

홀로그래피를 이용한 분무 액적의 3차원 속도 측정

Measurements of Three-Dimensional Droplet Velocities Using the Holographic System

오대진*, 추연준**, 강보선***

Dai-Jin Oh, Yeon-Jun Choo, and Bo-Seon Kang

ABSTRACT

The Holographic Particle Velocimetry system can be a promising optical tool for the measurements of three dimensional particle velocities. In this study, the holographic particle velocimetry system was used to measure the sizes and velocities of droplets formed by a commercial full cone spray nozzle. Uncertainty analysis was performed to identify the sources of all relevant errors and to evaluate their magnitude. The droplet velocities ranged from 10.3 to 13.3 m/s with average uncertainty of ± 1.6 m/s, which is ± 14 % of the mean droplet velocity. Compared with relatively small uncertainties of velocity components in the normal direction to the optical axis, the uncertainty of the optical axis component is ± 3.6 m/s. This is due to the long depth of field of droplet images in the optical axis, which is inherent feature of holographic system using forward-scattering object wave of particles.

주요기술용어(Key Words) : Holographic Particle Velocimetry(홀로그래피 입자 유속계), Particle Tracking(입자 추적), Uncertainty Analysis(불확실도 분석)

1. 서론

유동의 속도를 측정할 수 있는 다양한 속도 측정 방법 및 제품 중, 유동장에 영향을 주지 않는 광학적 측정 시스템은 레이저와 컴퓨터의 발전에 힘입어, 날로 새로워지고 있다. 1980년대 초부터 가장 보편적으로 사용되고 있는 LDV를 비롯하여, 1980년대 후반부터는 2차원 평면 측정이 가능한 PIV(Particle Image Velocimetry) 시스템이 등장하였다. 최근에는 속도장 측정의 궁극적 목표인, 3차원적 측정이 가능한 Stereoscopic PIV나 HPIV(Holographic PIV) 시스템 개발에 많은 관심이 쏟아지고 있

다. 또한, 분무 입경 측정을 위한 광학적 계측 시스템에는 광산란법을 이용하거나, 위상 도플러 기법을 이용하는 PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer) 등이 있다.

이러한 측정 시스템들은 분무의 하류 영역같이 입자가 희박하게 분포되어 있고, 거의 구형에 가까운 경우에는 신뢰성이 있는 측정 결과를 얻을 수 있지만, 입자가 과밀하게 분포할 뿐만 아니라, 크기도 크고, 모양도 매우 불규칙적인 노즐 출구와 가까운 지역에서는 측정의 정확성이 떨어지는 문제점이 있다.

3차원 물체를 있는 그대로 재생시킬 수 있는 홀로그래피 기술은 오래 전부터 입자 직경 측정 분야에서 많은 연구가 진행되어 왔다⁽¹⁾. 최근에는 3차원적 재현의 장점을 최대한 활용하여 입자 속도 측정 분야에서도 홀로그래피 이용에 대한 관심이 매우 높아지고 있다. 지금까지 발표된 홀로그래피 속도 측정 시스템을 크

* 회원, 한국동서발전 (주)

** 회원, 전남대학교 대학원 기계공학과

*** 회원, 전남대학교 자동차공학부

개 분류해 보면, 입자 이미지 자체를 영상 처리하여 크기와 변위를 구하는 방식^{(2) (8)}과, 변위를 직접 구하지 않고 2차원 PIV에서 사용하는 상관 관계를 3차원으로 확장하는 HPIV 방식^{(9) (12)}으로 구별할 수 있다. 전자의 연구로 Feldmann⁽⁷⁾은 실험 체적을 두 방향에서 홀로그래프를 기록한 후, 각 홀로그래프의 입자 이미지로부터 2차원 변위를 측정하여 서로 비교, 일치시킴으로써 3차원 변위 정보를 구하였다. Kang⁽⁸⁾은 두 방향의 기준광을 사용하여 각 펄스에 대한 이미지를 분리시킴으로써, 입자의 중첩이나 이동 방향의 모호성 문제를 해결하였으며, 2차원 평면 분무에 적용하였다. 후자 방식의 연구로 Barnhart 등⁽⁹⁾은 두 개의 기준광으로 각 입자의 이미지를 분리하여 기록 및 재생하고, Stereoscopic PIV 기법을 이용하여 난류 유동에 적용하였다. Zhang 등⁽¹⁰⁾은 축상 홀로그래피(in-line holography)와 비축 홀로그래피(off-axis holography)의 장점을 이용한 Hybrid HPIV 시스템을 개발하였으며, Meng

등⁽¹¹⁾은 축상 방식으로 홀로그래프를 기록하고 비축 방법으로 이미지를 재생하는 기법을 이용한 HPIV 시스템을 제안하여 난류 유동에 적용하였다.

현재 진행중인 본 연구의 최종 목표는, 홀로그래피를 이용한 3차원 속도 계측 방법 중, 입자 이미지 분석 방식을 택하여, 입자의 이중 펄스에 의한 이미지를 기록한 후, 이를 컴퓨터를 이용, 이미지 처리하여 입자의 직경과 3차원 속도를 측정할 수 있는 시스템을 개발하는 것이다. 이를 위한 기초 연구의 일환으로, 홀로그래피 입자 유속계의 검증 실험⁽¹⁴⁾을 수행하였고, 본 연구에서는 홀로그래피 속도 측정 시스템을 분무 액적에 적용시켜, 분무 액적의 위치, 크기, 속도를 측정하였으며, 측정 과정의 오차 요인들에 대한 정량적인 불확실도 분석을 수행하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 홀로그래피 기록 시스템

Fig. 1은 움직이는 입자의 이미지를 이중 펄스를 이용하여 기록하기 위한 홀로그래피 기록 시스템을 보여 주고 있다. 광원은 Nd:YAG 펄스 레이저(Quantel)로써 홀로그래피 응용에 맞도록 시딩 레이저(injection seeder laser)를 추가하여 레이저의 간섭 거리를 1 m 이상이 되도록 하였으며, 파장 532 nm, 출력에너지 300 mJ/pulse, 수직 방향으로 선형 편광된 단일 또는 이중 펄스가 발생된다. 펄스폭은 10 ns이고, 이중 펄스간 간격은 1~900 μs로 조정 가능하다. 광원에서 나온 빔은 편광 광분리기에서 기준광(reference wave)과 물체광(object wave)으로 나뉘고, 빔의 크기는 고 에너지 펄스레이저에 적합한 갈리리언 형식(Galilean type)의 빔 확대기(beam expander)를 사용하여 직경 10 cm까지 확대된 평면광으로 만들어진다. 두 빔의 편광 방향은 반파장판(half-wave plate)을 사용하여 일치시켰으며, 기준광과 물체광의 적정 빔 강도비는 빔강도 조절기(attenuator)를 사용하여, 시행착오 과정을 거쳐서 최적 강도

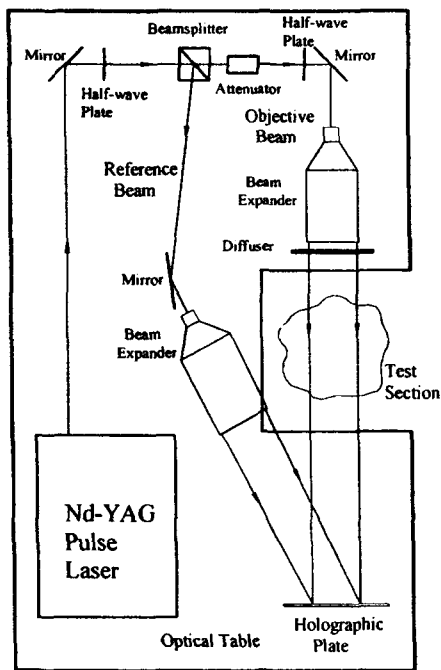


Fig. 1 Schematic diagram of the holographic recording system

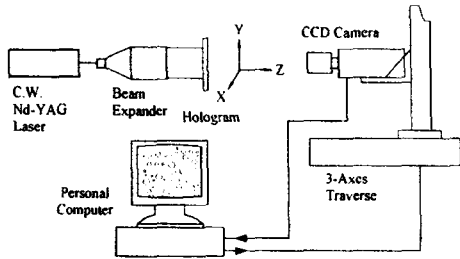


Fig. 2 Image reconstruction and processing system

4 : 1의 비율로 결정하였다. 물체광은 실험 체적을 통과하며 입자에 의해 전방 산란(forward scattering)되어 홀로그램 필름에 수직으로 도달하며, 기준광은 물체광과 28° 각도를 이루며 필름에 도달한다. 시험부(test section) 전방에 설치한 산란판(diffuser)은 빛을 사방으로 산란시켜 균일한 배경을 만듦과 동시에, 입자의 초점 깊이(depth of focus)를 짧게 하기 위하여 사용되었다. 광학 부품들은 기준광과 물체광의 경로차가 최소가 되도록 하였으며, 진동 흡수 장치가 되어 있는 광학 테이블 위에 설치하였다.

2.2 이미지 재생 및 처리 시스템

기록 시스템에 의하여 노출된 홀로그램은 사진 필름 처리과정과 비슷한 현상, 정착 과정을 거친 후 건조되어 Fig. 2에 나타낸 이미지 재생 및 처리 시스템에 의하여 분석된다. 재생 시 사용된 광원은 기록 시 사용한 광원과 같은 파장인 연속광의 다이오드 레이저(diode-pumped crystal laser)이며, 기록 당시와 동일한 기준광에 의해서 재생된다. 본 연구에서는 확대 배율이 큰 렌즈를 이용하여, 이미지를 접사하여 얻기 위해서 렌즈의 측정 거리에 제한을 주는 허상(virtual image)보다는 실상(real image)을 사용하였다.

재생되는 실상 정보는 3축 이송장치에 장착된 CCD 카메라(480×640)에 의해서 광축 방향으로 이송하면서 컴퓨터로 전송된다. CCD 카메라는 8 bit의 화소 깊이(gray level depth),

12 μm × 12 μm의 화소 크기를 가지고 있으며, 적정 명암은 카메라의 셔터 스피드를 이용하여 조절하였다. 저장된 이미지는 이미지 처리 프로그램인 이미지 프로세싱 소프트웨어(Inspector, Matrox Inc.)가 제공하는 기본 도구들(거리 측정, 면적 측정 등)을 이용하여 사용자가 직접, 액적의 크기와 이동 거리를 측정하였다.

2.3 분무 시스템

분사 유체는 물이며, 보다 안정되게 액체를 공급하기 위해 고압 질소를 이용하여 액체 저장용기를 일정한 압력으로 유지하였으며, 가압된 용기로부터 액체가 분사 노즐로 공급된다. 사용된 노즐은 상용 풀콘(full cone) 노즐이며 노즐 직경은 1mm, 분사 압력은 2.45×10⁵ Pa이다.

3. 결과 및 분석

3.1 액적 속도 및 크기 측정 불확실도 해석

액적 속도의 불확실도를 구하기 위해서는 각 축 방향 이동 거리 측정의 불확실도를 우선 구해야 한다. 광축(z 축)에 직각 방향인 x, y 축 액적의 이동 거리, D_x , D_y 는 두 액적의 중심 사이의 화소수를 구한 후, 환산 계수를 곱하여 구해진다. 실제 길이와 1 화소(pixel)와의 관계를 정의하는 환산 계수는 길이가 5 mm인 기준자를 사용하였다.

$$\text{환산 계수}(F) = \frac{\text{기준자의 길이}(L)}{\text{측정 화소수}(N)} \quad (1)$$

환산 계수의 불확실도, u_F 는 오차의 전파에 의한 불확실도 계산 방식⁽¹³⁾에 의하여

$$\begin{aligned} u_F &= \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial L} u_L\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial N} u_N\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{1}{N} u_L\right)^2 + \left(\frac{L}{N^2} u_N\right)^2} \quad (2) \end{aligned}$$

가 된다. 입자의 x, y 축상 이동 거리, D_i 는

$$D_i = F \times N, \quad i = x \text{ or } y \quad (3)$$

따라서, 각 축상 이동 거리 측정의 불확실도 u_{D_i} 는

$$u_{D_i} = \sqrt{\left(\frac{\partial D_i}{\partial F} u_F\right)^2 + \left(\frac{\partial D_i}{\partial N} u_N\right)^2} \\ = \sqrt{(N u_F)^2 + (F u_N)^2} \quad (4)$$

가 된다.

광축 방향인 z 축 상 이동 거리는 홀로그래피의 특성상 초점면의 결정이 어렵고, 초점 깊이 또한 매우 크기 때문에 많은 어려움이 있다. 우선, 초점면의 결정은 CCD 카메라를 광축 방향으로 이동하면서 획득한 다수의 입자 이미지를 이용하여, 병암값(gray value)의 기울기 변화와 육안 관찰을 이용하여 초점면으로 간주될 수 있는 z 축의 폭을 결정하고, 그 폭의 중심을 초점면으로 간주하였다.

초점면 결정에 있어서의 불확실도는 입자의 초점 깊이와 연관이 있다. 초점 깊이는 초점이 맞은 상태의 이미지에 많은 변화를 초래하지 않는 최대 초점거리를 의미한다. 홀로그래피 시스템을 이용하여 입자를 기록, 재생하는 경우, 입자의 초점 깊이는 입자의 직경과 사용된 광학시스템에 따라서 변하게 된다. Meng 등⁽¹¹⁾에 의하면 홀로그램에 의해서 재생된 입자 이미지의 한쪽 방향으로의 초점깊이(δ)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta = \frac{\beta d}{\Omega} \quad (5)$$

여기서 β 는 광학시스템이나 적용 범위에 따라 변하는 상수, d 는 입자의 직경, Ω 는 입자와 홀로그램간의 거리에 따라 결정되는 입자 이미지 형성 유효각이다. 위의 식으로부터, 입자의 초점깊이가 입자의 직경에 비례하므로,

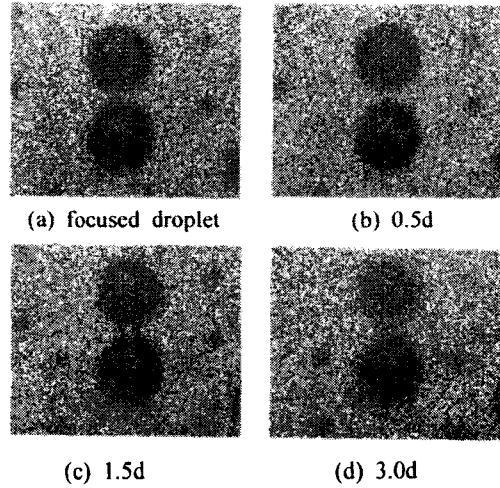


Fig. 3 Difference in focused droplet image due to the focal plane movement

광축 상 입자 초점면 위치의 불확실도로써, 액적의 직경을 사용하였다. Fig. 3은 액적의 초점면을 결정한 후, 초점면으로부터 z 축 상으로 $0.5d, 1.5d, 3.0d$ 만큼 이동하면서 획득한 액적 이미지를 보여주고 있다. 초점면에서 $0.5d$ 이상 떨어지면서부터 액적 이미지의 초점이 흐려지고 있음을 관찰할 수 있었다. 따라서, z 축상 액적 초점면 위치의 불확실도를 $0.5d$ 로 하였다. z 축상 액적 이동거리 측정의 불확실도 u_{D_z} 는 두 입자의 초점면이 결정되어야 하므로 $u_{D_z} = \pm d$ mm가 된다.

입자의 각 축 방향 이동거리가 측정되면, 각 축 방향 입자의 속도는

$$V_i = \frac{D_i}{t}, \quad i = x, y \text{ or } z \quad (6)$$

이므로, 각 방향 속도 측정의 불확실도는

$$u_{v_i} = \sqrt{\left(\frac{\partial V_i}{\partial D_i} u_{D_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial V_i}{\partial t} u_t\right)^2} \quad (7)$$

가 된다. 레이저 두 펄스간 시간 간격의 불확실도 u_t 는 미미하기 때문에 무시하였다.

액적 크기 측정의 불확실도 결정 방법은 다음과 같다. 입자의 초점면에서 얻어진 이미지는 적절한 입자와 배경의 명암 판별 기준치(thresholding)를 이용, 이진화하고, 화소 면적(A_F)으로부터 등가 직경의 구형 입자로 가정하여 직경을 구한다. 입자 크기, S_m 은 구해진 액적의 직경 화소수, D_F 에 환산 계수를 곱하여 구해진다.

$$S_m = F \times D_F \quad (8)$$

환산계수에 대한 불확실도는 속도 계측과 같으며, 액적 직경 화소수와 그 불확실도, u_{D_F} 는

$$D_F = \sqrt{\left(\frac{4}{\pi}\right)A_F} \quad (9)$$

$$u_{D_F} = \left(\frac{\partial D_F}{\partial A_F} u_{A_F}\right) \quad (10)$$

와 같이 표현된다.

3.2 액적의 3차원 속도 측정 결과

분무 액적의 3차원 속도 성분 및 크기 측정을 위하여 상용 풀콘 노즐에서 분사되는 분무의 홀로그램으로부터 재생된 일부 액적군 이미지를 Fig. 4가 보여 주고 있다. 두 펄스 간격은 100 μ s이며, 동일 액적의 첫 번째 이미지(위)와 두 번째 이미지(아래)를 확인할 수 있다.

Fig. 4와 같은 분무 홀로그램에 대해서, 앞에

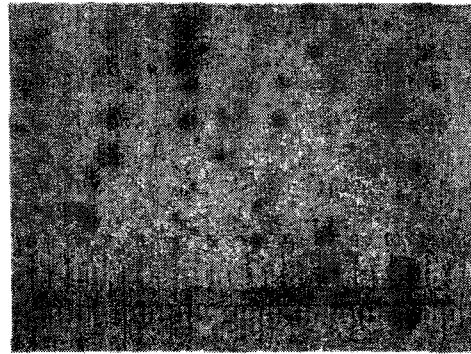


Fig. 4 Holographically reconstructed double pulse image of droplets

Table 1 Results of droplet velocities and diameter measurements

No.	Position(mm)			Velocity(%)			V(%)	Diameter(μ m)
	x	y	z	Vx	Vy	Vz		
1	-1.35	5.92	15.73	-2.90+0.39	10.93+0.71	6.99+4.76	13.29+2.57	476+24
2	-4.25	10.33	-2.00	3.02+0.54	10.71+0.67	-2.33+2.99	11.37+0.89	299+15
3	-11.52	16.48	-0.73	-4.42+0.43	9.17+0.58	-1.99+1.33	10.37+0.60	133+7
4	-6.92	20.22	5.00	-5.14+0.46	9.87+0.62	3.33+3.38	11.62+1.13	338+17
5	-4.12	27.74	-16.67	-0.79+0.31	10.15+0.64	-2.33+3.30	10.45+0.97	331+17
6	8.83	38.33	26.33	1.39+0.35	10.46+0.67	4.67+4.56	11.55+1.94	457+24
7	-10.14	45.59	11.89	1.55+0.30	9.38+0.60	-5.53+3.53	10.99+1.85	353+18
8	-18.13	48.82	-17.33	-1.87+0.32	9.17+0.58	-6.67+4.36	11.98+2.48	437+22
9	4.32	54.02	-27.67	1.55+0.37	9.86+0.62	-6.67+2.53	12.01+1.49	253+13
10	17.32	58.12	11.40	3.89+0.56	10.65+0.71	0.82+4.26	11.33+0.75	426+22
11	-4.75	60.22	26.70	-0.50+0.41	9.97+0.63	4.00+5.06	12.49+1.76	506+26
12	-13.25	67.12	21.40	-1.95+0.34	9.97+0.63	3.33+3.73	10.69+1.30	373+19
13	-12.51	73.21	25.60	-1.47+0.28	10.66+0.62	4.67+3.33	11.73+1.44	333+17
14	1.09	74.21	26.00	0.53+0.37	9.03+0.65	8.80+3.99	12.62+2.83	399+20
15	15.21	74.93	4.00	1.85+0.35	10.05+0.58	1.22+2.95	10.29+0.67	295+15
16	9.15	75.56	-5.00	0.88+0.38	10.29+0.55	-6.67+5.80	12.29+3.28	581+30
17	14.50	78.52	14.53	1.79+0.29	11.68+0.67	3.99+4.38	12.48+1.54	439+23

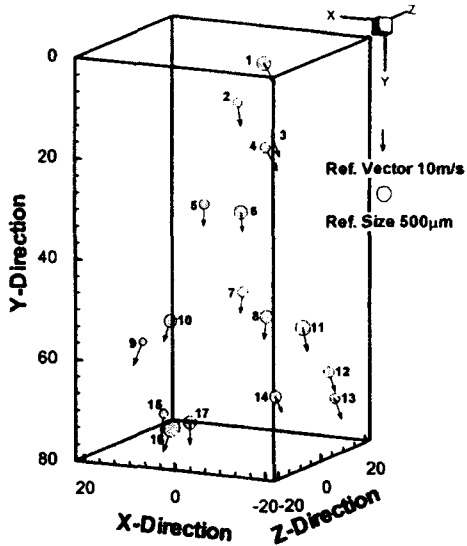
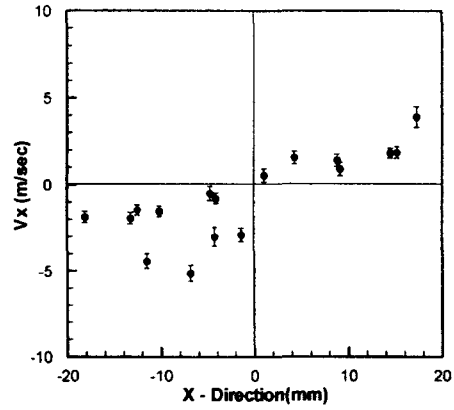


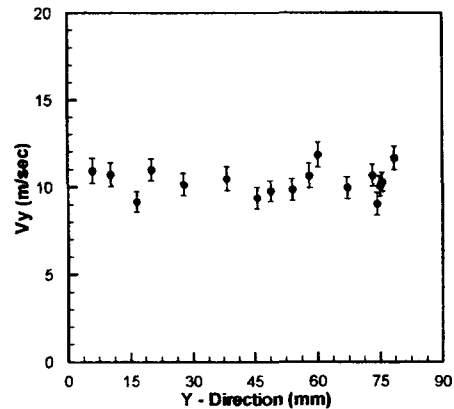
Fig. 5 Positions, sizes, and velocities of measured droplets

서 언급한 방법에 의해서 측정된 액적의 위치, 3방향 속도, 크기 및 각 측정값의 불확실도를 Table 1과 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 6은 각 방향 액적의 속도 성분을, Fig. 7은 액적 속도의 크기를 나타내었다. 그림의 오차 막대는 Table 1에 나타난 각 측정값의 불확실도를 나타내며, 원점은 노즐출구이다.

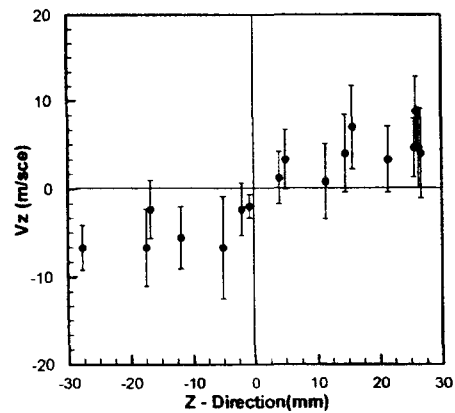
Fig. 6에서 알 수 있듯이, 분무 액적들은 분무 중심축에서 하향, 반경 방향으로 진행하며, x, z 축 방향 속도 성분들은 이러한 경향에 맞게, 음의 위치에서는 음의 속도값을 양의 위치에서는 양의 속도값을 나타내고 있다. 액적 속도 중 가장 큰 속도 성분은 예측대로 분무 축 방향인 y 축 방향 성분으로 크기는 $9.0 \sim 11.7$ m/s 범위, 평균 속도 10.3 m/s, 액적 속도 측정값의 불확실도 중에서 최대값은 ± 0.7 m/s, 평균은 0.64 m/s로써, y 축 방향 평균 액적 속도의 $\pm 6\%$ 이다. 반경 방향 속도에 해당하는 x, z 축 방향 속도 성분은 y 축 방향보다는 속도 크기가 작아진다. x 축 방향 속도는 $0.5 \sim 5.1$ m/s 범위, 평균 속도 2.1 m/s, 액적 속도 측정값의 불확실도 중에서 최대값은 ± 0.6 m/s, 평균은 0.4 m/s로써 x 축 방향 평균 액적 속도



(a) x-axis velocity



(b) y-axis velocity



(c) z-axis velocity

Fig. 6 Velocity components of droplets

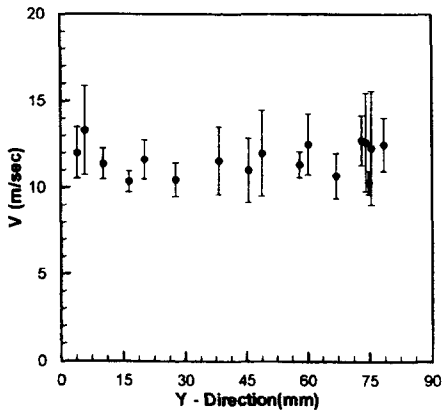


Fig. 7 Magnitude of droplet velocity

의 $\pm 18\%$ 이다. y 축과 비교하여 측정값의 불확실도는 낮지만, 불확실도 백분율이 높은 이유는, 분무 중심축에 가까운 액적들의 반경 방향 속도 성분이 낮기 때문이다. 위에서 보듯이, 광축에 직각 방향인 x, y 축 방향 속도 성분의 불확실도는 $\pm 0.6 \sim 0.7$ m/s로 액적 속도 크기 (11.6 m/s)에 비해서 그리 큰 값은 아니다.

반면에, 초점 깊이 문제가 존재하는 광축 방향 z 축은 속도 측정에 있어서 불확실도가 가장 크게 나타난다. z 축 방향 속도는 0.8 ~ 8.8 m/s 범위, 평균 속도는 4.4 m/s, 액적 속도 측정값의 불확실도 중에서 최대값은 ± 5.8 m/s, 평균은 ± 3.4 m/s로써, z 축 방향 평균 액적 속도의 $\pm 82\%$ 로 나타났다. 이와 같이, z 축 방향 속도 성분의 불확실도가 같은 반경 방향인 x 축에 비해서 8 배나 크게 나타나는 이유는, 홀로그래피 기록 당시의 물체광을 입자에 의한 전방 산란(forward scattering)광을 사용하여 입자의 초점 깊이가 길어졌기 때문이다. 물론, 측면 산란(side scattering)광을 사용하면, 초점깊이는 감소하게 되지만, 훨씬 더 높은 에너지의 레이저가 필요하며, 입자의 반쪽만 나타나게 되므로 크기 측정이 불가능해진다. 따라서, 입자의 크기와 3차원 속도 성분 측정을 위하여, 전방 산란광을 사용하더라도 z 축 방향 속도의 불확실도를 줄일 수 있는 광학 시스템 및 해석 방법에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

Fig. 7에 나타난 액적 속도는 10.3 ~ 13.3 m/s 범위, 평균값은 11.6 m/s이며, 액적 속도 측정값의 불확실도 중에서 최대값은 ± 3.3 m/s, 평균은 ± 1.6 m/s로써 평균 액적 속도의 $\pm 14\%$ 이다. 매우 큰 광축 방향 성분 불확실도에 의하여, 액적 속도의 불확실도도 조금은 큰 값을 나타낼 수 있다.

3.3 액적의 크기 측정 결과

Table 1에 측정된 액적의 크기와 불확실도 값을 나타내었다. 액적 직경은 133 ~ 581 μm 범위, 평균 직경은 378 μm , 액적 크기 측정값의 불확실도 중에서 최대값은 ± 30 μm , 평균은 ± 19 μm 로써, 평균 액적 크기의 $\pm 5\%$ 로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 3차원 입자 속도 계측을 위하여 홀로그래피 방법을 이용하여 입자 이미지를 기록하고, 재생한 입자의 이미지 분석을 통하여 입자의 크기, 이동 거리 및 속도를 측정할 수 있는 시스템을 구축하였다. 구축된 홀로그래피 입자 유속계를 상용 풀콘 노즐에 의해 형성되는 분무에 적용하여 기록된 액적의 순간 이미지로부터 액적의 직경과 3차원 속도를 계측하였다.

액적 직경 측정의 불확실도는 평균 ± 19 μm 로써, 평균 액적 크기의 $\pm 5\%$ 이내였으며, 액적 속도는 10.3 ~ 13.3 m/s 범위, 액적 속도 측정값의 불확실도의 평균은 ± 1.6 m/s로써 평균 액적 속도의 $\pm 14\%$ 이다. 광축의 직각 방향인 x, y 축 방향 불확실도는 평균 $\pm 0.4, 0.6$ m/s였지만, 광축(z 축) 방향 불확실도는 이보다 높은 평균 ± 3.6 m/s로 나타났다.

즉, 홀로그래피를 이용한 시스템은 광축에 수직인 속도 성분은 매우 정확히 측정할 수 있지만, 광축 방향은 입자의 초점깊이가 크기 때문에 오차 범위가 크게 나타나며, 이를 감소시키기 위하여 사용한 디퓨저로 인한 스페큘 노이즈로, 재생 이미지의 질이 저하되었으며, 앞

으로 좀 더 정확한 광축 방향 초점면 판별법이 해결되어야 측정의 정확도를 높일 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(2000-2-30400-002-3) 및 두뇌한국 21 사업 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. C. S. Vikram, Particle Field Holography, Cambridge University Press, 1979
2. G. Haussmann, W. Lauterborn, "Determination of Size and Position of Fast Moving Gas Bubbles in Liquids by Digital 3-D Image Processing of Hologram Reconstruction," Applied optics, Vol. 19, No. 20, pp. 3529-3535, 1980
3. I. Prikryl, C.M. Vest, "Holographic Imaging of Semitransparent Droplets," Applied optics, Vol. 21, No. 14, pp. 2541-2547, 1982
4. D.I. Staselko, V.A. Kosnikovskii, "Holographic Recording of Three-Dimensional Ensembles of Fast-Moving Particles," Optics and Spectroscopy, Vol. 34, No. 2, pp. 206-210, 1973
5. W. Lauterborn, W. Hentschel, "Cavitation Bubble Dynamics Studied by High Speed Photography and Holography: Part Two," Ultrasonics, Vol. 24, No. 2, pp. 59-65, 1986
6. W.K. Witherow, "A High Resolution Holographic Particle Sizing System," Optical Engineering, Vol. 18, No. 3, pp. 249-255, 1979
7. O. Feldmann, "Short-Time Holography and Holographic PIV Applied to Engineering Problems," Applied Optical Measurements, Springer-Verlag, 1999
8. B.S. Kang, "A Holographic Study of The Dense Region of a Spray Created by Two Impinging Jets," 1995, Ph.D. Thesis, Univ. of Illinois at Chicago
9. D.H. Barnhart, R.J. Adrian, "Phase-Conjugate Holographic System for High-Resolution Particle-Image Velocimetry," Applied Optics, Vol. 33, pp. 7159-7170, 1994
10. J. Zhang, B. Tao, J. Katz, "Turbulent Flow Measurement in a Square Duct with Hybrid Holographic PIV," Experiments in Fluids, Vol. 23, pp. 373-381, 1997
11. H. Meng, F. Hussain, "In-Line Recording and Off-Axis Viewing Technique for Holographic Particle Velocimetry," Applied Optics, Vol. 34, pp. 1827-1840, 1995
12. V. Zimin, H. Meng, F. Hussain, "Innovative Holographic Particle velocimeter: A Multibeam Technique," Optical Letters, Vol. 18, No. 13, pp. 1101-1103, 1993
13. R. S. Figliola, D. E. Beasley, "Theory and Design for Mechanical Measurement," John Wiley & Sons, pp.181-232, 1998
14. 오대진, 추연준, 강보선, "펄스 홀로그래피를 이용한 입자 속도 측정 시스템의 검증 실험." 대한기계학회 2001년도 춘계학술대회 논문집 E, pp.714-719, 2001