

공학석사 학위논문

**Stereoscopic-PIV에 의한 수직관내
선회류의 유동장 해석**

A Study on the Characteristics of the Swirling Flow
in a Vertical Pipe by Stereoscopic-PIV

지도교수 도 덕 희

2005년 2월

한국해양대학교 대학원

기 계 공 학 과

신 동 진

본 논문을 신동진의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 공학박사 김 동 혁 인

위 원 공학박사 윤 상 국 인

위 원 공학박사 도 덕 희 인

2004년 12월 23일

한국해양대학교 대학원

기 계 공 학 과

**A Study on the Characteristics of the Swirling Flow
in a Vertical Pipe by Stereoscopic-PIV**

by

Dong Jin, Shin

Department of Mechanical Engineering

Graduate School

Korea Maritime University

Abstract

The flow characteristics around a floating cylinder in a swirling flow field in a vertical pipe with a length of 600mm and an inner diameter of 100mm is investigated by the use of the Stereoscopic-PIV system.

The measurement system consists of two cameras, a Nd-Yag laser and a host computer. Optical sensors(LEDs) were used to detect the location of the floating cylinder and to activate the Stereoscopic-PIV system.

The flow fields around the floating cylinder are measured at the events of the activations. It has been verified that the motion of the floating cylinder becomes stable when the azimuthal velocity component of the swirl flow is maintained at stable states.

목 차

| | |
|--|------|
| Abstract | i |
| Contents | ii |
| List of figures | IV |
| Nomenclature | VIII |
| 제 1 장 서론 | 1 |
| 1.1 연구 배경 | 1 |
| 1.2 연구 목적 | 4 |
| 제 2 장 Stereoscopic PIV계측법의 원리 | 5 |
| 2.1 3차원 계측원리 | 5 |
| 2.2 영상 변환 | 11 |
| 2.3 Stereoscopic 계측원리 | 16 |
| 2.3.1 Scheimpflug camera lens 원리 | 20 |
| 2.3.2 Polynominal expression 원리 | 22 |
| 2.4 부유 실린더의 메커니즘 | 24 |
| 제 3 장 수직관내의 선회류 유동장 계측 | 26 |
| 3.1 실험장치 및 절차 | 26 |
| 3.2 실험계측 | 30 |
| 3.2.1 실험계측 조건 | 30 |
| 3.2.2 계측결과 | 35 |
| 3.2.3 X/R 단면에서의 수직관내 선회류 유동장 특성 분석 | 49 |
| 3.2.4 Y/R 단면에서의 수직관내 선회류 유동장 특성 분석 | 57 |

| | |
|-----------------|----|
| 제 4 장 결 론 | 65 |
| 참고문헌 | 66 |

List of figures

- Fig. 2.1 Relations between absolute and camera's coordinate system.
- Fig. 2.2.1 Images of each camera for a regular square.
- Fig. 2.2.2 Transformation between pixel and real coordinate planes.
- Fig. 2.3.1 Two basic configurations for stereoscopic PIV systems.
- Fig. 2.3.2 Definition of 3-D particle position.
- Fig. 2.3.3 (a) Before using schiempflug camera.
- Fig. 2.3.3 (b) After using schiempflug camera.
- Fig. 2.3.3 (c) Schematic view of schiempflug camera.
- Fig. 2.4 Mechanism of floating cylinder.
- Fig. 3.1.1 Schematic diagram of experimental apparatus.
- Fig. 3.1.2 Photograph of 3D determination systems.
- Fig. 3.1.3 Photograph of vortex blower.
- Fig. 3.2.1 Real experimental system.
- Fig. 3.2.2 Picture of calibrator.
- Fig. 3.2.3 Image for camera calibration.
- Fig. 3.2.4 Image by camera #1.
- Fig. 3.2.5 Image by camera #2.
- Fig. 3.2.6 Relationship of time delay between camera and laser.
- Fig. 3.2.7 Experimental image viewed by cameras.
- Fig. 3.2.8 Remove error 3D vectors (1/96).
- Fig. 3.2.9 Remove error 3D mean vectors.
- Fig. 3.2.10 (a) Turbulent kinetic energy contour obtained
by stereoscopic PIV ($V_{s1}=1.858 \text{ m/s} : 1/96$).

Fig. 3.2.10 (b) Reynolds stress contour obtained
by stereoscopic PIV ($V_{S1}=1.858 \text{ m/s}$: 1/96).

Fig. 3.2.11 (a) Turbulent kinetic energy contour obtained
by stereoscopic PIV ($V_{S1}=1.858 \text{ m/s}$: 48/96).

Fig. 3.2.11 (b) Reynolds stress contour obtained
by stereoscopic PIV ($V_{S1}=1.858 \text{ m/s}$: 48/96).

Fig. 3.2.12 (a) Turbulent kinetic energy contour obtained
by stereoscopic PIV ($V_{S1}=1.858 \text{ m/s}$: 96/96).

Fig. 3.2.12 (b) Reynolds stress contour obtained
by stereoscopic PIV ($V_{S1}=1.858 \text{ m/s}$: 96/96).

Fig. 3.2.13 (a) Turbulent kinetic energy contour obtained
by stereoscopic PIV ($V_{S1}=1.858 \text{ m/s}$: *mean*).

Fig. 3.2.13 (b) Reynolds stress contour obtained
by stereoscopic PIV ($V_{S1}=1.858 \text{ m/s}$: *mean*).

Fig. 3.2.14 (a) Turbulent kinetic energy contour obtained
by stereoscopic PIV ($V_{S2}=2.4653 \text{ m/s}$: 1/96).

Fig. 3.2.14 (b) Reynolds stress contour obtained
by stereoscopic PIV ($V_{S2}=2.4653 \text{ m/s}$: 1/96).

Fig. 3.2.15 (a) Turbulent kinetic energy contour obtained
by stereoscopic PIV ($V_{S2}=2.4653 \text{ m/s}$: 48/96).

Fig. 3.2.15 (b) Reynolds stress contour obtained
by stereoscopic PIV ($V_{S2}=2.4653 \text{ m/s}$: 48/96).

Fig. 3.2.16 (a) Turbulent kinetic energy contour obtained
by stereoscopic PIV ($V_{S2}=2.4653 \text{ m/s}$: 96/96).

Fig. 3.2.16 (b) Reynolds stress contour obtained
by stereoscopic PIV ($V_{S2}=2.4653 \text{ m/s}$: 96/96).

- Fig. 3.2.17 (a) Turbulent kinetic energy contour obtained
by stereoscopic PIV ($V_{s2}=2.4653$ m/s : *mean*).
- Fig. 3.2.17 (b) Reynolds stress contour obtained
by stereoscopic PIV ($V_{s2}=2.4653$ m/s : *mean*).
- Fig. 3.2.18 3D mean vectors contour obtained by stereoscopic PIV.
- Fig. 3.2.19 U , V direction stream line obtained by stereoscopic PIV.
- Fig. 3.2.20 (a) The dimensionless velocity at the $Y/R=-0.31846$ &
 $Z/R=0$ ($1/96$).
- Fig. 3.2.20 (b) The dimensionless velocity at the $Y/R=-0.31846$ &
 $Z/R=0$ ($48/96$).
- Fig. 3.2.20 (c) The dimensionless velocity at the $Y/R=-0.31846$ &
 $Z/R=0$ ($96/96$).
- Fig. 3.2.20 (d) The dimensionless velocity at the $Y/R=-0.31846$ &
 $Z/R=0$ (*mean*).
- Fig. 3.2.21 (a) The dimensionless velocity at the $Y/R=0.011794$ &
 $Z/R=0$ ($1/96$).
- Fig. 3.2.21 (b) The dimensionless velocity at the $Y/R=0.011794$ &
 $Z/R=0$ ($48/96$).
- Fig. 3.2.21 (c) The dimensionless velocity at the $Y/R=0.011794$ &
 $Z/R=0$ ($96/96$).
- Fig. 3.2.21 (d) The dimensionless velocity at the $Y/R=0.011794$ &
 $Z/R=0$ (*mean*).
- Fig. 3.2.22 (a) The dimensionless velocity at the $Y/R=0.318462$ &
 $Z/R=0$ ($1/96$).
- Fig. 3.2.22 (b) The dimensionless velocity at the $Y/R=0.318462$ &
 $Z/R=0$ ($48/96$).
- Fig. 3.2.22 (c) The dimensionless velocity at the $Y/R=0.318462$ &

$Z/R=0$ (96/96).

Fig. 3.2.22 (d) The *dimensionless velocity* at the $Y/R=0.318462$ &
 $Z/R=0$ (*mean*).

Fig. 3.2.23 (a) The *dimensionless velocity* at the $X/R=-0.8$ &
 $Z/R=0$ (1/96).

Fig. 3.2.23 (b) The *dimensionless velocity* at the $X/R=-0.8$ &
 $Z/R=0$ (48/96).

Fig. 3.2.23 (c) The *dimensionless velocity* at the $X/R=-0.8$ &
 $Z/R=0$ (96/96).

Fig. 3.2.23 (d) The *dimensionless velocity* at the $X/R=-0.8$ &
 $Z/R=0$ (*mean*).

Fig. 3.2.24 (a) The *dimensionless velocity* at the $X/R=-0.51282$ &
 $Z/R=0$ (1/96).

Fig. 3.2.24 (b) The *dimensionless velocity* at the $X/R=-0.51282$ &
 $Z/R=0$ (48/96).

Fig. 3.2.24 (c) The *dimensionless velocity* at the $X/R=-0.51282$ &
 $Z/R=0$ (96/96).

Fig. 3.2.24 (d) The *dimensionless velocity* at the $X/R=-0.51282$ &
 $Z/R=0$ (*mean*).

Fig. 3.2.25 (a) The *dimensionless velocity* at the $X/R=0$ &
 $Z/R=0$ (1/96).

Fig. 3.2.25 (b) The *dimensionless velocity* at the $X/R=0$ &
 $Z/R=0$ (48/96).

Fig. 3.2.25 (c) The *dimensionless velocity* at the $X/R=0$ &
 $Z/R=0$ (96/96).

Fig. 3.2.25 (d) The *dimensionless velocity* at the $X/R=0$ &
 $Z/R=0$ (*mean*).

Nomenclature

| | |
|----------------------|---|
| A_i | : Coefficient of Area <i>moment</i> |
| B_{ii} | : Inverse <i>matrix</i> of M |
| dis | : <i>Distance</i> of projection |
| C | : Fitness for continuous fluid of <i>vector</i> |
| c_x, c_y | : Plane distance from <i>lens center</i> |
| D | : Cylinder <i>diameter</i> |
| d_p | : <i>Diameter</i> of particle |
| I | : Intensity of particle |
| I_o | : <i>Maximum</i> intensity of particle |
| k_1, k_2 | : Lens coefficient |
| M | : Rotation <i>matrix</i> |
| m_x, m_y | : <i>Movement value</i> of principle point |
| o | : (0,0) Point of photographic coordinate |
| 0 | : (0,0,0) Point o absolute coordinate |
| $\Delta x, \Delta y$ | : Lens distortion <i>value</i> |
| \bar{x}, \bar{y} | : Center point of particle |
| x, y, z | : Photographic coordinate <i>system</i> |
| X, Y, Z | : Absolute coordinate <i>system</i> |
| X_M, Y_M, Z_m | : Rotated absolute coordinate <i>system</i> |
| X_0, Y_0, Z_0 | : Center of projection |
| x', y' | : <i>Image</i> coordinates <i>value</i> after transformation |
| x, y | : <i>Image</i> coordinates <i>value</i> before transformation |
| u, v, w | : Velocity <i>component</i> of x, y, z axis |
| F_c | : Centrifugal force acting on a floating cylinder |
| $F_{\theta A}$ | : <i>Drag</i> force on a floating cylinder |
| $F_{\theta B}$ | : Gravity of a floating cylinder |
| F_S | : Force on a floating cylinder due to inertia effect |

| | | |
|----------|---|--|
| r | : | Pipe inside radius |
| α | : | Force on a floating cylinder due to static pressure difference |
| V_R | : | Relative velocity of air flow in z -direction to a floating cylinder |
| ρ_p | : | Density of a floating cylinder |
| μ | : | Viscosity of air |
| V_{S1} | : | Swirling flow velocity by hot-wire (1/3 from bottom) |
| V_{S2} | : | Swirling flow velocity by hot-wire (2/3 from bottom) |
| F_M | : | Force on a floating cylinder due to a floating cylinder rotation |

Greek characters

| | | |
|------------|---|---------------------------|
| α | : | Titled angle for X axis |
| β | : | Titled angle for Y axis |
| χ | : | Titled angle for Z axis |
| $-$ | : | Time averaged value |
| δ_s | : | Error of root mean square |

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

나선형 유동은 소용돌이가 없는 넓은 영역과 축에 대한 높은 집중, 고도의 안전성을 지닌 선회류(Swirling flow)이다. 이와 같은 이유로 나선형 유동은 관내부의 굴곡 및 부식으로 인한 저항에도 불구하고, 광케이블 혹은 관을 통하여 수송을 해야 하는 곡물 및 부유물들을 관 벽에 닿지 않게 수송하고자 하는 산업응용분야에 많이 적용되고 있다. 두 개의 위상을 가진 나선형 파이프 내부유동의 고체부유물들은 큰 진동 없이 파이프라인 내부에서 자신들의 위치를 얻을 수 있다. 또한 취성과 점성이 있는 물질의 공기 운송은 화학과 식품 산업에 있어서 중요한 연구 과제이다. 하지만 파이프라인 내벽에 의한 재료 파괴와 내벽에의 재료 접촉 문제가 있다. 현재 일괄 시스템(batch system)이 이러한 화학적 재료들을 다루는데 사용되어 왔지만 효율이 매우 낮았다. 많은 기술들이 공기에 의한 운송 시스템과 일괄 시스템의 이러한 결점을 극복하기 위해 도입되어 왔지만, 어느 것도 완전히 성공적이지 않았다. 본 연구의 동기는 나선형 유동 시스템을 개선시키기 위한 고도의 안전성의 메커니즘을 분명하게 하는 것이며 최종 목적은 취성과 점성의 재료에 대한 문제를 해결할 수 있는 고성능 공기에 의한 운송 시스템을 개발하는 것이다. 이에 Horri(1990)⁽¹⁾는 고성능 공기의 운송 시스템 개발을 위한 컨셉으로 선회류와 가파른 축의 속도 분포의 특성을 가진 나선형 유동을 사용했다. Horri에 의해서 파악된 나선형 유동의 특성은 내벽과의 접촉 없이 입자들을 운송할 수 있는 장점을 가지고 있다. 반면에 Tomita et al.(1992)⁽²⁾은 선회류를 입자의 운동을 조정하는데 사용했지만 입자들이 파이프의 내벽에 접촉하는 문제점을 가지게 됐다. 이는 유용한 선회류가 주로 압력을 받은 소용돌이로 구성되어 있기 때문이라

고 결론을 도출했다. 또한 Masahiro Takei et al.(2003)⁽³⁾은 위에 나타난 선행 연구자들의 문제점을 포함하여 새로운 결론을 도출했는데 이는 나선형 유동이 낮은 변동 레벨과 중심점에서의 시간 주기성에 기여하는 규칙적인 반경방향 속도를 가진다는 것이다. 위에 제시된 선행 연구자들의 추론에 부합한 고성능 공기운송 시스템 중 관로를 이용한 공기운송은 설계의 자유도를 높임으로써 넓게 응용되고 있지만 운송물체의 움직임에 대한 규명은 못하고 있다. 이는 관내 벽의 충돌에 따른 품질저하와 운송효율의 저하에 따른 비용증가라는 문제를 포함하기 때문이다. 이에 부합한 연구의 첫 번째 단계는 수직 구역 안의 내벽에 대한 입자의 접촉 현상들에 대해 초점을 맞추고 동시에 입자 움직임에 대한 우세한 물리적인 요인들의 원인인 축과 반지름 방향에 대한 논의가 함께 실행되어야 한다. 먼저 운송물체의 연직 관내 공기 수송에 관해서는 수많은 실험적 또는 이론적 연구가 수행되어 왔는데 실험적인 방법으로는 Takei et al.(1997)⁽⁴⁾에 의해 수행된 LDV나 스트로보스코프 회전 속도계를 이용하여 세라믹 볼들의 유동속도를 수직관에서 정성적으로 측정했다. Hui Li et al.(1994)⁽⁵⁾은 폴리스틸렌, 폴리에틸렌 및 염화비닐을 이용하여 수직관에서 선회류 공기 운송의 효과를 직선류와 비교하였다. Tomita et al.(1993)⁽⁶⁾은 폴리에틸렌 구를 사용하여 압력 손실과 고체유동 양식이라는 관점에서 수평 배관 내에서의 선회류 공기 운송 시스템에 대한 실험적인 연구를 수행하였다.

수치해석적인 접근은 Hui Li et al.(1994)⁽⁷⁾에 의해서 수행된 수평관내의 3차원 고성능 선회류의 수치 시뮬레이션과 직선류를 비교한 것이 있다. 하지만 이를 검증할 수 있는 실험적 연구보고는 미비한 상태이며 본 논문에서 이를 구현하고자 한다.

유동장의 매질과 동일한 비중의 입자를 투입한 후 이들 입자들의 거동을 가시화 기술 및 디지털 화상처리 기술을 이용하여 입자들의 운동을 해석함으로써 유동장을 해석하는 PIV(Particle Image Velocimetry)방법은 동시다점 측정이 가능 하므로 비정상 유동장의 해석에 유리하다는 장점을 가지고 있다. PIV 측정기술의 3차원적인 해석기법에는 크게 2D3C, 3D3C로 구분되어 진다. PIV

계측을 하기 위하여 유동장에 레이저광원으로 조사(照査)된 가시영역이 2차원 단면형상으로 되어 있지만 그 단면도 좁은 폭(3mm 전후)을 가지고 있기 때문에 레이저광원을 매우 빠르게 2회 이상 단절(斷絶)하면 그 단면내의 추적 입자들은 3차원적 운동의 정보를 가지게 된다. 2D3C란 이와 같이 가시화된 2차원 (2-Dimensional)단면을 향하여 설치된 2대의 카메라 영상으로부터 스테레오 사진기술을 이용하여 2시각 이상의 영상을 얻은 후 이들 영상에 대하여 스테레오 사진기술 혹은 3차원 계측기술을 이용하여 유동의 3성분 (3-Component)을 측정영역 전체에 걸쳐 동시에 얻어내는 계측법을 말한다. Stereoscopic PIV 계측법은 현재 시판되고 있는 PIV계측장비들의 성능한계가 유동의 상세 구조까지 제공할 수 있는 수준까지 와 있다는 점으로 최근 많이 이용되고 있다. Stereoscopic PIV계측법은 보통 두 대의 카메라를 사용하여 측정한다. Stereoscopic System에서는 레이저 평면광으로 조명된 유동 단면에서의 3가지 속도성분을 측정하게 되는데, 일반적으로 out-of-plane의 속도성분은 바로 측정되지 않고 두 대의 카메라로 측정한 평면 데이터로부터 도출하게 된다. Stereoscopic 접근 방법에 따라 2대의 카메라렌즈를 유동가시영역에 대하여 평행으로 설치하여 계측하는 Translation 방법과 2대의 카메라렌즈가 유동가시영역과 수직하지 못하고 조명평면과 소정의 각도를 이루게 하여 속도장을 측정하는 Angular 방법이 있다. Translation법(Prasad & Adrian, 1993)⁽⁸⁾은 투시 방향에 대한 왜곡이 거의 없기 때문에 영상 기록면의 좌표를 유체내부 입자좌표로 쉽게 변환할 수 있으며 확대율이 영상 기록면의 변위에 무관하므로 3차원 속도 성분을 쉽게 계산할 수 있는 장점이 있지만 카메라 측정각도가 제한되기 때문에 out-of-plane 속도성분의 오차를 줄이는데 한계가 있다. 반면에 Angular 방법은 측정각도에 거의 제약이 따르지 않으나 취득한 영상에 강한 투시왜곡이 발생하게 되므로 영상 기록면 좌표와 측정단면 좌표 사이의 상관 함수를 구하는 작업이 필요할 뿐만 아니라 유동장의 가시용 벽면에 의한 굴절의 영향으로 카메라렌즈의 설치를 가능하면 지상면을 기준으로 평행하게 설치해야 하는 단점이 있다. 본 연구에서는 Angular법의 장점을 살리고 유동

계측의 제약을 주었던 카메라의 배치에 자유성을 부여할 수 있도록 영상의 기하학적 변환(Geometric transformation)으로 왜곡의 영향을 고려하며, 3차원 PTV계측법(Nishino(1989)⁽⁹⁾;Doh et al.(2001)⁽¹⁰⁾)에 적용되고 있는 카메라 교정법을 이용한 Stereoscopic PIV계측법을 사용하고, 카메라의 초점영역과 물체 사이에 편차가 생긴다는 것을 고려한 Scheimpflug Camera 원리를 접목시킨 Stereoscopic PIV시스템을 구축한 뒤 이를 수직관내에서 선회류에 의하여 운동하고 있는 봉(棒)상의 운송물체 주변의 유동장 측정에 적용하여 얻어진 계측결과로부터 운송물체의 안정적 운동과 관련한 유동특성을 해석하고자 한다.

1.2 연구 목적

본 연구는 Stereoscopic PIV기법에 의한 수직관내의 선회류 유동장에 대한 실험데이터 베이스를 구축함과 동시에 선회류 유동장 내에서 운동하고 있는 부유 실린더의 운동과 선회류 유동장 특성과의 관계를 정량적으로 정립 해석하고자 하는 것을 연구의 목적으로 삼고자 한다.

제 2 장 Stereoscopic PIV 계측법의 원리

2.1 3차원 계측 원리

2.1.1 카메라 교정의 원리

사람이 3차원 공간을 인식하려면 최소한 2개 이상의 눈이 필요하듯 카메라를 이용하여 3차원적인 계측을 하려면 2대 이상의 카메라가 필요하다. 우리의 두 눈이 안면에 고정되어 있으면서 두 눈 간의 상대적 운동이 순간적으로 신경세포로 전달되므로 우리는 공간을 실시간으로 인식할 수 있다. 이처럼 카메라를 이용하여 3차원 공간을 인식하기 위해서는 카메라간의 상대적 운동을 인식시킬 필요가 있는데 이를 3차원 계측에서는 카메라 교정이라 한다. 카메라의 외부요소(dis, α , β , X_m, Y_m, Z_m)와 내부요소(c_x, c_y, k_1, k_2) 등 10개의 요소로 나뉘어 정의하였다. 절대 좌표계 $O(0, 0, 0)$ 점으로부터 카메라 중심까지의 거리를 dis 라고 하고, 카메라 좌표계와 절대 좌표를 일치시키기 위해 X, Y, Z축에 대한 회전각을 각각 α , β , κ 로 정의하면, 축에 대한 회전행렬은 $M_M = M_Z M_Y M_X$ 가 된다. 이렇게 회전된 절대 좌표값을 (X_m, Y_m, Z_m) 으로 표시하고, 카메라의 z축과 절대좌표계의 Z축을 일치시키기 위한 이동량을 m_x, m_y 으로 표시한다. 즉 절대좌표계의 대상점과 사진좌표계의 투영점이 일직선상에 있다는 공선조건으로부터 다음과 같은 관측방정식을 얻을 수 있다.

$$x = c_x \frac{X_m - m_x}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2 - Z_m^2}} + \Delta x \quad (2.1.1)$$

$$y = c_y \frac{Y_m - m_y}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2 - Z_m}} + \Delta y \quad (2.1.2)$$

여기서 c_x, c_y 는 이미지 그래버에 따른 장방비의 차이를 고려한 것이며, $\Delta x, \Delta y$ 은 이미지 중심으로부터의 거리에 따른 렌즈에 의한 굴절을 고려하여 다음과 같이 정의하였다.

$$\Delta x = \frac{x}{r} (k_1 r^2 + k_2 r^4)$$

$$\Delta y = \frac{y}{r} (k_1 r^2 + k_2 r^4) \quad r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

식 2.1.1과 2.1.2와 같이 정의된 각 카메라의 표정요소를 구하기 위해 이미 알고 있는 3-D 좌표 (X_i, Y_i, Z_i)와 사진좌표 (x_i, y_i)에 대해 F, G는 식 2.1.3과 2.1.4와 같이 표시된다.

$$F = c_x \frac{X_m - m_x}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2 - Z_m}} - (x - \Delta x) = 0 \quad (2.1.3)$$

$$G = c_y \frac{Y_m - m_y}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2 - Z_m}} - (y - \Delta y) = 0 \quad (2.1.4)$$

이러한 F, G방정식은 비선형 연립방정식이므로 이를 풀기 위하여 초기에 표정 요소의 미지값을 가정하고 테일러 급수전개에 의한 최소자승법으로 보정량을 구하여 수렴될 때까지 근사치를 보정하는 수정 Gauss - Newton법을 사용하였다.

2.1.2 위치 결정의 원리

카메라의 표정요소가 구해지면 사진좌표(x, y)와 절대좌표(X, Y, Z)간에 식 2.1.3과 2.1.4로부터 다음과 같은 관계식이 성립된다.

$$F \Rightarrow \frac{c_x(X_m - m_x)}{d - Z_m} - (x - \Delta x) = 0 \quad (2.1.5)$$

$$\Rightarrow X_m = \frac{(x - \Delta x)}{c_x} (d - Z_m) + m_x$$

$$G \Rightarrow \frac{c_y(Y_m - m_y)}{d - Z_m} - (y - \Delta y) = 0 \quad (2.1.6)$$

$$\Rightarrow Y_m = \frac{(y - \Delta y)}{c_y} (d - Z_m) + m_y$$

여기서, $d = \sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2}$ 이다. $d - Z_m = t$ 라 두면

$$X_m = \frac{x - \Delta x}{c_x} t + m_x$$

$$Y_m = \frac{y - \Delta y}{c_y} t + m_y \quad (2.1.7)$$

$$Z_m = d - t$$

이 된다. 회전변환행렬을 M_M 이라 두고 역행렬을 B라 두면

$$\begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} = M_M \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = M_M^{-1} \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} \quad (2.1.8)$$

이 되며, 카메라의 위치 (X_o, Y_o, Z_o) 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} X_o &= B_{11}mx + B_{12}my + B_{13}d \\ Y_o &= B_{21}mx + B_{22}my + B_{23}d \\ Z_o &= B_{31}mx + B_{32}my + B_{33}d \end{aligned} \quad (2.1.9)$$

$$d = \sqrt{dis^2 - mx^2 - my^2}$$

이로부터 각 카메라에 대한 카메라중심 (X_o, Y_o, Z_o) 과 입자의 중심을 지나는 하나의 직선의 방정식을 구할 수 있으며, 하나의 입자에 대한 두 대의 카메라로부터 구해진 직선방정식을 공선의 조건을 이용하여 구하게 된다.

즉, Fig 2.1에서 보이는 바와 같이 P점에 대해 각각의 카메라는

$$A(X, Y, Z) = A(a_1t + X_o, a_2t + Y_o, a_3t + Z_o) \quad (2.1.10)$$

와 같은 직선의 방정식을 가진다.

두 개 직선의 방정식을 다음과 같이 표시하면

$$A(X, Y, Z) = A(a_{11}t + b_{11}, a_{12}t + b_{12}, a_{13}t + b_{13}) \quad (2.1.11)$$

$$B(X, Y, Z) = B(a_{21}s + b_{21}, a_{22}s + b_{22}, a_{23}s + b_{23}) \quad (2.1.12)$$

와 같다. 이 두 직선에 대한 최단거리를 가지는 t, s는 다음과 같다.

$$s = \frac{x - a\beta}{1 - a^2}, \quad t = \frac{x\alpha - \beta}{1 - a^2}$$

여기서

$$\alpha = a_{11} a_{21} + a_{12} a_{22} + a_{13} a_{23}$$

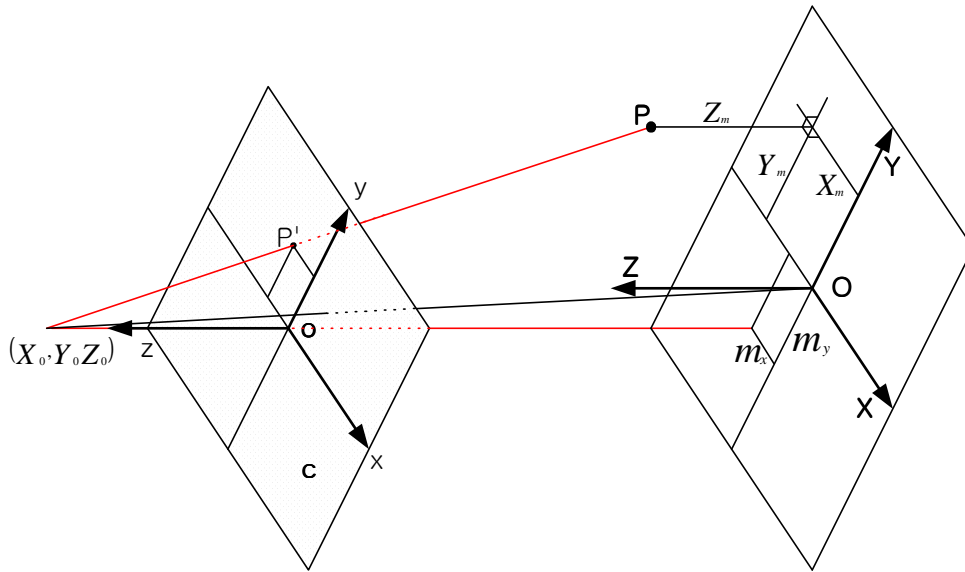
$$\beta = a_{11}(b_{11} - b_{21}) + a_{22}(b_{12} - b_{22}) + a_{23}(b_{13} - b_{23})$$

$$x = a_{21}(b_{11} - b_{21}) + a_{22}(b_{12} - b_{22}) + a_{23}(b_{13} - b_{23}) \text{이다.}$$

s, t가 구해지면 $A(X, Y, Z)$, $B(X, Y, Z)$ 가 결정되어 진다. 여기서 실제 $A(X, Y, Z)$ 값은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left\{ \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} \right\} \quad (2.1.13)$$

각 입자에 대해 위와 같은 과정을 거치면 대응하는 카메라간의 입자와 하나의 3차원 위치를 결정할 수 있게 된다.



X, Y, Z : 절대 좌표계

x, y, z : 사진 좌표계

m_x, m_y : 중심축의 이동량

(X_m, Y_m, Z_m) : X, Y, Z축에 의한 회전된 입자좌표

(X_o, Y_o, Z_o) : 카메라 중심의 위치(절대 좌표계)

c : 투영면(초점거리)

P: 공간상의 입자

P' : 카메라상의 입자

Fig. 2.1 Relations between absolute and camera's coordinate system.

2. 2 영상변환

스테레오 카메라 방식을 적용했을 때 카메라간의 사이각을 어느 정도 주어진다면, 정사각형의 대상물의 영상은 Fig. 2.2.1과 같이 정사각형의 영상이 아니라 사다리꼴의 일그러진 영상을 얻게 된다. 두 대의 카메라는 물체를 다른 각도에서 관찰하고 있는 것이므로 항상 동일점을 나타내고 있는 것은 아니다. 따라서 기하학적 변환인 왜곡변환(Warping)을 이용하여 영상의 변환을 실시하였다.

기하학적인 변환은 영상 안에 있는 픽셀(Pixel)들의 위치를 바꾸는 역할을 수행한다. 수학적 변환을 사용하여, 픽셀들은 입력 영상 안에 있는 공간 좌표값 (x', y') 로부터 출력 영상 안의 새로운 좌표값 (x, y) 으로 재배치된다.

컴퓨터 그래픽에서 쓰이는 동차 좌표 개념을 이용하면 모든 선형 변환을 행렬로 이용하여 쓸 수 있다. 2차원 좌표 $\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$ 를 $\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$ 로 표시하는 것이다. 왜곡 변환(Warping)을 설명하기 앞서 기본적인 2차원 영상변환의 평행이동, 회전, 신축을 나타내면,

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & T_x \\ 0 & 1 & T_y \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} && : \text{이동} \\
 \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos \Theta & \sin \Theta & 0 \\ -\sin \Theta & \cos \Theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} && : \text{회전} \\
 \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} && : \text{신축}
 \end{aligned} \tag{2.21}$$

여기서 T_x, T_y 은 이동값 이고, Θ 값은 픽셀 위치 $(0, 0)$ 에 대하여 영상

의 시계방향의 회전각이며, S_x, S_y 은 신축량 이다. (x', y') 는 입력 영상 좌표값, (x, y) 는 출력 영상 좌표값 이다. 그리고 이동, 회전, 신축 변환을 결합하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 x' &= (x \cos \Theta + y \sin \Theta) S_x + T_x & (2.2.2) \\
 &= (S_x \cos \Theta)x + (S_x \sin \Theta)y + T_x \\
 y' &= (-x \sin \Theta + y \cos \Theta) S_y + T_y \\
 &= (-S_y \sin \Theta)x + (S_y \cos \Theta)y + T_y
 \end{aligned}$$

더욱 일반화된 형태로는,

$$\begin{aligned}
 x' &= a_2 x + a_1 y + a_0 & (2.2.3) \\
 y' &= b_2 x + b_1 y + b_0
 \end{aligned}$$

위의 방정식을 사용한 변환은 선형변환이며, 왜곡변환을 할 때는 x^2, x^3, y^2, y^3 등과 같은 더 높은 차수 항을 첨가한 식이 된다. 그러나, 본 영상변환부분에서는 Stereoscopic PIV 특성상 단면의 유동장을 계측하므로 1차 왜곡만을 고려한 이동, 회전, 신축을 고려한 변환을 하였다. 더 복잡한 기하학적 왜곡을 고려한다면 높은 차수의 왜곡을 수행해야 하므로 이 부분은 생략하기로 했다. 계측하고자 하는 $Z = 0 \text{ mm}$ 지점의 영상을 기준으로 다음의 식을 이용하여 2차원 영상변환을 행하였다.

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

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

$$x' = \frac{x^*}{z^*} = \frac{a_{11}x + a_{12}y + a_{13}}{a_{31}x + a_{32}y + 1}$$

$$y' = \frac{y^*}{z^*} = \frac{a_{21}x + a_{22}y + a_{23}}{a_{31}x + a_{32}y + 1}$$

단, x, y : 변환전의 영상의 좌표 값

x', y' : 변환후의 영상의 좌표 값

2차원 변환 행렬식(A)과 실제(Real)와 픽셀(Pixel)좌표의 행렬식을 나타낸 것이다. 8개의 미지수(변환 행렬 A)는 최소자승법으로 구하였다. 그리고 영상에 기하학적 변환을 적용할 때 변환된 좌표가 정수 좌표로 직접 대응되지 못하는 경우가 있어서 본 연구에서는 대상 픽셀이 위치할 좌표 주변의 네 개 픽셀들의 밝기 평균값을 넣는 방법인 쌍일차 보간법(Bilinear Interpolation)⁽¹¹⁾을 취하였다.

Fig. 2.2.1은 카메라의 표정요소를 이용하여 각각 Camera #1 과 Camera #2 로 받아들인 영상을 이동, 회전, 신축 등의 과정을 거쳐 영상변환 되어지는 전체적인 개략도이다. Fig. 2.2.2는 Fig. 2.1에서 영상변환을 전체적으로 보여주듯이 평면 교정기(Plane calibrator)를 이용하여 2차원 영상변환을 한 것이다.

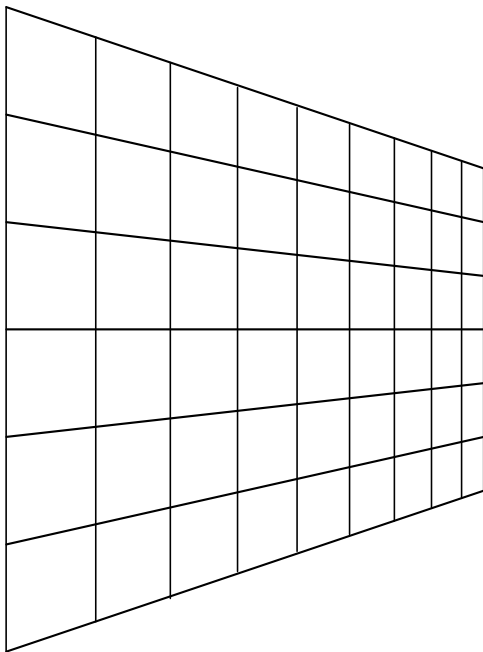


Image viewed by camera 1.

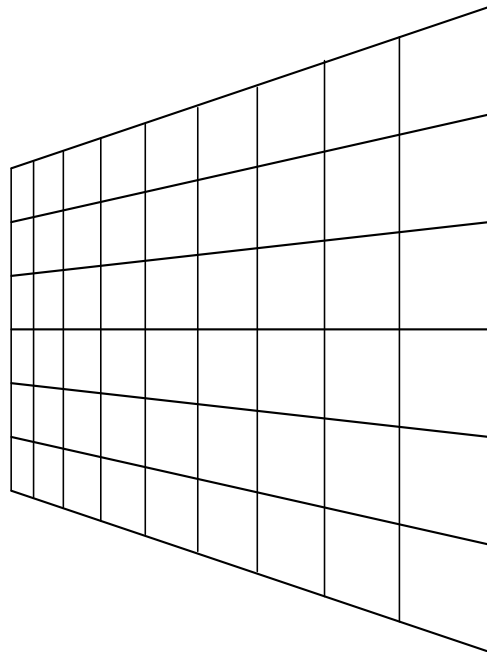


Image viewed by camera 2.

Fig. 2.2.1 Images of each camera for a regular square.

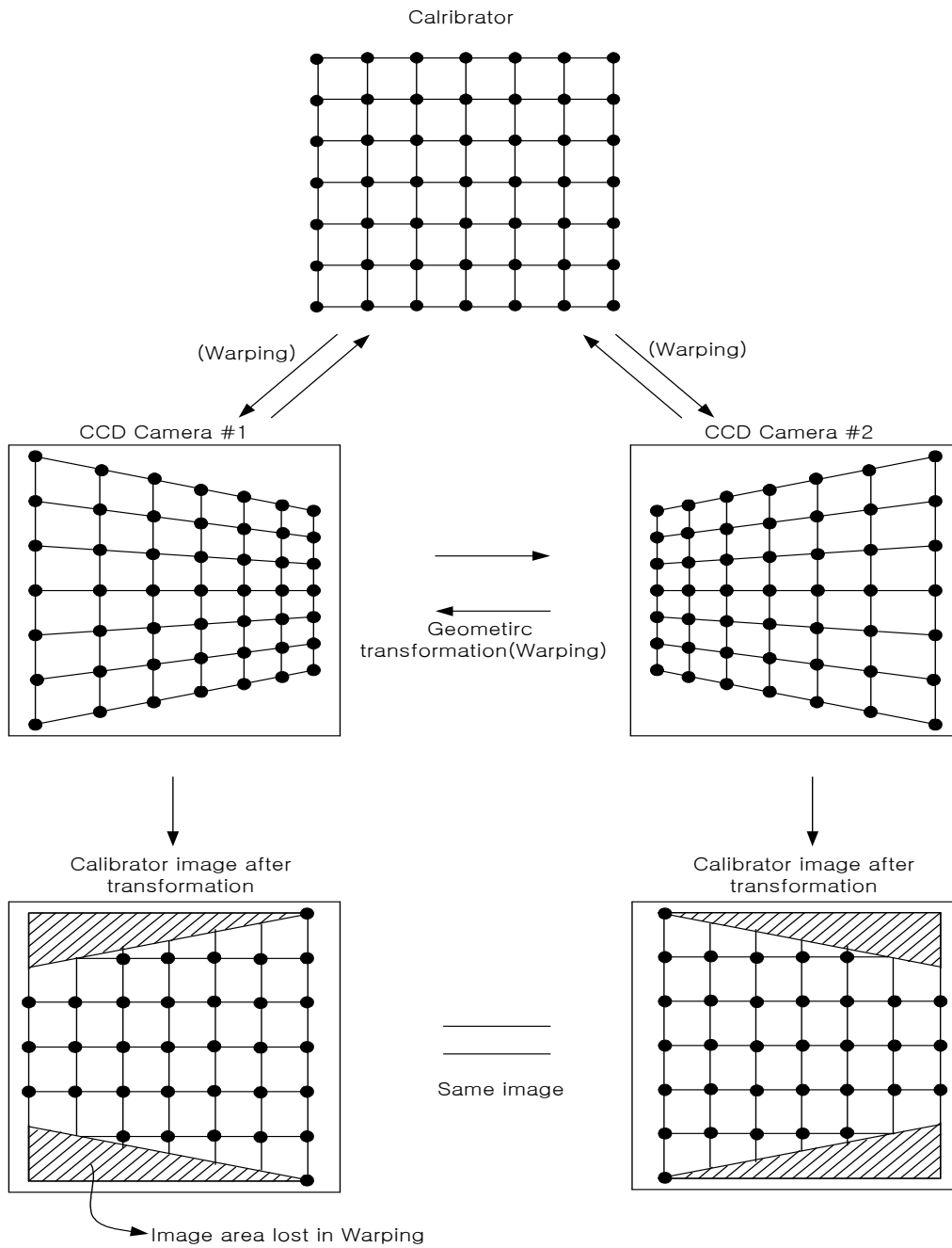


Fig. 2.2.2 Transformation between pixel and real coordinate planes.

2. 3 Stereoscopic PIV 계측법의 원리

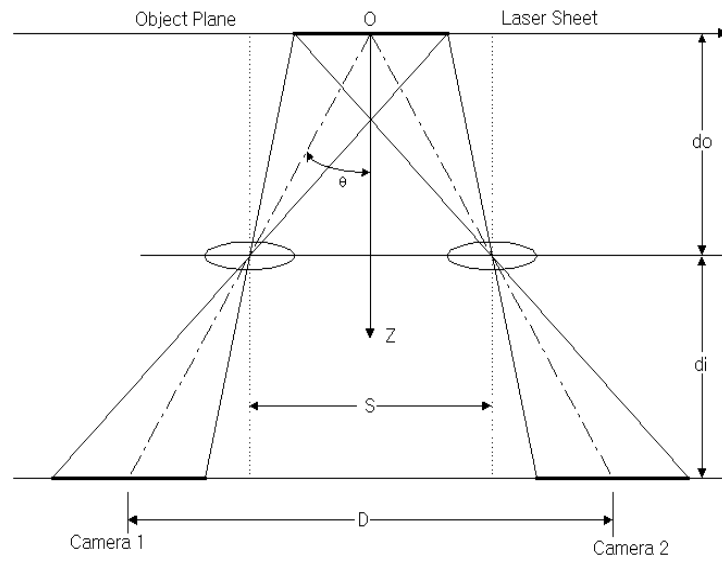
2개 이상의 CCD 카메라를 사용하여 Stereoscopic matching 기법으로 3차원 속도장을 추출해 내는 3-D PIV방식을 주로 사용하고 있다. 그러나 하나의 입자변위를 몇 대의 카메라로 동시에 촬영하여야 하므로 한번에 구할 수 있는 속도벡터의 수가 많지 않으며 데이터 해석이 복잡하다는 단점이 있다. 이 문제 해결을 위해 현재 고해상도 카메라의 적용과 속도벡터 취득용 알고리즘의 개선에 대한 연구 개발이 한창이며, 향 후 크게 개선 될 가능성이 크다.

3차원계측의 보편적인 방법인 Stereoscopic PIV는 크게 두 가지의 종류를 가지고 있다. 카메라의 배치에 따라 Fig. 2.3.1처럼 Translation 법과 Angular displacement 법으로 나눌 수 있다.

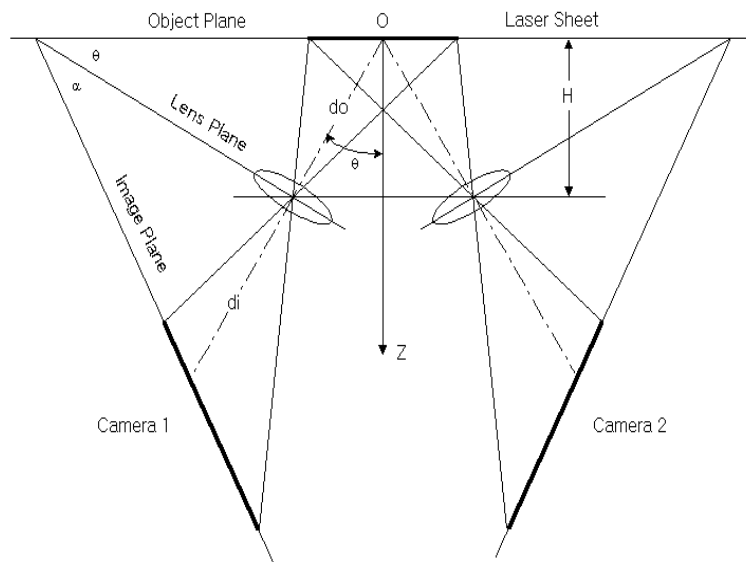
Translation 법은 카메라의 광학축(Optical axes)이 조명된 평면에 수직하여, 카메라의 렌즈 배율 요소(magnification factor)와 카메라간의 사이각(Θ)을 가지고 기하학적 이동거리와 3차원 속도성분을 계산하는 방법이다. 여기서, M (렌즈배율요소) = (d_i / d_o) 이다. 다시 말해서 Fig. 2.3.1의(a)와 같이 레이저 빔면(Object Plane)과 렌즈면(Lens Plane)과 카메라센서면(Image Plane)이 평행하게 설치되어진 시스템으로 Stereoscopic 효과가 카메라의 축으로부터 떨어진 거리에 바로 연관되어 진다.

반면, Angular displacement 법은 2대의 카메라렌즈가 유동가시영역과 수직하지 못하고 조명평면과 소정의 각도를 이루게 하여 속도장을 측정하는 법이다. 측정각도에 거의 제약이 따르지 않으나 취득한 영상에 강한 투시왜곡에 발생하게 되므로 영상 기록면 좌표와 측정단면 좌표 사이의 상관 함수를 구하는 작업이 필요할 뿐만 아니라 유동장의 가시용 벽면에 의한 굴절의 영향으로 카메라렌즈의 설치를 가능하면 지상면을 기준으로 평행하게 설치해야 하는 단점이 있다. 이 단점을 극복하기 위해 Scheimpflug stereocamera(A.K. Prasad, 1995)⁽¹²⁾를 제안했다. Fig. 2.3.1(b)처럼 카메라의 렌즈면과 센서면이 레이저 빔

면과 하나의 라인을 공통으로 가로지르도록 기울이게 하는 것이다. M (렌즈 배율요소)이 더 이상 상수가 될 수 없고 다른 교정 작업의 수단이 필요하게 된다.



(a) Translation system



(b) Angular displacement system

Fig. 2.3.1 Two basic configurations for stereoscopic PIV systems.

본 연구에서는 Angular법의 장점을 살리고 유동계측의 제약을 주었던 카메라의 배치에 자유성을 부여하여 유동의 형태에 따라서 카메라의 배치를 조절할 수 있게 하였다. 그리고 영상의 기하학적 변환(Geometric transformation)으로 굴절과 수차의 영향을 고려하며, 카메라 교정의 원리와 3차원 위치 결정의 원리를 이용한 Stereoscopic PIV계측법이 사용되고 있다.

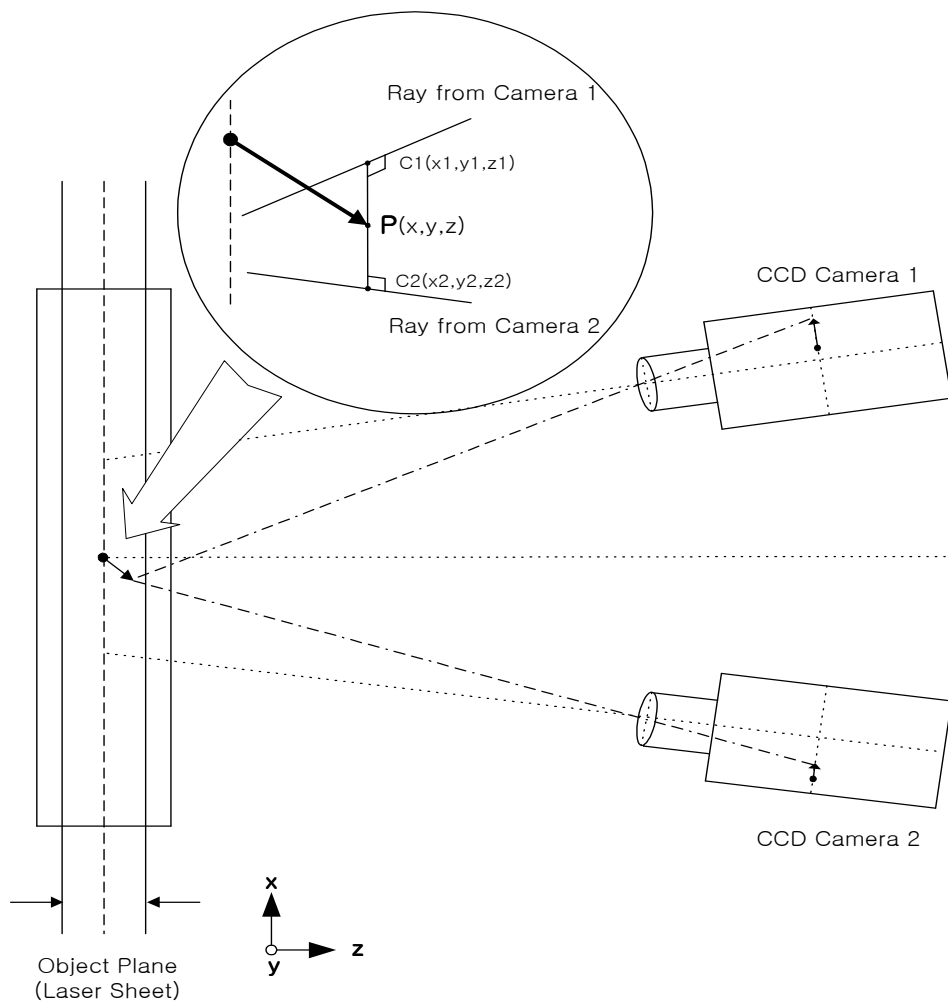


Fig 2.3.2 Definition of 3-D particle position.

2.3.1 Scheimpflug camera lens 원리

임의의 각을 가지고 있는 카메라의 회전에 의한 angular method 방법은 Fig. 2.3.3(a)와 같이 카메라의 초점영역과 물체사이에 편차가 생긴다는 것을 Scheimpflug condition(Prasad 2000)⁽¹³⁾에 의해 알 수 있다. 이미지의 초점이 흐트러지는 효과를 해결 하기 위해서는 카메라의 초점영역의 조정이 필요하다. Scheimpflug 렌즈는 Fig. 2.3.3(b)처럼 카메라의 이미지영역과 렌즈 사이의 각을 임의로 조정할 수 있도록 고안되었다. Fig. 2.3.3(c)는 Scheimpflug camera의 스틸사진이다

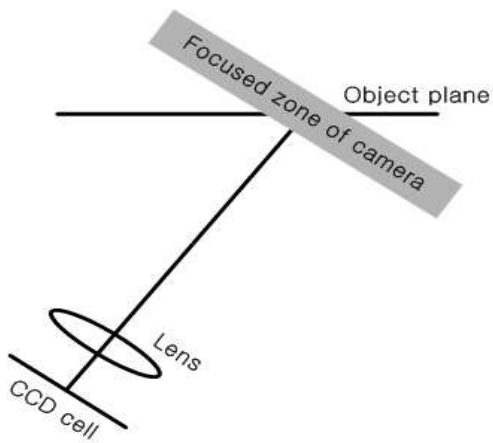


Fig. 2.3.3(a) Before using schiempflug camera.

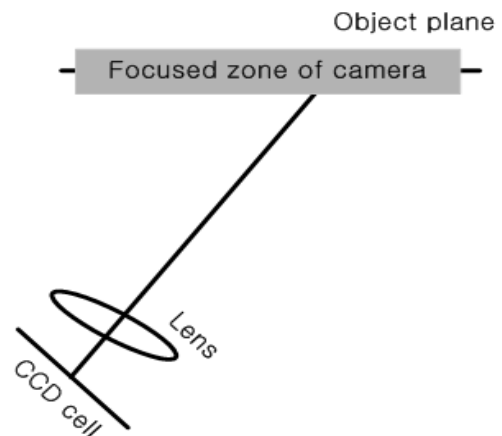


Fig. 2.3.3(b) After using schiempflug camera.



Fig. 2.3.3(c) Schematic view of schiempflug camera.

2.3.2 Polynomial expression 원리

각각의 카메라의 X, Y의 2차원 이미지평면과 3차원 물체의 x, y, z의 관계를 표현한 식을 Polynomial expression으로 다음과 같이 표현된다.

$$X = F(x, y, z) \quad (2.3.1)$$

$$X = a_0 + a_1x + a_2y + a_3z + a_4x^2 + a_5xy + a_6y^2 + a_7xz + a_8yz + a_9z^2 + a_{10}x^3 + a_{11}x^2y + a_{12}xy^2 + a_{13}y^3 + a_{14}x^2z + a_{15}xyz + a_{16}y^2z + a_{17}xz^2 + a_{18}yz^2 \quad (2.3.2)$$

여기서 x, y는 카메라 센서면 좌표를 X, Y, Z는 레이저빔면의 좌표를 나타낸 것이다. a_i 는 최소자승법에 의해서 결정된 벡터의 계수이다. a_i 의 4가지 경우는 2대의 카메라 X, Y에 얻어진다. 이 Polynomial식은 x, y에 대한 3차식과 z에 대한 2차식으로 구성되어 있다. 고차의 일치함수 경우에도 적용 (Hu et al. 2002)⁽¹⁴⁾이 가능하다. 다음은 Soloff et al.(1997)⁽¹⁵⁾에 의해서 분석된 추적 입자의 변위를 나타낸 것이다.

$$\Delta X = F(X + \Delta X) - F(X) \quad (2.3.3)$$

Taylor series와 일차적 근사에 의해 다음 방정식으로 표현된다.

$$\Delta X \approx \Delta F(X) \Delta X \quad (2.3.4)$$

최종적으로 표현하면

$$\begin{pmatrix} \overline{\Delta X_1} \\ \overline{\Delta Y_1} \\ \overline{\Delta X_2} \\ \overline{\Delta Y_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_{X1,x} & F_{X1,y} & F_{X1,z} \\ F_{Y1,x} & F_{Y1,y} & F_{Y1,z} \\ F_{X2,x} & F_{X2,y} & F_{X2,z} \\ F_{Y2,x} & F_{Y2,y} & F_{Y2,z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \overline{\Delta x} \\ \overline{\Delta y} \\ \overline{\Delta z} \end{pmatrix} \quad (2.3.5)$$

여기서 1과 2는 카메라를 의미하며 $F_{X1,x} = \partial F_{X1} / \partial x$ 이다.

위에 주어진 식은 3개의 미지수를 위해 4개 방정식을 최소자승법을 이용하여 전개할 수 있다. 이러한 Polynomial expression method는 Soloff(1997)와 Prasad(2000)에 의해서 발전되어 왔다.

2.4 부유 실린더의 메커니즘

Fig. 2.4는 방향성의 메커니즘을 나타낸 것이다. 먼저 역학적인 방향성의 프로세스에 대하여 살펴보면 축성분에 기인하는 항력 F_z 로부터 상승을 시작한다.(Jeffery 式, Cox式) 다음으로 중력 기인의 모멘트 M_g 로부터 부유 실린더는 위로 향하게 되고 선회 성분에 기인하는 항력 F_θ 로부터 부유 실린더는 자전과 선회를 시작한다. 여기서 부유 실린더에 걸쳐 작용하는 반경 방향의 힘과 원심력 F_C , 사프만 힘 F_S , 마그누스 힘 F_M 에 대해서는 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$F_C = F_M + F_S + a \quad (2.4.1)$$

여기서 a 는 파이프 중심의 측면부분과 부유 실린더와의 정압차에 의해서 발생하는 힘이다.

부유 실린더가 상대속도 V_R 에 의한 전단 흐름을 통해 이동할 때 두 종류의 양력이 발생하는데, 하나는 관성력이고 다른 하나는 부유 실린더의 회전력이다.

$$F_S = 81.2\mu V_R a^2 \left[\frac{\partial v_z}{\partial r} \right]^{1/2} / v^{1/2} \quad (2.4.2)$$

$$F_M = \pi\mu V_R a^3 \left[\frac{\partial v_z}{\partial r} \right] / 2v \quad (2.4.3)$$

$$F_C = \frac{4}{3} \pi a^3 \rho \frac{V_\theta^2}{r} \quad (2.4.4)$$

또한 원심력에 기인하는 방향성 모멘트 M_C 가 걸린다. 마지막으로 적절한 스윙수의 양함일 경우에 부유 실린더는 자전하고 선회한다.

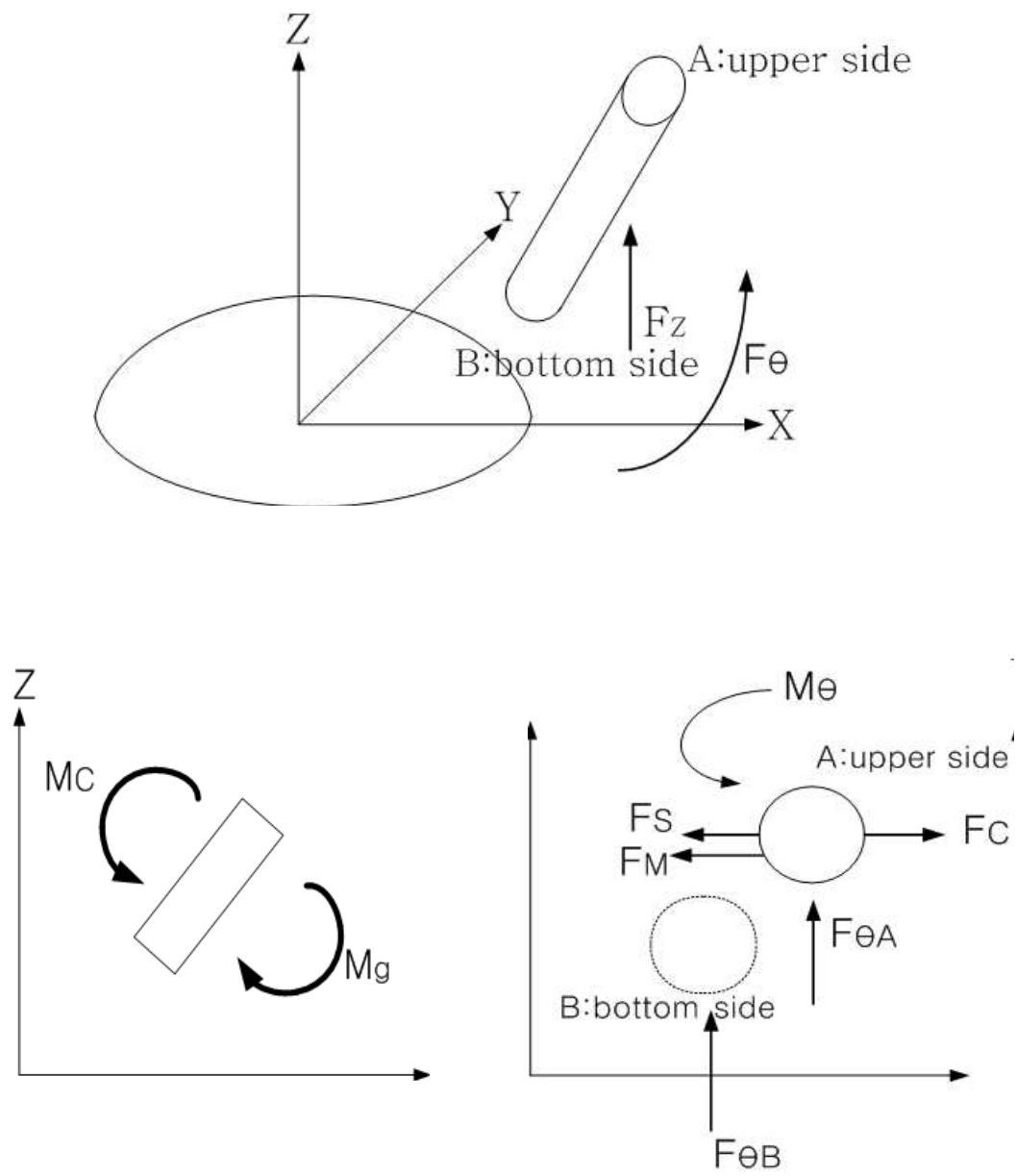


Fig. 2.4 Mechanism of floating cylinder.

제 3 장 수직관내에서의 유동장 계측

3.1 실험 장치 및 절차

Fig. 3.1.1은 수직관내에서의 유동장 계측을 위해서 적용된 시스템을 나타내고 있다. 계측시스템은 2대의 CCD카메라(KODAK Megaplus, ES1.0, 1008×1018 pixels), 이미지 그래버(Metrox, 1008×1018 pixels, 256 gray levels), 레이저(Nd-Yag LASER, 120mJ/Pulse) 와 32bit 호스트 컴퓨터로 구성하였다.

일반적으로 계측영역내의 미소 입자들을 추적하는데 있어 고속유동의 경우 AOM(Acoustic Optical Modulator)을 사용하여 레이저와 같은 광원을 쉼핑하여 시간해상도를 높일 수 있다. 본 논문에서는 AOM을 성능을 포함한 Lab Smith사의 Pulse generator 인 LC880을 사용하여 이미시간에 설정된 시간간격동안에 레이저 광원의 노출시간을 조절할 수 있었다.

본 실험에서의 속도장의 경우 수직관 주위에 설치한 광센서(Omron S82K)가 부유 실린더에 의해서 차단될 때 발생하는 24V의 신호를 Converter를 통해서 5V의 TTL신호로 전환하여 LC880를 통해 카메라와 레이저 각각에 신호를 주어 작동하게 했다. 이 신호는 호스트 컴퓨터에 장착된 이미지 그래버(Metrox metro II)로 보내져 A/D변환되어 256 gray levels(1008×1018)로 저장된다. 본 실험에서는 총 한 케이스당 저장되는 이미지는 총 64장으로 센서가 작동하는 순간에만 이미지가 저장된다.

저장된 이미지로부터 배경을 제거하는 과정을 거치면, 이미지는 순수 입자들만이 존재하게 된다. 이렇게 처리된 이미지는 임계값에 의한 이치화한 다음 윤곽선추적(boundary trace)을 행하여 하나의 입자로 인식되는 화소에 대해 면적모멘트 공식에 의해 입자의 중심을 결정한다. 결정된 입자의 중심으로부

터 수행된 카메라의 교정 작업 결과를 3차원 Stereoscopic PIV계측법을 이용하여 최종적인 3차원 벡터를 결정한다.

Fig. 3.1.2는 본 실험에 사용된 Vortex blower로 일정한 풍량을 유지할 수 있게 해주는 장치로 2가지 경우에 의해서 실험을 수행했다. 수직관의 전체길이 $600mm$ 에서 $200mm \sim 280mm$ 와 $400mm \sim 480mm$ 인 영역에서 실험을 하였다.

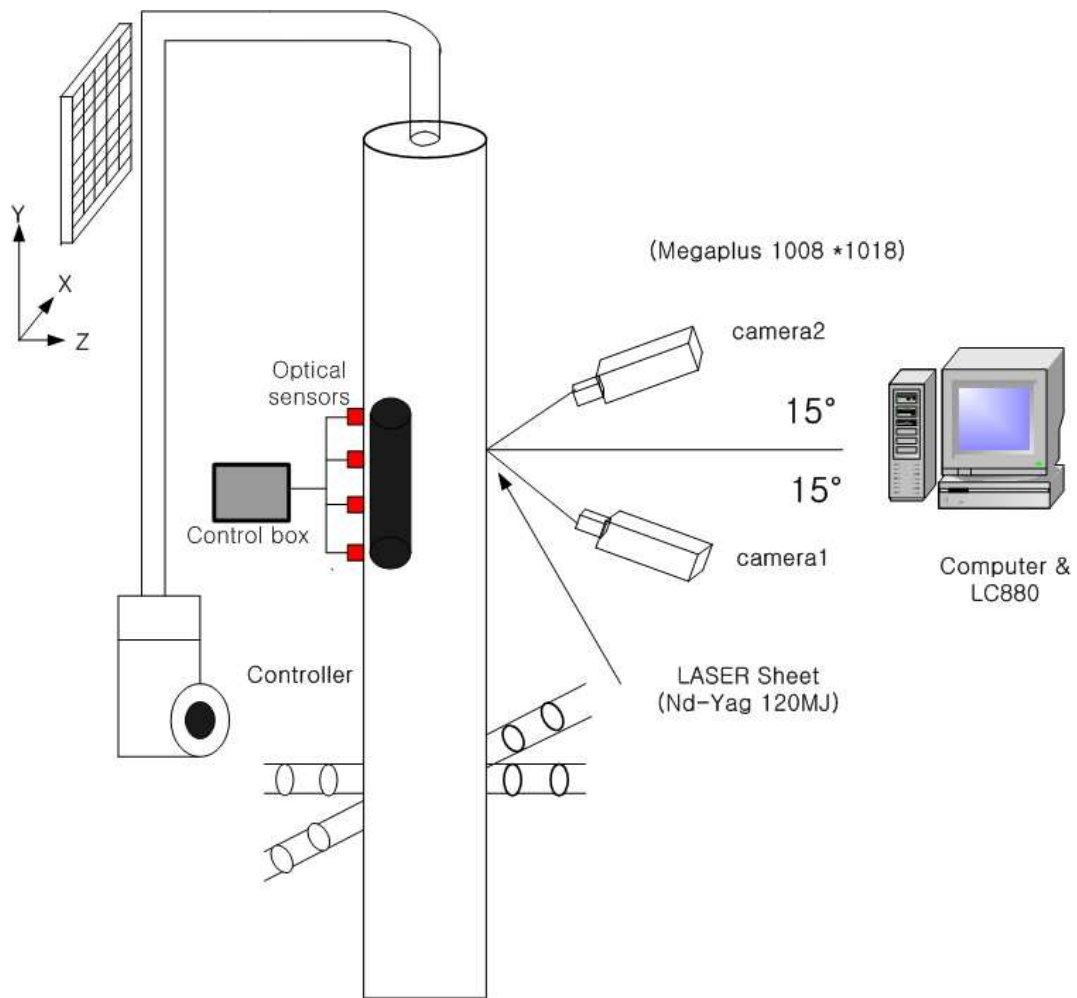


Fig. 3.1.1 Schematic diagram of experimental apparatus.



Fig. 3.1.2 Photograph of 3D determination Systems.



Fig. 3.1.3 Photograph of vortex blower.

3.2 실험계측

3.2.1 실험계측 조건

Fig. 3.2.1의 경우는 실제 수직관내의 유동장을 계측하는 중에 스틸 카메라로 찍은 사진이다. 본 실험에서는 $110\text{mm} \times 600\text{mm}$ 인 수직관을 사용하였다. $12\text{mm} \times 65\text{mm}$ 인 부유 실린더에 레이저 광원의 산란 및 굴절을 피하기 위해 무광흑색도료를 코팅하였다. 카메라의 교정 작업을 마친 후 스모그 발생기를 사용하여 추적 입자를 유동장에 투입한 후 레이저의 광원을 물체의 측면에 설치하여 관측영역 전체에 걸쳐 조사하였다. 검사 영역내의 유동 즉 3차원 공간 내 입자의 3차원 위치를 계산하기 위해서는 먼저 모든 카메라에 대한 교정 작업을 해야 한다. 이는 카메라의 정보를 알기 위함 이다. 이 작업은 3차원 공간 인식의 기준이 된다. 따라서 공간내의 표준이 되는 Fig. 2.1 과 Fig. 3.2.1에 보이는 교정기(가로 56mm , 세로 48mm 이고, 4mm 간격)를 사용하여 수직관의 바닥에서 1/3 지점과 2/3지점을 각각 실제 물체에 대한 교정 작업을 하였다. 수직관의 계측영역은 x축으로는 $-24\text{mm} \sim 28\text{mm}$, y축으로는 $-24\text{mm} \sim 24\text{mm}$, 원점에서 x축 방향으로 45mm 이동한 후 z축 방향으로 4mm 간격으로 이동하면서 7번($-12, -8, -4, 0, 4, 8, 12\text{mm}$)계측을 하였다. 얻어진 영상으로부터 2장에서 서술한 것처럼 10개의 표정요소를 가지는 관측방정식을 이용하여 카메라 정보를 구하였다. 각각의 카메라의 각도와 물체와의 거리는 입자의 초점이 최상인 지점인 15° 와 700mm 이다.

교정 작업이 모두 완료되면 스모그 발생기를 사용하여 추적 입자(Glycol , 직경 $0.5 \sim 1\mu\text{m}$)를 유동장내에 투입하고 Nd-Yag 레이저(120mJ/Pulse)의 광원을 수직관 측면에 설치하여 관측영역에 걸쳐 조사하였다. 저장된 이미지의 잡음제거, 배경화면생성, 도심추출의 일련의 과정을 거치게 되며 3차원 공간 벡터장은 3차원 Stereoscopic PIV계측법을 사용하였다. 3차원 공간 내에서 백

터장을 얻기 위한 절차는 2대의 CCD camera를 이용하여 영상을 얻고 각 카메라에 대한 위치 캘리브레이션을 한 다음, 입자의 3차원 위치를 계산하고, Stereoscopic PIV계측법을 이용하여 3차원 속도벡터를 획득하는 순이다.

Fig. 3.2.2는 본 실험에 사용된 교정기의 그림이며, Fig. 3.2.3은 교정기 영역에 대한 이미지를 나타낸 것이며, Fig. 3.2.4 와 Fig. 3.2.5는 실제 사용된 교정기를 카메라 1, 2가 획득한 이미지이다.



Fig. 3.2.1 Real experimental system.

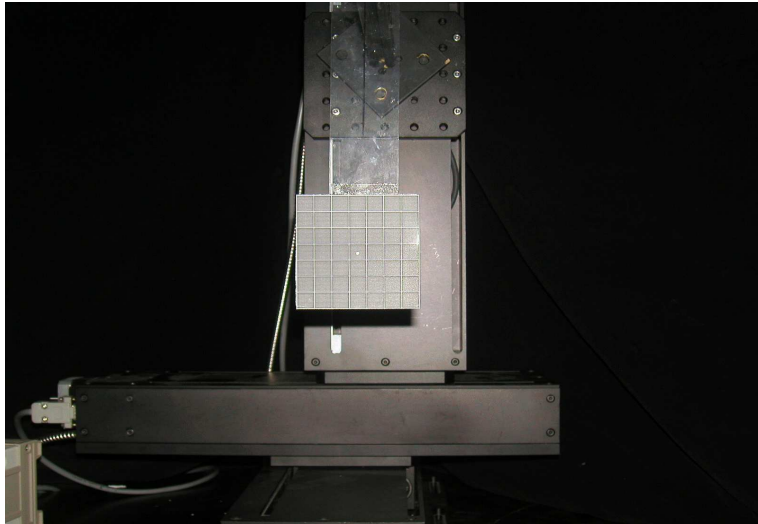


Fig. 3.2.2 Photograph of calibrator.

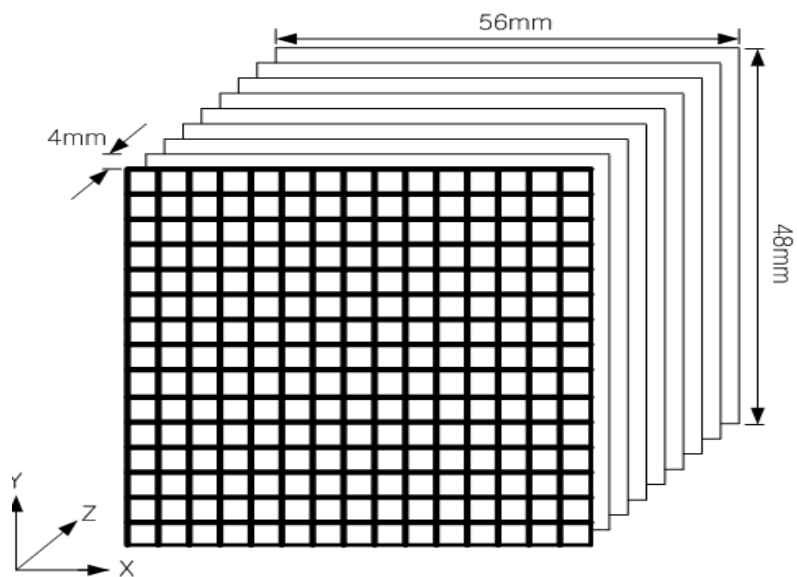


Fig. 3.2.3 Image for camera calibration.

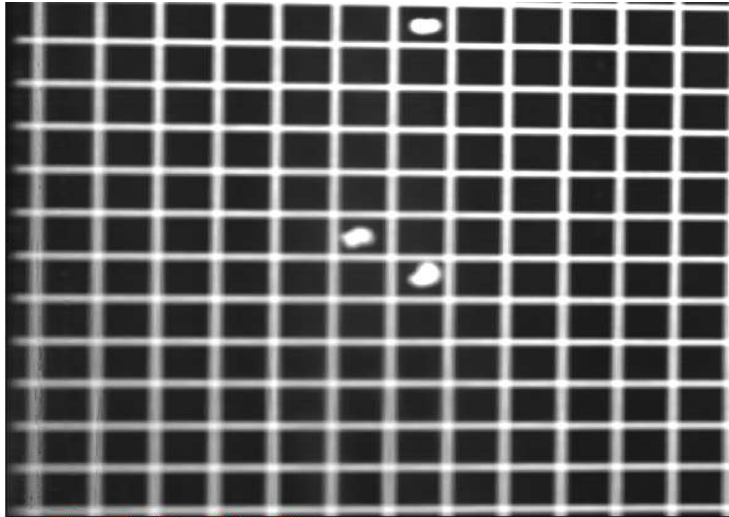


Fig. 3.2.4 Image by camera #1.

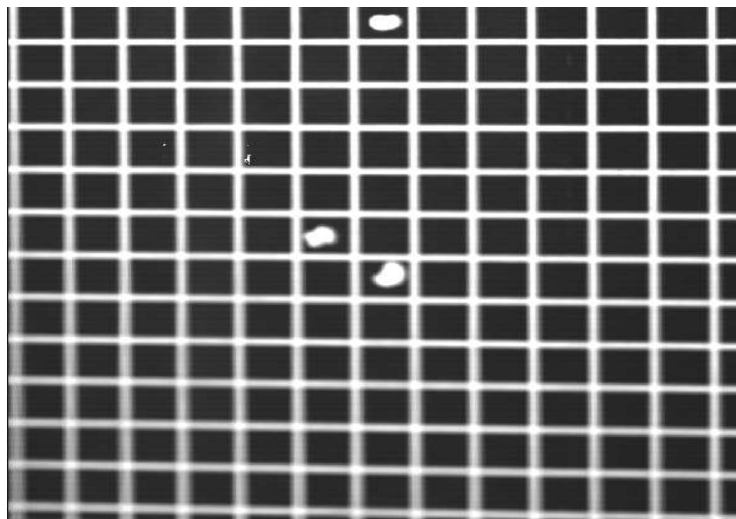


Fig. 3.2.5 Image by camera #2.

Fig. 3.2.6은 본 실험에 사용된 두 대의 카메라와 레이저 신호의 동기와 연속적인 이미지를 얻기 위한 시간조절의 개념을 표로 나타낸 것이다.

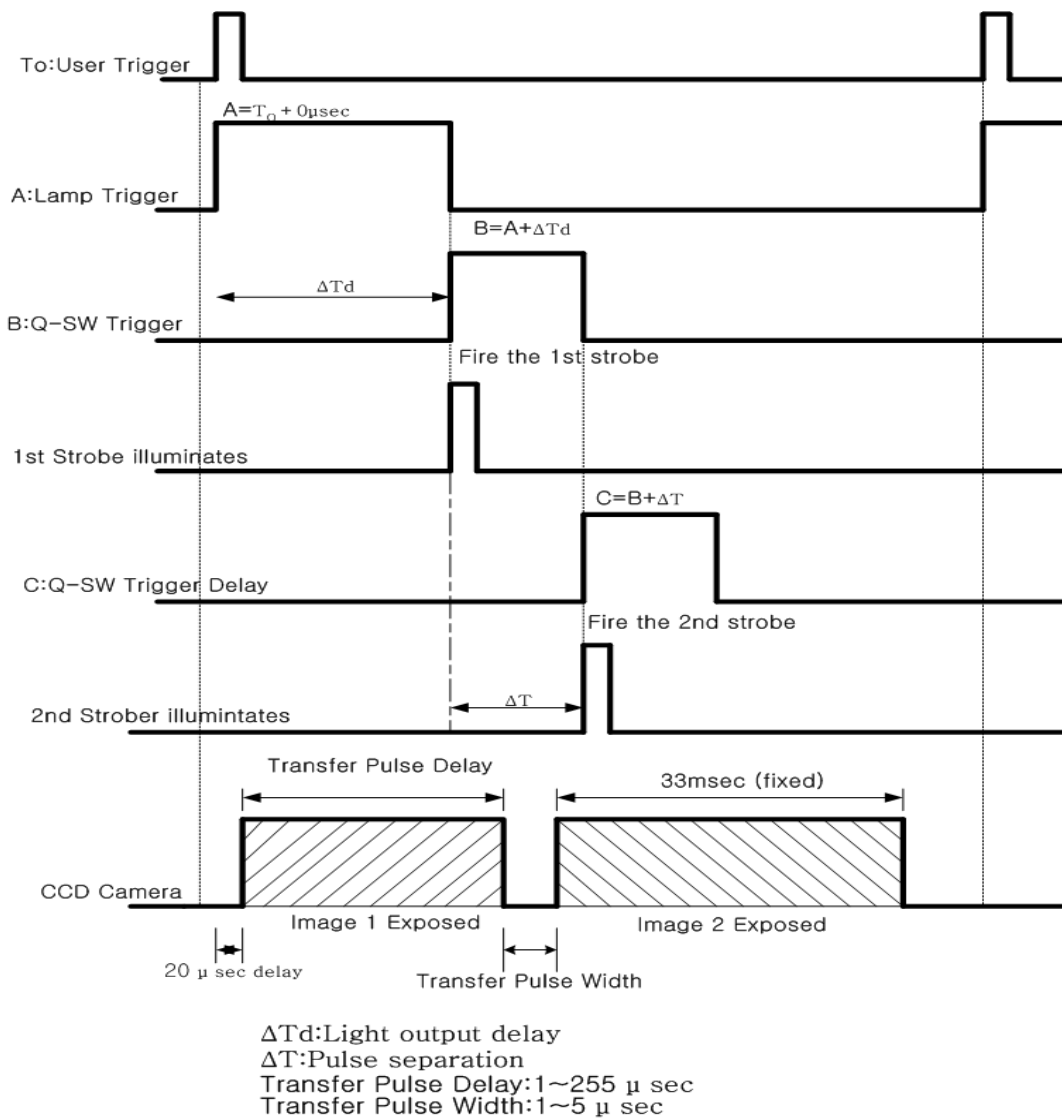


Fig. 3.2.6 Relationship of time delay between camera and laser.

3.2.2 계측결과

총 실험은 2가지 경우 즉, 수직관의 총길이(600mm)의 바닥면에서 1/3지점 (200mm ~ 280mm)과 2/3지점 (400mm ~ 480mm)에서 수행되었다. 스트로보스코프 회전 속도계와 Vortex blower를 사용하여 각각의 케이스에 대해 Hz 및 rpm을 측정 하였다. PIV기법 의해 측정된 1/3지점은 12.2Hz에 200rpm이고 같은 조건에서 열선유속계에 의해 측정된 선회류 속도 $V_{S1}=1.858m/s$ 이며 2/3지점은 14.4Hz 에 255rpm의 값을 가지며, 열선유속계에 의해서 측정된 선회류 속도 $V_{S2}=2.4653m/s$ 이다. PIV기법에 의해 측정된 값과 열선유속계에 의해서 측정된 속도 사이에는 2%의 상대오차를 가지므로 본 실험에서는 열선유속계에 의해 측정된 데이터를 가지고 실험데이터를 무차원 하였다. 본 실험은 각각의 케이스 마다 여러 번의 실험을 거쳐 수행하였는데, 그 중 획득된 이미지가 가장 좋은 것을 선별하여 각각 2개의 경우(case8, case15, case16, case19)에 대해서만 3D Stereoscopic PIV기법을 적용하여 3차원 속도벡터를 구하였다. 각 case는 총 64장의 3차원 속도벡터로 본 논문에서는 평균한 데이터를 사용하였다. Fig. 3.2.7은 각각의 카메라에 대한 순시적인 실험이미지이며, Fig. 3.2.8은 각각의 카메라가 획득한 이미지에 대해서 에러를 제거한 순시적인 3차원 속도벡터를 나타낸 것이며, Fig. 3.2.9는 두 대의 카메라에 대한 교정 작업을 거친 후 획득된 3차원 평균속도벡터를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 측정영역의 벽 쪽에서 W성분의 힘이 Z방향(+)으로 튀어나오고 관중심을 벗어나서는 W성분이 Z방향(-)으로 들어가는 것을 확인할 수 있었다. 이것으로 짐작하여 선회류의 방향을 유추할 수 있었다. Fig. 3.2.9는 순시 속도벡터를 평균한 것으로 좀더 완화된 형태를 볼 수 있다. Fig. 3.2.10(a)부터 Fig. 3.2.13(b)까지는 선회류 속도 즉, V_{S1} 가 1.858m/s 이고 Fig. 3.2.14(a)부터 Fig. 3.2.17(b)까지는 선회류 속도 V_{S2} 가 2.4563m/s 이다. 두 대의 카메라에 의해서 획득된 총 96장의 이미지로부터 첫 번째의 이미지와 중간, 그리고 마지막 이미지와 총 96장의 평균화된 이미지의 난류운동에너지와 레이놀즈 응력에 관하

여 나타냈다. 각각의 이미지에서 볼 수 있듯이 전체적으로 불안정한 난류형상이 나타난다. 이는 원심력에 의해서 관 중심에서 벽 쪽으로 난류성분이 불규칙적으로 이동한 것에서 나타나는 현상이다. 평균화된 이미지에서는 부분적으로 불규칙적인 곳이 보이지만 대부분 균일한 형상을 보이고 있다. 이는 관 내에서 유동하는 부유 실린더가 안정화된 궤도를 유지할 수 있는 조건이다. 2/3지점의 선회류 속도 즉 V_{S2} 가 증가함에 따라서 이러한 현상을 더욱 두드러지게 나타낸다. Fig. 3.2.10에서 Fig. 3.2.13보다는 Fig. 3.2.14에서 Fig. 3.2.17의 경우가 더욱더 난류의 성분이 전체적으로 불규칙적으로 분포되었음을 확인할 수 있다.

Fig. 3.2.18과 Fig. 3.2.19는 실제 측정영역을 그림으로 도식화한 것으로 U , V 성분은 벡터로 표시했고 W 성분은 쿼터(Contour)로 나타냈다. 그림에서 볼 수 있듯이 선회방향이 시계 반대 방향으로 움직임을 확인할 수 있다. Fig. 3.2.18은 3차원 속도벡터를 나타낸 것이며 Fig. 3.2.19는 3차원 속도벡터의 *Stream line*을 나타낸 것이다.



camera #1



camera #2

Fig. 3.2.7 *Experimental image viewed by cameras.*

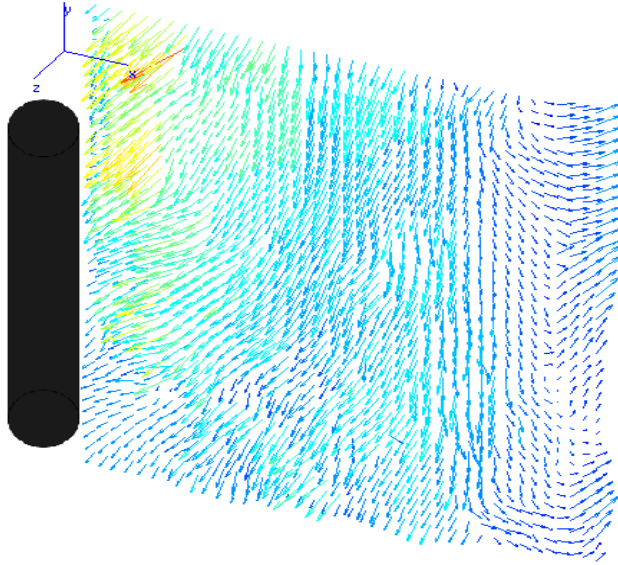


Fig. 3.2.8 Remove error 3D vectors (1/96).

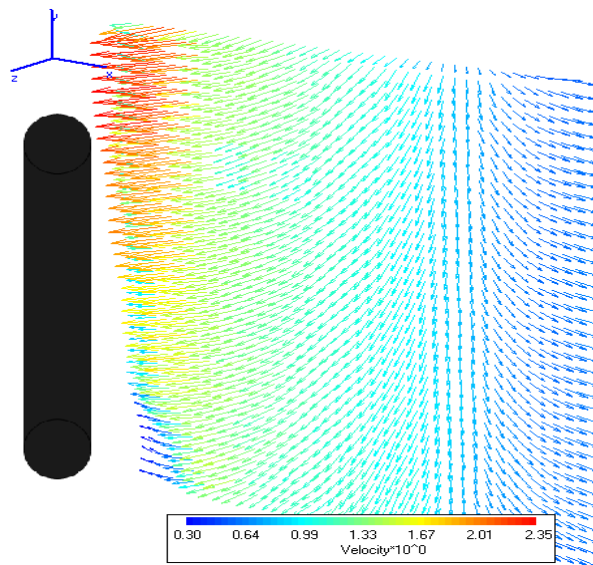


Fig. 3.2.9 Remove error 3D mean vectors.

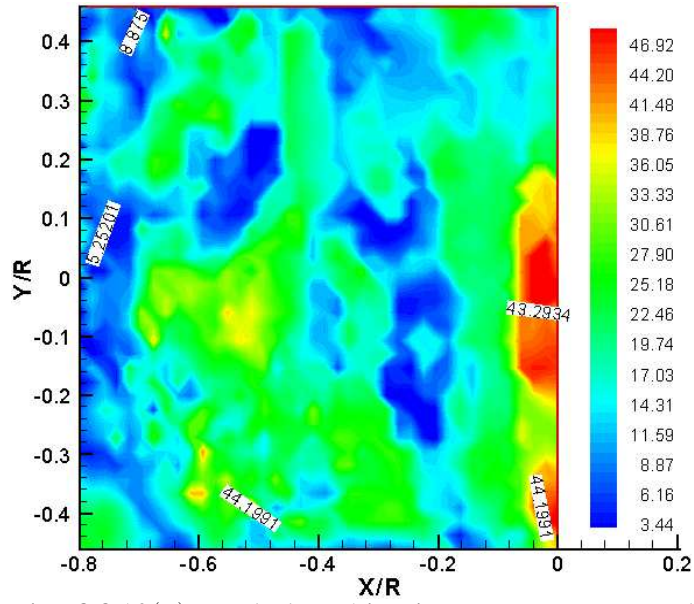


Fig. 3.2.10(a) Turbulent kinetic energy contour obtained by stereoscopic PIV ($V_{S1}=1.858 \text{ m/s} : 1/96$).

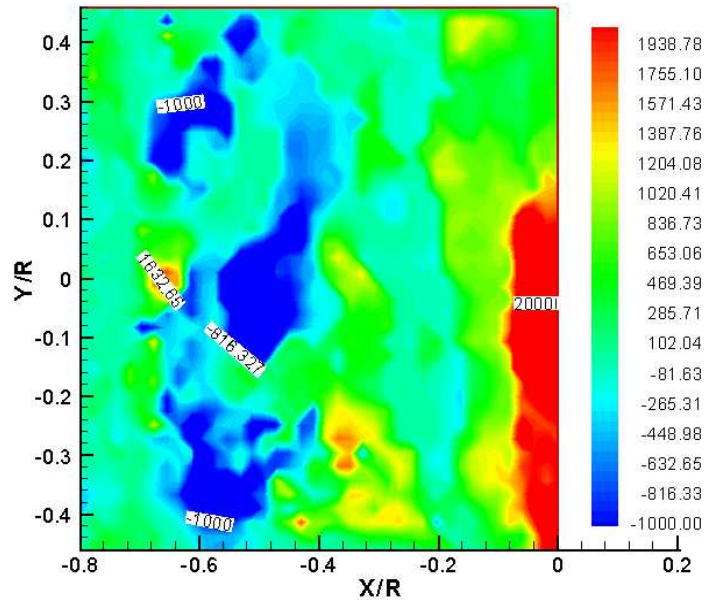


Fig. 3.2.10(b) Reynolds stress contour obtained by stereoscopic PIV($V_{S1}=1.858 \text{ m/s} : 1/96$).

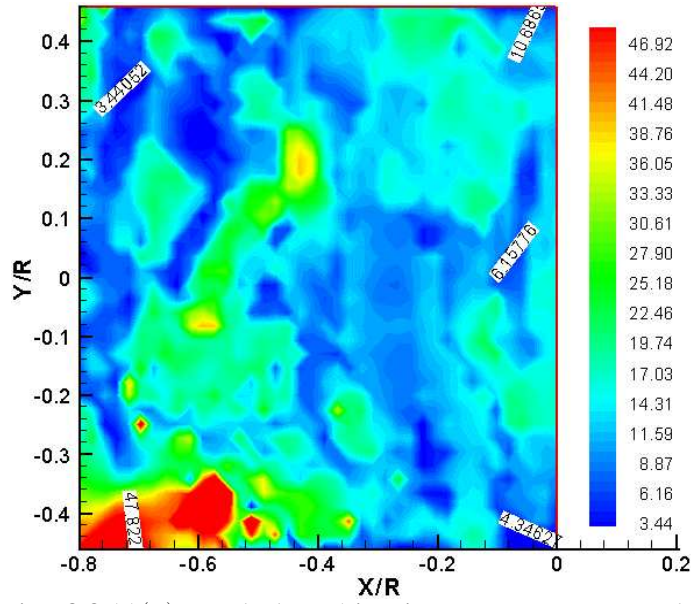


Fig. 3.2.11(a) Turbulent kinetic energy contour obtained by stereoscopic PIV ($V_{S1}=1.858 \text{ m/s} : 48/96$).

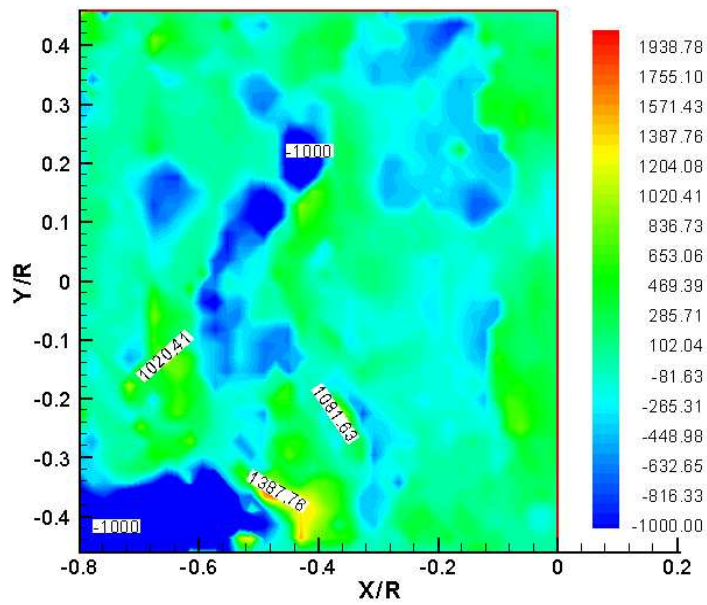


Fig. 3.2.11(b) Reynolds stress contour obtained by stereoscopic PIV($V_{S1}=1.858 \text{ m/s} : 48/96$).

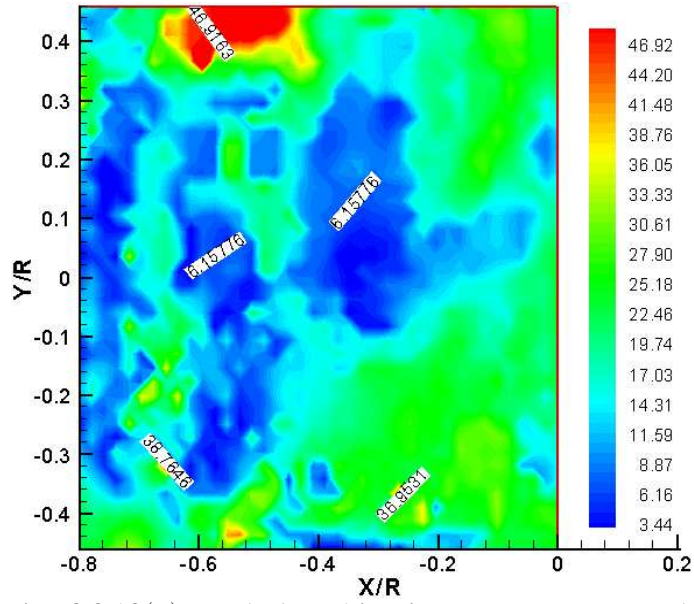


Fig. 3.2.12(a) Turbulent kinetic energy contour obtained by stereoscopic PIV ($V_{S1}=1.858 \text{ m/s}$: 96/96).

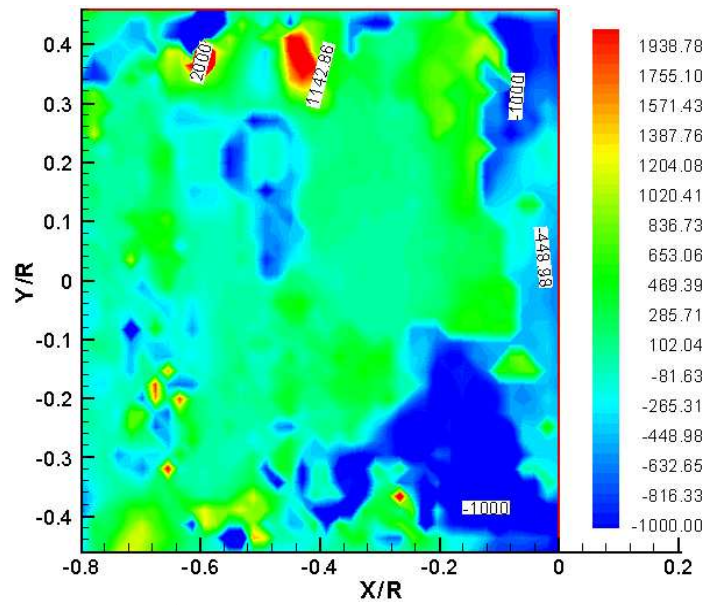


Fig. 3.2.12(b) Reynolds stress contour obtained by stereoscopic PIV($V_{S1}=1.858 \text{ m/s}$: 96/96).

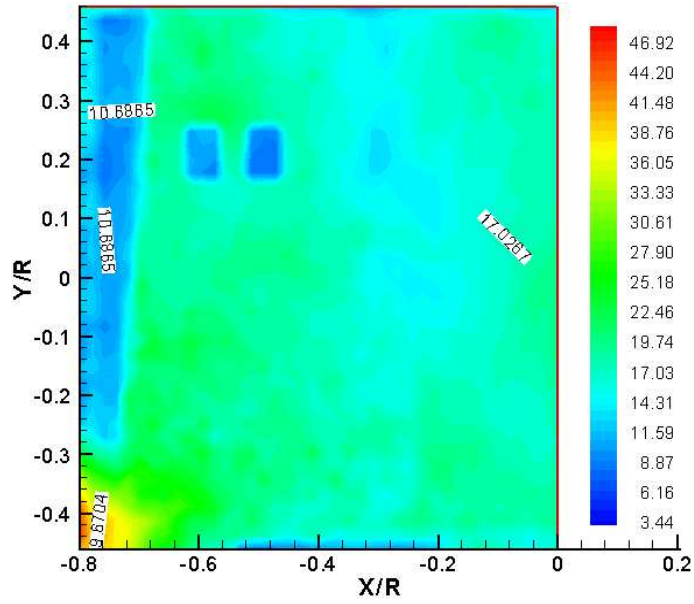


Fig. 3.2.13(a) Turbulent kinetic energy contour obtained by stereoscopic PIV ($V_{s1}=1.858 \text{ m/s}$: mean).

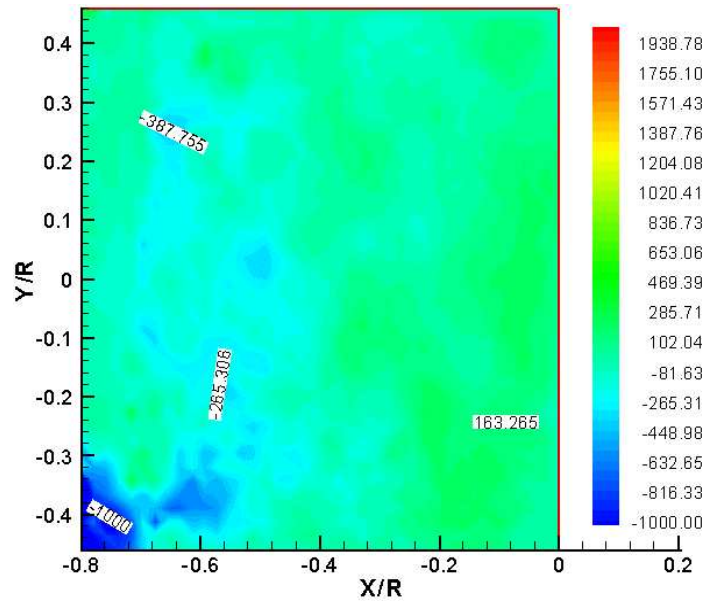


Fig. 3.2.13(b) Reynolds stress contour obtained by stereoscopic PIV($V_{s1}=1.858 \text{ m/s}$: mean).

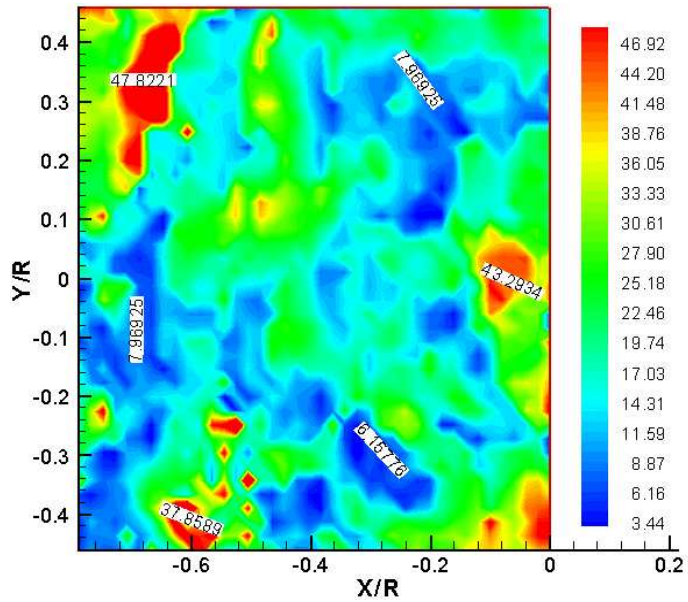


Fig. 3.2.14(a) Turbulent kinetic energy contour obtained by stereoscopic PIV ($V_{S2}=2.4653 \text{ m/s} : 1/96$).

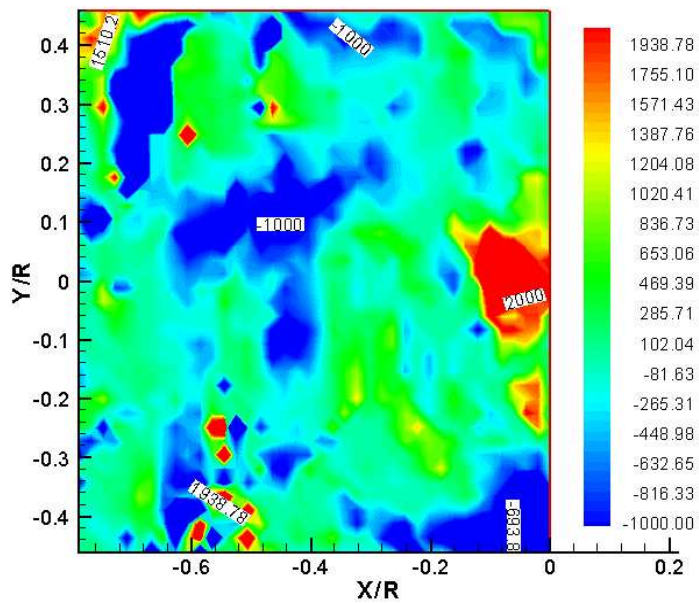


Fig. 3.2.14(b) Reynolds stress contour obtained by stereoscopic PIV ($V_{S2}=2.4653 \text{ m/s} : 1/96$).

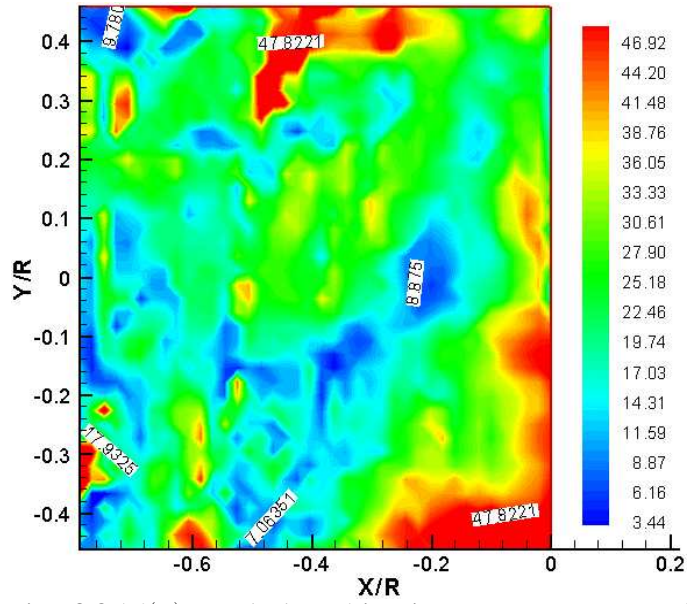


Fig. 3.2.15(a) Turbulent kinetic energy contour obtained by stereoscopic PIV ($V_{S2}=2.4653 \text{ m/s} : 48/96$).

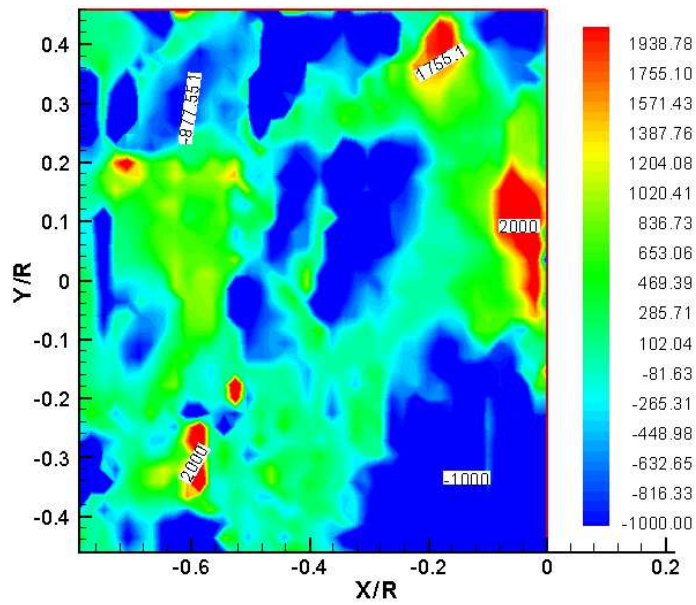


Fig. 3.2.15(b) Reynolds stress contour obtained by stereoscopic PIV($V_{S2}=2.4653 \text{ m/s} : 48/96$).

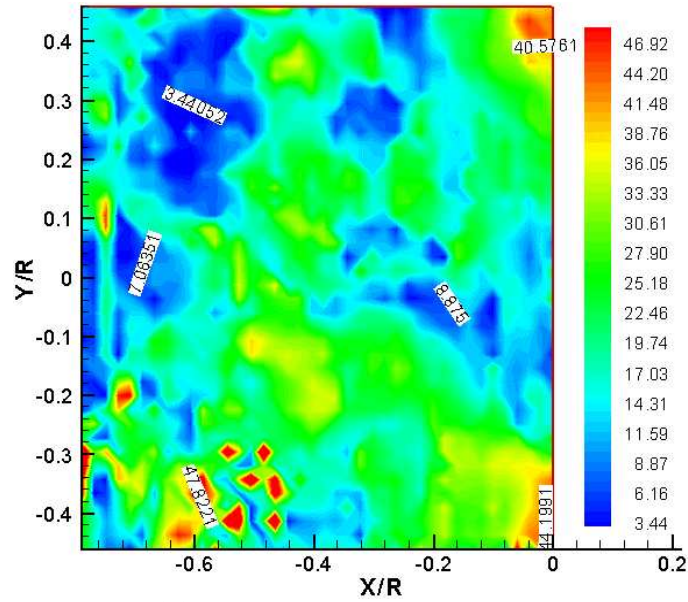


Fig. 3.2.16(a) Turbulent kinetic energy contour obtained by stereoscopic PIV ($V_{s2}=2.4653 \text{ m/s} : 96/96$).

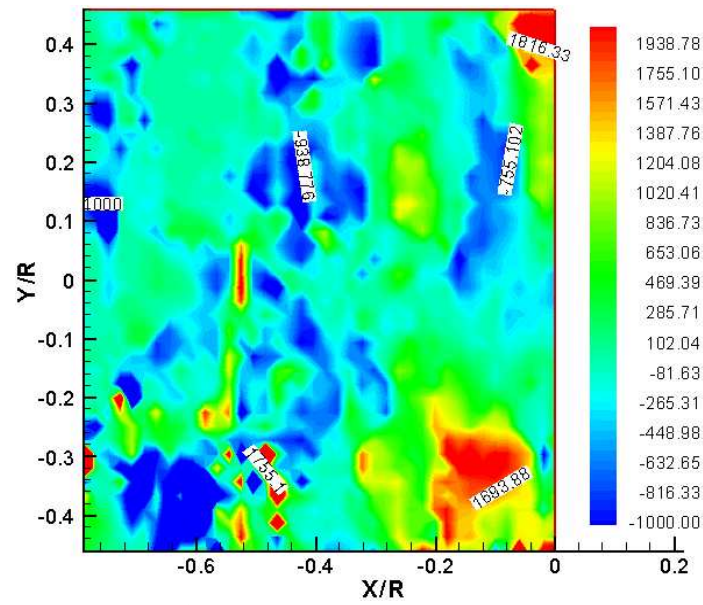


Fig. 3.2.16(b) Reynolds stress contour obtained by stereoscopic PIV($V_{s2}=2.4653 \text{ m/s} : 96/96$).

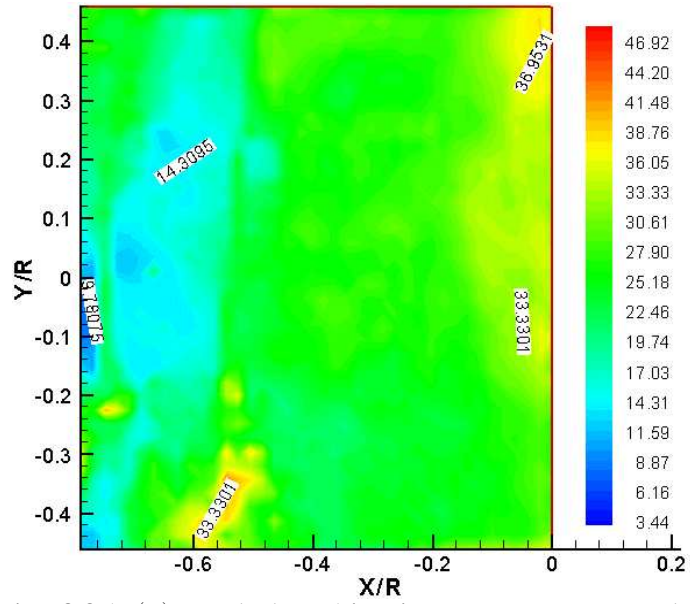


Fig. 3.2.17(a) Turbulent kinetic energy contour obtained by stereoscopic PIV ($V_{S2}=2.4653$ m/s : mean).

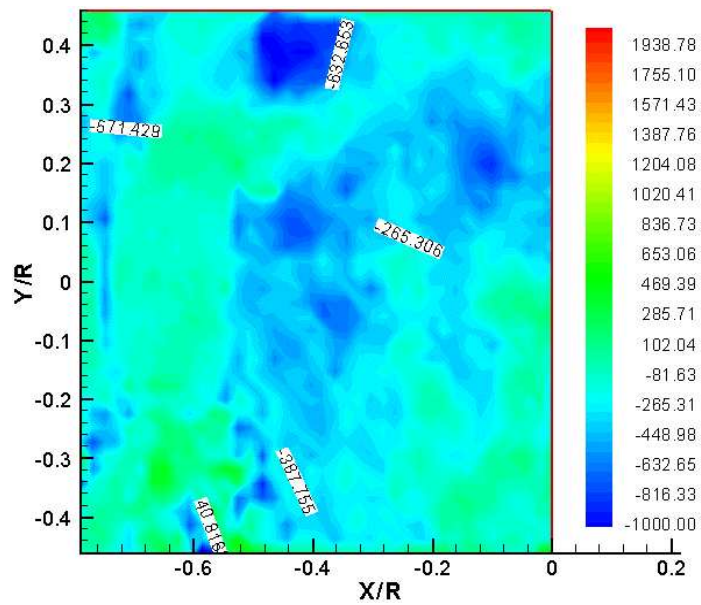


Fig. 3.2.17(b) Reynolds stress contour obtained by stereoscopic PIV ($V_{S2}=2.4653$ m/s : mean).

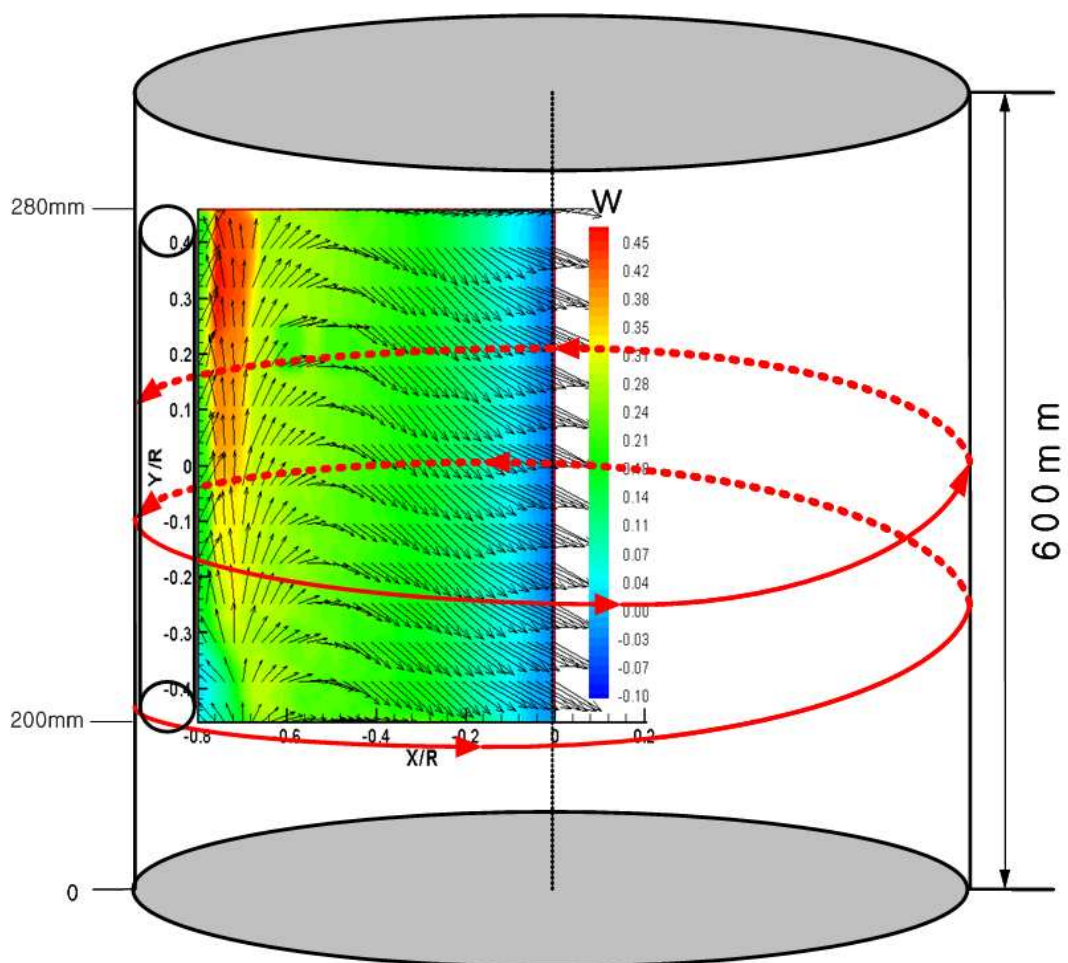


Fig. 3.2.18 3D mean vectors obtained by stereoscopic PIV.

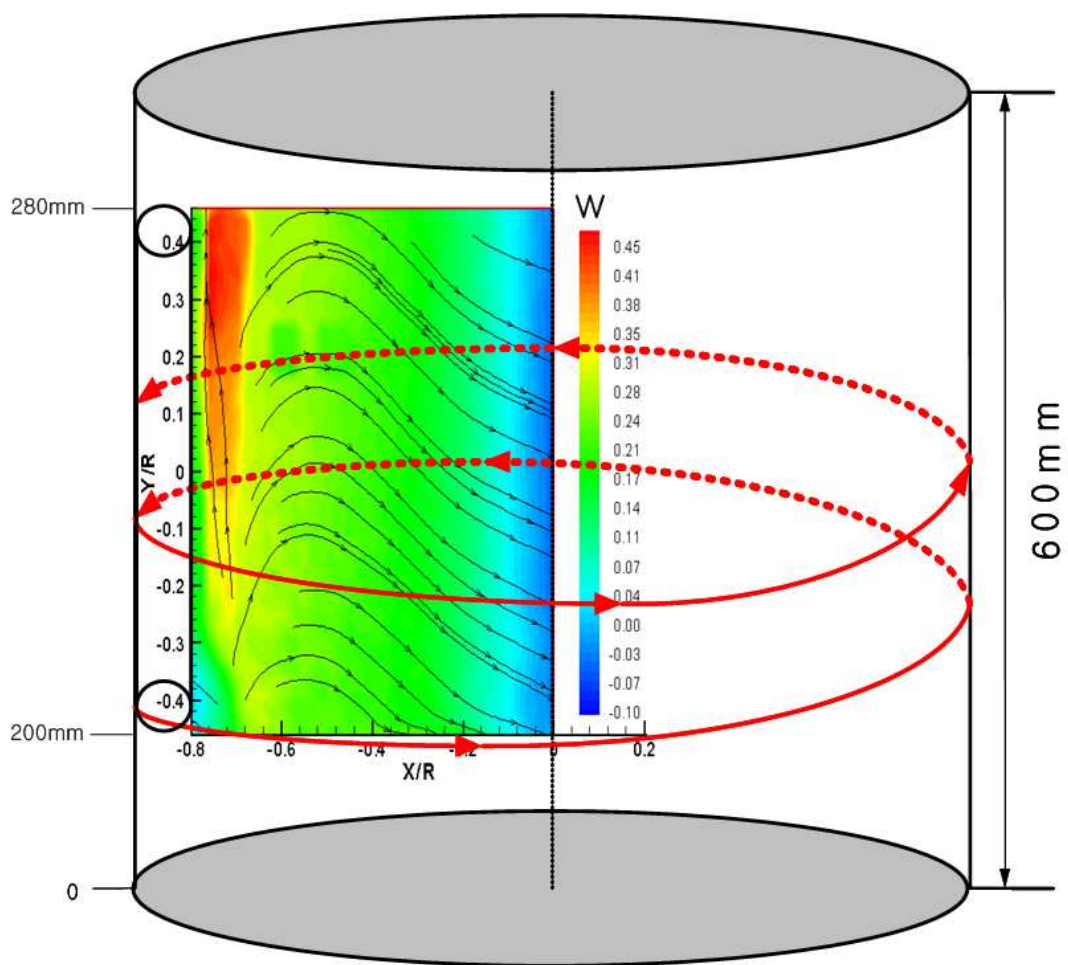


Fig. 3.2.19 U , V direction stream line obtained by stereoscopic PIV.

3.2.3 X/R 단면에서의 수직관내 선회류 유동장 특성 분석

Fig. 3.2.20에서 Fig. 3.2.22까지는 무차원축 X/R 와 무차원 속도 U/V_{S1} , V/V_{S1} , W/V_{S1} , U/V_{S2} , V/V_{S2} , W/V_{S2} 의 관계를 그래프로 나타낸 것으로 총 96장의 이미지중 (a)는 첫 번째에 해당하고 (b)는 48번째에 해당하는 이미지이며 (c)는 96번째에 해당하는 이미지이고 (d)는 총 이미지를 가지고 평균화한 것이다. 각각의 이미지를 선회류 속도 즉, $V_{S1}=1.858m/s$ 와 $V_{S2}=2.4653m/s$ 로 무차원 하였다.

여기서 Fig. 3.2.20에서 Fig. 3.2.23까지는 Z/R=0으로 고정시키고 Y/R의 변화에 따른 X/R 단면에서의 무차원 속도 변화를 살펴보았다.

Fig. 3.2.20은 관 중심에서 -Normal(y)방향으로 약 $0.3D$ 와 Span(z)방향으로 $0D$ 인 곳에서의 무차원 속도분포를 나타낸 것으로 (a), (b), (c), (d)의 모든 경우에 있어서 U, V성분에 의한 영향보다 W성분에 영향이 크게 미치는 것을 확인할 수 있다. (d)의 경우는 순시속도벡터들의 평균유동이므로 부드러운 형태가 보임을 확인할 수 있다. 또한 관의 벽 쪽에서 W성분이 Z(+)방향으로 유동현상이 강하게 튀어나오고 관 중심에서는 W성분이 Z(-)방향으로 들어가는 현상을 확인할 수 있었다. 이로 말미암아 관내에서의 선회류 현상이 나타남을 유추할 수 있었다. 또한 V_{S1} 보다 V_{S2} 의 선회류 속도가 크므로 확연한 차이가 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 3.2.21은 관 중심에서 Normal(y)방향으로 약 $0D$ 와 Span(z)방향으로 $0D$ 인 곳에서의 무차원 속도분포를 나타낸 것으로(a), (b), (c), (d)의 모든 경우에 있어서 U, V성분에 의한 영향보다 W성분에 영향이 크게 미치는 것을 확인할 수 있다. 다만 이전의 Fig. 3.2.21 보다는 관 중심에서의 경우가 좀더 안정적인 모습을 보이고 있다. (d)의 경우는 순시속도벡터들의 평균유동이므로 부드러운 형태가 보임을 확인할 수 있다. 또한 이전의 Fig. 3.2.20과 마찬가지로 (d)의 경우 즉, 평균화된 이미지에서는 선회류의 방향성을 확인할 수 있다.

Fig. 3.2.22는 관 중심에서 Normal(y)방향으로 약 $0.3D$ 와 Span(z)방향으로

0D인 곳에서의 무차원 속도분포를 나타낸 것으로 (a), (b), (c), (d)의 모든 경우에 있어서 U , V 성분에 의한 영향보다 W 성분에 영향이 크게 미치는 것을 확인할 수 있다. 다만 이전의 두 경우보다는 W 성분이 불안정함을 보였다. 두 경우와 마찬가지로 선회류의 방향성을 확인할 수 있었다.

속도 크기의 편차의 영향보다는 U , V , W 성분의 안정화 특히, W 성분의 안정화가 부유 실린더의 안정화 궤도를 유지하는데 가장 크게 좌우함을 확인할 수 있었다. 이로 말미암아 W 성분을 조절하면 속도에 상관없이 안정화된 결과 값을 얻을 수 있음이 예측 되어진다.

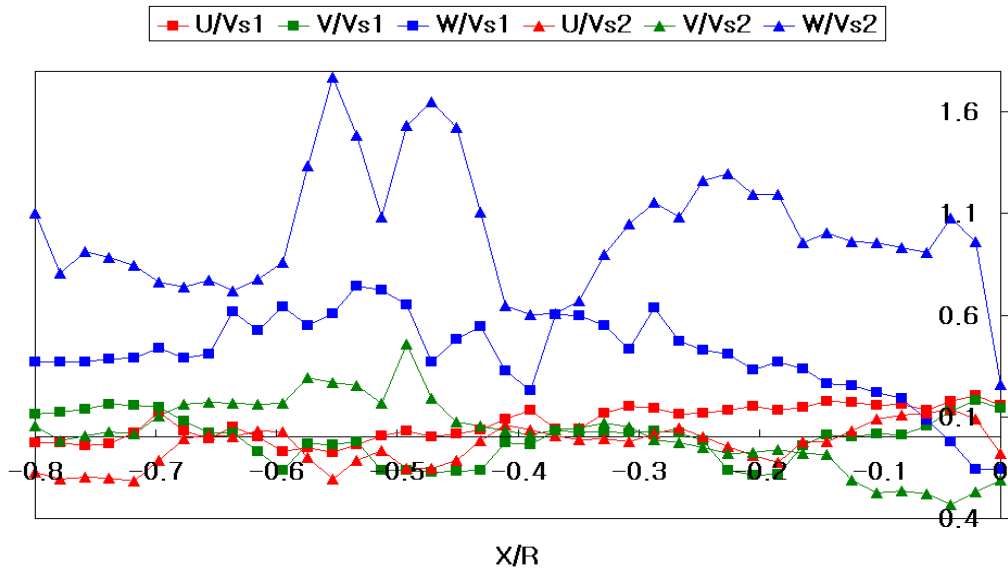


Fig. 3.2.20 (a) The dimensionless velocity at the $Y/R = -0.31846$ & $Z/R = 0$ (1/96).

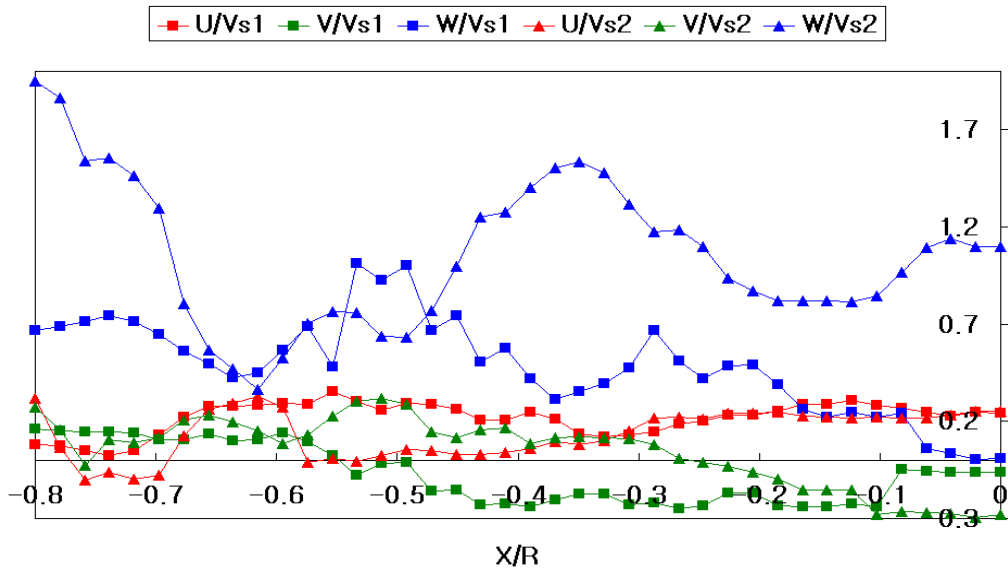


Fig. 3.2.20 (b) The dimensionless velocity at the $Y/R = -0.31846$ & $Z/R = 0$ (48/96).

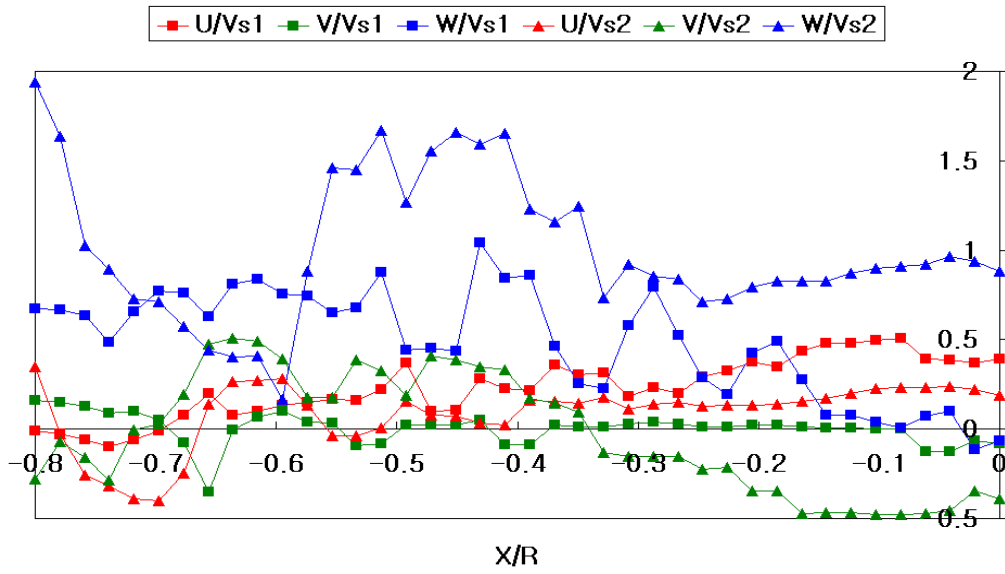


Fig. 3.2.20 (c) The dimensionless velocity at the $Y/R=-0.31846$ & $Z/R=0$ (96/96).

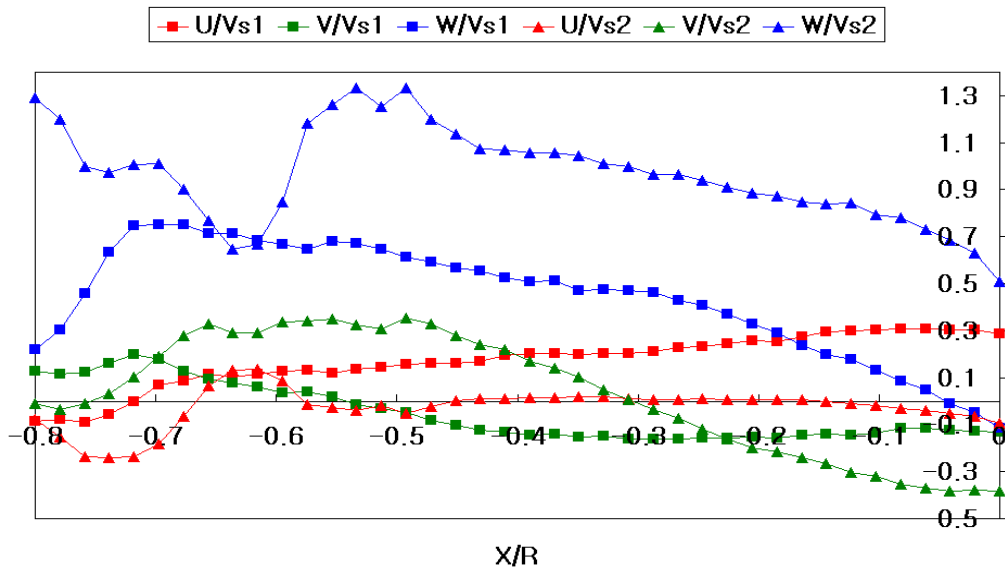


Fig. 3.2.20 (d) The dimensionless velocity at the $Y/R=-0.31846$ & $Z/R=0$ (mean).

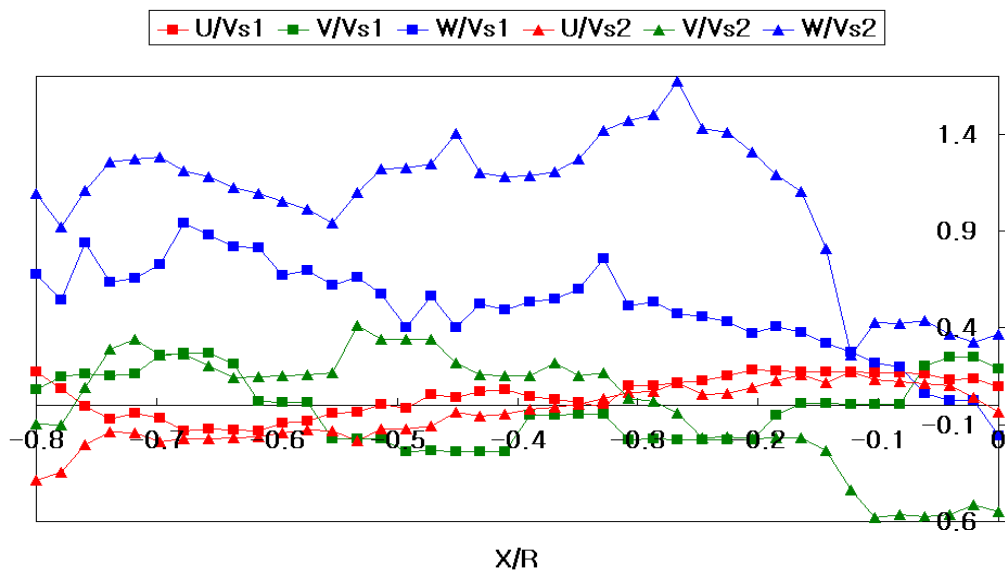


Fig. 3.2.21 (a) The dimensionless velocity at the $Y/R=0.01179$ & $Z/R=0$ (1/96).

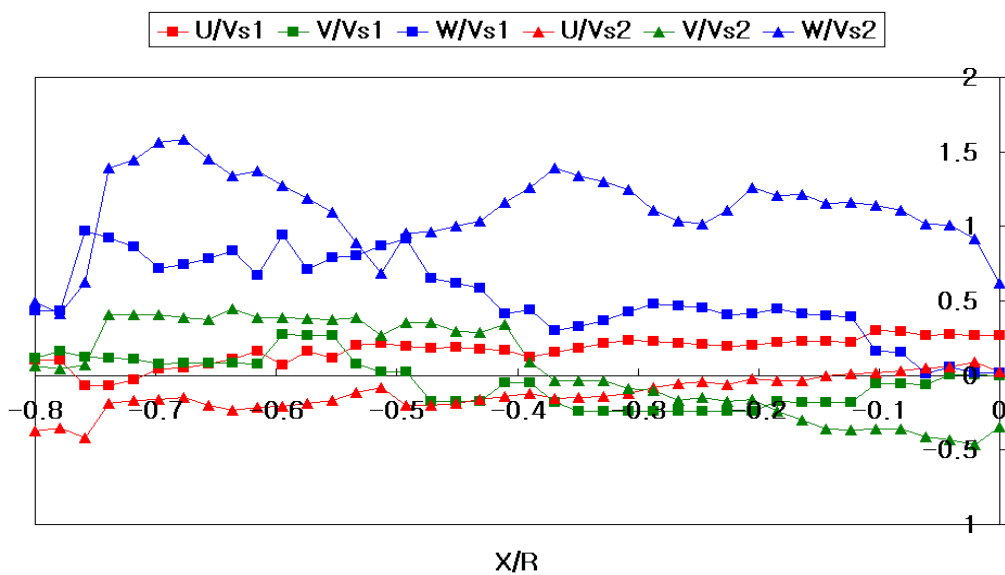


Fig. 3.2.21 (b) The dimensionless velocity at the $Y/R=0.01179$ & $Z/R=0$ (48/96).

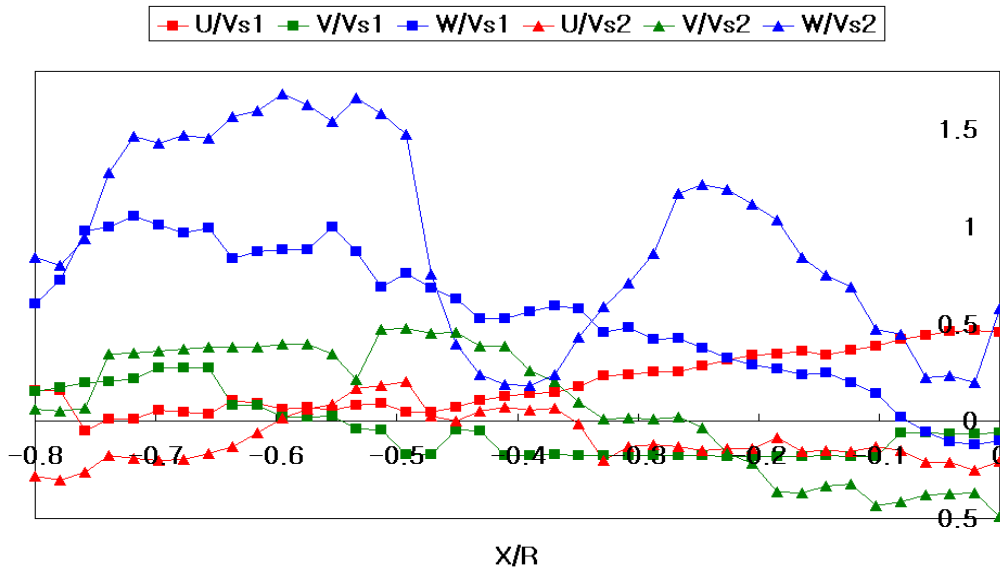


Fig. 3.2.21 (c) The dimensionless velocity at the $Y/R=0.01179$ & $Z/R=0$ (96/96).

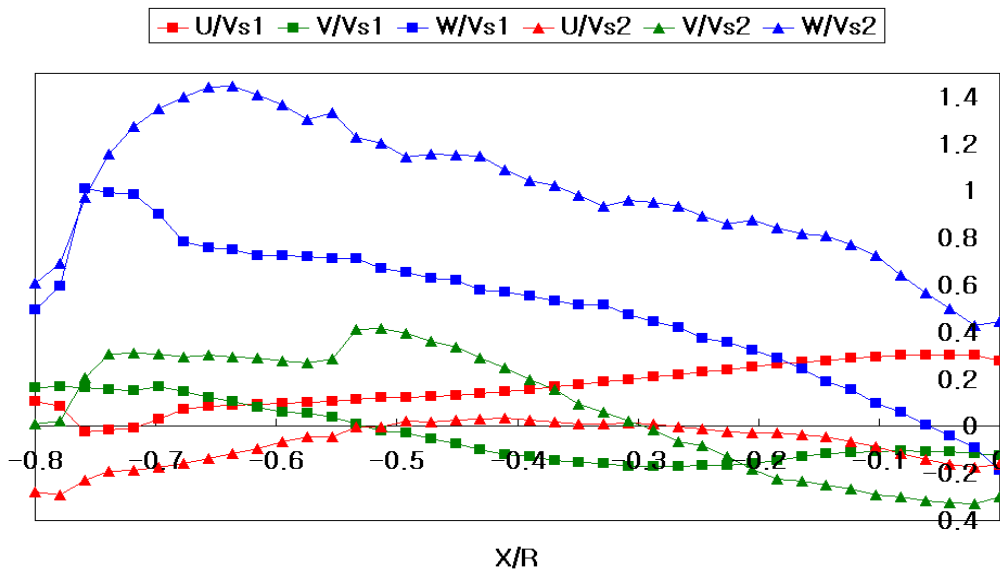


Fig. 3.2.21 (d) The dimensionless velocity at the $Y/R=0.01179$ & $Z/R=0$ (mean).

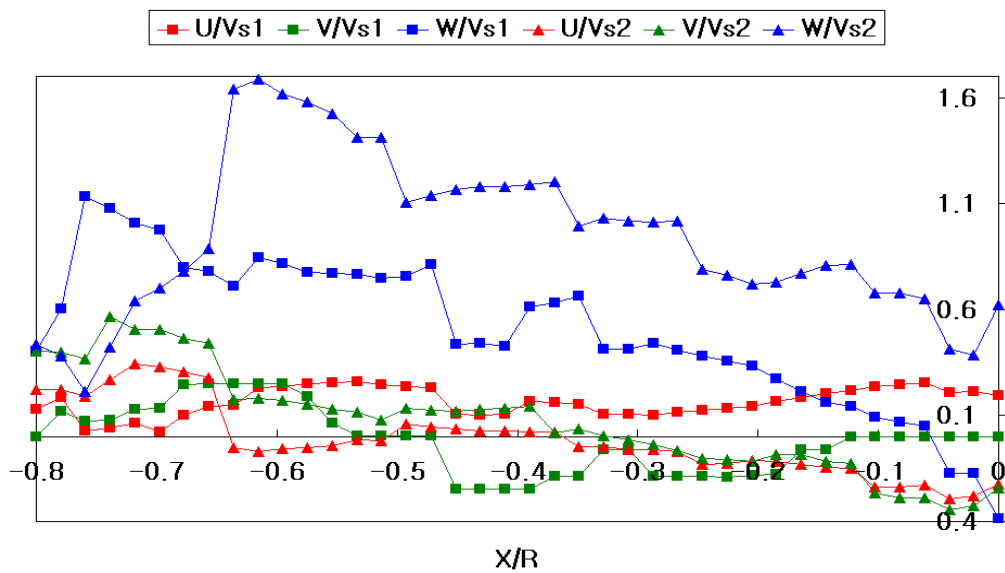


Fig. 3.2.22 (a) The dimensionless velocity at the $Y/R=0.318462$ & $Z/R=0$ (1/96).

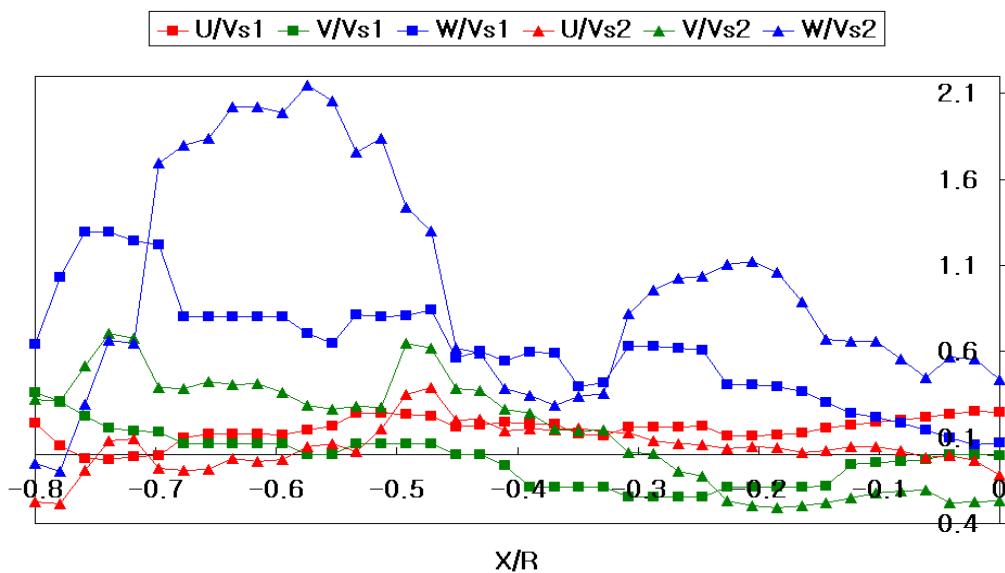


Fig. 3.2.22 (b) The dimensionless velocity at the $Y/R=0.318462$ & $Z/R=0$ (48/96).

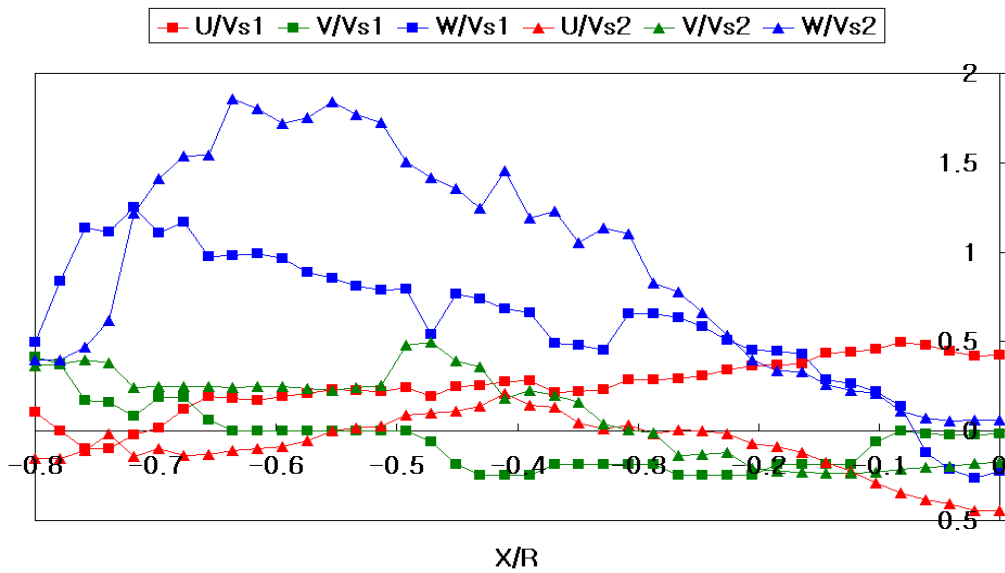


Fig. 3.2.22 (c) The dimensionless velocity at the $Y/R=0.318462$ & $Z/R=0$ (96/96).

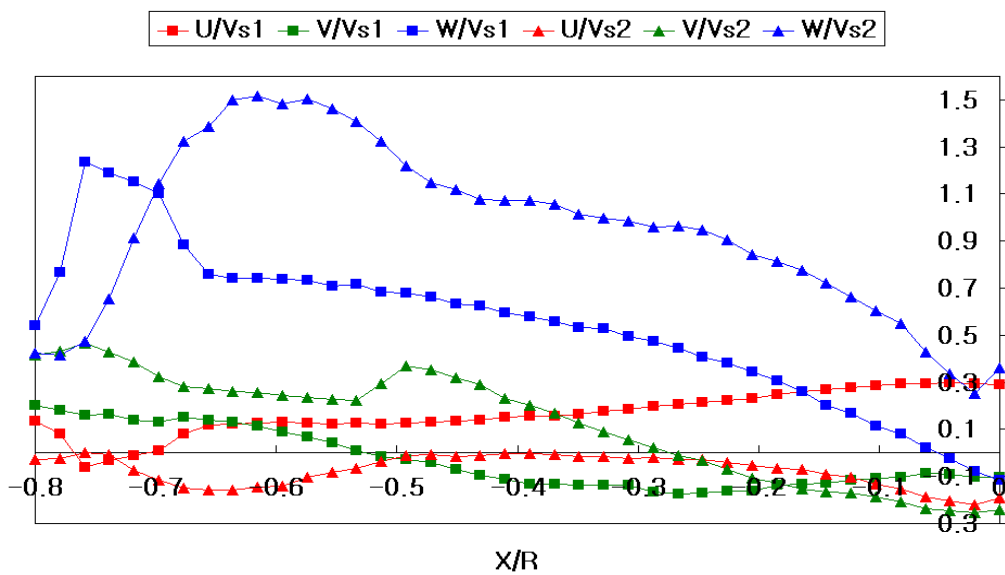


Fig. 3.2.22 (d) The dimensionless velocity at the $Y/R=0.318462$ & $Z/R=0$ (mean).

3.2.4 Y/R 단면에서의 수직관내 선회류 유동장 특성 분석

Fig. 3.2.23에서 Fig. 3.2.25까지는 무차원축 Y/R 와 무차원 속도 U/V_{S1} , V/V_{S1} , W/V_{S1} , U/V_{S2} , V/V_{S2} , W/V_{S2} 의 관계를 그래프로 나타낸 것으로 총 96장의 이미지중 (a)는 첫 번째에 해당하는 이미지이며 (b)는 48번째에 해당하는 이미지를 나타내고 (c)는 96번째에 해당하는 이미지를 나타내었으며 (d)는 총 이미지를 가지고 평균화한 것이다. 각각의 이미지를 선회류 속도 즉, $V_{S1}=1.858m/s$ 와 $V_{S2}=2.4653m/s$ 로 무차원화 하였다.

여기서 Fig. 3.2.23에서 Fig. 3.25까지는 Z/R=0으로 고정시키고 X/R의 변화에 따른 Y/R 단면에서의 무차원 속도 변화를 살펴보았다.

Fig. 3.2.23은 관 중심에서 -Stream(X)방향으로 약 $0.8D$ 와 Span(z)방향으로 $0D$ 인 곳에서의 무차원 속도분포를 나타낸 것으로 (a), (b), (c), (d)의 경우 모두 U, V성분은 어느 지점에서 일정하게 유지하는 반면에 W성분은 불안정한 모습을 보인다. 이는 X/R의 단면에서의 무차원 속도분포에서 살펴본 경우와 같이 선회류가 W성분에 의해서 크게 좌우가 됨을 알 수 있다. 이는 W성분이 크게 나타남으로 인하여 부유 실린더가 불안정한 궤도를 보이고 있으며 (d)경우와 같이 평균화한 무차원 속도분포에서 부유 실린더가 안정한 궤도를 유지할 수 있게 하는 조건을 확인할 수 있다. 이는 선회류는 W성분에 의해서 좌우되며 W성분을 안정화 시키면 수직관내의 부유 실린더를 안정화 시킬 수 있다는 것을 예측할 수 있다.

Fig. 3.2.24는 관 중심에서 -Stream(X)방향으로 약 $0.6D$ 와 Span(z)방향으로 $0D$ 인 곳에서의 무차원 속도분포를 나타낸 것으로 (a), (b), (c), (d)의 경우 모두 U, V성분은 어느 지점에서 일정하게 유지하는 반면에 W성분은 불안정한 모습을 보인다. (d)의 경우에서는 평균화한 무차원 속도분포를 나타낸 것으로 다른 경우 보다는 안정한 경향을 보임을 확인할 수 있었고 이전의 Fig. 3.2.23보다는 W성분이 안정화됨을 확인할 수 있다.

Fig. 3.2.25는 관 중심에서 $Stream(X)$ 방향 $0D$ 와 $Span(z)$ 방향으로 $0D$ 인 곳에서의 무차원 속도분포를 나타낸 것으로 (a), (b), (c), (d)의 경우 모두 U , V 성분은 어느 지점에서 일정하게 유지될 하는 반면에 W 성분은 불안정한 모습을 보인다. (d)의 경우에는 평균화한 무차원 속도분포를 나타낸 것으로 다른 경우 보다는 안정한 경향을 보임을 확인할 수 있었고 관의 중심이므로 다른 두 경우에 비하여 U , V 성분 및 W 성분도 가장 안정화 성향을 보였다.

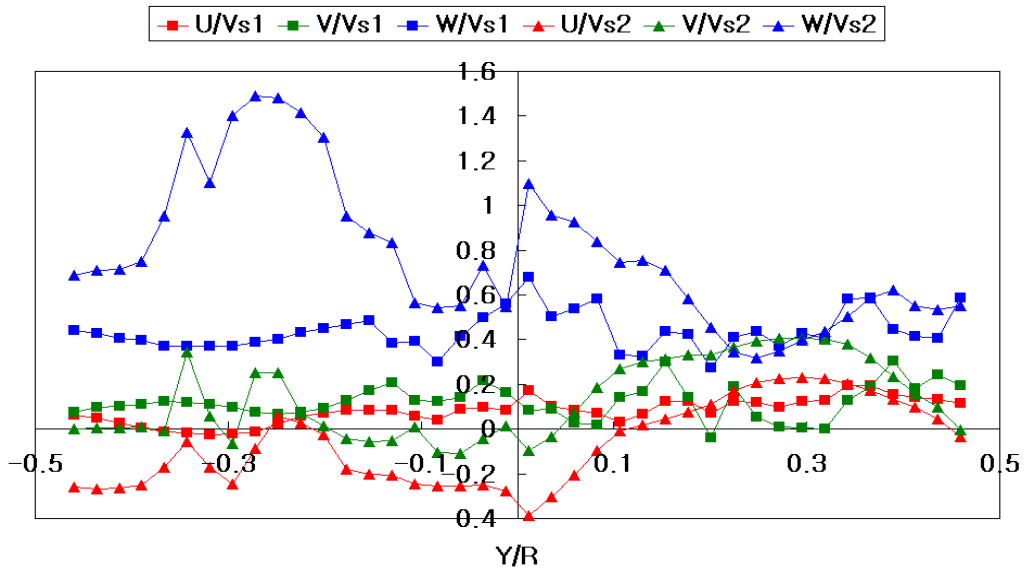


Fig. 3.2.23 (a) The dimensionless velocity at the $X/R=-0.8$ & $Z/R=0$ (1/96).

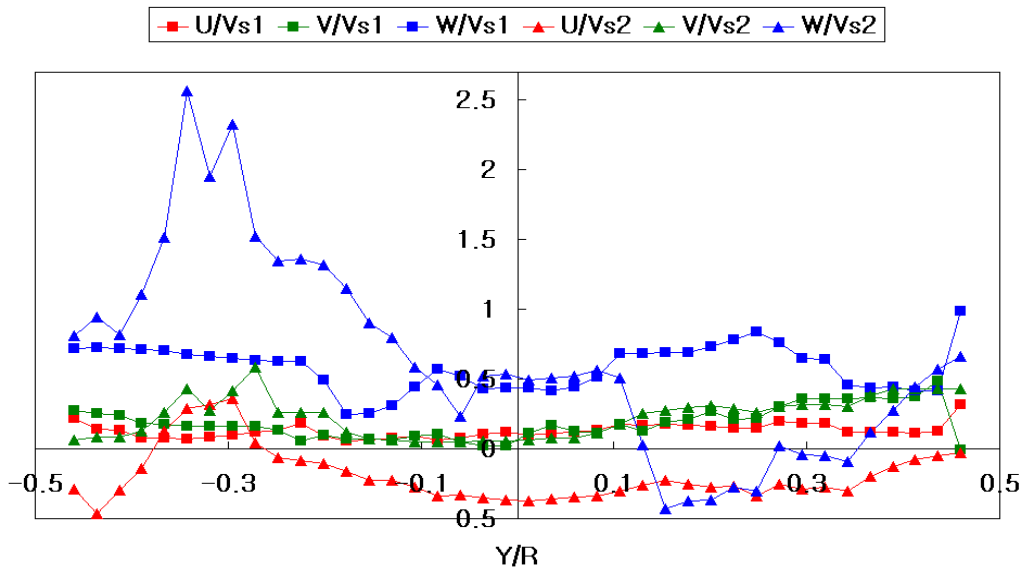


Fig. 3.2.23 (b) The dimensionless velocity at the $X/R=-0.8$ & $Z/R=0$ (48/96).

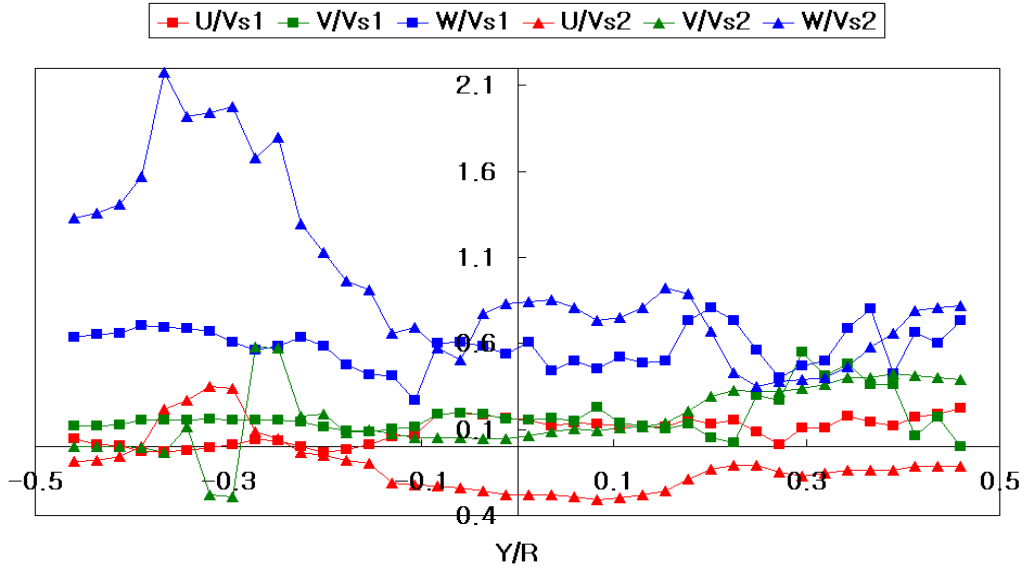


Fig. 3.2.23 (c) The dimensionless velocity at the $X/R=-0.8$ & $Z/R=0$ (96/96).

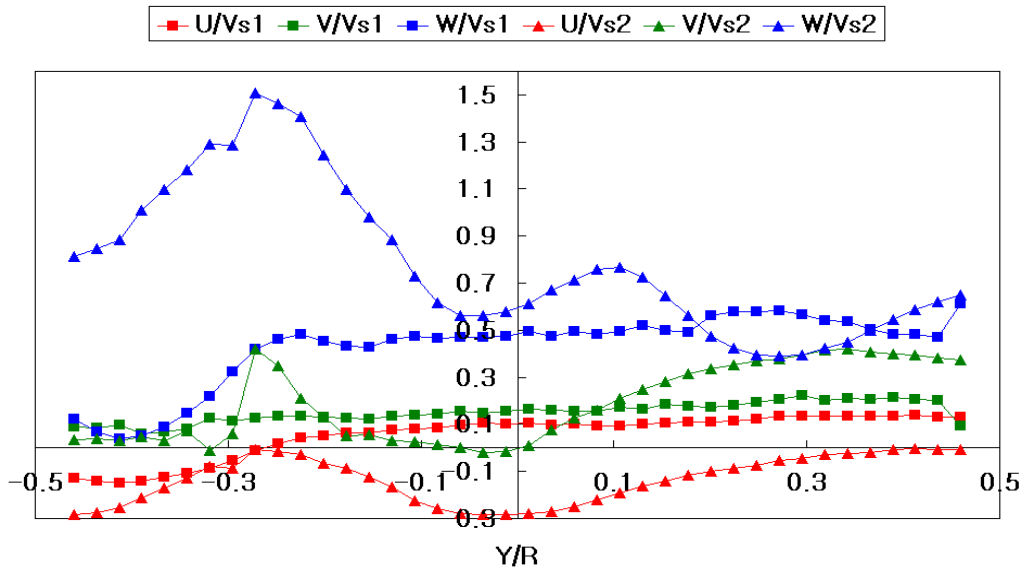


Fig. 3.2.23 (d) The dimensionless velocity at the $X/R=-0.8$ & $Z/R=0$ (mean).

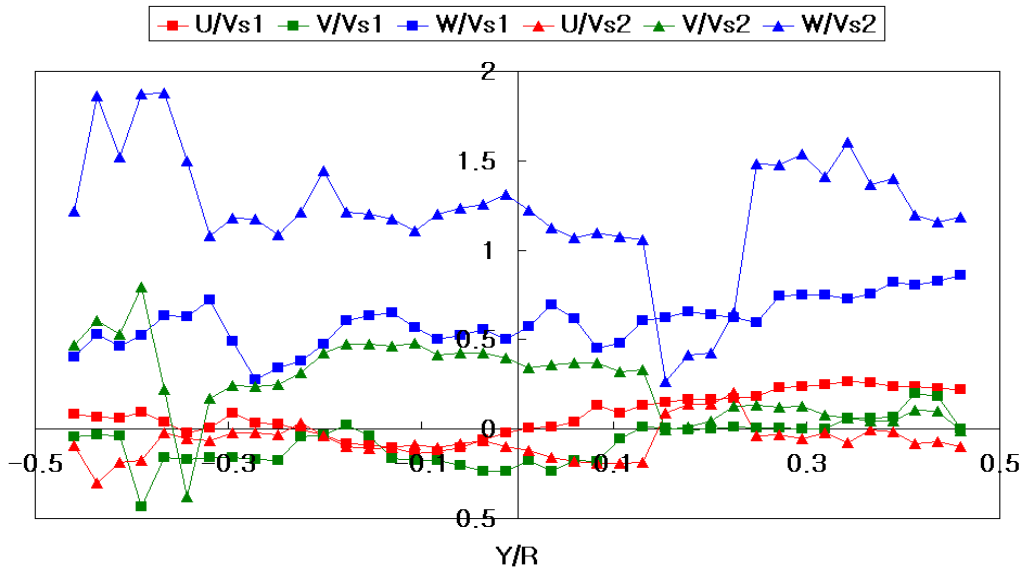


Fig. 3.2.24 (a) The dimensionless velocity at the $X/R=-0.51282$ & $Z/R=0$ (1/96).

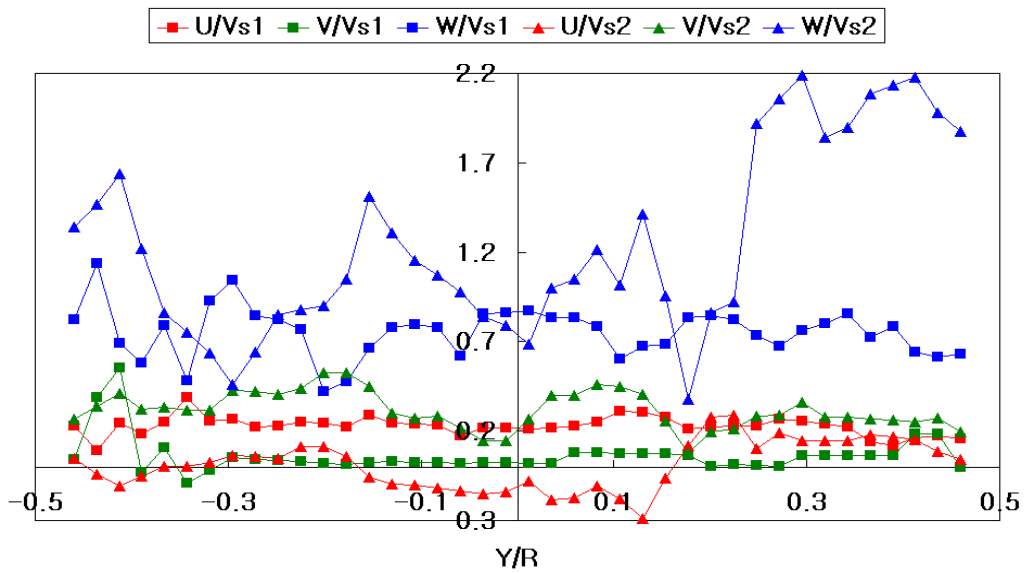


Fig. 3.2.24 (b) The dimensionless velocity at the $X/R=-0.51282$ & $Z/R=0$ (48/96).

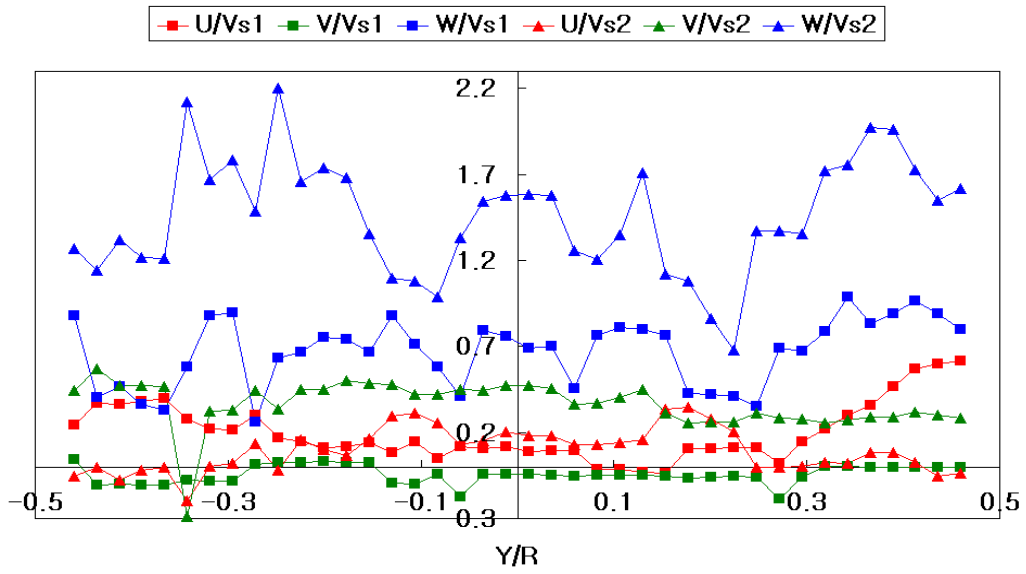


Fig. 3.2.24 (c) The dimensionless velocity at the $X/R=-0.51282$ & $Z/R=0$ (96/96).

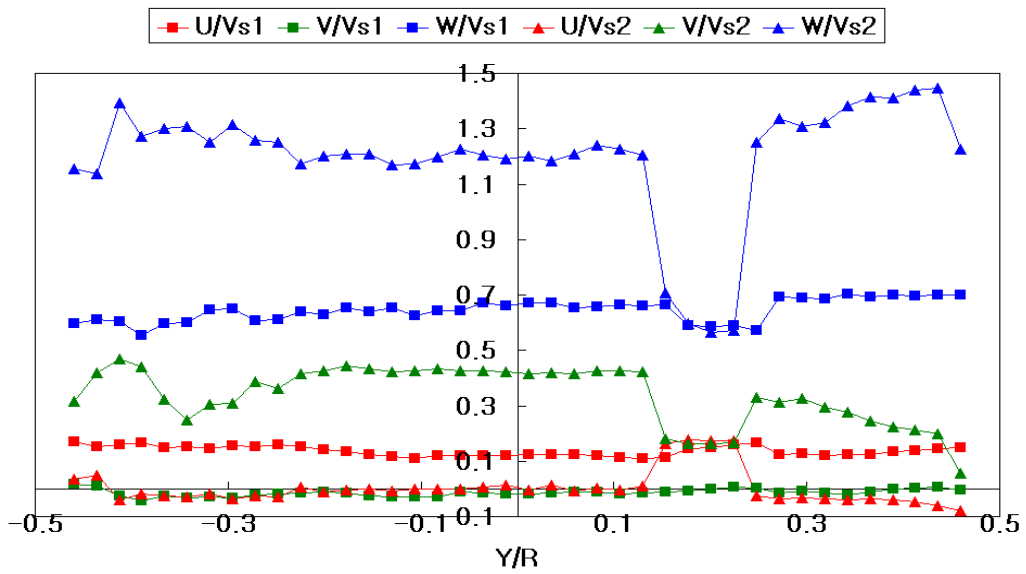


Fig. 3.2.24 (d) The dimensionless velocity at the $X/R=-0.5128$ & $Z/R=0$ (mean).

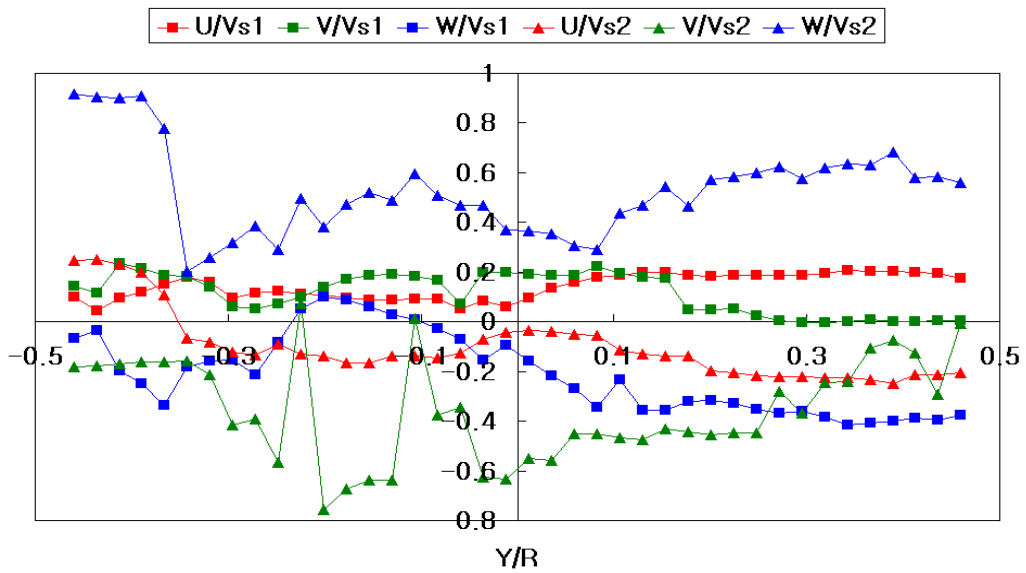


Fig. 3.2.25 (a) The dimensionless velocity at the $X/R=0$ & $Z/R=0$ (1/96).

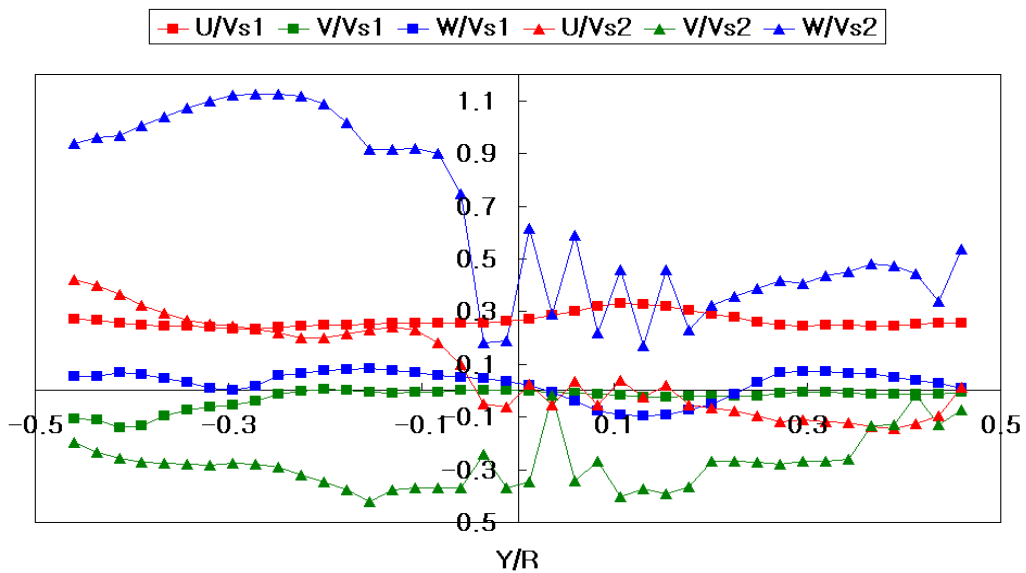


Fig. 3.2.25 (b) The dimensionless velocity at the $X/R=0$ & $Z/R=0$ (48/96).

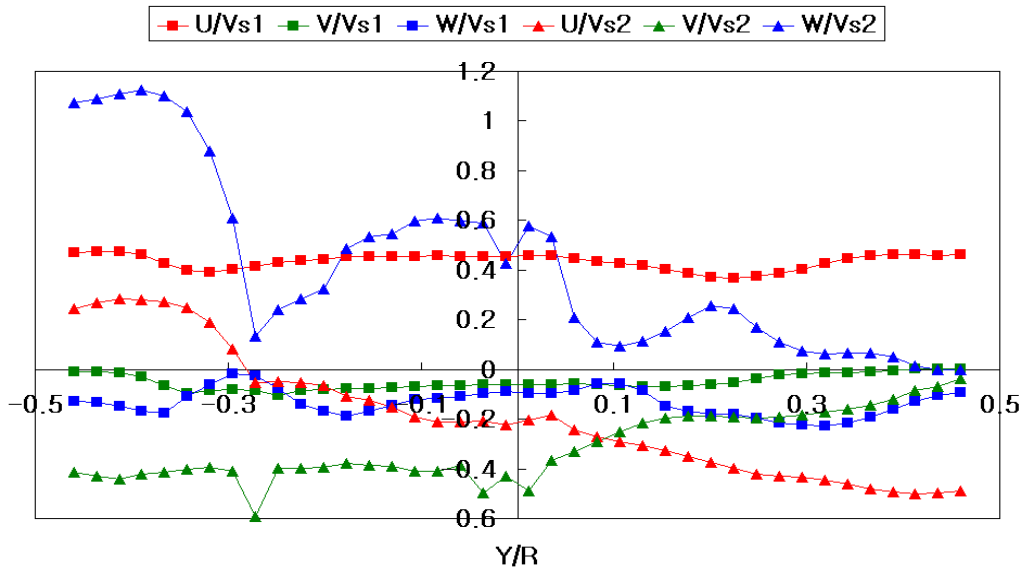


Fig. 3.2.25 (c) The dimensionless velocity at the $X/R=0$ & $Z/R=0$ (96/96).

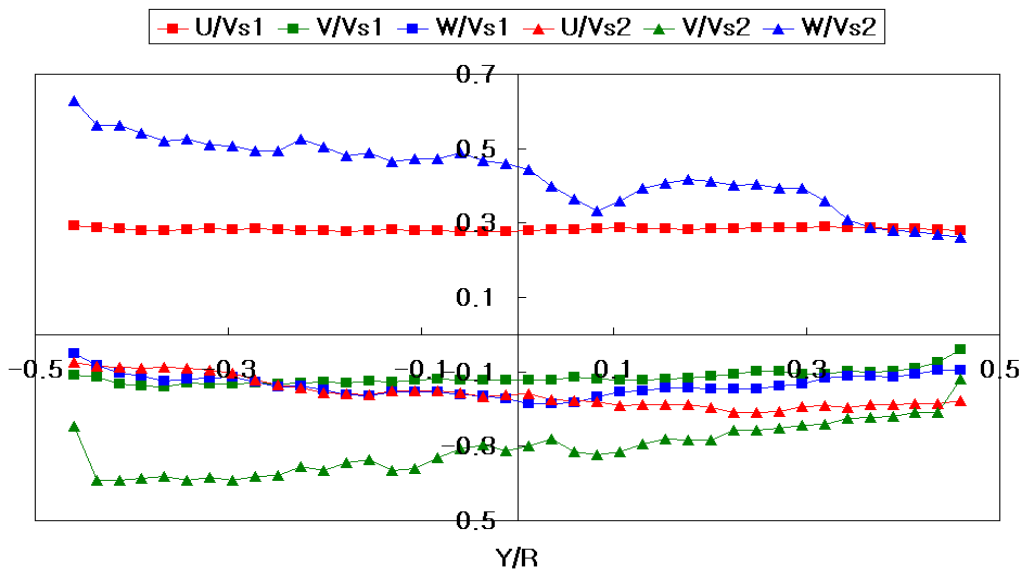


Fig. 3.2.25 (d) The dimensionless velocity at the $X/R=0$ & $Z/R=0$ (mean).

제 4 장 결 론

본 연구에서는 먼저 X/R, Y/R의 축에 대한 무차원 속도 U/V_{S1} , V/V_{S1} , W/V_{S1} , U/V_{S2} , V/V_{S2} , W/V_{S2} 의 관계를 도식화하여 수직관내의 선회류 유동장의 특성을 살펴 볼 수 있었으며, 선회류내의 부유 실린더가 안정한 궤도를 유지할 수 있는 조건을 살펴볼 수 있었다. 유량변화에 따른 부유 실린더의 위치변화는 부유 실린더의 안정화 궤도와는 별개의 문제이며 다만 부유 실린더의 안정화 궤도가 대략 20cm 정도 상승하는 효과를 얻을 수 있었다. 유속이 증가함에 따라 부유 실린더의 불안정화가 증가하는데 이는 유속증가에 따른 선회류(w)성분의 증가에 기인한다. 이에 부합하여 부유 실린더의 안정화 궤도를 유지시키기 위해서는 선회류(w)성분의 안정화가 최우선시 되어야함을 확인할 수 있었다. 또한 3차원 Stereoscopic PIV 기법에 의해서 얻어진 이미지를 통해서 알 수 있듯이 수직관내에서의 유동은 반시계 방향으로 선회류가 발생하고 있다는 것을 가시화 했으며 정성적인 것 뿐 만 아니라 난류 운동에너지 및 레이놀즈 응력을 구함으로써 정량적인 데이터를 획득 할 수가 있었다.

수직관내에서의 선회류 유동장의 정량적, 정성적인 통계치를 데이터베이스화하기 위해서는 단일 case보다는 앙상블 평균에 통계처리를 하기 위해서 좀 더 많은 실험 데이터가 필요하다는 것을 알 수 있었다. 단일 case의 경우 순시변동치의 영향이 유동장에 크게 작용하게 되나 이들 값의 평균치를 사용함으로써 순시 변동치에 의한 영향을 완화할 수 있었다. 이를 위해서는 실험시 획득할 수 있는 이미지의 량을 늘림과 동시에 계속되는 반복실험을 수행하여 다량의 실험 데이터를 준비해야 한다.

참 고 문 헌

- [1] Horii, K., *Experimental and Theoretical study of Turbulent swirling Jets Issuing from a Round Orifice*, *Israel J. Technology.*, Vol.4, pp.44-54 (1990)

- [2] Tomita et al., *Trans. ASME J. Fluid Engineering.*, Vol.116, No.1-4, pp.620-646 (1994)

- [3] Masahiro. Takei, Mitsuaki. Ochi, Kiyoshi. Horii, Hui. Li, Yoshifuru Saito, *Discrete wavelets auto-correlation of axial turbulence velocity in spiral single phase flow*, *Powder Technology.*, Vol.112, pp.289-298 (2000)

- [4] Masahiro. Takei, *Transporting Particles without Touching Pipe Wall*, *ASME Fluids Engineering*, (1997)

- [5] Hui. Li, *Research of Swirling Flow Pneumatic Conveying System in a Vertical Pipeline(Coefficients of Power Consumption and Additional Pressure Drop)*, *JSME*, Vol.66.571 (1994)

- [6] Yuji. Tomita, *Research of Swirling Flow Pneumatic Conveying System in a Horizontal Pipeline(Particle Velocity and Concentration Profiles)*, *JSME.*, Vol.59.558, (1993)

- [7] Hui. Li, Yuji. Tomita, A Numerical Simulation of Swirling Flow Pneumatic Conveying in a Horizontal Pipeline, *JSME.*, Vol.60.575, (1994)
- [8] Prasad A. K, Adrian R. J, Stereoscopic particle image velocimetry applied to liquid flows, *Exp. Fluids.*, 15, pp.49-60
- [9] Nishino K, Kasagi N, Hirata M, Three-dimensional particle tracking velocimetry based on automated digital image processing, *ASME J. Fluids Eng.* Vol.111 No.4, pp.384-391
- [10] Doh, D. H, Cho, K. R, Cho, Y. B, Development of a new 3D-PTV using genetic algorithm, Proc. of 3rd Pacific Symp. on Flow Visualization and Image Processing, PSFVIP-3, Maui, Hawaii, Mar.18-21, pp241-242. (2001)
- [11] 천인국, 윤영택 편저 “기초편 영상처리” 기한재 pp.73-87
- [12] Prasad A. K, Adrian R.J, Scheimpflug stereocamera for particle image velocimetry to liquid flows, *Appl Optics*, Vol.34, pp.7092-7099
- [13] Prasad A. K, Stereoscopic particle image velocity, *Exp.Fluids.*, 29, pp.103-116
- [14] Hu H, Saga T, Kobayashi T, Taniguchi N, and Yasuki M, Dual-plane stereoscopic particle image velocimetry: system set-up and its application on a lobed jet mixing flow, *Exp.Fluids.*, Vol31,pp277-293

- [15] Soloff S. M, Adrian R. J. and Liu Z. C, *Distortion compensation for generalized stereoscopic particle image velocimetry*, *Meas. Sci. Technol.*, Vol.8, pp.1441-1454

감사의 글

레이저에 의해 발광되는 입자가 마냥 멋있어 보여서 실험실에 들어와 교수님과 실험실 동료들과 인연을 맺은 지도 벌써 3년이라는 세월이 흘렀습니다. 석사과정을 마치고 떠나는 형들을 보면서 나도 언젠가는 석사과정을 마치고 멋진 모습으로 실험실을 떠날 것이라고 생각한지가 엇그제 같은데 이제 졸업 논문을 마치고 정말 실험실을 떠나려 합니다.

우선 부족한 저를 이 자리까지 올수 있게 길을 열어주신 도덕희 교수님께 정말 감사의 말씀을 드리고 싶습니다. 교수님께서서는 항상 저희들에게 35세의 자신의 모습과 50세의 모습을 염두 하면서 모든 일에 최선을 다하는 마음가짐으로 생활하라고 말씀하셨습니다. 부족한 제 논문을 심사해주신 김동혁 교수님과 윤상국 교수님께 감사의 마음을 전하고 싶습니다.

그리고 냉동공조공학과 및 기계공학과 모든 교수님들께 다시 한번 감사의 마음을 전하고 싶습니다. 일본에서 박사과정을 마치시고 돌아오신 경래형, 언제나 조용조용한 목소리로 후배들을 대하시는 조용범형, 이제 결혼을 앞에 두고 있으신 편용범형, 행복하게 사세요. 그리고 일본에서 열심히 공부하고 계신 원제형, 호주에서 일하시면서 공부중인 장덕이형, 실험실 생활에서부터 모든 실험 및 전공지식에 대해 차근차근 가르쳐 주시고 논문을 마무리 할 수 있게 도와주신 태규형, 언제나 말썽을 부리고 사고를 쳐도 눈감아 주시고 힘내라고 말씀해주신 천수형, 지금 수원에서 열심히 회사에 다니는 종찬, 미래의 곰탕집 사장님 영우, 항상 좋게 모든 사람들을 대하는 승현, 실험실생활을 처음부터 마지막까지 함께한 윤석, 열전달실험실의 나의 동기들 원호, 종명 그리고 태영이형, 후배 종욱, 형처럼 저를 감싸준 구만, 스피드광 경록, 항상 미안한 후배 지용 그리고 95동기들, 언제나 멀리 떨어져있지만 항상 응원해주는 고향친구들(현수,준상,정민,승룡,인학,홍록,진우),나의 사촌 동과 동혁, 하숙집 후배들(석봉,

재규,재환), 이번 해에 실험실에 들어와서 정말 열심히 공부하고 일 하면서 최고의 프로그래머를 꿈꾸는 주호, 항상 얼굴에 웃음꽃을 지닌 현호, 내년에 새로운 계획을 품고 휴학하는 병열, 귀염둥이 인승에게도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 여러분들이 있었기에 제가 여기 이 자리에 있습니다.

세상의 즐거움과 슬픔을 알 수 있도록 빛을 보게 해주신 부모님, 마냥 동생들에게 양보하는 누나, 우리 막내 경숙이, 아들 노릇을 하지 못하는 저를 대신해서 아들처럼 부모님을 대하시는 매형, 그리고 이쁘고 깜찍하게 잘 자라고 있는 조카 도희, 내년이면 세상의 빛을 보는 둘째조카에게도 감사의 맘 전합니다. 일본에 있는 카네코 에게도 이 소식을 전하고 싶습니다. 또한 친지 분들께도 정말 감사하다는 마음을 전합니다.

지금까지 살아오면서 감사해야 할 분들은 정말 많았는데 이 기회에 다시 한번 감사하다는 말을 전하고 싶습니다. 정말 감사합니다.

자식들이 잘되기만을 바라시고 고생하신 부모님 정말 감사하고 사랑합니다. 이 논문을 두 분께 바칩니다. 사랑합니다. 앞으로 정말 멋진 아들의 모습을 보여 드리겠습니다.

2005년 2월

아치섬에서 신동진 배상