



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2021년 8월
박사학위논문

셰이커를 이용한 임의의 위상 추출 방식
디지털 홀로그래피를 이용한
ITO 박막의 단차 측정에 대한 연구

조선대학교 대학원

기계시스템 · 미래자동차공학과

정 현 일

셰이커를 이용한 임의의 위상 추출 방식
디지털 홀로그래피를 이용한
ITO 박막의 단차 측정에 대한 연구

A Study on the Measurement of Height Difference of ITO Thin Film through
Random Phase Extraction from Shaker Vibration using Digital Holography

2021년 8월 27일

조선대학교 대학원

기계시스템 · 미래자동차공학과

정 현 일

셰이커를 이용한 임의의 위상 추출 방식
디지털 홀로그래피를 이용한
ITO 박막의 단차 측정에 대한 연구

지도교수 김 경 석

이 논문을 공학 박사학위신청 논문으로 제출함

2021년 4월

조선대학교 대학원

기계시스템 · 미래자동차공학과

정 현 일

정현일의 박사학위논문을 인준함

위원장	조선대학교	교수	<u>김재열 (인)</u>
위원	포항공과대학교	명예교수	<u>홍정기 (인)</u>
위원	조선대학교	교수	<u>정현철 (인)</u>
위원	무진기공(주)	연구소장	<u>장호섭 (인)</u>
위원	조선대학교	교수	<u>김경석 (인)</u>

2021년 6월

조선대학교 대학원

목 차

LIST OF FIGURES	iii
LIST OF TABLES	vii
Nomenclatures	viii
Abstract	ix
제 1 장 Introduction	1
제 2 장 Theory	3
제 1 절 Digital Holography	3
제 2 절 Phase Extraction	12
1. Phase Shifting	12
2. Interframe Intensity Correlation(IIC) method	14
3. Unwrapping	18
제 3 장 Experimental Equipment and Specimen	20
제 1 절 Phase Shifting Digital Holography with Shaker ..	20
제 2 절 Experimental Equipment	22
1. Shaker	22
2. Arbitrary/Function Generator	23

제 3 절 ITO Thin film made with Sputtering Method	24
제 4 절 FE-SEM	25
제 4 장 Experiment Results	26
제 1 절 Results of Frequency Height Difference Measurements using Shaker	26
제 2 절 Measurement of FE-SEM	105
제 5 장 Conclusion	107
Reference	109

LIST OF FIGURES

Fig. 2-1 Interferometer	4
Fig. 2-2 Schematic Illustration of the Digital Holography Recording and Reconstruction	5
Fig. 2-3 Schematic Illustration of the Coordinate System for Numerical Reconstruction	8
Fig. 2-4 Unwrapping	19
Fig. 3-1 Schematic Illustration of the Mach-Zehnder Interferometer	20
Fig. 3-2 Digital Holography System with Phase Extraction by Shaker	20
Fig. 3-3 Bruel & Kjaer, Mini Shaker Type 4810	22
Fig. 3-4 Arbitrary/Function Generator	23
Fig. 3-5 ITO Specimen with Sputtering Method	24
Fig. 3-6 FE-SEM	25
Fig. 4-1 Phase Extraction of Reference at 20 Hz	28
Fig. 4-2 Phase Extraction of Object at 20 Hz	29
Fig. 4-3 The Result of measuring the Height Difference at 20 Hz	30
Fig. 4-4 Phase Extraction of Reference at 30 Hz	31
Fig. 4-5 Phase Extraction of Object at 30 Hz	32
Fig. 4-6 The Result of Measuring the Height Difference at 30 Hz	33
Fig. 4-7 Phase Extraction of Reference at 40 Hz	34
Fig. 4-8 Phase Extraction of Object at 40 Hz	35
Fig. 4-9 The Result of Measuring the Height Difference at 40 Hz	36
Fig. 4-10 Phase Extraction of Reference at 50 Hz	37
Fig. 4-11 Phase Extraction of Object at 50 Hz	38
Fig. 4-12 The Result of Measuring the Height Difference at 50 Hz	39
Fig. 4-13 Phase Extraction of Reference at 60 Hz	40

Fig. 4-14 Phase Extraction of Object at 60 Hz	41
Fig. 4-15 The Result of Measuring the Height Difference at 60 Hz	42
Fig. 4-16 Phase Extraction of Reference at 70 Hz	43
Fig. 4-17 Phase Extraction of Reference at 70 Hz	44
Fig. 4-18 The Result of Measuring the Height Difference at 70 Hz	45
Fig. 4-19 Phase Extraction of Reference at 80 Hz	46
Fig. 4-20 Phase Extraction of Object at 80 Hz	47
Fig. 4-21 The Result of Measuring the Height Difference at 80 Hz	48
Fig. 4-22 Phase Extraction of Reference at 90 Hz	49
Fig. 4-23 Phase Extraction of Object at 90 Hz	50
Fig. 4-24 The Result of Measuring the Height Difference at 90 Hz	51
Fig. 4-25 Phase Extraction of Reference at 100 Hz	52
Fig. 4-26 Phase Extraction of Object at 100 Hz	53
Fig. 4-27 The Result of Measuring the Height Difference at 100 Hz	54
Fig. 4-28 Phase Extraction of Reference at 110 Hz	55
Fig. 4-29 Phase Extraction of Object at 110 Hz	56
Fig. 4-30 The Result of Measuring the Height Difference at 110 Hz	57
Fig. 4-31 Phase Extraction of Reference at 130 Hz	58
Fig. 4-32 Phase Extraction of Object at 130 Hz	59
Fig. 4-33 The Result of Measuring the Height Difference at 130 Hz	60
Fig. 4-34 Phase Extraction of Reference at 140 Hz	61
Fig. 4-35 Phase Extraction of Object at 140 Hz	62
Fig. 4-36 The Result of Measuring the Height Difference at 140 Hz	63
Fig. 4-37 Phase Extraction of Reference at 160 Hz	64
Fig. 4-38 Phase Extraction of Object at 160 Hz	65
Fig. 4-39 The Result of Measuring the Height Difference at 160 Hz	66
Fig. 4-40 Phase Extraction of Reference at 170 Hz	67

Fig. 4-41 Phase Extraction of Object at 170 Hz	68
Fig. 4-42 The Result of Measuring the Height Difference at 170 Hz	69
Fig. 4-43 Phase Extraction of Reference at 180 Hz	70
Fig. 4-44 Phase Extraction of Object at 180 Hz	71
Fig. 4-45 The Result of Measuring the Height Difference at 180 Hz	72
Fig. 4-46 Phase Extraction of Reference at 190 Hz	73
Fig. 4-47 Phase Extraction of Object at 190 Hz	74
Fig. 4-48 The Result of Measuring the Height Difference at 190 Hz	75
Fig. 4-49 Phase Extraction of Reference at 200 Hz	76
Fig. 4-50 Phase Extraction of Object at 200 Hz	77
Fig. 4-51 The Result of Measuring the Height Difference at 200 Hz	78
Fig. 4-52 Phase Extraction of Reference at 210 Hz	79
Fig. 4-53 Phase Extraction of Object at 210 Hz	80
Fig. 4-54 The Result of Measuring the Height Difference at 210 Hz	81
Fig. 4-55 Phase Extraction of Reference at 220 Hz	82
Fig. 4-56 Phase Extraction of Object at 220 Hz	83
Fig. 4-57 The Result of Measuring the Height Difference at 220 Hz	84
Fig. 4-58 Phase Extraction of Reference at 260 Hz	85
Fig. 4-59 Phase Extraction of Object at 260 Hz	86
Fig. 4-60 The Result of Measuring the Height Difference at 260 Hz	87
Fig. 4-61 Phase Extraction of Reference at 330 Hz	88
Fig. 4-62 Phase Extraction of Object at 330 Hz	89
Fig. 4-63 The Result of Measuring the Height Difference at 330 Hz	90
Fig. 4-64 Phase Extraction of Reference at 420 Hz	91
Fig. 4-65 Phase Extraction of Object at 420 Hz	92
Fig. 4-66 The Result of Measuring the Height Difference at 420 Hz	93
Fig. 4-67 Phase Extraction of Reference at 490 Hz	94

Fig. 4-68 Phase Extraction of Object at 490 Hz	95
Fig. 4-69 The Result of Measuring the Height Difference at 490 Hz	96
Fig. 4-70 Phase Extraction of Reference at 500 Hz	97
Fig. 4-71 Phase Extraction of Object at 500 Hz	98
Fig. 4-72 The Result of Measuring the Height Difference at 500 Hz	99
Fig. 4-73 Phase Extraction of Reference at 610 Hz	100
Fig. 4-74 Phase Extraction of Object at 610 Hz	101
Fig. 4-75 The Result of Measuring the Height Difference at 610 Hz	102
Fig. 4-76 Error Rate in Frequency	104
Fig. 4-77 Measurement of FE-SEM	105

LIST OF TABLES

Table 4-1 Specifications of Shaker	22
Table 4-2 Specifications of ARBITRARY/FUNCTION GENERATOR	23
Table 4-3. FE-SEM	24
Table 4-4. Result of Digital Holography	103
Table 4-5. Result of Error Rate	106

Nomenclatures

E	:	Wave
a	:	Amplitude of wave
ϕ	:	Phase of wave
*	:	Conjugate
U	:	Complex amplitude
η	:	Y-axis of object plane
ξ	:	X-axis of object plane
η'	:	Y-axis of image plane
ξ'	:	X-axis of image plane
d	:	Distance from object plane to hologram plane
d'	:	Distance from hologram plane to image plane
k	:	Wave number
\hat{U}	:	Fourier transform of complex amplitude
λ	:	Wave length
I	:	Irradiance
\dagger	:	Transposed matrix
Φ	:	Wrapped phase

ABSTRACT

A Study on the Measurement of Height Difference of ITO Thin Film through Random Phase Extraction from Shaker Vibration using Digital Holography

HyunIl Jung

Advisor : Prof. Kyeong-Suk Kim, Ph.D.

Dept. of Mechanical Engineering,

Graduate School of Chosun University

Organic Light Emitting Diodes (OLED) is a thin film that is widely used for light-emitting electrodes on display panels such as mobile phones and TVs due to their fast response speed. These OLEDs use Transparent Conducting Oxides (TCO) because they are affected by the electrical properties of anode electrodes. Among them, Indium Tin Oxide (ITO) with excellent electrical properties and 85% or more visible light transmittance is used. Deposition methods are largely divided into two categories as follows; Physical Vapor Deposition (PVD) and Chemical Vapor Deposition (CVD), and PVD is typically used. Accuracy and uniformity of the pattern and height of the circuit are important for high density integration of the circuit. The optical transmittance and electrical conduction characteristics of thin films are sensitive, so that the various defects are occurred in kinds of poor transmittance and open circuit, if the characteristics vary depending on the manufacturing process or the circuit is not accurately deposited. Various equipment such as SEM (Scanning Electron Microscopy), AFM (Atomic Force Microscopy), Alpha Step, and Surface Profilers are used to examine the geometric structure of the thin films. However, these methods have a problem that if not measured by conductive metal coating such as Au and Pt, severe image distortion can occur, causing damage to the object. Also, the size of the object to be measured is limited. As a way to compensate for these shortcomings,

non-destructive, non-contact digital holographic instruments with fast measurement time was used.

Holography was first started by D. Gabor. If the coherent reference wave and the objective wave which is diffracted or scattered by the object interfere and the interference fringe is formed, it has the information of the amplitude and phase of combined waves. Because it is possible to obtain the original image by reproducing the information of reference wave, Holos or Gram, meaning "complete recording", and Photography, were combined to create holography, meaning a technique to record and regenerate information about the combined waves. Through the continuous study of Holography, the diffraction of waves can be calculated numerically so that its 3D image can be regenerated. As a result of the development of the computer, it is possible to record and play the film using a CCD (Charge Coupled Device) and a computer instead of using the film to record it in existing holographies. This is called digital holography. With advantages such as short measurement time, non-contact, and non-destructive testing methods, Holography is widely applied to MEMS and NEMS industries, biology, and others. However, because precise phase shifting should be provided for the precise measurement, the measurement environment is limited to the laboratories. Recently, IIC techniques have been developed, and research has been conducted on digital holography measurements that are resistant to disturbance. A study was conducted to increase the applicability of the field, and instead of precise phase shifting, vibration is given and the phase shifting status is arbitrarily extracted by video measurement of the phase movement status in this vibration.

In this work, test pieces by depositing ITO up to a height of 150 nm, which is mainly used for OLED using the PVD method were produced. Height differences were measured using digital holography techniques by adding vibration in accordance with frequency through a shaker and extracting desired phase. The results are compared with those of the ITO thin film measured by FE-SEM, it was confirmed that the performance of the digital holography system used in this study is useful. From the result, the frequency bands available for phase shift could be identified. Through this study, the disadvantages of digital holography affected by disturbance supplemented so that it can be used in industrial sites.

제 1 장 Introduction

전기에 자극을 받아 빛을 발산하는 자체발광형 유기물질인 유기발광소자(Organic Light Emitting Diodes, OLED)는 박막이며 응답 속도가 빠르다는 등의 장점을 가져 휴대폰이나 TV와 같은 디스플레이 EL패널의 발광면 전극, 액정 패널, 조명 등에 쓰인다. 여기에서 전기적 특성은 양극 전극의 영향을 받는데 투명 전도성 산화막(Transparent Conducting Oxides, TCO)을 사용한다 [1-6]. 우수한 전기적 특성과 가시광선 85 % 이상의 높은 투과율을 가지고 있는 인듐주석산화물(Indium Tin Oxide, ITO)을 사용한다 [6-11]. 집적회로를 증착하는 방법은 크게 물리적 기상증착(Physical Vapor Deposition, PVD)과 화학적 기상증착(Cheical Vapor Deposition, CVD)인 방법이 있는데 PVD는 원하는 고체의 타겟을 물리적인 작용으로 기판 위에 박막을 증착하는 방법이다. 주로 Grove가 1852년에 처음 개발한 PVD 방법 중 진공증착법의 일종인 스퍼터링 공법을 Cr, Al, Mo 등 박막을 증착하는데 이용된다 [12-15]. 높은 운동에너지의 이온이 타겟 표면에서 충돌해 표면 원자들 역시 높은 운동에너지를 가진 채 진공으로 떨어져 나온다. 플라즈마 속의 Ar 양이온을 가속시켜 기판에 충돌하여 기판에 침착되면서 박막이 형성된다 [16-17]. 회로 고집적화를 위해서는 회로의 패턴, 높이 등 정확도와 균일성이 중요하다. 광 투과율, 전기전도 특성 등은 민감하여 제작 공정에 따라 특성이 달라지고 회로가 정확하게 증착되지 않을 경우 투과율 불량, 단선 등의 여러 가지 불량으로 나타날 수 있어 박막의 형상을 검사하는 방법으로 SEM(Scanning Electron Microscopy), AFM(Atomic Force Microscopy), Alpha Step, Surface Profiler 등의 다양한 장비들이 사용되고 있다. 그러나 이러한 방법들은 Au, Pt 등의 전도성 금속 코팅을 하여 측정하지 않으면 심한 이미지 왜곡 현상이 발생할 수 있어 대상체에 손상이 갈 수 있다는 문제점이 있다. 또한, 측정하고자 하는 대상체의 크기가 제한되어 있어 작게 잘라서 측정해야 하는 단점이 있다 [18-21]. 이러한 단점을 보완할 수 있도록 측정할 대상물을 훼손해야 하는 계측 방법이 아닌 비접촉, 비파괴 검사인 광계측 분야의 위상이동 디지털 홀로그래피 기법을 측정에 활용할 수 있도록 하였다.

홀로그래피는 1948년 Dennis Gabor에 의해 간섭성을 가진 참조파가 대상체에 의해 회절이나 산란된 물체파가 동시에 있게 되면 진폭과 위상 정보를 가지고 있다. 참조파의 정보를 재생해 원 이미지를 획득할 수 있어 완전한(Holos), 기록하다(Graphein)이라는 말과 사진술(Photography)라는 말을 합성하여 물체의 파에 대한 정보를 기록하고 재

생하는 기술로 홀로그래피(Holography)가 쓰이게 되었다 [22-25]. Goodman과 Lawrence에 의해 홀로그램을 이용해서 수치적 재생하는 방법을 발견하였다 [26-27]. Kronrod가 컴퓨터를 이용해 이를 실현해내었다. 컴퓨터의 발전에 따라 기존 홀로그래피에서 기록할 때 필름을 사용하던 것 대신 CCD(Charge Coupled Device)와 컴퓨터를 이용해 기록과 재생을 할 수 있게 되었고 이를 디지털 홀로그래피라고 한다 [28-29]. 이렇게 발명된 홀로그래피는 MEMS, NEMS, PCB 기판, 바이오 분야와 같이 미세 물체를 제작하는 산업 분야, 3차원 디스플레이 등 여러 분야에서 정밀한 공정을 위해 측정 기술을 요구하는데 앞서 언급한 기존 측정 방법들의 단점으로 인해 최근 대안으로 디지털 홀로그래피를 이용한 3차원 형상 측정법이 대두되고 있다. 그러나 디지털 홀로그래피를 이용해 정밀한 측정을 위해서는 정밀한 위상이동이 선행되어야 하여 이를 위해서는 일반적으로 PZT Actuator를 이용한 정밀하게 위상을 제어한다. PZT Actuator는 높은 분해능을 가질수록 수 백만원에 달할 정도의 고가의 장비에 속한다. 이러한 장비를 사용하여도 위상이동 디지털 홀로그래피는 진동이나 소음과 같은 외란에서 단절된 실험적인 환경에서 측정을 진행하여야 한다. 즉, 측정 환경이 실험실에서의 실험에 국한되어 있었다.

최근 IIC(Interframe Intensity Correlation) 기법이 개발되며 이를 이용하여 외란에 강한 디지털 홀로그래피 측정에 대한 연구가 진행되고 있다. 정밀한 위상이동 대신 진동을 부가하고 이러한 진동 안에서 움직인 위상을 동영상으로 측정하고 임의로 원하는 위상이동을 획득하는 방식으로 디지털 홀로그래피의 측정으로 현장 적용성을 높이는 연구를 진행하였다 [30-31].

본 논문에서는 이와 같은 연구를 토대로 PVD 방법으로 ITO를 OLED에 주로 사용되는 높이인 150nm로 증착하여 단차 시험편을 제작하였다. Shaker와 Arbitrary/Function Generator를 이용해 주파수에 따른 진동을 부가하고 원하는 위상을 추출하는 방식으로 디지털 홀로그래피 기법을 이용해 단차를 측정하였다. FE-SEM 장비로 측정한 ITO 박막 단차와 비교를 통해 본 연구에서 사용한 디지털 홀로그래피 시스템의 성능을 검증할 수 있도록 하였다. 이를 통해 위상이동으로 사용 가능한 주파수 대역을 확인하였다. 본 연구를 통해 외란에 약한 디지털 홀로그래피의 단점을 보완하여 산업 현장에서 측정 가능하도록 적용 가능한 주파수 대역에 대해 연구하였다.

제 2 장 Theory

제 1 절 Digital Holography

홀로그래피는 하나의 광원을 두 개로 나눠 참조로 하는 파와 대상체의 정보를 담고 있는 물체파가 만나 간섭을 일으키고 이 간섭무늬에서 복사조도와 위상 정보도 가지고 있어 대상체에서 반사되는 파와 똑같은 진폭과 위상을 갖는 파를 발생시키면 대상체에 대한 3차원 이미지로 재생, 즉 복원할 수 있다. 홀로그래피는 간섭계를 정렬을 시킨 In-line과 정렬이 틀어진 Off-axis 두 가지로 나뉘는데 실제 이미지와 가상 이미지가 DC 항이 겹쳐져 선명한 이미지를 얻기 힘들어 Off-axis 홀로그래피로 DC 항을 나눌 수 있도록 하였다. 하지만 조사각이 커지며 대상체에서 회절된 물체파가 CCD 상면에서 참조파와 만나 간섭을 일으켜야 하는데 CCD로 측정하는 것이 힘들다는 문제점이 있었다 [32-37]. 이 문제를 해결하기 위해 현재 주로 쓰이는 위상이동 디지털 홀로그래피를 Yamaguchi가 개발하였다. 참조파를 정해진 값만큼 위상을 이동시키는 방식으로 변수를 줄여 위상이 이동된 간섭무늬를 통해 복소진폭을 획득하고 푸리에 변환으로 면에 재생하는 것이다. 주로 위상이동에는 PZT Actuator를 사용하며 앞서 언급한 문제점이 해결되나 위상이동 장치가 정밀하여야 한다는 또 다른 문제점이 있다 [38-40].

홀로그래피 간섭계는 반사형 대상체를 측정할 경우 마이켈슨(Michelson) 간섭계, 투과형 대상체를 측정해야 하는 경우 마하젠더(Mach-Zehnder) 간섭계를 사용한다. 가간섭성이 좋은 레이저를 광원으로 하여 한 개의 파장을 분리시켜 각각의 경로로 이동한 후에 하나는 참조파로 위상을 이동시키는 용도로 사용하고 하나는 대상체를 투과하거나 반사해서 대상체에 대한 정보를 가지고 두 파가 만나며 중첩되어 간섭을 발생시킨다. 이 때, 가간섭거리보다 광경로차가 작아야 한다 [41].

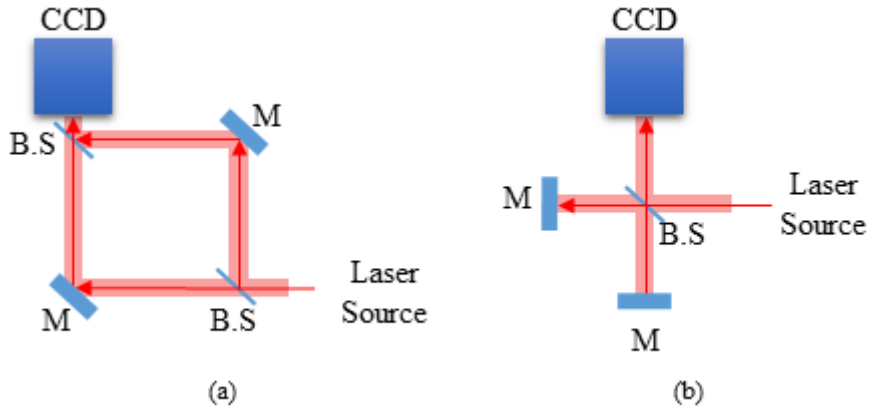


Fig. 2-1 Interferometer (a) Mach-Zehnder Interferometer
(b) Michelson Interferometer

파동은 발생원을 중심으로 사방으로 퍼지는데 동일한 위상이 떨어진 지점을 연결하여 생기는 선이나 면을 파면이라고 하며 동심원 형태로 바깥쪽으로 진행하여 구면파라 한다. 발생원으로부터 이 구면파가 멀어지면 곡률 반경이 증가하여 파면을 부분적으로 봤을 때 평면에 가까워진다. 이렇게 멀어져서 부분적으로 봤을 때 파면끼리 평행하게 보이면 평면파라고 본다. 이는 단일 주파수를 가지고 있어 진폭의 변화가 사인이나 코사인 함수로 나타나며 임의의 방향으로 이동하는 시간 독립적인 파는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$A(r) = A_m \cos(k \cdot r) \quad (2-1)$$

$A(r)$ 은 주어진 시공간 내에서 파장의 크기, A_m 은 최대 진폭, r 은 위치 벡터, k 는 라디안 공간 주파수 또는, 파수로 $k = 2\pi/\lambda$ 와 같으며 λ 는 파장이다. $k \cdot r$ 은 위상을 뜻한다. 파동 방정식은 오일러 법칙을 이용해 복소 진폭을 eq. 2-2로 나타내며 자연지수 \exp 와 허수 i 를 사용한다.

$$U(r) = A_m \exp(i\varphi) \quad (2-2)$$

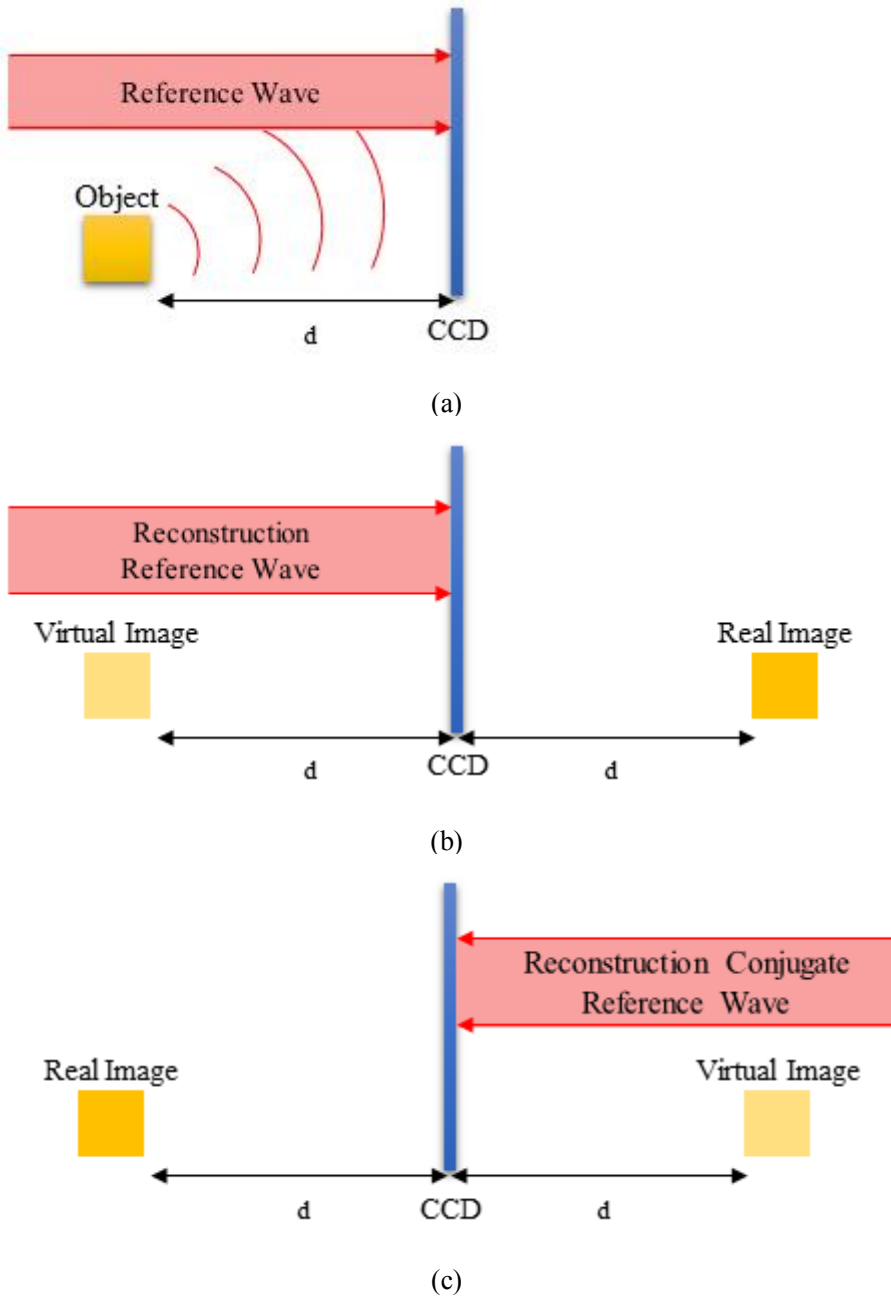


Fig. 2-2 Schematic Illustration of the Digital Holography Recording and Reconstruction (a) Recording (b) Reconstruction with Reference Wave (c) Reconstruction with Conjugate Reference Wave

Fig. 2-2에 레코딩과 재생하는 원리를 나타내었는데 이 중 (a)에 CCD 상면과 거리 d 만큼 떨어진 곳에서 오는 참조파와 물체파가 CCD 상면에서 간섭을 일어나도록 하여 간섭무늬를 획득할 수 있도록 하는 재생에 대해 나타내었다. (b)에 재생하는 원리에 대해 나타내었다. 참조파에 의해 물체를 재생하면 실제 이미지는 물체가 있던 곳과 반대 방향에 생기고 원래 물체가 있던 곳에는 허상이 자리한다. 이 상태에서 측정하면 이미지에 왜곡이 생겨 결과에 에러가 발생하기 때문에 (c)에 나타낸 것과 같이 복소공액(Conjugate)을 이용하여 이미지가 왜곡되는 문제를 해결한다. CCD는 광량에 대한 정보만 가지고 있기 때문에 위상과 진폭에 대한 정보는 수치적으로 획득해야 하며 물체파의 복소진폭은 파동 이론에 의해 참조파인 $E_r(x,y)$ 에서 a_r 은 진폭, φ_r 은 위상으로 다음 eq. 2-3처럼 표현된다.

$$E_r(x,y) = a_r(x,y)\exp(i\varphi_r(x,y)) \quad (2-3)$$

마찬가지로 물체파인 $E_o(x,y)$ 의 진폭을 a_o , 위상을 ϕ_o 이라 하면 eq. 2-4와 같이 표현된다.

$$E_o(x,y) = a_o(x,y)\exp(i\phi_o(x,y)) \quad (2-4)$$

참조파와 물체파가 만나 중첩되어 CCD에서 간섭을 일으키고 기록된다. 참조파와 물체파의 간섭에 의한 강도(Intensity) 분포와 비례해 계산된다.

$$\begin{aligned} h(x,y) &= |E_r(x,y) + E_o(x,y)|^2 \\ &= (E_r(x,y) + E_o(x,y))(E_r(x,y) + E_o(x,y))^* \\ &= |E_r|^2 + |E_o|^2 + E_r E_o^* + E_r^* E_o \end{aligned} \quad (2-5)$$

기록한 간섭무늬에서 물체의 정보를 재생하기 위해 eq. 2-5에 참조파의 복소진폭을 곱하면 eq. 2-6과 같다.

$$E_r(x,y)h(x,y) = (|E_o|^2 + |E_r|^2)E_r + |E_r|^2E_o + |E_r|^2E_o^* \quad (2-6)$$

위 식에서 $|E_r|^2$ 은 참조파의 세기를 의미하며 $|E_o|^2$ 은 물체파의 세기로 이 세기들은 홀로그래피에서 에러의 원인이 되는 DC 성분 항으로 파가 물체를 통해 바로 CCD에 기록되는 0차 회절이다. 따라서 $(|E_o|^2 + |E_r|^2)E_r$ 항은 디지털 홀로그래피 재생에서는 배제하여도 된다. $|E_r|^2E_o$ 은 물체파에 의해 재생된 허상(Virtual Image)이고 $|E_r|^2E_o^*$ 은 실제 이미지(Real Image)이다. 허상 이미지는 Fig. 2-2의 (b)에 나타난 것처럼 본래 물체의 자리에 놓이게 되고 실제 이미지는 CCD 기준 반대편에 놓이며 공간적인 복소 인자인 E_r^2 로 인해 왜곡된 결과가 나온다. 이미지가 왜곡되지 않은 상태로 획득하기 위해 eq. 2-5에 참조파의 복소공역을 곱하면 eq. 2-7과 같다. 허상인 $|E_r|^2E_o$ 에서 E_r^{*2} 가 복소수 제곱이 되고 왜곡 없는 원 물체 정보를 재생할 수 있다.

$$E_r^*(x,y)h(x,y) = (|E_o|^2 + |E_r|^2)E_r^* + |E_r^*|^2E_o + |E_r^*|^2E_o^* \quad (2-7)$$

Fig. 2-3은 수치적 재생을 하기 위한 좌표계를 나타낸 것으로 CCD 즉, 홀로그램 면과 물체 면과의 거리를 d , 홀로그램 면과 이미지 평면과의 거리를 d' 라고 한다. 수치적 재생을 할 때 필요한 복소진폭은 프레넬 변환을 하여야 하며 다음 eq. 2-8과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_h(x,y) = \iint U_o(\xi,\eta) \exp(ikd + ik\frac{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}{2d})d\xi d\eta \quad (2-8)$$

여기서 $U_o(\xi,\eta)$ 는 물체 면에서의 복소진폭, $U_h(x,y)$ 는 홀로그램 면에서의 복소진폭을 나타내고, d 는 물체 면과 홀로그램 면 사이의 거리를 의미하고, k 는 사용하는 광원에 대응하는 파수를 나타낸다.

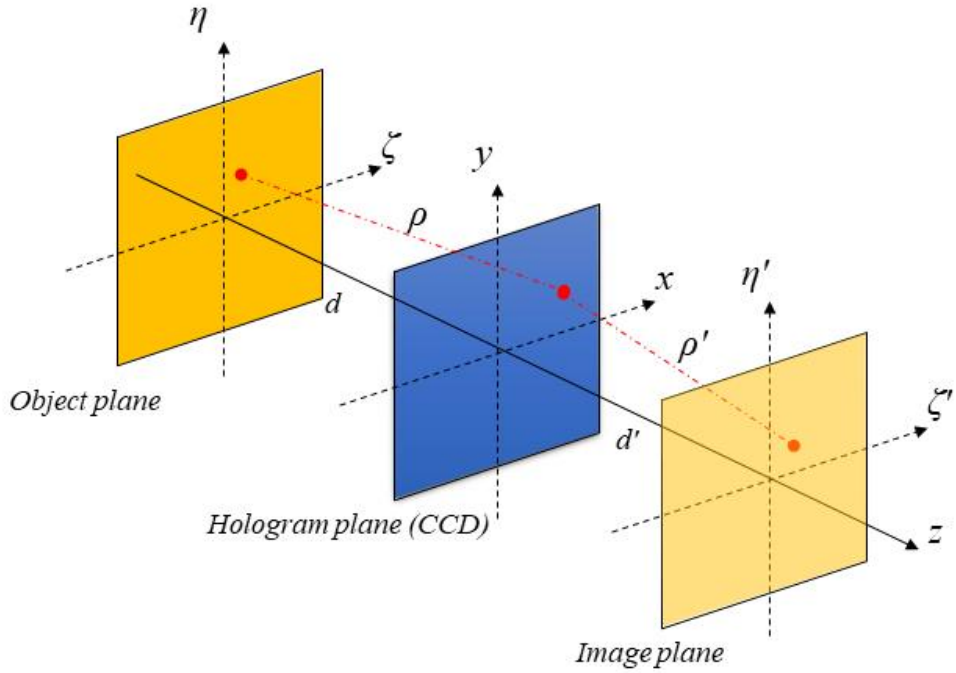


Fig. 2-3 Schematic Illustration of the Coordinate System for Numerical Reconstruction

다시 프레넬 변환하여 홀로그램 면에서 이미지 면의 복소진폭을 계산하게 되면 eq. 2-9로 표현될 수 있다. 이 때, 홀로그래피 면에 기록되는 정보는 디지털 신호로 저장되기 때문에 비연속적이며 기록되는 센서가 픽셀로 이루어져 그 크기가 유한해 CCD 센서의 크기에 대해 영향을 받는다.

$$U_i(\xi', \eta') = \iint U_h(x, y) \exp(ikd' + ik \frac{(\xi' - x)^2 + (\eta' - y)^2}{2d'}) dx dy \quad (2-9)$$

여기에 eq. 2-8을 대입하면 eq. 2-10이 되며

$$\begin{aligned}
 U_i(\xi', \eta') &= \exp\left[ik \left(d + d' + \frac{\xi'^2 + \eta'^2}{2d'} \right) \right] \\
 &\times \iint \iint U_o(\xi, \eta) \exp\left[ik \left\{ \left(\frac{x^2 + y^2}{2} \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{d'} \right) \right) \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \frac{\xi^2 + \eta^2}{2d} - x \left(\frac{\xi}{d} + \frac{\xi'}{d'} \right) - y \left(\frac{\eta}{d} + \frac{\eta'}{d'} \right) \right\} \right] d\xi d\eta dx dy \quad (2-10)
 \end{aligned}$$

여기에 $\xi' = \xi$, $\eta' = \eta$, $d' = -d$ 를 적용하면 eq. 2-11 이 되며 이를 통해 홀로그램 면에서 이미지를 재생할 수 있다. 이미지를 재생할 때 각 스펙트럼과 푸리에 변환을 적용하는 방법이 주로 사용된다 [42].

$$U_i(\xi', \eta', -d) = U_o(\xi, \eta) \quad (2-11)$$

이렇게 회절하는 이미지 계산을 위해 대표적으로 사용되는 것은 각 스펙트럼과 푸리에 변환의 컨볼루션(convolution)을 적용하는 방법이 있다. 이 때, 컨볼루션은 eq. 2-8 의 이미지 면상에서 복소진폭과 포물선 형태의 위상항과의 컨볼루션 적분으로 표현하는 것이다 [43].

$$\begin{aligned}
 U_i(\xi', \eta') &= \exp(ikd') \iint U_h(x, y) \exp\left(ik \frac{(\xi' - x)^2 + (\eta' - y)^2}{2d'} \right) dx dy \\
 &= \iint U_h(x, y) g(\xi' - x, \eta' - y) dx dy \\
 &= U_h * g \quad (2-12)
 \end{aligned}$$

$$g(x, y) = \exp\left(ik \frac{x^2 + y^2}{2d'} \right)$$

CCD 면에서의 물체에 대한 복소 위상의 역 푸리에 변환을 곱한 후 푸리에 변환을 적용하게 되면 구하고자 하는 이미지 면에서의 복소 진폭을 단순하게 계산할 수 있다. 하지만 컨볼루션의 경우는 프레넬 근사를 사용하기 때문에 재생하고자 하는 거리가

CCD의 픽셀 크기보다 작게 되면 오차를 발생하는 문제를 가지기 때문에 프레넬 근사 없이 이미지를 재생할 수 있는 각 스펙트럼 방법을 적용할 수 있다. 물체파의 복소진폭을 푸리에 변환하면 eq. 2-13와 같다.

$$\begin{aligned}
 \hat{U}(f_x, f_y) &= \iint U(x, y; 0) \exp(-i2\pi(f_x x + f_y y)) dx dy \\
 U(x, y; 0) &= \iint \hat{U}(f_x, f_y) \exp(i2\pi(f_x x + f_y y)) df_x df_y
 \end{aligned}
 \tag{2-13}$$

여기서 CCD 면에서 복소 지수항인 $\exp(i2\pi(f_x x + f_y y))$ 는 진폭을 1로 갖는 평면파 $\exp(i2\pi(ax + \beta y + \gamma z)/\lambda)$, $\gamma = \sqrt{1 - a^2 - \beta^2}$ 와 같다. eq. 2-13은 eq. 2-14로 바꿀 수 있다.

$$\hat{U}\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}\right) = \iint U(x, y; 0) \exp\left(-i2\pi\left(\frac{\alpha}{\lambda}x + \frac{\beta}{\lambda}y\right)\right) dx dy
 \tag{2-14}$$

여기에서 $U(x, y; 0)$ 는 각 스펙트럼이며 d' 만큼 떨어진 이미지 면에서의 복소진폭은 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\hat{U}_i\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}; D\right) = \iint U_i(\xi', \eta'; d') \exp\left(-i2\pi\left(\frac{\alpha}{\lambda}\xi' + \frac{\beta}{\lambda}\eta'\right)\right) d\xi' d\eta'
 \tag{2-15}$$

$U(x, y; 0)$ 와 $\hat{U}_i\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}; d'\right)$ 의 관계에 따라 물체파가 진행할 때의 복소진폭이 바뀌는 것을 알 수 있으며 이미지 면에서의 복소진폭을 eq. 2-16으로 계산한다. eq. 2-17에 나타난 헬름홀츠 방정식을 만족하는지 확인할 수 있도록 eq. 2-18로 나타내고 계산하면 해는 eq. 2-19가 된다.

$$U_i(\xi', \eta'; d') = \iint \widehat{U}\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}; d'\right) \exp\left(i2\pi\left(\frac{\alpha}{\lambda}\xi' + \frac{\beta}{\lambda}\eta'\right)\right) d\frac{\alpha}{\lambda} d\frac{\beta}{\lambda} \quad (2-16)$$

$$\nabla^2 U_i + k^2 U_i = 0 \quad (2-17)$$

$$\frac{d^2}{dz^2} \widehat{U}_i\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}; d'\right) + \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 (1 - \alpha^2 - \beta^2) \widehat{U}_i\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}; d'\right) = 0 \quad (2-18)$$

재생 거리 z 를 d' 이라고 했을 때 물체파의 복소진폭은 eq. 2-19로 구할 수 있다.

$$\widehat{U}_i\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}; d'\right) = \widehat{U}\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}; 0\right) \exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{1 - \alpha^2 - \beta^2} d'\right) \quad (2-19)$$

이 물체파의 복소진폭은 푸리에 변환을 이용해 위상항인 h 의 곱을 적용하고 전체를 역푸리에 변환을 한다. 그러면 원하는 위치에서의 물체 이미지의 복소진폭 U_i 를 획득할 수 있게 된다. 이를 통해 각 스펙트럼 방법을 이용하면 프레넬 근사를 이용하지 않아도 되고 재생 즉, 이미지를 복원할 때 초점을 맞추는 재생 거리의 경계 조건이 존재하지 않게 되기 때문에 물체와 재생 거리의 정보가 불확실한 현미경 위상이동 디지털 홀로그래피 분야에 주로 적용하기 좋다.

$$\begin{aligned}
 U_i(\zeta, \eta; d') &= \iint \widehat{U}\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}\right) \exp\left(i\frac{2\pi d'}{\lambda} \sqrt{1 - \alpha^2 - \beta^2}\right) \exp\left(i2\pi\left(\frac{\alpha}{\lambda}\xi + \frac{\beta}{\lambda}\eta\right)\right) d\frac{\alpha}{\lambda} d\frac{\beta}{\lambda} \\
 &= \iint \widehat{U}(\xi, \eta) \exp\left(i\frac{2\pi d'}{\lambda} \sqrt{1 - (\lambda\xi)^2 - (\lambda\eta)^2}\right) \exp(i2\pi(f_x\xi + f_y\eta)) d\xi d\eta \quad (2-20)
 \end{aligned}$$

$$= F^{-1}\{\widehat{U} \cdot h\}$$

$$= F^{-1}\{F\{U\} \cdot h\}$$

$$h = \exp\left(i\frac{2\pi d'}{\lambda} \sqrt{1 - (\lambda\xi)^2 - (\lambda\eta)^2}\right) \quad (2-21)$$

제 2 절 Phase Extraction

1. Phase Shifting

위상이동 디지털 홀로그래피는 In-line과 Off-axis 홀로그래피의 구성이 가지는 문제를 해결하기 위해 Yamaguchi에 의해 개발된 것으로 이동 거리에 따른 간섭 이미지에 서 복소진폭에 대한 정보를 얻기 위해 정확한 위상을 이동시키는 것이 중요하다. 수 나노의 분해능으로 작동이 가능한 압전소자는 참조파가 진행되는 거울에 적용하여 참조파의 위상을 조절하고, 위상 변화에 따른 간섭무늬의 변화를 통해 물체파와 참조파의 위상차를 알 수 있게 된다. CCD로 받아들인 파의 세기 정보를 이용하여 위상차를 구할 수 있다. eq. 2-22는 위상이동에 의한 파의 세기이다.

$$I(x, y) = A + B\cos(\phi_o - \phi_r) \quad (2-22)$$

여기서 $A = A_r^2 + A_o^2$ 로 A_r^2 은 참조파, A_o^2 는 물체파의 전기장의 제곱에 비례하는 파의 세기이다. $B = 2\sqrt{A_r^2 A_o^2}$ 으로 A_r^2 와 A_o^2 이 동일한 광원일 경우 $B = 2A_r A_o$ 이다. 따라서 CCD에 의해 $I(x, y)$ 는 측정되어 아는 값이 되지만, $A, B, \phi_o - \phi_r$ 은 물체파를 재생하기 위한 변수로 작용한다. 파의 위상 변화에 대한 세기를 얻기 위해서는 사용한 광원의 파장보다 더 짧은 거리의 위상 변화가 필요하며, 이를 위해서는 분해능이 수 나노의 정밀도를 가지는 압전소자를 사용하여 참조파의 위상을 변화시킨다. 변수를 해결하기 위해 최소 3개 이상의 방정식이 필요하므로 이를 얻기 위해 120° 의 위상을 적용하면 eq. 2-23이 된다 [42, 44].

$$\begin{aligned}
 I_1(x, y) &= A + B\cos(\phi_o - \phi_r) \\
 I_2(x, y) &= A + B\cos(\phi_o - \phi_r + 120^\circ) \\
 &= A - B\left(\frac{\sqrt{3}\sin\phi + \cos\phi}{2}\right) \\
 I_3(x, y) &= A + B\cos(\phi_o - \phi_r + 240^\circ) \\
 &= A + B\left(\frac{\sqrt{3}\sin\phi - \cos\phi}{2}\right)
 \end{aligned} \tag{2-23}$$

eq. 2-23에서 $\phi_o - \phi_r$ 을 구하면 eq. 2-24가 나온다.

$$\phi = \arctan \frac{\sqrt{3}(I_3 - I_2)}{2I_1 - I_2 - I_3} \tag{2-24}$$

대표적으로 Owner-Petersen에 의해 개발된 4단계 위상이동이 노이즈를 감소시켜 안정적이어서 주로 쓰이며 eq. 2-25과 같으며 위상차는 eq. 2-26으로 표현된다.

$$\begin{aligned}
 I_1(x, y) &= A + B\cos(\phi_o - \phi_r) \\
 I_2(x, y) &= A + B\cos(\phi_o - \phi_r + 90^\circ) \\
 I_3(x, y) &= A + B\cos(\phi_o - \phi_r + 180^\circ) \\
 I_4(x, y) &= A + B\cos(\phi_o - \phi_r + 270^\circ)
 \end{aligned} \tag{2-25}$$

$$\phi = \arctan \frac{(I_4 - I_2)}{(I_1 - I_3)} \tag{2-26}$$

2. Interframe Intensity Correlation(IIC) Method

상기한 기존 위상이동법은 복소진폭에서 위상 정보만을 획득해 빠른 연산 속도와 높은 정확도를 가지나 파의 세기 정보는 없으며 위상이동이 정밀하지 않은 경우, 위상이동 자체의 오차로 인해 전체적인 정보 획득이 불완전하다는 문제점이 있다. 위상이동 오류를 처리하는 방법이 있지만 이를 적용하면 위상이동 이미지의 숫자와 이동 성능에 대한 제한이 있게 된다.

따라서 이를 해결하고자 압전소자의 비선형적인 이동에도 물체파의 복소진폭이 획득 가능한 IIC(Interframe intensity correction) Method를 적용하였다. IIC는 위상이동 이미지 사이의 변화에 대한 정보로 복소진폭을 획득할 수 있다. 위상이동이 δ 일 때 위상이동 이미지에 대한 세기는 다음 eq. 2-27로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 I(x,y) &= A + B \cos(\delta + \phi) \\
 &= A + B \cos\delta \cos\phi - B \sin\delta \sin\phi \\
 &= (1 \cos\delta \sin\delta) \begin{pmatrix} A \\ B \cos\phi \\ -B \sin\phi \end{pmatrix} = Da
 \end{aligned} \tag{2-27}$$

eq. 2-27을 통해 세기를 행렬로 나타낼 수 있어 위상 정보를 가지는 행렬 a 를 구할 수 있게 되며 eq. 2-28로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 a(x,y) &= (D^\dagger D)^{-1} D^\dagger I \\
 &= B \cos\phi - i B \sin\phi = B \exp(i\phi) \\
 &= a_r a_o \exp(i(\varphi - \varphi_r))
 \end{aligned} \tag{2-28}$$

위 식에서 참조파는 바로 CCD로 향하기 때문에 공간적으로 일정하다고 볼 수 있다. 위상 역시 일정하다는 가정 하에 a_r 과 φ_r 은 상수로 취급할 수 있어, 물체파의 복소진폭은 $U = a \exp(i\varphi)$ 라고 할 수 있다. eq. 2-28를 이용해 위상이동을 한 이미지로

복소진폭을 쉽게 얻을 수 있다. 위상이동 이미지가 여러 장 있으면 위상 변화 시 비선형적 움직임에 대한 오류가 제거된 복소진폭을 획득할 수 있다. 세기의 노이즈가 포함된 위상이동 이미지들은 eq. 2-29으로 표현할 수 있다.

$$I_{Mn}(x, y) = A_n + B_n \cos(\phi_{on} - \phi_{rn}) + \Delta I_{Mn} \quad (2-29)$$

여기서, $m = 1, 2, 3, \dots, M$, $n = 1, 2, 3, \dots, N$, 이며 M 은 위상이동 수 N 은 픽셀의 수, ΔI_{Mn} 은 측정 과정에서의 오류이다. 따라서 위 식을 행렬로 표현한 식이 eq. 2-30이다.

$$I = \frac{1}{2} Ua^\dagger + \Delta I \quad (2-30)$$

여기서 \dagger 는 $u_m \equiv \exp(i\phi)$ 과 $z_n \equiv B_n \exp(i\phi_{on})$ 의 공액 전치로, $3N+M-1$ 개의 변수와 Mn 의 방정식을 가지며 $M \geq 4$ 를 만족하면 방정식이 변수보다 개수가 많으므로 계산이 가능하다. 위상이동의 행렬인 UU 를 유추하게 되면 물체파의 복소진폭을 뜻하는 행렬 a 는 CCD로 획득한 위상이동 이미지인 I 행렬을 이용하여 계산할 수 있게 되며 다음 eq. 2-31, eq. 2-32와 같다.

$$U = \begin{pmatrix} u_1 & u_1^* & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ u_M & u_M^* & 1 \end{pmatrix} \quad (2-31)$$

$$a = \begin{pmatrix} z_1 & z_1^* & 2A_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ z_n & z_n^* & 2A_n \end{pmatrix} \quad (2-32)$$

또한, 노이즈가 제거된 a 를 획득하기 위한 상관 행렬 $C^{(1)}$ 는 eq. 2-33과 같다.

$$\begin{aligned}
 C^{(1)} &\equiv \frac{1}{N} H^\dagger \\
 &\simeq \frac{1}{4N} U a^\dagger a U^\dagger + \sigma_0^2 1_M
 \end{aligned}
 \tag{2-33}$$

여기에서 σ_0 는 세기 오류의 변화값, 1_M 은 M 차 단위행렬 그리고 N^{-1} 은 표준화 요소이며 σ_0 를 알기 위해서 μ 이 고유벡터에 대응하는 $C^{(1)}$ 의 고유치라고 했을 때 eq. 2-33은 $C^{(1)}\nu = \mu\nu$ 로 표현할 수 있으며, eq. 2-26을 해밀턴 행렬로 바꾸면 다음 eq. 2-34가 된다.

$$\frac{1}{4N} U a^\dagger A a^\dagger \nu \simeq (\mu - \sigma_0^2)\nu
 \tag{2-34}$$

해밀턴 행렬은 선형적으로 독립된 3개의 열을 가지고 있으며 음수가 아니기 때문에 $M \geq 4$ 를 만족하면 $U a^\dagger a U^\dagger / 4N$ 은 두 개 이상의 0인 고유치를 갖게 되고, $C^{(1)}$ 의 가장 낮은 고유치가 σ_0^2 임을 의미한다. 따라서 U 에 대한 반복적 대입으로 잡음이 제거된 상관 행렬 $C^{(ns)}$ 를 유도할 수 있게 된다.

$$C^{(ns)} \simeq \frac{1}{4N} U a^\dagger a U^\dagger
 \tag{2-35}$$

식(2-32)에 k 번째의 값 U_k 를 대체하여 계산하면 eq. 2-36이 나오며 U_k 는 임의로 선택한 초기 추측 값 U 를 k 번 반복하여 얻는다.

$$\hat{A}_k = (U_k^\dagger U_k)^{-1} U_k^\dagger C^{(ns)} U_k (U_k^\dagger U_k)^{-1}
 \tag{2-36}$$

여기서 $\hat{A}_k = a^\dagger a / N$ 라 하면 U_{k+1} 은 $C^{(ns)} = U'_{k+1} \hat{A}_k U_k^\dagger$ 가 되고 eq. 2-37이 된다.

$$U'_{k+1} = C^{(ns)} U_k (U_k^\dagger C^{(ns)} U_k)^{-1} U_k^\dagger U_k \quad (2-37)$$

초기값 U 는 참조파의 제로 위상으로 정의되어, U'_{k+1} 의 모든 열의 구성 요소가 열의 첫 번째 값으로 나뉘며, i 와 j 가 $1, 2, \dots, M$ 라고 하면

$$U_{k+1} = Proj\{U'_{k+1}\} = \begin{pmatrix} u'_k(i,j) \\ u'_k(1,j) \end{pmatrix} \quad (2-38)$$

U_k 와 U_{k+1} 의 차이들의 평균값이 첫 번째 항을 제외하고 임의 값보다 작으면 반복은 멈추게 된다. 물체의 복소 진폭에 대한 정보는 수렴된 U 를 eq. 2-30에 대입하지만 ΔI 는 고유치 연산을 통해 배제할 수 있다. 그리하여 최종적으로 eq. 2-39는 위상이 동 이미지에 담겨 있는 노이즈에 대한 정보를 감쇄시킨 물체파의 복소진폭과 같다는 것을 알 수 있다 [30-31, 45-47].

$$a = I^\dagger U (U^\dagger U)^{-1} \quad (2-39)$$

3. Unwrapping

복수 함수의 위상은 주요값 범위에서 정의되며, 주요값에서 본래의 위상을 얻어내는 것이 위상 결렬침이다. 이 위상 결렬침은 샘플링을 위한 최소한의 기준이 되는 나이퀴스트율에 의해 최소한의 샘플링비를 만족하는 겹침에 위상과 결렬침의 관계식은 eq. 2-40과 같다. 여기서 $\phi(x)$ 는 실제 위상, $\Phi(x)$ 은 위상 겹침, W 은 겹침의 연산자, N 은 정수이며, n 은 샘플링에 따른 상수이다 [48-49].

$$W\{\phi(a)\} = \Phi(a) = \phi(n) + 2\pi N \quad (2-40)$$

겹침 연산자는 위상 겹침이 $-\pi \leq \phi(n) \leq \phi$ 가 되게 하며, 이토 정리에 의해 겹침 위상과 실제 위상은 다음 eq. 2-41과 같이 나온다.

$$\Delta\phi(n) = \phi(n+1) - \phi(n), \Delta N(n) = N(n+1) - N(n) \quad (2-41)$$

위의 두 식을 이용하여 겹침에 대한 위상 차이를 eq. 2-42와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta [W\{\phi(n)\}] = \Delta\phi(n) + 2\pi\Delta N_1(n) \quad (2-42)$$

다시 eq. 2-42에 겹침 연산자를 적용하면 eq. 2-43이 된다.

$$W[\Delta\{W(\phi(n))\}] = W\{\Delta(\Phi(n))\} = \Delta\{\phi(n)\} + 2\pi[\Delta N_1(n) + N_2] \quad (2-43)$$

여기서 N_1 과 N_2 는 겹침 연산자를 두 번 적용한 것으로 겹침의 위상차가 다음 식 구간에 존재하도록 한다.

$$-\pi \leq \Delta\{\phi(n)\} \leq \pi \quad (2-44)$$

위상이동을 함으로써 알게 된 변형량을 정량적으로 표현하는 위상이 Arctangent 함수로 계산되기 때문에 불연속성인 톱니 모양으로 나타난다. 따라서 이러한 불연속성을 연속성으로 변환하여 위상 변화에 대응하는 변형 정보를 획득하기 위해 Arctangent 함수가 $0 \sim \pi$ 만큼 주기적으로 불연속이 되므로 $0 \sim 2\pi$ 까지 주기를 늘려 위상을 펼치는 과정을 거치며 eq. 2-45를 이용한다.

$$\phi_{unw} = \phi_w + (2\pi \times D) \quad (2-45)$$

여기서 ϕ_{unw} 는 결편침 위상 ϕ_w 는 겹침 위상, D 은 회절 차수이며, 결편침을 위한 차수의 결정은 위상 변화의 전과 후의 값을 비교하여 큰 단차를 찾는 방법을 주로 취한다. 따라서 각 픽셀에서 전과 후의 위상값을 비교하고 임의로 정한 단차 값과 비교하여 조건을 만족하면, 회절 차수를 증가 및 감소하는 방향으로 회절 차수를 구할 수 있게 된다. 최종적인 변위 값의 경우는 기하학적 구성으로 인해 감도 벡터를 고려하여 구할 수 있게 된다 [30-32, 45-47].

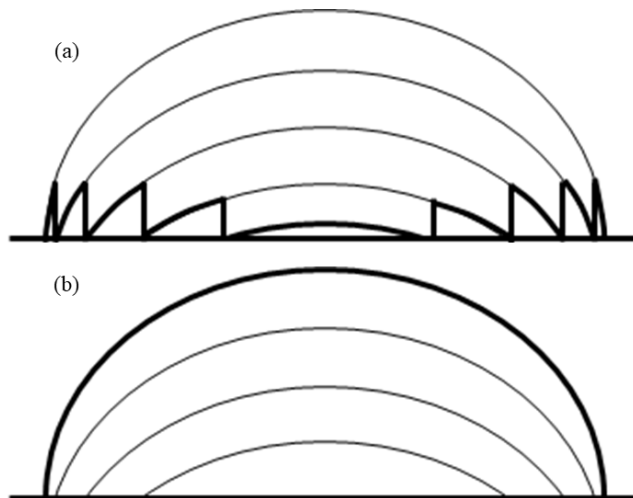


Fig. 2-4 Unwrapping

제 3 장 Experimental Equipment and Specimen

제 1 절 Phase Shifting Digital Holography with Shaker

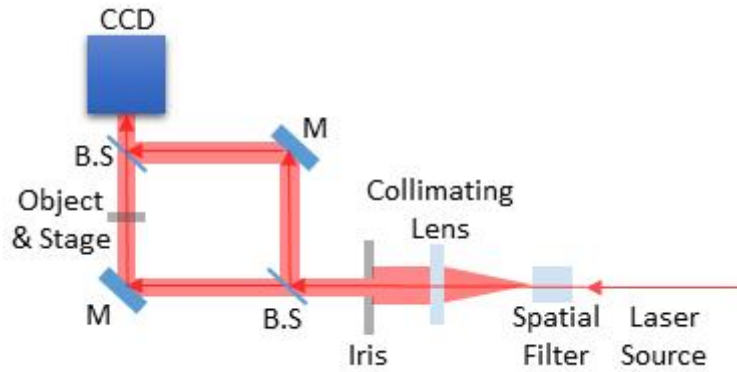


Fig. 3-1 Schematic Illustration of the Mach-Zehnder Interferometer

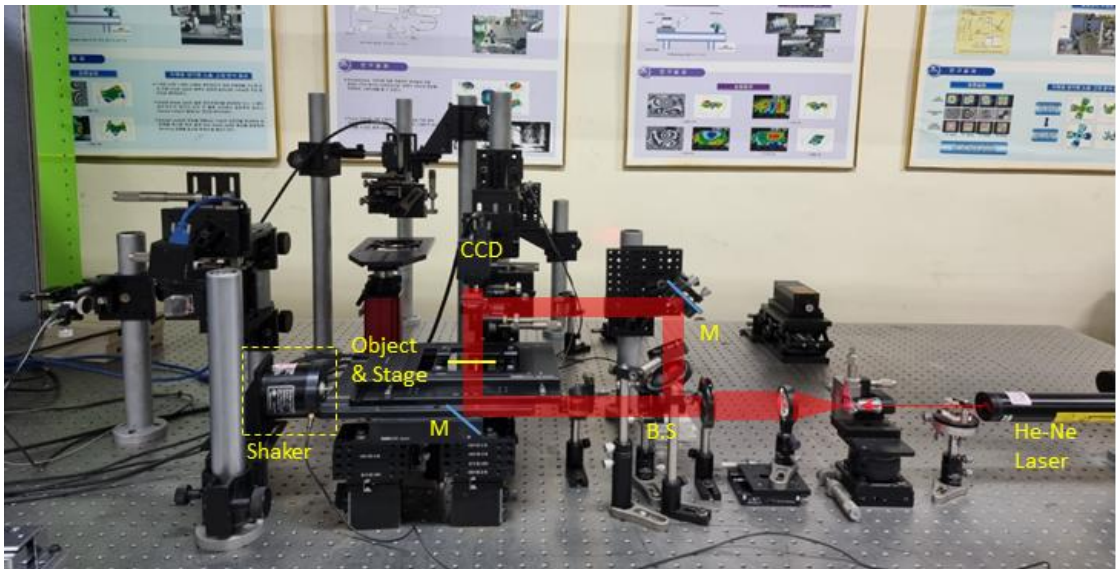


Fig. 3-2 Digital Holography System with Phase Extraction by Shaker

투과체를 측정하기 위해서는 Mach-Zehnder 간섭계를 베이스로 투과형 디지털 홀로그래피 시스템을 구성한다. 기본적으로는 B.S 2개, 거울 2개 그리고 CCD로 구성하는데 광원에서 나온 광이 B.S에 의해 두 개로 나뉘고 각각의 거울로 향해 다른 하나의 B.S로 바로 가는 광을 참조광, 참조파라고 하고, 물체를 투과하는 광을 물체광, 물체파라고 한다. 물체파에서 참조파를 감산처리하는 방식으로 물체에 대한 정보를 획득할 수 있도록 하였다. 위상이동 디지털 홀로그래피의 구성은 Fig. 3-1과 3-2에 나타난 것과 같다.

기존 디지털 홀로그래피 시스템은 광원에서 나오는 광이 MO를 통해 확산되고 MO의 배율에 맞는 Pin hole로 이루어진 Spatial filter를 거치게 하여 레이저의 바깥쪽을 걸러서 광의 품질을 향상시킨다. MO를 거쳐 확산되고 있는 광을 Collimating Lens를 이용하여 평행광으로 맞춰준다. 첫 번째 B.S에 의해 하나는 직진하여 45° 거울에서 반사되어 투명체를 통과해 물체파로 두 번째 B.S로 향하게 되고, 하나는 직각으로 꺾여 압전소자가 적용된 45° 각도의 거울에서 반사되어 두 번째 B.S로 향하는 참조파가 된다. 그리고 참조파와 물체파는 CCD에서 간섭을 일으키고 이 간섭무늬를 측정한다. 측정 시에는 압전소자를 움직여 위상이동을 수행하며 이미지를 측정한다. 위상을 이동시키는 방법으로 참조파의 경로에 있는 거울에 적용하던 압전소자 대신 간섭계 근처에 셰이커를 고정하여 간섭무늬에 영향을 줄 수 있도록 하였다. Bruel&Kjaer 사의 Mini shaker type 4810 모델의 셰이커를 Tektronix 사의 AFG1022 모델의 함수발생기를 이용하여 sin 파, 노이즈와 같은 진동을 부여하여 위상을 이동시키는 효과를 주도록 하였다. 셰이커와 함수발생기의 성능은 아래 표에 나타난 바와 같다.

위상이동에 사용되는 위상을 이동시키는 방법으로 기존 디지털 홀로그래피 시스템에서 사용되는 압전소자가 아닌 셰이커를 이용하여 외부에서 발생하는 진동과 같은 환경에서 좀 더 자유롭게 하여 산업 현장에 적용성을 높이기 위해 본 연구를 진행하였다.

제 2 절 Shaker and Arbitrary/Function Generator

1. Shaker

Bruel & Kjaer의 Mini Shaker Type 4810 모델의 셰이커는 영구 자석 기술을 이용하여 진동을 전달하는 손바닥 크기의 장비로 구조적 반응 테스트 및 진동 변환기 및 가속도계 교정을 포함한 다양한 연구 및 교육 응용 분야에 사용되며 여진기라고도 한다. DC - 18 kHz, 최대 Peak to peak 변위 4 mm (0.16 inch)의 주파수 범위를 가지고 있다. 작동 범위에 따라 최대 7 N (1.5 lbf) 또는 10 N (2.25 lbf)의 힘을 부여할 수 있는 장비로 본 논문에서는 이 셰이커 장비를 이용하여 진동을 부가하고 그 진동으로 위상 이동 효과를 낼 수 있도록 하였다.



Fig. 3-3 Bruel & Kjaer, Mini Shaker Type 4810

Table 4-1 Specifications of Shaker

Description	unit	Technical data
Model		Bruel&Kjaer, Mini Shaker Type 4810
Force rating	N	10
Frequency	kHz	DC-18
Peak-to-peak displacement(max)	mm	4
Amplitude	Vpp	1~20

2. Arbitrary/Function Generator

셰이커를 제어하기 위해 임의적인 신호와 함수 발생기를 Tektronix Inc의 AFG1022 모델을 사용하였으며 성능은 Table 4-2.에 나타내었다. 2개의 채널을 사용 가능하며 Sine, Square, Pulse, Ramp, Noise 함수를 발생시킬 수 있고 45 임의적인 신호를 발생시킬 수 있다. 레코드 길이는 8k 포인트, 샘플링 속도는 125 MS/s까지 가능하며 수직 분해능 14 비트로 진폭은 1부터 10 Vpp(Voltage peak to peak)까지 가능한 장비를 사용하였다.



Fig. 3-4 Arbitrary/Function Generator

Table 4-2 Specifications of ARBITRARY/FUNCTION GENERATOR

Description	unit	Technical data
Model		Tektronix Inc, AFG1022
Number of channels		2
Built-in waveforms		Sine, Square, Pulse, Ramp, Noise, 45 frequently used arbitrary waveform
Analog Frequency range	Hz	1 uHz to 25MHz
Record length	k point	8
Sampling speed (Signal processing)	MS/s	125
Vertical resolution	bit	14
Amplitude	Vpp	1~10

제 3 절 ITO Thin film made with Sputtering Method

ITO(Indium tin oxide) 투명 전극은 스마트폰 평면 디스플레이 등에 적용되는 유기 발광소자(Organic Light Emitting Diode, OLED)에 적용되는 핵심 소자 중에 하나로 높은 가시광 투과율에 더해 전기전도도 높은 특징으로 주로 사용된다[51-52]. ITO 투명 전극은 물리적인 방법과 화학적인 방법으로 사용 목적에 의해 증착하고 있다.

물리적인 방법의 경우는 진공 상태에서 중성 또는 이온화시킨 입자를 물리적인 방법으로 박막을 기판에 증착시키는 것을 말한다. 대표적으로 진공 증착, e 빔 증착, 열 증착, 스퍼터링 등이 있으나 이 중 생산성을 위해 주로 사용되는 방법은 스퍼터링 방법이다[54]. 이러한 스퍼터링은 플라즈마를 이용하여 박막을 증착하는 것으로 증착을 시킬 판에 고운동에너지의 이온을 충돌시켜 대상 표면과 내부에 에너지 전달을 통한 상호작용에 따라 형성된다[55-56]. OLED를 제작할 때 주로 사용되는 증착 높이는 150 nm로 본 논문에서도 ITO 투명전극 박막을 150 nm 증착하여 이를 대상으로 할 수 있도록 하였으며 ITO 투명전극을 증착하지 않은 유리 기판 부분을 참조하여 증착한 쪽의 높이에 대해 측정할 수 있도록 하였다.



Fig. 3-5 ITO Specimen with Sputtering Method

제 4 절 FE-SEM

방출형 주사전자현미경(Field Emission Scanning Electron Microscope)는 박막 검사용으로 사용되고 있는 상용 장비로서 본 논문에서 측정한 결과와 비교 검증을 하기 위해 사용하였으며 성능은 Table 4-3.에 나타내었다 [50].



Fig. 3-6 FE-SEM

Table 4-3. FE-SEM

Description	unit	Technical data
Model		Quanta 200 FEG FEI COMPANY)
Maximum Load Size	mm ²	50 × 50
Magnification		×12 ~ ×1,200,000
ESEM Resolution	mm	30Kv SE : 1.5
Acceleration Voltage	Kv	0.2 ~ 30
Beam Stability		<0.1%/1hr <0.4%12hr

제 4 장 Experiment Results

제 1 절 Results of Frequency Height Difference Measurements using Shaker

아날로그 파형을 이산 샘플링할 때 파형이 정확하게 기록되는지가 중요하다. 샘플이 기록되는 주파수의 샘플링 속도 $f_s = 1/\Delta t$ 와 기록된 점들의 수 N 이 우리가 제어 가능한 매개 변수이다. 샘플링 속도를 증가시키며 주파수 f 의 신호를 샘플링할 때 $f_s = 2f$ 로 샘플링되면 이산 샘플이 주파수 f 의 파로 확인할 수 있다. 즉 샘플링 속도를 $2f$ 이상 증가시켰을 때 정확한 신호 주파수를 얻을 수 있다. 나이퀴스트 주파수 (Nyquist frequency), 즉 $f_{Nyq} = \frac{f_s}{2} = \frac{1}{2\Delta t}$ 에 의해 따라 결정된다. $f_{Nyq} = f_s/2$ 보다 더 낮은 주파수는 정확하게 샘플링된다. 그보다 높은 주파수를 가진 신호를 받아들이면 부정확하며 이산적으로 샘플링된 신호가 다른 주파수와 같은 새로운 파형을 나타내는 현상 즉, 원 신호로 복원하지 못하는 앨리어싱 현상이 발생한다.

그러나 본 연구에서는 주파수 신호를 받아들이고 복구하고자 함이 아닌 첫째, 주파수에 따라 위상의 변화를 측정하고 이를 위상이동 디지털 홀로그래피로 사용할 수 있는지 확인하는 것에 목적이 있으며 둘째, 주파수에 따라 측정 여부를 확인하여 현장 적용성을 검증함에 목적이 있다.

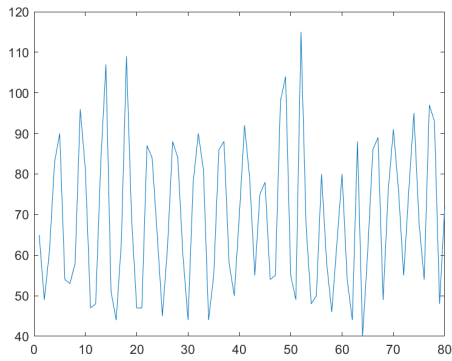
산업 현장에서 쓰이는 1114, 1273, 1432, 1592 rpm 회전체의 경우 1900 ~ 2800 Hz이며 지름 10 mm 엔드밀로 가공을 하는 경우 절삭 소음은 2800~560 0Hz로, 중심 주파수는 4000 Hz이다. 제조사업장의 소음 주요 주파수 대역은 1000 Hz, 운송, 판매사업장에서 소음의 주요 주파수 대역은 500 ~ 1000 Hz, 가공, 인쇄 사업장은 주로 2000Hz 이상의 고주파 대역의 소음이 있다. 디지털 홀로그래피 측정법을 적용할 법한 제작, 가공 사업장과 같이 이렇게 산업 현장에서의 소음은 1000 Hz가 넘어가는 고주파수 대역에 속한다. 고주파수는 간섭무늬에 위상 변화를 줄 수가 없어 위상이동으로 사용할 수 없으며 측정 시 영향을 줄 수가 없어 제외하였다 [58-60].

본 연구에서 사용한 CCD는 초당 82 프레임까지 측정할 수 있는 장치로 나이퀴스트 이론에 의해 CCD 측정 능력의 절반인 주파수 40 Hz까지는 모든 신호에 대해서 획득

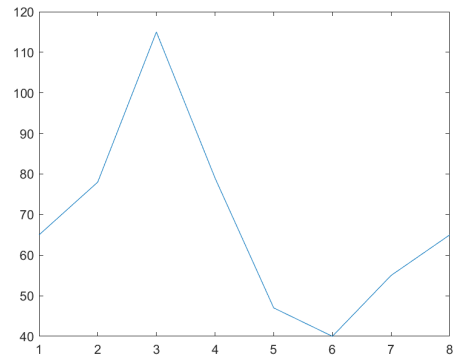
할 수 있다고 볼 수 있다. 그러나 앞서 언급한 바와 같이 본래의 신호로 복원하고자 함이 아닌 디텍터로 기록된 위상 변화 정보를 가지고 그 중 최대값과 최소값에 해당하는 위상 이미지를 추출하고 중간값을 계산해 역시 해당 위상 이미지를 추출한다. 8장의 위상이동 이미지를 위해 최대값과 중간값, 최소값과 중간값 사이의 임의의 위상 이미지를 추출하여 재구성해 위상이동값으로 이용한다.

마크네트론 스퍼터링 공법으로 150 nm를 증착한 ITO 박막의 단차를 대상으로 셰이커를 이용해 주파수별로 sine파를 발생시켜 이 진동을 위상이동 효과로 이용할 수 있도록 하였다. 이 때 위상이동의 효과를 보기 위해서는 간섭무늬가 2π 만큼의 변화가 일어나야 한다. CCD 카메라로 받아들이는 2048 x 2048 pixel의 화면 중에서 한 지점에 대한 데이터를 추출하는 방식으로 한 지점이 다른 모든 지점들과 같은 변화를 갖고 있다는 전제 하에 한 지점이 전체의 데이터를 대변할 수 있는 경우 사용할 수 있는 방법이다. 즉 간섭무늬가 전체적으로 변형을 일으키는 경우에만 측정이 가능하다. 간섭무늬가 2π 만큼의 변화를 일으키지 않는 경우 위상정보가 회색으로만 나타나 위상정보를 획득할 수 없게 되고 측정결과 역시 알 수 없게 된다.

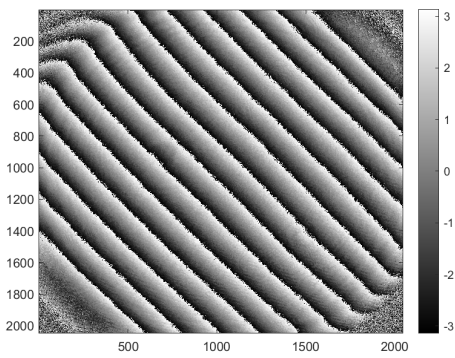
선행 연구자의 실험 결과 진폭은 큰 영향을 미치지 않는 것을 확인하여 본 연구에서는 CCD 80프레임으로 임의적/함수 발생기 설정을 Sine파, 진폭 8 Vpp, 주파수를 10 Hz 단위로 610 Hz 까지 위상 변화를 부여하는데 이용하였다. 그 중 10, 120, 150, 230, 240, 250, 270 ~ 320, 340 ~ 410, 430 ~ 480, 510 ~ 600 Hz는 간섭무늬의 변화가 생기지 않았으며 10 Hz는 너무 저주파라 간섭무늬에 변형을 일으키지 못하였으며 그 외 제외한 주파수의 경우 CCD 프레임 제한에 의해 위상에 변형을 일으키지 못하는 것이거나 샘플링 문제일 수 있어 측정에 이용하는 주파수에서 제외하였다.



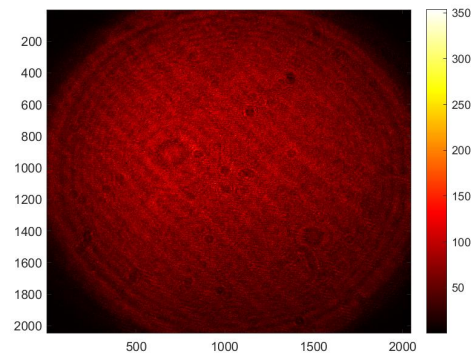
(a)



(b)



(c)

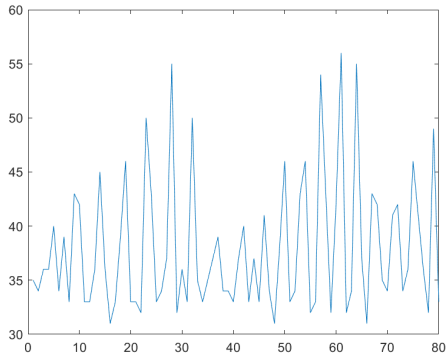


(d)

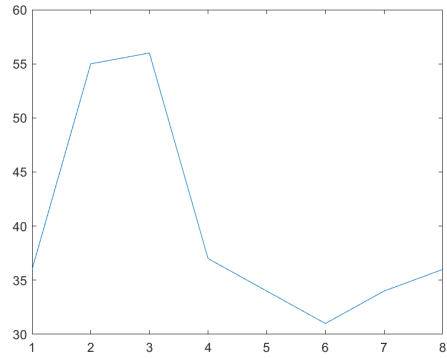
Fig. 4-1 Phase Extraction of Reference at 20 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

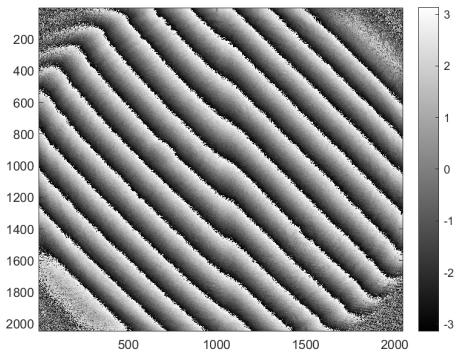
(c) Phase Image (d) Intensity Image



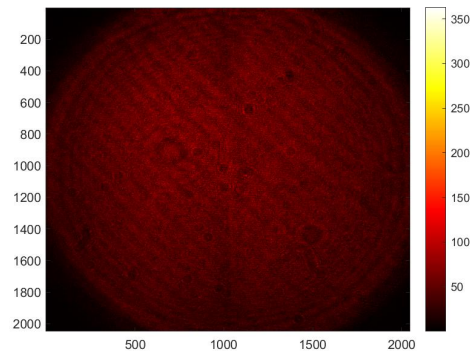
(a)



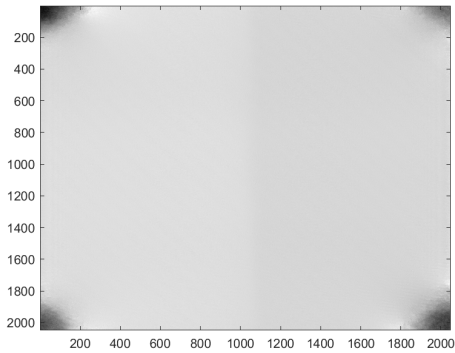
(b)



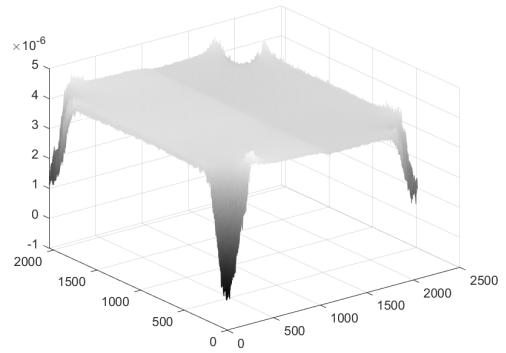
(c)



(d)



(e)

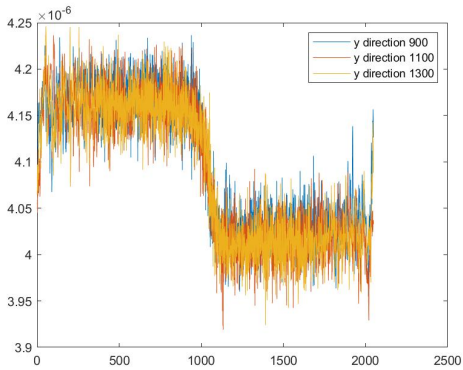


(f)

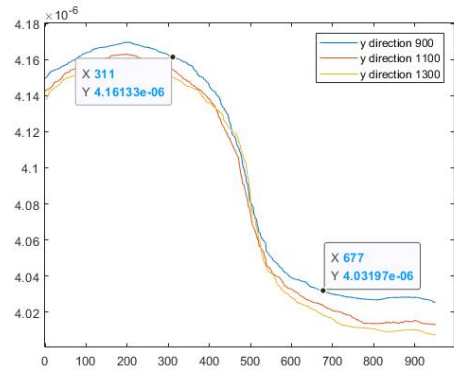
Fig. 4-2 Phase Extraction of Object at 20 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

(c) Phase Image (d) Intensity Image (e) Phase Unwrapping Image (f) 3D image



(a)

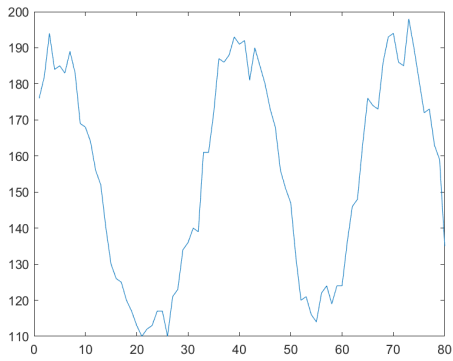


(b)

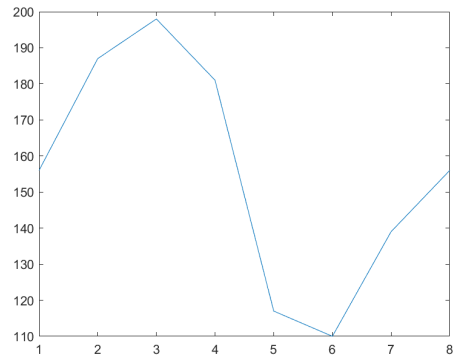
Fig. 4-3 The Result of Measuring the Height Difference at 20 Hz

(a) Line Profile of Y-Axis(900, 1100, 1300 pixel) (b) Result of Median Filter

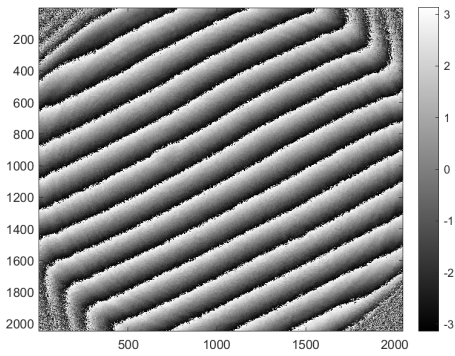
CCD 설정을 80 프레임으로 셰이커를 Sine파, 진폭 8 Vpp, 주파수 20 Hz로 진동을 부가하며 단차를 측정된 결과를 나타내었다. x축에서 900, 1100, 1300 pixel에 해당하는 y축 값을 추출하여 단차를 측정할 수 있도록 하였으며 이 높이 정보를 가진 그래프를 (a)에 나타내었다. (b)는 노이즈를 잡기 위해 메디안 필터를 적용시킨 결과로 대략적으로 각 단쪽의 평균을 낸 부분을 표기해두었으며 평균 단차는 138.943 nm 로 오차율 7.37 %로 측정되었다.



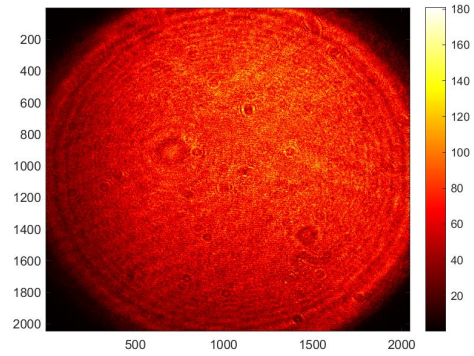
(a)



(b)



(c)

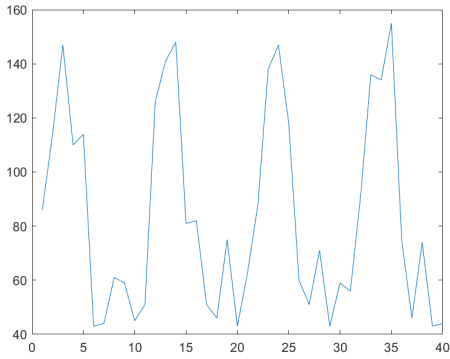


(d)

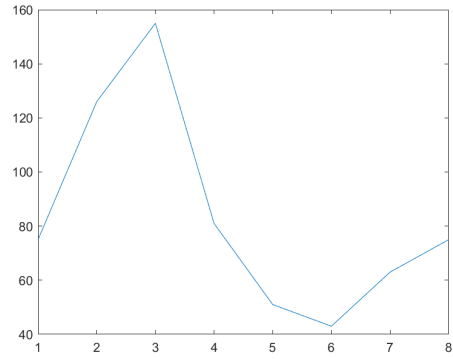
Fig. 4-4 Phase Extraction of Reference at 30 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

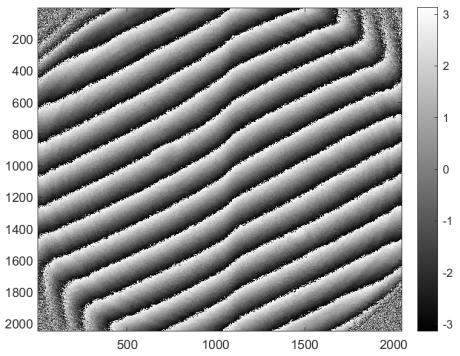
(c) Phase Image (d) Intensity Image



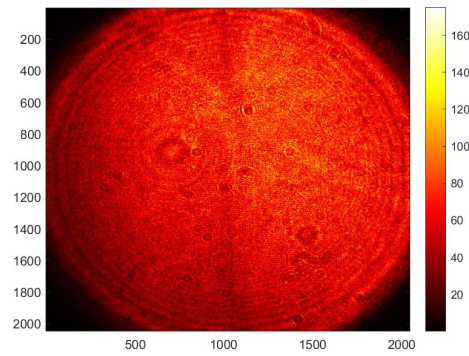
(a)



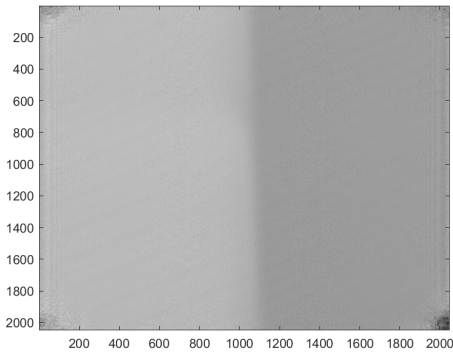
(b)



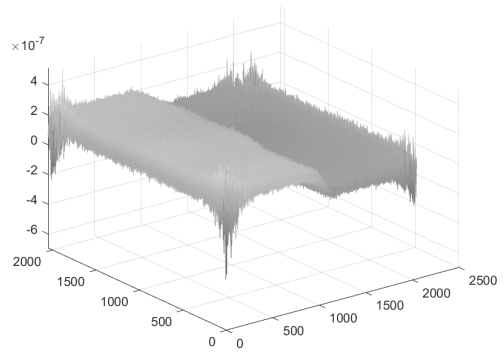
(c)



(d)



(e)

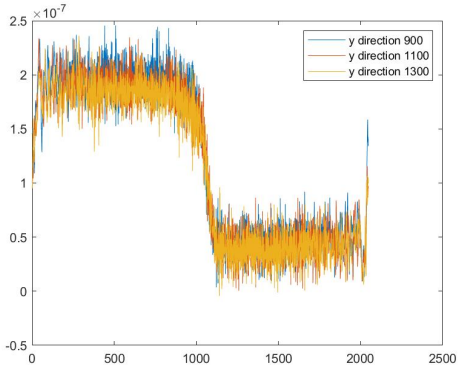


(f)

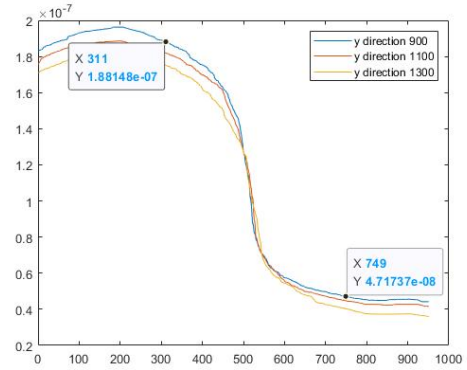
Fig. 4-5 Phase Extraction of Object at 30 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

(c) Phase Image (d) Intensity Image (e) Phase Unwrapping Image (f) 3D image



(a)

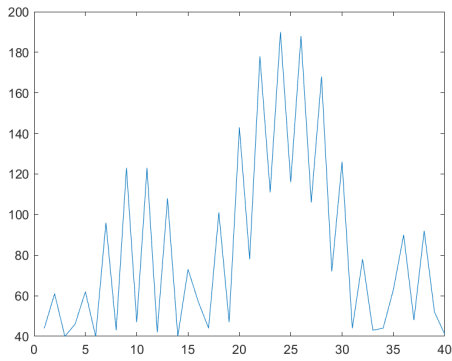


(b)

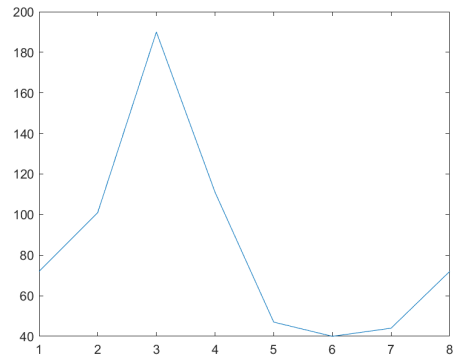
Fig. 4-6 The Result of Measuring the Height Difference at 30 Hz

(a) Line Profile of Y-Axis(900, 1100, 1300 pixel) (b) Result of Median Filter

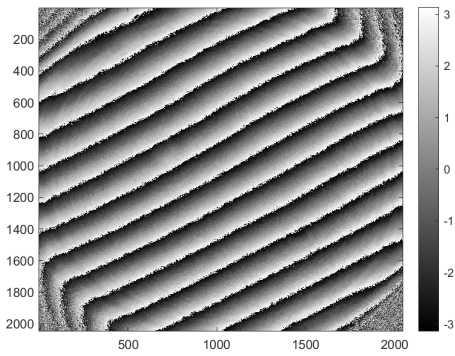
주파수 30 Hz를 Sine파로 부가하며 디지털 홀로그래피로 단차를 측정된 결과를 나타내었다. x축에서 900, 1100, 1300 pixel에 해당하는 y축 값을 추출하여 단차를 측정할 수 있도록 하였으며 이 높이 정보를 가진 그래프를 (a)에 나타내었다. (b)는 노이즈를 잡기 위해 메디안 필터를 적용시킨 결과로 대략적으로 각 단쪽의 평균을 낸 부분을 표기해두었으며 단차는 153.627 nm 로 측정되며 오차율은 2.42 %로 측정되었다.



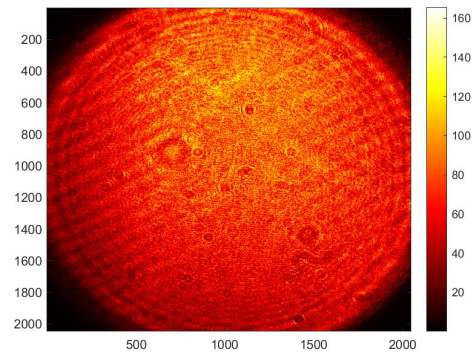
(a)



(b)



(c)

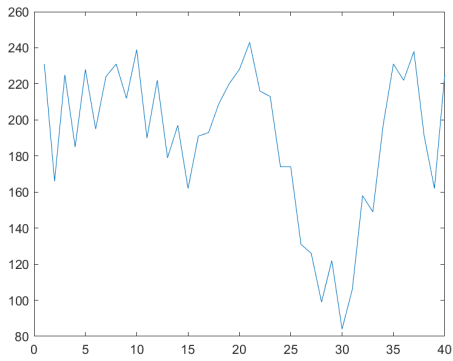


(d)

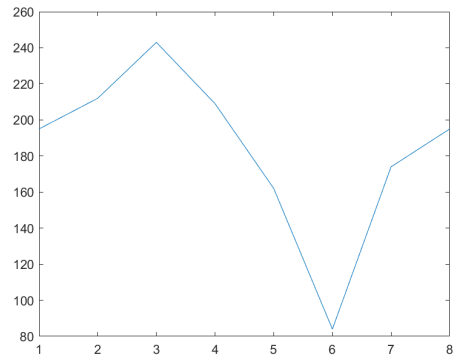
Fig. 4-7 Phase Extraction of Reference at 40 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

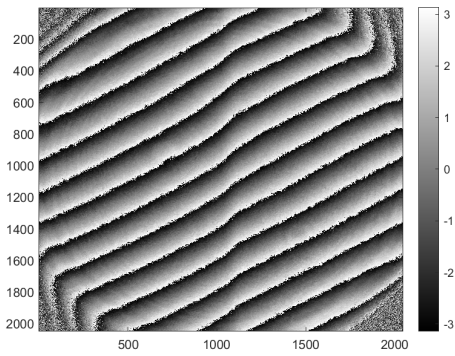
(c) Phase Image (d) Intensity Image



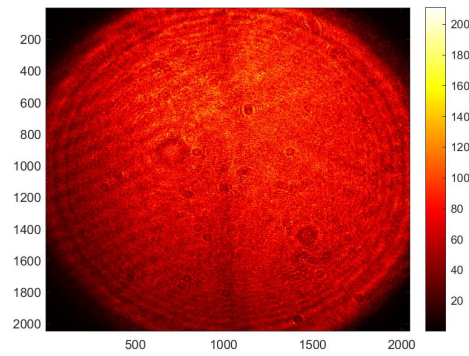
(a)



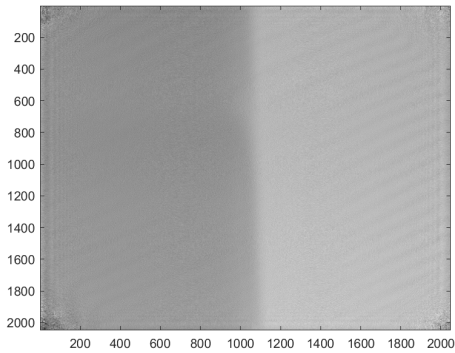
(b)



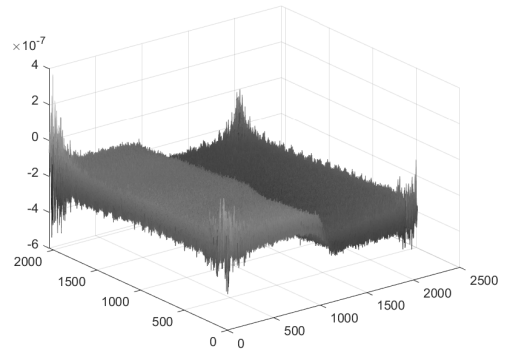
(c)



(d)



(e)

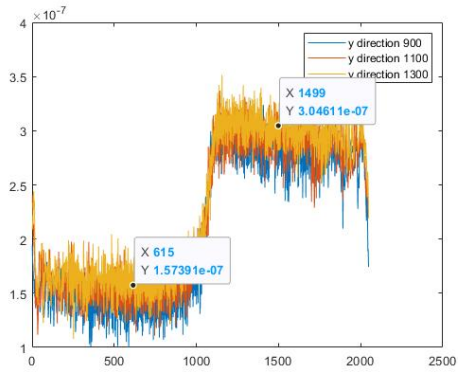


(f)

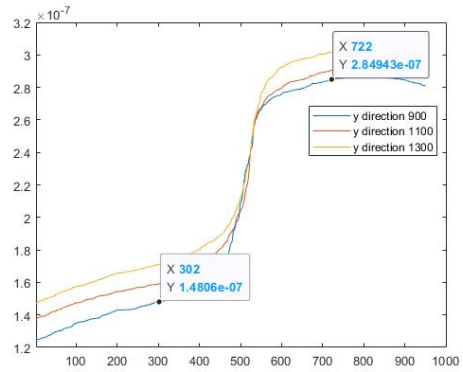
Fig. 4-8 Phase Extraction of Object at 40 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

(c) Phase Image (d) Intensity Image (e) Phase Unwrapping Image (f) 3D image



(a)

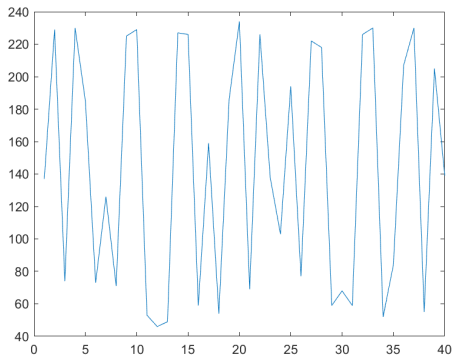


(b)

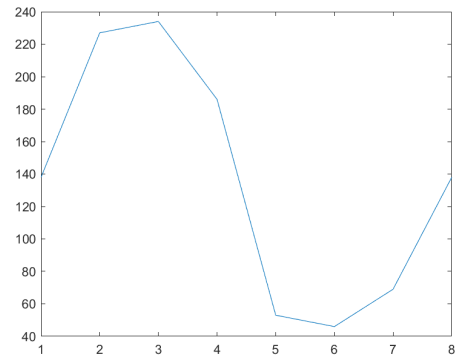
Fig. 4-9 The Result of Measuring the Height Difference at 40 Hz

(a) Line Profile of Y-Axis(900, 1100, 1300 pixel) (b) Result of Median Filter

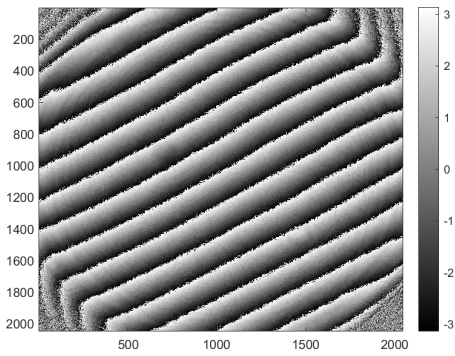
셰이커를 Sine파, 진폭 8 Vpp, 주파수 40 Hz로 두고 측정한 결과를 나타내었다. x축에서 900, 1100, 1300 pixel에 해당하는 y축 값을 추출하여 단차를 측정할 수 있도록 하여 이 높이 정보를 가진 그래프를 (a)에 표기하였으며 결과는 147.22 nm 로 측정된다. 노이즈에 대한 영향을 줄이기 위해 메디안 필터를 적용시켜 측정한 결과 평균 단차는 143.38 nm 로 (b)에 표기하였다. 오차율은 4.41 %로 확인되었다.



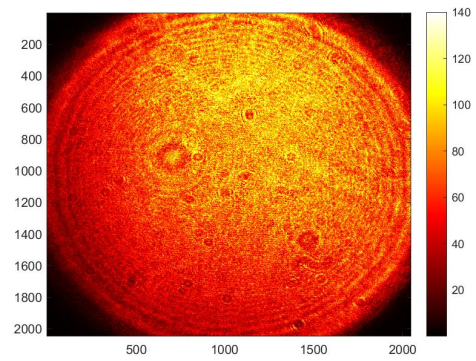
(a)



(b)



(c)

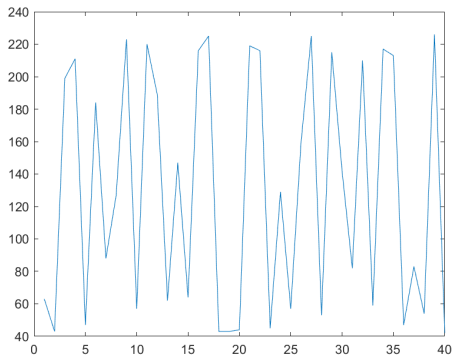


(d)

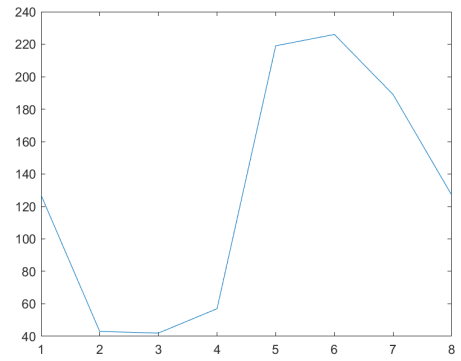
Fig. 4-10 Phase Extraction of Reference at 50 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

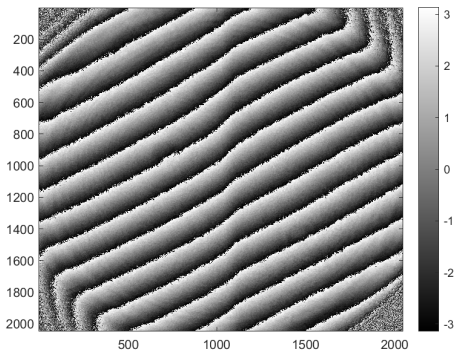
(c) Phase Image (d) Intensity Image



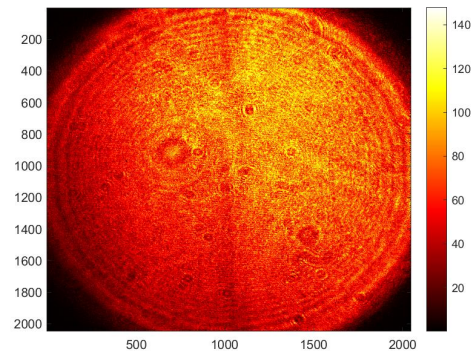
(a)



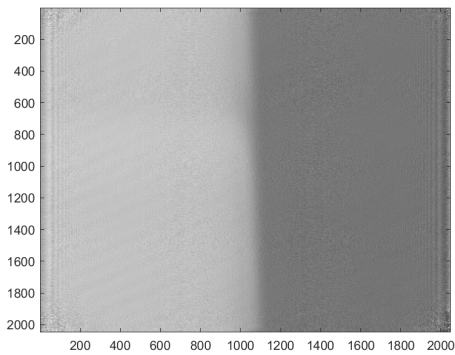
(b)



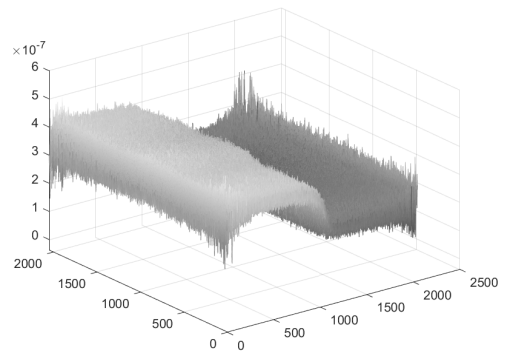
(c)



(d)



(e)

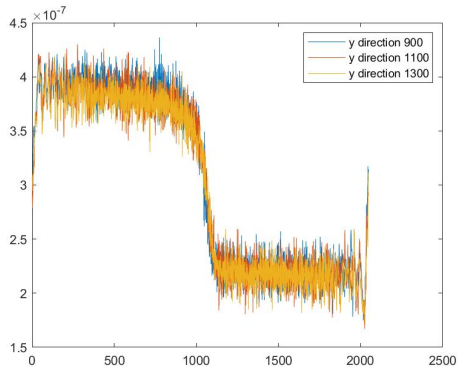


(f)

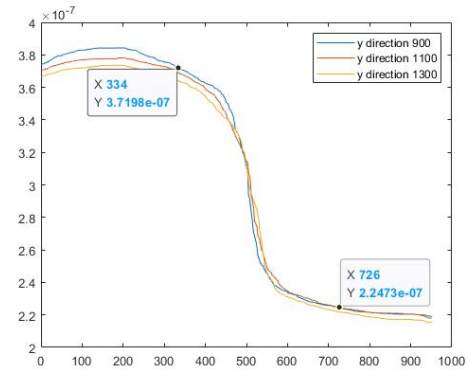
Fig. 4-11 Phase Extraction of Object at 50 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

(c) Phase Image (d) Intensity Image (e) Phase Unwrapping Image (f) 3D image



(a)

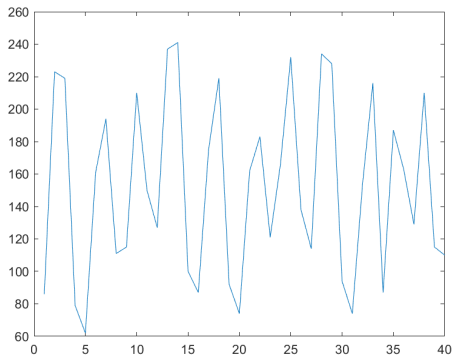


(b)

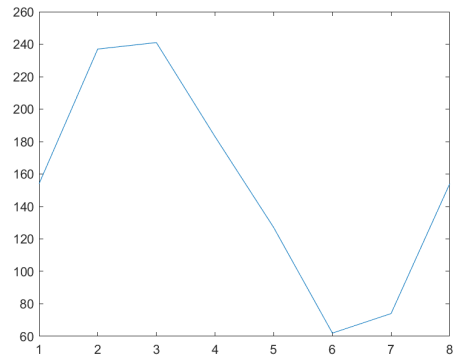
Fig. 4-12 The Result of Measuring the Height Difference at 50 Hz

(a) Line Profile of Y-Axis(900, 1100, 1300 pixel) (b) Result of Median Filter

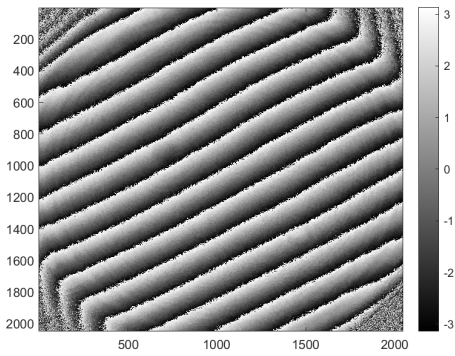
Fig. 4-10, 11, 12는 주파수 50 Hz로 두고 ITO 박막 단차를 측정된 결과를 나타내었다. x축에서 900, 1100, 1300 pixel에 해당하는 y축 값을 추출하여 단차를 측정할 수 있도록 하였으며 이 높이 정보를 가진 그래프를 (a)에 나타내었다. (b)는 노이즈를 잡기 위해 메디안 필터를 적용시킨 결과로 평균 단차는 151.276 nm로 측정되었으며 오차율은 0.85 %로 확인되었다.



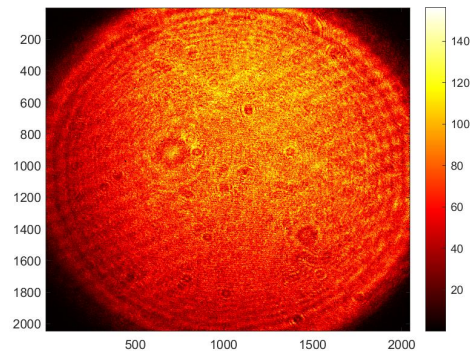
(a)



(b)



(c)

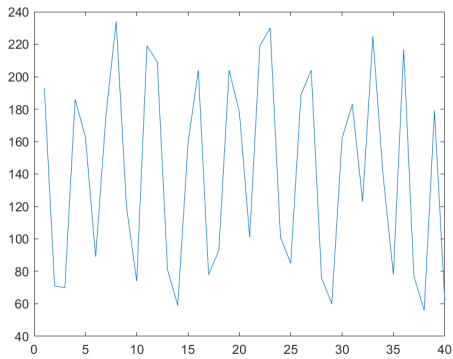


(d)

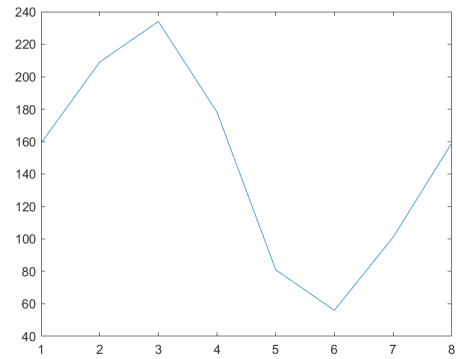
Fig. 4-13 Phase Extraction of Reference at 60 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

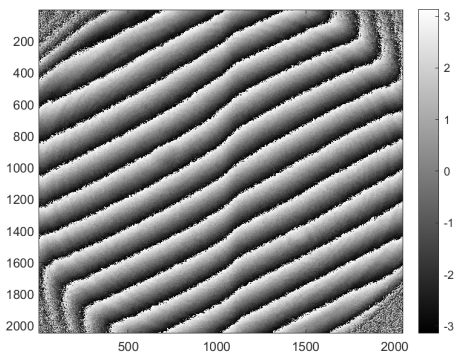
(c) Phase Image (d) Intensity Image



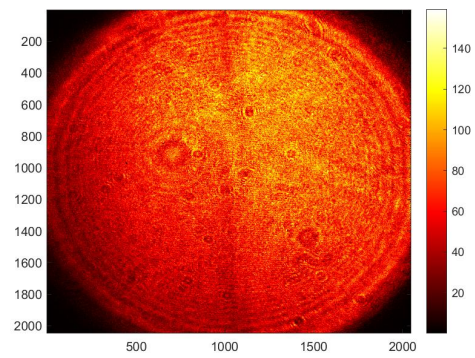
(a)



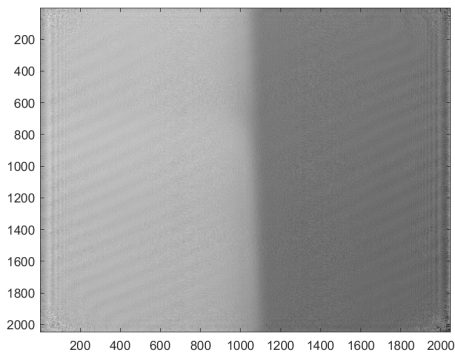
(b)



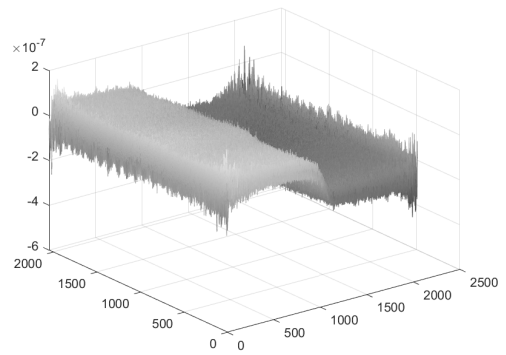
(c)



(d)



(e)



(f)

Fig. 4-14 Phase Extraction of Object at 60 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

(c) Phase Image (d) Intensity Image (e) Phase Unwrapping Image (f) 3D image

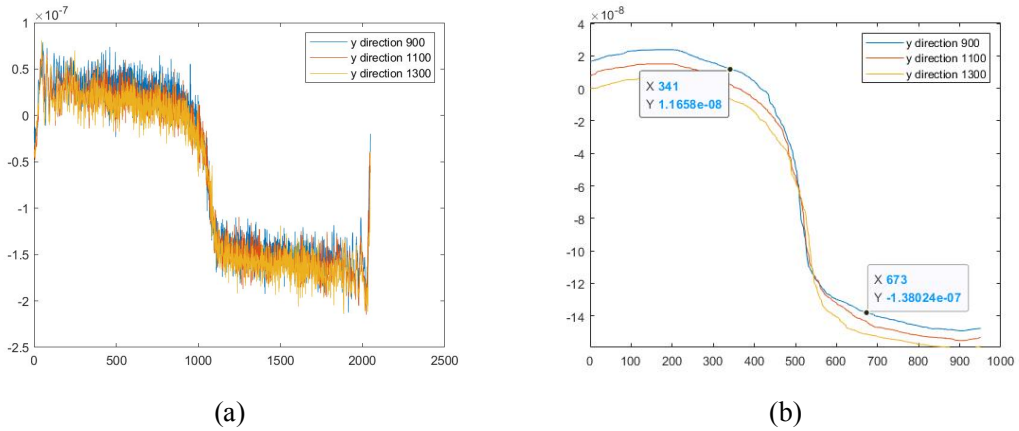
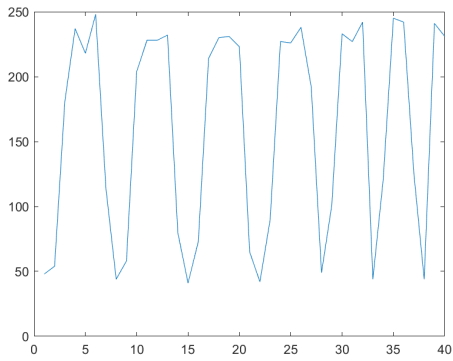


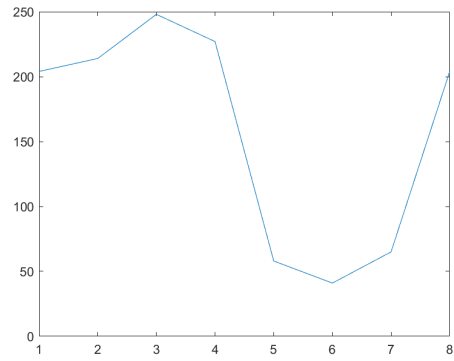
Fig. 4-15 The Result of Measuring the Height Difference at 60 Hz

(a) Line Profile of Y-Axis(900, 1100, 1300 pixel) (b) Result of Median Filter

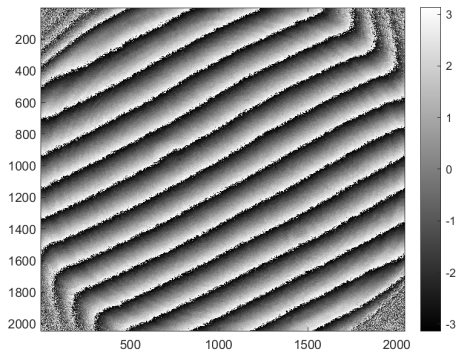
Fig. 4-13, 14, 15dp CCD 카메라 설정을 80프레임으로 셰이커를 Sine파, 진폭 8 Vpp, 주파수 60 Hz로 두고 측정한 결과를 나타내었다. x축에서 900, 1100, 1300 pixel에 해당하는 y축 값을 추출하여 단차를 측정할 수 있도록 하였으며 이 높이 정보를 가진 그래프를 (a)에 나타내었다. (b)는 노이즈를 잡기 위해 메디안 필터를 적용시킨 결과로 단차는 159.583 nm, 오차율 6.39 %인 것으로 측정되었다.



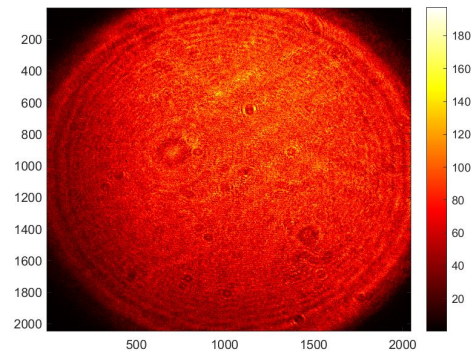
(a)



(b)



(c)

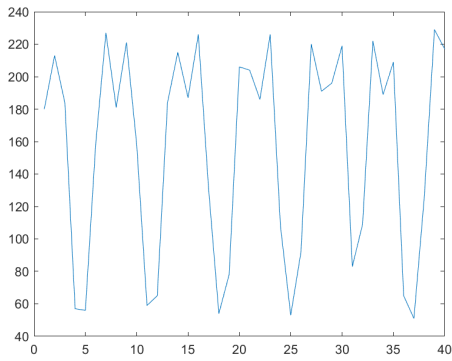


(d)

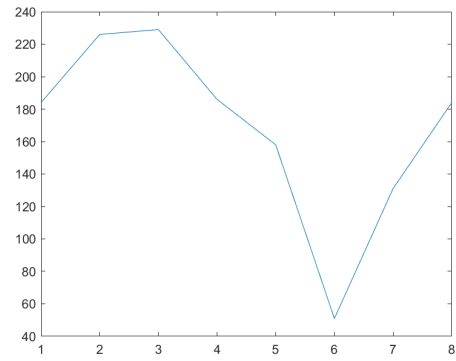
Fig. 4-16 Phase Extraction of Reference at 70 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

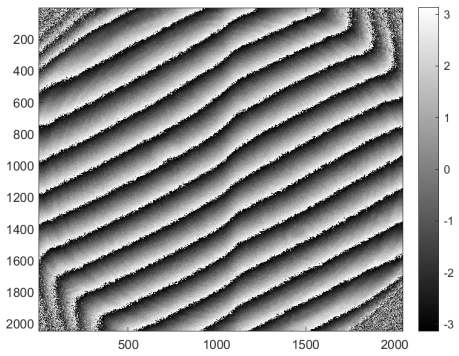
(c) Phase Image (d) Intensity Image



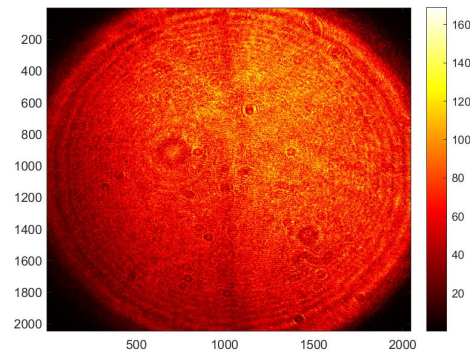
(a)



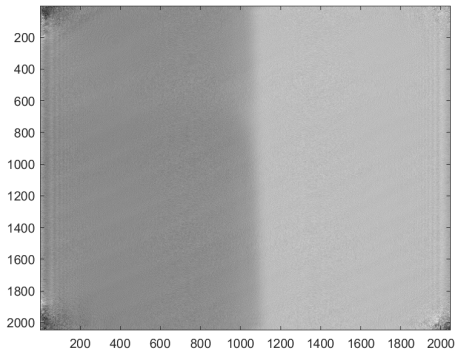
(b)



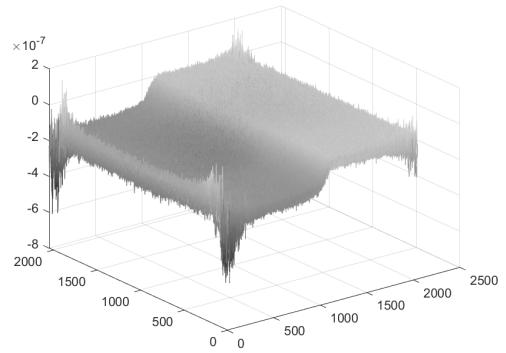
(c)



(d)



(e)

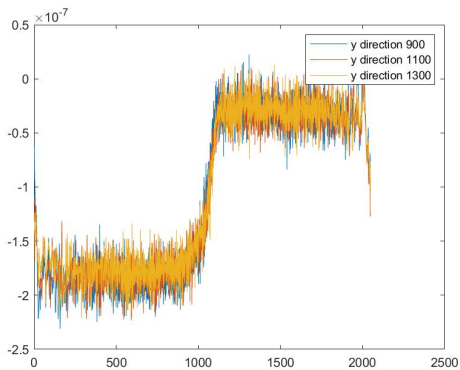


(f)

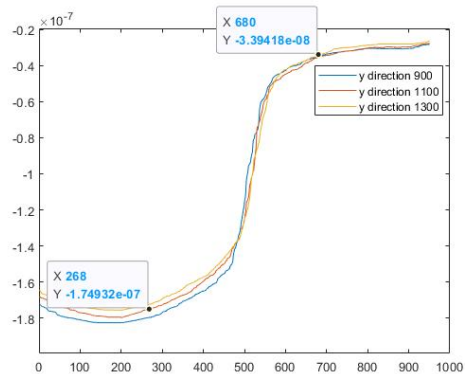
Fig. 4-17 Phase Extraction of Reference at 70 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

(c) Phase Image (d) Intensity Image



(a)

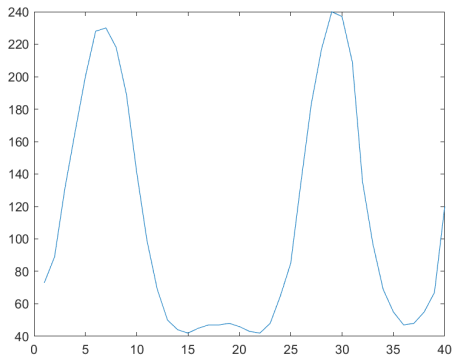


(b)

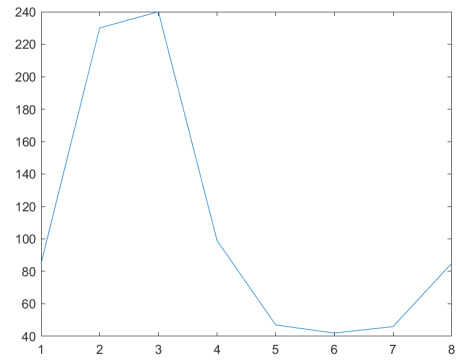
Fig. 4-18 The Result of Measuring the Height Difference at 70 Hz

(a) Line Profile of Y-Axis(900, 1100, 1300 pixel) (b) Result of Median Filter

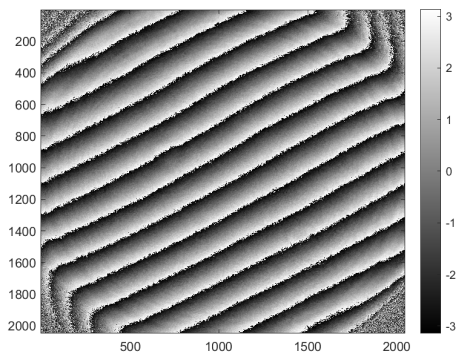
Fig. 4-16, 17, 18에 셰이커를 Sine파, 진폭 8 Vpp, 주파수 70 Hz로 두고 측정한 결과를 나타내었다. x축에서 900, 1100, 1300 pixel에 해당하는 y축 값을 추출하여 단차를 측정할 수 있도록 하였으며 이 높이 정보를 가진 그래프를 (a)에 나타내었다. (b)는 노이즈를 잡기 위해 메디안 필터를 적용시킨 결과로 단차는 142.815 nm, 오차율 4.79 %로 측정되었다.



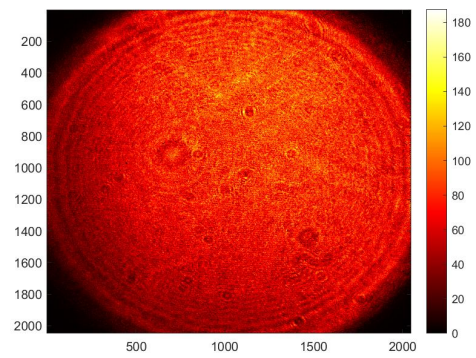
(a)



(b)



(c)

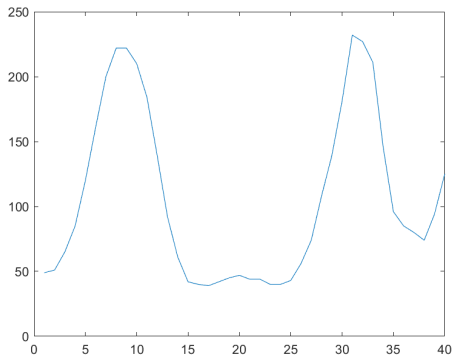


(d)

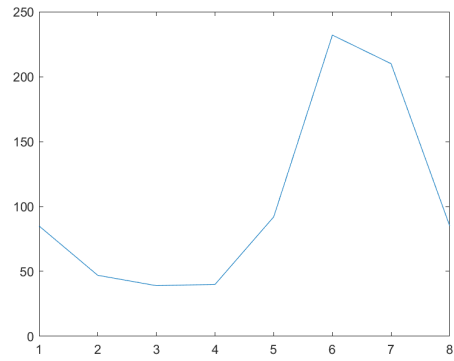
Fig. 4-19 Phase Extraction of Reference at 80 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

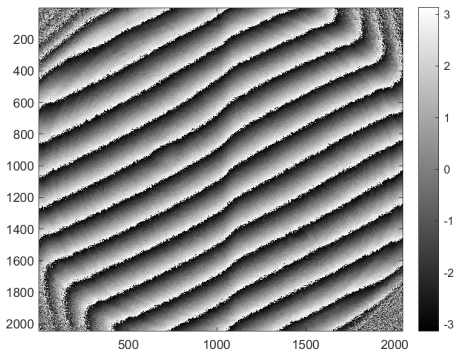
(c) Phase Image (d) Intensity Image



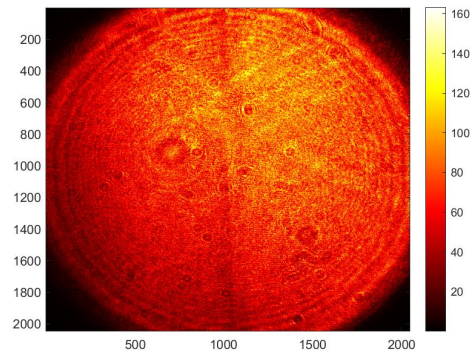
(a)



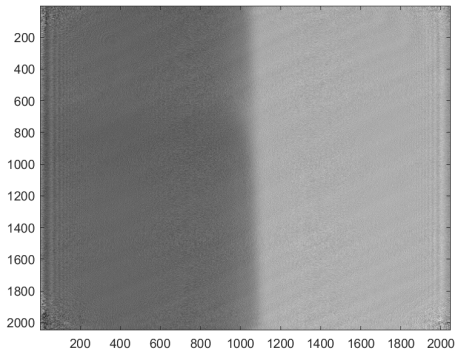
(b)



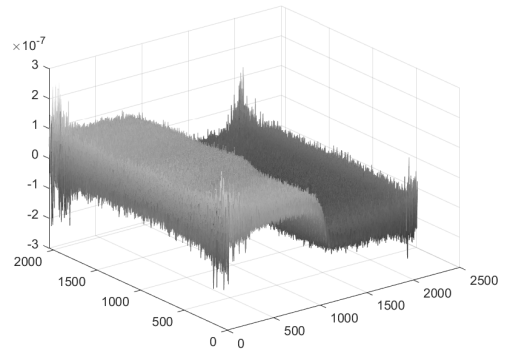
(c)



(d)



(e)

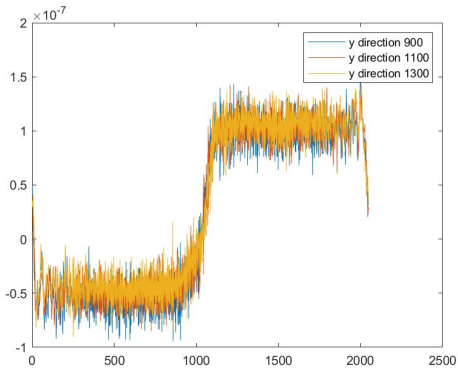


(f)

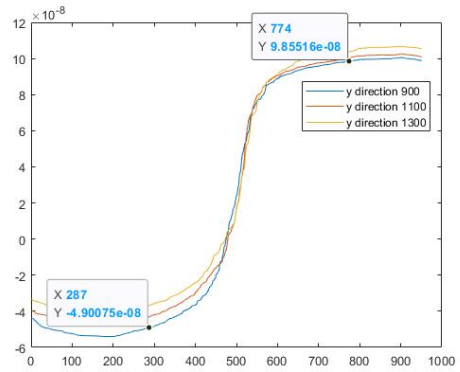
Fig. 4-20 Phase Extraction of Object at 80 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

(c) Phase Image (d) Intensity Image (e) Phase Unwrapping Image (f) 3D image



(a)

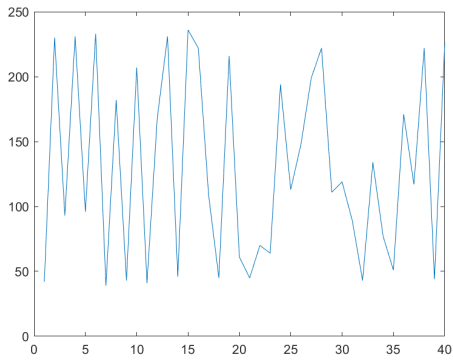


(b)

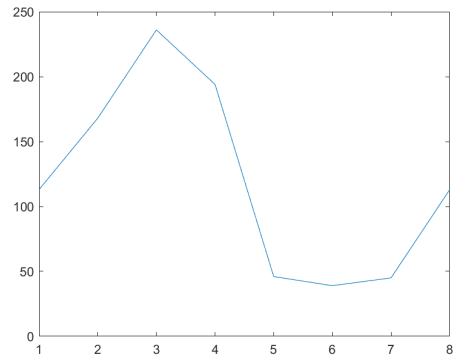
Fig. 4-21 The Result of Measuring the Height Difference at 80 Hz

(a) Line Profile of Y-Axis(900, 1100, 1300 pixel) (b) Result of Median Filter

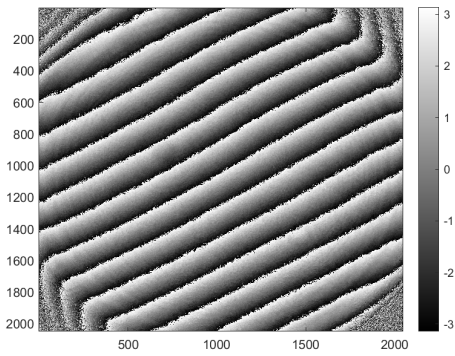
Fig. 4-19, 20, 21에 주파수를 80 Hz로 두고 측정한 결과를 나타내었다. x축에서 900, 1100, 1300 pixel에 해당하는 y축 값을 추출하여 단차를 측정할 수 있도록 하였으며 이 높이를 정보를 가진 그래프를 (a)에 나타내었으며 (b)에는 노이즈를 잡기 위해 메디안 필터를 적용시킨 결과로 평균 단차는 144.082 nm, 오차율 3.95 % 로 측정되었다.



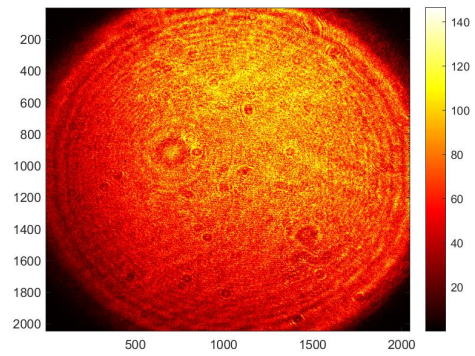
(a)



(b)



(c)

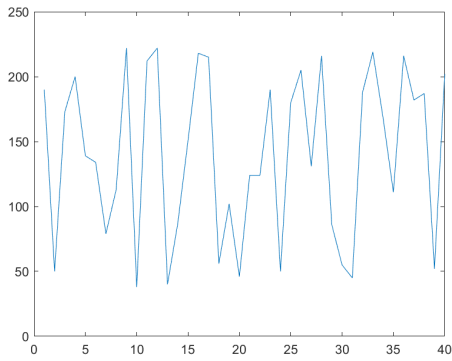


(d)

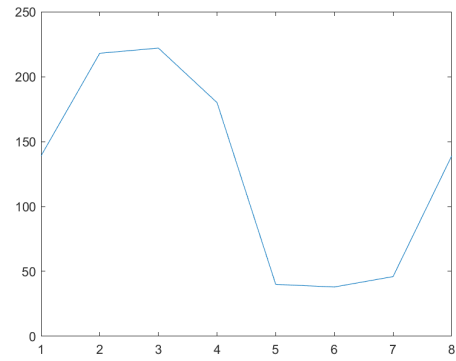
Fig. 4-22 Phase Extraction of Reference at 90 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

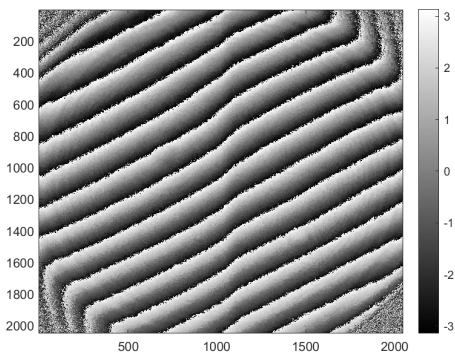
(c) Phase Image (d) Intensity Image



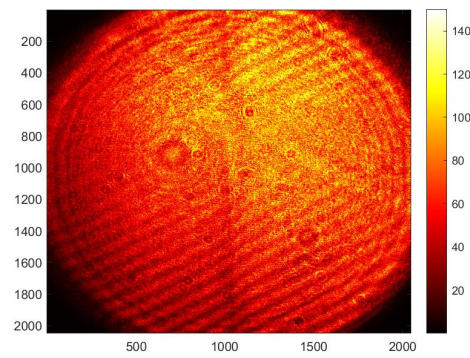
(a)



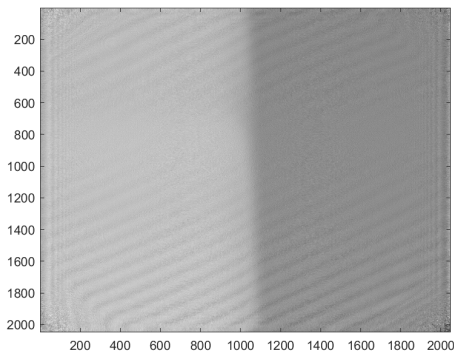
(b)



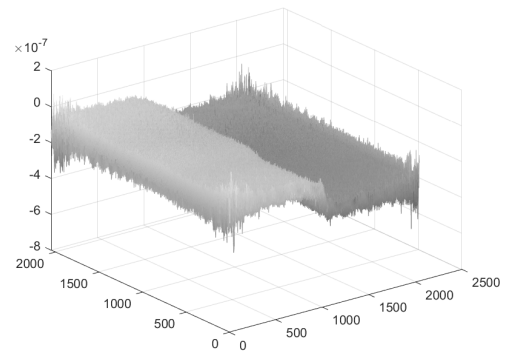
(c)



(d)



(e)

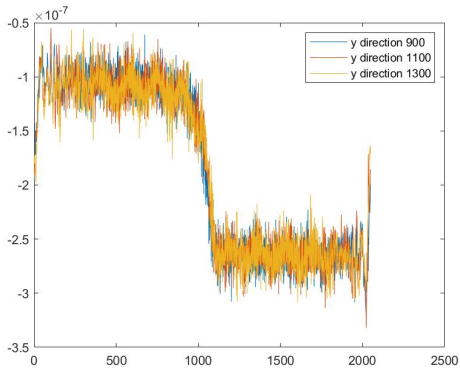


(f)

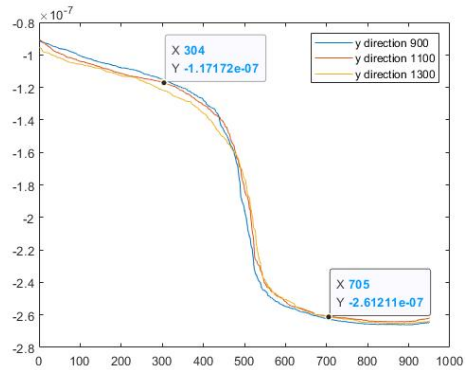
Fig. 4-23 Phase Extraction of Object at 90 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

(c) Phase Image (d) Intensity Image (e) Phase Unwrapping Image (f) 3D image



(a)

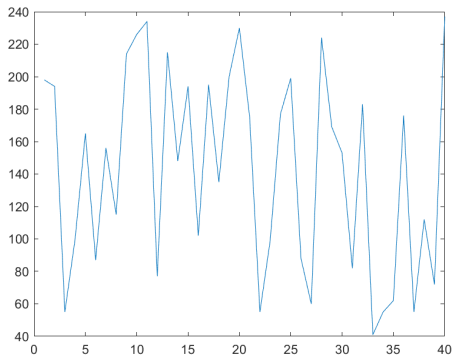


(b)

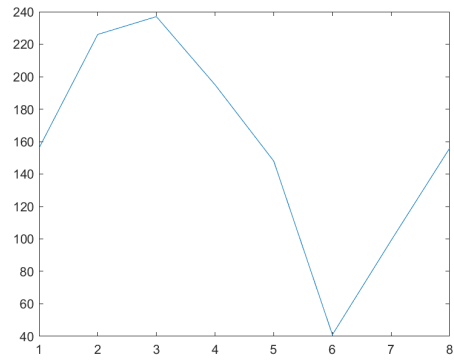
Fig. 4-24 The Result of Measuring the Height Difference at 90 Hz

(a) Line Profile of Y-Axis(900, 1100, 1300 pixel) (b) Result of Median Filter

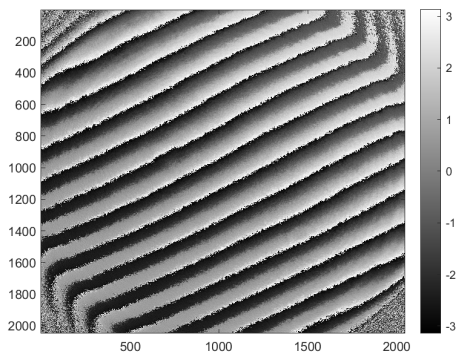
Fig. 4-22, 23, 24에 주파수 90 Hz를 부가하였을 때 측정된 결과를 나타내었다. x축에서 900, 1100, 1300 pixel에 해당하는 y축 값을 추출하여 단차를 측정할 수 있도록 하였으며 이 높이 정보를 가진 그래프를 (a)에 나타내었다. (b)는 노이즈를 잡기 위해 메디안 필터를 적용시킨 결과로 평균단차 146.632 nm, 오차율 2.25%로 측정되었다.



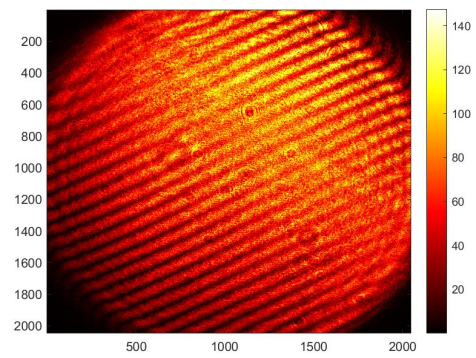
(a)



(b)



(c)

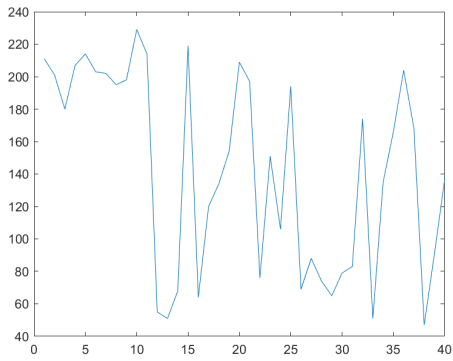


(d)

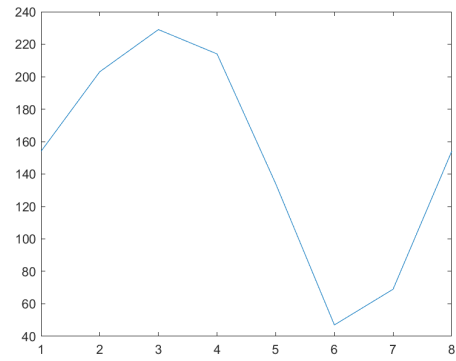
Fig. 4-25 Phase Extraction of Reference at 100 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

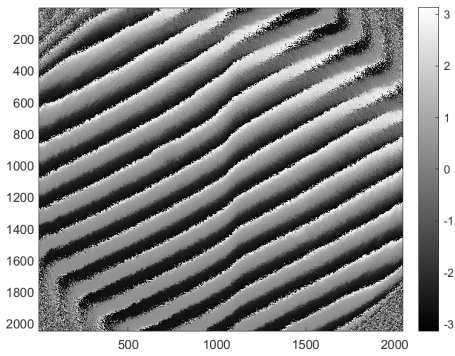
(c) Phase Image (d) Intensity Image



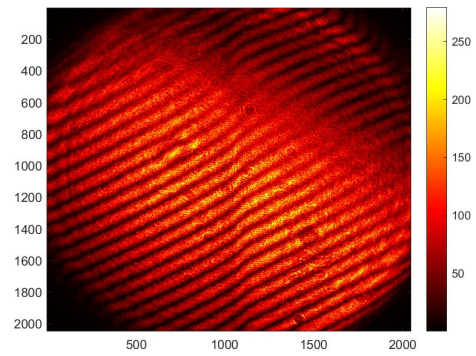
(a)



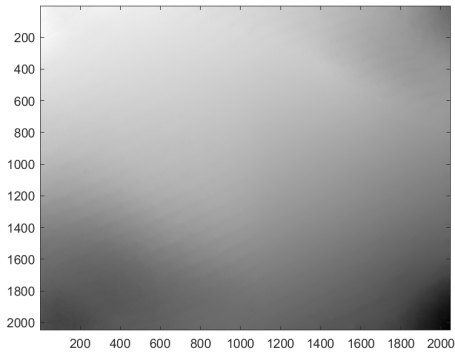
(b)



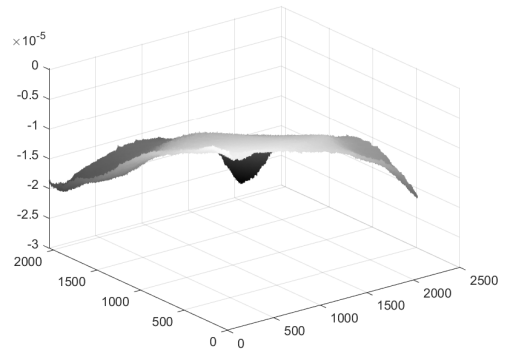
(c)



(d)



(e)

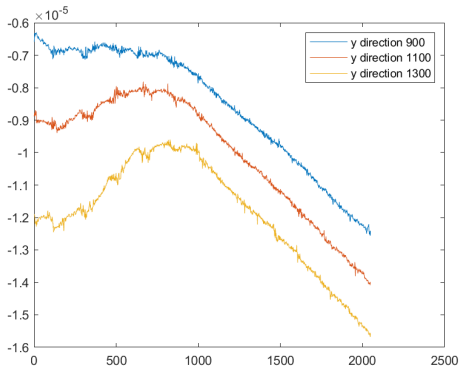


(f)

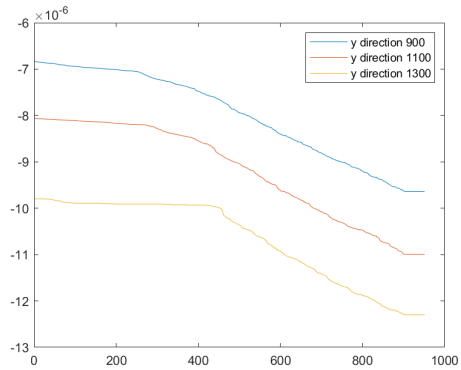
Fig. 4-26 Phase Extraction of Object at 100 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

(c) Phase Image (d) Intensity Image (e) Phase Unwrapping Image (f) 3D image



(a)

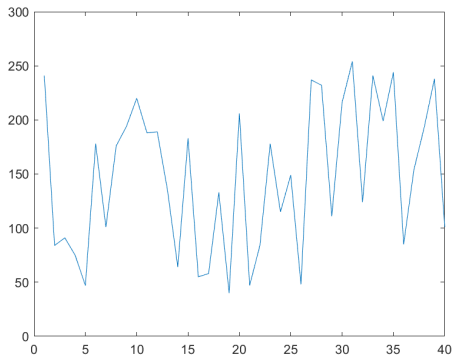


(b)

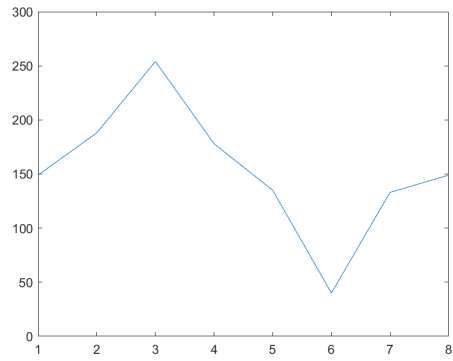
Fig. 4-27 The Result of Measuring the Height Difference at 100 Hz

(a) Line Profile of Y-Axis(900, 1100, 1300 pixel) (b) Result of Median Filter

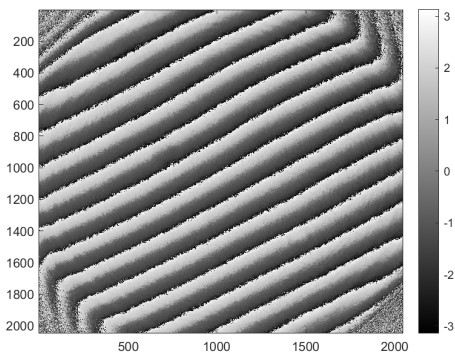
Fig. 4-25, 26, 27에 주파수 100 Hz로 두고 측정한 결과를 나타내었다. x축에서 900, 1100, 1300 pixel에 해당하는 y축 값을 추출하여 단차를 측정할 수 있도록 하였으며 이 높이를 정보를 가진 그래프를 Fig. 4-27 (a)에 나타내었다. (b)는 노이즈를 잡기 위해 메디안 필터를 적용시킨 결과로 단차는 -2,159.517 nm로 Fig. 4-25와 Fig. 4-26의 위상 이미지를 보면 검정색에서 흰색 그라데이션 된 위상맵이 아닌 회색으로 앞서 언급한 측정이 불가능한 상태이다. 위와 같은 위상지도 상태가 나오면 재측정이 필요하다.



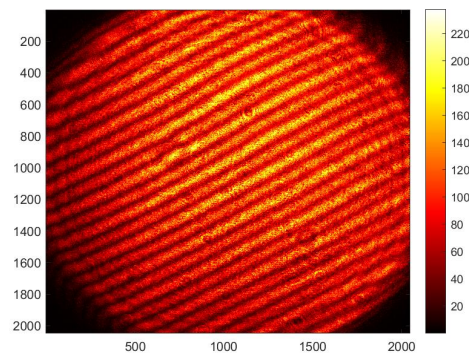
(a)



(b)



(c)

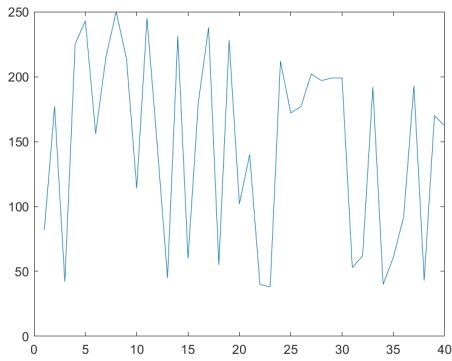


(d)

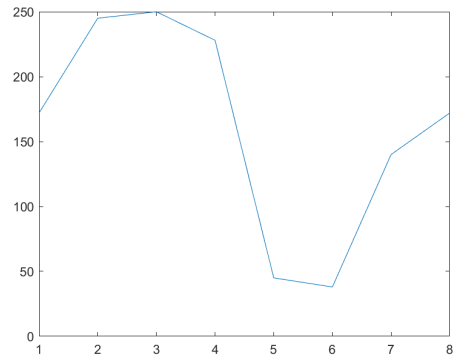
Fig. 4-28 Phase Extraction of Reference at 110 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

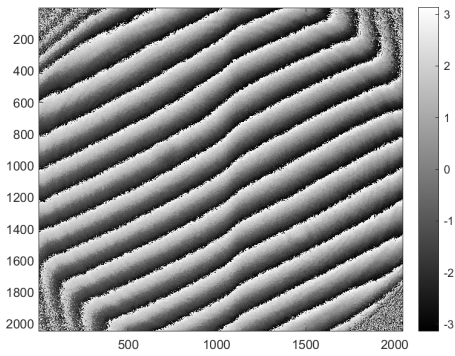
(c) Phase Image (d) Intensity Image



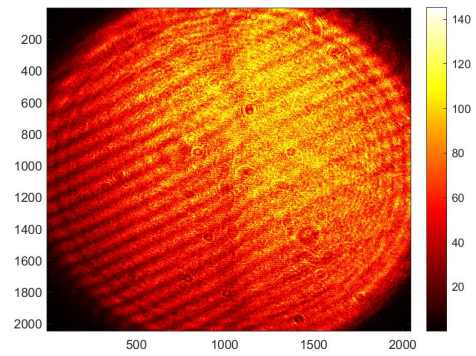
(a)



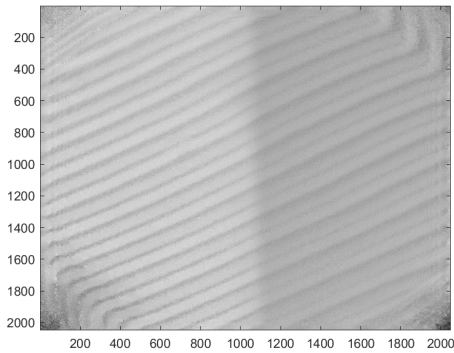
(b)



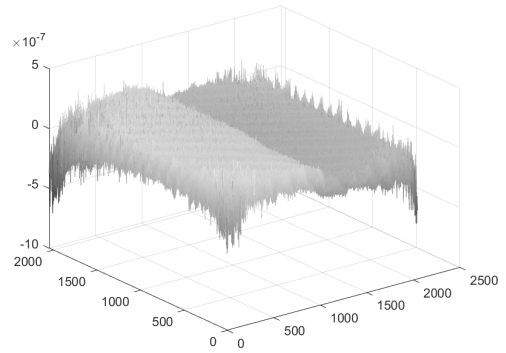
(c)



(d)



(e)

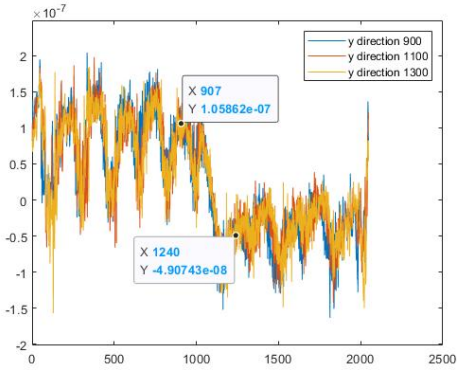


(f)

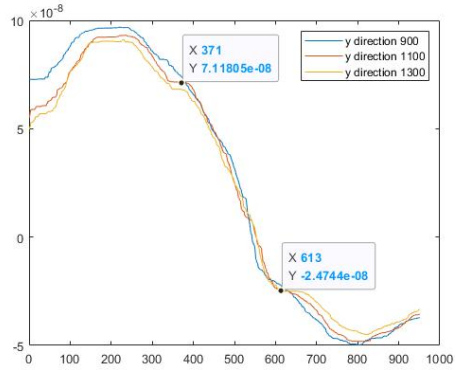
Fig. 4-29 Phase Extraction of Object at 110 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

(c) Phase Image (d) Intensity Image (e) Phase Unwrapping Image (f) 3D image



(a)

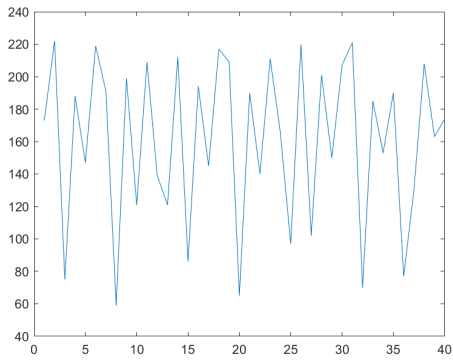


(b)

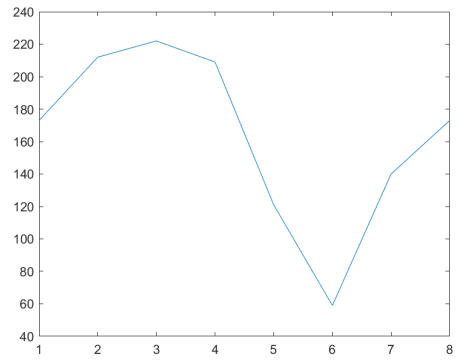
Fig. 4-30 The Result of Measuring the Height Difference at 110 Hz

(a) Line Profile of Y-Axis(900, 1100, 1300 pixel) (b) Result of Median Filter

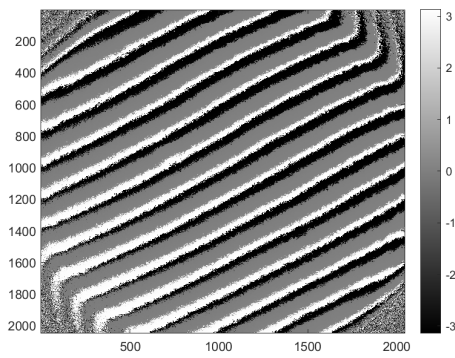
주파수를 110 Hz로 두고 측정한 결과를 Fig. 4-28, 29, 30에 나타내었다. x축에서 900, 1100, 1300 pixel에 해당하는 y축 값을 추출하여 단차를 측정할 수 있도록 하여 이 높이 정보를 가진 그래프를 (a)에 표기하였으며 결과는 154.936 nm 로 측정된다. 노이즈에 대한 영향을 줄이기 위해 메디안 필터를 적용시켜 측정한 결과 단차는 95.92 nm 로 (b)에 표기하였다. (f)에 나타낸 3차원으로 재구성한 결과와 같이 단차로 보이기 는 하나 결편침을 한 이미지에서도 노이즈가 심해 메디안 필터를 적용하였을 때 더 큰 오차율을 보인다. 앞서 주파수를 100 Hz일 때 측정한 결과처럼 위상지도가 회색빛 으로 나와 측정에 사용할 수 없는 상태이다. 120 Hz 부가하였을 때 위상이 변화는 하였으나 전체적으로 변형이 일어나지 않아 측정이 전혀 진행되지 않았다.



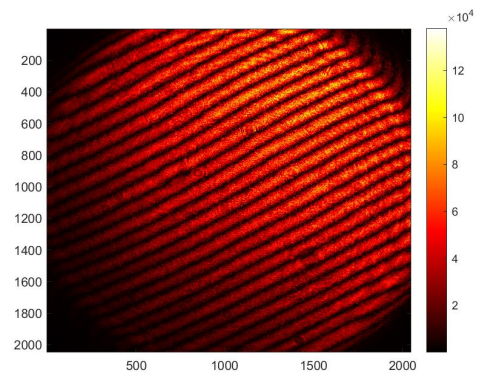
(a)



(b)



(c)

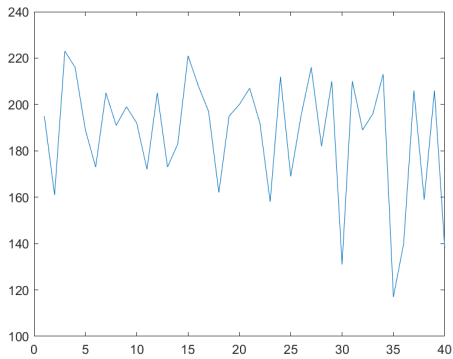


(d)

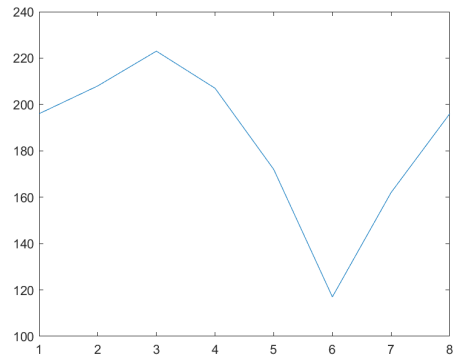
Fig. 4-31 Phase Extraction of Reference at 130 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

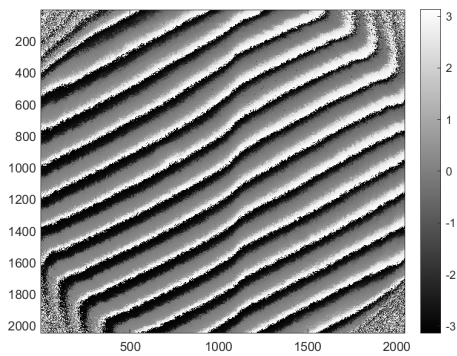
(c) Phase Image (d) Intensity Image



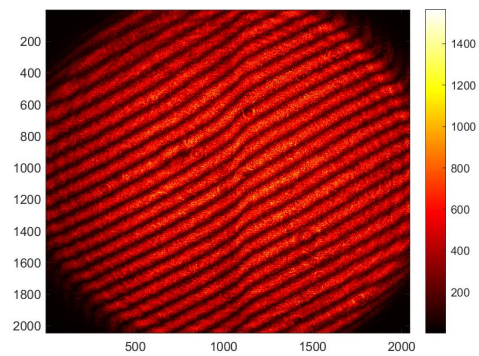
(a)



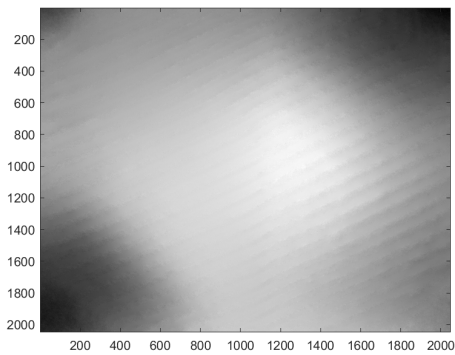
(b)



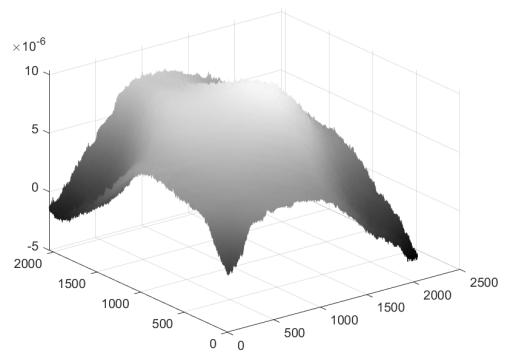
(c)



(d)



(e)

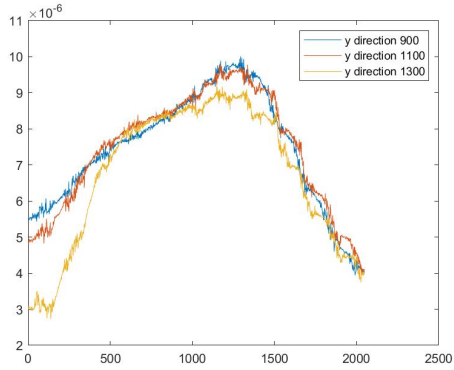


(f)

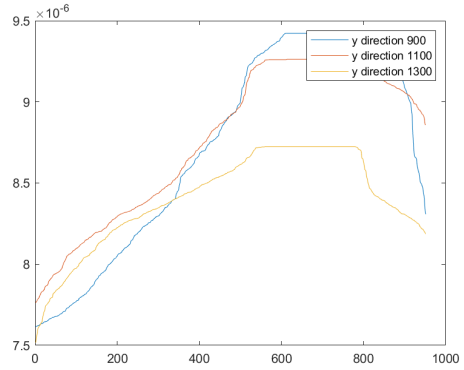
Fig. 4-32 Phase Extraction of Object at 130 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

(c) Phase Image (d) Intensity Image (e) Phase Unwrapping Image (f) 3D image



(a)

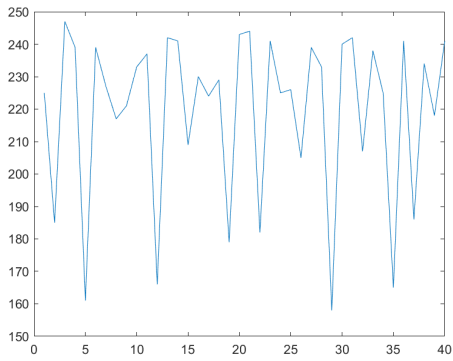


(b)

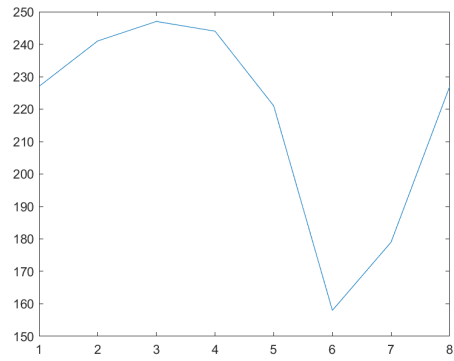
Fig. 4-33 The Result of Measuring the Height Difference at 130 Hz

(a) Line Profile of Y-Axis(900, 1100, 1300 pixel) (b) Result of Median Filter

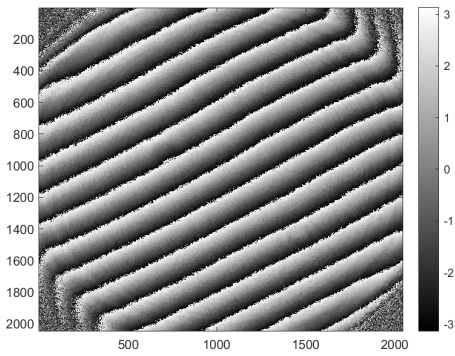
Fig. 4-30, 31, 32에 주파수 130 Hz로 두고 측정한 결과를 나타내었다. x축에서 900, 1100, 1300 pixel에 해당하는 y축 값을 추출하여 단차를 측정할 수 있도록 하였으며 이 높이 정보를 가진 그래프를 (a)에 나타내었다. (b)는 노이즈를 잡기 위해 메디안 필터를 적용시킨 결과로 단차는 652.103 nm 로 측정되었다. 130 Hz일 때 역시 100~120 Hz와 마찬가지로 측정에 사용할 수 없는 것으로 판단된다.



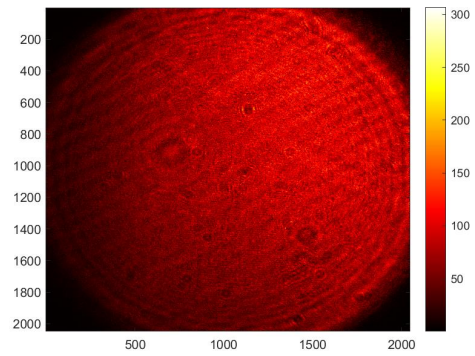
(a)



(b)



(c)

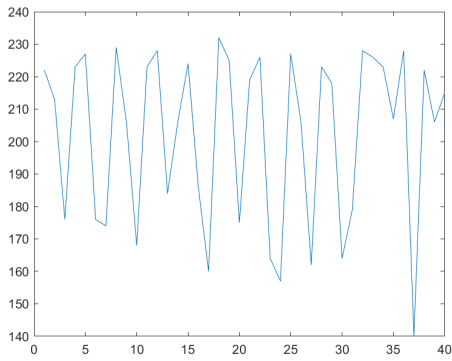


(d)

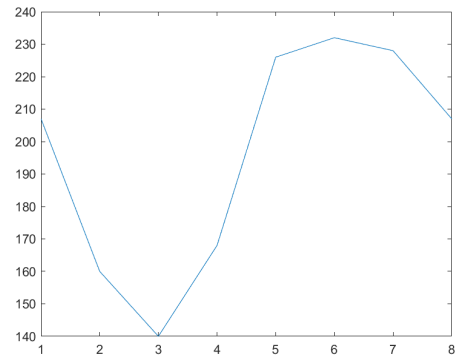
Fig. 4-34 Phase Extraction of Reference at 140 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

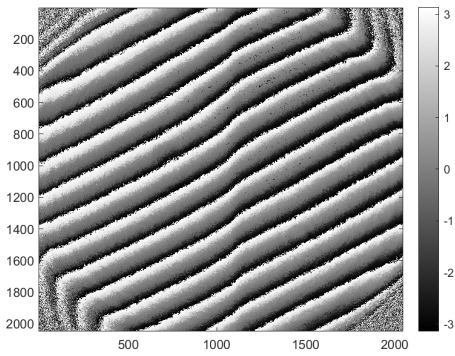
(c) Phase Image (d) Intensity Image



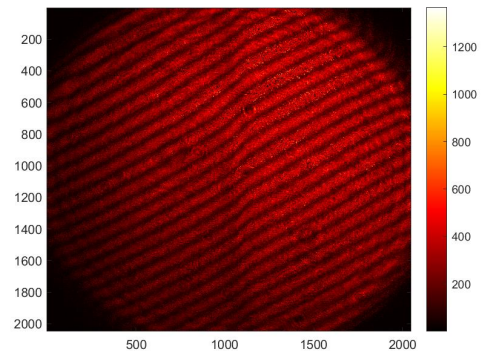
(a)



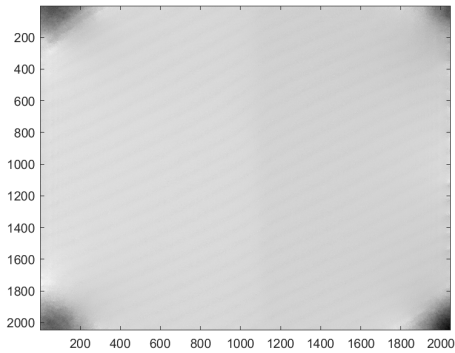
(b)



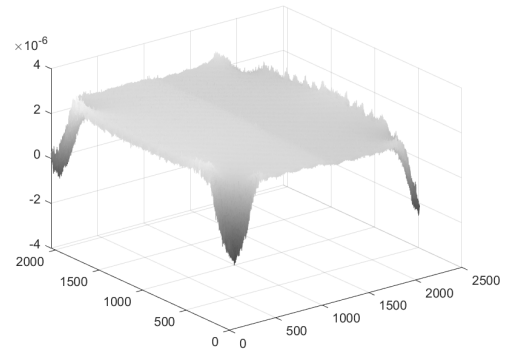
(c)



(d)



(e)

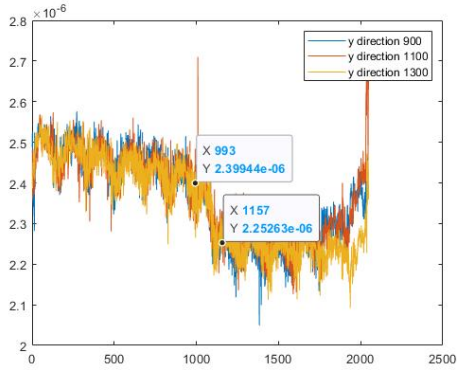


(f)

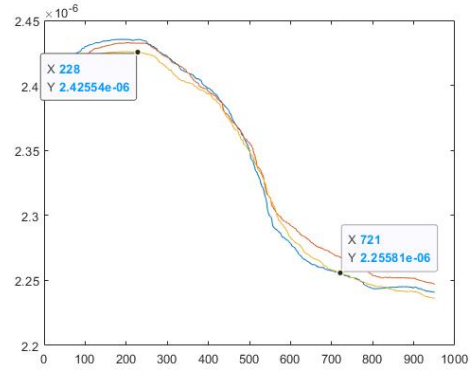
Fig. 4-35 Phase Extraction of Object at 140 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

(c) Phase Image (d) Intensity Image (e) Phase Unwrapping Image (f) 3D image



(a)

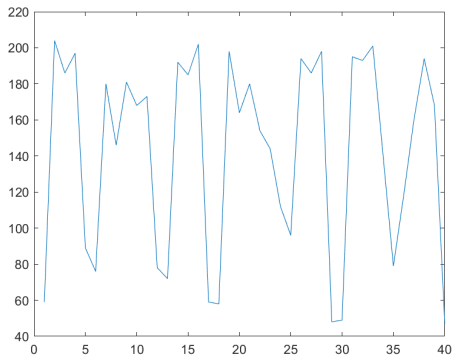


(b)

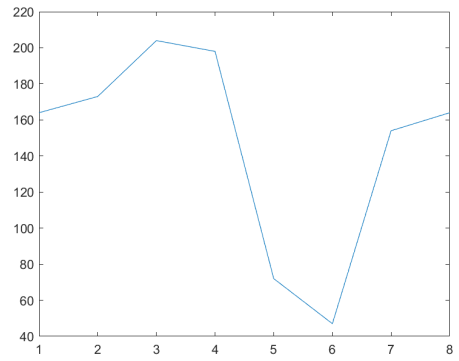
Fig. 4-36 The Result of Measuring the Height Difference at 140 Hz

(a) Line Profile of Y-Axis(900, 1100, 1300 pixel) (b) Result of Median Filter

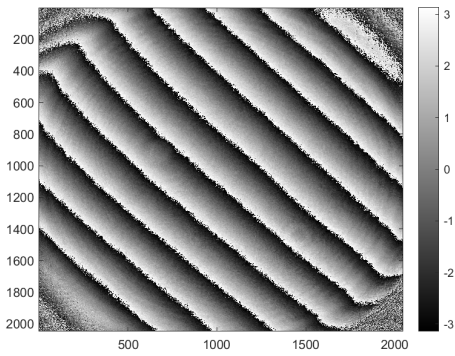
Fig. 4-34, 35, 36은 주파수 140 Hz로 두고 측정한 결과를 나타내었다. x축에서 900, 1100, 1300 pixel에 해당하는 y축 값을 추출하여 단차를 측정할 수 있도록 하여 이 높이 정보를 가진 그래프를 (a)에 표기하였으며 노이즈에 대한 영향을 줄이기 위해 메디안 필터를 적용시켜 측정한 결과 단차는 171.37 nm 로 (b)에 표기하였으며 오차율 14.25 %로 주파수 100-130 Hz 일 때보다는 낮지만 측정에 사용하기엔 무리가 있는 오차율로 보인다. 150 Hz를 측정에 사용하였을 때 위상 변화는 보이지만 다음 진행이 되지 않아 적합하지 않음을 알 수 있다.



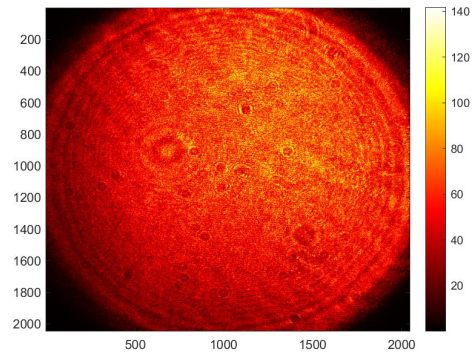
(a)



(b)



(c)

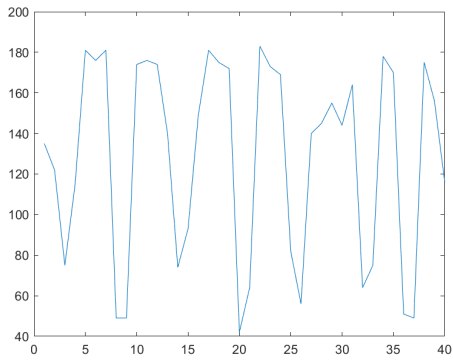


(d)

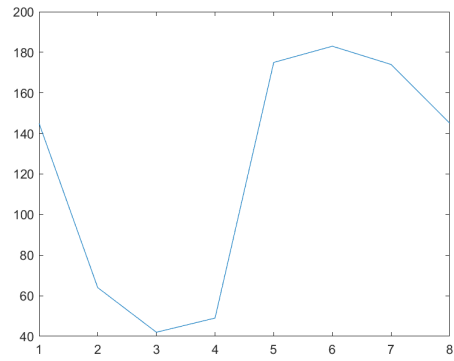
Fig. 4-37 Phase Extraction of Reference at 160 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

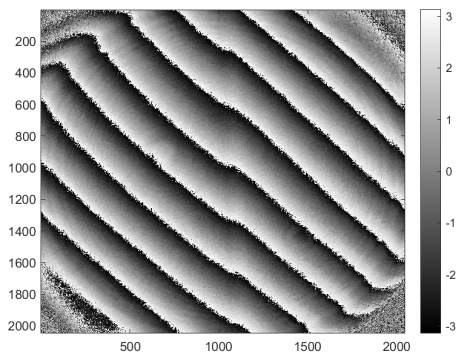
(c) Phase Image (d) Intensity Image



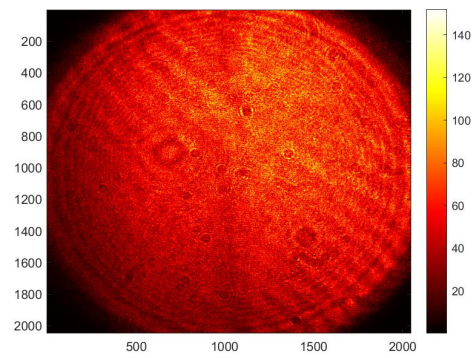
(a)



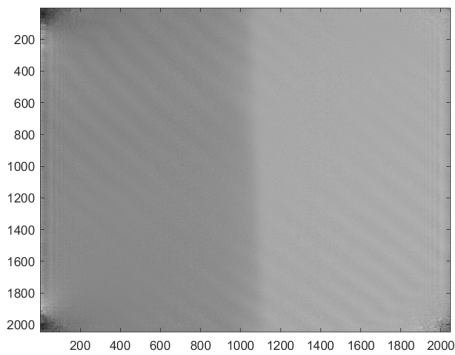
(b)



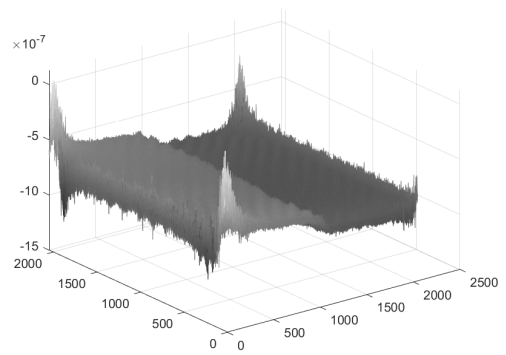
(c)



(d)



(e)

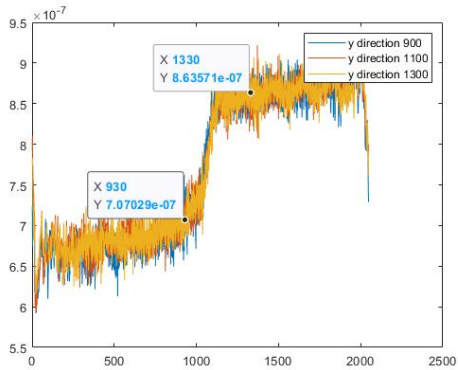


(f)

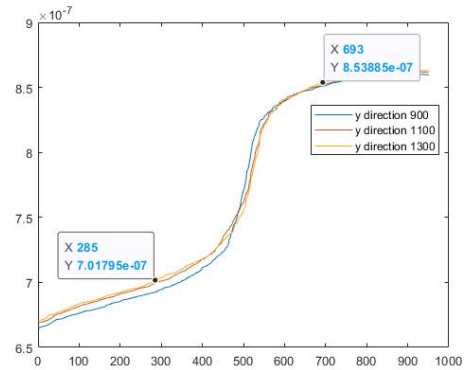
Fig. 4-38 Phase Extraction of Object at 160 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

(c) Phase Image (d) Intensity Image (e) Phase Unwrapping Image (f) 3D image



(a)

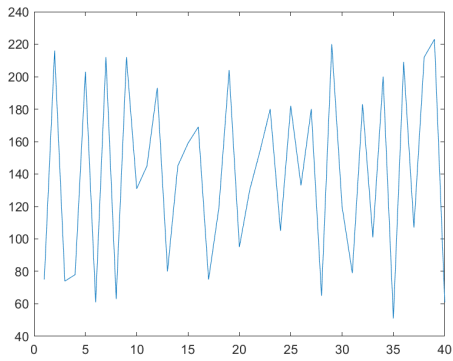


(b)

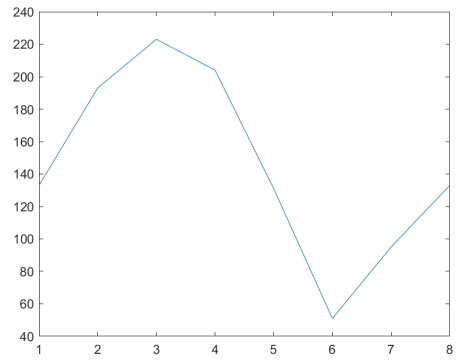
Fig. 4-39 The Result of Measuring the Height Difference at 160 Hz

(a) Line Profile of Y-Axis(900, 1100, 1300 pixel) (b) Result of Median Filter

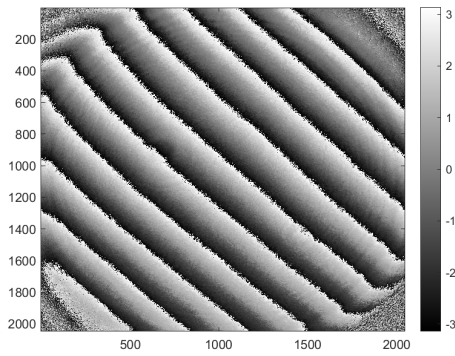
Fig. 4-37, 38, 39에 주파수 160 Hz로 두고 측정한 결과를 나타내었다. x축에서 900, 1100, 1300 pixel에 해당하는 y축 값을 추출하여 단차를 측정할 수 있도록 하여 이 높이 정보를 가진 그래프를 (a)에 표기하였으며 노이즈에 대한 영향을 줄이기 위해 메디안 필터를 적용시켜 측정한 결과 (b)에 표기하였다. 평균 단차는 160.261 nm로 오차율은 6.84 %이다.



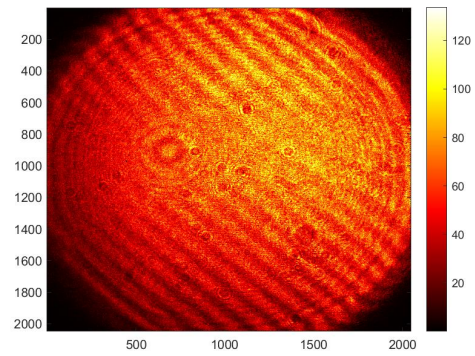
(a)



(b)



(c)

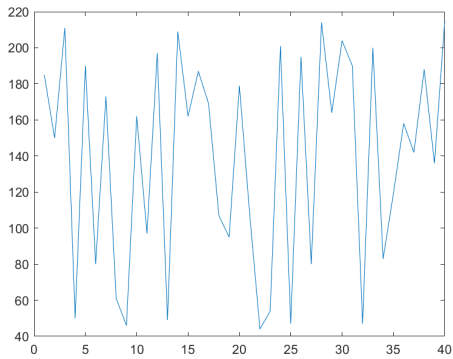


(d)

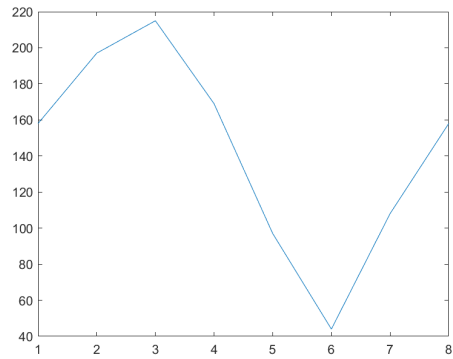
Fig. 4-40 Phase Extraction of Reference at 170 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

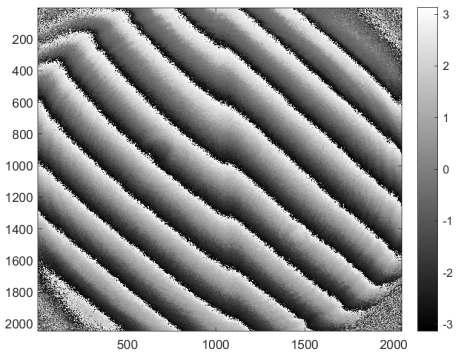
(c) Phase Image (d) Intensity Image



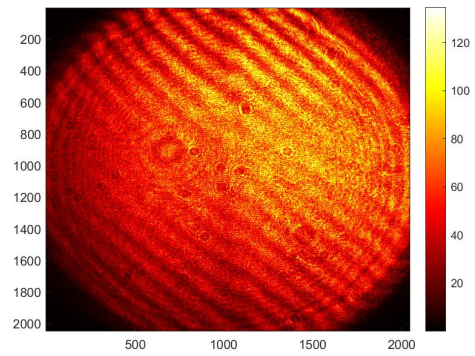
(a)



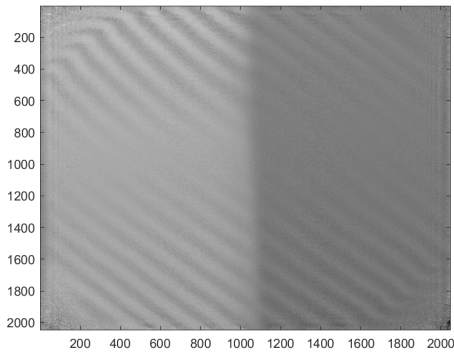
(b)



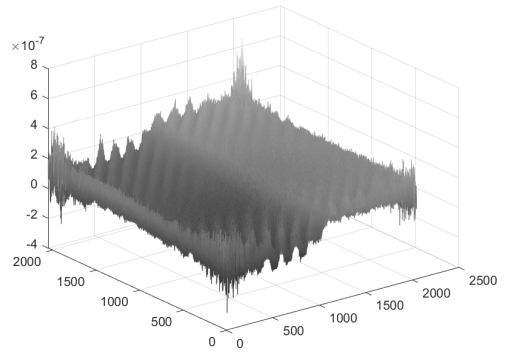
(c)



(d)



(e)

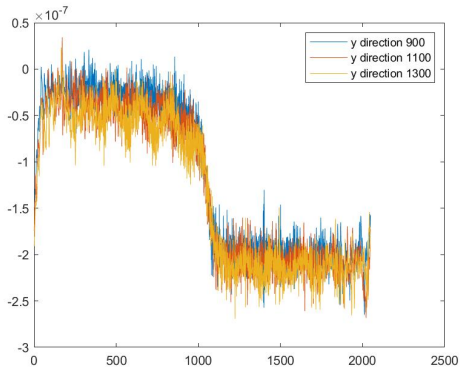


(f)

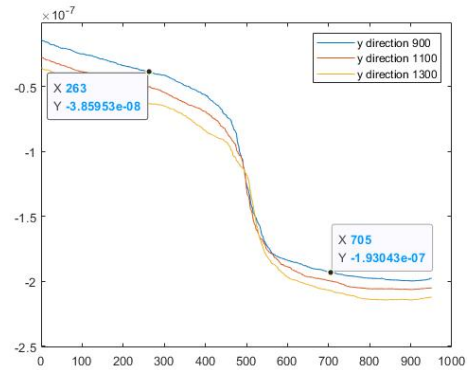
Fig. 4-41 Phase Extraction of Object at 170 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

(c) Phase Image (d) Intensity Image (e) Phase Unwrapping Image (f) 3D image



(a)

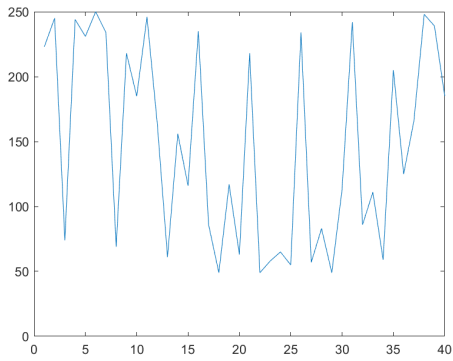


(b)

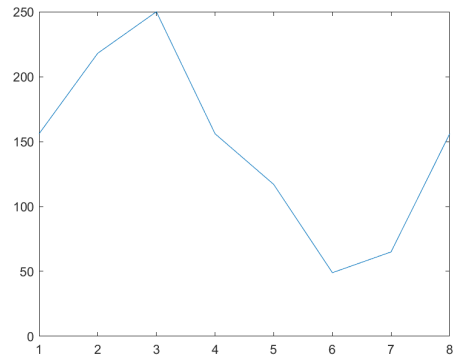
Fig. 4-42 The Result of Measuring the Height Difference at 170 Hz

(a) Line Profile of Y-Axis(900, 1100, 1300 pixel) (b) Result of Median Filter

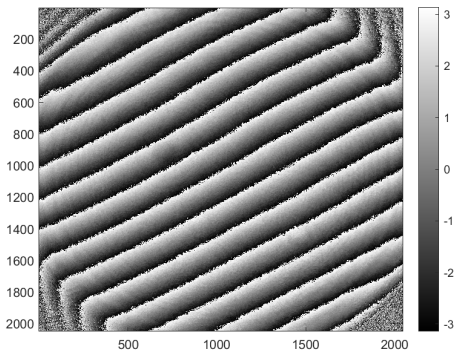
주파수 170 Hz로 두고 측정한 결과를 Fig. 4-40, 41, 42에 나타내었다. x축에서 900, 1100, 1300 pixel에 해당하는 y축 값을 추출하여 단차를 측정할 수 있도록 하였으며 이 높이 정보를 가진 그래프를 (a)에 나타내었다. (b)는 노이즈를 잡기 위해 메디안 필터를 적용시킨 결과로 평균 단차 151.193 nm, 오차율 0.8 %로 측정되었다.



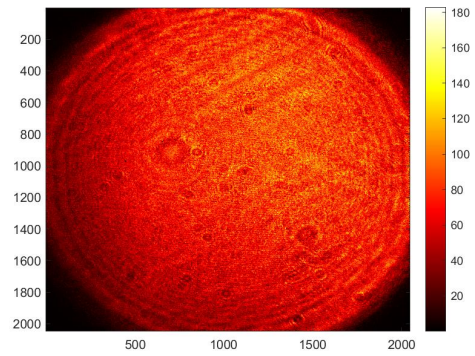
(a)



(b)



(c)

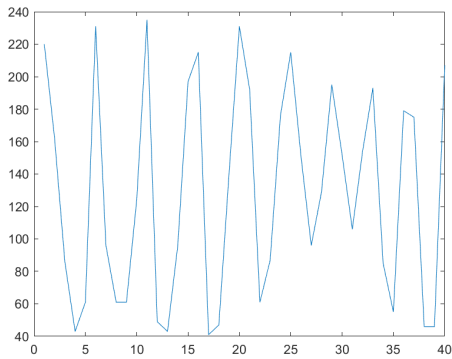


(d)

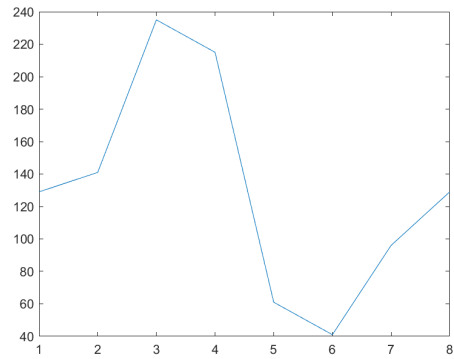
Fig. 4-43 Phase Extraction of Reference at 180 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

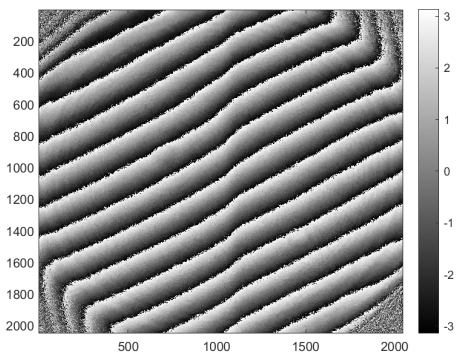
(c) Phase Image (d) Intensity Image



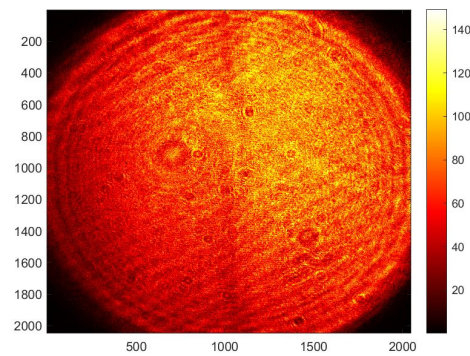
(a)



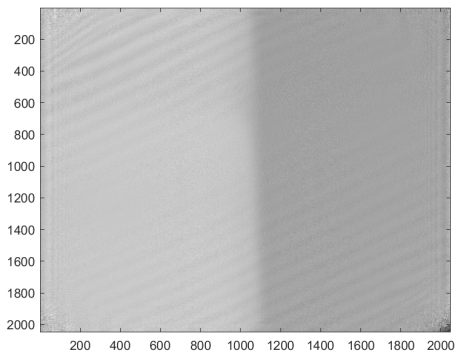
(b)



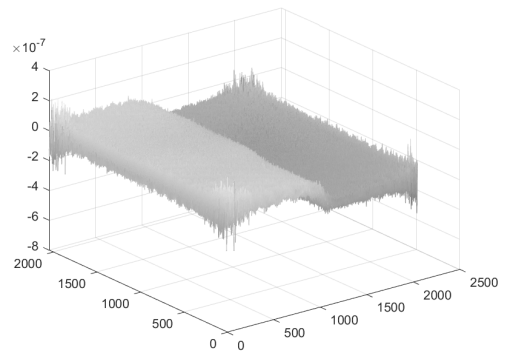
(c)



(d)



(e)

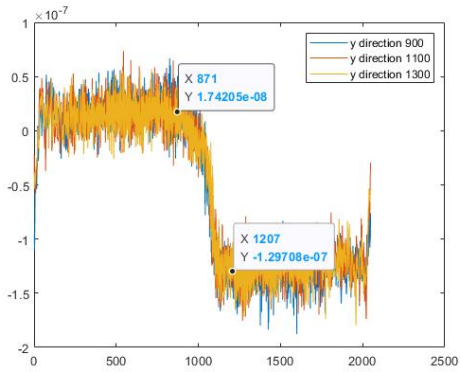


(f)

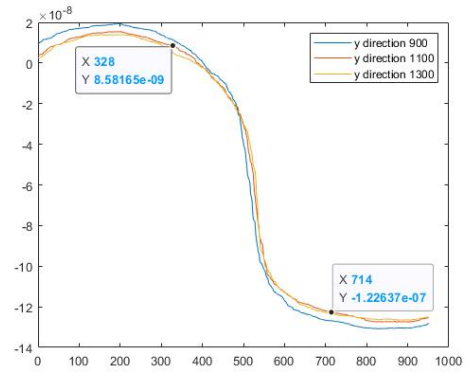
Fig. 4-44 Phase Extraction of Object at 180 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

(c) Phase Image (d) Intensity Image (e) Phase Unwrapping Image (f) 3D image



(a)

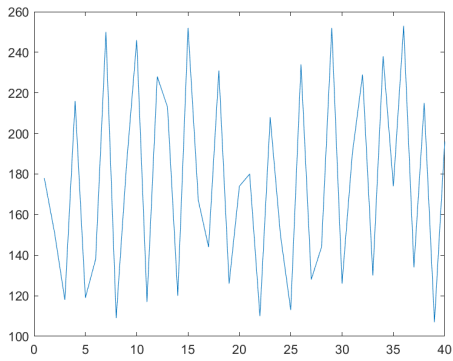


(b)

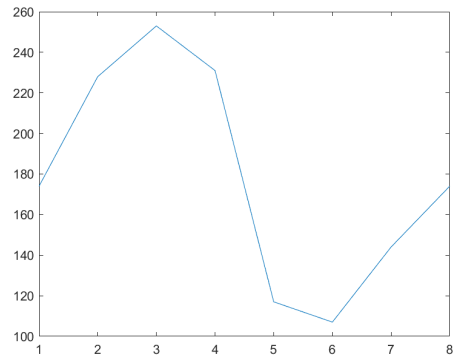
Fig. 4-45 The Result of Measuring the Height Difference at 180 Hz

(a) Line Profile of Y-Axis(900, 1100, 1300 pixel) (b) Result of Median Filter

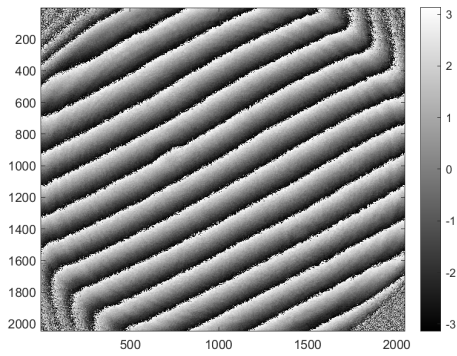
Fig. 4-43, 44, 45에 주파수 180 Hz로 부가하였을 때 측정된 결과를 나타내었다. x축에서 900, 1100, 1300 pixel에 해당하는 y축 값을 추출하여 단차를 측정할 수 있도록 하여 이 높이 정보를 가진 그래프를 (a)에 표기하였다. 노이즈에 대한 영향을 줄이기 위해 메디안 필터를 적용시켜 측정된 결과 평균 단차는 138.458 nm 로 (b)에 표기하였으며 오차율은 7.69 %다.



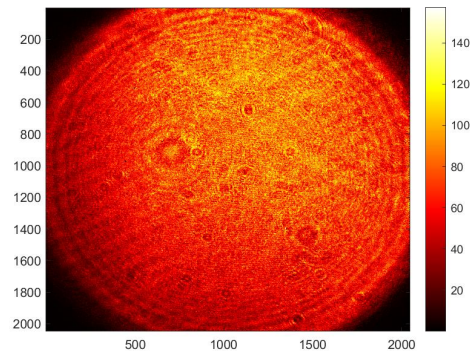
(a)



(b)



(c)

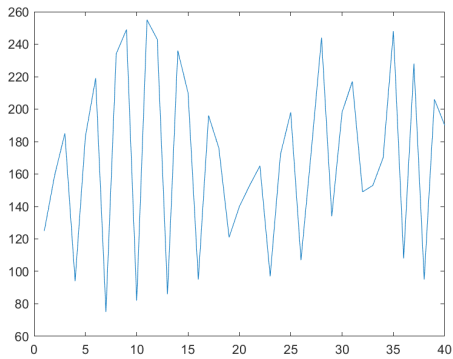


(d)

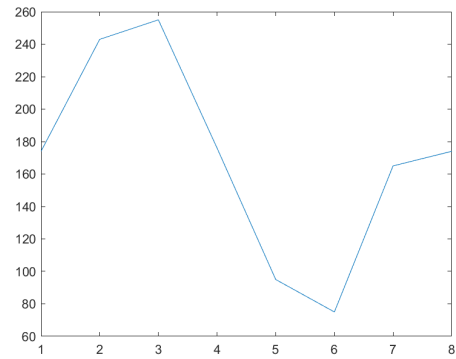
Fig. 4-46 Phase Extraction of Reference at 190 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

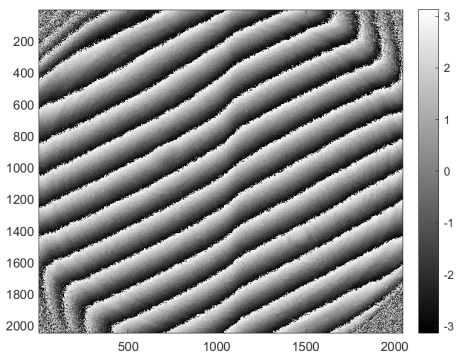
(c) Phase Image (d) Intensity Image



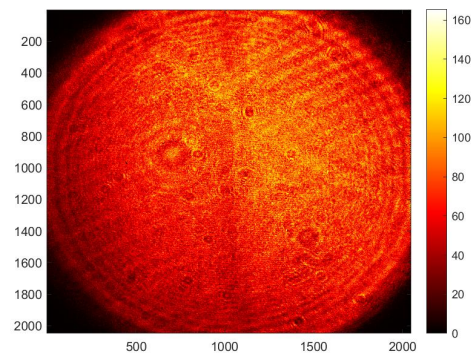
(a)



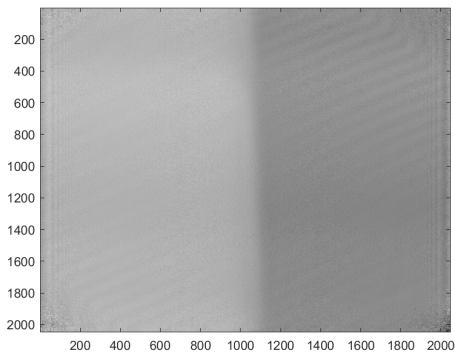
(b)



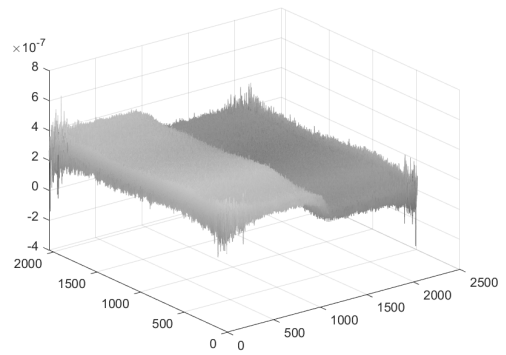
(c)



(d)



(e)

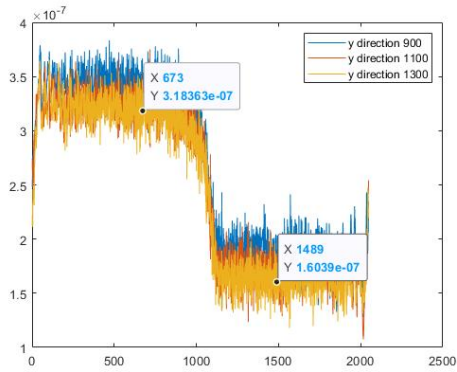


(f)

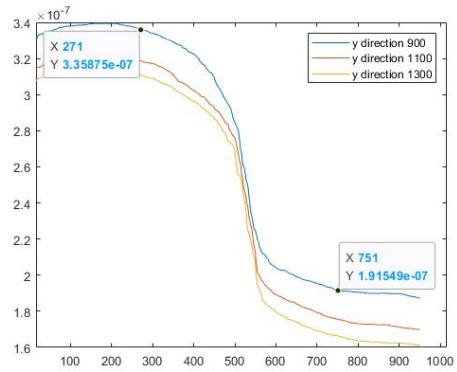
Fig. 4-47 Phase Extraction of Object at 190 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

(c) Phase Image (d) Intensity Image (e) Phase Unwrapping Image (f) 3D image



(a)

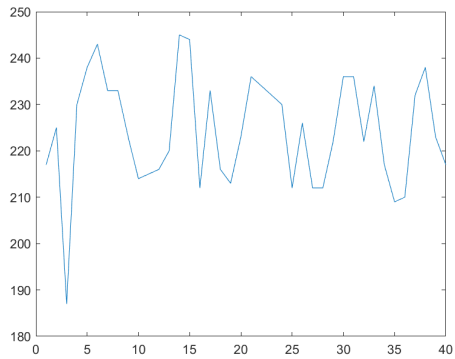


(b)

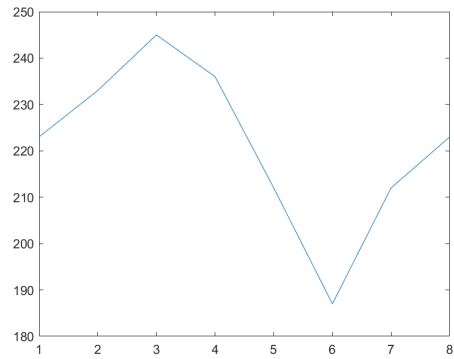
Fig. 4-48 The Result of Measuring the Height Difference at 190 Hz

(a) Line Profile of Y-Axis(900, 1100, 1300 pixel) (b) Result of Median Filter

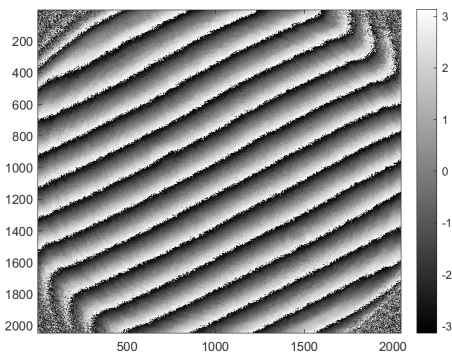
주파수 190 Hz로 두고 측정한 결과를 Fig. 4-46, 47, 48에 나타내었다. x축에서 900, 1100, 1300 pixel에 해당하는 y축 값을 추출하여 단차를 측정할 수 있도록 하여 이 높이 정보를 가진 그래프를 (a)에 나타내었다. 메디안 필터를 적용시켜 측정한 결과는 (b)에 표기하였으며 평균 단차는 144.108 nm 로 오차율은 3.93 %로 측정되었다.



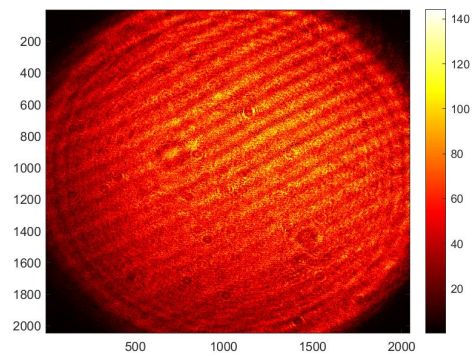
(a)



(b)



(c)

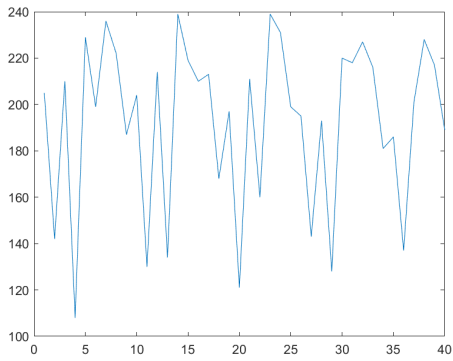


(d)

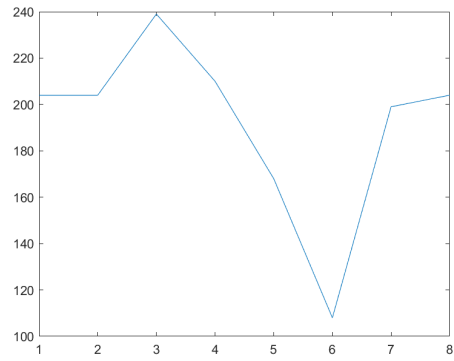
Fig. 4-49 Phase Extraction of Reference at 200 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

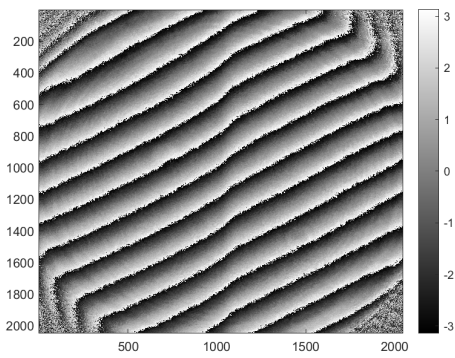
(c) Phase Image (d) Intensity Image



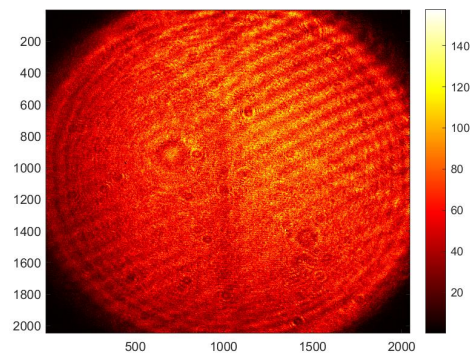
(a)



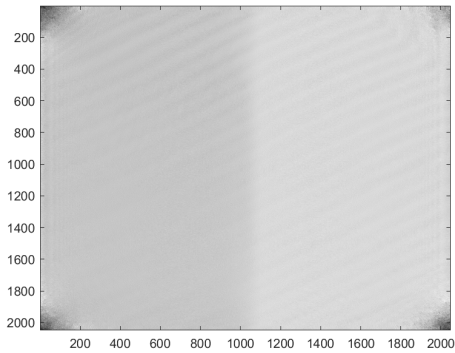
(b)



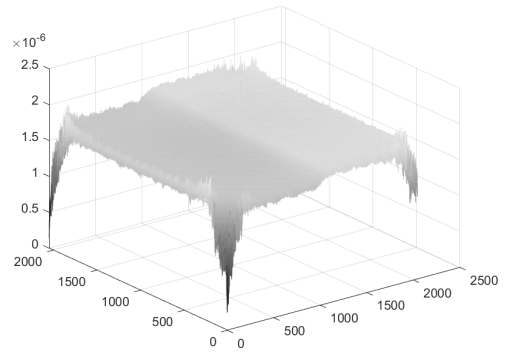
(c)



(d)



(e)

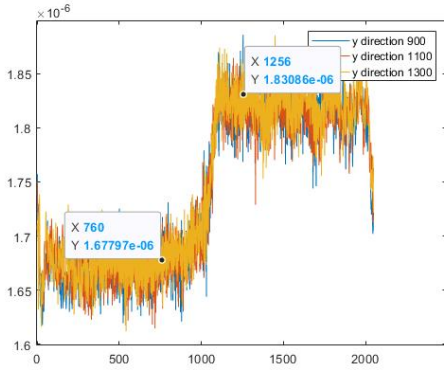


(f)

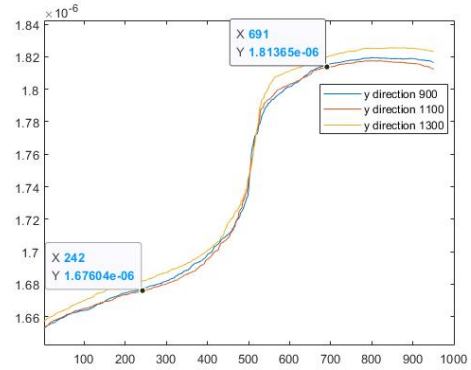
Fig. 4-50 Phase Extraction of Object at 200 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

(c) Phase Image (d) Intensity Image (e) Phase Unwrapping Image (f) 3D image



(a)

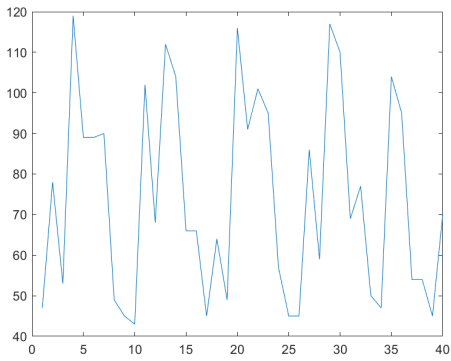


(b)

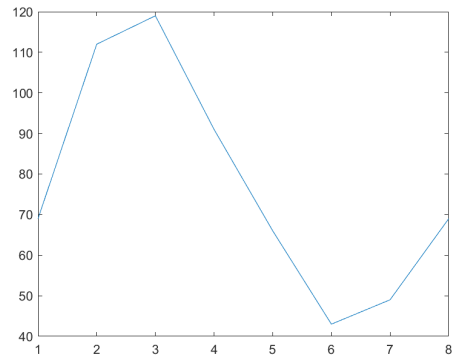
Fig. 4-51 The Result of Measuring the Height Difference at 200 Hz

(a) Line Profile of Y-Axis(900, 1100, 1300 pixel) (b) Result of Median Filter

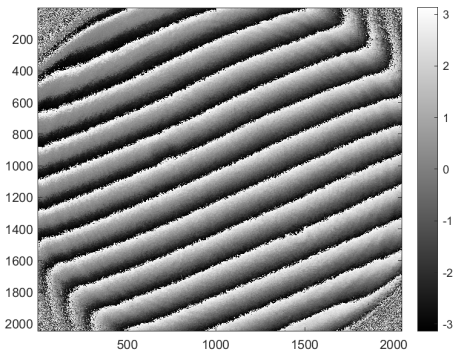
Fig. 4-49, 50, 51은 주파수를 200 Hz로 부가하며 측정된 결과를 나타내었다. x축에서 900, 1100, 1300 pixel에 해당하는 y축 값을 추출하여 단차를 측정할 수 있도록 하여 이 높이 정보를 가진 그래프를 (a)에 표기하였다. 노이즈에 대한 영향을 줄이기 위해 메디안 필터를 적용시켜 측정된 결과는 (b)에 표기하였다. 평균 단차는 136.871 nm로 오차율 8.75 %로 측정되어 노이즈가 많고 기울기가 있어 메디안 필터를 적용하였음에도 결과값이 좋지 않은 것으로 보인다.



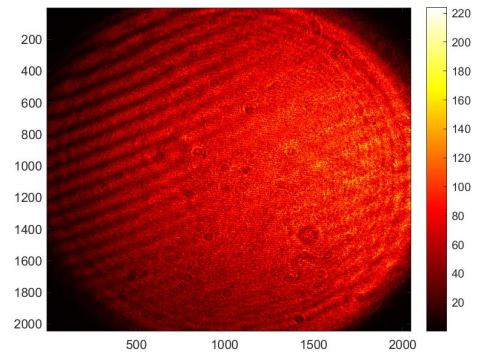
(a)



(b)



(c)

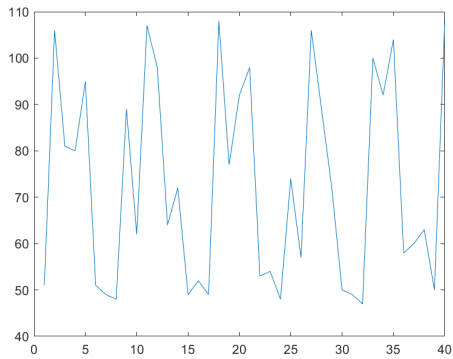


(d)

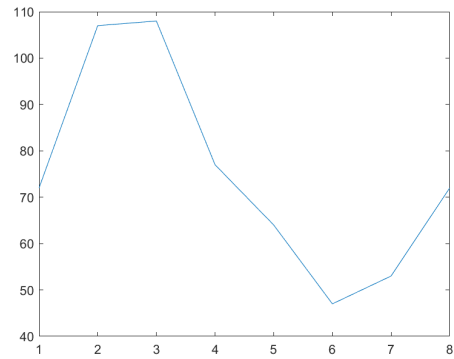
Fig. 4-52 Phase Extraction of Reference at 210 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

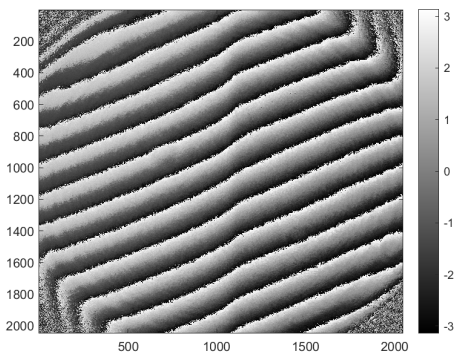
(c) Phase Image (d) Intensity Image



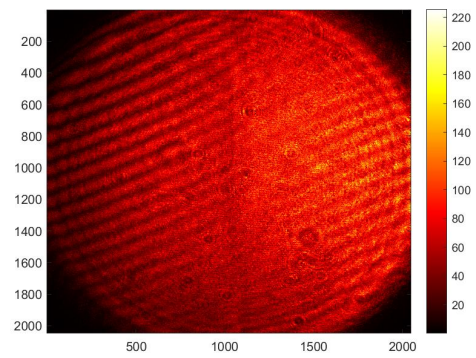
(a)



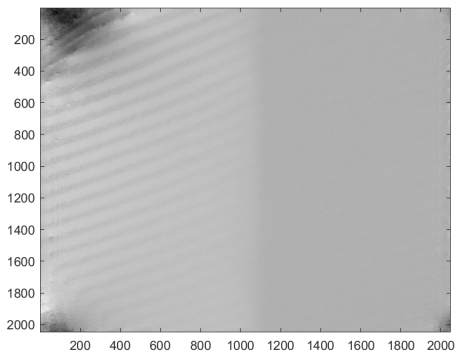
(b)



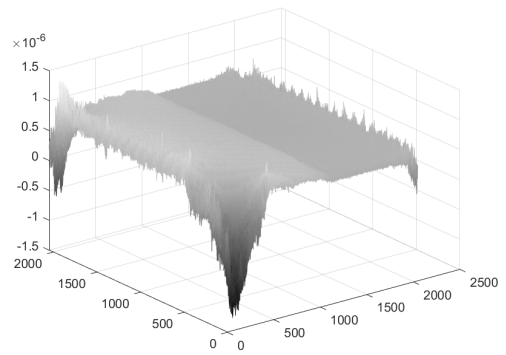
(c)



(d)



(e)

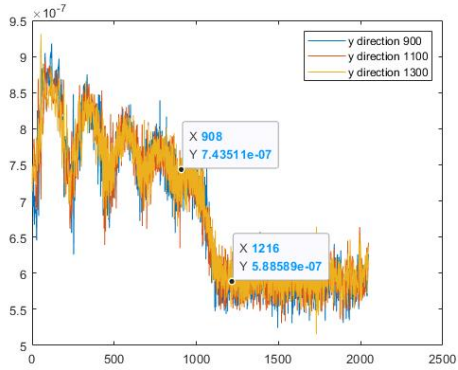


(f)

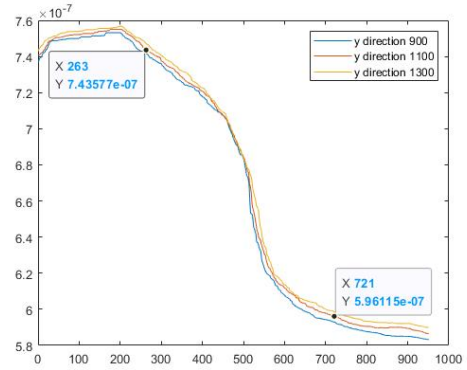
Fig. 4-53 Phase Extraction of Object at 210 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

(c) Phase Image (d) Intensity Image (e) Phase Unwrapping Image (f) 3D image



(a)

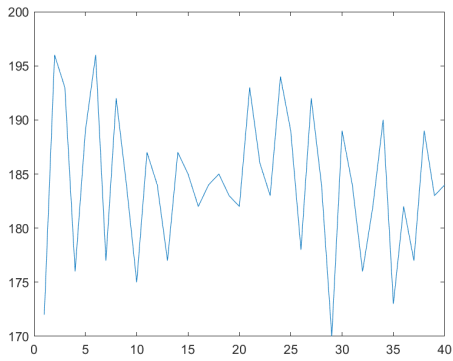


(b)

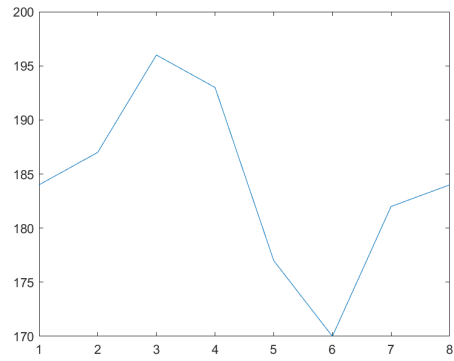
Fig. 4-54 The Result of Measuring the Height Difference at 210 Hz

(a) Line Profile of Y-Axis(900, 1100, 1300 pixel) (b) Result of Median Filter

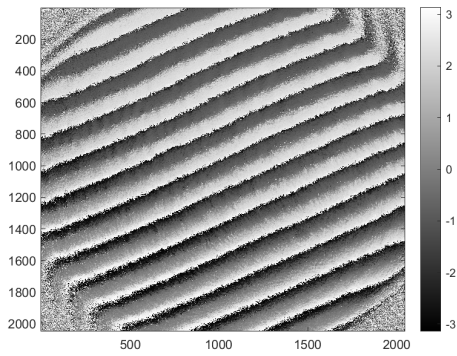
210 Hz를 부가할 때 디지털 홀로그래피로 측정된 결과를 Fig. 4-52, 53, 54에 나타내었다. x축에서 900, 1100, 1300 pixel에 해당하는 y축 값을 추출하여 단차를 측정할 수 있도록 하여 이 높이 정보를 가진 그래프를 (a)에 표기하였다. 노이즈에 대한 영향을 줄이기 위해 메디안 필터를 적용시켜 측정된 결과 (b)에 표기하였다. 평균 단차는 147.753 nm 로 오차율은 1.5%로 측정하기 매우 좋은 주파수로 판단된다.



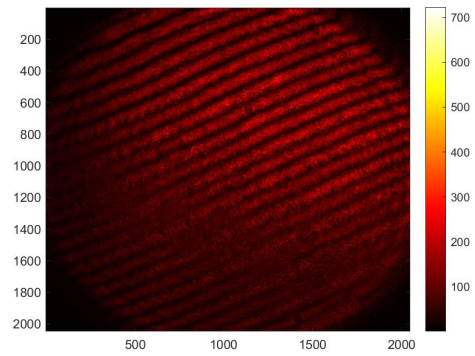
(a)



(b)



(c)

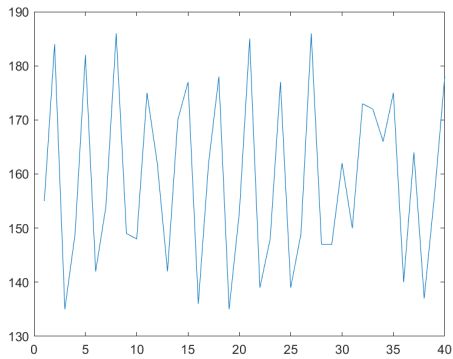


(d)

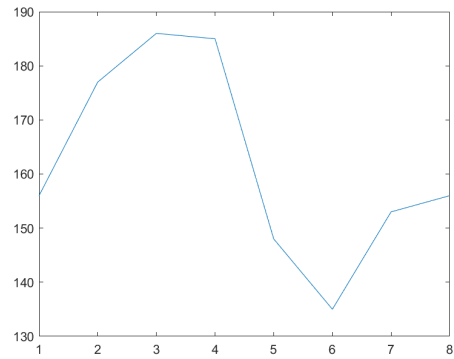
Fig. 4-55 Phase Extraction of Reference at 220 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

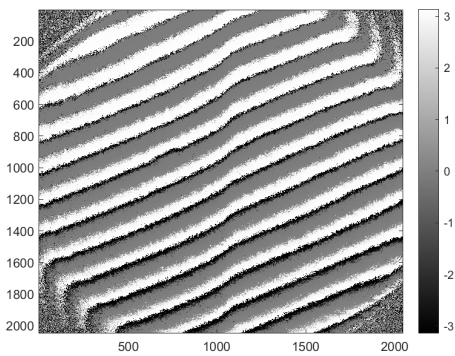
(c) Phase Image (d) Intensity Image



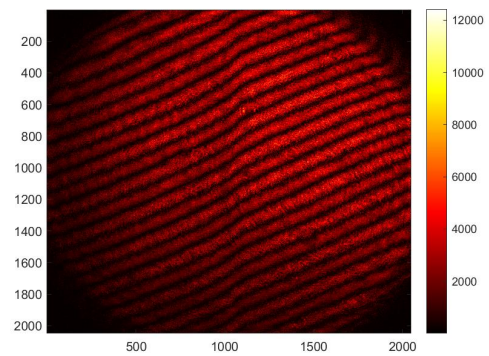
(a)



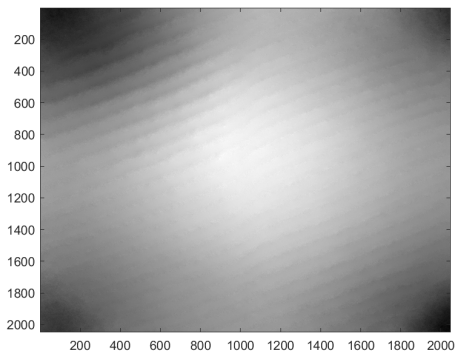
(b)



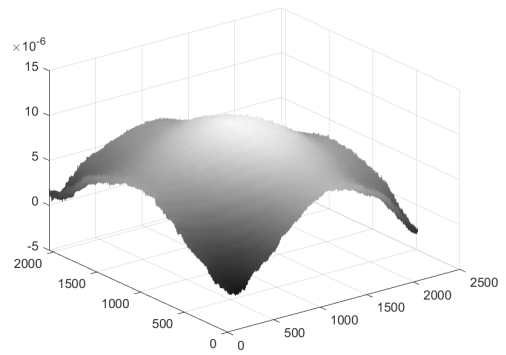
(c)



(d)



(e)

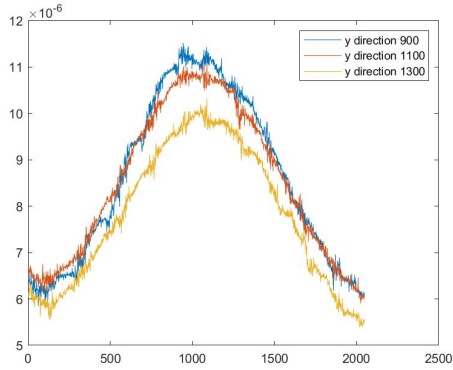


(f)

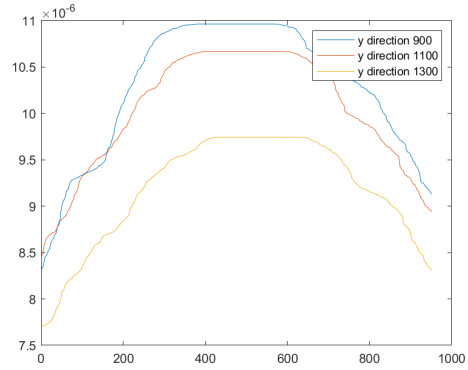
Fig. 4-56 Phase Extraction of Object at 220 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

(c) Phase Image (d) Intensity Image (e) Phase Unwrapping Image (f) 3D image



(a)

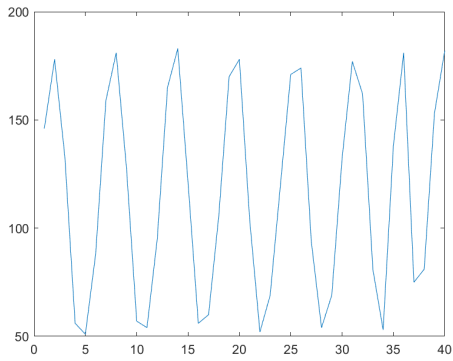


(b)

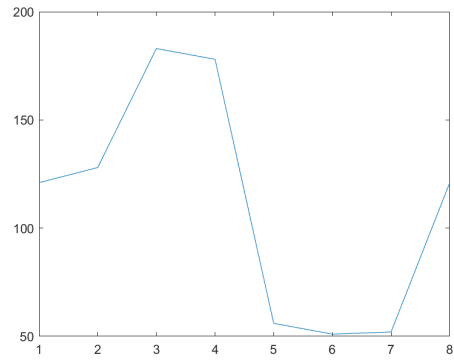
Fig. 4-57 The Result of Measuring the Height Difference at 220 Hz

(a) Line Profile of Y-Axis(900, 1100, 1300 pixel) (b) Result of Median Filter

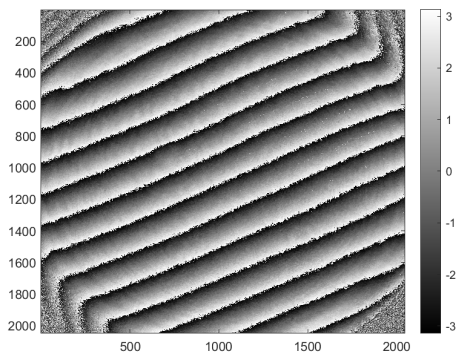
Fig. 4-55, 56, 57은 주파수 220 Hz일 때 측정된 결과를 나타내었다. x축에서 900, 1100, 1300 pixel에 해당하는 y축 값을 추출하여 단차를 측정할 수 있도록 하였으며 이 높이 정보를 가진 그래프를 (a)에 나타내었다. (b)는 노이즈를 잡기 위해 메디안 필터를 적용시킨 결과로 단차는 588.828 nm로 측정되었다. 그레이 레벨에 문제가 있는 경우 이와 같이 물체에 대한 정보가 제대로 측정되지 않아 220 Hz는 측정에 사용하기엔 적합하지 않은 것으로 보인다. 230 ~ 250 Hz 역시 위상정보가 변화하지 않아 측정에 사용하지 못하였다.



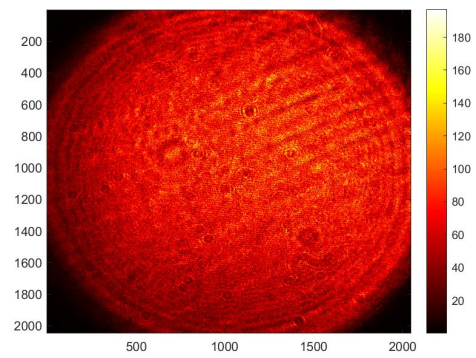
(a)



(b)



(c)

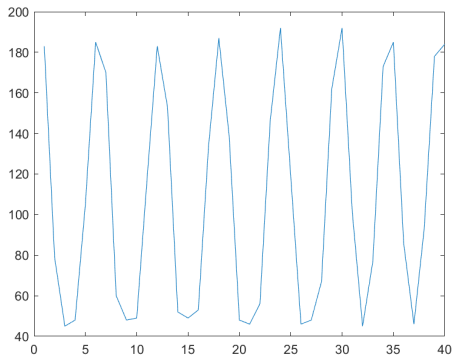


(d)

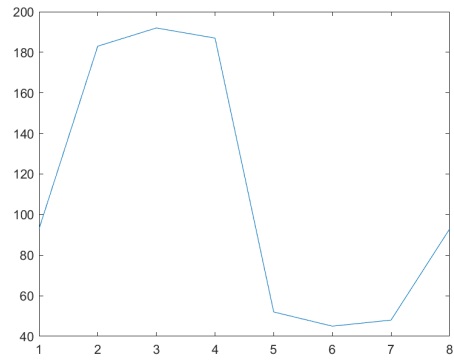
Fig. 4-58 Phase Extraction of Reference at 260 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

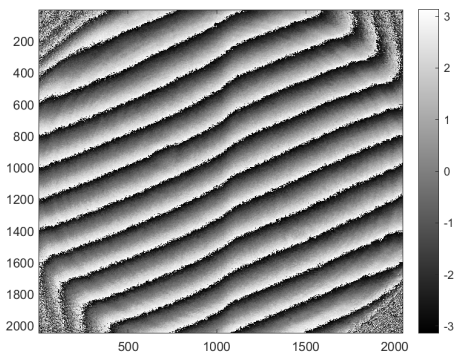
(c) Phase Image (d) Intensity Image



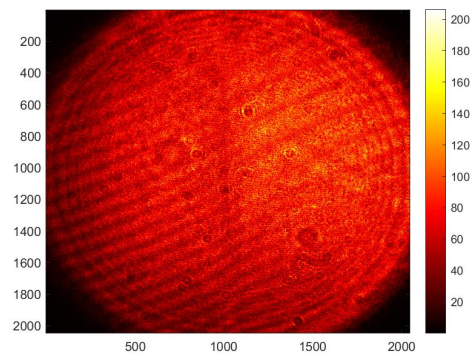
(a)



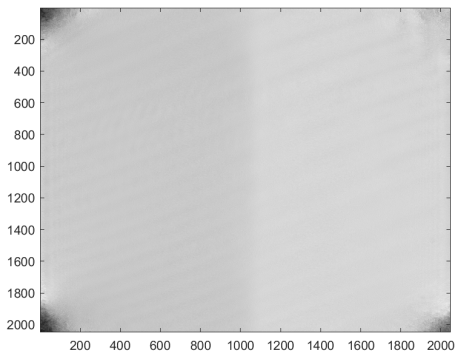
(b)



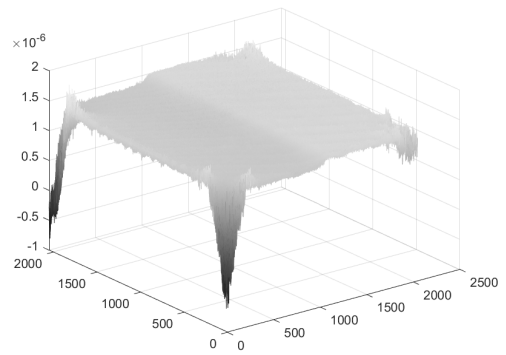
(c)



(d)



(e)

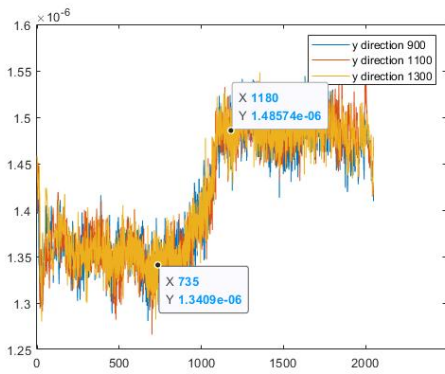


(f)

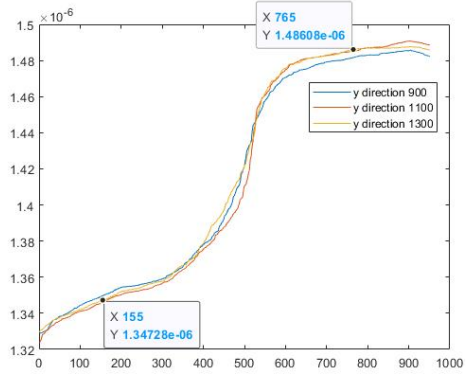
Fig. 4-59 Phase Extraction of Object at 260 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

(c) Phase Image (d) Intensity Image (e) Phase Unwrapping Image (f) 3D image



(a)

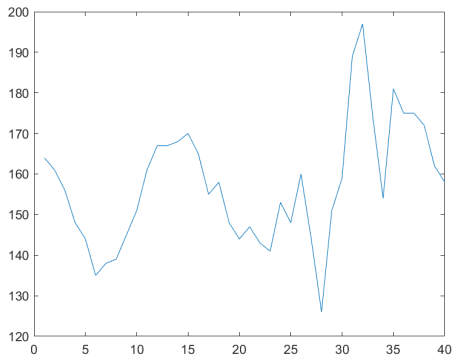


(b)

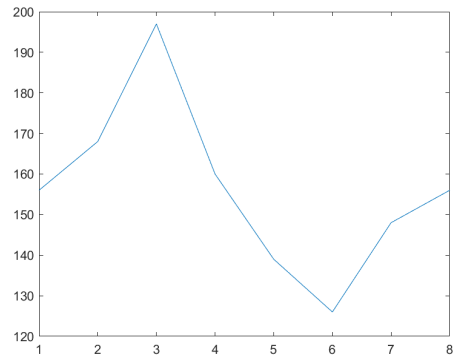
Fig. 4-60 The Result of Measuring the Height Difference at 260 Hz

(a) Line Profile of Y-Axis(900, 1100, 1300 pixel) (b) Result of Median Filter

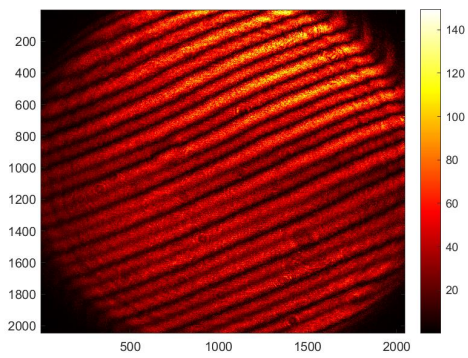
260 Hz로 셰이커를 작동시키며 측정한 결과를 Fig. 4-58, 59, 60에 나타내었다. x축에서 900, 1100, 1300 pixel에 해당하는 y축 값을 추출하여 단차를 측정할 수 있도록 하여 이 높이 정보를 가진 그래프를 (a)에 표기하였다. (b)에 메디안 필터를 적용시켜 측정한 결과를 나타내었으며 평균 단차는 127.014 nm 로 오차율은 15.32%이므로 위상 변화는 있었으나 측정 시 사용하기 좋은 주파수는 아닌 것으로 보인다.



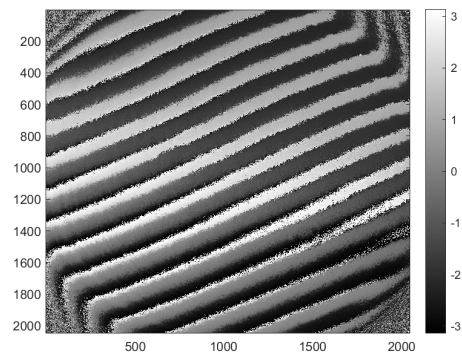
(a)



(b)



(c)

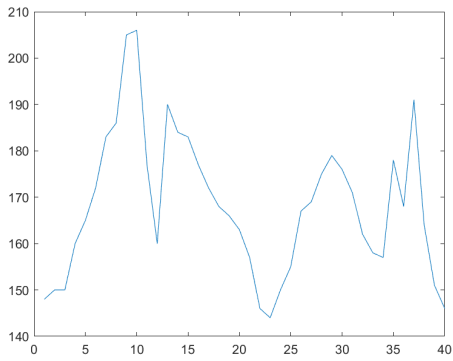


(d)

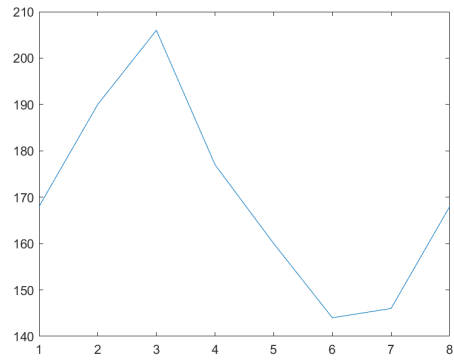
Fig. 4-61 Phase Extraction of Reference at 330 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

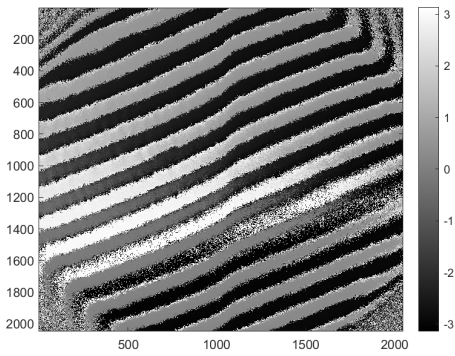
(c) Phase Image (d) Intensity Image



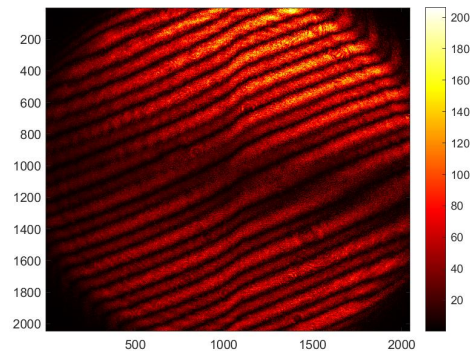
(a)



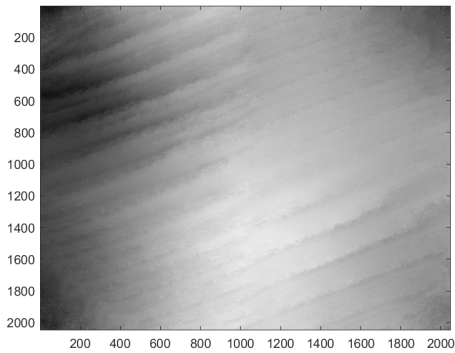
(b)



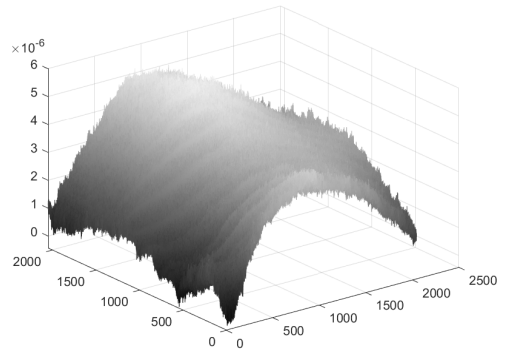
(c)



(d)



(e)

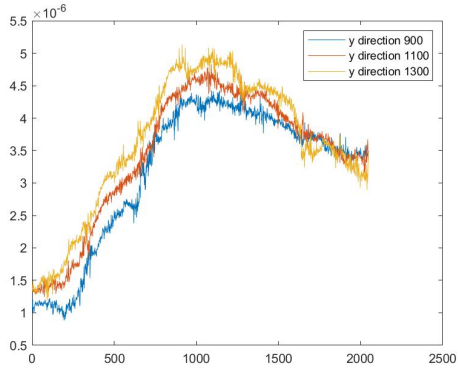


(f)

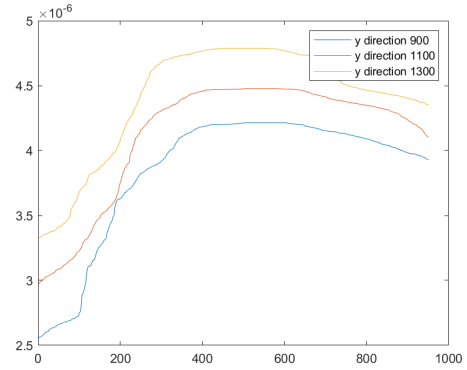
Fig. 4-62 Phase Extraction of Object at 330 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

(c) Phase Image (d) Intensity Image (e) Phase Unwrapping Image (f) 3D image



(a)

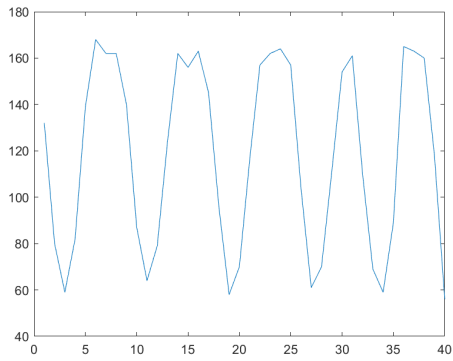


(b)

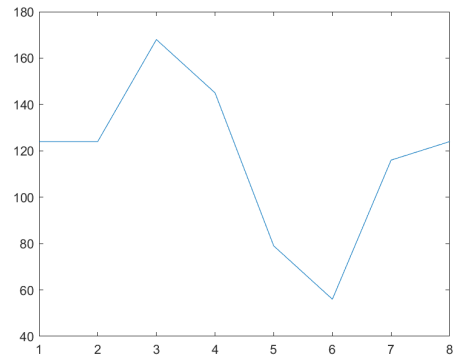
Fig. 4-63 The Result of Measuring the Height Difference at 330 Hz

(a) Line Profile of Y-Axis(900, 1100, 1300 pixel) (b) Result of Median Filter

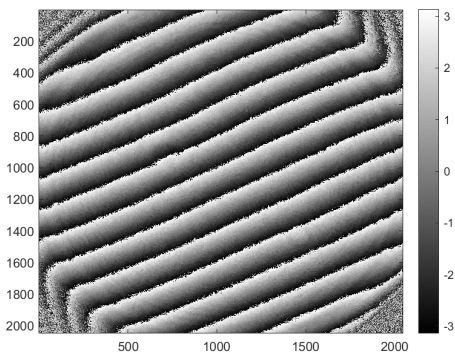
Fig. 4-61, 62, 63은 CCD 카메라 설정을 80프레임으로 셰이커를 주파수 330 Hz로 두고 측정한 결과를 나타내었다. x축에서 900, 1100, 1300 pixel에 해당하는 y축 값을 추출하여 단차를 측정할 수 있도록 하였으며 이 높이 정보를 가진 그래프를 (a)에 나타내었다. (b)는 노이즈를 잡기 위해 메디안 필터를 적용시킨 결과로 평균 단차는 118.4 nm 로 측정되었다. 오차율이 21.07 %로 너무 높은 오차율로 사용하기 힘든 주파수로 보인다.



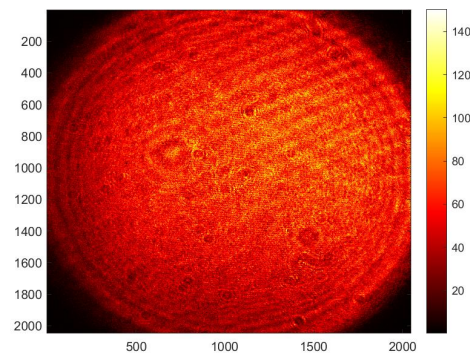
(a)



(b)



(c)

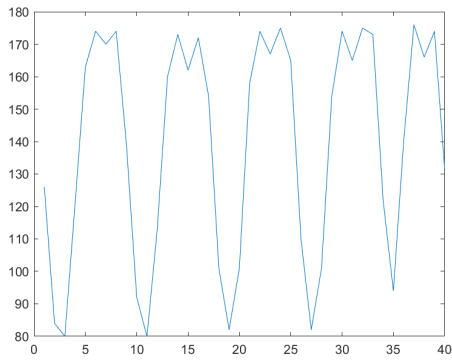


(d)

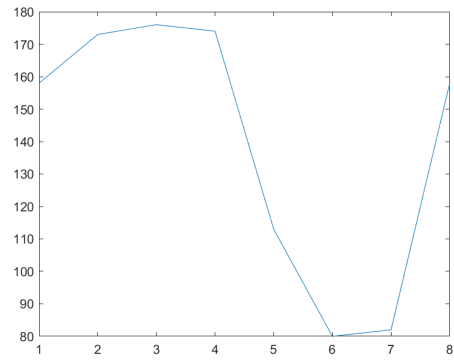
Fig. 4-64 Phase Extraction of Reference at 420 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

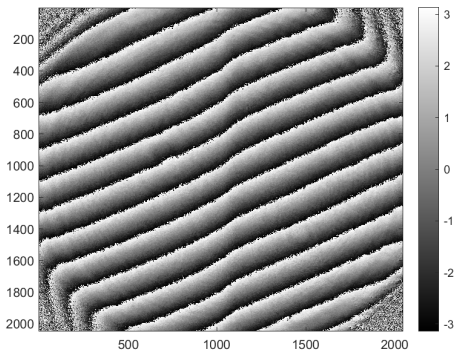
(c) Phase Image (d) Intensity Image



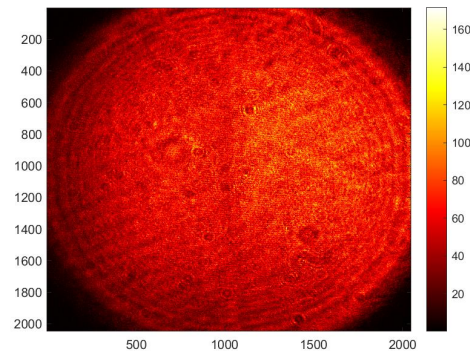
(a)



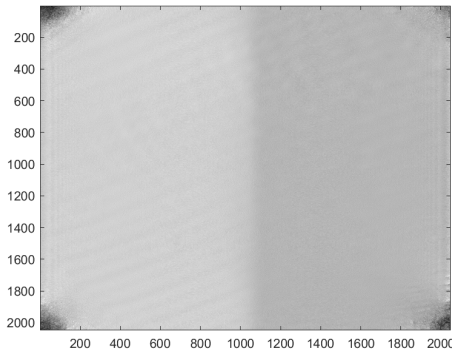
(b)



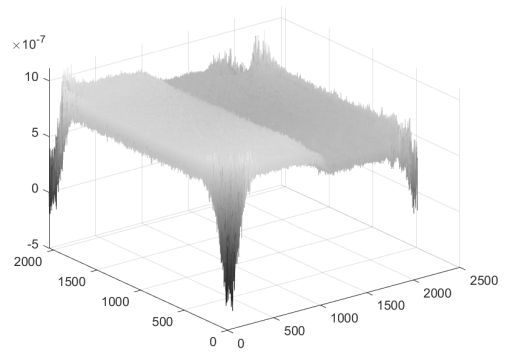
(c)



(d)



(e)

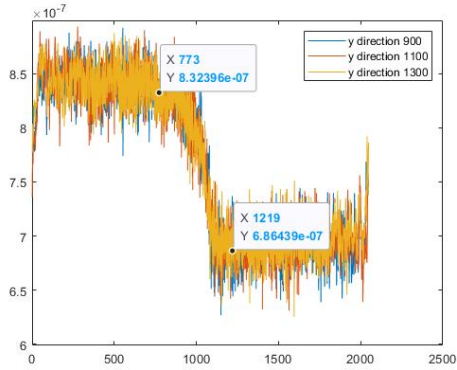


(f)

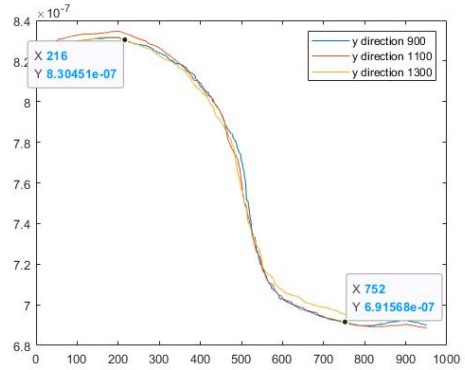
Fig. 4-65 Phase Extraction of Object at 420 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

(c) Phase Image (d) Intensity Image (e) Phase Unwrapping Image (f) 3D image



(a)

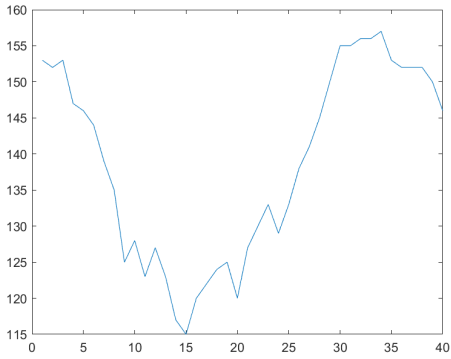


(b)

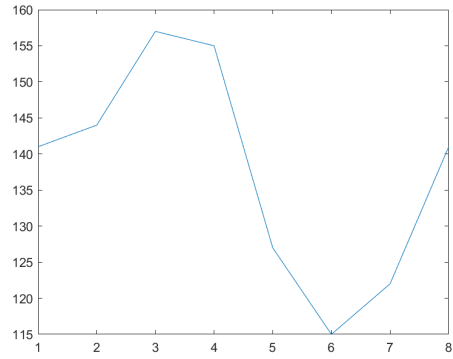
Fig. 4-66 The Result of Measuring the Height Difference at 420 Hz

(a) Line Profile of Y-Axis(900, 1100, 1300 pixel) (b) Result of Median Filter

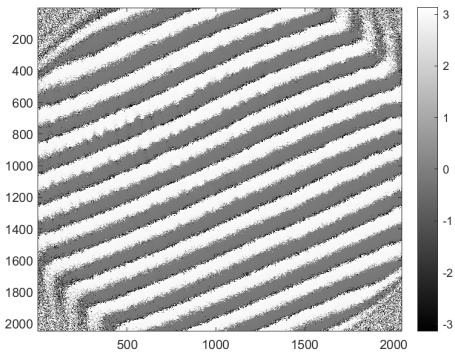
Fig. 4-64, 65, 66에 CCD 셰이커를 주파수 420 Hz로 두고 측정한 결과를 나타내었다. x축에서 900, 1100, 1300 pixel에 해당하는 y축 값을 추출하여 단차를 측정할 수 있도록 하여 이 높이 정보를 가진 그래프를 (a)에 표기하였으며 결과는 145.957 nm 로 측정된다. 노이즈에 대한 영향을 줄이기 위해 메디안 필터를 적용시켜 측정한 결과는 (b)에 표기하였다. 평균 단차는 132.992 nm 로 오차를 11.34 %로 역시 측정에 사용하 기엔 어려움이 있어 보인다.



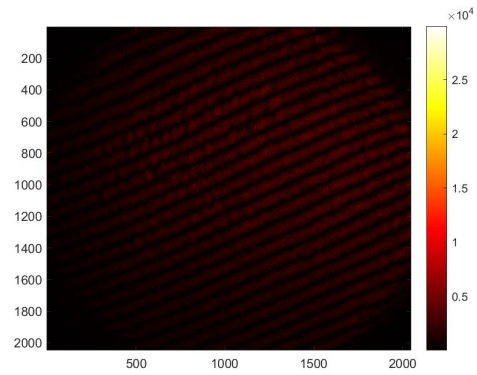
(a)



(b)



(c)

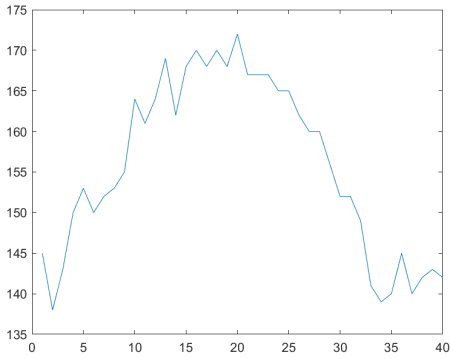


(d)

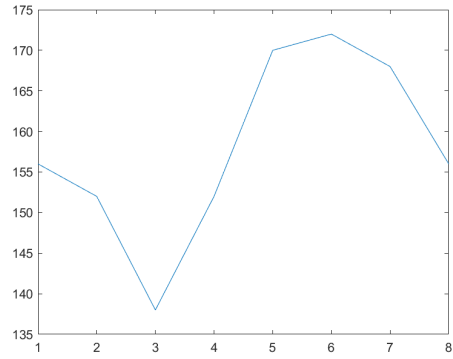
Fig. 4-67 Phase Extraction of Reference at 490 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

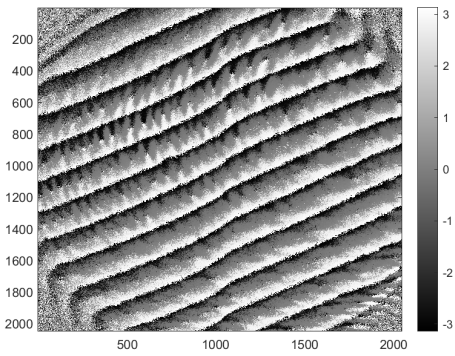
(c) Phase Image (d) Intensity Image



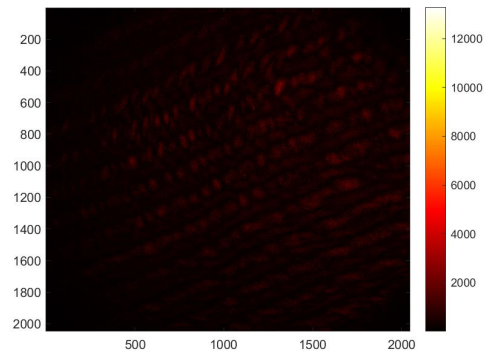
(a)



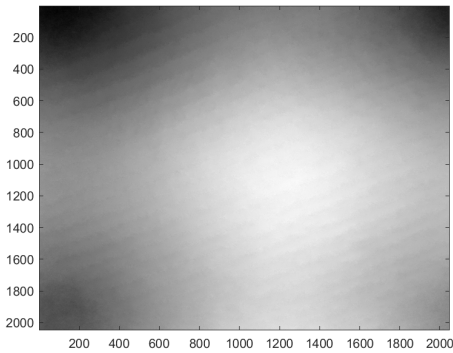
(b)



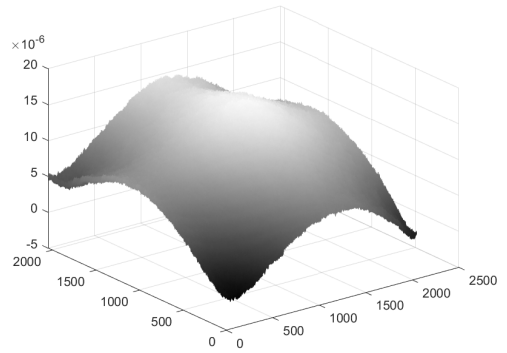
(c)



(d)



(e)

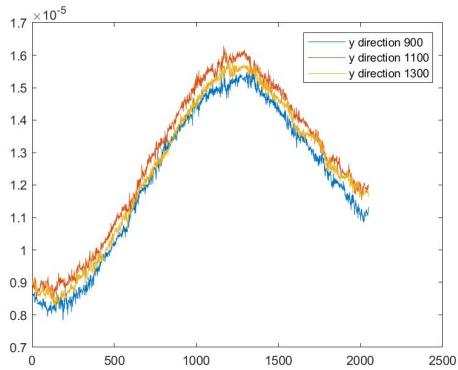


(f)

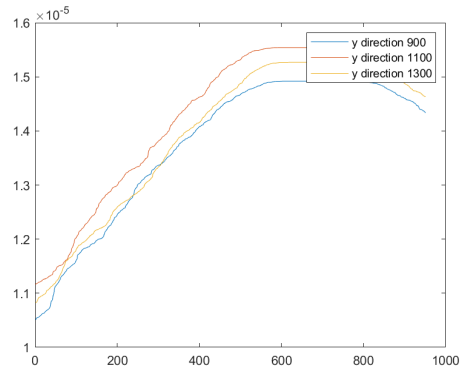
Fig. 4-68 Phase Extraction of Object at 490 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

(c) Phase Image (d) Intensity Image (e) Phase Unwrapping Image (f) 3D image



(a)

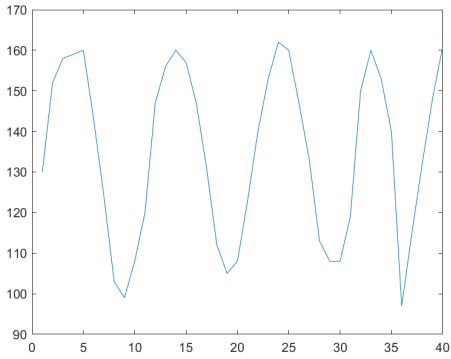


(b)

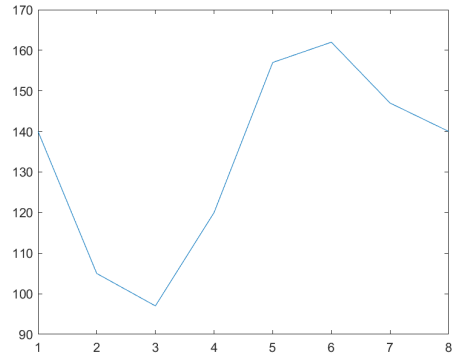
Fig. 4-69 The Result of Measuring the Height Difference at 490 Hz

(a) Line Profile of Y-Axis(900, 1100, 1300 pixel) (b) Result of Median Filter

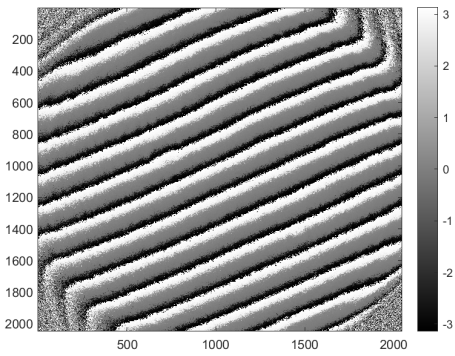
셰이커를 주파수 490 Hz로 두고 측정한 결과를 Fig. 4-67, 68, 69에 나타내었다. x축에서 900, 1100, 1300 pixel에 해당하는 y축 값을 추출하여 단차를 측정할 수 있도록 하였으며 이 높이 정보를 가진 그래프를 (a)에 나타내었다. (b)는 노이즈를 잡기 위해 메디안 필터를 적용시킨 결과로 평균 단차는 1,679.485 nm 로 측정되었다. 위상 변화가 2π 만큼의 변형을 일으키지 않아 측정에 사용할 수 없는 것으로 보인다.



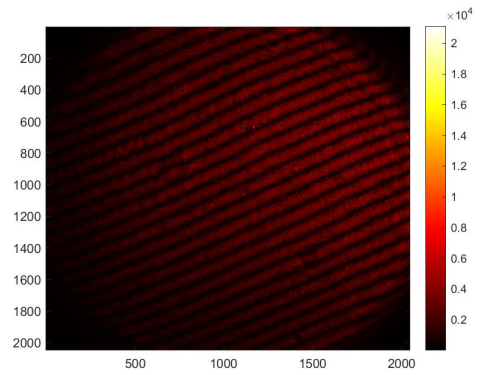
(a)



(b)



(c)

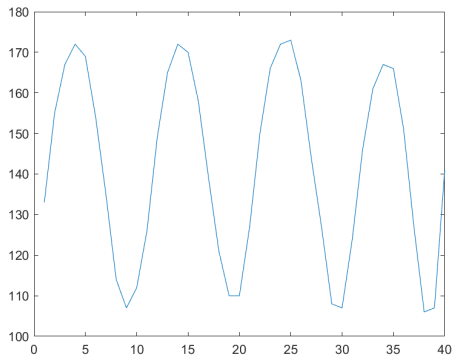


(d)

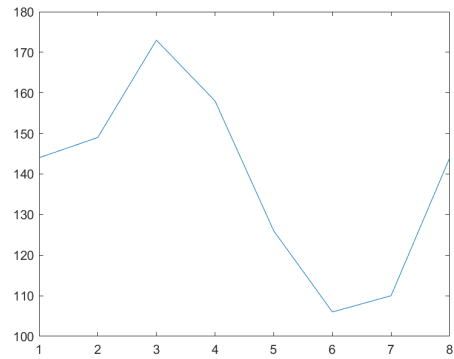
Fig. 4-70 Phase Extraction of Reference at 500 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

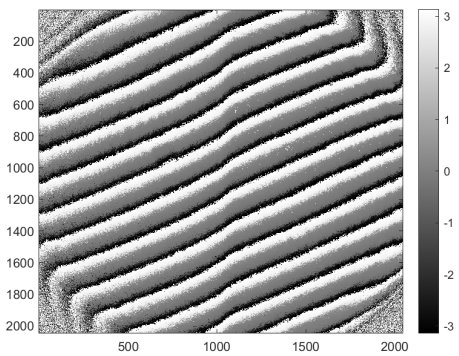
(c) Phase Image (d) Intensity Image



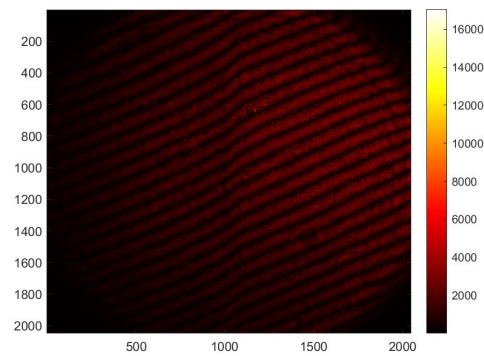
(a)



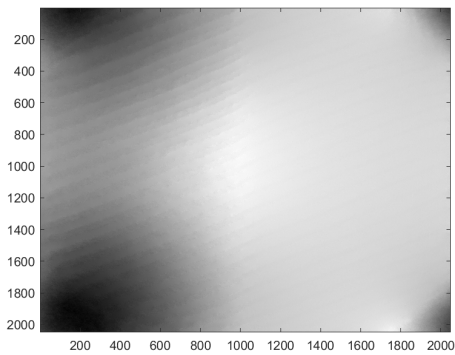
(b)



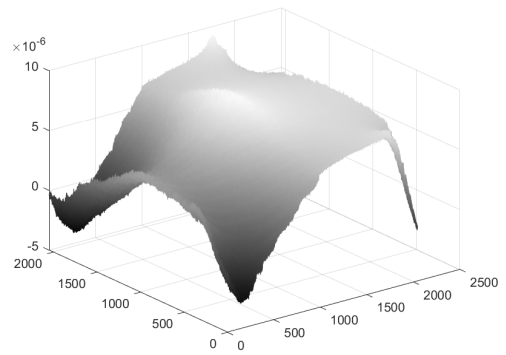
(c)



(d)



(e)

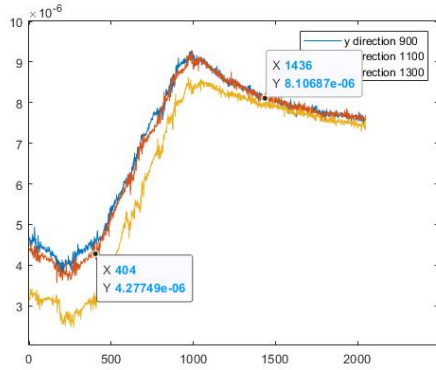


(f)

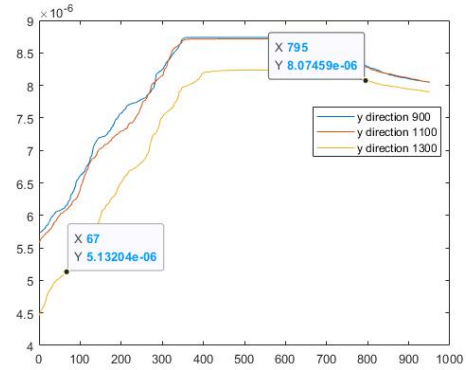
Fig. 4-71 Phase Extraction of Object at 500 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

(c) Phase Image (d) Intensity Image (e) Phase Unwrapping Image (f) 3D image



(a)

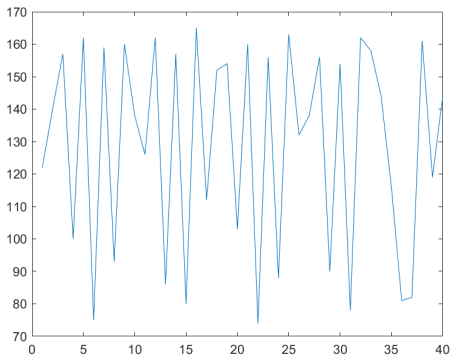


(b)

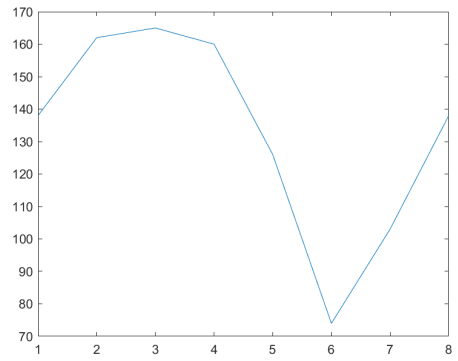
Fig. 4-72 The Result of Measuring the Height Difference at 500 Hz

(a) Line Profile of Y-Axis(900, 1100, 1300 pixel) (b) Result of Median Filter

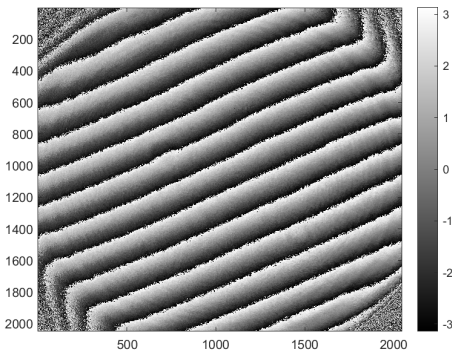
Fig. 4-70, 71, 72에 셰이커를 주파수 500 Hz로 가동하고 측정한 결과를 나타내었다. x축에서 900, 1100, 1300 pixel에 해당하는 y축 값을 추출하여 단차를 측정할 수 있도록 하여 이 높이 정보를 가진 그래프를 (a)에 표기하였으며 노이즈에 대한 영향을 줄이기 위한 메디안 필터를 적용시킨 결과를 (b)에 표기하였다. 평균 단차는 204.15 nm로 오차를 36.1 %이다.



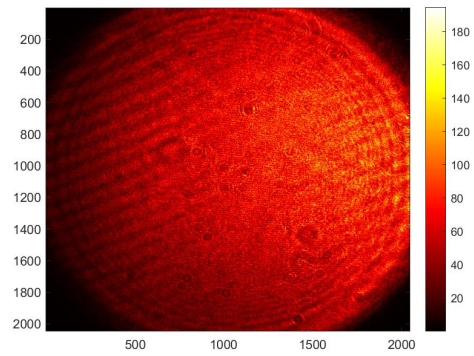
(a)



(b)



(c)

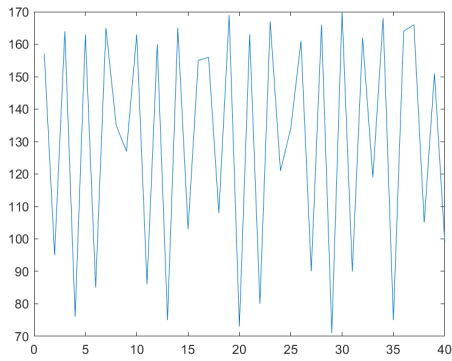


(d)

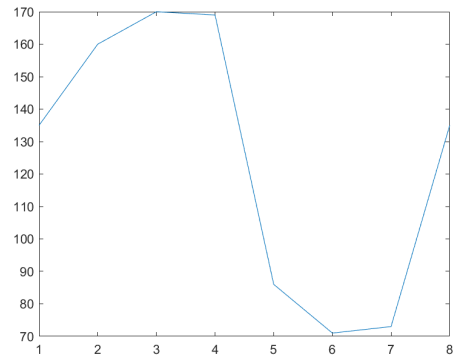
Fig. 4-73 Phase Extraction of Reference at 610 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

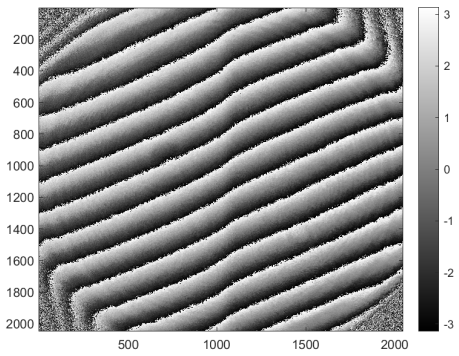
(c) Phase Image (d) Intensity Image



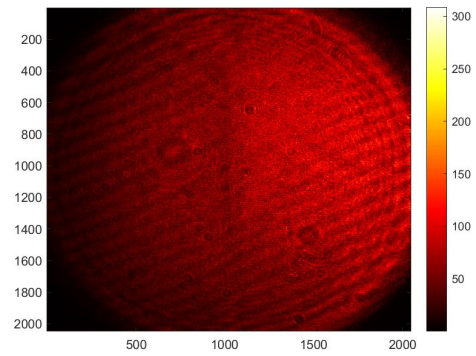
(a)



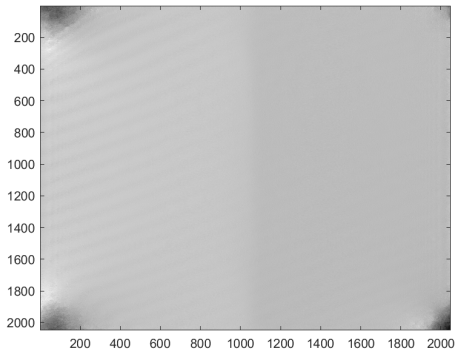
(b)



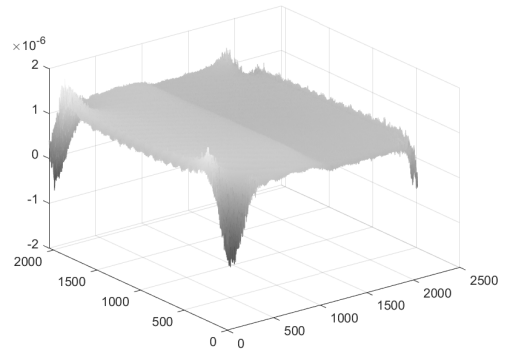
(c)



(d)



(e)



(f)

Fig. 4-74 Phase Extraction of Object at 610 Hz

(a) Grey Level Change at Any Point (b) Extracting 8 Phase Images

(c) Phase Image (d) Intensity Image (e) Phase Unwrapping Image (f) 3D image

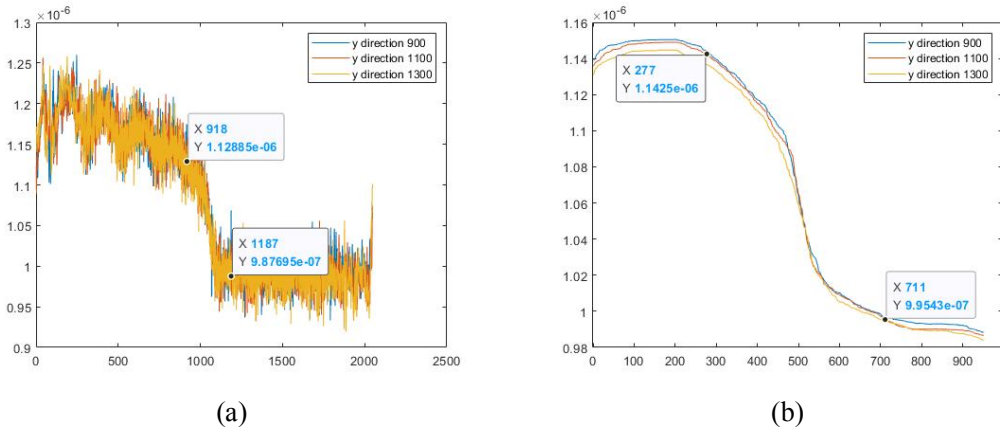


Fig. 4-75 The Result of Measuring the Height Difference at 610 Hz

(a) Line Profile of Y-Axis(900, 1100, 1300 pixel) (b) Result of Median Filter

주파수 610 Hz를 부여하며 측정된 결과를 Fig. 4-73, 74, 75에 나타내었다. x축에서 900, 1100, 1300 pixel에 해당하는 y축 값을 추출하여 단차를 측정할 수 있도록 하여 이 높이 정보를 가진 그래프를 (a)에 표기하였으며 메디안 필터를 적용시킨 결과는 (b)에 표기하였다. 결과는 145.56 nm로 측정된다. 오차율은 2.96 %로 확인되었다.

각 주파수별로 측정된 단차 결과와 오차율을 Table 4-4. 와 아래 그래프에 나타내었다. 셰이커의 멤브레인을 대상을 고정하는 스테이지에 부착하여 측정하였을 때 30, 40, 50, 70, 80, 90, 170, 190, 210, 610 Hz에서 측정된 결과는 설계값과 측정 결과와의 오차율 5 % 이내로 측정에 적합하다는 것을 알 수 있다. 20, 60, 160, 180, 200 Hz에서는 오차율 10 % 이내이며 110, 140, 420 Hz에서는 오차율 15 % 이내로 사용하기엔 오차율이 떨어지는 결과값을 보임을 알 수 있었다. 이 외에 오차율이 15 %가 넘어가는 100, 130, 220, 260, 330, 490, 500 Hz의 경우 역시 위상이동에 문제가 있어 측정결과를 예측할 수 없으므로 측정 시 위상이동으로 사용하기엔 적합하지 않은 주파수로 보인다. 실험 결과를 통해 최소 30에서 610 Hz까지 측정에 사용할 수 있는 주파수 범위인 것으로 보인다. 610 Hz를 넘어서면 측정에 사용하기에는 고주파여서 오히려 범위가 줄어들어 간섭무늬의 변화가 발생하지 않는 것을 확인할 수 있었다.

Table 4-4. Result of Digital Holography

Frequency [Hz]	900 px [nm]	1100 px [nm]	1300 px [nm]	AVG. [nm]	Error rate [%]
20	134.75	141.024	141.054	138.943	7.37
30	152.475	154.839	153.567	153.627	2.42
40	144.437	143.584	142.121	143.38	4.41
50	154.395	150.816	148.618	151.276	0.85
60	162.78	159.527	156.442	159.583	6.39
70	145.78	141.991	140.674	142.815	4.79
80	147.233	143.403	141.611	144.082	3.95
90	150.355	146.494	143.048	146.632	2.25
100	2106.36	2301.686	2070.505	2159.517	1339.68
110	-134.303	-129.59	-122.659	-128.851	14.10
130	1108.524	744.925	102.862	652.103	334.74
140	-177.144	-168.609	-168.358	-171.37	14.25
160	164.289	159.122	157.372	160.261	6.84
170	-155.383	-150.355	-147.841	-151.193	0.80
180	-144.222	-137.189	-133.962	-138.458	7.69
190	-143.56	-143.665	-145.099	-144.108	3.93
200	136.477	136.497	137.638	136.871	8.75
210	-148.077	-147.586	-147.596	-147.753	1.50
220	-766.662	-682.506	-317.317	-588.828	292.55
260	123.52	130.044	127.477	127.014	15.32
330	120.008	36.161	-199.03	-14.287	90.48
420	-133.582	-136.212	-129.181	-132.992	11.34
490	1510.843	1649.681	1877.931	1679.485	1019.66
500	-11.865	-10.955	589.632	188.937	25.96
610	-146.106	-147.506	-143.068	-145.56	2.96

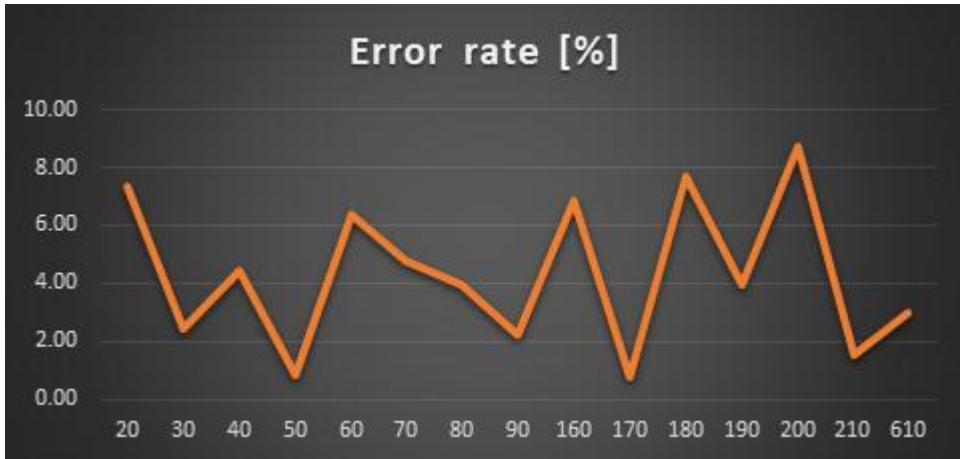


Fig. 4-76 Error Rate in Frequency

제 2 절 Measurement of FE-SEM

FE-SEM으로 150 nm로 설계하여 스퍼터링 공법으로 증착한 ITO 박막의 단차를 측정
 한 결과 148.6 nm로 측정되었다. 본 논문에서 측정한 결과와 비교하였을 때 오차율
 을 Table 4-5. 에 나타내었는데 Table 4-4에서 설계값과 비교한 결과와 큰 차이가 없어
 특정 주파수에서의 결과값은 신뢰할 수 있는 것으로 판단되며 산업 현장에 적용하는
 데 문제가 없을 것으로 판단된다.

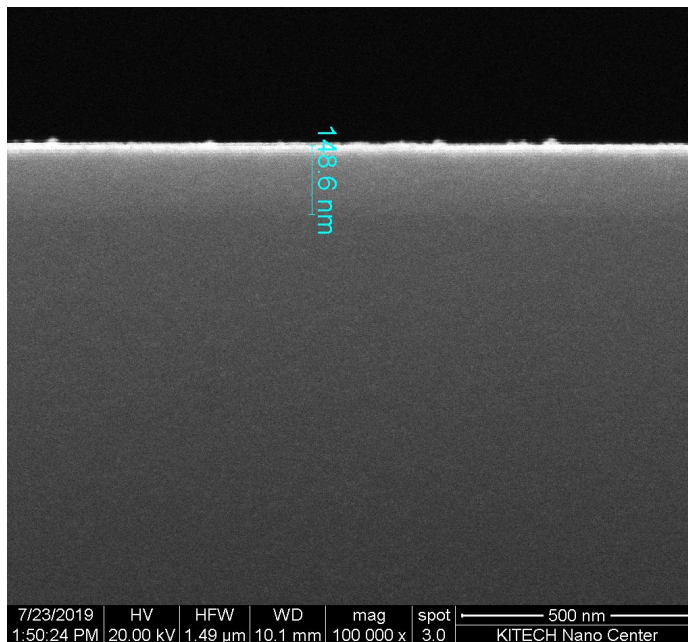


Fig. 4-77 Measurement of FE-SEM

Table 4-5. Result of Error Rate

Frequency [Hz]	Error rate [%]
20	6.50
30	3.38
40	3.51
50	1.80
60	7.39
70	3.89
80	3.04
90	1.32
100	1353.24
110	13.29
120	100.00
130	338.83
140	15.32
150	100.00
160	7.85
170	1.75
180	6.83
190	3.02
200	7.89
210	0.57
220	296.25
230	100.00
240	100.00
250	100.00
260	14.53

제 5 장 결 론

기존의 디지털 홀로그래피는 복소진폭에서 수치적 재생을 하기 위해서는 정확한 이동 거리에 대한 이미지를 획득하는 것이 중요하여 위상이동이 물체에 대한 정보를 정확하게 획득하기 위한 방법으로 위상 이동 역시 정밀해야만 했다. 이를 위해 정밀하게 위상을 이동시킬 수 있는 압전소자, 외부 환경에 대한 영향을 줄이기 위해 실험실에서 정반 위에 세팅을 하고 정반을 띄워 외부 환경에 대한 영향력을 최소화하기 위한 방법을 연구해왔다. 이러한 방법들로 디지털 홀로그래피에 대한 연구는 지속되어 오며 점점 발전해왔으나 환경적인 요인을 배제하는 방식으로만 연구가 지속되어 정밀한 압전소자가 발전되어 왔으며 정밀할수록 고가의 장비로 시스템을 구성하는데 비용적인 측면에서도 문제가 발생하였다. 이렇게 구성을 해도 실험하는 측정자가 디지털 홀로그래피 시스템을 직접 구성을 하다 보니 시스템 고정, 외란 등의 문제에서 자유로울 수는 없어 여러 가지 이유로 위상이동에 오차가 발생하면 정확한 정보를 획득할 수 없어 압전소자를 이용한 위상을 이동시킬 때 위상이동이 \sin 파 형태로 나올 때까지 여러 번 재측정을 감행해야 했다. 이러한 상황에서 벗어날 수 있도록 외부 환경의 영향을 감소시킬 수 있는 방법으로 최근 압전소자의 비선형적인 움직임에서 물체파의 복소진폭을 구할 수 있는 IIC 기법이 개발되었으며, 진폭 변위 진동기를 이용해 디지털 홀로그래피 측정을 실험을 검증하였다. 본 논문에서는 IIC 기법을 토대로 측정 가능한 진동 범위를 특정하기 위해 셰이커와 임의/함수 발생기를 이용하여 위상을 변화시키고 이를 동영상으로 측정해 원하는 이미지를 추출할 수 있도록 하는 방법을 연구하였다. OLED를 제작하는데 대체적으로 사용되는 증착 높이인 150 nm 로 스퍼터링 공법으로 ITO 투명전극 시형편을 증착하여 이를 대상으로 단차를 측정할 수 있도록 하였다. 위상이동에 정밀한 이동 대신 외부의 소란보다는 크고 간섭계가 틀어지지 않는 정도의 진동을 부가하여 간섭무늬만 변화할 수 있도록 하여 이를 동영상으로 측정하였다. 셰이커와 함수발생기를 이용하여 \sin 파 형태로 진동을 발생시키고 주파수에 따른 변화를 측정할 수 있도록 하였다. 진폭은 8 Vpp로 주파수 30 Hz부터 610 Hz까지 10 Hz 단위로 위상 변화를 측정하였다. 셰이커의 진동이 고주파로 갈수록 간섭무늬에 대해 선형적으로 주파수에 비례하여 떨림이 빨라지는 것을 예상하였으나 예상과는 다른 결과였다. 셰이커의 멤브레인을 대상을 고정하는 스테이지에 부착하여 측정하였을 때 주파수를 10 Hz 단위로 610 Hz 까지 위상 변화를 측정해보았다. 10, 120, 150, 230 ~

250, 270 ~ 320, 340 ~ 410, 430 ~ 480, 510~600, 620 Hz 이상의 주파수는 간섭무늬의 변화가 생기지 않아 측정에서 제외하고 20, 30, 40, 50, 70, 80, 90, 170, 190, 210, 610 Hz에서 측정한 결과는 오차율 5 % 이내로 전반적으로 20에서 90 Hz, 100 후반대에서 200 Hz 초반대가 잘 나온다는 것을 알 수 있었다. 주파수 100 Hz 근처, 200 Hz 중후반대와 300, 400, 500 대 역시 잘 나오지 않았으며 620 이후의 주파수에서는 간섭무늬의 변화가 없었다. 이를 통해 최소 20 Hz에서 최대 610 Hz까지 측정에 사용할 수 있는 주파수 범위인 것을 확인할 수 있었다.

위상 변화가 제대로 되지 않거나 CCD 카메라의 프레임 수를 벗어날 정도로 빠르게 움직이는 주파수의 경우 위상이동으로 쓸 수 있는 이미지가 없어 측정이 불가능한데 빠르게 움직이는 경우에는 재측정 시 위상이동으로 쓸 수 있는 프레임이 걸리는 경우가 발생하였다. 그러나 이 경우 결과값은 오차율이 높을 확률이 커 측정에 적합하지 않을 것으로 보이나 위상 이동으로 사용할 수 있는 진동은 위상이 변화하는 것을 확인할 수 있는 정도여야 하며 빠르게 변화하는 경우 동영상을 측정할 CCD 카메라의 초당 프레임 수가 더 높은 성능이 좋은 장치를 사용하면 좀 더 외란에 강해진다고 판단된다.

본 논문에서는 기존의 디지털 홀로그래피 측정에 사용되는 위상이동을 위한 압전소자를 대체하여 셰이커의 주파수를 조절하여 각 주파수별로 위상을 변화시키고 이를 통해 ITO 투명 전극의 단차를 측정하여 측정 가능한 주파수를 찾을 수 있었다. 산업 현장에서는 주로 1000 Hz 이상의 고주파인 소음이 발생하므로 저주파에서 측정이 가능한 디지털 홀로그래피 기술도 실험실적인 환경에서 벗어나 산업 현장에서의 직접적인 계측에 적용할 수 있는 중요한 토대가 될 것이라고 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] Govindjee, E. R. a, “Light absorption and fate of excitation energy”, 1969.
- [2] Tang, C. W., & VanSlyke, S. A., “Organic electro luminescent diodes”, Applied Physics Letters, 51(12), 913-915, 1987.
- [3] Castellano, J. A. “Handbook of display technology”, Elsevier, 2012.
- [4] Mentley, D. E. “State of flat-panel display technology and future trends”, Proceedings of the IEEE, 90(4), 453-459, 2002.
- [5] Ziemelis, K., “Display technology: Glowing developments”, Nature, 399(6735), 408-411, 1999.
- [6] S. P. Harvey, T. O. Mason, D. B. Buchholz, and R. P. H. Chang, “Carrier Generation and Inherent Off-Stoichiometry in Zn, Sn Codoped Indium Oxide (ZITO) Bulk and Thin-Film Specimens”, J. Am. Ceram. Soc. vol. 91, 467, 2008.
- [7] H. K. Park, J. A. Jeong, Y. S. Park, H. K. Kim, W. J. Cho, “Electrical, optical, and structural properties of InZnSnO electrode films grown by unbalanced radio frequency magnetron sputtering”, Thin Solid Films vol. 517, 5563, 2009.
- [8] A. Hagfeldt, G. Boschloo, L. Sun, L. Kloo, and H. Pettersson, “Dye-Sensitized Solar Cells” Chem. Rev. vol. 110, 6595, 2010.
- [9] C. A. Hoel, T. O. Mason, J. -F. Gaillard, and K. R. Poeppelmeier, “Transparent Conducting Oxides in the ZnO-In₂O₃-SnO₂ System”, Chem. Mater. vol. 22, 3569, 2010.
- [10] P. Carreras, A. Antony, F. Rojas, and J. Bertomeu, “Electrical and optical properties

- of Zn-In-Sn-O transparent conducting thin films”, *Thin Solid Films* vol. 520, 1223, 2011.
- [11] Y. D. Ko, C. H. Lee, D. K. Moon, Y. S. Kim, “Oxygen effect of transparent conducting amorphous Indium Zinc Tin Oxide films on polyimide substrate for flexible electrode.”, *Thin Solid Films* vol. 504, 32, 2013.
- [12] K. Wasa, S. Hayakawa, “Handbook of sputter deposition technology”, Noyes publications 1992.
- [13] J.L.Vossen, *Physics of Thin Films*, vol.9, p.1, 1977.
- [14] W. R. Grove, *Phil. Trans. Roy. Soc. London A142*, p87, 1852.
- [15] J.H.Park, J.M.Shin, S.Y.Cha, J.W.Park, S.E.Jeong, “Deposition-temperature effectson AZO thin film sprepared by RF magnetron sputtering and their physical properties”, *J.Korean. Phys.Soc*, vol.49, p.584, 2006.
- [16] Q.B.Ma, Z.Z.Ye, H.P.He, L.P.Zhu, J.R.Wang, B.H.Zhao, “Structural, electrical, and optical properties of transparent conductive ZnO: Gafilmsprepared by DC reactive magnetron sputtering”, *J.Crystal.growth*, vol.304, p.64, 2007.
- [17] “ThinFilm Technology”, Leemunhu
- [18] H. K. Park, J. A Jeong, Y. S. Park, H. K. Kim, W. J. Cho, “Electrical, optical, and structural properties of InZnSnO electrode films grown by unbalanced radio frequency magnetron sputtering”, *Thin Solid Films* vol. 517, 5563, 2009.
- [19] R.E.Egerton, “Physical Principles of Electron Microscopy An Introduction to TEM, SEM and AEM”, Springer, New York, 2005.
- [20] David C.Joy, “Monte Carlo Modeling for Electron Microscopy and Microanalysis”,

Oxford, 1995.

- [21] J.I.Goldstein, D.E.newbury, P.Echlin, D.C.Joy, C.E.Lyman et el, “Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis”, Springer, New York, 2007
- [22] D. Gabor, “A new microscopic principle,” *Nature*, 161, 777-778, 1948
- [23] D. Gabor, “Microscopy by reconstructed wavefronts,” *Proc. Roy. Soc.* 197, 454-487, 1949
- [24] D. Gabor, “Microscopy by reconstructed wavefronts: II,” *Proc. Phys. Soc.*64, 449-469, 1951
- [25] U. Schnars, W. Juptner, "Digital recording and numerical reconstruction of holograms", *Meas. Sci. Technol.* 13, R85-R101, 2002
- [26] J. W. Goodman, R. W. Lawrence, "Digital image formation from electronically detected holograms", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 11, 77-79, 1967
- [27] J. W. Goodman, “Some fundamental properties of speckle”, *Journal of the Optical Society of America*, Vol 66, pp.1145-1150, 1976
- [28] M. A. Kronrod, N.S. Merzlyakov, and L. P. Yaroslavskii, "Reconstruction of a hologram with a computer", *Sov. Phys. Tech. Phys.*, vol. 17, 444-334, 1972
- [29] K. Curtis, L. Dhar, A. Hill, W. Wilson, and M. Ayres, "Holographic Data Storage: From Theory to Practical Systems,", 2010
- [30] I. H. Kwon, “Research on resolution enhancement of X-ray phase contrast tomography and application of digital holography,” POSTECH, doctoral thesis, 15-18, 2019
- [31] J.Y Shin, “A Study on the Robust Vibrator Phase Shift Digital Holography used in

- Environmental Disturbance Condition”, CHOSUN Univ. doctoral thesis, 2020
- [32] S. R. Chinn, E. A. Swanson, and J. G. Fujimoto, “Optical coherence tomography using a frequency-tunable optical source,” *Opt. Lett.* 22, 340–342, 1997
- [33] A. Dubois, L. Vabre, A. C. Boccara, and E. Beaufrepair, “High-resolution full-field optical coherence tomography with Linnik microscope,” *Appl. Opt.* 41, 805–812 2002
- [34] M. C. Pitter, C. W. See, and M. G. Somekh, “Full-field heterodyne interference microscope with spatially incoherent illumination,” *Opt. Lett.* 29, 1200–1202 2004
- [35] M. V. Sarunic, S. Weinberg, and J. A. Izatt, “Full-field swept-source phase microscopy,” *Optics Letters* 31, 1462–1464, 2006
- [36] B. Nilsson, and T. E. Carlsson, “Direct three-dimensional shape measurement by digital light-in-flight holography,” *Applied Optics* 37, 7954–7959, 1998
- [37] M. K. Kim, “Wavelength scanning digital interference holography for optical section imaging,” *Opt. Lett.* 24, 1693–1695, 1999
- [38] L. P. Yaroslavskii and N. S. Merzlyakov. “Methods of Digital Holography. Consultants Bureau,” New York, 1980
- [39] O. Schnars and W. Juptner. “Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction,” *Applied Optics*, 33-179.181, 1994
- [40] J. W. Goodman, and R. W. Lawrence, “Digital phase formation from electronically detected holograms,” *Appl. phys. Lett.* 1, 77-79, 1967
- [41] S. S. Lee. “A study on Sensor and Optical Coherenece Tomography System Using Fiber Optic Interferometer,” Chosun Univ., doctoral thesis, 7-8, 2019

- [42] U. Schnars, “Direct phase determination in hologram interferometry with use of digitally recorded holograms,” J. Opt. Soc. Am. A 11(7), 2011-2015, 1994
- [43] Ulf Schnars, Werner Jueptner, “Digital holography”, Springer, 18-20, 2003
- [44] P. S. Huang and S. Zhang, “Fast three-step phase-shifting algorithm” Appl. Opt, 45, 21, 5086-5091, 2006
- [45] H. Y. Yun, S. J. Jeong, J. W. Kang, and C. K. Hong, “3-dimensional micro-structure inspection by phase-shifting digital holography,” Key. Eng. Master. 270-273, 756-761, 2004
- [46] H. Y. Yun, C. K. Hong, “. Interframe intensity correlation matrix for self-calibration in phase-shifting interferometry”, Appl. Opt, 44,23,4860-4869, 2005
- [47] H. I. Jung, “A study on the defect measurement of thin film using digital holography”, CHOSUN Univ. Master thesis, 10-22, 2015
- [48] David W. Robinson, Graeme T. Reid, “Interferogram Analysis: Digital fringe pattern measurement techniques”, IOP publishing Ltd., 1993
- [49] K. Greath, “Phase-measurement interferometry techniques,” Progress in Optics XXVI,pp. 349-393, 1988
- [50] J. Y. Shin, K. S. Kim, H. C. Jung, “Deposition Step-height Measurement for ITO Thin Film Pattern Fabricated with Photo-lithography using Digital Holography”, Journal of the korean society for nondestructive testing 40(1), 9-15, 2020
- [51] C. W. Tang and S. A. VanSlyke, “Organic electroluminescent diodes,” Applied Physics Letters, Vol. 51, No. 12, 913-915 1987
- [52] D. E. Mentley, “State of flat-panel display technology and future trends,” Proceeding

of the IEEE, Vol. 90, No. 4, 453-459 2002

- [53] J. A. Castellano and etc, “Handbook of display technology,” Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 4-5, 2012
- [54] G. H. Kim, S. H. Lee, J. H. Yoon and D. H. Kim, “ITO transparent electrode material technology trends,” Information Display, Vol. 11, No. 5, 17-22 2010
- [55] K. Wasa, I. Kanno and H. Kotera, “Handbook of sputter deposition technology: fundamentals and applications for functional thin films, nano- materials and MEMS,” Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 42-65, 2012
- [56] J. H. Park, J. M. Shin, S. Y. Cha, J. W. Park, S. Jeong, H. K. Pak and C. Cho, “Deposition- temperature effects on AZO thin film prepared by RF magnetron sputtering and their physical properties,” J. Korean Phys. Soc., Vol. 49, S584-S588, 2006
- [57] Thomas G. Beckwith, Roy D. Marangoni, John H. Lienhard V., “MECHANICAL MEASUREMENTS, 6th Edition”, YOUNG PUBLISHING CO. 137-146, 2007
- [58] J. H. Kwon “A Study on the Cutting Noise Characteristics in end milling”, Seoul National Univ. master thesis, 32-53, 2000
- [59] Y. I. Ji, “A Study on the Cutting Noise Force of End-milling”, Seoul National Univ. master thesis, 29-38, 2001
- [60] H. I. Choi, B. S. Lim, I. J. Yeon, “Characteristics of Noise Frequency from the Source of Noise in Workplace”, J. of Korean Society of Environmental Technology, Vol. 15, No.3, 219-227, 2014