

디지털 화상처리를 이용한 유동장의 비접촉 3차원 고속류 계측법의 개발

최성환* · 도덕희** · 이연원***

Development of noncontact velocity tracking algorithm for 3-dimensional high speed flows using digital image processing technique

S.H. Choi · D.H. Doh · Y.W. Lee

Key words : Digital image processing technique(디지털 화상처리기술), Three CCD cameras(3대의 CCD카메라), Moving particles(유동입자), Three-dimensional velocity components(3차원 속도성분), Backward facing step flow(후향단 유동)

Abstract

A new algorithm for measuring 3-D velocity components of high speed flows was developed using a digital image processing technique. The measuring system consists of three CCD cameras, an optical instrument called AOM, a digital image grabber, and a host computer. The images of moving particles arranged spatially on a rotating plate are taken by two or three CCD cameras and are recorded onto the image grabber or a video tape recorder. The three-dimensional velocity components of the particles are automatically obtained by the developed algorithm. In order to verify the validity of this technique, three-dimensional velocity data sets obtained from a computer simulation of a backward facing step flow were used as test data for the algorithm. An uncertainty analysis associated with the present algorithm is systematically evaluated. The present technique is proved to be used as a tool for the measurement of unsteady three-dimensional fluid flows.

1. 서 론

공학적으로 중요도가 높은 유동현상인 벽면난

류, 분류, 박리류 등의 난류유동장의 물리기구를 이해하기 위해서는 유동장의 넓은 영역에 있어서 순시속도의 3성분을 정량적으로 측정할 필요가 있

* 한국해양대학교 대학원(원고접수일 : 99년 3월)

** 한국해양대학교 기계공학계열

*** 부경대학교 기계공학과

다. 특히, 스케일이 큰 조직구조의 발생으로부터 소멸에 이르기까지의 메카니즘을 해석하기 위해서는 유동장의 공간적 구조에 관한 정보가 필요하다.

종래의 대표적인 난류계측법인 열선유속계 혹은 레이저도플러 유속계는 원칙적으로는 유동장의 한 점에서의 속도를 측정하는 방법이며 원리적으로는 공간구조에 관한 정보를 직접 제공하지는 못한다.

한편, Particle Tracking Velocimetry(이하 PTV라 명한다)¹⁾는 미세한 추적입자를 유동장에 투입하여 그 입자들의 이동경로를 카메라 및 조명광원으로 가시화 한 후 그 가시화 된 화상에 있어서 각자의 올바른 입자의 경로를 결정함으로써 속도를 측정하는 방법으로 유동장을 거의 교란하지 않으면서 비접촉식으로 유동장의 전역에 걸쳐서 속도를 동시에 측정할 수가 있다. 또한, PTV는 시간적으로 연속해서 계측을 하면 유동장 전체의 시간변화를 알 수가 있으므로 유동장의 조직적 구조를 이해하는데 커다란 도움이 된다. 그러나, 지금까지 대부분의 PTV계측에 의한 유동장의 속도계측법은 2차원에 의한 것들이며^{2)~5)} 계측대상의 유동장이 비교적 강한 3차원 흐름의 속도계측에 기존의 2차원 계측법을 적용할 경우에는 3차원의 정보를 손실하고 만다. 이를 극복하기 위하여 개발된 계측법이 스테레오사진법에 의거한 3차원 계측법이다^{6)~8)}.

그러나 현재 대부분의 PIV(Particle Imaging Velocimetry)¹⁾ 혹은 PTV계측시스템은 국제규격인 NTSC(National Television System Committee)방식의 CCD(Charge Coupled Device)카메라를 사용하여 속도를 계측하고 있기 때문에 촬영속도가 1/60초로 한정되어 있으므로 유동장의 계측영역의 국소속도가 빠른 계측에는 적용하기 어려운 점이 있다. 물론 고속카메라를 사용하면 이 문제는 해결되지만 경제적이지 못하다.

따라서 본 연구에서는 국제규격의 CCD카메라로 3차원성이 강하면서도 흐름의 국소속도가 빠른 유동장에 대해서도 속도계측이 가능한 3차원 PTV계측시스템을 구축하고자 한다. 이를 위하여 카메라의 입사광에 대한 차단 및 조절이 가능한 음향광학기(Acousto Optical Modulator : 이하 AOM

로 표기)를 이용하여 일치확률방식⁹⁾에 의거한 3차원 고속류 계측법을 개발하고자 한다.

개발된 계측시스템으로 회전원판위에 3차원적으로 배치되어 있는 추적입자의 회전속도를 계측함으로써 본 계측시스템의 유효성을 확인한 후 이를 후향계단 실제 유동장의 계측에 적용하였다.

또한 후향단 유동의 수치계산결과를 이용하여 본 계측알고리즘의 계측성능을 평가하였다.

끝으로 구축된 계측시스템에 대한 오차해석을 통하여 계측시스템의 계측정도를 정량적으로 추정함으로써 본 계측법의 유효성을 보이고자 한다.

2. 비접촉 3차원 계측원리 및 장치

본 계측법은 유동장에 프로브나 열선 등의 유속계를 투입하는 대신에 다수의 작은 추적입자를 투입하여 이들의 운동을 2대 이상의 카메라로 3차원적으로 추적함으로써 유속의 3성분을 동시에 측정하는 것이다.

Fig. 1은 계측법의 순서를 나타낸다. 유동장의 추적입자를 절대좌표계상에서 추적하기 위해서는 절대좌표계에 대한 카메라들의 상대적인 위치 및 자세를 알아야한다. 이 과정을 카메라교정작업이라 한다. 이때 교정작업에 기준이 되는 절대지상좌표계는 이미 알고 있는 36개의 3차원 기준점을 이용한다. 카메라의 교정작업이 끝나면 각 카메라들에 대한 3개의 공선(共線)의 교점들을 구하면 하나의 입자에 대한 3차원 위치가 결정된다. 모든 입자들에 대한 3차원 위치가 결정이 되면 또 다른 시각에서의 3차원 위치를 모든 입자들에 대해서 구한 다음 이들 두 시각에서의 입자들에 대하여 동일한

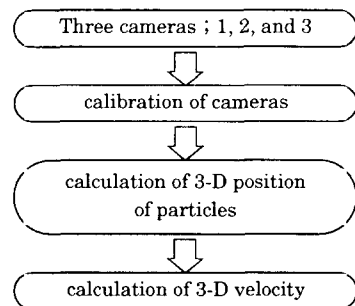


Fig. 1 Procedure of 3-D measurement.

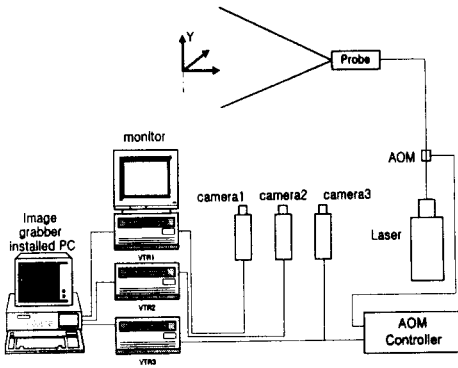


Fig. 2 Arrangement of measurement system.

입자를 찾기만 하면 3차원 공간상에서 움직인 속도벡터가 얻어지게 된다. 즉, 일정 시간간격 Δt 동안 움직인 3차원 거리와 방향에 시간간격 Δt 를 나누면 3차원 속도벡터가 된다. 이때 두 시각사이에서의 동일입자추적은 전술의 일치확률방식을 적용하였다. Fig. 2는 계측장치의 개요를 나타낸다. 추적입자의 3차원속도를 비접촉 계측하기 위하여 3대의 흑백 CCD카메라(Sony, SSC-M370)를 계측대상물을 향하여 설치한다. 3대의 카메라(SSC-M370)를 통하여 가시화 된 영상은VTR1(Panasonic, AG-7350) 혹은 VTR2(Sony, RS1) 및 VTR3(SLV-595HF)와 호스트컴퓨터(Pentium 360MHz)에 내장된 이미지그래버(DT64)에 기록된다. 이미지그래버에 입력된 화상은 호스트컴퓨터에 의해 추적입자의 사진좌표 (x, y) 를 구하는데 쓰인다. 화상처리되는 도중의 결과는 호스트컴퓨터의 모니터로 출력된다.

2. 1 사진측량법의 원리

Fig. 3은 절대좌표계(X, Y, Z)와 카메라좌표계(X, Y, Z) 및 사진좌표계(x, y)의 관계를 나타낸다. 그림에 나타난 바와 같이 추적입자 P는 카메라좌표계에서는 $P_i(i=1, 2, 3)$ 점에 해당된다.

카메라의 투영중심, 사진상 및 지상의 추적입자가 일치선상에 있다는 공선(共線)조건으로부터 다음 식 (1)이 성립된다.

$$x = -c \frac{a_{11}(X - X_0) + a_{12}(Y - Y_0) + a_{13}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} + \Delta x$$

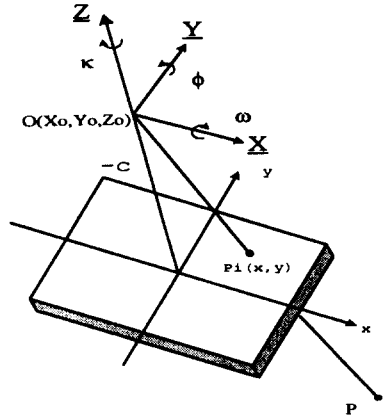


Fig. 3 Relations between absolute and camera's coordinate system.

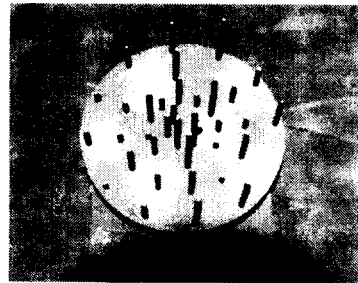


Fig. 4 Basic landmarks.

$$y = -c \frac{a_{21}(X - X_0) + a_{22}(Y - Y_0) + a_{23}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} + \Delta x \tag{1}$$

$$\begin{aligned} a_{11} &= \cos \phi \cos \kappa, & a_{12} &= -\cos \phi \sin \kappa, \\ a_{13} &= \sin \phi \\ a_{21} &= \cos \omega \sin \kappa + \cos \omega \sin \phi \cos \kappa, \\ a_{22} &= \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \phi \sin \kappa, \\ a_{23} &= -\sin \omega \cos \phi \\ a_{31} &= \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \phi \cos \kappa, \\ a_{32} &= \sin \omega \cos \omega + \cos \omega \sin \phi \sin \kappa, \\ a_{33} &= \cos \omega \cos \phi \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \Delta x &= x_0 - \bar{x}(k_1 r^2 + k_2 r^4), \\ \Delta y &= y_0 + \bar{y}(k_1 r^2 + k_2 r^4) \end{aligned}$$

$$r^2 = (x^2 + y^2) / c^2$$

$$\bar{x} = x - x_0, \bar{y} = y - y_0 \quad (3)$$

이때, 회전행렬 a_{ij} 는 식 (2)와 같으며 카메라렌즈의 왜곡에 의한 수정량 $\Delta x, \Delta y$ 는 식 (3)과 같다. 여기서, (X, Y, Z) 는 대상물 P의 절대좌표, (X_0, Y_0, Z_0) 는 투영중심의 절대좌표, c 는 화면거리, (x, y) 는 대응하는 사진상의 사진좌표이며 (x_0, y_0) 는 카메라 주점(principle point, center of camera)위치의 이동 량을 나타낸다.

2. 2 카메라의 교정작업

추적입자의 3차원위치 P(X, Y, Z)를 계산하기 위하여 카메라의 3차원위치 및 자세를 전술한 사진측량법에 의해 구하는 작업을 교정작업이라 한다. 카메라의 교정작업은 절대좌표계(지상좌표계)에서 측정영역내에 3차원적으로 배치되어 있는 기준점을 추적입자로 가정하여 실시한다. 3차원의 절대좌표를 알고 있는 기준점과 이에 대한 사진좌표를 이용하여 식(1), (2), (3)에 대한 최소자승법과 접목한 축차근사해법(10)으로부터 카메라의 외부 파라메타($X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa$)와 내부 파라메타(c, x_0, y_0, k_1, k_2)를 구한다. 본 연구에서는 3대의 카메라의 교정을 위하여 Fig. 4와 같이 3차원좌표 값이 이미 알려져 있는 36개의 기준점을 이용한다. 이들 기준점은 원판위에 고정되어 있으며 구축된 3차원 계측시스템의 검정을 위하여 원판하부에 부

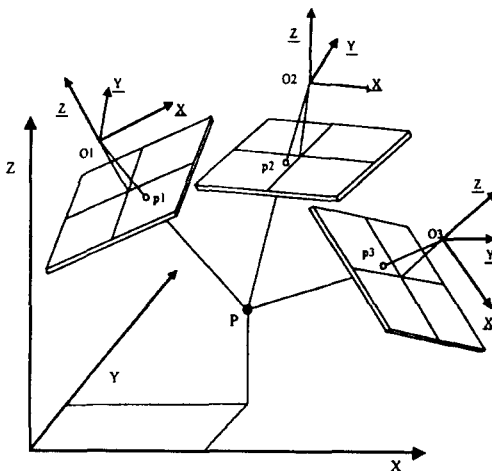


Fig. 5 Principle of 3-D position of particles.

착된 모터에 의하여 일정속도로 회전을 하게된다.

2. 3 추적입자의 3차원 속도계측

3대의 카메라에 대한 교정작업이 끝나면 추적입자의 시간 연속적인 추적을 위하여 64장의 프레임화상(frame image)이 카메라를 통해 컴퓨터내장의 이미지그래버로 입력된다. 입력된 64장의 프레임화상을 다시 128장의 필드화상(field image)으로 보간분리한 후 입자들에 대한 중심을 구하여 사진좌표의 데이터로 이용한다.

Fig. 5는 위치와 기울기가 서로 다른 3대의 카메라로 촬영했을 때의 관계를 나타낸다. 지상좌표계의 좌표가 (X, Y, Z) 인 표적 P를 투영중심이 $O_3(X_{01}, Y_{01}, Z_{01})$, 3축의 기울기각도가 $(\omega_1, \phi_1, \kappa_1)$ 인 카메라 1과 투영중심이 $O_2(X_{02}, Y_{02}, Z_{02})$, 3축의 기울기각도가 $(\omega_2, \phi_2, \kappa_2)$ 인 카메라 2와 투영중심이 $O_3(X_{03}, Y_{03}, Z_{03})$, 3축의 기울기각도가 $(\omega_3, \phi_3, \kappa_3)$ 인 카메라 3으로 촬영했을 때, 입력된 상은 투영중심으로부터 화면거리만큼 떨어진 평면상에 투영된 것과 같다. 전 절에서와 같이 카메라의 파라메타가 구해지면, 투영중심, 사진좌표, 피사체간에 공선(共線)조건식이 결정되므로 이것을 이용하며 피사체의 3차원 좌표는 다음과 같이 결정된다.

식 (1)을 변형하면 대응하는 한 조의 사진좌표계 (x, y) 로부터 절대좌표계 (X, Y, Z) 로의 변환은 식 (4)와 같이 된다. 카메라 1, 2, 3의 입자화상에 대응하는 사진좌표 $p_1(x_1, y_1), p_2(x_2, y_2), p_3(x_3, y_3)$ 는 식 (4)에 의해 사진좌표계로부터 절대좌표계로 변환되며 이들 점과 카메라들이 형성하는 3차원 좌표에 대한 관측방정식은 식(5)로 표시되며 이 식은 세 카메라가 형성하는 세 개의 직선들이 교차하는 3차원 교점을 나타낸다.

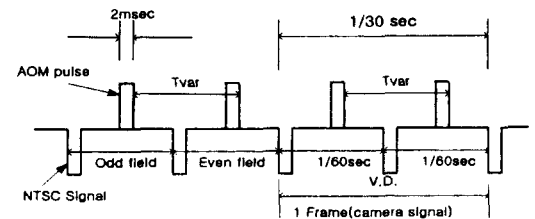


Fig. 6 Relation between NTSC camera signal and AOM signal.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ -c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \left[\begin{pmatrix} X_{01} + X_{02} \\ Y_{01} + Y_{02} \\ Z_{01} + Z_{02} \end{pmatrix} + k_1 \begin{pmatrix} X_{p1} - X_{01} \\ Y_{p1} - Y_{01} \\ Z_{p1} - Z_{01} \end{pmatrix} + k_2 \begin{pmatrix} X_{p1} - X_{01} \\ Y_{p1} - Y_{01} \\ Z_{p1} - Z_{01} \end{pmatrix} + k_3 \begin{pmatrix} X_{p2} - X_{02} \\ Y_{p2} - Y_{02} \\ Z_{p2} - Z_{02} \end{pmatrix} \right] \quad (5)$$

이때 $(X_{pi}, Y_{pi}, Z_{pi})(i=1,2,3)$ 는 제1카메라, 제2카메라, 제3카메라의 좌표변환후의 사진상이며, 미지수 k_1, k_2, k_3 는 매개변수로서 최소사승법에 의하여 구해지게 된다.

추적입자의 3차원속도는 이들 최종 3차원 절대좌표의 시간적 이동량을 구함으로써 얻어진다. 이때 동일한 입자추적은 전술의 일치확률방식을 응용하여 공간상에서 추적할 수 있도록 하였다. 이것은 2장의 연속된 디지털 유동화상내에 있는 입자의 가능한 모든 변위벡터를 고려한 후 각 변위들에 대한 일치확률(match probability)를 정의하고 불일치확률(no-match probability)과 함께 반복 계산함으로써 일치확률밀도가 가장 높은 것을 변위벡터로 결정하는 방식으로 2차원 속도계측에 관한 구체적인 알고리즘은 Lee & Baek⁹⁾에 잘 나타나 있으며 본 연구에서는 이를 3차원으로 확장하였다.

한편 측정영역에 대한 입자이동 속도가 빠르고 고속유동의 계측인 경우에는 Fig. 6에 나와 있듯이 표준규격(NTSC : National Television System Committee)의 CCD카메라의 촬영시간간격이 1/60초이기 때문에 이 시간해상도로는 속도계측이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 음향광학장치인 AOM시스템¹²⁾을 도입함으로써 이를 극복하였다.

이 시스템을 이용하면 표준규격의 CCD카메라의 고정된 촬영시간(1/60sec)에 대하여 레이저광원을 원하는 시각에 간헐적으로 단속이 가능하므로 계측영역을 통과하는 입자의 이동속도가 비교적 빠른 경우 속도벡터의 시점과 종점의 coding이 가능하게 된다. 만일 Fig. 6과 같은 coding을 하게 되면 두 개의 파일드화상(odd and even fields)으로 분리시키기만 하면 시점과 종점의 결정은 용이하게 된다. 결국 시점과 종점들에 대하여 전술의 3

차원 절대좌표만 결정되면 고속 3차원 유동장의 속도계측이 가능해진다. 본 연구에서는 Tvar을 4 msec로 고정하였다.

3. 고속 회전 원판실험

본 연구에서 구축한 3차원 PTV계측시스템을 고속으로 회전하고 있는 Fig. 4의 회전원판상에 3차원적으로 배치되어 있는 핀들의 침두부의 속도계측에 적용하였다. 각 핀들은 3차원적으로 배치되어 있으며 Fig. 4의 면의 수직방향을 절대좌표계에서의 Z축 방향으로 하고 면의 가로방향을 절대좌표계의 X방향, 세로방향을 절대좌표계의 Y방향으로 하였다. 또한 핀의 식별을 쉽게 하기 위하여 핀의 말단부에 흰색의 도료를 발랐다. 3차원 계측을 하기 위해서는 카메라의 교정작업이 필요하게 되는데 원판상의 핀의 침두부를 기준점의 위치정보로 이용하고 이들에 대한 각 카메라의 사진좌표들을 이용하여 카메라의 교정작업을 하였다. 이들 3차원위치는 원판의 중점을 절대좌표 (X, Y, Z)의 원점 (0, 0, 0)으로 하여 카메라 1의 좌표계에서 가

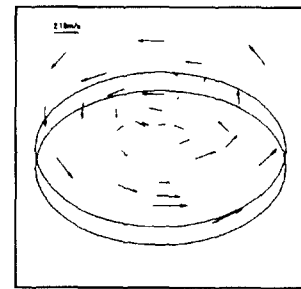


Fig. 7 Obtained 3-D velocity vectors.(300rpm)

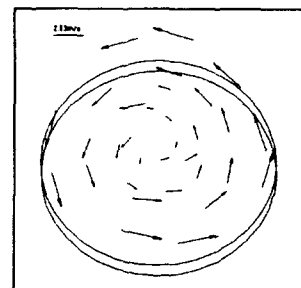


Fig. 8 Obtained 3-D velocity vectors.(400rpm)

로의 정방향을 X축방향, 세로의 정방향을 Y축방향, 원판의 수직방향을 Z축방향으로 정의하였다.

다음으로 유동장의 유속을 3차원적으로 계측하는 것과 같은 운동을 재현하기 위하여 Fig. 4의 실물을 각각 300rpm, 400rpm회전시켜서 원판상의 핀들의 속도벡터를 계측하는 실험을 했다. Fig. 7과 Fig. 8은 속도계측의 결과를 나타낸다. 36개의

Table. 1 Differences between the measured speed and the actual rotating speed of motor

No	300 RPM		400 RPM	
	measured m/sec	actual m/sec	measured m/sec	actual m/sec
1	0.610	0.628	0.830	0.838
2	0.616	0.628	0.847	0.838
3	0.613	0.628	0.836	0.838
4	0.622	0.628	0.822	0.838
5	0.633	0.628	0.852	0.838
6	1.410	1.414	1.876	1.885
7	1.383	1.414	1.868	1.885
8	1.422	1.414	1.870	1.885
9	1.392	1.414	1.867	1.885
10	1.397	1.414	1.889	1.885
11	1.406	1.414	1.891	1.885
12	1.410	1.414	1.898	1.885
13	1.423	1.414	1.859	1.885
14	1.385	1.414	3.358	3.351
15	2.493	2.513	3.355	3.351
16	2.523	2.513	3.363	3.351
17	2.512	2.513	3.358	3.351
18	2.522	2.513	3.343	3.351
19	2.518	2.513	3.352	3.351
20	2.499	2.513	3.356	3.351
21	2.501	2.513	3.358	3.351
22	2.530	2.513	3.339	3.351
23	2.513	2.513	3.350	3.351
24	2.517	2.513	4.994	5.027
25	2.523	2.513	5.042	5.027
26	3.762	3.770	5.030	5.027
27	3.789	3.770	4.969	5.027
28	3.684	3.770	4.998	5.027
29	3.785	3.770	4.992	5.027
30	3.753	3.770	5.015	5.027
31	3.760	3.770	5.052	5.027
32	3.786	3.770	5.010	5.027
$\sigma_u(300)=0.0210[\text{m/sec}]$ $\sigma_u(400)=0.0183[\text{m/sec}]$				

기준점 중에서 얻어진 총 개수는 32개였다. 전부 추적적이 되지 않은 것은 핀이 회전할 때 작은 핀이 큰 핀에 가려져서 카메라가 입자상을 상실했기 때문이다. Fig. 7과 8의 좌상단에 나타나 있는 화살표는 기준속도벡터를 의미하며 로 각각 2.10m/sec와 2.93m/sec를 나타낸다.

Table 1은 원판 위에 설치되어 있는 기준 점들이 회전할 때 계측된 속도와 각 기준점들이 300과 400 rpm으로 회전할 때 회전속도($u=\omega r$)와의 비교를 나타내고 있다. 회전원판의 회전속도는 원판 하부에 부착된 회전용 서어보모우터(FMD, E-40TA, 400W)와 연결된 회전속도계(GLA, DPI282, 오차한계 = $\pm 0.05\%$)로 계측하였다. 회전속도가 300rpm일 때 표준편차의 값은 0.021m/sec였으며 이는 가장 작은 속도인 0.628m/sec의 약 3%에 해당된다. 또한 회전속도가 400rpm일 때 표준편차의 값은 0.0183m/sec였으며 이는 가장 작은 속도인 0.838m/sec의 약 2%에 해당된다. 이는 본 연구에서 구축된 계측시스템과 회전원판상에 회전하고 있는 기준점 속도와 상대오차가 작으므로 본 계측시스템은 3차원 고속 계측에 유효함을 알 수 있다. 한편 에러벡터가 발생되지 않기 위해서는 일치확률방식⁶⁾에서는 탐색영역의 크기 설정에 주의해야 한다. 본 연구에서는 시행착오적 방법으로 이를 설정하여 속도를 구하였다.

4. 후향단 유동장의 3차원 속도계측

앞에서 구축한 계측시스템을 실제 유동에 적용하였다. 계측대상은 높이가 25mm 인 후향단의 유동이다. Fig. 9는 후향단의 유동을 계측하기 위해 구축된 계측시스템을 나타내고 있다. 전술한 바와 같이 3차원 계측을 하기 위해서는 카메라에 대한 교정작업이 필요하게 되는데 Fig. 10은 카메라를 교정하기 위한 교정판이다. 이 판의 크기는 가로 x 세로가 115mm x 110mm이다. 판 위에는 직경이 0.2mm인 흰색 도포의 원들이 가로 및 세로로 5mm간격으로 배치되어 있다. 카메라의 교정을 위하여 이 판은 수직 상방향으로 5mm간격으로 수동으로 0에서 50mm까지 이송시켜며 각 단면마다의 교정판에 새겨진 원형의 교정점들의 화상을 3대의

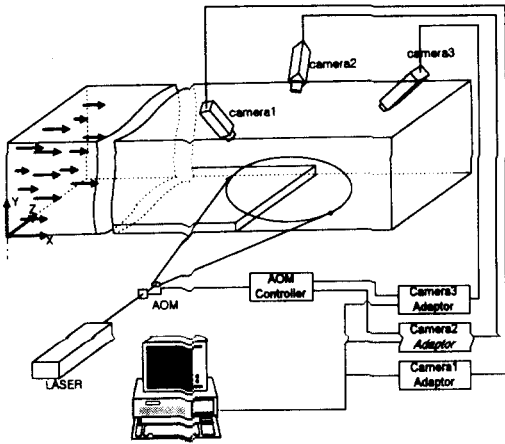


Fig. 9 3-D PTV measurement system.

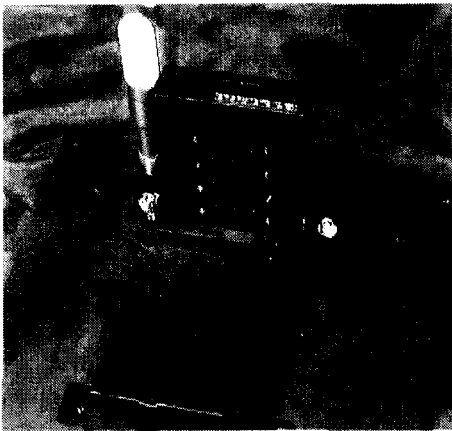


Fig. 10 Landmarks for the backward facing step flow.

카메라를 통하여 이미지그래버로 받아 들여 교정점들의 중점좌표(사진좌표)를 계산한다. 총 5082개의 교정점의 좌표들로부터 난수(random number)를 발생시켜 36개의 교정점을 얻어낸 후 이들 점의 사진좌표를 이용하여 카메라의 교정을 실시하였다. 카메라의 교정작업이 끝나면 교정판을 제거한 후 미리 제작된 후향계단을 수조 내에 설치하고 유동을 형성시킨다. 이때 형성된 유동장의 레이놀즈수는 계단의 높이를 대표길이로 하여 7,000정도이다. 다음으로 가시화용 레이저(Ar-ion)와 직경이 200 μ m 정도의 나일론입자(비중 1.02)를 투입하여 유동장을 가시화 한다. 후향계단으로부터 25mm 떨어진 위치에서 70mm사이의 유동장을 교

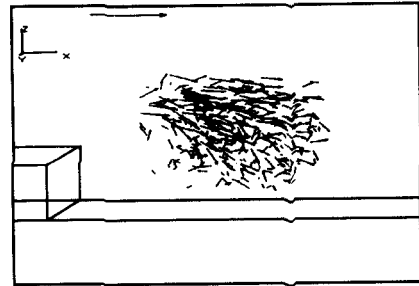


Fig. 11 Measured instantaneous 3-D velocity vectors.

정된 카메라를 통하여 가시화 된 영상을 이미지그래버로 취득하여 추적입자들의 사진좌표를 구한다. 구한 사진좌표와 카메라교정보로부터 구한 카메라의 파라메타를 이용하여 전철의 동일한 방법으로 3차원 좌표 및 속도를 구한다. 본 연구에서는 계측 영역 내에 약 1,000개 정도의 입자가 나타나도록 작동유체에 대한 입자의 밀도가 균일하도록 조절하여 투입하였으나 실제로는 입자점침 및 입자들에 의한 광원의 간섭영향 등으로 최종적으로 얻어진 속도벡터의 개수는 약 350개 정도였다.

Fig. 11은 얻어진 3차원 순시속도벡터의 분포를 나타낸다. 그림에서 좌상부에 있는 화살표는 후향단의 높이로 무차원화한 속도의 크기를 나타낸다.

5. 비접촉식 3차원 고속 계측법의 검증

개발된 알고리즘의 성능검증을 위해서 후향단 유동(backward-facing step flow)에 대한 3차원 수치계산결과의 속도벡터에 대하여 구축된 소프트웨어로 추적하여 보았다. 수치계산의 결과로부터 3차원 입자좌표 값을 구축된 프로그램에 입력하여 벡터의 추적성능을 평가하였다. 레이놀즈수 300일 때 수치계산으로부터 얻어낸 시간평균속도 벡터의 총수는 36,000개이며 이들 속도벡터로부터 무작위로 1,000개를 추출하여 3차원 계측의 추적성능을 검증하였다. Fig. 12는 추적결과의 일 예를 나타내며 1,000개의 속도벡터에 대하여 100% 3차원 추적이 가능하였다. 그림에서 좌상부에 있는 화살표는 후향단의 높이를 대표길이를 무차원화한 속도의 크기를 나타낸다.

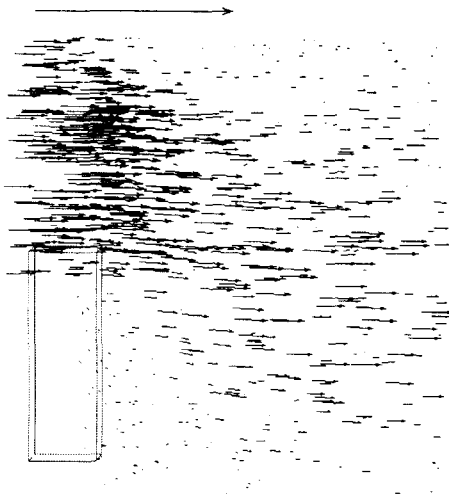


Fig. 12 Obtained 3-D velocity vectors of a backward facing step flow.

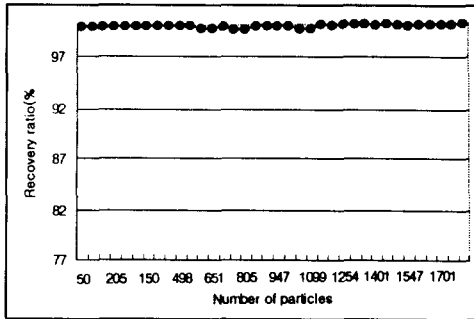


Fig. 13 Variation of the recovery ratio.

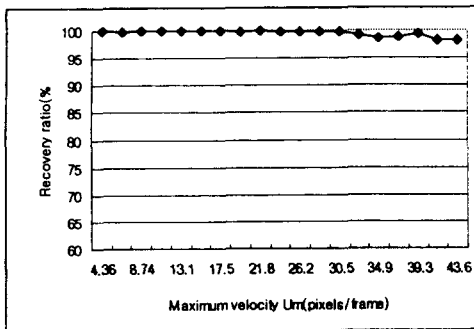


Fig. 14 Recovery ratio for maximum velocity.

Fig. 13은 유동장내 입자수 변화에 따른 recov-

ery ratio의 변화양상을 보여준다. 여기서, recovery ratio란 총 추적 가능한 속도벡터의 수에 대한 실제 추출된 정확한 벡터의 수의 비를 나타내며 이 값이 클수록 알고리즘의 성능이 뛰어난 것을 의미한다. 본 3차원 계측알고리즘은 입자수가 많은 경우에도 거의 높은 수준을 유지하고 있으므로 3차원 추적성능이 우수함을 알 수 있다. Fig. 14는 후향 계단 유동장 내의 3차원 최대속도 U_m 에 따른 recovery ratio의 변화를 나타낸다. U_m 이 큰 경우에도 3차원 추적알고리즘이 높은 recovery ratio를 보이므로 3차원 추적알고리즘은 넓은 dynamic range를 지닌다고 할 수 있다.

6. 계측오차

본 계측에 있어서의 추적입자의 3차원 위치를 계산할 때의 오차의 원인으로서 카메라 파라메타의 설정오차와 사진표준좌표측정시의 오차 등이 생각될 수 있으나 이들이 구해지더라도 입자의 3차원 위치와 이들 오차원인과의 사이에는 단순한 함수 관계가 성립하지 않으므로 오차전파의 식으로부터 오차를 검정하기란 쉽지 않다. 따라서, 미리 계측되어 있는 Fig. 10의 후향단 실험에 사용된 기준점의 위치와 카메라 파라메타를 사용해서 계산한 기준점의 위치를 비교하는 것으로 오차를 구하였다. 2대의 카메라로 추적하였을 때는 Table 2에 나타난 바와 같이 X, Y, Z에 대한 오차의 편차한계가 각각 0.04mm, 0.02mm, 0.09mm였으며 3대의 카메라로 추적하였을 때는 Table 3에 나타난 바와 같이 각각 0.03mm, 0.02mm, 0.03mm였다. 여기서 X, Y, Z는 기준점의 3차원 좌표이고 X', Y', Z'는 구축된 계측시스템으로 계측한 3차원 좌표이다. 이로부터 알 수 있는 것은 카메라 3대로 계측을 하게 되면 전반적으로 계측오차가 줄어들며 특히 Z방향에 대한 오차가 현격하게 줄어들음을 알 수 있다. 이는 카메라 한 대를 더 이용하게 되면 카메라의 시선각 방향으로의 오차를 줄여줄 수 있음을 의미한다.

교정작업에 쓰여졌던 기준점의 제작정도 및 조립정도를 더욱 정교히 하면 수십 μm 이내로 줄일 수 있다.

Table 2. Measurement errors in the case of two cameras.

No	(X')	(X)	(Y')	(Y)	(Z')	(Z)	X' - X	Y' - Y	Z' - Z
1	4.96	5.00	20.02	20.00	1.90	2.00	0.04	0.02	0.10
2	-5.00	-5.00	-4.98	-5.00	3.31	3.20	0.00	0.02	0.11
3	29.86	30.00	9.93	10.00	4.14	4.40	0.14	0.07	0.26
4	-14.95	-15.00	10.00	10.00	5.55	5.60	0.05	0.00	0.05
5	0.04	0.00	-15.00	-15.00	6.85	6.80	0.04	0.00	0.05
6	15.01	15.00	-5.00	-5.00	7.93	8.00	0.01	0.00	0.07
7	-9.97	-10.00	4.98	5.00	9.20	9.20	0.03	0.02	0.00
8	10.01	10.00	10.03	10.00	10.44	10.40	0.01	0.03	0.04
10	20.01	20.00	-9.98	-10.00	12.83	12.80	0.01	0.02	0.03
11	-19.99	-20.00	-0.06	0.00	13.91	14.00	0.01	0.06	0.09
12	5.01	5.00	5.06	5.00	15.35	15.20	0.01	0.06	0.15
13	-4.94	-5.00	-9.97	-10.00	16.55	16.40	0.06	0.03	0.15
14	-19.93	-20.00	15.00	15.00	17.79	17.60	0.07	0.00	0.19
16	-9.97	-10.00	0.01	0.00	20.04	20.00	0.03	0.01	0.04
17	20.03	20.00	5.03	5.00	21.19	21.20	0.03	0.03	0.01
18	-25.06	-25.00	-5.02	-5.00	22.31	22.40	0.06	0.02	0.09
19	5.01	5.00	-5.00	-5.00	23.66	23.60	0.01	0.00	0.06
20	-4.96	-5.00	25.04	25.00	24.90	24.80	0.04	0.04	0.10
21	29.98	30.00	-0.03	0.00	25.92	26.00	0.02	0.03	0.08
22	-15.04	-15.00	-5.04	-5.00	27.06	27.20	0.04	0.04	0.14
23	14.95	15.00	19.97	20.00	28.21	28.40	0.05	0.03	0.19
24	-20.05	-20.00	-10.02	-10.00	29.51	29.60	0.05	0.02	0.09
25	19.96	20.00	10.01	10.00	30.75	30.80	0.04	0.01	0.05
26	-9.91	-10.00	20.05	20.00	32.18	32.00	0.09	0.05	0.18
27	-4.98	-5.00	-20.00	-20.00	33.25	33.20	0.02	0.00	0.05
28	5.04	5.00	14.99	15.00	34.44	34.40	0.04	0.01	0.04
29	-20.09	-20.00	-15.00	-15.00	35.54	35.60	0.09	0.00	0.06
31	-20.02	-20.00	5.03	5.00	38.06	38.00	0.02	0.03	0.06
32	10.10	10.00	-24.92	-25.00	39.50	39.20	0.01	0.08	0.30
33	14.94	15.00	14.98	15.00	40.34	40.40	0.06	0.02	0.06
35	-9.97	-10.00	9.99	10.00	44.04	44.00	0.03	0.01	0.04
Standard Deviation σ :							0.04	0.02	0.09

7. 결 론

3대의 CCD카메라, 음향광학장치 및 디지털 화상처리를 이용한 고속 3차원 입자영상유속계의 계측시스템을 구축하는 과정에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

One-Frame 3차원 PIV 계측시스템을 개발하였다.

회전원판상에 3차원적으로 배치되어 고속으로 회전하고 있는 추적입자들의 속도를 개발된 3차원 계측시스템으로 계측한 결과와 실제 원판회전수가 거의 일치함을 확인함으로써 구축된 3차원 고속계측법의 유효성을 입증하였다.

구축된 3차원 계측시스템을 후향단 유동장의 실 계측에 적용하여 순시의 속도벡터를 얻을 수 있었다.

또한 후향계단 유동장의 수치계산 결과에 대한 속도벡터추적에 적용하여 본 결과 고속추적의 경우에도 우수한 성능을 보였다.

계측시스템에 대한 오차해석을 통하여 카메라 2대인 경우보다 3대인 경우의 계측이 정도가 높음을 알 수 있었다.

최적의 입자밀도를 선정하여 광원의 강도를 증가시키면 입자검침에 따른 오차증가 문제와 광원의 간섭영향 문제를 해결할 수 있으므로 계측성능도 향상될 수 있다.

Table 3. easurement errors in the case of three cameras.

No	(X')	(X)	(Y')	(Y)	(Z')	(Z)	X' - X	Y' - Y	Z' - Z
1	4.96	5.00	20.04	20.00	1.94	2.00	0.04	0.04	0.06
2	-5.01	-5.00	-5.00	-5.00	3.23	3.20	0.01	0.00	0.03
3	29.91	30.00	9.94	10.00	4.38	4.40	0.09	0.06	0.02
4	-14.96	-15.00	9.99	10.00	5.49	5.60	0.04	0.01	0.11
5	0.01	0.00	-14.97	-15.00	6.82	6.80	0.01	0.03	0.02
6	15.01	15.00	-4.98	-5.00	7.95	8.00	0.01	0.02	0.05
7	-9.97	-10.00	4.97	5.00	9.20	9.20	0.03	0.03	0.00
8	9.99	10.00	10.02	10.00	10.36	10.40	0.01	0.02	0.04
9	-20.04	-20.00	-19.98	-20.00	11.61	11.60	0.04	0.02	0.01
10	20.00	20.00	-9.99	-10.00	12.80	12.80	0.00	0.01	0.00
11	-19.97	-20.00	-0.07	0.00	13.96	14.00	0.03	0.07	0.04
12	5.00	5.00	5.03	5.00	15.22	15.20	0.00	0.03	0.02
13	-4.96	-5.00	-9.98	-10.00	16.47	16.40	0.04	0.02	0.07
14	-19.94	-20.00	14.96	15.00	17.69	17.60	0.06	0.04	0.09
15	20.04	20.00	-14.99	-15.00	18.78	18.80	0.04	0.01	0.02
16	-9.97	-10.00	0.00	0.00	20.02	20.00	0.03	0.00	0.02
17	20.05	20.00	5.01	5.00	21.22	21.20	0.05	0.01	0.02
18	-25.03	-25.00	-5.03	-5.00	22.36	22.40	0.03	0.03	0.04
19	4.99	5.00	-5.00	-5.00	23.59	23.60	0.01	0.00	0.01
20	-4.99	-5.00	25.04	25.00	24.79	24.80	0.01	0.04	0.01
21	30.01	30.00	-0.05	0.00	26.01	26.00	0.01	0.05	0.01
22	-15.01	-15.00	-5.02	-5.00	27.18	27.20	0.01	0.02	0.02
23	14.97	15.00	20.01	20.00	28.38	28.40	0.03	0.01	0.02
24	-20.03	-20.00	-10.02	-10.00	29.56	29.60	0.03	0.02	0.04
25	19.97	20.00	10.00	10.00	30.81	30.80	0.03	0.00	0.01
26	-9.95	-10.00	20.03	20.00	32.02	32.00	0.05	0.03	0.02
27	-5.01	-5.00	-19.97	-20.00	33.20	33.20	0.01	0.03	0.00
28	5.03	5.00	15.01	15.00	34.44	34.40	0.03	0.01	0.04
29	-20.06	-20.00	-14.99	-15.00	35.64	35.60	0.06	0.01	0.04
30	14.98	15.00	-0.02	0.00	36.79	36.80	0.02	0.02	0.01
31	-20.01	-20.00	5.00	5.00	38.03	38.00	0.01	0.00	0.03
32	10.05	10.00	-24.94	-25.00	39.28	39.20	0.05	0.06	0.08
33	14.94	15.00	15.02	15.00	40.43	40.40	0.06	0.02	0.03
34	-15.04	-15.00	-15.00	-15.00	41.57	41.60	0.04	0.00	0.03
35	30.02	30.00	-15.06	-15.00	42.77	42.80	0.02	0.06	0.03
36	-9.97	-10.00	9.98	10.00	44.00	44.00	0.03	0.02	0.00
Standard Deviation σ :							0.03	0.02	0.03

본 계측법은 완전 비접촉 계측으로 측정대상물에 계측으로 인한 영향을 미치지 않으므로 비정상 유체유동의 해석에 적용할 수 있다.

후 기

이 논문은 1997년 한국학술진흥재단의 공모과제(지방대육성과제) 연구비에 의하여 연구되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Adrian R. J., 1991, "Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics", Ann. Rev. Fluid Mech., Vol. 23, pp.261~304.
- (2) Buchhave, P., 1992, "Particle image velocimetry status and trends," Exp. Thermal and Fluid Sci., Vol.5, pp.586~604.
- (3) 도덕회, 1998, "PIV(입자영상상속계) 계측기술", 기

계저널, 제38권, 제10호, pp.36~41.

- (4) Gogineni S. P., Trump D. D., and Goss L. P., 1995, "PIV measurements of a jet in a crossflow", FED - Vol. 218, Experimental and Numerical Flow Visualization, ASME, pp.71-75.
- (5) Tokumoru, T. and Dimotakis, P. E., 1995, "Image correlation velocimetry", Exp. in Fluid, Vol.19, pp.1~15.
- (6) 도덕희, 이영호, 1998, "PIV를 이용한 3차원 속도계측에 의한 유동장의 공간 및 벽면압력 분포 추정에 관한 연구", 한국박용기관학회지, 제22권, 제4호, pp.468~480.
- (7) Nishino, K., Yamamoto, M., Kawamura, H., Morita, T., 1997, "Three-dimensional measurement of fluid in a liquid bridge suspended in microgravity", Proc. 1st Pacific Symp. on Flow Visualization and Image Processing, Honolulu, Hawaii, Feb., pp.633~638.
- (8) Kasagi, N. and Nishino, K., 1991, "Probing turbulence with three dimensional particle tracking velocimetry", Exp. Thermal and Fluid Sci., Vol.4, pp.601~612.
- (9) 백승조, 이상준, 1995, "일치확률방식의 2 - 프레임 PTV 알고리즘 개발", 대한기계학회논문집 제19권 제7호, pp.1741~1748.
- (10) 東京大學出版會, "最小自乗法による實驗データ解析", 1983.
- (11) Doh Deog-Hee, 1995, "A Study on three-dimensional particle imaging thermometry and velocimetry using liquid crystal", Ph.D. Thesis, The Univ. of Tokyo.
- (12) Kobayashi, T., Saga, T. Haeno, T., and Tsuda, N., 1991, "Development of a real-time velocimetry measurement system for high Reynolds fluid flow using a digital image processing design", ASME FED - Vol.128, pp.1220~1227.

저 자 소 개



최성환(崔成煥)

1970년 6월생, 1992년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 1997년 동 대학원 기관공학과 졸업(석사), 1997년~현재 동 대학원 기계공학과 박사과정



도덕희(都德熙)

1962년 10월생, 1985년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 1989년 동 대학원 기관공학과 졸업(석사), 1995년 일본 동경대학교 대학원 기계공학과 졸업(박사), 1995년 3월~9월 포항공대 첨단유체공학연구소 연구원, 1995년 10월~현재 한국해양대학교 기계공학계열 조교수, 당학회 회원



이연원(李蓮源)

1958년 8월, 1981년 경북대학교 공과대학 기계공학과 졸업, 1983년 동 대학원 기계공학과 졸업(석사), 1993년 일본 동경대학교 대학원 기계공학과 졸업(박사), 1984년~1986년 포스코개발 설계팀장, 1993년~현재 부경대학교 기계자동차공학부 부교수, 당학회 회원.