

디지털 홀로그래피 현미경에서 기준 광을 이용한 DC 항 제거연구

조형준, 김두철, 유영훈

제주대학교 물리학과

690-756 제주시 아라1동 1번지

디지털 홀로그램에서 영상 재현 시 DC 항에 의한 잡음으로 신호 대 잡음비가 좋은 영상을 구현하기 어렵다. 이와 같은 이유로 디지털 홀로그램이 여러 분야에 응용되는 것이 어렵다. DC 항의 영향을 줄이기 위해 홀로그램에서 참조광을 제거한 후 수치적 처리를 통하여 영상을 재현하는 연구를 하였다. 그 결과 본 연구에 사용된 방법이 DC 항의 효과를 감소시켜 해상도 좋은 영상을 재현 할 수 있음을 알았다.

I. 서 론

디지털 홀로그래피 기술은 30 여년전부터 개발되어 온 기술이고 비파괴 검사, 암호화 기술, 3차원 인식(3D Vision) 그리고 홀로그램 현미경 분야에 그 응용을 위하여 실용화 기술에 근접하는 연구가 진행되어 오고 있다 [1-5]. 이러한 디지털 홀로그래피 기술은 CCD (Charged Coupled Device)를 홀로그램 입력 장치로 사용하여 실시간으로 대상체의 홀로그램 데이터를 입력받을 수 있다. 이러한 장점은 고전 홀로그래피에서는 할 수 없었던 실시간 기록이 가능하다는 큰 장점이 있다. 이렇게 입력받은 디지털 홀로그램 데이터를 수치적 회절 계산 방법을 통하여 3차원 데이터를 추출한다. 홀로그램의 수치적 재생 방법은 Goodman과 Laurence에 의해서

30년 전에 제안된 것이며, 이러한 수치적 재생은 Kronrod등에 의하여 실현 되었다[1,2]. 홀로그래피 플레이트 (Holography Plate)를 사용하는 고전적인 홀로그래피와 비교하면 디지털 홀로그래피 (Digital Holography)는 화학적 홀로그램 생성 과정을 생략할 수 간편하며, 컴퓨터의 연산 속도의 발전으로 디지털 홀로그래피는 3차원 상을 필요로 하는 다수의 응용분야에서 관심을 가지게 되었다 [6-9].

그러나 CCD를 통해 얻어진 홀로그램을 이용하여 수치적으로 영상을 재생할 때 영차 회절광을 포함한 DC항과 허상 (Twin image) 이 잡음으로 작용하여 신호 대 잡음비가 좋은 영상을 구현하기 어렵다[10-14]. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 크게 3가지 방법이 연구 되었다. 첫째는 측정된 홀로

그램을 수치적으로 Fourier 변환을 시켜 공간 주파수가 영인 정보를 빼고 역 Fourier 변환을 통하여 DC 항이 제거 된 홀로그램을 얻은 후 재생하는 방법이다[10-12]. 이 방법은 한 번의 홀로그램을 얻고 나머지는 모두 수치적으로 처리하기 때문에 실험적으로 편리하다는 장점이 있다. 그러나 참조광이 이상적이지 않을 경우에는 DC 항 제거가 어렵다. 두 번째 방법은 위상 이동을 이용하여 DC 항을 제거하는 방법이다. 이 방법은 위상을 이동 시키면서 4장의 홀로그램을 얻고 이를 수치적으로 계산하여 DC 항이 제거 된 홀로그램을 얻는 방법이다[13]. 이 방법은 실험적으로 복잡하긴 해도 매우 안정적으로 DC 항을 제거 할 수 있다. 그리고 다른 한 가지 방법은 측정 된 홀로그램에서 복소수 물체광 파동만을 수학적으로 얻고 이를 재생하는 방법이다. 이 방법이 가장 간단한 방법이나 DC 항과 물체상이 겹쳐있는 경우에는 DC 항 제거가 용이하지 않다[14,15].

본 연구에서는 투과형 디지털 홀로그래피 현미경에서 신호 대 잡음비가 높은 재생상을 구현하기 위하여 언급된 3가지 방법과는 달

리 참조광의 세기 그리고 홀로그램을 각각 기록하고 홀로그램에서 참조광의 세기를 제거한 후 영상을 재현하는 방법에 대해 연구하였다.

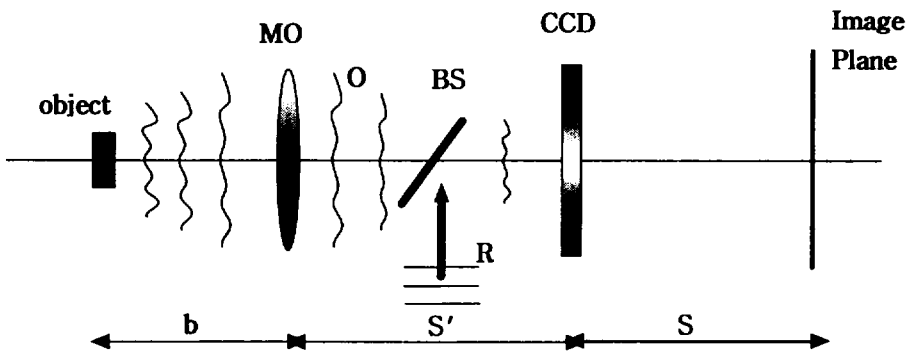
II. 이론적 배경

디지털 홀로그래피 현미경에서 홀로그램 데이터는 CCD로 입력되는 물체광(O)과 참조광(R)의 간섭에 의하여 주어진다. <그림 1>과 같이 렌즈의 초점거리가 f인 in-line 투과형 디지털 홀로그래피 현미경을 고려하자.

CCD에 형성되는 2차원 홀로그램의 빛 세기는 (1)식과 같다.

$$I_h(x, y) = |R|^2 + |O|^2 + R^*O + RO^* \dots (1)$$

(2) 식과 같이 참조광과 물체광에 의한 홀로그램 데이터는 수치적 영상 재생에 이용된다. 수치적 재생 파동은 참조광과 홀로그램데이터(I_h)를 이용하여 (2)식과 같이 표현된다.



<그림 1> 디지털 홀로그래피 현미경 구성과 영상 재생

MO: 확대렌즈, R: 참조광, O: 물체광, BS: 광 분할기, b: 물체와 렌즈간의 거리, S': 렌즈와 CCD간의 거리, S: CCD와 영상 재생 면 까지 거리.

$$\Psi = RI_h =$$

$$R|R|^2 + R|O|^2 + RR^*O + RRO^* \dots\dots\dots (2)$$

첫 번째 항과 두 번째 항은 0차 회절이고, 세 번째 항은 허상, 네 번째 항은 실상이다.

디지털 홀로그래피에서 0차 회절광으로 인해 선명한 영상을 얻기 어렵다.

(1)식과 같이 측정된 홀로그래피에서 $R^*O + RO^*$ 만 추출하여 영상재생이 가능하면 0차 회절광을 제거 할 수 있다. (1)식을 (3)식과 같이 수정하자

$$(I_h(x, y) - |R|^2)^2 = (|O|^2 + R^*O + RO^*)^2 = |O|^2(2I_h - |O|^2) + (OR^*)^2 + (O^*R)^2 \dots\dots\dots (3)$$

(3)식에서 $(OR^*)^2 = (O^*R)^2 \approx |OR^*|^2$ 이고 일반적으로 $I_h + |R|^2 \gg |O|^2$ 이다. 그러므로 (3)식으로부터 물체광의 세가는 (4)식과 같이 구할 수 있다.

$$|O|^2 \approx \frac{(I_h - |R|^2)^2}{I_h + |R|^2} \dots\dots\dots (4)$$

(4)식과 (1)식을 이용하면 (5) 식과 같이 DC 항이 제거된 홀로그래피를 얻을 수 있다.

$$I_{sh} \equiv O^*R + OR^* = I_h - |R|^2 - \frac{(I_h - |R|^2)^2}{I_h + |R|^2} \dots\dots\dots (5)$$

(5)식을 이용하여 영상을 재생하면 DC 항이 제거된 영상을 얻을 수 있다. 즉 참조광

데이터와 홀로그래피데이터 만을 이용하여 DC 항이 제거 된 영상을 얻을 수 있는 것이다.

물론 참조광, 물체광을 따로 따로 얻고 홀로그래피 데이터와 연산하여 0차 회절 광이 제거된 3차원 영상을 얻을 수 있으나, 물체광과 참조광을 따로 따로 얻는 것은 실시간으로 데이터를 수집하는 영상계에서는 바람직하지 않다. 하지만 참조광만을 이용하여 0차 회절광이 제거된 3차원 영상을 얻는 것은 매우 가치 있다. 일반적인 영상계에서 참조광은 고정 되어 있기 때문에 데이터를 취할 때마다 측정 할 필요가 없이 한번 측정한 참조광 데이터를 이용함으로써 0차 회절광이 제거된 영상을 얻을 수 있다. 그러므로 참조광을 이용한 0차 회절광 제거는 실시간으로 데이터를 얻는 영상계에서도 이용이 가능하다.

프레넬(Fresnel) 공식을 이용하여 영상이 맺히는 지점에서의 파동분포는 (6)식과 같다 [11,15]

$$\Psi(\xi, \eta) = A \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda S}(\xi^2 + \eta^2)\right] \times \iint I_{sh}(x, y) \exp\left[\frac{-i\pi}{\lambda S}(x^2 + y^2)\right] \exp\left[\frac{2i\pi}{\lambda S}(x\xi + y\eta)\right] dx dy \dots\dots\dots (6)$$

여기서 λ 는 사용된 빛의 파장이고 S 는 CCD에서 영상이 재생되는 곳까지의 거리, A 는 상수이다. (6)식은

$I_{sh}(x, y) \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda S}(x^2 + y^2)\right]$ 을 공간 주파수 공간 $(\xi/\lambda S, \eta/\lambda S)$ 으로 푸리에변환(Fourier Transformation) 한 것이다.

일반적으로 (6)식을 계산하기 위하여 FFT

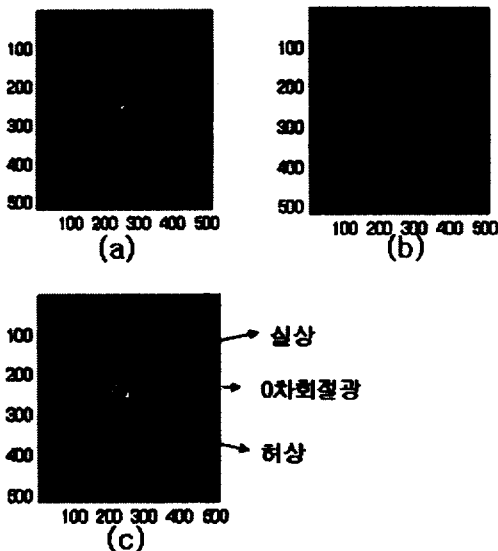
(Fast Fourier Transform) 알고리즘을 이용한다. (6)식은 복소수이기 때문에 재생 명암 영상 $I(m, n)$ 과 위상 영상 $\psi(m, n)$ 은 (7)식과 같이, 그리고 위상 영상은 얻어진다. 그리고 (7)식의 (m, n) 은 (6)식의 공간 좌표를 디지털화 하여 표시한 것이다.

$$I(m, n) = \text{Re}[\Psi(m, n)]^2 + \text{Im}[\Psi(m, n)]^2$$

$$\psi(m, n) = \arctan(\text{Im}[\Psi(m, n)]^2 / \text{Re}[\Psi(m, n)]^2) \dots\dots\dots (7)$$

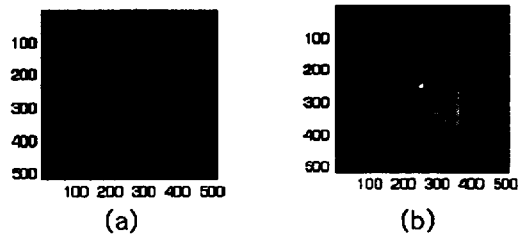
III. 전산기 시능

전산기 시능 시 참조광 새기와 물체광 새기의 비율은 1:1로 한다. 전산기 시능에 사용된 영상은 그림 2(a)와 같다. 그리고 참조광은 평면광을 이용하였으면 파장은 632 nm이다. 그림 2(b)는 물체광과 참조광에 의한



<그림 2> 디지털 홀로그램과 명암 재생상 (a)물체 (b)디지털 홀로그램 (c)명암 재생상

전형적인 디지털 홀로그램이고, 이 홀로그램과 (6)식과 (7)식을 이용하여 재생한 명암영상이 그림 2(c)와 같다. 그림 2(c)에서 보는 것과 같이 실상 허상 0차 회절광이 동시에 재생되고 0차 회절광에 의해 그림 2(a)의 영상이 제대로 복원 되 않는 것을 알 수 있다. 0차 회절광에 의한 재생영상 질 저하를 방지하기 위하여 참조광과 디지털 홀로그램을 이용하여 재생한 결과가 그림2와 같다. 그림 3(a)는 (5)식을 이용하여 구한 홀로그램 데이터이고, 그림 2(b)는 그림 2(a)의 홀로그램을 이용하여 재생한 명암 영상이다. 그림 3(b)와 그림 1(c)를 비교하면 0차 회절광이 제거되어 물체의 영상이 잘 재현 되어있음을 확인 할 수 있다.



<그림 3>

V. 결 론

디지털 홀로그래피에서 0차 회절광이 존재하여 영상 재생시 노이즈와 같은 역할을 해 해상도 좋은 영상을 얻기가 어렵다. 본 연구에서는 fourier 방법이나 스캐닝 방법을 이용하지 않고 단지 참조광만을 이용하여 0차 회절광을 제거하는 연구를 하였다. 측정된 홀로그램에서 참조광 효과를 제거한 홀로그램을 이용하여 영상 재생시 0차 회절광이 제거됨을 알 수 있었고, 이 방법은 일반적인 홀로그램계에 사용될 수 있다.

【참 고 문 헌】

- [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. Yaroslavski, "Reconstruction of hologram with a computer," *Sov. Phys. Tech.*, vol. 17, pp. 434-444, 1972.
- [3] G. K. Wernicke, O. Kruschke, N. Demoli, and H. Gruber, "Investigation of micro-opto-electro-mechanical components with a holographic microscopic interferometer," *SPIE*, vol. 3396, pp. 238-243, 1998.
- [4] L. Xu, X. Peng, J. Miao, and K. Asundi, "Studies of digital microscopic with application to microstructure testing," *Appl. Opt.*, vol. 40, pp. 5046-5051, 2001.
- [5] H. Cho, D. Kim, Y. Yu, W. Jung, and S. Shin, "3-Dimensional Measurement using Digital Holographic Microscope and Phase Unwrapping", *한국광학회지*, vol. 17, pp. 329-334, 2006.
- [6] S. Kim, H. Lee, and J. Son, "Recording of larger object by using two confocal lenses in digital holography," *한국광학회지*, vol. 14, pp. 244-248, 2003.
- [7] U. Schnars, "Direct phase determination in hologram interferometry with use of digitally recorded holograms," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. A 11, pp. 2011-2015, 1994.
- [8] 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.
- [9] Y. Takaki and H. Ohzu, "Fast numerical reconstruction technique for high resolution hybrid holographic microscopy," *Appl. Opt.*, vol. 38, pp. 2204-2055, 1999.
- [10] L. Xu, J. Miao, and A. Asundi, "Properties of digital holography based on in-line configuration," *Opt. Eng.*, vol. 39, pp. 3214-3219, 1999.
- [11] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics* (Roberts & Company Publishers, USA, 2005)
- [12] U. Schnars and W. Juepther, *Digital Holography* (Springer, Heidelberg, Germany, 2005)
- [13] L. Denis, F. Corinne, F. Thierry and D. Christophe, "Twin-image noise reduction by phase retrieval in in-line digital holography", *SPIE*, vol. 5914, pp. 148-161, 2005.
- [14] C. Depeursinge, *Digital Holography Applied to Microscopy* (Springer, USA, 2006), pp.95-143.
- [15] E. Cuche, P. Marquet and C. Depeursinge, "Simultaneous amplitude-contrast and quantitative phase-contrast microscopy by numerical reconstruction of Fresnel off-axis holograms", *Appl. Opt.*, vol. 38, pp. 6994-7001, 1999.

Zero-order Image Elimination Utilizing the Reference Wave in Digital Holography Microscope

Hyungjun Cho, Doocheol, Younghun Yu

Department of Physics, Cheju National University, Jeju 690-756, Korea

A fundamental problem in digital holography microscope is degradation the reconstructed image by zero-order image. In this paper, we have eliminated the zero-order noise by reference wave. The entire process needs only one hologram. Also the performance of numerical suppression is simple and effective by subtracting the numerical generated intensity of the object and reference waves from the hologram. We demonstrate that the subtracted hologram increase the image quality.