



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](#)

2018 년 8 월

석사학위 논문

융합형 디지털 홀로그래피를
이용한 웨이퍼에 증착한 회로
패턴에 대한 형태학적 물성평가

조선대학교 대학원

기계시스템공학과

이 설 희

융합형 디지털 홀로그래피를 이용한
웨이퍼에 증착한 회로패턴에 대한
형태학적 물성평가

Evaluation of Morphological Properties of vapour-deposited
circuit pattern on a wafer using Hybrid Digital Holography

2018 년 8 월 24 일

조선대학교 대학원
기계시스템공학과
이 설 희

융합형 디지털 홀로그래피를 이용한
웨이퍼에 증착한 회로패턴에 대한
형태학적 물성평가

지도교수 김 경 석

이 논문을 공학석사학위 신청 논문으로 제출함

2018 년 04 월

조선대학교 대학원
기계시스템공학과
이 설 희

이 설 희 의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 김 재 열 (인)

위 원 조선대학교 교수 김 경 석 (인)

위 원 조선대학교 교수 정 현 철 (인)

2018 년 05 월

조선대학교 대학원

목 차

LIST OF TABLES -----

LIST OF FIGURES -----

NOMENCLATURES -----

ABSTRACT -----

제 1 장 Introduction ----- **1**

제 2 장 Principle ----- **3**

제 1 절 Digital Holography ----- **3**

 1. Interferometry ----- **3**

 2. Phase ----- **5**

 3. Digital Holography ----- **9**

제 2 절 Infrared Thermography ----- **12**

 1. Infrared ----- **12**

 2. Infrared Thermography ----- **14**

제 3 절 Phase estimation ----- **17**

 1. Phase - Shifting method ----- **17**

 2. Interframe Intensity Correlation method ----- **18**

 3. 3D texturing method ----- **20**

 4. Reconstruction method ----- **21**

제 3 장 적외선 열화상 카메라를 활용한 반사판 재질 에 따른 반사판 효율성 검증 -----	22
제 4 장 디지털 홀로그래피를 활용한 허니콤 구조 회 로 측정 -----	28
제 5 장 Measurement of 3 dimensional surface temperature distribution by hybrid digital holographic imaging system -----	38
제 6 장 Dynamics hybrid digital holography for simultaneous measurement of phase and thermal image -----	45
제 7 장 Three-Dimensional thermal image of honeycomb structure lap on wafer using United Digital holography -----	52
References -----	57

LIST OF TABLES

Table 1 The slope of the temperature change per unit time of the reflector	27
Table 2 Thermal conductivity and Energy change of reflector	27
Table 3 Specification of AFM	32
Table 4 Specification of FE-SEM	33
Table 5 Result of Digital Holography	37

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Michelson Interferometry Schematic	3
Fig. 2 Mach-Zender Interferometry Schematic	4
Fig. 3 Light properties of reflection and refraction	5
Fig. 4 Light properties of diffraction	6
Fig. 5 Light scattering effect	6
Fig. 6 Wave function in time and space domain	7
Fig. 7 Relation of phase and wave propagation	8
Fig. 8 Digital Holography has several characteristics such as free focusing, flexible magnification, and variable viewing angle	10
Fig. 9 Digital Holography Principle	11
Fig. 10 Spectrum of Infrared	12
Fig. 11 Reflection and transmission of infrared	13
Fig. 12 How to heat transfers	14
Fig. 13 Temperature distribution image data	15
Fig. 14 Arrangement of detector and image data of Thermography	15
Fig. 15 Principle of measurement by Infrared Thermography equipment	16
Fig. 16 Principle of IIC method	20
Fig. 17 Principle of 3D Texturing method	21

Fig. 18 Reflector object (100 mm × 100 mm × 10 T) -----	23
Fig. 19 Infrared Thermography System -----	24
Fig. 20 System configuration -----	26
Fig. 21 Honeycomb structure specimen -----	30
Fig. 22 Honeycomb Measurement area -----	30
Fig. 23 Reflection type of Digital holography -----	31
Fig. 24 AFM (Atomic Force Microscope) -----	32
Fig. 25 FE-SEM (Field Emission Scanning Electron Microscope) -----	33
Fig. 26 Result of Digital Holography (Point 1) -----	35
Fig. 27 Result of reconstruction -----	36
Fig. 28 Schematic of Digital Holography -----	39
Fig. 29 Digital Holography system -----	39
Fig. 30 Used Spatial domain -----	40
Fig. 31 Interference pattern image of negative USAF resolution target using off-axis digital holography -----	41
Fig. 32 Reconstructed digital holography of USAF resolution target from Fig. 26 -----	42
Fig. 32 Schematic of Digital Holography -----	43
Fig. 33 Arbitrary binary thermal image from amplitude of reconstructed digital holography -----	43
Fig. 34 Simulation result of our superposed thermal image with phase deformation method -----	44
Fig. 35 Off-axis Digital Holography interference pattern -----	46
Fig. 36 Digital Holography recording and Reconstruction with reference wave -----	47
Fig. 37 Reconstruction progress of Digital Holography -----	49
Fig. 38 (1) Schematic of off-axis digital holography set-up -----	49
Fig. 38 (2) Interference pattern which used digital holography function from CCD -----	49
Fig. 38 (3) Thermography from Infrared camera -----	49
Fig. 39 (1) Fourier spectrum of interference pattern-----	50
Fig. 39 (2) Filtered Fourier spectrum image. We filtered except the real image term in red circle of (1) -----	50
Fig. 39 (3) The amplitude of reconstructed digital holography. the red box is phase of reconstructed -----	50
Fig. 40 (1) Conventional 3D thermography which 2D thermography -----	51

Fig. 40 (2) The result of superposed thermal image with surface deformation
----- 51

Fig. 41 The result of superposed thermal image with surface deformation using dynamic
holography. This image-set represents 3D thermal information at interval of 1.5 sec.
----- 51

Fig. 42 The result of honeycomb structure lap on wafer using United Digital holography
----- 55

Fig. 43 Reconstructed digital holography of Honeycomb structure lab on wafer
----- 55

Fig. 44 GUI digital holography restoration program implemented by MATLAB
----- 56

ABSTRACT

Evaluation of Morphological Properties of vapour-deposited circuit pattern on a wafer using Hybrid Digital Holography

YI SeolHee

Advisor : Prof. kyengsuk Kim, Ph.D.

Co-Advisor : Prof. Hyunchul Jung, Ph.D

Department of Mechanical System
Engineering, Graduated School of
Chosun University

In this paper describes basic measurements and applications of digital holography with these advantages. Nowadays Digital Holography is useful tool to observe the 3 D object. The hologram contains all diffracted information from the object, and the object can be reconstructed at any desirable position after numerical mathematics. Digital Holography applied in many fields such as applications in deformation analysis and shape measurement, particle tracking and microscopy, measurement of refractive index distributions within transparent object and so on.

However, when wave couldn't transfer of object, conventional Digital Holography couldn't analysis the measurement inner structure. Infrared (IR) thermography is a suitable method for non-destructive measurements when visible light cannot penetrate a target. According to the principle of black body radiation, all objects with temperature greater than absolute zero emit IR radiation. IR thermography detects radiation in the infrared range of the electromagnetic spectrum (roughly 700 nm to 1 mm) and produce images of that radiation. The result of the thermo graphic recording is an image or a sequence, which corresponds to the intensity of the thermal radiation of the measured

object. Thermographic systems with high-speed and high-sensitive IR camera expand the possibilities as an inspection method on the failures such as cracks, defects, voids and cavities. Recently, a digital holographic technique has an extended measurement range with IR wave, which called IR digital holography. IR digital holography has been widely applied in different fields, such as infrared optics, infrared transmitting materials. However, typical IR digital holography acquire the interference pattern high power coherent source in the mid IR range like a 10.6 μm wavelength CO₂ laser. Therefore, IR digital holography cannot expect high resolution as conventional visible light digital holography.

In this paper, I combined digital holography and thermography optical measurement system for analysis 3D surface deformation and thermal information of a vapour-deposited circuit pattern on a wafer. I obtained quantified phase maps and focused images using off-axis digital holography reconstruction techniques. Then we used 3D texturing method to create the 3D surface temperature map. This method could conserve the high resolution of visible digital holography and sensitivity of thermal detector. It is applied to various fields requiring a complex field. Because, Digital holography has fast computation time and high resolution. Examples are industrial measurement of microscale object surface information, and microscopes for medical sample measurements.

제 1 장 Introduction

제 1 절 Background of research

최근 제품의 소형화, 경량화, 저가화를 포함한 뛰어난 처리 능력 등의 소비자의 선호에 따라 전력대비 제품의 성능은 나날히 발전하고 있다. 이로 인한 나노미터 반도체 공정 기술이 활발함에 따라 반도체의 성능 또한 함께 성장하는 추세이며, 앞서 언급한 소비자의 선호에 따른 제품의 소형화와 경량화는 제품의 안정성에 높은 영향을 미칠 수 있다. 이러한 전자 제품을 사용할 경우, 다양한 이유로 인한 열이 발생하게 된다. 예를 들어 단자의 불량이나 장시간 고출력을 사용한 경우가 있다. 제품의 열 특성을 고려하기 위해 사용되는 모든 소재의 방열기능 또한 중요하나, 불량률을 포함한 열 저항과 방열으로 이루어지는 문제점의 초기 발견이 미흡할 경우 안정성의 문제점으로 대두될 것이다. 고로 문제점의 초기 발견을 위한 대안이 가장 중요할 것으로 판단된다.

본 논문에서 소개하는 융합형 디지털 홀로그래피의 기술은 열 특성을 고려하기 위한 분야 와 같이 미세한 대상체에서 발열이 이루어지는 LED 소자나 디스플레이 산업, 반도체 산업 등에서 열 저항으로 초래하는 미세결함의 초기 발견이 미흡한 산업에 높은 활용도가 이루어 질 것으로 전망한다.

제 2 절 Purpose & Method

융합형 디지털 홀로그래피를 언급하기 전, 디지털 홀로그래피의 간략한 설명을 하고자 한다. 먼저, 물체가 가진 높이 정보와 이미지를 마이크로·나노 단위로 동시에 표현할 수 있는 장점을 가진 디지털 홀로그래피의 기술은 수치적인 계산을 통해 자유로운 초점 변경이 가능하며 공간상 실사에 대한 상을 완벽하게 재현하여 관찰자에게 실사 관찰과 같은 입체감을 제공한다. 또한 디지털 홀로그래피 기술은 문화, 예술, 디스플레이, 측정산업, 의료, 학술 등 폭넓은 산업에 활용할 수 있는 것이 특징이다. 따라서 열 화상 이미지와 높이 정보를 동시에 실시간으로 획득할 수 있는 진단 시스템은 제품 품질 진단의 가속화를 이룰 수 있는 시스템이다. 기존의 디지털 홀로그래피를 응용하여

적외선 열화상 기술을 결합한 융합형 디지털 홀로그래피를 구현하며 융합형 기술을 활용한 3 차원 손상 진단은 연구를 수행함으로써 학술적인 중요성이 부각된다.

따라서 열화상 이미지와 높이 정보를 동시에 실시간으로 획득할 수 있는 진단 시스템은 대상체의 품질 진단의 가속화를 이룰 수 있는 장비임에 아래와 같은 중요성이 강조된다. 첫째, 3차원 좌표를 포함한 이미지를 이용하여 불량 지점을 진단 할 수 있기 때문에 제품 품질의 직관적인 진단 및 발열 해소 시스템의 최적화 설계에 새로운 계측 장비로 활용 될 수 있다. 둘째, 발열에 의한 반도체 소재의 물리적 변화를 계측할 수 있으므로 품질 진단은 물론 소재의 물리적 연구 수행이 가능한 장점이 있으므로 산업적인 중요도뿐만 아니라 학술적인 중요성을 지닌다. 마지막으로, 특정 고온 조건에서의 품질 진단뿐만 아니라, 발열량이 증가하는 원인 및 변화 양상을 실시간으로 획득할 수 있으므로 실제 사용에서 발생할 수 있는 문제점에 대한 조기 진단 역시 가능하다.

본 논문은 동적 융합형 디지털 홀로그래피를 이용한 3 차원 열화상 이미지 획득에 관한 연구로, 반도체의 발열 현상을 높이 정보와 동시에 복원하는 방법에 대하여 연구는 목적으로 하고 있다. 반사형 디지털 홀로그래피는 다양한 광학 기술들을 활용할 수 있다. 동적인 이미지를 획득하는 것이 최종 목표이지만, 정적인 디지털 홀로그래피의 연구 역시 기초 분야 연구에 중요한 점을 인지하였다. 초점 확장 (EDOF, Extended depth of focus) 기법이 도입이 된 디지털 홀로그래피 연구를 수행할 예정이다. 또한 해당 연구에 사용된 기술이 접목된 3차원 열화상 이미지 측정 및 복원 과정을 통해 디지털 홀로그래피의 장점과 중요성을 강조할 것이다.

앞서 언급한 EDOF 기법은 물체의 단차가 복원된 디지털 홀로그래피의 초점 심도보다 클 경우 초점 심도에서 벗어나는 영역들을 보정하는 방법이다. 이는 수치적 복원 거리마다 보정된 디지털 홀로그래피의 이미지를 결합하는 방식을 이용하며, 광학 위상 범위를 벗어나는 단층의 높이를 측정할 수 있는 방법이다. EDOF 연구는 열화상 카메라의 초점 심도와 디지털 홀로그래피에서 촬영하는 CCD 의 초점 심도의 차이를 극복할 수 있는 방법이다. 두 번째로, 조사 광에 대한 각도 (Illumination angle) 를 변형시켜 촬영하며 복원하는 반사형 단층 촬영 기법은 반사체의 3차원 높이 정보를 정확도를 향상시킬 수 있다. 이는 열화상 이미지와 디지털 홀로그래피의 각기 다른 촬영 조건을 해결할 수 있는 방법으로 사용될 수 있으며 열화상 이미지와의 시야각 일치 작업에 중요한 요소로 작용할 것이다.

제 2 장 Principle

제 1 절 Digital Holography

1. Interferometry

가. Michelson Interferometer

Digital Holography 에서 마이켈슨 간섭계는 주로 반사가 잘 이루어지는 재질의 시편을 측정하는데 이용된다. 마이켈슨 간섭계는 광원에서 조사되는 빛을 Beam Splitter 를 이용하여 분할시킨 뒤 각각의 광원이 CCD 와 Mirror, 대상체가 동일한 거리에서 반사되어 다시 Beam Splitter 로 조사된 광원이 CCD 에서 간섭이 이루어지는 간섭계이다.

이 간섭계를 Holography에 적용시키는 경우 간섭무늬에 대한 변형 정보를 획득하기 위한 위상제어기법을 사용할 수 있도록 PZT Actuator 를 활용한 Mirror 를 배치한다. 이와 같이 반사형 재질의 시험편 측정에 용이한 마이켈슨 간섭계 Digital Holography 시스템을 구성은 Fig. 1 에 개략도를 나타내었다.

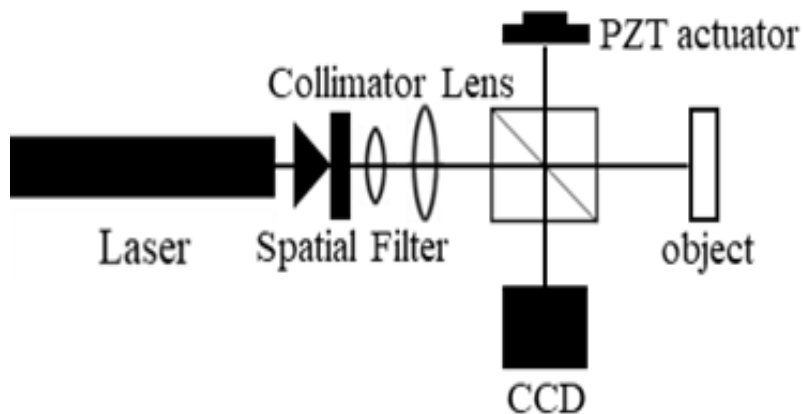


Fig.1 Michelson Interferometry Schematic

나. Mach-Zender Interferometer

Digital Holography에서 마하젠더 간섭계는 주로 투과가 잘 이루어지는 대상체를 측정하는데 이용된다. 마하젠더 간섭계의 원리는 광원에서 조사된 빛을 Beam Splitter 로 분할시키고 각각의 광원이 Mirror 에 반사되어 45° 의 경로를 변경하게 된다. 두 개의 광원 중 첫 번째의 광원은 위상제어가 가능하도록 PZT Actuator Mirror 를 통한 광원이며 두 번째의 광원은 투과가 가능한 대상체를 거친 광원이다. 이 두 개의 광원은 또 다른 Beam Splitter 에 조사되며 두 광원의 차이에 의해 대상체의 변형 정보를 CCD 를 통해 획득하게 된다. 마하젠더 간섭계를 활용한 Digital Holography 시스템의 구성은 Fig. 2 의 개략도를 통해 확인할 수 있다.

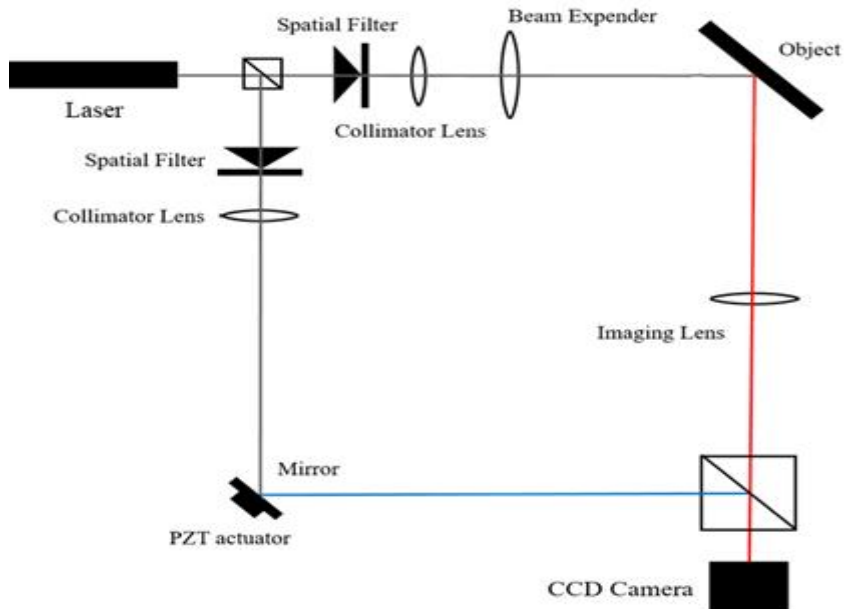


Fig.2 Mach-Zender Interferometry Schematic

2. Phase

빛의 성질 중 가장 쉽게 다가오는 특징은 반사와 굴절이다. 반사는 거울 표면에 입사된 빛의 입사각과 반사각이 일정한 현상을 말하며 진행 각도가 변화하는 것을 말한다. 이러한 두 가지 빛의 성질은 빛의 직진성을 증명하는 대표적 실험이다. 또 다른 빛의 성질 중 하나는 회절이 있다. 회절은 빛이 어느 일정한 공간 사이를 투과할 경우, 빛이 퍼지면서 진행되는 현상을 말한다. Young's single slit experiment 와 Young's double - slit experiment 는 빛의 회절을 가장 쉽게 설명하는 예이며 Single slit 을 통과한 평면의 Wavefront 가 구형파가 되는 과정을 설명한다. Double - slit 을 통과한 파동은 벽면에서 보강간섭과 상쇄간섭을 일으킨다.

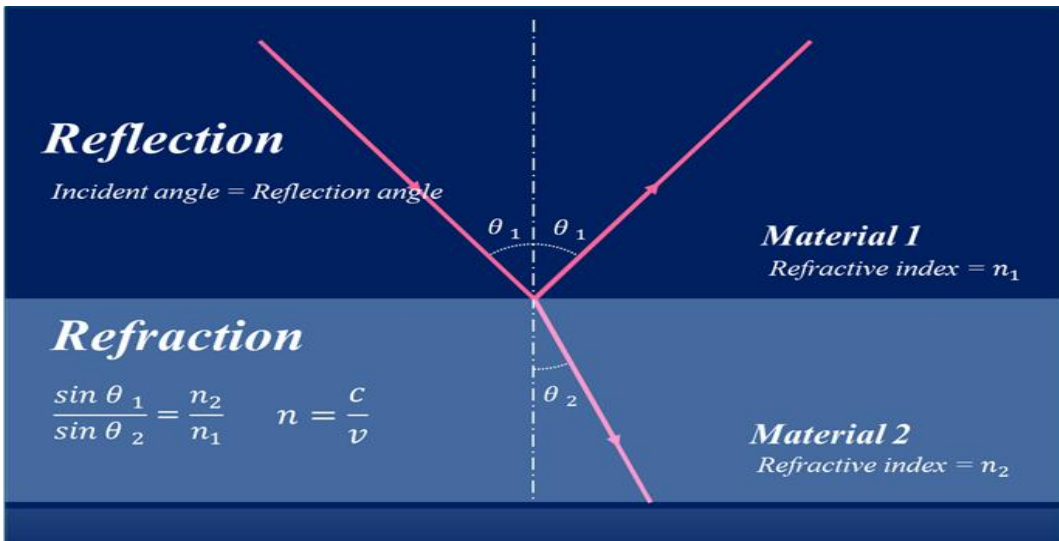


Fig.3 Light properties of reflection and refraction

빛은 파동성을 지닌 파동이며 파장도 가지고 있다. 빛의 파장에 대한 대표적인 예로는 프리즘 실험을 통해 볼 수 있고 이는 빛의 스펙트럼이다. 빛이 에너지를 가지고 있다는 것은 빛이 입자성을 띤다는 것을 의미하며 빛이 파동성과 입자성, 이 두 가지 특성을 Wave-Particle Duality 라고 한다. 단편적인 예로는 Scattering 이 있다. Scattering 은 에너지를 지닌 Photon 이 전자를 만나 손실된 에너지에 비례하는 파장을 방출하는 현상이다.

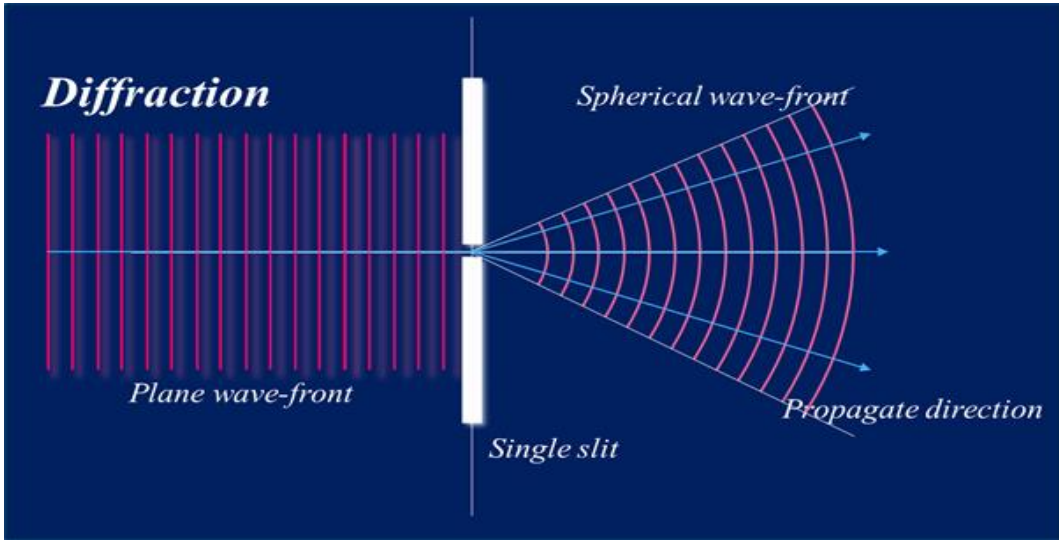


Fig.4 Light properties of diffraction

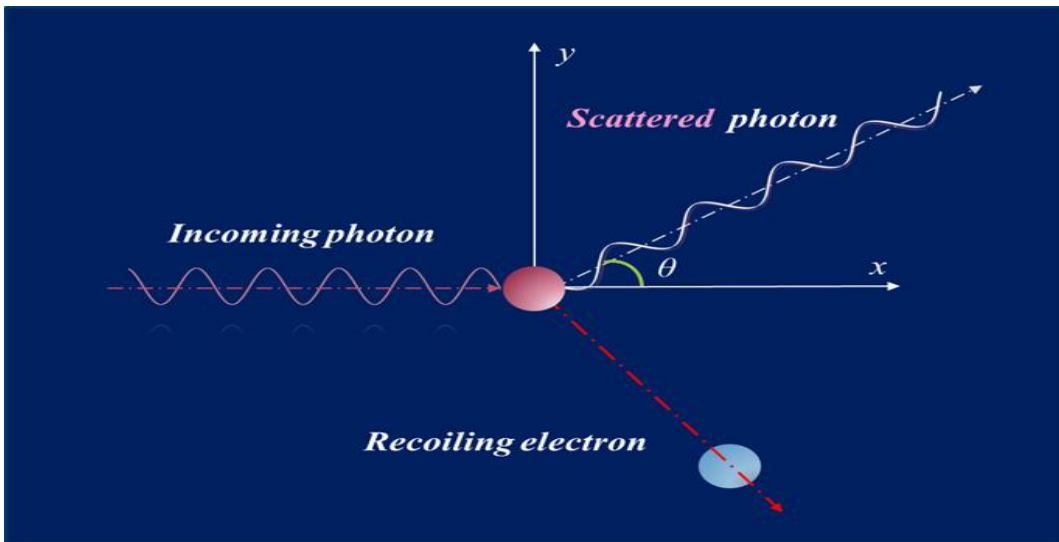


Fig.5 Light scattering effect

파동은 현의 진동을 수식으로 표현하고자 했으며, Bernoulli 의 시도는 삼각함수로 거리나 시간에 대한 변수를 하나로 표현하고자 하게 되었다. 그러나 파장은 거리단위의 영향을 받게 되며 주기는 시간에 따라 영향을 받기 때문에 불완전한 일반해였다. 이를 하나의 식으로 정리한 Erwin Schrödinger 의 식은 식 (1) 과 같다.

$$\nabla^2 \psi - \frac{1}{C^2} \frac{d^2 \psi}{dt^2} = 0 \tag{1}$$

$$\psi(r, t) = A \cdot \cos(2\pi\omega t + \varphi(r)) \tag{2}$$

파동 방정식을 만족하는 파동을 일반해라고 하는데, 이를 단순하게 수식화 하면 식 (2) 의 시간과 거리에 대한 변수를 포함한 삼각함수로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} &= A \cdot \exp(-i(kr + \omega t)) \\ &= A \cdot \exp(-ikr) \cdot \exp(-i\omega t) \tag{3} \\ &; k = 2\pi / \lambda, r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \end{aligned}$$

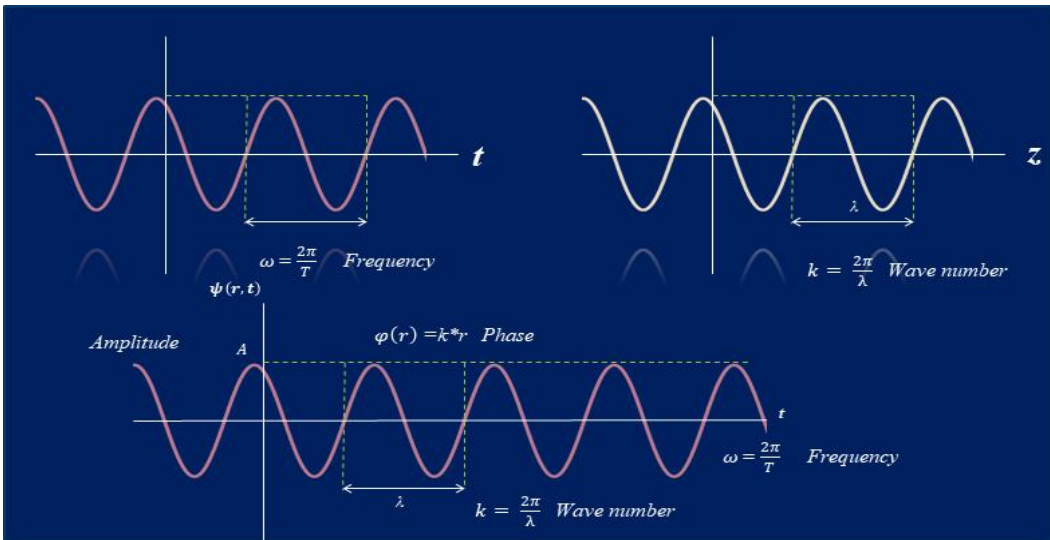


Fig.6 Wave function in time and space domain

이 삼각함수에는 Amplitude, Wave-number, Frequency 와 같은 상수가 포함되어 있는 것을 알 수 있다. 삼각함수를 “ exp ” 로 표현한 것을 Complex equation 이라 하는데 이 Complex equation 에서는 시간과 공간에 대한 함수를 독립적으로 표현할 수 있다.

Fig. 6 에서는 시간 및 공간 영역에서의 파동함수를 표현한 것이다. 우리는 실험 시 사용하는 Laser 의 Wave 를 Coherence Wave 라고 말한다. 또한, Coherence Wave 는 Spatial Frequency 와 Temporal Frequency 가 일정한 경우를 일컫는다. 즉, 진동수와 파장이 일정한 빛을 이용한다는 의미인 것이다.

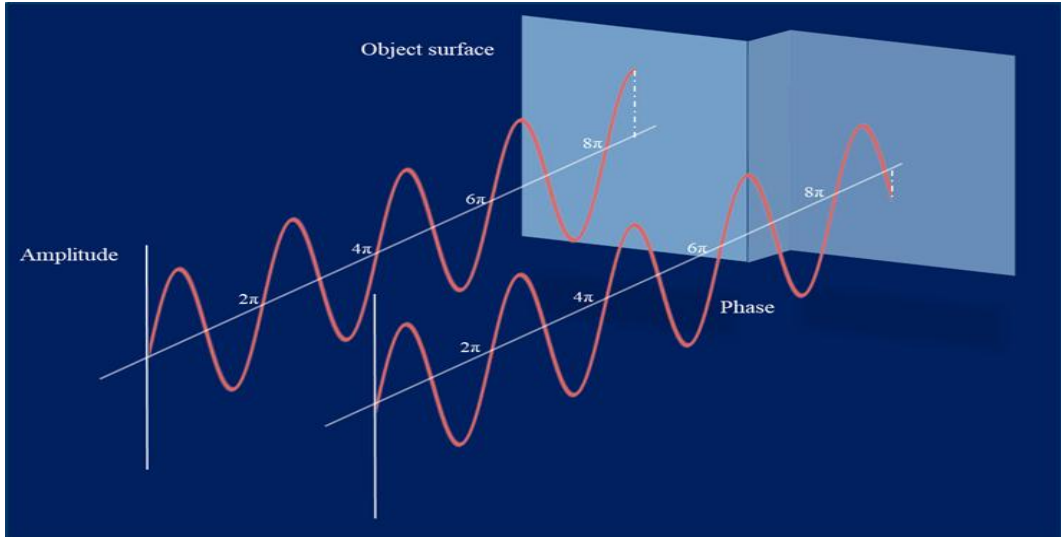


Fig.7 Relation of phase and wave propagation

이를 Time Harmonic Monochromatic Wave 라 한다. 이러한 Coherence Wave 의 성질 중에서 물리적으로 가장 중요한 것은 “시간”이다. 시간에 대한 함수는 식 (4) 와 같다.

$$\begin{aligned} \psi(r,t) &= A \cdot \exp(-ikr) \cdot \exp(-i\omega t) \\ \psi(r) &= A \cdot \exp(-ikr) \end{aligned} \quad (4)$$

시간에 대한 함수는 시간 변수가 있는 Term 을 제외한 모든 식을 상수화 시킨다는 의미이다. 그렇다면 “ $\exp(-i\omega t)$ ” 를 제외한 앞부분을 Amplitude 라 칭할 수 있는데 이 Amplitude에는 “ $\exp(-ikr)$ ” 과 같은 Complex Value 가 포함되어 있어 이 모든 Term, “ $A \cdot \exp(-ikr)$ ” 를 Complex Amplitude 라 하는 것이다. 이러한 Complex Amplitude 에는 빛이 어느 방향으로, 얼마만큼 진행했는지 보여주는 “ kr ” 이 포함되어

있는데 이를 바로 Phase 라 한다. 즉, Phase 란 빛의 위치 정보를 가지고 있는 Value 를 말하는 것이다.

앞서 설명하듯이 Phase 는 빛의 위치 정보를 나타내는 값이며 이를 이용하여 굴절률, 투과도, 높이 등의 수많은 값들을 계산할 수 있다. 빛이 진행을 할 경우 Fig. 6 과 같이 이동한 거리에 따라 Phase 가 결정된다. 그 중 물체의 표면에 닿을 경우 진행한 거리만큼 위상이 정해진다. 쉽게 이해하기 위한 Fig. 7 은 물체 표면이 높은 경우와 낮은 경우의 Phase 의 값에 대한 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

하지만 우리는 관측 시에 정확히 그 빛이 어느 정도로 진행되었는지는 알 수 없다. Phase 는 주기적으로 2π 간격에서 움직이기 때문에 정확한 진행 정도를 알 수 없는 것이다. 따라서 획득하는 Phase 는 전부 2π 범위 내에서 표현되며, 이를 Wrap Phase 라 한다. 이처럼 2π 범위 내로 Wrapping 되어진 Phase 를 풀어내는 과정을 Unwrap이라 하며, Phase 의 값을 획득하기 위해서는 Interferometry 를 이용한다. 빛의 진동수는 무려 10조가 넘어가는데, 이는 밝고 어두워지는 관계를 1초에 10조번 반복한다는 의미이며 고로 하나의 광원만으로는 위상을 구할 수 없기 때문이다. 간섭은 두 빛의 위상을 보강 혹은 상쇄를 통하여 위상차를 확인하는 방법이다. 이러한 간섭 패턴은 Intensity 로 확인할 수 있으며 Intensity 는 Wave Equation 의 절대 값과 같으며 아래 식 (5) 에 나타냈다.

$$\begin{aligned}
 \psi_1(r) &= A_1(r) \cdot \exp(-i\varphi_1) \\
 \psi_2(r) &= A_2(r) \cdot \exp(-i\varphi_2) \\
 U(r) &= A_1 \cdot \exp(-i\varphi_1) \cdot A_2(r) \cdot \exp(-i\varphi_2) \\
 I(r) &= I_1(r) + I_2(r) + 2\sqrt{I_1(r)I_2(r)} \cos(\varphi_1 - \varphi_2)
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

3. Digital Holography

Digital Holography 의 기술은 물체가 가진 높이 정보와 이미지를 마이크로 · 나노 단위로 동시적 표현이 가능하다. Holography 는 1948 년 Dannis Gabor 에 의해 처음 고안

되었으며 그 어원은 그리스어로 모든 것을 기록한다는 의미이다. 이 기술은 어원과 같이 물체와 기록 면 사이의 모든 광 평면 이미지를 분석할 수 있는 기술이다. 초기의 Holography 는 필름 기반의 기록 기술을 가지고 있었으며, Reference wave 와 Object wave 가 산란되어 간섭된 결과를 이용하였다. 그 후 1970 년 Yaroslavskii 에 의해 산술적인 Digital Holography 의 복원법이 소개되었다. 이는 현재 상용된 Digital Holography 의 근간이 되는 복원법이다. CCD 와 같은 디지털 녹화 장비를 이용하여 기록하고 수치적으로 분석하는 법은 U. Schnars 와 W. Jüptner에 의해 고안되었다. 이 후 Digital Holography 는 Phase 와 Intensity 를 동시에 획득하는 비파괴 광학 진단 장비로 급속하게 발전되었다. Digital Holography 는 수치적인 계산을 통해 자유로운 초점 변경이 가능하며 공간상 실사에 대한 상을 완벽하게 재현하여 관찰자에게 실사 관찰과 같은 입체감을 제공하는 장점이 있다.

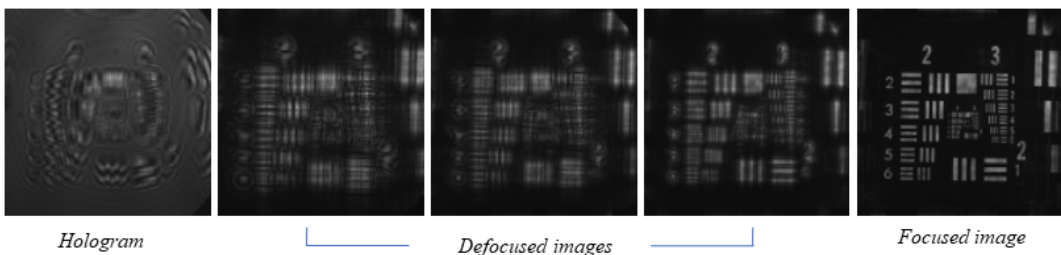


Fig.8 Digital Holography has several characteristics such as free focusing, flexible magnification, and variable viewing angle

Digital Holography 의 기본적인 Recording 의 원리는 Fig. 8 과 같다. Object wave 는 일반적으로 3D 물체에서 표면 반사 혹은 투과한 빛이며 CCD 에서부터 거리 d 만큼 떨어진 곳에 위치한다. 이러한 Object wave 와 Plane Reference wave 는 CCD 의 표면에서 간섭이 이루어진다. CCD 는 간섭 패턴의 Intensity 를 전자기적 신호로 기록하게 된다. 이러한 과정을 수식을 나타내면 식 (6) 과 같다.

$$\begin{aligned}
 O(x,y) &= o(x,y) \exp(i\phi_o(x,y)) \\
 R(x,y) &= r(x,y) \exp(i\phi_r(x,y))
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

O 은 물체의 Complex Amplitude 를 나타내며, R 은 Reference 의 Complex Amplitude 이다. CCD 에서 관측할 수 있는 간섭무늬는 두 Complex Amplitude 의 합의 제곱인 광량으로 표기되며 이는 식 (7) 과 같다.

$$\begin{aligned}
 I(x,y) &= |O(x,y) + R(x,y)|^2 \\
 &= (O(x,y) + R(x,y))(O(x,y) + R(x,y))^* \\
 &= O(x,y)O^*(x,y) + R(x,y)R^*(x,y) \\
 &\quad + O(x,y)R^*(x,y) + O^*(x,y)R(x,y)
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

“ * ” 는 복소함수의 Conjugate 를 의미한다. 식 (7) 은 4 가지의 Complex Amplitude term 으로 표기할 수 있다. 식 (7) 의 첫 번째 항과 두 번째 항은 Autocorrelation term 으로 불리운다. 이러한 Autocorrelation term 은 Object 와 Reference 의 Intensity 를 표현한다. 세 번째와 네 번째 항은 각각 물체의 Twin Image 와 Real Image 를 포함하고 있다.

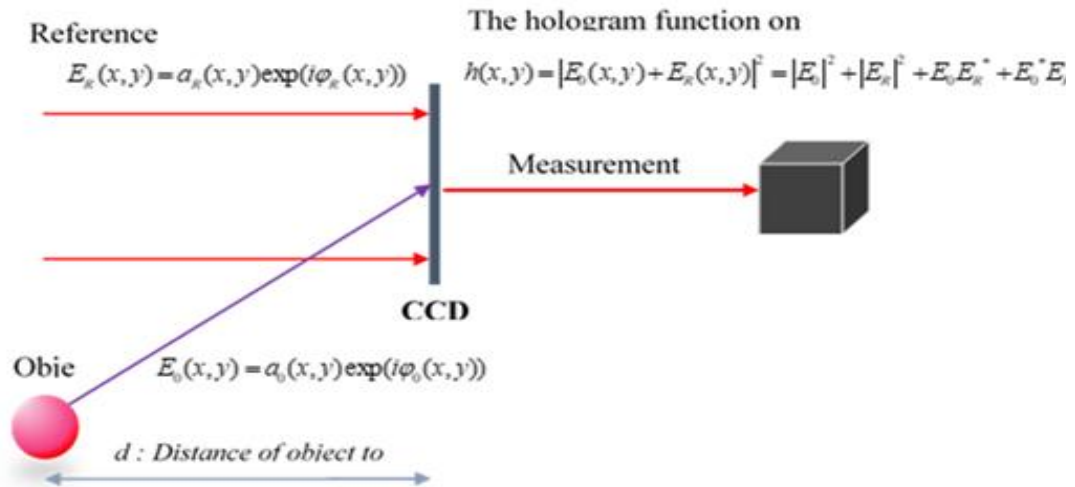


Fig.9 Digital Holography Principle

Twin Image 는 대개 Virtual Image 라 하며 Record 된 Object 의 원 위치에 나타나게 된다. 복원된 이미지의 품질을 위해서 Virtual Image 와 Real Image 를 구분할 수 있어

야 한다. 광원의 위치에 따라 Virtual Image 와 Real Image 의 위치는 바뀔 수 있다. 이와 같은 방법으로 Off-axis Digital Holography 에서는 2D Furier domain 에서의 Spatial filtering 기법을 이용한다.

Digital Holography 는 CCD 를 이용하여 광학 간섭계로 얻은 간섭 이미지를 임의의 거리에서의 2차원 복소 필드 (Complex Amplitude) 를 통해 이미지와 높이 정보를 복원할 수 있다. Digital Holography 의 수직분해능은 수평분해능보다 더욱 정밀하다. 수직 분해능은 파동의 진행 (Wave Propagation) 정도를 나타내는 Phase 의 정밀도에 영향을 받는다. Phase 의 정밀도에 영향을 주는 변수는 광원의 파장과 물질의 굴절률 (Material refractivity) 이며, 이 둘은 수직 분해능을 결정한다. 따라서 Digital Holography 는 기하광학의 물리적 연구와 디지털 이미지 프로세스의 두 가지 측면에서 동시에 이루어지며, 현재 Digital Holography 만의 장점을 부각시키는 연구가 활발히 진행 중이다.

제 2 절 IR Thermography

1. Infrared

적외선이란 태양이 방출하는 빛을 프리즘으로 분산시켰을 때 적색선의 끝보다 더 바깥쪽에 있는 전자기파를 말한다. 적외선 방출은 1800 년 영국의 천문학자인 Herschel 에 의해 발견되었다. Herschel 은 프리즘을 사용하여 햇빛을 분산시킬 때, 물체의 온도를 증가시킬 때 적색 빛 바깥에 보이지 않는 빛이 있음을 우연히 발견하였다.

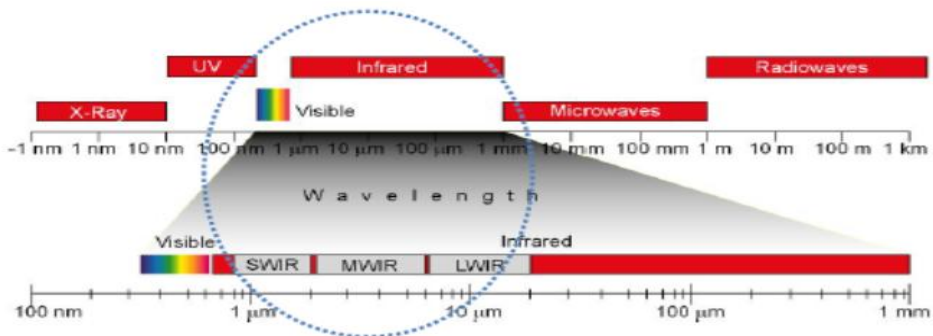


Fig.10 Spectrum of Infrared

적외선은 에너지 전달 형태의 일종으로 파장의 범위는 약 $0.7 \mu\text{m} \sim 1 \text{mm}$ 이하 이고, 주파수는 300 GHz 이상인 전자파의 한 종류이다. 적외선은 에너지 전달 시 전달을 위한 중간체가 필요하지 않기 때문에 에너지 전달과정 중 열 손실이 없다. 적외선은 가시광선이나 자외선에 비해 강한 열작용을 가지고 있는 것이 특징이다. 지구상에 존재하는 모든 물체는 절대온도 0 도 이상에서 복사에너지를 방출하며 이 방출되는 에너지는 여러 전달경로를 통해 흡수, 투과, 반사한다.

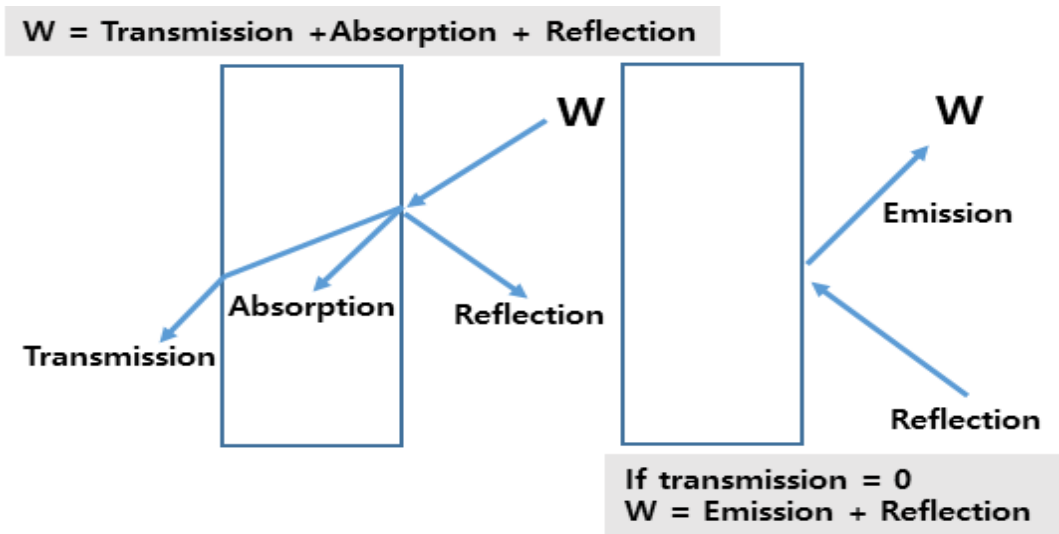


Fig.11 Reflection and transmission of infrared

적외선의 특성으로는 파장이 가시광선보다 길기 때문에 눈으로는 확인이 어렵다. 이것은 빛의 밝기나 어둡과는 관련이 없으며 온도가 0 K 이상인 모든 물체에서 자연적으로 방출되기 때문에 적외선 열화상 기법은 모든 필드에 적용할 수 있다. 또한 적외선은 물체를 가열하는 특성이 있어 열파 (Heat wave) 라고도 하며 열선이라고도 한다. 열파는 일종의 빛, 전자기파이며 전자기파는 진공을 통해 전달 될 수 있다. 적외선 에너지와 물체의 온도 사이에는 상관관계가 있으며 이것이 물체의 온도를 측정하는 데에 사용할 수 있는 이유이다. 태양이나 발열체로부터 공간으로 전달되는 복사열은 주로 적외선에 의한 것이다.

열전달 방법에는 크게 세 가지로 열전도, 열복사, 열대류가 있다. 열전도 (Thermal conductor) 는 열에너지가 물질의 이동을 수반하지 않으며, 고온에서 저온으로 연속적인 전달이 이루어지는 현상을 말한다. 열대류 (Thermal convection) 는 태양열에 의해 지면 가까운 공기가 가열되며 상승하면 발생하는 대류현상이며, 열복사 (Thermal radiation) 는 열에 의해서 들뜬 물질을 구성하는 원자 집단이 전자기파를 복사하는 현상을 일컫는다.

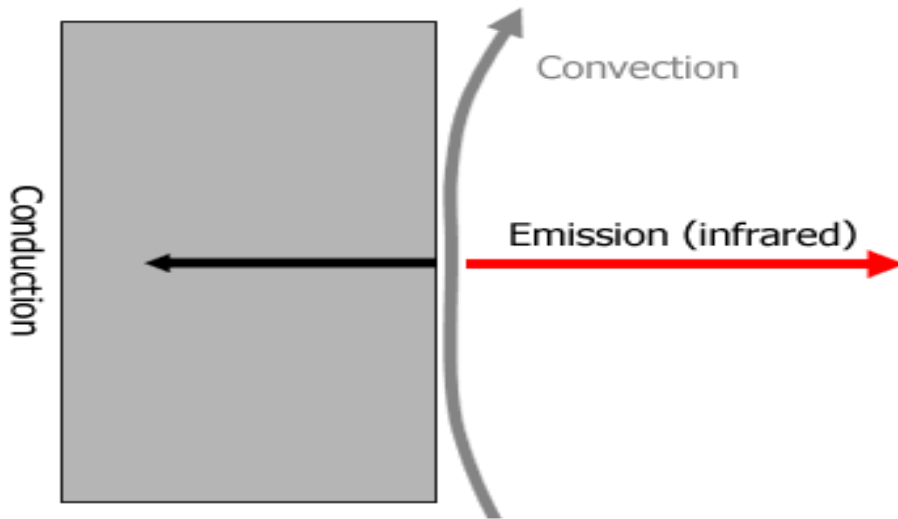


Fig.12 How to heat transfers

2. Infrared Thermography

적외선 열화상 (Infrared Thermography) 은 대상체 표면의 복사에너지를 검출한 뒤 이를 온도로 환산하여 미세한 온도차이로 구성된 온도 분포의 이미지를 실시간 영상을 통해 제공하는 기술이다. 적외선 열화상 (Infrared Thermography) 기술은 표면의 온도 분포를 포착하여 가시적인 정보로 표현이 가능하며 온도 분포에 대한 측정 시에 비접촉 측정이 가능하고 표면 온도 분포의 상대 비교는 넓은 영역에서 이루어진다. 움직이는 동적 물체나 측정 시에 가까워 질 위험이 있는 물체에 대해서도 보다 편리한 측정이 가능하다. 또한 미세한 온도 변화, 단기간의 온도 변화, 과도한 온도 변화에 대해 민감한 반응을 보인다.

적외선의 투과율로 인해 적외선 열화상 기법에는 일반적으로 8 ~ 14 μm 영역의 파장이 사용된다. 전자파의 일종인 적외선 파장 형태로 열에너지를 검출하는 방식이다. 대상체의 표면에서 방출되는 열에너지 강도에 따라 전기적인 신호로 변환되는 것이다.

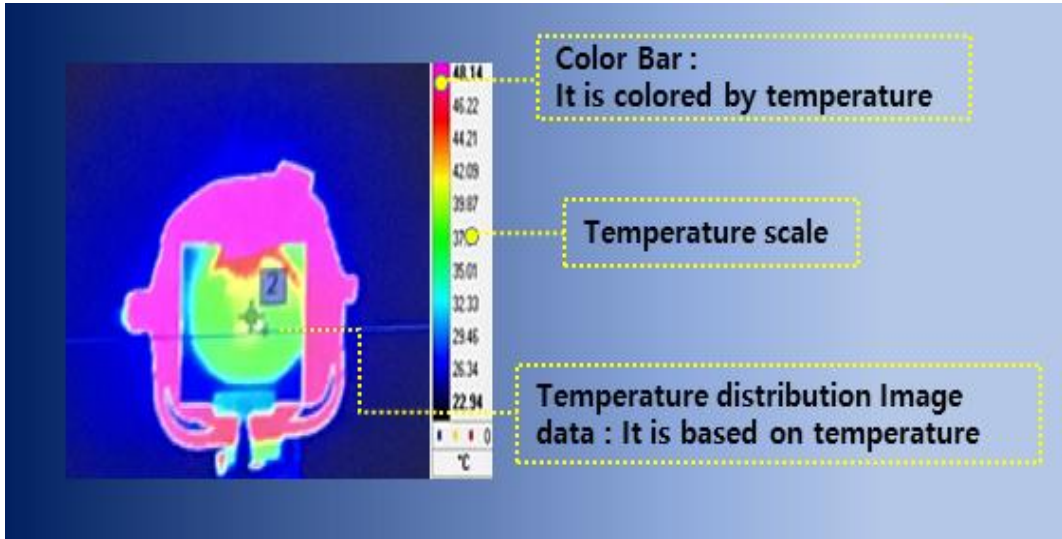


Fig.13 Temperature distribution image data

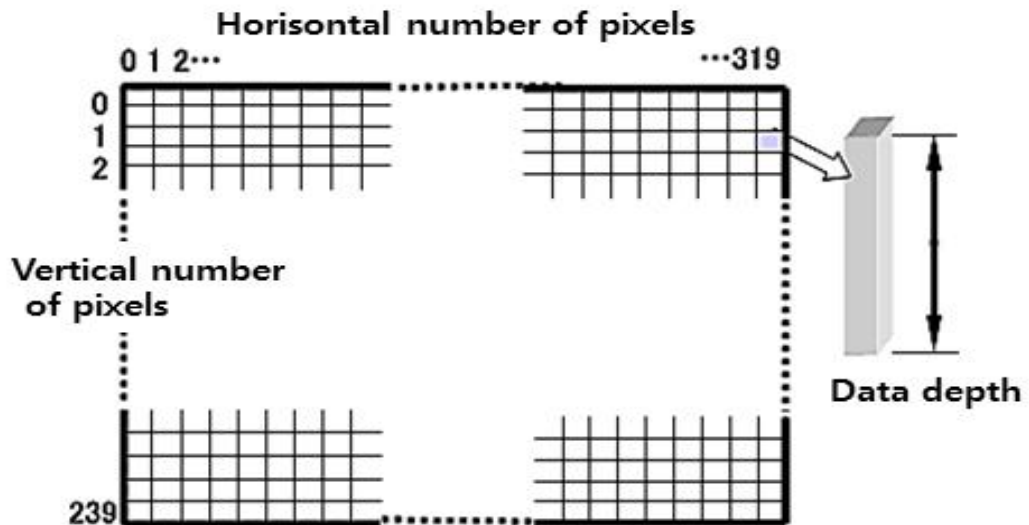


Fig.14 Arrangement of detector and image data of Infrared Thermography

적외선 열화상의 온도 분포 이미지 데이터는 위의 그림과 같이 픽셀 행렬 (320 horizontal x 240 vertical pixels) 로 구성된다. 열화상 데이터를 온도에 따라 픽셀단위로 지정이 되며 전기적인 신호는 PC로 전송된다. 열화상 카메라는 완전한 어둠 속에서도 선명한 이미지를 제공하며 열화상 카메라는 특수한 교정 기술을 이용하여 비접촉 방식으로 온도를 측정할 수 있어 광범위한 용도에 이상적인 장치이다. 또한 대상의 한 지점 뿐 만 아니라 대상의 전체 온도를 동시에 측정할 수 있다.

이런 장점들을 활용하여 인체, 동/식물의 온도 측정 및 분석 (신종 인플루엔자 및 조류독감), 장비 또는 기계의 고장 및 결함, PCB 기판 온도 측정, 미세한 온도 변화를 실시간으로 측정 가능하여 반도체 소자와 같은 재료의 열적 특성평가, 건축물 방열 측정, 유지보수를 위한 전기 선로 및 배선로 측정 등 다양한 방면에 사용된다.

실시간 온도 분석이 가능하며 최고, 최저 평균 온도를 한 눈에 확인 할 수 있다. 또한 지정된 영역의 온도 변화를 Time chart 를 이용하여 실시간 분석도 가능하다. 또한 3D 온도 분포 표현이 가능하여 시각적 온도차이 분석이 가능하다.

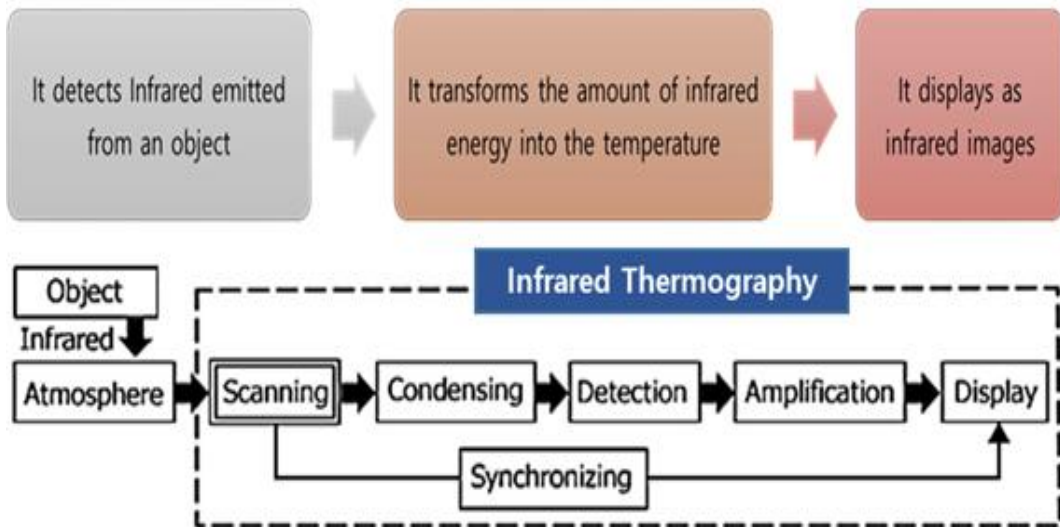


Fig.15 Principle of measurement by Infrared Thermography equipment

제 3 절 Phase estimation

1. Phase-shifting method

Single hologram을 이용한 방법과는 달리, Phase-shifting digital holography는 Auto Correlation 과 Twin Image를 고려하지 않아도 되는 장점을 가지고 있다. 또한, Phase shifting interferometry 에 의해 기록되어진 데이터를 이용해 다음과 같이 표현 가능하다, 식 (8). $a = a_o^2 + a_R^2$ 과 $b = 2a_o a_R \cdot a, b, \varphi_o - \varphi_R$ 은 Object wave-field 복원의 변수 이다.

Phase shifting 을 위해 Reference wave 는 PZT (Piezoelctric transducer) 위에 마운트 되어진 Mirror를 이용하여 일정한 간격으로 Phase가 변화된다. Phase 를 변화 시, Intensity의 일정한 변화로 Phase value 의 아주 작은 변화가 기록되어지며 PZT의 이동은 나노단위로 움직이게 된다.

앞서 언급한 변수들은 이 Phase shifting 에 의해 충족되게 되는 것이다. 이를 통해 우리는 이미 알고 있는 Reference Phase의 변화에 대한 상대적인 차이로 Object의 Complex Amplitude를 계산한다. 식 (9)에서 M은 Reference wave의 Shifting phase 의 횟수이며, Phase shifting interferometry reconstruction algorithm 은 측정 시 Noise sensitivity 를 감소시키는 작용을 한다. 이 4-stepping algorithm 은 Owner-petersen 에 의해 고안되어졌으며, 4번의 측정에 대한 Interference pattern 은 각각 $\phi = 0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}$ 으로 계산되어진다.

$$I(x, y) = a + b \cos(\varphi_o - \varphi_R) \quad (8)$$

$$I_M(x, y) = a + b \cos(\varphi_o - \varphi_R + \phi_M) \quad (9)$$

식 (10) 으로부터 4-stepping 을 활용하여 $\varphi_o - \varphi_R$ 을 추정한다.

$$\begin{aligned}
 I_1(x, y; 0) &= a + b \cos(\varphi_o - \varphi_R) \\
 I_2(x, y; \frac{\pi}{2}) &= -b \sin(\varphi_o - \varphi_R) \\
 I_3(x, y; \pi) &= a - b \cos(\varphi_o - \varphi_R) \\
 I_4(x, y; \frac{3\pi}{2}) &= b \sin(\varphi_o - \varphi_R)
 \end{aligned} \tag{10}$$

$$\varphi_o - \varphi_R = \arctan \left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right) \tag{11}$$

Object 의 Complex Amplitude 를 산출할 수 있는 Algorithm 에는 Phase stepping algorithm 과 Iterative least square phase estimation 이 있다. 우리는 Interframe Intensity Correlation matrix 를 이용한 Fitting model 을 통해 Phase Shifting 을 Estimation 하여, 정확도 높은 Object의 Complex Amplitude 를 획득할 수 있다. Phase Shifting 간섭이미지로부터 계산된 IIC matrix로부터 Fitting 되어 추정된다.

2. Interframe Intensity Correlation method

Interframe Intensity Correlation matrix 를 이용한 방법은 Intensity noise 의 무작위 Zero-mean 통계를 가정하고 있으며, 행렬은 여러 Spatial 변수 및 시간적 Phase Shifting 을 함수로 나타낼 수 있다. 이러한 희귀한 특성은 Eigenvalue 를 통해 Intensity noise 를 직접적으로 측정할 수 있다.

Interframe Intensity Correlation method 는 Phase estimation 을 위해 Reference 의 Phase 를 추정한다. Reference 와 Object 의 간섭되어진 Phase 정보에 대해 8 장의 패턴을 획득하고 8 장의 이미지의 Reference 는 임의적인 Phase 만큼 Shifting 된 것이다. 이렇게 획득한 8 장의 이미지를 통해 Complex Amplitude 를 가진 한 장의 이미지를 획득하게 된다.

Phase 와 Amplitude 를 동시에 추정하기 위해서는 Euler rule 을 활용하여 Wave equation 을 정리한다, 식 (12).

$$\begin{aligned}\psi &= a \cdot \exp(i\phi) \\ &= a \cdot (\cos \theta + \sin \theta)\end{aligned}\tag{12}$$

Fig. 16 에서의 θ 값을 보다 정확히 알기 위해서는 Phase-shifting method 를 활용한다.

$$R_{\theta} = \frac{R_{\theta 1} + R_{\theta 2} + R_{\theta 3} + R_{\theta 4}}{4} = (0, 0)\tag{13}$$

$$I_{\theta} = \frac{I_{\theta 1} + I_{\theta 2} + I_{\theta 3} + I_{\theta 4}}{4}\tag{14}$$

θ 는 Relative Phase 이며, 기준점으로 정해 놓은 $R_{\theta 1}$ 보다 θ 만큼 위상이 변화하게 된다. R_{θ} 는 Reference를 평면으로 가정하였을 때, $-\pi \sim \pi$ 까지의 범위를 $\frac{\pi}{2}$ 의 간격으로 4 번 이동하게 된다. 실험 시 외부적인 요인으로 인해 I_{θ} 의 값이 원하는 값 만큼 나오지 않을 수 있다.

이 때 Eigenvalue를 통해 Phase shifting 된 정보를 일정하게 보정하는 것이다. Fig. 16 의 해당 좌표에서 평균값은 임의의 Phase shifting 의 정확도를 판별할 수 있으며, 상대적인 Phase를 통해 Object Phase 를 추정할 수 있다.

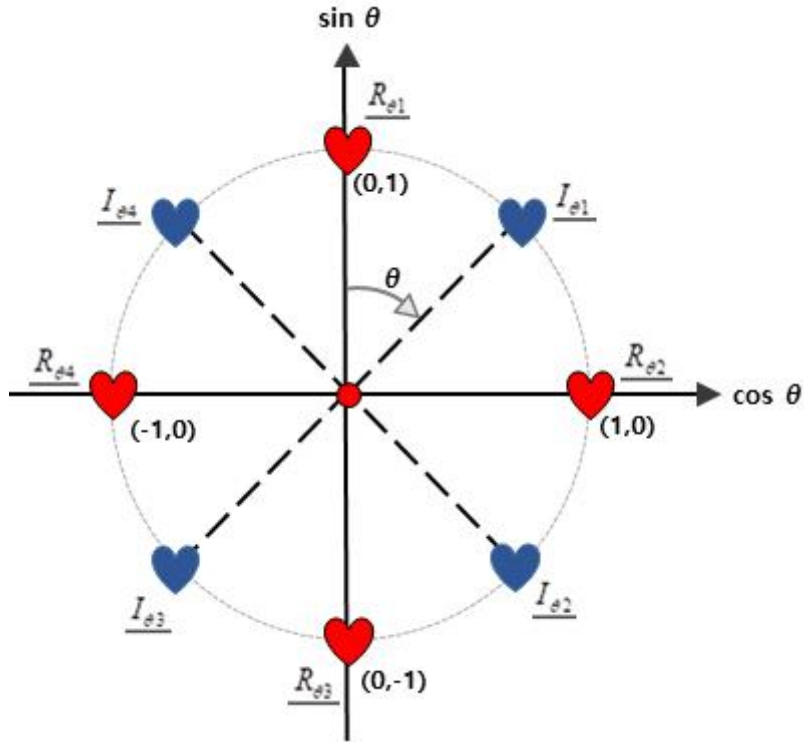


Fig.16 Principle of IIC method

3. 3D Texturing method

복원된 디지털 홀로그래피의 Phase 는 Unwrapped 방법을 이용하여 물체의 높이 정보를 3D로 표현할 수 있지만 디지털 홀로그래피는 Visible wave 를 이용하기 때문에 표면의 열 이미지를 획득할 수 없다. 하지만 Infrared camera 에서 획득한 2차원 열 이미지를 디지털 홀로그래피에서 복원한 3차원 높이의 표면에 Texture Mapping 을 통해 3차원 열 이미지를 표현할 수 있다. 3D Texture Mapping 은 Surface 의 2D texture 혹은 Color 정보를 3D 로 정의하는 기술을 의미한다.

물체 표면의 온도를 표현한 열 이미지는 2D Intensity 로 표현되며 Digital Holography 에서 복원한 높이 정보는 물체 표면의 높이 정보를 표현한 결과로 이 두 이미지는 Texture mapping Function 으로 결합할 수 있다. Texture mapping 을 위해서는 복원된 디지털 홀로그래피의 이미지와 Thermal 이미지가 동일한 표면의 초점이어야 하며

FOV (Field of veiw) 가 정확히 일치해야한다.

Structure (Body) ➡ Digital holography

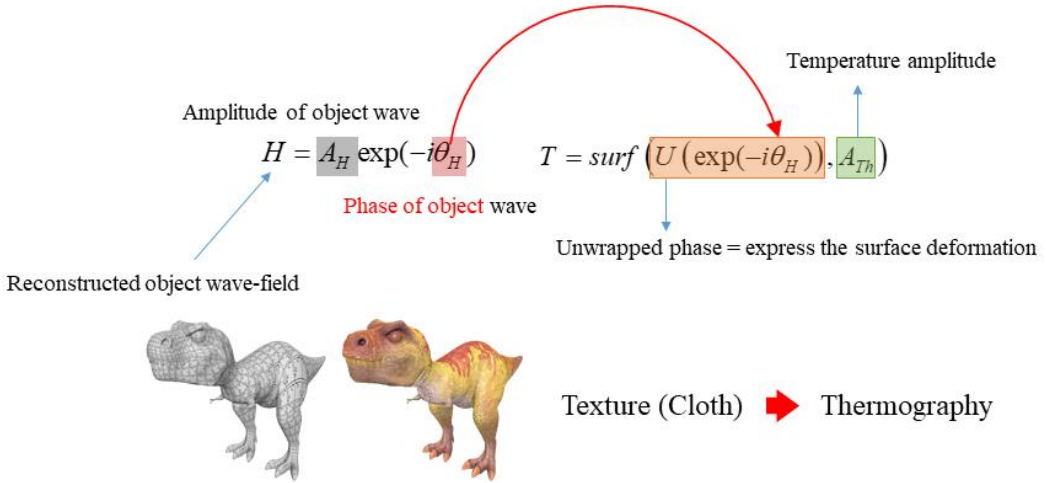


Fig.17 Principle of 3D Texturing method

이는 디지털 홀로그래피의 수치적 복원 과정에서 해결할 수 있다. Digital Hologram의 복원은 수치적으로 완전하며, Reconstruction 거리를 변경함으로써 Longitude axis 에 따라 Object의 Complex Amplitude 를 물체와 CCD 사이의 모든 Complex Amplitude 를 복원할 수 있기 때문이다.

4. Reconstruction method

복원된 홀로그래피는 Object 의 원래의 위치와 동일한, 거리 d 만큼 떨어진 곳에서 관측할 수 있다. 이러한 회절된 빛은 Frensel-Kirchhoff 의 적분으로 식 (16) 과 같이 표현 할 수 있다.

$$\Gamma(\xi', \eta') = \frac{i}{\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) R(x, y) \frac{\exp\left(-i\frac{2\pi}{\lambda} \rho'\right)}{\rho'} dx dy \quad (16)$$

$\Gamma(\xi', \eta')$ 는 복원된 Wave-Field를 의미하며, $h(x, y)$ 는 CCD에 맺힌 Complex Amplitude, 이를 Holography 함수라 부른다. $\rho' = \sqrt{(x - \xi')^2 + (y - \eta')^2 + d^2}$ 는 CCD에서 복원 필드까지의 거리를 의미한다. Digital Holography는 복원과정을 거칠 때, 이미지의 초점을 보정할 수 가 있는데, 이는 Digital Holography 만의 물체의 Amplitude 와 Phase, 두 정보를 모두 포함하는 Complex Amplitude를 계산할 수 있는 특수한 성질 때문이다. 위 식 (16) 을 계산할 수 있는 방법으로 Plane wave expansion method으로도 불리우는 Angular Spectrum 복원법이 있다.

Angular Spectrum 복원법을 이용하여 Object의 Wave정보를 복소 진폭으로 획득할 수 있다. 이는 이미지만 획득하는 기존 사진과는 다른 특유의 장점과 특징을 가지고 있다. 예를 들면 Digital Holography 는 초점 조정이 가능하다는 의미는 물체의 정확한 위치 혹은 높이 정보를 환산 할 수 있다는 의미이다. 또한 조사광에 의한 이미지의 변화는 Phase에 의해 영향을 받는 요소들이기 때문이며 이러한 Phase 는 디지털 홀로그래피의 특성상 수식을 이용한 변형이 언제든지 가능하기 때문이다.

제 3 장 적외선 열화상 카메라를 활용한 반사판 재질에 따른 반사판 효율성 검증

제 1 절 반사판 재질에 따른 온도 변화 분석

적외선 열화상 카메라가 측정하기 어려운 배관의 뒷 부분과 같은 좁은 지역 및 비가시 영역의 결함 측정을 위한 문제를 보완하기 위해 반사판의 활용은 효율적이다. 이러한 반사판의 효율적인 선택을 위해 반사판의 온도 특성 평가를 통한 반사판의 효율을 검증하고자 한다.

1. 반사판 시편 설계 및 시스템 구성

적외선 열화상 카메라와 할로겐 램프를 활용하여 반사판 재질에 따라 각각의 온도 변화에 대한 특성을 파악하기 위해 Fig. 16 과 같이 시스템을 구성하였다. 대상체의 규격은 100mm*100mm*10T 이며, 재질로는 황동 (BS), 탄소강 (SM45C), 구리 (CU), 순철 (SS41), 알루미늄 (AL6061), 유리, 웨이퍼를 선정하였다.

온도 분포 측정 시스템과 할로겐 램프의 위치는 대상체와 1 m 의 간격을 두었으며, 할로겐 램프를 이용하여 반사판에 각 각 5분간 가열하였으며, 각 시편마다 3 회 씩 반복적으로 진행하였다. 동시적으로 열 흡수가 이루어진 반사판의 온도를 적외선 열화상 카메라를 활용하여 반사판의 온도 분포를 측정하였다.

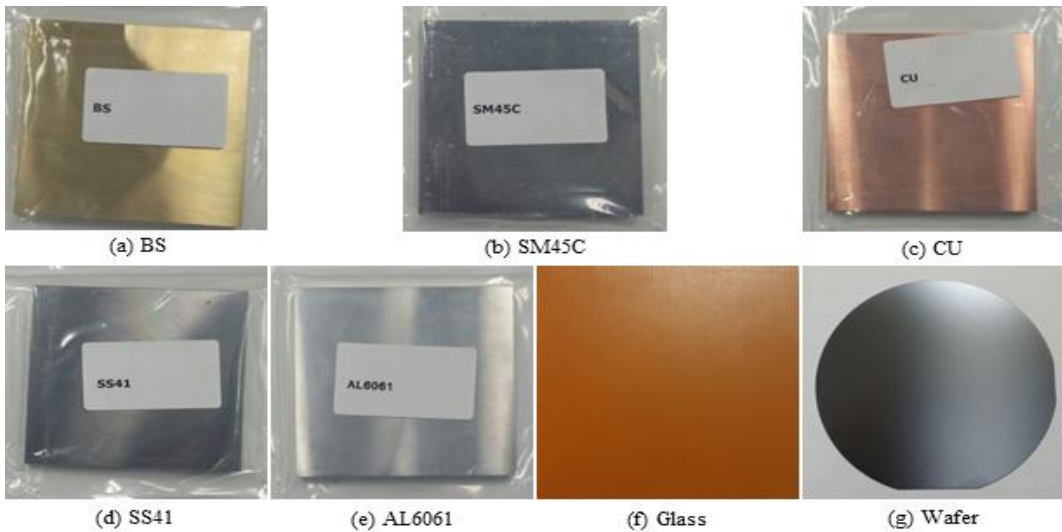


Fig.18 Reflector object (100mm*100mm*10T)

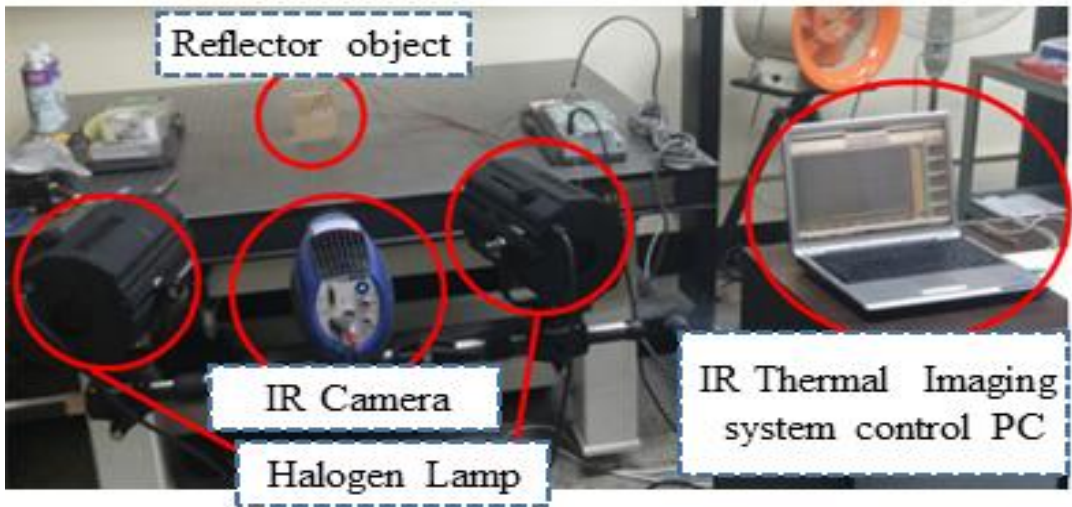


Fig.19 Infrared Thermography System

2. 반사판 재질에 따른 온도 변화 결과 및 분석

본 연구에서는 할로겐 램프를 통해 열에너지가 흡수된 반사판의 에너지 변화율과 열 전도율을 확인할 수 있었다, Table 2. 또한 적외선 열화상 카메라를 통하여 반사판의 온도 변화를 Table 1에 서술하였다.

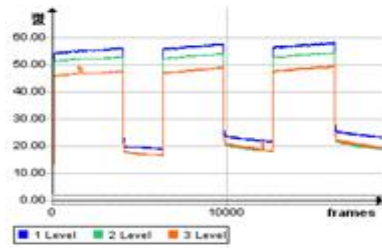
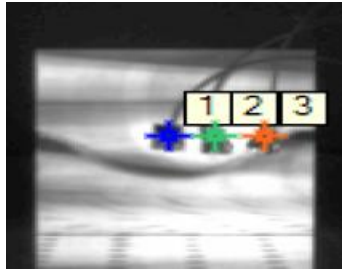
에너지 변화율이 높은 반사판일수록 결함 대상체로부터의 열에너지 흡수량이 높으며, 대상체의 결함을 발견할 확률이 높을 것으로 판단되며, 결과적으로는 철의 함량이 높은 반사판 재질일수록 에너지 변화율이 높음을 알 수 있다.

Fig. 20 에서는 각 각의 재질에 따른 반사판의 시스템 설정에 대한 적외선 열화상 영상과 적외선 열화상 온도 그래프를 확인 할 수 있다.

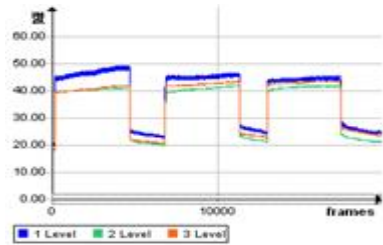
적외선 열화상 영상

적외선 열화상 온도 Graph

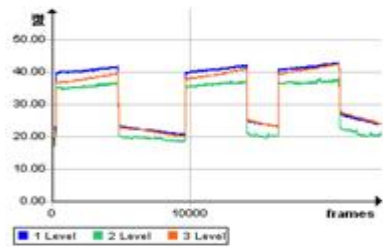
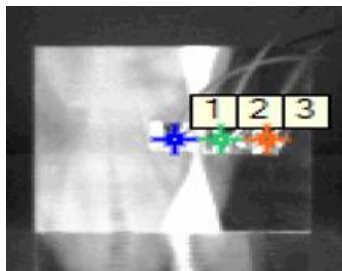
황동
(BS)



탄소강
(SM45C)



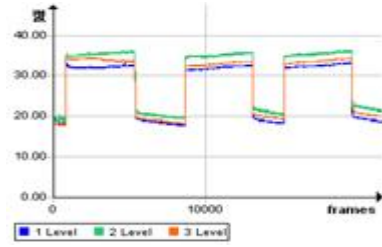
구리
(CU)



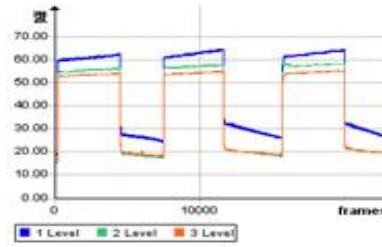
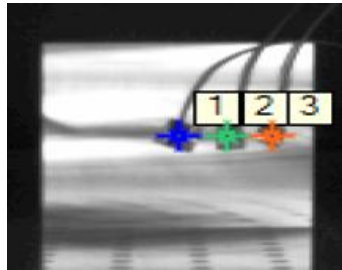
적외선 열화상 영상

적외선 열화상 온도 Graph

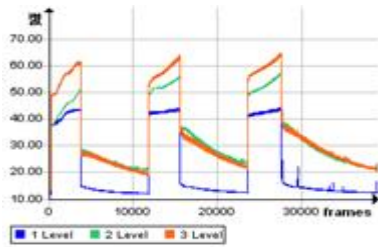
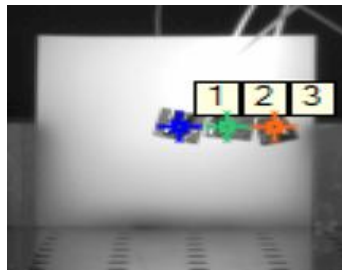
순철
(SS41)



알루미늄
(AL6061)



유리
(Glass)



웨이퍼
(Wafer)

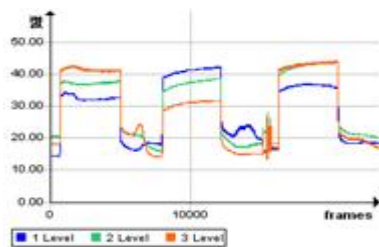


Fig. 20 System configuration

Table 1 The slope of the temperature change per unit time of the reflector (dT/dt)

	<i>1 time</i>	<i>2 time</i>	<i>3 time</i>	<i>Average</i>
Brass	0.010101	0.010526	0.008939	0.009855
Carbon Steel	0.023645	0.024658	0.018182	0.022162
Copper	0.008173	0.006796	0.005769	0.006913
Pure iron	0.035751	0.023585	0.019807	0.026381
Aluminum	0.013462	0.011795	0.010427	0.011894
Glass	0.085465	0.081675	0.074757	0.080633
Wafer	0.027632	0.035366	0.040476	0.034491

Table 2 Thermal conductivity and Energy change of the reflector

	<i>Thermal conductivity</i>	<i>Energy change</i>
Brass	0.1	3.20
Carbon Steel	0.043	8.09
Copper	0.4	2.40
Pure iron	0.045	9.24
Aluminum	0.237	2.89
Glass	0.00057	2.54
Wafer	0.149	0.22

제 4 장 디지털 홀로그래피를 활용한 허니콤 구조 회로 측정

제 1 절 반사형 디지털 홀로그래피 신뢰성 평가

1. 미세구조 측정 배경 및 목적

전자 반도체 제작 시에 활용되는 설계된 전기회로 패턴을 기판 위에 옮기는 과정을 포토 리소그래피 공정이라 한다. 이 때, 설계한 전기회로와 기판 위에 가공되어진 패턴이 높은 정확도를 통해 일치한 전사가 되었는지에 대한 여부는 반도체의 고집적화 연구에서 매우 중요하다. 고집적화 반도체 소자는 동일한 면적에서 메모리 용량을 증가시키는 기술이기 때문이다. 이러한 포토리소그래피 공정에 대한 결함유무를 판단하기 위해 대개는 AFM, FE-SEM, Alpha Step, CIRCLTM Suite 등의 장비를 이용하여 검사한다. 포토리소그래피 공정의 고집적화 공정 중에는 투영 노광 방식이 있다. 이 방식은 원하는 전기회로의 구조로 마스크를 제작하여 이를 유리 기판 위에 빛을 조사하였을 때 발생하는 그림자를 활용하게 되는데, 이 그림자를 통해 기판위에 전사한다.

공정이 완료된 기판의 전기회로 구조를 앞서 언급한 장비들을 활용하여 미세한 구조에 대한 검사를 진행하나 기존의 검사 장비들은 고가의 장비이며, 검사가 가능한 영역이 좁고 시험하고자하는 제품이 소형일 경우 측정 장비의 사이즈와 관계 또한 중요하다. 제품과 측정 장비의 규격이 비례하지 않을 경우에는 제품을 손상시켜 시편을 제작하게 되는 문제점을 야기하며 또한 측정 시간과 처리 시간이 길어지게 된다.

이러한 단점들을 보완하기 위해 반사형 재질의 허니콤 구조 회로 시편을 제작하였으며, 단시간 측정이 가능하도록 Digital Holography 의 측정을 제안하고자 한다. Digital Holography 는 대상체 표면의 정확한 상을 얻지 못한 빛의 파면 정보일지라도 Digital 로 기록하여 자유로운 초점조정을 통해 수치적인 복원이 가능하다. 앞서 언급한 비효율적인 단점들을 승화하여 비접촉식 측정이 가능한 이미지 검사 장비를 구현하였다.

본 연구에서는 포토리소그래피 공정을 통하여 허니콤 형상을 반사형 재질로서 제작하였으며, 현미경을 활용한 Reflection type 의 Digital Holography set-up을 구성하여 대상체의 회로 선에 대한 폭 측정을 진행하였다.

또한 Reflection type 의 Digital Holography 로 측정한 결과 값에 대한 신뢰도 평가를 위해 통상적으로 활용되는 검사 측정 장비인 AFM 과 FE-SEM 으로 비교, 검증하였다. 기존의 접촉방식 검사장비와는 다른 광학적인 비접촉방식의 Digital Holography를 이용한 검사 방법을 제안하였다. 허니콤 패턴이 제작된 시편에는 회로선의 기준을 위해 임의로 9 곳의 측정점을 지정하였고, 선택한 검사장비들로부터 회로선에 대한 측정을 시행하였다. 그 결과를 통해 설계한 회로대로 올바른 전사가 이루어졌는지에 대해 탐구하였다.

Reflection type 의 Digital Holography 의 경우 광학적인 비접촉방식이기 때문에 그 결과 값의 신뢰성을 확인하고자 했으며, 신뢰성 평가를 진행하기 위해서는 통상적으로 활용되는 AFM 과 FE-SEM 으로 결과를 비교하고 검증을 실시하였다.

2. 시험편 제작/설계 및 측정 시스템

가. 시험편

유리로 이루어진 기관 위에 반사형 재질인 Chromium 을 300 nm 도포하였다. 또한 허니콤 구조를 일정한 간격 및 폭을 유지하도록 포토리소그래피 공정을 통하여 Fig. 21 과 같이 시험편을 제작하였다. 또한, Digital Holography, AFM, FE-SEM 를 통해 측정하고 비교하기 위해 Fig. 22 에 표기한 바와 같이 9 지점을 임의로 지정하여 측정하였다.

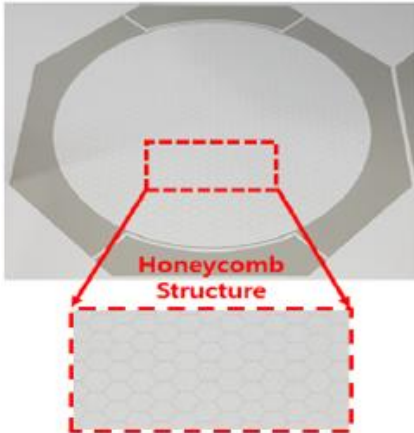


Fig.21 Honeycomb structure specimen

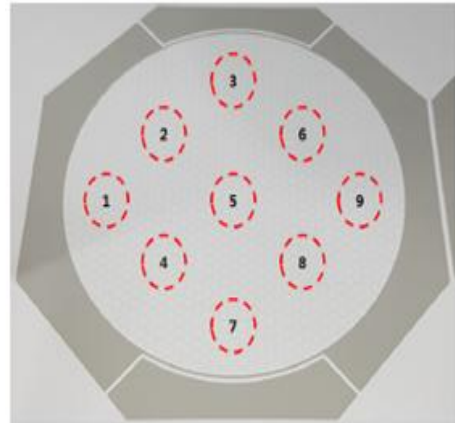
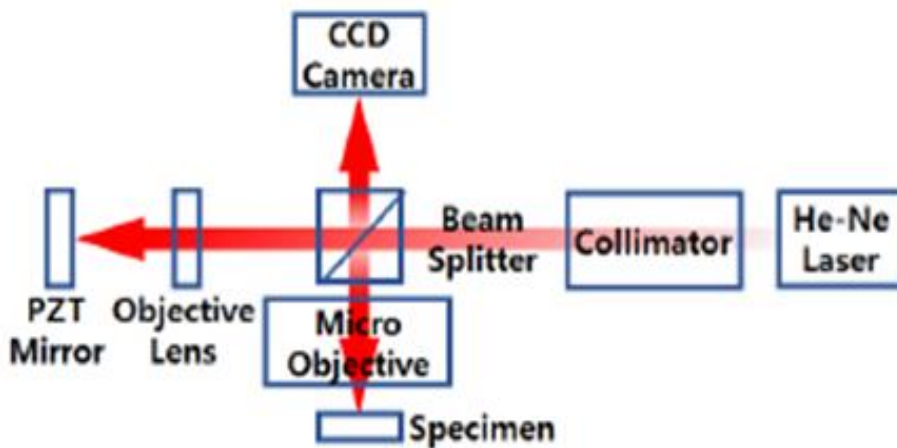


Fig.22 Honeycomb Measurement area

나. Digital Holography

본 연구에서는 Fig. 23 과 같이 현미경을 이용한 Reflection type 의 Digital Holography 를 구현하였다. Michelson Interferometry 를 바탕으로 한 Reflection type 의 Digital holography 는 He-Ne laser, X10 의 배율렌즈, Mirror, PZT, CCD Camera (Point grey 2048×2048) 등을 이용하였다.



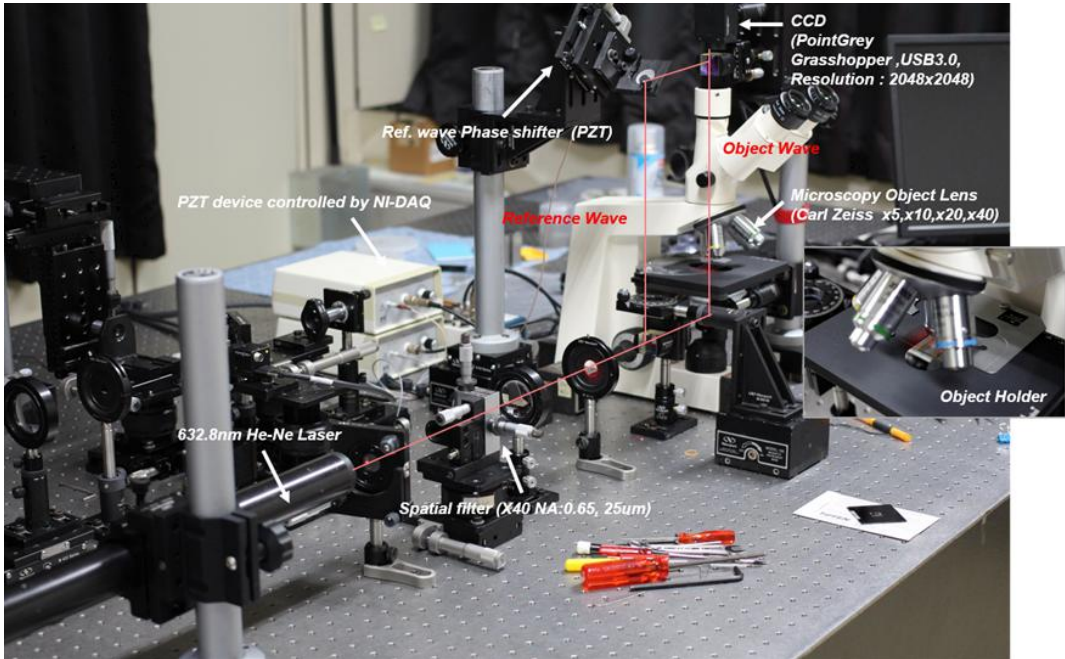


Fig.23 Reflection type of Digital holography

다. AFM (Atomic Force Microscope)

초미세 구조의 대상물의 표면을 최대 1,000만 배의 배율로 획득 가능하며 박막이나 도체, 절연체의 대상물의 손상 없이 표면 형상을 획득할 수 있는 장비인 AFM (Atomic Force Microscope) 은 전기도체 표면의 원자 상에서 측정해야만 하는 STM 의 단점을 보완하여 개발되어진 장비이다. 절연물의 미세한 Probe tip (지름 100Å 이하)과 대상체 표면의 거리가 가까울 경우, 양자의 원자 간에 힘이 작용하게 된다. 이 Interaction(bend or deflection) 을 위치 감응 광 다이오드 검출기 (Position sensitive photodiode; PSPD) 로 측정한다. 본 연구에서는 Fig. 24 에 나타낸 접촉식 검사 장비인 AFM 을 사용하여 측정하였으며 성능은 Table 3 에 나타낸 바와 같다.



Fig.24 AFM(Atomic Force Microscope)

Table 3 Specification of AFM

Model	XE-200 System (PSIA Company)
SPM Head	Contact AFM, DFM, Non-Contact AFM, FMM, Phase Image, Force vs. Distance curve, DC-EFM, Current AFM, I/V spectroscopy
Scan length	100 μm (Low voltage mode : 10 μm)
Scan Speed	2 $\mu\text{m}/\text{sec}$ to 200 $\mu\text{m}/\text{sec}$ or more Vertical range : 262 μm or more
Resolution	< 0.15 nm (Low voltage mode : 0.02 nm)
Zoom optics	500X
Stylus Tip	5 μm or more
Sample size	Up to 200mm \times 200mm, 20 mm thick

라. FE-SEM (Field Emission Scanning Electron Microscope)

본 연구의 신뢰성 확보를 위해 Fig. 25 에 나타난 주사전자현미경 (Field Emission Scanning Electron Microscope) 으로 허니콤 구조 회로선의 선 폭을 측정하였다. 이 장비는 대상체 표면에 전자선을 주사하여 입체구조를 직접 관찰할 수 있어 박막의 형상 측정이나 미세구조를 가진 물체의 검사, 성분 분석, 결함 검사 등에 주로 이용되며 성능에 대한 표는 Table 4 에 나타내었다.



Fig.25 FE-SEM (Field Emission Scanning Electron Microscope)

Table 4 Specification of FE-SEM

Model	Quanta 200 FEG (FEI Company)
Maximum Load Size	50mm × 50mm
Magnification	× 30 ~ × 200
ESEM Resolution	30Kv SE : 1.5 mm Acceleration Voltage : 0.2 ~ 30Kv

3. 실험 결과 및 데이터 분석

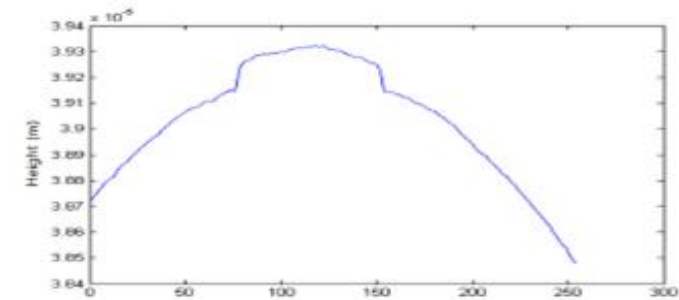
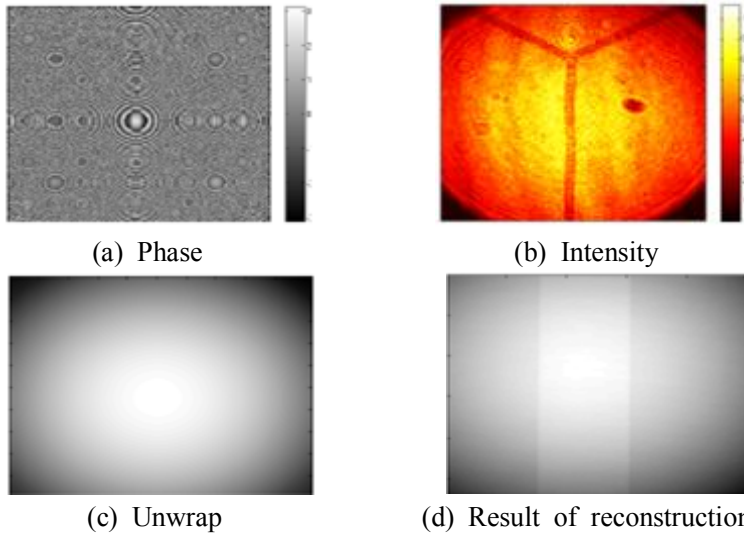
허니콤 구조 회로 선의 폭을 일정하게 제작하였으므로 임의로 지정한 9 지점의 측정 영역을 측정 시 결과 값이 일정하다는 가정 하에 진행하였다. 일정한 결과 값을 확인

하기 위해 디지털 홀로그래피로 측정하였다. Reference wave 와 대상체에서 반사된 Object wave 와의 간섭을 통해 8번의 위상이동을 이용하여 Complex Amplitude 를 계산하였다. 이러한 Complex Amplitude 는 Fig. 26 의 (a) 와 (b) 에 나타난 바와 같이 Complex Amplitude 를 각각의 Phase 와 Intensity 로 나타내었다. 2π 범위 내로 기록되는 위상 정보 값을 Unwrapping 하였다. Unwrap 은 Least square method 를 통해 오차를 최소화하였으며 그 결과는 Fig. 26 의 (c) 와 같다.

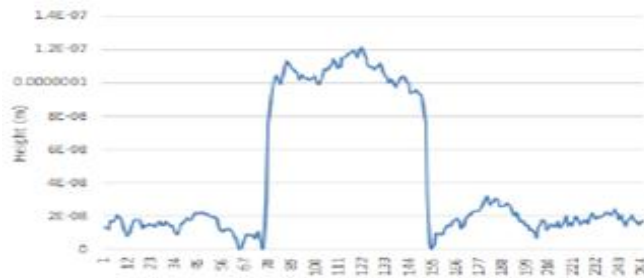
허니콤 구조의 전자 회로 선의 결과 비교를 위해 측정한 AFM, FE-SEM에 Image Profile 값을 확인 한 결과, 측정 시 기준과 대상체로 가는 빛에 각각 다른 배율의 M.O (Micro objective) 를 사용하여 Fig. 26 에서와 같이 Curvature 가 발생하였다.

반사형 디지털 홀로그래피이므로 기준이 되는 면이 없다. 이 때문에 Flat Mirror 를 이용한 위상 차이를 통해 M.O 에 의한 Curvature 를 제거하였다(Fig. 26 (f)). 디지털 홀로그래피는 초점 조절이 유연하여 초점이 맞지 않는 이미지를 획득하여도 복원거리를 조정하여 정확한 상을 획득할 수 있다. 포토리소그래피 공정으로 제작한 회로선의 동일 부에 초점을 맞춰 높이 정보 값을 획득 하였으며 평균적으로 $43.88\mu\text{m}$ 이다 (Table 5). 또한 9 지점의 복원 결과는 Fig. 26 의 (d) 와 Fig. 27 에 나타내었다.

AFM 으로 9 지점에서 $70\mu\text{m} \times 70\mu\text{m}$ 의 범위 내에서 측정한 결과는 Fig. 26 의 (a) 에서 보는 것처럼 3차원 이미지로 확인할 수 있으며 Fig. 26 의 (b) 에서와 같이 Profile 로 형상의 폭을 측정할 수 있다. Table 5 와 같이 측정되며 평균 $45.29\mu\text{m}$ 로 측정되었다. FE-SEM 으로 측정한 결과는 2 차원적으로 확인 가능하며 AFM 측정결과와 비교할 경우 약 3 % 의 편차율, FE-SEM 과 비교하였을 경우에는 0.5 % 의 편차율을 확인할 수 있다. AFM 으로 측정한 결과와는 어느 정도 차이를 보이지만 또 다른 상용 장비인 FE-SEM 으로 측정한 결과와는 흡사하다는 것을 확인하였다.

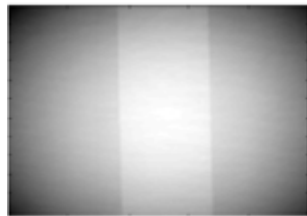


(e) Profile of resized image (120 pixel of Y direction)

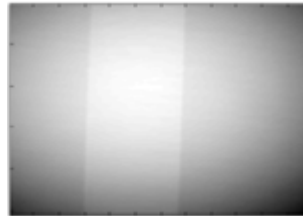


(f) Subtract

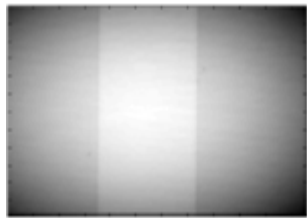
Fig.26 Result of Digital Holography (Point 1)



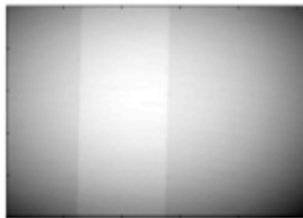
Point 2



Point 3



Point 4



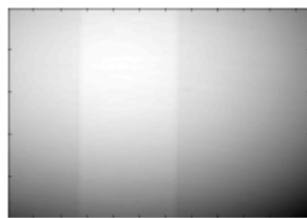
Point 5



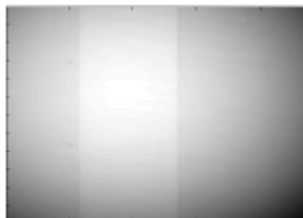
Point 6



Point 7



Point 8



Point 9

Fig.27 Result of reconstruction

Table 5 Result of Digital Holography

Measurement Point	Width (Unit : μm)
Point1	44.00
Point2	44.00
Point3	46.20
Point4	43.45
Point5	43.45
Point6	43.45
Point7	42.90
Point8	43.50
Point9	44.00
Average	44.88

반도체 제작 시 적용하는 Photolithography 공정 중 투영 노광 방식으로 허니콤 구조의 전자회로를 제작하였다. 설계한 바와 같이 정확한 전사를 목적으로 한 Photolithography 공정의 검수를 위해 다양한 상용 장비들이 사용되고 있으며 그 상용 장비들과의 결과 값을 디지털홀로그래피와 비교한 결과 AFM 의 결과와는 3 % 의 편차율을 가지며, FE-SEM으로 측정한 결과와는 0.5%의 편차율을 보이는 것으로 보아 측정 시간과 분해능이 뛰어난 디지털 홀로그래피 기법도 반도체 검사에 충분한 가능성을 보인다고 판단된다.

제 5 장 Measurement of three dimensional surface temperature distribution by hybrid digital holographic imaging system

5 장에서는 Nd:YAG Phase-Shifting 디지털 홀로그래피와 IR Camera 를 이용한 Thermal image 를 융합한 Hybrid Digital Holography 를 소개한다. 융합형 Hybrid Digital Holography 는 Numerical 하게 복원된 Digital Holography 와 IR Camera를 활용한 Thermal image 의 온도 정확도를 유지하며 $3.25 \mu\text{m}$ Spatial Resolution 을 가진다. 이러한 융합된 고해상도 하이브리드 디지털 홀로그래피는 3 차원 Thermal image 와 Microscopy Digital Holography 의 향상된 개선법을 소개한다.

제 1 절 In-line Hybrid Digital Holography의 시뮬레이션 3차원 온도 분포 이미지

1. Principle & Method

Digital Holography 는 대상체의 Amplitude 와 Phase 정보를 얻는 데 상당한 이점이 있으며, Numerical Processing 기술을 활용하여 3 차원 대상체의 Reconstruction 이 가능하다. Digital Holography 의 이러한 중요한 이점은 3 차원 이미징, Phase contrast 이미징, 대상체의 표면 측정 및 기타 다양한 분야에 활용도가 높다. 융합형 디지털 홀로그래피는 Reconstructed wave Field 에서 대상 표면 정보를 포함한 열 정보를 얻기 위한 기술 중 하나이다.

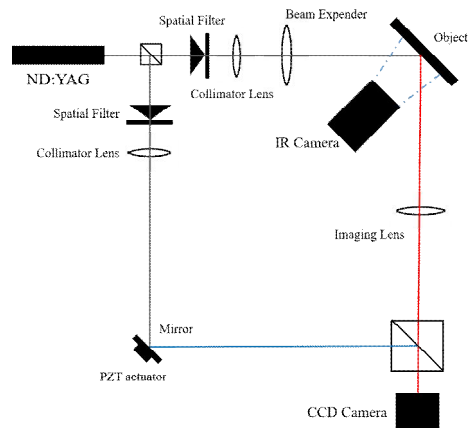


Fig28. Schematic of Digital Holography



Fig29. Digital Holography system

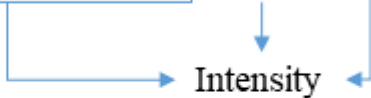
그러나 Digital Holography 의 해상도는 레이저 소스의 파장에 의한 영향을 받는다. 일반적인 IR Digital Holography 는 가시광선 레이저와 함께 사용되는 Digital Holography 보다 낮은 해상도를 가진다. IR Coherent 을 활용하기 위해 중적외선 범위 10.6 μm 파장 CO₂ 레이저를 사용하여 간섭패턴을 얻기 때문이다.

본 논문에서는 Phase-Shifting Digital Holography 와 IR Camera 의 열화상 이미지를 결합한 새로운 Digital Holography 를 소개한다. IR Camera 는 고감도의 열화상 이미지를 얻을 수 있으며 In-line Phase-Shifting Digital Holography 는 정확한 Phase contrast image

를 획득할 수 있다. 우리의 새로운 Digital Holography 는 이 두 가지 측정 시스템의 장점을 활용하였다.

우리의 목표는 Digital Holography 를 활용하여 대상체의 표면 온도와 대상체의 변형 및 결함을 동시에 획득하는 것이다. IR Camera 의 Thermal Image 는 대상체에 대한 Phase 정보를 포함 하지 않는다. 또한 Visible wave 와는 Incoherent 하기 때문에 Digital Holography 의 Phase 정보는 Thermal Image 에 대한 영향을 받지 않는 장점이 있다.

$$|E_1(x, y) + E_2(x, y)|^2 = |E_1|^2 + |E_2|^2 + E_1E_2^* + E_1^*E_2$$



Complex term

$$A_1A_2 \exp(-i(k_1r_1 + k_2r_2)) + A_1A_2 \exp(-i(k_1r_1 - k_2r_2))$$

$$A_1A_2 \exp(-i(\varphi_1 + \varphi_2)) + A_1A_2 \exp(-i(\varphi_1 - \varphi_2))$$

We select the virtual(or real) term and subtract the reference phase



Spatial filtering method

Fig30. Used Spatial domain

따라서 Phase map 을 갖는 Thermal Image 은 식 (16) 에서 표현된 Normalized Unwrap

Phase 와 관련이 있다고 제안했다.

$$\begin{aligned}
 D &= A_m; A_H \exp(-i\theta_H) \\
 T &= A_m + U(\exp(-i\theta_H))
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

A_m 는 IR Camera 으로 표면에 초점을 맞춰 측정된 Thermal Amplitude 이며, θ_H 는 CCD로 측정한 Reconstructed Holography wave-field 의 Phase 이다. U 는 Least square Phase unwrapping process 를 의미한다.

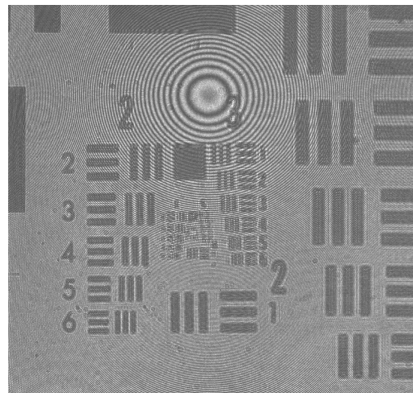


Fig.31 Interference pattern image of negative USAF resolution target using off-axis digital holography.

먼저, Digital Holography 를 활용한 측정을 통해 대상체에 대한 Amplitude 정보와 Phase 정보를 획득한다. Phase-Shifting Digital Holography 의 Interference pattern Intensity 는 식 (17) 에서 표현하였다.

$$I_N = I_R + I_O + 2\sqrt{I_R I_O} \cos(\theta_N)
 \tag{18}$$

I_R 과 I_O 는 Reference wave 와 Object wave 의 Intensity 를 나타내며 위상 $\theta_N = \theta_{R,N} - \theta_O$ 는 Reference wave 와 Object wave 의 위상 차이를 나타낸다. CCD 에서의 Wavefront 는 Complex Amplitude 를 Estimate 하기 위하여 Reference wave 를 Interframe Intensity Correlation (IIC) 이라 불리는 방법을 이용하여 8 - Step 이동시켜 Inteference pattern 을 얻어낸다. Wavefront 를 추정하기 위한 간섭되어진 Intensity 분포 에 비례하는 Digital Holography function $h(x,y)$ 이다. $h(x,y)$ 는 앞서 표현한

Coherent 한 두 Field 의 간섭을 통해 계산 되어진 것을 의미하며 식 (19) 에 나타내었다.

$$h(x,y)=|E_O|^2+|E_R|^2+E_R^*E_O+E_O^*E_R \quad (19)$$

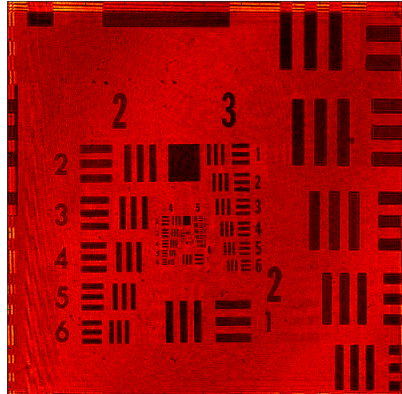


Fig.32. Reconstructed digital holography of USAF resolution target from Fig. 26

Digital Holography Reconstruction 과정에서 Reference 광원이 홀로그램에 조사되며, 대응하는 Complex Field를 곱하여 수치적인 표현이 가능하다. 서술한 식 (20) 은 조사되는 광원에 수직으로 배치된 Aperture 에서 광원의 회절을 Fresnel-Kirchhoff integral 을 통해 설명한 것이다.

$$\Gamma(\xi',\eta')=\frac{i}{\lambda}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}h(x,y)E_R(x,y)\frac{\exp(-i\frac{2\pi}{\lambda}\rho')}{\rho'}dxdy \quad (20)$$

$\Gamma(\xi',\eta')$ 은 Reconstructed Holography wave-field 이며, $\rho'=\sqrt{(x-\xi')^2+(y-\eta')^2+d^2}$ 은 홀로그램 면과 복원면의 거리이다. ρ' 은 Reconstructed Holography 의 Image-plane 이 결정되어지는 요소이며, Object 표면에 대한 Wave-Field 초점과 관련이 있다. Numerically reconstruction wave-field 는 Plane wave expansion method 로 알려진 Angular spectrum method 를 통해 Wave-field 를 복원 할 수 있다. Reconstructed Wave-Field 는 대상체 표면에 대한 Amplitude 와 Phase 정보를 포함한다. Thermal Image 와 Digital Holography 의 Amplitude 와 Phase 정보와 겹쳐지게 되는 것이다.

2. Simulation result

Newport negative USAF Target 을 2048×2048 Pixel size $5.5 \mu\text{m}$ CCD (Point grey Grasshopper 3) 를 활용하여 측정하였다. Piezo Actuator 를 이용하여 8 steps Phase-Shift 되어진 Interference pattern (Fig.27) 을 얻었고 실제 Thermal Image 를 획득하여 결합하기 전 Fig.27 와 같은 임의의 Thermal Image 를 활용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 임의의 Thermal Image 는 Reconstructed Holography 의 Amplitude 를 기반으로 하였다. 16 bit Amplitude 를 Binary image 로 분할하였으며, 라인의 한 부분을 강조하였다. Fig.(28)에서는 Thermal Image 와 Unwrapped Phase 가 겹쳐진 상을 보여준다. 우리는 1 ~3의 Intensity line profile 을 활용하여 Group 5 의 부분의 해상도를 확인한다. 평균적인 Lateral resolution 은 $3.25 \mu\text{m}$ 이다.

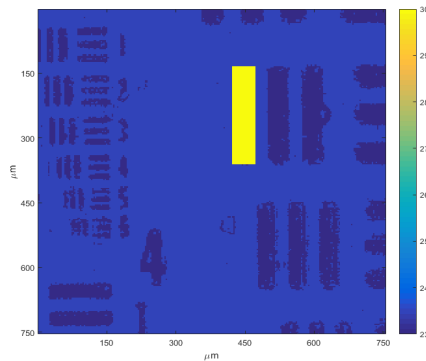


Fig.33. Arbitrary binary thermal image from amplitude of reconstructed digital holography.

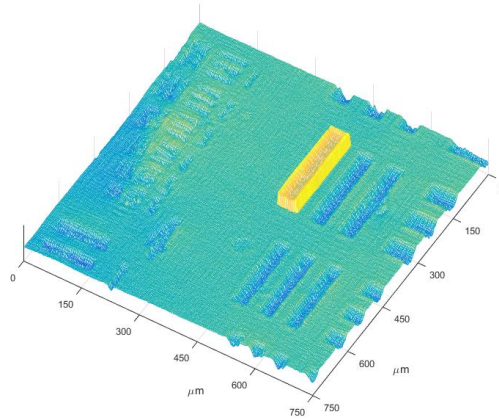


Fig.34. Simulation result of our superposed thermal image with phase deformation method

3. Conclusion

Digital Holography Image 와 Thermal Image 를 겹치는 시뮬레이션을 통해 표면 변형 열 정보를 확인할 수 있다. 이러한 방식으로 대상체의 표면에 대한 3 가지 종류의 정보를 얻을 수 있으며 대상체 표면과 일치하는 3차원 열 정보를 획득하였다.

이 방법은 Optical Digital Holography 해상도를 활용하기 때문에 높은 Lateral resolution 과 Axial resolution 을 기대할 수 있다. 이러한 Hybrid Digital Holography 는 숨겨진 손상 부, 역동적인 표면 온도 변화를 포함한 다양한 입체적 표면 변형에 대한 검사를 요구하는 방면에 새로운 Micro Thermography 를 제안할 수 있다..

새로운 이 방식은 Target 의 표면의 균열에 대한 발열 현상을 포함한 영향을 조사하였다. 현재 Fig. 25 과 같이 IR Camera (FLIR SC5500, 320×256 , 중적외선 파장 $2.5\mu\text{m} \sim 5.1\mu\text{m}$, temperature accuracy $\pm 1\%$) 와 In-line Phase-Shifting Digital Holography 을 활용하여 구성하였다.

제 6 장 Dynamics hybrid digital holography for simultaneous measurement of phase and thermal image

제 1 절 Hybrid Digital Holography의 3차원 온도 분포 이미지

1. Principle & Method

Digital Hologram Recording 의 기본 개념은 Fig. 30 에서 확인할 수 있다. 평행한 Reference wave 와 대상체에서 반사되어진 Object wave 는 CCD 표면에서 간섭되어진다. 이처럼 생성되어진 Hologram 은 전자적으로 기록되고 저장된다. 대상체는 일반적으로 CCD 로부터 거리 d 에 위치하는 확산 반사 표면을 가진 3차원적 객체이다. 이 과정은 수학적으로 다음과 같이 설명된다.

$$\begin{aligned} O(x,y) &= o(x,y)\exp(i\phi_o(x,y)) \\ R(x,y) &= r(x,y)\exp(i\phi_r(x,y)) \end{aligned} \quad (21)$$

O 는 Object wave의 Amplitude o 와 Phase ϕ_o 를 나타내며 R 은 Reference wave 의 Amplitude r 와 Phase ϕ_r 를 나타내는 Complex Amplitude 이다. 이 두 광원은 모두 CCD의 표면에서 간섭되어진다. 이 Interference pattern Intensity 는 Complex Amplitude 의 합의 제곱이며, “ * ” Conjugate Complex 에 의해 계산되어진다.

Off-axis Digital Holography 에서 식 (21) 는 Spatial frequency 영역을 표현하는 4 개의 Complex amplitude 이다.

$$\begin{aligned} I(x,y) &= |O(x,y) + R(x,y)|^2 \\ &= (O(x,y) + R(x,y))(O(x,y) + R(x,y))^* \\ &= O(x,y)O^*(x,y) + R(x,y)R^*(x,y) \\ &\quad + O(x,y)R^*(x,y) + O^*(x,y)R(x,y) \end{aligned} \quad (22)$$

Amplitude r 와 Phase ϕ 를 나타내는 Complex Amplitude 이다. 이 두 광원은 모두 CCD 의 표면에서 간섭되어진다. 이 Interference pattern Intensity 는 Complex Amplitude 의 합의 제곱이며, “ * ” Conjugate Complex 에 의해 계산되어진다.

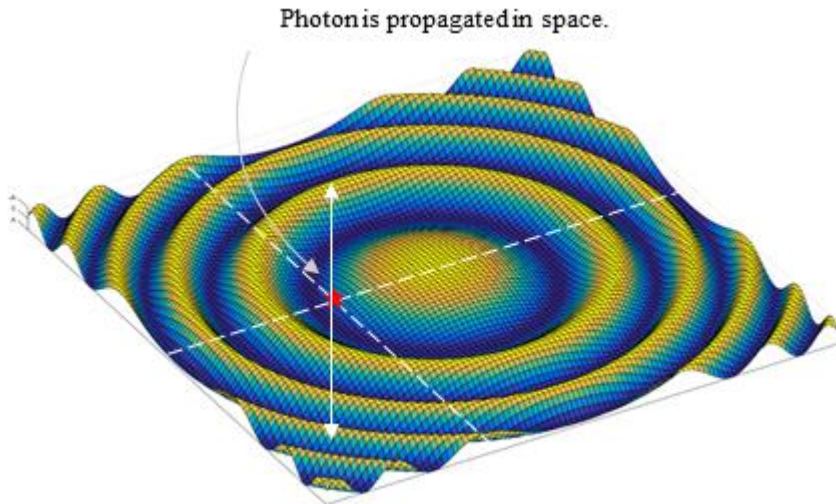


Fig.35. Off-axis Digital Holography interference pattern

앞서 언급한 바와 같이 Off-axis Digital Holography 에서 식 (22) 은 Spatial frequency 영역을 표현하는 4 개의 Complex amplitude 이다. 첫 번째 term 인 $O(x,y)O^*(x,y)$ 와 두 번째 term 인 $R(x,y)R^*(x,y)$ 는 Autocorrelation term 이다. 이 Autocorrelation term 은 Spatial frequency 영역의 중심부로 표현된다. 세 번째 term 인 $O(x,y)R^*(x,y)$ 와 네 번째 term $O^*(x,y)R(x,y)$ 은 대상체에 대한 Twin image 와 Real image 이다. Twin image 는 Virtual image 라고 하며, 기록된 대상체의 원래 위치에 나타난다.

Real image term 을 복원하기 위해서는 Autocorrelation term 과 Virtual image term 을 Spatial filtering method 나 Phase shifting method 를 활용하여 제거하여야한다. Real image term 또는 Virtual image term 중 하나의 term 을 획득하여도 무방하나 간섭계의 구성에 따라 복원된 이미지의 해상도는 달라질 것이다. Spatial filtering method 나 Phase shifting method 는 복원된 이미지의 해상도의 향상을 증진 시킨다.

6 장에서는 Spatial filtering method 를 활용하였으며, 결과는 Experiment result 에서 확인 할 수 있다.

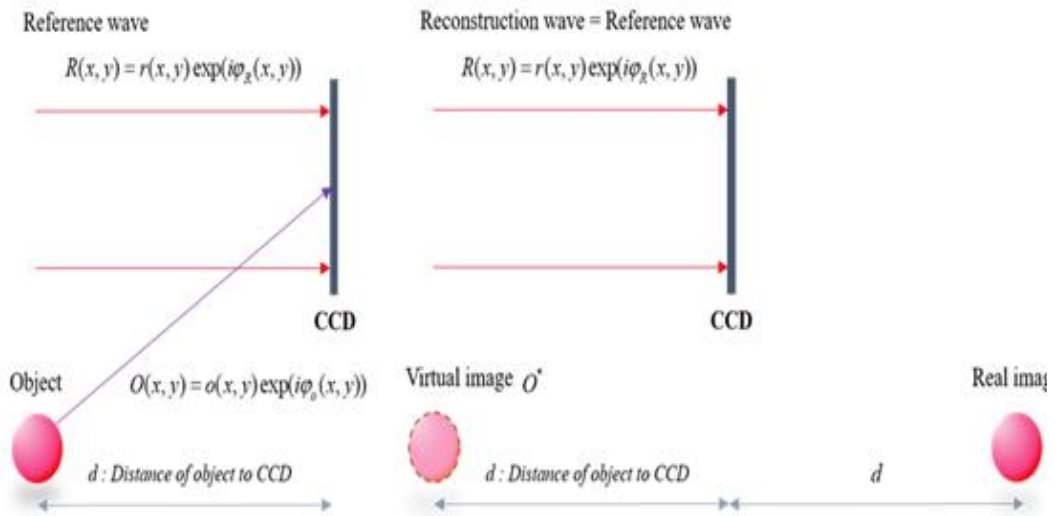


Fig.36. Digital Holography recording and Reconstruction with reference wave

Object wave-field 는 Fig. (36) 과 같이 CCD 로부터 거리 d 에 위치한 대상체에서 반사되어 확산된다. 회절되어진 Pattern 은 CCD 평면 뒤의 거리 d 에서 계산되어진다. 즉, Real image 의 평면에서 Complex Amplitude 를 복원한다는 의미이다. 광원의 이러한 회절은 Fresnel-Kirchhoff integral 에 의해 다음과 같이 설명되어진다 식 (23).

$$\Gamma(\xi', \eta') = \frac{i}{\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) R(x, y) \frac{\exp(-i \frac{2\pi}{\lambda} \rho')}{\rho'} dx dy \quad (23)$$

$\Gamma(\xi', \eta')$ 는 복원된 Wave-field 이며, $h(x, y)$ 는 Hologram Function 이라하는 CCD 에서의 Complex Amplitude 이다. $\rho' = \sqrt{(x - \xi')^2 + (y - \eta')^2 + d^2}$ 은 Hologram 의 평면과 복원 평면과 중심부의 사이 거리를 의미한다. 또한 Digital Holography 는 Numerical wave propagation 에 의해 복원된 Complex Amplitude 를 갖는다.

Digital Holography 는 복원과정에서 Intensity 뿐만 아니라 Phase 도 계산이 가능하다

는 독특한 특성을 가져 이미지 초점 조정이 가능하다. 식 (23) 을 계산하기 위해 Plan wave expansion method 로 알려진 Angular spectrum method 를 활용하였다.

앞서 서술하였듯 Thermal image 와 Digital Holography 를 결합하기 전 복원된 Digital Holography image 와 IR Camera 를 활용한 Thermal image 를 기하적으로 일치시켜야한다. 이 두 종류의 이미지는 3차원 이미지 T 로 표현하며, Texturing function *surf* 를 활용한다. 식 (24)

$$\begin{aligned} \Gamma &= A_H \exp(-i\varphi_H) \\ T &= \text{surf}(U(\exp(-i\varphi_H)), A_{Th}) \end{aligned} \quad (24)$$

Γ 는 CCD 로 측정된 Digital Holography 의 복원된 Object plan wave-field 이며, Amplitude A_H 와 Phase φ_H 를 포함한다. 2D Least square phase unwrapping function U 에 의해 복원되어진 Object Phase 를 해결 하였다. Unwrap Phase는 대상체의 표면 변형 정보를 포함하고 있으며, A_{Th} 는 IR Camera를 이용해 대상체의 표면에 초점을 맞춘 Thermal Amplitude 이다. 이 3 차원 이미지는 동시에 대상체의 표면정보와 온도분포 정보를 나타낸다.

2. Experiment results

실험에 사용된 Off-axis Digital Holographic micro system 의 개략도는 Fig. 38.1 에서 확인 할 수 있다. 선형 편광되어진 Nd:YAG laser (2W, 532.8nm) 을 이용한 광원이 Collimate 하게 조사되며 Object wave 와 Reference wave 로 분할된다. 이 Digital Holography 간섭계는 Mach-Zenhder interferometry 를 기반으로 하며 Reference beam 은 Flat Mirror 에서 반사되어진다. Object beam 과 Reference beam은 CCD Camera (Point-grey 3, 2048×2048 pixels, 5.5 μm × 5.5 μm pixel size, 16 bits, 60 frame per second) 앞에 배치된 Beam splitter 로 조사되어진다. Fig.38 과 같이 USAF Resolution target (Newport) 의 간섭패턴을 확인 하였으며, IR Camera (FLIR SC5500, 320×256, mid Infrared waveband 2.5 μm ~ 5.1 μm) 로 Thermography 를 획득하였다.

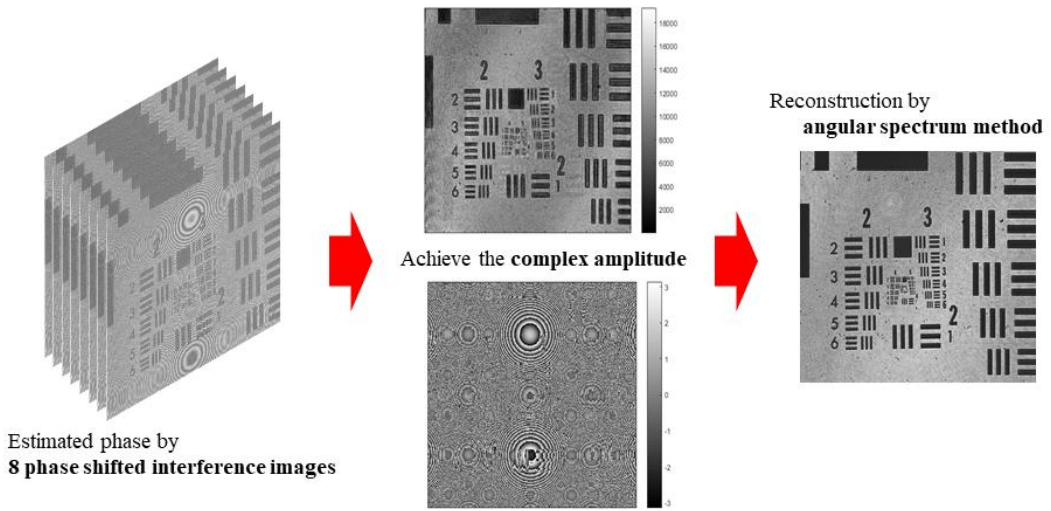


Fig.37. Reconstruction progress of digital holography

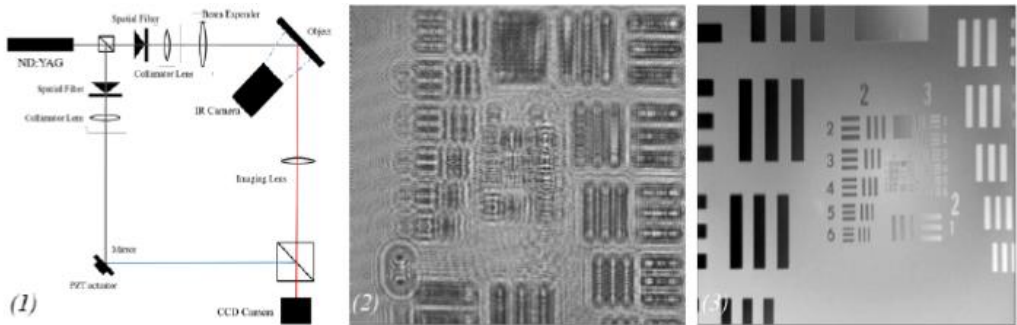


Fig.38. (1) Schematic of off-axis digital holography set-up
 (2) Interference pattern, which used digital holography function from CCD
 (3) Thermography from Infrared camera

시스템의 FOV (Field of View)는 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 이며, 할로겐 램프로 대상체를 가열 하면서 동시에 IR Camera 를 활용하여 열화상을 획득한다. 20 초 동안 IR image 와 Digital Holography 를 60 frame video file 로 recording 하였다. 또한 Video file 은 두 이미지의 결합이미지 획득을 위해 동일한 시간에 측정하여 분석하였으며 3차원적 온도 분포이미지를 완성했다. Real image term 만을 복원하기 위해 Fig.39 과 같이 Interference image 의 2D Fourier spectrum 을 분석하였다. 간섭패턴의 Fourier spectrum 은 Autocorrelation, Real, Virtual 을 보여준다. 복원 이미지 해상도를 증진하기 위해 Fig.

39.2 와 같이 Spatial filtering method 을 통해 Autocorrelation term 과 Virtual term 을 제거하였다. 또한 Fresnel angular spectrum (Plane wave expansion) method 에 의해 초점이 맞지 않는 Digital Holography 를 recording 하여 복원할 수 있다. Fig. 38.1 초점이 맞춰진 평행한 면은 CCD 와 16.5 cm 떨어진 거리에 위치한다.

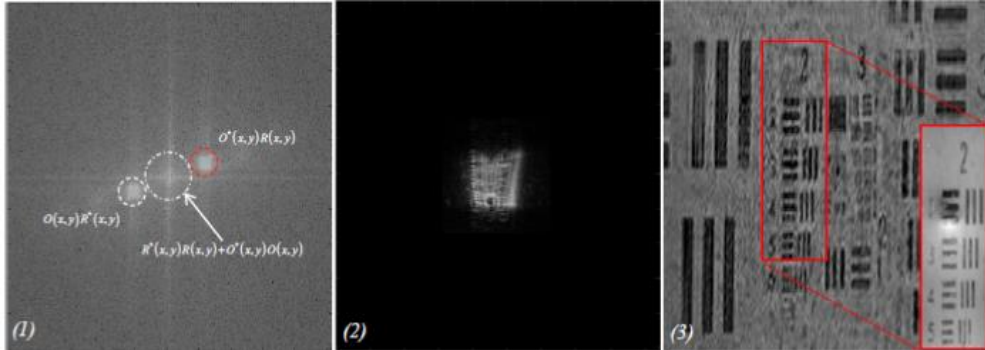


Fig.39. (1) Fourier spectrum of interference pattern
 (2) Filtered Fourier spectrum image. We filtered except the real image term in red circle of (1)
 (3) The amplitude of reconstructed digital holography. the red box is phase of reconstructed

복원된 Digital Holography 의 Group 2 , element 3 에서 Lateral Resolution 은 $2.5 \mu\text{m}$ 였으며, 깨끗하고 선명한 표면 Phase 분포를 나타내는 Axial Resolution은 $0.75 \mu\text{m}$ 이다. Thermal image 와 결합하기 위해서는 복원된 Digital Holography 의 Amplitude 를 활용하여 일치시켜야 한다. 결과, 복원된 Digital Holography 는 87 % 축소되었으며, 시계반대방향으로 0.4 도 기울기를 확인 할 수 있었다. 그 뒤, Thermal image 와 Unwrapped Phase 를 겹쳤다.

이러한 Image 는 Fig. 40 Resolution target 과 같이 기존의 2D Thermal image 로 3차원 열화상 검사로는 감지할 수 없는 표면 결함을 확인 할 수 있다. Fig. 41 과 같이 60장의 video image 모든 frame 에 적용하여 이 표면 높이 정보의 결과를 통해 알루미늄 코팅 표면과 Si 기관의 열 정보를 구별할 수 있었으며 3 차원 Thermal image 를 동적으로 분석할 수 있음을 확인하였다.

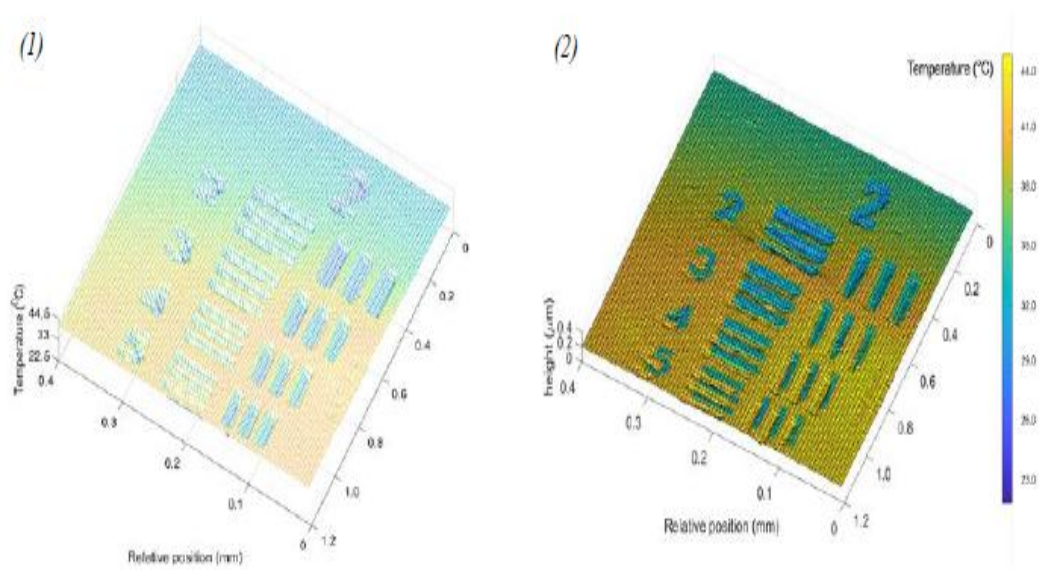


Fig.40. (1) Conventional 3D thermography which 2D thermography
(2) The result of superposed thermal image with surface deformation

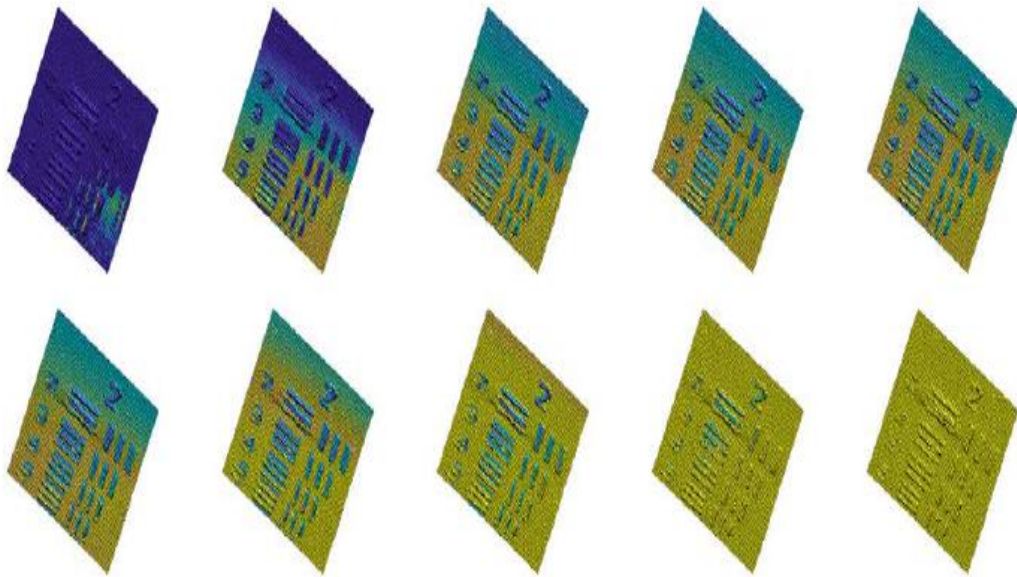


Fig.41. The result of superposed thermal image with surface deformation using dynamic holography. This image-set represents 3D thermal information at interval of 1.5 sec.

제 7 장 Three-Dimensional thermal image of honeycomb structure lap on wafer using United Digital holography

제 1 절 Background of Research

본 연구에서는 Digital Holography 를 이용한 Micro / Nano 단위의 구조물에 발생하는 잠닉손상을 정밀 진단 가능한 광융합 비파괴평가 기술에 대한 것이다. 본 연구를 통하여 연구된 기술은 다음과 같이 활용될 것으로 기대할 수 있다. 물체 표면의 높이와 이미지 정보를 동시에 획득할 수 있는 Digital Holography 의 장점을 재해석하여 물체의 온도 분포에 대해 한눈에 확인 가능한 Thermal image 와의 융합 연구는 기존의 IR Digital Holography 분해능의 한계를 극복한 3 차원 이미지 연구에 응용될 수 있다. 본 8 장에서 소개하는 Hybrid Digital Holography 는 열 특성을 고려하기 위한 분야와 같이 미세한 대상체에서 발열이 이루어지는 LED 소자나 디스플레이 산업, 반도체 산업 등에서 열 저항을 통해 초래하는 미세 결함의 초기 발견이 미흡한 산업에 높은 활용도가 이루어 질 것으로 전망한다.

1. Principle & Method

IR Digital Holography 는 복원된 Wave field 에서 대상체 표면의 온도 정보를 획득하는 기술 중 하나이다. IR Digital Holography 는 가시광선 영역의 광원을 사용하는 일반적인 Digital Holography 와는 달리 낮은 해상도를 가진다. 이를 극복하기 위해 수평 분해능과 온도 민감도의 저하를 상승시키고자 장파장이 아닌, 파장의 영역에서 독립적인 성향을 지닌 가시광선 영역의 Digital Holography와 Thermography 를 결합시켰다.

덧붙여 Digital Holography는 높은 표면 높이 분해능을 지닌 3 차원 광학 측정의

장점을 지니고 있지만 광원이 물체 내부를 투과하지 못하는 경우 내부 손상에 대한 정보를 확인 할 수 없다. 이러한 고질적인 문제를 해결하고자 3 차원 Image Rendering을 활용하였다. 식 (17). 두 이미지의 결합의 신뢰도를 높이기 위해서 양 이미지간의 촬영 영역, 초점 영역 및 광축이 일치해야한다. 이 방법은 3D Surface Texturing Function을 기반으로 한다.

수치적으로 복원된 Digital Holography 는 $2 K \times 2 K$ Pixels 이며, FOV 1cm^2 의 $3.25 \mu\text{m}$ Spatial resolution 이며, IR image 는 320×256 Pixels 로서 FOV 4cm^2 의 $6.5 \mu\text{m}$ Spatial resolution 및 $\pm 1 \%$ 온도정확도를 가지고 있다. Hybrid Digital Holography 는 서로 다른 광학적인 축과 시야각을 가진 측정 시스템으로부터 획득하였기 때문에 고도의 정밀한 표면 매칭을 필요로 한다.

Digital Holography 는 Micrometer 단위의 Dynamics Digital Holography 촬영을 위하여 Off-axis set-up을 구성하였으며, Fourier Filtering method 를 이용하여 한 장의 간섭 이미지로 초점이 올바른 상을 복원하였다.

$$\begin{aligned}
 H &= A_H \exp(-i\theta_H) \\
 T &= \text{surf}\{U[\exp(-i\theta_H)], A_H\}
 \end{aligned}
 \tag{25}$$

가. Reconstruction of digital holograms on arbitrarily-tilted planes

일반적인 Digital Holography 에서 평행 이미지 평면상의 Complex wave-field 는 Fresnel transform, Convolution method 및 Angular spectrum method (ASM)를 활용하여 Complex Hologram wave-field 로부터 수치적으로 복원된다. Angular spectrum method는 Propagation 거리 “ d ” 에 대한 제한이 없는 것이 장점이며, 이 기법을 기반으로 하여 임의의 기울기를 가진 평면에서 Complex wave-field를 정확히 복원이 가능한 3-axis rotation scheme 를 활용하였다, 식 (26). Digital Holography 로 복원된 기울기를 가진 이미지 평면상의 Complex wave 의 분포는 이미지의 평면상의 Propagation 의 차이를 계산하여 시뮬레이션 하는 것을 의미한다.

Standard transformation matrix 는 회전된 Wave vector 와 관련한 구성요소의 Spatial frequency인 k_x 와 k_y 를 고려하기 위해 y 축에서 θ_T 의 각도를 조정할 수 있으며, Spatial frequency transformation 에 따라 Fourier transform \mathcal{F} 를 활용하여 Rotated angular spectrum 은 식 (26) 으로 표현 가능하다.

$$U(x, y; \theta_T) = \int \mathcal{F}\{U(k_x \cos \theta_T - \tilde{w} \sin \theta_T, k_y)\} e^{i(k_x x - k_y y)} dk_x dk_y \quad \text{식 (26)}$$

모든 복원된 Object field 평면은 Hologram plane 위에 Object field 의 다음과 같은 변환으로부터 획득할 수 있다, 식(27).

$$U(X, Y; d; \theta_T) = \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}\{U(x, y; \theta_T)\} e^{ik_x d}\} \quad \text{식 (27)}$$

나. Phase detection autofocusing

Digital Holography는 복원된 Digital Holography 의 Intensity 와 Phase를 계산할 수 있는 고유한 특성 때문에 Reconstruction Process 에 초점을 맞춘 영상으로 조정한다. PDAF Algorithm 은 Minolta 에서 개발되었으며, 1985년 Maxxum camera system 에 도입되었다. PDAF method 의 기본 개념은 얇은 이중렌즈 공식을 기반으로 하여 정확한 초점 평면의 위치를 결정하는 것이다. 분리 렌즈의 렌즈 특성과 위치는 광학 축에 대해 대칭을 이루며, PDAF 는 들어오는 빛을 이중 분리 렌즈 이미지 쌍으로 나누어 위치를 비교함으로써 차이를 보인다. 대상체를 앞뒤로 이동하게 되면 렌즈 이미지 위치는 수직으로 바뀌게 된다.

2. Experiment results

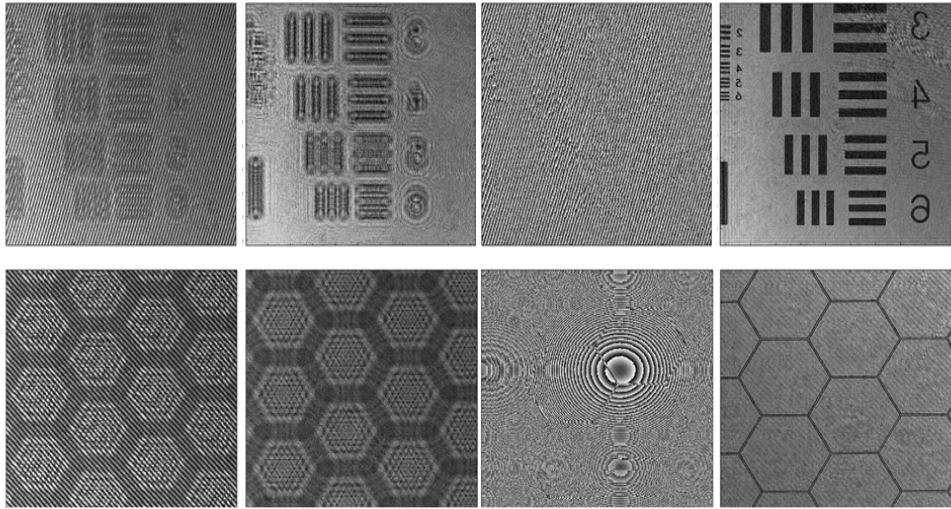


Fig.42. The result of honeycomb structure lap on wafer using United Digital holography

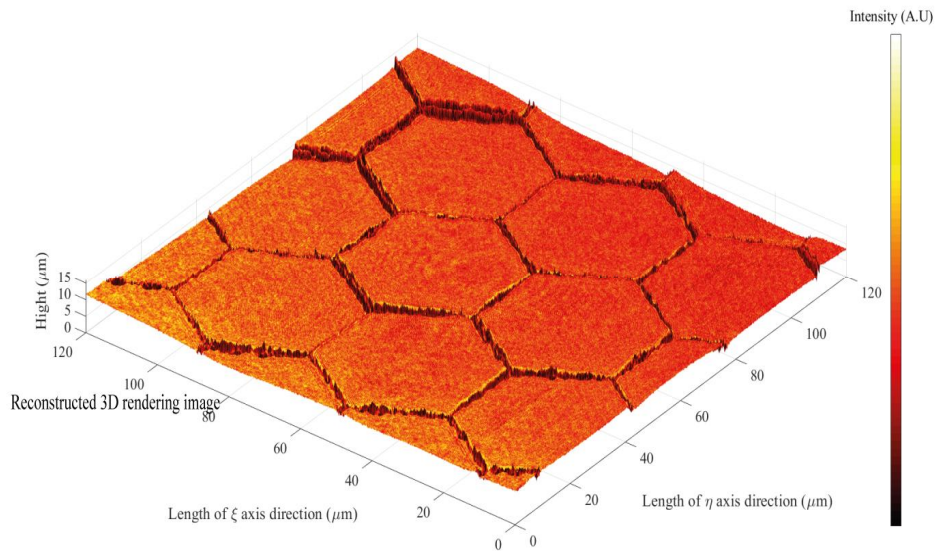


Fig.43. Reconstructed digital holography of Honeycomb structure lab on wafer

또한 Digital Holography Reconstruction Algorithms을 GUI Program 으로 구성하였다. 이 프로그램은 이용자들의 직관적인 이용이 가능하도록 Digital Holography 자동 복원 및 광학 단층 촬영 이미지 복원 또한 가능하다.

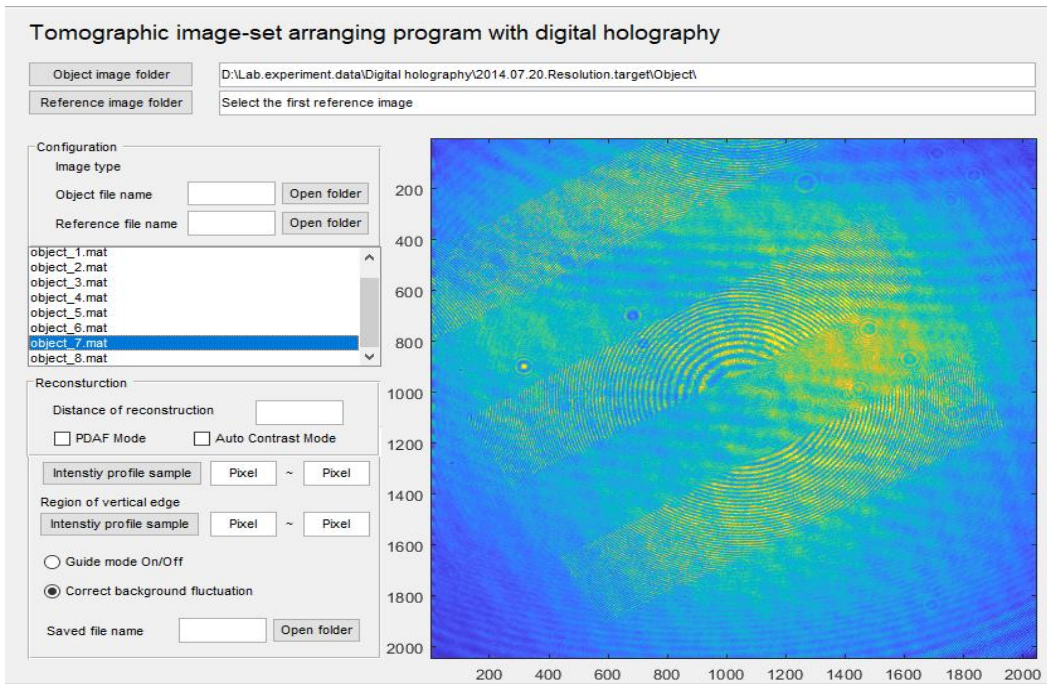


Fig.44. GUI digital holography restoration program implemented by MATLAB

REFERENCES

1. 적외선 열화상 카메라를 이용한 온도측정의 원리, 임강민, 제 8회 설비진단기술강습회, 2009.3, 373-388 (16 pages)
2. R.D.Hudson,Jr. , “적외선 시스템 공학”, jhon wily&Son,1969
3. D. Gabor, “A new microscopic principle”, Nature, 161, 777, 1948
4. L. Yaroslavsky, “Digital Holography and Digital Image Processing”, Kluwer Academic Publishers, Boston, 2004
5. Schnars. U and Jüptner, W, “Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction”, Applied Optics, 33(2), 179-181, 1994.
6. M. Pasquale et al., “Recent advances in holographic 3D particle tracking”, Advances in Optics and Photonics, 7, 4, 713-755, 2015
7. L. Tatiana et al., “Practical algorithms for simulation and reconstruction of digital in-line holograms”, Applied Optics, 54, (9), 2424-2434, 2015
8. Y. Tajumi et al., “Three-dimensional mapping of fluorescent nanoparticles using incoherent digital holography”. Optics Letters, 40, (14), 3312-3315, 2015
9. W. Yingchun et al., “Direct measurement of particle size and 3D velocity of a gas - solid pipe flow with digital holographic particle tracking velocimetry”, Applied Optics, 54, (9), 2514-2523, 2015
10. M. Vollmer, “Infrared Thermal Imaging”, Wiley-VCH, 2010
11. M. P. Georges, et al., “Combined holography and thermography in a single sensor through image- plane holography at thermal infrared wavelengths”, Optics Express, 22, 21, 25517-25529, 2014
12. K. Tadashi, et al., “Simultaneous measurement of temperature and chemicalspecies concentrations with a holographic interferometer and infrared absorption”, Applied Optics, 45(22), 5725-5732, 2006.
13. M. Locatelli, et al., “Imaging live humans through smoke and flames using far-infrared digital holography”, Optics Express, 21, 5, 5379-5390, 2013.
14. P. Ferraro, et al., “Infrared digital holographic imaging”, SPIE Newsroom, 10.1117/2.1200802.0991.
15. G. Pinhas, et al., “Fast phase processing in off-axis holography using multiplexing with

- complex encoding and live-cell fluctuation map calculation in real-time”, *Optics Express*, 23, (7), 8773- 8787, 2015
16. H. Y. Yun and C. K. Hong, “Interframe intensity correlation matrix for self-calibration in phase-shifting interferometry”, *Applied Optics*, 44(23), 4860-4869, 2005.
 17. H. Y. Yun. et al., “3-dimensional micro-structure inspection by phase-shifting digital holography”, *Key. Eng. Mater*, 270(273), 756-761, 2004.
 18. Bodansky, D, “The United Nations framework convention on climate change: a commentary,” *Yale J. Int'l l.*, Vol. 18, pp. 451, 1993
 19. Oberthür, Sebastian, and Hermann E. Ott, "The Kyoto Protocol: international climate policy for the 21st century," *Springer Science & Business Media*, pp. 1-136, 1999.
 20. Emissions, C. O, "Tracking Industrial Energy Efficiency and CO2 Emissions, "JRC Scientific and Technical Reports, pp. 1-324 2007.
 21. Shepeleva, L., Medres, B., Kaplan, W. D, "Bamberger, M., and Weisheit, "A. Laser cladding of turbine blades," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 125, No 1, pp. 45-48, 2000
 22. Sexton, L., Lavin, S., Byrne, G., and Kennedy, A, "Laser cladding of aerospace materials," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 122, No. 1, pp. 63-68, 2002
 23. Anton, S. R., and Inman, D. J, "Vibration energy harvesting for unmanned aerial vehicles," In *SPIE's 15th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials & Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*, Vol. 6928, pp. 692824, 2008
 24. Park, C. W., Kwon, K. S., Kim, W. B., Min, B. K., Park, S. J., Sung, I. H., Yoon, Y. S., Lee, K. S., Lee, J. H. and Seok, J. W, "Energy consumption reduction technology in manufacturing—A selective review of policies, standards, and research," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 10, No. 5, pp. 151-173, 2009