

博士學位論文

투과 반사 통합형 디지털  
홀로그래피 현미경에 관한 연구



濟州大學校 大學院

物理學科

趙亨峻

2008年8月

# 투과 반사 통합형 디지털 홀로그래피 현미경에 관한 연구

指導教授 劉 榮 勳

趙 亨 峻

이 論文을 理學 博士學位 論文으로 提出함

2008 年 8 月

趙亨峻의 理學 博士學位 論文을 認准함

審査委員長

委  
員

委  
員

委  
員

委  
員

이

정

신

간

유

윤

원

상

의

명



濟州大學校 大學院

2008 年 8 月

# Study of Digital Holographic Microscope Using a Combination of Transmission-Reflection

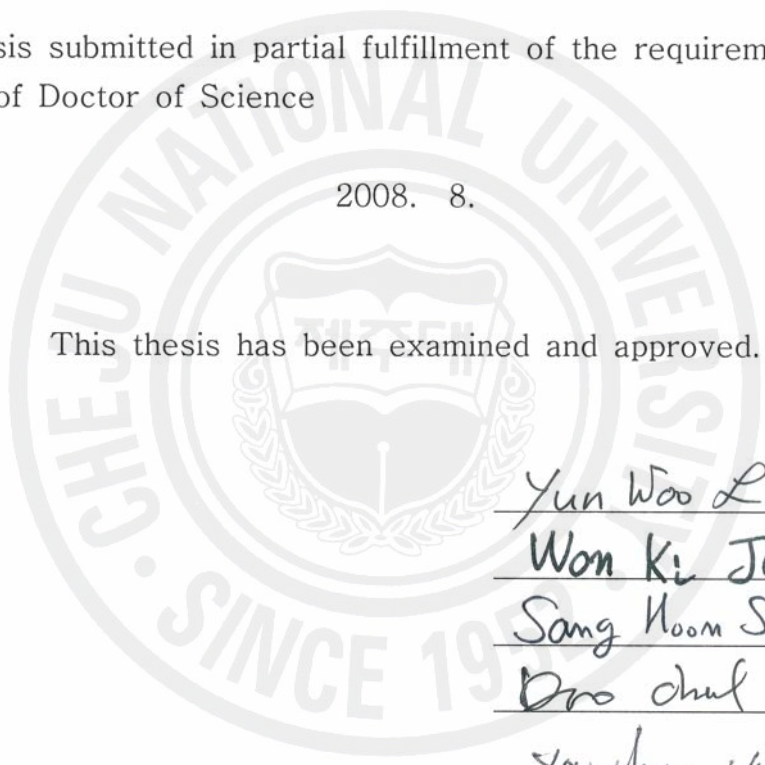



HyungJun Cho

(Supervised by professor YoungHun Yu)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the  
degree of Doctor of Science

2008. 8.

This thesis has been examined and approved.

2008. 8.

Department of Physics  
GRADUATE SCHOOL  
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

# 목 차

목 차 .....	i
그림목차 .....	iii
제 1 장 서 론 .....	1
제 2 장 이론적 배경 .....	5
1. 홀로그래피 .....	5
1.1 홀로그램 기록 및 재생 .....	6
2. 디지털 홀로그래피 현미경 .....	9
2.1 디지털 홀로그램 기록 .....	10
2.2 디지털 홀로그램 재생 .....	13
2.3 위상 펼침 .....	16
3. In-Line 디지털 홀로그래피 .....	20
3.1 허상 제거 .....	20
3.1.1 기하학적 배치를 이용한 허상 제거 .....	21
3.1.2 Zero Padding을 이용한 허상 제거 .....	21
3.2 영차 회절 광 제거 .....	25
3.2.1 평균 제거 방법을 이용한 영차 회절 광 제거 .....	26
4. 투과 반사 통합형 디지털 홀로그래피 현미경을 이용한 굴절률 측정 .....	27
제 3 장 실험 및 방법 .....	33
1. 일반적인 투과형과 반사형 In-Line 디지털 홀로그래피 현미경 .....	33
2. 투과 반사 통합형 디지털 홀로그래피 현미경 .....	35

제 4 장 결과 및 고찰 .....	40
1. In-Line 디지털 홀로그래피에서 허상 제거 .....	40
1.1 기하학적 배치를 이용한 허상 제거 .....	40
1.2 Zero Padding을 이용한 허상 제거 .....	43
2. In-Line 디지털 홀로그래피에서 영차 회절 광 제거 .....	51
2.1 주사(Scan) 방법을 이용한 영차 회절 광 제거 .....	51
2.2 물체 광과 기준 광을 이용한 영차 회절 광 제거 .....	57
2.3 변형된 평균 제거 방법을 이용한 영차 회절 광 제거 .....	62
3. 프레넬 Zone Plate 효과 제거 .....	90
4. 투과 반사 통합형 홀로그래피 현미경을 이용한 굴절률 측정 .....	98
4.1 굴절률 측정의 전산기시능 .....	99
4.2 PCX 렌즈의 굴절률 측정 .....	107
4.3 Cr-less 격자무늬 시료의 굴절률 측정 .....	114
 제 5 장 결 론 .....	 120
 Abstract .....	 123
 참고문헌 .....	 128

## 그림 목 차

Fig. 2.1	Hologram Recording. ....	7
Fig. 2.2	Hologram Reconstruction. ....	8
Fig. 2.3	Configuration of Digital Hologram Microscope and Image Reconstruction. MO : magnification lens, R : reference wave, O : object wave, b : distance between object and lens, c : distance between CCD and lens, d : distance between CCD and image plane. ....	11
Fig. 2.4	Two-Dimensional Sampling by CCD. ....	12
Fig. 2.5	Geometry for Hologram Reconstruction. $x-y$ : hologram plane, $\xi-\eta$ : reconstruction plane, $d$ : reconstruction distance, $\Psi(\xi, \eta)$ : reconstructed wave front. ....	14
Fig. 2.6	Hologram Recording and Reconstruction. ....	18
Fig. 2.7	Phase Unwrapping. ....	19
Fig. 2.8	Problem of Digital Encoding. Phase-Contrast Image(a), and Error(b) by 8-Bit-Encoded Numbers. ....	19
Fig. 2.9	Wave Path of real image and virtual image. solid line : wave path of real image, dotted line : wave path of virtual image, MO : magnification lens, c : distance between CCD and lens, d : distance between CCD and image plane. ....	22
Fig. 2.10	Reconstructed Virtual Image Size. ....	23
Fig. 2.11	Hologram Recording and Reading Mechanism in the In-Line Holographic Microscopy. ....	24
Fig. 2.12	Phase of Digital Holographic Microscopy. ....	28
Fig. 2.13	Thickness of 3D Reconstruction Image. ....	30
Fig. 3.1	Schematic of Digital Holographic Microscopy. VN : variable de-	

	nsity filter, BS : beam splitter, M : mirror, O : object wave, R : reference wave, BE : beam expander with spatial filter, ML : microscope objective lens. ....	34
Fig. 3.2	Digital Holographic Microscopy Using a Combination of Tran- smission-Reflection. VN : variable density filter, BS : beam splitter, M : mirror, BEL1 and BEL2 : lens for beam expander P : pin hole, ML : microscope objective lens, MTS : transmission and reflection selection component, CL : Condenser Lens, SL : loop change shutter. .....	36
Fig. 3.3	Transmission and Reflection Selection Component. ....	37
Fig. 3.4	Beam Pass of Transmission and Reflection. ....	38
Fig. 4.1	Reconstructed Image in case $c + d = 57$ cm . (unit : cm ) .....	41
Fig. 4.2	Hologram and Reconstructed Image when $c = d$ . ....	42
Fig. 4.3	(a) Hologram and (b) Reconstructed image. ....	44
Fig. 4.4	Hologram images constructed by the combination of a referen- ce beam and an objective beam that is passed through the objective lens without objects. ....	45
Fig. 4.5	Hologram images constructed by the combination of a referen- ce beam and an objective beam that is passed through the objective lens with objects. ....	46
Fig. 4.6	Zero Padding of Hologram. ....	47
Fig. 4.7	Reconstructed of each area in A, B, C, D. ....	48
Fig. 4.8	Reconstructed image obtained by a Zero Padding method. ....	49
Fig. 4.9	Reconstructed Image after Suppression of DC term. (a) Hologr- am, (b) Reconstruction Image, (c) area (b). ....	52
Fig. 4.10	Scanning Method. ....	52
Fig. 4.11	Hologram Information by Scanning Method. ....	53

Fig. 4.12	Hologram by Scanning Method. ....	54
Fig. 4.13	Hologram Reconstruction by Scanning Method. ....	55
Fig. 4.14	Reconstructed Image with Hologram Eliminated Object Wave and Zero-Order Diffraction. ....	58
Fig. 4.15	Reconstructed Image by Using Numerical Zero Order Diffraction Elimination Filter and Object Wave Elimination from Hologram. ....	59
Fig. 4.16	Reconstructed Image with Hologram, which is Eliminated Object and Reference Wave. (a) hologram, (b) intensity of object wave, (c) intensity of reference wave, (d) reconstructed image with hologram, which is eliminated object and reference wave, (e) reconstructed image without elimination of object and reference wave. ....	61
Fig. 4.17	DC term Suppression Hologram by Subtracting Average Intensity. ....	63
Fig. 4.18	Reconstruction of Fig. 4.17. ....	64
Fig. 4.19	Enlarge of Fig. 4.18 in Dotted Line. ....	65
Fig. 4.20	Number of Pixel for Average. ....	67
Fig. 4.21	DC term Suppression Hologram by Subtracting variable Pixels Average Intensity. ....	68
Fig. 4.22	Reconstruction of Fig. 4.17. ....	69
Fig. 4.23	Suppression Rate of Total Pixels Intensity. ....	70
Fig. 4.24	Fourier Transform of Fig. 4.5. ....	71
Fig. 4.25	Fourier Transform of Fig. 4.21. ....	72
Fig. 4.26	Low Frequency Rate. ....	73
Fig. 4.27	Hologram images by 50× Objective Lens. ....	76
Fig. 4.28	DC term Suppression Hologram by Subtracting variable Pixels Average Intensity. ....	77
Fig. 4.29	Suppression of Total Pixels Intensity. ....	78



Fig. 4.30	Fourier Transform of Fig. 4.27. ....	79
Fig. 4.31	Fourier Transform of Fig. 4.28. ....	80
Fig. 4.32	Low Frequency Rate. ....	81
Fig. 4.33	Reconstruction with DC Term Suppressed Hologram by average Intensity Subtracted of Constant Pixels Number. ....	83
Fig. 4.34	Reconstruction with DC Term Suppressed Hologram by average Intensity Subtracted of Constant Pixels Number. ....	84
Fig. 4.35	A of Fig. 4.33(a) and Fig. 4.34(a). ....	85
Fig. 4.36	B of Fig. 4.33(a) and Fig. 4.34(a). ....	86
Fig. 4.37	MTF of Fig. 4.35. ....	87
Fig. 4.38	MTF of Fig. 4.36. ....	88
Fig. 4.39	Hologram images constructed by the combination of a reference beam and an objective beam that is passed through the objective lens without objects. ....	91
Fig. 4.40	Phase Reconstruction images constructed by Fig. 4.20. ....	92
Fig. 4.41	Phase Unwrapping images constructed by Fig. 4.39. ....	93
Fig. 4.42	Fresnel Zone Plate Elimination. ....	94
Fig. 4.43	Fresnel Zone Plate Elimination after 10 Minute. ....	96
Fig. 4.44	Fresnel Zone Plate Elimination after 1 Day. ....	97
Fig. 4.45	Plano-Convex Lens. ....	100
Fig. 4.46	Hologram of Plano-Convex Lens. ....	102
Fig. 4.47	Phase Reconstruction of Fig. 4.46. ....	104
Fig. 4.48	Phase Unwrapping of Fig. 4.47. ....	105
Fig. 4.49	Refractive Index Restoration. ....	106
Fig. 4.50	Hologram of Plano-Convex Lens. ....	108
Fig. 4.51	Phase Reconstruction of Plano-Convex Lens. ....	109
Fig. 4.52	Phase Unwrapping of Fig. 4.51. ....	110
Fig. 4.53	Distribution of Refractive Index. ....	112
Fig. 4.54	Refractive Index of Dotted Line in Fig. 4.53. ....	113

Fig. 4.55 Cr-less Pattern Spider Mask. .... 115

Fig. 4.56 Hologram of Cr-less Pattern Spider Mask. .... 116

Fig. 4.57 Phase Unwrapping of Fig. 4.40. .... 117

Fig. 4.58 Refractive Index Restoration. .... 118



## 제 1 장 서 론

나노기술(Nano Technology)은 비교적 역사가 짧은 기술로서 탄소 나노튜브(Carbon Nanotube)나 단일 전자 트랜지스터(Single Electron Transistor)와 같은 비 생물체의 물질 특성 연구 및 반도체 분야 등에 한정되어왔다. 그러나 최근에 이르러서는 나노기술과 생물학이 접목되어 생체에서 일어나는 분자 및 원자 단위의 물리·화학적인 현상을 이해하고 응용함으로써, 생물학 및 의학 등의 바이오기술(Bio Technology) 전반에 혁명적인 변화를 초래 할 것으로 예상되고 있다.

그러나 이제까지 나노-바이오 기술을 뒷받침 하는 도구로는 MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)와 나노기계화(Nanomachining) 기술로 제작된 STM(Scanning Tunneling Microscope), AFM(Atomic Force Microscope), NSOM(Near field Scanning Optical Microscope) 등 이다. 그러나 살아있는 생물체를 실시간으로 관측해야 하는 생물학 및 의학 분야의 적용에는 한계가 있다.

디지털 홀로그래피 기술은 30 여년전부터 개발되어온 기술로 비파괴 검사, 암호화 기술, 3차원 인식(3D Vision) 그리고 홀로그램 현미경 분야에 그 응용을 위한 실용화 기술에 근접하는 연구가 진행되어 오고 있다[1-5]. 디지털 홀로그래피 기술은 CCD(Charged Coupled Device)에 기록된 홀로그램을, 수치적 회절 계산 방법을 이용하여 3차원 영상을 재생하는 것으로, Goodman과 Laurence가 제안 하였고, Kronrod 등에 의하여 실현 되었다[1,2]. 고전 홀로그래피와 디지털 홀로그래피의 가장 큰 차이점은 홀로그램 기록 장치와, 3차원 영상 재생방법 이다. 디지털 홀로그래피의 기록 장치는 홀로그래피 사진건판(Holography Photo-Plate) 대신 CCD 등의 디지털 영상 기록 장치를 사용하여, 화학적 홀로그램 생성 과정을 생략 할 수 있을 뿐 아니라 실시간으로 대상 체의 홀로그램 데이터를 기록 할 수 있게 되었다. 또한 광학적 방법을 이용하여 3차원 영상을 재생하던 고전 홀로그래피와 달리 컴퓨터를 이용한 수치 재생으로 3차원 영상을 재생함으로써, 공간적인 이득과 측정된 결과의 보관 및 편집, 이동이 가능해 졌다. 이러한 디지털 홀로그래피 기술은 컴퓨터 성능 향상과 디지털 입력장치의

비약적인 발전으로 고해상도 실시간 3차원 관측을 필요로 하는 다수의 응용 분야에서 관심을 갖고 있다[6-10].

그러나 CCD를 통해 얻어진 홀로그램을 이용하여 수치적으로 영상을 재생 할 때 영차 회절 광(Zero Order of Diffraction)을 포함한 DC 항과 허상(Twin Image)이 잡음으로 작용하여 신호 대 잡음비(Signal to Noise Ratio)가 좋은 영상을 구현하기 어렵다[11-15]. DC 항과 허상을 제거하여 신호 대 잡음비가 좋은 영상을 구현하는 방법으로는 하드웨어(Hardware)적인 방법과 소프트웨어(Software)적인 방법으로 구분된다. 광학적 시스템을 변경하여 실상과 허상 및 DC 항을 공간적으로 분리하는 것이 하드웨어적인 방법이고, 홀로그램 데이터를 수치적으로 재생하는 과정에서 제거하는 것이 소프트웨어적인 방법이다.

홀로그래피는 하드웨어적으로 기준 광(Reference Beam)의 입사 각도에 따라 In-Line 홀로그래피와 Off-Axis 홀로그래피로 분류된다. In-Line 홀로그래피는 Gabor가 최초로 사용한 방식으로, 물체 광(Objective Beam)에 대한 기준 광의 입사 각도가  $0^\circ$  인 경우이다. In-Line 홀로그래피의 경우 실상과 허상 및 DC 항이 중첩되어 선명한 상을 얻기 어렵다. 이러한 단점은 Leith와 Upatnieks에 의해 고안된 Off-Axis 홀로그래피에 의해 해결되었다. Off-Axis 홀로그래피는 기준 광이 각을 갖고 입사하는 것으로, 실상과 허상 및 DC 항이 공간적으로 분리된다. 그러나 Off-Axis 홀로그래피에서 실상은 CCD 재생영역 중 1/4 영역에서 만 재생된다[16-23]. 이는 해상도가 1000 line/mm 이상인 홀로그래피 사진건판을 사용하는 고전 홀로그래피와 달리, 50 lines/mm 이하 인 디지털 홀로그래피의 경우 시계(FOV : Field Of View)에 영향을 미치게 된다[20]. 즉 고해상도의 영상을 얻기 위해서는 In-Line 홀로그래피를 이용하여 소프트웨어적인 방법으로 허상 및 DC 항을 제거해야 한다[24-33].

DC 항을 제거하기 위한 소프트웨어적인 방법은 크게 4가지 방법이 연구 되어 왔다. 첫째는 측정된 홀로그램을 수치적으로 푸리에 변환을 시켜 공간 주파수가 영인 정보를 빼고 역 푸리에 변환을 통하여 DC 항이 제거 된 홀로그램을 얻은 후 재생하는 방법이다[11~13]. 이 방법은 한 번의 홀로그램 측정으로 DC 항을 제거 할 수 있기 때문에 편리하다. 그러나 기준 광이 이상적이지 않을 경우에는

DC 항 제거가 어렵다. 두 번째 방법은 위상 이동을 이용하여 DC 항을 제거하는 방법이다. 이 방법은 위상을 이동 시키면서 4장의 홀로그래를 얻고 이를 수치적으로 계산하여 DC 항이 제거 된 홀로그래를 얻는 방법이다[14]. 이 방법은 실험적으로 복잡하지만, 매우 안정적으로 DC 항을 제거 할 수 있다. 그리고 세 번째 방법은 측정된 홀로그래에서 물체 광의 복소수 파동만을 수학적으로 얻고 이를 재생하는 방법이다. 이 방법은 가장 간단한 방법이지만, DC 항과 실상이 겹쳐있는 경우에는 DC 항 제거가 용이하지 않다[15]. 네 번째 방법은 얻어진 홀로그래를 평균하여 원본 홀로그래에서 빼준 후 재생하는 평균 제거 방법으로, 한 번의 홀로그래 측정으로 재생이 가능하며, 계산 과정이 간단하여 재생시간이 짧다. 그러나 이 방법은 DC 항 근처의 실상 정보가 손실 될 수 있다. 현재까지 연구된 소프트웨어적인 DC 항 및 허상 제거 방법은 그 실효성의 측면에서 한계가 있다.

또한 빛을 이용하여 측정하는 경우 대상 체의 굴절률은 중요한 정보이다. 생물체와 같이 조직에 따라 굴절률이 다른 경우, 3차원 깊이 정보는 그 굴절률 차이만큼 왜곡된다. 굴절률은 단순한 깊이 정보에 그치지 않고 물질의 밀도를 역으로 환산해낼 수 있다. 이는 생물체 조직의 종류 및 밀집도, 결정 물질에서의 결함 등의 검사에 유용한 정보이다. 현재 측정 대상의 구조와 굴절률을 동시에 측정할 수 있는 장치는 엘립소메트리(Ellipsometry)가 유일하다. 그러나 엘립소메트리는 3차원 상을 구성하는 것이 아닌 박막의 두께와 굴절률의 단편적인 정보를 얻을 수 있고, 이 또한 주사(Scan) 방식으로 측정시간이 매우 길다[34-43]. 현재까지 측정 대상의 사실적인 3차원 구조와 굴절률을 동시에 측정할 수 있는 연구는 보고되어 있지 않다.

본 연구에서는 CCD에서 구현 할 수 있는 최고의 해상도 구현을 위해 In-Line 디지털 홀로그래피 현미경을 구성하여, 중첩된 허상 및 DC 항을 효과적으로 제거하는 방법을 연구하였다. 그리고 투과 반사 통합형 디지털 홀로그래피 현미경을 구성하여 3차원 구조와 굴절률을 동시에 측정하였다.

허상 제거의 경우, 기하학적 배치를 이용한 허상 제거 방법과, Zero Padding

을 이용한 허상 제거 방법을 연구하였다. 본 연구에서 수행한 2가지의 허상 제거 방법은 종래의 허상 제거 방법(위상을 이동하여 측정 후 허상을 제거하는 방법)과 달리 한 번의 홀로그래프 측정으로 허상을 제거 할 수 있는 방법으로 실시간 3차원 영상 관측이 가능하다. 더욱이 Zero Padding을 이용한 허상 제거 방법의 경우 하드웨어적인 제약이 없고, 재생 속도에도 큰 영향을 미치지 않는다.

DC 항 제거의 경우 3가지의 방법을 연구하였다. 첫 번째, 주사 방법의 경우 실험적으로 반복적인 홀로그래프 저장과 그에 따른 반복계산이 필요하여 다른 제거 방법에 비하여 불편하지만, DC 항을 효과적으로 제거 할 수 있다. 두 번째, 물체 광과 기준 광을 이용한 DC 항 제거 방법의 경우 DC 항 제거율이 주사 방법에 미치지 못한다. 그러나 주사 방법을 이용하지 않으므로 반복적인 불편함을 감소시킬 수 있다. 세 번째, 변형된 평균 제거 방법의 경우 기존 평균 제거 방법의 문제점인 실상의 손실을 최소화하여 신호 대 잡음비가 높은 3차원 재생 영상을 구현 할 뿐 아니라, 기존 방법과 마찬가지로 한 번의 홀로그래프 측정으로 DC 항 제거가 가능하고, 재생속도가 빠르다.

또한 본 연구에서는 굴절률의 영향을 받은 투과형 홀로그래피 현미경과 굴절률의 영향을 받지 않은 반사형 홀로그래피 현미경을 결합하여 굴절률을 측정 할 수 있는 투과 반사 통합형 디지털 홀로그래피 현미경을 개발하여, 3차원 영상과 굴절률을 동시에 측정하였다.

## 제 2 장 이론적 배경

### 1. 홀로그래피

은염을 이용한 감광물질을 사용하는 사진(Photography)이 처음으로 인류에 소개된 것은 1839년으로 160년 이상의 역사를 가지고 있으며, 현재에는 컴퓨터와 직접 연결 하거나 사진기에 장착되어 있는 화면을 통하여 촬영된 사진을 실시간으로 확인할 수 있는 디지털 사진기의 보급이 보편화 되어 있다. 이에 비해 홀로그래피는 1948년 Gabor에 의해 제안되었으나, 실제 활발한 연구가 진행된 것은 레이저(Laser)가 개발되고 난 1960년 이후부터이다. 홀로그래피는 전체라는 뜻의 홀로(Holo)와 기록 방법이라는 뜻의 그래피(Graphy)가 합쳐져 만들어진 합성어로 전체를 기록하는 방법이라는 의미를 가지고 있다. 일반사진은 태양이나 기타 조명에 의해 피사체로부터 반사되는 광이 카메라 렌즈를 통해 맺는 피사체의 상을 기록하는 것으로, 필름에는 상의 명암에 따른 빛의 세기(Intensity) 분포만 기록된다. 그러나 홀로그래피는 피사체에 투사되어 이 피사체로부터 반사되거나 투과되어 나오는 빛의 위상 변화를 기록하는 것으로 필름에는 빛의 간섭(Interference)에 의한 간섭무늬가 기록되어 진다. 일반사진에서는 빛의 위상 정보가 손실 되지만, 홀로그래피에서는 위상 정보가 손실 되지 않고 저장될 수 있는 것이다. 1948년에 개발되었으나 1960년 이후부터 활발한 연구가 진행된 것은 간섭무늬를 만들 수 있는 광원, 즉 가 간섭길이(Coherence Length)가 충분한 레이저가 개발되었기 때문이다.

1948년에 영국의 Gabor에 의한 홀로그래피 발명이후, 1960년에 레이저의 출현을 시작으로 1962년 미국의 Leith와 Upatnieks가 Off-Axis 홀로그래피 제작 기술을 개발하여 홀로그래피의 실용화를 위한 발판을 마련하였고, 같은 해 러시아의 Densiyuk에 의해 In-Line 홀로그래피 제작기술을 개발하였다. 그리고 1968년 미국의 Benton에 의한 무지개 홀로그래피 기술은 홀로그래피 영상 및

예술 분야 응용에 새로운 계기를 마련하였으며, 1969년 독일의 Lohman에 의한 컴퓨터 제작 홀로그램의 소개로 홀로그램의 디지털화의 토대를 제공하였다. 이는 Goodman과 Laurence 등에 의해 CCD와 컴퓨터를 이용한 디지털 홀로그래피로 발전하였다[44-51]. 디지털 홀로그래피 기술은 실제 측정된 홀로그래피를 화학적인 현상과정과, 광학적인 재생과정 없이 3차원 상을 구성할 수 있는 방식이었으나, 당시의 디지털 카메라와 컴퓨터의 성능은 디지털 홀로그래피를 구현하는데 한계가 있었다. 1990년대에 컴퓨터와 디지털 카메라가 눈부신 발전을 거듭했고, 이에 1990년대 후반부터 디지털 홀로그래피 기술은 현재 까지 많은 관심을 갖게 되었다. 현재 홀로그래피는 영상, 측정, 보안, 대용량 저장, 예술에 이르기 까지 다양한 분야에 적용되고 있으며, 활발한 연구가 진행되고 있다.

### 1.1 홀로그램 기록 및 재생

일반적인 홀로그래피는 사진건판 등의 평평한 필름 위에 기록되지만 삼차원의 정보를 갖는다. 사진촬영과 같은 전통적인 결상 기법에서는, 피사체에 의한 빛의 세기 분포만을 기록한다. 결과적으로 광 경로에 대한 정보가 손실되는 것이다.

홀로그래피의 특성은 물체로부터 나오는 빛의 위상과 진폭을 둘 다 기록하는 것이다. 그러나 홀로그래피에 사용되는 사진건판 역시 빛의 세기에만 반응하므로, 위상정보를 빛의 세기 변화로 변환시켜야 한다. 홀로그래피에서 위상정보를 기록하기 위해 빛의 가 간섭성에 의한 간섭무늬를 사진건판에 기록하게 된다. Fig. 2.1은 빛의 가 간섭성을 이용한 홀로그램의 기록 방법에 대한 모식도이다.  $E_R$  은 가 간섭길이가 충분한 광원으로, 사진건판으로 입사되는 기준 광이고,  $E_o$  는  $E_R$  과 동일한 광원에서 분리되어 나온 빛으로 피사체에 의하여 입사되는 물체 광이다. 사진건판에는 기준 파와 물체 파에 의한 간섭무늬가 형성된다. 간섭무늬는 피사체에 의한 빛의 세기 뿐 아니라 위상에 대한 정보도 포함하고 있다. Fig. 2.2는 홀로그램 재생 방법의 모식도이다. 홀로그램의 재생은 홀로그램 기록 시와 동일한 기준 광  $E_R$  을 홀로그램이 기록된 사진 건판에 조사하면, 3차원 상이 재생된다. 간섭무늬에서 임의의 점의 세기는 물체 광의 위상과 관련되어 있으므로, 기록 된 홀로그램은 물체 광의 진폭 뿐 아니라 위상에 대한 정보도



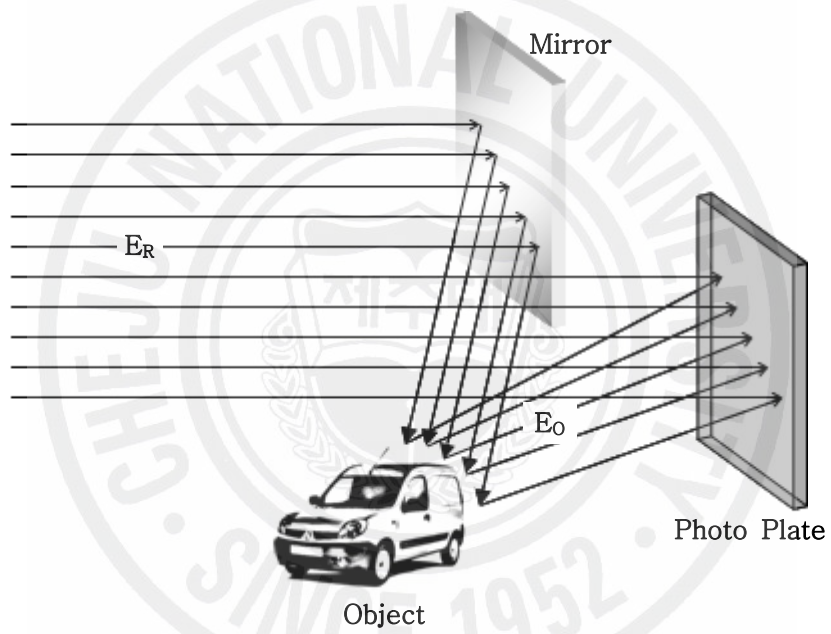


Fig. 2.1 Hologram Recording.

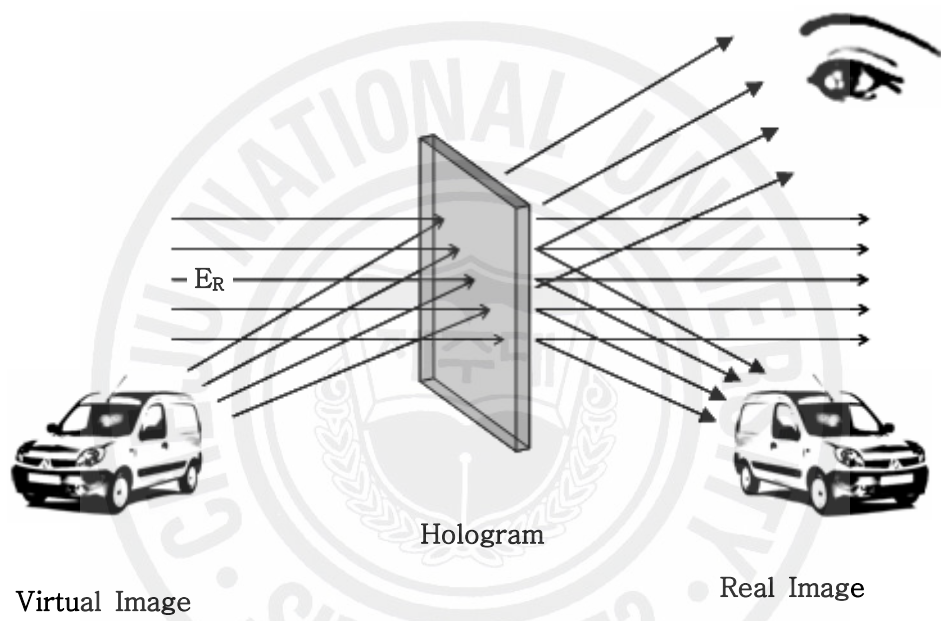


Fig. 2.2 Hologram Reconstruction.

포함되어있으므로, 홀로그램을 보고 있는 관찰자는 완전한 삼차원 상을 보게 된다. Fig. 2.2에서 보는 것과 같이 관찰자는 허상을 보게 된다. 실상은 재생을 위하여 사용된 기준 광이 실제 수렴하여 생기는 위상공역 현상에 의해 형성되고, 허상의 경우는 물체를 멀리서 바라보는 것과 같이 물체 표면에서 반사된 빛이 홀로그램의 재생에 의해 인식되는 상이다.

## 2. 디지털 홀로그래피 현미경

약 30년 전 Goodman과 Laurence 등에 의해 CCD와 컴퓨터를 이용한 디지털 홀로그래피가 제안되었다. 사진건판 대신 CCD를 사용하므로, 화학적 현상과정을 생략할 수 있고, 광학적 재생과정 대신 컴퓨터 수치 재생을 이용하므로, 측정과 동시에 3차원 상을 재생할 수 있게 되었다. 디지털 홀로그래피는 컴퓨터와 디지털 영상 저장장치의 눈부신 발전으로 1990년대부터 많은 연구가 이루어지고 있다.

지난 10년 동안 디지털 홀로그래피는 많은 형태로 응용되었다. Haddad와 Boyer 등은 생물 의학용 현미경(Biomedical Microscope)을 위해 푸리에 변환(Fourier Transform) 홀로그래피를 제안하였다[44,52]. Schnars와 Jüptner은 CCD로 저장된 프레넬(Fresnel) 홀로그램의 재생을 위한 수치 재생 방법을 발표하였다[53]. 이 방법은 위치 측정(Position Measurement), 내시경 검사(Endoscopy), 그리고 광 가 간섭 단층 촬영(Optical Coherence Tomography) 등에 다양하게 응용되었다. 그러나 초기에 응용된 디지털 홀로그래피 기법은 위상 천이 간섭계(Phase-Shifting Interferometry)를 응용한 디지털 홀로그래피 기법으로, 단지 진폭 대비(Amplitude-Contrast) 영상으로 빛의 세기를 재생하기 위한 방법이었다. 그 후 디지털 홀로그래피 간섭계를 이용한 위상 대비(Phase-Contrast) 영상을 재생하는 방법이 제안되었다[54-60]. 현재는 하나의 홀로그램을 이용하여 진폭 대비 영상 및 위상 대비 영상 재생이 가능할 뿐 아니라, 실시간에 가까운 재생속도와 수십 nm 이하의 광축방향 해상도를 갖는 디지

털 홀로그래피 현미경이 보고되고 있다.

## 2.1 디지털 홀로그램 기록

디지털 홀로그래피 현미경에서 홀로그램 데이터는 CCD로 입력되는 물체 광  $O$  와 기준 광  $R$  의 간섭에 의하여 주어진다. Fig. 2.3과 같은 디지털 홀로그래피 현미경을 고려하면, CCD에 형성되는 2차원 홀로그램의 빛 세기는 (2.1)식과 같다[24,61].

$$I_H(x,y) = |R|^2 + |O|^2 + R^*O + RO^* \quad (2.1)$$

일반적인 디지털 홀로그래피와는 달리 대물렌즈를 사용하는 디지털 홀로그래피 현미경의 물체 광은 (2.2)식과 같이 표현된다.

$$O(\xi_i, \eta_i) = \iint \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda D}(\xi_i^2 + \eta_i^2)\right] \delta(\xi_i - M\xi_0) \delta(\eta_i - M\eta_0) O_0(\xi_0, \eta_0) d\xi_0 d\eta_0 \quad (2.2)$$

(2.2)식에서  $D = f \frac{c+d}{b}$  이고,  $f$  는 초점거리이다.  $O_0(\xi_0, \eta_0)$  는 대물렌즈(MO)에 입사하는 물체 광,  $M$  은 확대배율이다. (2.2)식은 렌즈의 변환함수  $\exp\left[\frac{i\pi}{\lambda D}(\xi_i^2 + \eta_i^2)\right] \delta(\xi_i - M\xi_0) \delta(\eta_i - M\eta_0)$  와 물체 광  $O_0(\xi_0, \eta_0)$  의 콘볼루션(Convolution)이다. 그리고 (2.1)식에서  $R$  은 기준 광,  $O$  는 물체 광을 나타내고  $R^*$ ,  $O^*$  는 기준 광과 물체 광의 공액복소수이며, In-Line 홀로그래피에서 기준 광과 물체 광의 각도는  $0^\circ$  이다. 식(2.1)의 첫째항은 기준 광만의 세기이고, 둘째 항은 물체 광만의 세기이며, 첫 번째 항과 두 번째 항의 세기를 합쳐서 영차 회절 광(DC 항)이라 한다. 셋째 항과 넷째 항은 각각 허상과 실상을 나타낸다.

일반적으로 디지털 홀로그래피에서 홀로그램을 기록하는 장치로 CCD를 사용한다. CCD의 사양은 픽셀 수  $N_x \times N_y$ , 픽셀크기  $\Delta x \times \Delta y$  와 CCD의 센서 크

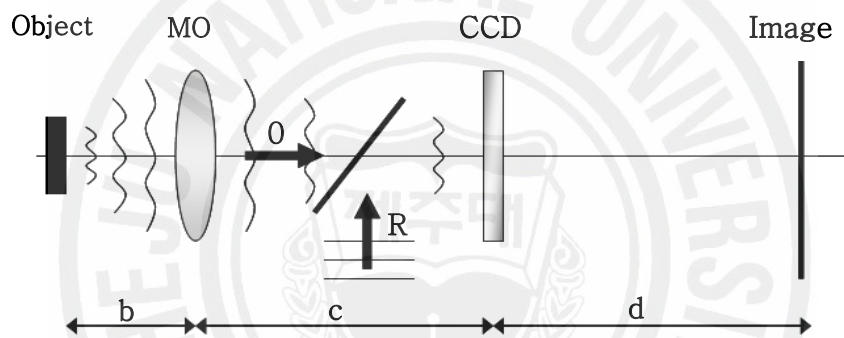
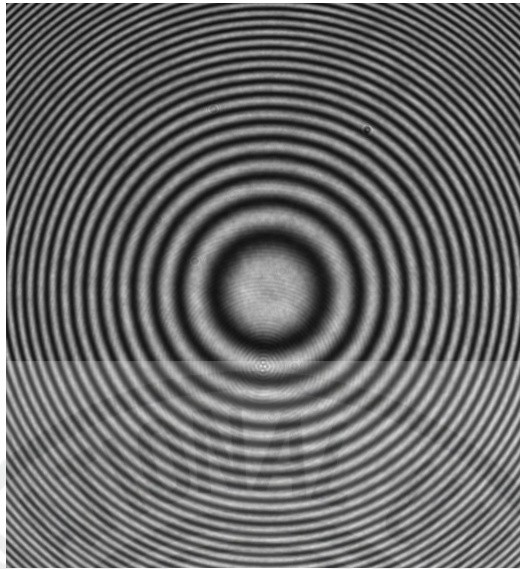
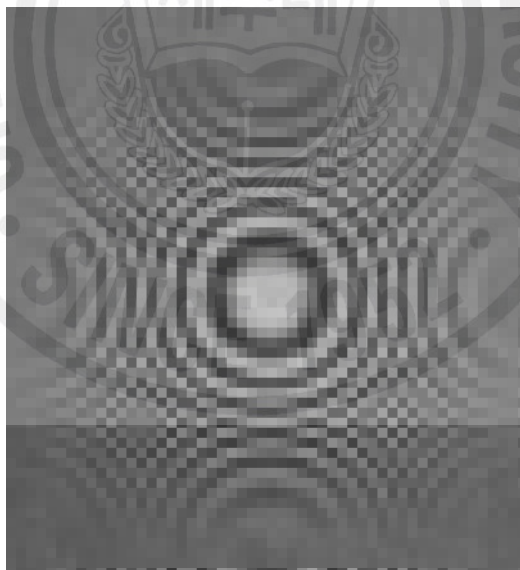


Fig. 2.3 Configuration of Digital Hologram Microscope and Image Reconstruction. MO : magnification lens, R : reference wave, O : object wave, b : distance between object and lens, c : distance between CCD and lens, d : distance between CCD and image plane.



(a)  $I_H(x, y)$



(b)  $I_H(k, l)$

Fig. 2.4 Two-Dimensional Sampling by CCD.

기  $L_x \times L_y$  로 주어진다. CCD의 임의의 픽셀에 저장되는 간섭세기  $I_H(k,l)$  는 (2.3)식과 같다[14,15].

$$I_H(k,l) = I_H(x,y) \text{rect}\left(\frac{x}{L_x}, \frac{y}{L_y}\right) \sum_{k=0}^N \sum_{l=0}^N \delta(x - k\Delta x, y - l\Delta y) \quad (2.3)$$

(2.3)식은 기준 광과 물체 광에 의한 홀로그램 데이터가 CCD에 의하여 디지털화 되어 기록되는 것을 의미한다. Fig. 2.4는 프레넬 Zone Plate 효과에 의한 홀로그램(Fig. 2.4(a))  $I_H(x,y)$  가 (2.3)식에 의해 디지털화 되어 기록되는 것(Fig. 2.4(b))을 보여 주고 있다. Fig. 2.4의 전산시뮬기에 사용된 CCD의 픽셀 수는  $N_x \times N_y = 50 \times 50$  , 픽셀 크기는  $\Delta x \times \Delta y = 4.7 \times 4.7 \mu m$  이다[62].

## 2.2 디지털 홀로그램 재생

일반적인 홀로그램의 경우 기준 광을 홀로그램에 투사하는 것으로 3차원 영상이 재생된다. 수치 재생 과정은 기준 광과 홀로그램 세기  $I_H$  를 이용하여 (2.4)식과 같이 표현된다[61].

$$\Psi = RI_H = R|R|^2 + R|O|^2 + |R|^2O + R^2O^* \quad (2.4)$$

(2.4)식에서 첫 번째 항과 두 번째 항은 영차 회절 항이고, 세 번째 항은 허상, 네 번째 항은 실상이다. Fig. 2.5는 홀로그램 재생 시 홀로그램 면과 영상 재생 면 사이의 관계를 그림으로 표현한 것이다. Fig. 2.5에서  $x-y$  평면은 홀로그램 면, 즉 CCD 면 이고,  $\xi-\eta$  평면은 홀로그램 재생 면이다.  $d$  는 홀로그램 면과 재생 면사이의 거리이다. 또한 Fig. 2.5는 In-Line 홀로그래피의 경우고,  $\xi-\eta$  평면에서 중앙에 위치한 것이 영차 회절 광, 그 주변의 초점이 흐린 상이 허상, 외곽에 초점이 뚜렷한 상이 실상이다.

(2.4)식에서 프레넬-키르히호프 적분(Fresnel-Kirchhoff Integral)을 이용하면

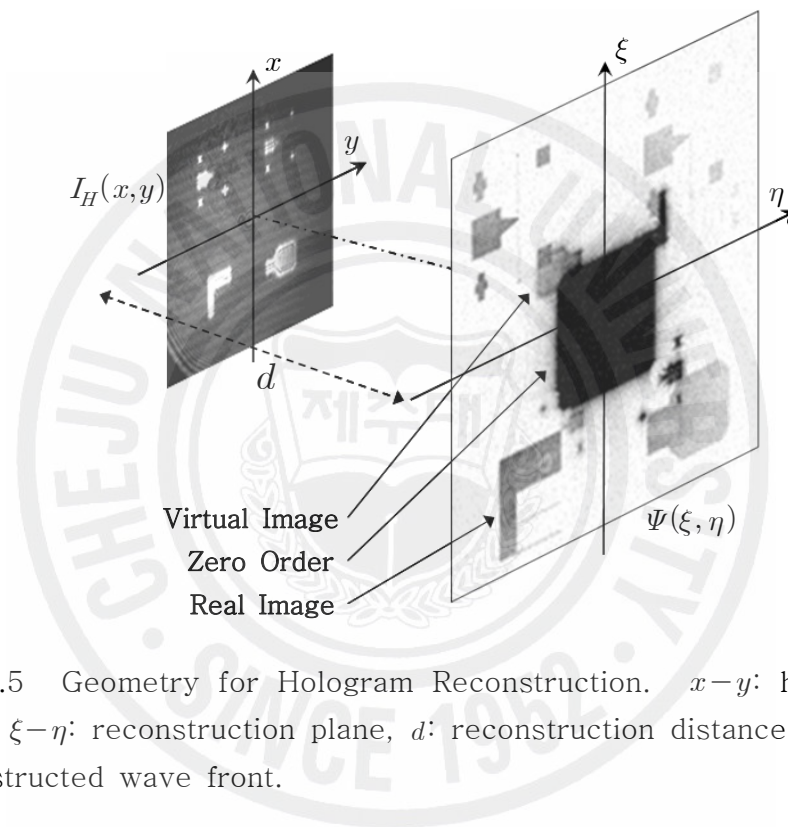


Fig. 2.5 Geometry for Hologram Reconstruction.  $x-y$ : hologram plane,  $\xi-\eta$ : reconstruction plane,  $d$ : reconstruction distance,  $\Psi(\xi, \eta)$ : reconstructed wave front.



홀로그램 재생 면에서의 파동분포는 (2.5)식과 같다[63,64].

$$\begin{aligned} \Psi(\xi, \eta) = & A \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda d}(\xi^2 + \eta^2)\right] \\ & \times \iint I_H(x, y) \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda d}(x^2 + y^2)\right] \exp\left[\frac{i2\pi}{\lambda d}(x\xi + y\eta)\right] dx dy \end{aligned} \quad (2.5)$$

여기서  $\lambda$  는 파장이고,  $A = \exp[i2\pi d/\lambda]/(i\lambda d)$  는 상수이다. (2.5)식은

$$I_H(x, y) \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda d}(x^2 + y^2)\right] \quad (2.6)$$

을 주파수 공간  $\xi/\lambda d$  와  $\eta/\lambda d$  으로 푸리에 변환 한 것이다[65-68]. 일반적으로 (2.5)식을 계산하기 위하여 FFT(Fast Fourier Transform) 알고리즘을 이용한다. 수치 재생을 위한 (2.5)식을 2차원 FFT 로 변환하면,

$$\begin{aligned} \Psi(m, n) = & A \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda d}(m^2 \xi^2 + n^2 \eta^2)\right] \\ & \times FFT\left\{I_H(k, l) \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda d}(k^2 \Delta x^2 + l^2 \Delta y^2)\right]\right\}_{m, n} \end{aligned} \quad (2.7)$$

와 같다. 여기서  $k, l, m, n$  은 정수 ( $0 \leq k, l, m, n \leq N$ ) 이고,  $I_H(k, l)$  은 CCD에 기록된 디지털 홀로그램이다(식(2.3)). (2.7)식은 복소수이므로, 재생 영상은 (2.8)식과 같이 얻어진다.

$$I(m, n) = Re[\Psi(m, n)]^2 + Im[\Psi(m, n)]^2 \quad (2.8)$$

(2.8)식은 진폭 대비 영상(Amplitude-Contrast Image)이다. 그리고 위상 대비 영상(Phase-Contrast Image)은 (2.9)식 이다.

$$\phi(m, n) = \arctan \left\{ \frac{\text{Im}[\Psi(m, n)]}{\text{Re}[\Psi(m, n)]} \right\} \quad (2.9)$$

(2.8)식과 (2.9)식을 이용하여 2차원 영상과 3차원 영상을 구성 할 수 있다.

### 2.3 위상펼침

디지털 홀로그램 재생을 통해 얻어진 위상 차  $\phi$  의 범위는  $-\pi < \phi \leq \pi$  이다. 하지만 실제의 물체 위상은  $2\pi$  라디안 범위 이상의 값을 가지고 있다[69-78].

위상차 정보를 이용하여 실제 물체 위상을 복원하는 방법이 위상 펼침(Phase Unwrapping)이다. 감긴 위상(Wrapped phase)과 위상 펼침 한 위상의 관계는 다음과 같다[79].

$$W\{\phi(n)\} = \psi(n) = \phi(n) + 2\pi k \quad (2.10)$$

여기서  $W$  는 감긴 연산자(wrapping operator)이고,  $\psi(n)$ ,  $\phi(n)$ 은 각각 감긴 위상과 재생된 위상이다.  $k$  는 정수이고,  $n$  은 표본화에 따른 상수이다.

감긴 연산자는 항상  $-\pi < \psi(n) \leq \pi$  이 되게 한다. 감긴 위상의 차이와 실제 위상의 차이는 다음과 같다[80].

$$\begin{aligned} \Delta\{\phi(n)\} &= \phi(n+1) - \phi(n) \\ \Delta\{k(n)\} &= k(n+1) - k(n) \end{aligned} \quad (2.11)$$

식(2.10)과 (2.11)를 사용하면 감긴 위상의 차는 (2.12)식과 같다.

$$\Delta\{W\{\phi(n)\}\} = \Delta\{\phi(n)\} + 2\pi\Delta\{k_1(n)\} \quad (2.12)$$

(2.12)식을 다시 감긴 연산자에 적용하면 (2.13)식과 같다.

$$W\{\Delta\{W\{\phi(n)\}\}\} = W\{\Delta\{\psi(n)\}\} = \Delta\{\phi(n)\} + 2\pi[\Delta\{k_1(n)\} + k_2(n)] \quad (2.13)$$

여기에서  $k_1$  과  $k_2$  는 두 번의 감긴 연산자를 사용하여 나타난 것이다. 식 (2.13)은 감긴 위상차가 (2.14)식과 같은 구간에 존재하게 한다.

$$-\pi < \Delta\{\phi(n)\} \leq \pi \quad (2.14)$$

따라서 (2.13)식에서  $2\pi[\Delta\{k_1(n)\}+k_2(n)] = 0$  이며,

$$\Delta\{\phi(n)\} = W\{\Delta\{W\{\phi(n)\}\}\} = W\{\Delta\{\psi(n)\}\} \quad (2.15)$$

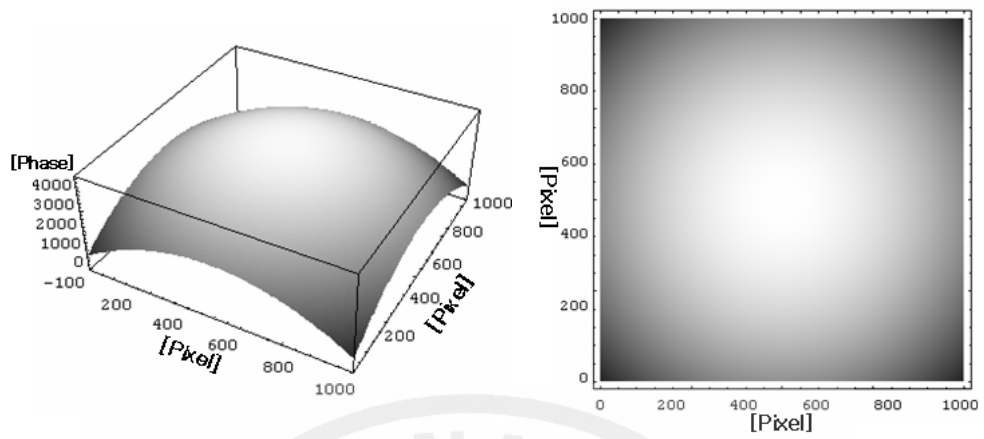
된다. 이는 인접한 감긴 위상 데이터의 미분 값이다.  $W\{\Delta\{\psi(n)\}\}$  은 실제 위상면의 인접한 점 사이의 미분 값인  $\Delta\{\phi(n)\}$  와 같다. 그러므로 미분 불가능한 점이 없다면, 재생된 위상은 (2.16)식과 같다.

$$\phi(m) = \phi(0) + \sum_{n=0}^{m-1} W\{\Delta\{\psi(n)\}\} \quad (2.16)$$

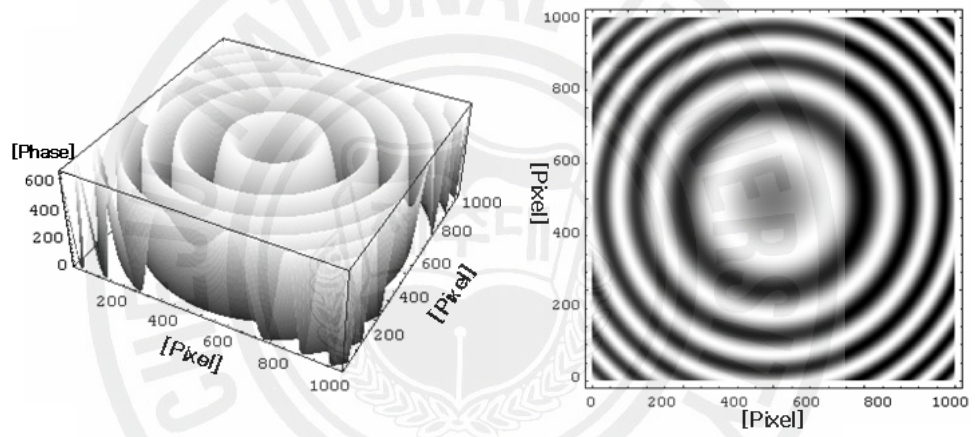
식(2.16)은 위상 펼침에 의한 감긴 위상차를 이용하여 구할 수 있다.

전산시능기를 이용하여 확인하면 Fig. 2.6, Fig. 2.7과 같다. Fig. 2.6(a)는 피사체의 실제 모양이고, (b)는 물체 광과 기준 광의 간섭에 의하여 CCD 면에 기록되는 홀로그램이고, 전산시능기에 사용한 CCD의 픽셀 수는 가로 세로 각각  $N_x \times N_y = 1000 \times 1000$  이고, 기준 광 및 물체 광의 파장은 633 nm 이다. (c)는 식(2.9)에 의하여 재생된 위상 대비 영상이다. 그러나 Fig. 2.6은 위상 펼침에 대한 전산시능기를 위한 모델로 영차 회절 광과 허상에 대한 영향은 제외 하였다.

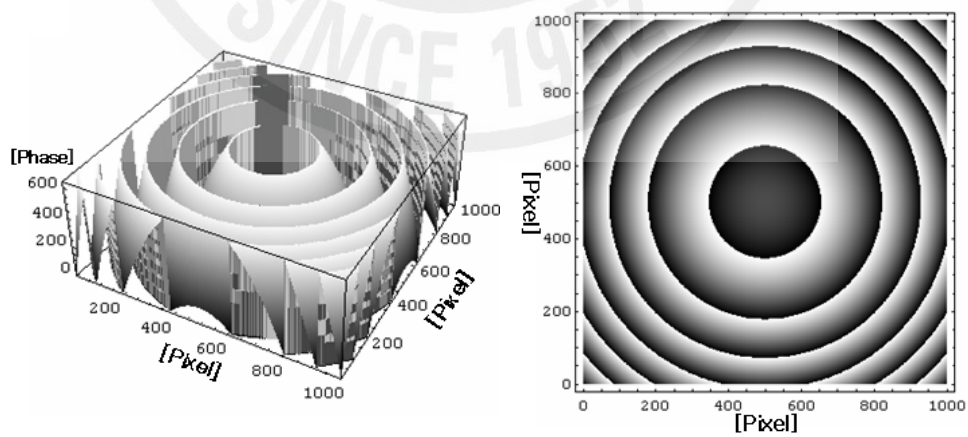
Fig. 2.7은 (2.16)식을 이용하여 위상 펼침을 한 결과이다. Fig. 2.7은 Fig. 2.6(a)와 일치한다. 그러나 실제 홀로그램 간섭무늬 세기 기록의 경우 그 파장이 기록되는 것이 아니고, 디지털화되어 기록된다. 예를 들어 8 bit 부호화(En-



(a) Object.



(b) Hologram Recording.



(c) Phase-Contrast Image.

Fig. 2.6 Hologram Recording and Reconstruction.

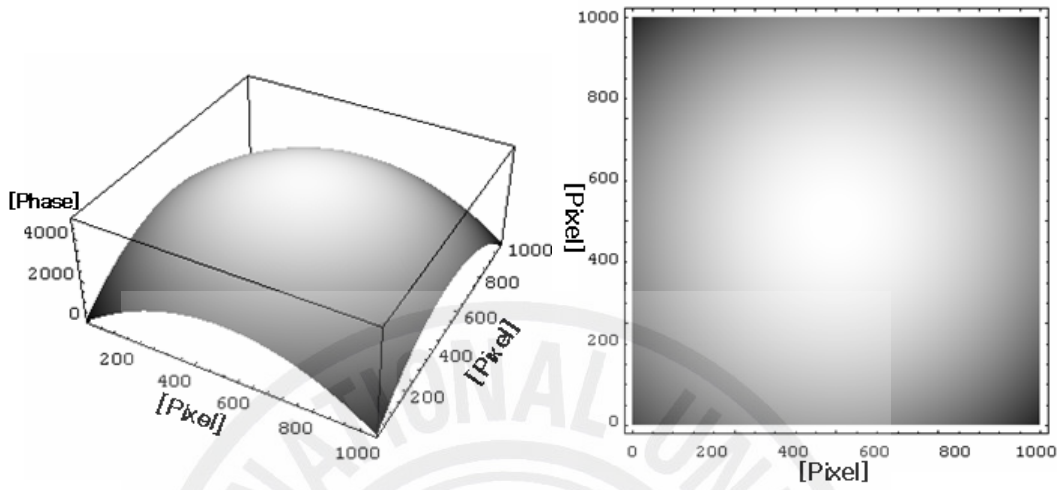


Fig. 2.7 Phase Unwrapping.

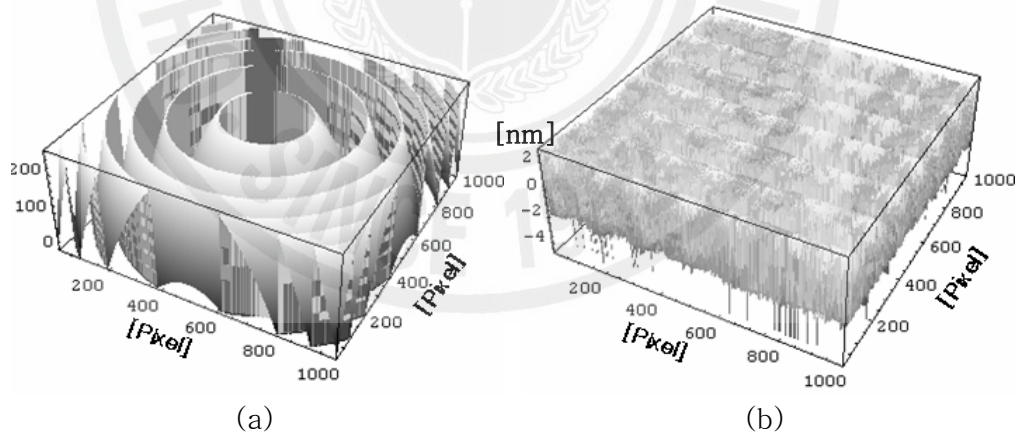


Fig. 2.8 Problem of Digital Encoding. Phase-Contrast Image(a), and Error(b) by 8-Bit-Encoded Numbers.

coded) CCD의 경우 0 ~ 633 nm 의 위상차는 0 ~ 255 사이의 값으로 기록된다(Fig. 2.8(a)). Fig. 2.8(b)는 디지털화에 의한 오차를 나타낸 것으로, 피사체(Fig. 2.6(a))와 위상 펼침 한 전산시뮬 결과(Fig. 2.7)는  $\pm 3$  nm 의 오차를 갖는다.

### 3. In-Line 디지털 홀로그래피

디지털 홀로그래피는 기준 광의 입사 각도에 따라 2종류로 구분된다. 물체 광과 같은 경로로 입사되는 In-Line 홀로그래피와, 각을 갖고 입사하는 Off-Axis 홀로그래피로 구분된다. Off-Axis 홀로그래피의 경우, 영차 회절 광과 허상이 실상과 구분되어 잔상이 없는 깨끗한 영상 재생이 가능하다. 그러나 Off-Axis 홀로그래피의 경우 CCD 면적의 1/4 만에서만 상이 재생되어 시계에 영향을 미치게 된다[61]. In-Line 홀로그래피의 경우 CCD의 모든 영역을 사용할 수 있으나, 영차 회절 광과 허상이 실상과 겹쳐서 재생되므로 신호 대 잡음비에 영향을 미친다. Off-Axis 홀로그래피를 사용하기 위해서는 CCD의 단위 수광 소자 크기와 전체 수광 면적의 물리적 한계를 극복한 고성능 CCD가 개발되기 이전에는 특별한 방법이 없다. 즉 고해상도의 3차원 디지털 영상을 재생하기 위해서는 In-Line 홀로그래피를 구성하여 시계 감소를 최소화 하고, 영차 회절 광과 허상을 제거하여 신호 대 잡음비를 극대화해야 한다[64,81~84].

#### 3.1 허상 제거

Fig. 2.2와 같이 CCD에 기록된 홀로그램 재생 시, 기록한 기준 광과 동일한 광으로 조명하는 경우에 CCD면의 한 점에서 기준 광은 1차 회절 차수(실상), -1차 회절 차수(허상) 그리고 투과 광으로 분리된다. 물론 2차 이상의 회절이 발생 할 수 있지만, 이는 세기가 상대적으로 약하기 때문에 무시할 수 있다. In-Line 디지털 홀로그램의 경우 Fig. 2.5와 같이 실상과 허상 및 DC 향이 중첩되어 신호 대 잡음비가 악화된다. 또한 허상의 경우는 DC 향과 달리 공간 주파

수 대역이 실상과 같으므로, 소프트웨어 방법을 통한 제거가 어렵다. 이러한 이유로 허상 제거에 관한 연구 성과가 미미한 현실이다.

본 연구에서는 디지털 In-Line 현미경에서 허상제거를 위한 하드웨어적인 방법과 소프트웨어적인 방법을 연구하였다.

### 3.1.1 기하학적 배치를 이용한 허상 제거

In-Line 홀로그래피 현미경을 이용하여 관측한 쌍둥이 영상 중 허상을 제거하기 위하여 Fig. 2.3과 같이 렌즈로부터 CCD까지 거리  $c$  와 CCD에서 재생 면까지의 거리  $d$  의 관계를 고려하였다. 홀로그램 재생은 (2.5)식과 같이  $d$  만의 함수임으로  $c$  와  $d$  에 따라 실상과 허상의 크기가 변화 될 것이라고 예상 할 수 있다. 그리고 기하학적으로는 (2.4)식과 같이 허상과 실상이 공액 복소수 관계에 있으므로 Fig. 2.9와 같은 관계를 고려하였다. Fig. 2.9에서 실선은 실상의 파면 진행이고 점선은 허상의 파면 진행이다. Fig. 2.9에서 보듯이 CCD 모든 점에서 재생 된 -1차 회절 차수는 한 점에 모이게 된다. 그러므로 대물렌즈의 후방 초점 거리를 고려하여, CCD면과 재생 면까지의 거리를 적당히 조절하면 허상의 크기가 최소가 되게 할 수 있다.

Fig. 2.10은 재생거리  $d$  에 따라 재생된 허상 크기의 전산기시뮬 결과이다. 여기서 파장은 633 nm 이고, 픽셀의 크기는  $7.4 \times 7.4 \mu\text{m}$  , CCD 픽셀의 개수는  $1024 \times 1024$  , 재생거리  $d$  는 9 cm 로 전산기시뮬을 하였다. Fig. 2.10에서 알 수 있듯이, 렌즈로부터 CCD까지 거리  $c$  와 CCD에서 재생 면까지의 거리  $d$  가 같은  $c=d$  거리에서 허상의 크기가 최소임을 알 수 있고, 이는 렌즈를 사용하는 디지털 홀로그래피의 특수한 성질이다.

이와 같이 기하학적 배치를 이용한 허상 제거 방법의 경우 피사체와 렌즈까지의 거리에 의해 결정되는 결상 위치와 렌즈로부터 CCD까지 거리  $c$  , CCD에서 재생 면까지의 거리  $d$  를 모두 고려하여 측정하여야만 한다.

### 3.1.2 Zero Padding을 이용한 허상 제거

3.1.1에서 설명한 기하학적인 방법으로 허상을 제거한 경우, 대물렌즈에서 CCD까지 거리와 CCD에서 재생 면까지의 거리 비에 의하여 허상이 제거되는 방

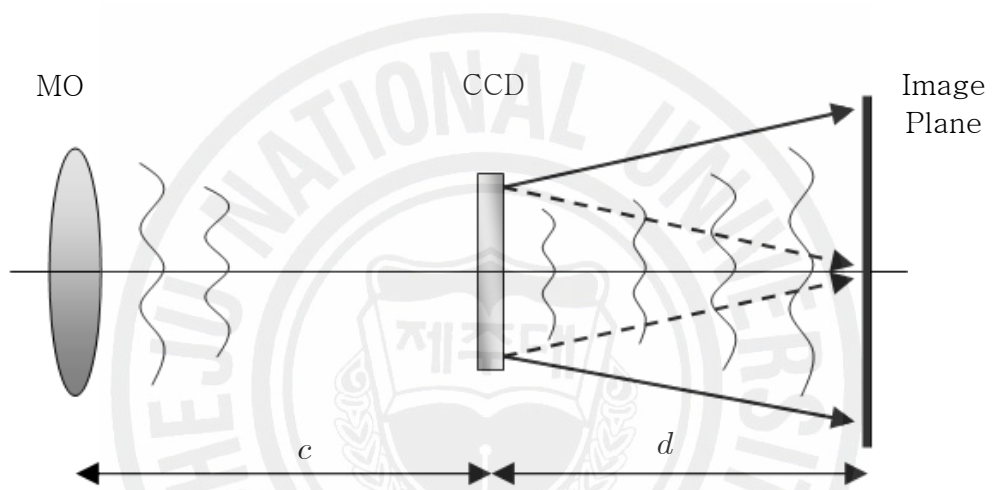


Fig. 2.9 Wave Path of real image and virtual image. solid line : wave path of real image, dotted line : wave path of virtual image, MO : magnification lens,  $c$  : distance between CCD and lens,  $d$  : distance between CCD and image plane.



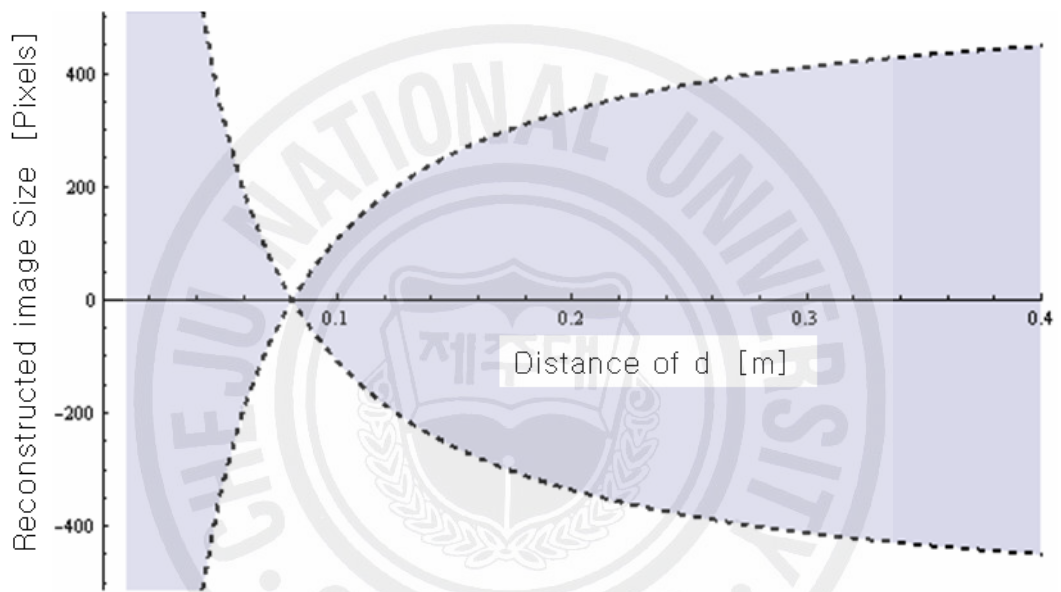


Fig. 2.10 Reconstructed Virtual Image Size.

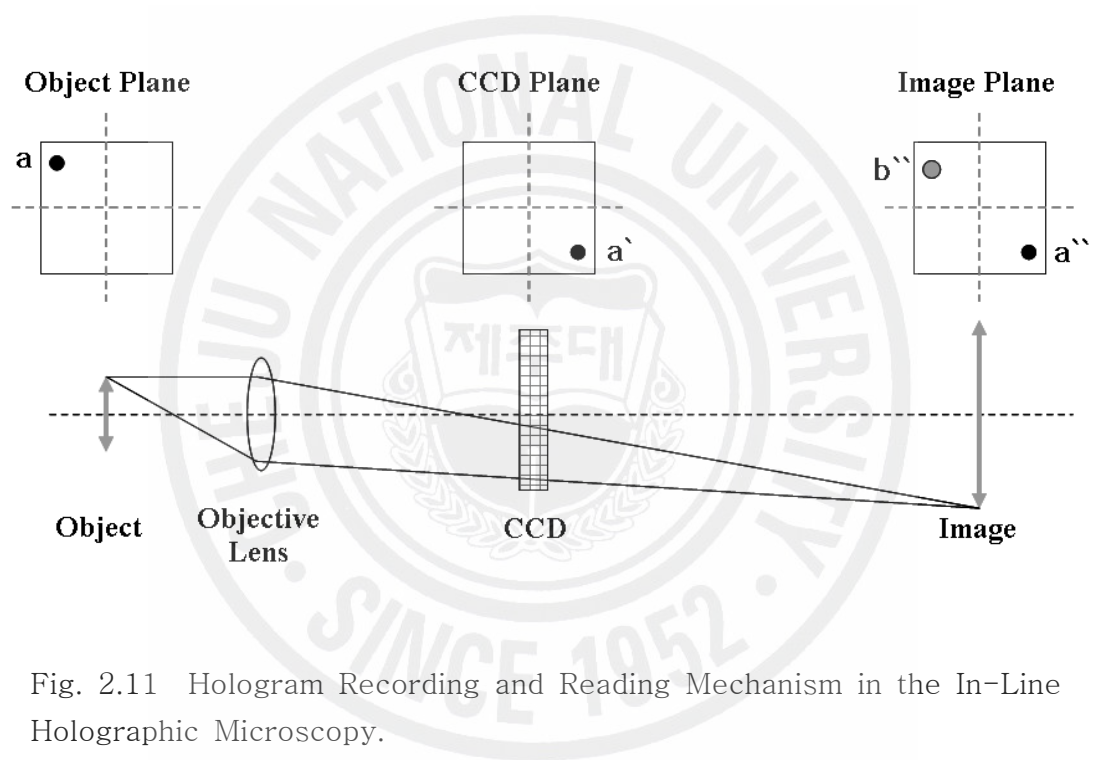


Fig. 2.11 Hologram Recording and Reading Mechanism in the In-Line Holographic Microscopy.

법으로 대물렌즈에서 피사체까지의 거리 역시 제한되며, 재생거리 역시 제한된다.

Fig. 2.11은 In-Line 디지털 홀로그래피 현미경에서 홀로그램의 기록과 재생 과정을 보여 주고 있다. 점  $a$  에 의한 홀로그램은  $a'$  위치에 생성된다. 실상과 허상은 각각  $a''$  와  $b''$  위치에 재생된다. Fig. 2.11은 일반적인 홀로그램과 다른 In-Line 디지털 홀로그래피 현미경에 의한 홀로그램 기록이다. 일반적인 홀로그램에서의 간섭 정보는 홀로그램 전 영역에 퍼져 있으며, 이는 Fig. 2.11과 다르다. 그러나 In-Line 디지털 홀로그래피 현미경에서는 대물렌즈에 의한 간섭 정보는 지역적으로 국한된 홀로그램이 기록된다. 그러므로 재생된 영상 역시 지역적으로 국한된다. 결과적으로, In-Line 디지털 홀로그래피 현미경에서의 홀로그램 기록은 피사체의 한 점에서의 정보가 각각의 위치에 국한 되므로, 여러 부분으로 나누어 재생 영상을 만드는 것이 가능하다. 이렇게 재생된 영상은 Fig. 2.11에서와 같이  $a''$ ,  $b''$  각각 실상과 허상이 분리된 영상을 얻을 수 있다. 즉 4개의 구역으로 홀로그램을 나누고 각각을 재생하면, 허상과 실상이 분리된 4개의 홀로그램 재생 영상을 얻을 수 있고, 허상부분을 제거한 실상 부분만을 취하여 4개의 영역을 합치면 허상이 제거된 3차원 이미지를 얻게 된다[85].

Zero Padding을 이용한 허상 제거의 경우 기하학적 배치를 이용한 허상 제거와 달리 소프트웨어적인 방식으로 하드웨어적인 제한 없이 3차원 상을 재생할 수 있다. 또한 Zero Padding을 이용한 허상 제거 방법과 기하학적 배치를 이용한 허상 제거 방법 모두 렌즈를 사용하는 홀로그래피에서의 특수한 성질을 이용한 것이다.

### 3.2 영차 회절 광 제거

DC 항은 (2.4)식에서 첫 번째 항과 두 번째 항에 의해서 발생된다. 서론에서 언급한 바와 같은 In-Line 홀로그래피의 경우 CCD의 모든 시계를 사용할 수 있으나, DC 항과 실상이 중첩되어 신호 대 잡음 비가 좋은 영상을 얻을 수 없다. 그러므로 CCD의 모든 시계를 사용하며, 신호 대 잡음 비가 좋은 영상을 얻기 위해서는 In-Line 홀로그래피를 구성하고, DC 항을 제거하여야 한다. DC 항 제거를 위해 일반적으로 사용되는 방법은, 한 번의 홀로그램 측정으로 DC 항

제거가 가능하며, 재생 속도가 빠르고 DC 항 제거효율이 비교적 좋은 평균 제거 방법이다.

### 3.2.1 평균 제거 방법을 이용한 영차 회절 광 제거

1997년 Kreis는 홀로그램 세기의 평균을 구하고 그 평균값을 빼주는 DC 항 제거 방법을 제안하였다[86]. 이 방법은 한 번의 홀로그램 측정으로 DC 항을 최소화 시켜줄 수 있으며, 그 연산과정이 간단하여 디지털 홀로그램의 수치 재생 시간에 큰 영향을 주지 않는다.

홀로그래피에서 DC 항은 (2.1)식에서 첫째 항과 둘째 항이다. 여기서

$$\begin{aligned} \text{물체파} : O(x,y) &= a_O(x,y)e^{i\phi_O(x,y)} \\ \text{기준파} : R(x,y) &= a_R(x,y)e^{i\phi_R(x,y)} \end{aligned} \quad (2.17)$$

이므로, (2.1)식은 (2.18)식과 같이 정리된다.

$$I_H(x,y) = a_R^2 + a_O^2 + 2a_R a_O \cos(\varphi_O - \varphi_R) \quad (2.18)$$

(2.18)식에서 첫째 항과 둘째 항이 재생 과정에서 DC 항으로 작용하는 부분이다. 셋째 항은 실상과 허상에 해당하며, CCD의 픽셀에 따라  $-2a_R a_O \sim 2a_R a_O$  사이의 값을 갖는다. CCD에서 측정된 픽셀의 빛 세기 평균  $I_m$  은 (2.19)식과 같다.

$$I_m = \frac{1}{N^2} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} I_H(k\Delta x, l\Delta y) \quad (2.19)$$

(2.18)식 세 번째 항의 모든 합은 통계적으로 “0”에 접근한다. 즉 홀로그램 세기에서 빛의 세기 평균을 제거한다면 (2.18)식에서 첫 번째 항과 두 번째 항을 합한 값과 통계적으로 같아진다. CCD에 측정된 홀로그램에서 (2.19)식을 제거

하여 주면 DC 항을 최소화 할 수 있다.

$$I'(k\Delta x, l\Delta y) = I_H(k\Delta x, l\Delta y) - I_m \quad (2.20)$$

식(2.20)  $I'$  을 재생한다면 영차 회절이 최소화 된 영상을 얻을 수 있다. CCD에 기록된  $I_H$  는 양수 값만을 갖는다. 그러나  $I'$  은 광학적으로 불가능한 음수 값을 갖는다. 이것은 수치 재생에서 실행 가능한 단계이다.  $I'$  세기는  $I_H$  의 하향 천이(Downshifted) 한 것과 같다.

평균 제거 방법을 이용한 영차 회절 광 제거는 고역 필터(High-Pass Filter)로 해석되며, CCD의 모든 픽셀을 평균한 값을 제거 한 (2.20)식과 같은 경우 저역 차단 주파수(Low Cutoff Frequency)는 '0' 에 근접한다. 또한 (2.18)식에서 평균의 범위를 작게 하면 할수록 차단 주파수가 커져 DC 항 제거율이 높아진다. 그러나 고주파 대역의 제거로 실상의 손실을 가져 올 수 있다[86].

#### 4. 투과 반사 통합형 디지털 홀로그래피 현미경을 이용한 굴절률 측정

서론에서 언급한 바와 같이, 굴절률 정보는 단순한 깊이 정보 뿐 아니라, 다양한 정보로 활용 될 수 있다. 그러나 3차원 형상과 굴절률을 동시에 측정할 수 있는 장치는 전무한 상태이다. 본 연구에서는 투과 반사 통합형 디지털 홀로그래피 현미경을 구성하여, 3차원 형상과 굴절률을 동시에 측정할 수 있는 방법을 모색 하였다.

디지털 홀로그래피 현미경의 경우 시료의 측정 방법에 따라 투과형 디지털 홀로그래피 현미경과 반사형 디지털 홀로그래피 현미경으로 구분된다. 투과형 디지털 홀로그래피 현미경은 시료 내부를 지나온 물체 광에 의하여 홀로그램이 형성되는 것이고, 반사형 디지털 홀로그래피 현미경은 시료 표면에서 반사된 물체 광에 의하여 홀로그램이 형성되는 것이다. 투과형과 반사형은 같은 시료의 같은

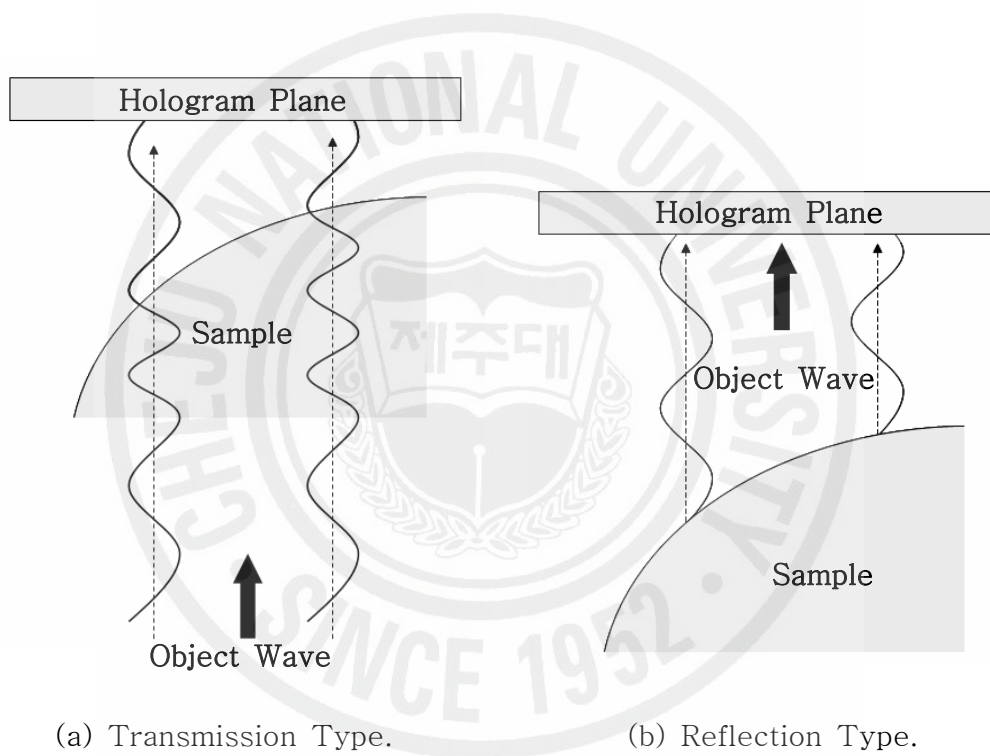


Fig. 2.12 Phase of Digital Holographic Microscopy.

위치를 같은 배율로 측정하더라도 근본적으로 다른 경로를 갖는다. 투과형의 경우 물체의 내부 굴절률에 따른 경로차가 발생하므로, 굴절률을 알지 못하는 경우 물체의 실제 크기를 측정할 수 없다. 반사형의 경우 시료의 실제 크기는 알 수 있으나, 굴절률은 알 수 없다. 즉 투과형과 반사형 두 경우 모두 시료의 실제 크기와 굴절률을 동시에 알 수 없다.

Fig. 2.12는 투과형과 반사형 디지털 홀로그래피 현미경에서 어떻게 위상차가 발생하는지를 나타낸 것이다. Fig. 2.12(a)는 투과형에서 물체 광이 시료 내부에서 시료의 굴절률에 따라 속도가 바뀌게 되며, 공간적으로 같은 거리를 이동한 광의 위상이 시료의 두께에 따라 CCD(홀로그램) 면에서 차이가 발생한다. 이렇게 차이가 발생한 위상 값을 가진 물체광과 기준 광이 결합하여 간섭무늬가 형성된다. Fig. 2.12(b)는 반사형에서 물체 광이 시료 표면에 반사되어 이동거리의 차가 발생되고, 기준 광과의 간섭에 의한 간섭무늬가 형성된다. 투과형에서는 굴절률에 의해 발생하는 위상차에 의한 홀로그램의 기록이고, 반사형에서는 경로 차에 의해 발생하는 위상차에 의한 홀로그램의 기록이다.

기록된 홀로그램은 (2.9)식을 이용하여 위상을 재생할 수 있고, (2.16)식의 위상 펼침을 이용하여 3차원 복원이 가능하다. Fig. 2.13은 투과형 디지털 홀로그래피 현미경 (a)와 반사형 디지털 홀로그래피 현미경 (b)의 3차원 복원 영상이다. Fig. 2.13에서 점선(---)은 시료를 나타내고, 음영으로 표시된 부분은 디지털 홀로그래피 현미경에서 측정되는 측정 영역이다. Fig. 2.13(a)에서  $d_0$  는 측정 영역 중에서 가장 얇은 부분의 두께이며,  $d_{k,l}$  는 위치에 따른 두께이다. 투과형 디지털 홀로그래피 현미경의 경우, 3차원으로 재생 된 영상에서 위치에 따른 시료의 두께  $\Delta d_t(k,l)$  은 (2.21)식과 같다.

$$\Delta d_t(k,l) = d_{k,l}(k,l) - d_0 \quad (2.21)$$

Fig. 2.13(b)에서  $h_0$  는 측정 영역에서 시료의 가장 얇은 부분까지의 물체 광이 진행한 경로 거리이고,  $h_{k,l}$  는 위치에 따른 물체 광의 진행한 경로 거리이다. 반사형의 경우, 물체 광의 진행 경로를 이용하여 시료의 두께를 표현하게 된다.

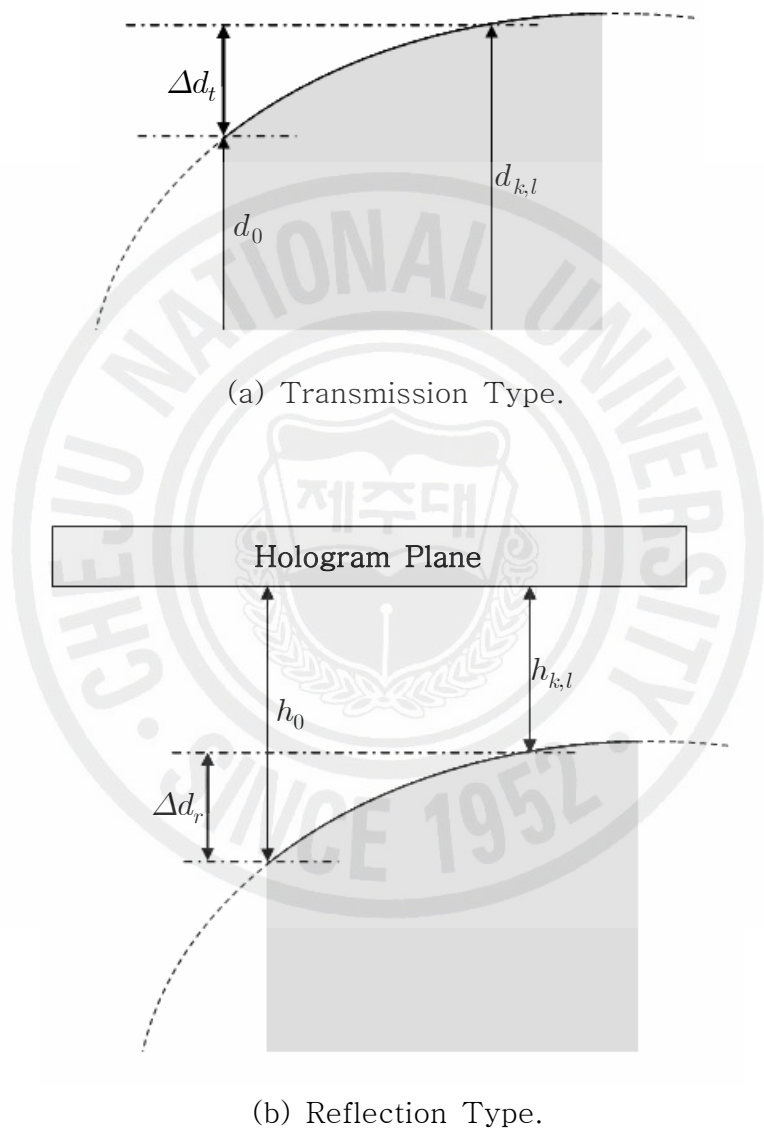


Fig. 2.13 Thickness of 3D Reconstruction Image.



반사형 디지털 홀로그래피 현미경의 경우, 3차원으로 복원된 영상에서 위치에 따른 시료의 두께  $\Delta d_r(k,l)$  은 (2.22)식과 같다.

$$\Delta d_r(k,l) = h_{k,l}(k,l) - h_0 \quad (2.22)$$

또한  $\Delta d_t(k,l)$  와  $\Delta d_r(k,l)$  는 측정 영역 내의 시료 두께 차이와는 본질적인 차이가 있다. 우선  $\Delta d_t(k,l)$  는 시료 내부를 통과하므로 시료의 굴절률 영향을 고려해야한다. 시료의 굴절률  $n$  을 고려한 실제 시료의 두께 차  $d$  는 (2.23)식과 같다.

$$d(k,l) = \frac{\Delta d_t(k,l)}{n-1} \quad (2.23)$$

$\Delta d_r(k,l)$  는 시료의 내부를 통과하지 않으나 물체 광이 시료로 조사되고, 반사되어 나오는 과정을 거치므로 2배의 경로차가 발생하게 된다. 또한 반사형의 경우, 홀로그램 면을 기준으로 한 거리 차이므로, 실제거리와 부호가 반대가 된다. 즉 실제 시료의 두께 차  $d$  는 (2.24)식과 같다.

$$d(k,l) = -\frac{\Delta d_r(k,l)}{2} \quad (2.24)$$

(2.23)식에서 알 수 있듯이 투과형 디지털 홀로그래피 현미경을 이용하여 3차원 상을 복원한 경우 시료의 굴절률을 알지 못하면 실제 시료의 표면 두께 차를 알 수가 없다. 반사형의 경우 (2.24)식에서 알 수 있듯이 시료의 표면 두께 차를 알 수 있다.

만약 투과형 디지털 홀로그래피 현미경과 반사형 디지털 홀로그래피 현미경이 시료의 같은 위치를 같은 배율로 측정 할 수 있다면, (2.23)식과 (2.24)식을 이용하여 시료의 굴절률을 구할 수 있다. 굴절률  $n$  은 (2.25)식과 같다.

$$n(k,l) = 1 - 2 \frac{\Delta d_t(k,l)}{\Delta d_r(k,l)} \quad (2.25)$$

즉, (2.25)식을 이용한다면, 시료의 굴절률을 위치에 따라 측정 할 수 있고, 이를 다시 3차원 영상 재생 시 이용한다면, 굴절률에 따른 경로차가 보정된 3차원 영상을 재생할 수 있다.



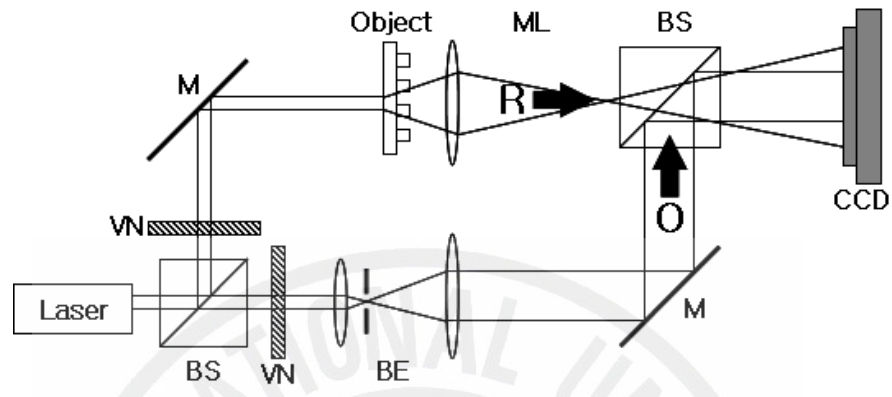
## 제 3 장 실험 및 방법

### 1. 일반적인 투과형과 반사형 In-Line 디지털 홀로그래피 현미경

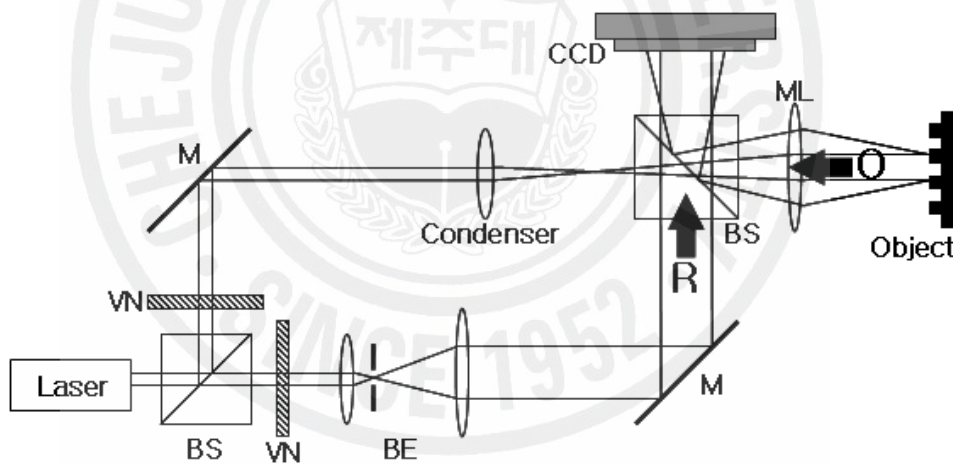
Fig. 3.1은 일반적인 투과형 In-Line 디지털 홀로그래피 현미경 (a)와 반사형 In-Line 디지털 홀로그래피 현미경 (b)의 개략도이다. 기본적인 구성은 모두 마흐젠더(Mach-Zender) 간섭계와 같다. 시료를 투과한 영상을 확대하기 위하여 현미경 대물렌즈 ML 을 사용하며, 필터 VN(Variable Neutral Density filter) 은 간섭무늬의 명암대비가 최대인 홀로그램을 얻기 위하여 사용한다. TEM<sub>00</sub> 모드와 CCD의 촬상 소자보다 큰 기준 광원을 얻기 위하여 2개의 렌즈와 핀홀을 사용하여 광 확대기(Beam Expander)를 구성한다. 또한 홀로그램 기록을 위해서 CCD를 사용한다. 반사형의 경우, 집광과 시준 광(Collimated Beam)을 만들기 위한 집광 렌즈(Condenser Lens)가 필요하다.

Fig. 3.1(a)는 투과형 디지털 홀로그래피 현미경으로 물체 광 O 가 시료를 투과하여, 기준 광 R 과 간섭하여 CCD에 홀로그램이 기록된다. Fig. 3.1(b)는 반사형 디지털 홀로그래피 현미경으로 물체 광 O 가 시료에 반사 되어, 기준 광 R 과 간섭하여 CCD에 홀로그램이 기록된다. 홀로그램에 사용되는 광원은 가 간섭길이가 길어야하며, 물체 광에 대한 기준 광의 CCD 입사각은 0° 이다.

투과형 디지털 홀로그래피 현미경의 경우 피사체(object) 내부를 투과한 물체 광은 피사체의 굴절률의 영향으로 경로차가 발생하므로, 3차원 영상의 재생 시 굴절률을 알아야 피사체의 실제 두께를 알 수 있다. 반사형 디지털 홀로그래피 현미경의 경우, 피사체 표면에서 산란된 광의 거리 차에 의하여 경로차가 발생하므로, 물체의 굴절률과 상관없이 피사체의 실제 두께를 알 수 있으나, 굴절률을 알 수 없다.



(a) Transmission Type Digital Holographic Microscopy.



(b) Reflection Type Digital Holographic Microscopy.

Fig. 3.1 Schematic of Digital Holographic Microscopy. VN : variable density filter, BS : beam splitter, M : mirror, O : object wave, R : reference wave, BE : beam expander with spatial filter, ML : microscope objective lens.

## 2. 투과 반사 통합형 디지털 홀로그래피 현미경

Fig. 3.2는 본 연구에서 제작한 투과 반사 통합형 디지털 홀로그래피 현미경 장치이다. 기본적인 구성은 Fig. 3.1과 같이 마흐젠더 간섭계를 사용하였다. 사용한 광원은 10 mW He-Ne 레이저이고, 시료를 투과 혹은 반사한 영상을 확대하기 위하여 사용한 현미경 대물렌즈 ML은 Mitutoyo LWD(Long Working Distance) 100X (NA = 0.9) 와 Mitutoyo LWD 50X (NA = 0.75)를 사용하였다. 필터 VN 은 간섭무늬의 명암대비가 최대인 홀로그램을 얻기 위하여 사용하였다. TEM<sub>00</sub> 모드의 기준 광을 얻기 위하여 2개의 렌즈 BEL1 , BEL2 와 편광 P 를 사용하였다. 집광과 시준 광을 만들기 위한 집광 렌즈 CL 을 사용하였다. 홀로그램을 저장하기 위하여 CCD는 Sony IPX4M 와 Sony IPX1M 를 사용하였고, CCD의 픽셀 크기는  $\Delta x \times \Delta y = 7.4\mu m \times 7.4\mu m$  이고, 픽셀 개수는 Sony IPX4M 의 경우  $N_x \times N_y = 2048 \times 2048$  이고, Sony IPX1M 의 경우  $N_x \times N_y = 1024 \times 1024$  이며, 빛의 세기는 8-bit-encoded 로 기록된다. 그리고 기준 광과 물체 광의 입사각을 일치시켜 In-Line 형태의 디지털 홀로그래피 현미경을 구성하였다.

본 연구에서는 투과형과 반사형 디지털 홀로그래피 현미경을 통합 한 투과 반사 통합형 디지털 홀로그래피 현미경으로 투과형과 반사형을 선택 할 수 있는 기구 MTS 와 가 간섭 경로를 보상해 주기 위한 기구 SL을 추가로 구성하였다. Fig. 3.3(a)는 투과형 디지털 홀로그래피 현미경으로 선택 된 경우로, MTS 의 구멍을 통과하는 광 경로로 Fig. 3.4(a)와 같다. Fig. 3.3(b)는 반사형 디지털 홀로그래피 현미경으로 선택 된 경우로, MTS 의 거울에 반사되는 광 경로로 Fig. 3.4(b)와 같다. MTS 는 회전이 가능하며, 회전 위치에 따라 투과형과 반사형이 선택된다. 반사형의 경우 대물렌즈에 위치한 BS 에서 시료까지 왕복하는 경로로 인하여 기준 광과 물체 광 사이에 경로 차가 발생하고, 이를 보상해 주기 위해 Fig. 3.4(b)와 같이 가 간섭 길이 보상(Coherence Length Compens-

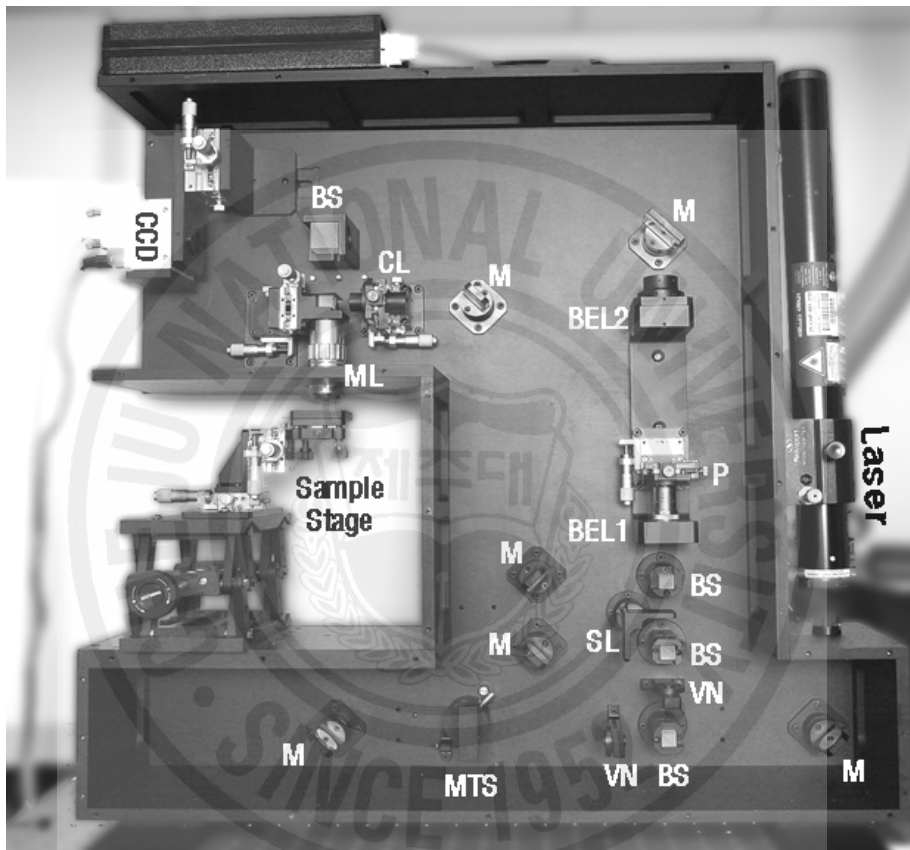
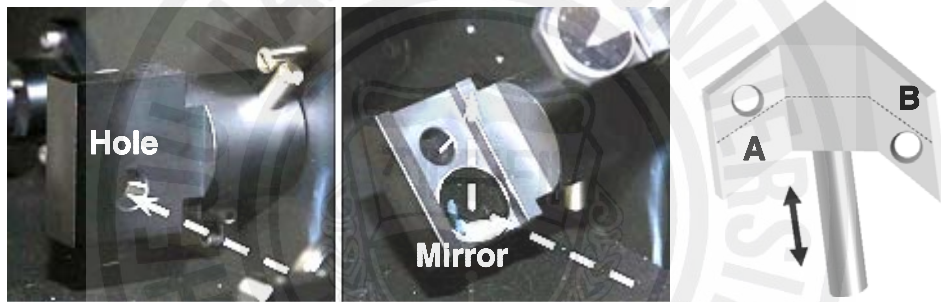
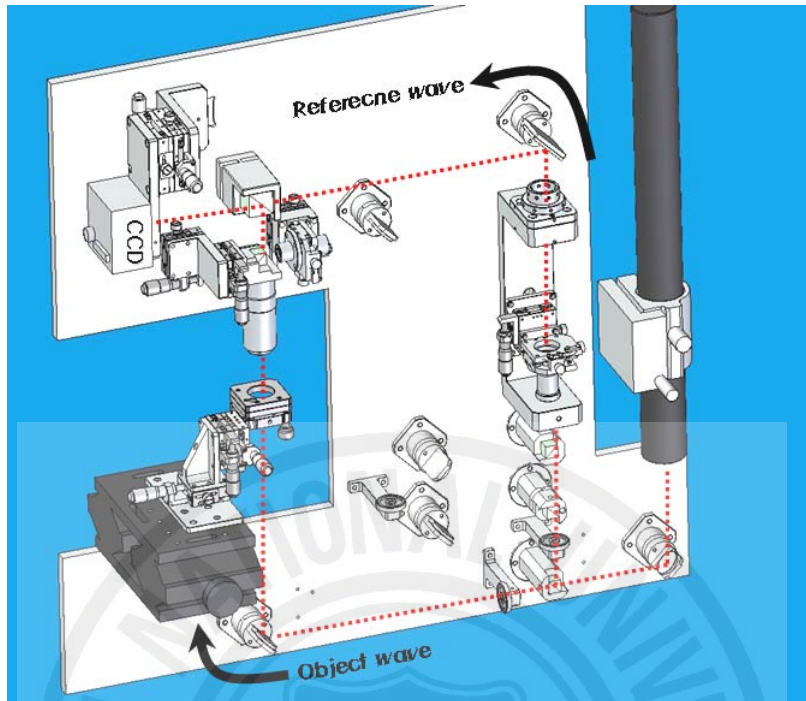


Fig. 3.2 Digital Holographic Microscopy Using a Combination of Transmission-Reflection. VN : variable density filter, BS : beam splitter, M : mirror, BEL1 and BEL2 : lens for beam expander P : pin hole, ML : microscope objective lens, MTS : transmission and reflection selection component, CL : Condenser Lens, SL : loop change shutter.

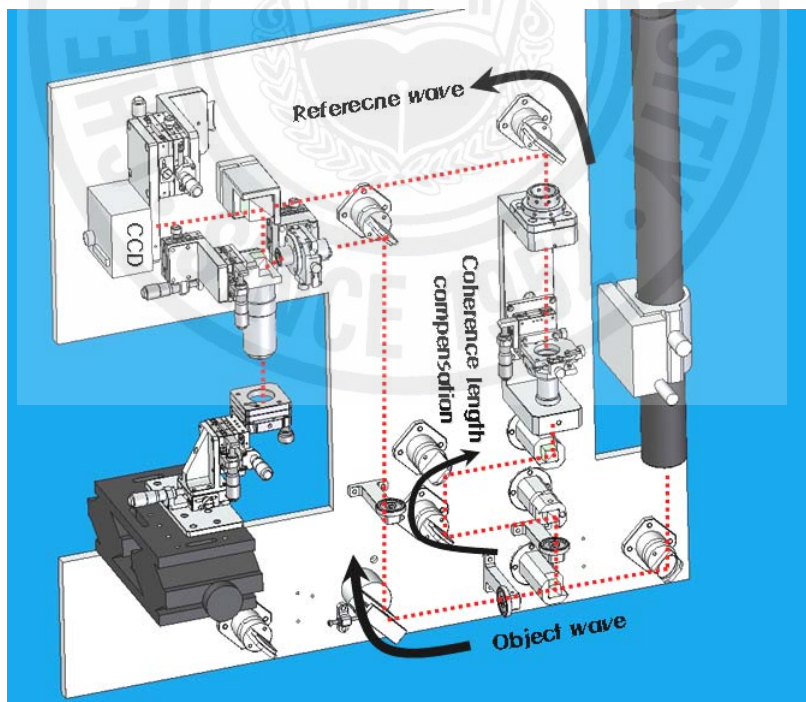


(a) Transmission. (b) Reflection. (c) SL.

Fig. 3.3 Transmission and Reflection Selection Component.



(a) Transmission Type.



(b) Reflection Type.

Fig. 3.4 Beam Pass of Transmission and Reflection.



sation) 경로를 구성하였다. 가 간섭 길이 보상 경로에 위치한 경로 변환 개폐기 SL 은 상·하로 움직일 수 있으며, 투과형의 경우는 SL을 위로 올려서 B 층의 구멍을 통하여 진행하고, 반사형의 경우 SL을 밑으로 내려서 A 층의 구멍을 통하여 진행한다(Fig. 3.3(c)). 본 연구에서 구성한 투과 반사 통합형 디지털 홀로그래피 현미경은 MTS 와 SL 의 간단한 조작으로 투과형과 반사형의 전환이 가능하며, 투과형으로 선택된 경우와 반사형으로 선택된 경우 피사체의 같은 위치가 같은 배율로 측정 될 수 있도록 구성하였다.



## 제 4 장 결과 및 고찰

### 1. In-Line 디지털 홀로그래피에서 허상 제거

CCD 소자를 사용하는 디지털 홀로그래피의 경우 CCD 소자가 가진 픽셀 크기의 한계로 고해상도를 얻기 위해서는 CCD 전체 면적을 활용 할 수 있는 In-Line 홀로그래피를 구성하여야한다. 그러나 재생 시 영차 회절 광, 실상과 허상이 겹친 3차원 영상이 재생된다. 따라서 In-Line 홀로그래피를 이용한 홀로그래피에서는 영차 회절 광과 허상을 제거하여야만 신호 대 잡음비가 높은 물체의 정보를 얻을 수 있다.

#### 1.1 기하학적 배치를 이용한 허상 제거

제2장 3.1.1에서 언급된바와 같이 대물렌즈의 후방 초점 거리를 고려하여, CCD면과 재생 면까지의 거리를 적당히 조절하면 허상의 크기가 최소인 위치를 확인 할 수 있다. Fig. 4.1은 대물렌즈와 영상 재생 면까지의 거리  $c+d$  를 57 cm 로 고정하고 렌즈로부터 CCD까지 거리  $c$  와 CCD에서 재생 면까지의 거리  $d$  를 변화시키면서 얻은 실험 결과이다.

Fig. 4.1(a)는 실험에 사용된 마스크 패턴이고, (b)는 (a)의 실선부분의 정보를 대물렌즈와 CCD간의 거리  $c$  와 CCD와 재생 면까지의 거리  $d$  에 따른 재생 상의 변화이다. Fig. 4.1(b)에서 알 수 있듯이  $c, d$  에 따라 허상과 실상의 크기가 변화되고,  $c \approx d$  인 지점에서 허상의 기기가 최소가 되는 것을 확인 할 수 있다. Fig. 4.1의  $c \approx d$  인 지점은 본 실험에서 사용된 대물렌즈의 후방 초점거리와 일치한다. 이는 렌즈를 사용하는 디지털 홀로그래피의 특수한 성질이다. Fig. 4.2은 Fig. 4.1(a)의 시료 마스크의 일부분을  $c = d$  (30 cm) 조건을 만족시켰을 때 영차 회절 광을 제거한 경우와 제거되지 않는 경우의 결과이다.

Fig. 4.2(a)는 홀로그램이고, (b)는 영차 회절 광을 제거한 경우이고, (c)는 영

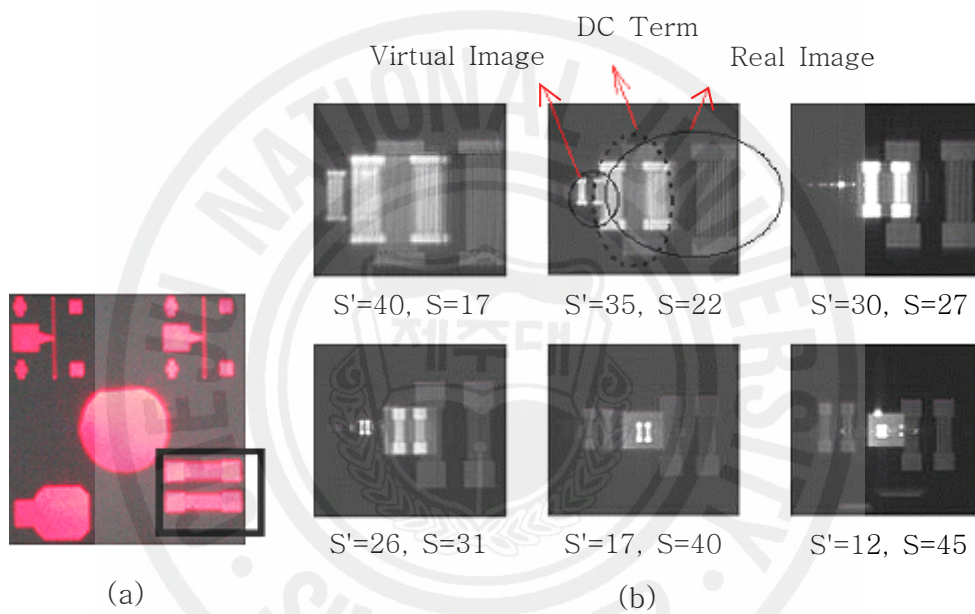


Fig. 4.1 Reconstructed Image in case  $c + d = 57$  cm . (unit : cm )

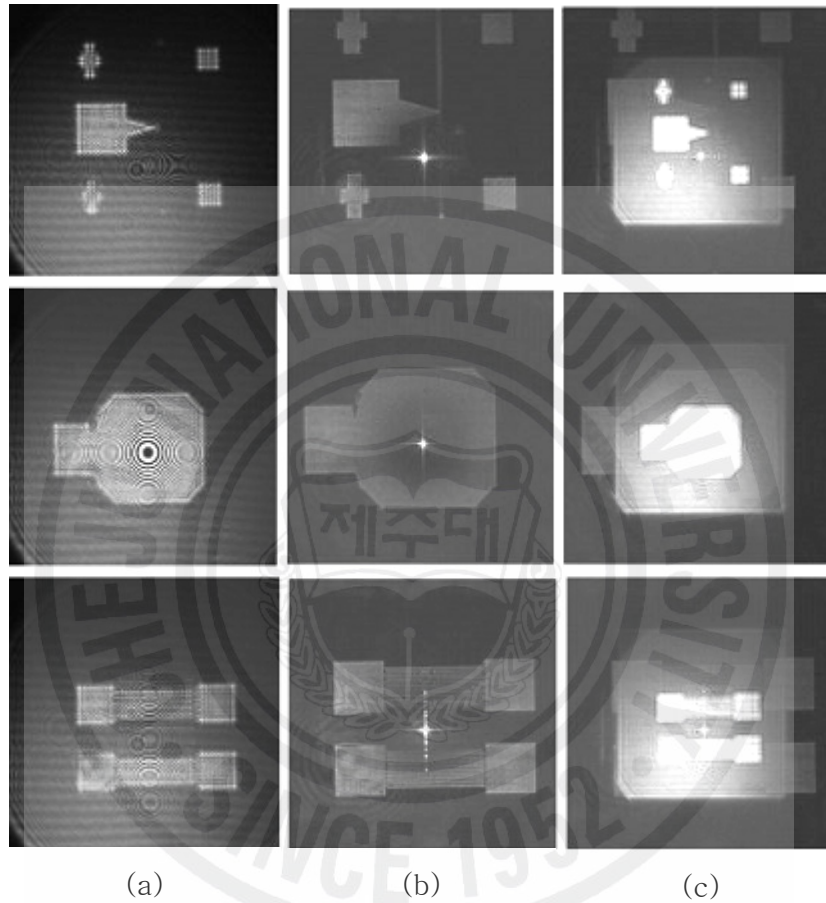


Fig. 4.2 Hologram and Reconstructed Image when  $c = d$  . (a) hologram, (b) reconstructed image with 0<sup>th</sup> remove, (c) reconstructed image without 0<sup>th</sup> remove.

차 회절 광을 제거하지 않는 경우이다. Fig. 4.2(c)를 보면 가운데 사각형 형태가 있고 그 안쪽에 밝은 부분의 패턴 모양이 나타나는데 이는 영차 회절 광에 의한 재생 상이다. 사각형 형태로 재생되는 이유는 홀로그램이 기록된 전체 면의 모양으로 투영된 것이기 때문이다. 그 안쪽에 밝은 패턴 모양은 시료 마스크가 투과형으로 패턴 부분만 빛이 통과하기 때문이다. Fig. 4.2(c)에서 보듯이 영차 회절 광의 영향으로 시료 마스크의 상을 얻기가 어렵다. 영차 회절 광을 제거하기 위하여 여러 가지 방법을 사용 할 수 있으나, 여기에서는 CCD에 기록된 홀로그램의 각각의 픽셀 값에서 하나의 픽셀을 중심으로  $7 \times 7$  픽셀 값들의 평균 값을 취하여 얻어진 각각의 픽셀 값을 원래의 홀로그램에 대응되는 픽셀 값에서 빼고 재생하였다. 그 결과를 Fig. 4.2(b)에 나타내었다. 렌즈에서 CCD까지 거리와 CCD에서 재생 면까지 거리를 같게 조절하여 재생한 경우는 실상과 허상이 분리 될 뿐 아니라 허상이 점과 같이 중앙에 모여 있게 된다. 중앙에 모인 허상은 DC-필터를 이용하여 제거 할 수 있다. Fig. 4.2의 결과는 In-Line 홀로그래피의 최대 장점인 홀로그램을 기록하는 CCD 면 전체를 사용하면서 In-Line 홀로그래피의 문제점 중 하나인 실상과 허상이 겹치는 현상을 제거 할 수 있는 방법을 제시한 것이다.

## 1.2 Zero Padding을 이용한 허상 제거

앞서 연구되었던  $c = d$  의 기하학적인 방법으로 허상을 제거한 경우, 대물렌즈와 CCD간의 거리와 CCD와 재생 면까지의 거리 비에 의하여 허상이 제거 되는 방법으로 대물렌즈에서 피사체까지의 거리 역시 제한되며, 재생거리 역시 제한된다. Zero Padding을 이용한 허상 제거는 제2장 3.1.2에서 언급된바와 같이 렌즈에 의한 간섭 정보가 지역적으로 국한되어 홀로그램이 기록되는 디지털 홀로그래피 현미경의 특성을 이용한 것으로 Fig. 2.11과 같이 실상과 허상이 분리된 영상을 얻을 수 있는 방법이다.

Fig. 4.3(a)는 대물렌즈의 후면 초점거리(Back Focal Length)로부터 20 cm에서 얻은 홀로그램이고, (b)는 CCD로부터 75 cm의 거리에서 수치 재생을 한 결과이다. Fig. 4.3(b)에서 중앙에 밝은 사각형 부분은 영차 회절 영상이 재생된



(a)

(b)

Fig. 4.3 (a) Hologram and (b) Reconstructed image.

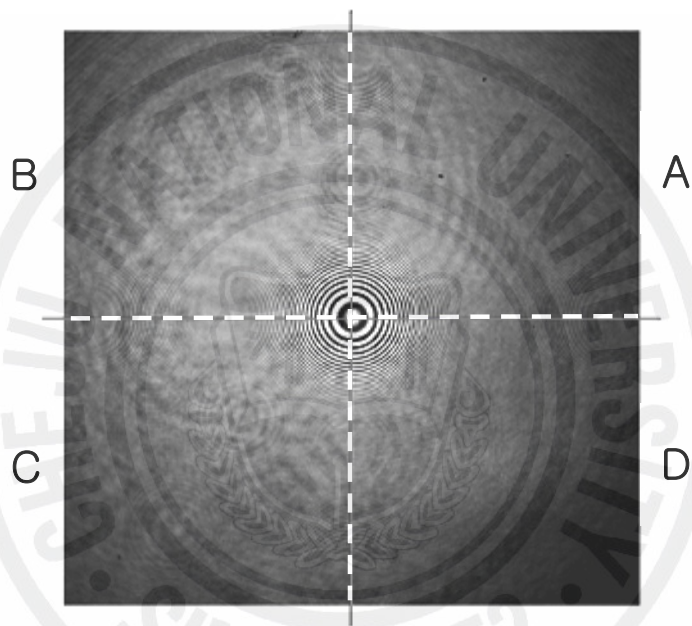


Fig. 4.4 Hologram images constructed by the combination of a reference beam and an objective beam that is passed through the objective lens without objects.

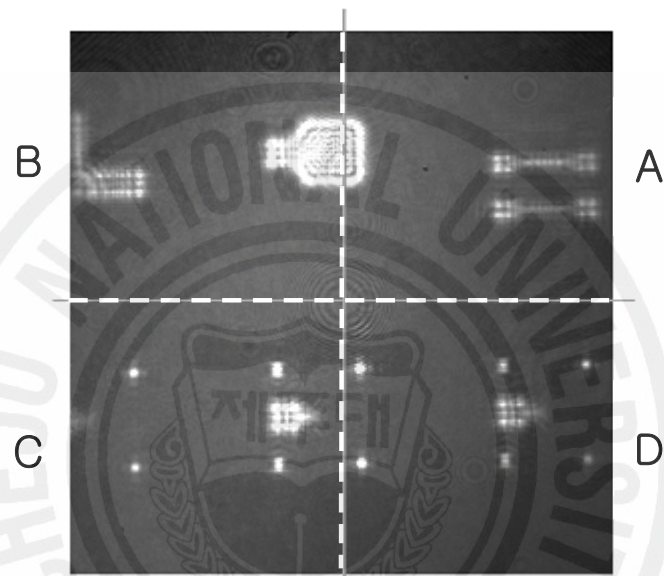


Fig. 4.5 Hologram images constructed by the combination of a reference beam and an objective beam that is passed through the objective lens with objects.





(a) area B.

(b) area A.



(c) area C.

(d) area D.

Fig. 4.6 Zero Padding of Hologram.

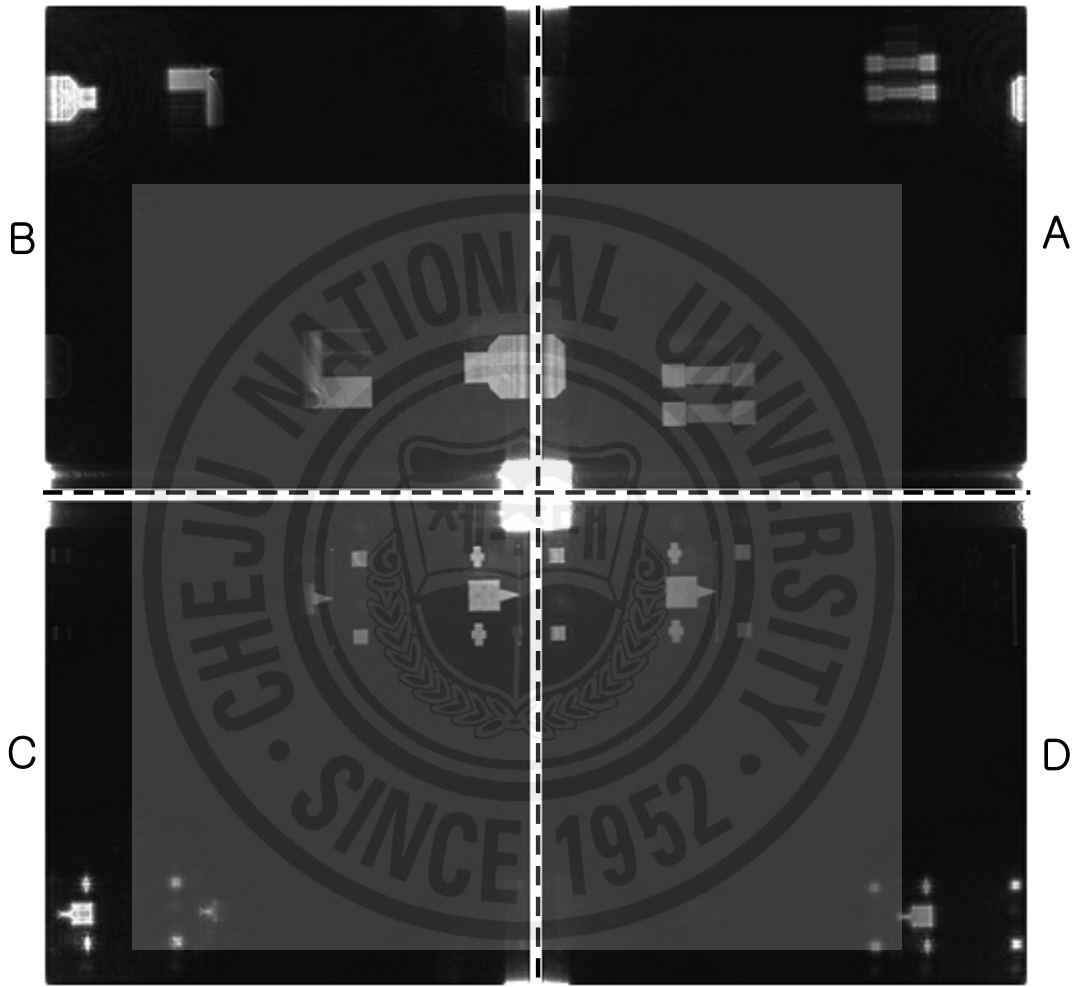


Fig. 4.7 Reconstructed of each area in A, B, C, D.



Fig. 4.8 Reconstructed image obtained by a Zero Padding method.

것이고, 밝은 사각형 주변의 초점이 맞지 않은 것이 허상이고, 초점이 맞은 4개의 뚜렷한 상이 실상이다. 실상과 허상이 재생된 모양을 비교하여 보면, Fig. 2.11과 같이 서로 대각선 위치에 재생되어 있고, 실상과 허상은 서로 겹쳐있다.

Fig. 4.4는 피사체가 없는 경우 기준 광과 물체 광의 간섭에 의한 무늬로, In-Line 디지털 홀로그래피 현미경의 대물렌즈에 의해 발생하는 프레넬 Zone Plate이다. 본 연구에서는 Fig. 4.4에서와 같이 4개의 영역 A, B, C, D로 나누었다. 만약 C 영역의 홀로그램 간섭무늬를 재생하면, 실상은 C 영역에 허상은 A 영역에 위치하게 된다. 이는 일반적인 경우 A 영역 재생에 의한 실상과 C 영역 재생에 의한 허상이 겹치게 되고, A 영역 재생에 의한 허상과 C 영역 재생에 의한 실상이 겹치게 될 것이다. 그러나 각각의 영역을 나눠서 재생한 경우에는 서로 독립된 실상과 허상으로 분리 할 수 있다.

Fig. 4.5은 대물렌즈의 후면 초점거리로부터 20 cm 에서 얻어진 홀로그램이다. Fig. 4.6은 Fig. 4.5의 홀로그램의 Zero Padding 과정을 보여 주는 것이다. Fig. 4.5 에서와 같이 4개의 영역으로 나누고 해당 영역을 제외한 나머지 영역을 "0" 으로 만들어 Fig. 4.6과 같이 각 영역에 해당하는 4개의 Zero Padding 된 홀로그램을 얻을 수 있다. 이들 각각의 영역을 재생한 영상이 Fig. 4.7이다.

Fig. 4.7의 A 영역은 Fig. 4.6(b) A 영역의 수치 재생을 한 결과이고, 나머지 B, C, D 영역은 Fig. 4.7의 (a), (c), (d) 영역을 각각 수치 재생 한 결과이다. Fig. 4.7의 재생 거리는 160 cm 이다. Fig. 4.7에서 각 영역 별로 재생 된 결과에서 알 수 있듯이 허상과 실상이 완전히 분리되어 있는 재생 결과를 얻을 수 있다. 4개의 각각의 영역을 합치고 중앙의 실상 부분만을 남기고, 나머지 부분을 제거 한 것이 Fig. 4.8 이다. 이는 4개가 합쳐지는 가운데 점을 기준으로  $2048 \times 2048$  픽셀을 남기고 제거한다.

이와 같이 영역을 나누고 Zero Padding 된 홀로그램을 각각 수치 재생하는 것으로 원하는 초점 거리에서 별다른 기하학적 변경이나 고려 없이 허상이 최소화 된 상을 얻을 수 있다. 이 방법은 기존의 허상을 제거하는 방법 즉 최소한 2장 이상의 홀로그램이 필요한 방법과는 달리 한 장의 홀로그램을 이용함으로써 실시간으로 3차원 관찰이 가능하고, 이것은 생물 분야의 살아 있는 세포 관찰에 매우 유익하다.

## 2. In-Line 디지털 홀로그래피에서 영차 회절 광 제거

(2.4)식에서 첫 번째 항과 두 번째 항은 영차 회절 광이고, In-Line 디지털 홀로그래피 현미경에서 신호 대 잡음비가 높은 재생 상을 구현하기 위해서는 영차 회절 광을 제거해야 한다.

### 2.1 주사(Scan) 방법을 이용한 영차 회절 광 제거

Fig. 4.9는 시료의 홀로그램인 CCD에서 20 cm 떨어진 지점에 수치적으로 재생한 영상이다. Fig. 4.9는 홀로그램 데이터로부터 고주파수 통과 필터를 이용하여 DC 항을 제거한 후 재생한 것이다. 즉 사용된 고주파수 통과 필터 역할은 측정된 홀로그램(Fig. 4.9(a))을 푸리에 변환 한 후 중심에서 일정거리에 있는 픽셀 값을 영으로 하고 다시 역 푸리에 변환 함으로써 고주파수 항만이 남은 홀로그램을 얻을 수 있다. 이렇게 얻어진 홀로그램을 재생하여 Fig. 4.9(b)와 같은 결과를 얻었다. Fig. 4.9(b)로부터 영차 회절 광과 물체 광 간섭의 영향으로 물체의 상이 올바르게 재생되지 않았음을 알 수 있다. 영차 회절 광에 가려서 재생되지 않는 물체의 상은 Fig. 4.9(b)의 사각형 내에 있는 모양과 같다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 즉 영차 회절 광 제거를 위하여 많은 연구가 이루어져 왔다. 가장 간단한 방법 중 하나는 재생 상까지의 거리를 매우 크게 하여 영차 회절 광이 차지하는 면적을 매우 작게 하는 방법이 있으나, 이러한 방법은 홀로그램 현미경의 결상 면에서의 피사체의 해상도(분해능)를 저하시키기 때문에 해상도를 최대한으로 유지 하면서 영차 회절 광 효과를 줄이는 방법으로는 적당하지 않다. 다른 방법으로는 위상 이동을 이용하여 여러 번 홀로그램을 측정한 후 이를 계산하여 영차 회절 광과 허상을 제거하여 재생 상의 신호 대 잡음비를 향상시키는 방법이 있다. 이외에 다수의 방법들이 연구되고 있다.

본 연구에서는 스캐닝 방법을 이용한 영차 회절 광과 물체 광 간섭 제거에 대하여 연구하였다. 스캐닝 방법에 의한 영차 회절 광과 물체 광 간섭 제거는 다음과 같다.

물체를 이동시키지 않고 얻을 수 있는 홀로그램은 Fig. 4.10(o)와 같다. 물체

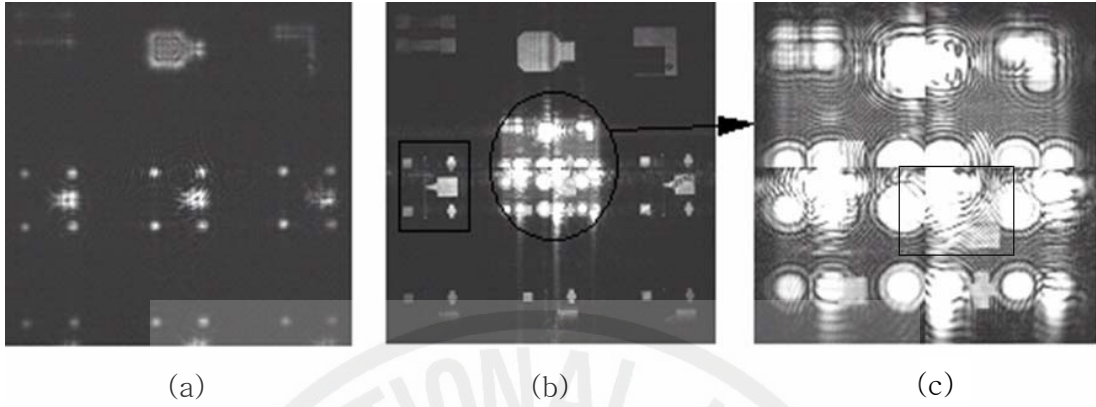


Fig. 4.9 Reconstructed Image after Suppression of DC term. (a) Hologram, (b) Reconstruction Image, (c) area (b).

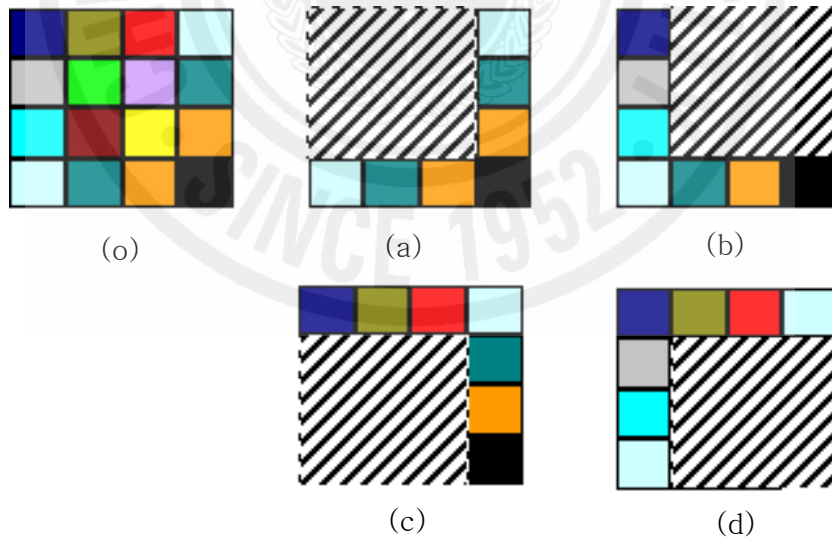


Fig. 4.10 Scanning Method.

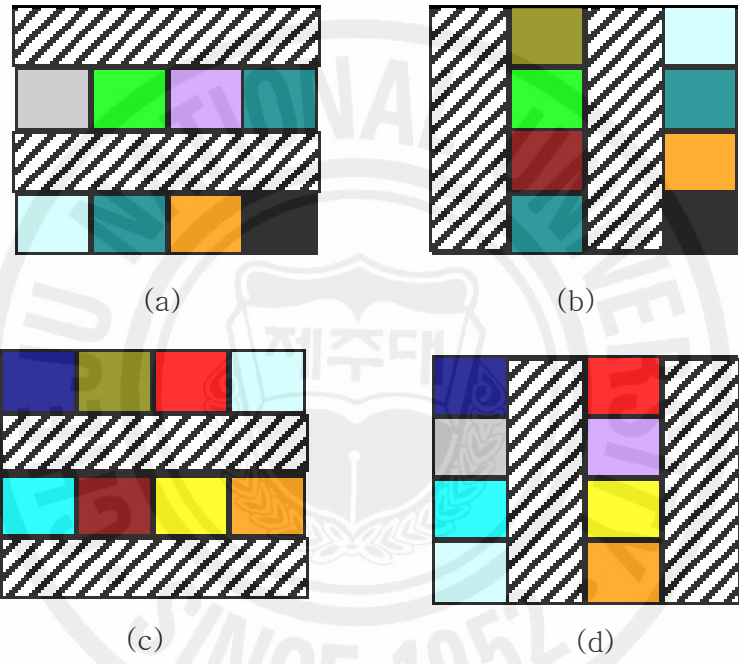


Fig. 4.11 Hologram Information by Scanning Method.

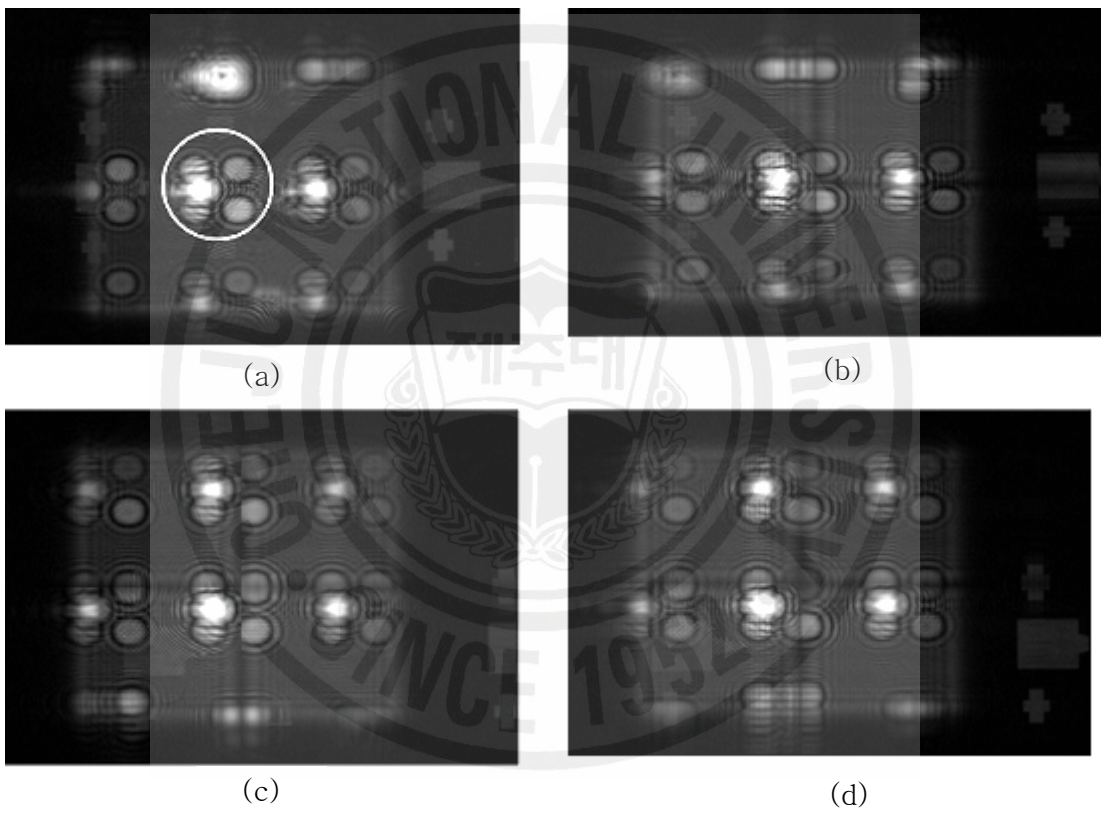


Fig. 4.12 Hologram by Scanning Method.



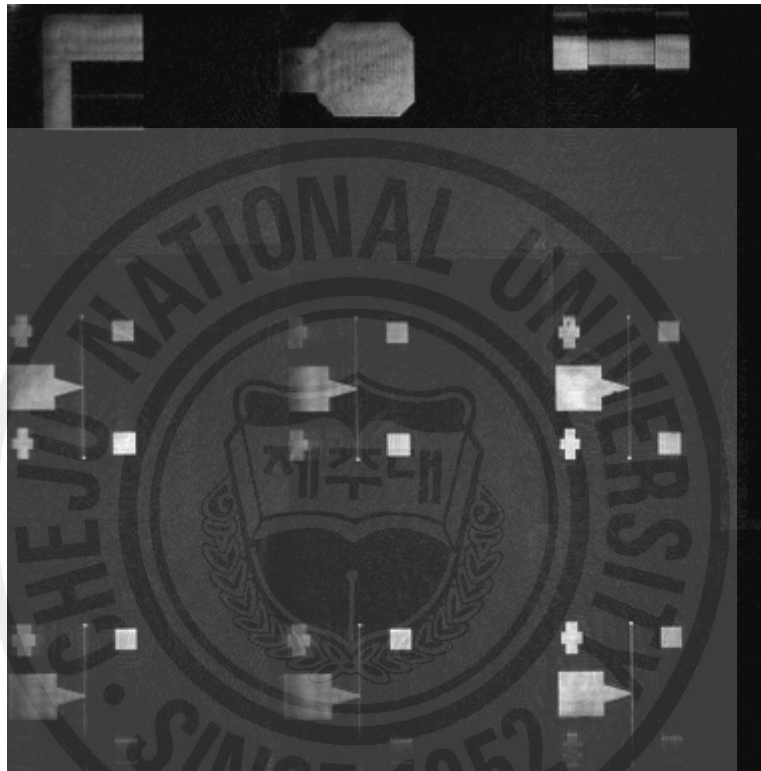


Fig. 4.13 Hologram Reconstruction by Scanning Method.

를 조금씩 이동 시켜 (a), (b), (c), (d)의 사선으로 표시된 부분의 홀로그래프를 각각 얻는다. 각각의 홀로그래프의 재생 상에서 재생 상의 전체 면적을 9등분 했을 때 가운데를 포함한 십자가 모양의 영역은 영차 회절 광에 의한 영향이 큰 부분으로 이 부분을 뺀 나머지 모서리 부분의 4지역만이 의미 있는 측정 결과이다. 이렇게 얻어진 홀로그래프를 이용하면 각각의 홀로그래프로부터 Fig. 4.11과 같이 부분적인 정보를 얻을 수 있다.

즉 최대의 해상도를 얻기 위한 조건으로 CCD로부터 재생 상까지 거리가 20 cm 일 경우이며, 이 경우에 Fig. 4.9(b)와 같이 재생 상의 중심부분과 중심부분을 포함하는 십자가 형태의 지역에서 재생된 상은 잡음이 있고, 제거하기 힘들기 때문에 이 부분을 제외한 나머지 부분만이 유용한 측정 결과이다. 그러므로 잡음이 있는 부분을 제외시키고 잡음이 없는 부분만을 취하면 신호 대 잡음비가 높은 영상을 재생할 수 있다. 따라서 피사체를 움직이는 거리는 CCD 가로 길이의 1/3 에 해당되는 만큼 이동하도록 측정 대상 체를 이동한다. 즉 우측(Fig. 4.10(b)), 아래(Fig. 4.10(c)), 다시 좌측(Fig. 4.10(d))으로 동일한 거리만큼 이동하여 얻은 데이터에서 중심부분을 포함하는 십자가 형태의 지역의 홀로그래프를 제거한 후 나머지 홀로그래프를 조합하여 모든 정보를 얻을 수 있다. Fig. 4.12는 Fig. 4.10의 방법으로 측정한 홀로그래프이다.

Fig. 4.12의 중심부분(원내)을 보면, Fig. 4.12 (a), (b), (c), (d) 각각에서 물체의 이동으로 다른 홀로그래프가 형성되었음을 알 수 있다. Fig. 4.13은 Fig. 4.12의 홀로그래프와 Fig. 4.11의 방법으로 홀로그래프를 구성한 후 재생한 영상이다. Fig. 4.13의 스캐닝 방법에 의한 재생 영상을 보면 영차 회절 광의 효과와 물체 광 간섭효과가 거의 제거 되어 영차 회절 광에 가려졌던 부분이 효과적으로 재생되었음을 알 수 있다. 이와 같이 스캐닝 방법을 이용하는 것은 실험적으로 반복적인 홀로그래프 저장과 그에 따른 반복계산이 필요하여 일반적인 디지털 홀로그래피에 비하여 불편하나, 스캐닝 방법을 사용하면 해상도를 유지하면서 영차 회절 광과 물체 광간의 간섭에 의한 잡음을 제거할 수 있다.

## 2.2 물체 광과 기준 광을 이용한 영차 회절 광 제거

본 연구에서 DC 항을 제거하기 위하여 두 번째로 수행한 연구는, 기준 광의 세기와 물체 광의 세기, 홀로그램을 각각 기록하고 홀로그램에서 물체 광의 세기와 기준 광의 세기를 제거한 후 영상을 재생하는 방법에 대해 연구하였다.

Fig. 4.14는 CCD에 측정된 홀로그램과 CCD 면에서 50 cm 떨어진 지점에 수치적으로 재생한 영상이다. Fig. 4.14(a)는 기준 광과 물체 광의 간섭에 의한 홀로그램이고, Fig. 4.14(b)는 기준 광을 가리고 CCD에서 측정한 물체 광만의 상이다. Fig. 4.14(c)는 홀로그램에서 물체 광 효과를 제거한 후, 즉 홀로그램에서 물체 광의 세기를 제거 한 후 CCD에서 50 cm 떨어진 지점에 재생한 영상이다. 기준 광과 물체광의 세기 및 홀로그램 측정은 동시에 이루어져야한다. 그러나 CCD의 위치, CCD의 동일성 등이 문제가 되므로 위치가 고정된 하나의 CCD로 기준 광과 물체 광의 세기 및 홀로그램을 측정하였다. 기준 광의 세기와 물체 광의 세기는 홀로그램과 달리 간섭무늬가 아니므로 진동에 큰 영향을 받지 않고 레이저 광원의 세기 변화에 민감하므로 레이저 광원의 안정화를 위하여 레이저 광원을 구동시키고 안정화 시간(약 30분)이 지난 후 측정하였다. 그리고 기준 광과 물체 광을 반복 측정한 결과, 측정치의 변화가 거의 없다. 그러므로 기준 광과 물체 광 그리고 홀로그램을 각각 측정하여도 영상 재생에는 문제가 없음을 확인하였다. Fig. 4.14(c), (d)에서 사각형 영역이 영차 회절 광에 의한 재생된 상이며 원형 영역이 재생된 허상이다. Fig. 4.14(c)의 결과에서 영차 회절 광의 효과가 그대로 남아있음을 볼 수 있다. 즉 (2.4)식에서 두 번째 항이 제거 되어도 첫 번째 항이 남아있게 되는 것을 확인 할 수 있다.

남아있는 첫 번째 항을 제거하기 위하여 푸리에 변환 방법을 사용하였다. 즉 영차 회절 광이 공간 주파수로 환산하면 거의 '0' 근처에 있으므로 홀로그램을 푸리에 변환 후 공간 주파수 필터를 사용하여 영차 회절 광을 제거 한 후, 역 푸리에 변환하여 영차 회절 광이 제거된 홀로그램을 수치적으로 얻을 수 있다. 이러한 방법을 통해 얻은 홀로그램을 이용하여 얻은 재생 상이 Fig. 4.14(d)이다. Fig. 4.14(d)의 결과를 보면 Fig. 4.14(c)의 결과와 비교하여 영차 회절 광 효과가 많이 감소하였으나, 충분하지 않음을 알 수 있다. Fig. 4.14(d)의 결과가 홀로그램을 푸리에 변환 후 필터를 사용하여 영차 회절 광 제거 시 필터의 크기를

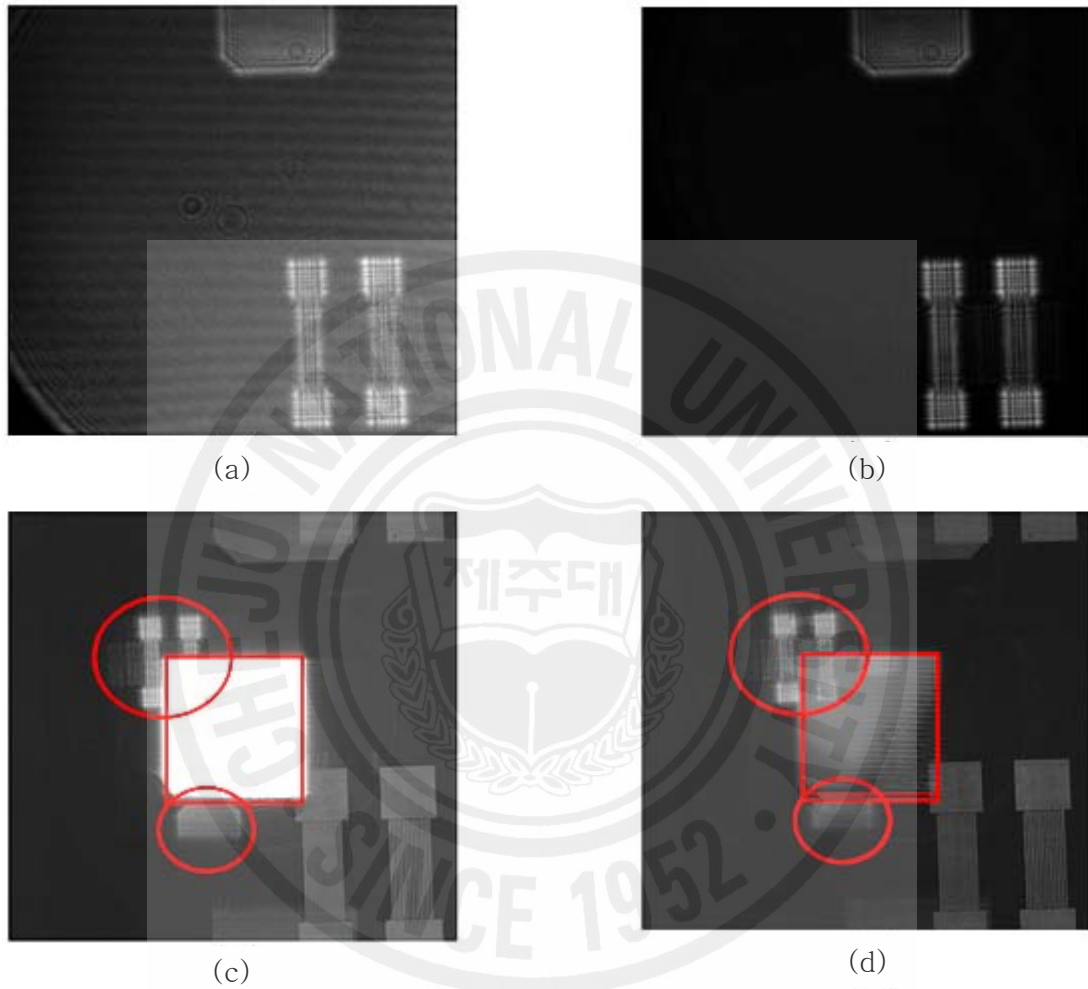


Fig. 4.14 Reconstructed Image with Hologram Eliminated Object Wave and Zero-Order Diffraction. (a) hologram, (b) object image at CCD, (c) reconstructed image with hologram eliminated object wave, (d) reconstructed image with hologram eliminated object wave and zero-order diffraction with numerical filter.

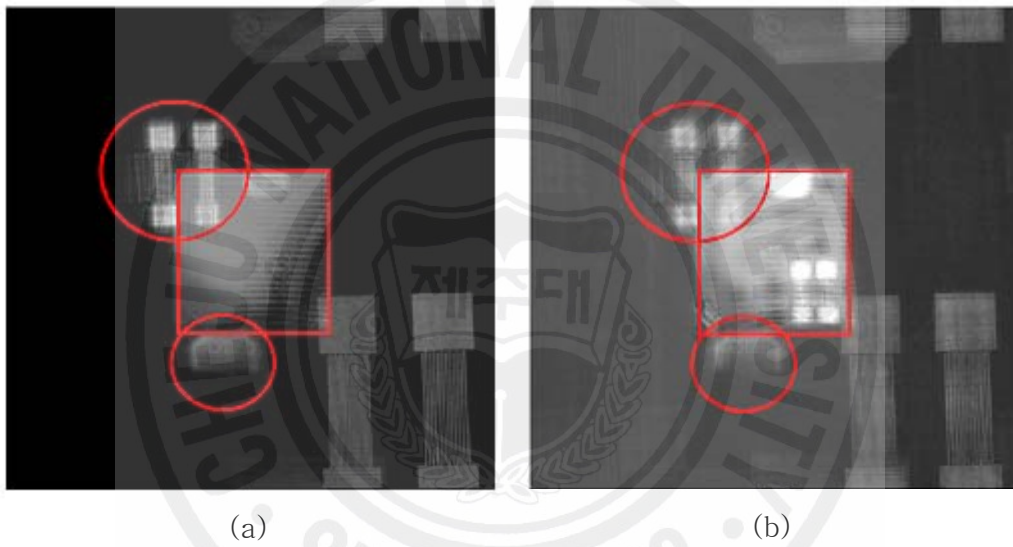


Fig. 4.15 Reconstructed Image by Using Numerical Zero Order Diffraction Elimination Filter and Object Wave Elimination from Hologram. Cut-off frequencies of filter are 0 (a) and 50 (b).

잘못 하여 발생한 것인지를 확인하기 위하여 필터 크기를 변환하여 상을 재생하였다. 그 결과는 Fig. 4.15과 같다. Fig. 4.15(a)와 (b)는 Cut-off 주파수 0 과 50 을 사용하여 재생한 영상이다. 여기서 Cut-off 주파수 0 과 50 의 의미는 CCD로부터 얻어진 홀로그램을 푸리에 변환 시  $2048 \times 2048$  픽셀로 변환되는데 변환된 좌표의 중심인 픽셀 (1024, 1024) 을 원점으로 놓은 경우로 Fig. 4.15(a)는 원점 값을 '0' 으로 놓고 역 푸리에 변환 후 재생한 상이며, Fig. 4.15(b)는 원점을 중심으로 50 픽셀 만큼의 거리에 있는 모든 픽셀들의 값을 '0' 으로 하여 역 푸리에 변환 후의 재생 상이다. Fig. 4.15(b)를 보면 영차 회절 광에 가려 있어 보이지 않던 물체의 상이 보이나 영차 회절 광이 많이 남아 있음을 볼 수 있다. 그리고 필터 사이즈 크기가 증가함으로써 물체상의 선명도가 감소함을 알 수 있다. 필터의 크기를 더욱 크게 하면 영차 회절 광의 효과가 많이 감소하나 물체 상의 명암대비도 같이 감소하여 선명한 영상을 구현 할 수 없다. 즉 수치적으로 필터의 사이즈를 변환시켜도 영차 회절 광의 효과가 제거 되지 않는다.

Fig. 4.15의 결과에서 수치적으로 영차 회절 광의 효과를 제거하는 것이 어려움을 알 수 있다. 푸리에 변환을 이용하여 영차 회절 광을 제거 할 수 있는 경우는 기준 광이 공간적으로 세기 분포가 일정한 경우나 세기 분포가 존재하더라도 공간 주파수가 매우 작아 "0"에 근접할 때이다. 따라서 첫 번째 항을 제거하기 위하여 기준 광의 세기 값을 측정하고, 홀로그램에서 기준 광의 세기를 뺀 홀로그램을 이용하여 상을 재생하였다. 그 결과가 Fig. 4.16과 같다.

Fig. 4.16(a)는 홀로그램이고, Fig. 4.16(b)는 기준 광을 제거 한 후 CCD에서 측정한 물체 광세기, Fig. 4.16(c)는 물체 광을 가리고 CCD에서 측정한 기준 광 세기이고, Fig. 4.16(d)는 홀로그램에서 Fig. 4.16(b)와 (c)의 측정값을 뺀 홀로그램을 재생한 영상이다. Fig. 4.16(c)를 보면 기준 광의 공간 주파수가 영이 아님을 알 수 있고, Fig. 4.16(b)와 비교하여 기준 광의 공간 주파수가 물체 광의 공간 주파수가 크게 차이가 나지 않음을 알 수 있다. 기준 광과 물체 광의 공간 주파수가 확연히 다르지 않기 때문에 Fig. 4.15의 결과와 같이 수치적으로 영차 회절 광의 효과를 줄이고 물체의 상을 재생하는 것이 매우 어려움을 알 수 있다. Fig. 4.16(e)에 홀로그램만을 재생한 상으로 그림에서 사각형 영역이 영

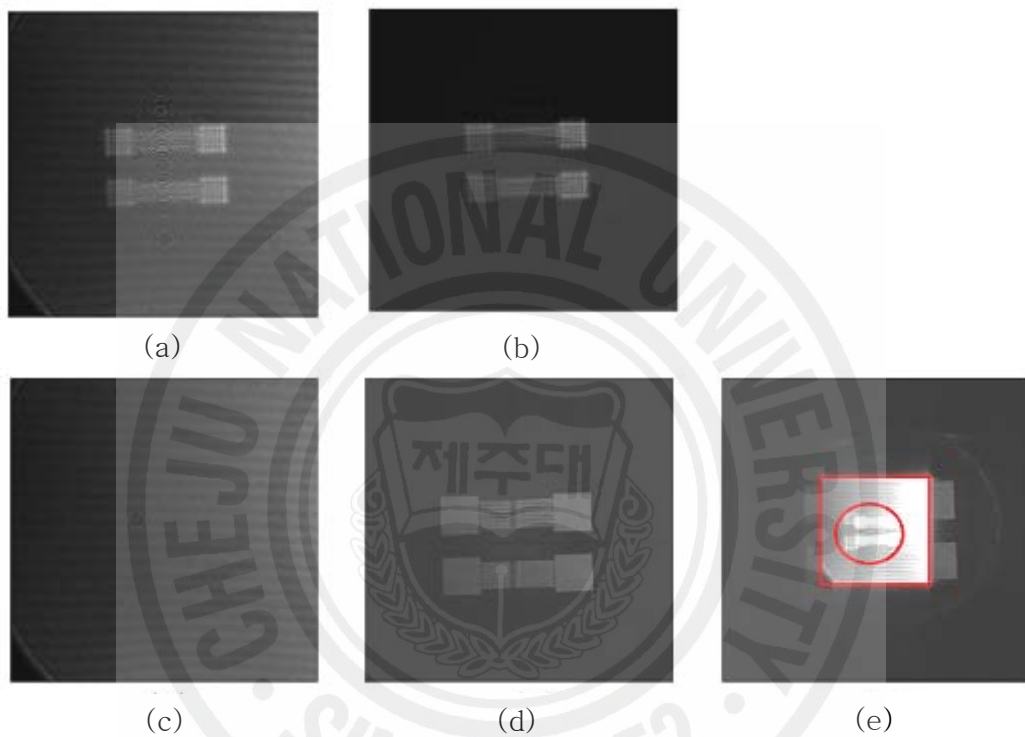


Fig. 4.16 Reconstructed Image with Hologram, which is Eliminated Object and Reference Wave. (a) hologram, (b) intensity of object wave, (c) intensity of reference wave, (d) reconstructed image with hologram, which is eliminated object and reference wave, (e) reconstructed image without elimination of object and reference wave.

차 회절 광에 의한 것이며, 원형 영역이 재생된 허상 영역으로 모든 재생부분이 겹쳐져 있어 실상을 분간 할 수 없음을 알 수 있다. Fig. 4.16(d)의 결과를 보면 영차 회절 광과 물체 광의 영향이 제거 되어 물체가 매우 효과적으로 재생되었음을 알 수 있다. 그러나 CCD에서 측정한 각각의 측정 결과가 아날로그 값이 아니고 디지털 값이므로, 완벽하게 DC 항이 제거가 되지 않아 재생 상 안에 약간의 간섭무늬가 있음을 알 수 있다. 그러나 수치적으로 DC 항을 제거한 결과 보다는 실험적으로 DC 항을 제거한 결과가 우수함을 알 수 있다. 즉 Fig. 4.14 (c)와 Fig. 4.16 (d)를 비교하면 영차 회절 광 효과가 현저히 감소했음을 알 수 있다.

물체 광과 기준 광을 이용한 영차 회절 광 제거 방법은 주사 방법을 이용하지 않으므로 반복적인 불편함은 없으나, 피사체를 측정 할 때 마다 물체 광과 기준 광을 측정해야 하며, 주사 방법에 비하여 영차광의 제거율이 미비하다.

### 2.3 변형된 평균 제거 방법을 이용한 영차 회절 광 제거

2.1과 2.2에서 살펴본 방법은 시료를 움직이며 측정을 하거나 물체 광과 기준 광을 각각 측정해야 되는 번거로움이 있다. 제2장 3.2.1에서 언급된바와 같이 평균 제거 방법을 이용한 영차 회절 광 제거 방법은 한 번의 홀로그램 측정으로 DC 항을 최소화 시켜줄 수 있으며, 그 연산과정이 간단하여 컴퓨터를 이용하는 디지털 홀로그램의 재생시간에 큰 영향을 주지 않는다. 또한 평균 제거 방법은 고역 필터로 해석되며, 평균을 취하는 픽셀의 개수를 작게 할수록 DC 항의 제거율은 높아지고, 실상의 손실율 역시 높아진다.

본 연구에서는 디지털 홀로그래피 현미경에서 평균을 취한 픽셀 개수에 따른 DC 항 제거율을 조사하였고, 위치에 따라 평균 픽셀의 개수를 달리하여 DC 항의 제거율은 높이면서, 실상의 손실율은 최소화하는 변형된 평균 제거 방법을 이용한 영차 회절 광 제거 방법을 연구하였다.

Fig. 4.17은 (2.20)식을 이용하여 Fig. 4.5의 홀로그램에서 빛의 세기 평균을 제거한 홀로그램이다. Fig. 4.17(a)는 평균 과정에서  $3 \times 3$  픽셀, (b)는  $7 \times 7$  픽셀, (c)는  $15 \times 15$  픽셀, (d)는  $30 \times 30$  픽셀을 평균한 것이다. Fig. 4.5와 비교한다면 시료의 무늬에 의한 회절 영역 이외의 부분이 대부분 제거되었고, 평



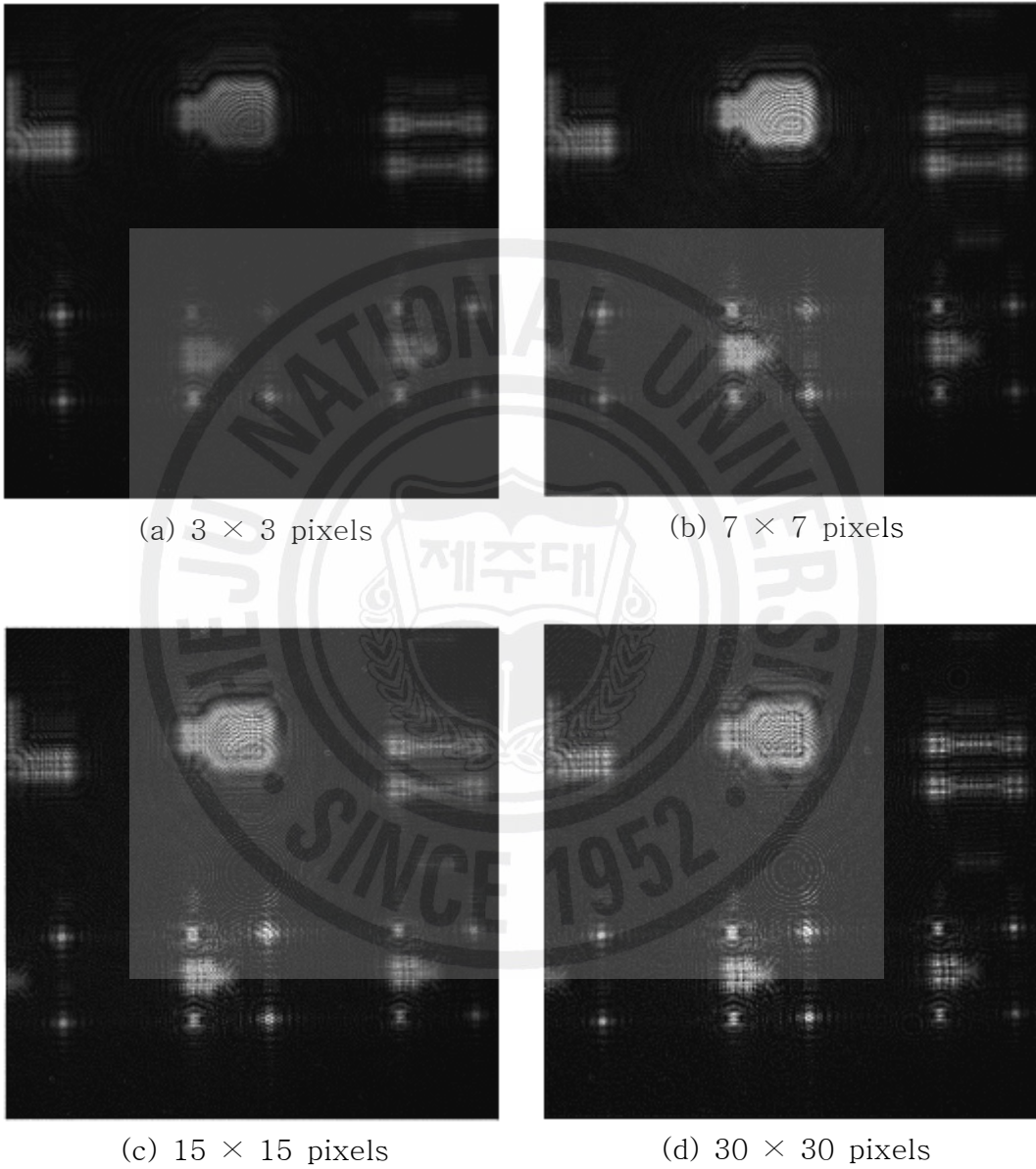
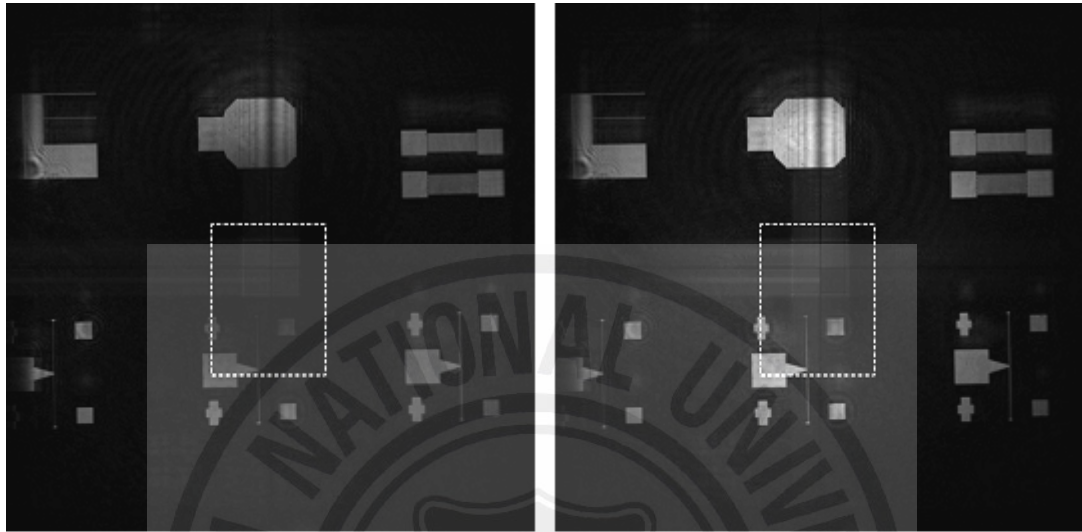
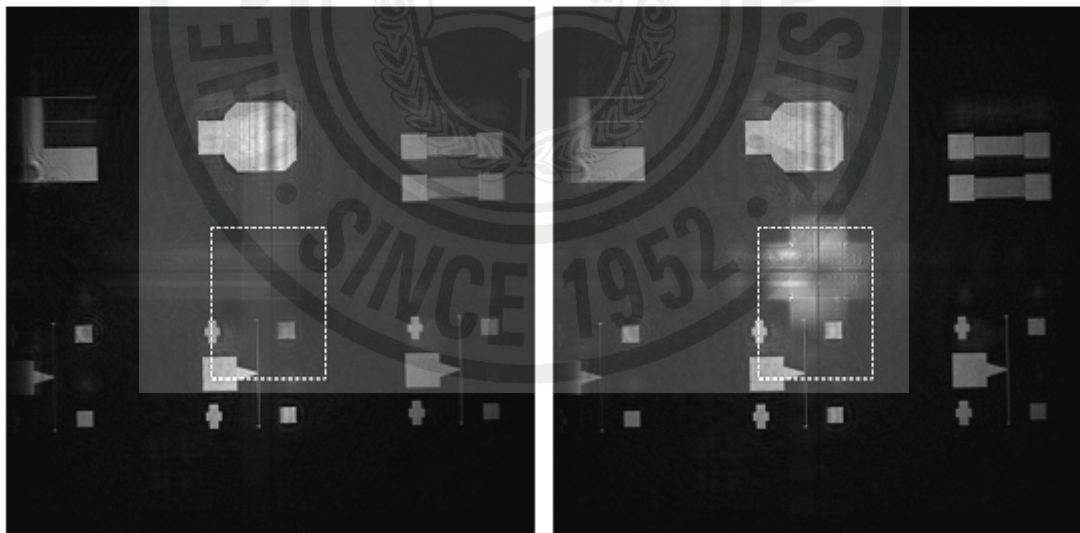


Fig. 4.17 DC term Suppression Hologram by Subtracting Average Intensity.



(a)  $3 \times 3$  pixels

(b)  $7 \times 7$  pixels



(c)  $15 \times 15$  pixels

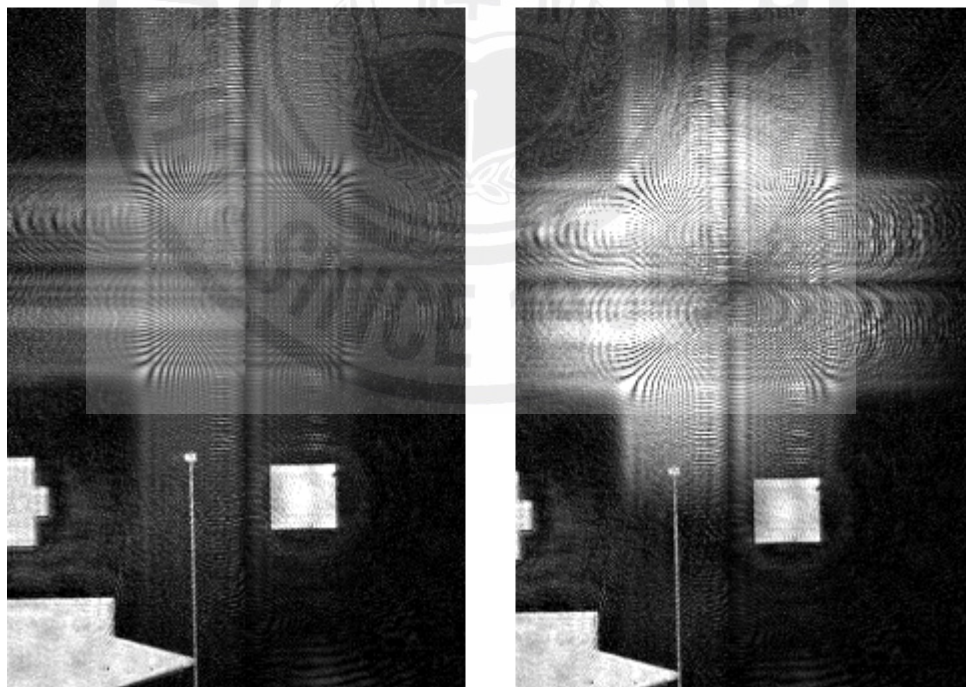
(d)  $30 \times 30$  pixels

Fig. 4.18 Reconstruction of Fig. 4.17.



(a)  $3 \times 3$  pixels

(b)  $7 \times 7$  pixels



(c)  $15 \times 15$  pixels

(d)  $30 \times 30$  pixels

Fig. 4.19 Enlarge of Fig. 4.18 in Dotted Line.

균 값을 취한 픽셀의 개수가 적을수록 많은 부분이 제거 되었다.

Fig. 4.18은 평균 제거 방법을 이용하여 얻어진 홀로그램 Fig. 4.17를 재생한 결과이다. Fig. 4.18은 160 cm 에서 재생된 결과이며, Zero Padding 방법으로 허상이 제거된 결과이다.

Fig. 4.19 (a), (b), (c), (d)는 Fig. 4.18 (a), (b), (c), (d)의 점선 내부를 확대한 것이다.  $3 \times 3$  영역을 평균하고 그 값을 뺀 홀로그램을 재생한 (a)의 경우, 그림 상에 표시된 사각형 내부의 실상 부분이 DC 항과 함께 제거 되었다. (b), (c), (d)의 경우는 DC 항 이외의 제거 된 부분은 거의 없으나 DC 항이 완전히 제거되지 않았다. 또한 평균한 영역 픽셀의 수가 많을수록 DC 항의 제거 효율이 떨어지고, 실상의 손실율은 감소한다.

슬릿에 수직으로 입사하는 일반적인 회절의 경우 회절 무늬의 중심에 대부분의 저주파가 존재하고, 회절무늬의 말단으로 갈수록 그 영향력은 약하다. 물체 파와 기준파가 같은 각도로 입사하는 In-Line 홀로그램 역시 대부분의 저주파는 그 중심 부분에 위치하고, 말단으로 갈수록 그 영향력은 약하다. 즉 홀로그램에서 대부분의 DC 항은 Fig. 4.8과 같이 중심부분에 존재하게 된다. 또한 일반적인 레이저 광원은 가우시안에 근접한 빛 세기 분포를 갖게 되며, 이는 중심부분에서의 DC 항 영향을 가중시킨다.

Fig. 4.19 에서와 같이 DC 항의 제거율이 높아지면서 발생하는 실상의 손실과 같은 대립적인 양상을 최소화 하기 위해서는 중심부분에 집중되어 있는 DC 항의 제거율은 높이면서, 실상의 제거율을 최소화해야 한다.

Fig. 4.20은 본 연구에서 수행한 변형된 평균 제거 방법의 CCD의 위치에 따라 평균값을 취한 픽셀의 개수를 나타낸 것이다. 변형된 평균 제거 방법의 경우 중앙 부분은  $30 \times 30$  픽셀의 평균값을 취하고, 픽셀의 수를 순차적으로 줄여 홀로그램의 가장자리 영역은  $3 \times 3$  픽셀을 평균값을 취하였고, 이 과정을 통하여 얻어진 홀로그램은 Fig. 4.21(b)에 해당되며, Fig. 4.21(a)는 중앙 부분을  $10 \times 10$  픽셀, 가장자리 영역은  $3 \times 3$  픽셀, (c)는 중앙 부분을  $30 \times 30$  픽셀, 가장자리 영역은  $10 \times 10$  픽셀을 취하여 DC 항을 제거시키기 위한 홀로그램을 얻었다.

Fig. 4.22의 (a), (b), (c)는 Fig. 4.21의 (a), (b), (c)를 각각 재생한 영상이다.

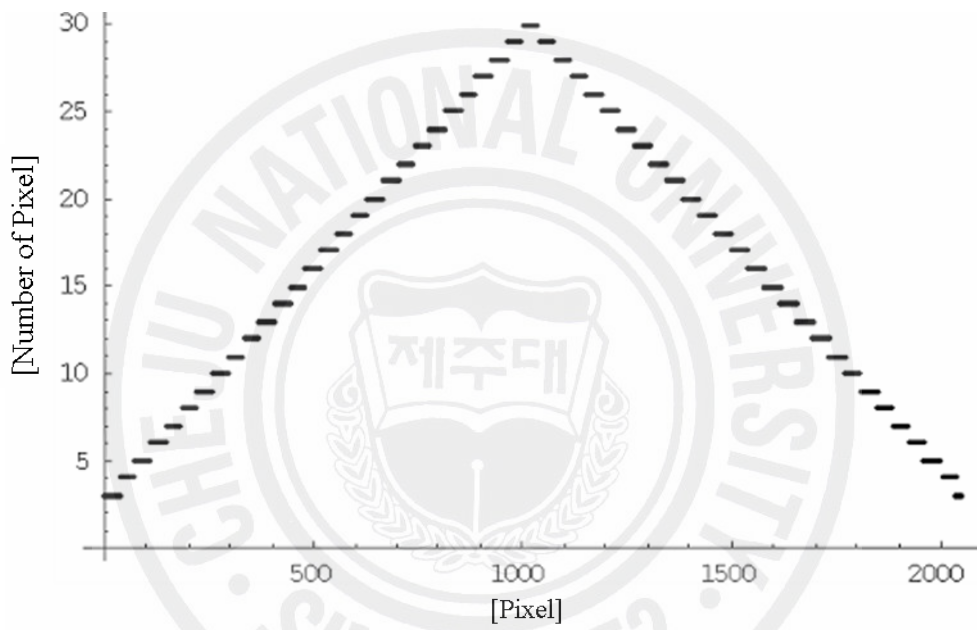
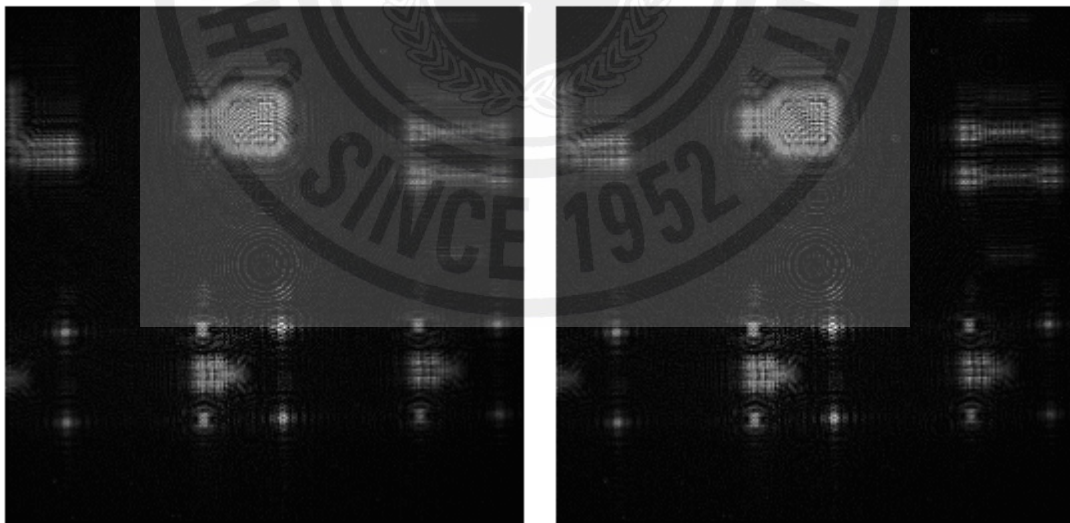


Fig. 4.20 Number of Pixel for Average.



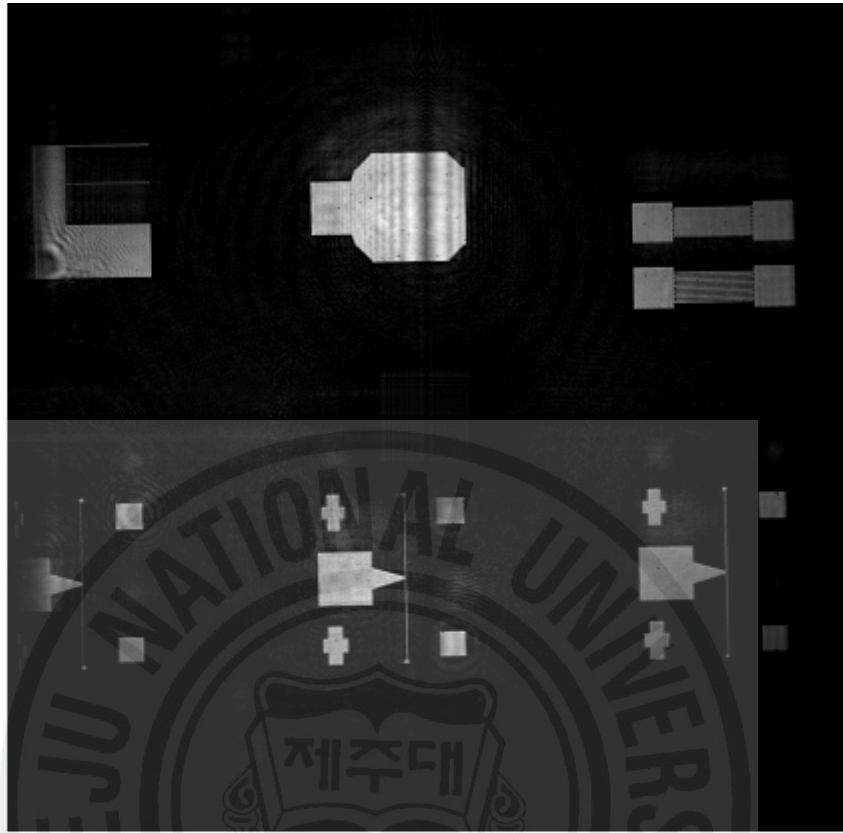
(a)  $10 \times 10 \rightarrow 3 \times 3$  pixels



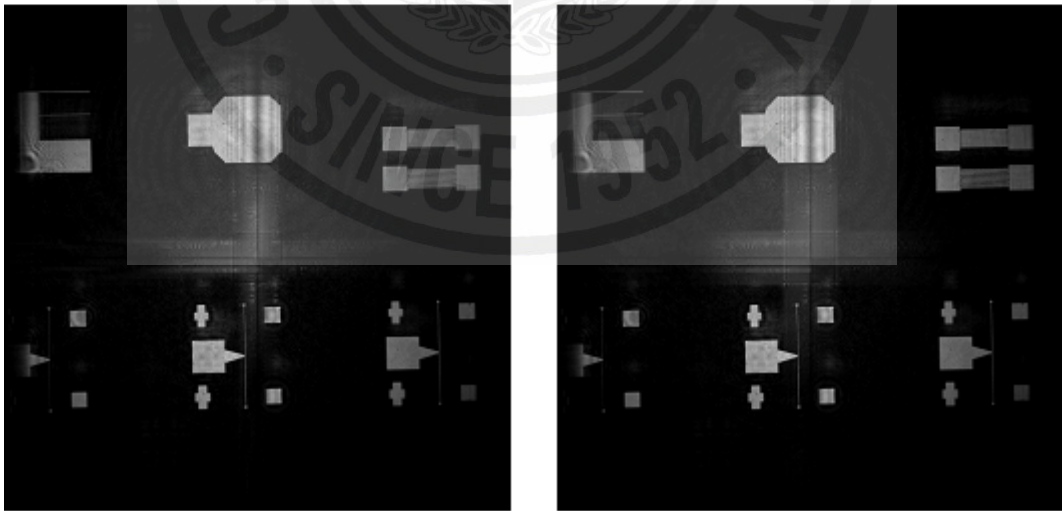
(b)  $30 \times 30 \rightarrow 3 \times 3$  pixels

(c)  $30 \times 30 \rightarrow 10 \times 10$  pixels

Fig. 4.21 DC term Suppression Hologram by Subtracting variable Pixels Average Intensity.



(a)  $10 \times 10 \rightarrow 3 \times 3$  pixels



(b)  $30 \times 30 \rightarrow 3 \times 3$  pixels

(c)  $30 \times 30 \rightarrow 10 \times 10$  pixels

Fig. 4.22 Reconstruction of Fig. 4.17.

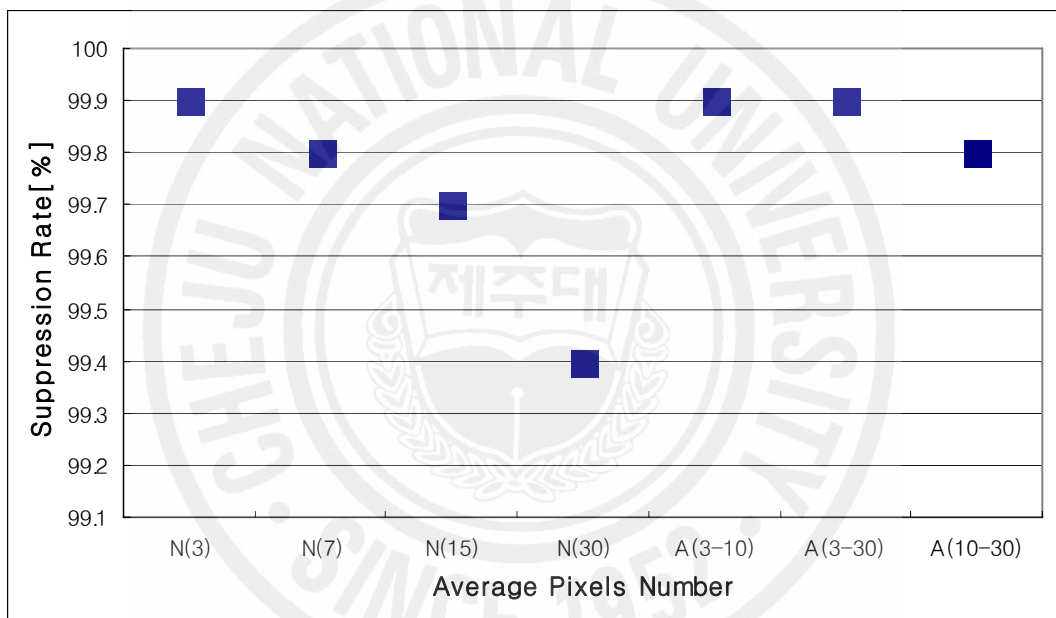


Fig. 4.23 Suppression Rate of Total Pixels Intensity.



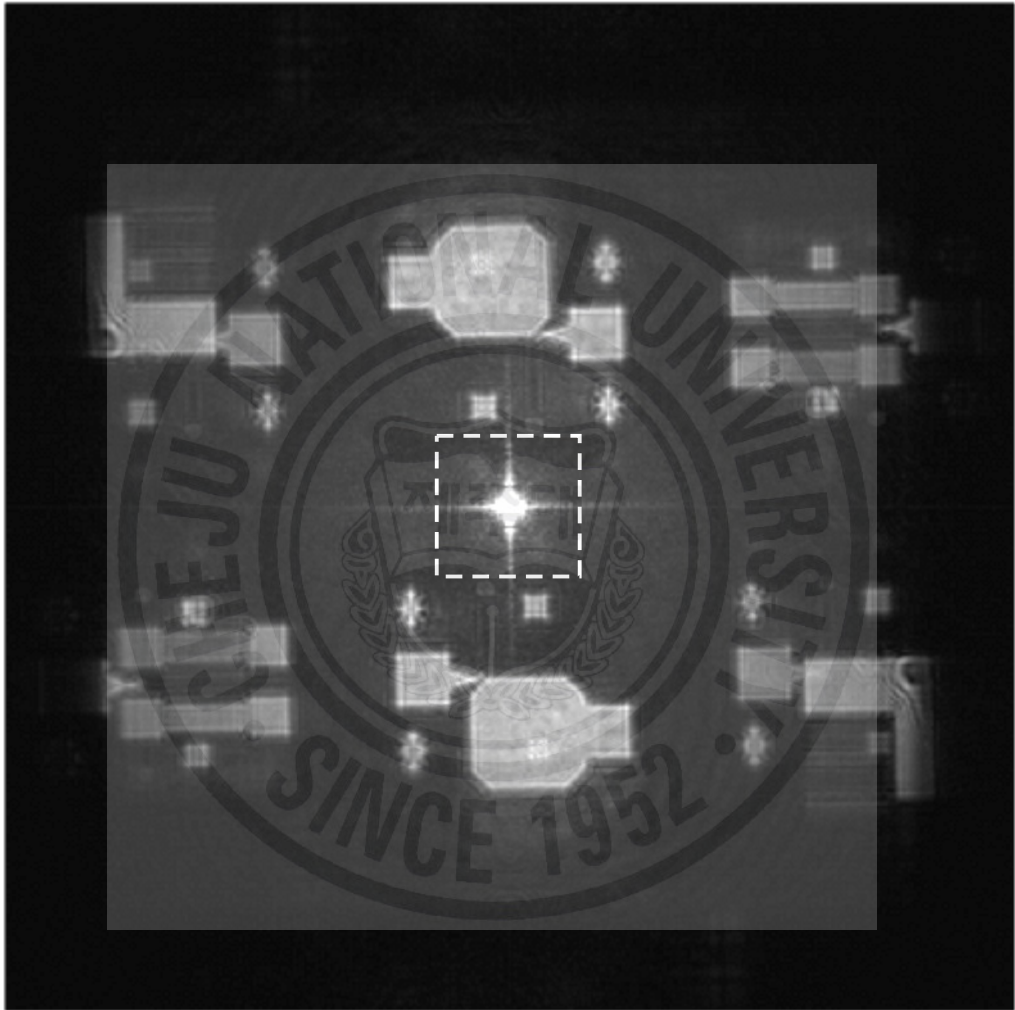
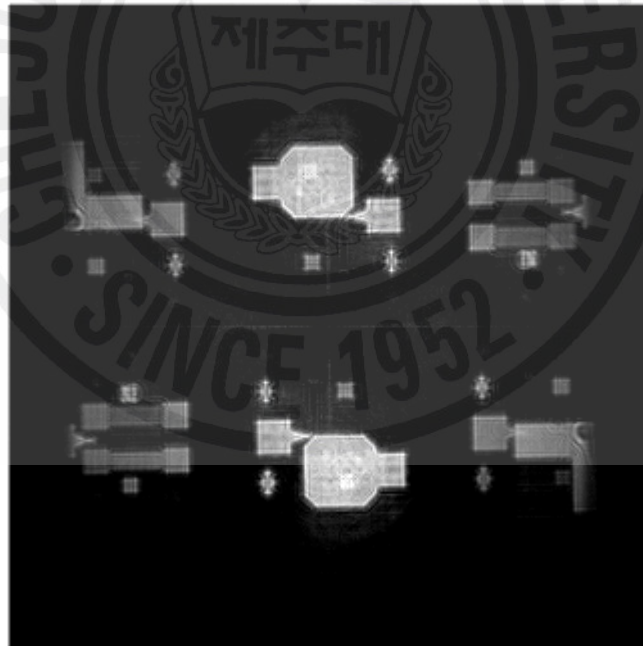


Fig. 4.24 Fourier Transform of Fig. 4.5.



(a)  $3 \times 3$  pixels



(b)  $10 \times 10 \rightarrow 3 \times 3$  pixels

Fig. 4.25 Fourier Transform of Fig. 4.21.

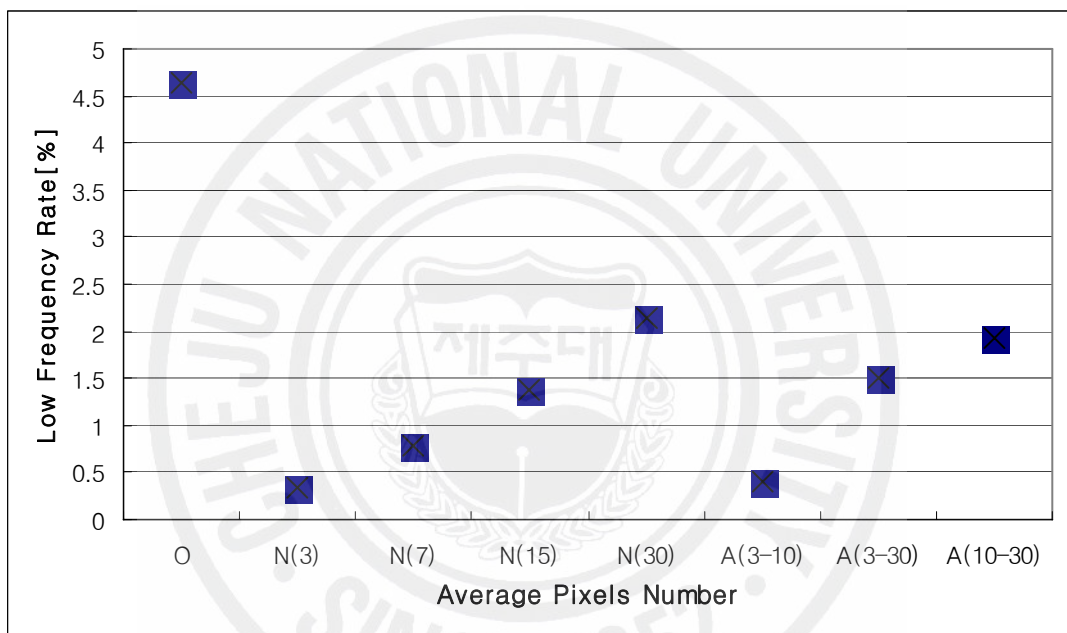


Fig. 4.26 Low Frequency Rate.

Fig. 4.22(a)의 경우 DC 항은 대부분 제거 되었으나, Fig. 4.18(a)에서 손실되었던 사각형 내부의 실상이 손실되지 않았다.

Fig. 4.5와 같이 홀로그램에 있어서 DC 항(식(2.1))의 첫 번째 항과 두 번째 항이 차지하는 빛의 세기는 실상과 허상에 비하여 매우 크다. 즉 홀로그램에서 빛의 전체 세기는 DC 항의 제거 정도를 나타내는 척도로 사용 할 수 있다.

$$SR = \frac{\sum I_H - \sum I'}{\sum I_H} \times 100 \quad (4.1)$$

여기서  $\sum I_H$  는 원본 홀로그램의 모든 픽셀의 세기 합이며,  $\sum I'$  은 (2.20)식에서 주어진 평균 제거 방법에 의하여 DC 항이 제거된 홀로그램의 모든 픽셀의 세기 합이다. 식(4.1)은 (2.20)식에서 얻어진 DC 항이 제거된 홀로그램  $I'$  의 원본 홀로그램의 전체 빛의 세기에 대해 DC 항이 제거된 홀로그램의 전체 빛의 세기 비율이고, Fig. 4.23에 나타나 있다. Fig. 4.23에서 N(3), N(7), N(15), N(30)은 평균값을 취하는 픽셀의 개수를 각각  $3 \times 3$ ,  $7 \times 7$ ,  $15 \times 15$ ,  $30 \times 30$  으로 일정하게 취한 것이고, A(3-10), A(3-30), A(10-30)은 평균값을 취하는 픽셀의 개수를 각각 중앙 :  $10 \times 10$  - 외곽 :  $3 \times 3$ , 중앙 :  $30 \times 30$  - 외곽 :  $3 \times 3$ , 중앙 :  $30 \times 30$  - 외곽 :  $10 \times 10$  으로 취한 경우이다. 픽셀의 개수를 일정하게 한 경우  $3 \times 3$  픽셀을 취한 경우가 전체 빛의 세기 비율이 99.9 % 로 가장 많이 감소하였고, 99.9 ~ 99.4 % 분포를 가진다. 위치에 따라 픽셀의 개수를 변경 한 경우는 99.9 ~ 99.8 % 감소하였다. 또한 픽셀의 개수를 일정하게 한 경우와 그렇지 않은 경우 모두 픽셀의 개수가 적을수록 전체 빛의 세기가 감소하였다.

DC 항의 감소율은 푸리에 변환을 이용하여 위상 공간에서 저주파 영역의 비율을 나타냄으로써 효과적으로 나타낼 수 있다. Fig. 4.24은 Fig. 4.5의 푸리에 변환이다. 중앙의 점선 내부가 저주파 영역에 해당된다. Fig. 4.25은 평균 제거 방법으로 DC 항이 제거된 Fig. 4.17(a)와 Fig. 4.21(a)의 푸리에 변환이다. Fig. 4.25 (a)는 평균값을 취하는 픽셀의 개수를  $3 \times 3$  으로 일정하게 취한 것

이고, (b)는 평균값을 취하는 픽셀의 개수를 중앙 :  $10 \times 10$  - 외곽 :  $3 \times 3$  으로 취한 경우이다. Fig. 4.25은 (a), (b) 모두 저주파대역이 제거되었으나, (a)의 경우는 저주파 대역 근처의 다른 영역까지 같이 제거 되었으며, 전체적으로도 신호의 선명도가 (b)에 비해 낮다.

Fig. 4.26은 모든 주파수 영역의 세기에 대한 저주파 영역의 비율 LFR 을 나타낸 것으로, 식(4.2)와 같다.

$$LFR = \frac{\sum_{LFmin}^{LFmax} FFT[I']}{\sum_{All Pxel} FFT[I']} \times 100 \quad (4.2)$$

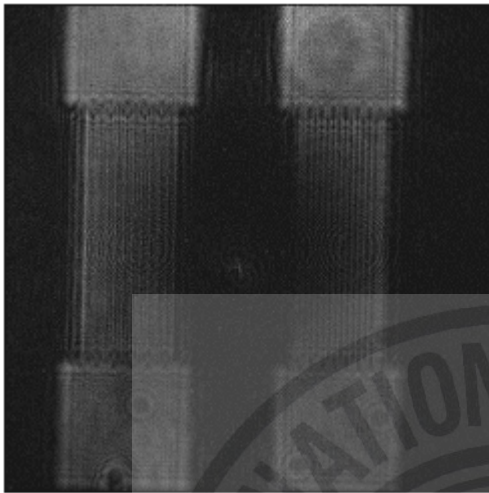
여기서  $LFmax$  와  $LFmin$  은 저주파 영역으로 Fig. 4.26에서는 각각 100 , -100 을 취하였고,  $All Pxel$  은 모든 픽셀이다. 0는 평균 제거 방법을 적용하지 않은 원본 홀로그램의 저주파 영역 비율이며, N(3), N(7), N(15), N(30)은 평균 값을 취하는 픽셀의 개수를 각각  $3 \times 3$ ,  $7 \times 7$ ,  $15 \times 15$ ,  $30 \times 30$  으로 일정하게 취한 것이고, A(3-10), A(3-30), A(10-30)은 평균값을 취하는 픽셀의 개수를 각각 중앙 :  $10 \times 10$  - 외곽 :  $3 \times 3$ , 중앙 :  $30 \times 30$  - 외곽 :  $3 \times 3$ , 중앙 :  $30 \times 30$  - 외곽 :  $10 \times 10$  으로 취한 경우이다. 평균값을 취하지 않은 경우 저주파 비율은 4.6 % 로 평균값을 취한 다른 경우보다 2배 이상 높고, 평균 픽셀 개수를 일정하게 한 경우와 픽셀 개수를 다르게 한 경우 모두 픽셀 개수를 작게 할수록 저주파의 비율이 낮아지고, 두 경우 모두 근소한 차이만을 보인다. 즉 픽셀의 개수를 다르게 한 경우 역시 종래의 평균 제거 방법과 비슷한 수준의 저주파 영역 제거 비율을 얻을 수 있다.

Fig. 4.5은  $10\times$  의 대물렌즈를 사용하여 측정한 결과이며, Fig. 4.27는  $50\times$  의 대물렌즈를 사용하여 Fig. 4.5의 오른쪽 상단의 격자무늬를 측정한 홀로그램이다.

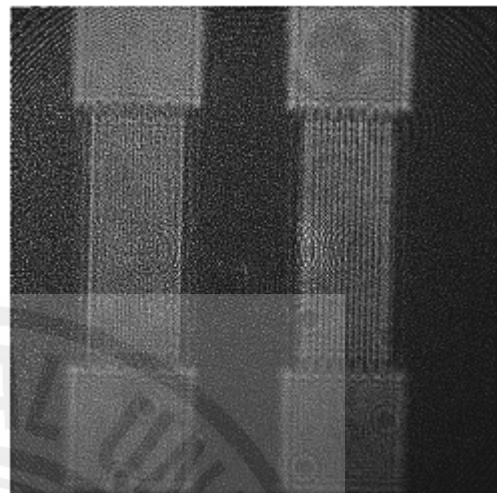
Fig. 4.28은 (2.20)식을 이용하여 Fig. 4.27 홀로그램에서 빛의 세기 평균을 제거한 홀로그램이다. Fig. 4.28(a)는 픽셀 값들의 평균 과정에서  $3 \times 3$  픽셀, (b)는  $15 \times 15$  픽셀을 평균한 것이고, (c)는 중앙 부분을  $10 \times 10$  픽셀, 가장



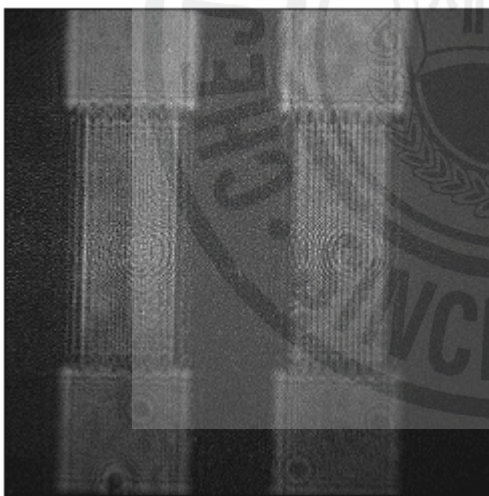
Fig. 4.27 Hologram images by 50× Objective Lens.



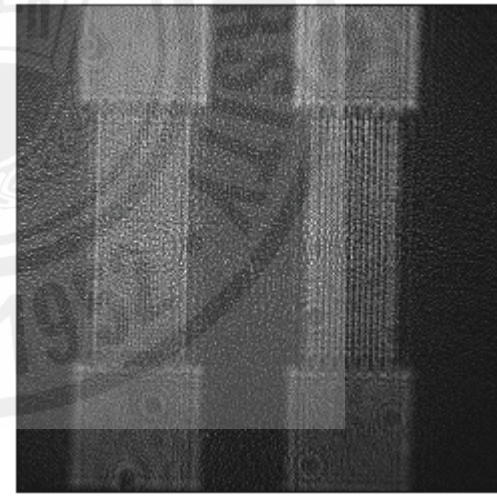
(a)  $3 \times 3$  pixels.



(b)  $15 \times 15$  pixels.



(c)  $10 \times 10 \rightarrow 3 \times 3$  pixels.



(d)  $30 \times 30 \rightarrow 3 \times 3$  pixels.

Fig. 4.28 DC term Suppression Hologram by Subtracting variable Pixels Average Intensity.

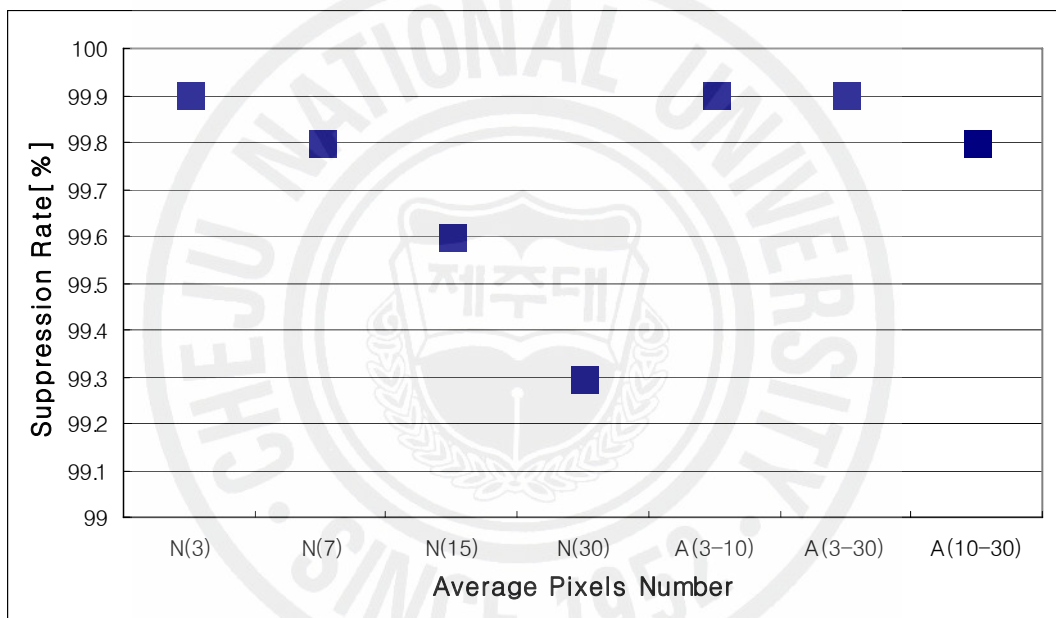


Fig. 4.29 Suppression of Total Pixels Intensity.



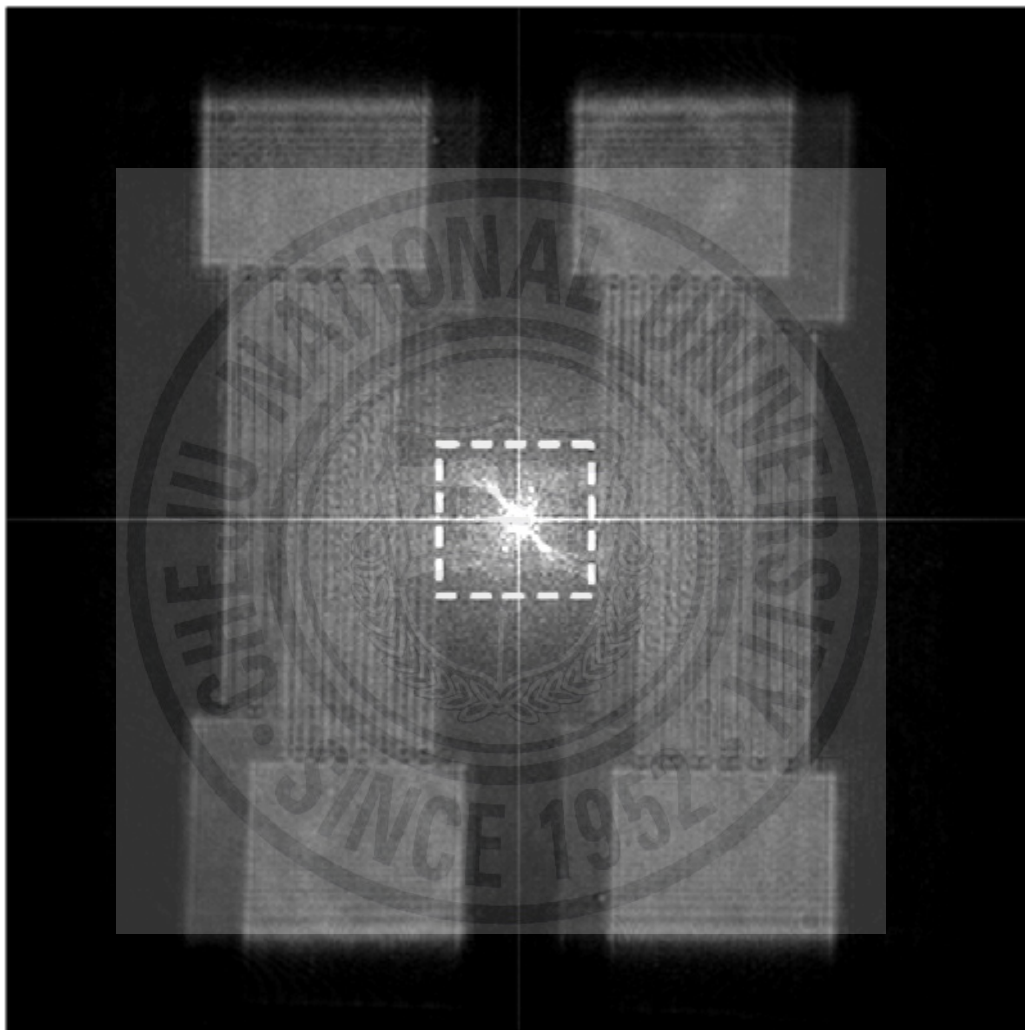
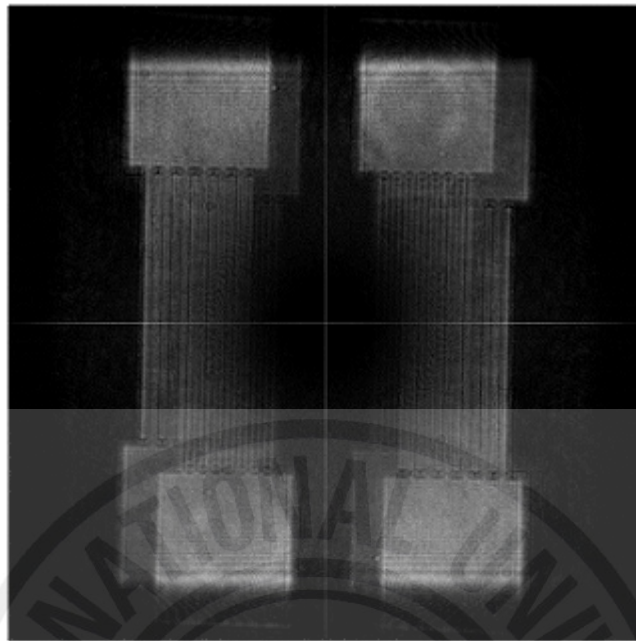


Fig. 4.30 Fourier Transform of Fig. 4.27.



(a)  $3 \times 3$  pixels.



(b)  $10 \times 10 \rightarrow 3 \times 3$  pixels.

Fig. 4.31 Fourier Transform of Fig. 4.28.

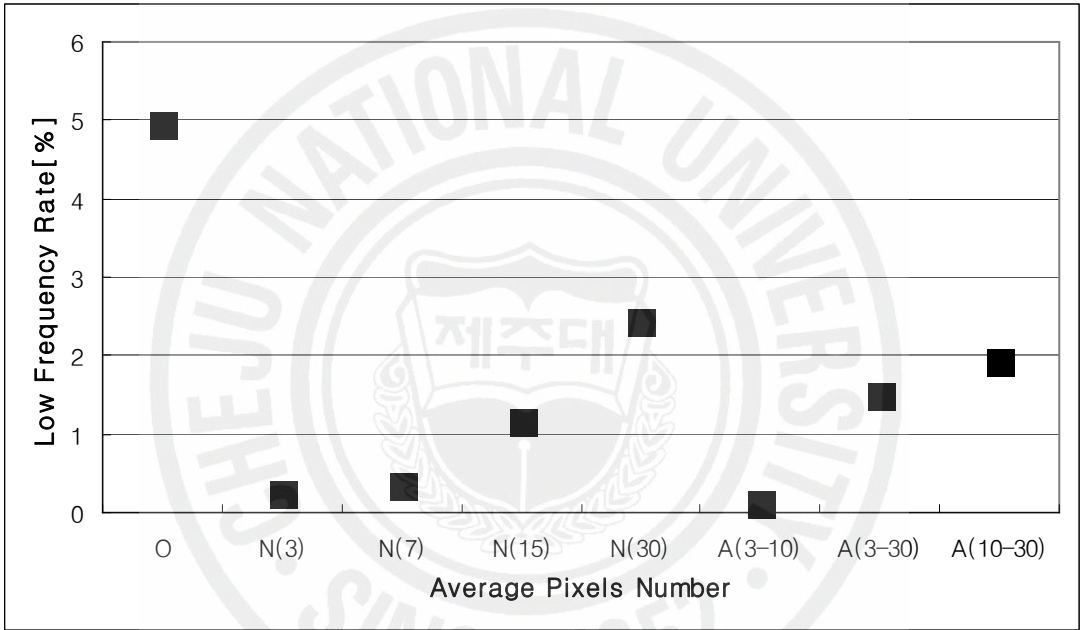


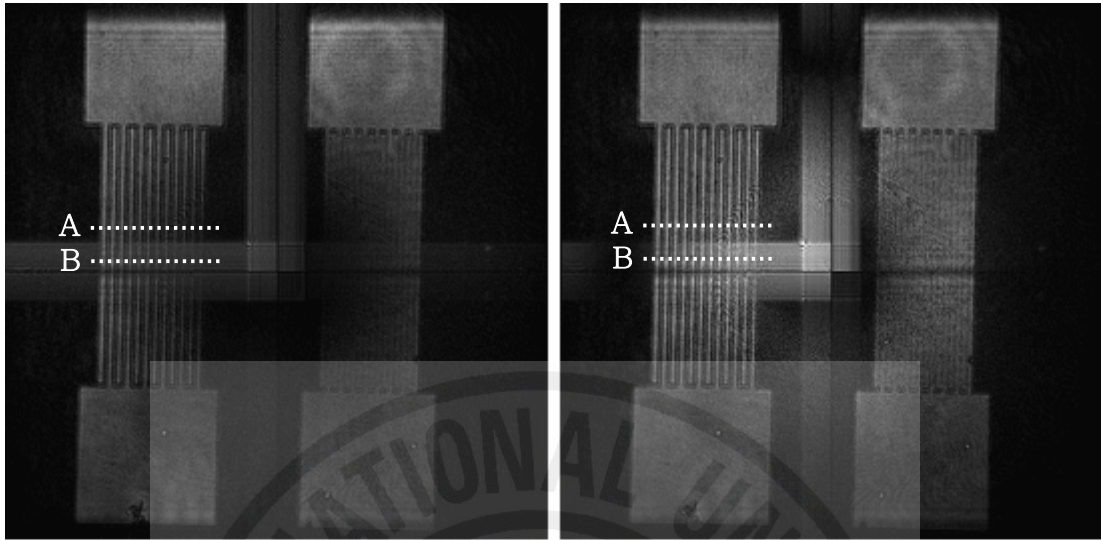
Fig. 4.32 Low Frequency Rate.

자리 영역은  $3 \times 3$  픽셀, (d)는 중앙 부분을  $30 \times 30$  픽셀, 가장자리 영역은  $3 \times 3$  픽셀을 평균한 것이다. Fig. 4.27과 비교하면 피사체의 무늬에 의한 회절 영역 이외의 대부분이 제거되었고, 평균값을 취한 픽셀의 개수가 적을수록 많은 부분이 제거되었다. 또한 일정한 픽셀의 개수를 평균한 것에 비해 위치에 따라 다른 픽셀의 개수를 평균한 경우가 회절 무늬가 더욱 선명하다.

Fig. 4.29은 Fig. 4.27의 DC 항이 제거 되지 않은 원본 홀로그램의 전체 빛의 세기에 대해 DC 항이 제거된 홀로그램의 전체 빛의 세기 비율이고(식(4.1)),  $N(3)$ ,  $N(7)$ ,  $N(15)$ ,  $N(30)$ 은 평균값을 취하는 픽셀의 개수를 각각  $3 \times 3$ ,  $7 \times 7$ ,  $15 \times 15$ ,  $30 \times 30$  으로 일정하게 취한 것이고,  $A(3-10)$ ,  $A(3-30)$ ,  $A(10-30)$ 은 평균값을 취하는 픽셀의 개수를 각각 중앙 :  $10 \times 10$  - 외곽 :  $3 \times 3$ , 중앙 :  $30 \times 30$  - 외곽 :  $3 \times 3$ , 중앙 :  $30 \times 30$  - 외곽 :  $10 \times 10$  으로 취한 경우이다. 픽셀의 개수를 일정하게 한 경우  $3 \times 3$  픽셀을 취한 경우가 전체 빛의 세기 비율이 99.9 % 로 가장 많이 감소하였고, 위치에 따라 픽셀의 개수를 변경 한 경우는 99.9 ~ 99.8 % 로 감소하였으며, 이는  $10\times$  대물렌즈를 사용하여 측정한 Fig. 4.23과 유사한 결과이다.

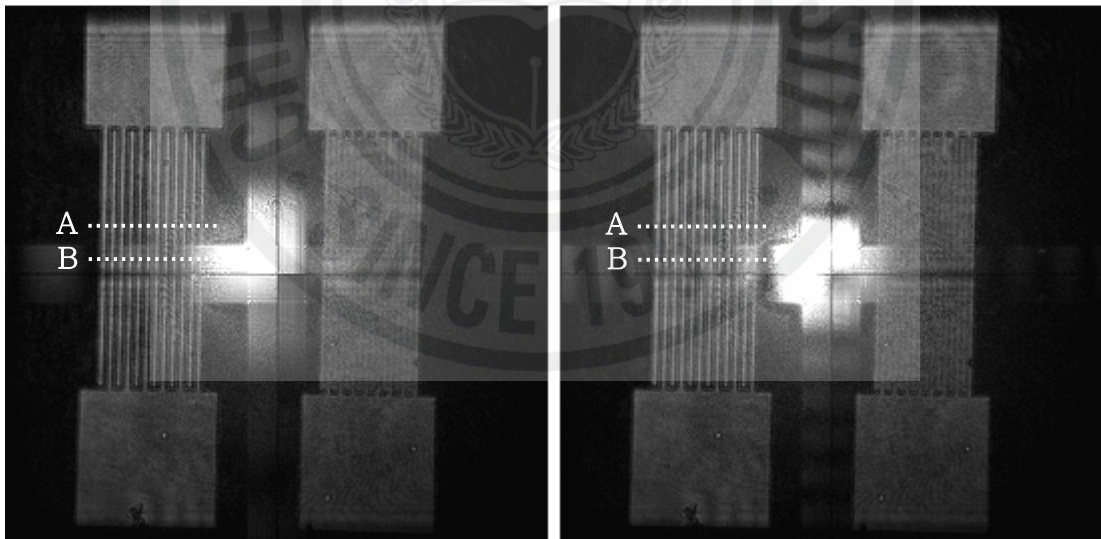
Fig. 4.30은 Fig. 4.27의 푸리에 변환이다. 중앙의 점선 내부가 저주파 영역에 해당된다. Fig. 4.31은 평균 제거 방법으로 DC 항이 제거된 Fig. 4.28(a)와 (c)의 푸리에 변환이다. Fig. 4.31(a)는 평균값을 취하는 픽셀의 개수를  $3 \times 3$  으로 일정하게 취한 것이고, (b)는 평균값을 취하는 픽셀의 개수를 중앙 :  $10 \times 10$  - 외곽 :  $3 \times 3$  으로 취한 경우이다. Fig. 4.31은 (a), (b) 모두 저주파대역이 제거되었으나, (a)의 경우는 저주파 대역 주변의 다른 영역도 같이 제거 되었으며, 전체적으로도 신호의 선명도가 (b)에 비해 낮다.

Fig. 4.32는 모든 주파수 영역의 세기에 대한 저주파 영역의 세기 비율(식(4.2))을 나타낸 것이고, O는 평균 제거 방법을 적용하지 않은 경우이고,  $N(3)$ ,  $N(7)$ ,  $N(15)$ ,  $N(30)$ 은 평균값을 취하는 픽셀의 개수를 각각  $3 \times 3$ ,  $7 \times 7$ ,  $15 \times 15$ ,  $30 \times 30$  으로 일정하게 취한 것이고,  $A(3-10)$ ,  $A(3-30)$ ,  $A(10-30)$ 은 평균값을 취하는 픽셀의 개수를 각각 중앙 :  $10 \times 10$  - 외곽 :  $3 \times 3$ , 중앙 :  $30 \times 30$  - 외곽 :  $3 \times 3$ , 중앙 :  $30 \times 30$  - 외곽 :  $10 \times 10$  으로 취한 경우이다. 평균 제거 방법을 취하지 않은 경우 저주파 비율은 4.9 % 로 평균값을



(a)  $3 \times 3$  pixels.

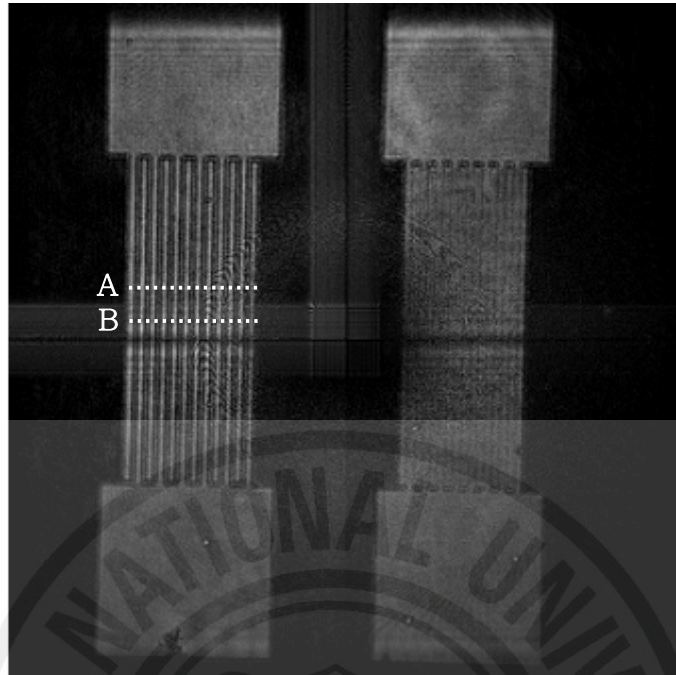
(b)  $7 \times 7$  pixels.



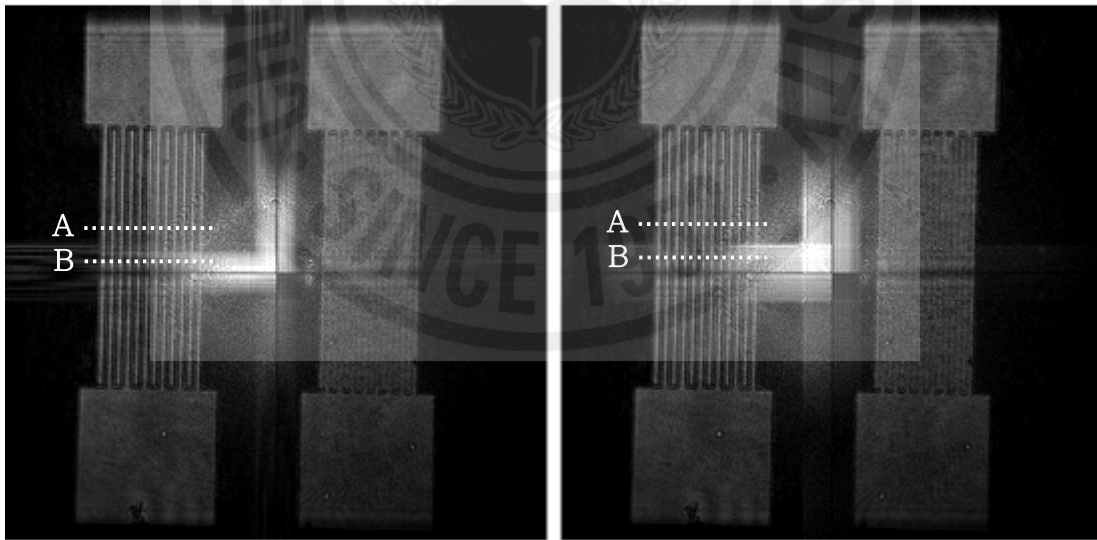
(a)  $15 \times 15$  pixels.

(a)  $30 \times 30$  pixels.

Fig. 4.33 Reconstruction with DC Term Suppressed Hologram by average Intensity Subtracted of Constant Pixels Number.



(a)  $10 \times 10 \rightarrow 3 \times 3$  pixels.



(b)  $30 \times 30 \rightarrow 3 \times 3$  pixels.

(c)  $30 \times 30 \rightarrow 10 \times 10$  pixels.

Fig. 4.34 Reconstruction with DC Term Suppressed Hologram by average Intensity Subtracted of Constant Pixels Number.

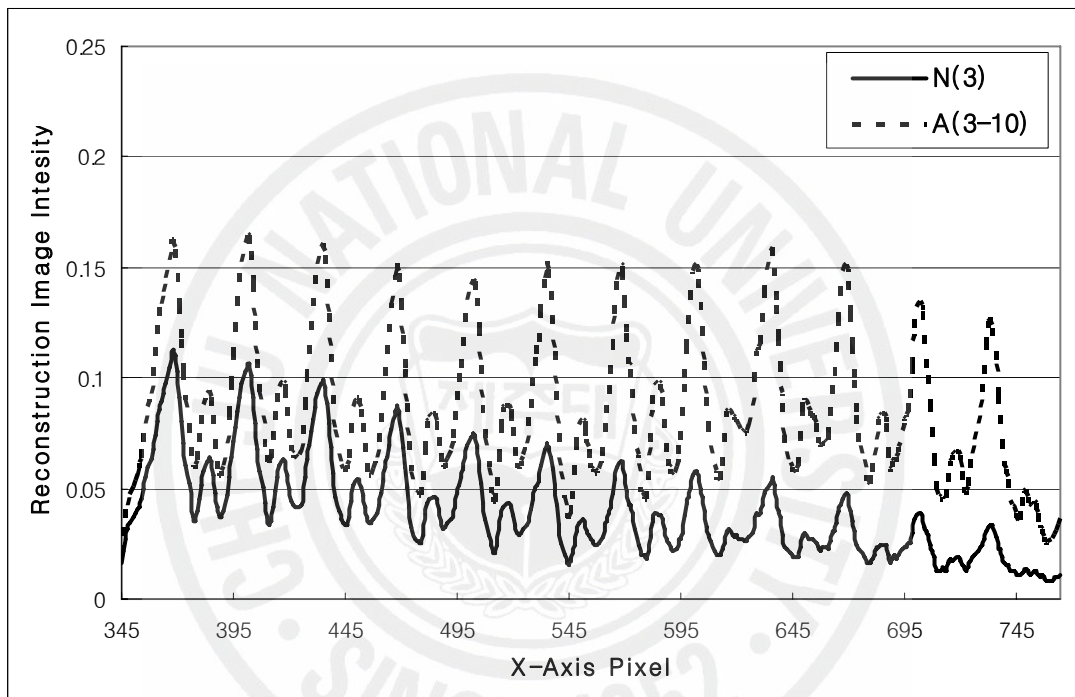


Fig. 4.35 A of Fig. 4.33(a) and Fig. 4.34(a).

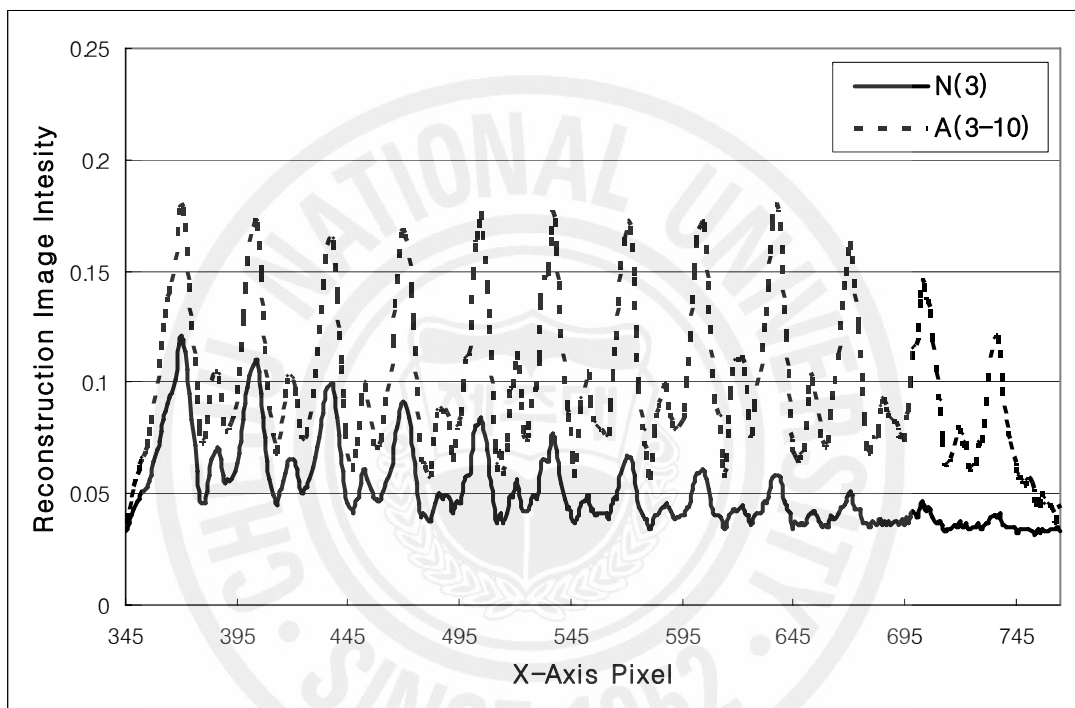


Fig. 4.36 B of Fig. 4.33(a) and Fig. 4.34(a).



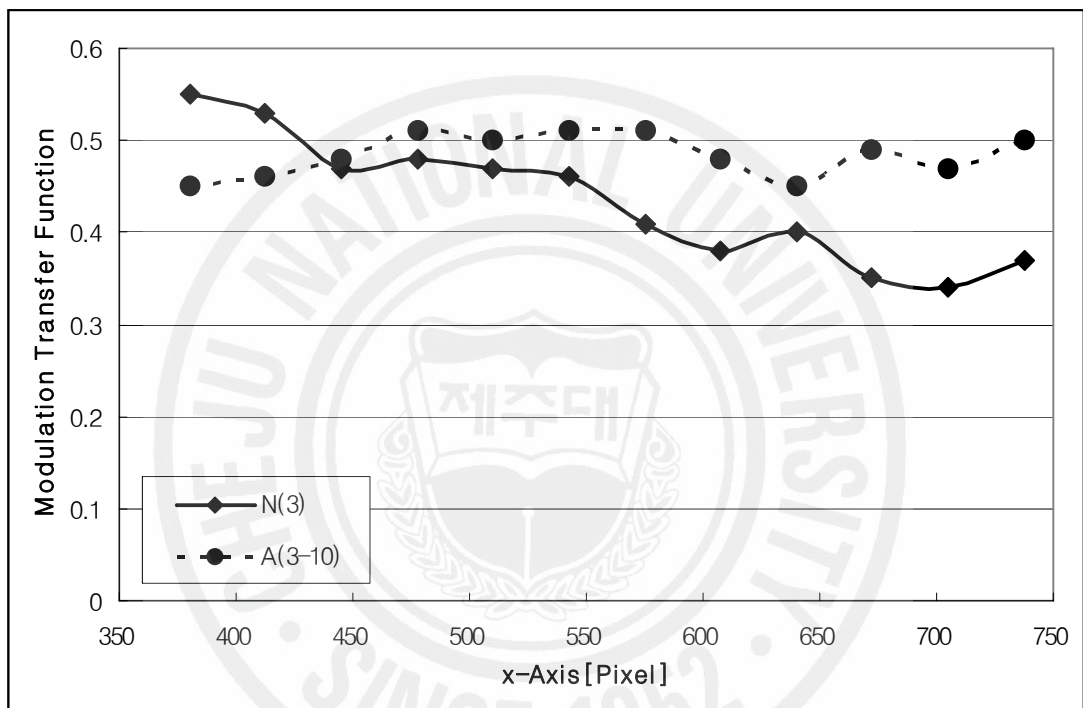


Fig. 4.37 MTF of Fig. 4.35.

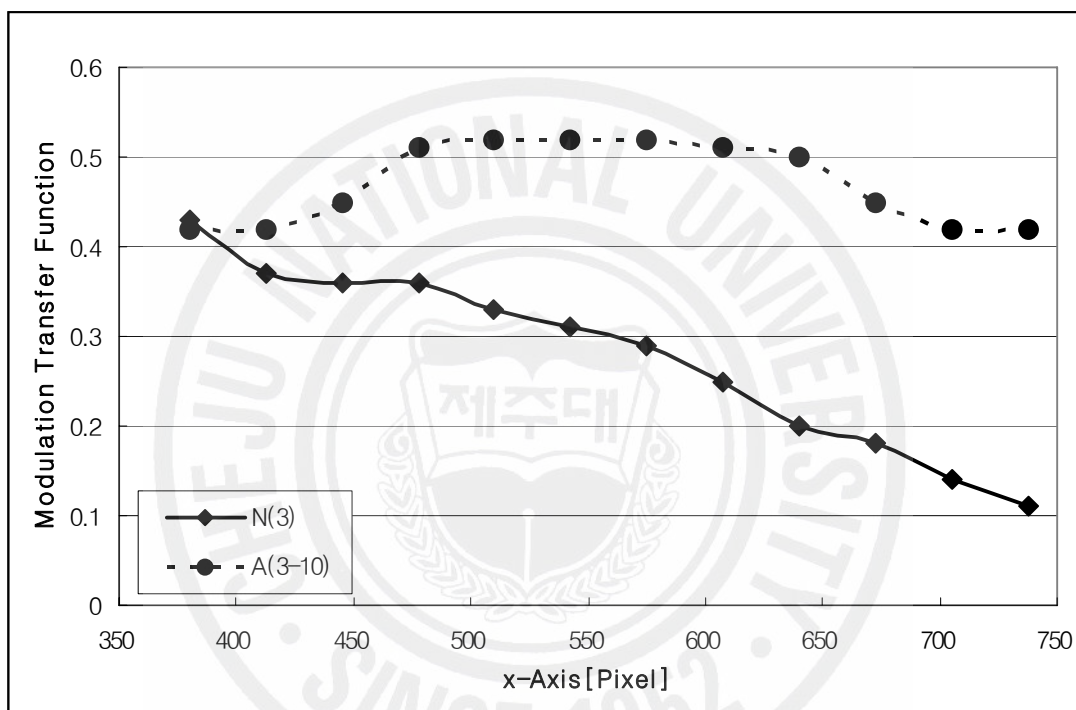


Fig. 4.38 MTF of Fig. 4.36.

취한 다른 경우보다 높다. 일정하게  $3 \times 3$  픽셀 평균을 취한 경우가 0.22 %, 중앙 :  $10 \times 10$  - 외곽 :  $3 \times 3$  픽셀을 취한 경우 0.08 % 이다. 이 결과에서 알 수 있듯이, 본 연구에서 수행한 변형된 평균 제거 방법 역시 비슷한 수준의 저주파 영역 제거율을 갖는다.

Fig. 4.33과 Fig. 4.34는 (2.20)식을 이용하여 홀로그램을 얻은 후 재생한 결과이고, Zero Padding 방법을 이용하여 허상을 제거하였다. Fig. 4.33의 (a), (b), (c), (d)는 평균값을 취하는 픽셀의 개수를 각각  $3 \times 3$ ,  $7 \times 7$ ,  $15 \times 15$ ,  $30 \times 30$  으로 일정하게 취한 것이고, Fig. 4.34의 (a), (b), (c), (d)는 평균값을 취하는 픽셀의 개수를 각각 중앙 :  $10 \times 10$  - 외곽 :  $3 \times 3$ , 중앙 :  $30 \times 30$  - 외곽 :  $3 \times 3$ , 중앙 :  $30 \times 30$  - 외곽 :  $10 \times 10$  으로 취한 경우이다. Fig. 4.33(a)와 Fig. 4.34(a)는 Fig. 4.33(b), (c), (d)와 Fig. 4.34(b), (c)에 비하여 DC 항의 영향이 적다. 이 결과는 Fig. 4.32에서 확인한 바와 같이 평균을 취해준 픽셀의 개수가 적을수록 저주파 영역의 제거 비율이 높은 것에 기인한 것이다. 또한 Fig. 4.33(a)와 Fig. 4.34(a)를 비교해 보면, DC 항의 세기는 평균값을 취한 픽셀의 개수를 일정하게 한 Fig. 4.33(a)가 작고, 이미지의 손실은 평균값을 취한 픽셀의 개수를 위치에 따라 변경한 Fig. 4.34(a)가 작다.

Fig. 4.35와 Fig. 4.36은 평균 제거 법에 의한 DC 항 제거와 이미지의 손실을 알아보기 위한 Fig. 4.33(a)와 Fig. 4.34(a)에 표시된 A와 B영역의 그래프이다. 여기서 실선으로 표시된  $N(3)$ 은 평균값을 취한 픽셀의 개수를  $3 \times 3$ 으로 일정하게 한 것이고, 점선으로 표시된  $A(3-10)$ 은 중앙 :  $10 \times 10$  - 외곽 :  $3 \times 3$  으로 위치에 따라 평균값을 취한 픽셀의 개수를 다르게 한 것이다.  $A(3-10)$ 가  $N(3)$ 에 비해 격자무늬가 더욱 선명하다. 또한  $N(3)$ 의 경우 DC 항 이외의 실상의 손실로 인하여 745 픽셀로 접근 할수록 작아진다. Fig. 4.36은 DC 항이 완전히 제거 되지 않은 영역으로 Fig. 4.35에 비하여 전체적으로 높은 값을 가지며,  $N(3)$ 의 경우 DC 항이 존재하는 중심부분으로 갈수록 격자무늬의 선명도가 떨어진다. 본 연구에서 수행한 변형된 평균 제거 방법의 경우 기존의 평균 제거 방법에 비하여 실상의 손실률이 적음을 알 수 있다.

Fig. 4.37과 Fig. 4.38은 A와 B의 위치에 따른 변조전파함수(MTF : Modulation Transfer Function)를 나타낸 것으로 (4.3)식과 같다.

$$MTF = \frac{I_{Rmax} - I_{Rmin}}{I_{Rmax} + I_{Rmin}} \quad (4.3)$$

여기서  $I_{Rmax}$ ,  $I_{Rmin}$  는 각각 재생된 영상 세기 최고값과 최저값이다.

DC 항의 영향력이 비교적 작은 A의 MTF(Fig. 4.37)의 경우, N(3)는 재생 영상의 중심으로 갈수록 MTF가 0.55 에서 0.38 로 감소하였고, A(3-10)의 MTF는  $0.48 \pm 0.03$  으로 위치에 따라 큰 변화가 없다. DC 항의 영향력이 큰 B의 MTF(Fig. 4.38)의 경우, N(3)는 재생 영상의 중심으로 갈수록 MTF가 0.43 에서 0.11 로 감소하였고, A(3-10)의 MTF는  $0.47 \pm 0.04$  로 위치에 따라 큰 변화가 없다. 즉 위치에 따라 평균을 취한 범위가 일정한 기존의 방법은 저주파 이외의 고주파 영역까지 동일하게 제거됨으로써, 실상의 손실로 인하여 MTF가 감소하였고, 본 연구에서 시행한 변형된 평균 제거 방법의 경우 위치에 따라 평균을 취한 범위를 차등적으로 적용함으로써, 재생 영상의 중심에서 발생하는 재생 영상의 손실을 최소화하였다.

본 연구에서 제안된 변형된 평균 제거 방법은 기존의 평균 제거 방법과 동일한 수준의 DC 항 제거율을 유지하면서도 실상의 손실을 최소화하여 MTF를 증가시킴으로써 보다 선명한 재생 영상을 구현 할 수 있다. 또한 변형된 평균 제거 방법 역시 재생 속도에 큰 영향을 미치지 않으며, 한 번의 홀로그램 기록으로 3차원 영상을 재생 할 수 있다.

### 3. 프레넬 Zone Plate 효과 제거

렌즈를 사용하는 간섭계의 경우 프레넬 Zone Plate가 발생한다. 디지털 홀로그래피 현미경의 경우 대물렌즈가 사용되고, 프레넬 Zone Plate의 영향을 받게 된다.

Fig. 4.39는 시료를 제거하고 기준 광과 물체 광이 형성한 간섭무늬를 측정한

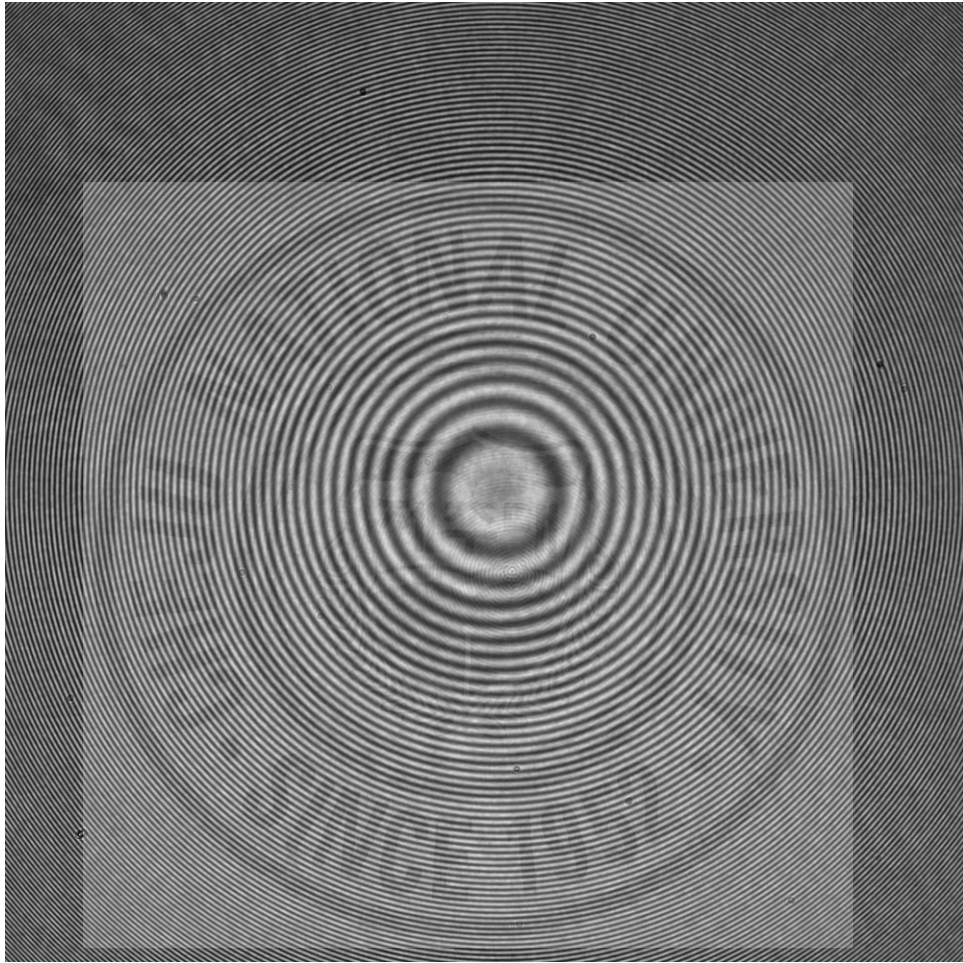


Fig. 4.39 Hologram images constructed by the combination of a reference beam and an objective beam that is passed through the objective lens without objects.

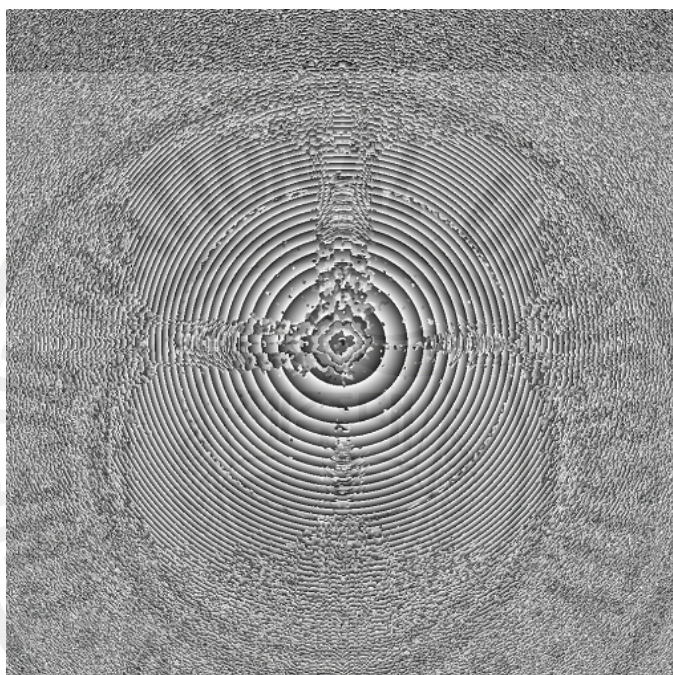
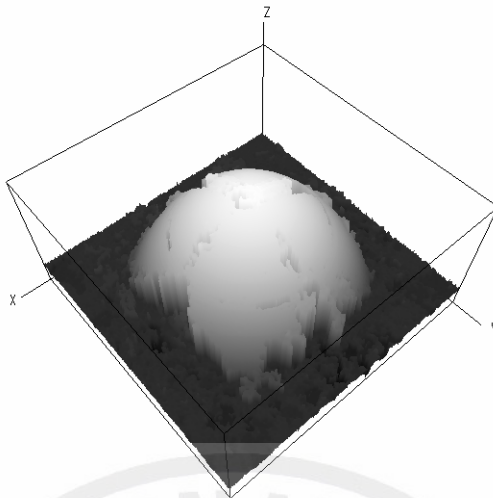


Fig. 4.40 Phase Reconstruction images constructed by Fig. 4.20.



(a) Three-Dimensional Graphics.



(b) Density Graphics.

Fig. 4.41 Phase Unwrapping images constructed by Fig. 4.39.



(a) Phase Reconstruction. (b) Phase Unwrapping.

Fig. 4.42 Fresnel Zone Plate Elimination.

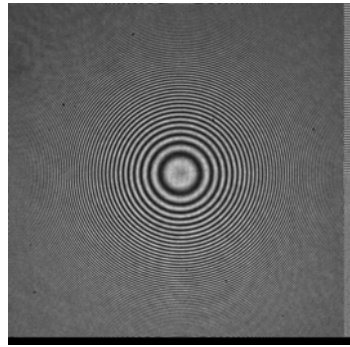


결과이다. Fig. 4.39는 디지털 홀로그래피 현미경의 대물렌즈의 구면 수차 영향으로 발생하는 프레넬 Zone Plate이다. Fig. 4.39을 위상 재생한 결과가 Fig. 4.40이다. 위상 재생 시 허상 제거를 위해 사용한 방법은 Zero Padding 방법이고, DC 항 제거를 위해 사용한 방법은 평균 제거 방법이며, 평균한 픽셀 수는 Fig. 4.20 에서와 같이 택하였다. Fig. 4.41는 Fig. 4.40을 위상 펼침 한 결과이다. Fig. 4.41는 대물렌즈에 의한 프레넬 Zone Plate의 영향으로 볼록렌즈와 같은 3차원 영상이 재생되었다. 대물렌즈가 존재하는 홀로그래피 현미경의 경우 프레넬 Zone Plate의 영향이 제거되지 않은 경우 복원된 3차원 영상은 프레넬 Zone Plate의 영향을 받게 된다[87-91].

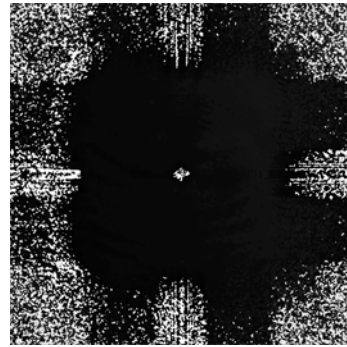
본 연구에서는 대물렌즈에 의한 프레넬 Zone Plate의 영향을 제거하기 위하여 시료가 제거된 상태에서 기록된 홀로그램의 위상 재생 영상  $\phi_0$  를 시료가 제거되지 않은 상태에서 기록된 홀로그램의 위상 재생 영상  $\phi$  에서 제거 하여 프레넬 Zone Plate의 영향이 제거된 위상 재생 영상  $\phi'$  은 (2.9)식으로부터 (4.4)식과 같다.

$$\phi'(m, n) = \phi(m, n) - \phi_0(m, n) \quad (4.4)$$

(4.4)식을 이용하여 Fig. 4.40의 위상 재생 영상에서 프레넬 Zone Plate 영향을 제거한 것이 Fig. 4.42이다. Fig. 4.42(a)는 위상 재생 영상이고, (b)는 위상 펼침 결과이다. Fig. 4.42은 Fig. 4.40의 위상 재생 결과에서 자기 자신을 뺀 결과로 (4.4)식에서  $\phi = \phi_0$  인 경우이다. 그러므로 Fig. 4.42(a)의 모든 값은 “0” 이 된다. 홀로그램 기록 시 사용된 CCD는 8-bit-encode 로 기록되므로, 0 ~ 255 의 값을 갖게 되며, 0 ~ 255 로 기록되어지는 값은 광원으로 사용된 He-Ne 레이저의 파장인 0 ~ 632.8 nm 의 파장과 동일하다. Fig. 4.42(a)와 같이 흰색은 255 의 디지털 값을 갖는 것이고, 0과 255는 정확히 한 파장의 차이이며, 이 값은 0과 동일하다. 즉 Fig. 4.42(a)의 결과는 프레넬 Zone Plate 영향이 완전히 제거되었다. Fig. 4.42 (b)는 (a)를 위상 펼침하여 3차원을 복원한 영상이고, Fig. 4.41의 프레넬 Zone Plate가 완전히 제거되었다.



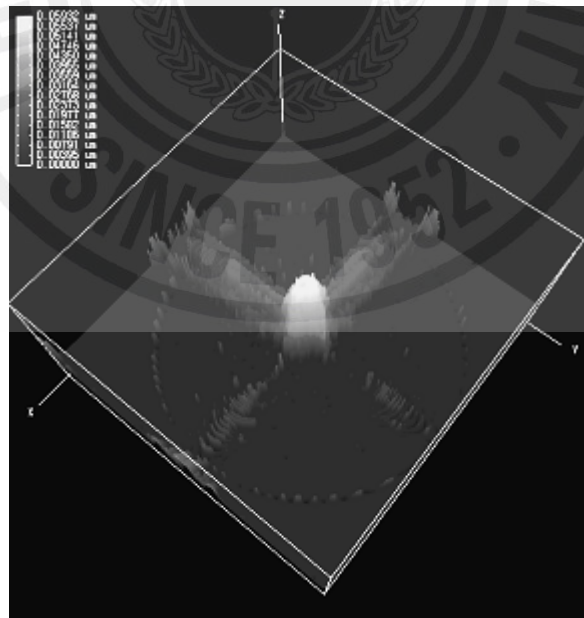
(a) Hologram.



(b) Phase Reconstruction.

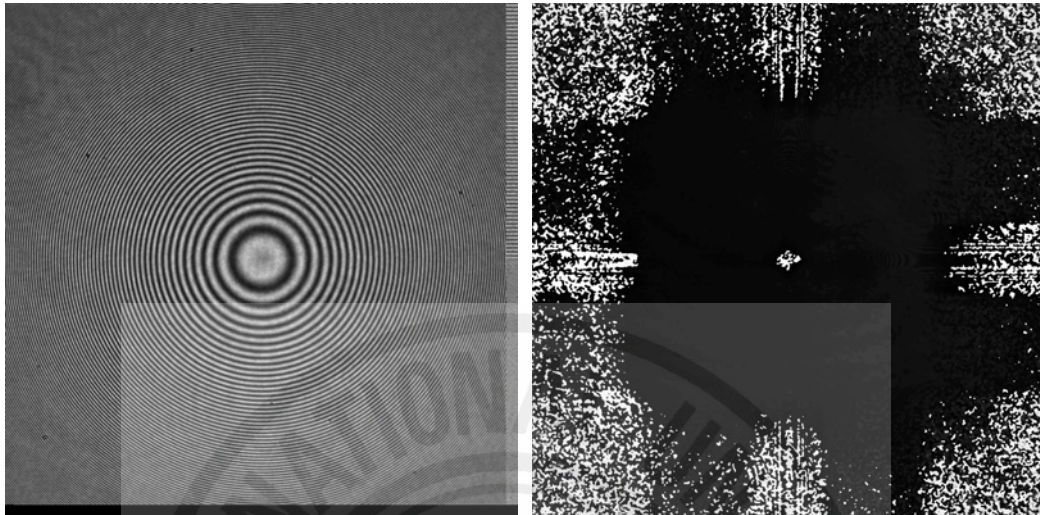


(c) Phase Unwrapping.



(d) Enlarge of (c).

Fig. 4.43 Fresnel Zone Plate Elimination after 10 Minute.



(a) Hologram.

(b) Phase Reconstruction.



(c) Phase Unwrapping.

Fig. 4.44 Fresnel Zone Plate Elimination after 1 Day.

(4.4)식을 이용한 프레넬 Zone Plate의 제거는 시료를 제거한 홀로그램을 추가로 측정하여야한다. 만일 동일한 대물렌즈를 사용하고 광학적 설계에 변경이 없는 경우에는 시료를 제거한 최초에 측정 결과의 위상 재생 영상을 빼줌으로서 같은 결과를 얻을 수 있다.

Fig. 4.43(a)은 Fig. 4.39을 측정하고, 10 분 후에 측정한 결과이고, (b)는 홀로그램의 위상 재생 후 Fig. 4.40의 값을 빼준 것이고, (c)는 (b)의 위상 펼침 결과이다. Fig. 4.43은 동일한 대물렌즈를 사용하고 광학적 설계에 변경이 없는 경우 한 번 측정된 결과로 프레넬 Zone Plate를 제거한 결과이다. Fig. 4.43(d)는 (c)의 점선 영역을 확대한 것으로, 가운데의 부분은 DC 항이 완전히 제거되지 않은 것이다. 또한 Fig. 4.43(c)와 (d)는 Fig. 4.42(a)와 (b)에 나타나지 않았던 주변의 잡음이 발생하였다. 완전히 제거 되지 않은 영차 회절 광의 영향은 약 50 nm 의 경로차가 발생하였고, 주변 잡음의 경우 3 nm 이하의 경로차가 발생 하였다. Fig. 4.44은 Fig. 4.39을 측정하고, 하루 후에 측정한 결과이고, (b)는 홀로그램의 위상 재생 후 Fig. 4.40의 값을 빼준 것이고, (c)는 (b)의 위상 펼침 결과이다. Fig. 4.44 역시 동일한 대물렌즈를 사용하고 광학적 설계에 변경이 측정된 결과이다. 이 결과는 Fig. 4.43의 결과와 같이 수 nm 의 잡음이 발생하였으나, 프레넬 Zone Plate의 영향이 완전히 제거되었다.

시료가 없는 홀로그램의 위상 재생 결과를 이용하여 프레넬 Zone Plate의 영향을 제거하는 방법은 동일한 광학적 설계에서 최초 한 번의 측정으로 제거할 수 있다.

#### 4. 투과 반사 통합형 홀로그래피 현미경을 이용한 굴절률 측정

디지털 홀로그래피 현미경은 피사체의 3차원 구조를 측정 할 수 있다. 또한 수치 재생을 이용하여 컴퓨터상에서 손쉽게 3차원 영상을 재생 할 수 있다. 그러나 시료의 굴절률을 알 수 있는 방법은 이제까지 연구되지 않았다.

본 연구에서, 3차원 형상과 굴절률을 측정 할 수 있는 투과 반사 통합형 홀로그래피 현미경을 연구하였다. 투과 반사 통합형 홀로그래피 현미경(Fig. 3.2)은 간단한 조작으로 투과형 디지털 홀로그래피 현미경과 반사형 홀로그래피 현미경을 선택할 수 있고, 선택된 투과형과 반사형 각각에서 홀로그램을 얻을 수 있다. 물론 투과형과 반사형이 통합되지 않은 2가지의 디지털 홀로그래피 현미경을 이용하여서도 각각의 홀로그램을 얻을 수 있다. 그러나 통합되지 않은 2가지의 홀로그래피 현미경에서 동일한 위치에서, 광학적으로 동일한 조건의 홀로그램 정보를 획득하는 것은 매우 어렵다. 투과 반사 통합형 홀로그래피 현미경은 동일한 측정위치와, 광학적으로 동일한 조건의 홀로그램 정보 획득이 용이하다.

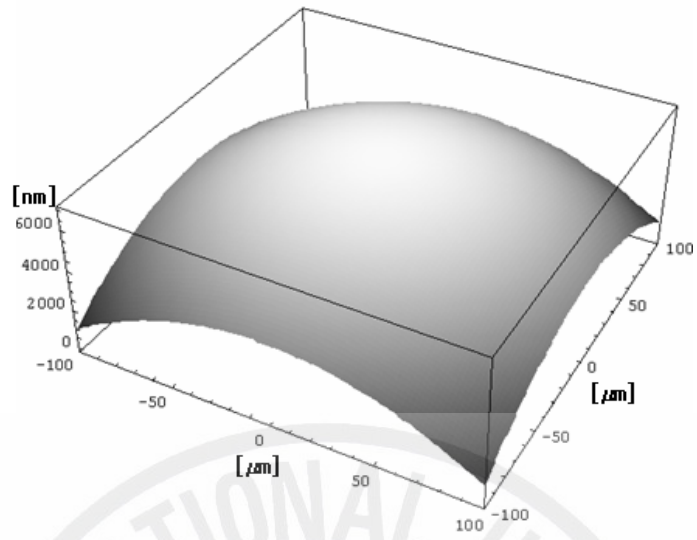
투과형과 반사형에서 얻어지는 홀로그램은 Fig. 2.12에 나타난 것과 같이 다른 특성을 갖고 있다. 투과형 홀로그램 간섭무늬의 경우(Fig. 2.12(a))는 물체 광이 시료 내부의 시료 굴절률에 영향에 의하여 위상차가 결정된다. 즉 투과형 홀로그램의 경우 그 굴절률의 정보를 포함하고 있다. 반사형 홀로그램 간섭무늬의 경우(Fig. 2.12(b))는 물체 광이 시료 표면에 반사되어 위상차가 결정된다. 즉 반사형 홀로그램의 경우 시료의 실제 크기 정보이다. 즉 반사형에서 얻어진 시료의 실제 크기 정보를 이용하여 투과형에 포함 되어 있는 굴절률 정보를 (2.25)식으로 계산 할 수 있다.

#### 4.1 굴절률 측정의 전산시능

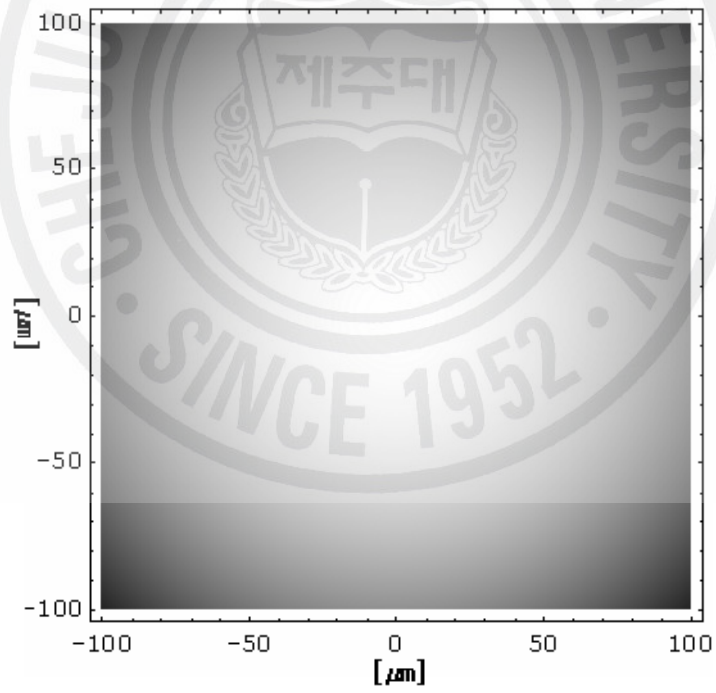
Fig. 4.45는 굴절률 측정을 위한 전산시능을 수행하기 위하여 채택된 한 면이 평평하고 다른 면이 볼록한 PCX 렌즈(Plano-Convex Lenses)이다. 또한 전산시능에 사용된 프로그램은 Wolfram Research 사의 Mathematica 5.1 을 사용하였다.

Fig. 4.45는 지름이 200  $\mu\text{m}$  이고, 높이가 5.8  $\mu\text{m}$  인 PCX 렌즈이며, BK7의 굴절률을 갖는다. Table 3.2는 BK7의 파장에 따른 굴절률 이고, He-Ne 레이저를 사용한 경우 굴절률은 1.51509 이다.

Fig. 4.46은 Fig. 4.45의 홀로그램이다. Fig. 4.46(a)는 투과형 디지털 홀로그래피 현미경에서 기록되는 홀로그램을 전산시능 한 결과이고, (b)는 반사형 디지털 홀로그래피 현미경에서 기록되는 홀로그램을 전산시능 한 결과이다. CCD의



(a) Three-Dimensional Graphics.

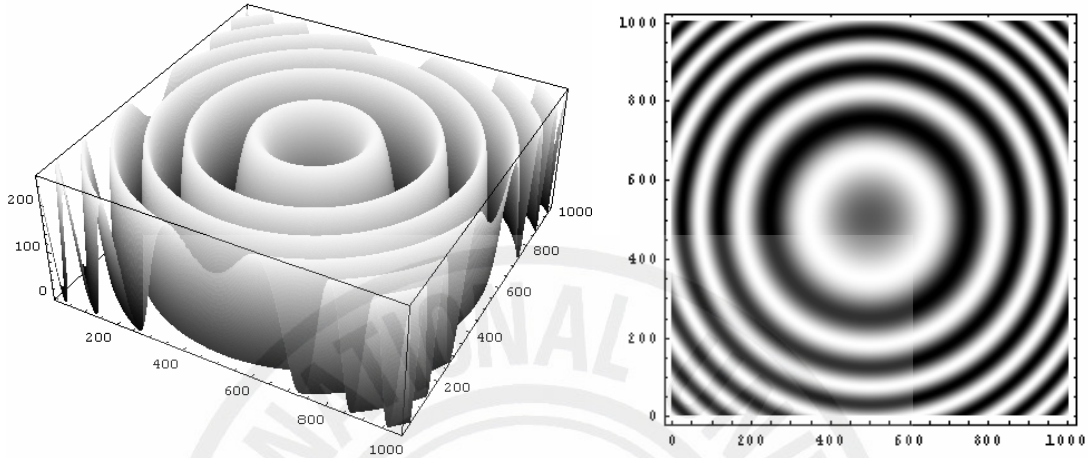


(b) Density Graphics.

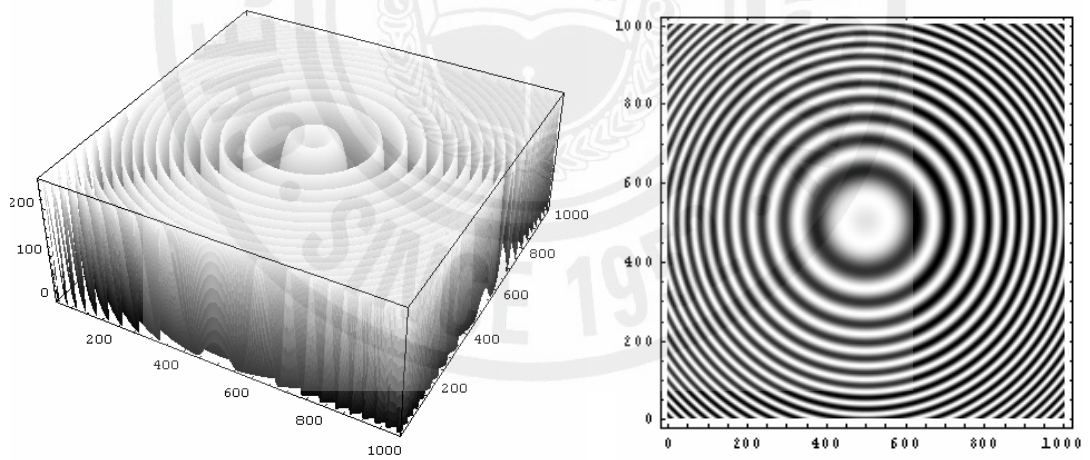
Fig. 4.45 Plano-Convex Lens.

$\lambda$ [ $\mu\text{m}$ ]	$n$
0.5461	1.51872
0.55876	1.51680
0.5893	1.51673
0.6328	1.51509
0.6438	1.51472
0.6563	1.51432

Table 3.2 BK7 Refractive Index  $n$  Vs. Wavelength  $\lambda$ .



(a) Transmission Type.



(b) Reflection Type.

Fig. 4.46 Hologram of Plano-Convex Lens.



픽셀 수는  $1000 \times 1000$  , 8-bit-encode 로 설정하였다.

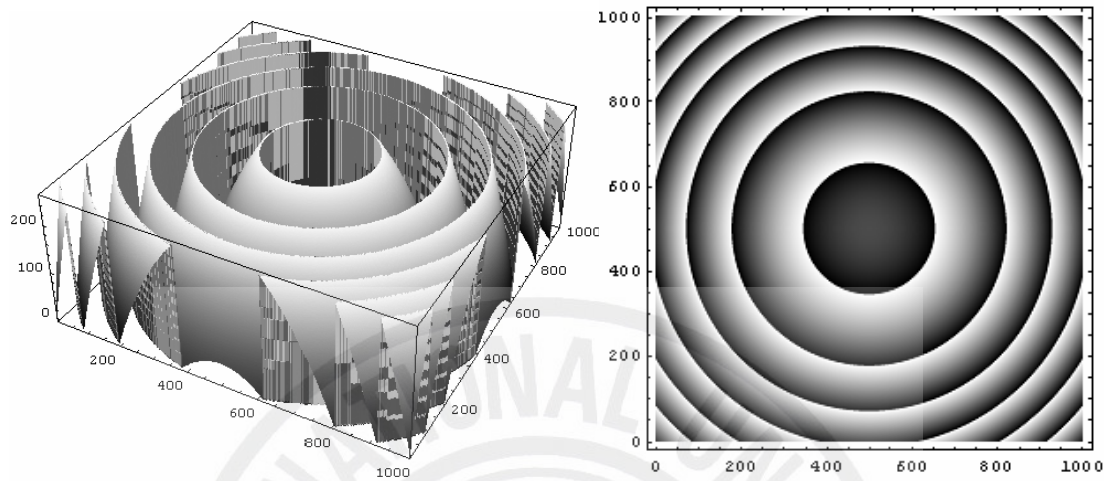
Fig. 4.47은 Fig. 4.46의 위상 재생의 전산시뮬 결과이다. Fig. 4.47(a)는 투과형의 위상 재생 결과이고, (b)는 반사형의 위상 재생 결과이다. Fig. 4.47의 위상 재생에서는 굴절률 재생 효율을 극대화하기 위하여, 허상 및 영차 회절 광의 영향과 프레넬 Zone Plate의 영향을 배제 시켰으며, 대물렌즈의 배율 역시 고려하지 않았다. 빛의 세기는 CCD의 기록 해상도가 8-bit 이므로 0 ~ 255 로 저장되고, 위상 재생의 결과 역시 0 ~ 255 값을 가지며, 이 값은 He-Ne 레이저의 파장이 633 nm 이므로 0 ~ 633 nm 에 해당한다.

Fig. 4.48은 Fig. 4.47을 위상 펼침하여 3차원 영상을 측정한 결과이다. Fig. 4.48(a)는 투과형의 위상 펼침 영상이고, (b)는 반사형의 위상 펼침 영상이다. Fig. 4.48(a)는 Fig. 4.45에 비해 높이가 낮으며, (2.23)식으로부터 굴절률  $n$  의 영향임을 알 수 있다. 즉 Fig. 4.48(a)는 시료의 굴절률에 의한 정보가 포함되어 있다. Fig. 4.48(b)는 3.38에 비해 그 높이가 2배이며, (2.24)식으로부터 시료의 실제 두께에 비해 2배가 높은 것을 알 수 있다.

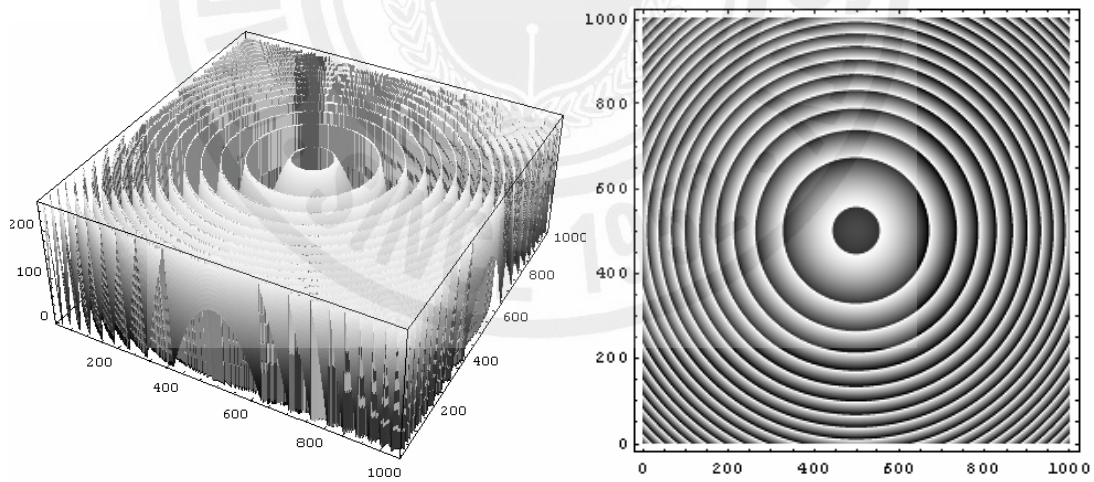
반사형 홀로그램을 재생한 Fig. 4.48(b)는 Fig. 2.13과 같이 홀로그램 면을 기준으로 한 거리 차이므로 위상이 반전되어 재생된다. (2.24)식에서 “-” 를 취한 것은 위상이 반전되어 재생되는 것을 보정하기 위한 것이다. Fig. 4.47(b)는 시료의 반전된 재생을 보상해주기 위하여, (2.9)식으로부터 재생된 위상  $\phi$  를 (4.5)식과 같이 보상해준 결과이다.

$$\phi' = \phi_{\max} - \phi \quad (4.5)$$

여기서  $\phi'$  는 반사형 홀로그램 위상 재생 시 반전 재생을 보상해준 위상이며,  $\phi_{\max}$  는 위상의 최고값이다. Fig. 4.47의 경우 8-bit-encoded 에 의하여 간섭무늬의 세기가 저장되었으므로  $\phi_{\max} = 255$  이고, He-Ne 레이저를 사용한 실제 위상은 633 nm 에 해당된다. 또한 (4.5)식의 반전 보상을 이용하여 재생된 경우 (2.24)식은 (4.6)식으로 적용된다.

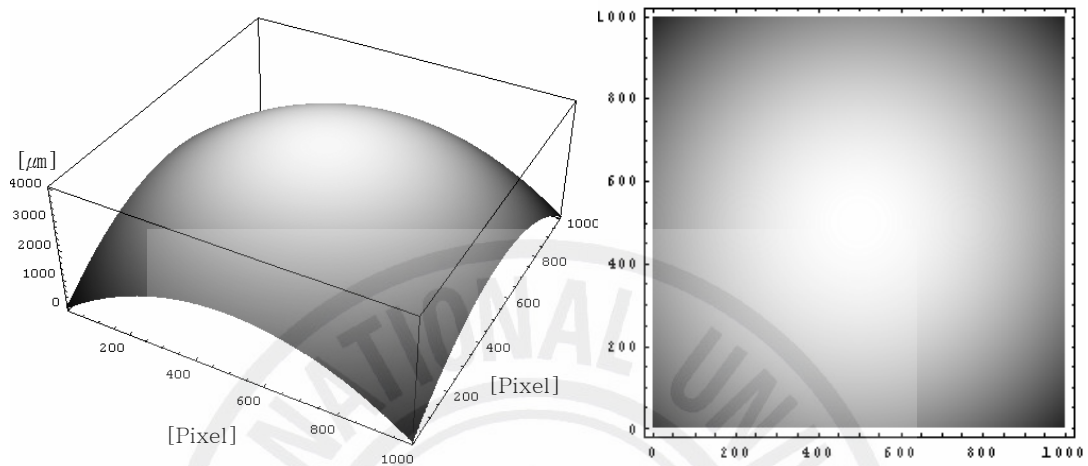


(a) Transmission Type.

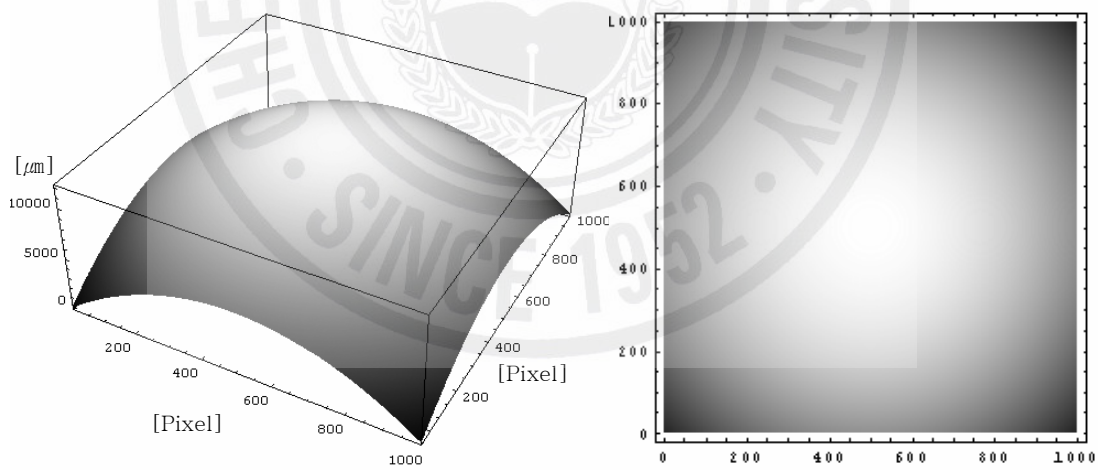


(b) Reflection Type.

Fig. 4.47 Phase Reconstruction of Fig. 4.46.

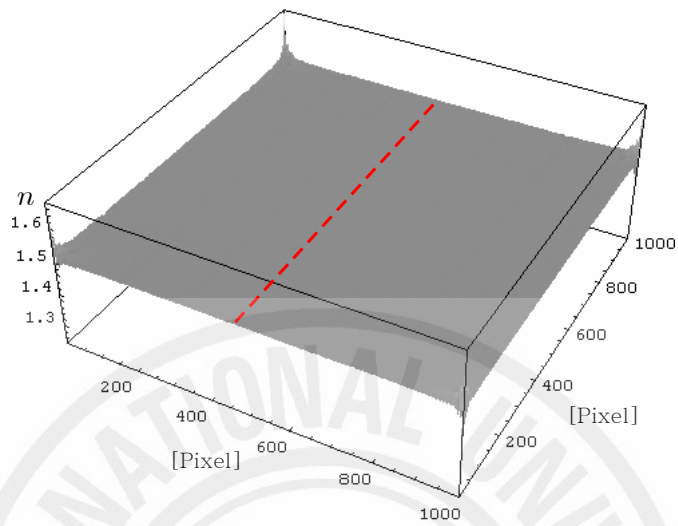


(a) Transmission Type.

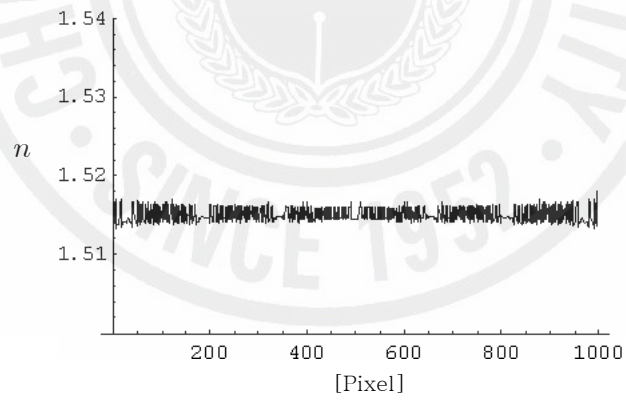


(b) Reflection Type.

Fig. 4.48 Phase Unwrapping of Fig. 4.47.



(a) Distribution of Refractive Index.



(b) Cross Section of (a).

Fig. 4.49 Refractive Index Restoration.

$$d'(k,l) = \frac{\Delta d_r(k,l)}{2} \quad (4.6)$$

즉 굴절률  $n$  은 (2.25)식과 (4.6)식으로부터 (4.7)식으로 정의된다.

$$n(k,l) = 1 + 2 \frac{\Delta d_t(k,l)}{\Delta d_r(k,l)} \quad (4.7)$$

(4.6)식과 (4.7)식은 반사형 홀로그래피 현미경에서 위상의 반전 재생을 보상하여준 결과에 따른 것이다. Fig. 4.47(b)는 반전되어 측정된 결과를 보상 한 것이므로, 이를 위상 펼침 한 Fig. 4.48은 반전되지 않은 3차원 영상이다.

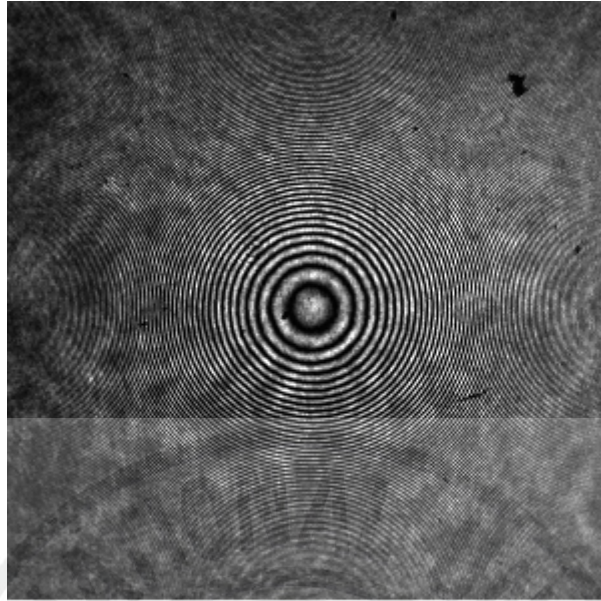
Fig. 4.49는 (4.7)식을 이용하여 굴절률을 측정한 결과이다. Fig. 4.49(a)는 CCD의 픽셀 위치에 따른 굴절률의 측정 결과이고, (b)는 (a)의 점선 부분의 굴절률 이다. Fig. 4.49의 모든 픽셀에서의 굴절률의 평균은 1.51506 이고, Fig. 4.45의 전산시늉에서 입력된 굴절률은 1.51509 로 유효숫자 범위 내에서 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 또한 위치에 따른 굴절률의 경우 표준오차  $\pm 0.0001$  이내 이다. Fig. 4.49에서 발생한 오차는 Fig. 2.8(b)의 CCD 8-bit 디지털화에 따른 오차와 일치한다.

Fig. 4.49는 DC 항 및 허상, 프레넬 Zone Plate의 영향을 완전히 배제한 전산시늉의 결과이고, 실제 측정 시 발생할 수 있는 광학적 수차 및 CCD의 재현성과 픽셀 간의 민감도 차이 등이 고려되지 않은 결과이다.

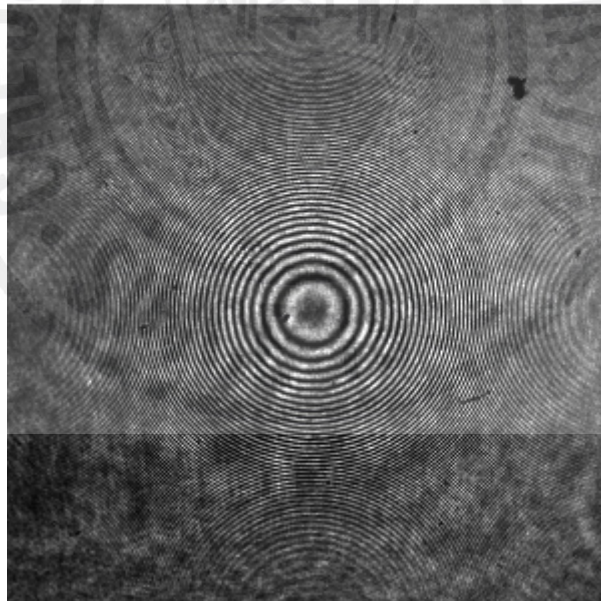
## 4.2 PCX 렌즈의 굴절률 측정

앞서 4.1 에서 굴절률 측정을 위한 전산시늉을 통하여 PCX 렌즈의 굴절률 측정을 확인하였다. 그러나 실제 측정에서는 잡음을 포함 한 많은 환경 변수를 포함하고 있다.

우선 전산시늉 결과와 비교를 위하여 초점거리가 15 mm 이고, 곡률반경이 7.54 mm , BK7 로 제작된 PCX 렌즈를 측정하였다. CCD는 전산시늉과 동일한 조건의 Sony IPX1M 를 사용하였다.



(a) Transmission Type.

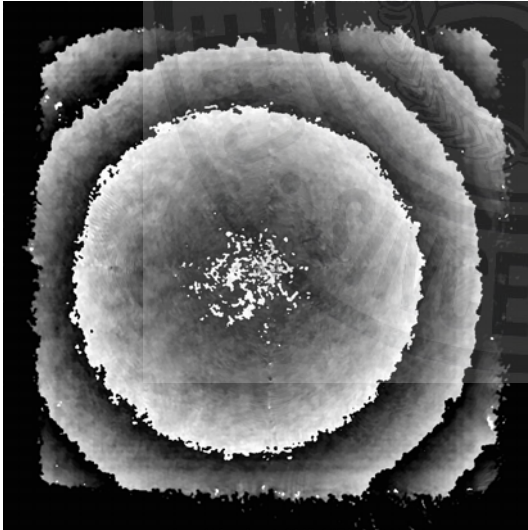


(b) Reflection Type.

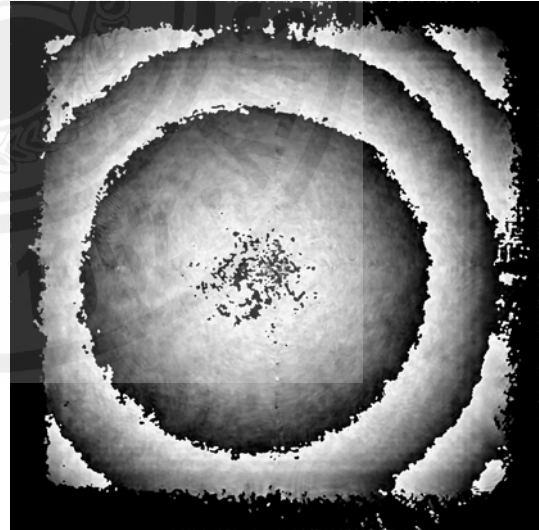
Fig. 4.50 Hologram of Plano-Convex Lens.



(a) Transmission Type.



(b) Reflection Type.

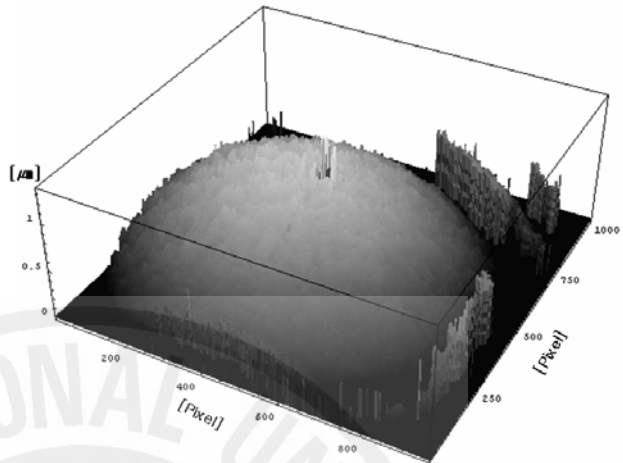


(c) Phase Inversion of (b).

Fig. 4.51 Phase Reconstruction of Plano-Convex Lens.



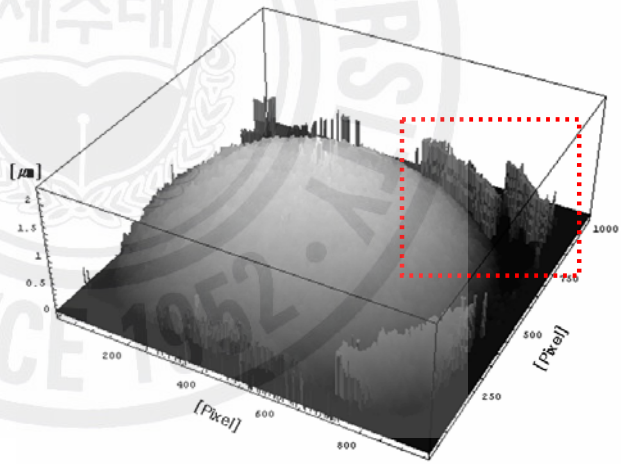
(a1) Transmission Type.



(a2) Transmission Type.



(b1) Reflection Type.



(b2) Reflection Type.

Fig. 4.52 Phase Unwrapping of Fig. 4.51.



Fig. 4.50(a)는 투과형 디지털 홀로그래피 현미경에서 기록된 홀로그램이고, (b)는 반사형 디지털 홀로그래피 현미경에서 기록된 홀로그램이다. Fig. 4.46의 경우 투과형 홀로그램과 반사형 홀로그램의 회절무늬가 개수가 확연한 차이를 나타낸다. 그러나 Fig. 4.50의 경우 프레넬 Zone Plate의 영향이 PCX 렌즈에 비해 월등하기 때문에 그 개수의 차이가 확연하게 나타나지 않는다.

Fig. 4.51은 위상 재생의 결과이다. Fig. 4.51(a)는 투과형에서 위상 재생 결과이고, (b)는 반사형에서 위상 재생 결과이다. 변형된 평균 제거 방법을 이용하여 DC 항이 제거된 홀로그램을 얻은 후, Zero Padding 방법을 이용하여, DC 항과 허상이 최소화 된 위상재생결과를 얻었다. 변형된 평균 제거 방법에서 평균을 취한 픽셀의 개수는 중앙 :  $10 \times 10$  - 외곽 :  $3 \times 3$  이다. 또한 프레넬 Zone Plate의 영향을 제거하기 위하여 (4.4)식을 사용하였다. 반사형 홀로그램을 재생한 Fig. 4.51(b)는 Fig. 2.13과 같이 홀로그램 면을 기준으로 한 거리 차이므로 위상이 반전되어 있으며, (4.5)식을 이용하여 위상을 보상해준 결과가 Fig. 4.51(c)이다.

Fig. 4.52는 Fig. 4.51(a)와 (c)를 위상펼침 한 결과이다. Fig. 4.52(a1,a2)는 투과형 홀로그램의 3차원 영상이고, (b1,b2)는 반사형 홀로그램의 3차원 영상이다. 정확한 굴절률 측정을 위해 위상펼침 과정에서 결함이 발생하거나, 렌즈 면이 아닌 영역(Fig. 4.52(a1)의 점선으로 표시된 영역)의 바깥쪽을 계산과정에서 제외 시켰다.

Fig. 4.53은 (4.7)식을 이용하여 굴절률을 측정 한 결과이다. Fig. 4.53에서 점선으로 표시된 C 부분은 완전히 제거되지 않은 영차 회절 광에 의한 영향이다. 또한 굴절률을 측정 시 제외된 영역은 전체 면적의 1/2 이다. Fig. 4.54(a)는 Fig. 4.53 A 에서의 굴절률이고, Fig. 4.54(b)는 영차 회절 광을 포함한 Fig. 4.53 B 에서의 굴절률이다. 영차 회절 광은 굴절률 측정 시 심각한 영향을 미친다. Fig. 4.53에서 C 영역을 제외한 나머지 부분의 굴절률 평균은 1.51653 으로 실제 BK7의 굴절률과 비교해 볼 때 약 0.1 % 의 오차를 보며, 표준편차는  $\pm 2 \%$  이내이다. 그러나 C 영역을 포함한 부분의 굴절률 평균은 1.63925 로 약 8.2 % 의 오차를 보인다.

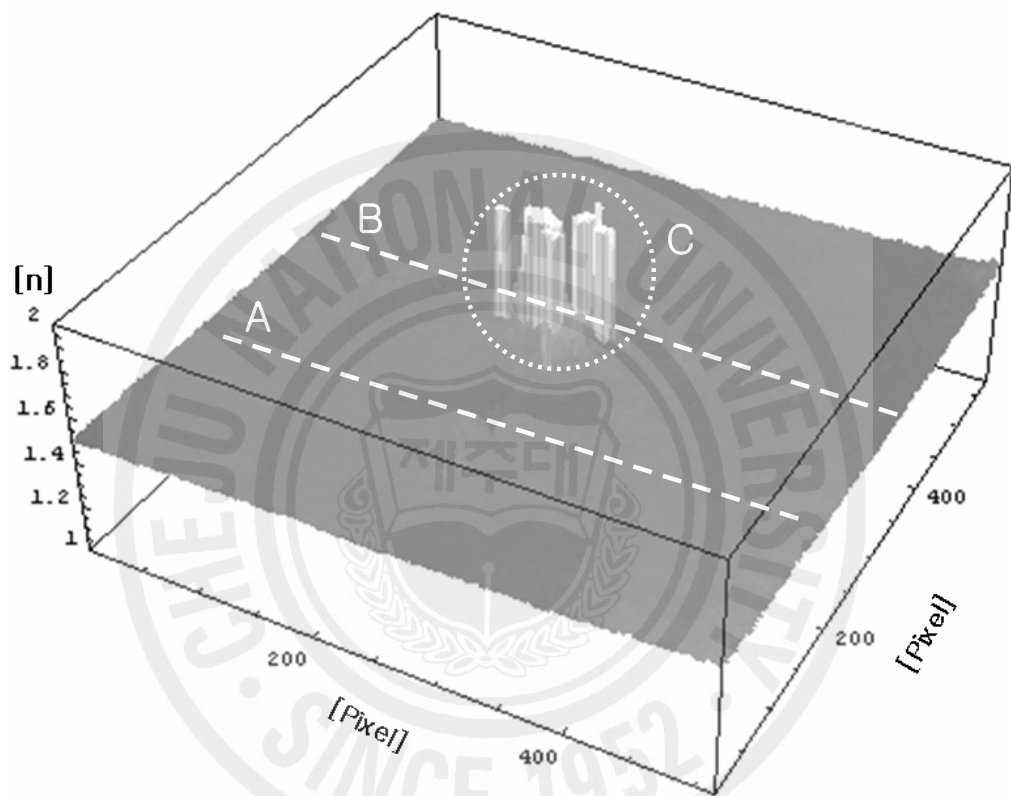
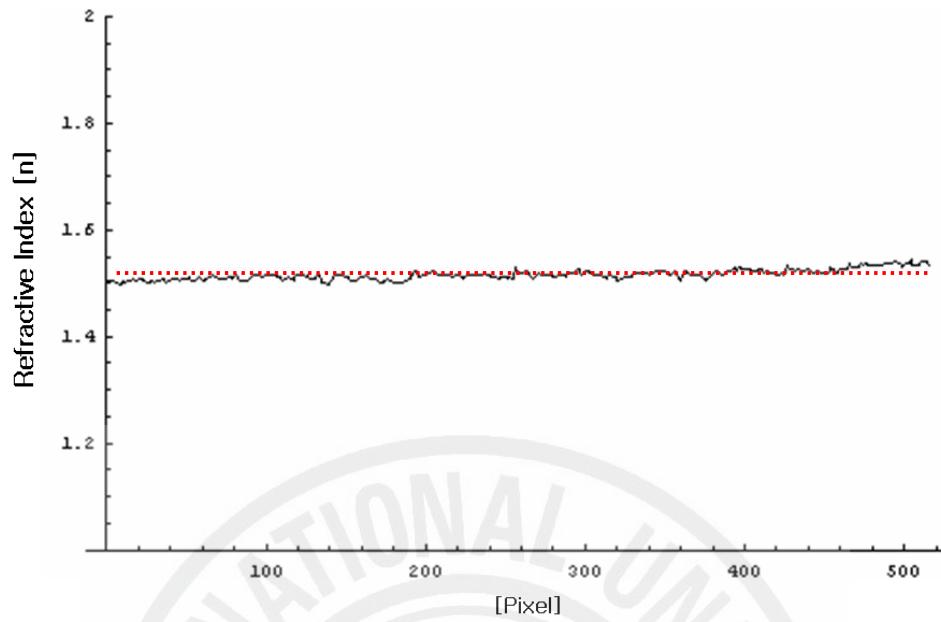
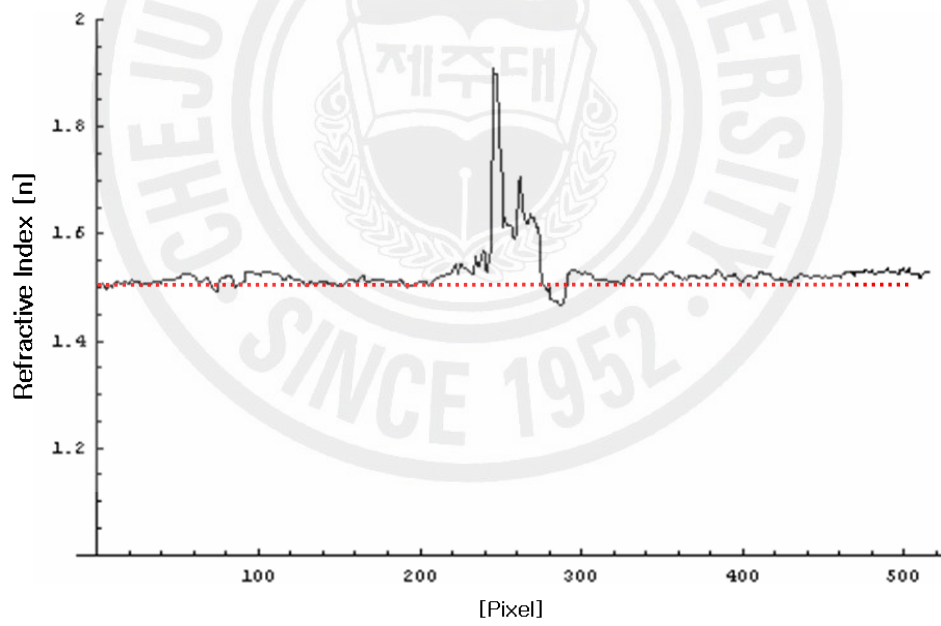


Fig. 4.53 Distribution of Refractive Index.



(a) Dotted Line A in Fig. 4.53.



(b) Dotted Line B in Fig. 4.53.

Fig. 4.54 Refractive Index of Dotted Line in Fig. 4.53.

In-Line 홀로그래피에서 영차 회절 광은 재생 영상의 중심에 집중된다. 굴절률을 측정에 있어서 재생 영상의 중심과, 위상 재생, 위상펼침 시 발생하는 가장자리의 결함 영역을 제외 하면, 피사체 굴절률을 측정 할 수 있을 뿐 아니라, 피사체의 굴절률 분포를 동시에 확인 할 수 있다.

### 4.3 Cr-less 격자무늬 시료의 굴절률 측정

PCX 렌즈는 그 형태의 변화가 연속적이다. 그러나 다중슬릿(Grating)과 같이 그 형태의 변화가 불연속적인 Fig. 4.55와 같은 피사체의 경우, 홀로그램 측정 및 재생, 위상펼침 등의 과정에서 모서리 효과(Edge Effect)에 의한 왜곡이 발생한다. 즉 동일한 조건에서 측정하더라도, 투과형 측정과 반사형 측정에서 왜곡의 다른 형태로 나타나므로, 굴절률 측정에 심각한 영향을 미치게 된다.

Fig. 4.55는 굴절률이 1.459 이고, 높이가 400  $\mu\text{m}$  이고, 무늬 간격이 위에서부터 3.6  $\mu\text{m}$  , 3  $\mu\text{m}$  , 2  $\mu\text{m}$  , 1.6  $\mu\text{m}$  , 1  $\mu\text{m}$  인 Cr-less 패턴이다. Fig. 4.56(a)와 (b)는 각각 투과형 홀로그램과 반사형 홀로그램이고, 홀로그램 기록에 사용된 CCD는 2048  $\times$  2048 픽셀의 Sony IPX4M 이다.

Fig. 4.57은 홀로그램을 재생한 후, 위상펼침 한 3차원 영상이다. 변형된 평균 제거 방법(중앙 : 10  $\times$  10 픽셀 - 외곽 : 3  $\times$  3 픽셀)을 사용하여 DC 항을 제거 하였고, Zero Padding 방법을 사용하여 허상을 제거하였으며, 프레넬 Zone Plate의 영향을 제거하였다.

Fig. 4.58은 Fig. 4.57에 점선으로 표시된 무늬 간격이 2  $\mu\text{m}$  인 부분의 굴절률이다. Fig. 4.58(a)에서 패턴 무늬 이외의 영역은 제2장 4절에서 언급한 바와 같이 굴절률이 측정되지 않는다. 또한 패턴 무늬 가장자리의 굴절률이 급격하게 큰 것은, 반사형의 경우 피사체의 표면에 반사된 빛이 광학계를 벗어나거나, 격자무늬 사이에서 소실되어 실제 보다 작게 측정되기 때문이다. 즉 투과형과 반사형의 측정된 크기 차이로 인하여 무늬의 가장자리 영역이 급격히 증가 하였고 패턴이 없는 부분은 '0' 에 근접한다.

Fig. 4.58(b)는 Fig. 4.58(a)에 표시된 점선 부분의 굴절률이다. Fig. 4.58(b)에 표시된 점선은 피사체의 굴절률 1.45이다. 격자무늬와 같이 급격하게 형태가 변하는 피사체의 경우 PCX 렌즈와 같이 완만한 형태의 피사체와 같은

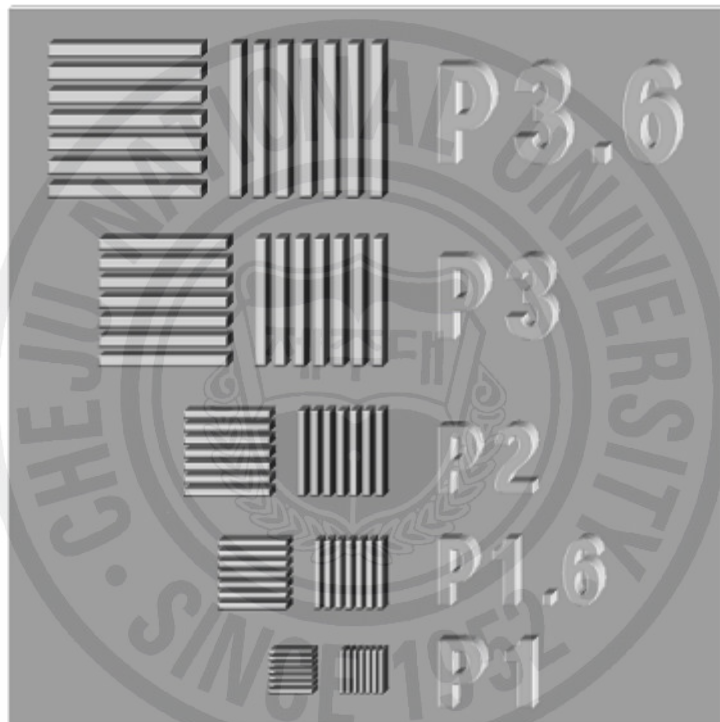
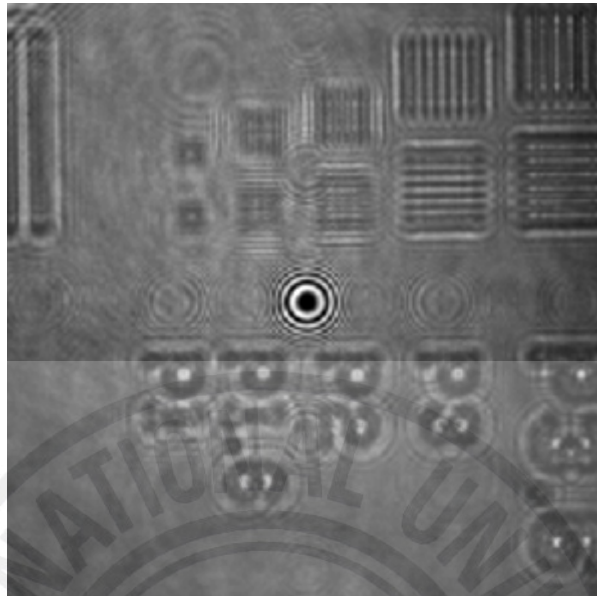
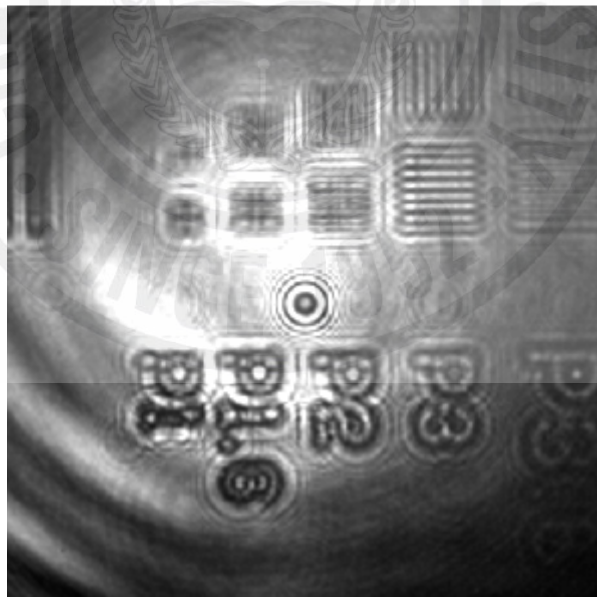


Fig. 4.55 Cr-less Pattern Spider Mask.

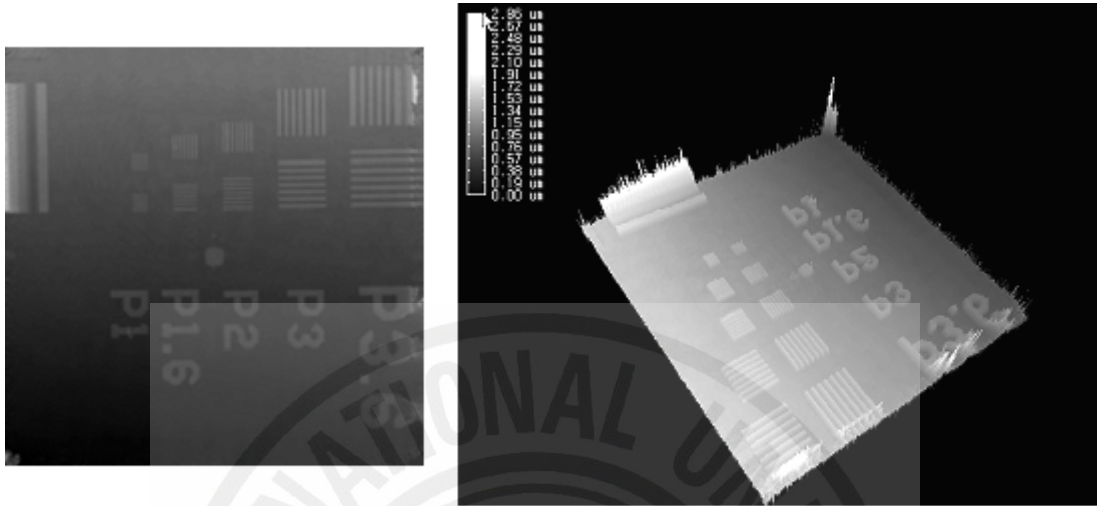


(a) Transmission Type.



(b) Reflection Type.

Fig. 4.56 Hologram of Cr-less Pattern Spider Mask.

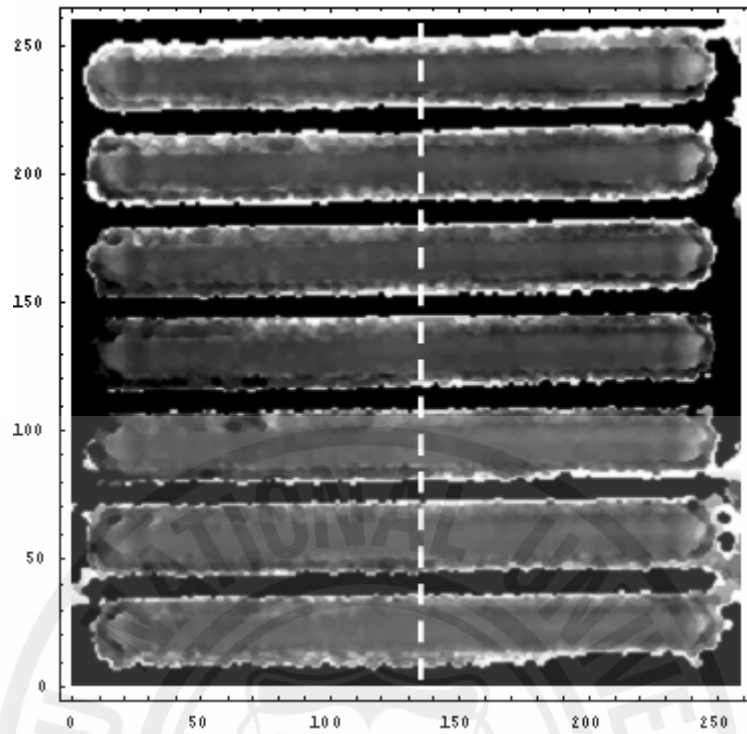


(a) Transmission Type.

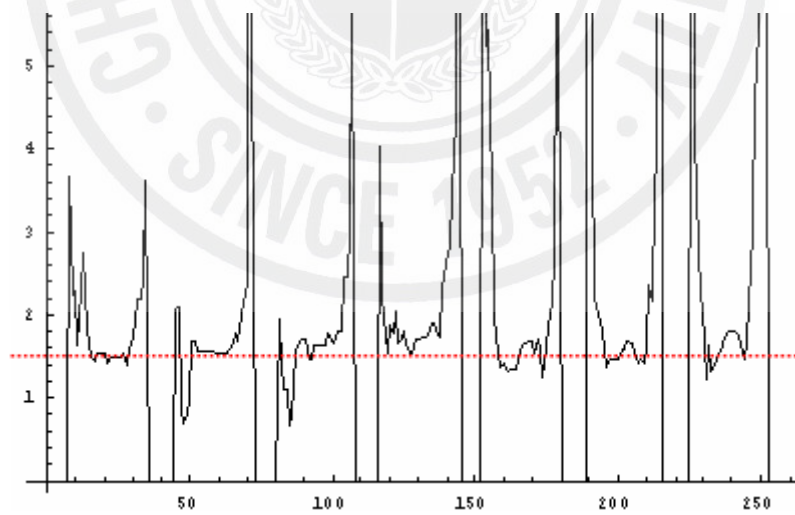


(b) Reflection Type.

Fig. 4.57 Phase Unwrapping of Fig. 4.40.



(a) Distribution of Refractive Index.



(b) Cross Section of (a).

Fig. 4.58 Refractive Index Restoration.



굴절률 분포를 알 수 없으나, 격자무늬에서의 굴절률 양상을 확인 할 수 있다.



## 제 5 장 결 론

In-Line 디지털 홀로그래피는 CCD에서 구현 할 수 있는 최고의 FOV를 구성 할 수 있다. 그러나 In-Line 홀로그램의 경우 실상과 허상 및 DC 항이 중첩되어 신호 대 잡음비가 높은 재생 상을 구현하기 어렵다. 그리고 정확한 3차원 형상과 굴절률을 동시에 측정할 수 있는 연구는 아직 보고되어 있지 않다.

본 연구에서는 CCD에서 구현 할 수 있는 최고의 해상도 구현을 위해 In-Line 디지털 홀로그래피 현미경을 구성하여 중첩된 허상 및 DC 항을 효과적으로 제거하는 방법을 연구하였고, 투과 반사 통합형 디지털 홀로그래피 현미경을 구성하여 3차원 구조와 굴절률을 동시에 측정하였다.

우선 허상제거의 경우, 기하학적 배치를 이용한 허상 제거 방법과 Zero Padding을 이용한 허상 제거 방법을 연구하였다. 기하학적 배치를 이용한 허상 제거 방법은 렌즈에서 CCD까지 거리와 CCD에서 재생 면까지의 거리를 고려하여 허상의 크기가 최소가 되는 위치를 이용한 것으로, 렌즈를 갖는 홀로그래피에서 효과적으로 허상을 제거 할 수 있다. 그러나 기하학적인 방법으로 허상을 제거한 경우, 측정 및 재생과정에 제약이 따른다. 이를 보완하기 위해 연구된 방법이 Zero Padding을 이용한 허상 제거 방법이다. Zero Padding을 이용한 허상 제거 방법역시 렌즈를 사용하는 홀로그래피에서의 특수한 성질을 이용한 것이다. In-Line 디지털 홀로그래피 현미경에서는 대물렌즈에 의한 간섭 정보는 지역적으로 국한되어 홀로그램이 기록되므로, 재생된 영상 역시 지역적으로 국한된다. 즉 4개의 구역으로 홀로그램을 나누고 각각을 재생하면, 허상과 실상이 분리된 4개의 홀로그램 재생 영상을 얻을 수 있고, 허상부분을 제거한 실상 부분만을 취하여 4개의 영역을 합치면 허상이 제거된 3차원 이미지를 얻게 된다. Zero Padding을 이용한 허상 제거 방법은 하드웨어적인 제약이 없고, 재생 속도에도 큰 영향을 미치지 않는다.

DC 항의 경우 허상과 달리 그 세기가 매우 강하여 신호 대 잡음비가 높은 영

상을 구현하기 위해서는 DC 항을 반드시 제거해야 한다. DC 항을 제거하기 위하여 주사 방법을 이용한 영차 회절 광 제거 방법과 물체 광과 기준 광을 이용한 영차 회절 광 제거 방법 및 평균 제거 방법을 이용한 영차 회절 광 제거 방법을 연구 하였다. 주사 방법을 이용한 영차 회절 광 제거의 경우 피사체를 이동시켜 선택적으로 홀로그램을 구성하여 영차 회절 광을 제거하는 방법이다. 스캐닝 방법을 이용하는 것은 실험적으로 반복적인 홀로그램 저장과 그에 따른 반복계산이 필요하여 다른 제거 방법에 비하여 불편하나, DC 항을 효과적으로 제거 할 수 있다. 물체 광과 기준 광을 이용한 영차 회절 광 제거 방법은 기준 광의 세기와 물체 광의 세기를 측정하여 홀로그램 데이터로부터 빼는 방법으로 영차 회절 광과 물체 광의 효과가 제거된 홀로그램을 얻고, 이를 이용하여 DC 항이 제거 된 영상을 구현하는 방법이다. 주사 방법을 이용하지 않으므로 반복적인 불편함은 없으나, 피사체를 측정 할 때 마다 물체 광과 기준 광을 측정해야 하며, 주사 방법에 비하여 영차광의 제거율이 현저하다. 평균 제거 방법을 이용한 영차 회절광 제거 방법의 경우 한 번의 홀로그램 측정으로 DC 항 제거가 가능하고, 재생 속도가 빠르며, DC 항의 제거 효율이 비교적 좋아 일반적으로 사용된다. 평균 제거 방법은 홀로그램 세기의 평균을 구하고, 그 평균값을 빼주어 DC 항을 제거 하는 방법이다. 그러나 평균의 범위를 작게 하면 저주파 대역의 제거율이 향상되어 DC 항 제거율이 높아지지만, 고주파 대역의 동반 제거로 실상의 손실을 가져온다. 본 연구에서는 홀로그램의 저주파 영역과 고주파 영역에서의 평균 범위를 차등적으로 적용함으로써, DC 항의 제거율을 유지하고 실상의 손실을 최소화 하는 변형된 평균 제거 방법을 이용하여 3차원 영상을 구현하였다. 그 결과 저주파 영역의 비율은 평균 범위를 일정하게 한 경우 0.22 % , 평균 범위를 차등적으로 적용한 경우 0.08 % 로 근소한 차이만을 나타내며, 평균 제거 방법을 시행하지 않은 경우의 저주파 비율 4.9 % 에 비하여 두 경우 모두 월등하다. 그러나 MTF의 경우 변형된 평균 제거 방법은 위치에 상관없이  $0.47 \pm 0.04$  임에 반해 기존의 평균 제거 방법은 실상의 손실이 발생하는 재생영상의 중심부분에서 0.11 에 불과하다. 즉 본 연구에서 제안한 변형된 평균 제거 방법은 기존의 평균 제거 방법과 동일한 수준의 DC 항 제거율을 유지하면서도 실상의 손실을 최소화 하여, MTF를 증가시킴으로써 보다 선명한 3차원 재생 영

상을 구현 할 수 있었다.

본 연구에서는 투과형 디지털 홀로그래피 현미경과 반사형 디지털 홀로그래피를 결합한 투과 반사 통합형 디지털 홀로그래피 현미경을 구성하여 3차원 영상과 굴절률을 동시에 측정하였다. 투과 반사 통합형 디지털 홀로그래피 현미경은 굴절률의 영향을 받은 투과형 홀로그램과 굴절률의 영향을 받지 않은 반사형 홀로그램을 비교하여 굴절률을 측정한다. PCX 렌즈의 굴절률을 측정한 경우, 피사체의 굴절률과 비교해 볼 때 전체 영역을 평균한 굴절률의 상대오차는 8.2 %였고, DC 항이 존재 하는 영역을 제외한 다른 부분의 평균한 굴절률은 0.1 % 상대오차에, 표준편차  $\pm 2$  % 로 측정되었다. 또한 격자무늬의 경우 투과형과 반사형의 측정 차이에 의해 격자무늬 가장자리 영역이 급격히 증가 하였으나, 격자무늬의 중심 부분에서는 피사체의 굴절률에 근접함을 알 수 있었다.

본 연구에서는 CCD가 구현할 수 있는 최고의 FOV를 구현하기 위하여 In-Line 디지털 홀로그래피 현미경을 구성하였으며, 실상과 허상 및 DC 항 제거를 위한 방법을 연구하였다. 허상 제거를 위하여 본 연구에서 수행하였던 Zero Padding 방법의 경우, 하드웨어적 제약이 없고 재생 속도에 큰 영향을 미치지 않으며, 허상을 효율적으로 제거 시킬 수 있다. DC 항 제거를 위하여 본 연구에서 수행하였던 변형된 평균 제거 방법의 경우 기존의 평균 제거 방법과 동일한 장점을 가질 뿐 아니라, 실상의 손실을 최소화하였다. 또한 투과 반사 통합형 디지털 홀로그래피 현미경을 구성하여 3차원 구조와 굴절률을 동시에 측정하였다.

## Abstract

### Study of Digital Holographic Microscope Using a Combination of Transmission-Reflection

HyungJun Cho

Department of Physics, Graduate School  
Cheju National University  
Jeju City, 690-756, Korea

(Supervised by professor YoungHun Yu)

Since nano technology was introduced recently, it has been used in studies on material characteristics of non-organism such as carbon nanotube, single electron transistor and semi-conductor. However lately nano technology has been applied to biology for understanding physical and chemical phenomenon of a molecular. It is expected to raise the revolutionary change throughout bio technology such as biology and medicine. But, the past nano technology has been restricted for applying to biology and medicine which must observe a living body in real time.

Digital holographic technology has been developed for the last three decades to apply to In-Vivo inspection, encrypting technology, 3D vision, and holographic microscope. We call it 'digital holographic technology'

that reconstructs 3D image of hologram recorded in CCD(Charged Coupled Device) with using numerical diffraction calculation. This technology was proposed by Goodman and Laurence, and realized by Kronrod et al. The biggest difference in classic holography and digital holography is the hologram recorder and 3D image reconstruction method. A recorder can abbreviate chemical hologram process, and record the hologram data in real time with using digital image recorder such as CCD instead of holography photo-plate. Also digital holography can get spatial benefit, and moreover, save, copy and edit the measured results. And unlike classic holography that reconstructs 3D image by optical method, digital holography reconstructs 3D image by computer. Digital holographic technology has more interest in large number of applications for a high resolution real-time 3D observation when the technology of computer & digital recorder has developed remarkably.

However, we have some difficulty in embodying the image with good signal to noise ratio because DC term including zero-order suppression and twin image work as noise when the image is reconstructed numerically with using hologram from CCD. Holography is classified with an in-line hologram and an off-axis hologram by the incidence angle of reference beam. Gabor developed in-line hologram for the first time. Its incidence angle of reference beam to objective beam is  $0^\circ$ .

In the in-line hologram, it is difficult to provide a clear image because real image, virtual image, and DC term can be superposed. These problems were solved by off-axis hologram designed by Leith and Upatnieks. We call it when reference beam enters with angle, and real image, virtual image, and DC term are separated spatially. However, a real image in off-axis is reconstructed within only 1/4 of reconstruction zone. For that reason, it has a bad effect on FOV(Field Of View) of digital holography because resolution of digital holography recorder is

less than 50 lines/mm . Virtual image and DC term must be removed with using in-line hologram to get a high resolution image.

Also, in case of measurement using the light, refractive index is an important factor. The 3D depth information is distorted as much as the difference in refractive index because each organizer in a living body provides the various refractive index. Furthermore, refractive index can give the information to convert the density of materials reversely. This is useful information in test of sorts, densities of a living body, and defect of materials. Only the Ellipsometry can measure object's structure and refractive index simultaneously. However, Ellipsometry can provide a fragmentary information of film thickness, but composes a 3D image. Also its measuring time is very long because it is a scan type. Until now, there is no report about any study on measuring a real 3D structure and a refractive index simultaneously.

This study was performed to construct an in-line digital holographic microscope to embody the highest resolution of CCD, and to research the method of removing integrated virtual image and DC term effectively. And, in this study I measured 3D structure and refractive index simultaneously by constructing digital holographic microscope using a combination of transmission-reflection.

At first, for the case of removing virtual image, I researched the virtual image removal method using geometric arrangement and the virtual image removal method using a zero padding method. The virtual image removal method using geometric arrangement is to use the phenomenon that virtual image size is minimized with considering the distance from lens to CCD, and the distance from CCD to a reconstructed plane. This method uses specific property in holography using a lens. However, in case of removing real image with a geometric method, there is some constraint in

the measurement and reconstruction process. We studied the virtual image removal method using a zero padding method that was studied to complement this problem. The virtual image removal method using a zero padding method uses also specific property in holography using a lens. In an in-line digital holographic microscope, because the interference information is recorded in a hologram with some local limitation, the reconstructed image also is locally limited. That is to say, if we reconstruct each of hologram after dividing hologram into 4 domains, then we can get each of reconstruction image whose virtual image and real image are separated. Futhermore, if we combine 4 domains after selecting only the real images, then we can get a 3D image without virtual image. The virtual image removal method using a zero padding method has no dependence on hardware, and also exerts immaterial influence on reconstruction speed.

In case of removing DC term, because its intensity is very strong, much more than that of virtual image, DC term must be removed to embody the image with higher signal to noise ratio. In this study, it researched zero-order suppression method using scanning, zero-order suppression method using object beam & reference beam, and zero-order suppression method using the average removal method to remove DC term. Zero-order suppression method using scanning is to construct a hologram selectively by moving a subject of zero-order suppression, and remove zero-order beam.

When using this method, it is inconvenient more than other methods because it needs experimentally repetitive hologram saving and repetitive calculation, but it can remove DC term effectively. Zero-order suppression method using object beam and Reference Beam is to eliminate the intensity of reference beam and object beam from the hologram intensity. This method can provide a hologram without the DC



term removed by eliminating zero-order beam and object beam. Because this method doesn't use a scanning method, it gives repetitive work inconveniency. But an object beam and a reference beam must be measured whenever we measure a subject. And refractive index of zero-order beam is significant as compared to scanning. Zero-order suppression using the average removal method is used widely because it can remove DC term with measuring a hologram once the reconstruction speed is fast, and the removal efficiency of DC term is relatively higher. The average removal method is to calculate the average of hologram intensity and then to extract the average for removing DC term. However, if we lower the average range(number of pixel to calculate the average), then DC term elimination rate will be improved. But at the same time, the high frequency region will be removed too. I researched the variable average removal method. This method is applied with the average range within a low frequency region and a high frequency region of hologram by grade. In consequence, we have minimized the loss of real image with maintenance DC term elimination rate.

Furthermore, I developed a digital holographic microscope using a combination of transmission-reflection by combining transmission holographic microscope that is influenced by refractive index and reflection holographic microscope that is not influenced by refractive index, and then measured the 3D images and refractive index simultaneously.

## 참 고 문 헌

- [1] J. W. Goodman and R. W. Lawrence, Appl. Phys. Lett. vol. 11, pp. 77, 1967.
- [2] M. A. Kronrod, N. S. Merzlyakov and L. P. Yaroslavski, Sov. Phys, Tech. vol. 17, pp. 434, 1972.
- [3] G. K. Wernicke, O. Kruschke, N. Demoli and H. Gruber, SPIE, vol. 3396, pp. 238, 1998.
- [4] L. Xu, X. Peng, J. Miao and K. Asundi, Appl. Opt. vol. 40, pp. 5046, 2001.
- [5] S. Kim, H. Lee and J. Son, Hankook Kwanghak Hoeju, vol. 14, pp. 244, 2003.
- [6] U. Schnars, J. Opt. Soc. Am. vol. A11, pp. 2011, 1994.
- [7] C. Wangneer, S. Seebacher, W. Osten and W. Jüptner, Appl. Opt. vol. 38, pp. 4812, 1999.
- [8] Y. Takaki and H. Ohzu, Appl. Opt. vol. 38, pp. 2204, 1999.
- [9] L. Xu, J. Miao and A. Asundi, Opt. Eng. vol. 39, pp. 3214, 1999.
- [10] H. Cho, D. Kim, Y. Yu, W. Jung and S. Shin, Hankook Kwanghak Hoeji, vol. 17, pp. 329-334, 2006.
- [11] M. Takada, H. Ina and S. Kobayashi, J. Opt. Soc. Am. vol. 72, pp. 156, 1982.
- [12] E. Cuhe, F. Bevilacqua and Ch. Depeursinge, Opt. Lett. vol. 24, pp. 291, 1999.
- [13] T. Kreis, J. Opt. Soc. Am. vol. A 3, pp. 847, 1986.
- [14] Y. Takaki, H. Kawai and H. Ohzu, Appl. Opt. vol. 38, pp. 4990, 1999.
- [15] M. Liebling, T. Blu and M. Unser, J. Opt. Soc. Am. vol. A 21, pp.

- 367, 2004.
- [16] E. Cuche, P. Marquet and C. Depeursinge, *Appl. Opt.* vol. 39, 4070, 2000.
- [17] L. Xu, X. Peng, Z. Guo, J. Miao and A. Asundi, *Opt. vol. Express* 13, pp. 2444, 2005.
- [18] W. Kim, *J. Korean Phys. Soc.* vol. 44, pp. 287, 2004.
- [19] H. G. Rhee, J. B. Song, D. I. Kim and Y. W. Lee, *J. Korean Phys. Soc.* vol. 50, pp. 1032, 2007.
- [20] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, 2nd ed. edited by J. Goodman (McGraw Hill, New York, 2005), Chap 9.
- [21] M. A. Kronrod, L. P. Yaroslavski and N. S. Merzlyakov, *Sov. Phys. Tech. Phys.*, vol 17, pp 329, 1972.
- [22] M. A. Kronrod, L. P. Yaroslavski and N. S. Merzlyakov, *Sov. Phys. Tech. Phys.*, vol 17, pp 333, 1972.
- [23] L. P. Yaroslavski and N. S. Merzlyakov, *Methods of Digital Holography* (Consultance Gureau, New York, 1987).
- [24] U. Schnars and W. Juepthner, *Digital Holography*, edited by U. Schnars and W. Juepthner (Springer, Heidelberg, 2005).
- [25] L. Denis, F. Corinne, F. Thierry and D. Christophe, *Proc. SPIE.* vol. 5914, pp. 148, 2005.
- [26] C. Depeursinge, *Digital Holography and Three-Dimensional Display*, edited by T. C. Poon (Springer, 2006).
- [27] T. Kreis and W. P. O. Jüptner, *Opt. Eng.* vol. 36, pp. 2357, 1997.
- [28] I. Yamaguchi and T. Zhang, *Opt. Lett.* vol. 22, pp. 1268, 1997.
- [29] Y. Zhang, Q. Lu and B. Ge, *Opt. Commun.* vol. 240, pp. 261, 2004.
- [30] S. Shin, M. C. Park, S. Yoon, H. Cho and Y. H. Yu, *J. Korean Phys. Soc.* vol. 48, pp. 1242, 2006.
- [31] H. Cho, S. Shin and Y. Yu, *Hankook Kwanghak Hoeji*, vol. 18, pp. 117, 2007.

- [32] U. Schnars and W. Jupter, Appl. Opt., vol 33, pp 179, 1994.
- [33] W. Xu, M. H. Jericho, I. A. Meinertzhagen and H. J. Kreuzer, PNAS., vol 98, pp 11301, 2001.
- [34] L.T. Canham, Appl. Phys. Lett., vol. 57, p. 1046, 1990.
- [35] D.A. Aspnes and A. A. Studna, Phys. Rev. B, vol. 27, p. 985, 1983.
- [36] F. Ferrieu, A. Halimaoui and D. Bensahel, Solid State Commun., vol. 48, p. 293, 1992.
- [37] U. Rossow, H. Munder, M. Thonissen and W. Theiss. J. Lumin, vol. 57), p. 205. 1993.
- [38] P. Basmaji, V.S. Bagnato, V. Grivickas, G.I. Surdutovich and R. Vitlina, Thin Solid Films, vol. 223, p. 131, 1993.
- [39] P. Basmaji, G.I. Surdutovich, R. Vitlina, J. Kolenda and V.S. Bagnato, Solid State Commun, vol. 91, p. 649, 1994.
- [40] I. Michalcescu, G. Lerondel and R. Romestain, Thin Solid Films, vol. 297, p. 245, 1997.
- [41] A.G. Cullis, L.T. Canham and P.D.J. Calcott, J. Appl. Phys., vol. 82, p. 909, 1997.
- [42] O. Teschke and F. Alvarez, Appl. Phys. Lett., vol 63, p. 1927, 1993.
- [43] J. Zuk, M. Kulik, G.T. Andrews, H. Kiefte, M.J. Clouter, R. Goulding, N.H. Rich and E. Nossarzewska-Orłowska, Thin Solid Films, vol. 297, p. 106, 1997.
- [44] Haddad W, Cullen D, Solem J, Longworth J, McPherson A, Boyer K and Rhodes K, Appl. Opt. vol. 31, pp. 4973-4978, 1992.
- [45] H. J. Kreuzer and R. A. Pawlitzek, Akademie, Berlin, pp. 364-367, 1997.
- [46] W. Kebbel, H. J. Hartmann and W. Jüptner, SPIE. vol. 4398, pp. 189-198, 2001.
- [47] Coppola G. De Nicola S, Ferraro P, Finizio A, Grilli S, Iodice M,

- Magra C and Pierattini G, SPIE. vol. 4933, pp. 226-231, 2003.
- [48] C. Wagneer, S. Seebacher, W. Osten and W. Jüptner, Appl. Opt. vol. 38, pp. 4812-4820, 1999.
- [49] G. Liu and P. D. Scott, Opt. Soc., vol. 44, 287, 1987.
- [50] L. Onural and M. T. Ozgen, J. Opt. Soc. Am. A., vol 9, pp 252, 1992.
- [51] U. Schnars and W. Jupter, *Proc. 2nd Int. Worksop on Automatic Proessing of Fringe* (Akademie, Berlin, 1992)
- [52] K. Boyer, J. C. Solem, J. W. Longworth, A. B. Borisov and C. K. Rhodes, Nat. Med. N. Y. vol. 2, pp. 939-941, 1996.
- [53] U. Schnars and W. Jüptner, Appl. Opt. vol. 33, pp. 179-181, 1994.
- [54] K. Yoshinori, U. Hiroaki, T. Kenji, H. Okamoto and E. Shimizu, S. A. Benton, ed., Proc. SPIE. vol. 2716, pp. 272-282, 1994.
- [55] O. Coquoz, R. Conde, F. Taleblou and C. Depeursinge, Appl. Opt. vol. 34, pp. 7186-7193, 1995.
- [56] J. Pomarico, U. Schnars, H. J. Hartmann and W. Jüptner, Appl. Opt. vol. 34, pp. 8095-8099, 1995.
- [57] E. Cucho, P. Poscio and C. Depeursinge, R. Marchesini and H. Pobielska, eds., Proc. SPIE. vol. 2927, pp. 61-66, 1996.
- [58] E. Cucho, P. Poscio and C. Depeursinge, J. Opt. Paris. vol. 28, pp. 260-264, 1997.
- [59] T. Zhang and I. Yamaguchi, Opt. Lett. vol. 23, p. 1221-1223, 1998.
- [60] U. Schnars, T. M. Kreis and W. P. O. Jüptner, Opt. Eng. vol. 35, pp. 977-982, 1996.
- [61] E. Cucho, P. Marquet and C. Depeursinge, Appl. Opt. vol. 38, pp. 6994-7001, 1999.
- [62] M. Pluta, in *Advances in Optical and Eletron Microscopy*, R. Barer and V. E. Cosslett, eds. (Academic, London, 1987), vol. 10, pp. 99-213.

- [63] D. Malacara, *Optical Shop Testing* (Wiley, New York, 1992) pp. 501.
- [64] M. Servin and F. J. Cuevas, *J. Mod. Opt.* vol. 42, pp. 1853, 1995.
- [65] J. E. Grevenkamp and J. H. Brunning, *Optical Shop Testing* (Wiley, New York, 1992).
- [66] P. C. Sun and E. Arons, *Appl. Opt.*, vol. 34, pp 1254, 1995.
- [67] S. H. Baik, S. K. Park and S. J. Kim, *J. Korean Phys. soc.*, vol 39, pp 891, 2001.
- [68] C. S. Rim *J. Korean Phys. soc.*, vol 46, pp 488, 2005
- [69] J. M. Huntley, *Appl. Opt.* vol. 28, pp. 3268-3270, 1989.
- [70] T. J. Flynn, *J. Opt. Soc. Am. A.* vol. 14, No. 10, pp. 2692-2701, 1997.
- [71] G. Fornaro, G. Franceschetti, R. Lanari, E. Sansositi and M. Tesauro, *J. Opt. Soc. Am. A.* vol. 12, pp. 2355-2366, 1997.
- [72] H. O. Saldner and J. M. Huntley, *Opt. Eng.* vol. 36, pp. 610-615, 1997.
- [73] M. D. Pritt, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing.* vol. 43, pp. 728-738, 1996.
- [74] Howard A. Zebker and Yanping Lu, *J. Opt. Soc. Am. A.* vol. 15, pp. 586-597, 1998.
- [75] Vyacheslav V. Volkov and Yimei Zhu, *Opt. Lett.* vol. 28, pp. 2156-2158, 2003.
- [76] Wei Xu, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing.* vol. 37, pp. 124-134, 1999.
- [77] R. M. Gusack, H. A. Zebker and C. L. Werner, *Appl Opt.*, vol 23, pp 713, 1988.
- [78] R. Cusack, H. M. Huntley and R. M. Goldstein, *Appl. Opt.*, vol 34, pp 7481, 1995.
- [79] K. Itoh, *Appl. Opt.* vol. 21, pp. 2470-2474, 1982.

- [80] D. C. Ghiglia and M. D. Pritt, John Wiley & Sons. Ch3-Ch5, 1998.
- [81] J. W. Goodman, Introduction to Fourier Optics (Roberts & Company Publishers, USA, 2005)
- [82] M. Takeda, H. Ina and S. Kobayashi, J. Opt. Soc. Am. vol. 72, pp. 156-160, 1982.
- [83] W. W. Macy, Appl. Opt. vol. 22, pp. 3898-3901, 1983.
- [84] K. A. Nugent, Appl. Opt. vol. 24, pp. 3101-3105, 1985.
- [85] H. Cho, D. Kim, S. Shin, W. Jang, J. Son, and Y. Yu, J. Kor. Phys. Soc., vol. 52, No. 4, pp. 1031-1035, 2008.
- [86] T. Kreis, W. Jupter, Opt. Eng. vol. 36, pp. 2357, 1997.
- [87] B. D. Duncan and T. C. Poon, J. Opt. Soc. Am. vol. A 9, pp. 229-233, 1992.
- [88] T. C. Poon, K. B. Doh, B. W. Schilling, M. H. Wu, K. Shinoda and Y. Suzuki, Opt. Eng. vol. 34, pp. 1338-1344, 1995.
- [89] U. Schanrs, J. Opt. Soc. Am. vol. A11, pp. 2011-2015, 1994.
- [90] U. Schanrs and W. Juptner, Meas. Sci. Technol. vol. 13, pp. R85-R101, 2002.
- [91] L. Onural and P. D. Scott, Opt. Eng., vol. 26, pp. 1124-1132, 1987.

## 감사의 글

논문을 마무리하며 뒤를 돌아보니 아쉬움이 많이 남는 대학원 생활이었습니다. 그 동안 도움을 주신 많은 분께 논문의 말미에나마 고마움을 전하고자 합니다.

군대 제대 후 연구실에 들어오면서부터 지금까지 11년 동안, 인생의 다른 길을 보여주시고, 힘들고 어려운 일이 있을 때면 늘 아버지처럼 걱정해주시고, 나태해 있을 때면 엄하게 꾸짖어 주시고, 기쁜 일이 생기면 당신 일인 양 좋아해주신 유영훈 교수님 진심으로 감사합니다.

늘 웃는 얼굴로 저에게 따뜻한 격려와 많은 조언을 해주시고, 학위논문을 마치 당신의 일인 양 걱정해주신 신상훈 박사님 정말 감사합니다. 그리고 때로는 일침을 가하는 질문으로 당황하곤 하였지만, 마치 당신의 지도 학생인 듯, 항상 너그러이 이해해주시는 김두철 교수님 정말 감사합니다.

논문심사 시, 많은 조언과 충고를 하여주시고, 바쁜 일정에도 연구실의 하나하나를 소개해 주셨던 이윤우 박사님과 저의 피부를 보시며 많은 걱정과, 좋은 치료 방법을 찾아 주셨던, 정원기 교수님께 감사드립니다.

학생들을 항상 걱정하시는 홍성락 교수님, 오며 가며 학위논문을 잘 쓰고 있냐며 걱정해주신 최치규 교수님, 많은 조언을 해주신 현남규 교수님, 남다른 열정으로 학생들을 대하여 주시는 고정대 교수님, 학생들의 학업 및 생활을 꼼꼼히 살펴주시는 김용주 교수님, 물리학과에 부임하시고 얼마되지 않았음에도 밤을 지새워가며 논문을 수정하여 주신 우종관 교수님 진심으로 감사합니다. 또한 언제나 학생들의 장래를 걱정해주시던 고 류재연 교수님의 명복을 빕니다.

지금은 먼 곳에 있지만, 실험실의 유일한 선배인 역봉이형, 영원히 동기임을 강조하였던 두성이형께도 고마움을 전합니다. 그리고 항상 옆에서 응원하여 주었던 문석이 형, 항상 달려와 주는 한순호, 학교에서 동고동락 하였던 고승욱, 자신의 집을 기꺼이 내준 강민범, 언제나처럼 나를 응원하여 주는 김태언, 실험실의 뒷일을 조용히 처리해주던 윤선규와 김아름에게도 고마움을 전하고 싶습니다. 대학교 입학년 때부터 모든 대학 생활을 항상 나와 같이 하며, 응원 해주었던 선



이, 귀찮은 내색하지 않고 도움을 주는 서아름, 안정규, 임진웅, 김광휘에게도 따뜻한 고마움을 전합니다. 또한 같은 동네라고, 어려울 때면 제일 먼저 달려와 주는 호정이 형과 안수에게도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 어려울 때나 기쁠 때 자신의 일처럼 생각하는, 언젠가부터 가족이 되어 버린 영욱이 형과 영훈에게도 고마움을 전합니다. 늘 친구 같이 든든한 버팀목이 되어준 형욱이와 원표에게도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다.

큰 병환 중에도 저를 있게 해주신 어머니, 아버지께 깊이 고개 숙여 감사드립니다. 아버지와 어머니가 보여주신 신념과, 성실함을 거름 삼아 열심히 살겠습니다. 예쁜 막내딸을 저에게 시집보내고, 멀리 타향에서 저를 위해 기도해주시는 어머니, 아버지께도 감사드리고 나에게 소중한 두 아들과 항상 든든한 후원자가 되어주는 영원한 나의 친구이자, 아내인 경희에도 고마움을 전하고 싶습니다.

또한 학위논문을 위하여 도움을 주신 많은 분께 감사드립니다.

- 2008년 7월 어느 저녁에... 조형준 올림