



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](#)

2017년 2월

박사학위논문

박사학위논문

간디
섭지
무터
니
홀
안로
정그
화래
피
시
스현
템미
구의
구축
에정
에밀
관도
한
향
연상
구을

위한

디지털 홀로그래피 현미경의 정밀도 향상을 위한 간섭무늬 안정화 시스템 구축에 관한 연구

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

최 태 호

최

태

호

디지털 홀로그래피 현미경의 정밀도 향상을 위한 간섭무늬 안정화 시스템 구축에 관한 연구

A Study on the construction of the fringe stabilization system for the
precision enhancement of digital holographic microscopy

2017년 2월 24일

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

최 태 호

디지털 홀로그래피 현미경의 정밀도
향상을 위한 간섭무늬 안정화 시스템
구축에 관한 연구

지도교수 김 경 석

이 논문을 공학 박사학위신청 논문으로 제출함

2016년 10월

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

최 태 호

최태호의 박사학위논문을 인준함

| | | | |
|-----|--------|----|---------|
| 위원장 | 조선대학교 | 교수 | 양인영 (인) |
| 위원 | 포항공과대학 | 교수 | 홍정기 (인) |
| 위원 | 조선대학교 | 교수 | 김재열 (인) |
| 위원 | 조선대학교 | 교수 | 정현철 (인) |
| 위원 | 조선대학교 | 교수 | 김경석 (인) |

2016년 12월

조선대학교 대학원

목 차

| | |
|--------------------------------------|----|
| 제 1 장 서 론 | 1 |
| 1.1 연구배경 | 1 |
| 1.2 연구동향 | 4 |
| 1.3 연구내용 | 14 |
| 1.3.1 위상 이동 분석 | 14 |
| 1.3.2 위상 이동 디지털 홀로그래피-마이크로 스코프 | 17 |
| | |
| 제 2 장 이론적 배경 | 20 |
| 2.1 파동의 전파 및 회절 이론 | 20 |
| 2.1.1 키르-호프 적분 정리 | 20 |
| 2.1.2 프레넬 키르-호프 회절 식 | 23 |
| 2.1.3 호리겐즈-프레넬 원리 | 29 |
| 2.2 이미지 형성 및 재구성 | 31 |
| 2.2.1 이미지 형성 | 32 |
| 2.2.2 수치적 이미지 재구성 | 34 |
| 2.3 결필침 | 35 |
| | |
| 제 3 장 실험 장치 | 38 |
| 3.1 간섭계의 안정화 | 38 |
| 3.1.1 안정화 원리 | 38 |
| 3.1.2 안정화 실험 장치 구성 및 실험 | 44 |
| 3.1.2.1 레이저 | 44 |
| 3.1.2.2 CCD 카메라 | 45 |
| 3.1.2.3 Detector Assembly | 45 |
| 3.1.2.4 Control Electronics | 46 |
| 3.1.2.5 Mirror(PZT) Assembly | 46 |
| 3.1.3 실험절차 | 47 |

| | |
|--|----|
| 3.1.4 실험결과 | 52 |
| 3.2 투과형 홀로그래피 시스템 구성 | 55 |
| 3.3 프린지 안정화 적용 투과형 홀로그래피 시스템 | 59 |
| | |
| 제 4 장 실험결과 | 63 |
| 4.1 시험편 | 63 |
| 4.1.1 resolution target 시험편 | 63 |
| 4.1.2 resolution target 실험 결과 | 65 |
| 4.2.1 micrometer 시험편 | 71 |
| 4.2.2 micrometer 실험 결과 | 72 |
| 4.3.1 CO ₂ 시험편 | 76 |
| 4.3.2 CO ₂ Spot 실험결과 | 78 |
| 4.4.1 적혈구 (Erythrocyte) 시험편 | 82 |
| 4.4.2 단세포 적혈구 (Erythrocyte) 실험결과 | 84 |
| 4.4.3 다세포 적혈구 (Erythrocyte) 실험결과 | 88 |
| | |
| 제 5 장 결 론 | 93 |
| | |
| 참 고 문 헌 | 96 |

LIST OF FIGURES

| | |
|---|----|
| Fig. 1-1 Fibroblast 3D shape measurement | 5 |
| Fig. 1-2 Pattern Shape of a microstructure with step | 6 |
| Fig. 1-3 International Patent Status of Digital Holography | 8 |
| Fig. 1-4 Domestic Patent Status of Digital Holography | 9 |
| Fig. 1-5 World Market Forecast of Digital Holography | 10 |
| Fig. 1-6 Domestic market forecast of Digital Holography | 11 |
| Fig. 2-1 Surface of integration | 21 |
| Fig. 2-2 Diffraction by a flat screen with an opening | 24 |
| Fig. 2-3 Screen illuminated by point light source | 27 |
| Fig. 2-4 Coordinate system of Fresnel formula | 29 |
| Fig. 2-5 A schematic set up of the above two-phase moving digital holography | 31 |
| Fig. 2-6 Coordinate systems for Digital Holography | 32 |
| Fig. 2-7 1-D phase Unwrapped | 36 |
| Fig. 3-1 Graphical solution of closed loop equation | 42 |
| Fig. 3-2 Experimental setup of Stabilization interferometer | 44 |
| Fig. 3-4 Detector Assembly Appearance | 46 |
| Fig. 3-5 Stabilization Configuration Flowchart | 48 |
| Fig. 3-6 Stabilization Configuration Electronics | 48 |
| Fig. 3-7 Stabilization basic circuit diagram | 49 |
| Fig. 3-8 Interference pattern stability measurement program(front panel) | 50 |
| Fig. 3-9 Interference pattern stability measurement program(block diagram) | 51 |
| Fig. 3-10 Interference pattern and its profile | 51 |
| Fig. 3-11 Unstable wave form causer by external environmental factors | 52 |
| Fig. 3-12 Stabilization process by operating Control Electronics | 53 |
| Fig. 3-13 waveform measured after stabilization of interference pattern | 53 |

LIST OF FIGURES(Continued)

| | |
|---|----|
| Fig. 3-14 stabilization waveform after an external turbulence was applied to the stabilization interferometer | 54 |
| Fig. 3-15 Waveform with / without stabilization function | 54 |
| Fig. 3-16 A schematic of a transmissive holographic interferometer | 55 |
| Fig. 3-17 Reproduction of a hologram | 57 |
| Fig. 3-18 Flowchart of 3D shape restoration | 57 |
| Fig. 3-19 Flowchart of reproduction of digital hologram | 58 |
| Fig. 3-20 Configuration of a holographic interferometer fringe stabilization device | 59 |
| Fig. 3-21 A digital holographic microscopy with an interference fringe stabilization device | 60 |
| Fig. 3-22 LabVIEW Program for digital holographic microscopy(front panel) | 61 |
| Fig. 3-23 LabVIEW Program for digital holographic microscopy(block diagram) | 62 |
| Fig. 4-1 USAF transmissive resolution target | 63 |
| Fig. 4-2 USAF Resolution target with groups 4 and 5 | 65 |
| Fig. 4-3 The reconstructed phase image(stabilization mode Off) | 66 |
| Fig. 4-4 The reconstructed phase image(stabilization mode On) | 66 |
| Fig. 4-5 Measurement result of resolution target Test piece (z : 4mm) | 67 |
| Fig. 4-6 Measurement result of resolution target Test piece (z : 6mm) | 67 |
| Fig. 4-7 Measurement result of resolution target Test piece (z : 8mm) | 68 |
| Fig. 4-8 Measurement result of resolution target Test piece (z : 10mm) | 68 |
| Fig. 4-9 3D-Shape restoration of resolution target | 69 |
| Fig. 4-10 Line profile of set 2 in group 4 of Fig. 4-9 | 70 |
| Fig. 4-11 0.01mm stage micrometer(Nikon) | 71 |
| Fig. 4-12 Magnification micrometer test specimen | 72 |
| Fig. 4-13 Measurement result of micrometer Test piece (z : 1 mm) | 73 |
| Fig. 4-14 Measurement result of micrometer Test piece (z : 10 mm) | 73 |

LIST OF FIGURES(Continued)

| | |
|---|----|
| Fig. 4-15 3D-shape restoration of micrometer | 74 |
| Fig. 4-16 3D-shape restoration of micrometer | 74 |
| Fig. 4-17 Line profile of Fig.4-15 | 75 |
| Fig. 4-18 Measurement result of quartz test piece with a CO ₂ Spot | 78 |
| Fig. 4-19 Measurement result of quartz test piece with a CO ₂ Spot (z : 0.5mm) | 79 |
| Fig. 4-20 Measurement result of quartz test piece with a CO ₂ Spot (z : 1 mm) | 79 |
| Fig. 4-21 Measurement result of quartz test piece with a CO ₂ Spot (z : 2 mm) | 80 |
| Fig. 4-22 3D-shape restoration of with a CO ₂ spot | 80 |
| Fig. 4-23 3D-shape restoration of with a CO ₂ spot | 81 |
| Fig. 4-24 Line profile of Fig.4- | 81 |
| Fig. 4-25 Erythrocyte | 83 |
| Fig. 4-26 Erythrocyte image | 84 |
| Fig. 4-27 Measurement result erythrocyte Test piece (z : 0.6mm) | 85 |
| Fig. 4-28 Measurement result erythrocyte Test piece (z : 0.8mm) | 85 |
| Fig. 4-29 Measurement result erythrocyte Test piece (z : 1.5mm) | 86 |
| Fig. 4-30 3D-shape restoration of erythrocyte | 87 |
| Fig. 4-31 3D-shape restoration of erythrocyte | 87 |
| Fig. 4-32 Line profile of Fig.4.30 | 88 |
| Fig. 4-33 Measurement result erythrocyte Test piece (z : 0.4mm) | 89 |
| Fig. 4-34 Measurement result erythrocyte Test piece (z : 0.6mm) | 89 |
| Fig. 4-35 Measurement result erythrocyte Test piece (z : 0.8mm) | 90 |
| Fig. 4-36 3D-shape restoration of erythrocyte | 91 |
| Fig. 4-37 3D-shape restoration of erythrocyte | 92 |
| Fig. 4-38 Line profile of Fig.4-36 | 92 |

LIST OF TABLES

| | |
|--|----|
| Table 1-1 International research status for digital holography | 13 |
| Table 3-1 Specifications of Laser | 45 |
| Table 3-2 Specifications of CCD Camera | 45 |
| Table 3-3 Specifications of Detector Assembly | 45 |
| Table 3-4 Specifications of Control Electronics | 46 |
| Table 3-5 Specifications of PZT Mirror Assembly | 47 |
| Table 4-1 Number of Line Pairs | 64 |
| Table 4-2 Width of 1 line in micrometers | 64 |
| Table 4-3 Specification of CO ₂ Laser Machine | 78 |

LIST OF PHOTOGRAPHS

| | |
|--|----|
| Photo 3-1 Laser stabilization interferometer | 47 |
| Photo 3-2 Configuration of a transmissive digital holographic interferometer | 56 |
| Photo 4-1 0.01mm Stage micrometer (Nikon) | 71 |
| Photo 4-2 CO ₂ Laser machine used for fabricating quartz specimen with a CO ₂ spot | 76 |
| Photo 4-3 Quartz specimen with a CO ₂ spot | 77 |

ABSTRACT

A Study on Digital Holography Microscopic Using Fringe Stabilization System

Choi, Tae-Ho

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

Dept. Advanced Parts & Materials Engineering

Graduate School of Chosun University

Holography is an optical technique in which the wave nature of light is used to produce three-dimensional images of an object of interest. In addition to the 2D representation of a photograph, the holograph also records the depth of field by recording the phase of an incoming wave field. The principles of holography can also be used to examine the optical properties of transparent media. The refractive index of a transparent material is defined to be the fraction by which light slows down as it propagates through the medium. A digital holographic microscope (DHM) has been constructed to measure the refractive index of living biological cells as this information has been shown to be an indicator of cell health and is also central to cellular biomechanics measurements made with optical force instruments. In order to find the index, the DHM records interferograms which quantitatively measure laser light's change in phase as it traverses the cells. These interferograms are then processed to reveal the cell's refractive index and height. The theory and design for the DHM will

be presented along with a full discussion of the interferogram processing algorithms. The experimental procedure will be outlined in detail, and verification for the integrity of the index measurements will be discussed. Finally, a summary of refractive index measurements made of red cells at several wavelengths will be presented.

A digital holographic microscope that can be used to measure the refractive index of biological cells at different wavelengths that extend to the near-infrared spectrum was built. The interference pattern produced by the reference and object beams was recorded by a CCD camera. The recording process followed a special procedure called decoupling procedure. Three digital holograms with different interference patterns were recorded by varying the refractive index of the cell medium.

holographic experiments based on LabVIEW are demonstrated in this work in order to offer a teaching modal by making full use of LabVIEW as an educational tool. Digital incoherent holography enables holograms to be recorded from incoherent light with just a digital camera and spatial light modulator , and three-dimensional properties of the specimen are revealed after the hologram is reconstructed in the computer. The experiment of phase shifting incoherent digital holography is designed and implemented based on the principle of Fresnel incoherent correlation holography.

An automatic control application is developed based on LabVIEW, which combines the functions of major experimental hardware control and digital reconstruction of the holograms. The basic functions of the system are completed and a user-friendly interface is provided for easy operation. The students are encouraged and stimulated to learn and practice the basic principle of incoherent digital holography and other related optics-based technologies during the programming of the application and implementation of the system.

Due to the characteristics of the optical metrology technique, a process to remove some noise due to the complexity of an optical system is essential. for constructing an noise-reduced interference system, has less noise factors than the conventional transmissive type of the digital holography system. Also, in order to stabilize the digital holography system, the corresponding error signal to the movement of the interference fringes generated by the external environment, when the external air flow, th vibration

and so on are applied to the interferometer, is controlled. An interference fringes stabilization system can be constructed by using a method that the low electric voltage is applied to a piezo-electric element. The measured results are compared with those obtained from the conventional transmissive type of the digital holography system. It is confirmed that the digital holography system with an interference fringes stabilization system can obtain more stable results than the conventional method.

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

Dennis Gabor는 1948년에 우리가 지금 Holography로 인식하고 있는 파면재생(Wavefront reconstruction)의 2단계 무 렌즈 영상 처리 방법을 제안하였다.[1-3]. 홀로그래피라는 말은 ‘완전한’을 뜻 하는 그리스어 ‘holos’와 ‘메시지 or 기록’을 의미하는 ‘gram’을 합친 말이며 후에 홀로그래피와 사진기술 (photography)을 결합하여 물체가 가지고 있는 모든 정보를 기록 및 재생하는 기술로 Holography로 쓰이게 되었다. Gabor는 간섭성 물체파가 적당히 물체에 의해 산란되거나 회절 된 빛과 함께 존재하면, 산란되거나 회절된 파에 따른 진폭 및 위상 정보를 얻을 수 있음을 알았다. 이렇게 기록된 간섭무늬에서 원래 물체가 가지고 있던 영상을 획득할 수 있음을 증명하였다.[1]

Gabor가 제안한 영상 기술은 당시의 기술에 의해 얻어진 hologram의 열등한 화질로 인해 관심을 얻지 못했지만, 코히어런트 특성을 가진 레이저의 개발은 홀로그래피 연구에 또다른 시작을 불러 일으켰다. 1960년대에 이르러 개념과 기술적인 부분에서 진취적인 발전을 하였고, 그 응용이나 실용성 면에서 크게 확대 발전 되었다.[6] 1971년에 Gabor는 그 발견으로 Nobel 물리학상을 수상 하였다.

Gabor의 홀로그래피에 대한 연구는 초기 X-ray 결정학(Crystallography) 분야에서 W.L. Bragg의 연구에 많은 영향을 받았지만, 새롭게 발견된 전자 홀로그래피에 대한 응용 가능성이 그의 주된 동기가 되었다. 1949년, 1951년에 출판된 두 논문을 통해 현미경을 위한 홀로그래피의 응용 가능성이 나와 있다. 실질적 이유로 자신이 계획했던 홀로그래피에 대한 응용은 실현되지 못했지만, 1960년대에 기술로 그가 예견하지 못했던 많은 응용이 이루어지게 되었다.[1,2]

1950년대에 들어와서 G.L. Roger, H.M.A. EL-Sum, A.W.Lohmann 등 많은 학자들에 의해서 홀로그래피의 이론적 확대와 이해가 이루어졌다. 이 후 1960년대 초부터 홀로그래피에 대한 혁명적 발전이 이뤄지게 된다. Leith and Y. Upatnieks는 기존 레이더에서도 Gabor의 홀로그램에서 발생 되는 문제와 유사한 문제가 발생하는 것을 발견했으며, 이러한 문제를 해결하고자 Off-axis 홀로그램을 제안하였다. Y. N. Denisyuk는 기존의 Gabor와 Lippmann의 아이디어를 자신의 발명인 Thick reflection 홀로그램에 적용하였다[7] Y. N. Denisyuk는 발전된 형태로 두꺼운 반사형 홀로그램을 만들기 위해 Gabor와 프랑스 물리학자 G.Lippmann의 생각을 종합하였다.

미시간 대학의 연구자들은 1964년 레이더연구소의 Leith와 Upatnieks 교수가 데니스 가보의 구성법을 발전시켜 3차원 물체에 대한 투과형 홀로그램 기술을 제시하였다. 이 방법은 물체과와 기준 파의 방향을 같은 방향으로 필름에 노출시켜 밝고 선명한 색의 특성을 갖는 재생 방법을 얻게 되었다. 이 방법을 통해 얻어진 3차원 영상의 현실감과 품질은 대중적 관심을 그 분야에서 불러일으켰다. 하지만 사람들의 관심과는 반대로 3차원 영상능력과는 무관한 것들이다.[4,5]

디지털 홀로그래피의 용어는 1960년 중반기부터 사용되었다[8] 디지털 홀로그래피를 기반으로 하는 아이디어는 이로부터 30년전 처음 제안되었고[9], 기본적인 이론은 1980년도 초에 정립되었다.[10] 1960년대 후반 소련의 과학자 Denisyuk는 투과형 홀로그램을 이용하는 방식을 개선하여 반사형 홀로그램 기술을 제안했다. 이 방법은 물체과와 기준파의 입사를 반대 방향에서 입사시키는 방법으로 제작하는 방식이다. 이 또한 파장에 따른 선택에 있어서 구해 받지 않아 컬러로 재현하는 홀로그램 영상을 얻을 수 있는 획기적인 특징을 갖는 것으로 평가 받았지만 조도가 밝은 홀로그램을 얻기가 힘들어 상품화되지는 못하였다.

최근 들어 고해상도 CCD카메라의 발전을 비롯한 고속 컴퓨터의 개발을 통해 홀로그램의 재상과 저장에 따른 전 과정을 상용화 된 컴퓨터로 처리 할 수 있게 되었는데, 이것을 디지털 홀로그래피라 부르게 되었다. 이 방법은 크거나 작은 물체를 측정할 수 있는 방법으로 보다 다양하게 응용 되었고 지금의 컴퓨터와 CCD와 같은 영상 저장장치의 발전으로 혁신적인 측정방법으로 자리매김 하고 있다.

C.G.H(Computer Generated Hologram)는 빛을 간섭하여 얻어지는 광홀로그램의 간섭 패턴을 대신하여 영상을 재생하는 데 필수적인 정보만 컴퓨터로 설계하여 제작하기 때문에 물리적으로는 존재하지 않는 가상 물체의 생성과 합성도 가능하다.[1-4]

홀로그래피는 위와 같이 다양하고 지속적으로 발전해 왔으며 또한 많은 응용 산업에 적용하여 현재 수많은 산업분야에서 활용되어 지고 있어 미래적 발전 가능성이 많은 기술 이다. 그러나 간섭계를 설치하고 측정하는데 많은 애로 사항이 존재하며 측정시 외부 환경으로부터 자유롭지 못하다. 이는 홀로그래피 시스템의 정밀한 측정 및 고 분해능 해석을 위한 안정화 시스템의 연구의 필요성이 요구되었으며 간섭계의 간소화를 비롯한 CCD의 픽셀에 따른 분해능의 한계, 레이저의 가 간섭 거리등과 같은 다양하고 많은 문제점들이 제시 되어 있다.

1.2 연구동향

홀로그래피의 주된 응용 분야는 광학 소자, 간섭 계측, 광학 소자, 메모리 보안 정보 처리, 홀로그래픽 디스플레이등 매우 다양한 분야가 준비해 있다 이러한 각 분야에는 다른 기술에서는 실현 불가능하며 홀로그래피에 의해서만 유일하게 가능한 독창적인 응용이다. 홀로그래피는 기본적으로 파의 성질인 간섭성과 회절을 이용하지만 단순히 빛의 영역에서만 한정된 것은 아니며 빛 이외의 다양한 분야에서 연구되고 있다. Burney et al. [19]는 TV에 홀로그래픽 기법을 활용한 영상 획득 및 저장에 따른 디스플레이를 포함한 모든 과정에 대해 특허를 출원하였다.

1998년에는 20초 분량의 애니메이션 홀로그램을 선보였지만, 이러한 이때 선보인 홀로그램은 낮은 해상도를 비롯한 낮은 칼라 선명도, 상대적으로 작은 객체로 인해 당시에 큰 호응을 얻지 못했다. 현재까지의 홀로그래피와 컴퓨터 그래픽은 서로 간에 분리되어 다루어 왔다. 그러나 지금에 와서 두 기술의 결합으로 인한 과학, 전자, 정보, 우주산업에 이르기까지 많은 분야에서 응용될 수 있는 강력한 틀이 만들어 질수도 있다.

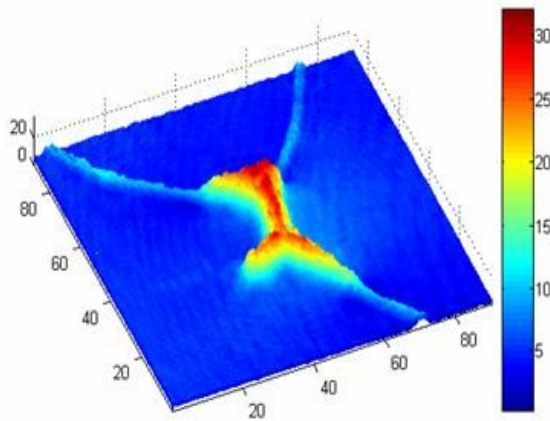
최근 들어 그래픽 산업의 발달은, 그래픽 가속기를 포함한 고속 컴퓨팅 시스템의 개발을 통해 완벽하지는 않지만 과거에 발생한 컴퓨팅문제를 해결할 수 있게 되었다.[20]. 홀로그래피의 장점인 고해상도의 3차원 입체 영상 디스플레이, depth cue, 시점 위치에 대한 자유 등이며, 근래의 컴퓨터 그래픽 처리의 성능은 실시간 렌더링, simulation, interactive가 가능한 수준까지 향상되었다 [21].

기존 기술에 레이저를 탑재한 형상 측정 기술은 근래 모든 산업계 전반에 걸쳐 측정 및 검사 기술로 중요한 자리를 차지하고 있으며, 고속 측정검사, 정밀 측정이라는 기반아래 수많은 획기적 발전을 이루고 있다. 그리고 지금에 와서 LCD, 반도체, MEMS, Build-up PCB, 바이오 셀 등 미세 표면 형상을

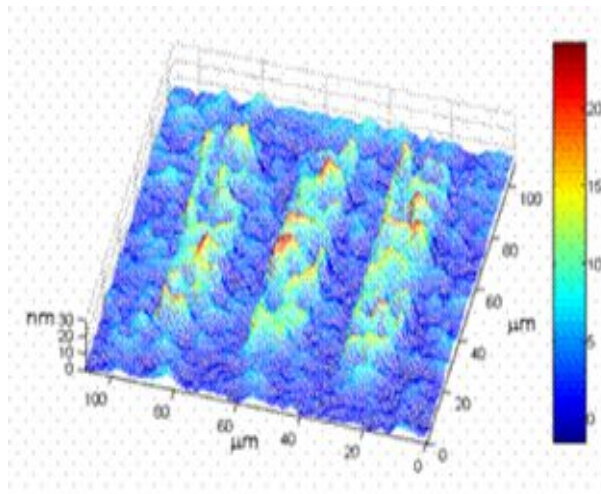
가공 하는 제조 산업 분야에서 정밀공정 및 우수 제품 관리를 위하여 신개념의 측정 기술을 요구하고 있다. 이에 따른 대안으로 최근에 떠오르는 것이 디지털 홀로그래피를 이용한 3D 미세 형상 측정 기술이다.

일반 광학 현미경은 시편에서 빛의 흡수도를 영상화하기 때문에 투명한 물체를 관찰하기 어렵다는 한계가 있었다. 이로 인해 세포와 조직 같은 생체 시편이나 플라스틱이나 액정 같은 투명 시편들을 관찰하기가 어려웠다. 이 문제를 해결한 기술이 위상차 현미경(phase contrast microscopy)이다.

위상차 현미경이 추가 염색 과정 없이 투명한 시편을 관찰할 수 있게 해주었지만, 시편의 윤곽만 정성적으로 보여주는 점, 2차원 영상만 획득 가능한 한계가 있었다. 이 두 문제를 해결한 것은 정량 위상 현미경(quantitative phase microscopy) 기술이다. 2000년대 중반 들어 2차원 디지털 홀로그래피 기술을 이용하여 레이저 간섭패턴을 측정함으로써 시편의 위상 지연 정보를 정량적으로 측정할 수 있다.



[Fig. 1.1] Fibroblast 3D shape measurement



[Fig. 1.2] Pattern Shape of a microstructure with step

생명공학 및 의학 분야와 광기술 등의 학제간 복합 과학이 발전됨에 따라, 생물학적 시료의 입체적인 영상과 측정 물체에 데미지를 가하지 않고 빠른 시간 안에 정밀한 측정도구에 대한 중요성이 어느 때보다 크게 부각되고 있는 실정이다.

실시간으로 살아 있는 셀의 거동 현상을 관측함으로써 셀의 동적, 정적 특성을 명확하게 파악할 수 있게 되었다. 이러한 셀의 특성을 파악하기 위하여 주사 현미경, 원자 현미경, 공초점 현미경 등이 사용되어있으나, 주사를 이용하여 3D 정보를 얻기 때문에 주사로 인해 발생하는 시간 지연과 진동이 발생 하게 된다. 이러한 단점을 보완한 디지털 홀로그래피와 기존의 현미경 기술을 결합하여 이러한 셀의 특성을 분석하는 기술이 개발되고 있다.

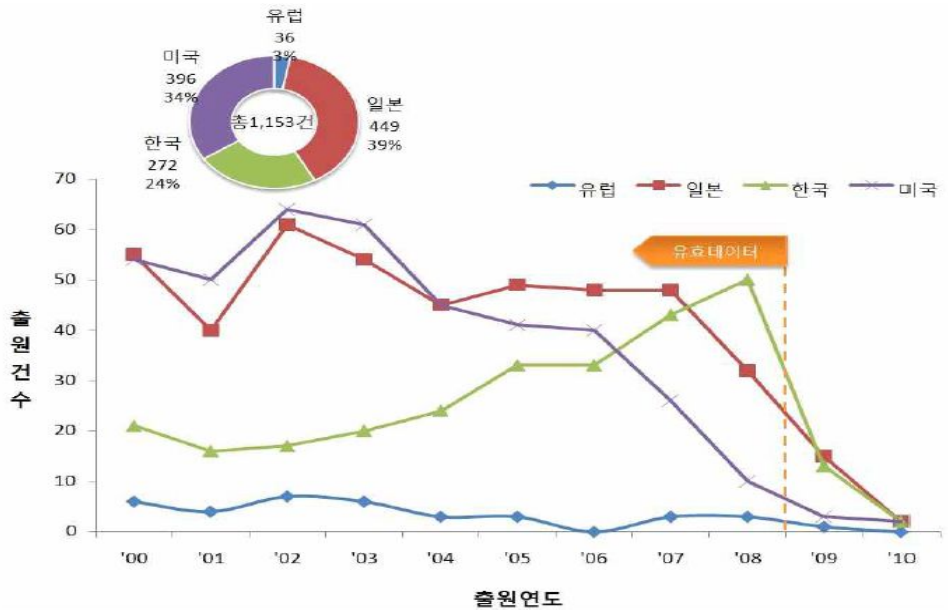
홀로그래피 현미경 기술은 생명체 내의 세포를 생물학적으로 살아있는 상태에서 측정하여 영상으로 재생하여 분석하는 기술이며, 투명한 물성을 지닌 생물학 분야의 제약이 많고 정량화하기 어려운 물체들을 다루는 분야의 측정 도구로서 적합하다. 이러한 기술은 바이오 광학의 기본 목표인 첨단 영상 기

술을 이용한 질병관련 규명과 바이오 산업화를 위한 적합하며, 세포 수준의 바이오 영상 기초 및 활용 기술로 부합된다.

홀로그래피 기반 영상처리 시스템 기술의 범위로는 홀로그래피 기술을 활용한 분야 중 3차원 공간을 표현한 기술 영역이며 영상획득 이나 처리된 대상체에 대한 3차원 정보를 홀로그래피 기술을 활용하여 임의의 공간상에 원 대상체와 동일한 재생을 하는 기술 영역을 말한다. 기술적으로는 디지털 홀로그램의 편집 및 비롯한 3차원 복원, 대용량 Digital hologram 고속복원 등 관련된 모든 기술을 포함한다.

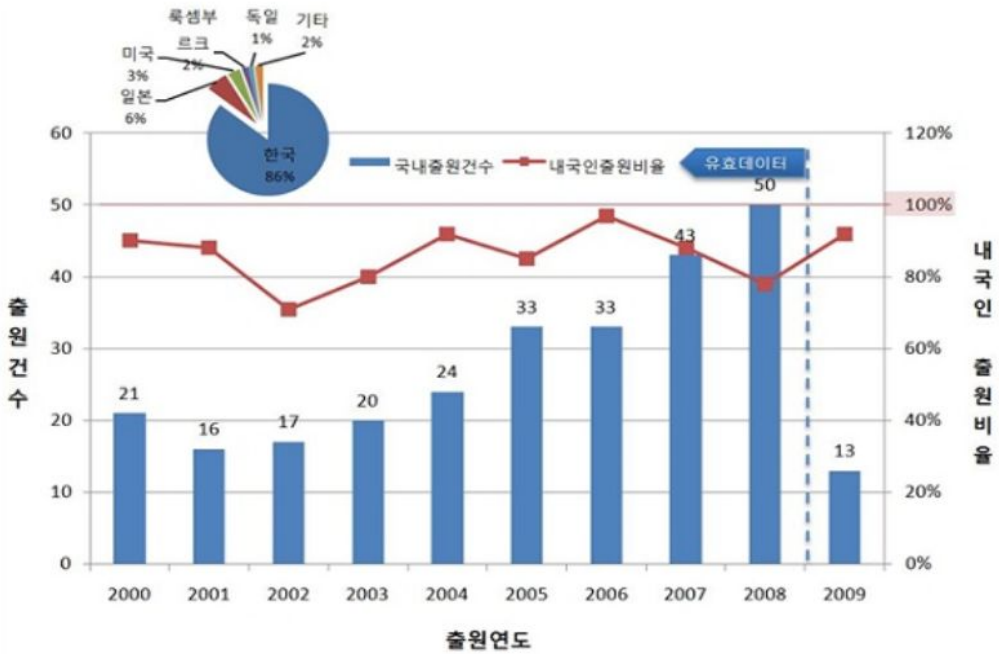
홀로그래픽을 기반으로 하는 영상처리 시스템 분야의 각국 연도별 출원 동향을 분석한 결과는 그림 1-3과 같고 이를 토대로 볼 때 현재 일본이 가장 많은 특허 출원을 하고 있으며 상대적으로 미국은 감소하고 있음을 할 수 있다. 한국은 지속적인 성장세를 나타내고 있으며, 가장 최근에는 많은 특허출원을 진행하고 있다.

해외특허 주요 출원인의 삼국 특허 출원 현황을 살펴 볼 때, 일본 과 미국 이 강세를 보이고 있다.



[Fig. 1.3] International Patent Status of Digital Holography

국내특허 동향은 그림 1-4와 같다, 한국은 한국 내에서 특허출원을 많이 이루고 있고 이 내국인으로 일본 및 미국에 의한 출원 또한 꾸준히 이루어지고 있는 것을 볼 수 있다.



[Fig. 1.4] Domestic Patent Status of Digital Holography

홀로그래피 기술의 디지털 간섭패턴은 정밀기기를 비롯한 의료기기에 활용되고 있으며, 디지털 간섭패턴은 수치적 모델 기반의 3D 대상체에 대한 간섭패턴을 계산하는 것으로 디스플레이 및 의료, 정밀측정, 보안 등에 활용된다.

굴절 및 회절패턴 기술을 이용하는 디스플레이 기술은 동적 디스플레이와 정적 디스플레이로 분리할 수 있는데, 정적 디스플레이 기술로는 보안 제품을 비롯한 홀로그래피 프린터를 이용한 교육, 문화 등에 응용될 수 있으며, 이러한 기술은 에너지와 홀로그래피 광학소자 부분에도 응용되고 있다. 동적인 디스플레이 기술은 홀로그래피의 디지털화로 인해 근 미래에 가능해질 분야로 현재로서는 기술개발 단계에 있다. 근 미래에 동영상 홀로그래피가 실현될 경우, 이를 응용한 방송 통신을 비롯한 많은 분야에서의 응용이 현실화될 것으로 기대된다.

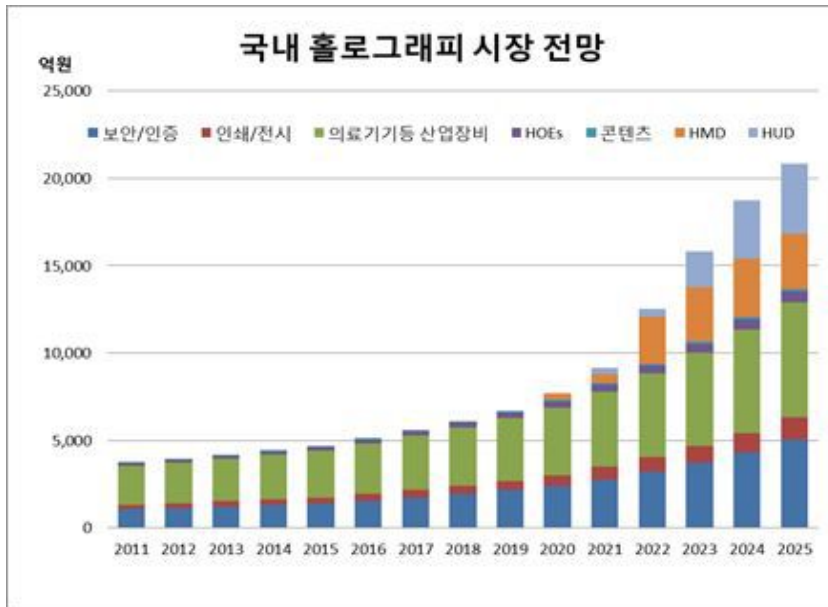
2011년 세계 홀로그래피 시장규모는 총 143억 달러 규모이며, 특히 보안/인증, 의료 기기 등의 첨단 산업장비가시장이 주도하는 것으로 추정하며, 연평균 14% 내외로 지속적으로 성장할 것으로 보인다.



자료 : ETRI, 2012

[Fig. 1.5] World Market Forecast of Digital Holography

매출액 기준 2011년 국내 홀로그래피 시장규모는 총 3,762억 원 정도로 추정하며, 이 중 보안 및 인증, 의료기기, 첨단산업장비가 시장을 주도할 것으로 전망된다.



자료 : ETRI, 2012

[Fig. 1.6] Domestic market forecast of Digital Holography

2020년대의 세계 홀로그램 시장은 무엇보다 디스플레이 분야에서 4.5조 원, 3D 영상 분야에서 12조 원, 그 외기타 응용산업분야에서 21조 원 정도로 전망되며 첨단의료 시장을 포함시키면 그 규모는 훨씬 크다고 할 수 있다. 국내의 홀로그램 시장 창출은 2017~2025년까지 총액 기준으로 22조 4천억 원 정도의 생산유발, 총액기준 5조 1천억 원의 부가가치를 기대, 총 11만 명 정도의 고용창출 효과를 기대한다.

현재 홀로그래피 분야에서 국제적 표준 기준은 ISO/TC172/SC9/WG7 으로 추진되고 있다. 2012년 ISO/WD를 시작으로 해서 두개의 표준안이 ISO/FDIS 의 승인을 받은 상태이다. 2014년 국내에서는 TTA 산하에 있는 TTA-TC6-PG610-디지털홀로그래피 WG가 구성되어 표준화절차를 추진하고 있다. 그리고 2015년 TTA 지원을 바탕으로 '홀로그램 포럼'이 설립되어 새로운 표준화 기술에 따른 동향 보급 및 동향 조사 보고서 제작, 표준기술 로드

맵 작성과 같은 활동을 하고 있다.

더불어 디지털홀로그래피 WG과 연계하여 국내의 표준 제정을 비롯한 국제 표준화를 선점하고자 하는 노력을 하고 있다. 디지털 홀로그래피 분야는 현재 시장이 성숙되지 않은 상황이다. 이에 국제 표준화도 초기 상황이다. 현재 표준 기술을 선점하기 위한 다양한 전략을 구성하고 실천한다면 디지털 홀로그래피 분야의 국제표준을 가장먼저 선도할 수 있으리라 기대한다.

국외 연구 현황은 다음과 같다.

| 구분 | 업체명 및 연구기관 | 사업영역 및 주요내용 |
|----|---------------------|---|
| 해외 | 아리조나 대학 | ○ 홀로그램 필름개발(재사용 가능) - 기록: 9,000V, 영상유지: 4,000V볼트 필요 - 장점 : 100%회절효율, 빠른 기록시간 및 장시간 영상 유지, 대면적 구현, 빠른 삭제가능 |
| | 버지니아 공대 | ○ '광 주사 홀로그래피(optical scanning holography)' 기술개발 |
| | MIT 미디어랩 | ○ 'HoloVideo' 개발 -AOM(Acousto-Optic Modulator)과 LCD 방식을 이용 |
| | 서던 캘리포니아대학 | ○ "Interactive 360 light field display" 시스템 개발 |
| | Zebra Imaging | ○ 광굴절 매질에 가상의 객체를 이용한 디지털 홀로그램을 기록할 수 있는 홀로그래픽 프린터 개발 |
| | NICT | ○ Full color 광전자 홀로그래픽 디스플레이 시스템 개발 |
| | Lyncee Tec. | ○ 홀로그래픽 현미경 개발 -세포에 대한 3D 모델링 기술을 포함 |
| | FP7 Real 3D Project | ○ 디지털 홀로그래피 원천 핵심 기술 연구(전처리, 전송, 디지털 홀로그램 획득, 후처리, 휴먼팩터, 디스플레이.) |

[Table. 1-1] International research status for digital holography

1.3 연구 내용

최근 3D 측정 기술로 관심이 높아지고 있는 디지털 홀로그래피의 원리는 오래전부터 알려져 왔던 것이다. 근래의 현미경이 2차원 정보만을 얻을 수 있는 데 비해 디지털 홀로그래피는 파동으로 빛이 가지고 있는 진폭과 위상을 동시에 기록함으로써 대상체의 3D 정보를 얻을 수 있다. 홀로그래피는 1960년대 간섭성이 탁월한 Laser의 발명으로 획기적인 발전을 거쳐 오게 되었다. 최근 전자 장치의 발전으로 인해 사진건판 대신한 CCD를 활용한 기록과 컴퓨터를 활용한 재생이 가능해 졌다. 전자 장치를 활용한 홀로그래피를 지금의 디지털 홀로그래피라고 한다.[1-5]

근래에 디지털 홀로그래피 기술에 위상 이동 기술을 활용한 위상 검출법이 도입되었다. 위상 검출법의 도입은 홀로그램 Plane에서 복소 진폭으로부터 재생이 가능해 지는데 이것을 위상이동 디지털 홀로그래피라 한다.[6]

1.3.1 위상 이동 분석

위상이동 기술은 위상 측정 간섭계로부터 2차원의 상대 위상차를 결정하는 기술이다. 상대 위상은 간섭계를 이루는 두 기준광과 물체광간의 광학적 경로 차로부터 생기는 위상 차이를 말한다.

위상 측정 간섭계에서 위상 이동은 기준광에 따른 광학적 경로 차를 임의로 조절하여 이루어진다. 이렇게 얻어진 위상 이동은 간섭무늬 밝기 분포에 대해 영향을 미치고, 위상이 이동한 간섭무늬간의 상관관계를 확인함으로써 구하고자 하는 상대 위상을 구할 수 있다. 먼저는 광원으로부터 나오는 결맞음된 빛은 분광기에 의해 2개의 경로로 분리된다.

분리된 두 광원 중 하나는 기준광으로 위상 이동 장치를 통과한다. 나머지 광원은 물체를 통과하거나 물체에서 반사되는 물체광이다. 물체파와 기준파

는 beam combiner 에 의해 합쳐진 후 CCD 와 같은 기록장치에서 간섭무늬로써 기록된다.

이런 위상 측정 간섭계의 위상이동 기술은 1966년에 이르러 Carre 에 의해 처음 소개되었다. 이후 Bruning 등에 의해 발전되었으며,[7,8] 현재에 이르러 위상이동 간섭계는 기준광의 위상을 임의로 움직여 여러 간섭무늬간의 상관 관계를 통하여 정량적인 파면에 대한 분석을 가능케 하는 기술로 Speckle pattern interferometry[8], Digital Holography[10], 3-D profilometry [11]등의 여러 다양한 분야에서 널리 활용되고 있다.

위상이동 간섭계는 파면에 대한 위상을 정량적 획득이 가능하다는 장점을 가지고 있으나 여러 오차 요소를 내포하고 있다. 대표적인 오차 요소로 위상이동장치에 따른 부정확함이다.[12] 위상 이동 장치로써 주로 사용되는 piezo-electric transducer의 경우만 보더라도 전압에 따른 위상 이동 량이 정확히 선형적 관계를 보이지 않으며 반복에 결과에 있어서도 그 이동량을 신뢰하기가 어렵다는 것이 위상 이동 장치로써 중대한 오차 요소로 지목할 수 있다. 이러한 오차를 해결하기 위한 방법으로 위상 이동량을 감시하기 위해 기록 장치를 추가하는 방법이 고안되기도 하였다.[9,12] 이처럼 추가적인 기록장치 없이 정량적 위상 이동량을 알아내기 위해 측정된 간섭무늬로부터 그 이동량을 추정하는 것이 바람직하다.

위상 이동 오차를 해결하기 위한 지속적인 노력들이 지금껏 있어 왔으나, 대계의 경우 위상이동 장치의 성능 및 간섭무늬의 제약을 받거나 특정한 활용 분야에서 효과적인 것들이 대부분이었다.

초기 위상 검출 방법에서는 위상이동 장치의 비선형성을 상대적으로 작은 것으로 가정고 측정을 실시하였다.[7,13] Optical testing과 같은 활용 분야에서 간섭무늬에 Fringe가 있는 것을 이용하였다.[1] 기록하는 장치의 위치에 따른 Brightness 변화는 Spatial carrier인 변조 정현파 함수로 기술 된다. 상대적으로

작은 수의 간섭무늬를 이용하는 알고리즘은 *spatial carrier*의 정보를 이용한다. Brug의 개발 방법은 다음과 같다. 두 위상이 이동한 간섭무늬 간의 *correlation* 으로부터 위상 정보를 측정 하였다.[14] 이러한 방법의 결점은 단순히 평균 영역에서 *fringe*의 존재가 정수배가 될 수 있다는 것이다. 또 다른 방법으로 두 *fringe pattern*을 활용하여 구속 되지 않은 간섭무늬에 두 개의 국부 극값을 이용하는 것이다.[15] 이외의 응용 분야에서는 *fringe pattern*의 공간 주파수 대역폭이 굉장히 좁다. 이 경우, Goldberg등이 제안했던 푸리에 변환 방법이 가장 실용적이다.[16] 그러나 *speckle pattern interferometry*나 위상 이동을 이용한 홀로그래피와 같은 응용분야 에서는 간섭무늬에 대한 *spatial carrier*가 존재 하지 않음으로 기준파에 대한 위상 이동량을 결정하는 것이 쉽지 않다.

Okada가 제기한 기준광의 위상 움직임을 결정하는 가능성 제시 이후,[17] *iterative least square method*는 지속적으로 개량되어 왔다. 실용적인 방법으로 Kim과 Kong에 의해 개발되었고,[18] Kim과 Kong에 의해서 방법이 향상되었다.[19] 이 방법은 위상이동 장치의 성능이나 간섭무늬의 모양에 거의 제한 받지 않는다. 그러나 5장 이상 위상이 이동된 *intensity* 정보를 필요로 하며 많은 전산량으로 느린 점이 한계이다.

이에 정확하며 빠른 간섭무늬 모양과 비교적 위상 이동 장치의 성능에 따른 의존도가 작은 위상 측정 방법이 필요하다. 이런 요구를 만족하는 위상 측정 방법으로 *intensity correlation modeling*을 사용한 위상 검출 방법이 있다.[20]

*Intensity correlation modeling*을 활용한 위상 측정 방법은 *correlation matrix*를 활용하여 간섭무늬에 따른 상호 관계를 기술한다. 이러한 위상 검출 방법은 빠른 시간 안에 물체파와 기준파 사이의 위상 이동량, 상대 위상 차이 등을 정확하게 계산할 수 있다.

1.3.2 위상 이동 디지털 홀로그래피-마이크로 스코프

물체에 대한 광학적 3차원 측정은 다양 분야에서 필요로 하는 기술이다. 기존의 2차원적 광학 측정 방법은 렌즈를 활용하여 상을 이루며 기계적이며 정교한 초점 조절을 요구하였다. 이에 반해 디지털 홀로그래피 기술은 결상 렌즈가 필요치 않는다. 또 렌즈에 의한 정밀하고 기계적인 초점 조절이 필요치 않다. 이런 홀로그래피의 특성은 다양한 분야에서 큰 이점으로 적용될 수 있다.[21-23] 만약 첨단 분야나 바이오 분야에서 미세 구조를 관찰하는 도구로 홀로그래피가 응용다면 기존의 렌즈를 사용한 결상계가 원천적으로 가지고 있는 렌즈 오차를 고려하지 않아도 되기 때문이다.[24-30] 이는 대상체가 미세해질수록 거울과 렌즈로 이루어진 광학 측정 장치가 가지고 있는 각각 광학적 요소에서 발생하는 오차로부터 자유로움을 말한다. 또 디지털 홀로그래피 기술의 장점으로 기존 방법인 렌즈를 이용한 기계적인 초점 조절이 필요치 않다. 시스템이 가지고 있는 초점 심도로부터 대상 물체를 자유로이 재생해 낼 수 있다. 이는 높은 배율의 확대로부터 초점 심도가 작아짐을 생각한다면 중요한 장점된다. 이처럼 광학 측정 기술로써의 3차원 측정에 따른 장점은 지금에 있어서 디지털 홀로그래피의 개발 가능성을 더욱 부각시키고 있다.[31-33]

Off-axis 홀로그래피는 간섭을 일으키는 물체파와 기준파 중 한개의 파면을 기울여 $d_{\text{part}} - 0^{\text{th}}$ order intensity 및 허상을 분리할 수 있었다. 그러나 이러한 Off-axis 기술은 CCD의 성능을 살리지 못하는 단점을 가지고 있다.[39] 구하고자 하는 상과 원치 않는 상을 구분하기 위해서는 대상체는 CCD에서 충분히 먼 거리에 위치해야 한다. 이는 대상체로부터 회절된 물체파가 충분히 CCD 이미지 플랜에 입사하지 않을 가능성이 높다. 경사각이 커질 때 CCD의 pixel 크기보다 기준파와 물체파의 간섭무늬 간격은 좁아진다. 그래서 간섭무늬 정보가 CCD내의 pixel 에서 평균되어 정보가 없어지는 결과가 나타나는 것이다. Off axis 홀로그래피는 원하지 않는 상과 원하는 상을 분리 하는데에는 효과가 있으나 CCD 성능을 살릴 수 없기에 상의 저하를 피할 수 없

다.[40-45] Inline 홀로그래피에서 생기는 허상과 dc intensity를 제거하려는 다양한 시도가 있었다. 과장 조절이 가능한 Laser를 활용한 wave-length scanning 홀로그래피가 제시되었다. 그러나 과장축을 포함한 3차원 퓨리에 변환으로 인한 계산상 부담이 너무나 컸다.[43]

Yamaguchi는 앞에서 말한 다양한 제한들과 별개의 새로운 위상이동 디지털 홀로그래피를 제시하였다.[9,10] 위상이동 간섭계를 활용하여 CCD 이미지 평면상에서 물체파의 복소진폭을 직접 측정하는 기법이다. 기준파를 미리 알고 있는 정량적인 값만큼 위상이동을 통해 얻은 간섭무늬의 관계를 활용하여 파면의 복소진폭의 분포를 검출한다. 이러한 복소진폭의 분포는 PC에서 퓨리에 변환되어 임의의 평면에 상으로 재생된다. 광원이 B.S를 통해 두 개의 경로로 갈라져 기준 beam은 PZT(piezo-electric transducer)에 의해 위상이 이동되고 물체 beam은 측정하고자 하는 대상체에 반사 되거나 통과된다. 다시 두 beam은 CCD 이미지 플랜에서 간섭무늬로써 기록된다. 여기에 기록된 간섭무늬는 PC에서 복소진폭으로 계산되어지며 다시 상으로 재생된다. 위상이동 디지털 홀로그래피는 허상과 dc intensity가 없는 우수한 상을 제공하고, off-axis가 아닌 inline 홀로그래피로 높은 분해능을 가지고 있다. 위상이동 디지털 홀로그래피가 지금의 CCD 성능을 충분히 활용할 수 있는 장점을 가지고 있으나 위상이동 장치에 따른 오차 한계를 가지고 있다. [24,26]

먼저 기술한 것처럼 위상이동 장치의 부정확성을 벗어나기 위한 방법들이 제시되어왔다. 대표적으로 위상 이동에 대한 감시를 위한 장치로 CCD 카메라를 활용하여 위상이동을 정확히 측정하는 방법이 제시되었다.[9] 이와 별개로 오차의 원인인 위상이동 자체의 횡수를 줄이려는 시도도 있었다. Object intensity, 및 reference intensity만을 기록한 후 두 파면을 간섭 시킨 intensity와 간섭 상태에서 위상을 이동시킨 intensity를 활용하여 intensity간의 연립방정식을 계산하는 것으로 물체파의 복소진폭을 구하는 방법이다. 그러나 이런 방법들은 더욱더 많은 장치를 이용하게 하여 광학계가 복잡해지거나 물체파로

부터의 회절자체가 무작위적이라는 가정에 근거한 방법으로 한계적이다.[40-43]

본 연구논문에서는 위상이동 간섭계를 활용한 위상이동 디지털 홀로그래피를 구현시켰다. Intensity-correlation modeling에 의한 위상추측 및 self calibration 알고리즘을 이용하여 물체파의 복소진폭을 검출할 것이다. 그리고 물체파의 복소진폭 으로부터 상재생을 보일 것이며 이를 활용한 간섭무늬 안정화 현미경을 구현할 것이다.

2.1장에서는 자유공간 내에서 파의 회절과 진행 이론을 이루는 수학적 기술에 대해서 다룰 것이다. 2.2장은 2.1장에서 다룬 파의 회절과 진행 이론을 활용하여 결상과 물체파의 복소진폭 으로부터 실제 상의 재생 원리에 대해 기술할 것이다.

3.1장에서는 디지털 홀로그래피에 적용할 안정화 시스템의 구현 방법을 비롯한 이론을 소개할 것이며 안정화 시스템의 작동 원리 및 기본 실험에 대해서 결과를 보일 것이다. 3.2장에서는 투과형 홀로그래피 시스템을 구성하고 기초 실험을 통해 데이터를 획득 할 것이며 3.3장 에서는 안정화 장치를 적용시킨 홀로그래피 시스템을 장착한 구현할 것이다.

4.1 시료로 쓰이는 적혈구에 대한 간단한 소개와 resolution target, Co2 Spot, micrometer에 대해서 간단하게 소개하고 안정화 장치가 구현된 홀로그래피 시스템을 이용해 측정한 측정 결과를 기술할 것이다.

제 2 장 이론적 배경

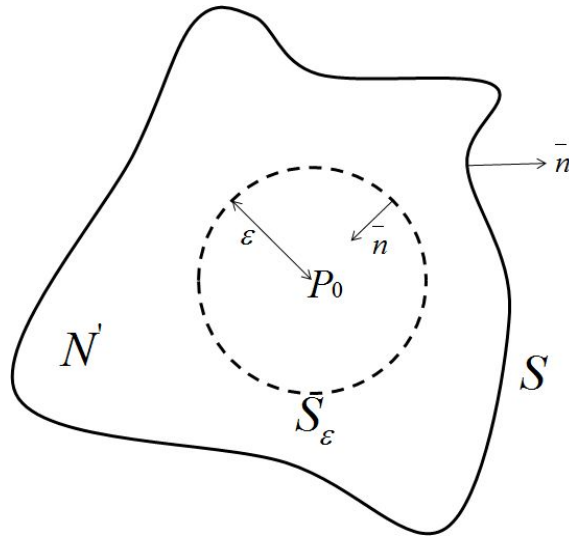
2장에서는 위상 이동 디지털 홀로그래피의 기초가 되는 여러 이론에 따른 수학적 기술 내용을 보일 것이다. 2.1장에서는 파동으로서 빛이 가지고 있는 중요한 특징을 수학적 기술로 파동의 진행과 회절 이론에 대해 다룰 것이다. 2.2장에서는 재생과 결상에 대하여 기술할 것이다. 2.3장에서는 위상 결필침에 대해서 기술할 것이다.

2.1 파동의 전파 및 회절이론

물리적 현상중 하나인 회절은 파동의 전파를 다루는 공학 및 물리학의 다양한 분야에서 주요한 역할을 하고 있다. 무엇보다 광학 측정이나 광학적 신호 처리 과정에 대해 이해하고 분석하는데 있어서 회절의 특성과 회절이 가지는 한계를 이해하는 것이 필수적이다. 이것은 디지털 홀로그래피에서 회절된 빛의 전파가 어떻게 전파되어 홀로그램에 기록되는냐는 그 기록된 홀로그램으로부터 다시 상을 재생하는데 중요한 상호 관계를 가진다. [33]

2.1.1 키르-호프 적분 정리

회절 문제에 대한 키르호프의 formulation은 임의의 공간에서의 동차의 파동 방정식에 의한 해를 해의 값과 임의의 공간을 둘러싼 닫혀진 면에서 1차도함수로 표현한 적분정리에 그 기초를 두고 있다.



[Fig. 2.1] Surface of integration

[Fig 2.1]과 같이 관찰 지점을 P_0 라고 하고 P_0 를 둘러싼 임의의 닫힌 면을 S 라고하고 임의의 점 P_1 에서 단위진폭의 구면파를 G 라고 하면 식(2.1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$G(P_1) = \frac{\exp(jkr_{01})}{r_{01}} \quad (2.1)$$

위 식에서 r_{01} 은 P_0 에서 P_1 까지의 거리를 나타내 주는 벡터이다. Green Theorem에서 쓰기위해 G 는 닫혀진 부피 V 에서 연속이어야 한다. 그러므로 P_0 에서의 불연속성을 제외하기 위해서 ϵ 의 반지름을 가지고 있는 작은 구면 S_ϵ 가 P_0 둘레에 삽입된다. 그러면 S_ϵ 와 S 사이의 공간, V' 에서 Green Theorem이 적용된다. 부피 V' 에서의 Helmholtz 방정식을 만족하는 교란 G 는 간단히 퍼져 나가는 구면파이다.

Helmholtz 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla^2 + k^2)G = 0 \tag{2.2}$$

Helmholtz 방정식 $(\nabla^2 + k^2)U = 0$ 를 만족하는 임의의 U 를 도입하여 G 와 U 를 Green Theorem에 대입하면 다음과 같다.

$$\iiint (G\nabla^2 U - U\nabla^2 G)dv = 1 \iiint (GUK^2 - UGk^2)dv \equiv 0 \tag{2.3}$$

식(2.3)과 같이 계산 결과가 0 이며 Green Theorem의 다른 한 변 또한 0이다. 그러므로 식(2.4)와 같이 전개할 수 있다.

$$\iiint (G\frac{\partial U}{\partial n} - U\frac{\partial G}{\partial n})ds = 0 \tag{2.4}$$

$$- \iiint (G\frac{\partial U}{\partial n} - U\frac{\partial G}{\partial n})ds = \iint (G\frac{\partial U}{\partial n} - U\frac{\partial G}{\partial n})ds$$

이제 S' 상에 존재하는 일반적인 P' 에 대해서 식(2.5)와 같이 전개할 수 있다.

$$G(P_1) = \frac{\exp(jkr_{01})}{r_{01}} \tag{2.5}$$

$$\frac{\partial G(P_1)}{\partial n} = \cos(\bar{n}, \overline{r_{01}}) \left(jk - \frac{1}{r_{01}} \right) \frac{\exp(jkr_{01})}{r_{01}}$$

$\cos(\bar{n}, \overline{r_{01}})$ 는 바깥쪽으로 향하는 단위 수직 벡터 \bar{n} 과 벡터 $\overline{r_{01}}$ 간의 각에 대한 코사인 값이다. P_1 이 S_e 상에 존재하고, $\cos(\bar{n}, \overline{r_{01}}) = -1$ 인 특정한 경우에 대해 식(2.5)는 식(2.6)과 같이 기술할 수 있다.

$$G(P_1) = \frac{e^{jk\epsilon}}{\epsilon} \tag{2.6}$$

$$\frac{\partial G(P_1)}{\partial n} = \frac{e^{jk\epsilon}}{\epsilon} \left(\frac{1}{\epsilon} - jk \right)$$

ϵ 가 무한히 작아진다고 하면, P_0 에서의 함수 U 의 연속성은 식(2.7)과 같은 기술을 가능하게 해준다.

$$\iint \left(G \frac{\partial U}{\partial n} - U \frac{\partial G}{\partial n} \right) ds = 4\pi\epsilon^2 \left[\frac{\partial U(P_0)}{\partial n} \frac{e^{jk\epsilon}}{\epsilon} - U(P_0) \frac{e^{jk\epsilon}}{\epsilon} \left(\frac{1}{\epsilon} - jk \right) \right] = -4\pi U(P_0) \tag{2.7}$$

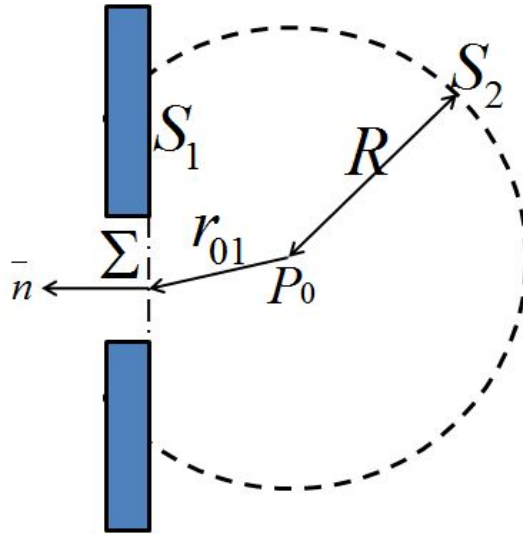
위의 결과를 식(2.4)에 대입하여 식(2.8)과 같은 결과를 구할 수 있다.

$$U(P_0) = \frac{1}{4\pi} \iint \left\{ \frac{\partial U}{\partial n} \left[\frac{\exp(jkr_{01})}{r_{01}} \right] - U \frac{\partial}{\partial n} \left[\frac{\exp(jkr_{01})}{r_{01}} \right] \right\} ds \tag{2.8}$$

식(2.8)의 결과가 헬름홀츠와 키르호프의 적분을 정리한 것이며 회절에 대한 스칼라 이론발전에 중대한 역할을 했다.

2.1.2 프레넬 키르-호프 회절 식

이제 구멍에 의해 회절 되는 문제를 생각해 보자. [Fig 2.2]에서 파동이 왼쪽으로부터 스크린과 구멍에 의해 교란된다고 가정할 때 Screen 뒤의 위치 p_0 에서의 field를 계산하겠다.



[Fig. 2.2] Diffraction by a flat screen with an opening

P_0 에서의 field를 계산하기 위해서 헬름홀츠와 키르호프의 적분 정리를 응용해야 한다. 계산이 성공적으로 이루어지기 위한 적분면 S 를 다음과 같이 정한다. Screen 뒤의 닫힌 면을 S_1 이라고 하고 P_0 를 중심으로 하는 반지름 R 의 구면을 S_2 라고 하자. 그러면 전체 닫힌 면, S 는 S_1 와 S_2 의 합이다. 식 (2.8)에 적용해 보자.

$$U(P_0) = \frac{1}{4\pi} \iint \left\{ \frac{\partial U}{\partial n} G - U \frac{\partial}{\partial n} G \right\} ds, \text{ where } G = \frac{\exp(jkr_{01})}{r_{01}} \quad (2.9)$$

반지름 R 이 증가함에 따라 S_2 는 커다란 반구와 같이 된다. U 와 G 가 $1/R$ 로 감소하기 때문에 S_2 에서 면에 대한 적분을 할 경우 대부분 0이라고 생각하기 쉽다. 그렇지만 R 이 증가함에 따라 적분 면 역시 R^2 로 증가하여 쉽게 결론을 내릴 수 없다. 이 문제에 대해서는 좀 더 면밀히 알아보자

$$G = \frac{\exp(jkR)}{R} \quad (2.10)$$

식(2.5)로부터 상대적으로 큰 R 에 대해 아래와 같이 근사하여 적용할 수 있다. 근사하면 식(2.11)과 같이 전개할 수 있다.

$$\frac{\partial G}{\partial n} = \left(jk - \frac{1}{R} \right) \frac{\exp(jkR)}{R} \cong jkG \quad (2.11)$$

그러면 적분은 식(2.12)와 같이 간단해진다.

$$\iint \left[G \frac{\partial U}{\partial n} - U(jkG) \right] ds = \int_{\Omega} G \left(\frac{\partial U}{\partial n} - jkU \right) R^2 d\omega \quad (2.12)$$

위 식(2.12)에서 Ω 는 S_2 의 호에 대한 입체각이다. 이제 $|RG|$ 는 S_2 에 균일하게 구속되어 있다. 그러므로 S_2 에서의 전체 적분은 교란된 U 가 다음과 같은 특성을 가질 경우 R 이 무한대로 증가함에 따라 소거된다.

$$\lim_{R \rightarrow \infty} R \left(\frac{\partial U}{\partial n} - jkU \right) = 0 \quad (2.13)$$

위의 조건이 조머펠트 복사조건이다. 틸므로 조사된 빛이 교란된다 해도 그 빛은 구면파들의 선형 조합으로 구성되어 있다. 이에 면 S_2 에서 위 적분이 0임을 확신할 수 있다.

Screen 뒤의 면 S_1 에서의 적분을 살펴보자. 우리는 P_0 에서 교란을 그 교란과 Screen 뒤의 면 S_1 에서의 1차 미분 값으로 나타낼 수 있다.

$$U(P_0) = \frac{1}{4\pi} \iint \left(\frac{\partial U}{\partial n} G - U \frac{\partial G}{\partial n} \right) ds \quad (2.14)$$

Screen은 구멍을 제외하고는 빛이 통과할 수 없다. 그러므로 위의 적분에

대해 대부분의 기여가 뚫려져 있는 구멍에서 발생하는 것을 알 수 있다. 편의상 구멍부분을 Σ 라고 하겠다. 키르호프는 아래와 같은 가정을 도입하였다.

1. 면 Σ 에서의 field U 와 U 의 도함수 $\partial U/\partial n$ 는 정확히 일치한다.
2. 면 S_1 중 스크린 있는 부분에서의 field U 와 U 의 도함수 $\partial U/\partial n$ 는 0이다.

위의 조건은 키르호프의 경계 조건으로 알려져 있다. 위에서 말하는 두 조건을 대입하면 식(2.14)는 (2.15)와 같이 기술할 수 있다.

$$U(P_0) = \frac{1}{4\pi} \iint \left(\frac{\partial U}{\partial n} G - U \frac{\partial G}{\partial n} \right) ds \quad (2.15)$$

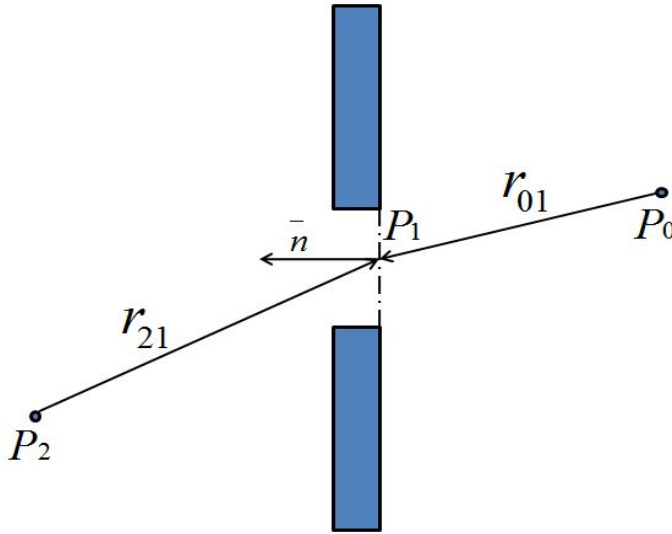
$U(P_0)$ 에 대한 표현을 좀 더 간략히 기술하기 위해 다른 하나의 조건을 더 도입한다. 구멍으로부터 관찰 지점 P_0 까지의 거리 r_{01} 가 파장에 비해서 크다는 조건이다. 그렇다면 식(2.5)는 $k \gg \frac{1}{r_{01}}$ 라는 가정 하에 아래와 같이 된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial G(P_1)}{\partial n} &= \cos(\bar{n}, \bar{r}_{01}) \left(jk - \frac{1}{r_{01}} \right) \frac{\exp(jkr_{01})}{r_{01}} \\ &\cong jk \cos(\bar{n}, \bar{r}_{01}) \frac{\exp(jkr_{01})}{r_{01}} \end{aligned} \quad (2.16)$$

위의 근사를 식(2.5)과 함께 식(2.15)에 대입하여 정리하면 식(2.17)과 같은 결과를 구할 수 있다.

$$U(P_0) = \frac{1}{4\pi} \iint \frac{\exp(jkr_{01})}{r_{01}} \left[\frac{\partial U}{\partial n} - jk U \cos(\bar{n}, \bar{r}_{01}) \right] ds \quad (2.17)$$

구멍이 [Fig. 2.3]과 같이 P_2 에 위치하는 단일 구면파에 의해서 조사된다고 한다면.



[Fig. 2.3] Screen illuminated by point light source

P_1 에서의 field는 아래와 같이 간단히 기술된다.

$$U(P_1) = \frac{A \exp(jkr_{21})}{r_{21}} \quad (2.18)$$

벡터 r_{21} 은 [그림 2.3]에서의 P_1 과 P_2 사이의 거리를 나타낸다. 만약 r_{21} 가 파장에 비해서 크다면 식(2.17)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$U(P_0) = \frac{A}{j\lambda} \iint \frac{\exp[jk(r_{21} + r_{01})]}{r_{21}r_{01}} \left[\frac{\cos(\bar{n}, \overline{r_{01}}) - \cos(\bar{n}, \overline{r_{21}})}{2} \right] ds \quad (2.19)$$

위의 결과는 단일 점광원으로 구성된 조사에 적용될 수 있는 공식으로 프

레넬 키르호프 회절 공식으로 알려진 식이다.

프레넬 키르호프 회절은 경계 조건의 field의 세기와 수직 도함수에 동시에 적용되어야 하는 어려움을 갖고 있다. 만약에 유한한 조각에서 2차원 전위함수와 그것의 수직 도함수가 동시에 제거된다면, 그 전위함수는 전체 영역에서 제거된다. 이것을 3차원 파동 전파에 적용시킨다. 그럴 때 파동 방정식의 해가 유한한 조각에서 제거된다면 전체 영역에서도 마찬가지로 제거되어야 함을 예측할 수 있다. 앞서 보았던 문제에서 구멍 뒤에서 field가 zero가 되어야 한다는 결론을 도출할 수 있다.

솜메르펠트는 식(2.14)에서의 G가 광원뿐 아니라 Screen 반대편에 위상이 180° 차이가 있는 mirror source가 존재한다는 아이디어를 도입해 문제를 해결하였다. 결과식은 다음과 같다.

$$U(P_0) = \frac{1}{j\lambda} \iint U(P_1) \frac{\exp(jkr_{01})}{r_{01}} \cos(\bar{n}, \overline{r_{01}}) ds \quad (2.20)$$

$U(P_1)$ 이 [그림 2.3]에서의 P_2 에 위치한 구면 점광원이라고 한다면 식 (2.21)과 같이 전개할 수 있다.

$$U(P_1) = A \frac{\exp(jkr_{21})}{r_{01}} \quad (2.21)$$

$$U(P_0) = \frac{A}{j\lambda} \iint \frac{\exp[jk(r_{21} + r_{01})]}{r_{21}r_{01}} \cos(\bar{n}, \overline{r_{01}}) ds$$

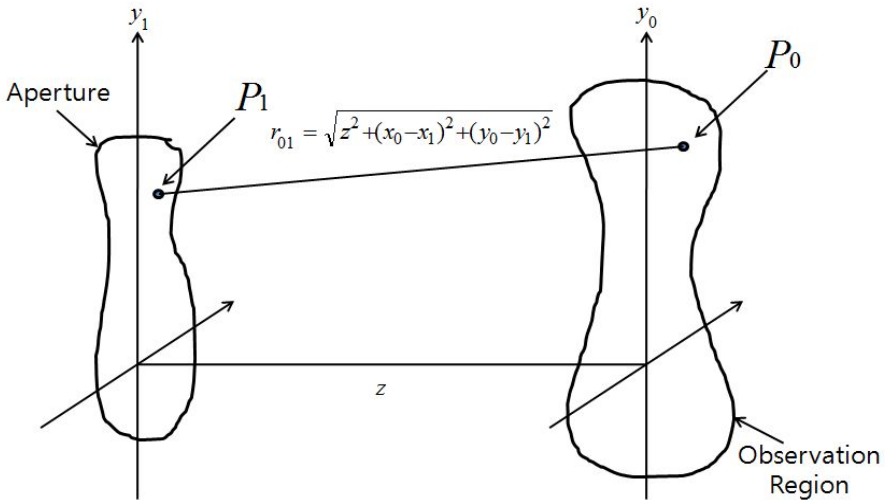
식(2.21)은 레일리-솜메르펠트 회절 공식으로 알려져 있다. 위의 식(2.20)은 선형성을 고려하여 식(2.22)와 같은 중첩적분으로 표현할 수 있다.

$$U(P_0) = \iint h(P_0, P_1) U(P_1) ds$$

$$h(P_0, P_1) = \frac{1}{j\lambda} \frac{\exp(jkr_{01})}{r_{01}} \cos(\bar{n}, \bar{n}_{01}) \quad (2.22)$$

2.1.3 호이겐스-프레넬 원리

그림[2.4]와 같은 유한한 Aperture를 고려하자.



[Fig. 2.4] Coordinate system of Fresnel formula

Aperture Σ 는 무한히 넓은 불투명 스크린에 위치한다. [Fig. 2.4]에서와 같이 Screen은 평면이며 직교 좌표계 (x_1, y_1) 을 사용한다. 관찰 영역은 스크린에서 z 만큼 떨어진 거리에 위치한다. 스크린 평면과 평행한 (x_0, y_0) 좌표계의 평면이다. 위의식(2.22)을 도입하여 (x_0, y_0) 에서 field amplitude를 아래와 같이 표현한다.

$$\begin{aligned}
 U(x_0, y_0) &= \iint h(x_0, y_0; x_1, y_1) U(x_1, y_1) dx_1, dy_1 \\
 h(x_0, y_0; x_1, y_1) &= \frac{1}{j\lambda} \frac{\exp(jkr_{01})}{r_{01}} \cos(\bar{n}, \overline{r_{01}})
 \end{aligned} \tag{2.23}$$

Aperture Σ 외에 영역에서 complex amplitude가 0이라는 키르호프 경계 조건을 대입하면 (2.23)식의 적분 영역을 무한대로 하여도 상관없다. 그러면, 식 (2.23)은 다음과 같이 전개할 수 있다.

$$U(x_0, y_0) = \iint h(x_0, y_0; x_1, y_1) U(x_1, y_1) dx_1 dy_1 \tag{2.24}$$

관찰점과 구멍 사이 거리는 Aperture Σ 의 maximum linear dimension보다 크다고 가정한다.

이러한 가정에 의해 $\cos(\bar{n}, \overline{r_{01}}) \cong 1, \frac{1}{r_{01}} = \frac{1}{z}$ 이라고 근사할 수 있다. 그리고 이를 대입한 식(2.23)의 $h(x_0, y_0; x_1, y_1)$ 은 다음과 같다.

$$h(x_0, y_0; x_1, y_1) \cong \frac{1}{j\lambda z} \exp(jkr_{01}) \tag{2.25}$$

Exponent의 r_{01} 은 간단히 z 라고 근사할 수 없다. 왜냐하면, r_{01} 에 곱해지는 k 의 값에 따른 정보가 없기 때문이며 만약 k 의 값이 크다면 위상에 있어서 2π 보다 큰 오차가 발생할 수 있다.

보다 간단한 결과를 위해 exponent의 r_{01} 에 대해 아래와 같은 전개에 의한 근사를 대입한다.

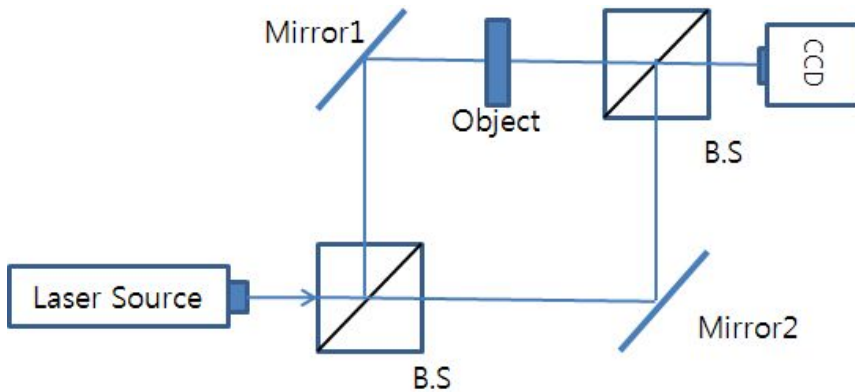
$$\begin{aligned}
 r_{01} &= \sqrt{z^2 + (x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2} \\
 &= \sqrt[3]{1 + \left(\frac{x_0 - x_1}{z}\right)^2 + \left(\frac{y_0 - y_1}{z}\right)^2}
 \end{aligned}$$

$$\cong z \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{x_0 + x_1}{z} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{y_0 - y_1}{z} \right)^2 \right] \quad (2.26)$$

전개 후 2차 항까지의 결과를 $h(x_0, y_0; x_1, y_1)$ 에 대입하면 식(2.27)과 같은 프레넬 근사를 얻을 수 있다.

$$h(x_0, y_0; x_1, y_1) \cong \frac{\exp(jkz)}{j\lambda z} \exp \left\{ j \frac{k}{2z} [(x_0 - x_1) + (y_0 - y_1)^2] \right\} \quad (2.27)$$

2.2 이미지 형성 및 재구성

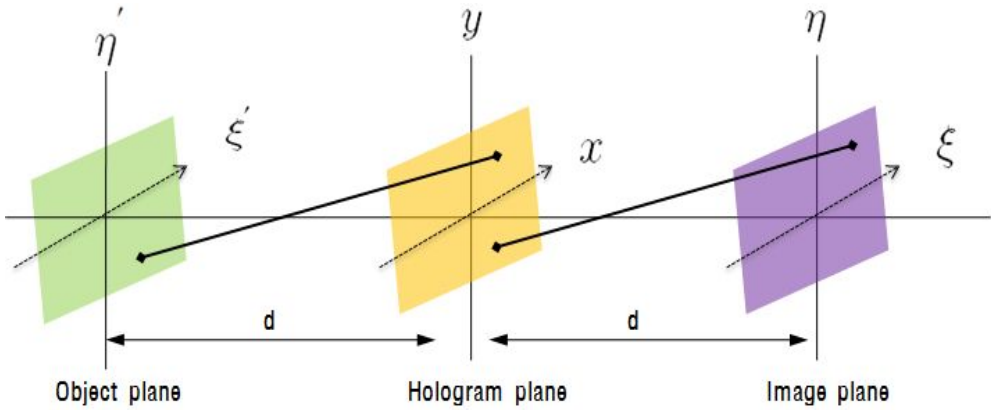


[Fig. 2.5] A schematic set up of the above two-phase moving digital holography

위상 이동 Digital holography의 일반적인 set up은 [Fig. 2.5]와 같다. 기준파는 컴퓨터에 의해 제어되는 위상이동장치 - PZT(piezo-electric transducer)를 거치고 물체파는 측정하고자 하는 대상체를 통과하여 합쳐져서 CCD 이미지 플랜에 홀로그램으로 기록된다.

2.2.1 이미지 형성

결상을 설명하기 위해 일반적으로 [Fig. 2.6]과 같은 좌표계를 도입한다. 측정하고자 하는 대상체가 위치한 평면을 물체평면이라고 한다면 홀로그램이 기록되는 CCD 이미지 플랜이 위치한 평면을 홀로그램평면 혹은 CCD 이미지 평면이라고 한다.



[Fig 2.6] Coordinate systems for Digital Holography

물체 평면에서의 complex amplitude가 $U_0(x',y')$ 라고 하면, CCD 이미지평면에서의 complex amplitude $U(x,y)$ 는 푸레넬 변환에 의해 아래와 같이 구할 수 있다.

$$U(x,y) = \iint U_0(x',y') \exp \left[ikz_0 + ik \frac{(x-x')^2 + (y-y')^2}{2z_0} \right] dx' dy' \quad (2.28)$$

위 식(2.28)에서의 적분은 무한대에서 수행되며 z_0 는 물체 평면과 CCD사이의 거리이다. 위에서 기술된 물체와 $U(x,y)$ 는 복수진폭 $U_R(x,y)$ 을 가지는 기준파와 합쳐진다. 여기에 합쳐진 두 파는 홀로그램 평면에서 아래와 같은 intensity 분포를 기록하게 된다.

$$I_H(x,y,\delta) = |U_R(x,y)\exp(i\delta) + U(x,y)|^2 \quad (2.29)$$

위의 식에서 δ 는 위상이동 장치에 의해서 이동된 위상을 나타내고, 아래와 같이 기술할 수 있다.

$$I_H(x, y; \delta) = |U_R|^2 + |U|^2 + 2R[U_R U^* \exp(i\delta)] \quad (2.30)$$

Intensity correlation modeling을 활용해 홀로그래프 평면에서의 물체파의 복소진폭 $U(x, y)$ 를 구한다. $U(x, y)$ 는 다시 푸레넬 변환을 이용해 아래와 같이 상평면에서의 복소진폭으로 진행이 가능하다.

$$U_1(x, y, z) = \iint U(x, y) \exp\left[ikZ + ik\frac{(X-x)^2 + (Y-y)^2}{2Z}\right] dx dy \quad (2.31)$$

위 식(2.31)에서 적분은 CCD 이미지평면으로부터 이루어진 것으로 CCD의 크기에 대해 행하여진다. 물체 평면에서 전파된 복소진폭 $U(x, y)$ 를 식(2.31)에 대입하게 되면 식(2.32)와 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$U_I(X, Y, Z) = \exp\left[ik\left(z_0 + Z + \frac{X^2 + Y^2}{2Z}\right)\right] \iint \iint U_0(x', y') \exp\left\{ik\left[\frac{x^2 + y^2}{2}\left(\frac{1}{z_0} + \frac{1}{Z}\right) + \frac{x'^2 + y'^2}{2z_0} - x\left(\frac{x'}{z_0} + \frac{X}{Z}\right) - y\left(\frac{y'}{z_0} + \frac{Y}{Z}\right)\right]\right\} dx dy dx' dy' \quad (2.32)$$

상평면까지의 거리 Z 를 $Z = -z_0$ 와 같이 취한다면 위의 식(2.32) exponent 안에 있는 x 와 y 의 제곱 항은 사라지고 아래와 같이 결상이 이루어진다.

$$U_I(X, Y, -z_0) = U_0(X, Y) \quad (2.33)$$

(2.33)식을 통해 물체 평면에서의 복소진폭의 분포가 상평면에서 재생되었음을 알 수 있다.

2.2.2 수치적 이미지 재구성

홀로그램에 의한 상의재생은 다음과 같이 두 가지 방법이 있다. 두 방법은 (2.31)식에 기반 한다. 첫째 방법은 exponent의 포물선 함수의 전개를 이용한 방법이다. 전개방식은 아래와 같다.

$$\begin{aligned}
 U_I(X, Y, Z) = \exp\left[ik\left(Z + \frac{X^2 + Y^2}{2Z}\right)\right] \iint U(x, y) \exp\left(ik\frac{x^2 + Y^2}{2Z}\right) \\
 \times \exp\left(-ik\frac{Xx + Yy}{Z}\right) dx dy
 \end{aligned} \tag{2.34}$$

(2.34)식은 parabolic phase function이 곱하여진 복소진폭의 2차원 푸리에 변환으로 인식할 수 있다. 둘째 방법은 (2.31)식을 convolution 적분으로 이해하는 것이다. 즉, CCD에서 복소진폭과 parabolic phase 함수에 convolution 적분 형태라고 볼 수 있다. 그 수학적 표현은 다음과 같다.

$$\hat{U}_I(\xi, \eta; Z) = \exp[i\pi\lambda Z(\xi^2 + \eta^2)] \hat{U}(\xi, \eta) \tag{2.35}$$

식(2.30)에서의 $\hat{U}(\xi, \eta)$ 는 아래와 같이 정의 되는 $U(x, y)$ 의 Fourier transform이며 ξ 와 η 는 각각 x, y 방향의 주파수이다.

$$\begin{aligned}
 \hat{U}(\xi, \eta) &= \iint U(x, y) \exp[i2\pi(\xi x + \eta y)] dx dy \\
 \hat{U}_I(\xi, \eta; Z) &= \iint U_I(X, Y, Z) \exp[i2\pi(\xi X + \eta Y)] dXdY
 \end{aligned} \tag{2.36}$$

이 방법에서 먼저 CCD 평면에서의 복소진폭의 푸리에 변환을 구하여 (2.35)식 에서처럼 parabolic phase function에 곱한다. 다음 곱한 결과는 (2.36)식 에서의 $\hat{U}_I(\xi, \eta; Z)$ 과 동일하므로 다시 역푸리에 변환을 취함으로써 $U_I(X, Y, Z)$ 를 얻을 수 있다.

그 결과는 다음과 같다.

$$U_I(X, Y, Z) = \iint \widehat{U}_I(\xi, \eta; Z) \exp[-i2\pi(\xi X + \eta Y)] d\xi d\eta \quad (2.37)$$

2.3 결별침

복소함수의 위상은 주요 값 범위에서만 유일하게 정의 된다는 것은 잘 알려져 있다. 주요 값에서 원래의 위상 값을 복구하는 것이 **phase unwrapping**이다. 위상 결별침은 **sampling**을 위한 기준인 **Nyquist rate**에 의한 최소 **sampling**비를 만족한 **wrapped**에 위상과 **unwrapped**의 위상 관계식은 (2.38)과 같고 실제 위상은 $\phi(x)$ 이다.[68-69]

$$W\{\phi(a)\} = \Phi(a) = \phi(a) + 2\pi k \quad (2.38)$$

위 식에서 W 는 **wrapping**의 연산자이고, $\Phi(x), \phi(x)$ 는 각각의 **wrapped**의 위상과 재생되어진 위상이다. 이때 k 는 정수, a 는 **sampling**에 따른 상수를 말한다. **wrapping** 연산자는 항상 $\Phi(x)$ 가 $-\pi \leq \phi(a) \leq \pi$ 가 되게 하며 이토의 계산에 의해 **wrapped** 위상과 실제 위상은 (2.39)과 같다.

$$\Delta \phi(a) = \phi(a+1) - \phi(a), \Delta k(a) = k(a+1) - k(a) \quad (2.39)$$

(2.38)식과 (2.39)식을 이용하여 **wrapped**에 위상차를 나타내면 식(2.40)이 된다.

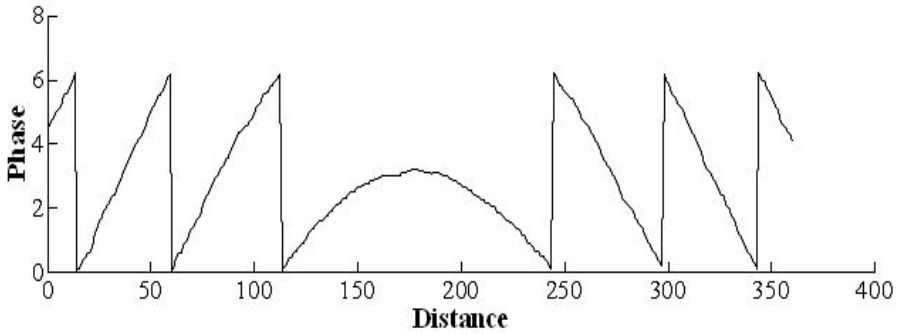
$$\Delta [W\{\phi(a)\}] = \Delta \phi(a) + 2\pi \Delta k_1(a) \quad (2.40)$$

식 (2.40)를 다시 **wrapped** 연산자에 적용하게 되면 식 (2.41)이 된다.

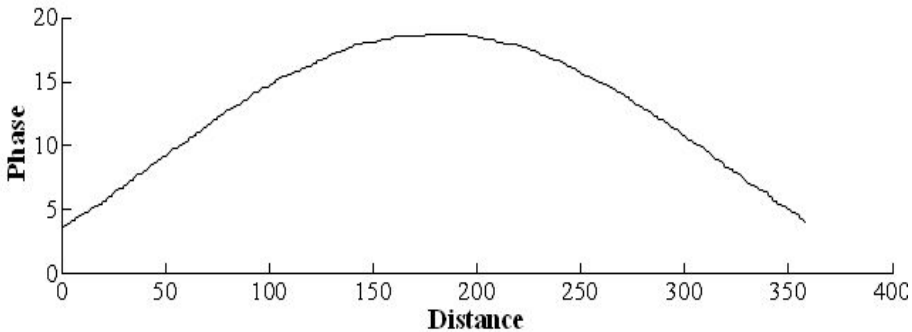
$$W[\Delta \{W(\phi(a))\}] = W\{\Delta(\Phi(a))\} = \Delta\{\phi(a)\} + 2\pi[\Delta k_1(a) + k_2] \quad (2.41)$$

식 (2.41)에서 k_1 과 k_2 는 두 번의 wrapped 연산자를 이용하여 나타난 것이며 wrapped에 위상차가 다음 구간에 존재 하게 해준다.

$$-\pi \leq \Delta\{\phi(a)\} \leq \pi \quad (2.42)$$



(a)



(b)

[Fig 2.7] 1-D phase Unwrapped

위상이동으로 얻어진 변형량을 정량적으로 나타내는 위상은 Arc-tangent 함수로 계산이 되며 위의 Fig 2.7 그림과 같이 불연속성을 가진 톱니바퀴 형상으로 나타난다. 이러한 불연속성을 해결하기 위하여 불연속성을 연속성으로 변환하여 위상변화에 따라 변형 정보를 얻기 위해 Phase unwrapping 과정을

거치게 된다. 대상물의 형태가 기하학적이고 노이즈가 많은 위상지도는 이미지의 깨짐 현상을 비롯한 이미지 왜곡이 발생하여 해석하는데 많은 어려움이 있다. 결필침은 위상을 얻기 위하여 사용된 Arc-tangent 함수가 가지고 있는 불연속성을 해결하기 위한 불연속 변위 값을 연속변위 값으로 변환해 주는 과정이다. 먼저 Arc-tangent 함수는 $0 \sim \pi$ 의 주기로 불연속 됨으로 그 주기를 $0 \sim 2\pi$ 로 연장하고, 또 연속 위상으로 변환을 위한 결필침은 (2.43)식을 이용하여 구하게 된다.

$$\phi_{unw} = \phi_w + (2\pi \times N) \quad (2.43)$$

위 식(2.43)에서 ϕ_{unw} : Unwrapped Phase, ϕ_w : Wrapped phase, N : Fringe order 이며 Unwrapping을 위한 차수(N) 결정은 위상전후 값을 비교하여 단차가 큰 것을 찾는 방법을 선택한다. 각각의 Pixel에 대한 전후의 위상 값을 비교하여 임의로 정한 기준 값과 비교하여 조건 만족시 N 을 증가 하거나 감소시키는 방식으로 Fringe order을 구하게 된다.

최종변위 값은 광 간섭계의 기하학적 구성에 따라 Sensitive vector을 고려하여 구하게 된다.[71,72]

제 3 장 실험 장치

3.1 안정화 간섭계

3.1.1 안정화 간섭계 원리

주변의 온도 및 진동 변화 등 여러 외부적인 요인에 의하여 측정하고자 하는 물체로부터 물체빔과 기준 레이저 빔에 의해 생긴 간섭무늬가 불규적으로 변화가 일어날 나게 경우 측정하고자 하는 물체 표면의 정확한 3차원 형상 구조를 얻을 수 없다. 간섭무늬계의 흔들림으로 인한 진동 및 외란 요인을 정밀하게 제거할 필요가 있다. 불안정한 레이저 간섭계의 단점을 보완하기 위해서 진동 및 외란에 의한 신호의 위상과 기준이 되는 레이저 위상사이 차이의 변화를 획득하여 Closed-loop 회로를 이용한 기준이 되는 파의 길이를 변화하여 위상 변화 상태를 제거하여 간섭계를 안정화 시킬 수 있다. 위상 차이를 비교하여 기준 레이저 간섭계 빔과 또 다른 레이저 간섭계 빔은 기준 레이저에 따른 위상 변화를 측정하기 위한 신호 레이저 간섭계 빔으로 사용한다. 외부 섭동에 교란된 간섭 신호를 PD(photo diode) 또는 광 검출기를 사용하여 작은 위상 변화를 측정한다. 레이저간섭계를 안정화시키기 위해 위상 변화 $\Delta\phi=0$ 인 조건이 만족해야하기 때문에 알맞은 Closed-loop 제어를 이용하여 레이저 간섭계의 한쪽 암의 길이를 조절하여야 한다. 레이저 간섭에 따라 생긴 간섭무늬들의 변화되는 값을 보상을 위한 참조 빔 or 물체 빔과 실제 경로를 충분히 보상하게 되면, 레이저의 간섭에 따라 생긴 간섭무늬들은 효과적으로 흔들림이 없도록 할 수 있다.

변화되는 위상변화의 시간적 변화를 고려하기 위하여 레이저간섭에 의해 생긴 두 Wave의 중첩을 고려해야 한다.

위상과 진동수가 일정한 두 파동이 중첩될 때 중첩된 파동 전장 진폭은 진폭의 합 $E = E_1 + E_2$ 가 된다. 또한, 파동의 세기는 $I \propto (E_1 + E_2)^2$ 와 같이

진폭합의 제곱에 비례한다. 비례상수를 무시하고 등호에 대한 수식을 처리하면 진동수는 동일하며 위상이 각각 다른 두 파동의 중첩에서 파동의 전장은 각각 다음과 같다.

$$\vec{E}(1) = \vec{E}_1 \exp i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t + \Psi_1) \quad (3.44)$$

$$\vec{E}(2) = \vec{E}_2 \exp i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t + \Psi_2) \quad (3.45)$$

식(3.44).(3.45) 와 같은 식의로 표현할 수 있다. 이 식에서 Ψ_1 과 Ψ_2 는 두 파동의 초기값 위상을 나타낸다. 이 식에서 초기 값의 위상이 시간의 변화된 경과에 상관없이 일정한 경우에 두 파동의중첩과 중첩된 파동의 증폭의 세기는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 I &= \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2^* \\
 &= [\vec{E}(1) + \vec{E}(2)] \cdot [\vec{E}^*(1) + \vec{E}^*(2)] \\
 &= I_1 + I_2 + 2\text{Re} \vec{E}_1 \vec{E}_2 \exp i[(\vec{k}_1 - \vec{k}_2) \cdot \vec{r} + \Psi_1 - \Psi_2] \\
 &= I_1 + I_2 + 2\text{Re} \vec{E}_1 \vec{E}_2 \cos\theta \quad (3.46)
 \end{aligned}$$

이때 나타낸 θ 는 $(\vec{k}_1 - \vec{k}_2) \cdot \vec{r} + \Psi_1 - \Psi_2$ 이다. 식(3.46) 에서 전 수식에서 두 항은 각 파동의 세기를 합한 값이며, 위식에서의 세기가 되며 레이저 간섭 항은 3번 항이 된다. 위 식의 세기를 평균한 중간 값으로 하여 이보다 더 사인파의 격자무늬가 연속적으로 생성된다. 식(3.46) 에서 두 파동간의 위상차 $\Psi_1 - \Psi_2$ 가 일정한 경우에는 θ 는 변위 r 의 함수가 되어 공간상에서 일정한 형태로의 레이저 간섭무늬가 형성된다. 위 식(3.46) 을 이용하여 수식을 정리하면 다음과 같이

$$I(t) = I_1 + I_2 \cos[\Phi_0 + \Psi(t) + k\Delta(t)] \quad (3.47)$$

ϕ_0 : 위상

ψ : Phase shift 이동 정도

$k\Delta$: Phase 변조기에 의해 움직이는 Optical Path Length

나타낼 수 있다. Phase detector의 출력 (V_{pm})은 아래와 같이 표현 된다.

$$V_{pm} = I_{pm}I(t) \quad (3.48)$$

(I_{pm} : 홀 위치에 있는 Phase detector 입력된 평균 강도)

Phase detector 신호는 두 신호가 선형적인 상태로 만나 일정한 직류전압에 해당하는 바이어스전압(V_{bi})로 변환되어진다. 증폭된 신호는 $V_{\in} = V_{pm} + V_{bi}$ 와 출력 신호는 $V_{out} = V_{\in} + V_{bo}$ 로 표현된다. 여기서 I_{amp} 는 증폭된 전압 이득 값이고 V_{bo} 는 저장된 출력 바이어스 voltage 값이다. 출력 값을 알기 위해서는 합쳐서 식(3.49)과 같이 표현 된다.

$$V_{out} = V_{bo} + I_{amp}[V_{bi} + I_{pm}\{I_1 + I_2 \cos(\phi_0 + \Psi + k\Delta)\}] \quad (3.49)$$

Closed-loop 회로가 Cross될 때 증폭 된 출력 voltage는 두 beam의 광 경로 길이의 차이의 값에 양은 $\Delta = I_{cry} V_{out}$ 로 변하여 압전소자 모듈로 보내지고 I_{cry} 은 광 경로 길이의 차로 생긴 전압으로 전환하여 이동한다.. 다음과 같이 Closed-loop 기능을 사용한 시스템은 안정화 된다.

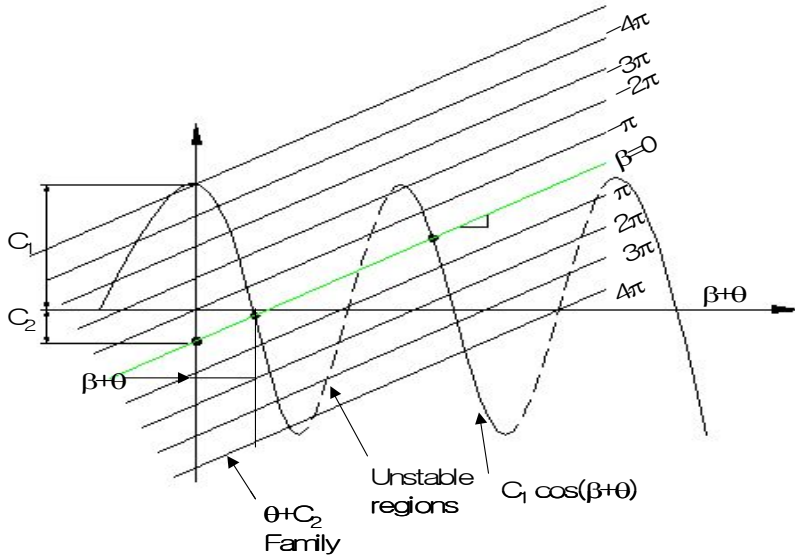
$$\Delta = I_{cry}[V_{bo} + I_{amp}\{V_{bi} + I_{pm}I_2 \cos(\phi_0 + \Psi + k\Delta)\}] \quad (3.50)$$

Closed-loop 위상 이동에서 $\theta(t) = k\Delta(t) = 2\pi\Delta(t)/\lambda$ 로 표현이 된다면 식 (3.51) 로 나타내진다.

$$C_1 \cos(\beta + \theta) = \theta + C_2 \quad (3.51)$$

위의 식(3.51) 에서 $C_1 = k I_{cry} I_{amp} I_{pm} I_2$ 는 Closed-loop 상수이고 $C_2 = -k I_{cry} (V_{bo} + I_{amp} V_{vi} + I_{amp} I_{pm} I_1)$ 은 시스템의 변화된 값인 바이어스 전압 상수 이다. $\beta(t) = \phi_0 + \Psi(t)$ 는 되먹임 없는 간섭무늬의 흔들린 위상이다.

시스템의 획득된 신호 C_1 이 증가 하면은 Cosin 곡선으로 된다. 바이어스 전압을 조정하여 C_2 의 위치로 변화하게 되고 C_2 의 위치에서 위 아래로 움직여 직선 $\beta=0$ 의 위치선상에 놓이게 된다. Fig.5.1 은 레이저 간섭무늬 패턴의 위상으로 나타낼 수 있다. $\beta+\theta$ 은 상수 C_1 의 획득된 변화 값에 대한 불완전한 위상 β 의 함수로 β 의 값이 C_2 의 값이 변화하면 곡선은 왼쪽, 오른쪽으로 이동하게 된다. 그래프에서 높은 획득된 C_1 값의 간섭된 위상은 더욱더 불안정한 상태임을 확연하게 알 수 있다. 흔들림의 정도가 충분하기 위해서는 레이저 간섭무늬의 강도가 간격 격자에 최소로 이루어질 때이다. ($\beta+\theta=180$) 흔들림이 증가 될 때 레이저 간섭무늬는 불안정한 구역을 지나가고 만약 획득된 신호가 충분하다면 레이저 간섭무늬에서 고정이 된다. ($C_1=10$) 최소 시스템 획득은 β 지역에서 안정화가 되지 못한 상태로 존재한다. 이러한 구역에서는 Closed-loop 시스템은 안정화가 되지 않고 레이저 간섭무늬는 움직이게 된다. 흔들림 위상이 계속적으로 증가 한다면 시스템은 다음 레이저 간섭무늬에서 고정이 되고, 조정은 피드백 해준다. ($C_1=1$) C_1 상수 이득은 ($C_1>0$)이 된다. 높은 획득 시스템은 흔들림이 큰 경우 레이저 간섭무늬 위상은 많이 변화 되고, 획득한 레이저 간섭무늬 패턴은 비교적으로 낮아진다.



[Fig. 3.1] Graphical solution of closed loop equation

검출기 voltage는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{pm} = RSl \int_{x_0 - \omega/2}^{x_0 + \omega/2} [I_1 + I_2 \cos(2\pi \frac{\pi}{\lambda_h})] dx_0 \quad (3.52)$$

R= 포토다이오드의 입력 저항

S= 포토다이오드 민감도

l= 포토다이오드 크기

x_0 = 포토다이오드 중심좌표

$$V_{pm} = RSl [I_1 \omega + \frac{I_2 \lambda_h}{\pi} \sin(\frac{\pi}{\lambda_h}) \cos(\frac{2\pi x_0}{\lambda})] \quad (3.53)$$

λ_h = 간섭무늬의 간격

ω = 최대 전압의 간섭무늬 변화된 증폭은

$$V_{ac} = RI_{\max} \frac{I_2}{I_1} \sin\left(\frac{\pi\omega}{\lambda_h}\right) \quad (3.54)$$

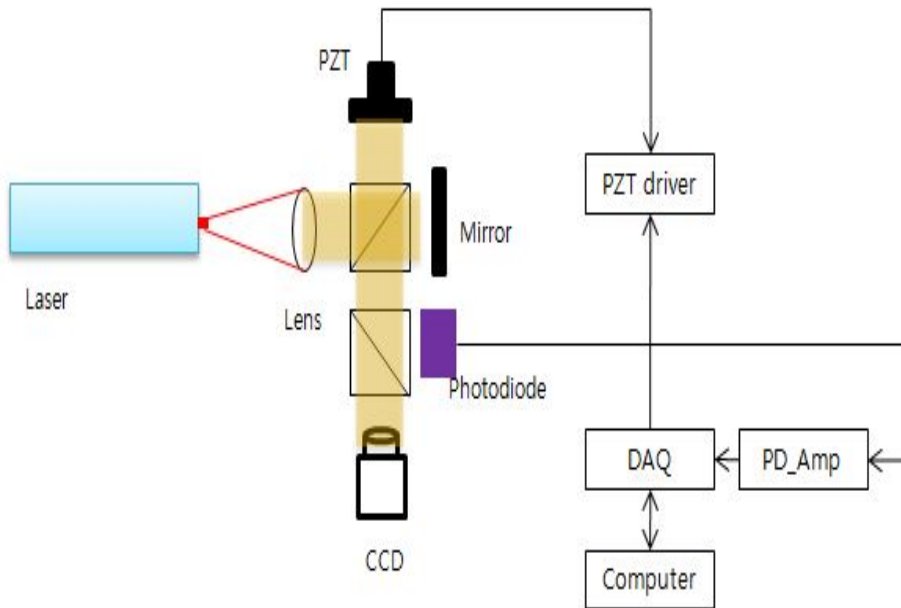
$$\omega = I_{\max} \frac{I_1}{SI}$$

광센서 또는 포토다이오드는 레이저 간섭에 생긴 간섭무늬의 움직임을 찾고, 영점이 잡히는 전압 (레이저의 간섭에 따라 생긴 간섭무늬 에러) 으로 변환한다. 레이저의 간섭에 따라 형성되는 간섭무늬 **error**가 사라질 때까지 참조 및 Object 빔의 실제로 **Optical path** 길이를 변경하는 제어 시스템으로 전압이 공급되는 원리이다.

Reference beam과 Object beam 사이에서 위상 차이의 변화되는 과정을 감지하는 **Phase detector**가 있으며 레이저의 간섭에 따라 생긴 레이저 간섭무늬 운동의 에러 전압 비례 값 제어 신호를 생성하는 **Electronic control** 부분이 있고 에러 전압에 비례하여 두개의 빔들의 관련 있는 위상을 변경하는 경우 **Phase modulator**로 구성 되어있다.

3.1.2 안정화 실험장치 구성 및 실험

디지털 홀로그래피 현미경 구성은 마흐젠더 간섭계를 사용하며 레이저로부터 나온 빔이 Beam splitter에 의해 두 방향으로 나누어 참조광과 표준시편 또는 시료를 투과한 물체광의 이미지를 확대하기 위해 현미경 대물렌즈 사용한다. 이러한 시스템에 안정화 적용하기 위해서 기초적인 Michelson 간섭계를 구성하여 [Fig. 3.2]와 같이 외부 소음이나 진동 및 외란에도 안정한 시스템을 구성하였다.



[Fig. 3.2]. Experimental setup of Stabilization interferometer

3.1.2.1. 레이저

레이저를 이용하여 간섭무늬를 만들고 632.8 nm 파장의 레이저를 이용하여 간섭무늬를 얻기 위해서 이다.

| | |
|---------------|-----------------|
| 제 조 사 | Thorlabs |
| Laser | He-Ne (632.8nm) |
| Model | HNL225R |
| Beam Diameter | 0.50 mm |

[Table. 3-1] Specifications of Laser

3.1.2.2. CCD카메라

CCD 카메라는 결상되는 면에 전하결합소자(Charge Coupled Device)의 검출능력(Detector)을 가지고 있는 카메라로 간섭무늬의 안정화 값을 분석하고 간섭무늬 이미지를 저장하는데 사용되어 진다.

| | |
|---------|----------------|
| 제조사 | FLIR |
| Model | Gs3-U3-41C6M |
| image | 2048*2048 |
| Pixel | 5.5 μ m |
| Shutter | Global shutter |

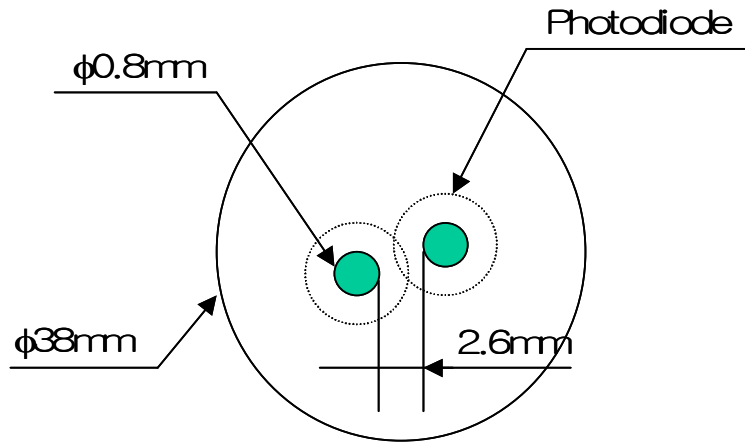
[Table. 3-2] Specifications of CCD Camera

3.1.2.3. Detector Assembly

Voltage비교를 위한 기준 간섭무늬와 참조 간섭무늬들의 Voltage차이를 검출하기 위한 장치이다.

| | |
|----------------------|----------------|
| Type | 실리콘 포토다이오드 |
| System sensitivity | 1 microwatt/cm |
| Peak sensitivity | 800 nm |
| Spectral sensitivity | 350~1100 nm |
| Detector spacing | 2.6 mm |
| Detector Size | Fig. 6.2 참조 |

[Table. 3-3] Specifications of Detector Assembly



[Fig. 3.4] Detector Assembly Appearance

3.1.2.4. Control Electronics

간섭무늬를 비교하여 신호의 차이를 조절하는 장치이다.

| | |
|----------------------|-------------|
| Frequency response | 0.5 KHz |
| Rolloff (adjustable) | 10 - 500 Hz |
| Gain(adjustable) | 1 - 100X |
| Monitor output | 0-3.5 VDC |

[Table. 3-4] Specifications of Control Electronics

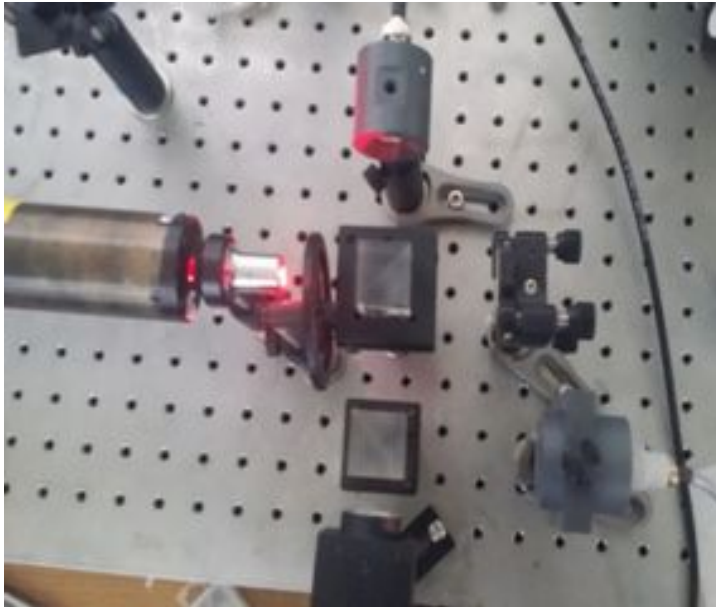
3.1.2.5. Mirror(PZT) Assembly

외부 환경이나 진동 및 외란 등에 의해 변화된 차이만큼 전압으로 변환하여 간섭무늬 안정화 시키는 장치이다.

| | |
|------------------|----------------------------|
| Diameter | 11.5 mm |
| Displacement | 5 micrometers |
| System stability | 1/20 |
| Driver | Low voltage piezo-electric |

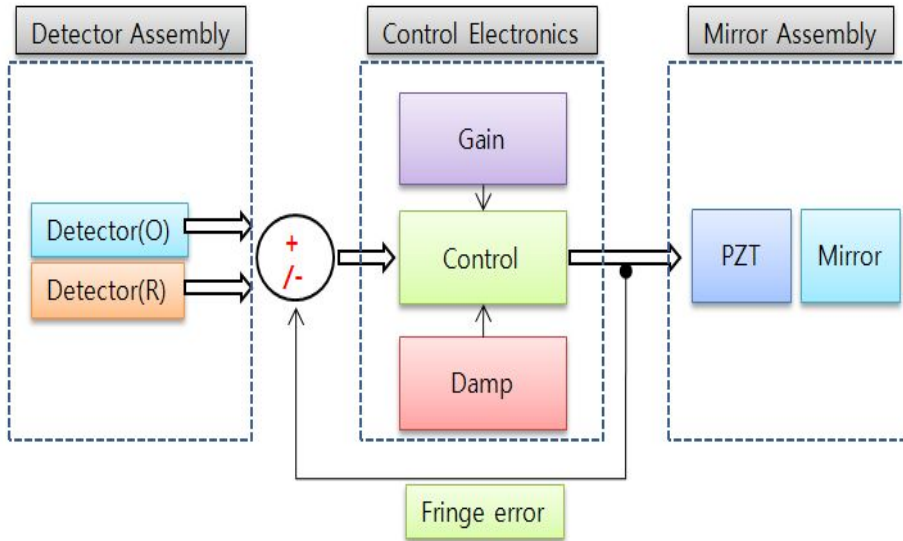
[Table. 3-5] Specifications of Mirror(PZT) Assembly

3.1.3. 실험절차

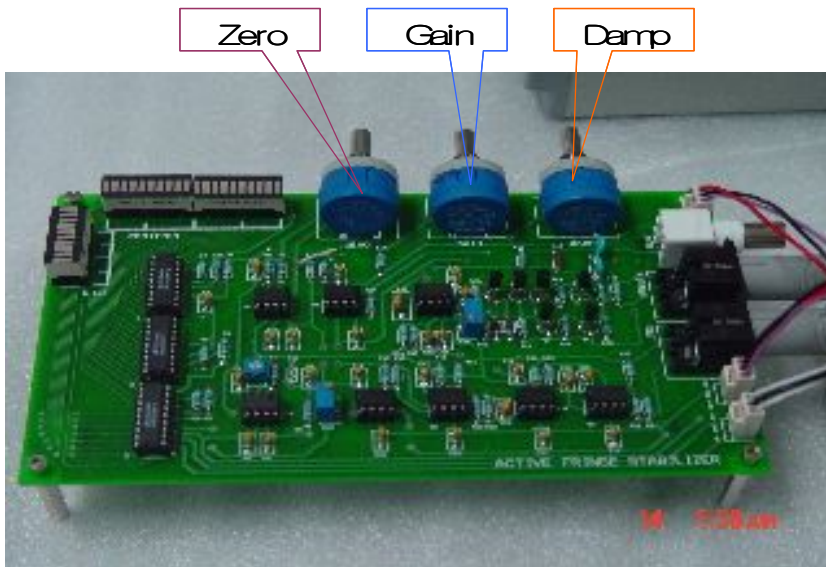


[Photo. 3.1] Laser stabilization interferometer

Fig. 6.3 과 같이 레이저를 이용하여 마이켈슨 간섭계를 구성하여 이미지 얻어 레이저 간섭무늬의 흔들림 정도를 측정하고 간섭무늬 획득 모듈을 통해 흔들림의 정도를 측정하여 흔들림의 오차를 전자 제어모듈로 보내어 전압으로 변환 하여 압전소자로 보내어 이동하게 한다. 안정화 시스템 구성 순서도를 [Fig. 3.5] 에 표현 할 수 있다. [Fig. 3.6] 또한 안정화 구성 모듈을 표시하였다.



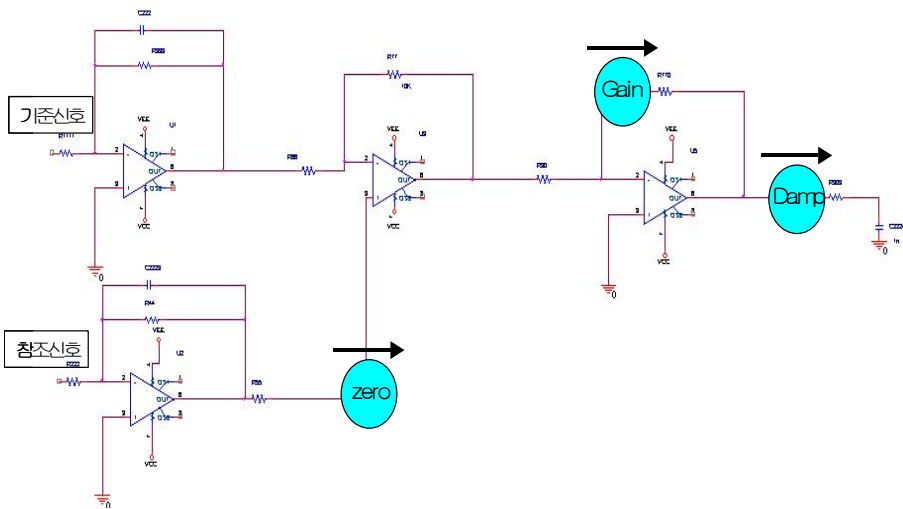
[Fig. 3.5] Stabilization Configuration Flowchart



[Fig. 3.6] Stabilization control Electronic

위 [Fig. 3.6] 과 같이 간섭무늬 안정화 시스템의 구성요소는 참조빔과 기준빔의 전압차이를 얻게 되는 간섭무늬 획득 모듈 부분과 이 신호에 비례하

는 error voltage를 조절하는 전자 제어는 Fig. 3.6 에 나타나 있고 error voltage만큼 이동하는 미러 및 압전소자 모듈로 구성되어 있다. 레이저 간섭무늬를 획득 모듈에서 얻은 Fringe는 전압차가 발생한다. 이러한 전압차이를 Fig. 3.6 에 있는 Zero 노브를 이용하여 차이를 제로로 만들고 안정화 상태의 구간을 찾기 위해서 Damp 노브를 간섭무늬가 최대한 흔들림이 있을 때 까지 오른쪽으로 돌린다. 극점 구간을 찾지 못할 경우에는 신호의 양이 미비하기 때문에 이 경우에는 Gain 노브를 오른쪽으로 돌리면 간섭무늬는 최고의 흔들림 상태에 이르게 된다. 이때 안정화 상태의 지점을 찾기 위해서 Damp 노브를 반대로 왼쪽으로 돌려서 간섭무늬가 흔들림이 없을 때 까지 안정화 구간 지점을 찾아 위치에 맞춘다. 그러면 Fringe가 안정화 상태인 위치에 있다.

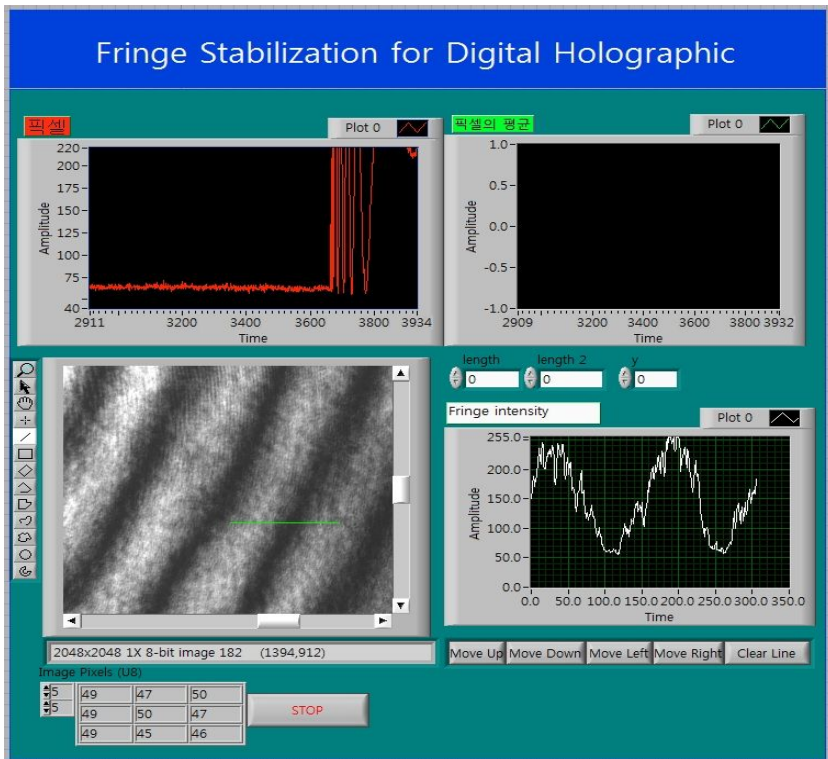


[Fig. 3.7] Stabilization basic circuit diagram

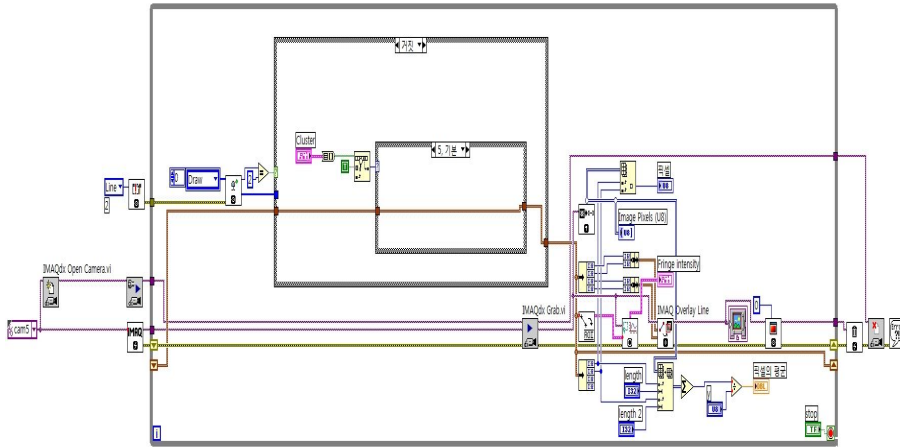
[Fig. 3.7] 은 Reference signal와 Comparative Signal을 입력한 후 반전 신호로 변환하여 차이를 비교한다. 차이만큼 Zero 노브를 돌려 오차만큼 전압이 압전소자에 가하여 점점 차이가 없어진다. 안정화 된 구역을 찾기 위해서 Zero인 상태에서 Damp 노브를 돌리면 안정화 된 구역을 찾기 위해서 간섭무늬의 흔들림 현상이 발생한다. 이때 최대치만큼 돌려서 못 찾을 경우에는 Gain 노브를 돌리면 Fringe가 흔들림 현상이 일어난다. 최대점으로 흔들림 현

상이 일어 날 경우까지 돌려서 재 **Damp** 노브를 반대 방향으로 돌려서 흔들림 없는 상태까지 위치로 돌린다. 이 구역이 안정화 지점이다. **Closed-loop** 원리를 활용하여 지속적으로 입력된 신호가 외란 및 진동으로 인한 차이만큼 압전소자에 전압을 빼주거나 가하거나 **loop**를 돌린다.

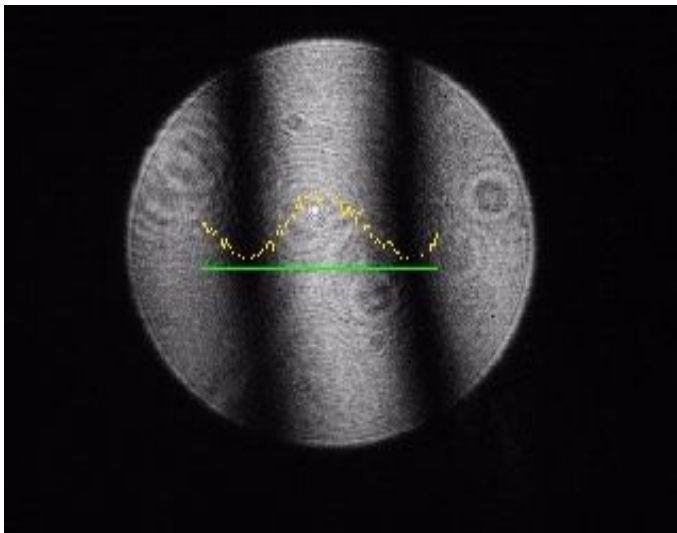
[Fig. 3.8] 은 CCD 카메라를 이용하여 이미지를 얻어 Fig. 3.9 Labview 프로그램으로 이미지를 처리하여 선택하는 구역을 평균하여 움직이는 정도를 가지고 레이저 간섭무늬의 프로파일 신호를 검출함으로써 간섭무늬 움직임에 대한 정도를 관찰 할 수 있다.



[Fig. 3.8] Interference pattern stability measurement program
 (front panel)



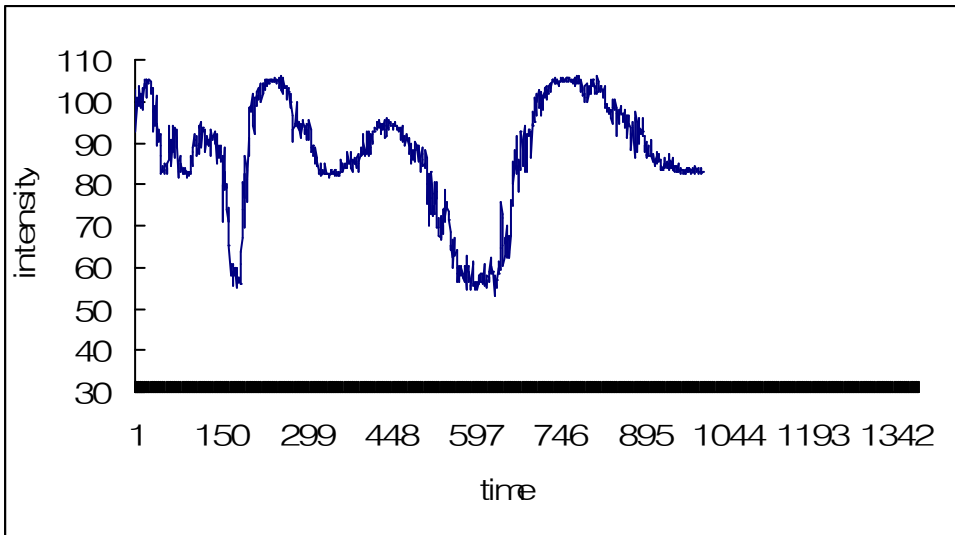
[Fig. 3.9] Interference pattern stability measurement program (block diagram)



[Fig. 3.10] Interference pattern and its profile

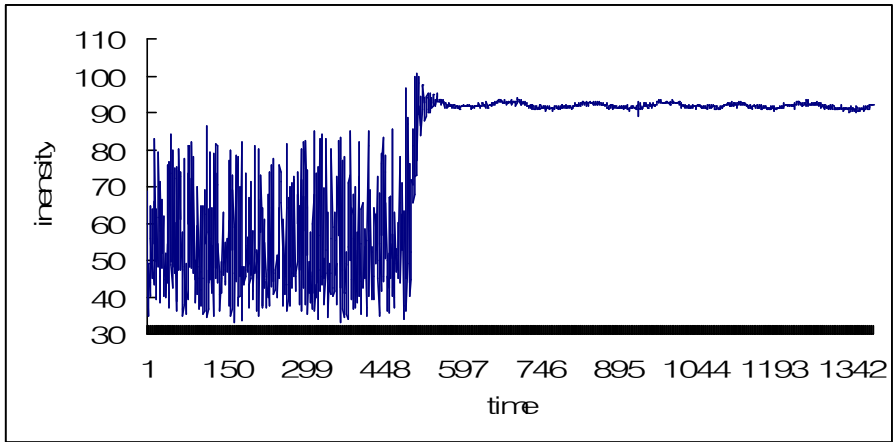
3.1.4. 실험결과

안정화 장치를 적용한 마이켈슨 간섭계의 실험을 진행하였으며 [Fig 3.11~3.15]까지는 실험 결과를 나타낸 것이다. [Fig 3.11]은 안정화 장치를 적용하기 전 Fringe 패턴의 불안정화 정도를 보여주고 있다. 실제 측정시 외부 환경에 따른 Fringe 패턴의 민감성에 따라 주위의 온도를 비롯한 환경적 외란에 의한 신호가 심각하게 움직이는 것을 알 수 있다.



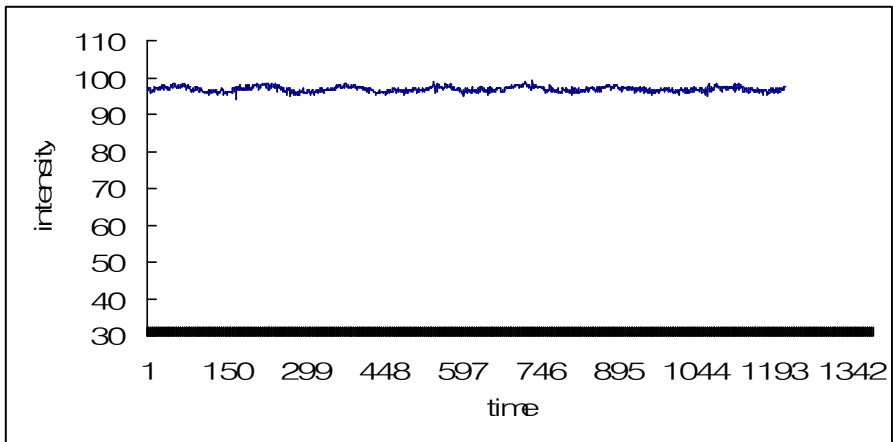
[Fig. 3.11] Unstable wave form causer by external environmental factors

[Fig 3.12]는 불안정한 상태의 Fringe 패턴에 안정화 장치를 작동시켰을 때를 보여준다. 장치의 작동으로 인해 처음에는 민감하게 패턴이 떨리지만 일정 시간이 경과된 후 부터는 파형이 움직이지 못하도록 잡아줌으로써 지속적으로 안정된 패턴을 그리고 있다.



[Fig. 3.12] Stabilization process by operating Control Electronics

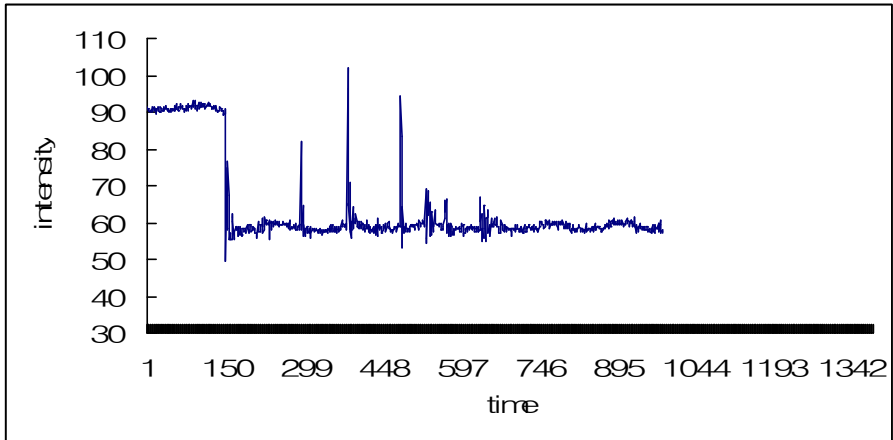
[Fig 3.13]은 안정화된 상태를 측정된 것으로 안정화 단계에 접어든 패턴이 지속적으로 큰 변화 없이 일정한 시간이 경과된 후에도 변함없는 것을 확인할 수 있다.



[Fig. 3.13] waveform measured after stabilization of interference pattern

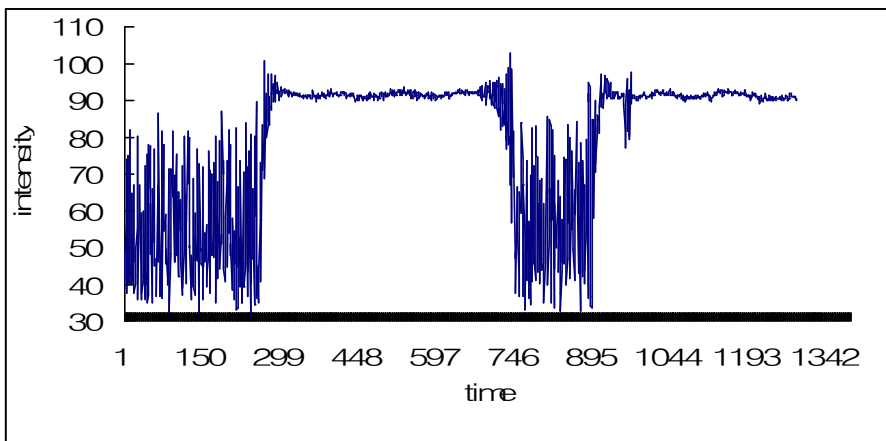
[Fig 3.14]는 안정화 상태중 임의의 외란을 가한 상태이다 순간적인 프린지 패턴의 떨림으로 위상이 변하여 중간에 파형이 튀는 것을 확인할 수 있다. 그러나 곧 바로 패턴을 인식하고 안정화 상태로 다시 회기 하는 것을 확인할

수 있다.



[Fig. 3.14] stabilization waveform after an external turbulence was applied to the stabilization interferometer

[Fig 3.15]는 순간적으로 안정화 상태의 진행 중에 파워를 on/off 시킨 것이다. 안정화 상태가 순간적으로 깨지는 것을 알 수 있지만 다시 작동 시켰을 때 안정화 상태로 다시 회기 하는 것을 확인 할 수 있다.

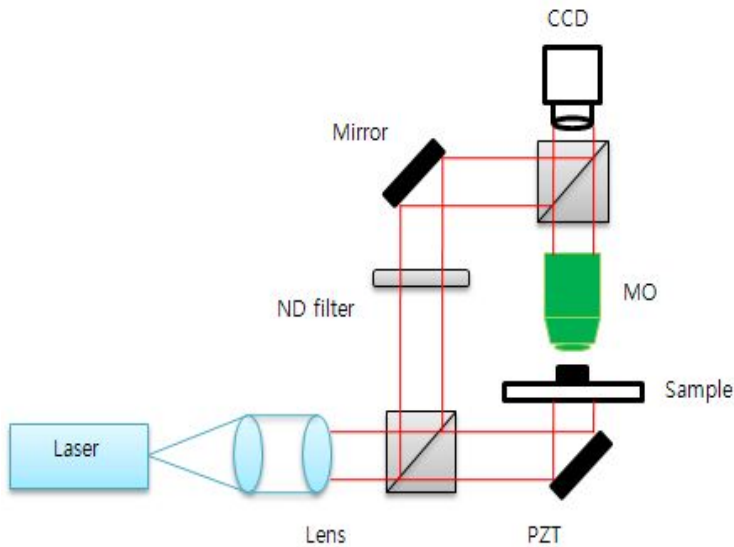


[Fig. 3.15] Waveform with / without stabilization function

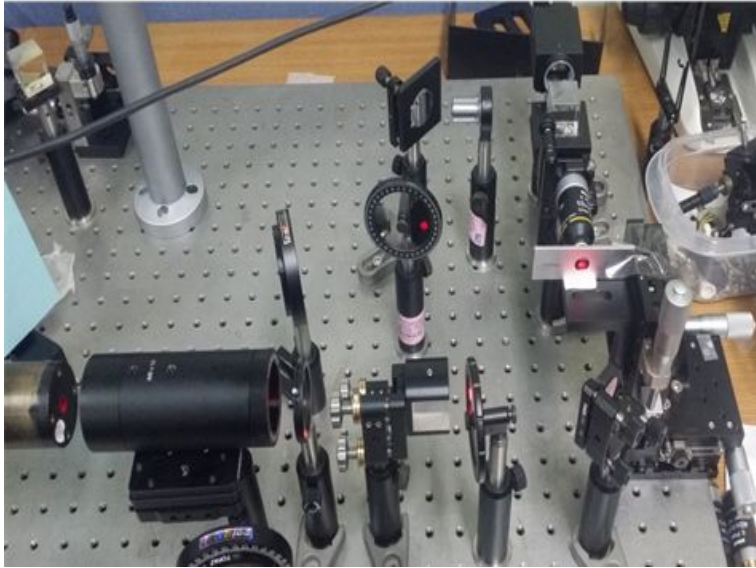
3.2 투과형 홀로그래피 시스템 구성

[Fig. 3.16]는 투과형 디지털 홀로그래피 현미경의 개략도이다. 여기서 참조광의 방향을 기준 Mirror로 바꿀 수 있으며 간섭계의 구성은 마흐젠더 간섭계와 같다. 그림 3.16에 He-Ne 레이저 10mmW을 가진 광원이고, 시편을 투과한 이미지를 확대하기 위하여 현미경에 쓰이는 대물렌즈 MO (Nikon 60X, NA=0.8)을 사용하였다.

Neutral Density filter는 간섭무늬의 명암 Contrast가 최대인 홀로그램을 얻기 위해 사용하였다. 홀로그램 이미지를 저장하기 위하여 CCD(POINT GREY사 GS3-U3-41C6M)를 사용하였고, CCD의 픽셀크기는 $5.5\mu\text{m} \times 5.5\mu\text{m}$ 이고 픽셀개수는 2048×2048 이다. 본 연구 논문 에서는 CCD의 위치를 초점거리에서 18cm 떨어진 지점에 위치하였고 4가지(적혈구, USAF, standard target, CO₂ 가공물) 시료를 사용하였다.



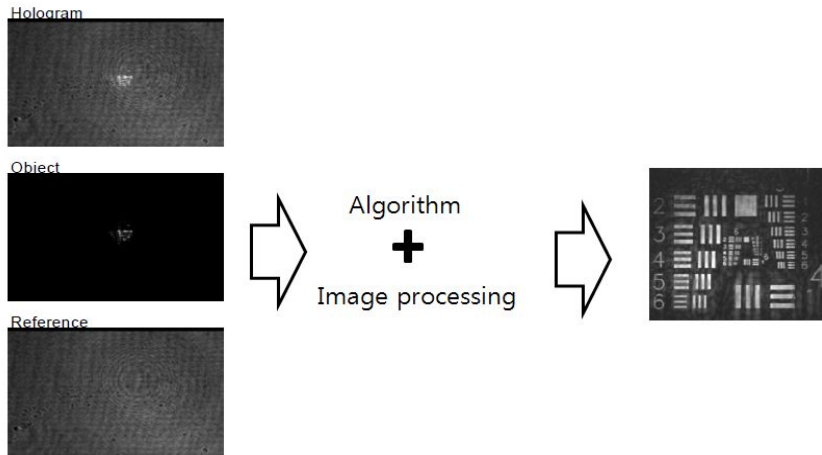
[Fig 3.16] A schematic of a transmissive holographic interferometer



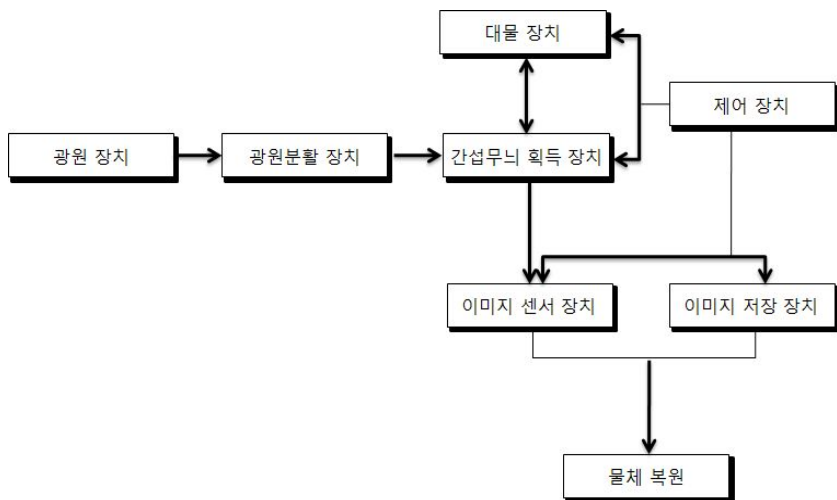
[Photo.3-2] Configuration of a transmissive digital holographic interferometer

본 논문에서는 CCD 결상면에서의 참조광과 물체광의 간섭에 대해 수치적 방법으로 생성한 홀로그램을 이용한다.

이렇게 생성된 수치적 홀로그램 데이터의 푸리에 변환을 활용하여 영차 회절광을 수식적으로 제거한 홀로그램 이미지 데이터를 생성한다. Fourier transform 과정을 통해 3D 물체 정보를 기록한 홀로그램은 데이터로 전환된다. 변환된 홀로그램의 Fourier transform 데이터에서 Fourier transform 공간의 영차 회절광에 해당하는 저주파 성분을 제거하고 Phase 정보를 갖고 있는 수치적 홀로그램을 계산하였다. 이러한 방법을 이용한 홀로그램의 장점은 광학적 Fourier transform에서 Fourier transform 렌즈의 초점면에서 영차 회절광을 없애는 방법과 같은 개념의 수치적 영차 회절광의 제거가 가능하다는 것이다. 역푸리에 변환에 따라 생성된 전기장 분포에서 Amplitude와 Phase을 갖는 복소수로 표현되는 전기장을 이용하면, Amplitude만을 이용하여 홀로그램을 생성할 수도 있고, Phase만을 갖는 홀로그램을 만들 수 있다. 그림 3.17는 홀로그램의 재생 방법을 나타낸 것이고 그림 3.18은 측정 물체의 3차원 이미지 형상 복원 방법의 개략도이다.



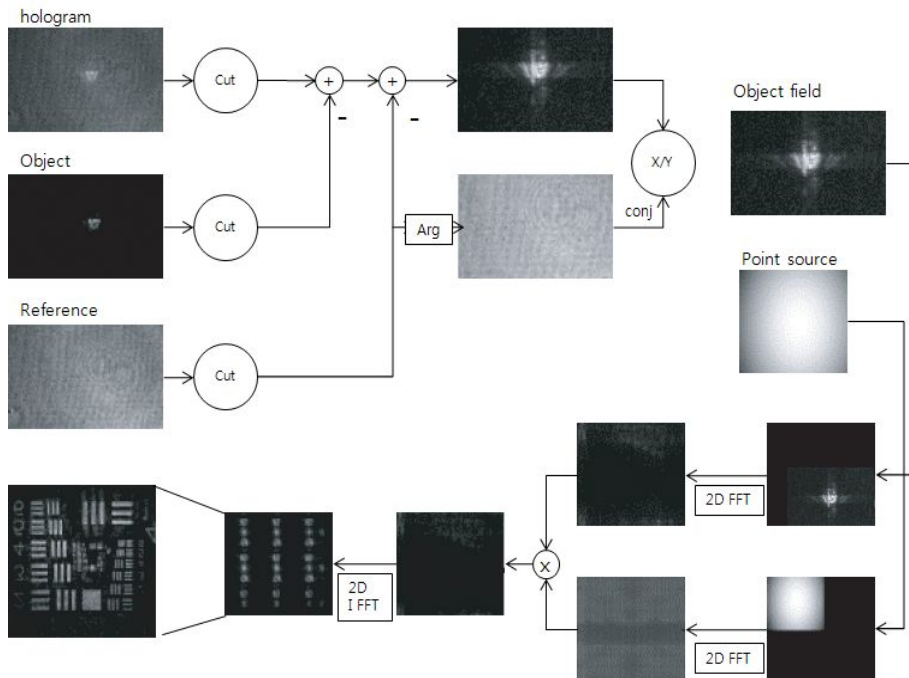
[Fig 3.17] Reproduction of a hologram



[Fig 3.18] Flowchart of 3D shape restoration

본 연구논문에서의 영차 회절 광 제거 방법은 CCD 카메라를 사용하여 Object beam과 Reference beam의 간섭에 의한 홀로그램을 입력 받아 Fourier

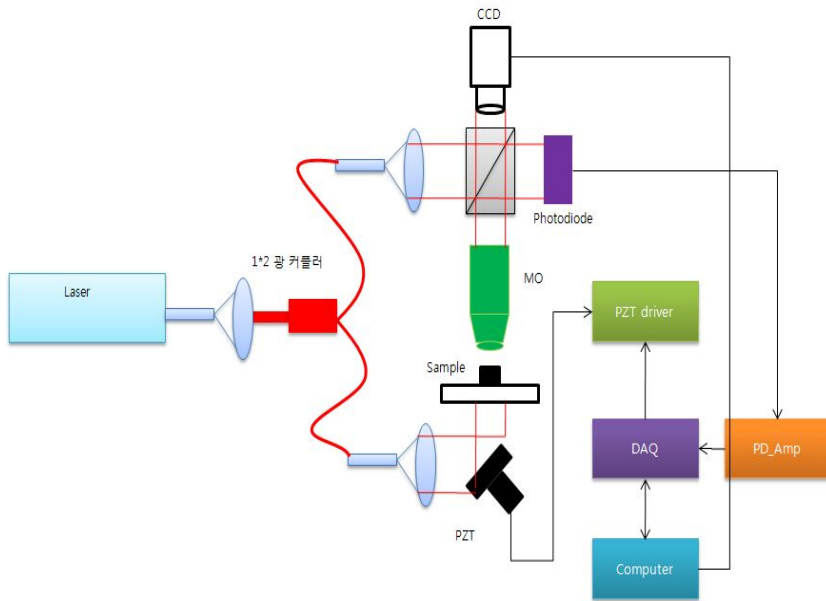
transform과 제거함수를 적용시킨 역 푸리에 변환을 활용하여 영차 회절광을 제거하는데 적용할 수 있는 방법이다. 제거함수를 적용함으로써 Object beam과 Reference beam에 의한 간섭을 CCD 카메라로 입력 받은 경우에 영차 회절광 성분이 제거된 Phase 홀로그램을 생성할 수 있는 효과적인 방법이 된다.



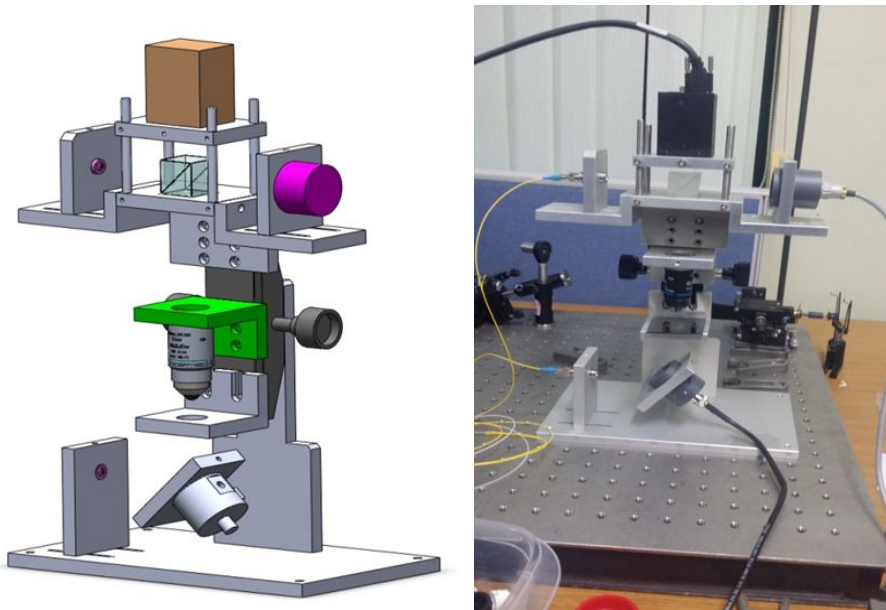
[Fig 3.19] Flowchart of reproduction of digital hologram

3.3 프린지 안정화 적용 투과형 홀로그래피 측정 시스템

[Fig. 3.20]은 본 논문에서 마흐-젠더 간섭계의 간섭무늬 안정화를 적용한 디지털 홀로그래피 현미경 타입의 광학계 장치도이다. 광 커플러로 시준광을 Object beam과 Reference beam으로 나눈다. 물체광은 PZT 거울에 반사되어 진행한다. 이것은 대물렌즈를 거쳐 푸리에 변환된다. Object beam과 Reference beam이 광 커플러 끝단으로 통해 푸리에 변환되는 초점거리 CCD 카메라를 설치하여 레이저 간섭무늬를 획득하고, 제작된 안정화 시스템을 작동하여 간섭무늬 안정화를 실행한다. 설정된 데이터는 포토다이오드로 입력되어 제작된 전자회로로 입력하여 연산 작용하여 PZT 모듈로 전송되어 안정화가 작동된다. 작동된 시스템에 간섭무늬에서 DC signal 성분을 제거해야 위상 정보를 얻을 수 있기 때문에 DC signal 성분을 알 수 있는 기준광과 신호광의 크기 정보를 얻어야 한다.



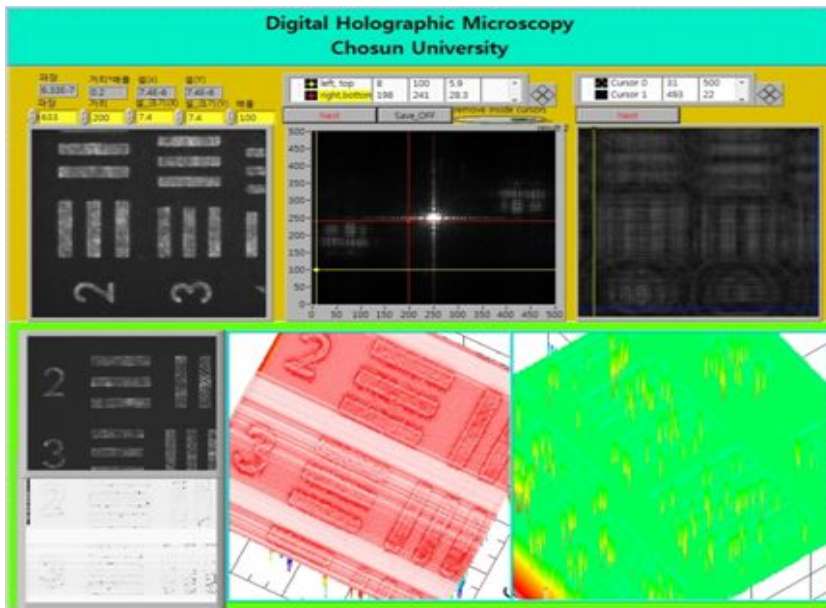
[Fig 3.20] Configuration of a holographic interferometer fringe stabilization device



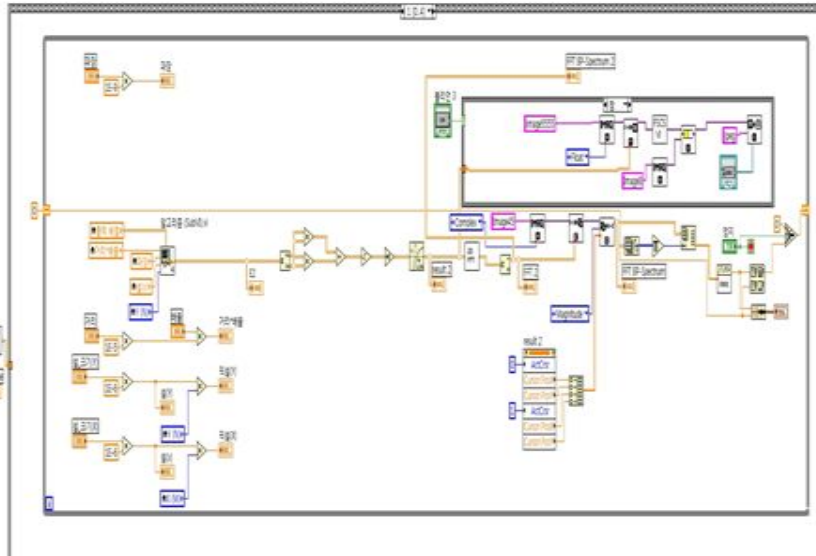
[Fig 3.21] A digital holographic microscopy with an interference fringe stabilization device

디지털 홀로그래피 현미경에서 기본적인 구성은 마흐젠더 간섭계를 사용하여 광원으로 이용되는 Laser로부터 나온 beam이 BS(beam splitter)에 의해 양 방향으로 나누어진 후 기준광과 대상체를 투과한 물체광의 영상을 확대하기 위해 현미경 대물렌즈 사용한다. 본 연구에서는 이러한 복잡한 간섭 시스템을 1*2 광 커플러를 활용하여 간섭 시스템을 간소화 하였다. 또 간섭 홀로그램 데이터를 홀로그램 필름 CCD 카메라를 사용하여 높은 정확도를 구현한다. CCD 카메라를 통해 얻은 홀로그램을 활용하여 수치적 영상을 재생할 때 0차 회절광이 포함된 허상과 DC signal이 노이즈로 작용하여 신호에 따른 잡음비가 좋은 이미지를 나타내기 힘들다. 이러한 문제를 해결하기 위해 0차 회절광과 허상 제거법을 사용하였다. 이렇게 구현한 field를 전파 수식에 따라 program을 이용하여 수치적으로 전파시키며 초점이 맞는 거리에 상을 재생한다. 재생 알고리즘은 크게 세 가지로 Fresnel 근사를 이용한 방법과 Convolution Method 그리고 Fresnel 근사를 사용하지 않는 Angular spectrum

Method가 있다. 생물학 또는 미세가공 시편 시료에 적합한 방법으로 측정한다. [Fig. 3.22]와 같이 Labview 프로그램을 작성하여 연속적인 대상 물체는 디지털 홀로그래피를 통해 얻어진 이미지는 물체의 Phase 정보는 물체의 3차원 정보를 분석한다. 이때 디지털 홀로그래피로 부터 얻어진 위상정보는 Object beam과 Reference beam의 phase차를 나타내며, Phase 정보의 범위는 $-\pi \sim \pi$ 이다. 실제의 2π 범위 이상의 값을 가지고 있어서 이를 수치적 해석을 통하여 복원하는 방법인 Phase Unwrapping을 구현한다.



[Fig 3.22] LabVIEW Program for digital holographic microscopy
(front panel)



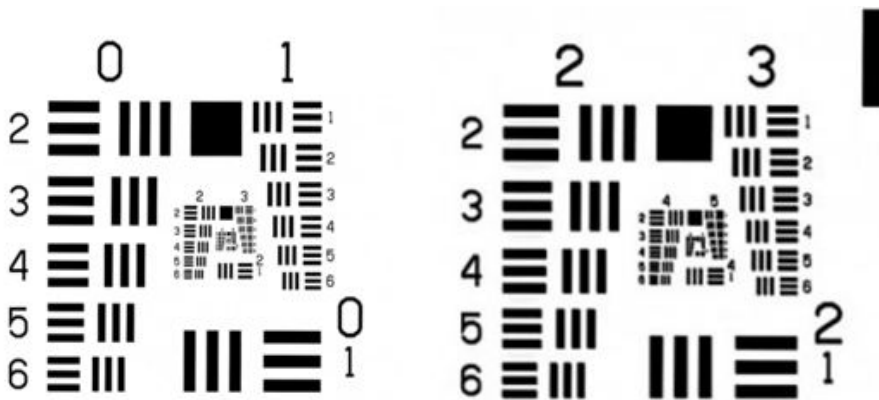
[Fig 3.23] LabVIEW Program for digital holographic microscopy (block diagram)

제4장 실험결과

4장1절 시험편

4.1.1 시험편 resolution target

본 연구에서 사용된 resolution target는 Edmund Optics의 1951 USAF resolution test chart를 사용하였다. 일반적으로 resolution targets은 잘 정의된 두께와 간격을 갖는 기준선 패턴으로 구성되어 있으며 테스트 대상의 이미징 시스템의 해상도를 측정하는데 주로 사용되어 진다. 본 연구에서는 resolution target의 형상을 디지털 홀로그래피 현미경 시스템을 사용하여 측정 하였으며 측정 결과를 통해 구축한 디지털 홀로그래피 시스템의 분해능을 비롯한 다른 측정 시편에 대한 신뢰성을 확보하고자 하였다. [Fig 4.1]는 연구에 사용된 시편이며 [Table.4-1,2] 는 시편의 사양이다.



[Fig 4.1] USAF transmissive resolution target

| Number of Line Pairs / mm in USAF Resolving Power Test Target 1951 | | | | | | | | | | | | |
|--|-------|-------|------|------|------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| Group Number | | | | | | | | | | | | |
| Element | -2 | -1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 1 | 0.250 | 0.500 | 1.00 | 2.00 | 4.00 | 8.00 | 16.00 | 32.0 | 64.0 | 128.0 | 256.0 | 512.0 |
| 2 | 0.281 | 0.561 | 1.12 | 2.24 | 4.49 | 8.98 | 17.96 | 35.9 | 71.8 | 143.7 | 287.4 | 574.7 |
| 3 | 0.315 | 0.630 | 1.26 | 2.52 | 5.04 | 10.08 | 20.16 | 40.3 | 80.6 | 161.3 | 322.5 | 645.1 |
| 4 | 0.354 | 0.707 | 1.41 | 2.83 | 5.66 | 11.31 | 22.63 | 45.3 | 90.5 | 181.0 | 362.0 | 724.1 |
| 5 | 0.397 | 0.794 | 1.59 | 3.17 | 6.35 | 12.70 | 25.40 | 50.8 | 101.6 | 203.2 | 406.4 | 812.7 |
| 6 | 0.445 | 0.891 | 1.78 | 3.56 | 7.13 | 14.25 | 28.51 | 57.0 | 114.0 | 228.1 | 456.1 | 912.3 |

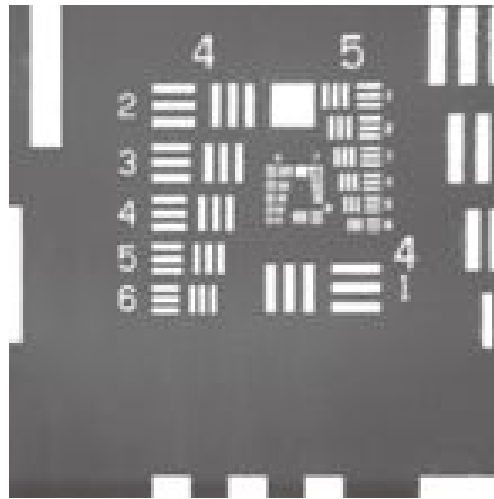
[Table. 4.1] Number of Line Pairs

| Width of 1 line in micrometers in USAF Resolving Power Test Target 1951 | | | | | | | | | | | | |
|---|---------|---------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
| Group Number | | | | | | | | | | | | |
| Element | -2 | -1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 1 | 2000.00 | 1000.00 | 500.00 | 250.00 | 125.00 | 62.50 | 31.25 | 15.63 | 7.81 | 3.91 | 1.95 | 0.98 |
| 2 | 1781.80 | 890.90 | 445.45 | 222.72 | 111.36 | 55.68 | 27.84 | 13.92 | 6.96 | 3.48 | 1.74 | 0.87 |
| 3 | 1587.40 | 793.70 | 396.85 | 198.43 | 99.21 | 49.61 | 24.80 | 12.40 | 6.20 | 3.10 | 1.55 | 0.78 |
| 4 | 1414.21 | 707.11 | 353.55 | 176.78 | 88.39 | 44.19 | 22.10 | 11.05 | 5.52 | 2.76 | 1.38 | 0.69 |
| 5 | 1259.92 | 629.96 | 314.98 | 157.49 | 78.75 | 39.37 | 19.69 | 9.84 | 4.92 | 2.46 | 1.23 | 0.62 |
| 6 | 1122.46 | 561.23 | 280.62 | 140.31 | 70.15 | 35.08 | 17.54 | 8.77 | 4.38 | 2.19 | 1.10 | 0.55 |

[Table. 4.2] Width of 1 line in micrometers

4.1.2 resolution target 실험 결과

USAF 사양 표는 시스템의 분해 성능을 확인하는 시편으로 사용된다. He-Ne 레이저는 광원으로 사용되며 CCD 카메라의 크기는 500*500mm이며 전파 거리 4,6,8,10 mm로 설정하여 홀로그래프 이미지를 얻었다. USAF의 Fig. 4.5 (17.54 mm) 시편에 적용하고, 그림에서 실험 결과는 대략 일치 한다.

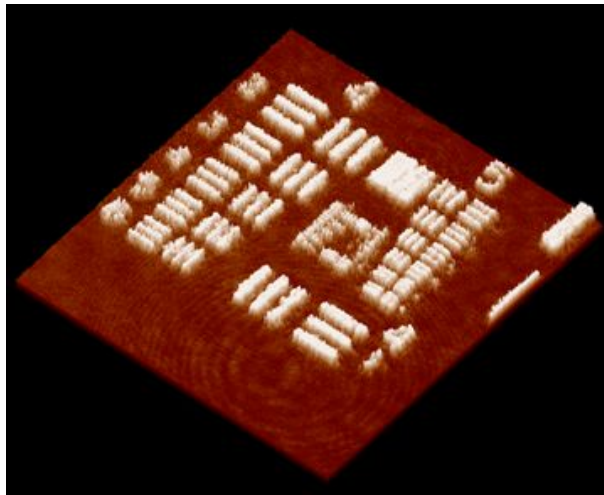


[Fig. 4.2] USAF Resolution target with groups 4 and 5

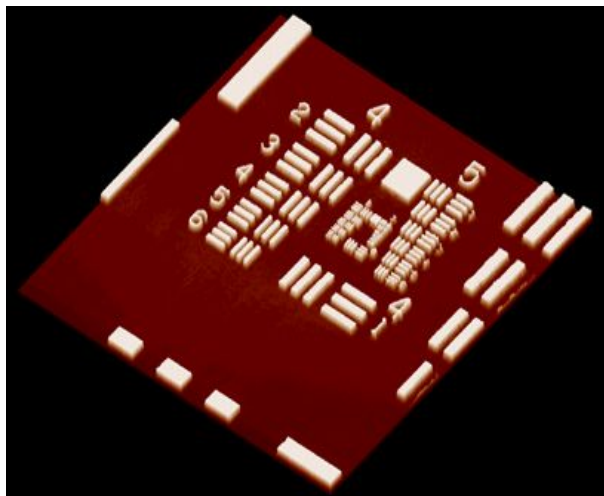
렌즈가 없는 구성은 분해는 측정에 제한이 있지만 다른 디지털 홀로그래피 현미경 구성보다 큰 시야각을 얻을 수 있다. 또한 Optical 이미지 시스템으로 인해 발생할 수 있는 수차 왜곡을 피할 수 있으며, 매우 높은 분해능이 요구되지 않는 응용 분야에서 유용하게 사용된다. 3D 디스플레이, 저해상도 및 높은 시야각 측정은 렌즈가 없는 디지털 홀로그래피 현미경의 좋은 적용 예이다. 디지털 홀로그래피 현미경의 횡 방향 분해능을 향상시키기 위해 Optical 이미지 시스템은 일반적인 광학 현미경으로 활용 될 수 있다.

그러나 디지털 홀로그래피는 정확한 이미지 평면에 정보를 기록 할 수 없기 때문에 가능합니다. 이미지 형상을 위한 광학 시스템과 시편의 고정밀 조

정을 필요로 하지 않다. 이것은 또 다른 간접계 3D 측정 시스템과 비교하여 디지털 홀로그래프 현미경 중 가장 큰 장점이다. 다음 [Fig. 4-3, 4-4]는 본 연구에 적용한 안정화 on/off 측정에 대한 비교 사진이다. 안정화 적용 전과 후의 비교를 통해 안정화 상태의 이미지가 훨씬 선명한 것을 확인 할 수 있었다.

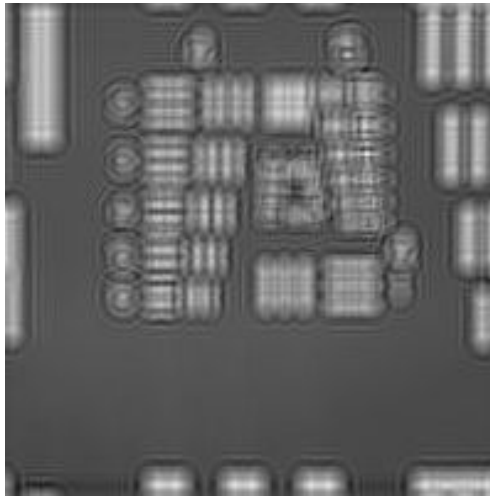


[Fig. 4.3] The reconstructed phase image(stabilization mode Off)

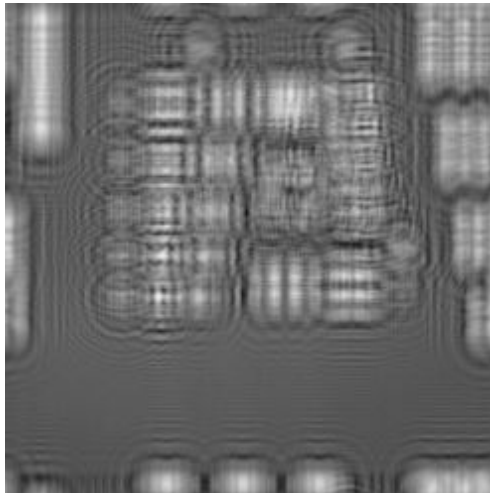


[Fig. 4.4] The reconstructed phase image(stabilization mode On)

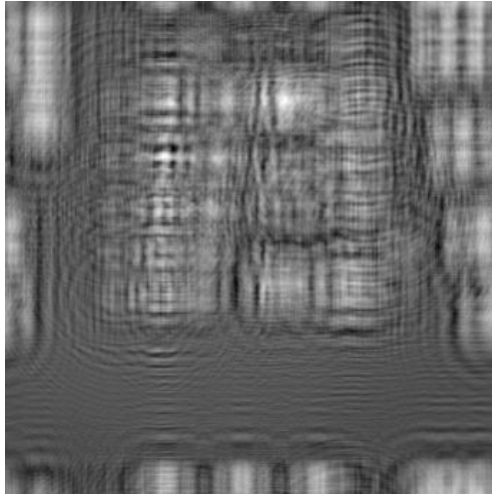
USAF-1951 resolution target 의 실제 사진으로 측정 실험의 물체로 사용되었다. 디지털 홀로그래피에 장치 구성에서 4~10mm 간격으로 움직이면서 홀로그램을 구할 수 있다. 얻은 후 hologram을 Fresnel 근사화 방식의 수치적 재생 알고리즘을 이용한 프로그램으로 다양한 위치에서의 이미지 상을 얻을 수 있다.



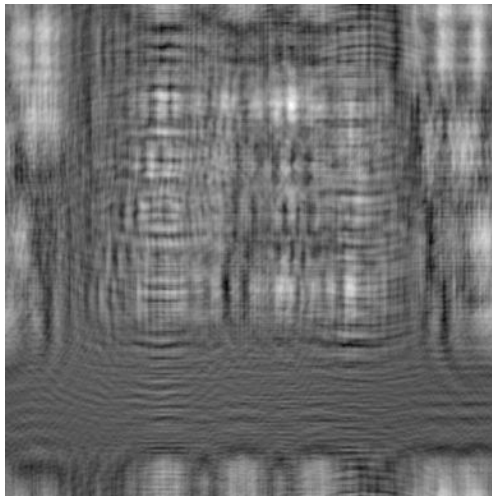
[Fig. 4.5] Measurement result of resolution target Test piece (z : 4mm)



[Fig. 4.6] Measurement result of resolution target Test piece (z : 6mm)

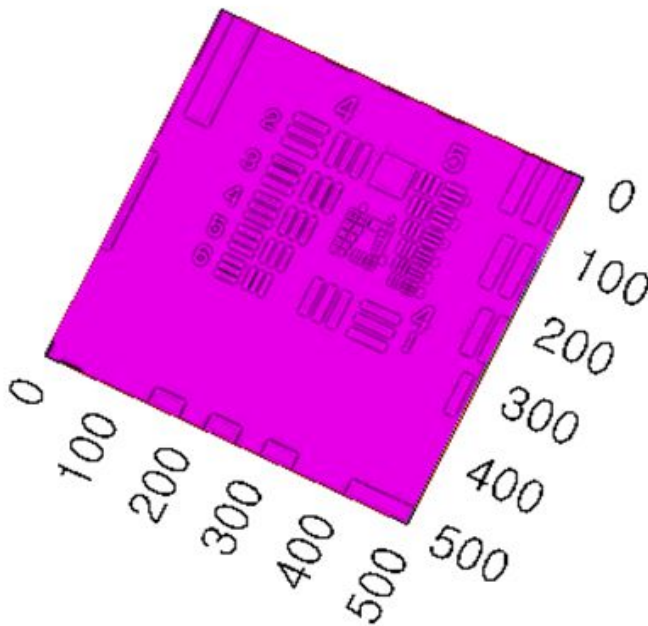


[Fig.4.7] Measurement result of resolution target Test piece (z : 8mm)

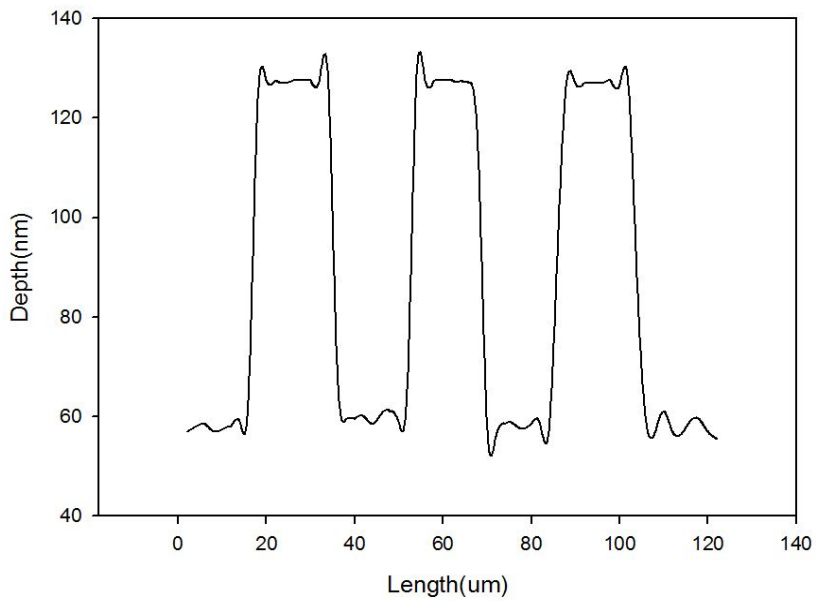


[Fig.4.8] Measurement result of resolution target Test piece (z : 10mm)

3차원 영상을 얻기 위해서, 표준시편 Width of 1 line 는 $27\ \mu\text{m}$ 에서 $17\ \mu\text{m}$ 까지 여러 주기로 되어있고, 표준시편 Number of Line Pairs는 17 mm 에서 28 mm까지 여러 주기로 제작하였으며, 표준시편 깊이 z는 40 nm에서 60 nm 까지 다양하게 되어있다. USAF-1951 resolution target를 안정화를 적용한 디지털 홀로그래피 현미경 시스템으로 측정한 결과 주기오차는 $\pm 5\ \mu\text{m}$ 이었으며, 깊이 오차는 $\pm 10\ \text{nm}$ 였다.



[Fig.4.9] 3D-Shape restoration of resolution target



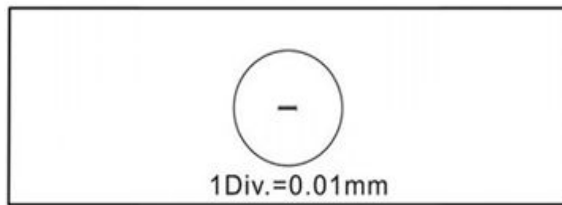
[Fig. 4.10] Line profile of set 2 in group 4 of Fig. 4.9

4.2.1 시험편-micrometer

안정화를 적용한 디지털 홀로그래피 현미경을 구성하고 길이에 대한 정보를 보정하기 위한 Nikon stage micrometer 0.01mm 표준 스케일을 사용 하였다.



[Photo. 4-1] 0.01mm Stage micrometer (Nikon)



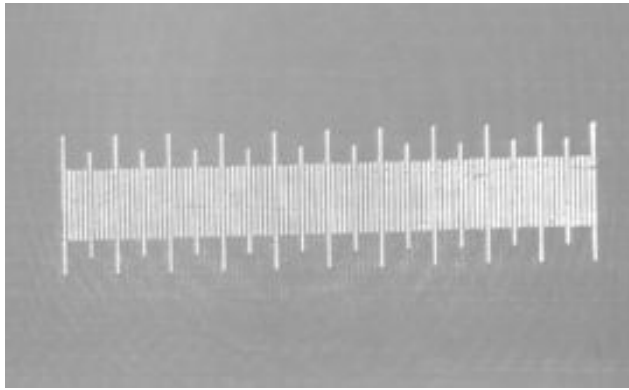
TS-M1 / 106011

X Ruler 100×0.01mm=1mm

[Fig. 4.11] 0.01mm stage micrometer(Nikon)

4.2.2 micrometer 실험 결과

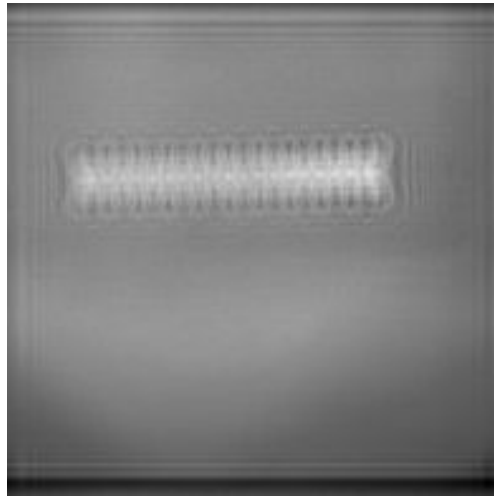
마이크로미터에 대한 디지털 홀로그래피의 수치 집중 이미지는 $5.5 \times 5.5 \times 2 \mu\text{m}$ 의 영역 안에서 측정하였으며 데이터 획득은 (500×500픽셀)이며 복원 거리인 z 값은 각각 1, 10 mm 로 측정하였다.



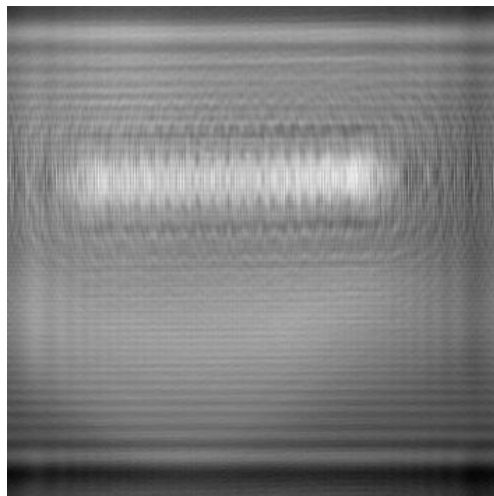
[Fig.4-12] Magnification micrometer test specimen

Fig.4-12는 표준 스케일 자의 초점이 맞는 홀로그램 이미지와 과 Fig.4-13,14 현미경 타입의 대물렌즈에서 1~10 mm 떨어진 지점에 홀로그램 이미지를 획득하였다. 수치적으로 계산할 홀로그램으로부터 얻어진 데이터는 안장화 홀로그래피를 적용한 실험장치에 의해 위상왜곡을 제거한 데이터를 사용하였다. 즉 표준 스케일 시편을 삽입한 후 얻어진 홀로그램 데이터와 대상체 없이 얻어진 홀로그램 데이터의 차이를 사용하였다. Fig.4-15는 표준 스케일 시편 일정한 주기로 만들어져 있어 실험 결과도 정확한 주기의 홀로그램과 재생과 3차원 형상을 알 수 있다. Fig.4-15 에서 회절광의 영향으로 인해 줄무늬 모양의 간섭 모양이 있는 것을 알 수 있다.

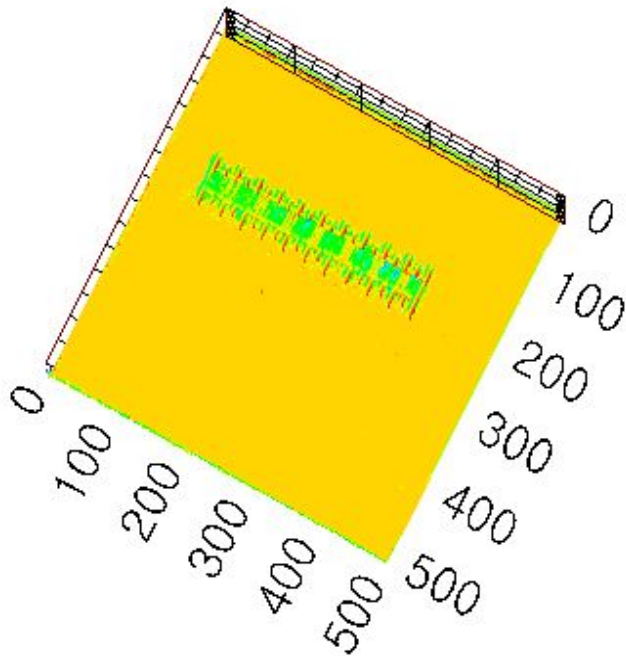
표준 스케일 시편 표면에 간섭이 생긴 것이고 강한 회절 패턴으로 인한 왜곡된 이미지 형상을 알 수 있다. 길이 정보는 정확히 알 수 있으나, 세분화된 주기에서 왜곡된 회절 패턴으로 인한 복원이 불가능 하였다.



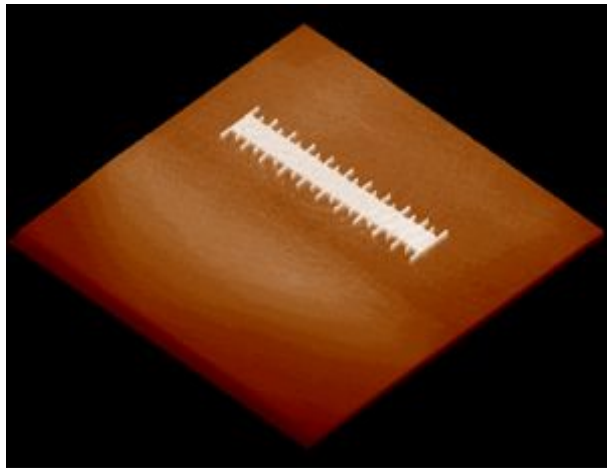
[Fig. 4.13] Measurement result of micrometer Test piece (z : 1 mm)



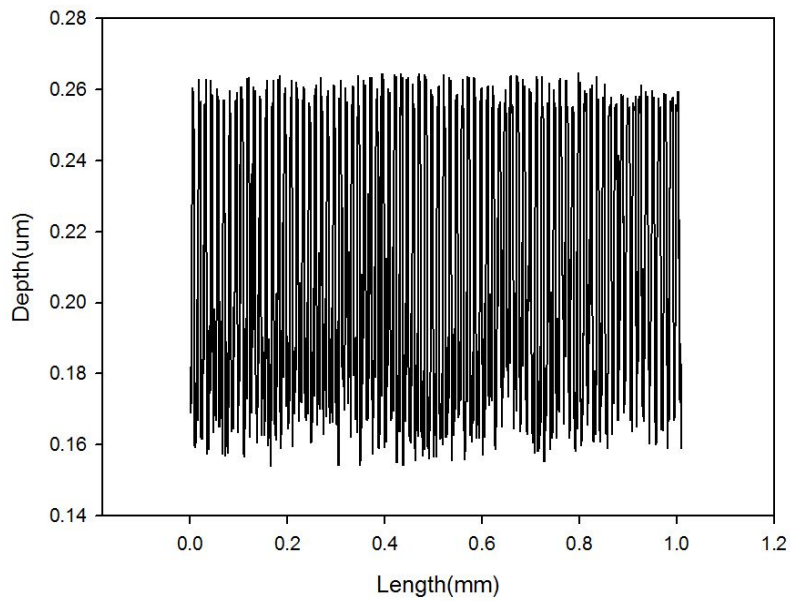
[Fig. 4.14] Measurement result of micrometer Test piece (z : 10 mm)



[Fig. 4.15] 3D-shape restoration of micrometer



[Fig. 4.16] 3D-shape restoration of micrometer



[Fig. 4.17] Line profile of Fig.4.15

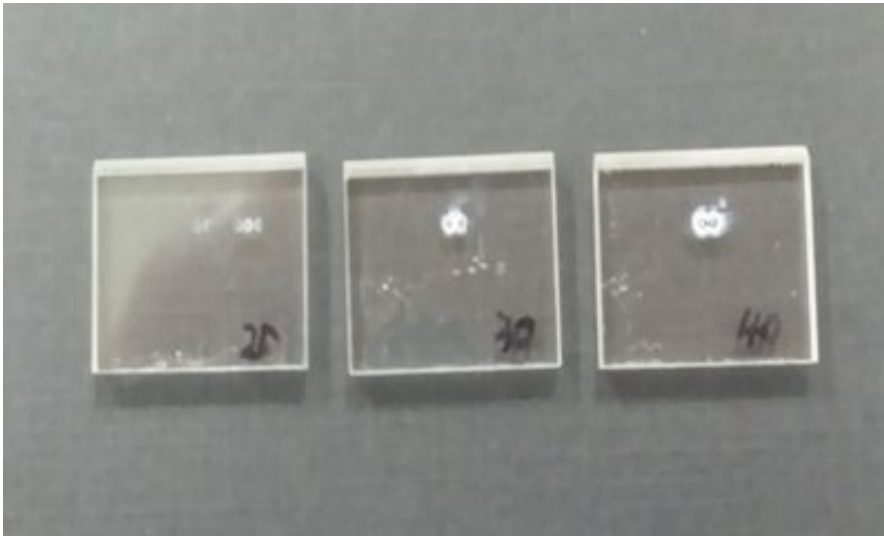
4.3.1 시험편 Co₂ Spot

현재 레이저 가공 기술은 여러 종류의 금속재료나 목재, 플라스틱, 아크릴, 과 같은 비금속 재료 및 첨단 소재의 난 가공까지 다양한 분야에서 이용되고 있다. 가공에 활용되는 Laser 가운데 CO₂ Laser는 다소 저렴한 가격의 고출력 Laser로서 산업적용에 용의하여 절단을 비롯한 용접, 마킹(Marking)과 같이 큰 면적 가공에 주로 적용되었다. 최근 들어 첨단 기술인 미세 공정기술발달에 맞추어 Laser를 활용한국부적인 표면 열처리를 비롯한 비아 홀(Via hole) 가공 및 광섬유 가공 등 마이크로단위의 소재 가공에 대한 연구도 지속적으로 진행 중이다.



[Photo. 4.2] CO₂ Laser machine used for fabricating quartz specimen with a CO₂ spot

특히 quartz glass 가공에서는 기존가공 방법인 다이아몬드 휠에 의해 절단은 상대적으로 느린 절단속도와 절단면에 마이크로크랙(Micro Crack)이 발생되어 quartz glass 강도의 약화와 파손되는 단점이 있었다. 이런 문제점을 해결하기 위해 현재는 quartz glass을 위해 CO₂ Laser를 주로 사용한다. 이는 일반적인 laser과는 달리 절단 시 절단면이 laser beam에 녹아 마이크로크랙이 발생하지 않기 때문이다. 이런 장점은 짧은 시간 내에 국부적으로 유리의 가공이나 연마를 하는데 용의하여 지금은 유리가공 뿐만 아니라 여러 분야에서 많이 활용되고 있으며 최근 Optical fiber 와 quartz Block을 붙여 광전송 관련 응용분야에 많이 사용되고 있다. 이러한 초기 조건을 잡기위해서 Spot 공정을 필수적으로 해야 한다. Spot 사이즈와 깊이 정보를 알기 위해서 디지털 홀로그래피 시스템을 이용하여 정확한 정보를 얻을 수가 있다.



[Photo. 4.3] Quartz specimen with a CO₂ spot

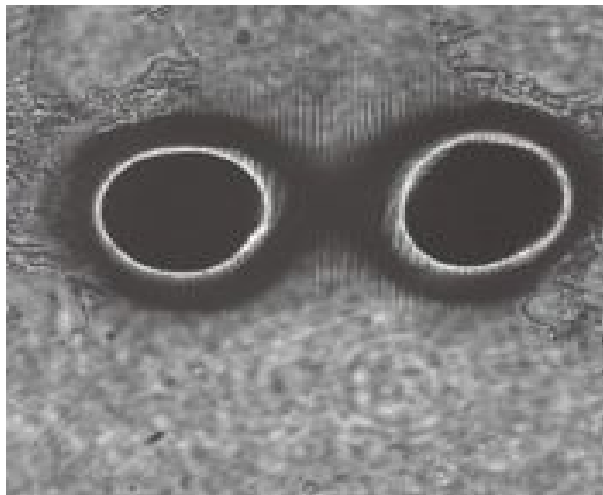
4.3.2 CO₂ Spot 실험결과

본 연구에서 CO₂ 레이저로 이용하여 가공하기 위해서 쿼츠 블록을 15mm*10mm*2t 로 가공하여 아래와 같은 사양으로 레이저 가공을 실시하였으며 사양은 [Table. 4.3]과 같다.

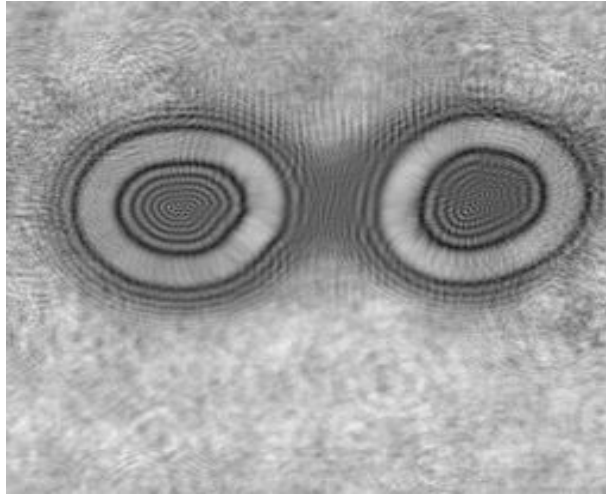
| Duty(@5kHz) | Output Power(W) | |
|-------------|-----------------|-----------|
| | Right head | Left head |
| 10 | 1.8 | 1.8 |
| 20 | 4.2 | 4.38 |
| 25 | 5.3 | 5.4 |
| 30 | 6.46 | 6.42 |

[Table. 4.3] Specification of CO₂ Laser Machine

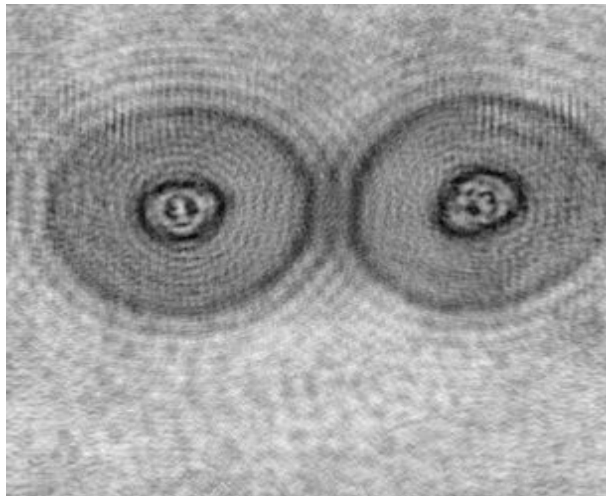
CO₂ Spot에 대한 디지털 홀로그래피의 수지 집중 이미지는 $5.5 \times 5.5 \times 2\mu\text{m}$ 의 영역 안에서 측정하였으며 데이터 획득은 (500×500픽셀)이며 복원 거리인 z 값은 각각 0.5, 1, 2mm 로 측정하였으며 결과는 아래와 같다.



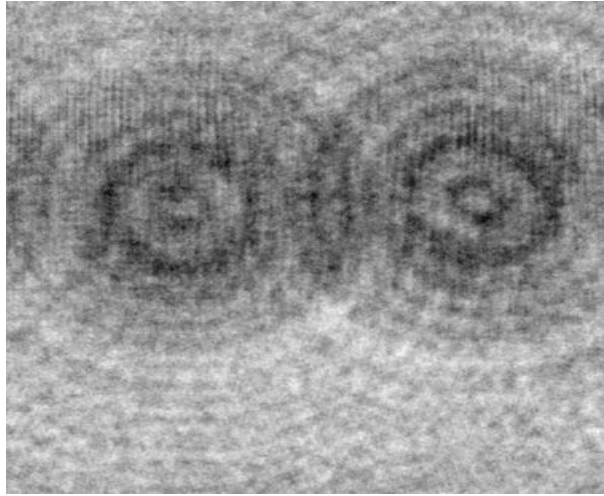
[Fig. 4.18] Measurement result of quartz test piece with a CO₂ Spot



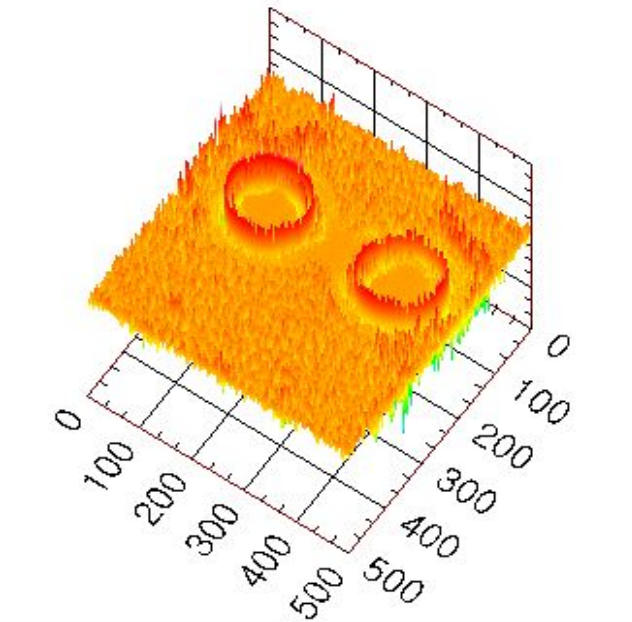
[Fig.4-19] Measurement result of quartz test piece with a CO₂ Spot (z :0.5mm)



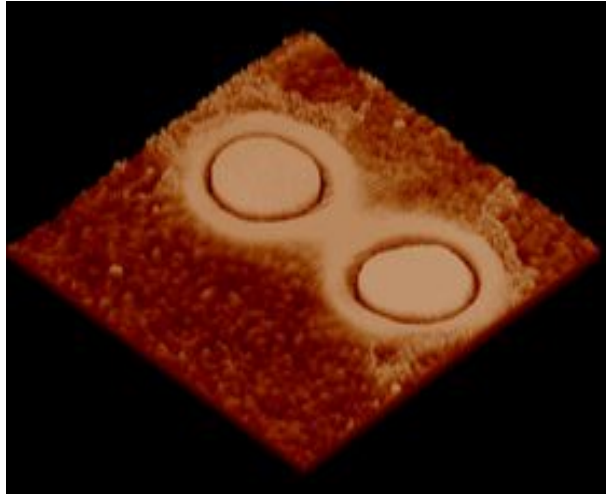
[Fig.4-20] Measurement result of quartz test piece with a CO₂ Spot (z : 1 mm)



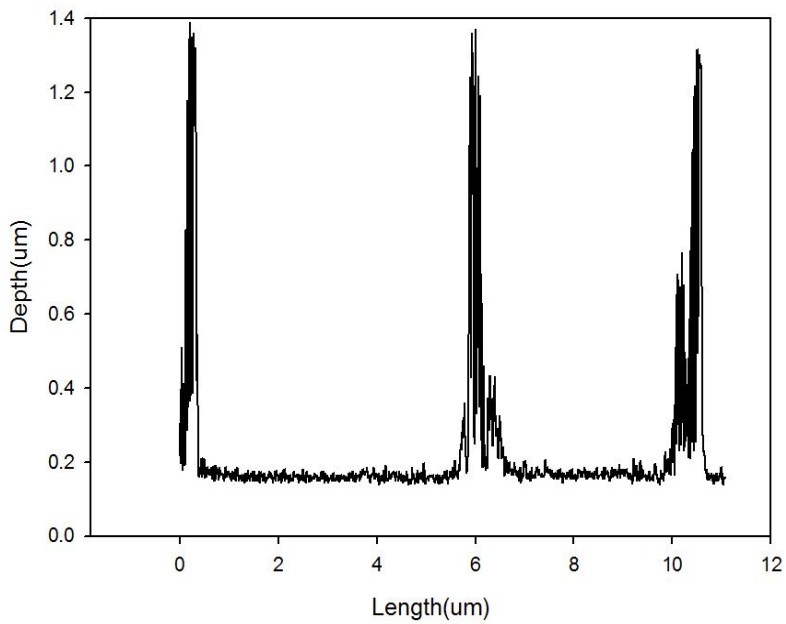
[Fig.4-21] Measurement result of quartz test piece with a CO₂ Spot (z : 2 mm)



[Fig.4-22] 3D-shape restoration of with a CO₂ spot



[Fig.4-23] 3D-shape restoration of with a CO₂ spot



[Fig.4-24] Line profile of Fig.4.22

4.4.1 적혈구(Erythrocyte)

혈구 중에서 가장 많은 비중을 차지하는 것이 적혈구이며 적혈구의 특징은 세포이긴 한데 세포 속에 핵이 존재하지 않는다.

적혈구의 모양은 동그란 도넛을 생각하면 연상할 수 있으며 도우넛은 가운데 구멍이 뚫려 있지만 적혈구는 구멍이 막혀있는 도우넛을 생각하면 정확한 적혈구의 모양이 된다. 적혈구의 이런 모양은 혈중에서 산소 및 이산화 탄소를 만나 운반하기 위해 표면적자체 최대한으로 넓히기 위한 구상이라고 해석한다. 즉, 적혈구의 중요한 기능은 혈중 속에 있는 산소를 헤모글로빈과 결합하여 우리 신체의 모든 것으로 전달을 하는 것이다.

이러한 적혈구의 단위 면적당 숫자 및 모양, 색깔, 크기는 우리 몸의 건강 상태를 측정하는데 매우 중요하다. 적혈구는 대략 $6\sim 8\mu m$ 정도 되는데 직경이 $8\mu m$ 이상, $MCV 100\mu^3$ 되는 대적혈구(Macrocyte), $12\mu m$ 이상은 거대 적혈구로 분류된다. 정상적인 혈구보다 Hb 함량이 높은 것이 특징이며 $Vit-B_{12}$ 와 엽산 결핍 시 생성된다. 직경이 $6\mu m$ 이하, $MCV 80\mu^3$ 이하는 소적혈구에 해당하며 정상 적혈구보다 Hb 함량이 낮은 것이 특징이다. 철 결핍성 빈혈, 납 중독, 구형적혈구증에서 증가한다. 크기가 크거나 작은 적혈구가 다양하게 출현하는 경우는 대소부동증(Anisocytosis)를 의심할 수 있기에 적혈구의 크기 및 모양을 측정하는 매우 중요하다. 이러한 적혈구의 내용은 아래의 그림 (3.24) 와 같다.

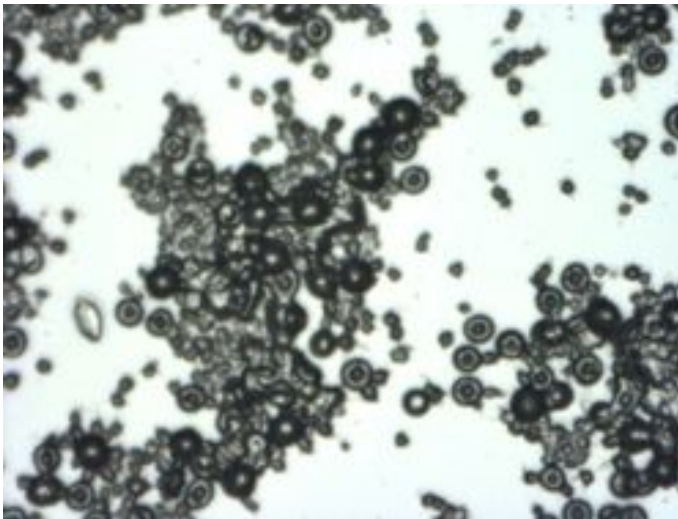


[Fig.4-25] Erythrocyte

- (1) 모양 : 도넛 모양(평면상 : 원판형, 측면상 : 아령형)
- (2) 관찰요소 : 중앙 Central pallor
- (3) 특징 : 표면적이 넓어서 가스교환 효율적, 무핵세포
- (4) 직경 : 평균 $6\sim 8\mu m$, 두께 : 약 $2.2\mu m$
- (5) 적혈구 수 : 혈액 $1mm^3$ 중 성인 남자: 약 500만 개, 여자: 약 450만 개
- (6) 수명 : 120일(전체 적혈구량의 1/120이 매일 파괴되고 생성)

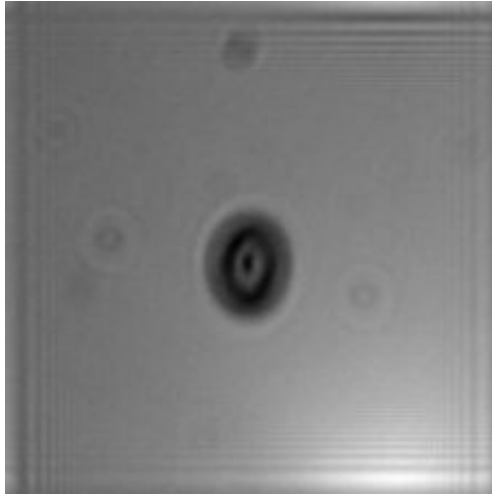
4.4.2 단세포 적혈구 실험 결과

간섭무늬 안정화 시스템을 적용한 디지털 홀로그래피 현미경에 적용하여 3차원 형상을 재생 및 측정하기 위해 의료 및 바이오산업에 응용될 수 있는 적혈구 시편을 선택하였다. [Fig.4-26]는 고 배율 현미경으로 촬영된 이미지를 확인 할 수가 있었다.

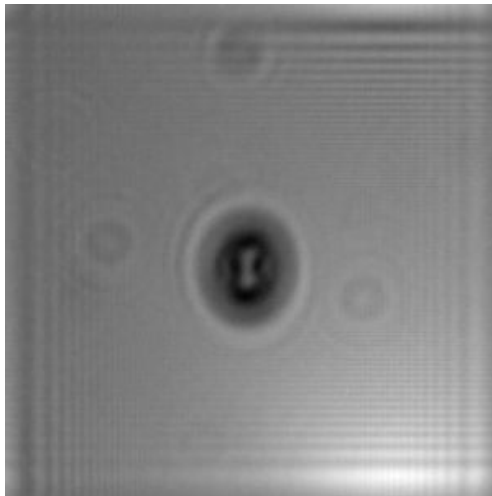


[Fig.4-26] Erythrocyte image

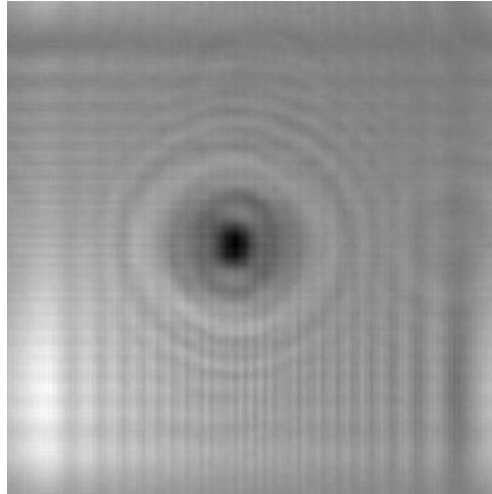
[Fig 4-27]는 적혈구 홀로그램인 대물렌즈에서 0.6~1.5 mm 떨어진 지점에 홀로그램을 CCD 카메라로 획득한 이미지이다. 수치적 홀로그램 데이터는 실험장치에 의해 위상 왜곡을 소거한 데이터를 사용하였다.



[Fig. 4.27] Measurement result erythrocyte Test piece (z : 0.6mm)



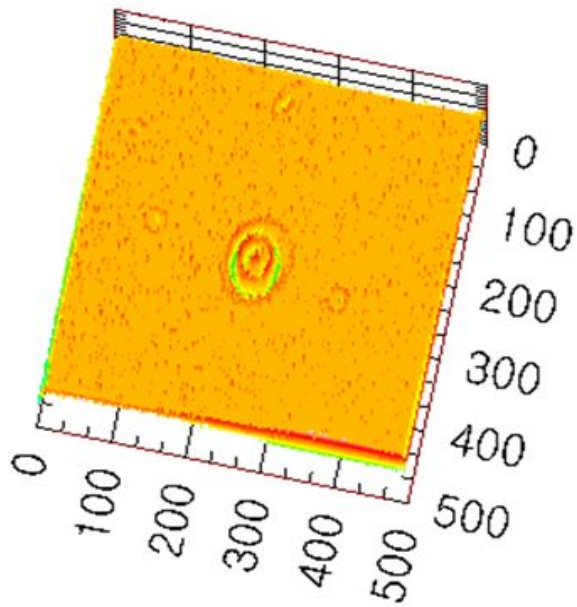
[Fig. 4.28] Measurement result erythrocyte Test piece (z : 0.8mm)



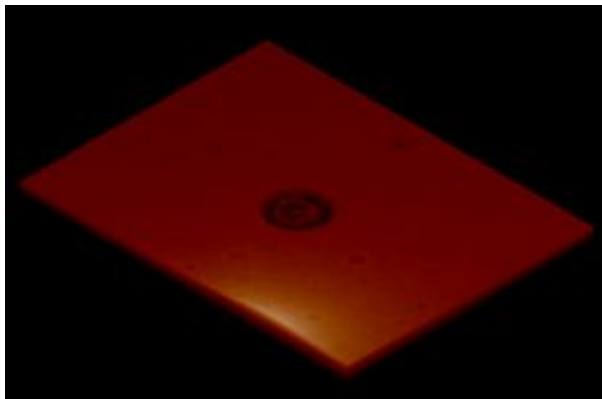
[Fig. 4.29] Measurement result erythrocyte Test piece ($z : 1.5\text{mm}$)

디지털 홀로그래피 현미경 시스템 기계적인 초점조정 없이 numerical reconstruction을 하기 때문에 하나의 hologram으로부터 임의 평면에서의 이미지를 여러 번 획득할 수 있다. 측정하고자 하는 대상체의 축 방향 길이가 초점심도를 벗어난 영역까지 존재하면, 초점심도에 따라서 초점이 잘 맞는 부분을 합하여 원래의 측정하고자 하는 이미지를 얻을 수 있다.

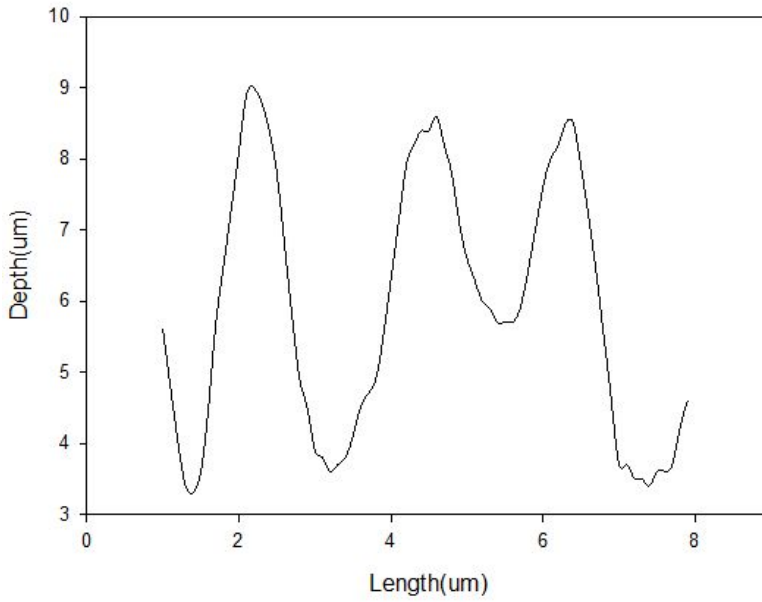
이러한 방법으로 실제 기울어진 면의 적혈구 시편에 대해 구현해 보았다. 실험에서는 적혈구 시편을 CCD 카메라 평면에 대하여 기울여 놓고 위상 이동된 홀로그램을 측정하였다. 재생 거리를 변화해가면서 상을 재생하며 3차원 형상 측정하여 확인한 결과상의 일부에만 초점이 잘 맞는 것을 확인할 수 있었다.



[Fig. 4.30] 3D-shape restoration of erythrocyte



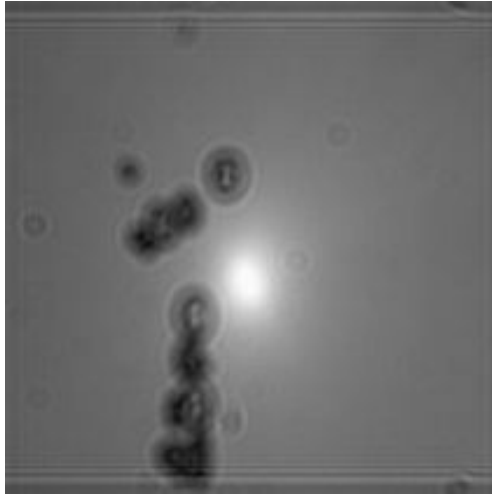
[Fig. 4.31] 3D-shape restoration of erythrocyte



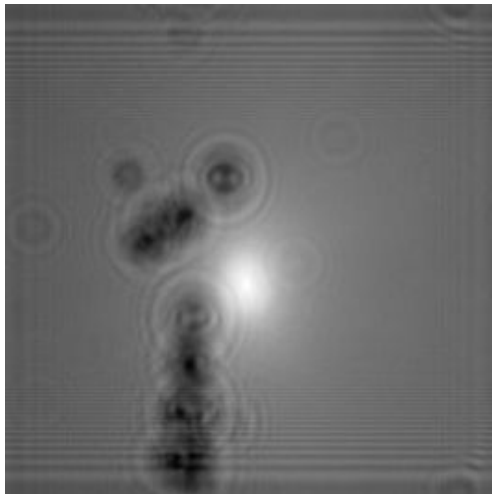
[Fig. 4.32] Line profile of Fig.4.30

4.4.3 다세포 적혈구 실험 결과

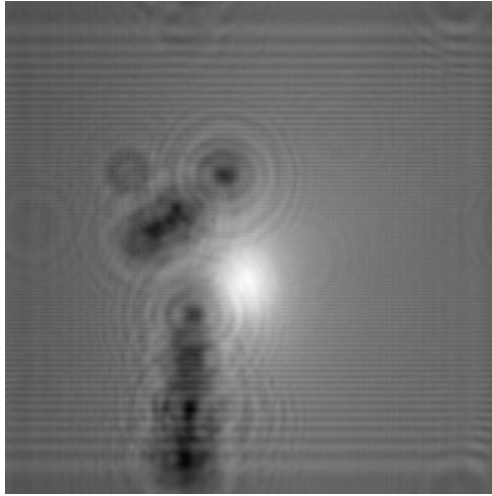
[Fig 4-33,34,35]는 여러군으로 섞여 있는 적혈구를 대물렌즈에서 0.4~0.8 mm 떨어진 지점에 홀로그램을 CCD 카메라로 획득한 이미지이다. 수치적으로 계산할 hologram data는 실험장치에 의해 위상 왜곡을 제거한 Date를 사용하였다.



[Fig. 4.33] Measurement result erythrocyte Test piece (z : 0.4mm)



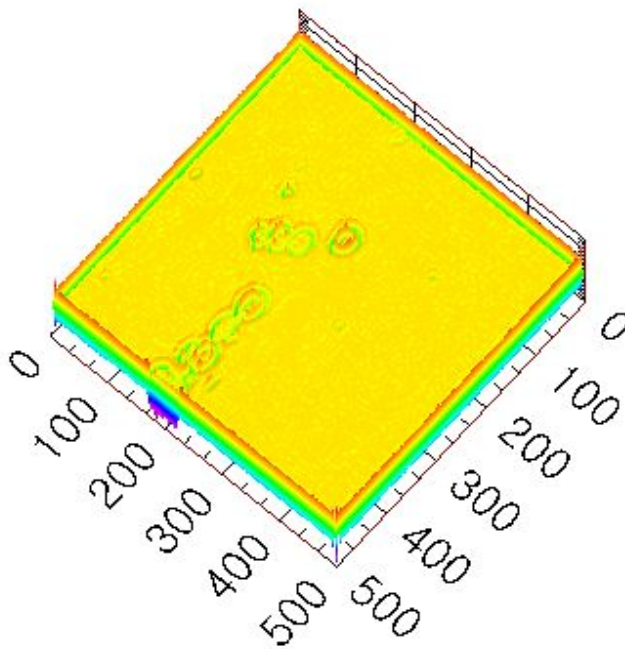
[Fig. 4.34] Measurement result erythrocyte Test piece (z : 0.6mm)



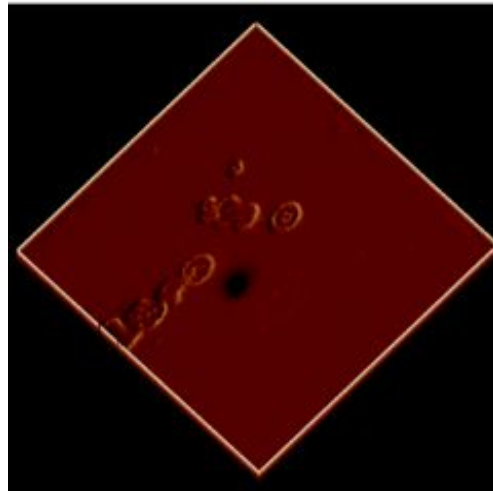
[Fig. 4.35] Measurement result erythrocyte Test piece ($z : 0.8\text{mm}$)

디지털 홀로그래피 현미경 시스템에서 정확한 재생은 매우 중요한 문제이다. 재생에 필수적으로 Fourier-transform이 활용되어진다. Numerical Reconstruction에서 쓰이는 Fourier transform은 fast Fourier transform(FFT) algorithm에 의한 discrete Fourier transform(DFT)이다. 디지털 홀로그래피 현미경의 저장장치는 픽셀 간격을 가지는 CCD 카메라이므로 불연속한 정보를 취한다. CCD 카메라로부터 얻어진 정보는 2차원의 data array로 나타내어진다. 이러한 2차원 data array은 comb function으로 치부할 수 있으며, comb function의 discrete Fourier transform은 역시 comb function이다. 그렇기 때문에 CCD 카메라를 통하여 얻어진 데이터를 푸리에 변환할 경우 푸리에 영역에서 주기적으로 스펙트럼 영역이 반복된다. 각각의 스펙트럼 영역 사이의 거리(center-to-center)는 2차원 data array에서의 Date 사이의 간격으로 결정된다. CCD 카메라에 적용하면, CCD 카메라 픽셀간의 픽셀 간격이다. 적혈구 같은 시료의 측정에서 문제는 스펙트럼 영역사이의 거리가 충분히 멀지 않으면 즉 픽셀 간격이 충분히 작지 않을 경우 스펙트럼 영역이 서로 겹치는 현상이 발생한다. 주파수 영역에서의 겹침 현상은 불필요한 노이즈의

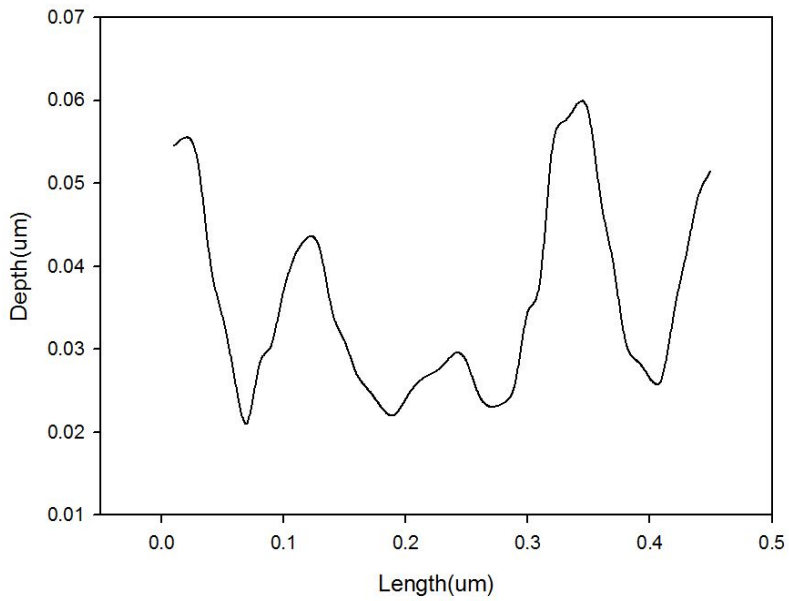
추가로 이미지에 훼손을 발생할 수 있다. 이러한 겹침 현상으로 인한 오차를 줄이기 위해 불연속적인 Date간의 간격을 좁혀야만 한다. 상대적인 Date간의 간격을 줄이기 위해서 원본 이미지의 홀로그램 주위를 값이 제로인 값들로 둘러싼다. 그러면, 배열 전체의 크기가 커져서 전체적인 크기에 비해 각각의 Date간의 거리가 상대적으로 적어지는 효과를 나타냄으로 겹침현상을 저지할 수 있다. 이런 방법을 Zero-padding 방법라고 한다. Fig.4-36은 Zero-padding Method를 적용하여 3차원 형상 구현한 이미지이다. 이런 오차와 Zero-padding의 효과를 보이기 위해서는 기준 시편인 Resolution target의 값을 비교하기 위해 사용하였다.



[Fig.4-36] 3D-shape restoration of erythrocyte



[Fig.4-37] 3D-shape restoration of erythrocyte



[Fig.4-38] Line profile of Fig.4.36

제 5 장 결 론

본 논문에서 안정화 적용한 디지털 홀로그래피 현미경의 광학계 구성은 마흐젠더 간섭계를 사용하여 레이저로부터 나온 빔이 광 커플러를 이용하여 두 방향으로 나뉘어 시료를 투과한 물체광과 참조광의 영상을 확대하기 위해서 현미경 대물렌즈 사용하여, 세포 또는 미세구조를 갖는 물체를 실시간으로 관찰, 측정하기 위해 재생 알고리즘을 연구하며, 진동 및 외란에도 안정된 시스템을 구축하여 3차원 형상 측정을 위한 디지털 홀로그래피 현미경을 연구하고자 하였다. 안정화를 적용한 디지털 홀로그래피 현미경을 구현하여 resolution target과 표준 스케일 시편을 측정하여 측정하고자하는 생물학적, 미세가공 등 시편의 적용하여 3차원 형상을 구현 하였다.

디지털 홀로그래피 시스템을 구성하여 안정화시키기 위하여 간섭계에 외부 외란 및 진동과 소음, 온도차와 같은 외부적 환경 변화에 의하여 발생하는 간섭무늬의 동적 떨림에 해당하는 오차신호를 PZT에 전압을 가해 주는 방식을 채택하였다. 이런 오차 신호를 추출하기 위해 간섭계를 통해 검출된 간섭무늬의 간격을 2.5 mm씩 둔 두개의 광 검출기를 통해 정현파 형태의 세기를 가지는 간섭무늬를 획득한 후 두 신호의 차이를 활용하여 실질적인 오차 신호를 처리 하였다. 간섭무늬 안정화를 위하여 632.8 nm 파장을 갖는 Laser를 사용 하였으며 간섭무늬의 stabilization에 영향을 미치는 회로요소에 인가되는 시상수 및 오차 signal의 이득이며, 또한 Laser Power가 민감하게 반응 하였다. 또한 공기유동이 있을 때 간섭무늬 움직임 signal과 stabilization된 간섭무늬를 측정할 수 있었다. 또한 stabilization 회로를 작동 시킬 때 Optic table이 방진되지 않거나, 주변외란의 영향을 받았어도 간섭무늬의 안정화됨을 확인할 수 있었다.

또한, stabilization System을 디지털 홀로그래피 현미경 시스템에 적용하였다. 디지털 홀로그래피를 이용한 기본 표준시편을 이용하여 선행한 결과 상대오

차는 $0.2\mu\text{m}$ 의 상대오차 결과를 얻었으며, 이를 이용하여 실제의 3차원 상을 재생할 수 있었다.

| | 측정시편 | | 안정화 |
|------|----------------------|--------------|-----------------|
| 측정범위 | 50n~10 μm | 안정도 | 1/40 |
| 측정오차 | 0.5 μm | Displacement | 5 μm |

디지털 홀로그래피에서 영차 회절광과 시편 공간의 간섭이 존재한다. 이러한 영차 회절광과 시편광 간섭은 오차 및 에러와 나타내기 때문에 수치적 이미지 영상을 재생하고자 할 때 신호 대비 잡음비를 좋지 않는 역할을 한다. 디지털 홀로그래피는 2차원 측정뿐만 아니라 3차원 측정 및 다양한 측정이 동시에 하며, 이와같은 장점을 가진 측정 장비의 조건이 되기 위해서 영차 회절광과 시편 공간 간섭에 의한 잡음의 제거가 필수적이다. 본 실험연구에서는 해상도 및 분해능을 유지하면서 영차 회절광을 제거하기 위하여 푸리에 변환 방법으로 홀로그램을 얻고, 이를 사용한 영차 회절광과 물체광 간섭항의 영향이 없이 홀로그램을 형성함으로써 신호 대 잡음비가 영향이 가지 않기 위한 이미지 상을 재생하였다.

일반적으로 바이오셀 또는 μm 이하의 형상 또는 크기는 현미경에 배율 높은 렌즈를 사용하여 측정할 수 있다. 그러나 상용 현미경으로는 3차원 측정이 불가능하기 때문에 이를 극복하기 위하여 공초점(Confocal)현미경을 이용하고 있다. 공초점 현미경은 콘트라스트가 증가, 불필요한 산란광을 제거해 고해상도가 높으며, Z 방향으로 스캔이 가능하여 형상, 단차 측정으로 3차원 측정이 가능하나, 측정범위가 좁고 측정시간이 길다는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 보완하면서 마이크로미터에서 나노 단위까지 형상의 2차원과 3차원 영상을 동시에 얻기 위하여 투과형 디지털 현미경을 제작하였고, 3차원 이미지 영상을 구현하기 위하여 효율적인 Phase unwrapping Algorithm을 이용하

였다. 안정화를 적용한 디지털 홀로그래피 현미경이 마이크로미터에서 나노 단위까지 형상의 2차원과 3차원 이미지 영상을 실시간 정밀하게 측정할 수 있음을 확인할 수가 있었다. 본 연구 결과 안정화 시스템을 적용한 디지털 홀로그래피 현미경은 실시간으로 관찰이 필요한 생물, 바이오 분야 등에 적용 될 수 있음을 확인할 수가 있었다.

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 ||," Proc. Phys. Soc. 64, 449-469(1951)
4. F. 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. E. N. Leith and J. Upatnieks. Reconstructed wavefronts and communication theory. JOSA, 52:1123.1130, 1962.
7. Y. N. Denisyuk. Photographic reconstruction of the optical properties of an object in its own scattered field. Sov. Phys. Dokl., 7:543, 1962.
8. F. Wyrowski and O. Bryngdahl. Digital holography as part of diffractive optics. Rep Prog Phys., pages 1481.1571, 1991.
9. J. W. Goodman and R. W. Lawrence. Digital image formation from electronically detected holograms. Appl Phys Lett, 11:77.79, 1967.
10. L. P. Yaroslavskii and N. S. Merzlyakov. Methods of Digital Holography. Consultants Bureau, New York, 1980.
11. M. A. Kronrod. N. S. Merzlyakov and L. P. Yaroslavskii, "Reconstruction of a hologram with a computer," Sov. Phys. Phys. Tech. Phys. 17, 333-334 (1972)
12. J. H. Bruning, J. E. Gallapher, D. P. Roslnfeld, A. D. White, D. J. Brangaccio and D. R. Herriott, "digital wavefront measuring interferometer for testing optical plane and lenses," Appl. Opt. 31, 2693-2703 (1974)
13. I. Yamaguchi, T. Zhang, "phase shifting digital holography," Opt. Lett. 22, 1268-1270 (1997)

14. P. Carre, "Installation et utilisation du comparateur photoelectrique et interferential du Burear International des Poids et Mesures," *Metrologia* 2, 13-23 (1996)
15. K. Creath, "phase shifting speckle interferometry," *Appl. Opt.* 24, 3053-3058(1985)
16. I. Yamaguchi, T. Zhang, "phase shifting digital holography," *Opt. Lett.* 22, 1268-1270 (1997)
17. T. Zhang and I. Yamaguchi, "Three-dimensional microscopy with phase shifting digital holography," *Opt. Lett.* 23, 1221-1223 (1998)
18. H. van Brug, "Phase-step calibration for phase-stepped interferometry," *Appl. Opt.* 38, 3549-3555 (1999)
19. U. Schnars, and W. Juptner, "Direct recording of hologram by a CCD target and numerical reconstruction," *Appl. Opt.* 33, 179-181(1994)
20. B. Javidi, and E. Tajahuerce, "Three-dimensional object recognition by use of digital holography," *Opt. Lett.* 25, 610-612(2000)
21. B. C. Kim and S. W. Kim, "Absolute interferometer for three-dimensional profile 45 measurement of rough surfaces," *Opt. Lett.* 28, 528-530 (2003)
22. A. W. Lohmann and D. Paris. Binary Fraunhofer holograms generated by computer. *Applied Optics*, 6:1739.1748, 1967.
23. F. Wyrowski and O. Bryngdahl. Digital holography as part of diffractive optics. *Rep Prog Phys.*, pages 1481.1571, 1991.
24. L. P. Yaroslavskii and N. S. Merzlyakov. *Methods of Digital Holography.* Consultants Bureau, New York, 1980.
25. J. W. Goodman and R. W. Lawrence. Digital image formation from electronically detected holograms. *Appl Phys Lett*, 11:77.79, 1967.
26. O. Schnars and W. Juptner. Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction. *Applied Optics*, 33:179.181, 1994.
27. J. S. Kollin, S. A. Benton, and M. L. Jepsen. Real-time display of 3-D computed holograms by scanning the image of an acousto-optic modulator.

- In Proc. SPIE, Holographic Optics II: Principles and Applications, volume 1136, pages 178.185, 1989.
28. P. S.-Hilaire, M. Lucente, and S. A. Benton. Synthetic aperture holography: A novel approach to three dimensional displays. *JOSA A*, 9:1969.1977, 1992.
 29. Ryder S. Nesbitt, Steven L. Smith, Raymond A. Molnar, and Stephen A. Benton. Holographic recording using a digital micromirror device, 1999.
 30. Mark Lucente. Interactive three-dimensional holographic displays: seeing the future in depth. *SIGGRAPH Computer Graphics*, special issue on “Current, New, and Emerging Display Systems”, 31:63.67, 1997.
 31. Michael H. Burney, Lawrence J. Dickson, and Bernard H. Freund. Allelectronic system for the capture, storage, and display of volumetric images utilizing holography. In Proc. SPIE, volume 2734, pages 227.234, 1996.
 32. C. Petz and M. Magnor. Fast hologram synthesis for 3D geometry models using graphics hardware. In Proc. SPIE, Practical Holography XVII and Holographic Materials IX, volume 5005, pages 266.275, 2003.
 33. J. Schwider, R. Burow, K-E Elssner, J. Grznna, R. Spolaczyk, and K. Merkel, “Digital wave-front measuring interferometry: some systematic error sources,” *Appl. Opt.* 22, 3421-3432 (1983)
 34. Y. Y. Cheng nad J. C. Wyant, “Phase shifter calibration in phase shifting interferometry,” *Appl. Opt.* 24, 3049-3052 (1985)
 35. G. Gaussorgurs, “Infrared thermography,” translated by Chomet, S., Champman & Hall, London, (1994)
 36. T.-C. Poon, M. H. Wu, K. Shinoda, and T. Suzuki, “Optical scanning holography,” *Proc. IEEE* 84, 753 - 764 (1996).
 37. G. Indebetouw, “Properties of a scanning holographic microscope: improved resolution, extended epth-of-focus, and/or optical sectioning,” *J. Mod. Opt.* 49, 1479 - 1500 (2002).

38. G. Indebetouw, Y. Tada, J. Rosen, and G. Brooker, "Scanning holographic microscopy with resolution exceeding the Rayleigh limit of the objective by superposition of off-axis holograms," *Applied Optics* 46, 993 - 1000 (2007).
39. G. Indebetouw, and P. Klysubun, "Space-time digital holography: A three-dimensional microscopic imaging scheme with an arbitrary degree of spatial coherence," *Applied Physics Letters* 75, 2017 - 2019 (1999).
40. S. R. Chinn, E. A. Swanson, and J. G. Fujimoto, "Optical coherence tomography using a frequency-tunable optical source," *Opt. Lett.* 22, 340 - 342 (1997).
41. A. Dubois, L. Vabre, A. C. Boccara, and E. Beaufrepaire, "High-resolution full-field optical coherence tomography with Linnik microscope," *Appl. Opt.* 41, 805 - 812 (2002).
42. M. C. Pitter, C. W. See, and M. G. Somekh, "Full-field heterodyne interference microscope with spatially incoherent illumination," *Opt. Lett.* 29, 1200 - 1202 (2004).
43. M. V. Sarunic, S. Weinberg, and J. A. Izatt, "Full-field swept-source phase microscopy," *Optics Letters* 31, 1462 - 1464 (2006).
44. B. Nilsson, and T. E. Carlsson, "Direct three-dimensional shape measurement by digital light-in-flight holography," *Applied Optics* 37, 7954 - 7959 (1998).
45. M. K. Kim, "Wavelength scanning digital interference holography for optical section imaging," *Opt. Lett.* 24, 1693 - 1695 (1999).
46. A. Dakoff, J. Gass, and M. K. Kim, "Microscopic three-dimensional imaging by digital interference holography," *J. Electron. Imaging* 12, 643 - 647 (2003).
47. M. C. Potcoava, and M. K. Kim, "Optical tomography for biomedical applications by digital interference holography," *Measurement Science & Technology* 19, 074010 (2008).
48. M. C. Potcoava, C. N. Kay, M. K. Kim, and D. W. Richards, "In vitro imaging of ophthalmic tissue by digital interference holography," *Journal of*

- Modern Optics 57, 115 - 123 (2010).
49. L. F. Yu, and Z. P. Chen, "Improved tomographic imaging of wavelength scanning digital holographic microscopy by use of digital spectral shaping," Optics Express 15, 878 - 886 (2007).
 50. F. Montfort, T. Colomb, F. Charriere, J. Kuhn, P. Marquet, E. Cuche, S. Herminjard, and C. Depeursinge, "Submicrometer optical tomography by multiple-wavelength digital holographic microscopy," Applied Optics 45, 8209 - 8217 (2006).
 51. F. Charriere, A. Marian, F. Montfort, J. Kuehn, T. Colomb, E. Cuche, P. Marquet, and C. Depeursinge, "Cell refractive index tomography by digital holographic microscopy," Optics Letters 31, 178 - 180 (2006).
 52. W. S. Choi, C. Fang-Yen, K. Badizadegan, R. R. Dasari, and M. S. Feld, "Extended depth of focus in tomographic phase microscopy using a propagation algorithm," Optics Letters 33, 171 - 173 (2008).
 53. M. Debailleul, B. Simon, V. Georges, O. Haeberle, and V. Lauer, "Holographic microscopy and diffractive microtomography of transparent samples," Measurement Science & Technology 19, 074009 (2008).
 54. N. Fukutake, and T. D. Milster, "Proposal of three-dimensional phase contrast holographic microscopy," Optics Express 15, 12662 - 12679 (2007).
 55. X. Chen, M. Gramaglia, J. A. Yeazell, "Phase-shift calibration algorithm for phase shifting interferometry," J. Opt. Soc. Am. A 17, 2061-2066 (2000)
 56. K. A. Goldberg, and J. Bokor, "Fourier-transform method of phase-shift determination," Appl. Opt. 40, 2886-2894 (2001)
 57. K. Okada, A. Sato, and J. Tsujiuchi, "Simultaneous calculation of phase distribution and scanning phase in phase shifting interferometry," Opt. Comm. 84, 118-124(1991)
 58. I. B. Kong and S. W. Kim, "General algorithm of phase shifting interferometry by iterative least-square fitting," Opt Eng. 34, 183-188 (1995)
 59. S. W. Kim, M. G. Kang, and G. S. Han, "Accelerated phase measuring

- interferometry by least square for phase shifting interferometry,” *Opt. Eng.* 36, 3101-3106 (1997)
60. H. Y. Yun and C. K. Hong, “Inter-frame intensity correlation matrix method for self-calibration in phase shifting interferometry,” in preparation
 61. Y. Zhang and X. Zhang, “Reconstruction of a complex object from two in-line holograms,” *Opt. Exp.* 11, 572-578 (2003)
 62. M. Centurion, Y. Pu, Z. Liu, and D. Psaltis, T. W. Hänsch, “Holographic recording of laser-induced plasma,” *Opt. Lett.* 29, 772-774 (2004)
 63. C. Kittel, *Introduction to Solid State Physics*, 7th ed., (John Wiley & Sons Inc.1997), pp. 406-410.
 64. Y. C. Cho, H. J. Lee, S. E. Park, C. R. Cho, and S. Jeong, “Structural study of the intermediate phase of the ferroelastic $\text{Pb}_3(\text{PO}_4)_2$ crystal,” *Phys. Rev. B* 66. 184103 (2002)
 65. G. Indebetouw and P. Klysubun, T. Kim and T. Poon, “Imaging properties of scanning holographic microscopy,” *J. Opt. Soc. Am. A* 17, 380-390 (2000)
 66. S. Jeong and M. Jang, A. Lim, “Definition and geometrical consideration of the domain walls of $\text{Pb}_3(\text{PO}_4)_2$ ferroelastic crystals,” *Phys. Rev. B* 48, 340-343 (1993)
 67. P. Guo and A. J. Devaney, “digital microscopy using phase shifting digital holography with two reference waves,” *Opt. Lett.* 29, 857-859 (2004)
 68. David W. Robinson, Graeme T. Reid, “Interferogram Analysis: Digital fringe pattern measurement techniques”, IOP publishing Ltd., 1993.
 69. K. Greath, “Phase-measurement interferometry techniques,” *Progress in Optics XXVI*,pp. 349-393, 1988
 70. Charette P.G. and Hunter I. W., “Robust phase-unwrapping method for phase images with high noise content”, *Appl. Opt.*, Vol. 35, pp. 3506-3513,1996
 71. J.S.Lee., “Optical Tomography and Superresolution and Extreme Wide Angle Lens Design in Digital Holography”. Myongji Univ., master’s thesis, pp. 11-12, 2014

72. J.Y. Shin., “Measurement of surface shape and step height of advanced components using digital holography system”. Chosun Master’s thesis, pp. 12-14, 2016