

# 위상천이 디지털 홀로그래피를 이용한 평판의 표면 평면도 측정 Refractive media flatness measurement by phase shifting digital holography

전성빈\*, 김도형\*\*, 조장현\*\*, 박노철<sup>†</sup>, 양현석\*, 박경수\*\*, 박영필\*

Sungbin Jeon, Do-Hyung Kim, Janghyun Cho, No-Cheol Park, Hyunseok Yang,  
Kyoung-Su Park, and Young-Pil Park

(2012년 9월 10일 접수; 2012년 9월 17일 심사완료; 2012년 9월 20일 게재확정)

## Abstract

We measured the surface flatness of both sides for refractive media using the transmitted digital holography method. To enhance the accuracy of the result, phase-shifting system was used. With two different phase modulation of reference beam, the phase profile of object can be easily obtained. Thus, we proposed the surface measurement method which can measure large area fast, compared with conventional methods. To guarantee the reliability of obtained result, we compared with Zygo measurement system. With the proposed method, the surface flatness of  $3.45 \mu\text{m}$  resolution could be obtained.

**Key Words :** 홀로그래피(Holography), 디지털 홀로그래피(Digital holography), 위상천이 간섭계(Phase-shifting interferometry), 표면 측정(Surface measurement)

## 1. 서론

홀로그래피 저장 장치[1-2]는 고밀도의 정보를 광학적으로 저장하기 위한 기술로써, 기존의 2차원적인 광학 정보 저장장치에 비해 저장매체에 3차원적으로 정보를 기록하는 방식이다. 매체에 저장된 데이터는 기록시 사용된 동일한 참조광을 입사함으로써 얻어진다. 이렇게 얻어진 정보는 센서로 획득되고 인코딩 과정을 거쳐 원래의 정보를 복원한다. 디지털 홀로그래피는 일반적인 광학 홀로그래피와는 다르게 저장 매체로써 CCD 등의 이미지 센서를 사용한다. 디지털 홀로그래피는 저장 매체에 아날로그적으로 정보를 기록하는 홀로그래피 저장 장치에 비해 저장된 데이터도 디지털 형태를 띠므로, 데이터에 여러가지 후처리가 가능

하다. 이러한 장점으로 인해 디지털 홀로그래피는 많은 분야에 응용할 수 있으며, 역으로 이 과정에서 개발된 기술을 저장 장치 기술에 접목시키는 것도 가능하다.

디지털 홀로그래피[3]는 3차원 이미징 분야에서 활발히 연구가 이루어지고 있는 기술 중 하나이다. 디지털 홀로그래피는 일반적인 광학계를 약간의 수정만으로 이용할 수 있음에도 불구하고 높은 해상도를 기대할 수 있으며, 깊이 방향 정보의 경우 피사체의 위상 정보를 이용해 획득하므로 광학계의 Diffraction Limit 을 크게 뛰어넘는 높은 해상도를 취득할 수 있다. 이러한 장점으로 인해 디지털 홀로그래피는 3차원 디스플레이, 현미경을 통한 미소물체의 측정, 유체의 3차원 유동 기록 등의 다양한 응용분야에 활발한 연구가 이루어지고 있다. 특히 디지털 홀로그래피 현미경의 경우, 기존의 3차원 이미징 방식에 비해 간소한 광학계 설계와 빠른 촬영속도, 높은 해상도를 확보할 수 있는 장점을 가지고 있다.

디지털 홀로그래피 현미경을 응용할 수 있는 분야 중 하나는 물체의 표면 평면도를 측정하는 것이다. 팁이나 스타일러스를 이용한 기존의 기계적인 측

<sup>†</sup> School of Mechanical Engineering, Yonsei Univ.

E-mail : pnch@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-4530

\* School of Mechanical Engineering, Yonsei Univ.

\*\* Center for Information Storage Device, Yonsei Univ.(CISD)

정법은 높은 수준의 해상도와 정밀도를 가진다는 장점을 가지지만, 그에 비해 현저히 느린 측정 속도와 접촉 등의 방지를 위한 정밀한 기기 구성 등의 단점을 가지고 있다. 이에 비해 광학계를 이용하는 표면 측정 방식은 광선을 이용하므로 기기와 시료 간의 접촉 가능성이 완전히 사라지며, 기계적 방식에 상응하는 수준의 높은 해상도를 얻을 수 있다. 이러한 장점 때문에 Fizeau 광학계[4], Twyman-Green 광학계[5] 등의 방식을 이용해 광학적으로 표면 평면도를 측정하는 연구가 활발히 이루어져 왔다.

기존의 표면 측정 방식은 물체의 표면에 광학적이나 기계적인 신호를 가해 반사되는 정보를 획득하고, 이를 토대로 높이나 평면도를 구하는 방법을 취한다[6]. 이 방식은 종류에 관계없이 일정 수준 이상의 반사율을 가지는 물체의 표면을 정밀한 정도로 측정할 수 있다는 장점이 있으나, 물체의 기울어짐에 따라 그 결과에 크게 영향을 받으며, 한번에 한 쪽 표면만 측정할 수 있으므로 양쪽을 모두 측정하기 위해서는 많은 시간이 소요되며, 그 결과도 부정확하다는 단점이 있다.

본 연구에서는 이러한 반사식 표면 측정 방식을 보완하기 위해, 투명한 물체의 양 표면 평면도를 투과식 디지털 홀로그래피로써 측정하는 방식을 제안한다. 디지털 홀로그래피 획득 과정에서 발생하는 오차를 최소화하기 위해, 본 연구에서는 위상천이 디지털 홀로그래피를 사용해서 이를 보완하고자 하였다.

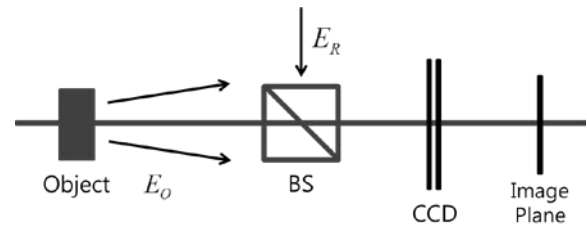
## 2. 이론적 배경

### 2.1 디지털 홀로그래피

디지털 홀로그래피는 피사체에 주사되어 나오는 신호광( $E_o$ )에 참조광( $E_r$ )을 간섭시켜, 그 이미지를 CCD, CMOS 등의 디지털 촬상 소자로 획득하는 방식을 취한다. Fig. 1 과 같은 디지털 홀로그래피 장치에서 이미지면에 기록되는 간섭 화상은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$I_s(x, y) = |E_r + E_o|^2 = |E_r|^2 + |E_o|^2 + E_r^* E_o + E_r E_o^* \quad (1)$$

$E_r^*$ ,  $E_o^*$  는 각각 참조광과 신호광의 공액복소수



**Fig. 1** Schematic diagram of digital holography. BS: beam splitter,  $E_r$ : reference wave,  $E_o$ : object wave, BS: beam splitter

이다. CCD 나 CMOS 등 일반적으로 디지털 홀로그래피를 기록하는 장치는 입사되는 정보를 픽셀 크기에 맞추어 샘플링하는 방식으로 화상을 저장한다. 이 때 픽셀 수  $N_x \times N_y$ , 센서 크기  $X_0 \times Y_0$  인 CCD 에 대한 샘플링 함수는 다음과 같다.[7]

$$P(x_o, y_o) = \text{rect}\left(\frac{x_o}{X_0}, \frac{y_o}{Y_0}\right) \left[ \text{comb}\left(\frac{x_o}{X_0/N_x}, \frac{y_o}{Y_0/N_y}\right) \square \text{rect}\left(\frac{x_o}{X_0/N_x}, \frac{y_o}{Y_0/N_y}\right) \right] \quad (2)$$

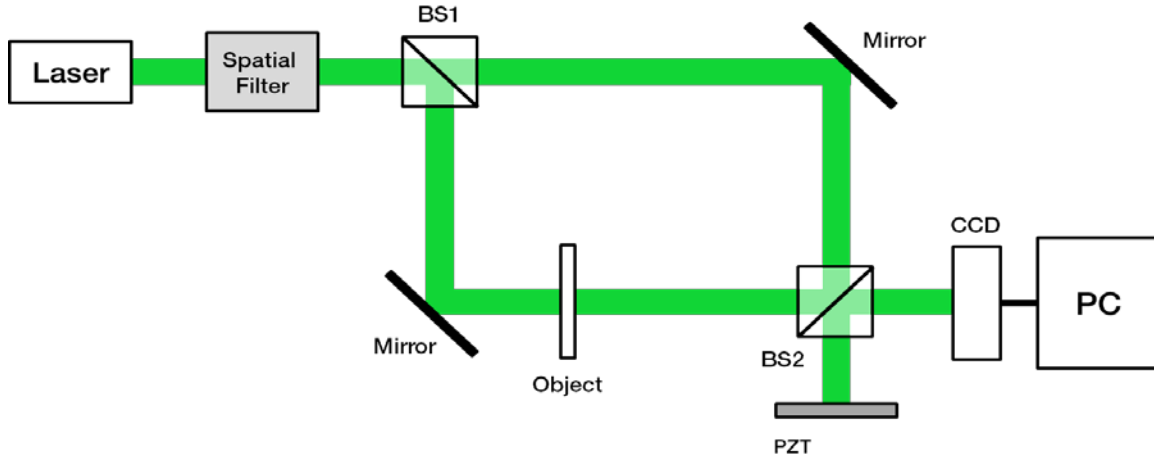
위의 과정을 통해 획득한 디지털 홀로그래피는 기존 홀로그래피를 복원하는 과정을 수치적으로 수행함으로써 영상을 재생한다. 일반적으로 영상을 수치적으로 재생하기 위해서는 홀로그램 화상( $I_h$ )에 참조광을 곱한다.

$$E_o^i = E_r I_h = E_r |E_r|^2 + E_r |E_o|^2 + E_r E_r^* E_o + E_r E_r E_o^* \quad (3)$$

식(3)에서 첫 번째 항과 두 번째 항은 참조광과 신호광에 의한 0 차 회절이고, 세 번째 항과 네 번째 항은 각각 신호광에 대한 허상과 실상이다. 재생한 영상 정보를 원하는 위치에서 재생할 때는 Fresnel 공식, Kirhioff 공식 등의 수치적 방법을 사용한다. 복원한 2 차원 혹은 3 차원 영상에 포함된 0 차 회절과 허상 정보는 일종의 에러로서 작용한다.

### 2.2 위상천이 디지털 홀로그래피를 이용한 표면 측정

일반적인 디지털 홀로그래피에서 발생하는 0 차 회절을 제거하는 방법으로는, 이미지 세기의 평균값을 구해 그 값만큼 밝기를 낮추는 DC-억압 등



**Fig. 2** Schematic diagram of transmitted phase-shifting digital holography system with Piezoelectric transducer (PZT) actuator.

이 있다. 이러한 방법을 사용할 경우, 0 차 회절 정보가 완전히 사라지지 않으면서도, 홀로그램 이미지 전체에 영향을 주므로 표면 측정을 위한 시스템 구축에는 적절하지 않다. 이러한 난점을 해결하기 위해, 참조광의 위상을 변경해 여러 장의 홀로그램을 촬영하고, 이를 통해 수치적으로 0 차 회절을 제거하는 위상천이 디지털 홀로그래피 방식이 제안되었다[8]

2.1 절의 디지털 홀로그래피 시스템에서 참조광의 위상을  $\phi_R$ , 신호광의 위상을  $\phi$ 로 정의하면, 식 (1)은 아래와 같이 치환될 수 있다.

$$I_h(x, y; \phi_R) = |E_R|^2 + |E_o|^2 + 2\sqrt{|E_R E_o|} \cos(\phi - \phi_R) \quad (4)$$

위상천이 디지털 홀로그래피 시스템은 그림 2와 같이 기존 홀로그래피 장치의 참조광단에 PZT, Wave Plate 등의 위상변조 장치를 더하는 차이가 있다. 위상이 다른 두 장 이상의 홀로그래피 화상을 통해서 신호광의 위상을 직접 구하고, 이를 통해 0 차 회절 정보를 제거하는 것이 가능하다.

참조광의 위상을 0,  $-\pi/2$ 의 두 장으로 변조할 경우 신호광의 복소 진폭은 아래와 같이 표현된다 [9].

$$E_o(x, y) = \frac{1}{2\sqrt{|E_R|}} \left[ \left\{ I_h(x, y; 0) - a(x, y) \right\} - i \left\{ I_h\left(x, y; -\frac{\pi}{2}\right) - a(x, y) \right\} \right] \quad (5)$$

위 식에서  $a$ 는 다음을 의미한다.

$$a(x, y) = \frac{v - \sqrt{v^2 - 2w}}{2}, \quad (6)$$

$$v = I_h(x, y; 0) + I_h\left(x, y; -\frac{\pi}{2}\right) + 2|E_R|, \quad (7)$$

$$w = I_h(x, y; 0)^2 + I_h\left(x, y; -\frac{\pi}{2}\right)^2 + 4|E_R|^2 \quad (8)$$

식 (6)에서 위상  $\phi$ 는

$$\phi = \arctan \left\{ \text{Im}[E_o(x, y)] / \text{Re}[E_o(x, y)] \right\} \text{로 표현된다.}$$

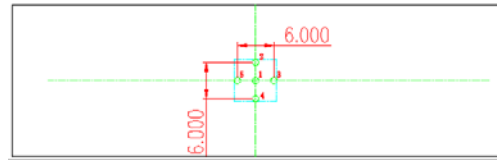
투명한 물체를 디지털 홀로그래피 방식으로 측정할 경우, 물체와 공기의 굴절률 차에 의해 위상의 변조가 일어나고, 이 차이를 통해 물체 양 표면의 두께를 계산할 수 있다. 공기의 굴절률을  $n_0 \approx 1$ , 물체의 굴절률을  $n$ 이라 할 경우  $\lambda$  파장의 빛으로 획득한 홀로그램에서 표면의 프로파일은 다음 식을 통해 계산된다.

$$\Delta t = \frac{\phi}{2\pi} \left( 1 - \frac{1}{n} \right) \lambda \quad (9)$$

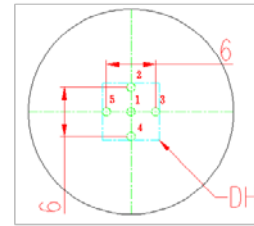
식 (9)를 통해 재생된 위상은  $-2\pi \leq \phi \leq \pi$ 의 범위를 가지므로, 측정할 수 있는 최대 표면 높이차는  $\Delta t_{\max} = 2(1-1/n)\lambda$ 가 된다. 이 범위보다 표면 평면도가 좋지 않을 경우, 위상 펼침(phase unwrapping) 등의 방법을 사용해 정확한 표면 정보를 구할 수 있다.

### 3. 실험 장치 구성

Fig. 2는 투과형 위상천이 디지털 홀로그래피에 대한 개략도이다. 사용한 광원은 532nm의 ND:YAG 레이저이다. 본 연구에서는 광학계를 사용하지 않고 직접 평면파를 시료에 주사해 홀로그래프를 얻는 방식을 취했다. 따라서 공간 필터를 사용해 원 레이저 광선을 직경 7mm의 평면파로 확대하였다. 홀로그래프를 기록하는 CCD는 Sony XCL-5005(2050×2448픽셀, 픽셀 크기 3.45 $\mu\text{m}$ ×3.46 $\mu\text{m}$ )을 사용하였다. 실험의 정확성을 위해 디지털 홀로그래피에서 위상 변조를 위해 일반적으로 쓰이는 Wave Plate, 위상 SLM 대신 Piezoelectric transducer (PZT) 액추에이터를 사용했다. 실험에 쓰인 PZT는 PI사의 S-303이며 0.03nm의 수평



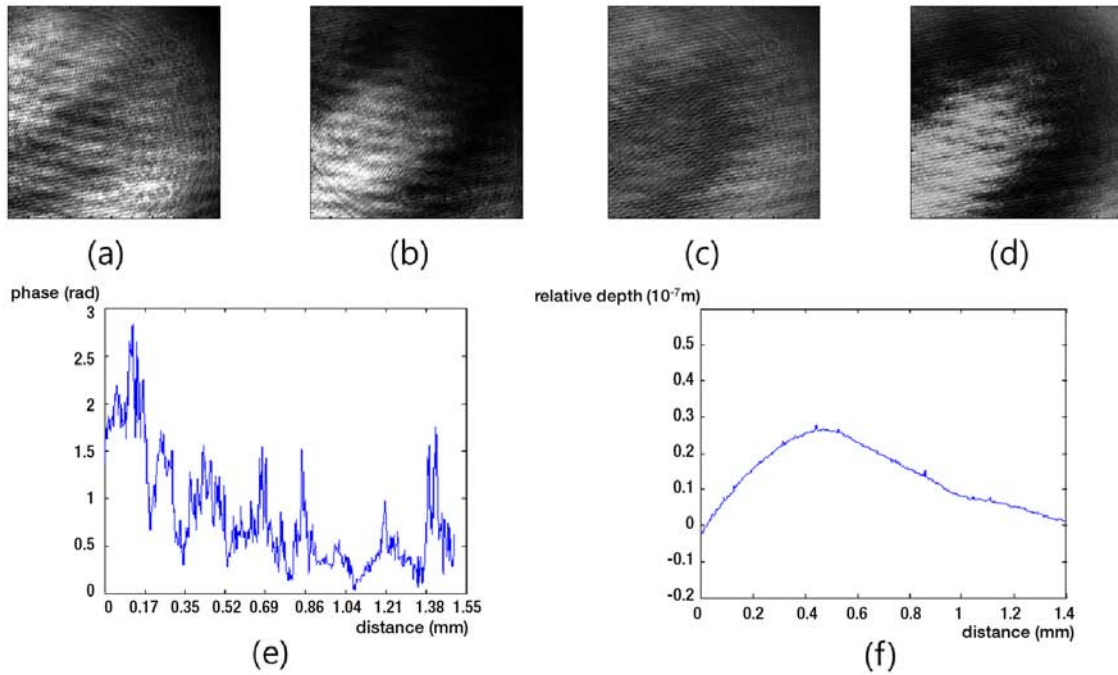
(a)



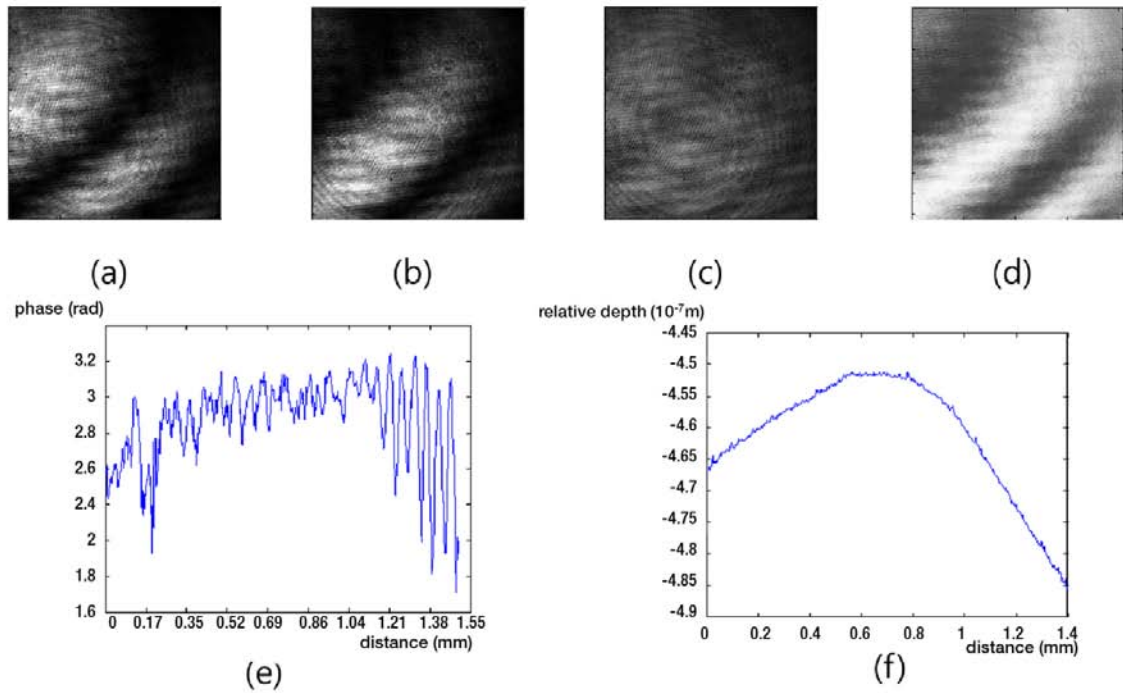
(b)

**Fig. 3** Measurement areas of (a) glass and (b) quartz plate for Zygo

해상도를 가지고 있다. 거울을 부착한 PZT를 참조광단에 설치한 후,  $\lambda/8$ 만큼 이동시켜  $\pi/2$ 의 위상이 이동한 홀로그래프를 촬영하는 것이 가능하다. CCD에 기록된 디지털 홀로그래프는 식 (5)~(9)를 이용해 컴퓨터를 통한 계산으로 재생할 수 있다.



**Fig. 4** Glass plate surface flatness measurement result: Captured hologram image of glass plate with the reference phase of (a) 0 and (b)  $-\pi/2$ . Restored image of (c) amplitude and (d) phase. 2D-plot image of surface profile measurement using (e) digital holography and (f) Zygo system.



**Fig. 5** Quartz plate surface flatness measurement result: Captured hologram image of glass plate with the reference phase of (a) 0 and (b)  $-\pi/2$ . Restored image of (c) amplitude and (d) phase. 2D-plot image of surface profile measurement using (e) digital holography and (f) Zygo system.

표면 평면도를 측정하기 위해 실험에서 사용된 시료는 유리와 수정 평판으로써, 공업용으로 정밀 가공된 것이다. 가공시의 표면 공차는  $632\text{nm}$  기준  $\lambda/10$ 이므로, 위상 펄칭 등의 방법을 사용하지 않아도 무방하다. 시료의 굴절률은 유리 1.519(BK7), 수정 1.547(Quartz)이다.

본 연구에서는 기존의 표면 측정 방식 중 반사식 광학 측정 시스템을 사용해 실험에서 획득한 결과와 비교했다. 현재 관련 장비 중 비교적 광범위하게 쓰이고 있는 Zygo 사의 NewView 700s 를 사용했으며, 정확도를 위해 Fig. 3 과 같이 시료의 중심점을 기준으로 상하좌우 3mm 거리의 영역에서 임의의 중심좌표를 택해  $1.5\text{mm} \times 1.5\text{mm}$  넓이로 양쪽에서 측정하고, 그 결과를 홀로그램의 동일한 위치와 비교하였다.

#### 4. 실험 결과

Fig. 2 의 장치를 이용해 촬영한 유리 평판과 수정 평판의 표면 측정 결과를 각각 Fig. 4 와 5 에 (a)는 참조광의 위상이 0 이고, (b)는 (a) 대비  $-\pi/2$  만큼 위상을 천이시켜 촬영한 것이다. 이를 토대로 시료 표면의 복소 진폭을 구할 수 있다.

Fig. 4 (c)와 (d)에 얻어낸 복소 진폭의 세기와 위상을 각각 나타내었다.

Fig. 4 (d)에서 구한 위상값을 통해 계산한 물체의 표면 정보를, 같은 위치에서 Zygo 측정 장치로 구한 값과 비교해 (e)와 (f)에 나타내었다. 홀로그램 촬영 시에 발생하는 간섭 줄무늬의 영향을 감안할 때 두 결과가 유사한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다. 표면의 평면도를 정량적으로 측정하기 위해 본 연구에서는 Ra 값과 RMS 값을 계산해 Table 1 에 나타내었다. 두 결과를 비교했을 때, 홀로그래피와 기존의 측정 방식으로 구한 표면 평면도를 비교하면 최대 21nm 의 오차가 발생하였다. 이는 시료의 가공 공차를 고려하면 오차 범위 내에 있는 것이다.

Fig. 4 와 5, Table 1 의 결과로부터 본 연구에 사용된 위상천이 디지털 홀로그래피를 통해 표면의

**Table 1** Flatness measurement of digital holography and Zygo.

	Glass		Quartz	
	Ra	RMS	Ra	RMS
Digital Holography	54.79	73.84	61.77	71.38
Zygo	68.70	82.23	74.82	92.96

평면도를 측정할 수 있음을 확인할 수 있다. 투명한 물체의 경우, 양쪽 표면에 대해서 모두 정밀한 평면도를 요구하는 경우가 많으므로, 본 방식을 사용했을 경우 기존의 반사 방식에 비해 빠르게 표면을 측정할 수 있다. 하지만 이 방식은 양쪽 표면의 평면도를 하나의 결과값으로 합쳐진 형태로만 구할 수 있으므로, 한쪽 표면만의 정보를 얻기가 불가능하다는 단점이 있다. 이를 해결하기 위해서는 반사형 홀로그래피 장치를 추가해서 한쪽의 표면 정보를 얻고, 이를 투과형 홀로그램으로 얻은 정보에 대입해서 반대쪽 표면 정보도 구하는 방식으로 보완하는 것이 가능하다.

## 5. 결론

투명한 물체의 양 표면에 대해서 그 평면도를 측정하기 위해 투과형 위상천이 디지털 홀로그래피 시스템을 구성하였다. 위상천이 디지털 홀로그래피는 참조광의 위상을 바꿔가며 여러 장의 홀로그램을 촬영 후, 수치적으로 0 차 회절 정보를 제거하기 때문에 보다 정확한 위상 정보를 구하는 것이 가능하다. 이를 통해 얻어진 정보를 Zygo 등 기존에 쓰이는 방식과 비교했을 때 21nm 이하의 평면도 오차를 보여줌으로써, 그 결과가 신뢰할 수 있을 만한 것임을 확인하였다. 디지털 홀로그래피를 이용하면 표면에 대한 정보를 보다 빠르고 쉽게 획득할 수 있다. 더 나아가, 본 연구에서 사용한 방법을 통해 마이크로 렌즈 등의 곡면 표면에 대한 표면 측정에 응용할 수 있으므로, 홀로그래픽 저장 장치 분야에 접목이 가능하다.

## 후기

이 논문은 2012 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012-009378).

## 참고문헌

[1] K. Curtis, L. Dhar, A. Hill, W. Wilson, and M. Ayres, 2010, "Holographic Data Storage: From Theory to Practical Systems,"

- [2] H. Coufal, D. Psaltis, and G. T. Sincerbox, 2000, "Holographic data storage, Springer series in optical sciences"
- [3] J. W. Goodman and R. W. Lawrence, 1967, "Digital Image Formation from Electronically Detected Holograms," *Applied Physics Letters*, Vol.11, pp. 77-79
- [4] Dipankar Bhattacharyya, Ayan Ray, Bibhas K. Dutta, and Pradip N. Ghosh, 2002, "Direct measurement on transparent plates by using Fizeau interferometry," *Optics & Laser Technology*, Vol.34, pp. 93-96
- [5] Ichirou Yamaguchi, Sohgo Ohta, and Jun-ichi Kato, 2001, "Surface contouring by phase-shifting digital holography," *Optics and Lasers in Engineering*, Vol.36, pp. 417-428
- [6] Osuk Kwon, J. C. Wyant, and C. R. Hayslett, 1980, "Rough surface interferometry at 10.6  $\mu\text{m}$ ," *Applied Optics*, Vol.19, pp.1862-1869
- [7] Myung K. Kim, 2011, "Digital Holographic Microscopy: Principles, Techniques, and Applications," Springer
- [8] I. Yamaguchi and T. Zhang, 1997, "Phase-shifting digital holography," *Optics letters*, Vol.22, pp. 1268-1270
- [9] Yasuhiro Awatsuji, Tatsuki Tahara, Atsushi Kaneko, Takamasa Koyama, Kenzo Nishio et al., 2008, "Parallel two-step phase-shifting digital holography", *Applied Optics*, Vol.47, No. 19 pp. D183-D189