

홀로그래피를 이용한 분무 액적 속도 측정시스템 개발을 위한 실험적 검증

오대진* · 추연준* · 강보선†
(2001년 7월 19일 접수, 2002년 1월 31일 심사완료)

Experimental Validation for the Development of Holographic Particle Velocimetry System for Spray Droplets

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

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

Abstract

The Holographic Particle Velocimetry system can be a promising optical tool for the measurements of three dimensional particle velocities. In this research, validation experiments for the development of holographic particle velocimetry system for spray droplets 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 magnitude. The measurement results of distance between glass beads, size, and velocities obtained with holographic method are compared reasonably well with the known values within acceptable range of errors.

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 Holographic PIV 시스템 개발에 많은 관심이 쏟아지고 있다. 또한, 분무 입경 측정을 위한 광학적 계측 시스템에는 광산란법을 이용하거나 (Malvern), 위상 도플러 기법을 이용하는 PDPA (Phase Doppler Particle Analyzer) 등이 있다.

하지만 이러한 측정 시스템들은 분무의 하류 영역같이 입자가 희박하게 분포되어 있고, 거의 구형에 가까울 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 크게 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 Holographic PIV 방식⁽⁹⁻¹²⁾으로 구별할 수 있다.

전자의 연구로 Feldmann⁽⁷⁾은 실험 체적을 두

* 회원, 전남대학교 대학원 기계공학과

† 회원, 전남대학교 자동차공학부

E-mail : bskang@chonnam.ac.kr

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

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 증착이나 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 in-line holography와 off-axis holography의 장점만을 이용한 Hybrid HPIV 시스템을 개발하였으며, Meng 등⁽¹¹⁾은 in-line 방식으로 홀로그래프를 기록하고 off-axis 방법으로 이미지를 재생하는 기법을 이용한 HPIV 시스템을 제안하여 난류 유동에 적용하였다.

현재 진행중인 본 연구의 최종 목표는, 홀로그래피를 이용한 3차원 속도 측정 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 연구로써, 본 연구에서는 입자 속도 측정이 가능한 홀로그래피 기록 및 재생, 이미지 처리 시스템을 구성하고, 검증 실험을 위해 회전 원판을 제작하였다. 또한, 회전 원판 위에 설치한 기지의 입자의 크기, 거리, 속도를, 홀로그래피를 이용하여 얻은 실험값과 비교하는 검증 실험을 수행하고, 입자의 크기, 거리, 속도 측정 과정에서의 오차 요인들에 대한 불확실도 분석을 수행하였다.

2. 실험 방법

2.1 홀로그래피 기록 시스템

Fig. 1은 이중 펄스를 이용하여 움직이는 입자의 이미지를 기록하기 위한 홀로그래피 기록 시스템을 보여 주고 있다. 광원은 Nd:YAG 펄스 레이저로써 홀로그래피 응용에 맞도록 injection seeder를 추가하여 레이저의 간섭 거리를 1 m 이상이 되도록 하였으며, 파장 532 nm, 출력에너지 300 mJ/pulse, 수직 방향으로 선형 편광된 단일 또는 이중 펄스를 발생시킨다. 펄스폭은 10 ns 이

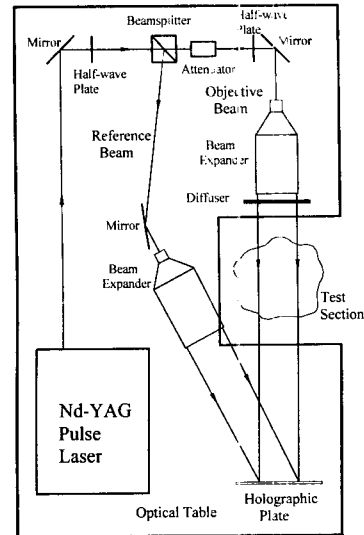


Fig. 1 Schematic diagram of the holographic recording system

고, 두 펄스 사이 간격은 1~900 μ s 로 조정 가능하다. 광원에서 나온 빔은 편광 광분리기에 서 기준광(reference wave)과 물체광(object wave)으로 나뉘고, 빔의 크기는 고에너지 펄스레이저에 적합한 갈리리언 형식(Galilean type)의 빔 확대기(beam expander)를 사용하여 직경 10 cm 까지 확대하였다. 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 강도비 4 : 1의 비율로 결정하였다. 물체광은 실험 체적을 통과하여 홀로그래피 필름(Slavich, VRP-M)에 수직으로 도달하며 기준광은 물체광과 28° 각도를 이루며 필름에 도달한다. 시험부(test section) 전방에 설치한 산란판(diffuser)은 빛을 사방으로 산란시켜 균일한 배경을 만들고 동시에, 입자의 초점 깊이를 짧게 하기 위하여 사용되었다. 광학 부품들은 기준광과 물체광의 경로차가 최소가 되도록 배치하였다.

2.2 회전 원판 실험 장치

홀로그래피를 이용한 입자 속도 측정 시스템이 구성되면, 속도 측정 결과에 대한 검증 단계가 필요하다. 이를 위해서는 입자의 속도를 미리 알 수 있고, 속도 변화가 용이한 실험장치가 필요하

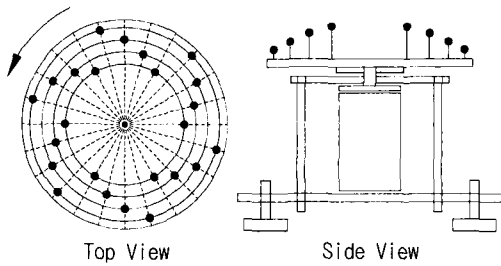


Fig. 2 Experimental apparatus of rotating disk system

Table 1 Size and position of glass beads

No.	Radius of bead position (mm)	Actual Diameter (mm)	No.	Radius of bead position (mm)	Actual Diameter (mm)
1	125	3.108 ± 0.012	13	105	2.056 ± 0.008
2		2.090 ± 0.010	14		2.231 ± 0.019
3		3.034 ± 0.008	15		2.210 ± 0.016
4		3.244 ± 0.015	16		2.094 ± 0.008
5		3.054 ± 0.019	17		2.162 ± 0.017
6		3.052 ± 0.017	18		1.996 ± 0.045
7	115	1.112 ± 0.012	19	85	0.862 ± 0.021
8		1.148 ± 0.014	20		0.826 ± 0.019
9		1.162 ± 0.012	21		0.790 ± 0.024
10		1.124 ± 0.012	22		0.770 ± 0.018
11		1.060 ± 0.015	23		0.772 ± 0.023
12		1.122 ± 0.012	24		0.750 ± 0.012

다. 이러한 목적으로 본 연구에서 사용한 회전 원판 실험장치를 Fig. 2에 나타내었다. 실험장치는 구동 회전부와 회전 원판으로 구성되어 있으며, 직류 전력조절기를 이용하여 회전수를 최대 3,000 rpm까지 조절할 수 있다. 유리구(glass bead)는 회전 원판 위에 가는 철편을 고정시키고, 그 위에 설치하였다. Table 1에 나타낸 것과 같이 R=85, 105, 115, 125 mm 위치에 지름 750~870, 1,970~2,230, 1,060~1,160, 2,085~3,115 μm 범위의 유리구 6 개씩, 전체 24 개를 위치시켰다. 최대 회전수에서 가장 바깥쪽에 위치한 유리구가 갖게 되는 최대 입자 속도는 약 40 m/s 이다.

2.3 이미지 재생 및 처리 시스템

기록 시스템에 의하여 노출된 홀로그램은 사진 필름 처리과정과 비슷한 현상, 정착 과정을 거친 후 건조되어 Fig. 3에 나타낸 이미지 재생 및 처리 시스템에 의하여 분석된다. 재생 시 사용된 광원은 기록시 사용한 광원과 같은 파장인 연속

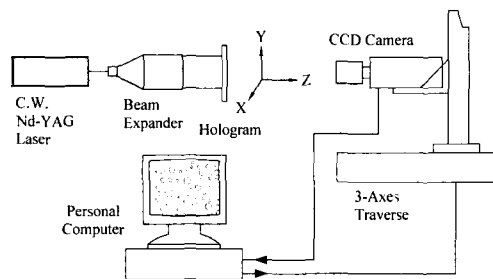


Fig. 3 Image reconstruction and processing system

광의 diode pumped crystal 레이저이며, 기록당시와 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 디지털 CCD 카메라(1024×1024)에 의해서 광축 방향으로 이송하면서 컴퓨터로 전송된다. CCD 카메라는 8 bit의 gray level depth, 9 $\mu\text{m} \times 9 \mu\text{m}$ 의 화소 크기를 가지고 있으며, 적정 명암은 카메라의 셔터 스피드를 이용하여 조절하였다. 저장된 이미지는 이미지 처리 프로그램인 Inspector(Matrox Inc.)가 제공하는 기본 도구들(거리 측정, 면적 측정 등)을 이용하여 사용자가 직접, 입자의 크기와 이동 거리를 측정하였다.

3. 실험 결과

3.1 거리 측정 결과

회전 원판을 이용한 속도 검증 실험에 앞서서, 홀로그램에 의해서 재생되는 이미지를 이용한 거리 측정의 오차를 확인하는 실험을 먼저 수행하였다. 이를 위하여, 서로 다른 직경의 유리구를 광축(z)과 x 축 방향으로 서로 다른 위치에 설치하고, 유리구 사이의 실제 거리를 측정하여, 단일 펄스 홀로그래피로 재생 및 기록된 이미지를 이용하여 구한 거리와 비교하였다. Fig. 4는 정지 상태 원판 위의 유리구를 홀로그래피로 재생하여, 유리구 D에 초점을 맞춘 이미지를 보여주고 있으며, 실제 위치를 Fig. 5에 표시하였다.

Fig. 5에 나타낸 것처럼 입자의 광축 방향 거리는 최대 (A와 D) 121.7 mm 떨어져 있기 때문에,

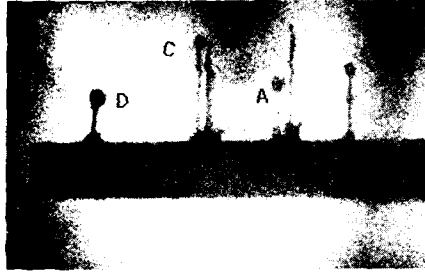


Fig. 4 Holographically reconstructed virtual image of glass beads

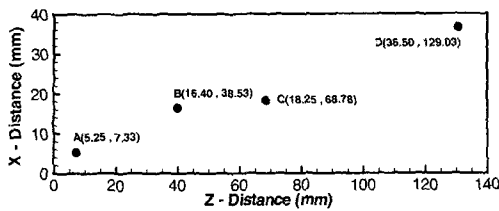


Fig. 5 Position of 4 glass beads shown in Fig. 4

심도가 수 mm 에 불과한 카메라에 의해서는 초점면에 있는 입자 이외에는 희미하게 보일 수 밖에 없다. Table 2에 나타난 입자의 x, z 축간 실제 거리는 버니어 캘리퍼스를 이용하여 측정하였으며, 실제 거리 측정의 불확실도는 측정 계기에 의한 0 차 불확실도(u_0)이며 사용 버니어 캘리퍼스 분해능의 절반값인 ± 0.025 mm 가 된다.

홀로그램으로 재생된 이미지를 이용하여 거리를 측정하기 위하여, z축 방향으로 입자 이미지의 초점면을 결정하여야 한다. 본 실험에서는 CCD 카메라를 광축 방향으로 이동하면서 획득한 다수의 입자 이미지를 이용하여, 입자와 배경의 명암값(gray value)의 기울기 변화와 육안 관찰을 이용하여 초점면으로 간주될 수 있는 z축의 폭을 정하고, 그 폭의 중심을 초점면으로 결정하였다.

실제 길이와 이미지 처리 시 1 화소(pixel)와의 관계를 정의하는 환산 계수(F)는 길이가 5 mm 인 기준자의 홀로그램 이미지를 통하여 구하였다.

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

측정 화소수는 112이며, 환산 계수 $F= 0.04464$ mm/pixel 이 된다. 환산계수에 대한 불확실도, u_F

Table 2 Comparison of actual distances between glass beads with measured values

Axis	Beads	Actual Distance (mm)	Measured Distance (mm)	Relative Error(%)
ΔX	A-B	11.15 ± 0.025 (0.2%)	10.972 ± 0.308 (2.8%)	1.6
	B-C	1.85 ± 0.025 (1.4%)	1.784 ± 0.101 (5.7%)	3.6
	C-D	18.25 ± 0.025 (0.1%)	17.974 ± 0.490 (2.7%)	1.5
ΔZ	A-B	31.20 ± 0.025 (0.1%)	32.301 ± 1.000 (3.1%)	3.5
	B-C	30.25 ± 0.025 (0.1%)	28.638 ± 1.000 (3.5%)	5.3
	C-D	60.25 ± 0.025 (0.1%)	61.672 ± 1.000 (1.6%)	2.4

는 오차의 전파에 의한 불확실도 계산 방식⁽¹³⁾에 의하여

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

$$= \sqrt{\left(\frac{1}{N} u_L\right)^2 + \left(\frac{L}{N^2} u_N\right)^2}$$

가 되며, 기준자의 길이에 대한 불확실도, u_L 은 임의로 ± 0.1 mm 정도, 측정 화소수의 불확실도, u_N 은 ± 2 화소 정도의 오차로 가정하였다. 식 (2)에 의해 환산 계수의 불확실도는 $u_F = 0.001197$ mm/pixel 이 된다.

입자 A, B간 x 축 거리, D_x 는 기준점으로부터 각 입자 중심까지의 화소수로부터 A, B 사이의 화소수(246)를 구한 후, 환산 계수를 곱하여 구해진다.

$$D_x = F \times N \quad (3)$$

따라서, x 축 거리 측정의 불확실도 u_{D_x} 는

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

$$= \sqrt{(N u_F)^2 + (F u_N)^2}$$

에 의해 계산되며, 측정 화소수의 불확실도, u_N 은 ± 2 화소 정도의 오차로 가정하였다.

입자 A, B간 z 축 거리는 전술한 초점면 결정 방법에 의하여 각 입자의 초점면을 결정하여, 두 입자 사이의 거리를 계산하였다. z 축 거리 측정의 불확실도 u_{Dz} 는 초점면 결정에 있어서, 초점면으로 간주될 수 있는 z 축 폭이 한 입자에 대해서 ± 0.5 mm 이므로 두 입자에 대해 $u_{Dz}=\pm 1.0$ mm 로 간주하였다.

같은 방법에 의하여 홀로그래피를 이용하여 측정된 입자간 x, z 축간 거리와 불확실도, 실제 거리에 대한 상대 오차를 Table 2에 나타내었다. 괄호 안의 값은 각 계측값에서 불확실도가 차지하는 백분율이다. 각 입자 사이의 실제 거리에 대해서 홀로그래피를 이용하여 측정된 거리의 상대 오차는 최대 6 % 이내로 나타나고 있다. 따라서, 홀로그래피를 이용한 측정에 있어서의 불확도는 측정값의 최대 ± 6 % 이내에 존재한다는 것을 알 수 있다. 초점면 결정의 불확실성으로 인하여 z 축 거리 측정에 있어서의 불확실도값이, x 축 거리 측정 불확실도값보다 높게 나타나고 있다.

3.2 크기 측정 결과

Fig. 4의 입자들에 대하여 입자 직경을 측정, 비교하였다. 각 입자의 실제 직경은 마이크로미터를 이용, 10 회 정도 계측하였으며, 그 평균값을 Table 3에 나타내었다. 실제 직경 측정시 불확실도 $u_{s,a}$ 는 측정 계기에 의한 0 차 불확실도(± 0.005 mm)와 다중 측정에 의한 정밀오차로 구성된다.⁽¹³⁾

$$u_{s,a} = \sqrt{(u_0)^2 + (t_{\nu,P} S_{\bar{x}})^2} \quad (5)$$

여기서 $t_{\nu,P}$ 는 확률 P %, 표준 분산의 자유도 ν 인 경우의 t 추정자이며, t 정규분포표로부터 구할 수 있다. $S_{\bar{x}}$ 는 평균의 표준편차이다.

홀로그램 이미지로부터 측정되는 입자 직경은, 입자가 구형이 아닌 경우 적절한 이미지 처리를 이용하여, 입자 이미지의 둘레 길이 또는 입자 이미지에 해당하는 면적의 화소수로부터 등가 직경의 구형 입자로부터 직경을 얻을 수 있다. 그러나, 본 연구에서는 입자 크기의 검증을 위해서

Table 3 Comparison of actual glass bead diameters with measured values

Bead	Actual Diameter (mm)	Measured Diameter (mm)	Relative Error (%)
1	1.122 \pm 0.012 (1.1%)	1.070 \pm 0.094 (8.8%)	4.6
2	1.996 \pm 0.045 (2.3%)	2.007 \pm 0.104 (5.2%)	0.6
3	3.052 \pm 0.017 (0.6%)	3.077 \pm 0.122 (4.0%)	0.8
4	3.108 \pm 0.012 (0.4%)	3.122 \pm 0.122 (3.9%)	0.5

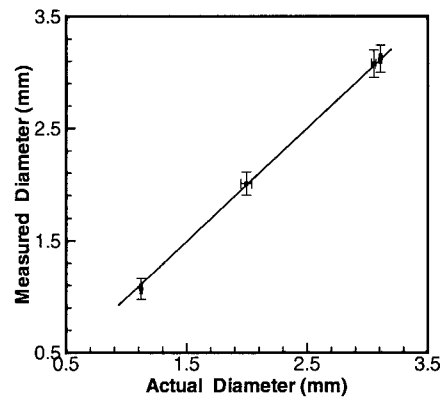


Fig. 6 Comparison of actual glass bead diameters with measured values

구형 입자를 사용하였기 때문에, 입자 크기(S_m)는 각 입자 직경의 화소수를 구한 후, 환산 계수를 곱하여 구해진다.

$$S_m = F \times N \quad (6)$$

따라서, 입자 크기 측정의 불확실도 $u_{s,m}$ 는

$$u_{s,m} = \sqrt{\left(\frac{\partial S_m}{\partial F} u_F\right)^2 + \left(\frac{\partial S_m}{\partial N} u_N\right)^2} \quad (7)$$

$$= \sqrt{(N u_F)^2 + (F u_N)^2}$$

이며, 여기서 측정 화소수의 불확실도, u_N 은 앞에서와 마찬가지로 ± 2 화소 정도의 오차로 가정하였다. 위 방법에 의하여 홀로그래피를 이용하여

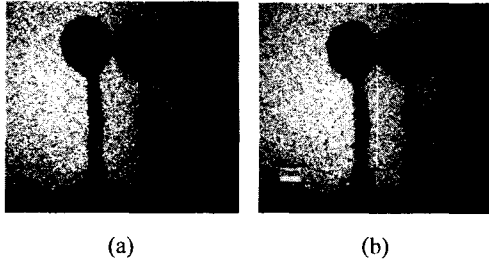


Fig. 7 Holographically reconstructed double images of particle; image of (a) first pulse (b) second pulse is focus

여 측정된 직경의 불확실도, 실제 직경에 대한 상대 오차를 Table 3과 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 수직 오차막대는 홀로그래피에 의한 계측값의 불확실도 폭을 나타내며, 수평 오차막대는 실제 계측값의 불확실도 폭을 나타낸다. 입자의 실제 크기에 대하여 홀로그래피를 이용해서 측정된 입자 직경의 상대 오차는 최대 5%를 넘지 않으며, 홀로그래피 이용 측정시의 불확실도는 측정값의 최대 $\pm 9\%$ 범위를 넘지 않음을 알 수 있다. 이러한 오차들은 입자 크기가 작은 경우, 상대적으로 매우 크게 나타나고 있다.

3.3 속도 측정 결과

입자의 속도 측정을 위하여 813 또는 1,284 rpm으로 회전하는 원판 위 반경 125 mm에 위치한 입자에 대하여, 펄스 간격 500 μs 인 이중 펄스 홀로그래피를 이용하여 두 순간에서의 입자 이미지를 획득하였다. Fig. 7은 첫 번째와 두 번째 펄스에 의한 입자 이미지이며, CCD 카메라를 z 축상을 따라 이동하며 Fig. 7 (a)는 첫 번째 펄스의 이미지에, (b)는 두 번째 펄스 이미지에 초점을 맞춘 것이다.

원판 회전수로부터 계산된 입자의 실제 속도와 불확실도 값을 Table 4에 나타내었다. 원판 회전 속도 측정의 불확실도 u_ω 는 측정 계기에 의한 0차 불확실도(± 0.5 rpm)와 다중 측정에 의한 정밀 오차로 구성된다.

$$u_\omega = \sqrt{(u_0)^2 + (t_{v,p} S_x^-)^2} \quad (8)$$

입자의 실제 속도 V_a 는

$$V_a = R \times \omega \quad (9)$$

이므로, 실제 입자 속도의 불확실도 $u_{V,a}$ 는

$$u_{V,a} = \sqrt{\left(\frac{\partial V_a}{\partial R} u_R\right)^2 + \left(\frac{\partial V_a}{\partial \omega} u_\omega\right)^2} \quad (10)$$

$$= \sqrt{(\omega u_R)^2 + (R u_\omega)^2}$$

로 표시되며, u_R 은 반지름 측정시 불확실도, 즉 버니어 캘리퍼스로 반지름 측정시 오차 $u_R = \pm 0.025$ mm가 된다.

홀로그래피를 이용한 입자 속도 측정은 이중 펄스에 의해 획득된 입자의 이미지로부터, x, z 축으로 이동한 거리를 측정하여 펄스 간격으로 나누어 구할 수 있다. x, z 방향 변위의 불확실도는, 전술한 x, z 방향 입자간 거리 측정시의 불확실도 산출 방법과 같은 방법에 의해 구해진다.

원판 회전수 813, 1284 rpm의 경우, 환산 계수 (F)는 각각 0.025, 0.033 mm/pixel이다. 입자 이미지간 x 축상 이동거리, D_x 는 각 입자 중심간의 화소수(117, 126)를 구한 후, 환산 계수를 곱하여 구해진다.

$$D_x = F \times N \quad (11)$$

따라서, x 축 거리 측정의 불확실도 u_{D_x} 는

$$u_{D_x} = \sqrt{\left(\frac{\partial D_x}{\partial F} u_F\right)^2 + \left(\frac{\partial D_x}{\partial N} u_N\right)^2} \quad (12)$$

$$= \sqrt{(N u_F)^2 + (F u_N)^2}$$

에 의해 계산되며, 측정 화소수의 불확실도, u_N 은 ± 2 화소 정도의 오차로 가정하였다.

입자 이미지간 z 축 거리는 전술한 초점면 결정 방법에 의하여 각 입자의 초점면을 결정하여, 두 입자간 거리를 계산하였다. z 축 이동거리 측정의 불확실도 u_{D_z} 는 초점면 결정에 있어서, 초점면으로 간주될 수 있는 z 축 폭이 한 입자에 대해서 각 원판 회전수 813, 1284 rpm에 대해서

Table 4 Comparison of actual glass bead velocities with measured values

RPM	Actual Velocity (m/s)		Measured Velocity (m/s)			Relative Error (%)
	Va	Vx	Vz	Vm		
813 ± 2.05 (0.3%)	10.637 ± 0.027 (0.3%)	5.850 ± 0.165 (2.8%)	8.550 ± 0.224 (2.6%)	10.365 ± 0.207 (2.0%)	2.56	
1284 ± 1.37 (0.1%)	16.799 ± 0.020 (2.8%)	8.316 ± 0.280 (3.4%)	13.722 ± 0.285 (2.1%)	16.045 ± 0.284 (1.8%)		

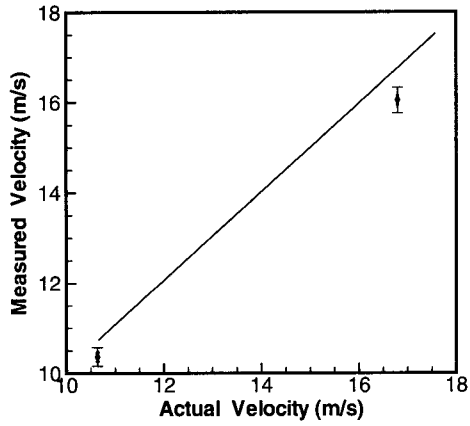


Fig. 8 Comparison of actual glass bead velocities with measured values

± 0.06 mm, 0.07 mm 이므로 두 입자 이미지에 대해서 $u_{Dz} = \pm 0.12$ mm, 0.14 mm 로 간주하였다.

입자 속도는 입자의 전체 이동 거리로부터 구할 수도 있고, x, z축 이동 거리로부터 구해지는 각각의 속도성분으로부터도 구할 수 있다. 먼저, 전자에 의한 방법에 의해 입자 이동거리, D는

$$D = \sqrt{D_x^2 + D_z^2} \quad (13)$$

이므로, 입자 이동 거리의 불확실도 $u_{D,m}$ 은

$$u_{D,m} = \sqrt{\left(\frac{\partial D}{\partial D_x} u_{D_x}\right)^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial D_z} u_{D_z}\right)^2} \quad (14)$$

에 의하여 계산된다. 또한 측정되는 입자 속도의 불확실도 $u_{v,m}$ 은

$$u_{v,m} = \sqrt{\left(\frac{\partial(D/t)}{\partial t} u_t\right)^2 + \left(\frac{\partial(D/t)}{\partial D} u_{D,m}\right)^2} \quad (15)$$

으로 계산된다.

후자에 의한 입자 속도 계산 방법에 있어서는, x, z 방향 속도성분이

$$V_i = \frac{D_i}{t} \quad i = x \text{ or } z \quad (16)$$

에 의해 결정되므로 x, z 방향 속도의 불확실도는

$$\begin{aligned} u_{V_i} &= \sqrt{\left(\frac{\partial V_i}{\partial D_i} u_{D_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial V_i}{\partial t} u_t\right)^2} \quad (17) \\ &= \sqrt{\left(\frac{1}{t} u_{D_i}\right)^2 + \left(\frac{D_i}{t^2} u_t\right)^2} \end{aligned}$$

이며, 레이저 두 펄스간 시간간격의 불확실도 u_t 는 0으로 하였다. 또한, 입자 속도 V는

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_z^2} \quad (18)$$

이므로, 측정되는 입자 속도의 불확실도 $u_{v,m}$ 은

$$u_{v,m} = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial V_x} u_{V_x}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial V_z} u_{V_z}\right)^2} \quad (19)$$

에 의하여 계산된다. 식 (15)와 (19)의 두 방법에 의해서 구해지는 속도 측정의 불확실도는 동일한 결과를 나타낸다.

위 방법에 의하여 홀로그래피를 이용하여 계산된 입자의 x, z 방향 속도와, 그 크기의 불확실도, 실제 속도에 대한 상대 오차 값을 Table 4와 Fig. 8에 나타내었다. 실제 입자의 속도에 비해서 홀로그래피를 이용해서 측정한 속도값이 최대 5% 이내로 측정되었으며, 저속보다는 고속에서 오차가 크게 나타나고 있다. 홀로그래피 측정방법의 불확실도는 홀로그래피 측정값의 최대 ± 4% 이내임을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 3차원 입자 속도 계측을 위하여, 3차원 재현성이 가장 우수한 홀로그래피 방

법을 이용하여 입자 이미지를 기록하고, 재생한 입자의 이미지 분석을 통하여 입자의 크기, 거리 및 속도를 측정할 수 있는 시스템을 구축하였다. 그리고 이미 알고 있는 입자의 크기, 거리 및 속도 성분 정보에 대하여, 펄스 홀로그래피를 이용하여 얻은 결과값과 비교 분석하였으며, 측정과정에 관여되는 오차에 대한 불확실도 분석을 통하여, 각 오차 발생요소별로 분석, 검증하였다.

(1) 입자의 크기는 마이크로미터로 측정한 값과의 상대 오차가 5 % 이내였으며, 홀로그래피 계측값의 불확실도는 홀로그래피 계측값의 ± 9 % 이내였다.

(2) 입자의 속도는 원판 회전수에 의해 예측된 입자의 속도값과 상대 오차 5 % 이내였으며, 홀로그래피 계측값의 불확실도는 홀로그래피 계측값의 ± 4 % 이내였다.

후 기

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

참고문헌

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