

디지털 홀로그래피에서 푸리에 변환을 이용한 0차 회절광의 제거와 위상홀로그램의 생성에 대한 전산 모사

김성규[†]

한국과학기술연구원 영상미디어센터

☎ 130-650 서울시 성북구 하월곡동 39-1

박민철 · 이 석

한국과학기술연구원 광기술센터

☎ 130-650 서울시 성북구 하월곡동 39-1

김재순

서울대학교 물리학과

☎ 151-742 서울시 관악구 신림 9동 산 56-1

손정영

한양대학교 전기정보통신연구소

☎ 133-7691 서울시 성동구 행당동 17

(2003년 8월 1일 받음, 2004년 1월 8일 수정본 받음)

CCD의 입력면에서의 물체광과 참조광의 간섭을 수치적 방법으로 생성한 광 강도 분포 홀로그램을 대상으로 푸리에 변환 방법을 이용한 0차 회절광의 제거를 전산 모사 방법으로 구현하였고, 0차 회절광 성분이 제거된 광 강도 분포와 위상을 갖는 홀로그램을 생성하였다. 그리고 그 결과를 수치적 재생 방법을 사용하여 0차 회절광 성분의 제거를 확인하였다. 그리고 푸리에 변환 방법에 의한 0차 회절광 성분이 제거된 위상홀로그램의 생성이 가능하다. 0차 회절광을 제거하기 위한 제거 함수를 도입하였고 제거 영역에 따른 0차 회절광의 제거와 재생되는 실상의 정보 손실 정도를 비교하였고, 기존의 방법에 비하여 효과적임을 증명하였다.

주제어 : computer holography, three-dimensional image acquisition, holographic interferometry.

I. 서 론

홀로그램의 수치적 재생 방법은 Goodman과 Laurence에 의해서 30년 이상 이전에 제안된 것이다.^[1] 이러한 수치적 재생은 Kronrod등에 의하여 실현되었다.^[2] 이러한 방법은 디지털 데이터로 기록된 홀로그램에서 수치적으로 재생할 수 있고 기록된 물체의 3차원적 정보를 추출할 수 있다. 홀로그래픽 플레이트(Holographic Plate)를 사용하는 고전적인 홀로그래피와 비교하면, 디지털 홀로그래피(Digital Holography)에 있어서는 화학적 홀로그램 생성 과정을 생략할 수 있고 이로 인한 빠른 결과를 볼 수 있다. 컴퓨팅 연산 속도와 전자적 홀로그래픽 영상(Holographic Image)의 획득 장치의 발전은 다수의 응용 분야에 매우 매력적인 도구가 되었다.^[3-6]

디지털 홀로그래피의 응용을 고려할 때 CCD(Charge-Coupled Device)의 각 픽셀의 크기(>5 micro meter)는 제약 요소로 작용한다. 실버 할라이드(Silver Halide)에서의 에멀전(Emulsion)을 사용하는 고전적 홀로그래피에서는 그 공간 주

파수가 5000 lines/mm 정도이다. 이러한 에멀전의 경우에는, 참조광과 물체광 사이의 각도에 있어서 기록과 재생에 있어 거의 제한이 없다. 그러나 CCD 카메라의 경우에는 의미가 있는 기록 가능한 공간 주파수가 <100 lines/mm 이므로 간섭하는 물체광과 참조광 파동의 사잇각은 수 도 정도로 한정된다. 이러한 경우에 특별한 방법을 사용하지 않는 한도에서는 기록 대상체의 크기가 상대적으로 작고 먼 거리에 있어야 그 간섭 패턴을 기록할 수 있어 그 응용에는 한계가 있어 이를 극복하려는 논문들이 있다.^[7,8] 이러한 극복 이외에도 홀로그램의 근본적인 문제인 0차 회절광과 실상, 허상의 동시 재생을 효과적으로 제거하는 것이 디지털 홀로그램의 중요한 과제이다.

기존의 홀로그래피에서와 마찬가지로, 디지털 홀로그래피도 물체광과 참조광의 간섭을 기록함에 있어 그 간섭의 광 강도(Light Intensity)만을 기록하게 된다. 그러나, 간섭의 광 강도 만으로도 기록한 물체의 3차원적 정보를 보유한다. 물체광과 참조광의 간섭으로 형성되는 광 강도 분포 홀로그램(Light Intensity Distribution Hologram)을 이용하여 0차 회절광 성분이 제거된 위상홀로그램을 생성하고, 생성된 위상홀로그램을

[†]E-mail: kkk@kist.re.kr

이용하여 기록된 물체의 3차원적 정보를 재생하는 것은 디지털 홀로그래프의 활용 영역을 확대시키는 것이다. 위상 홀로그래프는 파면 변형(Wave Shaping)과 HOE(Holographic Optical Element)와 같은 영역 등에 적용되고 있어, CCD로 광 강도 분포 홀로그래프를 입력 받는 디지털 홀로그래프에서의 위상 정보 생성은 디지털 홀로그래프의 활용 범위를 넓힐 수 있다.

본 논문에서는 CCD 입력면에서의 물체광과 참조광의 간섭을 수치적 방법으로 생성한 광 강도 분포 홀로그래프를 이용한다. 이렇게 생성된 수치적 광 강도 분포 홀로그래프 데이터의 푸리에 변환(Fourier Transform)을 이용하여 0차 회절광을 수치적으로 제거한 새로운 홀로그래프 데이터를 생성한다. 푸리에 변환 과정을 통하여 3차원 물체 정보를 기록한 수치적 광 강도 분포 홀로그래프는 주파수 공간에서 데이터로 변환된다. 이렇게 변환된 홀로그래프의 푸리에 변환 데이터에서 푸리에 변환 공간의 0차 회절광에 해당하는 저주파 성분을 제거하고 역푸리에 변환을 이용하여 광 강도 분포와 위상 정보를 모두 갖는 수치적 홀로그래프(Numerical Hologram)를 계산하였다. 이 방법을 이용한 수치적 홀로그래프의 장점은 광학적 푸리에 변환에서 푸리에 변환 렌즈의 초평면에서 0차 회절광을 제거하는 방법과 같은 개념의 수치적 0차 회절광의 제거가 가능하다는 것이다. 또한 역푸리에 변환에 의해 생성된 전기장 분포에서 진폭과 위상을 갖는 복소수 전기장을 이용하면, 진폭만을 이용하여 홀로그래프를 생성할 수도 있고, 위상만을 갖는 홀로그래프를 생성할 수도 있다. 수치적 재생에서 0차 회절광을 제거하는 방법들이 연구 발표 되었으나, 이들은 0차 회절광의 제거가 완벽하지 않거나, 2회 이상의 동일 물체에 대한 물체광, 참조광, 또는 참조광의 위상이 변화된 간섭 무늬를 입력 받아 0차 회절광을 제거한다.^{19,11}

본 논문에서의 0차 회절광 제거 방법은 CCD를 사용하여 물체광과 참조광의 간섭에 의한 홀로그래프를 1회 입력 받아 푸리에 변환과 제거함수를 적용한 역푸리에 변환을 이용하여 0차 회절광을 제거에 적용할 수 있는 방법이다. 또한 제거함수를 도입함으로써 물체광과 참조광에 의한 간섭을 CCD로 입력 받는 경우에 0차 회절광 성분이 제거된 위상홀로그래프를 생성할 수 있는 유용한 방법이 된다. 수치적으로 광 강도 분포 홀로그래프를 생성하고, 생성된 디지털 홀로그래프를 대상으로 제거함수를 도입하여 0차 회절광을 제거한 수치적 계산의 결과를 본 논문에 나타내었고 기존의 방법¹⁰과 0차 회절광의 제거 정도를 비교하였다. 본 논문에서 제안된 방법은 푸리에 변환 공간에서의 데이터에서 선택적으로 저주파 영역을 설정하여 제거하는 방법으로, 0차 회절광의 제거 조건을 변화시키면서 0차 회절광의 제거 정도와 수치적 결과 재생상의 3차원적 물체의 정보의 소실 정도를 확인할 수 있는 장점이 있다.

II. 이론적 배경

2.1. 수치적 방법에 의한 광 강도 분포 홀로그래프의 생성

디지털 홀로그래피에서의 홀로그래프 데이터는 CCD로 입력되는 물체광과 참조광의 간섭광의 강도를 사용하였다. 본 논문에서는 수치적 방법을 사용하여 광 강도 분포 홀로그래프를 생

성하였다. 다수의 점광원으로 구성된 물체광(Object Wave; $\sum_{i=1}^N U_i(x, y)$)과 참조광(Reference Wave; U_R)의 간섭에 의한 간섭 패턴의 형성은 식 (1)에 의하여 표현된다. 간섭 결과의 첫 항과 둘째 항은 참조광과 물체광의 기록이며, 셋째 항이 참조광과 물체광의 간섭에 의하여 형성되며, 실상과 허상의 정보가 혼합되어 있고, 넷째 항은 물체를 구성하는 각각의 점광원들 간의 간섭이다. 식 (1)에 의하여 가상적인 물체에 대한 수치적 광 강도 분포 홀로그래프를 계산할 수 있으며, 디지털 홀로그래피에서 적용되는 여러 분야에 가상적인 수치적 광 강도 분포 홀로그래프를 생성할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 I_{total}(x, y) &= \left| U_R(\phi_R) + \sum_{i=1}^N U_i(x, y) \right|^2 \\
 &= |U_R(\phi_R)|^2 + \sum_{i=1}^N |U_i(x, y)|^2 \\
 &\quad + \sum_{i=1}^N (U_R U_i^* + U_R^* U_i) + \sum_{i=1}^N \sum_{j \neq i}^N U_i U_j^* \\
 U_R &= A_R e^{i\phi_R} \\
 U_i(x, y) &= \frac{A}{r_i(x, y)} e^{i\phi_R} \\
 i &= 1, 2, \dots, N
 \end{aligned} \tag{1}$$

본 논문에서는 수치적 계산의 단순화를 위하여 참조광을 가상적 홀로그래프 건판에 수직으로 입사하는 평면파로 가정하였고, 0차 회절광의 제거를 위한 대상 디지털 홀로그래프는 수치적으로 생성한 광 강도 분포 홀로그래프를 사용하였다. 수치적 홀로그래프의 계산에 있어 식 (1)에 표현되는 모든 항을 계산하여 실제 CCD로 입력 받는 경우의 디지털 홀로그래프와 최대한 유사하도록 하였다.

2.2. 수치적 재생과 푸리에 변환을 이용한 0차 회절광의 제거

광 강도 분포 홀로그래프에서 Huygens-Fresnel 원리에 따른 원거리 장(Far Field) 근사를 식 (2)과 같이 적용하면, 푸리에 변환 형태의 식 (3)을 얻을 수 있다. 이러한 근사식으로 인하여 수치적 재생의 계산 시간은 줄일 수 있다.^{11,2}

$$z^3 > \frac{\pi}{4\lambda} [(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2]_{max}^2 \tag{2}$$

여기에서 x 와 y 는 수치적 재생에서의 수평과 수직의 좌표이고, ξ 와 η 는 가상적 홀로그래프 평면에서의 수평과 수직의 좌표이다. 그리고 z 는 수치적 재생 평면과 가상적 홀로그래프 사이의 깊이 방향의 거리이다.

$$U(x, y) = \frac{e}{i\lambda z} e^{i\frac{k}{2z}(x^2 + y^2)} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ U(\xi, \eta) e^{i\frac{k}{2z}(\xi^2 + \eta^2)} \right\} e^{-i\frac{k}{2z}(\xi^2 + \eta^2)} d\xi d\eta \tag{3}$$

여기에서 깊이 방향 좌표 z 의 수치적 재생 평면(x, y)에서 계

산되어진 전기장이 $U(x, y)$ 이다. 그리고 λ 는 기록과 재생에서 사용되어진 파장이다. 본 논문에서는 수치적으로 가상 홀로그래프를 생성하고 수치적 재생상을 계산하므로 계산상의 파장은 큰 의미를 갖지 않는다.

광 강도 분포 홀로그래프에 광학적 푸리에 변환을 적용하면 수식적으로는 식 (4)으로 표현할 수 있다.

$$U_f(u, v) = \frac{1}{i\lambda f} e^{i\frac{k}{2f}(u^2+v^2)} \int_{-\infty}^{\infty} \int U(\xi, \eta) e^{-i\frac{2\pi}{\lambda f}(\xi u + \eta v)} d\xi d\eta \quad (4)$$

여기에서 푸리에 렌즈의 초점 거리가 f 인 경우, 푸리에 렌즈의 초평면에서의 푸리에 변환된 결과 전기장이 $U_f(u, v)$ 이다. u 와 v 는 푸리에 렌즈의 초평면에서의 수평과 수직 방향의 좌표이다.

또한 공간 주파수와 공간 좌표와의 관계는 식 (5)로 두 공간의 단위 거리에 대한 관계를 알 수 있다.

$$f_x = \frac{u}{\lambda f}, f_y = \frac{v}{\lambda f} \quad (5)$$

여기에서 푸리에 렌즈의 초점거리에 있는 초평면에서의 좌표는 수평 공간주파수 f_x 와 수직 공간 주파수 f_y 로 나타낼 수 있다.

이러한 광학적 푸리에 변환의 수식적 표현은 수치적 푸리에 변환으로 적용되어질 수 있다. 이러한 푸리에 변환과 역변환이 조건없이 진행되면 초기의 광 강도 분포 홀로그래프가 계산되어진다. 따라서, 0차 회절광에 해당하는 광학적 푸리에 변환에서의 초평면의 영역을 수치적으로 제거함으로써 0차 회절광이 제거된 진폭과 위상을 갖는 복소수 전기장을 계산할 수 있다. 광학적 푸리에 변환에서 고주파 통과 필터와 같은 작용을 수치적으로 도입하기 위하여 식 (6)의 제거 함수를 도입한다. 제거 함수의 목적은 0차 회절광의 제거이지만 0차 회절광은 초평면에서의 저주파 영역에 포함되므로 제거영역을 자유롭게 설정하여 0차회절광의 제거와 수치적으로 재생되는 3차원 물체의 정보 소실의 정도를 비교할 수 있게 하기 위함이다. 이러한 상황을 수식적으로 표현하면 식 (6)이 된다.

$$B(u, v) = \begin{cases} 0 & \text{if } u < |a| \text{ and } v < |b| \\ 1 & \text{else area} \end{cases} \quad (6)$$

여기서 제거 함수는 푸리에 렌즈의 초평면에서 수평과 수직의 중심축으로부터 수평(수직) 방향으로 양과 음의 $a(b)$ 값 이내의 정보를 제거하고, 이외의 영역에서는 푸리에 변환 정보를 보존하는 함수이다.

광학적 푸리에 변환된 전기장 $U_f(u, v)$ 에서 제거함수 $B(u, v)$ 를 적용하고 역변환을 통한 새로운 전기장 $U_{new}(\xi', \eta')$ 은 식 (7)로 표현된다.

$$U_{new}(\xi', \eta') = i\lambda f e^{-i\frac{k}{2f}(\xi'^2 + \eta'^2)} \int_{-\infty}^{\infty} \int U_f(u, v) e^{i\frac{2\pi}{\lambda f}(\xi' u + \eta' v)} du dv \quad (7)$$

이와 같은 광학적 푸리에 변환과 0차 회절광의 제거를 적용하는 역푸리에 변환은 수치적으로 계산 가능하며 고속 푸리에 변환(FFT; Fast Fourier Transform) 알고리즘을 사용한다. 식

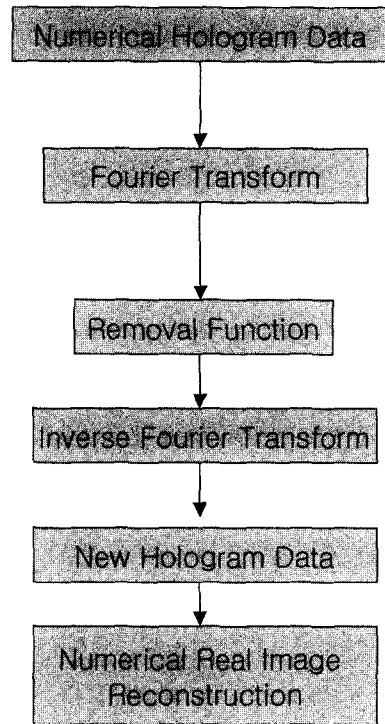


그림 1. 초기 홀로그래프 데이터에서 0차 회절광이 제거된 수치적 실상 재생에 이르는 순서도.

(6)의 계수의 변화에 따른 0차 회절광의 제거를 통한 수치적 재생상의 정보가 변화되는 것을 시각적으로 확인 할 수 있다. 또한 새로운 전기장을 이용하면, 0차 회절광이 제거된 광 강도 분포 홀로그래프와 위상홀로그래프를 생성할 수 있다. 0차 회절광을 제거한 수치적 실상의 재생 과정을 순서대로 표시하면 그림 1과 같다. 본 논문에서는 홀로그래프 데이터 생성과 푸리에 변환, 제거함수의 적용, 역푸리에 변환, 새로운 홀로그래프 데이터의 생성, 그리고 새로운 홀로그래프 데이터로부터의 수치적 실상 재생에 이르는 전과정을 광학적 장치 없이 수치적 계산만으로 실현하였다.

III. 결 과

“KIST” 글자가 가상적 홀로그래프 평면으로부터 300 mm 떨어진 경우에 CCD 입력면에서의 물체광과 참조광에 의한 간섭을 계산하여 수치화된 광 강도 분포 홀로그래프는 그림 2의 (a)이다. 광 강도 분포 홀로그래프의 크기는 FFT 계산을 고려하여 1024×1024의 정보점들로 구성하였다. 각 정보점의 간격은 수평, 수직 모두 6.8 μm로 하였다. 이 화소 간격은 수치적 홀로그래프의 생성에서는 큰 의미가 없으나, 이 후 CCD를 적용할 경우를 생각하여 유사 크기를 적용하였다. 이러한 광 강도 분포 홀로그래프를 수치적 계산으로 재생하면 그림 2의 (b)를 얻는다. 여기에서 확인할 수 있듯이 0차 회절광으로 인하여 본래의 “KIST” 글자의 윤곽만이 확인 가능하며 판독이 어려운 상태이다.

0차 회절광을 완전히 제거하기 위한 제거 함수의 계수의 변화에 따른 0차 회절광의 제거와 수치적 실상 재생의 정보 회

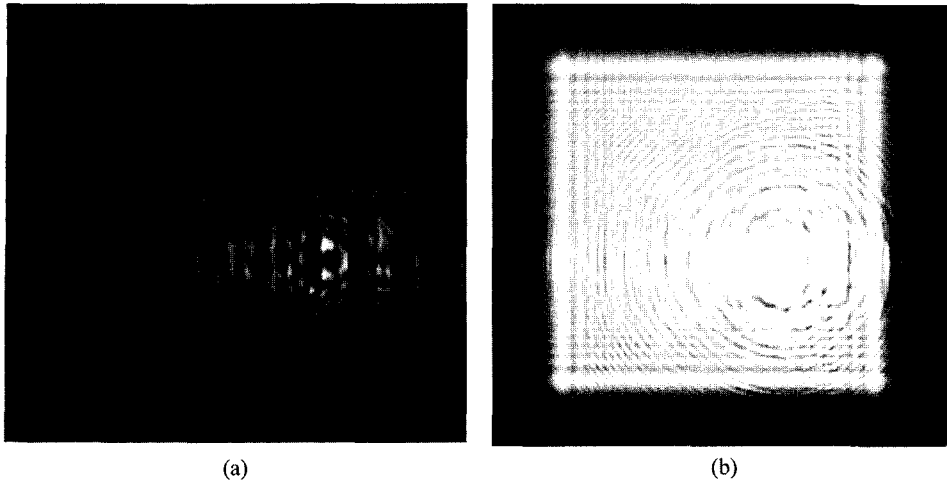


그림 2. CCD 입력면에서의 물체광과 참조광의 간섭을 수치적으로 계산한 (a) 간섭무늬와 (b) 간섭무늬로부터 수치적으로 실상을 재생한 결과

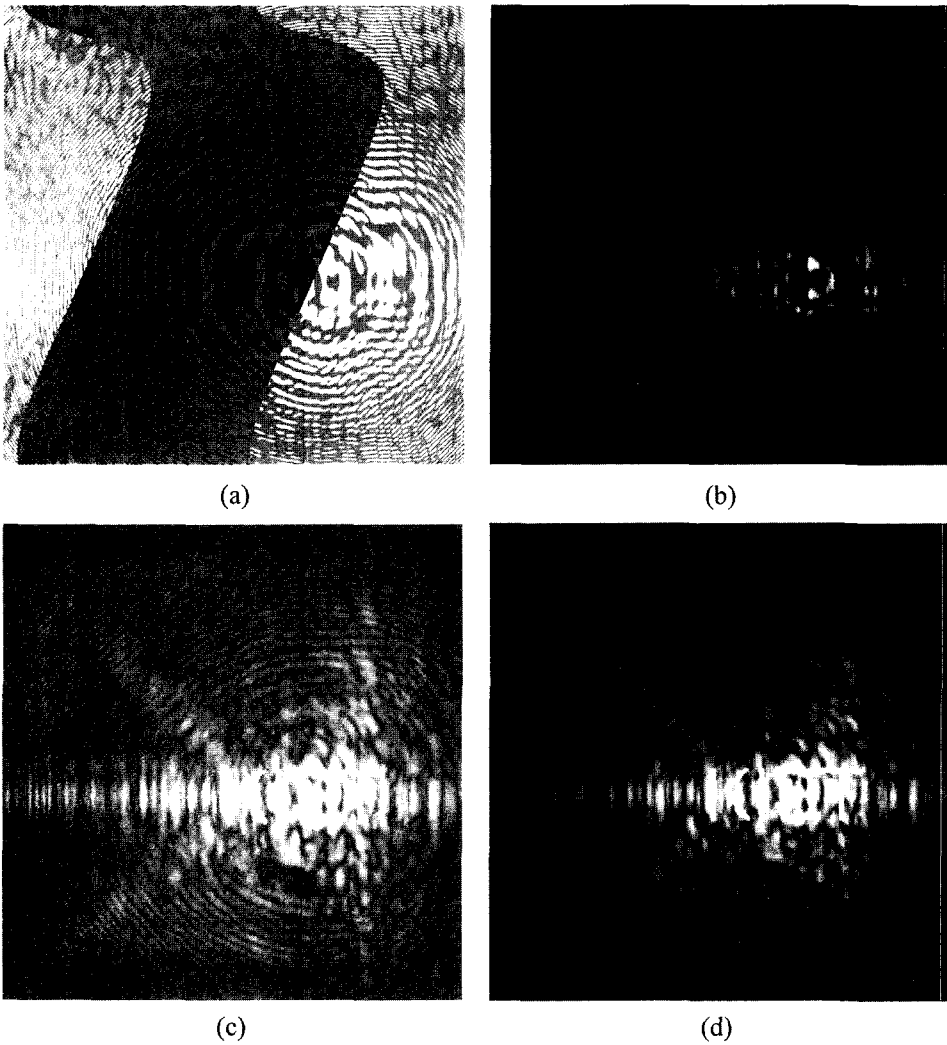


그림 3. 푸리에 변환후 제거 영역 1인 경우의 역푸리에 변환에 의하여 생성된 (a) 위상 분포 그리고 (b) 광 강도 분포와 (c) 광 강도 분포를 이용한 수치적 실상 재생, 그리고 (d) DC 제거 방법을 적용으로 0차 회절광을 감소한 수치적 실상의 재생.

손 정도를 확인하였다. 그리고 계산의 단순화를 위하여 0차 회절광 제거를 위한 제거 함수의 영역을 정사각형 영역을 설정

($a = b$)하여 적용하고 각각의 영역 설정에 따른 0차 회절광 영역의 제거와 수치적으로 재생되는 물체의 정보 손실을 그림 3

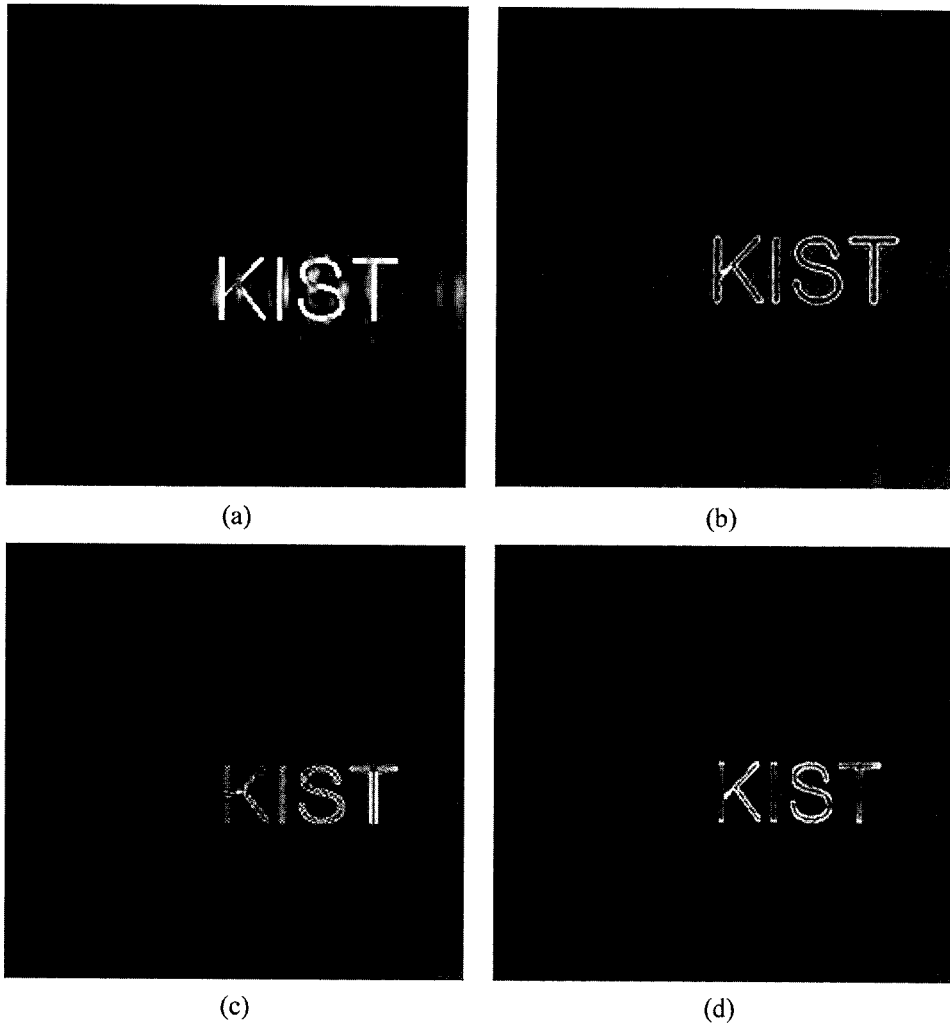


그림 4. 제거 함수의 영역이 (a) 10, (b) 50, (c) 100인 경우의 광 강도 분포 홀로그램으로 수치적으로 재생한 실상과 (d) 제거 함수의 영역이 10인 경우의 위상 홀로그램으로 수치적으로 재생한 실상

과 4에 비교하여 나타내었다.

그림 2의 (a)에서 0차 회절광을 제거하기 위한 계수(a)를 1로 설정하여 진폭과 위상을 갖는 복소수 전기장을 계산하여 그 위상 분포만을 표현하면 그림 3(a)가 된다. 그리고 진폭으로부터 광 강도 분포 분포만을 표현하면 그림 3(b)가 된다. 광 강도 분포 홀로그램으로부터 수치적 재생을 하면 그림 3(c)와 같이 0차 회절광이 제거된 수치적 재생 실상을 얻을 수 있다. 그러나 이와 같은 계수의 조건에서는 0차 회절광이 완전히 제거되지 않았음을 알 수 있다. 0차 회절광이 완전히 제거되지 않음을 보여주기 위하여 수치적으로 재생된 실상의 밝기를 전체적으로 밝게한 결과이다. 기존의 유사한 방법¹⁾ 동일 수치적 홀로그램에 적용하였다. 그 결과가 그림 3(d)이다. 이 결과에는 제거함수의 계수 1의 경우에 비하여 0차회절광의 제거가 부족한 결과를 나타내었다. 즉, 0차 회절광에 의하여 확인되지 않던 물체의 영상 정보가 재생되었지만, 0차 회절광이 완벽하게 제거되지 않음을 알 수 있다. 또한 수치적 실상 재생에 있어서 허상은 배경 잡음으로 나타났다. 본 논문에서와 같이 대상 물체가 홀로그램으로부터 깊이 방향으로 300

mm 떨어진 경우에 홀로그램을 계산하면 수치적 실상의 재생에서의 허상의 영향이 크지 않음을 알 수 있다. 그림 3의 결과에서와 같은 0차 회절광의 제거 방법은 디지털 홀로그래피를 이용한 대부분의 분야에 적용가능하며, 특히 홀로그램 디지털 현미경 영역으로의 응용에는 유용한 방법이 된다.

그림 4에서 제거 함수의 계수가 10, 50, 100인 경우의 계산되어진 광 강도 분포 홀로그램에서 수치적으로 재생된 실상의 0차 회절광 제거 정도와 재생상의 선명도를 그림상으로 비교하였고, 제거 함수의 계수가 10인 경우의 생성된 위상 홀로그램을 이용하여 0차 회절광이 제거된 수치적으로 재생한 실상을 나타내었다. 1024(수평)×1024(수직)개의 정보점 들로 구성된 수치적 홀로그램을 푸리에 변환하면 푸리에 변환 공간에서 1024(수평)×1024(수직)개의 정보점 들이 생성되므로, 제거 함수의 계수는 이러한 푸리에 변환 공간의 수평과 수직 방향의 중심 축으로부터의 정보점의 수를 그 값으로 한다.

계수가 10인 경우는 그림 4(a)에서 볼 수 있으며 0차 회절광이 완벽하게 제거됨을 알 수 있다. 또한 0차 회절광 영역내의 물체의 정보도 소실이 없음을 수치적 재생상으로 확인할

수 있다. 계수가 50으로 증가되면서 그림 4(b)와 같이 재생된 실상의 선명도가 상당부분 감소됨을 알 수 있다. 계수가 100으로 증가한 결과가 그림 4(c)로, 선명도가 현저히 감소한다. 그림 4의 결과에서 알 수 있듯이 0차 회절광은 완벽하게 제거할 수 있고, 계수가 증가함에 따라 수치적 재생상에 영향을 주어 재생 정보의 소실이 발생되었음을 알 수 있다. 또한 제거함수의 계수가 10인 경우 역푸리에 변환으로 계산된 전기장의 위상 성분만을 이용한 위상 홀로그램을 이용하여 수치적으로 실상을 재생하면 그림 4 (d)가 된다. 이 결과에서 알 수 있듯이 0차 회절광이 완벽하게 제거되고 0차 회절광 영역의 실상이 확인된다. 그러나, 위상 홀로그램을 이용하여 재생한 경우에는 대상 물체의 모서리를 제외한 대상 물체의 내부 부분의 밝기가 감소함을 알 수 있고 광 강도 분포 홀로그램에 의하여 수치적 실상을 재생한 경우에 비하여 재생 실상의 선명도가 감소함을 알 수 있다. 이것의 원인을 규명하기 위한 추가 연구가 필요한 것으로 판단된다. 본 논문의 제거함수를 적용한 역푸리에 변환을 이용하여 위상 홀로그램을 생성하는 것이 가능하다. 따라서 이러한 0차 회절광이 제거된 위상홀로그램의 생성은 실제 물체의 홀로그램 데이터를 이용한 위상 소자의 제작에 매우 유용한 방법이 된다.

IV. 결 론

CCD 입력면에서의 물체광과 참조광의 간섭을 수치적으로 계산한 광 강도 분포 홀로그램을 푸리에 변환과 제거함수를 이용한 역푸리에 변환을 적용함으로써 0차 회절광 성분이 제거된 광 강도 분포 또는 위상을 갖는 홀로그램을 수치적으로 생성하였다. 이렇게 생성된 홀로그램을 이용하여 3차원 물체의 정보 유실을 최소화하고, 효과적으로 0차 회절광을 제거하였다. 또한 0차 회절광 제거 함수의 계수 변화에 따른 0차 회절광 제거 정도와 초기 광 강도 분포 홀로그램이 갖는 3차원 물체 정보의 유실 정도를 비교하였다. 또한 기존의 방법에 따른 1회 입력된 광 강도 홀로그램의 수치적 재생에서의 0차 회절광 제거에 비하여 보다 유용함을 확인하였다. 본 논문에서와 같이 1번 기록한 홀로그램만을 이용하여 효과적으로 0차 회절광을 제거할 수 있는 것은 디지털 홀로그래피의 여러 응용에서 유용하게 적용할 수 있으리라 생각되며, CCD로 광 강도 분포 홀로그램을 입력 받는 경우에, 현미경 영역에서와 같이 0차 회절광의 영역이 전체 재생 실상에서의 비중이 큰 응용 영역에서는 적용 시에 그 효과가 보다 클 것으로 생각된다. 수치적 계산으로 생성한 광 강도 분포 홀로그램에 대한 0차 회절광의 제거는 제거 함수의 계수 값이 증가함에 따라 효과

적으로 제거됨을 알 수 있으나, CCD로 물체광과 참조광의 간섭을 기록하는 경우에는 추후 제거 함수의 계수의 변화 정도에 따른 0차 회절광의 제거 및 재생되는 영상의 정보 소실 정도를 확인할 필요가 있다. 또한 이러한 방법은 실제 물체에 대한 광 강도 분포 홀로그램을 적용하는 경우에 0차 회절광이 제거된 위상 홀로그램의 생성에 이용할 수 있다.

참고문헌

- [1] J.W. Goodman and R.W. Lawrence, "Digital image formation from electronically detected holograms," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 11, pp. 77-79, 1967.
- [2] M.A. Kronrod, N.S. Merzlyakov, and L.P. Yaroslavskii, "Reconstruction of a hologram with a computer," *Sov. Phys. Tech. Phys.*, vol. 17, pp. 444-334, 1972.
- [3] U. Schnars, "Direct phase determination in hologram interferometry with use of digitally recorded holograms," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 11, pp. 2011-2015, 1994.
- [4] J. Pomarico, U. Schnars, H.-J. Hartmann, and W. Juptner, "Digital recording and numerical reconstruction of holograms: a new method for displaying light in flight," *Appl. Opt.*, vol. 34, pp. 8095-8099, 1995.
- [5] C. Wagneer, S. Seebacher, W. Osten, and W. Juptner, "Digital recording and numerical reconstruction of lensless Fourier holograms in optical metrology," *Appl. Opt.*, vol. 38, pp. 4812-4820, 1999.
- [6] Y. Takaki and H. Ohzu, "Fast numerical reconstruction technique for high-resolution hybrid holographic microscopy," *Appl. Opt.*, vol. 38, pp. 2204-2055, 1999.
- [7] U. Schnars, T. Kreis, and W. Juptner, "Digital recording and numerical reconstruction of holograms: reduction of the spatial frequency spectrum," *Opt. Eng.*, vol. 35, no. 4, pp. 977-982, 1998.
- [8] 김성규, 최현희, 손정영, "디지털 홀로그래피에서의 공초점 렌즈계를 이용한 보다 큰 물체의 기록," *한국광학회지*, 제 14권, 3호, pp. 244-248, 2003.
- [9] T. M. Kreis and W. P. O. Juptner, "Suppression of the dc term in digital holography," *Opt. Eng.*, vol. 36, no. 8, pp. 2357-2360, 1997.
- [10] I. Yamaguchi and T. Zhang, "Phase-shifting holography," *Opt. Lett.*, vol. 22, no. 16, pp. 1268-1270, 1997.
- [11] Y. Takaki, H. Kawai, and H. Ohzu, "Hybrid holographic microscopy free of conjugate and zero-order images," *Appl. Opt.*, vol. 38, no. 23, pp. 4990-4996, 1999.
- [12] J.W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, 2nd ed., (McGrawHill, New York, 1996), pp. 65-67.

**Computer simulation of the removal of the 0-th order diffraction
by using fourier transform in digital holography**

Sung-Kyu Kim[†]

Imaging Media Center, Korea Institute of Science and Technology P.O.Box 131, Cheongryang, Seoul 130-650, KOREA

[†]E-mail: kkk@kist.re.kr

Min-Chul Park and Seok Lee

Photonics Research Center, Korea Institute of Science and Technology

Jae-Soon Kim

Physics, Seoul National University

Jung-Young Son

Electric Information Communication Lab, Hanyang University

(Received August 1, 2003, Revised manuscript January 8, 2004)

A computer simulation about removal of the 0-th order diffraction is achieved by using numerical reconstruction in digital holography and the Fourier transform method. A light intensity distribution hologram is generated through numerical calculation of the interference pattern. Additionally a phase hologram without the 0-th order diffraction is generated. The removal function for elimination of the 0-th order diffraction is introduced and the numerical reconstructions with several conditions for the removal of the 0-th order diffraction and the production of high quality numerically reconstructed images are tested and compared. The removal function is proven to be more effective at the suppression of the 0-th order diffraction compared with the DC suppression method.

OCIS Codes : 090.1760, 110.6880, 120.2880.