



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

# 불규칙한 위상과 진폭을 갖는 진동자를 이용한 반사형 디지털 홀로그래피에 관한 연구

조선대학교 대학원

기계시스템 · 미래자동차공학과

김 한 섭

# 불규칙한 위상과 진폭을 갖는 진동자를 이용한 반사형 디지털 홀로그래피에 관한 연구

A Study on Reflection-Type Digital Holography Using Vibrators  
with Irregular Phase and Amplitude

2021년 8월 27일

조선대학교 대학원

기계시스템 · 미래자동차공학과

김 한 섭

# 불규칙한 위상과 진폭을 갖는 진동자를 이용한 반사형 디지털 홀로그래피에 관한 연구

지도교수 김 경 석

이 논문을 공학 박사학위신청 논문으로 제출함

2021년 4월

조선대학교 대학원

기계시스템 · 미래자동차공학과

김 한 섭

## 김한섭의 박사학위논문을 인준함

위원장	조선대학교	교수	김재열 (인)
위원	포항공과대학교	교수	홍정기 (인)
위원	조선대학교	교수	장완식 (인)
위원	조선대학교	교수	정현철 (인)
위원	조선대학교	교수	김경석 (인)

2021년 6월

조선대학교 대학원

## 목 차

LIST OF FIGURES .....	iii
LIST OF TABLES .....	v
Nomenclatures .....	vi
Abstract .....	vii
제 1 장 서 론 .....	1
제 1 절 연구 배경 .....	1
제 2 절 연구 목표 및 내용 .....	3
제 2 장 이론적 배경 .....	5
제 1 절 디지털 홀로그래피의 배경 .....	5
1. 디지털 홀로그래피 기본 .....	5
2. 이미지 센서의 역할 .....	9
3. 디지털 홀로그래피의 복조 .....	14
제 2 절 디지털 홀로그래피 이론 .....	22
1. 홀로그래피 기록 및 재구성 이론 .....	22
2. 디지털 홀로그래피 일반 이론 .....	25
제 3 절 위상 이동 .....	29
1. 홀로그래피 위상 이동 .....	29
2. 디지털 홀로그래피 위상 이동 .....	31
3. 위상 결핍침 .....	37

제 3 장 실험장치 구성 및 시험편 .....	39
제 1 절 진동자를 적용한 반사형 디지털 홀로그래피 .....	39
제 2 절 시험편 .....	41
제 4 장 실험 결과 .....	43
제 1 절 Resolution target 측정 결과 .....	43
제 2 절 Photolithographic Product 측정 결과 .....	46
제 3 절 AFM 이용 photolithographic Product 측정 결과 .....	63
제 4 절 측정 결과 고찰 .....	65
제 5 장 결 론 .....	66
참 고 문 헌 .....	67

## LIST OF FIGURES

Fig. 2-1 Free space diffraction, interferences and notations .....	6
Fig. 2-2 Fine structure of a digital hologram .....	9
Fig. 2-3 Recording digital color holograms .....	13
Fig. 2-4 Spectral distribution of orders and spectral filtering .....	15
Fig. 2-5 Implementation of parallel phase-shifting digital holography, e-shifting array device and the distribution of the reference wave for parallel four-step phase-shifting .....	20
Fig. 2-6 Holgram recording .....	24
Fig. 2-7 Holgram reconstruction .....	24
Fig. 2-8 Digital Holography .....	26
Fig. 2-9 Coordinate system for numerical hologram reconstruction .....	27
Fig. 2-10 Reconstruction of the virtual image .....	28
Fig. 2-11 Set-up of phase shifting Digital Holography .....	31
Fig. 2-12 Phase unwrapping .....	38
Fig. 3-1 Reflective digital holography with vibrator .....	40
Fig. 3-2 Negative type of Resolution Target .....	41
Fig. 3-3 Photolithographic product .....	42
Fig. 4-1 Resolution Target measurement reference wave .....	43
Fig. 4-2 Resolution Target measurement object wave .....	44
Fig. 4-3 Resolution target measurement .....	45
Fig. 4-4 Reference wave for photolithographic product measurement .....	46
Fig. 4-5 Frame 20 measurement with vibration level 0 .....	47
Fig. 4-6 Frame 40 measurement with vibration level 0 .....	48
Fig. 4-7 Frame 60 measurement with vibration level 0 .....	49
Fig. 4-8 Frame 20 measurement with vibration level 1 .....	50



Fig. 4-9 Frame 40 measurement with vibration level 1 ..... 51  
 Fig. 4-10 Frame 60 measurement with vibration level 1 ..... 52  
 Fig. 4-11 Frame 20 measurement with vibration level 2 ..... 53  
 Fig. 4-12 Frame 40 measurement with vibration level 2 ..... 54  
 Fig. 4-13 Frame 60 measurement with vibration level 2 ..... 55  
 Fig. 4-14 Frame 20 measurement with vibration level 3 ..... 56  
 Fig. 4-15 Frame 40 measurement with vibration level 3 ..... 57  
 Fig. 4-16 Frame 60 measurement with vibration level 3 ..... 58  
 Fig. 4-17 Frame 20 measurement with vibration level 4 ..... 59  
 Fig. 4-18 Frame 40 measurement with vibration level 4 ..... 60  
 Fig. 4-19 Frame 60 measurement with vibration level 4 ..... 61  
 Fig. 4-20 Atomic force microscope ..... 63  
 Fig. 4-21 Photolithographic Product Measurement Results Using AFM ..... 64

## LIST OF TABLES

Table 3-1 Specifications of vibrator .....	40
Table 3-2 Specifications of resolution target .....	41
Table 4-1 Result of Experiment .....	62
Table 4-2 Specification of Atomic force microscope .....	63
Table 4-3 Result of Experiment .....	64
Table 4-4 Compare of Result .....	65

## Nomenclatures

$E$	:	Wave
$a$	:	Amplitude of wave
$\phi$	:	Phase of wave
*	:	Conjugate
$U$	:	Complex amplitude
$\eta$	:	y-axis of object plane
$\xi$	:	x-axis of object plane
$\eta'$	:	y-axis of image plane
$\xi'$	:	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
$\lambda$	:	Wave length
$I$	:	Irradiance
$\dagger$	:	Transposed matrix
$\Phi$	:	Wrapped phase

## ABSTRACT

### **A Study on Reflection-Type Digital Holography Using Vibrators with Irregular Phase and Amplitude**

Han-Sub Kim

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

Dept. of Mechanical System & Automotive Engineering,  
Graduate School of Chosun University

Digital hologram technology is a method of acquiring hologram data of an object to be measured in real time using a moving picture recording device such as a CCD, starting from the existing hologram technology, and acquiring 3D data of the object to be measured by a method of reproducing a numerical 3D image.

Holography can be considered suitable as a technology capable of recording and reproducing optical wave fields. More specifically, holography is a method of recording and reproducing information on a 3D object based on interference and diffraction between an object beam diffusely reflected from a 3D object and a reference beam used for recording and reproduction. It is widely used in various optical applications. In fact, the term holography or hologram is used as a collective term for all methods of physically reconstructing a three-dimensional object by light waves. Holographic display technology has been steadily developed since the 1960s.

Research on 3D displays using holograms has been continuously researched for the past 60 years according to the technological belief that a hologram of a method of extracting and restoring light information will provide the ultimate solution for 3D video display. In particular, in recent years, with the rapid development of digital technology, research on a 3D hologram display of a method of extracting 3D hologram information of an object in

the form of a digital signal and processing and restoring it has been actively conducted.

However, research on digital holograms for 3D displays is a method of synthesizing and restoring computer generated holograms of virtual objects, such as 3D animation, and studies on computer generated holograms and hologram restoration display devices have become mainstream. However, for a complete loop of a 3D image system using holograms, it is essential to extract hologram information of an actual object in the form of a digital signal.

In this paper, a reflective digital holography system based on a Michelson interferometer using He-Ne Laser, Spatial filter, Collimating lens, Iris, Beam Splitter (BS), CMOS Camera, and Mirror to measure a specimen of reflective material. First, in the measurement of the resolution target using the oscillator phase shift reflection type digital holography, the measurement is performed on an arbitrary part to measure the step difference for the pattern. Second, the measurement of the photolithographic product using the oscillator phase shift reflective digital holography is a frame to check the measurement result of the reflective digital holography on the relationship between the intensity of vibration and the frame to measure the level of the electrode portion deposited on the Chrome substrate. Conditions were measured for three conditions of 20, 40, and 60, and vibration conditions were measured for five conditions of vibration levels 0, 1, 2, 3, and 4 displayed on the controller.

This equipment is universally used to secure the reliability of the measurement results of photolithographic products using the oscillator phase shift reflective digital holography, and can measure non-destructively by scanning the measurement object directly with the probe tip for the object to be measured. It compared with the measurement result of phosphorus AFM.

# 제 1 장 서 론

## 제 1 절 연구 배경

디지털 홀로그래피 기술은 기존 홀로그래피 기술로부터 출발하여 CCD와 같은 동영상 기록장치를 이용하여 실시간으로 측정 대상체의 홀로그래피 데이터를 획득하고 수치적 3차원 영상 재생의 방법으로 측정 대상체의 3차원 데이터를 획득하는 방법이다. 빛의 정보를 추출하고 복원하는 방식의 홀로그래피가 3차원 동영상 디스플레이의 궁극적인 해를 제시해 줄 것이라는 기술적 신념에 따라 지난 60여 년간 끊임없이 연구되어 왔으며 최근에는 디지털 기술의 비약적인 발전으로 디지털 신호 형태로 물체의 3차원 홀로그래피 정보를 추출하고 이를 처리 전송 복원하는 방식의 3차원 홀로그래피 디스플레이에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있고 다양한 광학 응용분야에서 광범위하게 활용되고 있다.

1948년 Dennis Gabor는 파동 장의 진폭과 위상을 기록하고 재구성하는 방법으로 홀로그래피를 발명했으며 전체 또는 전체를 의미하는 그리스어 'holos'와 쓰기를 의미하는 'graphein'에서 홀로그래피라는 단어를 만들었다.<sup>[1-3]</sup>

홀로그래피로 저장된 이미지 또는 홀로그래피는 물체에서 산란 된 파동장과 기준파라는 일관된 배경 사이의 사진 또는 달리 기록 된 간섭 패턴으로서 일반적으로 평평한 표면에 기록되지만 전체 3차원 파동장에 대한 정보를 포함한다.

이 정보는 간섭 줄무늬 형태로 코딩되며 일반적으로 높은 공간 주파수로 인해 사람의 눈에는 보이지 않는다. 물체파는 다시 기준파로 홀로그래피를 비추어 재구성 할 수 있으며 이 재구성된 파동은 원래의 물체 파동과 구별 할 수 없는 수동적 수단이다. 관찰자는 원근과 초점 심도의 모든 효과가 있는 3차원 이미지를 인식한다.

Gabor는 실제 홀로그래피 구성에서 거의 투명한 물체를 통해 평행 빔으로 비췄고 물체 파동과 기준 파동의 축은 평행했다. 이 홀로그래피의 재구성은 재구성 파의 회절되지 않은 부분과 광축에 놓인 소위 '쌍둥이 이미지'(또는 가상 이미지)에 의해 중첩 된 실제 이미지를 생성한다. in-line 홀로그래피의 획기적인 개선은 축외 기준파를 도입 한 Leith와 Upatnieks에 의해 이루어졌고 그들의 설정은 두 이미지와 재구성 파를 공간적으로 분리한다.<sup>[4,5]</sup>

홀로그래피의 주요 응용 분야 중 하나는 지난 세기 후반 Stetson, Powell 등에 의해 개발 된 홀로그래픽 간섭계 (HI)입니다. HI를 사용하면 마이크로미터의 일부의 정확도로

거친 표면의 변위를 작성할 수 있다.<sup>[6,7]</sup> 또한 서로 다른 시간에 존재하는 저장된 표면의 간섭계 비교를 가능하게 했다.

컴퓨터 기술의 발달로 녹음 과정이나 재구성 과정을 컴퓨터로 옮길 수 있으며 첫 번째 방식은 수치적 방법으로 인위적 홀로그램을 생성하는 CGH(Computer Generated Holography)이다. 그 후 이러한 컴퓨터 생성 홀로그램은 광학적으로 재구성 된다.

수치 홀로그램 재구성은 Goodman, Lawrence, Yaroslavskii, Merzlyakov 및 Kronrod 에 의해 시작되었으며 사진판에 기록된 인라인 및 푸리에 홀로그램의 광학적으로 확대 된 부분을 샘플링했다. 이러한 디지털화된 기존의 홀로그램은 수치적으로 재구성되었고 Onural과 Scott은 재구성 알고리즘을 개선하고 이 방법을 입자 측정에 적용했다.<sup>[8,9]</sup> 또한 Haddad는 푸리에 홀로그램의 수치적 재구성에 기반한 홀로그램 현미경을 설명했다.<sup>[10]</sup>

큰 진전은 Schnars와 Jüptner의 CCD (Charged Coupled Devices)를 사용한 Fresnel 홀로그램의 직접 기록 개발이었고 이 방법은 이제 중간 단계로 사진 기록없이 홀로그램의 완전한 디지털 기록 및 처리를 가능하게 하였다. 이 기술을 위해 원래 제안 된 이름은 광학 기록에서 수치 처리에 이르는 직접적인 방식을 강조하는 '직접 홀로그래피'였으나 나중에 디지털 홀로그래피라는 용어가 채택되었다.

Schnars와 Jüptner는 간섭계에 디지털 홀로그래피를 적용했으며 디지털 홀로그램 재구성이 기존 광학 처리보다 훨씬 더 많은 가능성을 제공한다는 것을 입증했다. 저장된 광파의 위상은 위상 이동 간섭을 생성하지 않고 디지털 홀로그램에서 직접 계산할 수 있었다.<sup>[11]</sup> Shearography 또는 Speckle Photography와 같은 다른 광학 계측 방법은 Digital Holography 에서 수치적으로 파생 될 수 있고 수학적 방법으로 홀로그램 기록 후 간섭 측정 기술 (홀로그램 간섭 측정, 전단 측정 또는 기타 기술)을 선택할 수 있다.<sup>[12]</sup>

인터페로그램 기록을 위한 CCD와 같은 전자 장치의 사용은 이미 전자스펙클패턴 간섭계(ESPI 또는 TV-holography)에서 확립되었으며 Butters, Leendertz, Macovski, Ramsey 및 Schaefer에 의해 서로 독립적으로 발견되었다.<sup>[13]</sup> 두 개의 스페클 인터페로그램이 조사 대상 물체의 서로 다른 상태로 기록되고 스페클 패턴은 전자적으로 제거된다. 그 결과 프린지 패턴은 기존 디지털 HI의 것과 약간 유사하다. 주요 차이점은 프린지의 스페클 모양과 상관 프로세스에서 위상 손실이다.

## 제 2 절 연구 목표 및 내용

디지털 홀로그래피 기술은 기존 홀로그래피 기술로부터 출발하여 CCD와 같은 동영상 기록장치를 이용하여 실시간으로 측정 대상체의 홀로그래피 데이터를 획득하고 수치적 3차원 영상 재생의 방법으로 측정 대상체의 3차원 데이터를 획득하는 방법이다. 측정 대상체의 3차원 데이터는 홀로그래피 방법으로 기록함으로써 1회 촬영으로 측정 대상체의 3차원 데이터를 획득하고 수치적 재생으로 측정 대상체의 3차원 데이터를 재구성하여 표시 할수 있으므로 3차원 데이터 획득, 처리, 표시 면에 있어서 앞서 개발되어온 첨단 현미경들에 비하여 비교할 수 없을 정도의 성능 향상을 기대 할 수 있다.

홀로그래피는 optical wave field를 기록 및 재생할 수 있는 기술로 적합한 여겨질 수 있다. 좀더 구체적으로, 홀로그래피는 3차원 객체로부터 난반사된 물체빔과 기록 및 재생에 활용되는 참조빔 간의 간섭 및 회절을 기반으로 3차원 객체에 대한 정보 기록 및 재생을 하는 방법으로써 다양한 광학 응용분야에서 광범위하게 활용되고 있다. 실제로, 홀로그래피 또는 홀로그래피라는 용어는 물리적으로 3차원 객체를 광파에 의해 복원하는 모든 방법을 통칭하여 일컫는 말로 사용되고 있다. 홀로그래피 디스플레이 기술은 1960년대 이후 꾸준히 개발되어 왔지만, 아직 유년기로 볼 수 있다.

홀로그래피를 이용한 3차원 디스플레이에 대한 연구는 빛의 정보를 추출하고 복원하는 방식의 홀로그래피 3차원 동영상 디스플레이의 궁극적인 해를 제시해 줄 것이라는 기술적 신념에 따라 지난 60여년간 끊임없이 연구되어 왔다. 특히, 최근에는 디지털 기술의 비약적인 발전으로 디지털 신호 형태로 물체의 3차원 홀로그래피 정보를 추출하고 이를 처리 전송 복원하는 방식의 3차원 홀로그래피 디스플레이에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

하지만 3차원 디스플레이를 위한 디지털 홀로그래피 연구는 3차원 애니메이션과 같이 가상(fictitious) 물체의 컴퓨터 생성 홀로그래피를 합성하여 복원하는 방식으로 컴퓨터 생성 홀로그래피와 홀로그래피 복원 디스플레이 장치에 대한 연구가 주류를 이루었다. 하지만 홀로그래피를 이용한 3차원 영상 시스템의 완결된 루프를 위해서 실제 물체의 홀로그래피 정보를 디지털 신호 형태로 추출하는 것이 필수적이다.

본 논문에서는 반사형 재질의 시험편을 측정하기 위해 He-Ne Laser, Spatial filter, Collimating lens, Iris, Beam Splitter(BS), CMOS Camera, Mirror을 이용하여 마이켈슨 간섭계를 기반으로 하는 반사형 디지털 홀로그래피 시스템을 구축하였으며, 첫 번째로



진동자 위상이동 반사형 디지털 홀로그래피를 이용한 Resolution target의 측정은 패턴에 대한 단차 측정을 위해 임의적인 부분에 대한 측정을 진행하였으며, 두 번째로 진동자 위상이동 반사형 디지털 홀로그래피를 이용한 Photolithographic product의 측정은 Chrome 기판위에 증착된 전극부의 단차 측정을 위해 진동의 세기와 프레임과의 관계에 대한 반사형 디지털 홀로그래피의 측정 결과를 확인하기 위해 프레임 조건은 20, 40, 60의 3가지 조건, 진동 조건은 제어기에 표시된 진동 레벨 0, 1, 2, 3, 4의 5가지 조건에 대한 측정을 진행하였다.

진동자 위상이동 반사형 디지털 홀로그래피를 이용한 Photolithographic product의 측정의 결과의 신뢰성 확보를 위해 범용적으로 사용되며, 측정하고자 하는 물체에 대해 프로브 팁으로 직접적으로 측정체를 스캔하여 비파괴적으로 측정할 수 있는 장비인 AFM의 측정 결과와 비교를 하였다.

진동자 위상이동 반사형 디지털 홀로그래피를 이용한 Resolution target의 Chrome과 Glass의 단차에 대한 측정 결과는 평균 126.5nm로 사양인 120nm를 기준으로 약 5.4%의 오차율을 나타내어 신뢰성 있는 측정 결과임을 알 수 있었고, Photolithography Product의 전극부와 기판부에 대한 단차 측정의 결과는 평균은 396.4nm를 나타내었으며, 신뢰성 확보를 위해 범용적으로 사용 장비인 AFM의 결과는 386.5nm로 AFM의 결과를 기준으로 적용하게 되면, 편차율 2.5%로 매우 신뢰할만한 결과를 가져옴을 알 수 있었다.

## 제 2 장 이론적 배경

### 제 1 절 디지털 홀로그래피의 배경

#### 1. 디지털 홀로그래피 기본

광학 웨이브 프론트를 디지털 방식으로 재구성한다는 아이디어는 1960년대에 처음 나타났습니다. 목표는 물체의 아날로그 기록, 디코딩 기록 된 이미지로 구성된 디지털 격자로부터 회절을 시뮬레이션하는 디지털 기록 디코딩으로 대체하는 것이다.<sup>[14]</sup> 따라서 홀로그래피는 홀로그램의 이산값의 행렬로 교체되어 디지털화 되었다. 그 후 1971년에 Huang은 광 파면의 컴퓨터 분석에 대해 논의하고 처음으로 "디지털 홀로그래피" 개념을 도입했다.<sup>[15]</sup> 1972년 Kronrod가 역사적으로 홀로그램에 코딩 된 물체를 계산하여 복원을 시도한 최초의 시도였다.<sup>[16]</sup> 당시 Minsk-22 컴퓨터로 512 x 512 픽셀의 필드를 재구성하려면 6 시간의 계산이 필요했으며 이산 값은 다음과 같다. 스캐너를 이용한 64 비트 디지털화에 의해 홀로그램 플레이트에서 획득되었지만 배열 검출기 기반 디지털 홀로그래피가 구현되기까지는 1990년대까지 걸렸으며 실제로 두 기술 분야서 중요한 발전이었다.<sup>[17]</sup> 이 기간 이후 마이크로 기술 프로세스는 홀로그램의 공간 샘플링을 위한 Shannon 조건을 충족하기에 충분히 작은 픽셀을 가진 CCD (Charge Coupled Device) 어레이를 생성했으며 이미지의 계산 처리는 주로 마이크로 프로세서 성능 특히 처리 장치 및 저장 용량이 크게 향상되었다.

디지털 홀로그래피의 물리적 원리는 기존 홀로그래피와 유사하다. 그러나 검출기 (CCD 또는 CMOS (complementary metal oxyde semicon))의 픽셀 크기는 기존 사진 판의 입자 크기(25nm에 비해 일반적으로 약 2 ~ 3 $\mu$ m)보다 분명히 더 크다. 이러한 제약은 아날로그 홀로그래피에서 더 많거나 명확한 특정 매개 변수 (픽셀 영역, 픽셀 수 및 픽셀 피치)를 고려하도록 부과한다.

## 1.1. 물체와 기준파 사이의 간섭

디지털 홀로그램은 기준 파와 관심 물체의 파동 사이의 간섭계 혼합이며 빛의 회절 원리, 디지털 홀로그램 및 컬러 홀로그램을 기록하는 방법, 디지털 홀로그램을 재구성 하는 알고리즘, 다양한 홀로그램 구성, 홀로그램을 복조하기위한 특수 기술에 대한 설명을 한다.

Figure 2.1은 기록 디지털 홀로그램의 기본 형상을 보여준다. 물체 파는 기준 파와 일 관되게 혼합되고 그 간섭은 기록면 디지털 홀로그래피에 기록되며 기록은 픽셀 매트릭 스 센서를 사용하여 수행된다.

단색 파로 비추는 확장 된 물체를 생각해보면 물체는 거리  $d_o = |z_o|$ 에 국한된 관측 평면에 파동을 회절시키며 물체의 표면은  $A(i = \sqrt{-1})$ 로 표시되는 파면을 생성한 다.

$$A(x,y) = A_o(x,y)\exp(i\varphi_o(x,y)) \quad (1-1)$$

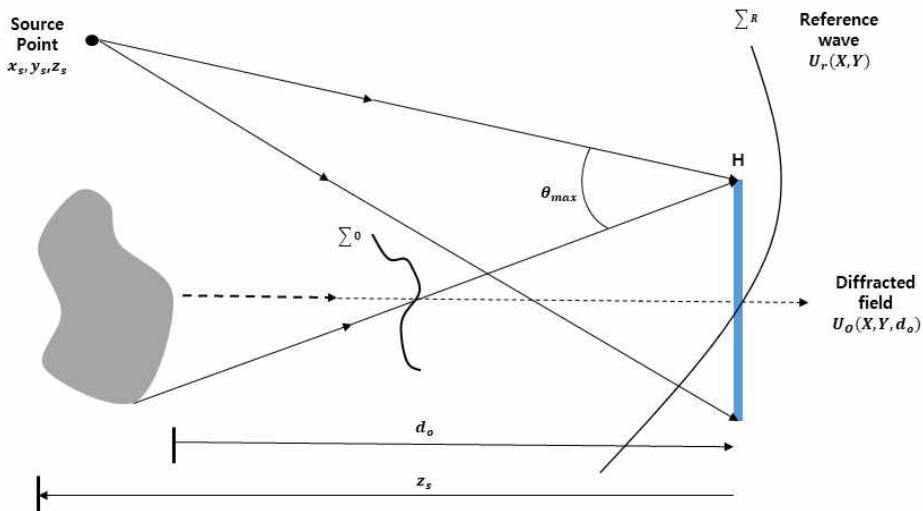


Figure 2.1. Free space diffraction, interferences and notations.

진폭  $A_0$ 는 물체의 반사율 및 투과율을 나타내며 위상  $\varphi_0$ 는 물체의 표면과 모양 또는 두께와 굴절률과 관련 있다. 물체의 자연스러운 거칠기 때문에  $\varphi_0$ 는  $[-\pi, +\pi]$ 에 균일하게 분포 된 랜덤 변수이며 거리  $d_0$ 와 관측 평면의 공간 좌표  $(X, Y)$ 에서 회절 된 필드  $U_0$ 는 물체 파동이 기록 평면으로 전파되어 주어진다. 관측면에서 이 파동은 간단히 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$U_0(X, Y, d_0) = a_0(X, Y)\exp(i\varphi_0(X, Y)) \quad (1-2)$$

여기서  $A_0$ 는 복소 진폭의 계수이고  $\varphi_0$ 는 광학 위상이다. 물체가 거칠기 때문에  $d_0$  거리에서 회절 된 필드는 반점 패턴이다. 기록 평면에서 기준 파면의 복소 진폭  $U_0$ 를 고려해 보면 다음과 같다.

$$U_r(X, Y) = a_r(X, Y)\exp(i\varphi_r(X, Y)) \quad (1-3)$$

여기서  $a_0$ 는 계수이고  $\varphi_0$ 는 광학 위상이다. 기준 파면은 일반적으로 작은 편향에서 비롯되며 이것은 구면 발산 파동으로 입사각이 0이 아닌 평면에 영향을 준다. 홀로그래프 기준 프레임 ( $z_s < 0$ )에서 포인트의 좌표  $(x_s, y_s, z_s)$ 를 고려하면 기준 파의 광학 위상은 다음과 같은 근사값으로 기록 될 수 있다. [18, 19]

$$\varphi_r(X, Y) = \frac{\pi}{\lambda z_s}((X-x_s)^2 + (Y-y_s)^2) \quad (1-4)$$

광학 위상은 다음과 같이 작성할 수도 있다.

$$\varphi_r(X, Y) = 2\pi(u_0X + v_0Y) + \frac{\pi}{\lambda z_s}(X^2 + Y^2) \quad (1-5)$$

여기서  $(u_o, v_o)$ 는 홀로그래ムの 반송파 공간 주파수이고  $\phi_s$ 는 생략 할 수 있는 상수 항이다.  $(u_o, v_o) = (0,0)$ 일 때,  $z$ 축에 국한된 기준점 소스인 경우 홀로그래피는 "in-line"(두 파동 사이의 기울기 없음)이라고 한다. 반면에  $(u_o, v_o) \neq (0,0)$ , 홀로그래피는 "off-axis" (두 파동 사이의 약간의 기울기)이라고 한다. 일반적으로 기준 파가 균일 한 진폭을 갖도록 조정하는데 관심이 있다. 즉, *i.e.*  $a_r(X, Y) = C^{te}$ .  $H$ 로 표시된 총 조명은 다음과 같이 기록된다. [20-22]

$$H = |U_r + U_o|^2 = |U_r|^2 + |U_o|^2 + U_r^* U_o + U_r U_o^* \quad (1-6)$$

이 방정식은 다음과 같이 작성할 수도 있다.

$$H = a_r^2 + a_o^2 + 2a_r a_o \cos(\phi_r - \phi_o) \quad (1-7)$$

방정식 [1-6]과 [1-7]은 디지털 홀로그래피라고 불리고 여기에는 3 개의 순서가 포함 된다. 0 순서는  $|U_r|^2 + |U_o|^2$ 이라는 용어로 구성되고 +1 순서는  $U_r^* U_o$  라는 용어, -1 순서는 트윈 이미지라고도 하는  $U_r U_o^*$  용어입니다. 일반적으로 +1 차수는 초기 객체와 관련이 있기 때문에 관심이있는 반면 -1 차수는 푸리에 연산자의 은둔 속성으로 인해 대칭을 나타낸다. 그림 1.2는 디지털 홀로그래피와 그 부분 중 하나를 확대 한 것이다.

보시다시피, 디지털 홀로그래피의 미세 구조는 마이크로 프린지, 다른 한편으로는 가벼운 입자로 구성되어 있다. 이러한 가벼운 입자는 물체에서 반사 된 빛의 무작위 특성으로 인한 반점이며 물체가 투명하고 확산되지 않는 경우 홀로그래피의 반점 특성이 사라질 수 있다. [23,24]

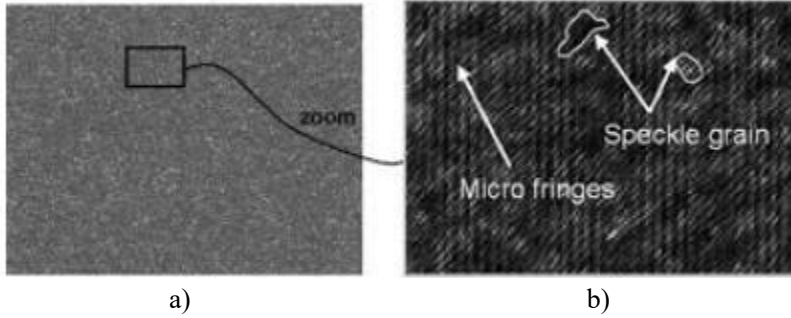


Figure 2.2. Fine structure of a digital hologram  
 a) digitally recorded hologram and  
 b) zoom showing micro fringes and speckle grains

## 2. 이미지 센서의 역할

### 2.1. 공간 샘플링 및 Shannon 조건

디지털 홀로그래피에서 홀로그램은 피치  $P_x$  및  $P_y$ 를 갖는  $N \times M$  픽셀과  $\Delta_x$  및  $\Delta_y$  방향에 대해 각각 활성 표면  $x$  방향 및  $y$  방향으로 기록된다. 따라서 기록면의 공간 좌표가 샘플링되며 이것은  $(m;n) \in (-M/2, +M/2-1; -N/2, +N/2-1)$ 과 함께  $(X, Y) = (np_x, mp_y)$ 를 가진다는 것을 의미한다. 홀로그램의 샘플링은 Shannon 조건으로 이어집니다. 두 파동 사이의 최대 각도  $\theta_{\max}$  (그림 1.1 참조)를 고려할 때 두 개의 기울어진 파면에 의해 국부적으로 생성된 마이크로 프린지는 샘플링 피치가 적어도 2 배가되도록 샘플링해야 한다. 따라서 다음 방정식에 따라 설정에 허용되는 최대 각도가 된다. [25]

$$\theta_{\max} < 2 \sin^{-1} \left( \frac{\lambda}{4 \max(p_x, p_y)} \right) \quad (1-8)$$

예를 들어  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$  및  $p_x = p_y = 4.65 \text{ }\mu\text{m}$ 이고 최대 허용 각도는  $4^\circ$  보다 작다. 즉, Shann 조건을 충족하기 위해 설정을 정확하게 조정해야함을 의미한다.

## 2.2. Low-pass filtering

센서에 의해 효과적으로 기록 된 디지털 홀로그램은 식 [1-6]으로 간단히 설명된다. 실제로 픽셀의 활성 표면을 가져와야 하는데 이것은 로컬 공간 통합을 유도한다. 그래서 지점에서 기록 된 홀로그램  $(np_x, mp_y)$ 은 다음과 같은 식으로 작성된다. [26]

$$H_{IX}(np_x, mp_y) = [H(X, Y) * \Pi_{\Delta_x, \Delta_y}(X, Y)](np_x, mp_y) \quad (1-9)$$

짝수 픽셀 기능으로,

$$\Pi_{\Delta_x, \Delta_y}(x, y) = \begin{cases} 1/\Delta_x \times 1/\Delta_y & \text{if } |x| \leq \Delta_x/2 \text{ and } |y| \leq \Delta_y/2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1-10)$$

방정식 [1-9]에서 기본 효과를 이해할 수 있다. 픽셀이 마이크로 프린지의 국부적 통합을 제공하기 때문에 결과적으로 이러한 프린지가 흐려진다. 질적으로 이것은 공간 해상도가 저하되고 픽셀이 디지털 홀로그램에 저역 통과 필터링을 유도한다는 것을 의미한다.

### 2.3. 노출시간의 영향

홀로그래를 기록하는 동안 픽셀은 노출 시간  $T$  라고 하는 특정 기간 동안 빛을 받으며 센서가 받는 총 에너지는 다음과 같다. [27]

$$W = \int_{t_1}^{t_1+T} H(t) dt \quad (1-11)$$

홀로그래에 시간적 의존성이 없으면 통합을 생략 할 수 있다. 그러나 물체가 시간의존성, 즉 정현파 진동을 나타내는 경우 노출 시간은 기록 된 홀로그래에 상당한 영향을 미친다. 기록의 특징적인 매개 변수는  $\alpha = T/T_0$ 로 정의되는 순환 비율이며, 이는 노출 시간  $T$ 와 진동 시간  $T_0$  사이의 비율이다.

일반적으로  $a \ll 1$ 이면 기록 방식은 광 펄스를 사용하고 코드가 수행되는 순간에 물체가 동결되는 것과 동일하다. (임펄스 방식) [28]

반대로  $a \gg 1$ 에서 정권은 "시간 평균화"라고 하고 디지털 홀로그래에서 재구성된 객체는 Bessel 함수에 의해 진폭 변조된다. [29,30]  $0 \ll a < 1$  인 실험에서 주기 비율이 너무 높기 때문에 임펄스로 분류 할 수 없고 너무 낮아 "시간 평균화"로 간주 할 수 없다. 이 체제를 "준 시간 평균화"라고 하며 물체 진폭은 또한 순수한 시간 평균화 방식보다 더 복잡한 변조를 나타낸다. [31]



## 2.4. 디지털 홀로그래프 기록

최초의 디지털 컬러 홀로그래프는 2000년대에 컬러 검출기의 출현과 함께 등장했습니다. Yamaguchi는 디지털 컬러 홀로그래피를 사물의 색상 재구성에 적용 할 수 있음을 보여주었다.<sup>[32]</sup> 그 이후로 특히 비접촉 계측 분야에서 다양한 응용 분야가 개발되었습니다. 유체 역학의 유동 분석<sup>[33,34]</sup>, 2color 현미경에 의한 표면 프로파일 측정<sup>[35-37]</sup>, 일관성이 낮은 3color 디지털 홀로그래픽 현미경(DHM)<sup>[38]</sup>, 변형 된 물체의 다차원 계측<sup>[39-42]</sup> 디지털 컬러 홀로그래프를 기록하는 방법에는 여러 가지가 있으며, 특히 세 가지 색상을 동시에 기록하는 경우가 있다. 가장 간단한 방법은 단색 감지기를 사용하고 색상을 순차적으로 기록하는 것이며 가장 간단한 방법은 단색 검출기를 사용하고 색상을 순차적으로 기록하는 것이다. 이 방법은 2003년 Demoli에 의해 제안되었으며 시간이 지남에 따라 변화하는 물체의 경우에만 적용된다.<sup>[43]</sup> Figure 2.3은 다양한 기록을 보여준다. 첫 번째 가능성은 Bayer 모자이크로 구성된 색채 필터를 사용하는 것이다. (Figure 2.3(a)). 그러나 이러한 검출기에서 픽셀의 절반은 녹색을 감지하고 1/4만이 적색 또는 청색을 감지한다.<sup>[44,45]</sup>

공간 컬러 필터는 메시에 홀을 만들고 따라서 해상도의 손실로 변환 정보의 메시에 홀을 생성한다. 예를 들면, Yamaguchi는 1,636 x 1,238 픽셀 크기  $3.9 \times 3. \mu m^2$ 의 감지기를 사용했다.<sup>[46]</sup> 그의 결과는 상대적으로 낮은 해상도를 가졌으며 각 색상의 픽셀 수는 818 x 610이고 픽셀 피치는  $7.8 \mu m$ 이다. 두 번째 가능성은 tri-CCD로 구성된 3개의 검출기로 구성되며 스펙트럼 선택은 이색 성 층이있는 프리즘에 의해 수행된다. (Figure 2.3(b)) 이러한 검출기는 높은 공간 분해능과 제약 조건과 호환되는 스펙트럼 선택성을 보장한다. 물론 세계의 센서의 상대적인 조정은 높은 정밀도로 실현되어야 한다.

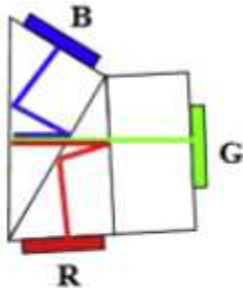
예를 들어, Desse는 1,344 x 1,024 픽셀 크기  $6.45 \mu m \times 6.45 \mu m$ 의 세 개의 감지기를 사용하여 유체 역학에 사용하기 위한 일종의 홀로그래프 간섭계를 개발했다.<sup>[47]</sup> 세 번째 가능성은 포토 다이오드 스택을 기반으로 하는 색상 검출기를 사용하는 것이다.<sup>[48-51]</sup> (Figure 2.3(c)) 스펙트럼 선택성은 실리콘에있는 광자의 평균 침투 깊이에 상대적이며  $425 nm$ 의 청색 광자는 약  $0.2 \mu m$ 까지 침투하고, 녹색 광자는  $532 nm$ 에서 약  $2 \mu m$ 까지, 적색 광자는  $630 nm$ 에서 약  $3 \mu m$ 까지 침투한다. 따라서 약 0.2, 0.8 및

$3.0\mu m$  의 깊이에서 접합부를 구성하면 컬러 이미징을 위한 정확한 스펙트럼 선택성이 제공된다. 그러나, 녹색 광자가 청색 및 적색 대역에서 검출 될 수 있기 때문에 스펙트럼 선택성은 완전하지 않지만 각 파장에 대한 유효 화소수를 전체 행렬의 때문에 아키텍처는 최대 스펙트럼 해상도를 보장한다. [52]



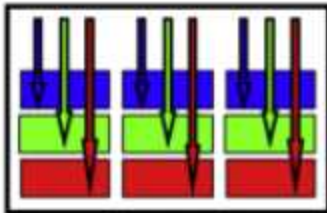
3 color recording with a Bayer mosaic

- a)  $\Rightarrow$  low spatial resolution
- $\Rightarrow$  medium spectral selectivity



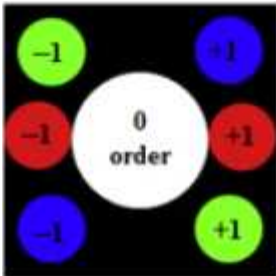
3 color recording with a tri-CCD

- b)  $\Rightarrow$  3 matrices of pixels
- $\Rightarrow$  good spectral selectivity
- $\Rightarrow$  need of spatial adjustment



3 color recording with a stack of photodiodes

- c)  $\Rightarrow$  spatial resolution is maximal
- $\Rightarrow$  need of color calibration



3 color recording with a monochrome CCD

- d)  $\Rightarrow$  3 reference waves
- $\Rightarrow$  spectral selectivity by spatial multiplexing

Figure 2.3. Recording digital color holograms.

### 3. 디지털 홀로그래피의 복조

방정식 [1.6]과 [1.7]은 디지털 홀로그래피를 설명한다. +1 차수는  $U_r^* U_o$ 라는 용어를 통한 물체 파동을 포함하기 때문에 -1,  $U_r U_o^*$ 는  $U_r^* U_o$ 의 켈레 복소수이며 물체 파동에 대한 전체 정보도 포함 한다. 디지털 홀로그래피의 복조는 H 기록에서 +1 차수를 검색하는 것으로 구성되며 복조를 수행하는 방법에는 주로 두 가지 방법이 있다. 기록 시 약간의 축을 벗어난 형상을 사용하거나 위상 이동을 사용하는 것이다.

#### 3.1. Off-axis 홀로그래피

축외 기하학은 공간 반송파 주파수를 도입하고 복조는 파면의 전체 공간 주파수 성분 즉  $U_r^* U_o$ 를 복원한다. 방정식 [1-5]에서 기준 파의 위상에는 홀로그래피의 반송파 공간 주파수  $(u_0, v_0)$ 가 포함된다.  $(u_0, v_0) \neq (0,0)$ 이면 두 파동 사이에 약간의 기울기가 있고 홀로그래피는 축에서 벗어납니다. 실제로 홀로그래피에 인코딩 된 다른 회절 용어 (0차 파, 실제 이미지 및 가상 이미지)는 다른 방향으로 전파되어 재구성을 위한 분리를 가능하게 한다. 이 구성은 완전한 수치 기록 및 재구성 홀로그래피의 첫 번째 데모에 사용되었다. [53,54] 실제로 축외 구성을 기반으로 한 재구성 방법은 일반적으로 홀로그래피 ( $U_r^* U_o$  또는  $U_r U_o^*$ )에 포함 된 회절 항 중 하나를 필터링하기 위해 푸리에 방법을 사용한다. [55]에 포함 된 회절 항 중 하나를 필터링하기 위해 푸리에 방법에 의존합니다. 이 개념은 Takeda 등에 의해 제한되었고 이 방법은 나중에 위상 회복을 위한 매끄러운 지형 측정을 위해 확장되고진폭 및 위상 복구와 함께 DHM에서 사용하기 위해 일반화 되었다.

방정식 [1-3]~[1-6]에 따르면 공간 주파수 스펙트럼에서 three-modal 분포는 홀로그래피의 3 차 회절 차수와 관련된다. ( $FT$  및  $FT^{-1}$ 는 각각 푸리에 변환 및 역 푸리에 변환을 의미 함)

$$FT[H](u,v) = C_o(u,v) + C_1(u-u_o, v-v_o) + C_1^*(-u-u_o, -v-v_o) \quad (1-12)$$

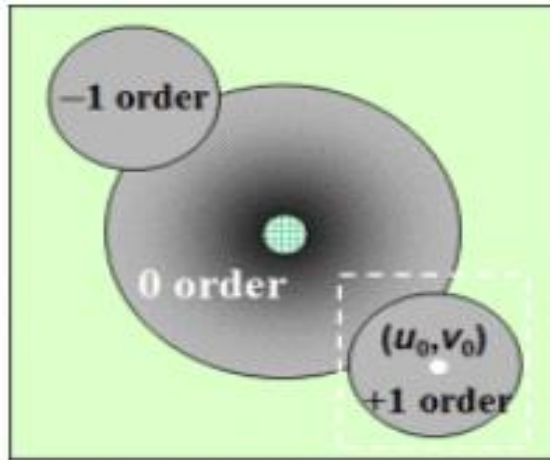


Figure 2.4. Spectral distribution of orders and spectral filtering

여기서  $C_0$ 는 0 차의 푸리에 변환이고  $C_1$  은 +1 차의 푸리에 변환이며 푸리에 평면에서 세 차수가 잘 분리되어 있으면 푸리에 스펙트럼에서 +1 차수를 추출 할 수 있다. 그림 1.4는 디지털 홀로그램의 푸리에 영역에서 스펙트럼 분포를 보여준다. 공간 주파수  $(u_0, v_0)$  는 유용한 정보를 지역화하며 세 회절 차수의 겹침을 최소화하도록 조정해야 하고 공간 주파수  $(u_0, v_0)$  주변에 대역폭 제한 필터 ( $\Delta u \times \Delta v$  폭)를 적용하고 필터링 및 역 2차원(2D) 푸리에 변환 후 객체 복소 진폭을 얻는다.

$$O_{+1}(x,y) = FT^{-1}[C_1(u-u_o, v-v_o)] = a_r \{a_o(x,y) \exp[i\phi_o(x,y)]\} * h(x,y) \quad (1-12)$$

여기서 기호 \*는 중첩을 의미하고  $h(x,y)$ 는 푸리에 영역에 적용된 필터링에 해당하는 임펄스 응답이다.

필터의 임펄스 응답은 다음과 같다.

$$h(x,y) = \Delta u \Delta v \exp[2i\pi(u_o x + v_o y)] \text{sinc}(\pi \Delta u x) \text{sinc}(\pi \Delta v y) \quad (1-14)$$

그런 다음 공간 해상도는  $x-y$  축에서 각각  $1/\Delta u$  및  $1/\Delta v$  와 관련된다. 또한 식 [1-13]으로 복구 된 위상에는 제거 해야하는 공간 반송파 변조가 포함된다. 이것은  $\exp[-2i\pi(u_0x + v_0y)]$ 에  $O_{+1}$  을 곱하여 얻을 수 있다.

순환 대역폭을 가진 필터(직사각형 대역폭 대신)도 사용할수 있으며 이 경우 필터의 임펄스 응답은  $J_0 Bessel$  함수에 비례한다.

그런 다음 홀로그래프 평면의 광학 물체 위상을 다음 식에서 추정 할 수 있다.

$$\phi_o(x,y) = \tan^{-1}\left(\frac{\mathfrak{J}_m[O_{+1}(x,y)]}{R_e[O_{+1}(x,y)]}\right) \quad (1-15)$$

객체 진폭은 다음과 같다.

$$a_o(x,y) = \sqrt{\mathfrak{J}_m^2[O_{+1}(x,y)] + R_e^2[O_{+1}(x,y)]} \quad (1-16)$$

방정식 [1-15]와 [1-16]에서,  $\mathfrak{J}_m[...]$ 와  $R_e[...]$  은 각각 복소수 값의 허수부와 실수부에 해당된다.

이 접근법의 가장 큰 장점은 단 한 번의 획득을 통해 복잡한 물체 파동을 복구 할 수 있다는 것이다. 따라서 헤테로다인 또는 미래 이동에 소요되는 시간이 없으며 진동의 영향이 크게 감소한다. 그러나 회절 용어가 홀로그래프에서 공간적으로 인코딩되기 때문에 이 원샷 기능은 잠재적으로 사용 가능한 대역폭(필터  $\Delta u \times \Delta v$  폭)의 비용이 발생한다. 또한 기준파와 물체파 사이의 각도에 의해 유도되는 주파수 변조는 디지털 탐지기의 샘플링 용량과 호환되는 주파수를 전달하면서 홀로그래프에 인코딩된 서로 다른 회절 조건에 포함 된 정보의 분리를 보장한다.

그러나 현미경 분야에서 현미경 대물 렌즈를 사용하면 일반적으로 물체 파동 장을 카메라의 샘플링 용량에 맞게 적절하게 조정할 수 있으며 파동 벡터  $k_{x \text{ or } y}$  의 측면 성분은 현미경 대물 렌즈의 배율  $M$  으로 나뉩니다.

실제로 수마이크론 픽셀의 표준 카메라를 사용하면 배율이  $\times 20$ 보다 큰 현미경 대물 렌즈를 사용하면 조리개 수 (NAs)를 고려하더라도 회절 제한 해상도를 얻을 수 있다. [56] 또한 물체 파면의 수치적 재구성 특히 그 전파는 현대 광학 및 특히 현미경에서 획기적인 발전을 나타낸다. [57]

실제로 오프라인 자동 초점을 달성하고 초점 깊이를 확장 할 수 있는 가능성 외에도 이러한 수치 재구성 절차를 통해 복잡한 광학 시스템을 모방 할 수 있을뿐만 아니라 수차, 왜곡 및 실험적 노이즈를 보상하여 다양한 파장 및 통합 시간을 포함한 기타 매개 변수에 따라 실제로 초고해상도의 광학 경로 길이를 나노 미터 이하 규모까지 정량적으로 측정 할 수 있는 간단하고 강력한 간섭계를 구성한다.

### 3.2. Phase-shifting digital holography

Off-axis 디지털 홀로그래피 (푸리에 영역)와 달리 물체 파동의 복잡한 진폭은 시간 영역에서 위상 이동 방법을 사용하여 직접 추출 할 수 있다. [58,59] 이 접근 방식은 1997 년 Yamaguchi에 의해 설명되었으며 0차 및 이중 상이 (-1차) 없는 이미지의 재구성으로 이어지고 다음과 같이 홀로그램 방정식이 작성된다. [60]

$$H = a_r^2 + a_o^2 + 2a_r a_o \cos(\phi_o - \phi_r) \quad (1-17)$$

기본적으로 방정식 [1.17]에서 우리는 세 가지 미지수를 고려해야 한다. 항  $a_r^2 + a_o^2$ , 변조 항  $2a_r a_o$  및 코사인 함수의 위상  $\phi_o - \phi_r$  을 상쇄한다.

따라서 H에 대해 3개 이상의 값을 사용하여 이 세 가지 미지수를 풀 수 있어야 한다. 이것은 홀로그래픽 간섭계에 위상 변조기를 추가하여 코사인 함수의 위상을 이동하여 수행 할 수 있다. 실제적으로 (다른 방법이 존재하더라도) 압전 변환기 (PZT)가 사용된다. [61,62]

PZT는 미러에 스탬핑되어 PZT에 작은 전압을 적용하면 결과적으로 미러가 약간 움직여야 광학 위상이 이동되고 미러의 3개 이상의 위치로 물체 파동 장을 복구 할 수 있습니다. 이와 같은 방법의 견고성은 위상 편이 홀로그램의 수가 증가함에 따라 증가한다.

$$H_p = a_r^2 + a_o^2 + 2a_r a_o \cos(\phi_o - \phi_r + 2(p-1)\pi/P) \quad (1-18)$$

$p = 1, 2, \dots, P$ ,  $P \geq 3$ 의 경우, 검출기 평면에서 물체 파동의 위상은 다음과 같이 계산된다. [63]

$$\phi_o = \phi_r + \arctan \left\{ \frac{\sum_{n=1}^P H_p \sin(2\pi(p-1)/P)}{\sum_{n=1}^P H_p \cos(2\pi(p-1)/P)} \right\} \quad (1-19)$$

진폭은 다음과 같이 계산된다.

$$a_o = \frac{1}{2a_r} \sqrt{\left( \sum_{n=1}^P H_p \sin(2\pi(p-1)/P) \right)^2 + \left( \sum_{n=1}^P H_p \cos(2\pi(p-1)/P) \right)^2} \quad (1-20)$$

만약 기준파가 수차가 없는 평면 또는 구형 인 경우, 위상  $\phi_o(x,y)$ 는 모호함없이 결정되고 보상 될 수 있고 복잡한 파동을 평가하고 객체를 직접 재구성 할 수 있다. 컬러 복소파를 사용하여 이중 이미지를 계산할 수 있다.

$P=4$ 에서는 Yamaguchi와 Zhang이 제안한 4개의  $\pi/2$  위상이동 홀로그램을 가장 널리 사용되고 이 경우 다음과 같다. [64,65]

$$\begin{aligned} \phi_o &= \phi_r + \arctan \left\{ \frac{H_4 - H_2}{H_1 - H_3} \right\} \\ a_o &= \frac{1}{4a_r} \sqrt{[H_1 - H_3]^2 + [H_4 - H_2]^2} \end{aligned} \quad (1-21)$$

### 3.3. Parallel phase-shifting

위상이동 기술에서는 홀로그램의 순차적 기록으로 인해 디지털 홀로그래피의 단일샷 및 실시간 기능이 모두 손실된다. 4개의 홀로그램은  $0$ ,  $\pi/2$ ,  $\pi$  및  $3\pi/2$  와 같이 위상 지연이 다른 기준파를 사용하여 순차적으로 기록된다. 위상 이동 방식은 무소음 이미지를 구현하지만 움직이는 물체의 순간 측정에는 쓸모가 없다. Off-axis 디지털 홀로그래피가 1차 회절파만을 순간적으로 얻을 수 있는 후보 중 하나이지만 몇 가지 단점이 있다. 공간 반송파 무늬를 기록하려면 고해상도 이미지 센서가 필요하고 공간 대역폭을 신중하게 점유 해야한다. (그림 1.4 참조)

병렬 위상이동 디지털 홀로그래피에서는 기록 홀로그램에서 이미지 센서의  $2 \times 2$  픽셀로 구성된 각 부분의 기준파에 대해 4가지 위상이동이 동시에 수행된다. 따라서 공간 분할 다중화 기법을 이용하여 4개의 위상이동 과정을 구현한다. 위상이동 간섭계에 필요한 4개의 홀로그램은 기준파와 함께 기록 된 홀로그램에서 수치적으로 생성된다. 기술의 기록 과정은 그림 1.5 에 설명되어 있다.

위상이동 어레이 장치는 홀로그램 간섭계의 기준 빔에 배치되고 어레이 장치는 주기적인 4단계 위상 분포  $0$ ,  $\pi/2$ ,  $\pi$  및  $3\pi/2$  를 생성하는  $2 \times 2$  셀 구성의 부분 어레이이다. 어레이 장치는 주기적으로 4단계 두께의 유리판을 사용하여 구현할 수 있으며 어레이 장치는 이미지 센서에 이미징 되어 이미지 센서 평면에서 기준파의 위상 분포가 이미지 센서의 픽셀 배열과 일치하도록 한다. 이미지 센서에서 이미징 된 셀의 크기는 픽셀의 크기와 동일하며 이미지 센서는 4단계 위상 분포를 포함하는 기준파로 기록된 홀로그램을 캡처한다. 동일한 위상이동을 포함하는 픽셀은 기록된 홀로그램에서 추출되고 각 위상이동에 대해 추출된 픽셀은 추출되기 전에 위치했던 동일한 주소의 다른 2D 이미지로 재배치 된다. 2D 이미지에서 재배치 되지 않은 픽셀의 값은 재구성 프로세스에서 인접한 픽셀 값을 사용하여 단순히 선형 보간된다. 4개의 위상 시프트에 대해 재배치 및 보간을 수행하여 4개의 홀로그램  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $H_3$  및  $H_4$ 를 얻는다. 그런 다음 기존 알고리즘 [1-21]을 사용하여 복잡한 물체 필드의 진폭과 위상을 계산할 수 있다.



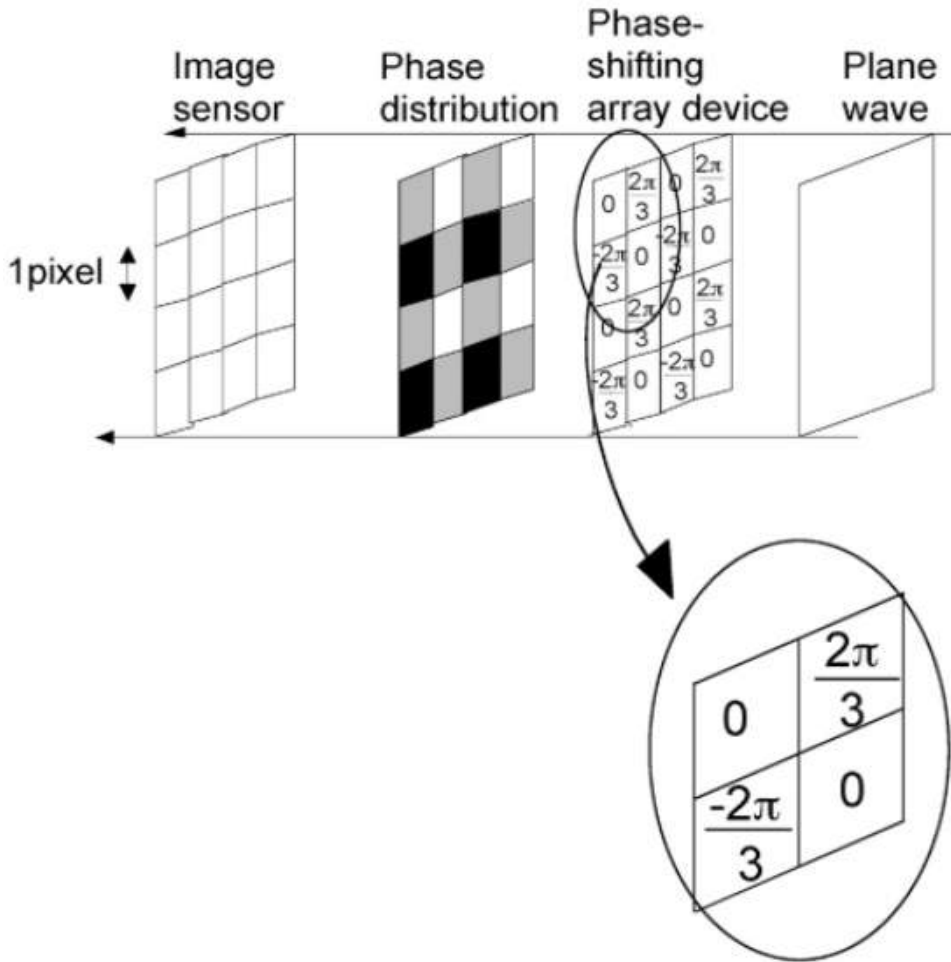


Figure 2.5. Implementation of parallel phase-shifting digital holography, e-shifting array device and the distribution of the reference wave for parallel four-step phase-shifting [66]

### 3.4. Heterodyne digital holography

헤테로다인 디지털 홀로그래픽 방식에서 기준 빔은 물체 필드에 대해 동적으로 위상 이동되며 이 이동은 센서 평면에서 시간에 따라 변하는 인터페로그램을 생성한다. 일반적으로 위상이동은 시간상 선형적이다.(주파수 편이) 검출기 평면의 홀로그램은 방정식 [1-22]에 설명 된대로  $\delta f$  이동 기준파와 물체 파동의 간섭으로 인해 발생한다.

$$\begin{aligned}
 H &= |U_r \exp(2i\pi\delta ft) + U_o|^2 \\
 &= |U_r|^2 + |U_o|^2 + U_r^* U_o \exp(-2i\pi\delta ft) + U_r U_o^* \exp(+2i\pi\delta ft)
 \end{aligned} \tag{1-22}$$

$P$  세트 홀로그램  $H_p (p=1,2,\dots,P)$ 는  $t_p = 2\pi(p-1)/\delta f$  에서  $\delta f$  주기 내에 기록되고 복조 알고리즘은 다음과 같다. [67,68]

$$U_o = \frac{1}{P} \frac{1}{U_r^*} \sum_{p=1}^{p=P} H_p \exp\left[\frac{2i\pi(p-1)}{P}\right] \tag{1-23}$$

$P=4$ 의 경우 물체 복소파는  $(H_1 - H_3) + i(H_2 - H_4)$ 에 비례하며 알고리즘은 방정식 [1-21]에 제공된 것과 매우 유사하다. 따라서 헤테로다인 홀로그래피는 서로 다른 시간에 얻은 정보를 사용하여 위상을 측정한다. 실제적인 관점에서 주파수 편이는 각각  $\Delta f + \delta f$  및  $\Delta f$ 에서 작동하는 두 개의 음향 광학 변조기를 결합하여 제공되며 센서 프레임 속도의 1/4로 조정된다. [69-72]

Off-axis 홀로그래피와 헤테로다인을 결합하면 샷 노이즈 감지에 도달하고 디지털 홀로그래피의 궁극적인 감도를 얻을 수 있다. [73-76]

## 제 2 절 디지털 홀로그래피 이론

### 1. 홀로그래피 기록 및 재구성 이론

홀로그램은 일반적으로 광원과 빔 가이드용 렌즈로, 사진촬영용 기록장치로 구성된 광학 구성으로 기록된다. 일반적인 설정은 Figure 2.6에 나와 있다. [77,78]

충분한 일관성 길이를 가진 빛은 빔 스플리터(BS)에 의해 두 개의 부분파로 분할되고 대상체를 비추게 되고 물체 표면에 흠어져 기록 매체에 반사되며 두 번째 파동이라는 이름의 기준 파동은 감광 매체를 직접 비추게 된다.

두 파동이 간섭을 일으키게 되고 간섭 패턴은 사진판의 화학적 현상에 의해 기록된 간섭 패턴을 홀로그램이라고 한다. 홀로그램을 기준파 (Figure 2.7)로 비추어 원래의 물체 파동을 재구성한다. 관찰자는 원래 객체와 구별 할 수 없는 가상 이미지를 보게 되며 재구성 된 이미지는 원근감과 초점 심도의 모든 효과를 보여준다.

물체 파동의 복잡한 진폭은 다음과 같이 설명된다.

$$E_O(x,y) = a_o(x,y)\exp(i\varphi_o(x,y)) \quad (2-1)$$

실제 진폭  $a_o$  및 위상  $\varphi_o$ ,

$$E_R(x,y) = a_R(x,y)\exp(i\varphi_R(x,y)) \quad (2-2)$$

실제 진폭  $a_R$  및 위상  $\varphi_R$  를 갖는 기준파의 복소 진폭이다.

두 파장 모두 기록 매체의 표면에서 간섭하고 강도는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}
 I(x,y) &= |E_O(x,y) + E_R(x,y)|^2 \\
 &= (E_O(x,y) + E_R(x,y))(E_O(x,y) + E_R(x,y))^* \\
 &= E_R(x,y)E_R^*(x,y) + E_O(x,y)E_O^*(x,y) + E_O(x,y)E_R^*(x,y) + E_R(x,y)E_O^*(x,y)
 \end{aligned} \quad (2-3)$$

현상 된 사진판의 진폭 투과  $h(x,y)$  는  $I(x,y)$ 에 비례하며 다음과 같다.

$$h(x,y) = h_o + \beta\tau I(x,y) \quad (2-4)$$

상수  $\beta$  는 빛에 민감한 재료의 노출 특성에 대한 진폭 투과율의 기울기이고 사진유제의 경우  $\beta$  는 음수이다.  $\tau$  는 노출 시간이고  $h$  는 노출되지 않은 플레이트의 진폭 투과율이다.

$h(x,y)$  는 홀로그램 함수라고 하고 CCD를 기록 매체로 사용하는 디지털 홀로그래피에서는  $h$  를 무시할 수 있다. 또한 홀로그램 재구성을 위해 진폭 전송은 재구성 파의 복소 진폭과 곱해야 한다.

$$E_R(x,y)h(x,y) = [h_o + \beta\tau(a_R^2 + a_O^2)]E_R(x,y) + \beta\tau a_R^2 E_O(x,y) + \beta\tau E_R^2(x,y)E_O^*(x,y) \quad (2-5)$$

이 방정식의 오른쪽에 있는 첫 번째 항은 계수를 곱한 기준파이며 홀로그램을 통과하는 회절되지 않은 파동을 나타낸다.

두 번째 용어는 가상 이미지를 형성하는 재구성 된 물체 파동이고 실제 계수  $\beta\tau a_R^2$  는 이미지의 밝기에만 영향을 준다. 세 번째 용어는 물체의 왜곡 된 실제 이미지를 생성하며 off-axis 홀로그래피의 경우 가상 이미지, 실제 이미지 및 회절되지 않은 파동이 공간적으로 분리된다.

실제 이미지가 왜곡되는 이유는 공간적으로 변화하는 복소계수  $E_R^2$  로 이미지 형성 공액 물체파  $E_O^*$  를 변조한다. 재구성을 위해 켈레 참조  $E_R^*$  을 사용하여 왜곡되지 않은 실제 이미지를 생성 할 수 있다.

$$E_R^*(x,y)h(x,y) = [h_o + \beta\tau(a_R^2 + a_O^2)]E_R^*(x,y) + \beta\tau a_R^2 E_O^*(x,y) + \beta\tau E_R^{*2}(x,y)E_O(x,y) \quad (2-6)$$

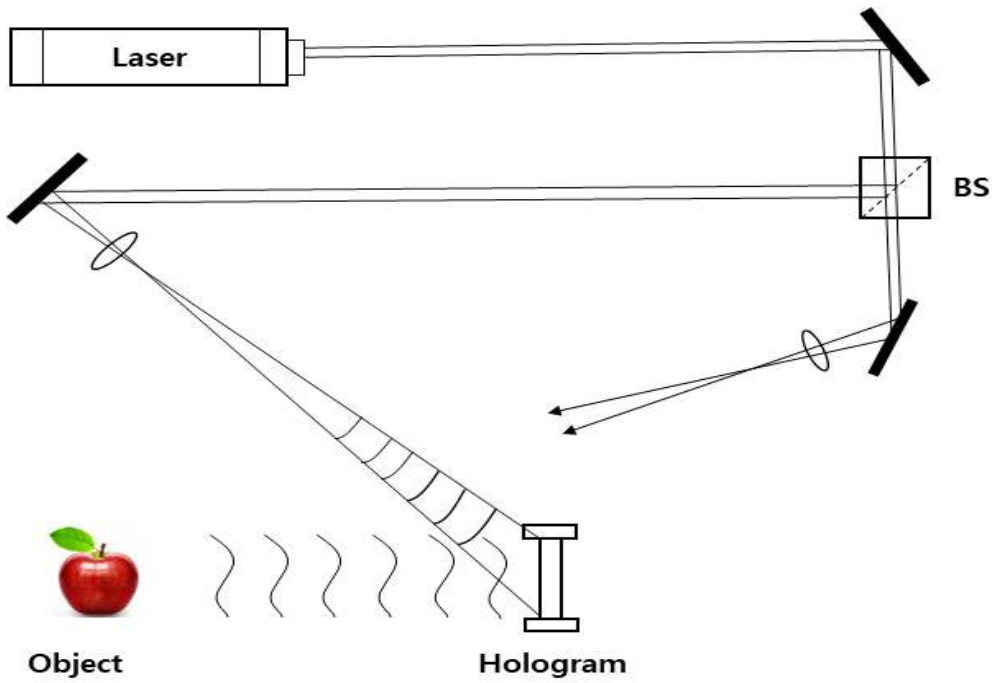


Figure 2.6 Hologram recording

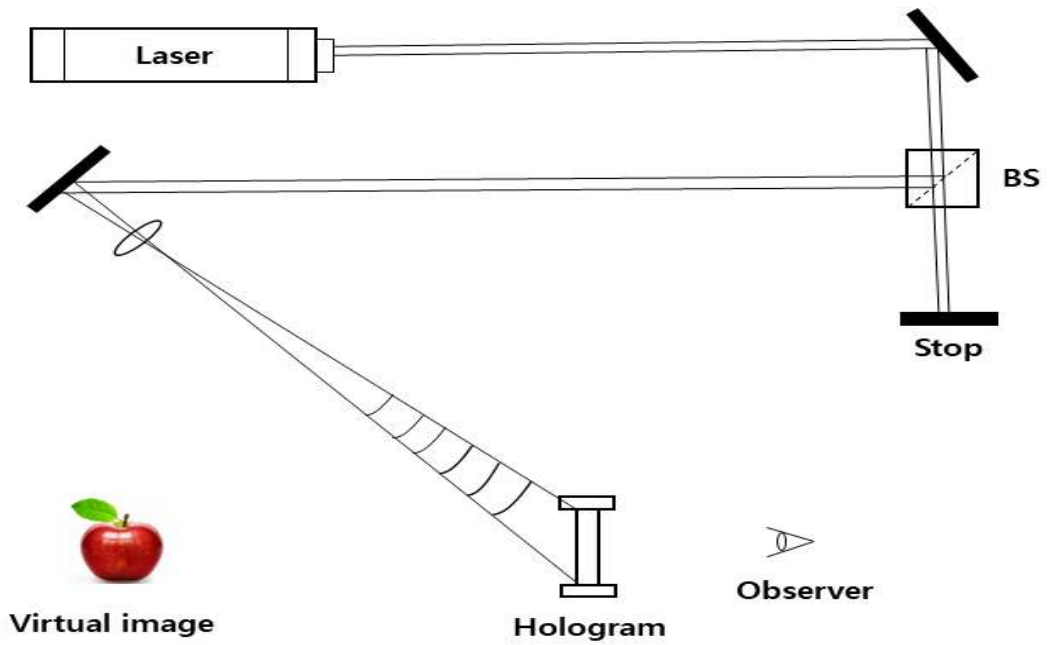


Figure 2.7 Hologram reconstruction

## 2. 디지털 홀로그래피 일반 이론

디지털 홀로그램 기록의 개념은 Figure 2.8 (a) 에 설명되어 있다. 평면 기준파와 물체에서 반사된 파동은 CCD (Charged Coupled Device)의 표면에서 간섭한다. 그 결과 홀로그램은 전자적으로 기록되고 저장되고 물체는 일반적으로 CCD에서  $d$  거리에 위치한 확산 반사 표면을 가진 3차원 물체이다.

광학 재구성에서 가상 이미지는 원래 물체의 위치에 나타나고 실제 이미지는 거리  $d$  에서도 형성되지만 CCD와 반대 방향으로 형성됩니다. (Figure 2.8 (b) 참조) 들어오는 빔에 수직으로 장착된 조리개에서 광파의 회절은 Fresnel- Kirchhoff 적분으로 설명된다.

$$\Gamma(\xi', \eta') = \frac{i}{\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) E_R(x, y) \frac{\exp(-i \frac{2\pi}{\lambda} \rho')}{\rho'} dx dy \quad (2-7)$$

$$\rho' = \sqrt{(x - \xi')^2 + (y - \eta')^2 + d^2} \quad (2-8)$$

$h(x, y)$  는 홀로그램 함수이고  $\rho'$  는 홀로그램 평면의 점과 재구성 평면의 점 사이의 거리이다. 기하학적 수량은 Figure 2.4 에 설명되어 있다. 각도  $\theta$  와  $\theta'$  가 대략 0 이기 때문에 경사 계수는 1로 설정되고 이것은 모든 수치 재구성 알고리즘에 유효하다. 평면 기준 파의 경우  $E_R(x, y)$  는 단순히 실제 진폭으로 제공된다.

$$E_R = a_R + i0 = a_R \quad (2-9)$$

회절 패턴은 CCD 평면 뒤의 거리  $d$  에서 계산되 이는 실제 이미지 평면에서 복소 진폭을 재구성함을 의미한다. 식(2-7)은 수치 홀로그램 재구성의 기초이고 재구성 된 파동역역  $\Gamma(\xi', \eta')$ 는 복잡한 함수이기 때문에 세기와 위상을 모두 계산할 수 있다. [79] 이것은 광 홀로그램 재구성의 경우와 대조적으로 강도만 표시된다.

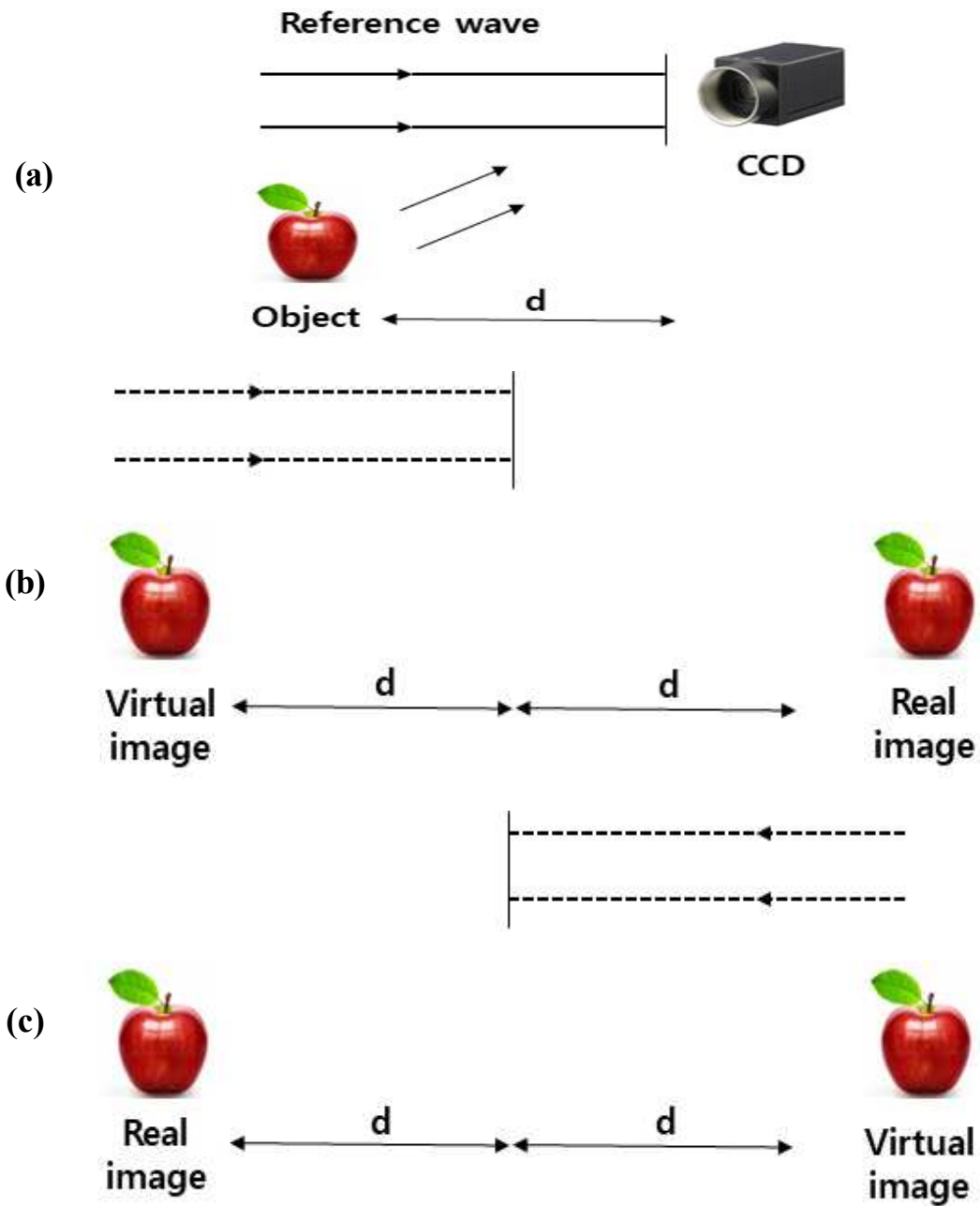


Figure 2.8 Digital Holography

(a) Recording

(b) Reconstruction with reference wave  $E_R$

(c) Reconstruction with conjugate reference wave  $E_R^*$

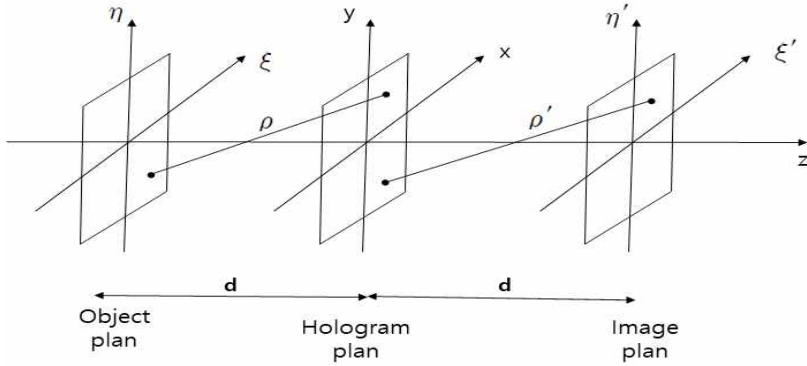


Figure 2.9 Coordinate system for numerical hologram reconstruction

실제 이미지는 왜곡 될 수 있으며 재구성을 위해 켈레 참조빔을 사용하여 왜곡되지 않은 실제 이미지를 생성 할 수 있다. 디지털 홀로그래피에서 왜곡되지 않은 실제 이미지를 재구성하려면 식 (2-7)에  $E_R^*$  대신  $E_R$  를 삽입해야 한다.

$$\Gamma(\xi, \eta) = \frac{i}{\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) E_R^*(x, y) \frac{\exp(-i \frac{2\pi}{\lambda} \rho)}{\rho} dx dy \quad (2-10)$$

$$\rho = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + d^2} \quad (2-11)$$

이 재구성 계획은 Figure 2.8 (c) 에 나와 있고 실제 이미지는 녹화 중에 물체가 있던 위치에서 나타난다. 식에 정의된 평면 기준파에 대해 언급하면 식 (2-9) 두 재구성 공식, 식 (2-7) 및 (2-10)는  $E_R = E_R^* = a_R$  이므로 동일하다.

CCD에 수직으로 충돌하는 평면 기준파가 있는 Figure 2.9 의 설정은 디지털 홀로그래피에서 자주 사용되고 다른 기록 기하학은 나중에 설명한다. 가상 이미지의 재구성은 또한 렌즈의 이미징 속성을 수치 재구성 프로세스에 도입함으로써 가능합니다.<sup>[80]</sup> 이 렌즈는 광학적으로 재구성 된 홀로그램을 통해 보는 관찰자의 눈 렌즈에 해당하고 가장 단순한 경우에 이 렌즈는 홀로그램 Figure 2.10 바로 뒤에 있다. 초점 거리가  $f$  인 렌즈의 이미징 속성은 다음과 같은 복잡한 요소로 고려된다.



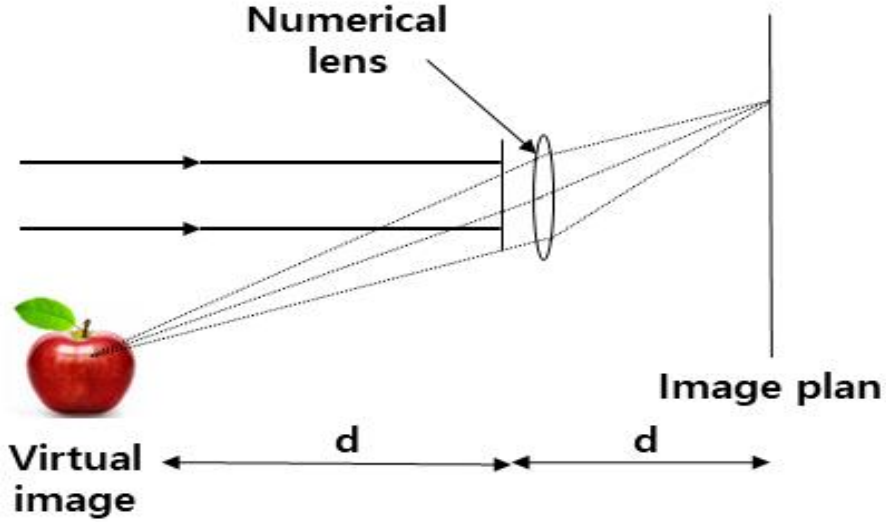


Figure 2.10 Reconstruction of the virtual image

$$L(x,y) = \exp\left[i\frac{\pi}{\lambda f}(x^2 + y^2)\right] \quad (2-12)$$

1의 배율을 위해  $f = d/2$  의 초점 거리를 사용해야 한다.

식 (2-12) 에 의해 설명 된 렌즈는 위상 수차를 일으켜 재구성 된 파동장에 계수를 곱하여 수정할 수 있다.

$$P(\xi', \eta') = \exp\left[i\frac{\pi}{\lambda f}(\xi'^2 + \eta'^2)\right] \quad (2-13)$$

따라서  $f = d/2$  인 가상 렌즈를 통한 전체 공식은 다음과 같다.

$$\Gamma(\xi', \eta') = \frac{i}{\lambda} P(\xi', \eta') \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x,y) E_R(x,y) L(x,y) \frac{\exp(-i\frac{2\pi}{\lambda}\rho')}{\rho'} dx dy \quad (2-14)$$

## 제 3 절 위상 이동

### 1. 홀로그래피 위상 이동

매개 변수  $A(x,y)$  와  $B(x,y)$ 가 알려지지 않았고 부호가 결정되지 않았기 때문에 측정 된 강도로부터  $\Delta\varphi$  을 명확하게 계산하는 것은 불가능합니다.

Phase shifting Holographic Interferometry는 추가 정보를 기록하여 간섭 위상을 결정하는 방법이다.<sup>[81,82]</sup> 원칙은 세 가지 기록의 상호 위상 편이로 세 개 이상의 간섭 패턴을 기록하는 것입니다. 간섭 패턴은 다음과 같이 설명된다.

$$\begin{aligned}
 I_1(x,y) &= A(x,y) + B(x,y)\cos(\Delta\varphi) \\
 I_2(x,y) &= A(x,y) + B(x,y)\cos(\Delta\varphi + \alpha) \\
 I_3(x,y) &= A(x,y) + B(x,y)\cos(\Delta\varphi + 2\alpha)
 \end{aligned}
 \tag{2-15}$$

만약 위상 각  $\alpha$ 가 알려진 경우( $120^\circ$  등) 방정식 시스템은  $\Delta\varphi$  에 대해 명백하게 풀 수 있다. 위상 변이는 실제로 압전 변환기에 장착 된 거울에 의해 실현 될 수 있으며 거울은 물체 또는 참조 빔에 배치된다. 홀로그램 재구성 중에 PZT에 적절한 전압이 적용되면 파장의 일부 범위에서 잘 정의 된 경로 변경이 도입 될 수 있다. 이러한 경로 변경은 물체와 기준파 간의 위상 차이에 해당한다.

2개의 상호 위상 이동으로 식 (2-15)를 사용하여 최소 3개의 재구성을 사용하는 대신 3개의 상호 위상이동을 사용하여 4개의 식을 생성 할 수도 있다.

$$\begin{aligned}
 I_1(x,y) &= A(x,y) + B(x,y)\cos(\Delta\varphi) \\
 I_2(x,y) &= A(x,y) + B(x,y)\cos(\Delta\varphi + \alpha) \\
 I_3(x,y) &= A(x,y) + B(x,y)\cos(\Delta\varphi + 2\alpha) \\
 I_4(x,y) &= A(x,y) + B(x,y)\cos(\Delta\varphi + 3\alpha)
 \end{aligned}
 \tag{2-16}$$

이 경우 방정식은 위상이동 각도  $\alpha$  에 대한 지식 없이도 일정하게 풀 수 있으며  $\Delta\varphi$  의 해는 다음과 같다. [83]

$$\Delta\varphi = \arctan \frac{\sqrt{I_1 + I_2 - I_3 - I_4} \cdot \sqrt{3I_2 - 3I_3 - I_1 + I_4}}{I_2 + I_3 - I_1 - I_4} \quad (2-17)$$

기록 횟수 (최소 3개),  $\alpha$  값, 위상 이동 생성 방법 (단계적 또는 연속) 또는 기타 세부 사항이 다른 다양한 HI 위상 이동 방법이 발표되었다.

마지막으로 위상이동 HI 는 프린지 패턴에서 위상을 결정하는 유일한 방법이 아니라 가장 많이 적용되는 방법이라는 점에 주목하며 다른 단계 평가 기술은 푸리에 변환 방법, skeletonizing 또는 heterodyne 기술등이 있다.

## 2. 디지털 홀로그래피 위상 이동

광파의 진폭과 위상은 단일 홀로그램에서 재구성 할 수 있으며 완전히 다른 접근법이 Skarman에 의해 제안 되었다. [84,85] 그는 위상 이동 알고리즘을 사용하여 초기 위상과 이미지 평면의 모든 평면에서 복잡한 진폭을 계산했다. 한 평면의 초기 복소 진폭 분포로 다른 평면의 파동 장은 회절의 Fresnel-Kirchhoff 공식을 사용하여 계산할 수 있고 나중에 위상 이동 디지털 홀로그래피가 개선되어 Yamaguchi 등이 불투명 물체에 적용 했다. [86,87]

위상 이동 디지털 홀로그래피의 기본 배열은 Figure 2.11 에 나와 있다. 물체파와 기준 파가 CCD 표면에서 간섭하고 있으며 기준파는 압전 변환기(PZT) 에 장착 된 거울 을 통해 전달되고 PZT를 사용하면 기준 파의 위상을 단계적으로 이동할 수 있다.

상호 위상 이동이있는 여러개 (최소 3개)의 인터페로그램이 기록되고 그 후 물체 위상은 이러한 위상이동 인터페로그램에서 계산되며 절차는 기준 HI의 위상이동과 유사 하다. 물체파의 실제 진폭  $a_o(x,y)$ 은 기준파를 차단에 의해 세기를 측정 할 수 있다. 결과적으로 물체 파동의 복소 진폭은 기록  $(x,y)$  평면에서 결정된다.

$$E_O(x,y) = a_o(x,y)\exp(+i\varphi_o(x,y)) \quad (2-18)$$

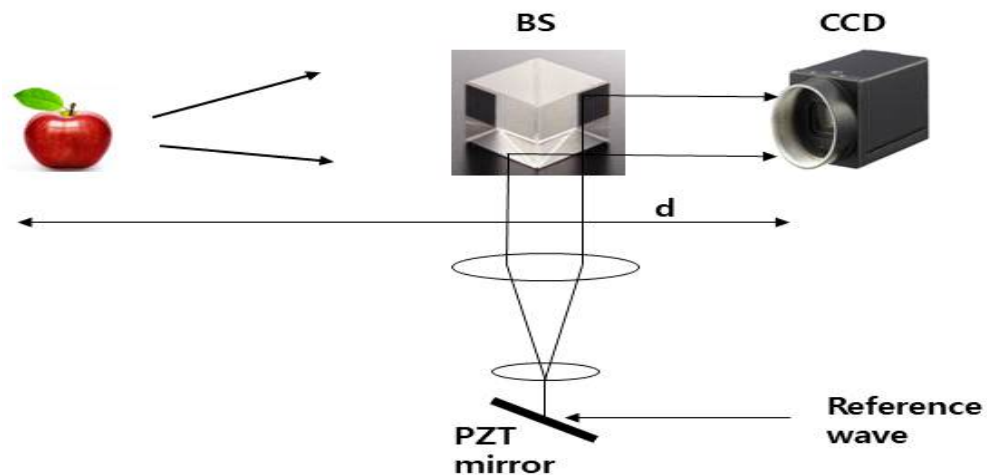


Figure 2.11 Set-up of phase shifting Digital Holography

이제 Fresnel-Kirchhoff 적분을 사용하여 다른 평면의 복소 진폭을 계산할 수 있다. 물체의 이미지를 계산하기 위해  $f = d/2$  인 인공 렌즈가 식 (2-12)에 따라 기록면에 도입되고 프레넬 근사식을 사용한다. 따라서 이미지 평면의 복소 진폭은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}
 E_O(\xi', \eta') &= C \exp \left[ +i \frac{\pi}{\lambda d} (\xi'^2 + \eta'^2) \right] \\
 &\times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_O(x, y) L(x, y) \exp \left[ -i \frac{\pi}{\lambda d} (x^2 + y^2) \right] \exp \left[ i \frac{2\pi}{\lambda d} (x\xi' + y\eta') \right] dx dy \\
 &= C \exp \left[ +\frac{i\pi}{\lambda d} (\xi'^2 + \eta'^2) \right] \\
 &\times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_O(x, y) \exp \left[ +i \frac{\pi}{\lambda d} (x^2 + y^2) \right] \exp \left[ i \frac{2\pi}{\lambda d} (x\xi' + y\eta') \right] dx dy
 \end{aligned} \tag{2-19}$$

여기서 Figure 2.9 의 좌표계가 적용된다. 복소 진폭은 홀로그래프 평면에 알려져 있기 때문에 기록 과정을 역전시켜 물체를 재구성하는 것도 가능하다. 홀로그래프 기록은 다음과 같이 설명된다.

$$\begin{aligned}
 E_O(x, y) &= \frac{i}{\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_O(\xi, \eta) \frac{\exp(-i \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{d^2 + (\xi - x)^2 + (\eta - y)^2})}{\sqrt{d^2 + (\xi - x)^2 + (\eta - y)^2}} d\xi d\eta \\
 &= \mathfrak{I}^{-1} \{ \mathfrak{I} (E_O(\xi, \eta)) \cdot \mathfrak{I} (g(\xi, \eta, x, y)) \}
 \end{aligned} \tag{2-20}$$

$$g(\xi, \eta, x, y) = \frac{i}{\lambda} \frac{\exp \left( -i \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{d^2 + (\xi - x)^2 + (\eta - y)^2} \right)}{\sqrt{d^2 + (\xi - x)^2 + (\eta - y)^2}} \tag{2-21}$$

$E_O(\xi, \eta)$ 는 방출 표면에서 물체 파동의 복소 진폭이다. 따라서 식 (2-20)을 반대로하여 직접 계산할 수 있다.

$$E_O(\xi, \eta) = \mathcal{J}^{-1} \left\{ \frac{\mathcal{J}(E_O(x, y))}{\mathcal{J}(g(\xi, \eta, x, y))} \right\} \quad (2-22)$$

이 재구성 방법의 수치적 구현은 식 (2-22)의 분할로 인해 중요하다.

위상 이동 디지털 홀로그래피의 장점은 0차 항과 결레 이미지가 없는 물체의 재구성된 이미지이며 이 업적에 대한 대가는 더 높은 기술적 노력이다. 위상 이동 인터페로그램을 생성해야하며 기록주기 동안 일정한 위상으로 천천히 변화하는 방법을 제한해야 한다.

또한 압전소자의 비선형적인 이동에도 물체파의 복소진폭이 획득 가능한 인터프레임 세기 보정법(Interframe intensity correction)을 적용하였다. IIC는 위상이동 이미지 사이의 변화에 대한 정보로 복소 진폭을 획득할 수 있다. 위상이동을  $\delta$ 라 하면 위상 이동 이미지에 대한 세기는 다음 식(2-23)로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 I(x, y) &= A + B \cos(\delta + \phi) \\
 &= A + B \cos\delta \cos\phi - B \sin\delta \sin\phi \\
 &= (1 \cos\delta \sin\delta) \begin{pmatrix} A \\ B \cos\phi \\ -B \sin\phi \end{pmatrix} = Da
 \end{aligned} \quad (2-23)$$

식(2-24)에 의해 세기는 행렬로 표현할 수 있으며, 이를 이용하여 위상에 대한 정보를 가지는 행렬  $a$ 를 구할 수 있게 되며 식(2-24)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 a(x, y) &= (D^\dagger D)^{-1} D^\dagger I \\
 &= B \cos\phi - i B \sin\phi = B \exp(i\phi) \\
 &= a_r a_o \exp(i(\varphi - \varphi_r))
 \end{aligned} \quad (2-24)$$

식(2-24)에서 참조파는 아무런 영향 없이 바로 CCD로 향하기 때문에 공간적으로 균

일하다고 할 수 있으며, 마찬가지로 위상이 일정하다고 가정하게 되면  $a_r$ 과  $\varphi_r$ 은 상수로 취급할 수 있어, 물체파의 복소진폭은  $U = a \exp(i\varphi)$  표현할 수 있다.

따라서, 식(2-24)를 이용하게 되면 위상이동 한 이미지로 복소진폭을 단순하게 획득할 수 있으며, 여러 장의 위상이동 이미지가 있을 때 압전소자의 비선형적 움직임에 대한 오류가 제거된 복소진폭을 획득할 수 있다는 것이다. 이로 인해서 본 논문에서는 압전소자를 이용한 위상이동 대신에 진동자를 이용한 위상이동의 수행으로 압전소자와 동일한 결과를 얻을 수 있었으며, 세기의 노이즈가 포함된 위상이동 이미지들은 다음 식(2-25)으로 표현 할 수 있다.

$$I_{Mn}(x, y) = A_n + B_n \cos(\phi_{on} - \phi_{rn}) + \Delta I_{Mn} \quad (2-25)$$

여기서,  $m = 1, 2, 3, \dots, M$ ,  $n = 1, 2, 3, \dots, N$ , 이고  $M$ 은  $N$ 은 각각 위상이동 수와 픽셀의 수를 나타내고,  $\Delta I_{Mn}$  은 측정 과정에서의 오류이다. 따라서 식(2-26)을 행렬로 표현하게 되면 다음 식(2-26)로 표현할 수 있다.

$$I = \frac{1}{2} U a^\dagger + \Delta I \quad (2-26)$$

여기서  $\dagger$ 는  $u_m \equiv \exp(i\phi)$ 과  $z_n \equiv B_n \exp(i\phi_{on})$ 의 공액 전치를 의미하고,  $U$ 와  $a$ 는 다음 식(2-27)과 식(2-28)로 표현할 수 있다.

$$U = \begin{pmatrix} u_1 & u_1^* & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ u_M & u_M^* & 1 \end{pmatrix} \quad (2-27)$$

$$a = \begin{pmatrix} z_1 & z_1^* & 2A_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ z_n & z_n^* & 2A_n \end{pmatrix} \quad (2-28)$$

식(2-26)은  $3N+M-1$ 개의 변수와  $Mn$ 의 방정식을 가지고 있고, 여기서  $M \geq 4$ 를 만족한다면, 방정식이 변수보다 개수가 많아져 식(2-26)은 계산이 가능하다. 따라서 위상이동의 행렬인  $U$ 를 유추하게 되면 물체파의 복소진폭을 뜻하는 행렬  $a$ 는 CCD로 획득한 위상이동 이미지인  $I$ 행렬을 이용하여 계산할 수 있게 된다. 또한, 잡음이 제거된  $a$ 를 획득하기 위해서는 상관 행렬  $C^{(1)}$ 을 획득해야 하며 다음 식(2-29)과 같다.

$$\begin{aligned}
 C^{(1)} &\equiv \frac{1}{N} I I^\dagger \\
 &\simeq \frac{1}{4N} U a^\dagger a U^\dagger + \sigma_0^2 1_M
 \end{aligned}
 \tag{2-29}$$

여기에서  $\sigma_0$ 는 세기 오류의 변화값,  $1_M$ 은  $M$ 차 단위행렬 그리고  $N^{-1}$ 은 표준화 요소를 의미한다. 그리고 추가 적으로  $\sigma_0$ 를 알아내기 위해서  $C^{(1)}$ 의 가장 낮은 고유치를 정의해야 한다.  $\mu$ 이 고유벡터에 대응하는  $C^{(1)}$ 의 고유치라면, 식(2-29)은  $C^{(1)}\nu = \mu\nu$ 로 표현할 수 있으며, 식(2-22)을 해밀턴 행렬로 표현하면 다음 식(2-30)로 표현할 수 있다.

$$\frac{1}{4N} U a^\dagger A a^\dagger \nu \simeq (\mu - \sigma_0^2) \nu
 \tag{2-30}$$

해밀턴 행렬은 선형적으로 독립된 3개의 열을 가지고 있으며 음수가 아니기 때문에  $M \geq 4$ 를 만족하면  $U a^\dagger A a^\dagger / 4N$ 은 두 개 이상의 0인 고유치를 갖게 되고,  $C^{(1)}$ 의 가장 낮은 고유치가  $\sigma_0^2$ 임을 의미한다. 따라서  $U$ 에 대한 반복적 대입으로 잡음이 제거된 상관 행렬  $C^{(ns)}$ 를 유도할 수 있게 된다.



$$C^{(ns)} \simeq \frac{1}{4N} U a^\dagger a U^\dagger \quad (2-31)$$

식(2-31)에  $k$ 번째의 값  $U_k$ 를 대체하게 되면, 다음 식(2-32)을 얻을 수 있으며  $U_k$ 는 임의로 선택한 초기 추측 값  $U$ 를  $k$ 번 반복하여 얻는다.

$$\mathring{A}_k = (U_k^\dagger U_k)^{-1} U_k^\dagger C^{(ns)} U_k (U_k^\dagger U_k)^{-1} \quad (2-32)$$

여기서  $\mathring{A}_k = a^\dagger a / N$  라 하면  $U_{k+1}$ 은  $C^{(ns)} = U_{k+1}' \mathring{A} U_k^\dagger$ 가 되고, 다음 식(2-33)로 표현된다.

$$U_{k+1}' = C^{(ns)} U_k (U_k^\dagger C^{(ns)} U_k)^{-1} U_k^\dagger U_k \quad (2-33)$$

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

$$U_{k+1} = Proj\{U_{k+1}'\} = \begin{pmatrix} u_k'(i, j) \\ u_k'(1, j) \end{pmatrix} \quad (2-34)$$

$U_k$ 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 식(2-26)에 대입하지만  $\Delta I$ 는 고유치 연산을 통해 배제 할 수 있어 최종적인 식(2-35)는 위상이동 이미지에 담겨 있는 잡음에 대한 정보를 감쇄시킨 물체파의 복소진폭과 같다는 것을 알 수 있다.<sup>[88]</sup>

$$a = I^\dagger U (U^\dagger U)^{-1} \quad (2-35)$$

### 3. 위상 결핍침

이 위상 편이와 같은 방법으로 간섭 위상을 결정한 후에도 문제가 남아 있으며 코사인 함수는 주기이다. 간섭 위상 분포는  $2\pi$ 의 추가 정수로 한정되지 않는다.

$$\cos(\Delta\varphi) = \cos(\Delta\varphi + 2\pi n) \quad n \in Z \quad (2-36)$$

따라서  $\arctan$  함수 또는 기타 역삼각 함수로 계산된 간섭 위상 맵에는 해당 위치에서  $2\pi$ 가 포함되며, 여기서 극한 값  $\Delta\varphi$  ( $-\pi$  또는  $\pi$ )에 도달한다.

이러한 위상 이미지의 선을 따른 간섭 위상은 톱니 함수처럼 보이며 (Figure 2.7 (a)). 연속적인 위상 분포를 생성하기 위해 이러한 모듈로  $2\pi$ 를 보정하는 것을 복조, 연속 또는 위상 언래핑이라고 한다.

지난 몇년 동안 몇가지 언래핑 알고리즘이 개발되었으며 다음에서는 소위 경로 의존적 언래핑 알고리즘이 설명되었다. 처음에는 1차원 간섭 위상 분포가 고려되고 인접한 픽셀  $\Delta\varphi(n+1) - \Delta\varphi(n)$ 의 위상 값 간의 차이가 계산됩니다. 이 차이가  $-\pi$ 보다 작으면  $(n+1)$  픽셀 이후의 모든 위상 값이  $2\pi$ 씩 증가한다.

이 차이가  $+\pi$ 보다 크면  $(n+1)$ 부터 시작하여 모든 위상 값에서  $2\pi$ 를 뺀다.

위에 언급된 조건이 유효하지 않은 경우 위상 값은 변경되지 않으며 이 절차의 실제 구현은 모든 픽셀에 대해  $2\pi$ 를 누적하는 첫 번째 단계 함수를 계산하여 수행된다. (Figure 2.7 (b))

연속적인 위상 분포는 Figure 2.7 (c)의 언래핑된 위상 분포에 이 단계 함수를 추가하여 계산되고 이 언래핑 절차의 시작점으로 거의 모든 픽셀을 사용할 수 있으며 반드시 라인의 시작 부분에 있는 픽셀일 필요는 없다. 중심 픽셀을 시작점으로 선택한 경우 해당 지점에서 양방향으로 절차를 수행해야 한다.

이 1차원 언래핑 계획은 2차원으로 전송될 수 있으며 한가지 가능성은 위에서 설명한 알고리즘을 사용하여 2차원 위상 맵의 첫 번째 행을 풀기 위한 것이다. 이 언래핑된 행의 픽셀은 열복조의 시작점 역할을 한다.

여기에 설명된 간단한 언래핑 절차의 한가지 단점은 마스크된 영역이 위상 이미지에 있는 경우 어려움이 발생한다는 것이다. 물체 표면의 구멍에 의해 가려진 영역이 발

생하며 이 문제와 다른 어려움을 피하기 위해 더 정교한 복조 알고리즘이 개발되었다. 마지막으로 언 래핑 절차는 톱니와 같은 이미지를 생성하는 모든 계측 방법에 대해 항상 동일하다는 점을 언급해야 한다. 이는 HI 및 기타 방법을 위해 개발된 다양한 언 래핑 알고리즘을 디지털 홀로그래픽 간섭계에도 사용할 수 있음을 의미하고 이 기술 모듈로  $2\pi$  이미지도 생성하기 때문이다.

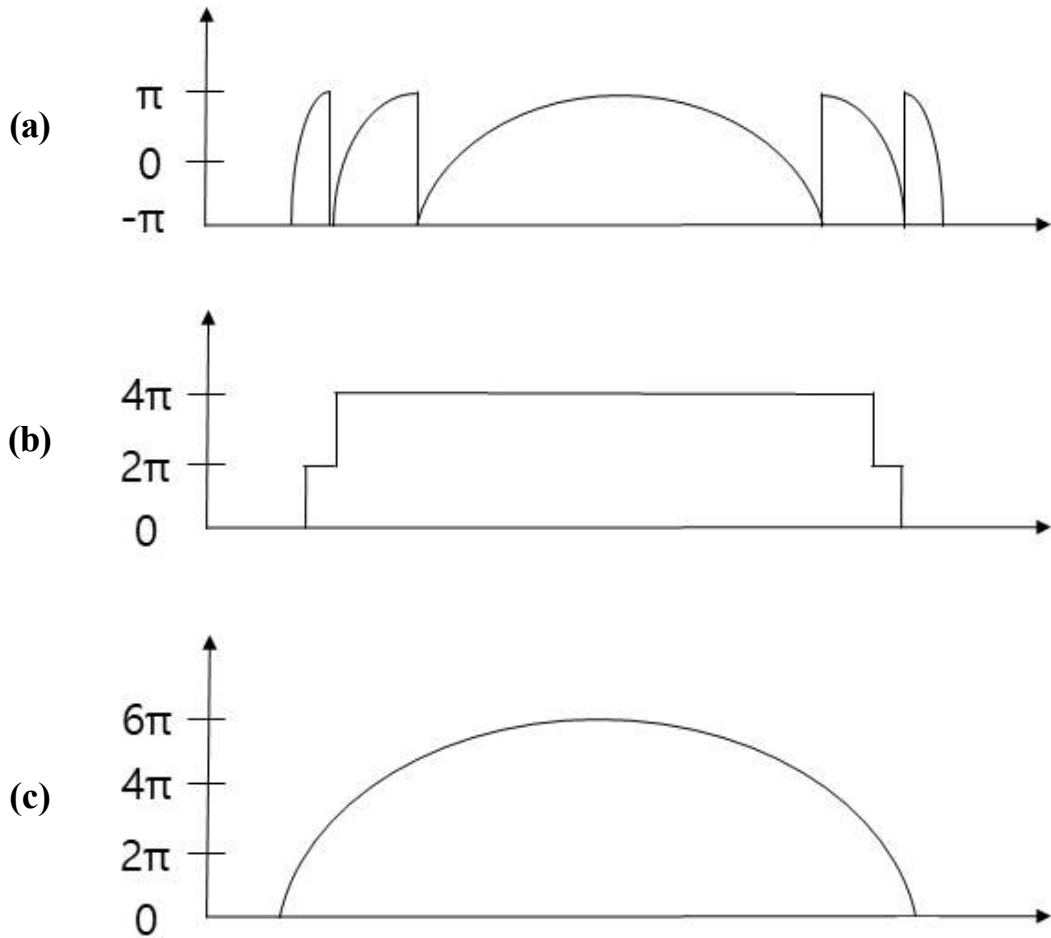


Figure 2.12 Phase unwrapping

(a) Interference phase modulo  $2\pi$  :  $\Delta\varphi_{2\pi}(x)$

(b) Step function :  $\Delta\varphi_{jump}(x)$

(c) unwrapped interference phase :  $\Delta\varphi_{2\pi}(x) + \Delta\varphi_{jump}(x)$

## 제 3 장 실험 장치 구성 및 시험편

### 제 1 절 진동자를 적용한 반사형 디지털 홀로그래피

본 논문의 연구는 반사형 재료의 시험편을 측정하기 위해 Figure 3.1에서 보는바와 같이 He-Ne Laser, Spatial filter, Collimating lens, Iris, Beam Splitter(BS), CMOS Camera, Mirror를 이용하여 마이켈슨 간섭계를 기반으로 하는 반사형 디지털 홀로그래피 시스템을 구축하였으며, 위상이동을 위한 진동자를 적용하였다. 작동조건은 광원인 He-Ne Laser에서 나오는 빛의 Spatial noise를 제거하기 위해 Spatial filter를 우선 통과시키고, 이후 BS를 이용하여 빛을 둘로 나뉘어, 하나는 물체를 향하는 물체파, 다른 하나는 거울을 향하는 기준파로 한 후 다시 반사되어 온 빛이 BS에서 만나 간섭을 일으키고 CMOS센서에 기록되게 된다.

위상이동을 위한 진동자는 (주)동명바이브로사에서 제작하는 일반적인 마그네틱 진동자 DMMV-05B 모델을 이용하였으며, 사양은 Table 3-1과 같다.

측정은 진동자를 간섭계 근처에 설치한 다음 구동하며, 진동의 세기는 시험편과 간섭계 자체에 영향을 주지 않고 위상이동만 가능하도록 진동의 세기를 조절하여 측정을 진행한다. 만약 진동의 세기가 너무 세게 되면 시험편 자체나 간섭계 자체에 진동에 대한 영향을 주게 되며, 이는 곧 간섭무늬의 무작위적으로 변하기 때문에 측정이 자체가 불가능하거나 매우 나쁜 결과를 가져올 수 있다.

위상이동은 진동자를 구동하여 진동에 대한 간섭무늬의 움직임에 대해서 CMOS의 프레임을 20, 40, 60으로 설정하여 2초간 동영상을 측정하였으며, 각각의 프레임에 대해 진동자와 같이 구성된 제어기의 진동 레벨을 0~4까지 1씩 증가하여 측정을 진행하였다. 측정 후 각각의 동영상에 대해 한 점에서의 그레이 레벨을 그래프로 표현하였으며, 이 그래프에서 8장의 프레임 이미지를 추출하여,  $2\pi$  위상이동 효과를 적용하였다.

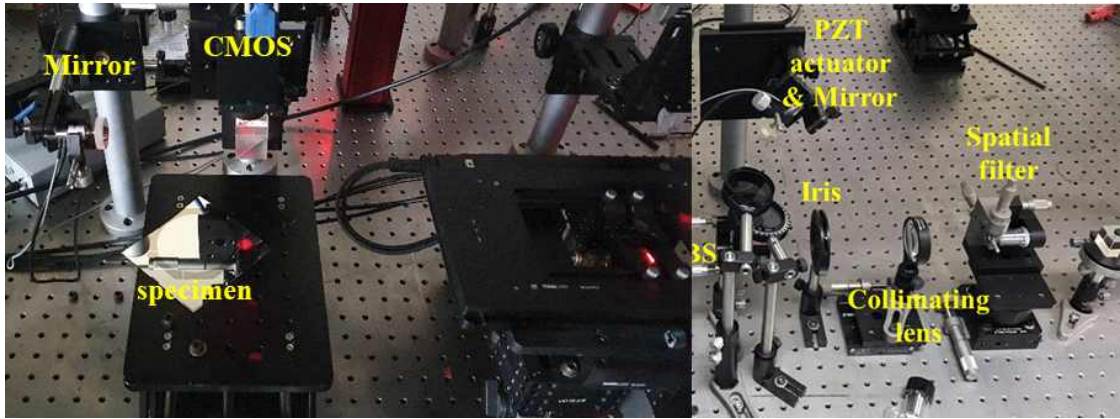


Figure 3.1 Reflective digital holography with vibrator

Table 3-1 Specifications of vibrator

Description	unit	Technical data
Model		DMMV-5B
Exciting Force	<i>kgf</i>	5
Voltage	<i>V</i>	220
Frequency	<i>Hz</i>	50/60
Vibration(Per Min)	<i>VPM</i>	300/3600
Withstanding voltage	<i>V</i>	1000
Current	<i>A</i>	0.02
Mouting Bolt	<i>size</i>	M6
Weight	<i>kg</i>	1.1

## 제 2 절 시험편

### 1. Resolution Target

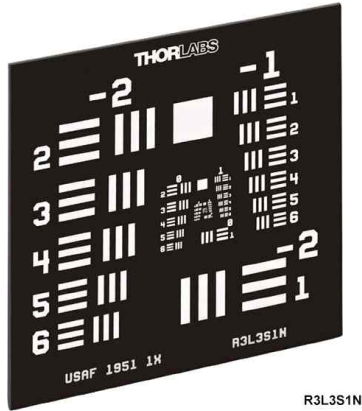


Figure 3.2 Negative type of Resolution Target

본 논문의 측정 시스템인 진동자 위상이동 반사형 디지털 홀로그래피의 성능 검증을 위해 사용된 시험편은 Figure 3.2 와 같은 Thorlabs사의 1951 USAF Resolution test target를 이용하였으며, 기존의 해상도 테스트가 아닌 Chrome 층의 두께를 측정하기 위해 사용하였으며, 사양은 Table 3-2 와 같다.

Table 3-2 Specifications of resolution target

Description	unit	Technical data
Design		Chrome-on-glass
Substrate		Clear soda lime glass
Chrome Thickness	um	0.120um
Chrome optical density	mm	OD $\geq$ 3 at 430nm
Substrate thickness	mm	0.06"(1.5mm)
Surface flatness	um	< 5um
Line spacing tolerance	um	$\pm$ 1um
Line width tolerance	um	$\pm$ 0.5um

## 2. Photolithographic Product

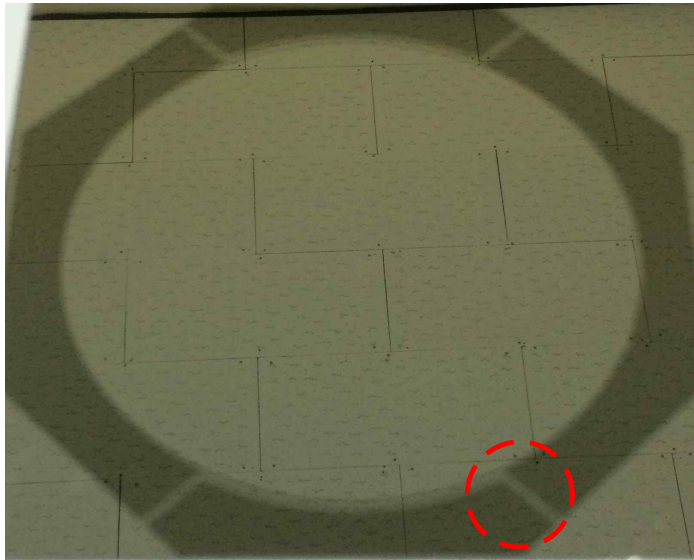


Figure 3.3 Photolithographic product

본 논문에서 측정하고자 하는 시험편은 포토리소그래피 공정을 거쳐 패터닝된 시험편으로 모양 형태로 전극이 증착되어있다. 기판의 재질은 Chrome으로 구성되어, 반사가 잘되기 때문에 반사형 디지털 홀로그래피 시스템으로 측정하기가 적합하다.

측정은 기판에 증착된 전극을 높이를 측정하기 위해 Figure 3.3에 표시된 부분을 선택하였으며, 선택의 이유는 증착된 부분과 증착되지 않는 부분이 극단적으로 차이로 정확한 측정 결과를 가져올 것으로 판단하였다.

## 제 4 장 실험 결과

### 제 1 절 Resolution target 측정 결과

진동자 위상이동 반사형 디지털 홀로그래피를 이용한 Resolution target의 측정은 패턴에 대한 단차 측정을 위해 임의적인 부분에 대한 측정을 진행하였으며, 기준파에 한 점에서의 위상 변화, 8장의 프레임을 추출하여 재구성한 위상 변화 그래프 및 세기 이미지와 위상 이미지는 Figure 4.1 에 나타내었다.

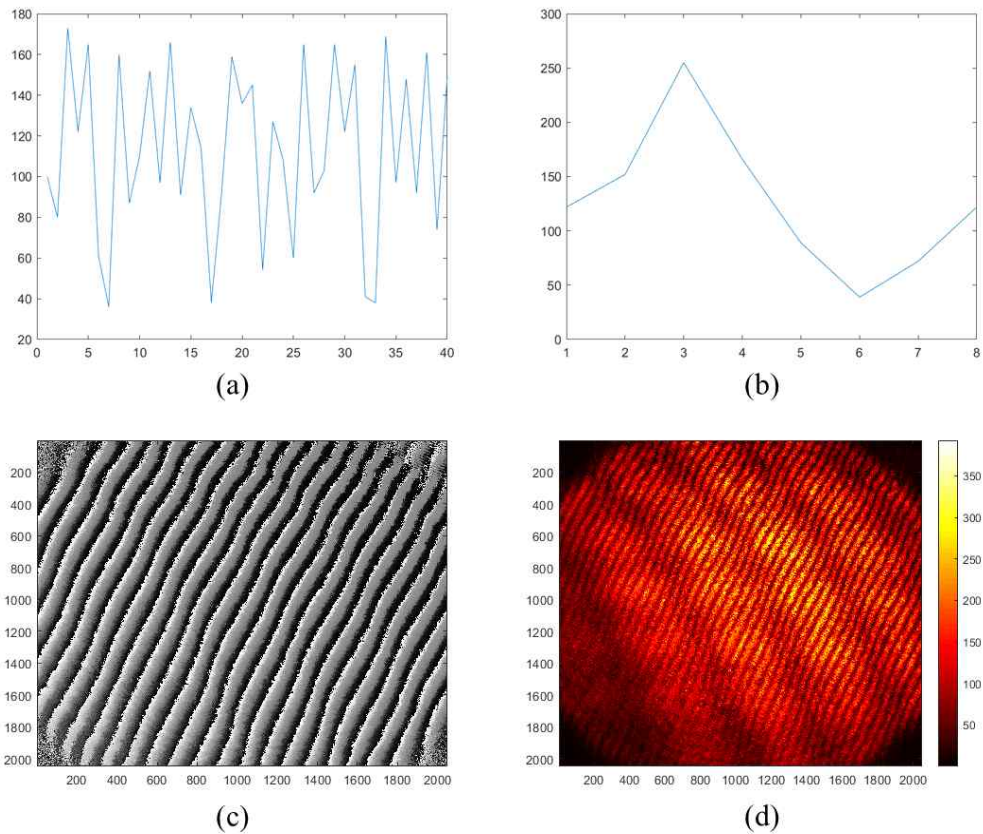
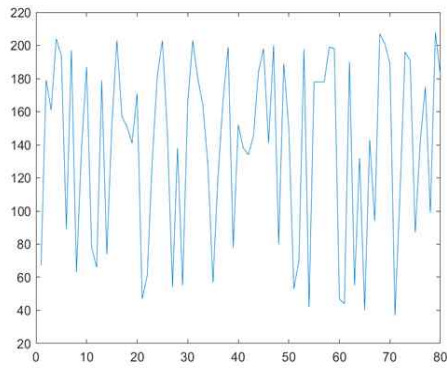


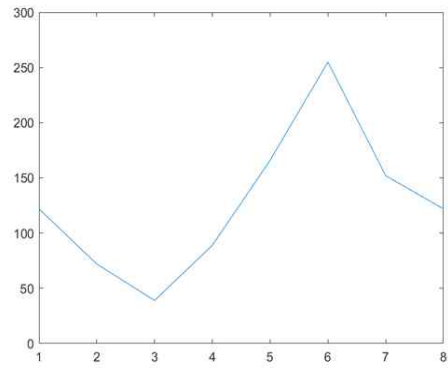
Figure 4.1 Resolution Target measurement reference wave

- (a) Phase change at one point
- (b) Extraction of 8 frames in (a)
- (c) Phase image
- (d) Intensity image

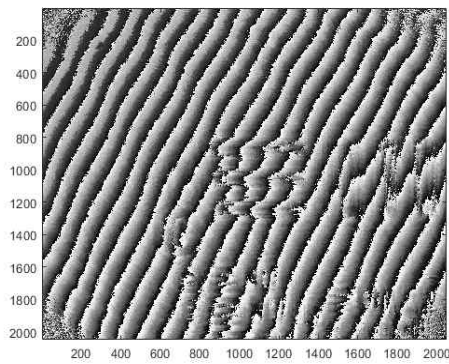




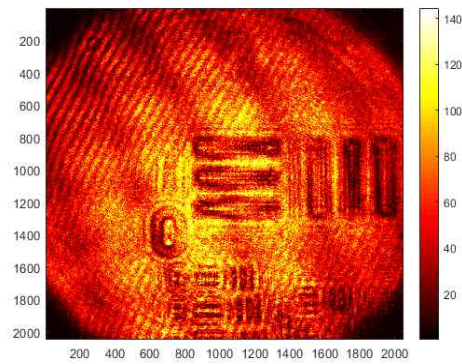
(a)



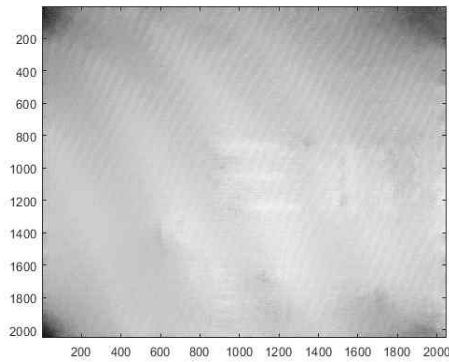
(b)



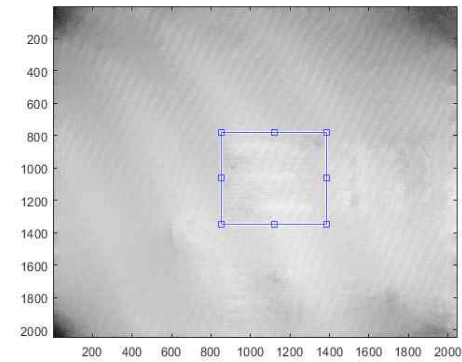
(c)



(d)



(e)



(f)

Figure 4.2 Resolution Target measurement object wave

- (a) Phase change at one point
- (b) Extraction of 8 frames in (a)
- (c) Phase image
- (d) Intensity image
- (e) Phase unwrapping image
- (f) Setting the enlarged area in (e)

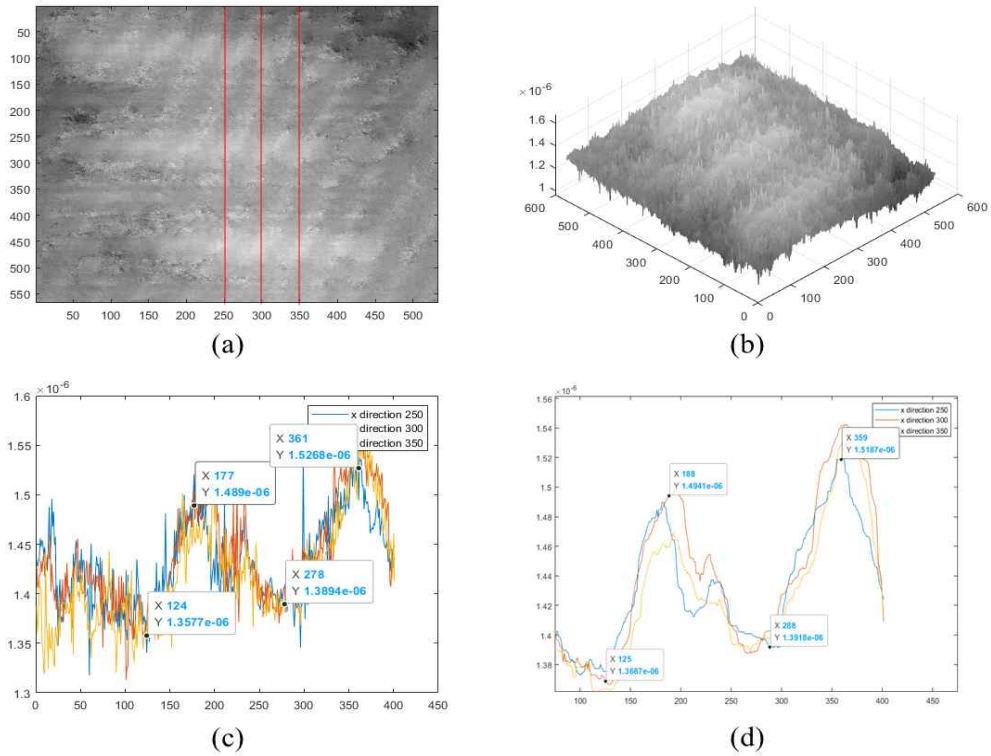


Figure 4.3 Resolution target measurement

- (a) Line profile
- (b) The three-dimensional image of (a)
- (c) Line profile result
- (d) Apply median filter

Figure 4.2 은 Resolution target 에 대한 물체파의 측정으로 (a)는 물체파 한 점에서의 위상변화, (b)는 (a)에서 8장의 프레임을 추출하여 재배열한 이미지이며, (c)는 물체파의 위상 이미지, (d)는 물체파의 세기 이미지이다. Figure 4.2의 (e)는 Resolution target의 측정에 대한 위상 결편침 이미지이며, (f)는 (e)에서 단차 정보를 확인하기 위해 Crop 영역에 대한 이미지이다. Figure 4.3 은 Resolution target의 측정 결과로 (a)는 Crop한 이미지에서 라인 프로파일에 대한 위치를 나타내며 (b)는 (a)의 3차원 이미지 정보이고 (c)는 라인프로파일에 대한 결과 이며 (d)는 (c)의 결과에 중앙값 필터를 적용한 결과이다. 단차 측정 결과 126, 127nm로 Resolution target 사양인 120nm에 비해 약 5.4%의 오차를 보임을 알 수 있다.

## 제 2 절 Photolithographic Product 측정 결과

진동자 위상이동 반사형 디지털 홀로그래피를 이용한 Photolithographic product 의 측정은 Chrome 기판위에 증착된 전극부의 단차 측정을 위해 Figure 3.3에 나타난 부분을 측정하였으며, 진동의 세기와 프레임과의 관계에 대한 반사형 디지털 홀로그래피의 측정 결과를 확인하기 위해 프레임 조건은 20, 40, 60의 3가지 조건, 진동 조건은 제어기에 표시된 진동 레벨 0, 1, 2, 3, 4의 5가지 조건에 대한 측정을 진행하였다.

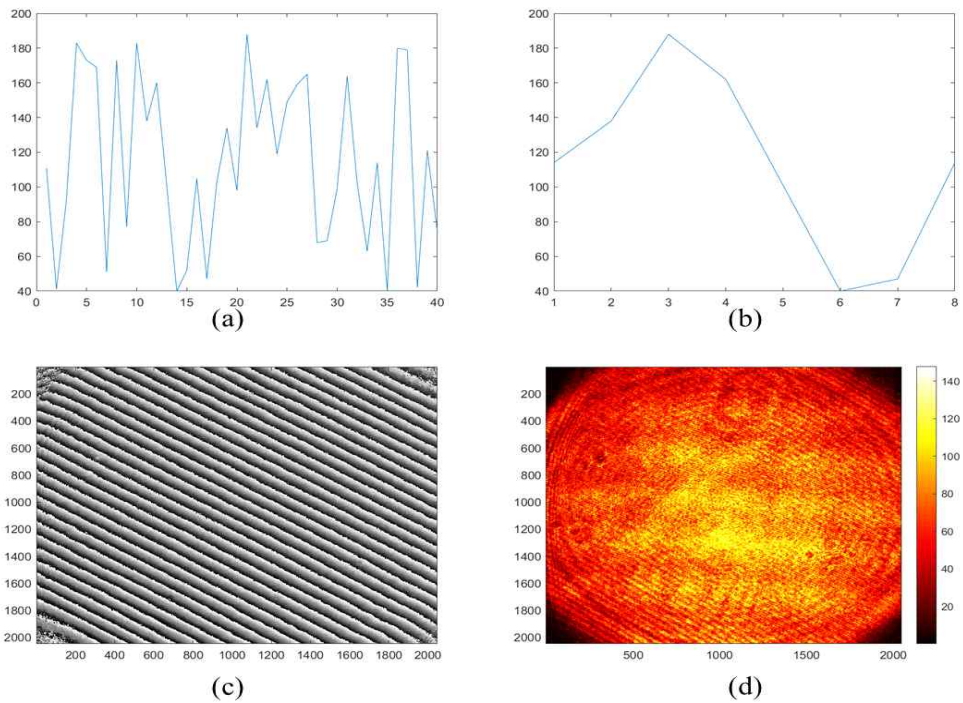


Figure 4.4 Reference wave for photolithographic product measurement  
 (a) Phase change at one point                      (b) Extraction of 8 frames in (a)  
 (c) Phase image of the reference wave            (d) Reference wave intensity image

Figure 4.4의 측정 결과 (a)는 이미지 전체 영역중 한 점에서의 그레이 레벨 변화를 나타내주고, (b)는 (a)에서 8장의 프레임 이미지를 추출하여 나열한 결과이며, (c)는 참조파의 위상이미지를 나타내주고, (d)는 참조파의 세기 이미지를 나타낸다.

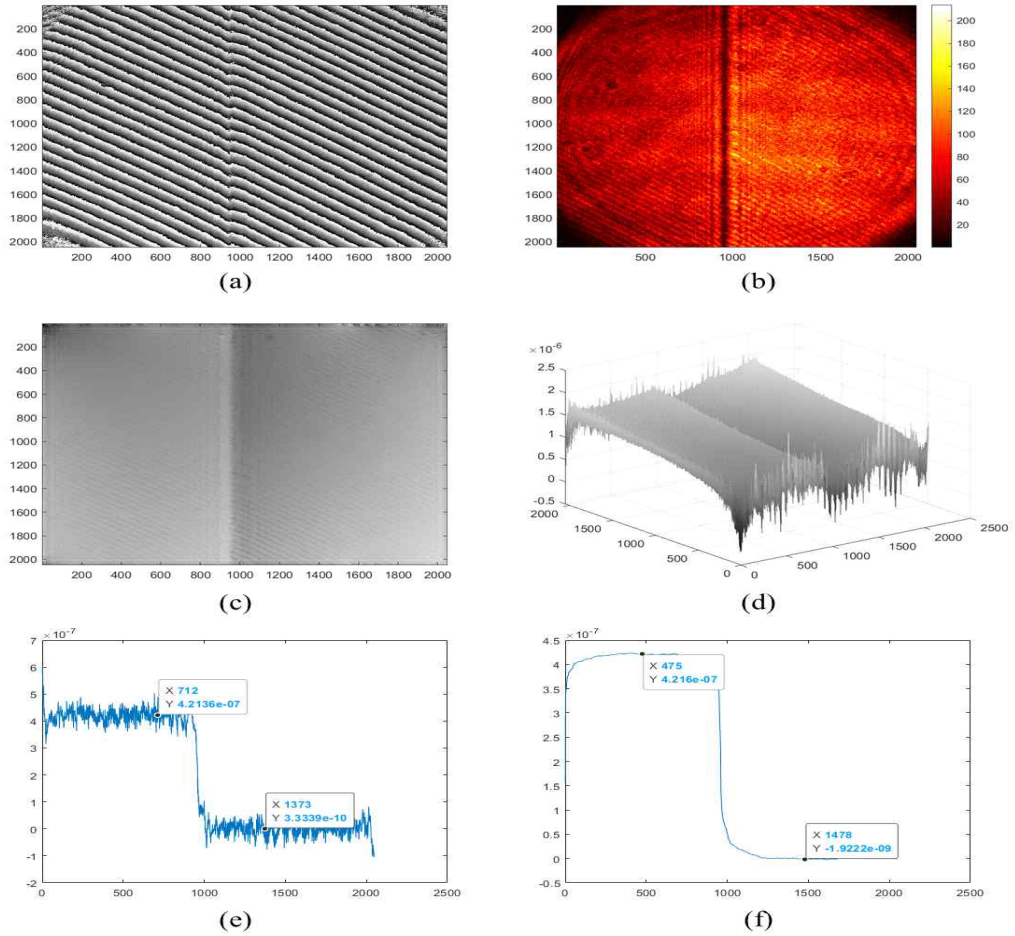


Figure 4.5 Frame 20 measurement with vibration level 0

- (a) Object wave phase image    (b) Object wave intensity image
- (c) Phase unwrapping image    (d) 3D image
- (e) Result of line profile        (f) Median filter applied image for the result of (e)

Figure 4.5는 Figure 4.4에 대응하는 물체파의 측정결과로 그 조건은 진동 레벨 0과 CMOS 20프레임의 결과로 (a)는 물체파의 위상이미지를 나타내고, (b)는 물체파의 세기 이미지를 나타내며, (c)는 참조파와의 간섭을 통해 복원된 위상결편침 이미지, (d)는 위상 결편침 이미지를 3D화한 이미지, (e)는 좌에서 우측으로 향하는 프로파일 이미지이며, (f)는 (e)의 결과에 중앙값 필터를 적용한 이미지를 나타낸다.

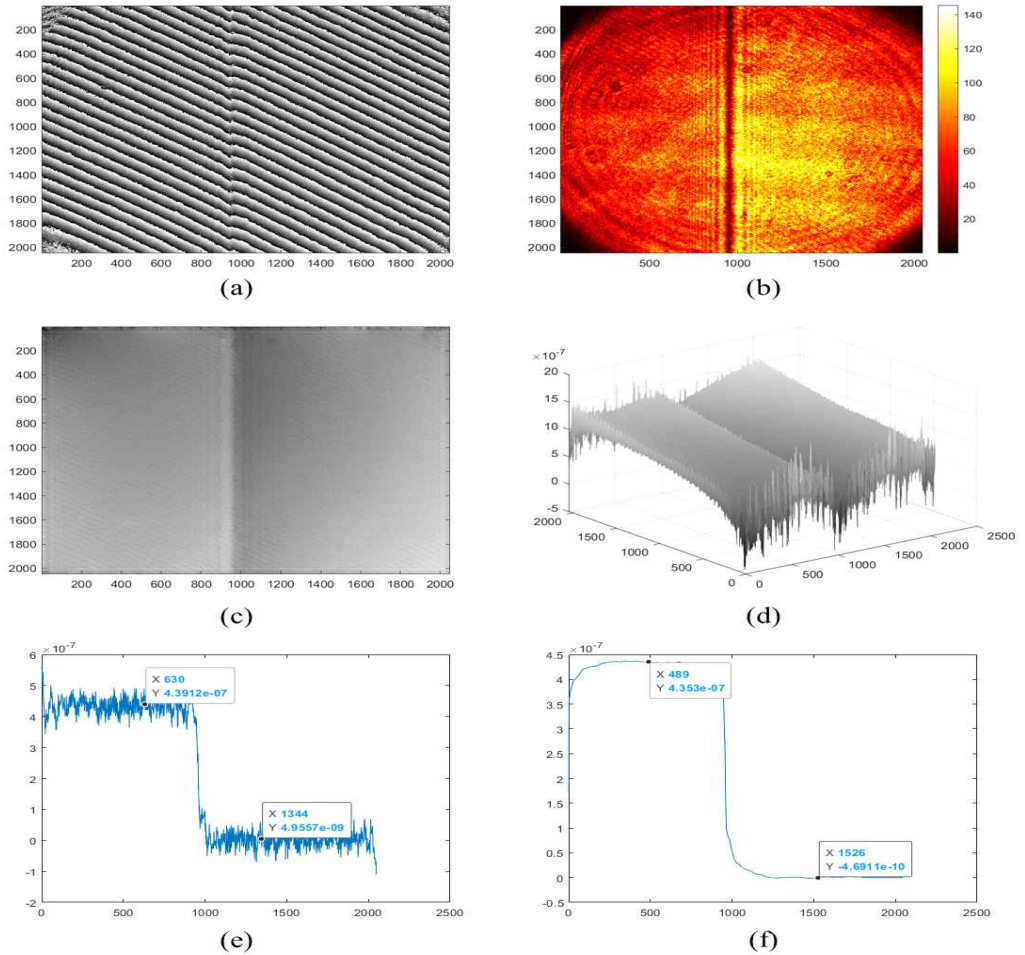


Figure 4.6 Frame 40 measurement with vibration level 0

- (a) Object wave phase image      (b) Object wave intensity image
- (c) Phase unwrapping image      (d) 3D image
- (e) Result of line profile          (f) Median filter applied image for the result of (e)

Figure 4.6는 Figure 4.5의 결과와 진동 레벨 조건은 동일하지만 CMOS 카메라의 40프레임의 결과로 (a)는 물체파의 위상이미지를 나타내고, (b)는 물체파의 세기 이미지를 나타내며, (c)는 참조파와의 간섭을 통해 복원된 위상결편침 이미지, (d)는 위상 결편침 이미지를 3D화한 이미지, (e)는 좌에서 우측으로 향하는 프로파일 이미지이며, (f)는 (e)의 결과에 중앙값 필터를 적용한 이미지를 나타낸다.

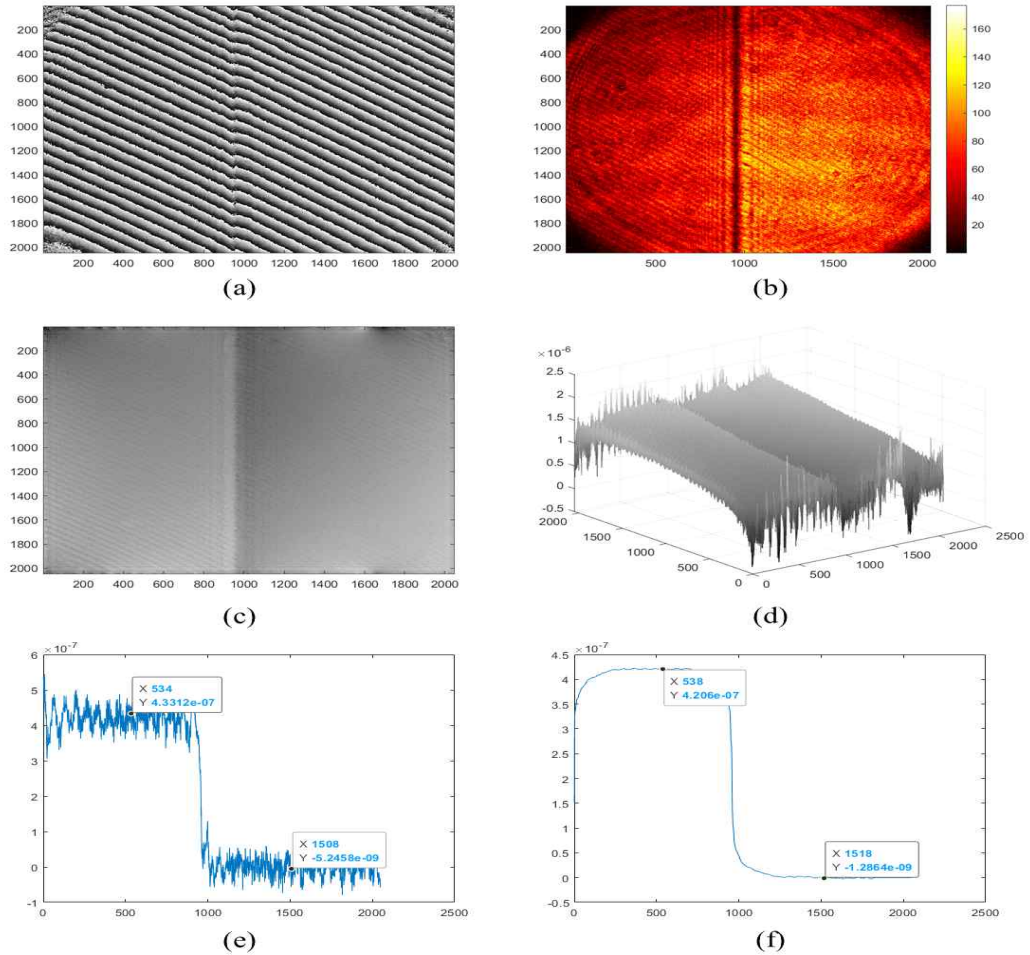


Figure 4.7 Frame 60 measurement with vibration level 0

- (a) Object wave phase image    (b) Object wave intensity image  
 (c) Phase unwrapping image    (d) 3D image  
 (e) Result of line profile        (f) Median filter applied image for the result of (e)

Figure 4.7은 CMOS 카메라의 조건을 60프레임으로 설정한 결과로 (a)는 물체파의 위상 이미지를 나타내고, (b)는 물체파의 세기 이미지를 나타내며, (c)는 참조파와의 간섭을 통해 복원된 위상결편침 이미지, (d)는 위상 결편침 이미지를 3D화한 이미지, (e)는 좌에서 우측으로 향하는 프로파일 이미지이며, (f)는 (e)의 결과에 중앙값 필터를 적용한 이미지를 나타낸다.

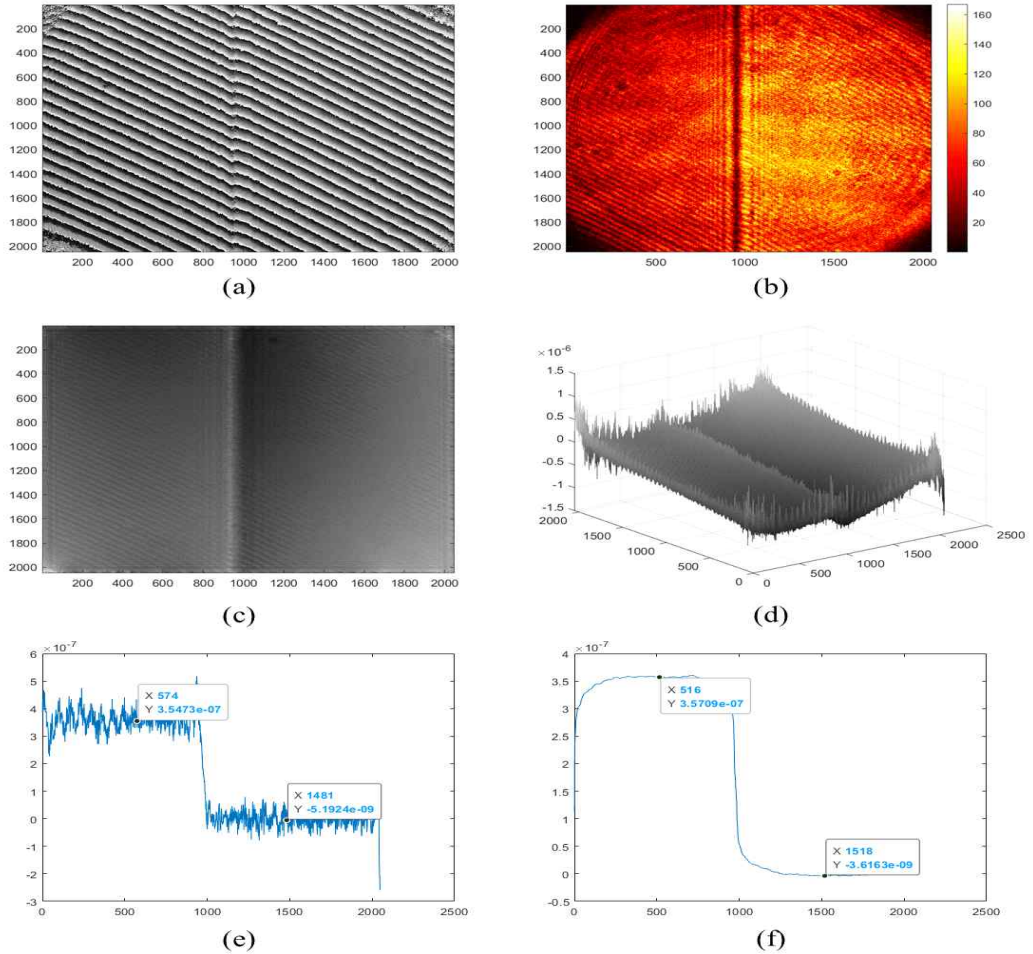


Figure 4.8 Frame 20 measurement with vibration level 1

- (a) Object wave phase image      (b) Object wave intensity image
- (c) Phase unwrapping image      (d) 3D image
- (e) Result of line profile      (f) Median filter applied image for the result of (e)

Figure 4.8은 Figure 4.5에서와 같이 CMOS 카메라의 조건은 20프레임으로 설정하지만, 진동 레벨을 1로 올린 결과로 (a)는 물체파의 위상이미지를 나타내고, (b)는 물체파의 세기 이미지를 나타내며, (c)는 참조파와의 간섭을 통해 복원된 위상결편침 이미지, (d)는 위상 결편침 이미지를 3D화한 이미지, (e)는 좌에서 우측으로 향하는 프로파일 이미지이며, (f)는 (e)의 결과에 중앙값 필터를 적용한 이미지를 나타낸다.

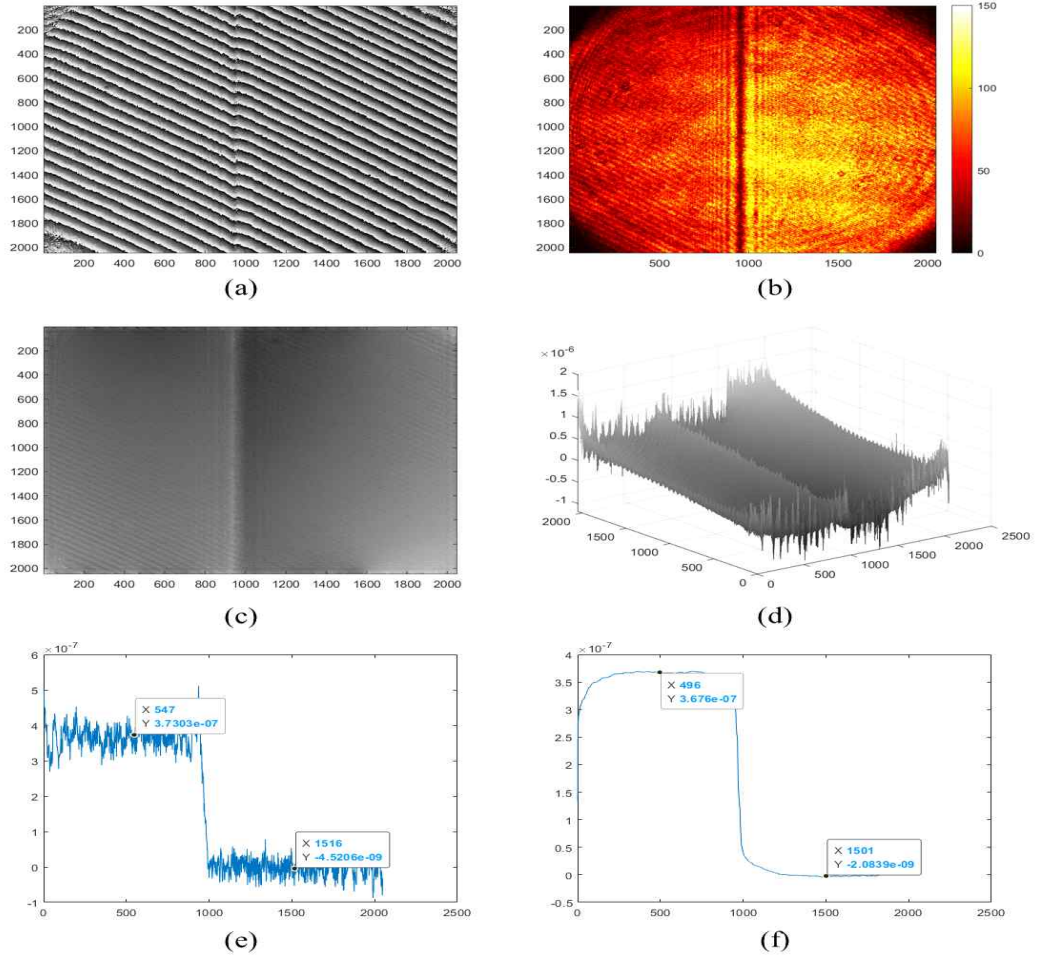


Figure 4.9 Frame 40 measurement with vibration level 1

- (a) Object wave phase image      (b) Object wave intensity image
- (c) Phase unwrapping image      (d) 3D image
- (e) Result of line profile          (f) Median filter applied image for the result of (e)

Figure 4.9은 Figure 4.8과 같이 진동 레벨 조건은 1이지만, CMOS 카메라의 조건을 40 프레임으로 설정한 결과로 (a)는 물체파의 위상 이미지를 나타내고, (b)는 물체파의 세기 이미지를 나타내며, (c)는 참조파와의 간섭을 통해 복원된 위상결편침 이미지, (d)는 위상 결편침 이미지를 3D화한 이미지, (e)는 좌에서 우측으로 향하는 프로파일 이미지이며, (f)는 (e)의 결과에 중앙값 필터를 적용한 이미지를 나타낸다.



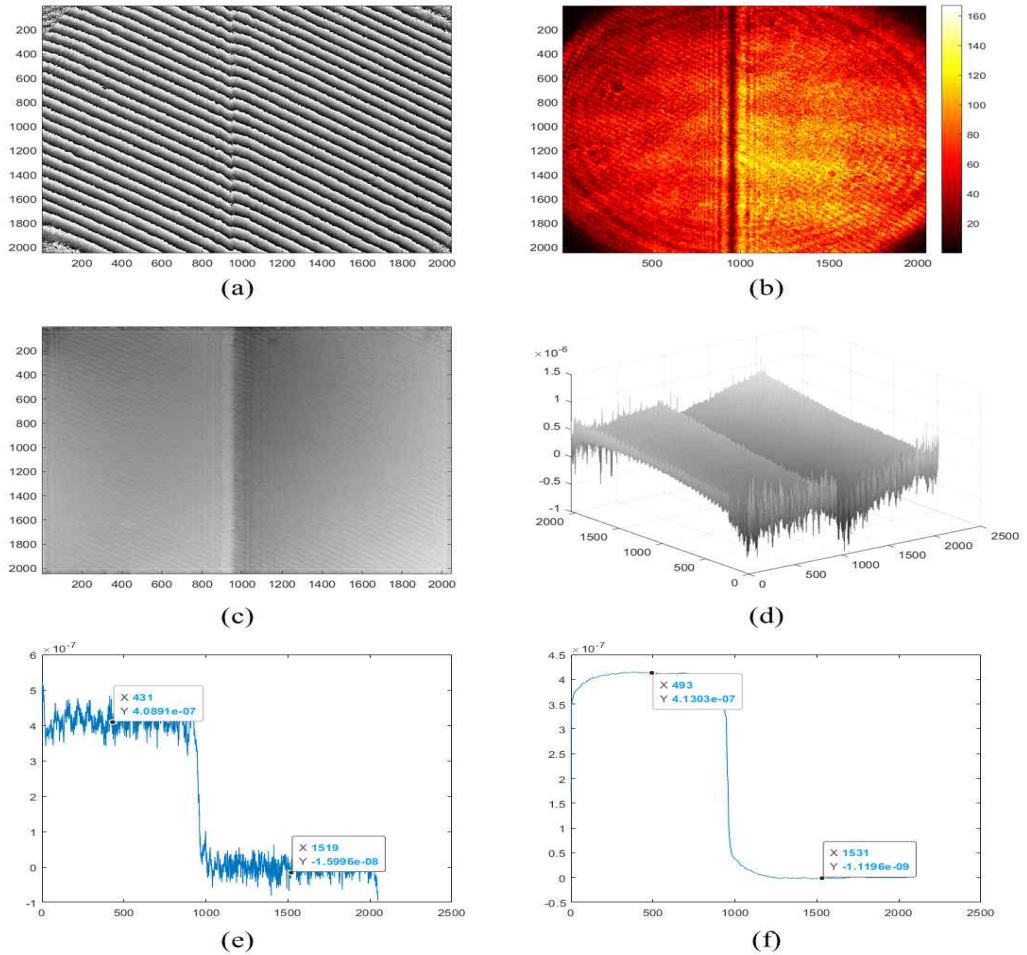


Figure 4.10 Frame 60 measurement with vibration level 1

- (a) Object wave phase image    (b) Object wave intensity image  
 (c) Phase unwrapping image    (d) 3D image  
 (e) Result of line profile        (f) Median filter applied image for the result of (e)

Figure 4.10은 Figure 4.8과 같이 진동 레벨 조건은 1이지만, CMOS 카메라의 조건을 60 프레임으로 설정한 결과로 (a)는 물체파의 위상 이미지를 나타내고, (b)는 물체파의 세기 이미지를 나타내며, (c)는 참조파와의 간섭을 통해 복원된 위상결편침 이미지, (d)는 위상 결편침 이미지를 3D화한 이미지, (e)는 좌에서 우측으로 향하는 프로파일 이미지이며, (f)는 (e)의 결과에 중앙값 필터를 적용한 이미지를 나타낸다.

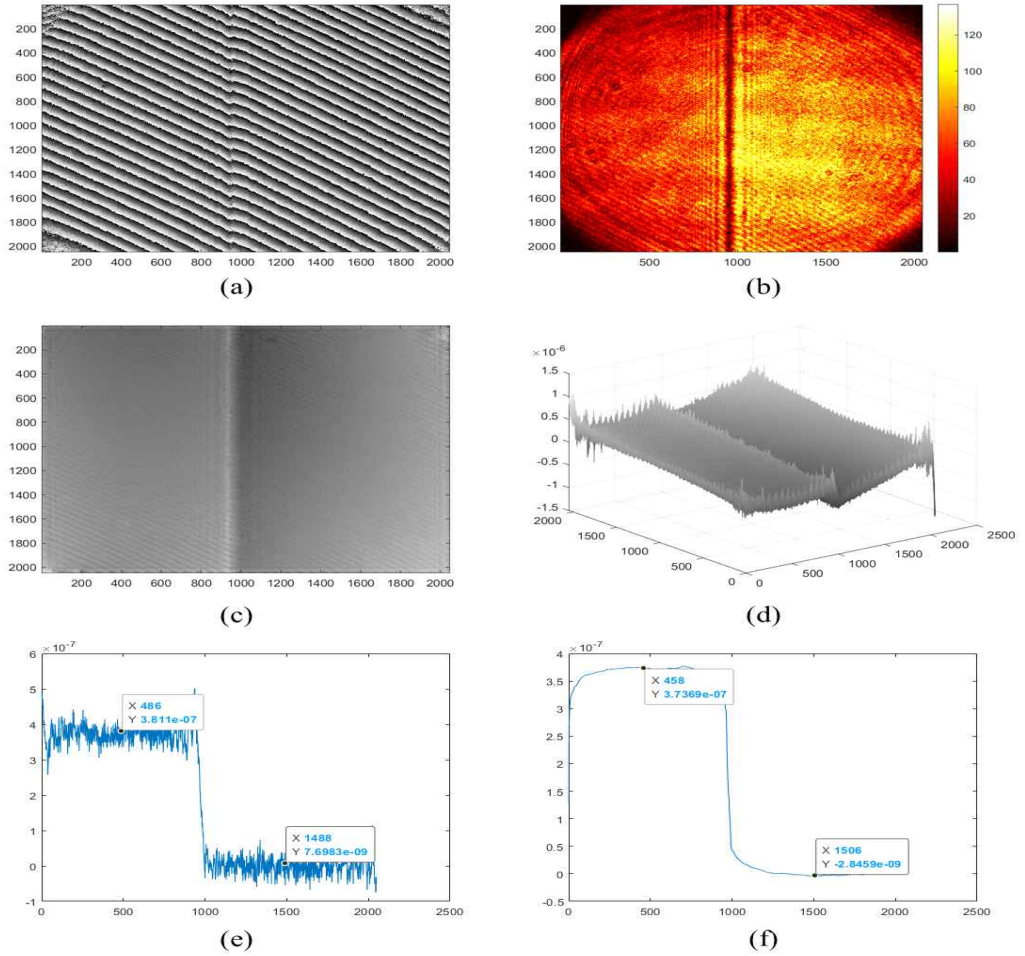


Figure 4.11 Frame 20 measurement with vibration level 2

- (a) Object wave phase image      (b) Object wave intensity image
- (c) Phase unwrapping image      (d) 3D image
- (e) Result of line profile      (f) Median filter applied image for the result of (e)

Figure 4.11은 Figure 4.5에서와 같이 CMOS 카메라의 조건은 20프레임으로 설정하지만, 진동 레벨을 2로 올린 결과로 (a)는 물체파의 위상이미지를 나타내고, (b)는 물체파의 세기 이미지를 나타내며, (c)는 참조파와의 간섭을 통해 복원된 위상결편침 이미지, (d)는 위상 결편침 이미지를 3D화한 이미지, (e)는 좌에서 우측으로 향하는 프로파일 이미지이며, (f)는 (e)의 결과에 중앙값 필터를 적용한 이미지를 나타낸다.

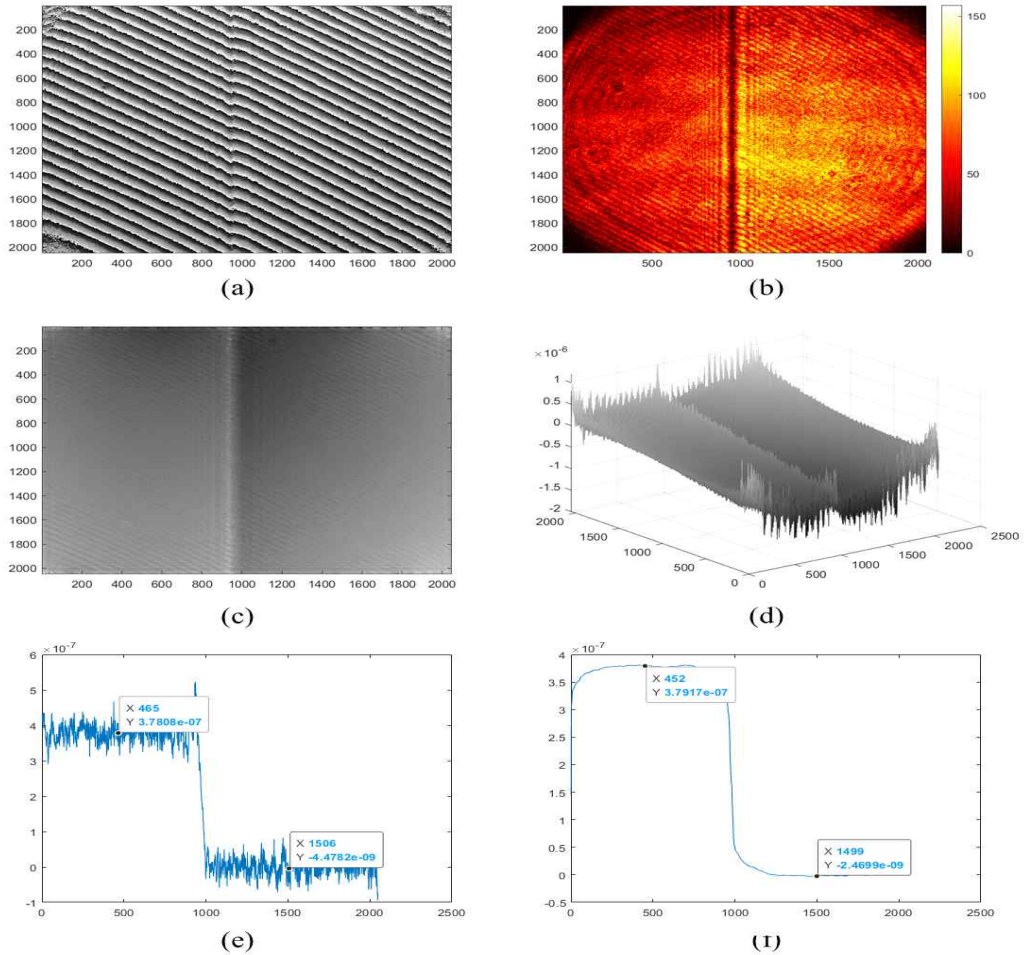


Figure 4.12 Frame 40 measurement with vibration level 2

- (a) Object wave phase image    (b) Object wave intensity image  
 (c) Phase unwrapping image    (d) 3D image  
 (e) Result of line profile        (f) Median filter applied image for the result of (e)

Figure 4.12는 Figure 4.11과 같이 진동 레벨 조건은 2이지만, CMOS 카메라의 조건을 40프레임으로 설정한 결과로 (a)는 물체파의 위상이미지를 나타내고, (b)는 물체파의 세기 이미지를 나타내며, (c)는 참조파와의 간섭을 통해 복원된 위상결편침 이미지, (d)는 위상 결편침 이미지를 3D화한 이미지, (e)는 좌에서 우측으로 향하는 프로파일 이미지이며, (f)는 (e)의 결과에 중앙값 필터를 적용한 이미지를 나타낸다.

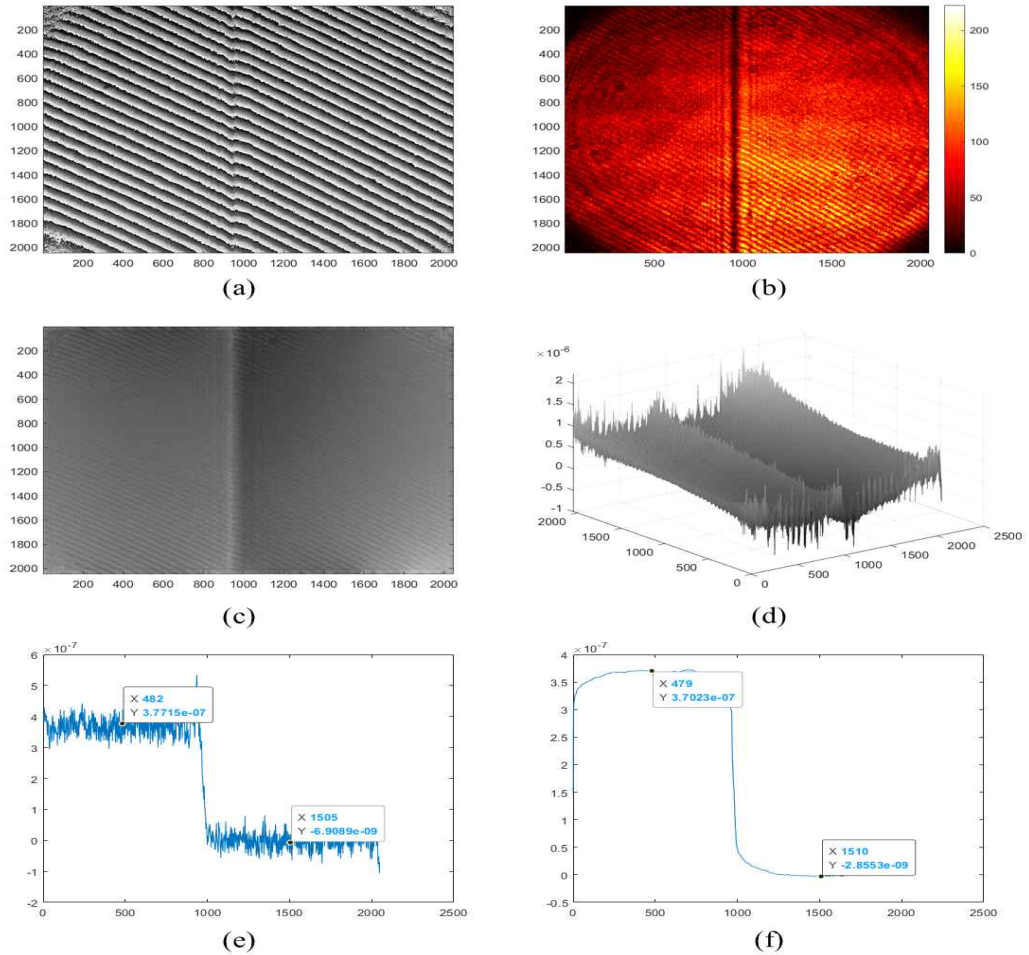


Figure 4.13 Frame 60 measurement with vibration level 2

- (a) Object wave phase image    (b) Object wave intensity image  
 (c) Phase unwrapping image    (d) 3D image  
 (e) Result of line profile        (f) Median filter applied image for the result of (e)

Figure 4.13은 Figure 4.11과 같이 진동 레벨 조건은 2이지만, CMOS 카메라의 조건을 60프레임으로 설정한 결과로 (a)는 물체파의 위상이미지를 나타내고, (b)는 물체파의 세기 이미지를 나타내며, (c)는 참조파와의 간섭을 통해 복원된 위상결편침 이미지, (d)는 위상 결편침 이미지를 3D화한 이미지, (e)는 좌에서 우측으로 향하는 프로파일 이미지이며, (f)는 (e)의 결과에 중앙값 필터를 적용한 이미지를 나타낸다.

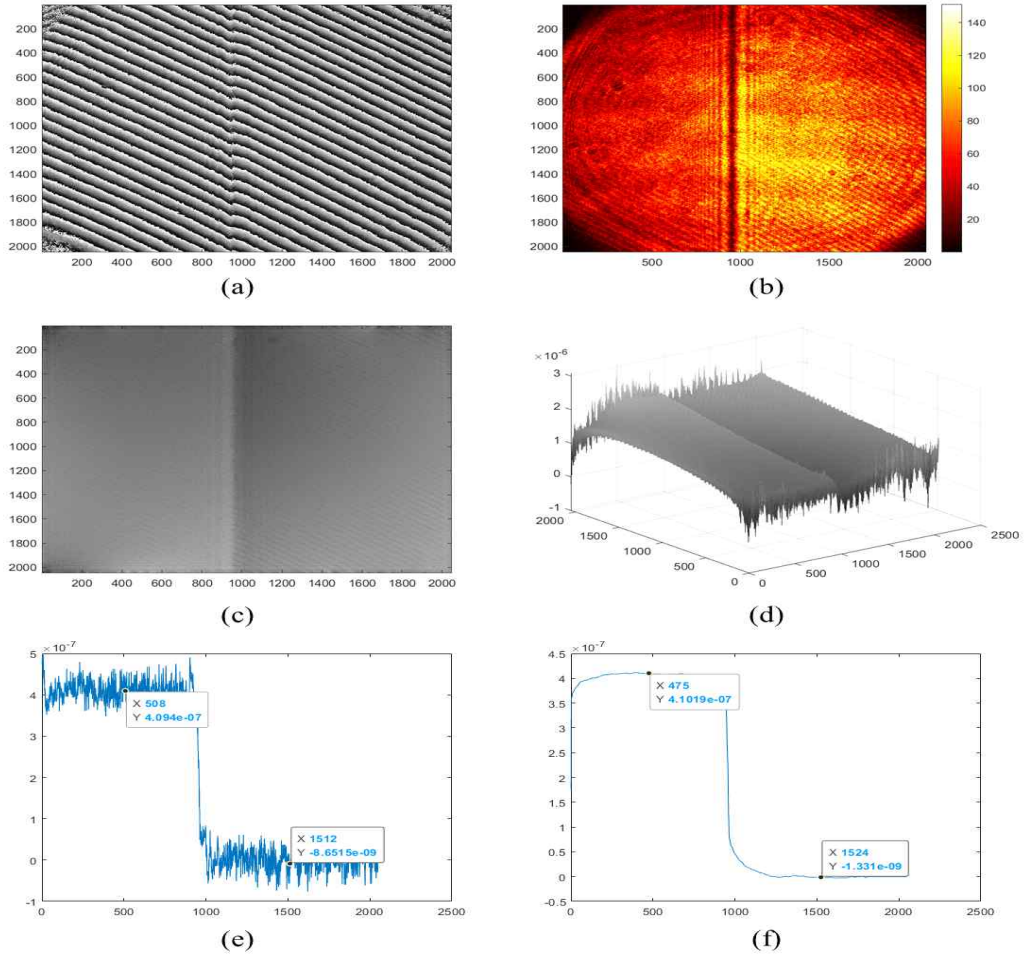


Figure 4.14 Frame 20 measurement with vibration level 3

- (a) Object wave phase image (b) Object wave intensity image  
(c) Phase unwrapping image (d) 3D image  
(e) Result of line profile (f) Median filter applied image for the result of (e)

Figure 4.14는 Figure 4.5에서와 같이 CMOS 카메라의 조건은 20프레임으로 설정하지만, 진동 레벨을 3으로 올린 결과로 (a)는 물체파의 위상이미지를 나타내고, (b)는 물체파의 세기 이미지를 나타내며, (c)는 참조파와의 간섭을 통해 복원된 위상결편침 이미지, (d)는 위상 결편침 이미지를 3D화한 이미지, (e)는 좌에서 우측으로 향하는 프로파일 이미지이며, (f)는 (e)의 결과에 중앙값 필터를 적용한 이미지를 나타낸다.

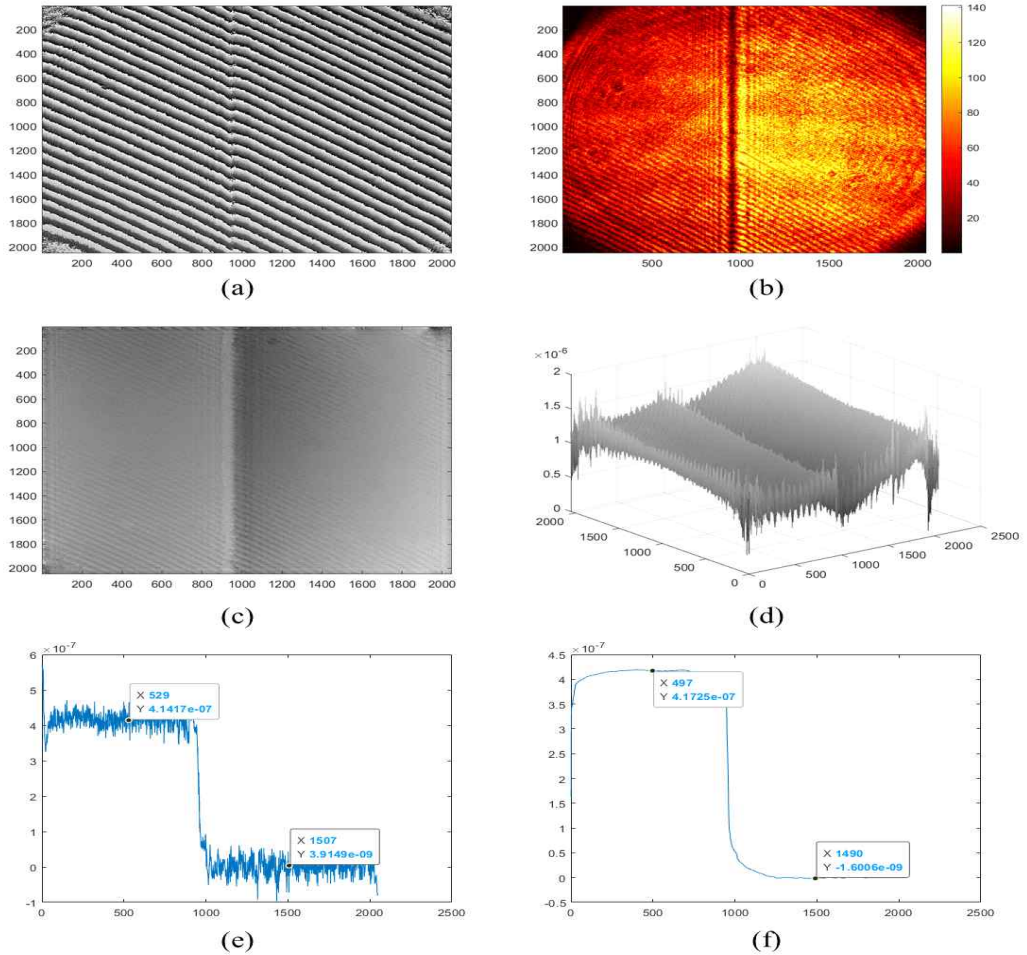


Figure 4.15 Frame 40 measurement with vibration level 3

- (a) Object wave phase image    (b) Object wave intensity image  
 (c) Phase unwrapping image    (d) 3D image  
 (e) Result of line profile    (f) Median filter applied image for the result of (e)

Figure 4.15는 Figure 4.14와 같이 진동 레벨 조건은 3이지만, CMOS 카메라의 조건을 40프레임으로 설정한 결과로 (a)는 물체파의 위상이미지를 나타내고, (b)는 물체파의 세기 이미지를 나타내며, (c)는 참조파와의 간섭을 통해 복원된 위상결편침 이미지, (d)는 위상 결편침 이미지를 3D화한 이미지, (e)는 좌에서 우측으로 향하는 프로파일 이미지이며, (f)는 (e)의 결과에 중앙값 필터를 적용한 이미지를 나타낸다.

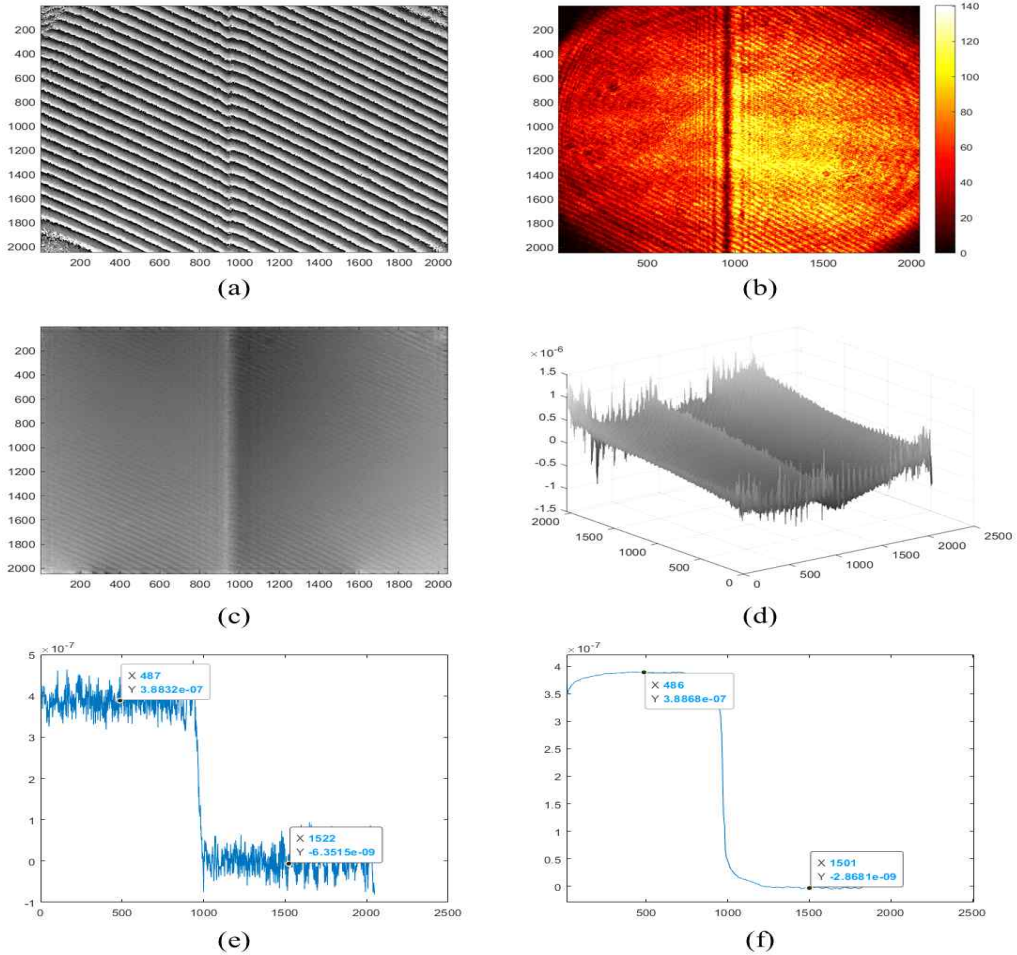


Figure 4.16 Frame 60 measurement with vibration level 3

- (a) Object wave phase image      (b) Object wave intensity image
- (c) Phase unwrapping image      (d) 3D image
- (e) Result of line profile      (f) Median filter applied image for the result of (e)

Figure 4.16은 Figure 4.14와 같이 진동 레벨 조건은 3이지만, CMOS 카메라의 조건을 60프레임으로 설정한 결과로 (a)는 물체파의 위상이미지를 나타내고, (b)는 물체파의 세기 이미지를 나타내며, (c)는 참조파와의 간섭을 통해 복원된 위상결편침 이미지, (d)는 위상 결편침 이미지를 3D화한 이미지, (e)는 좌에서 우측으로 향하는 프로파일 이미지이며, (f)는 (e)의 결과에 중앙값 필터를 적용한 이미지를 나타낸다.

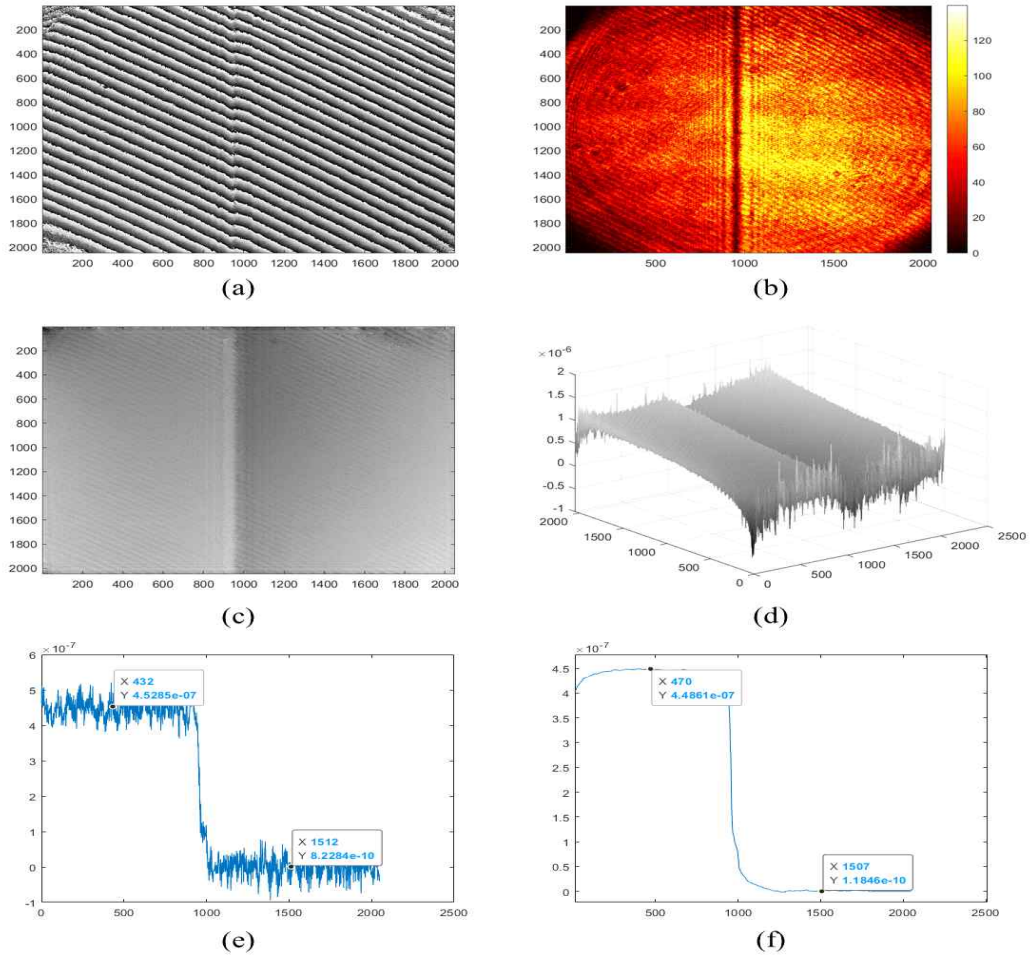


Figure 4.17 Frame 20 measurement with vibration level 4

- (a) Object wave phase image      (b) Object wave intensity image
- (c) Phase unwrapping image      (d) 3D image
- (e) Result of line profile      (f) Median filter applied image for the result of (e)

Figure 4.17은 Figure 4.5에서와 같이 CMOS 카메라의 조건은 20프레임으로 설정하지만, 진동 레벨을 4로 올린 결과로 (a)는 물체파의 위상이미지를 나타내고, (b)는 물체파의 세기 이미지를 나타내며, (c)는 참조파와의 간섭을 통해 복원된 위상결편침 이미지, (d)는 위상 결편침 이미지를 3D화한 이미지, (e)는 좌에서 우측으로 향하는 프로파일 이미지이며, (f)는 (e)의 결과에 중앙값 필터를 적용한 이미지를 나타낸다.



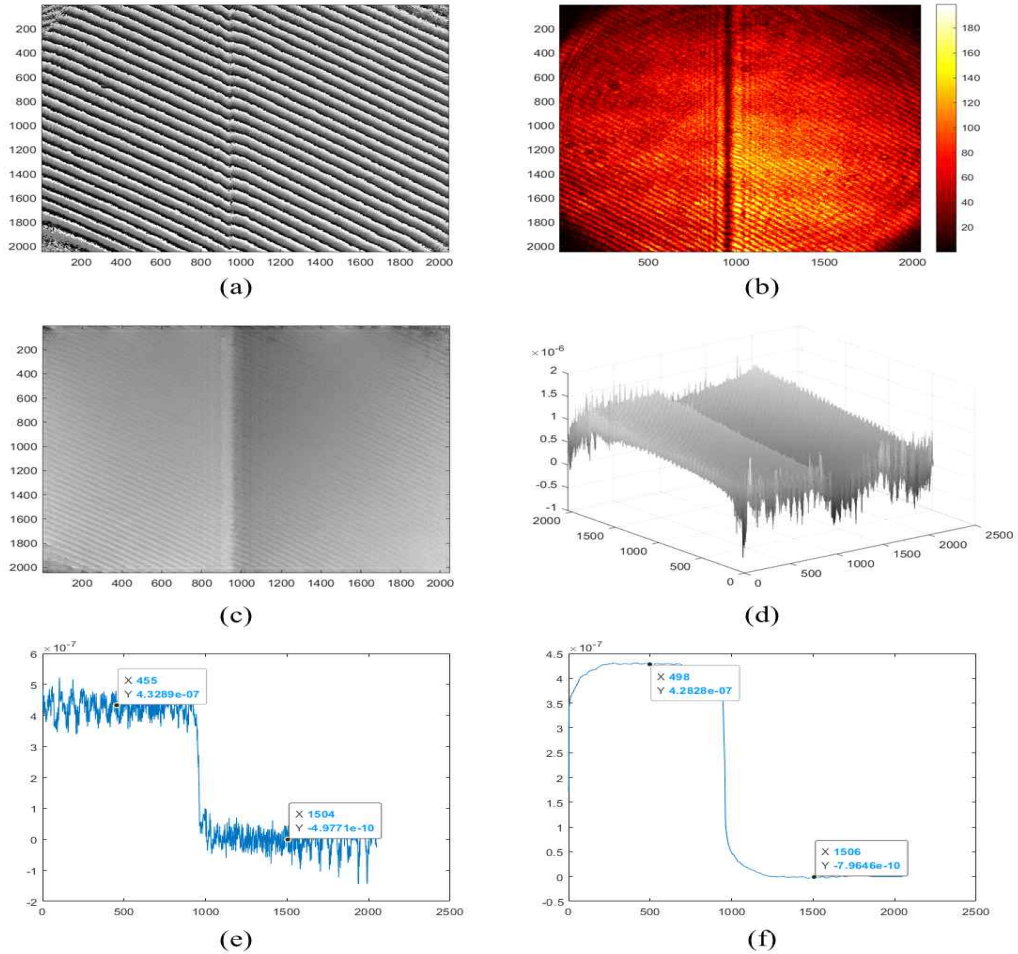


Figure 4.18 Frame 40 measurement with vibration level 4

- (a) Object wave phase image    (b) Object wave intensity image  
 (c) Phase unwrapping image    (d) 3D image  
 (e) Result of line profile        (f) Median filter applied image for the result of (e)

Figure 4.18은 Figure 4.17과 같이 진동 레벨 조건은 4이지만, CMOS 카메라의 조건을 40프레임으로 설정한 결과로 (a)는 물체파의 위상이미지를 나타내고, (b)는 물체파의 세기 이미지를 나타내며, (c)는 참조파와의 간섭을 통해 복원된 위상결편침 이미지, (d)는 위상 결편침 이미지를 3D화한 이미지, (e)는 좌에서 우측으로 향하는 프로파일 이미지이며, (f)는 (e)의 결과에 중앙값 필터를 적용한 이미지를 나타낸다.

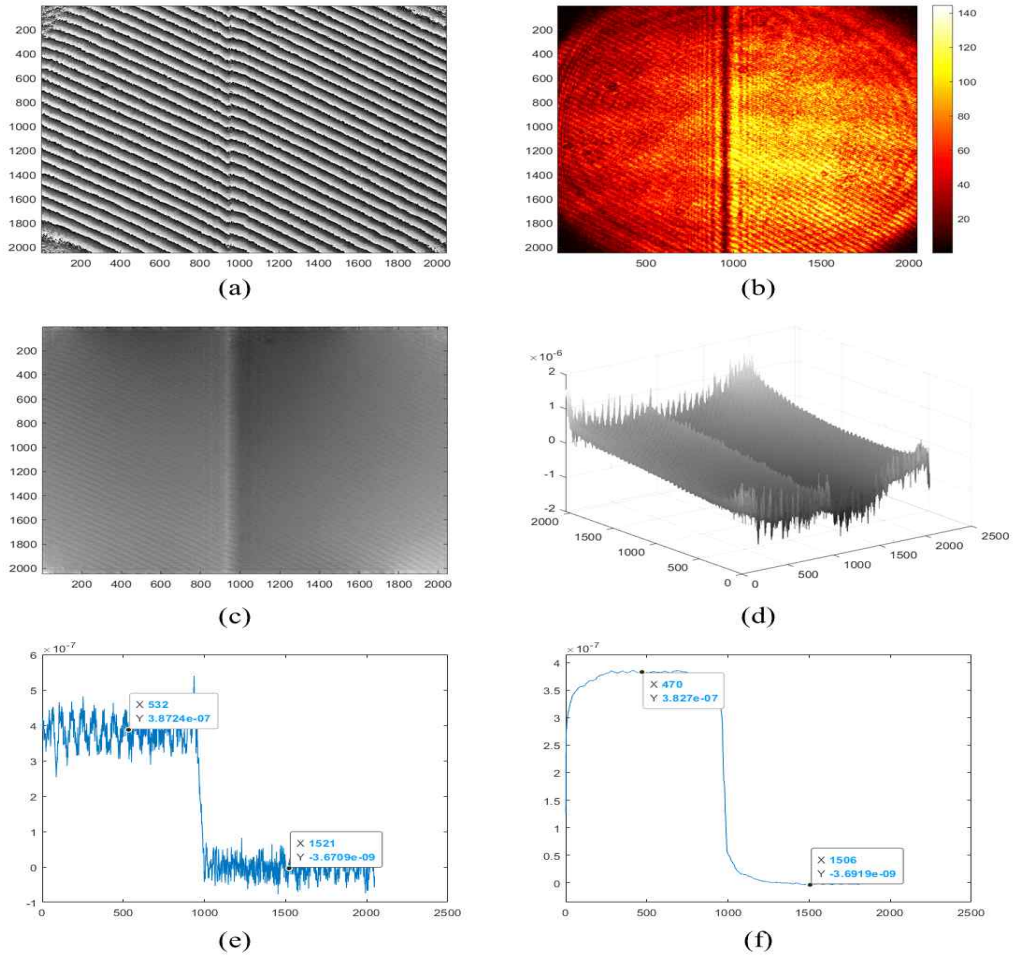


Figure 4.19 Frame 60 measurement with vibration level 4

- (a) Object wave phase image      (b) Object wave intensity image
- (c) Phase unwrapping image      (d) 3D image
- (e) Result of line profile      (f) Median filter applied image for the result of (e)

Figure 4.19는 Figure 4.17과 같이 진동 레벨 조건은 4이지만, CMOS 카메라의 조건을 60프레임으로 설정한 결과로 (a)는 물체파의 위상이미지를 나타내고, (b)는 물체파의 세기 이미지를 나타내며, (c)는 참조파와의 간섭을 통해 복원된 위상결편침 이미지, (d)는 위상 결편침 이미지를 3D화한 이미지, (e)는 좌에서 우측으로 향하는 프로파일 이미지이며, (f)는 (e)의 결과에 중앙값 필터를 적용한 이미지를 나타낸다.

Table 4-1 Result of Experiment

	Vol.0 [nm]	Vol.1 [nm]	Vol.2 [nm]	Vol.3 [nm]	Vol.4 [nm]	AVG [nm]
20frame	421.5	357.3	376.2	410.9	446.2	402.4
40frame	436.0	370.1	381.2	418.6	431.0	407.38
60frame	420.5	414.1	371.3	390.2	385.0	396.2
AVG [mm]	426.0	380.5	376.2	406.6	420.7	402

진동자 위상이동 반사형 디지털 홀로그래피를 이용한 Photolithographic product 의 측정의 결과는 프레임 수와는 관계없이 비선형적인 결과가 나타남을 알 수 있으며 마찬가지로 진동의 세기가 증가함에 따라 측정의 결과가 비선형적임을 알 수 있어 측정이 가능한 진동 세기에서의 프레임과 진동의 상관관계가 없다는 것을 확인 할 수 있었다.

### 제 3 절 AFM 이용 Photolithographic Product 측정 결과

진동자 위상이동 반사형 디지털 홀로그래피를 이용한 Photolithographic product 의 측정의 결과의 신뢰성 확보를 위해 범용적으로 사용되며, 측정하고자 하는 물체에 대해 프로브 팁으로 직접적으로 측정체를 스캔하여 비파괴적으로 측정할 수 있는 장비인 AFM(Atomic force microscope)의 측정 결과와 비교를 하였다. 측정에 사용된 AFM은 Figure 4.12과 같으며 Table 4-2에 사양을 나타내었다.



Figure 4.20 Atomic force microscope

Table 4-2 Specification of Atomic force microscope

Model	XE-200 System(PSIA)
SPM Head	Contact AFM
Maximum Load Size	200 mm x 200 mm (8 inch)
Scan Length	100 um (low voltage mode : 10 um)
Scan Speed	2 um/sec to 200 um/sec or more Vertical range 262 um or more

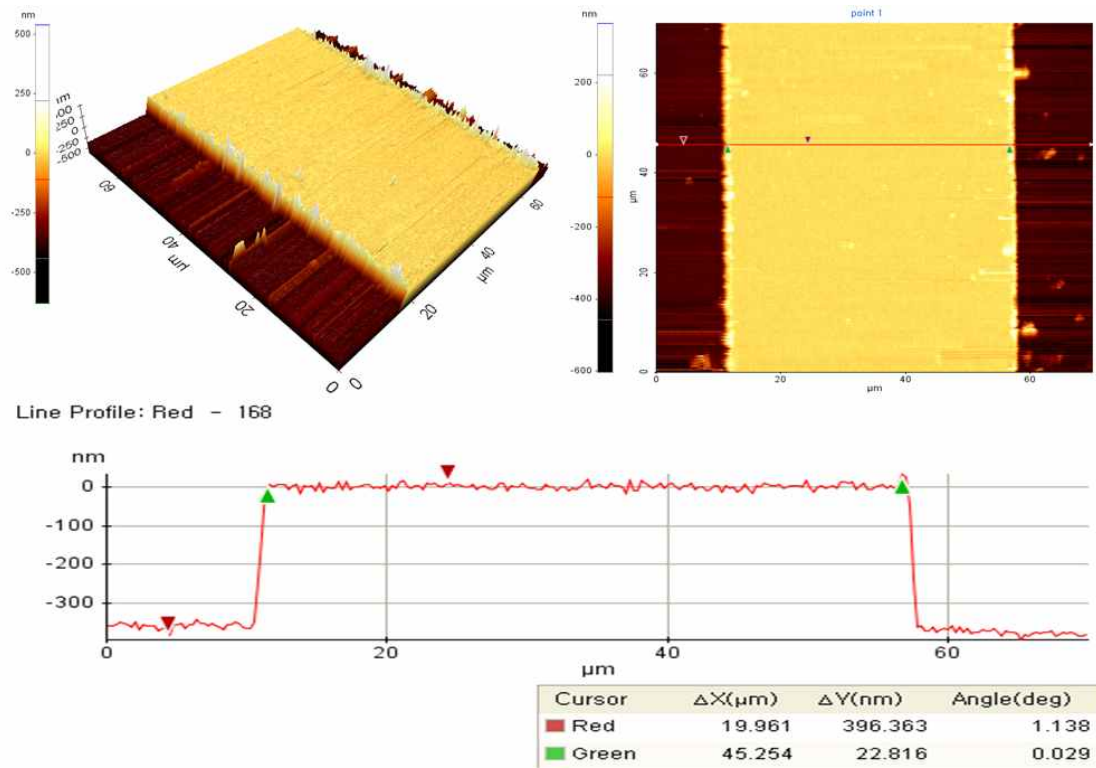


Figure 4.21 Photolithographic Product Measurement Results Using AFM

Table 4-3 Result of Experiment

No.	Step-height[nm]
1	396.4
2	386.5
3	387.4
4	376.0
5	375.5
6	370.1
7	353.2
8	380.1
9	372.0
Avg.	377.5

## 제 4 절 측정 결과 고찰

Table 4-4는 진동자 위상이동 반사형 디지털 홀로그래피를 이용한 Resolution target의 Crome과 Glass의 단차에 대한 측정 결과는 평균 126.5nm로 사양인 120nm를 기준으로 약 5.4%의 오차율을 나타내어 신뢰성 있는 측정 결과임을 알 수 있었고, Photolithography Product의 전극부와 기판부에 대한 단차 측정의 결과는 평균은 402nm를 나타내었으며, 신뢰성 확보를 위해 범용적으로 사용 장비인 AFM의 결과는 377.5nm로 AFM의 결과를 기준으로 적용하게 되면, 편차율 6.4%로 매우 신뢰할만한 결과를 가져옴을 알 수 있었다. 이는 나노급 측정이 가능한 반사형 디지털 홀로그래피를 이용하여 수백 nm에 대한 측정은 범용장비 못지 않는 성능을 가져옴을 알 수 있었으며, 추가적으로, 기존의 위상이동에 적용되는 압전소자 없이도 높은 정밀도의 측정이 충분히 가능함을 알 수 있었다.

Table 4-4 Compare of Result

Method	Step-height
Digital holography	402nm
AFM	377.5nm
Deviation[%]	6.4%

## 제 5 장 결 론

본 논문에서는 기존의 위상이동 반사형 디지털 홀로그래피에서 사용되는 압전소자 대신에 진동자를 적용하여 진동수 변화에 따른 측정과, CMOS의 카메라의 프레임에 변화를 주어 프레임과 진동수와의 상관관계에 대해 파악하였으며, 추가적으로, 비접촉 측정에 범용적으로 사용되는 AFM과의 결과 비교를 통하여 신뢰성 확보 및 대체 측정 가능성을 확인 할 수 있었다. 따라서 본 연구를 통해 얻을 수 있는 결과는 다음과 같다.

첫 번째, 위상이동 디지털 홀로그래피는 위상 변화의 정량화를 바탕으로 측정하고자 하는 물체에서의 위상 변화를 통해 수치적인 해석을 바탕으로 측정을 진행하기 때문에 매우 정밀도가 높은 압전소자를 사용하여 선형적인 위상 변화를 이용하였으나, 본 논문에서는 기존에 사용하는 압전소자 대신에 진동자를 이용한 위상 변화를 바탕으로 프레임 추출 방법을 적용하여 측정을 진행하였고, 측정 결과 매우 신뢰할만한 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

두 번째, 진동자를 이용한 위상이동 측정에 대해 진동의 세기 증가 또는 측정 카메라의 프레임의 변화에 따른 측정 결과의 선형성을 확인하기 위한 측정을 진행한 결과, 프레임과 진동의 세기와의 결과가 비선형적으로 나타남에 따라 측정 가능한 진동의 세기에서는 프레임 수와 진동의 세기의 선형성이 없음을 확인하였다.

세 번째, 물체에 대한 단차를 측정할 수 있는 반사형 디지털 홀로그래피의 성능 검증을 위해 광학 시스템의 평가를 위해 두루 사용되는 1951 USAF Resolution target의 Glass에 증착된 Chrome의 측정 결과 5.4%의 오차율로 수 nm의 영역에서 수준 높은 정밀도로 측정이 가능함을 알 수 있었다.

네 번째, Resolution target의 측정과 마찬가지로 Photolithographic product의 기판부와 증착된 전극부의 단차를 진동자 위상이동 반사형 디지털 홀로그래피로 측정하고, 측정 신뢰성 평가를 위해 범용적으로 사용되는 AFM으로 측정한 결과의 평균을 기준으로 진동자 위상이동 반사형 디지털 홀로그래피의 결과에 대한 편차를 확인한 결과 6.4%로 매우 신뢰성 있으며 수준 있는 결과가 나타남을 확인하였다.

본 논문은 진동자를 이용하여 위상이동을 수행한 반사형 디지털 홀로그래피에 대한 연구로 측정 결과에 대해 타 장비의 측정 결과와 비교를 바탕으로 수준 높은 결과를 얻어냄에 따라 대체 측정이 가능함을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. Gabor D, "A new microscopic principle", Nature 161:777-778, (1948)
2. Gabor D, "Microscopy by reconstructed wavefronts", Proc Roy Soc 197:454-487, (1949)
3. Gabor D, "Microscopy by reconstructed wavefronts: 2", Proc Phys Soc 64:449-469, (1951)
4. Leith EN, Upatnieks J, "Reconstructed wavefronts and communication theory", Jour Opt Soc Amer 52:1123-1130, (1962)
5. Leith EN, Upatnieks J, "Wavefront reconstruction with diffused illumination and threedimensional objects", Journ Opt Soc Amer 54: 1295-1301, (1964)
6. Powell RL, Stetson KA, "Interferometric Vibration Analysis by Wavefront reconstructions", J Opt Soc Amer 55:1593-1598, (1965)
7. Stetsom KA, Powell RL, "Interferometric hologram evaluation and real-time vibration analysis of diffuse object", J Opt Soc Amer 55:1694-1695, (1965)
8. Onural L, Scott PD, "Digital decodirng of in-line holograms", Opt Eng 26(11):1124-1132, (1987)
9. Liu G, Scott PD, "Phase retrieval and twin-image elimination for in-line Fresnel holograms", J Opt Soc Am A 4(1): 159-165, (1987)
10. Haddad W, Cullen D, Solem J, Longworth J, McPherson A, Boyer K, Rhodes K, "Fourier-transform holographic microscope", Appl Opt 31(24): 4973-4978, (1992)
11. Schnars U, "Direct phase determination in hologram interferometry with use of digitally recorded holograms", Journ Opt Soc Am A 11(7):2011-2015, reprinted, In: Hinsch K,



Sirohi R (eds). SPIE Milestone Series MS 144, pp 661 - 665, (1994)

12. Schnars U, Juptne W, “Digital reconstruction of holograms in hologram interferometry and shearography”, Applied Optics 33(20):4373-4377, (1994)

13. Macovski A, Ramsey D, Schaefer LF, “Time Lapse Interferometry and Contouring using Television System”, Appl. Opt. 10(12):2722-2727, (1971)

14. Goodman J.W., Lawrence R.W., “Digital image formatid electronically detected holograms”, Applied Physics Letters, vol. 11, pp. 77-79, (1967)

15. Huang T.S., “Digital holography”, Proceedings of the IEEE, vol. 159, pp. 1335-1346, (1971)

16. Kronrod M.A., Merzlyakov N.S., Yaroslaavski LP., “Reconstruction of a hologram with a computer”, Soviet Physics Technical Physics, vol. 17, pp. 333-334, (1972)

17. Schnars U., Joptner W., “Direct recording of holoor CCD target and numerical reconstruction”, Applied Ontic, vol. 33, pp. 179-181, (1994)

18. Goodman J.W., “Speckle Phenomena in Optics”, Ben Roberts and Co, Swansea, (2007)

19. Goodman J.W., “Introduction to Fourier Optics”, 3rd ed., Roberts & Company Publishers, Greenwood Village, (2005)

20. Kreis T., “Holographic Interferometry”, Principles and Mont Akademie Verlag GmbH, Berlin, (1996)

21. Hariharan P., “Basics of Holography”, Cambridge University Press, New York, (2002)

22. Kreis T., “Handbook of Holographic Interferometry Optical Digital Methods”, Wiley-VCH, Weinheim, (2004)

23. Goodman J.W., “Statistical Optics”, Wiley, New York, (1985)
24. Dainty J.C., “Laser Speckle and Related Phenomena”, Springer Verlag, Berlin, (1984)
25. Schnars U., Joptner W., “Direct recording of holoour CCD target and numerical reconstruction”, Applied Ontic, vol. 33, pp. 179-181, (1994)
26. Picart P., Leval J., “General theoretical formulation of image formation in digital Fresnel holography”, Journal of the Optical Society of America A, vol. 25, pp. 1744-1761, (2008)
27. Kreis T., “Holographic Interferometry”, Principles and Mont Akademie Verlag GmbH, Berlin, (1996)
28. Leclercq M., Karray M., Isnard V., et al., “Evaluation of surface acoustic waves on the human skin using quasi-time-averaged digital Fresnel holograms”, Applied Optics, vol. 52, pp. A136 – A146, (2013)
29. Picart P., Leval J., Mounier D., et al., “Time-averaged digital holography”, Optics Letters, vol. 28, pp. 1900-1902, (2003)
30. Picart P., Leval J., Mounier D., et al., “Some opportunities for vibration analysis with time averaging in digital Fresnel holography”, Applied Optics, vol. 44, pp. 337-343, (2005)
31. Leclercq M., Karray M., Isnard V., et al., “Evaluation of surface acoustic waves on the human skin using quasi-time-averaged digital Fresnel holograms”, Applied Optics, vol. 52, pp. A136 – A146, (2013)
32. Yamguchi L., MatsumuraA T., Kato J., “Phase shifting color digital holography”, Optics Letters, vol. 27, pp. 1108-1110, (2002)
33. Demoli N., Vukicevic D., Torzynski M., “Dynamic digital holographic interferometry with three wavelengths”, Optics Express, vol. 11, pp. 767-774, (2003)
34. Desse J.M., Picart P., Tankam P., “Digital three-com holographic interferometry for

flow analysis”. Optics Express, vol. 1 pp. 5471-5480, (2008)

35. Kumar U.P., Bhaduri B., Kothiyal M.P., et al., “Two wavelength microinterferometry for 3-D surface profiling”, Optics and Lasers in Engineering, vol. 47, pp. 223-229, (2009)

36. Kuhn J., Colomb T., Montfort F., et al., “Real-time dual wavelength digital holographic microscopy with a single hologram acquisition”, Optics Express, vol. 15, pp. 7231-7242, (2007)

37. Mann C.J., Bingham P.R., Paquit V.C., et al., “Quantitative phase imaging by three wavelength digital holography”, Optics Express, vol. 16, pp. 9753-9764, (2008)

38. Dubois F., Yourassowsky C., “Full off-axis red-green-blue digital holographic microscope with LED illumination”, Optics Letters, vol. 37, pp. 2190-2192, (2012)

39. Khmaladze A., Martinez A.R., Kim M., et al., “Simultaneous dual wavelength reflection digital holography applied to the study of the porous coal samples”, Applied Optics, vol. 47, pp. 3203 – 3210, (2008)

40. Tankam P., Song Q., Karray M., et al., “Real-time three sensitivity measurements based on three-color digital Fresnel holographic interferometry”, Optics Letters, vol. 35, pp. 2055-2057, (2010)

41. Tankam P., Picart P., Mounier D., et al., “Method of digital holographic recording and reconstruction using a stacked color image sensor”, Applied Optics, vol. 49, pp. 320-328, (2010)

42. Tankam P., Picart P., “Use of digital color holography for crack investigation in electronic components”, Optics and Lasers in Engineering, vol. 49, pp. 1335 – 1342, (2011)

43. Demoli N., Vukicevic D., Torzynski M., “Dynamic digital holographic interferometry with three wavelengths”, Optics Express, vol. 11, pp. 767-774, (2003)

44. Yamaguchi L., Matsumura T., Kato J., “Phase shifting color digital holography”, Optics

Letters, vol. 27, pp. 1108-1110, (2002)

45. Desse J.M., Picart P., Tankam P., “Sensor influence in digital  $3\lambda$  holographic interferometry”, Measurement Science and Technology vol. 22, p.064005, (2011)

46. Yamaguchi L., Matsumura T., Kato J., “Phase shifting color digital holography”, Optics Letters, vol. 27, pp. 1108-1110, (2002)

47. Desse J.M., Picart P., Tankam P., “Sensor influence in digital  $3\lambda$  holographic interferometry”, Measurement Science and Technology vol. 22, p.064005, (2011)

48. Tankam P., Song Q., Karray M., et al., “Real-time three sensitivity measurements based on three-color digital Fresnel holographic interferometry”, Optics Letters, vol. 35, pp. 2055-2057, (2010)

49. Tankam P., Picart P., Mounier D., et al., “Method of digital holographic recording and reconstruction using a stacked color image sensor”, Applied Optics, vol. 49, pp. 320-328, (2010)

50. Desse J.M., Picart P., Tankam P., “Digital three-color holographic interferometry for flow analysis”. Optics Express, vol. 1 pp. 5471-5480, (2008)

51. Desse J.M., Picart P., Tankam P., “Sensor influence in digital  $3\lambda$  holographic interferometry”, Measurement Science and Technology vol. 22, p.064005, (2011)

52. Tankam P., Picart P., Mounier D., et al., “Method of digital holographic recording and reconstruction using a stacked color image sensor”, Applied Optics, vol. 49, pp. 320-328, (2010)

53. Schnars U., Joptner W., “Direct recording of hologram CCD target and numerical reconstruction”, Applied Optics, vol. 33, pp. 179-181, (1994)

54. Coquoz O., Conde R., Taleblou F., et al., “Performances of endoscopic holography with a multicore optical-fiber”, Applied Optics, vol. 34, pp. 7186-7193, (1995)

55. CuChe E., Marquet P., Depeursinge C., “Spatial filtering for zero-order and twin-image elimination in digital off-axis holography Applied Optics”, vol. 39, pp. 4070-7075, (2000)
56. Marquet P., Rappaz B., Magistretti P., et al. “Digital holographic microscopy: a non-invasive contrast imaging technique allowing quantitative visualization of living cells with sub-wavel axial accuracy”, Optics Letters, vol. 30, pp. 468 470, (2005)
57. Marquet P., Depeursinge C., Magistretti P.J., “Exploring neural cell dynamics with digital holographic microscopy”. Annual Review of Biomedical Engineering, vol. 15, pp. 407-431, (2013)
58. Creath K. “Phase measurement interferometry techniques”, in WOLF E. (ed.). Progress in Optics, North-Holland publishing Company, vol. 26, pp. 349-393, (1988)
59. Dorrio B.V., Fernandez J.L., “Phase evaluation methods in whole-field optical measurement techniques”, Measurement Science and Technology, vol. 10, pp. 33-55, (1999)
60. Yamaguchi I., Zhang T., “Phase-shifting digital holography”, Optics Letters, vol. 22, pp. 1268-1270, (1997)
61. Creath K. “Phase measurement interferometry techniques”, in WOLF E. (ed.). Progress in Optics, North-Holland publishing Company, vol. 26, pp. 349-393, (1988)
62. Creath K. “Phase measurement interferometry techniques”, in WOLF E. (ed.). Progress in Optics, North-Holland publishing Company, vol. 26, pp. 349-393, (1988)
63. Greivenkamp J.E., “Generalized data reduction for heterodyne interferometry”, Optical Engineering, vol. 23, pp. 350-352, (1984)
64. Creath K. “Phase measurement interferometry techniques”, in WOLF E. (ed.). Progress in Optics, North-Holland publishing Company, vol. 26, pp. 349-393, (1988)

65. Wyant J.C., “Use of an ac heterodyne lateral shear interferometer with real-time wavefront correction systems”, *Applied Optics*, vol. 14, pp. 2622-2626, (1975)
66. Awatsuji Y., Fujii A., Kubota T., et al., “Parallel three-step phase-shifting digital holography”, *Applied Optics*, vol. 45, pp. 2995 - 3002, (2006)
67. Le Clerc F., Collot L., Gross M.. “Numerical heterodyne holography with two-dimensional photodetector arrays”, *Optics Letters*, vol. 25, pp. 716-718, (2000)
68. Le Clerc F., Gross M., Collot L., “Synthetic-aperture experiment in the visible with on-axis digital heterodyne holography”, *Optics Letters*, vol. 26, pp. 1550-1552, (2001)
69. Le Clerc F., Collot L., Gross M.. “Numerical heterodyne holography with two-dimensional photodetector arrays”, *Optics Letters*, vol. 25, pp. 716-718, (2000)
70. Le Clerc F., Gross M., Collot L., “Synthetic-aperture experiment in the visible with on-axis digital heterodyne holography”, *Optics Letters*, vol. 26, pp. 1550-1552, (2001)
71. Absil E., Tessier G., Gross M., et al., “Photothermal heterodyne holography of gold nanoparticles”, *Optics Express*, vol. 18, pp. 780-786, (2010)
72. Samson B., Verpillat F., Gross M., et al., “Vides-rate laser Doppler vibrometry by heterodyne holography”, *Optics Letter*, vol.36 pp. 1449-1451, (2011)
73. Atlan M., Gross M., Absil E., “Accurate phase-shifting digital interferometry”, *Optics Letters*, vol. 32, pp. 1456-1458 (2007)
74. Atlan M., Gross M., Desbiolles P., et al., “Heterodyna holographic microscopy of gold particles”, *Optics Letters*, vol. 33 pp. 500-502, (2008)

75. Gross, M., Atlan M., “Digital holography with ultimate sensitivity”, Optics Letters, vol. 32, pp. 909-911, (2007)
  
76. Gross M., Atlan M., Absil E.. “Noise and aliases in off-axis and phase-shifting holography”, Applied Optics, vol. 47, pp. 1757-1766, (2008)
  
77. Harrigan P, “Optical Holographic”, Cambridge University Press, Cambridge Kreis “T Holographic Interferometry”, Akademie, Berlin, (1984)
  
78. Kreis T “Holographic Interferometry”, Akademie, Berlin, (1996)
  
79. Schnars U, “Direct phase determination in hologram interferometry with use of digitally recorded holograms”, Journ Opt Soc Am 11(7): 2011-2015, reprinted (1997)
  
80. Schnars U, “Digitale Aufzeichnung und mathematische Rekonstruktion von Hologrammen in der Interferometrie”, VDI-Fortschritt-Berichte series 8 no 378 VDI, Dusseldorf, (1994)
  
81. Breuckmann B, Thieme W, “Computer-aided analysis of holographic interferograms using the phase-shift method” Appl Opt 24: 2145-2149, (1985)
  
82. Creath K, “Phase-shifting holographic interferometry”, In: Holographic Interferometry, Springer Series in Optical Sciences 68, pp 109-150, (1994)
  
83. Kreis T, “Holographic Interferometry”, Akademie, Berlin, (1996)
  
84. Skarman B, Becker J, Wozniak K, “Simultaneous 3D-PIV and temperature measurements using a new CCD-based holographic interferometer”, Flow Meas Instrum 7(1): 1-6, (1996)
  
85. Wozniak K, Skarman B, “Digital Holography in Flow Visualization”, Final Report for ESA/ESTEC purchase order 142722, Noordwijk, (1994)

86. Zhang T, Yamaguchi I, “Three-dimensional microscopy with phase-shifting digital holography”, *Optics Letters* 23(15): 1221-1223, (1998)
87. Zhang T, Yamaguchi I, “3D microscopy with phase-shifting digital holography”, In: *Proc SPIE* vol 3479: 152-159, (1998)
88. I. H. Kwon, “Research on resolution enhancement of X-ray phase contrast tomography and application of digital holography”, POSTECH, doctoral thesis, 15-18, (2019)



## 감사의 글

저는 항상 아침에 일어나면 일용할 양식과 살아 숨 쉬는 기쁨에 감사합니다.

지난 시절 평소에 아버님 살아생전 우리 아들이 하버드에 가서 석박사 학위를 따서 대한민국의 자랑스러운 아들이 되는 것을 보는 게 마음속에 있었노라고 말씀을 하셨습니다. 지금에 와서 지난날을 생각하고 많은 일을 겪어오면서 꿈에도 그리던 학업의 길을 애정 어린 마음으로 도와주신 많은 분들께 진심으로 감사의 글을 올립니다.

쉽지 않은 학업의 길을 시작하게 하고 때론 질책과 따뜻한 격려로 인도해주신 지도 교수 김경석 교수님의 지도 편달에 진심으로 감사의 말씀을 전합니다. 또, 심사위원장 김재열 교수님, 심사위원 홍정기 교수님, 장완식 교수님, 정현철 교수님께 진심으로 감사를 드립니다. 또한, 학위 과정을 마칠 수 있게 옆에서 물심양면으로 도와주신 강찬근 박사님, 신주엽 박사님께도 진심어린 감사를 드립니다.

아울러, 공부하는 동안 많은 힘과 도움이 되어준 김경석 교수님의 연구실, 정현철 박사님 외 여러 박사님들과의 연구실 생활도 새삼 기억이 새록새록 떠올라 그리습니다. 회사 생활을 하는 회사 직원 모두에게도 감사를 드립니다.

논문의 아이디어를 제공해 주시고 논문의 틀을 갖출 수 있도록 도와주신 김재열 교수님께 특별히 감사를 전합니다.

사위인 저를 항상 자식같은 마음으로 아껴주신 곡성의 장모님 추수남 어머님께 감사드립니다. 삶의 모범이 되어주신 부모님께서 기뻐하실 얼굴을 떠올리면 그 동안의 어려움도 행복으로 변합니다.

멀리 부산에 계시는 형님 김민철, 형수 권정애, 동생 효숙, 연숙, 현종, 민섭, 민숙 모두가 있었기에 학위를 취득하는 영광을 얻게 되었으므로 이 논문을 우리 형제에게 바칩니다.

끝으로 오늘 이 순간 항상 내 옆에서 함께 수고해 주신 소중한 아내 김경후 여사님, 아들 김동준과 며느리 서리, 아들 김동국과 며느리 지수, 나의 꿈 민서, 사랑하는 서하에게 사랑과 감사를 보냅니다.

이 영광이 가족과 함께 할 수 있음을 영원히 감사드립니다.

2021년 7월

김 한 섭