

# Modulating Laser 를 이용한 ESPI System algorithm 개발에 관한 연구

## Research about ESPI System Algorithm Development that Use Modulating Laser

김성종<sup>1</sup>, 강영준<sup>2,✉</sup>, 박낙규<sup>1</sup>, 이동환<sup>2</sup>

Seong Jong Kim<sup>1</sup>, Young June Kang<sup>2,✉</sup>, Nak Kyu Park<sup>1</sup> and Dong Hwan Lee<sup>2</sup>

1 전북대학교 대학원 기계설계학과 (Department of Mechanical Design Engineering, Chonbuk Univ.)

2 전북대학교 기계설계공학부(Department of Mechanical Design Engineering, Chonbuk Univ.)

✉ yjkang@chonbuk.ac.kr, Tel: 063-270-2453

Manuscript received: 2008.5.27 / Revised: 2009.1.10 / Accepted: 2009.4.2

*Laser interferometry is widely used as a measuring system in many fields because of its high resolution and its 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 3-D 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 (Laser Diode) Modulating interferometry that involves four-frame phase shift method. This study proposes a four-frame 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. Using modulating laser and research of measurement algorithm does comparison with existent ESPI measurement algorithm. Algorithm measures using GPIB communication through most LabVIEW 8.2. GPIB communication does alteration through PC. Transformation of measurement object measures through modulating laser algorithm that develops. Comparison of algorithm of modulating laser developed newly with existent PZT algorithm compares transformation price through 3 - D. Comparison of 4-frame phase mapping, unwrapping, 3-D is then introduced.*

Key Words : Laser Diode (LD, 레이저 다이오드), Out-of-plane ESPI (면외변위 간섭법), Phase Shift Method (위상이동법) Current Modulating (전류변조), GPIB (제어 통신)

### 1. 서론

광학식 계측 방법은 높은 정밀도로 기계의 미세한 움직임이나 미세 표면의 형상 측정 등에 많은 적용 사례를 보이고 있다. 광학식 계측 방법으

로는 광삼각법(optical triangulation), Moire 방법, 위상측정방법(PMP;Phase Measuring Profilometer), 전자스펙클 간섭법(ESPI:Electronic Speckle Pattern Interferometry), 공초점 방법 등의 여러 가지 기술들이 개발되어 있으며 본 논문에서는 기존 전자

스펙클 간섭법(ESPI)의 단점을 보완한 레이저 다이오드를 이용한 모듈레이팅 ESPI 시스템에 대한 실험을 통하여 PZT 와의 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. 본 연구는 PZT 를 이용하지 않고 Modulating Laser 의 변조를 통한 정량적 위상이동으로 측정하기 위하여, ESPI 중 면의 변위에 민감한 Out-of-plane ESPI 와 레이저를 이용한 장치를 구성하였다. 본 측정의 궁극적인 목적은 Modulating Laser 를 GPIB 통신을 통한 전류를 변조하여 변형량을 측정하고, PZT 와의 비교를 통한 정확한 알고리즘을 확인하고 PZT 장비를 보완하기 위해서 Modulating ESPI 간섭법에서는 레이저 다이오드의 특성을 이용하여 위상을 직접 변조시키는 방법을 채택하였다.<sup>1</sup> 이 밖에도 레이저 다이오드는 다른 레이저에 비해 소형이며 가격이 저렴하다는 장점을 가지고 있으며, 그 동안 문제점으로 지적되던 온도안정화 및 출력 면에서도 최근 많은 향상을 보여 안정적인 광원으로 레이저 간섭계에 적용할 수 있다. 또한 다이오드 레이저의 특성을 이용하여 간섭계를 구성하면 PZT 와 그 주변기기가 없어도 정현적 위상변조가 가능<sup>9,10</sup> 로 시스템을 좀 더 간단히, 소형으로 구성할 수 있다는 장점을 가지고 있어 산업현장에서 측정시스템으로서의 레이저 변조방식의 적용 성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

2. 이론

2.1 Wavelength Modulation

다이오드를 사용한 간섭계에서는 입력전류(injection current)를 변조시켜 직접적으로 파장(wavelength)의 위상값을 변화시킬 수 있다.<sup>1,9,11</sup> 입력전류가 시간에 의한 선형적인  $\Delta i = \alpha \cdot t$  이며, 파장의 길이(wavelength)는 미세하게 변하며, 그 식은 다음과 같다.

$$\Delta \lambda = \beta \cdot \Delta i = \beta \cdot \alpha \cdot t \tag{1}$$

여기서  $\alpha$  와  $\beta$  는 비례상수이고  $\Delta \lambda$  은 파장길이 변화, 레이저 다이오드 파장의 변조식은 다음 식으로 나타낼 수 있다. 레이저 공진 조건(Laser

cavity condition)의 파장은 다음 식에 의해 주어지며

$$\lambda = \frac{2}{m} n \cdot L \tag{2}$$

$n$  : Refractive index  
 $L$  : Cavity length  
 $m$  : Integer

다이오드 레이저의 입력전류가  $\Delta i$  만큼 주어질 때, 적은 양의 온도 변화  $\Delta T$  가 일어난다.

$$\Delta T = R \cdot \Delta i \tag{3}$$

$R$  : Thermal resistance

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

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

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

$$\Delta \lambda = \frac{\lambda}{n} \frac{\partial n}{\partial T} R \cdot \Delta i \tag{5}$$

그러므로,  $\beta$  는 Wavelength(656.5nm), Refractive, 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 계산된다.

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

2.2 Direct Modulation

간섭계 시스템은 Fig. 1 과 같이 마이켈슨 간섭계(Michelson Interferometer)를 원리로 하며, 광원으로는 레이저 다이오드(LD)를 사용하였다. 가간섭

광원은 Beam-Splitter 에 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.

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

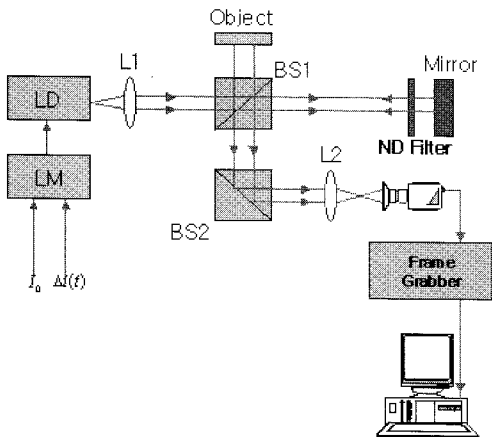


Fig. 1 Schematic of ESPI

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  $\alpha$ 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,  $\lambda_0$ 는  $i_0$ 에 의하여 정해진다.<sup>8</sup> 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 기준 빔(reference beam)이 된다. 측정 대상 체의 변위를

$r(t)$ 라 한다면 간섭계의 광 경로는  $2(l+r(t))$ 이며, 이 때 CCD 에 의해 감지되는 간섭신호는 다음과 같다.<sup>9</sup>

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

- $I_1(t)$  : 간섭신호의 직류성분 신호(배경강도)
- $I_0(t)$  : 간섭신호의 교류성분 신호(변조강도)
- $\lambda_0$  : 중심파장
- $2l$  : 광경로차(OPD;Optical Path Difference)
- $\beta$  : 전류변조율(Efficiency of the current modulation)
- $z$  : 변조깊이(Modulating depth)

식 (9)에서의  $z$ 는 다음과 같다.

$$z = \frac{4\pi A \beta l}{\lambda_0^2} \quad (10)$$

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 대상 체의 변위 또한 식 (11)에 의하여 실시간으로 측정이 가능하다.

### 2.3 GPIB 통신

기존의 PZT 는 RS-232 라는 통신을 이용하여 전기적인 신호를 기계적인 신호로 바꾸어 위상이동

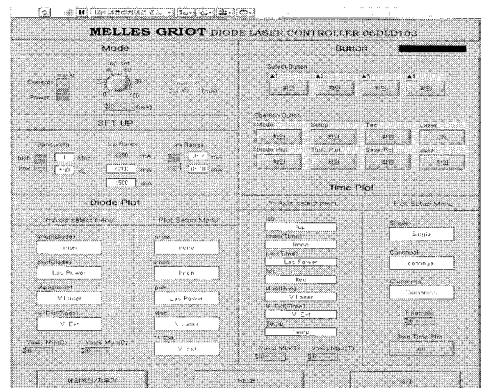


Fig. 2 Modulating GPIB program of ESPI system

을 통한 위상지도를 얻어 측정을 하였다. 하지만 PZT 는 자체 비선형 오차와 고가 장비, 시스템 구성에 불편함이 있었다. 이를 대처하기 위한 수단으로 모듈레이팅 레이저의 고유의 IP 주소를 이용하여 GPIB(General Purpose Instrument Bus)통신을 통한 모듈레이팅 레이저의 전류값을 변조시켜 위상이동을 한 후 위상지도를 얻을 수 있는 통신을 사용한다. 또한 GPIB 의 통신을 통해 모듈레이팅 레이저의 제어는 LabVIEW 8.2 의 NI 사의 PCI-GPIB 보드를 사용하여 제어할 수 있도록 하였다.

**2.4 Modulating Laser 이용한 ESPI 영상처리 Program 개발**

스펙클 간섭무늬를 PhaseMap 으로 변환하기 위하여 LabVIEW 8.2 를 사용하여 모듈레이팅 알고리즘의 영상 처리 프로그램을 개발하였다. 개발된 간섭무늬 영상처리 프로그램의 알고리즘은 Fig. 4 와 같고, 주 화면의 구성은 Fig. 3 과 같다.

스펙클 간섭무늬 영상처리 알고리즘은 실행단계의 메모리 설정 이전에 사용자로부터 현재 사용 중인 카메라의 종류를 선택하게 하고, 기존에 설정한 혹은 기본 값으로 설정된 영상처리보드 정보를 하드디스크에 저장된 파일로부터 설정한다. 그런 후 프로그램은 메모리를 설정하고 주변 시스템을 초기화시킨 후 화면상에 주화면이 나타난다(4-1). 본 프로그램에서 간섭계 영상획득은 LabVIEW 프로그램의 Start 버튼이 실행되면 프로그램은 사용자가 설정함에 따라 자동으로 실시간 화면이 디스플레이 된다. Save Before 아이콘 부분을 선택하면 스펙클 무늬의 Reference 를 4 장의 이미지를 파일에 저장 하게 된다. 다음 Save After 아이콘을 선택하면 변형 후 이미지 4 장을 저장하게 된다. 따라서 레이저 간섭해석 모드에 따라 측정대상체의

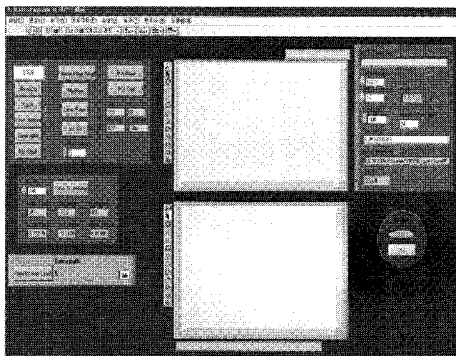


Fig. 3 Image processing interface of ESPI system

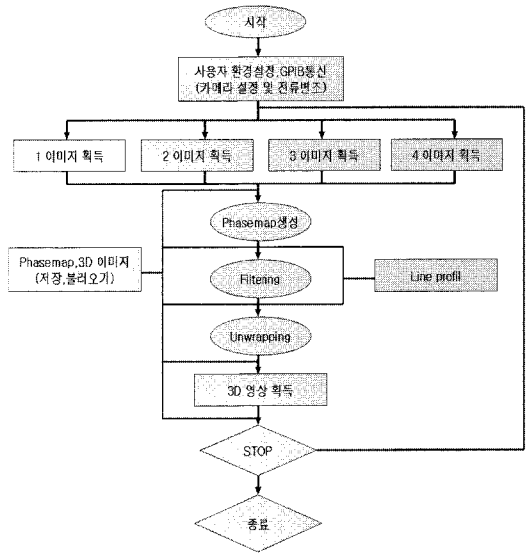


Fig. 4 Modulating algorithm of ESPI system

변형 전/후의 영상들의 파일을 저장 하게 된다. 저장된 파일은 PhaseMap Right 이라는 아이콘을 선택하여 PhaseMap 의 획득에 대한 알고리즘 순서로 이미 저장된 이미지 8 장으로 PhaseMap 을 획득하게 된다. 이렇게 얻은 파일들의 파일명은 1.bmp, 2.bmp, 3.bmp, 4.bmp, PhaseMap.bmp 와 같이 기본 이름으로 할당되어 지정된 폴더에 저장된다.

**3. 실험**

**3.1 시편의 제작**

본 논문에서는 변형 여기가 쉽도록 가로 300mm, 세로 160mm, 두께 2mm 의 알루미늄 사각판을 시험 편으로 사용하였다.

**3.2 실험장치 구성**

본 논문에서 모듈레이팅 레이저를 이용한 ESPI 시스템의 구성도와 실험은 Fig. 5 와 Fig. 6 과 같이 면의 변위의 ESPI 시스템을 이용하여 실험하였다. 또한 식(18)에서 변위측정을 위해 기준빔과 CCD 와의 조사 각도는 12 도로 일정하게 하여 측정하였고 레이저의 파장은 656.5nm 이다.

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 광경로차등의 오차를 감소하기 위한 것과

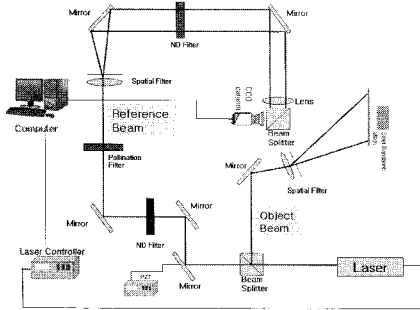


Fig. 5 Schematic of modulating ESPI system

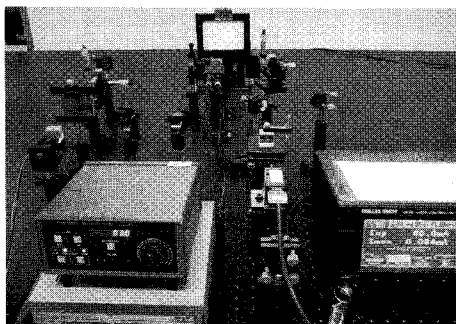


Fig. 6 Set-up of modulating ESPI system

시편의 1/3 지점에 대한 변위를 가하고 측정이 쉬운 변내변위 간섭무늬를 이용했다. 모듈레이터와 다이오드 레이저에서 시작된 빔은 Beam splitter에 의해 두 개로 나누어진다. 두 개로 나누어진 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 저장이 된다. 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 광 경로차에 따른 변조 값

정확한 위상이동을 통한 위상지도를 얻기 위해

서는 광경로차에 따른 전류변조를 해야만 한다. 또한 식(5), (6)을 통해 가능한 변조값을 얻기 위해서는 광경로차를 정확하게 구한다음 전류 변조 값을 주었고 Fig. 7은 그래프로 나타낸 것이다. 다이오드 레이저의 컨트롤러의 Iop(전류 값)의 변조형태는 컨트롤러의 특성상 소수점 한자리 까지만 변조가 이루어지는 문제점이 있다. 따라서 본 실험은 광경로차 즉 Object Beam과 Reference beam의 경로차를 4.4cm로 하고 변조해야 할 변조량은 Iop 80mA 기준으로 ±0.4mA로 변조하여 측정하였다(광경로차가 4.4cm일 때 변조해야 할 변조량은 0.4mA이다). 보다 정확한 위상지도를 얻고 PZT와의 값을 비교하게 위해서 0.1mA-0.7mA까지 값을 구하여 비교하였다.

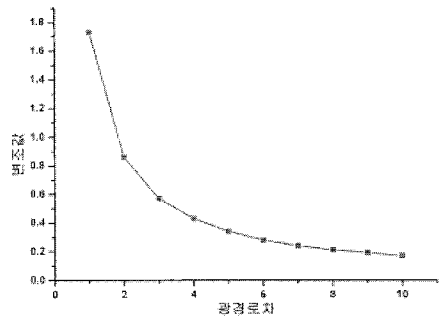


Fig. 7 Modification volume of optical-path difference

### 3.4 실험순서

알루미늄 시험편에 변형여기 방법으로 Steel Translation Stage를 사용하였다. 시험편의 뒤에서 1mm씩 앞뒤로 변형을 주어가며 PZT를 사용한 ESPI 시스템과 모듈레이팅 레이저를 이용한 ESPI 시스템의 Phasemap을 비교하였다. 위상이동 장치로 PZT를 사용할 때에는 모듈레이팅을 하지 않고 기

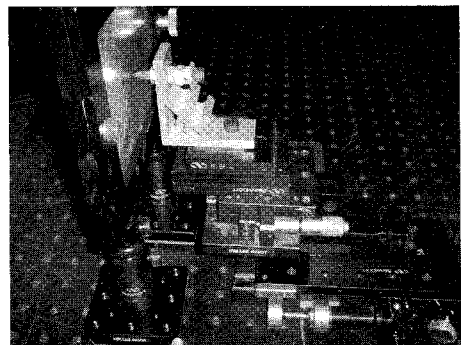


Fig. 8 Steel translation stage

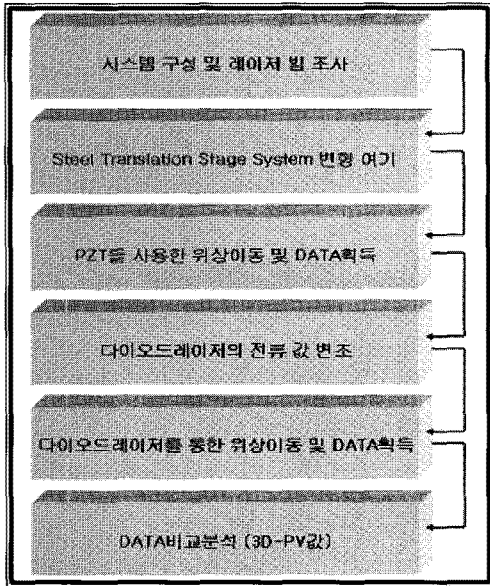


Fig. 9 Flow chart

존의 방법대로 Phasemap 을 얻어냈으며, 모듈레이팅 레이저를 이용한 ESPI 시스템에서는 단순히 PZT 를 Mirror 로써 사용하였으며, Fig. 9 는 실험순서도를 나타낸 것이다.

3.5 실험결과

실험순서에 따라 위상이동장치로써 PZT 와 레이저다이오드를 사용하여 Fig. 10~Fig. 12 처럼 3.5  $\mu\text{m}$ , 4.0  $\mu\text{m}$ , 4.5  $\mu\text{m}$  범위에서 각각의 Phasemap, Unwrapping, 3D 를 비교 분석해 보았다. 동일한 영역의 grip 통하여 micro star 라는 프로그램에서 동일하게 filtering 을 하였다. 변형 전/후에 얻은 4 개의 스펙클 간섭무늬영상은 4-buckets 위상이동 알고리즘으로 각각 처리하고 PZT 를 위상이동장치로 사용했을 때의 pick value(변형량)값들을 비교하였다.

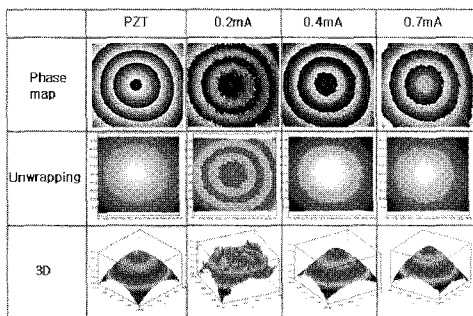


Fig. 10 Data of 3.5  $\mu\text{m}$

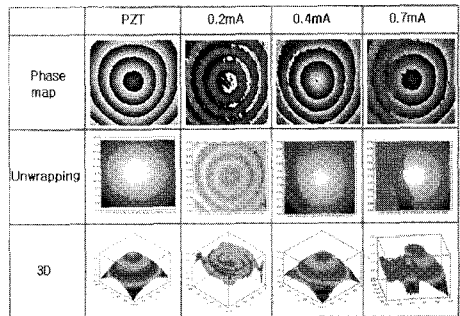


Fig. 11 Data of 4.0  $\mu\text{m}$

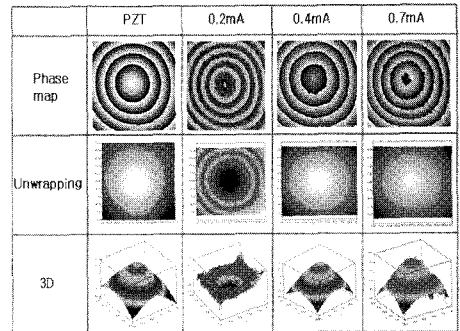


Fig. 12 Data of 4.5  $\mu\text{m}$

다이오드 레이저의 전류 값의 변조에 따른 위상이동을 통한 Data 를 얻는데 있어서 Fig. 13~Fig. 16 처럼 오차를 분석할 수 있다.

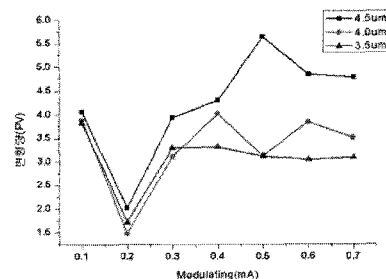


Fig. 13 Modification volume of modulating graph

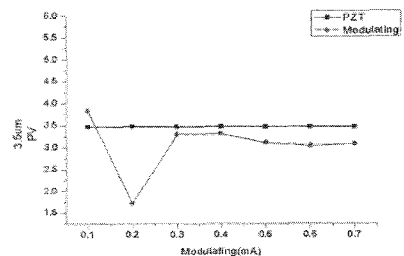


Fig. 14 PZT, Modulating graph of 3.5  $\mu\text{m}$

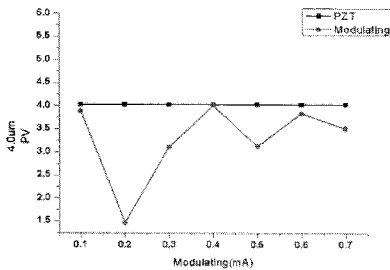


Fig. 15 PZT, Modulating graph of 4.0µm

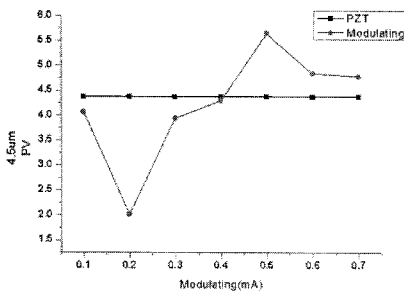


Fig. 16 PZT, Modulating graph of 4.5µm

Table 1 Error rats of PZT, Modulating

	PZT	Modulating	PZT error(%)	Modulating error(%)
3.5 µm	3.474	3.316	0.7	5.2
4.0 µm	4.024	4.020	0.6	1.05
4.5 µm	4.368	4.301	2.9	4.4

본 실험에서 Table 1 에 나타난 것처럼 PZT 는 자체 비선형 오차를 가지는 특징상 오차를 나타내지만 현재까지는 상용화된 PZT 장비에 대한 신뢰도가 높은 것에 비해 Modulating 측정을 비교했다. Fig. 13 은 0.1~0.7 까지 변조했을 때의 변조 특성을 나타내며, Fig. 14~1 은 실제 변조량 대비 PZT 측정값과 모듈 레이팅 측정값을 그래프로 나타낸 것이다. 그래프의 값들을 Table 1 같이 정리하면 오차 범위가 6%이내에 포함되기 때문에 다이오드 레이저의 전류 값 변조를 통한 측정이 가능하다. PZT 를 이용하여 변형량과 모듈레이팅 레이저의 전류값의 변조에 따른 변형량의 측정 결과 PZT 와의 변조량에 비해 큰 오차를 나타내지 않는 것을 볼 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 ESPI 시스템에 관한 연구가 활발히 이루어지는 가운데, 기존의 위상이동장치로써 PZT 를 사용하여 시스템을 구성하고 Data 를 얻는데 상용화 된 장비로서 고가임에도 불구하고 자리를 잡으면서 ESPI 시스템에 사용되어 왔다. 본 연구를 통해서 다이오드 레이저의 전류 값 변조를 이용한 ESPI 시스템 개발에 관한 연구하였다. 다이오드 레이저의 전류 값 변조를 이용하여 ESPI 시스템을 구성하는데 있어서 알고리즘의 개발과 더불어 PZT 와의 측정 결과에 대한 다이오드 레이저의 전류 값의 변조를 통해 측정 대상체의 변형 전/후에 얻은 4 개의 스펙클 간섭무늬 영상은 4-bucket 위상이동 알고리즘으로 각각 처리하여 이미지 패턴을 획득하고, 획득된 영상으로부터 위상지도(Phasemap)와 Unwrapping, 3D 를 얻어 PZT 를 위상이동장치로 사용했을 때의 위상지도, Unwrapping, 3D 를 비교 하였고, 프로그램을 구현하였다. 각각 PZT 와 Modulating 을 통해 얻은 3D 이미지에서의 Peak Value 의 값들을 비교했을 때 6%안의 오차 범위 안에서 결과 값을 얻어 다이오드 레이저를 이용한 Modulating ESPI 시스템 구현이 가능하였다. 본 논문에서 연구한 시스템의 최대 장점은 위상이동장치로써 자체 비선형오차를 갖는 PZT 를 사용하지 않는다는 것이다. PZT 를 사용하지 않음으로써 비용절감과 광학 실험 설계 시 공간을 효과적이고 간단한 구성 효과를 얻을 수 있다. 다이오드 레이저의 Controller 의 LabVIEW 8.2 로 구성된 GPIB 통신을 이용하여 ESPI System 알고리즘의 완성과 다이오드 레이저의 전류변조에 의한 위상지도를 구함으로서 알고리즘구성에 따른 ESPI 의 측정이 가능하게 되었다. 더불어 Unwrapping 과 3D 까지 얻는데 문제는 없었지만, 다이오드 레이저의 Controller current 변조가 소수점 한자리까지 국한되어 있어서 보다 Detail 한 변조 값이 필요하다. 이 연구를 통한 현재 ESPIS System 의 PZT 장비를 대신하여 다이오드 레이저를 통해 측정이 가능할 수 있게 되었다. 이것은 실험 광학 설계가 간단하고, 저렴한 실험 장비의 비용 등에 장점이 있다. 또한 LabVIEW 8.2 를 이용한 측정 알고리즘의 구성은 기존의 측정 보다 높은 가시도와 작동의 간결성, 빠른 정보를 얻을 수 있다. 향후 연구에서 파장 측정기 등을 이용한 정확한 위상이동의 파장을 분석과 좀 더 다양한 시편에 의한 시편의 변형에 대한 실험을 통해 오차범위를 줄이는 연구가 필요 할 것이다.

## 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. 3-4, 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," *Proc. 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," *Proc. 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, 2002.
7. Wang, X., Wang, X., Qian, F., Chen, G., 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. 1949-1953, 2002.
9. Ku, J., Youm, J. and Chee, C., "A Study on real time measuring microscopic movements in sinusoidal phase modulating interferometry using a laser diode," *KIIEE Annual Autumn Conference*, pp. 23-27, 1990.
10. 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.
11. Lee, K. Y., Kang, Y. J., Park, N. K. and Lee, D. H., "Development of ESPI System Using a Modulating LASER," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 25, No. 3, pp.93-100, 2008.
12. 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.