접 변조시키는 방법을 채택하였다.[2-6] 이 밖에도 레이저 다이오드는 다른 레이저에 비해 소형이며 가격이 저렴하다는 장점을 가지고 있으며, 그 동안 문제점으로 지적되던 온도안정화 및 출력면에서도 최근 많은 향상을 보여 안정

적인 광원으로 레이저 간섭계에 적용할 수 있다.[3,4] 또한 다이오드 레이저의 특성을 이용하여 간섭계를 구성하면 PZT 와 그 주변기기가 없이도 정현적 위상변조가 가능하므로 시스템을 좀 더 간단히, 소형으로 구성할 수 있다는 장점을 가지고 있어 산업현장에서의 적용성을 높일 수 있다.

2. 이 론

2.1 다이오드 레이저의 파장변조

LD-SPM 간섭계 실험 시스템은 Fig. 1 과 같이 마이켈슨 간섭계(Michelson interferometer)를 원리로 하여, 광원으로 레이저 다이오드(LD)를 사용하였다. 마이켈슨 간섭계는 하나의 광선을 두 개로 나누고, 이들이 다시 결합하여 생기는 간섭 현상을 이용하는 간섭계이다. 가간섭 광원은 Beam-Splitter 에 의해 두 개의 광경로로 나뉘며 각각의 거울에 의해 반사되고 다시 Beam-Splitter 를 통해 CCD, Photo-diode 등의 검출기(Detector)에서 합쳐진 후 간섭 무늬를 생성한다. 이렇게 생성된 간섭 무늬의 신호는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I(t) = I_1(t) + I_0(t)\cos(\Delta\phi + \alpha) \qquad (1)$$

식(1)의 $I_1(t)$ 은 배경강도(background intensity)에 의한 간섭신호, $I_0(t)$ 는 변조강도(modulation intensity)에 의한 간섭신호이다. $\Delta\phi$ 는 위상차, α 는 초기위상값이다.

LD-SPM 간섭계는 광원인 레이저 다이오드의 입력 전류를 조절함에 따라 위상을 직접 변조할 수 있다.[5] 입력 전류는 직류 바이어스 전류 i_0 와 레이저 다이오드 변조기(LM)에 의한 변조 전류 i_m 으로 이루어진다. 이 변조 전류가 $\beta \cdot i_m(t)$ 의 크기로 레이저 다이오드의 파장을 변화시키며, 중심파장 λ_0 는 직류 바이어스 전류 i_0 에 의하여 정해진다. 레이저 다이오드를 이용한 정현적 위상변조 간섭계 또한 위와 같은 방식으로 간섭신호가 얻어지게 된다. 변조 전류 $i_m(t)$ 는

$$i_m(t) = A\cos\omega_c t \qquad (2)$$

로 표현되며, 거울에 의해 반사되는 광선이 기준빔(reference beam)이 된다. 진동 등에 의해 생긴 측정 대상체의 변위를 $r(t)$ 라 한다면 간섭계의 광경로차는 $2[l + r(t)]$ 이며, 이때 CCD 에 의해 감지되는 간섭신호는 다음과 같다.

$$I(t) = I_1(t) + I_0\cos[z\cos\omega_c t + \phi(t)] \qquad (3)$$

$I_1(t)$ 는 간섭신호의 직류성분 신호, $I_0(t)$ 는 간섭신호의 교류성분 신호, λ_0 는 중심파장, $2l$ 은 광경로차(OPD; Optical Path Difference), β 는 전류변조율(efficiency of the current modulation)이다. 식(3)에서 z 는 변조 깊이(modulation depth)로 다음과 같다.

$$z = \frac{4\pi a\beta l}{\lambda_0^{\ 2}} \qquad (4)$$

위상 $\phi(t)$ 는

$$\phi(t) = \frac{4\pi}{\lambda_0}[l + r(t)] \qquad (5)$$

로 나타낼 수 있으며, 위상 $\phi(t)$ 가 신호 $I(t)$ 로부터 실시간으로 얻어진다면, 측정 대상체의 변위 또한 식(5)에 의하여 실시간으로 측정이 가능하다.

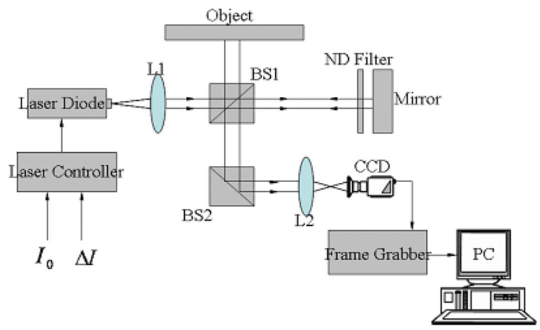


Fig. 1 Schematic Setup of LD-SPM interferometer

2.2 위상이동법

측정 대상체의 정보를 가진 위상정보를 얻기 위해서 4-frame 위상이동법을 사용한다.[7,8]

$$I_1(x,y) = a(x,y) + b(x,y)\cos[\phi(x,y)] \qquad (6)$$
$$I_2(x,y) = a(x,y) + b(x,y)\cos[\phi(x,y) + \Delta\phi] \qquad (7)$$
$$I_3(x,y) = a(x,y) + b(x,y)\cos[\phi(x,y) + 2\Delta\phi] \qquad (8)$$
$$I_4(x,y) = a(x,y) + b(x,y)\cos[\phi(x,y) + 3\Delta\phi] \qquad (9)$$

전자 스페클 간섭계에서 PZT 등을 이용하여 광경로차를 고려하여 4-frame 위상이동법일 경우 전체 경로가 레이저 파장의 1/4 만큼씩 증가 혹은 감소되도록 미세 이동시키게 되는데 그 이동거리가 시스템에서 사용된 레이저 파장의 상대적인 위상차($\Delta\phi$)가 각각 $\pi/2$ 일 때 식(6)~(9)와 같이 각각에서의 측정 대상체의 이미지를 얻을 수 있다. LD-SPM 간섭계는 PZT 대신에 2.1 절에 서술한 바와 같이 레이저 다이오드의 특성에 의해 다음 식(10)~(12)와 같이 변조전류를 통해 위상이동법을 적용하면 된다.[6-8]

$$\phi(x,y,t) = 2\pi\Delta l/\lambda_0 - 2\pi(\Delta l/\lambda_0^2)\Delta\lambda = \phi_0 - \Delta\phi \quad (10)$$

$$\Delta\phi = 2\pi(\Delta l/\lambda_0^2)\beta\cdot\Delta i \quad (11)$$

여기서 Δl 을 광경로차, Δi 를 변조전류량, λ_0 는 초기 파장값(initial wavelength), β 는 전류변조율, ϕ_0 를 초기 위상값의 위치이며, 레이저 다이오드의 입력 전류 변조에 따른 위상의 변화는 식(11)과 같다. 이에 4-frame 위상이동법에 적용하기 위해 위상이동값($\Delta\phi$)을 $\pi/2$ 로 설정하면

$$\Delta i = \frac{\Delta\phi\cdot\lambda_0^2}{2\pi\cdot\Delta l\cdot\beta} = \frac{\lambda_0^2}{4\cdot\Delta l\cdot\beta} \quad (12)$$

와 같이 변조전류량이 정해진다.[6] 이렇게 정해진 레이저 다이오드의 변조전류를 통해 위상이동을 시키면, 식(6)~(9)에 의해 얻어진 intensity 정보를 가진 이미지가 4-frame 위상이동 알고리즘에 적용되어 각각의 화소에 대한 결과값을 화면상에 나타내게 되면 각 화소의 밝기값이 그 점에서의 위상과 비례하는 위상도를 얻을 수 있게 된다. 측정 대상체 표면의 각 점들이 갖는 위상값을 얻기 위해 위상항 ϕ에 대하여 정리하면 식(13)과 같이 정리가 가능하다.

$$\phi(x,y) = \tan^{-1}\frac{I_4(x,y) - I_2(x,y)}{I_1(x,y) - I_3(x,y)} \quad (13)$$

식(13)에서와 같이 arctan 함수의 특성상 2π 마다 불연속성을 지니게 되는 위상도가 구해지게 된다.[8] 이 불연속성은 위상 펼침(unwrapping)작업을 통해 물체의 정보를 연속적으로 나타나게 할 수 있다.

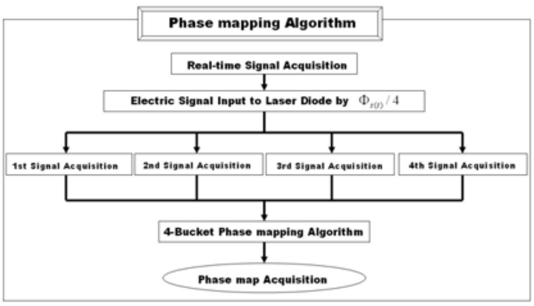


Fig. 2 4-frame Phase mapping algorithm

3. 실험 및 결과

3.1 실험장치 구성

본 LD-SPM 간섭계의 광원은 파장 $\lambda_0 = 656.5nm$, 최대출력 30mW, $\beta = 6.2\times10^{-3} nm/mA$ 의 특성을 가지는 Hitachi 社의 레이저 다이오드를 사용하였다. 레이저 다이오드 작동온도의 변화가 레이저의 파장에 영향을 미치는 것을 방지하기 위해서, 온도제어 기능이 있는 Laser Controller 를 통해 작동온도를 $25\,^\circ C$ 로 유지하여 실험을 수행하였다. 시편은 무광택 백색도료로 도색한 지름 70mm, 두께 2mm 의 알루미늄 원판을 사용하였다. 간섭계에 의해 레이저빔이 두 개의 경로로 나뉜 후, 기준빔(reference beam)과 물체빔(object beam)의 간섭으로 나타나는 무늬(speckle pattern)가 CCD 카메라를 통해 얻어진 후 Frame-Grabber 를 거쳐 PC 에 기록되며, Laser Controller 로 입력전류를 변조하여 위상이동을 실행한다. 구성한 시스템의 광경로차는 10cm 로 식(12)를 통해 변조전류량 Δi 는 0.17mA 로 정해준다. 함수발생기(Function Generator)로 주파수를 0Hz 부터 10000Hz 까지 서서히 올려가며 가진기(Exciter)로 시편에 진동을 가한다. 주파수를 조절하다가 CCD 를 통해 얻어진 간섭무늬가 모니터 상에 선명하게 나타날 때의 주파수를 시편의 고유진동수(Natural Frequency)라 판단하였다.

Fig. 3 Experimental setup of LD-SPM interferometer

3.2 실험 결과

함수발생기와 가진기로 0Hz 에서 10000Hz 까지의 시편에 진동을 가한 결과, 모니터상에 간섭무늬가 선명하게 나타난 주파수는 2190Hz, 4900Hz, 8610Hz 로 진동 주파수의 노달(nodal)선은 각각 2 개, 3 개, 4 개로 나타났다. 이를 4-frame 위상이동법에 적용하여 Phase map 을 얻는다. Fig. 4 는 검출된 진동 주파수에서의 진동형태를 나타내고 있다.

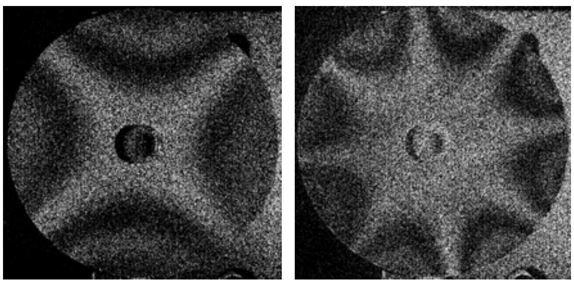


Fig. 4(a) Fringe pattern of specimen at 2190Hz and 8610Hz

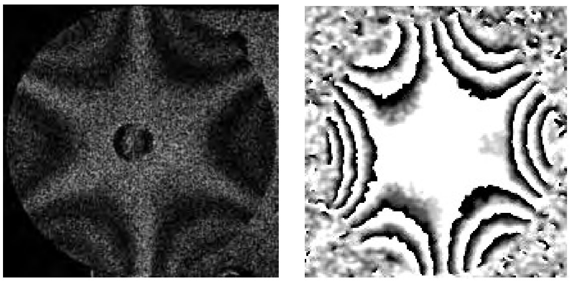
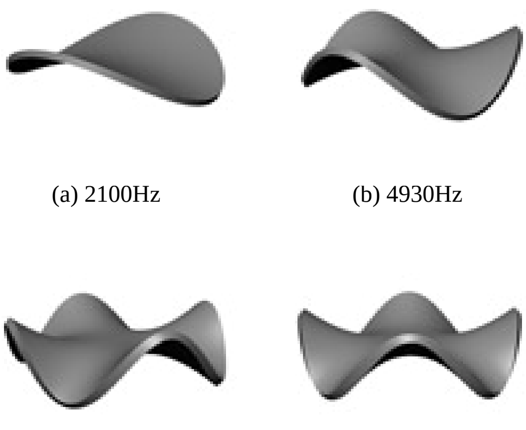


Fig. 4(b) Fringe pattern and Phase map of specimen at 4900Hz

위와 같이 얻은 결과를 유한요소해석 프로그램인 MSC. visualNastran4D 를 이용하여 검증해 보았다. 시편의 0Hz 에서 10000Hz 까지의 고유진동수를 찾은 결과 2100Hz, 3680Hz, 4930Hz, 8260Hz, 8610Hz, 8620Hz 에서 Mode shape 를 얻었다. Fig. 5 는 MSC. visualNastran4D 를 이용하여 얻은 Mode shape 이며 좀더 가시화하기 위해 Scale deflection 을 15%로 상향 조정하였다.



(a) 2100Hz (b) 4930Hz

(c) 8610Hz (d) 8620Hz

Fig. 5 Mode shape using MSC. visualNastran4D

두 가지 방법으로 얻은 데이터를 비교하면 오차범위 5% 이내로, 결과가 거의 일치하고 있다. 이는 LD-SPM 간섭계가 물체의 진동모드를 계측하는데 적합함을 검증했다고 하겠다. 프로그램으로 얻은 3680Hz, 8260Hz 의 영역에서, 간섭계를 이용한 실험을 다시 실시하고 더불어 가속도계를 부착하여 실험을 병행한 결과, 별다른 특징을 찾을 수 없어서 상대적으로 의미가 없는 진동수라고 판단하였다.

4. 결 론

본 논문은 비선형 오차를 가진 PZT 로 위상이동을 하여 결과를 얻는 기존의 전자 스페클 간섭계 방식의 단점을 보완한 LD-SPM 간섭계를 제시하였다. LD-SPM 간섭계의 광원인 레이저 다이오드의 입력 전류를 변조함에 따라 일어나는 파장변조 및 레이저 다이오드의 고유특성, 간섭계의 광경로차 등에 의해 위상이동이 가능함을 보였다. 이를 이용하여 진동체의 고유진동수를 실시간으로 구할 수 있음을 제시하였고, 이 데이터를 유한요소해석 프로그램인 MSC. visualNastran4D 를 이용하여 시스템의 신뢰성을 검증하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-2004-000-10426-0) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. Huntley, J., "Optical shape measurement technology: past, present, and future", Proceedings of SPIE, Vol. 4076, pp. 162-173, 2000.
2. Xuefeng Zhao, Takamasa Suzuki, and Osami Sasaki, "Sinusoidal phase modulating laser diode interferometer using an additive operating type of integrating bucket method", Proceedings of SPIE, Vol. 4919, pp. 275 - 282, 2002.
3. Takamasa Suzuki, Osami Sasaki, "Laser diode interferometers equipped with an electrical feedback loop", Proceedings of SPIE, Vol. 4919, pp. 256 - 267, 2002.
4. Takamasa Suzuki, Toshiyuki Maki, Xuefeng Zhao, and Osami Sasaki, "Disturbance-free high-speed sinusoidal phase-modulating laser diode interferometer", Applied Optics, Vol.41, pp. 1949-1953, 2002.
5. 강성철, 진상규, 지철근, "레이저 다이오드를 이용한 정현파 위상변조 간섭에 의한 실시간 극미세 진동 측정에 관한 연구", 한국조명·전기설비학회 논문집, pp. 33-37, 1991.
6. Kimio Tatsuno, Yoshito Tsunoda, "Diode laser direct modulation heterodyne interferometer", Applied Optics, Vol.26, pp. 37-40, 1987.
7. K. Creath, "Phase Shifting Speckle Interferometry", Applied Optics, Vol.24, pp. 3053-3058, 1985.
8. 강영준, 노경완, 나의균, "레이저 스페클 간섭법을 이용한 면내 변형 측정 및 해석에 대한 연구 (II) ", 한국정밀공학회지, 제 15 권, 제 12 호, pp. 113-119. 1998.