

論文96-33A-10-18

# 바이어스와 공액영상이 제거된 인코히어런트 삼각 홀로그래피에 대한 이론적 연구

## (Theoretical Study on Incoherent Triangular Holography without Bias and Conjugate Image)

金秀吉\*, 金恩洙\*\*, 李赫\*, 李竝浩\*

(Soo-Gil Kim, Eun-Soo Kim, Hyuk Lee, and ByoungHo Lee)

### 요 약

본 논문에서는 인코히어런트 홀로그래피인 기존의 Cochran 삼각 간섭계의 근본적인 문제인 바이어스와 공액영상의 문제를 해결할 수 있는 새로운 변형된 Cochran 삼각 간섭계에 대한 이론적 분석과 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 제시하였다. 즉, 기존의 Cochran 삼각 간섭계에 편광 광분할기, wave plate, 선형편광기의 간단한 광학소자를 추가함으로써 바이어스와 공액영상을 제거할 수 있음을 Jones 행렬연산을 통해 이론적으로 보였으며, 또한 하나의 점광원에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 기존의 방법과 비교분석함으로써 본 논문에서 새로이 제시된 방법의 타당성을 검증하였다.

### Abstract

In this paper, the theoretical analysis and the computer simulation of a new modified Cochran's triangular interferometer as an incoherent holography, which can eliminate bias and conjugate image problems of the conventional Cochran's triangular interferometer, are presented. In other words, it is theoretically derived by using Jones matrix operation that bias and conjugate image can be removed by adding simple optical components including a polarizing beam splitter, wave plates, and linear polarizers to the conventional Cochran's triangular interferometer. Also, through the computer simulation with a point source, we demonstrated the validity of the suggested method by comparing the modified Cochran's triangular interferometer with the conventional one.

### I. 서 론

1948년 Gabor에 의해 최초로 제안된 광홀로그래피(optical holography) 기술<sup>11)</sup>은 1962년 Leith와 Upatniek<sup>12)</sup>에 의해 두 개의 빔을 이용한 off-axis 홀로그램이 발표된 이후 3차원 영상 디스플레이를 위한 홀로그래피 방법의 잠재력이 인정받기 시작하였다.

\* 正會員, 서울大學校 電氣工學部  
(School of Electrical Eng., Seoul National Univ.)

\*\* 正會員, 光云大學校 電子工學科  
(Dept. of Electronic Eng., Kwangwoon Univ.)

接受日字: 1996年4月23日, 수정완료일: 1996年10月7日

그러나 70, 80년대를 걸쳐 홀로그래피에 대한 연구가 활발히 진행되었지만 홀로그래피를 3차원 영상의 디스플레이를 위한 목적으로 사용하고자 할 때 여러가지 문제점이 나타나게 되어 그 응용이 크게 제한되었다.<sup>13)</sup>

특히, 기존의 홀로그래피는 레이저광을 이용하여 만들기 때문에 우리가 일상적으로 보는 야외풍경이나 실내의 방과 같이 부피가 큰 장면은 레이저광의 가간섭거리의 한계 때문에 홀로그램구성이 불가능하다. 더욱이, 현재의 레이저광원은 비효율적이며 에너지 이용효율이 매우 낮은 에너지 다소비 광원이므로 이러한 단점을 극복하기 위해서는 가간섭거리가 무한이라 할 수 있는 이상적인 광원을 만들고 이 광원의 이용 효율을 크게 높이면 되겠지만 현실적으로 기술적인 어려움이

많기 때문에 그 실현이 불가능하다.

따라서, 기존의 광홀로그래피가 가지고 있는 근본적인 문제점을 해결하기 위한 새로운 접근방법으로 태양 광에 의해 반사되는 자연광을 이용하는 인코히어런트 홀로그래피(incoherent holography)기술이 제시된 바 있다. 물체의 각 점의 위치와 광의 세기를 인코딩하는 Gabor zone pattern(GZP)의 중첩을 이용하는 것으로 삼각 간섭계<sup>[4]</sup>, 이중 초점을 가진 복굴절 렌즈를 이용한 진폭분할 간섭계<sup>[5]</sup> 그리고 코노스코픽 홀로그래피(conoscopic holography)<sup>[6]</sup> 등이 인코히어런트 홀로그래피 기술로서 제안되었다. 이중 코노스코픽 홀로그래피는 비등방성 결정에서 OW(ordinary wave)와 EOW(extraordinary wave)의 위상속도의 불일치를 이용하고, 삼각 간섭계는 한 쌍의 렌즈와 거울 그리고 광분할기와 같은 간단한 광학기구로 GZP를 만들게 된다. 그러나, 인코히어런트 홀로그래피는 on-axis 홀로그래피이기 때문에 두 가지의 근본적인 단점을 가지고 있다. 즉, 바이어스의 영향이 크고, 홀로그램 복원시 실상과 허상이 동시에 나타나므로 복원된 영상의 명암비를 크게 낮추게 된다는 것이다.

코노스코픽 홀로그래피에서는 복굴절 결정에서의 OW와 EOW의 속도차, LCLV(liquid crystal light valve), 마스크 등을 이용하여 바이어스와 공액영상을 없애는 방법이 제시됐는데<sup>[7]</sup>, 이 방법은 고가의 광학소자를 사용할 뿐만 아니라 바이어스와 공액영상이 없는 복소홀로그램의 실수부는 기본시스템을 이용하고 허수부는 기본시스템에 마스크를 새로 추가하여 구하게 되므로 마스크의 유무에 따른 두가지 시스템을 사용해야 하는 등의 문제점을 가지고 있다.

따라서, 본 논문에서는 복소홀로그램의 실수부와 허수부를 동일한 시스템에서 구할 수 있고, 렌즈와 거울 2개, 광분할기 1개로 간단하게 구성되는 Cochran 삼각 간섭계를 변형한 새로운 인코히어런트 홀로그래피 시스템을 제시하고자 한다. 이 시스템은 LCLV나 복굴절 결정과 같은 고가의 광학소자를 사용하지 않고 선형 편광기와 편광 광분할기, wave plate와 같은 간단한 광학소자를 이용하므로 구성이 간단하고, 동일한 시스템을 이용하여 복소홀로그램의 실수부와 허수부를 구하므로 시스템의 신뢰도가 뛰어난 장점을 가질 뿐만 아니라 차후에 동영상의 복소홀로그램을 구성할 때에도 사용될 수 있다.

II장에서는 본 논문에서 새로이 제안된 변형된

Cochran 삼각 간섭계 시스템에서 바이어스와 공액영상을 제거하는 방법을 이론적으로 유도하고, III장에서는 시뮬레이션을 통하여 II장에서 새로이 제시된 방법의 타당성을 입증하고자 한다.

## II. 변형된 Cochran 삼각 간섭계의 이론적 분석

### 1. Cochran 삼각 간섭계

Mertz와 Young은 가간섭 광원의 사용이 홀로그램 구성을 위한 필수적인 조건이 아니며, 다만 물체가 점들의 집합이라고 생각할 때, 홀로그램을 만들기 위해서는 각 점광원(point source)의 위치와 빛의 세기에 관한 정보를 가지는 2차원의 간섭패턴을 만드는 것이 필요할 뿐임을 지적한 바 있다<sup>[8]</sup>.

1966년에 발표된 Cochran 삼각 간섭계는 Mertz와 Young이 지적한 내용을 토대로 일반적인 레이저 홀로그래피가 가지고 있는 단점을 극복하기 위한 인코히어런트 홀로그래피의 새로운 접근방법으로 제안된 것이다. 이 간섭계는 인코히어런트한 광원에서 발산되는 빛이 광분할기에서 분할되어 하나는 시계방향으로 다른 하나는 반시계방향으로 진행한다. 시계 방향과 반시계 방향의 렌즈배율이 다르므로 시계방향과 반시계방향으로 진행한 빛은 결과적으로 출력면에서 위상차가 발생하게 되고 이 위상차로 인해 관측자나 광검출기로 간섭패턴을 얻을 수 있게 된다.

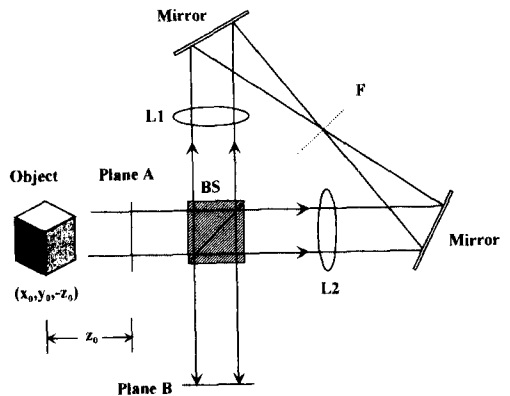


그림 1. Cochran 삼각 간섭계  
Fig. 1. Cochran's triangular interferometer.

그림 1은 Cochran 삼각 간섭계를 나타낸 것으로 그림에서 A면은 렌즈 L1과 L2로부터 각각  $f_1$ ,  $f_2$ 만큼

떨어진 평면이며 B면도 마찬가지이다. F는 렌즈 L1과 L2의 초점거리에 있는 지점으로서 필터가 위치한 곳을 나타낸다.

백색광원을 사용하면, 점광원에서 나오는 빛에는 파장이 다른 빛들이 혼재되어 있으나 필터 F에 의해 출력면(B면)에서는 특정한 파장만이 도달하게 되며 다른 점광원간에는 간섭무늬가 만들어지지 않는다. 따라서, 하나의 점광원에서 발산되는 빛은 출력면에서 특정한 파장에 의한 간섭무늬를 만들게 된다. 그러므로 단파장의 빛에 대하여 Cochran 삼각 간섭계를 해석할 수 있다. [4,9]

그림 1에서 좌표가  $(x_0, y_0, -z_0)$ 로 주어지는 임의의 물체의 한 점을 생각하자. 먼저, 물체에 파장  $\lambda$ 의 단색광을 조사하면, A면에서의 복소진폭은 Fresnel 근사를 이용하면 식 (1)과 같이 주어진다.

$$U(x, y) = \frac{-ik}{2\pi z_0} \exp \left[ -i \frac{k}{2z_0} \{ (x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 \} \right] \quad (1)$$

여기서,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  ( $k$ : wave number)이며, 수식에서 크기가 일정한 위상 계수는 생략하였다.

그림 1에서 빛은 두 개의 경로를 따라 A면에서 B면까지 진행하는 데, 간섭계를 따라서 하나는 시계방향으로 다른 하나는 반시계방향으로 진행하게 되며, 출력평면인 B면에서 시계방향과 반시계방향으로 진행해온 빛의 결과적인 복소 진폭은 식 (2), (3)과 같이 주어진다.

$$U_{cw}(x, y) = \frac{-ik}{2\sqrt{2}\pi z_0} \exp \left[ -i \frac{k}{2z_0} \{ (\alpha x - x_0)^2 + (\alpha y - y_0)^2 \} \right] \quad (2)$$

$$U_{ccw}(x, y) = \frac{-ik}{2\sqrt{2}\pi z_0} \exp \left[ -i \frac{k}{2z_0} \{ (\beta x - x_0)^2 + (\beta y - y_0)^2 \} \right] \quad (3)$$

여기서,  $\alpha = -\frac{f_1}{f_2}$ ,  $\beta = -\frac{f_2}{f_1}$  를 나타낸다. 따라서, 출력면에서의 전체 복소진폭은 다음과 같이 식 (2)와 식 (3)의 합으로 주어지게 되며,

$$U_B(x, y) = U_{cw}(x, y) + U_{ccw}(x, y) \quad (4)$$

$\alpha - \beta = 1$ 로 할 경우에 식 (4)의 빛의 세기는 다음과 같이 간단하게 정리된다.

$$I_B(x, y) = 2C^2 + 2C^2 \cos \left[ \frac{k}{2z_1} \{ (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 - (x_1^2 + y_1^2) \} \right] \quad (5)$$

여기서,  $C = \frac{k}{2\sqrt{2}\pi z_0}$ ,  $x_1 = \frac{x_0}{\alpha + \beta}$ ,  $y_1 = \frac{y_0}{\alpha + \beta}$ ,  $z_1 = -\frac{z_0}{\alpha + \beta}$

등을 나타낸다.

또한, 식 (5)의 cosine함수를 지수함수로 표현하게 되면 식 (6)과 같이 정리된다.

$$I_B(x, y) = 2C^2 + C^2 \exp \left[ i \frac{k}{2z_1} \{ (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 - (x_1^2 + y_1^2) \} \right] + C^2 \exp \left[ -i \frac{k}{2z_1} \{ (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 - (x_1^2 + y_1^2) \} \right] \quad (6)$$

식 (6)에서 첫 번째 항은 바이어스를 나타내며, 두 번째와 세 번째항은 복원될 때 실상과 허상을 각각 나타내는 데 동축상에 존재하게 된다. 식 (6)으로 표현된 간섭무늬를 복원할 때, 바이어스는 실상과 허상의 배경에 존재하여 관측하고자 하는 영상의 질을 떨어뜨리며, 식 (6)의 두 번째 항인 실상에 초점을 맞출 때는 허상이, 허상에 초점을 맞출 때는 실상이 동시에 관측되므로 관측되는 영상의 질이 크게 떨어지게 된다. 따라서, Cochran 삼각 간섭계를 이용하여 얻은 홀로그램은 복원될 때, 복원된 영상은 바이어스 및 분리되지 않은 공액영상 때문에 영상의 질이 떨어지며, 이러한 문제점으로 인해 인코히어런트 홀로그래피의 실질적인 응용이 크게 제한되었다.

### 2. 변형된 Cochran 삼각 간섭계

본 논문에서는 동축상에 존재하는 바이어스와 공액영상을 제거하기 위한 새로운 접근방법으로 기존의 Cochran 삼각 간섭계의 A면(입력면)과 B면(출력면)에 선형 편광기를 설치하고 x축과 y축에 평행한 편광을 분리하기 위한 편광 광분할기, 그리고 wave plate를 새로이 추가함으로써 바이어스와 공액영상을 제거할 수 있는 변형된 Cochran 삼각 간섭계를 제시하고자 한다.

그림 2는 본 논문에서 새로이 제시된 변형된 Cochran 삼각 간섭계로 PL1과 PL2는 선형편광기, WP1과 WP2는 wave plate 그리고, PBS는 편광 광분할기를 각각 나타낸다.

그림 2에서 wave plate WP1의 slow axis는 x축과 일치하도록 하고 wave plate WP2는 x축에 대하여 45°회전되도록 구성하며, 선형편광기 PL1은 x축과 45°기울어지도록 설치한다. 편광 광분할기는 선형 편광기 PL1을 통과한 빛을 x축 방향과 y축 방향의 편광을 가진 빛으로 분할하는 역할을 하며, 선형편광기 PL2는 x축 편광기를 나타낸다.

따라서, Jones 벡터 표현<sup>[10]</sup>을 이용하여 PL2 앞의 출력면에서의 빛의 복소진폭을 계산하면 식 (7)과 같으며,

$$\begin{aligned} \vec{U}(x, y) &= \begin{pmatrix} \cos \frac{\Gamma_2}{2} & -i \sin \frac{\Gamma_2}{2} \\ -i \sin \frac{\Gamma_2}{2} & \cos \frac{\Gamma_2}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-i\Gamma_1} & 0 \\ 0 & e^{i\Gamma_1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_{ccw}(x, y) \\ U_{cw}(x, y) \end{pmatrix} \\ &= e^{-i\frac{\Gamma_1}{2}} \begin{pmatrix} \cos \frac{\Gamma_2}{2} U_{ccw}(x, y) - i e^{i\Gamma_1} \sin \frac{\Gamma_2}{2} U_{cw}(x, y) \\ -i \sin \frac{\Gamma_2}{2} U_{ccw}(x, y) + e^{i\Gamma_1} \cos \frac{\Gamma_2}{2} U_{cw}(x, y) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

PL2를 통과한 복소진폭은 식 (8)과 같이 주어진다.

$$\vec{U}_B(x, y) = e^{-i\frac{\Gamma_1}{2}} \left\{ \cos \frac{\Gamma_2}{2} U_{ccw}(x, y) - i e^{i\Gamma_1} \sin \frac{\Gamma_2}{2} U_{cw}(x, y) \right\} \hat{x} \quad (8)$$

여기서  $\hat{x}$ 는 xy좌표계의 x축방향의 단위벡터를 나타낸다. 따라서, 식 (8)에서  $\Gamma_1$ 과  $\Gamma_2$ 의 4개의 조합을 이용함으로써 영상복원시 바이어스와 공액영상이 없는 복소홀로그램을 얻을 수 있게된다.

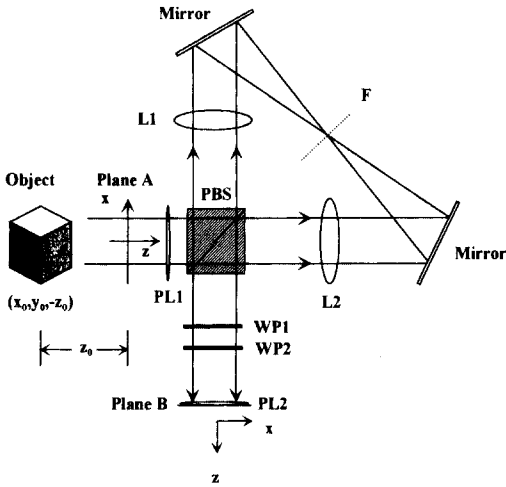


그림 2. 변형된 Cochran 삼각 간섭계  
Fig. 2. Modified Cochran's triangular interferometer.

먼저, 식 (8)은  $\Gamma_1=0$ 와  $\Gamma_2=\pm\frac{\pi}{2}$ 의 경우 식 (9)와 같이 주어지며,

$$\vec{U}_B(x, y) = \frac{\sqrt{2}}{2} \{ U_{ccw}(x, y) \mp i U_{cw}(x, y) \} \hat{x} \quad (9)$$

두번째로,  $\Gamma_1=\frac{\pi}{2}$ 와  $\Gamma_2=\pm\frac{\pi}{2}$ 의 경우에는 식 (10)과 같이 주어지게 된다.

$$\vec{U}_B(x, y) = \frac{\sqrt{2}}{2} e^{-i\frac{\pi}{4}} \{ U_{ccw}(x, y) \pm U_{cw}(x, y) \} \hat{x} \quad (10)$$

그리고, 식 (9)와 식 (10)에 대응하는 결과적인 출력빛

의 세기는 CCD 카메라와 같은 광검출기로 얻을 수 있으며 다음과 같이 각각 주어진다.

$$I_{+s}(x, y) = C^2 \mp C^2 \sin \left[ \frac{k}{2z_1} \{ (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 - (x_1^2 + y_1^2) \} \right] \quad (11)$$

$$I_{-s}(x, y) = C^2 \pm C^2 \cos \left[ \frac{k}{2z_1} \{ (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 - (x_1^2 + y_1^2) \} \right] \quad (12)$$

식 (11)에서  $I_{+s}$ 를  $I_{-s}$ 에서 뺀 다음에 그 결과를 2로 나누면 식 (13)을 얻을 수 있으며,

$$I_s(x, y) = C^2 \sin \left[ \frac{k}{2z_1} \{ (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 - (x_1^2 + y_1^2) \} \right] \quad (13)$$

같은 방법으로 식 (12)에서  $I_{+s}$ 에서  $I_{-s}$ 를 뺀 다음에 그 결과를 2로 나누면 식 (14)의 결과를 얻을 수 있다.

$$I_c(x, y) = C^2 \cos \left[ \frac{k}{2z_1} \{ (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 - (x_1^2 + y_1^2) \} \right] \quad (14)$$

따라서, 식 (13)과 (14)를 전자적으로(electronically) 결합함으로써 식 (15)와 같은 바이어스와 공액영상이 제거된 최종 복소홀로그램을 얻을 수 있게 된다.

$$\begin{aligned} &C^2 \cos \left[ \frac{k}{2z_1} \{ (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 - (x_1^2 + y_1^2) \} \right] \\ &\pm i C^2 \sin \left[ \frac{k}{2z_1} \{ (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 - (x_1^2 + y_1^2) \} \right] \\ &= C^2 \exp \left[ \pm i \frac{k}{2z_1} \{ (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 - (x_1^2 + y_1^2) \} \right] \end{aligned} \quad (15)$$

식 (15)는 wave plate의 위상지연의 조합을 이용하여 실수부와 허수부를 구하고 이 두 항의 결합을 통해 얻게 된 복소홀로그램을 나타내며, 이것은 바이어스와 공액영상이 없는 복소홀로그램이므로 식 (15)에서 양의 부호를 가진 복소홀로그램을 복원시 실상을, 음의 부호를 가진 복소홀로그램을 복원시 허상만을 관측할 수 있다. 따라서, 본 연구에서 새로이 제안된 변형된 Cochran 삼각 간섭계에서는 wave plate의 위상지연  $\Gamma_1$ 과  $\Gamma_2$ 의 4가지 조합과 CCD 카메라를 이용하여 검출된 빛의 세기를 전자적으로 조작함으로써 바이어스와 공액영상이 제거될 수 있으므로 기존의 인코더 런트 홀로그래피의 근본적인 문제점의 해결가능성을 제시하였다.

따라서, 본 논문에서 새로이 제안된 변형된 Cochran 삼각 간섭계는 광원의 종류에 관계없이 임의의 3차원 물체의 각 점광원의 빛의 세기와 위치에 대한 정보를 바이어스와 공액영상이 제거된 복소홀로그램으로 기록

할 수 있으므로 차세대 홀로그래픽 3차원 입체 영상통신 시스템의 입력부로서의 활용도 가능하리라 본다.

변형된 Cochran 삼각 간섭계에서 유도된 식 (15)의 복소홀로그래프의 복원은 수치적으로<sup>111)</sup> 또는 CGH (computer-generated hologram)<sup>112)</sup> 등을 사용하여 광학적으로 얻을 수 있다. 또한 Ransom<sup>113)</sup>은 홀로그래프의 실수부와 허수부에 해당하는 transparency를 만든 후에 이를 Mach-Zehnder 간섭계의 두 경로에 각각 배치하고 허수부를 표현하는 transparency 뒤쪽에  $\lambda/4$  만큼 위상차가 생기게 하는 매질을 사용함으로써 복소홀로그래프를 구현하는 방법을 제안한 바 있으며, 본 논문에서는 이 시스템을 변형하여 실시간으로 복소홀로그래프를 디스플레이하고 영상을 복원할 수 있는 시스템을 제시하고자 한다. 그림 3은 본 논문에서 제안된 복소홀로그래프를 복원하기 위한 시스템을 나타낸 것으로 제안된 시스템은 먼저 Mach-Zehnder 간섭계를 구성하고 이 간섭계의 각 경로에 공간광변조기인 LCD를 배치하고 LCD2 뒤쪽에  $\lambda/2$  wave plate를 추가하여 구성된다. 그림 3에서 선형편광기인 PL은 x축에 대하여 45도 회전되어 있다.

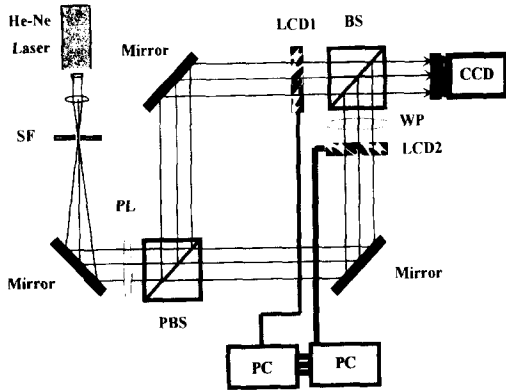


그림 3. 3차원 복소홀로그래프 복원 시스템  
Fig. 3. The system for reconstructing 3-D complex hologram.

그림 3에서 LCD에 연결되어 있는 PC를 이용하여 메모리에 저장되어 있는 복소홀로그래프의 실수부는 LCD1에, 허수부는 LCD2에 전송한 다음에 레이저광을 각 LCD에 조사하게 되면 광분할기를 통과한 후의 복소진폭은 식 (16)과 같다.

$$\vec{U}_s(x, y, z) = \begin{pmatrix} C^2 E \exp(\pm i\phi) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (16)$$

따라서, 광분할기 뒤쪽에서 원하는 복소홀로그래프를 얻을 수 있으며 적당한 거리를 진행하게 되면 Fresnel 회절 이론에 의해 원하는 복원영상을 얻을 수가 있다. 이 시스템에 대한 상세한 이론적인 전개는 다음에 발표되는 논문에서 다루도록 하겠다.

### III. 시뮬레이션 및 결과 분석

새로이 제시된 변형된 Cochran 삼각 간섭계의 이론적 분석결과를 검증하기 위한 방법으로 단파장 점광원에 대한 인코히어런트 홀로그래프의 합성 및 복원에 대한 시뮬레이션을 기존의 Cochran 삼각 간섭계와 변형된 Cochran 삼각 간섭계에 대해 각각 수행하고 그 결과를 비교분석하였다. 시뮬레이션에서 사용한 광원의 파장은 632.8 nm이고, 점광원에서 입력면(A면)까지의 거리는 30 mm, 삼각 간섭계에 사용된 렌즈 L1, L2의 초점거리는 각각  $f_1 = 150$  mm,  $f_2 = 242.7$  mm이며, 변형된 Cochran 삼각 간섭계에 사용된 wave plate는  $\lambda/4$  plate이다. 그리고 구성된 홀로그래프의 복원은 파장이 632.8 nm인 코히어런트한 평면파를 이용하여 수행되었다.

먼저 Cochran 삼각 간섭계의 A면에서 30 mm만큼 떨어진 점광원의 Fresnel 회절에 의한 간섭패턴을 시뮬레이션을 통해 B면에서 구하였다. 그림 4의 (a)는 시뮬레이션에 사용한 점광원의 입력영상이고 (b)는 B면에서 구한 점광원의 간섭패턴이다.

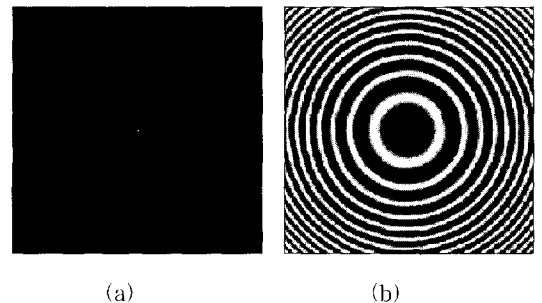


그림 4. Cochran 삼각 간섭계에서 구한 간섭패턴  
(a) 입력 영상 (b) 간섭패턴  
Fig. 4. Interference pattern obtained from Cochran's triangular interferometer.  
(a) Input image (b) Interference pattern

Cochran 삼각 간섭계에서 구한 점광원의 간섭패턴은 최대값과 최소값이 위상이  $2\pi$ 의 정수배가 되는 위치에

서 주기적으로 발생하는 것을 그림 4의 (b)의 그림을 통해 알 수 있으며, 이 간섭패턴은 흔히 Fresnel Zone Plate라고 불리는 것과 같은 형태의 패턴임을 알 수 있다.

두 번째는 변형된 Cochran 삼각 간섭계의 A면에서 30 mm만큼 떨어진 점광원에 대하여 Fresnel 회절식을 사용하여 시계방향과 반시계방향으로 진행하는 빛의 복소진폭을 wave plate WP1, WP2의 위상지연  $\Gamma_1$ 과  $\Gamma_2$ 의 4가지 조합에 따라 계산하고 이에 대응하는 빛의 세기를 구하였다. 그리고, 이 빛의 세기의 선형 결합을 이용하여 최종 복소홀로그래ムの 실수부와 허수부를 얻었다. 그림 5는 wave plate의 위상지연  $\Gamma_1$ 과  $\Gamma_2$ 의 4가지 조합에 의한 점광원의 B면에서의 간섭패턴을 나타낸 것이다. 그림 5의 (a), (b), (c), (d)는 각각 식 (11)과 식 (12)의  $I_{+s}, I_{-s}, I_{+c}, I_{-c}$ 에 대응하는 점광원의 간섭패턴이다.

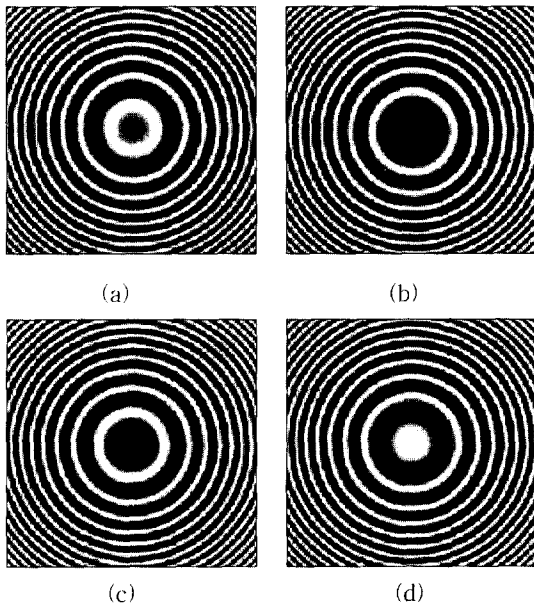


그림 5. 변형된 Cochran 삼각 간섭계에서 얻은 간섭패턴

- (a)  $\Gamma_1=0, \Gamma_2=\frac{\pi}{2}$ 의 경우 (b)  $\Gamma_1=0, \Gamma_2=-\frac{\pi}{2}$ 의 경우
- (c)  $\Gamma_1=\frac{\pi}{2}, \Gamma_2=\frac{\pi}{2}$ 의 경우 (d)  $\Gamma_1=\frac{\pi}{2}, \Gamma_2=-\frac{\pi}{2}$ 의 경우

Fig. 5. Interference patterns obtained from modified Cochran's triangular interferometer.

- (a) Case  $\Gamma_1=0, \Gamma_2=\frac{\pi}{2}$  (b) Case  $\Gamma_1=0, \Gamma_2=-\frac{\pi}{2}$
- (c) Case  $\Gamma_1=\frac{\pi}{2}, \Gamma_2=\frac{\pi}{2}$  (d) Case  $\Gamma_1=\frac{\pi}{2}, \Gamma_2=-\frac{\pi}{2}$

Case  $\Gamma_1=\frac{\pi}{2}, \Gamma_2=-\frac{\pi}{2}$   
 변형된 Cochran 삼각 간섭계에서 wave plate의 위상지연  $\Gamma_1$ 과  $\Gamma_2$ 의 4가지 조합에 따른 점광원의 B면에서의 간섭패턴들도 최대값과 최소값이 위상이  $2\pi$ 의 정수배가 되는 위치에서 주기적으로 발생하는 것을 그림 5를 통해 알 수 있으며, 이 간섭패턴들도 Fresnel Zone Plate와 비슷한 형태의 패턴임을 알 수 있다.

그림 5의 간섭패턴 (b)에서 간섭패턴 (a)를 뺀 다음에 2로 나누면 점광원의 B면에서의 복소홀로그래ムの 실수부에 해당하는 결과를, 그림 5의 간섭패턴 (c)에서 간섭패턴 (d)를 뺀 다음에 2로 나누게 되면 복소홀로그래ムの 허수부에 해당하는 결과를 얻을 수 있는 데 이를 나타낸 것이 그림 6의 (a)와 (b)이다.

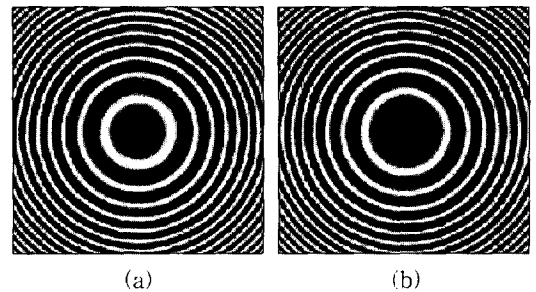


그림 6. 변형된 Cochran 삼각 간섭계로부터 얻은 복소홀로그래ム

- (a) 복소홀로그래ムの 실수부 (b) 복소홀로그래ムの 허수부

Fig. 6. Complex hologram obtained from modified Cochran's triangular interferometer.

- (a) Real part of complex hologram (b) Imaginary part of complex hologram

그림 6의 (a)와 (b)는 식 (15)에 대응하는 복소홀로그래ムの 실수부와 허수부인 데, 삼각함수는 양수와 음수값을 모두 포함하고 있기 때문에 음수값을 화면에 표현해 주기 위해 절댓값이 최대인 음수값이 0이 되도록 바이어스를 더해 표현한 그림이다. 그림 6의 (a), (b)는 각각 그림 5의 (c), (b)와 같은 그림이 되므로 최대값과 최소값이  $2\pi$ 의 정수배가 되는 위치에서 주기적으로 생기는 것을 알 수 있으며, 이 결과는 식 (15)의 복소홀로그래ムの 실수부와 허수부에 해당되는 결과임을 알 수 있다. 따라서, 변형된 Cochran 삼각 간섭계를 이용하여 복소홀로그래ムの 실수부와 허수부를 구할 수 있음을 알 수 있다.

그림 7의 (a)는 기존의 Cochran 삼각 간섭계를 이

용하여 얻은 바이어스와 공액영상이 제거되지 않은 홀로그래를 이용하여 복원한 영상이고, (b)는 변형된 Cochran 삼각 간섭계를 이용하여 바이어스와 허상이 제거된 복소홀로그래를 이용하여 복원한 영상을 나타낸 것이고 (c)는 바이어스와 실상이 제거된 복소홀로그래를 이용하여 복원한 영상이다. 복원 영상은 그림 6의 복소홀로그래를 입력으로 하고 Fresnel-Kirchhoff 적분<sup>[11]</sup>을 이용하여 실상이 맺히는 부분에서 구하였다. 그림 7의 (a)에서는 배경에 바이어스와 허상이 존재하므로 점광원이 뚜렷하게 보이지 않음을 알 수 있다. 반면에, (b)의 복원영상은 바이어스와 허상이 없으므로 점광원이 뚜렷이 보임을 알 수 있다.

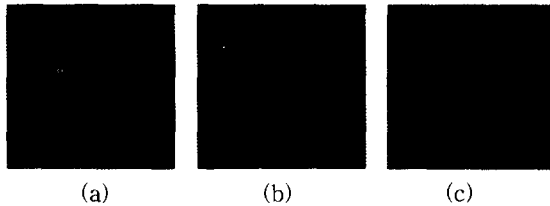


그림 7. 삼각 간섭계의 복원영상 (a) 기존의 삼각 간섭계에 의한 복원영상 (b) 변형된 삼각 간섭계의 실상만을 이용한 복원영상 (c) 변형된 삼각 간섭계의 허상만을 이용한 복원 영상

Fig. 7. Reconstructed images of the triangular interferometer (a) Reconstructed image by the conventional(Cochran's) triangular interferometer (b), (c) Reconstructed images using real and virtual images of the modified triangular interferometer, respectively.

따라서, 이상의 결과를 통해 기존의 Cochran 삼각 간섭계에서 구성된 홀로그래의 복원시 바이어스와 공액영상들이 동축상에 함께 존재하므로 영상의 질을 크게 떨어뜨리는 반면에, 본 논문에서 새로이 제시된 변형된 Cochran 삼각 간섭계로부터 구성된 복소홀로그래의 복원시에는 바이어스와 공액영상이 제거됨을 이론적 분석과 시뮬레이션을 통해 검증함으로써 앞으로, 홀로그래픽 3차원 입체영상통신 시스템의 입력부로서의 응용가능성을 제시하였다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 인코히어런트 홀로그래피인 기존의 Cochran 삼각 간섭계의 근본적인 문제인 바이어스와

공액영상의 문제를 해결할 수 있는 새로운 변형된 Cochran 삼각 간섭계에 대한 이론적 분석과 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 제시하였다. 즉, 기존의 Cochran 삼각 간섭계에 편광 광분할기, wave plate, 선형편광기의 간단한 광학소자를 추가함으로써 바이어스와 공액영상을 제거할 수 있음을 Jones 행렬연산을 통해 이론적으로 보였으며, 또한 한 개의 점광원에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 기존의 방법과 비교분석함으로써 본 논문에서 새로이 제시된 방법의 타당성을 검증하였다.

본 연구의 결과를 통해 앞으로, 동축 인코히어런트 홀로그래피의 3차원 입체 영상 디스플레이에의 실질적인 응용가능성을 제시하였으며, 향후 과제로 본 논문에서 새로이 제시된 변형된 Cochran 삼각 간섭계를 이용한 인코히어런트 홀로그래피의 다양한 광학적 실험과 실질적인 3차원 영상으로의 확장연구가 진행중에 있다.

#### 참 고 문 헌

- [1] D. Gabor, "A new microscope principle," *Nature*, Vol. 161, pp. 777-778, 1948.
- [2] E. N. Leith and J. Upatnieks, "Reconstructed wavefronts and communication theory," *J. Opt. Soc. Am.*, Vol. 52, No. 10, pp. 1123-1130, 1962.
- [3] T. Okoshi, "Three-dimensional displays," *Proc. of IEEE*, Vol. 68, No. 5, pp. 548-564, 1980.
- [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] A. W. Lohmann, "Wavefront reconstruction for incoherent objects," *J. Opt. Soc. Am.*, Vol. 55, pp. 1555-1556, 1965.
- [6] G. Sirat and D. Psaltis, "Conoscopic holography," *Opt. Lett.*, Vol. 10, No. 1, pp. 4-6, 1985.
- [7] 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.
- [8] L. Mertz and N. O. Young, *Proc. ICO Conf.*

- Opt. Instr., London, p. 305, 1961.
- [9] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier optics*, McGraw-Hill, 1968.
- [10] A. Yariv and P. Yeh, *Optical Waves in Crystals*, Wiley, New York, 1984
- [11] U. Schnars and W. Jüptner, "Direct recording of holograms by CCD target and numerical reconstruction," *Appl. Opt.*, Vol. 33, No. 2, pp. 179-181, 1994.
- [12] W.-H. Lee, "Binary synthetic holograms," *Appl. Opt.*, Vol. 13, No. 7, pp. 1677-1682, 1974.
- [13] P. L. Ransom, "Synthesis of complex optical wavefronts," *Appl. Opt.*, Vol. 11, No. 11, pp. 2554-2561, 1972.

---

 저 자 소 개
 

---



金秀吉(正會員)

1965년 8월 2일생. 1988년 2월 서울대학교 공과대학 전기공학과 졸업(공학사). 1991년 2월 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1991년 2월 ~ 현재 서울대학교 대학원 전기공학부 박사

과정. 주관심분야는 이코히어런트 홀로그래피, 3차원 디스플레이 시스템, 광정보처리 등임

金恩洙(正會員)

第 32卷 A編 第 10號 參照

현재 광운대학교 전자공학과 교수, 신기술연구소

李赫(正會員)

1955년 7월 15일생. 1978년 2월 서울대학교 자연과학대학 물리학과 졸업(이학사). 1982년 6월 California Institute of Technology 전기공학과 졸업(석사). 1986년 6월 California Institute of Technology 전기공학과 졸업(박사). 1986년 1월 ~ 1991년 1월 New York Polytechnic University 전기공학과 조교수. 1991년 2월 ~ 1994년 2월 서울대학교 공과대학 전기공학과 조교수. 1994년 2월 ~ 1996년 2월 서울대학교 공과대학 전기공학과 부교수. 1996년 2월 1일 별세

李竝浩(正會員)

第 33卷 A編 第 1號 參照

현재 서울대학교 전기공학부 조교수