

## 변형 삼각간섭계를 이용한 3차원 영상의 광학적 구현

(Optical Implementation of Three-Dimensional Image using Modified Triangular Interferometer)

김수길\*

(Soo - Gil Kim)

### 요 약

복소홀로그램을 광학적으로 구현할 수 있는 시스템을 제안하고, 제안된 시스템이 복소홀로그램을 표현할 수 있다는 것을 이론적으로 입증하였다. 그리고, 변형 삼각간섭계를 이용하여 3차원 영상의 복소홀로그램을 생성하고, 이를 수치적 및 광학적으로 복원한 3차원 영상을 제시하고 분석하였다.

### Abstract

We presented the optical reconstruction system of complex hologram and theoretically demonstrated that the proposed system could display complex hologram. And we made the complex hologram of a three-dimensional image using the modified triangular interferometer, and presented and analyzed the three-dimensional images numerically and optically reconstructed from it.

Key Words : complex hologram, modified triangular interferometer, 3D image display

### 1. 서 론

1948년 Gabor[1]에 의해 제안된 홀로그래피(holography)는 3차원 영상 디스플레이에 가장 적합한 방법으로 생각되었다. 이후 레이저가 개발되면서 이를 이용하여 3차원 영상을 기록하고 복원하는 연구가 활발히 전개되었다. 그러나 기존의 홀로그래피는 레이저를 이용함으로써 가간섭거리의 한계를 벗어나는 거리에 있는 장면은 홀로그램 생성이 불가능

하였다.

따라서, 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 자연계에 존재하는 물체에서 직접 나오거나 반사되는 백색광을 이용하여 홀로그램을 만드는 인코히어런트 홀로그래피 방법이 가장 유망한 방법중의 하나로 생각된다. 일반적으로 인코히어런트 홀로그래피는 물체의 각 점의 위치와 빛의 세기에 대한 정보를 암호화하는 Fresnel zone plates(FZP)의 증첩을 이용하는데, 지금까지 인코히어런트 홀로그램의 기록을 위해서 여러 가지 방법들이 제안되었다[2-6]. 그러나, 인코히어런트 홀로그래피는 물체가 복잡해짐에 따라 바이어스가 강해져서 콘트라스트가 떨어지는 단점이 있는데, 이에 대한 해결책이 제시되지 않아서 인코히어런트 홀로그래피는 상당기간 주목을 끌지

\* 주저자 : 호서대학교 전기정보통신공학부 조교수

Tel : 041-540-5676, Fax : 041-540-5693

E-mail : sgkim@office.hoseo.ac.kr

접수일자 : 2003년 8월 1일

1차심사 : 2003년 8월 12일

심사완료 : 2003년 11월 6일

## 변형 삼각간섭계를 이용한 3차원 영상의 광학적 구현

못하였다. 그러다가 1985년에 Sirat와 Psaltis가 이방성 결정인 방해석을 이용하여 인코히어런트 홀로그램을 기록하고 복원할 수 있는 방법을 제안하였다 [7]. 이 방법은 이방성 물질에서 진행되는 ordinary wave와 extraordinary wave의 위상속도가 다르다는 사실을 이용하여 인코히어런트 홀로그램을 기록하는 방법이다. 그리고 Mugnier와 Sirat은 인코히어런트 홀로그램의 가장 치명적 결함중의 하나인 바이어스와 공액영상을 LCLV(liquid crystal light valve)와 마스크 등을 이용하여 제거할 수 있는 방법을 제시하였다[8]. 그러나 이 방법은 고가의 광학소자를 사용할 뿐만 아니라 바이어스와 공액영상을 제거하기 위해서는 두가지 시스템을 사용하여야 한다는 단점을 가지고 있다. 따라서, 이러한 단점을 없애기 위하여 복소홀로그램의 실수부와 허수부를 동일한 시스템에서 구할 수 있는 변형 삼각간섭계가 제안되었으며, 이는 Cochran 삼각간섭계를 개선한 것으로서 단일과장에 대한 점광원 홀로그램을 기록하고 복원하는 실험을 통하여 바이어스와 공액영상이 제거될 수 있다는 것이 입증되었다[9,10].

본 논문에서는 제안된 변형 삼각간섭계로 생성된 복소홀로그램을 광학적으로 표현할 수 있는 방법을 제안하고, 이를 이론적으로 입증하였다. 또한, 변형 삼각간섭계를 이용하여 3차원 영상의 복소홀로그램을 생성하고, 이를 수치적 및 광학적으로 복원한 결과를 제시함으로써 제안된 시스템이 3차원 영상을 복원할 수 있다는 것을 입증하였다.

## 2. 변형 삼각간섭계

변형 삼각간섭계[8,9]를 그림 1에 나타내었다. 그림 1에서 LP1,2와 WP1,2는 각각 선형편광기와 파장판(wave plate)이며 파장판은 위상지연을 발생시킨다. L1과 L2는 초점거리가 각각  $f_1$ 과  $f_2$ 인 렌즈들이다. PBS(Polarizing beam splitter)는 편광 광분할기이며, LP1과 WP2는 x축에 대하여 45도 회전되어 있고 WP1의 slow axis는 x축과 일치되어 있다. 그리고 LP2는 편광축이 x축 방향이며 F는 간섭필터를 나타내며 특정파장만을 통과시키는 역할을 한다.

변형 삼각간섭계에서는 시계방향과 반시계방향으

로 진행되는 빛이 출력면에서 더해지게 되는데, 출력면쪽에 위치한 파장판들의 4가지 조합에 따라 출력면에서 4가지의 빛의 세기가 얻어진다.

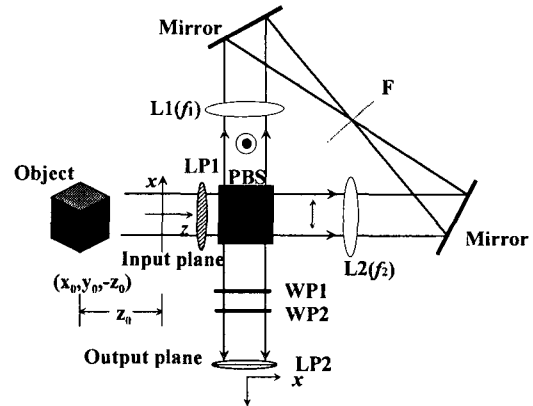


그림 1. 변형 삼각 간섭계  
Fig. 1. Modified triangular interferometer

그림 1에서 좌표가  $(x_0, y_0, -z_0)$ 인 점광원의 파장을  $\lambda$ 라고 하자. 그러면 출력면에서의 점광원에 의한 PSF(point-spread function)는 파장판의 위상지연(phase retardation)의 4가지 조합에 의해 표 1과 같이 4개의 PSF가 주어진다[10].

표 1. 위상지연에 따른 PSF  
Table 1. PSF by combination of phase retardation

파장판	PSF
$\Gamma_1 = \frac{\pi}{2}$ 와 $\Gamma_2 = +\frac{\pi}{2}$	$I_{+,c}(x, y) = C^2(1 + \cos \phi(x, y))$
$\Gamma_1 = \frac{\pi}{2}$ 와 $\Gamma_2 = -\frac{\pi}{2}$	$I_{-,c}(x, y) = C^2(1 - \cos \phi(x, y))$
$\Gamma_1 = 0$ 와 $\Gamma_2 = +\frac{\pi}{2}$	$I_{+,s}(x, y) = C^2(1 - \sin \phi(x, y))$
$\Gamma_1 = 0$ 와 $\Gamma_2 = -\frac{\pi}{2}$	$I_{-,s}(x, y) = C^2(1 + \sin \phi(x, y))$

여기서,  $\phi(x, y) = k/2z_1 \{ (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 - (x_1^2 + y_1^2) \}$ ,  
 $C = k/2\sqrt{2}\pi z_0$ ,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $x_1 = x_0/(\alpha + \beta)$ ,  
 $y_1 = y_0/(\alpha + \beta)$ ,  $z_1 = z_0/(\alpha^2 - \beta^2)$ ,  $\alpha = -f_1/f_2$ , 그리고  $\beta = -f_2/f_1$  이다. 또한, 점광원의 위치에 따른 빛의 진폭성분은 생략하였다.

표 1에서의 PSF를 전자적으로(electronically) 또는 광학적으로 결합함으로써 식 (1)의 바이어스와 공액영상이 제거된 복소홀로그램을 얻게 된다.

$$H(x, y) = C^2 \exp[\pm i\phi(x, y)] \quad (1)$$

### 3. 복소홀로그램의 광학적 복원 시스템

변형 삼각간섭계에서 유도된 식(1)의 복소 홀로그램은 수치적으로 또는 광학적으로 복원이 가능하다. Ransom[11]은 홀로그램의 실수부와 허수부에 해당하는 transparency를 만든 후에 이를 Mach-Zehnder 간섭계의 두 경로에 각각 배치하고 허수부를 표현하는 transparency 뒤쪽에  $\lambda/4$  만큼 위상가 지연되게 하는 매질을 사용함으로써 복소홀로그램을 구현하는 방법을 제안한 바 있으며, 본 논문에서는 이러한 Ransom의 시스템을 변형하여 실시간으로 복소홀로그램을 디스플레이하여 3차원 영상을 복원할 수 있는 시스템을 제안하였다.

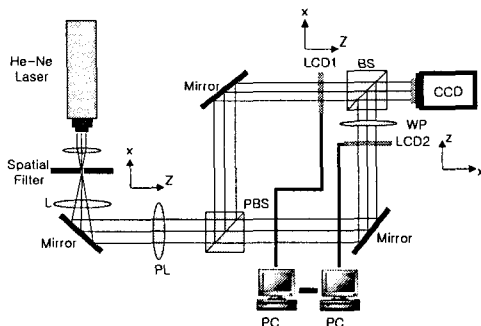


그림 2. 복소홀로그램 복원 시스템  
Fig. 2. Reconstruction system for complex hologram

그림 2는 본 논문에서 제안된, 복소홀로그램의 복원시스템을 나타낸 것이다. 제안된 시스템은 먼저 Mach-Zehnder 간섭계를 구성하고 이 간섭계의 각 경로에 공간광변조기인 LCD를 배치하고 LCD2 뒤쪽에  $\lambda/2$  파장판을 추가하여 구성된다. 그리고, 편광 LCD1과 LCD2가 위치한 경로를 각각 경로 1, 경로 2라 한다. 그림 2에서 LCD에 연결된 두 대의

PC는 동기화 되어 있으며, 이를 이용하여 저장되어 있는 복소홀로그램 중 LCD1에는 실수부를 LCD2에는 허수부를 띄우면 광결합기(BS; Beam splitter) 뒤 쪽에서 식(1)을 얻을 수 있으며 적당한 거리를 진행하게 되면 Fresnel 회절 이론에 의해 복원 영상이 나타난다.

앞에서 언급한 내용을 수식적으로 표현하면 입사되는 레이저 광원은 편광기(PL)를 통과한 후에 x축 및 y축 성분으로 나눌 수 있으므로 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$U(x, y, z) \cong \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기서,  $E_x, E_y$ 는 각각 x축 및 y축 방향의 복소진폭이며, 진행거리에 의한 위상성분은 빛의 세기에 영향을 미치지 않으므로 이후에 생략하기로 한다. PBS를 경유한 복소진폭은 경로 1일 경우 식 (2)에서의 y축 성분만 나타나며 경로 2일 경우는 x축 성분만 나타난다. 그리하여 LCD1 및 LCD2 뒤쪽의 복소진폭은 각각 식 (3)과 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$U_{LCD1}(x, y, z) = C^2 \cos \phi(x, y) \begin{pmatrix} 0 \\ E_y \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$U_{LCD2}(x, y, z) = C^2 \sin \phi(x, y) \begin{pmatrix} E_x \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

여기서, 식 (3)과 식 (4)의 계수는 각각 식 (1)의 실수부와 허수부에 해당한다. 경로 2에서 LCD2 뒤에  $\lambda/2$  파장판을 설치해두면 파장판 뒤쪽의 복소진폭은 식 (5)와 같이 주어진다[12].

$$U_{\mu}(x, y, z) = \pm iC^2 \sin \phi(x, y) \begin{pmatrix} E_x \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

여기서, +와 -는  $\lambda/2$  파장판의 slow axis가 x축에 대하여 각각 -45도와 +45도 회전된 경우에 대응

## 변형 삼각간섭계를 이용한 3차원 영상의 광학적 구현

한다. 그리고 광결합기(BS)를 통과한 두 빛은 결합이 되어 식(6)과 같이 된다.

$$\begin{aligned}
 U_S(x, y, z) &= U_{LCD}(x, y, z) + U_H(x, y, z) \\
 &= C^2 \cos \phi(x, y) \begin{pmatrix} E_y \\ 0 \\ E_x \end{pmatrix} \\
 &\quad \pm iC^2 \sin \phi(x, y) \begin{pmatrix} E_x \\ 0 \\ E_y \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} C^2 \cos \phi(x, y) E_y \pm iC^2 \sin \phi(x, y) E_x \\ 0 \\ C^2 \cos \phi(x, y) E_x \pm iC^2 \sin \phi(x, y) E_y \end{pmatrix}
 \end{aligned} \quad (6)$$

$E_x = E_y = E$  이라면 식 (6)은 식 (7)과 같이 표현된다.

$$U_S(x, y, z) = \begin{pmatrix} C^2 E \exp\{\pm i\phi(x, y)\} \\ 0 \\ C^2 E \exp\{\pm i\phi(x, y)\} \end{pmatrix} \quad (7)$$

식 (7)은 복원하고자 하는 복소홀로그램이다. 즉, 식 (1)과 같은 형태이다. 식 (7)의 Fresnel 회절식은 식 (8)과 같이 되며,

$$\begin{aligned}
 U(x, y, z) &= \int \int_{-\infty}^{\infty} U_S(x', y', z') \\
 &\quad \times \exp\left[-i\frac{k}{2z_0}\{(x-x')^2 + (y-y')^2\}\right] dx' dy'
 \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)에 대한 빛의 세기는 식 (9)와 같이 나타난다.

$$I(x, y) = |U(x, y, z)|^2 \quad (9)$$

결과적으로 관측면에서 식 (9)의 빛의 세기를 광검출기나 사람의 눈으로 보게 되면 3차원 영상을 인식할 수 있게 된다.

## 4. 실험 및 결과 분석

### 4.1. 3차원 영상의 수치적 복원

변형 삼각간섭계의 3차원 영상 기록장치로서의

가능성을 입증하기 위하여 3차원 영상에 대한 홀로그램의 합성 및 수치적 복원에 대한 실험을 수행하고 그 결과를 분석하였다. 변형 삼각간섭계를 이용하여 3차원 영상에 대한 홀로그램을 생성하기 위해 사용된 광원은 Coherent(모델명 OPSS532)사의 제품으로  $\lambda=532.8$  [nm] 인 Nd-YAG 레이저를 사용하였으며 출력은 100 [mW] 이다. 코히어런트 광원인 레이저를 회전하는 확산판을 통과시켜 인코히어런트 광으로 변환시켰다. 물체에서 입력면까지의 거리는 1,000 [mm], 삼각간섭계의 렌즈 L1, L2의 초점거리는 각각  $f_1=150$  [mm],  $f_2=250$  [mm] 이며, 변형 삼각간섭계에 사용된 파장판은  $\lambda/4$  plate이다.

그림 3은 기록을 위해서 사용된 3차원 영상이며, 거리가 다른 두 원 모양의 영상을 입력 영상으로 만들었다. 작은 원은 큰 원보다 50 [mm] 뒤에 놓여졌다.

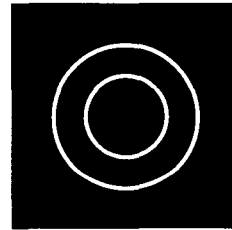


그림 3. 입력영상  
Fig. 3. Input image

그림 4는 변형 삼각간섭계를 이용하여 표 1과 같은 파장판의 조합을 통해 구한 4개의 간섭패턴으로부터 유도된 인코히어런트 홀로그램의 실수부 및 허수부를 나타낸다.

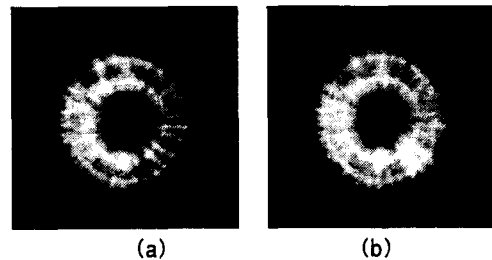


그림 4. 인코히어런트 복소 홀로그램 (a) 실수부 (b) 허수부  
Fig. 4. Incoherent complex hologram (a) real part (b) imaginary part

그림 5는 Fresnel-Kirchhoff[13]적분에 의해 여러 각도에서 복원된 그림을 보여주는데, 그림에서 알 수 있는 바와 같이 보는 각도에 따라서 형태가 달라지는 것을 알 수 있다. 이는 원래의 영상이 가지고 있는 위치와 깊이감에 대한 정보가 인코히어런트 홀로그래프에 저장되고 영상의 복원시에 위치와 깊이감에 대한 정보도 동시에 복원되므로 보는 각도에 따라서 다른 영상을 보여주는 것이다.

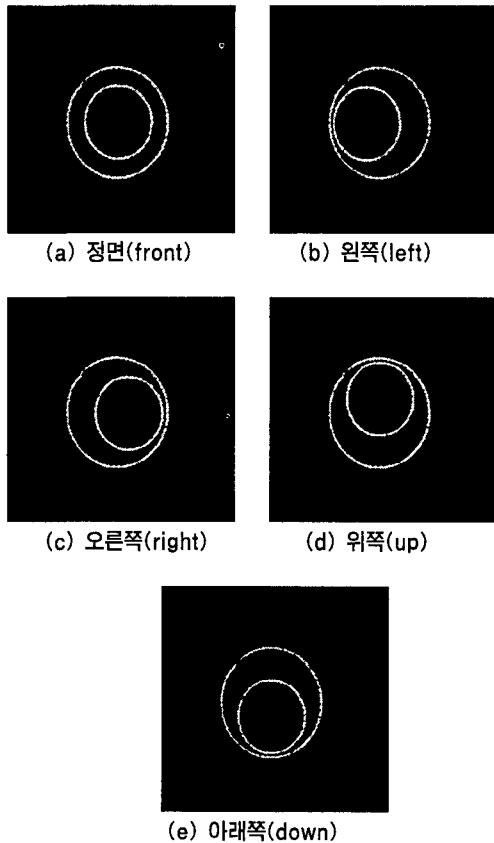


그림 5. 수치적으로 복원된 영상  
Fig. 5. Numerically reconstructed images

4.2. 3차원 영상의 광학적 복원

그림 6은 그림 4의 복소홀로그래프를 그림 2의 광학적 복원시스템을 이용하여 복원한 영상이며, 우측부분은 각각 작은 원과 큰 원의 빛의 세기 profile을 나타낸다. 그림 6은 복소홀로그래프 복원시스템인 그림 2에서 CCD를 앞뒤로 수평이동시키면서 각각 큰 원

과 작은 원이 복원되는 초점면에 위치시켜서 얻은 영상들이며, 그림 6의 (a)는 작은 원의 초점 평면에서의 복원영상을 찍은 결과인데, 이 그림에서 큰 원은 작은 원과의 깊이감 때문에 거의 인식할 수 없다는 것을 알 수 있다. (b)는 큰 원의 초점 평면에서 복원한 영상을 찍은 결과이며, 여기서도 깊이감에 의한 효과 때문에 작은 원을 거의 인식할 수 없었다. 따라서, 작은 원에 초점을 맞추면 작은 원의 모습이 선명하게 나타나고, 큰 원에 초점을 맞추면 큰 원의 모습이 선명하게 나타나는 것을 알 수 있다. 이로부터 변형 삼각간섭계가 깊이감에 대한 정보를 기록한다는 사실을 확인할 수 있다.

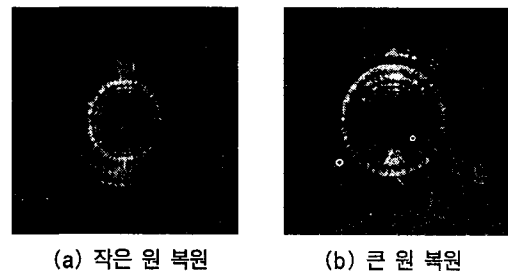


그림 6. 초점거리에 따라 광학적으로 복원한 영상  
Fig. 6. Optically reconstructed images with focal length (a) reconstruction of small circle (b) reconstruction of large circle

그림 7은 큰 원과 작은 원이 동시에 관측되는 평면에서 복원된 3차원 영상을 여러 각도에서 관찰한 결과를 보여주는 사진이다. 관측자의 위치에 따라서 3차원 영상의 모습이 다르게 복원된다.

그림 (a)는 복원영상을 정면에서 바라본 모습이고, (b), (c), (d), (e)는 복원영상을 각각 왼쪽, 오른쪽, 위쪽, 아래쪽에서 관측한 모습이며, 수치적으로 복원된 그림 5의 영상과 모습이 일치하는 것을 알 수 있다. 복원영상은 관찰시점에 따라 다른 모습을 보여주고 있으며, 이는 변형 삼각간섭계로 생성된 복소홀로그래프는 3차원 정보를 가지고 있다는 것을 의미한다. 이를 통해 변형 삼각간섭계가 위치와 깊이감에 대한 정보를 저장하고 복원하는 역할을 한다는 것을 알 수 있으며, 이런 특징을 이용하여 3차원 영상 디스플레이에 응용이 가능하리라 생각한다.

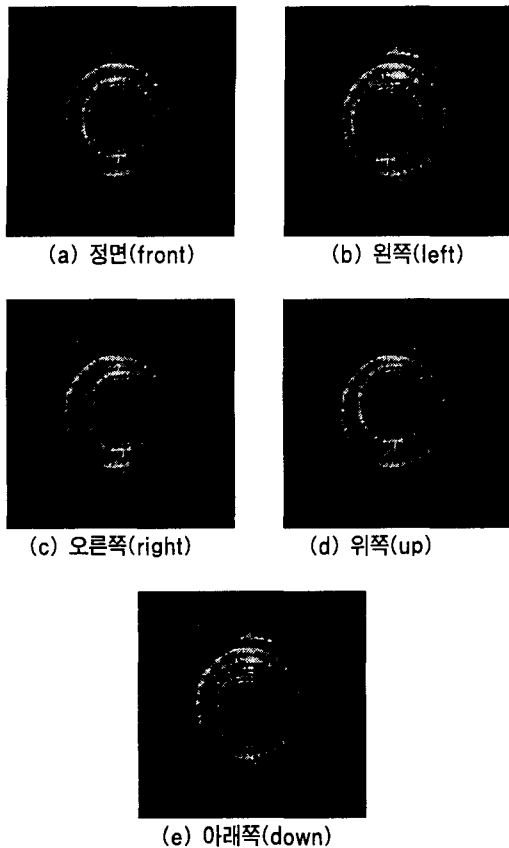


그림 7. 광학적으로 복원된 영상  
Fig. 7. Optically reconstructed images

## 5. 결론

복소홀로그램을 광학적으로 구현할 수 있는 시스템을 제안하고, 제안된 시스템이 복소홀로그램을 표현할 수 있다는 것을 이론적으로 입증하였다. 그리고, 변형 삼각간섭계를 이용하여 3차원 영상의 복소홀로그램을 생성하고, 이를 수치적 및 광학적으로 복원한 결과를 제시하였다. 복원된 영상은 관찰위치에 따라 모양이 변하고, 이런 변화는 변형 삼각간섭계로 기록된 복소홀로그램이 3차원 정보를 가지고 있으며, 제안된 광학적 구현 방법이 복소홀로그램을 잘 표현하고 있다는 것을 입증한다. 따라서, 변형 삼각간섭계는 미래의 3차원 영상 디스플레이의 입력부로 사용되고, 복소홀로그램 복원 시스템은 출력부로 사용될 수 있으리라 생각된다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소(03-504)주관으로 수행된 과제입니다.

## References

- [1] D. Gabor, "A new microscopic principle," *Nature*, Vol. 161, pp. 777-778, 1948.
- [2] A. W. Lohmann, "Wavefront reconstruction for incoherent objects," *J. Opt. Soc. Am.* Vol. 55, pp. 1555-1556, 1965.
- [3] G. W. Stroke and R. C. Restrick III, "Holography with spatially noncoherent light," *Appl. Phys. Lett.* Vol. 7, pp. 229-231, 1965.
- [4] H. R. Worthington, "Production of holograms with incoherent illumination," *J. Opt. Soc. Am.* Vol. 56, pp. 1397-1398, 1966.
- [5] G. Cochran, "New method of making Fresnel transforms with incoherent light," *J. Opt. Soc. Am.* Vol. 56, pp. 1513-1517, 1966.
- [6] P. J. Peters, "Incoherent holograms with mercury light source," *Appl. Phys. Lett.* Vol. 8, pp. 209-210, 1966.
- [7] G. Sirat and D. Psaltis, "Conoscopic holography," *Opt. Lett.* Vol. 10, pp. 4-6, 1985.
- [8] L. M. Mugnier and G.Y.Sirat, "On-axis conoscopic holography without a conjugate image," *Opt. Lett.* Vol. 17, pp. 294-296(1992)
- [9] S.-G. Kim, "Incoherent triangular holography using mercury lamp," *J. KIIEE*, vol. 15, no. 1, pp. 22-27, 2001.
- [10] S.-G. Kim, B. Lee, and E.-S. Kim, "Removal of bias and the conjugate image in incoherent on-axis triangular holography and real-time reconstruction of the complex hologram," *Appl. Opt.* Vol. 36, no. 20, pp. 4784-4791, 1997.
- [11] P. L. Ransom, "Synthesis of complex optical wavefronts," *Appl. Opt.* Vol. 11, no. 11, pp. 2554-2561, 1972.
- [12] A. Yariv and P. Yeh, *Optical Waves in Crystals*, Wiley, New York, 1984.
- [13] U. Schnars and W. J. ptner, "Direct recording of holograms by CCD target and numerical reconstruction," *Appl. Opt.* Vol. 33, no. 2, pp. 179-181, 1994.

## ◇ 저자소개 ◇

### 김수길 (金秀吉)

1965년 8월 3일생, 1988년 2월 서울대학교 공과대학 전기공학과 졸업(학사), 1991년 2월 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1997년 2월 서울대학교 대학원 전기공학부 졸업(박사), 1997년-현재 호서대학교 전기정보통신공학부 조교수.