

< 논문 >

입자 홀로그래피에서 입자의 광축 방향 위치 특성에 관한 연구

추연준* · 강보선†

(2005년 7월 14일 접수, 2006년 3월 8일 심사완료)

The Characteristics of the Particle Position Along an Optical Axis in Particle Holography

Yeon-Jun Choo and Bo-Seon Kang

Key Words: Holographic Velocimetry(홀로그래피 속도계), Diffused Illumination Holography(산란광 홀로그래피), Particle Position(입자 위치), Focusing Parameter(초점변수), Speckle(스펙클)

Abstract

The Holographic Particle Velocimetry system can be a promising optical tool for the measurements of three dimensional particle velocities. One of inherent limitations of particle holography is the very long depth of field of particle images, which causes considerable difficulty in the determination of particle positions in the optical axis. In this study, we introduced three auto-focusing parameters corresponding to the size of particles, namely, Correlation Coefficient, Sharpness Index, and Depth Intensity to determine the focal plane of a particle along the optical axis. To investigate the suitability of the above parameters, the plane image of dot array screens containing different size of dots was recorded by diffused illumination holography and the positions of each dot in the optical axis were evaluated. In addition, the effect of particle position from the holographic film was examined by changing the distance of the screen from the holographic film. All measurement results verified that the evaluated positions using suggested auto-focusing parameters remain within acceptable range of errors. These research results may provide fundamental information for the development of the holographic velocimetry system based on the automatic image processing.

1. 서론

입자를 포함하는 유동현상에서 입자의 분포 및 속도와 관련된 정보가 중요시되는 산업 및 연구 분야들이 날로 증가하고 있으며, 이러한 입자의 정보를 획득하기 위한 계측장비의 개발도 첨단화 되어가고 있다. 그리고 최근에 입자 해석을 위해 가장 널리 이용되고 있는 LDV, PDPA, PIV, 영상

처리 기법 등은 레이저를 이용한 광계측 기법에 기반을 두고 있다. 이러한 광계측 기법들은 각기 측정대상, 정보추출 등의 제한된 범위 내에서만 적용이 가능하다. 그러므로 모든 계측기법이 추구하는 3차원 정보추출이 가능하고, 한순간의 공간 분해능을 갖는 측정기법을 필요로 하는 경우에 적합한 홀로그래피 기법을 이용한 입자 해석의 요구가 날로 증가하고 있다.

그럼에도, 홀로그래피가 가지는 몇몇 단점과 관련된 기술의 미비로 인하여 실제 계측에 그다지 많이 적용되고 있지 못한 실정이다. 입자의 해석을 목적으로 하는 홀로그래피 계측기법의 개

† 책임저자, 회원, 전남대학교 기계시스템공학부
E-mail : bskang@chonnam.ac.kr
TEL : (062)530-1683 FAX : (062)530-1689

* 회원, 전남대학교 대학원 기계공학과

발과 관련된 기존의 몇몇 연구를 살펴보면, Haussman et al.⁽¹⁾은 펄스 루비 레이저와 산란판(diffuser)을 이용하여 산란된 물체광을 적용하여 기포 특성을 해석하였으며, 영상처리 기법을 통해 입자의 크기와 3차원 위치 결정을 위한 자동 초점 변수를 소개하였다. Feldmann et al.⁽²⁾은 확산 물체광을 이용하여 양방향에서 분무 액적을 기록한 후, 양방향에서 본 입자들의 좌표를 결정하고 스테레오매칭을 통해서 3차원 속도를 결정하였다. Tao et al.⁽³⁾은 양방향 홀로그래피를 사용하여, 각 방향에서 입자 영상 상관관계를 이용하여 2차원 속도 벡터를 구하고, 양방향 매칭 기법을 이용하여, 3차원 속도 벡터를 구하였다. 또한, 한 방향만의 기록으로 입자의 3차원 좌표를 얻을 수 있는지에 대한 연구도 수행하였다. 즉, 한 방향에서 광축 방향으로의 입자의 밝기 분포 중 최대 밝기로 광축 방향 위치를 결정하고, 다른 방향에서 구한 좌표와 비교하는 방식으로 검증하였으며, 입자의 깊은 심도(depth of focus)에 의해 야기되는 부정확성을 해결하기 위한 방법이 요구된다는 결론을 내렸다. 위와 같이 입자의 3차원 속도 측정을 위해서는 재생된 입자의 3차원 좌표 결정이 선행되어야 하지만, 아직까지 적절하게 입자좌표를 결정하는 방법이 소개되지 못하고 있다.

본 연구에서는 산란광 홀로그래피를 이용한 자동화된 입자 해석 기법의 개발을 궁극적인 목표로, 사람의 개입 없이 재생 입자들을 인식하고 3차원 좌표를 결정하기 위한 적절한 위치결정 변수의 개발에 관한 연구를 수행하였다. 우선, 해석 대상이 되는 입자 영상과 산란광 홀로그래피에서 가장 큰 단점이며 입자 영상의 배경으로 존재하는 스펙클 노이즈 영상의 정량적, 정성적인 해석을 수행하였다. 그리고 재생 입자의 배경으로 존재하는 스펙클 노이즈와 입자 영상의 재생 과정에 대한 기초적인 이해를 바탕으로, 입자의 광축 방향 위치 결정을 위하여, 입자의 크기에 따른 적절한 초점 결정 변수를 도출하고, 검증 실험을 통하여 타당성을 확인하였다.

2. 홀로그램 기록 및 재생

본 실험의 홀로그램 기록 조건을 Fig. 1에 나타내었다. 홀로그램은 비축(off-axis) 홀로그래피이

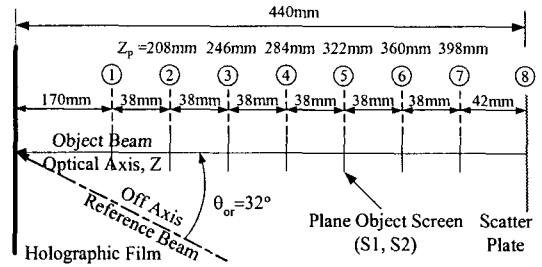


Fig. 1 Recording conditions

며, 물체광은 재생 영상의 심도를 줄이기 위해서, 산란판에 광축 방향으로 평면 조사된 산란광을 이용하였고, 참조광은 광축으로부터 $\theta = 32^\circ$ 를 가지고 감광필름에 조사되며, 정확한 영상 재현을 위해서, 수차가 보정된 빔확대시준기(wavefront distortion $< \lambda/10$)를 이용하였다. 기록 입자를 대신하여, 투명 유리판에 8~300 μm 의 크기의 점들이 불투명하게 기록된 스크린 S1과, 500 μm 크기의 점들이 일정 간격으로 기록된 스크린 S2를 이용하였다. 산란판은 감광 필름에서 일정 위치에 고정되어 있고, 그 사이에 스크린들을 일정 간격으로 이동시키며 기록하여, 스크린의 기록 위치 변화에 따른 입자들의 재생 특성을 살펴보았다. 또한, 홀로그램 개구경(hologram aperture, D_H)에 따른 재생 영상의 특성을 해석하기 위해, 10, 20, 30, 50, 70, 100mm 크기의 직경을 갖는 조리개를 홀로그램과 밀착되도록 위치시켰다.

Fig. 2는 기록 및 재생 시스템의 좌표계를 나타낸다. 기록시 감광필름, 재생시 홀로그램의 중앙을 원점(O)으로 물체광의 진행 방향을 Z축, Z축에 수직한 평면을 XY평면으로 하였다. 기록시, $z_s = -440\text{mm}$ 에 산란판(S)이 위치하고, 산란판과 감광 필름 사이에 놓인 스크린 위에 존재하는 기록 입자의 좌표는 $-x_p, y_p, -z_p$ 이다. 기록된 필름은 현상 후, 왜곡이 없는 실상의 재현을 위해, 기록시 이용된 광학계를 그대로 유지하고 Y축을 중심으로 홀로그램을 180° 회전하여, 홀로그램 오른쪽 공간에 공액기준광에 의한 실상을 재현하였다. 재생 입자 영상은 3축 이송장치(PI Inc., 최소 이송거리 = 33nm)에 설치된 CCD 카메라(Kodak, MegaPlus ES 1.0, pixel size = $9\mu\text{m}$)에 렌즈 없이, 센서를 직접 노출시켜 획득하였다. 이는 렌즈 구경의 제한으로 인한 입자 심도의 증가를 피하고, 스펙클의 영향을 줄이기 위해 가능한 넓은 관찰

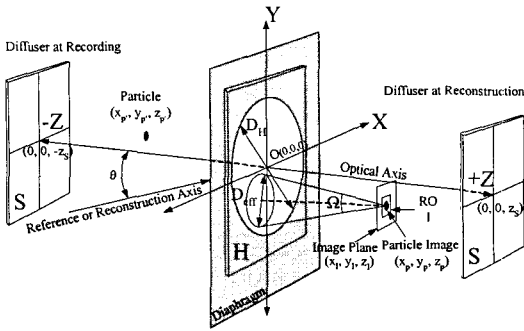


Fig. 2 Coordinates of the recording and reconstruction systems

각을 확보하기 위해서였다. 기록시 참조광과 재생광의 파면이 정확히 공액복소이어서 확대비가 1이고 수차가 거의 없는 실상을 이상적으로 재생한다면, 재생 입자의 초점에서의 좌표는 $x_p, y_p, z_p = x_p', y_p', z_p'$ 이 된다. 이미지를 획득하는 센서의 화소 좌표는 x_p, y_p, z_p 이며, 한 입자와 배경을 포함하는 영상을 해석 영역(Region of Interest; ROI)으로 정의한다. 한 입자의 재생에 기여하는 홀로그램 영역이 유효 구경(D_{eff})이고, 유효 구경과 입자 위치로 형성되는 각을 각구경(angular aperture, Ω)으로 정의한다.

재생 입자 해석은 실시간 또는 저장후 처리방식을 택할 수 있는데, 본 연구에서는 실시간 처리시 장치의 장시간 작동을 피하기 위하여, 해석공간을 일정한 주사간격으로 이동하여 저장한 후 처리하는, 저장후 해석 방식을 택하였다. 따라서 주사간격이 광축(Z)방향 최저 해상도가 되기 때문에, 효율성을 고려한 적절한 주사간격의 설정이 중요하며, 측정하려는 가장 작은 입자의 광축 방향 심도를 고려하여, 이송장치의 최소이송거리의 1000 배에 해당하는 $33\mu\text{m}$ 로 설정하였다.

3. 재생 영상의 특성

3.1 스펙클 배경

영상 재현을 목적으로 하는 산란광 홀로그래피 기법에서 가장 큰 문제점은 재생 이미지에 배경으로 존재하는 스펙클이다. 이들은 해석 입자의 해상도를 감소시키고, 광축 방향 초점 위치 결정을 어렵게 하기 때문에, 스펙클 특성과 스펙클의 재생 과정에 대한 분석이 필수적이다. 스펙클의

크기가 영상장치의 화소 크기보다 작을 경우는 마이크로(micro) 스펙클, 큰 경우는 매크로(macro) 스펙클로 구별되며, 두 경우 모두 재생 영상의 질을 저하시킨다. 하지만, 재생 영상의 인식 능력 관점에서 마이크로 스펙클이 매크로 스펙클에 비해 조금 더 유리하기 때문에, 본 연구와 같이 아주 작은 입자를 해석할 경우, 최소한 매크로 스펙클은 발생되지 않도록 해야 한다.^(4,5)

스펙클의 특성은 주로 통계적 기법⁽⁶⁻⁸⁾을 이용하여, 스펙클 세기와 크기를 정량적으로 표현한다. 식 (1)은 이론적으로 유도되는 스펙클 영상의 밝기(I)에 대한 확률밀도함수(Probability Density Function; PDF, $P(I)$)이며, 식 (2)는 PDF의 형상계수, B , 식 (3)은 밝기의 명암대비, C 를 의미한다.

$$P_I(I) = (B/\bar{I})^B I^{B-1} \exp[-B(I/\bar{I})] / \Gamma(B) \quad (1)$$

$$B = (\bar{I}^2) / \sigma_I^2, \quad \sigma_I^2 = \overline{(I^2)} - (\bar{I})^2 \quad (2)$$

$$C = \frac{\sigma_I}{\bar{I}} = \frac{1}{B^{0.5}} \quad (3)$$

여기서 \bar{I} 는 평균값, σ 는 표준편차, Γ 는 감마함수이며, B 와 C 는 1에 가까울수록 물체의 인식력은 감소한다.

Fig. 3은 전형적인 마이크로 스펙클(Fig. 3a)과 매크로 스펙클(Fig. 3b)패턴, 그리고 이 두 경우의 측정된 확률밀도분포와 식 (1)에 의한 확률밀도함수를 비교하여 나타내었다. 마이크로 스펙클의 경우, B 의 값이 큰 반면, 매크로 스펙클의 경우, B 의 값이 1에 가깝고, 측정된 확률밀도분포와 이론적 확률밀도함수가 서로 일치하지 않음을 알 수 있다. 이러한 오차는 상당히 다양한 원인들에서 야기되는 것으로 알려져 있지만,⁽⁸⁾ 본 연구에서는 이러한 오차의 영향은 고려하지 않을 것이다. Fig. 4는 광축 방향을 따라서 변하는 이미지 평면, z_I 와 홀로그램 개구경, D_H 의 변화에 따라 구해진 확률밀도함수의 형상계수와 명암대비를 보여 주고 있다. D_H 가 감소하고, z_I 가 커질수록 B 와 C 값이 1에 가까워지므로, 스펙클로 인해 양질의 입자 영상을 얻는 것이 어려워진다는 것을 예측할 수 있다.

두 번째 스펙클 특성은 스펙클의 크기(d)인데,

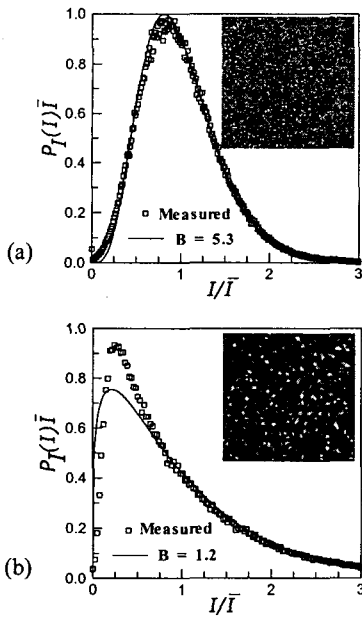


Fig. 3 Typical speckle pattern and probability density function; (a) micro speckle, $D_H = 100$ mm, $z_l = 170$ mm, $B = 5.3$, (b) macro speckle, $D_H = 10$ mm, $z_l = 440$ mm, $B = 1.2$

일반적으로 가간섭성이 높은 레이저가 산란 표면에 조사되어 형성되는 스펙클의 크기는 이론적으로 다음과 같다.

$$d = 1.22\lambda z_l / L \tag{4}$$

여기서, λ 는 레이저의 파장, z_l 는 산란 표면에서 관측 평면까지의 거리, L 은 산란 영역의 특성 길이가 되며, 본 연구의 경우 z_l 는 홀로그램에서 관찰면까지 거리, L 은 홀로그램의 유효 구경(D_{eff})을 의미한다. 스펙클의 크기를 실험적으로 구하기 위해 가장 많이 이용되는 다른 방법은, 자기 공분산(Auto-Covariance Function; ACF)을 이용하는 것이다.⁽⁸⁾ 만일, ΔI 가 스펙클을 표현하는 이산화된 영상 함수라면, 이산화된 자기 공분산의 표현은 다음과 같이 정의된다.

$$ACF(m, n) = \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^N \Delta I(k, l) \Delta I(k+m, l+n),$$

$$\Delta I(m, n) = I(m, n) - \bar{I} \tag{5}$$

여기서, m 과 n 은 화소의 색인, M 과 N 은 영상의 크기를 나타낸다.

Fig. 5a는 Fig. 3b의 스펙클 패턴에 대한 정규화된 ACF 분포로서, ACF의 FWHM(Full Width at Half Maximum)을 평균 스펙클의 크기로 결정하며, z_l 와 D_H 의 변화에 따라 결정된 스펙클 크기의 변화를 Fig. 5b에 나타내었다. 실선($D_H = 10$ mm)과 점선($D_H = 20$ mm)은 식 (4)에 의한 이론적인 스펙클의 크기이다. 실험적으로 예측된 스펙클의 최대 크기는 D_H 가 10, 20mm인 경우를 제외하고는, 대략 CCD 카메라의 단일 화소 크기인 $9\mu\text{m}$ 이하에서 형성됨을 확인할 수 있다. 즉, 스펙클 크기가 CCD 화소보다 큰 매크로 스펙클의 경우는 위의 방법에 의해 스펙클의 크기를 어느 정도 예측할 수 있지만, 마이크로 스펙클의 경우는 ACF를 적용하여 스펙클 크기를 계산하기가 어려우며, 예측된 스펙클의 크기는 대개 CCD 단일 화소의 크기와 비슷한 결과를 나타냄을 확인할 수 있었다.⁽⁸⁾ 스펙클 특성과 관련한 결과를 종합해 볼 때, 스펙클의 영향을 줄이기 위해서는 가능한 홀로그램은 크게 하고 기록 입자는 홀로그램에 가까울수록 유리하며, 최소한 매크로 스펙클을 피할 수 있는 조건도 예측할 수 있음을 알

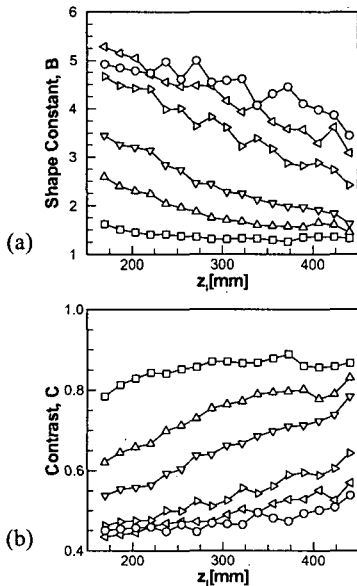
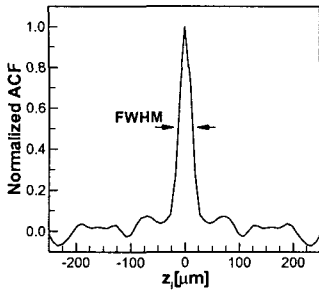
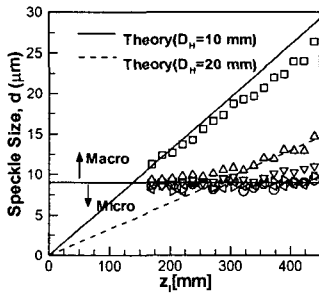


Fig. 4 (a) Shape Constant and (b) Speckle Contrast variations along the Z axis at different hologram apertures, D_H (\square :10, \circ :20, \triangle :30, ∇ :50, \triangleleft :70, \triangleright :100 [mm])



(a)



(b)

Fig. 5 Characteristics of speckle size; (a) normalized auto-covariance function, (b) speckle size along the Z axis at different hologram apertures, D_H (\square :10, \circ :20, \triangle :30, ∇ :50, \diamond :70, \triangleright :100 [mm])

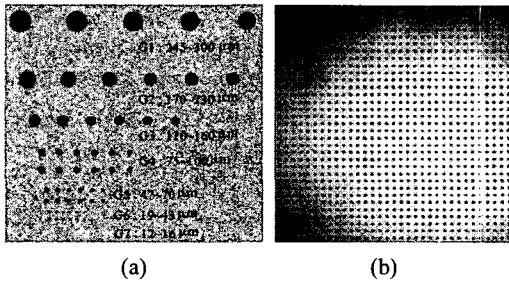


Fig. 6 Typical reconstructed image of screens at $z_p = 170\text{mm}$; (a) screen S1, (b) screen S2

수 있다. 이후 실험에서는 홀로그램 개구경을 기록시 참조광의 직경과 같은 $D_H = 100\text{mm}$ 으로 고정하였다.

3.2 입자 이미지

Fig. 6은 $z_p = 170\text{mm}$ 에 위치한 스크린 S1(Fig. 6a)과 S2(Fig. 6b)의 재생 영상이다. S1의 재생 영상에서 육안 관찰에 의해 해석할 수 있는 최소한

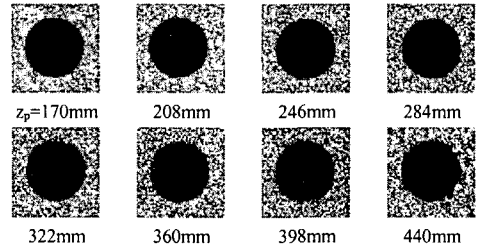
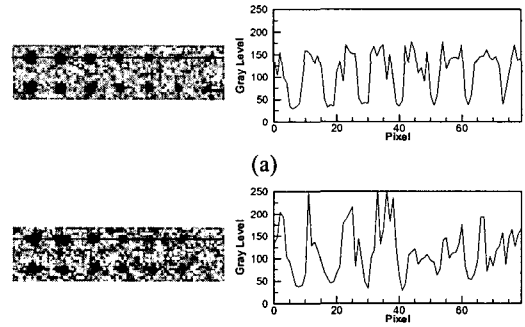


Fig. 7 Sharpness of a $300\mu\text{m}$ dot on the S1 at each

z_p



(b)

Fig. 8 Particle image of G6 group on S1 and line profile of intensity; (a) $z_p = 170\text{mm}$, (b) $z_p = 440\text{mm}$

의 입자 크기는 약 $20\mu\text{m}$ 정도임을 알 수 있는데, 이보다 작은 입자들은 CCD 화소 개수가 1~3개 정도에 불과하며, 스펙클에 의한 영상의 저하와 홀로그램의 재생 능력을 감안하면 너무 작은 입자들이다. S2의 재생 영상을 통해서 스크린에 기록된 입자들의 배열 간격과 측정된 입자들의 배열 간격이 아주 정확히 일치하여, 재생 과정의 정확성을 확인할 수 있다.

광축 방향 위치에 따른 재생 입자 이미지의 변화를 보기 위해, 각 z_p 위치에서 $300\mu\text{m}$ 입자의 초점 영상을 Fig. 7에 나타내었다. 정량적인 분석은 어렵지만, z_p 가 커질수록 매크로 스펙클 특성이 나타나면서, 경계 부분이 선명하지 않음을 확인할 수 있다. Fig. 8은 S1을 $z_p = 170\text{mm}$ (Fig. 8a)와 $z_p = 440\text{mm}$ (Fig. 8b)에 위치했을 때, G6 그룹 입자들의 이미지와 중심선을 따른 명암값을 보여주고 있다. 입자들을 나타내는 명암 패턴이 z_p 가 커질수록 불규칙해지는 것을 다시 한 번 확인할 수 있다.

이처럼, 기록 입자가 필름에서 멀어질수록 재생 영상의 해상도, 혹은 선명도가 낮아지는 원인

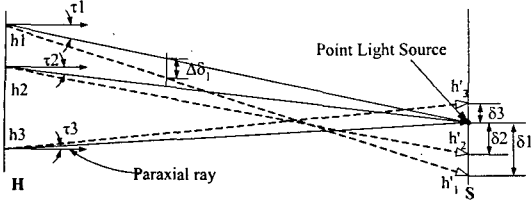


Fig. 9 Image displacement originated from aberration

은, 앞에서 확인한 스펙클의 영향 이외에도 Fig. 9에 나타낸 수차를 들 수 있다. 만일, 홀로그램 위의 세 점 (h_1, h_2, h_3)에서 재생되는 파면은 수차를 무시한다면, 재생된 산란판 위의 한 점광원으로 수렴해야 하는 경우를 생각해 보자. 하지만, 홀로그래피에서는 이론적으로는 완전히 제거할 수 있지만,⁽⁹⁾ 현실적으로는 피할 수 없는 수차가 발생한다. 이러한 수차로 인해서, 세 점에서 나오는 파면은 근축과 이루는 각 τ 의 크기에 따라서, 서로 다른 세 점(h'_1, h'_2, h'_3)으로 $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ 만큼의 수차를 가지고 벗어난 파면을 재현한다. 이때, 수차에 의한 파면과 원래 파면의 편차인 $\Delta \delta$ 는 홀로그램에서 가까울수록 줄어들을 알 수 있다. 따라서 Fig. 7과 8에서 알 수 있듯이, 홀로그램에서 멀리 떨어질수록 수차에 의해 파면이 벗어나는 정도가 커져, 선명도는 감소하게 된다.

4. 초점 결정 변수

입자 홀로그래피에서 입자의 속도를 결정하기 위해서는, 두 순간에 존재하는 입자의 정확한 3차원 위치가 결정되어야 한다. 입자의 XY좌표는 비교적 간단하고 정확하게 결정되지만, 광축(Z) 방향 좌표는 재생 입자가 가지는 긴 광축 방향 심도로 인하여 간단하지 않다. Fig. 10은 스크린 S2의 중앙에 있는 한 입자에 대해, 광축 방향으로 이동하며 획득한 입자의 전형적인 초점 패턴을 보여주고 있다. 이처럼 재생 입자가 존재하는 심도 내에서, 입자의 정확한 광축 방향 좌표 결정을 위해서는 적절한 초점 판단 변수가 필요하다. 입자의 패턴이나 명암 분포, 명암 기울기 등을 사용한 기존 연구들도 있지만,⁽¹⁻³⁾ 스펙클이 존재하는 홀로그램 이미지에 적용하기에는 적절하지 않기 때문에, 본 연구에서는 1) 상관계수법(Correlation Coefficient Method, CCM), 2) 선명도

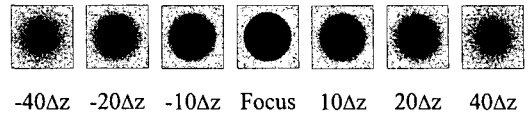


Fig. 10 Defocusing pattern of a 500 μm dot at the center of screen S2

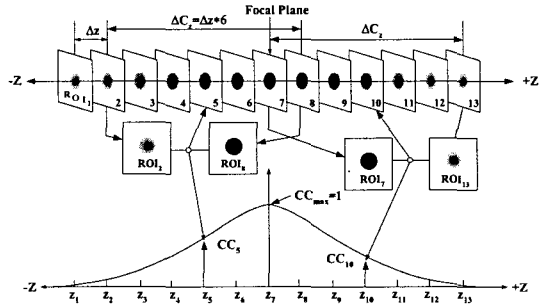


Fig. 11 Correlation Coefficient Method using ROI-series images

계수법(Sharpness Index Method; SIM), 3) 깊이 밝기계수법(Depth Intensity Method; DIM)을 개발, 적용하였다.

4.1 상관계수법(CCM)

영상의 상관관계는 두 영상간의 연관성과 유사성의 정도를 수치화한 것이며, 상관계수(Correlation Coefficient; CC)는 다음과 같이 정의된다.

$$CC = \frac{\sum_m \sum_n (F_{mn} - \bar{F})(G_{mn} - \bar{G})}{\sqrt{(\sum_m \sum_n (F_{mn} - \bar{F})^2)(\sum_m \sum_n (G_{mn} - \bar{G})^2)}} \quad (6)$$

여기서 m, n 은 화소의 색인, F 와 G 는 각 영상, \bar{F} 와 \bar{G} 는 각 영상의 명암값의 평균을 나타낸다. 상관계수는 두 영상간 유사성이 낮으면 0에 가까운 값, 유사성이 아주 높으면 1에 가까운 값을 갖는다.

Fig. 11은 상관계수를 이용한 광축 방향 위치 결정의 개략도이다. 광축상의 임의 위치에서의 입자의 상관계수는, 그 평면의 앞, 뒤 일정거리(상관간격: ΔC_2)만큼 떨어져 있는 두 위치에서의 입자 영상들의 상관계수로 정의된다. 가장 적절한 상관간격은 입자만의 상관관계는 잘 표현하면

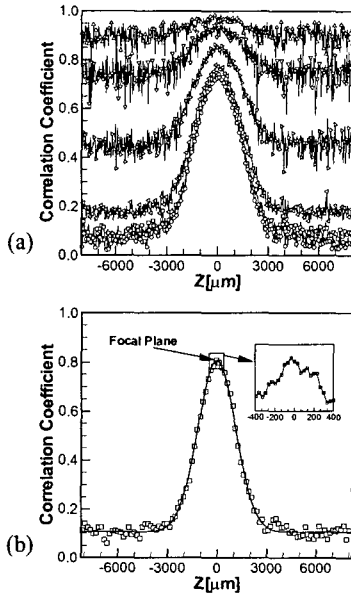


Fig. 12 Correlation Coefficient; (a) effect of correlation interval, ΔC_z (Δ : 16.5, ∇ : 33, \triangleright : 65.9, \triangleleft : 131.8, \square : 200, \circ : 263.6 [μm]) with $z_p = 322\text{mm}$, $D_d = 300\ \mu\text{m}$, (b) Gaussian curve fitting with $z_p = 170\text{mm}$, $D_d = 300\ \mu\text{m}$, $\Delta C_z = 200\ \mu\text{m}$

서, 동시에 배경이 되는 스펙클의 상관관계는 배제할 수 있을 정도의 거리가 되어야 한다.

Fig. 12a는 스크린 S1의 $300\ \mu\text{m}$ 입자에 대해서 상관간격을 변화시키며 계산된 상관계수 분포를 보여주고 있다. 상관간격이 좁을수록, 상관계수는 전체적으로 크지만, 최대값과 최소값의 진폭은 낮은 분포를 보인다. 이는, 상관간격이 좁을수록 입자의 상관도가 높게 나타나지만, 스펙클배경의 상관도 역시 높게 나타나기 때문이다. 상관간격이 커지면서 스펙클 배경의 심도보다 상대적으로 깊은 심도를 가지는 입자가 상관계수 결정에 더 큰 영향을 주기 때문에, 진폭이 커지고 입자 위치의 분별력도 높아지게 된다. 하지만, 상관간격이 필요 이상으로 커지면, 스펙클 배경과 입자 모두 낮은 상관관계를 가지므로, 전체적으로 상관계수가 낮아지고 진폭도 낮아져, 위치 분별력이 떨어진다. Fig. 12a로부터 최적 상관간격은 $200\ \mu\text{m}$ 로 결정하였다. 이렇게 결정된 상관간격으로 계산된 상관계수 분포는 Fig. 12b에 나타내었듯이, 가우시안 분포 함수로 곡선근사할 수 있으

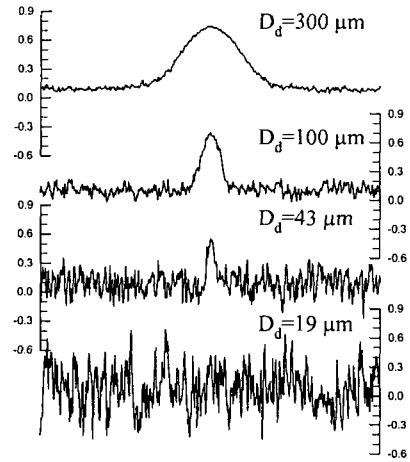


Fig. 13 Correlation coefficient distributions on changing particle sizes on screen S1 ($D_d = 19, 43, 100, 300\ \mu\text{m}$)

며, 가우시안 분포의 중심 좌표(최대값)를 입자의 초점 위치로 결정할 수 있다.

Fig. 13은 입자의 크기 변화에 따른 상관계수 분포를 나타낸다. 입자가 작아질수록 입자의 심도는 짧아져, 상관계수 분포가 무질서해지고, 상관계수는 더 이상 입자의 위치 결정을 위한 변수로써 이용되기 어렵다는 것을 알 수 있다.

4.2 선명도계수법(SIM)

또 다른 초점 판단 변수인 선명도계수(Sharpness Index; SI)는 입자의 경계 부분이 얼마나 선명한지를 나타낼 수 있는 지표를 의미한다. Fig. 14는 입자 해석 영역의 밝기에 대한, 명암 히스토그램과 그것의 누적 히스토그램(점선)을 나타내고 있다. 명암 히스토그램에서 첫 번째 높은 빈도는 입자의 명암에 의한 것이며, 두 번째 높은 빈도는 입자의 배경이 되는 스펙클 명암에 의한 것이다. 두 피크 사이의 매우 낮은 빈도값을 갖는 영역은, 입자와 배경 사이의 경계 부분에 해당한다. 경계 부분의 명암의 빈도가 낮을수록, 선명한 경계를 갖는, 초점이 잘 맞는 입자의 영상이라고 할 수 있다. 하지만, 경계면의 선명도는, 명암 히스토그램보다 누적 히스토그램을 통해서 보다 쉽게 표현할 수 있다. 즉, 누적 히스토그램에서 나타나듯이 두 피크 사이에서는 거의 선형적인 증가를 하며, 이 선형 구간의 기울기가 낮다는 것은, 경계 부분의 선명도가 높다는 것을

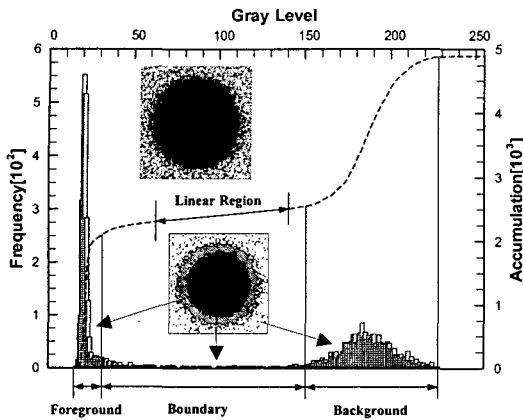


Fig. 14 Illustration of the Sharpness Index Method

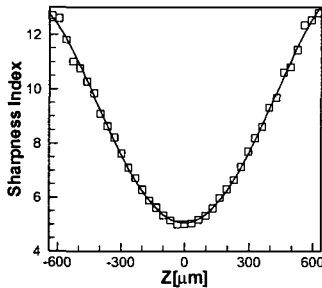


Fig. 15 Sharpness Index around the focal position with $D_d = 500\mu\text{m}$

의미하게 된다. 따라서 이 구간의 기울기인 선명도계수가 입자의 초점을 결정하기 위한 적절한 판단 변수로써 이용될 수 있다.

Fig. 15는 스크린 S2의 $500\mu\text{m}$ 재생 입자의 선명도계수를 초점을 기준으로 나타낸 것이다. 초점에서 멀어질수록 선명도계수가 높아지며, 상관계수법에 비해, 비교적 좁은 구간만으로 초점 변화를 쉽게 표현할 수 있음을 확인할 수 있다.

4.3 깊이밝기계수법(DIM)

입자가 아주 작은 경우, 이전의 두 방법에 의한 초점 판단이 용이하지 않기 때문에, 이 경우 적합한 깊이밝기계수(Depth Intensity; DI)를 도입하였으며, Fig. 16은 이 방법에 의한 초점 결정 과정의 개략도이다. Fig. 16a는 크기가 $M \times N$ 인 해석 영상(ROI_y)이며, 이 면을 중심으로 앞, 뒤로 Δz 간격으로 입자가 존재하는 전 영역을 주사한 K 개의 영상들은 해석영상군(ROI_y -series, Fig. 16b)이다. 해석 입자의 중심을 원점으로 하는 좌표계

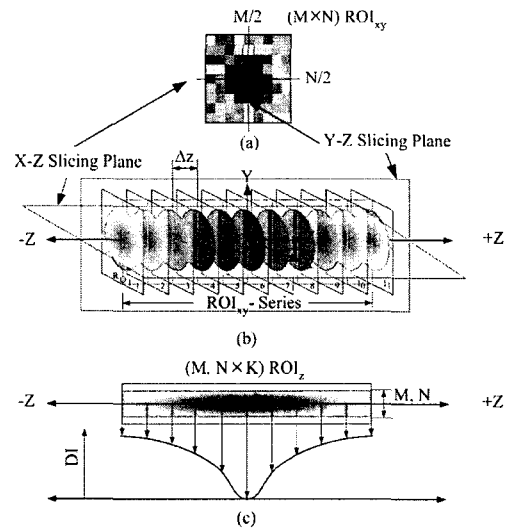


Fig. 16 Illustration of the Depth Intensity Method; (a) ROI_y image, (b) slicing planes for ROI_z , (c) Depth Intensity of ROI_z

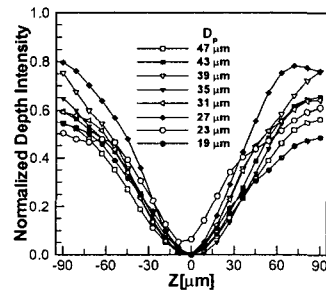


Fig. 17 Depth Intensity of small particles $< 50\mu\text{m}$

에서, XZ 또는 YZ 평면을 따라 해석영상군을 절단하면, $M \times K$ 또는 $N \times K$ 크기의 절단면 영상(ROI_z)을 얻을 수 있다. 최종적인 ROI_z 는, 스펙클 영향을 배제하기 위해 smooth 연산자를 이용한 필터링을 하고, 좀 더 높은 위치 분별력을 갖도록, 명암 대비를 향상시켰다(Fig. 16c).

광축을 따라 이 절단면 영상의 명암값을 나타내면, 초점에서 가장 낮은 값을 갖는 깊이 방향 명암 분포를 얻을 수 있다. 이것은 입자 영상이 초점에 가까워질수록, 중심부의 명암값도 낮은 값을 갖기 때문에 가능하다. ROI_z 의 $M/2$ 번째 행 벡터가 깊이밝기계수이며, $50\mu\text{m}$ 이하 입자들에 대하여 Fig. 17에 나타내었다. 모든 입자들이 초점에서 가장 낮은 값을 가지며, 이 결과는 이 방법이 매우 작은 입자들에 대한 적절한 초점 판단

기준이 될 수 있음을 나타낸다.

4.4 입자 크기별 초점 판단 변수

앞에서 제안한 세 초점 판단 변수의 특징은 다음과 같다. 상관계수법은 아주 작은 입자(<50 μ m)를 제외하고는 비교적 잘 적용되지만, 큰 입자일수록 초점 주변의 상관계수 분포만으로는 어느 정도 오차를 내포한다. 따라서 입자가 존재하는 광축 방향 전 영역에 걸친 상관계수 패턴에 대한, 가우스 함수 곡선 근사에 의해 초점을 판단해야 한다. 선명도계수법은 상관계수법에 비해 상대적으로 초점 주변의 좁은 광축 방향 입자 영상만으로도 초점 판단이 가능하며, 입자를 표현하는 화소수가 많은 경우나 고해상도의 입자 영상에서 비교적 정확한 판단값을 기대할 수 있다. 깊이밝기계수법은 입자 중심 화소의 명암값을 기초로 하기 때문에, 명암 값의 변화가 적은 큰 입자보다는, 크기가 작고 심도가 얇은 입자에 효과적이다. 따라서, 입자의 크기에 따른 적절한 초점 판단 변수를 아래와 같이 설정, 적용하였다.

- 큰 입자($D_d > 300\mu$ m): 상관계수법과 선명도계수법을 순차적인 적용
- 중간 입자(50μ m < $D_d < 300\mu$ m): 상관계수법
- 작은 입자($D_d < 50\mu$ m): 깊이밝기계수법

5. 광축 방향 입자의 위치 결정

4 절에서 소개한 세 초점 결정 방법 중 상관계수법과 선명도계수법의 성능을 비교하기 위해, $z_p = 322$ mm 위치에서 기록된 스크린 S2의 500 μ m 입자의 재생 영상에 대해, 상관계수법과 선명도계수법을 적용시켜 계산된 입자의 3차원 좌표를 Fig. 18a 와 18b에 나타내었다. 스크린 S2 위의 입자들은 평면 위에 존재하므로, 이상적으로 재생된 입자들의 광축 방향 위치는 모두 같아야 하지만, 측정 결과는 스크린 S2의 위치를 기준으로 조금씩 벗어나 있다. 측정 오차(E_z)는 기록시 스크린 상 입자의 실제 좌표(z_p)와 측정 좌표(z_p')의 차이이며, 다음과 같이 표현된다.

$$E_z = z_p - z_p' = \overline{z_p} \pm u_z \tag{7}$$

$$= z_p \pm t_{\nu,p} S_z = E_{bias} \pm E_{pre}.$$

측정 좌표값의 평균이 편향오차(bias error, E_{bias}),

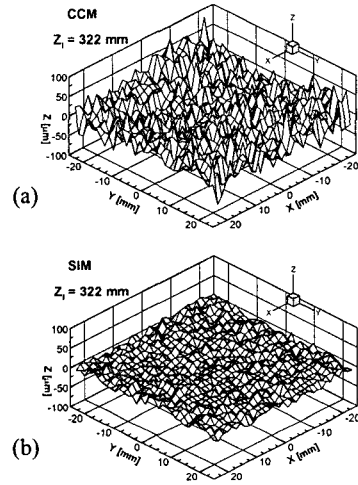


Fig. 18 Reconstructed position of particles on screen S2 at $z_p = 322$ mm; (a) CCM, (b) SIM

불확실도가 정밀오차(precision error, E_{pre})를 나타낸다. 불확실도의 $t_{\nu,p}$ 는 유한한 자료 집합에 사용되는 가중치로, 자료 개수(N)에 의해 결정되는 자유도($\nu=N-1$)와 신뢰 수준을 결정하는 확률($P\%$)로 결정되며, S_z 는 표준편차이다.

Fig. 18의 경우, 측정 좌표값의 평균은 거의 0이어서 편향오차는 0이며, 이는 재생 입자들의 광축 좌표를 근사하는 평면이 기록시 평면과 일치하는 것을 의미한다. 불확실도는 상관계수법이 $u_z = \pm 44.74\mu$ m, 선명도계수법이 $u_z = \pm 16.07\mu$ m이어서, 선명도계수법이 상관계수법에 비해 1/3 정도의 낮은 값을 보였다. 즉, 4.4 절에서 언급하였듯이, 비교적 큰 입자에 대해서, 두 방법 모두 입자의 초점 결정에 이용될 수 있으나, 상관계수법보다는 선명도계수법이 보다 좋은 결과를 나타낸다는 것을 확인할 수 있다.

하지만, 선명도계수법을 적용하기 위해서는, 대략적인 초점의 위치를 알고 있어야 하므로, 상관계수법에 의해 대략적인 초점을 결정한 후, 결정된 초점 주변의 좁은 폭의 입자 영상구간에 대해 선명도계수법을 적용하면, 보다 정확한 초점을 결정할 수 있다. Fig. 19는 스크린 S2의 재생 영상에 대해, 위와 같은 방법을 적용시킨 결과이다. 홀로그래피에서 가장 가까운 위치의 경우($z_p = 170$ mm), 근사면이 굴곡을 형성하는 반면에, 근사면을 기준으로 오차의 변화폭은 심하지 않다. 반면에,

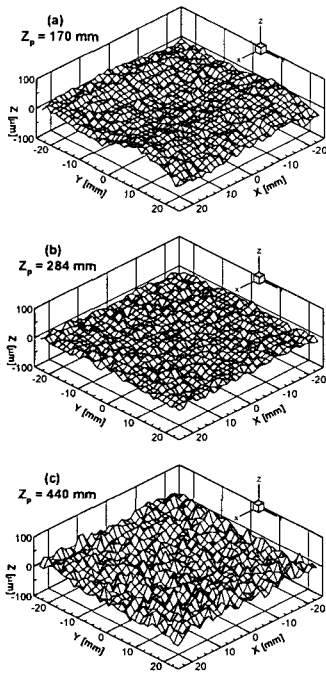


Fig. 19 Reconstructed position of particles by CCM + SIM

홀로그래프에서 가장 먼 위치의 경우($z_p = 440\text{mm}$), 근사면은 거의 평면에 가깝지만, 오차의 변화폭은 크다. 입자가 홀로그래프에서 가까운 경우는, 상대적으로 낮은 수차로 재생 영상의 선명도가 높기 때문에, 모든 위치에서 초점 계산 과정에서 발생하는 오차의 변화폭, 즉 소프트웨어적인 요인에 의해 발생하는 오차는 크지 않게 나타난다. 하지만, 좁은 홀로그래프 개구경(D_{eff})으로 인하여, 홀로그래프 전 영역에 걸친 균일한 조건의 완벽한 재생이 어려워져, 입자들의 근사면이 굴곡을 형성하며, 이는 하드웨어적인 오차 요인으로 간주할 수 있다. 반대로, 입자가 홀로그래프에서 먼 경우는, 수차로 인한 입자 경계의 선명도 저하에서 기인하는 초점 계산 과정의 소프트웨어적인 오차는 커지지만, 넓은 홀로그래프 구경에 의한 재생이 가능하여 균일한 재생 효과를 얻을 수 있어, 하드웨어적인 오차는 작다고 할 수 있다.

Fig. 20a는 스크린 S2의 $z_p = 322\text{mm}$ 인 경우, 측정된 광축 방향 좌표의 오차에 대한 히스토그램이며, Fig. 20b는 홀로그래프와 스크린의 거리 변화에 따른 광축 방향 좌표의 불확실도를 나타내고 있다. 입자 직경이 $500\mu\text{m}$ 인 점을 감안하면, 광축

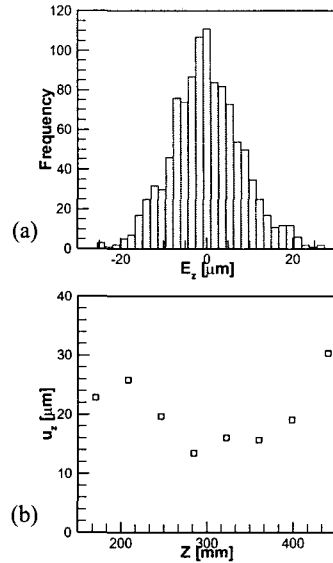


Fig. 20 Position errors of particles reconstructed by CCM + SIM; (a) error histogram at $z_p = 322\text{ mm}$, (b) uncertainties of position errors along the Z axis

방향 모든 경우에 대해서, 불확실도가 최소 $\pm 13\mu\text{m}$ 에서 최대 $\pm 30\mu\text{m}$ 이내로 아주 작음을 확인할 수 있다. 하지만, Fig. 19에서도 나타내었듯이, 입자가 홀로그래프에서 가까운 경우는, 완벽하지 못한 기록 시스템의 하드웨어적 측면에서 기인하는 오차가 크게 나타나고, 입자가 홀로그래프에서 먼 경우는, 재생 영상의 선명도가 떨어짐으로써 발생하는 소프트웨어적 측면의 오차가 크게 나타난다. 따라서 오차 요인이 가장 최소화될 수 있는 최적 입자 위치는, 두 오차 요인들이 서로 상쇄될 수 있는 홀로그래프와 산란판의 중간 영역임을 확인할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 입자 홀로그래피를 위한, 자동화된 입자 처리 시스템을 개발함에 있어, 입자의 광축 방향 위치 결정에 적용될 수 있는 초점 결정 변수에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위해, 산란광 홀로그래피에 의해 재생되는 영상의 스펙클 및 입자 이미지의 특성을, 광축 방향 위치와 홀로그래프 개구경을 변화시켜가며 분석하였다. 이를 바탕으로, 광축 방향 입자 위치를 결정하기

위한 초점 결정 방법인 상관계수법, 선명도계수법, 깊이밝기계수법을 개발하였다. 이 방법들은 입자의 크기에 따라 효율성이 다르므로, 300 μm 이상 입자는 상관계수법과 선명도계수법의 순차적 적용, 50~300 μm 입자는 상관계수법, 50 μm 이하의 깊이밝기계수법을 적용하였다. 위 방법들의 타당성을 검증하기 위하여, 평면 스크린에 존재하는 입자에 대한 적용 결과, 최대 $\pm 30\mu\text{m}$ 이내의 불확실도로 입자의 광축 방향 위치가 결정될 수 있음을 알 수 있었으며, 오차를 최소화할 수 있는 최적의 광축 방향 입자 위치가 존재함을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 두뇌한국 21 사업 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Haussmann, G. and Lauterborn, W., 1980, "Determination of Size and Position of Fast Moving Gas Bubbles in Liquids by Digital 3-D Image Processing of Hologram Reconstructions," *Applied Optics*, Vol. 19, No. 20, pp. 3529~3535.
- (2) Feldmann, O., Mayinger, F. and Gebhard, P., 1998, "Evaluation of Pulsed Laser Holograms of Flashing Sprays by Digital Image Processing and Holographic Particle Image Velocimetry," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 184, pp. 239~252.
- (3) Tao, B., Malkiel, E. and Katz, J., 1999, "Analysis Tools for Holographic Particle Image Velocimetry(HPIV)," *3rd International Workshop on Particle Image Velocimetry*, September, pp. 16~18.
- (4) Dallas, W. J., 1978, "Deterministic Diffusers for Holography," *Applied optics*, Vol. 12, No. 5, pp. 1179~1187.
- (5) Diamond, F. I., 1969, "Some Effects of Diffused Illumination in Holography," *J. Opt. Soc. Am.*, Vol. 59, No. 10, pp. 1339~1342.
- (6) Goodman, J. W., 1985, "Statistical Optics," *John Wiley & Sons*.
- (7) Jones, R. and Wykes, C., 1989, "Holographic and Speckle Interferometry," *Cambridge Univ. Press*.
- (8) Alexander, T. L., Harvey, J. E. and Weeks, A. R., 1994, "Average Speckle Size as a Function of Intensity Threshold Level : Comparison of Experimental Measurements with Theory," *Applied optics*, Vol. 33, No. 35, pp. 8240~8250.
- (9) Champagne, E. B., 1967, "Nonparaxial Imaging, Magnification, and Aberration Properties in Holography" *J. Opt. Soc. Am.*, Vol. 57, No. 1, pp. 51~55.