

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2008.32.5.374

디지털 입자 홀로그래피에서 입자의 초점면 결정에 관한 연구

양 양* · 강 보 선†

(2008년 1월 3일 논문접수, 2008년 2월 29일 심사완료)

A Study on Determination of the Focal Plane of Particle in Digital Particle Holography

Yan Yang and Bo-seon Kang

Key Words: Digital Particle Holography(디지털 입자 홀로그래피), Focal Plane(초점면), Correlation Coefficient Method(상관계수법)

Abstract

The correlation coefficient method, which was proposed by our research group, is applied to digital particle holography to locate the focal plane of particles. It uses the fact that the correlation coefficient is maximum at the focal plane. The factors influencing this method are discussed with a numerical simulation of holograms. For real holograms, the Wiener filter was proposed to process both recorded holograms and reconstructed images. The application results using the dot array target showed that the Wiener filter is a very effective tool for processing holography-related images. The effects of the dot size and the object distance on the errors in the determination of the focal plane by the correlation coefficient method were investigated by using the calibration target.

1. 서 론

물체를 3차원적으로 기록, 재생할 수 있는 홀로그래피는 측정 체적의 정보를 기록한 이후에, 다양한 방법으로 재생함으로써 홀로그램에 저장된 많은 양의 정보를 추출할 수 있다. 기존 광학적 홀로그래피를 급속하게 대체하고 있는 디지털 홀로그래피는 홀로그램의 화학적 처리가 필요하지 않고 시스템을 단순화시킬 수 있으며, 실시간 분석이 가능하다는 여러 가지 장점으로 인하여, 여러 분야에서 광범위하게 응용되고 있다.⁽¹⁾

디지털 입자 홀로그래피는 입자의 크기, 속도, 공간분포와 같은 특성을 분석하는데 매우 유용한

기법이다. 하지만, 홀로그래피에서 재생된 입자 이미지는 일반적인 카메라 이미지와는 다르게 대개 초점 심도(depth of focus)가 매우 크기 때문에, 초점면을 어떻게 결정하느냐가 입자 홀로그래피 해석에 있어서 중요한 문제 중의 하나이다. 초점면을 결정하기 위한 다양한 방법이 제안되고 있는데, Yu와 Cai⁽²⁾는 기울기를 기반으로 한 기준을 제안하였고, 통합 강도 크기(integrated amplitude modulus)를 사용한 방법이 Dubois 등⁽³⁾에 의해 소개되었다. Cristina 등⁽⁴⁾은 Wavelet 변환의 최대값이 초점면에서 나타남을 보여주었고, Zhang 등⁽⁵⁾은 Gabor 변환을 사용하여 초점면 위치를 결정하였다.

광학적 홀로그래피에서 입자의 초점면을 결정하기 위한 상관계수법이 본 연구 그룹에서 처음 제안되었다.(Choo와 Kang⁽⁶⁾) 하지만, 광학적 홀로그래피에서는 이 방법을 입자 크기가 $D > 50 \mu\text{m}$ 인 경우에만 사용할 수 있었다. 본 연구에서는

† 책임저자, 회원, 전남대학교 기계시스템공학부

E-mail : bskang@chonnam.ac.kr

TEL : (062)530-1683 FAX : (062)530-1689

* 전남대 기계공학과

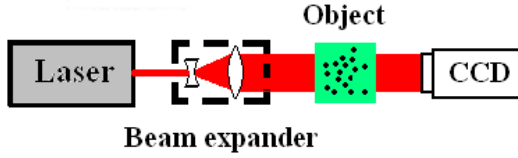


Fig. 1 Principle of in-line digital holography

상관계수법을 디지털 입자 홀로그래피에 적용하여, 아주 작은 입자($D \sim 10 \mu\text{m}$)를 포함한 다양한 크기 입자들의 초점면을 결정하였다. 홀로그램의 수치모사 방법을 사용하여 상관계수법의 중요한 매개 변수들과 그 영향에 대해서 조사하였으며, 각 변수들의 최적화된 값들을 파악하였다. 또한, 최적화된 매개 변수들을 사용하여 실험적으로 디지털 홀로그램을 기록하고, 기록된 홀로그램과 재생된 이미지 처리과정에 Wiener 필터를 사용하여 이미지를 개선시킨 후, 다양한 크기 입자의 초점면을 상관계수법을 적용하여 구하였다.

2. 기본 원리

2.1 In-line 디지털 홀로그래피의 원리

광학적 홀로그래피와 마찬가지로 디지털 홀로그래피도 홀로그램을 기록한 후 재생하는 두 단계를 거치지만, 기록 매체로 필름 대신에 CCD 카메라를 사용하고, 기록된 홀로그램을 컴퓨터를 이용하여 수치적으로 재생한다. 디지털 홀로그래피의 광학적 시스템 구성은 in-line 방식이나 off-axis 방식으로 구별되며, in-line 방식이 구성의 단순함 때문에 광범위하게 사용되고 있다. In-line 디지털 홀로그래피의 개념을 Fig. 1에, 홀로그램의 기록 및 재생과 관련된 좌표들을 Fig. 2에 나타내었다. 확장된 레이저 빔이 기록 대상이 되는 물체 영역을 통과하면서, 물체에 의해 회절되어 카메라 센서에 도달된 레이저 빔이 물체파(object beam), $O(\xi, \eta)$ 가 되고, 물체에 의한 굴절이 없이 도달한 빔은 기준파(reference beam)가 된다. 두 빔이 카메라 센서에서 중첩되면서 간섭이 발생하게 되고, 카메라 센서에 기록된 간섭 패턴이 홀로그램, $h(x, y)$ 가 된다. 이 홀로그램을 기록 당시 사용한 기준광, $E_R(x, y)$ 으로 다시 비추게 되면 재생면에 재생 이미지, $R(\xi', \eta')$ 가 나타나게 되며, 이 회절은 Fresnel-Kirchhoff 적분으로 나타낼 수 있다.⁽⁷⁾

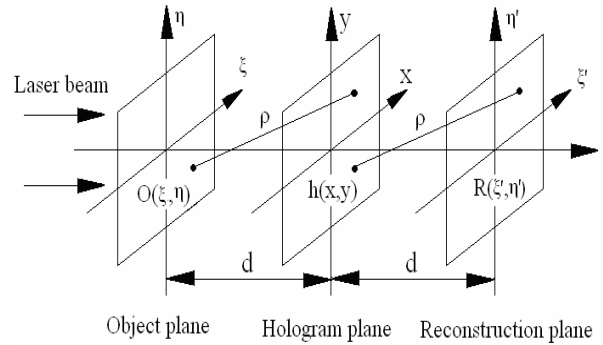


Fig. 2 Coordinate system

$$R(\xi', \eta') = \frac{i}{\lambda} \iint_{-\infty}^{\infty} h(x, y) E_R(x, y) \frac{\exp(-i \frac{2\pi}{\lambda} \rho)}{\rho} dx dy \quad (1)$$

여기서 λ 는 레이저 빔의 파장, ρ 는 인접한 두 면에서 대응하는 두 점 사이의 거리로 다음과 같이 표현되며

$$\rho = \sqrt{(\xi' - x)^2 + (\eta' - y)^2 + d^2} \quad (2)$$

d 는 인접한 두 평면 사이의 거리이다.

홀로그램의 수치모사 방법은 실험 수행시 포함될 수 밖에 없는 여러 오차 요인과 잡음을 배제할 수 있기 때문에 관련 파라미터 해석에 많이 활용되고 있다. 수치모사 방법은 Fig. 2에서 기록된 홀로그램, $h(x, y)$ 에서 재생 이미지, $R(\xi', \eta')$ 를 구하는 과정이 물체파, $O(\xi, \eta)$ 로부터 홀로그램을 구하는 과정과 동일하다는 사실을 이용한다. 즉, 식 (1)의 재생 과정의 변수를 기록 과정의 변수로 바꾸면

$$h(x, y) = \frac{i}{\lambda} \iint_{-\infty}^{\infty} O(\xi, \eta) E_R(\xi, \eta) \frac{\exp(-i \frac{2\pi}{\lambda} \rho)}{\rho} d\xi d\eta \quad (3)$$

가 되며, 물체파, $O(\xi, \eta)$ 를 대입하면, 홀로그램, $h(x, y)$ 를 구할 수 있게 된다.

2.2 홀로그램의 재생 방법

재생 이미지 $R(\xi', \eta')$ 은 Fresnel 근사 방법이나 Convolution 방법으로 구할 수 있으며, 수학적 표현은 Fresnel 근사 방법은 식 (4), Convolution 방법은 식 (5)로 표현된다.⁽⁷⁾

$$R(\xi', \eta') = \frac{i}{\lambda d} \exp(-i \frac{2\pi}{\lambda} d) \exp[-i \frac{\pi}{\lambda d} (\xi'^2 + \eta'^2)] \cdot F^{-1}\{h(x, y) \exp[-i \frac{\pi}{\lambda d} (x^2 + y^2)]\} \quad (4)$$

$$R(\xi', \eta') = F^{-1}\{F[h(x, y)] \cdot F[\frac{i}{\lambda} \frac{\exp[-i \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{(d^2 + (x - \xi')^2 + (y - \eta')^2)}]}{\sqrt{(d^2 + (x - \xi')^2 + (y - \eta')^2)}}]\} \quad (5)$$

여기서 F 는 푸리에 변환, F^{-1} 은 역푸리에 변환이다.

두 재생 방법을 비교하기 위하여 여러 직경의 점들이 인쇄된 보정판을 홀로그램으로 기록하고, 재생하여 재생 이미지의 해상도를 비교하였다. Convolution 방법에 의해 재생된 이미지의 해상도가 Fresnel 방법에 의해 재생된 이미지의 해상도보다 더 우수하기 때문에 본 연구에서는 Convolution 재생 방법을 선택하였다.⁽⁸⁾

홀로그래피는 기록 물체의 위치에 따라서 Fresnel 또는 Fraunhofer 홀로그래피로 분류되며, 본 연구의 경우는 Fresnel 홀로그래피에 해당된다. 이 경우 물체와 CCD 센서간 최소 물체 거리는 Fresnel 회절 조건에 의해 구해진다.⁽⁹⁾

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{1[(\xi-x)^2 + (\eta-y)^2]^2}{8\lambda}} = \sqrt[3]{\frac{1[N^2(\Delta\xi-\Delta x)^2 + N^2(\Delta\eta-\Delta y)^2]^2}{8\lambda}} \quad (6)$$

$\Delta\xi$, $\Delta\eta$ 는 물체 이미지의 해상도이며, 본 연구에서는 $N=2,048$, $\lambda=0.6328 \mu\text{m}$, $\Delta\xi = \Delta\eta = \Delta x = \Delta y = 7.4 \mu\text{m}$ 이다. 이 값을 식 (6)에 대입하면 최소 물체 거리 $d \geq 140.17 \text{ mm}$ 가 얻어진다.

2.3 상관계수법(Correlation Coefficient Method)

두 영상 F 와 G 에 대해 정의되는 상관계수는 식 (7)과 같이 정의되며, 두 영상간 유사성이 낮으면 0에 가까운 값, 유사성이 아주 높으면 1에 가까운 값을 갖는다.

$$CC = \left[\frac{\sum_m \sum_n (F_{mn} - \bar{F})(G_{mn} - \bar{G})}{\sqrt{[\sum_m \sum_n (F_{mn} - \bar{F})^2][\sum_m \sum_n (G_{mn} - \bar{G})^2]}} \right] \quad (7)$$

여기서 m , n 은 픽셀의 색인, \bar{F} 와 \bar{G} 는 각 영상의

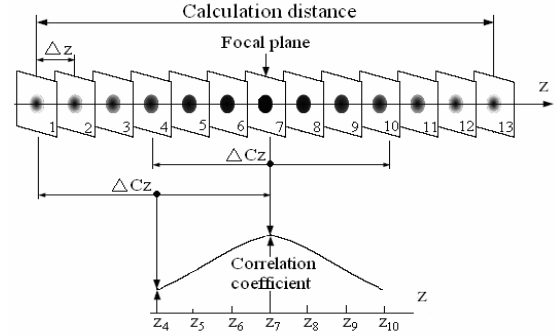


Fig. 3 Correlation coefficient method.

평균 명암값을 나타낸다. Fig. 3은 상관계수를 이용한 광축 방향 위치 결정의 개략도이다. 입자 이미지는 재생간격 Δz 로 층층이 재생되며, 광축 상의 임의 위치에서의 입자의 상관계수는, 그 평면의 앞뒤 일정거리(상관간격: ΔC_z)만큼 떨어져 있는 두 위치에서의 입자 영상들간의 상관계수로 정의된다. 입자의 초점면에서는 상관간격만큼 떨어진 두 이미지가 최대한 유사해야 하기 때문에 상관계수가 최대가 되어야 한다. 따라서, 입자의 초점면은 상관계수 곡선의 최대점으로 결정된다.

3. 홀로그램의 수치모사

3.1 상관계수법

상관계수법의 최적 상관간격을 결정하기 위하여 홀로그램의 수치모사 방법을 이용하였다. 이때 필요한 입자이미지는 컴퓨터로 생성하였다. 이미지 재생간격 Δz 는 작을수록 초점면 결정의 정밀도는 증가하지만, 재생 이미지의 수가 증가하기 때문에 계산시간도 역시 증가한다. 대략적인 예를 들면, 상관계수법으로 초점면을 결정할 때, Δz 가 $1 \mu\text{m}$ 일 때의 계산 시간은 거의 10 시간이었지만, Δz 가 $10 \mu\text{m}$ 일 때는 1 시간이 소요되었다. 따라서, 본 연구에서는 이미지 처리의 효율성과 정확도를 고려하여 이미지 재생간격 Δz 를 $10 \mu\text{m}$ 로 하였다. 이 재생간격에서 실제 물체의 위치와 상관계수법으로 예측된 초점면 사이의 차이로 정의되는 오차는 다음과 같이 표현 된다.

$$e = \pm n \times \Delta z / 2 = \pm n \times 5 \mu\text{m}, n = 0, 1, 2, \dots \quad (8)$$

상관계수 곡선이 두 개의 연속적인 최대점을 가

진 경우에는 두 이미지면의 중간이 초점면이 되기 때문에 $\Delta z/2$ 의 정수배로 오차를 정의할 수 있다. $20 \mu\text{m}$ 보다 적은 오차 수준은 허용될 수 있으며, 이보다 더 적은 오차 수준이 요구된다면, 계산 시간은 길어지지만 이미지 재생간격을 줄임으로써 가능하다.

최적의 상관간격 ΔC_z 를 구하기 위해서는, Fig. 3의 z_4 와 z_7 위치에서의 상관계수값의 차이가 충분히 커야 한다. Fig. 4는 입자 직경, $D=75 \mu\text{m}$, 입자 위치, $d=150 \text{ mm}$ 인 입자 홀로그램에서, 상관간격 변화에 따른 z_4 와 z_7 위치에서의 상관계수 값을 보여 준다. 상관간격 10 mm에서 z_4 와 z_7 위치에서의 상관계수 값의 차이가 최대가 됨을 알 수 있다.

Fig. 5는 입자 직경 $D=75 \mu\text{m}$, 입자 위치 $d=150 \text{ mm}$ 인 경우, 상관간격이 상관계수에 미치는 영향을 보여주고 있다. 상관간격이 너무 크거나 작으면 초점면을 정확히 결정할 수 없기 때문에, 최적 상관간격, $\Delta C_z=10 \text{ mm}$ 로 결정하였으며, 이 때 상관계수 곡선은 대칭적이며 최고점에

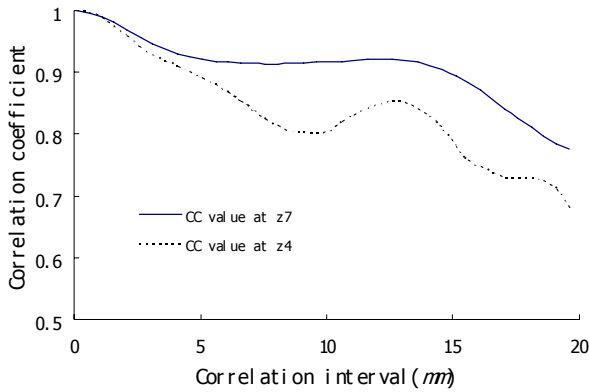


Fig. 4 Correlation coefficients by different correlation intervals (object distance, $d=150 \text{ mm}$)

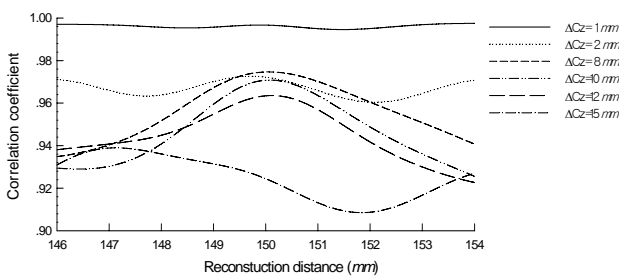
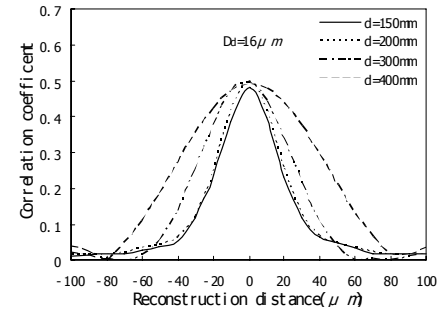
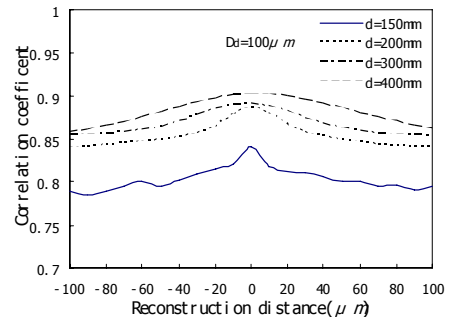


Fig. 5 Effect of correlation interval on correlation coefficient (object distance, $d=150 \text{ mm}$)

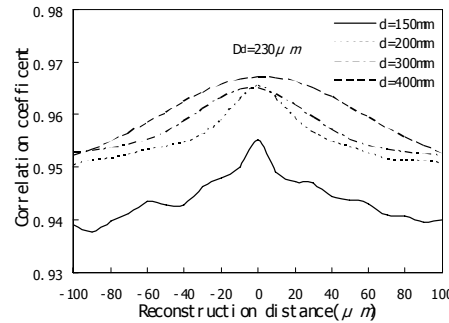
해당되는 초점면은 가정한 입자의 거리와 정확히 일치하였다. 입자의 크기와 입자 위치가 상관계수에 미치는 영향은 Fig. 6에 나타내었다. 거리는 구해진 초점면을 원점으로 했을 때의 좌표이다. 다양한 입자 크기와 위치에도 불구하고 초점면을



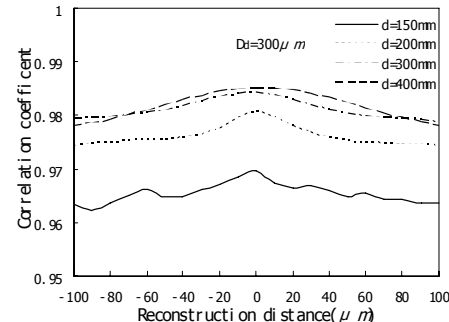
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 6 Effect of particle size and object distance on correlation coefficient; (a) $D=16 \mu\text{m}$, (b) $D=100 \mu\text{m}$, (c) $D=230 \mu\text{m}$, (d) $D=300 \mu\text{m}$

Table 1 Errors of focal plane determination by CC method(Unit : μm)

Size, D (μm)	Object distance, d (mm)											
	150	160	170	180	200	210	220	230	240	300	400	
16	10	0	0	0	0	0	0	0	0	-20	10	
100	0	-10	0	0	0	-10	5	15	10	-20	30	
300	0	0	0	0	0	0	0	-20	15	-30	30	
500	-10	5	10	0	5	-10	10	20	20	-30	25	

Table 2 Errors of focal plane determination by gradient method(Unit : μm)

Size, D (μm)	Object distance, d (mm)											
	150	160	170	180	200	210	220	230	240	300	400	
16	40	20	90	-20	50	20	10	20	90	10	-10	
100	40	80	-70	20	-30	0	70	100	-70	25	90	
300	10	70	20	20	90	-80	-90	-90	90	50	90	
500	20	-20	20	70	10	10	10	80	30	80	80	

결정할 수 있는 상관계수 곡선의 최대점은 쉽게 결정될 수 있음을 알 수 있다.

상관계수법에 의한 초점면 결정에 있어서 입자 크기와 위치에 따른 오차를 Table 1에 나타내었다. 입자 위치가 240 mm 이내인 경우는 오차가 그리 크지 않지만, 그 이상인 경우 오차가 매우 커짐을 알 수 있다. 따라서, 최적 입자 위치는 180 ~ 240 mm임을 알 수 있다.

3.2 기울기방법(Gradient Method)

초점면 결정에 있어서 기존에 가장 많이 사용되는 방법이 기울기방법이다.^(2,10) 즉, 입자 경계에서의 이미지 명암값의 기울기가 가장 큰 면을 초점면으로 결정하게 된다. 홀로그래피에 의해 구해진 재생 이미지의 초점면을 기울기방법을 적용하여 결정하고 상관계수법과 비교하였다.

기울기방법에 의한 초점면 결정에 있어서 입자 크기와 위치에 따른 오차를 Table 2에 나타내었으며, 입자 크기별 오차 평균값을 Fig. 7에 나타내었다. 상관계수법이 기존의 기울기방법보다 훨씬 더 우수하고, 높은 정확도를 나타냄을 알 수 있다.

4. 디지털 홀로그램에의 적용

4.1 잡음 제거

실제 기록되는 홀로그램은 실험 조건과 광학부

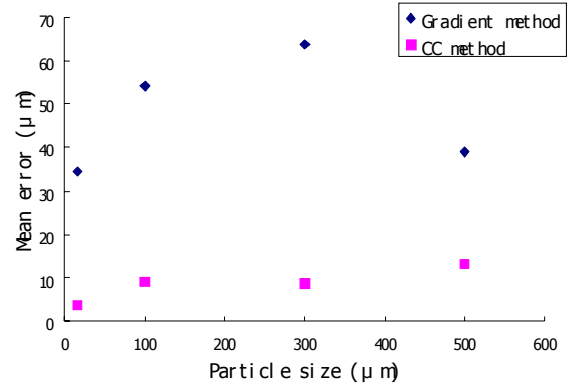


Fig. 7 Comparison of Errors for CC and gradient methods

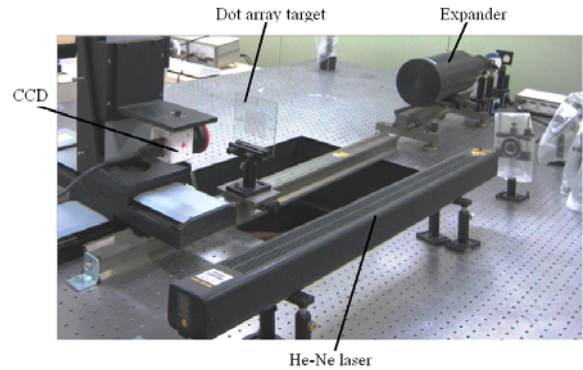


Fig. 8 Experimental setup of in-line digital holography

품에 의해 많은 잡음을 포함하고 있기 때문에 이를 효과적으로 제거할 수 있는 적절한 이미지 처리 방법이 필요하다. 이러한 목적으로 inverse 필터,⁽¹¹⁾ subtraction 방법,⁽¹²⁾ Gaussian high pass and spectral 필터⁽¹³⁾ 등이 사용되고 있으며, 본 연구에서는 이러한 필터들을 검증해 본 결과 가장 성능이 좋은 Wiener 필터⁽¹⁴⁾를 채택하였다.

푸리에 영역에서 Wiener 필터는 식 (9)로 표현된다.

$$G(\omega_1, \omega_2) = \frac{H^*(\omega_1, \omega_2) S_{uu}(\omega_1, \omega_2)}{|H(\omega_1, \omega_2)|^2 S_{uu}(\omega_1, \omega_2) + S_{\eta\eta}(\omega_1, \omega_2)} \quad (9)$$

$S_{uu}(\omega_1, \omega_2)$ 와 $S_{\eta\eta}(\omega_1, \omega_2)$ 는 각각 본래의 이미지와 노이즈의 파워스펙트럼이고, $H^*(\omega_1, \omega_2)$ 는 inverse 필터, $H(\omega_1, \omega_2)$ 는 blurring 필터이다. 즉, Wiener 필터는 inverse 필터링과 잡음 smoothing의 두 부분을 가지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 in-line 디지털 홀로그램을 기록하기

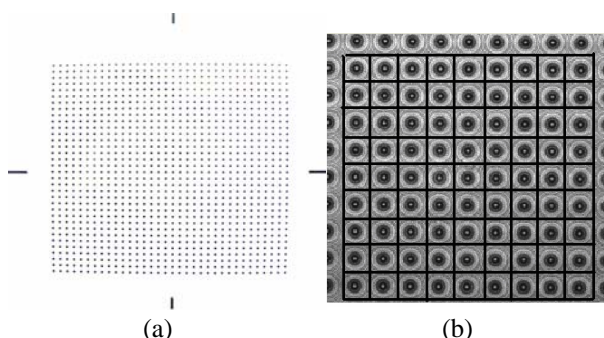


Fig. 9 Dot array target and its hologram: (a) dot array target, (b) hologram of target showing ROIs of 81 dots

위한 실험 장치를 보여주고 있다. 광원인 헬륨-네온 레이저의 파장은 $0.6328 \mu\text{m}$, CCD 카메라의 픽셀 수는 $2,048 \times 2,048$, 픽셀사이즈는 $7.4 \mu\text{m}$ 이다. Wiener 필터의 유용성을 검증하기 위하여 $500 \mu\text{m}$ 점이 가로, 세로 방향으로 33 개씩 인쇄된 보정판 A(dot array target, $48.5 \times 48.5 \text{ mm}^2$)을 사용하였으며 Fig. 9는 이 보정판과 이것의 홀로그램을 보여주고 있다. 점 하나를 포함하는 한 해석영역(Region of Interest)은 $2.25 \times 2.25 \text{ mm}^2$, 210×210 픽셀이며 점 면적은 전체 면적의 8.75%를 차지한다.

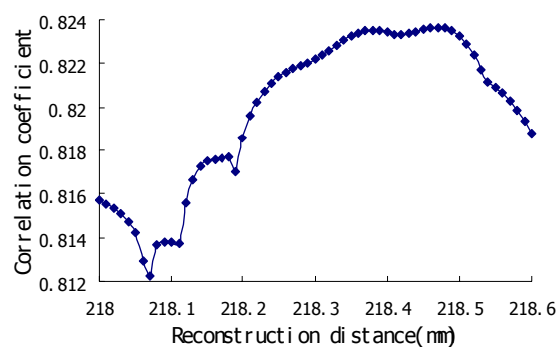
입자의 점에 대한 Wiener 필터 적용 효과를 Fig. 10에 나타내었는데, 필터의 적용으로 상관계수 곡선 형상이 많이 개선됨을 알 수 있다. 잡음이 섞인 홀로그램과 재생 이미지를 Wiener 필터를 사용하여 처리한 후, 각 입자의 초점면은 상관계수법에 의해 구해진다. 이렇게 구해진 각 입자 초점면의 평균값을 보정판의 광축상 실제 위치로 간주한다. 따라서, 오차는 각 입자의 상관계수법에 의해 예측된 초점면과 광축상 위치(초점면들의 평균값)의 차이로 정의된다. Wiener 필터의 적용에 의한 오차 감소 효과를 Table 3에 나타내었다. Wiener 필터는 초점면 결정의 오차를 매우 감소시켰으며, 홀로그램과 재생 이미지의 잡음 제거에 매우 효과적임을 알 수 있다.

4.2 입자 크기의 영향

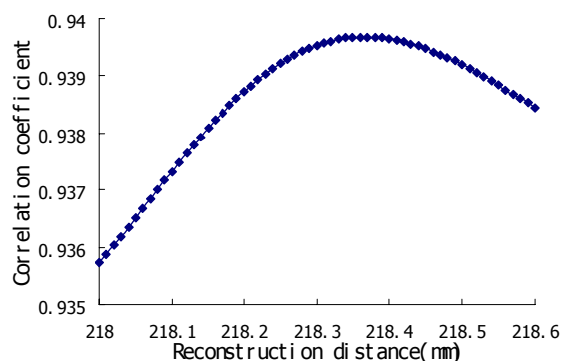
입자 크기가 상관계수법에 의한 초점면 결정에 미치는 영향을 파악하기 위하여, Fig. 11에 나타난 $8 \sim 300 \mu\text{m}$ 범위의 다양한 점 크기를 가지고 있는 보정판 B(calibration target)을 사용하였다. 각 점의 초점면들의 평균값이 보정판 B의 광축상

Table 3 Effect of Wiener filter on errors of focal plane determination

Object distance, $d(\text{mm})$		Mean of errors (μm)	Standard deviation of errors (μm)
155.799	Without filtering	10.790	7.375
	With filtering	4.235	4.080
185.234	Without filtering	23.074	11.584
	With filtering	17.103	11.465

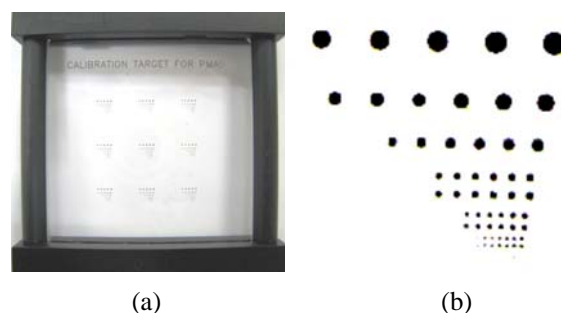


(a)



(b)

Fig. 10 Application of Wiener filter: (a) without filtering, (b) with filtering



(a)

(b)

Fig. 11 Calibration target with different size particles: (a) calibration target, (b) magnified images of different size dots

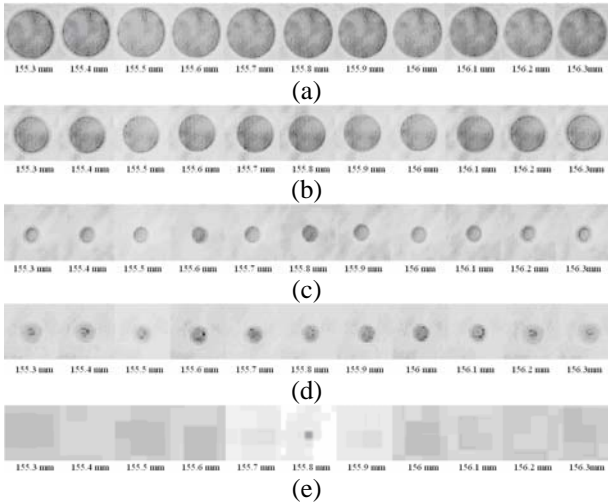


Fig. 12 Reconstruction images of particles at different reconstruction distances; (a) $D=300 \mu\text{m}$, (b) $D=230 \mu\text{m}$, (c) $D=100 \mu\text{m}$, (d) $D=51 \mu\text{m}$, (2 times of (c) scale), (e) $D=10 \mu\text{m}$, (5 times of (c) scale)

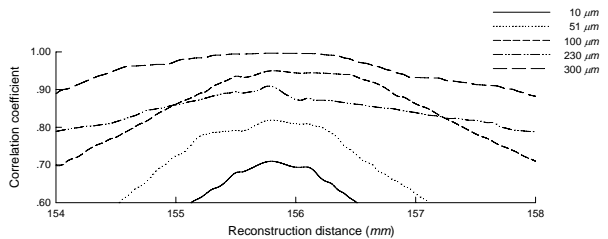


Fig. 13 Variation of correlation coefficient for different dot sizes

위치 $d=155.799 \text{ mm}$ 이다. 광축상을 따른 다른 크기 입자들의 재생 이미지를 Fig. 12에 나타내었으며, 이들의 상관계수는 Fig. 13에 나타내었다. 전반적으로, 초점 깊이는 입자의 크기에 비례하며, 홀로그램의 수치모사 결과와 일치함을 알 수 있다. 입자들의 크기가 증가함에 따라 상관계수곡선은 수평에 가까워지지만, 초점면을 결정하기 위한 최대점은 쉽게 판별할 수 있다. 입자 크기에 따른 초점면 결정의 오차를 Fig. 14가 보여 주고 있으며 오차는 허용범위 이내에 존재한다. 오차의 평균값은 $7.6 \mu\text{m}$ 이고, 표준 편차는 $4.271 \mu\text{m}$ 이다.

5. 결 론

본 연구에서는 초점면을 결정하기 위한 상관계수법을 in-line 디지털 입자 홀로그래피에 적용하

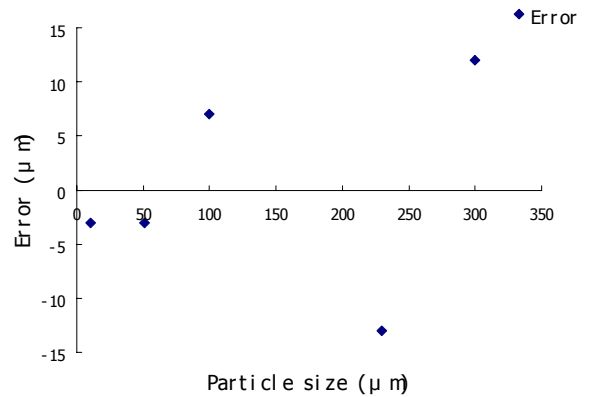


Fig. 14 Errors of focal plane for different dot sizes

였다. 홀로그램의 수치모사를 통하여, 중요 파라미터인 이미지 재생간격, 상관간격, 입자의 위치, 입자의 크기의 영향을 파악하였으며, 이미지 재생간격, 상관간격, 입자 위치의 최적값을 파악하였다.

실험적으로 기록된 실제 디지털 홀로그램에 대해서 디지털 홀로그램과 재생된 이미지의 잡음 제거에 Wiener 필터가 효과적임을 검증하였다. 또한 다양한 입자 크기에 상관계수법을 적용하여, 초점면 결정에 있어서의 오차가 허용 범위 이내임을 확인하였다.

따라서, 광학적 홀로그래피에 적용되었던 상관계수법은 디지털 입자 홀로그래피에서도 초점면을 결정하는 적절한 방법임을 확인하였다. 하지만, 유동장 측정에 이용되는 고체 입자들의 경우, 매우 작은 입자의 크기 및 입자간 상호 작용에 의해 상관관계법의 적용이 어려울 수도 있다.

참고문헌

- (1) Schnars, U. and Jueptner, W., 2002, "Digital Recording and Numerical Reconstruction of Holograms," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 13, pp. 85~101.
- (2) Yu, L. and Cai, L., 2001, "Iterative Algorithm with a Constraint Condition for Numerical Reconstruction of Three-dimensional Object from its Hologram," *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 18, pp. 1033~1045.
- (3) Dubois, F., Schockaert, C., Callens, N. and Yourassowsky, C., 2006, "Focus Plane Detection Criteria in Digital Holography Microscopy by Amplitude Analysis," *Opt. Express*, Vol. 14, pp.

- 5895~5980.
- (4) Lefebvre, C. B., Coëtmelec, S., Lebrun, D., and Özkul, C., 2000, "Application of Wavelet Transform to Hologram Analysis: Three-dimensional Location of Particles," *Opt. Laser Eng.*, Vol. 33, pp. 409~421.
- (5) Zhang, Y., Zheng, D. X., Shen, J. L. and Zhang, C. L., 2005, "3D Locations of the Object Directly from In-line Holograms Using the Gabor Transform," *Proc. SPIE* 5636, pp. 116~120.
- (6) Choo, Y. J. and Kang, B. S., 2006, "The Characteristics of the Particle Position Along an Optical Axis in Particle Holography," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 17, pp. 761~770.
- (7) Schnars, U. and Jueptner, W., 2005, *Digital Holography*, Springer, Berlin, pp. 41~45.
- (8) Yang, Y. and Kang, B. S., 2007, "Numerical Simulation of In-line Digital Holograms," *Proceedings of Asia Display 2007*, pp. 2055~2059.
- (9) Goodman, J. W., 2005, *Introduction to Fourier Optics*, Roberts & Company, Englewood, Colorado, pp. 68~72.
- (10) Ilchenko, V., Lex, T. and Sattelmayer, T., 2005, "Depth Position Detection of the Particles in Digital Holographic Particle Image Velocimetry," *Proc. SPIE* 5851, pp. 123~128.
- (11) Denis, L., Fournier, C., Fournel, T., and Ducottet, C., 2005, "Twin-image Noise Reduction by Phase Retrieval in In-line Digital Holography," *Proc. SPIE* 5914, pp. 148~161.
- (12) Singh, V. R. and Asundi, A. K., 2005, "Amplitude Contrast Image Enhancement in Digital Holography for Particles Analysis," *Proc. SPIE* 5878, pp. 17.1~17.8.
- (13) Kim, S. and Lee, S. J., 2006, "Effect of Particle Concentration on Digital Holographic PTV Measurement," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 30, pp. 929~934.
- (14) Jain, A. K., 1989, *Fundamentals of Digital Image Processing*, Prentice-Hall, Inc., USA, pp. 276~306.