[UCI]I804:24011-200000232731

2006年度
碩士學位論文

PTV system과 CFD code를 이용한 Cylinder model 周圍의 3차원 流動解釋에 關한 比較研究

朝鮮大學校 大學院

船 舶 海 洋 工 學 科

嚴 基 昶

PTV system과 CFD code를 이용한 Cylinder model 周圍의 3차원 流動解釋에 關한 比較研究

A Comparative Study of 3-D flow analysis around a cylinderical model using PTV system and CFD code

2006年 8月 25日

朝鮮大學校 大學院

船 舶 海 洋 工 學 科

嚴 基 昶

PTV system과 CFD code를 이용한 Cylinder model 周圍의 3차원 流動解釋에 關한 比較研究

指導教授　李　貴　珠

이 論文을 工學碩士學位 申請 論文으로 提出함.

2006年　4月　19日

朝鮮大學校 大學院

船 舶 海 洋 工 學 科

嚴　基　昶

嚴基昶의 碩士學位 論文을 認准함

委員長　朝鮮大學校　敎授　　左 淳 元　印

委　員　朝鮮大學校　敎授　　李 貴 珠　印

委　員　朝鮮大學校　敎授　　朴 齊 雄　印

2006年　5月　29日

朝鮮大學校 大學院

목 차

List of Tables

List of Figures

Abstract

제 *1* 장 서 론

1.1 연구개요 ····· 4

1.2 유동가시화 기법의 종류 및 특성 ····· 6

1.2.1 유동가시화 기법의 개요 ····· 6

1.2.2 고전적 유동가시화(Flow visualization)기법의 종류 ····· 7

1.2.3 분산법 ····· 13

1.2.4 단층촬영법 ····· 15

제 *2* 장 *Particle Tracking Velocimetry System*

2.1 3차원 PTV-system 특성 ····· 16

2.1.1 3차원 PTV-system 개요 ····· 16

2.1.2 3차원 PTV-system 원리 ····· 17

2.1.3 One frame 3차원 PTV system ····· 25

2.2 Circular Dynamic Stereo PTV-system ····· 27

2.2.1 Circular Dynamic Stereo PTV-system의 개요 ····· 27

2.2.2 Circular Dynamic Stereo PTV-system의 원리 ····· 30

제 3 장 *Circular Dynamic Stereo PTV-system*을 이용한 *Model* 주위의 유동가시화 및 계측
3.1 실험설비 ····· 35
3.2 유동가시화 실험 및 계측결과 ····· 40
3.2.1 유동가시화 실험 및 계측 ····· 40
3.2.2 실험 및 계측결과 ····· 46

제 4 장 *CFD-code*를 이용한 유동해석
4.1 FLUENT를 이용한 유동해석 ····· 50
4.1.1 유동해석 조건 설정 ····· 50
4.1.2 유동해석 및 결과 ····· 50

제 5 장 *Circular Dynamic Stereo PTV-system*과 *CFD-code*의 계측결과 비교
5.1 PTV-system result ····· 52
5.2 CFD-code result ····· 56

제 6 장 *PTV-system*을 이용한 *2500TEU container* 모형선의 유동 계측
6.1 계측장비 ····· 61
6.2 유동계측 ····· 64
6.3 계측결과 및 고찰 ····· 66

제 7 장 결 론

List of Tables

Table 1-1 각 가시화 기법의 적용 유속 범위 ····· 12
Table 6-1 Principle Dimension of 2500TEU container Ship ····· 60
Table 6-2 Flow velocity of each point ····· 69

List of Figures

Fig. 1-1 유막법 실험결과 ····· 7
Fig. 1-2 유막법 개략도 및 유막을 바르는 방법 ····· 8
Fig. 1-3 유점법 실험결과 ····· 8
Fig. 1-4 표면 터프트법 개략도 ····· 9
Fig. 1-5 깊이 터프트(Depth Tuft) 부착 방법 ····· 9
Fig. 1-6 깊이 터프트(Depth Tuft)법 실험모습 ····· 9
Fig. 1-7 터프트 그리드(Tuft Grid)법 실험모습 ····· 10
Fig. 1-8 수소기포법 실험모습 ····· 12
Fig. 1-9 Generation of laser sheet ····· 13
Fig. 1-10 Two example of particle tracking ····· 14
Fig. 1-11 Diagram of a projection as used in tomography ····· 15
Fig. 2-1 Arrangement of measurement system ····· 18
Fig. 2-2 Principle of camera calibration ····· 19
Fig. 2-3 Principle of 3-D position decisions ····· 20
Fig. 2-4 Temporal-spatial pair matching(T-S method) ····· 22
Fig. 2-5 Procedure of T-S pair matching method ····· 23
Fig. 2-6 Spatial-Temporal pair matching(S-T method) ····· 24
Fig. 2-7 Procedure of S-T pair matching method ····· 24
Fig. 2-8 Relation between NTSC camera signal and AOM signal ····· 26
Fig. 2-9 Experimental Setup ····· 27
Fig. 2-10 Example of the streaks of tracer particle ····· 28
Fig. 2-11 Principle of the motion stereoscopic vision ····· 30
Fig. 2-12 example of 2-D analysis ····· 31
Fig. 2-13 The image on the TV Monitor ····· 32
Fig. 2-14 The image on the TV Monitor ····· 32
Fig. 2-15 Identifying by difference of threshold ····· 33
Fig. 2-16 Experimental setup using multi laser spots ····· 34
Fig. 2-17 Prism rotating system ····· 34
Fig. 2-18 Frame composition ····· 35
Fig. 2-19 Analysis of spiral streak ····· 35
Fig. 2-20 Accumulation of pixel intensities along the streak ····· 36
Fig. 2-21 Measurement of the size of annular streak ····· 36

Fig. 2-22 Extraction of the center of streak ····· 36
Fig. 3-1 Circulating Water Channel ····· 38
Fig. 3-2 Cylinder Model for Experiment ····· 39
Fig. 3-3 Scheme of PTV system ····· 40
Fig. 3-4 Scheme of image processing and motor control system ····· 41
Fig. 3-5 Chart of calibration ····· 43
Fig. 3-6 Setup for Calibration ····· 44
Fig. 3-7 Detection of annular streak & pairs of each coordinates ····· 44
Fig. 3-8 Pito tube ····· 45
Fig. 3-9 pressure cell ····· 46
Fig. 3-10 Amplifier ····· 46
Fig. 3-11 $\mu\epsilon$ vs $H(m)$ graph ····· 47
Fig. 3-12 $V(m/s)$ vs $\tilde{N}(rpm)$ graph ····· 47
Fig. 3-13 Annular Streak Numbering ····· 49
Fig. 3-14 Velocity Vectors of Each Particles ····· 49
Fig. 3-15 Velocimetry ····· 50
Fig. 3-16 Flow around Cylinder Model in PTV ····· 50
Fig. 3-17 Chart of measurement ····· 51
Fig. 4-1(a) CWC & Cylinder model ····· 52
Fig. 4-1(b) CWC & Cylinder model ····· 52
Fig. 4-2 Stream lines of cylinder model ····· 53
Fig. 5-1(a) Flow direction around cylinder model ····· 54
Fig. 5-1(b) Flow direction around cylinder model ····· 55
Fig. 5-2 Stream lines of the flow behind Cylinder model ····· 56
Fig. 5-3 Flow direction & Stream lines of the flow behind Cylinder model ····· 57
Fig. 5-4 Stream lines & Velocity vectors colored byvelocity magnitude of cylinder model ····· 58
Fig. 6-1 Body plan of 2500TEU container ship ····· 60
Fig. 6-2 Camera system of PTV-system ····· 62
Fig. 6-3 Calibration board & Lighting system ····· 63
Fig. 6-4 Particle injection system & collecting system ····· 63
Fig. 6-5 Schematic diagram of PTV-system mesurement ····· 64
Fig. 6-6 model ship & mesuring point ····· 64
Fig. 6-7 Annular streak image ····· 65
Fig. 6-8 Analysis of image ····· 65

Fig. 6-9 3-D display of test-1 vector result ····· 66
Fig. 6-10 display of test-2 vector result ····· 67
Fig. 6-11 3-D flow direction view of test-2 result ····· 67
Fig. 6-12 extract isoline view(Y-axis) of test-2 result ····· 68
Fig. 6-13 extract isoline view(X-axis) of test-2 result ····· 68
Fig. 6-14 Speed measurement of flow using propeller velocitymeter ····· 69

ABSTRACT

Comparison study of three Dimensional Flow Analysis around Model using Circular Dynamic Stereo PTV-system & CFD-code

Eom, Ki-Chang
Advisor : Prof. Lee, Kwi-joo, Ph.D.
Department of Naval Architecture
& Ocean Engineering,
Graduate School of Chosun University

By introducing a refractor to the lens of a camera it is possible to take an accurate measurement of three dimensional position of any object by one camera. When the refractor is rotated around the optical axis at high speed, the tracer particles create annular streaks due to the effect caused by the refractor's circular shift. Since the radius of each annular streak, of a point being measured, is inversely proportional to its distance from the camera, it is therefore possible by analyzing these annular streaks, to determine the three dimensional positional information of the point. In this paper, three dimensional measurement by CCD camera using refractor is introduced and applied for the flow around Cylinder model. The use of 3-Dimensional information obtained by computer vision system is attractive in various fields and the automatic inference of 3-D information has been and continuous to be one of the primary aims of computer vision system. In order to obtain 3-Dimensional information, some methods have been developed up to now. One is based on stereovision with two or more TV cameras and another one is based on

slit-ray projection method. In stereovision method, the depth of measuring points is measured by measuring the disparity of matching pairs betweenframes viewed from different angle. One problem related to the stereovision is finding matching pairs between frames causes problematic computer processing since there are several possibilities for the choice of matching points. In the slit ray projectionmethod, the measuring object is reconstructed by many images that include a structured light (slit ray) at the different position. The quantitative measurement is established by considering the geometric configuration between a TV camera and a structured light. In this method, the measuring object must be stationary while the structured light (slit ray) is scanned over the surface of the object. Therefore, moving object cannot be measured by the slit ray projection method. In this paper, a new technique tomeasure the instantaneous three-dimensional positions of multiple points by analyzing a single image is introduced. The main feature of our technique is to use a single TV camera with an image shifting apparatus[1]. By introducing a refractor on the TV camera lens, the image of the measuring point is displaced on the image plane with the corresponding displacements related to the distances between the TV camera and the measuring point[2][4]. The magnitude of displacement on the image plane is inversely proportional to the distance between the TV camera and measuring point. When the refractor is rotated physically at high speed during the exposure of the TV camera, annular streaks of measuring points appear on an image since the rotational shift is added to the image. Since the size of the annular streak is inversely proportional to the distance of the measuring point

from the camera, each annular streak has three-dimensional information of a measuring point. The three-dimensional information can be calculated by analyzing annular streaks. That is, center position and the size of annular streak can be converted to three-dimensional world coordinate. Reliable information can be obtained since our system is free from difficult matching task of measuring points between different frames. This method has been applied to the measurement of tracer particles in flow and obtained the satisfactory results. In this paper, the surface measurement of moving surface such as swinging water is introduced for one of the applications of our system. This measurement can be realized by utilizing the peculiarity of our circular dynamic method and multi laser spots projector. These results proved a feasibility of our method. Circular dynamic stereo has special advantages as it enables a 3-D measurement using a single TV camera. Annular streaks are recorded using this system and the size of annular streaks directly concerns to the depth from the TV camera. That is, the size of annular streaks is inversely proportional to the depth fromthe TV camera and the depth can be measured by image processing technique. Since the three dimensional information can be extracted from a single image, moving points such as moving particles or moving surface can be measured. Experimental results show the feasibility of our system. The concluding part includes a basic comparison between the CFD codes and the PTV system by analyzing the data sheet from the experiment conducted. Though more research work is needed in this field, we can see from the conducted experiments that PTV system is at par with the CFD code analysis methods.

제 1 장 서 론

1.1 연구개요

선박이나 해양구조물의 최적 설계를 위한 구조물 주위의 유동에 대한 연구는 오래 전부터 수행되어졌으며 대표적인 방법이 유동을 가시화하여 해석하는 것이다. 유동가시화에는 크게 실험계측에 의한 해석방법과 수치적 해석 방법으로 나눌 수 있다.

유동가시화를 위해 예전부터 사용되어왔던 실험기법에는 여러 가지 있다. paint test, tuft test, dye injection test, hydrogen bubble, smoke등을 이용한 고전적인 유동가시화 방법은 전체 유동장의 정성적인 정보를 제공하지만 정확한 유동해석에 요구되는 정량적인 결과를 얻을 수 없다는 단점이 있다. 이와는 반대로 LDV(Laser Doppler Velocimetry), 열선유속계등과 같은 기존의 유속측정장비는 한 측정 점에서 순간속도를 정량적으로 정확히 제시하지만 전체 유동장의 공간적 구조, 즉, 순간 속도장을 짧은 시간 내에 구하기는 거의 불가능하다. 최근 컴퓨터와 전자계측기술, 화상기법등의 발달로 인하여 기존의 단점들을 보완한 정량적인 유동가시화 기법들이 선진국을 중심으로 개발되고 있다. 실험의 결과를 화상 처리하여 직접 눈으로 확인할 수 있는 방법들이 개발되어 사용 중에 있으며 지금도 계속적으로 보다 간단하면서도 정확한 결과를 얻기 위한 노력이 계속되고 있다.

현재까지 개발된 화상처리기법은 주로 유동장내에 광원에 의한 얇은 막을 만들고 이를 통과하는 매체의 굴절률에 의하여 정량적인 속도측정을 함으로서 결과를 얻는 것이다. 즉 주어진 측정 시간 동안 움직인 유체의 변위를 측정하는 것으로써

주어진 시간이 짧을수록 더욱 정확한 측정이 가능하나 측정의 불확실성에 기인한 오차가 커지게 된다. 측정한 결과들을 컴퓨터로 처리하여 눈으로 결과들을 확인할 수 있도록 그래픽 처리를 하게 되는데 영상 기법에 관한 기존의 연구는 입자 변위 길이를 측정하는 방법에 따라 PSV(Particle Streak Velocimetry), PIV(Particle Image Velocimetry), PTV(Particle Tracking Velocimetry)등으로 나눌 수 있다..

본 논문에서는 제2장에서 PTV-system의 기본원리에 대해 설명하고 유동계측 실험에 사용한 Circular Dynamic Stereo PTV-system에 대해 설명하였다.

제3장에서는 위의 System을 이용하여 회류수조내에서 Cylnder Model 주위의 유동을 측정하고 그 결과를 해석하였으며 제4장에서 CFD-code를 이용하여 동일 모델에 대한 유동해석을 실시하였다. CFD-code로써 Fluent program을 이용하였으며 제3장과 제4장의 결과를 비교하여 실제 유동을 계측하는 실험을 통하여 얻어진 해석결과와 수치적 해석방법을 이용한 유동해석결과를 비교하여 논하였다.

연구결과 Circular Dynamic Stereo System은 수치적 해석에서 볼 수 없는 후류에 대한 실측이 가능하며 수치적 해석방법에 범할 수 있는 오류들을 줄일 수 있는 방법으로써 실제 유동의 3차원 해석이 가능한 시스템이다. 본 계측시스템은 유용성이 높을 것으로 판단되며 해양구조물의 유동 해석에도 적합한 시스템으로 사용될 수 있는 것으로 추정된다.

1.2 유동가시화 기법의 종류 및 특성

1.2.1 유동가시화 기법의 개요

눈에 보이지 않는 유체의 흐름을 보이게 하는 기술을 유동의 가시화기법(Flow Visualization Technique)이라고 한다. 선박이 물 위를 달릴 때에 선체표면 위에서 물이 어떤 모습으로 흘러가는가하는 것은 조선엔지니어들에게는 큰 관심거리이며 선형개발 및 성능개선에 중요한 요소가 된다.

선체표면 위를 물이 흐르는 선을 유선(Stream Line)이라고 하고 이러한 유선의 집합체를 유장이라고 말할 수 있다. 이러한 유선 및 유장을 선명하게 파악하기 위한 가시화기법 (혹은 가시화실험)의 목적은 물체 주변의 전체적인 유체의 흐름을 직접 눈으로 볼 수 있게 함으로써 새로운 현상을 발견하기도 하고 이론적인 설명의 단서를 제공해 주는데 있다.

한편, 흐름의 가시화기술은 일반적으로 유체 흐름을 주로 정성적으로 파악하고 있다고 할 수도 있겠으나, 보다 정량적인 계측을 위해서는 피토튜브(Pitot tube), 레이저 유속계(L.D.V.) 등의 장비를 이용하여 유체 흐름을 양적으로 계측하기도 한다.

paint test, tuft test, dye injection test, hydrogen bubble, smoke등을 이용한 고전적인 유동가시화 방법은 전체 유동장의 정성적인 정보를 제공하지만 정확한 유동해석에 요구되는 정량적인 결과를 얻을 수 없다는 단점이 있다. 이와는 반대로 LDV(Laser Doppler Velocimetry), 열선유속계등과 같은 기존의 유속측정장비는 한 측정 점에서 순간속도를 정량적으로 정확히 제시하지만 전체 유동장의 공간적 구조, 즉, 순간 속도장을 짧은 시간 내에 구하기는 거의 불가능하다. 최근 컴퓨터

와 전자계측기술, 화상기법등의 발달로 인하여 기존의 단점들을 보완한 정량적인 유동가시화 기법들이 선진국을 중심으로 개발되고 있다. 실험의 결과를 화상 처리하여 직접 눈으로 확인할 수 있는 방법들이 개발되어 사용 중에 있으며 지금도 계속적으로 보다 간단하면서도 정확한 결과를 위한 노력이 계속되고 있다.

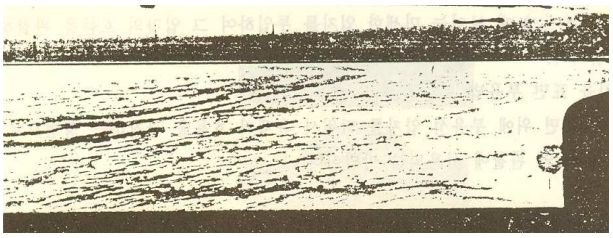
1.2.2 고전적 유동가시화*(Flow Visualization)* 기법의 종류

1.2.2.1 표면 트레이스*(TRACE)*법

이 방법은 물체의 표면에 용착할 수 있는 물질을 물체의 표면에 바르면 그 물질이 유체의 흐름에 의하여 어떠한 모양을 나타내게 되는데 그 모양을 관찰함으로써 유체의 흐름을 볼 수 있는 방법이다. 이 방법은 유동성 물질이 물체의 표면 위에 얇은 막을 형성하고 있어서 주로 경계층 내에서 유체의 흐름을 관찰하는 기법으로 사용되고 있다.

1)유막법

물체 표면에 도료를 칠하여 그 도료의 막이 변화하는 모양을 통하여 유체의 흐름을 알 수 있는 방법이다. 일반적으로 비교적 물체의 표면에서 유동 전단력이 큰 경우에 사용되고 있다.



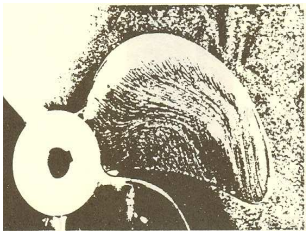


Fig. 1-1 유막법 실험결과

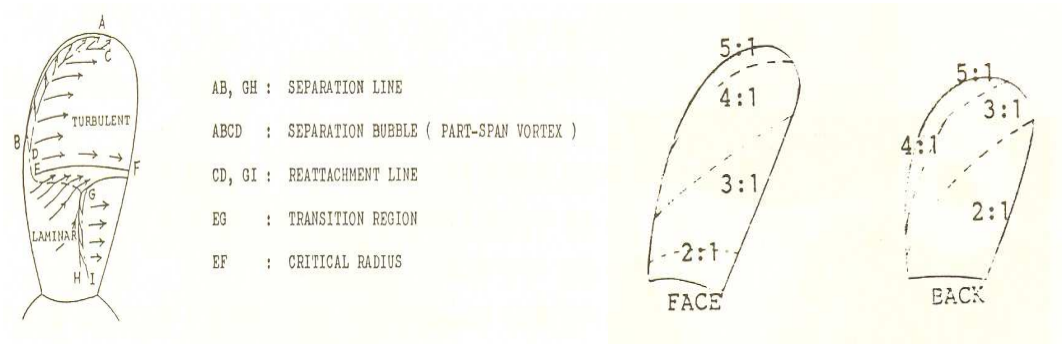


Fig. 1-2 유막법 개략도 및 유막을 바르는 방법

2)유점법

물체 표면의 특정한 지점에 미세한 도료의 점을 만들어서 그 도료가 이동하는 모양을 관찰함으로써 유체의 흐름을 알 수 있는 방법이다.

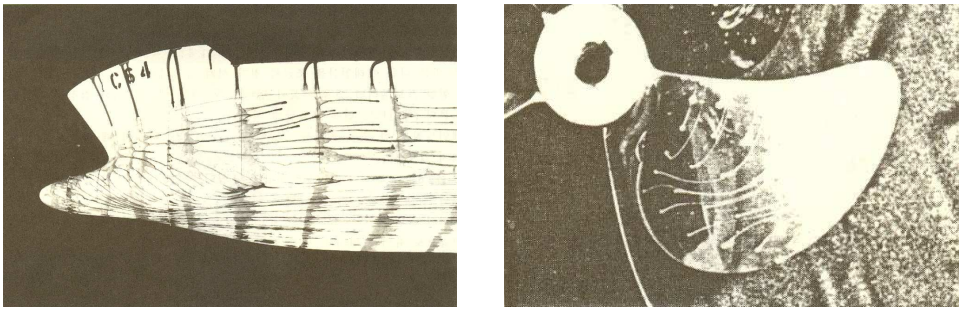


Fig. 1-3 유점법 실험결과

1.2.2.2 터프트*(Tuft)*법

물과 비중이 같은 작은 막대나 실(통상 길이는 약 3~5 cm)을 터프트(Tuft)라고 한다. 이러한 터프트를 선체표면이나 선미표면에 부착하고 물을 흘려보내면 터프트는 물의 흐름에 따라 그 방향성을 유지하게 된다. 이와 같이 터프트법은 유체의 흐름 속에 터프트를 설치하여 그 거동을 관찰함으로써 유체 흐름의 방향, 상태 등을 관찰하는 방법이다.

1)표면 터프트(Tuft)법

물체 표면에 터프트의 한 쪽 끝 단을 부착시켜서 이 터프트의 거동을 통하여 표면 근방에서의 흐름의 방향과 경계층의 상태 등을 알 수 있는 방법이다.

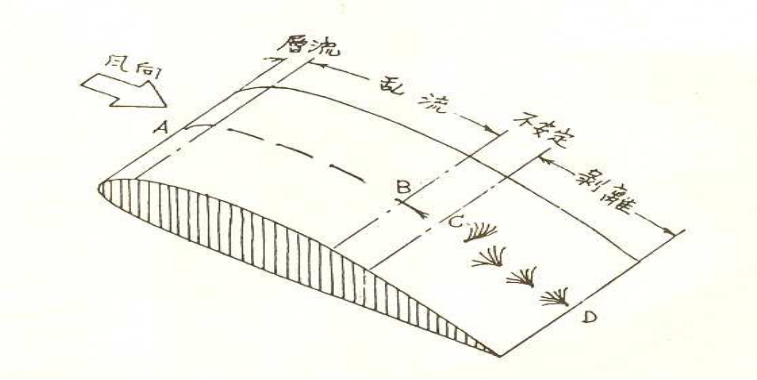


Fig. 1-4 표면 터프트법 개략도

2)깊이 터프트(Depth Tuft)법

표면에서 조금 떨어진 위치에 터프트를 설치하여 흐름을 관찰하는 방법이다.

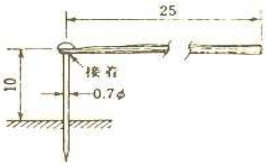


Fig. 1-5 깊이 터프트(Depth Tuft) 부착 방법

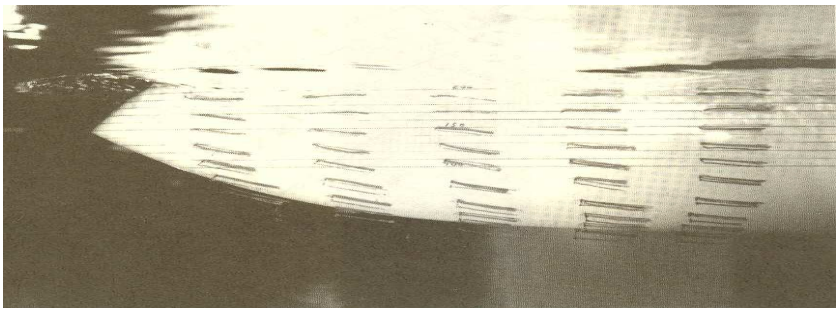


Fig. 1-6 깊이 터프트(Depth Tuft)법 실험모습

3)터프트 그리드(Tuft Grid)법

일반적으로 한변의 길이가 선폭의 약 1.5배가 되는 정사각형 틀(그리드)에 다수의 터프트를 부착한 것을 터프트 그리드라고 한다. 이러한 터프트 그리드를 선미부의 바로 뒤에 놓으면 선미부근에서 발생하는 반류상태를 한 눈에 관측할 수 있다. 이와 같이 터프트 그리드법은 유체 흐름의 한 평면(일반적으로 흐름 방향의 수직 평면)에 터프트 그리드를 설치하여 유체흐름의 거동을 관찰하는 방법이다. 이 방법은 주로 잠수체 후방의 유체 흐름을 관찰하는 데에 쓰인다.

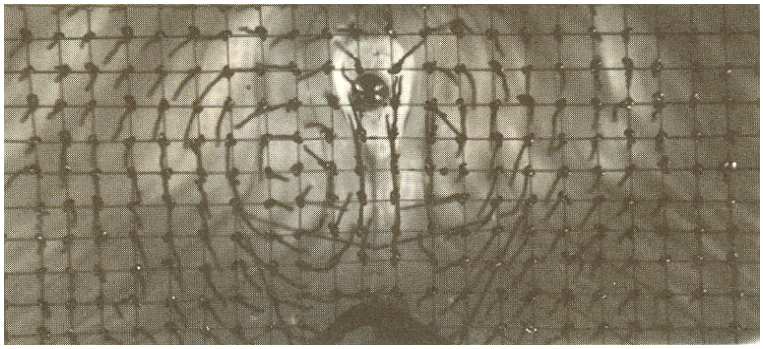


Fig. 1-7 터프트 그리드(Tuft Grid)법 실험모습

4)터프트 스틱(Tuft Stick)법

어떤 작은 막대(봉)의 끝에 터프트를 부착한 것을 터프트 스틱이라고 한다. 터프트 스틱법은 유체 흐름 속의 임의 지점에 터프트 스틱을 갖다 대거나 혹은 이동시키면서 유체의 거동을 관찰함으로써 임의 위치에서의 유체 흐름의 상태를 쉽게 알아낼 수 있는 방법이다.

1.2.2.3 입자추적*(Particle Trace)*법

유체의 흐름 속에 어떤 알갱이 혹은 입자(Particle)를 투입하여 그 입자가 유체

의 흐름에 따라 흘러가는 모양을 관찰함으로써 유체의 흐름을 파악하는 방법이다 이 방법에 쓰이는 알갱이 (혹은 입자)의 크기는 일반적으로 직경 약 1~3mm 정도이며 입자의 비중은 터프트에서와 같이 1이 되어야 한다. 이 방법은 입자의 종류와 입자 발생장치(Particle Generator)에 따라서 직접주입법, 화학반응법, 전기제어법 등으로 나눌 수 있다.

1)직접 주입법

직접적으로 추적 입자를 유체의 흐름 중에 투입하는 방법이다.

i)주입 유맥법

물체의 내부에 아주 미세한 구멍을 뚫어서 그 구멍을 통하여 염료를 흘려 보내어 그 염료의 흐름을 관찰하는 방법이다.

ii)주입 유적법

주입 유맥법과 같은 방법이나 이 때 사용하는 염료는 점성이 아주 강한 물질이거나 고체 입자이다.

iii)현탁법

유체 중에 눈에 보이는 미세한 입자를 투입하여 그 입자의 흐름을 관찰하는 방법이다.

iv) 자유표면 부유법

자유표면 위에 부유성 입자를 띄워서 유체의 흐름을 관찰하는 방법으로 주로 wave의 관찰에 사용되는 방법이다.

2)화학반응법

이 방법은 두 가지 화학물질 사이에서 일어나는 화학반응의 결과를 이용하여 유체의 흐름을 관찰하는 방법이다.

i)수소기포법

물 속에서 물의 전기분해를 이용하여 수소기포 또는 산소기포를 발생시켜서 그 발생된 수소기포가 물의 흐름에 따라 움직일 때, 유장을 관측하는 방법이다. 수소기포의 비중이 가볍기 때문에 유체의 속도가 빠른 경우에는 충분한 관측이 어렵다는 단점이 있으며, 현재 이를 극복하기위한 기술개발이 지속되고 있으나 아직까지는 유체의 속도가 비교적 저속인 경우에 사용하고 있다.

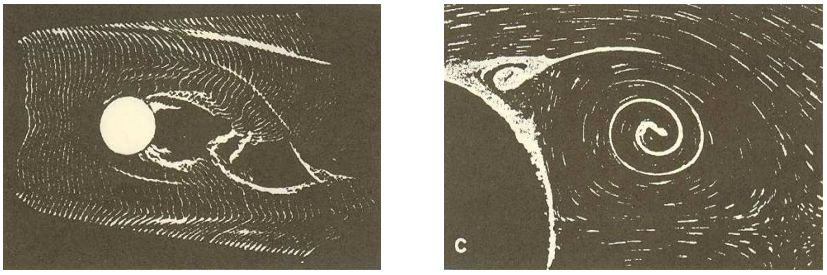


Fig. 1-8 수소기포법 실험모습

Table 1-1 각 가시화 기법의 적용 유속 범위

기 법	유 속	기 법	유 속
유막법	0.2～20m/s	유점법	0.7～20m/s
표면터프트 법	0.05～0.2m/s	깊이터프트법	0.05～2m/s
터프트그리드법	0.05～2m/s	터프트스틱법	0.05～2m/s
주입 유맥법	0.001～1m/s	주입유적법	0.01～10m/s
현탁법	0.001～20m/s	표면부유법	0.01～2m/s
수소기포법	0.01～0.2m/s	연백법	0.5～2m/s

1.2.3 분산법(Scattering)

분산법은 유체분자나 종자(seed particle)가 빛을 분산시키는 현상을 이용하는 방법으로 PIV(particle imaging velocimetry), LSV(laser speckle velocimetry) 그리고 LIF(laser induced fluorescene)등이 이 범주에 해당된다. 이들 중세서 LIF는 제트 엔진이나 내연기관 등의 연소실험에 적합한 방법이므로 아직은 주러 일점계측(point measuerment)에만 이용되므로 여기서는 상세한 언급을 피한다. LSV와 PIV는 모두 Laser광을 원주형(cylindrical)의 lens에 투과시켜 얻은 얇은 판상의 빛(laser sheet)을 유동장의 필요한 위치에 조사하여 화상화하는 방법이다. 보총의 경우 유체입자는 빛을 분산시키는 능력이 매우 약하므로 유동장내에 종자를 투입하게 되는데 이 경우 빛의 분산효과는 종자의 크기에 따라 약 10~24배까지 증가한다. 그러나 굴절에 의한 Gaussian beam이 같은 방향으로 전파되기 때문에 laserrhkd의 크기와 세기가 위치에 따라 변하여 종자를 매우 균일하게 분포시킨 경우에도 분산된 빙의 세기는 위치에 따라 다르게 된다.

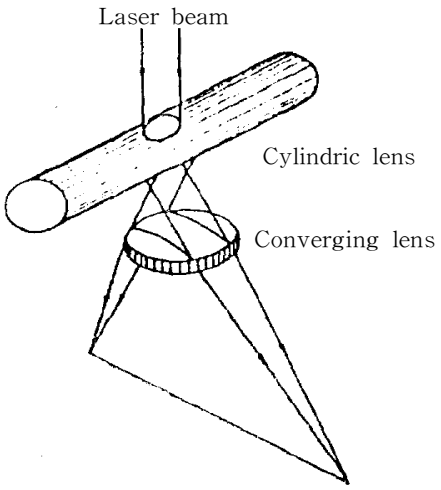


Fig. 1-9 Generation of laser sheet

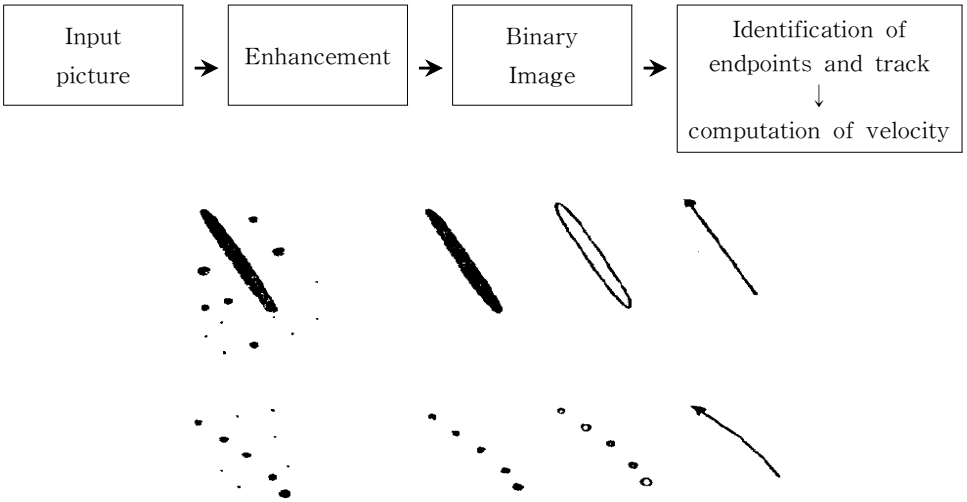


Fig. 1-10 Two example of particle tracking

화상의 해상도는 화상취득을 위한 광학장치에 달려있다. 화상으로부터 구별할 숭 있는 최소면적을 해상면적(resolution cell)이라고 하면 투입된 종자의 크기는 반드시 조사된 laser sheet의 두께보다는 작아야 하지만 해상면적 보다는 클 수도 작을 수도 있다. LSV에서는 작은 크기의 종자를 조밀하게 분포시키기 때문에 임의의 점에서의 속도 vector를 구할 수 있으나 PIV에서는 큰 종자 들을 상대적으로 저밀도로 분포시켰기 때문에 빛이 조사된 종자의 위치에서의 속도 vector만을 계측할 수 있다. 수치적인 처리를 위하여는 일반적으로 등간격의 격자(grid)에서의 속도 분포를 필요로 하기 때문에 높은 정도를 필요로 하는 계측에는 어려움이 따르는 경우가 있다. laser를 단속적으로 여러번 조사하면 해상면적당 여러개의 종자가 들어있는 LSV의 경우 사진 film에 기록된 화상은 speckle pattern을 나타내게 되는데 그 특성은 수학적으로 잘 정의되어 있다. PIV의 경우에는 해상면적당 하나 이하의 종자만이 들어 있으므로 다중노출 화상으로부터 속도 vector를 구하는 것은 종자를 서로 구별할 수만 있다면 큰 어려움이 따르지 않는다.

1.2.4 단층 촬영법(Tomography)

단층촬영법은 여러 각도에서의 line-of-sight 계측(projection)으로부터 화상을 재구성하는 방법을 말한다. 이 방법은 이미 의학이나 우지, 해양 분야에서 널리 사용되어 왔으나 유체역학 분야에서는 고전적인 광학적 방법들을 이용하여 밀도 등 물리적 변수들의 3차원 분포를 계측할 수 있다는 장점에도 불구하고 극히 최근에 이르러서야 도입되었다. Fig. 1-11에서 보듯이 화상을 재구성하기 위하여는 projection (R)로부터 목적함수 n(x.y)를 역으로 구하여야 하며 엄밀히는 이론적으로 무한히 많은 projection을 필요로 한다. 이때 가장 많이 사용되는 방법은 'filterd backprojection'이며 Hermam에 다른 역변환들도 포함하여 자세히 설명되어 있다. 이 방법이 난류유동 계측등의 유체역학 분야에 성공적으로 응용ㅇ된 사례들은 Hesslink등에서 찾아볼수 있다.

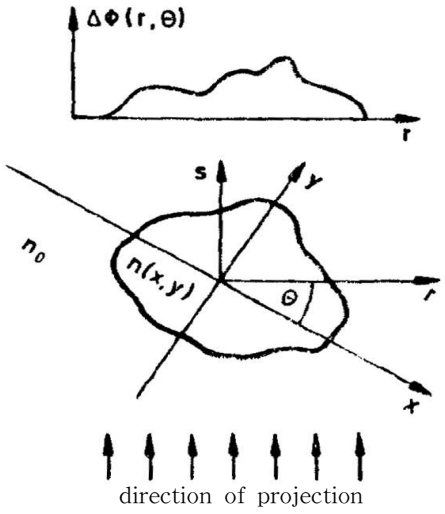


Fig. 1-11 Diagram of a projection as used in tomography

제 2 장 *Particle Tracking Velocimetry System*

2.1 3차원 PTV-system 특성

2.1.1 3차원 PTV-system 개요

공학적으로 중요도가 높은 유동현상인 벽면난류, 분류 , 박리류 등의 난류유동장의 물리기구를 이해하기 위해서는 유동장의 넓은 영역에 있어서 순시속도의 3성분을 정량적으로 측정할 필요가 있다. 특히, 스케일이 큰 조직구조의 발생으로부터 소멸에 이르기까지의 메카니즘을 해석하기 위해서는 유동장의 공간적 구조에 관한 정보가 필요하다.

종래의 유체계측법인 열선유속계가 가지고 있는 단점(유동장의 한 점에서만 속도정보를 제공, 유동장에 교란을 초래)과 레이저도플러 유속계의 단점(유도장의 한 점에서만 속도정보를 제공)을 극복하기 위하여 개발된 것이 2차원 PIV계측기술인데 이 2차원 PIV계측법은 유동장의 2차원적 단면의 전체에 걸친 정보를 제동하므로 공학적으로 실용적인 非定常 유동장에 대한 정성적 평가에 유리하다는 장점은 있으나, 유동의 본질적 구조를 파악함에 있어서 필수요건인 유동의 전 공간에 걸쳐 속도 3성분을 계측해야하는 걸림돌을 극복하지 못한다.

유체와 동일 비중의 미소입자들이 들어 있는 유동장을 2차원 가시화 광원으로 조사하고 조사된 영역을 CCD(Charge Coupled Camera)카메라를 이용하여 영상화한 후 화상처리과정을 거침으로서 유동장의 전체에 걸쳐서 한꺼번에 속도분포를

얻어내는 방법이 2차원 PIV(Particle Imaging Velocimetry) 계측법이다. 그런데, 이 방법은 단면에 대한 수직성분, 즉 3차원 속도성분에 대한 정보를 제공하지 못한다. 이를 극복하기 위하여 2대 이상의 CCD카메라와 디지털 화상처리를 이용하여 유동장의 3차원 속도성분을 전역에 걸쳐 동시에 계측하는 시스템을 3차원 PTV라고 한다.

2.1.2 3차원 PTV-system 원리

우리가 3차원 공간을 정량적으로 인식하려면 최소한 2개 이상의 눈이 필요하듯이 카메라를 이용한 계측의 세계에서도 2대 이상의 카메라가 필요하다. 우리의 두 눈이 안면에 고정되어 있으면서 두 눈 사이의 상대적 운동이 순간적으로 신경세포로 전달되므로 우리는 공간을 실시간(real time)으로 인식할 수 있게 된다. 이처럼 카메라를 이용하여 3차원 공간을 인식하기 위해서는 카메라간의 상대적 운동을 인식시킬 필요가 있게 된다. 이를 3차원 계측에서는 카메라교정(校正)이라 한다. 로봇이 쳐다보는 세계를 인식시키기 위해서는 로봇이 두 눈의 3차원 위치 및 각도에 대한 시간적 변화정보가 필요하지만 유체 유동장의 3차원 속도 계측을 위해서는 카메라가 고정되어 있고 유체가 움직이는 관계에 있으므로 카메라교정을 한 후 유동장의 수많은 입자들에 대한 시간적 공간이동의 정보가 필요하게 된다. 입자들의 시간적 공간이동의 정보는 각 카메라들이 쳐다보는 공선의 교점을 시간적으로 추적하는 과정을 거침으로써 얻어지는데 유동장에 들어 있는 수많은 입자들 중 동일입자 쌍들을 찾아야 만이 올바른 공간상에서 동일한 입자들이 찾아지게 되면 공간이동벡터가 구해지고 이를 일정시간 간격으로 나누면 3차원 속도성분이 되는 것이다.

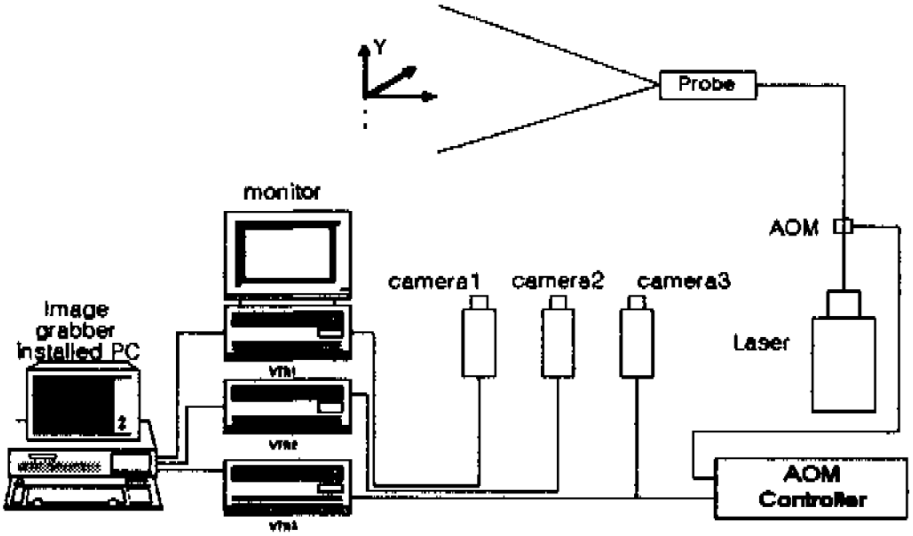


Fig. 2-1 Arrangement of measurement system

2.1.2.1 3차원 PTV계측 시스템의 구성

그림 1은 3차원 PTV 계측시스템의 전형적인 구성을 나타낸다. 추적 입자의 3차원속도를 비접촉계측하기 위해서는 2대 이상의 CCD카메라가 필요하게 된다.

계측시스템은 구성요소들의 성능과 특징에 따라 다양하게 구성될 수 있으나 계측시스템의 작동원리 등에 대한 이해를 돕기 위하여 연재 필자보유의 계측시스템을 예로 들어 설명하고자 한다. 3대의 CCD카메라(Sony, SSC-M370) 혹은 VTR2(Sony, RS1)및 VTR3(SLV-595HF)에 내장된 이미지 그래버(DT64)에 기록된다. 이미지 그래버에 입력된 화상은 호스트컴퓨터에 의해 추적입자의 사진좌표(x,y)를 구하는데 쓰인다. 화상처리되는 도중의 결과는 처리과정의 확인을 용이하게 하기 위하여 호스트컴퓨터의 모니터에 각각 표시되도록 한다.

2.1.2.2 카메라의 교정법

전술한 바와 같이 추적입자의 3차원위치 P(X,Y,Z)를 계산하기 위하여 카메라의 3차원위치 및 자세를 구하는 작업을 교정작업이라 하였다. 다시 말하면, 카메라의 교정작업은 절대좌표계(지상좌표계)에서 측정영역 내에 기지의 값으로 3차원적으로 배치되어 있는 점들을 추적입자로 가정하여 이들의 기준점들과 카메라의 사진좌표와의 상관 관계를 나타내는 식인 공선조건식을 이용하여 카메라의 외부 파라메타(표정 요소라고도 함)(X0,Y0,Z0,ω,ϕ,k)와의 내부 파라메타(c, x0, y0, k1, k2)를 구하는 작업이다.

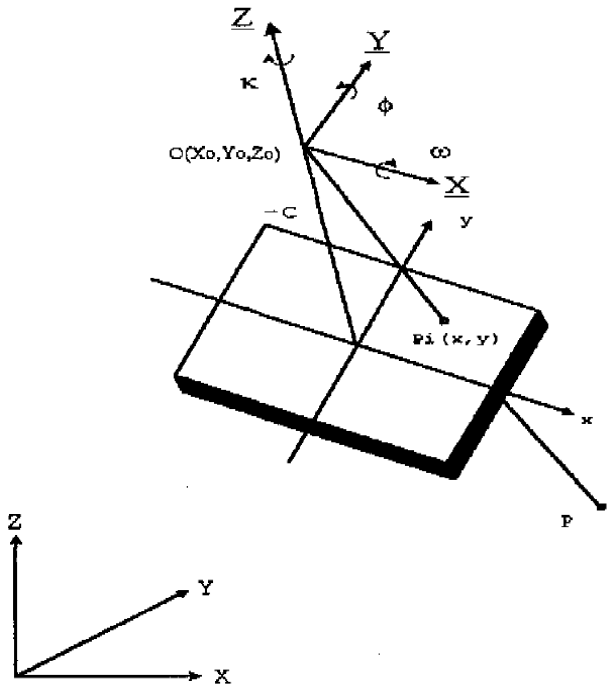


Fig. 2-2 Principle of camera calibration

Fig. 2-2는 카메라교정의 원리를 나타내는 그림이다. (X,Y,Z)는 대상물 P의 절대좌표(X0,Y0, Z0)는 투영중심의 절대좌표, c는 화면거리, (x,y)는 대응하는 사진

상의 사진좌표를 나타내는데 이들 세점이 일직선상에 위치한다는 공선조선에 카메라 렌즈의 왜곡에 의한 수정량과 카메라 제작상 CCD소자중심의 위치와 렌즈중심이 어긋나 이동되는 주점위치의 이동량을 각각 고려하여 최소자승법과 접목한 축차근사해법을 적용함으로써 카메라의 내부 및 외부파라메타들을 구할 수 있다.

*2.1.2.3 3*차원 위치결정법

카메라의 교정작업을 통하여 절대좌표계에 대한 카메라들의 위치 및 자세가 구해지면 이번에는 역으로 3차원 공간상에서의 놓여진 미지의 점에 대하여 각 카메라들로부터의 직선들의 교점을 구하면 미지의 점에 대한 3차원 위치가 결정되게 된다. Fig. 2-3은 위치와 기울기가 서로 다른 3대의 카메라로 촬영했을 때의 관계를 나타낸다.

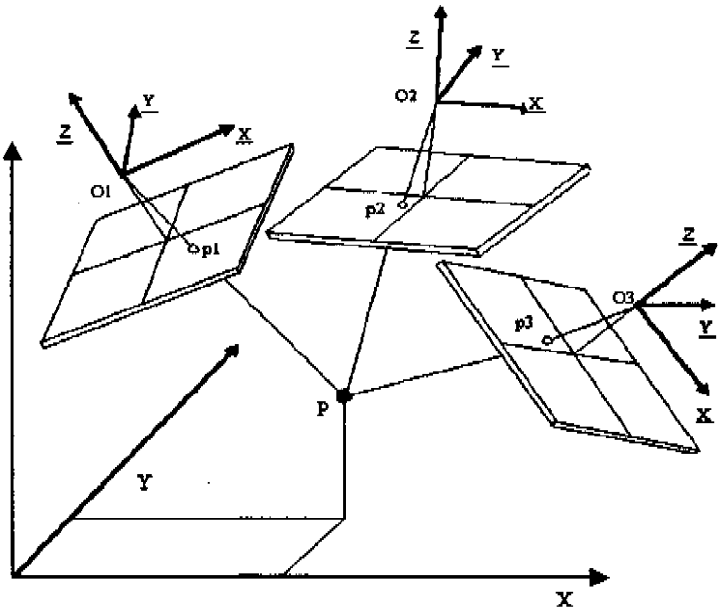


Fig. 2-3 Principle of 3-D position decisions

지상좌표계의 좌표가 (X,Y,Z)인 표적 P를 투영중심이 O1(X01,Y01,Z01), 3축의 기울기각도가(ω1,ϕ1,k1)인 카메라 1과 초점중심이 O2(X02,Y02,Z02), 3축의 기울기각도가(ω2,ϕ2,k2)인 카메라 2와 투영중심이 O3(X03,Y03,Z03), 3축의 기울기각도가(ω3,ϕ3,k3)인 카메라 3으로 촬영했을때, 입력된 상은 투영중심으로부터 화면거리만큼 떨어진 평면상에 투영된 것과 같다. 카메라의 파라메타가 구해지면, 투영중심, 사진좌표, 피사체간에 공선조건식을 얻을 수가 있고 일반적으로 피사체의 3차원 좌표는 이들 세 개의 공선들이 만나는 교점으로 정의한다.

*2.1.2.4 3*차원 속도결정법

3차원 속도를 구하기 위해서는 추적대상물이 공간상에서 적어도 두 시각 이상에서 인식되어져야 한다. 다시 말하면, 3차원 속도는 임의의 시간동안 동일한 추적대상물이 공간상에서 움직인 공간좌표의 이동량을 알기만 하면 구해지게 된다. 그런데, 유동장 속에 수많은 추적입자들이 들어 있기 때문에 동일입자를 어떻게 인식하느냐가 문제가 되는데 이는 전술의 3차원 위치를 결정함에 이성서 각 카메라의 화상에 나타나는 수많은 입자들의 사진 좌표들이 형성하는 공간직선들간의 거리가 가장 작은 쌍을 동일한 입자로 판정한다.

3차원 속도는 두 시각사이에서의 입자의 이동량에 시간차를 나눔으로서 구해지게 된다. 이를 추적입자의 도심좌표는 어떤 기준 농도치(threshold value)로부터 화상의 농도를 이진화(binarization)한 뒤, 그 입자들의 형상에 대한 면심을 계산함으로써 구해진다.

2.1.2.5 3차원 속도계측 알고리즘의 종류

3차원 속도계측을 하기 위한 계측의 알고리즘에는 크게 두 가지로 나누어 질 수 있다. 하나는 시간, 공간 대응법이고 또 다른 하나는 공간, 시간 대응법이다. 전자는 복수대의 각 카메라의 화상으로부터 구해지는 입자의 2차원 유적을 먼저 구한 뒤에 2차원 유적선끼리 공간상에서 대응시킴으로써 3차원 속도를 구하는 방법이며 Fig. 2-4는 이 방법 중의 한 예를 보이며 Fig. 2-5는 이 방법의 3차원 속도를 얻기까지의 절차를 보인다. 먼저 카메라의 고정작업이 각 카메라에 대해 끝나면 8시각분의 2차원 공간상에서 벡터를 대응시키는 방법이다.

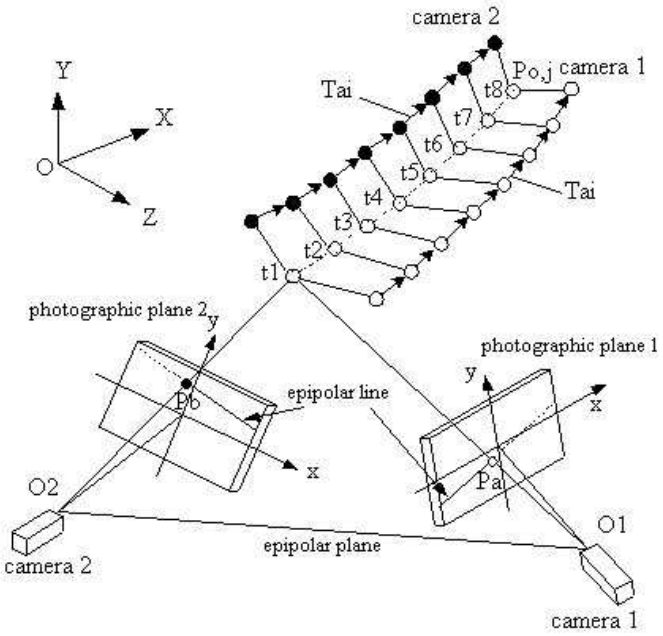


Fig. 2-4 Temporal-spatial pair matching(T-S method)

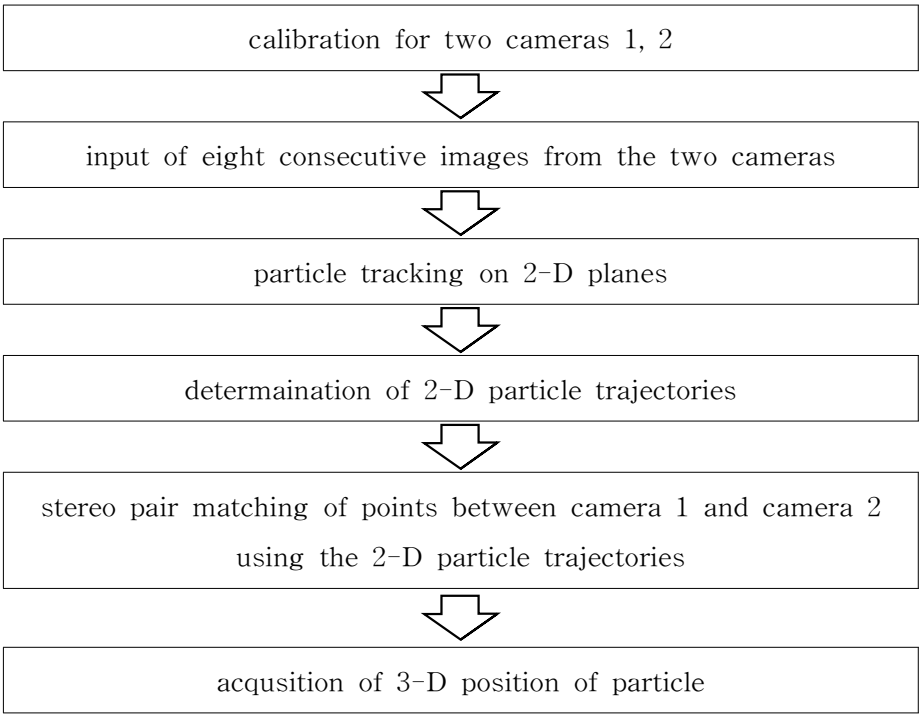


Fig. 2-5 Procedure of T-S pair matching method

후자는 직접 3차원 공간상에서 입자의 위치를 먼저 대응시킨 다음 시간상에서 동일의 입자를 찾아서 시계열상에서 대응시키는 방법이다. Fig. 2-6은 후자의 방법의 한 예를 나타내고 있다. 공간상에서 한 시각에서의 3차원 위치를 계산한 다음 그 다음 시각에서의 공간상의 동일한 입자를 찾아내는 방법이다. 이때 동일의 입자추적은 일치확률방식을 공간상에 확장하여 공간상에서 추적할 수 있도록 하였다. 이것은 2장의 연속된 디지털 화상내에 있는 입자의 가능한 모든 변위벡터를 고려한 후 각 변위들에 대한 일치확률(match probability)을 정의 (Tg내부에 제 2 시각점 T1이 있을 때)하고 불일치확률(no-match probability)과 함께 반복 계산함으로써 일치확률밀도가 가장 높은 것을 변위벡터로 결정하는 방식이다.

Si는 제 1시각에서의 입자들의 3차원 위치를 Ti는 제2시각에서의 입자들의 3차

원 위치를 나타낸다. Fig. 2-7은 이 방법에 이상에서의 3차원 속도벡터를 얻는 절차를 나타내고 있다. 즉 이 방법에서는 먼저 카메라의 교정 작업을 끝낸 후 입자들의 3차원 위치를 계산한 다음, 또 다른 시각에 있어서 3차원 위치를 계산한 다음, 또 다른 시각에 있어서 3차원 위치를 계산하여 움직인 3차원 벡터에 두 시각 차를 나누면 3차원 속도가 얻어지게 되는 방법이다.

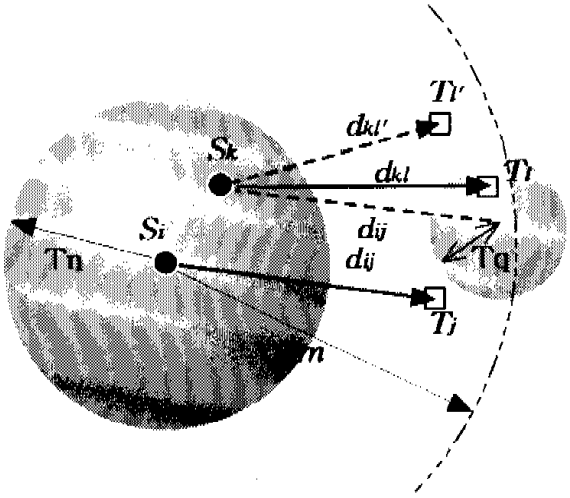


Fig. 2-6 Spatial-Temporal pair matching(S-T method)

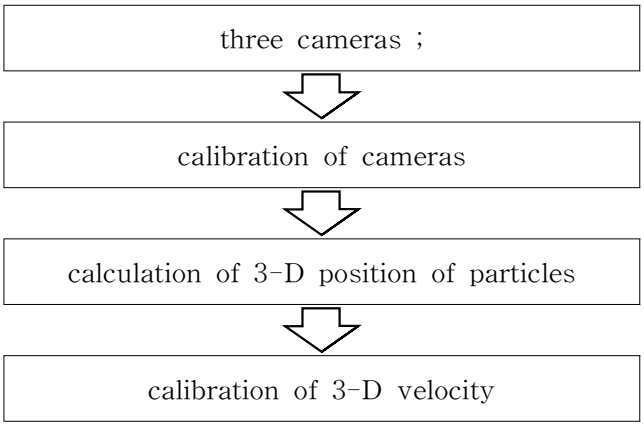


Fig. 2-7 Procedure of S-T pair matching method

2.1.3. One-Frame 3차원 PTV system

한편, 측정영역이 작거나 아니면 실제 유동장의 속도가 비교적 빠른 유동의 계측인 경우에는 일반적으로 쓰이고 있는 CCD 카메라의 시간 해상도가 국제표준규격(NTSC : National Television System Committee)으로서 1/60초에 한정되어 있으므로 입자추적이 불가능한 경우가 많다. 이를 극복하기 위하여 유동장을 가시화하기 위해서 사용되는 레이저광원 자체를 간헐적으로 조사함으로써 광학적으로 시간해상도를 올리는 방법이 있다. 이를 위해서는 음향광학장치라는 AOM(Acousto Optical Mojulator)시스템을 도입하는 데 NTSC 표준규격의 카메라 신호체계와 광학적 단속기구인 AOM 신호체계와의 관계처럼 시간해상고가 Tvar로 되어 1/60초보다 작음을 알 수가 잇다. 또한 이 시간해상도는 조정이 가능하므로 유동장의 속도에 따라 최적의 시간 해상도의 선택을 자유롭게 할 수 있다. 즉, 카메라의 고정된 촬영시간(1/60sec)에 디하여 레이저광원을 원하는 시각에 간헐적으로 단속이 가능하므로 계측영역을 통과하는 입자의 이동속도가 비교적 빠른 경우 속도벡터의 시점과 종점의 coding이 가능하게 된다. 지금 Fig. 2-8과 같은 신호에 의해 광원이 coding되었을 경우에는 두 개의 필드화상(odd and even fields)으로 분리시키기만 하면 시점과 종범의 결정은 용이하게 되어 속도벡터의 시점 및 종점판정이 가능해 진다. 이와 같은 아이디어를 3차원 계측에도 도입함으로써 계측영역에 비하여 상대적으로 입자속도가 빠른 경우의 3차원 속도계측을 가능하게 한 방법이 One-Frame 3D-PTV 계측법이다.

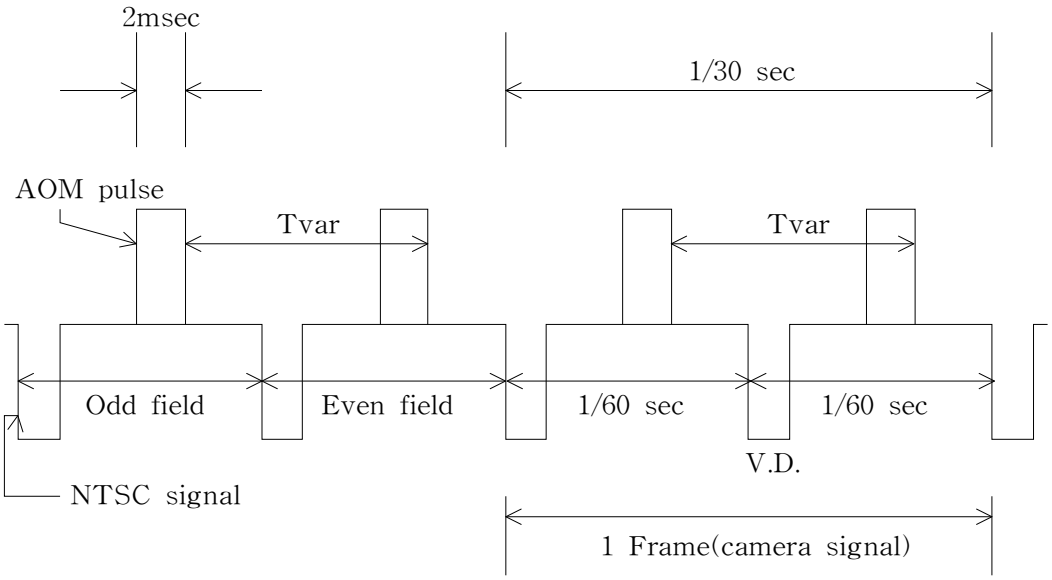


Fig. 2-8 Relation between NTSC camera signal and AOM signal

2.2 Circular Dynamic Stereo PTV-system

2.2.1 Circular Dynamic Stereo PTV-system 개요

PTV에서 속도를 구하기 위한 기본적인 개념은 질점역학에서와 마찬가지로 임의의 입자 운동에 요하는 시간 간격 및 벡터 변위 관계로부터 구해진다. 즉, 유동장에 추종성이 우수한 입자를 균일하게 분포시키고 이들 입자의 운동을 CCD카메라를 이용하여 기록한 다음, 보존된 유동장을 미소시간 간격으로 영상처리하여 각각의 입자변위를 자동으로 추적하고 있다. PTV에서는 입자의 인식 및 관련된 연산기능을 컴퓨터를 이용하여 효율적으로 행하고 있다. 한편, 이 시스템은 비정상, 동시다점 계측 및 유동장을 영상기록매체에 기록하여 보존 및 재생이 가능함으로서 유동장의 재현성 확보가 원리적으로 가능함으로서 CFD에 필적할 수 있는 유일한 실험 기법으로 평가되고 있다.

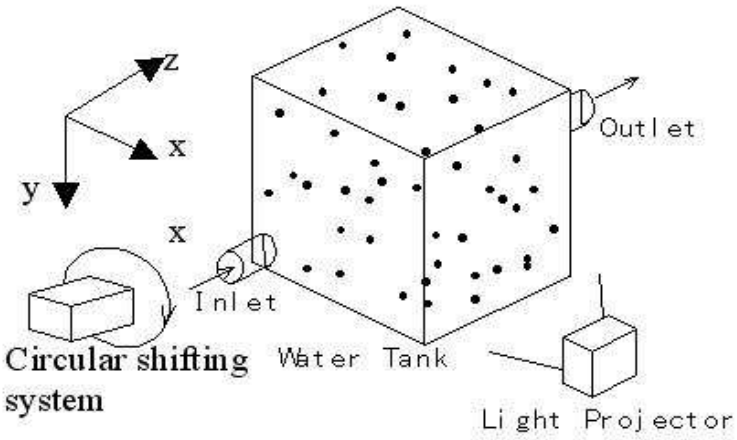
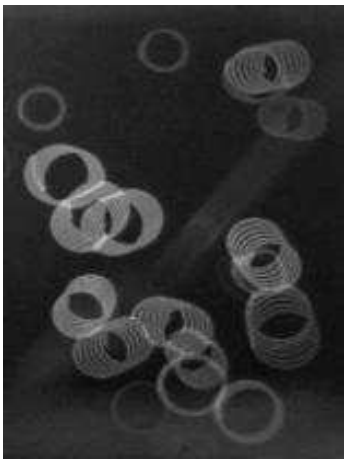
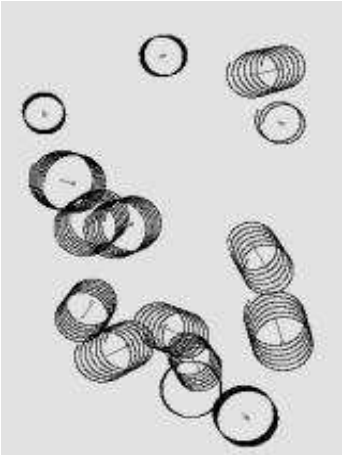


Fig. 2-9 Experimental Setup



a. Recorded image



b. Result of analysis

Fig. 2-10 Example of the streaks of tracer particle

PTV에서는 입자 가시화기법에 의해 얻어진 영상을 처리하여, 미소시간 간격동안 움직인 다수 입자의 이동 변위를 자동적으로 추적함으로서 속도벡터를 구한다. 그러나 가장 큰 문제가 되는 것은 수많은 입자들을 서로 다른 시간 간격의 영상에서 추적하여 각각 동일입자임을 자동적으로 판별하는 일이다. 이 시스템은 원리상 추적 입자로부터의 산란광을 영상정보로서 기록을 한다. 따라서 추종성 및 표면 반사율이 좋은 입자의 선택이 무엇보다 필요하다. 물의 경우에는 나이론 12 또는 폴리스틸렌 구형입자가 주로 사용되며, 공기의 경우에는 헬륨기포 또는 수미크론의 알루미늄 분말이 사용되기도 한다. 입자가 작을수록 추종성능이 양호하나 조명조건이 까다로워진다. 유동특성에 적합한 입자를 선별하는 것은 실험의 성패에 커다란 영향을 미친다.

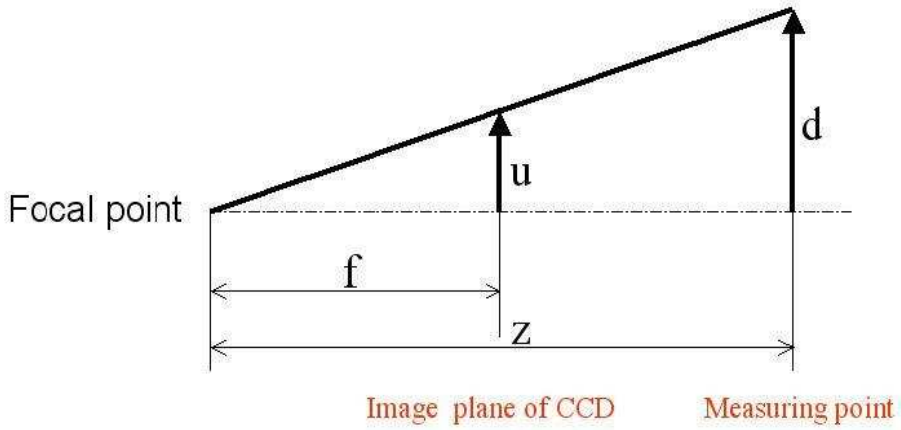
종래의 PTV System은 2-3개의 카메라를 이용하여 3차원 영상을 만드는 스테레오 방식이었으나 3D-PTV System은 한 개의 카메라를 이용하여 3차원 영상을 얻음으로써 더욱 정확하고 빠른 입자 추적이 가능하게 하였다.

PTV system에서는 연속된 영상에서 동일 입자를 확인하는 작업이 반드시 필요하며 연속된 영상 프레임간의 시간 간격은 유동장의 Raynold number에 따라 조정된다. 프레임 수를 늘리면 원리적으로는 동일 입자의 검색에 수반하는 오차를 줄일 수가 있다. 그러나 이 경우에는 처리시간이 더 걸리고 무엇보다 입자의 직선, 등간격 이동이라는 원래의 조건을 벗어나기 쉬움으로서 최종적으로 얻어진 속도 값에 수반하는 불확실성 성분이 커지게 된다. 그 중 2-frame 방식은 기억용량 면에서 유리하다. 2-frame 방식을 채택한 경우, 약 450개의 입자를 처리하여 보관된 속도 벡터를 얻기까지 걸리는 시간은 2~3초 전후이다. PTV에서 사용되는 입자의 추정성이 충분히 검토가 되어야 하며 텔레비전 주사방식을 택한 경우에 최대 60Hz의 시간 해상도를 유지할 수 있다. 이보다 높은 해상도를 얻기 위해서는, 별도의 고속 frame의 영상 기록장치가 필요하다. 또한 현재의 일반적인 영상 입출력장치는 1frame당 512*512pixel의 공간해상도를 제공한다. 따라서 유동장의 공간해상도를 높이기 위해서는 고가의 촬영장치 또는 별도의 실험적인 기법이 요구된다.

2.2.2 Circular Dynamic Stereo PTV-system 원리

2.2.2.1 Circular Dynamics Stereo의 2차원 변위계산 원리

PTV System의 기본 원리를 간단하게 도식화 하였으며 다음의 비례식을 통하여 입자의 이동거리 d를 구할 수 있다.



$$z : f = d : u$$

f : Focus length of the TV camera

z : Distance from the focus point to the measuring point

u : Amount of displacement on the image plane

d : Shift length

Fig. 2-11 Principle of the motion stereoscopic vision

쉽게 말해서 2차원 평면상의 움직임에 대한 화상처리는 실제거리를 화면상의 거리로 변환하여 계산하는 것이다. 대부분의 일반적인 monitor들은 pixel이라는 수많은 점들의 구성으로 이루어져 있다. 각각의 점들이 Red, Green, Blue의 색상

에 대한 정보를 가지고 표현함으로써 우리가 일반적으로 볼 수 있는 color image가 나타나는 것이다. 만약 실제 길이가 10m인 배를 영상으로 획득하여 monitor에 표현했을 때, 화면에서 차지하는 길이가 500pixel이라하면 그 monitor의 1pixel당 길이는 10㎜가 되는 것이다.

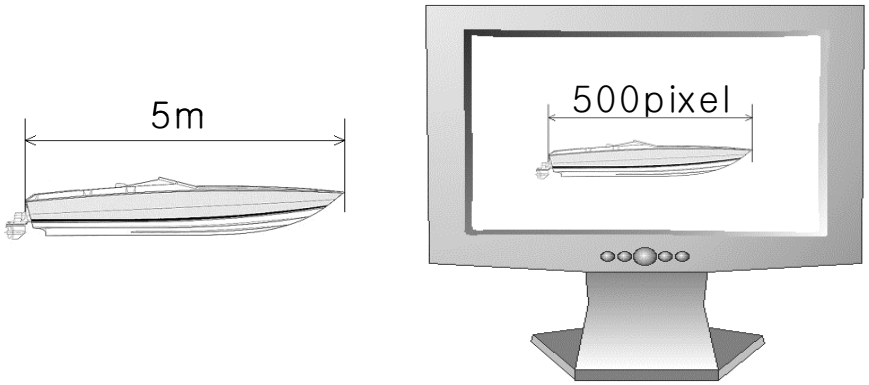


Fig. 2-12 example of 2-D analysis

따라서 위와 같은 monitor상에서 어떠한 입자가 3pixel의 값만큼 이동하였다면 실제 입자의 이동거리는 30㎜가 되는 것이다.

*2.2.2.2 Circular Dynamics Stereo*의 *3*차원 변위계산 원리

PTV System을 위한 카메라 설치는 Fig. 2-13와 같고 refractor가 60Hz로 회전하면서 24개의 연속된 frame을 얻는다. 정지해 있는 측정점들에 대해서는 모니터에 원으로 나타내어지고 그 원들의 반지름을 이용하여 실제 점들의 위치를 추정할 수 있다. Fig. 2-14은 모니터에 나타난 이미지이다.

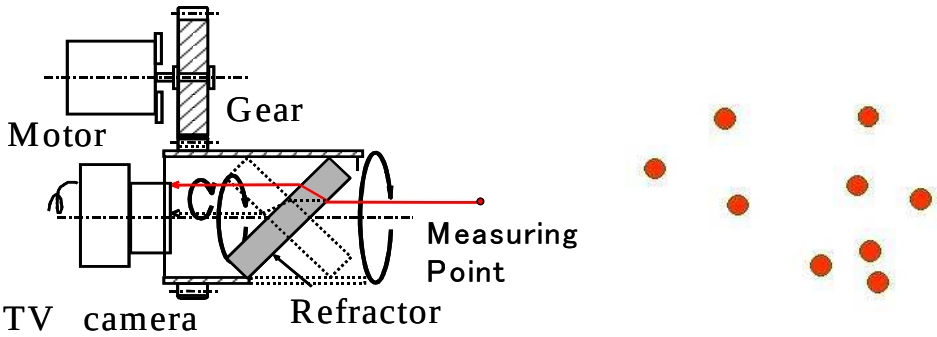


Fig. 2-13 The image on the TV Monitor

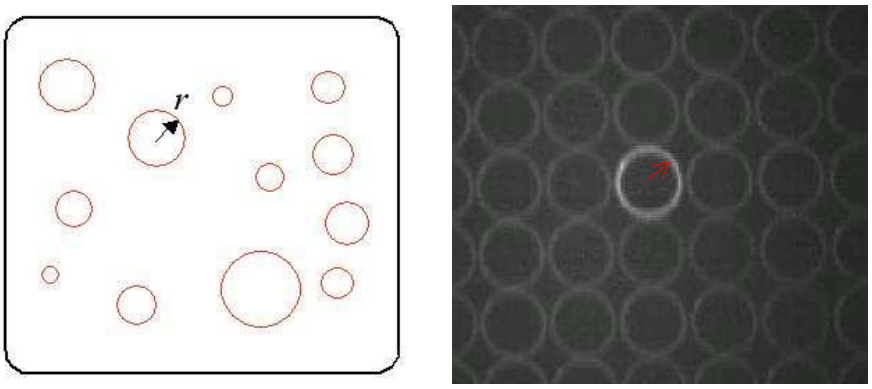
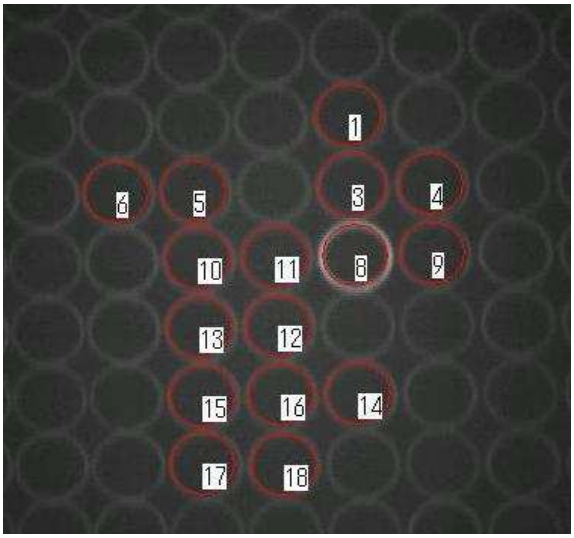


Fig. 2-14 The image on the TV Monitor

이렇게 카메라를 통해 얻어진 영상들에 나타난 원들의 조도 차이를 이용하여 Fig. 2-15에 나타난 것처럼 각각의 원들에 번호를 부여하고 카메라와 입자 사이의 거리와 원의 반지름과의 관계를 이용하여 카메라와 입자의 거리를 추정할 수 있다.



$$D = \frac{f \times \Delta x}{r}$$

r : size of circular streak

D : distance between particle and camera

f : focal length

Fig. 2-15 Identifying by difference of threshold

실제 CCD camera로부터 멀리 떨어져 있는 입자는 작은 원으로 나타나게 되고 가까이 있는 입자는 보다 큰 원을 그리게 된다. 따라서 일정한 거리에 따른 원의 크기를 측정하여 교정값을 얻게 되면, 이제는 역으로 입자가 그리는 원의 크기에

따라 측정점으로부터 떨어진 거리를 계산할 수 있다.

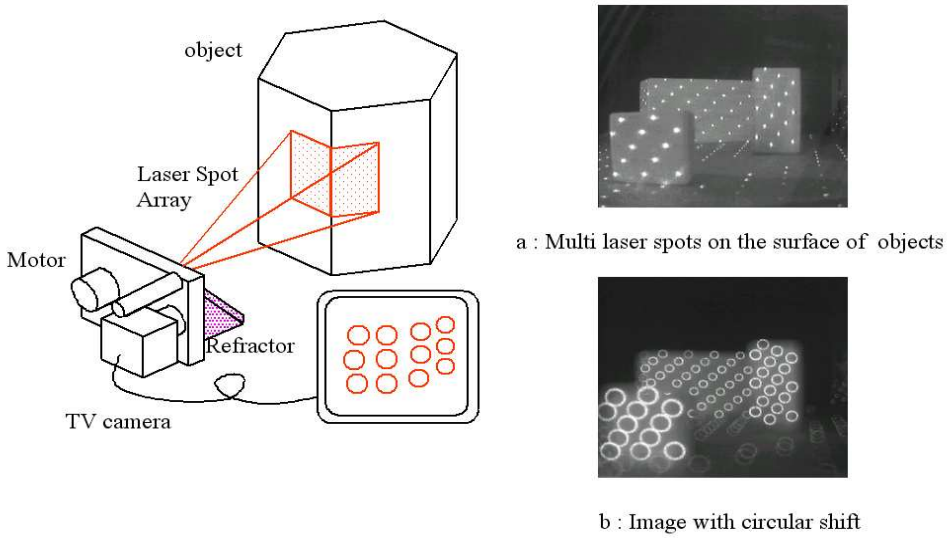


Fig. 2-16 Experimental setup using multi laser spots

실제 계측에 있어서 CCD camera를 회전시킨다는 것은 무리가 있으므로 고정된 카메라의 lens 전면에 기울어진 prism을 설치하고 이 prism을 회전시킴으로써 CCD camera가 회전하는 것과 같은 효과를 얻을 수 있다.

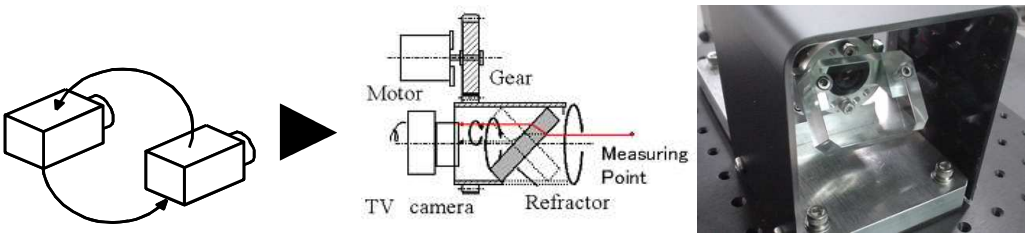


Fig. 2-17 Prism rotating system

2.2.2.3 Image processing

입자의 위치 추정을 위해 입자가 그린 원을 추정해야 한다. PTV System은 60Hz의 refractor로 얻어진 24개의 frame 영상으로 해석을 한다. 따라서 각각의 frame은 1/60sec의 시간 간격을 갖는다. 각각의 frame은 Fig. 2-18에 보인 바와 같이 2개의 field로 이루어져 있으며 각 field를 중첩시켜 대략적인 나선 형태를 보여준다.

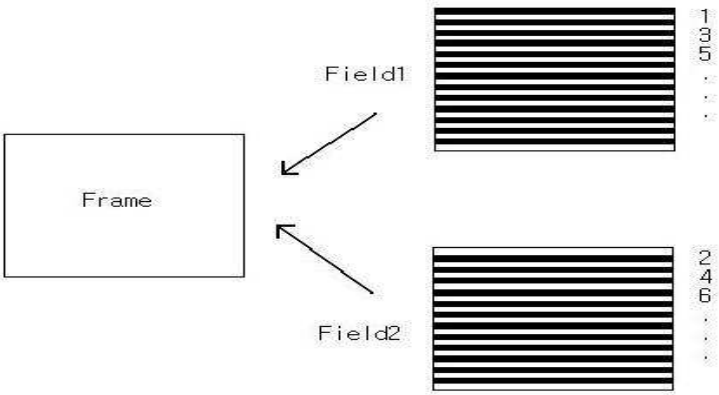


Fig. 2-18 Frame composition

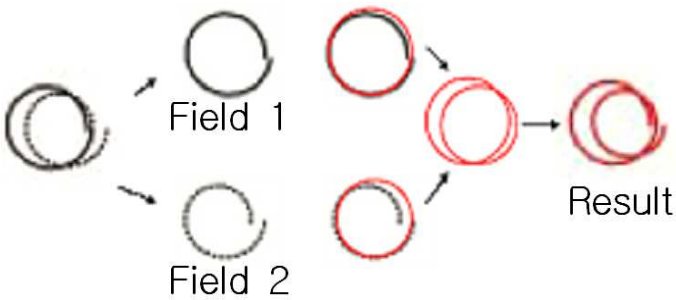


Fig. 2-19 Analysis of spiral streak

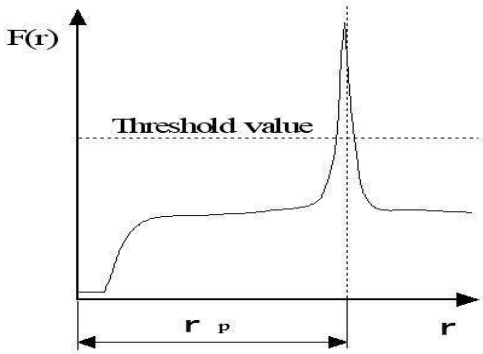


Fig. 2-20 Accumulation of pixel intensities along the streak

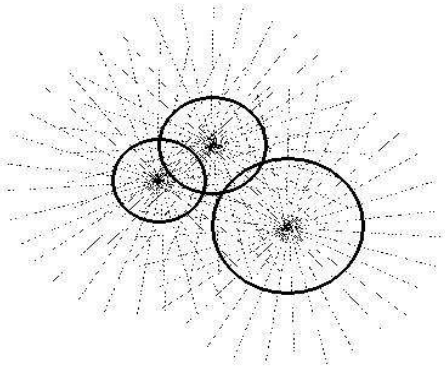


Fig. 2-21 Measurement of the size of annular streak

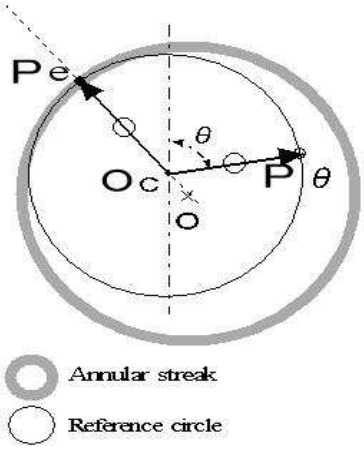


Fig. 2-22 Extraction of the center of streak

제 3 장 *Circular Dynamic Stereo PTV-system*을 이용한 *Model* 주위의 유동가시화 및 계측

3.1 실험설비

Cylinder model 주위의 3차원 유동해석을 위한 실험은 서일본유체연구소(WJFEL) 회류수조에서 실시하였으며 시스템의 구성은 1대의 CCD카메라와 호스트 컴퓨터, TV모니터, 조명시스템 등으로 구성되어있으며 입자는 관을 통해 투입시킨다. 측정 장비에 대한 제원은 다음과 같다.

1) CWC

Type : 2impellers, vertical type

Dimensions :

Whole Body : 14.8mL × 3mB × 5.2mH

Measuring Section : 6mL × 2mB × 1mD

Velocity Range : 0.1m/s ~ 2.0m/s

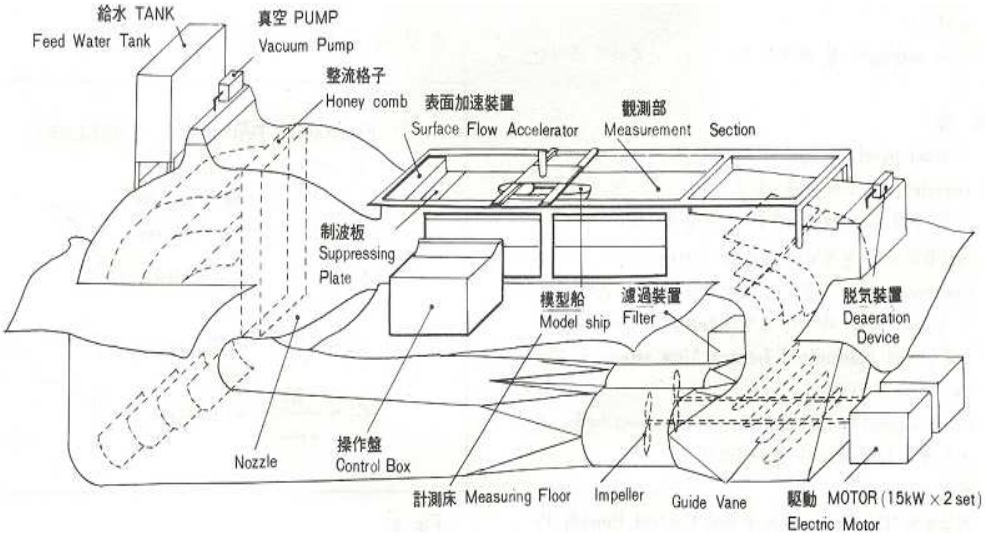


Fig. 3-1 Circulating Water Channel

2) Specifications of the system

* Camera System

Total pixels : 512*512

Frame rate : 30 frame/sec

Lens mount : F-mount

Power source : AC100V, 50/60Hz

* Calibration System

Plate set : 500mm″*500mm grid plate

Diode laser : 670nm of wave length,

30mW of laser power including 19 x 19 dot matrix lens, AC100V 50/60Hz

* Tracer particle : Colored polystyrene beads, 0.5-1.0mm diameter

* Lighting System

Light source : Halogen light″~4

Power source : AC 100V, 50/60Hz

* Specifications of software

Name : Micro-AVS

Usage : Visualization, 3D graphics,

3) Model Type

* Cylinder (Fig. 9)

D : 165 mm, H : 220 mm

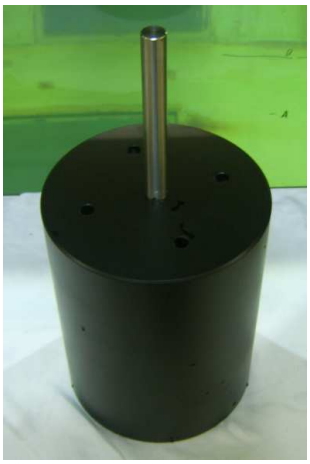


Fig. 3-2 Cylinder Model for Experiment

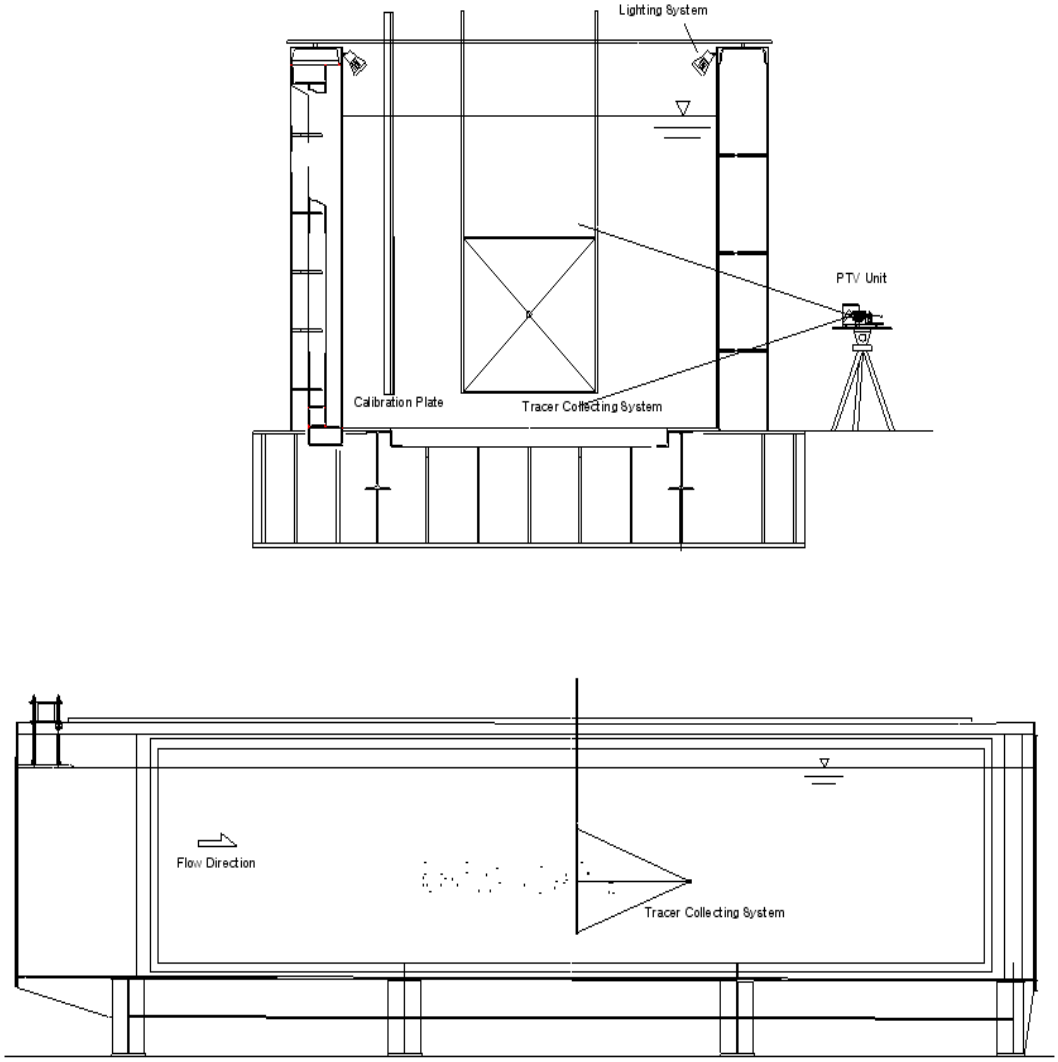


Fig. 3-3 Scheme of PTV system

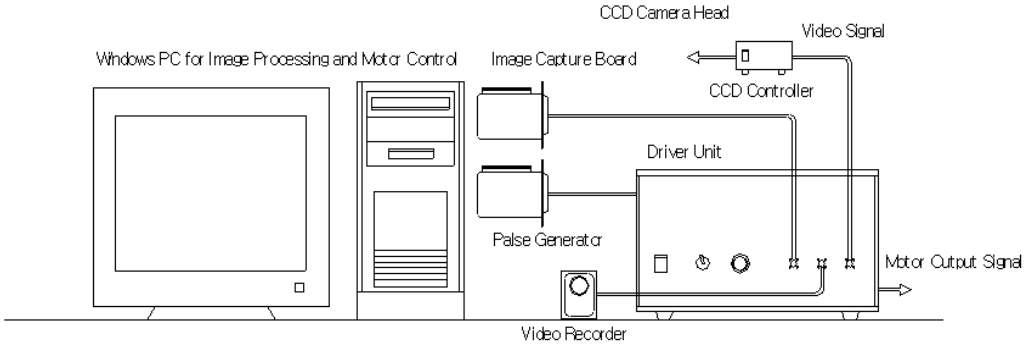


Fig. 3-4 Scheme of image processing and motor control system

3.2 유동가시화 실험 및 계측결과

3.2.1 유동가시화 실험 및 계측

3.2.1.1 Calibraion work

Calibration이란 실제 유동의 계측에 앞서 기초적인 데이터베이스를 구하는 것으로서 컴퓨터에 이미지상의 원주와 그에 따른 실제 거리를 측정할 수 있도록 정보를 입력해 주는 것이다. 실제 유동의 계측을 CWC장치에서 하기 때문에 Calibration 또한 CWC에 설치하고 계측한다. CCD카메라의 refractor는 컴퓨터의 Motor control 프로그램을 이용해 회전을 제어할 수 있으며 test라는 프로그램을 이용하여 계측한다. Calibration의 방법 및 순서는 다음과 같고 Fig.22에 도식화하였다. 컴퓨터 화면상에서의 이동거리는 Pixel값으로 인식되어 지며 이는 자동으로 거리로 계산되어 진다.

(1) 카메라와 Multi laser spot, 계측을 위한 board를 설치하고 모니터 및 컴퓨터에 나타나는 화상을 점검한다. (Fig. 3-6)

(2) 실제 계측에 앞서 카메라와 Multi laser spot의 focus를 조정한 후 refractor의 회전상태를 점검하고 board를 기준점에 설치한다.

(3) refractor의 최초 위치를 확인한 후 Multi laser spot을 board에 투사하고 refractor를 회전시켜 이미지를 얻은 후에 다시 refractor를 정지시키고 얻어진 이미지를 표시하고 각각의 프레임(24frame/sec)을 분석한다. (Fig. 3-7)

(4) Multi laser spot의 투사를 중지하고 refractor를 다시 최초의 상태로 위치시킨 후 다시 board의 이미지를 얻는다. 이때 board의 격자 중 하나를 중심점으로 정하고 이를 중심으로 4개의 점을 지정하여 각각의 지점마다 (x, y, z)값을 입력

한다.

(5) 다시 board를 일정한 거리만큼 이동시키고 다시 반복하여 계측한다.

(6) (1)~(5)를 5회 반복한 후 이 Data를 저장시키고 컴퓨터 화면상에서 두개의 위치를 지정하여 실제 거리와 화면상의 이동거리가 일치하는지 확인한다.

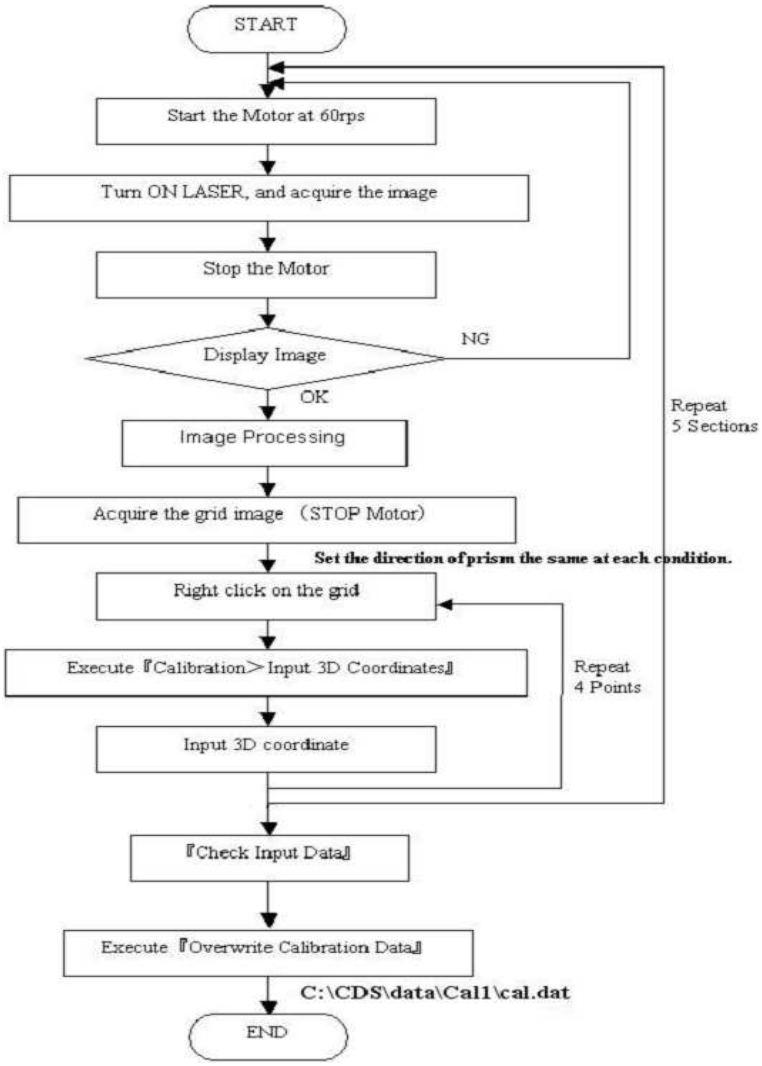


Fig. 3-5 Chart of calibration

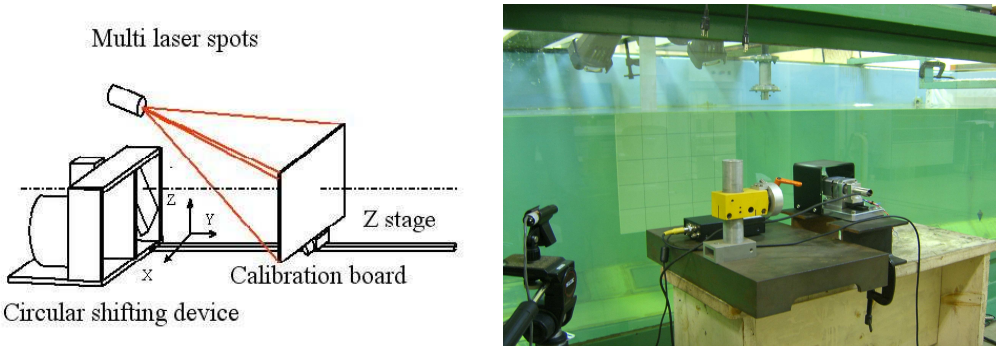


Fig. 3-6 Setup for Calibration

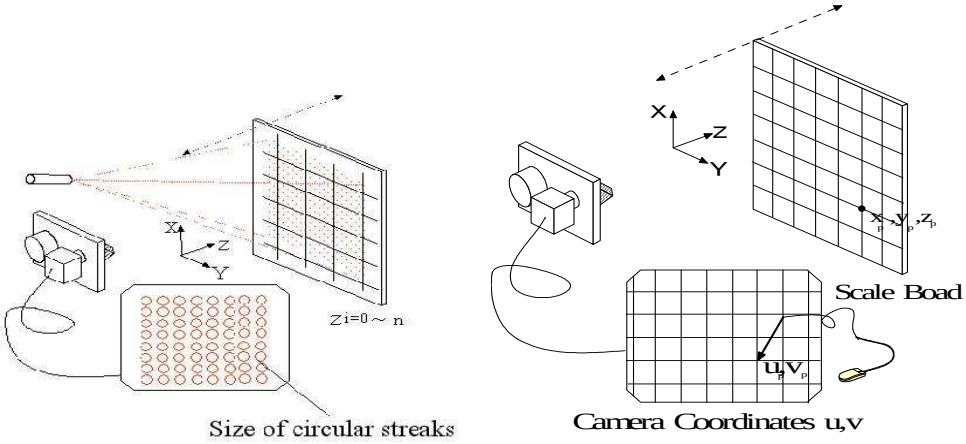


Fig. 3-7 Detection of annular streak & pairs of each coordinates

3.2.1.2 Measurement of water speed using pitot tube

Calibration을 비롯한 모든 실험 및 계측이 CWC장치에서 이루어지며 CWC의 유속은 Control장치에서 impeller의 ratating speed를 설정하여 조정한다. 따라서 Impeller rotating speed에 따른 유속을 알아야만 실험 조건에 대한 정확한 값을 얻을 수 있을 것이다. 그러므로 실제 실험을 하기 전에 pitot tube를 이용하여 CWC의 유속을 측정하였다.

(1) Pito tube를 CWC의 수면에서 수직으로 수심 약 200㎜ 지점에 설치한다.

(2) Pito tube의 호스를 pressure cell과 연결한다. (호스내에 기포는 제거한다.)

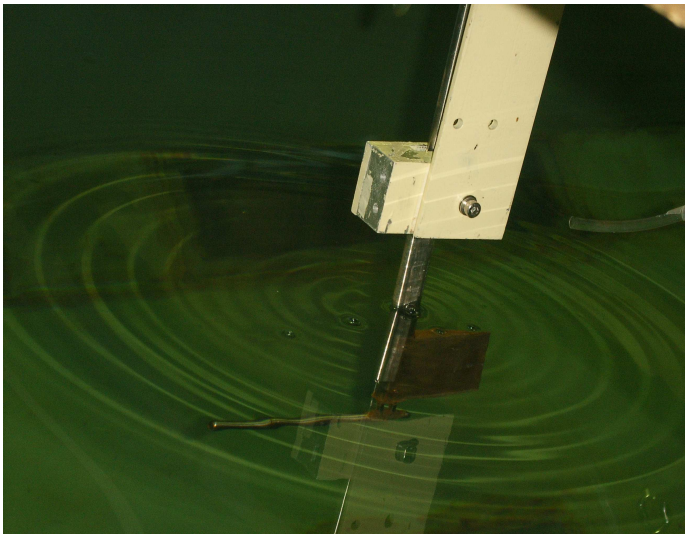


Fig. 3-8 Pito tube

(3) impeller의 ratating speed를 설정해서 물을 순환시킨다.

(4) 원하는 impeller ratating speed에 도달하면 pressure cell에 연결된 amplifier의 전압값을 기록한다.

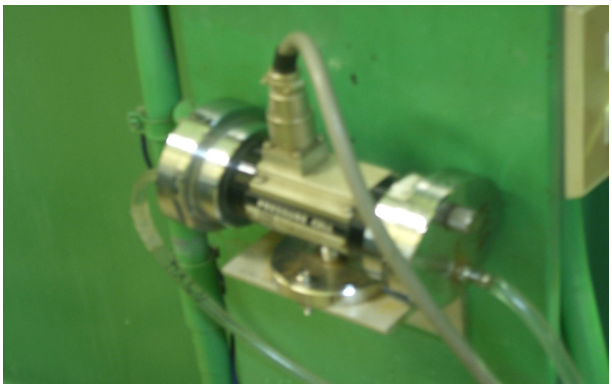


Fig. 3-9 pressure cell

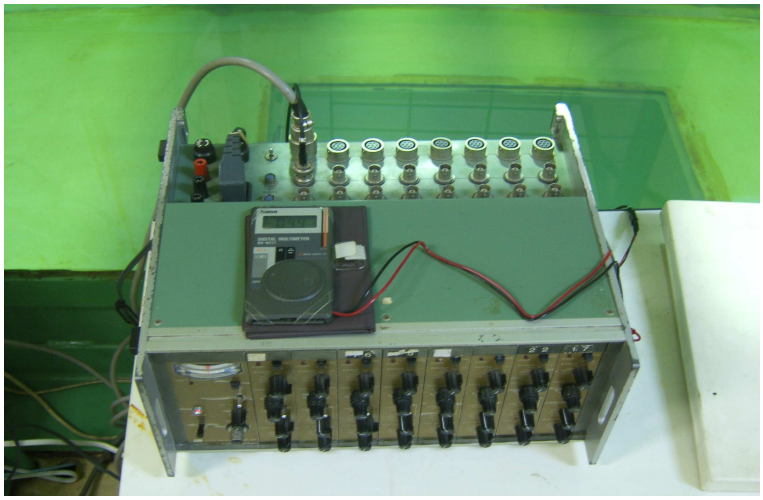


Fig. 3-10 Amplifier

(5) $1000\mu\epsilon$=$1.04E(v)$의 식으로 전압 값을 $\mu\epsilon$의 값으로 변환한 후 $\mu\epsilon/H(m)$의 graph를 이용하여 H의 값을 구한다.

(6) $V=\sqrt{2\times g\times H}$의 식을 이용하여 속도를 구한다.

(7) impeller rotating speed에 따른 유속 V를 구하여 graph를 작성한다.

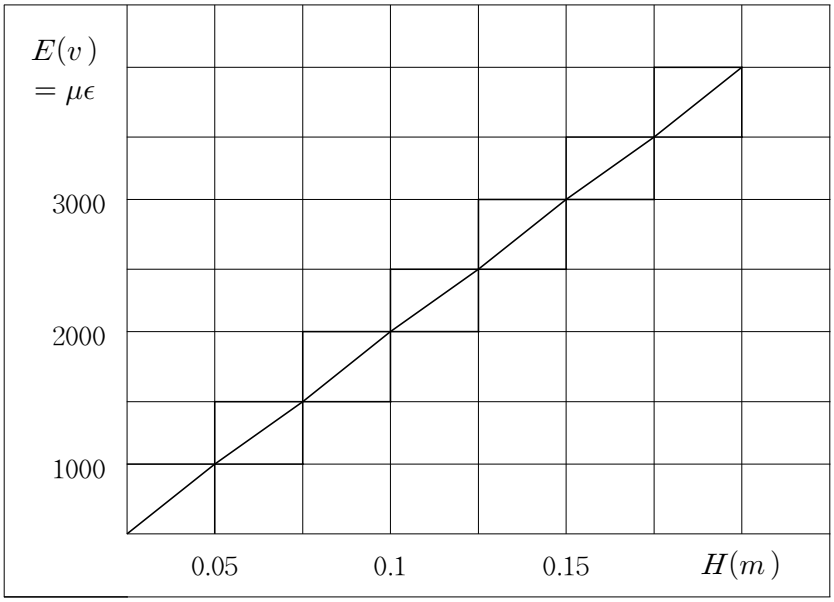


Fig. 3-11 $\mu\epsilon$ vs $H(m)$ graph

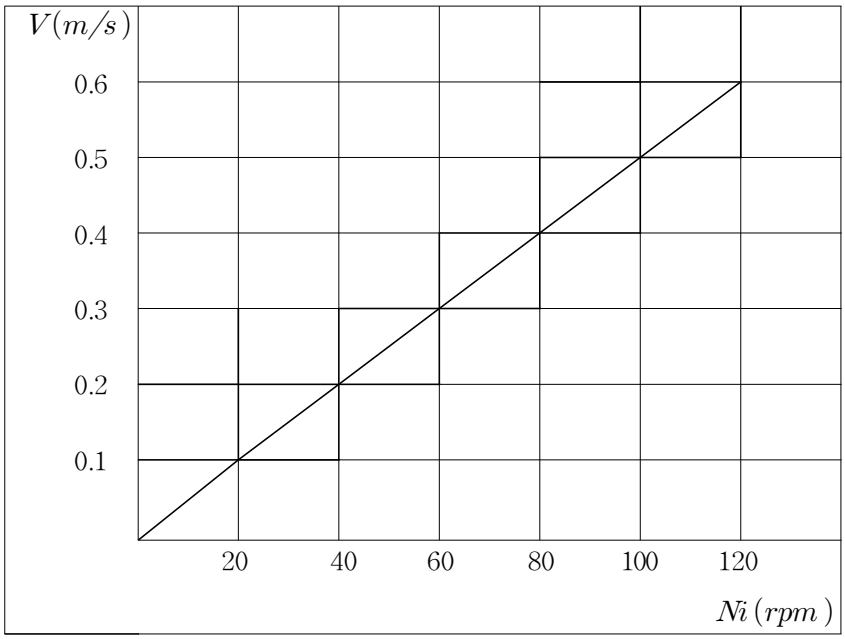


Fig. 3-12 $V(m/s)$ vs $Ni\,(rpm)$ graph

3.2.2 실험 및 계측결과

실제 유동을 계측하기 위해서는 흐름이 있는 유체 속에 계측할 대상 model를 고정시키고 Particle을 유동장 내에 주입하여 대상물체 주변에 흘러가도록 한다. 그 다음 Particle이 조명을 통해 만든 스크린을 통과할 때 조명에 반사되는 Particle의 움직임을 계측한다. 이후 영상에 나타난 Paticle의 위치를 추적하여 변위를 구한다. CWC장치에 먼저 카메라와 Multi laser spot등 계측을 위한 장비들을 설치하고 계측 대상 model을 CWC내에 고정시킨다. 장비의 이상유무를 확인하고 최초 계측을 위한 환경을 구성한 뒤 물체의 전면에서 Particle을 흘려보내 물체의 주변 유동에서 Paticle 흐름의 image를 획득한 뒤 프레임으로 저장하여 각각의 프레임마다 분석 및 계산하여 변위벡터를 구하고 이 값을 저장한다. 최종 프레임까지 분석을 마친 후 1~24번 프레임까지의 변위벡터를 계산한 파일을 종합하여 실제 좌표의 벡터값을 구할 수 있으며 또한 이를 가시화 할 수 있는 것이다.

흐르는 유체의 유동을 관찰하는 것이므로 모니터에 나타나는 이미지는 원이 아닌 나선의 형태가 된다. threshold의 레벨을 낮춤으로 더 많은 입자의 운동을 인식할 수 있으나 입자가 많고 속도가 빠를수록 움직임이 겹쳐 Fig. 3-13의 10번 원과 같이 오류가 나는 경우가 있다. 오류 제거 메뉴에 원의 번호를 입력함으로써 제거할 수 있으며 연속하여 얻어진 이미지들을 이용하여 입자의 순간 속도를 구할 수 있다. 아래의 그림들은 각각의 프레임을 분석하고 다음 프레임과 비교하여 입자 중심의 이동을 계산하는 장면이다.

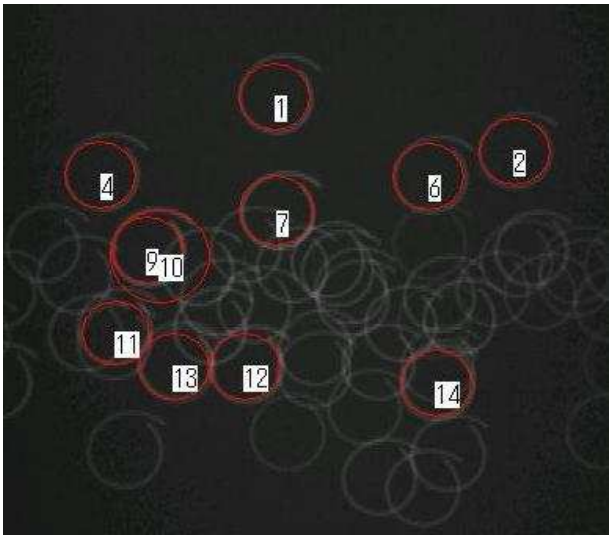


Fig. 3-13 Annular Streak Numbering

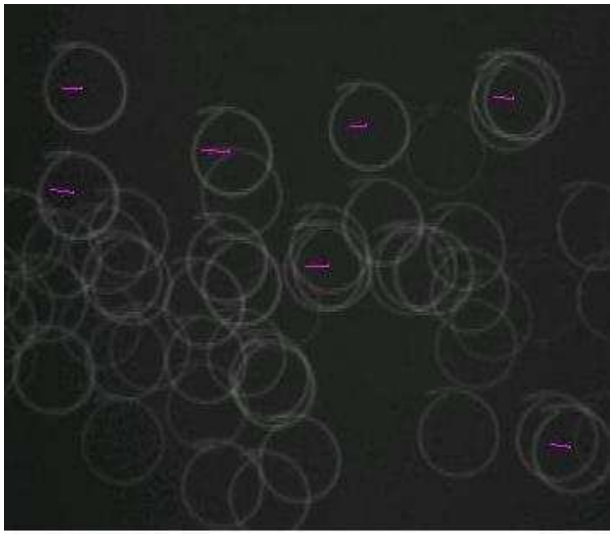


Fig. 3-14 Velocity Vectors of Each Particles

모든 프레임의 분석과 계산을 종합하여 얻어진 계측의 결과는 다음과 같이 벡터값으로 나타내어 질 수 있으며 Micro AVS 7.0 프로그램을 통해 3차원 입체 영상으로 가시화 할 수 있다.

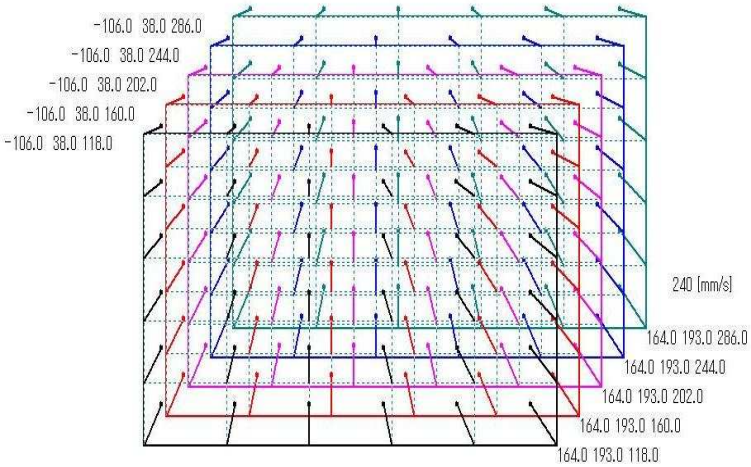


Fig. 3-15 Velocimetry

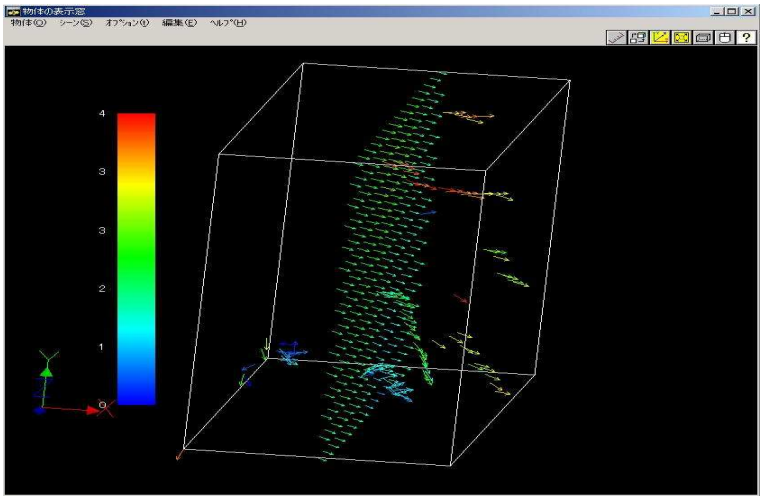


Fig. 3-16 Flow around Cylinder Model in PTV

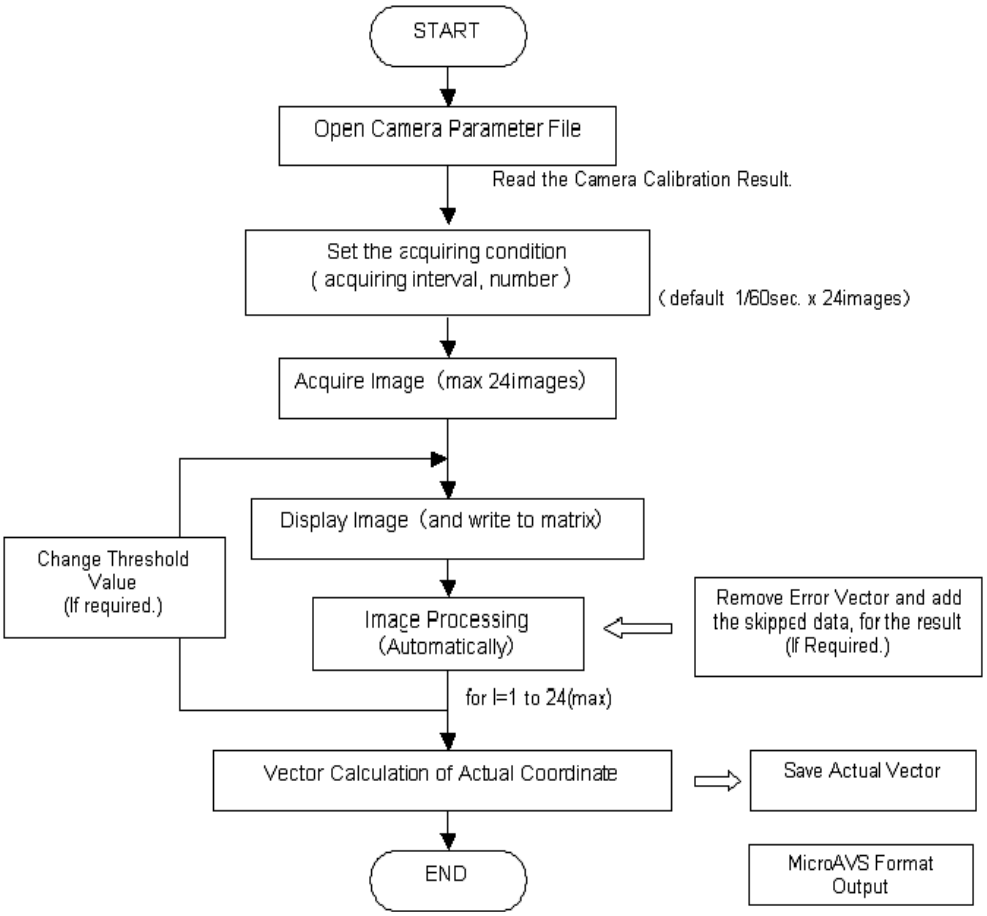


Fig. 3-17 Chart of measurement

제 4 장 CFD-code를 이용한 유동해석

4.1 Fluent를 이용한 유동해석

4.1.1 유동해석 조건 설정

CFD-code를 이용한 유동해석에는 계산을 위해 GAMBIT program을 이용하여 model 및 유동계측 영역을 만들고 짜여진 grid를 FLUENT를 이용하여 해석하였다.

실제 회류수조에서 PTV-system을 이용하여 Model 주위의 유동을 계측한 것과 동일한 조건을 만들어주기 위하여 회류수조의 계측 공간과 동일한 형상과 크기의 조건을 만들었으며 유속, 수온등의 조건도 동일하게 하였다.

4.1.2 유동해석 및 결과

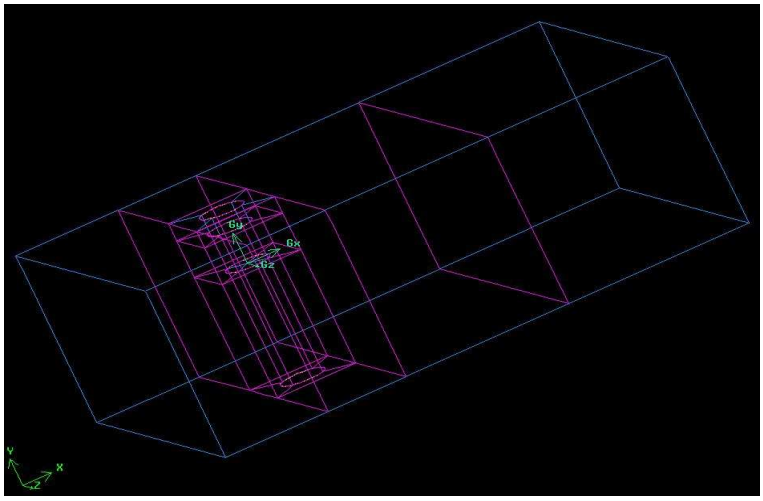


Fig. 4-1(a) CWC & Cylinder model

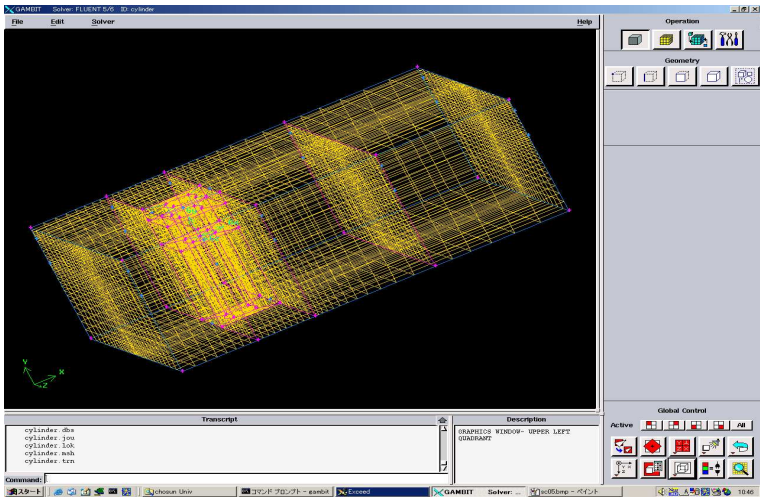


Fig. 4-1(b) CWC & Cylinder model

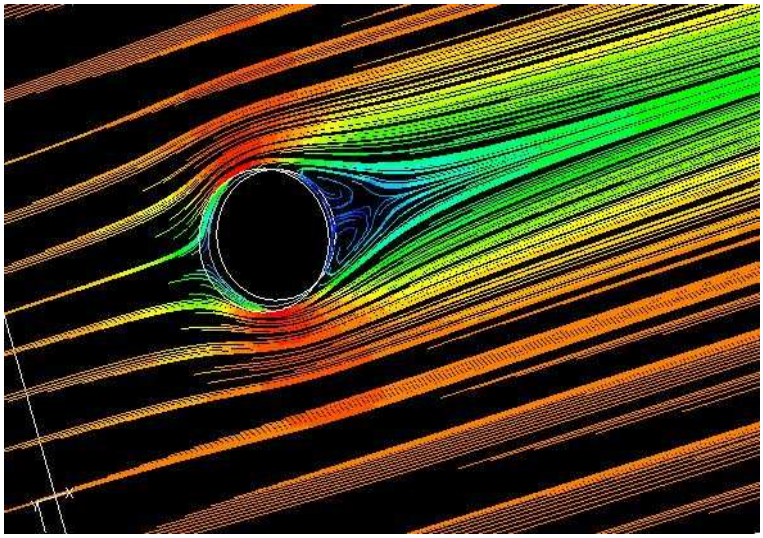


Fig. 4-2 Stream lines of cylinder model

Fig. 4-1(a)와 (b)는 회류수조의 계측영역 및 model의 형상을 GAMBIT를 이용하여 만들어 놓은 모습이며 Fig. 4-2는 Fig. 4-1의 짜여진 model과 유동계측영역을 FLUENT를 이용하여 주위 유동을 나타낸 것이다.

제 5 장 *Circular Dynamic Stereo PTV-system*과 *CFD-code*의 계측결과 비교

5.1 PTV-system result

각각의 Vector의 값으로 계산되어진 결과는 Micro-AVS program을 이용해서 3차원의 Streamline image를 얻을 수 있다.

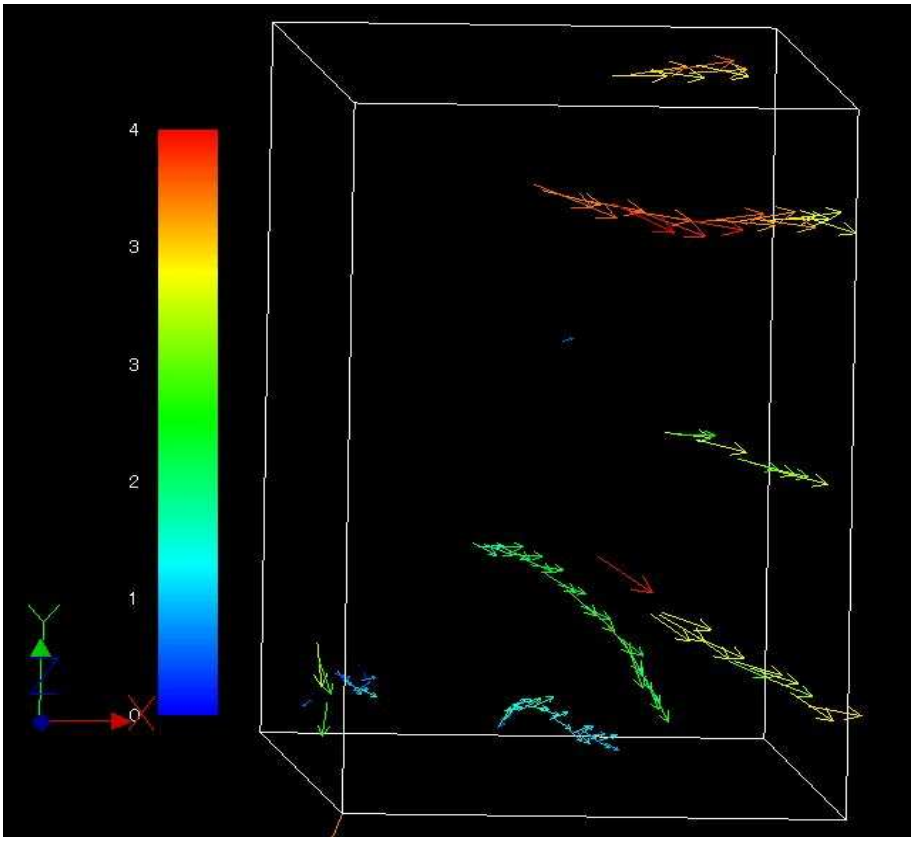


Fig. 5-1(a) Flow direction around cylinder model

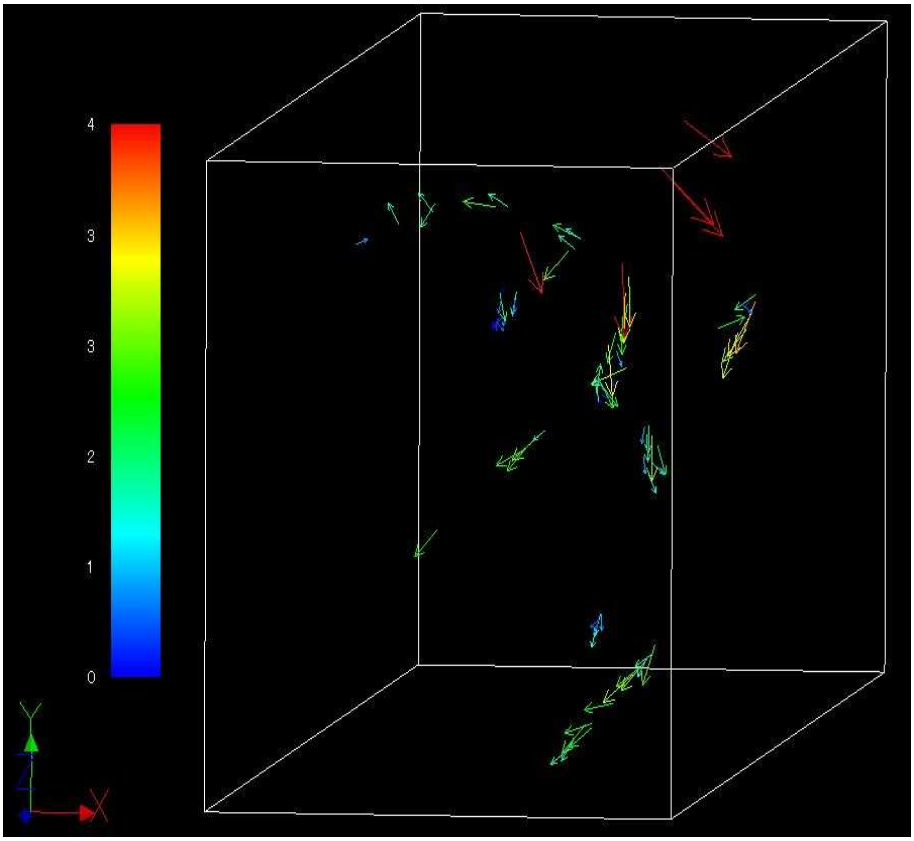


Fig. 5-1(b) Flow direction around cylinder model

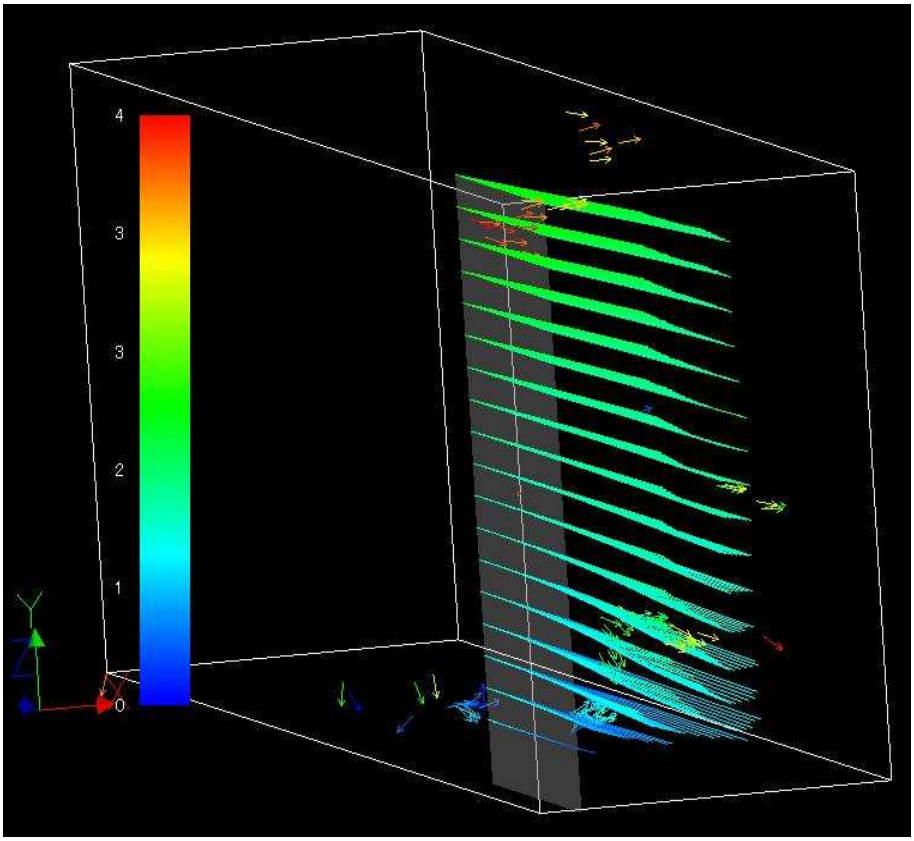


Fig. 5-2 Stream lines of the flow behind Cylinder model

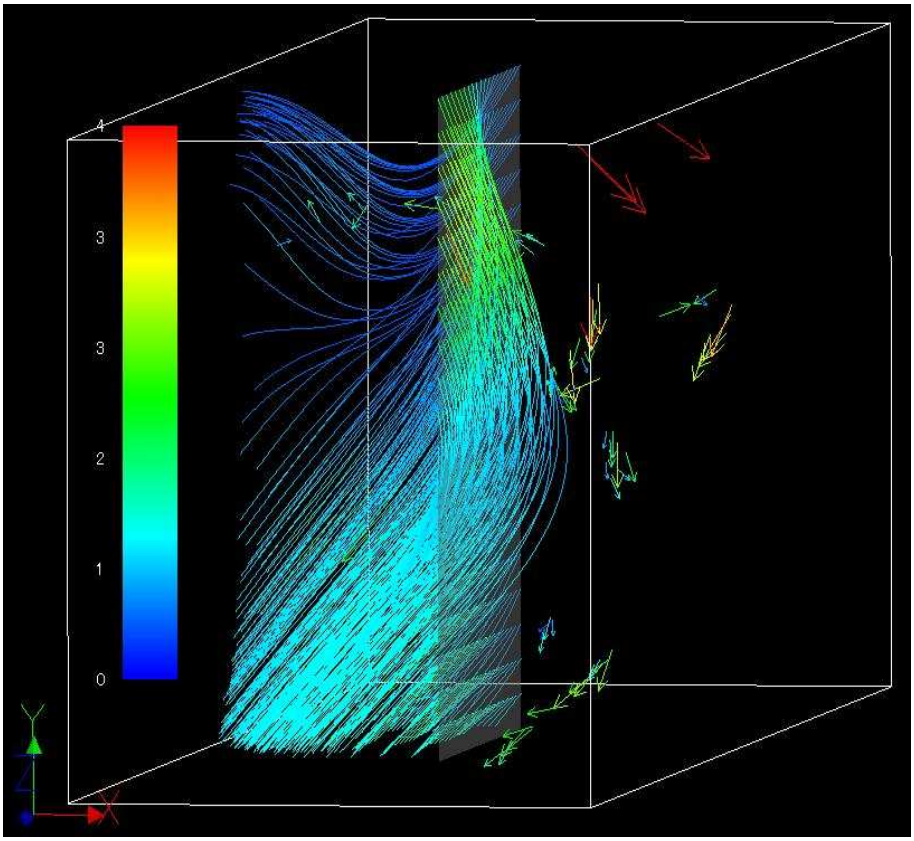


Fig. 5-3 Flow direction & Stream lines of the flow behind Cylinder model

5.2 CFD-code result

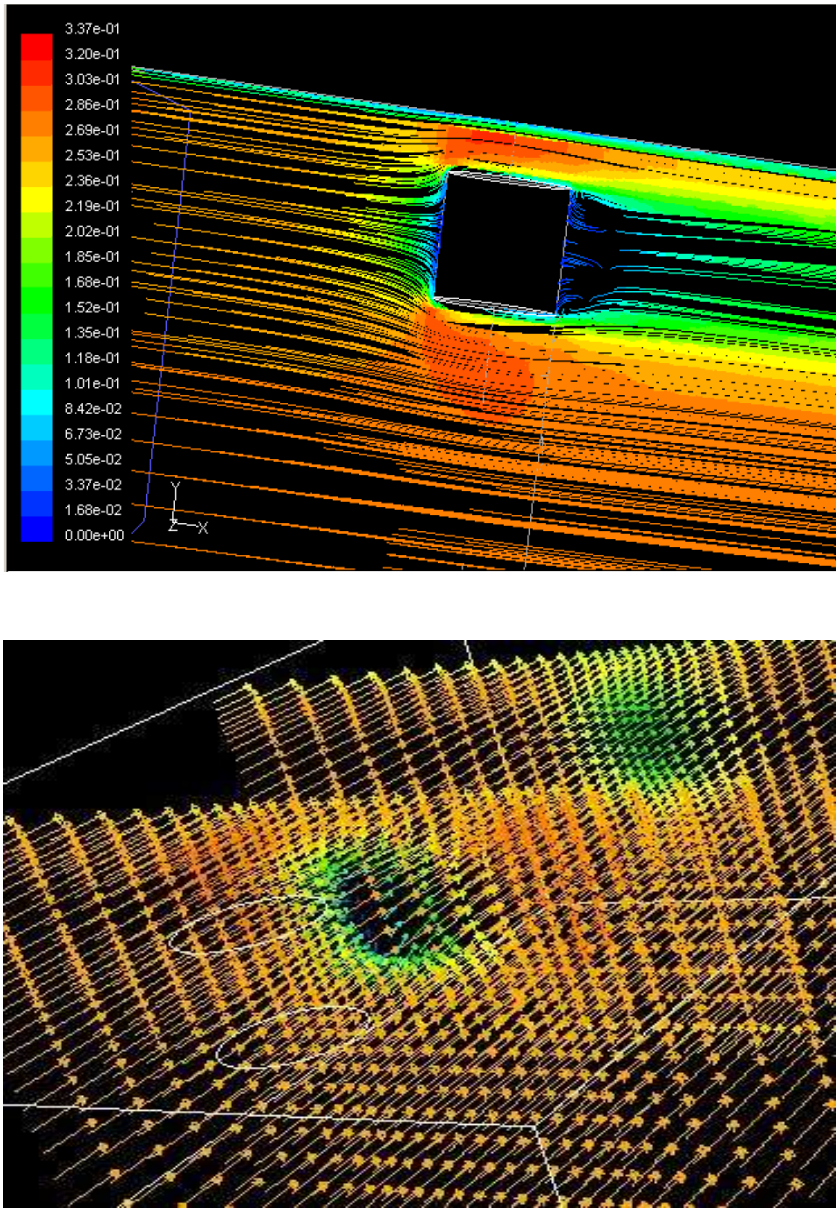


Fig. 5-4 Stream lines & Velocity vectors colored by velocity magnitude of cylinder model

5.3 PTV-system result와 CFD-code result 비교

PTV system과 CFD code를 이용한 Cylinder model 주위의 3차원 유동해석결과를 비교해본 결과, PTV system에 의한 유동계측의 경우 Cylinder model의 전면 및 측면의 주위에서는 매끄러운 유선을 보인 반면에 아래부분으로 통과한 유동은 후미에서 다소 불규칙적이고 비정상적인 흐름을 나타내었다. 반면 CFD-code를 이용하여 계측하였을 때는 역시 전면 및 측면에서의 흐름과 마찬가지로 아래부분과 후류에서도 규칙적인 유동을 나타내었다.

제 6 장 *PTV-system*을 이용한

2500TEU container 모형선의 유동 계측

Circular dynamic streo PTV-system의 선체주위 유동해석에의 적용가능성을 검증하기 위해 2500TEU 컨테이너 모형선의 선미 후류를 계측하였다. 계측에 사용한 대상선의 선도는 Fig. 6-1에 나타내었고 모형선 및 실선에 대한 제원은 Table 6-1과 같다.

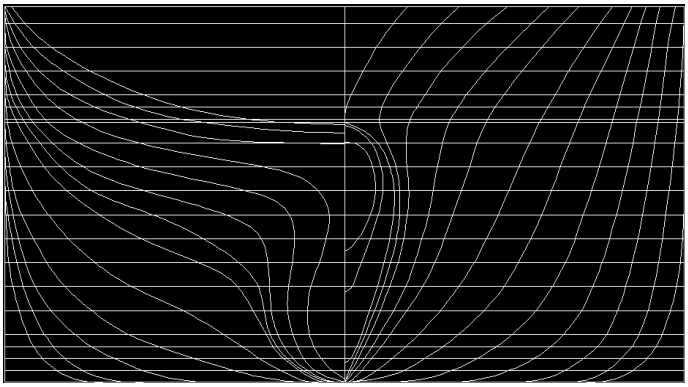


Fig. 6-1 Body plan of 2500TEU container ship

Table 6-1 Principle Dimension of 2500TEU container Ship

Parameters	Full scale ship	Model ship
L_{PP}	196.8	1.2
B	29.72	0.18
T	10.85	0.066
C_B	0.63	

6.1 계측장비

본 실험은 조선대학교 회류수조에서 실시하였으며 PTV-system은 이전의 cylinder model을 계측할 때 사용하였던 system과 동일한 계측방식을 가지고 있으나 Prism의 회전속도는 120㎐로 보다 향상되었으며 2가지 형태의 Prism을 사용하여 실상과 허상이 동시에 나타내어지도록 하였다. 실험에 사용하였던 회류수조의 주요제원과 PTV-system의 구성은 다음과 같다.

(1) CWC Type

2 impeller Type, Vertical circulating water channel

(2) CWC Particulars

① Whole Body	length	: Abt.	1400mm(outside)
	heigh	: Abt.	5800mm(outside)
	width	: Abt.	2400mm(outside)
② Measuring Section	length	: Abt.	5500mm(inside)
	heigh	: Abt.	1300mm(inside)
	width	: Abt.	2000mm(inside)
	water depth	: Abt.	1000mm(inside)

(3) Composition of PTV-system

1. 3D-PTV Basic System

(1) Camera system

a. PTV unit with prism unit for image shiftin

b. PTV unit base frame

c. CCD camera

d. Motor control unit

(2) Calibration system

a. Laser pattern projector

b. Calibration plate and its stay for setting on the traverse system

(3) Computer system

a. One set of Windows PC (English Version)

b. Visualizing Software, Micro-AVS

c. Image Acquiring and Processing Software (CD-ROM)

d. TV Minitor

2. Tracer Collecting System

a. Collecting Net and its fixing frame

b. Tracer Injection System

c. Tracer Particles

3. Lighting System

a. Lighting system

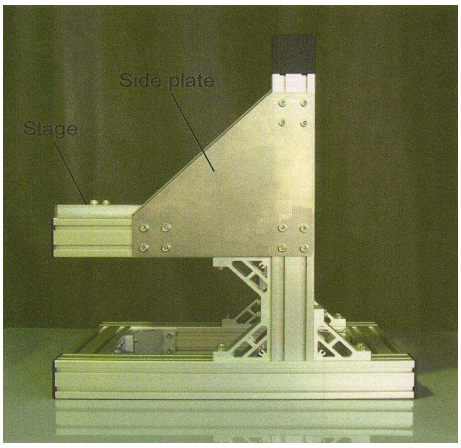


Fig. 6-2 Camera system of PTV-system

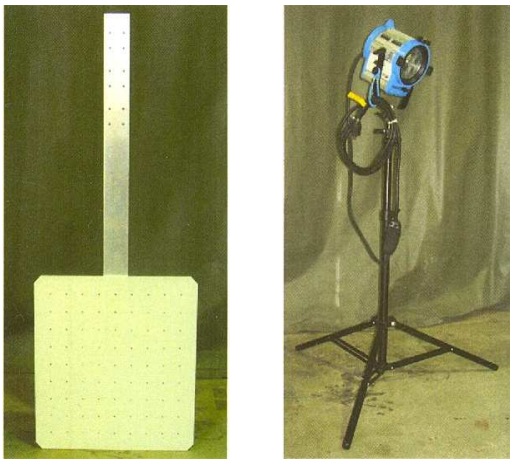


Fig. 6-3 Calibration board & Lighting system

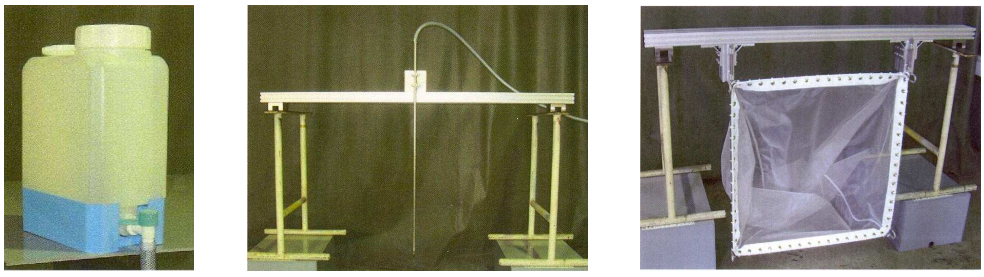


Fig. 6-4 Particle injection system & collecting system

6.2 유동계측

유동계측시 회류수조의 Impeller speed는 좌·우 각각 120rpm으로 하였고 Rotor speed는 180rpm으로 하였다. Camera의 Parameter를 구하기 위해 Calibration을 실시하였다. 앞서 3.2.1.1절에서 언급하였던 방법과 마찬가지로 동일한 순서로 교정작업을 수행하였으며 얻어진 교정값을 바탕으로 실제 계측을 실시하였다. 모형선을 계측지점에 위치시키고 조명조건을 구성하여 Particle을 조금씩 흘려보내면서 모형선의 선미에서 나타나는 후류를 계측하였다.

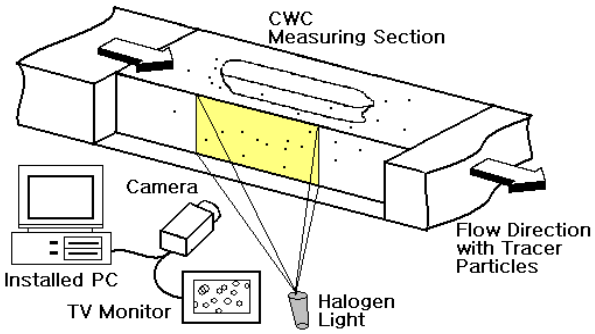


Fig. 6-5 Schematic diagram of PTV-system mesurement

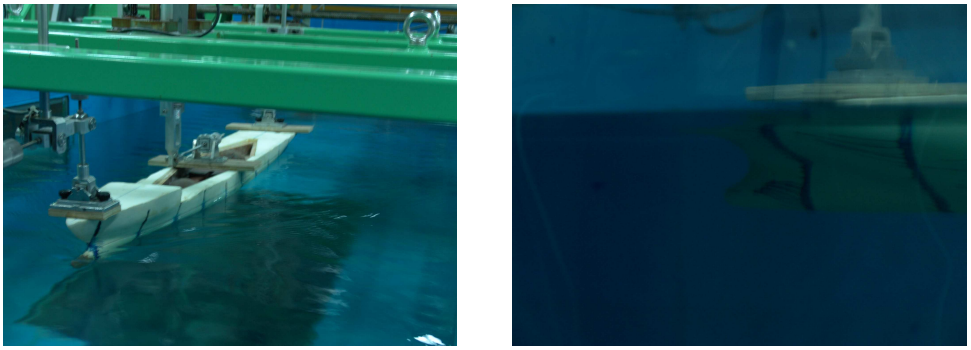


Fig. 6-6 model ship & mesuring point

총 24개의 frame을 획득하고 각각의 frame에 나타나는 입자의 이동경로를 분석하여 vector값을 얻는 과정을 거쳐서 유동을 계측하였다. Particle의 주입지점을 선체의 세로방향 중심에 위치하여 계측하고 다시 수면에 가까이 위치하여 총 2회 계측하였다.

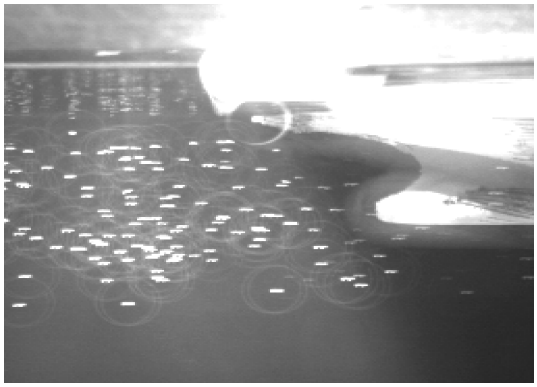


Fig. 6-7 Annular streak image

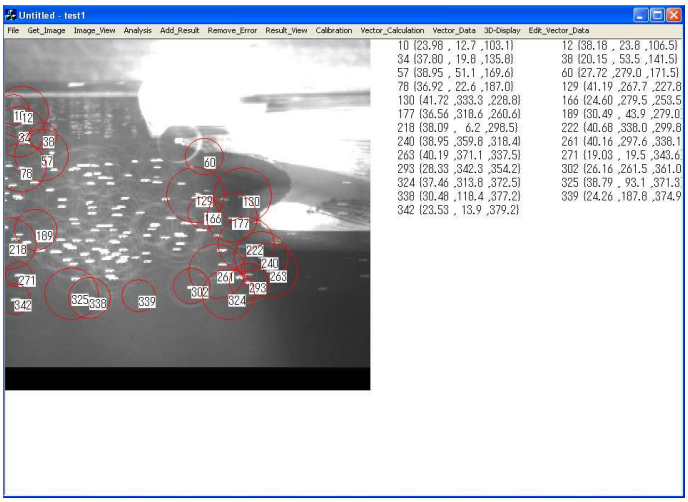


Fig. 6-8 Analysis of image

6.3 계측결과 및 고찰

먼저 particle의 주입지점을 선체의 세로방향 중심에 두고 계측한 결과는 다음과 같다.

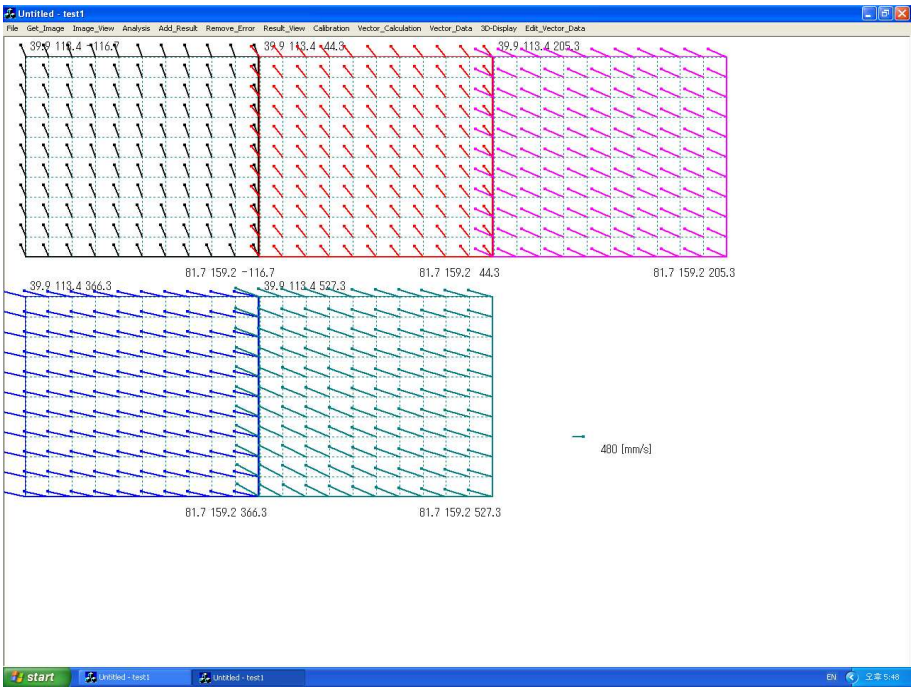


Fig. 6-9 3-D display of test-1 vector result

결과값을 보면 알 수 있듯이 주입지점이 낮게 설정되어 particle이 선저부분을 타고 흐르다가 선미에서 선형을 따라 올라오는 거의 균일한 방향의 속도분포를 보이는 유동을 볼 수 있다. 하지만 정확한 선미유동의 계측을 위해서는 다소 불충분한 결과값이므로 particle의 주입지점을 수면에 가깝도록 수정하여 다시 계측하였다. Particle의 주입지점을 수면 가까이 설정하여 계측한 결과값은 다음과 같다.

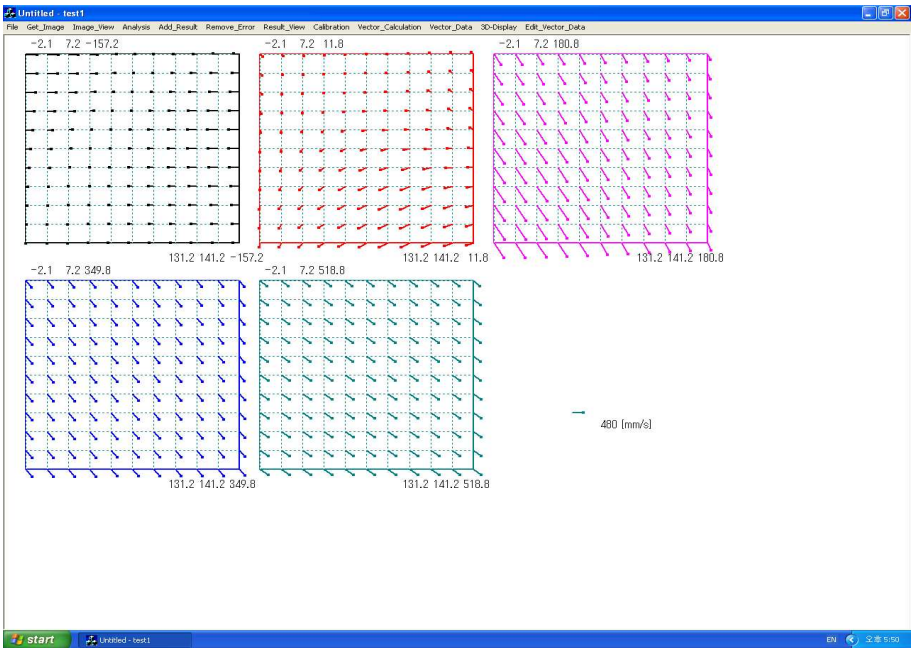


Fig. 6-10 display of test-2 vector result

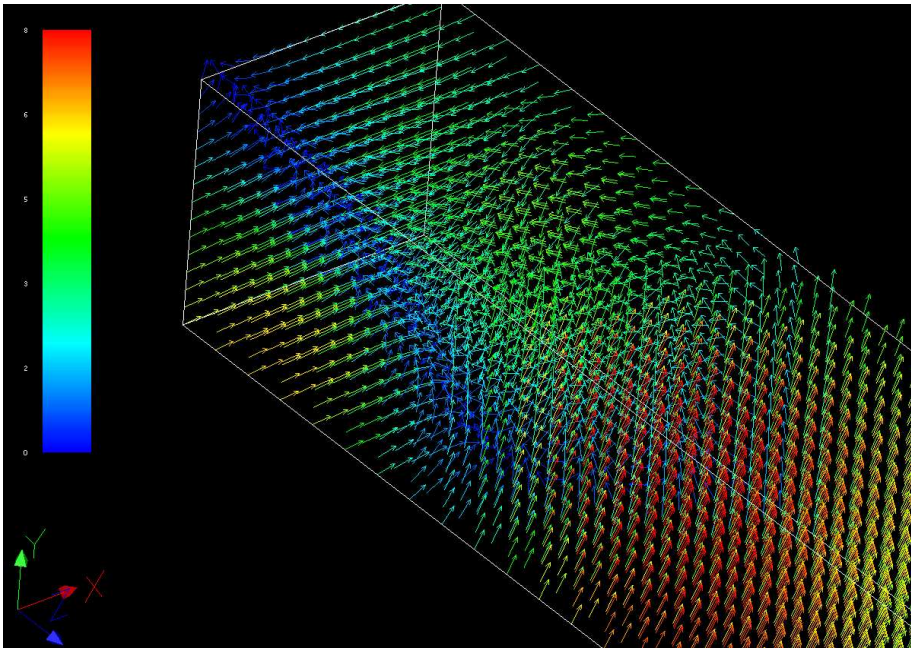
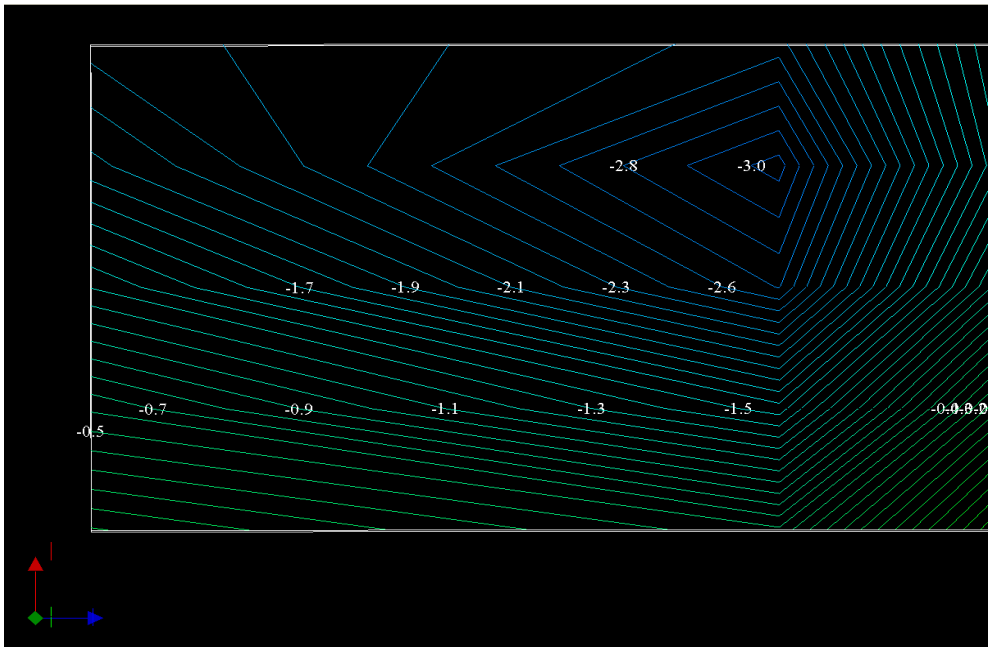
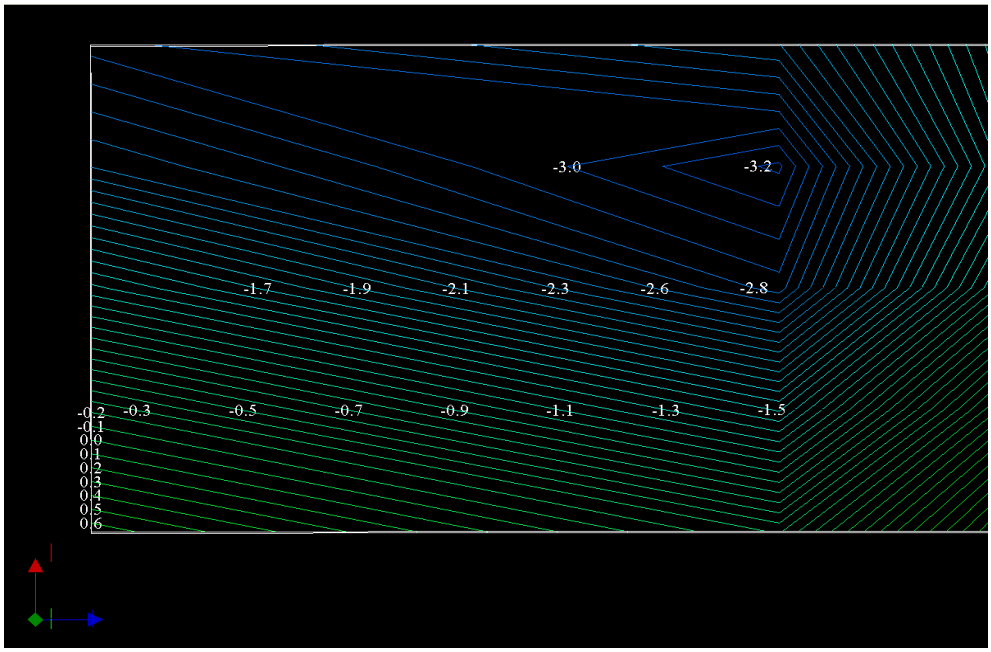


Fig. 6-11 3-D flow direction view of test-2 result

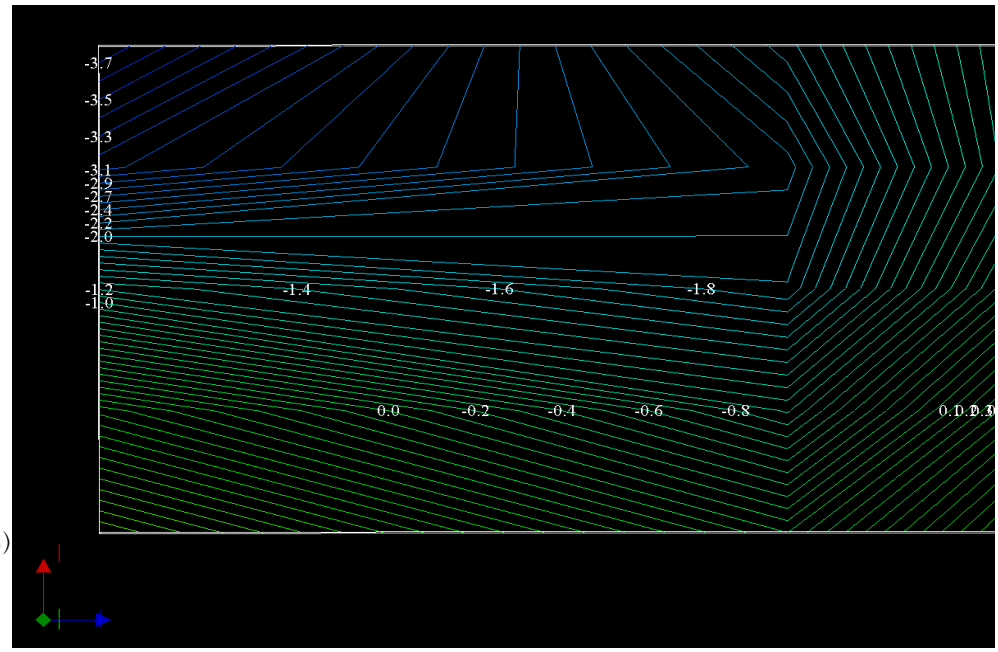

-2.8
-3.0
-1.7
-1.9
-2.1
-2.3
-2.6
-0.7
-0.9
-1.1
-1.3
-1.5
-0.5

(a)

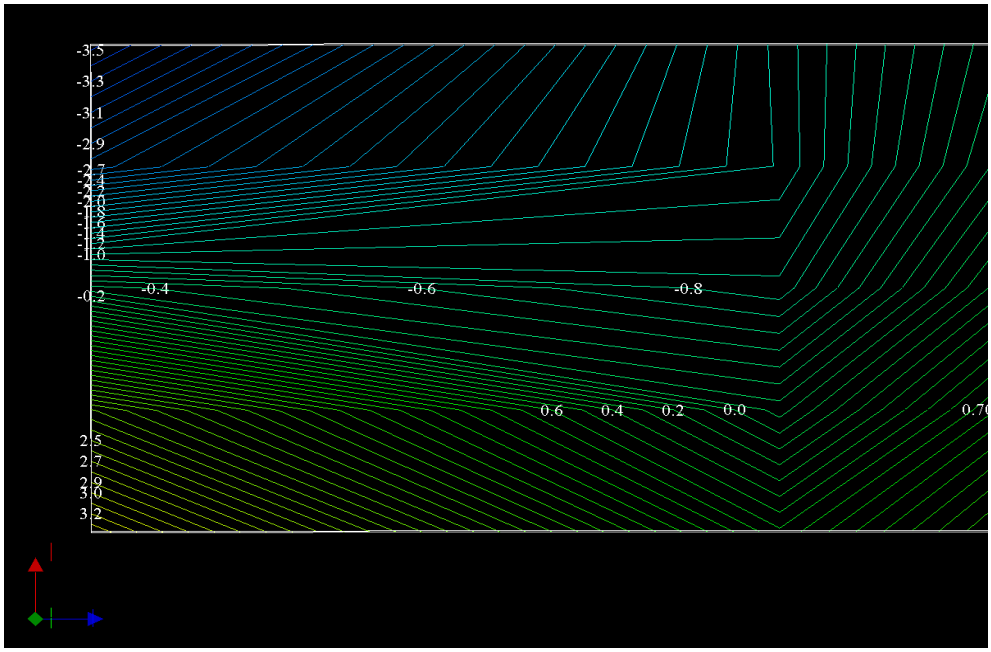

-3.0
-3.2
-1.7
-1.9
-2.1
-2.3
-2.6
-2.8
-0.2
-0.3
-0.5
-0.7
-0.9
-1.1
-1.3
-1.5
-0.1
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6

(b)

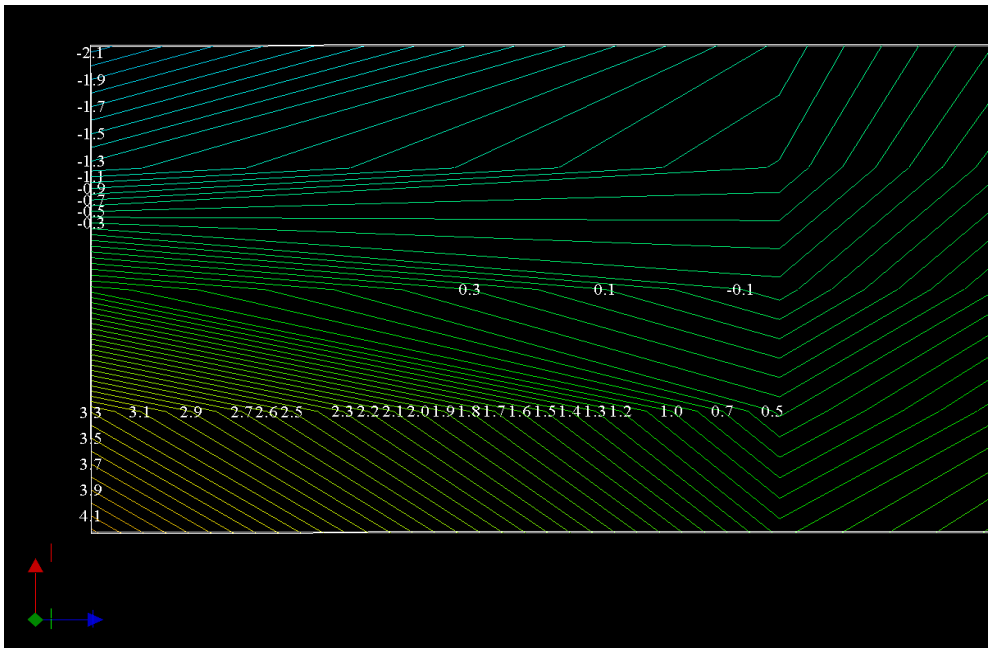
(b)


-3.7
-3.5
-3.3
-3.1
-2.9
-2.7
-2.4
-2.2
-2.0
-1.2
-1.0
-1.4
-1.6
-1.8
0.0
-0.2
-0.4
-0.6
-0.8

(c)

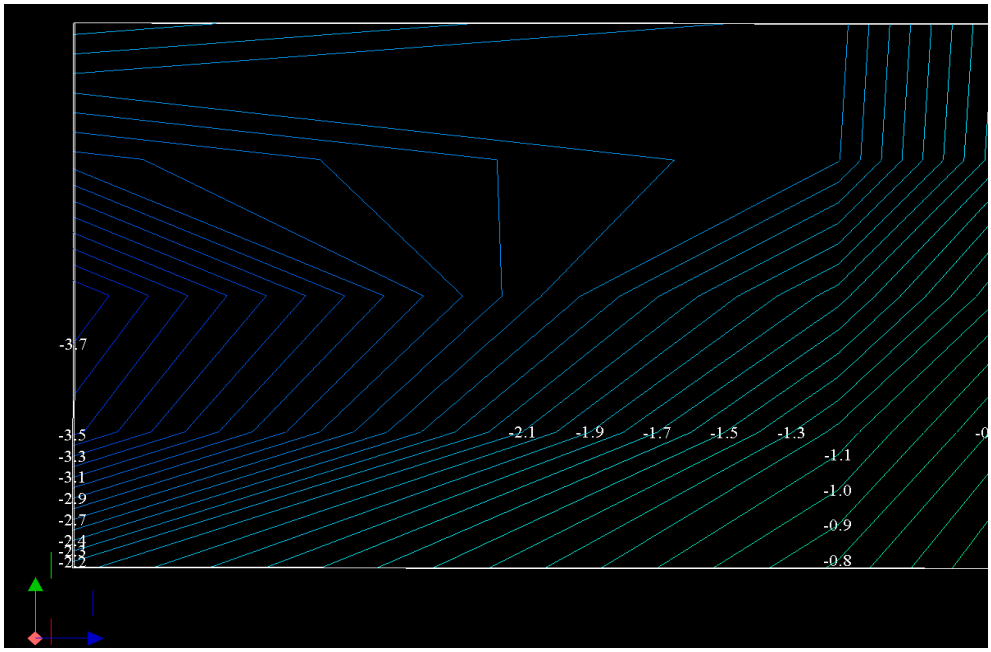

-3.5
-3.3
-3.1
-2.9
-1.0
-0.2
-0.4
-0.6
-0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
2.5
2.7
3.0
3.2

(d)

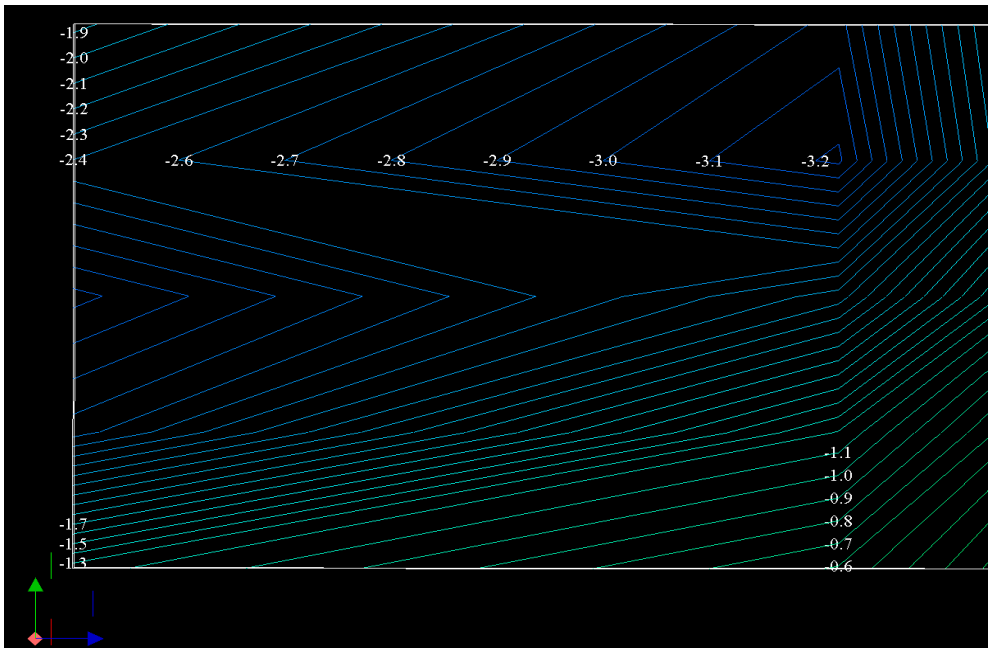


(e)

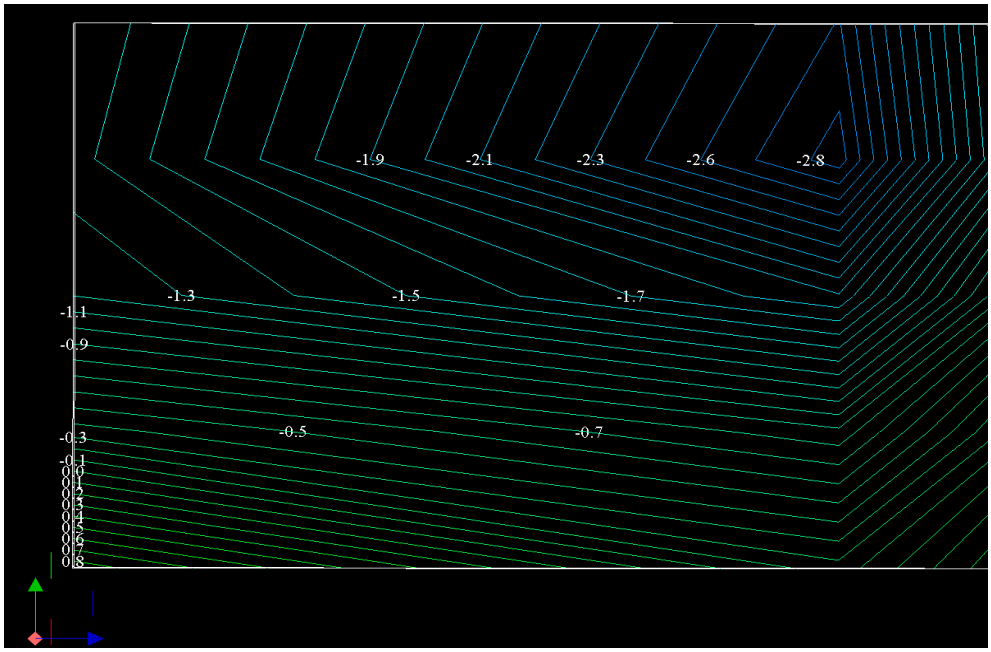
Fig. 6-12 extract isoline view(Y-axis) of test-2 result



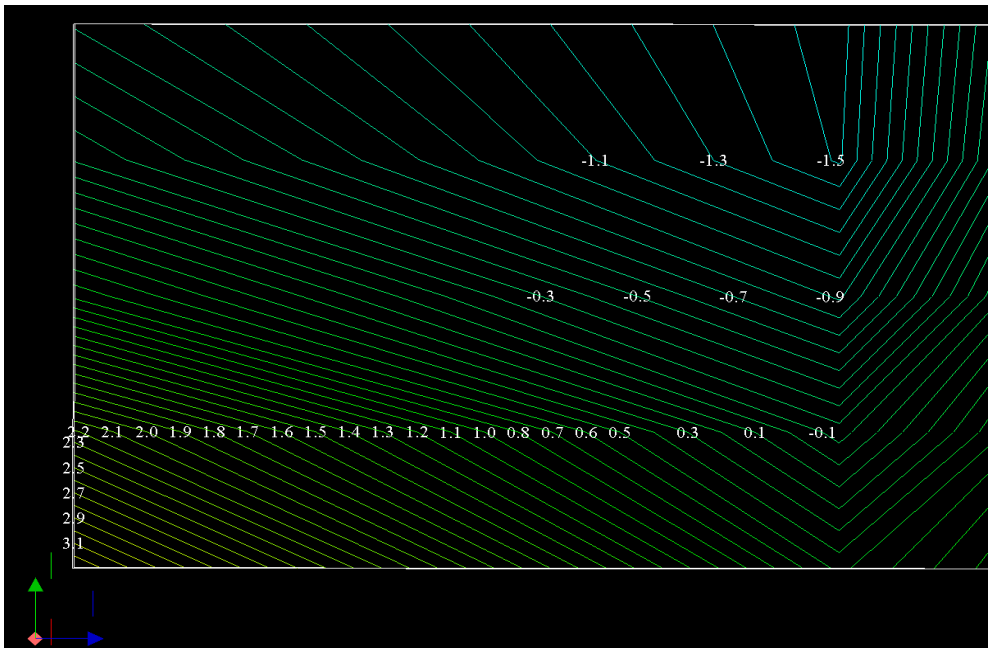
(a)


-1.9
-2.0
-2.1
-2.2
-2.3
-2.4
-2.6
-2.7
-2.8
-2.9
-3.0
-3.1
-3.2
-1.1
-1.0
-0.9
-0.8
-0.7
-0.6
-1.7
-1.5
-1.3

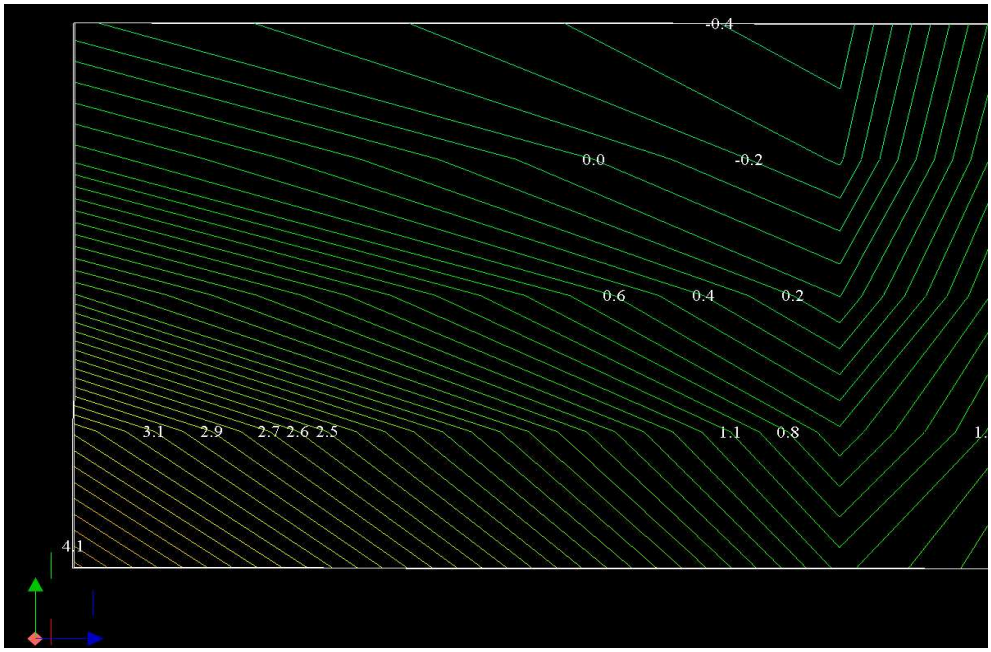
(b)


-1.9
-2.1
-2.3
-2.6
-2.8
-1.3
-1.5
-1.7
-1.1
-0.9
-0.5
-0.7
-0.3
-0.1
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8

(c)



(d)



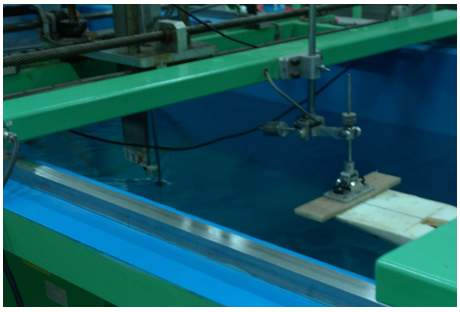
(e)

Fig. 6-13 extract isoline view(X-axis) of test-2 result

주입지점을 수정하여 다시 계측한 결과 선미의 중심부에서 오른쪽 부분의 후류가 계측되었고 Fig. 6-12와 같이 수면에서 가까운 곳으로부터 반류가 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 본 실험의 기초로 하였던 참고문헌[7]의 결과와 매우 유사한 경향을 보인다. Fig. 6-13은 후류를 뒤에서 바라보았을 때를 나타낸 것으로 선체에서 가까운 곳으로부터 순서대로 나타낸 것이다.

위의 실험결과들은 계측된 총 9개의 Vector data를 바탕으로 경향을 분석하여 나타낸 것이다. 향후 좀더 정확하고 확실한 측정을 위해서는 계측할 수 있는 최대한의 Vector data를 바탕으로 하여서 분석하여야 할 것으로 사료된다. 또한, 모형선의 후류를 측정했던 본 실험과는 다르게 선체주위의 유동을 해석하기 위해서는 측정 대상이였던 모형선의 표면색상이 밝은 색으로 이루어져 있어서 camera에 의해 획득된 frame에서 명확한 particle의 흐름을 추적하기 어려우므로 모형선의 표면을 검은색등의 어두운 색으로 해서 측정해야 할 것이다.

실험에서 계측된 모형선 후류의 최대유속은 약 0.68m/s의 분포를 보였다. 따라서 프로펠러 유속계를 이용하여 모형선 선미 후류의 속도를 측정하였다. 프로펠러 유속계에 의해서 계측된 유속은 0.65m/s～0.68m/s의 분포를 가진 것으로 나타났으며 PTV-system을 이용한 계측값과 유사한 속도를 보였다.



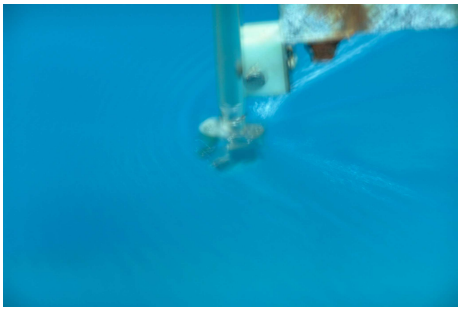


Fig. 6-14 Speed measurement of flow using propeller velocitymeter

Circular dynamic streo PTV-system을 이용하여 선체 후미에서의 유동을 계측한 결과값이 기존에 수행되었던 PIV를 이용하여 3600TEU container model ship의 선미유동 계측결과와 유사한 결과임을 확인할 수 있었으며 또한 프로펠러 유속계를 이용한 유속계측의 결과와도 동일함을 확인하였다. 이러한 결과들을 통해 Circular dynamic streo PTV-system을 이용하여 선체 주위 유동해석이 가능함을 검증하였다.

제 7 장 결 론

지금까지의 실험으로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) PTV-system은 계측 및 실험이 다소 까다로운 반면 실제 유동을 계측하는 것이기에 신뢰성이 높으며 정확한 유동계측이 가능하다. 또한 고전적인 유동가시화 방법에서는 정성적인 결과만을 얻을 수 없었던 반면에 정량적인 결과를 Vector값으로 얻을 수 있다. 정확한 결과값을 얻기 위해서는 particle의 주입위치에 유의하여야하며 particle의 주입량의 조절에도 유의하여야 할 것이다. 또한 원하는 부분의 유동을 정확하게 계측하기 위해서는 calibration work시 측정점으로부터 계측범위를 넓게 설정하거나 계측지점의 전영역에 걸쳐 분포할 수 있도록 설정하여 수행하여야 할 것으로 사료된다.

2) 공학분야의 대부분의 유동현상이 3차원성이 강한 유동이라는 점을 고려하며 3차원 PTV의 계측법의 공학적 의의는 날로 증대되어가고 있다. 모형선의 선체주위의 유동과 선미에서 나타날 수 있는 복잡한 유동까지도 PTV-system을 이용하여 계측할 수 있으며 선체부가물 주위의 유동해석에도 효율적으로 이용할 수 있을 것으로 예상된다.

3) 향후 설계된 선형을 CFD-code를 이용하여 계산된 Data를 바탕으로 선형을 개선하고 이를 실제 모형실험에서 PTV-system을 이용하여 유동해석하는 방법으로써 두가지 기술을 접목시켜 사용한다면 선형설계 및 개발에 매우 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

參考文獻

[1] K. Kawasue, Y. Oya, "Three- dimensional Measurement Using Circular Dynamic Stereo and Multi Laser Spots," Transactions of the ASME, Vol.126, 2002.

[2] 이귀주, "實驗流體力學", 도서출판 정자나무, 1998. 2.

[3] 좌순원, "선박설계응용이론 및 모형시험", 도서출판 다보, 2006. 4.

[4] 김진, 류권규, "PIV/PTV를 이용한 균일 유입류에서의 프로펠러 후류 유동장 계측," 대한조선학회학술대회논문집, 2004.

[5] 백부근, 이상준, "위상평균 PTV기법을 이용한 프로펠러 후류의 속도장 측정", 대한조선학회논문집, 제39권, 제3호, 2002.

[6] 도덕희, "PIV(입자영상유속계)계측기술", 기계저널, 제38권, 제10호, 1995.

[7] 이상준, 고민석, 이정묵, "PIV를 이용한 KRISO 3600TEU 컨테이너 모형선의 반류 측정 및 해석", 대한조선학회논문집, 제39권, 제3호, 2002.

[8] Doh, D.H., "A Study on three-dimensional particle imaging thermometry and velocimetry using liquid crystal", Ph.D. Thesis, The Univ. of Tokyo, 1995.

[9] Kasagi, N. and Nishino, K, "Probing turbulence with three dimensional particle tracking velocimetry", Exp. Thermal and Fluid Sci., Vol. 4, 1991.

[10] 도덕희, 최성환, 홍성대, 이연원, "디지털 화상처리를 이용한 유동장의 비접촉 3차원 고속류 계측법의 개발", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집(B), 1999.

[11] 백승조, 이상준, "일치확률방식의 2-프레임 PTV 알고리듬 개발", 대한기계학회논문집, 제19권, 제7호, 1995.

[12] Kobayashi, T. Saga, T. Haeno, T., and Tsuda, N., "Development of a real-time velocimetry measurement system for high Reynolds fluid flow using a digital image processing design", ASME FED-Vol. 128, 1991.

[13] Doh, D. H., Choi, S. H., Cho, K. R., Y. W. Lee, "Virtual image for a benchmark test of 3-dimensional PIV algorithm for unsteady tuebulent flows", KSME Fluid Engineering Division, 1999.

[14] Merzkiirch,W., "Flow Visualization", Academic Press, New York, 1974.

[15] Matsuo, Y., et al., "Transonic Flow Analysis and Its Visualization Using PC