

모듈레이팅 레이저를 이용한 ESPI 시스템 개발

이근영*, 강영준#, 박낙규*, 이동환**

Development of ESPI System Using a Modulating LASER

Kun Young Lee*, Young June Kang#, Nak Kyu Park* and Dong Hwan Lee**

ABSTRACT

Laser interferometry is widely used as a measuring system in many fields because of its high resolution and ability to measure a broad area in real-time all at once. In conventional LASER interferometry, for example Out-of-plane ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry), In plane ESPI, Shearography and Holography, it uses PZT or other components as a phase shift instrumentation to extract 3D deformation data, vibration mode and others. However, in most cases PZT has some disadvantages, which include nonlinear errors and limited time of use. In the present study, a new type of LASER interferometry using a laser diode is proposed. Using LASER Diode Sinusoidal Phase Modulating (LD-SPM) interferometry, the phase modulation can be directly modulated by controlling the LASER Diode injection current thereby eliminating the need for PZT and its components. This makes the interferometry more compact. This paper reports on a new approach to the LD Modulating interferometry that involves four-buckets phase shift method. This study proposes a four-bucket phase mapping algorithm, which was developed to have a guaranteed application, to stabilize the system in the field and to be a user-friendly GUI. In this paper, the theory for LD wavelength modulation and sinusoidal phase modulation of LD modulating interferometry is shown. Four-bucket phase mapping algorithm is then introduced.

Key Words : LASER Diode (레이저 다이오드), ESPI (전자스펙클간섭법), Phase shift method (위상이동법)

1. 서론

광학식 계측 방법은 실시간에 가까운 빠른 측정속도, 높은 정밀도, 비파괴/비접촉식 측정 방식 등의 차별성을 앞세워 사업 현장 전반에서 기존의 측정 방법을 대신해 나가고 있다. 최근 들어 반도체, MEMS, LCD, Build-Up PCB 등 정밀 제조 산업분야

야가 각광을 받으면서, 광학식 계측 방법은 높은 정밀도로 기계의 미세한 움직임이나 미세 표면의 형상 측정 등에 많은 적용 사례를 보이고 있다. 광학식 계측 방법으로는 광삼각법(optical triangulation), Moire 방법, 위상측정방법(PMP;Phase Measuring Profilometer), 전자 스펙클 간섭법(ESPI:Electronic Speckle Pattern Interferometry), 공초

☞ 접수일: 2007년 3월 13일; 게재승인일: 2007년 12월 17일

* 전북대학교 대학원 기계설계학과

전북대학교 기계항공시스템공학부

E-mail: yjkang@chonbuk.ac.kr Tel. (063) 270-2453

** 전북대학교 기계항공시스템공학부

점 방법 등의 여러 가지 기술들이 개발되어 있으며 본 논문에서는 기존 전자 스펙클 간섭법(ESPI)의 단점을 보완한 레이저 다이오드를 이용한 모듈 레이팅 ESPI 시스템에 대한 실험을 통하여 PZT와의 비교분석을 했다. 기존의 전자 스펙클 간섭법에서 물체의 진동모드나 3 차원 형상 등을 측정하고자 할 때, 대부분 PZT(Piezo-electronic Transducer)를 이용한 위상이동을 통하여 위상도(Phase map)를 구하였다. 그러나 PZT의 자체 비선형 오차(Hysteresis error)¹³는 이상적인 PZT이 이동량과 실제 이동량에 차이를 발생시키게 되고, 이것이 시스템 전체 정밀도의 한계를 결정하게 되어 기하학적으로 이동량의 이상적인 제어가 되도록 구성된 알고리즘에 이러한 오차요소가 개입되면서 이를 감소하기 위한 다양한 필터링을 적용해야 하는 어려움이 있다. 이를 보완하기 위해서 Modulating ESPI 간섭법에서는 레이저 다이오드의 특성을 이용하여 위상을 직접 변조시키는 방법을 채택하였다.¹ 이 밖에도 레이저 다이오드는 다른 레이저에 비해 소형이며 가격이 저렴하다는 장점을 가지고 있으며, 그동안 문제점으로 지적되던 온도안정화 및 출력 면에서도 최근 많은 향상을 보여 안정적인 광원으로 레이저 간섭계에 적용할 수 있다. 또한 다이오드 레이저의 특성을 이용하여 간섭계를 구성하면 PZT와 그 주변기기가 없어도 정현적 위상변조가 가능^{9,14}하므로 시스템을 좀 더 간단히, 소형으로 구성할 수 있다는 장점을 가지고 있어 산업현장에서 측정시스템으로서의 레이저 변조방식의 적용성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.⁹

2. 이론

2.1 Wavelength Modulation

다이오드를 사용한 간섭계에서는 입력전류(injection current)를 변조시켜 직접적으로 파장(wavelength)의 위상값을 변화시킬 수 있다.^{1,9} 이는 입력전류가 시간에 의한 선형적인 $\Delta i = \alpha \cdot t$ 이며, 파장의 길이(wavelength)는 미세하게 변하며, 그 식은 다음과 같다.

$$\Delta \lambda = \beta \cdot \Delta i = \beta \cdot \alpha \cdot t \quad (1)$$

여기서 α 와 β 는 비례상수이고 $\Delta \lambda$ 은 파장길이변화, 레이저 다이오드 파장의 변조식은 다음 식으로

나타낼 수 있다. 레이저 공진 조건(Laser cavity condition)의 파장은 다음 식에 의해 주어지며

$$\lambda = \frac{2}{m} n \cdot L \quad (2)$$

n : refractive index

L : cavity length

m : integer

다이오드 레이저의 입력전류가 Δi 만큼 주어질 때, 적은 양의 온도 변화 ΔT 가 일어난다.

$$\Delta T = R \cdot \Delta i \quad (3)$$

R : Thermal resistance

그리고, 파장길이의 변화 $\Delta \lambda$ 는 식 (2)를 미분한 다음에 주어지는 식처럼 나타낼 수 있다.

$$\Delta \lambda = \frac{2}{m} \left(L \frac{\partial n}{\partial T} + n \frac{\partial L}{\partial T} \right) \cdot \Delta T \quad (4)$$

공진(cavity length)의 변화량은 굴절률(refractive index)에 비해 그 양이 무시할 정도로 작기 때문에 식 (3)과 식 (4)에 의해 다음과 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$\Delta \lambda = \frac{\lambda}{n} \frac{\partial n}{\partial T} R \cdot \Delta i \quad (5)$$

그러므로, β 는 Wavelength(656.5nm), ref-reactive, index(=3.5), refractive-index differential($\approx 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$), 그리고 다이오드 레이저의 thermal resistance($R \approx 25^{\circ}\text{C}/\text{A}$)에 의해 계산 된다.

$$\beta = \frac{\lambda}{n} \frac{\partial n}{\partial T} R \approx 6 \times 10^{-3} (\text{nm}/\text{mA}) \quad (6)$$

2.2 Direct Modulation

간섭계 시스템은 Fig. 1과 같이 마이켈슨 간섭계(Michelson Interferometer)를 원리로 하며, 광원으로는 레이저 다이오드(LD)를 사용하였다. 가간섭 광원은 Beam-Splitter에 의해 두 개의 광경로로 나뉘며 각각의 거울에 의해 반사되고 다시 Beam-

Splitter 를 통해 CCD, Photodiode 등의 검출기 (Detector)에서 합쳐진 후 간섭무늬를 생성한다. 이렇게 생성된 간섭 무늬의 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I(t) = I_1(t) + I_0(t)\cos(\Delta\phi + \alpha) \quad (7)$$

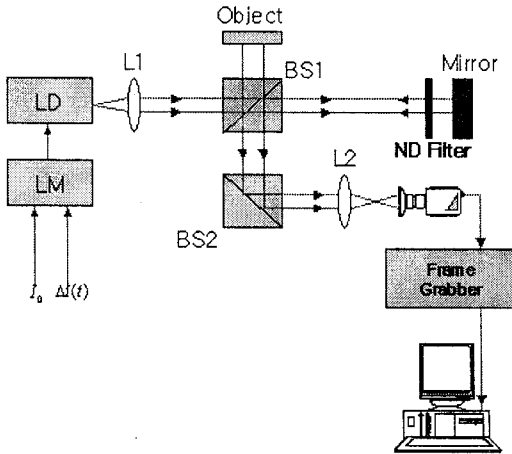


Fig. 1 Schematic of ESPI

식 (7)의 $I_1(t)$ 은 배경강도(Background intensity)에 의한 간섭신호, $I_0(t)$ 는 변조강도(Modulation intensity)에 의한 간섭신호이다. $\Delta\phi$ 는 위상 차, 또한 식(7)에서 α 는 초기위상 값 즉 intensity 값이다.

Modulating ESPI 시스템에서 광원인 레이저 다이오드의 입력 전류를 조절함에 따라 위상을 직접 변조할 수 있다. 입력 전류는 직류바이어스 전류 i_0 과 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, λ_0 는 i_0 에 의하여 정해진다.⁸ 레이저 다이오드를 이용한 Modulating ESPI 또한 위와 같은 방식으로 간섭신호가 얻어지게 된다. 변조 전류 $i_m(t)$ 는

$$i_m(t) = A\cos\omega_c t \quad (8)$$

로 표현되며, 거울에 의해 반사되는 광선이 기준빔(reference beam)이 된다. 측정 대상체의 변위를 $r(t)$ 라 한다면 간섭계의 광경로는 $2(l+r(t))$ 이며, 이 때 CCD 에 의해 감지되는 간섭신호는 다음과 같다.⁹

$$I(t) = I_1(t) + I_0 \cos\{z \cos\omega_c t + \phi(t)\} \quad (9)$$

$I_1(t)$: 간섭신호의 직류성분 신호(배경강도)

$I_0(t)$: 간섭신호의 교류성분 신호(변조강도)

λ_0 : 중심파장

$2l$: 광경로차(OPD; Optical Path Difference)

β : 전류변조율(Efficiency of the current Modulation)

z : 변조깊이(modulating depth)

식 (9)에서의 z 는 다음과 같다.

$$z = \frac{4\pi A \beta l}{\lambda^2_0} \quad (10)$$

위상 $\phi(t)$ 는

$$\phi(t) = \frac{4\pi}{\lambda_0} l + r(t) \quad (11)$$

로 나타낼 수 있으며, 위상 $\phi(t)$ 가 신호 $I(t)$ 로부터 실시간으로 얻어진다면, 측정 대상체의 변위 또한 식(11)에 의하여 실시간으로 측정이 가능하다.

2.3 위상이동법

측정 대상체의 정보를 갖는 위상정보를 얻기 위해서 4-buckets 위상이동법을 사용한다.^{3,19}

$$I_1(x, y) = a(x, y) + b(x, y)\cos[\phi(x, y)]$$

$$I_2(x, y) = a(x, y) + b(x, y)\cos[\phi(x, y) + \Delta\phi] \quad (12)$$

$$I_3(x, y) = a(x, y) + b(x, y)\cos[\phi(x, y) + 2\Delta\phi]$$

$$I_4(x, y) = a(x, y) + b(x, y)\cos[\phi(x, y) + 3\Delta\phi]$$

전자 스펙클 간섭법에서 PZT 등을 이용하여 광경로차를 고려하여 4-buckets 위상이동법을 사용할 경우 전체 경로가 레이저 파장의 1/4 만큼씩 증가 혹은 감소되도록 미세 이동시키게 되는데 그 이동거리가 시스템에서 사용된 레이저 파장의 상대적인 $\Delta\phi$ 가 각각 $\pi/2$ 일 때 식 (12)와 같이 각각에서의 측정 대상체의 이미지를 얻을 수 있다.¹⁵ 다이오드의 특성에 의해 다음 식 (13)과 같이 변조전류를 통해 위상이동법을 적용할 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi(x, y, t) &= 2\pi\Delta l / \lambda_0 - 2\pi(\Delta l / \lambda_0^2)\Delta\lambda \\ &= \phi_0 - \Delta\phi \\ \Delta\phi &= 2\pi(\Delta l / \lambda_0^2)\beta\Delta i \end{aligned} \quad (13)$$

- Δl : 광경로차
- Δi : 변조전류량
- λ_0 : 초기 파장값(initial wavelength)
- ϕ_0 : 초기 위상값의 위치

레이저 다이오드의 입력 전류 변조에 따른 위상 변화는 식 (13)과 같다. 이에 4-buckets 위상이동 법에 적용시키기 위해 $\Delta\phi$ 을 $\pi/2$ 로 설정하면

$$\Delta i = \frac{\Delta\phi \cdot \lambda_0^2}{2\pi \cdot \Delta l \cdot \beta} = \frac{\lambda_0^2}{4 \cdot \Delta l \cdot \beta} \quad (14)$$

와 같이 변조전류 량이 정해진다.³ 이렇게 정해진 레이저 다이오드의 변조 전류를 통해 위상이동을 시키면 식 (12)에 의해 얻어진 intensity 정보를 갖는 이미지가 4-buckets 위상이동 알고리즘에 적용되어 각각의 화소에 대한 결과값을 화면상에 나타나게 되어 각 화소의 밝기 값이 그 점에서의 위상과 비례하는 위상도를 얻을 수 있게 된다. 측정 대상체 표면의 각 점들이 갖는 위상 값을 얻기 위해 위상 값 ϕ 에 대하여 정리하면 식 (15)와 같이 정리가 가능하다.

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \quad (15)$$

2.4 민감도 벡터에 의한 변위 측정

광학계 구성시 물체빔의 조사 각도와 거리, 관측 위치 그리고 광원의 종류에 따라 간섭무늬의 형태로 가시화 되는 변위의 방향이 달라지게 되는데 이 변위의 방향을 표시하는 벡터가 바로 민감도 벡터가 된다. 광학계의 구성형태에 의존하는 민감도 벡터에 의한 변위 구하는 식은 다음과 같다.^{16, 17}

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} [(\cos\theta + 1)dx] \quad (16)$$

변위는 2π 의 위상차에 의한 간섭무늬의 개수로써 결정이 되므로 위상차는 다음과 같다.

$$\Delta\phi = 2\pi N \quad (17)$$

식 (16)과 (17)에 의해서 최종적인 변위 식은 다음과 같다.¹⁸

$$dx = \frac{N\lambda}{\cos\theta + 1} \quad (18)$$

- dx : 물체의 변위
- N : 간섭무늬 차수
- λ : 실험에서 사용되는 레이저의 파장
- θ : 레이저빔이 물체에 조사되는 방향과 축이 이루는 각도

3. 실험

3.1 시편의 제작

본 논문에서는 변형 여기가 쉽도록 가로 300mm, 세로 160mm, 두께 2mm의 알루미늄 사각판을 시험편으로 사용하였다.

3.2 실험장치 구성

본 논문에서 모듈레이팅 레이저를 이용한 ESPI 시스템의 구성도와 실험은 Fig. 2와 Fig. 3과 같이 면의 변위의 ESPI 시스템을 이용하여 실험하였다. 또한 식(18)에서 변위측정을 위해 기준빔과 CCD와의 조사 각도는 12도로 일정하게 하여 측정하였고 레이저의 파장은 656.5nm이다.

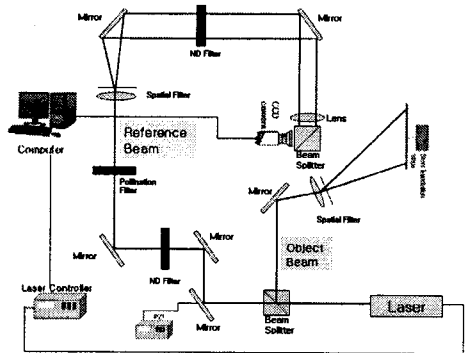


Fig. 2 Schematic of Modulating ESPI system

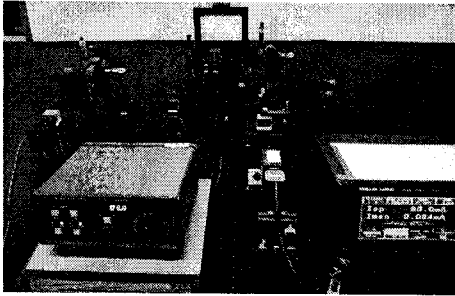


Fig. 3 Set-up of Modulating ESPI system

본 시스템은 광원인 레이저 다이오드와 영상을 획득하는 CCD 카메라 및 획득한 영상을 처리하는 영상신호처리 전용보드와 컴퓨터로 구성되어 있다. 면내변위 ESPI 시스템을 이용한 이유는 두 빔의 정확한 광경로차동의 오차를 감소하기 위한 것과 시편의 1/3 지점에 대한 변위를 가하고 측정이 쉬운 면내변위 간섭무늬를 이용했다. 모듈레이터와 다이오드 레이저에서 시작된 빔은 Beam Splitter에 의해 두 개로 나눈다. 두 개로 나눈 빔은 Mirror와 Spatial Filter를 통해 확산된 빔을 조사시킨다. 이 때 조사된 빔은 speckle를 무늬로 나타나며 CCD 카메라에 Intensity 정보를 포함하여 받아들여지게 되고, CCD 센서에 획득된 영상은 다시 영상신호처리 전용보드의 버퍼에 저장된다. 레이저 빔 영상은 640×480 픽셀 행렬에 256 단계의 밝기 강도 값으로 구성되어 있고 획득된 영상은 각 열에는 측정 대상체의 높이 정보를 가지고 있는 픽셀이 하나씩 존재하므로 하나의 영상에는 640개의 높이 정보를 가지고 있는 픽셀이 존재한다. 이러한 영상정보를 연결된 컴퓨터의 Frame Grabber와 영상처리 프로그램에 의하여 Fringe Pattern과 Phasemap을 구할 수 있다. 본 논문은 PZT를 위상 이동 장치로 사용하지 않는 모듈레이팅 레이저 ESPI 시스템이며 비교를 위해 PZT를 연결하였다.

3.3 실험순서

알루미늄 시험편에 변형여기 방법으로 Steel Translation Stage를 사용하였다. 시험편의 뒤에서 1 μm씩 앞뒤로 변형을 주어가며 PZT를 사용한 ESPI 시스템과 모듈레이팅 레이저를 이용한 ESPI 시스템의 Phasemap을 비교하였다. 위상 이동 장치로 PZT를 사용할 때에는 모듈레이팅을 하지 않고 기존의 방법대로 Phasemap을 얻어냈으며, 모듈레이

팅 레이저를 이용한 ESPI 시스템에서는 단순히 PZT를 Mirror로써 사용하였다.

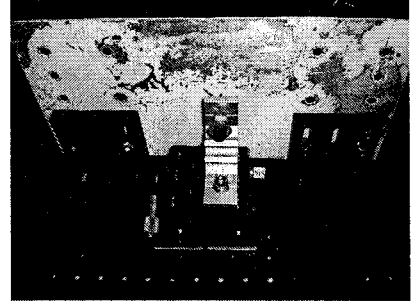


Fig. 4 Steel Translation Stage

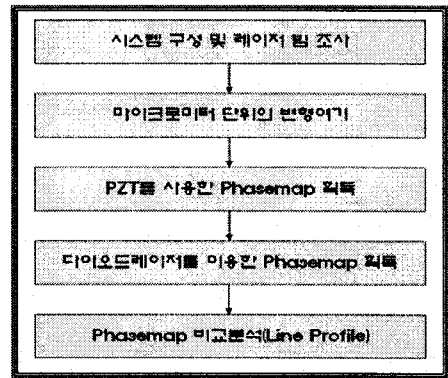


Fig. 5 Flow Chart

4. 실험결과

실험순서에 따라 위상 이동 장치로써 PZT와 레이저 다이오드를 사용하여 1 μm, 1.5 μm, 2 μm 범위에서 각각의 Phasemap을 비교 분석해보았다. Fig 6에서 보여지듯 본 논문에서 사용된 모듈레이팅 방법과 PZT 측정 방법에 대한 Filtering을 하였다. Fig 7~12는 변형 전/후에 얻은 4개의 스페클 간섭무늬 영상은 4-buckets 위상 이동 알고리즘으로 각각 처리하고 PZT를 위상 이동 장치로 사용했을 때의 위상 지도와 비교를 하였다. 즉 PZT를 사용했을 때와 모듈레이팅으로 사용했을 때 위상 지도를 비교하였다. 각각의 Line Profile에서 X축은 Phasemap에서 Line의 길이를 나타내며, Y축은 Phasemap에서 Line의 조도 값을 8bit로 나타낸 것입니다.

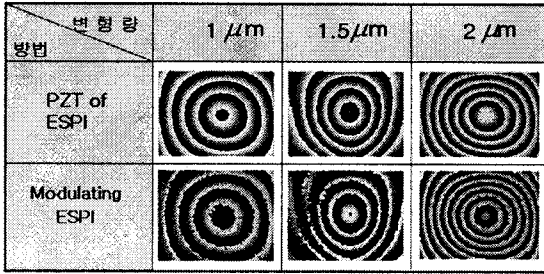
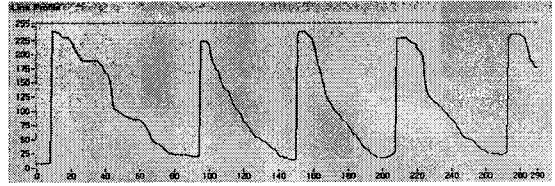
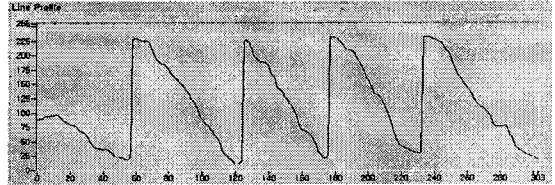


Fig. 6 Raw Phase map

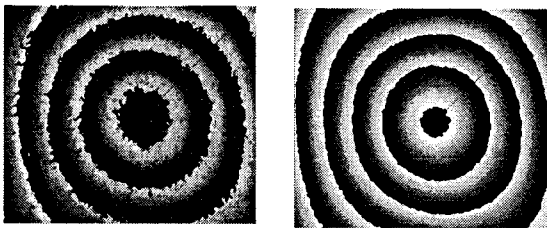


(a) Modulating ESPI



(b) PZT of ESPI

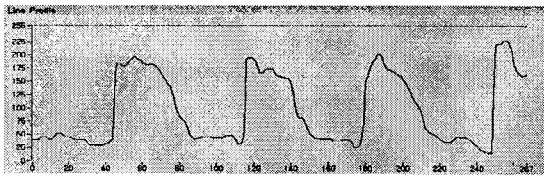
Fig. 10 Line Profile after Filtering (1.5 μm)



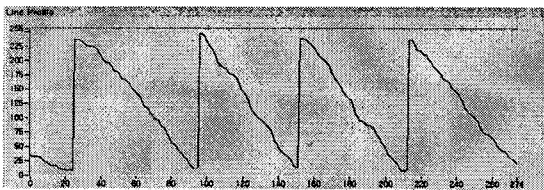
(a) Modulating ESPI

(b) PZT of ESPI

Fig. 7 Phase map after Filtering (1 μm)

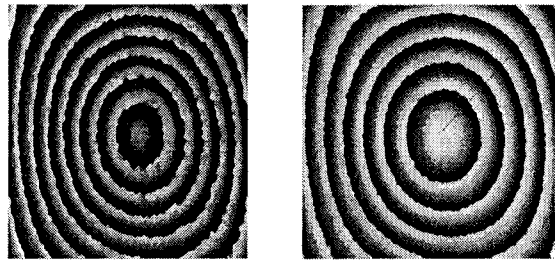


(a) Modulating ESPI



(b) PZT of ESPI

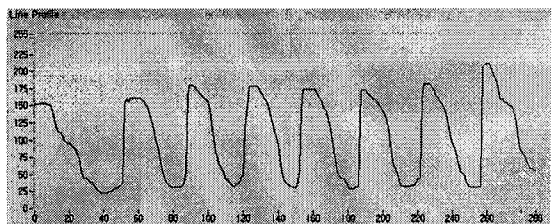
Fig. 8 Line Profile after Filtering (1 μm)



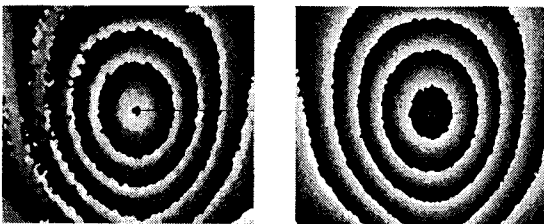
(a) Modulating ESPI

(b) PZT of ESPI

Fig. 11 Phase map after Filtering (2 μm)



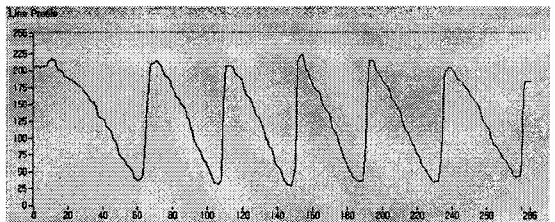
(a) Modulating ESPI



(a) Modulating ESPI

(b) PZT of ESPI

Fig. 9 Phase map after Filtering (1.5 μm)



(b) PZT of ESPI

Fig. 12 Line Profile after Filtering (2 μm)

Table 1 transformation qualification

	PZT of ESPI 변형량(μm)	Modulating 변형량(μm)
1 μm	0.9	1.3
1.5 μm	1.6	1.3
2 μm	1.9	2.3

본 실험에서 Table. 1 에 나타난 것처럼 식(18)을 통하여 각각의 변형량을 구하여 각각의 변형량을 측정하였다. PZT 를 이용하여 변형량을 구했을 때 오차는 거의 0.1 μm 의 차이를 볼 수 있다. 반면 모듈레이팅 레이저의 전류값의 변조에 따른 변형량의 측정 결과 PZT 와의 변조량에 비해 큰 오차를 나타내지 않는 것을 볼 수 있다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 ESPI 시스템에 관한 연구가 활발히 이루어지는 가운데, 위상이동장치로써 PZT 를 사용하지 않는 모듈레이팅 레이저를 이용한 ESPI 시스템 개발에 관하여 연구하였다. 모듈레이팅 레이저를 이용하여 ESPI 시스템을 구성하여 측정 대상체의 이미지 패턴을 획득하고, 획득된 영상으로부터 위상맵(Phase map)을 얻을 수 있는 프로그램을 구현하였다.

변형 전/후에 얻은 4 개의 스펙클 간섭무늬 영상은 4-bucket 위상이동 알고리즘으로 각각 처리하고 PZT 를 위상이동장치로 사용했을 때의 위상지도와 비교하였다. PZT 를 사용했을 때와 모듈레이팅 레이저를 이용했을 때를 비교한 결과 Line Profile 자체는 큰 차이를 보이지 않았으나 Phasemap 을 얻는 과정에서 모듈레이팅 레이저를 사용했을 때에는 다이오드 레이저의 current 변조에 따른 출력변화로 인하여 Intensity 차이를 보여 이미지가 선명하지 못한 문제점을 나타내었다.

측정 분해능은 CCD 카메라의 픽셀 분해능에 의존하기 때문에, CCD 카메라와 측정 대상체와의 거리가 멀어지면 분해능이 떨어지게 되고, 반대로 측정 대상체와의 거리가 가까워지게 되면 분해능이 향상된다. 그러나 파장변조가 어렵고 출력이 낮아 넓은 영역의 대상체에 적용은 어려울 것으로 보인다. 본 논문에서 연구한 시스템의 최대 장점은 위상이동장치로써 자체 비선형오차를 갖는 PZT 를 사용하지 않는다는 것이다. PZT 를 사용하

지 않음으로써 비용과 공간을 절감시키는 효과를 얻을 수 있다. 추후 실용적인 시편에 대한 다이오드 레이저의 변조 값을 얻기 위한 실험을 통하여 정확한 위상이동을 할 수 있는 변조값을 찾는 연구가 필요하겠다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음. (GJ-05-015)

참고문헌

1. Tatsuno, K. and Tshunoda, Y., "Diode laser direct modulation heterodyne interferometer," Applied Optics, Vol. 26, No. 1, pp. 37-40, 1987.
2. Sasaki, O., Ikeada, Y. and Suzuki, T., "Superluminescent diode interferometer using sinusoidal phase modulation for step-profile measurement," Applied Optics, Vol. 37, No. 22, pp. 5126-5131, 1998.
3. Sandoz, P., Gharbi, T. and Tribillon, G., "Phase-shifting methods for interferometers using laser-diode frequency-modulation," Optics Communications, Vol. 132, No. 3, pp. 227-231, 1996.
4. Zhao, X., Suzuki, T., Masutomi, T. and Sasaki, O., "Direct phase modulating laser diode interferometer for in-process measurement using sinusoidal signal synchronized with the CCD camera's exposure time," Proceedings of SPIE, Vol. 5633, pp. 272-279, 2005.
5. Zhao, X., Suzuki, T. and Sasaki, O., "Sinusoidal phase modulating laser diode interferometer using an additive operating type of integrating bucket method," Proceedings of SPIE, Vol. 4919, pp. 275-282, 2002.
6. Zhao, X., Suzuki, T. and Sasaki, O., "Photothermal Phase-Modulating Laser Diode Interferometer with High-Speed Feedback Control," Optical Review, Vol. 9, No. 1, pp. 211-214, 2002.
7. Wang, X., Qian, F., Chen, G. and Fang, Z., "Photothermal modulation of laser diode wavelength: application to sinusoidal phase-modulating interferometer for displacement measurements," Optics & Laser Technology, Vol. 31, No. 8, pp. 559-

- 564, 1999.
8. Suzuki, T., Maki, T., Zhao, X. and Sasaki, O., "Disturbance-free high-speed sinusoidal phase-modulating laser diode interferometer," *Applied Optics*, Vol. 41, No. 10, pp. 1945-1953, 2002.
 9. Kang, S. C., Jin, S. K. and Chee, C. K., "A Study on real time measuring microscopic movements in sinusoidal phase modulating interferometry using a laser diode," The Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers autumn conference, pp. 23-27, 1990.
 10. Suzuki, T., Suda, H. and Sasaki, O., "Double sinusoidal phase-modulating distributed-Bragg-reflector laser-diode interferometer for distance measurement," *Applied Optics*, Vol. 42, No. 1, pp. 60-66, 2003.
 11. Suzuki, T., Matsuda, M., Sasaki, O. and Maruyama, T., "Laser-diode interferometer with a photothermal modulation," *Applied Optics*, Vol. 38, No. 34, pp. 7069-7075, 1999.
 12. Zhao, X., Suzuki, T. and Sasaki, O., "Stroboscopic step height measurement with two-wavelength interferometer using single diode laser source," *Proceedings of SPIE*, Vol. 5265, pp. 127-133, 2004.
 13. Chong, S. T. and Cho, S. H., "Nonlinear Resonance Characteristics of Transverse Type PZT ceramic resonator," *Journal of the Korean Ceramic Society*, Vol. 31, No. 10, pp. 1133-1140, 1994.
 14. Lee, C. H., Yun, T. H. and Sin, S. Y., "Large-Signal Modulation Characteristics of a Diode Laser," *Journal of the Institute of Electricians Engineers of Korea*, Vol. 23, No. 1, pp. 91-10, 1988.
 15. Baek, T. H., Kim, M. S., Na, E. G. and Koh, S. K., "Application of ESPI to Measurement of Out-of-plane Displacement in a Spot Welded Canti-levered Plate," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 4, No. 5, pp. 41-46, 2003.
 16. Hong, K. H., Kang, Y. J. and Park, N. K., "Research about responsiveness vector by angles in Out-of-Plane ESPI," *Korea Machine Learned Society Spring Conference*, pp. 353-356, 2006.
 17. Kim, S. J. Kang, Y. J. and Park, N. K., "A Study on the effect Phase-map by Sensitivity Vector in ESPI System," *Proc. of KSPE Spring Conference*, pp. 313-314, 2007.
 18. Moon, S. J., Kang Y. J. and Baik S. H., "Analysis on the Error of Sensitivity Vector of Holographic Interferometer for Measuring Out-of-plane Displacement," *Proc. of KSPE Spring Conference*, pp. 515-520, 1995.
 19. Baik, T. H., Kim, S. U. and Na, E. K., "Measurement of Out-of-plane Displacement in a Spot Welded Canti-levered Plate using Laser Speckle Interferometry with 4-step Phase Shifting Technique," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 19, No. 3, pp. 66-72, 2002.