工學博士 學位論文

3차원 PTV계측법의 개발과 후향단 유동계측

Development of 1-Frame 3-D PTV and its Application to Measurement of a Backward-Facing Step Flow

指導教授 都 德 熙

2000 年 2 月

韓國海洋大學校 大學院

機 械 工 學 科

崔 成 煥

本 論文을 崔成煥의 工學博士 學位論文으로 認准함

主審 工學博士　李 重 雨　印

副審 工學博士　姜 信 榮　印

副審 工學博士　李 蓮 源　印

副審 工學博士　趙 孝 濟　印

副審 工學博士　都 德 熙　印

2000 年 2 月

韓國海洋大學校 大學院

機 械 工 學 科

崔 成 煥

목 차

List of Figures

Development of 1-Frame 3-D PTV and its Application to Measurement of a Backward-Facing Step Flow

Abstract

In this paper, a new three-dimensional PTV(Particle Tracking Velocimetry) technique using the concept of match probability between two-field (1-Frame) images has been developed to obtain an instantaneous three-dimensional velocity field of high speed flows. The measuring system consists of three CCD (Charge Coupled Device) cameras, an optical instrument called AOM (Acousto-Optical Modulator), a digital image grabber, and a host computer. For verification of the developed technique, moving particles which are spatially installed on a rotating plate are tracked by the developed technique and are compared with those of actual rotating speed.

The developed 1-Frame 3-D PTV system is applied to the measurement of turbulent backward-facing step flow and the results are compared with those of a Panoramic-PIV system which has been developed in this study. The performance of the developed algorithm is verified by a benchmark test using the three-dimensional velocity vectors obtained by the experiment on the backward-facing step flow. An uncertainty analysis associated with the present 1-Frame 3-D PTV technique is quantitatively evaluated. The capability of the developed technique is validated by probing three-dimensional velocity fluctuation components (u', v', w') of a relatively high speed backward-facing step flow.

Nomenclature

A, B	constants used for iteration calculation of match probability(A < 1, B >1)
a_{ij}	rotation matrix
c	plane distance from lens center
c_{fg}	correlation coefficient
CCD	charged couple device
d_{ij}	displacement vector between S_i and T_j
dT	pulse time interval of illumination
dW	pulse width of illumination
F^k	3-D positions of particles obtained at (k-1)Δt
k_1, k_2	lens coefficient
NTSC	National Televisition system committee
P_{ij}	match probability that S_i would coincide to T_j
$P_i^\star$	no-match probability that S_i has no corresponding T_j on F^2
R_{min}	threshold distance
R_0	expected existing area for particle positions of the second image
RES	Reynolds shear stress
R_{uv}	Reynolds shear stress($-\overline{u'v'}/U_0^2$)
R_{uw}	Reynolds shear stress($-\overline{u'w'}/U_0^2$)
R_{vw}	Reynolds shear stress($-\overline{v'w'}/U_0^2$)
T_m	maximum movement threshold
T_n	neighbourhood threshold

T_q	quasi-rigidity threshold
T_u	streamwise turbulence intensity($T_u = \sqrt{\overline{u'^2}} / U_0$)
T_v	transverse turbulence intensity($T_v = \sqrt{\overline{v'^2}} / U_0$)
T_w	spanwise turbulence intensity($T_w = \sqrt{\overline{w'^2}} / U_0$)
U_0	free stream velocity
U_m	maximum velocity
S_i	3-D particle position in the first image field
T_j	3-D particle position in the second image field
TKE	turbulence kinetic energy($TKE = \frac{1}{2} q^2 / U_0{}^2$)
t_1, t_2, t_3	variables used for calculation of 3-D particle position
u'	streamwise fluctuating component
v'	transverse fluctuating component
w'	spanwise fluctuating component
V_0	total number of particles in 3-D measurement volume
x_0, y_0	deviation of the principal point from the center of image
x_i, y_i	photographic coordinate system
x, y	coordinates on photograph
$\overline{x}$, $\overline{y}$	distance from the principal point
X, Y, Z	absolute coordinate system
X_0, Y_0, Z_0	center of projection
Δt	time interval between obtained field image
$\Delta x, \Delta y$	lens distortion

Greek characters

ω	tilted angle for X axis
ϕ	tilted angle for Y axis
χ	tilted angle for Z axis
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	standard deviation of X, Y, Z
ρn	particle number density
ϕ_e	error ratio
ϕ_r	recovery ratio

Superscript

(n)	number of iteration step
$(\overline{\ \ })$	non-normalized probability value

제 1 장 서 론

공학적인 문제로써 종종 발생하는 벽면 난류, 분류, 박리류 등과 같은 난류의 물리적인 메카니즘의 이해를 위해서는 유동장 전체의 3방향(u,v,w)속도 성분을 동시에 계측하는 것이 필요하다. 특히, 스케일이 큰 조직구조의 발생으로부터 소멸에 이르는 메카니즘의 해석을 위해서는 유동장의 공간적 구조에 관한 정보를 아는 것이 중요하다.

충분한 정확도와 신뢰도를 가진 다양한 난류계측에서는 열선유속계와 LDV (Laser Doppler Velocimetry)가 계측에 널리 적용되어져 왔다. 하지만, 이러한 기법이 충분한 해상도를 유지하기 위해서는 유동장의 공간적 구조계측이 어렵다는 점과 비정상 계측이 불가능하다는 점에서 유동장의 전체에 걸친 난류길이척도(turbulence length scale)나 두점 상관 텐서와 등과 같은 난류통계치를 얻는 것은 실질적으로 불가능하다.

또한, 난류 마이크로스케일을 계측하기 위한 아주 작은 크기의 다중센서 열설유속계의 탐침을 제조하고 교정하는 것은 거의 불가능하고, 3차원 LDV계측법의 광학적인 배치와 이동은 매우 복잡하다. 따라서, 비정상 3차원 유동의 계측을 위한 이러한 결점들을 극복할 수 있는 새로운 계측기법의 개발이 요구된다.

이와 같은 단점들을 극복하기 위한 일환으로 개발된 정량적 계측법이 PTV(Particle Tracking Velocimetry)이다(Adrian, 1991). 이 계측법은 유동장의 유체와 동일한 비중의 미소추적입자를 투입하여 광원과 카메라로 가시화한 후 디지털화상처리를 이용하여 이들 입자들의 운동을 해석함으로써 유동장을 해석하는 방법이다. 이 방법은 유동장의 공간에 걸친 정량적 순간 속도분포를 제공할 수 있다는 장점으로부터 최근 실험유체역학에 많이 이용되고 있다. 그

러나, 지금까지 개발된 PTV계측법들 중의 대부분은 유동장에 대한 2차원적 계측에 관한 것이기 때문에 공학상 실용적인 유동장과 같은 3차원성이 강한 유동장의 적용에는 한계를 가지고 있었다. 이를 극복하기 위하여 개발된 계측법이 3차원 PTV계측법이다(Kasagi, 1987). 이 계측법은 복수대의 카메라를 이용하여 각기 다른 시각으로부터 여러 장의 이미지를 동시에 얻은 후 소기의 화상처리과정을 거쳐 유동장과 함께 움직이는 추적입자를 3차원적으로 재현하는 방법이다.

최근의 디지털 화상처리장비들의 발달에 힘입어 3차원 이미지 데이터 분석을 위한 작업과정도 간편해졌으며, 이로 인한 유동장의 3차원 PTV계측에 관한 연구도 진행되고 있다. Chang and Tattersoon(1983) 및 Chang et al.(1984)들은 Bolex Stereoscopic lens를 장비한 16mm 율동사진 카메라를 이용하여 다중 사진기법으로 실용적인 속도계를 고안하여 3차원성이 강한 난류유동의 계측에 성공하였으나 유동장을 향하는 두 대의 카메라의 시선각이 작음으로 인한 깊이 방향의 정확도가 빈약하였다. 이를 극복하기 위해 Yamakawa and Iwashige(1986), Racca and Dewey(1988), Adamczyk and Rimai(1988), Kobayashi et al.(1989)등은 두 대의 카메라를 유동장에 대하여 직각 방향으로 설치함으로써 카메라의 좁은 시선각으로 인한 깊이 방향의 계측오차를 줄였다. 그러나, 이 방법 또한 채널유동과 같은 단순한 유동의 계측에 있어서 유리하였으나, 복잡한 유동장의 계측에는 카메라를 다양하게 배치해야 함을 보여주었다. Kasagi et al.(1987, 1991), Nishino et al.(1989)과 Papanroniou and Dracos (1989)등은 고속으로 데이터를 처리하며 카메라의 설치 위치를 섬세히 고려함으로써 계측오차를 줄이는 방안을 강구하였다.

Kent(1993)와 Trigui et al.(1995)은 폭발이 없는 연소실 내부의 유동에 3차원 PTV를 적용하였다. Hassan et al.(1992, 1997)과 Murai(1997)는 기포가 발

생하는 유동의 계측에 3차원 PTV를 적용했다. Nishino et al.(1995, 1998)는 로켓 내부의 미소중력 유동의 계측에 3차원 PTV를 적용하였다.

3차원 PTV와 관련된 대부분의 연구자들은 NTSC(National Television Standard Committee)계열의 표준 CCD(Charge Coupled Device)카메라를 사용하고 있었기 때문에 계측의 시간해상도가 이미지의 필드간격인 1/60초로 제약을 피할 수 없었다. 비 측량용 카메라인 NTSC 계열의 CCD카메라로 계측을 할 경우 유동장의 속도가 상대적으로 빠르거나 계측영역이 작을 경우에는 유동장에 투입된 미소입자들의 이동거리가 길어져서 입자추적이 불가능하게 된다. 이와 같은 문제는 고속카메라를 이용함으로써 속도관찰의 시간 해상도를 증대시킬 수 있으나 고속카메라의 가격이 고가이므로 경제적이지 못하다는 단점이 있다.

Kobayashi et al.(1991)은 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 AOM (Acousto-Optic Modulator)이라는 음향광학장치를 적용한 2차원 PTV계측 법을 개발하였다. 이 연구에서는 4-Frame PTV 알고리즘(Kobayashi, 1990)을 단일의 이미지 프레임에 적용하였으나, 입자밀도가 매우 높아져 최종으로 얻어진 순간벡터의 수가 기존의 연구성과들보다 적었다. 이 연구에서는 동일입자를 찾는 회복률이 Baek and Lee(1996)의 2-Frame PTV보다 상대적으로 낮았다. Baek and Lee(1996)는 작은 시간간격에 의해서 분리된 이미지로부터 일치점을 이용하는 것에 대한 5개의 heuristics(Computer Vision, 1987)를 이용하는 것에 의해서 95%이상 벡터를 회복시켰다. 하지만 이도 역시 2차원 계측에 한정되어 있다.

또한, Multi-frame PTV 방법은 일반적으로 3장 이상의 연속적인 이미지를 사용하여 동일입자를 추적하는 알고리즘을 채택하고 있기 때문에 NTSC 계열의 기계적인 시간해상도인 1/60초를 극복할 수 없다. 따라서, 여러장의 프레임

을 통해서 동일입자를 추적해야 Multi-frame PTV 방법은 고속 유동장, 난류 유동장과 같은 3차원성이 강한 복잡한 유동장에 적용하는 것은 거의 불가능하다. 이러한 Multi-frame의 문제점을 해결할 수 있는 새로운 알고리즘의 개발이 필요하며, 따라서 본 연구에서는 Baek and Lee(1996)의 단면상에서의 일치확률의 개념을 공간상으로 확대 적용하여 고속 유동장에 적용이 가능한 1-Frame 3-D PTV 알고리즘을 개발하였다. 개발된 알고리즘의 검증을 위해 후향단에 대한 LES(Large Eddy Simulation) 데이터를 이용하여 동일입자의 추적을 위한 구속조건에 대해 정량적인 데이터를 얻음으로써 개발된 알고리즘을 검증하였다.

본 연구의 내용으로 제 2장에서는 입자의 3차원 위치를 계산하기 위한 카메라의 교정작업의 원리와 입자의 3차원 위치계산의 원리에 대해서 설명하였다.

제 3장에서는 화상처리에 의한 일반적인 유동가시화 기법인 PIV와 PTV에 관한 내용과 속도벡터를 얻기 위한 전처리과정, 2차원 속도벡터의 검출알고리즘과 3차원 속도벡터의 검출 알고리즘에 대하여 기술하였다. 전처리 과정에서는 추적입자의 정확한 도심을 찾을 수 있도록 잡음제거, 회전화상 보정등의 이미지 프로세싱에 관하여 기술되었고 검출된 속도벡터의 에러성분 제거와 보간 작업을 행하는 후처리 과정에 대하여 기술되었다. 또한, 개발된 알고리즘을 후향단의 LES데이터에 적용하여 알고리즘의 성능을 정량적으로 평가하였으며, 고속회전원판실험을 실시하여 본 알고리즘의 고속유동장에 적용 가능성을 확인하였다.

제 4장에서는 후향단에 대해서 3차원 계측 결과와 2차원 Panoramic-PIV에 의한 계측결과에 대한 난류 통계치를 비교하여 본 알고리즘의 성능을 정량적으로 평가함으로써 본 연구에서 구축한 1-Frame 3-D PTV 계측시스템의 비정상 고속유동장의 3차원 계측가능성을 제시하고자 한다.

제 2 장 1-Frame 3-D PTV 시스템

2.1 1-Frame 3-D PTV 계측시스템의 구성

Fig. 2.1은 본 연구에서 후향단 실험에 적용된 시스템을 나타낸 그림이다. 계측시스템의 구성은 3대의 CCD카메라(768 × 494 pixels), 이미지 그래버(512 × 512 pixels, 256 gray levels), 레이져(5W), 3대의 비디오, 그리고 32bit 호스트 컴퓨터를 포함하고 있다.

본 연구에서는 계측 영역내의 미소입자들을 추적하는데 있어 검사 영역의 시간해상도를 높이기 위하여 AOM장치를 사용하였다. AOM의 펄스신호는 CCD카메라에 의해서 동기 되며, 이미지의 1프레임에 해당하는 1/30초의 짝수(1/60초)와 홀수(1/60초)필드 이미지 각각에 설정한 시간간격동안 레이져 광원의 노출시간을 제어한다. 이러한 원리로 레이져 광원의 노출시간을 자유로이 조절할 수 있으며, 3대의 CCD카메라와 AOM을 동기 시켜서 계측을 실시하였다. 본 연구에서의 1-Frame 3D-PTV계측법은 1개의 이미지 프레임을 AOM을 통해 조절된 일정시간 간격을 가지는 2개의 필드 이미지로 분리하여 3차원 속도를 계산하였다.

3대의 카메라 각각에 연결되어 있는 3대의 비디오레코더(Panasonic AG-7350, Sony SLV-RS1, SLV-595HF)를 통해 이미지가 동시에 기록되며, 이 신호는 호스트컴퓨터에 장착된 이미지 그래버(Ditect 64)로 보내져 아날로그에서 디지털로 전환되어 256gray levels(512 × 512)로 저장된다. 이미지 그래버의 메모리에 저장된 이미지를 다시 호스트컴퓨터에 저장한다. 본 실험에 사용된 이미지 그래버는 64 Mega bytes의 RAM이 장착되어 있으며, 카

메라에 의해 동기된 R(빨간색), G(녹색), B(파란색)이미지를 동시에 실시간으로 64장씩 저장 할 수 있다.

입자의 3차원위치 계산을 하기 위해 먼저 다음 장에서 설명할 카메라의 교정작업을 실시한다. 교정작업을 마치면, 이미지상에서 입자의 도심을 찾는 작업을 행한다. 정확한 도심을 구하기 위해 입자 외의 잡음성분 제거 등과 같은 전처리 과정이 수행한다. 전처리 과정을 마치면 입자의 3차원 위치계산, 동일입자의 쌍을 구하는 과정을 수반한다. 본 연구에서는 최종 3차원 벡터를 구할 때까지의 모든 처리과정을 개발된 계측 시스템 프로그램에 의해 자동으로 처리하였다.

3차원 입자 위치의 계산 과정을 포함한 3차원 속도 벡터를 얻기 위한 세부적인 과정은 다음 장에 나와 있다.

Fig 2.1 1-Frame 3-D particle tracking velocimetry system

2.2 카메라의 교정작업

Fig. 2.2는 3차원 위치계측의 절차를 보여주고 있다. 추적 입자의 3차원 위치를 계산하기 위해서 카메라의 위치, 방위, 초점 길이, 그리고 이미지의 왜곡계수와 같은 각각의 카메라의 매개변수(標定요소라고도 함)를 결정해야 한다. 이들 매개변수를 구하는 것을 카메라 교정작업이라고 한다. 카메라 2대 또는 3대를 이용하여 이미 알고있는 교정기의 3차원 위치정보를 이용하여 각각의 카메라의 교정작업을 행하고, 계산된 매개변수를 이용하여 입자의 3차원 좌표를 계산한 다음 1-Frame 3D-PTV 계측알고리즘에 의해서 3차원 속도벡터를 얻는다. 카메라의 교정작업을 위해서 Fig. 2.3의 그림과 같이 110mm(지름) × 10mm(높이)의 교정기를 제작하여 그 위에 직경이 1mm인 핀의 끝단에 지름이 0.6mm인 구를 만들어 3차원적으로 배치하였다. 핀의 식별을 쉽게 하기 위하여 핀의 끝단에 위치해 있는 구 주위에 흰색의 도료를 발랐다. Fig. 2.4는 위에서 보았을 때와 옆에서 보았을 때 교정기의 모양을 보여주고 있다. Fig. 2.5는 핀의 모양을 나타내며, 설계길이는 교정기의 상면으로부터 3.8mm에서 52.5mm 까지 각각 다른 길이로 42개를 제작하였다. 교정기의 3차원 위치는 공인된 검정기관을 통하여 1/1000 mm 오차 이내까지 계측하여 얻어낸 결과를 이용하였다. 평판 위의 교정점의 절대좌표는 본 연구에서 유동계측의 대상이 되는 후향단의 임의의 기준점 (X=0, Y=0, Z=0)에 대하여 상대적으로 계산하였다. X, Y, Z 좌표계는 교정기에서 사용한 좌표계와 동일하다. 교정기에서의 기준점은 교정기의 중심으로 정의하였으며, 좌표계는 Fig. 2.1에 나타내었다. 카메라 교정기의 Y축 방향은 Fig. 2.3의 평면에 수직이다. 교정기는 Fig. 2.1과 동일한 좌표계를 위하여 후향단의 바닥에 장착되며, 교정기의 기준점과

후향단의 기준점의 상대적 위치는 이미지상에 나타난 후향단의 형상좌표를 이용하여 구하였다.

절대좌표계(X, Y, Z)와 카메라의 외부 파라메타(X_0, Y_0, Z_0) 그리고 사진좌표(x, y)의 관계를 Fig. 2.6에서 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 3차원적인 공간상에 위치해 있는 표적 P는 투영위치인 사진좌표점 P_i에 의해서 표현 된다. 카메라 투영중심 O(X_0, Y_0, Z_0), 투영점 P_i(x, y) 와 표적 P(X, Y, Z)는 동일선상에 놓여있다는 공선조건으로부터 식(2.1)과 같은 공선식이 성립된다.

$$
\begin{aligned}
x &= -c\frac{a_{11}(X-X_0)+a_{12}(Y-Y_0)+a_{13}(Z-Z_0)}{a_{31}(X-X_0)+a_{32}(Y-Y_0)+a_{33}(Z-Z_0)}+\Delta x \\
y &= -c\frac{a_{21}(X-X_0)+a_{22}(Y-Y_0)+a_{23}(Z-Z_0)}{a_{31}(X-X_0)+a_{32}(Y-Y_0)+a_{33}(Z-Z_0)}+\Delta y
\end{aligned}
\tag{2.1}
$$

여기서 a_{ij}는 회전행렬요소이며, 아래와 같다.

$$
\begin{aligned}
&a_{11} = \cos\phi\cos\chi,\quad a_{12} = -\cos\phi\sin\chi, \\
&a_{13} = \sin\phi \\
&a_{21} = \cos\omega\sin\chi + \cos\omega\sin\phi\cos\chi, \\
&a_{22} = \cos\omega\cos\chi - \sin\omega\sin\phi\sin\chi, \\
&a_{23} = -\sin\omega\cos\phi \\
&a_{31} = \sin\omega\sin\chi - \cos\omega\sin\phi\cos\chi, \\
&a_{32} = \sin\omega\cos\chi + \cos\omega\sin\phi\sin\chi, \\
&a_{33} = \cos\omega\cos\phi
\end{aligned}
\tag{2.2}
$$

여기서 Δx,Δy는 비측량용 카메라에 대한 렌즈왜곡 보정량이고 식(2.3)과 같다.

$$\Delta x = x_0 + \bar{x}(k_1 r^2 + k_2 r^4),$$
$$\Delta y = y_0 + \bar{y}(k_1 r^2 + k_2 r^4)$$
$$r^2 = (\bar{x}^2 + \bar{y}^2)/c^2$$
$$\bar{x} = x - x_0,\ \bar{y} = y - y_0 \tag{2.3}$$

여기서, x_0**와** y_0**는 이미지 중심으로부터 주점위치의 이동량을 나타낸다. 교정점의 사진좌표는 그 이미지의 도심들로 정의된다. 카메라의 외부 파라메타**(X_0, Y_0, Z_0, ω, ϕ, $\varkappa$)**와 내부파라메타**(c, x_0, y_0, k_1, k_2)**는 최소자승법과 축차근사해법**(Murai, 1980)**을 적용하여 구하였다. 이들 카메라 파라메타의 계산을 위한 기준점의 수는 교정기의** 42**개의 핀 중에** 3**대의 카메라에서 동시에 보여지는 핀을 사용하였다. 본 연구에서는** 40**개의 핀을 사용하여 교정작업을 하였다.**

Fig. 2.2 Procedure of 3-D measurement

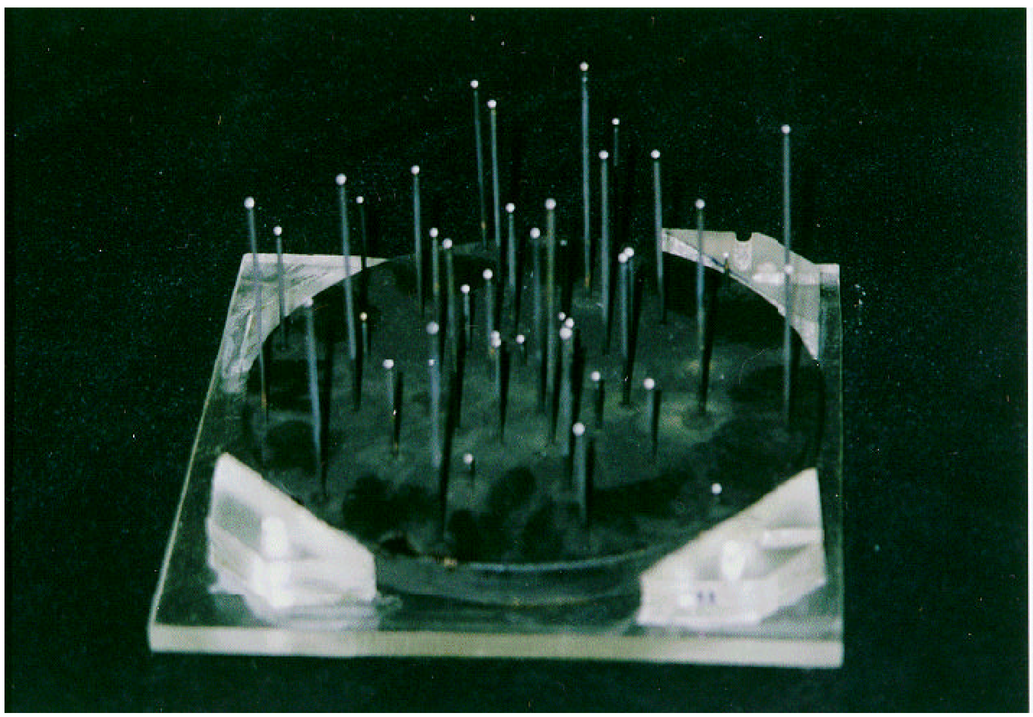


Fig. 2.3 Picture of landmarks for camera calibration for 1-Frame 3-D PTV measurement

Fig. 2.4 Schematics of landmarks

Fig. 2.5 Shape of pins

Fig. 2.6 Calibration of camera

2.3 3차원 위치 계측의 원리

3대의 카메라에 대한 교정작업을 통하여 카메라의 매개변수가 구하고 나면 교정된 카메라를 통하여 가시화된 화상을 이미지그래버로 저장하여 추적입자들의 사진좌표를 구한다. 저장된 이미지는 연속된 두 장의 짝수필드와 홀수필드 로 분리하고, 분리된 각각의 필드에 대해 주변입자들의 밝기정보에 대한 평균보간 작업을 실시함으로써 하나의 완전한 이미지를 얻는다. Fig. 2.7에 본 연구의 후향단의 실험에서 사용된 3대의 카메라에 의해서 얻어진 입자화상을 나타낸다. 각 입자들의 평균직경은 4 9화소 정도였다. 입자영상의 밝기정보(Gray level 값)가 다르기 때문에 단계적으로 계조치(階調値)를 바꿔가면서 입자의 도심을 계산하였다.

이들 입자의 도심은 각 카메라에 대한 사진좌표로 이용된다. 입자의 도심과 카메라 파라메타로부터 입자의 속도는 다음에 기술하는 두 과정에 의해서 결정된다.

Fig. 2.8은 3차원 위치계측법의 원리를 설명하기 위한 그림이다. 입자들의 3차원 위치는 Fig. 2.8에 보이는 것처럼 3대의 카메라로부터 투영선에 대응하는 교차점으로 구해진다. 각 카메라의 공선식은 아래 식(2.4)으로 주어진다.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ -c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix} \tag{2.4}$$

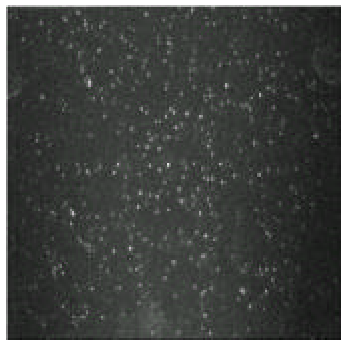
여기서, X, Y, Z는 사진좌표 x, y로부터 변환된 절대좌표이다. 그리고 그 외의 파라메타들은 전 절에서 언급한 것과 같다. 입자의 3차원 위치를 계산하기

위하여 이미지에 보여진 입자들 중에서 대응하는 쌍을 찾아야 한다. 에피폴라 기법(Kobayashi et al. 1989)을 이용하여 입자들의 대응하는 쌍을 구하는 작업을 행하였다. 수학적으로 말해서, 입자들의 도심좌표만큼이나 카메라의 매개변수와 연관된 피할 수 없는 불확실성 때문에 대응하는 투영선은 교차할 수 없다. 따라서, 교차는 각 카메라의 투영선들의 거리로써 정의된다. 대응하는 쌍의 결정은 선택된 이미지에서 가장 짧은 거리를 가진 입자의 쌍과 3대의 카메라의 투영선들의 계산에 의하여 이루어진다.

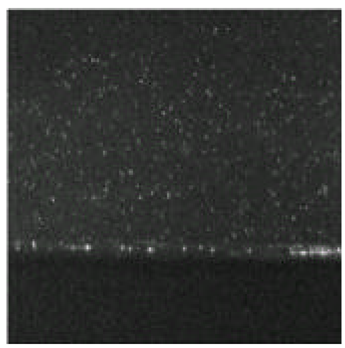
사진좌표의 대응하는 쌍을 구한 다음, 각 카메라에 대한 $p_i(x_1, y_1)$, $p_i(x_2, y_2)$, $p_i(x_3, y_3)$ 좌표가 절대좌표계의 좌표로 변환하고 모든 입자의 3차원 위치는 다음의 식으로 계산된다.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \frac{1}{3}\left[\begin{pmatrix} X_{01} + X_{02} + X_{03} \\ Y_{01} + Y_{02} + Y_{03} \\ Z_{01} + Z_{02} + Z_{03} \end{pmatrix} + t_1 \begin{pmatrix} Xp_1 - X_{01} \\ Yp_1 - Y_{01} \\ Zp_1 - Z_{01} \end{pmatrix} + t_2 \begin{pmatrix} Xp_2 - X_{02} \\ Yp_2 - Y_{02} \\ Zp_2 - Z_{02} \end{pmatrix} + t_3 \begin{pmatrix} Xp_3 - X_{03} \\ Yp_3 - Y_{03} \\ Zp_3 - Z_{03} \end{pmatrix}\right] \tag{2.5}$$

여기서, X_{0i}, Y_{0i}, Z_{0i}는 카메라의 투영중심이며, Xp_i, Yp_i, Zp_i (i = 1, 2, 3)는 사진좌표계가 절대좌표계로 변환된 후의 좌표이다. 일반적으로 두 공선식이 공간상에서 한 점에 완전히 교차하는 것이 불가능하므로 t_1, t_2, t_3는 하나의 해를 가지지 않는다. 따라서 이들 값은 최소자승법을 이용하여 구하였다.



(Image viewed by camera 1)



(Image viewed by camera 2)

(Image viewed by camera 3)

Fig. 2.7 A set of three simultaneous images of tracer particles

Fig. 2.8 Definition of 3-D particle position

제 3 장 유동 가시화를 이용한 정량적 계측방법

자연계에서 혹은 공학적인 실험에 있어서 대상물체의 움직임은 볼 수 있지만 그 물체의 주위의 흐름은 눈으로 볼 수 없다. 이와 같이 눈으로 보이지 않는 흐름을 어떤 기법에 의해 보이도록 하는 기술이 흐름의 가시화이다.

유동의 거시적인 특성이나 미시적인 특성을 직감적으로 보여주며, 이러한 가시화화상은 정성적 및 정량적인 정보를 포함하고 있으므로 이를 추출할 수 있다면 흐름의 전체적인 정보를 파악 가능하다. 최근 저가의 고속PC와 하드웨어의 보급으로 전 유동장에 걸쳐서 정량적인 정보를 동시에 얻을 수 있는 기법들의 연구가 활발하게 진행되고 있다.

PIV는 전 유동장계측 방법으로 연속적인 순간시간에서 대상 유동장에 추종성(traceability)이 우수한 입자를 분포시키고 입자들의 순간적인 위치를 파악함으로써 순간유체속도를 계측하는 기본적인 원리에 의해 제안되었다. 단, 유동장에 분포된 입자들은 미소시간간격으로 밀접하게 유체의 유동을 따르며 입자가 충분히 작고 밀도가 유체에 근접한다는 가정을 포함한다.

실험적 방법인 화상처리를 이용한 PIV는 비접촉식으로 유동특성에 대한 직관적인 파악과 광범위한 공간의 모든 정보를 동 시각에 얻을 수 있다. 그러나 가시화 화상을 처리하는데 수반하는 방대한 작업량 때문에 원리적으로만 제시되었을 뿐, 유동의 대표적인 계측대상인 유체의 속도 및 압력값을 정량적으로 얻기 보다 정성적인 접근에 국한되었었다. 그러나 최근의 화상처리기술의 발전과 집적회로 기술의 발달에 따라 종래에 비해 소형, 경량의 값싼 하드웨어(고속 대용량의 데이터 저장 시스템, 고속연산장치 및 고성능의 이미지보오드)가 급속하게 개발되었고 이로 인해 화상처리를 위한 컴퓨터 및 주변장치를 보

다 쉽게 구입하게 되었다. 이에 따라 PIV가 계측기법으로 개발되어 원리적인 장점인 동시다점 계측 및 정량적인 계측이 가능하게 되었다.

PIV는 계측하고자 하는 유동장을 가시화가 가능하도록 투명한 자재로서 실험체를 구성하고 추종성(traceability)이 우수한 입자를 고루 분포하여 그 거동을 미소시간동안 촬영한 사진 또는 화상을 분석하는 기법으로서, 컴퓨터의 고속 대용량의 데이터처리능력을 화상처리에 적극적으로 이용한 계측 방법이다. 따라서, 전 유동장에 걸친 시간 평균적인 정보뿐만 아니라 순간적인 유동의 특성을 유동장에 영향을 미치지 않는 비접촉식으로 유동현상을 규명할 수 있다.

일반적으로 넓은 의미에서 PIV는 PTV를 포함하고 있지만 본 연구에서는 개별입자의 중심을 찾아서 속도벡터를 추적하는 기법을 PTV, 이미지의 화소의 계조치를 이용하여 최대 상관계수를 구하여 속도벡터를 검출하는 기법을 PIV라고 구분하여 용어의 혼돈을 피하고자 한다.

3.1 PIV (Particle Image Velocimetry)

PIV(Particle Image Velocimetry)란 원래 유동화상의 조사구간(interrogating window)내 산란입자들의 강도분포에 대한 퓨리의 변환이나 직접적인 상관계수 계산으로부터 조사구간의 평균속도를 구하는 방법이다. 다중 노출된 화상(multiple-exposed image frame)을 이용할 경우에는 렌즈를 통하여 광학적으로 퓨리의 변환시킨 후 카메라의 초점에 형성된 Young's fringe를 컴퓨터에서 분석하여 속도를 얻거나 Young's fringe를 한번 더 렌즈를 통과시킴으로써 조사구간내 입자화상들의 자기상관함수(auto-correlation)를 광학적으로 처리하여 속도를 구할 수 있다. 일정 시간간격으로 얻어진 두개의 화상을 이용할 경우

에는 조사구간사이의 상호상관함수(cross-correlation)를 계산하고 그 값이 가장 큰 점을 평균변위로 간주함으로써 속도를 구한다. PIV는 입자밀도가 매우 큰 경우에 보통 적용되며 조사구간내의 평균속도를 추출함으로써 제한된 공간분해능을 지닌다.

3.2 PTV (Particle Tracking Velocimetry)

PTV(Particle Tracking Velocimetry)는 연속적으로 획득된 입자화상으로부터 각 입자위치를 추출한 후 각각의 입자를 추적함으로써 입자의 변위를 결정하는 기법을 말한다. PTV방식은 각 입자위치에서의 속도벡터를 제공하며 속도의 방향모호성이 없는 반면, 상대적으로 낮은 입자밀도를 갖는 유동장에 유용하다. 임으로 분포된 위치에서의 랜덤벡터가 구해지므로 후처리과정에서 격자보간이 필요하다. PTV방식의 경우 입자위치에서의 Lagrangian 속도벡터를 측정하고, 측정된 속도벡터의 방향모호성이 없으나, 입자밀도가 낮다는 단점을 극복하여야 한다.

3.3 화 상 처 리

3.3.1 전처리 과정

본 연구에서 PIV 와 PTV의 알고리즘은 NTSC계열의 카메라의 원리를 이용하고 있다. 1/30초로 저장된 프레임은 화상의 세로방향에 대해서 짝수라인과 홀수라인이 1/60초의 시간해상도를 가지며 분리된 필드 화상의 각각 서로 다른 라인은 보간을 실시하여 하나의 이미지로 만들어 화상처리를 행한다. 이

렇게 함으로써 시간해상도를 더욱 짧게 할 수 있다. Fig. 3.1(a)은 프레임의 영상이고 Fig. 3.1(b), Fig. 3.1(c)은 보간된 짝수의 필드와 홀수의 필드이미지를 보여주고 있다.

입력화상은 일반적으로 잡음성분을 대부분 포함하고 있다. 유동장을 가시화하는 경우 입자 외의 잡음성분과 배경화상을 제거해야 하는데 그렇지 않을 경우 입자의 처리결과에 많은 에러성분을 포함하게 되는 요인이 된다. 특히, PTV에 의한 속도벡터계측에 있어서 잡음성분은 입자 획득율을 떨어뜨리기 때문에 화상처리 기법을 행하여 잡음성분을 제거하였다. 본 연구에서는 화상에서 잡음성분을 제거를 위하여 해당 화소의 값을 주위의 농도치의 평균값으로 치환하는 방법으로 대상 화상에 따라서 평균치가 아닌 중앙치를 사용하는 미디움-필터 등을 사용하여 화상처리를 행하였다. 또한, 짧은 시간의 이미지라 하더라도 각각의 화상은 같은 밝기의 화상을 가진다는 것은 사실상 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 계조치의 설정을 고정시키지 않고 화상의 밝기가 약간 변한다 할 지라도 입자수는 크게 변하지 않기 때문에 예상되는 입자수를 고정시켜놓고 입자수에 가장 가까운 계조치를 이용하여 입자를 구하였다.

배경화상을 제거하기 위한 방법으로 1/30초의 연속적인 간격으로 얻은 64장의 화상을 2장의 필드로 분리하여 보간한 128장의 필드 화상을 이용하여 배경화상을 만들고 순간화상에서 배경화상을 감산연산작업을 통하여 배경화상을 제거하였다.

Fig. 3.2(a), Fig. 3.2(b), Fig. 3.2(c)는 각각의 카메라로부터의 순간 필드 이미지를 보여주고 있으며, Fig. 3.2(d), Fig. 3.2(e), Fig. 3.2(f)는 각각의 카메라로부터의 순간필드 128장으로부터의 배경화상을 보여주고 있고, Fig. 3.2(g), Fig. 3.2(h), Fig. 3.2(i)는 각각의 카메라로부터의 순간 필드에서 배경화상을 감산연산을 행한 2치화된 이미지를 보여주고 있다.

3.3.2 화상의 보정

화상을 저장할 때 카메라를 정확히 수평을 유지하여 입력하는 것은 거의 불가능하기 때문에 대부분의 화상은 카메라의 중심에 대해서 회전된 각도로 저장된다. 따라서 회전된 화상을 보정해 줄 필요가 있다. 본 연구에서는 회전된 화상을 보정하기 위해 실험전에 정확한 위치정보(절대좌표)를 가진 교정판을 실제 실험과 같은 조건하에서 이미지로 저장하여 아래의 절차에 의한 이미지 처리에 의해서 보정을 행하였다.

2차원 회전행렬을 A가 다음과 같을 때,

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & 1 \end{bmatrix} \tag{3.1}$$

원 이미지의 Pixel $A(x, y)$ 가 $B(sx, sy)$의 Pixel 값으로 변환식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$x = \frac{a_{11}sx + a_{12}sy + a_{13}}{a_{31}sx + a_{32}sy + 1}, \quad y = \frac{a_{21}sx + a_{22}sy + a_{23}}{a_{31}sx + a_{32}sy + 1} \tag{3.2}$$

이미지상의 굴절량($\varDelta x, \varDelta y$)을 다음과 같이 다음과 같이 정의할 때

$$\begin{aligned} \varDelta x &= \frac{x}{r}\left(k_1 r^2 + k_2 r^4\right) \\ \varDelta y &= \frac{y}{r}\left(k_1 r^2 + k_2 r^4\right) \end{aligned} \tag{3.3}$$

위의 식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$
\begin{aligned}
F(x;a_{11},a_{12},a_{13},\cdots,k_2) &= \frac{a_{11}x+a_{12}y+a_{13}}{a_{31}x+a_{32}+1} - sx \\
&= \frac{a_{11}x+a_{12}y+a_{13}}{a_{31}x+a_{32}+1} - \left(px+\frac{px}{r}(k_1r^2+k_2r^4)\right)
\end{aligned}
\tag{3.4}
$$

$$
\begin{aligned}
G(y;a_{11},a_{12},a_{13},\cdots,k_2) &= \frac{a_{21}x+a_{22}y+a_{23}}{a_{31}x+a_{32}+1} - sy \\
&= \frac{a_{21}x+a_{22}y+a_{23}}{a_{31}x+a_{32}+1} - \left(py+\frac{py}{r}(k_1r^2+k_2r^4)\right)
\end{aligned}
\tag{3.5}
$$

$$
\left(r=\sqrt{(px^2+py^2)}\right)
$$

수정 Gauss-Newton 방법을 적용하여 선형화 한 후 변화량에 대해서는 최소자승법을 적용하여 미지 변수를 구하고 구해진 미지 변수를 이용해서 모든 점에 대하여 이미지 변환을 수행하였다.

3.3.3 도심의 검출(Centroid Tracking)

전술한 절차에 의해서 잡음제거와 배경화상의 제거 같은 전처리를 거쳐 처리된 화상을 2치화한 다음 입자의 도심을 검출하였다. 2치화 작업에 의해서 저장된 이미지의 입자를 구성하는 화소값은 1, 배경부분은 0의 값을 가진다. 이러한 화상정보를 이용하여 단일 입자를 검출하기 위해서 입자로 인식되는 화소의 외곽선을 연결하는 윤곽선추적(boundary trace)을 행하였다. 먼저 래스터 스캔(raster scan) 방향으로 이동해가면서 픽셀의 값이 0또는 1인가를 조사

하고 최초로 1의 값이 위치한 검출위치를 윤곽선 추적의 탐색 시작점으로 한다. 이 픽셀은 입자를 구성하는 화소 중에서 최상 행에서 가장 왼쪽의 픽셀이다. 이 픽셀을 중심으로 인접한 화소는 8개로서 3×3의 마스크를 형성할 수 있다. 이를 좌상의 첫 번째 픽셀로부터 반 시계 방향으로 조사하여 1의 값이 없을 경우 단일입자로 판단하고 만약 입자가 검출되면 이를 중심으로 동일한 방법으로 윤곽선을 추적한다.

다음으로 입자의 윤곽선을 추적하여 단일 입자로 확인되었으면 각각의 입자의 도심좌표를 계산한다. 도심좌표를 구하는 데 있어 윤곽선의 좌표만을 사용할 수도 있으나 속도벡터를 구할 때의 오차성분을 감소시키기 위하여 내부까지 고려하여 입자중심좌표는 면적모멘트 공식에 의해 식(3.6)과 같이 표현된다. 여기서 x_i, y_i는 입자를 구성하는 각 픽셀의 좌표이며, A_i는 그 면적이다.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} A_i x_i}{\sum_{i=1}^{n} A_i} \quad , \qquad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^{n} A_i y_i}{\sum_{i=1}^{n} A_i} \tag{3.6}$$

3.3.4 속도벡터의 검출

화상처리를 이용한 유동장 측정기법의 기본원리는 주어진 시간간격(ΔT)동안 움직인 유동입자(Particle)들의 위치정보를 CCD 카메라를 이용하여 영상을 이미지 보오드를 통하여 디지털 영상으로 변환된 영상을 저장한 후, 화상처리기법을 이용하여 입자의 이동거리를 계측한다. 픽셀단위로 계측된 이동거리를 미리 교정작업을 통해 계산된 정보를 이용해서 화면좌표계에서 실제좌표계로 변환시킨 길이를 시간간격 ΔT로 나누어줌으로써 속도벡터를 추출하는 것이다. 화상처리를 이용한 속도장 측정기법으로 PIV 와 PTV의 2가지가 주로 사

용되고 있다. 전술한 바와 같이 일반적으로 입자밀도가 큰 경우에 적용되는 PIV기법은 유동화상의 미소 조사구간내 입자영상강도의 상관계수를 계산함로써 조사구간을 대표하는 평균속도를 구한다. PTV방식은 연속적으로 획득된 입자화상으로부터 각 입자위치를 추출한 후 그 입자 하나하나를 추적함으로써 입자의 변위를 결정한다. 프레임의 다수 입자 중에서 미소시간의 경과 후 동일입자를 정확하게 식별하는 것은 어려운 문제이다. 동일 입자를 추적하는 방법으로 제안되어 있는 2차원 PTV의 처리 알고리즘중 4프레임법, 2프레임법과 PIV의 속도계측법으로 계조치 상호상관법과 3차원 PTV의 처리 알고리즘중 8시각 3차원 동일입자 추적법과 본 연구에서 개발한 1-Frame 3-D PTV에 의한 동일입자 추적법에 대해서 검증하기로 한다.

3.3.4.1 4프레임 입자추적법

연속하는 4시각의 순간적인 추적입자화상을 사용하여 동일입자를 추적하는 4프레임 입자추적법은 동일입자의 확인방법으로 가장 먼저 소개된 기법으로 화상입력의 시간간격은 충분히 짧고 동시에 일정하다는 것, 유동의 속도가 공간적·시간적으로 급격히 변하지 않는 것을 가정한 알고리즘이다. 전술한 화상의 처리의 순서로 도심좌표가 구해진 것으로 동일 입자를 추적한다. 다프레임 입자추적의 경우 어느 경우에나 그 원리는 비슷하나, Fig. 3.4를 참조하여 설명하면 다음과 같다. 먼저 제1프레임에 위치한 임의의 입자가 제2프레임까지 이동할 수 있는 최대거리를 유동장의 특성으로부터 미리 파악한다. 이 범위내(R_1)에 존재하는 입자는 입자 P_1 이 이동하여 제2프레임상에 존재할 수 있는 이동 위치점 후보들 이 될 수 있다. 같은 원리로 제2프레임의 입자 P_2의 제3프레임상의 예상 이동위치는 제2프레임까지의 이동거리와 같은 곳의 동일한

방향에 위치(O_3)한다고 볼 수 있다. 이때에 후보탐사범위(R_2)를 제1-2프레임의 것보다 축소하면 처리속도를 향상시킬 수 있으며 오류벡터의 발생을 억제할 수 있다. 제4프레임에서의 입자이동위치(O_4) 및 탐사범위(R_3)는 같은 요령으로 구한다. 이와 같은 방법으로 구해진 하나의 입자에 대한 이동경로는 일종의 계층구조를 형성하여 수많은 예상궤적이 얻어진다. 다음으로 얻어진 예상후보 가운데 입자의 참된 이동경로로 판단되어지는 하나의 경로를 얻기 위해서 각각의 이동거리 L_1, L_2, L_3에 대한 분산(分散)을 구하여 이 값이 최소가 되는 경로를 참된 경로로 간주한다.

$$C = Min(2L_2 - (L_1 + L_3)) \tag{3.7}$$

동일입자의 확인기법은 원리상 입자의 직선, 등 간격 이동을 전제하므로 평가함수인 식(3.7)의 값이 최소가 되는 경로를 참된 입자경로로 택하였다. 프레임수를 더 늘리면 원리적으로는 동일입자의 검색에 수반하는 오차를 줄일 수가 있다. 그러나, 이 경우에는 처리시간이 더 걸리고 무엇보다도 입자의 직선, 등 간격이동이라는 원래의 조건을 만족시키기 어려우므로 최종적으로 얻어진 속도 값에 수반하는 불확실 성분이 커지게 된다.

3.3.4.2 2프레임 입자추적법

2프레임방식에 의한 입자추적에는 지금까지 몇 가지의 방법이 제안되어 있으며, 어느 경우에도 입자의 분포특성에 대한 상관계수를 구하여 동일입자를 판별하는 기법을 택하고 있다. Fig. 3.5는 이 방법을 개념적으로 보여주고 있다. 제 1프레임에 존재하는 입자가 이동할 수 있는 최대거리의 중심을 제 2프

레임에 설정한다. 각각의 중심을 중앙으로 하여 상관값의 계산영역을 다시 설정한다. 입자의 중심점이 위치하는 픽셀은 1의 값을, 존재하지 않는 픽셀은 0의 값을 부여한다. 같은 크기를 갖는 양쪽의 상관값 계산영역의 대응위치에서 이 값들을 곱한다. 따라서 대응하는 각각의 배열에서 1의 값을 갖는 경우에만 (1 × 1) = 1의 상관값을 갖게 된다.

$$C = \sum_{m=1}^{24} p_m \times q_m \qquad (3.8)$$

이와 같은 조작을 상관영역전체에 걸쳐 행하여 식(3.8)을 평가함수로 이 값이 최대가 되는 입자위치를 동일입자의 이동위치로 결정한다.

3.3.4.3 계조치 상호상관법

Fig. 3.6은 계조치상호상관법의 원리를 보여준다.
미소시간동안 유동장의 화상의 계조패턴은 크게 변화하지 않는다고 가정하면 제1프레임에서의 상관영역내의 계조치 분포와 미소 시간후의 제2프레임에서의 계조치 분포는 유사한 특성을 나타낸다. 따라서, 제1프레임의 임의의 위치를 중심으로 하여 제2프레임상의 같은 크기를 갖는 영역과의 계조치에 대하여 상호상관 계수 값을 구하여 비교하여 그 중 가장 큰 값을 동일입자군의 이동위치로 간주할 수 있다. 식(3.9)으로 계산되는 두 프레임간의 추적입자들의 농도분포에 대한 상관계수의 값이 최대치일 때의 점이 가상의 중심 입자군 속도(속도벡터의 시점)에 대한 이동벡터의 종점으로 한다.

$$c_{fg} = \frac{\sum_{i=1}^{n^2}(f_i - \overline{f_i})(g_i - \overline{g_i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n^2}(f_i - \overline{f_i})^2 \sum_{i=1}^{n^2}(g_i - \overline{g_i})^2}} \tag{3.9}$$

여기서 f_i , g_i 는 상관영역내의 각 픽셀의 계조치를 의미하며 -는 연속화상에 대한 시간평균을 의미한다.

3.3.4.4 8시각 3차원 입자추적법

본 연구에서는 3차원의 경로를 결정하기 위하여 먼저 2차원의 경로를 결정한다. 즉 3차원의 경로는 동일한 2차원의 경로를 찾아냄으로써 결정이 된다. 2차원의 경로를 찾는 방법은 고바야시등의 방법인 어느 한 입자에 대하여 이동경로가 복수로 여겨질 수 있는 경우에는 각 시각간의 이동거리의 분산이 최소인 경로를 선택하는 방법을 도입했다. Fig. 3.7은 2차원 경로를 찾아 3차원 경로를 찾는 방법에 대한 그림이다. Fig. 3.8와 Fig. 3.9는 2차원 시간추적방법에 대한 설명을 위한 것이며 그 구체적인 알고리즘은 다음과 같다.

(1) 시각1의 어떤 입자의 중심위치를 중심으로 하는 어느 정도의 크기(R_{WX} , R_{WY})의 장방형연역을 시각2의 입자의 예상존재범위로 선정한다.
(2) 그 범위 중에 시각2의 입자가 발견되었을 때에는 그들의 입자번호를 기억하고 그 입자에 대해서 각각 다음의 절차를 수행한다.
(3) 시각 1-2 사이의 입자의 이동거리 R_1을 구해 기준치 R_{min}과 비교한다.
   (a) $R_1 \leq R_{min}$ 인 경우

발견된 시각2의 입자의 중심위치를 중심으로 반경 $2R_{min}$의 원의 영역을 시각3의 입자의 예상범위로 한다.

(b) $R_1 \geq R_{min}$ 인 경우

발견된 시각2의 입자의 중심위치를 중심으로 내경 $0.5R_1$, 외경 $1.5R_1$으로 시각1-2의 벡터의 연장선을 중심으로 양측으로 $60°$의 부채꼴영역을 시각3의 예상존재범위로 한다. 여기서 1시각 전의 입자로부터 이동거리에 의해서 입자의 예상존재범위를 나누었지만 이것은 입자의 이동거리가 짧을 때에는 다음에 입자가 이동하는 방향의 변화가 크지만 입자의 이동거리가 클 때에는 이동하는 방향의 변화가 적기 때문이다.

(4) 그 범위중에 시각3의 입자가 발견되면 그들의 입자의 번호를 기억하고 그 입자에 대해서 각각 다음을 사항을 실행한다.

(5) 이하는 동일하게 (3)(4)의 처리를 입자3,4,5,6,7에 대해서 실행한다.

(6) (5)까지의 과정에서 시각1에서 시각8까지의 입자가 입자번호를 기준으로 대응된 것이 된다. 그 대응 결과를 사용하여 시각1 → 시각2사이, 시각2 → 시각3사이,...,시각7 → 시각8사이의 입자의 벡터를 계산하여 그 벡터의 크기의 분산을 구해 시각1에서 시각8까지의 대응정보와 함께 그의 분산도 기억한다.

(7) 이상의 작업을 시각1에서의 모든 입자에 대하여 실행함에 의하여 시각1에서 시각8까지의 입자의 경로가 정해진다.

(8) 위에서 구한 모든 이동경로에 대해서 시각1의 어떤 입자에 대해서 복수의 이동경로가 있는지를 조사해서 2중대응이 발견되었을 경우에는 그중에서 분산이 제일 적은 것을 선택한다. 이 작업에 의하여 시각1의 어떤 입자에

대해서 최종적으로 대응이 결정된다.

(9) 이 작업을 사진좌표계 1(카메라1), 사진좌표계 2(카메라2)에 대하여 실행한다. 이상에서 입자의 시간적인 2차원 추적이 종료된다.

다음에 전 단계에서 구한 카메라1과 카메라2에 대한 유적의 벡터에 대해 어느것이 동일한 유적벡터를 나타내는가를 결정한다.

동시각의 2장의 사진이 주어졌다고 하자 이때 사진좌표계 1에 잇는 입자가 사진좌표계 2의 어느 입자에 대응하는지를 알면 제2장에 기술한 방법으로 그입자의 3차원좌표를 구할 수가 있다. 따라서, 2장의 사진간에 동일한 입자의대응을 알기만 하면 입자들의 3차원좌표가 결정된다. 이와 같이 2장의 사진간에서의 동일입자를 판별하는 것을 스테레오매칭이라고 한다. 본 연구에서는 입자의 중심위치를 대응의 대상으로 하여 스테레오 매칭을 실시하였다. 또한, 스테레오매칭의 판단기준을 2개의 사진좌표계의 각각에 있어서의 투영중심과 사진좌표상의 점을 잇는 2직선간의 거리가 최소로 되는 것으로 하였다. 사진좌표계 1의 각각의 입자에 대해서 사진좌표계 2의 모든입자를 적용대상으로 하여 앞서 설명한 2직선간의 거리를 구하여 거리가 작은 순으로 추출하여 그 때의 사진좌표계 2의 입자번호를 거리가 작은 순으로 3개만 기억해 둔다. 이 작업을 사진좌표계 1의 모든 입자에 대하여 실시한다. 다음으로, 사진좌표계 1의 각각의 입자에 대해서 거리가 보다 작은 사진좌표계 2의 입자를 선택하여 그 거리가 어느 기준치를 넘으면 사진좌표계 1의 그 입자에 대하여 사진좌표계 2의 대응입자는 없는 것으로 판정한다. 그 다음 사진좌표계 1의 서로 다른 2개 이상의 입자에 대하여 사진좌표계 2의 동일입자를 대응하고 있지 않은지를 조사한다. 즉 동일입자가 대응할 때에는 거리가 짧은 쪽의 사진좌표계 1의 입자를 우선으로 했다. 스테레오 매칭작업을

끝낸 뒤에 대응이 된 입자들의 사진좌표를 이용하여 3차원위치를 계산하였다. 또한 앞에서 구한 2차원의 경로정보는 3차원의 대응작업을 간소화하기 위하여 이용된다. 즉, 사진좌표계 1의 제1시각과 사진좌표계 2의 제1시각에서의 한 입자에 대한 3차원대응을 결정하면 나머지 시각에서는 2차원의 경로정보만으로도 3차원대응이 쉽게 이루어지기 때문이다. Fig. 3.10에 3차원속도벡터의 결정과정을 나타낸다.

3.3.5 1-Frame 3-D PTV에 의한 입자추적법

본 연구에서 개발 구축한 알고리즘에 해당되며, 그 구체적인 3차원 속도벡터 획득은 이하에 기술된다.

3차원 속도벡터를 얻기 위해서는 각기 다른 두 시각에서 얻어진 입자의 위치정보가 필요하다. 입자의 3차원 속도벡터는 어떤 시간 간격을 가진 동일입자의 3차원 이동거리를 나누는 것에 의해서 계산된다. 계측의 공간해상도를 증가시키기 위하여 계측영역의 크기를 상대적으로 작게 설정하였다. 입자들이 작은 영역을 빠르게 지나가기 때문에 NTSC 카메라의 시간해상도인 1/60초를 가지고 유동장의 속도분포를 조사하기란 쉽지 않다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 전 절에서 언급된 AOM (Acousto-Optical Modulator) 장치를 이용하였다.

Fig. 3.3에 NTSC 카메라와 AOM신호의 시간관계를 보여주고 있다. AOM의 펄스 신호는 레이저 빛의 조명에 대하여 두 번 작동하는데 한번은 프레임의 홀수필드에 대하여 또 다른 한번은 동일한 프레임의 짝수필드에서 활성화된다. 그리하여 홀수필드와 짝수필드의 두 필드가 작은 시간 간격 dT를 가진다. 보간처리(Kobayashi et al. 1991)로 단일 프레임으로부터 두 개의 필드영상을 얻을 수 있다. 즉, 이 두 필드영상의 시간차는 AOM의 활성화 시간차인

dT값으로 되므로 NTSC카메라의 시간해상도를 1/60초보다 더 작은 시간까지 자유롭게 조절할 수 있게 된다.

본 연구의 유동계측의 대상이 되는 후향단 난류유동의 계측실험에 있어서 dT는 3msec로 설정하였고 wT는 0.5msec로 설정하였다. Fig. 3.11은 각 카메라에 대하여 dT만큼의 시간차를 가진 연속된 두 장의 필드 이미지를 나타내며 이들 이미지들로부터 3차원 속도가 구해진다. 즉, 첫 번째 시각의 이미지로부터는 속도벡터의 시점이 두 번째 시각의 이미지로부터는 속도벡터의 종점이 구해지게 된다. Fig. 3.11에 보이는 바와 같이 각각의 이미지에는 수많은 입자들로 되어 있기 때문에 제 1시각의 어느 입자가 제 2시각의 어느 입자에 해당하는가를 결정되어야 속도벡터를 결정할 수 있게 된다. 이처럼 동일입자를 발견해 내는 문제를 입자대응(Adrian, 1991)이라고 한다. 본 연구에서의 입자대응의 알고리즘은 평면 이미지상에서 적용된 확률일치방법(Ballard DH; Brown CM 1982)을 3차원 공간으로 확장하여 적용하였다. 구축한 공간확률일치방법 알고리즘은 다음의 세 가지 가정을 세워서 구축되어 있다.

(a) 최대 속도가 Fig. 3.3에서 와 같이 AOM에서 설정한 시간 간격(dT)동안 Fig. 3.12와 Fig. 3.13의 거리 T_m을 초과하지 않아야 하는데 이는 대응하는 입자들의 3차원적 위치가 설정된 임계값 이상으로 움직일 수 없기 때문이다. 일반적으로 이 임계치는 유동장에서 입자의 3차원적 이동의 최대 기대치로 설정된다.

(b) 비록 두 필드 이미지 사이의 전체적인 이동이 신축적일 수 있더라도 작은 영역안에서의 이동은 고정(반 강체 상태)되어 있다. 그것은 공간상에서 작은 영역안의 입자들이 유사한 운동형태를 보이기 때문이다.

(c) T_n으로써 결정되는 이웃하는 영역에서의 모든 입자들은 두 번째 이미지에 있어서의 그들에 대응하는 쌍을 가진다.

비록 이들 조건이 본 알고리즘의 적용에 있어서 엄격하게 보일지라도 PIV와 4-Frame PTV 기법에 있어서도 역시 이와 같은 가정이 성립되어야 한다. 유사운동 상태는 입자들의 속도가 갑자기 변하지 않으며, 유동장에서 입자들은 밀착된 형태로 움직인다. 그것은 비록 두 필드 이미지 사이의 전체적인 이동이 신축적일지라도 작은 공간영역 안에서는 거의 구속을 받는 움직임이다. 여기에서 제안된 알고리즘은 주로 최대속도(heuristic a)와 유사운동 상태(heuristic b)에 기초를 둔다. 이들 heuristic을 이용하여 시간간격으로 분리된 입자의 대응하는 쌍이 결정된다. Fig. 3.12의 S_i, T_j는 각각 첫 번째 시각(F^1)과 두 번째 시각(F^2)에 있어서의 입자중심을 나타낸다. 최대속도 조건에 따라서 S_i에 대한 후보 T_j의 3차원적 위치는 반드시 최대 이동거리 T_m안에서 있어야한다. S_i, T_j의 이동거리 d_{ij}는 다음의 조건을 만족시킨다.

$$|d_{ij}| = |Si - Tj| < T_m, \quad T_m = U_m \Delta t \tag{3.10}$$

U_m은 유동장에서 최대허용속도이며 Δt는 Fig. 3.3에서의 시간간격 dT이다. 식(3.10)을 만족시키는 F^2에 있어서 T_j점들은 F^1에 있어서 S_i의 후보로 일치된다. T_m은 Fig. 3.12로 표현된다. T_m을 반경으로 하는 원안에 존재하는 세 점 (T_1, T_2, T_3)은 S_1에 대하여 일치될 후보로써 예상된다.

제시된 1-Frame 3-D PTV 알고리즘은 단일 이미지 프레임을 가지는 공간에

서 입자들의 대응하는 쌍을 찾기 위한 일치도의 수단으로 일치확률 P_{ij}과 불일치확률 P_i^*의 반복적 평가를 기초로 한다. 일치확률 P_{ij}는 첫 번째 프레임에서 한 점 S_i에 대한 두 번째 프레임에 위치한 각 점 T_j에 일치할 확률로써 결정된다. 또한, 불일치확률 P_i^*은 두 번째 프레임에 있어서 T_m 안에 일치하지 않는 점 S_i의 확률로 표현된다. 예를 들어 S_1이 T_1으로 이동한다면 이동벡터 d_{11}에 대응하는 P_{11}은 1에 가까운 큰 값(최대확률)을 가지고 다른 점들 $(P_{12},\ P_{13},\ P_i^*)$은 0에 가까운 작은 값을 가질 것이다. 각 S_i에 대한 일치확률의 값은 식(3.11)의 조건으로 반복작업의 마지막 단계에서 교환될 것이다.

$$\sum_j P_{ij} + P_i^{\star} = 1 \qquad (3.11)$$

확률값은 확률일치의 초기계산의 단계에서 (P_{ij}, P_i^*)로 똑같이 주어진다. Fig. 3.12에서 입자들 $(T_1,\ T_2,\ T_3)$에 대한 S_1의 초기값은 $P_{11}^{(0)},\ P_{12}^{(0)},\ P_{13}^{(0)}$와 $P_1^{*(0)}$로 결정된다. 이들은 초기화를 위해 0.25(1/4)로 주어진다. $P_{ij}^{*(0)}$는 초기값을 의미한다. 입자들의 확률 T_k는 유사운동 조건과 이웃하는 조건을 동시에 만족하며 계산된다. 유사운동 조건과 이웃하는 조건은 Fig. 3.12와 Fig. 3.13에 나타난다. 식(3.12)을 만족하는 입자 (S_k)는 첫 번째 시각에서 입자 S_i에 대한 이웃하는 입자라 부른다. 이 상태는 이웃하는 입자들의 T_n 안에서 유사운동을 의미한다. T_n은 공간에서 입자들의 위치간 평균거리를 기초로 정해진다.

$$|S_i - S_k| < T_n \qquad (3.12)$$

유사운동 조건식인 식(3.13)으로 표현되는 유사운동 조건은 입자들 T_j가 T_q 안에 위치해 있을 때 만족한다.

$$|d_{ij} - d_{kl}| < T_q \tag{3.13}$$

여기서, d_{ij}는 첫 번째 시각에서의 S_i와 두 번째 시각에서의 T_j에 의해서 구성된 벡터이다. d_{kl}은 이웃하는 입자 S_k로 정해진 원래의 것과 두 번째 시각에서의 T_l로 정해진 종점에 의해서 결정된 모든 벡터이다. 그러므로 S_k와 T_l의 수는 동일하다. d_{kl}'은 d_{ij}와 유사운동을 하지 않은 벡터이다. 4개의 점선은 d_{11}의 벡터이다. Fig. 3.13의 경우에 입자 S_2, S_3, S_4와 S_5는 S_1의 이웃이 된다. 이웃하는 조건 T_n안에 있는 원래의 벡터 d_{22}, d_{55}를 제외한 벡터 d_{33}, d_{44}는 유사운동 제한 T_q보다 작은 벡터 d_{33}, d_{44}의 종점과 벡터 d_{11}의 종점사이의 거리로부터 유사운동 조건을 만족한다. 즉, Fig. 3.13에 보여지는 것과 같이 $|d_{11} - d_{33}| < T_q$ 와 $|d_{11} - d_{44}| < T_q$를 만족한다. 그러므로 확률일치 P_{33}, P_{44}는 최대속도 조건을 기초로 하는 확률일치에 추가되는 조건으로 유사운동을 기초로 한다. 위의 두 조건을 기초로 확률일치의 계산은 첫 번째 시각에서의 확률일치가 1에 가깝게 되거나 최대값에 도달할 때까지 반복적으로 첫 번째 시각의 모든 입자에 대하여 실시한다. 계산도중에 각 입자에 대한 확률일치값은 앞에서 논한 두 가지 조건을 만족하는 모든 입자의 확률일치값을 더해 감으로써 치환된다. 또한, 아래의 식들을 이용하여 반복계산을 행한다.

$$\overline{P}_{ij}^{(n)} = A \cdot P_{ij}^{(n-1)} + B \cdot Q_{ij}^{(n-1)} \tag{3.14}$$

$$Q_{ij}^{(n-1)} = \sum_k \sum_l P_{kl}^{(n-1)} \tag{3.15}$$

$$P_{ij}^{(n)} = \frac{\overline{P}_{ij}^{(n)}}{\sum_j \overline{P}_{ij}^{(n)} + P_i^{\bigstar(n-1)}}$$

$$P_{ij}^{\bigstar(n)} = \frac{P_{ij}^{\bigstar(n-1)}}{\sum_j \overline{P}_{ij}^{(n)} + P_i^{\bigstar(n-1)}} \tag{3.16}$$

여기에서, A와 B는 상수이고, 기호 $\overline{}$는 일반화되지 않은 확률값이며, 윗첨자(n)는 반복의 수, Q_{ij}는 유사운동 조건을 만족하는 벡터 d_{ij}의 거리에 대한 모든 이웃하는 확률일치의 합이다. $P_{ij}^{(n)}$은 n번째의 계산에서 두 조건을 만족하는 T_j를 가지는 첫 번째 시각에서의 입자 S_i에 대한 확률일치를 나타낸다. k는 S_i와 연관된 이웃하는 입자 S_k의 수를 말하며, l은 유사운동 식(3.13)을 만족하는 T_l의 수를 말한다. 식(3.16)은 치환시키는 식이다. 위의 계산은 두 조건을 만족하는 모든 입자가 높은 확률을 가질 때까지 모든 입자에 대하여 실행된다. 입자에 대한 속도벡터 S_i는 Fig. 3.3에서의 dT 시간간격에 의해서 높은 확률일치를 가지는 거리 d_{ij}를 나눔으로써 구한다.

3.4 후처리 과정

계산되어진 속도벡터는 대부분 에러벡터가 포함되어있다. 특히, 고속의 유동장에서는 처리할 이미지간에 사라지는 입자, 완전히 제거되지 않은 잡음성분에 의한 원인등 여러 가지 원인에 의해서 에러벡터가 발생할 수 있다. 이러한 에러벡터를 제거하지 않고 후처리를 행하면 주변벡터에까지 영향을 미친다. 본

연구에서 PIV에 대해서 에러벡터를 제거하는 알고리즘으로 유동의 연속성을 기본으로 한 알고리즘을 이용하여 에러벡터를 제거하였다. 임의의 점 P의 벡터를 포함함으로서 유동의 연속성이 만족되지 않는 경우, 즉 D의 값이 어떤 기준치의 DM 값보다 클 경우 점 P의 벡터는 에러벡터로 판정한다.

$$X \text{ 방향} \quad \left[\frac{\partial u}{\partial x}\right]_{min} = Min\left\{\left[\frac{\partial u}{\partial x}\right]_f, \left[\frac{\partial u}{\partial x}\right]_b\right\}$$

$$Y \text{ 방향} \quad \left[\frac{\partial v}{\partial y}\right]_{min} = Min\left\{\left[\frac{\partial v}{\partial y}\right]_f, \left[\frac{\partial v}{\partial y}\right]_b\right\} \tag{3.17}$$

$$D(i,j) = \left|\left[\frac{\partial u}{\partial x}\right]_{min}\right| + \left|\left[\frac{\partial v}{\partial y}\right]_{min}\right|$$

계측된 순간 속도벡터에 포함 되어있는 서로 잘못 대응된 3차원 속도벡터를 제거하는 방법으로 본 연구에서는 식(3.18)을 이용한 통계적인 방법으로 이들 오류벡터들을 제거하였다. 이를 위하여 계측영역 안의 모든 계측된 벡터에 대하여 조사(照査)하였고, 영역내의 벡터에 대한 표준편차를 계산한 다음 Tomson's value, τ,(Kasagi 1998)를 이용하여 이상(異狀)벡터를 제거하였다.

$$S = \left[\sum_{k=1}^{N}(X_k - \overline{X})^2/(N-1)\right]^{1/2} \tag{3.18}$$

$$\overline{X} = \sum_{k=1}^{N} X_k / N$$

여기서, S 는 표준편차, n은 측정횟수, $\overline{X}$는 측정치 X_k의 평균치이다.

설정한 영역의 데이터 X_k 와 설정한 영역의 데이터의 평균치 $\overline{X}$ 의 차(절대치 $\sigma = |X_k - \overline{X}|$)를 구하여 S 와 τ값을 곱한 값을 비교하고 "$\sigma \geq \tau S$"을 만족

하는 X_k를 이상치로 정한다. 입자의 밀도에 따라 경험적으로 처리할 영역의 설정을 달리하여 위의 작업을 여러 번 실시하여 에러벡터를 제거한다.

PIV에서는 에러벡터를 제거하고 제거된 자리를 보충하기 위한 보간작업이 필요하게 된다. PTV에서 또한 얻어지는 속도벡터는 유동장에 불규칙하게 분포하고 있으며, 이들의 속도값을 이용하여 유동장의 정보를 정량적으로 평가하기 위해서는 반드시 격자상의 속도값으로 보간을 행하여야 한다. 이와 같이 PIV나 PTV에서는 어느 경우에나 데이터의 보간이 매우 중요하며 최종적인 결과의 신뢰도에 커다란 영향을 미친다.

본 연구에서는 PIV에 대한 보간 방법은 계산격자를 195(가로방향) × 55(세로방향)에 대해서 등 간격 격자에 대해서 식(3.19)에 의해 거리역수 보간을 실시하였다.

$$U_p = \Sigma \frac{U_i}{R_i} \Big/ \Sigma \frac{1}{R_i} \tag{3.19}$$

보간된 각각의 순간 벡터를 평균하여 평균 속도장을 계산하고 순간벡터에서 평균벡터를 뺀 난동속도성분을 이용하여 난류 통계치를 계산하였다.

1-Frame 3D-PTV에서 최종적으로 계산된 순간 3차원 벡터는 한번의 계측으로 약 300개 정도를 얻었다. 공간상에서 구해진 모든 벡터들이 임의의 위치를 가지는 것으로부터 공간적 격자점상에서 속도벡터를 얻기 위하여 식(3.20)에 의한 Gaussian Window (Agui JC; Jimenez J 1987)를 적용하여 보간을 실시하였다.

$$
\begin{aligned}
u_i(x_i, y_i, z_i) &= \sum_{k=1}^{N_0} \gamma_k u_k \Big/ \sum_{k=1}^{N_0} \gamma_k \\
v_i(x_i, y_i, z_i) &= \sum_{k=1}^{N_0} \gamma_k v_k \Big/ \sum_{k=1}^{N_0} \gamma_k \\
w_i(x_i, y_i, z_i) &= \sum_{k=1}^{N_0} \gamma_k w_k \Big/ \sum_{k=1}^{N_0} \gamma_k \\
\gamma_k &= \exp\left(- \frac{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2 + (z_i - z_k)^2}{h^2} \right)
\end{aligned}
\tag{3.20}
$$

가중계수 γ_k의 합은 항상 1이고, 계산에서 윈도우의 크기 h=3mm로 하였다.

Frame image(a)

Even field image(b)

Odd field image(c)

Fig. 3.1 Raw image from NTSC camera

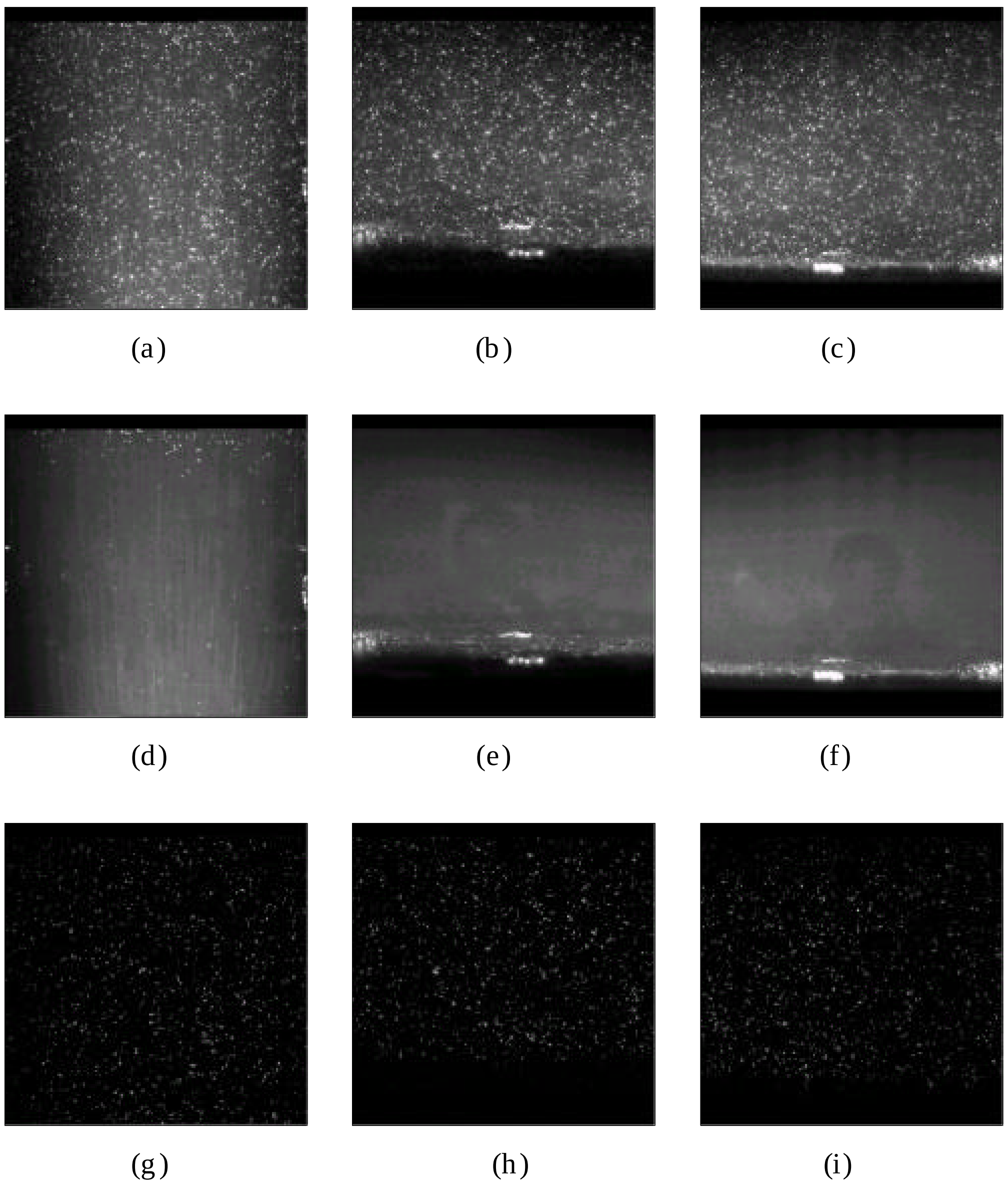


Fig. 3.2 Original images (a),(b),(c); Background images (d),(e),(f); Subtracted images(g),(h),(i)

Fig. 3.3 Relation between NTSC(camera signal) and AOM signals

Fig. 3.4 Four-frame identification

Fig. 3.5 Two-frame identification

Fig. 3.6 Principle of cross-correlation method based on density distribution patterns

Fig. 3.7 Particle tracking with stereo-pair matching

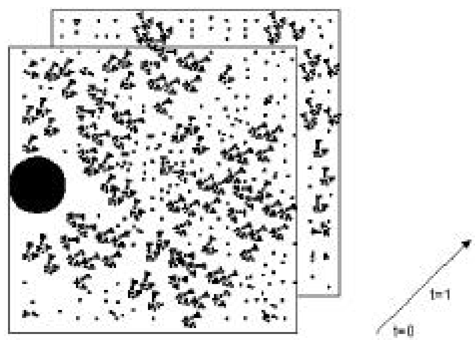
(1) Target area for searching the position of the particles at the second image

(2) Target area for searching the position of the particles at the third image

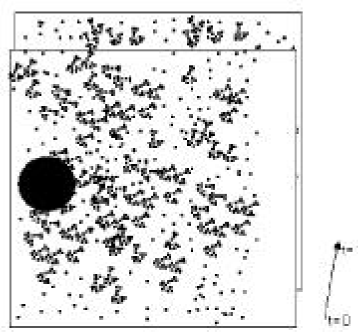
Fig. 3.8 Tracking method between the particle position of the first image and the particle position of the third image(when $R_1 \leq R_{min}$)

Fig. 3.9 Tracking area for searching the position of the particle at the third image

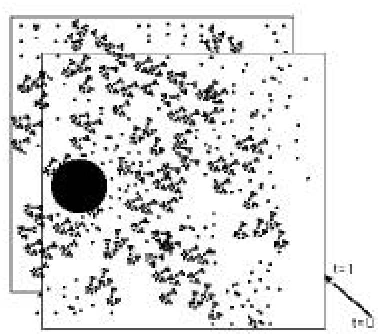
Fig. 3.10 Procedure of digital image processing



(a) Image of camera 1 with time difference dT



(b) Image of camera 2 with time difference dT



(c) Image of camera 3 with time difference dT

Fig. 3.11 Two consecutive particle images

Fig. 3.12 Finding principle for the same particle points in space using neighboring match probability

Fig. 3.13 Relations of T_m, T_n, T_q, d_{11}, d_{33}, d_{44}

3.5 1-Frame 3-D PTV system의 알고리즘 검증

본 연구에서 제시한 1-Frame 3-D PTV 알고리즘의 추종성을 검증하기 위하여 LES 데이터로부터 2,000개의 속도 벡터를 무작위로 추출하였다. 이 추출된 데이터는 벡터의 시점과 종점이 첫 번째 시각의 3차원 입자의 위치와 두 번째 시각의 3차원 입자의 위치로 간주한다. 실행은 3대의 카메라가 입자 전체를 보는 동안 수행한다.

Fig. 3.14는 제시된 1-Frame 3-D PTV 알고리즘에 의해 후향단 유동의 실험에서 회복된 3차원 속도벡터가 2000개 정도일 때를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 거의 완벽한 추종성을 보이고 있다.

식(3.16)의 반복계산으로 일정치 이하의 값으로 수렴이 얻어진 후에서의 특정한 입자 s_{30}에 대한 결과를 Fig. 3.15에 나타낸다. 가상입자의 개수는 2000, 그리고 최대 속도 U_m은 0.45m/s이다. 여러 번의 계산을 반복한 후에, p_{304}(F^1에서의 입자 s_{30}과 F^2에서의 일치하는 후보점 T_4의 확률일치가 1에 가까운 반면 다른 입자들의 확률일치가 0에 가까운 경향이 있는) 즉, 가장 근사한 3차원 궤도인 s_{30}은 d_{304}로 고려된다. 가장 근사한 3차원 변위 벡터를 얻기 위한 수렴속도는 매우 빠르므로, 반복 횟수 n에 의해서 영향을 받는 계산 시간은 상대적으로 짧다. 이 그림에서 알 수 있듯이 확률일치 p_{304}는 단지 3회의 반복으로 1에 수렴한다. 1-Frame 3-D PTV 알고리즘의 계산 시간과 정도에 영향을 주는 파라메타가 많다. 1-Frame 3-D PTV 알고리즘의 수행에 있어서 T_n, T_q 그리고 T_m과 같은 다양한 임계치에 대한 연구하기 위해서는 회복률 ϕ_r과 에러율 ϕ_e을 확실한 연속적인 이미지 프레임에서 계산되어져야 한다. 회복

률 ψ_r은 테스트를 위해 사용되는 벡터 개수에 대한 일치된 최대벡터의 개수의 비로 정의된다. 또한, 에러율 ψ_e는 사용하는 벡터개수에 대한 에러벡터의 개수의 비로 정의된다.

F^1과 F^2에 있어서 연속적인 입자의 3차원 위치는 각각 2,000개이며, 최대 가능한 벡터는 1,999개이다. 최대속도 U_m은 후향단 유동의 실제 속도인 0.45m/sec로 설정되었다.

Fig. 3.16은 1-Frame 3-D PTV 알고리즘의 실행에 있어 이웃한 임계치 T_n의 효과를 보여준다. 이 그림에서, $T_m/(U_m \Delta t)$과 $T_q/(U_m \Delta t)$는 각각 1.5와 0.08로 설정되었다. 이것은 비록, 회복률 ψ_r이 T_n의 값에 의해 크게 영향을 받지만, 에러율 ψ_e는 T_n에 상관없이 작은 값을 가지는 것을 의미한다. 여기서,Δt는 본 연구에서의 field 이미지 dT의 시간 간격을 의미한다.

Fig. 3.17은 추적성능이 유사운동 임계치 T_q에 의존하는 것을 보여준다. 그림에서 파라메타 $T_m/(U_m \Delta t)$과 $T_n/(U_m \Delta t)$은 각각 1.5 와 2.0 으로 설정하였고 반복계산은 4회로 하였다. 유사운동 임계치 T_q가 Δt 동안의 유사한 이동을 보이는 T_n내의 입자군의 유연성을 암시하므로, 큰 T_q는 여러 개의 부적절한 이웃하는 일치입자의 결과로 반복되는 연산을 통하여 나쁜 결과를 유도하게된다. 그러나, 유사운동 임계치 T_q가 최대 이동속도의 70%보다 작을 때 회복률은 에러율보다 크다. T_m은 유동장에서의 최대 이동속도보다 크게 설정되어야 하므로 정확히 결정된 최대 속도 U_m이 짧은 계산시간 내에 가장 가능한 입자경로를 얻기 위하여 필요하다. 그러나, 실제 유동장에서 U_m을 정확하게 결정하기란 쉽지가 않다. $T_m/(U_m \Delta t) < 0.8$의 경우에서 회복률 ψ_r은 몇몇 사라진 일치점의 후보들 때문에 상대적으로 낮다. 여전히, 회복률은 T_n값을 고려하지 않은 상태에서 90%를 상회한다. 이것은 본 알고리즘이 첫 번째 시각의

모든 입자의 경로에 대하여 넓은 다이나믹 렌지를 가지며, Fig. 3.19에서 처럼 T_n의 증가에 따른 계산시간의 증가를 암시한다.

Fig. 3.20은 일반적인 입자수의 밀도 $\rho_n = N_0/V_0$ 에 기인하는 3차원 계측 영역에 포함된 입자수에 대한 회복률(ψ_r)과 에러율(ψ_e)의 변화를 나타내는 것으로 입자의 수는 회복률(ψ_r)과 에러율(ψ_e)에 전혀 영향을 주지 않고 있다. 이것은 본 알고리즘이 3차원 비정상 난류 유동의 계측에 있어 매우 중요한, 공간상의 많은 입자들의 추적에 있어서도 매우 효과적임을 암시한다.

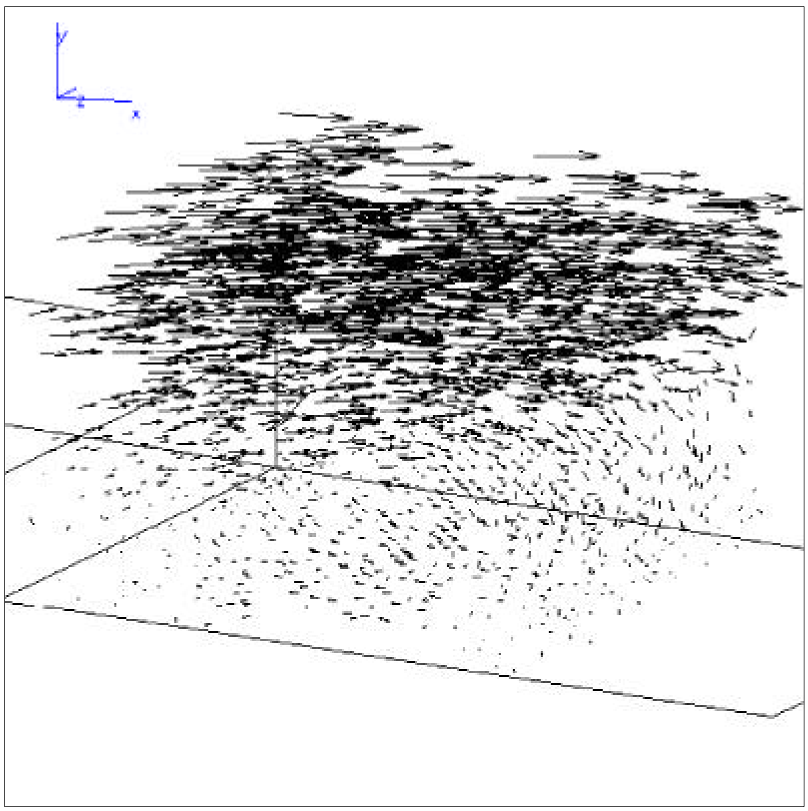


Fig. 3.14 Recovered velocity vector field of the backward-facing step flow(total number of particles N = 2,000)

Fig. 3.15 Variation of match probabilities P_{30j} vs number of iteration step

(P_{30} is the match probability of S_{30} particle for T_j in the second instance)

Fig. 3.16 The effect of the neighbourhood threshold T_n on the recovery ratio (ϕ_r) and error ratio(ϕ_e)

Fig. 3.17 The effect of the quasi-rigidity threshold T_q on the recovery ratio (ϕ_r) and error ratio(ϕ_e)

Fig. 3.18 The effect of the maximum movement threshold T_m on the recovery ratio(ϕ_r) and error ratio(ϕ_e)

Fig. 3.19 The effect of the maximum movement threshold T_m on computational time

Fig. 3.20 Variation of recovery ratio(ϕ_r) and error ratio(ϕ_e) vs. number of particles 98% while the error ratio remains very low

3.6 회전 원판 Test 계측실험

본 연구에서 구축한 3차원 PTV계측시스템을 고속으로 회전하고 있는 Fig. 3.21의 회전원판상에 3차원적으로 배치되어 있는 핀들의 운동을 AOM을 사용하여 첨두부의 속도계측에 적용하였으며, AOM을 사용하지 않을 경우에 대하여 계측결과를 비교하였다. 원판은 원판의 아랫부분에 설치된 서보모터(FMD, E-40TA, 400W)에 의하여 회전된다. 실제 모터의 회전속도는 RPM 게이지(GLA, DPI282, ±0.05%)로 계측하였다. 각 핀들은 3차원적으로 배치되어 있으며 Fig. 3.21의 면의 수직방향을 절대좌표계에서의 Y축 방향으로 하고 면의 가로방향을 절대좌표계의 X방향, 세로방향을 절대좌표계의 Z방향으로 하였다. 핀의 식별을 쉽게 하기 위하여 핀의 말단 부에 흰색의 도료를 발랐다. 3차원 계측을 하기 위해서는 카메라의 교정작업이 필요하게 되는데 원판상의 핀의 첨두부를 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 가로의 정방향을 X축방향, 세로의 정방향을 Z축방향, 원판의 수직방향을 Y축방향으로 정의하였다. 다음으로 유동을 3차원적인 것과 같은 운동을 재현하기 위하여 Fig. 3.21의 실물을 AOM을 사용하지 않을 경우에 대해서는 150rpm, AOM을 사용할 경우에 대해서 300rpm, 400rpm으로 회전시켜 원판상의 핀들의 속도벡터를 계측하는 실험을 행하였다. Fig. 3.22(a)의 그림은 카메라1에서 AOM을 사용하지 않았을 때의 프레임 이미지를 나타낸 것이고, Fig. 3.22(b), Fig. 3.22(c)는 Fig. 3.22(a)를 필드 분리한 그림이다. 그림에서도 알 수 있듯이 카메라 셔터의 노출시간(1/60)이 길므로 해서 셔터의 노출시간동안 입자의 궤적이

나타나기 때문에 입자의 정확한 도심을 찾기는 매우 어려워진다. 150rpm일 때 AOM을 사용했을 경우의 Fig. 3.23(a)과 같은 프레임 이미지는 적절한 시간동안의 레이져 광원의 간격(dT)과 넓이(dW)를 조절한 이미지를 보여주고 있다. Fig. 3.23(a)을 필드 분리하여 보간한 그림을 Fig. 3.23(b), Fig. 3.23(c)처럼 보여주고 있으며, AOM을 사용하였을 경우 정지상태의 것과 같은 선명한 입자의 영상을 얻었다. 분리된 필드 이미지를 제2장에서 전술한 화상처리에 의해서 AOM을 사용하지 않았을 경우에 대해서 속도벡터를 구한 결과를 Fig. 3.26에서 표현하고 있다. 위의 그림에서와 같이 AOM을 사용하지 않았을 경우 원판은 바깥부분에서의 상대 속도가 빠른 이유로 도심의 위치를 구하는 것이 어려웠으며, 속도벡터의 검출이 되지 않았다. 그러나 AOM을 사용하였을 경우 연속적인 이미지 사이의 dT를 2.5msec, wT를 0.8msec로 하였을 경우 같은 150rpm으로 실험을 실시한 결과 Fig. 2.26과 같이 거의 모든 입자에 대해서 3차원 속도벡터를 얻을 수 있었다. 모두 36개의 기준점 중에서 얻어진 총 개수는 32개였다. 전부 추적이 되지 않은 것은 핀이 회전할 때 작은 핀이 큰 핀에 가려져서 카메라가 입자상을 상실했기 때문이다. Fig. 3.28과 Fig. 3.29의 좌상단에 나타나 있는 화살표는 기준속도벡터를 의미하며 각각 3.10m/sec 와 3.93m/sec를 나타낸다. 본 연구에서 개발된 알고리즘을 적용하여 3차원 속도벡터를 계산 한 결과 회전원판의 바깥쪽 핀의 회전속도가 400rpm에서 5.3m/sec 이었다.

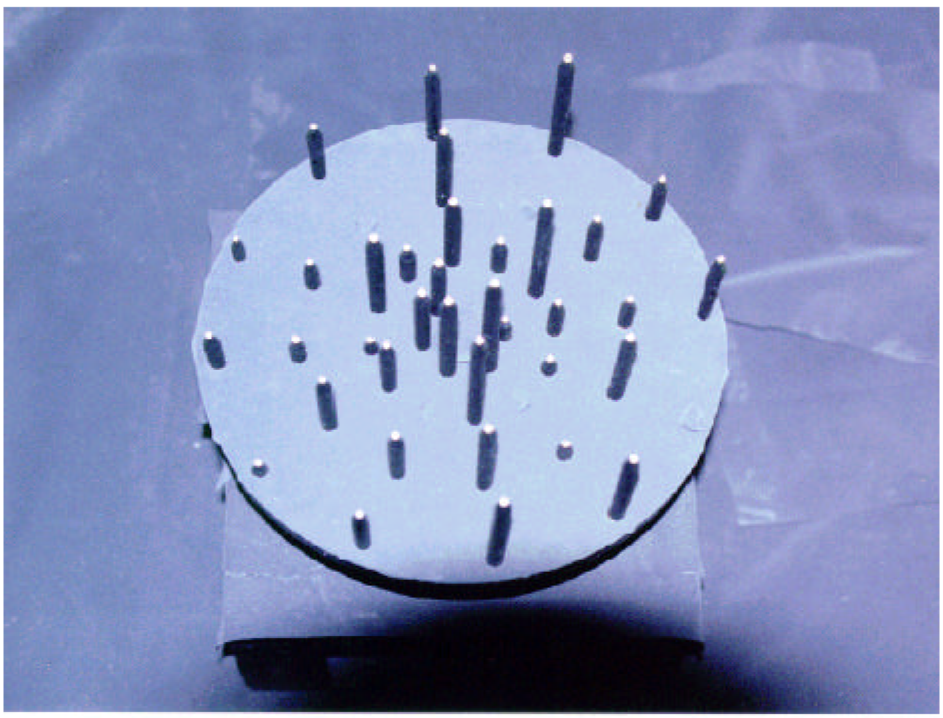
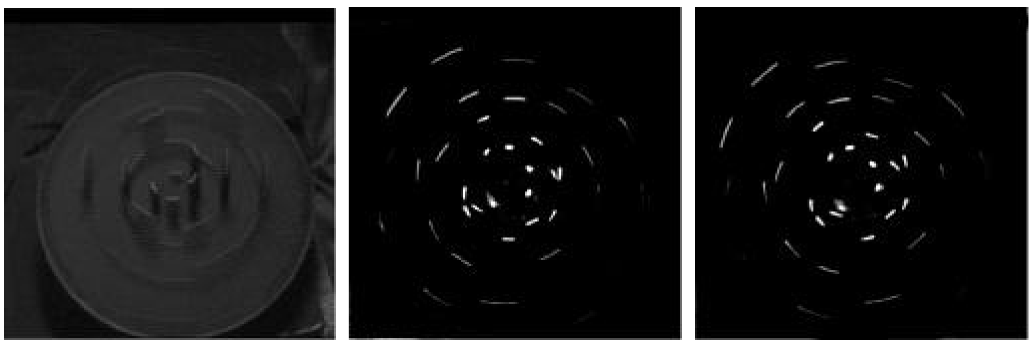


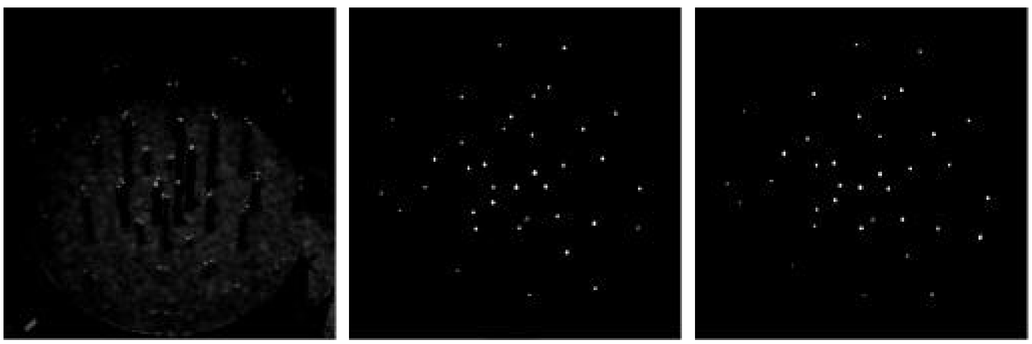
Fig. 3.21 Experimental set of the rotating plate



(a) Frame image (b) Even field image (c) Odd field image

Fig. 3.22 Unused AOM raw image from camera 1 (150rpm)

Fig. 3.23 Used AOM raw image from camera 1 (150rpm)



(a) Frame image (b) Even field image (c) Odd field image

Fig. 3.24 Used AOM raw image from camera 1 (300rpm)

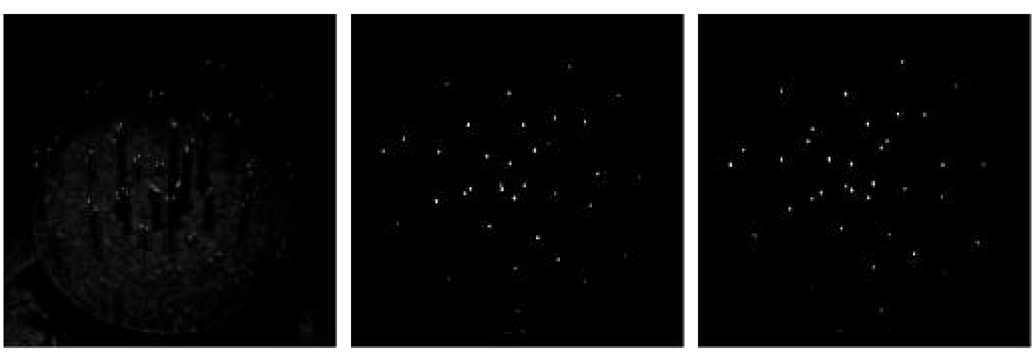


Fig. 3.25 Used AOM raw image from camera 1 (400rpm)

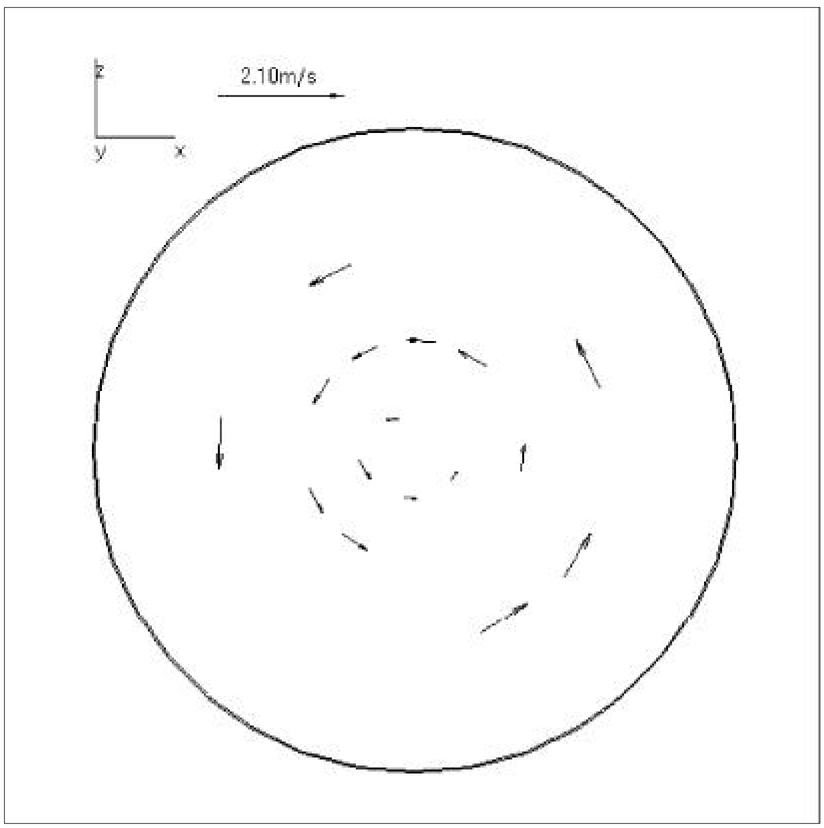


Fig. 3.26 Unused AOM obtained 3-D velocity vectors(150rpm)

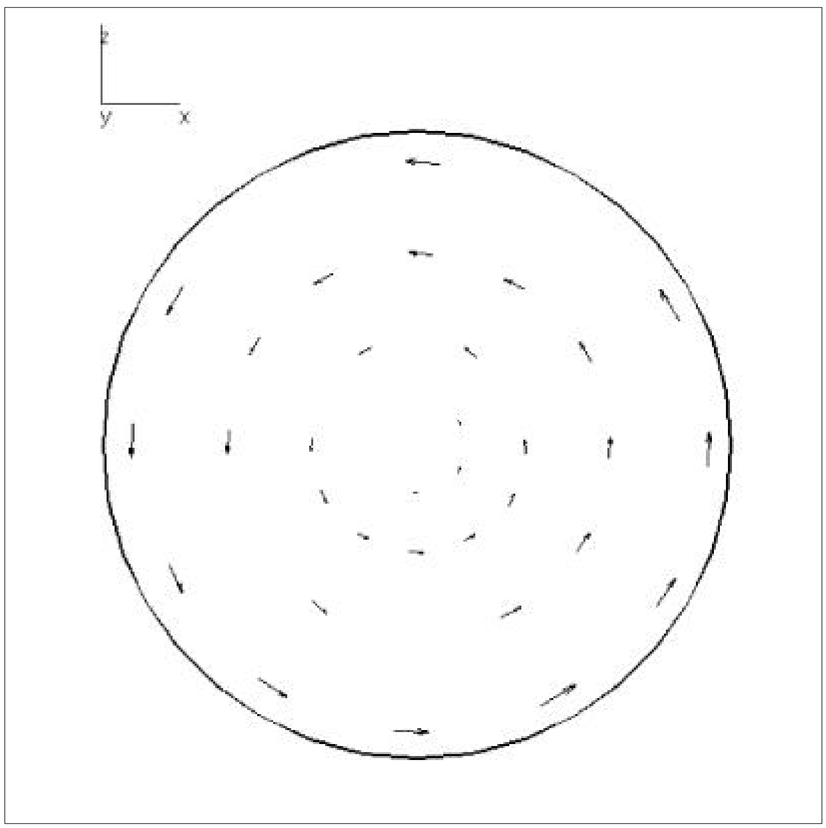


Fig. 3.27 Used AOM obtained 3-D velocity vectors (150rpm)

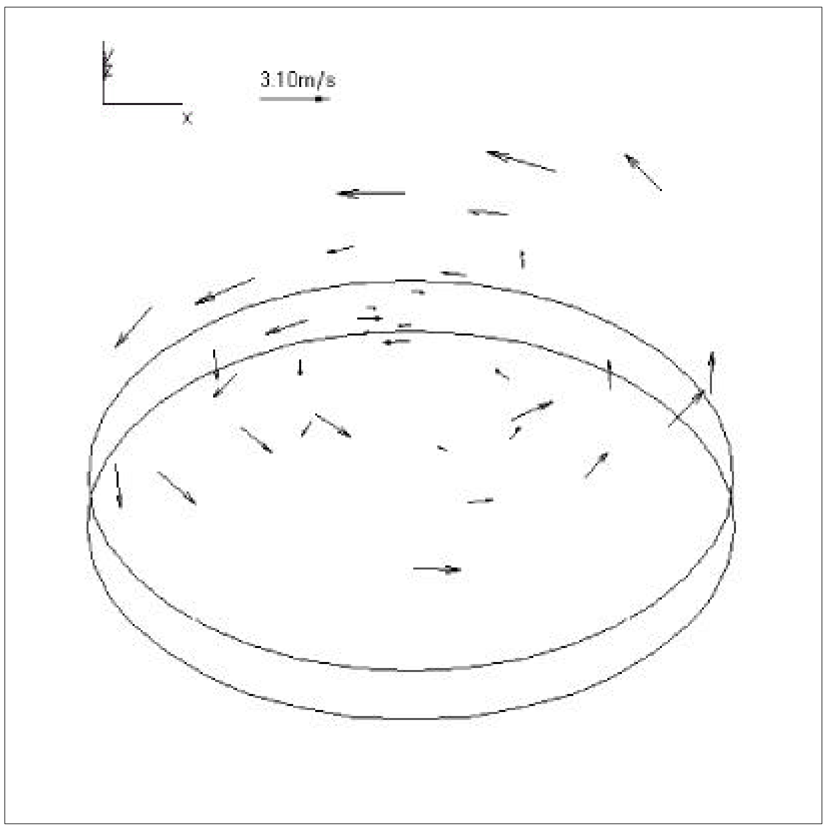


Fig. 3.28 Used AOM obtained 3-D velocity vectors(300rpm)

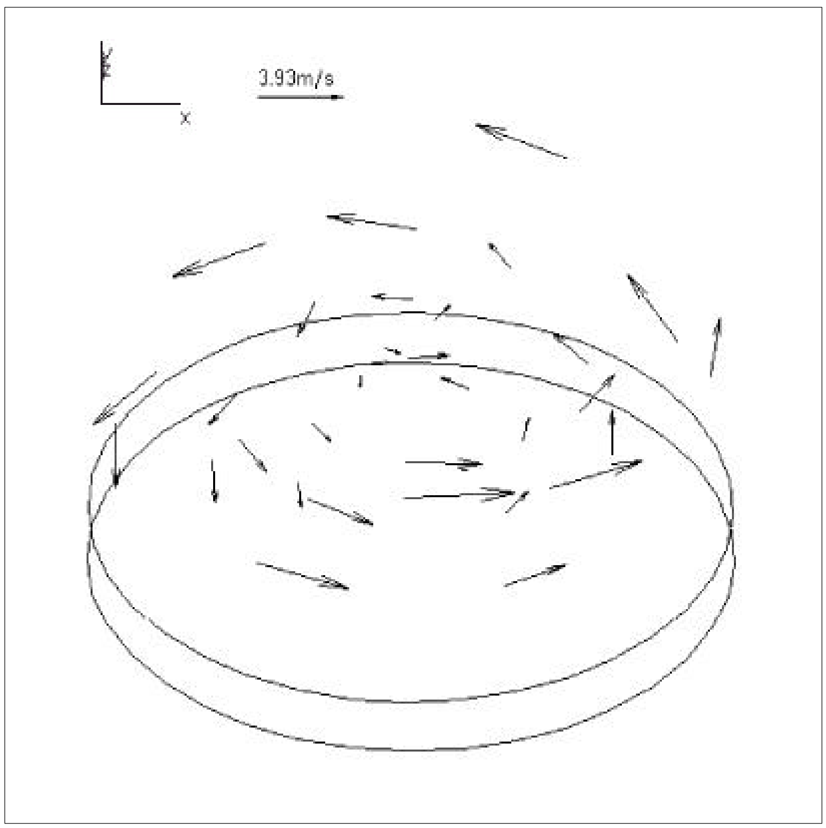


Fig. 3.29 Used AOM obtained 3-D velocity vectors(400rpm)

3.7 오차해석

본 계측에 있어서의 추적입자의 3차원위치를 계산할 때의 오차의 원인으로서는 카메라 파라메타의 설정오차와 사진좌표측정시의 오차 등이 생각될 수 있으나 이들이 구해지더라도 입자의 3차원위치와 이들 오차원인과의 사이에는 단순한 함수관계가 성립하지 않으므로 오차전파의 식으로부터 오차를 검정하기란 쉽지 않다. 따라서, 미리 계측되어 있는 기준점의 위치와(원판의 기준점) 카메라 파라메타를 사용해서 계산한 기준점의 위치를 비교하는 것으로 오차를 구하는 것으로 하여 계산해 본 결과 회전속도가 300rpm일 때 표준편차의 값은 0.021m/sec이었으며 이는 가장 작은 속도인 0.628m/sec의 약 3%에 해당된다. 또한, 회전속도가 400rpm일 때 표준편차의 값은 0.0183m/sec이었으며, 이는 가장 작은 속도인 0.838m/sec의 약 2%에 해당된다. 이는 본 연구에서 구축된 계측시스템과 회전원판상에 회전하고 있는 기준점 속도와의 상대오차가 작으므로 본 계측시스템은 3차원 고속 계측에 유효함을 알 수 있다. 한편 에러벡터가 발생되지 않기 위해서는 일치확률방식에서는 탐색영역의 크기 설정에 주의해야 한다. 본 연구에서는 시행착오적 방법으로 이를 설정하여 속도를 구하였다.

제 4 장 1-Frame 3-D PTV 계측법에 의한 후향단의 계측

4.1 계측장치의 개요 및 계측방법

유동의 3차원 속도를 계측하기 위하여 카메라의 교정작업을 수행하였다. 3대의 카메라는 물과 공기와 아크릴의 굴절률을 최소로 하기 위해서 수조의 좌, 우, 상 방향에서 수직으로 배치시켰다. 계측의 오차를 줄이기 위하여 본 실험에 있어서 시행착오를 거쳐 최적의 카메라 위치를 선정하였다. Fig. 2.1은 후향단 유동의 실험장치의 개략도를 나타낸다.

유동장의 3차원 속도벡터는 본 연구에서 개발한 계측알고리즘 (1-Frame 3-D PTV)으로 계측하였다. 카메라의 교정작업을 마친 후 교정판을 제거하고 미리 제작된 후향단을 설치하고 추적입자(나일론 12, 비중 1.02)를 유동장에 투입한 후 전술의 AOM장치를 거친 Ar-ion 레이져 (5W)광원은 프로브를 이용하여 유동장에 비춰진다. 3대의 카메라에 의해서 얻어진 이미지는 이미지 그래버(Ditect 64)로 이송된다.

입자의 3차원적 위치는 3대의 카메라에 대한 이미지의 쌍들에 나타난 입자들의 도심을 이용하여 계산되고 카메라의 파라메타가 얻어진다. 마지막으로 3차원 속도벡터는 개발된 3-D PTV 계측법으로 구하였다.

Fig. 4.2는 계측된 3차원 순간 속도벡터를 보인다. 계측된 영역은 후향단의 끝에서부터 110mm × 110mm × 320mm이고 후향단을 기점으로 하류방향인 X 방향으로 80mm씩 이동하면서 A, B, C, D의 4개의 단면으로 나누어 계측

하여 얻어낸 약 200만개의 3차원 속도벡터를 전술한 본 계측법의 검정용 데이터로서 활용하였고 A단면과 B단면사이에서 나타나는 유동이 재 부착되는 점인 x/H = 3.8의 전후부 영역 90mm × 90mm × 80mm 을 집중적으로 계측하여 얻어낸 약 200만개의 3차원 속도벡터로부터 레이놀즈응력 등을 포함한 난류통계량을 얻었다.

4.2 실험조건

후향단의 앞부분에 설치되어 있는 판 상부 x/H = -2 인 지점에 대해서 평균속도 프로파일, 난류강도, 레이놀즈 전단응력, 난류 운동에너지에 대한 계산결과를 Fig. 4.1에서 보여주고 있다. 자유흐름의 판 상부에서 계측된 속도를 대표속도 U_0로 하였으며, 본 연구의 실험에서는 U_0는 0.45m/s이었다. 레이놀즈수(UH/ν)는 약 11,000이다. H는 후향단의 높이로 25mm이며, ν는 20℃일 때 물의 동점성계수이다. x/H = -2 지점에서 경계층(δ/H) 두께가 2.3이었다. 이것은 본 연구에서 사용된 회류수조의 길이가 후향단의 입구에서 충분한 난류의 유동을 만들어 주지 못한 것으로 사료된다. 이러한 입구조건은 후향단의 유동에 상당히 영향을 미치고 있다. Lee and Baek(1996)의 실험결과와 비교했을 때 후향단의 X방향으로 y/H = 1.5 이하인 부분에서는 난류 통계치의 값이 거의 일치하나 상부에서는 전체적으로 매우 큰 값이 계측되었다.

(a) Mean velocity profile

(b) Turbulence intensity
($T_u = \sqrt{\overline{u'^2}} / U_0$, $T_v = \sqrt{\overline{v'^2}} / U_0$)

(c) Turbulence kinetic energy and
Reynolds stress($TKE = \frac{1}{2} q^2 / U_0{}^2$,
$RES = -\overline{u'v'} / U_0{}^2$)

Fig. 4.1 Inlet flow condition at x/H = -2

4.3 계측결과

Fig. 4.2는 본 연구에서 개발된 1-Frame 3-D PTV 시스템에 의해서 처리된 각 단면에서의 순간 3차원 속도벡터를 보여주고 있다. 단면 A의 후향단 바로 뒤(y/H < 1)에서는 3차원성이 상당히 강한 복잡한 유동이 일어나고 있음을 확인할 수 있으며, 재 부착 지점이 일어나는 단면 B의 중간 이후부터는 큰 유동의 경향이 없이 단면 C, D와 비슷한 결과를 보이고 있다. 그러나 y/H > 1 부분에서도 속도벡터들의 움직임이 유니폼하지 않음이 나타난다. 이는 전술한 바와 같이 입구조건의 영향으로 통계치가 크게 계측되는 원인이 되고 있다. 원하는 난류 통계치를 얻기 위해서 순간 3차원 속도벡터의 개수가 충분하지 못하기 때문에 본 연구에서는 통계처리를 위해 0.5초에 해당하는 속도벡터를 추출하여 통계처리를 하였다. Fig. 4.3은 0.5초 동안의 순간 3차원 속도벡터를 추출한 그림이다. 이와 같은 방법으로 얻은 벡터를 단면 A에 대해서 전술한 Gaussian Window 보간법을 적용하여 보간을 행하였으며, 결과는 Fig. 4.4와 같다. 같은 방법으로 계측영역의 모든 단면에 대해서 보간을 실시한 결과를 Fig. 4.5에서 보여주고 있다.

Fig. 4.6은 Z축의 중앙단면에 대해서 계측영역 모든 단면에 걸쳐 보간한 결과이며, 본 실험의 결과와 비교하기 위하여 실시한 Panoramic-PIV에 의한 2차원 결과와 유사한 분포를 보이는 결과를 얻었다.

Fig. 4.7은 x/H = 1.3과 x/H = 2.7인 지점에서 평균속도 분포를 LES, Kim et al.(1978)의 결과와 비교한 그림이다. LES 결과와는 차이가 있으나, Kim et al.의 실험결과와 거의 유사한 분포의 속도분포를 보이고 있다. 이것은 실험에 의한 결과는 평균치에 대한 속도분포를 표시했기 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 4.8에서 Fig. 4.15까지는 재 부착이 일어나는 부분인 x/H = 1.5 x/H = 4.9 부분에 대해서 Z축 중심을 대칭으로 약 6mm씩 16등분하여 X-Y단면에서 얻어낸 3차원 속도벡터로부터 난류 통계치를 계산한 결과를 보이고 있다.

Fig. 4.8은 Z위치에 따른 X-Y단면에 있어서의 하류방향에서의 u' 에 대한 난류강도를 나타낸 그림이다. 이들 그림으로부터 알 수 있는 것은 후향단의 X-Y중앙단면을 기준으로 양의 방향인 +Z방향과 음의 방향인 -Z방향으로의 난류강도는 Z의 위치에 따라서 서로 유사한 분포를 가질 뿐만 아니라 하류방향으로도 유사한 분포를 유지하고 있음을 알 수 있다. 다만, y/H가 1에 가까운 위치에서 최대치가 존재하고 있음을 알 수 있으며 후향단의 후류로 인하여 난류강도가 큰 값을 유지하고 있음을 알 수 있다. 또한, y/H가 1보다 큰 영역의 범위에서 난류강도가 여전히 비교적 큰 값을 유지하고 있다. 이는 후향단의 입구에서 유동이 충분히 발달되지 않은 난류라는 점과 후향단의 앞쪽 부위의 모서리부의 박리류의 발생으로 인하여 Fig. 4.1에 나타나 있는 바와 같이 후향단 입구부에서의 난류강도가 이미 커져 있는 이유에 기인한 것으로 사료된다.

Fig. 4.9는 Z위치에 따른 X-Y단면에 있어서의 하류방향에서의 v'에 대한 난류강도를 나타낸 그림이다. 앞에서와 마찬가지로 난류강도는 Z의 위치에 따라서 서로 유사한 분포를 가질 뿐만 아니라 하류방향으로도 유사한 분포를 유지하고 있음을 알 수 있으며 y/H가 1보다 큰 영역에서의 난류강도의 값은 비교적 큰 값을 유지하고 있다. 이 또한 입구부에서의 박리류의 영향 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 4.10은 Z위치에 따른 X-Y단면에 있어서의 하류방향에서의 w'에 대한 난류강도를 나타낸 그림이다. v'의 난류강도분포와 유사한 양상을 보이고 있는 것으로 보아 spanwise 방향으로도 비교적 난류강도가 커져 있음을 알 수 있다. 이는 전술한 바와 같이 후향단 입구부에서 발생한 박리류가 3차원적으

로 발달한 관계로 w'성분이 증가한 것으로 사료된다.

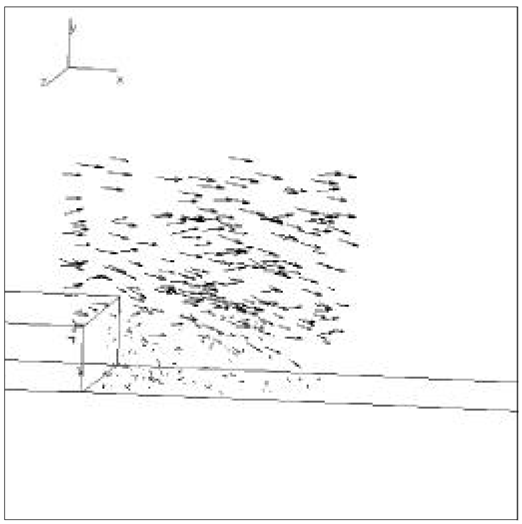
Fig. 4.11, Fig. 4.12, Fig. 4.13은 Z위치에 따른 X-Y단면에 있어서의 하류방향에서의 레이놀즈응력, ($\overline{u'v'}$), ($\overline{u'w'}$), ($\overline{v'w'}$)의 분포를 나타내고 있다. 이들 역시 Z방향의 대칭인 X-Y단면에 있어서는 중단의 X-Y단면을 기준으로 서로 대칭인 양상을 보이고 있음을 알 수 있으며 이로부터 후향단 입구부 모서리부에서 발생한 박리류로 인한 와의 증가는 중앙단면을 기준으로 서로 대칭으로 발달되어 감을 추론할 수 있다. 또한, ($\overline{v'w'}$)분포는 다른 레이놀즈 응력에 비하여 y/H가 1보다 작은 영역에서는 상대적으로 작은량을 나타내는 양상을 보이고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4.14는 Z위치에 따른 X-Y단면에 있어서의 하류방향에서의 난류운동에너지분포를 나타낸다. 난류에너지의 최대치는 하류로 갈수록 작아짐을 알 수 있으며 이는 전단층과 재순환류를 매개로 하여 하류로 갈수록 난류에너지가 분산되어 감을 추론할 수 있다.

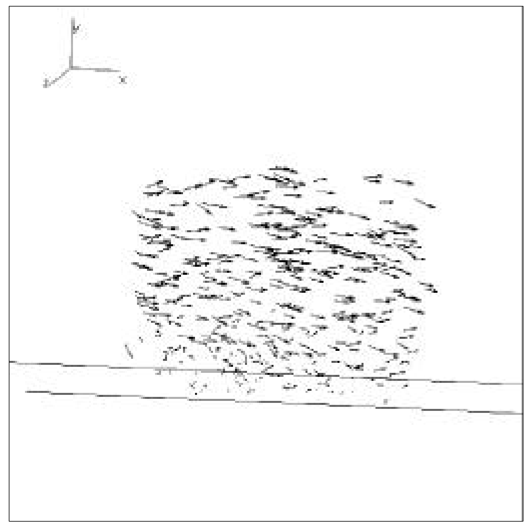
Fig. 4.15와 Fig. 4.16은 X-Y단면에 있어서의 하류방향에서의 난류강도 및 레이놀즈 응력분포를 Z방향으로 모두 겹쳐놓은 그림을 나타낸다. 이들 그림으로부터 이들 물리량들이 중앙단면을 기준으로 서로 대칭적인 량을 유지하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4.17, Fig. 4.18, Fig. 4.19는 후향단 중앙단면에서의 u', v', w'의 난류강도분포를 나타내고 있다. Fig. 4.20, Fig. 4.21, Fig. 4.22는 레이놀즈 응력분포 ($\overline{u'v'}$), ($\overline{u'w'}$), ($\overline{v'w'}$)를 나타내고 있으며, Fig. 4.23은 난류운동에너지의 분포를 나타내고 있다.

Fig. 4.24는 계측한 전 구간에 대해서 보간한 속도성분을 이용하여 3차원 유적선을 구현한 결과를 보여주고 있으며, Fig. 4.25는 동일한 데이터를 이용하여 구현한 3차원 유맥선에 대한 결과를 보여주고 있다.

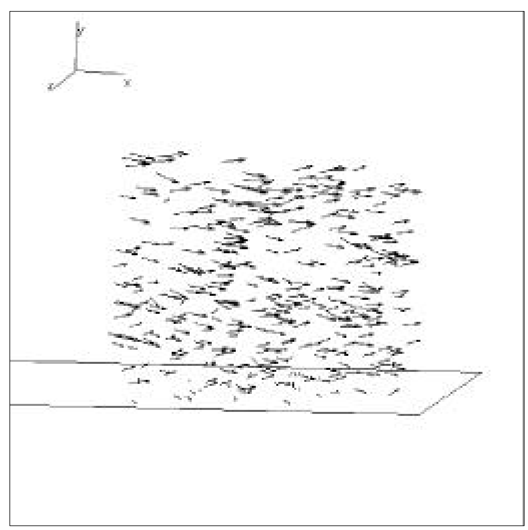


(a) Section A



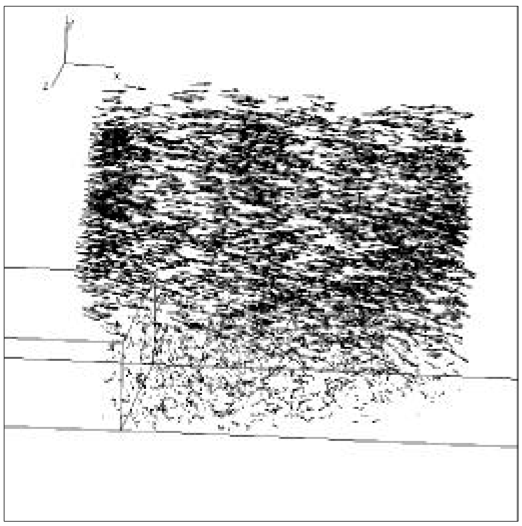
(b) Section B

(c) Section C

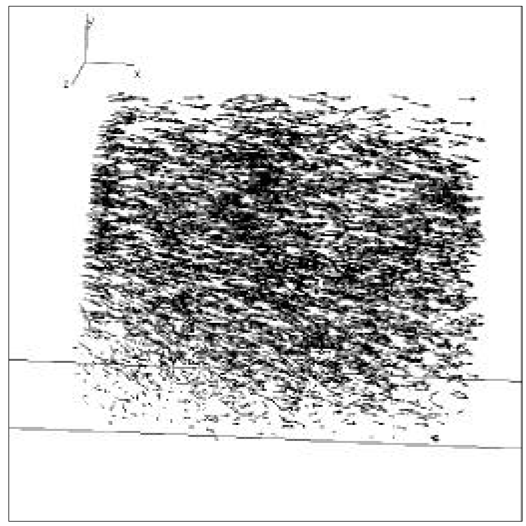


(d) Section D

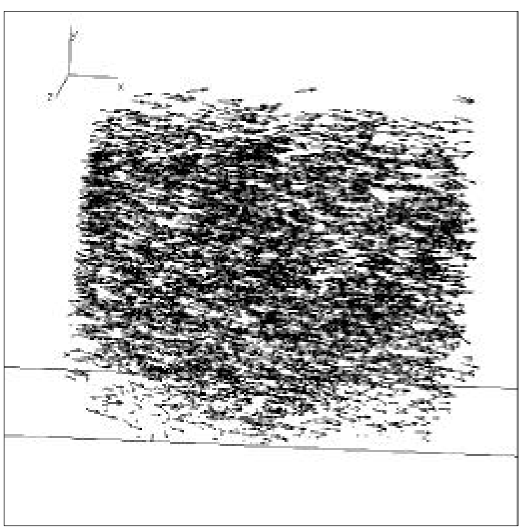
Fig. 4.2 Instantaneous 3-D velocity vectors of backward-facing step flow



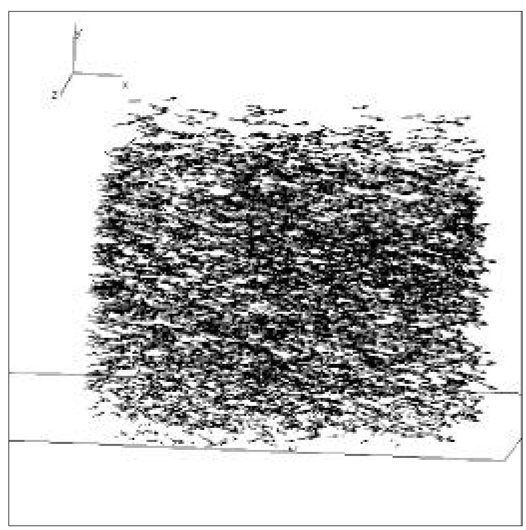
(a) Section A



(b) Section B



(c) Section C



(d) Section D

Fig. 4.3 Integrated 3-D velocity vectors

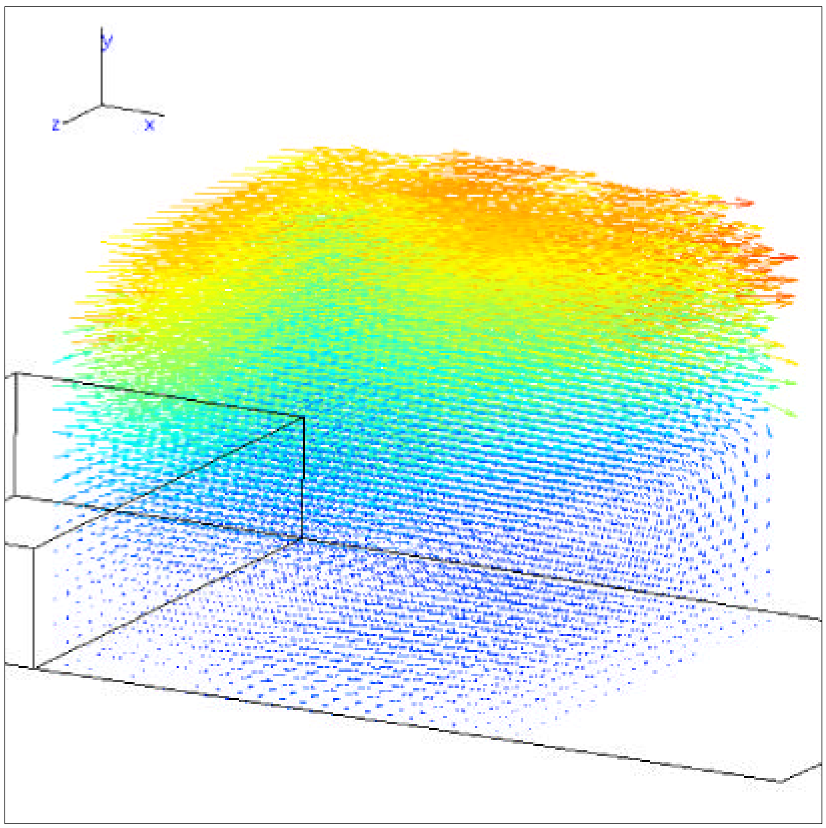


Fig. 4.4 Interpolated 3-D vectors of section A

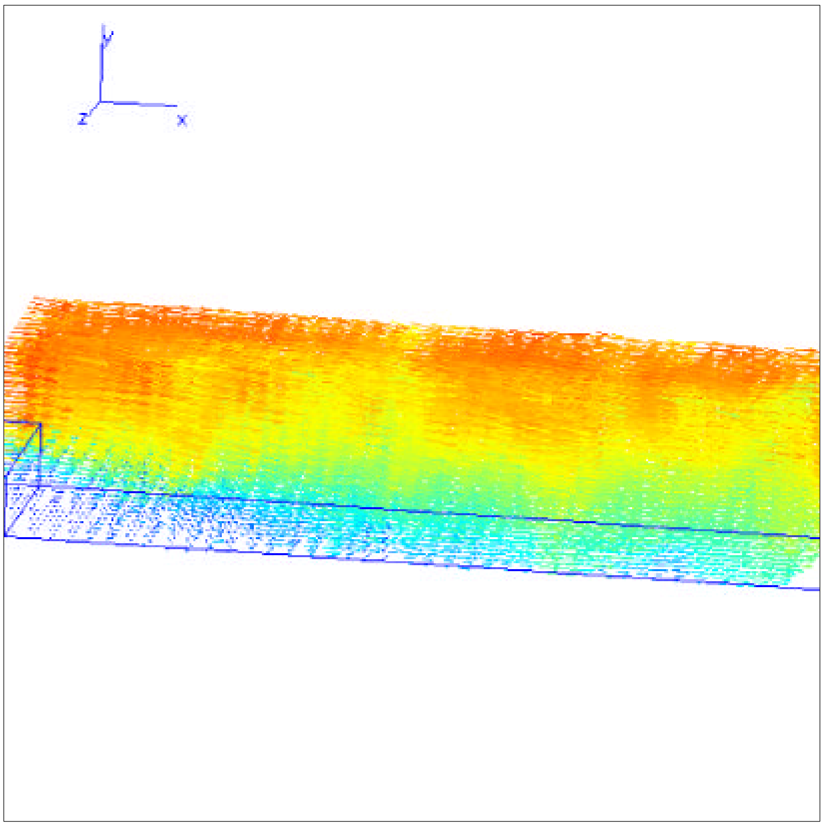


Fig. 4.5 Interpolated 3-D vector

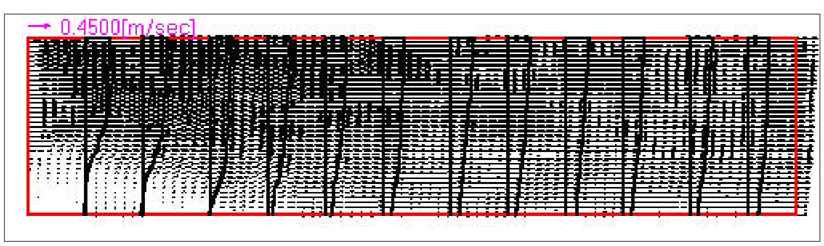


Fig. 4.6 Interpolated vector at center of Z axis

Fig. 4.7 Mean velocity profile

Fig. 4.8 Streamwise turbulence intensity profile ($T_u = \sqrt{\overline{u'^2}} / U_0$)

Fig. 4.8 : (Continued)

Fig. 4.9 Transverse turbulence intensity profile ($T_v = \sqrt{\overline{v'^2}} / U_0$)

Fig. 4.9 : (Continued)

Fig. 4.10 Spanwise turbulence intensity profile ($T_w = \sqrt{\overline{w'^2}} / U_0$)

Fig. 4.10 : (Continued)

Fig. 4.11 Reynolds stress profile(- $\overline{u'v'}/U_0^{\;2}$)

Fig. 4.11 : (Continued)

Fig. 4.12 Reynolds stress profile($-\overline{u'w'}/U_0^2$)

Fig. 4.12 : (Continued)

Fig. 4.13 Reynolds shear stress profile($-\overline{v'w'}/U_0^{\,2}$)

Fig. 4.13 : (Continued)

Fig. 4.14 Turbulence kinetic energy profile($TKE = \frac{1}{2} q^2 / U_0{}^2$)

Fig. 4.14 : (Continued)

(a) $T_u = \sqrt{\overline{u'^2}} / U_0$

(b) $T_v = \sqrt{\overline{v'^2}} / U_0$

(c) $T_w = \sqrt{\overline{w'^2}} / U_0$

Fig. 4.15 Total turbulence intensity profile of X-Y plane

(a) $R_{uv} = -\overline{u'v'} / U_0^{\,2}$

(b) $R_{uw} = -\overline{u'w'} / U_0^{\,2}$

(c) $R_{vw} = -\overline{v'w'} / U_0^{\,2}$

(d) $TKE = \frac{1}{2} q^2 / U_0^{\,2}$

Fig. 4.16 Total Reynolds shear stress profile of X-Y plane(a,b,c);
Total turbulence kinetic energy(d)

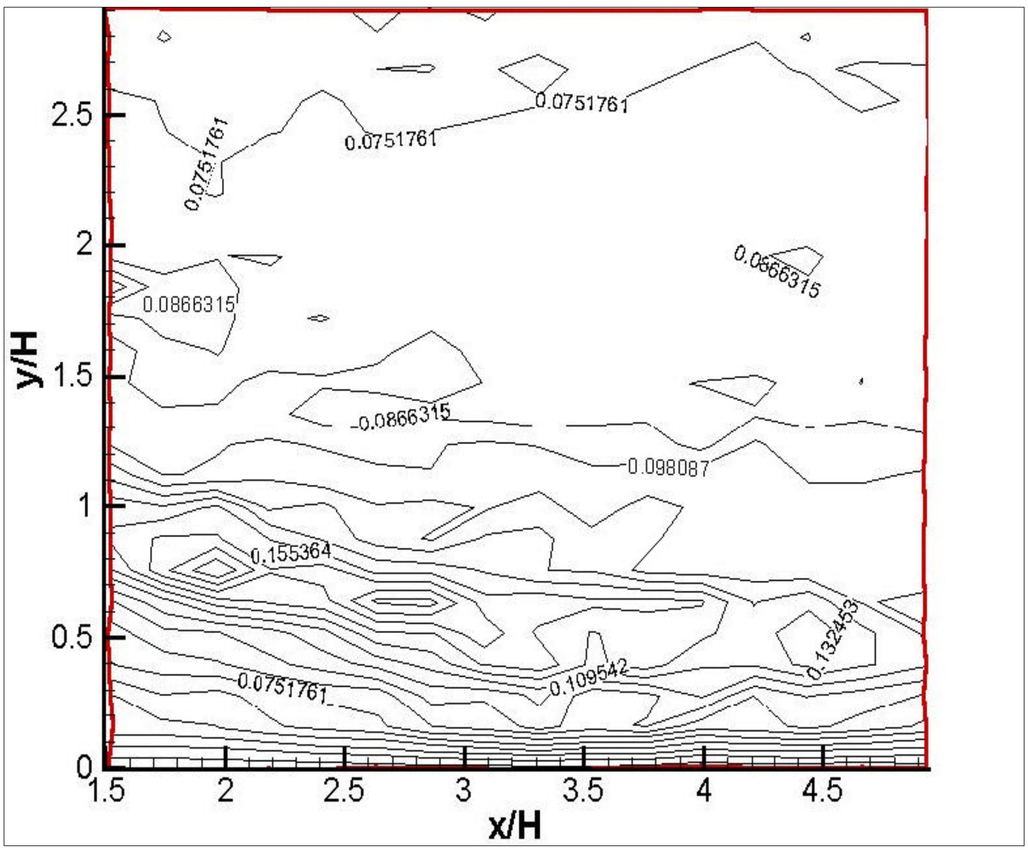


Fig. 4.17 Streamwise turbulence intensity distribution($T_u = \sqrt{\overline{u'^2}} / U_0{}^2$)

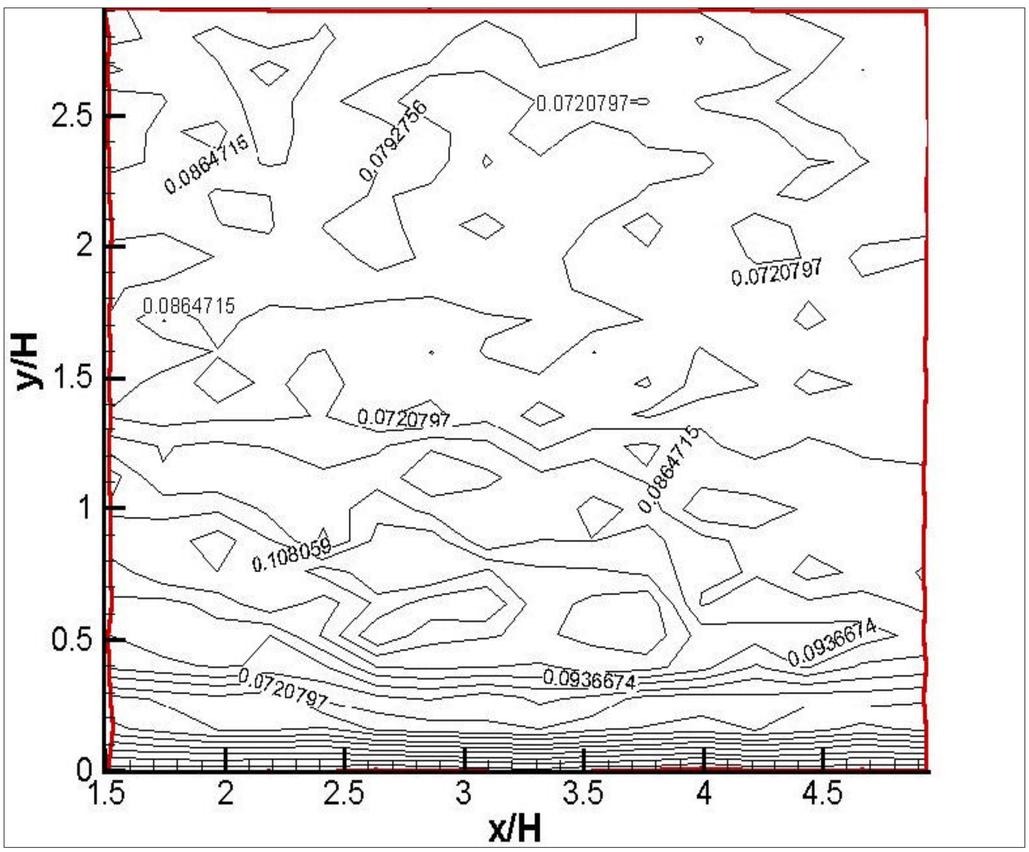


Fig. 4.18 Transverse turbulence intensity distribution($T_v = \sqrt{\overline{v'^2}} / U_0{}^2$)

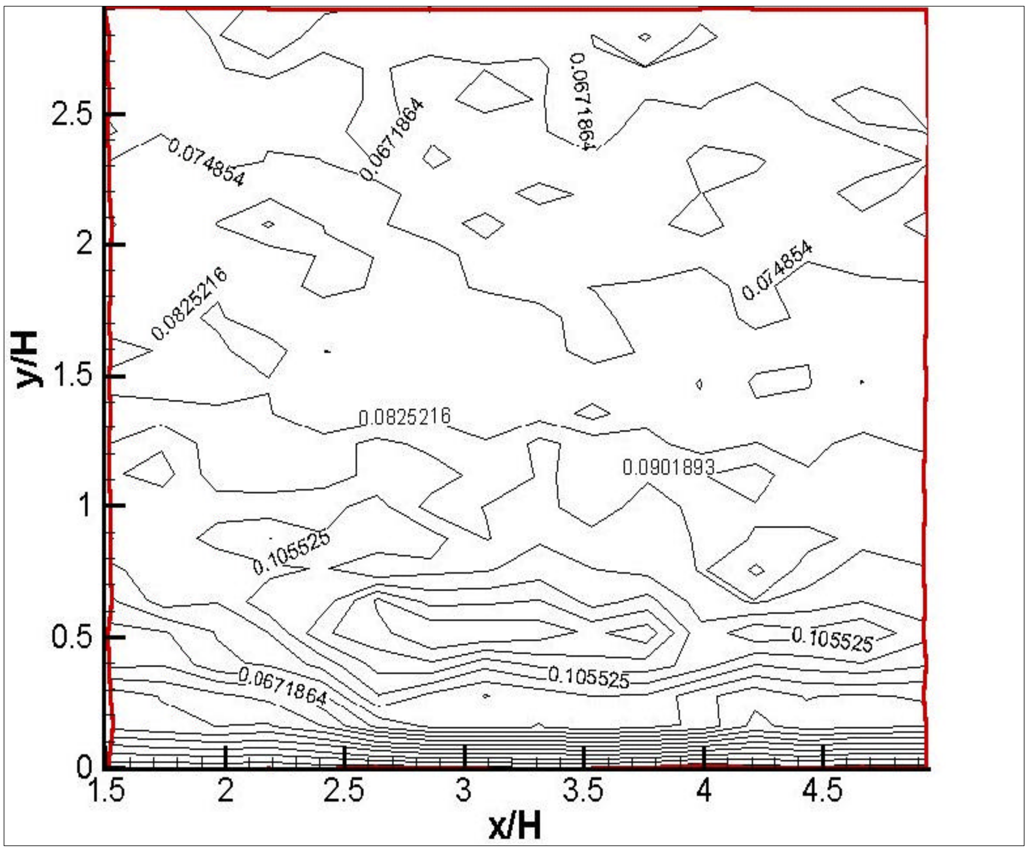


Fig. 4.19 Spanwise turbulence intensity distribution($T_w = \sqrt{\overline{w'^2}} / U_0{}^2$)

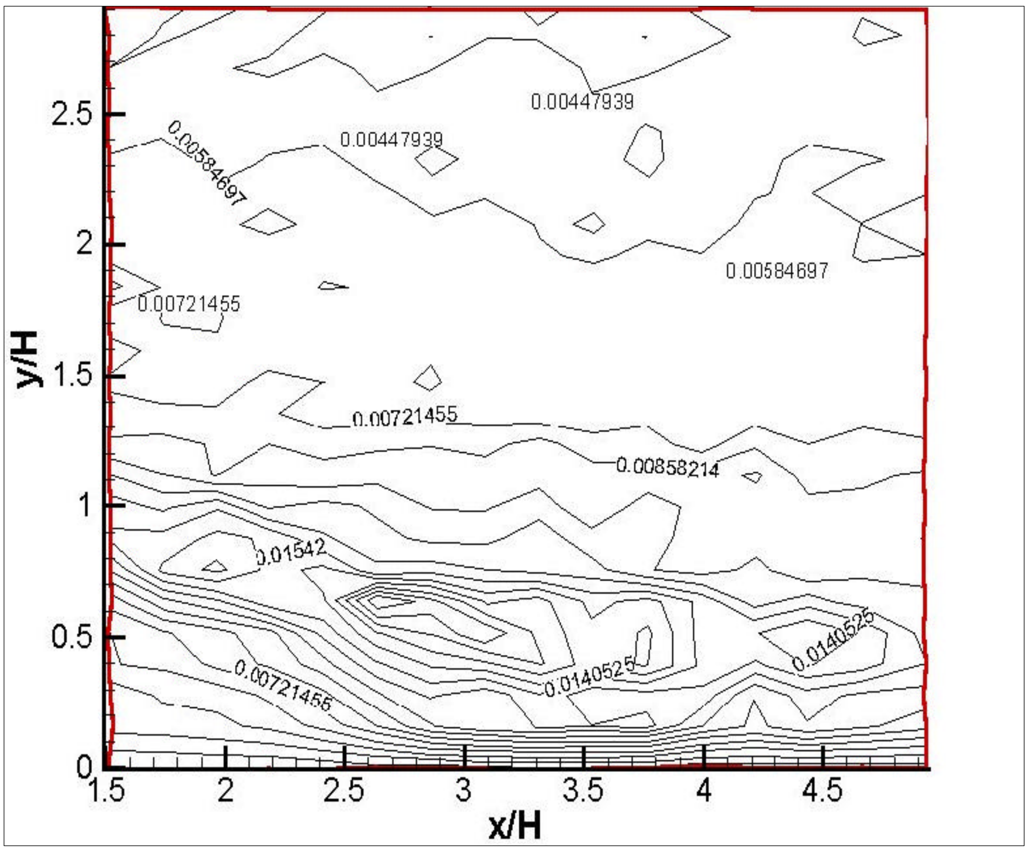


Fig. 4.20 Reynolds shear stress distribution($-\overline{u'v'}/U_0{}^2$)

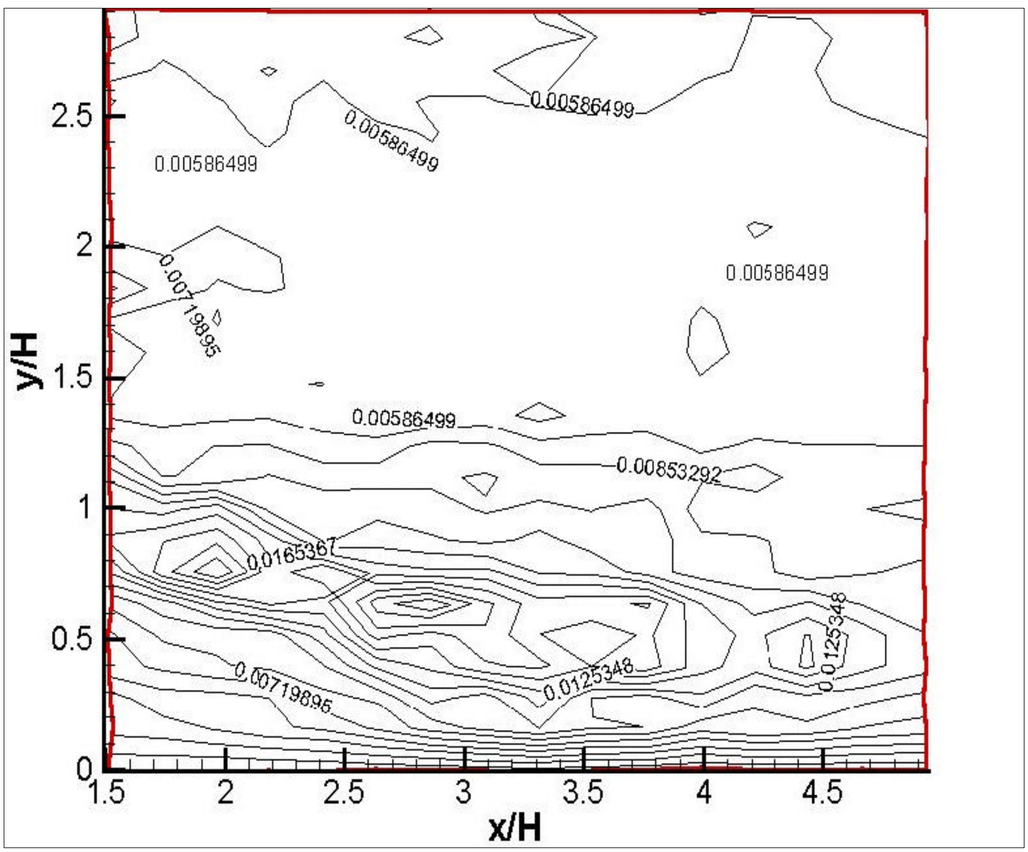


Fig. 4.21 Reynolds shear stress distribution($-\overline{u'w'}/U_0^2$)

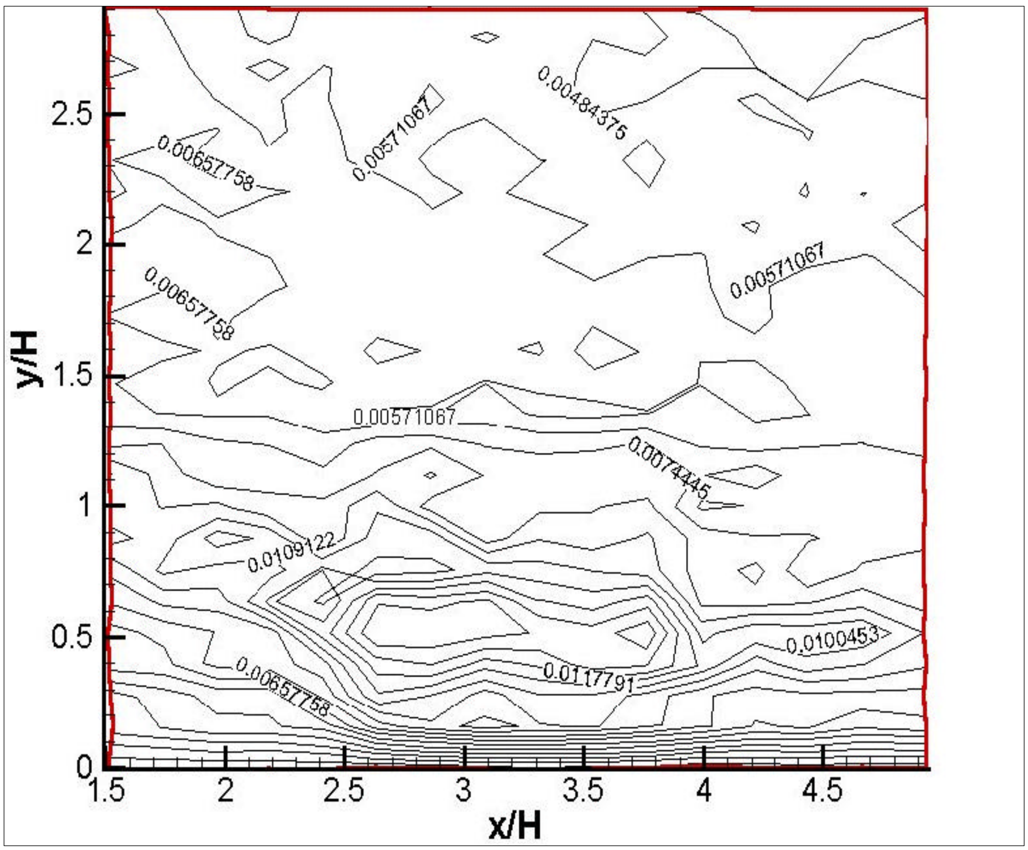


Fig. 4.22 Reynolds shear stress distribution($-\overline{v'w'}/U_0^{\ 2}$)

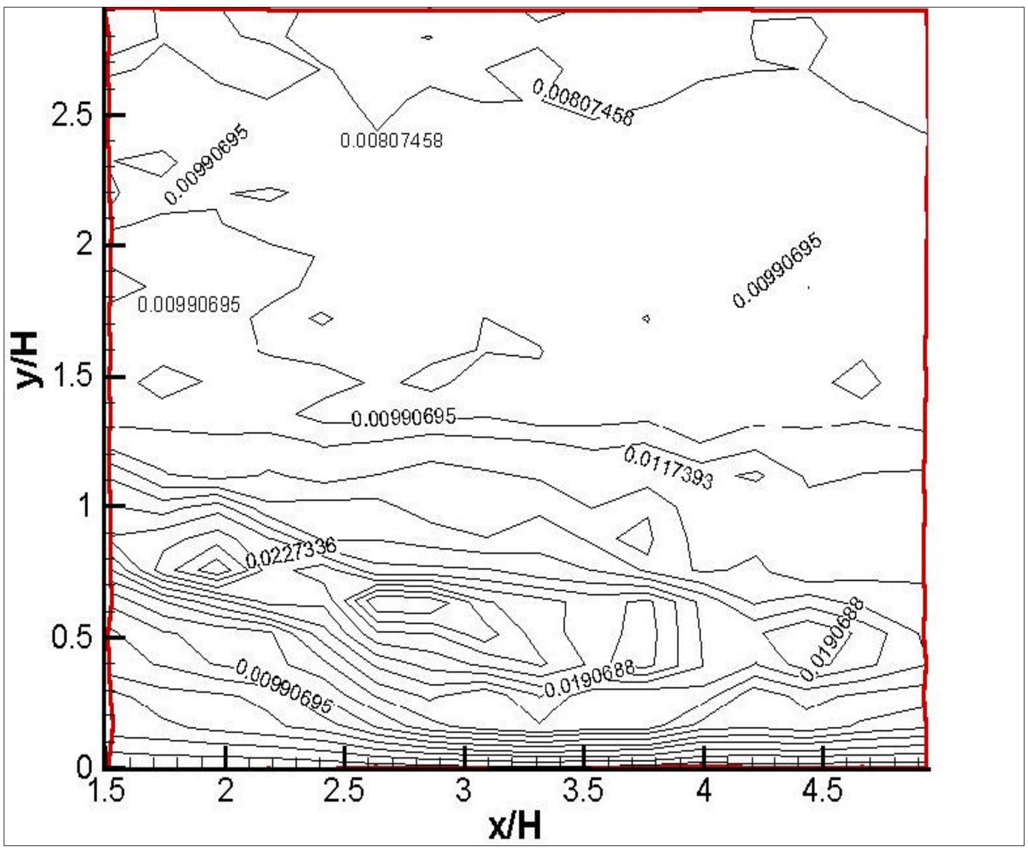


Fig. 4.23 Turbulence kinetic energy distribution($\frac{1}{2}q^2/U_0{}^2$)

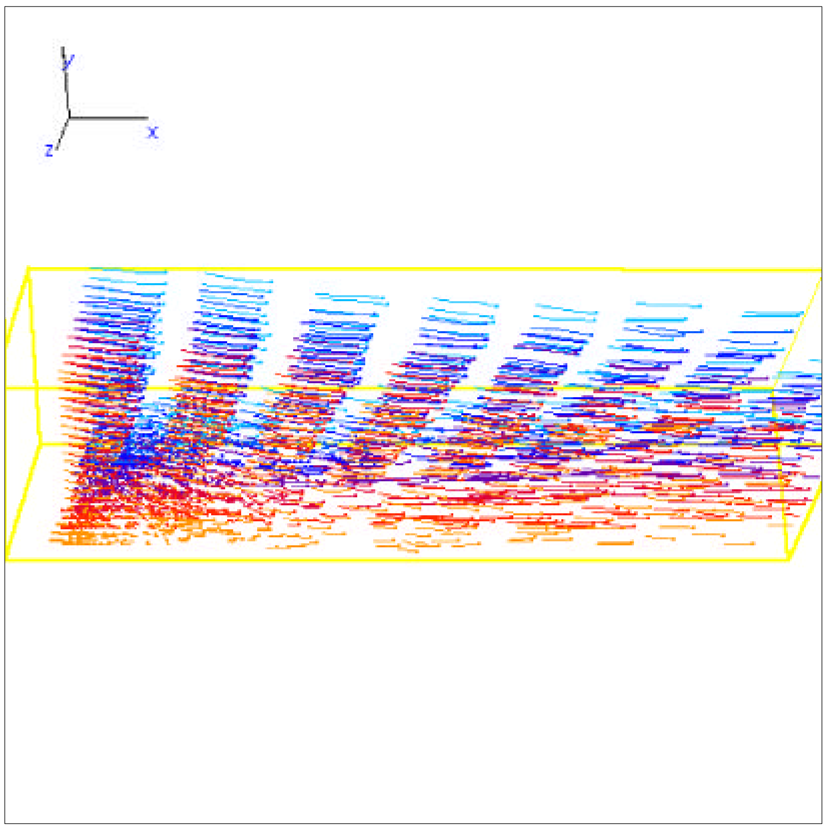


Fig. 4.24 3D Path line

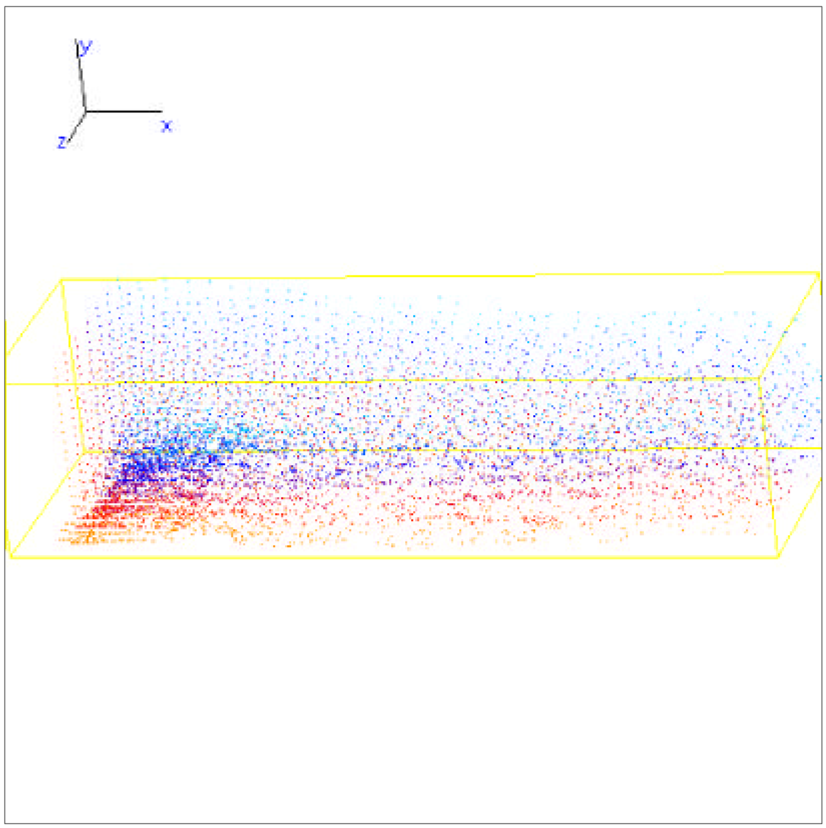


Fig. 4.25 3D Streak line

4.4 Panoramic-PIV 계측법

유동장의 넓은 영역에 걸쳐 작은 스케일의 와동을 계측하기 위해서는 일반적으로 상용되고 있는 저해상도 CCD 카메라 1대만으로는 어려움이 많이 따른다. 고해상도의 카메라를 사용하면 이러한 어려움을 어느 정도는 극복할 수 있지만 일반사용자가 사용하기에는 가격이 상대적으로 너무 고가이기 때문에 문제점으로 작용한다. 그러므로 본 연구에서는 이와 같은 문제점들을 극복하기 위하여 일반적으로 상용되고 있는 저 해상도의 CCD 카메라 3대로 구성된 Panoramic-PIV계측시스템을 구축하였으며, 이 계측시스템을 이용하여 후향단에서 3차원 실험조건과 같은 조건하에서 2차원 속도벡터를 계산하였으며, 이 결과를 3차원 PTV 실험 결과와 비교 자료로 사용하고자 한다.

4.4.1 Panoramic-PIV 계측시스템

Fig. 4.27은 후향단 주위 유동장의 거동해석을 위하여 계측부 크기가 1m × 0.3m × 0.3m인 소형 회류수조에서의 PIV실험 개요도를 나타낸다. 수조의 바닥에 알루미늄으로 제작한 두께 2mm의 평판을 설치한 후 그 위에 수조의 입구에서 320mm위치에 가로(110mm) × 세로(295mm) × 높이(25mm)의 직각의 계단을 설치하였다. 레이져 광원에 의해서 반사되는 것을 방지하기 위하여 후향단에 검은색 무광 페인트로 발랐다. 자유표면의 효과를 최소화하기 위해서 수조의 윗면에 5mm정도의 아크릴로 제작한 평판을 올려놓았다.
3대의 상용카메라(Sony, SSC-M370)를 Fig. 4.27처럼 계측부에 대하여 평행으로 나란히 배치하였다. 이때 각 카메라의 영상은 분리된 형태로 나타나기 때

문에 한 장의 파노라마 영상을 얻기 위해서는 각 카메라의 영상을 합성하여야 한다. 올바른 영상합성을 하기 위해서는 각 카메라간의 교정작업을 하여야 한다. 이는 Fig. 4.27(a), (b), (c)에 나타나 있는 것과 같이 교정판을 실험을 진행하기 전에 보면서 영상합성의 상대적 위치정보를 데이터로써 이용하는 작업이다. 이후, 각 카메라 영상의 합성 점들의 상대적 위치를 기준으로 실험영상에 대하여 합성을 실시하면 하나의 파노라마 영상을 얻어낼 수 있다.
각각의 카메라로부터의 영상은 확대율, 회전각도 등이 모두 다르기 때문에 이에 대한 보정작업을 해주어야 한다. 실제 유동장에 대한 파노라마 영상을 얻기 위해서는 각 카메라로부터 얻어진 영상은 동시에 기록이 되어져야 한다. Fig. 4.28은 실제 유동장에 대한 합성영상을 나타낸다.

교정작업이 끝나면 후향단을 설치하고 그 다음 Panoramic-PIV가시화 실험을 위하여 직경이 50μm정도의 나일론입자(비중 1.02)를 20℃의 회류하고 있는 수조에 투입하였다. 대표속도 $U_0 = 0.437 m/s$, 레이놀즈수 ($Re = U_0 H/\nu$)는 후향단의 높이(25mm)를 기준으로 하였을 때 11000 이었다.
수조 위에 계측부 중앙단면에 대하여 50-60cm 정도로 2차원 광원(아르곤이온 레이저, 5W)으로 2차원 광원의 형성을 위해 LLS(Laser Light Sheet)프로브를 통한 광원을 2mm 정도의 두께로 비추었다.

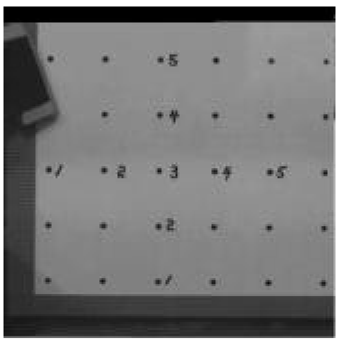
3대의 카메라(ESC-M370)를 통하여 가시화 된 영상은 VTR1(Pansophic, AC-7350) 혹은 VTR2(Soy, STV-RA1) 및 VTR3(STV-595HA)과 호스트컴퓨터(Pentium 333MHz)에 내장된 이미지그래버(Ditect64)에 기록된다. 기록된 이미지의 PIV처리는 계조치상호상관법에 의거하여 속도벡터를 구하였다. 한편 측정영역내에서의 속도계측의 향상을 위하여 AOM 시스템을 도입하였다.

4.4.2 계측결과

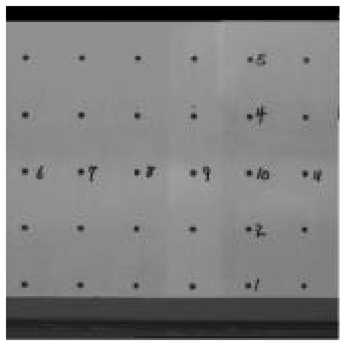
앞 절에서 설명한 전 처리과정과 계조치 상호상관법에 의한 속도벡터의 계산후 유동의 연속성을 이용한 주변벡터 성분들을 이용하여 에러벡터를 제거한 후 재배치한 격자점에 대해 거리의 역수 보간을 실시하였다. Fig. 4.29는 순간 속도장에 대해서 보간을 행한 결과를 보여주고 있다. 보간은 격자를 등간격 X 방향(195) × Y방향(55)으로 재배치하여 보간을 실시하였다. Fig. 4.30은 각 격자에 대응하는 순간 속도벡터에서 900장의 순간 속도장을 평균한 평균속도 벡터를 뺀 u', v' 의 속도장을 나타내고 있다. 전체적인 유동의 분포가 매우 복잡한 구조를 보이고 있는 것을 알 수 있다. 특히, 후향단의 상부에서 큰 와동이 존재하고 있으며, 이로 인해서 유동장의 난류통계치가 크게 계측되었다. Fig. 4.31은 평균 속도장을 보여주고 있다. 전 장에서도 확인 한 바와 마찬가지로 3차원의 중앙단면상에서 보간한 계측결과와 거의 유사한 속도분포를 보이고 있다. Fig. 4.32는 유동의 재 부착 지점을 중심으로 Fig. 4.29의 순간 속도장의 일부를 확대한 그림이다. 재 부착점을 중심으로 서로 반대방향으로 속도분포가 보이고 있다. Fig. 4.33은 Fig. 4.30의 일부를 확대한 그림이다. 이 그림에서는 부착지점에서의 와동성분이 큰 것을 확인할 수 있으며, 상부에서도 매우 복잡한 구조의 와의 구조를 보여주고 있다. Fig. 4.34는 평균 속도장의 확대그림이고, 흐름방향을 따라서 속도벡터가 음의 방향에서 양의방향으로 바뀌어 가는 와의 분포가 확인된다. Fig. 4.35, Fig. 4.36은 난류강도(u', v')분포를 나타낸 그림이다. 전 장에서 언급한 바와 같이 y/H > 1 지점에서 난류 통계치의 값이 크게 나타나고 있으며, 3차원의 결과와 거의 일치하고 있다. 후술하는 다른 결과도 마찬가지로 3차원 결과와 거의 유사한 분포를 나타내고 있다.

Fig. 4.37은 **레이놀즈응력**($\overline{u'v'}$)**분포를 나타낸 그림이다**. Fig. 4.38은 **운동에너지** $\left(\frac{1}{2}q^2 \approx \frac{3}{4}(\overline{u'^2}+\overline{v'^2})\right)$**분포를 나타낸 그림이다**. Fig. 4.39, Fig. 4.40은 **난류강도의 프로파일을 하류방향에 대해서 나타낸 그림이다**. x/H = 5.2 , y/H = 0.6 **부근에서 최대치를 나타내고 있다**. **재 부착 지점에서의** u', v'**의 분포는 다른 지점에 비해 대체적으로 큰 값을 보이고 있다**. Fig. 4.41은 **레이놀즈응력 프로파일**, Fig. 4.42는 **운동에너지 프로파일을 흐름방향에 대해서 나타낸 그림이다**.

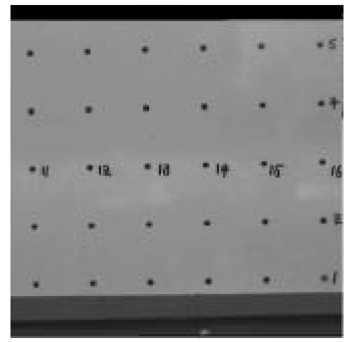
Fig. 4.26 Panoramic-PIV measurement system



(a) image of camera 1



(b) image of camera 2



(c) image of camera 3

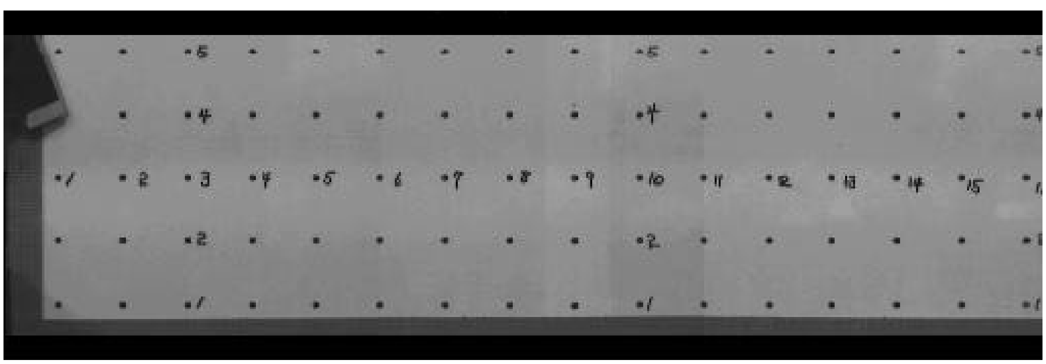
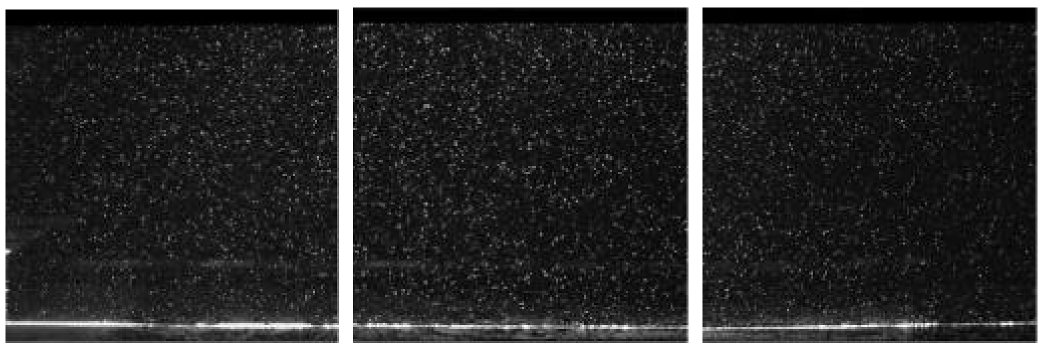


Fig. 4.27 Composite image from the images of cameras, 1, 2, and 3. (Calibrator Image)



(a) image of camera 1 (b) image of camera 2 (c) image of camera 3

Fig. 4.28 Composited image from the images of cameras, 1, 2, and 3 (Raw Image)

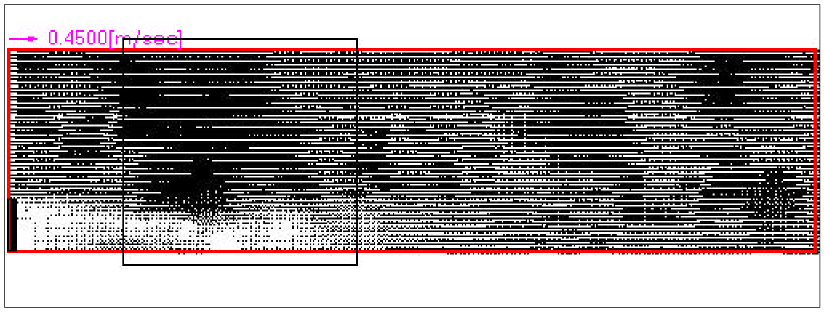


Fig. 4.29 Instantaneous interpolated velocity vector field

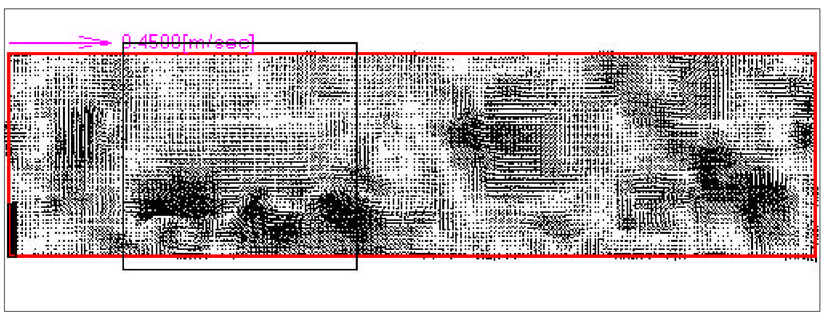


Fig. 4.30 Fluctuating velocity vector field

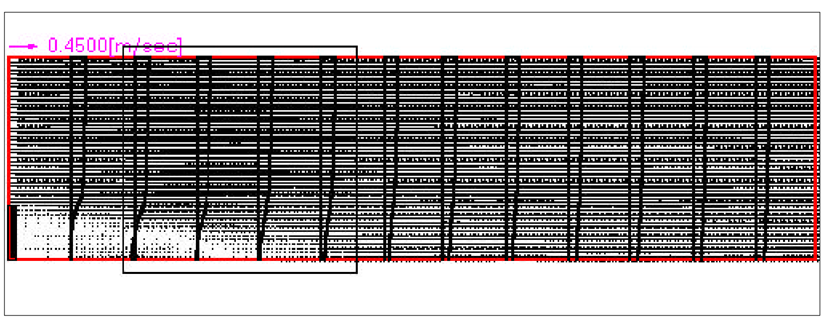


Fig. 4.31 Mean velocity vector field

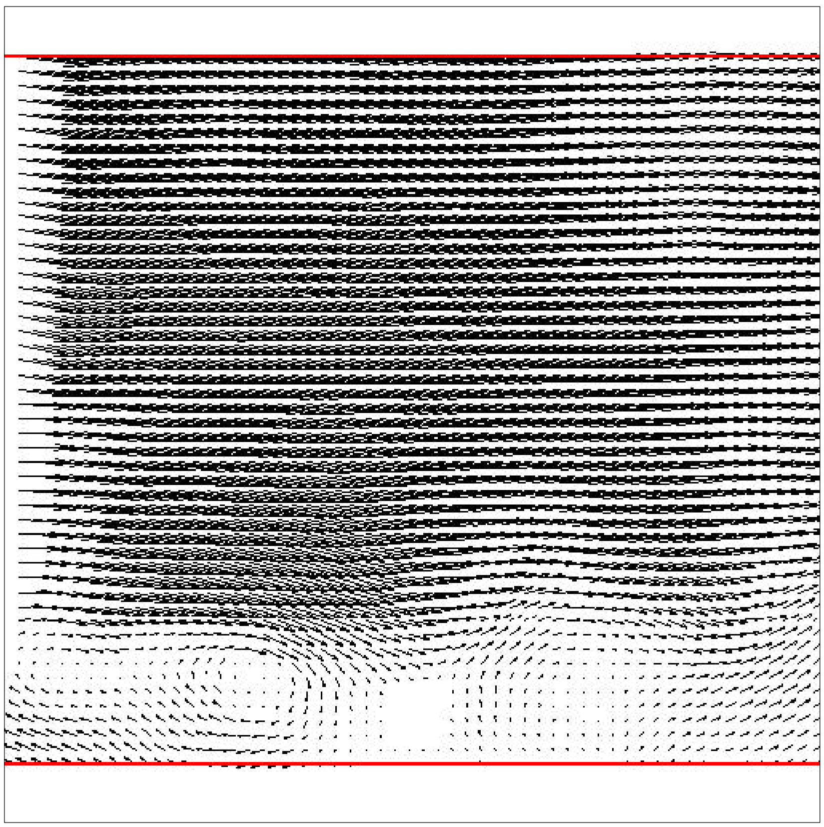


Fig. 4.32 Zoomed window of interpolated instantaneous velocity vector field

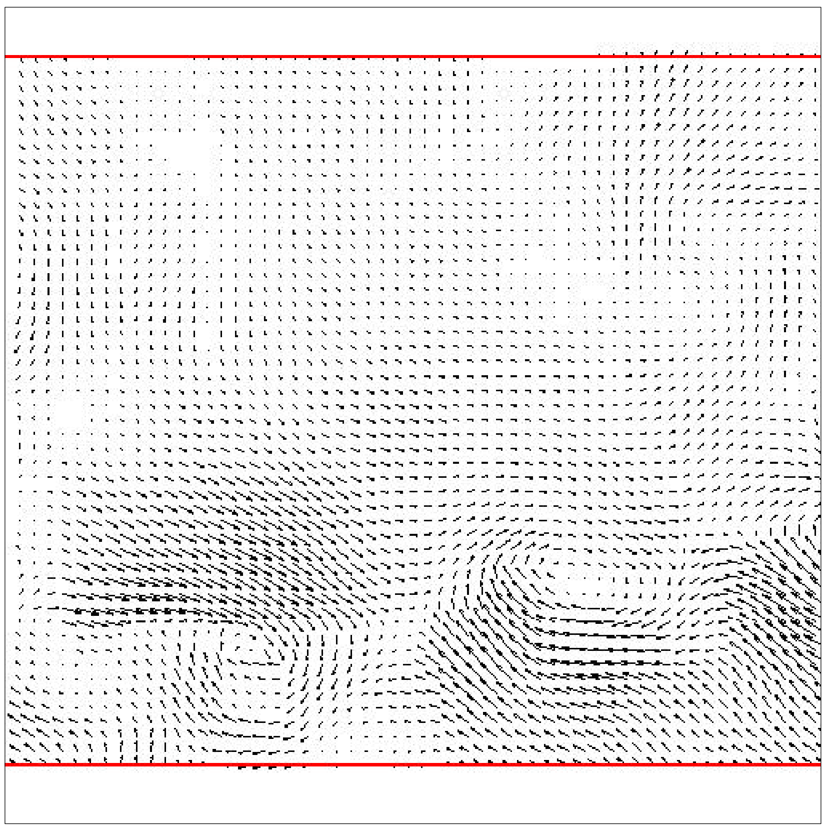


Fig. 4.33 Zoomed window of fluctuating instantaneous velocity vector field

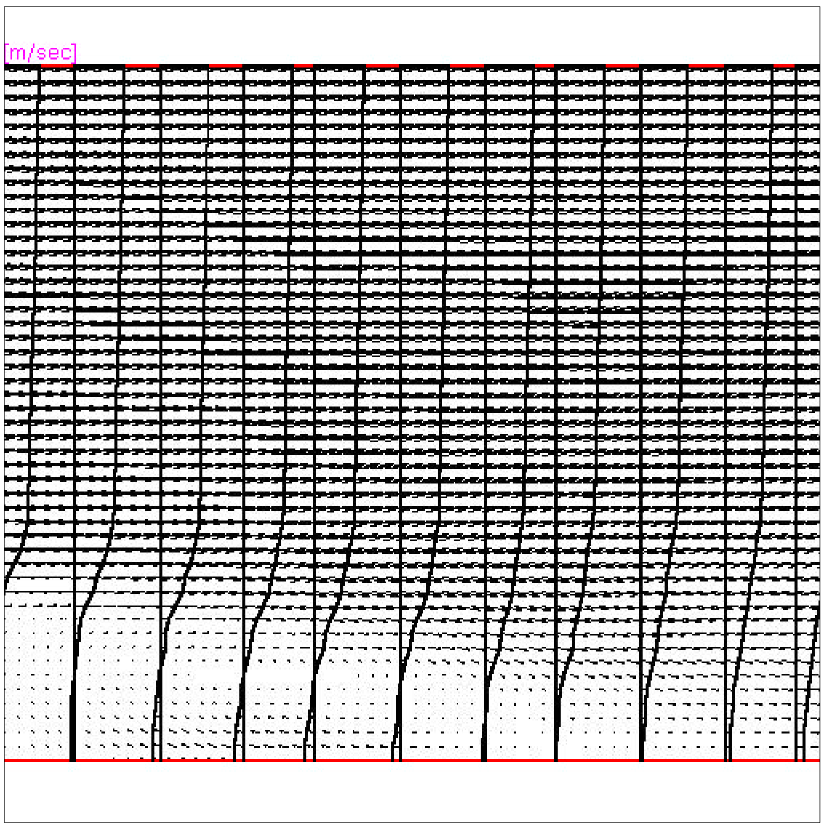


Fig. 4.34 Zoomed window of mean velocity vector field

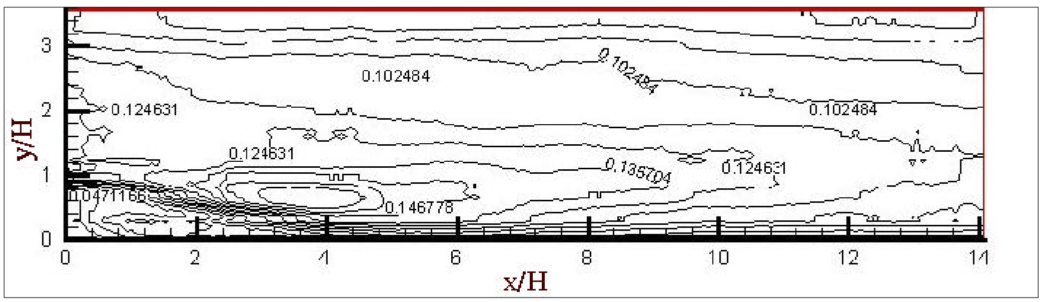


Fig. 4.35 Streamwise turbulence intensity distribution($\sqrt{\overline{u'^2}}/ U_0$)

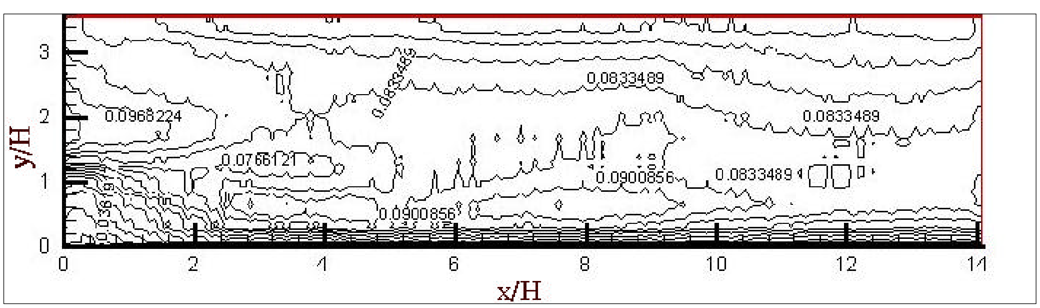


Fig. 4.36 Transverse turbulence intensity distribution($\sqrt{\overline{v'^2}}/ U_0$)

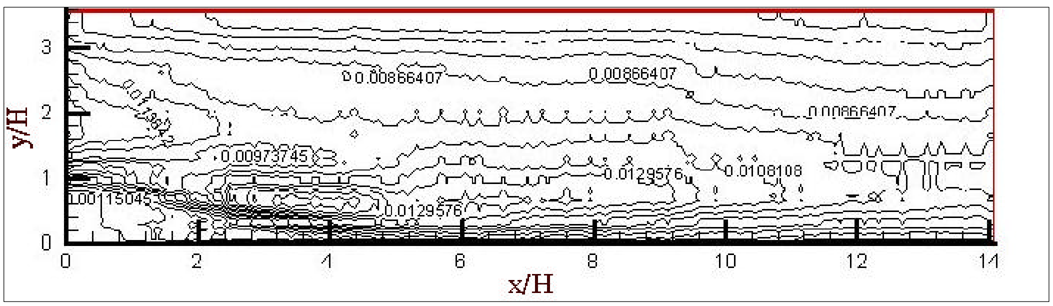


Fig. 4.37 Reynolds stress distribution($-\overline{u'v'}/U_0^{\,2}$)

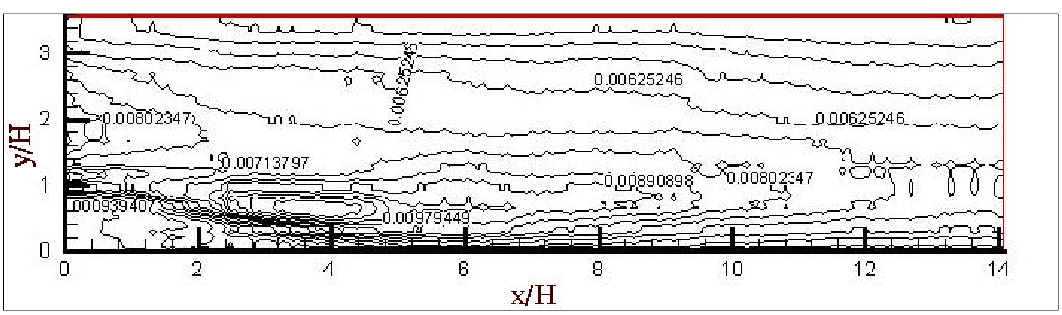


Fig. 4.38 Turbulence kinetic energy distribution($\frac{1}{2}q^2/U_0^{\,2}$)

Fig. 4.39 Streamwise turbulence intensity profile($\sqrt{\overline{u'^2}}/U_0$)

Fig. 4.40 Transverse turbulence intensity profile($\sqrt{\overline{v'^2}}/U_0$)

Fig. 4.41 Reynolds stress profile($-\overline{u'v'}/U_0^{\,2}$)

Fig. 4.42 Turbulence kinetic energy profile($\frac{1}{2}q^2/U_0^{\,2}$)

제 5 장 결 론

3대의 비측정용 CCD카메라, 음향광학장치 및 디지털 화상처리를 이용한 고속 3차원 입자영상유속계의 계측시스템(1-Frame 3-D PTV)을 개발하였으며, 본 연구 과정에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

본 연구에서는 공학적으로 의의가 있는 유동장의 대부분이 3차원적인 구조이지만, 기존의 유동장의 해석을 위한 대표적 기법인 PIV와 PTV는 대부분 2차원에 의존하고 있는 실정이고, 또한 여러 장의 프레임을 통해서 속도벡터를 검출해야 하는 Multi-frame PTV 방법에 의한 유동장의 3차원 해석방법의 근본적인 문제점인 고속 유동장에의 적용이 어려운 점을 개발된 알고리즘을 이용하여 가능하게 하였다.

회전원판 상에 3차원적으로 배치되어 고속으로 회전하고 있는 추적입자들의 속도를 개발된 3차원 계측시스템으로 계측한 결과와 실제 원판회전수가 거의 일치함을 확인함으로써 구축된 3차원 고속 계측법이 고속유동장의 계측에도 적용이 가능함을 입증하였다.

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

후향단에 대한 LES 데이터를 이용하여 동일입자 추적을 위한 구속조건에 대해 정량적인 데이터를 얻음으로써 개발된 알고리즘 성능의 우수성을 정량적으로 평가하였다. 또한, 구축한 계측시스템으로 얻어낸 후향단 유동장의 3차원 속도를 이용하여 본 연구에서 구축한 확률일치방식의 3차원 계측알고리즘의 성능이 우수함을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 개발한 3차원 계측법으로부터 얻어낸 정량적 제반 물리량들의 비교검정을 위하여 Panoramic-PIV를 개발하였으며, 이 계측법을 이용한 동일의 후향단 계측결과로부터 본 연구에서 개발된 1-Frame 3-D PTV계측시스템의 타당성을 검정하였다.

개발된 계측시스템으로 후향단 유동장의 난류통계량 계측에 적용하여 본 결과 기존의 다른 방법들에 의한 연구성과들과 유사한 결과를 보임을 확인함으로써 본 연구에서 개발한 계측시스템이 난류유동장의 계측에도 적용이 가능함을 확인할 수 있었다.

입자 겹침에 따른 오차를 줄이기 위한 최적의 입자밀도를 선정하여 입자밀도의 증가에 따른 광원의 간섭영향을 줄임과 동시에 광원의 강도를 줄이면서 고해상의 카메라를 적용한다면 보다 작은 난류스케일까지도 계측이 가능함을 실험을 통하여 정리할 수 있었다.

계산된 입자의 3차원 위치 중 동일입자로 검출된 입자의 비가 약 40%정도 얻을 수 있었으며, 이는 본 연구에서 사용된 비 측량용 CCD카메라의 공간 해상도가 낮음으로써 저장된 이미지로부터 입자의 도심을 검출할 때 발생하는 오차 때문인 것으로 카메라의 공간해상도를 높이면 속도벡터의 획득률을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구의 주 목적은 고속 3차원 계측법의 개발이고 개발된 개측법으로 후향단을 대상으로 3차원 난류계측을 하였으나 본 연구에 사용된 회류수조의 길이가 난류 유동을 만들어주기에는 너무 작은 이유로 후향단의 입구에서 원하는 조건을 만들지 못하였다. 그러나 대체적으로 유동 패턴은 기존의 연구결과

와 유사했으며 특히 $y/H < 1$ 인 부분에서는 거의 같은 난류통계치를 얻을 수 있었다. 따라서 수조의 길이를 충분히 길게 하면 더 좋은 연구결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

유동장의 계측에서 물과 수조의 아크릴 그리고 공기와의 비중차이에 의한 굴절을 최소로 하기 위해서 3대의 카메라의 배치를 각각 최대한 수직을 유지하려 하였으나, 공학적인 관점에서 반드시 굴절률을 고려해야만 오차를 최대한 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

2차원 실험의 경우와는 다르게 3차원 실험에서는 레이져의 광원을 입체적으로 주사해야 한다. 하지만 본 연구에서 광원으로 사용한 Ar-ion 레이져 광원이 후방에서 조사되는 관계로 추적입자의 입자상에 명암의 영향이 커지게 되어 입자의 위치계산에 오차를 증폭시킨 것으로 사료되며, 이를 줄이기 위해서는 다방향에서 광원을 조사할 필요가 있다.

본 계측법은 완전 비접촉 계측으로 측정대상물에 계측으로 인한 영향을 미치지 않으므로 비정상유체유동의 해석에 크게 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

Adamczyk. AA Rimai L, "Reconstruction of a 3-Dimensional flow field from orthogonal views of seed track video images," Exp. in Fluids, Vol. 6, 1988, pp.380-386.

Adrian RJ, "Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics," Ann. Rev. Fluid Mech. Vol. 23, 1991, pp.261-304.

Agui JC, Jimenez J, "On the performance of particle tracking," J. Fluid Mech. Vol. 185, 1996, pp.447-468.

Baek SJ, Lee SJ, "A new two-frame particle tracking algorithm using match probability" Exp. in Fluids. Vol. 22, 1996, pp.23-32.

Ballard DH, Brown CM, "Computer vision," New Jersey, Prentice-Hall, 1982, pp.195-225.

Chang TP, Tatterson GB, "An automated analysis method for complex three dimensional mean flow fields," Proc. Third Int. Symp, Flow Visualization, 1983, pp.266-273.

Chang TP, Wilcox NA, Tatterson GB, "Application of image processing to the analysis of three-dimensional flow fields," Opt. Eng. Vol. 23(3), 1984, pp.283-287.

Hassan YA, Blanchat TK, Seeley CHJr, Canaan RE, "Simultaneous velocity measurement of both components of a two-phase flow using particle image velocimetry," Int. J. Multiphase Flow. Vol. 18, 1992, pp.371-395.

Hassan YA, "Multiphse flow measurement using three-dimensional PIV," Proc. Intl. Conference on Fluid Eng. Tokyo Jpn, Vol. 3, 1997, pp.813-818.

Itoh N, Kasagi N, "Turbulent measurement in a separated and reattaching flow over a backward-facing step with the three-dimensional particle tracking velocimeter," J. Flow Visualization, 9-34, 1989, pp.245-248.

Kasagi N, Hirata M, Nishino K, Ninomiya N, Koizumi N (1987), "Three-dimensional velocity measurement via digital image processing technique," J flow Visualization Soc. Jpn., Vol. 7(26), 1987, pp.283-288.

Kasagi N, "An introduction to measurement uncertainty analysis. J," Visualizaion. Visualization Society of Japan, Vol.9(31), 1988, pp.29-35.

Kasagi N, Nishino K, "Probing turbulence with three dimensional particle tracking velocimetry," Exp. Thermal and Fluid Sci, Vol. 4, 1991, pp.601-612.

Kent JC, Trigui N, Choi WC, Guezennec YG, Brodkey RS, "Photogrammetric calibration for improved three-dimensional particle tracking velocimetry," Proc. SPIE Int. Symp. on Optical Diagnostic in

Fluid and Thermal Flows, San Diego, 1993, July.

Kim, J. , Kline, S. , Johnston, J.P, "Investigation of separation and Reattachment of a turbulent shear layer : Flow over a backward-facing step," Technical Report MD-37, 1978, Thermosciences Div.,Dept. of Mechanical Engineering, Stanford Univ.

Kobayashi T, Saga T, Sekimoto K, "Velocity measurement of three-dimensional flow around rotating parallel disks by digital image processing," ASME FED, Vol. 85, 1989, pp.29-36.

Kobayashi T, Saga T, Segawa S, "Multi-point velocity measurement for unsteady flow field by digital image processing," Flow Visualization V (Ed. Reznicek R), Washington D. C., Springer-Verlag, 1990, pp.197-202.

Kobayashi T, Saga T, Haeno T, Tsuda N, "Development of a real-time velocity measurement system for high Reynolds fluid flow using a digital image processing design," Experimental and Numerical Flow Visualization (Ed Khalighia B et al.), ASME FED, Vol. 128, 1991, pp.9-14.

Murai S, Nakamura H, Suzuki Y, "Analytical orientation for non-metric camera in the application to terrestrial photogrammetry," Architecture Photogrammetry XXIII, Commision V, pp.516-524.

Murai Y, Watanabe S, Yamamoto F, Matsumoto Y, "Three-dimensional measurement of bubble motions in bubble," Workshop on PIV (Ed.

Kobayashi T; Yamamoto H), Fukui, Visualization Society of Japan, 1997, pp.13-18.

Nishino K, Kasagi N, Hirata M, "Three-dimensional particle tracking velocimetry based on automated digital image processing," ASME J. Fluids Eng, Vol. 111(4), 1989, pp.384-391.

Nishino K, Yamawaki T, Masakazu T, "Application of 3-D PTV to microgravity fluid experiments," Workshop on PIV (Ed. Kobayashi T; Yamamoto H), Fukui, Visualization Society of Japan, 1995, pp.49-58.

Nishino K, Emori T, Kawamura H, Kawasaki K, Makino K, Yoda S, Kawasaki H, "Three-dimensional PTV measurement of marangoni convection in a sounding rocket experiment," Optical Tech. and Image Processing in Fluid, Thermal, and Combution Flow, VSJ-SPIE, (Ed. Kobayashi T), Yokohama.: Visualization Society of Japan, 1998, pp.254-256.

Okamoto K, Nishio S, Kobayashi T, Saga T, " Particle Imaging Velocimetry standard images for transient three-dimensional flow," Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics, (Ed. Heitor MV), Lisbon, Springer-Verlag, 1998, pp.134-140.

Panantoniou D, Dracos T, "Analyzing 3-D turbulent motions in open channel flow by use of stereoscopy and particle tracking," Advances in Turbulence 2 (Ed. Fernholz HH; Fiedler HE), Berlin: Springer-Verlag, 1989, pp.278-285.

Racca RG, Dewey JM, "A method for automatic particle tracking in a three-dimensional flow field," Exp. in Fluids, Vol. 6, 1988, pp.25-32.

Sata Y, Nishino K, Kasagi N, "Whole field measurement of turbulent flows using a three-dimensional particle tracking velocimeter," Flow Visualization V (Ed. Reznicek R), Washington D. C., Springer-Verlag, 1990, pp.248-253.

Trigui N, Guezennec YG, Brodkey RS, "Fully automated three-dimensional particle tracking velocimetry," theory, implementation, and validation, Workshop on PIV (Ed. Kobayashi T, Yamamoto H), Fukui, Visualization Society of Japan, 1995, pp.59-70.

Yamakawa M, Iwashige K, "On-line velocity distribution measuring system applying image processing," J Flow Visualization Soc. Jpn., Vol. 6(20), 1986, pp.50-58.

최장운, "PIV 및 CDF에 의한 오리피스제트의 유동특성에 관한 연구," 공학석사학위논문, 기계공학과, 한국해양대학교, 1994.

발 표 논 문

-----< 국제학술지 >-----

D.H. Doh, D. H. Kim, S. H. Choi, S.D. Hong, Development of noncontact velocity tracking algorithm for three-dimensional high speed flows using digital image processing technique, *Experiments in Fluids*.(to be published)

-----< 국내학술지 >-----

최성환, 도덕희, 이연원, 디지털화상처리를 이용한 유동장의 비접촉 3차원 고속류 계측법의 개발, 한국박용기관학회지, 1999, 3, 제 23권, 제 2호, pp.149-159.

도덕희, 현범수, 최성환, 홍성대, 이중유벽사이에 가두어진 기름층의 거동특성, 한국해양환경공학회지.

-----< 국제학술회의 >-----

D.H. Doh, S.H. Choi, T.S. Baek, Y.W. Lee, T. Kobayashi, T. Saga, Measurement of 3-Dimensional velocity and pressure distribution of a complex flow by 3-D PTV, Proc. of 4th KSME-JSME Fluids, Eng. Conf., Haeundae, Pusan, Korea, KSME/JSME, 1998, 10, 18-21, pp.365-368.

D.H. Doh, S.H. Choi, S.D. Hong, T.S. Baek, T. Kobayashi, T. Saga, Quantitative real time measurement of an acoustic energy flow by PIV, Proc. off International Conf. on Optical Tech and Image Processing in Fluid, Thermal, and Combustion Flow, VSJ-SPIE98, Yokohama, Japan, The

Visualization Society of Japan, The International Society for Optical Engineering, 1998, 12, 6-10, pp.268-269.

D.H. Doh, D. H. Kim, S. H. Choi, S.D. Hong, Development of noncontact velocity tracking algorithm for three-dimensional high speed flows using digital image processing technique, Proc. of 3th International Workshop on Particle Image Velocimetry, Univ. of California-Santa Barbara, USA, Sept. 16-18, 1999, pp. 483-492.

D.H. Doh, B. S. Hyun, S.W. Choi, S.D. Hong, T.S. Baek, Panoramic-PIV system and its application to tandem oil fences, Proc. of 3th International Workshop on Particle Image Velocimetry, Univ. of California-Santa Barbara, USA, Sept. 16-18, 1999, pp. 613-618.

-----< **국내학술회의** >-----

화상처리를 이용한 유동장의 3**차원계측법에 관한연구**, **냉동공기조화공학회 동계학술대회 논문집**, **한국과학기술회관**, 1996, 11.21, pp.387-394.

3**차원** PIV(Particle Imaging Velocimetry)**개발에 관한 연구**, **대한기계학회부산지부 춘계학술대회논문집**, **동의대**, 1997, 6, 21, pp.26-32.

3**차원** PIV**시스템에 관한 연구**, **대한기계학회 추계학술대회논문집**(B), **숭실대**, 1997, 11, 7-8, pp.703-709.

3**차원** PIV**에 의한 교반탱크내의 속도 및 압력분포추정**, **한국해양공학회 추계학술대회논문집**, **대우중공업**, 1997, 11, 21-22, pp.173-179.

도덕희, **최성환**, **최석주**, **변용수**, PIV**에 의한 소음장의 가시화**, **공기조화냉동공학회 하계학술대회논문집**, **용평**, 1998, 6,26-27, pp.1470-1476.

도덕희, 최성환, 홍성대, 김동혁, 최석주, PIV에 의한 음향류의 실시간 가시화 계측, 한국음향학회 학술대회논문집, 전북대, 1998, 7, 3-4, Vol.17, No.1(s), pp.239-242.

장동식, 최성환, 조경래, 이연원, 도덕희, 자동차 주위유동계산시 차분스킴 및 난류모델의 영향, 대한기계학회부산지부 추계학술대회논문집, 부산대학교, 1998, 10, 10, pp.6-11.

도덕희, 최성환, 홍성대, 백태실, PIV에 의한 2차원 머플러 음장내의 가시화, 대한기계학회 추계학술대회논문집(B), 영남대, 1998, 11, 6-7, Vol.B, pp.523-528.

도덕희, 현범수, 최성환, 홍성대, PIV를 이용한 이중격벽 사이의 유동특성에 관한 연구, 한국해양환경공학회 추계학술대회논문집, 한국해양대, 1998, 11, 20-21, pp.123-128.

도덕희, 최성환, 홍성대, 백태실, PIV에 의한 건축물 실내환기 특성 조사법, 공기조화냉동공학회 동계학술대회논문집(II), 한국과학기술회관, 1998, 11, 27, Vol.2, pp.474-481.

최성환, 홍성대, 백태실, 도덕희, 이연원, 디지털화상처리를 이용한 유동장의 비접촉 3차원 고속류 계측법의 개발, 대한기계학회 춘계학술대회논문집(B), 한국기술교육대학, 1999, 4, 22 - 24, pp.20-25.

홍성대, 최성환, 백태실, 도덕희, 현범수, 파노라마-PIV계측기법의 개발, 대한기계학회 춘계학술대회논문집(B), 한국기술교육대학, 1999, 4, 22 - 24, pp.26-30.

최성환, 홍성대, 도덕희, 이중우, 디저털화상처리에 의한 해양유출기름 표류속도 계측기법, 한국해양공학회 춘계학술대회논문집, 한국해양환경공학회, 한국

해양연구소 선박해양연구소, 1999, 5, 14-15, pp.19-24.

현범수, **도덕희**, **최성환**, **홍성대**, **이중유벽사이에 가두어진 기름층의 거동에 대한 유체역학적 소고**, **한국해양공학회 춘계학술대회논문집**, **한국해양환경공학회**, **한국해양연구소 선박해양연구소**, 1999, 5, 14-15, pp.25-32.

D. H. Doh, S. H. Choi, K. R. Cho, Y. W. Lee, Virtual images for a benchmark test of 3-dimensional PIV algorithm for unsteady turbulent flows, KSME Fluid Engineering Division, 1999 Annual Fall Meeting, Seoul National Univ. Samsung Convention Center, 1999, 10, 8, pp.152-158.

도덕희, **최성환**, **홍성대**, **조경래**, **이연원**, 1-Frame 3**차원** PTV**에 의한 후향단 유동의 계측**, **대한기계학회**, 1999**년도 추계학술대회**, **부산대학교**, 1999, 11, 5-6, pp.

감사의 글

학위과정동안 여러모로 부족한 저에게 시종일관 관심과 배려로 학문의 길로 인도해 주시고 지도해 주신 都德熙 지도교수님께 심심한 감사를 드립니다.

그리고 바쁘신 중에도 미흡한 학위논문을 성심성의껏 세심하게 심사해 주시고 다듬어 주신 李重雨교수님, 姜信榮교수님, 趙孝濟교수님, 부경대학교 李蓮源교수님께 깊은 감사를 드립니다.

또한, 석사과정부터 PIV라는 생소한 분야에 입문할 수 있도록 도와주시고 관심을 가져주신 李英浩 석사지도교수님께 감사 드립니다.

힘들 때 따뜻한 격려와 조언을 해주신 포항1대학의 교수님으로 계신 白泰實 선배님께도 감사의 마음을 전합니다.

조금은 늦게나마 대학원에 입학하여 달콤한 신혼을 연구실에서 불을 밝히며 보내면서 학위논문의 많은 부분에 참여해준 12년 지기 친구 홍성대에게 특별한 감사를 전하고 연구실 초창기에 학부과정 때부터 줄곧 같이 밤을 새며 여러모로 많은 도움을 준 후배 조경래에게 고마움을 전합니다. 학위논문을 완성하기까지 불철주야로 자신들의 일처럼 열의를 가지고 도와준 문지섭,조용범,이원제,박천수,편용범,황태규,차규한등 연구실 후배들에게도 고마움을 전합니다. 그리고 일일이 열거하진 못하지만 보이지 않게 도움을 주었던 동기들, 선・후배님들 또한 저에겐 큰 힘이 되었습니다. 특히, 석사학위논문 실험장치를 만드는데 도움을 많이 준 동기 한진석, 성실하고 정직하게 살아가는 동기 오화석, 국진이 아빠 동기 신혁교, 부지런하고 추진력이 강한 곧 사장이 될 동기 표현영, 항상 밝고 매사에 최선을 다하는 동기 조현기, 실험할 때 실험장치를 구성하는데 많은 도움을 준 실습선 한나라호 1기사 동기 이진욱, 현역 해군 대위인 동기 이창식에게도 뜨거운 감사를 드립니다.

그리고 연구에만 전념할 수 있도록 3년동안 옆에서 묵묵히 믿고 도와준 다음달에 아내가 될 사랑하는 지영이에게 사랑을 보냅니다.

끝으로, 대학원 과정동안 바쁘다는 핑계로 자주 찾아뵈지도 못한 아들 몫까지 부모님을 위해 항상 애쓰는 형님과 형수님, 동생 용안이, 누나들게 고마움을 전합니다.

그리고 어려운 시절 6남매의 자식 뒷바라지를 위해 원래의 모습보다 훨씬 늙으신 주름진 부모님의 모습을 보며 죄송한 마음을 금할 수 없습니다. 끝까지 아들을 이해해 주시고 헌신적으로 뒷바라지해 주신 사랑하는 부모님께 이 작은 결실을 바칩니다.

2000年 1 月 12 日　崔 成 煥 拜上