creative commons
COMMONS DEED

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

dCollection

[UCI]I804:24011-200000239312

2010 년 2월
석사학위논문

디지털 홀로그래피를 이용한 CT시험편의 파단면 조도 측정

조 선 대 학 교 대 학 원

첨단부품소재공학과

김 동 수

디지털 홀로그래피를 이용한 CT시험편의 파단면 조도 측정

The measurement of fracture surface roughness of CT specimen by using Digtal Holography

2010년 2월 25일

조 선 대 학 교 대 학 원

첨단부품소재공학과

김 동 수

디지털 홀로그래피를 이용한 CT시험편의 파단면 조도 측정

지도교수 김 경 석

이 論文을 工學碩士學位 論文으로 提出함

2009년 10월

조 선 대 학 교 대 학 원

첨단부품소재공학과

김 동 수

金東洙 學位論文을 認准함

委員長　朝鮮大學校　敎授　梁 仁 榮　印

委　員　朝鮮大學校　敎授　鄭 洛 奎　印

委　員　朝鮮大學校　敎授　金 庚 錫　印

2009年 11月

朝鮮大學校 大學院

- 목 차 -

LIST OF TABLE ····· IV
LIST OF FIGURE ····· V
ABSTRACT ····· VII

제 1 장 서 론 ····· 1
제 1 절 연구 배경 ····· 1
제 2 절 연구목표 및 내용 ····· 3

제 2 장 이론적 배경 ····· 4
제 1 절 디지털 홀로그래피 ····· 4
제 2 절 디지털 홀로그램의 기록 ····· 8
1. 공간 주파수 요구조건 ····· 8
2. 기록장치의 구성 ····· 9
3. 위상이동 디지털 홀로그래피 ····· 12
제 3 절 디지털 홀로그램의 재생 ····· 14
1. 각 스펙트럼 ····· 14
제 4 절 스페클 기초 이론 ····· 17

제 5 절 적외선 열화상 기술 ·····21

제 3 장 실험장치 및 방법 ·····24

제 1 절 실험장치 ·····24

1. 투과형 간섭계 ·····24

2. 반사형 간섭계 ·····25

3. 피로시험기 ·····26

4. 열화상 카메라 ·····27

제 2 절 시험편 ·····28

제 3 절 실험 방법 ·····30

제 4 장 실험결과 및 분석 ·····32

제 1 절 Resolution target의 측정 및 분석 ·····32

1. 반사형 간섭계를 이용한 측정 결과 ·····33

2. 투과형 간섭계를 이용한 측정 결과 ·····35

제 2 절 온도 변화 측정 ·····36

1. 하중 변화에 따른 온도변화 측정 ·····36

2. 모멘트 변화에 따른 온도 변화 측정 ·····39

제 3 절 CT 시험편 표면 거칠기 측정 ·····43

1. 파단면의 표면 거칠기 측정 ·····43

2. 파단된 CT 시험편의 표면 거칠기 측정 ·····46

제 4 절 모멘트와 표면 거칠기의 상관관계 ·····54

제 5 장 결론 ·····57

참고문헌 ·····58

- LIST OF TABLE -

Table 3-1 Specification of fatigue testing machine ·····26

Table 3-2 Specification of infrared thermography system ·····27

Table 3-3 Specification of Resolution target ·····28

Table 3-4 Specification of fixed jig ·····30

Table 4-1 The reconstruction image of resolution target ·····34

Table 4-2 The reconstruction image of resolution target ·····35

Table 4-3 reconstruction image of 20KN hologram image ·····48

Table 4-4 reconstruction image of 25KN hologram image ·····49

Table 4-5 reconstruction image of 30KN hologram image ·····50

Table 4-6 reconstruction image of 35KN hologram image ·····51

Table 4-7 reconstruction image of 40KN hologram image ·····52

Table 4-8 Moment from each area ·····54

- LIST OF FIGURE -

Fig. 2-1 Digital holography ·····5
Fig. 2-2 Coordinate system for numerical reconstruction ·····7
Fig. 2-3 Recording set-ups. Left:side views; top views
seen from CCD ·····11
Fig. 2-4 Mach-zehnder interferometer ·····12
Fig. 2-5 wave number vector $\vec{k}$ ·····16
Fig. 2-6 Formation of speckle pattern ·····18
Fig. 2-7 Subjective speckle size on the CCD image plane ·····20
Fig. 2-8 Detection principle of IRT ·····21
Fig. 2-9 Temperature calibration ·····23
Fig. 3-1 Transmitted interferometry for holography ·····24
Fig. 3-2 Reflected interferometry for holography ·····25
Fig. 3-3 Fatigue machine system ·····26
Fig. 3-4 Infrared thermography system ·····27
Fig. 3-5 Resolution target ·····28
Fig. 3-6 Shape and dimensions of CT specimen ·····29
Fig. 3-7 Shape of fixed jig ·····30
Fig. 3-8 Set-up of fatigue test and Infrared camera ·····31
Fig. 3-9 Reflected interferometry for holography ·····31
Fig. 4-1 Type of interferometer ·····33
Fig. 4-2 line profile ·····34
Fig. 4-3 Measurement height by line profile ·····34

Fig. 4-4 line profile ·····35
Fig. 4-5 Measurement height by line profile ·····36
Fig. 4-6 CT specimen spreaded spray ·····37
Fig. 4-7 Analysis area for temperature measurement ·····38
Fig. 4-8 Average temperature of total area ·····38
Fig. 4-9 each location temperature distribution about load force ·····41
Fig. 4-10 each location average temperature distribution about load force ·····42
Fig. 4-11 Shape of fractural surface roughness of CT specimen ·····43
Fig. 4-12 Location of measure area ·····44
Fig. 4-13 Digital hologram image ·····44
Fig. 4-14 Intensity 3-D image of reconstruction image ·····45
Fig. 4-15 Height 3-D image of reconstruction image ·····46
Fig. 4-16 Average surface of two fractural surface ·····47
Fig. 4-17 Average surface roughness of each location ·····53
Fig. 4-18 Distance and vector of fractural CT specimen ·····54
Fig. 4-19 Moment from each area ·····55
Fig. 4-20 Average roughness of each area ·····56

ABSTRACT

The measurement of fracture surface roughness of CT specimen by using Digtal Holography

Kim, Dongsoo
Advisor Prof. Kim, Koungsuk Ph.D.
Department of Advanced Parts and
Materials Engineering,
Graduate School of Chosun University

Digital holography is an imaging technique offering both sub-wavelength resolution and real time observation capabilities. The reconstruction of the wavefront from the hologram provides the amplitude and the absolute phase of the wave diffracted by the microscopic objects. Absolute phase contrast yields longitudinal accuracies as low as one nanometer in air or even less in dielectric media. The lateral accuracy and the corresponding resolution can be kept at a sub-micron level by the use of a high Numerical Aperture (N.A.) microscope Objective (M.O.). The principles of hologram formation, acquisition and wavefront reconstruction from digital holograms, acquired in a non-scanned modality, are described in details. The role of the M.O. in the capture of high spatial frequencies components of diffracted light and their restitution for high fidelity imaging is developed. A variety of applications of this new type of optical microscopy are described: material research, surface and interface sciences, microtechnologies, micro-optics and MOEMS.

For reconstruction of fracture surface roughness of CT 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 surface roughness of specimen. In the accordance with, the evolution is detected to Infrared camera, 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.

In this paper, the specimen variation according to outside condition measured the quantitative evaluation. The system of interferometer measured 10^{-9} unit. So, the nano 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 연구 배경

1948년에 Dennis Gabor는 현재 우리가 홀로그래피로 알고 있는 파면재생(Wavefront reconstruction) 이라는 2단계의 새로운 무렌즈 영상 처리 방법을 제안하였다[1-3]. Gavor는 간섭성 참조파가 적절히 물체에 의해 회절되거나 산란된 빛과 동시에 존재하면, 회절되거나 산란된 파의 진폭과 위상 정보를 기록할 수 있음을 알았다. 결국 그는 이렇게 기록된 간섭무늬(그는 '전체를 기록한다(Total recording)'는 뜻에서 홀로그램(Hologram)이라고 부름)에서 원래 물체가 갖고 있던 영상을 얻을 수 있음을 증명하였다[1].

Gabor의 영상 기술은 초창기에 관심을 얻지 못했지만, 1960년대에는 개념이나 기술적인 면에서 상당한 발전을 보였고, 그 응용이나 실용면에서 크게 확대 발전되었다. 1971년에 Gabor는 그의 발견에 대해 Novel 물리학상을 받았다.

홀로그래피에 대한 Garbor의 초기 연구는 X-ray 결정학(Crystallography)에서 W.L. Bragg의 연구에 영향을 받았지만, 주된 동기는 새롭게 발견된 전자 홀로그래피로서의 응용 가능성이었다. Gabor는 초기의 제안을 1949년과 1951년에 출판된 두 개의 긴 논문에 발표하였는데, 여기에는 현미경을 위한 홀로그래피의 응용 가능성이 나와 있다. 실질적인 이유로 자신이 계획했던 응용을 실현하지 못했지만, 1960년대에 발전된 기술로 그가 예견하지 못했던 많은 응용들이 이루어지게 되었다[1,2].

1950년대에는 G.L. Roger, H.M.A. El-Sum, 그리고 A.W.Lohmann 등을 포함한 많은 학자들에 의해 상당한 이론적 확대와 홀로그래피에 대한 이해가 이루어졌다. 그러나 홀로그래피에 대한 혁명이 일기 시작한것은 1960년대 초부터였다. 다시 Gabor의 무렌즈 영상 처리와 합성 개구 레이더(Synthetic-aperture-radar : SAR)의 문제점 사이에 유사한 점이 있음을 인지하고, 처리를 크게 향상 시켰던 그의 초기 기술에 대한 수정을 제안한 것은 미시간 대학의 레이더 연구실에서 근무하는 E.N. Leith와 J.Upatnieks에 의해서였다. 같은 시대에 구소련에서 근무했던 Y.N. Denisyuk는 진보된 형태로 개량한 두꺼운 반사형 홀로그램을 만들기 위해 Gabor와

프랑스 물리학자 G.Lippmann의 생각을 종합하였다.

미시간 대학의 연구자들은 무렌즈 3차원 사진을 위해 바로 자신들의 새로운 기술과 레이저 기술의 출현을 결합하였다. 홀로그래피를 이용하여 얻은 3차원 영상의 품질과 현실감은 그 분야에서 상당한 대중적 관심을 불러일으켰고, 오늘날 세계의 여러 대도시에서 홀로그래피를 특성화한 박물관이나 화랑을 쉽게 찾아볼 수 있다. 그러나 대중의 관심과는 대조적으로 3차원 영상능력과는 동떨어지고 무관한 것들이다[4,5].

Schnars 와 Juptner에 의해 홀로그램을 필름이 아닌 CCD에 직접 기록함으로써 홀로그램을 저장하고 재생하는 전 과정을 컴퓨터로 처리 할 수 있게 되었으며, 그 후 이것을 디지털 홀로그래피라 부르게 되었다. 이 방법들은 크고 작은 물체들을 측정하는 방법으로 다양하게 응용되었고, 컴퓨터와 CCD 같은 영상 저장 장치의 발전으로 더욱더 매력적인 측정도구로 자리매김 하고 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[1-4].

위와 같이 디지털 홀로그래피는 다양한 분야에서 응용성이 증대되고 있는 반면 기계적 응용성은 많이 제시 되어 있지 않다. 홀로그래피 간섭계의 고 분해능으로 외부 특성에 따라 금속 재질의 특성 파악이나 표면의 정량적 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

이 논문에서는 디지털 홀로그래피를 이용하여 물체의 표면 거칠기를 측정하여 기계적 응용을 증대하고자 기술하였다. 먼저 기존의 표면 거칠기를 측정하는 접촉식 방법이나 분해능의 한계를 극복하는 단계로, 디지털 홀로그래피에 짧은 간섭거리를 가진 광원을 사용함으로써 Resolution target을 측정하여 본 논문의 분해능을 검증하였다. 그 후 CT시험편이 파단에 이르기까지 파단면의 각 위치별로 모멘트의 변화에 따라 파단면 내에서 거칠기를 측정하였다. 이 실험에서는 디지털 홀로그래피 반사형 간섭계를 이용하여 홀로그램 이미지를 얻었으며, 수치적 재생이 이루어졌다. 초점이 맞는 파단면에 진폭(Intensity) 정보 뿐 아니라, 위상정보도 이용함으로써 파단면의 형상을 정밀하게 측정하였다.

제 2 장 이론적 배경

제 2 장에서는 디지털 홀로그래피의 개념을 살펴본다. 디지털 홀로그래피 실험 장치에 있어서의 기하학적 구성(Geometrical configuration) 및 특징(Feature)에 대하여 살펴보고 몇 가지 재생방법에 대해 알아본다.

제 1 절 디지털 홀로그래피

디지털 홀로그램 기록의 개념을 Fig. 2-1(a)에 나타내었다. 디지털 홀로그래피는 참조파(Reference wave)와 물체로부터 반사된 물체파(Object wave)가 CCD면상에서 간섭을 일으킨다는 가정으로 시작된다. CCD면상에서 간섭된 홀로그램 영상은 전자적으로 기록되고 저장된다. 일반적으로 CCD 셀(Cell)로부터 d의 거리에 위치한 물체는 3차원의 형태이며 반사된 물체의 표면의 정보는 CCD면상에 기록된다. 홀로그래피의 처리 과정은 수치적 공식을 사용하여 표현할 수 있다[6-8].

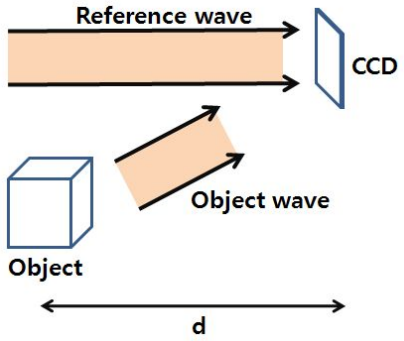
물체파의 복소 진폭(Complex amplitude) E_0은 eq. 2-1과 같으며, a_0는 실제 진폭(Real amplitude)을 나타내고 ϕ_0는 위상(Phase)을 나타낸다.

$$E_0(x,y) = a_0(x,y)\exp(i\phi_0(x,y)) \qquad \text{eq. 2-1}$$

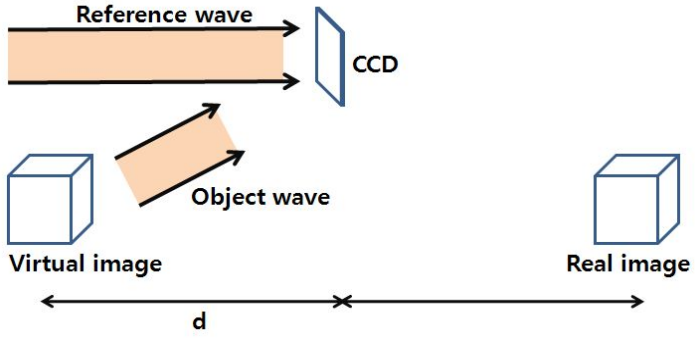
참조파의 복소 진폭은 E_R은 eq.2-2와 같다.

$$E_R(x,y) = a_R(x,y)\exp(i\phi_R(x,y)) \qquad \text{eq. 2-2}$$

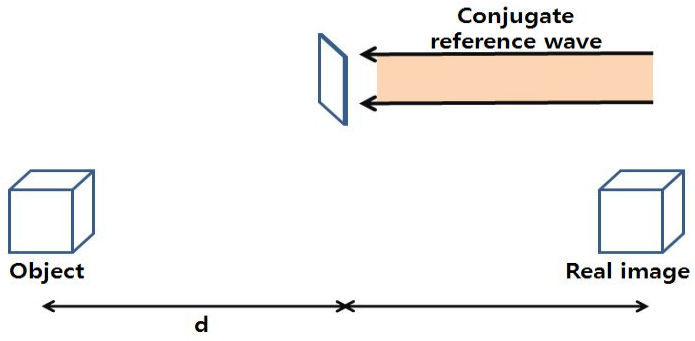
물체파 및 참조파의 실제 진폭과 위상 정보는 CCD 셀의 표면에서 간섭되어 기록되어진다. Fig. 2-1에 디지털 홀로그래피의 기록 및 재생의 시스템의 개략도를 나타내었다.



(a)



(b)



(c)

(a) Recording

(b) Reconstruction with reference wave

(c) Reconstruction with conjugate reference wave

Fig. 2-1 Digital holography

두 파(Wave)에 의한 간섭은 CCD와 같은 중간 매개물의 표면에서 기록된다. 홀로그램 함수는 참조파와 물체파의 간섭에 의한 빛의 강도(Intensity) 분포와 비례하여 계산된다. eq. 2-3에 의해서 계산되어 진다.

$$h(x,y) = |E_0(x,y) + E_R(x,y)|^2 \qquad \text{eq. 2-3}$$
$$= |E_0|^2 + |E_R|^2 + E_0 E_R^* + E_0{}^* E_R$$

홀로그래피 재생에서, 재생을 위한 참조파의 복소진폭이 eq. 2-4에 곱해져야 한다.

$$E_R(x,y)h(x,y) = (|E_0|^2 + |E_R|^2)E_R + |E_R|^2 E_0 + E_0{}^*|E_R|^2 \qquad \text{eq. 2-4}$$

위식에서 $|E_R|^2$항은 참조파에 의해서 CCD에 균일하게 작용되는 정보이고, $|E_o|^2$은 물체의 진폭정보이다. $(|E_0|^2 + |E_R|^2)E_R$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 나타낸다. 그리고 $E_0{}^*|E_R|^2$ 은 대상물의 실제 이미지의 왜곡에 의해서 나난다. 왜냐하면 실제 이미지 상의 왜곡은 공간적인 이동 복소 인자 E_R^2 때문이다. 따라서 왜곡되지 않은 실제의 상을 얻기 위해서 참조파 E_R을 켤레(Conjugate)시킨다. Fig. 2-1(c)와 같으며 식은 다음과 같다.

$$E_R^*(x,y)h(x,y) = (|E_0|^2 + |E_R|^2)E^{*}{}_R + E_R^{*2}E_0 + E_0{}^*|E_R|^2 \qquad \text{eq. 2-5}$$

eq. 2-4,5에서 파면은 회절은 되었지만 초점(Focusing)이 맞춰지지는 않았다. 파면을 재생하기 위해서는 Fig. 2-2에서는 홀로그램 평면에서 대상면과 이미지면 사이의 d의 거리만큼 떨어져 있을 경우에 광학적으로나 수치적으로 빔이 전파될 때 파면을 재생을 할 수 있다는 것을 보여준다.

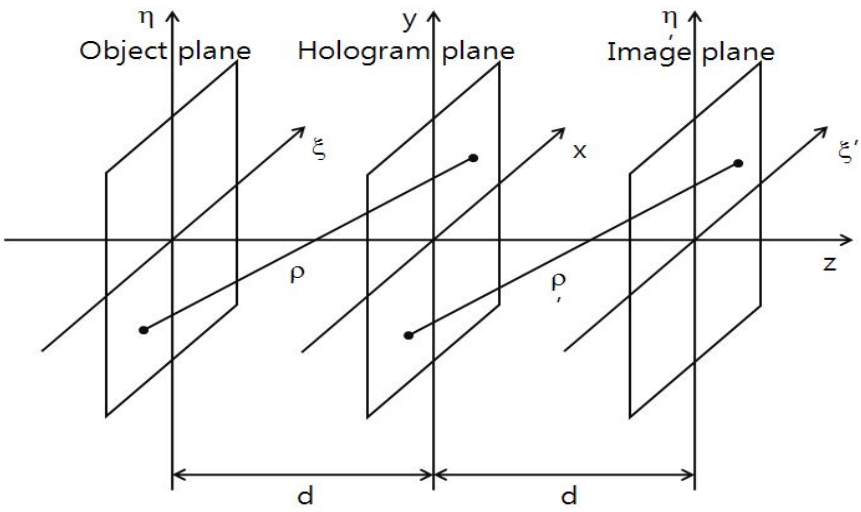


Fig. 2-2 Coordinate system for numerical reconstruction

홀로그램에서 광파(Light wave)의 회절에서 수직으로 입사되는 빔은 Fresnel-Kirchhoff 적분에 의해서 eq. 2-6로 표현 할 수 있다.

$$U(\xi',\eta') = \frac{1}{j\lambda}\int_{\infty}^{\infty}\int_{\infty}^{\infty} h(x,y)E_R(x,y)\frac{1}{\rho'}exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda}\rho'\right)dxdy \qquad \text{eq. 2-6}$$

eq. 2-6에서 $\rho' = \left[(x-\xi')^2+(y-\eta')^2+d^2\right]^{\frac{1}{2}}$, ρ'는 홀로그램 평면과 재생 평면사이의 거리, λ는 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.

$$E_R = a_R + j0 = a_R \qquad \text{eq. 2-7}$$

여기서 a_R 은 실제 진폭이다.

회절 무늬는 CCD 평면 뒤에의 거리 d에 의해서 계산된다. 이것은 실제 이미지에서 복소 진폭이 재생된다.

eq. 2-6은 수치적 홀로그램 재생을 위한 기초 공식이다. 왜냐하면 재생된 파의

필드 $U(\xi',\eta')$은 복소함수이고 빔의 강도와 위상을 계산 할 수 있기 때문이다.

eq. 2-6에서는 실제의 이미지가 왜곡이 된다. 따라서 왜곡되지 않는 실제의 이미지를 재생하기 위해서는 E_R 대신에 E_R'을 넣어서 eq. 2-8을 얻었다.

$$U(\xi',\eta') = \frac{1}{j\lambda}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} h(x,y)E'^{R}(x,y)\frac{1}{\rho'}exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda}\rho'\right)dxdy \qquad \text{eq. 2-8}$$

eq. 2-8을 이용한 재생의 방법은 Fig. 2-1(c)에서 보여준다. 실제의 이미지는 대상물이 재생하는 동안 위치되어 나타난다.

제 2 절 디지털 홀로그램의 기록

CCD는 전하를 집속하여 정보를 교환할 수 있어 물체의 이미지를 만들 수 있는 전기적 장치이다. 감광판과 달리 더욱 정밀하며, 물체의 이미지 및 데이터를 기록하는데 편리하다. 이번 절에서는 공간 주파수 요구조건(Spatial frequency requirements)과 기록 장치의 구성(Setup)에 대하여 살펴볼 것이다.

1. 공간주파수 요구조건(Spatial frequency requirements)

CCD는 홀로그램이 다양한 물체점(Object points)으로부터 흩어진 파와 참조파의 중첩으로부터 간섭 패턴을 분석함으로써 기록 홀로그램으로 사용되었다. 최대 공간 주파수(Maximum spatial frequency)는 물체파와 참조파에 의한 최대 각도(Angle) $\theta_{\max}$에 의하여 결정되고 eq. 2-9과 같다.

$$f_{\max} = \frac{2}{\lambda}sin\frac{\theta_{\max}}{2} \qquad \text{eq. 2-9}$$

광학 홀로그래피에서 사용된 감광판은 밀리미터 당 5000 줄(Lp/㎜)의 분해능을 가지고 있다. 이 감광판을 사용한 홀로그램은 참조파와 물체파 사이의 180°까지의 각으로 기록될 수 있다. 그러나, 높은 해상도의 CCD의 경우 바로 이웃한 픽셀들

(Pixels)과의 거리는 약 $\Delta x \approx 5\mu m$이다. 상응된 최대 분해 공간 주파수는 eq. 2-10에 의해 계산되어 진다.

$$f_{\max} = \frac{1}{2\Delta x} \qquad \text{eq. 2-10}$$

eq. 2-10는 100 Lp/㎜의 범위 안에 있다. eq. 2-9와 식 eq. 2-10을 조합하여 eq. 2-11을 유도할 수 있다.

$$\theta_{\max} = 2\arcsin(\frac{\lambda}{4\Delta x}) \approx \frac{\lambda}{2\Delta x} \qquad \text{eq. 2-11}$$

여기서 근사는 작은 각도에서 효과적이다. 그러므로 이웃한 픽셀사이의 거리는 참조파와 물체파 사이의 최대 각 한계량과 관계가 있다.

2. 기록장치의 구성

디지털 홀로그래피에서 사용되는 전형적인 구성은 공간주파수 한계(Limitation)에 대하여 분석함으로써 알 수 있다. Fig. 2-3(a)에서 평면 참조파를 사용하고, CCD에 수직으로 입사된다. 물체는 CCD 중심 라인(Center line)과 관련이 없는 비대칭 지역에 위치한다. 이 구성은 매우 간단하지만 공간적으로 효과적이지 못한다. 물체의 모서리(Edge)에서 CCD 모서리에 방사된 최대 각은 eq. 2-12와 같다.

$$\theta_{\max} \approx \frac{x}{d_{\max}x} = \frac{\sqrt{\frac{5}{4}}(L+N\Delta x)}{d_{\min}} \qquad \text{eq. 2-12}$$

최소 물체 거리($d_{\min}$)는 eq. 2-11의 근사된 최대 각($\theta_{\max}$)을 식 eq. 2-12의 최대각과 동일하게 취급함으로써 계산된다.

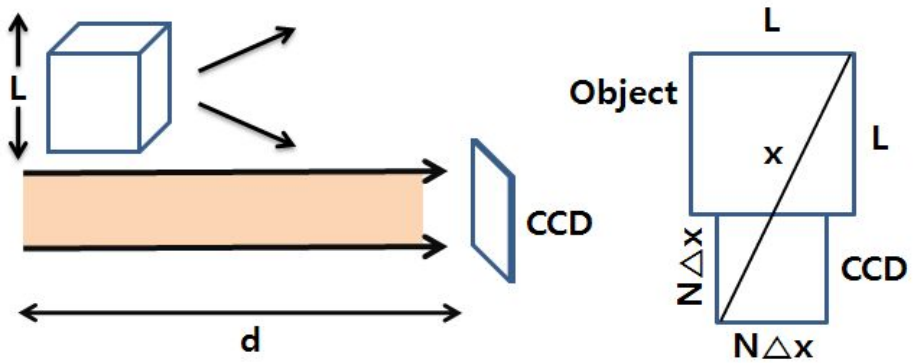
$$d_{\min} = \sqrt{\frac{5}{4}}\frac{2\Delta x}{\lambda}(L+N\Delta x) = \sqrt{5}\frac{\Delta x}{\lambda}(L+N\Delta x) \qquad \text{eq. 2-13}$$

Fig. 2-3(b)의 평면 참조파는 광분할기(Beam splitter)를 거쳐 CCD에 입사된다. 물체의 위치는 CCD와 동등선에 있으며, 거리 d만큼 전파되어 CCD에 입사된다. 물체와의 최소 거리 d는 eq. 2-14와 같다.

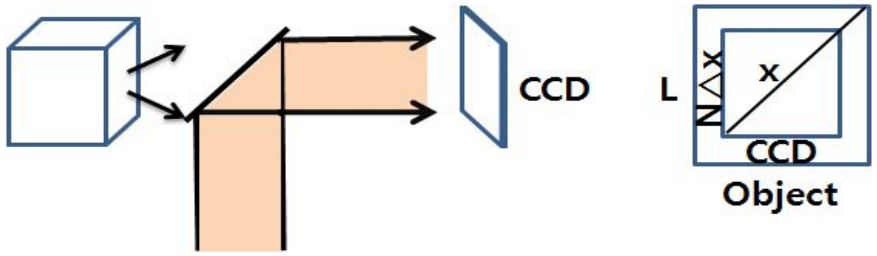
$$d_{\min} \approx \frac{x}{\theta_{\max}} = \sqrt{2}\,\frac{\Delta x}{\lambda}(L + N\Delta x) \qquad \text{eq. 2-14}$$

Fig. 2-3(c)는 렌즈가 없는 푸리에 홀로그래피(Fourier holography)를 위한 구성을 보여준다. 구면(Spherical) 참조파는 물체의 한 점이 점광원이 되어 광분할기를 거쳐 CCD에 입사된다. 물체와의 최소 거리 d는 eq. 2-15와 같다.

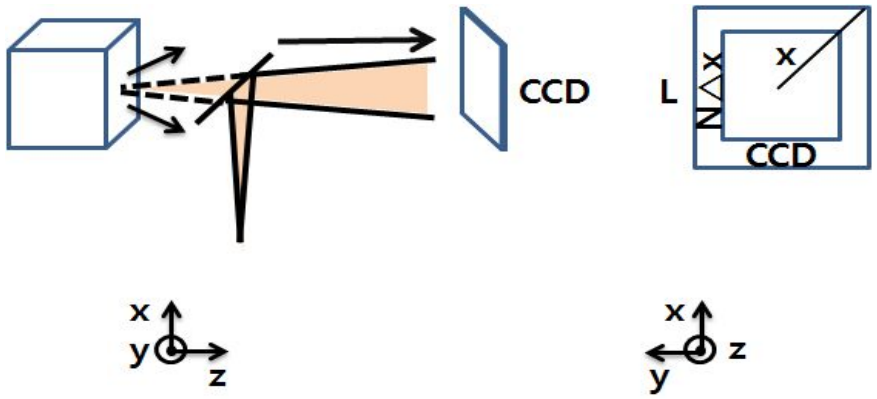
$$d_{\min} = \sqrt{2}\,\frac{\Delta x}{\lambda} L \qquad \text{eq. 2-15}$$



(a)



(b)



(c)

Fig 2-3 Recording set-ups. Left:side views; top views seen from CCD

3. 위상이동 디지털 홀로그래피

위상이동 간섭계에서 간섭무늬의 밝기 분포는 기준파와 물체파 사이의 광경로 차이에 의해 결정된다. 기준파의 위상을 인위적으로 변화시키게 되면 간섭무늬의 밝기 분포가 달라지게 되는데, 이 변화된 기준파의 위상과 간섭무늬의 상관 관계를 파악함으로써 기준파와 물체파 사이의 위상차를 결정할 수 있다.

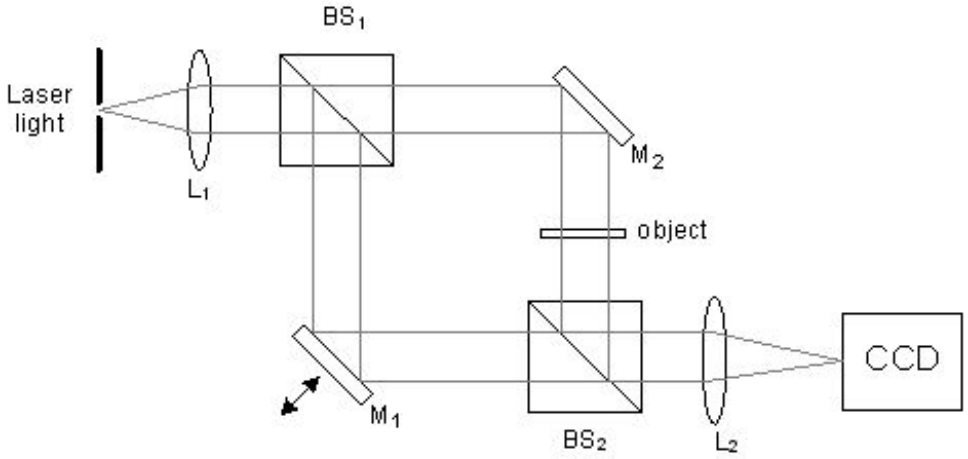


Fig. 2-4 Mach-Zehnder interferometer (BS_1, BS_2: beam splitter, M_1, M_2: mirror, L_1: collimating lens, L_2: imaging lens)

위상이동 방법을 사용하면 파면에 대한 정확한 위상정보를 추출할 수 있다. Fig. 2-4과 같은 마흐-젠더 간섭계를 생각해보면 레이저 광원으로부터 나온 빛은 렌즈 L_1을 지나 평행광이 되고, 광 분할기(Beam splitter) BS_1에서 반사된 빛은 PZT 등으로 조절되는 움직일 수 있는 거울 M1에서 반사되어 광 분할기 BS_2와 CCD에 초점이 맞춰진 렌즈 L_2를 거쳐 CCD에 입사된다. 동시에 BS_1을 투과한 빛은 고정된 거울 M_2에 반사되어 BS_2와 렌즈 L_2를 거쳐 CCD에 입사된다. 결국 두 거울에서 반사된 빛은 간섭을 일으키면서 CCD카메라에 상이 맺히게 된다. 여기서 움직이는 거울 M_1을 지나는 빛은 기준파(reference beam)가 되며 고정된 거울을 지나는 빛은 물체파(object beam)가 된다. CCD에 들어오는 각각의 빛의 진폭은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_r = a_r \exp[-j(\psi + 2\pi l_r / \lambda)] \qquad \text{eq. 2-16}$$

$$u_o = a_o \exp[-j(\psi + 2\pi l_o / \lambda)] \qquad \text{eq. 2-17}$$

여기서 ψ는 레이저광이 광 분할기에 처음으로 입사할 때의 위상이고, λ는 레이저 광원의 파장, l_r과 l_o는 갈라진 후 두 빛의 경로이다.
두 빛이 간섭을 일으킨 후의 세기는 eq. 2-18이 되고 이것이 CCD에서 검출되는 결과이다.

$$\begin{aligned} I &= |u_r + u_o|^2 \\ &= |a_r|^2 + |a_o|^2 + 2|a_r a_o| \cos[2\pi(l_r - l_o)/\lambda]. \end{aligned} \qquad \text{eq. 2-18}$$

식 (3)에서 미지수 a_r, a_o 와 $l_r - l_o$을 결정하기 위해서는 3개의 다른 식이 필요하게 된다. 이 값들을 구하는 가장 간단한 방법으로는 거울 M1을 광경로가 $\lambda/4$씩 차이가 나도록 4번을 밀어주는 4-step 방법이 있다. 각각의 단계에서의 빛의 세기는 eq. 2-19와 같다.

$$I_k = |a_r|^2 + |a_o|^2 + 2|a_r a_o| \cos[2\pi(l_o - l_r)/\lambda + k\pi/2] \qquad \text{eq. 2-19}$$

여기서 k는 거울을 광경로가 $\lambda/4$씩 차이가 나도록 밀어주는 각 단계를 나타낸다. 위 식으로부터 두 경로의 광경로차를 구할 수 있게 되고, eq. 2-20와 같이 된다.

$$l_o - l_r = \frac{\lambda}{2\pi}\left[\arctan\left(\frac{I_3 - I_1}{I_0 - I_2}\right) + 2m\pi\right] \qquad \text{eq. 2-20}$$

여기서 m은 정수이며 $2m\pi$는 arctan함수에 의해 포장된(wrapped) 위상이 된다.

제 3 절 디지털 홀로그램의 재생

반사형(Off-axis) 또는 투과형(In-line) 디지털 홀로그래피 구성을 사용하여 CCD로 획득된 디지털 홀로그램은 스칼라 회절 이론들(Scalar diffraction theories)에 기초하여 수치적으로 재생된다. 이번 절에서 소개될 각 스펙트럼 알고리즘(Algorithm)은 매우 유용하며 다방면으로 사용되고 있다. 실제로 각 스펙트럼 이외에 프레넬(Fresnel), 콘볼루션(Convolution) 방법들이 있는데 재생 거리에 따라 제한이 있어 각 상황에 맞게 사용되어진다. 본 논문에서는 근거리 및 원거리에서도 유용한 각 스펙트럼을 적용한다.

1. 각 스펙트럼(Angular spectrum)

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 웨이브필드(Wave-field)를 해석 할 수 있는 방법이 필요하다. 본 논문에서 이용한 방법은 평면파의 확장(Plane wave expansion)으로 흔히 알려져 있다. 이 방법은 현미경 영역까지 해석이 가능하다[4].

평면파는 직진한다는 것을 가정으로 Fig. 2-2의 z=0 인 평면을 가로 지르는, 함수 U(:홀로그램 평면에서 물체의 웨이브필드)는 푸리에 적분의 확장으로 식의 개념을 이용하여 eq. 2-21과 같이 2차원 푸리에 변환으로 표현 할 수 있다[9-11].

$$A(f_x, f_y) = \iint_{-\infty}^{\infty} U(x,y,0)\exp[(-j2\pi(f_x x + f_y y)]dxdy \qquad \text{eq. 2-21}$$

U를 스펙트럼의 역 스펙트럼으로 나타내면, eq. 2-22과 같이 표현할 수 있다.

$$U(x,y,0) = \iint_{-\infty}^{\infty} U(f_x, f_y, 0)\exp[(j2\pi(f_x x + f_y y)]df_x df_y \qquad \text{eq. 2-22}$$

파수(전파) 벡터 $\vec{k}$로 진행하는 간단한 평면파를 고려해 보자. 여기서 $\vec{k}$는 아래 그림과 같이 $2\pi/\lambda$의 크기와 $\cos(\alpha,\beta,\gamma)$의 방향을 가진다. 그러한 평면파의 복소 표현은 eq. 2-23과 같다.

$$p(x,y,z;t) = \exp[j(\vec{k} \bullet \vec{r} - 2\pi vt)] \qquad \text{eq. 2-23}$$

여기서, $\vec{k} = \frac{2\pi}{\lambda}(\alpha\hat{x} + \beta\hat{y} + \gamma\hat{z})$
$\vec{r} = x\hat{x} + y\hat{y} + z\hat{z}$

eq. 2-23의 시간 의존도를 없애면 일정한 z평면을 가로지르는 평면파의 복소 위상의 크기는 eq. 2-24과 같다.

$$P(x,y,z) = \exp(j\vec{k} \bullet \vec{r}) = e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(\alpha x + \beta y)} e^{j\frac{2\pi}{\lambda}} \qquad \text{eq. 2-24}$$

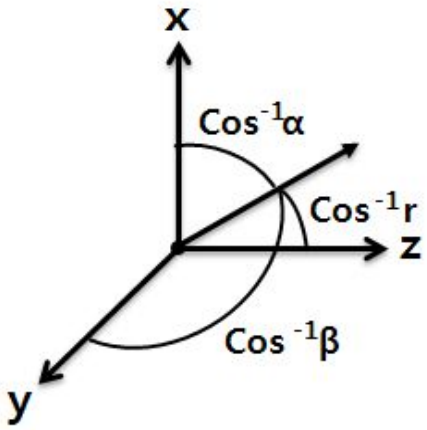


Fig. 2-5 wave number vector $\vec{k}$

방향 cosine, $\gamma = \sqrt{1-\alpha^2-\beta^2}$ 이므로, 평면 z=0을 가로지르는 복소 지수함수 $\exp[j2\pi(f_x x + x_y y)]$는 다음과 같이 방향 cosine으로 진행하는 평면파를 나타낸다고 생각할 수 있다.

$$\alpha = \lambda f_x \quad \beta = \lambda f_y \quad \gamma = \sqrt{1-(\lambda f_x)^2-(\lambda f_y)^2} \qquad \text{eq. 2-25}$$

U의 푸리에 분해에서 공간주파수 (f_x, f_y)를 갖는 평면파 성분의 복소진폭은 간단하게 $(f_x = \alpha/\lambda, f_y = \beta/\lambda)$일 때 $A(f_x, f_y; 0)df_x df_y$ 으로써 간단히 구해진다.

$$A(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}; 0) = \iint_{-\infty}^{\infty} U(x,y,0)\exp[-j2\pi(\frac{\alpha}{\lambda}x + \frac{\beta}{\lambda}y)]dxdy \qquad \text{eq. 2-26}$$

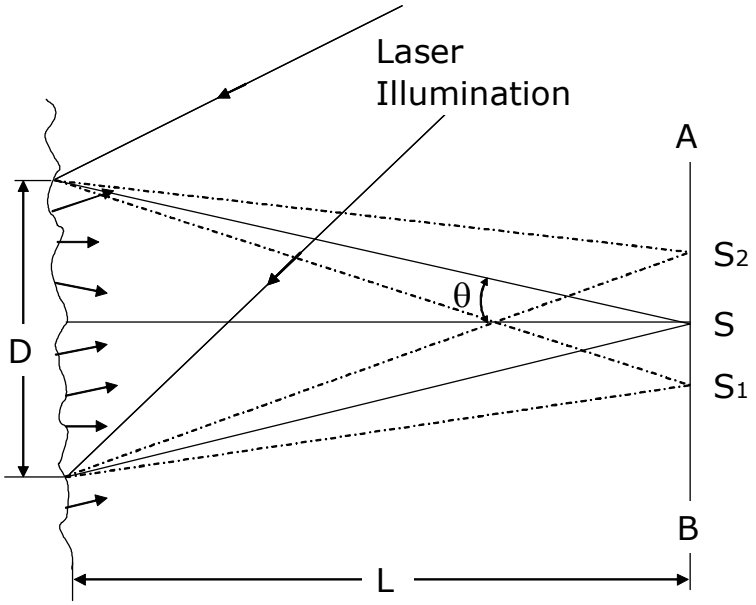
eq. 2-26과 같은 함수를 같은 방법을 각 스펙트럼(Angular spectrum)이라 한다. 본 논문에서 이용한 재생 방법은 고속 푸리에 변환과 역 고속 푸리에 기반을 둔 방법을 기반으로 한다. 그리고 이 방법은 기존의 방법보다 더 가까운 영역까지 해석 할 수 있다. 또한 고 분해능을 요구되는 대상물에 적합한 방법이다.

제 4 절 스페클(Speckle) 기초이론

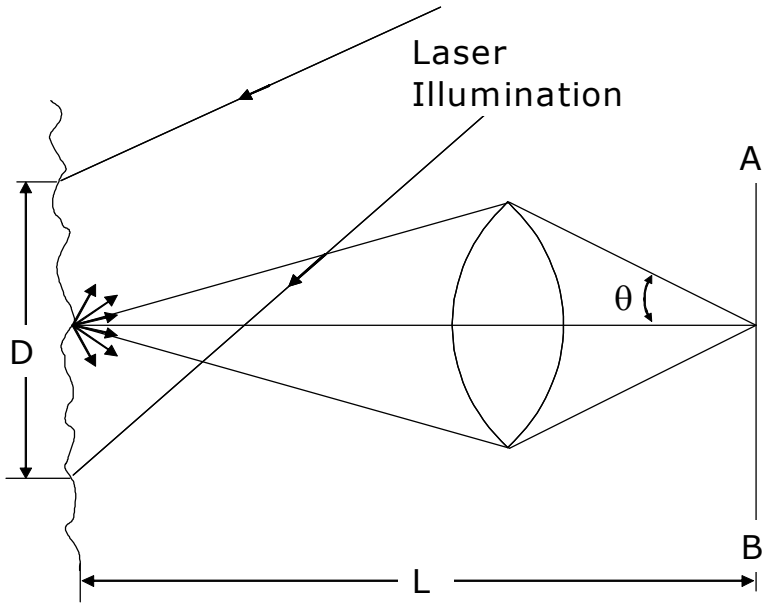
레이저 스페클(Laser speckle)은 레이저의 우수한 간섭성질로 인하여 나타나는 현상으로 표면이 레이저의 파장보다 큰 거칠기를 갖는 물체에 레이저를 조사할 경우 물체표면에서 난반사된 광들이 겹쳐서 간섭을 일으키게 되고, 이로 인한 보강간섭과 소멸간섭은 마치 반점과 같은 형태로 표면에 나타나게 된다. 이를 스페클 패턴(Speckle pattern)이라 하며, 물체표면에서 반사된 후에도 레일리 산란(Rayleigh scattering)을 만족하며 간섭성질을 유지할 수가 있다. 이 스페클패턴은 또 다른 스페클 패턴과 간섭하여 새로운 스페클을 형성할 수도 있으며, 물체표면 변위에 대해 함께 움직이거나, 위상변화를 일으켜 물체 변위의 정보 전달자로서 광검출기에 광강도(Intensity) 분포로 기록되어진다. 스페클은 관찰하는 방법에 따라 objective speckle과 subjective speckle로 나누어진다. Fig. 2-6은 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 밝기점과 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 D의 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 eq. 2-27로 objective speckle의 크기를 정의하고 있다.

$$S_{obj} = 1.22\frac{\lambda L}{D} \qquad \text{eq. 2-27}$$

여기서, λ: 조사되는 레이저의 파장, L: 물체와 결상면 사이의 거리, D: 물체에 조사된 면적이다.



(a) Objective speckle



(b) Subjective speckle

Fig. 2-6 Formation of speckle pattern

스페클 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 결상함으로 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 회절크기 만큼이 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. 2-28과 같이 정의된다.

$$S_{sub} = 1.22(1+M)\lambda F \qquad \text{eq. 2-28}$$

여기에서 M: 렌즈 확대배율, λ: 조사된 레이저의 파장, F: 렌즈의 f-number 이다. 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

$$S_{sub\ on\ object} = 1.22(1+M)\lambda \frac{F}{M} \qquad \text{eq. 2-29}$$

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 하나

에 한 개의 스페클이 존재할 때이다.

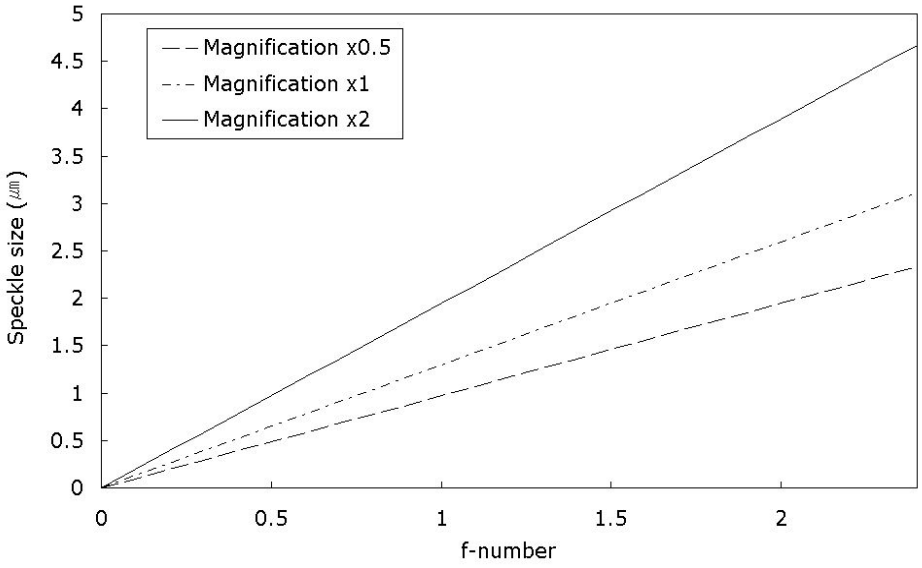
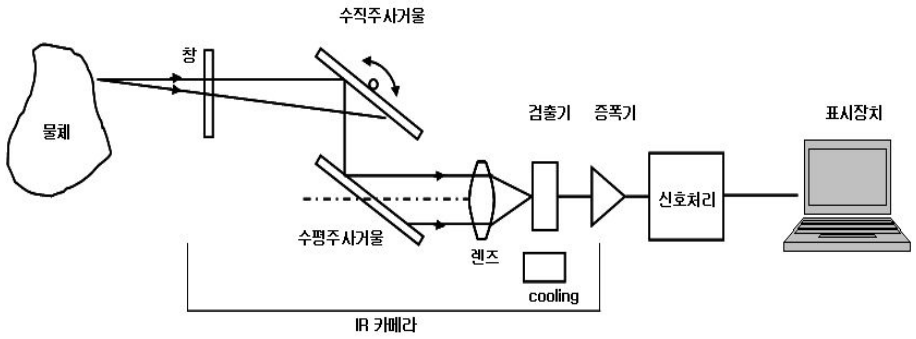


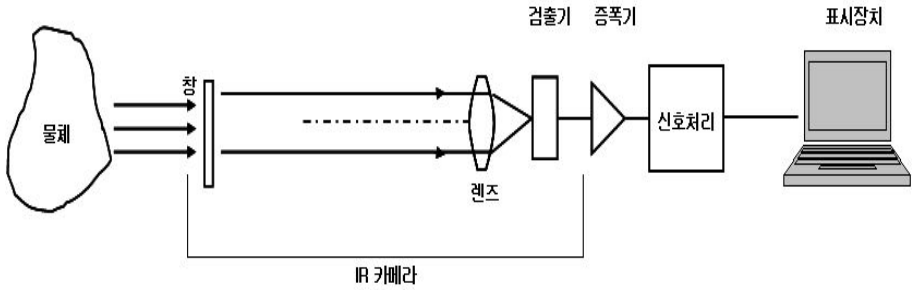
Fig. 2-7 Subjective speckle size on the CCD image plane

Fig. 2-7은 광학배율과 f-number에 따른 CCD 촬영 소자에 형성되는 스페클의 크기를 나타내었다. 스페클의 크기가 CCD 화소의 크기보다 작을 경우에 광 강도는 형성적인 스페클패턴의 integrated 또는 smoothed된 상태로 관찰되게 된다.

제 5 절 적외선 열화상 기술



(a) Scanning type



(b) Staring type

Fig. 2-8 Detection principle of IRT

어떤 물체의 형태를 인식하고자 하려면 사람의 눈을 생각하면 쉽게 이해가 된다. 눈으로 넓은 영역을 보려면 얼굴을 돌리거나 눈알을 굴리면서 전체를 인식한다. 여기에서 눈은 적외선 센서에 해당하며, 눈알을 굴리는 것은 적외선 광학계에 해당한다. 그리고 얼굴은 적외선 영상 시스템 전체를 의미한다. 이와 같은 원리를 응용하여 두 가지 방법의 광학계를 이용하여 영상을 획득한다. 먼저 Fig. 2-8(a)와 같은 수평, 수직 거울을 돌리면서 전체를 인식하는 주사 방법(Scanning type)과 Fig. 2-8(b)와 같이 수평, 수직 거울 없이 인식하는 주시 방법(Staring type)이 있다.

주사(Scanning)방법은 모니터에 나오는 물체를 실시간으로 보고자 하면 수평, 수직 거울을 고속으로 움직이도록 해야 한다. 왜냐하면 모니터의 주사선을 250선으로 보고, 영상을 무리 없이 보고자 하면 초당 24 frame은 되어야 하므로, 기본적으로 세로축으로는 24×250 에 의해 초당 6000번을 움직여야 한다. 그리고 가로축도 같은 비율로 움직여야 하므로 세로축은 6000×250 에 의해 약 1 MHz 이상의 주기로 움직여야 한다는 결론이 나온다. 거울이 이렇게 빨리 움직이려면 구동 부분이 특수 설계로 이루어져야 한다. 보통의 평면거울로는 이 속도를 도저히 낼 수 없기 때문에 8각형 또는 그 이상의 각을 이룬 거울을 사용한다. 이 방법의 장점은 주사하면서 신호를 증폭하여 신호 대 잡음비를 높일 수 있는 것과 센서의 소자 개수가 작아도 된다는 것이다. 그러나 광학계의 복잡성 때문에 시스템 자체의 크기와 무게 때문에 이 방법보다는 주시 방법으로 기술이 옮겨가고 있다.

주시(Staring)방법은 주사 방법과는 달리 거울이 없는 대신에 센서의 소자 하나하나가 모니터의 한 픽셀에 해당하도록 설계되어 있다. 그러므로 센서의 소자 개수가 많으면 많을수록 화면에 나타나는 화질은 그만큼 향상되며, 복잡한 광학계가 없기 때문에 크기 및 무게에서 많은 이점을 갖고 있다. 주시 방법에 사용되는 적외선 센서는 256×256 이상의 이차원 배열을 갖는 소자가 필요하며, 현재 센서의 재료에 따라 다르지만, PtSi를 사용한 경우 1024×1024 배열을 갖는 센서가 개발되어 실용화되었으며, 가장 성능이 우수한 HgCdTe 반도체형 센서인 경우 512×512 배열까지 개발되어 있다.

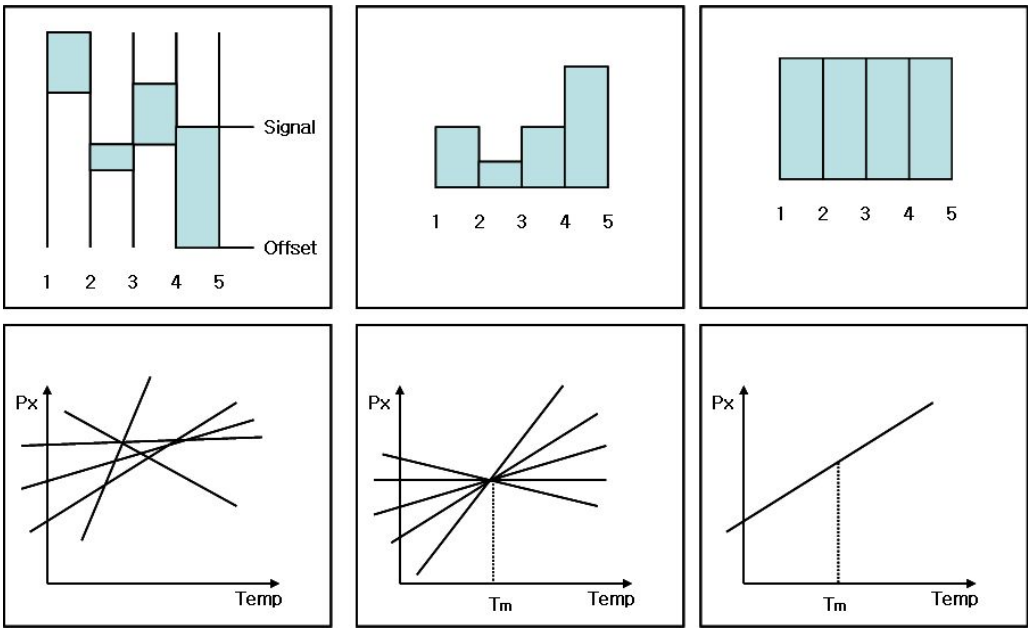


Fig. 2-9 Temperature calibration

주사 및 주시 방법으로 광학계에서 센서에 적외선을 집속시켜 주면 센서는 적외선과 반응하여 전압 또는 전류를 발생시킨다. 그런데 센서의 소자 개수가 많아지게 되면 소자 각각의 특성들이 일정하지 않기 때문에 신호처리기에서는 각 소자의 신호 크기를 보상해 주거나 반응을 하지 않는 소자의 신호도 보상해 주어 모니터에 깨끗한 영상이 구현되도록 해야 한다. 이러한 역할의 내용을 Fig. 2-9에 나타내었다. 첫 번째 그림은 각 소자의 특성들이 서로 다른 특성을 갖고 있음을 나타내고 있다, 주위 온도에 변화에 대해 반응하는 정도와 기준점인 offset이 모두 다르다. 이것을 두 번째 그림에서 기준점인 offset을 모두 맞추고, 세 번째 그림에서처럼 소자의 특성을 모두 균일하게 맞추어 주면, 온도변화에 대한 반응 정도가 모두 동일하게 나타나게 되어 깨끗한 상을 얻을 수 있는 것이다[12].

제 3 장 실험장치 및 방법

제 1 절 실험장치

1. 투과형 간섭계

실험에 있어 투과형 간섭계는 구성은 Fig. 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)에서에 의해서 두 개의 경로로 나눠진다. 하나의 광은 압전소자가 부착된 거울을 거치는 기준파가 되고 다른 하나의 광은 물체를 통과하는 물체파가 된다.

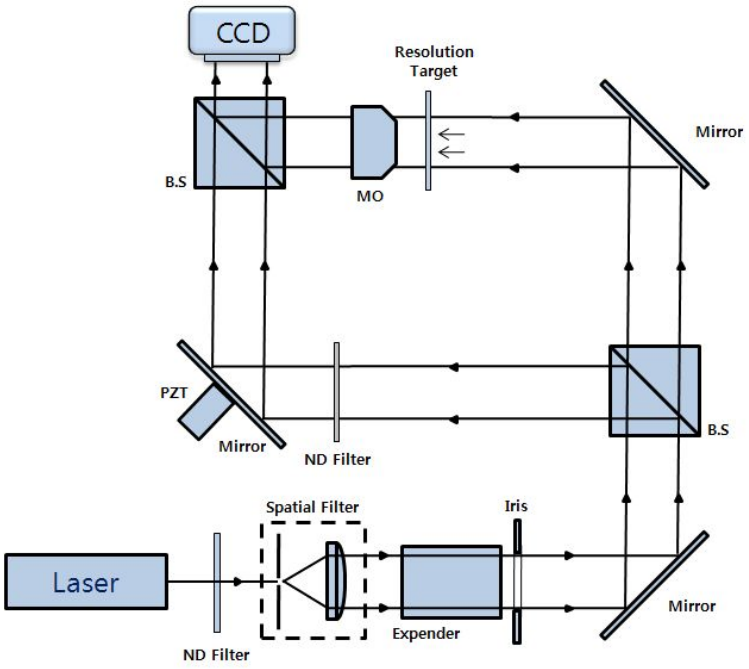


Fig. 3-1 Transmitted interferometry for holography

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.

2. 반사형 간섭계

투과형 간섭계와는 달리 반사형 간섭계는 마이켈슨 간섭계를 기반을 두어서 간섭장치가 매우 간단한 광 경로로 구성된다. 본 논문의 실험에 사용된 간섭계의 구성은 Fig. 3-2와 같다. 본 간섭계는 광원을 투과 하지 못하고 반사하는 대상물에 사용하는 방법이다. 이 또한 투과형과 마찬가지로 CCD의 상면에서 물체파와 참조파가 간섭이 발생되어서 얻어진 홀로그램을 가지고 위상이동 추정 및 위상 처리 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.

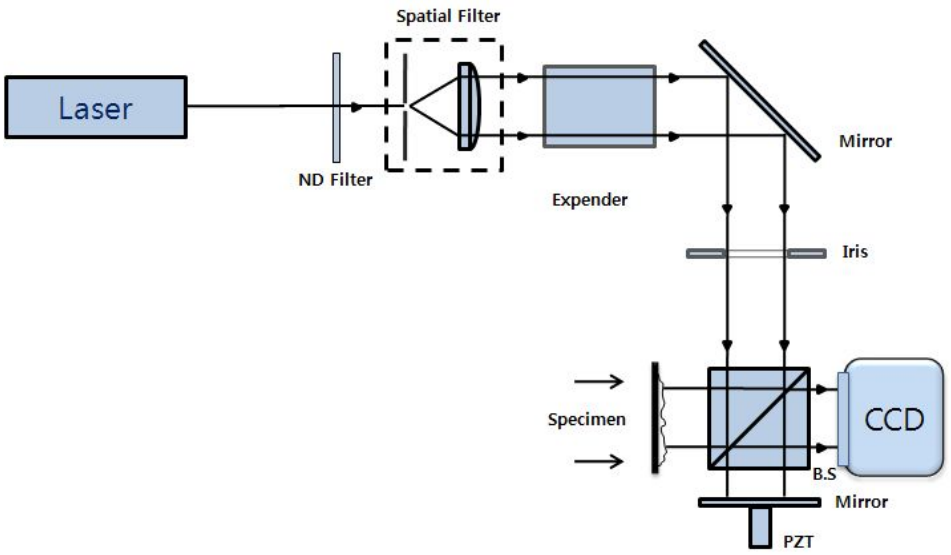


Fig. 3-2 Reflected interferometry for holography

3. 피로시험기

피로시험기는 미국 MTS 사의 상용제품(Model:793.01)을 사용하였으며, H/W controller, S/W controller, PC, servovalve controller로 이루어져 있다.

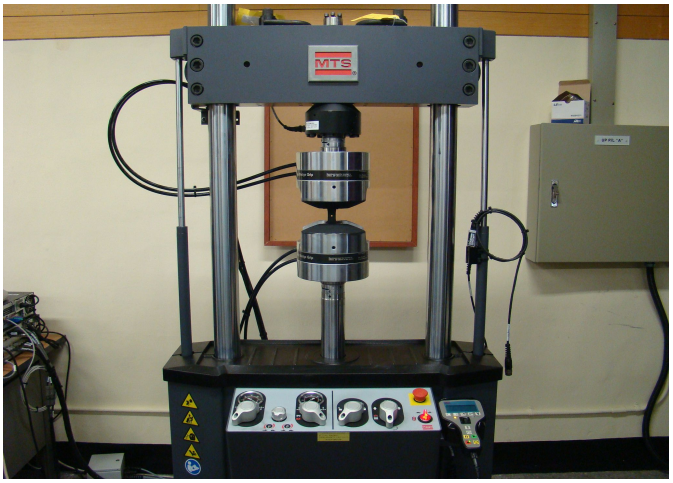


Fig. 3-3 Fatigue machine system

Table 3-1 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

4. 열화상 카메라

피로 시험기를 이용하여 시험편에 피로하중을 인가하는 동시에 적외선 열화상카메라를 이용하여 피로하중을 받는 시험편의 표면온도 변화를 측정하였다. 적외선 열화상카메라는 프랑스 FLIR systems사의 silver480 모델을 사용하였고, 세부사양은 Table. 3-2에 나타내었다.

Fig. 3-4 Infrared thermography system

Table 3-2 Specification of infrared thermography system

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

제 2 절 시험편

간섭계를 구성하고 본 실험을 수행하기 전에 resolution target을 측정하는 예비실험을 하였다. 이 때 resolution target은 Edmund optics사의 USAF 1951모델(Positive와 negative)을 사용하였다. Fig. 3-5은 resolution target의 형상을 나타낸 것이고, Table 3-3은 세부사양을 나타낸 것이다.

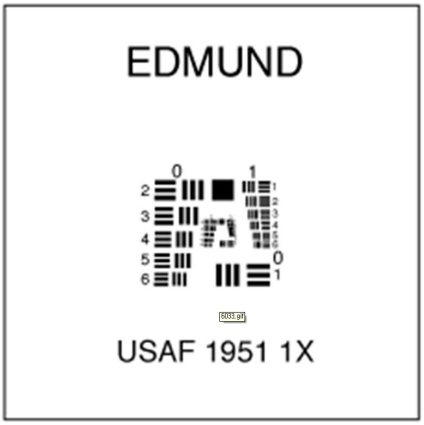


Fig. 3-5 Resolution target

Table 3-3 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
Maximum Resolution	for Standard: Group 7, Element 6 for High Res: Group 9, Element 3

본 논문의 실험을 위하여 시험편은 ASTM 규격에 준하여 압연방향과 크랙의 진전 방향이 직각이 되도록 하였고, 하중 제어방식에 적합한 CT시험편을 사용하였으며 시험편의 형상 및 치수는 Fig. 3-6과 같다.

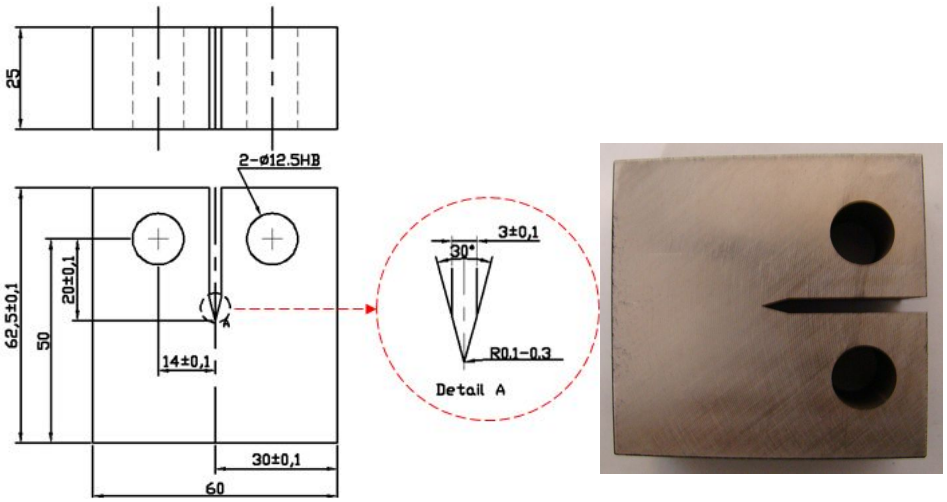
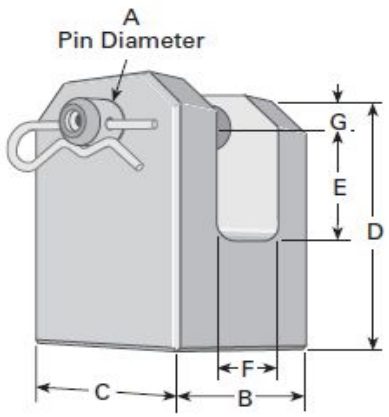


Fig. 3-6 Shape and dimensions of CT specimen

CT시험편에 하중을 인가하기 위하여 고정용 지그를 설계하였으며, 이는 피로시험기의 그립(Grip)을 고려하여 제작하였다. 고정용 지그의 형상은 Fig. 3-7과 같으며, 핀과 마운트 킷이 포함되어있다.

(a)



(b)

Fig. 3-7 Shape of fixed jig

Table. 3-4 Specification of fixed jig

Model Number	Specimen (Nominal) Width	Pinhole	Stud Size	Weight (Each)	Dimensions A	B	C	D	E	F	G	Part Number
640.20B-01	0.5 in	0.5 in	1-14	1.5 lb	0.480 in	1.5 in	1.5 in	2.6 in	1.06 in	0.52 in	0.52 in	07172741
640.20B-03	1.0 in	0.5 in	1-14	3 lb	0.480 in	2.2 in	1.8 in	2.6 in	1.10 in	1.03 in	0.52 in	07172743
640.20B-21	12.7 mm	12.7 mm	M27x2	0.7 Kg.	12.2 mm	38.1 mm	38.1 mm	66 mm	26.9 mm	13.2 mm	13.2 mm	07172741
640.20B-23	25.4 mm	12.7 mm	M27x2	1.4 Kg.	12.2 mm	55.9 mm	45.7 mm	66 mm	27.9 mm	26.2 mm	13.2 mm	07172743

제 3 절 실험 방법

모멘트(Moment)에 따른 CT시험편의 표면 거칠기를 측정하기 위하여 장치를 구성하였다. 피로시험을 함에 있어 하중을 변화시키면서 이 때 신호를 열화상 카메라로 촬영한다. 열화상 카메라는 -10V ~ +10V 이상의 신호를 획득하기 때문에 피로시험기의 신호 -10V ~ +10V 사이의 신호를 증폭기를 통하여 제한조건에 만족시킨 후 사용하였다. 파단된 CT시험편을 구하기 위하여 피로시험기 및 열화상 카메라의 구성을 Fig. 3-8에 나타내었다.

Fig. 3-8 Set-up of fatigue test and Infrared camera

파단된 CT시험편의 모멘트와 표면 거칠기의 관계를 구하기 위하여 마이켈슨 간섭계를 Fig. 3-9와 같이 구성하여 측정하였다. 측정 시 시험편의 위치를 나누어 위치에 따른 표면 거칠기 정보를 획득하기 위하여 마이크로 스테이지를 제작하였다. 이는 항상 같은 위치로 이동하도록 설계하였다.

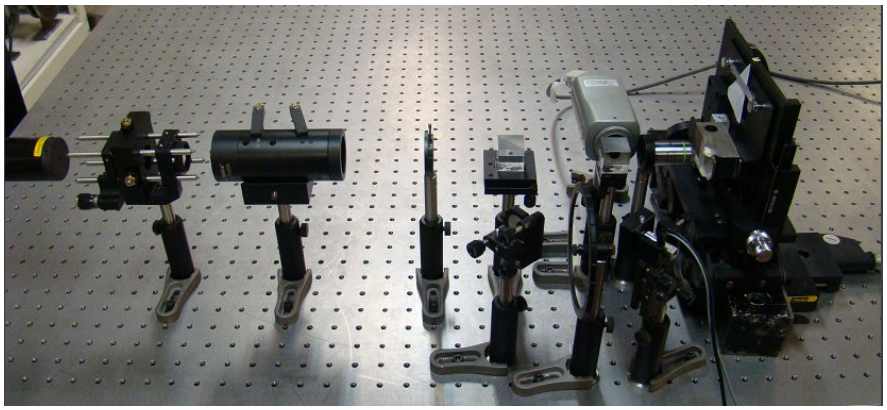
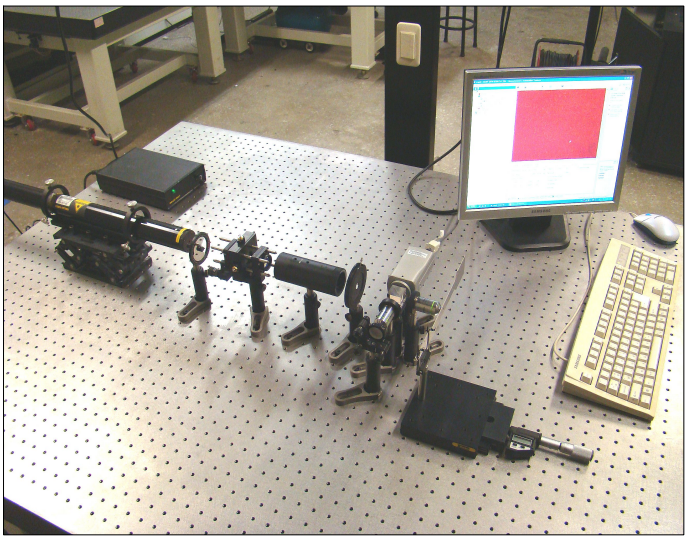


Fig. 3-9 Reflected interferometry for holography

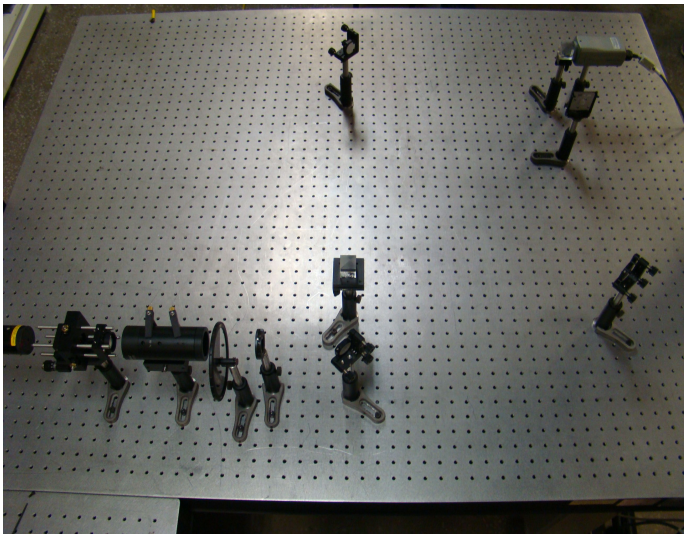
제 4 장 실험결과 및 분석

제 1 절 Resolution target의 측정 및 분석

본 논문에서 적용 될 반사형 및 투과형 간섭계의 분해능을 알아보고자 Resolution Target을 측정하였다. Fig. 4-1은 두 가지 타입의 간섭계로 Fig. 4-1(a)는 반사형 간섭계, Fig. 4-1(b)는 투과형 간섭계를 나타낸다. 획득된 홀로그램은 본 논문에서 제시한 알고리즘을 이용한 수치적 과정을 통하여 재생되며, 수치 재생된 이미지는 Table. 4-1,2에 나타내었다.



(a)



(b)

(a) Reflected interferometer

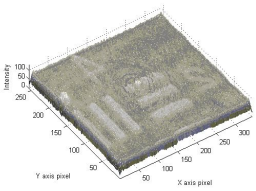
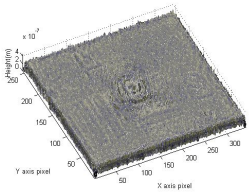
(b) Transmitted interferometer

Fig. 4-1 Type of interferometer

1. 반사형 간섭계를 이용한 측정 결과

반사형 간섭계를 이용하여 홀로그램 이미지를 획득하여 본 논문에서 제시한 각 스펙트럼 방법을 이용하여 재생 이미지를 얻었다. 홀로그램 이미지 및 재생 이미지는 Table. 4-1과 같다. 측정영역은 resolution target의 중앙부로 가장 작은 높이정보를 갖고 있는 영역이다. 재생 이미지 중 높이 정보에 resolution target의 높이를 알고자 프로파일(Profile)을 지정해주어 높이 정보를 분석하였다. 지정된 프로파일에 따른 높이정보를 분석함에 따라, 약 65nm로 측정되었다.

Table. 4-1 The reconstruction image of resolution target

area	Hologram image	Reconstruction (Intensity)	Reconstruction (Height)
1			

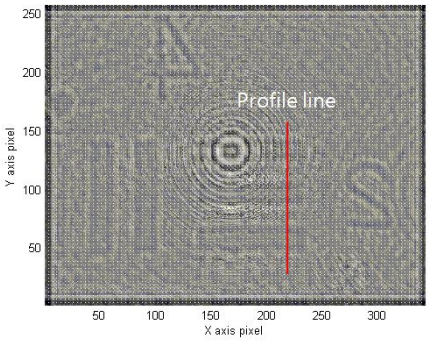


Fig. 4-2 line profile

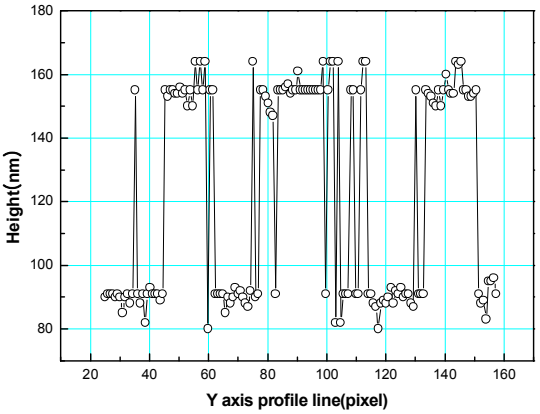
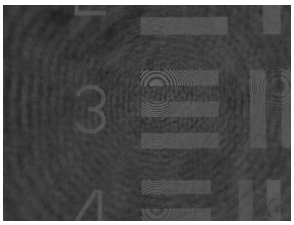
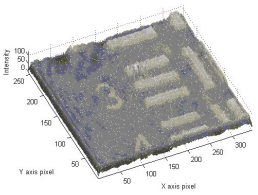
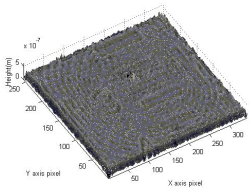


Fig. 4-3 Measurement height by line profile

2. 투과형 간섭계를 이용한 측정 결과

투과형 간섭계를 이용하여 홀로그램 이미지를 획득하여 본 논문에서 제시한 각 스펙트럼 방식을 이용하여 재생 이미지를 얻었다. 홀로그램 이미지 및 재생 이미지는 Table. 4-2와 같다. 측정영역은 resolution target의 좌측 영역으로 가장 높은 높이 정보를 갖고 있는 영역이다. 재생 이미지 중 높이 정보에 resolution target의 높이를 알고자 프로파일(Profile)을 지정해주어 높이 정보를 분석하였다. 지정된 프로파일에 따른 높이정보를 분석함에 따라, 약 160nm로 측정되었다.

Table. 4-2 The reconstruction image of resolution target

area	Hologram image	Reconstruction (Intensity)	Reconstruction (Height)
1			

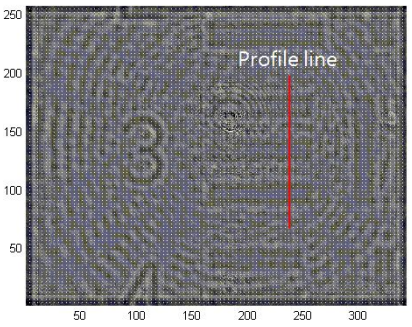


Fig. 4-4 line profile

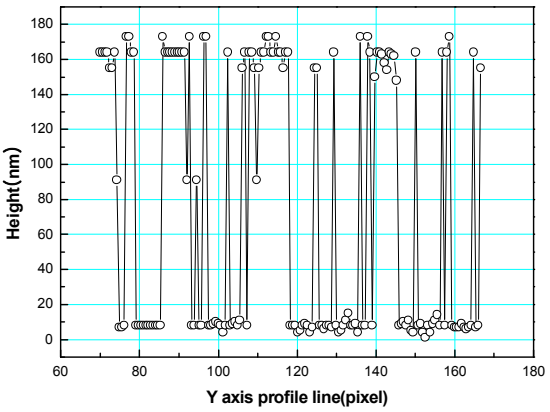


Fig. 4-5 Measurement height by line profile

Resolution target을 CCD를 통하여 획득된 홀로그램 이미지는 물체의 진폭 및 위상 정보를 포함하고 있기 때문에, 각 스펙트럼 알고리즘을 통하여 높이 정보로 환산되어 질 수 있다. 하지만 노이즈 및 언랩핑의 문제로 차후 좀 더 심도 깊은 연구가 필요하다.

제 2 절 온도 변화 측정

1. 하중 변화에 따른 온도변화 측정

피로시험기를 통하여 하중 변화를 주었을 때, 열화상 카메라를 이용하여 온도를 측정하였다. 열화상 카메라를 이용하여 온도를 측정하기 위해서는 방사율이 높고, 투과율 및 반사율이 낮아야 적외선 온도계의 측정값이 정확하기 때문에 흑체에 가까운 무광택 스프레이(ε=0.95)를 도포하여 방해요인을 줄였다. 무광택 스프레이를 도포한 시험편의 형상은 Fig. 4-6과 같다.

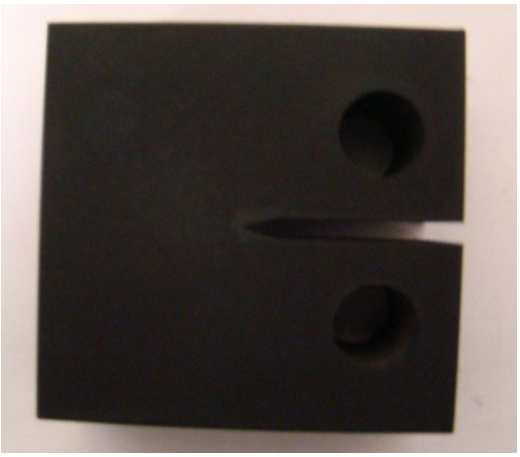


Fig. 4-6 CT specimen spreaded with spray

하중이 증가함에 따라 온도의 분포를 확인하기 위하여 열화상 카메라를 통하여 분석하였다. 분석 시 측정 전체 영역의 평균온도를 측정하여 하중 변화에 따른 온도의 분포도를 측정하였다. 또한 4개 구역을 나누어 각 시험편의 각 위치별로 온도를 측정하여 결과를 비교하였다. 구역 설정 시 4개 구역만 설정한 이유는 4개구역 이상에 대해서는 급격한 파단이 일어나기 때문에 측정 결과의 데이터가 정확하지 않기 때문이다. 온도 측정 해석 영역 및 전체 영역의 평균 온도는 각각 Fig. 4-7, Fig. 4-8과 같다.

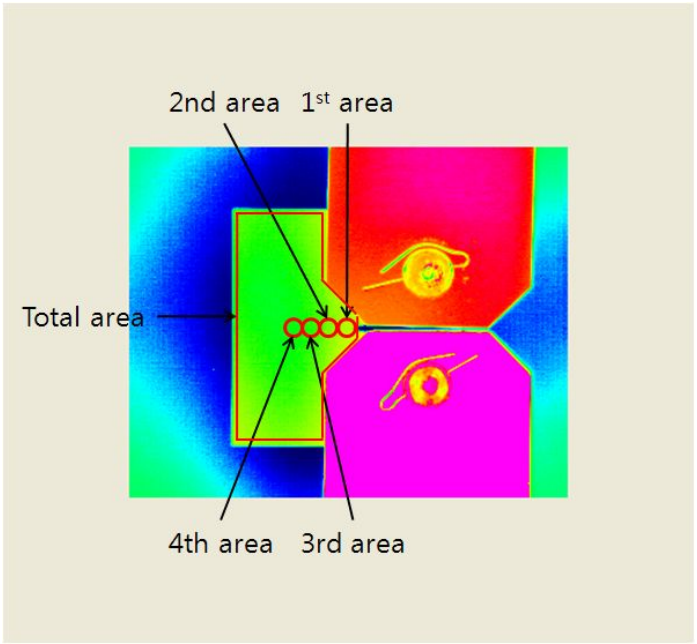


Fig. 4-7 Analysis area for temperature measurement

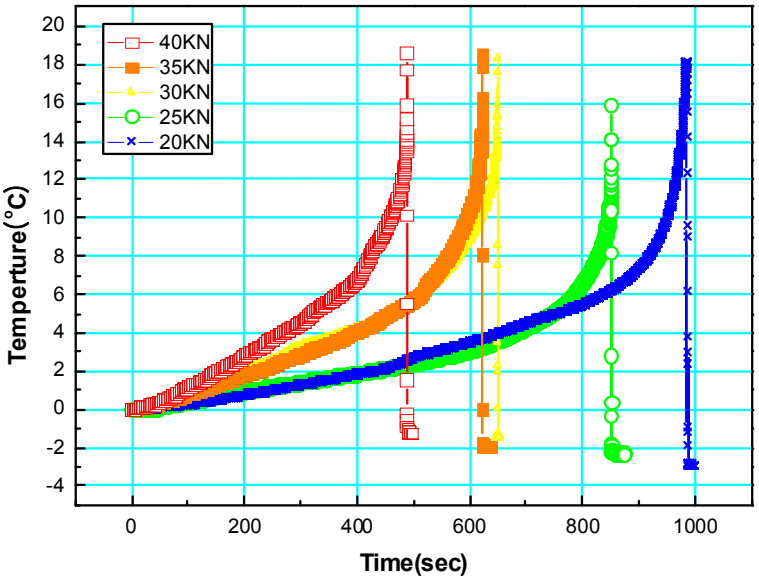
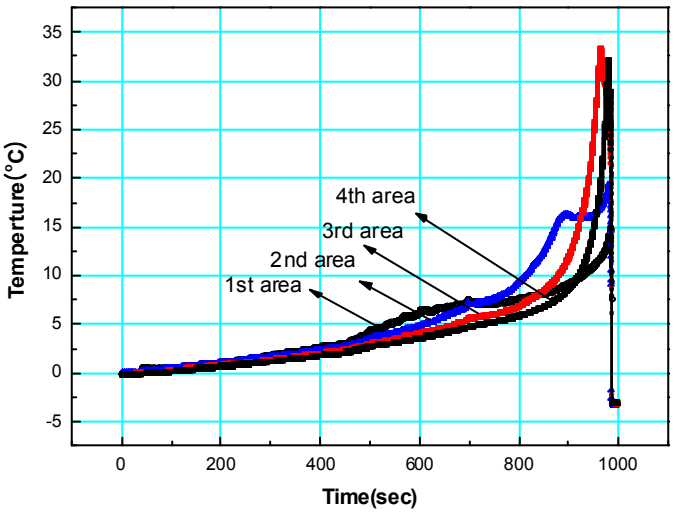


Fig. 4-8 Average temperature of total area

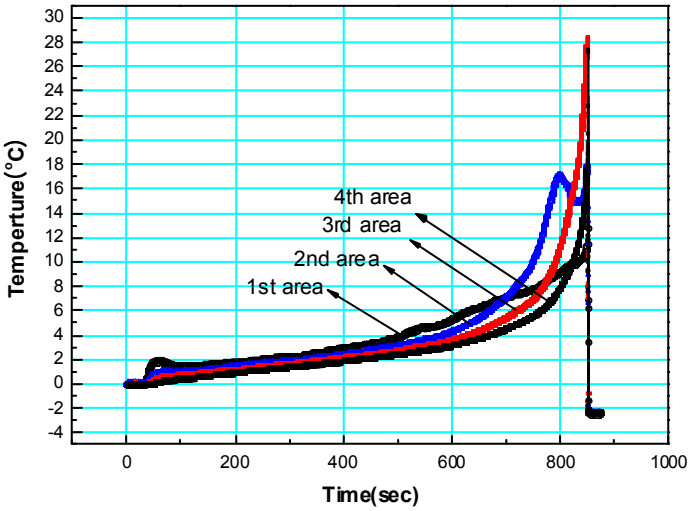
CT시험편의 하중 인가 시 평균 온도 분포는 피로 하중이 증가함에 따라 파단시간이 감소하였으며, 온도의 변형 기울기가 증가하였다. 이는 피로 하중이 증가할수록 시험편의 부피의 변화가 증가하여 온도가 상승하기 때문이다. 또한 파단시간의 감소는 하중 값에 비례하여 응력집중이 발생하였으므로, 크랙발생 시간이 단축되었으며, 크랙의 진전속도가 증가하였기 때문이다.

2. 모멘트 변화에 따른 온도 변화 측정

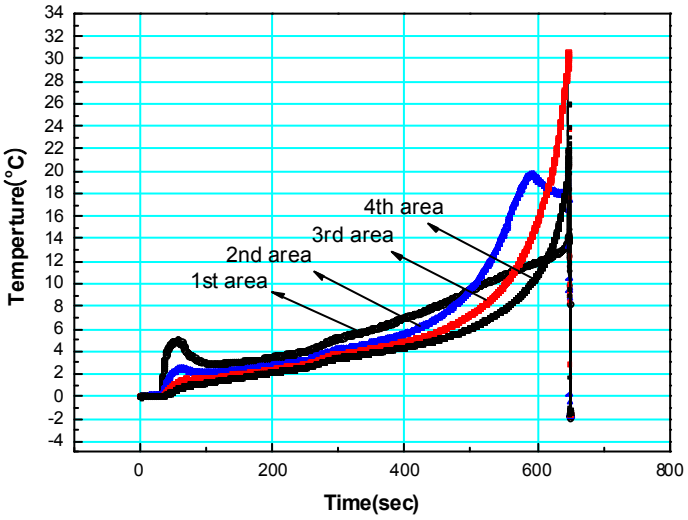
시험편의 위치별로 모멘트 변화에 따른 온도의 변화 분포를 분석하였다.
파단에 이르기까지 노치 부분에서 열이 가장 많이 발생하였으며, 크랙의 진전에 따라 온도의 분포가 변화하였다. 각 위치별 온도분포는 Fig. 4-9과 같다.



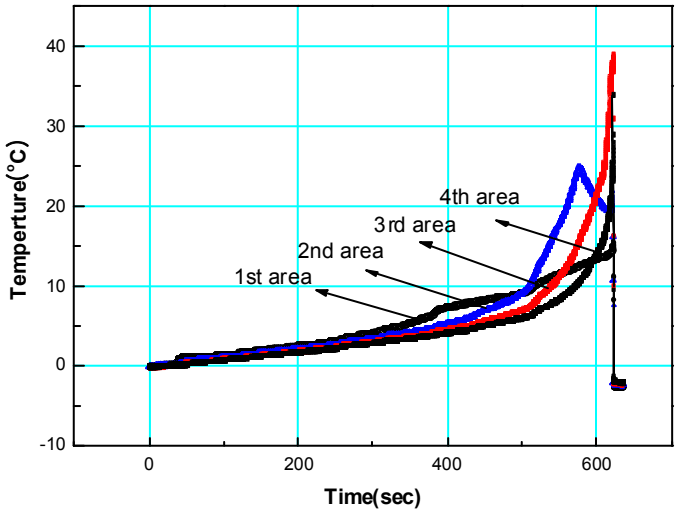
(a) 20KN


Temperture(°C)
Time(sec)
4th area
3rd area
2nd area
1st area

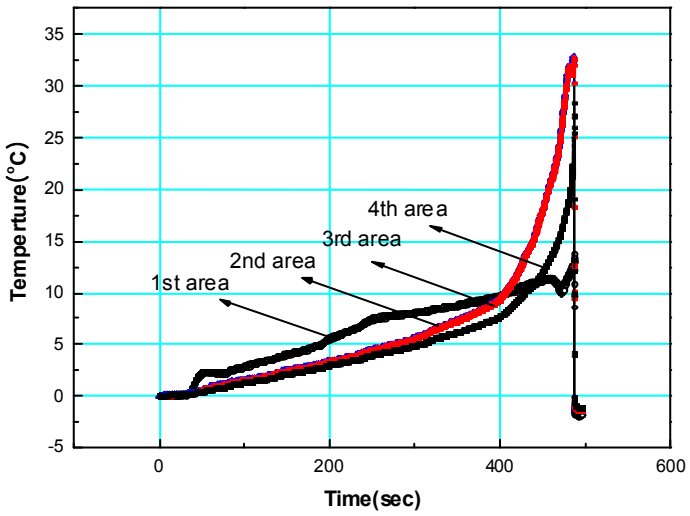
(b) 25KN


Temperture(°C)
Time(sec)
4th area
3rd area
2nd area
1st area

(c) 30KN



(d) 35KN



(e) 40KN

Fig. 4-9 Temperature distribution by force at each location

실험 결과 노치부와 가까운 1st area에서 열 발생이 가장 많이 발생하였다. 하지만 하중이 인가하였을 때부터 파단을 기준으로 75~80% 시간부터 온도발생의 역전 현상이 발생하였다. 이는 CT 시험편에 인장응력이 가해지면 노치부분에 응력이 집중하여 노치 끝 부분에 작은 균열이 생기고 이 균열의 끝이 다시 선택적으로 응력이 집중되어 새로운 균열이 진행되어 파괴되기 때문이다. 따라서 각 모멘트를 가장 많이 받는 부분보다 상대적으로 노치부의 열 발생이 더 큰 것으로 나타났다. 그러나 크랙 발생 후 균열 진전 속도에 따라 국부 응력의 영향으로 온도 발생 역전 현상이 나타났다. 각 모멘트에 따른 위치별 온도분포도는 선형적으로 나타났으며, 이는 추후 논의될 표면 거칠기와 연관이 있다.

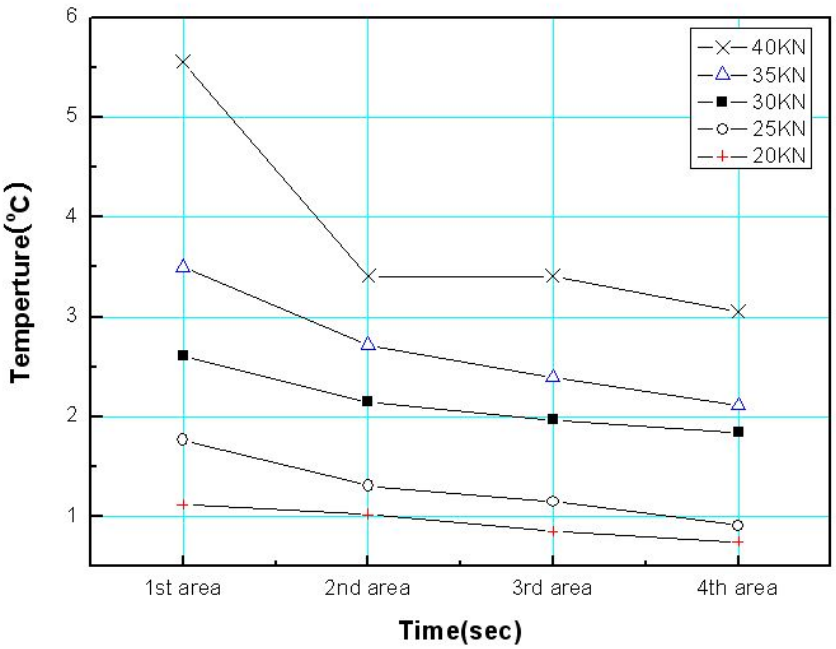


Fig. 4-10 Average temperature distribution by force at each location

제 3 절 CT시험편 표면 거칠기 측정

1. 파단면의 표면 거칠기 측정

CT시험편 파단면의 거칠기는 육안으로 확인이 불가능하였으며 분해능을 높이기 위하여 대물렌즈(Microscope lens)를 사용하여 분해능을 나노미터(nm) 단위까지 높였다. 파단된 시험편의 실형은 Fig. 4-11과 같다.

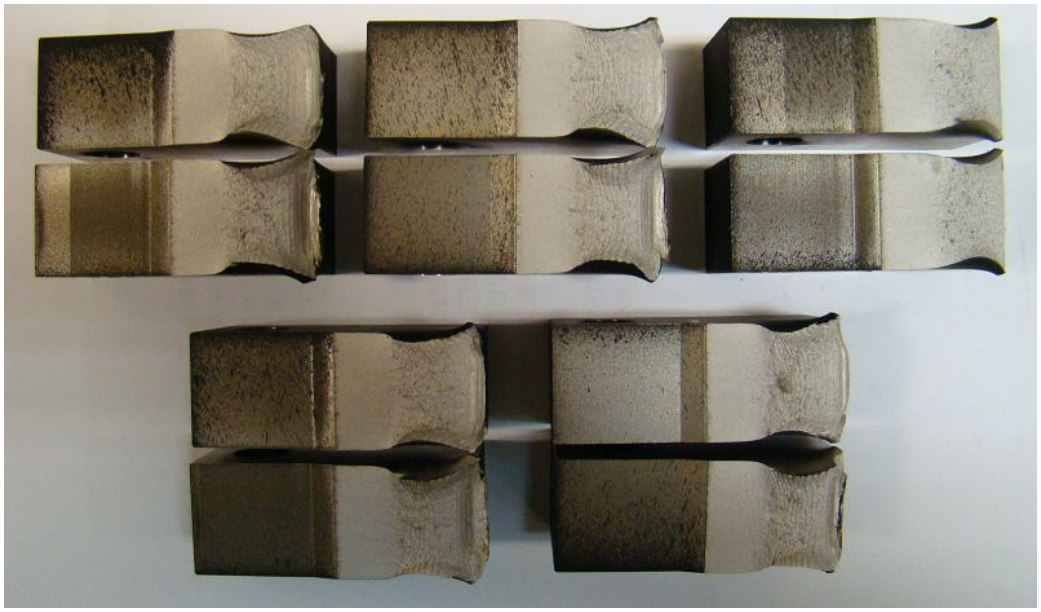


Fig. 4-11 Shape of fractural surface roughness of CT specimen

파단된 시험편을 측정하는 위치는 열화상카메라의 분할 구역과 같은 축에 있으며 마이크로 스테이지를 이용하여 각 피로하중별 시험편을 같은 위치의 구역으로 측정하였다. 분할된 구역의 위치는 Fig. 4-12와 같다.

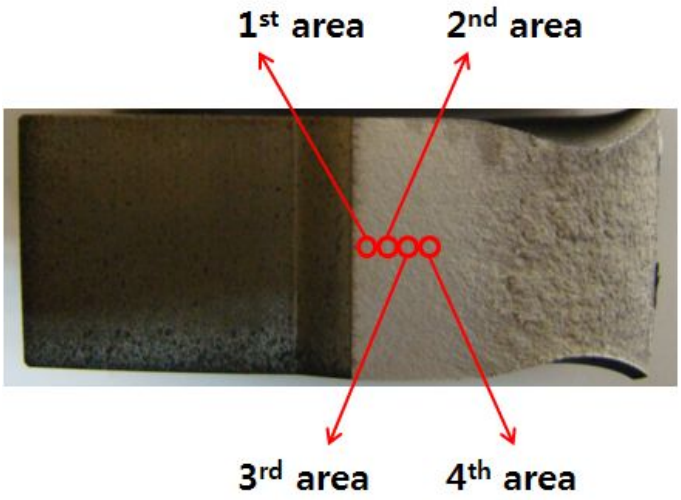


Fig. 4-12 Location of measure area

각각의 하중에 따라 CT시험편의 파단면의 형태는 동일한 형태로 파단되었으며, 파단 후 4개 구역의 대하여 홀로그램 이미지를 획득하였다. 홀로그램 이미지는 Fig. 4-13과 같다.

Fig. 4-13 Digital hologram image

Fig. 4-13은 CCD와 CT시험편 파단면까지의 거리를 대략 8cm정도로 하여 얻은 이미지이며, 파단면의 변화가 미세하므로 20배율을 대물렌즈를 통하여 파단면을 확대하였다. 획득된 홀로그램 이미지는 본 논문에서 제시한 각 스펙트럼 방법으로 이미지를 재생하였다. 파단면의 진폭과 위상정보를 구하여 각각의 정보를 해석하였으며, 위상정보를 이용하여 높이 정보를 추출할 수 있었다. 진폭과 높이의 3차원 재생이미지는 각각 Fig. 4-14, Fig. 4-15와 같다.

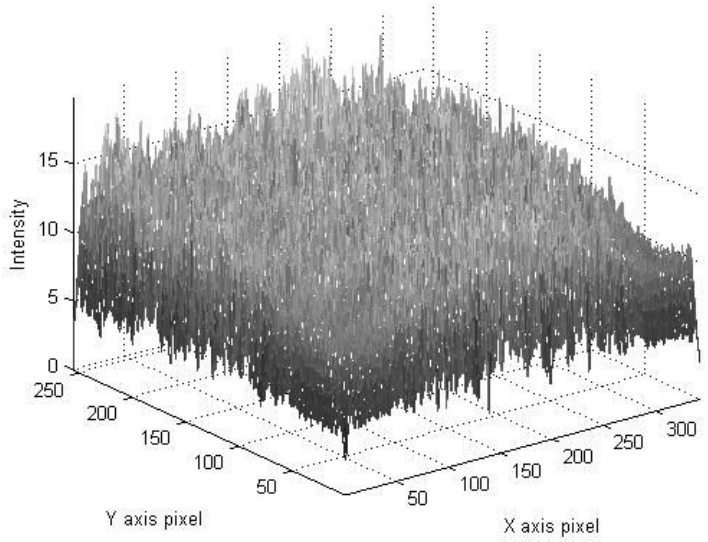


Fig. 4-14 Intensity 3-D image of reconstruction image

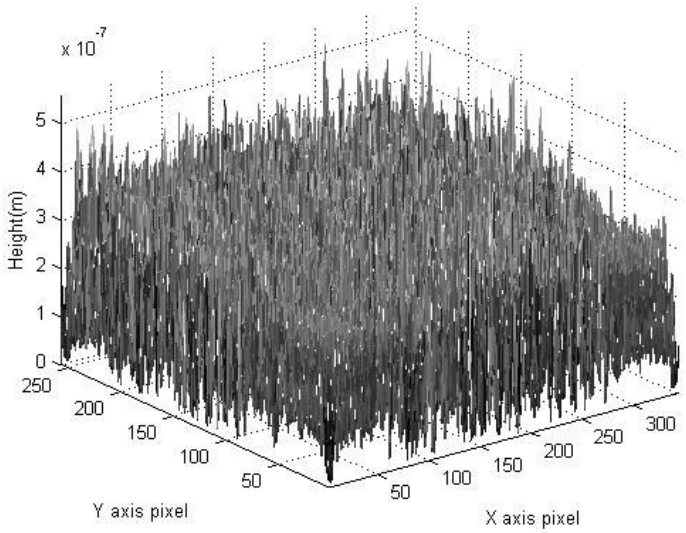


Fig. 4-15 Height 3-D image of reconstruction image

Fig. 4-15에서 보여주듯 각 화소의 위치에 따라 높이의 차가 나타남을 확인 할 수 있었으며 0~500nm의 높이 범위에서 표면의 거칠기 변화를 확인할 수 있었다. 최대 거칠기는 약 520nm로 측정되었다.

2. 파단된 CT 시험편의 표면 거칠기 측정

위의 파단면의 거칠기 측정 해석 방법으로 파단면의 각 위치별에 따른 파단면을 측정하였다. 같은 하중을 인가하였을 때 각 위치에 따른 모멘트의 영향으로 인하여 표면 거칠기의 변화는 차이를 보였다. 이는 시험편의 파단에 이르는 도중 분자간의 거리가 멀어지며 생기는 현상으로 예측되어질 수 있으며, 이를 수치적으로 분석할 수 있다.

CT시험편의 파단 후, 두 조각으로 나뉘어 지게 되는데 이 때, 실험의 신뢰도를 높이기 위하여 상단과 하단의 파단면의 표면 거칠기를 분석하였다. 인가하중 30KN으로 파단되었을 때 각 위치별(노치로부터 0㎜, 2.5㎜, 5.0㎜, 7.5㎜)의 파단면의 평균 거칠기는 Fig. 4-16과 같다.

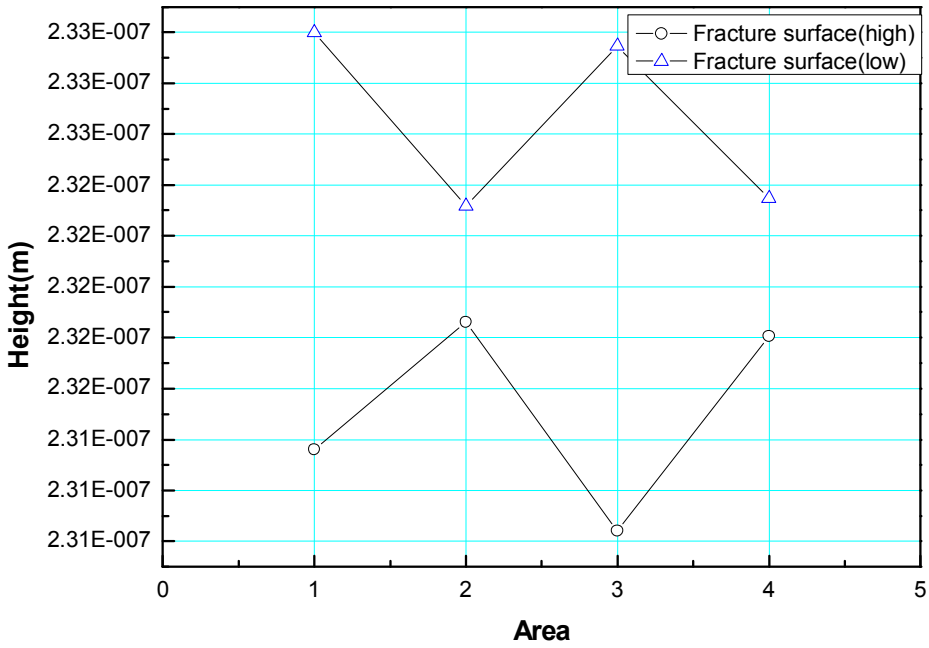
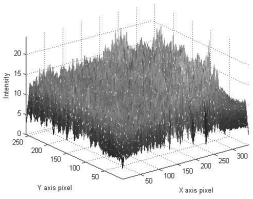
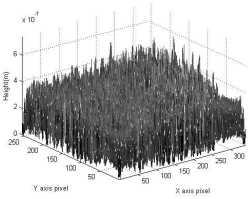
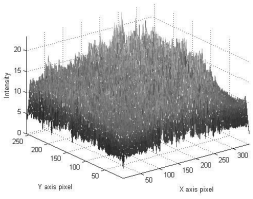
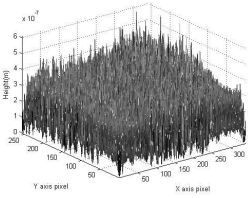
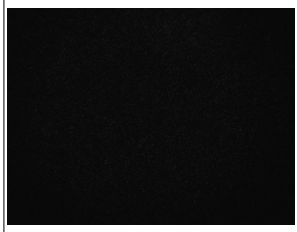
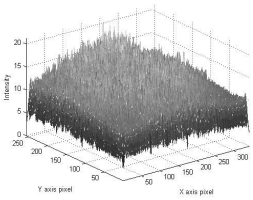
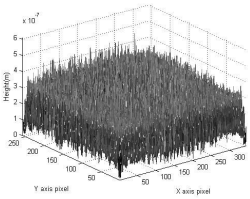
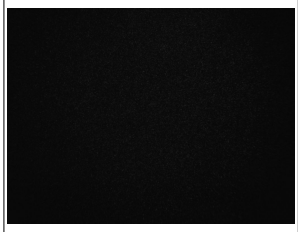
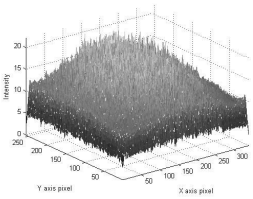
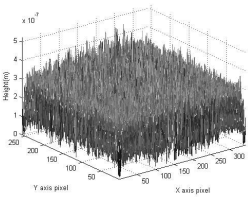


Fig. 4-16 Average surface of two fractural surface

실험 결가 평균 거칠기의 변화는 파단된 CT 시험편의 두 조각이 대칭적으로 나타났으며 높이의 차이는 약 20%로 나타났다. 이 때 높이의 차이는 상단과 하단으로 파단 되었을 때의 오차율과 무관하며, 비례적으로 나타났기 때문에 본 실험에서는 하단 부위만을 측정하고자 한다.

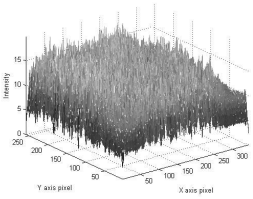
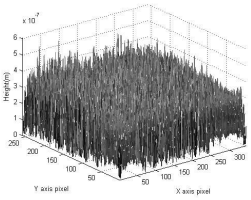
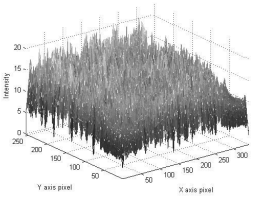
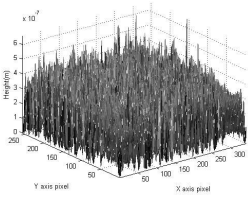
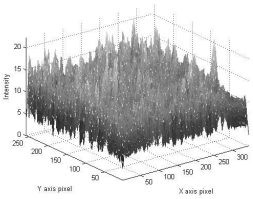
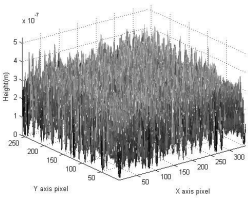
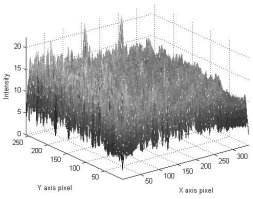
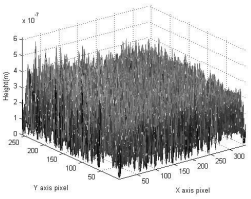
20kN의 하중 인가 CT 파단 시험편은 노치부로부터 0mm, 2.5mm, 5.0mm, 7.5mm 위치를 측정하였다. Table. 4-3은 측정된 홀로그램 이미지로부터 진폭 정보를 재생하였으며, 위상 정보를 이용하여 높이정보를 추출하였다.

Table. 4-3 Reconstruction image of 20kN hologram image

area	Hologram image	Reconstruction (Intensity)	Reconstruction (Height)
1			
2			
3			
4			

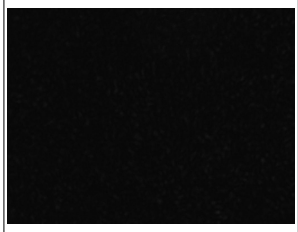
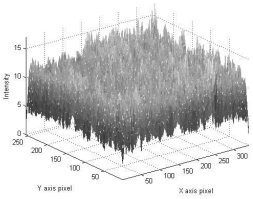
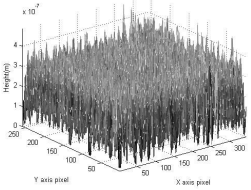
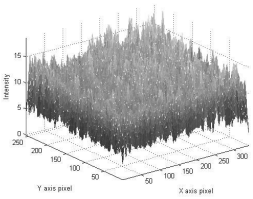
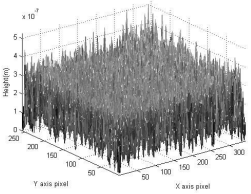
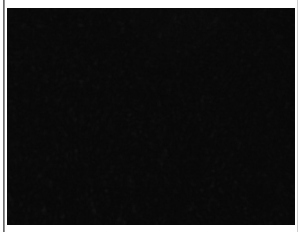
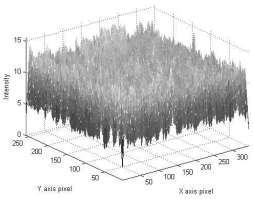
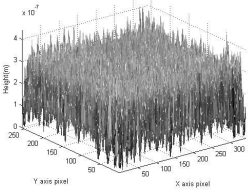
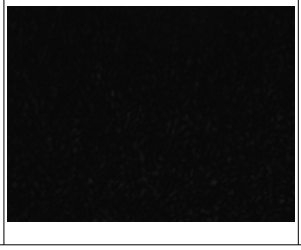
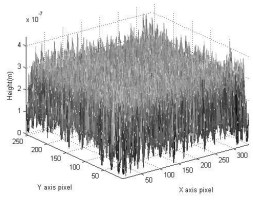
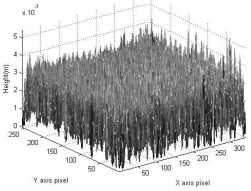
25kN의 하중 인가 CT 파단 시험편은 노치부로부터 0mm, 2.5mm, 5.0mm, 7.5mm 위치를 측정하였다. Table. 4-4는 측정된 홀로그램 이미지로부터 진폭 정보를 재생하였으며, 위상 정보를 이용하여 높이정보를 추출하였다.

Table. 4-4 Reconstruction image of 25kN hologram image

area	Hologram image	Reconstruction (Intensity)	Reconstruction (Height)
1			
2			
3			
4			

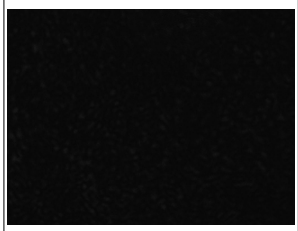
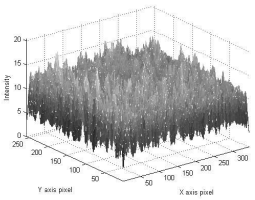
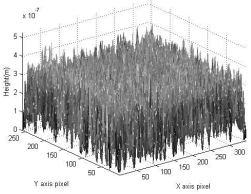
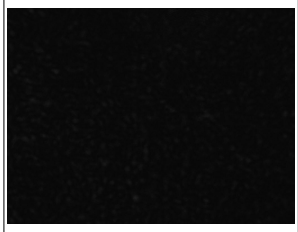
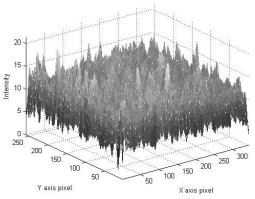
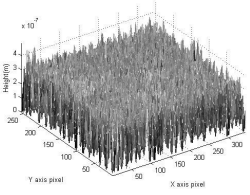
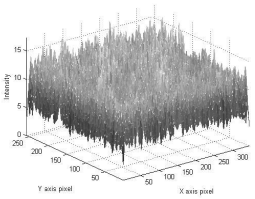
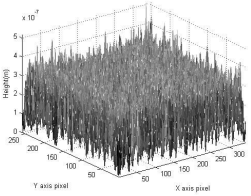
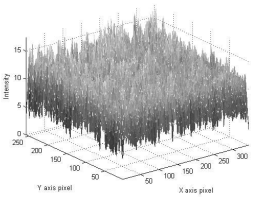
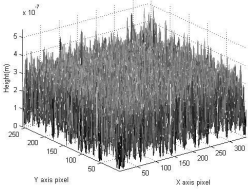
30kN의 하중 인가 CT 파단 시험편은 노치부로부터 0mm, 2.5mm, 5.0mm, 7.5mm 위치를 측정하였다. Table. 4-5는 측정된 홀로그램 이미지로부터 진폭 정보를 재생하였으며, 위상 정보를 이용하여 높이정보를 추출하였다.

Table. 4-5 Reconstruction image of 30kN hologram image

area	Hologram image	Reconstruction (Intensity)	Reconstruction (Height)
1			
2			
3			
4			

35kN의 하중 인가 CT 파단 시험편은 노치부로부터 0mm, 2.5mm, 5.0mm, 7.5mm 위치를 측정하였다. Table. 4-6은 측정된 홀로그램 이미지로부터 진폭 정보를 재생하였으며, 위상 정보를 이용하여 높이정보를 추출하였다.

Table. 4-6 Reconstruction image of 35kN hologram image

area	Hologram image	Reconstruction (Intensity)	Reconstruction (Height)
1			
2			
3			
4			

40kN의 하중 인가 CT 파단 시험편은 노치부로부터 0mm, 2.5mm, 5.0mm, 7.5mm 위치를 측정하였다. Table. 4-7은 측정된 홀로그램 이미지로부터 진폭 정보를 재생하였으며, 위상 정보를 이용하여 높이정보를 추출하였다.

Table. 4-7 Reconstruction image of 40kN hologram image

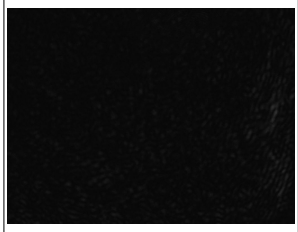
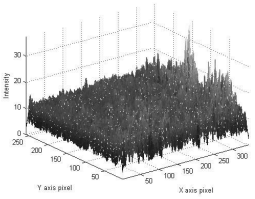
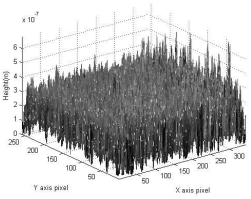
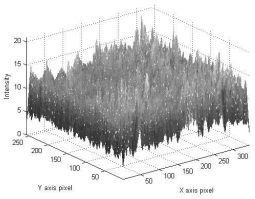
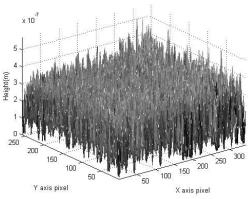
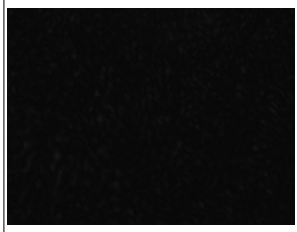
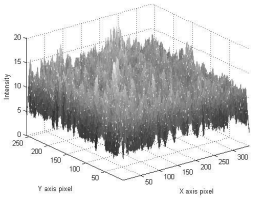
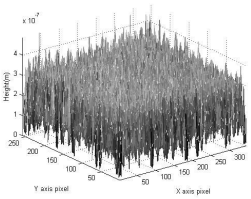
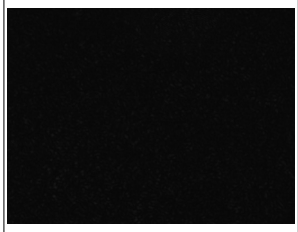
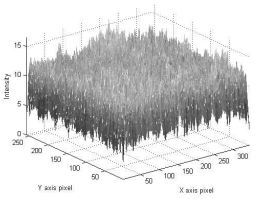
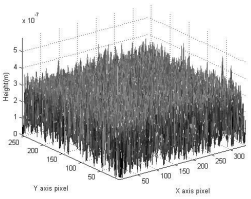
area	Hologram image	Reconstruction (Intensity)	Reconstruction (Height)
1			
2			
3			
4			

Table. 4-3부터 Table. 4-7까지의 재생된 이미지를 통하여 각 위치별에 따른 평균 표면 거칠기를 측정하였다. 측정결과는 Fig. 4-17과 같으며, 선형적인 경향을 보이나 3rd area 및 4th area에서의 비선형적인 결과는 노치부로부터 크랙이 진전될때 크랙진전속도와 국부적인 열의 발생으로 인한 요인으로 사료된다.

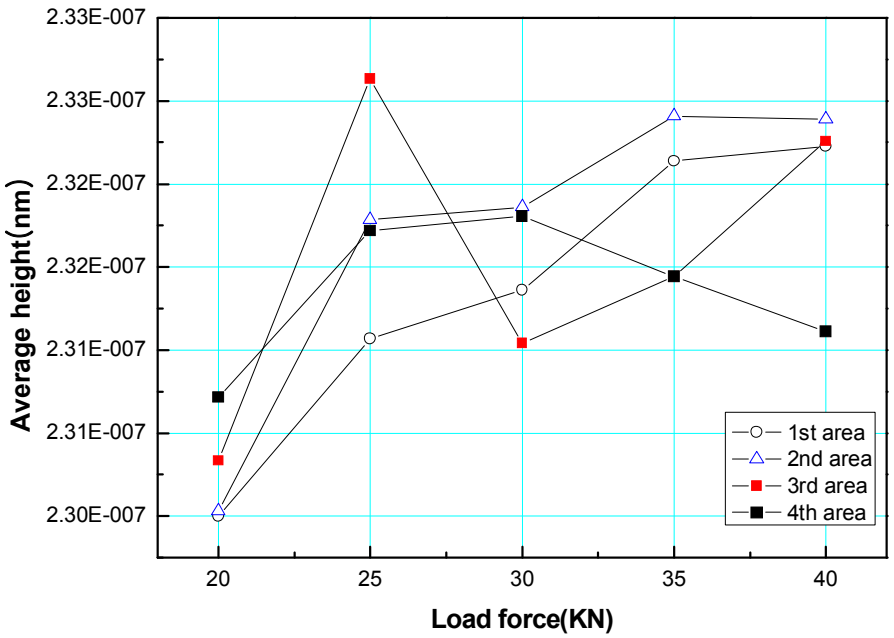


Fig. 4-17 Average surface roughness at each location

제 4 절 모멘트와 표면 거칠기의 상관관계

CT시험편의 모멘트와 표면 거칠기의 상관관계를 알아보기 위하여, CT시험편 파단면의 해당위치의 모멘트를 구했다. 모멘트를 구하기 위하여 해당영역까지의 거리 및 벡터를 Fig. 4-18에 표시하였다.

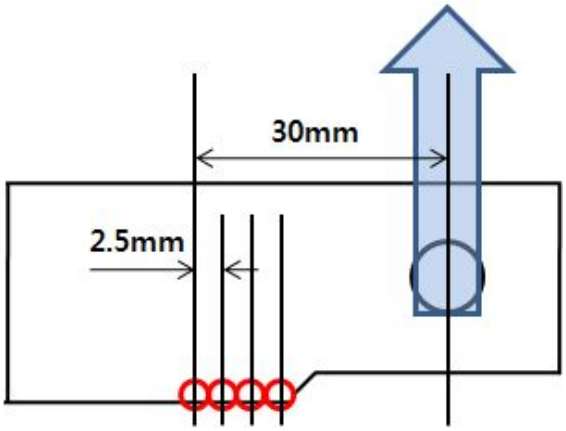


Fig. 4-18 Distance and vector of fractural CT specimen

M=r・F의 수식을 이용하여 각 위치의 모멘트를 Table. 4-8과 같이 구하였다.

Table. 4-8 Moment from each area (단위: kN・m)

거리(mm)	하중(kN)				
	20	25	30	35	40
20	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
22.5	0.45	0.5625	0.675	0.7875	0.9
25	0.5	0.625	0.75	0.875	1
27.5	0.55	0.6875	0.825	0.9625	1.1

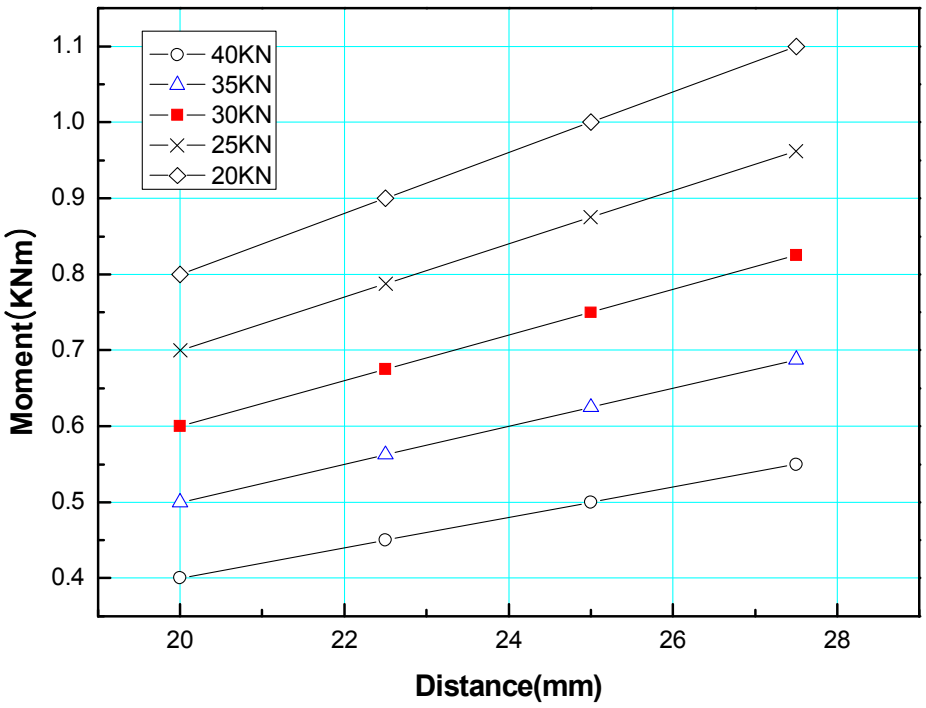


Fig. 4-19 Moment from each area

Fig. 4-19에서 볼 수 있듯이 측정 위치에 따라 모멘트의 힘은 증가하며, 인가 하중이 클수록 모멘트의 값도 커짐을 알 수 있다. 이에 따라 측정 위치에 따른 파단면의 표면 거칠기를 측정하여 비교하였다. 해당 위치에 따른 평균 거칠기는 Fig. 4-20와 같다.

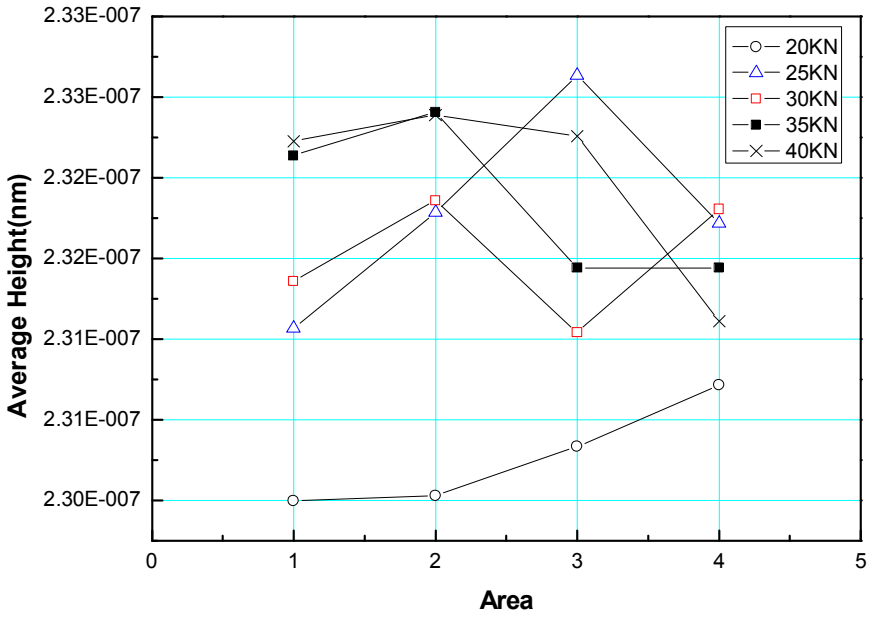


Fig. 4-20 Average roughness at each area

각 위치에 따른 표면 거칠기를 측정한 결과 노치부와 가까운 1st area와 2nd area부분에서는 모멘트 힘에 비례하여 선형적으로 증가하였다. 하지만 3rd area와 4th area에서는 모멘트 힘의 비례하지 않는 것을 확인할 수 있었다. 이는 시험편의 크랙이 노치부로부터 진전 되었을 때 크랙 진전속도와 국부적인 열 영향의 요인으로 분석된다. 파단면의 모멘트와 거칠기의 상관관계를 비교함으로써 측정 영역의 모멘트 힘이 발생하였을 때 파단면의 거칠기는 선형적인 결과를 수치적으로 구할 수 있음을 알 수 있다. 이는 시험편이 파단 시에 파단이 시작된 위치로부터 표면 거칠기의 변화가 어떠한지 알 수 있다. 이와 같은 사실은 외부 조건에 따른 시험편의 온도와 표면의 형상관계를 파악하는 매우 유용한 방법이며, 향후 외부 조건의 변형에 따른 정밀 연구가 필요하다.

제 5 장 결론

본 논문은 축 하중이 아닌 모멘트가 걸리는 부재에 대하여 부재의 파단면을 관찰하여 전후 환경을 예측하는 새로운 연구이다. 따라서 외부 하중을 인가 시 모멘트를 발생시켜 대상물이 파단에 이르렀을 때 대상물의 변화를 디지털 홀로그래피와 적외선 열화상카메라를 이용하여 시험편에 발생하는 변화를 측정하였다.

1) 외부 하중조건에 의해 시험편은 내부 에너지를 발산하며, 이는 온도나 체적, 표면의 변화로 나타난다. 이러한 변화를 측정하는데 본 논문에서는 적외선 카메라를 이용하여 온도 변화를 측정하였으며, 디지털 홀로그래피를 통하여 파단면을 관찰함으로써 상호연관 관계를 파악하였다.

2) 디지털 홀로그래피를 구성하여 모멘트에 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.

3) 반사형 간섭계를 통하여 위상정보를 이용함으로써 정밀한 형상 측정이 가능하였다. 또한 디지털 홀로그래피의 장점인 수치적 재생을 이용하여 초점이 맞는 상을 구하고, 전체 위상변화를 계싼하여 물체의 3-D 형상을 정밀 측정하였다.

4) CT시험편의 각 모멘트 발생 부위에 따라 파단면의 거칠기와 비교하였으며, 온도, 체적, 외부조건의 발생이 적은 영역에 대해서 선형적인 결과를 얻을 수 있었다. 또한 모멘트 힘은 파단면의 거칠기와 밀접한 상관관계를 갖고 있음을 알 수 있으며, 향후 외부조건의 변화에 따른 연구가 필요하다.

참고문헌

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. JOSEPH W. GOODMAN, "Introduction to fourier optics", McGRAW-HILL BOOK COMPANY, (2000)

5. J. W. Goodman, and R. W. Lawrence, "Digital phase formation from electronically detected holograms," Appl. Phys. Lett. 1, 77-79 (1967)

6. 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)

7. U. Schnars, and W. Juptner, "Direct recording of hologram by a CCD target and numerical reconstruction," Appl. Opt. 33, 179-181 (1994)

8. B. Javidi, and E. Tajahuerce, "Three-dimensional object recognition by use of digital holography," Opt. Lett. 25, 610-612 (2000)

9. B. C. Kim and S. W. Kim, "Absolute interferometer for three-dimensional profile 45 measurement of rough surfaces," Opt. Lett. 28, 528-530 (2003)

10. J. Schwider, R. Burow, K-E Elssner, J. Grnznna, R. Spolaczyk, and K. Merkel, "Digital wave-front measuring interferometry: some systematic error sources," Appl. Opt. 22, 3421-3432 (1983)

11. Y. Y. Cheng and J. C. Wyant, "Phase shifter calibration in phase shifting interferometry," Appl. Opt. 24, 3049-3052 (1985)

12. G. Gaussorgurs, “Infrared thermography,” translated by Chomet, S., Champman & Hall, London, (1994)

감사의 글

대학원에 입학한 게 엊그제 같은데 벌써 2년이란 시간이 지났습니다. 부푼 기대를 갖고 광주로 내려와 학문적이나 생활면이나 많은 것을 가르쳐 주신 김경석 교수님께 감사드립니다. 바쁘신 와중에도 논문을 심사하여 주신 양인영, 정낙규 교수님과 항상 격려와 조언을 아끼지 않으셨던 양광영, 김택현, 나기대, 김지훈, 박정우 교수님께도 감사의 말씀 드립니다.

힘든 상황에서도 꼼꼼히 챙겨주신 정현철 박사님, 최선을 다하여 가르침을 주신 장호섭 박사님께도 감사한 말씀 전해드립니다. 모두 건강하시고 앞날에 좋은 일들만 가득하시길 기원합니다.

낯선 광주에 와 힘들고 지칠 때마다 가족같이 동고동락한 실험실원들에게 깊은 감사의 말씀드립니다. 이제는 사회 각지에서 활약하고 있는, 의형제 수옥이형, 소심한 귀염둥이 민근이형, B형 남자 현민이형, 재간둥이 종현이형, 선배들이 있어서 대학원 생활이 재미있고 힘들어도 생활할 수 있었습니다. 언제나 탁월한 성취 있으시길 바랍니다.

대학원 생활을 같이 시작하여 이제는 같이 졸업하는 착한 성원이형, 형이 있어 큰 위안과 힘이 되어주어 감사합니다. 좀더 오랜 시간을 같이하고 싶은 마음에 못내 아쉬움이 남습니다.

후배지만 나이가 많았던 덕운이형, 경수형, 형들 덕분에 더욱 자극이 되고 많은 배울 점이 많아 좀 더 수월하게 대학원 생활을 할 수 있었던 것 같습니다. 앞으로도 남은 대학원 생활 마무리 잘하시고 좋은 일들만 있기를 기원합니다.

마지막으로, 가족은 저에게 가장 큰 힘이 되어 주었습니다. 항상 믿어주시고 묵묵히 지켜봐주시는 아버지, 하나부터 열까지 세심하게 신경써주시는 어머니, 멀리 떨어져있다는 핑계로 효도를 다하지 못한 죄송한 마음이 앞섭니다. 군대에 있지만 언제나 걱정해주고 잘 따라주는 동생 현수, 형은 내 동생이 참 대견스럽다. 그 존재만으로 존경스러운 가족께 마음속 깊은 사랑을 전하며 이 논문을 바칩니다.

저작물 이용 허락서

학 과	첨단부품소재 공학과	학 번	20087143	과 정	석사, 박사
성 명	한글: 김 동 수 한문 : 金 東 洙 영문 : Kim, Dong-soo				
주 소	강원도 평창군 평창읍 하 5리 75-5				
연락처	E-MAIL : victory동수@naver.com				
논문제목	한글: 디지털 홀로그래피를 이용한 CT시험편의 파단면 조도 측정 영어: The measurement of fracture surface roughness of CT specimen by using 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 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.

동의여부 : 동의(○) 반대( )

2010년 2월

저작자: 김 동 수 (서명 또는 인)

조선대학교 총장 귀하