

# 변형된 코노스코픽 홀로그래피를 이용한 바이어스와 공액영상의 제거

(Removal of bias and conjugate image using the modified conosopic holography)

김수길\*

(Soo-Gil Kim)

## Abstract

Conoscopic holography, which consists of two linear polarizers and two wave plates, and an uniaxial crystal, is incoherent holographic technology for three-dimensional display. In the uniaxial crystal, the wave from object divides into extraordinary and ordinary waves and phase difference between two waves is caused by the different refractive index of two waves. Four intensity patterns, which are made by phase difference, are obtained using LCLV(liquid crystal light valve) and conosopic holography system. By combining four intensity patterns, the complex hologram without bias and conjugate image. In this paper, we propose the optimized system, which consists of a wave plate and a linear polarizer, and uniaxial crystal. In the proposed system, it doesn't need LCLV. By adjusting the azimuth angle of a linear polarizer and a wave plate, we derive four intensity patterns in recording plane. We demonstrate theoretically that the complex hologram with bias and a conjugate image is obtained using the proposed system.

Key Words : Conoscopic Holography, Optimization, Uniaxial Crystal, Bias, Conjugate Image, Incoherent Holography

## 1. 서 론

홀로그래피는 3차원 영상을 표현할 수 있는 기술로서 최근에 많은 관심을 받고 있는 기술이다[1]. 홀로그래피는 크게 레이저와 일반광을 이용하여 대상물체를 기록하고 재생하는 두 가지 기술로 분류할 수 있다. 레이저를 이용하여 실내에서 3차원 물체에 대한 홀

로그램을 생성하는 것은 상업적으로 이루어지고 있을 정도로 쉬운 편이다. 그러나, 실외환경에서 3차원 물체에 대한 홀로그램을 만드는 것은 가간섭길이의 한계로 인해 쉽지 않은 일이다. 이를 극복하기 위해 일반광을 이용하여 물체의 홀로그램을 생성하고 재생할 수 있는 인코히어런트 홀로그래피 기술이 발표되었다[2-7].

인코히어런트 홀로그래피의 하나인 코노스코픽 홀로그래피(conoscopic holography)는 Psaltis 그룹에 의해 1985년 발표되었다[8].

비등방성 매질에서는 보통파동(ordianry wave)과

\* Main author : Professor, Dept. of Digital Control,  
Hoseo University  
Tel : 041-540-5676, Fax : 041-540-5587  
E-mail : sgkim@hoseo.edu  
Received : 2015. 11. 2.  
Accepted : 2015. 11. 25.

특수파동(extraordinary wave)에 대한 굴절률이 다르  
고 이에 따라 두 파동간에 위상차가 생기게 된다.

비등방성 매질에서는 보통파동(ordianry wave)과  
특수파동(extraordinary wave)에 대한 굴절률이 다르  
고 이에 따라 두 파동간에 위상차가 생기게 된다. 코  
노스코픽 홀로그래피는 이를 이용하여 3차원 물체의  
홀로그래프를 생성할 수 있는 기술이다.

현재 이 기술은 3차원 물체의 홀로그래프 생성 뿐만  
비접촉진단과 같은 분야에서도 활발하게 응용이 이루어  
지고 있다[9-10].

코노스코픽 홀로그래피는 단축결정(uniaxial  
crystal)과 두 개의 선형편광기(linear polarizer)와 두  
개의 파장판(wave plate)을 이용하여 시스템이 구성  
된다. 본 연구에서는 기존 방식을 최적화하여 단축결  
정과 파장판 및 선형편광기를 하나씩만 이용하여 기  
존방식과 동일한 결과를 얻을 수 있는 시스템을 제안  
한다. 수식적 유도를 통해 제안된 방식의 유효성을 입  
증할 것이다.

## 2. 본 론

### 2.1 코노스코픽 홀로그래피

코노스코픽 시스템은 그림 1과 같이 선형편광기와  
파장판들 사이에 단축결정이 위치한 구조를 가지고  
있다. 그림 1에서 보는 바와 같이 한 점에서 나온 단색  
광은 단축결정의 왼쪽에 있는 선형편광기와 파장판을  
지나간다. 선형편광기를 통과한 선형 편광(linear  
polarization)은  $\lambda/4$  파장판을 통과하면서 원형 편광  
(circular polarization)으로 변환된다. 단축결정의 복  
굴절로 인해 원형 편광은 단축결정을 통과하는 과정  
에서 두 개의 파동으로(보통파동과 특수파동) 분할되  
며, 이 두 개의 파동은 단축결정내에서 다른 속도로 진  
행하게 된다. 두 개의 파동은 단축결정을 통과한 후에  
단축결정의 오른쪽에 있는 파장판과 선형편광기를 통  
과하게 되는데, 오른쪽에 있는 파장판은 단축결정을  
통과한 원형편광을 선형편광으로 변환시키는 역할을  
한다. 파장판과 선형편광기를 통과한 두개의 파동은  
출력면에서 FZP(Fresnel Zone Pattern) 모양의 간섭

패턴을 생성하게 된다. 코노스코픽 홀로그래피는 다  
른 종류의 홀로그래피와 마찬가지로 각 점광원의 횡  
축과 종축방향의 위치를 암호화한 FZP를 기록면에서  
만들며, 이러한 FZP들의 중첩으로 이루어지는 것이  
바로 홀로그램이다. 기존 홀로그래피에서는 신호와  
기준빔이 다른 경로를 가지면서 홀로그램을 생성하지  
만 코노스코픽 홀로그래피에서는 신호와 기준빔이 동  
일한 기하학적인 경로를 거치면서 다른 길이의 광로  
를 만들어 홀로그램을 생성한다는 것이 가장 큰 차이  
점이다.

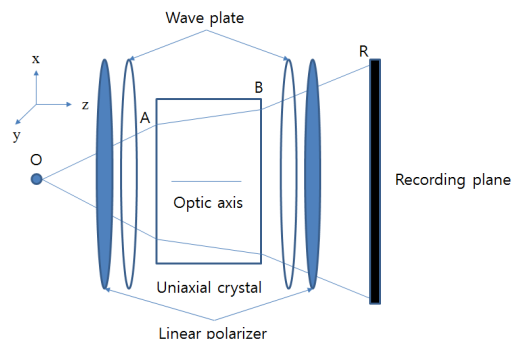


Fig. 1. The set up of conoscopic holography

동축(on-axis) 코노스코픽 홀로그래피의 문제점은  
홀로그램에 포함된 바이어스와 공액영상이다. 이 문  
제를 해결하기 위해 Mugnier와 Sirat[11]은 단축결  
정 왼쪽의 선형편광기와 파장판 다음에 LCLV  
(liquid-crystal light valve)를 삽입하여 두 개의 파동  
에 대한 위상지연을 제어함으로써 4개의 PSF  
(point-spread function)을 얻고, 이를 조합함으로써  
바이어스와 공액영상이 제거된 실상을 얻을 수 있었  
다. 표 1은 LCLV의 위상지연에 따라 얻을 수 있는  
PSF를 보여준다.

Table 1. PSF with the phase retardation of LCLV.

LCLV의 위상지연	Intensity
0	$\{1 + \cos\phi\}/2$
$\lambda$	$\{1 - \cos\phi\}/2$
$\lambda/4$	$\{1 + (2/\pi)\sin\phi\}/2$
$-\lambda/4$	$\{1 - (2/\pi)\sin\phi\}/2$

표 1의 네 식을 조합하여 식 (1)과 같은 바이어스와 공액영상이 제거된 복소홀로그램을 얻을 수 있다.

$$H_r(x,y) = \exp(-i\phi) \quad (1)$$

여기서,  $\phi = \theta_e - \theta_o = \frac{2\pi}{\lambda}(n_e(\theta) - n_o)L$ 이며,  $\lambda$ 는 빛의 파장이며,  $L$ 은 단축결정의 길이를 나타낸다. 그리고  $n_o$ 와  $n_e(\theta)$ 는 보통파동과 특수파동에 대한 굴절률(refractive index)을 나타낸다.

이 방식은 바이어스와 공액영상을 제거하기 위해서는 기존 시스템에 능동소자인 LCLV를 추가해야만 하는 단점을 가지고 있다.

## 2.2 변형 코노스코픽 홀로그래피

본 연구에서는 바이어스와 공액영상을 제거하기 위하여 그림 2와 같은 시스템을 제안하였다. 제안된 방식에서는 기존방식과 달리 능동소자인 LCLV와 단축결정의 왼쪽에 있던 선형편광기와 파장판을 제거함으로써 단축결정과 수동소자인  $\lambda/4$  파장판 그리고 선형편광기만으로 구성하였다.

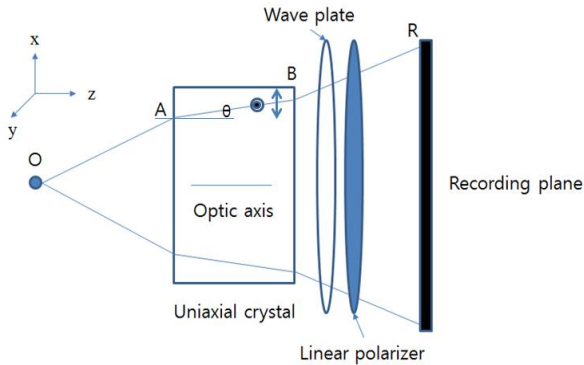


Fig. 2. Proposed system

그림 2에서 단축결정내에서 보통파동과 특수파동은 근사적으로 동일한 기하학적인 경로를 지나가며, ●는 보통파동의 편광방향, ◐는 특수파동의 편광방향을 나타낸다.  $\theta$ 는 단축결정에서 광축(optic axis)과 파동이 진행하는 경로와의 각을 나타낸다. 단축결정에서 파

동은 보통파동과 특수파동으로 나누어지게 되는데, 각 파동이 진행하는 광로는 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$L_o = \overline{OA} + n_o \overline{AB} + \overline{BR} \quad (2)$$

$$L_e = \overline{OA} + n_e(\theta) \overline{AB} + \overline{BR}$$

여기에서,  $L_o$ 와  $L_e$ 는 각각 보통파동과 특수파동의 광로를 나타내며,  $n_o$ 와  $n_e(\theta)$ 는 보통파동과 특수파동에 대한 굴절률(refractive index)을 나타낸다.

제안된 방식에서 O에서 출발한 파동이 단축결정(uniaxial crystal)과 파장판 및 선형편광기를 통과한 후에 기록면에 도달했을 때의 파동은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$E_{out} = A(\varphi_2)W(\varphi_1)E_{input} \quad (3)$$

여기서,  $E_{input}$ 은 단축 결정을 통과한 후의 파동을 나타내며,  $A(\varphi_2)$ 와  $W(\varphi_1)$ 는 각각 선형편광기와  $\lambda/4$ 파장판의 Jones 행렬을 나타낸다.  $E_{input}$ 과 편광소자들의 Jones 행렬들은 다음과 같이 표현할 수 있다[12].

$$E_{input} = \begin{pmatrix} P_e \\ P_o \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ae^{-j\theta_e} \\ be^{-j\theta_o} \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$A(\varphi_2) = \begin{pmatrix} \cos^2 \varphi_2 & 1/2 \sin 2\varphi_2 \\ 1/2 \sin 2\varphi_2 & \sin^2 \varphi_2 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$W(\varphi_1) = \begin{pmatrix} i\sqrt{2} \sin^2 \varphi_1 + e^{-i\frac{\pi}{4}} & -i\frac{\sqrt{2}}{2} \sin 2\varphi_1 \\ -i\frac{\sqrt{2}}{2} \sin 2\varphi_1 & -i\sqrt{2} \sin^2 \varphi_1 + e^{i\frac{\pi}{4}} \end{pmatrix} \quad (6)$$

여기서,  $P_o$ 와  $P_e$ 는 보통파동과 특수파동을 나타내며,  $\varphi_1$ 과  $\varphi_2$ 는 각각 파장판과 선형편광기의 방위각을 나타낸다.  $\Gamma$ 는 파장판의 위상지연을 나타낸다. 그리고, 보통파동과 특수파동의 위상은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\theta_o = \frac{2\pi}{\lambda} (\overline{OA} + n_o \overline{AB} + \overline{BR}) \quad (7)$$

$$\theta_e = \frac{2\pi}{\lambda} (\overline{OA} + n_e(\theta) \overline{AB} + \overline{BR})$$

제안된 시스템에서 식 (3)~(6)을 이용하여 다음과 같은 선형편광기와 파장판의 방위각 조합에 대하여 빛의 세기(intensity)를 구한다. 이 때 선형편광기와 파장판의 slow axis에 대한 방위각은 그림 2에서의 양의  $x$  축을 기준으로 하여 양이나 음의 방향으로 회전한 것이다.

1) 선형편광기가 45도이고 파장판이 0도 일 때

기록면에서의 파동은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} E_{out} &= A(\pi/2)W(0)E_{input} \\ &= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 11 \\ 11 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-i\pi/4} & 0 \\ 0 & e^{-i\pi/4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} ae^{-i\theta_e} \\ be^{-i\theta_o} \end{pmatrix} \\ &= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} (\frac{\sqrt{2}}{2} - i\frac{\sqrt{2}}{2})ae^{-i\theta_e} + (\frac{\sqrt{2}}{2} + i\frac{\sqrt{2}}{2})ae^{-i\theta_o} \\ (\frac{\sqrt{2}}{2} - i\frac{\sqrt{2}}{2})ae^{-i\theta_e} + (\frac{\sqrt{2}}{2} + i\frac{\sqrt{2}}{2})ae^{-i\theta_o} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} E_{outx} \\ E_{outy} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)에서 빛의 세기(intensity)는 다음 식과 같이 하여 구할 수 있다.

$$I_1 = |E_{outx}|^2 + |E_{outy}|^2 \quad (9)$$

식 (9)를 이용하여 구한 빛의 세기는 식 (10)과 같이 표현할 수 있다.

$$I_1 = \frac{1}{2}a^2 + \frac{1}{2}b^2 - ab \sin \phi \quad (10)$$

2) 선형편광기가 45도이고 파장판이 45도일 때

기록면에서의 파동은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$E_{out} = A(\pi/2)W(\pi/2)E_{input} \quad (11)$$

$$= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 11 \\ 11 \end{pmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{pmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} ae^{-i\theta_e} \\ be^{-i\theta_o} \end{pmatrix}$$

식 (11)을 정리하고 정리된 식으로부터 빛의 세기를 구하면 식 (12)와 같이 표현할 수 있다.

$$I_2 = \frac{1}{2}a^2 + \frac{1}{2}b^2 + ab \cos \phi \quad (12)$$

3) 선형편광기가 45도이고 파장판이 -45도일 때

기록면에서의 파동은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$E_{out} = A(\pi/2)W(-\pi/2)E_{input} \quad (13)$$

$$= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 11 \\ 11 \end{pmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} ae^{-i\theta_e} \\ be^{-i\theta_o} \end{pmatrix}$$

식 (13)을 정리하고 정리된 식으로부터 빛의 세기를 구하면 식 (14)와 같이 표현할 수 있다.

$$I_3 = \frac{1}{2}a^2 + \frac{1}{2}b^2 - ab \cos \phi \quad (14)$$

4) 선형편광기가 -45도이고 파장판이 0도일 때

기록면에서의 파동은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$E_{out} = A(-\pi/2)W(0)E_{input} \quad (15)$$

$$= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-i\pi/4} & 0 \\ 0 & e^{-i\pi/4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} ae^{-i\theta_e} \\ be^{-i\theta_o} \end{pmatrix}$$

식 (15)를 정리하고 정리된 식으로부터 빛의 세기를 구하면 식 (16)과 같이 표현할 수 있다.

$$I_4 = \frac{1}{2}a^2 + \frac{1}{2}b^2 + ab \sin \phi \quad (16)$$

여기에서  $\phi = \theta_e - \theta_o = \frac{2\pi}{\lambda} (n_e(\theta) - n_o) \overline{AB}$ 이며, 보통 파동과 특수파동간의 위상차를 나타낸다. 이것은 파

동이 단축결정을 통과하면서 발생한다. 따라서, 위상차를 크게 하기 위해서는 굴절률차가 큰 매질을 사용하든지 아니면 단축결정의 길이를 크게 하면 된다. 여기에서  $n_e(\theta)$ 와  $n_o$ 는 각각 특수파동과 보통파동의 굴절률을 나타낸다.

식 (10), (12), (14), (16)으로부터 빛의 세기는 물체에 대한 3차원정보를 가지고 있는 위상차  $\phi$ 가 존재해야만 홀로그램이 생성됨을 알 수 있다.

식 (10)과 (16)을 조합하여 복소홀로그램의 허수부인  $\sin$ 항을 구할 수 있고, (12)와 (14)를 조합하여 실수부인  $\cos$ 항을 구할 수 있다. 이 두 항을 결합하여 식 (1)과 같은 복소홀로그램을 얻을 수 있다.

표 1은 선형편광기와 파장판의 방위각 조합에 따른 빛의 세기 패턴의 단면도를 나타낸다. 문헌 [13]에 따르면, 두 파동의 위상차는 다음과 같이 정의된다.

$$\phi = \theta_e - \theta_o = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\Delta n L r^2}{n_c^2 z_c^2} \quad (17)$$

여기에서,  $\Delta n = n_e - n_o$ ,  $n_c = \frac{2n_o n_e^2}{n_o + n_e}$ 이며, 유효굴절률이다. 그리고,  $z_c$ 는 보통파동과 특수파동의 진행거리의 곱에 대한 제곱근을 나타내며,  $r^2 = (x - x')^2 + (y - y')^2$ 이다.  $(x, y)$ 는 물체에 대한 좌표를  $(x', y')$ 는 기록면에서의 좌표를 나타낸다. 본 연구에서 유도한 식으로부터 홀로그램이 정상적으로 생성되는지 확인하기 위해,  $n_e = 1.488$ ,  $n_o = 1.656$ ,  $n_c = 2.33$ ,  $\Delta n = -0.168$ ,  $z_c = 70\text{cm}$ ,  $\lambda = 632.8\text{nm}$ ,  $L = 25\text{mm}$ , 그리고 홀로그램의 크기는  $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 으로 놓고, 식 (17)과 식 (10), (12), (14), (16)을 이용하여 표 2에서의 빛의 세기에 대한 단면도를 구하였다. 이때  $(x, y) = (0, 0)$ 으로 가정하였다. 표 2에서 보는 바와 같이 원점에서의 점광원에 대하여 FZP가 정상적으로 생성되는 것을 볼 수 있다.

본 연구에서 제안한 방식은 기존 방식[11]보다 수동소자의 개수는 절반이며 또한, 기존 방식의 경우에는 바이어스와 공액영상을 제거하기 위해서는 능동소자인 LCLV를 사용해야만 4가지 빛의 세기를 구할 수

있지만, 본 연구에서 제안한 방식은 능동소자를 사용하지 않고 2개의 수동소자만으로 4가지 빛의 세기를 구할 수 있었다. 이렇게 구한 빛의 세기들을 이용하면 바이어스와 공액영상이 제거된 복소홀로그램을 얻을 수 있다.

Table 2. Intensity cross section with the azimuth angle of a linear polarizer and a wave plate

선형편광기의 방위각	파장판의 방위각	빛의 세기의 단면도
	0도	
45도	45도	
	-45도	
-45도	0도	

### 3. 결 론

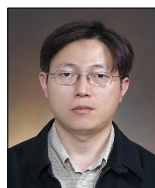
코노스코픽 홀로그래피는 선형편광기 및 파장판을 각각 두 개씩 사용하여 단축결정과 함께 구성된다. 코

노스코픽 홀로그래피는 능동소자인 LCLV를 사용하여 4가지 빛의 세기를 구하여 복소홀로그램을 구성한다. 본 연구에서는 기존 시스템을 최적화하여 파장판 및 선형편광기를 하나씩만 이용하여 기존시스템과 동일한 결과를 얻을 수 있는 시스템을 제안하였다. 제안된 방식에서는 수동소자인 파장판과 선형편광기의 방위각을 조정하여 출력면에서 4가지 빛의 세기를 유도하였고, 이를 이용하여 복소홀로그램의 실수부와 허수부를 구할 수 있음을 보였다.

## References

- [1] D. Gabor, "A new microscopic principle," Nature, vol. 161, pp. 777-778, 1948.
- [2] L. Mertz and N. O. Young, "Fresnel transformation of optics," in Proceedings of the Conference on Optical Instruments and Techniques, K. J. Habell, ed. (Chapman & Hall, London, 1962) p. 305.
- [3] A. W. Lohmann, "Wavefront reconstruction for incoherent objects," J. Opt. Soc. Am., vol. 55, no. 11, pp. 1555-1556, 1965.
- [4] G. Cochran, "New method of making Fresnel transforms with incoherent light," J. Opt. Soc. Am., vol. 56, no. 11, pp. 1513-1517, 1966.
- [5] P. J. Peters, "Incoherent holograms with mercury light source," Appl. Phys. Lett., vol. 8, no. 8, pp. 209-210, 1966.
- [6] J. Rosen and G. Brooker, "Digital spatially incoherent Fresnel holography," Opt. Lett. vol. 32, no. 8, pp. 912-914, 2007.
- [7] J. Hong and M. K. Kim, "Single-shot self-interference incoherent digital holography using off-axis configuration," Opt. Lett. vol. 38, no. 23, pp. 5196-5199, 2013.
- [8] G. Sirat and D. Psaltis, "Conoscopic holography," Opt. Lett. Vol 10, pp. 4-6, 1985.
- [9] Y. Malet and G. Y. Sirat, "Conoscopic Holography application: multipurpose rangefinders", J. Opt. Vol 29, pp. 183-187, 1998.
- [10] L. M. Mugnier, "Conoscopic holography: toward three-dimensional reconstructions of opaque objects", Appl. Opt. Vol 34, no 8, pp. 1363-1371, 1995.
- [11] L. M. Mugnier and G. Y. Sirat, "On-axis conoscopic holography without a conjugate image," Opt. Lett. vol. 17, no. 4, pp. 294-296, 1992.
- [12] Yariv and Yeh, Optical Waves in Crystals, Wiley Interscience (Hoboken, New Jersey, 2003), Chap. 5.
- [13] G. Y. Sirat, "Conoscopic holography. I. Basic principles and physical basis," J. Opt. Soc. Am A, vol. 9, no. 1, pp. 70-83, 1992.

## ◇ 저자소개 ◇



### 김수길 (金秀吉)

1965년 8월 2일생. 1988년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1991년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1997년~현재 호서대학교 공대 디지털제어공학과 교수.