

수은등을 이용한 인코히어런트 삼각 홀로그래피

(Incoherent Triangular Holography using Mercury Lamp)

김수길

(Soo-Gil Kim)

요 약

기존의 인코히어런트 홀로그래피의 주요한 단점인 바이어스와 공액영상을 제거할 수 있는 변형 삼각 간섭계를 제시하였다. 또한, 제안된 방법을 이용한 인코히어런트 홀로그래피의 가능성을 입증하기 위하여 수은 램프를 이용하여 인코히어런트 홀로그램을 구성하고 이를 수치적 및 광학적으로 복원한 실험결과를 제시하였다.

Abstract

We presented a modified triangular interferometer as an incoherent holography, which can eliminate bias and conjugate image problems of the conventional one. Also, to demonstrate the feasibility of incoherent holography, the formation of an incoherent hologram using a mercury lamp and its numerical and optical reconstructions were presented.

1. 서 론

1948년 Gabor[1]에 의해 제안된 홀로그래피(holography)는 3차원 영상 디스플레이에 가장 적합한 방법으로 생각되었으나, 3차원 영상을 기록하고 복원하는 과정이 복잡하여 실용성이 떨어지는 문제가 있으며, 기존의 홀로그래피는 레이저를 이용함으로써 사용되는 레이저에 따른 고유한 가간섭거리의 한계를 벗어나는 거리에 있는 장면은 홀로그램구성이 불가능하다. 따라서, 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 자연계에 존재하는 물체에서 직접 나오거나 반사되는 백색광을 이용하여 홀로그램을 만드는 인코히어런트 홀로그래피 방법이 가장 유망한 것으

로 생각된다. 지금까지 제안된 인코히어런트 홀로그램의 기록을 위해서 여러 가지 방법들이 제안되었다[2-7].

1966년 Cochran[5]에 의해 제안된 인코히어런트 삼각 홀로그래피는 자연광을 이용하여 홀로그램을 만들 수 있다는 장점이 있지만 근본적으로 두가지 주요한 단점을 가지고 있다. 먼저 물체가 복잡해질 때 홀로그램이 구성이 되는 평면에서 S/N비가 급격히 감소한다는 것이고 두 번째는 동축홀로그램이 복원될 때 실상과 허상이 동축상에 존재하게 되어 복원영상에 잡음이 많이 존재하게 된다는 것이다.

인코히어런트 홀로그램에 존재하는 바이어스를 제거하기 위해 여러가지 방법이 제안되었으며, 가장 최근인 1992년에는 Mugnier와 Sirat[8]이 코노스코픽 시스템에 LCLV와 회전하는 마스크를 이용하여 출력

* 정회원 : 호서대학교 전기공학부 정보제어전공
접수일자 : 2000년 12월 8일

면에서 4가지 간섭패턴을 얻고 이들의 조합에 의해 바이어스와 신호를 분리하는 방법을 제안하였다. 그러나 LCLV와 회전하는 마스크와 같은 능동소자를 이용하므로 가격이 비싸고 동작에 따른 신뢰도에 있어서 문제를 가지는 단점이 있다. 이러한 단점을 없애기 위하여 기존의 삼각간섭계에 간단한 수동소자를 추가함으로써 물체의 홀로그래프에서 바이어스와 공액영상을 제거하는 방법이 제안되었다[9].

본 논문에서는 변형 삼각간섭계를 이용하여 실험적으로 홀로그래프를 구성하고 제안된 방법을 이용하면 이 홀로그래프에서 바이어스와 공액영상이 제거될 수 있다는 것을 실험적으로 입증하였다. 또한, 레이저가 아닌 일반 수은 램프를 사용하여 홀로그래프를 구성하여 복원함으로써 인코히어런트 홀로그래피의 가능성을 입증하였다.

2. 변형 삼각 간섭계

변형 삼각간섭계[9]를 그림 1에 나타내었다. 그림 1에서 LP1,2와 WP1,2는 각각 선형편광기와 파장판(wave plate)을 나타내며, L1과 L2는 초점거리가 각각 f_1 과 f_2 인 렌즈들이다. PBS는 편광 광분할기이며, PL1과 WP2는 x축에 대하여 45도 회전되어있고 WP1의 slow axis는 x축과 일치되어 있다. 그리고 PL2는 편광축이 x축 방향이며 F는 간섭필터를 나타낸다.

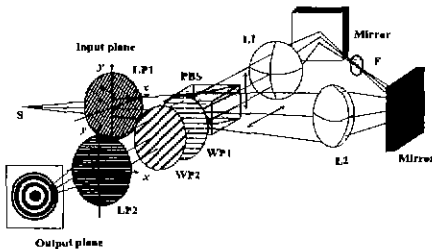


그림 1. 변형 삼각 간섭계
Fig. 1. Modified triangular interferometer (MTI)

변형 삼각간섭계에서는 시계방향과 반시계방향으로 진행하는 빛이 출력면에서 더해지게 되는데, 출력면쪽에 위치한 파장판들의 4가지 조합에 따라 출력면에서 얻어지는 빛의 세기도 4가지가 얻어진다.

그림 1에서 좌표가 $(x_0, y_0, -z_0)$ 인 점광원의 파

장을 λ 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.

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

wave plate	PSF
$\Gamma_1 = \frac{\pi}{2}$ 와 $\Gamma_2 = +\frac{\pi}{2}$	$I_c(x, y) = \frac{1}{2}(1 + \cos \phi)$ (1)
$\Gamma_1 = \frac{\pi}{2}$ 와 $\Gamma_2 = -\frac{\pi}{2}$	$I_c(x, y) = \frac{1}{2}(1 - \cos \phi)$ (2)
$\Gamma_1 = 0$ 와 $\Gamma_2 = +\frac{\pi}{2}$	$I_s(x, y) = \frac{1}{2}(1 - \sin \phi)$ (3)
$\Gamma_1 = 0$ 와 $\Gamma_2 = -\frac{\pi}{2}$	$I_c(x, y) = \frac{1}{2}(1 + \sin \phi)$ (4)

여기서, $\phi = \frac{k}{2z_1} \{ (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 - (x_1^2 + y_1^2) \}$,
 $x_1 = \frac{x_0}{\alpha + \beta}$, $y_1 = \frac{y_0}{\alpha + \beta}$, $z_1 = \frac{z_0}{\alpha + \beta}$, $\alpha = -\frac{f_1}{f_2}$,
 $\beta = -\frac{f_2}{f_1}$ 그리고 $\alpha - \beta = 1$ 이다. 또한, 점광원의 위치에 따른 빛의 진폭성분은 생략하였다. 식 (1)에서 식 (2)를 빼면 다음과 같은 복소홀로그래프의 실수부가 얻어진다.

$$I_c(x, y) = \cos \phi \tag{5}$$

식 (4)에서 식 (3)을 빼면 복소홀로그래프의 허수부가 식 (6)과 같이 얻어진다.

$$I_s(x, y) = \sin \phi \tag{6}$$

따라서, 식 (5)와 (6)을 전자적으로(electronically) 결합함으로써 식 (7)과 같은 바이어스와 공액영상이 제거된 최종 복소홀로그래프를 얻을 수 있게 된다.

$$\exp(\pm i\phi) \tag{7}$$

윗 식은 식 (5)와 (6)의 결합을 통해 얻게 된 복소홀로그래프를 나타내며, 바이어스와 공액영상이 없는

수은등을 이용한 인코히어런트 삼각 홀로그래피

복소홀로그램이므로 식 (7)에서 양의 부호를 가진 복소홀로그램을 복원시 실상을, 음의 부호를 가진 복소홀로그램을 복원할 때에는 허상만을 관측할 수 있다. 따라서, 변형 삼각간섭계에서는 파장판의 위상지연 I_1 과 I_2 의 4가지 조합과 CCD 카메라를 이용하여 검출된 빛의 세기를 전자적으로 조합함으로써 바이어스와 공액영상이 제거될 수 있다

3. 실험 및 결과 분석

3.1. 실험결과

변형 삼각간섭계의 이론적 분석결과를 실험적으로 검증하기 위하여 단파장 점광원에 대한 인코히어런트 홀로그래프의 합성 및 복원에 대한 실험을 기존의 삼각간섭계와 변형 삼각간섭계에 대해 각각 수행하고 그 결과를 비교분석하였다. 실험에서 사용된 광원의 파장은 632.8 nm이고, 점광원에서 입력면(A면)까지의 거리는 1,000 mm, 삼각간섭계에 사용된 렌즈 L1, L2의 초점거리는 각각 $f_1 = 150$ mm, $f_2 = 250$ mm이며, 변형 삼각간섭계에 사용된 파장판은 $\lambda/4$ plate이다.

먼저 기존의 삼각간섭계에서 점광원의 간섭패턴을 출력면에서 구하였다. 그림 2는 실험을 통해 출력면에서 구한 점광원의 간섭패턴이다.

삼각 간섭계에서 구한 점광원의 간섭패턴은 최대값과 최소값이 위상이 2π 의 정수배가 되는 위치에서 주기적으로 발생하는 것을 그림 2를 통해 알 수 있으며, 이 간섭패턴은 흔히 Fresnel Zone Plate라고 한다.



그림 2. 삼각간섭계에서 구한 간섭패턴
Fig. 2. Interference pattern obtained from the triangular interferometer

그림 3은 변형 삼각간섭계에서 점광원에 대하여

파장판의 위상지연 I_1 과 I_2 의 4가지 조합에 따라 출력면에서의 간섭패턴들을 CCD카메라를 이용하여 찍고 이를 전자적으로 조합하여 구한 복소홀로그램의 실수부와 허수부를 나타낸 것이다.

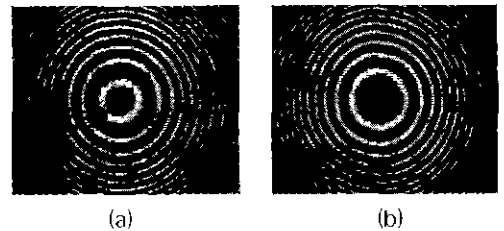


그림 3. 변형 삼각 간섭계로부터 얻은 복소홀로그램
(a) 실수부 (b) 허수부
Fig. 3. Complex hologram obtained from MTI
(a) Real part (b) Imaginary part.

그림 3의 (a)와 (b)는 식 (7)에 대응하는 복소홀로그램의 실수부와 허수부인 데, 실제 복소홀로그램의 실수부와 허수부는 음수값을 포함하고 있으나 그림에서는 음수의 절대값이 가장 큰 부분이 256 gray level에서 0 레벨이 되도록 바이어스를 더해져 표현한 그림이다. 따라서, 변형 삼각 간섭계를 이용하여 복소홀로그램의 실수부와 허수부를 구할 수 있음을 알 수 있다. 또한, 바이어스가 제거된 영상에서는 원래의 간섭패턴에 존재했던 결함들이 제거된다는 것을 알 수 있다.

3.2. 수치적 복원과정

그림 4는 일반적인 홀로그램의 기록방법을 보여주는 것이다. 평면기준파와 물체파가 홀로그램 기록물질의 표면에서 간섭을 일으켜 홀로그램을 기록하게 된다. 광학 홀로그래피에서, 물체파는 기록과정에서 사용된 것과 비슷한 평면파로 홀로그램을 조명함으로써 복원될 수 있다. 복원시에 홀로그램을 바라보면 사람은 원물체의 위치에 물체의 허상을 볼 수 있다. (그림 (b)) 만약 스크린이 홀로그램 뒤쪽 d만큼 떨어져 위치해 있다면 실상이 형성되는 것을 볼 수 있다.

수치적으로 실상이 맺히는 평면에서의 진폭과 위상의 분포는 Fresnel-Kirchhoff 적분에 의해 구할 수 있다. 평면파가 $z=0$ 인 평면에 위치한, 진폭투과도 $t(x,y)$ 의 홀로그램을 조명하면, Fresnel-Kirchhoff 적분[10]에 의해 실상이 맺히는 면에서 식 (8)과 같은

복소진폭이 구해진다.

$$\Gamma(\xi, \eta) = \frac{ia}{\lambda d} \exp\left[-i\frac{\pi}{\lambda d}(\xi^2 + \eta^2)\right] \times \iint t(x, y) \exp\left[-i\frac{\pi}{\lambda d}(x^2 + y^2)\right] \times \exp\left[+i\frac{2\pi}{\lambda d}(x\xi + y\eta)\right] dx dy. \quad (8)$$

여기서, a는 입사파의 진폭이다. 빛식은 정확한 공식의 근사식이다. 이러한 Fresnel 근사는 다음과 같은 조건이 충족되면 유효하다.

$$d^3 \gg \frac{\pi}{4\lambda} [(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2]^2 \quad (9)$$

부등식에서 $(\xi - x)^2$ 와 $(\eta - y)^2$ 의 최대가능한 값이 고려되어야 한다. $\lambda = 600\text{nm}$ 와 $(\xi - x)_{\max} = (\eta - y)_{\max} = 0.5\text{cm}$ 전형적인 홀로그램 크기에 대해, d는 15cm보다 더 커야 한다. 실상의 빛의 세기는 식 (10)과 같이 얻을 수 있다.

$$I(\xi, \eta) = |\Gamma(\xi, \eta)|^2. \quad (10)$$

함수 $\Gamma(\xi, \eta)$ 는 홀로그램 투과도 $t(x, y)$ 가 좌표축을 따라 Δx 와 Δy 의 간격으로 $N \times N$ 개의 행렬점으로 샘플링되면 디지털화될 수 있다. ξ 와 η 가 $r\Delta\xi$ 와 $s\Delta\eta$ 로 대체되며, 여기서, r과 s는 정수이다. 이 경우에 식 (8)의 discrete한 표현은 다음 식과 같이 주어진다.

$$\Gamma(r, s) = \exp\left[-i\frac{\pi}{\lambda d}(r^2\Delta\xi^2 + s^2\Delta\eta^2)\right] \times \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} t(k, l) \exp\left[-i\frac{\pi}{\lambda d}(k^2\Delta x^2 + l^2\Delta y^2)\right] \times \exp\left[+i2\pi\left(\frac{kr}{N} + \frac{ls}{N}\right)\right]. \quad (11)$$

$\Gamma(r, s)$ 는 실상의 진폭과 위상을 설명하는 $N \times N$ 개의 점의 행렬이며, $\Delta\xi$ 와 $\Delta\eta$ 는 복원된 영상에서의 화소의 크기이다. 식 (10)에 따르면, 빛의 세기 분포만이 관심이 있으므로 합기호 앞에 있는 위상성분은 생략될 수 있다. 수치적 관점에서 식 (11)은 discrete Fourier 변환에 의한 Fresnel 근사이다. 이것은 FFT의 표준알고리즘이 적용될 수 있기 때문에 중요한 사실이다. 그림 5는 앞에서 설명된 홀로그램의 수치적 복원과정을 보여주는 것이다.

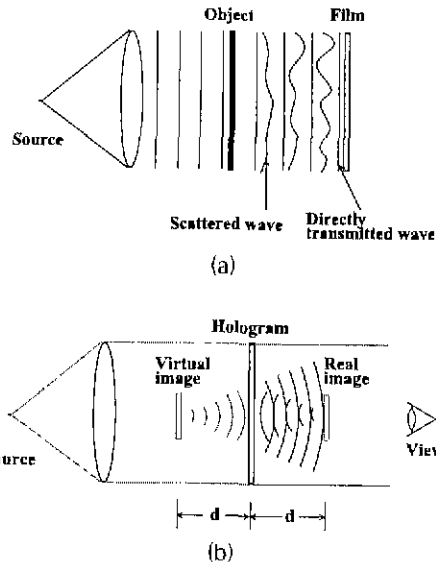


그림 4. 동축 홀로그래피 (a) 기록 (b) 복원
Fig. 4. On-axis holography (a) recording (b) reconstruction.

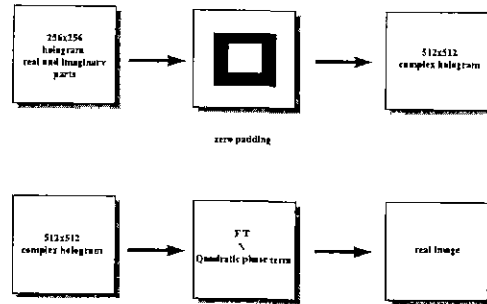


그림 5. 기록된 홀로그램의 수치복원과정
Fig. 5. Numerical processing of the recorded hologram.

그림 6은 그림 5와 같은 과정을 거쳐서 복원한 영상이다. 그림 6의 (a)는 기존의 삼각간섭계를 이용하여 얻은 홀로그램을 이용하여 복원한 영상이고, (b)는 변형 삼각간섭계를 이용하여 바이어스와 허상이 제거된 복소홀로그램을 이용하여 복원한 실상을 나타낸 것이다. 그림 6의 (a)에서는 배경에 바이어스와 허상이 존재하고, (b)의 복원영상은 바이어스와 허상이 존재하지 않으므로 SNR(signal to noise ratio)이 기존의 삼각간섭계의 홀로그램을 복원한 것보다 변형 삼각간섭계의 복소홀로그램을 이용하여 복원한

수은등을 이용한 인코히어런트 삼각 홀로그래피

영상이 월등히 좋다는 것을 알 수 있다.

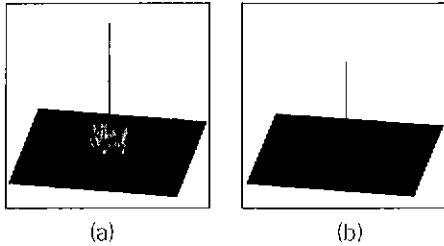


그림 6. 복원영상 (a) 기존의 삼각 간섭계의 간섭패턴의 복원영상 (b) 변형 삼각 간섭계의 복소홀로그램을 복원한 영상.

Fig. 6. Images reconstructed numerically from (a) a hologram from a conventional (Cochran's) triangular interferometer and (b) a complex hologram from MTI.

따라서, 이상의 결과를 통해 기존의 삼각간섭계에서 얻은 홀로그램의 복원시 바이어스와 공액영상이 동축상에 함께 존재하므로 영상의 질이 크게 떨어지는 반면에, 변형 삼각간섭계에서 얻은 복소홀로그램의 복원시에는 바이어스와 공액영상이 제거되어 SNR이 월등히 향상되는 것을 실험과 복원을 통해 검증하였다.

3.3. 수은등을 이용한 홀로그램의 생성과 복원

인코히어런트 광원을 이용하는 경우에 있어서 변형 삼각간섭계의 가능성을 시험하기 위해서, 중심파장이 546.1nm인 수은등을 사용하여 하나의 점광원 홀로그램을 생성하고 복원하는 실험을 수행하였다. 출력면에서의 간섭패턴 즉 홀로그램영상은 CCD 카메라에 의해 찍혔다. 546.1nm에 대한 위상지연이

$\Gamma_1 = \frac{\pi}{2}$ 인 파장판이 없어서, 그림 1에서 파장판 WPI가 없는 시스템을 사용하였다.

그림 7의 (a)와 (b)는 각각 표 1의 $I_{+s}(x, y)$ 와 $I_{-s}(x, y)$ 에 대응하는 점광원 홀로그램을 나타낸다. 그림 7(c)는 바이어스가 제거된 sine 함수를 보여준다. 이것은 그림 7의 (a), (b)에서 영상의 전자적인 조작에 의해 얻어진다. 이런 전자적인 결과를 시각적으로 보여주기 위해, 그림 7 (c)에서 이진값은 256 gray

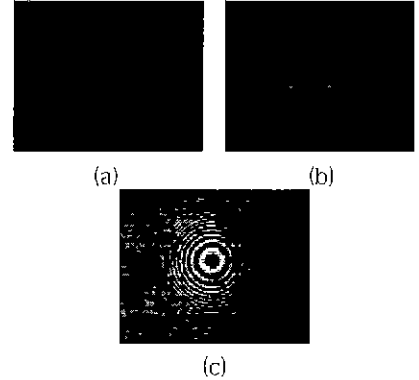


그림 7. 실험에 의해 변형 삼각간섭계에서 얻어진 간섭패턴 (a) $\Gamma_1=0, \Gamma_2=\frac{\pi}{2}$ 인 경우의 점광원 홀로그램 (b) $\Gamma_1=0,$

$\Gamma_2=-\frac{\pi}{2}$ 인 경우의 점광원 홀로그램 (c) (b)에서 (a)를 뺀 영상.

Fig. 7. Interference patterns obtained from the modified triangular interferometer by experiment (a) $\Gamma_1=0, \Gamma_2=\frac{\pi}{2}$ (b)

$\Gamma_1=0, \Gamma_2=-\frac{\pi}{2}$ (c) image obtained by subtracting (a) from (b).

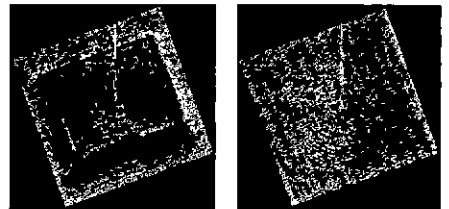


그림 8. 한 개의 점광원 홀로그램에서 수치적으로 복원된 영상들.

Fig. 8. Images reconstructed numerically from the hologram of a single point source.

level로 변환되어서 이 결과에서는 음의 값을 가지지 않는다. 그림 8은 그림 7의 홀로그램에서 복원된 영상을 보여준다. 이 영상들은 Fresnel-Kirchhoff 적분에 의해 디지털적으로 계산된 것들이다. 바이어스가 제거된 홀로그램에서(그림 7(c)) 복원된 영상(그림 8(b))은 바이어스가 있는 홀로그램에서(그림 7(a)) 복원된 그림(그림 8(a))보다 더 선명하다는 것을 알 수 있다. 그림 8(a)에서 배경잡음은 바이어스때문에 생기는 것이다. 그런데, 그림 8(b)에서는 바이어스가 존재하지 않지만, 공액영상이 제거되지 않았기 때문에,

공액영상에 의한 잡음이 그림 8(b)에서는 존재한다는 것을 알 수 있다. 이 결과는 인코히어런트 홀로그래피에서 바이어스와 공액영상을 제거하기 위해 제안된 방법이 유효하다는 것을 입증한다.



그림 9. (a) 바이어스가 존재하는 홀로그램에서 광학적으로 복원된 영상 (b) 바이어스가 제거된 홀로그램에서 광학적으로 복원된 영상.

Fig. 9. Images reconstructed optically from the hologram (a) with bias (b) without bias.

하나의 점광원 홀로그램의 광학적 복원이 또한 구현되었다. 복원에 사용된 코히어런트 광원은 He-Ne 레이저였다. 그림 9의 (a), (b)는 그림 7의 홀로그램으로부터 광학적으로 복원된 영상들이다. 홀로그램의 이진값들은 256 gray level로 양자화되어서 LCD로 전송되었다. 그림 9(a)에서, 바이어스에 의한 잡음이 복원영상에 존재하기 때문에 잘 볼 수 없다. 반면에 바이어스가 제거되었기 때문에, 복원영상 (b)는 (a)보다 더 선명하게 보인다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 인코히어런트 홀로그래피인 기존의 삼각간섭계의 근본적인 문제인 바이어스와 공액영상의 문제를 해결할 수 있는 변형 삼각간섭계를 이용한 인코히어런트 홀로그램 생성 실험결과와 실험을 통해 얻은 홀로그램의 수치복원 및 광학적 복원 결과를 제시하였다. 즉, 한 개의 점광원에 대한 실험결과를 통해 기존의 방법과 비교분석함으로써 변형 삼각간섭계를 이용하여 바이어스와 공액영상의 제거가 가능하다는 것을 검증하였다.

또한, 제안된 방법의 유효성을 입증하기 위해서 수은등을 이용하여 점광원에 대한 홀로그램을 생성하고 이에 대한 복원실험도 수행하였다.

참 고 문 헌

- [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. Restnick 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, No. 4, pp. 294-296, 1992.
- [9] 김수길, 김은수, 이희, 이병호, "바이어스와 공액영상이 제거된 인코히어런트 삼각 홀로그래피에 대한 이론적 연구", 대한전자공학회 논문지 Vol. 33-A, No. 10, pp. 144-152, 1996.
- [10] U. Schnars and W. Juptner, "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 2일생 1988년 2월 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 2월 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 2월 서울대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1997~1997년 서울대 공학연구소 특별연구원. 현재 호서대 전기공학부 조교수.