

이중푸리에변환을 이용한 2 파장 디지털 홀로그래픽 연구

신상훈¹ · 정원기² · 유영훈^{3†}

¹AP & Tec

Ⓞ 135-539 AP & Tec, 서울 강남구 수서동

²전주대학교 전기전자정보통신공학부

Ⓞ 560-759 전주시 완산구 효자동 3가 1200

³제주대학교 물리학과

Ⓞ 690-756 제주시 아라1동 1번지

(2010년 4월 26일 받음, 2010년 5월 31일 수정본 받음, 2010년 6월 1일 게재 확정)

디지털 홀로그램을 이용하여 상을 재생 할 때 재생상의 크기는 재생거리와 파장의 함수이다. 이러한 재생거리와 파장 의존성을 제거하기 위하여 이중푸리에변환법이 제안되었고, 이중푸리에변환을 이용하면 일정 크기의 재생상을 얻을 수 있다. 일반적으로 사용된 광원의 파장보다 큰 단차의 높낮이 측정은 단일파장 디지털 홀로그래픽 방식으로 측정이 가능하지 않기 때문에 2 파장 홀로그래피가 제안되었는데, 두 파장에서 얻어진 각각의 재생상의 크기가 같아야 하는 제약이 있다. 본 연구에서는 투과 및 반사형 2 파장 디지털 홀로그래픽 현미경을 이용하여 각각의 파장별로 홀로그램을 촬영하고 이중푸리에변환을 이용하여 재생함으로써 두개의 파장에서 얻어진 재생상의 크기를 같게 만들어 주는 과정 없이 단차를 가진 샘플의 3차원 높낮이 측정을 할 수 있었다.

Study on the Two-wavelength Digital Holography Using Double Fourier Transform

Sanghoon Shin¹, Wonki Jung², and Younghun Yu^{3†}

¹AP & Tec, Suseo-dong, Gangnam-gu, Seoul 135-539, Korea

²School of Electrical Engineering, Jeonju University, Jeonju 560-759, Korea

³Department of Physics, Cheju National University, Jeju 690-756, Korea

(Received April 26, 2010; Revised manuscript May 31, 2010; Accepted June 1, 2010)

The size of a reconstructed image depends on the reconstruction distance and wavelength. The double fourier transform method is proposed to eliminate the dependence on the reconstruction distance and wavelength. We can get a fixed reconstructed image size by using the double fourier transform method. Two wavelength digital holography is proposed to measure the step height, which is larger than a single wavelength. The two image size of different wavelength holograms should be the same in order to apply two wavelength digital holography. We use two wavelength digital holography and double fourier transforms to measure the step height. The measured data were reasonable and we found that the double fourier transform is useful in two wavelength digital holography.

Keywords: Holography, Digital holography, Double fourier transform

OCIS codes: (090.0090) Holography; (090.1760) Computer holography; (070.2590) Fourier transforms

I. 서 론

디지털 홀로그램 기술은 기존의 홀로그램 기술(홀로그램 건판을 사용하여 사진 촬영과 같은 방식의 기록과 참조광 제공에 의한 3차원 영상을 재생하는 방법)로부터 출발하여

CCD(Charge Coupled Device)와 같은 동영상 기록 장치를 이용하여 실시간으로 측정 대상체의 홀로그램 데이터를 획득하고, 수치적 3차원 영상 재생의 방법으로 측정 대상체의 3차원 데이터를 획득하는 방법이다. 이러한 방법은 약 30년 전 개념적 방법론이 제안되어, CCD의 발전과 컴퓨터 연산

†E-mail: yyhyoung@cheju.ac.kr

속도의 발전으로 수치적 3차원 영상 재생의 방법이 발전하여 현재 실용적 용도에 적용하기 위한 다수의 연구들이 세계적으로 활발히 진행되고 있다^[1-5]. 이와 같이 측정 대상체의 3차원 데이터는 홀로그램 방법으로 기록함으로써 1회 촬영으로 측정 대상체의 3차원 데이터를 획득하고, 수치적 재생으로 측정 대상체의 3차원 데이터를 재구성하여 표시 할 수 있으므로 3차원 데이터 획득, 처리, 표시 면에 있어서 앞서 개발되어온 첨단 현미경들에 비하여 비교할 수 없을 정도의 성능 향상을 기대할 수 있다. 이러한 3차원 데이터 관련 능력으로 보다 다양한 측정 대상체의 데이터 표시 욕구를 충족시킬 수 있어서 다양한 응용이 예상되어진다^[6-9].

디지털 홀로그램은 홀로그램 필름 대신에 CCD를 이용함으로써 CCD에 입력된 정보는 홀로그래픽용 필름에 감광된 현상과 일치하며 홀로그램의 일반 원리와 이론적으로 동일하다.

이러한 디지털 홀로그램의 장점에도 불구하고 간섭을 이용한 측정이기 때문에 파장보다 큰 단차가 있는 경우에는 3차원 측정이 어렵다. 이러한 단차 문제를 해결하기 위하여 2파장을 이용한 홀로그래픽 방법이 제시 되었다^[10, 11]. 즉 다른 파장을 이용하여 원래 사용한 파장보다 큰 유사파장에 의한 위상차를 측정하는 방법이다. 그러나 2개의 다른 파장을 이용하여 홀로그램을 얻고 이를 재생하여 유사 파장에 대한 위상차 정보를 얻기 위해서는 2개의 재생상의 크기가 같아야 한다. 이를 위하여 상을 재생하고 크기를 조절하는 방법이 사용되고, 이 과정에서 오차가 발생할 수 있다.

최근 디지털홀로그램 재생 시 이중푸리에변환(Double Fourier Transform)을 이용하여 이미지 크기가 재생거리에 의존하지 않고 영상을 재생할 수 있는 방법이 제시되었다^[12]. 이 방법을 이용하면 재생거리에 상관없이 일정 크기의 영상을 재생할 수 있다.

본 연구에서는 이중푸리에변환을 2 파장 홀로그램에 이용하여 재생상의 크기를 조절하지 않고 파장 보다 큰 단차가 있는 시료의 단차를 측정 할 수 있는 방법에 대하여 연구하였다.

II. 이론적 배경

2.1. 디지털 홀로그램의 기록과 재생

디지털 홀로그래픽 현미경에서 홀로그램 데이터는 CCD로 입력되는 물체광(O)과 참조광(R)의 간섭에 의하여 주어진다. 그림 1과 같이 렌즈의 초점거리가 f인 in-line 투과형 디지털 홀로그래피 현미경을 고려하자.

CCD에 형성되는 2차원 홀로그램의 빛 세기는 식 (1)과 같다.

$$I_h(x, y) = |R|^2 + |O|^2 + R^*O + RO^* \tag{1}$$

일반적으로 디지털 홀로그래픽에서 홀로그램을 저장하는 장치로 CCD를 사용한다. CCD의 사양은 픽셀 수 $N_x \times N_y$, 픽셀크기($\Delta x \times \Delta y$)와 센서 크기($L_x \times L_y$)로 주어진다. CCD의 (k, l) 픽셀에 저장되는 간섭세기 정보는 식 (2)와 같다.

$$I_h(k, l) = I_h(x, y) \text{rect}\left(\frac{x}{L_x}, \frac{y}{L_y}\right) \sum_{k=-N_x/2}^{N_x/2} \sum_{l=-N_y/2}^{N_y/2} \delta(x - k\Delta x, y - l\Delta y) \tag{2}$$

식 (2)와 같이 참조광과 물체광에 의한 홀로그램 데이터는 수치적 영상 재생에 이용된다. 수치적 재생 파동은 참조광과 홀로그램데이터(I_h)를 이용하여 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\Psi = RI_h = R |R|^2 + R |O|^2 + RR^*O + RRO^* \tag{3}$$

프레넬(Fresnel) 공식을 이용하여 영상이 맺히는 지점에서의 파동분포는 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} \Psi(\xi, \eta) = & A \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda S} (\xi^2 + \eta^2)\right] \\ & \times \int \int I_h(x, y) \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda S} (x^2 + y^2)\right] \exp\left[\frac{i2\pi}{\lambda S} (x\xi + y\eta)\right] dx dy \end{aligned} \tag{4}$$

여기서 λ 는 사용된 빛의 파장이고 S 는 CCD 에서 영상이

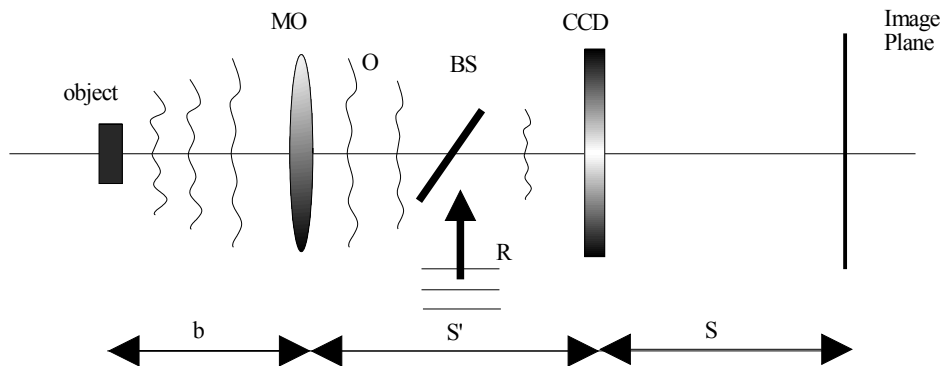


FIG. 1. Digital holography microscope and image reconstruction. MO: magnification lens, R: reference wave, O: objective wave, BS: beam splitter, b: distance between object and lens, S', distance between lens and CCD, S; distance between reconstruction plane and CCD.

재생되는 곳까지의 거리, A는 상수이다. 식 (4)는 $I_h(x,y)exp[\frac{i\pi}{\lambda S}(x^2+y^2)]$ 을 공간 주파수로($\xi/\lambda S, \eta/\lambda S$) 푸리에변환(Fourier Transformation) 한 것이다. 식 (4)를 이용하여 명암대비영상과 위상영상을 구할 수 있다. 식 (4)에서 보는 것과 같이 재생영상의 크기는 재생거리(S)와 파장(λ)의 함수이다.

2.2. 이중푸리에 변환

홀로그램을 이용하여 재생거리 S 일 때 식 (4)를 간단히 쓰면 식 (5)와 같다.

$$\Psi(\xi, \eta, S) = \Psi(\xi, \eta) \exp(i\pi\lambda S \chi^2) \quad (5)$$

식 (5)에서 $\chi^2 = \left(\frac{\xi}{\lambda S}\right)^2 + \left(\frac{\eta}{\lambda S}\right)^2$ 이다. 이것을 선형시스템 이론을 이용하여 그림 2와 같이 변환하는 과정을 쓰면 식 (6)과 같다^[12, 13].

$$\begin{aligned} \Psi(\xi, \eta, z_1) &= \Psi(\xi, \eta) \exp(i\pi\lambda z_1 \chi_1^2) \\ \Psi(\xi, \eta, z_2) &= \Psi(\xi, \eta, z_1) \exp(i\pi\lambda z_2 \chi_2^2) \\ \chi_1^2 &= \left(\frac{\xi}{\lambda z_1}\right)^2 + \left(\frac{\eta}{\lambda z_1}\right)^2, \chi_2^2 = \left(\frac{\xi}{\lambda z_2}\right)^2 + \left(\frac{\eta}{\lambda z_2}\right)^2 \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)에서 $S = z_1 + z_2$ 이고, $\Psi(\xi, \eta, z_1)$ 은 그림 2의 푸리에 변환 중간 면에서의 재생상을 공간 주파수로 나타낸 것이고, $\Psi(\xi, \eta, z_2)$ 는 식 (5)의 재생상과 같다. 이와 같이 이중푸리에 변환을 통해 재생상을 얻는 방법을 이중푸리에변환이라 한다. 식 (6)에서 가상 초점 μ 를 식 (7)과 같이 도입하자^[12].

$$\mu = \frac{Np_H^2}{\lambda S}, \mu_1 = \frac{Np_H^2}{\lambda z_1}, \mu_2 = \frac{N\Delta X_1^2}{\lambda z_2} \quad (7)$$

식 (7)에서 $p_H \Delta X_1$ 은 각각 홀로그램 면과 중간 푸리에 변환면에서의 이미지의 픽셀크기이고, $\Delta X_1 = p_H/\mu_1$ 의 관계가 있다. 이미지 면에서의 픽셀크기를 ΔX_2 라고 하면 $\Delta X_2 = \Delta X_1/\mu_2$ 와 같이 쓸 수 있고, 이를 재생거리 z_1, z_2 를

이용하면 식 (8)과 같이 나타 낼 수 있다.

$$\Delta X_2 = \frac{z_2}{z_1} p_H = p_H \left(\frac{\mu_1}{\mu} - 1\right) \quad (8)$$

식 (8)로부터 재생상의 픽셀크기를 이중푸리에변환을 이용하여, 즉 거리 z_1, z_2 를 이용하여 조절할 수 있음을 알 수 있다. 즉 재생상의 크기를 조절할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 식 (8)에서 이미지 크기가 가상 초점과 관계가 있으므로 파장과 재생거리에 의존한다. 그러나 가상 초점 μ_1/μ 를 식 (9)와 같이 정하면 파장과 재생거리에 의존하지 않게 할 수 있다^[12].

$$\frac{\mu_1}{\mu} = 1 + \frac{S_{view}}{S_H} \quad (9)$$

식 (9)에서 S_{view}, S_H 는 각각 재생상의 크기와 홀로그램 면, 즉 CCD의 크기이다. 가상 초점간의 관계를 식 (9)와 같이 정하면, 즉 재생상의 크기를 먼저 정하면, 식 (8)에서 알 수 있듯이 재생면에서의 픽셀 크기가 정해짐으로 거리와 파장에 관계없이 일정 크기의 재생상을 얻을 수 있다.

III. 전산기 시능

그림 3과 그림 4는 거리와 파장의 함수로 재생한 단일푸리에변환을 이용한 재생상과 이중푸리에변환을 이용한 재생상이다. 그림 3, 그림 4의 (a)와 (d)는 각각 시료의 모양과 홀로그램 모양이다. 그리고 시료이미지의 크기는 $L \times L$ 이다. 그림 3의 (b)와 (c)는 $0.6 \times 10^{-6}m$ 의 파장의 빛을 이용하고, 재생거리(S) 25*L과 30*L을 이용하여 재생한 상이다. 예상했던 것과 같이 거리에 따라 재생상의 크기가 달라짐을 볼 수 있다. 그림 3의 (e)와 (f)는 $0.6 \times 10^{-6}m$ 의 파장의 빛을 이용하고, 중간 재생거리(z_1)를 250*L과 180*L을 이용하고, 이중푸리에변환을 이용하여 재생한 상이다. 이결과는 재생거리(S)가 다름에도 불구하고 재생상의 크기가 같음을 볼 수 있다.

그림 4는 재생거리를 일정하게 놓고, 파장을 변화시켰을 때의 결과이다. 그림 4의 (b)와 (c)는 재생거리가 30*L 일 때, $0.6 \times 10^{-6}m, 0.5 \times 10^{-6}m$ 파장과 단일푸리에변환을 이용하여 재생한 재생상이고, (e)와 (f)는 이중푸리에변환을 이용하여 얻은 재생상이다. 그림 4의 (b)와 (c)의 결과는 예상했던 것과 같이 파장에 따라 재생상의 크기가 달라짐을 볼 수 있다. 그림 4의 (e)와 (f)는 이중푸리에변환을 이용하여 재생한 영상으로 파장이 다름에도 재생상의 크기가 동일함을 확인 할 수 있다. 그림 3과 그림 4에서 재생상은 식 (3)에 있는 것과 같이 허상, 실상, DC 항이 모두 포함된 재생상으로 상이 뚜렷하지 않다. 이러한 이중상과 DC 항은 수학적으로 제거 할 수 있다. 실험 결과에서는 이중상과 DC 항이 제거된 결과를 보여줄 것이다.

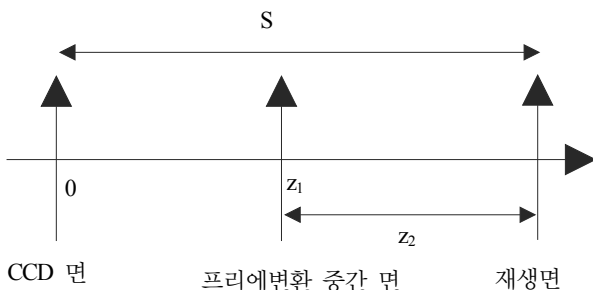


FIG. 2. Double fourier transform.

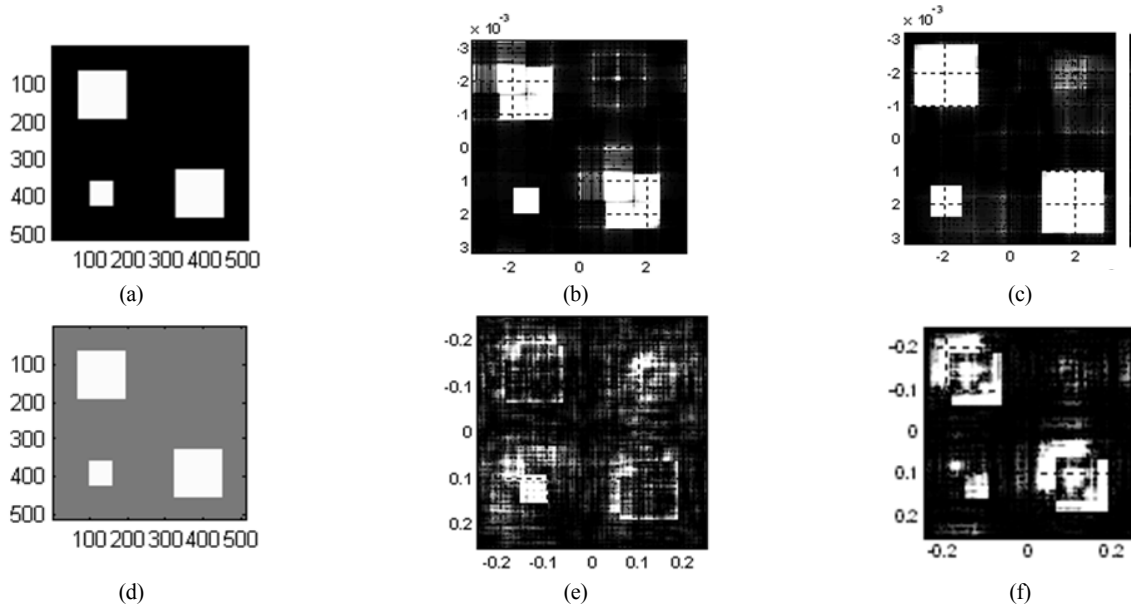


FIG. 3. reconstructed images at different reconstruction distances (wave length= $0.6 \times 10^{-6} m$) (a) object, (b) reconstructed image by single fourier transform at reconstructed distance of $25 * L$, (c) reconstructed image by single fourier transform at reconstructed distance of $30 * L$, (d) hologram, (e) reconstructed image by double fourier transform ($z_1=280 * L$, $S=2800 * L$), (f) reconstructed image by double fourier transform ($z_1=180 * L$, $S=1800 * L$).

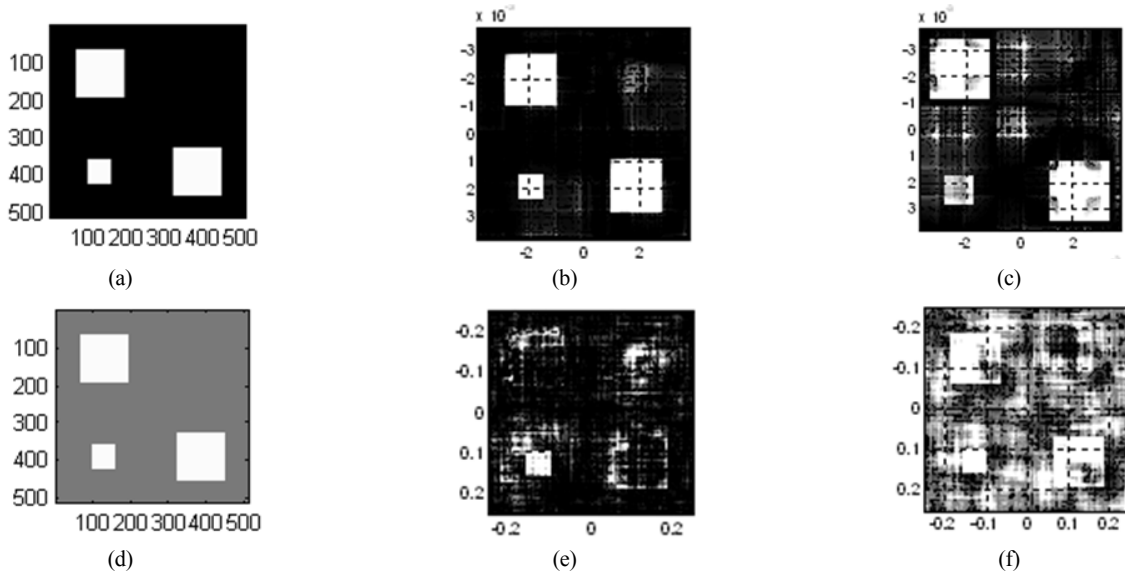


FIG. 4. reconstructed images with different wavelengths (a) object, (b) reconstructed image by single fourier transform (reconstruction distance= $30 * L$, wavelength= $0.5 \times 10^{-6} m$), (c) reconstructed image by single fourier transform (reconstruction distance= $30 * L$, wavelength= $0.6 \times 10^{-6} m$), (d) hologram, (e) reconstructed image by double fourier transform (reconstruction distance $z_1=280 * L$, $S=2800 * L$, wavelength= $0.5 \times 10^{-6} m$), (f) reconstructed image by double fourier transform (reconstruction distance $z_1=280 * L$, $S=2800 * L$, wavelength= $0.6 \times 10^{-6} m$).

IV. 실험결과

그림 5는 2 파장 in-line 투과형 및 반사형 홀로그래픽 현미경의 개략도이다. 기본적인 구성은 마흐젠더 간섭계와 같다. 사용한 광원은 10 mW He-Ne 레이저와 다이오드 레이저이고, 시료를 투과한 영상을 확대하기 위하여 현미경 대물렌

즈 ML(Mitutoyo M PLAN APO 50X, NA=0.55)을 사용하였다. 필터(VN)는 간섭 문양의 명암대비가 최대인 홀로그래프를 얻기 위하여 사용하였다. 홀로그래프를 저장하기 위하여 CCD (Sony IPX1M48)를 사용하였고, CCD의 픽셀크기는 $7.4 \mu m \times 7.4 \mu m$ 이고 픽셀 개수는 1024×1024 이다. 본 연구에서는 CCD의 위치를 ML에서 9 cm 떨어진 지점에 위치하였다.

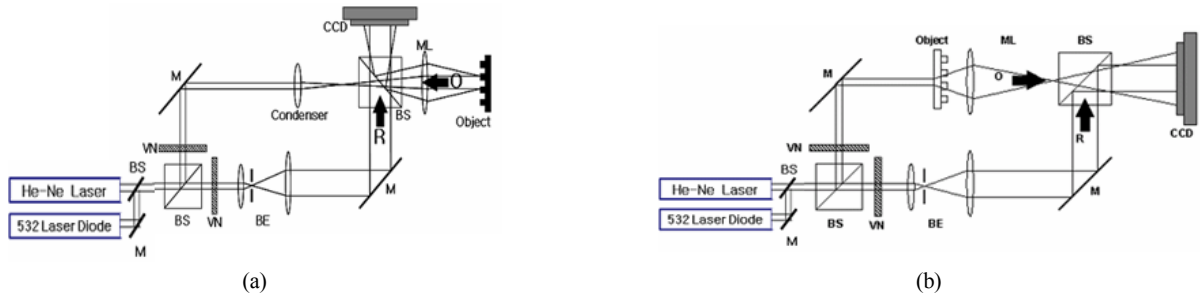


FIG. 5. Schematic diagram of experimental set-up (a) reflection two wavelength digital holographic microscope (b) transmission two wavelength digital holographic microscope. M: mirrors, VN; Variable neutral density filters, ML; micro lenses, BS; Beam Splitters.

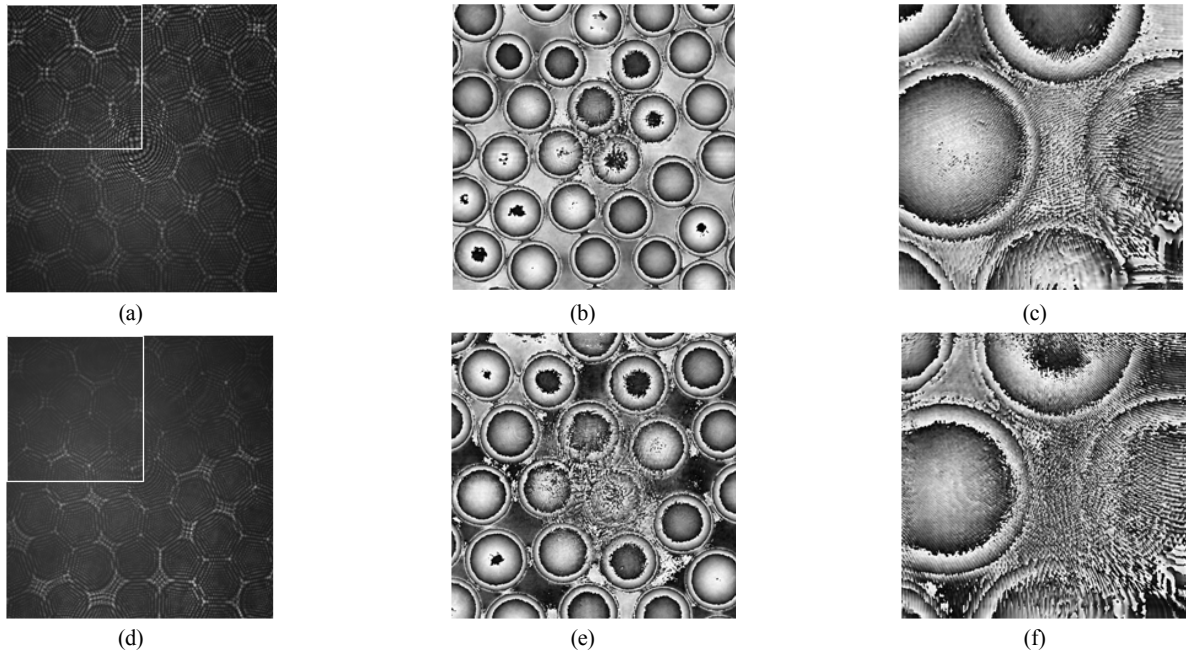


FIG. 6. Comparison between reconstructed phase image by single fourier transform and double fourier transform (a),(d) hologram with 633 nm and 532 nm wavelength, respectively, (b), (e) reconstructed images by single fourier transform with hologram (a) and (d), respectively, (c), (f) reconstructed images by double fourier transform with hologram (a) and (d), respectively.

그림 6은 광학 확산판을 in-line 투과형 홀로그래픽 실험장치를 이용하여 얻은 홀로그램과 이를 재생한 결과이다. 그림 6 (a)와 (d)는 각각 He-Ne(633 nm) 레이저와 다이오드레이저(532 nm)를 이용하여 얻은 홀로그램이고, 그림 6의 (b)와 (e)는 재생거리 30 cm와 단일푸리에변환을 이용하여 얻은 재생상이며, 그림 6의 (c)와 (f)는 이중푸리에변환을 이용하여 얻은 재생상이다. 특히 그림 6 (c), (f)는 그림 6 (a),(d)의 백색 사각형 부분을 재생한 것이다. 그림 6의 (b)와 (e)에서 픽셀 크기는 각각 25 μm , 21 μm 이며, 그림 6의 (c)와 (f)에서 픽셀크기는 동일하게 14.8 μm 이다. 그림 6의 (b)와 (e)의 결과에서 재생된 상이 크기가 서로 상이함을 볼 수 있다. 이는 앞에서 논의 한 바와 같이 단일푸리에변환에 의한 재생상의 크기는 파장과 거리에 의존 한다는 결과와 같다. 그러나 그림 6의 (c)와 (f)는 이중푸리에변환을 이용한 결과로 먼저 이미지 크기를 정하고 푸리에변환을 한 것이므로 파장이 다른 예도 불구하고 재생상의 크기가 동일함을 볼 수 있는데, 이

는 전산기 시뮬에서 얻은 결과와 같다.

그림 7은 반사형 2 파장 홀로그래픽을 이용하여 파장보다 큰 단차(약 2 μm)가 있는 TFT(Thin Film Transistor)를 측정 한 실험결과이다. 시료의 크기는 약 35 $\mu\text{m} \times 35 \mu\text{m}$ 이다. 2 파장 홀로그래픽을 이용하여 단차를 측정하기 위해서는 각 파장에서 측정한 위상영상의 크기가 동일하여야 한다. 이를 위해서 단일푸리에변환을 이용하여 위상영상을 얻는 경우에는, 각 파장에서 위상영상을 얻고 두 위상영상의 크기를 동일하게 해주는 작업이 필요하다. 그러나 이중푸리에변환을 이용하는 경우에는 재생상의 크기를 재 조절하는 작업이 필요 없이 동일한 크기의 위상영상을 얻을 수 있다. 그림 7의 (a)와 (b)는 633 nm 파장과 532 nm 파장을 이용하여 얻은 홀로그램과 이중푸리에변환을 이용하여 얻은 위상영상이다. 파장이 다른 예도 각 파장에서 얻은 위상영상의 크기가 동일함을 알 수 있다. 그림 7의 (a)와 (b)를 이용하여 그림 7의 (c)와 같이 유사파장에 의한 위상영상을 얻을 수 있다^[10]. 그

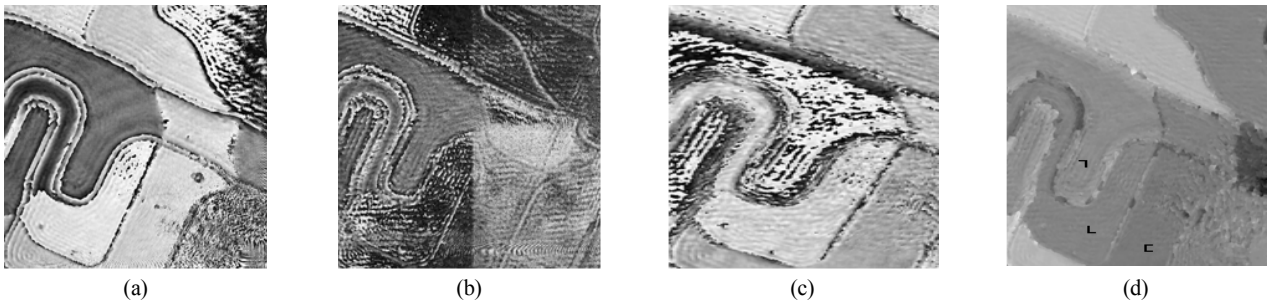


FIG. 7. Reconstructed phase image by double fourier transform (a),(b) reconstructed phase image with hologram (633 nm), (b) reconstructed phase image with hologram (633 nm), (c) reconstructed phase image with phase image (a) and (b), (d) 3-dimension gray level image.

림 7의 (d)는 그림 7(c)를 이용하여 위상 펼침을 한 3차원 모양이다. 그레이 레벨로 높낮이를 표시하였으며 가장 밝은 곳이 가장 높은 곳이다.

그림 7(d)에서 보듯이 ㄱ, ㄴ, ㄷ 지역이 각각의 단차를 가지고 있는 것을 알 수 있다. 단일 레이저광원만을 사용한 경우에 그림 7(d)와 같은 단차를 찾아낼 수 없었다.

그림 6, 그림 7의 결과로부터, 이중푸리에변환을 이용하면, 파장에 의존하지 않고 원하는 크기의 이미지를 얻을 수 있음을 확인 할 수 있고, 이를 2 파장 홀로그래피에 이용하면 재생된 영상의 크기를 재조정 할 필요 없이 파장 보다 큰 단차를 측정 할 수 있음을 알 수 있다.

V. 결 론

디지털홀로그래피에서 홀로그램을 이용하고, 수식적으로 3차원 영상을 얻을 수 있는데, 이때 재생된 상의 크기는 재생거리와 파장의 함수이다. 그리고 디지털 홀로그래피의 문제점 중 하나는 파장보다 큰 단차를 측정할 수 없다는 것이다. 이러한 단점을 해결하기 위하여 2 파장 홀로그래피가 제안되었다. 2 파장 홀로그래피를 이용하여 파장보다 큰 단차를 측정하기 위해서는 다른 파장으로부터 얻어진 홀로그램을 이용하여 위상영상을 만들고 이를 이용하는 것이다. 이때 두 위상영상의 크기가 동일하여야 한다. 그러나 재생상의 크기가 파장과 재생거리의 함수이기 때문에 동일한 크기의 위상영상을 얻기 위해서는 재생상의 크기를 조절하는 과정이 필수적이다. 최근 이중푸리에변환을 이용하여 재생상의 크기가 재생거리와 파장에 의존하지 않는 방법이 제안되었다. 본 연구에서는 이중푸리에변환을 이용하여 재생상의 크기가 파장과 거리에 의존 하지 않음을 전산기 시뮬과 실험을 통해 확인하였고, 이를 2 파장 홀로그래피에 적용하여 파장보다 큰 단차를 측정하는데 응용할 수 있음을 실험을 통하여 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 산업자원부 차세대신기술개발사업 지원으로 수행되었습니다.

References

1. J. W. Goodman and R. W. Lawrence, "Digital image formation from electronically detected holograms," *Appl. Phys. Lett.* **11**, 77-79 (1967).
2. M. A. Kronrod, N. S. Merzlyakov, and L. P. Yaroslavski, "Reconstruction of hologram with a computer," *Sov. Phys. Tech.* **17**, 434-444 (1972).
3. G. K. Wernicke, O. Kruschke, N. Demoli, and H. Gruber, "Investigation of-micro-opto-electro-mechanical components with a holographic microscopic interferometer," *Proc. SPIE* **3396**, 238-243 (1998).
4. L. Xu, X. Peng, J. Miao, and K. Asundi, "Studies of digital microscopic with application to microstructure testing," *Appl. Opt.* **40**, 5046-5051 (2001).
5. S. Kim, H. Lee, and J. Son, "Recording of larger object by using two confocal lenses in digital holography," *Hankook Kwanghak Hoeji (Korean J. Opt. Photon.)* **14**, 244-248 (2003).
6. U. Schnars, "Direct phase determination in hologram interferometry with use of digitally recorded holograms," *J. Opt. Soc. Am.* **A11**, 2011-2015 (1994).
7. C. Wagneer, S. Seebacher, W. Osten, and W. Juptner, "Digital recording and numerical reconstruction of lensless Fourier holograms in optical metrology," *Appl. Opt.* **38**, 4812-4820 (1999).
8. Y. Takaki and H. Ohzu, "Fast numerical reconstruction technique for high resolution hybrid holographic microscopy," *Appl. Opt.* **38**, 2204-2055 (1999).
9. L. Xu, J. Miao, and A. Asundi, "Properties of digital holography based on in-line configuration," *Opt. Eng.* **39**, 3214-3219 (1999).
10. K. Creath, Y. Cheng, and J. C. Wyant, "Contouring aspheric surfaces using two-wavelength phase-shifting interferometry," *Optica Acta* **32**, 1455-1464 (1985).
11. J. Gass, A. Dakoff, and M. K. Kim, "Phase imaging without 2π ambiguity by multiwavelength digital holography," *Opt. Lett.* **28**, 1141-1143 (2003).
12. F. Zhang and I. Yamaguchi, "Algorithm for reconstruction of digital holograms with adjustable magnification," *Opt. Lett.* **29**, 1688-1670 (2004).
13. J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics* (Roberts & Company Publishers, USA, 2005).