



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](#)

2009 년 2월  
석사학위논문

디지털 홀로그래피를 이용한  
인장시험편 파단면의  
표면조도측정

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

김 현 민

디지털 홀로그래피를 이용한  
인장시험편 파단면의  
표면조도측정

Measurement of Surface Roughness in a crack surface  
specimen by Digital Holography

2009년 2월 25 일

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

김 현 민

디지털 홀로그래피를 이용한  
인장시험편 파단면의  
표면조도측정

지도교수 김 경 석

이 論文을 工學碩士學位 論文으로 提出함

2008년 10월

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

김 현 민

# 金賢旻의 碩士學位論文을 認准함

委員長 朝鮮大學校 教授 金 在 烈 印

委 員 朝鮮大學校 教授 梁 光 永 印

委 員 朝鮮大學校 教授 金 庚 錫 印

2008年 11月

朝鮮大學校 大學院

# - 목 차 -

LIST OF TABLE .....	III
LIST OF FIGURE .....	IV
ABSTRACT .....	VI
제 1 장 서 론 .....	1
제 1 절 연구배경 .....	2
제 2 절 연구목표 및 내용 .....	3
제 2 장 이론적 배경 .....	4
제 1 절 홀로그래피의 기초이론 .....	4
1. 파동방정식 .....	4
2. 구면파와 평면파 .....	5
3. 회절 .....	5
4. 간섭 .....	6
제 2 절 디지털 홀로그래피 .....	8
1. 일반적 개념 .....	8
2. 디지털 홀로그램의 재생 .....	12
제 3 절 스펙클의 기초이론 .....	14
제 4 절 필터링 .....	18

제 3 장 실험장치 및 방법 .....	20
제 1 절 실험장치 .....	20
1. 반사형 간섭계 .....	20
2. 투과형 간섭계 .....	21
3. 인장시험기 .....	22
4. 적외선 열화상 카메라 .....	23
제 2 절 실험방법 및 시험편 .....	24
제 4 장 실험결과 및 분석 .....	26
제 1 절 디지털 홀로그래피 개발 프로그램 적용 .....	26
제 2 절 인장 속도에 따른 부피와 온도변화 측정 .....	29
제 3 절 반사형 간섭계를 이용한 표면 거칠기 측정 .....	33
1. 파단면의 표면 거칠기 측정 .....	33
2. 기계가공 시험편의 표면 거칠기 측정 .....	36
3. 인장속도에 따른 각 위치별 표면 거칠기 측정 .....	38
제 5 장 결론 .....	47
참고문헌 .....	48

## - LIST OF TABLE -

Table 2-1 Specifications of UTM .....	22
Table 2-3 Specifications of IR and CCD camera .....	23
Table 4-1 The reconstruction image in a 3mm/min tensile speed .....	38
Table 4-2 The reconstruction image in a 5mm/min tensile speed .....	39
Table 4-3 The reconstruction image in a 7mm/min tensile speed .....	40
Table 4-4 The reconstruction image in a 9mm/min tensile speed .....	41



## - LIST OF FIGURE -

Fig. 2-1 Digital holography basic expression .....	10
Fig. 2-2 Coordinate system for numerical reconstruction .....	11
Fig. 2-3 Coordinate system for numerical reconstruction .....	15
Fig. 2-4 Subjective speckle size on the CCD image plane .....	17
Fig. 2-5 Concept of median filtering .....	18
Fig. 2-6 Example of median filtering .....	19
Fig. 3-1 Transmitted interferometry for holography .....	20
Fig. 3-2 Reflected interferometry for holography .....	21
Fig. 3-3 UTM Device .....	22
Fig. 3-4 Measurement of temperature and volume by CCD and Infrared camera .....	23
Fig. 3-5 Specimen Specifications .....	24
Fig. 3-6 Sort of specimen detection zone .....	25
Fig. 3-7 Resolution target .....	25
Fig. 4-1 System of Mach Zheneder interferometer .....	26
Fig. 4-2 USAF1951 target hologram image 2 dimensional reconstruction .....	27
Fig. 4-3 USAF1951 target hologram image 3 dimensional reconstruction .....	27
Fig. 4-4 Measurement height by line profiling .....	28
Fig. 4-5 Measurement height data processing .....	28

Fig. 4-6 Specimen result by tensile speed .....	29
Fig. 4-7 Temperature evolution by tensile .....	30
Fig. 4-8 Data comparison of the inclination tendency by tensile speed .....	31
Fig. 4-9 System of Michesion interferometer .....	33
Fig. 4-10 Fractured surface 2 dimensional reconstruction .....	34
Fig. 4-11 Fractured surface 3 dimensional reconstruction .....	34
Fig. 4-12 A surface of standard specimen 2 dimensional reconstruction .....	36
Fig. 4-13 A surface of standard specimen 3 dimensional reconstruction .....	37
Fig. 4-14 The expressed height according to Y pixel in a standard specimen surface .....	37
Fig. 4-15 Comparison of average height by Fracture surface to distance .....	42
Fig. 4-16 Comparison of Maximum height by distance .....	43
Fig. 4-17 Distribution of average height in the detected zones .....	44
Fig. 4-18 T The temperature variation and 2D reconstruction surface image according to tensile speed in 0mm zone .....	45
Fig. 4-19 The temperature variation and 2D reconstruction surface image according to distance in 5mm/min tensile speed .....	45

# ABSTRACT

## Measurement of Surface Roughness in a crack surface specimen by Digital Holography

Kim, hyunmin

Advisor Prof. Kim, Koungsuk Ph.D.

Department of Advanced Parts and  
Materials Engineering

Graduate School of Chosun University

Holography involves recording a modulated form of a desired object wave. It is also known as wave front reconstruction. The resulting device is called a hologram. This technique is more commonly known as diffractive. Some other terminologies used for diffractive optics are computer-generated holography, diffractive optical elements (DOEs), and binary optics. Holography was first discovered by Dennis Gabor in 1948, which is before the invention of the laser. Being a communications engineer, he recognized that the intensity resulting from the sum of a desired wave and a reference wave carries the information on both the amplitude and the phase of the object wave.

Digital holography enables the storage of the whole optical wave field by a complex vector component proportional to electric or magnetic vector.

The reconstruction is performed by the numerical simulation of the diffraction of the reference wave at the hologram in most of the cases. Holographic imaging depends on a number of parameters such as wavelength

and CCD pixel size and reconstruction distance.

Holography is now used widely as a display medium. In addition, it is firmly established as a tool for scientific and engineering studies, and has found a remarkably wide range of applications for which it is uniquely suited. For example, measure of height and movement in a cell, X-ray application, measurement for the determination of material quantities, evaluation of the refractive index, distance shape control. However this application just used the medical and biology industry. According this thesis is expanded the field in a metal material of machine.

For reconstruction of specimen, the hologram is need to expressed parameters and reconstruction basic theory. There are three main reconstruction algorithms most widely used. Each method has different properties with respect to available reconstruction distance, resolution of reconstructed image, and computational load. This is very important for reliable reconstruction to choose the appropriate method in a given situation. In a accordance with, the reconstruction algorithm for this thesis is choose the angular spectrum method. Because this method correctly reconstructed near wavefields for more diffractive that the micro variation of object surface.

In this thesis, the variation of outside condition is appeared to the temperature and volume, surface roughness of specimen. In the accordance with, the evolution is detected to Infrared camera and charged coupler device(CCD), system of Michelson interferometer. This condition is associated with each other. The thesis found it the association. That research isn't attempt to other technician so it has important things. The analysis of experiment will explain the next contents.

Firstly, the tendency of volume variation according to temperature was measure liner. So the variation of temperature increase fracture moment. Also the surface roughness of fractured surround district increase abruptly because of fracture influence.

Secondly, the fractured surface roughness isn't has variation in the changed

tensile speed. This result explained which that roughness according to changed tensile speed influence the surround district.

Third, the analysis explain the specimen surface appear to necking situation. Also using the above analysis data measured necking position.

Lastly, the temperature and surface roughness are detectable in the required distance of fractured surface.

In this thesis, the specimen variation according to outside condition measured the quantitative evaluation. The system of interferometer measured  $10^{-9}$  unit. So, the micro variation and crack of object will be detectable. That result is very useful in the nondestructive testing method in industry.

# 제 1 장 서론

## 제 1 절 연구배경

최근에 홀로그래피 기술이 각 분야에서 응용되면서부터 홀로그래피라는 말이 널리 알려지게 되었으나, 홀로그래피의 원리는 비교적 오래 전부터 알려져 있었던 것으로, 1948년 Dennis Gabor가 전자현미경의 분해능을 향상시킬 목적으로 생각해낸 영상방법이 홀로그래피 기술이다. 종래의 사진이 물체의 밝고 어두운 면의 분포만을 기록한 데 반해서 홀로그래피는 파동으로서 빛이 가지는 모든 정보, 즉 진폭과 위상(位相)을 동시에 축적하고 재생한다는 뜻으로 생각할 수 있다. 실제로 우리에게 소개된 것은 레이저가 개발되고 난 1960년 이후 부터이다. 이후 Goodman 과 Laurence에 의해서 홀로그램을 수치적으로 재생할 수 있는 방법이 제안 되었으며, Krrod 가 컴퓨터를 이용하여 수치적 재생을 구현 하였다. Schnars 와 Juptne에 의해서 홀로그램이 필름이 아닌 CCD 에 직접 기록함으로써 이것을 저장하고 재생하는 전 과정을 컴퓨터를 통해서 처리할 수 있게 되었다. 그 후 홀로그램의 저장매체가 검광판 대신에 CCD를 사용한 것을 디지털 홀로그래피라고 부르게 되었다. 여기서 디지털 홀로그래피의 원리는 레이저 광원에서 나온 간섭성 빛을 광분할기(beam splitter)로 둘로 나누어 그 중 한 광선은 대상물에 비추게 하면 대상물 표면에서 난반사(亂反射)된 빛이 CCD의 상면에 도달한다. 이 광선을 물체광(物體光)이라고 한다. 나머지 다른 한 광선은 렌즈로 확산시켜 직접 홀로그래피 CCD의 상면 전면에 비추게 한다. 이 광선을 참조광(參照光)이라고 한다. 이렇게 되면 홀로그래피 CCD의 상면에 물체광과 참조광이 서로 간섭(干涉:interference) 현상을 일으켜 1 mm당 500~1,500개 정도의 매우 미세하고 복잡한 간섭무늬를 만든다. 이 간섭무늬를 기록한 영상을 디지털 홀로그램이라고 한다. 이와 같이 하여 만든 홀로그램에 참조광과 같은 광선을 쬐면 간섭무늬가 회절격자(回折格子)의 역할을 해서 참조광이 입사한 방향과 다른 위치에서 빛이 회절되는데, 이 같은 회절광이 모인 것이 마치 처음 물체에서 반사해서 생긴 빛과 같이 된다. 이와 같이 하여 홀로그램에서 처음의 물체광이 재생된다. 그렇기 때문에 재생된 파면(波面) 안에서 들여다보면 처음 물체가 보이기

는 하나 마치 물체가 저 안쪽에 있는 것처럼 보인다. 다시 보는 점을 옮기면 물체가 보이는 위치도 변하여 마치 입체사진을 보는 것처럼 보인다. 또 원래 물체의 파면(波面)이 재생되기 때문에 아주 약간 변형한 물체에서 나오는 파면과도 간섭시킬 수가 있다. 또한 홀로그래피는 렌즈를 사용하지 않고 광원상을 결상시킬 수다. 한 홀로그램에 다른 화상을 다중기록(多重記錄)하여 한꺼번에 재생할 수 있는 다중정보처리(多重情報處理)를 할 수 있는 기능이 있으며, 또 입체상(立體像)을 재현시킬 수 있기 때문에, 입체 텔레비전도 가능할 것이며, 영화필름을 홀로그램으로 전환시켜 놓았다가 필요에 따라 재생시키면 필름의 손상이나 먼지가 전혀 없는 셀렉터비전이 가능하다든지, 단과장광으로 촬영한 홀로그램을 장과장광으로 찍어 보면 상이 확대되어 보이기 때문에 X-선 현미 홀로그래피로서 생체 내부를 분자정도의 크기로 입체적으로 볼 가능성도 있다. 이와 비슷한 원리로 자외선이나 적외선 등의 불가시광선으로 촬영한 홀로그램을 가시광선으로 조명하여 볼 수도 있다.

최근 백색광으로 홀로그램의 재생과 합성이 가능해 홀로그램을 이용한 고화질의 3차원 영상 재생기술이 의료 진단분야에 유용하게 사용되게 됐다. 지난 10년 동안 선진국에서는 홀로그램 기술을 의학적으로 이용하는 연구가 활발히 진행됐고 실용화 단계까지 이르고 있다. 컴퓨터 단층촬영이나 핵 자기 공명 및 초음파 영상으로부터 얻어진 단편적인 영상들을 모아 이들을 중첩시켜 만든 다중 노출 홀로그램을 만드는 방법, 여러 가지 방향으로 찍은 X선 영상으로부터 합성해 만든 스테레오그램 홀로그램 방식이 그것이다. 다중 홀로그램이나 스테레오그램 홀로그램 등을 이용하기 위해선 해결할 과제도 있지만 의료진단이나 외과수술, 의료 교육분야에 매우 유용할 것으로 보인다. 최근 컴퓨터 기술이 발전하면서 홀로그램을 전자적으로 직접 계산 합성하는 기술이 꾸준히 발전하고 있다. 컴퓨터 생성 홀로그램(Computer Generated Hologram:CGH)은 빛을 간섭해서 얻어지는 광 홀로그램의 간섭 패턴 대신 영상을 재생하는 데 필요한 정보만 컴퓨터로 설계해 제작하기 때문에 물리적으로 존재하지 않는 가상 물체의 합성 및 생성도 가능하다.<sup>[1-4]</sup>

위와 같이 다양한 분야에서 응용성이 증대되고 있는 반면에 기계적 응용성을 많이 제시 되어 있지 않다. 홀로그래피 간섭계의 고 분해능으로 외부 특성에 따라

금소 재질의 특성 파악이나 표면의 정략적 측정 분야의 연구는 전무한 상태이다. 또한 광원의 크기의 제한 때문에 측정 대상체가 클 경우에 상당한 문제점들이 많으며, 물리적 수식을 프로그램을 구현기도 어려우며, CCD의 분해능 한계, 레이저의 가간섭 거리등 다양한 문제점들이 제시 되어 있다.

## 제 2 절 연구목표 및 내용

본 논문에서는 홀로그래피의 기계적 응용을 증대 시키고자 한다. 이와 같은 목적으로 인장별 표준 시험편을 만들어 각 인장 상태에 따라 시험편의 표면 특성을 정량적으로 측정 하고자 한다. 또한 개발 장비를 이용하여 표면의 상태를 측정하여 신뢰성을 확보하며, 각각의 인장속도에 시험편이 파단 될 경우 체적에 따른 온도 변화의 상관관계를 파악 하고자 한다. 시스템의 구성에는 반사형 홀로그래피와, 투과형 홀로그래피를 구성하여 각각의 실험을 진행하였다. 홀로그래피의 샘플링의 문제점을 극복을 위해서 제로패딩 (zero padding)방법을 사용하였다. 이를 기반으로 외부 조건에 따른 기계 부품의 표면이나 변형 상태를 정량적으로 측정 할 수 있을 뿐만 아니라 단일 시험편에 여러 조건을 고려함으로써 외부의 조건에 따른 시험편의 특성을 파악 하는데 도움이 될 것으로 생각된다.



## 제 2 장 이론적 배경

### 제 1 절 홀로그래피를 위한 기초이론

#### 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, 소밀파동로 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 수학적 해는 물리적 법칙을 만족시키는 파동이다.

전자기파의 기본개념에서 파동방정식을 유도 하기위하여 자유공간(진공 중)  $[\rho = 0, J = 0, \epsilon = \epsilon_0, \mu = \mu_0]$ 에서 페러데이 법칙으로부터 좌 우변에 벡터의 회전(curl)을 취하면 식 (2-1)과 같다.

$$\nabla \times (\nabla \times E) = \nabla \times \left(-\frac{dB}{dt}\right) \quad (2-1)$$

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

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

## 2 구면파와 평면파 (Spherical Wave and Plane Wave)

### 2.1 구면파 (Spherical Wave)

전자파의 발생원으로부터 동일위상 떨어진 지점을 연결하여 생기는 선 또는 면을 파면(Wavefront)이라고 하는데, 이 파면은 발생원을 중심으로 동심원을 이루어 바깥으로 진행한다. 3차원적으로 보면, 발생원으로부터의 전자파는 이 발생원을 중심으로 서로 동심원을 형성하면서 사방으로 전파되므로 구면파(spherical Wave)라고 부른다. 수식적 표현은 식 (2-3)과 같다.

$$E(r,t) = E_0 \frac{i(kr - wt)}{r} \quad (2-3)$$

### 2.1 평면파 (Plane Wave)

발생원을 중심으로 파면이 충분히 멀어졌을 때, 그 곡률반경이 증가하므로 파면의 부분 부분이 평면에 가까워진다. 따라서 발생원에서 아주 먼 거리 떨어진 위치에서는 파면의 일부분만 감지되어 파면 사이가 거의 평행한 것 같이 되어지므로, 평면파(Plane Wave)라고 부른다. 수식적 표현은 식 (2-4)과 같다.

$$E(r,t) = E_0 i(kr - wt) \quad (2-4)$$

여기서 k 는 파수 (Wave number), w 주파수 (Frequency) 이다.

## 3 회절(Diffraction)

회절은 직진하는 빛의 진행 방향이 물체에 부딪쳐 그 방향을 벗어나는 현상을 말하며, 이 현상에 의해 입사광의 축 방향에 특정한 광 패턴이 형성된다. 이 광 패턴은 물체의 단면 형상에 의해 입사광이 산란되어 공간으로 퍼져나가는 산란광의 공간 에너지 분포를 수치적으로 해석 하는 방법이 디지털 홀로그래피에서 응용된다.

#### 4 간섭(Interference)

간섭(interference)은 파동이 가지고 있는 특별한 성질 중 하나로서 둘 이상의 동일한 진동수의 파동이 진행방향이나 위상을 달리하면서 공간에 전파될 때 위치에 따라 파동이 커져 나타나거나 줄어 나타나는 것을 말한다. 이때 두 빔이 서로 중첩할 때 형성되는 광 강도의 분포  $I$  는 식(2-5)과 같다.

$$I = A(x,y) + B(x,y)\cos[(k_1 - k_2)r - (\omega_1 - \omega_2)t + \phi_1 - \phi_2] \quad (2-5)$$

여기서  $A(x,y)$ 는 바이어스(Bias) 강도,  $B(x,y)$ 는 변조파의 강도,  $k_i, \omega_i, \phi_i (i = 1,2)$ 는 각각  $i$ 번째 빔의 파수(wave number), 각 주파수, 초기 위상 값(Phase value)이다.

간섭무늬 중 가장 강한 빔 강도를  $I_1$ , 가장 약한 빔 강도를  $I_2$ 라 할 때, 이 간섭무늬의 평균 빔 강도 즉 바이어스 강도는 가우시안 분포를 가지며, 식(2-6)에 나타낸 바와 같이 주어진다.

$$A(x,y) = (I_1 + I_2)/2 \quad (2-6)$$

$$B(x,y) = (I_1 - I_2)/2$$

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 광원으로부터 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 식(2-7)과 같다.

$$E_1 = E_{01}\cos(kx_1 - \omega t_1 + \phi_1) \quad (2-7)$$

$$E_2 = E_{02}\cos(kx_2 - \omega t + \phi_2)$$

식(2-7)을 합성하면 식(2-8)과 같다.

$$E_t = E_1 + E_2 \quad (2-8)$$

식 (2-8)을 이용하여 간섭항의 값을 구해보면, 식(2-9)과 같다.

$$\begin{aligned} E_1 \cdot E_2 &= E_{01} \cdot E_{02} \cos(k_1 \cdot r - wt + \epsilon_1) \times \cos(k_2 \cdot r - wt + \epsilon_2) \\ E_1 \cdot E_2 &= E_{01} \cdot E_{02} [\cos(k_1 \cdot r + \epsilon_1) \cos wt + \sin(k_1 \cdot r + \epsilon_1) \sin wt] \\ &\quad \times [\cos(k_2 \cdot r + \epsilon_2) \cos wt + \sin(k_2 \cdot r + \epsilon_2) \sin wt] \end{aligned} \quad (2-9)$$

이 식에 시간 간격 t에 대해서 함수를 시간평균한 후 얼마간의 수학적 과정을 거치면, 총 복사 조도를 구할 수 있다.

$$I_1 = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\phi) \quad (2-10)$$

이때 합성된 파동의 세기가 각각의 파동의 세기를 합한 것보다 더 커지는 것을 보강간섭, 줄어드는 것을 소멸간섭(상쇄간섭)이라 한다. 각각 파동이 시간에 따라 변함없이 일정하게 주어진다면 간섭된 결과도 시간에 따라 변하지 않고 보강 및 소멸간섭의 분포가 공간에 일정한 형태를 유지할 것이다. 이렇게 파동이 공존하는 공간에 간섭된 결과 만들게 되는 특이한 세기의 분포 모양을 간섭무늬라고 한다. 무늬라고 부르게 된 것은 주로 빛에서 밝고 어두운 모양이 빛의 파장에 비하여 훨씬 큰 규모로 나타나서 눈으로 보기에 얼룩무늬를 하고 있기 때문이다. 이러한 간섭무늬가 나타나는 근본적인 원인은 파동이 중첩의 원리를 만족하고, 이에 의해 같은 진동수의 여러 파가 합성되더라도 그 결과는 같은 진동수의 파동으로 진폭이 서로의 상대적인 위상에 따라 예민하게 변하기 때문이다. 즉 공간의 각 지점에 따라 각각의 파동의 위상 값이 변하기 때문에 합성된 파동의 진폭이나 세기도 지점에 따라서 다르게 나타난 결과가 바로 간섭무늬이다.

## 제 2절 디지털 홀로그래피

### 1. 일반적 개념 (General Principles)

디지털 홀로그램의 재생의 개념을 그림 2.1에 나타내었다. 홀로그래피의 기본적인 개념의 시작은 참조파(reference beam)와 대상체로부터 반사된 물체파(object wave)가 CCD의 표면에서 간섭을 일으킨다는 가정으로 시작한다. 이와 같은 가정에 의해서 얻어진 홀로그램의 결과는 CCD를 통하여 전자적으로 기록되고 저장된다. 일반적으로 대상물은 3차원의 형태이며 표면 반사에 의한 환산이 쉬운 것이며, CCD 셀(Cell)로부터 d의 거리에 위치한다. 홀로그래피의 처리 과정은 아래의 수치적 공식을 사용하여 표현할 수 있다. 물체파의 복소진폭은 식(2-11)과 같다.<sup>[5-7]</sup>

$$E_0(x,y) = a_o(x,y)\exp(j\phi_0(x,y)) \quad (2-11)$$

위식에서  $a_o, \phi_0$  는 물체파의 실제 진폭과 위상이다.

$$E_R(x,y) = a_R(x,y)\exp(j\phi_R(x,y)) \quad (2-12)$$

위식에서  $a_R, \phi_R$  는 참조파의 실제 진폭과 위상이다

두 파(wave)에 의한 간섭은 CCD와 같은 중간 매개물의 표면에서 기록된다. 홀로그램 함수는 참조파와 물체파의 간섭에 의한 빛의 강도(intensity) 분포와 비례하여 계산된다. 식(2-13)에 의해서 계산되어 진다.

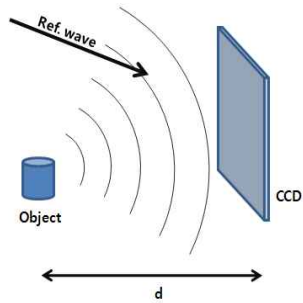
$$\begin{aligned} h(x,y) &= |E_0(x,y) + E_R(x,y)|^2 \\ &= |E_0|^2 + |E_R|^2 + E_0E_R^* + E_0^*E_R \end{aligned} \quad (2-13)$$

홀로그래피 재생에서, 재생을 위한 참조파의 복소진폭이 식(2-13)에 곱해져야 한다.

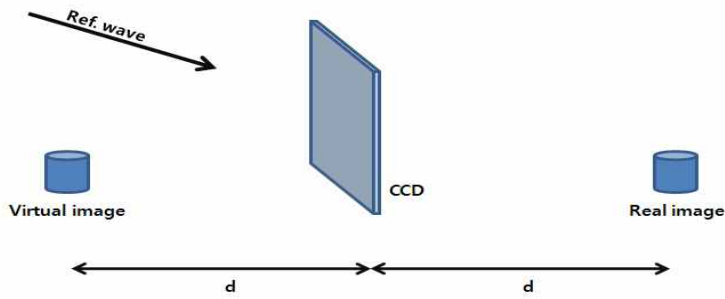
$$E_R(x,y)h(x,y) = (|E_0|^2 + |E_R|^2)E_R + |E_R|^2 E_0 + E_0^* |E_R|^2 \quad (2-14)$$

위식에서  $|E_R|^2$  항은 참조파에 의해서 CCD에 균일하게 작용되는 정보이고,  $|E_0|^2$  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. 그림 2-1(c)와 같으며 식은 다음과 같다.

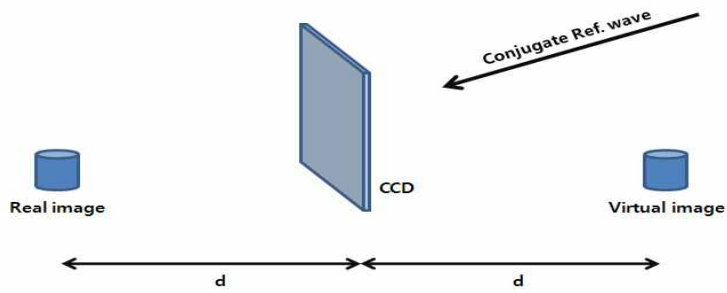
$$E_R^*(x,y)h(x,y) = (|E_0|^2 + |E_R|^2)E_R^* + E_R^{*2} E_0 + E_0^* |E_R|^2 \quad (2-15)$$



(a) Recording



(b) Reconstruction with reference wave  $E_R^*$



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

Fig. 2-1 Digital holography basic expression

식(2-13), (2-14)에서 Wavefields 회절은 되었지만 초점(focusing)이 맞춰지지 않았었다. Wavefields를 재생하기 위해서는 그림 2-2에서는 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 식(2-16)로 표현 할 수 있다.

$$U(\xi', \eta') = \frac{1}{j\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) E_R(x, y) \frac{1}{\rho} \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} \rho'\right) dx dy \quad (2-16)$$

(2-16)식에서  $\rho' = [(x - \xi')^2 + (y - \eta')^2 + d^2]^{\frac{1}{2}}$ ,  $\rho'$ 는 홀로그램 평면과 재생 평면 사이의 거리,  $\lambda$ 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.<sup>[8-9]</sup>

$$E_R = a_R + j0 = a_R \quad (2-17)$$

여기서  $a_R$ 은 실제 진폭이다.

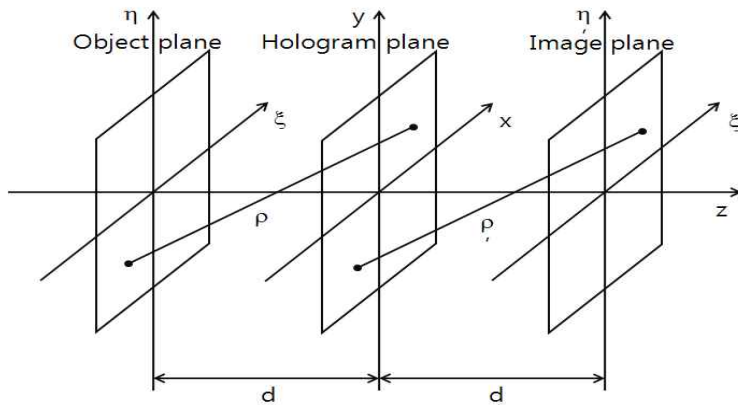


Fig. 2-2 Coordinate system for numerical reconstruction.

회절 무늬는 CCD 평면 뒤의 거리 d에 의해서 계산된다. 이것은 실제 이미지



에서 복소 진폭이 재생된다. 식(2-16)은 수치적 홀로그램 재생을 위한 기초 공식이다. 왜냐하면 재생된 파의 필드  $U(\xi', \eta')$ 은 복소함수이고 빔의 강도와 위상을 계산 할 수 있기 때문이다. 식(2-16)에서는 실제의 이미지가 왜곡이 된다. 따라서 왜곡되지 않는 실제의 이미지를 재생하기 위해서는  $E_R$  대신에  $E'_R$ 을 넣어서 식(2-18)을 얻었다.

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

식(2-18)을 이용한 재생의 방법은 그림2-1(c)에서 보여준다. 실제의 이미지는 대상물이 재생하는 동안 위치되어 나타난다.

## 2. 디지털 홀로그램의 재생 (Reconstruction of digital holograms)

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 대상물은 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 식(2-19)과 같이 표현 할 수 있다.<sup>[10-12]</sup>

$$U_0(k_x, k_y) = \int u_0(x, y) \exp[j(k_x x + k_y y)] dx dy \quad (2-19)$$

$U_0(k_x, k_y)$ 는 평면파의 복소 증력장으로 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(2-20)에서 보는 바와 같이 고려된다.

$$u_z(k_x, k_y) = \int U_0(k_X, k_Y) \exp[(-j(k_X X + k_Y Y + k_Z Z))] dx dy \quad (2-20)$$

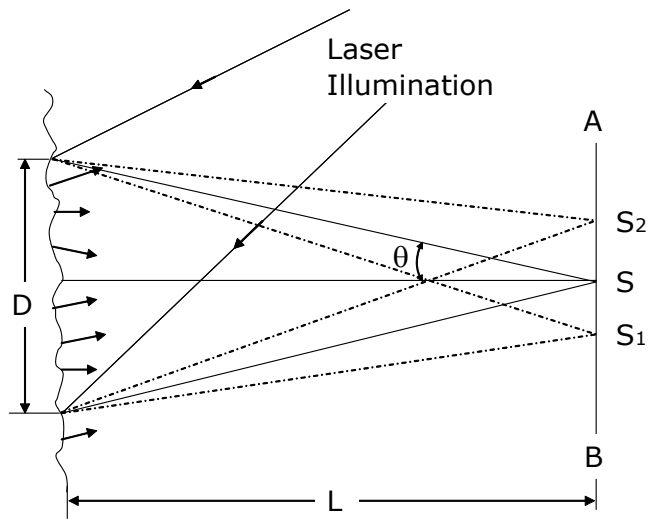
본 논문에서 이용한 재생 방법은 고속 푸리에 변환과 역 고속 푸리에 기반을 둔 방법을 기반으로 한다. 그리고 이 방법은 기존의 방법보다 더 가까운 영역까지 해석 할 수 있다. 또한 고 분해능을 요구되는 대상물에 적합한 방법이다.

### 제 3절 스페클(Speckle) 기초이론

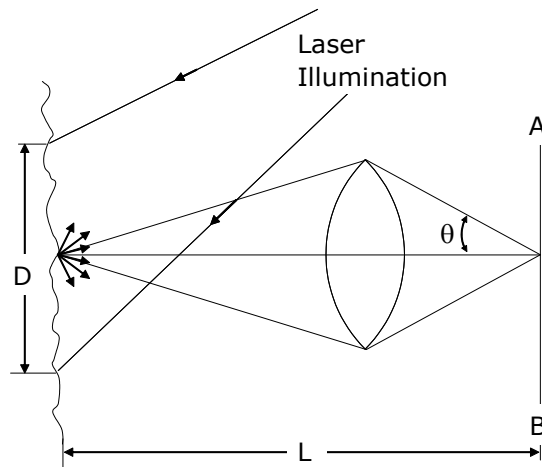
레이저 스페클(laser speckle)은 레이저의 우수한 간섭성질로 인하여 나타나는 현상으로 표면이 레이저의 파장보다 큰 거칠기를 갖는 물체에 레이저를 조사할 경우 물체표면에서 난반사된 광들이 겹쳐서 간섭을 일으키게 되고, 이로 인한 보강 간섭과 소멸간섭은 마치 반점과 같은 형태로 표면에 나타나게 된다. 이를 스페클 패턴(speckle pattern)이라 하며, 물체표면에서 반사된 후에도 레일리 산란(Rayleigh scattering)을 만족하며 간섭성질을 유지할 수가 있다. 이 스페클패턴은 또 다른 스페클 패턴과 간섭하여 새로운 스페클을 형성할 수도 있으며, 물체 표면 변위에 대해 함께 움직이거나, 위상변화를 일으켜 물체 변위의 정보 전달자로서 광검출기에 광강도(intensity) 분포로 기록되어진다. 스페클은 관찰하는 방법에 따라 objective speckle과 subjective speckle로 나누어진다. 그림 2-3은 objective speckle과 subjective speckle의 형성을 보여 주고 있다. 즉, 이 두 스페클의 차이는 결상렌즈의 사용 여부에 따라서 구별되며, 그 크기 또한 다르게 된다. 스페클의 크기는 결상면(image plane) 위에서 형성되는 스페클의 최대 밝기 점과 최소 밝기 점(간섭의 보강과 소멸) 사이의 거리를 스페클 크기라 정의하고 있다. 즉, 서로 상관하지 않는 광강도 사이의 거리를 스페클 크기라고 추정할 수 있다. objective speckle 크기의 정의는 물체표면의  $D$ 의 면적에 레이저광이 조사되고 면적  $D$  위의 모든 점은 AB plane(viewing plane)에 형성되는 스페클에 영향을 주게 된다는 이론을 바탕으로 하고 있으며, 확률분포이론에 기초하여 제안한 식(2-21)로 objective speckle의 크기를 정의하고 있다.

$$S_{obj} = 1.22 \frac{L}{D} \quad (2-21)$$

여기서  $\lambda$  : 조사되는 레이저의 파장,  $L$ : 물체와 결상면 사이의 거리,  $D$ : 물체에 조사된 면적 이다.



(a) Objective speckle



(b) Subjective speckle

Fig. 2-3 Formation of speckle pattern

스펙클 상관 간섭법 (speckle correlation interferometry)에서는 subjective speckle pattern을 대부분 사용하고 있으며, 공간분해능은 subjective speckle의 크기에 의존하게 된다. subjective speckle은 결상렌즈가 사용되어 형성이 되는 스페클로 정의를 하며, 렌즈의 회절한계로 인하여 objective speckle과는 다르게

정의하고 있다. 즉, 결상렌즈는 물체표면 위의 한 점을 결상면의 한 점으로 결상함으로써 물체의 한점과 결상면의 한 점은 1:1 대응이라 할 수 있다. 따라서 수차가 없는 렌즈라면 결상면에 형성되는 스페클의 강도는 물체 표면 위의 한 점만이 영향을 주게 된다. 그러나 실제 결상렌즈의 회절한계는 한 점으로 결상을 하지 못함으로, 결상면에 대응하는 물체 위의 한 점을 중심으로 렌즈의 회절크기만큼 결상면 위의 스페클 형성에 영향을 주게 된다. 따라서 subjective speckle의 크기는 결상렌즈에 의해 생기는 회절의 primary maximum와 first minimum 사이의 거리(Bessel function의 1차 최소점 사이의 거리)라고 할 수 있으며, 결상면에서 형성되는 subjective speckle의 크기는 식 2-22와 같이 정의된다.

$$S_{sub} = 1.22(1 + M) F \quad (2-22)$$

여기에서  $M$ : 렌즈 확대배율,  $F$ : 조사된 레이저의 파장,  $f$ : 렌즈의 f-number이다. 스페클은 하나의 위상정보를 전달하며, 그 크기는 측정 대상의 공간분해능을 결정하게 된다. 실제 적용실험에서 zoom 렌즈 광학배율 1배, 파장 532 nm 레이저, 비디오 배율 47.6 배(1/2 inch format CCD 카메라와 15 inch 모니터(pixel pitch: 0.297 mm))를 사용하여 렌즈의 f-number 1.2로 하였을 때, 실제 모니터 상에 관찰되는 subjective speckle의 크기는 37.07 mm가 된다. 또한 subjective speckle의 물체표면에서 크기는

$$S_{sub\ on\ object} = 1.22(1 + M) \frac{F}{M} \quad (2-23)$$

으로 정의되며, 위 조건에서 물체 표면에서 형성된 스페클의 크기는 778.78 nm가 된다. 스페클의 크기는 CCD 카메라의 화소크기와 같을 때 가장 이상적이며, uniform field와의 조합하여 간섭하는 면외변위측정 간섭계에서는 스페클의 크기가 2배로 커지게 된다. 측정시스템에서 스페클의 이상적인 크기는 CCD pixel 하나에 한 개의 스페클이 존재할 때이다.

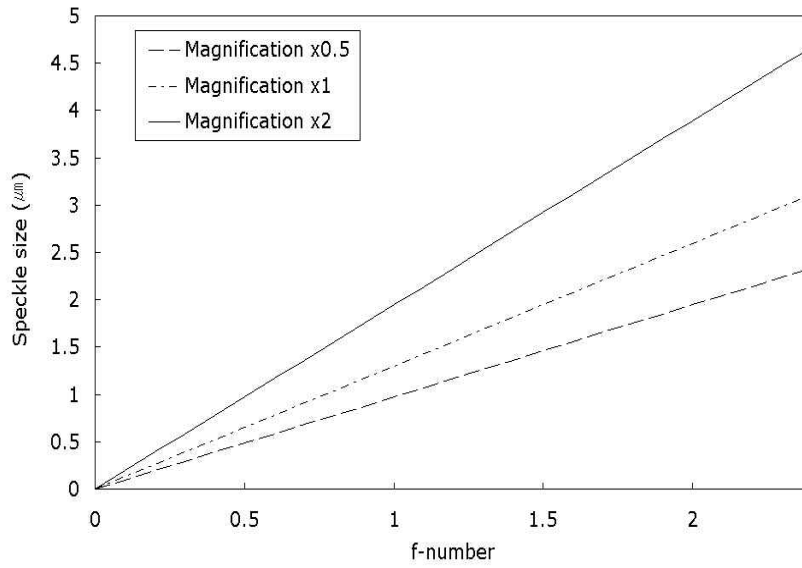


Fig. 2-4 Subjective speckle size on the CCD image plane

그림 2-4 는 광학배율과 f-number에 따른 CCD 촬상소자에 형성되는 스페클의 크기를 나타내었다. 스페클의 크기가 CCD 화소의 크기보다 작을 경우에 광강도는 형성적인 스페클패턴의 integrated 또는 smoothed된 상태로 관찰되게 된다.

## 제 4절 필터링 (Filtering)

홀로그래의 정보 함수의 특성상 일정하게 반복되는 노이가 많이 포함되어 있다. 따라서 홀로그래의 재생 시에 오류를 최소화하기 위해서 메디안 필터링 이용하여 오류를 최소화 하였다. 메디안 필터링이란 주변 픽셀 값들 중에서 그 중간 값으로 대체하는 필터링 방법으로 그 원리는 그림 2-5와 같다.

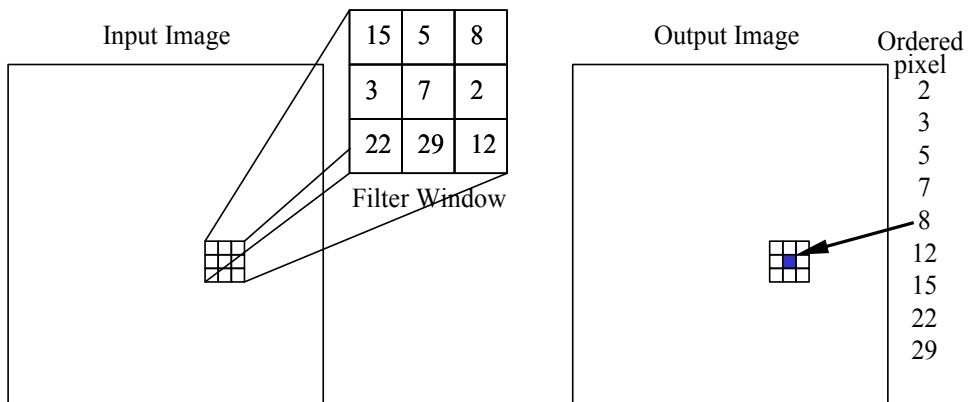


Fig. 2-5 Concept of median filtering

그림 2-6은 노이즈를 포함하고 있는 일차원 톱니파 데이터에 대한, 메디안 필터를 적용한 결과를 보여주고 있다. 여기서 알 수 있는 것과 같이 원래의 데이터는 노이즈가 심하고(위), 3개의 선형마스크를 사용한 메디안 필터링(가운데), 5개의 선형마스크를 사용한 메디안 필터링(아래)의 차이를 잘 보여주고 있다.

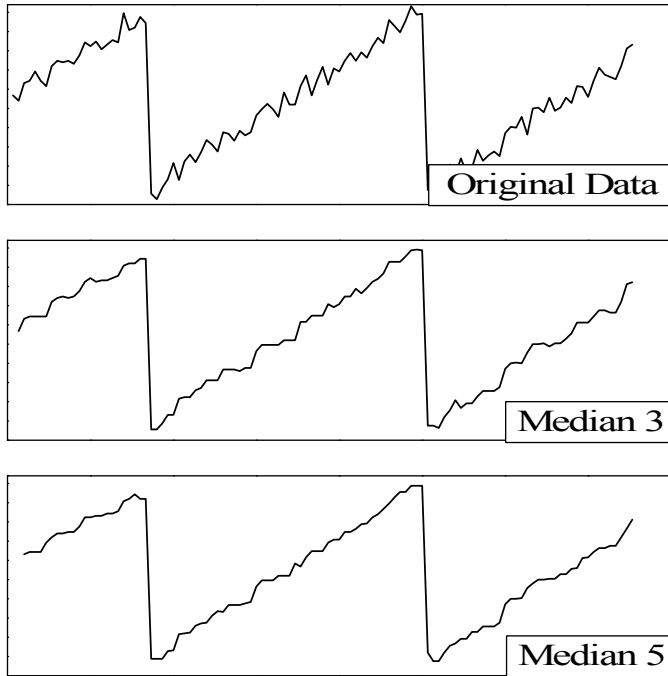


Fig. 2-6 Example of median filtering



# 제 3 장 실험장치 및 방법

## 제1절 실험 장치

### 1 투과형 간섭계

실험에서 투과형 간섭계는 구성은 그림 3-1과 같다. 레이저로부터 나온 빛이 대물렌즈와 핀홀로 이루어진 공간필터(Spatial filter)에서 필터링 된 후에 평행렌즈(collimating lens)에서 의해서 평행광으로 만든다. 평행광은 광분할기(beam splitter)에서 의해서 두 개의 경로로 나뉘진다. 하나의 광은 압전소자가 부착된 거울을 거치는 기준파가 되고 다른 하나의 광은 물체를 통과하는 물체파가 된다. 최종적으로 기준파와 물체파는 CCD 상면에서 합쳐서 디지털 영상으로 기록된다. CCD로 찍은 위상 이동된 홀로그램들로부터 위상이동 추정 및 위상 처리 방법을 통하여 물체파의 복소 진폭과 위상을 알아낸다. 2장에 제시한 수치적 재생 알고리즘을 이용하여 상을 재생한다.

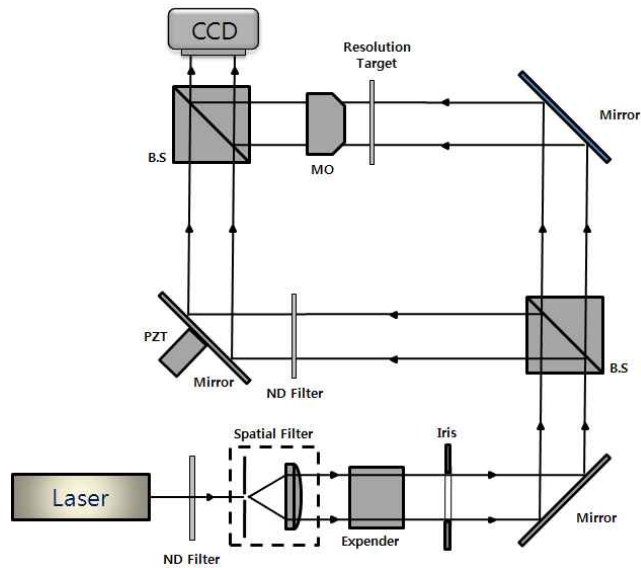


Fig. 3-1 Transmitted interferometry for holography

## 2 반사형 간섭계

투과형 간섭계와는 달리 반사형 간섭계는 마이켈슨 간섭계를 기반을 두어서 간섭장치가 매우 간단한 광 경로로 구성된다. 본 논문의 실험에 사용된 간섭계의 구성은 그림 3-2와 같다. 본 간섭계는 광원을 투과하지 못하고 반사하는 대상물에 사용하는 방법이다. 이 또한 투과형과 마찬가지로 CCD의 상면에서 물체파와 참조파가 간섭이 발생되어서 얻어진 홀로그램을 가지고 위상이동 추정 및 위상처리 방법을 통하여 물체파의 복소 진폭과 위상을 알아내고, 수치 재생 알고리즘을 통하여 재생을 한다. 또한 대상물 앞에 대물렌즈(objective lens)를 두어서 표면의 미세한 변화를 확대 측정하고자 장치를 구성 하였다. 이는 대물렌즈의 배율에 따라서 분해능을 높일 수 있을 것이다.

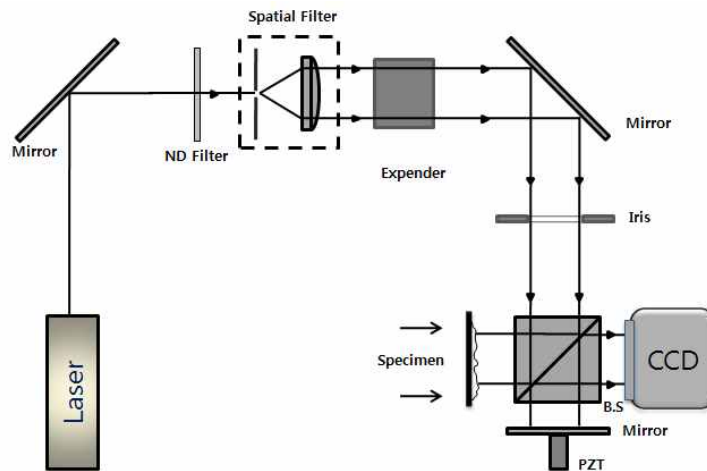


Fig. 3-2 Reflected interferometry for holography

### 3 인장시험기

인장시험기는 SHIMADZU사의 제품(AG-IS 100kN)을 사용하였고, 장비의 전체적인 구성은 그림 3-3과 같다. 인장시험기 인장시험, 압축시험, 굽힘시험 등 규격에 따른 시험이 가능하고, 장기간의 시험이 가능하고 다양한 재료의 시험이 가능한 장비이다. 본 논문의 실험에서는 표준 인장시험편의 인장을 위해서 사용하였다. 장비의 세부 사항은 표 2-1과 같다.



Fig. 3-3 UTM Device

Table 2-1 Specifications of UTM

Description	Technical data
Loading method	High-precision, constant-speed strain control using two ball screws
Force capacity	50N to 250kN (5kgf to 25kgf)
Force measurement accuracy	Standard accuracy type : Within $\pm 1\%$ of an indicated value
	High accuracy type : Within $\pm 0.5\%$ of an indicated value

#### 4 적외선 열화상 카메라

본 논문의 온도에 따른 체적변화를 측정하기 위해서 장치의 구성은 그림 3-4와 같은 시스템을 구성하여 온도에 따른 체적 변화를 측정하였다.

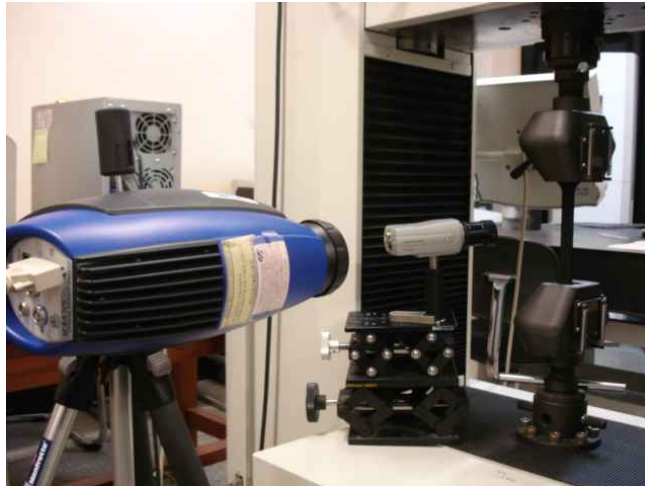


Fig. 3-4 Measurement of temperature and volume by CCD and Infrared camera

인장에 따른 온도를 측정하기 위해서 적외선 열화상 카메라를 사용하였으며, 체적의 변화는 측정은 CCD 카메라를 사용하였다. 세부 사항은 표 2-2와 같다.

Table 2-2 Specifications of IR and CCD camera

Equipment	Infrared camera	Equipment	CCD camera
Model	FLIR Co.(silver480)	Model	SONY(DFW-X710)
Temperature: Resolution	0.02k	Digital Interface	IEEE-1394
Frame rate	380Hz	CCD cell size	4.65 X 4.65 $\mu\text{m}$

## 제2절 실험방법 및 시험편

본 논문의 실험을 위해서 투과형 간섭계의 분해능을 측정 및 성능 평가를 위해서 USAF 1951 타겟을 측정 하였다. 타겟의 형상은 그림 3-7과 같다. 인장 실험을 위해 사용될 시험편의 재질은 STS-304, 두께는 3mm 을 그림 3-5 (a) 와 같은 기계 가공 방법을 사용하여 대상물의 발생되는 잔류 응력을 최소화 하였으며, 시험편의 세부사항은 그림 3-5 (b)와 같다.

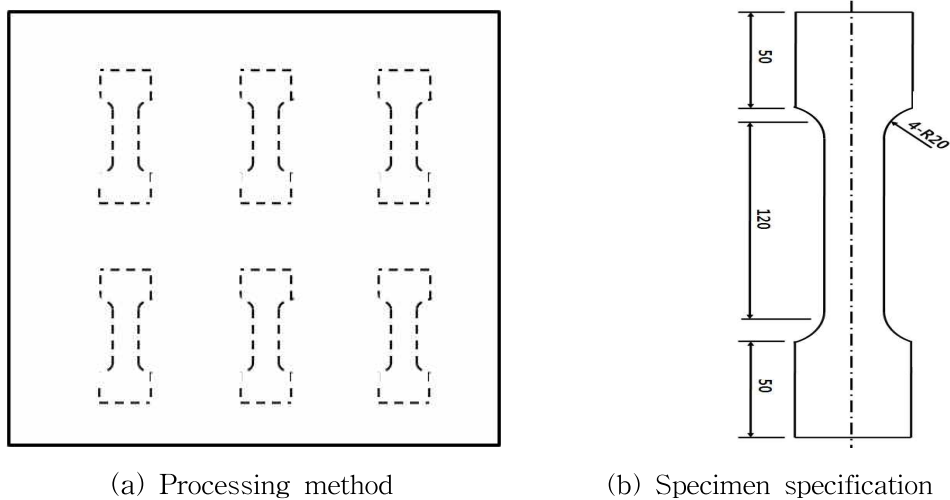


Fig. 3-5 Specimen Specifications (unit: mm)

3mm 두께의 시험편은 3mm/min, 5mm/min, 7mm/min, 9mm/min 인장 속도로 파단 되었을 때 파단면을 측정하였다. 또한 각각의 시험편의 측정 영역은 그림 3-6에서 나타낸 바와 같이 파단면에 0mm, 5mm, 10mm, 15mm 떨어진 부분에서 표면 거칠기를 측정하였다. 본 논문의 표준 시험편 실험에는 반사형 간섭계가 사용되었다.

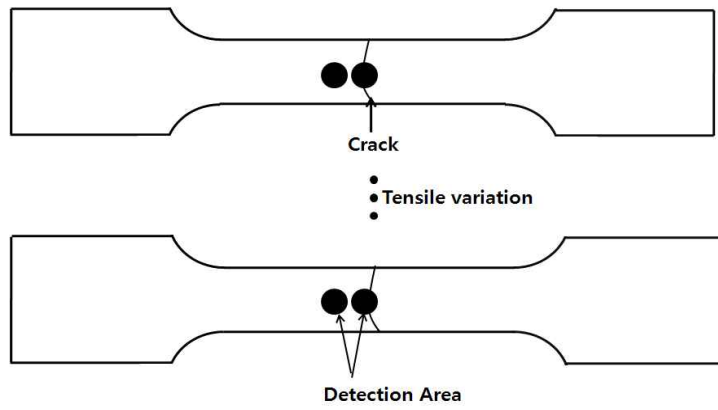


Fig. 3-6 Sort of specimen detection zone

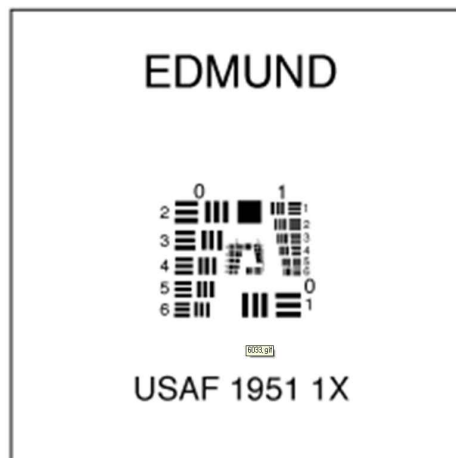


Fig. 3-7 Resolution target

## 제 4 장 실험결과 및 분석

### 제1절 디지털 홀로그래피 개발 프로그램 적용

투과형의 간섭계를 그림 4-1과 같이 구성하여 인장 시험편의 적용 앞서 USAF1951 타겟을 대상으로 하여, 재생 거리를 마이크로 디지털 게이지(Micro digital gage)를 통하여 초점 거리를 변화시켜 홀로그램 영상을 얻었다. 그림 4-2 은 투과형 간섭계를 구성하여 1장의 이미지를 이용하여 CCD 평면과 상면 사이의 재생 거리를 20cm 하여 수치 재생한 이미지이며, 그림 4-3 은 3차원 재생 이미지를 보여주고 있다.

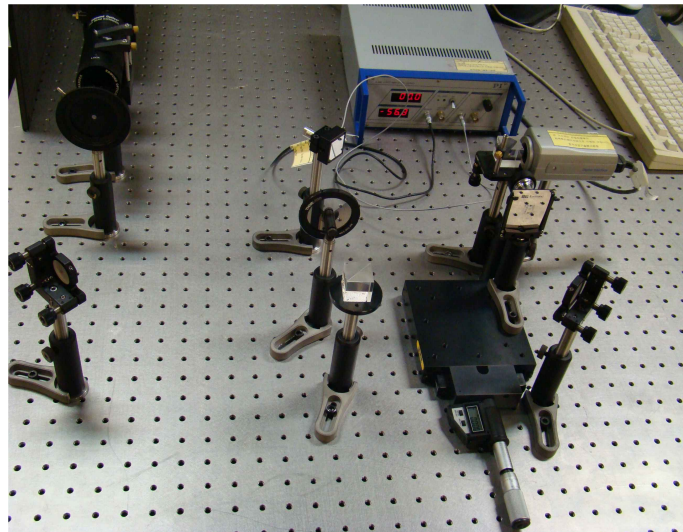


Fig. 4-1 System of Mach Zehnder interferometer

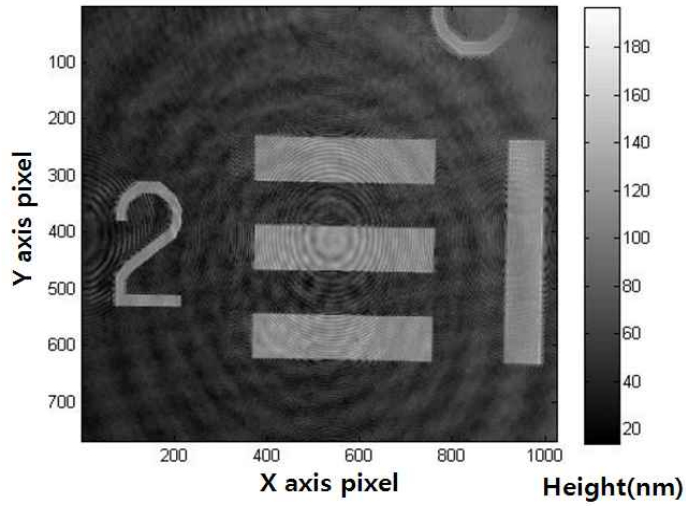


Fig. 4-2 USAF1951 target hologram image 2 dimensional reconstruction

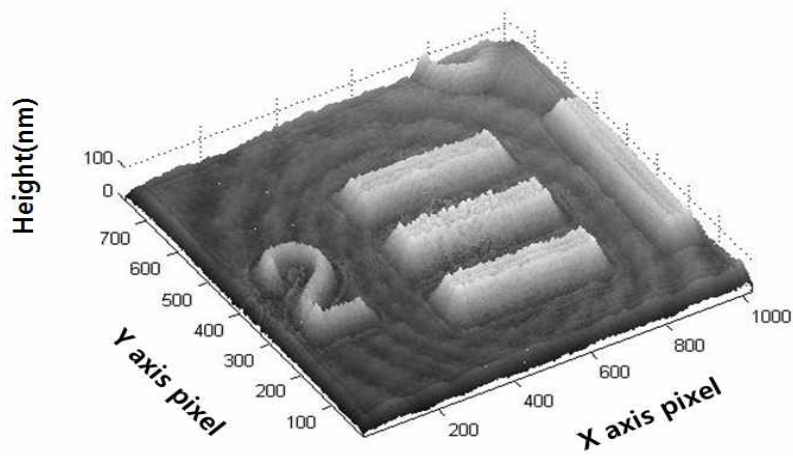


Fig. 4-3 USAF1951 target hologram image 3 dimensional reconstruction

CCD를 통해서 얻어진 홀로그램 영상은 그 물체의 위상 정보를 포함하고 있기 때문에 2장에서 제시한 재생 방법과 개발된 알고리즘을 통해서 높이 정보를 알 수 있다. 그림 4.3 은 대상물을 기울어져 있다. 따라서 그림 4.4는 기울기값을 구



하여 데이터를 기울어진 것을 복원 시켰으며, 측정 높이는 약 65nm 측정 되었다.

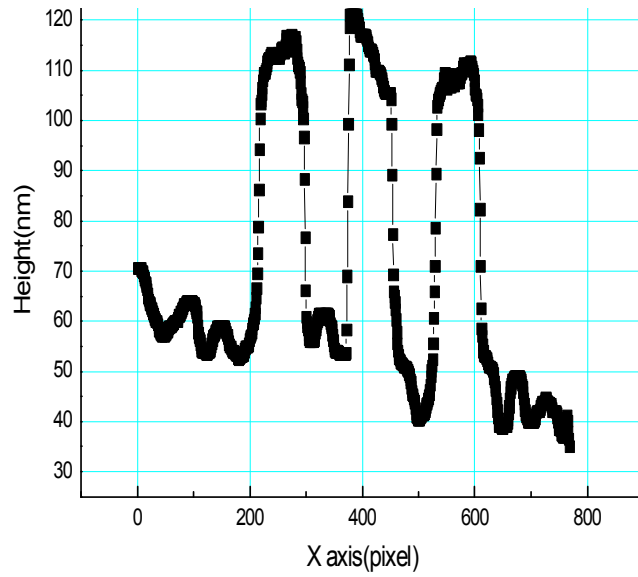


Fig. 4-4 Measurement height by line profiling

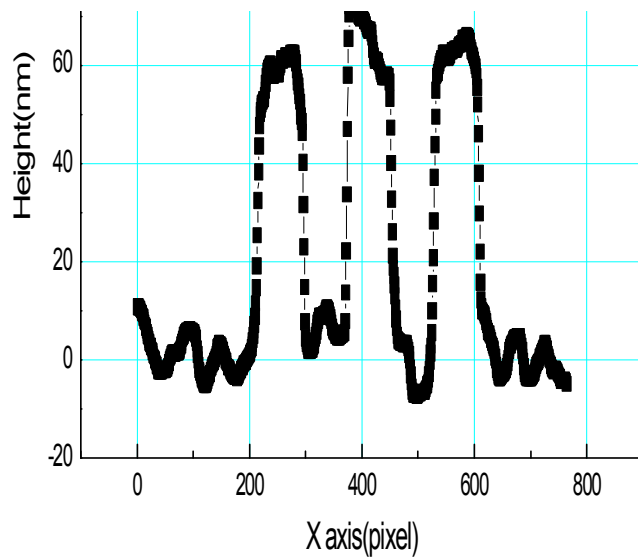


Fig. 4-5 Measurement height data processing

## 제2절 인장 속도에 따른 부피와 온도변화 측정

표준인장시험편을 UTM 장비, 적외선 열화상 카메라, CCD 카메라를 동기화 하여 3mm/min, 5mm/min, 7mm/min, 9mm/min 인장 속도로 파단 되었을 때 체적 변화와 온도변화를 측정 하였다. 그림 4-6은 각각의 속도에 따른 파단 시험편의 실형(實形)이다.

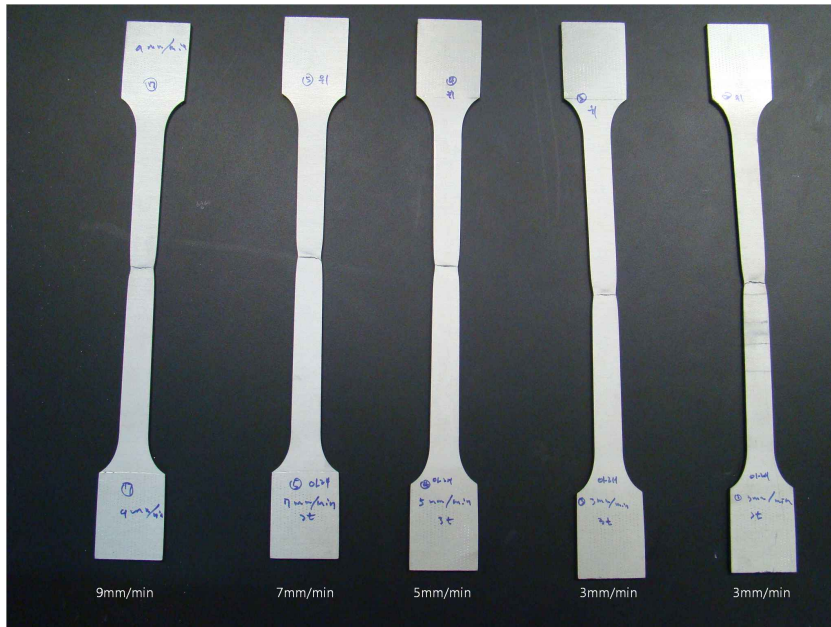


Fig. 4-6 Specimen result by tensile speed

각각의 시험편은 인장속도가 빠를수록 인장 길이가 상대적으로 변화되어 체적의 변화가 발생한다. 또한 체적 변화에 따른 온도변화가 일어나며 표면 거칠기가 변화 된다. 이와 같은 현상을 측정하기 위하여 시험편의 인장 실험에서 적외선 열화상카메라를 이용하여 온도 변화를 측정하여 체적에 따른 온도 변화 분석해 보았다.

시간의 변화에 따른 온도변화는 체적 변화와 비슷한 기울기를 가지고 증가 하

였으며, 인장 속도가 증가됨에 따라 시간에 따른 온도 변화의 기울기가 증가 하였다. 또한 시험편이 인장될시 국부수축이 일어나는 곳에 온도상승 추이가 급격하게 증가하고 이때의 체적 변화도 급격하게 발생하였다. 9mm/min 인장속도 시험편의 체적에 따른 온도 변화는 파단까지 외부 인자의 영향을 많이 받는다. 따라서 본 논문에서는 9mm/min 시험편의 결과는 비교하지 않았다. 그림 4-7 은 3mm/min 시험편이 파단 될 때 시간에 따른 시험편의 온도 변화를 보여준다. 이는 국부 수축이 일어나는 곳에서 온도 변화가 크다는 것을 보여준다. 또한 그림 4-7 에서는 시간이 지남에 따라 체적 변화에 따른 온도 변화가 수반 되며, 이를 통해 표면의 거칠기의 변화가 생긴다.

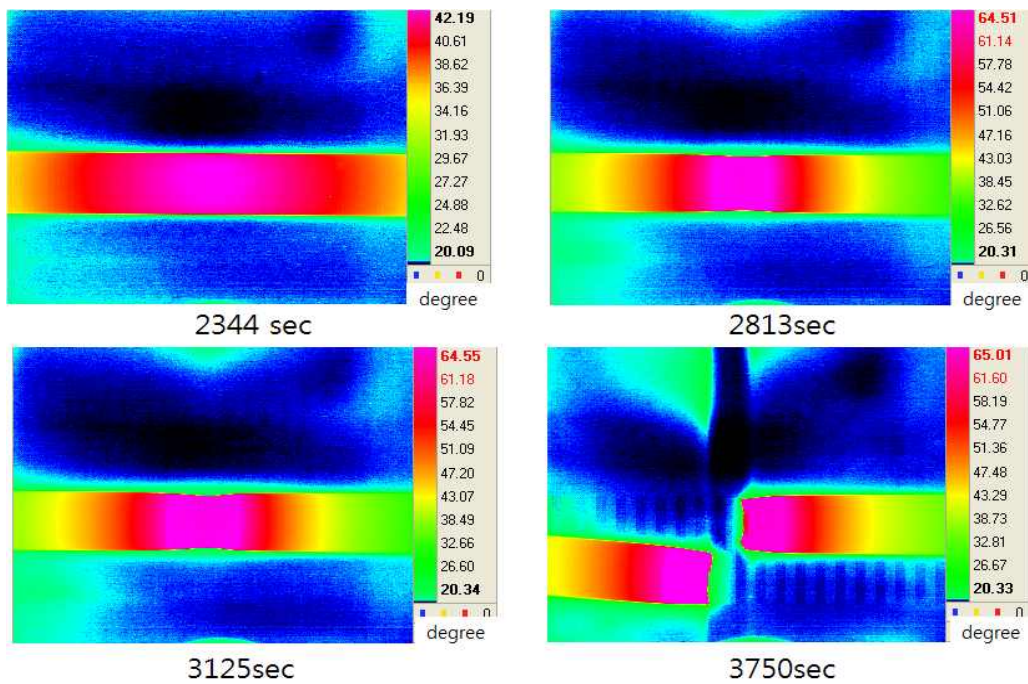
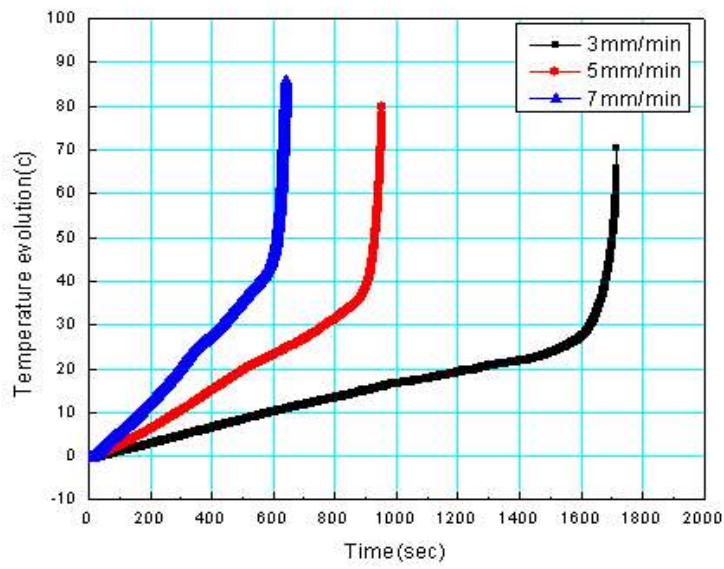
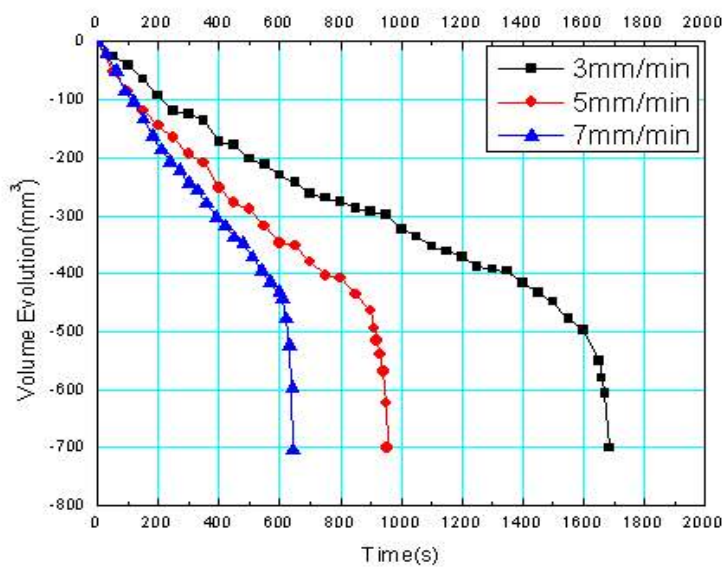


Fig. 4-7 Temperature evolution by tensile

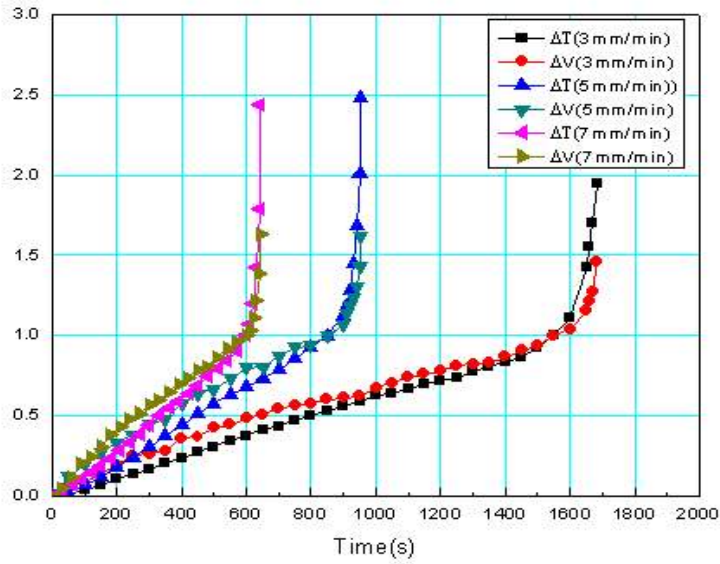
그림 4-7과 같이 적외선 열화상 카메라와 CCD 카메라를 이용하여 얻은 정보를 각각의 인장속도에 따른 온도와 체적 변화를 분석해보면 그림 4-8과 같은 결과를 확인 할 수 있다.



(a) Temperature evolution by tensile speed



(b) Volume evolution by tensile speed



(c) The comparison of temperature and volume inclination

Fig. 4-8 Data comparison of the inclination tendency by tensile speed

그림 4-8의 그래프는 각각의 인장속도에 따라서 온도와 체적 변화의 기울기의 추세이며, 차원은 기울기의 변화를 보기위해 무차원화 하였다. 또한 인장 속도에 따른 체적의 변화와 온도 변화가 일치함을 정량적으로 확인 할 수 있었다.

### 제3절 반사형 간섭계를 이용한 표면 거칠기 측정

#### 1 파단면의 표면 거칠기 측정

본 논문의 실험을 위해 그림 4.9와 같이 시스템을 구성 하였으며, 이를 이용하여 파단면의 거칠기를 측정하였다. 각각의 인장속도에 따른 시험편의 파단의 위치는 불균일하나 파단면의 형태는 동일한 표면 거칠기로 측정 되었다. 그림 4-10은 5mm/min 의 인장속도로 시험편을 파단 시켰을 때 표면의 형상을 재생한 이미지이다.

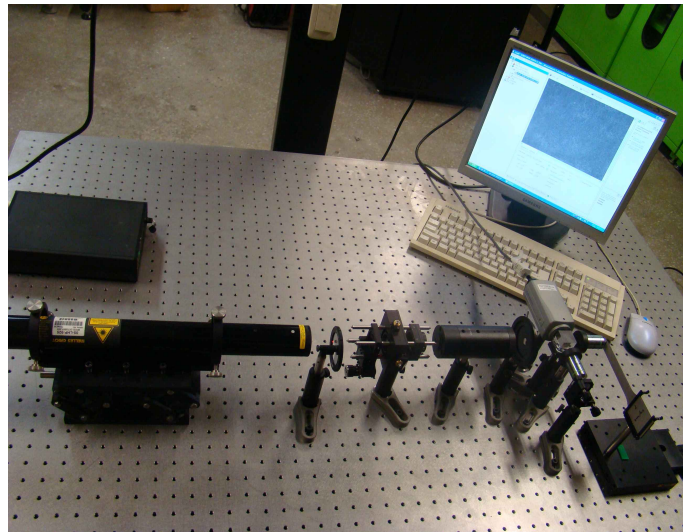


Fig. 4-9 System of Michelson interferometer

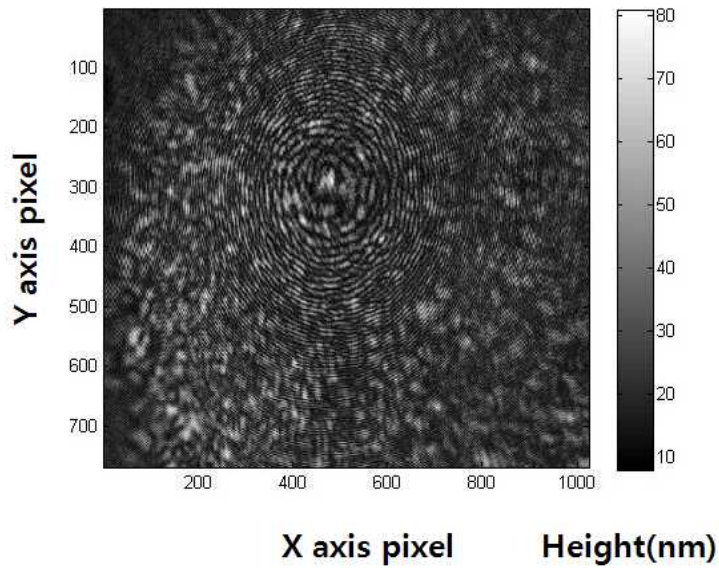


Fig. 4-10 Fractured surface 2 dimensional reconstruction

그림 4-10은 CCD 평면과 상면 사이의 거리를 10cm 하여 수치 재생한 이미지로 본 논문의 2장에서 제시한 방법을 통하여 재생하였다. 파단면의 변화가 미세하기 때문에 20배율의 대물렌즈를 통해 파단면을 확대 하였다. 위의 이미지를 3차원의 형태로 나타내면 그림 4-11과 같다.

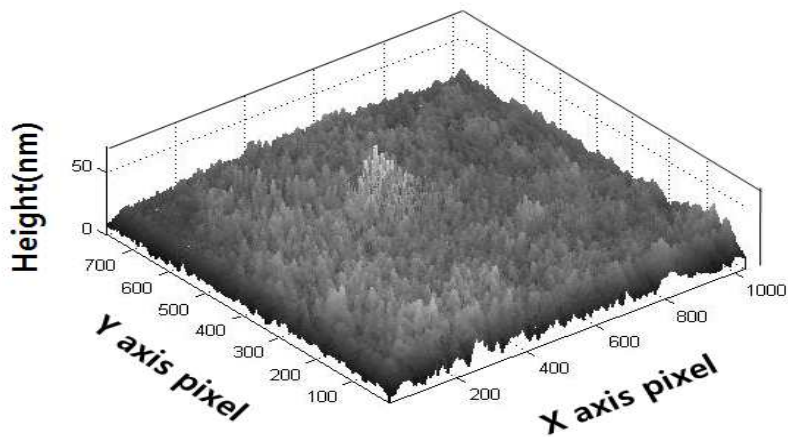


Fig. 4-11 Fractured surface 3 dimensional reconstruction

그림 4-11에서 보여주듯 각각의 화소의 위치에 따라 높이의 차가 나타남을 확인할 수 있었다. 또한 높이가 0-50nm 의 높이의 범위에서 표면의 형태가 변화함을 확인할 수 있었으며, z축의 높이 정보를 통해 파단면의 평균 거칠기를 구해 보면 대략 20nm로 측정 되었으며, 최대 거칠기는 약 48nm 측정 되었다. 본 논문에서는 5mm/min의 파단면의 거칠기의 측정값만을 거론 하였지만 각각의 인장 속도에 따른 파단면의 평균의 거칠기의 측정값은 20nm- 25nm의 범위로 측정 되었으며 인장속도에 따른 파면의 표면 거칠기의 변화는 거의 없는 것으로 생각된다.



## 2 기계가공 시험편의 표면 거칠기 측정

각각의 인장속도에 따른 위치별 표면 거칠기 측정하기 전에 표준인장시험편의 표면 거칠기를 측정 해보았다. 그림 4-1의 반사형 간섭계를 이용하여 CCD 평면과 상면 사이의 거리를 10cm 하여 수치 재생하여 시험편의 중앙부를 표면 거칠기를 측정하였다. 그림 4-12는 재생된 2차원의 결과를 보여주며, 그림 4-13은 표준 시험편의 재생된 3차원의 표면 형태를 보여준다.

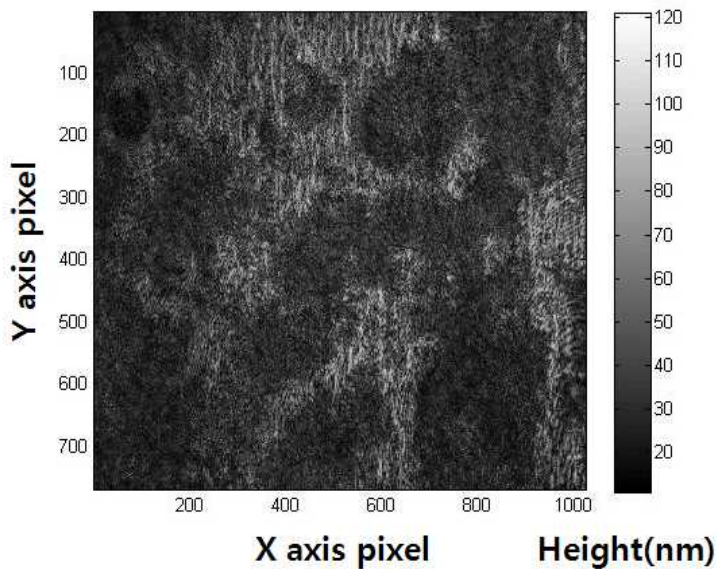


Fig. 4-12 A surface of standard specimen 2 dimensional reconstruction

그림 4-12에서 보여주는 것처럼 가공 직후의 시험편은 거칠기가 매우 크게 측정 되었다. 이는 가공에 따른 시험편의 본래의 표면의 형상을 보여준다고 볼 수 있으며, 상대적으로 파단면의 거칠기보다 변화의 범위가 크다는 것을 확인 할 수 있었다. 이와 같은 사실은 화소에 따른 높이를 그래프로 나타낸 그림 4-14의 그래프를 통해서 더욱 명확히 알 수 있으며, 이를 바탕으로 한 평균 거칠기 또한 52nm 측정 되었다. 또한 최대 거칠기는 115nm로 측정 되었다.

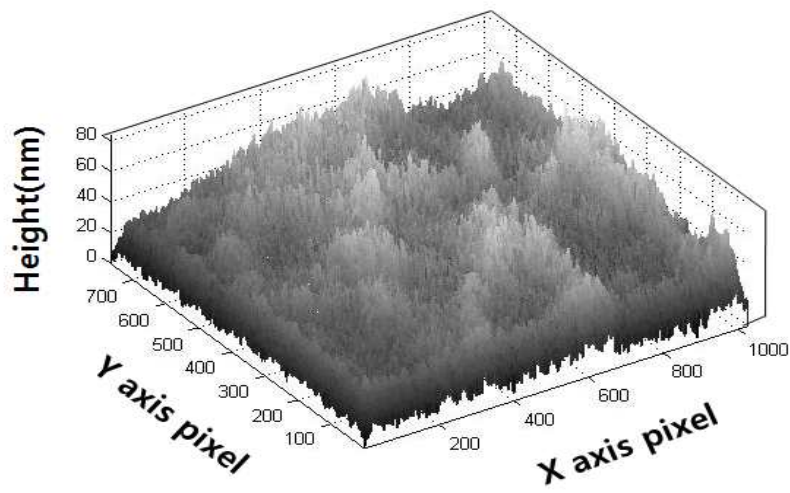


Fig. 4-13 A surface of standard specimen 3 dimensional reconstruction

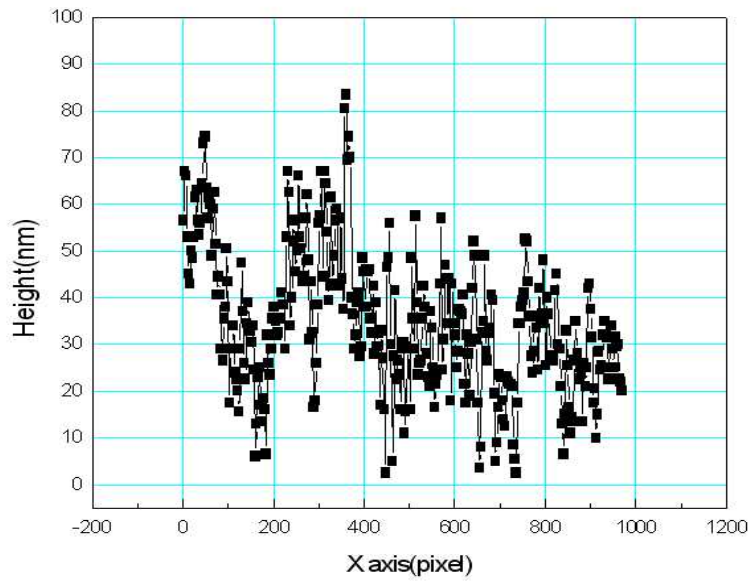
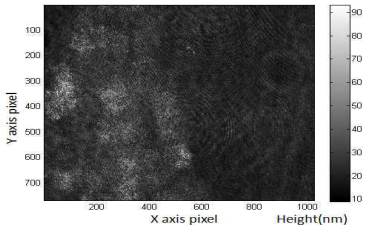
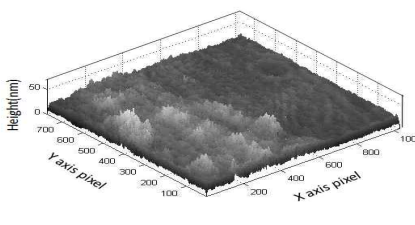
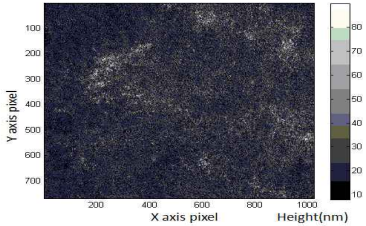
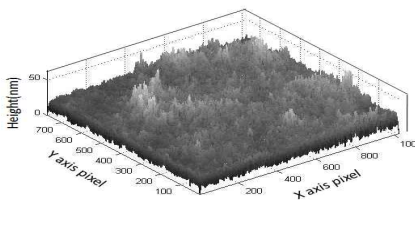
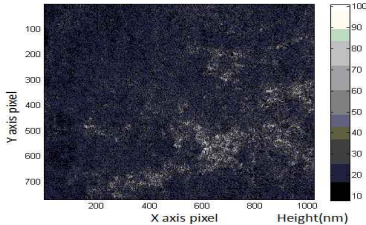
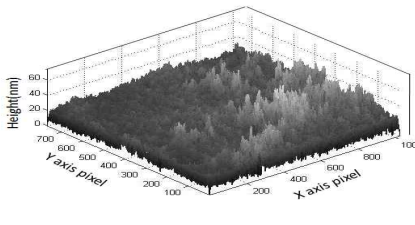
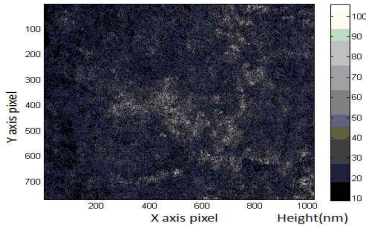
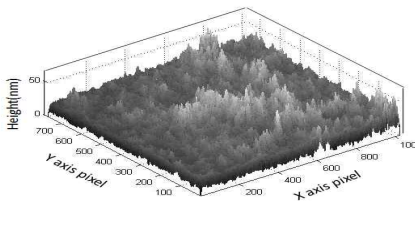


Fig. 4-14 The expressed height according to Y pixel in a standard specimen surface

### 3 인장속도에 따른 각 위치별 표면 거칠기 측정

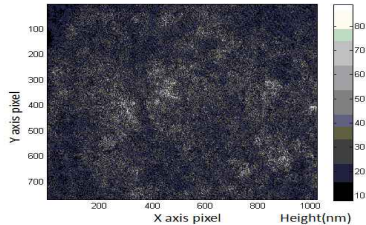
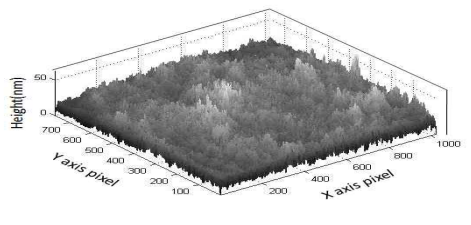
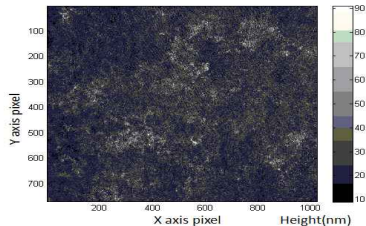
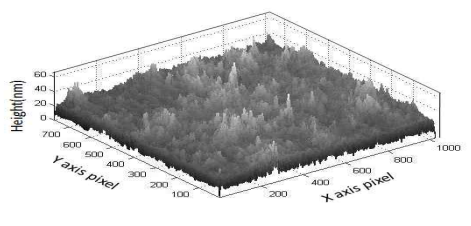
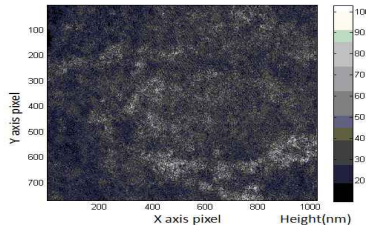
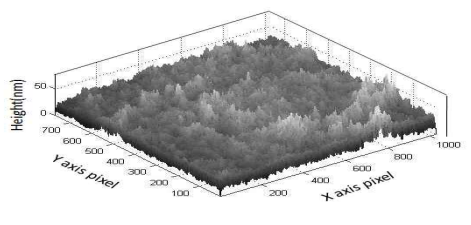
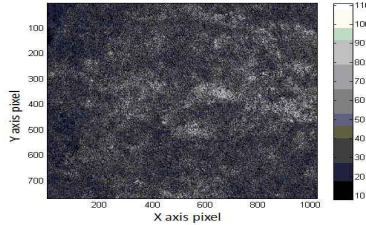
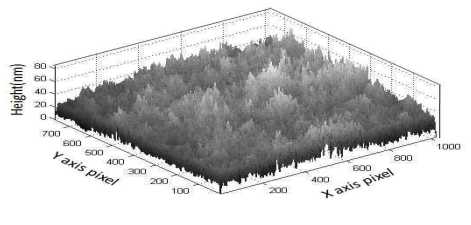
3mm/min 의 인장속도 파단 시험편은 파단면에서 0mm, 5mm, 10mm, 15mm 떨어진 곳에서 표면 거칠기를 측정 하였다. 표 4-1은 CCD 평면과 상면 사이의 거리를 10cm 이고, 2장에서 제시한 재생 방법을 통하여 재생한 2차원 , 3차원의 이미지를 재생하였다.

Table 4.1 The reconstruction image in a 3mm/min tensile speed

Zone(mm)	Reconstruction (2 dimensional )	Reconstruction (3 dimensional )
0		
5		
10		
15		

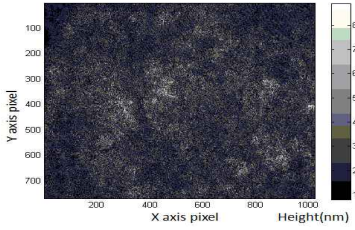
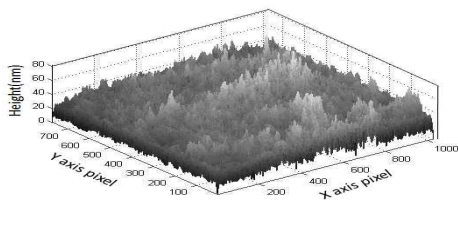
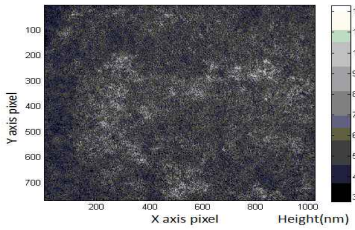
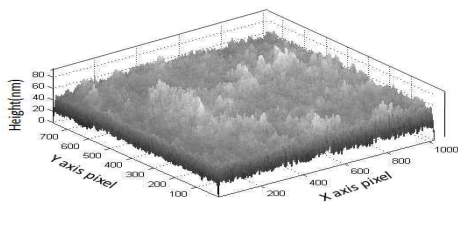
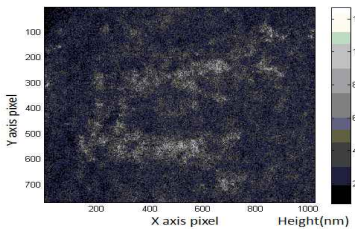
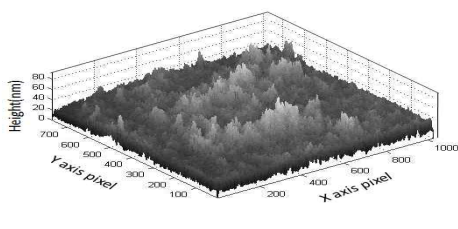
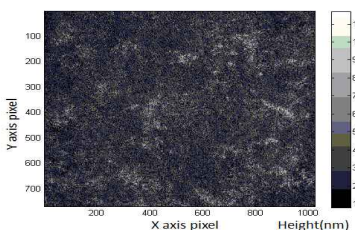
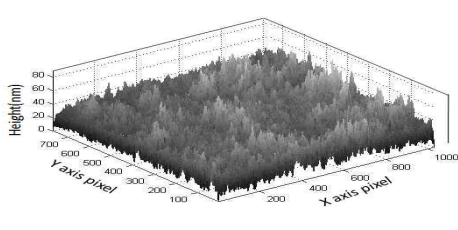
5mm/min 의 인장속도 파단 시험편은 파단면에서 0mm, 5mm, 10mm, 15mm 떨어진 곳에서 표면 거칠기를 측정 하였다. 표 4-2는 CCD 평면과 상면 사이의 거리를 10cm 이고, 2장에서 제시한 재생 방법을 통하여 재생한 2차원 , 3차원의 이미지를 재생하였다.

Table 4.2 The reconstruction image in a 5mm/min tensile speed

Zone(m m)	Reconstruction (2 dimensional )	Reconstruction (3 dimensional )
0		
5		
10		
15		

7mm/min 의 인장속도 파단 시험편은 파단면에서 0mm, 5mm, 10mm, 15mm 떨어진 곳에서 표면 거칠기를 측정 하였다. 표 4-3는 CCD 평면과 상면 사이의 거리를 10cm 이고, 2장에서 제시한 재생 방법을 통하여 재생한 2차원 , 3차원의 이미지를 재생하였다.

Table 4.3 The reconstruction image in a 7mm/min tensile speed

Zone(mm)	Reconstruction (2 dimensional )	Reconstruction (3 dimensional )
0		
5		
10		
15		

9mm/min 의 인장속도 파단 시험편은 파단면에서 0mm, 5mm, 10mm, 15mm 떨어진 곳에서 표면 거칠기를 측정 하였다. 표 4-4는 CCD 평면과 상면 사이의 거리를 10cm 이고, 2장에서 제시한 재생 방법을 통하여 재생한 2차원 , 3차원의 이미지를 재생하였다.

Table 4.4 The reconstruction image in a 9mm/min tensile speed

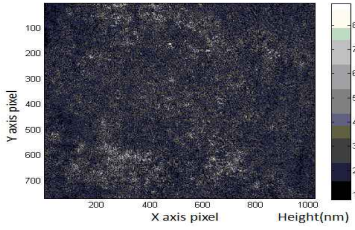
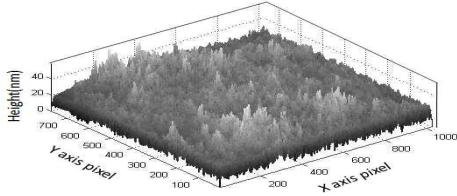
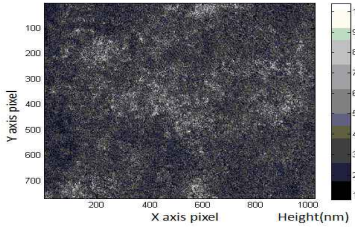
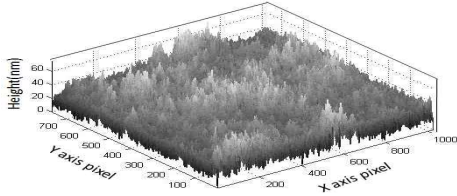
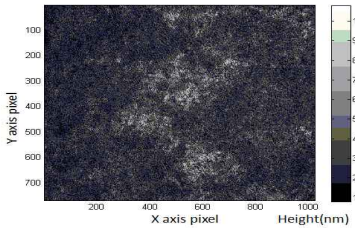
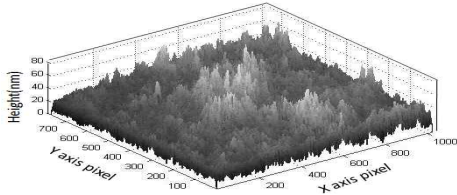
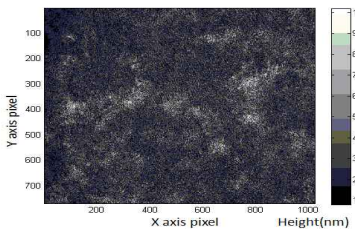
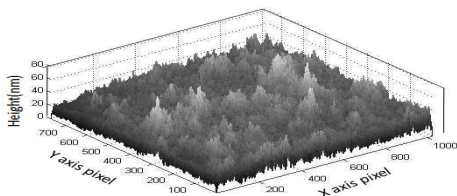
Zone(mm)	Reconstruction (2 dimensional )	Reconstruction (3 dimensional )
0		
5		
10		
15		

표4.1에서 표4.4까지의 재생된 이미지의 통하여 표면의 높이 정보를 측정 하였다. 위의 정보를 이용하여 인장속도에 따른 위치별 평균 표면 거칠기, 최대 표면 거칠기를 측정하였다. 측정 결과는 그림 4-15, 4-16과 같다. 그림 4-15의 그래프는 파단면으로부터 거리가 멀어질 질수록 표면 거칠기의 평균은 증가하다가 감소하는 형태를 보였다. 이는 시험편의 파단시에 국부 수축현상이 발생하는데, 표면의 거칠기가 국부 수축의 현상의 영향을 받아서 표면의 표면 거칠기가 변화된 것으로 사료된다. 이와 같은 현상은 파단면과의 거리에 따른 최대 표면 거칠기의 그림 4-18의 그래프를 통해서 더욱 명확히 확인 할 수 있었다. 본 논문에서는 이와 같은 사실을 수치적으로 보여주었다.

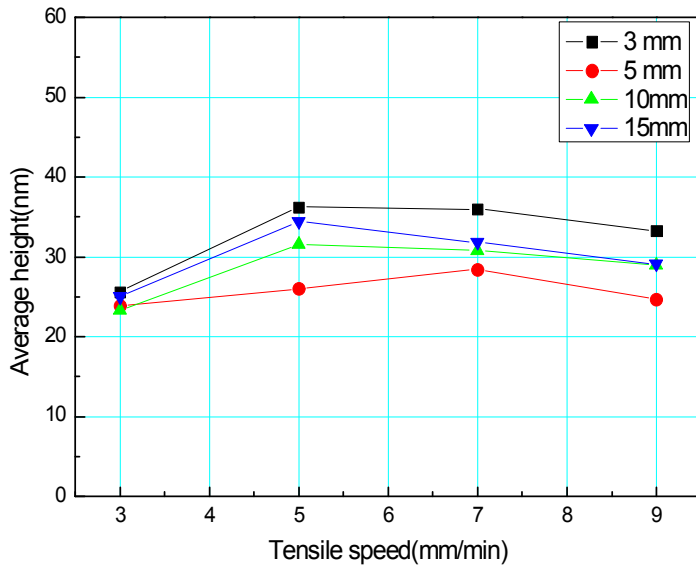


Fig. 4-15 Comparison of average height by Fracture surface to distance

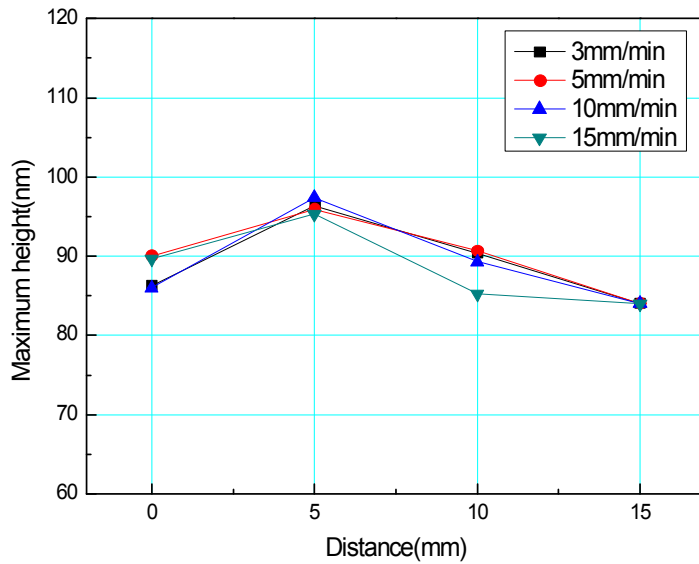


Fig. 4-16 Comparison of Maximum height by distance

그림 4-15와 그림 4-16의 그래프를 통해서 알 수 듯이 평균 거칠기와, 최대 거칠기는 비슷한 형태의 추세로 표현되었다. 이는 국부 수축현상이 표면 거칠기에 영향이 있다는 것으로 이해 할 수 있다. 또한 가공전의 시험편보다 인장에 따른 파단시험편의 평균 거칠기가 약 1.5 배 낮아졌다. 이는 시험편을 인장 할 경우에 분자간의 거리가 멀어져 표면의 거칠기의 최대 높이와 최소 높이의 차가 작아져서 나타난 결과로 분석된다. 이를 수치적으로 분석 할 수 있다는 것을 본 논문에서는 제시 하였다.



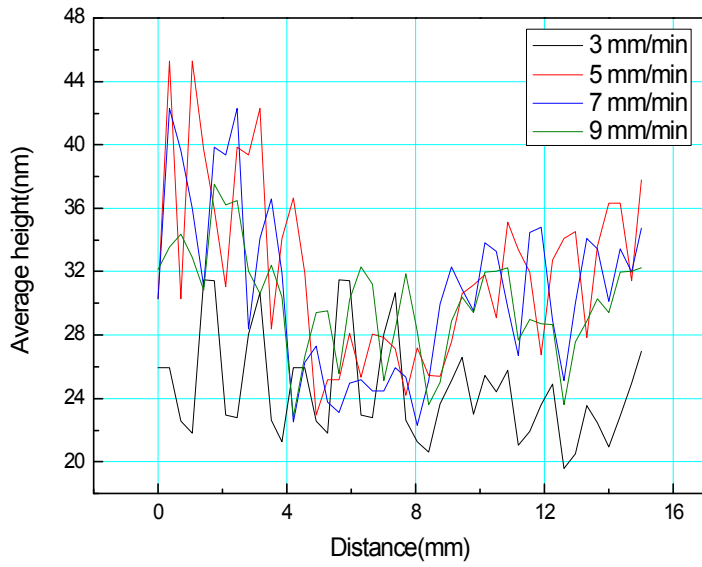


Fig. 4-17 Distribution of average height in the detected zones

그림 4-17 는 각각의 인장속도에서 과단면에서 0-15 mm 부분까지의 평균 거칠기의 값이며, 4-8mm 지역에서 급격하게 거칠기가 감소된다. 따라서 이는 인장에 따른 국부 수축에 영향으로 표면의 거칠기가 급격한 변화가 일어난 것으로 생각된다. 이와 같은 분석 결과는 각각의 위치에 따른 표면 거칠기의 정보를 이용하여 국부 수축이 일어난 위치를 역으로 추론 할 수 있을 것이다.

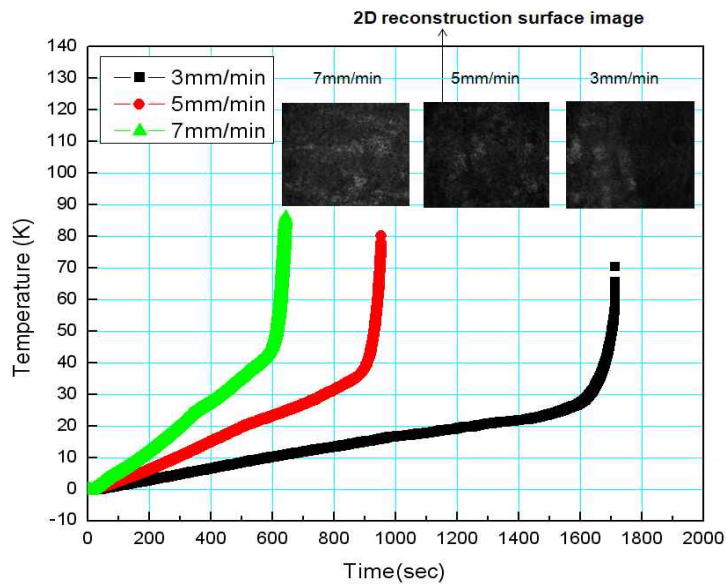


Fig. 4-18 The temperature variation and 2D reconstruction surface image according to tensile speed in 0mm zone

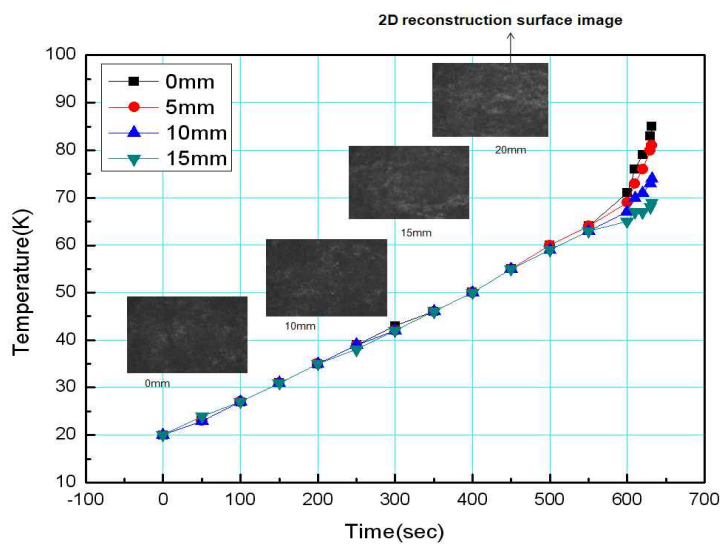


Fig. 4-19 The temperature variation and 2D reconstruction surface image according to distance in 7mm/min tensile speed

그림 4-18은 각각의 인장속도에 대하여 파단면으로부터 0mm 떨어진 지점으로 부터의 온도 변화, 표면의 형상을 보여준다. 또한 X 축의 시간의 값을 통하여 인장속도에 따른 파단 시간을 예측 할 수 있다. 그림 4-19는 7mm/min의 인장속도에 대하여 파단면으로부터 0, 5, 10, 15 mm 떨어진 곳의 온도변화의 표면의 형상을 보여준다. 이와 같은 결과는 시험편이 파단시에 파단면과 가까운 곳에 온도 변화가 크며, 각 위치에 따른 표면의 형상과 온도를 보여준다. 이와 같은 사실은 외부 조건에 따른 시험편의 온도와 표면의 형상의 관계를 파악하는 매우 유용한 방법이며, 향후 이와 관련하여 더 많은 연구가 필요하다.

## 제 5 장 결론

본 논문에서는 기계 구조물에 많이 사용되는 재료로 표준 시험편을 제작하여 외부 인장조건에 따라 대상물에 발생하는 현상을 파악하고자 한다. 따라서 외부 하중에 조건에 의한 대상물의 변화를 마이크로 디지털 홀로그래피와 적외선 열화상카메라, CCD 카메라를 이용하여 시험편에 발생하는 변화를 측정하였다. 이러한 외부 현상의 미소한 측정하기 위해서 반사형 디지털 홀로그래피 시스템을 구성 하였다. 본 논문의 결론은 다음과 같다.

1) 외부 하중조건에 의해 시험편은 내부 에너지를 발산하며, 이는 온도나 체적, 표면의 변화로 나타난다. 이러한 변화를 측정하는데 본 논문에서는 적외선 카메라, CCD 카메라, 마이크로 디지털 홀로그래피를 통하여 상호연관 관계를 파악하였다.

3) 마이크로 디지털 홀로그래피를 구성하여 인장속도에 따라 대상물의 표면의 변화를 나노( $10^{-9}$ ) 단위까지 측정 하였다. 이와 같은 사실은 대상물의 미세 변화의 측정에 있어서 분해능향상이라는 기술적 의미가 있으며, 대상물을 기계 재료로 확장시켜 응용 분야를 넓혔다.

4) 마이크로 디지털 홀로그래피를 이용한 각각의 인장속도에 따라서 표면의 변화는 일정한 형태로 측정되어야 하나 대상물이 국부 수축이 일어나는 부분의 표면 거칠기가 급격하게 감소되었다. 이는 시험편의 국부 수축이 일어나는 부분이라고 추정되며, 각각의 지점에서의 정보를 통해 국부 수축이 일어나기 시작하는 부분을 예측 할 수 있을 것이다.

5) 시험편이 외부 인장 조건에 따라 온도, 체적 및 표면의 형상이 변화 한다. 이를 온도, 체적, 외부조건, 표면의 상관관계가 상호 밀접한 관계가 있었음을 확인 하였으며, 이와 관련하여 향후 많은 연구가 필요 할 것으로 생각된다.

## 참고 문헌

1. D. Gabor, "A new microscopic principle," *Nature*. 1611 777-778
2. D. Gabor, "Microscopy by reconstructed wavefront," *Proc. Roy. Soc.* 197, 454-487(1949)
3. D. Gabor, "Microscopy by reconstructed wavefront II," *Proc. Phys. Soc.* 64, 449-469(1951)
4. J. W. Goodman, and R. W. Lawrence, "Digital phase formation from electronically detected holograms," *Appl. Phys. Lett.* 1, 77-79 (1967)
5. M. A. Kronrod, N. S. Merzlyakov and L. P. Yaroslavskii, "Reconstruction of a hologram with a computer," *Sov. Phys. Tech. Phys.* 17, 333-334 (1972)
6. U. Schnars, and W. Juptner, "Direct recording of hologram by a CCD target and numerical reconstruction," *Appl. Opt.* 33, 179-181 (1994)
7. B. Javidi, and E. Tajahuerce, "Three-dimensional object recognition by use of digital holography," *Opt. Lett.* 25, 610-612 (2000)
8. P. Carre, "Installation et utilisation du comparateur photoelectrique et interferential du Bureau International des Poids et Mesures," *Metrologia* 2, 13-23 (1996)
9. T. Zhang and I. Yamaguchi, "Three-dimensional microscopy with phase shifting digital holography," *Opt. Lett.* 23, 1221-1223 (1998)
10. B. C. Kim and S. W. Kim, "Absolute interferometer for three-dimensional profile measurement of rough surfaces," *Opt. Lett.* 28, 528-530 (2003)
11. J. Schwider, R. Burow, K-E Elssner, J. Grzanna, R. Spolaczyk, and K. Merkel, "Digital wave-front measuring interferometry: some systematic error sources," *Appl. Opt.* 22, 3421-3432 (1983)
12. Y. Y. Cheng and J. C. Wyant, "Phase shifter calibration in phase shifting interferometry," *Appl. Opt.* 24, 3049-3052 (1985)

## 감사의 글

대학원에 입학하여 어느덧 2년이라는 시간을 보내고 이 논문을 끝으로 실험실을 떠나야 한다는 생각이 그 동안에 추억이 많이 생각이 납니다. 후회와 아쉬움도 많지만 저에게는 모두 소중한 기억으로 남을 것 같습니다. 대학원에서 보냈던 시간이 저의 인생에서 가장 가르침을 주었고, 이 생활이 저의 앞길에 큰 도움이 될 거라고 생각합니다.

우선 많은 것을 가르쳐 주신 양광영, 나기대, 양인영, 정낙규, 김택현 교수님 그리고 지도교수님 이신 김경석 교수님께 감사의 말씀을 올리며, 마지막까지 저의 저에게 부족함을 채워 주시려고 질타를 아끼지 않으셨던 장호섭 박사님, 사소한 것 하나하나 챙겨주셨던 정현철 박사님께 정말 감사드리며 행복한 일만 가득하길 바랍니다. 그리고 아무것도 알지 못한 저에게 많은 가르침을 주신 포항공대 홍정기 교수님과, 정승준 박사님께 감사의 마음을 전합니다.

동기이지만 나에게 많은 도움을 준 수옥이형, 종현이, 민근이가 있어서 지치고 힘든 실험실 생활도 잘 마무리 한 거 같습니다. 이 모든 것이 다 고맙고, 좋은데 취직하고 아리따운 아가씨 만나서 꼭 결혼하길 바랍니다.

선배들이 많아서 기도 피지 못한 3학기가 되는 동수, 성원 너희들의 조그마한 보탬이 있어서 내가 졸업논문을 마칠 수 있었다. 고맙고 앞으로 남은 실험실 생활 힘들고 고단한 일이 많을 테지만 열심히 해서 좋은 성과 있길 바란다.

마지막으로 항상 저를 믿고 사랑해주신 아버지, 어머니가 계셔서 지금의 제가 있습니다. 부모님 항상 저의 곁을 지켜 주셔서, 가슴속 깊이 감사의 마음을 전합니다. 그리고 격려해준 동생한테 고마움을 전합니다.

## 저작물 이용 허락서

학 과	첨단부품소재 공학과	학 번	20077267	과 정	석사
성 명	한글: 김 현 민    한문: 金 賢 旻    영문: Kim, Hyunmin				
주 소	광주광역시 서구 화정2동 763-37번지 1층				
연락처	E-MAIL: khmin1127@naver.com    H.P: 010-5109-9700				
논문제목	한글: 디지털 홀로그래피를 이용한 인장시험편 파단면의 조도 측정 영문: Measurement of surface roughness in a crack surface specimen by Digital Holography				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다            음 -

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 의사 표시가 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.

동의여부 : 동의(  )    반대(  )

2009 년 2월

저작자: 김 현 민 (인)

**조선대학교 총장 귀하**