



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 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](#) 

2015년 2월
석사학위논문

디지털 홀로그래피를 이용한 박막 결함 측정에 대한 연구

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과(정밀기계설계공학전공)

정 현 일

디지털 홀로그래피를 이용한 박막 결함 측정에 대한 연구

A Study on the Defect Measurement of Thin Film
Using Digital Holography

2014년 11월

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과(정밀기계설계공학전공)

정 현 일

디지털 홀로그래피를 이용한 박막 결함 측정에 대한 연구

지도교수 김 경 석

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함.

2014년 11월

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과(정밀기계설계공학전공)

정 현 일

정현일의 석사학위 논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 김 재 열 ㉠

위 원 조선대학교 교수 김 경 석 ㉠

위 원 조선대학교 교수 허 섭 ㉠

2014년 11월

조선대학교 대학원

목 차

LIST OF TABLES	iii
LIST OF FIGURES	iv
ABSTRACT	v
제 1 장 Introduction	1
제 2 장 Theory	3
제 1 절 레이저 스페클(Laser Speckle)	3
제 2 절 홀로그래피(Holography)	8
1. 파동방정식(Wave Equations)	9
2. 구면파와 평면파(Spherical Wave and Plane Wave)	10
제 3 절 디지털 홀로그래피(Digital Holography)	11
1. 디지털 홀로그래피의 원리	11
제 4 절 디지털 홀로그래피를 적용한 형상측정	17
1. Phase shifting method	17
2. Unwrapping method	20
제 3 장 Experiment	23
제 1 절 시험편	23
1. 표준조도시험편	23
2. Resolution Target	24

3. Molybdenum 박막 시험편	26
제 2 절 실험장치 및 구성	27
1. 반사형 디지털 홀로그래피 시스템	27
2. Surface Profiler	28
3. AFM	29
제 3 절 실험방법	31
제 4 장 Experiment Result	32
제 1 절 표준조도시험편	32
제 2 절 Resolution Target	36
제 3 절 Molybdenum 박막 시험편	39
1. Clean Molybdenum 박막 시험편 측정 결과	40
2. Dirty Molybdenum 박막 시험편 측정 결과	45
제 5 장 Conclusion	52
참고문헌	53

LIST OF TABLES

Table 3-1 Standard Test Piece (BS-2) Technical Data	26
Table 3-2 Resolution Target Technical Data	26
Table 3-3 Surface Profiler System Technical Data	26
Table 3-4 AFM Technical Data	26
Table 4-1 Avg. Roughness	26

LIST OF FIGURES

Fig. 2-1 Speckle	3
Fig. 2-2 Formation of Speckle Pattern	5
Fig. 2-3 Subjective speckle size on the CCD image plane	7
Fig. 2-4 Interferometer	12
Fig. 2-5 Digital holography basic expression	14
Fig. 2-6 Coordinate system for numerical reconstruction	15
Fig. 2-7 4-Step 위상이동 및 Phase map Image 획득	19
Fig. 2-8 Comparison wrapped phase and unwrapped phase	21
Fig. 2-9 Comparison wrapped phase and unwrapped phase graph	21
Fig. 2-10 Comparison wrapped phase and unwrapped phase graph	22
Fig. 3-1 Standard Test Piece (BS-2)	23
Fig. 3-2 Negative USAF 1951 Test Target	24
Fig. 3-3 Clean Molybdenum Thin Film	26
Fig. 3-4 Dirty Molybdenum Thin Film	26
Fig. 3-5 Digital Holography System	27
Fig. 3-6 Surface Profiler System	28
Fig. 3-7 AFM	29
Fig. 4-1 Standard Test Piece 3D Measurement Result	33
Fig. 4-2 Standard Test Piece 2D Measurement Result	34
Fig. 4-3 Standard Test Piece Profile Graph	35
Fig. 4-4 Digital Holography System Resolution Target 2D Measurement Result	37
Fig. 4-5 Surface Profiler Resolution Target 2D Measurement Result	37
Fig. 4-6 Resolution Target Profile Graph	38
Fig. 4-7 Clean Molybdenum Thin Film 3D Measurement Result	41
Fig. 4-8 Clean Molybdenum Thin Film 2D Measurement Result	42
Fig. 4-9 Clean Molybdenum Thin Film Profile Graph	43
Fig. 4-10 8-Step Phase Shifting Image	45

Fig. 4-11 Angle & Intensity Result 47
Fig. 4-12 Dirty Molybdenum Thin Film 3D Measurement Result 48
Fig. 4-13 Dirty Molybdenum Thin Film 2D Measurement Result 49
Fig. 4-14 Dirty Molybdenum Thin Film Profile Graph 51

ABSTRACT

A Study on the Defect Measurement of Thin Film Using Digital Holography

Hyun-II Jung

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

Dept. Advanced Parts & Materials Engineering.

Graduate School of CHOSUN University

Holography has been developed continuously since the invention allows the light source to an object irradiated by Dennis Gabor in 1948 by recording the amplitude and phase to obtain the three-dimensional information of the object film, and reconstruction. Consequently, record the whole. 'Has both amplitude and phase information through the image-forming device such as a CCD camera directly in a holographic storage means to the computer, and was able to process. To do this, the recorded hologram can be processed from the type of the object in a reproduction machine that is called digital holography. In addition, it is possible to set the processing after the data three-dimensional display, the measurement of the micro-object, and is used in many fields, such as to record the flow of the fluid. Integrated circuit, the thin film storage device, a thin film which is used in electronic components, such as glass or metal on Sub-Strate and insulating ceramic, semiconductor, materials in vacuum deposition or plating method such as electric insulating material, a laser beam vapor deposition method by using a less $1\mu\text{m}$ to create a thin film. In general, there are a lot of this evaporation method using a vacuum deposition method is a method of depositing the objects to be deposited in a Vacuum Chamber over Sub-Strate. Due to this method Chamber naena Sub-Strate, if there is to be deposited on

the object Particle drop the adhesion of the object shown in the form of depositing Pin hole or Crack, peel the like. Interfere with the formation of the device or poor electrical conductivity or permeability, break, degrade the performance of the thin-film defects, such as deformation of the microstructure and reduced life and safety also results in a decrease. This problem occurs, because in order to prevent a thin film with a defect in the product coming out of the defect inspection it can be seen that the critical. Thus, the contribution to the study to ensure the reliability and the test piece by measuring the standard illumination Resolution Target validation using digital holography, and the resolution. In addition, when making the films deposited with Molybdenum Molybdenum in Glass Sub-Strate Sputtering deposition techniques over, Sub-Strate the Clean one that is produced by two different types of Particle it would be Dirty. Reflective digital holography interferometers is reduced failure rate of the semiconductor configuration applies to evaluate a defect in the thin film by measuring by, were sought to improve the safety and stability, and carrying out research to evaluate the energy savings due to the defect and its life extension.

제 1 장 Introduction

1948년 Dennis Gabor는 현미경에 사용되는 렌즈의 수차 문제를 해결하기 위하여 파동의 위상과 진폭의 기록 및 재생을 위한 방법을 개발하였다.[1-3] 간섭성 참조 파가 물체에 의해 회절되거나 산란된 빛과 만나면 파의 진폭과 위상 정보를 기록할 수 있고 이렇게 기록된 간섭무늬는 오늘날 그리스어의 전체를 의미하는 ‘holos’와 기록을 뜻하는 ‘graphein’에서 초래되어 전체를 기록한다는 뜻에서 홀로그램이라고 부르며[5] 이를 통해 원래 물체가 갖고 있는 정보를 얻을 수 있음을 증명하였다.[1] 또한 현미경을 이용한 홀로그래피의 응용 가능성에 대하여도 논문에 언급한 적이 있었는데 기술의 부족으로 인해 실현하지 못했지만 1960년대 기술의 발전으로 Dennis Gabor도 예상하지 못한 많은 응용들이 이루어졌다.[2-3]

Goodman과 Lawrence가 홀로그램을 수치적으로 재생하는 방법(Numerical Reconstruction)을 발견하였고[7] Krrod가 컴퓨터를 이용해 이를 실현해내었다.[8] 고밀도의 정보를 광학적으로 저장하기 위한 기술로 필름에 홀로그램 정보를 기록하여 인코딩 과정을 거쳐 원래의 정보를 재생하던 홀로그래피[9-10]에서 Schnars와 Juptner에 의해 홀로그램을 저장하고 재생할 때 일부분이 아닌 전 과정을 컴퓨터로 처리할 수 있게 되었고 이를 디지털 홀로그래피라고 하게 되었으며 이 방법은 컴퓨터, CCD Camera와 같이 기록장치의 발달로 크고 작은 물체들을 측정하는데 다양하게 응용되고 있으며 데이터에 후처리를 할 수 있어 3차원 디스플레이, 미소물체의 측정, 유체의 유동을 기록하는 등 여러 분야에서 이용되고 있다.

박막은 절연된 유리나 세라믹 또는 반도체 등의 Sub-Strate 위에 금속, 반도체, 절연물 등의 재료로 진공 증착이나 전기도금법, 레이저빔 증착법, 화합물 열분해법, 기체나 액체 속의 산화법 등을 이용하여 회로 소자, 배선, 단자와 같이 약 $1\mu\text{m}$ 이하의 매우 얇은 피막을 만드는 것이다. 박막으로 만들었을 때 성질이 달라지는 재료들이 있는데 점성이 커지고 표면장력이 작아지며 빛의 간섭에 의해 착색현상이 일어나는 특성이 생기는 경우가 있다. 이러한 박막의 경우 이화학 원리의 실험이나 기계를 제작할 때 활용된다. 또한 광학렌즈에서 반사방지막으로도 사용되고 있으며 소형화 및 경량화를 할 수 있고 $0.1\mu\text{m}$ 이하로 제작하기 때문에 표면적을 넓게 해도 무게에 큰 영향을 미치지 않으므로 표면적을 크게함으로써 열방산이 증대하여 큰 전력을 다룰 수 있게 된다. 즉 성능이 뛰어나지므로 기존의 저항이나 콘덴서를 대

용할 수 있어 집적회로, 콘덴서, 초전도배선, 고감도 자기센서, 자성 재료로 자성 박막 기억 장치, 전자부품으로 만드는 등 전자분야에서 활발하게 이용되고 있다. 이렇게 현대 사회에서 활발하게 활용되고 있는 반도체 즉, 박막을 만드는 방법으로는 여러 가지가 있지만 그 중에서도 진공증착법을 가장 많이 사용하고 있다. 이 진공증착법은 Vacuum Chamber 내에서 Sub-Strate 위에 증착할 물체 즉, Target을 분해하여 증착하는 방법인데 증착할 때 Particle이나 Dust와 같은 물질이 Sub-Strate 나 Target에 묻어있다가 증착 시 박막에 같이 증착되는 경우 불량이 된다. Particle이나 Dust가 묻게 되면 증착되는 물질의 밀착력을 떨어뜨려 Pin hole이나 Crack, 박리 등과 같은 형태로 결함이 나타난다. 이와 같은 결함은 소자의 형성을 방해하거나 전기전도나 투과율 불량, 단선, 미세 구조의 변형 등으로 박막의 성능을 저하시키고 수명을 단축시키며 안전도 저하를 야기한다. 이러한 결함으로 인한 불량을 막기 위한 방법으로서 반도체의 결함 검사는 매우 중요함을 알 수 있다. 본 연구에서는 디지털 홀로그래피를 이용하여 표준조도시험편과 Resolution Target을 측정함으로써 신뢰성을 검증하고 반도체가 적용되는 제품의 불량을 감소, 안전성 및 안정성 향상을 꾀하고 수명 연장과 그에 따른 에너지 절감 효과를 위해 결함을 평가하는 연구를 수행하였다.

제 2 장 Theory

제 1 절 레이저 스페클(Laser Speckle)

복사의 유도방출에 의한 빛 증폭(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)이라는 말에서 레이저(Laser)라고 부르게 되었다. 이러한 레이저는 단색성, 지향성, 고휘성, 간섭성, 집속성 등의 특성을 가지고 있다. 임의의 파가 정확하게 사인 곡선과 같은 형태로 전파되는 것이 파동의 간섭성이다. 일반적으로 형광등의 광원은 공간 및 시간적으로 일정하지 못하고 파의 진폭이나 주파수가 서로 다른 불규칙한 파의 집합으로 간섭현상이 일어나지 않는데 레이저의 파장보다 큰 거칠기를 갖는 물체에 조사하여 물체표면에서 이런 광파가 2개 이상이 서로 겹쳐질 경우 간섭을 일으키는데 강도변화가 보강되거나 소멸됨으로써 보강간섭과 소멸간섭이 일어나 검은 반점과 같은 형태의 무늬가 Fig. 2-1과 같이 무작위적으로 표면에 나타나게 되는데 이를 스페클 패턴(Speckle Pattern)이라 한다.



Fig. 2-1 Speckle

물체표면에서 반사된 후에도 레일리 산란(Rayleigh scattering)을 만족하며 간섭 성질을 유지할 수가 있다. 이 스페클패턴은 또 다른 스페클 패턴과 간섭하여 새로운 스페클을 형성할 수도 있으며 물체표면 변위에 대해 함께 움직이거나 위상변화를 일으켜 물체 변위의 정보 전달자로서 광검출기에 광강도(Intensity) 분포로 기록되어진다. 이 때, 광강도 분포 I 는 eq. (2-1)과 같다.

$$I = A(x, y) + B(x, y) \cos[(k_1 - k_2)r - (\omega_1 - \omega_2)t + \phi_1 - \phi_2] \quad (2-1)$$

$A(x, y)$ 는 바이어스(Bias) 강도, $B(x, y)$ 는 변조파의 강도, $k_i, w_i, \phi_i (i = 1, 2)$ 는 각각 i 번째 빔의 파수(Wave Number), 각 주파수, 초기 위상값(Phase Value)이다. 간섭무늬 중 가장 강한 빔 강도를 I_{\max} , 가장 약한 빔 강도를 I_{\min} 라 할 때, 이 간섭무늬의 평균 빔 강도 즉 바이어스 강도는 가우시안 분포를 가지며 eq. (2-2)에 나타낸 바와 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} A(x, y) &= (I_{\min} + I_{\max})/2 \\ B(x, y) &= (I_{\min} - I_{\max})/2 \end{aligned} \quad (2-2)$$

여기서 변조파의 강도를 바이어스 강도로 나눈 값 $B(x, y)/A(x, y)$ 는 간섭무늬의 명암(contrast) 즉, 가 간섭도(visibility)를 나타낸다. 간섭현상은 동일 광원으로 부터 나온 광파가 서로 다른 경로로 전파되어 임의의 한 점에 동시에 도달할 때 관측자가 볼 수 있는 것이다. 이 현상을 기술하기 위하여 파의 전계를 이용한다. 각 경로의 전계를 식으로 나타내면 eq. (2-3)과 같고 이를 합한 값이 E_t 로 시간 t 에 대한 함수로 값을 구해보면 eq. (2-5)와 같다.

$$\begin{aligned} E_1 &= E_{01} \cos(kx_1 - wt_1 + \phi_1) \\ E_2 &= E_{02} \cos(kx_2 - wt + \phi_2) \end{aligned} \quad (2-3)$$

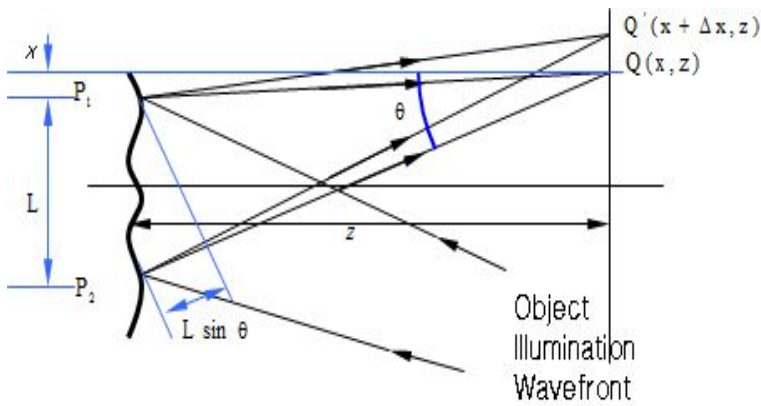
$$E_t = E_1 + E_2 \quad (2-4)$$

$$\begin{aligned} E_1 \cdot E_2 &= E_{01} \cdot E_{02} \cos(k_1 \cdot r - wt + \epsilon_1) \times \cos(k_2 \cdot r - wt + \epsilon_2) \\ &= E_{01} \cdot E_{02} [\cos(k_1 \cdot r + \epsilon_1) \cos wt + \sin(k_1 \cdot r + \epsilon_1) \sin wt] \\ &\quad \times [\cos(k_2 \cdot r + \epsilon_2) \cos wt + \sin(k_2 \cdot r + \epsilon_2) \sin wt] \end{aligned} \quad (2-5)$$

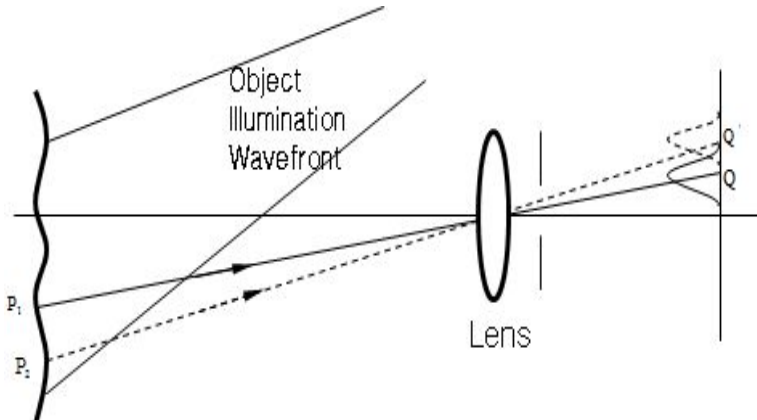
스페클은 관측 시 결상렌즈의 사용여부에 따라 Objective와 Subjective Speckle로 나뉘며 크기 또한 다르게 나타나는데 Fig. 2-2에서 Speckle이 형성되는 것을 보여주었다. 스페클의 크기는 결상면(Image Plane) 위에서 형성된 스페클의 최대 밝

기 지점과 최소 밝기 지점사이의 거리로 서로 무관한 광강도 사이의 거리라고 볼 수 있다. Objective Speckle의 크기는 물체 표면에 면적 D 에 레이저가 조사되고 이 조사된 곳의 점은 Viewing Plane인 AB Plane에 형성되는 스페클에 영향을 준다는 이론과 확률분포이론을 이용하여 U. Schnars와 W.Jneptner가 Objective Speckle의 크기를 eq. (2-6)과 같이 정의하였다. 여기서 λ 는 조사되는 레이저의 파장이고 L 은 물체와 결상면 사이의 거리, D 는 물체에 조사된 면적이다.[6]

$$S_{obj} = 1.22 \frac{\lambda L}{D} \quad (2-6)$$



(a) Objective Speckle



(b) Subjective Speckle

Fig. 2-2 Formation of Speckle Pattern

Subjective Speckle은 관측 시 결상렌즈를 사용하였을 때 형성되는 것으로 구별한다. 결상렌즈는 물체 표면 위의 한 점을 1:1로 결상면의 한 점에 결상하여 수차가 없는 렌즈의 경우 결상면에 형성되는 스페클의 강도는 물체 표면 위의 한 점에만 영향을 주어야 하지만 실제 결상렌즈는 회절한계가 존재하여 한 점에 결상을 하지 못하므로 결상면에 대응하는 물체 위의 한 점을 중심으로 렌즈의 회절 크기만큼 결상면 위의 스페클 형성에 영향을 주게 된다. 따라서 Subjective Speckle의 크기는 결상렌즈에 의해 생기는 회절의 Primary Maximum와 First Minimum사이의 거리 (Bessel Function의 1차 최소점 사이의 거리)라고 할 수 있으며 결상면에서 형성되는 Subjective Speckle의 크기는 eq. (2-7) 와 같이 정의된다.

$$S_{sub} = 1.22(1 + M)\lambda F \quad (2-7)$$

여기에서 M : 렌즈 확대 배율, λ : 조사된 레이저의 파장, F : 렌즈의 f-number 이다. 스페클은 하나의 위상정보를 전달하며 그 크기는 측정 대상의 공간분해능을 결정하게 된다. 물체 표면에서 Subjective Speckle의 크기는 eq. (2-8)로 정의된다. 스페클의 크기는 CCD 카메라의 화소크기와 같을 때 가장 이상적이며 Uniform Field와의 조합하여 간섭하는 면외변위 측정 간섭계에서는 스페클의 크기가 2배로 커지게 된다. 측정시스템에서는 CCD pixel 하나에 한 개의 스페클이 존재할 때가 가장 이상적인 크기이다.

$$S_{sub\ on\ object} = 1.22(1 + M)\lambda \frac{F}{M} \quad (2-8)$$

광학배율과 f-number에 따른 CCD Cell에 형성되는 스페클의 크기를 Fig. 2-3에 나타내었다. 스페클의 크기가 CCD 화소의 크기보다 작을 경우에 광강도는 형성적인 스페클패턴의 Integrated 또는 Smoothed된 상태로 관찰되게 된다.

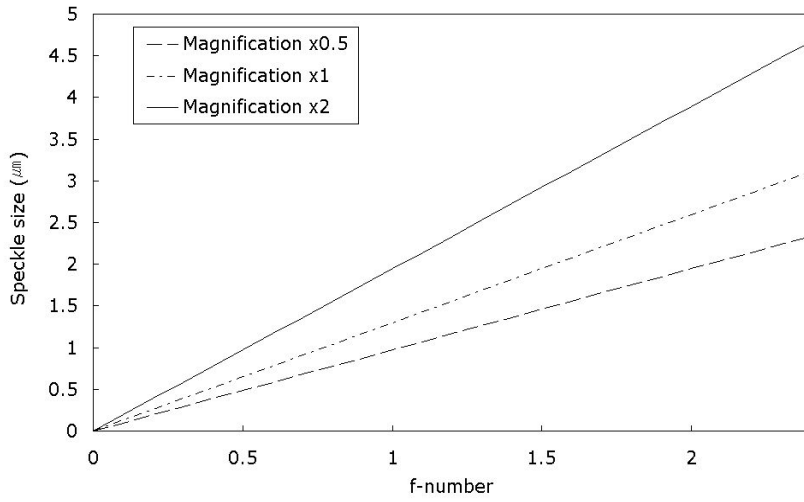


Fig. 2-3 Subjective speckle size on the CCD image plane

제 2 절 홀로그래피(Holography)

전체라는 뜻의 'Holo'와 기록 방법이라는 뜻의 'Graphy'의 합성어로 '전체를 기록하는 방법'인 홀로그래피는 1948년 Dennis Gabor가 현미경에 사용되는 렌즈의 수차 문제를 해결하기 위해 파동의 위상과 진폭, 둘 모두를 기록하고 재생하기 위해 발명하였다.[1-3] 이로써 하나의 광원이 물체에 조사되어 물체의 위상의 변화가 반사되거나 투과되어 필름에 입사되는 물체파와 물체를 거치지 않고 필름에 입사되는 참조파가 만나 간섭을 일으켜 나타나는 간섭무늬를 홀로그램이라고 부르며 이를 이용하여 원래 물체가 갖고 있는 정보를 얻을 수 있음을 증명하였다.[1] 전체를 기록하는 방법이라는 뜻에 걸맞게 파동의 위상과 진폭을 모두 기록하고 물체의 전방위적인 상을 기록하여 재생 가능하다는 것이 특징이다. 이렇게 발명된 홀로그래피는 전방위적인 상을 기록하여 재생 가능하므로 물체를 3차원으로 기록하고 재생하는 특징을 극대화시켜 영상으로서 응용, 예를 들어 디스플레이와 같은 영상장치의 발전을 목적으로 개발되고 있다. 그 외에는 광학소자 제작이나 계측으로 응용되는데 부피가 크고 단순한 유리광학소자의 대체품으로 소형화 된 광학소자의 개발에 이용되고 있다. 특히 계측 분야로의 응용은 정밀계측, 비파괴검사를 필요로 하는 산업분야가 늘어남에 따라 계속해서 발전해왔으며 산업분야 또한 발전을 거듭하여 점점 더 정밀적인 기술을 요하는 부분이 많이 생겨나 이에 발맞춰 개발되어졌다. 주로 홀로그래피 간섭계와 같은 홀로그램을 이용한 계측이 주를 이뤄 재생 상 이용 방법과 홀로그램을 기준패턴으로 하여 물체의 특성을 파악하는 방식, 간섭계를 꾸며서 이용하는 방식이 있다. 광원이 레이저이므로 물체와의 접촉으로 인해 변화를 주거나 형태를 파괴시키지 않으므로 비파괴 및 비침습 계측이라 한다. 이러한 비파괴 검사는 산업현장에서 적용가능하며 시험편을 별도로 필요로 하지 않는다는 장점으로 인해 나날이 수요가 증가하고 있는 현황이다.[11]

1. 파동방정식(Wave Equations)

파동의 모든 것은 파동함수로 기술된다. 호수의 물결을 잘 관찰해보면 호수면의 수면의 높이가 각 지점에 따라 달리 되어 있으면서 그 형태가 계속 움직이는 것을 볼 수 있을 것이다. 수면의 높이(파동량)를 호수내의 각 지점의 위치, 즉 공간과 시간의 함수로 표현한다면 그 수면파(물결)에 대한 총체적인 표현이 될 것이다. 이처럼 파동의 모든 정보는 파동량의 공간, 시간의 함수로서 완벽하게 기술되며 이를 파동함수라고 한다. 이 파동함수의 차원은 그것이 표현하는 파동량의 물리적인 차원이 되어 수면파나 줄의 파동 경우 파동함수는 거리의 차원을 가지고, 소리의 경우는 음압파동으로 보면 압력, 소밀파동으로 보면 밀도, 변위파동으로 보면 거리의 차원을 갖는다. 파동도 물리적인 현상이므로 운동법칙이나 전자기법칙 등 기본적인 물리법칙을 만족해야 하여 파동함수도 특별한 방정식을 만족하게 되는데 이를 파동방정식이라 한다. 즉 파동의 파동함수는 파동방정식을 만족해야 하며 또한 이 파동방정식의 모든 수학적인 해는 물리적 법칙을 만족시키는 파동이다.

전자기파의 기본개념에서 파동방정식을 유도 하기 위하여 자유공간(진공 중) $[\rho = 0, J = 0, \epsilon = \epsilon_0, \mu = \mu_0]$ 에서 페러데이 법칙으로부터 좌 우변에 벡터의 회전 (curl)을 취하면 eq. (2-9)과 같다.

$$\nabla \times (\nabla \times E) = \nabla \times \left(-\frac{dB}{dt}\right) \quad (2-9)$$

여기서, 벡터 항등식 $\nabla \times (\nabla \times E) = \nabla(\nabla \cdot E) - \nabla^2 E$ 과 $\nabla \cdot E = 0$ 을 이용하면 다음과 같은 eq. (2-2)과 같은 파동방정식(Wave equation)을 얻는다.

$$\nabla^2 E - \mu\epsilon \frac{d^2 E}{dt^2} = 0 \quad (2-10)$$

2 구면파와 평면파 (Spherical Wave and Plane Wave)

전자파는 발생원에서 발생되어 발생원을 중심으로 사방으로 퍼져 나간다. 이 때 동일위상 떨어진 지점을 연결하여 생기는 선 또는 면을 파면(Wavefront)이라고 하는데 이 파면은 발생원을 중심으로 동심원 형태를 형성하고 바깥으로 진행한다. 3차원적으로 보면 발생원으로부터의 전자파는 이 발생원을 중심으로 서로 동심원을 형성하면서 파면이 동심원 형태로 사방으로 전파되므로 구면파(spherical Wave)라고 부른다. 수식적 표현은 eq. (2-11)과 같다.

$$E(r,t) = E_0 \frac{i(kr - \omega t)}{r} \quad (2-11)$$

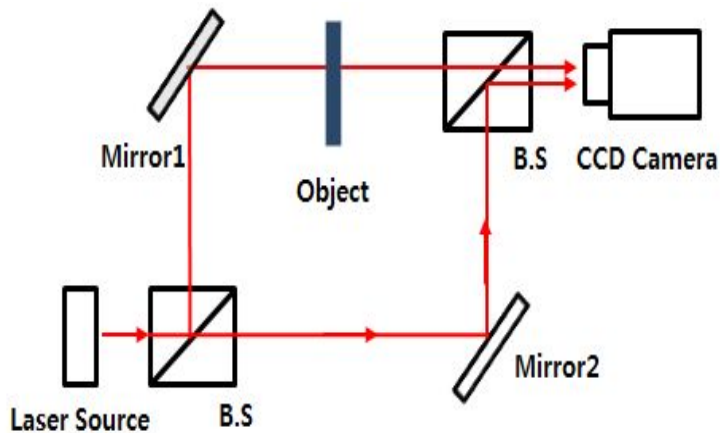
발생원을 중심으로 파면이 충분히 멀어졌을 때 그 곡률반경이 증가하여 파면의 부분 부분으로 봤을 때 평면에 가까워진다. 따라서 발생원에서 아주 먼 거리 떨어진 위치에서는 파면의 일부분만 감지되기 때문에 파면 사이가 거의 평행한 것 같이 된다. 이렇게 됐을 때 평면파(Plane Wave)라고 부른다. 수식적 표현은 eq. (2-12)과 같으며 여기서 k 는 파수 (Wave number), ω 는 주파수(Frequency)이다.

$$E(r,t) = E_0 i(kr - \omega t) \quad (2-12)$$

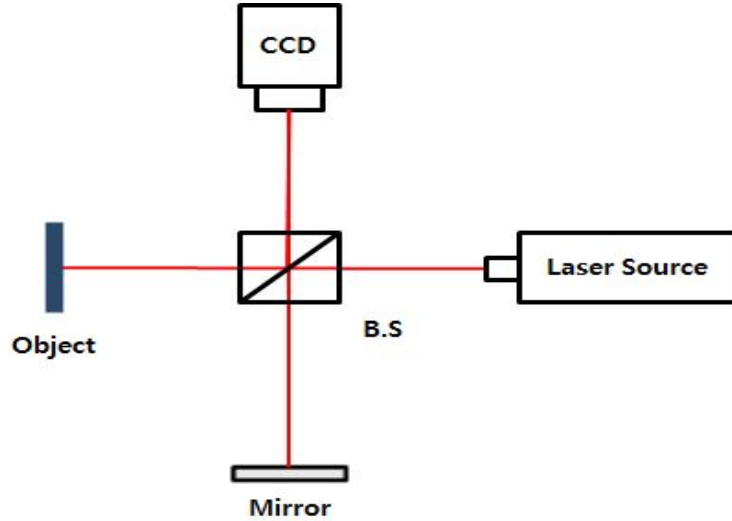
제 3절 디지털 홀로그래피(Digital Holography)

1. 디지털 홀로그래피 원리

홀로그래피의 기본원리는 하나의 광원을 두 개로 분리한 기준파와 물체파가 만나 발생하는 간섭현상이다. 간섭에 의해 변형이 있는 부분에 간섭무늬가 대상체의 변형 정도를 찌그러짐의 방향과 형태 등으로 표시된다. 이러한 간섭무늬를 해석함으로써 대상물의 변형 상태나 변형 정도를 측정 가능하다. 이 때, 필름에 간섭현상을 기록하던 기존의 방법과 다르게 CCD 카메라와 같은 영상 저장 장치를 이용하여 컴퓨터에 저장하게 된 것을 디지털 홀로그래피라고 한다. Fig. 2-4에 나타난 바와 같이 Mach-Zehnder 간섭계와 Michelson 간섭계 등을 바탕으로 디지털 홀로그래피 간섭계를 이용하여 대상체의 시간에 따른 미소 형태 변위나 이동거리를 측정 가능하다.



(a) Mach-Zehnder Interferometer



(b) Michelson Interferometer

Fig. 2-4 Interferometer

홀로그래피의 기본적 개념의 시작은 참조파(reference beam)와 대상체로부터 반사된 물체파(object wave)가 CCD 카메라의 셀에서 간섭을 일으킨다는 가정으로 시작한다. 이와 같은 가정에 의해서 얻어진 홀로그램의 결과는 CCD 카메라를 통하여 전자적으로 기록되고 저장된다. 일반적으로 대상체는 3차원의 형태이며 표면 반사에 의한 확산이 쉬운 것이며, CCD 셀(Cell)로부터 d 의 거리에 위치한다. 홀로그래피의 처리 과정은 아래의 수치적 공식을 사용하여 표현할 수 있다. 물체파의 복소진폭은 eq. (2-13)과 같다.

$$E_0(x,y) = a_o(x,y)\exp(j\phi_0(x,y)) \quad (2-13)$$

위 식에서 a_o, ϕ_0 는 물체파의 실제 진폭과 위상이다.

$$E_R(x,y) = a_R(x,y)\exp(j\phi_R(x,y)) \quad (2-14)$$

위 식에서 a_R, ϕ_R 는 참조파의 실제 진폭과 위상이다. 두 파(wave)에 의한 간섭

은 CCD 카메라와 같은 중간 매개물의 표면에서 기록된다. 홀로그램 함수는 참조파와 물체파의 간섭에 의한 강도(Intensity) 분포와 비례하여 식(2-14)에 의해서 계산되어 진다.

$$\begin{aligned}
 h(x,y) &= |E_0(x,y) + E_R(x,y)|^2 \\
 &= |E_0|^2 + |E_R|^2 + E_0 E_R^* + E_0^* E_R
 \end{aligned}
 \tag{2-15}$$

홀로그래피 재생에서, 재생을 위한 참조파의 복소진폭이 식(2-15)에 곱해져야 한다.

$$E_R(x,y)h(x,y) = (|E_0|^2 + |E_R|^2)E_R + |E_R|^2 E_0 + E_0^* |E_R|^2
 \tag{2-16}$$

위 식에서 $|E_R|^2$ 항은 참조파에 의해서 CCD 카메라에 균일하게 작용되는 정보이며 $|E_0|^2$ 은 물체의 진폭정보이다. $(|E_0|^2 + |E_R|^2)E_R$ 는 빛이 통과할 때 0차 회절이다. 홀로그래피 재생에서 고려 사항이 아니다. $|E_R|^2 E_0$ 는 재생된 물체파에 의한 허상(virtual image)의 생성을 나타낸다. 그리고 $E_0^* |E_R|^2$ 은 대상물의 실제 이미지의 왜곡에 의해서 난다. 왜냐하면 실제 이미지 상의 왜곡은 공간적인 이동 복소인자 E_R^2 때문이다. 따라서 왜곡되지 않은 실제의 상을 얻기 위해서 참조파 E_R 을 켈레(conjugate)시킨다. Fig. 2-5의 (c) 와 같으며 식은 다음과 같다.

$$E_R^*(x,y)h(x,y) = (|E_0|^2 + |E_R|^2)E^{*R} + E_R^{*2} E_0 + E_0^* |E_R|^2
 \tag{2-17}$$

eq. (2-15), (2-16)에서 Wavefields 회절은 되었지만 초점(focusing)이 맞춰지지 않는 않았다. Wavefields를 재생하기 위해서는 Fig. 2-5에서는 홀로그램 평면에서 대상면과 이미지면 사이의 d의 거리만큼 떨어져 있을 경우에 광학적으로나 수치적으로 빔이 전파될 때 파면을 재생을 할 수 있다는 것을 보여준다. 홀로그램에서 광파(Light wave)의 회절에서 수직으로 입사되는 eq. (2-18)로 표현 할 수 있다.

$$U(\xi', \eta') = \frac{1}{j\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) E_R(x, y) \frac{1}{\rho} \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda} \rho'\right) dx dy \quad (2-18)$$

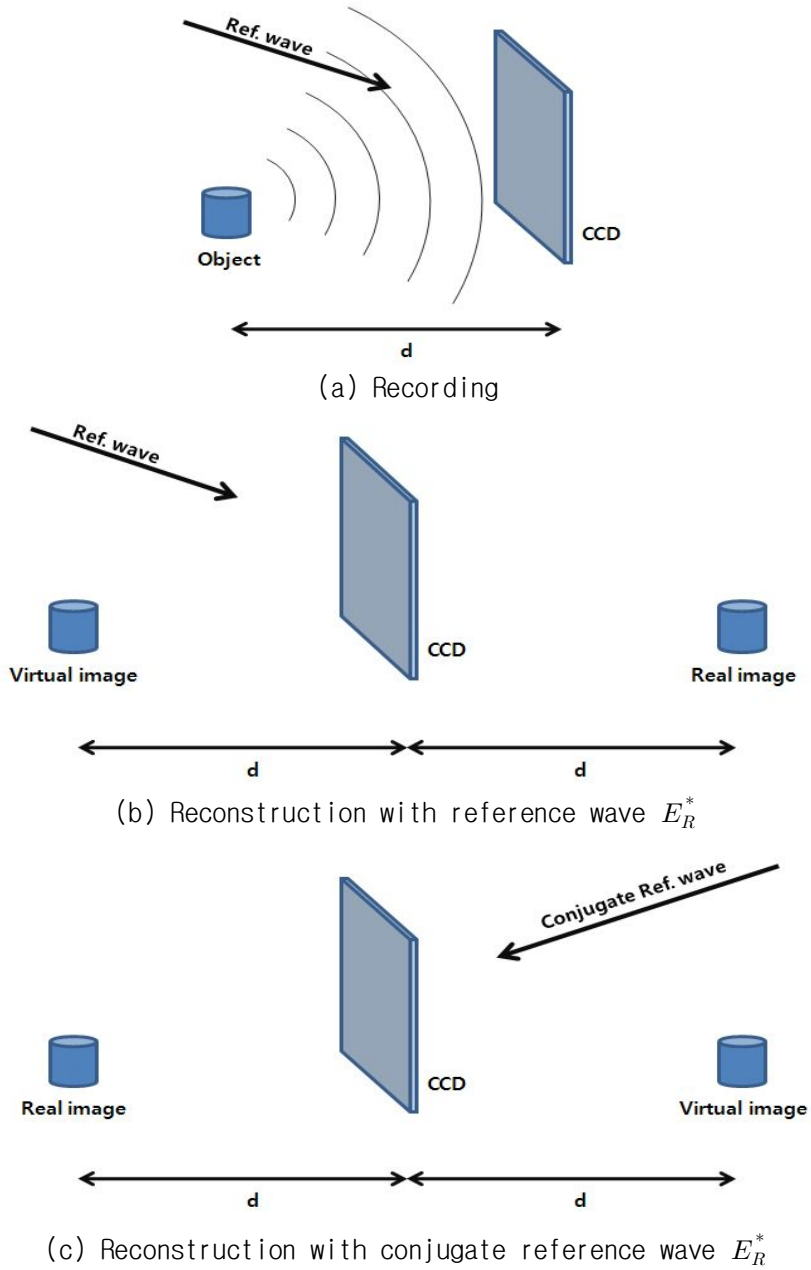


Fig. 2-5 Digital holography basic expression

위 식에서 $\rho' = [(x-\xi')^2 + (y-\eta')^2 + d^2]^{\frac{1}{2}}$, ρ' 는 홀로그램 평면과 재생 평면 사이의 거리, λ 는 광파의 파장, $U(\xi', \eta')$ 는 재생파의 필드이다. 기울기의 인자는 대략적으로 0으로 수렴하기 때문에 무시한다. 평면 참조파 $E_R(x, y)$ 는 실제 진폭을 이용하여 간단하게 얻을 수 있다. 여기서 a_R 은 실제 진폭이다.

$$E_R = a_R + j0 = a_R \quad (2-19)$$

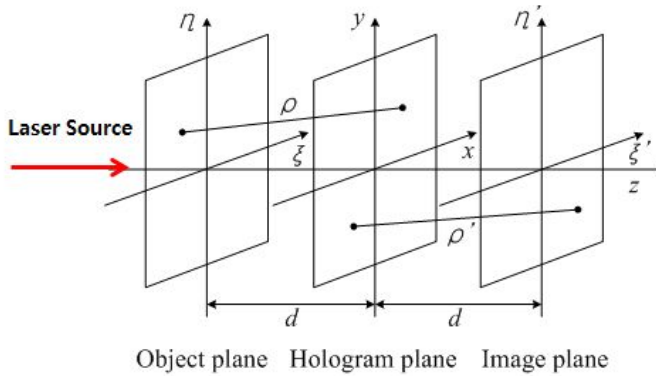


Fig. 2-6 Coordinate system for numerical reconstruction

회절 무늬는 CCD 평면 뒤의 거리 d에 의해서 계산된다. 이것은 실제 이미지에서 복소 진폭이 재생된다. 재생된 파의 필드 $U(\xi', \eta')$ 은 복소함수이고 빔의 강도와 위상을 계산 할 수 있는 eq. (2-18)은 수치적 홀로그램 재생을 위한 기초 공식이다. 이 때 실제의 이미지가 왜곡되기 때문에 왜곡되지 않는 실제의 이미지를 재생하기 위해서는 E_R 대신에 E'_R 을 넣어서 eq. (2-20)로 만든다.

$$U(\xi', \eta') = \frac{1}{j\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) E'_R(x, y) \frac{1}{\rho'} \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} \rho'\right) dx dy \quad (2-20)$$

eq. (2-20)을 이용한 재생의 방법은 Fig. 2-5 (c)에서 보여준다. 실제의 이미지는 대상체를 재생하는 동안 위치되어 나타난다.

In line이나 Off-axis의 셋업의 디지털 홀로그래피에서 기록된 영상은 스칼라 회절 이론에 기초를 두고 수치적으로 재생한다. 단색성 교란의 복소 필드 분포가 어떤 평면을 가로질러 푸리에 해석이 가능하게 되면 다양한 공간의 푸리에 성분들은 그 평면에서 떨어져 다른 방향으로 진행하는 평면파와 동일하게 취급될 수 있는 조건에서만 본 논문에서 사용한 방법이 적용된다. 기존에 사용된 재생 방법은 느리고 부드럽게 변화하는 대상체는 정확하게 재생된다. 그러나 실제 필드의 재생은 한계가 있다. 따라서 회절 대상체의 실제 wavefield 해석 할 수 있는 방법이 필요하다. 본 논문에서 이용한 방법은 평면파의 확장으로 흔히 알려져 있다. 이 방법은 현미경 영역까지 해석이 가능하다. 홀로그램 평면에서 대상체의 wavefield는 푸리에 적분의 확장으로 식의 개념을 이용하여 eq. (2-21)과 같이 표현 할 수 있다.

$$U_0(k_x, k_y) = \int u_0(x, y) \exp[(j(k_x x + k_y y))] dx dy \quad (2-21)$$

$U_0(k_x, k_y)$ 는 평면파의 복소 중력장으로 간주한다. 이러한 과정은 u_0 의 고속푸리에 변환에 의해서 수행된다. 만약 이미지 평면상에서 평면파가 생성되거나 소멸되지 않으면, 이미지 평면에 wavefield는 각각의 파가 더해진 과정을 통하여 재생 할 수 있다. 그리고 각각의 평면파의 일시적은 위상 이동은 식(2-22)에서 보는 바와 같이 고려된다.

$$u_z(k_x, k_y) = \int U_0(k_X, k_Y) \exp[(-j(k_X X + k_Y Y + k_Z Z))] dx dy \quad (2-22)$$

본 논문에서 이용한 재생 방법은 고속 푸리에 변환과 역 고속 푸리에 기반을 둔 방법을 기반으로 한다. 그리고 이 방법은 기존의 방법보다 더 가까운 영역까지 해석 할 수 있다. 또한 고 분해능을 요구되는 대상물에 적합한 방법이다.

제 4절 디지털 홀로그래피를 적용한 형상측정

1. Phase shifting method

형성되는 간섭으로부터 물체의 변형에 따른 위상을 추출하기 위한 기법으로 가장 효과적으로 널리 사용되고 있는 방법이다. 위상이동 기법은 위상 이동자(PZT)에 의하여 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 씩 위상을 이동하여 다음 식과 같이 4개의 방정식으로 기록하게 된다. 본 논문에서는 위상이동 기법의 4-Step으로 대상물의 변형측정이 가능하고 오차를 최소화하기 위하여 $\pi/2$ 위상이동을 사용하였다. 전체 표면에서의 한 점에서 기록된 빛의 강도는 eq. (2-23)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I = I_0 [1 + \gamma \cos[\phi + \alpha_i]] \quad (2-23)$$

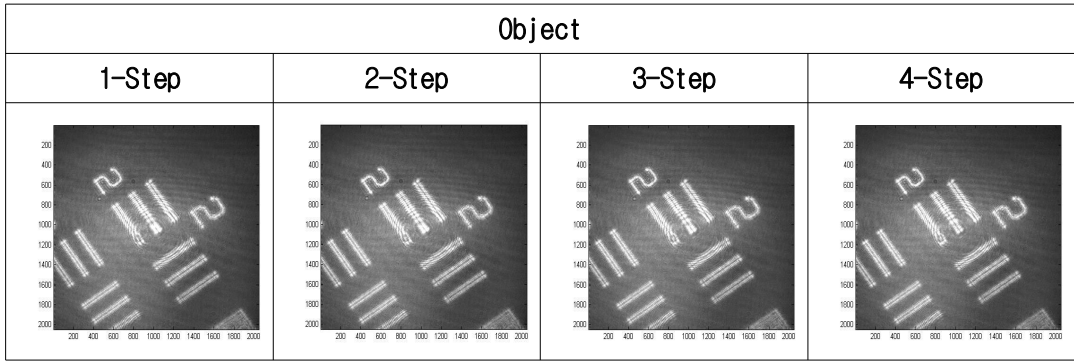
위 식에서, I : 선명도, ϕ : 위상, α_i : 위상 이동 값을 의미한다. 4-Step technique은 연속적인 위상 이동에 의한 서로 다른 위치에서의 위상 값을 얻기 위하여 사용된다. 물체에 변위가 발생하면 새롭게 얻어진 화상을 다시 $\pi/2$ 씩 3번 위상이동 시킨 후에 저장하여 저장된 이미지를 이용하여 변형 전, 후의 각각의 위상 정보를 획득, 감산 처리하여 줄무늬(Fringe pattern)를 생성하게 된다. 즉, 참조광의 위상을 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 로 $\pi/2$ 씩 이동시켜 이들을 4단계 위상이동 기법에 의해 위상 값(ϕ)를 구하는 방법이다. 획득한 위상이미지를 eq. (2-24), eq. (2-25), eq. (2-26)을 이용하여 위상 값을 계산하고 변형 전, 후의 이미지를 감산처리를 통하여 위상지도를 얻을 수 있다. 레이저 파장에 관련한 위상의 이동은 CCD 카메라와 위상을 이동시킬 수 있는 정밀한 장치와 컴퓨터를 이용해서 가능하다. CCD 카메라에서 저장된 이미지를 처리하면 대상물에 대한 위상정보를 획득할 수 있다. 또한 참조광은 물체광과 거의 일치하도록 검출기에 수직으로 입사된다. 물체에 변형이 발생하여 거리가 이동하였다고 하면 물체광이 eq. (2-27) 만큼 위상이동이 일어나기 때문에 간섭무늬는 변하게 된다.

$$\begin{aligned}
 I_1 &= I_0 [1 + \gamma \cos \phi] \\
 I_2 &= I_0 [1 + \gamma \cos (\phi + \pi/2)] = I_0 [1 - \sin \phi] \\
 I_3 &= I_0 [1 + \gamma \cos (\phi + \pi)] = I_0 [1 - \cos \phi] \\
 I_4 &= I_0 [1 + \gamma \cos (\phi + 3\pi/2)] = I_0 [1 + \sin \phi]
 \end{aligned}
 \tag{2-24}$$

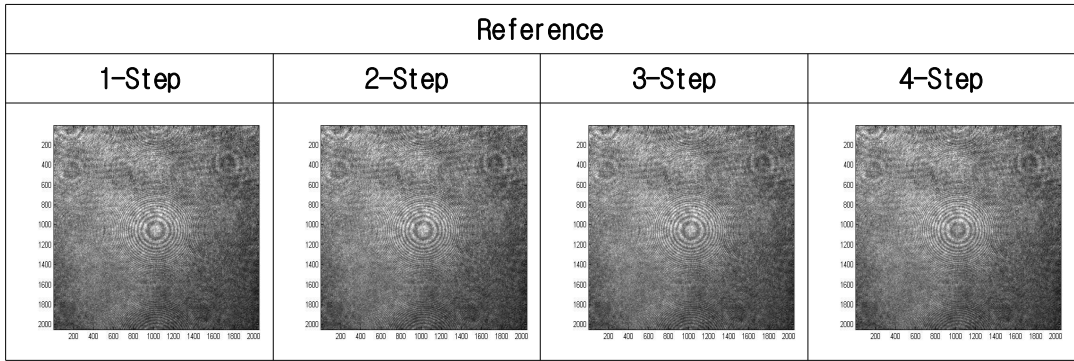
$$\begin{aligned}
 I_4 - I_2 &= 2I_0 \sin \phi \\
 I_1 - I_3 &= 2I_0 \cos \phi
 \end{aligned}
 \tag{2-25}$$

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right]
 \tag{2-26}$$

$$\phi_2 = 4\pi d_z / \lambda
 \tag{2-27}$$



|



||

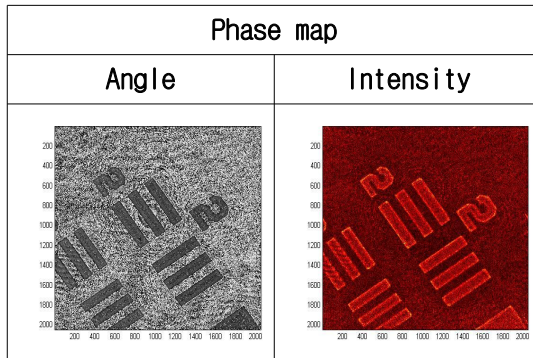


Fig. 2-7 4-Step 위상이동 및 Phase map Image 획득

2. Unwrapping Method

위상 이동 기법에 의해 얻어진 변형량을 정량적으로 표현하는 위상은 Arc-tangent 함수로 계산이 되었기 때문에 불연속성을 가지는 톱니바퀴 형상으로 나타나기 때문에 이러한 불연속성을 해결하기 위해 불연속성을 연속성으로 변환하여 위상 변화에 따른 변형 정보를 획득하기 위해서 Phase unwrapping 과정을 거치게 된다. 대상물의 형태가 복잡하고 노이즈가 많은 위상지도는 이미지의 깨짐 현상 및 왜곡의 발생이 심하여 해석에 있어 상당한 어려움이 있다. 결필침은 위상이동기법에서 위상을 구하기 위해 사용되는 Arc-tangent 함수가 갖는 불연속성을 해결하기 위해 불연속의 변위값을 연속값으로 변환하여 주는 과정이다. 먼저 Arc-tangent 함수는 $0 \sim \pi$ 의 주기로 불연속이 되므로 그 주기를 $0 \sim 2\pi$ 로 연장하고, 연속 위상으로 변환을 위한 결필침은 eq. (2-28)을 이용하여 구하게 된다.

$$\phi_{unw} = \phi_w + (2\pi \times N) \quad (2-28)$$

여기에 ϕ_{unw} : Unwrapped phase, ϕ_w : Wrapped phase, N : Fringe order 이다. 여기서, 결필침을 위한 차수(N)의 결정은 위상전후의 값을 비교하여 큰 단차를 찾는 방법을 취한다. 각 Pixel 전후의 위상값을 비교하여 임의로 정한 문턱값과 비교하여 조건을 만족하면 N 을 증가 또는 감소시키는 방식으로 프린지 차수(Fringe order)를 구하게 된다. 최종의 변위 값은 간섭계의 기하학적 구성에 따라 감도벡터(Sensitive vector)를 고려하여 구하게 된다. Fig. 2-8에서는 왼쪽의 Wrpped 상태의 Phase와 오른쪽의 Unwrapped된 Phase의 Image를 비교하였고, Fig. 2-9에서는 이때 각 Image에 Profile을 그었을 때의 Phase graph를 나타내었다.

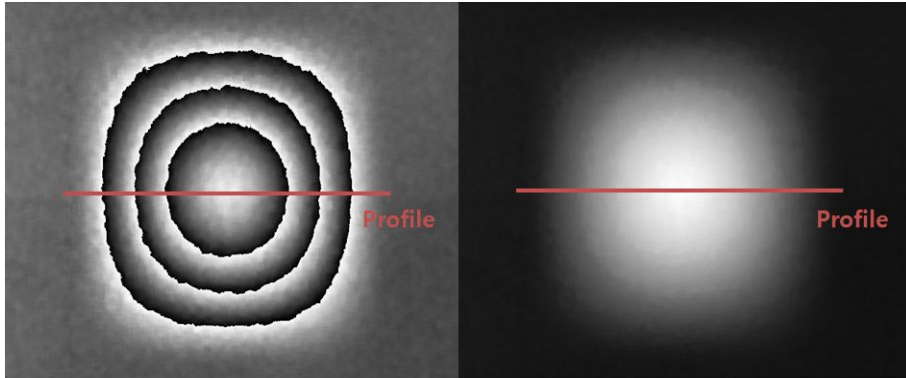


Fig 2-8 Comparison wrapped phase and unwrapped phase

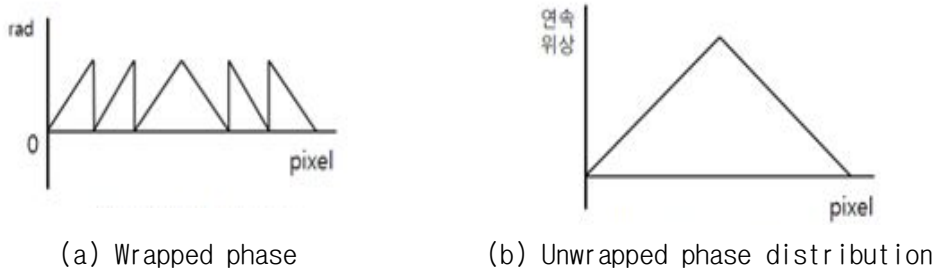


Fig 2-9 Comparison wrapped phase and unwrapped phase graph

본 논문에서는 Unwrapping method로 최소자승법(Least square method)을 사용하였다. 최소자승법이란 Data가 주어졌을 때 오차의 제곱을 물체의 전 영역에 걸쳐 합한 값이 최소가 되도록 하는 방법으로써 이를 일반적으로 실험을 행할 때 실험 값(x, y)을 얻는다고 할 때, 이 Data들의 규칙성을 찾기 위해서 두 변수 간에 상관 관계를 함수로 표현해서 나타내서 하나의 공식으로 표현함으로써 두 변수 간의 상관 관계를 찾을 수 있게 해주는 방법이다. 보다 구체적으로는 직선으로 표현 하면서 각각의 에러를 최소화 하여 Fig. 2-10과 같이 0이 되는 해를 구하는 방법이다.

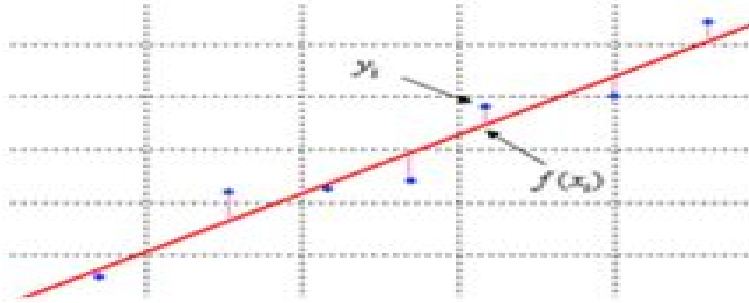


Fig 2-10 Principle of least square method

제 3 장 Experiment

제 1 절 시험편

1. 표준조도시험편

개발 시스템의 분해능 검증을 위하여 평면 표준 조도 시험편인 BS-2를 Fig. 3-1에 표기된 바와 같이 25 μm 부분을 디지털 홀로그래피 시스템으로 측정한다.

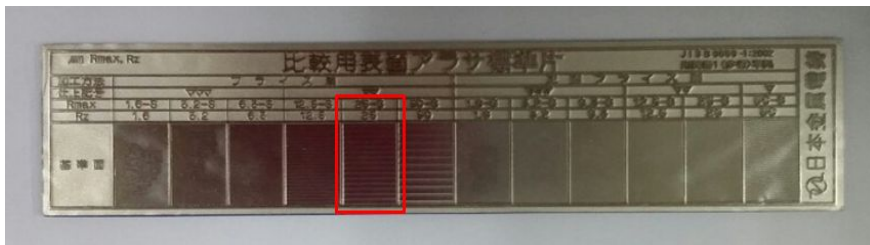


Fig. 3-1 Standard Test Piece (BS-2)

Table. 3-1 Standard Test Piece (BS-2) Technical Data

양식	가공법	▽▽▽▽			▽▽▽			▽▽			▽			적요
		0.2	0.4	0.8	1.6	3.2	6.3	12.5	18	25	35	50	100	
(BS-2) 평면	페퍼사상			○										2매 1조
	연삭			○	○	○	○	○		○				
	형삭						○	○		○		○	○	
	정면후라이스깎이				○	○	○	○		○		○		
	후라이스 깎이				○	○	○	○		○		○		

2. Resolution target

디지털 홀로그래피 시스템의 분해능 검증을 위하여 Edmund optics사의 Negative Target을 사용하였으며 형상과 사양을 Fig. 3-2와 Table. 3-2에 나타내었다.



Fig. 3-2 Negative USAF 1951 Test Target

Table. 3-2 Resolution Target Technical Data

Description	Negative USAF 1951 Test Target Technical data
Substrate	1.5mm (0.06") soda lime glass with beveled edges
Flatness	0.0001" or better
Surface Quality	40-10
Coating	Vacuum-deposited durable chromium, density 3.0 or greater
Minimum Resolution	for 38-256, 38-257, 55-622 & 58-198: Group 0, Element 1 for 36-408 & 36-275: Group -2, Element
Maximum Resolution	for Standard: Group 7, Element 6 for High Res: Group 9, Element 3

3. Molybdenum 박막 시험편

본 실험에서 사용된 시험편은 Particle 유무에 따른 결함을 측정하고자 Sub-Strate로 사용되는 Glass로 Particle이 없는 깨끗한 상태의 Glass와 임의의 Particle을 부여한 Glass를 준비하여 각각의 Glass 위에 Sputtering 기법으로 Molybdenum을 증착하여 Fig. 13과 14와 같이 제작하였다.



Fig. 3-3 Clean Molybdenum Thin Film



Fig. 3-4 Dirty Molybdenum Thin Film

제 2 절 실험장치 및 구성

1. 반사형 디지털 홀로그래피 시스템

마이켈슨 간섭계는 광원을 투과시키지 못하고 반사하는 대상을 측정 시 사용하는 간섭계로 632.8 nm 파장의 He-Ne Laser에서 나오는 빔을 ND Filter를 통과시켜 CCD 카메라로 잘 볼 수 있도록 빔 세기를 조절해주고 Objective Lens와 Pin hole로 이루어진 Spatial Filter를 통과시킨다. Spatial Filter의 Objective Lens를 통과함으로써 퍼지며 Pin hole을 통과하며 Laser에서 나타나는 노이즈가 제거되어 깨끗해진 빔을 Collimating Lens를 사용하여 평행광을 만든다. 이 빔을 Iris로 크기를 조절해 B.S로 들어가 2개로 나뉘어져 하나는 PZT 압전소자를 이용하여 만든 Translator 장치와 결합된 Mirror로 가서 반사되어 다시 Objective Lens, B.S를 거쳐 CCD 카메라로 들어가 참조광이 된다. 그리고 나뉜 빔 중 다른 하나의 빔은 Objective Lens를 통해 대상물에 조사되는데 대상물에서 다시 반사되어 다시 B.S를 통해 CCD 카메라로 들어가 물체광이 된다. 이 참조광과 물체광이 CCD 카메라에서 만나 간섭을 일으키고 이렇게 생성된 간섭무늬를 획득하여 위상이동 기법을 이용한 위상처리 방법을 통해 물체광의 복소 진폭과 위상을 알아낼 수 있는 디지털 홀로그래피 시스템을 구성한다.

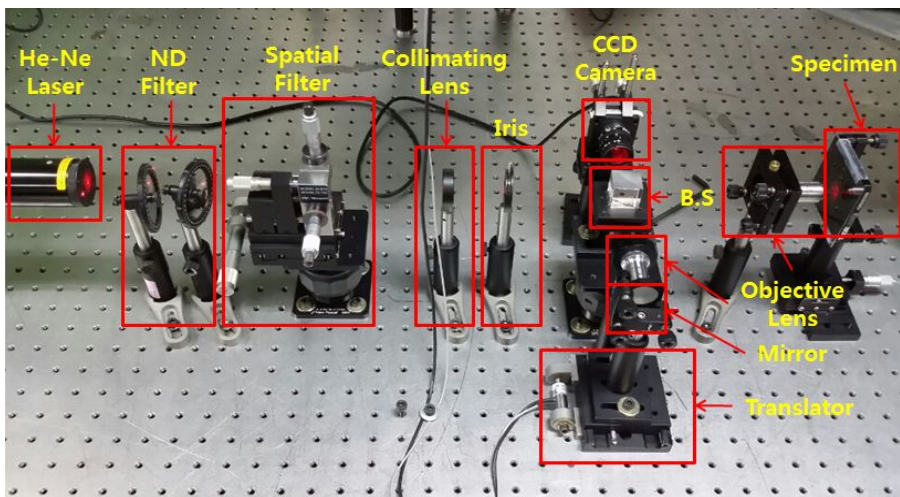


Fig. 3-5 Digital Holography System

2. Surface Profiler

이 장치는 공초점 다중 핀홀 기술에 의한 비접촉 표면 측정 시스템으로 본 연구에서는 KORTherm Science의 uSurf 제품을 사용하였다. 이 시스템은 소자의 형상과 특성을 관찰하고 분석하는 시스템으로써 Table. 3-3에서 Surface Profiler에 대하여 보여주고 있다.



Fig. 3-6 Surface Profiler System

Table. 3-3 Surface Profiler System Technical Data

Optical, non-contact technology	Confocal Multi-pinholes system
Simple operation	Dynamic real-time synchronization & User friendly interface
Nanometer accuracy	Vertical resolution (1nm), Lateral resolution(0.31 μ m)
Robust technology	Precise acquisition of complex geometry & Insensitive echnology to mechanical vibrations

2. AFM

AFM은 Probe Tip(지름 100\AA 이하)과 시편 표면 사이의 Interaction(Bend or Deflection)을 laser beam의 위치감응 광 다이오드 검출기(PSPD)로 측정함으로써 초미세 구조를 가지고 있는 시편의 표면 영상을 최대 1,000만 배의 배율로 획득 가능한 현미경이다. 도체나 부도체 및 폴리머, 박막 등의 샘플의 파괴나 손실 없이 삼차원 높이 및 깊이를 측정하여 입체 표면 영상화가 가능한 시스템이며 본 연구에서는 PSIA사의 XE-200 System 모델을 이용하여 접촉식으로 측정하였다.



Fig. 3-7 AFM

Table. 3-4 AFM Technical Data

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 μ m (low voltage mode : 10 μ m)
Scan Speed	2 μ m /sec to 200 μ m/sec or more Vertical range : 262 μ m or more
Resolution	< 0.15nm (Low voltage mode : < 0.02nm)
Zoom optics	500X
Stylus Tip	5 μ m or more
Sample size	Up to 200 mm x 200 mm, 20 mm thick

제 3 절 실험방법

본 연구에서는 디지털 홀로그래피 시스템을 이용하여 Molybdenum 박막의 결함을 평가하고자 하였다. 대상물 특성에 따라 반사형 간섭계인 Michelson 간섭계를 기초로 Fig. 3-5와 같이 디지털 홀로그래피 시스템을 구성한다.

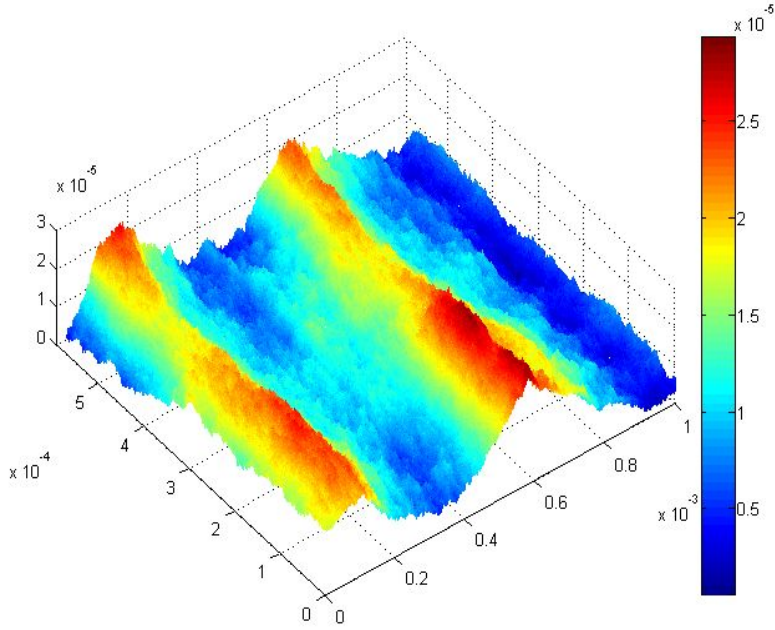
박막 시험편 측정 시 위상 이동을 위해 PZT 압전소자로 8-STEP의 변화를 주며 Reference와 Object 각각 8번씩의 변화된 위상을 기록하고 기록된 위상을 이용하여 Phase map을 획득한다. 이 정보를 이용하여 3차원과 2차원으로 Reconstruction을 하는데 이 때, 노이즈를 제거하고 데이터 피팅을 통해 표면 형상 이미지와 표면 조도 값을 획득한다.

디지털 홀로그래피 시스템으로 획득한 데이터 값에 대한 신뢰성을 얻기 위해 상용화된 표면 형상 측정 및 조도 측정 장비인 Surface Profiler(모델명 : uSurf)와 AFM(모델명 : XE- 200 System)로 제작한 시험편의 표면 형상 및 조도를 측정하여 디지털 홀로그래피 시스템 결과 데이터와 비교 분석하였다.

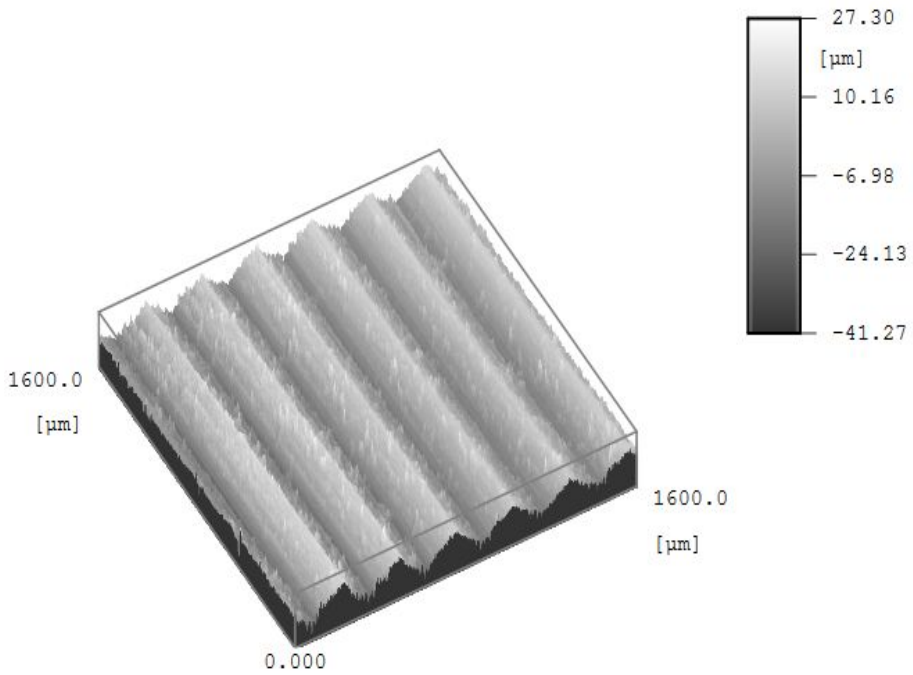
제 4 장 Experiment Result

제 1 절 표준 조도 시험편

디지털 홀로그래피 시스템으로 표준 조도 시험편의 25 μm 영역을 측정하여 획득한 홀로그램을 수치적 재생 방법으로 Fig. 4-1 (a)와 Fig. 4-2 (a)와 같이 각각 3차원, 2차원적으로 재생하고 Profile 정보를 Fig. 4-3의 (a)와 같이 획득하였다. 획득한 평균 조도값은 23.48 μm 였다. Surface Profile로 측정한 결과 Fig. 4-1, 4-2, 4-3의 각각 (b)와 같이 나왔으며 평균 조도값 25.53 μm 로 약 8 %의 오차율이 발생하였다.

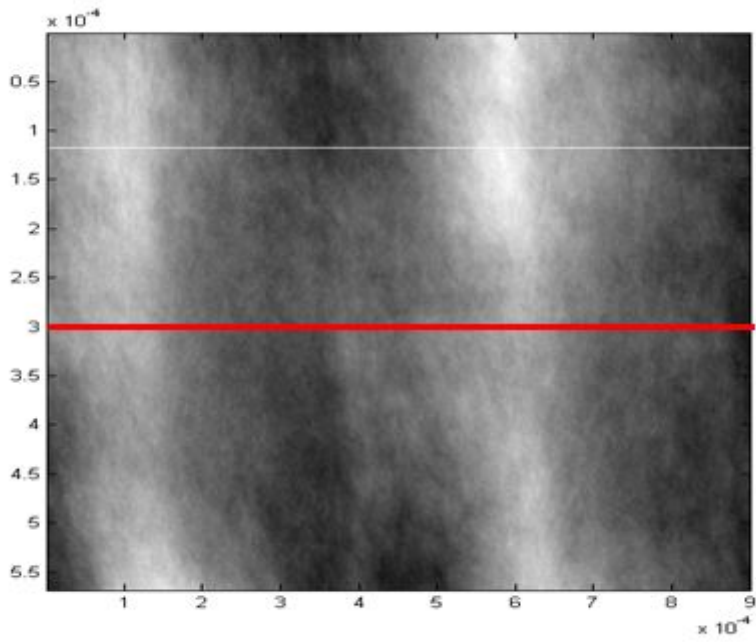


(a) Digital Holography System

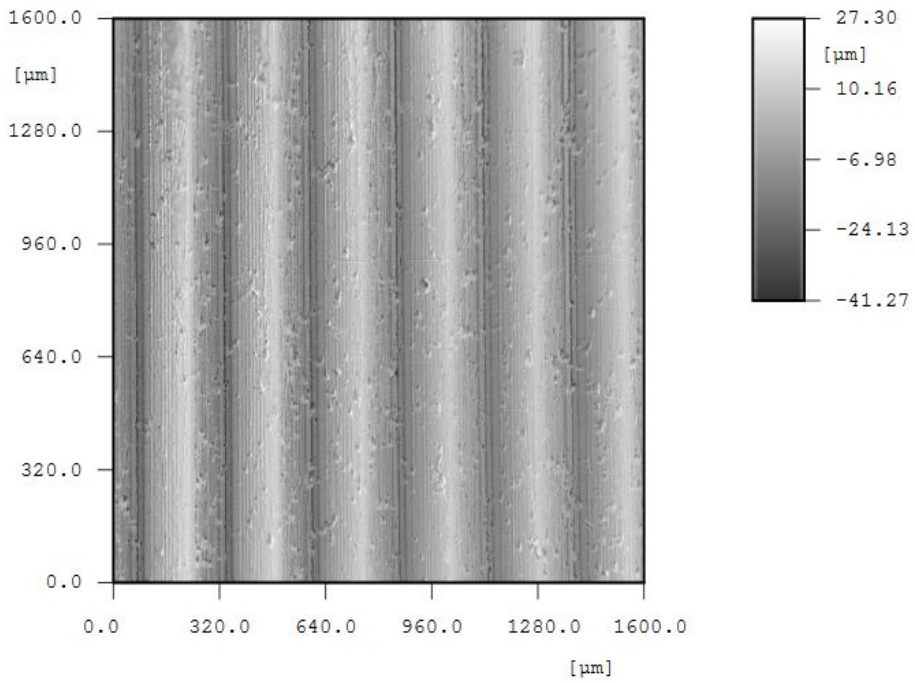


(b) Surface Profiler

Fig. 4-1 Standard Test Piece 3D Measurement Result

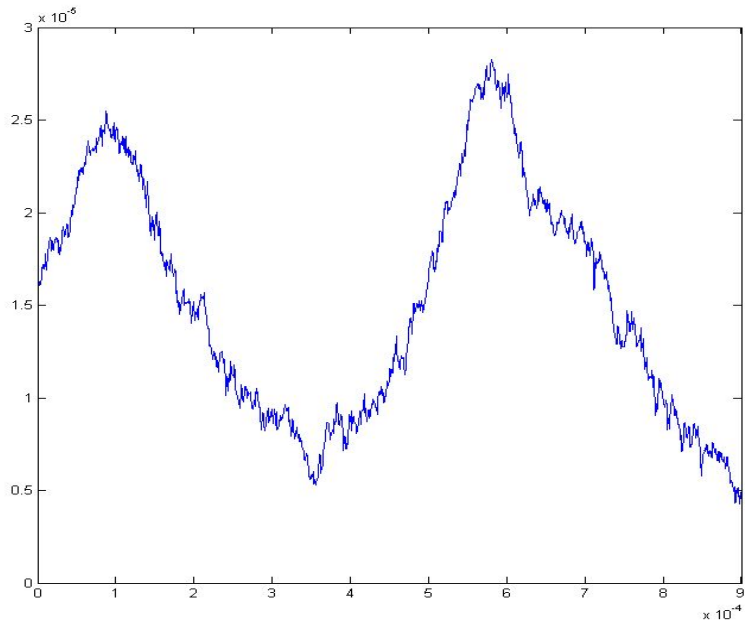


(a) Digital Holography System

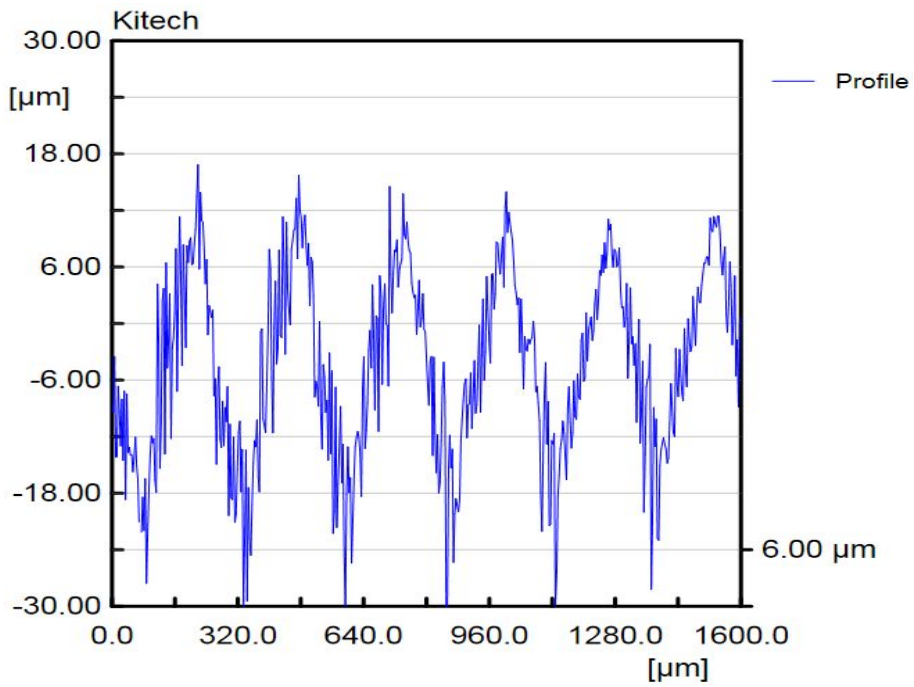


(b) Surface Profiler

Fig. 4-2 Standard Test Piece 2D Measurement Result



(a) Digital Holography System

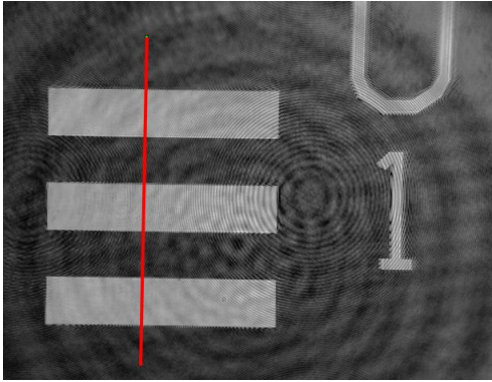


(b) Surface Profiler

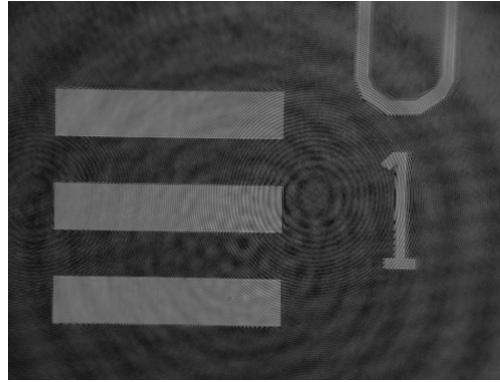
Fig. 4-3 Standard Test Piece Profile Graph

제 2 절 Resolution Target

PZT 압전소자를 이용한 Translator를 위상이동 기법으로 4-Step만큼 움직였을 때 위상차가 2π 만큼 움직이도록 제어하고 각 Step마다 획득한 이미지를 분석하여 Angle 값과 Intensity 값을 획득한다. 마흐젠더 간섭계를 이용한 디지털 홀로그래피 시스템으로 Negative Resolution Target을 측정하여 획득한 홀로그램 이미지를 수치적 재생 방법으로 재생하고 Fig. 4-4와 같이 측정된 패턴에 Profile의 높이 정보를 확인한 결과 553 nm로 나왔으며 상용 장비인 Surface Profiler로 측정했을 때 604 nm로 나와 92 %의 정확도를 보여주었다. 오차는 시험편에 묻은 이물질 또는 측정 시 환경적인 요인이나 획득한 홀로그램의 노이즈로 인한 것으로 판단된다. 이로써 디지털 홀로그래피 시스템으로 투명한 대상물을 측정할 때 노이즈를 줄이고 보정을 하는 등의 방법을 통해 보완한다면 더 높은 분해능과 정확도를 가지는 시스템이 될 것으로 사료된다.



(a) Hologram image



(a) Unwrapping image

Fig. 4-4 Digital Holography System Resolution Target 2D Measurement Result

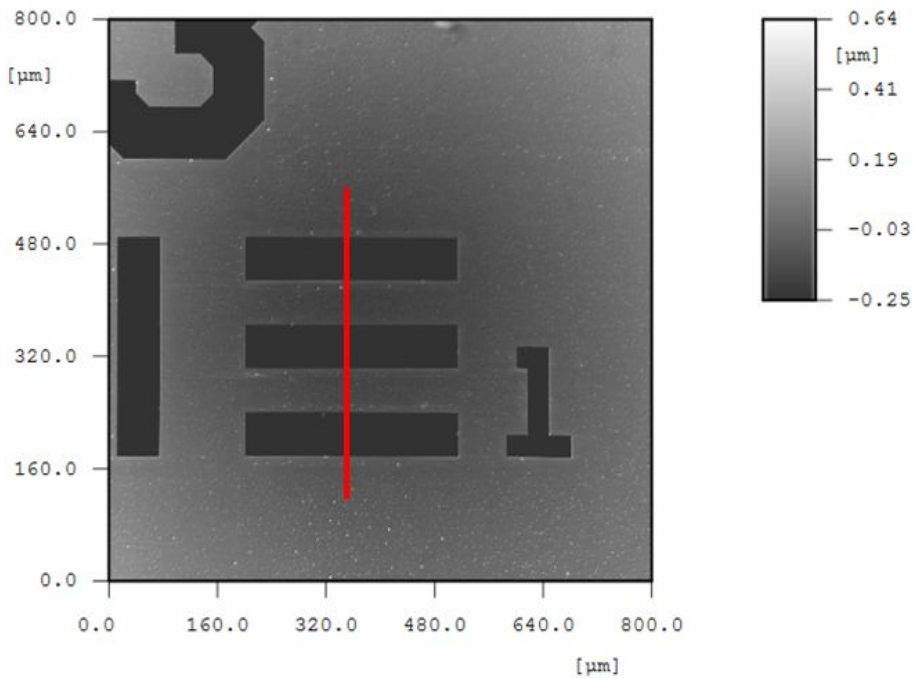
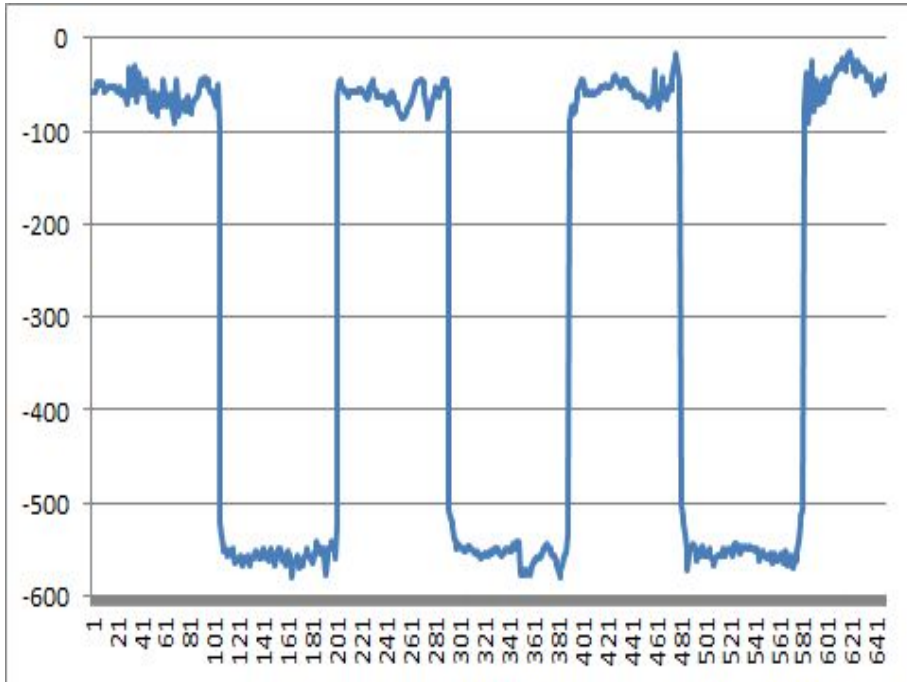
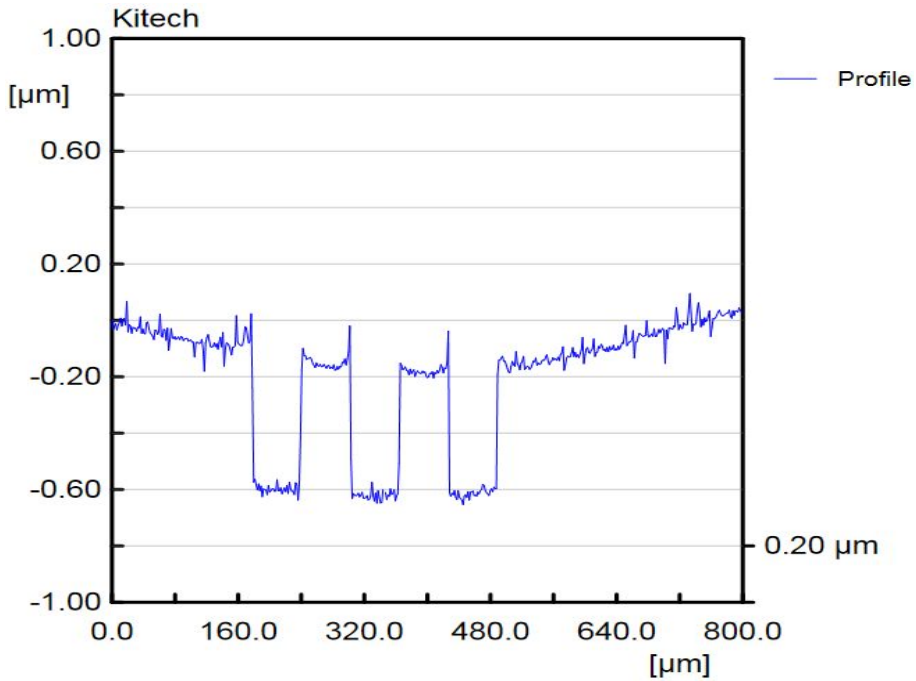


Fig. 4-5 Surface Profiler Resolution Target 2D Measurement Result



(a) Digital Holography System



(b) Surface Profiler

Fig. 4-6 Resolution Target Profile Graph

제 3 절 Molybdenum 박막 시험편

반사형 디지털 홀로그래피 시스템을 이용하여 Molybdenum 박막을 측정하여 Fig. 4-7 (a)와 Fig. 4-8의 (a)에 Clean한 박막 시험편을 Fig. 4-12의 (a)와 Fig. 4-13의 (a)에 Dirty한 박막 시험편을 각각 3차원과 2차원으로 재생한 결과를 보여주고 있다. Reconstruction한 결과인 2D와 3D 이미지를 보면 Clean한 박막 시험편과 Dirty한 박막 시험편의 차이를 식별할 수 있으며 Particle로 인한 결함 모양 또한 판별 가능하였다. Profile 그래프를 보면 Clean한 박막 시험편의 경우는 Max 값이 104 nm, Min 값이 72 nm 로 비교적 데이터가 일정하고 단차가 작으나 Dirty 박막 시험편의 경우 Max 값이 148 nm, Min 값이 65 nm 로 데이터가 일정하지 않고 단차 역시 커 결함의 유무에 따른 차이를 볼 수 있었다.

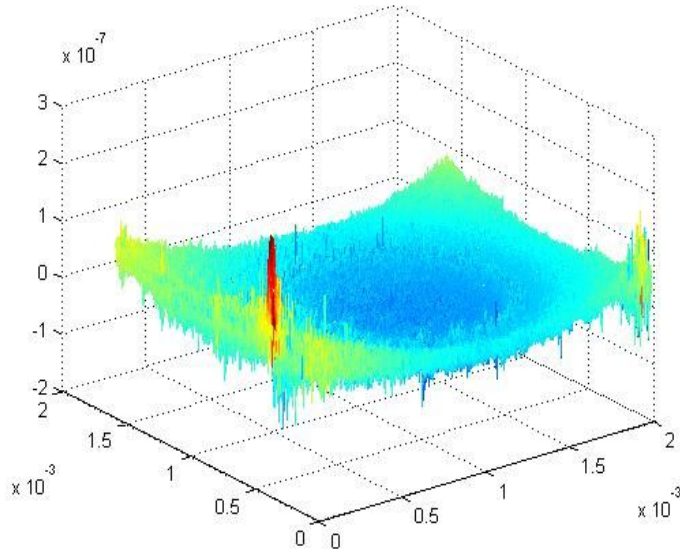
본 실험 결과의 비교를 위하여 타 상용 장비인 Surface Profiler로 측정한 결과를 Fig. 4-7 (b)와 Fig 4-8 (b), Fig. 4-12 (b)와 Fig. 4-13 (b)에 Clean한 박막 시험편과 Dirty 박막 시험편을 3차원과 2차원으로 나타내고 있다. 또한 AFM으로 측정하고 Fig. 4-8 (c)와 Fig. 4-13 (c)에 Clean, Dirty 박막 시험편의 측정 결과를 나타내었다. 이렇게 측정한 결과를 이용하여 Fig. 4-9와 Fig. 4-14에 두 종류의 시험편의 조도를 Profile로 확인한 결과를 나타내었다.

이러한 측정 결과를 보면 디지털 홀로그래피 시스템으로 측정한 결과보다 상용 장비로 측정한 결과가 확연한 차이를 보여주는 경향이 보였으나 측정 영역이 각 장치마다 다르기 때문에 결과 또한 다르게 나와 비교를 위해 각각의 평균 조도를 구해 Table. 4-1에 나타내었다. Clean한 박막 시험편과 Dirty 박막 시험편을 디지털 홀로그래피 시스템으로 측정한 평균 조도는 각각 86.2 nm, 108.5 nm 이고 Surface Profiler로 측정한 평균 조도는 각각 1.5 nm, 9.96 nm 로 나왔으며 AFM으로 측정한 평균 조도는 1.56 nm, 37.89 nm 이다. 이와 같이 결과를 보면 디지털 홀로그래피 결과 값이 타 장비 결과에 비해 큰 값을 갖는 다는 것을 알 수 있다. 이는 두 가지 이유에 의해 차이가 나는 것으로 판단이 된다. 첫 번째는 디지털 홀로그래피 시스템 구성에 M0가 사용되는데 렌즈의 구면 수차 감소 부분에 있어 보완해야 할 점이 있다는 것이고, 두 번째는 측정 영역이 다른 장비들에 비해 넓은 것이다. 디지털 홀로그래피 시스템의 측정 영역은 2 mm X 2 mm 이며 Surface Profiler의 측정 영역은 800 μm X 800 μm , AFM은 40 μm X 40 μm 로 측정한 세 종류의 시스템 중 디지털

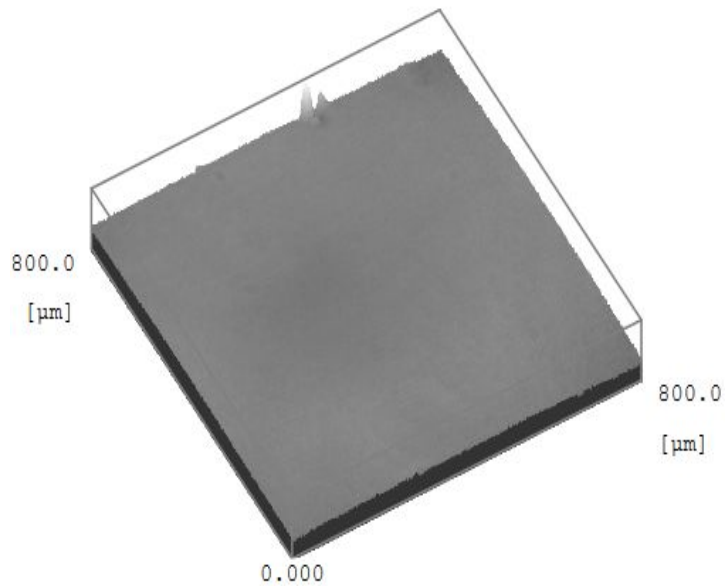
홀로그래피 시스템의 측정 영역이 가장 커서 오차율이 발생한 것으로 판단된다.

1. Clean Molybdenum 박막 시험편 측정 결과

Clean한 Molybdenum 박막 시험편을 측정 시 Reference로 삼을 것이 없기 때문에 디지털 홀로그래피의 강점인 컴퓨터를 이용하여 Reference용으로 평평한 면을 만들고 8-Step 위상이동 기법에 따라 측정한 이미지를 Subtraction한다. 이를 이용하여 대상체의 형태를 재생하고 Surface Profiler와 AFM으로 측정하여 조도값을 확인하였다.

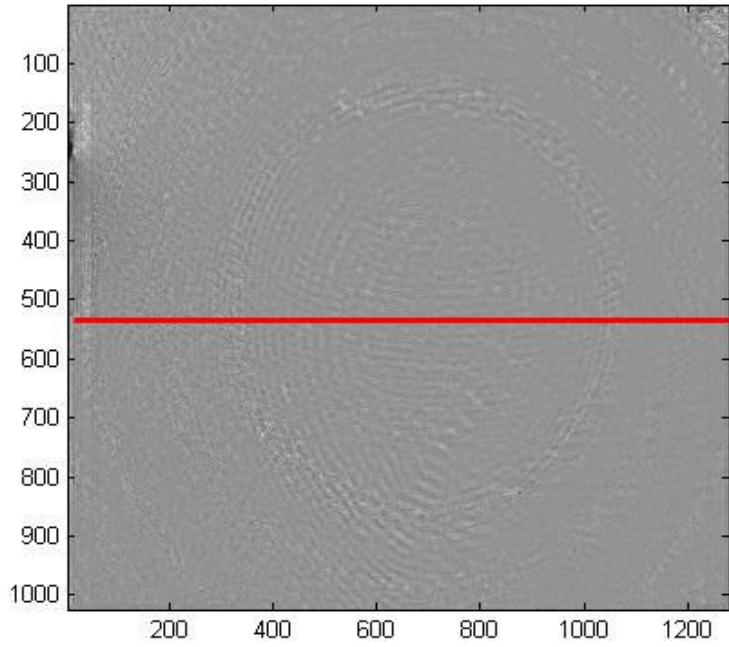


(a) Digital Holography System

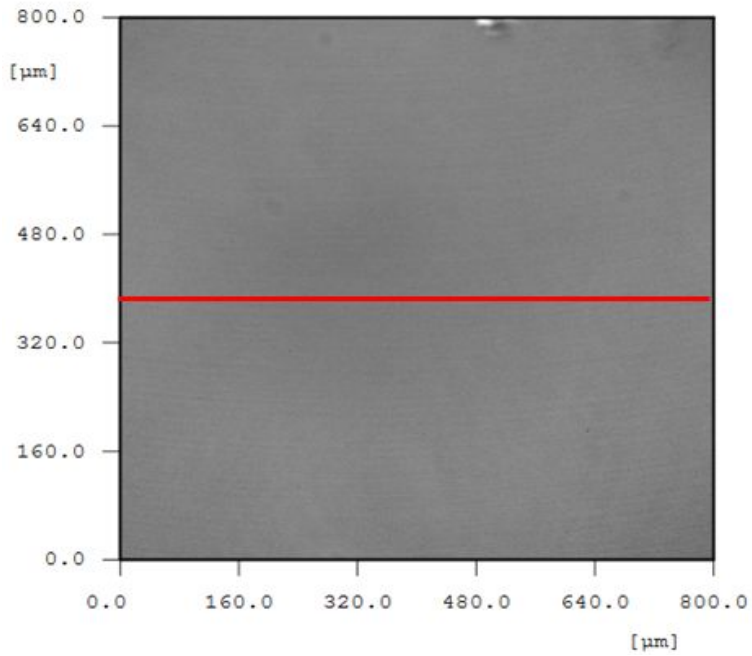


(b) Surface Profiler

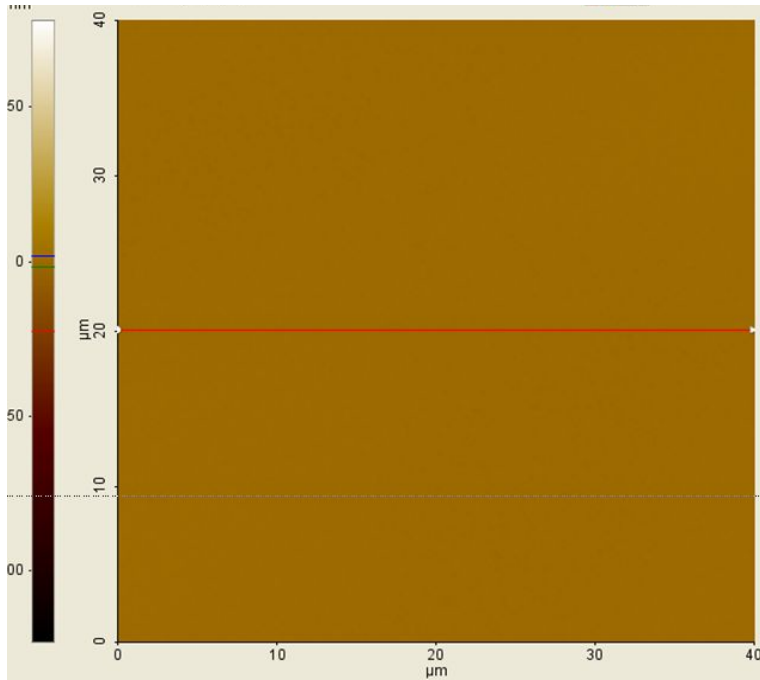
Fig. 4-7 Clean Molybdenum Thin Film 3D Measurement Result



(a) Digital Holography System

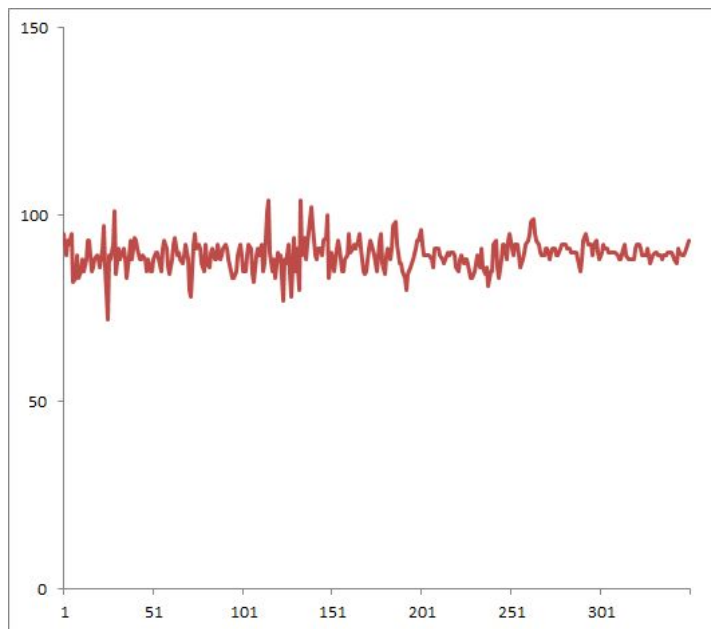


(b) Surface Profiler

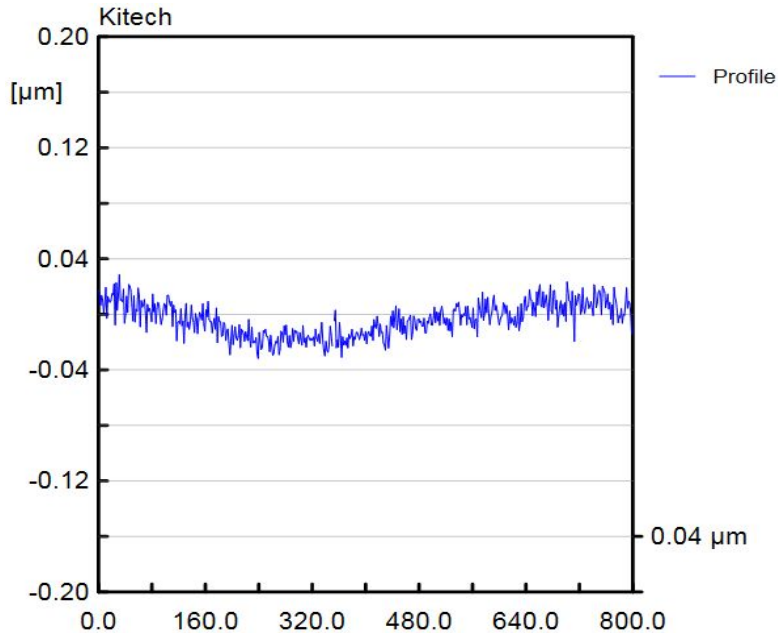


(c) AFM

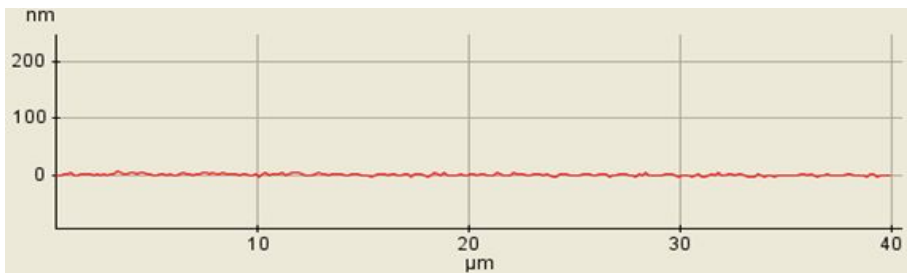
Fig. 4-8 Clean Molybdenum Thin Film 2D Measurement Result



(a) Digital Holography System



(b) Surface Profiler



(c) AFM

Fig. 4-9 Clean Molybdenum Thin Film Profile Graph

2. Dirty Molybdenum 박막 시험편 측정 결과

Dirty Molybdenum 박막 시험편은 Clean Molybdenum 박막 시험편을 Reference로 하여 측정 시 광학부품의 Dust로 인한 오류를 최소화하여 측정하였다.

Step	Object	Reference
1		
2		
3		
4		

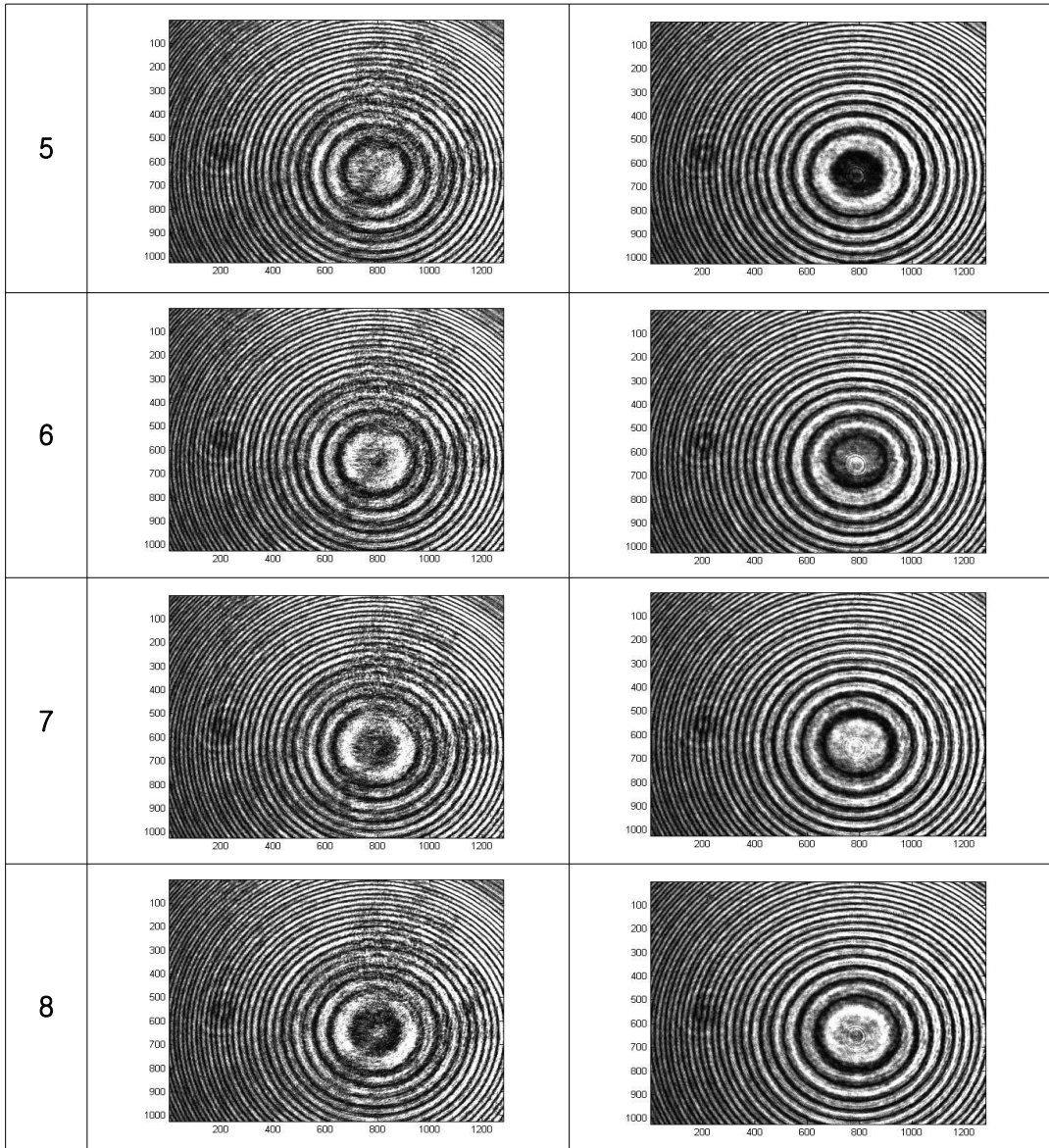


Fig. 4-10 8-Step Phase Shifting Image

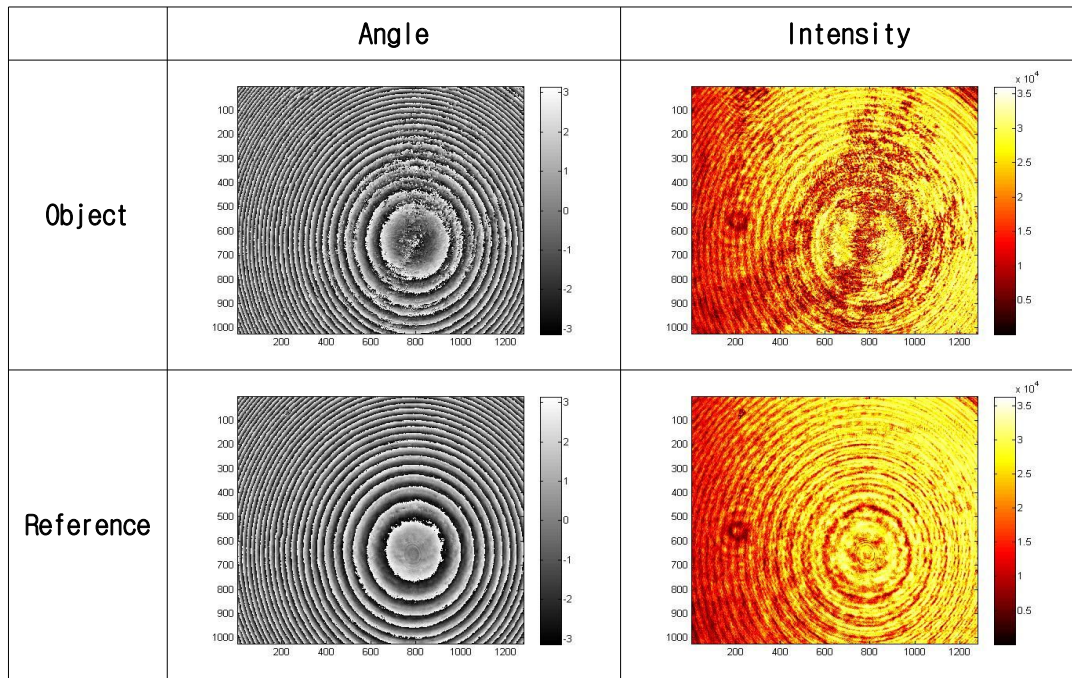
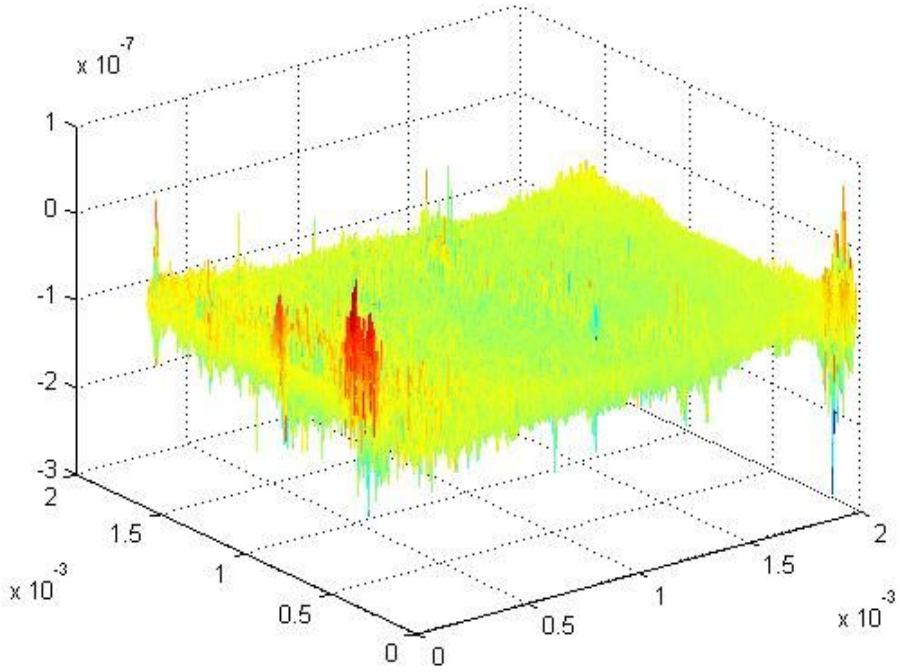
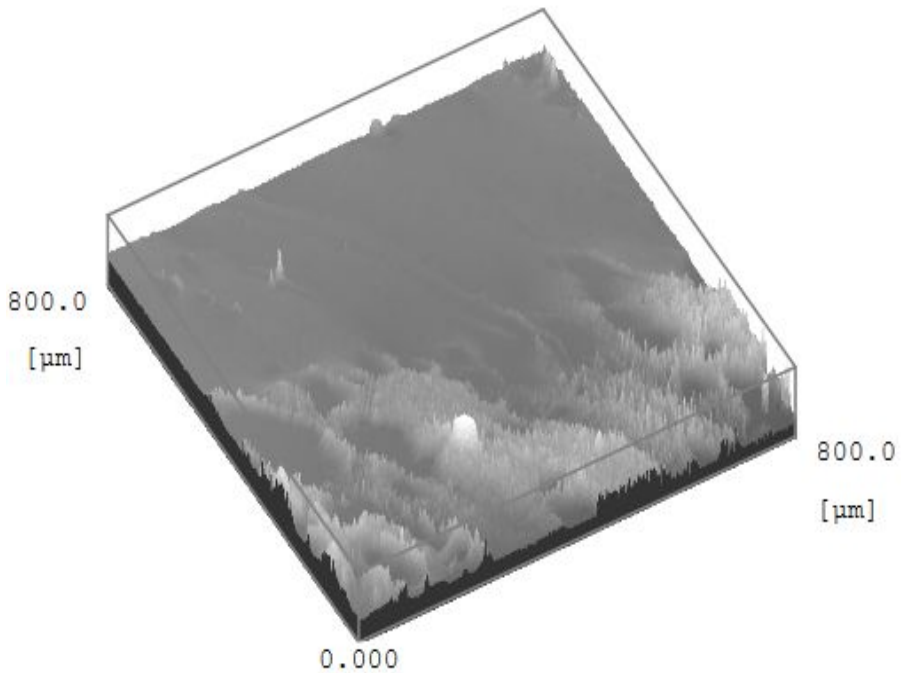


Fig. 4-11 Angle & Intensity Result

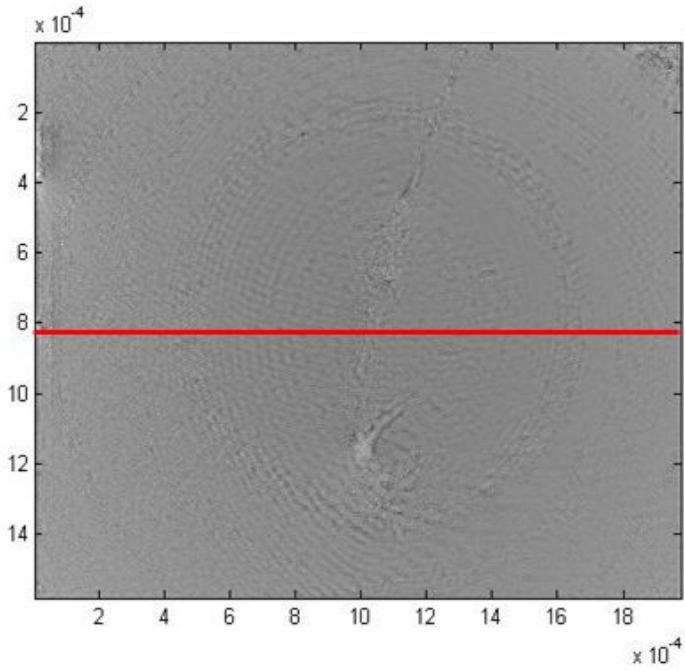


(a) Digital Holography System

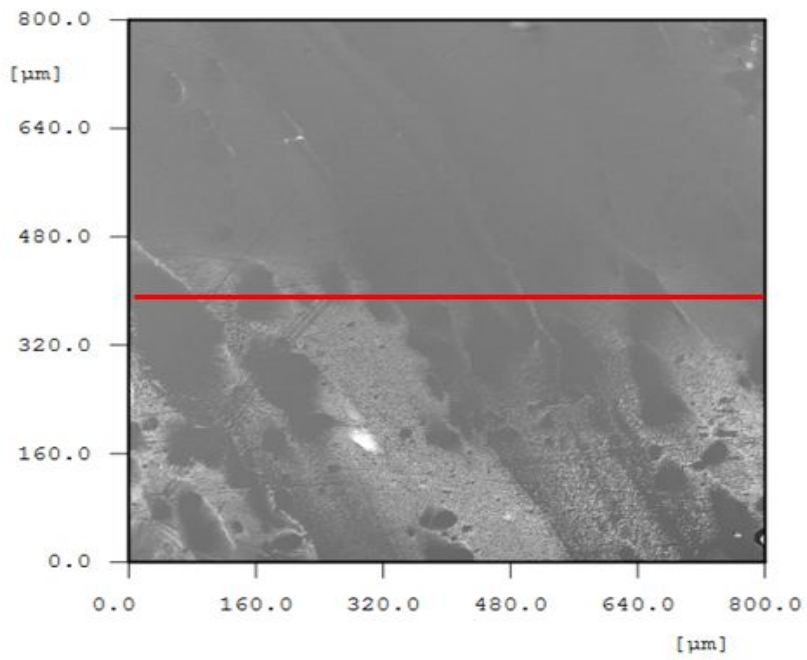


(b) Surface Profiler

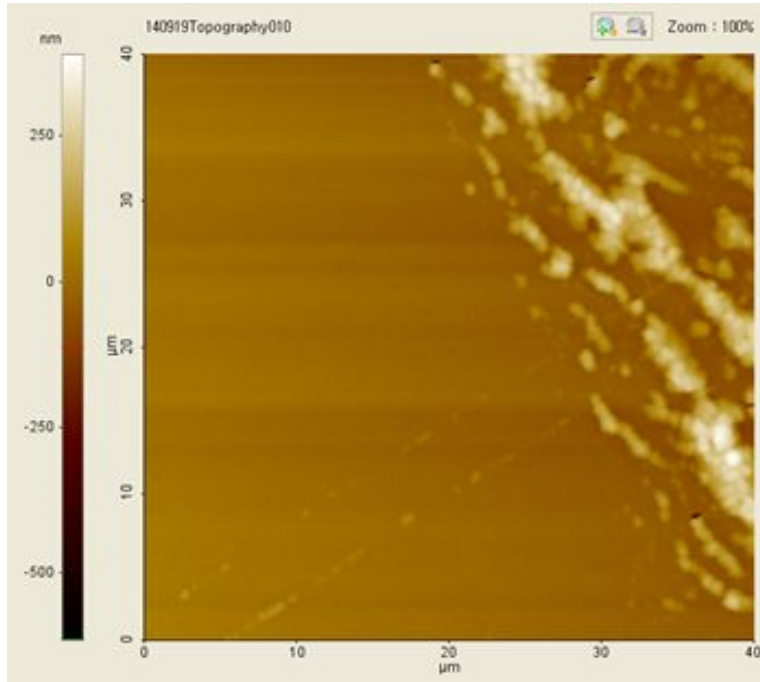
Fig. 4-12 Dirty Molybdenum Thin Film 3D Measurement Result



(a) Digital Holography System

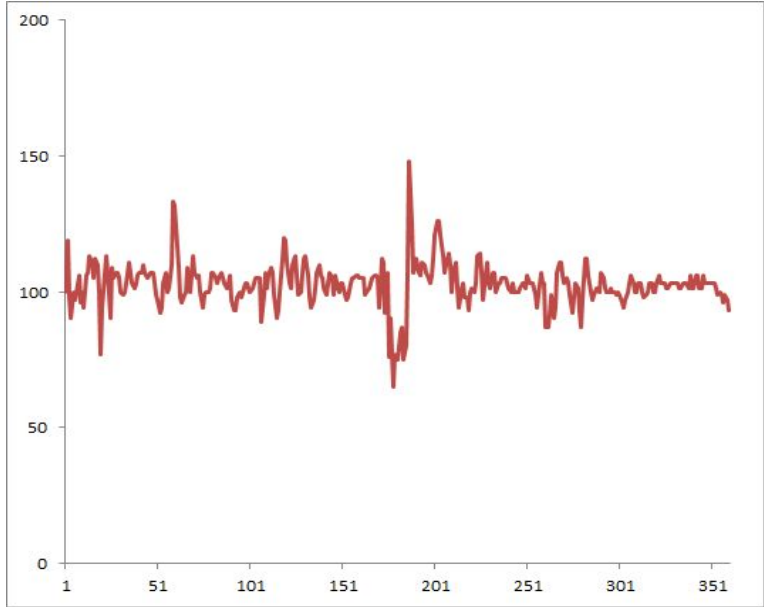


(b) Surface Profiler

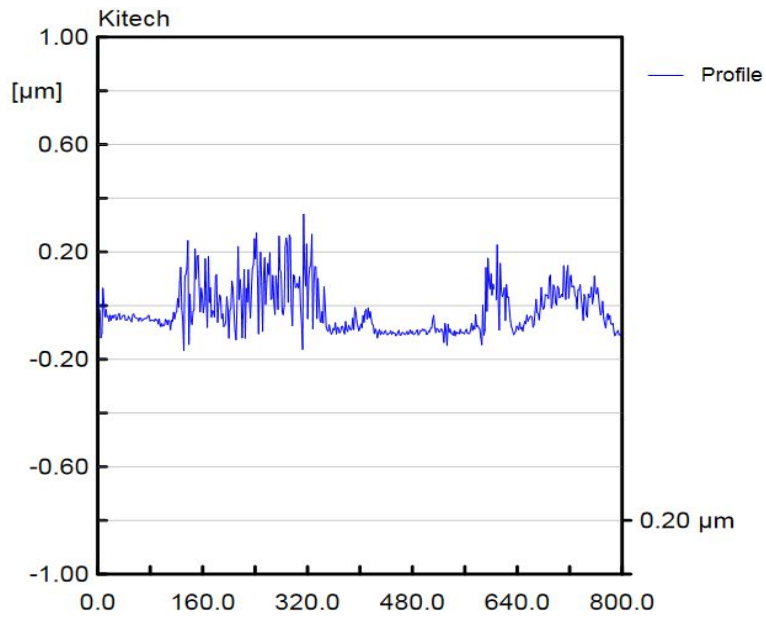


(c) AFM

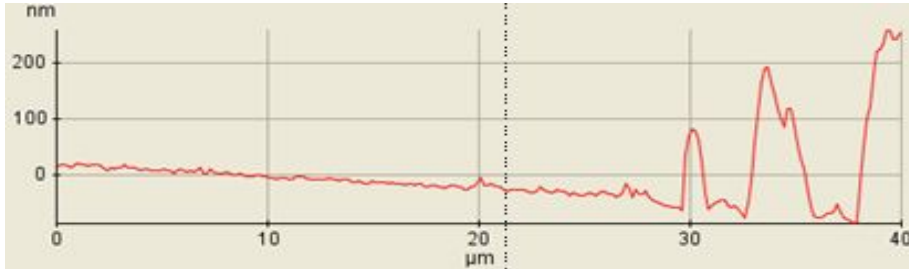
Fig. 4-13 Dirty Molybdenum Thin Film 2D Measurement Result



(a) Digital Holography System



(b) Surface Profiler



(c) AFM

Fig. 4-14 Dirty Molybdenum Thin Film Profile Graph

Table. 4-1 Avg. Roughness [nm]

Specimen	Digital Holography system	Spatial Profiler	AFM
Clean Avg. Roughness	86.2	1.50	1.56
Dirty Avg. Roughness	108.5	9.96	37.89

제 5 장 Conclusion

본 논문에서는 반사형 디지털 홀로그래피 시스템을 이용하여 Sub-Strate 표면이 깨끗한 것과 Particle 이 있는 표면에 Molybdenum을 증착한 박막 시험편을 측정하여 재생하였으며 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 디지털 홀로그래피 시스템을 이용하여 측정하고 2차원 및 3차원으로 재생하여 결함의 유무를 식별 가능함을 통해 박막의 결함 검사가 가능함을 확인하였다.

2) 여러 환경적인 요인과 측정 범위가 크고 영역이 각기 달라 오차율이 발생하고 분해능이 떨어지는 결과가 발생하여 상용 장비들과의 비교가 어려웠으나 측정 영역을 줄임으로써 분해능을 높이고 오차 범위를 줄임으로써 신뢰성을 확보한다.

3) 디지털 홀로그래피 시스템은 비파괴, 비접촉식으로 박막의 결함을 측정할 수 있는 장치로 꾸준한 연구를 통해 박막의 성능 저하, 수명 단축 및 안전도 저하를 방지하는데 기여하는 검사 장치가 될 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] D. Gabor, "A new microscopic principle," Nature 161, No.4098, pp. 777-778 (1948)
- [2] D. Gabor, "Microscopy by reconstructed wavefront," Proc. Roy. Soc. 197, pp. 454-487 (1949)
- [3] D. Gabor, "Microscopy by reconstructed wavefront II," Proc. Phys. Soc. 64, pp. 449-469 (1951)
- [4] U. Schnars, W. Juptner, "Direct recording of holograms by a CCD-target and numerical reconstruction", Appl. Opt. 33(2), pp. 179-181 (1994)
- [5] U. Schnars, W. Juptner, "Digital recording and numerical reconstruction of holograms", Meas. Sci. Technol. 13, pp. R85-R101 (2002)
- [6] Ulf Schnars, Werner Jueptner, "Digital holography", Springer, pp. 18-20 (2003)
- [7] J. W. Goodman, R. W. Lawrence, "Digital image formation from electronically detected holograms", Appl. Phys. Lett., vol. 11, pp. 77-79(1967)
- J. W. Goodman, "Some fundamental properties of speckle", Journal of the Optical Society of America, Vol 66, pp.1145-1150, 1976.
- [8] M. A. Kronrod, N.S. Merzlyakov, and L. P. Yaroslavskii, "Reconstruction of a hologram with a computer", Sov. Phys. Tech. Phys., vol. 17, pp. 444-334 (1972)
- [9] K. Curtis, L. Dhar, A. Hill, W. Wilson, and M. Ayres, "Holographic Data Storage: From Theory to Practical Systems," (2010)
- [10] H. Coufal, D. Psaltis, and G. T., "Holographic data storage, Springer series in optical sciences", Sincerbox, (2000)
- [11] 손정영, "홀로그래피의 원리와 응용", pp.221 (2004)

저작물 이용 허락서					
학 과	첨단부품소재공학과	학 번	20137112	과 정	석사
성 명	한글: 정 현 일 한문: 鄭 現 一 영문: Jung, Hyun-Il				
주 소	광주광역시 남구 주월2동 명지APT 102동 606호				
연락처	e-mail : junghi0713@gmail.com				
논문제목	한글: 디지털 홀로그래피를 이용한 박막 결함 측정에 대한 연구 영문: A Study on the Defect Measurement of Thin Film Using Digital Holography				
<p>본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.</p> <p style="text-align: center;">- 다 음 -</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함 2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함. 3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함. 4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함. 5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함. 6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음 7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함. <p style="text-align: center;">동의여부 : 동의(○) 반대() .</p> <p style="text-align: center;">2014 년 10 월</p> <p style="text-align: center;">저작자: 정 현 일 (인)</p> <p style="text-align: center;">조선대학교 총장 귀하</p>					