

Determining the Refractive Index and Three-Dimensional Shape of an Optical Component using Digital Holographic Microscopy with Liquid

Sanghoon Shin¹ and Younghun Yu^{2†}

¹KPS, DongTan Myon, Hwasung 445-811, Korea

²Department of Physics, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea

(Received April 17, 2014; Revised manuscript May 13, 2014; Accepted May 21, 2014)

In this study a method is proposed for measuring both the refractive index and the shape of a transparent object. The proposed method combines a digital holographic microscope with a liquid. The holograms of a sample immersed in different liquids are recorded and then the three-dimensional phase information of the sample is reconstructed numerically. In particular, we have proposed a theoretical model for determining both the refractive index and shape of a sample, and micro-corner cubes are examined experimentally.

Keywords: Holography, Digital holography, Corner cube

OCIS codes: (090.0090) Holography; (090.1760) Computer holography; (070.0070) Fourier optics and signal processing

액체와 DHM을 이용한 소형 광학부품의 굴절률 및 형상측정

신상훈¹ · 유영훈^{2†}

¹KPS

☎ 445-811 KPS, 경기도 화성시

²제주대학교 물리학과

☎ 690-756 제주시 아라1동 1번지

(2014년 4월 17일 받음, 2014년 5월 13일 수정본 받음, 2014년 5월 21일 게재 확정)

디지털 홀로그래피 현미경은 기준광과 시료의 굴절률과 두께에 의한 물체광의 광 경로차를 측정하여 3차원 형상을 측정하는 방법이다. 대량 생산을 위해 사용되는 사출방법을 이용한 광학제품은 공정 조건에 의해 굴절률과 같은 물성이 변화한다. 소형 사출 광학제품의 정확한 광학적 기능을 디자인하기 위해서는 물질의 굴절률과 3차원 형상을 정확히 측정 할 필요가 있다. 본 연구에서는 2개의 액체와 투과형 디지털 홀로그래피 현미경을 이용하여 사출된 소형 코너 큐브의 굴절률과 3차원 형상을 측정하는 연구를 하였다.

Keywords: 홀로그래피, 디지털 홀로그래피, 코너큐브

OCIS codes: (090.0090) Holography; (090.1760) Computer holography; (070.0070) Fourier optics and signal processing

I. 서 론

현대 금형기술의 발전으로 소형 광학부품을 대량으로 사출하여 사용하고 있다. 이로 인해 광학기기의 값이 매우 싸지고, 비구면 사출에 의해 기기의 크기도 작아지는 장점이 있다. 이러한 사출 과정에서 광학기기의 3차원 형상을 제조하기 위해 열을 가한다. 열을 가하고 냉각하는 과정에서 물질의 굴절률이 변화 된다.^[1, 2] 사출 광학기기가 정확한 광학적

작용을 위해서는 광학기기 물질의 굴절률과 형상이 디자인 값과 일치하여야 한다. 그러므로 사출 광학기기의 정확한 굴절률 값과 3차원 형상 측정이 필수적이다.

굴절률 측정 방법은 많이 알려져 있다.^[3-12] 그 중 가장 정밀하게 측정 할 수 있는 방법은 편광해석법(ellipsometry) 방법과 간섭을 이용하는 방법이다. 일반적인 편광해석법방법과 간섭방법은 시료의 한 위치에서 굴절률을 측정한다. 시료의 2차원 굴절률 측정을 위해서는 2차원 스캐닝 방법을 이용하

†E-mail: yyhyoung@cheju.ac.kr

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

여 정밀한 2차원 굴절률 측정을 할 수 있다. 그러나 2차원 스캐닝 방법을 이용한 굴절률 측정 방법은 측정 시간이 매우 긴 단점이 있다. 근래에 간섭 방법 중 2차원 스캐닝 방법을 이용하지 않고 한번에 2차원 위상정보를 알 수 있는 DHM (Digital Holographic Microscopy) 방법이 개발되고 많이 연구 되었다.^[13-14] DHM 방식은 CCD(Charge Coupled Device)와 같은 반도체 기록 장치를 이용하여 실시간으로 측정 대상체의 홀로그램 데이터를 획득하고, 수치적 3차원 영상 재생의 방법으로 측정 대상체의 3차원 데이터를 획득하는 방법이다. 그러나 디지털 홀로그래피도 간섭을 이용하기 때문에 물체의 단차가 사용된 파장(λ) 보다 큰 물체의 측정에는 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 2파장 디지털 홀로그래피가 제안 되었다.^[15-17] 그러나 2파장 디지털 홀로그래피는 2파장 각각에 대하여 홀로그램을 얻고 이를 수치적으로 재생하는 과정이 복잡한 단점이 있어 굴절률 차이를 이용하여 광 경로차(optical pass difference)를 작게 하여 측정하는 방법이 제안 되었다.^[18, 19] 일반적으로 투과형 방법을 이용하여 3차원 측정을 위해서는 물질의 굴절률을 정확히 알아야 측정할 수 있다. 또한 정확한 굴절률 측정을 위해서는 정확한 형상정보를 알아야 한다.

본 논문에서는 굴절률이 다른 2개의 액체와 투과형 DHM을 이용하여 시료의 형상정보와 굴절률 정보를 모르는 경우, 사출된 소형 코너큐브의 굴절률 값과 3차원 형상을 동시에 측정 하는 방법에 대하여 연구하였다.

II. 이론적 배경

디지털 홀로그래피 현미경에서 홀로그램 데이터는 CCD로 입력되는 물체광(O)과 참조광(R)의 간섭에 의하여 주어진다. 그림 1과 같이 액체에 담겨져 있는 시료를 투과하여 홀로그램면에 간섭문양을 형성하는 투과형 DHM을 고려하자. 홀로그램면에 형성되는 2차원 홀로그램의 빛 세기는 식 (1)과 같다.

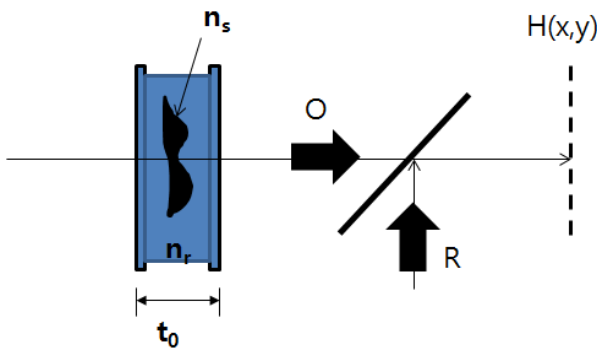


FIG. 1. Schematic diagram of Digital holography microscope with immersion liquid. R: Reference Beam, O: Objective Beam, BS: Beam Splitter, $H(x, y)$: Hologram plane, n_s ; refractive index of sample, n_r ; refractive index of immersion liquid, t_0 ; thickness of immersion liquid.

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

식 (1)에서 R 은 참조광, O 는 물체광을 나타내고 R^* , O^* 는 각각 참조광과 물체광의 공액복소수이다. 식 (1)의 첫째 항은 참조광 만의 세기이고, 둘째 항은 물체광 만의 세기이며 세째 항 과 넷째 항이 각각 허상 항과 실상 항을 나타낸다. 따라서 첫째항과 둘째 항은 영차회절광에 해당되며 셋째 항과 넷째 항이 임의의 각도로 회절하는 회절차수에 해당되는 항이다. 홀로그램 면에 형성된 간섭 문양을 Fresnel-Kirchhoff 적분을 이용하여 재생 파면을 얻을 수 있다. 재생된 파면은 식 (2)와 같다.^[15-17]

$$U(X, Y) = |U(X, Y)| e^{i\Phi(X, Y)} \\ = \frac{e^{-i2\pi d/\lambda}}{i\lambda d} e^{-ik(X^2 + Y^2)/2d} \\ \times \iint H(x, y) e^{-ik(x^2 + y^2)/2d} e^{ik(xX + yY)/2d} dx dy \quad (2)$$

식 (2)에서 (X, Y) 와 (x, y) 는 각각 재생면과 홀로그램면의 좌표이고, d 는 재생거리이다. 그리고 λ, k 는 각각 사용된 빛의 파장과 파수이며, $\Phi(X, Y)$ 는 시료에 의해 왜곡된 위상, $H(x, y)$ 는 홀로그램이다. 액체에 담겨있는 시료에 의한 위상 변화는 식 (3)과 같다.^[18, 19]

$$\Phi(X, Y) = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^t n_s(X, Y; z) dz + \frac{2\pi}{\lambda} \int_t^{t_0} n_r dz \\ = \frac{2\pi}{\lambda} [n_s(X, Y) - n_r(X, Y)] t(x, y) + \frac{2\pi}{\lambda} n_r t_0 \quad (3)$$

식 (3)에서 n_s, n_r 는 각각 시료와 액체의 굴절률이고, $t(x, y), t_0$ 는 각각 시료의 3차원 형상과 액체의 두께이다. 식 (3)은 액체의 두께를 포함하고 있는데, 시료내의 상대적 위상 변화만 고려하면 $\frac{2\pi}{\lambda} n_r t_0$ 무시할 수 있다. 식 (3)는 위상 변화가 시료의 형상과 굴절률에 의존함을 보여주고 있다. 시료의 굴절률을 구하기 위해서는 형상정보($t(x, y)$)를 제거하여야한다. 이를 위해 시료를 담그는 액체의 굴절률을 변화시켜 주면 같은 형상에 대해 다른 위상 정보를 얻을 수 있다. 굴절률이 다른 2개의 액체에 의한 위상 변화는 식 (4)와 같다.

$$\Phi_1(X, Y) = \frac{2\pi}{\lambda} [n_s(X, Y) - n_{r1}(X, Y)] t(x, y) \\ \Phi_2(X, Y) = \frac{2\pi}{\lambda} [n_s(X, Y) - n_{r2}(X, Y)] t(x, y) \quad (4)$$

식 (4)에서 $\Phi_1(X, Y), \Phi_2(X, Y)$ 는 각각 굴절률이 다른 액체 (n_{r1}, n_{r2})를 이용하여 얻은 위상 변화이다. 식 (3)을 이용하여 형상정보를 제거하고 굴절률 정보를 식 (5)와 같이 얻을 수 있다.

$$n_s(X, Y) = \frac{\Phi_2(X, Y)n_{r1}(X, Y) - \Phi_1(X, Y)n_{r2}(X, Y)}{\Phi_2(X, Y) - \Phi_1(X, Y)} \quad (5)$$

식 (5)는 두 개의 다른 액체와 DHM을 이용하여 형상에 관계없이 시료의 굴절률, 굴절률 분포를 알 수 있음을 보여주고 있다.

III. 실험 및 결과

그림 2에 투과형 홀로그래피 현미경의 개략도를 나타내었다. 기본적인 구성은 마흐젠더 간섭계와 같다. 사용한 광원은 10 mW He-Ne 레이저이고, 시료를 투과한 영상을 확대하기 위하여 현미경 대물렌즈 ML(Mitutoyo LWD 50X, NA=0.55)을 사용하였다. 가변필터는 간섭 문양의 명암대비가 최대한 홀로그래프를 얻기 위하여 사용하였다. 홀로그래프를 저장하기 위하여 CCD(IMPERX)를 사용하였고, CCD의 픽셀크기는 7.4 μm×7.4 μm이고 픽셀 개수는 1024×1024이다. 사용한 시료는 필름 타입의 사출된 이등변 삼각형, 정삼각형 코너큐

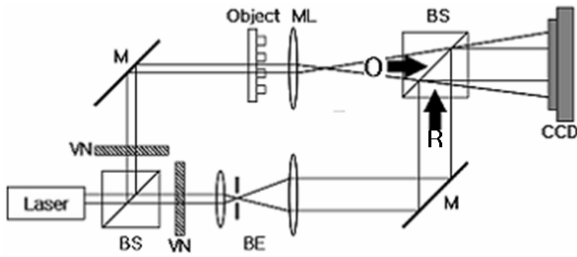


FIG. 2. Schematic diagram of experimental set-up for transmission DHM. VN: variable neutral density filter, BS: Beam splitter, M: Mirror, O: Objective light, R: Reference light, BE: Beam expander, ML: Objective lens.

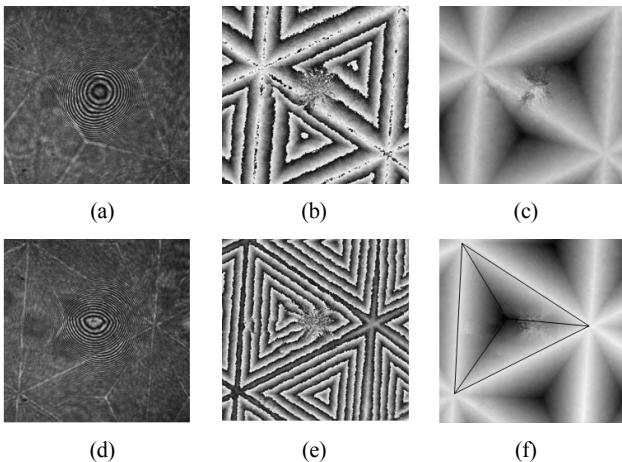


FIG. 3. Measurement of regular triangle micro corner cubes with liquids of different refractive index. (a), (b), (c) and (d), (e), (f) are results of refractive index of 1.528 and 1.544, respectively. (a), (d) hologram; (b), (e) reconstructed phase image; (c), (f) 3D grey level image.

브이다. 각각의 디자인 값은 200×200×200 μm, 220×193×193 μm이다. 시료를 담는 액체는 Cargille에서 구입한 굴절률이 각각 1.528, 1.544 인 액체를 사용하였다.

그림 3은 정삼각형 코너큐브의 측정결과이다. 그림 3(a), (b), (c)는 굴절률이 1.528인 액체에 시료를 잠겨 실험한 결과이고, 그림 3(d), (e), (f)는 굴절률이 1.544 인 액체에 시료를 잠겨 실험한 결과이다. 그림 3(a), (d)는 홀로그래프, (b), (e)는 홀로그래프를 이용하여 재생한 위상영상, (c), (f)는 위상필침을 사용하여 얻은 3차원 회색조 영상이다. 위상 필침은 Flynn 방법을 이용하였다.^[20] 시료의 굴절률을 구하기 위해 그림 3(c), (f) 데이터와 식 (5)를 이용하였으며, 그 결과 굴절률은 1.5030±0.0002이었다. 이 굴절률 값을 이용하여 3차원 형상의 높이를 측정한 결과 81.50±0.03 μm이었고, 이 시료를 공초점 현미경을 이용하여 측정한 결과 높이는 81.93±0.02 μm이었다.

그림 4는 이등변 삼각형 코너큐브의 측정결과이다. 그림 4(a), (b), (c)는 굴절률이 1.528인 액체에 시료를 잠겨 실험한 결과이고, 그림 4(d), (e), (f)는 굴절률이 1.544 인 액체에 시료를 잠겨 실험한 결과이다. 그림 4(a), (d)는 홀로그래프, (b), (e)는 홀로그래프를 이용하여 재생한 위상영상, (c), (f)는 위상 필침을 사용하여 얻은 3차원 회색조 영상이다. 이등변 삼각형 코너큐브의 굴절률은 1.5030±0.0001 이었다. 이 굴절률 값을 이용하여 3차원 형상의 높이를 측정한 결과는 81.79±0.05 μm 이었고, 이 시료를 공초점 현미경을 이용하여 측정 한 결과는 81.92±0.01 μm 이었다. 그림 5는 실험에 사용한 시료를 confocal 현미경으로 측정 한 결과이다.

위의 실험에서 각각의 굴절률 액체를 이용하여 측정할 때, 같은 위치에서 측정하는 것이 바람직하나 본 연구에서는 시료의 모양이 모두 동일하다고 가정하고 실험하였다. 위의 실험 결과로부터 액체와 DHM을 이용하여 시료의 굴절률 값과

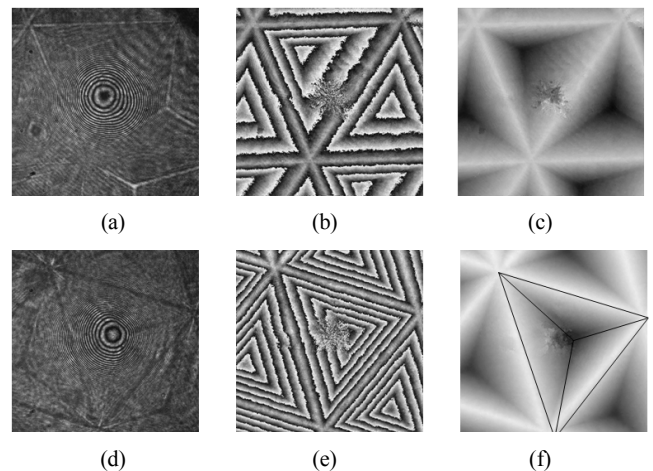


FIG. 4. Measurement of isosceles triangle micro corner cubes with liquids of different refractive index. (a), (b), (c) and (d), (e), (f) are results of refractive index of 1.528 and 1.544, respectively. (a), (d) hologram; (b), (e) reconstructed phase image; (c), (f) 3D grey level image.

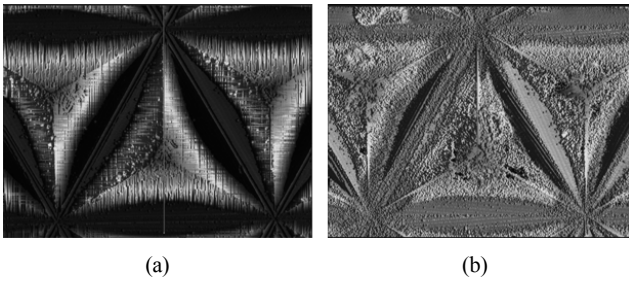


FIG. 5. Measurements results of triangle corner cube by confocal microscope. (a) regular triangle (b) isosceles triangle.

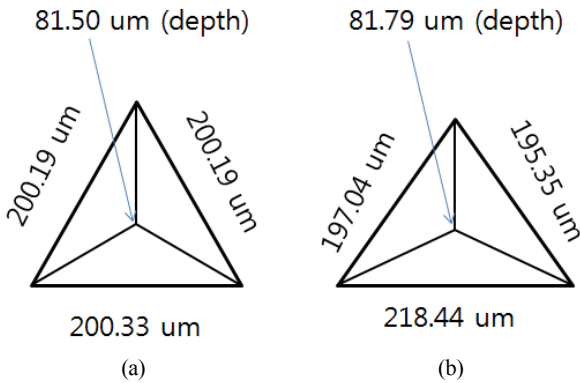


FIG. 6. Measurements results of triangle corner cube. (a) regular triangle (b) isosceles triangle.

3차원 형상을 매우 정밀하게 측정 할 수 있음을 알 수 있다. 그림 6은 그림 3과 그림 4의 결과를 이용하여 코너큐브의 3차원 모양을 형상화한 것이다. 이 값은 디자인한 값과 매우 유사하였다.

IV. 결 론

액체를 이용한 DHM은 사용된 빛의 파장 보다 큰 단차를 측정할 때 광 경로차를 줄여주기 위해 사용되는 방법이다. 투과형 DHM을 이용하여 3차원 형상을 측정하기 위해서는 시료의 정확한 굴절률 정보가 필요하다. 그러나 사출 방법을 이용하여 광학제품을 제작할 때는 인가하는 열의 영향으로 물질의 굴절률 특성이 변화한다. 그러므로 사출된 렌즈의 광학적 특성을 알기 위해서는 사출된 광학기기의 굴절률 및 굴절률 분포를 정확히 측정하여야 한다. 본 연구에서는 이러한 요구를 만족하기 위해 2개의 액체와 투과형 DHM 방식을 이용하여 사출된 정삼각형 코너큐브와 이등변 삼각형 코너큐브의 굴절률 값과 3차원 형상을 측정하였다. 측정 결과를 공초점 현미경 측정 결과와 비교하여 그 결과가 매우 잘 일치함을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 “제주대학교 학술진흥연구비 지원사

업”에 의하여 연구되었음

References

1. S. Baumer, *Handbook of Plastic Optics* (Wiley-VCH Verlag GmbH, New York, USA, 2005).
2. S. Baumer, L. Shulepova, J. Willemse, and K. Renkmene, “Integral optical system design of injection molded optics,” *Proc. SPIE* **5173**, 38 (2003).
3. W. Choi, C. Fang-Yen, K. Badizadegan, S. Oh, N. Lue, R. Dasari, and M. S. Feld, “Tomographic phase microscopy,” *Nature Methods* **4**, 717-719 (2007).
4. Y. Sung, W. Choi, C. Fang-Yen, K. Badizadegan, R. Dasari, and M. S. Feld, “Optical diffraction tomography for high resolution live cell imaging,” *Opt. Express* **17**, 266-277 (2009).
5. Z. Liu, X. Dong, Q. Chen, C. Yin, Y. Xu, and Y. Zheng, “Nondestructive measurement of an optical fiber refractive-index profile by a transmitted-light differential interference contact microscope,” *Appl. Opt.* **43**, 1485-1492 (2004).
6. I. Banyasz, “Direct measurement of the refractive index profile of phase gratings, recorded in silver halide holographic materials by phase-contrast microscopy,” *Appl. Phys. Lett.* **83**, 4282-4284 (2003).
7. Y. S. Ghim and S. W. Kim, “Thin-film thickness profile and its refractive index measurements by dispersive white-light interferometry,” *Opt. Express* **14**, 11885-91 (2006).
8. K. M. Yassien, “Comparative study on determining the refractive index profile of polypropylene fibres using fast Fourier transform and phase-shifting interferometry,” *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **11**, 075701 (2009).
9. S. D. Nicola, P. Ferraro, A. Finizo, G. Pesce, and G. Pierattini, “Reflective grating interferometer for measuring the refractive index of transparent materials,” *Opt. Commun.* **118**, 491-494 (1995).
10. C. Y. Han, Z. Y. Lee, and Y. F. Chao, “Determining thickness of films on a curved substrate by use of ellipsometric measurements,” *Appl. Opt.* **48**, 3139-3143 (2009).
11. Z. Liu, Y. Zhang, S. W. Kok, B. P. Ng, and Y. C. Soh, “Near-field ellipsometry for thin film characterization,” *Opt. Express* **18**, 3298-3310 (2010).
12. Y. F. Chao and K. Y. Lee, “Index profile of radial gradient index lens measured by imaging ellipsometric technique,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **44**, 1111-1114 (2005).
13. J. W. Goodman and R. W. Lawrence, “Digital image formation from electronically detected holograms,” *Appl. Phys. Lett.* **11**, 77-79 (1967).
14. M. A. Kronrod, N. S. Merzlyakov, and L. P. Yaroslavski, “Reconstruction of hologram with a computer,” *Sov. Phys. Tech.* **17**, 434-444 (1972).
15. 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).

16. H. Cho, D. Kim, W. Jung, S. Shin, and Y. Yu, "Dual-wavelength digital holography microscopy for BGA measurement using partial coherence source," *J. Opt. Soc. Korea* **15**, 352-356 (2011).
17. U. Schnars, "Direct phase determination in hologram interferometry with use of digitally recorded holograms," *J. Opt. Soc. Am. A* **11**, 2011-2015 (1994).
18. B. Rappaz, P. Marquet, E. Cuhe, Y. Emery, C. Depeursinge, and P. J. Magistretti, "Measurement of the integral refractive index and dynamic cell morphometry of living cells with digital holographic microscopy," *Opt. Express* **13**, 9361-9373 (2005).
19. L. A. Gerasimova, "Interferometric measurement of the refractive-index gradient distribution in gradient-index optical blanks," *Appl. Opt.* **35**, 2997-3001 (1996).
20. D. C. Ghiglia and M. D. Pritt, *Two-Dimensional Phase Unwrapping* (John Wiley & Sons. Inc., USA, 1999).