



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  
원공시험편의 표면조도 측정

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

박 종 현

디지털 홀로그래피를 이용한  
원공시험편의 표면조도 측정

Measurement for Surface Roughness of Circle  
Holed Specimen by Digital Holography

2009년 2월 25일

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

박 종 현

디지털 홀로그래피를 이용한  
원공시험편의 표면조도 측정

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

박 중 현

# 朴鍾鉉의 碩士學位論文을 認准함

委員長 朝鮮大學校 教授 張完植 (印)

委員 朝鮮大學校 教授 梁仁榮 (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 -

ABSTRACT .....	VI
----------------	----

## 제 1 장 서 론

제 1 절 연구배경 .....	1
제 2 절 연구목표 및 내용 .....	2

## 제 2 장 홀로그래피를 위한 기초광학

1. 회절(Diffraction) .....	3
2. 간섭(Interference) .....	3
3. 구면파와 평면파 .....	6

## 제 3 장 디지털 홀로그래피

제 1 절 홀로그래피의 기본원리 .....	8
제 2 절 디지털 홀로그램의 재생 .....	11

## 제 4 장 실험장치 및 실험방법

### 제 1 절 시험편

1. Resolution target .....	13
2. 원공 인장시험편 .....	14
3. 시험편 제작 .....	15

제 2 절 실험장비	
1. 피로시험기 .....	17
2. 적외선 열화상카메라 .....	18
제 3 절 디지털 홀로그래피 간섭계 구성	
1. 투과형 Mach-Zehnder 간섭계 .....	19
2. 반사형 Michelson 간섭계 .....	20
제 4 절 실험방법 .....	21
제 5 장 실험결과 및 고찰	
제 1 절 Resolution target 측정	
1. 투과형 Mach-Zehnder 간섭계 .....	22
2. 반사형 Michelson 간섭계 .....	24
제 2 절 시험편의 표면온도 변화 측정 .....	26
제 3 절 인장길이에 따른 시험편의 표면 거칠기 분포 변화 .....	29
제 4 절 인장길이에 따른 각 측정영역의 표면 거칠기 변화 .....	40
제 6 장 결론 .....	43
참고문헌 .....	44

## - LIST OF TABLE -

Table 4-1 Specification of Resolution target .....	13
Table 4-2 Specification of Fatigue testing machine .....	17
Table 4-3 Specification of InfraRed Thermography .....	18
Table 5-1 Reconstruction image of 5mm stretched specimen .....	29
Table 5-2 Reconstruction image of 10mm stretched specimen .....	30
Table 5-3 Reconstruction image of 15mm stretched specimen .....	31
Table 5-4 Reconstruction image of 20mm stretched specimen .....	32
Table 5-5 Reconfstruction image of 25mm stretched specimen .....	33



## - LIST OF FIGURE -

Fig. 3-1 Digital holography .....	9
Fig. 3-2 Coordinate system for numerical reconstruction .....	10
Fig. 4-1 Shape of resolution target(USAF1951) .....	13
Fig. 4-2 Dimension and shape of specimen .....	14
Fig. 4-3 Specimens .....	14
Fig. 4-4 Fatigue testing machine and InfraRed Thermography .....	15
Fig. 4-5 Stretched Specimens .....	16
Fig. 4-6 InfraRed Thermography .....	18
Fig. 4-7 Schematic of Mach-Zehnder interferometer .....	19
Fig. 4-8 Schematic of Michelson interferometer .....	20
Fig. 4-9 Set-up of Michelson interferometer .....	21
Fig. 4-10 Position of measurement region .....	21
Fig. 5-1 Hologram image of resolution target(USAF1951) .....	22
Fig. 5-2 Reconstruction image(2D) of resolution target(USAF1951) .....	22
Fig. 5-3 Reconstruction image(3D) of resolution target(USAF1951) .....	23
Fig. 5-4 Height distribution of resolution target(USAF1951) .....	23
Fig. 5-5 Hologram image of resolution target(USAF1951) .....	24
Fig. 5-6 Reconstruction image(2D) of resolution target(USAF1951) .....	24
Fig. 5-7 Reconstruction image(3D) of resolution target(USAF1951) .....	25
Fig. 5-8 Height distribution of resolution target(USAF1951) .....	25
Fig. 5-9 Distribution of temperature according to stretched length .....	27
Fig. 5-10 Variation of temperature according to stretched length .....	28

Fig. 5-11 Distribution of temperature according to stretched length ...	28
Fig. 5-12 Distribution of surface roughness according to stretched length .....	39
Fig. 5-13 Variation of surface roughness according to measurement location .....	41

# ABSTRACT

## Measurement for Surface Roughness of Circle Holed Specimen by Digital Holography

Park, Jonghyun

Advisor Prof. Kim, Koungsuk Ph.D.

Department of Advanced Parts and

Materials Engineering

Graduate School of Chosun University

Holography was invented in 1948 as a method for recording and reconstructing amplitude and phase of a wave field by Dennis Gabor. Hologram image is recorded interference pattern between a wave field scattered from the object and a coherent background named reference wave. It contains the information about the entire three-dimensional wave field and the object wave can be reconstructed by illuminating the hologram with the reference wave again. An observer recognizes a three-dimensional image with all effects of perspective and depth of focus.

Holography was developed to Digital Holography with development of Computer technology and CCD's (Charged Coupled Devices). This method enables full digital recording and processing of holograms, without any photographic recording as intermediate step.

Hologram that was recorded by digital holography is reconstructed with scalar diffraction theory. There are three main algorithms most widely used for reconstruction of digital holograms (Fresnel transform method,

Angular spectrum method, Convolution Method). Each method has different properties with respect to available reconstruction distance, resolution of reconstructed image and computational load. It is very important for reliable reconstruction to choose the appropriate method in a given situation. In this thesis, measurement zone is very small and it need a method can correctly reconstruct in near wavefields so, angular spectrum method is choose for reconstruction algorithm.

Recently, Holography is used widely in several areas. For examples, 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, the application in the mechanical industrial field is deficient.

Surface roughness means the degree of the minute unevenness happened when processing the product. Generally it is the numerical value which shows the precision of the structure surface. Surface roughness have repercussions on abrasion, durability, precision of product and lifetime, friction of machine parts and it is important to know the value of surface roughness for safety and hygiene.

There are two methods for Surface roughness measurement. Firstly comparative measurement method is compares the standard sample and the objective surface to the naked eye. And the other is method to use the surface roughness tester. Comparative measurement method's precision is low because it depends upon individual eyesight and a sense of touch. And the method using surface roughness tester has a demerit that is contact the surface of material.

Therefore, in this thesis, Surface roughness is measured by Digital holography that has merits of non-destructive and non-intrusive in order to increase of digital holography's application in industrial field. For this, surface roughness of circle holed specimen that was stretched in fixed

length is measured using digital holography and calculated a surface roughness value and compared. As a result of conduct the experiment, surface roughness can be measured by digital holography interferometry in high resolution. Also the experiment proves that when the surface roughness value closed to the closed circle holed area and the stretched length had increased, the surface roughness had been roughed by external conditions.

# 제 1 장 서론

## 제 1 절 연구배경

1948년 Dennis Gabor는 현재 우리가 홀로그래피로 알고 있는 파면재생(wavefront reconstruction)이라는 2단계의 새로운 무렌즈 영상 처리 방법을 제안하였다. Gabor는 간섭성 참조파가 물체에 의해서 회절되거나 산란된 물체파와 동시에 존재하면, 회절되거나 산란된 파의 진폭과 위상을 기록할 수 있다는 것을 제시하였다<sup>[1,2]</sup>. 그는 이렇게 기록된 간섭무늬에서 원래 물체가 갖고 있던 영상을 재생할 수 있다는 것을 제시 하였으나, 실제로 우리에게 소개된 것은 간섭성이 뛰어난 레이저광원이 개발된 1960년 이후부터 이다. 이후 Goodman 과 Laurence에 의해서 홀로그램을 수치적으로 재생할 수 있는 방법이 제안되었으며<sup>[3]</sup>, Krorod가 컴퓨터를 이용하여 수치적 재생을 구현하였다<sup>[4]</sup>. Schnars와 Juptne에 의해서 홀로그램을 필름이 아닌 CCD 에 직접 기록함으로써 이것을 저장하고 재생하는 전 과정을 컴퓨터를 통해서 처리할 수 있게 되었다<sup>[5]</sup>. 그 후 홀로그램의 저장매체로 검광판 대신에 CCD를 사용한 것을 디지털 홀로그래피라고 부르게 되었다.

디지털 홀로그래피는 대상물의 형상(shape)에 따른 위상(Phase)의 변화를 간섭무늬의 형태로 기록하기 위하여 최소 두 개의 파가 필요한데, 이는 광원을 대상물에 조사하였을 때 대상물에 반사 또는 투과되어 CCD의 상면(Cell)에 입사되는 물체파(object wave)와 CCD의 상면(Cell)에 직접 입사되는 기준파(Reference wave)이다.

레이저는 가간섭 광원이지만 아직 한 파장의 빛을 발진시키지 못하고 얼마간의 대폭을 가지므로, 같은 파장의 레이저라도 그 빛을 서로 가간섭적으로 합치기가 어려우므로, 두 파가 동일한 위상값을 얻기 위하여 반드시 단일광원으로부터 두 파가 나뉘줘야 한다. 대상물의 형상에 따라 변화하는 물체파의 위상은 기준파와의 간섭에 의해서 CCD의 상면(Cell)에 기록되어진다. 이와 같이 상면에 기록된 영상을 디지털 홀로그램이라고 한다. 디지털 홀로그램은 컴퓨터의 프로그램을 통하여 수치적으로 재생되어 물체파의 복소진폭(Complex amplitude)을 구하고 대상물의 형상 정보를 얻을 수 있다.

디지털 홀로그래피는 간섭계의 구성 형태와 홀로그램 기록방식에 따라 기본적으로 투과형(Transmission Type)과 반사형(Reflection Type)으로 구분할 수가 있고, 투과형은 다시 물체파와 기준파 사이의 각도에 따라 Off-axis 과 On-axis로 나눌

수 있다. On-axis는 Gabor가 최초로 사용한 방식으로, 물체파와 기준파가 거의 동일방향으로 진행하므로 두 파사이의 각도가 거의  $0^\circ$ 가 된다. 이 On-axis 홀로그램은 밀도가 낮은 간섭무늬가 기록되며, 상 재생시에 실상과 허상이 중복됨에 따라 이중상이 생기게 되어 선명한 상을 얻기가 어렵다는 단점을 갖고 있다. 이러한 단점을 해결한 것이 미시간 대학의 Leith와 Upatnieks에 의해 고안된 Off-axis이다. 이는 물체파와 기준파를 분리시켜 서로 일정각도를 가지게 하여 감광판에 입사시키기 때문에 On-axis 홀로그램이 갖는 재생상의 중첩과 중복문제를 해결하여 선명한 재생상의 생성을 가능하게 한다.<sup>[6]</sup>

## 제 2 절 연구목표 및 내용

앞서 간략히 설명한 홀로그래피는 지난 몇 년 동안 여러 분야에서 꾸준한 연구가 진행되어 왔고, 실용화가 이루어지고 있다. 렌즈나 반사경의 역할을 할 수 있는 홀로그램의 특성을 살려 홀로그램을 광학소자로 사용할 수 있도록 만든 홀로그래픽 광학소자(HOE: Holographic Optical Element)를 그 예로 들 수 있는데 이 HOE는 기존의 고전적인 각종 유리를 재료로 하는 광학소자로는 얻을 수가 없는 다양한 특성을 가진 광학소자를 만들 수 있고, 판형으로 부피가 거의 없으며 특성도 뛰어나다는 장점을 가지고 있다. 그리고 의료진단이나 의료 교육분야에서 매우 유용하게 사용될 수 있는 다중 홀로그램과 스테레오그램 홀로그램이 있다. 그 밖에도 예술분야(홀로그래픽 영화, 초상화, 증명사진 등)와 보안분야(화폐 및 문서 위조방지) 등에서 사용되고 있으며, 메모리 및 패턴 인식, 직접 화상전송 등에도 응용되고 있다. 이와 같이 다양한 분야에서 홀로그래피 기술이 응용되어 사용되고 있지만, 공학계열 및 산업현장에서는 그 응용성이 낮은 것이 사실이다.

기계분야에서 제품의 표면거칠기는 그 정도에 따라 마모 및 내구성, 정밀도, 수명, 마찰, 유속등에 심각한 문제를 야기하며 경제적이나 안전, 위생 등 여러 가지 측면에 큰 영향을 끼치기 때문에 기계제품의 표면거칠기를 측정하는 것이 중요하다.

따라서, 비파괴(Non-destructive), 비침습(Non-intrusive)의 특성을 갖는 디지털 홀로그래피를 이용하여 시험편의 표면거칠기를 측정함으로써 기계분야에서의 디지털 홀로그래피의 응용성을 증대시키고자 한다. 이를 위하여 표준원공인장시험편의 인장길이에 따라 표면 거칠기가 어떻게 변화하는지를 측정하였다.

# 제 2 장 홀로그래피를 위한 기초광학

## 1. 회절(Diffraction)

회절이란 진행하는 파면의 일부가 차단되었을 때 발생하는 파동현상의 일반적인 특성으로써, 빛이 투명/불투명한 장애물을 만나서 일부파면의 진폭이나 위상이 변하게 되어 초기 진행선으로부터 발산하는 현상을 말하며, 회절의 정도는 틈의 크기와 파장의 영향을 받는다.

이러한 회절현상에 의해 입사광의 축방향에 특정한 광패턴을 형성하게 되는데, 이 광패턴은 물체의 단면형상에 의한 산란광의 공간에너지 분포를 나타낸다. 이 산란광의 공간에너지 분포는 '1차 파면상의 모든 점은 2차 구면작은파들의 중심으로 작용하고 일정시간 후의 새로운 파면은 2차 구면작은파들의 포락선(envelope)으로 만들어진다.'고 하는 호이겐스의 원리(Huygens Principle)에 의해 수식적인 표현이 가능해진다.<sup>[7]</sup> 이러한 수식적인 표현을 통하여 공간에너지 분포나 공간 주파수 분포를 알 수 있고, 그에 따라 물체의 단면형상이나 크기에 대한 정보를 얻을 수 있다.

## 2. 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(2-1)과 같다.

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

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 위상값이다.

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(2-2)에 나타난 바와 같이 주어진다. 변조파의 강도 역시 식(2-2)에 같이 나타내었다.



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

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

여기서, 변조파의 강도를 바이어스 강도로 나눈 값  $B(x,y)/A(x,y)$ 는 간섭무늬의 명암(contrast), 즉 가간섭도(visibility)를 나타낸다.

간섭현상은 동일 광원으로부터 나온 파가 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(2-3)과 같다.

$$E_1 = E_{01} \cos(kx_1 - \omega t_1 + \phi_1) \quad (2-3)$$

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

식(2-3)을 합성하면 식(2-4)과 같다.

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

여기서 고려해야 할 사항은  $E_1$ 과  $E_2$ 는 모두 가시범위 내에서는 상당히 빠른 주파수로 변화하기 때문에 이들의 변화를 일정 시간동안 평균하게 되면 0이 된다. 왜냐하면  $E_1$ 은  $E_{01}$ 과  $-E_{01}$ 사이에서 진동하기 때문이다. 즉,  $E_1$ 과  $E_2$ 의 변화는 의미가 없고 이들의 제곱 값은 각각 그들의 평균값이  $(E_{01})^2$ 에서 0사이에 또는  $(E_{02})^2$ 에서 0사이에 존재하기 때문에 물리적 의미를 갖는다. 홀로그래피는 관측대상물에서 반사되거나 관측대상물을 투과하여 나오는 빛의 간섭에 의한 간섭무늬를 기록한다. 이 간섭무늬의 각 부분의 세기가 대상물에 대한 정보가 되며 이 간섭무늬의 세기는 진폭의 제곱에 비례한다. 이 간섭무늬의 세기를  $I$ 로 표시하며 이를 복사조도(irradiance), 즉 단위 시간당 단위 면적당 평균에너지라 한다.

$$I \equiv \langle S \rangle_T = \frac{c\epsilon_0}{2} E_o^2 \quad (2-5)$$

$I = \epsilon_0 c \langle E^2 \rangle_T$  로 표현  $\langle E^2 \rangle_T$ 의 의미는 전기장 크기의 제곱의 시간평균 즉,  $\langle E \cdot E \rangle_T$ 이다.

$$E^2 = (E_1 + E_2) \cdot (E_1 + E_2) \tag{2-6}$$

$$= E_1^2 + E_2^2 + 2E_1 \cdot E_2$$

양변에 시간 평균을 취하면, 식(2-7)과 같다.

$$I = I_1 + I_2 + I_{12} \quad \begin{aligned} I_1 &= \langle E_1^2 \rangle_T \\ I_2 &= \langle E_2^2 \rangle_T \\ I_{12} &= 2 \langle E_1 \cdot E_2 \rangle_T \end{aligned} \tag{2-7}$$

$I_{12}$  항을 간섭항(interference term)이라고 하는데 이 식의 값을 구해보면, 식(2-8)과 같다.

$$E_1 \cdot E_2 = E_{01} \cdot E_{02} \cos(k_1 \cdot r - \omega t + \epsilon_1) \times \cos(k_2 \cdot r - \omega t + \epsilon_2)$$

$$E_1 \cdot E_2 = E_{01} \cdot E_{02} [\cos(k_1 \cdot r + \epsilon_1) \cos \omega t + \sin(k_1 \cdot r + \epsilon_1) \sin \omega t] \times [\cos(k_2 \cdot r + \epsilon_2) \cos \omega t + \sin(k_2 \cdot r + \epsilon_2) \sin \omega t] \tag{2-8}$$

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

$$I = I_1 + I_2 + 2 \sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \tag{2-9}$$

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 역시 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.

진폭이 같은 두 파동이 만났을 때에는 두 파의 마루와 골이 정확하게 일치되어 합성된다면 하나의 파동에 비하여 진폭은 2배가 되지만 세기는 4배가 된다 (완전보강간섭). 반면에 마루와 골이 서로 어긋나게 되면 진폭과 세기가 모두 0이 되어 파동이 사라진 것처럼 관측 된다 (완전소멸간섭).

만일 두 파의 진동수가 약간 상이하거나 위상이 시간에 따라 변한다면 간섭의 정도가 시간에 따라 달라져서 간섭무늬가 잘 관측되지 않거나 시간에 따라 변할 것이다. 이 경우의 두 파는 간섭성이 약하다고 말하게 되는데 만일 두 파가 일정한 수준 이내로 진동수가 (거의) 동일하고 위상차이가 또한 (거의) 일정하게 유지되는 경우 이들은 간섭이 일어날 가능성이 있어 가간섭성(coherence)을 가진 파동이라 한다.<sup>[8]</sup>

### 3. 구면파와 평면파(Spherical wave & Plane wave)

일반적으로 전자파의 발생원에서 발생하는 전자파는 발생원을 중심으로 사방으로 퍼져나가는데, 이 퍼져나가는 전자파의 발생원으로부터 동일위상 떨어진 지점을 연결하여 생기는 선 또는 면을 파면(wavefront)이라고 한다. 이 파면은 발생원을 중심으로 하는 동심원을 이루어 바깥으로 진행한다. 3차원적으로 보면 발생원으로부터의 전자파는 이 발생원을 중심으로 파면이 서로 동심 구를 형성하면서 사방으로 전파되므로 ‘구면파(Spherical Wave)’라고 부른다. 구면파는 수식적으로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$E(r,t) = E_0 \frac{e^{i(kr - \omega t)}}{r} \quad (2-10)$$

그러나 발생원을 중심으로 파면이 중심에서 멀어질수록 그 곡률반경(Radius of Curvature)이 증가되므로, 이 곡률반경이 증가될수록 파면의 부분 부분은 더 평면에 가까워진다. 그러므로 발생원에서 아주 먼 거리 떨어진 위치에서는 파면의 일부분만 감지되어, 파면 사이가 거의 평행한 것과 같이 되므로, ‘평면파(Plane Wave)’라고 부른다. 평면파는 수식적으로 다음과 같이 표현할 수 있다.<sup>[9]</sup>

$$E(r,t) = E_0 i(kr - wt) \quad (2-11)$$

전자파가 발생원에서 멀어질수록 파면의 크기가 거리의 제곱에 비례하여 증가하므로 전자파의 진폭은 거리에 반비례하여 감소하며, 강도는 거리의 제곱에 반비례하여 줄어든다.

## 제 3 장 디지털 홀로그래피

### 제 1절 홀로그래피의 기본 원리(General Principles)

디지털 홀로그램의 재생의 개념을 Fig. 3-1에 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 것이고, CCD cell로부터 d의 거리에 위치한다. 홀로그래피의 처리 과정은 아래의 수치적 공식을 통하여 표현될 수 있다. 물체파의 복소진폭은 식(3-1)과 같다.

$$E_0(x, y) = a_o(x, y)\exp(j\phi_0(x, y)) \quad (3-1)$$

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

$$E_R(x, y) = a_R(x, y)\exp(j\phi_R(x, y)) \quad (3-2)$$

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

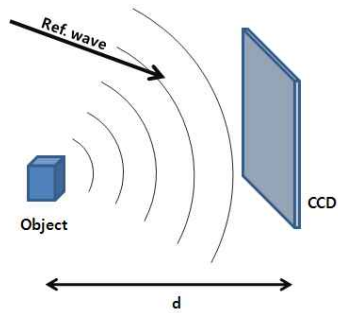
두 파(wave)에 의한 간섭은 CCD와 같은 중간 매개물의 표면에 기록된다. 홀로그램 함수는 참조파와 물체파의 간섭에 의한 빛의 강도(intensity)분포와 비례하여 식(3-2)과 같은 식에 의하여 계산된다.

$$\begin{aligned} h(x, y) &= |E_0(x, y) + E_R(x, y)|^2 \\ &= |E_0|^2 + |E_R|^2 + E_0 E_R^* + E_0^* E_R \end{aligned} \quad (3-3)$$

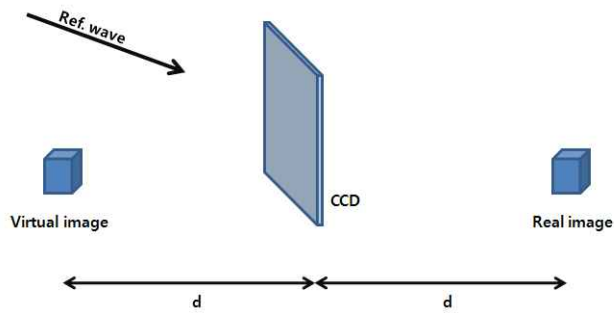
홀로그래피 재생에서, 재생을 위한 참조파의 복소진폭이 식(3-3)에 곱해져야 한다.

$$E_R(x, y)h(x, y) = (|E_0|^2 + |E_R|^2)E_R + |E_R|^2 E_0 + E_0^* |E_R|^2 \quad (3-4)$$

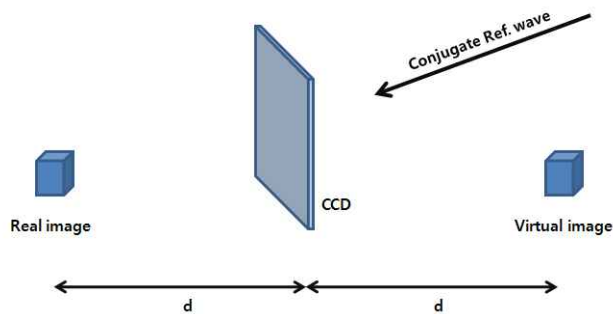
위식에서  $|E_R|^2$ 항은 참조파에 의해서 CCD에 균일하게 작용되는 정보이고,  $|E_o|^2$ 은 물체의 진폭정보이다.



(a) Recording



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



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

Fig. 3-1 Digital holography

$(|E_0|^2 + |E_R|^2)E_R$ 는 빛이 통과할 때 0차 회절이므로, 홀로그래피 재생에서 고려 사항이 아니다.  $|E_R|^2 E_0$ 는 재생된 물체파에 의한 허상(virtual image)의 생성을 나타내고, 실제 이미지 상의 왜곡은 공간적인 이동 복소인자  $E_R^2$  때문이므로  $E_0^* |E_R|^2$ 은 대상물의 실제 이미지의 왜곡에 의해서 나타난다. 따라서 왜곡되지 않은 실제의 상을 얻기 위해서 참조파  $E_R$ 을 결합시킨다. 이는 Fig. 3-1(c)와 같다.

식(3-3), (3-4)에서 Wavefields 회절은 되었지만 초점(focusing)이 맞춰지지 않는 것이다. Fig. 3-2는 홀로그램 평면과 대상물 평면, 이미지평면이 각각 거리  $d$ 만큼 떨어져 있을 경우에 광학적으로나 수치적으로 빔이 전파될 때의 파면을 재생할 수 있다는 것을 보여준다.

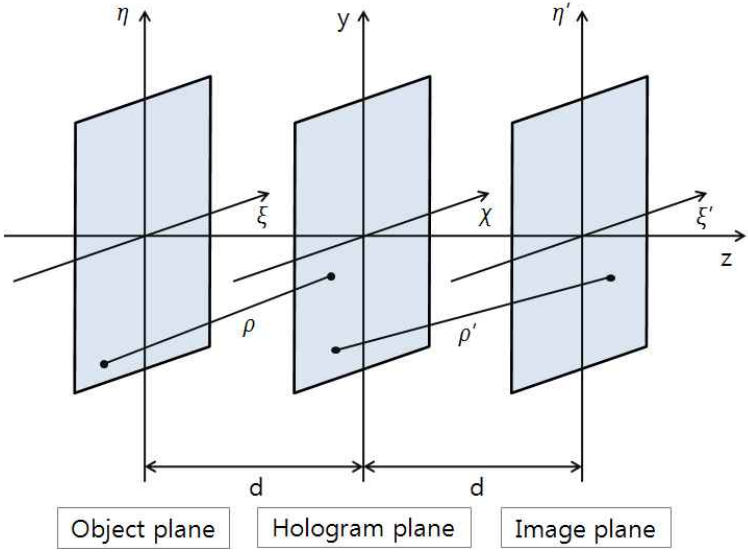


Fig. 3-2 Coordinate system for numerical reconstruction.

평면 참조파  $E_R(x, y)$  는 실제 진폭을 이용하여 간단하게 얻을 수 있다.

$$E_R = a_R + j0 = a_R \tag{3-5}$$

여기서  $a_R$  은 실제 진폭이다.

회절 무늬는 CCD 평면 뒤의 거리  $d$ 에 의해서 계산되며 실제 이미지에서 복소 진폭으로 재생된다. 왜곡되지 않는 실제의 이미지를 재생하기 위해서  $E_R$  대신에  $E'_R$ 을 넣어서 식(3-6)을 얻는다.<sup>[10,11]</sup>

$$U(\xi', \eta') = \frac{1}{j\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) E'_R(x, y) \frac{1}{\rho} \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} \rho'\right) dx dy \quad (3-6)$$

식(3-6)을 이용한 재생의 방법은 Fig. 3-1(c)에서 보여준다. 실제의 이미지는 대상물이 재생되는 동안 CCD상면에 위치되어 나타난다.

## 제 2절 디지털 홀로그래프의 재생(Reconstruction of digital holograms)

디지털 홀로그래피에서 기록된 영상은 스칼라 회절 이론에 기초를 두고 수치적으로 재생된다. 프레넬 회절 공식에 기반을 둔 방법은 속도가 느리고 부드럽게 변화하는 대상물의 재생에 있어서 정확하지만, 실제 필드의 재생은 프레넬 방법으로는 한계가 있다. 따라서 회절 대상체의 실제 wavefield를 해석할 수 있는 각 스펙트럼 방법이 필요하다. 각 스펙트럼 방법은 평면파의 확장으로 흔히 알려져 있다. 이 방법은 프레넬 영역보다 더 가까운 곳 까지 해석이 가능하며 홀로그래프 평면에서 대상체의 wavefield는 푸리에 적분의 확장으로 식(3-7)과 같이 표현될 수 있다.

$$U_0(k_x, k_y) = \int u_0(x, y) \exp[(j(k_x x + k_y y))] dx dy \quad (3-7)$$

$U_0(k_x, k_y)$ 는 평면파의 복소 중력장으로 간주하고, 파의 벡터는  $\vec{k} = k_x \hat{x} + k_y \hat{y} + k_z \hat{z}$ 이다. ( $k = 2\pi/\lambda$ ) 이러한 과정은  $u_0$ 의 고속푸리에 변환에 의해서 수행된다. 만약 이 이미지 평면상에서 평면파가 생성되거나 소멸되지 않으면, 이미지 평면에 wavefields는 각각의 파가 더해진 과정을 통하여 재생될 수 있다. 그리고 각각의 평면파의 일시적인 위상 이동은 식(3-8)에서 보는 바와 같이 고려된다.



$$u_z(k_x, k_y) = \int U_0(k_X, k_Y) \exp[-j(k_X X + k_Y Y + k_Z Z)] dx dy \quad (3-8)$$

이 방법은 고속 푸리에 변환과 역 고속 푸리에 변환에 기반을 둔 컨볼루션 방법을 기반으로 한다. 그러므로 재생된 이미지의 픽셀 크기는 식 (3-8)과 동일하며, 이 방법은 프레넬 영역보다 더 가까운 영역까지 해석할 수 있다.<sup>[12,13]</sup> 또한 고 분해능을 요하는 대상물에 적합한 방법이다.

## 제 4 장 실험장치 및 실험방법

### 제 1절 시험편

#### 1. Resolution target

간접계를 구성하고 본 실험을 수행하기 전에 resolution target을 측정하는 예비 실험을 하였다. 이 때 resolution target은 Edmund optics사의 USAF 1951모델 (positive와 negative)을 사용하였다. Fig. 4-1은 resolution target의 형상을 나타낸 것이고, Table 4-1은 세부사양을 나타낸 것이다.

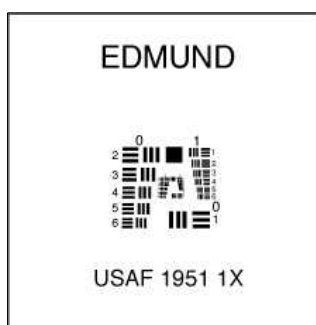


Fig. 4-1 Shape of resolution target(USAF 1951)

Table 4-1 Specification of Resolution target

Description	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 1
Maximum Resolution	for Standard: Group 7, Element 6 for High Res: Group 9, Element 3

## 2. 원공 인장시험편

시험편은 한국산업규격(KS)에 KSB0801로 고시된 금속재료 인장시험편의 중앙 부분에 지름 5mm의 원공을 가공한 시험편을 사용하였다. 재질은 STS304이며 각 부분의 치수 및 형상은 Fig. 4-2와 같고, Fig. 4-3은 실제 시험편의 모습이다.

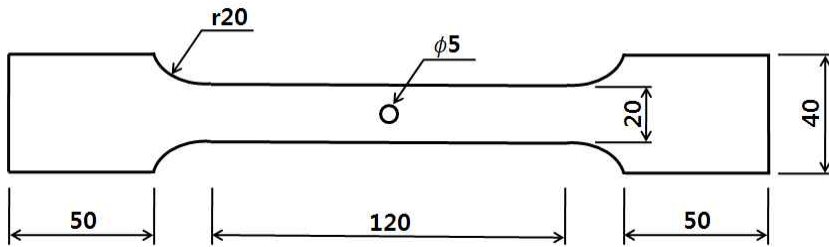


Fig. 4-2 Dimension and Shape of specimen

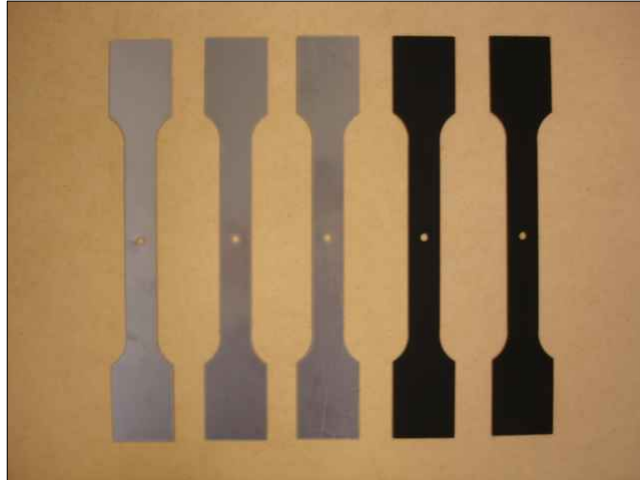


Fig. 4-3 Specimens

### 3. 시험편의 제작

각각의 인장길이에 따른 표면 거칠기의 측정 및 비교를 위하여 인장길이를 일정하게 증가시키면서 시험편을 인장하였다. 이를 위하여 먼저 시험편이 파단 될 때까지 인장하고, 파단직전 시험편이 늘어난 길이를 측정하였다. 이 늘어난 길이를 10 구간으로 나누고 각 인장길이를 시험편을 인장하였다.

이 때 시험편의 인장은 MTS사의 피로시험기(모델명:MTS 793 series)를 사용하였으며, 시험편이 인장될 때의 시험편의 온도변화를 관찰하기 위하여 적외선열화상 카메라(InfraRed Thermography)를 이용하여 동시에 측정하였다. 이 때 시험편의 한 쪽 표면을 흑색방사페인트(방사율 : 0.95)로 도포하여 방사율을 1에 가깝게 유지하였다. Fig. 4-4는 피로시험기와 적외선열화상카메라를 이용하여 실험하는 모습을 나타낸 것이다.



Fig. 4-4 Fatigue testing machine and InfraRed Thermography

시험편의 파단 직전 늘어난 길이는 대략 25mm 정도로 측정되었으므로, 인장길이를 2.5mm 간격으로 일정하게 증가시키면서 시험편을 인장시켰으며 이 때 인장속도는 5mm/min으로 고정하였다. 그 결과 Fig. 4-5와 같은 총 10개의 시험편을 확보하였다.

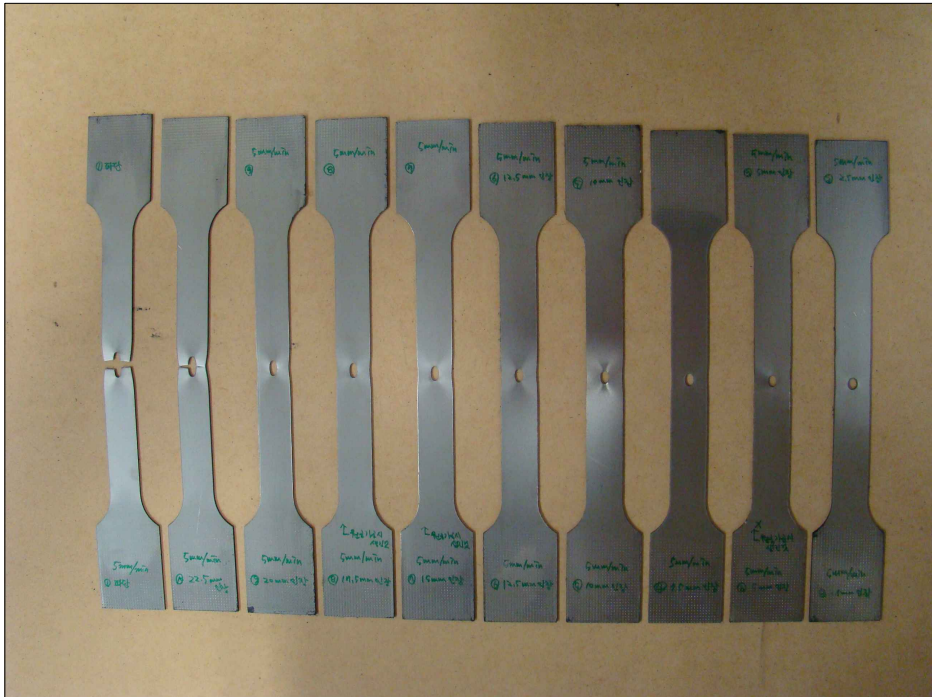


Fig. 4-5 Stretched specimens

## 제 2절 실험장비

### 1. 피로시험기(fatigue testing machine)

원공시험편 인장시 사용된 피로시험기는 미국 MTS사에서 만든 장비(모델명:MTS 793 series)로서 반복 하중에 의한 피로 파괴를 실험하는 유압식 피로시험 장비이며 digital control로 제어 된다. 이 피로시험기는 주로 재료와 부품에 대한 동적(dynamic) 및 정적(static)시험을 수행하기 위한 장비이지만 여러 가지 형태의 실험프로그램을 직접 작성하여 실행할 수 있기 때문에, 시험편의 인장길이를 정량적으로 제어하며 인장시킬 수 있는 프로그램을 작성하여 사용하였다. Table 4-2는 실험에 사용된 피로시험기의 세부사양을 나타낸 것이다.

Table 4-2 Specification of fatigue testing machine

Description	Technical data
Force capacity	100kN (Monotonic : 120kN)
Available actuator ratings	25kN
Dynamic stroke	100mm
Output voltage	±10V(full scale)
Excitation frequency	10kHz(±100 mm)
Data sampling rate	122.88kHz

## 2. 적외선 열화상 카메라 ( InfraRed Thermography)

피로 시험기를 이용하여 시험편을 인장하는 동시에 적외선 열화상카메라를 이용하여 인장하중을 받는 시험편의 표면온도 변화를 측정하였다. 적외선 열화상카메라는 프랑스 FLIR systems사의 silver480 모델을 사용하였고, 세부사양은 Table 4-3에 나타내었다.



Fig. 4-6 InfraRed Thermography

Table 4-3 Specification of InfraRed Thermography

Description	Technical data
Detector Materials	InSb(안티몬화 인듐)
Cooling method	내장 스텐링 쿨러(Stirling)
Spectral Response	3.7~5.0um
Number of Pixels	320*256
Pitch	30um*30um
NETD	25mK@25도 (20mK typical)
Temperature measure range	-15~2000도
Frame rate	5Hz~380(400)Hz
Frame rate resolution	1Hz Step

### 제 3절 디지털 홀로그래피 간섭계 구성

#### 1. 투과형 Mach-Zehnder 간섭계

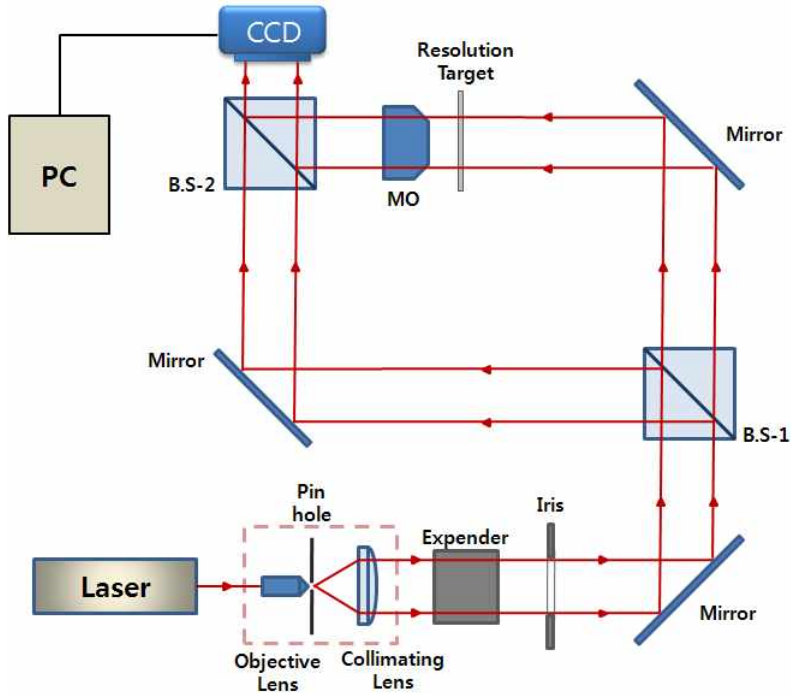


Fig. 4-7 Schematic of Mach-Zehnder interferometer

Fig. 4-7은 디지털 홀로그래피의 일반적인 실험장치 중 투과형 Mach-zehnder간섭계를 나타낸 것이다. 먼저 광원에서 나온 레이저 빔은 대물렌즈와 핀홀(Pin Hole)로 구성된 공간필터(Spatial filter)를 통과하게 되는데, 이 공간필터는 레이저 빔의 전파경로내의 미세물질로 인해 포함된 스파이크성 잡음을 제거시켜 강도분포가 평탄한 가우시안 레이저빔을 만들어주는 동시에 레이저빔을 확대시키는 빔 확대기로서의 기능을 한다.

이 공간필터를 통과한 레이저 빔은 B.S(광 분할기 : Beam Splitter)-1에 의하여 물체파와 기준파로 나뉜다. 물체파는 시험편을 투과하여 B.S-2로 입사되고, 기준파는 광학거울에 반사되어 B.S-2에 입사된다. 이렇게 B.S-2에서 기준파와 물체파가 합쳐지면서 발생하는 간섭무늬가 CCD에 입사되어 홀로그램으로 저장된다.



## 2. 반사형 Michelson 간섭계

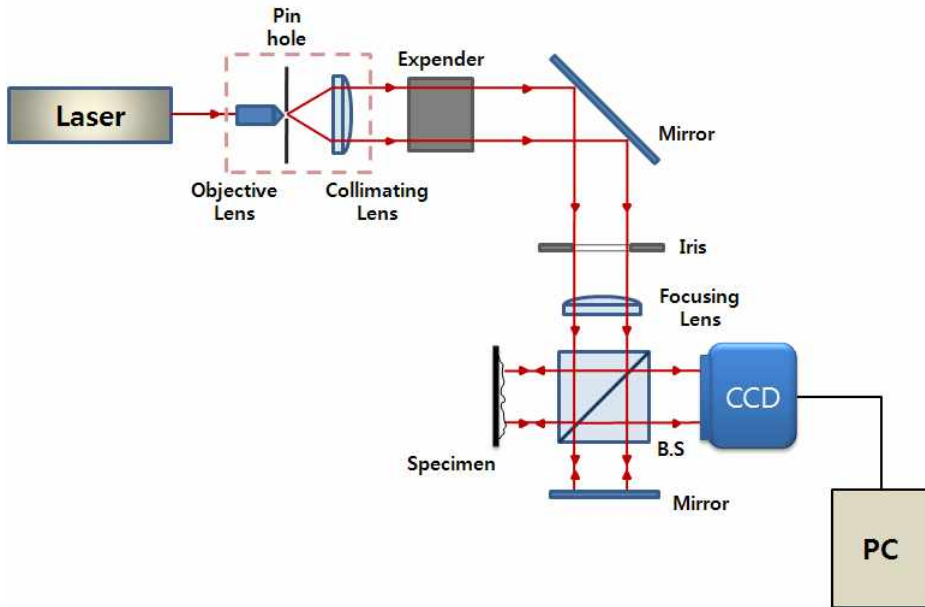


Fig. 4-8 Schematic of Michelson interferometer

Fig. 4-8은 디지털 홀로그래피의 일반적인 실험장치 중 반사형 Michelson간섭계를 나타낸 것이다. 투과형 간섭계와 마찬가지로 공간필터를 통과하면서 필터링/확대된 레이저 빔은 B.S에서 각각 기준파와 물체파로 나누어진다. 기준파와 물체파는 각각 광학거울과 시험편의 표면에서 반사되어 다시 같은 B.S에 입사된다. 이렇게 만들어지는 간섭무늬는 CCD에 의하여 홀로그램으로 저장되고, 일련의 재생 알고리즘을 통하여 재생된다.

## 제 4절 실험방법

인장길이에 따른 원공시험편의 표면 거칠기 변화를 측정하고 비교하기 위하여 Fig. 4-9와 같이 반사형 Michelson간섭계를 구성하고, 앞서 1절에서 설명한 방법으로 인장시킨 각 시험편의 표면 거칠기를 측정하였다. 이 때 측정영역은 원공의 중심을 기준으로 하여 1.5cm의 일정한 간격을 갖는 4곳으로 정하고 총 10개의 시험편에서 표면 거칠기를 측정하였다.

Fig. 4-10은 시험편의 측정영역을 나타낸 것이다.

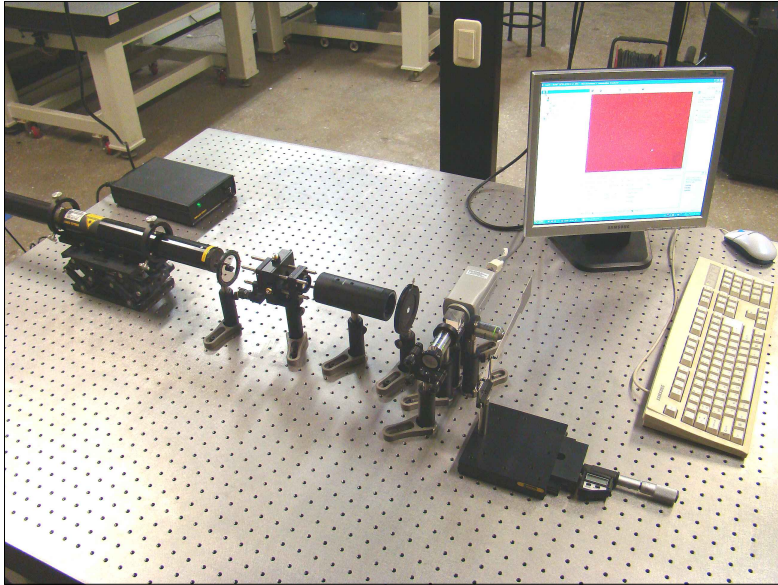


Fig. 4-9 Set-up of Michelson interferometer

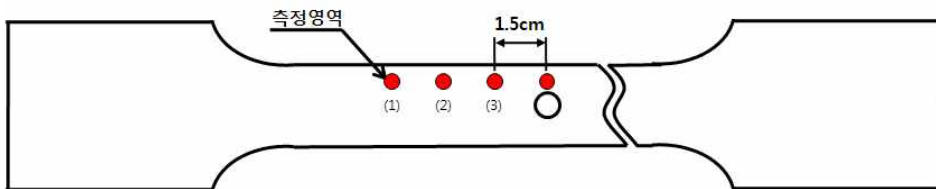


Fig. 4-10 Position of measurement region

## 제 5장 실험결과 및 고찰

### 제 1절 홀로그래피 간섭계 구성과 Resolution target 측정

#### 1. 투과형 Mach-Zehnder간섭계

Fig. 5-1은 Fig. 4-7과 같은 투과형 Mach-Zehnder간섭계를 실제로 구성하고 Resolution Target(모델명 : USAF1951)을 촬영하여 저장한 홀로그램을 나타낸 것이다. 이 홀로그램 이미지는 물체의 위상정보를 포함하고 있기 때문에 일련의 재생 알고리즘을 통하여 3차원 이미지와 높이정보를 획득할 수 있다.

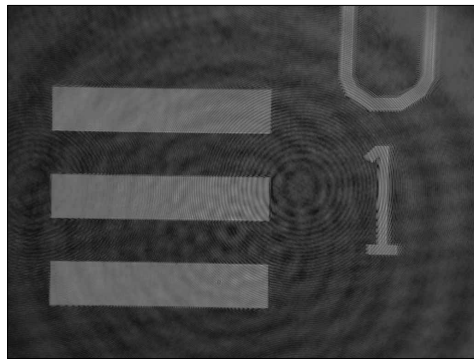


Fig. 5-1 Hologram image of resolution target(USAF1951)

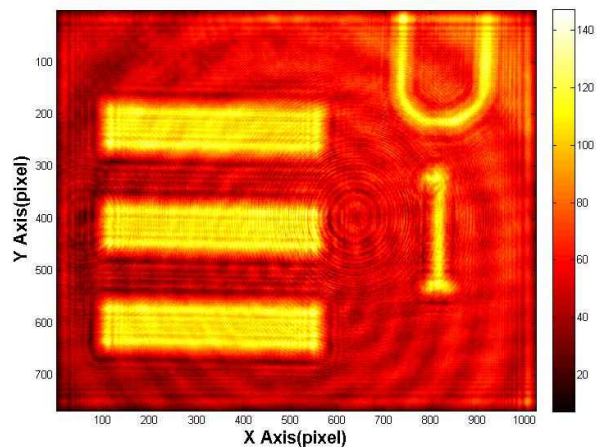


Fig. 5-2 Reconstruction image(2D) of resolution target(USAF1951)

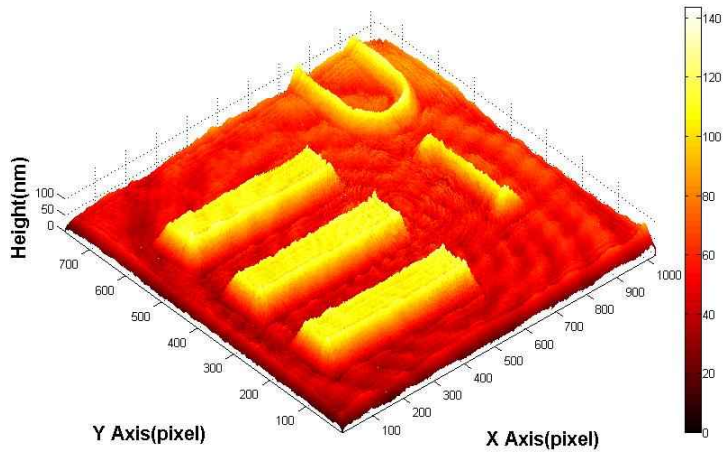


Fig. 5-3 Reconstruction image(3D) of resolution target(USAF1951)

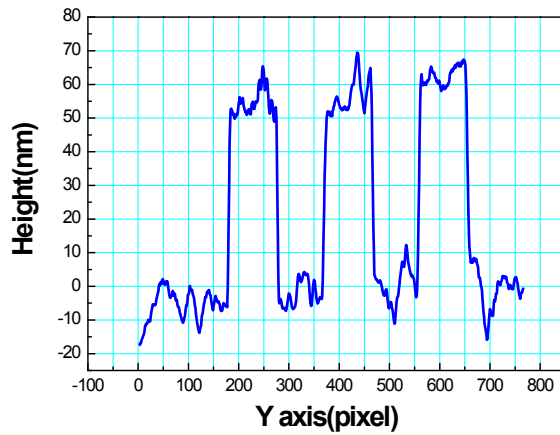


Fig. 5-4 Height distribution of resolution target(USAF1951)

Fig. 5-2, Fig. 5-3은 일련의 재생방법을 통하여 재생된 2차원과 3차원 이미지가  
고, Fig. 5-4는 3차원 이미지를 통하여 측정된 실제 높이정보를 line profile을 통해  
나타낸 것으로서 측정높이가 약 65nm인 것으로 나타났다.

## 2. 반사형 Michelson간섭계

Fig. 5-5는 반사형 Michelson간섭계를 실제로 구성하고 resolution target(모델명 : USAF1951)을 촬영하여 저장한 홀로그램 이미지 이다. 이때 타겟의 미소한 영역을 촬영하기 위하여 20배율의 대물렌즈를 사용하였다. Fig. 5-6과 Fig. 5-7은 각각 2차원과 3차원으로 재생된 이미지이고, Fig. 5-8은 3차원 재생이미지를 통하여 측정된 실제 높이정보를 나타낸 것이다.



Fig. 5-5 Hologram image of resolution target(USAF1951)

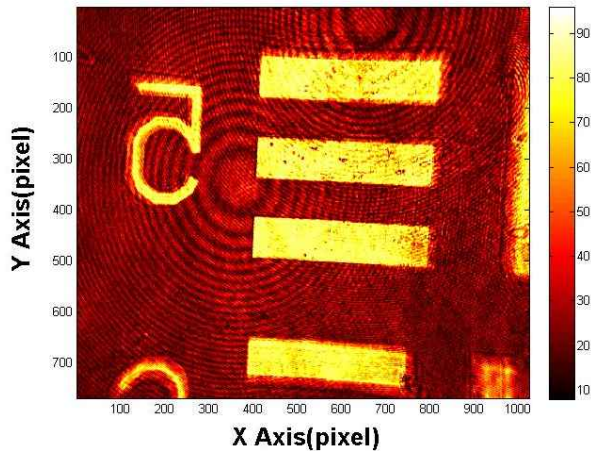


Fig. 5-6 Reconstruction image(2D) of resolution target(USAF1951)

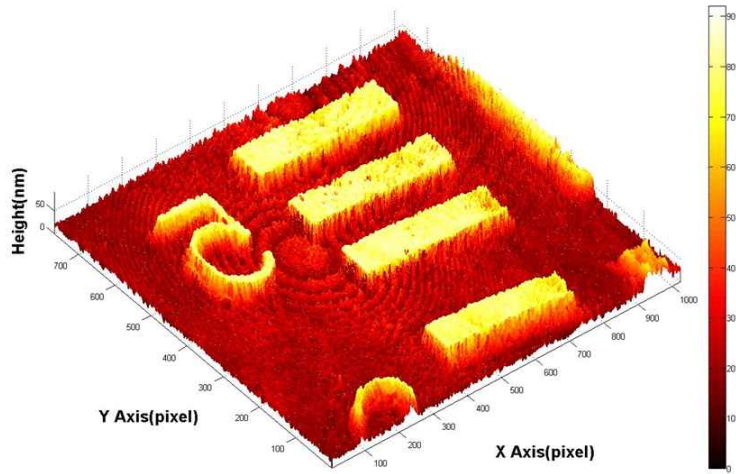


Fig. 5-7 Reconstruction image(3D) of resolution target(USAF1951)

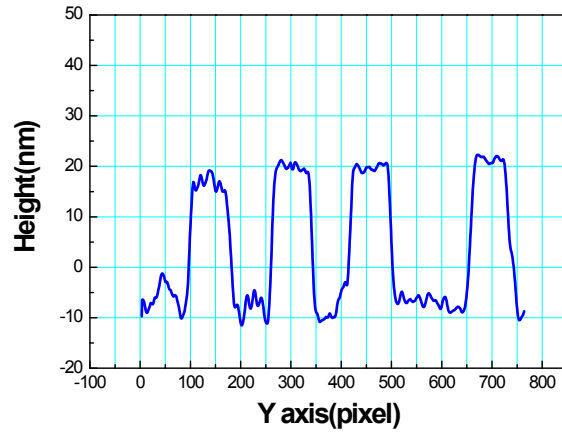
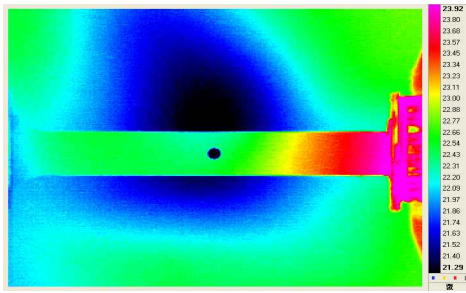


Fig. 5-8 Height distribution of resolution target(USAF1951)

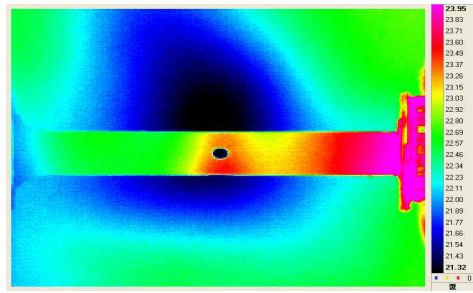


## 제 2절 시험편의 표면온도 변화측정

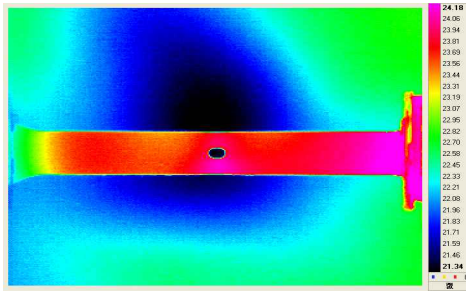
시험편의 표면 거칠기를 측정하기 위하여 원공시험편을 일정한 길이로 인장할 때 적외선 열화상카메라를 통하여 시험편의 표면온도가 어떻게 변화하는지 관찰하였다. Fig. 5-9는 관찰 결과로써 각 시험편의 인장길이에 따른 표면온도 분포를 나타낸 것이다. 원공으로 인한 단면적의 감소로 인하여 원공부에 응력집중이 발생하고 그에 따라 원공주변부가 시험편의 다른 부분에 비해 온도가 급격히 상승하는 것을 육안으로 확인할 수 있다.



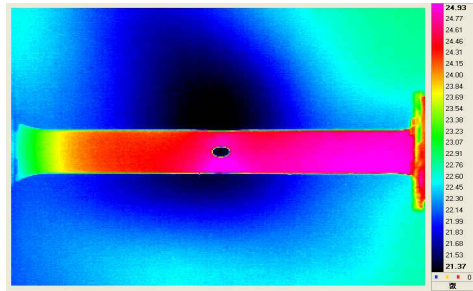
(a) 0mm



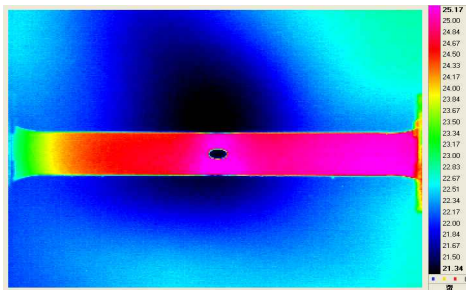
(b) 2.5mm



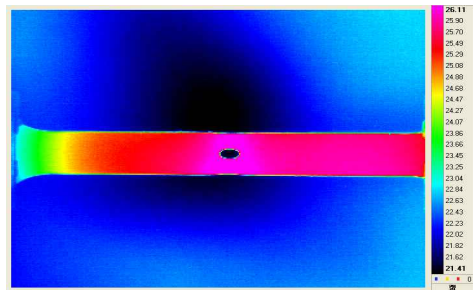
(c) 5mm



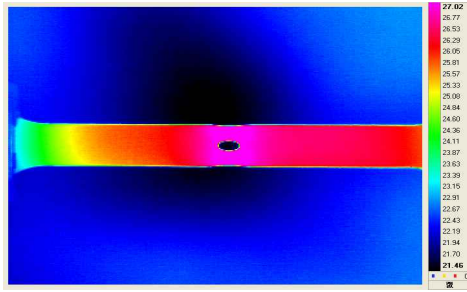
(d) 7.5mm



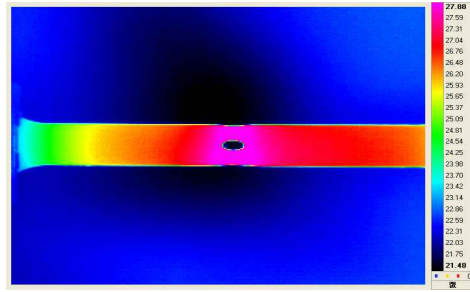
(e) 10mm



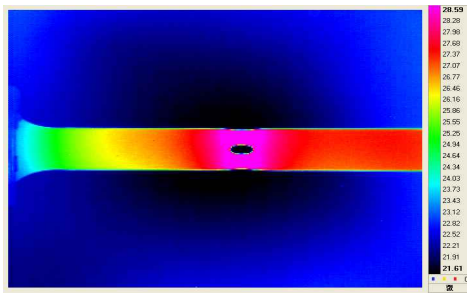
(f) 12.5mm



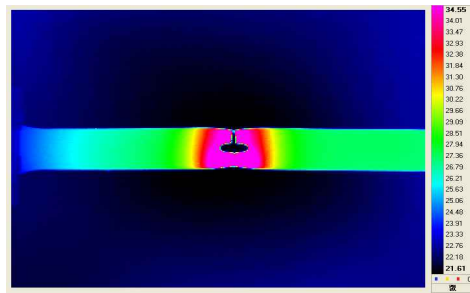
(g) 15mm



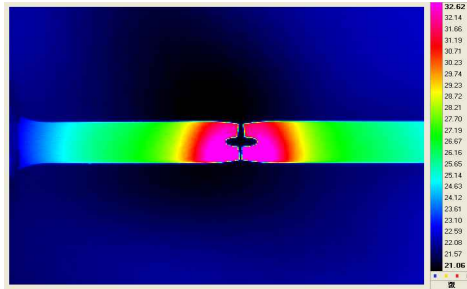
(h) 17.5mm



(i) 20mm



(j) 22.5mm



(k) Fractured

Fig. 5-9 Distribution of temperature according to stretched length

Fig. 5-10은 각 영역들의 온도가 인장길이에 따라 어떻게 변화하는지를 수치적으로 보여주는 그래프이다. 그래프에서 확인할 수 있듯이, 시험편의 각 측정영역 위치의 온도는 10mm 인장될 때까지는 각 영역들 간에 아주 미세한 온도차이를 보이며 선형으로 증가하였다. 하지만 그 이후부터는 응력집중으로 인해 원공주변부인 측정영역 4의 온도가 다른 부분에 비하여 급상승하였다. 파단직전인 22.5mm까지 인장되었을 때 온도상승의 기울기가 매우 높아졌다가 파단된 후에는 응력의 소멸



과 파단면과 표면에서의 방열로 인해 온도가 감소되었다.

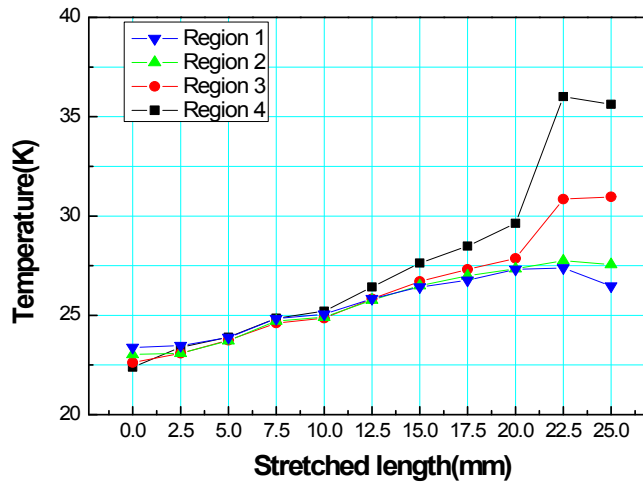


Fig. 5-10 Variation of temperature according to stretched length

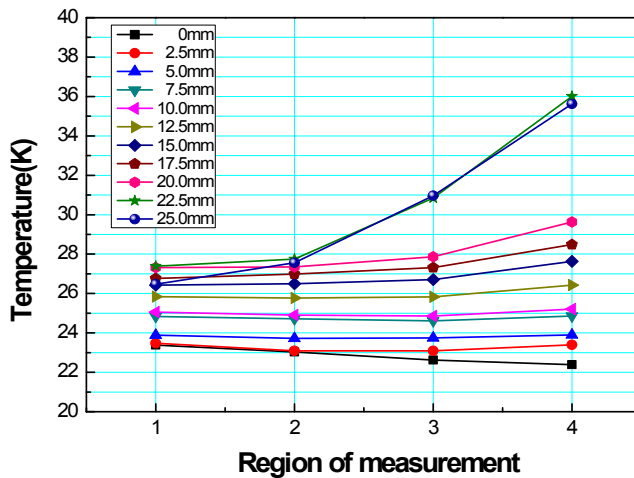


Fig. 5-11 Distribution of temperature according to stretched length

Fig. 5-11은 각 인장길이에 대해 시험편내의 온도분포를 그래프로 나타낸 것이다. 그래프를 통해 10mm 인장될 때까지는 온도가 거의 균일하다가 12.5mm인장되었을 때부터 원공주변부와 다른 부분과의 온도차가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

### 제 3절 인장 길이에 따른 시험편의 표면 거칠기 분포 변화

Table 5-1~5-5는 실험결과 중 일부인 5mm, 10mm, 15mm, 20mm 25mm 인장한 시험편의 표면을 측정하여 2D와 3D로 재생한 이미지를 나타낸 것이다. 이미지들을 통하여 원공부에 가까워질수록 표면이 거칠어진다는 것을 확인할 수 있다. 대체적으로 거의 모든 시험편에서 이와 같은 현상을 관찰할 수 있었다.

Table 5-1 Reconstruction image of 5mm stretched specimen

	2D Reconstruction Image	3D Reconstruction Image
1		
2		
3		
4		

Table. 5-2 Reconstruction image of 10mm stretched specimen

	2D Reconstruction Image	3D Reconstruction Image
1		
2		
3		
4		



Table. 5-3 Reconstruction image of 15mm stretched specimen

	2D Reconstruction Image	3D Reconstruction Image
1		
2		
3		
4		

Table. 5-4 Reconstruction image of 20mm stretched specimen

	2D Reconstruction Image	3D Reconstruction Image
1		
2		
3		
4		



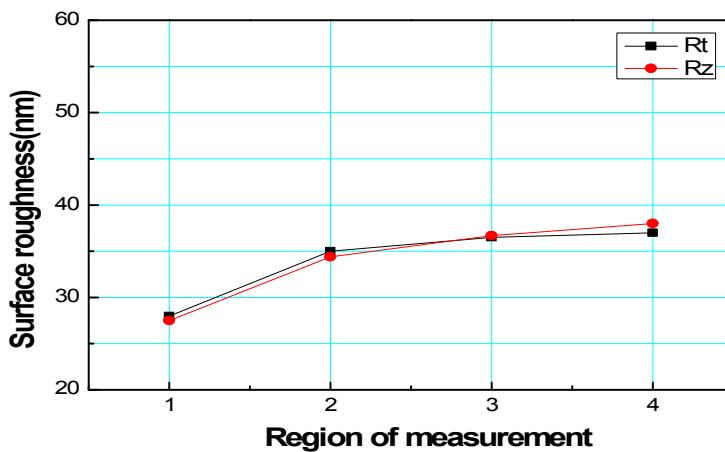
Table. 5-5 Reconstruction image of 25mm stretched specimen

	2D Reconstruction Image	3D Reconstruction Image
1		
2		
3		
4		

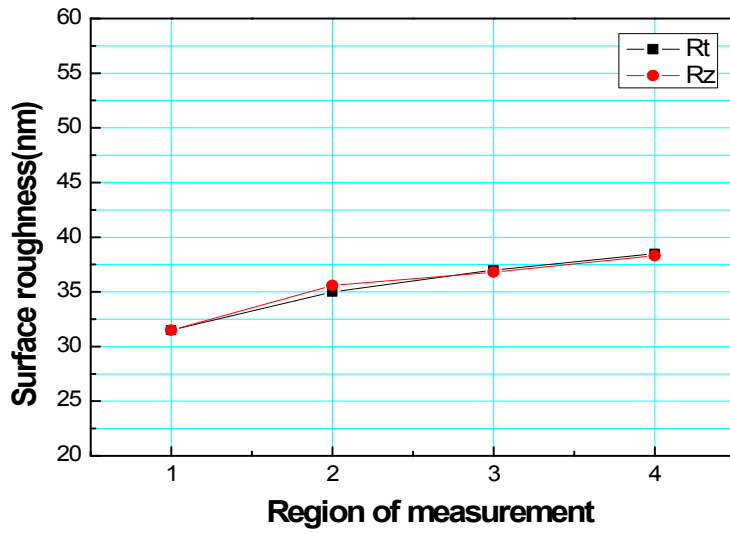
Table 5-1~5까지의 재생이미지들을 통하여 시험편의 원공부분으로 갈수록, 인장 길이가 증가할수록 표면이 거칠어진다는 것을 육안으로 확인할 수 있었다. 하지만 디지털 홀로그래피의 측정분해능이 나노미터(nm)단위이고, 각 시험편들의 인장길이 차가 2.5mm로 작으며, 측정영역간의 간격 또한 1.5cm로 비교적 가까운 거리이기 때문에 표면 거칠기 값의 차이가 적어 재생이미지를 통하여 육안으로 표면 거칠기의 차이를 정확하게 비교한다는 것은 불가능하다. 따라서 재생된 이미지에서 각 pixel들의 높이정보를 획득하여 표면 거칠기를 수치적으로 계산하고, 비교하였다. 비교결과 최소 표면 거칠기 값을 나타낸 곳은 2.5mm인장된 시험편의 1번 영역(약 28nm)이었고, 최대 표면 거칠기 값을 나타낸 곳은 22.5mm인장된 시험편의 3번 영역(약 48nm)으로써 측정된 표면 거칠기의 최대 편차가 20nm로 아주 미소한 것으로 나타났다.

Fig. 5-12는 인장된 길이에 따라 시험편내의 표면 거칠기 분포가 어떻게 변화되고, 원공이 표면 거칠기의 변화에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위하여 각 인장길이별 시험편 내에서 위치별로 측정하여 계산한 표면 거칠기의 분포를 그래프로 나타낸 것이다. 여기서 표면 거칠기는 Rt(최대 거칠기)와 국제표준기구, 미국, 영국 등에서 공통적으로 사용되고 있는 Rz(10점 평균 거칠기)로 각각 계산하여 표시하였다.

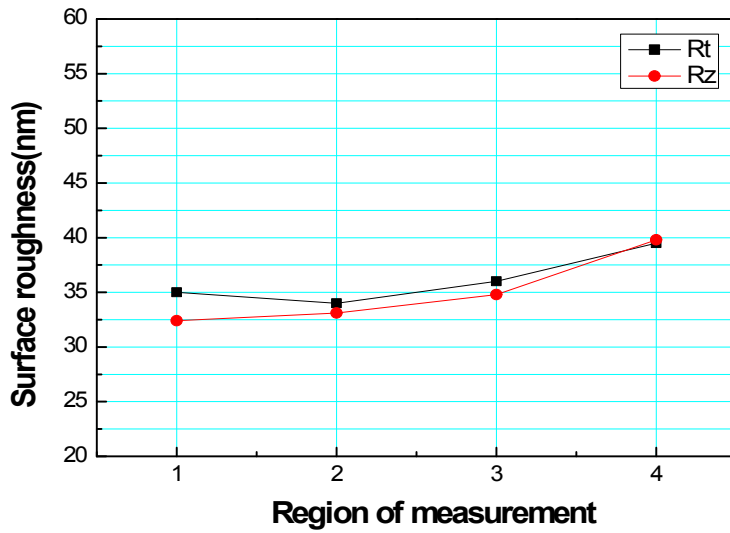
측정영역의 번호는 원공중심부분(4번)을 기준으로 하고, 시험편의 그림방향으로 1.5cm 간격으로 일정하게 이동하면서 각각 3, 2, 1로 부여하였다.



(a) 2.5mm

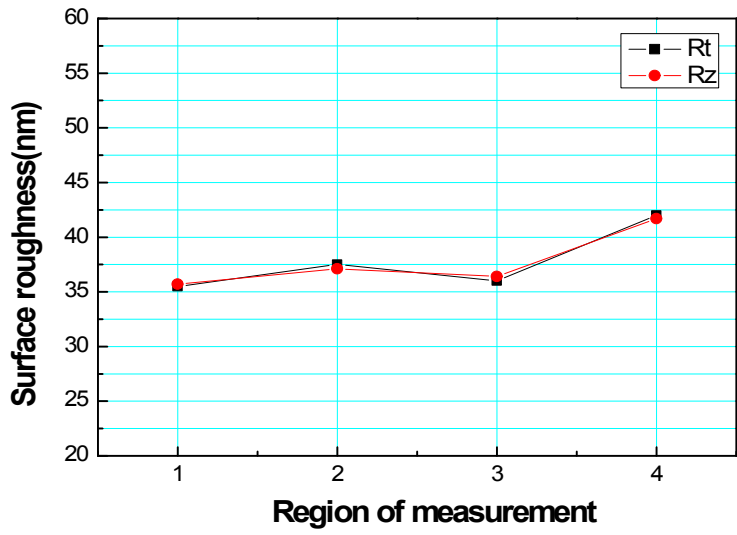


(b) 5.0mm

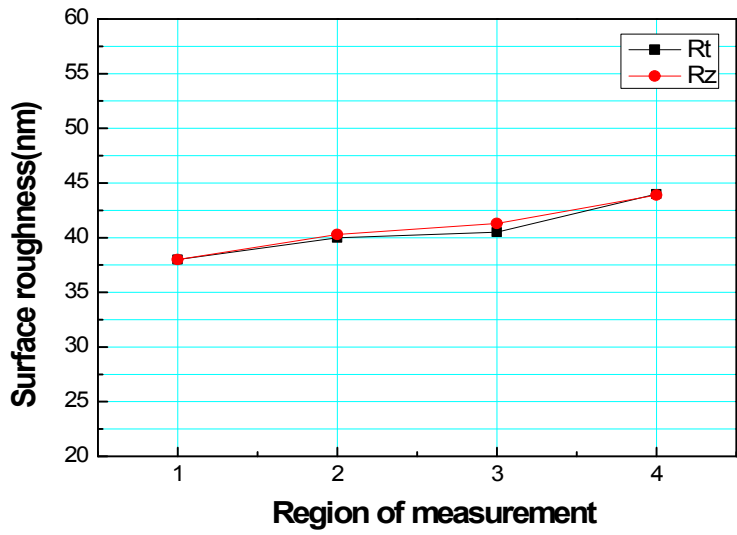


(c) 7.5mm

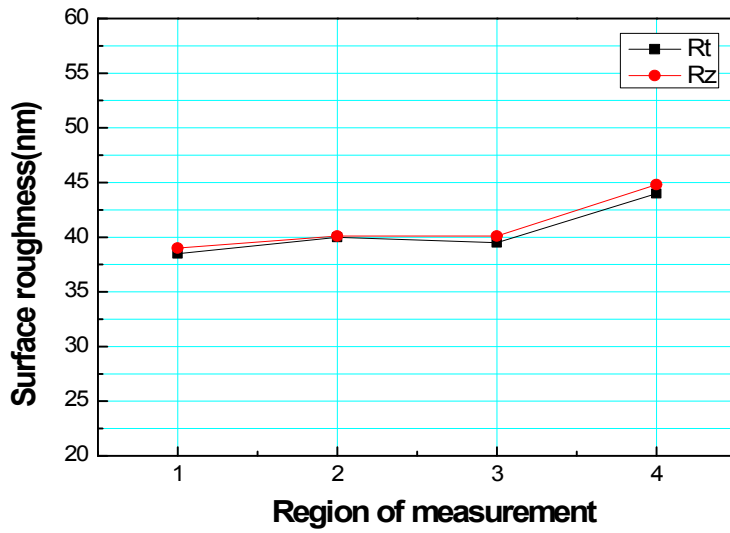




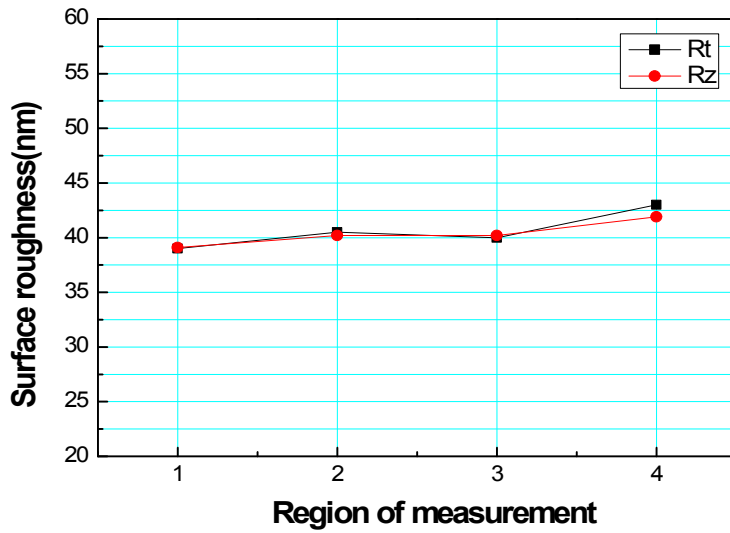
(d) 10.0mm



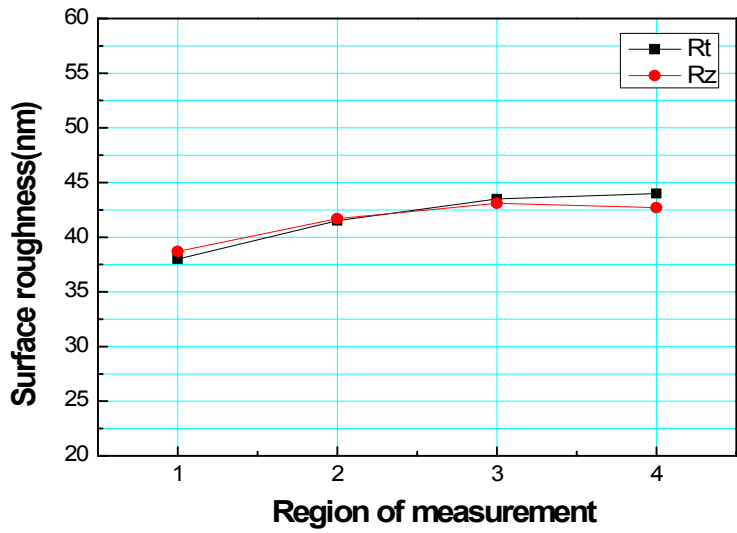
(e) 12.5mm



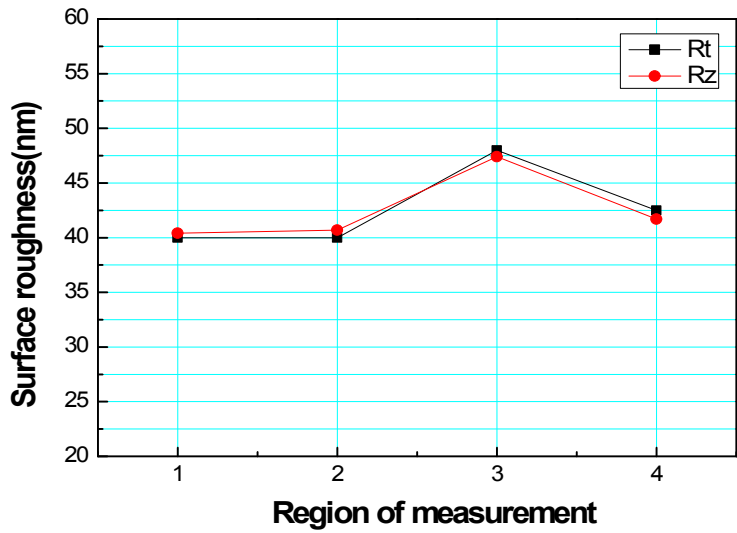
(f) 15.0mm



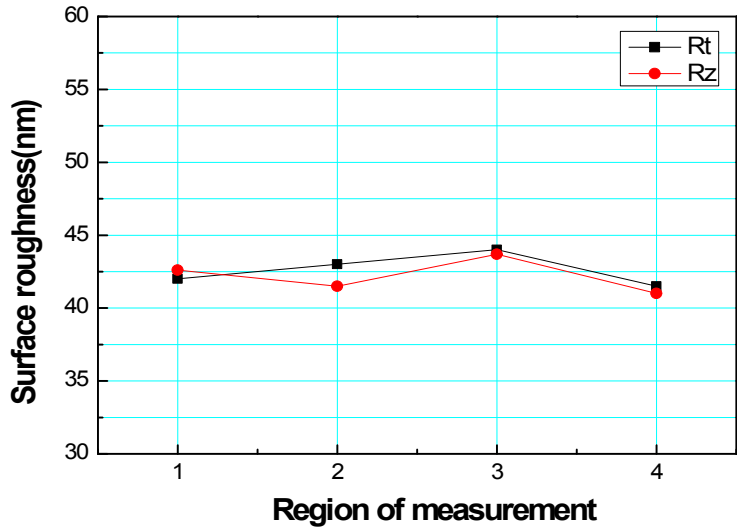
(g) 17.5mm



(h) 20.0mm



(i) 22.5mm



(j) fractured specimen (25mm)

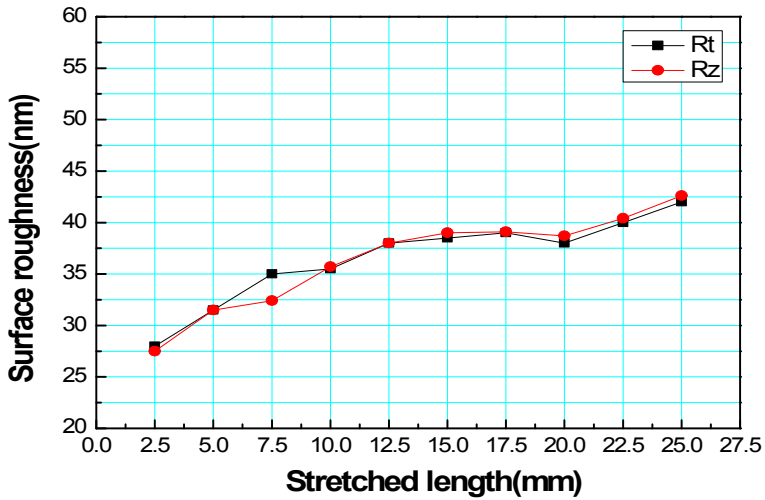
Fig. 5-12 Distribution of surface roughness according to stretched length

그래프들을 통하여 대체적으로 원공주변으로 갈수록 표면 거칠기가 증가하는 것을 확인할 수 있는데, 그 이유는 적외선열화상이미지를 통하여 확인할 수 있듯이 시험편 인장시 원공부분에 단면적의 감소로 인한 응력집중현상이 발생하고 그로인해 원공주변의 변형이 다른 부분에 비하여 상대적으로 크기 때문에 원공주변부가 하중에 의한 영향을 가장 먼저 많이 받고, 그 영향이 점차 전체적으로 퍼져나갔기 때문이라고 볼 수 있다.

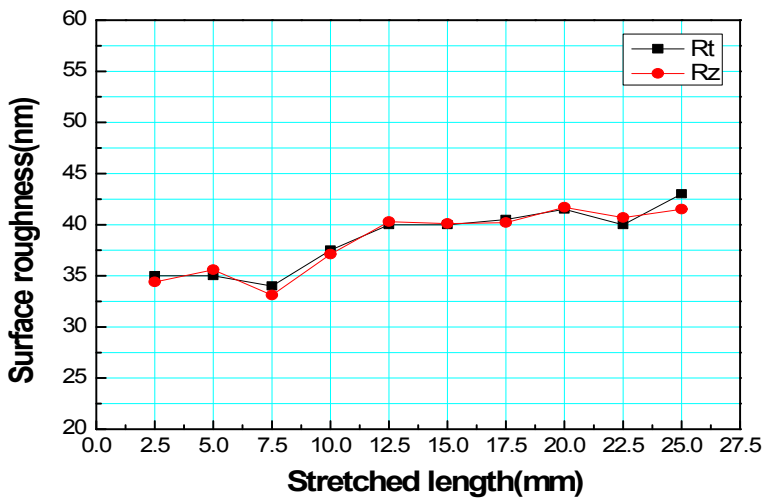
이러한 표면 거칠기 분포는 기울기의 차이는 있지만 거의 모든 시험편에서 유사하게 얻을 수 있었다. 하지만, 파단 직전의 시험편(22.5mm 인장)과 파단된 시험편에서는 원공주변부에서의 표면 거칠기가 오히려 더 낮게 측정되었는데, 그 이유는 파단되기 직전 시험편의 취약부분인 원공주변부가 집중적으로 늘어나면서 두께가 감소하였고(국부수축현상 : necking), 표면이 늘어나면서 산과 골 사이의 간격이 증가하였기 때문에 표면 거칠기가 감소된 것으로 추측된다.

### 제 4절 인장길이에 따른 각 측정영역의 표면 거칠기 변화

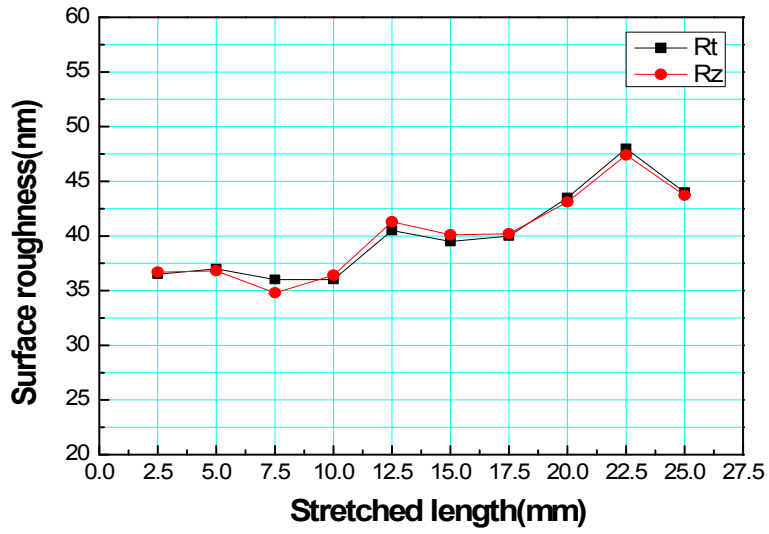
Fig. 5-13은 시험편의 각 측정영역에서의 표면 거칠기가 인장길이에 따라 어떻게 변화하는지를 보여주는 그래프이다. 그래프를 통하여 인장길이가 증가할수록 표면 거칠기가 전체적으로 증가하는 것을 알 수 있다.



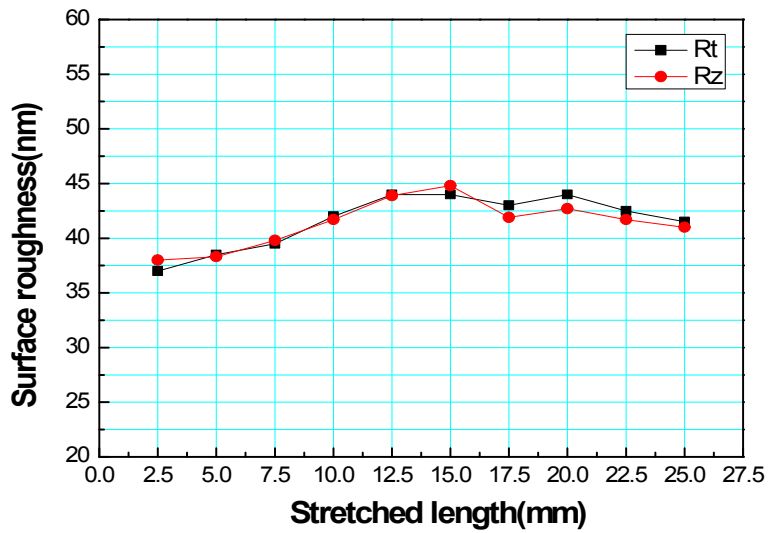
(a) Region 1



(b) Region 2



(c) Region 3



(d) Region 4

Fig. 5-13 Variation of surface roughness according to measurement location

먼저 원공주변(region 4)의 표면 거칠기 변화를 살펴보면, 15mm인장될 때까지 표면 거칠기가 거의 선형으로 증가하여 최고 값을 나타내고 그 이후 20mm구간까지 거의 일정한 값을 나타내다가 그 이후 구간에서는 표면 거칠기가 감소하는 것으로 나타났다. 그 이유는 앞서 설명한 바와 같이 국부수축과 표면의 신장으로 인해 산과 골의 간격이 증가되었기 때문인 것으로 추측된다.

원공주변과 가장 가까운 3번 영역에서도 이와 비슷한 형상을 나타냈다. 하지만 3번 영역은 원공주변부 보다 국부수축과 표면 신장의 영향을 더 늦게 받기 때문에 파단되기 직전(22.5mm인장)까지 표면 거칠기가 증가하다가 파단되면서 표면 거칠기가 감소된 것으로 추측된다.

원공으로 부터의 거리가 상대적으로 먼 1번 영역과 2번 영역은 이러한 영향을 거의 받지 않기 때문에 표면 거칠기가 시험편의 인장에 따라 계속 증가하는 것으로 측정되었다.

## 제 6장 결론

본 논문에서는 디지털 홀로그래피의 기계공학적 응용과 산업현장에서의 적용성을 높이고자 디지털 홀로그래피를 사용하여 시험편의 표면 거칠기를 측정하였다. 이를 위하여 표준인장시험편의 중앙에 구멍이 뚫린 원공시험편을 일정하게 증가되는 길이로 인장시키고, 인장길이에 따라 표면조도가 어떻게 변화하는지 살펴보았다. 시험편을 일정한 길이로 인장시키는 데에는 피로시험기를 사용하였고 인장시키는 도중 적외선 열화상카메라를 통하여 시험편의 표면온도 변화를 측정, 원공부에 응력이 집중되는 것을 영상으로 확인할 수 있었다.

시험편의 표면 거칠기는 디지털 홀로그래피 간섭계중 반사형 Michelson간섭계를 구성하여 측정하였고, 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 반사형 디지털 홀로그래피 간섭계와 20배율의 대물렌즈를 이용하여 시험편의 표면정보를 나노( $10^{-9}$ )미터 단위로 측정할 수 있었다.
- 2) 시험편의 인장길이가 길어질수록 표면 거칠기 값이 지속적으로 증가하지만 응력 집중으로 인한 국부수축(necking)현상의 발생으로 인해 원공부분과 그 근접부분에서는 파단 직전에 오히려 표면 거칠기가 감소하는 것을 확인할 수 있었다.
- 3) 시험편이 인장될 때 단면적의 감소로 인해 응력이 집중되는 원공주변부에 온도 변화가 다른 부분에 비하여 집중적으로 나타났음을 적외선 열화상카메라를 통하여 확인하였고, 표면 거칠기 또한 원공주변부가 다른 부분에 비하여 거칠게 측정되었으므로 시험편에서의 응력집중과 온도변화 그리고 시험편의 표면 거칠기 변화사이에 일련의 관계가 있음을 알 수 있었다.

이러한 연구내용을 바탕으로 하여, 기계재료 또는 부품의 가공과 사용에 있어서 매우 중요한 요소로 작용하는 표면 거칠기를 측정하는 방법 중 하나로써 비접촉, 비침습이라는 장점을 가지고 있는 디지털 홀로그래피의 적용성을 높일 수 있을 것이라 생각된다.



## 참고 문헌

1. Gabor, D., "A New Microscopic Principles", Nature 161, No.4098, pp.777-778,(1948)
2. Gabor, D., "Microscopy by Reconstructed Wavefronts", Proc.Roy.Soc. (London) A 197, pp.454-487,,(1949)
3. J.W.Goodman and R.W.Lawrence, "Digital image formation from electronically detected holograms", Appl.Phys.Lett., vol.11, pp.77-79,(1967)
4. M.A.Kronrod,N,S.Merzlyakov, and L.P.Yarovslavskii, "Reconstruction of a hologram with a computer", Sov.Phys.Tech.Phys.,vol.17,pp.444-334,(1972)
5. U.Schnars and W.Juptner, "Direct recording of holograms by a CCD-target and numerical reconstruction", Appl.Opt.33(2),179-181.(1994.)
6. Jung Young Son, "Principle and application of holography",.2004.
7. J.W.Goodman, "Introduction to Fourier Optics", McGraw-Hill, New York,1968
8. E.Hecht and A.Zajac,"Optics", Addison-Wesley, Reading.1979
9. J.R.Meyer-Arendt, "Introduction to Classical and Modern Optics, Prentice-Hall International, Inc.,New Jersey,1989
10. U.Schnars and W.Juptner,"Direct recording of holograms by a CCD-target and numerical reconstruction", Appl.Opt.33,179-181(1994)
11. M.V.Klein and T.E.Furtak,"Optics",2nd ed.Willy,New York,1986.
12. Hae Young Yun,Seng Jun Jeong,JeonWoong Kang, and Chung Ki Hong, "3-dimensional micro-structure inspection by phase-shifting digital holography," Key Eng. Mat. 270-273, 756-761.(2004)
13. Lingfeng Yu and Myung K. Kim, "Wavelength-scanning digital interference holography for tomographic three-dimensional imaging by use of the angular spectrum method,"Opt.Lett.30,2092-2094.(2005)

## 감사의 글

길게만 느껴지던 2년이 지나 어느덧 졸업논문이라는 석사생활의 열매를 맺고 졸업을 하게 되다니 아직도 믿기지 않습니다. 지난 2년 동안의 대학원 생활을 통하여 인생에 있어 피가 되고 살이 될 좋은 경험과 많은 가르침을 얻었고 많은 분들의 따뜻한 관심과 애정 어린 질책 속에 한층 성숙해 질 수 있었습니다. 이제 논문을 정리하면서 그동안 격려해주시고 도움을 베풀어주신 많은 분들께 감사의 인사를 드리고자 합니다.

먼저, 부족한 저에게 따뜻한 조언과 격려를 아끼지 않으신 김경석 교수님께 진심으로 감사드립니다. 또한 지난 2년 동안 학업에 있어서는 엄한선생님이 되어주시고, 대학원생활에 있어서는 따뜻한 형님이 되어주신 정현철 선배님과 장호섭 선배님께 감사의 말씀을 드립니다. 오랜 실험실 생활을 통해서 얻은 경험과 지식으로 언제나 조언을 아끼지 않으셨던 성욱이 형님, 태호 형 에게도 진심으로 감사드립니다.

어려운 일이 있으면 항상 먼저 찾게 되는, 항상 도움만 받아서 미안하기만 한 너무나도 착한 수욱이형, 남자로서 학생으로서 배울 점이 많은 멋진 민근이, 항상 쾌활하고 가벼운 듯 보이지만 그 누구보다도 깊은 생각과 마음을 가진 현민이. 이 세명의 동기가 없었다면 대학원생활을 어떻게 했을지 상상도 못 할 만큼 소중한 동기들에게 항상 도움만 받은 것 같아서 미안하고 고맙다는 말을 전하고 싶습니다.

많이 챙겨주지 못해 미안하기만 한 친구이자 후배 성원이, 힘들어도 힘든 내색 없이, 선배들의 짓곳은 장난에도 항상 웃는 얼굴로 대해주는 동수에게도 고맙다는 말을 전합니다.

비록 대학원생활은 같이 하지 않았지만, 힘들 때 마다 편안한 쉼터가 되어준 고등학교 동창들 중윤이, 인수, 재열이, 중모, 훈이에게 항상 고맙고, 사랑한다는 말을 전하고 싶습니다.

마지막으로 항상 저를 믿어주시고 저의 모든 것을 묵묵히 성원하고 기다려주시는 너무나 사랑하는 나의 가족들, 아버지, 어머니, 그리고 내 동생 해리에게 이루 말할 수 없이 깊은 감사드립니다.

졸업 후 사회로 나가 어느 곳에서 무엇을 하던, 선후배로서 그리고 친구로서 많은 관심과 애정을 가지고 저를 지켜봐주신 분들께 부끄럽지 않도록 어디서든 최선을 다하겠습니다. 감사합니다.

# 저작물 이용 허락서

학 과	첨단부품소재 공학과	학 번	20077269	과 정	석사
성 명	한글: 박 종 현    한문: 박 鍾 鉉    영문: Park, Jonghyun				
주 소	광주광역시 북구 매곡동 금호아파트 102동 505호				
연락처	E-MAIL: yukgong@nate.com		H.P: 011-9474-7810		
논문제목	한글: 디지털 홀로그래피를 이용한 원공시험편의 표면조도 측정 영문: Measurement for Surface Roughness of Circle Holed 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:    박 종 현    (인)

조선대학교 총장 귀하