



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

두 파장 디지털 홀로그래피를 이용한
물체의 3차원 상 재생과 굴절률 측정



濟州大學教 教育大學院

物理教育專攻

金 善

2010年 8月

두 파장 디지털 홀로그래피를 이용한 물체의 3차원 상 재생과 굴절률 측정

指導教授 康 東 植

金 善

이 論文을 教育學 碩士學位 論文으로 提出함

2010年 8月

金 善의 教育學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ (인)

委 員 _____ (인)

委 員 _____ (인)

濟州大學教 教育大學院

2010年 8月

3-dimensional Information and Refractive Index
Measurement Using a Dual-wavelength Digital
Holographic Microscope

Seon Kim

(Supervised by professor Dong Shik Kang)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree of
Master of Education

2010. 8.

This thesis has been examined and approved.

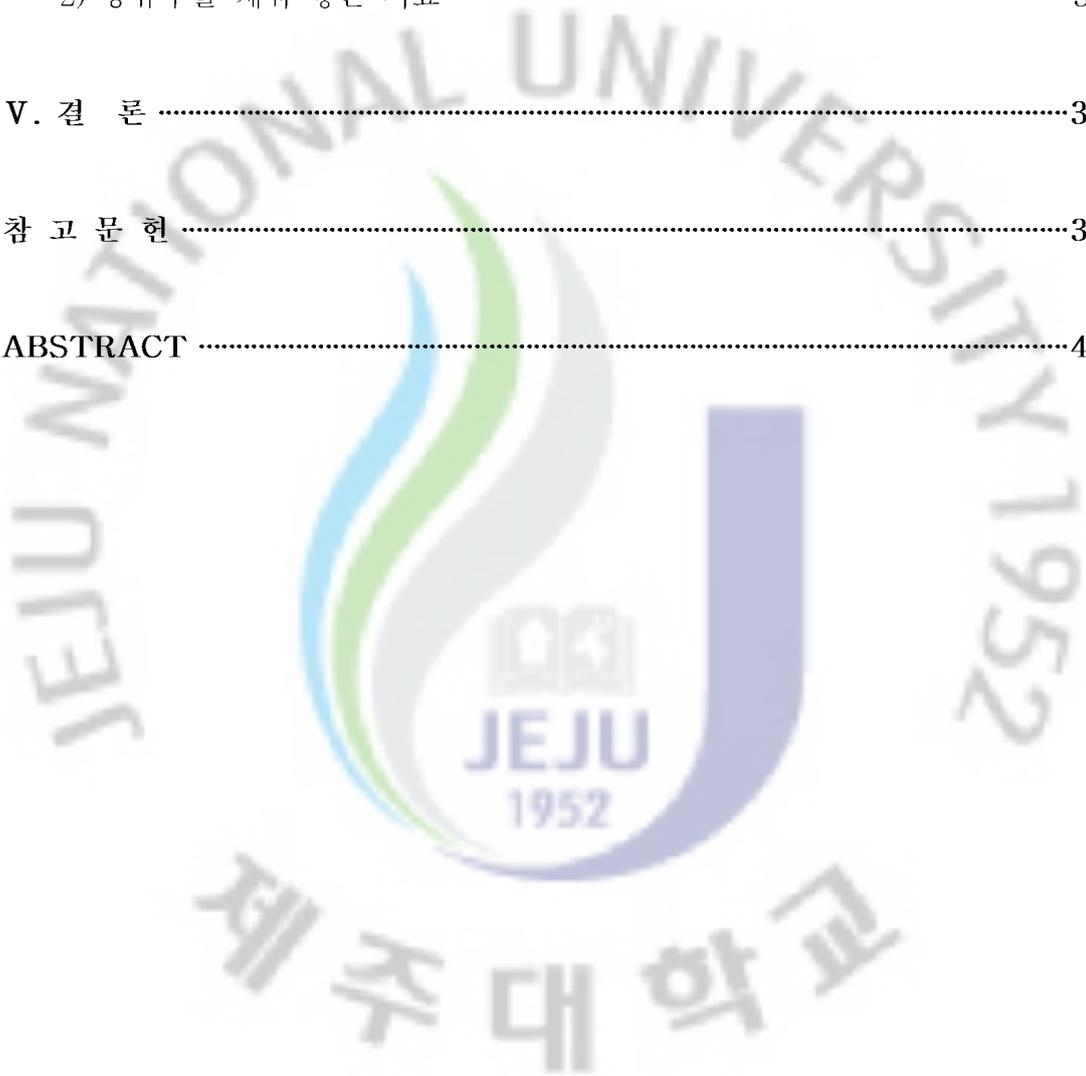
.....
.....
.....
.....

Major in Physics Education
GRADUATE SCHOOL OF EDUCATION
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

차 례

국문초록	iii
I. 서 론	1
II. 이론적 배경	3
1. 홀로그래피	3
1) 홀로그램의 기록	4
2) 홀로그램의 재생	5
2. 디지털 홀로그래피 현미경	6
1) 디지털 홀로그램의 기록	6
2) 디지털 홀로그램의 재생	10
3) 위상 펼침	13
3. 인라인 디지털 홀로그래피	14
1) 제로 패딩(Zero Padding)을 이용한 허상 제거 방법	15
2) 평균 제거 방법을 이용한 영차 회절 광 제거 방법	17
4. 인라인 디지털 홀로그래피 현미경의 일반적인 형태	18
5. 두 파장 홀로그램을 이용한 굴절률의 측정	20
III. 실험방법	23
1. 실험장치	23
2. 시료 제작	25

IV. 실험결과 및 고찰	27
1. 전산기 시능	27
2. 실험 결과	32
1) 글리세린을 채워 넣은 시료	32
2) 증류수를 채워 넣은 시료	35
V. 결 론	38
참 고 문 헌	39
ABSTRACT	42



국문 초록

두 파장 디지털 홀로그래피를 이용한 물체의 3차원 상 재생과 굴절률 측정

디지털 홀로그래피 기술은 전하결합소자(Charge Coupled Device: CCD)와 같은 반도체 기록 장치를 이용하여 실시간으로 시료의 홀로그래피 정보를 얻고, 수치적 3차원(3-Dimensional: 3D) 상을 재생하여, 시료의 3차원 정보를 얻는 방법이다. 그러나 디지털 홀로그래피 방법으로 3차원 정보를 얻기 위해서는 시료의 굴절률이나 3차원 정보를 정확히 알아야 하는 단점이 있다. 정확한 3차원 정보를 제공하는 두 파장 디지털 홀로그래피 현미경을 이용하여 시료의 굴절률과 3차원 상을 측정하면 이 단점을 해결할 수 있다. 두 파장 디지털 홀로그래피 현미경과 홀로그래피의 위상 차이를 이용하여 실험한 결과, 시료의 굴절률을 계산할 수 있었고, 동시에 정확한 3차원 상을 얻을 수 있었다.

주요어 : 디지털 홀로그래피, 3차원 상 재생, 위상 편침

※ 본 논문은 2010년 8월 제주대학교 교육대학원 위원회에 제출된 교육학 석사학위 논문임.

I. 서 론

최근 3차원 영상 기술의 발전으로 전산화단층촬영(CT)과 같은 3차원 영상장치 및 측정기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 물체의 3차원 상 측정기술은 유전공학, 나노-바이오, 의학 기술을 뒷받침 해주는 도구로써 필요성이 더욱 절실해지고 있는 시점이다. 현재 개발되어진 3차원 현미경은 주사형 터널 현미경(Scanning Tunneling Microscope: STM), 원자간력주사 현미경(Atomic Force Microscope: AFM), 근접주사 광학 현미경(Near field Scanning Optical Microscope: NSOM) 등이 있다.

홀로그래피(Holography)는 1940년대 영국의 과학자 Dennis Gabor에 의해 제안되었다. 디지털 홀로그래피 기술은 약 1960년대부터 개발되어온 기술로서 비파괴 검사, 암호화 기술, 3차원 인식, 홀로그램 현미경 분야에 응용을 위하여 실용화 기술에 근접하는 연구가 진행되어 오고 있다 [1-7]. 디지털 홀로그래피 기술은 전하결합소자를 홀로그램 입력 장치로 사용하여 실시간으로 물체의 홀로그램 정보를 기록할 수 있다. 이는 고전 홀로그래피에서는 할 수 없었던 실시간 기록이 가능하다는 큰 장점이 있다. 이렇게 기록된 디지털 홀로그램 정보는 수치적 회절 계산 방법을 통하여 3차원 정보를 얻을 수 있다. 홀로그램의 수치적 재생 방법은 Goodman과 Laurence에 의해서 1960년 후반에 제안된 것이고, Kronrod 등에 의하여 실현 되었다 [1-2]. 홀로그래피 사진건판을 대신하여 전하결합소자 등의 디지털 영상 기록 장치를 사용하는 디지털 홀로그래피는 화학적 홀로그램 생성 과정을 생략할 수 있어 간편하고, 컴퓨터 연산 속도의 발전으로 인하여 3차원 상을 필요로 하는 다수의 응용분야에서도 많은 관심을 가지게 되었다 [8-12]. 1970년대에 Yaroslavskii 등이 수치적으로 홀로그램을 재생하는 방법을 제안하였고, Ounral과 Scott은 수치적으로 재생하는 재생 알고리즘을 개선한 후 입자의 크기를 측정하였다 [13-15]. 디지털 홀로그래피는 주사(Scan) 없이 3차원 상을 구성하고, 수치적 계산을 통하여 3차원 상을 재생하므로, 시료의 염색 등 화학적 과정이 필요 없다. 이렇게 획득된 상 및 3차원 정보는 파일 형태

로 보관이 되므로 시공간적 제약이 없다는 장점이 있다 [16,17].

그러나 측정하고자 하는 시료의 굴절률이 위치에 따라 일정하지 않은 경우 위치에 따른 광경로차(Optical Path Difference: OPD)는 측정시료의 실제 크기와 상이하게 된다. 광경로차는 그 주변 매체의 굴절률 차와 시료의 높이에 따라서도 다르게 나타난다. 시료의 굴절률이 알려지지 않았거나 일정하지 않을 경우, 재생되는 3차원 상은 실제 시료의 크기와 다르게 측정된다 [18-20].

디지털 홀로그래프 현미경은 높은 해상도를 가지고 있으며, 광경로차를 측정하는데 사용할 수 있다. 광경로차는 굴절률과 시료의 형태에 따라 달라진다. 또한, 두 파장 디지털 홀로그래피 방법을 이용하여 3차원 형상 정보를 얻고, 굴절률을 측정하기 위해서는 시료의 굴절률이나 형상 정보 중 한 개 이상의 정보를 정확하게 알고 있어야 측정이 가능하다.

본 연구는 동시에 굴절률과 3차원 형상을 측정할 수 있는 두 파장 인라인(In-line) 디지털 홀로그래피 현미경을 구성하였다. 두 파장 디지털 홀로그래피를 이용하여, 3차원 상과 시료의 굴절률에 대한 정보를 동시에 얻어 분석할 수 있다. 굴절률이 서로 다른 시료를 준비하여 홀로그래프와 굴절률 측정할 수 있는 방법을 구현하여 3차원 상 재생과 굴절률을 측정하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장은 두 파장 디지털 홀로그래피 현미경과 굴절률 측정에 대한 이론적 고찰을 한다. III장은 두 파장 디지털 홀로그래피 현미경을 이용하여 시료의 굴절률을 측정하고 3차원 상을 재생하는 실험 장치와 실험방법을 설명한다. IV장은 글리세린과 증류수를 채워 넣은 시료에 대하여 두 파장 디지털 홀로그래피를 이용하여 굴절률을 측정하고, 3차원 상을 재생하였다. 두 시료의 이론적 굴절률 값과 측정한 굴절률 값을 비교·분석하였고, 3차원 상을 재생한 결과에 대하여 고찰한다. V장에서 결론을 맺는다.

II. 이론적 배경

1. 홀로그래피

홀로그래피는 1948년 Gabor에 의해 제안되었고, 레이저가 개발된 1960년대 이후부터 활발한 연구가 진행되었다. 홀로그래피(Holography)는 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 분포만 기록된다. 그러나 홀로그래피는 피사체에 투사되어 피사체로부터 반사되거나 투과되어 나오는 빛의 진폭 및 위상 변화를 동시에 기록하는 것으로, 홀로그래피 필름에는 빛의 세기 분포뿐 아니라 간섭에 의한 간섭무늬가 기록된다. 즉, 일반사진에서는 빛의 위상 정보가 손실 되지만, 홀로그래피에서는 간섭무늬에 의해 위상 정보를 손실 하지 않고 저장할 수 있다. 1960년 레이저의 출현을 시작으로 연구가 더욱 활성화 되었고, 1962년 미국의 Leith와 Upatnieks가 오프 축(Off-Axis) 홀로그래피 제작 기술을 개발하여 홀로그래피의 실용화를 위한 발판을 마련하였다. 같은 해 러시아의 Densiyuk에 의해 인라인 홀로그래피 제작기술이 개발되었고, 1969년 독일의 Lohman이 컴퓨터 구현 홀로그램 소개로 홀로그램의 디지털화를 제공하였으며, Goodman과 Laurence 등에 의해 전자결합소자와 컴퓨터를 이용한 디지털 홀로그래피로 발전하였다 [1-4,19-21]. 디지털 홀로그래피 기술은 홀로그램을 화학적 현상과정과, 광학적 재생과정 없이 3차원 상을 구성할 수 있는 방식이었으나, 당시의 디지털 영상 저장장치와 컴퓨터의 성능은 디지털 홀로그래피를 구현하는데 한계가 있었다. 디지털 영상 저장장치와 컴퓨터가 1990년대부터 눈부신 발전을 거듭했고, 디지털 홀로그래피 기술은 1990년대 후반부터 현재 까지 많은 관심을 갖게 되었으며, 현재도 활발한 연구가 진행되고 있다.

1) 홀로그래프의 기록

사진촬영과 같은 전통적인 결상 기법은 피사체에 의한 빛의 세기 분포만을 기록하여 광 경로에 대한 정보가 손실되는 것임에 반해, 홀로그래피는 물체로부터 나오는 빛의 위상과 진폭을 둘 다 기록하는 것이다. 그러나 홀로그래피에 사용되는 사진건판 역시 빛의 세기에만 반응하므로, 홀로그래피에 위상정보를 기록하기 위해서는 빛의 가간섭성을 이용하여 간섭무늬를 기록하게 된다. 그림 1은 빛의 가간섭성을 이용한 홀로그래프의 기록 방법에 대한 모식도이다. E_R 은 가간섭 길이가 충분한 광원으로 사진건판으로 입사되는 기준광이고, E_O 는 E_R 과 동일한 광원에서 분리되어 나온 빛으로서 피사체에 의하여 입사되는 물체광이다. 사진건판에는 기준광과 물체광에 의한 간섭무늬가 형성된다. 간섭무늬는 피사체에 의한 빛의 세기 뿐 아니라 위상에 대한 정보도 포함하고 있다 [1-4].

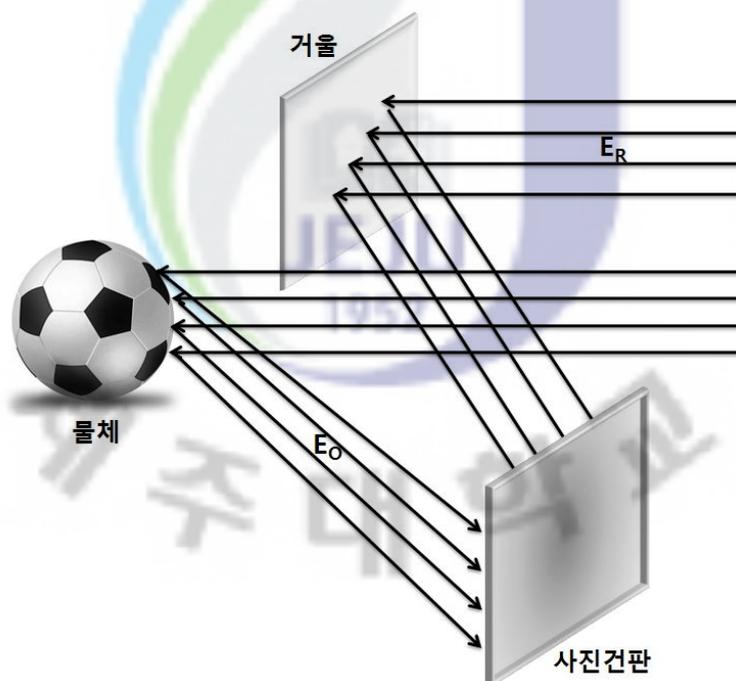


그림 1. 홀로그래프 기록.

2) 홀로그래프의 재생

홀로그래프를 기록할 때, 동일한 기준광 E_R 을 홀로그래프가 기록되어진 사진건판을 조사하여 3차원 상을 재생하는데, 이것을 홀로그래프 재생이라고 하며, 그림 2의 홀로그래프 재생 방법 모식도를 통하여 알 수 있다. 간섭무늬에서 임의의 점의 세기는 물체광의 위상과 관련되어 있고, 기록되는 홀로그래프는 물체광의 진폭 뿐 아니라 위상에 대한 정보도 포함되어 있으므로 홀로그래프를 보고 있는 관찰자는 완전한 삼차원 상을 보게 된다. 그림 2에서 보는 것과 같이 관찰자는 허상을 보게 되는데, 실상은 재생을 위하여 사용되는 기준광이 실제 수렴하여 생기는 위상공역 현상에 의해 형성되고, 허상은 물체를 멀리서 바라보는 것과 같이 물체 표면에서 반사된 광이 홀로그래프의 재생에 의해 인식되는 상이다 [1-4].

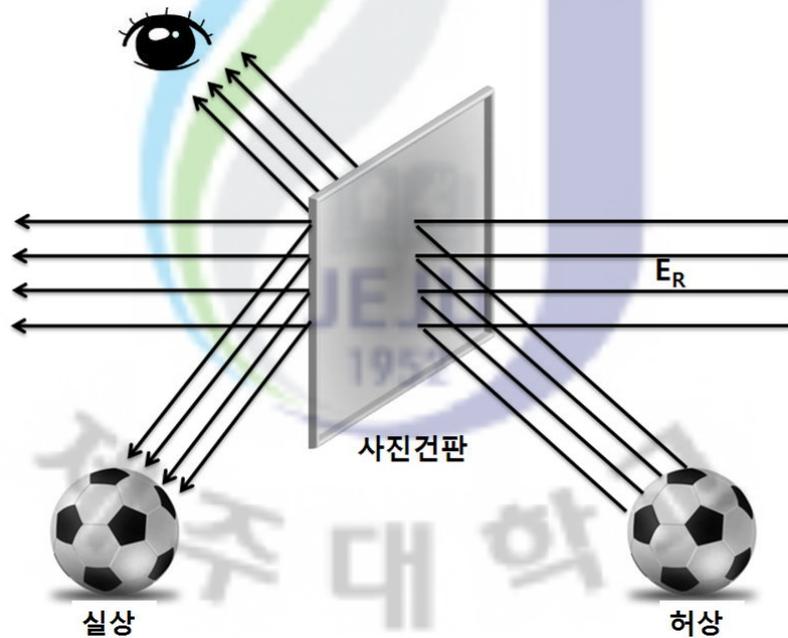


그림 2. 홀로그래프 재생.

2. 디지털 홀로그래피 현미경

1960년 후반 Goodman과 Laurence 등에 의해 전자결합소자와 컴퓨터를 이용한 디지털 홀로그래피가 제안되었으며, 사진건판 대신 전자결합소자를 사용하여 화학적 현상과정을 생략할 수 있고, 컴퓨터의 수치적 재생이 광학적 재생과정을 대신하게 되면서, 측정과 3차원 상을 재생할 수 있게 되었다. 디지털 홀로그래피는 1990년대부터 컴퓨터와 디지털 영상 저장장치의 비약적인 발전으로 많은 연구가 이루어지고 있다.

최근 10년 동안 디지털 홀로그래피는 많은 형태로 응용되었으며, Haddad와 Boyer 등은 생물 의학용 현미경을 위해 푸리에(Fourier) 변환 홀로그래피를 제안하였다 [2]. Schnars와 Jüptner는 전자결합소자로 저장된 프레넬(Fresnel) 홀로그래프의 재생을 위한 수치 재생 방법을 발표하였다 [22,23]. 이 방법은 위치 측정, 내시경 검사, 광 가간섭 단층 촬영 등에 다양하게 응용되었다. 그러나 초기에 응용된 디지털 홀로그래피 기법은 위상 천이 간섭계를 응용한 디지털 홀로그래피 기법으로, 단지 진폭 대비 영상으로 빛의 세기를 재생하기 위한 방법이었다. 그 후 디지털 홀로그래피 간섭계를 이용한 위상 대비 영상을 재생하는 방법이 제안되었다 [3,24-26]. 현재는 하나의 홀로그램을 이용하여 진폭 대비 영상 및 위상 대비 영상 재생이 가능할 뿐 아니라, 실시간에 가까운 재생속도와 수십 nm 대역의 광축방향 해상도를 갖는 디지털 홀로그래피 현미경이 보고되고 있다.

1) 디지털 홀로그램의 기록

디지털 홀로그래피 현미경에서 전자결합소자로 입력되는 홀로그램 정보는 물체광(Object Beam) O와 기준광(Reference Beam) R의 간섭에 의하여 주어진다. 그림 3과 같은 디지털 홀로그래피 현미경을 고려하면, 전자결합소자에 형성되는 2차원 홀로그램의 빛 세기는

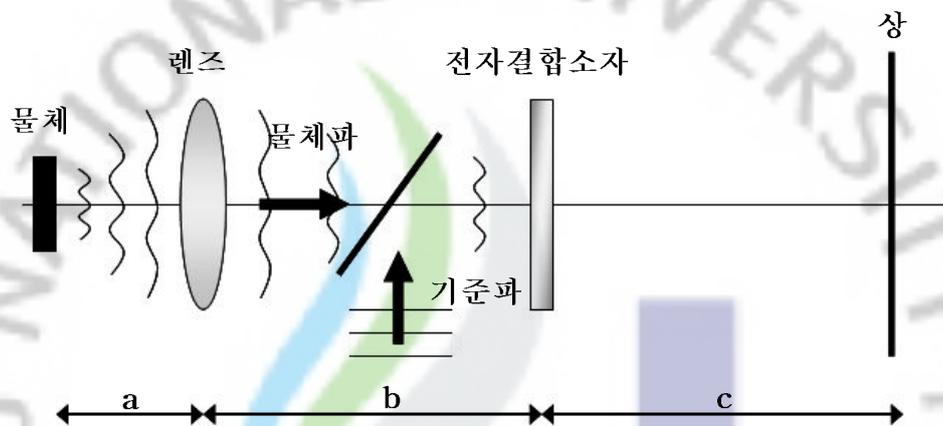


그림 3. 디지털 홀로그래프 현미경과 이미지 재생 구성도. a: 물체와 렌즈사이의 거리, b: 렌즈와 전자결합소자 사이의 거리, c: 전자결합소자와 상 사이의 거리 [3].

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

와 같다 [13,18].

대물렌즈를 사용하는 디지털 홀로그래피 현미경의 물체광은

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

와 같이 표현된다.

식 (2.2)에서 $D = f(c+d)/b$ 이고, f 는 초점거리이다. O_0 는 대물렌즈(MO)에 입사하는 물체광, M 은 확대배율이다. 식 (2.2)는 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 물체광 O_0 의 합성곱(Convolution)이다.

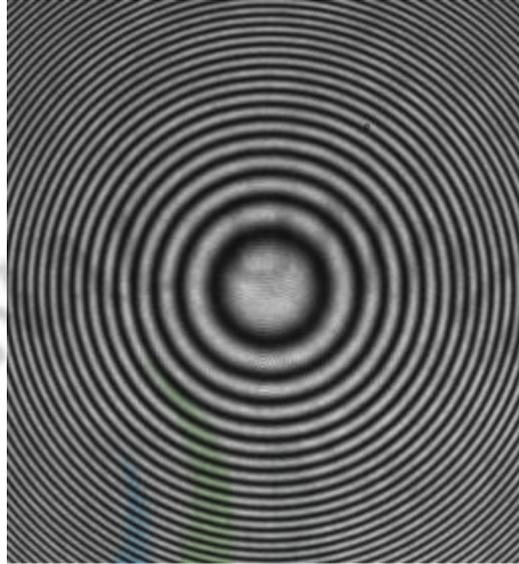
식 (2.1)에서 R 은 기준광, O 는 물체광, R^* , O^* 는 기준광과 물체광의 공액복소수이고, 인라인 홀로그래피에서 기준광과 물체광의 입사각도는 0° 이다. 식 (2.1)의 첫째 항은 기준광의 세기이고, 둘째 항은 물체광의 세기이며, 첫 번째 항과 두 번째 항의 세기를 합쳐서 영차 회절 광이라 한다. 셋째 항과 넷째 항은 각각 허상과 실상을 나타낸다.

일반적으로 디지털 홀로그래피는 홀로그램을 기록하는 장치로 전자결합소자를 사용한다. 전자결합소자의 사양은 픽셀수 $N_x \times N_y$, 픽셀크기 $\Delta x \times \Delta y$ 와 전자결합소자의 센서 크기 $L_x \times L_y$ 로 주어진다. 전자결합소자의 임의의 픽셀에 저장되는 간섭세기 $I_H(k,l)$ 는

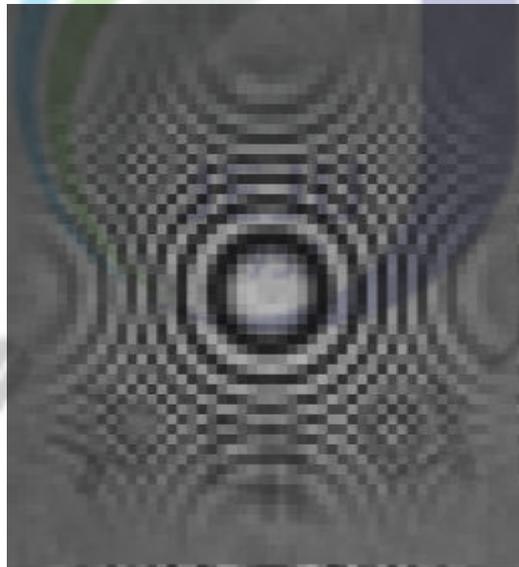
$$I_H(k,l) = I_H(x,y) \text{rect}\left(\frac{x}{L_x}, \frac{y}{L_y}\right) \sum_{k=0}^N \sum_{l=0}^N \delta(x - k\Delta x, y - l\Delta y) \quad (2.3)$$

와 같다 [27].

식 (2.3)은 기준광과 물체광에 의한 홀로그램 정보가 전자결합소자에 의하여 디지털화 되어 기록되는 것을 의미한다. 그림 4(a)는 프레넬 동심원 회절판



(a) 동심원 회절판 홀로그램



(b) 전자결합소자에 기록된 홀로그램

그림 4. 홀로그램.

(Zone Plate) 효과에 의한 홀로그래프를 보여 주고 있으며, (b)는 픽셀수 50×50 인 전자결합소자로 기록된 홀로그래프이다 [3,11-12].

2) 디지털 홀로그래프의 재생

전통적인 홀로그래프는 기준광을 홀로그래프에 조사하는 것으로 3차원 상이 재생된다. 수치 재생 과정은 기준광과 홀로그래프 세기 I_H 를 이용하면,

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

와 같이 표현된다 [13].

식 (2.4)에서 첫 번째 항과 두 번째 항은 영차 회절 항이고, 세 번째 항은 허상, 네 번째 항은 실상이다. 그림 5는 홀로그래프 재생 시 홀로그래프 면과 영상 재생 면 사이의 관계를 그림으로 표현한 것이다. $x-y$ 평면은 홀로그래프 면, 즉, 전자결합소자 면 이고, $\xi-\eta$ 평면은 홀로그래프 재생 면, d 는 홀로그래프 면과 재생 면사이의 거리이다. 그림 5는 인라인 홀로그래피의 경우이고, $\xi-\eta$ 평면에서 중앙에 위치한 것이 영차 회절 광, 그 주변의 초점이 흐린 상이 허상, 외곽에 초점이 뚜렷한 상이 실상이다.

식 (2.4)에서 프레넬-키르히호프 적분을 이용하면 홀로그래프 재생 면에서 파동의 세기는

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

와 같다 [28,29].

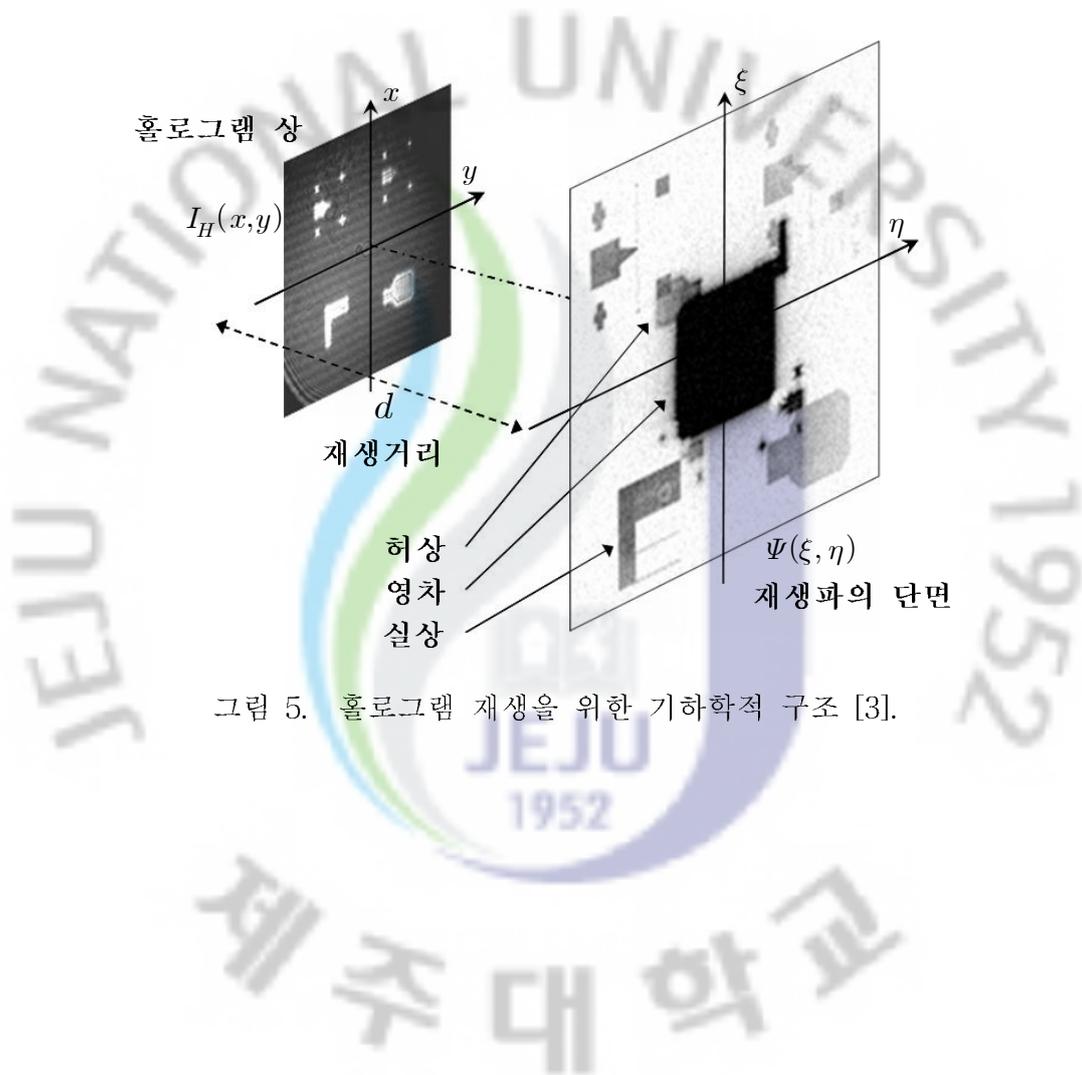


그림 5. 홀로그램 재생을 위한 기하학적 구조 [3].

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

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

을 주파수 공간 $\xi/\lambda d$ 와 $\eta/\lambda d$ 으로 푸리에 변환한 것이다 [2,30-32]. 일반적으로 식 (2.5)를 계산하기 위하여 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform: FFT) 알고리즘을 이용한다.

수치 재생을 위한 식 (2.5)를 2차원 FFT로 변환하면,

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

와 같다. 여기서 k, l, m, n 은 정수($0 \leq k, l, m, n \leq N$)이고, $I_H(k,l)$ 은 식 (2.3)인 전자결합소자에 기록된 디지털 홀로그램이다. 식 (2.7)은 복소수이므로, 재생 상은

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

과 같이 얻어지며, 진폭 대비 상을 의미한다. 위상 대비 상은

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

같이 주어진다. 식 (2.8)과 식 (2.9)를 이용하여 2차원과 3차원 상을 구현 할 수 있다.

3) 위상 펼침

디지털 홀로그램 재생을 통해 얻어진 위상 차 ψ 의 범위는 $-\pi < \psi \leq \pi$ 이다. 하지만 실제의 물체 위상은 2π 라디안 범위 이상의 값을 가지고 있다 [31-33].

위상차 정보를 이용하여 실제 물체 위상을 복원하는 방법이 위상 펼침이다. 감긴 위상과 위상 펼침을 한 위상 관계는 다음과 같다 [3,4].

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

여기서 W 는 감긴 연산자이고, $\phi(n)$ 과 $\psi(n)$ 은 각각 감긴 위상과 재생된 위상이다. k 는 정수이고, n 은 표본화에 따른 상수이다.

감긴 연산자는 항상 $-\pi < \phi(n) \leq \pi$ 이 되게 한다. 감긴 위상의 차이와 실제 위상의 차이는

$$\Delta\{\psi(n)\} = \psi(n+1) - \psi(n), \quad (2.11a)$$

$$\Delta\{k(n)\} = k(n+1) - k(n) \quad (2.11b)$$

과 같다 [34].

식 (2.10)과 식 (2.11)을 사용하면 감긴 위상의 차는

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

으로 나타낼 수 있으며, 식 (2.12)를 다시 감긴 연산자에 적용하면,

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

과 같다.

여기에서 k_1 과 k_2 는 두 번 감긴 연산자를 사용하여 나타난 것이다. 식 (2.13)

은 감긴 위상차가 다음과 같은 구간에 존재하게 한다.

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

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

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

이 된다. 이는 인접한 감긴 위상 정보의 미분값이다. $W\{\Delta\{\phi(n)\}\}$ 은 실제 위상면의 인접한 점 사이의 미분값인 $\Delta\{\psi(n)\}$ 과 같다. 그러므로 미분 불가능한 점이 없다면, 재생된 위상은

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

과 같으며, 위상 펼침에 의한 감긴 위상차를 이용하여 구할 수 있다.

3. 인라인 디지털 홀로그래피

디지털 홀로그래피는 기준광이 물체광과 같은 경로로 입사되는 인라인 홀로그래피와 각을 갖고 입사하는 오프 축 홀로그래피로 구분된다. 인라인 홀로그래피는 전자결합소자의 모든 영역을 사용할 수 있으나, 영차 회절 광과 허상이 실상과 겹쳐서 재생되므로 신호 대 잡음비에 영향을 미친다. 오프 축 홀로그래피는 영차 회절 광과 허상이 실상과 구분되어 잔상이 없는 깨끗한 영상 재생이 가능하지만, 전자결합소자 면적의 1/4 만에서만 상이 재생되어 시계에 영향을 미치게 된다 [3,11,12]. 고해상도의 3차원 디지털 영상을 재생하기 위해서는 인라인 홀로그래피를 구성하여, 영차 회절 광과 허상을 제거하여 신호 대 잡음비를 최소화

해야 하며, 오프 축 홀로그래피를 사용하기 위해서는 전자결합소자의 물리적 한계를 극복한 고성능 전자결합소자가 개발되어야 한다 [11,12].

1) 제로 패딩(Zero Padding)을 이용한 허상 제거 방법

전자결합소자에 기록된 홀로그램 재생 시, 기록한 기준광과 동일한 광으로 조명하는 경우에 전자결합소자면의 한 점에서 기준광은 1차 회절 차수(실상), -1차 회절 차수(허상) 그리고 투과광으로 그림 2와 같이 분리된다. 2차 이상의 회절이 발생 할 수 있지만, 이는 세기가 상대적으로 약하기 때문에 무시할 수 있으며, 인라인 디지털 홀로그램의 경우 그림 5와 같이 실상과 허상 및 영차 회절 광이 중첩되어 신호 대 잡음비가 악화된다. 또한 허상의 경우는 영차 회절 광과 달리 공간 주파수 대역이 실상과 같으므로, 소프트웨어 방법을 통한 제거가 어렵다.

그림 6은 인라인 디지털 홀로그래피 현미경에서 홀로그램의 기록과 재생 과정을 보여 주고 있다. 육각형 a 에 의한 홀로그램은 a' 위치에 생성된다. 실상과 허상은 각각 a'' 와 b'' 위치에 재생된다. 디지털 홀로그래피 현미경에서 홀로그램의 기록은 피사체 한 점에서의 정보가 각각의 위치에 국한 되므로, 여러 부분으로 나누어 재생 영상을 만드는 것이 가능하다. 이렇게 재생된 영상은 그림 6의 a'' , b'' 와 같이 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 상을 얻을 수 있다.

제로 패딩을 이용한 허상 제거의 경우에는 기하학적 배치를 이용한 허상 제거와 달리 하드웨어적인 제한 없이 소프트웨어적인 방식으로 3차원 상을 재생할 수 있다 [3,35].

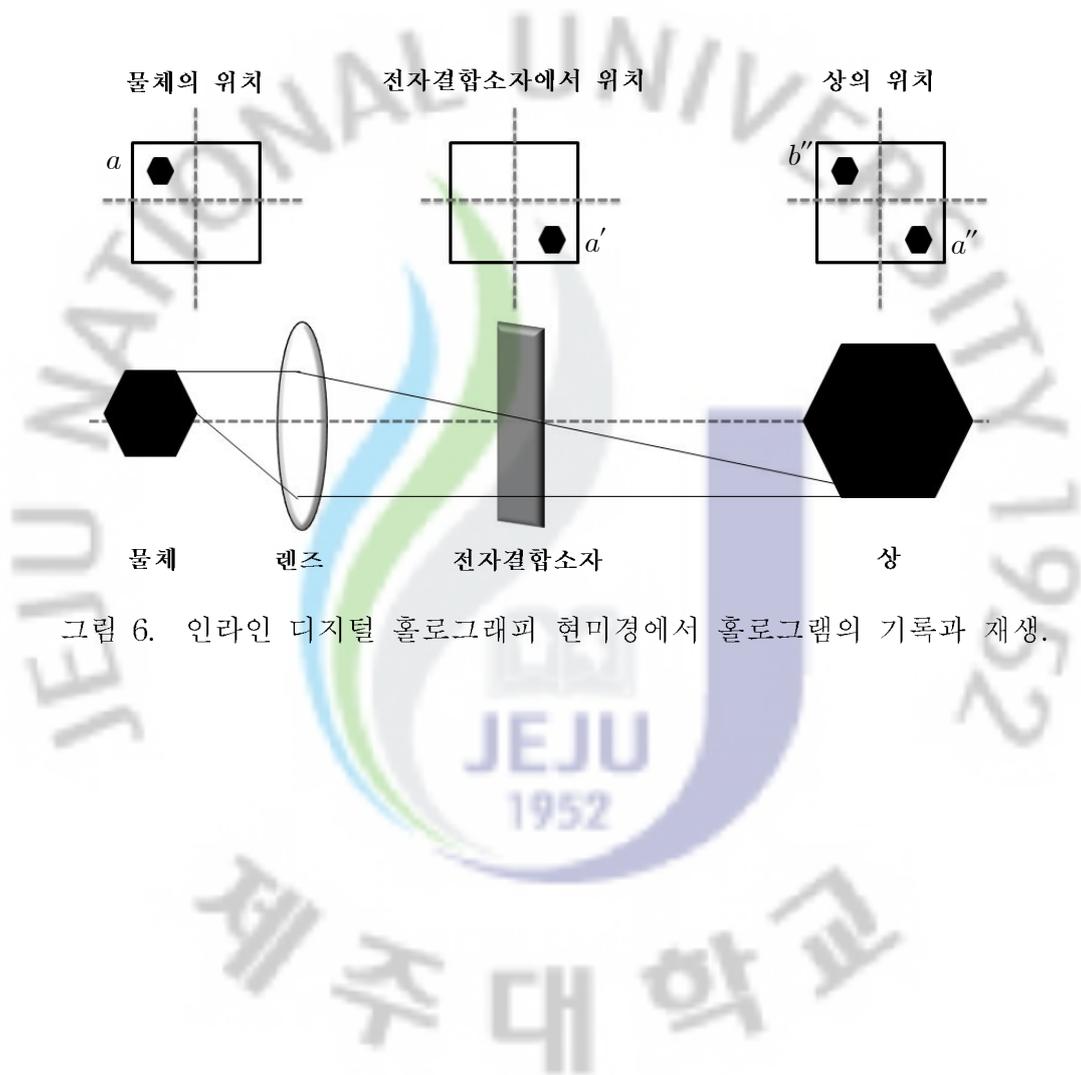


그림 6. 인라인 디지털 홀로그래피 현미경에서 홀로그램의 기록과 재생.

2) 평균 제거 방법을 이용한 영차 회절 광 제거 방법

평균 제거 방법을 이용한 영차 회절 광 제거 방법은 한 번의 홀로그램 측정으로 영차 회절 광을 최소화 시켜줄 수 있으며, 연산과정이 간단하여 디지털 홀로그램의 수치 재생 시간에 큰 영향을 주지 않는다.

홀로그래피에서 영차 회절 광은 식 (2.1)에서 첫째 항과 둘째 항이다. 여기서,

$$\text{물체광} : O(x,y) = a_O(x,y)e^{i\phi_O(x,y)}, \quad (2.17a)$$

$$\text{기준광} : R(x,y) = a_R(x,y)e^{i\phi_R(x,y)} \quad (2.17b)$$

이므로, 식 (2.1)은 다음과 같이 정리된다.

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

식 (2.18)에서 첫째 항과 둘째 항이 재생 과정에서 영차 회절 광으로 작용하는 부분이다. 셋째 항은 실상과 허상에 해당하며, 전자결합소자의 픽셀에 따라 $-2a_R a_O \sim 2a_R a_O$ 사이의 값을 갖는다. 전자결합소자에서 측정된 픽셀의 빛 세기 평균 I_m 은 다음과 같다.

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

식 (2.18)에서 세 번째 항의 모든 합은 통계적으로 '0'에 접근한다. 홀로그램 세기에서 빛의 세기 평균을 제거한다면 식 (2.18)에서 첫 번째 항과 두 번째 항을 합한 값과 통계적으로 같아진다. 전자결합소자에서 측정되어진 홀로그램에서 식 (2.19)를 제거하여 주면 영차 회절 광을 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. 전자결합소자에 기록된 I_H 는 양수 값만을 갖는다.

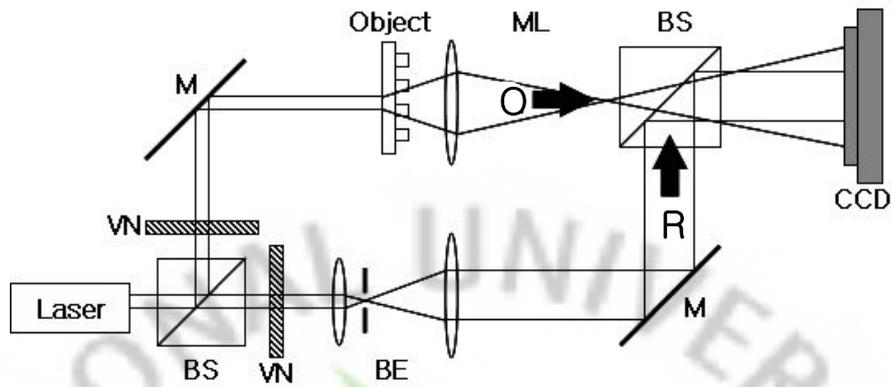
평균 제거 방법을 이용한 영차 회절 광 제거는 고대역 필터(High-Pass Filter)로 해석되며, 전자결합소자에 대한 모든 픽셀의 평균값을 제거 한 것이 식 (2.20)과 같은 경우, 지역 차단 주파수는 '0'에 근접한다 [3,36].

4. 인라인 디지털 홀로그래피 현미경의 일반적인 형태

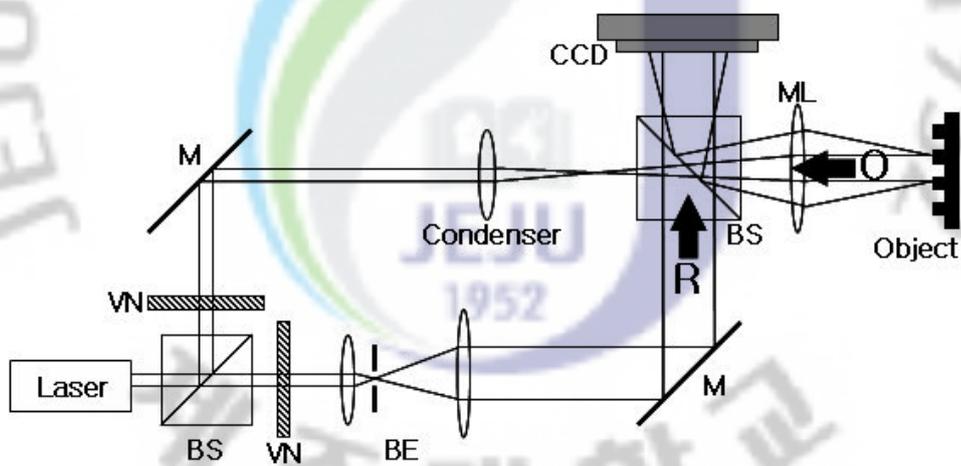
그림 7(a)와 그림 7(b)는 마흐-젠더(Mach-Zender) 간섭계와 같은 일반적인 투과형과 반사형 인라인 디지털 홀로그래피 현미경의 모식도이다. 현미경 대물렌즈(Microscope Objective Lens: ML)를 사용하면 시료를 투과한 영상이 확대되며, 간섭무늬의 명암대비가 최대인 홀로그램을 얻기 위해 가변농도필터(Variable Neutral Density filter: VN)를 사용하여 측정한다. 입사광원의 주변 잡음을 최소화 하고, 기준광의 단 면적이 넓은 광을 얻기 위해 2개의 렌즈와 핀홀(Pin hole)을 사용하여 광 확대기를 구성하고, 홀로그램 기록을 위해 전자결합소자를 사용한다. 반사형 디지털 홀로그래피 현미경은 집광과 평행광을 만들기 위한 집광렌즈가 필요하다.

투과형 디지털 홀로그래피 현미경 모식도인 그림 7(a)는 물체광 O가 시료를 투과하여, 기준광 R과 간섭하여 전자결합소자에 홀로그램이 기록되는 것을 나타낸다. 그림 7(b)는 반사형 디지털 홀로그래피 현미경으로 물체광 O가 시료에 반사 되어, 기준광 R과 간섭하여 전자결합소자에 홀로그램이 기록되어진다.

3차원 상의 재생 시 굴절률을 알아야 물체의 실제 두께를 알 수 있는데, 이는 물체 내부를 투과하는 물체광이 물체의 굴절률 영향으로 경로차가 발생하기 때문에 경로차가 발생하는 투과형 디지털 홀로그래피 현미경을 사용하게 된다. 반사형 디지털 홀로그래피 현미경의 경우, 물체 표면에서 산란된 거리 차에 의하여 경로차가 발생하므로 물체의 굴절률과 상관없이 실제 두께를 알 수 있으나, 물체



(a) 투과형 디지털 홀로그래피 현미경



(b) 반사형 디지털 홀로그래피 현미경

그림 7. 디지털 홀로그래피 현미경 모식도.

의 굴절률은 알 수 없다 [11,12,35].

5. 두 파장 홀로그래프를 이용한 굴절률의 측정

그림 8에서와 같이 굴절률이 서로 다른 시료에서 화살표를 따라 광선이 투명한 시료로 진행하는 다양한 광경로차를 고려하려면,

$$OPL_s(x, y) = n_s h(x, y), \quad (2.21a)$$

$$OPL_m(x, y) = n_m h(x, y) \quad (2.21b)$$

와 같이 광경로 길이를 구할 수 있다. 여기서 n_s 와 n_m 은 시료의 굴절률을 나타내고, $h(x, y)$ 는 시료의 높이를 나타낸다.

시료의 광경로차는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} OPD &= OPL_s(x, y) - OPL_m(x, y) \\ &= (n_s(x, y) - n_m(x, y)) h(x, y). \end{aligned} \quad (2.22)$$

두 파장에 따른 위상은

$$\phi_1(x, y; \lambda_1) = \frac{2\pi}{\lambda_1} \times OPD(x, y, \lambda_1), \quad (2.23a)$$

$$\phi_2(x, y; \lambda_2) = \frac{2\pi}{\lambda_2} \times OPD(x, y, \lambda_2) \quad (2.23b)$$

와 같다.

식 (2.22)와 식 (2.23)을 이용하여 $h(x, y)$ 에 대하여 정리하면,

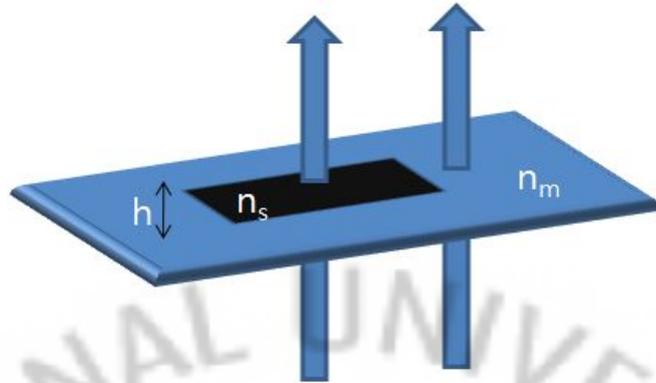


그림 8. 굴절률이 서로 다른 시료의 광경로차.

$$h(x, y, \lambda_1) = \frac{\lambda_1}{2\pi(n_s(x, y, \lambda_1) - n_m(x, y, \lambda_1))}, \quad (2.24a)$$

$$h(x, y, \lambda_2) = \frac{\lambda_2}{2\pi(n_s(x, y, \lambda_2) - n_m(x, y, \lambda_2))} \quad (2.24b)$$

이고, 여기서 $h(x, y, \lambda_1)$ 와 $h(x, y, \lambda_2)$ 는 같고, 두 파장 λ_1 과 λ_2 의 차이가 매우 작다면, $n_s(x, y, \lambda_1) \approx n_s(x, y, \lambda_2) \equiv n_s(x, y)$ 이다. 즉, 시료를 통과하는 두 파장의 차이가 크지 않은 경우 파장에 따른 굴절률 $n_s(x, y, \lambda_1)$ 와 $n_s(x, y, \lambda_2)$ 는 매우 근접한 값을 갖는다. 식 (2.24)에서 $h(x, y, \lambda_1) - h(x, y, \lambda_2) = 0$ 이므로,

$$\frac{\lambda_1 \phi_1}{n_s(x, y) - n_m(x, y, \lambda_1)} = \frac{\lambda_2 \phi_2}{n_s(x, y) - n_m(x, y, \lambda_2)} \quad (2.25)$$

와 같이 정리할 수 있으며, n_s 에 대하여 정리하면,

$$n_s(x, y) = \frac{n_m(\lambda_2)\lambda_1\phi_1 + n_m(\lambda_1)\lambda_2\phi_2}{\lambda_1\phi_1 - \lambda_2\phi_2} \quad (2.26)$$

와 같다.

식 (2.26)은 두 파장 λ_1 과 λ_2 에 대한 각각의 굴절률 $n_m(\lambda_1)$ 과 $n_m(\lambda_2)$ 을 알고 있을 때, n_s 를 구할 수 있음을 의미한다.

시료의 굴절률을 계산하기 위해서는 두 파장을 사용하여 순차적으로 홀로그래프를 측정 후 홀로그래피를 재생하고, 식 (2.26)을 이용하여 시료의 굴절률과 높이를 동시에 측정할 수 있다. 이렇게 얻어진 굴절률 분포를 다시 홀로그래프 영상에 적용하여 줌으로써, 시료의 실제 크기와 동일한 3차원 상을 얻을 수 있다 [36-41].



Ⅲ. 실험방법

1. 실험장치

그림 9는 투과형 두 파장 디지털 홀로그래피 현미경에 대한 모식도이고, 그림 10은 투과형 두 파장 디지털 홀로그래피 현미경의 실제 실험 장치이다. 전체적인 실험장치는 마하-젠더 간섭계와 동일하고, 파장이 633 nm인 He-Ne 레이저와 532 nm인 NdYag 레이저를 사용하였다. 입사광은 광 분할기(BS)를 이용하여 물체광(O)과 기준광(R)으로 나뉘지게 된다. 물체광은 거울(M)에 반사되어, 현미경 대물렌즈(ML)를 통과하고 광 분할기를 지나 전자결합소자에 입사된다. 기준광은 가변농도필터(VN)를 통과하여, 광 확대기(BE)를 지나서 거울에 반사되어 전자결합소자에 입사된다. 이때 입사된 두 개의 파는 간섭무늬를 형성하고 전자결합소자에 기록된다. 투과형 두 파장 디지털 홀로그래피 현미경을 통하여 전자결합소자로 얻어진 시료의 홀로그램을 수치적 재생으로 3차원 상을 획득하였고, 이를 이용하여 굴절률을 계산하였으며, 실제 시료의 크기와 동일한 3차원 상을 재생하였다.

또한 시료를 통과한 빛을 확대시키기 위해 대물렌즈를 사용하였다. 가변농도필터를 사용하여 간섭무늬의 명암 대비가 최대가 되도록 하였고, 기준파를 TEM₀₀모드가 되도록 광 확대기를 사용하였다. 대물렌즈로부터 20 cm 떨어진 곳에 전자결합소자를 위치시켜 홀로그램을 기록하였고, 인라인 홀로그래피 구성을 위하여 기준광과 물체광의 각도는 0°를 유지 하였다. 이와 같이 구성된 투과형 두 파장 디지털 홀로그래피 현미경 장치를 이용하여, 시료의 굴절률과 3차원 상을 측정하였다.

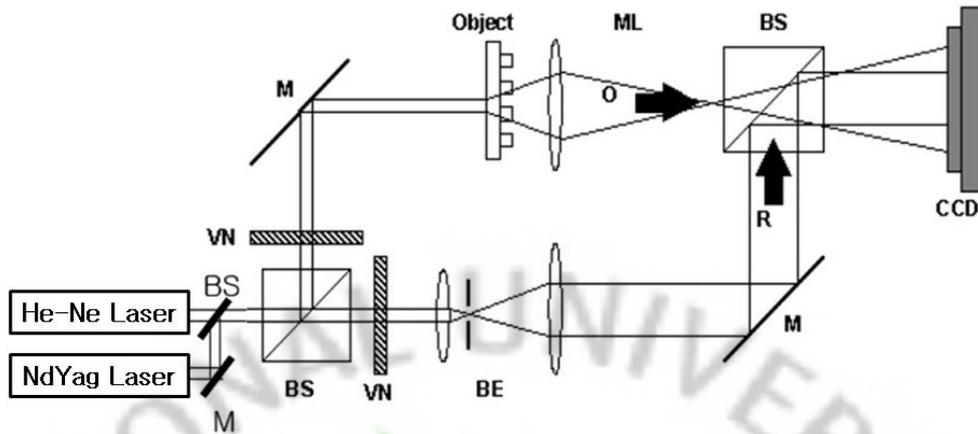


그림 9. 투과형 두 파장 디지털 홀로그래피 현미경 모식도. VN: 가변농도필터, BS: 광 분할기, M: 거울, O: 물체파, R: 기준파, BE: 광 확대기, ML: 현미경 대물렌즈.

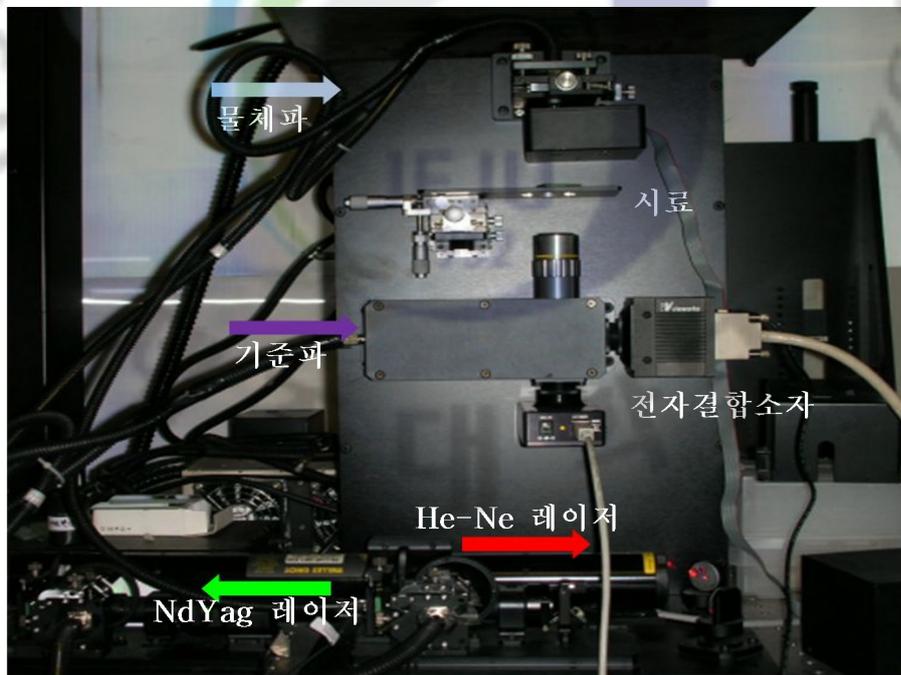


그림 10. 투과형 두 파장 디지털 홀로그래피 현미경 장치.

2. 시료 제작

본 연구에 사용한 시료는 그림 11과 같이, 슬라이드 글라스를 이용하여 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 와 $1\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 의 크기로 디자인하였다.

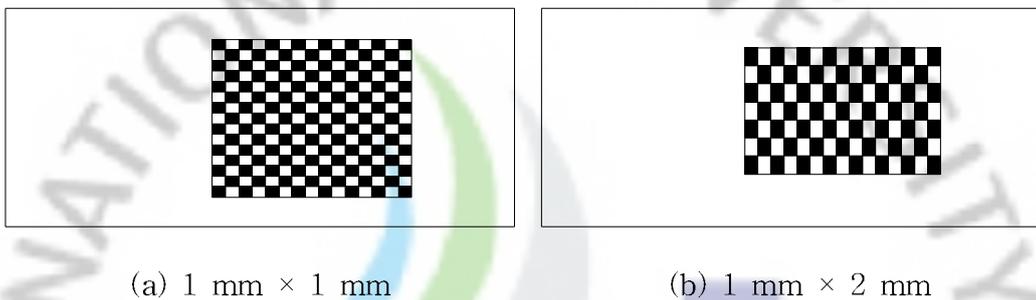


그림 11. 시료 이미지.

20 %, 30 %, 35 %의 플루오르화수소(HF)를 사용하여 그림 11의 검정색 영역을 식각하였으며, 식각 시간은 각 농도에 대해 1분 30초 이고, 그 결과는 그림 12와 같다. 플루오르화수소의 농도에 따라 각각 50개씩 총 150개의 시료를 제작하였으며, 슬라이드 글라스에서 식각 된 부분을 확인하기 위하여 광학현미경을 이용하였다.

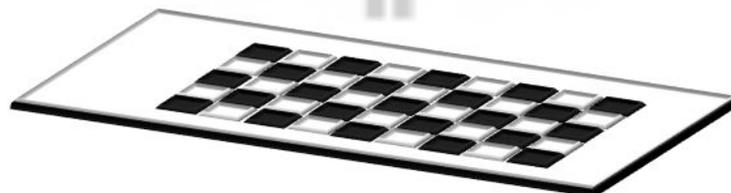


그림 12. 제작된 시료.

그림 12는 시료로 사용된 슬라이드 글라스가 식각 되어있는 것을 나타내고 있다. 이렇게 제작된 시료의 식각된 영역에 글리세린과 증류수를 각각 채워 넣고 커버글라스로 같은 높이가 되도록 압착하여 고정한 후, 두 파장 인라인 디지털 홀로그래피 현미경을 사용하여 위상정보를 획득하고, 위상 펼침 하여 시료의 광경로차에 따른 3차원 정보를 구성하였으며, 이를 계산하여 굴절률을 얻은 후, 계산된 굴절률을 적용하여 실제 시료와 사이즈가 같은 3차원 상을 재구성 하였다.



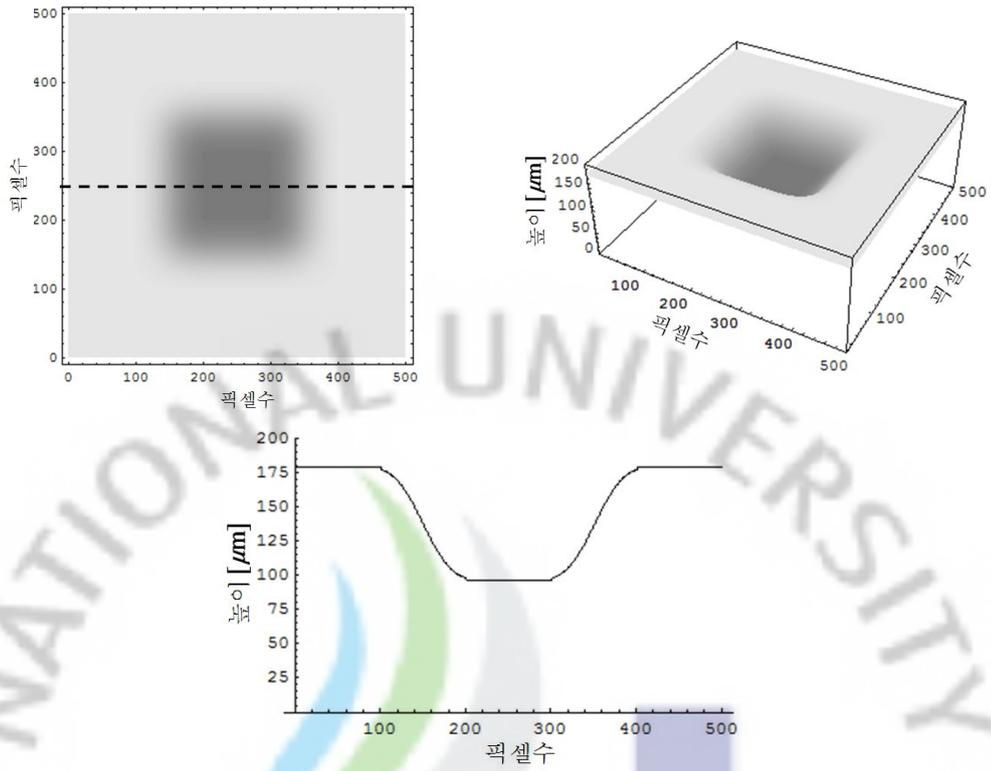
IV. 실험결과 및 고찰

1. 전산기 시뮬

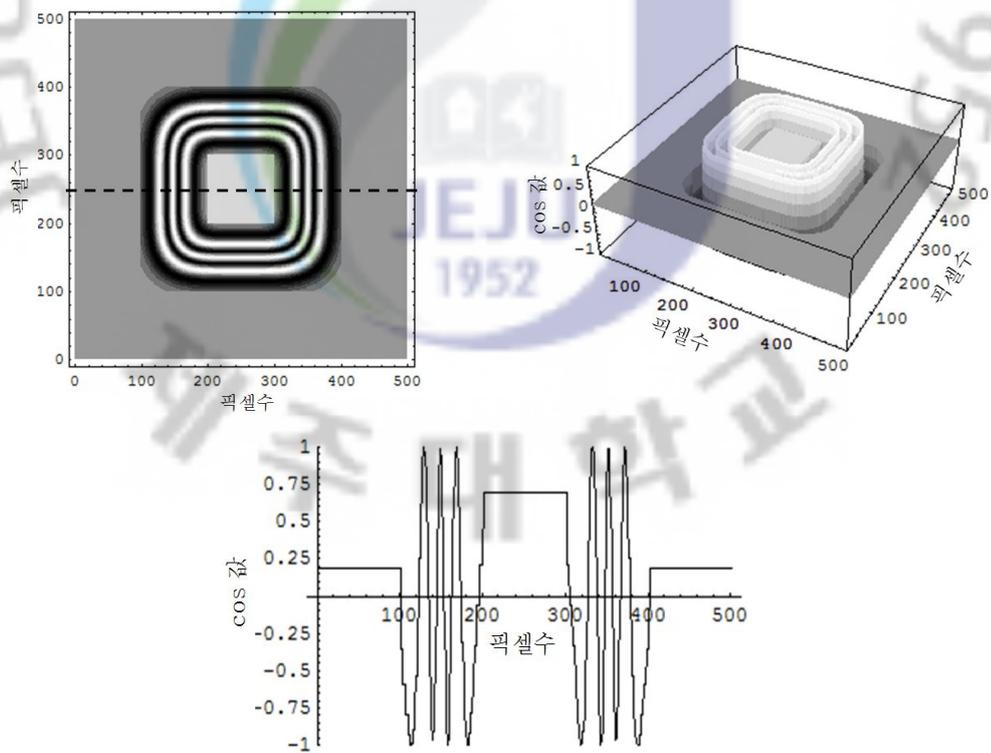
본 연구에서는 수치해석 응용프로그램인 메스메티카(Mathematica 5.1) 프로그램을 이용하여 홀로그램 및 홀로그래피 재생, 위상 펼침, 굴절률 측정에 대한 전산기 시뮬을 수행하였다.

홀로그램이 기록되는 전자결합소자 면에는 물체광에 의한 회절과 기준광에 의한 간섭 세기의 변화가 기록되고, 식 (2.9)로 위상 대비 영상을 계산하며, 식 (2.16)으로 위상 펼침을 하여 3차원 상을 획득할 수 있다.

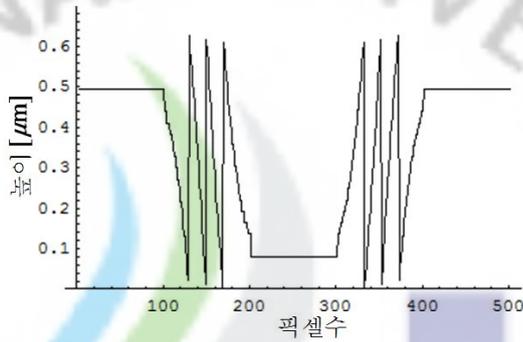
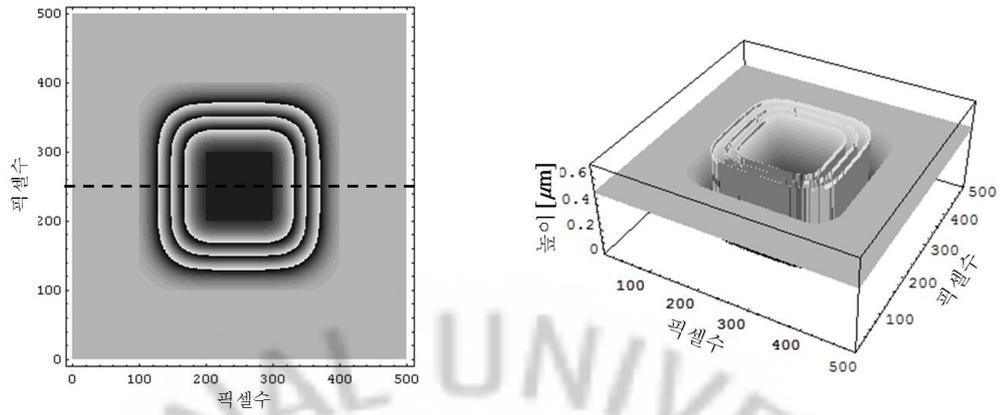
그림 13(a)는 시료의 형상으로 단차 내에 글리세린을 채우기 이전에 해당되며, 그림 13(b)는 단차 내에 글리세린을 단차와 동일한 높이 까지 채워 넣은 상태의 물체광과 기준광 간섭에 의한 전자결합소자 면에 기록된 홀로그램이다. 또한 시료의 단차는 $83 \mu\text{m}$ 로 설정하였고, 단차의 낮은 부분에 해당하는 글리세린의 굴절률은 532 nm , 633 nm 파장에서 1.472 , 1.471 로 적용하였다. 단차의 높은 부분에 해당하는 유리의 굴절률은 532 nm , 633 nm 파장 일 때, 1.522 , 1.517 로 실제 시료와 동일하게 적용하였다. 그림 13은 파장 633 nm 인 입사광을 사용하였을 때, 전산기 시뮬한 계산 결과이며, 전산기 시뮬에 사용한 전자결합소자의 픽셀수는 $N_x \times N_y = 500 \times 500$ 이고, 그림 13(c)는 식 (2.9)에 의하여 재생된 위상 대비 영상이다. 여기서 N_x 는 가로 픽셀수이고, N_y 는 세로 픽셀수이며, 픽셀 당 크기는 $1 \mu\text{m}$ 이다. 그림 13(d)는 식 (2.16)에 의하여 3차원으로 재생된 영상이다. 여기서 단차 영역에 글리세린을 채워 넣어 단차 영역의 높이를 동일하게 하였으나, $2.312 \mu\text{m}$ 의 높이 차가 발생한 원인은 단차 영역에 채워 넣은 글리세린과, 유리의 굴절률 차에 의한 현상으로, 두 영역에서의 광경로차에 기인한 것이다.



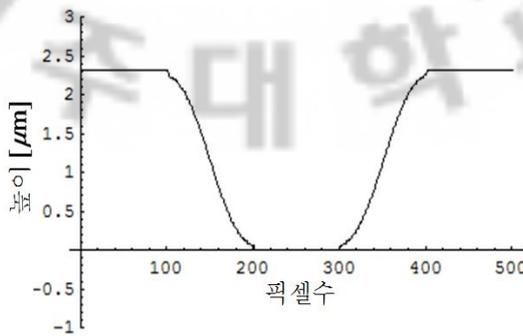
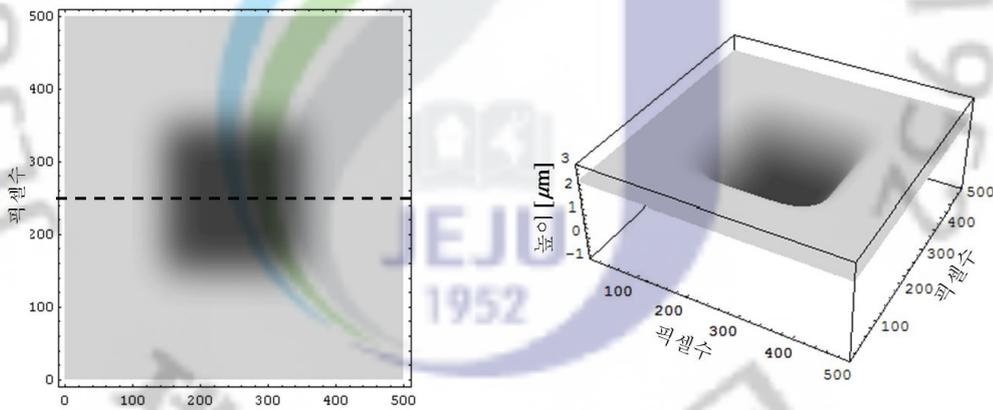
(a) 시료



(b) 홀로그래프 기록



(c) 위상 대비 영상



(d) 위상 펄침 영상

그림 13. 633nm 에서의 홀로그램 기록과 재생.

그림 14는 입사광 파장이 532 nm인 경우에 대한 3차원 영상의 전사기 시뮬레이션 결과이며, 그림 13(d)와 동일한 방법으로 계산되어진 결과이다. 그림 13과 그림 14에서 알 수 있듯이 두 파장 633 nm와 532 nm에 대하여 서로 다른 광경로차가 발생하였다. 다시 말하면 단차에 글리세린을 채워 넣으므로 시료는 단차가 발생하지 않았으나, 글리세린과 유리의 굴절률 차에 기인한 광경로차가 발생한 것이다. 또한 광경로차는 532 nm 파장에서 더욱 크게 측정이 되었으며, 파장이 작을수록 굴절률이 큰 것에 기인한 결과이다. 즉, 유리에 비해 글리세린의 굴절률이 작으므로 532 nm 와 633 nm에서 모두 글리세린을 채워 넣은 영역이 보다 낮은 높이로 재생 된 것이다.

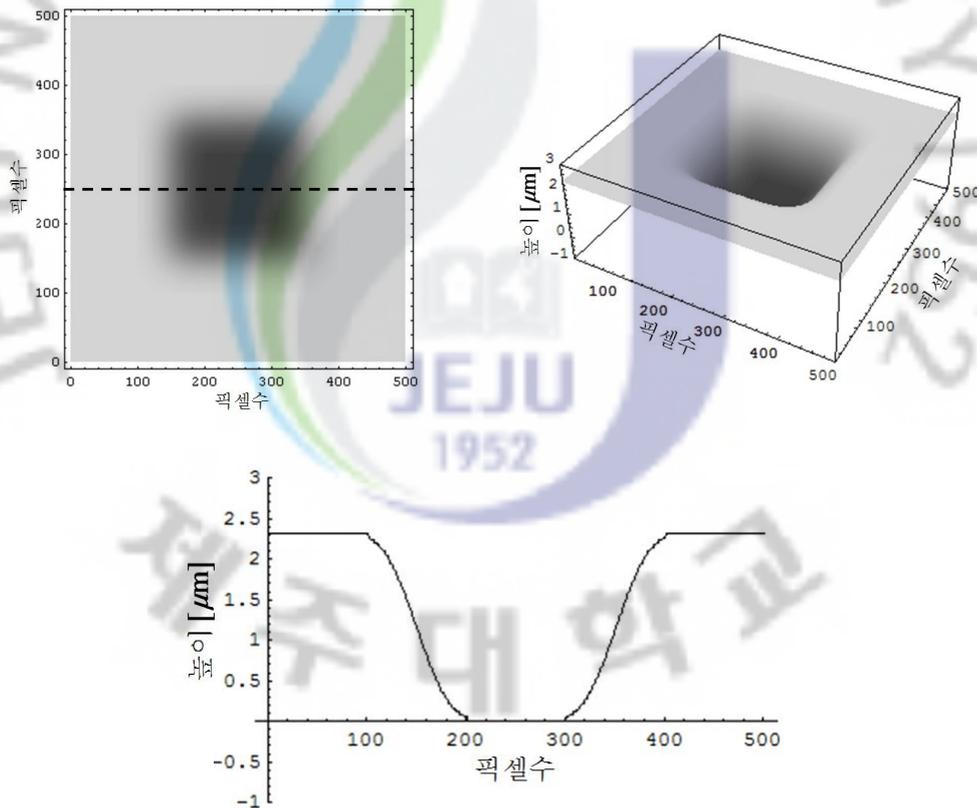
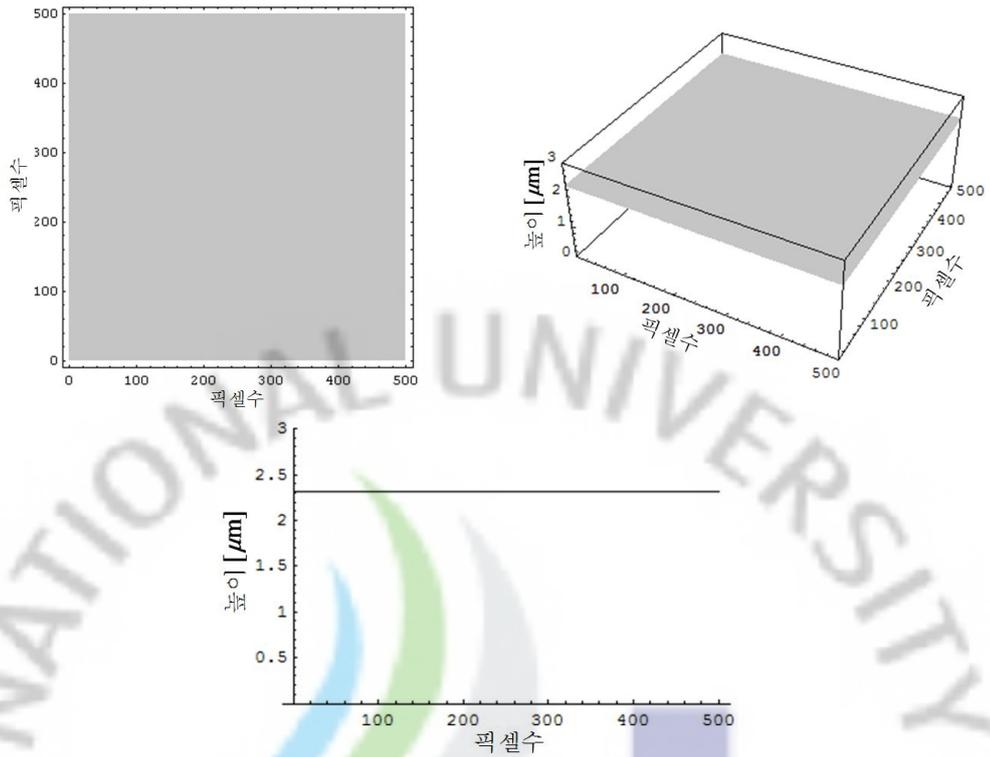
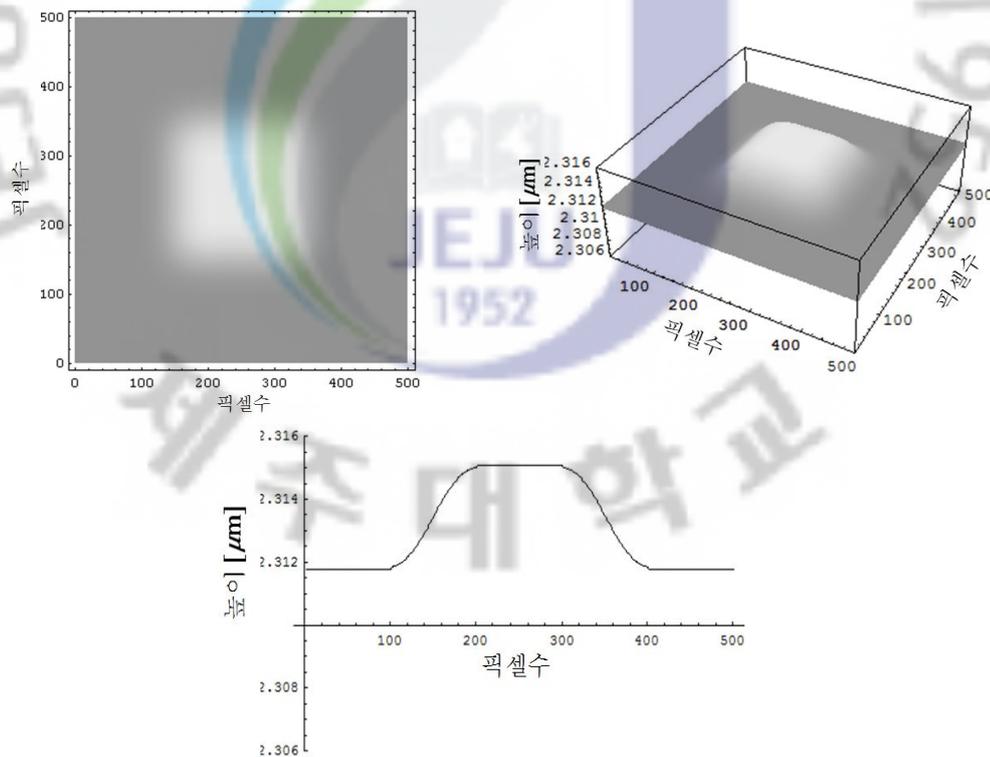


그림 14. 532 nm 파장에의 위상 편침 영상.



(a) 광경로 길이를 보상한 실제 측정 크기



(b) 그림 13(d)의 점선 영역 확대

그림 15. 광경로 길이를 보상한 실제 측정 크기.

식 (2.22)를 이용하여 광경로차를 구하면, 532 nm에서 $2.315 \mu\text{m}$, 633 nm에서는 $2.312 \mu\text{m}$ 로 전산기 시능 결과와 부합됨을 알 수 있다. 그리고 식 (2.26)을 이용하여 전산기 시능한 결과 단차 내 즉, 글리세린의 굴절률이 1.450로 측정되었으며, 상대오차는 1.444 %이었다.

이렇게 계산되어진 굴절률을 그림 13(d)에 적용하여 광경로 길이 그래프를 그림 15와 같이 수정할 수 있다. 그림 15를 통해 알 수 있듯이 단차에 글리세린을 같은 높이까지 채워 일직선 모양으로 나타났음을 알 수 있다. 그림 15(b)처럼 글리세린 영역이 아주 미세한 차이로 높게 전산기 시능되었다. 이것은 상대오차에 의해서 발생한 것이다. 본 연구에서 제시한 굴절률이 서로 다른 두 영역 중 하나의 굴절률을 알고 있을 때, 다른 영역의 굴절률을 정확하게 측정 할 수 있음을 전산기 시능을 통하여 알 수 있었고, 이를 이용하여 실제 시료와 동일한 상을 재현할 수 있었다.

2. 실험 결과

1) 글리세린을 채워 넣은 시료

그림 13(a)와 같이 20 %의 플루오르화수소와 반응하여 식각된 슬라이드 글라스에 글리세린을 채웠다. 글리세린이 일정한 높이로 채워질 수 있도록 시료 상부에 커버글라스를 압착하여 고정한 후, 두 파장 홀로그래피 현미경을 사용하여 3차원 상을 측정하였다. 시료의 홀로그래피를 측정 후 재생 결과는 그림 16과 같고, 여기에 사용된 슬라이드 글라스의 굴절률은 532 nm, 633 nm 파장에서 각각 1.522, 1.517이며, 글리세린은 532 nm, 633 nm 파장에서 굴절률 1.472, 1.471이다.

그림 16은 홀로그래피를 재현한 상이다. 여기서 높은 부분은 유리이고, 낮은 부분이 글리세린을 채워 넣은 부분에 해당 되며, x축과 y축의 한 픽셀은 $0.89 \mu\text{m}$ 이다. 글리세린의 굴절률이 슬라이드 글라스에 비해 상대적으로 낮으므로, 광경로 길이도 상대적으로 짧은 것이다. 이는 전산기 시능 결과와 일치 한다.

유리 부분을 홀로그래피로 재생한 결과 평균 높이는 532 nm에서 2.704 μm , 633 nm에서 3.005 μm 로 측정되었고, 글리세린으로 채워진 어두운 부분의 높이는 532 nm에서 0.683 μm , 633 nm에서 1.003 μm 로 측정되었다. 이것은 홀로그래피 재생 시 모든 부분의 굴절률을 1로 가정하여 측정된 결과로 엄밀하게 말하면, 측정된 홀로그래피는 광 경로 거리에 의한 측정 결과라 할 수 있다. 그리고 두 영역의 광경로차가 532 nm파장에서 2.070 μm , 633 nm에서 2.321 μm 로 측정되었다. 여기서 광경로차는 시료의 단차에 해당된다. 슬라이드 글라스의 굴절률을 알고 있다고 가정하면, 식 (2.26)을 이용하여 글리세린의 굴절률을 측정한 결과는 1.492이며, 상대오차는 1.384 %이다.

위 결과에서 측정된 위치에 따른 굴절률을 그림 16에 적용하여 실제의 크기로 3차원 상을 보정하면 그림 17과 같다.

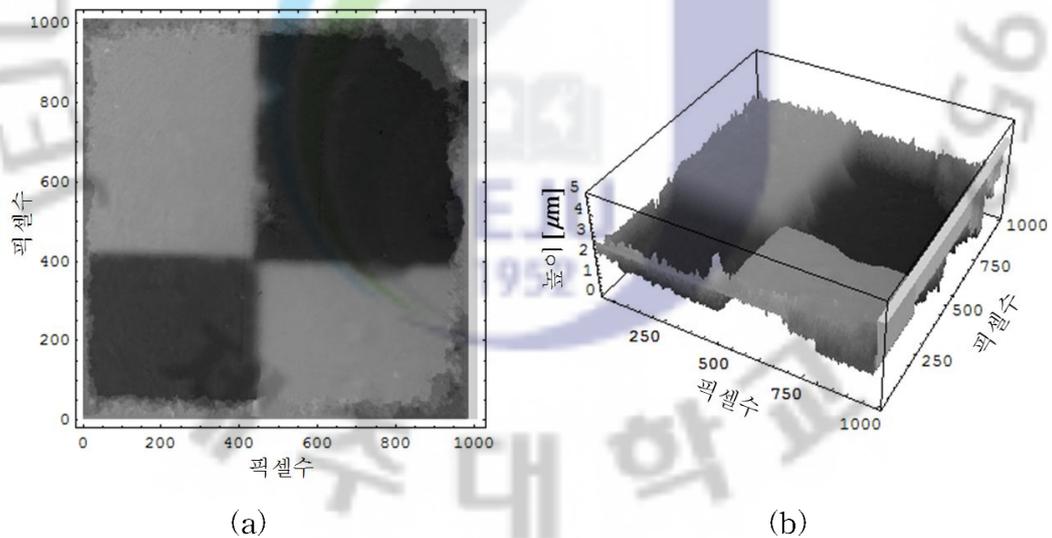


그림 16. 홀로그래피 측정 결과.

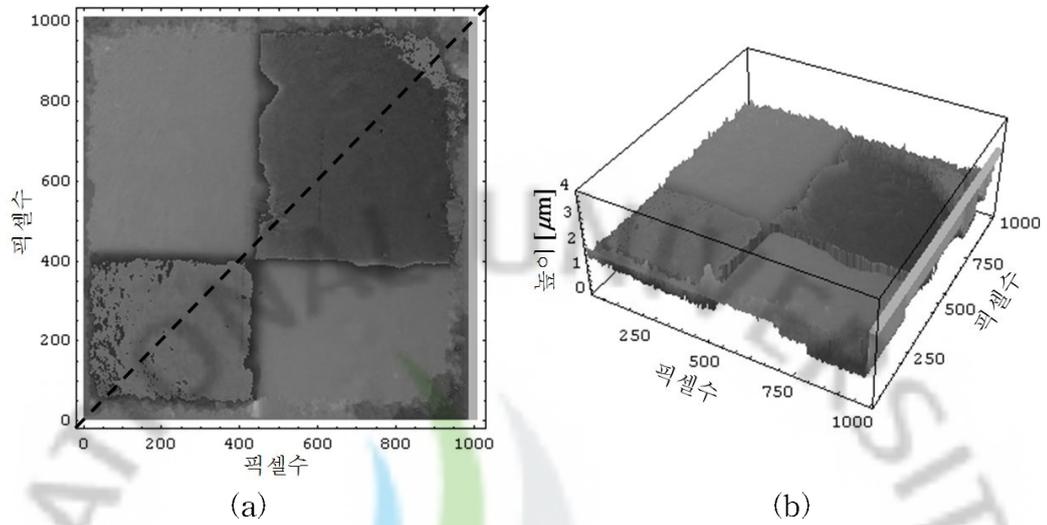


그림 17. 그림 16에 대한 3차원 상 보정.

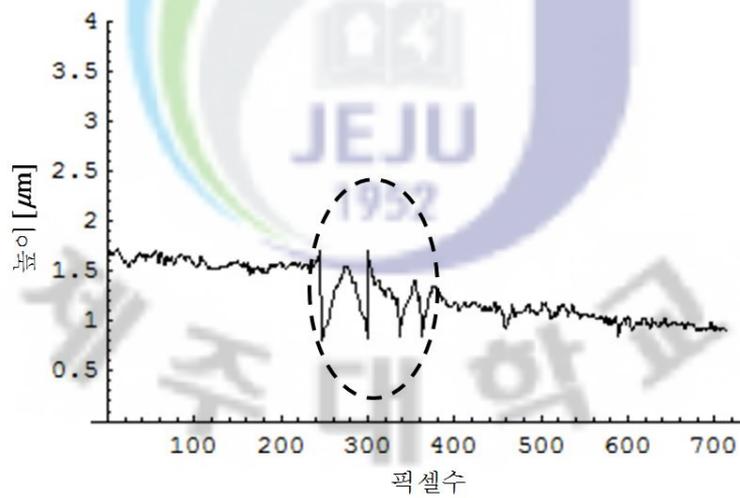


그림 18. 그림 17(a)에서 점선의 단면.

그림 17은 슬라이드 글라스 부분의 굴절률과 글리세린으로 채워 놓은 부분의 굴절률을 보상하여 주므로, 그림 16과 비교하였을 때, 광경로차에 의한 단차가 보상되어진 것을 확인할 수 있었다. 또한 그림 17(a)에 점선을 단면에서 시료 이외의 영역을 제외하고 확인하여 보면 그림 18과 같다.

2) 증류수를 채워 넣은 시료

글리세린 시료와 동일한 방법으로 30 %의 플루오르화수소와 반응하여 식각된 슬라이드 글라스에 증류수를 채우고, 일정한 높이가 되도록 시료 상부에 커버글라스를 압착하여 고정한 후, 두 과장 홀로그래피 현미경을 사용하여 3차원 상을 측정하였다. 시료의 홀로그래피를 측정 후 재생 결과는 그림 19와 같고, 사용된 증류수의 굴절률은 1.330이다.

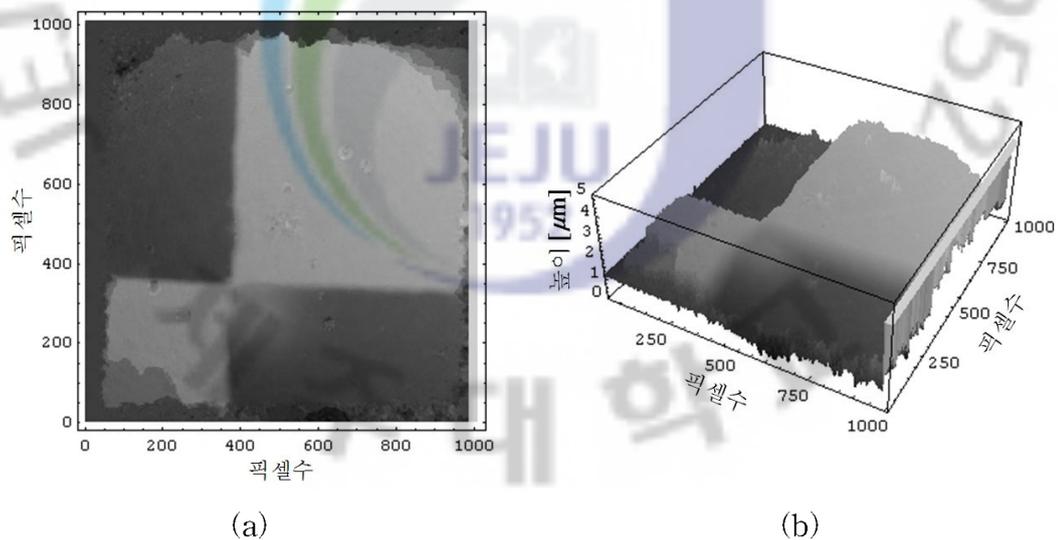


그림 19. 홀로그래피 측정 결과.

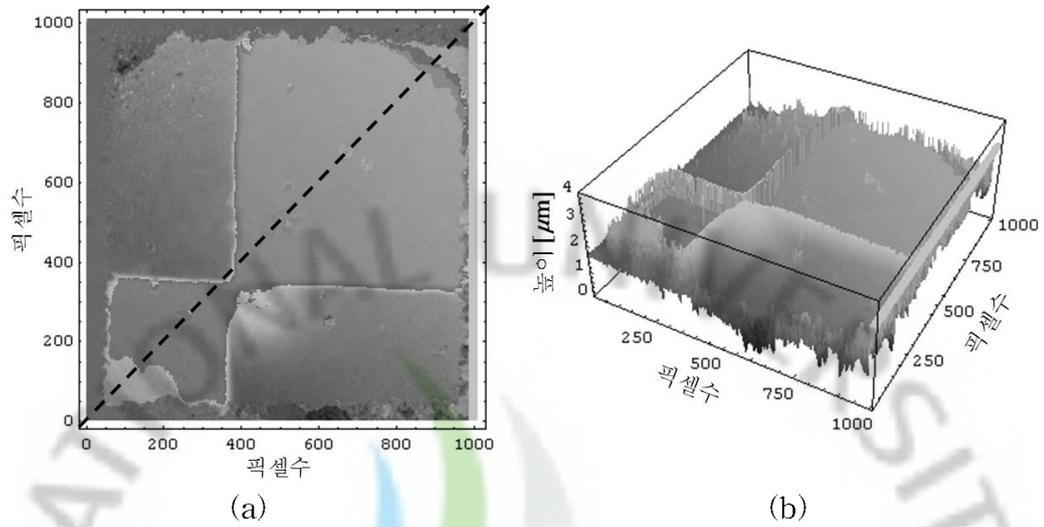


그림 20. 그림 19에 대한 3차원 상 보정.

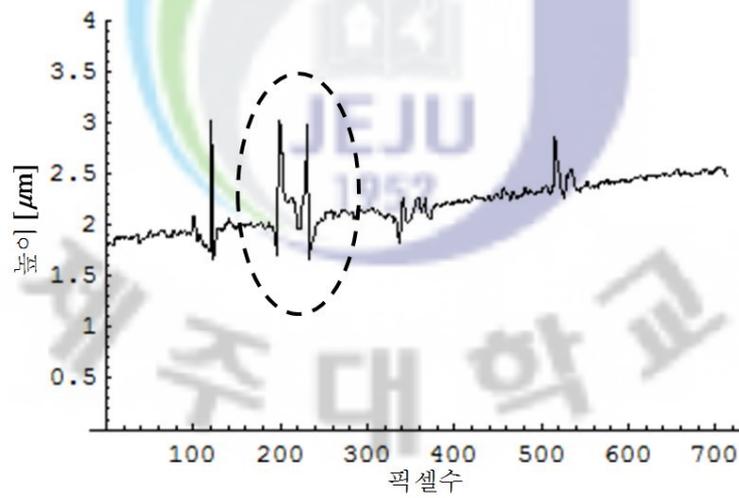


그림 21. 그림 20(a)에서 점선의 단면.

홀로그래피를 재현한 그림 19에 높은 부분은 유리이고, 낮은 부분이 증류수를 채워 놓은 부분에 해당 되며, x축과 y축의 한 픽셀은 $0.89 \mu\text{m}$ 이다. 두 영역의 광경로차가 532 nm파장에서 $1.751 \mu\text{m}$, 633 μm 에서 $1.823 \mu\text{m}$ 로 측정되었다. 여기서 광경로차는 시료의 단차에 해당된다. 유리의 굴절률은 알고 있으므로, 식 (2,26)을 이용하여 증류수의 굴절률을 계산한 결과는 1.380이며, 상대오차는 3.772 %이다.

이상의 결과에서 측정된 위치에 따른 굴절률을 그림 19에 적용하여 실제의 크기로 3차원 상을 보정하면 그림 20과 같다. 그림 20은 슬라이드 글라스 부분의 굴절률과 증류수로 채워 놓은 부분의 굴절률을 보정하여 주므로, 그림 19와 비교하였을 때, 광경로차에 의한 단차가 보정되어진 것을 확인할 수 있었다. 또한 그림 20(a)에서 점선의 단면을 시료 이외의 영역을 제외하고 확인하여 보면 그림 21과 같다.

그림 18과 그림 21에서 시료가 전체적으로 기울어진 것을 확인할 수 있다. 이는 시료가 광축에 대해 기울어진 상태로 측정되었기 때문이며, 가운데 점선 영역은 식각 작업 패턴의 경계면이 과잉 식각되는 일반적인 현상에 기인한 것으로 사료된다.

이러한 결과로부터, 굴절률이 서로 다른 두 개의 시료 중 하나의 굴절률을 알고 있다면, 두 파장 디지털 홀로그래피를 이용하여 알려지지 않은 시료의 굴절률과 실제 크기와 동일한 3차원 상을 재생 할 수 있음을 확인 할 수 있었다.

V. 결 론

본 연구는 홀로그래피를 이용하여 3차원 상을 재생하고, 시료의 굴절률이 위치에 따라 상이한 경우 위치에 따른 굴절률을 측정하여, 광경로 길이로 재현된 3차원 상을 실제 크기로 재구성하는 것을 목적으로 하였다. 이를 위하여 두 파장 홀로그래피를 구성하였으며, 2개의 시료에 대한 3차원 상을 재현하여 위치에 따른 굴절률을 측정하였으며, 실제 크기로 재구성한 3차원 상을 획득하였다.

두 파장 홀로그래피를 이용한 굴절률 측정의 타당성을 조사하기 위해 선행한 전산기 시뮬의 결과, 1.444 %의 상대오차 결과를 얻었으며, 이를 이용하여 실제 크기의 3차원 상을 재생 할 수 있었다. 이때, 1.444 %의 상대오차를 보인 것은 파장에 따라 굴절률이 다르고, 서로 다른 광경로차 발생에 따른 계산적 오차에 해당한다.

본 논문에서 20 % 플루오르화수소에 식각시킨 시료는 식각된 면에 굴절률 1.450을 갖는 글리세린을 넣고 식각의 높이와 동일하게 하여 시료를 측정하였다. 그 결과 측정된 굴절률은 1.492로, 시료 제작에 사용된 실제 굴절률과 1.384 %의 상대오차를 보였다. 30 % 플루오르화수소에 식각시킨 시료는 식각된 면에 굴절률이 1.330인 증류수를 넣고 식각 높이와 동일하게 만든 것이다. 실험 결과 측정된 증류수의 굴절률은 1.380으로 시료 제작에 사용된 실제 굴절률과 3.772 %의 상대오차를 보였으며, 두 개의 시료로부터 측정된 굴절률을 적용하여 실제 크기와 동일한 3차원 상을 재생 할 수 있었다.

본 연구에서 제안한 두 파장 디지털 홀로그래피를 이용하여 물체의 3차원 상 재생과 굴절률 측정이 가능함을 알 수 있었다. 또한 반도체, LCD 제조과정, 렌즈의 검사 등과 같이 대상체의 굴절률을 알 수 있는 경우 많은 응용이 가능할 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

- [1] J. H. Jo, S. Jang, C. K. Hwangbo and D. J. Cho, Optics (Dooyangsa, Seoul, 2008).
- [2] J. W. Goodman, Introduction to Fourier Optics (Roberts & Company Publishers, USA, 2005).
- [3] H. Cho, "Study of Digital Holographic Microscope Using a Combination of Transmission-Reflection", Jeju National Uni., PhD Thesis, 2008, 8.
- [4] S. Yun, "Study of the objects to the 3-dimensional Data Extraction Using Digital Holography and Phase-Unwrapping", Jeju National Uni., Master's Thesis, 2007, 2.
- [5] G. K. Wernicke, O. Kruschke, N. Demoli and H. Gruber, SPIE **3396**, 238 (1998).
- [6] L. Xu, X. Peng, J. Miao and K. Asundi, Appl. Opt. **40**, 5046 (2001).
- [7] S. Kim, H. Lee and J. Son, Hankook Kwanghak Hoeju, **14**, 244 (2003).
- [8] C. Wangneer, S. Seebacher, W. Osten and W. Jüptner, Appl. Opt. **38**, 4812, (1999).
- [9] Y. Takaki and H. Ohzu, Appl. Opt. **38**, 2204 (1999).
- [10] L. Xu, J. Miao and A. Asundi, Opt. Eng. **39**, 3214 (1999).
- [11] H. Cho, D. Kim, Y. Yu, W. Jung and S. Shin, Hankook Kwanghak Hoeji, **17**, 329 (2006).
- [12] H. Cho, D. Kim, Y. Yu, W. Jung and S. Shin, Hankook Kwanghak Hoeji, **18**, 303 (2007).
- [13] E. Cucho, P. Marquet and C. Depeursinge, Appl. Opt. **38**, 6994 (1999).
- [14] M. Jeong, N. Kim and J. H. Park, J. Korean Opt. Soc. **12**, 275 (2008).
- [15] L. P. Yaroslavskii and N. S. Merzlyakov, Methods of Digital Holography, (Consultants Bureau, New York, 1980).
- [16] D. Kim, B. J. Baek, Y. D. Kim and B. Javidi, J. Korean Opt. Soc. **11**,

- 108 (2007).
- [17] J. W. Kang and C. K. Hong, *J. Korean Opt. Soc.* **10**, 178 (2006).
- [18] U. Schnars and W. Juepther, *Digital Holography*, edited by U. Schnars and W. Juepther (Springer, Heidelberg, 2005).
- [19] H. Cho, J. Lim, D. C. Kim, S. Shin and Y. Yu, *J. Korean Phys. Soc.* **53**, 2391 (2008).
- [20] J. Kün, F. Charrière, T. Colomba, E. Cuche, Y. Emery and C. Depeursinge, in *Proceedings of the 2006 Optical Micro- and Nanometrology in Microsystems Technology*, (Strasbourg, France, April 5, 2006), SPIE. Vol. 6188, pp.618804-618814.
- [21] W. Kebbel, H. J. Hartmann and W. Jüptner, *SPIE.* **4398**, 189 (2001).
- [22] U. Schnars and W. Jüptner, *Appl. Opt.* **33**, 179 (1994).
- [23] C. Wagner, S. Seebacher, W. Osten and W. Jüptner, *Appl. Opt.* **38**, 4812 (1999).
- [24] Coppola G. De Nicola S, Ferraro P, Finizio A, Grilli S, Iodice M, Magra C and Pierattini G, *SPIE.* **4933**, 226 (2003).
- [25] E. Cuche, P. Poscio and C. Depeursinge, *J. Opt. Paris.* **28**, 260 (1997).
- [26] T. Zhang and I. Yamaguchi, *Opt. Lett.* **23**, 1221 (1998).
- [27] M. Lieblich, T. Blu and M. Unser, *J. Opt. Soc. Am.* **A21**, 367 (2004).
- [28] D. Malacara, *Optical Shop Testing* (Wiley, New York, 1992).
- [29] M. Servin and F. J. Cuevas, *J. Mod. Opt.* **42**, 1853 (1995).
- [30] S. H. Baik, S. K. Park and S. J. Kim, *J. Korean Phys. Soc.* **39**, 891 (2001).
- [31] C. S. Rim, *J. Korean Phys. Soc.* **46**, 488 (2005).
- [32] Howard A. Zebker and Yanping Lu, *J. Opt. Soc. Am. A.* **15**, 586 (1998).
- [33] Vyacheslav V. Volkov and Yimei Zhu, *Opt. Lett.* **28**, 2156 (2003).
- [34] D. C. Ghiglia, M. D. Pritt and John Wiley & Sons. Ch3-Ch5, 1998.
- [35] H. Cho, D. Kim, S. Shin, W. Jang, J. Son and Y. Yu, *J. Kor. Phys.*

- Soc. **52**, 1031 (2008).
- [36] T. Kreis and W. Jupter, *Opt. Eng.* **36**, 2357 (1997).
- [37] J. Gass, A. Dako and M. K. Kim, *Opt. Lett.* **28**, 1141 (2003).
- [38] Y. Fu, G. Pedrini, B. Hennelly, R. Groves and W. Osten, *Opt. Laser Technol.* **47**, 552 (2008).
- [39] P. Ferraro, S. D. Nicola, G. Coppola, A. Finizio, D. Alfieri and G. Pierattini, *Opt. Lett.* **29**, 844 (2004).
- [40] N. Demoli, D. Vukicevic and M. Torzynski, *Opt. Exp.* **11**, 767 (2003).
- [41] S. Shin and Y. Yu, *J. Kor. Opt. Soc.* **13**, 173 (2009).



ABSTRACT

3-dimensional Information and Refractive Index Measurement Using a Dual-wavelength Digital Holographic Microscope

Digital hologram technology uses semiconductor recording device such as CCD(Charge Coupled Device) to obtain hologram information of the sample. Moreover, it could acquire 3-dimension information of the sample by using numerical 3-dimension image reconstruction method. However, optician must be accurately informed of the refractive index and 3-dimension shape of the sample to get 3-dimension information from digital holography method. To solve the problem, the experiment was done by using two wavelength digital holography microscope which provides precise refractive index and shape of the sample. As a result of using two wavelength digital holography microscope, the experimenter could calculate refractive index of the sample using different phase of hologram, also, measured refractive index and 3-dimension shape simultaneously to get the accurate 3-dimension information.

Keywords : Digital holography, 3-dimension image reconstruction, Phase unwrapping