디지털 홀로그래피 입자 속도 계측시스템의 검증

노현석* · 강보선†

Validation of Digital Holographic Particle Velocity Measurement System

H. S. Roh and B. S. Kang

Key Words: Digital holographic particle velocity measurement system(디지털 홀로그래피 입자 속도 계측시스템), Spray droplets(분무 액적), Rotating disk(회전 원판), Glass beads(유리구)

Abstract

Digital holographic particle velocity measurement system can be a promising optical tool for the measurements of three dimensional particle velocities. In this research, validation experiments for the digital holographic particle velocity measurement system were conducted with measuring the velocities of glass beads on a rotating disk. Uncertainty analysis was performed to identify the sources of all relevant errors and to evaluate their magnitudes. The measurement results of particle velocities obtained with digital holographic method are compared reasonably well with the known values within acceptable range of errors. Moreover, digital holographic method showed better performance compared with that of optical holographic system.

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. 디지털 홀로그래피는 홀로그램의 화학적 처리가 필요하지 않고 시스템을 단순화시킬 수 있으며, 실시간분석이 가능하다는 여러 가지 장점으로 인하여 여러 분야에서 광범위하게 응용되고 있다⁽¹⁾.

레이저를 이용한 입자 특성을 계측하는 광계측 시스템으로는 LDV(Laser Doppler Velocimetry), PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer), PIV(Particle Image Velocimetry), 영상처리기법, 홀로그래피 기법 등이 있다. 1980

년대 초부터 가장 보편적으로 이용되어 온 LDV는 대량의 샘플링이 가능하여 신뢰성이 높은 측정이 가능하고, 3차원 속도 벡터를 얻을 수 있지만, 점 측정이라는 단점이 있다. 1980년대 후반부터 등장한 PIV는 간단한 측정 원리로 먼 측정이 가능하지만, 영상처리기법과 같이 2차원 속도 측정에 국한된다. 위상 도플러 기법을 이용하는 PDPA는 입자의 크기와 형상을 측정하기 위해서 서로 다른 각도에서 입자에 의해 굴절된 빛의 위상 정보를 해석한다. 하지만, LDV와 같은 점 측정이며, 입자가 희박하게 분포되어 있고 거의 구형에 가까운 경우에는 신뢰성이 있는 측정 결과를 얻을 수 있지만 입자가 과밀하게 분포하면서 크기도 크고 모양도 매우 불규칙적인 노즐의 출구와 가까운 영역에서는 측정의 정확성이 떨어지는 문제점이 있다.

위와 같은 광계측시스템이 가지는 단점들을 해결할 수 있는 이상적인 계측방법으로, 기록 공간의 3차원 재현성이 뛰어나 전체 계측 공간에 대해서 3차원 속도 벡터를 얻을 수 있는 홀로그래피 기법이 있다. 계측기법으로 홀로그래피가 이용되기 시작했던 1960년대부터, 많

(2013년 6월 26일 접수 ~ 2013년 9월 7일 심사완료, 2013년 9월 11일 게재확정)

*삼성중공업

†책임저자, 전남대 기계공학부

E-mail : bskang@jnu.ac.kr

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

은 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⁽²⁻⁴⁾. 최근 연구가 활발해지고 있는 디지털 입자 홀로그래피(Digital Particle Holography)는 CCD 카메라와 컴퓨터의 급격한 발전과 함께, 홀로그램의 질도 개선되고, 이미지 재생을 위한 계산 속도도 빨라지면서, 입자의 크기, 모양, 3차원 속도와 같은 입자 특성을 계측할 수 있는 가장 적절한 광계측시스템으로 주목받고 있다^(5,6).

본 연구에서는 디지털 홀로그래피 입자 속도 계측시스템을 구축하고 계측의 정확성을 검증하였다. 디지털 홀로그래피 입자 속도 계측시스템은 레이저 동기화 시스템을 포함한 디지털 홀로그래피 방법을 이용하여 입자 이미지 홀로그램을 기록하였다. 홀로그램의 재생 방법은 convolution 재생 방법이며, 재생시 상관계수법을 이용한 초점면 결정, Wiener 필터를 사용한 잡음제거, 두 개의 이진화 값 및 분할 이진화 방법을 사용한 입자의 이미지 분석을 통하여, 입자의 크기, 이동 거리 및 속도를 측정할 수 있는 시스템을 구축하였다. 구축된 시스템의 정확성을 검증하기 위하여 회전원판 위에 놓인 유리구의 속도를 측정하여 실제 유리구의 속도와 비교, 검증하는 실험을 수행하였다. 뿐만 아니라, 입자의 속도 측정 과정에 결부된 오차 요인들에 대한 불확실도 분석을 수행하였다.

2. 기본 원리

2.1 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)

Fig. 1 Principle of in-line digital holography

Fig. 2 Coordinate system

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 비추면 재생면에 재생 이미지, $R(\xi', \eta')$ 가 나타나며, 이 회절은 Fresnel-Kirchhoff 적분으로 나타낼 수 있다^(7,8).

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

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

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

d 는 두 인접한 평면 사이의 거리이다.

2.2 홀로그램의 재생방법

재생이미지 $R(\xi', \eta')$ 은 Fresnel 근사 방법이나 Convolution 방법으로 구할 수 있다⁽⁸⁾. 두 재생방법을 비교한 이전 연구⁽⁹⁾에서 Convolution 방법에 의해 재생된 이미지의 해상도가 Fresnel 근사 방법보다 더 우수했기 때문에 본 연구에서는 Convolution 재생방법을 선택하였다. Convolution 재생방법의 수학적 표현은 다음과 같다.

$$R(\xi', \eta') = F^{-1} \left\{ F[h(x, y)] \cdot F \left[\frac{\exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{d^2 + (x - \xi')^2 + (y - \eta')^2}\right]}{\sqrt{d^2 + (x - \xi')^2 + (y - \eta')^2}} \right] \right\} \quad (3)$$

여기서 F , F^{-1} 은 푸리에 및 역푸리에 변환이다.

3. 디지털 입자 홀로그래피 시스템

3.1 홀로그래피 기록 시스템

디지털 홀로그래피를 기록하기 위한 시스템을 Fig. 3에 나타내었으며, 장비의 구체적인 사양은 Table 1에 나타내었다. 레이저와 CCD 카메라의 동기화를 위한 펄스 제어 시스템은 Fig. 4에 나타내었다. CCD 카메라의 첫 번째, 두 번째 노출 시간 중에 Q-스위칭에 의해서 이중 레이저 펄스가 생성되어 입자의 두 순간에서의 홀로그래피를 기록하게 된다.

3.2 초점면의 결정

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⁽¹⁰⁾, Wavelet 변환에 의한 최대 크기를 이용하는 방법⁽¹¹⁾ 등이 있으며, 본 연구에서는 본 연구그룹에서 제안한 상관 계수법⁽¹²⁾을 사용하였다. 두 영상 F 와 G 에 대해 정의되

는 상관계수(CC, Correlation Coefficient)는 식 (4)와 같이 정의되며, 두 영상간 유사성이 낮으면 0에 가까운 값, 유사성이 아주 높으면 1에 가까운 값을 갖는다.

$$CC = \frac{\sum_m \sum_n (F_{mn} - \bar{F})(G_{mn} - \bar{G})}{\left[\sum_m \sum_n (F_{mn} - \bar{F})^2 \right] \left[\sum_m \sum_n (G_{mn} - \bar{G})^2 \right]} \quad (4)$$

여기서 m, n 는 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

Fig. 4 Control diagram of synchronization system

Fig. 3 Digital particle holographic system

Fig. 5 Correlation coefficient method

Table 1 Optical system components

Component	Company	Model	Specifications
Nd-YAG laser	Quantel	Brillant B	10 Hz, $\lambda=532$ nm
CCD camera	Kodak	ES4020	size 7.4 μ m, 2,048 $\times$ 2,048
Pulse generator	Berkeley	555	4 channels
Translation system	Physik instrumente	M-531	Precision: 33 nm

평면의 앞뒤 일정거리(상관간격: ΔC_z)만큼 떨어져 있는 두 위치에서의 입자영상들 간의 상관계수로 정의된다. 입자의 초점면에서는 상관간격만큼 떨어진 두 이미지가 최대한 유사해야 하기 때문에 상관계수가 최대가 되어야 한다. 따라서, 입자의 초점면은 상관계수 곡선의 최대점으로 결정된다.

3.3 노이즈 제거

실제 기록되는 홀로그램은 실험 조건과 광학 부품에 의해 많은 노이즈를 포함하고 있기 때문에 이를 효과적으로 제거할 수 있는 적절한 이미지처리 방법이 필요하다. 이러한 목적으로 inverse 필터⁽¹³⁾, subtraction 방법⁽¹⁴⁾, Gaussian high pass and spectral 필터⁽¹⁵⁾ 등이 사용되고 있으며, 본 연구에서는 이러한 필터들을 검증해 본 결과 가장 성능이 좋은 Wiener 필터⁽¹⁶⁾를 사용하였다.

푸리에 영역에서 Wiener 필터는 식 (5)로 표현된다.

$$G(\omega_1, \omega_2) = \frac{H^*(\omega_1, \omega_2)S_{uu}(\omega_1, \omega_2)}{|H(\omega_1, \omega_2)|^2 S_{uu}(\omega_1, \omega_2) + S_{\eta\eta}(\omega_1, \omega_2)} \quad (5)$$

$S_{uu}(\omega_1, \omega_2)$ 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 노이즈 smoothing의 두 부분을 가지고 있음을 알 수 있다. 필터 적용의 효과는 Yang과 Kang⁽¹⁷⁾에 나타나 있다.

3.4 이진화

입자의 광축 위치에서 재생된 액적 이미지는 배경과의 명암 차이가 크지 않으며 스펙클을 비롯한 잡음이 많기 때문에 적절한 이진화기준을 사용하여 이진화할 필요가 있다. 본 연구에서는 두 단계에 의해 계산된 이진화기준을 적용하였다. 첫 단계의 이진화기준, I_{th1} 은

$$I_{th1} = I_{1min} + \bar{I}_1 \quad (6)$$

으로 계산되며, I_{1min} 과 $\bar{I}_1$ 은 재생이미지의 최저, 평균 값이다. 두번째 단계의 이진화기준, I_{th2} 는 첫 단계의 이진화기준, I_{th1} 보다 낮은 값만을 대상으로 최저값, I_{2min} 과 평균, $\bar{I}_2$ 를 구하여, 식 (7)에 의해 구해지며, 이를 사용하여 이미지를 이진화한다.

$$I_{th2} = I_{2min} + \bar{I}_2 \quad (7)$$

재생 이미지는 모든 영역에서 균일하지 않기 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 적용하였으며, 계산 시간을 고려하여 재생이미지를 16 개로 분할하여 서로 다른 이진화기준을 적용하였다.

3.5 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(particle tracking algorithm)을 적용하여 첫 번째와 두 번째 펄스에서의 동일 액적을 찾는 것이며, 본 연구에서는 Back과 Lee의 일치 확률(matching probability) 방법⁽¹⁸⁾을 이용하였다.

3.6 홀로그램 이미지처리

디지털 홀로그램의 기록 후 처리 흐름을 Fig. 6에 나타내었으며, 구체적인 처리 과정은 다음과 같다.

- ① 필요한 파라미터(레이저 파장, 픽셀 크기, 픽셀 수, 재생거리)의 값과 홀로그램 입력
- ② Wiener 필터 이용 홀로그램의 노이즈 제거
- ③ 홀로그램의 재생 및 노이즈 제거

Fig. 6 Flow chart of hologram processing

- ④ 이미지의 이진화
- ⑤ 상관계수법을 이용한 입자 초점면 결정 및 입자의 3차원 좌표 추출
- ⑥ 입자추적알고리즘을 이용한 동일 입자 결정
- ⑦ 입자의 3차원 속도, 크기 결정

4. 검증 실험

4.1 회전원판 실험장치

디지털 홀로그래피를 이용한 입자 속도 계측시스템이 구성되면, 속도 측정 결과에 대한 검증 단계가 필요하다. 이를 위해서는 입자의 속도를 미리 알 수 있고, 변화시키기 용이한 실험장치가 필요하다. 이러한 목적으로 본 연구에서 사용한 회전원판 실험장치를 Fig. 7에 나타내었다. 실험장치는 구동 회전부와 회전원판으로 구성되어 있으며, 직류 전력조절기를 이용하여 회전수를 최대 1,800 rpm까지 조절할 수 있으며, 회전원판 회전수는 타코미터를 사용하여 측정하였다. 유리구는 회전원판 위에 가는 철판을 고정시키고, 그 위에 설치하였다. 회전원판의 회전수는 756, 1260, 1524 rpm이며, 유리구의 지름은 0.8 mm, 회전원판 중심에서 유리구까지의 반지름 $R = 105$ mm이다.

4.2 입자 홀로그래프의 기록

Fig. 8은 756 rpm에서 첫 번째와 두 번째 펄스에서 기

(a) schematic diagram

(b) photographs

Fig. 7 Rotating disk system

(a) at the first pulse

(b) at the second pulse

Fig. 8 Typical holograms(left) and reconstructed images (right) at 756 rpm

록된 유리구의 홀로그램과 초점면에서 재생한 이미지를 보여주고 있다. 재생된 유리구의 이미지에서 3차원 좌표가 구해지고, 이동거리를 펄스 간격으로 나누면 입자의 속도가 구해진다.

4.3 속도 측정의 불확실도 분석

유리구의 실제 속도와 디지털 홀로그래피를 이용한 측정 속도의 오차분석은 다음과 같다. 유리구의 실제 속도 V_a 는

$$V_a = R \times \omega \quad (8)$$

이므로, 실제 입자 속도의 불확실도 $u_{V,a}$ 는

$$u_{V,a} = \sqrt{\left(\frac{\partial V_a}{\partial R} u_R\right)^2 + \left(\frac{\partial V_a}{\partial \omega} u_\omega\right)^2} = \sqrt{(\omega u_R)^2 + (R u_\omega)^2} \quad (9)$$

로 계산된다. u_R 은 버니어캘리퍼스의 반지름 측정 시 불확실도이며, $u_R = \pm 0.025$ mm가 된다. 원판 회전 속도 측정의 불확실도 u_ω 는 측정 계기에 의한 0차 불확실도 (± 0.5 rpm)와 다중 측정에 의한 정밀오차로 구성된다.

$$u_\omega = \sqrt{(u_0)^2 + (t_{v,p} S_x)^2} \quad (10)$$

디지털 홀로그래피를 이용해 측정되는 유리구의 속도

V 는

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_z^2} \quad (11)$$

이므로, 측정되는 입자 속도의 불확실도 $u_{V,m}$ 은

$$u_{V,m} = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial V_x} u_{V_x}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial V_z} u_{V_z}\right)^2} \quad (12)$$

이다.

x, z 방향 속도성분은

$$V_i = \frac{D_i}{t} \quad i = x \text{ or } z \quad (13)$$

에 의해 결정되므로 x, z 방향 속도의 불확실도는

$$u_{V_i} = \sqrt{\left(\frac{\partial V_i}{\partial D_i} u_{D_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial V_i}{\partial t} u_t\right)^2} \quad (14)$$

이며, 레이저 두 펄스간 시간간격의 불확실도 u_t 는 0으로 하였다. x 축 거리 측정의 불확실도 u_{D_x} 는 각 이미지에서 ± 1 화소의 오차로 가정하여, 총 ± 2 화소 $\times 7.4 \mu\text{m}$ /화소로 계산된다. z 축 이동거리 측정의 불확실도 u_{D_z} 는 초점면 결정시 재생 간격의 절반인 $\pm \Delta z/2$ 로 가정하였다.

4.4 입자 속도 측정 결과

위 방법에 의하여 회전속도에 의한 유리구의 실제 속도, 디지털 홀로그래피를 이용하여 측정된 유리구의 x, z 방향 속도, 그 크기의 불확실도, 실제 속도에 대한 상대오차를 Table 2와 Fig. 9에 나타내었다. 실제 유리구의 속도에 비해서 디지털 홀로그래피를 이용해서 측정한 속도값의 상대오차는 최대 2.5% 이내로 나타났으며, 저

Fig. 9 Comparison of actual glass bead velocities with measured values

속보다는 고속인 경우 동일 펄스 간격에서 유리구의 이동거리가 커짐으로 인해 오차가 크게 나타나고 있다.

또한 기존 광학 홀로그래피의 측정값⁽¹⁹⁾을 디지털 홀로그래피 측정값과 비교하기 위해 Table 2에 나타내었다. 저속에서는 디지털 홀로그래피를 이용한 756 rpm 일 때와 광학 홀로그래피를 이용한 813 rpm 일 때의 값을 비교했을 시, 불확실도는 각각 0.066 m/s와 0.207 m/s로 큰 차이를 보였고 상대오차 역시 각각 0.68%, 2.56%로 디지털 홀로그래피가 상대오차가 작음을 알 수 있다. 또한 저속보다는 고속에서 디지털 홀로그래피가 광학 홀로그래피보다 상대적으로 불확실도 및 상대오차가 작음을 알 수 있다.

Table 2 Comparison of actual glass bead velocities with measured values

Actual velocity (m/s)		Measured velocity (m/s)			Relative error (%)
RPM	V_a	V_x	V_z	V_m	
Present Results (Digital Holography)					
756±0.94	8.31±0.012	1.97±0.049	8.13±0.067	8.37±0.066	0.68
1,260±0.94	13.85±0.012	1.88±0.049	13.87±0.067	13.99±0.066	0.10
1,524±0.94	16.76±0.011	2.62±0.049	16.13±0.067	16.34±0.066	2.47
Previous Results (Optical Holography) ⁽¹⁹⁾					
813±2.05	10.64±0.027	5.85±0.165	8.55±0.224	10.37±0.207	2.56
1,284±1.37	16.80±0.020	8.32±0.280	13.72±0.285	16.05±0.284	4.49

5. 결 론

본 연구에서는 3차원 입자 속도 계측을 위하여 디지털 홀로그래피 방법을 이용하여 입자 이미지를 기록하고, 재생한 입자의 이미지 분석을 통하여 입자의 크기, 이동거리 및 속도를 측정할 수 있는 디지털 홀로그래피 입자 속도 계측시스템을 구축하였다.

구축된 시스템의 정확성을 검증하기 위하여 회전원판 위에 놓인 유리구의 속도를 측정하여 실제 유리구의 속도와 비교, 검증하는 실험을 수행하였다. 입자의 속도는 원판 회전수에 의해 예측된 입자의 속도값과 상대 오차 2.5% 이내였으며, 디지털 홀로그래피 방법이 기존 광학적 홀로그래피 방법에 의한 측정값보다 상대오차 및 불확실도가 감소하였음을 확인하였다. 이를 통해 3차원 입자 속도 계측에 디지털 홀로그래피가 매우 정확하고 효과적임을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) U. Schnars and W. Jueptner, "Digital recording and numerical reconstruction of holograms", *Meas. Sci. Tech.*, Vol. 13, 2002, pp. 85-101.
- (2) C. S. Vikram, "Particle field holography", Cambridge Univ. Press, 1992, pp. 6-16.
- (3) K. D. Hinsch, "Holographic particle image velocimetry", *Meas. Sci. Tech.*, Vol. 13, 2002, pp. R61-R72.
- (4) H. Meng, G. Pan, Y. Pu and S. H. Woodward, "Holographic particle image velocimetry: from film to digital recording", *Meas. Sci. Tech.*, Vol. 15, 2004, pp. 673-685.
- (5) M. Malek, D. Allano, S. Coëtmelec, C. Ozkul and D. Lebrun, "Digital in-line holography for three-dimensional two-components particle tracking velocimetry", *Meas. Sci. Tech.*, Vol. 15, 2004, pp. 699-705.
- (6) S. L. Pu, D. Allano, B. P. Rouland and M. Malek, "Particle field characterization by digital in-line holography: 3D location and sizing", *Exp. Fluids*, Vol. 39, 2005, pp. 1-9.
- (7) J. W. Goodman, "Introduction to fourier optics", McGraw-Hill, 2004, pp. 60-61.
- (8) U. Schnars and W. Jueptner, "Digital holography", Springer, 2005, pp. 41-53.
- (9) Y. Yang and B. S. Kang, "Application of digital holography to sprays", *Proc. Asia Display*, 2007, pp. 2050-2054.
- (10) 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.
- (11) C. B. Lefebvre, S. Coëtmelec, 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.
- (12) 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.
- (13) L. Denis, C. Fournier, T. Fournel, and C. Ducottet, "Twin-image noise reduction by phase retrieval in in-line digital holography", *Proc. SPIE*, Vol. 5914, 2005, J1-J14.
- (14) V. R. Singh and A. K. Asundi, "Amplitude contrast image enhancement in digital holography for particles analysis", *Proc. SPIE*, Vol. 5878, 2005, pp. 17.1-17.8.
- (15) S. Kim and S. J. Lee, "Effect of particle concentration on digital holographic PTV measurement", *Trans. of the Korea Society of Mech. Eng. B*, Vol. 30, 2006, pp. 929-934.
- (16) A. K. Jain, "Fundamentals of digital image processing", Prentice-Hall, 1989, pp. 276-284.
- (17) Y. Yang and B. S. Kang, "A study on determination of the focal plane of particle in digital particle holography", *Trans. of the Korea Society of Mech. Eng. B*, Vol. 32, No. 5, 2008, pp. 374-381.
- (18) S. J. Baek and S. J. Lee, "A new two-frame particle tracking algorithm using match probability", *Exp. Fluids*, Vol. 22, 1996, pp. 23-32.
- (19) D. J. Oh, Y. J. Choo and B. S. Kang, "Experimental validation for the development of holographic particle velocimetry system for spray droplets", *Trans. of the Korea Society of Mech. Eng. B*, Vol. 26, No. 4, 2002, pp. 539-546.