

분무 액적을 위한 디지털 입자 홀로그래피의 파라미터 해석

Yan Yang* · 강보선†

Parametric Analysis of Digital Particle Holography for Spray Droplets

Yan Yang and Bo-seon Kang

Key Words: Digital particle holography(디지털 입자 홀로그래피), Spray droplets(분무 액적), Image reconstruction (이미지 재생), Focal Plane(초점면)

Abstract

This study presents in-line digital particle holography and its application to spray droplets to measure the characteristics of spray droplets. Several important parameters at the time of hologram recording such as the object distance and the region of laser beam used were verified. The correlation coefficient method with important parameters such as the reconstruction interval and the correlation interval was used for determination of the focal planes of particles. The optimal values of all these parameters are obtained by either numerical simulation of holograms or experiments. Using these optimal parameters, double pulse digital spray holograms in a short time interval were recorded with the synchronization system for the time control. The spatial positions of droplets that are used for the evaluation of the three dimensional droplet velocities can be easily located, which proves the feasibility of the digital holographic technology for measurements of several important features of spray droplets.

1. 서 론

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

레이저를 이용하여 입자 특성을 측정하는 광계측 시스템으로는 LDV, PDDPA, PIV, 영상처리기법, 홀로그래피 기법 등이 있다. LDV는 대량의 샘플링이 가능하여

신뢰성이 높은 측정이 가능하고, 3차원 속도 벡터를 얻을 수 있지만, 점 측정이라는 단점이 있고, PIV는 간단한 측정 원리라면 측정이 가능하지만, 영상처리 기법과 같이 2차원 속도 측정에 국한된다. PDDPA는 속도 측정의 원리는 LDV와 같은 점 측정이지만, 입자의 크기와 형상을 측정하기 위해서 서로 다른 각도에서 입자에 의해 굴절된 빛의 위상 정보를 해석한다.

위와 같은 광계측 시스템이 가지는 단점들을 해결할 수 있는 이상적인 계측 방법으로, 기록 공간의 3차원 재현성이 뛰어나 3차원 공간에 대해서 3차원 속도 벡터를 얻을 수 있는 홀로그래피 기법이 있다. 계측 기법으로 홀로그래피가 이용되기 시작했던 1960년대부터, 많은 연구자들이 입자 해석을 목적으로 홀로그래피를 이용한 접근을 시도하였다. 초기에는 주로 입자의 크기, 가시화와 관련된 연구가 주를 이루었으나, 근래에는 입자의 크기뿐만 아니라 3차원 속도 측정을 위한 시스템에 대한 연구도 활발해졌다. 최근 연구가 활발해지고 있는 디지털 입자 홀로그래피(Digital Particle Holography)는 CCD

(2007년 11월 23일 접수 ~ 2007년 12월 6일 심사완료)

*전남대 기계공학과

†책임저자, 전남대 기계시스템공학부

E-mail : bskang@chonnam.ac.kr

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

카메라와 컴퓨터의 급격한 발전과 함께, 홀로그래프의 질도 개선되고, 이미지 재생을 위한 계산 속도도 빨라지면서, 입자의 크기, 모양, 3차원 속도와 같은 입자 특성을 측정할 수 있는 가장 적절한 광계측 시스템으로 주목받고 있다.

본 연구의 최종적인 목표는 디지털 입자 홀로그래피를 이용하여 분무 액적의 크기 및 3차원 속도를 측정할 수 있는 시스템을 개발하고자 하는 것이다. 본 논문에서는 그 기초적 연구로서, 디지털 입자 홀로그래피에 있어서 중요한 매개 변수들과 그 영향에 대해서 조사하였으며, 각 변수들의 최적화된 값들을 파악하였다. 또한, 최적화된 매개 변수들을 사용하여 실제 분무 액적에 적용하여 액적의 크기와 3차원 속도 측정을 수행함으로써, 디지털 입자 홀로그래피 시스템의 분무 특성 계측에의 적용 가능성을 확인하였다.

2. 기본 원리

2.1 디지털 홀로그래피의 원리

광학적 홀로그래피와 마찬가지로 디지털 홀로그래피도 홀로그래프를 기록한 후 재생하는 두 단계를 거치지만, 기록 매체로 필름 대신에 CCD 카메라를 사용하고, 기록된 홀로그래프를 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, 홀로그래프의 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 홀로그래프, $h(x, y)$ 가 된다. 이 홀로그래프를 기록 당시 사용한 기준광, $E_R(x, y)$ 으로 다시 비추게 되면 재생면에 재생

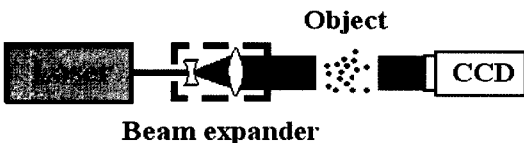


Fig. 1 Principle of in-line digital holography

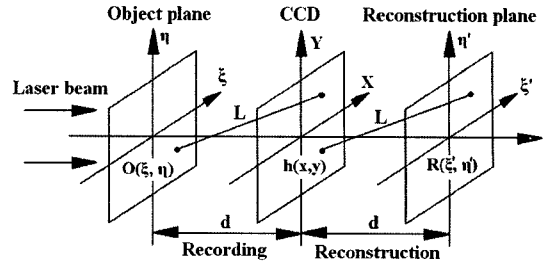


Fig. 2 Coordinate system

이미지, $R(\xi', \eta')$ 가 나타나게 되며, 이 회절은 Fresnel-Kirchhoff 적분으로 나타낼 수 있다^(2, 3).

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

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

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

d 는 두 인접한 평면 사이의 거리이다.

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

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

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

2.2 홀로그래프의 재생 방법

재생 이미지 $R(\xi', \eta')$ 은 Fresnel 근사 방법이나 Convolution 방법으로 구할 수 있으며, 각 방법의 수학적 표현은 다음과 같다⁽³⁾.

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

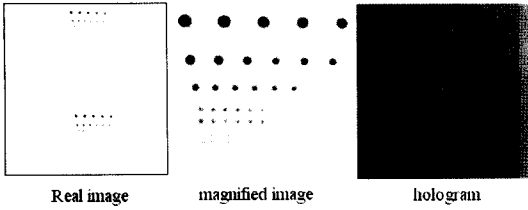


Fig. 3 A calibration target and its hologram

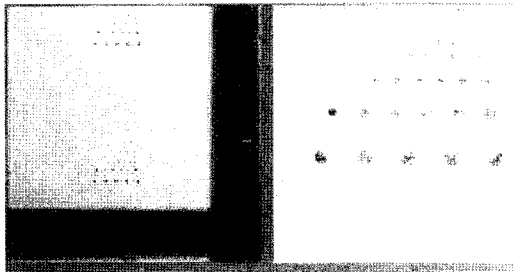
이미지의 해상도보다 더 우수하기 때문에 본 연구에서는 Convolution 재생 방법을 선택하였다.

3. 파라미터 해석

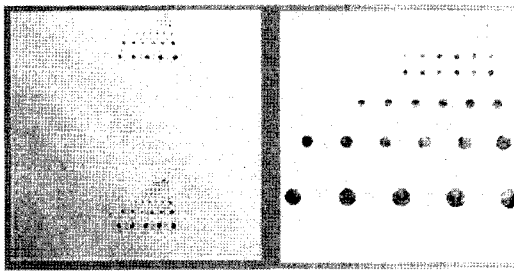
3.1 초점면 결정

3.1.1 상관계수법

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. 지금까지 제안된 방법 중에는 강도를 이용하는 방법⁽⁴⁾, Wavelet 변환에 의한 최대 크기를 이용하는 방법⁽⁵⁾ 등이 있으며, 본 연구에서는 본 연구그룹에서 제안한 상관계수법⁽⁶⁾을 사용하였다. 두 영상 F 와 G 에 대해 정의되는 상관계수는 식 (5)와 같이 정의되며, 두 영상간 유사성이 낮으면 0에 가까운 값, 유사성이 아주 높으면 1에 가까운 값을 갖는다.



(a) Fresnel method



(b) convolution method

Fig. 4 Comparison of two reconstruction methods

$$CC = \left| \frac{\sum_{m,n} (F_{mn} - \bar{F})(G_{mn} - \bar{G})}{\sqrt{\left[\sum_{m,n} (F_{mn} - \bar{F})^2 \right] \left[\sum_{m,n} (G_{mn} - \bar{G})^2 \right]}} \right| \quad (6)$$

여기서 m, n 은 픽셀의 색인, \bar{F} 와 \bar{G} 는 각 영상의 평균 명암값을 나타낸다. Fig. 5는 상관계수를 이용한 광축 방향 위치 결정의 개략도이다. 입자이미지는 재생간격 Δz 로 층층이 재생되며, 광축상의 임의의 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

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

여기서 F 는 푸리에 변환, F^{-1} 은 역푸리에 변환이다.

두 재생 방법을 비교하기 위하여 여러 직경의 점들이 인쇄된 보정판을 홀로그래프로 기록하고, 재생하여 재생 이미지의 해상도를 비교하였다. Fig. 3은 보정판과 기록된 홀로그래프, Fig. 4는 두 재생 방법을 이용하여 재생된 이미지를 보여주고 있다. Convolution 방법에 의해 재생된 이미지의 해상도가 Fresnel 방법에 의해 재생된

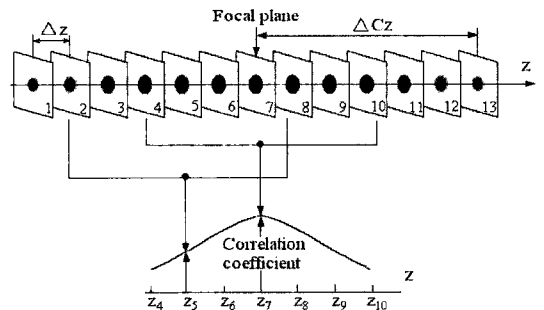


Fig. 5 Correlation coefficient method

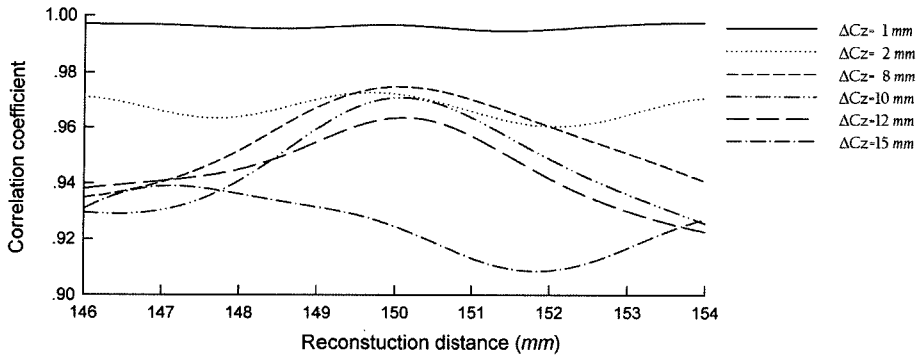


Fig. 6 Effect of correlation interval

상관계수가 최대가 되어야 한다. 따라서, 입자의 초점면은 상관계수 곡선의 최대점으로 결정된다.

3.1.2 상관간격

상관계수법의 최적 상관간격을 결정하기 위하여 홀로그램의 수치모사 방법을 이용하였다. 이미지 처리의 효율성과 정확도를 고려하여, 이미지 재생간격 Δz 는 10 μm 로 하였다. Fig. 6은 입자 직경 $D = 75 \mu\text{m}$ 인 입자가 홀로그램 평면으로부터 거리 $d = 150 \text{ mm}$ 떨어져 있을 때, 상관간격이 상관계수에 미치는 영향을 보여주고 있다. 상관간격이 너무 크거나 작으면 초점면을 정확히 결정할 수 없기 때문에, 최적 상관간격, $\Delta Cz = 10 \text{ mm}$ 로 결정하였으며, 이 때 상관계수 곡선은 대칭적이며 최고점에 해당되는 초점면은 가정한 입자의 거리와 정확히 일치하였다.

3.2 물체의 위치

물체와 CCD 센서간 최소 물체 거리는 Fresnel 회절 조건에 의해 구해진다^(2, 3).

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{1[(\xi-x)^2 + (\eta-y)^2]_{max}}{\lambda}} \quad (7)$$

본 연구에서 사용한 CCD 카메라의 픽셀 크기는 $\Delta x = \Delta y = 7.4 \mu\text{m}$, 레이저 파장 $\lambda = 0.532 \mu\text{m}$, 픽셀 개수 $N = 2,048$ 을 대입하면 최소 거리, $d = 173.25 \text{ mm}$ 를 구할 수 있다.

물체의 최대 거리를 결정하기 위하여, 입자의 크기와 카메라 센서로부터의 거리에 따른 상관계수법의 오차를 Table 1에 나타내었다. 상관계수법의 오차는 상관계수법으로 예측된 초점면과 실제 거리의 차이로 정의된다. 입자 위치가 240 mm 이내인 경우는 오차가 그리 크지 않

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

Size, $D(\text{m})$	Object distance, d (mm)						
	180	200	210	230	240	300	400
16	0	0	0	0	0	-20	10
100	0	0	-10	15	10	-20	30
300	0	0	0	-20	15	-30	30
500	0	5	-10	20	20	-30	25

지만, 그 이상인 경우 오차가 매우 커짐을 알 수 있다. 따라서, 최적 입자 위치는 최소 180 mm에서 최대 240 mm 사이로 결정하였다.

3.3 잡음 제거

실제 기록되는 홀로그램은 실험 조건과 광학 부품에 의해 많은 잡음을 포함하고 있기 때문에 이를 효과적으로 제거할 수 있는 적절한 이미지처리 방법이 필요하다. 이러한 목적으로 inverse 필터⁽⁷⁾, subtraction 방법⁽⁸⁾, Gaussian high pass and spectral 필터⁽⁹⁾ 등이 사용되고 있으며, 본 연구에서는 이러한 필터들을 검증해 본 결과 가장 성능이 좋은 Wiener 필터⁽¹⁰⁾를 사용하였다. 이 필

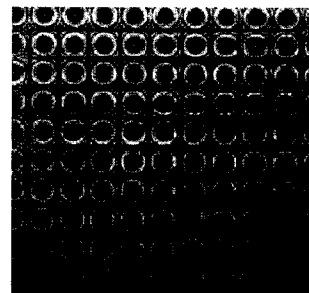


Fig. 7 Dot array hologram and ROIs of 81 dots

Table 2 Effect of Wiener filter on errors of focal plane determination

Object distance		Mean of errors
155.799 mm	without filtering	10.790 μm
	with filtering	4.235 μm
185.234 mm	without filtering	23.074 μm
	with filtering	17.103 μm

터의 효과를 검증하기 위하여 500 μm 점이 가로, 세로 방향으로 33 개씩 인쇄된 보정판(48.5×48.5 mm²)을 사용하였으며 Fig. 7은 이 보정판의 홀로그램을 보여주고 있다. 점 하나를 포함하는 한 해석영역(Region of Interest)은 2.25×2.25 mm², 210×210 픽셀이며 점 면적은 전체 면적의 8.75%를 차지한다. Table 2는 Wiener 필터의 적용 여부에 따른 초점면 결정 오차를 보여 주고 있으며, 필터의 적용으로 오차를 크게 줄일 수 있음을 확인할 수 있다.

3.4 사용 레이저 빔의 위치

본 연구에서는 레이저에서 나온 빔이 빔확장기에 의해 직경 10 cm로 커진 후 CCD 카메라 센서(15×15 mm²)에 도달하기 때문에 확장된 빔의 일부 영역만을 사용하게 된다. 확장된 빔은 위치에 따라 균일한 강도 분포를 갖고 있지 않기 때문에, 어느 영역을 사용하느냐에 따라서 실험 결과에 영향을 미친다. 따라서, 사용 레이저 빔의 위치가 입자 초점면 결정 오차에 미치는 영향을 500 μm 점 보정판을 사용하여 조사하였다. 레이저 빔의 중앙부를 사용한 경우는 평균 오차가 8.194 μm , 빔의 옆부분을 사용한 경우는 8.96 μm 으로 나타나, 레이저 빔의 중앙부를 사용하는 경우가 오차가 더 적음을 확인하였다.

4. 분무 실험

4.1 분무 홀로그램의 기록

분무 홀로그램을 기록하기 위한 실험장치를 Fig. 8에 나타내었으며, 레이저와 CCD 카메라의 동기화를 위한 펄스 제어 시스템은 Fig. 9에 나타내었다. CCD 카메라의 첫 번째, 두 번째 노출 시간 중에 Q-스위칭에 의해서 이중 레이저 펄스가 생성되어 분무 액적들의 두 순간에서의 홀로그램을 기록하게 된다. 노즐과 CCD 카메라의

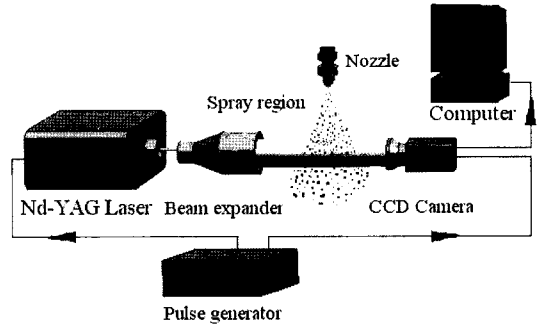


Fig. 8 Experimental setup for recording spray hologram

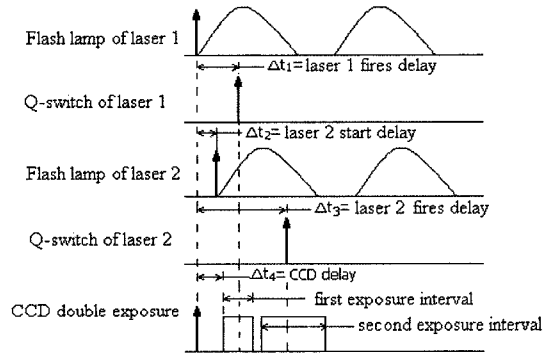
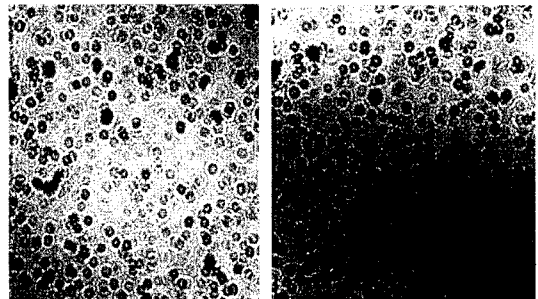


Fig. 9 Control diagram of synchronization system



(a) at first exposure (b) at second exposure

Fig. 10 Spray holograms

간격은 180 mm, 두 펄스 간격은 250 μs , 노즐 분사 압력은 200 kPa이며, 전형적인 분무 홀로그램은 Fig. 10에 나타내었다.

4.2 분무 홀로그램의 재생

임의의 광축 위치에서 재생된 액적 이미지는 배경과의 명암 차이가 크지 않으며 스펙클을 비롯한 잡음이 많기 때문에 적절한 이진화기준을 사용하여 이진화할 필요가 있다. 재생 이미지는 모든 영역에서 균일하지 않

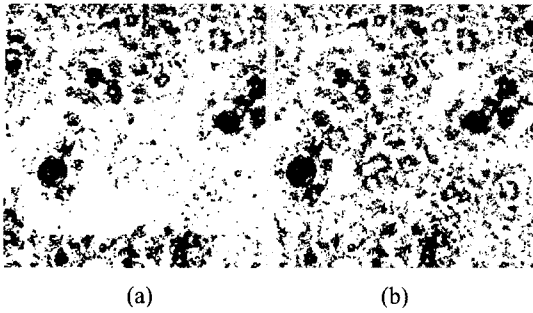


Fig. 11 Binary images; (a) using different thresholds, (b) using one threshold

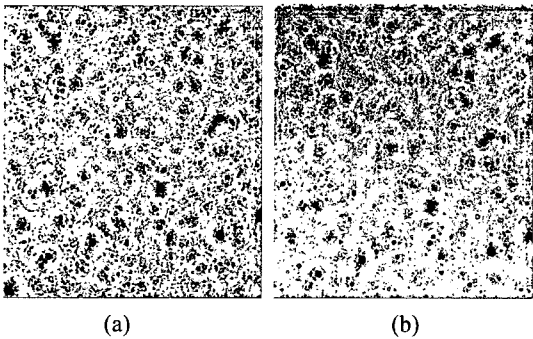


Fig. 12 Binary images; (a) at first exposure, (b) at second exposure

기 때문에 전체 영역에서 단일 이진화기준을 사용하여 이진화해 버리면 중요한 정보가 상실될 가능성이 높다. 따라서, 본 연구에서는 전체 영역을 작은 해석 영역으로 구분한 뒤 영역마다 다른 이진화기준을 적용하였다. Fig. 11은 단일 이진화기준과 서로 다른 이진

화기준을 적용하여 이진화된 이미지를 보여주고 있으며, 단일 이진화기준보다는 영역마다 다른 이진화기준을 적용하는 것이 효과적임을 보여 주고 있다. Fig. 12는 분무 액적들의 최종적인 이진화 이미지이다.

4.3 입자추적알고리즘

각 펄스의 재생된 액적 이미지에서 액적의 x, y 좌표는 쉽게 결정되며, 광축인 z 좌표는 상관계수법을 사용하여 구함으로써 각 펄스에서의 액적의 3차원 좌표가 구해진다. 다음 단계는 입자추적알고리즘(particel tracking algorithm)을 적용하여 첫 번째와 두 번째 펄스에서의 동일 액적을 찾는 것이며, 본 연구에서는 Baek과 Lee의 일치 확률(matching probability) 방법⁽¹¹⁾을 이용하였다.

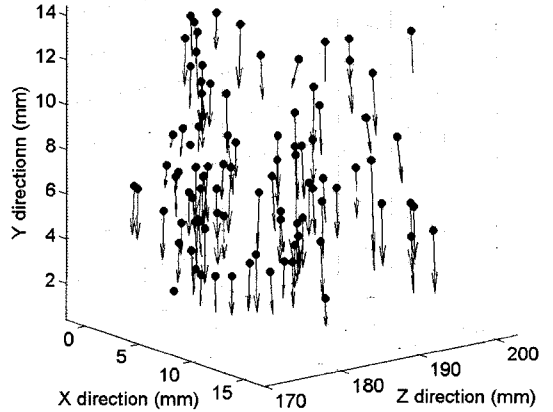


Fig. 13 Spatial velocity vectors of spray droplets

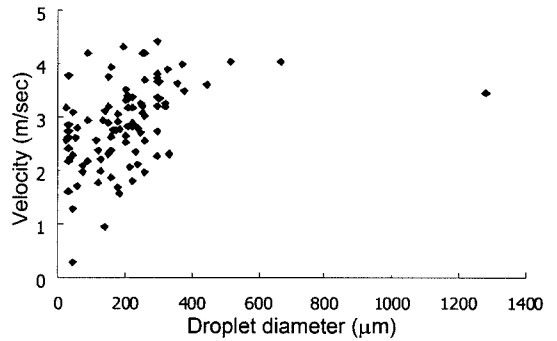


Fig. 14 Distribution of droplet velocities and sizes

4.4 분무 액적의 3차원 속도와 크기

동일 액적의 두 펄스에서의 3차원 좌표와 펄스간 시간 간격을 이용하여 액적의 3차원 속도가 계산되며, 구해진 액적의 속도 벡터를 Fig. 13에 나타내었다. 또한, 상관계수법으로 결정된 초점면에서의 액적 픽셀 수로 액적의 면적과 직경을 구할 수 있으며, 이렇게 구해진 액적 속도와 크기를 Fig. 14에 나타내었다.

5. 결 론

본 논문에서는 디지털 입자 홀로그래피에 있어서 중요한 매개 변수들과 그 영향에 대해서 홀로그래피의 수치 모사 방법이나 실험을 통하여 조사하였으며, 각 변수들의 최적화된 값들을 파악하였다. 초점면 결정을 위하여 상관계수법을 적용하였고 최적 상관간격은 10 mm로 파악되었다. 최적 입자 위치는 180~240 mm이며, Wiener 필

터 사용으로 초점면 결정 오차를 크게 감소시킬 수 있었고 레이저 빔의 중앙을 이용하는 것이 오차가 적었다. 또한, 최적화된 매개 변수들을 사용하여 실제 분무 액적에 적용하여 액적의 크기와 3차원 속도 측정을 수행함으로써, 디지털 입자 홀로그래피 시스템의 분무 특성 계측에의 적용 가능성을 확인하였다.

참고문헌

- (1) U. Schnars and W. Jueptner, "Digital recording and numerical reconstruction of holograms," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 13, 2002, pp.85~101.
- (2) J. W. Goodman, "Introduction to Fourier Optics," McGraw-Hill, 2004, pp.60~61.
- (3) U. Schnars and W. Jueptner, "Digital Holography," Springer, 2005, pp.41~53.
- (4) F. Dubois, C. Schockaert, N. Callens, and C. Yourasowsky, "Focus plane detection criteria in digital holography microscopy by amplitude analysis," *Opt. Express*, Vol. 14, 2006, pp.5895~5980.
- (5) C. B. Lefebvre, S. Coëtmellec, D. Lebrun and C. Özkul, "Application of wavelet transform to hologram analysis: three-dimensional location of particles," *Opt. Laser Eng.*, Vol. 33, 2000, pp.409~421.
- (6) Y. J. Choo and B. S. Kang, "The characteristics of the particle position along an optical axis in particle holography," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 17, 2006, pp.761~770.
- (7) L. Denis, C. Fournier, T. Fournel, and C. Ducottet, "Twin-image noise reduction by phase retrieval in inline digital holography," *Proc. SPIE*, Vol. 5914, 2005, J1~J14.
- (8) V. R. Singh, A. K. Asundi, "Amplitude contrast image enhancement in digital holography for particles analysis," *Proc. SPIE*, Vol. 5878, 2005, pp.17.1~17.8.
- (9) S. Kim and S. J. Lee, "Effect of particle concentration on digital holographic PTV measurement," *Journal of Korea society of mechanical engineering*, Vol. 30, 2006, pp.929~934.
- (10) A. K. Jain, "Fundamentals of digital image processing," Prentice-Hall, 1989, pp.276~284.
- (11) S. J. Baek and S. J. Lee, "A new two-frame particle tracking algorithm using match probability," *Experiments in Fluids*, Vol. 22, 1996, pp.23~32.