

펄스 홀로그래피를 이용한 입자 속도 측정 시스템의 검증 실험

오대진* · 추연준** · 강보선***

Validation Experiments for a Holographic Particle Velocimetry System

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

Key Words: Holographic Particle Velocimetry (홀로그래피 입자 유속계), Gray Level (명암), Particle Tracking (입자 추적), Uncertainty Analysis (불확도 분석)

Abstract

The Holographic Particle Velocimetry system can be a promising optical tool for the measurements of three dimensional particle velocities. In this research, the optical system for double pulse holographic recording and reconstruction of particle images was developed. Validation experiments for the developed system were conducted 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 of them using holographic method compared reasonably well with the known values within acceptable range of errors.

1. 서론

유동의 속도장을 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 2차원적인 면 측정이 가능한 PIV(Particle Image Velocimetry) 시스템이 등장하였다. 최근에는 속도장 측정의 궁극적 목표인, 3차원적 측정이 가능한 Stereoscopic PIV 나 Holographic PIV 시스템 개발에 많은 관심이 쏟아지고 있다. 또한, 분무 입경 측정을 위한 광학적 계측 시스템에는 광산란법을 이용(Malvern)

하거나 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 홀로그래피는 오래 전부터 입자 직경 측정 분야에서는 많은 연구가 진행되어 왔다⁽¹⁾. 최근에는 3차원적 재현의 장점을 최대한 활용하여 입자 속도 측정 분야에서도 홀로그래피를 이용한 기법에 대한 관심이 매우 높아지고 있다. 지금까지 발표된 홀로그래피 속도 측정 시스템을 크게 분류해 보면, 입자 이미지 자체를 영상 처리하여 크기와 변위를 구하는 방식^{(2),(3)}과, 변위를 직접 구하지 않고 2차원 PIV에서 사용하는 상관 관계를 3차원으로 확장하는 Holographic PIV 방식⁽⁴⁾⁽⁷⁾으로 구

* 회원, 전남대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 전남대학교 대학원 기계공학과

*** 회원, 전남대학교 자동차공학부

별할 수 있다.

본 연구에서는 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 개발하고자 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 입자 속도 측정이 가능한 홀로그래피 기록 및 재생, 이미지 처리 시스템을 구성하고, 회전 원판 위에 놓인 입자의 속도를 측정하여 회전 속도로부터 알려진 입자 속도와 비교하는 검증 실험을 수행하고, 입자 속도 측정 과정에 결부된 오차 요인들에 대한 불확도 분석을 수행하였다.

2. 실험 방법

2.1 홀로그래피 기록 시스템

Figure 1은 움직이는 입자의 이미지를 이중 펄스를 이용하여 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, 수직 방향으로 선형 편광된 단일 또는 이중 펄스가 발생된다. 펄스폭은 10 ns이고, 이중 펄스간 간격은 1~900 μ s로 조정 가능하다. 광원에서 나온 빔은 편광 광분리기에서 기준광과 물체광으로 나뉘고, 빔의 크기를 빔 확대기(beam expander)를 사용하여 직경 10 cm까지 확대하였다. 두 빔의 편광 방향은 반파장판(half-wave plate)을 사용하여 일치시켰으며, 기준광과 물체광의 적정 빔 강도비는 빔강도조절기(attenuator)를 사용하여, 시행착오 과정을 거쳐서 최적 강도비를 결정하였다. 유리알(glass beads) 도달 전에 설치한 산란판(diffuser)은 빛을 사방으로 산란시켜 균일한 배경을 만듦과 동시에 입자의 초점 깊이를 짧게 하기 위하여 사용되었다. 기준광과 물체광의 경로차는 최소가 되도록 광학 부품들을 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

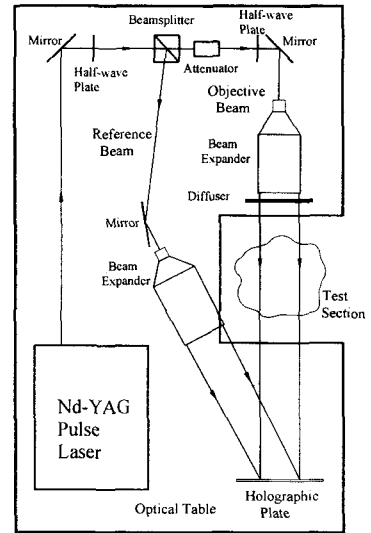


Fig. 1 Schematic diagram of the holographic recording system

수 있고, 변화시키기 용이한 실험 장치가 필요하다. 이러한 목적으로 본 연구에서 사용한 회전 원판 실험 장치를 Fig. 2에 나타내었다. 이 실험 장치는 구동 회전부와 회전 원판으로 구성되어 있으며, 직류 전력조절기를 이용하여 회전수를 최대 3,000 rpm까지 조절할 수 있다. 유리알은 회전 원판 위에 가는 철편을 고정시키고, 그 위에 설치하였다. $R=85, 105, 115, 125$ mm 위치에 지름 750~870, 1,970~2,230, 1,060~1,160, 2,085~3,115 μ m 범위에 있는 유리알 6개씩, 전체 24개를 위치시켰다. 최대 회전수에서 가장 바깥쪽에 위치한 유리알이 갖게 되는 최대 입자 속도는 약 40 m/s이다.

2.3 이미지 재생 및 처리 시스템

기록 시스템에 의하여 노출된 홀로그램은 사진

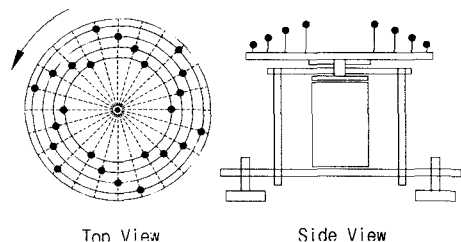


Fig. 2 Experimental apparatus of rotating disk system

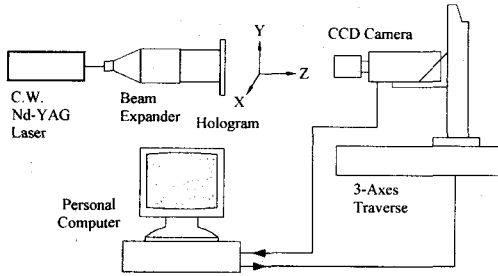


Fig. 3 Image reconstruction and processing system

필름 처리와 비슷한 현상, 정작 과정을 거친 후 건조되어 Fig. 3에 나타난 이미지 재생 및 처리 시스템에 의하여 분석된다. 재생 시 사용한 광원은 기록 시 사용한 광원과 같은 파장인 연속광 Nd:YAG 레이저(50 mW, Crystalaser)이며, 기록 당시와 동일한 기준광에 의해서 재생된다. 재생되는 실상(real image) 또는 허상(virtual image)은 3축 이송장치(Physik Instruments)에 장착된 디지털 CCD 카메라(Kodak)에 의해서 광축 방향으로 30 μm 씩 이송하면서 컴퓨터로 전송된다. 이미지 처리 프로그램은 Inspector(Matrox)를 사용하였다.

3. 실험 결과

3.1 거리 측정 결과

회전 원판을 이용한 속도 검증 실험에 앞서서, 홀로그램에 의해서 재생되는 이미지를 이용한 거리 측정의 오차를 확인할 수 있는 실험을 먼저 수행하였다. 이를 위하여, 서로 다른 직경의 유리알을 광축(z)과 x 축 방향으로 서로 다른 위치에 설치하고, 유리알 사이의 실제 거리를 측정하여, 홀로그래피로 재생된 이미지를 이용하여 측정된 거리와 비교하였다. Figure 4는 정지 상태의 원판 위에 Fig. 5에 표시된 위치에 놓인 유리알을 홀로그래피로 재생하여 유리알 D에 초점을 맞춘 이미지를 보여 주고 있다.

Figure 5에 나타난 것처럼 입자의 광축 방향 거리는 최대 (A와 D) 121.7 mm 떨어져 있기 때문에, 심도가 수 mm에 불과한 카메라에 의해서는 초점면에 있는 입자 이외에는 희미하게 보일 수밖에 없다. Table 1에 나타난 입자의 x, z 축간 실제 거리는 버니어 캘리퍼스를 이용하여 측정하

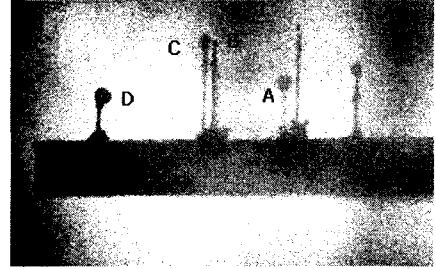


Fig. 4 Holographically reconstructed virtual image of glass beads

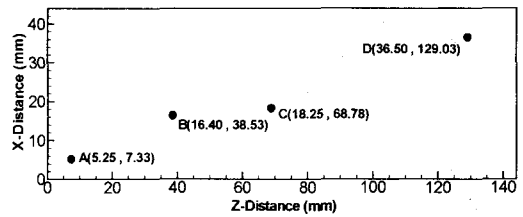


Fig. 5 Position of glass beads

였으며, 실제 거리 측정의 불확도는 측정 계기에 의한 0 차 불확도(u_0)인 사용 버니어 캘리퍼스 분해능의 절반값이 된다.

홀로그램으로 재생된 이미지를 이용하여 거리를 측정하기 위하여, z 축 방향으로 입자 이미지의 초점면을 결정하여야 한다. 본 실험에서는 CCD 카메라를 광축 방향으로 32 μm 씩 이동하면서 획득한 다수의 입자 이미지를 이용하여, 입자와 배경의 명암값(gray value)의 기울기 변화와 육안 관찰을 이용하여 초점면으로 간주될 수 있는 z 축의 폭을 정하고 그 폭의 중심을 초점면으로 결정하였다.

실제 길이와 이미지 처리 시 1 화소(pixel)와의 관계를 정의하는 환산 계수(F)는 길이가 5 mm인

Table 1 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 \pm 0.025	10.972 \pm 0.308	1.6
	B-C	1.85 \pm 0.025	1.784 \pm 0.101	3.6
	C-D	18.25 \pm 0.025	17.974 \pm 0.490	1.5
ΔZ	A-B	31.20 \pm 0.025	32.301 \pm 1.000	3.5
	B-C	30.25 \pm 0.025	28.638 \pm 1.000	5.3
	C-D	60.25 \pm 0.025	61.672 \pm 1.000	2.4

기준자의 홀로그래프 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/pixel이 된다. 환산계수에 대한 불확도, u_F 는 오차의 전파에 의한 불확도 계산 방식에 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 불확도, u_L 는 임의로 ± 0.1 mm 정도, 측정 화소수의 불확도, u_N 은 ± 2 화소 정도의 오차로 가정하였다. 식 (2)에 의해 환산 계수의 불확도 $u_F = 0.001197$ mm/pixel이 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 불확도 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 불확도, u_N 은 ± 2 화소 정도의 오차로 가정하였다.

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

위 방법에 의하여 홀로그래피를 이용하여 측정된 입자간 x, z 축간 거리와 불확도, 실제 거리에 대한 상대 오차를 Table 1에 나타내었다. 각 입자 사이의 실제 거리에 대해서 홀로그래피를 이용하여 측정된 거리의 상대 오차는 최대 6% 이내로 나타나고 있다. 또한, 홀로그래피를 이용한 측정에 있어서의 불확도는 측정값의 최대 $\pm 6\%$ 이내에 존재한다는 것을 알 수 있다. 초점면 결정의 불확실성으로 인하여 z 축 거리 측정에 있어서의 불확도가 x 축 거리 측정 불확도보다는 높게 나타나고 있다.

3.2 크기 측정 결과

Figure 4의 입자들에 대하여 입자 직경을 측정, 비교하였다. 각 입자의 실제 직경은 마이크로미터를 이용, 10 회 정도 계속하였으며, 그 평균값을 Table 2에 나타내었다. 실제 직경 측정의 불확도 $u_{s,a}$ 는 측정 계기에 의한 0 차 불확도(± 0.005 mm)와 다중 측정에 의한 정밀오차⁽⁸⁾로 구성된다.

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

여기서 $t_{\nu,P}$ 는 확률 $P\%$, 자유도 ν 인 경우의 t 추정치이며, S_x 는 평균의 표준편차이다.

홀로그래프 이미지로부터 측정되는 입자 직경은 입자 직경에 해당하는 화소수를 측정하여 환산 계수를 곱하여 계산되었다. 따라서, 직경 측정의 불확도, $u_{s,m}$ 은 전술한 x 축 거리 측정시 불확도와 동일하게 된다.

$$u_{s,m} = \sqrt{(N u_F)^2 + (F u_N)^2} \quad (6)$$

Table 2 Comparison of actual glass bead diameters with measured values

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

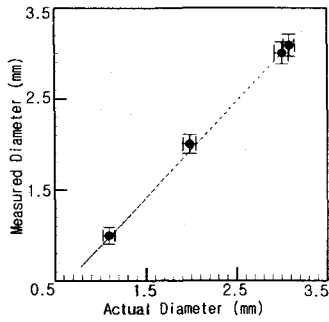


Fig. 6 Comparison of actual glass bead diameters with measured values

측정 화소수의 불확도, u_N 은 마찬가지로 ± 2 화소 정도의 오차로 가정하였다.

위 방법에 의하여 홀로그래피를 이용하여 측정된 직경과 불확도, 실제 직경에 대한 상대 오차를 Table 2와 Fig. 6에 나타내었다. 입자의 실제 크기에 대하여 홀로그래피를 이용해서 측정한 입자 직경의 상대 오차는 최대 5%를 넘지 않으며, 홀로그래피 측정시의 불확도는 측정값의 최대 $\pm 9\%$ 범위를 넘지 않음을 알 수 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 μ s인 이중 펄스 홀로그래피를 이용하여 두 순간에서의 입자 이미지를 획득하였다. Figure 7 (a)의 왼쪽은 첫 번째, 오른쪽은 두 번째 펄스에 의한 입자 이미지이며, (a)는 첫 번째 펄스의 이미지에, (b)는 CCD 카메라를 z 축상에서 이동하며 두 번째 펄스 이미지에 초점을 맞춘 것이다.

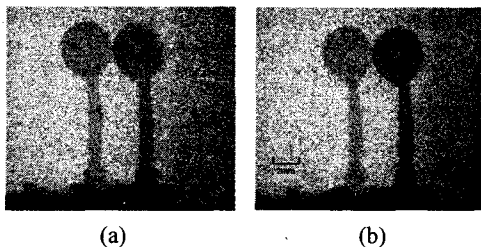


Fig. 7 Holographically reconstructed double images of particle; image of (a) first pulse (b) second pulse is focusd

원판 회전수로부터 계산된 입자의 실제 속도와 불확도 값을 Table 3에 나타내었다. 원판 회전 속도 측정의 불확도 u_ω 는 측정 계기에 의한 0 차 불확도(± 0.5 rpm)와 다중 측정에 의한 정밀오차로 구성된다.

$$u_\omega = \sqrt{(u_0)^2 + (t_{v,p} S_{\bar{x}})^2} \quad (7)$$

입자의 실제 속도 V_a 는

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

이므로, 실제 입자 속도의 불확도 $u_{V,a}$ 는

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

로 표시되며, u_R 은 반지름 측정시 불확도, 즉 버니어 캘리퍼스도 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 나누면 구해진다. x, z 방향 변위의 불확도는 전술한 x, z 방향 입자간 거리 측정시의 불확도 산출 방법과 같은 방법에 의해 구해진다. 원판 회전수 813, 1284 rpm의 경우, 환산 계수 F는 각각 0.025, 0.033 mm/pixel이다. x, z 방향 속도는

$$V_i = \frac{D_i}{t} \quad i=x \text{ or } z \quad (10)$$

에 의해 결정되므로 x, z 방향 속도의 불확도는

Table 3 Comparison of actual glass bead velocities with measured values

RPM	Actual Velocity (m/s)		Measured Velocity (m/s)		Relative Error (%)
	V_a	V_x	V_z	V_m	
813 ± 2.05	10.637 ± 0.027	5.850 ± 0.165	8.550 ± 0.224	10.365 ± 0.207	2.56
1284 ± 1.37	16.799 ± 0.020	8.316 ± 0.280	13.722 ± 0.285	16.045 ± 0.284	4.49

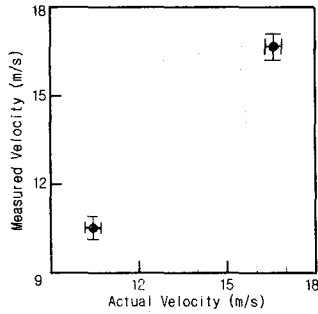


Fig. 8 Comparison of actual glass bead velocities with measured values

$$u_{vi} = \sqrt{\left(\frac{1}{t} u_{D_i}\right)^2 + \left(\frac{D_i}{t^2} u_t\right)^2} \quad (11)$$

이며, 레이저 두 펄스간 시간 간격의 불확도 u_t 는 0으로 하였다. 입자 속도 V 는

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_z^2} \quad (12)$$

이므로, 측정되는 입자 속도의 불확도 $u_{v,m}$

$$u_{v,m} = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial V_x} u_{v_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial V_z} u_{v_i}\right)^2} \quad (13)$$

에 의하여 계산된다.

위 방법에 의하여 홀로그래피를 이용하여 계산된 입자의 x, z 방향 속도와 그 크기, 불확도, 실제 속도에 대한 상대 오차 값을 Table 3과 Fig. 8에 나타내었다. 실제 입자 속도와 홀로그래피를 이용해 측정된 속도와와의 상대 오차는 최대 5%를 넘지 않으며, 홀로그래피 측정법의 불확도는 측정값의 $\pm 2\%$ 이내임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 3차원 입자 속도 계측을 위하여, 3차원 재현성이 가장 우수한 홀로그래피 방법을 이용하여 입자 이미지를 기록하고, 재생한 입자의 이미지 분석을 통하여 입자의 크기와 속도를 측정하여 실제의 값과 비교하였으며, 측정 과정에 관여되는 오차에 대하여 불확도 분석을 통하여 오차의 범위를 분석하였다.

입자의 크기는 마이크로 미터로 측정한 값과의 상대 오차가 5% 이내였으며, 홀로그래피 측정값의 불확도는 측정값의 $\pm 9\%$ 이내였다. 입자의 속도는 원판 회전수에 의해 예측된 입자의 속도 값과 상대 오차 5% 이내였으며, 홀로그래피 측정값의 불확도는 측정값의 $\pm 2\%$ 이내였다.

후 기

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

참 고 문 헌

- (1) Vikram, C. S., 1979, *Particle Field Holography*, Cambridge University Press.
- (2) Feldmann, O., 1999, "Short-Time Holography and Holographic PIV Applied to Engineering Problems," *Applied Optical Measurements*, Springer-Verlag.
- (3) Kang, B.S. 1995, "A Holographic Study of The Dense Resion of a Spray Created by Two Impinging Jets," Ph.D. Thesis, Univ. of Illinos at Chicago.
- (4) Barnhart, D.H., Adrian, R.J., 1994, "Phase-Conjugate Holographic System for High-Resolution Particle-Image Velocimetry," *Applied Optics*, Vol. 33, pp. 7159~7170.
- (5) J. Zhang, B. Tao, J. Katz, 1997, "Turbulent Flow Measurement in a Square Duct with Hybrid Holographic PIV," *Experiments in Fluids*, Vol. 34, pp.1857~1840.
- (6) Meng, H., Hussain, F., 1995, "In-Line Recording and Off-Axis Viewing Technique for Holographic Particle Velocimetry," *Applied Optics*, Vol. 34, pp. 1827~1840.
- (7) Zimin, V., Meng, H., Hussain, F., 1993, "Innovative Holographic Particle Velocimeter; A Multibeam Technique," *Optical Letters*, Vol. 18, No. 13, pp. 1101~1103, .
- (8) Figliola, Richard S., Beasley, Donald E., 1998, *Theory and Design for Mechanical Measurement*, John Wiley & Sons.