

디지털 홀로그래피와 위상 펼침을 이용한 3차원 상 구현

윤 선규, 조 형준, 김 두철, 유 영훈,

제주대학교 물리학과, 기초과학 연구소 690-756 제주시 아라동

Abstract

Goldstein 위상 펼침 알고리즘과 전산기를 이용하여 얻은 디지털 홀로그래피 위상 정보를 이용하여 3차원 상을 구현하였다. 잡음의 영향으로 실제 데이터와 복원된 데이터의 차이가 있음을 알 수 있었으며, 그 차이가 잡음의 크기에 비례함을 알 수 있었다. 그리고 잡음의 크기 영향을 줄이기 위하여 템프리트 마스크를 이용하여 위상 펼침을 하면 잡음 크기에 따른 왜곡 정도의 변화가 매우 둔화됨을 알 수 있었다.

1. 서 론

디지털 홀로그래피 기술은 30여 년 전부터 개발되어 온 기술이고 비파괴 검사, 암호화 기술, 3차원 인식(3D Vision) 그리고 홀로그램 현미경 분야 등에 실용화 기술에 근접하는 연구가 진행되어 오고 있다^[1-5]. 이러한 디지털 홀로그래피 기술은 CCD(Charged Coupled Device)를 홀로그램 입력 장치로 사용하여 실시간으로 연속적인 대상체의 홀로그램 데이터를 입력받을 수 있다. 이렇게 입력받은 디지털 홀로그램 데이터를 수치적 회절 계산 방법을 통하여 빛 세기 분포와 위상 정보를 얻을 수 있다. 홀로그램의 수치적 재생 방법은 Goodman과 Laurence에 의해서 30년 전에 제안된 것이며, 이러한 수치적 재생은 Kronrod 등에 의하여 실현되었다^[1,2]. 홀로그래피 플레이트(Holography Plate)를 사용하는 고전적인 홀로그래피와 비교하면 디지털 홀로그래피(Digital Holography)는 화학적 홀로그램 생성 과정을 생략할 수 있어

간편하며, 컴퓨터의 연산 속도의 발전으로 디지털 홀로그래피는 3차원 상을 필요로 하는 응용분야에서 관심을 가지게 되었다^[6-9].

디지털 홀로그래피에서 수치적으로 얻은 위상 정보를 이용하여 3차원 이미지를 생성할 때는 위상 접힘(Phase wrapping)문제를 해결하여야 한다. 즉 측정 대상체의 실제 위상차이는 $\pm\pi$ 라디안 이상일 수 있으나, 디지털 홀로그래피에서 측정되는 위상차는 항상 $\pm\pi$ 라디안 이하이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 Goldstein은 펼침 알고리즘(unwrapping algorithm)을 개발하여 측정된 접힌 위상을 이용하여 실제 위상차를 구할 수 있었다^[10]. 현재는 이러한 펼침 위상 알고리즘을 좀더 정확하고, 실시간 적으로 3차원 영상을 얻을 수 있는 알고리즘을 개발하는 연구들이 진행 중이다^[11-15].

본 연구에서는 전산기 시뮬을 통하여 디지털 홀로그램 데이터를 생성하고 이로부터 위상 펼침(unwrapping) 알고리즘을 이용하여 3차

원 상을 구현하여, 디지털 홀로그래피를 이용한 3차원 측정이 가능함을 확인하였고 잡음의 영향에 대하여 연구하였다.

II. 이론적 배경

2.1 디지털 홀로그래피

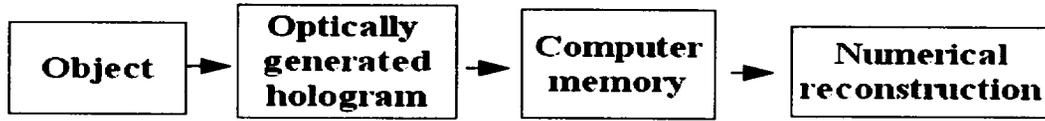


그림 1. 디지털 홀로그래피 프로세스

그림 1은 일반적인 디지털 홀로그래피에서 상을 재현하는 과정이다. 디지털 홀로그래피에서 홀로그램 데이터는 CCD로 입력되는 물체광과 참조광의 간섭에 의하여 주어진다. 다수의 점광 원으로부터 구성된 물체 광(Object Wave:

$\sum_{i=1}^N U_i(x, y)$)과 참조 광 (Reference wave : U_R)의 중첩에 의한 빛 세기는 다음식과 같다^[16].

$$\begin{aligned}
 I(x, y) &= \left| U_R(\phi_R) + \sum_{i=1}^N U_i(x, y) \right|^2 \\
 &= \left| U_R(\phi_R) \right|^2 + \left| \sum_{i=1}^N U_i(x, y) \right|^2 + \sum_{i=1}^N (U_R U_i^* + U_R^* U_i) + \sum_{i=1}^N \sum_{j \neq i}^N U_i U_j^*
 \end{aligned} \tag{1}$$

(1) 식의 첫 번째 항과 두 번째 항은 참조광과 물체광의 빛 세기이며, 셋째 항은 물체광과 참조광의 간섭항이며, 넷째 항은 물체광끼리의 간섭결과이다. 그러므로 실제 홀로그래피에서 의미 있는 항은 3째 항이고, 위식에 의하여 가상적인 물체의 대한 수치적 광 세기 홀로그램을 생성할 수 있다.

2.2 위상 펼침 (Phase Unwrapping)

간섭이 정밀 측정에 매우 유용하다는 것은 잘 알려진 사실이다. 그러나 간섭 문양을 이용하여 측정할 수 있는 위상(ϕ) 범위는 $-\pi \leq \phi < \pi$ 이다. 실제의 위상차가 이 범위를 벗어나면 간섭을 이용하여 실제 데이터를

얻는 것은 매우 어렵다. 즉 위상차 ϕ 에 의한 간섭세기와 $\psi = \phi + 2\pi k$ (k =정수)에 의한 간섭세기가 같기 때문이다. 이러한 문제점을 극복하고자 많은 연구들이 진행되고 있다. π 이상의 위상차를 측정하기 위한 방법으로는 주로 수치적 해석을 통한 소프트웨어, 위상 펼침 (phase unwrapping)을 이용한 방법들이 연구되고 있다. 1차원 위상 펼침은 Itoh의 이론이 많이 사용되고 있다^[17]. 접힌 위상과 실제 위상의 관계는 다음과 같다.

$$W\{\phi(n)\} = \psi(n) = \phi(n) + 2\pi k \tag{2}$$

여기서 W 는 접힘 작용자(wrapping operator)이고, $\psi(n), \phi(n)$ 은 각각 접힌

위상과 실제위상이고, k 는 정수이다. W 는 항상 $\psi(n)$ 이 $-\pi \leq \psi(n) < \pi$ 이 되도록 한다. Itoh의 계산에 의하면 접힌 위상의 차이와 실제 위상의 차이는 다음과 같다.

$$\Delta \{ \phi(n) \} = W \{ \Delta \{ \psi(n) \} \} \quad (3)$$

그러므로 실제 위상은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\phi(m) = \phi(0) + \sum_{n=0}^{m-1} W \{ \Delta \psi(n) \} \quad (4)$$

(4)식은 위상 펼침에 의한 위상은 접힌 위상차를 이용하여 구할 수 있음을 보여 주고 있다. 이러한 아이디어를 2차원으로 확장 한 것이 Goldstein 알고리즘이다. 그러나 2차원의 경우에는 1차원의 경우와 달리 적분 경로를 고려하여야 한다. 그러나 적분 경로를 고려한 수치 적분은 매우 복잡하고 일반적으로 사용하기에 부적합하다. Goldstein 알고리즘은 적분 경로에 무관한 영역과 무관하지 않은 영역을 구분하고, 적분 경로에 무관하지 않은 적분 경로를 최소화 한 것이다. 이 알고리즘을 이용한 위상 펼침은 그림2와 같다.

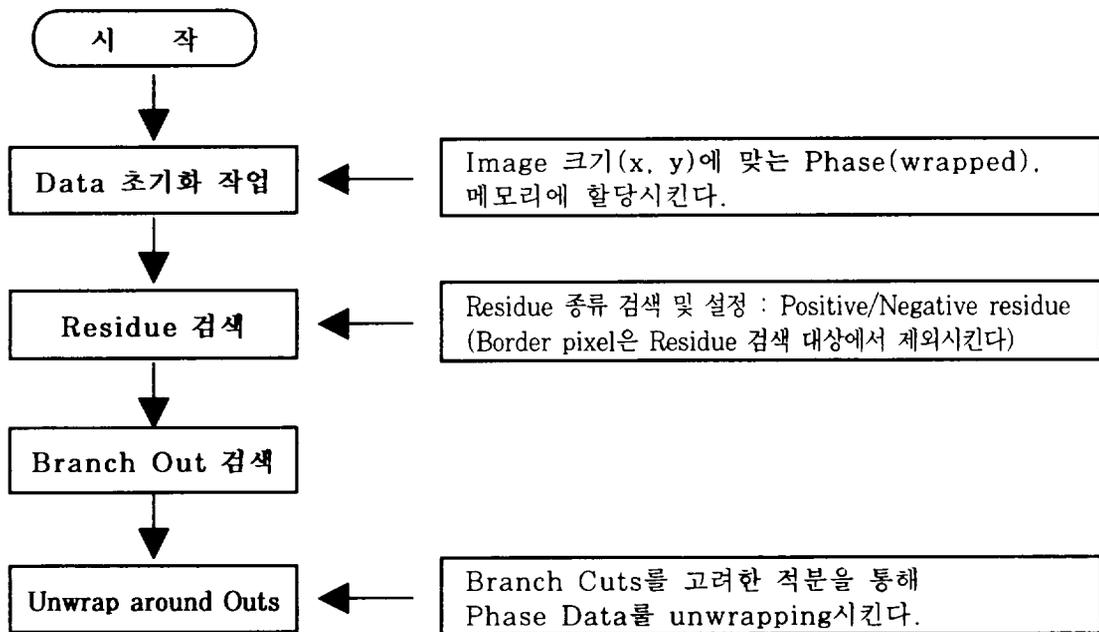


그림 2. Goldstein 알고리즘 Flow-Chart

이 알고리즘에서 residue와 branch cut은 적분 경로에 의존하는 값들의 집합이다⁽¹⁸⁾. 위상 펼침을 위해서는 적분경로에 의존하는 데이터들은 배제하고 위상 펼침을 수행한 후 residue와 residue를 연결한 branch cut에 해당하는 데이터를 복원하는 것이다. 이 방법은

현재 까지 알려진 위상 펼침 알고리즘 중 가장 빠르고 신뢰성이 있는 것으로 알려져 있다.

III. 결 과

그림 3은 반구 모양과 계단 모양으로부터

수치적으로 계산한 홀로그램과 이로부터 얻은 접힘 위상 정보를 이용하여 3차원 상을 구현한 결과이다. (a)는 실제 모양이고, (b)는 홀로그램 데이터, (c)는 홀로그램 데이터의 접힘 위상과 Goldstein 알고리즘을 이용하여 얻은 3차원 상이고, (d)는 실제 데이터(a)와 위상

펼침을 이용하여 구현 상 데이터(c)와의 차이이다. 그림 3 (d)에서 보는 것과 같이 위상 펼침을 통하여 얻은 데이터와 실제 데이터의 차이가 매우 적어 Goldstein 알고리즘과 디지털 홀로그래피를 이용한 3차원 상 구현이 가능함을 알 수 있다.

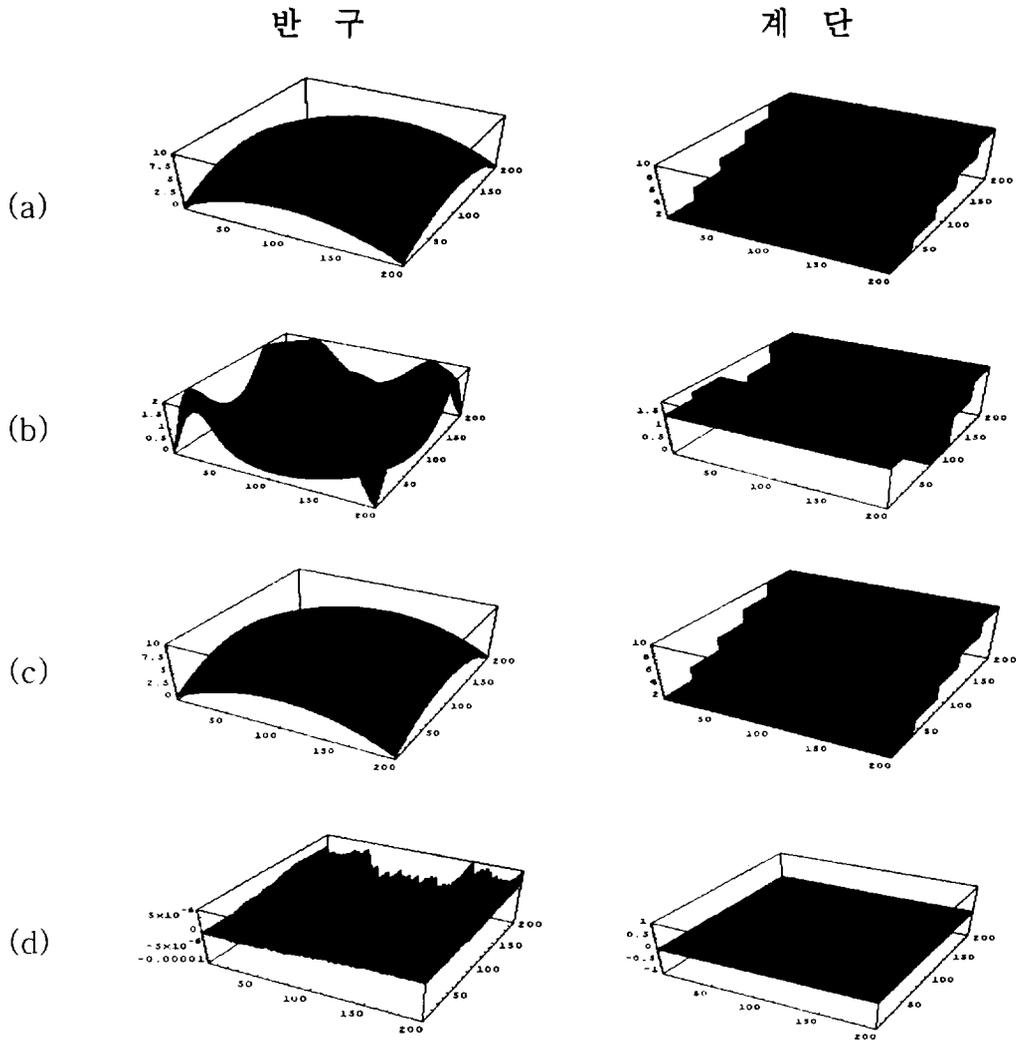


그림 3. 위상 펼침을 통한 3차원 영상 : (a) 실제 데이터 (b) 홀로그램 데이터 (c) 위상 펼침을 이용한 3차원 상 (d) 실제데이터와 위상 펼침을 통해 얻은 데이터의 차이

그리고 실제 CCD를 이용하여 간섭무늬를 측정할 때 필수적으로 잡음이 섞이게 된다. 이러한 잡음이 위상 펼침에 미치는 영향을 조사하

였다. 그림 4는 그림 3(a)의 데이터에 잡음이 5%일 때 위상 펼침을 보여주고 있다.

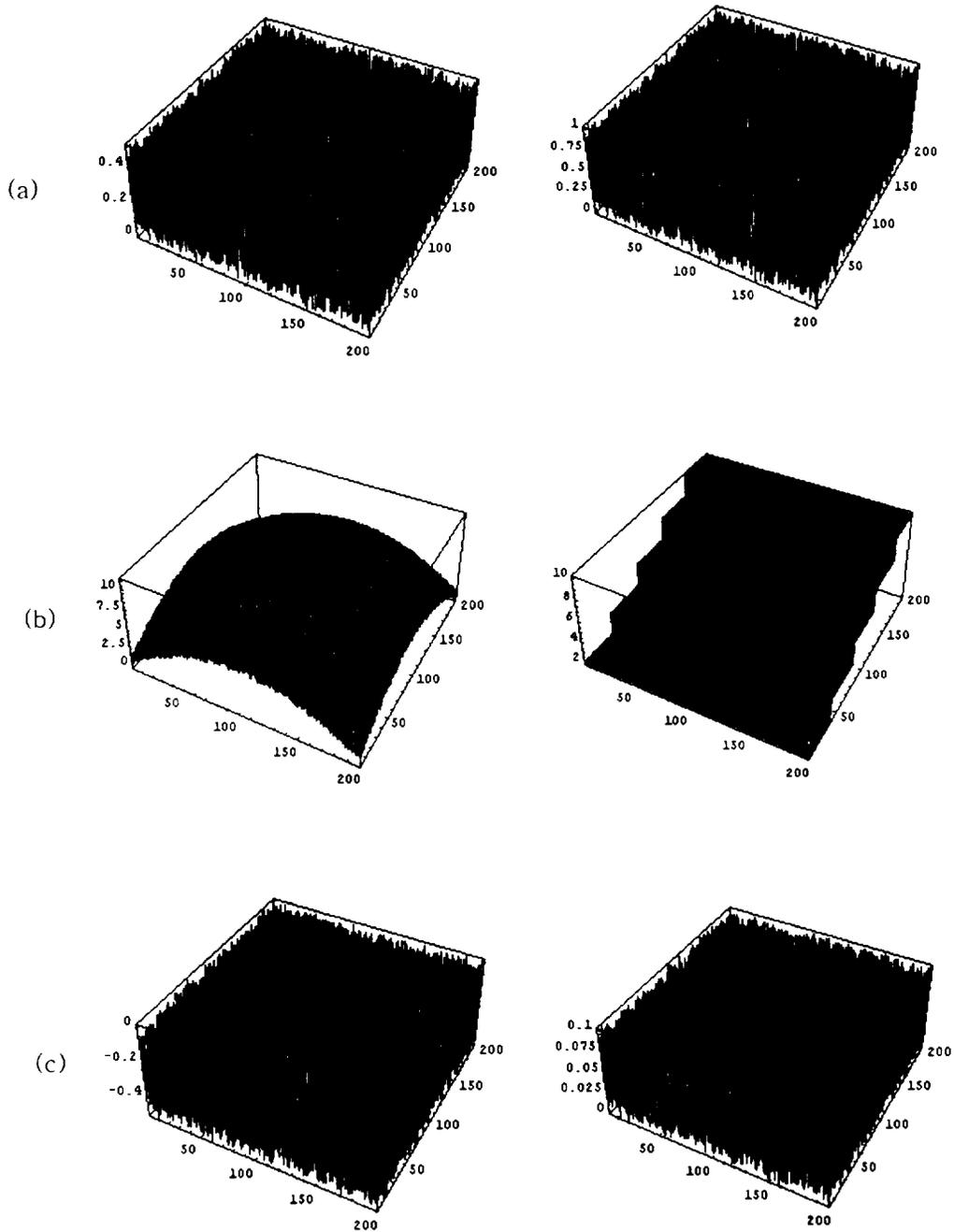


그림 4. 잡음이 있을 때 위상 필터를 통한 3차원 영상 : (a) 잡음 데이터 (b) 위상 필터를 이용한 3차원 상 (c) 실제데이터와 위상 필터를 통해 얻은 데이터의 차

그림에서 잡음이 섞여 있을 때 위상 필터 결과와 위상 필터 데이터의 차이가 무시할 수 없는 원래 모양에 근접하게 되나 실제 데이터를 볼 수 있다. 이러한 잡음의 영향을 줄이기

위한 여러 노력이 진행되고 있다. 즉 적응성 필터(adaptive filter), 평균필터(averaging filter), 중간필터(median filter)와 템플릿 필터(template filter)와 같은 잡음 제거 및 중화 필터를 이용하여 잡음을 제거 하려는 연구가 진행 중이다⁽¹⁹⁾. 본 연구에서는 잡음의 크기를 줄이는 방법보다는 잡음의 크기의 영향에 덜 민감한 방법을 찾으려한다. 즉 잡음의 크기가 증가함에 따라 위상 펼침을 통해 구해지는 데이터의 왜곡은 증가한다. 그리고 잡음의 크기는 실험 조건에 따라 변화가 심하다. 그러므로 잡음 영향을 최소화 하여 위상 펼침에 의한 상의 왜곡을 최소화 하는 것도 중요하지만 환경 변화에 따른 잡음의 크기 변화에 따른 왜곡의 차이 변화도 매우 중요하다. 이러한 목적으로 본 연구에서는 잡음이 섞인 위상 데이터를 적절한 마스크를 이용하여 위상 펼침에 의한 상 구현에서 잡음의 영향에 덜 민감하도록

하였다. 즉, 측정된 위상 데이터를 템플릿 필터와 유사한 마스크를 이용하여 (5)식과 같이 변화시켰다.

$$\Psi(i, j) = \sum_{k,l=-1,0,1} \phi(i+k, j+l) a_{kl} ,$$

$$a_{kl} = \begin{pmatrix} 0.075 & 0.125 & 0.075 \\ 0.125 & 0.2 & 0.125 \\ 0.075 & 0.125 & 0.075 \end{pmatrix} \quad (5)$$

(5)식에서 $\Psi(i, j)$ 는 CCD의 (i, j) 픽셀의 가공된 위상 데이터이고, $\phi(i, j)$ 는 실제 측정된 CCD (i, j) 픽셀의 데이터이다. 잡음의 영향을 줄이기 위하여 인접한 픽셀에 적절한 값을 곱하여, 즉 a_{kl} 마스크를 이용하여, 데이터를 변화시켰다. 이렇게 가공된 데이터를 이용하여 위상 펼침을 한 결과가 다음 그림 (5)와 같다.

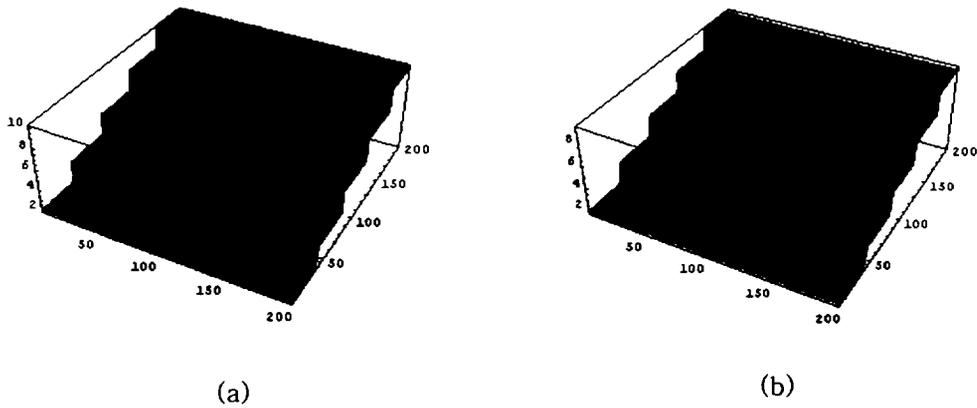


그림 5. 마스크와 위상 펼침 알고리즘을 이용한 3차원 상 구현 (a) 실제 데이터
(b) 마스크를 이용한 3차원 데이터

그림 5 (a)는 실제 데이터이고, (b)는 5%의 잡음이 있을 때 a_{kl} 마스크와 위상 펼침을 통해 얻은 결과이다. 두 그림이 매우 유사함을 알 수

있고, 본 연구에서 채택한 마스크가 적절함을 알 수 있다. 이러한 마스크를 이용하여 잡음의 존재에 대하여 조사한 것이 그림 6 과 같다.

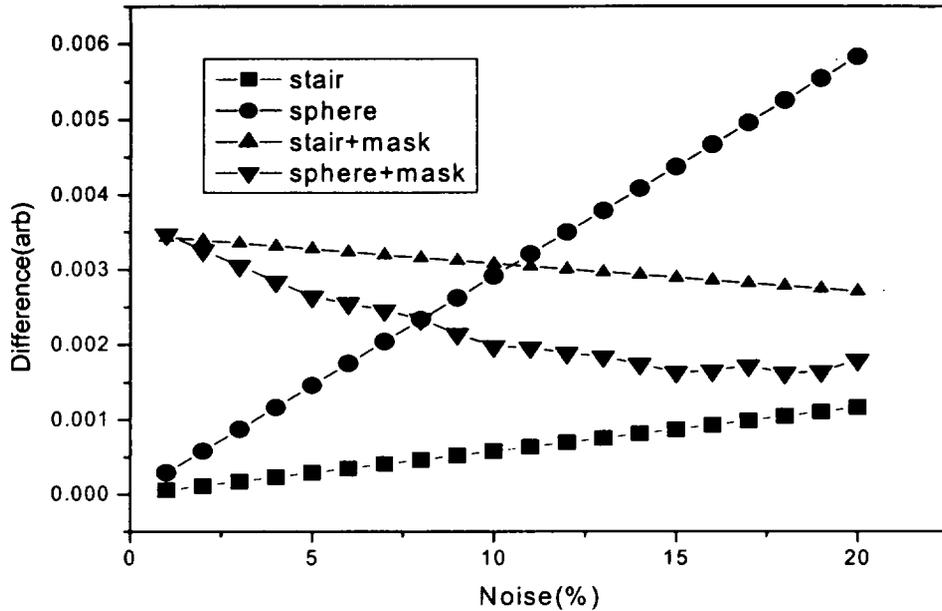


그림 6. 잡음 크기에 따른 왜곡 효과, ■ : 계단 모양의 왜곡, ●:반구 모양의 왜곡, ▼: 마스크를 이용한 경우 계단 모양의 왜곡, ▲:마스크를 이용한 경우 반구 모양의 왜곡

그림 6에서 ■과 ●은 각각 계단모양, 반구 모양으로부터 얻은 위상 데이터에 잡음이 섞인 신호를 위상 꺾침 했을 때 실제 데이터와의 차이를 잡음 크기의 함수로 나타 낸 것이고, ▲과 ▼은 a_{kl} 마스크를 사용하여 위상 꺾침 했을 때 실제 데이터와 차이를 잡음 크기의 함수로 보인 것이다. 위 그림에서 보면 예측했던 것과 같이 마스크를 사용하지 않으면 잡음의 영향이 매우 크고, 위상 꺾침을 이용한 상 구현에서 실제 데이터와의 왜곡이 잡음의 크기에 매우 민감하게 영향 받음을 볼 수 있다. 그러나 마스크를 사용한 경우에는 왜곡 값이 상대적으로 크기는 하나, 잡음 크기에는 크게 영향을 받지 않음을 볼 수 있다. 위의 결과로부터 신호 처리 시 적절한 마스크를 사용하면 잡음 크기의 영향에 둔한 알고리즘을 구현 할 수 있으며, 위상 꺾침 알고리즘을 이용하여 3차원

상을 구현 할 수 있음을 알 수 있다.

IV. 결 론

디지털 홀로그래피는 고전적 홀로그래피와 홀로그래피 간섭계에서 새로운 가능성을 가지고 있고, 간단하게 3차원 상을 얻을 수 있는 방법으로 고려되고 있다. 이를 위해서는 디지털 홀로그래피에서 얻은 위상 정보를 이용하여야 한다. 그러나 디지털 홀로그래피에서 얻을 수 있는 위상정보의 범위는 $\pm\pi$ 라디안 이하이다. 그러므로 이렇게 접힌 위상을 이용하여 실제 위상 데이터를 복원하는 알고리즘이 필요하다. 본 연구에서는 Goldstein 알고리즘을 이용하여 잡음이 있는 경우와 없는 경우의 3차원 상을 구현하였다. 그리고 잡음이 복원된 3

차원 상을 실제 데이터를 왜곡시킴을 알 수 있었으며, 잡음 크기가 커지면 왜곡 정도도 비례하여 커짐을 알 수 있었다. 이러한 잡음 크기에 의존하는 왜곡을 줄이기 위하여 마스크를 이용하여 데이터를 처리 하면 잡음 크기에 따른 왜곡 정도가 잡음 크기에 덜 민감 함을 알 수 있었다. 그러나 마스크를 이용하면 상대적으로 왜곡이 커지기 때문에 이를 최소화 할 수 있는 마스크에 대한 연구가 더 필요하다.

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. 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] 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
- [6] 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
- [7] 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
- [8] Y. Takaki and H. Ohzu, "Fast numerical reconstruction technique for high resolution hybrid holographic microscopy," *Appl. Opt.*, vol. 38, pp. 2204-2055, 1999
- [9] L. Xu, J. Miao, and A. Asundi, "Properties of digital holography based on in-line configuration," *Opt. Eng.*, vol. 39, pp.. 3214-3219, 1999
- [10] R. M. Goldstein, H. A. Zebker, and C. L. Werner, "Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping," *Radio Science*, vol. 23, pp.713-720, 1988
- [11] J. M. Huntley, "Noise-immune phase unwrapping algorithm," *Appl. Opt.*, vol. 28, pp. 3268-3270, 1989
- [12] T. J. Flynn, "Two-dimensional phase unwrapping with minimum weighted discontinuity," *J. Opt. Soc. Am.* vol A 14, pp. 2692-2701, 1997
- [13] G. Fornaro, G. Franceschetti, R. Lanari, E. Sansositi, and M. Tesauro,

- "Global and local phase unwrapping technique: A comparison," *J. Opt. Soc. Am.* vol A 12, pp. 2355-2366
- [14] H. O. Saldner, and J. M. Huntley, "Profilometry using temporal phase unwrapping and spatial light modulator-based fringe projector," *Opt. Eng.*, vol. 36, pp. 610-615, 1997
- [15] M. D. Pritt, "Phase unwrapping by means of multigrid techniques for interferometric SAR," *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, vol. 34, pp. 728-738, 1996
- [16] S. Kim, M. Park, S. Lee, J. Kim and J. Son, "Computer simulation of the removal of the 0-th order diffraction by using fourier transform in digital holography," *한국광학회지*, vol.15, pp. 40-45, 2004
- [17] K. Itoh, "Analysis of the phase unwrapping problem," *Appl. Opt.*, vol. 21, pp. 2470, 1982
- [18] D. C. Ghiglia and M. D. Pritt, "Two-Dimensional Phase Unwrapping," (John Wiley & Sons, 1998) pp. 103-107
- [19] D. C. Ghiglia and M. D. Pritt, "Two-Dimensional Phase Unwrapping," (John Wiley & Sons, 1998) pp. 93-95

3 Dimensional Image using Digital Holography and Phase Unwrapping

Seonkyu Yoon, HyungJun Cho, DooChul Kim, YoungHun Yu

Department of Physics, Basic research Institute, Cheju National University, Jeju City, 690-756

Abstract

Using digital hologram and Goldstein phase unwrapping algorithm, three-dimensional image was reconstructed. We found that the distortion between the real data and reconstructed data depends on the noise amplitude. To reduce the dependence of noise amplitude, we choose the template mask in signal processing, and found that the distortion depends on the noise amplitude was reduced.