

Aspheric Lens Measurements by Digital Holographic Microscopy and Liquid

Doocheol Kim¹, Sanghoon Shin², and Younghun Yu^{1†}

¹Department of Physics, Cheju National University, Jeju 690-756, Korea

²KPS, Jeongwang 2-dong, Siheung-si, Gyeonggi-do 429-920, Korea

(Received September 2, 2013; Revised manuscript October 16, 2013; Accepted October 28 2013)

Digital holographic microscopy allows optical path difference measurement. Optical path difference depends on both the refractive index and the morphology of the sample. When interference fringes are very closely spaced, the phase data contain high frequencies where 2π ambiguities cannot be resolved. The immersion testing method, which is a transmission test while the sample is immersed in liquid, is very effective in reducing high frequency fringes in transmission measurements so that large dynamic range testing is possible for a non-null configuration. We developed a digital holographic microscope using liquid that can measure the high numerical aperture aspheric morphology of a sample. This system provides highly precise three-dimensional information on the sample. By improving the experimental method, choosing liquids which have similar refractive index to the sample, we can measure more accurate three-dimensional information on the samples.

Keywords: Holography, Digital holography, Aspheric lens

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

액체와 Digital Holographic Microscopy을 이용한 비구면 렌즈 측정 연구

김두철¹ · 신상훈² · 유영훈^{1†}

¹제주대학교 물리학과

☎ 690-756 제주시 아라1동 1번지

²KPS

☎ 429-926 KPS, 경기도 시흥시 정왕2동

(2013년 9월 2일 받음, 2013년 10월 16일 수정본 받음, 2013년 10월 28일 게재 확정)

디지털 홀로그래피 현미경은 기준광과 시료의 굴절률과 두께에 의한 광경로 차이를 간섭 방법을 이용하여 측정하여 3차원 형상을 측정하는 방법이다. 그리고 광 경로차는 시료의 두께와 시료와 시료 주변의 굴절률 차이에 의존한다. 시료 형상 기술기가 매우 큰 경우에는 광 경로차가 커져 일반적인 간섭 방법으로는 측정이 어렵다. 이런 경우 시료를 액체에 담그어 측정하면 광 경로차가 매우 작아져서 일반적인 간섭 방법을 이용하여 측정할 수 있다. 본 연구에서는 디지털 홀로그래피 현미경과 액체를 이용하여 기술기가 큰 비구면 렌즈의 형상을 측정하는 연구를 하였다. 시료의 굴절률과 비슷한 액체를 선택함으로써 비구면 렌즈의 정밀한 3차원 측정이 가능하였다.

Keywords: 홀로그래피, 디지털 홀로그래피, 비구면렌즈

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

I. 서 론

일반 구면 렌즈는 근축 광학을 벗어나는 경우 여러 가지 왜곡 현상을 유발한다. 이러한 왜곡을 보정하기 위하여 여러 장의 렌즈를 조합하여 사용한다. 이러한 방법은 소형화와 경

량화가 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위해 비구면 렌즈가 소개되었다. 현재는 금형기술과 사출 기술의 발전으로 비구면 렌즈의 제작이 용이해졌다. 이러한 소형 비구면렌즈는 IT 산업의 급격한 성장과 IT기기의 영상 획득 장치로 이용됨으로써 그 수요가 급격히 팽창하고 있다. 그리고 렌즈의 성능

[†]E-mail: yyhyoung@cheju.ac.kr

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

향상을 위해 렌즈의 NA(Numerical Aperture)를 크게 하는 경향이 있다. 이러한 비구면 렌즈의 우수한 영상특성을 얻기 위해서는 디자인 대비 제작된 렌즈의 정확도를 측정하여야 한다.

렌즈의 3차원 형상을 정밀 측정하기 위해 일반적으로 간섭계가 많이 사용되고 있다.^[1] 이러한 비구면 렌즈 측정이 어려운 것은 측정 범위가 큰 것도 있지만, 구면의 기울기가 매우 크기 때문이다. 이러한 급격한 기울기는 측정을 불가능하게 하기도 한다. 일반적으로 많이 사용되는 간섭계방식에서는 간섭간격이 조밀해져 Nyquist 데이터 추출이론(Nyquist sampling theorem)을 위배하게 된다. 위상이동 간섭계(Phase shifting Interferometry)는 좀 더 조밀한 간섭문양을 측정할 수 있으나, sparse-array 센서를 필요하고, Nyquist 데이터 추출이론의 1/2 정도 밖에 측정할 수 없다.^[2, 3] 이러한 문제점으로 접촉 방식의 측정 방법이 사용되고 있으나 측정에러 문제와 측정 시간이 매우 오래 걸린다는 단점이 있어 좀더 빠른 비접촉 측정방식을 개발하려는 노력이 진행 중이다.

본 논문에서는 액체를 이용한 DHM(Digital Holography Microscope)^[4-8] 방식을 이용하여 비구면 렌즈의 형상을 측정하는 방법에 대하여 연구하였다.

II. 이론적 배경

2.1. 디지털 홀로그래피

디지털 홀로그래피 현미경에서 홀로그램 데이터는 CCD로 입력되는 물체광(O)과 참조광(R)의 간섭에 의하여 주어진다. 그림 1과 같이 렌즈의 초점거리가 f 인 투과형 디지털 홀로그래피 현미경을 고려하자.

CCD에 형성되는 2차원 홀로그램의 빛 세기는 식 (1)과 같다.

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

식 (1)에서 R은 참조파, O는 물체파를 나타내고 R*, O*는 각각 참조파와 물체파의 공액복소수이다. 식 (1)의 첫째 항

은 참조광만의 세기이고, 둘째 항은 물체광만의 세기이며 셋째 항과 넷째 항이 각각 허상 항과 실상 항을 나타낸다. 따라서 첫째 항과 둘째 항은 영차회절광에 해당되며 셋째 항과 넷째 항이 임의의 각도로 회절하는 회절차수에 해당되는 항이다.

일반적으로 디지털 홀로그래피에서 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.^[6-8]

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

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

$$\Psi = RI_h = R |R|^2 + R |O|^2 + RR^*O + RRO^* \quad (3)$$

프레넬(Fresnel) 공식을 이용하여 영상이 맺히는 지점에서의 파동분포는 식 (4)와 같다.^[6-8]

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

여기서 λ 는 사용된 빛의 파장이고 S는 CCD에서 영상이 재생되는 곳까지의 거리, A는 상수이다. 일반적으로 식 (4)를 계산하기 위하여 FFT(Fast Fourier Transform) 알고리즘을 이용한다. 식 (4)는 복소수이기 때문에 재생 영상($I(m, n)$)과 위상영상($\phi(m, n)$)은 식 (5)와 같이 얻어진다.

$$I(m, n) = \text{Re} [\Psi(m, n)]^2 + \text{Im} [\Psi(m, n)]^2 \quad (5)$$

$$\phi(m, n) = \arctan \frac{\text{Im}(\Psi(m, n))}{\text{Re}(\Psi(m, n))}$$

식 (5)에서 얻은 위상 정보와 위상펼침(phase unwrapping)^[9] 기술을 이용하여 3차원 형상을 얻을 수 있다.

2.2. 액체에 의한 광경로차 및 전산기 시능

그림 2와 같이 최대 두께가 $h(x, y)$, 굴절률이 n_s 인 시료가 굴절률이 n_M 인 물질에 포함 되어 있는 경우에 시료를 통과하는 빛과 시료를 통과하지 않는 빛의 위상차(ϕ)와 광경로차(OPL)는 식 (6)과 같다.

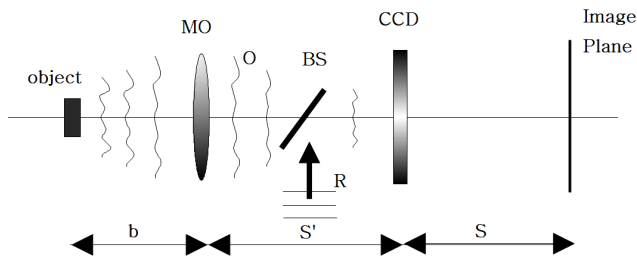


FIG. 1. Schematic diagram of digital holography microscope and image reconstruction.

MO: Magnify Lens, R: Reference Beam, O: Objective Beam, BS: Beam Splitter, b: distance between sample and lens, S': distance between lens and CCD, S: distance between CCD and image reconstruction plane.

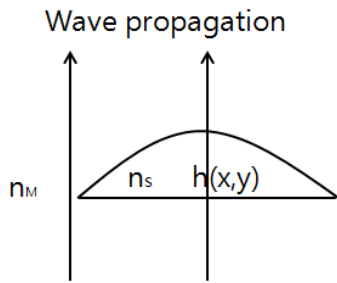


FIG. 2. Transmission DHM and Optical path difference in different refractive index material.

$$OPL = (n_s(x,y) - n_M) * h(x,y) \tag{6}$$

$$\phi = OPL * 2\pi / \lambda$$

식 (6)에서 $n_s(x,y)$, $d(x,y)$ 는 각각 시료의 위치 (x,y) 에서의 굴절률과 두께이다. 식 (6)으로부터 굴절률이 $n_M \approx n_s$ 인 물질을 이용하면 광경로차와 위상차가 $n_M = 1$ 인 공기 경우보다 감소함을 알 수 있다.

그림 3은 본 연구에 사용된 렌즈에 대한 2-파장 DHM^[1, 10, 11]과 단파장 DHM의 전산기시능결과이다.

그림 3 (a)(b)는 각각 633 nm, 671 nm 파장으로부터 얻은

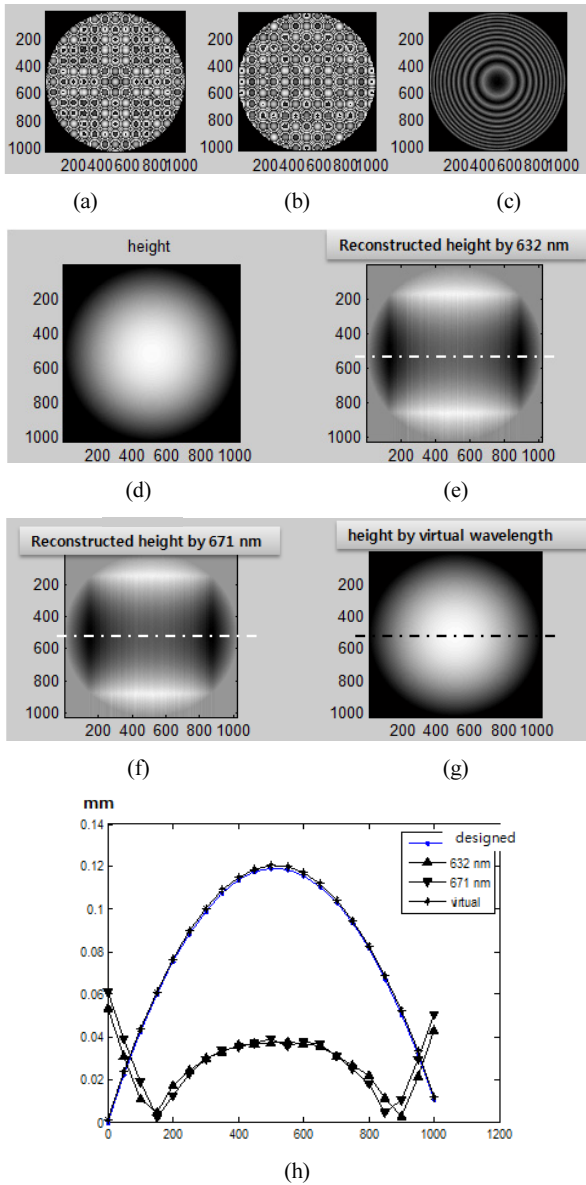


FIG. 3. Simulation with aspheric lens in air. (a) phase of 633 nm wavelength, (b) phase of 671 nm wavelength, (c) phase of virtual wavelength, (d) 3-D grey level of designed aspheric lens, (e) phase unwrapping result of (a), (f) phase unwrapping result of (b), (g) phase unwrapping result of (c), (h) profile of dotted line in unwrapping results.

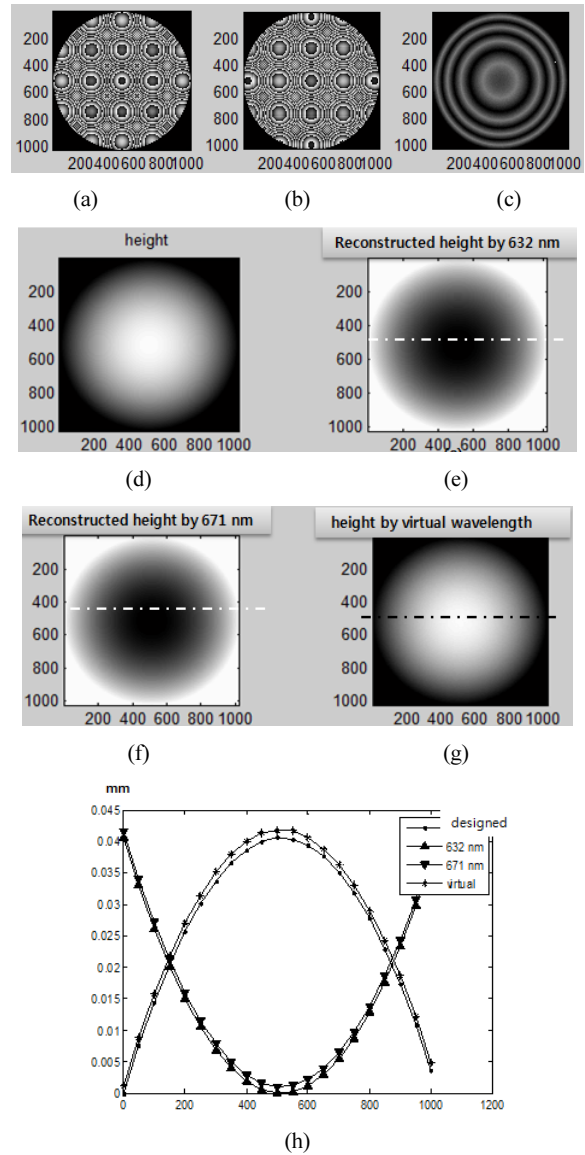


FIG. 4. Simulation with aspheric lens in water. (a) phase of 633 nm wavelength, (b) phase of 671 nm wavelength, (c) phase of virtual wavelength, (d) 3-D grey level of designed aspheric lens, (e) phase unwrapping result of (a), (f) phase unwrapping result of (b), (g) phase unwrapping result of (c), (h) profile of dotted line in unwrapping results.

위상데이터이고, (c)는 (a)(b)를 이용하여 얻은 가상 파장에 의한 위상이다^[1,10,11]. 가상 파장은 각각의 파장에서 얻은 위상정보를 빼 줌으로서, $\frac{1}{\lambda_{virtual}} = \frac{|\lambda_1 - \lambda_2|}{\lambda_1 * \lambda_2}$, 얻을 수 있다. 그림 3(d)는 렌즈디자인 방정식에서 얻은 3차원 형상의 회색조 영상(grey level image)이고, (e), (f), (g)는 각각 (a), (b), (c)를 위상필름해서 얻은 그레이레벨 3차원 영상, (h)는 3차원 영상의 프로파일이다. 앞에서 예상한 것과 같이 가상 파장에 의해서는 3차원 측정이 가능하나, 단파장으로는 측정이 안됨을 확인할 수 있다.

그림 4는 그림 3에 이용되었던 비구면렌즈를 물에 담그어 측정한 전산기 시뮬 결과이다.

그림 4(h)로부터 단파장(671 nm, 632 nm)으로부터 얻은 렌즈의 프로 파일과 2-파장에서 얻은 프로 파일이 동일함을 알 수 있다. 이는 앞에서 예상한 것과 같이 액체의 굴절률 때문에 식 (6)과 같이 광 경로차가 줄어들어 단파장 홀로그래피 방법을 이용해서도 3차원 형상이 측정 가능함을 알 수 있다. 그림 4(h)에서 632 nm데이터와 671 nm데이터가 조금 다르게 보이는 것은, 실제 데이터는 일치하나, 그래프로 표시하기 위해 데이터를 조금 이동해서 표시한 결과이다. 마찬가지로 가상파장에 의한 데이터와 실제 형상 데이터도 표시하기 위해 조금 이동해서 표시한 것으로 실제로는 두 값이 거의 동일하다.

III. 실험장치

그림 5는 투과형 디지털 홀로그래피 현미경의 개략도이다.

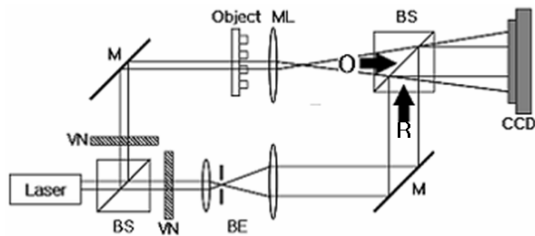


FIG. 5. Schematic diagram of experimental set-up for transmission DHM. VN: variable neutral density filter, BS: Beam splitter, M: Mirror, O: Object, R: Reference light, BE: Beam expander, ML: Objective lens.

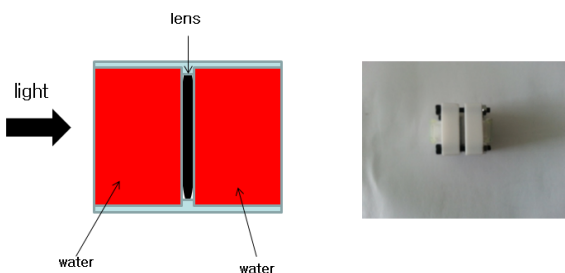


FIG. 6. Lens holder with liquid cell.

기본적인 구성은 마흐젠더 간섭계와 같다. 사용한 광원은 10 mW He-Ne 레이저이고, 시료를 투과한 영상을 확대하기 위하여 현미경 대물렌즈 ML(4X, NA=0.1)을 사용하였다. 가변 필터는 간섭 문양의 명암대비가 최대인 홀로그램을 얻기 위하여 사용하였다. 홀로그램을 저장하기 위하여 CCD(IMPREX)를 사용하였고, CCD의 픽셀크기는 $7.4 \times 7.4 \mu\text{m}$ 이고 픽셀 개수는 1024×1024 이다. 시료는 Thorlab 에서 비구면 렌즈 정보를 알 수 있는 소형 비구면 렌즈 C610(NA=0.6), A 230(NA=0.54)를 이용하였다. C610 은 한 면은 비구면, 다른 면은 평면이고, A 230 은 한면은 비구면, 다른 면은 구면으로 각각의 ROC(Radius of Curvature)값은 3.49 mm, -18 mm 이다. 렌즈는 ECO-550으로 제작 되었으며 굴절률은 1.606이다. 그리고 비구면 렌즈의 SAG(sagitta) 값은 렌즈 제작회사에서 제공한 렌즈 변수 값을 이용하여 구하였다.

시료홀더는 그림 6과 같이 렌즈 양면에 다른 액체를 채울 수 있는 구조로 제작하였다.

IV. 결 과

사용된 액체는 물($n=1.33$)을 이용하였다. 렌즈 측정 결과를 분석하기 위하여 렌즈의 SAG 값과 ROC를 SAG 공식을 이용하여 측정 데이터로부터 구하였다. ROC 값은 MATLAB의 LSQcurvefit 함수를 이용하여 구하였고, 피팅 함수는 식 (7)과 같다.

$$SAG = \frac{r^2}{R(1 + \sqrt{1 - (1+k)r^2/R^2})} \quad (7)$$

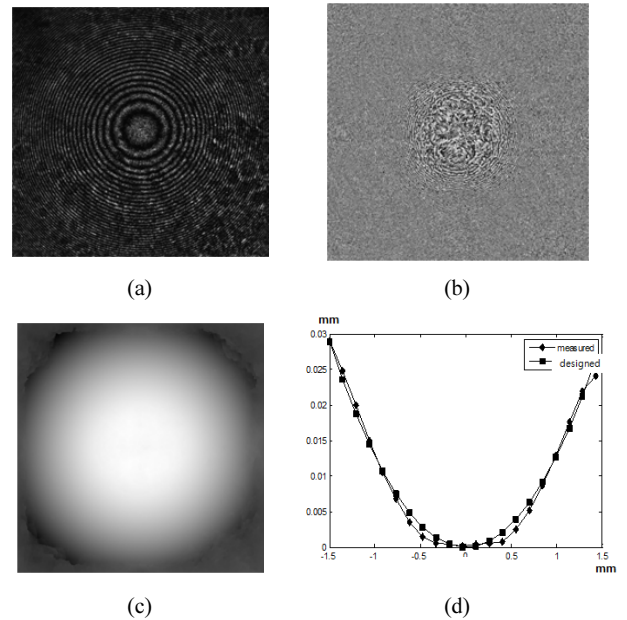


FIG. 7. Hologram and profile of Lens C610. (a) Hologram, (b) Phase image, (c) 3-D grey level of lens, (d) designed profile of lens (■) and measured profile (◆).

식 (7)에서 k 는 conic값으로, 본 연구에서는 $k = -1$ 로 하였다. 비구면 렌즈의 정확한 모양을 측정하기 위해서는 conic 값도 측정하여야 하나, 렌즈의 모양을 paraboloid로 가정하였고, 렌즈의 중심 부분만 측정하였고 이 부분은 conic값의 영향이 미미한 부분이다. r 은 렌즈 중심으로부터 반경 방향의 거리, R 는 ROC이다.

그림 7과 그림 8은 렌즈를 물에 넣어 측정한 결과이다. 그림 7과 그림 8에서 (a)는 홀로그램, (b)는 위상, (c)는 위상 펼침을 이용하여 얻은 회색조(grey level) 3차원 영상, (d)는 디자인된 렌즈 형상(■)과 측정된 렌즈의 profile(◆)이다.

그림 7과 그림 8로부터 얻은 C610과 A230의 ROC값은 각

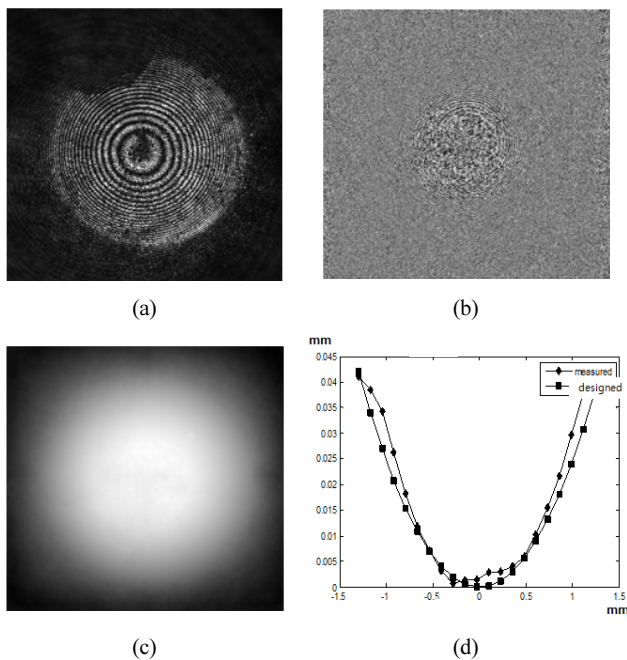


FIG. 8. Hologram and profile of Lens C610. (a) Hologram, (b) Phase image, (c) 3-D grey level of lens, (d) designed profile of lens (■) and measured profile (◆).

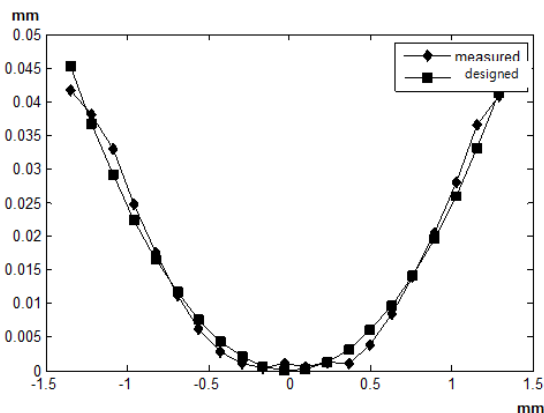


FIG. 9. Designed lens profile (■) and measured profile with using 2 different refractive index material (◆).

각 2.715, 2.875 이다. 이는 디자인 ROC값 2.71, 3.49와 비교하면, C610의 경우는 매우 유사하게 측정 되었으나, A230은 그 차이가 크다. A230의 경우 렌즈 양면(전면, 후면) 모두 상당한 곡면을 가지고 있다. 투과형 DHM의 경우 렌즈의 전면과 후면의 영향을 분리할 수 없기 때문에 두면의 곡률이 측정에 영향을 준 것이다. 후면의 곡률 영향을 최소화하기 위해 그림 6의 렌즈 홀더에, 렌즈 후면 쪽에 렌즈 물질의 굴절률과 유사한 굴절률 정합액체(Cargille, $n=1.6220$)를 채우고 전면은 물을 채워 측정한 결과는 그림 9와 같다. 그림 9로부터 얻은 ROC값은 3.394로 디자인 ROC와 유사함을 알 수 있다.

실험 결과 적절한 액체를 조합하여 사용하면, DHM을 이용하여 NA가 큰 비구면 렌즈의 형상과 ROC값을 측정할 수 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 방법을 이용하면, 기존의 접촉 측정 방식에 비해 보다 빠른 측정이 가능하다. 그리고 본 실험에 사용된 DHM의 정밀도는 약 $\frac{\lambda}{20}$ 정도이고, 현재 실험은 렌즈의 중심 부분을 측정하였으나, 비구면 렌즈의 경우 렌즈 끝 부분에서 비구면 성질을 더 많이 가지고 있다. 이 경우에는 렌즈의 ROC뿐만 아니라 conic 값도 측정하여야 한다. 이러한 실험을 위해서는 측정 시스템의 FOV(Field of View)를 확장하고, 측정 정밀도를 더욱 좋게 하여야 한다. 본 연구는 이를 위한 초기 실험 결과로 액체를 이용하여 측정 범위를 확장할 수 있다는 것을 확인한 실험이고, 추후 실험 장치를 개선하여 ROC뿐만 아니라 conic 값도 측정할 수 있게 할 것이다.

V. 결 론

디지털 홀로그래피는 넓은 면적의 3차원 데이터를 신속하게 획득할 수 있는 방법이다. 그러나 디지털 홀로그래피도 간섭을 이용하기 때문에 사용된 빛의 파장보다 큰 단차를 측정하기 어렵다. NA가 큰 비구면 렌즈의 경우 기울기가 커서 인접한 두 측정지점의 단차가 크다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 액체를 이용하여 굴절률 차이를 작게 하여 위상차를 측정하였다. 또한 비구면 렌즈의 경우 전면과 후면 모두 곡률을 가지는 경우가 많은데, 전면 곡률, 혹은 후면 곡률만을 측정하기 위해 적절한 굴절률 정합을 이용하면 전면 혹은 후면의 곡률만을 선택적으로 측정할 수 있음을 확인하였다.

적절한 액체 조합과 DHM을 이용함으로써 NA가 큰 비구면 렌즈의 형상과 ROC와 같은 디자인 변수를 측정할 수 있음을 확인하였다. 그리고 이 방법은 기존의 접촉 방식에 비해 측정이 용이하고, 측정 시간이 짧다는 장점이 있다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 “제주대학교 제술진흥연구비 지원사업”에 의하여 연구되었음.

References

1. D. Malacara, *Optical Shop Testing* (Wiley & Sons, Inc., USA, 2007).
2. G. R. Brady, M. Sicairos, and J. R. Fienup, "Optical wavefront measurement using phase retrieval with transverse translation diversity." *Opt. Express* **624**, 103801-103809 (2009).
3. G. R. Brady and J. R. Fienup, "Range of phase retrieval in optical metrology," in *Frontiers in Optics 2005/Laser Science XXI* (Optical Society of America, Washington DC, 2005), paper FTuS3.
4. J. W. Goodman and R. W. Lawrence, "Digital image formation from electronically detected holograms," *Appl. Phys. Lett.* **11**, 77-79 (1967).
5. M. A. Kronrod, N. S. Merzlyakov, and L. P. Yaroslavski, "Reconstruction of hologram with a computer," *Sov. Phys. Tech.* **17**, 434-444 (1972).
6. H. Cho, D. Kim, Y. Yu, W. Jung, and S. Shin, "3-dimensional measurement using digital holographic microscope and phase unwrapping," *Korean J. Opt. Photon.* (Hankook Kwanghak Hoeji) **17**, 329-334 (2006).
7. E. Cuche, P. Marquet, and C. Depeursinge, "Simultaneous amplitude-contrast and quantitative phase-contrast microscopy by numerical reconstruction of Fresnel off-axis holograms," *Appl. Opt.* **38**, 6994-7001 (1999).
8. U. Schnars, "Direct phase determination in hologram interferometry with use of digitally recorded holograms," *J. Opt. Soc. Am.* **A11**, 2011-2015 (1994).
9. D. C. Ghiglia and M. D. Pritt, *Two-Dimensional Phase Unwrapping* (John Wiley & Sons., Inc. USA, 1999).
10. H. Cho, D. Kim, W. Jung, S. Shin, and Y. Yu, "Dual-wavelength digital holography microscope for BGA measurement using partial coherence source," *J. Opt. Soc. Korea* **15**, 352-356 (2011).
11. L. Yu and M. K. Kim, "Wavelength-scanning digital interference holography for tomographic three-dimensional imaging by use of the angular spectrum method," *Opt. Lett.* **30**, 2092-3094 (2005).