

2006 년 8월  
박사학위 논문

# 흡입관에 부착된 이젝터의 속도 및 압력분포 특성에 관한 연구

A Study on the Velocity Profile and Pressure  
Distributions in Ejector Linking Inhale Duct.

조선대학교 대학원

기 계 공 학 과

설 재 림

# 흡입관에 부착된 이젝터의 속도 및 압력분포 특성에 관한 연구

A Study on the Velocity Profile and Pressure  
Distributions in Ejector Linking Inhale Duct.

2006 년 8 월 25 일

조선대학교 대학원

기 계 공 학 과

설 재 림

흡입관에 부착된 이젝터의 속도 및  
압력분포 특성에 관한 연구

지도교수 이 행 남

이 논문을 공학 박사 학위 신청 논문으로 제출함

2006 년 4 월 일

조선대학교 대학원

기 계 공 학 과

설 재 림

# 설 재 림의 박사학위 논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 공학박사 박 길 문 ㉠  
위 원 조선대학교 교수 공학박사 모 양 우 ㉠  
위 원 동아대학교 교수 공학박사 서 이 수 ㉠  
위 원 전남대학교 교수 공학박사 박 상 규 ㉠  
위 원 조선대학교 교수 공학박사 이 행 남 ㉠

2006년 6월 일

조선대학교 대학원

# 目 次

目次 .....	i
LIST OF TABLE .....	iii
LIST OF FIGURES .....	iii
NOMENCLATURE .....	iv
ABSTRACT .....	ix
第 1 章 序 論 .....	1
第1節 연구의 배경 .....	1
第2節 연구의 목적 .....	4
第 2 章 理論的 背景 .....	8
第1節 Ejector의 이론식 .....	8
1. Ejector내의 유동 지배방정식 .....	8
第2節 PIV 실험의 이론적 배경 및 이론식 .....	11
1. PIV 실험의 기본원리 .....	11
2. PIV 구성요소 .....	12
3. PIV 측정기법의 종류 .....	14
第3節 CFD 이론적 배경 및 이론식 .....	22
1. CFD 이론적 배경 .....	22
2. 유한체적법 .....	23

第 3 章 實驗 및 數值解析 .....	35
第1節 실험장치 .....	35
第2節 PIV 계측실험 .....	36
第3節 CFD 수치해석 .....	40
第 4 章 結果 및 考察 .....	43
第1節 PIV 결과 및 고찰 .....	43
第2節 CFD 결과 및 고찰 .....	62
第3節 PIV/CFD 결과 비교분석 .....	99
第 5 章 結論 .....	103
REFERENCES .....	104

## LIST OF TABLE

Table. 3-1 PIV System Visualization Equipment .....	37
Table. 3-2 Experiment Condition of Driving Flow .....	38
Table. 3-3 CFD Condotion of Driving Flow .....	42
Table. 4-1 Units of Physical Property .....	62
Table. 4-2 Mean Total Pressure Distribution( $P[N/m^2]$ ) ..	98

## LIST OF FIGURES

Fig. 1-1. Diffuser Pump Diagram .....	4
Fig. 2-1 Velocity Components in Ejector .....	8
Fig. 2-2 Calculation of velocity vector by PIV .....	11
Fig. 2-3 Auto - Correlation Method .....	17
Fig. 2-4 Cross - Correlation Method .....	19
Fig. 2-5 An outline detection of particle streakline .....	21
Fig. 2-6 Discretization Diagram of X-Direction Momentum Equation .....	24
Fig. 2-7 Discretization Diagram of Y-Direction Momentum Equation .....	29
Fig. 2-8 Discretization Diagram of Continuity Equation ..	32
Fig. 3-1 Experiment apparatus and Test Section .....	35
Fig. 3-2 Schematic Arrangement of PIV System .....	36
Fig. 3-3 Photograph of Experimental Equipment .....	39
Fig. 3-4 CFD Grid of Ejector .....	42
Fig. 4-1 Mean Velocity Vector by PIV .....	47
Fig. 4-2 Mean Kinematic Energy by PIV .....	53
Fig. 4-3 Mean Vorticity by PIV .....	55
Fig. 4-4 Mean XY-Stress Distributions Field by PIV .....	61

Fig. 4-5 Mean Velocity Vector Distribution ( $Q = 1.1355 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ) .....	63
Fig. 4-6 Static Pressure Distribution ( $Q = 1.1355 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ) .....	64
Fig. 4-7 Total Pressure Distribution ( $Q = 1.1355 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ) .....	65
Fig. 4-8 Turbulent Kinetic Energy ( $Q = 1.1355 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ) .....	66
Fig. 4-9 Turbulent Viscosity ( $Q = 1.1355 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ) .....	67
Fig. 4-10 Dissipation ( $Q = 1.1355 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ) .....	68
Fig. 4-11 Mean Velocity Vector Distribution ( $Q = 1.7055 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ) .....	69
Fig. 4-12 Static Pressure Distribution ( $Q = 1.7055 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ) .....	70
Fig. 4-13 Total Pressure Distribution ( $Q = 1.7055 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ) .....	71
Fig. 4-14 Turbulent Kinetic Energy ( $Q = 1.7055 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ) .....	72
Fig. 4-15 Turbulent Viscosity ( $Q = 1.7055 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ) .....	73
Fig. 4-16 Dissipation ( $Q = 1.7055 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ) .....	74
Fig. 4-17 Mean Velocity Vector Distribution ( $Q = 2.2755 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ) .....	75
Fig. 4-18 Static Pressure Distribution ( $Q = 2.2755 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ) .....	76
Fig. 4-19 Total Pressure Distribution ( $Q = 2.2755 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ) .....	77
Fig. 4-20 Turbulent Kinetic Energy .....	78



Fig. 4-21 Turbulent Viscosity ( $Q = 2.2755 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ) .....	79
Fig. 4-22 Dissipation ( $Q = 2.2755 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ) .....	80
Fig. 4-23 Velocity Distribution ( $D_s : D_h = 1 : 2.3$ ) .....	86
Fig. 4-24 Velocity Distribution ( $D_s : D_h = 1 : 1.9$ ) .....	88
Fig. 4-25 Velocity Distribution ( $D_s : D_h = 1 : 1.5$ ) .....	90
Fig. 4-26 Total Pressure Distribution ( $D_s : D_h = 1 : 2.3$ ) .....	92
Fig. 4-27 Total Pressure Distribution ( $D_s : D_h = 1 : 1.9$ ) .....	94
Fig. 4-28 Total Pressure Distribution ( $D_s : D_h = 1 : 1.5$ ) .....	96
Fig. 4-29 Velocity Distribution by PIV and CFD ( $D_s : D_h = 1 : 1.9$ ) .....	100
Fig. 4-30 Velocity distributions by PIV and CFD .....	102

## NOMENCLATURE

$a$	: Duct half-width (mm)
$b$	: Duct half-height (mm)
$D$	: Pipe diameter
$D_h$	: Hydraulic diameter ( $= 4ab/2(a+b)$ )
$f$	: Frequency of oscillation
$g$	: Gravitation
$Le$	: Entrance length
$l$	: Length of test section
$p$	: Pressure
$Re$	: Reynolds number ( $= D_h \cdot \bar{u}_m/\nu$ )
$t$	: Time
$u, v, w$	: Velocity components in $x$ , $y$ and $z$ -axis, respectively
$u_m$	: Cross-sectional mean velocity
$x, y, z$	: Rectangular coordinates of test section

## Greeks

$\gamma_{air}$	: Specific weight of air
$\delta$	: Boundary layer thickness
$\mu$	: Coefficient of viscosity
$\nu$	: Coefficient of kinematic viscosity
$\rho$	: Density
$\varepsilon$	: Kinetic turbulence of dissipation rat

## Subscripts

cl	: Value on duct center-line
$C_r$	: Critical value
e	: Value on developing flow
fd	: Value on developed flow
m	: Cross-sectional mean value
p	: Fluid particle
q	: Quasi-steady flow
s	: Straight duct
st	: Steady flow
1	: Fundamental wave in finite Fourier series

## Superscripts and others

- : Mean value
  - $\wedge$  : Quantities in the Laplace domain
  - \*
- : Dimensionless quantity

# ABSTRACT

## A Study on the Velocity Profile and Pressure Distributions in Ejector Linking Inhale Duct.

Sul Jae-Lim

Advisor : Prof. Lee Haeng-Nam Ph.D.

Department of Mechanic,

Graduate School of Chosun University

Ejectors is a fluid transportation device for which a principle is used that high-pressure fluid are spouted through driving pipe and the pressure of low-pressure fluid is increased through exchange of momentum with low-pressure gas.

As it inducts solid as well as fluid and gas, it can be applied for many industries and construction areas such as heat organs, fluid machinery power station, air conditioning duct, petroleum chemistry, food industry and environment industry.

Steam-steam ejectors have been widely used for suction, mixture and dehydration, and have been considered as the most important to control various kinds of harmful gases and for air conditioning to generate pleasant air.

Ejectors can be simple irregardless of size and installed easily. They can be easily used in places where fluid moves and expenses are reasonable. In addition, it is a semi-permanent fluid device as it needs little maintenance.

This study is to analyse characteristics of flow according to volume of driving pipe and expanded pipe, and Reynolds number through experiments and numerical analysis (CFD).

This study compares and analyses mean velocity of compound pipe, distribution of static pressure, distribution of total pressure, turbulent flow energy, turbulent viscosity, dissipation energy and concludes as follows:

- 1) In measuring PIV, as Reynolds number increases because of influence of shearing force of wall, vortex of velocity vector is formed near the wall.
- 2) When suction occurs at branch pipe, vortex that is formed at the joint of branch pipe with curvature ( $R= 28\text{mm}$ ) and expanded pipe increases as velocity increases.
- 3) To increase suction efficiency, nozzle configuration should be realized at proper place of expanded pipe as a means to decrease dissipation of energy.
- 4) About 93% of the values of PIV measurement test and dimensionless velocity distribution by and CFD numerical analysis are identical.
- 5) Flux efficiency decrease as diameter of driving pipe increases, and it increases as Reynolds number increases.
- 6) Flux efficiency is the highest when the ratio of diameter of driving pipes is 1: 2.3, and flux efficiency increase to  $\eta_1 = 50\%$ ,  $\eta_2 = 69\%$  and  $\eta_3 = 75\%$  according to velocity ratio.

# 第 1 章 序 論

## 第1節 연구 배경

이젝터(Ejector)는 분사 유체의 운동 에너지를 이용하여 고압의 유체를 구동관로에서 분출시켜, 그 주변의 저압기체와 운동량 교환을 통하여 저압의 유체를 보다 높은 압력까지 상승시켜 흡인되는 원리를 이용한 수송 장치로서 기계적 운동부분이 없기 때문에 비교적 고장이 거의 없다. 액체, 기체는 물론 고체가 혼입하여도 작동상 별다른 무리가 없다는 점에서 열기관, 유체기계 발전소, 공기조화 덕트, 석유화학, 식품공업, 환경산업 등 많은 공업 및 건축분야에 적용되고 있다. 이젝터는 시스템이 대형, 소형화 등 크기에 상관없이 단순 구조로 제작이 가능하고, 설치가 용이하여 유체가 유동하고 있는 장소에서 쉽게 이용할 수 있으며, 설계 제작비가 저렴할 뿐만 아니라 유지보수가 거의 불필요한 반영구적인 유체기계라는 장점을 가지고 있다.

에너지 효율을 증대시키기 위한 노력은 오늘날과 같은 문명사회를 구축 하였으며 이에 대한 연구는 끊임없이 계속되고 있다. 에너지 효율을 증가시키기 위한 한 예로서 이젝터(Ejector)는 산업현장에서 흡수, 혼합, 탈수 등의 목적으로 사용되고 있을 뿐 아니라, 주거환경의 90%를 차지하고 있는 건축물은 초고층, 대형화로 인해 쾌적한 환경을 만들어 내기 위한 공기조화 기술에서도 가장 중요한 사항으로 연구되고 있다.

이러한 이젝터에 대한 연구로서, Chen과 Hsu<sup>1)</sup>는 냉동장치에 적용하여 높은 온도 쪽에 보일러를 이용하여 이젝터를 압축기 대신 사용하였다. Fluegel<sup>2)</sup>은 액체-액체 이젝터의 유동특성을 베르누이 방정식과 운동량 방정식을 적용하여 기본적인 해석방법을 제시하였으며 증기-증기 이젝터의 각각의 특성을 엔탈피-엔트로피 선도로 나타내었다. Sun and

Eames<sup>3)</sup>는 냉동시스템에서 이중 증발기의 출구에 이젝터를 설치하여 압축일을 줄여 성적계수를 향상 시킬 수 있음을 이론과 실험을 통해 분석하였다. 구동유체와 흡입유체의 혼합에 관한 이론적 연구를 중점적으로 수행하였다. 그 외 Witte<sup>4)</sup>에 의한 액체-가스 이젝터에 대한 이론적인 설계방법, Biswas and Mitra<sup>5)</sup>에 의한 다공노즐에 대한 흡입량과 액체와 가스의 혼합 특성을 규명한 연구들이 있다.

그러나 이러한 장치들에 관한 연구는 기존의 환경에 따라 설명 되어졌으며, 속도, 온도, 유량, 압력 등 유체역학 연구에 중요한 내용들은 이론적인 연구만으로 이루어졌으며 실제로 실험적인 방법이 거의 없었다. 실험적인 방법으로서, 피토탐관, 열선유속계, 유량계, LDV 등이 사용되어 왔는데, 이러한 실험 방법들은 국부적인 몇몇 위치에서 속도나 압력 값만을 제공하였고, 유동전반에 대해 미친 영향을 고려하지 않을 수 없으며, 자연계에서 발생하는 대부분의 유동은 비정상, 난류유동에 대한 공간변화와 이에 대한 유동 패턴의 해석을 하기에는 거의 불가능하다고 볼 수 있다. 최근에는 컴퓨터를 비롯한 하드웨어의 급속한 발달과 디지털 화상 처리기법의 발전에 힘입어 최근의 실험 방법으로 입자영상유속( Particle Image Velocimetry, PIV) 실험 기법이 개발되어 유동장 정보를 정량적으로 획득할 수 있으며, 유체의 기본 물리량을 동시다점으로 계측하여 연구할 수 있게 되었을 뿐만 아니라 비정상적인 유동패턴을 가시화 시킴으로서 유체유동에 대한 전반적인 해석이 가능하게 되었다.

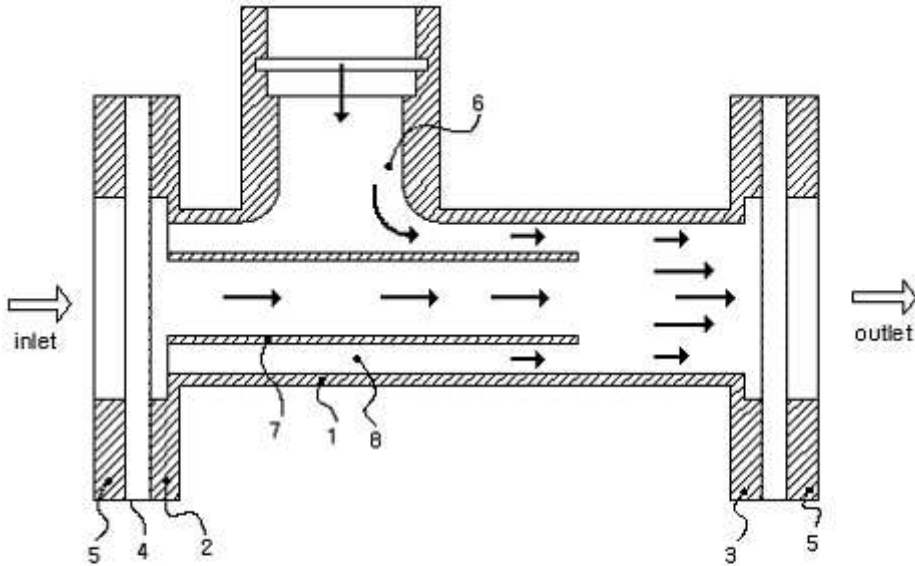
CFD(Computational Fluid Dynamics)란 유체역학과 수치해석을 병합시켜 수학적으로 풀기 어려운 비선형 편미분 방정식들의 근사 해를 구하는 것으로서 컴퓨터의 처리속도와 용량이 증가함에 따라 수치해법의 발달과 조합하여 전산유체역학(CFD) 다양한 정식화 기법을 적용하여 모든 유동장 해석 연구에 수행되고 있으며, 실험적으로 얻기 어려운 유체역학 문제를 해결하고, 실험값과 비교 분석할 수 있는 미래의 해석기법으로 인식되고 있다, 컴퓨터를 이용한 수치 해석적 방법은 많은 비용과 시간이 소비되는 실험에 의한 방법에 비해 빠르고 경제적인 장점이 있어 많은 산



업분야에 응용되고 있는 추세이다. 실제로 실험적 방법에 비해 수배의 비용 절감과 시간 단축을 할 수 있으며, 실험적 방법으로 해석할 수 없는 분야도 컴퓨터에 의한 simulation 작업으로 해석이 가능하게 되었다.

본 연구에서는 기존의 방법보다 더욱 발전된 실험기법을 이용하여 특정 해석영역에 대한 정확한 실험 데이터를 획득하여 유체유동에 대한 전반적인 내용을 분석하였다, 이 실험을 검증할 만한 자료로서 전산유체역학을 이용하여 실험의 타당성을 점검하여 주어진 문제인 이젝터의 유동특성을 규명하였다, 실험으로는 얻을 수 없는 부분들에 대한 내용을 분석하여 최적화 설계를 제시함으로써 장치의 성능개선이나 새로운 성능평가를 할 수 있도록 하였다, 향후 기계 장치나 건축설비에 이용하게 될 제반적인 이젝터 장치들을 단순 압축이나 진공장치로서가 아닌 펌프 및 기계장치들을 대응할 수 있는 장치로 적용하는데 필요한 자료를 제공하고자 한다.

## 第2節 연구의 목적



※ 도면의 주요 부분에 대한 부호 설명

- 1 : diffuser pump body
- 2 : inlet- flange
- 3 : outlet- flange
- 4 : packing
- 5 : flange cover
- 6 : suction pipe
- 7 : pipe
- 8 : jet slit

Fig. 1-1 Diffuser Pump Diagram

본 연구에서는 같은 정사각형 단면을 갖는 흡입관로가 부착된 확대관로와 원형단면을 갖는 구동관로가 조합된 이젝터 장치에 레이놀즈수(Re) 등의 유동변수에 따라 이론 배경을 제시한 후, 실험적 방법으로 같은 정사각형 단면을 갖는 흡수관로와 혼합관로로 구성된 45mm×45mm인 분지덕트에 원형 단면을 갖는 구동관로를 연결한 이젝터(Ejector) 장치의 직경비 (구동관로:혼합관로 (1:2.3, 1:1.9, 1:1.5))에 따랐다, 이 영역에

서 정상유동의 Reynolds 수를 변화시켜가며 정상유동에서 PIV와 CFD를 이용하여 직경비(1:2.3, 1:1.9, 1:1.5)에 따른 혼합(확대)관로의 축방향속도와 2차유동의 속도분포를 측정하였다, 층류정상유동의 이론해와 PIV계측 실험결과로부터 얻어진 속도분포, 운동에너지 분포, xy-축 응력 분포 및 와도분포 등의 유동특성을 연구하였다. 이러한 PIV계측 실험을 바탕으로 실제적인 시험과 동일한 조건으로 CFD의 분석을 이용하여 1:2.3, 1:1.9, 1:1.5에 직경비를 갖는 구동관로와 확대(혼합)관로의 속도 및 압력분포에 대해서 규명하였다, 직경비 따른 층류 정상유동의 유동변수들이 유동특성에 미치는 영향을 고찰하고 객관적인 정확성을 얻어 이젝터의 응용 펌프설계에 유체 공학적인 기초자료를 제공함에 본 연구의 목적이 있다.

이 연구는 중소기업청에 특허를 신청한 이젝터의 원리를 응용한 슬러지 분리형 디퓨저펌프 개발에 관한 것으로서 신기술 창업 보육사업에 추천된 내용의 이론적 정립과 실험과 수치해석을 통한 최적 설계를 행하는데 목적을 두고 있다. Fig. 1-1은 본 실험 장치에 표시한 바와 같이, 디퓨저를 사용하는 일반적인 확산펌프설비의 확산부분 및 챔버를 개발하여 기존 펌프에 적용시켰다. 펌프의 효율을 증대함은 물론, 슬러지를 여과하고, 송출구경이 큰 경우에도 적용이 가능하게 하였다. 유체의 이송에 대한 이론 및 기술적인 발전은 압력수두와 속도수두를 변환하는 방법과 펌프의 효율을 증가시키는 방법으로 제트펌프와 확산펌프가 이용되고 있다. 제트펌프의 경우 압력을 증가시켜 속도를 배가시키면 전수두는 속도의 제곱에 비례하므로 전양정 또한 속도의 제곱에 비례하게 된다. 그러나 이 경우 제트효과를 만족시키기 위하여는 반드시 일정한 에너지의 크기에 따른 관내경을 작게 해야 하고, 대구경에서는 송출압력을 높게하는 데는 많은 동력을 필요로 하게 된다. 종래의 확산펌프의 유체이송은 L자형 구조로 인하여 양정효율이 저하되었으며, 기포발생 및 슬러지가 증가될 경우에는 관내 송수가 원활치 못했다. 특히 2곳 이상에서 원수를 취수하는 경우, 취수량에 따라 펌프의 특성곡선이 다른 2개의 펌프를 연합 운전시 압

력의 차이가 생길 경우 저압측의 펌프에 역류가 생겨 성능에 큰 영향을 미친다. 이러한 L자형 구조의 송수관로를 직선형으로 바꿔 기포 및 슬러지가 많이 포함된 유체의 이송을 원활하게 하였다. 특히 취수량의 차이로 배관내의 차압이 발생하는 경우에도 입구 측 플랜지 내부에 장착된 확산관 주변의 제트슬리트에 형성되는 진공압으로 상호다른 차압의 배관수도 원활히 혼입되어, 과부하로 저압측의 펌프가 멈추거나 캐비테이션 현상이 발생되지 않아 효율을 증대시킬 수 있다. 여기에 슬러지 분리장치를 부착하여 슬러지 및 부유물을 처리할 수 있는 장치를 부가적으로 설치할 수도 있다. 이 장치는 종래의 원심 분리식 슬러지 분리장치가 부유물이나 모래가 자주 막히는 단점을 보완하여 원통형 챔버의 내벽을 따라 수류가 회전되게 펌핑시켰다. 원심 속도가 느린 챔버의 중심수류에 배치된 확대관을 통해 정수된 유체만 챔버 상층으로 분리해 낼 수 있는 슬러지 분리 장치이다. 이 장치를 확산펌프에 부착하여, 이 확산펌프 본체는 입구측 플랜지로 유입하게 되는 배관수가 확산펌프의 출구측 플랜지에 근접된 확대관을 통해 배출되는 순간 배관수의 수압이 확산되어 진공상태가 된다. 이러한 진공상태는 확대관 송출구경 주변의 제트 슬리트와 주변 배관수가 자기흡입 방식으로 수류가 형성된다. 확산 펌프 몸체에 직각으로 형성된 분기의 흡입관을 통해 유입되어, 입구측 플랜지와 동일선상에 있는 출구측 플랜지로 배출되는 배관수와 혼입되므로 일반 급수펌프의 양정을 크게 증진하는 효과가 있다. 확산펌프에 부착한 슬러지 분리는 별도의 구동장치를 설비하지 않고, 챔버로 유입된 수류가 일정방향으로 관내벽을 따라 회전되게 유도하여, 비중이 무거운 현탁 슬러지는 아래로 퇴적 분리시킴과 동시에 비중이 가벼운 부유물은 챔버 상부의 스크린과 여과지에 의해 여과 흡수되어 배출되게 하였다. 챔버의 중심수류에 배치된 확대관에 의해 정수된 물은 챔버 상층으로 흡입분리하는 장치로서 내부구조가 간단하며 역세척이 필요치 않았다. 슬러지 및 부유물을 처리하기 위해 별도의 응집 재를 사용하지 않았으며, 설치면적이 적기 때문에 유지 가동비가 거의 들지 않아 운전비가 아주 경제적인 특징을 가지고 있다. 이와 같은 장

치를 사용할 때 산업상에 미치는 효과는 기존 펌프와 비교시 단위 무게당 발생 수동력 증대로 설비 면적이 축소되어, 설비비가 절감되고 유지관리 및 기기의 소형화에 따른 비용의 절감으로 가격 경쟁력을 향상시킬 수 있었다. 펌프 뿐만 아니라 공기조화에 응용이 가능하여 건축구조물의 획기적인 에너지 절감으로 모든 경제 분야에 큰 영향을 미칠 것으로 생각된다. 학문적 가치로서는 이젝터 원리를 이용한 슬러지 분리형 확대관로에 대한 이론적 뒷받침과 그에 따른 실험치를 표준화하고, 수치해석을 이용한 실험의 타당성 규명하여 유체이론을 보다 체계적으로 이해하고 능률적이고 단계적으로 확산펌프에 대한 특성을 이해하는데 도움이 될 것으로 확신한다.

## 第 2 章 理 論 的 背 景

### 第1節 Ejector의 이론식

#### 1. Ejector내의 유동 지배방정식

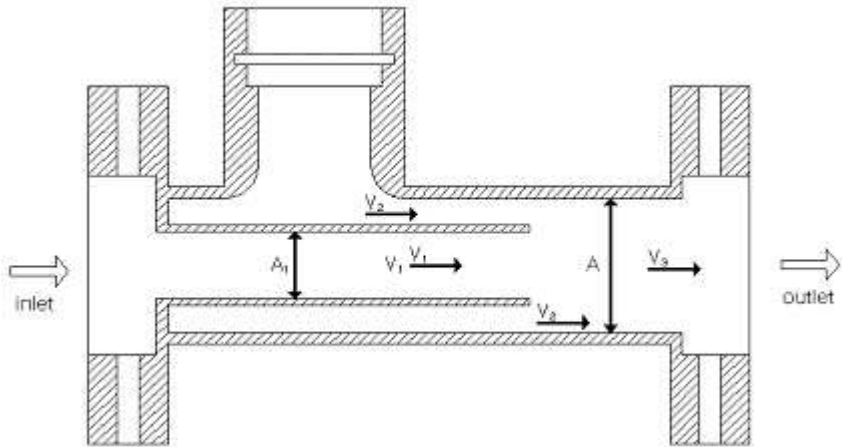


Fig. 2-1 Velocity Components in Ejector

Fig. 2-1은 이론에 적용하게 될 이젝터 내의 관로 에서 속도  $V_1$ 을 운반하는 관로를 구동관로, 분지부 형태를 가지고 있고  $V_2$ 가 생성되는 관로를 흡입관로,  $V_1$ ,  $V_2$ 가 서로 혼합되는 관로를 확대관로로 하고, 혼합(확대)관로와 흡입관로, 구동관로의 조합인 Ejector에 연결된 혼합영역(Mixing Area)에 대한 유동특성을 이론적으로 규명하기 위하여 본 연구에 적용한 좌표계를 Fig 2-1에 표시 된 바와 같이, 속도  $V_1$ 과 면적  $A_1$ 의 제트가 한 지점에서 면적  $A$ 의 혼합관로에 같은 축으로 배열되어 있다. 여기서 혼합관로의 유동의 속도는  $V_2$ 이고 압력은  $p_1$ 이다. 두 흐름이 완전히 혼합되는 하류에서, 속도는  $V_3$ ,이고 이때 압력  $p_2$ 는  $p_1$ 보다 크다. 압력상승의 크기는  $p_2 - p_1$ 의 값은 Fig 2-1에 나타난 검사체적 내에 있

는 유체에 질량과 운동량 보존의 원리를 적용함으로써 얻어지고, 속도  $V_2$ 와  $V_1$  및 면적비  $A_1 / A$ 의 값에 의존한다.

구동유체와 흡입되는 유체가 둘 다 비압축성이고 같은 밀도를 가진 경우를 고려해 보면, 검사표면 내에서 생성되는 유체의 정상유동에 대해서 다음과 같은 법칙을 적용할 수 있다.

먼저 질량보존의 법칙을 적용하면,

$$\rho A V_3 = \rho (A - A_1) V_2 + \rho A_1 V_1 \text{-----}(2-1)$$

이 된다.

이젝터 내의 검사체적에 대하여 선형 운동량 방정식을 적용하면,

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} \int \int \int_V \rho V dV + (\dot{m} V)_{out} - (\dot{m} V)_{in} \\ & = \int \int_S (-pn) dS + \int \int_S \tau dS + \int \int \int_V \rho g dV \text{-----}(2-2) \end{aligned}$$

이다. 여기에서 사용된 선형 운동량 이론은 검사체적이 유체만을 포함하고 있다고 가정한 것이다. 그러나 실제 사용된 장치는 유체 주위를 둘러싸고 있는 고체(덕트)가 존재하므로 이것에 유체에 대한 외력을 가한다. 이러한 힘 외력  $F_{ex}$ 를 설명하기 위하여 우변에  $\sum F_{ex}$  항을 더해야만 한다.

따라서 위의 선형운동량 식은

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} \int \int \int_V \rho V dV + (\dot{m} V)_{out} - (\dot{m} V)_{in} \\ & = \int \int_S (-pn) dS + \int \int_S \tau dS + \int \int \int_V \rho g dV + \sum F_{ex} \text{된다.----}(2-3) \end{aligned}$$

여기에서 정상유동 비압축성 유동이라고 가정하고, 점성에 대한 영향은 크지 않다고 가정하면 위의 식은 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} & 0 + \rho A V_3^2 - \rho (A - A_1) V_2^2 - \rho A_1 V_1^2 \\ & = (p_1 - p_2)A + 0 + 0 + 0 \end{aligned}$$

이 두 방정식 사이에서  $V_3$ 를 제거하고 압력상승에 대하여 풀면,

$$p_2 - p_1 = \frac{A_1}{A} \left( 1 - \frac{A_1}{A} \right) \rho (V_1^2 - V_2^2) \text{-----(2-4)}$$

이 된다.

우리가 기대할 수 있는 최대압력상승은  $V_1$ 의 속도로부터  $V_3 = V_1 A_1 / A$ 로 감속하는 제트의 비점성 유동에 대한 것이고,

$(\rho V_1^2 / 2) (1 - A_1^2 / A^2)$ 은 압력상승을 나타낸다. 이 압력상승으로 식 (2-3)을 나누면 Ejector 식에 대한 무차원 형태를 얻을 수 있다.

$$\frac{p_1 - p_2}{\frac{1}{2} \rho V_1^2 [1 - (A_1/A)^2]} = 2 \left( \frac{A_1/A}{1 + A_1/A} \right) \left( 1 - \frac{V_2}{V_1} \right)^2 \text{-----(2-5)}$$

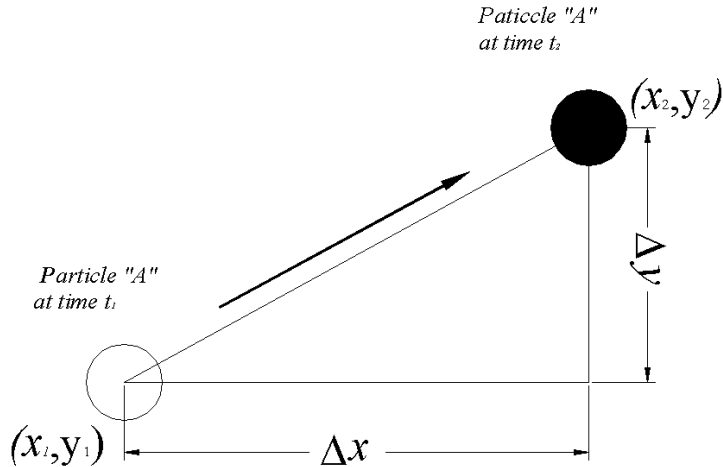
$A_1/A \leq 1$ 이고  $V_2/V_1 \leq 1$ 이기 때문에 식(2-5)의 우변항이 항상 1보다 작다.

Ejector는, 제트 공급에 필요한 것보다 낮은 압력이지만, 제트의 유량 ( $V_1 A_1$ )을 공급하는데 필요한 것보다 더 큰 체적유량 ( $V_2 [A - A_1]$ )을 생성 할 수 있다.



## 第2節 PIV 실험의 이론적 배경 및 이론식

### 1. PIV의 기본 원리



$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = u, \quad \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta t} = v$$

Fig. 2-2 Calculation of velocity vector by PIV

유동장 속에 어떠한 영향을 미치지 않을 정도의 미소한 입자를 주입하여 입자 흔적들의 입자영상을 화상 처리하여 주어진 유동의 속도장을 측정하는 입자영상유속계(Particle Image Velocimetry)의 기본 개념도는 Fig. 2-2 과 같다.

화상처리를 이용한 속도장 측정 시스템은 Laser, 광학장치, Particle, Camera, Image Grabber, 컴퓨터 및 그 외 주변기기들로 이루어진다. 속도장 측정기법은 먼저, 유동장에 영향을 미치지 않으면서 유동 패턴을 잘 추종할 수 있는 가볍고 작은 입자를 유동속에 주입한 후, 측정하고자 하는 Test Section을 레이저와 광학장치를 이용하여 광원을 평면광으로 만

든 후 유동 단면에 조사하게 되면, 유동 속에 주입된 추종성이 우수한 입자들은 빛에 노출되어 산란하게 된다. 레이저 평면광에 산란된 입자들을 CCD 카메라, 고속도 카메라 등과 같은 영상 입력장치로 유동 속도의 조건에 따라 프레임을 조절하여 시간  $t_1$  에서 첫 번째 영상을 획득한 후,  $\Delta t$  가 지난 시간  $t_2$  에서 두 번째 영상을 획득한다. 이렇게 얻어진 야날로그 영상들은 256계조치의 디지털 영상파일로 변환하여 디지털 화상처리 기법으로 분석함으로써 시간간격  $\Delta t$  동안 입자가 이동한 변위  $\Delta S$  를 계산하게 된다. 여기서 계산된 입자들의 변위  $\Delta S$  는 시간과 공간의 함수로 표현되어지며, 입자들의 변위벡터  $\Delta S$  를 시간간격  $\Delta t$  로 나누어 줌으로서 속도벡터  $u(x,y)$ 를 계산해 낼 수 있게 된다.

## 2. PIV 구성 요소

입자 영상을 획득하여 유동장을 해석하기 위한 PIV측정 시스템의 구성은 해석영역을 조명하기 위한 광원, 유체유동과 함께 유동하는 입자, 조명에 의해 산란된 입자를 촬영하기 위한 영상획득장치, 원시영상을 디지털 영상으로 변환하기 위한 A/D 변환기, 해석을 수행하기 위한 컴퓨터로 구성된다.

### 1 ) 레이저 (Light Amplified Simulated of Emission Radiation)

레이저란 빛을 유도방출한 후 증폭하여 순수한 빛을 만드는 것을 말한다. 양자이론에서는 분자는 일정한 에너지 준위를 가지고 있으며 빛을 흡수하면 기저상태에서 높은 에너지 상태로 전이를 유발하는데, 이 때 여기 상태에 있는 분자는 이완과정에 의해 에너지를 방출하면서 다시 기저상태로 떨어지게 되는데 이때 전자들이 한꺼번에 공급된 빛과 같은 파장의 또 다른 광자를 방출하게 되어 같은 방향의 빛은 그 세기가 증폭되게 된다. 이렇게 증폭된 빛만을 방출하는 것을 유도방출이라고 하는데, 이러한 빛

이 일반적인 자연방출과 가장 큰 차이점은 방향성을 가지고 있기 때문에 효율이 떨어지더라도 빛의 제어를 위해 레이저를 사용하는 것은 이러한 이유 때문이다. 레이저 설계시 유도방출을 일으키는 매질을 활성매질이라고 하는데, 각각의 매질의 종류(기체, 액체, 고체)에 따라 출력형태는 다르기 때문에 적당한 활성매질을 선정하는 것이 중요하며 여기상태의 에너지를 방출하도록 외부로부터 에너지를 주어야 한다. 광원 발생은 연속광(CW) 레이저와 펄스(Pulse)레이저 형태로 나누어지며, 레이저의 종류로는 He-Ne, He-Ne Kr, Argon-ion, Ruby, Ar He-Cd, CO<sub>2</sub>, Nd-YAG 레이저 등이 있다.

## 2) 광학장치 (Optical Equipment)

레이저 평면광을 만들기 위해 사용되는 광학장치는 주로 렌즈라고 말할 수 있으며, 렌즈의 적절한 배치는 주어진 실험조건에서 조절이 가능하다. 렌즈에는 각각 렌즈에 고유한 초점( $f$ )이 있어 광축에 평행하게 입사하는 평행광선은 렌즈를 통과한 후 이 점에 모이거나, 발산하게 된다. 이러한 광학장치를 이용하여 평면광을 만들기 위해 광원으로부터 1차원적인 빔을 생성시킨 후, 실험조건에 알맞은 렌즈로 초점화된 빛을 통과하게 하여 2차원적인 평면광을 만들게 된다. 여기에서 주의 하여야 할 점은 레이저 빔은 Gaussian 강도 분포를 가지고 있기 때문에 두께방향으로는 일정한 강도분포의 빛을 얻을 수 없기 때문에 실험조건의 해석영역에 대해 light sheet를 적절히 조절해야 한다.

## 3) 입자 (Particle)

유동장에 주입되는 입자는 유체의 유동패턴을 직접 가시화하거나 유동상태량을 나타내는데 사용하게 된다. PIV 측정기법은 직접 유체의 유동을 측정하는 것이 아니라 유동장 속에 주입된 입자의 궤적을 추적하여 간접적인 방법으로 유체유동을 측정하는 것이기 때문에 유체의 특징에 관계해서 적절한 입자를 선정해야 하며, 영상의 획득을 위해 가시성이 좋은 것,

부력의 영향을 받지 않는 것, 입자와 유체의 미끄러짐이 적은 것을 사용해야 한다. 또한 영상 획득 장치의 사양을 고려하거나, 유동 속도에 대해서도 조건을 만족하는 입자를 선정해야 한다.

#### 4) 영상 획득 장치 ( Camera )

영상 획득 장치는 PIV 속도추출기법에 따라서 결정되며 대표적인 입력 장치로서 사진 촬영용 film이나 CCD(Charge Coupled Device) 카메라, 고속도 카메라가 주로 사용된다. 최근에는 PIV 속도장 측정에 있어서 CCD 카메라를 이용하여 유동의 입자영상을 취득하는 추세이다. 고속도 카메라는 해상도와 시간 분해능이 우수하여 유동장으로부터의 정보를 직접 받아들인다는 이점과 가장 손쉽게 유동정보를 얻을 수 있는 장점이 있지만 가격이 고가라는 단점을 가지고 있다.

### 3. PIV 계측 기법의 종류

PIV 계측기법은 입자의 기록 방식과 분석방식에 따라 나누어지고, 속도 벡터의 추출에 이용되는 입자의 종류가 개별입자인가 아니면 임의의 검사 영역내의 입자군인가의 여부에 따라 구분이 가능하다. 입자영상을 취득하는 기록매체에 따라 photographic film 카메라와 CCD 카메라 방식으로 분류되고, 하나의 Frame에 기록되는 입자영상의 노출 횟수에 따라 다중 노출 및 단일노출 방식으로 분류되며, 속도벡터를 추출하는 방식에 따라 자기상관기법과 상호상관기법으로 나누어진다.

#### 1) 개별입자추적 PIV와 입자분포상관 PIV

속도벡터의 추출에 이용되는 입자의 종류가 개별입자인가 아니면 임의의 검사영역(Interrogation Region)내의 입자군(중복되거나 독립적으로 존재함) 인가의 여부에 따른 구분이 가능하다. 개별 입자를 독립적으로

인식하고 이들에 대하여 순서 또는 번지수를 부여하는 라벨링(Labeling) 작업과 함께 개별입자의 미소궤적을 추적하는 개별입자 추적(Discrete Particle Tracking, DPT) PIV(과거의 PTV)와 검사 영역내의 입자군의 분포에 대한 상관관계로부터 속도벡터를 추출하는 입자분포상관 (Particle Distribution Correlation, PDC) PIV로 대별할 수 있다. 이 경우에 DPT-PIV는 PTV와 같은 특성을 나타낸다. 임의로 분포된 위치에서의 랜덤벡터가 얻어지며 후처리과정에서 격자보간이 필요하다. 그러나 PDC-PIV에서는 처음부터 정의된 격자 점의 위치에서 속도벡터가 구해지기 때문에 격자간 보간이 필요 없게 된다. 또한 PDC-PIV에서는 원리적으로 검사영역내의 개별입자의 도심좌표(Centroid)에 대해서도 상관계수를 구할 수가 있기 때문에 DPT-PIV용의 개별입자 영상이 사용될 수가 있다.

일반적으로 두 기법의 장단점을 비교해 보면 다음과 같다. 먼저 DPT-PIV는 개별입자의 자동 인식작업에 약간의 계산시간이 필요하나 동일입자의 추적 알고리즘은 비교적 간단한 연산과정을 요한다. 따라서 전체적인 작업시간이 매우 단축될 수가 있다. 또한 미소시간 동안의 유동장의 변형에 대하여 비교적 둔감한 성질을 나타내기 때문에 이상치(Outliner)의 발생이 억제된다. 그러나 유동장 전체에 걸쳐 추적입자가 독립적으로 균일하게 분포하여야 하며 양호한 산란광의 영상을 제공하여야 한다. 이것은 조명을 비롯한 실험환경 및 실험기법에 크게 의존하게 되며 일반적으로 한장의 화면에서 얻을 수 있는 유효벡터의 수가 많지 않게 된다.

한편 PDC-PIV에서는 Adrian의 고정상밀도 PIV방식을 제외하고는 스펙클(LSV) 또는 픽셀 계조치의 밝기정보(Intensity, Grey-Level)를 이용(계조치 상호상관법 등)하기 때문에 유동장에 분포된 입자가 개별적으로 인식이 되지 않아도 문제가 되지 않는다. 따라서 입자에 대한 제한조건이 크게 완화가 되어 유동장의 생성이 비교적 용이하게 이루어진다. 또한 얻어진 벡터 수는 검사영역의 격자수로 정해지므로 많은 수의 벡터가 얻어질 수 있다. 그러나 이 방식에서는 상관함수(계수)의 산출에 번거로운 광

학적인 배치가 필요하거나 FFT연산과 상관계수의 계산에 매우 큰 컴퓨터 부하를 요구한다. 한편 유동장의 변형에 대하여 상관함수(계수)의 최고치가 민감하게 변함으로서 이상치의 발생에 주의를 하여야 한다. 요약하면 DPT-PIV에서는 PIV에 적합한 입자의 공급 및 조명 등의 문제에 유의하여야 하나 대신 속도벡터 추출에 필요한 컴퓨터 연산속도가 빠르다. 그러나 PDC-PIV에서는 이와 반대로 유동장의 입자조건이 까다롭지 않은 반면 상관계수의 계산에 번거로운 작업이 요구된다.

## 2) 단일프레임 PIV

한 장의 프레임에 입자영상을 다중 노출시켜 입자 쌍을 취득하고, 취득한 입자영상으로부터 상관함수를 계산하여 유동속도벡터를 분석하는 방식으로 이 방법을 Adriam의 정의에 의한 저영상밀도 PIV(PTV)중 단일프레임(single-frame)법을 의미한다. 즉, 한 장의 사진 또는 프레임에 조명을 부호화하여 벡터의 크기 및 벡터의 시점과 종점을 구하는 기법으로서 PTV의 초기에 많이 적용되었다. 펄스조명의 폭 및 간격을 조정하여 연속펄스 또는 긴 유맥선(streak) 입자영상을 기록한 뒤에 개별 입자의 궤적을 추적한다. 취득한 입자 영상으로부터 상관함수를 계산하여 유동속도벡터를 분석하는 방식이다. 상관함수는 직접계산이나 FFT 변환을 사용하여 계산하며, 계산된 자기상관(auto-correlation)함수는 중심에 대해 대칭인 두개의 상관 값을 가지므로 유동방향의 모호성이 발생하여 벡터의 시점 또는 종점을 알아내기 위하여 조명을 부호화하여 이를 해독해야 하는 어려운 점이 있다.

## 3) 다중프레임 PIV

개개의 입자영상을 각기 다른 프레임에 취득하고, 시간간격  $\Delta t$ 로 취득한 2개의 입자영상에 대해 상호상관(cross-correlation)함수를 계산하여 속도벡터를 구하는 방법이다. 상관함수는 자기상관값과 다른 하나의

상관 값을 나타내므로 유동방향의 모호성 문제는 발생하지 않는다. 그러나 고속유동의 경우, 매우 짧은 시간간격  $\Delta t$  동안 2개의 입자영상을 서로 다른 frame에 기록하여야 하는 어려움이 따른다.

#### 4) 자기상관 PIV

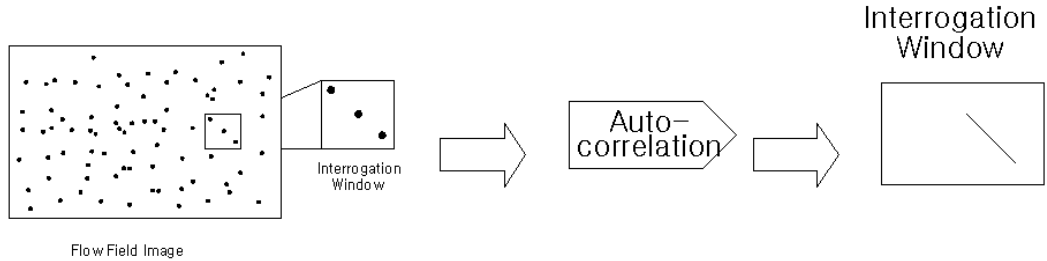


Fig. 2-3 Auto - Correlation Method

하나의 프레임에 기록되어 있는 입자 쌍의 변위를 분석하는 방법으로, 같은 위치에 미소조사구간을 설정하여 푸리에 변환(Fourier Transform)과 역 푸리에 변환과정을 거쳐 자기상관함수 값을 구하여 속도벡터를 추출하는 방법으로서 지금까지 많은 연구자들이 채택을 하여 왔으며 대부분의 상용제품이 이 기법에 따라서 개발되었다. 푸리에 변환은 영상처리에서 공간영역의 밝기정보를 주파수영역의 정보로 바꾸어 주는 역할을 행한다. 1차원의 경우를 생각하면 1차원의 실수  $x$ 의 연속함수  $f(x)$ 에 대한 이산산 FT의 쌍은 다음 식으로 구해진다.

$$F(u) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} f(x) e^{\left(\frac{-j\pi ux}{N}\right)} \text{-----}(2-6)$$

$$f(x) = \sum_{u=0}^{N-1} F(u) e^{\left(\frac{j\pi ux}{N}\right)} \text{-----}(2-7)$$

만일  $f(x)$  및  $g(x)$ 가  $F(u)$ 와  $G(u)$ 의 FT라면 합성은 주파수 영역의 해석에서 푸리에 변환에서와 같이 한 쌍을 이루며 다음의 관계가 성립한다.

$$f(x) * g(x) = FT^{-1} F(u) G(u) \text{-----}(2-8)$$

이산합성(discrete convolution)의 식은 다음과 같이 주어진다.

$$f_e(x) * g_e(x) = \sum_{m=0}^{M-1} f_e(m) g_e(x-m) \text{-----}(2-9)$$

상관식도 합성과 유사하나 한쪽의 함수에 공액복소수를 취하는 점이 다르며 상관에서도 합성에서와 같이 FT에 관한 법칙이 그대로 적용된다.

$$f(x) \cdot g(x) = FT^{-1} F^*(u) G(u) \text{-----}(2-10)$$

여기에서  $\cdot$  는 상관의 표시이며  $*$  는 공액복소수를 의미한다. 이산상관 (discrete correlation)의 식은 다음과 같다.

$$f_e(x) \cdot g_e(x) = \sum_{m=0}^{M-1} f_e^*(m) g_e(x+m) \text{-----}(2-11)$$

f(x)와 g(x)가 같은 식이 되면 자기상관함수(auto-correlation function)가 되고 다르면 상호상관함수(cross-correlation function)식이 된다.

식 (2-9)와 식 (2-11)은 영상이미지에서 적용되는 이산식들이나 큰 공간 영역으로 인하여 계산식의 합이 클 경우에는 이들 대신에 식 (2-8)과 식 (2-11)에서와 같이 주파수 영역의 FT의 계산에 이산DFFT(Discrete Fast Fourier Transform)기법을 적용하여도 무방하다. 상관함수식에서의 공액복소수는 영상의 픽셀데이터에 대해서 허수부에만 영향을 미치기 때문에 크기는 변하지 않고 위상만을 변화시킴으로서 합성의 조작과 아주 유사함을 알 수가 있고 자기상관 PIV에서 상관계수를 구하기 위해서는 푸리에 변환을 반드시 행하여야 한다.

### 5 ) 상호상관 PIV

그림과 같은 영역에서 2차원 이산 상호상관함수(Cross-Correlation Function, CCF)의 식은 다음과 같다.

$$c(s, t) = \sum_x \sum_y f(x, y) w(x-s, y-t) \text{-----}(2-12)$$

단, 여기에서 미소영역 w(x, y)의 크기는 J×K 이며 f(x, y)의 크기는 M×N이다. 또한 s = 0, 1, 2, ..., M-1, t = 0, 1, 2, ..., N-1 이다. 그러나 식 (2-12)로 주어지는 함수식은 f(x, y) 및 w(x, y)의 진폭의 변화에 매우 민감하여 다음의 식으로 정의되는 상호상관계수(Cross Correlation



Coefficient, CCC)를 구하여 최대상관의 위치를 찾아내는 것이 합리적이다.

$$\gamma(s, t) = \frac{\sum_x \sum_y [\mathcal{A}(x, y) - \overline{\mathcal{A}(x, y)}][w(x-s, y-t) - \overline{w}]}{\left\{ \sum_x \sum_y [\mathcal{A}(x, y) - \overline{\mathcal{A}(x, y)}]^2 \sum_x \sum_y [w(x-s, y-t) - \overline{w}]^2 \right\}^{1/2}} \quad (2-13)$$

여기에서  $\overline{w}$ 는  $w(x, y)$ 영역내의 평균치(1회계산)이며  $\overline{\mathcal{A}(x, y)}$ 는  $w$ 가 현재 위치하는 곳의 평균값을 의미한다. 이 때 상관계수  $\gamma(s, t)$ 는 -1과 1 사이의 값을 갖게 된다. 상관에 관한 식 (2-10)으로부터 알 수 있는 바와 같이 상관함수 또는 상관계수는 주파수 영역에서 FFT에 의해 구해될 수가 있다. 상호상관

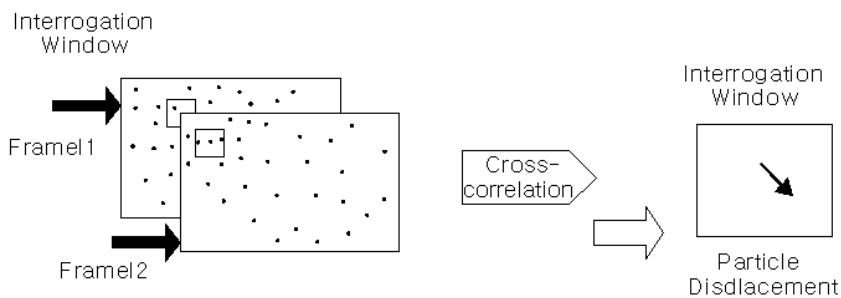
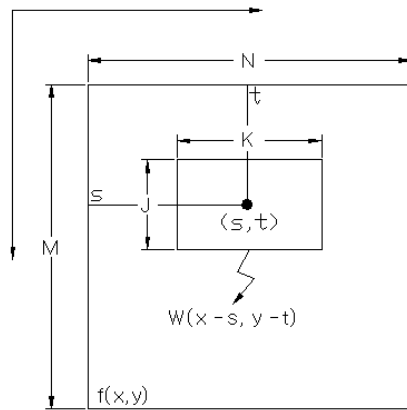


Fig. 2-4 Cross - Correlation Method

PIV에서는 그림의  $(x, y)$ 의 원점이 제 1 프레임 상에서 속도벡터를 구하

기 위한 가상격자의 중심 즉 벡터의 시점을 나타낸다. 이 점을 중심으로 제 2 프레임 상에서  $M$ (또는  $N$ , 일반적으로는  $M=N$ )의 값으로 정의되는 탐색영역 반경내의 모든 픽셀의 위치  $(s, t)$ 에서  $(J \times K)$ 의 값으로 표시되는 상관영역에 대한  $\gamma(s, t)$ 의 값을 구한다. 다음으로 이 값들 중에서 최대치의 위치를 찾으면 이곳이 제 2 프레임에서의 벡터의 종점이 된다.

## 6) 조명부호 PIV

이 방법은 Adrian의 정의에 의한 저영상밀도 PIV(PTV)중 단일 프레임 (Single-Frame)법을 의미한다. 즉 한 장의 사진 또는 프레임에 조명을 부호화하여 벡터의 크기 및 벡터의 시점과 종점을 구하는 기법으로서 PTV의 초기에 많이 적용되었다. 펄스 조명의 폭 및 간격을 조정하여 연속펄스 또는 긴 유맥선(streak) 입자영상을 기록한 뒤에 개별 입자의 궤적을 추적한다. 가장 기본적인 방법은 사진을 확대하여 디지털저상에서 사람의 눈으로 구별하는 것이나 번거로운 작업이 필요하며 무엇보다 역류 영역에서 벡터의 방향을 제대로 파악하는 것이 매우 어렵다. 또한 벡터의 시점과 종점의 정확한 위치산정이 어려워 측정정도가 떨어진다. 한편 컴퓨터는 전용의 영상처리장치(Image Processor)또는 영상 보오드(Image Grabber, Image Board)로부터 이들의 입자의 궤적의 밝기정보를 2차원의 위치(예를 들어  $640 \times 480$  픽셀) 및 각 픽셀에서의 계조치(보통 256단계)의 값으로 데이터파일을 받아서 영상처리를 하게 된다. 보통 필터처리를 통한 노이즈제거 및 입자영상의 강조, 윤곽선의 검출, 세션화, 라벨링 (labelling), 도심좌표(Centroid)의 계산 등을 거쳐 적절한 추적알고리즘에 의해 벡터의 방향과 크기가 자동으로 계산된다. 이 방법에서 가장 어려운 점은 벡터의 시점 또는 종점을 알아내기 위하여 조명을 부호화하여 이를 해독하는 작업이다. 지금까지 여러 가지의 기법이 제안되고 있으며 Kobayashi와 Yoshitake는 카메라의 셔터가 개방되는 초기시점에 스트로

스코프에 의한 짧은 조명 펄스를 첨가하여 벡터의 시점을 구별하는 기법을 제시하였다. Fig. 2-5는 이렇게 얻어진 유맥선을 처리한 예를 보이고 있다. Grant와 Liu는 펄스태깅(Pulse Tagging)법을 적용하여 방향판별을 하고 있다. 조명부호법은 원리 및 관련장치가 비교적 단순하여 쉽게 적용할 수가 있으나 일반적으로 조명이 시작하여 끝나는 시점까지의 시간 간격이 크다는 점이 제약이 될 수가 있다. 즉 레이저의 2차원 시이트광(Sheet Light)내에 입자가 계속 머물러야만 유효벡터가 산출될 수가 있으나 추적입자가 주어진 미소시간동안 2차원의 조명영역(In-Plane)내에 머물지 않고 이 단면을 이탈하는(out-of-plane)문제를 발생시키며 특히 고속의 3차원 유동장 해석에는 계측의 다이내믹 레인지가 크게 떨어질 수가 있다.

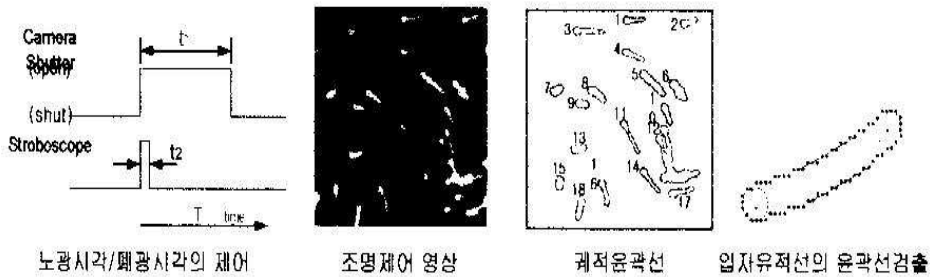


Fig. 2-5 An outline detection of particle streakline

### 第3節 CFD 이론적 배경 및 이론식

#### 1. CFD 이론적 배경

점성(viscosity)이 있는 유체운동의 직접적인 수치해석은 1953년경부터 시작하였는데, 작은 레이놀즈수(Low Reynolds Number)에서의 단순한 2차원 원주유동을 당시의 수동 계산기를 1년 동안 계속 돌려서 수치해석을 수행하였다. 현재는 부동(浮動) 소숫점 계산을 1초당  $10^9$ 회 이상 수행하는 즉,  $1G(=10^9)$  FPOPS (Floating Point Operation Per Second)이상의 슈퍼컴퓨터를 구사한 수치해석이 항공기, 에너지 기계, 기상 등 여러 분야에서 유체현상의 해석과 설계에 커다란 공헌을 하고 있다.

그러나, 레이놀즈수가 큰 유체의 운동은 난류유동에 의해서 지배되며, 그 비선형성(非線型性)에 의해서 생기는 여러 가지 스케일의 와류운동(Vortex Motion)을 포함하고 있지만, 현재까지도 이 모든 와류운동구조를 규명할 수 없어서 난류모델(Turbulence Model)을 도입하여 보완하고 있는 실정이다. 수치유체역학에서 Navier-Stokes 방정식을 완벽하게 풀어내는 것은 현시점에서는 불가능하며, 반드시 물리적인 고찰과 모델이 필요하다.

고전적인 유체역학의 역사도 역시 점성의 영향을 어떻게 해석에 집어넣을까라는 문제로 하나의 커다란 흐름을 형성하고 있다. Navier-Stokes 방정식이 만들어진 뒤에는 작은 레이놀즈 수에서의 유동을 해석적으로 명확히 하기 위해 관성항을 생략하는 Stokes 근사나, 그 점근 전개를 이용하는 Oseen 근사를 생각해 내게 되었다. 큰 레이놀즈수의 유동을 명확하게 하기 위해 점성의 영향을 벽면 가까이에 한정시킨 경계층 이론(Boundary

Layer Theory)을 만들어 내었다. 이 경계층과 그 외측 유동을 표현하는 이상유체(理想流體)의 유동을 실제로 풀기 위해서 수치계산이 본격적으로 도입되었다.

현재 널리 행하여지고 있는 수치유체역학(數值流體力學)은 필요에 따라 난류모델을 도입하면서도 Navier-Stokes방정식을 직접 풀어서 점성유체의 운동을 명확히 하는 수치계산방법이다. 따라서, Stokes 근사나 경계층 근사 등 근사방법은 사용되고 있지 않다. 그러나, 컴퓨터로 풀 수 있도록 기초방정식을 이산화(Discretization)하기 때문에, 이 과정에서 생기는 근사나 오차를 당연히 포함하고 있는 것을 인식할 필요가 있다.

Navier-Stokes 방정식 등의 미분방정식을 이산화 하는 방법으로 크게 유한차분법(FDM : Finite Difference Method), 유한요소법(FEM : Finite Element Method) , 유한체적법(FVM : Finite Volume Method)의 3가지 종류를 들 수 있다. 컴퓨터는 미분방정식을 해석적으로 푸는 것이 불가능하기 때문에, 풀어야 할 영역에 배치된 유한개의 격자점상에서의 미지수에 관한 대수방정식이나 관계식을 만드는 것이 요구된다. 이것을 이산화(Discretization)라고 한다. 본 논문에서 유한체적법(FVM)을 채용했으며, 이것은 비압축성 유동에 대한 수치해석 방법의 하나인 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation)도입과도 관련이 있다. 이 해법은 정상(steady) 유동을 효율적으로 풀 수가 있으며, 퍼스널 컴퓨터나 워크스테이션 등의 소형계산기에서도 충분히 이용될 수 있다. SIMPLE해법과 유한체적법은 오랜 경험과 전통으로부터 일체화되어 발전되어 왔다.

## 2. 유한체적법

유한체적법은 운동량 및 질량보존법칙(Conservation Principle)을 만족시키기 위해 용이하도록 적분으로 기초방정식을 이산화하는 방법이다. 구체

적으로는 고려하고 있는 격자점을 중심으로 한 미소영역 내에서 방정식을 적분하고, 그 경계의 값을 인접 격자점을 이용하여 요구되는 정확도로 주어 적분식을 이산화 하는 것이다. 미소영역에서 보존법칙을 만족하는 것은 Navier-Stokes 방정식 등의 기초방정식을 구할 때 당연하게 실행되어 왔다. 그러나 최종적으로 얻어진 미분방정식을 단순히 차분한 경우에는 이산식이 보존법칙을 만족시키지 못할 경우도 발생한다. 이에 반해 유한체적법은 적분한 후 이산화하기 때문에 항상 그 미소영역 내의 운동량 등의 출입을 고려하게 되어 보존법칙을 확실하게 만족시키는 이산식을 얻을 수 있다.

가.  $x$  방향 운동량방정식의 이산화

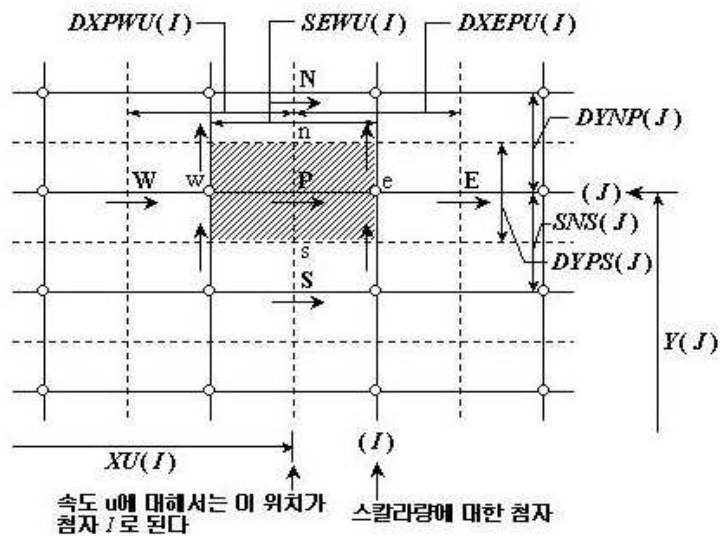


Fig. 2-6 Discretization Diagram of X-Direction Momentum Equation

운동량방정식을 속도  $u$ 를 미지수로 하여 유한체적법으로 이산화 하도록 한다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho v \cdot u) = \frac{\partial}{\partial x}(\rho \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \frac{\partial u}{\partial y}) - \frac{\partial p}{\partial x} \quad \text{-----}(2-14)$$

Fig. 2-6는 이산화 할 때의 위치 및 길이에 대한 기호를 나타낸 것으로, 사선은 적분하는 영역, 즉 제어체적을 나타낸다. 첨자 (I, J) 에 대응하는 중심점 P의 위치에서 속도 U(I, J)를 정의한다. 엇갈림 격자를 취하고 있기 때문에 압력 p는 제어체적의 경계점 w, e에서 주어지고, 속도 v는 경계의 모서리에서 주어진다. 이때 압력과 속도 v의 x방향 첨자 I는 그것들의 서쪽에 있는 속도 u와 일치된다. y방향에 대해서는 압력의 위치는 속도 u와 같으나 속도 v는 북쪽에 있는 속도 u의 첨자 J에 대응된다. 비 균일한 격자간격에 대해서도 응용될 수 있도록 x, y 양 방향의 좌표, 격자간격 등에도 배열(Dimension)을 가지도록 한다. 참고로 대문자로 나타낸 변수는 후술하는 프로그램에서 이용되고 있는 변수명과 거의 일치한다.

대류항의 제1항에 대한 이산화를 다음과 같이 진행한다.

$$\begin{aligned} \int \int \frac{\partial}{\partial x}(\rho u \cdot u) dx dy &= \Delta y \int \frac{\partial}{\partial x}(\rho u u) dx = SNS(J) * [(\rho u u)_e - (\rho u u)_w] \\ &= SNS(J) * \{0.5 * [DEN * U(I, J) + DEN * U(I+1, J)] * u_e \\ &\quad - 0.5 * [DEN * U(I-1, J) + DEN * U(I, J)] * u_w\} \\ &= SNS(J) * 0.5 * (GP+ \geq) * u_e - SNS(J) * 0.5 * (GW+ GP) * u_w \\ &= CE * u_e - CW * u_w = CE * 0.5 * [U(I+1, J) + (I-1, J)] \\ &\quad - CW * 0.5 * [U(I, J) + U(I-1, J)] \quad \text{-----}(2-15) \end{aligned}$$

즉 y방향의 적분에 대해서는 평균값 y방향의 구폭간 SNS(J)를 곱한 것으로 나타내고, x방향의 적분은 원시함수(原始函數) ρ u u가 주어져 있기 때문에 그 적분구간의 차로써 표현되어 있다. 여기서 DEN은 ρ의 변

수값으로 주어져 있다. 미지수인 속도  $u$ 의 선형방정식을 얻기 위해  $\rho u u$ 의 한쪽  $u$ 는 이미 알고 있는 값을 이용하여 계수에 포함시켜서 최종 식(2-15)을 얻는다.

대류항의 제2항도 같은 방법으로 유한체적법에 의한 이산화방정식(2-16)을 얻는다. 속도  $v$ 는 이 방정식에서 미지수로 취급하지 않기 때문에 계수에 포함되어 있다.

$$\begin{aligned} \int \int \frac{\partial}{\partial y} (\rho v u) dx dy &= \Delta x \int \frac{\partial}{\partial y} (\rho v u) dy = SWEM(\Delta) * [(\rho v u)_n - (\rho v u)_s] \\ &= SWEM(\Delta) * [(\rho v u)_n - (p v u)_s] \\ &= SEWU(\Delta) * \{0.5 * [DEN * U(I, J+1) + DEN * U(I-1, J+1)] * u_n \\ &\quad - 0.5 * [DEN * U(I, J) + DEN * U(I-1, J)] * u_s\} \\ &= SEWU(\Delta) * 0.5 * (GN + GNW) * u_n - SEWU(\Delta) * 0.5 * (GS + GSW) * u_s \\ &= CN * u_n - CS * u_s = CN * 0.5 * [U(I, J+1) + U(I, J)] \\ &\quad - CS * 0.5 * [U(I, J) + U(I, J-1)] \quad \text{-----(2-16)} \end{aligned}$$

점성항의 제1항에서  $y$ 방향의 적분은 평균값에 구간간격을 곱하여 나타내고  $x$ 방향은 원시함수  $u \partial u / \partial x$ 의 차로 나타낸다. 이 미분항의 동쪽 경계  $e$ 에서의 값은 속도  $u$ 의 점E, P의 차를 이 두 점간의 거리  $DXEPU(1)$ 로 나눈 것으로 주어지며, 2차 정확도를 가진다. 식(2-17)은 점성항의 제1항에 대해 이산화된 식을 나타내며, 식(2-18)는 같은 방법으로 하여 얻어지는 점성항의 제2항에 대한 이산화된 식을 나타낸다.

$$\int \int \frac{\partial}{\partial x} \left( u \frac{\partial u}{\partial x} \right) dx dy = \Delta y \int \frac{\partial}{\partial x} dx = \Delta y \left[ \left( u \frac{\partial u}{\partial x} \right)_e - \left( u \frac{\partial u}{\partial x} \right)_a \right]$$



$$\begin{aligned}
&= SNS(\lambda) * \left[ VIS * \frac{1}{DXEPU(\lambda)} * (\partial u)_e - VIS * \frac{1}{DXEPU(\lambda)} (\partial u)_w \right] \\
&= DE * (\partial u)_e - DW * (\partial u)_w = DE * [U(I+1, \lambda) - U(I, \lambda)] \\
&\quad - DW * [U(I, \lambda) - U(I-1, \lambda)] \quad \text{-----}(2-17)
\end{aligned}$$

$$\int \int \frac{\partial}{\partial y} \left( u \frac{\partial u}{\partial y} \right) dx dy = \Delta x \int \frac{\Delta}{\Delta y} \left( u \frac{\partial u}{\partial y} \right) dy = \Delta x \left[ \left( u \frac{\partial u}{\partial y} \right)_n - \left( u \frac{\partial u}{\partial y} \right)_s \right]$$

$$\begin{aligned}
&= SEWU(\lambda) * \left[ VIS * \frac{1}{DYNP(\lambda)} * (\partial u)_e - VIS * \frac{1}{DYPS(\lambda)} * (\partial u)_s \right] \\
&= DN * (\partial u)_n - DS * (\partial u)_s = DN * [U(I, J+1) + U(I, \lambda)] \\
&\quad - DS * [U(I, \lambda) - U(I, J-1)] \quad \text{-----}(2-18)
\end{aligned}$$

압력 구배항은  $y$ 방향에 대해서는 평균값에 구간간격을 곱하고,  $x$ 방향은 경계점  $w, e$ 에 압력의 격자점이 배치되어 있기 때문에 그것들의 차로 직접 주어진다.

$$\begin{aligned}
\int \int \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) dx dy &= - \Delta y \int \frac{\partial p}{\partial x} dx = - \Delta y [p_e - p_w] \\
&= SNS(\lambda) * [P(I-1, \lambda) - P(I, \lambda)] \quad \text{-----}(2-19)
\end{aligned}$$

이상의 각 항을 종합하면  $x$ 방향 운동량방정식의 이산화방정식은 다음 식과 같이 된다.

$$\begin{aligned}
AP(I, \lambda) * U(I, \lambda) &= AM(I, \lambda) * U(I, J+1) \\
&+ AS(I, \lambda) * U(I, J-1) + AE(I, \lambda) * U(I+1, \lambda) \\
&+ AW(I, \lambda) * U(I-1, \lambda) + SP(I, \lambda) * U(I, \lambda) + SU(I, \lambda) \\
&\text{-----}(2-20)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
AM(I, J) &= -0.5 * CN + DN \rightarrow DN + [-CN, 0] \\
&\text{(상류차분 도식)}
\end{aligned}$$

$$\rightarrow [ - CN, DN - 0.5 * CN, 0 ] \text{ -----(2-21)}$$

(하이브리드 도식)

$$AS(I, J) = 0.5 * CS + DS \rightarrow DS + [ CS, 0 ]$$

$$\rightarrow [ CS, DS + 0.5 * CS, 0 ] \text{ -----(2-22)}$$

$$AE(I, J) = -0.5 * CE + DE \rightarrow DE + [ -CE, 0 ]$$

$$\rightarrow [ -CE, DE - 0.5 * CE, 0 ] \text{ -----(2-23)}$$

$$AW(I, J) = 0.5 * CW + DW \rightarrow DW + [ CW, 0 ]$$

$$\rightarrow [ CW, DW + 0.5 * CW, 0 ] \text{ -----(2-24)}$$

$$AP(I, J) = AM(I, J) + AS(I, J) + AE(I, J) + AW(I, J)$$

$$+ (CN - CS + CE - CW) \text{ -----(2-25)}$$

$$SU(I, J) = SNS(J) * [ P(I-1, J) - P(I, J) ] \text{ -----(2-26)}$$

나.  $y$ 방향 운동량방정식의 이산화

식 (2-27)의  $y$ 방향에 대한 운동량방정식으로부터 속도  $v$ 를 구하는 이산화방정식을 전절과 마찬가지로 방법으로 만든다.

$$\frac{\partial}{\partial y}(p v \cdot v) = \frac{\partial}{\partial x} \left( u \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( u \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} \text{ -----(2-27)}$$

Fig. 2-7와 같이 사선으로 나타낸 제어체적을 설정하고 그 중심점 P에 속도  $v$ 에 대응하는 미지수  $V(I, J)$ 를 설정한다. 엇갈림 격자를 채용하기 때문에 전절의 기호와 대응하지 않는 부분도 있으나, 이산화방정식을 얻는 순서는  $x$ 방향의 운동량방정식과 같다. 여기서는 식의 상세한 유도과정은 생략한다.

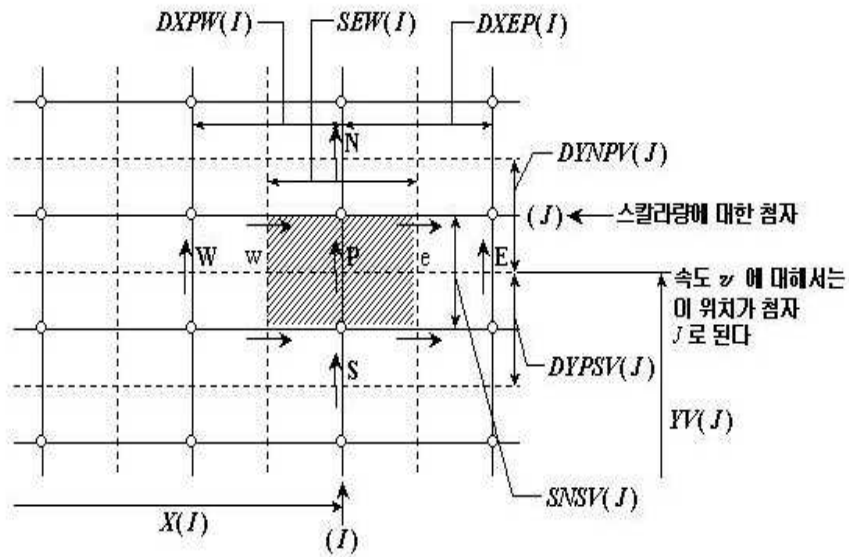


Fig. 2-7 Discretization Diagram of Y-Direction Momentum Equation

다. 연속방정식과 운동량방정식의 결합-SIMPLE 해법

연속방정식은 전술한 바와 같이 2차원 정상유동인 경우

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) = 0 \quad \text{-----}(2-28)$$

이다. 이미 운동량방정식으로부터 속도를 구했기 때문에 연속방정식에서는 압력을 구해야 한다. 그러나 연속방정식에는 압력이 포함되어 있지 않기 때문에 운동량방정식과 조합시킬 필요가 있다. 여러 가지 조합방법이 있으나 여기서는 압력보정식을 만드는 SIMPLE 해법이라 불리우는 방법을 채용한다.

속도  $u$ 를 구하는  $x$ 방향의 운동량방정식의 이산화방정식(2-20)을

$$a_e u_e = \sum a_{nb} u_{nb} + b + A_e(p_P - p_E) \quad \text{-----}(2-29)$$

로 고쳐쓴다. 첨자는 연속방정식에 대한 제어체적을 설명하는 Fig. 2-8에 대응하고 있다. 속도  $v$ 를 구하는  $y$ 방향의 운동량방정식에 대해서도 다음과 같이 나타낸다.

$$a_n v_n = \sum a_{nb} v_{nb} + b + A_n(p_P - p_N) \quad \text{-----}(2-30)$$

압력에 대한 적절한 추정값  $p$ 를 주면 속도에 대한 근사값  $u, v$ 를 위의 두식으로부터 아래와 같이 구할 수 있다.

$$a_e u_e^* = \sum a_{nb} u_{nb}^* + b + A_e(p_P^* - p_E^*) \quad \text{-----}(2-31)$$

$$a_n v_n^* = \sum a_{nb} v_{nb}^* + b + A_n(p_P^* - p_N^*) \quad \text{-----}(2-32)$$

정확한 압력 및 속도를  $p, u, v$ 로 하고 추정값  $p$ 에 대한 보정량을  $p'$ , 그것에 대응하는 속도 보정량을  $u', v'$ 로 한다. 즉

$$p = p^* + p' \quad \text{-----}(2-33)$$

$$u = u^* + u' \quad \text{-----}(2-34)$$

$$v = v^* + v' \quad \text{-----}(2-35)$$

의 관계식을 정의한다. 이 세 식을 식(2-29), (2-30)에 대입하여 각각 식 (2-31), 식(2-32)로 빼면

$$a_e u'_e = \sum a_{nb} u'_{nb} + A_e (\dot{p}_P - \dot{p}_E) \quad \text{-----}(2-36)$$

$$a_n v'_n = \sum a_{nb} v'_{nb} + A_n (\dot{p}_P - \dot{p}_N) \quad \text{-----}(2-37)$$

로 된다. 여기서 인근 격자점의 속도 보정량의 영향이 적다고 가정하여 우변 제1항을 생략한다. 만일 수렴해를 얻을 수 있다면 보정량은 전부 0 이 되기 때문에 이 생략은 수렴해를 얻는 것을 전제로 할 경우 허용될 수 있는 합리적인 가정이다. 따라서 속도 보정량은

$$u'_e = d_e (\dot{p}_P - \dot{p}_E), \quad d_e \equiv A_e / a_e \quad \text{-----}(2-38)$$

$$u'_n = d_n (\dot{p}_P - \dot{p}_N), \quad d_n \equiv A_n / a_n \quad \text{-----}(2-39)$$

로 주어질 수 있기 때문에 연속방정식의 이산화에 필요한 속도는 다음 식으로 주어질 수 있다.

$$u_e = u_e^* + d_e (\dot{p}_P - \dot{p}_E) \quad \text{-----}(2-40)$$

$$u_n = u_n^* + d_n (\dot{p}_P - \dot{p}_N) \quad \text{-----}(2-41)$$

연속방정식(2-28)을 제어체적에 걸쳐서 적분하면

$$[(pu)_e - (pu)_w] \Delta y + [(pu)_n - (pu)_s] \Delta x = 0 \quad \text{-----}(2-42)$$

으로 되고, 이 식에 식(2-38), 식(2-39) 및  $u_w, v_s$ 에 관한 동등한 식을 대입하여, 다음 식과 같은 압력 보정량  $p'$ 에 관한 압력 보정식을 얻는다.

$$a_p \dot{p}_P = a_E \dot{p}_E = a_w \dot{p}_w + a_n \dot{p}_n + a_s \dot{p}_s + b \quad \text{-----}(2-43)$$

$$a_E = p d_e \Delta y, \quad a_w = p d_w \Delta y, \quad a_n = p d_s \Delta x,$$

$$a_p = a_E + a_w + a_n + a_s \quad \text{-----}(2-44)$$

$$b = [(pu^*)_w - (pu^*)_e] \Delta y + [(pv^*)_s - (pv^*)_n] \Delta x$$

속도를 구할 때와 같이 적당한 완화법으로  $p'$ 가 얻어질 수 있다면 식

(2-43), 식(2-40), 식(2-41) 등을 이용하여 새로운  $p'$ ,  $u'$ ,  $v'$ 를 구할 수 있다.

이 방법은 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation)해법이라고 불리워지고 있다.

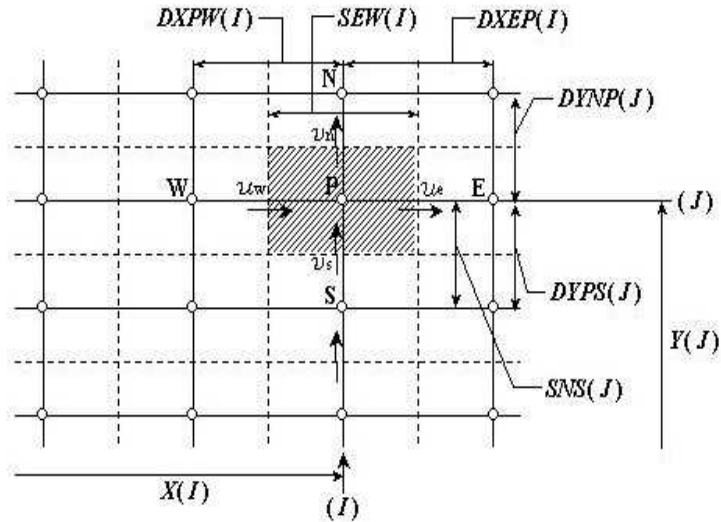


Fig. 2-8 Discretization Diagram of Continuity Equation

SIMPLE 해법에서는 정상해를 구하기 위한 시간간격을 무한대로 취해 비정상항을 생략하고 그 무한대 시각에서 음적해법으로 미지수를 구하도록 정식화되어 있다. 그러나 식(2-36), 식(2-37)에서 어떤 항을 생략한다는 근사적 방법을 도입하여 압력 보정식을 얻고 있기 때문에 ‘반음적(半音的)’해법이라고 이름이 붙여져 있다. 생략하는 항의 취급방법에 따라 근사 정확도를 상승시킨 해법도 가능하며, SIMPLER, SIMPLEC 등의 애칭으로 불리우고 있다. 이들 SIMPLE계 해법의 특징은 정상해를 구할 때 다른 방법에 비해 최소의 계산시간이 걸린다는 것이다. 통상 이 방법에서 이산화는 유한체적법으로 행해지기 때문에 물리량 보존법칙을 만족시키고

있는 것도 특징 중의 하나이다.

이와 함께 압력보정식을 사용하지 않고, 운동량방정식과 연속방정식을 직접적으로 연립시켜 보다 거대한 연립대수방정식을 푸는 방법도 이론적으로는 존재하나 계산시간이 너무 커지므로 공학적인 목적으로는 이용되지 않는다.

SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations)알고리즘은 준 암시적 이라는 용어를 사용한 것으로 속도에 관한 압력의 간접적 또는 암시적인 영향을 나타낸다. 인접한 위치에서 압력수정은 인접 속도에 영향을 줄 수 있으며, 고려중인 위치에서 속도수정의 원인이 된다. SIMPLE 알고리즘은 많은 장점을 가지고 있다. 그 장점 중에 각각 방향의 속도에 연속성을 만족시키며, 이러한 합리적인 속도에 관하여 하향이 완을 하는 것은 각각 방향에 대한 속도의 타당성을 유지시키면서 질량생성을 작게 유지하는 데 도움이 되며, SIMPLE 3 차원 알고리즘의 수식은 연속방정식을 적분하면 다음과 같은 수식이 된다.

$$\frac{(\rho_p - \rho^0_p)\Delta x\Delta y\Delta z}{\Delta t} + [(\rho u)_e - (\rho u)_w]\Delta y\Delta z + [(\rho v)_n - (\rho v)_s]\Delta z\Delta x + [(\rho v)_t - (\rho v)_b]\Delta x\Delta y = 0 \quad \text{-----}(2-45)$$

모든 속도 성분들을 속도수정식 및 압력수정식 의한 표현으로 대치하여 정리하면 다음과 같은 이산화방정식을 얻게 된다.

$$a_P P'_P = a_E P'_E + a_w P'_w + a_N P'_N + a_s P'_s + a_T P'_T + a_B P'_B + b \quad \text{--}(2-46)$$

각각의 계수 값을 대입하면 다음과 같은 SIMPLE 알고리즘의 수식이 된다.

$$a_E = \rho_e d_e \Delta y \Delta z, \quad a_w = \rho_w d_w \Delta y \Delta z, \quad a_n = \rho_n d_n \Delta z \Delta x$$

$$a_s = \rho_s d_s \Delta z \Delta x, \quad a_t = \rho_t d_t \Delta x \Delta y, \quad a_B = \rho_b d_b \Delta x \Delta y$$

$$a_P = a_E + a_w + a_N + a_s + a_T + a_B$$

$$b = \frac{(\rho^0_p - \rho_p)\Delta x\Delta y\Delta z}{\Delta t} + [(\rho u^*)_w - (\rho u^*)_e]\Delta y\Delta z + [(\rho v^*)_s - (\rho v^*)_n]\Delta z\Delta x$$

$$+ [(\rho w^*)_{,y} - (\rho w^*)_{,x}] \Delta x \Delta y \quad \text{-----}(2-47)$$

여기에서,  $\delta$ 는 질량생성(Mass Source)이고, 속도수정 및 압력수정은  $\delta$ 를 0으로 만들어야 한다. 그 이유는 연속방정식을 만족시키기 위해서 이며, 이 말은 속도수정 및 압력수정 값들이 일정하게 수렴함을 나타낸다.



# 第 3 章 實 驗 및 數 值 解 析

## 第1節 실험 장치

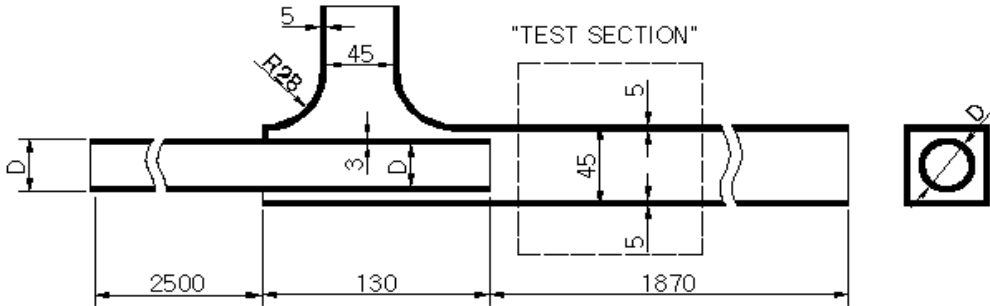


Fig. 3-1 Experiment apparatus and Test Section

Fig. 3-1은 본 실험을 위해 사용된 이젝터 장치를 보여주고 있다. 본 실험에서는 구동관로의 직경 및 레이놀즈 수를 변화시키면서 구동관로로부터 나오는 유체의 속도에 의해 분지관로의 유체가 확대관로로 흡입되는 양을 분석하여 이젝터 장치의 유동특성을 규명하고 효율을 최적화 시키는데 그 목적이 있다. 본 실험에 사용된 구동관로는 두께 3mm인 원형관으로서 투명 아크릴로 제작하였으며 실험시 완전발달영역 조건을 만족시켜주기 위해 입구길이  $L_e=2,630\text{mm}$ 로 설정하였으며, 실험조건 각각의 원형관 지름  $D$ 는 20mm, 24mm, 30mm이다. 흡입관로 및 확대관로는 PIV 실험시 유동가시화를 위해 두께 5mm, 수력직경  $D_h = 45\text{mm}$ 인 정사각덕트로 제작하였고, 확대관로의 길이는 2,000mm이다.

유동특성을 규명하기 위한 실험 계측 영역(Test Section)은 구동관로와 확대관로가 만나는 지점으로부터 길이 130mm까지의 구간을 설정하였고, 폭은 사각덕트의 중간지점인 22.5mm를 기준으로 평면을 계측하였으며, 입구영역에서의 유체를 일정한 유량으로 유지시키기 위해 220V 정전압 트랜스를 이용하여 송풍기의 RPM을 조절하였다.

## 第2節 PIV 계측실험

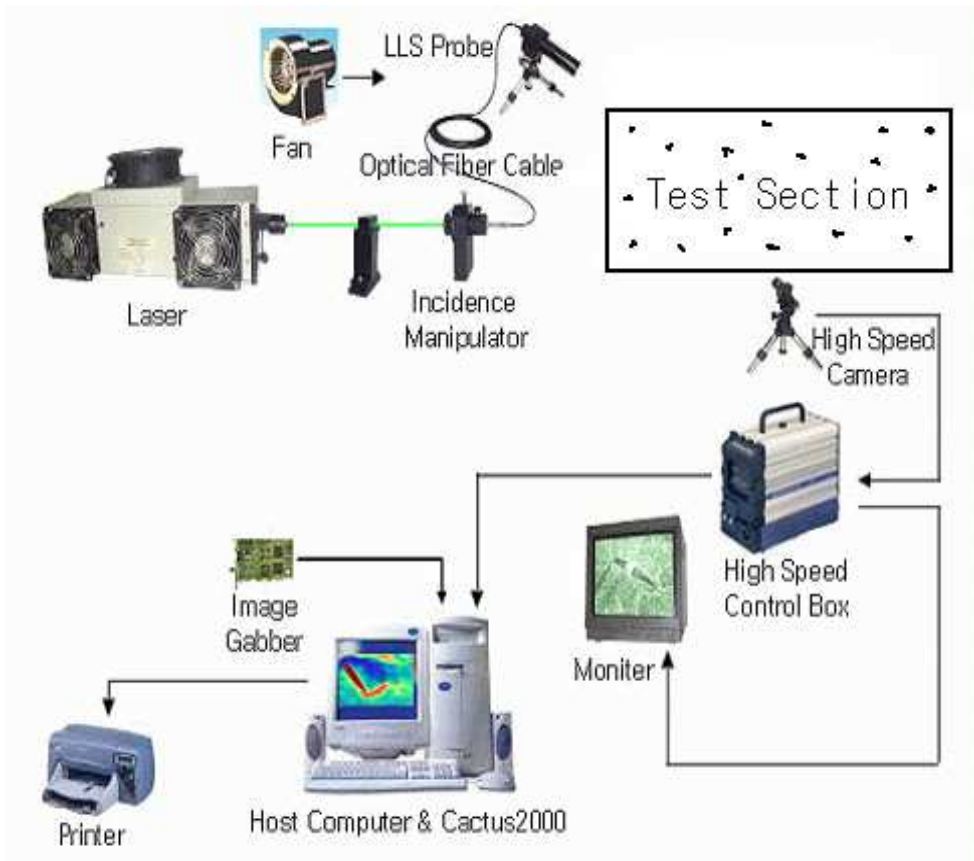


Fig. 3-2 Schematic Arrangement of PIV System

Fig. 3-2는 실험에 사용하게 될 PIV 시스템의 대략적인 도해를 나열한 것이다. 먼저 구동관로의 직경에 대해 입구조건의 유량을 일정하게 유지시키기 위해 정전압을 이용한 제어로 송풍기로부터 나오는 유체의 속도를 일정하게 유지시켰으며 구동관로의 팬에 초음파 입자 발생기를 이용해서 수증기 입자를 송풍기에 주입시켰다. Test Section에 산란되는 입자를 가시화 시키고, 계측영역을 Sheet화 시켜 평면광을 만들어 내기 위해 Argon-Ion 레이저와 LLS Probe(Laser Light Sheet Probe)를 사용하여 두께 약 3mm의 Sheet Light를 해석영역 구간 내에 조명시켰다. 조명시킨 Test Section 구간은 고속 카메라를 이용하여 프레임 시간을 적절히

조정하여 영상을 획득하여 Control Box에 저장시킨 후, 영상정보의 질을 확인한 후, 원시영상을 디지털 신호로 변환시키기 위해 A/D 변환 이미지 그래버를 사용하였다. 디지털 신호로 변환시킨 영상파일은 Frame 영상을 Field 분할하여 계조치 상호상관법을 적용시켜 입자에 대한 농도 분포를 분석하여 유동에 대한 속도분포를 추출하였다.

사용된 장비에 대한 세부 장치들에 대한 설명은 Table 3-1에 도시하였다.

Table. 3-1 PIV System Visualization Equipment

	Item	Specification
PIV System Equipments	Fan	HIDRIVE-J100(HYUNDAI) 최대풍압 5000mmAg최대풍량 3m <sup>3</sup> /min
	Probe	KANOMAX LLS Probe
	Laser	LEXEL Argon-Ion Laser (최대 7W)
	CAMERA	FASTCAM-RABBIT-MINI1 ( 30 ~ 400 fps )
	Image Grabber	DT-3152 (DATA Translation) - 256 Grey Level
	Computer	Pantium IV PC (CPU 2.54 GHz RAM 1G)
	Software	CACTUS'2000 (Cross-Correlation Algorithm)

실험 온도는 상온 20℃에서 ±1℃의 온도차를 유지시켰고, 구동 유체는 공기를 이용하였으며 구동관로에 송풍기를 이용하여 유동시켰다. 고속도 카메라에 측정된 Test Section 부분은 Mixing Area 100 × 45 mm<sup>2</sup>으로 잡았으며, 속도에 대한 영향을 고려하여 고속도 카메라의 Frame 속도를 120 ~ 400 fps 로 설정하여 촬영하였다.

실험조건은 실제 제품에 설계되어있는 구동관로의 직경(D = 24mm)에 대해서 실행하였고, 속도에 대한 조건은 3가지로 나누어서 분석하였는데, 각각의 속도조건은 흡입되는 현상을 직접 가시적으로 확인한 후, 입구속

도 조건을 각각  $V_1 = 2.51\text{m/s}$ ,  $V_2 = 3.77\text{m/s}$ ,  $V_3 = 5.03\text{ m/s}$ 로 속도를 변화시켜 가면서 Mixing Area 영역의 영상을 취득하였다. 이 때의 계산영역에 적용한 시간 평균 프레임 수는 50프레임으로 촬영된 영상은 고속도 카메라의 자체 메모리(최대 160MB)에 저장한 후, Host-Computer에 연결하여 CACTUS'2000을 이용하여 유동특성을 해석하였다.

Table. 3-2 Experiment Condition of Driving Flow

$D_h / D_s$	Q ( $\text{m}^3 / \text{sec}$ )	V (m / s)	Re. No
1. 5	$1.1355 \times 10^{-3}$	1.6064	3,192
	$1.7055 \times 10^{-3}$	2.4128	4,794
	$2.2755 \times 10^{-3}$	3.2192	6,396
1. 9	$1.1355 \times 10^{-3}$	2.5100	3,989
	$1.7055 \times 10^{-3}$	3.7700	5,992
	$2.2755 \times 10^{-3}$	5.0300	7,995
2. 3	$1.1355 \times 10^{-3}$	3.6144	4,787
	$1.7055 \times 10^{-3}$	5.4288	7,191
	$2.2755 \times 10^{-3}$	7.2432	9,594

Table. 3-2는 PIV 실험에 적용한 확대관로의 수력직경에 대한 구동관로의 유량, 속도 및 Re 수를 나타내고 있고, Fig. 3-3은 실제 설치된 이젝터 실험장치의 사진을 보여주고 있다.

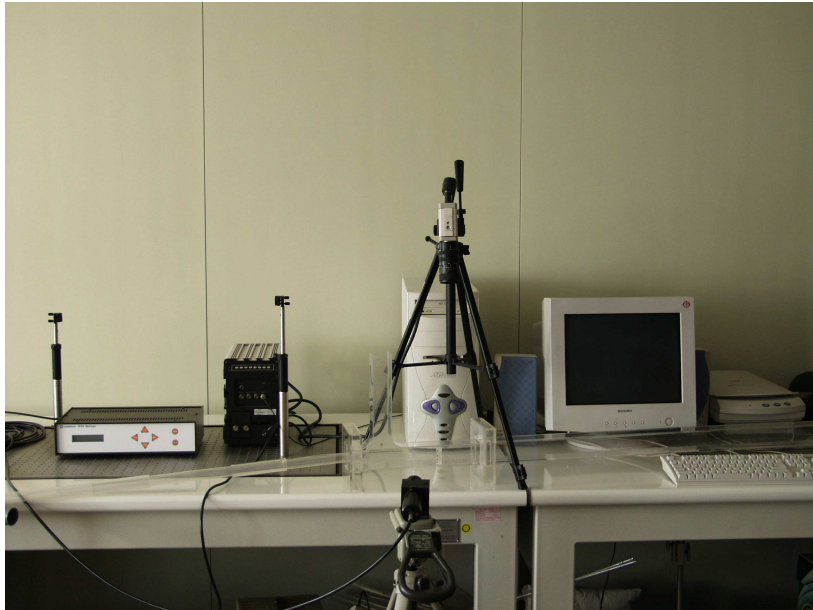


Fig. 3-3 Photograph of Experimental Equipment

### 第3節 CFD 수치해석

본 연구에서는 PIV계측 실험을 바탕으로 실제적인 실험과 동일한 조건으로 CFD(Computational Fluid Dynamics)분석을 이용하여 구동관로의 직경비 1:1.9에 따른 혼합 관로의 축 방향속도와 2차 유동의 속도분포를 해석하여 PIV계측 실험결과로부터 얻어진 속도분포, 운동에너지 분포, 압력분포, 와류분포의 유동특성을 비교 및 연구하였다.

동일한 유량 조건으로부터 구동관로의 직경비를 변화시켜 흡인되는 관로내의 유량과, 출구 유량을 분석하여 주어진 조건하에서의 구동관로의 최적 직경비를 얻어내고자 한다.

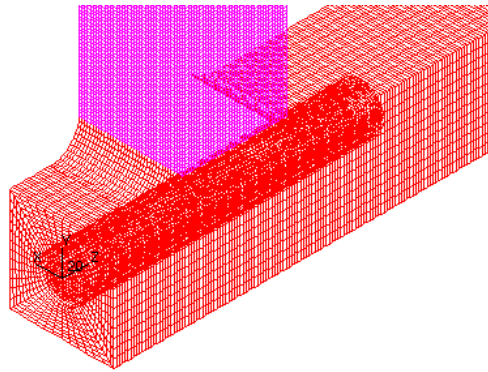
본 계산은 유체운동의 전반적 지배방정식인 연속방정식(질량보존의 법칙)과 운동량방정식의 편미분 방정식들로부터 수치해를 구하기 위하여 유체 유동해석에 많이 쓰이고 있는 유한체적법(Finite Volume Method)을 사용한 상용 코드 프로그램인 STAR-CD를 이용하여 수치해석을 수행하였으며, 주어진 관로내의 유동에 대한 Reynolds 수의 기준에 근거하여 난류로 가정하여 계산하였다. 난류모델은  $k-\epsilon$ /Low Reynolds Number를 적용하였고, 해석 알고리즘은 SIMP LE 해법을 사용하였다. 계산조건은 정상상태로서 열전달과 압축성 효과를 무시하였으며, 작동 유체는 공기이며 열역학적 특성치는 공기온도  $20^{\circ}\text{C}$ 를 기준으로 밀도  $\rho = 1.205 \text{ kg/m}^3$ , 점성계수  $\mu = 1.82 \times 10^{-5} \text{ N}\cdot\text{s/m}^2$  를 입력하였다.

본 CFD 수치해석에서 사용된 메시는 Fig. 3-4와 같으며 주관부의 길이는 총 4,500 mm, 지관부 총 200 mm이며, 구동관로의 직경비에 따라 메시의 정도를 각각 다르게 설정하였으며, 구동관로가 원형 관로임을 감안하여 수치해석의 정도를 높이기 위해 Ogrid-mesh를 사용하였다. 또한 구동관로로부터 유입된 유량이 흡인관로와 확대관로 사이에서 흡인이 유도되는지 단지 분지부로 유량이 흘러나가는지 알지 못하므로, 출구쪽과 흡인관로쪽은 이러한 경계조건을 감안하여 Pressure Boundary를 사용하였다.

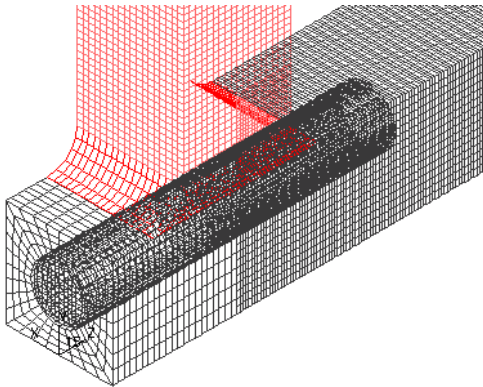
Table. 3-3는 CFD 해석에 적용한 해석조건으로서 확대관로의 수력직경에 대한 구동관로의 유량, 속도, Re 수 및 격자의 수를 나타내고 있다.

Table. 3-3 CFD Condition of Driving Flow

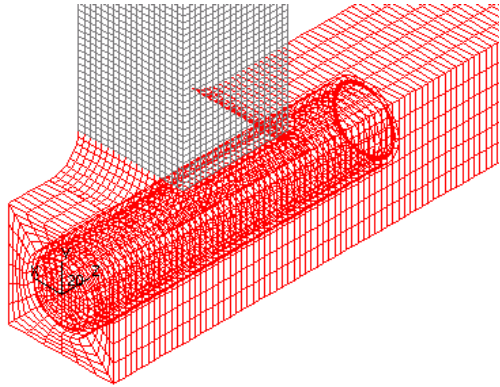
$D_h / D_s$	Q (m <sup>3</sup> / sec)	V (m / s)	Re	격자수
1. 5	$1.1355 \times 10^{-3}$	1.6064	3,192	100,000
	$1.7055 \times 10^{-3}$	2.4128	4,794	100,000
	$2.2755 \times 10^{-3}$	3.2192	6,396	100,000
1. 9	$1.1355 \times 10^{-3}$	2.5100	3,989	200,000
	$1.7055 \times 10^{-3}$	3.7700	5,992	200,000
	$2.2755 \times 10^{-3}$	5.0300	7,995	200,000
2. 3	$1.1355 \times 10^{-3}$	3.6144	4,787	400,000
	$1.7055 \times 10^{-3}$	5.4288	7,191	400,000
	$2.2755 \times 10^{-3}$	7.2432	9,594	400,000



( a )  $D_s : D_h = 1 : 2.3$



( b )  $D_s : D_h = 1 : 1.9$



( c )  $D_s : D_h = 1 : 1.5$

Fig. 3-4 CFD Grid of Ejector



## 第 4 章 結 果 및 考 察

### 第1節 PIV 결과 및 고찰

구동관로에 대한 확대 관로의 비는 1 : 1.9 로서 구동관로를 통과한 후, 확대관로를 지나는 유동에 관해 확산효과를 고려하여 설계하였다. 입구 쪽 유량을 각각  $Q_1 = 1.136 \text{ l/s}$ ,  $Q_2 = 1.706 \text{ l/s}$ ,  $Q_3 = 2.276 \text{ l/s}$ 로 변화시켜, 발생하는 평균속도벡터, 평균운동에너지, 평균와도, x-y 응력 분포를 CACTUS2000을 사용하여 분석하였으며, 각각의 조건에 대한 Re 수는  $Re_1 = 3,989$ ,  $Re_2 = 5,992$ ,  $Re_3 = 7,995$  이다.

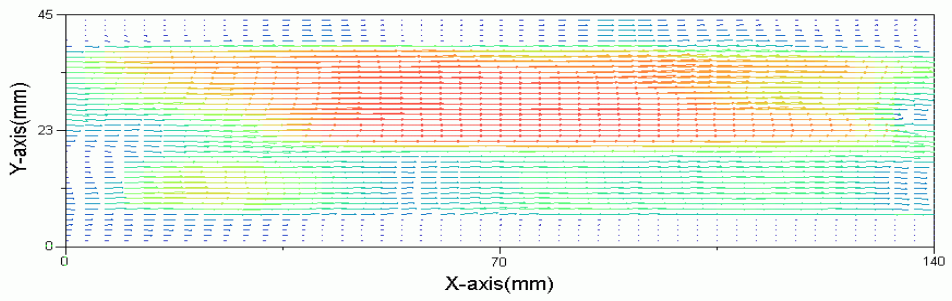
Fig. 4-1은 Re 수 변화에 따른 평균 속도 분포를 PIV 실험을 통해 분석된 영상을 보여주고 있으며, 해석영역은 구동관로가 확대관로와 만나는 지점으로부터 길이 100mm인 지점까지이다. Re 수가 3,898일 때 속도분포는 구동관로에 흡입되어지는 현상은 나타나지 않고 오히려 확대관로의 영향에 의해 속도가 감소되어지는 현상을 그림( a )를 통해 알 수 있다. 그러나 Re 수를 5,992, 7,995로 증가시킬 경우에는 분지관으로부터 나오는 벡터의 크기가 커지는 것에서 알 수 있듯이 구동관로의 영향으로 인한 압력강하가 분지관로에 영향으로 흡인되는 현상이 발생함을 확인할 수 있다. 벽면에서는 구동관로의 속도를 증가시킬 경우 벽면근처에서 점성에 의한 영향과 흡인현상의 발생으로 와류가 발생되어짐을 확인할 수 있었다.

Fig. 4-2는 각각의 입구조건에 대한 평균운동에너지 값을 보여주고 있으며, 구동관로에서 유출되는 유량의 값이 커질수록 전체적인 평균운동에너지 값이 증가하는 것을 알 수 있으며, 각각의 조건에서 주목할 만한 차이점은 ( a )에서는 구동관로에서 확대관로로 유출될 때, 운동에너지 값이 곡선형태를 보이면서 그 값이 50mm 부근까지는 증가하다가 그 이후에는 감소되어지는 것을 확인할 수 있으나, ( b ), ( c )에서는 확대관로로 유출될 때, 각각에 대한 운동에너지는 일정한 크기를 유지하면서 측정영역 구간까지 그 값을 유지하면서 유체유동이 일어남을 확인할 때,( a )

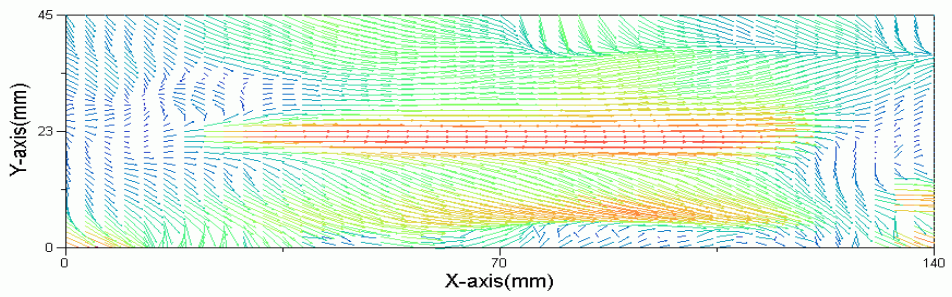
에서의  $Re_1 = 3,989$  는 난류 값의 레이놀즈수이지만, 그 값이 저난류값에 해당하고, 유동에 별다른 효과가 없음을 알 수 있다. 레이놀즈수가 증가함에 따라 운동에너지 값은 증가하지만 흡입효과를 증가시키기 위해서는 적정 이상의 레이놀즈 수를 증가시켜주어야 한다고 사료된다. 추후 흡입효과를 증가시키는 적정한 조건의 레이놀즈 수를 찾아내는 연구도 필요하다고 생각된다.

Fig. 4-3는 평균 와도값을 나타내고 있다. 와도는 유동의 속도와 벽면 전단력에 의해 밀접한 관계를 가지고 있다. 전체적으로 ( a ), ( b ), ( c )를 비교해 볼 때, 레이놀즈 수가 증가할수록 와도의 값은 증가함을 알 수 있으며, 벽면 근처에서 점성에 의한 벽면전단력의 영향에 크게 작용됨을 알 수 있다. ( a )에서는 ( b ), ( c )의 값과 비교했을 때, 와도 값은 작지만 해석영역 전반에 걸쳐 일정한 분포를 나타내고 있고, 흡입관로가 부착된  $y = 45\text{mm}$  부근에서는 양의 와도 값을, 반대 부분인  $y = 0\text{mm}$  부근에서는 음의 와도가 발생되어지고 있음을 알 수 있다. ( a )에서는 운동에너지가 감소되어지는  $50\text{mm}$  이후에서는 와도 값이  $y$ 축에 대해 일정함을 확인할 수 있고, ( b ), ( c )에서는 벽면근처에서 ( a ) 값보다 불규칙하게 나타내고 있다. 그 이유는 구동관로의 속도증가와 흡입속도의 증가로 인해 와류가 커지게 되고,  $y=0\text{mm}$ 인 벽근처까지 흡입속도가 영향을 미치기 때문에 와도 값이 불규칙적으로 나타난다고 생각된다.

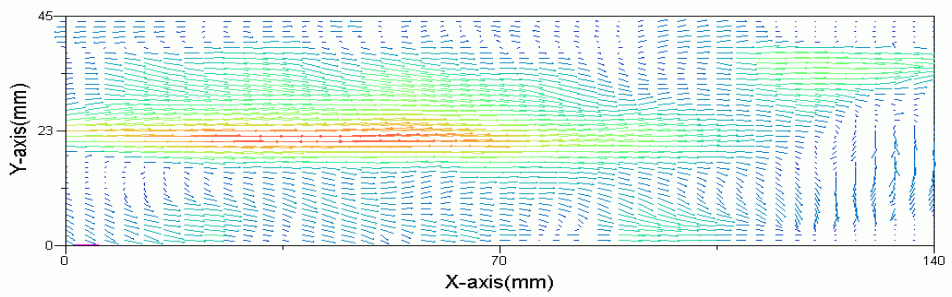
Fig. 4-4는  $x$ - $y$ 축 레이놀즈 응력분포를 나타내고 있다. 레이놀즈 수가 증가함에 따라 그 값이 증가함을 알 수 있으며, 파동속도의 영향은 벽면 근처에서 많은 변화를 보이는 것으로 나타났다. ( a )에서는 전반적으로 해석영역 전반에 걸쳐 불규칙한 값을 나타내고 있으며, 속도 값이 작아지는 지점인  $x=50\text{mm}$ 인 지점에서 값이 감소하며, ( b ), ( c )에서는 구동관로의 속도가 유지되는 안쪽 부근에서는 응력분포는 작고 일정하게 유지됨을 확인할 수 있고, 벽면근처에서 응력 값이 집중되어 있음을 알 수 있다.



$$Re_{1-1} = 6,423$$

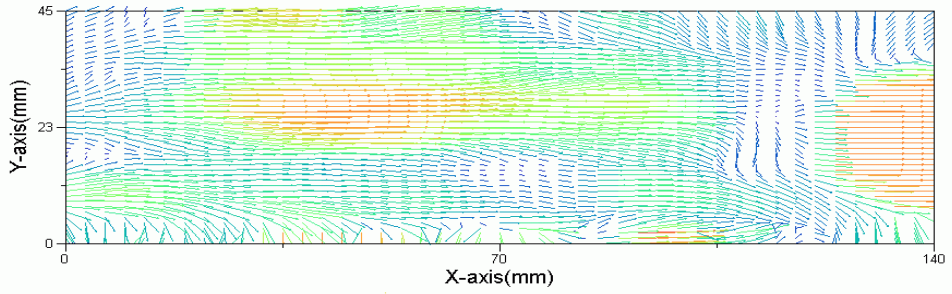


$$Re_{1-2} = 6,784$$

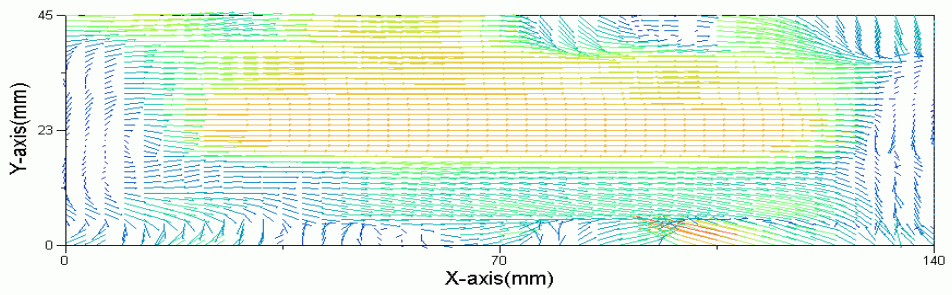


$$Re_{1-3} = 9,045$$

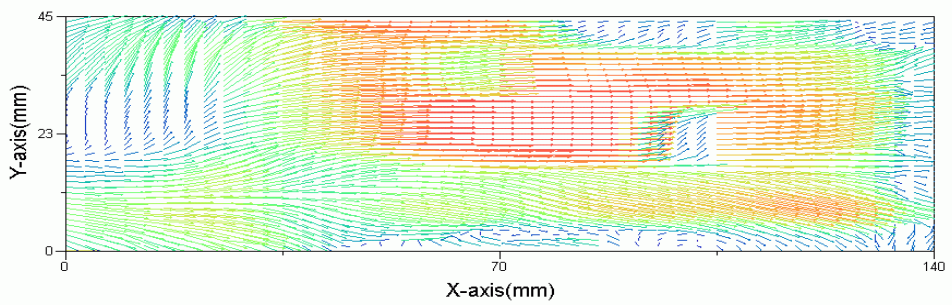
( a )  $D_x : D_h = 1 : 2.3$



$$Re_{2-1} = 3,989$$

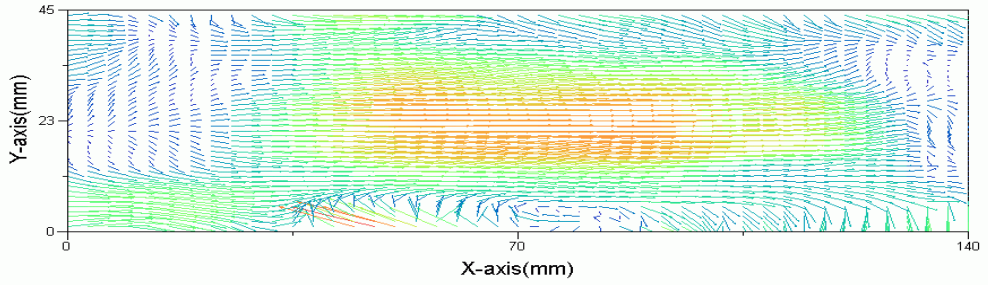


$$Re_{2-2} = 5,992$$

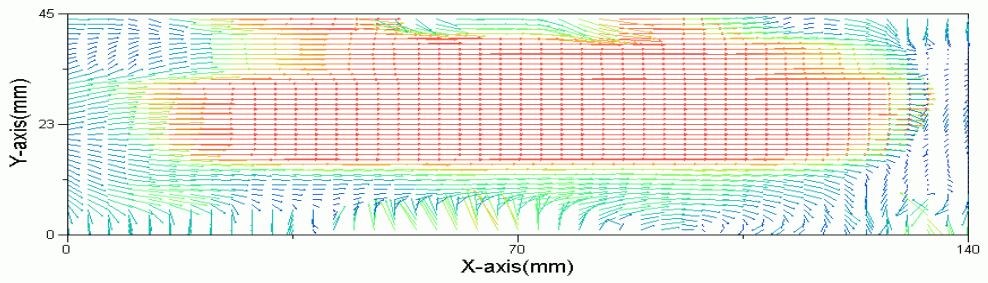


$$Re_{2-3} = 7,994$$

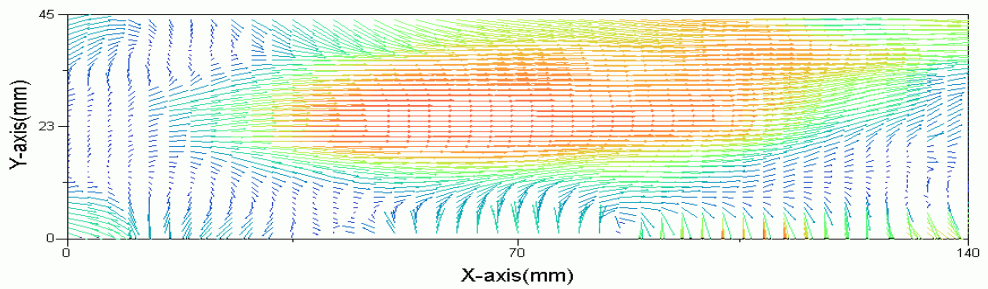
( b )  $D_x : D_h = 1 : 1.9$



$$Re_{3-1} = 3,015$$



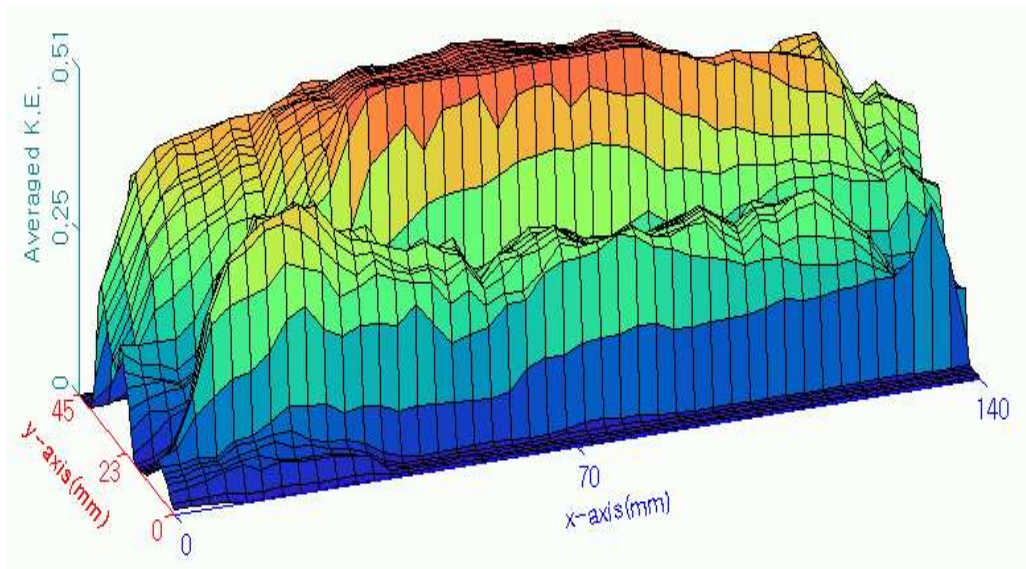
$$Re_{3-2} = 4,523$$



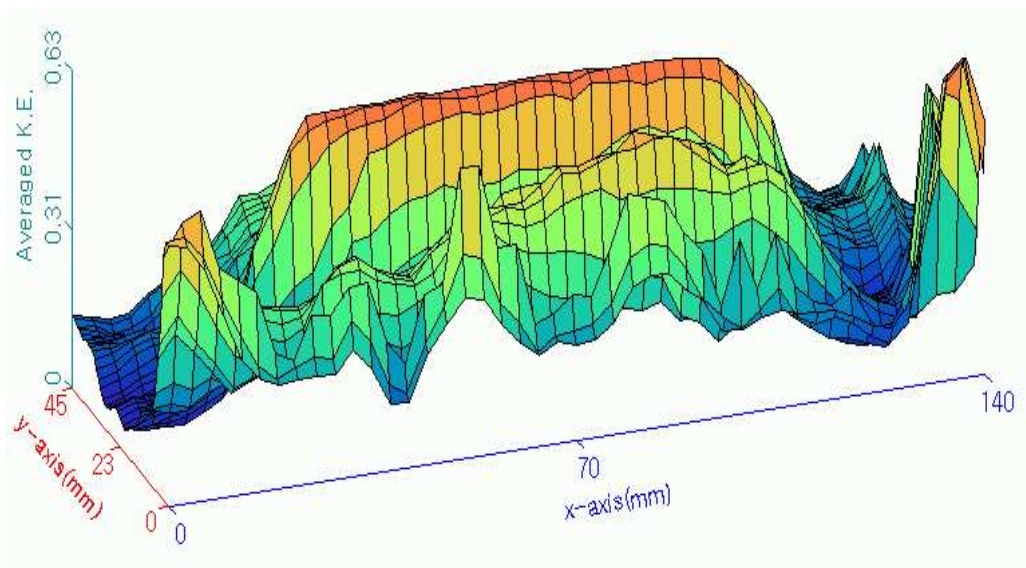
$$Re_{3-3} = 6,030$$

( c )  $D_x : D_h = 1 : 1.5$

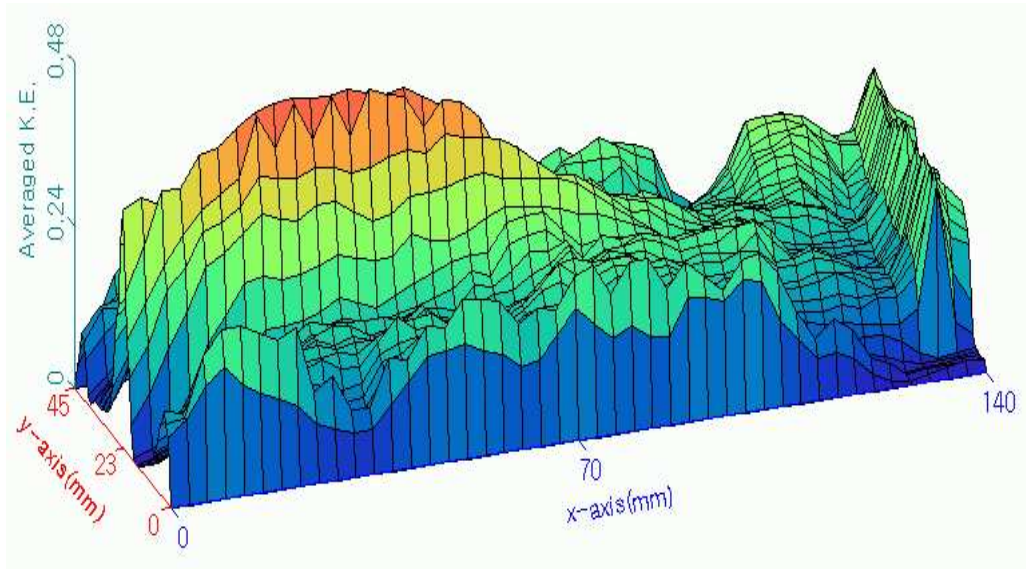
Fig. 4-1 Mean Velocity Vector Field by PIV



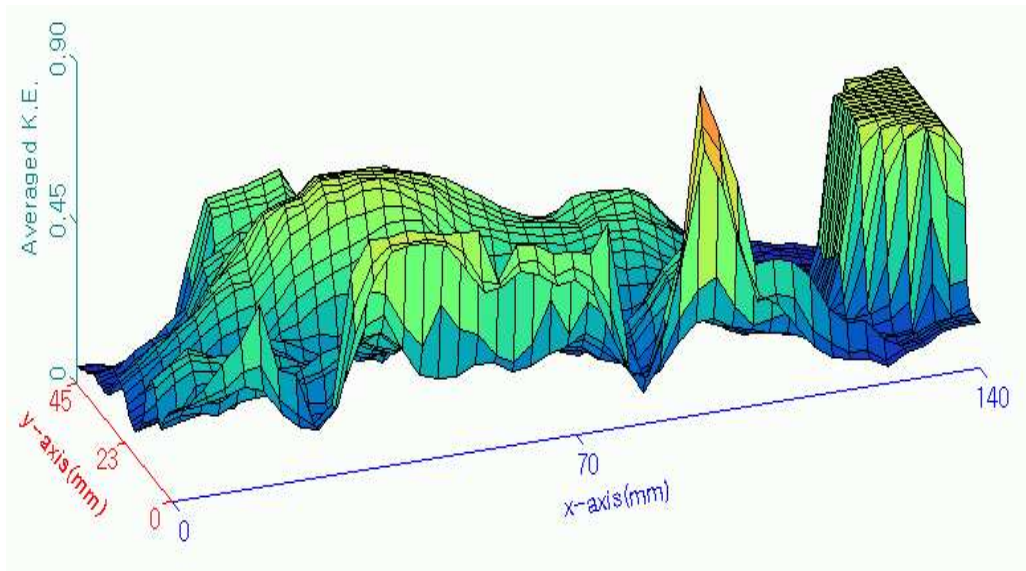
$$Re_{1-1} = 6,423$$



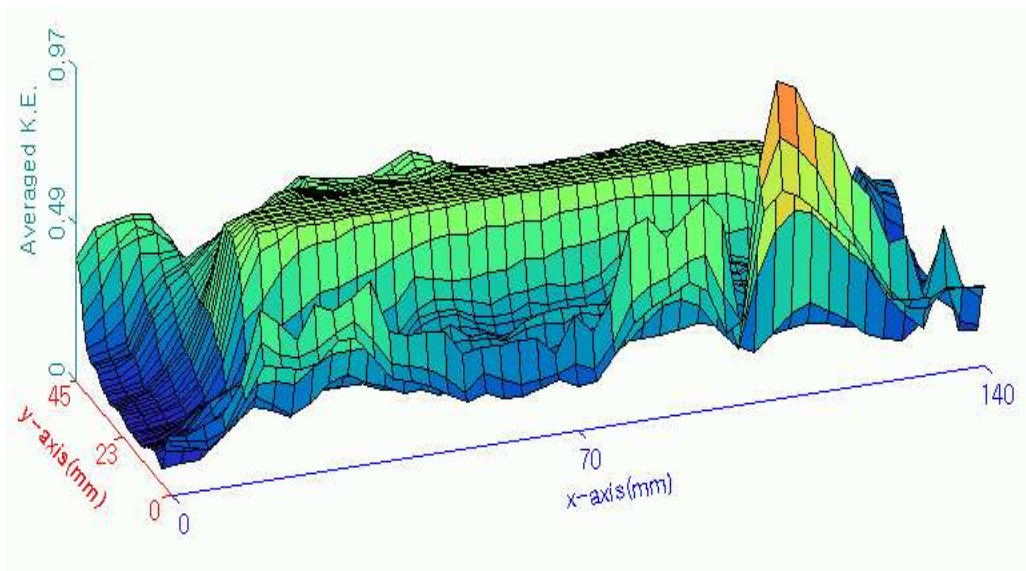
$$Re_{1-2} = 6,784$$



$Re_{1-3} = 9,045$   
( a )  $D_x : D_h = 1 : 2.3$

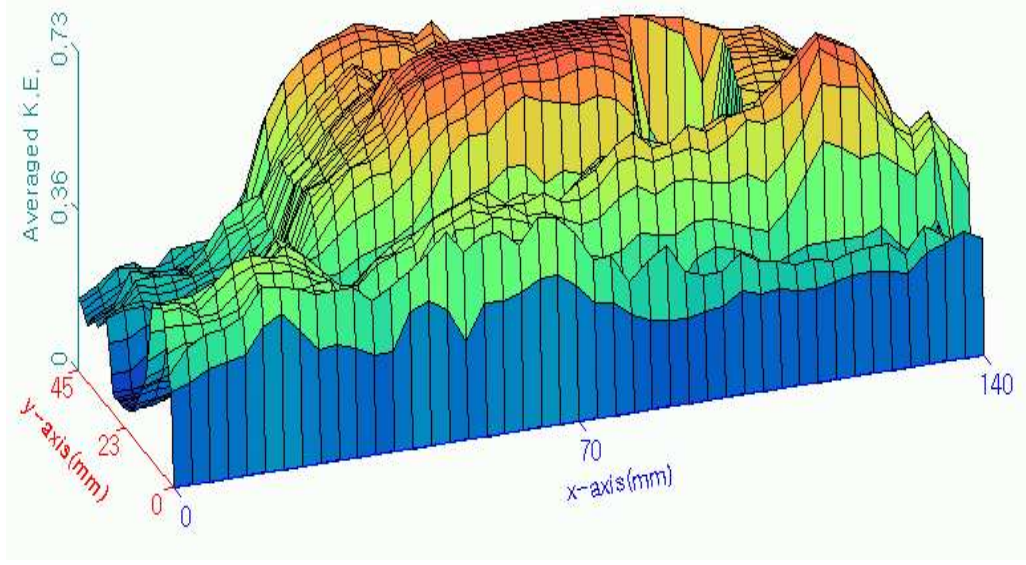


$$Re_{2-1} = 3,989$$

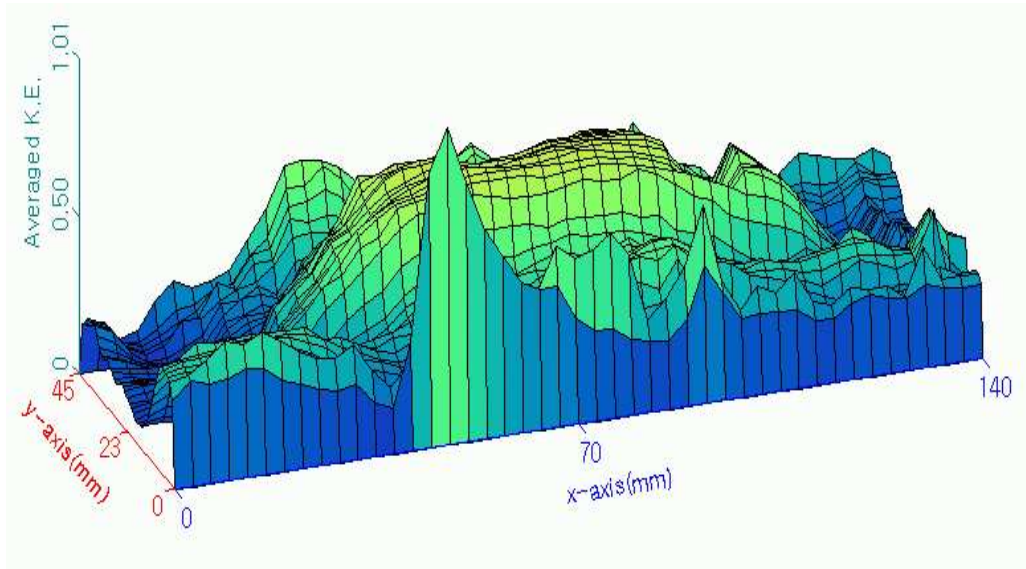


$$Re_{2-2} = 5,992$$

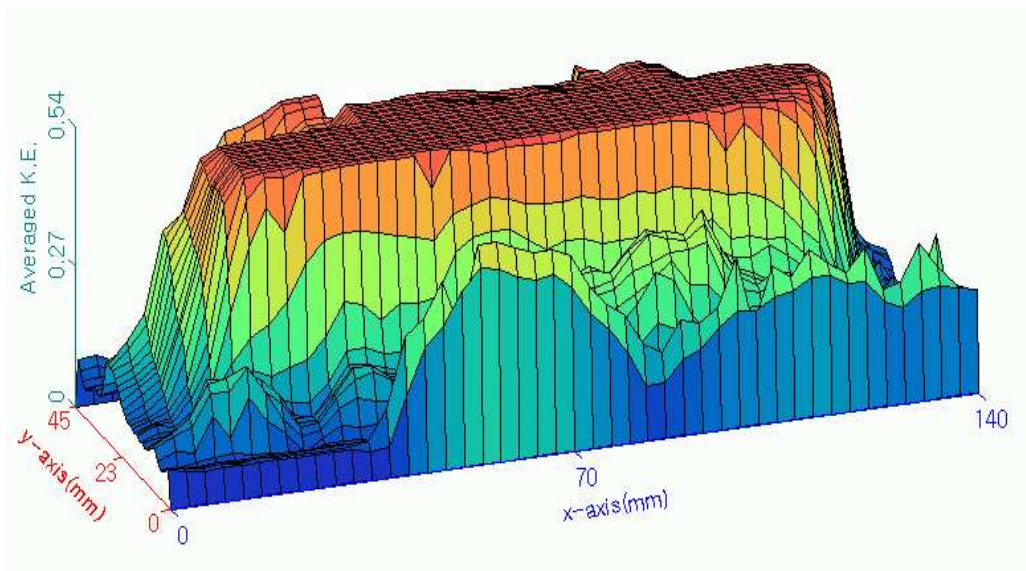




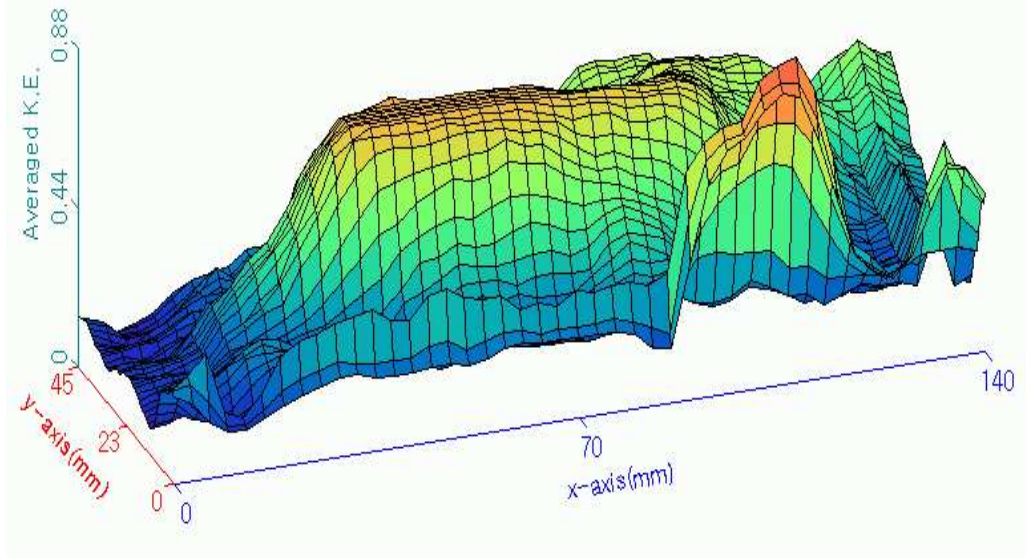
$Re_{2-3} = 7,994$   
( b )  $D_x : D_h = 1 : 1.9$



$$Re_{3-1} = 3,015$$

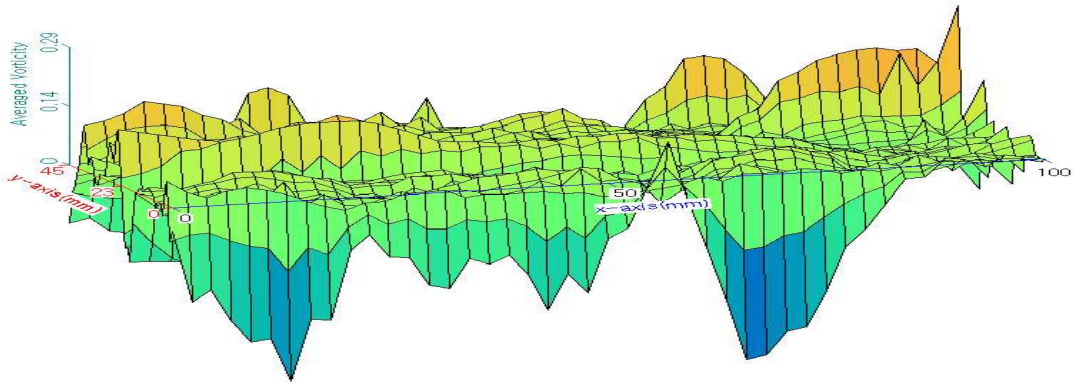


$$Re_{3-2} = 4,523$$

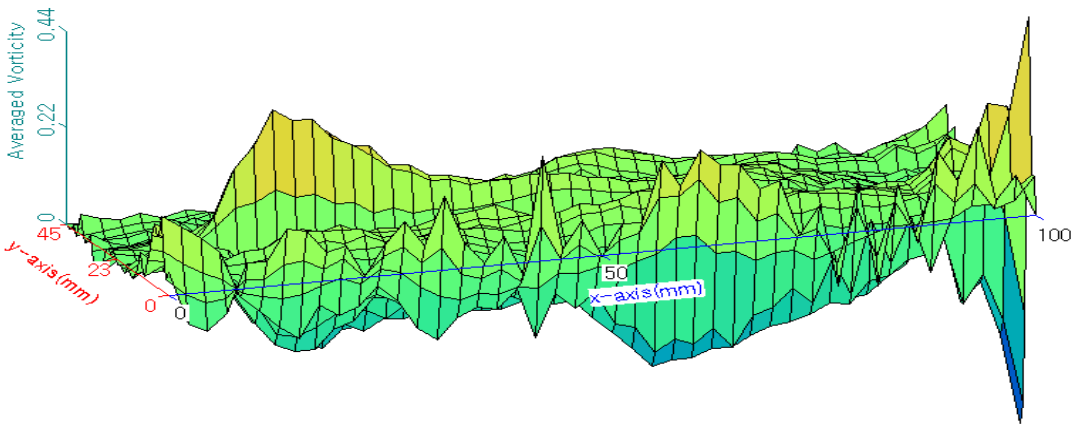


$Re_{3-3} = 6,030$   
( c )  $D_x : D_h = 1 : 1.5$

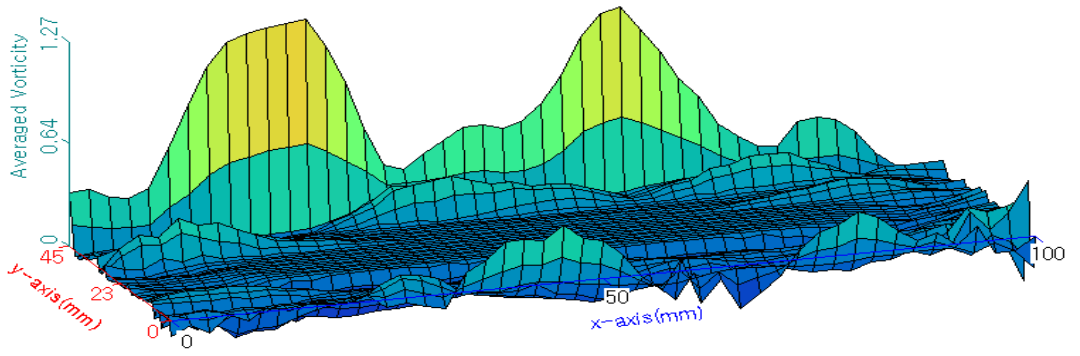
Fig. 4-2 Mean Kinematic Energy Field by PIV



( a )  $Re = 3,989$

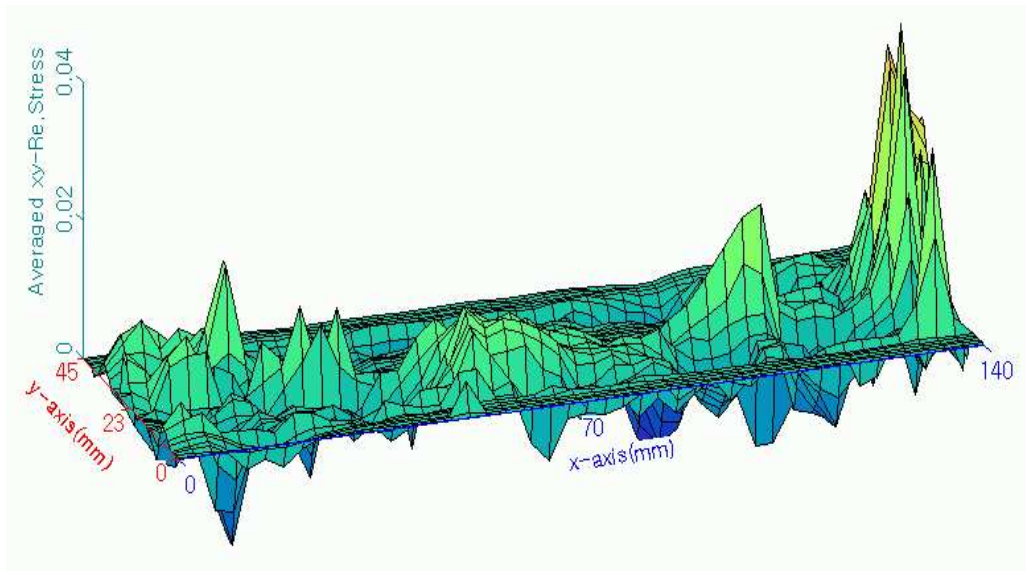


( b )  $Re = 5,992$

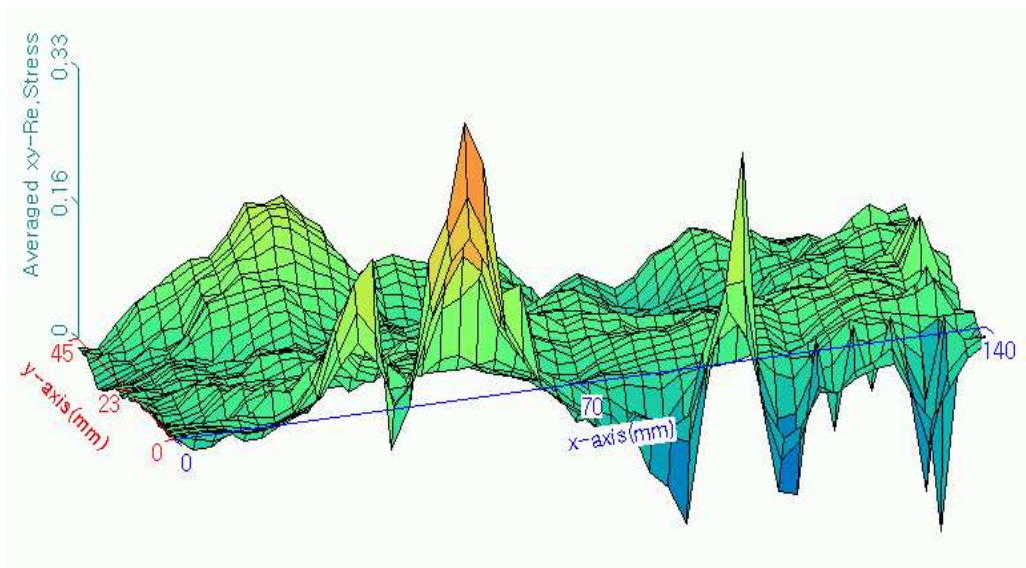


( c )  $Re = 7,995$

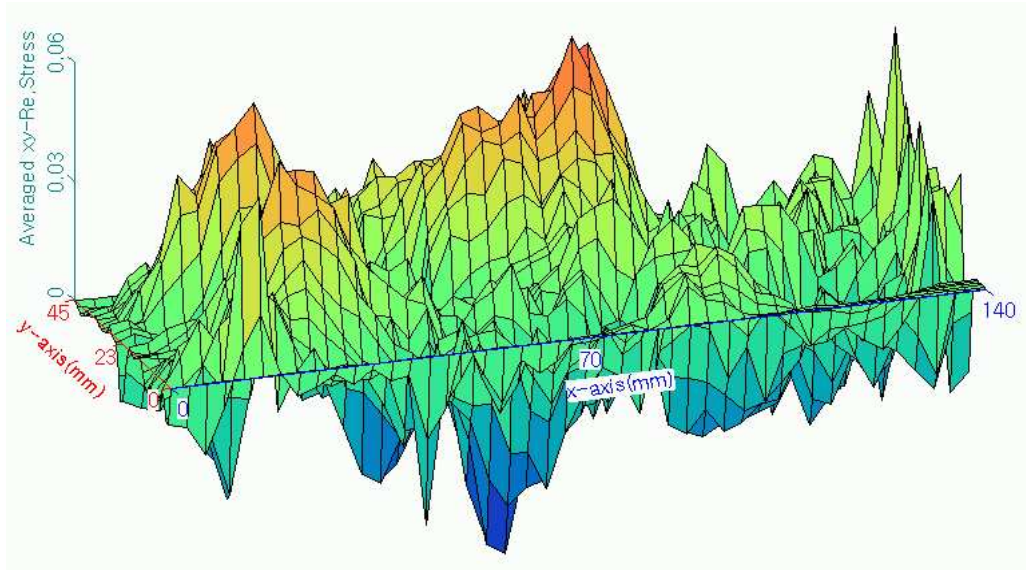
Fig. 4-3 Mean Vorticity by PIV



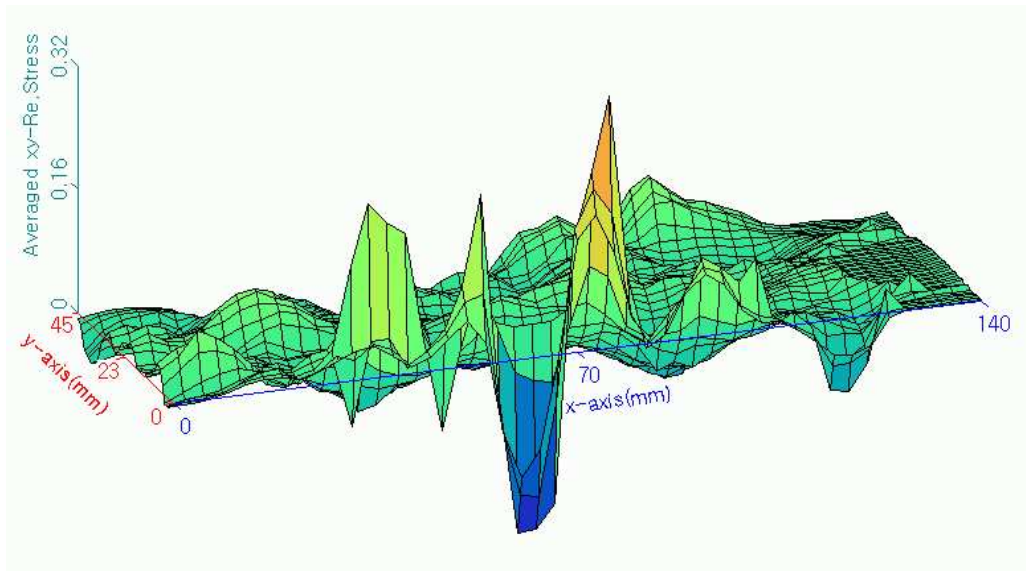
$$Re_{1-1} = 6,423$$



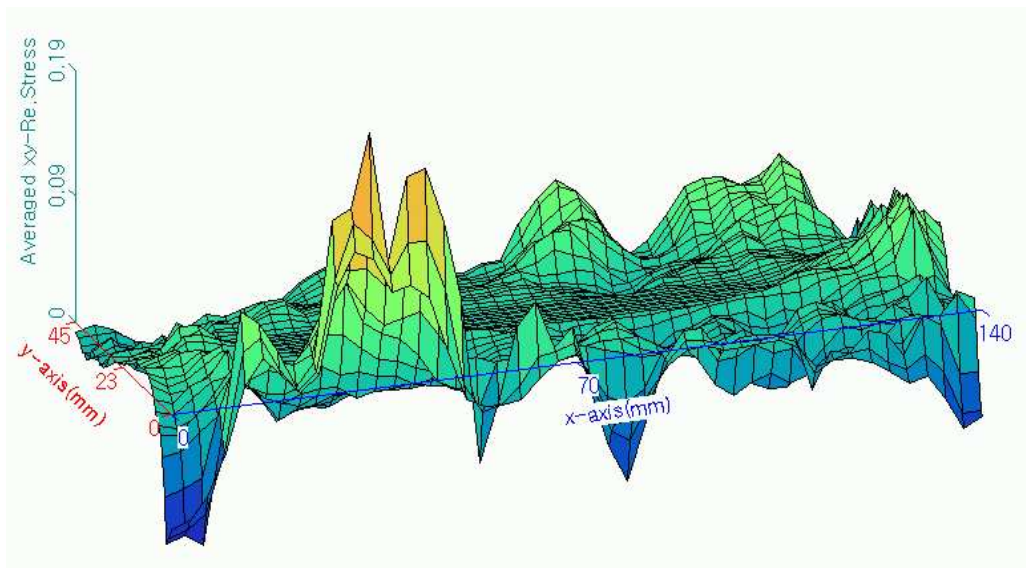
$$Re_{1-2} = 6,784$$



$Re_{1-3} = 9,045$   
( a )  $D_x : D_h = 1 : 2.3$

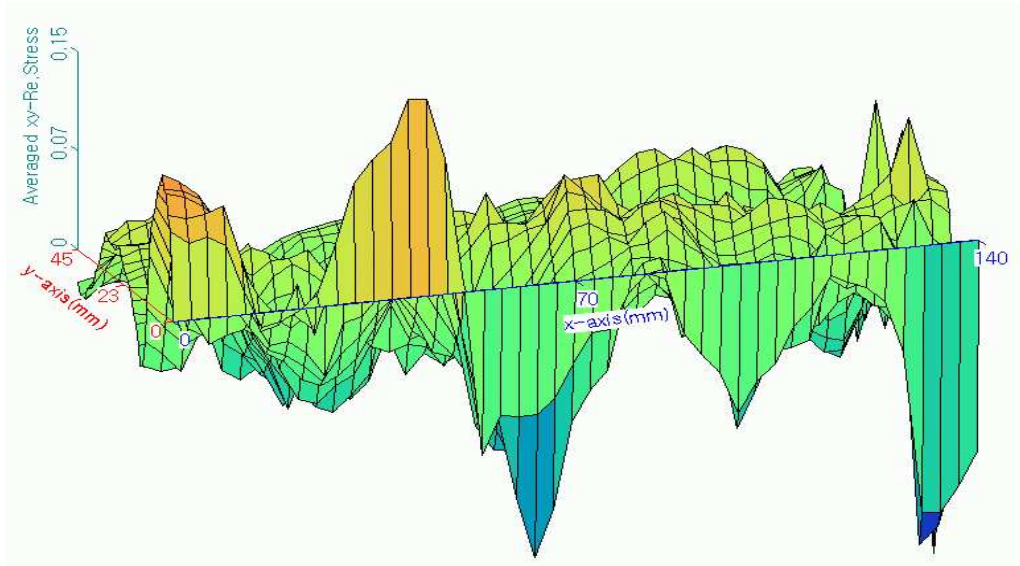


$$Re_{2-1} = 3,989$$

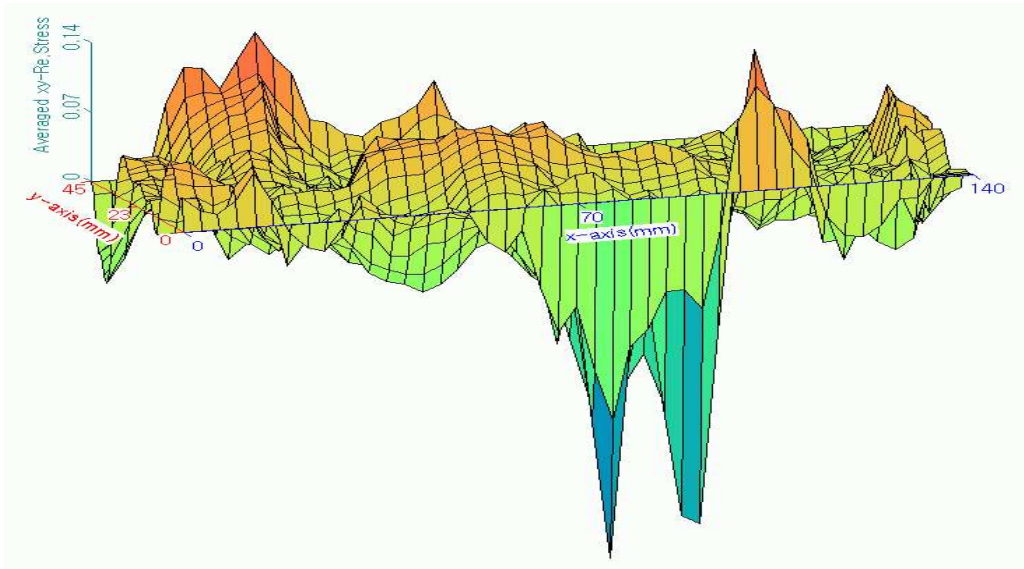


$$Re_{2-2} = 5,992$$

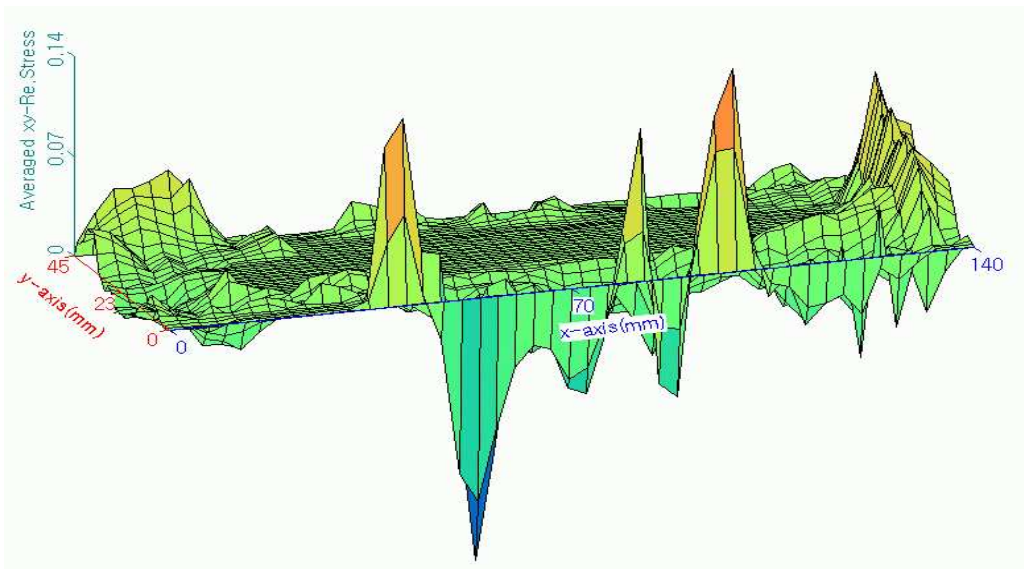




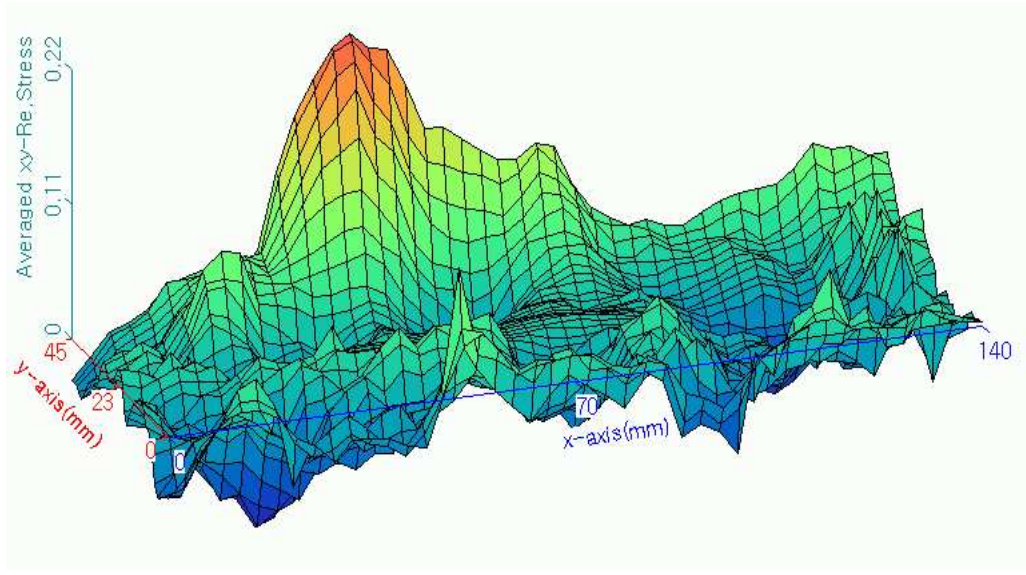
$Re_{2-3} = 7,994$   
( b )  $D_x : D_h = 1 : 1.9$



$Re_{3-1} = 3,015$



$Re_{3-2} = 4,523$



$Re_{3-3} = 6,030$   
( c )  $D_x : D_h = 1 : 1,5$

Fig. 4-4 Mean XY-Stress Distributions Field by PIV

## 第2節 CFD 결과 및 고찰

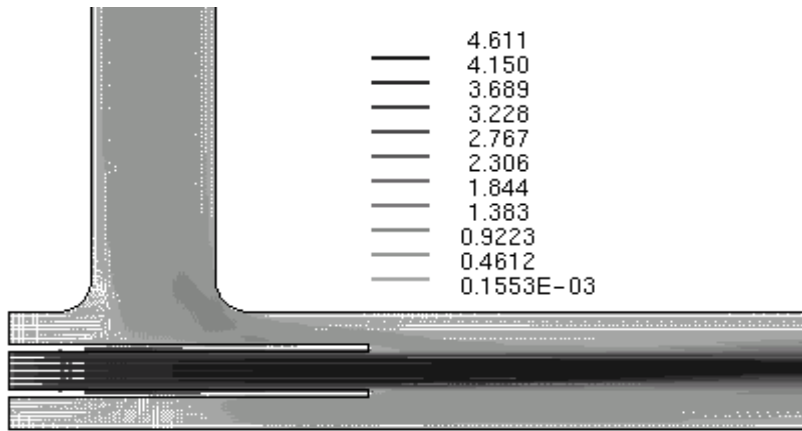
Table. 4-1 Units of Physical Property

Physical Property	Unit	Physical Property	Unit
Velocity	m/s	Dissipation per kg	$m^2/s^3$
Pressure	Pa	Turbulent Viscosity	Pa · s
Turbulent Kinetic Energy per kg	$m^2/s^2$		

수치해석 조건으로 이젝터 효과의 효율증가를 규명하기 위해 사용된 구동 관로에 대한 확대관로의 조건비는 1 : 1.5, 1 : 1.9, 1 : 2.3으로 설정하였으며, PIV 실험에 사용된 직경비 1 : 1.9를 기준으로 동일한 유량 값을 적용하여 해석을 수행하였다. 실험결과의 TEST SECTION 구간은 구동 관로가 확대관로와 만나는 지점으로부터 시작하여 Mixing Area 부분인 45 × 100 mm<sup>2</sup>, 단면의 중간부분인 22.5mm 구간의 면을 해석하였으며, 수치해석의 TEST SECTION 구간은 유동장 전영역에 걸쳐 해석을 수행하여 평균속도, 정압력, 전압력, 평균난류운동에너지, 난류 점도, 소산 등을 연구하였다.

각각의 계산결과 값은 SI 단위를 사용하였으며, 이에 대한 단위 설명은 Table. 4-1에 나타내었다.

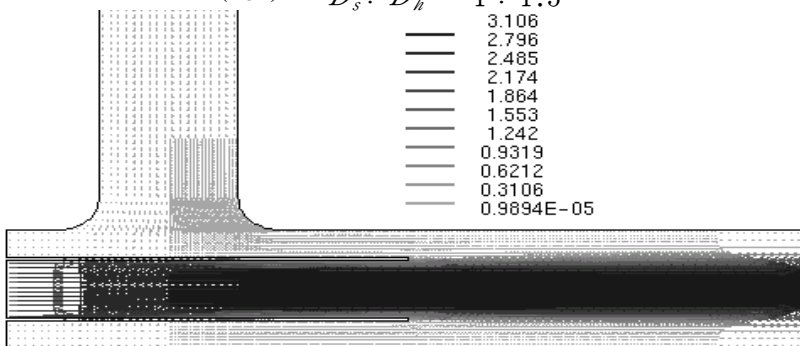
직경비 1:1.5, 1:1.9, 1:2.3에 사용된 격자의 수는 각각, 100,000, 200,000, 400,000개 이며, 해석영역구간은 메시의 질을 더 향상시켜 설계하였고 수치해석에 소모된 계산시간은 Pentium IV PC(CPU 2.54GHz, RAM 1G)를 사용하여 각각의 직경비에 대해서 2시간, 3시간, 4시간 정도의 시간이 소요되었으며, Solver Iteration Number는 반복변수는 최대 1000회, 최대수렴조건 0.001를 기준으로 각각 약 600회, 450회, 950회에서 수렴했다.



( a )  $D_s : D_h = 1 : 2.3$

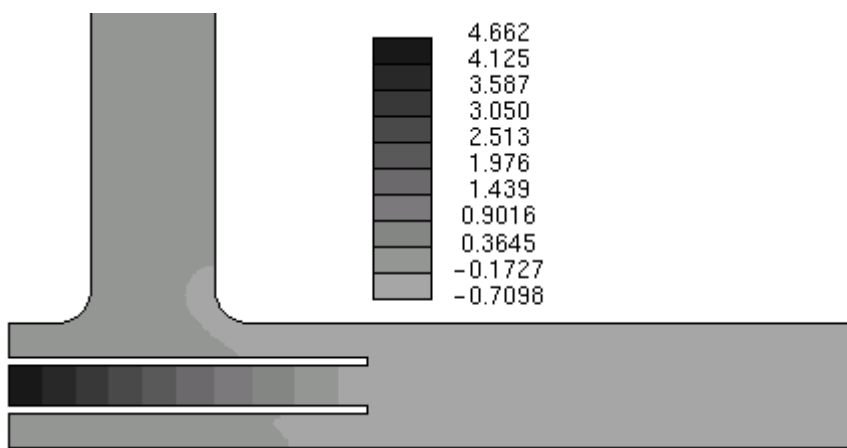


( b )  $D_s : D_h = 1 : 1.5$

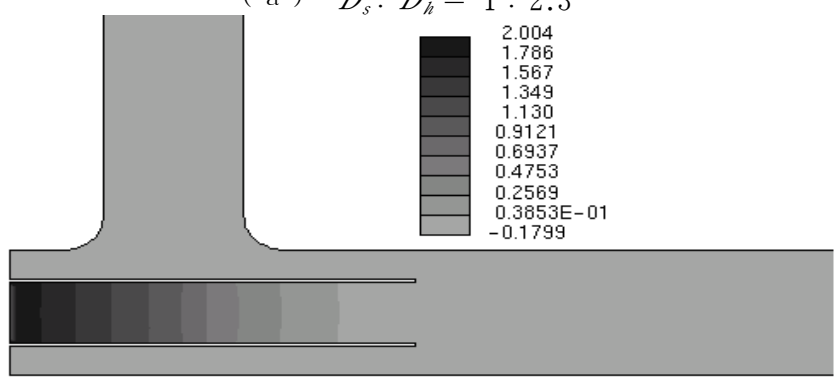


( c )  $D_s : D_h = 1 : 1.9$

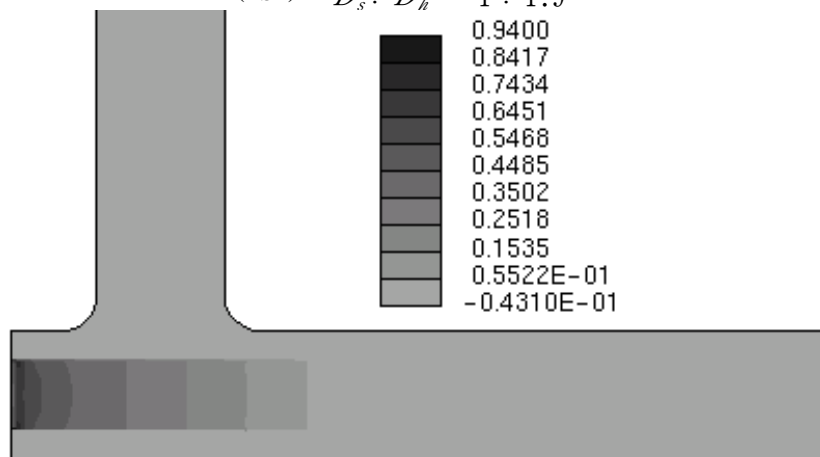
Fig. 4-5 Mean Velocity Vector Distribution (  $Q = 1.1355 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  )



( a )  $D_s : D_h = 1 : 2.3$

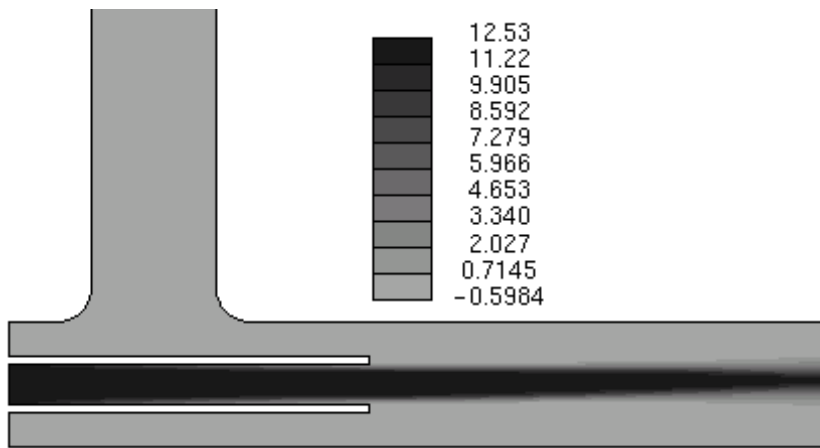


( b )  $D_s : D_h = 1 : 1.9$

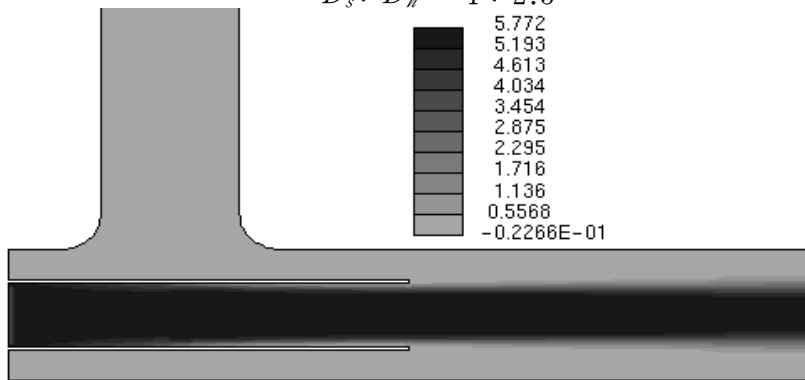


( c )  $D_s : D_h = 1 : 1.5$

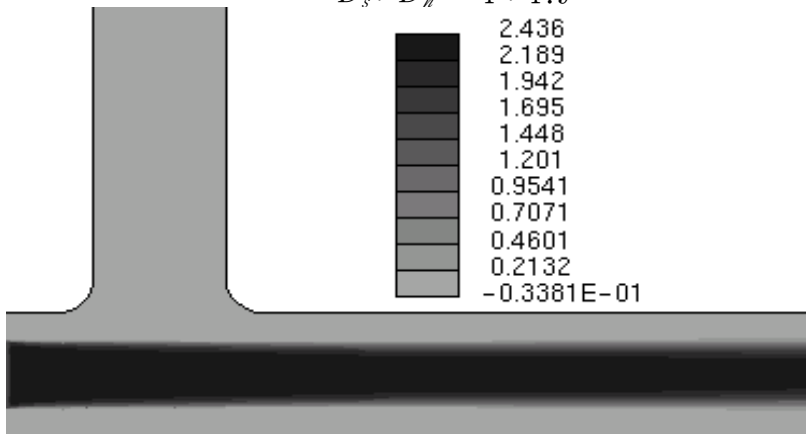
Fig. 4-6 Static Pressure Distribution(  $Q = 1.1355 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  )



( a )  $D_s : D_h = 1 : 2.3$

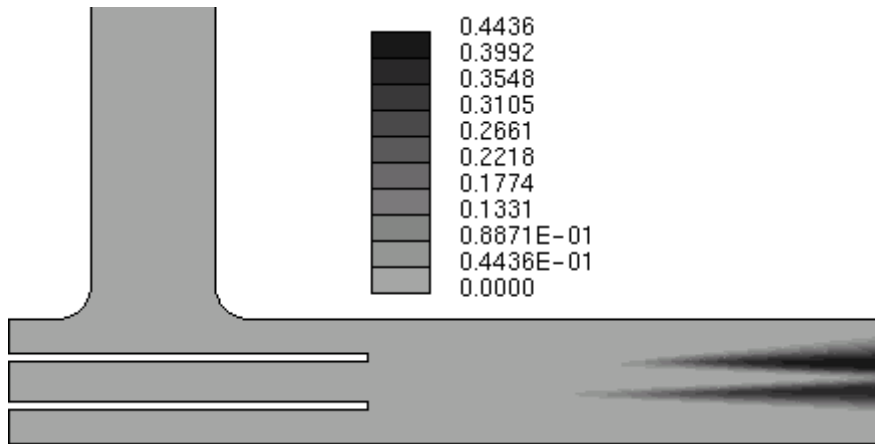


( b )  $D_s : D_h = 1 : 1.9$

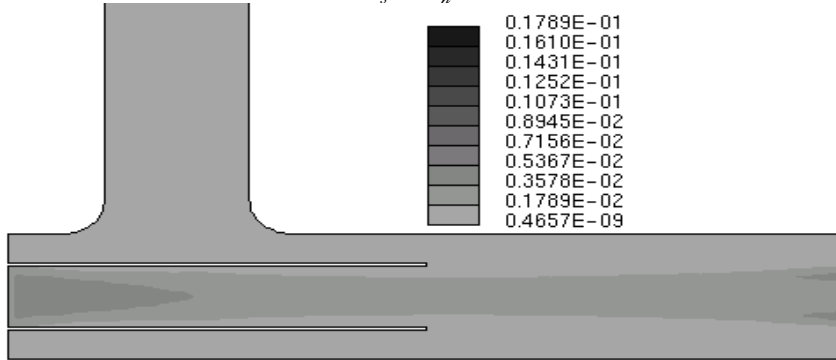


( c )  $D_s : D_h = 1 : 1.5$

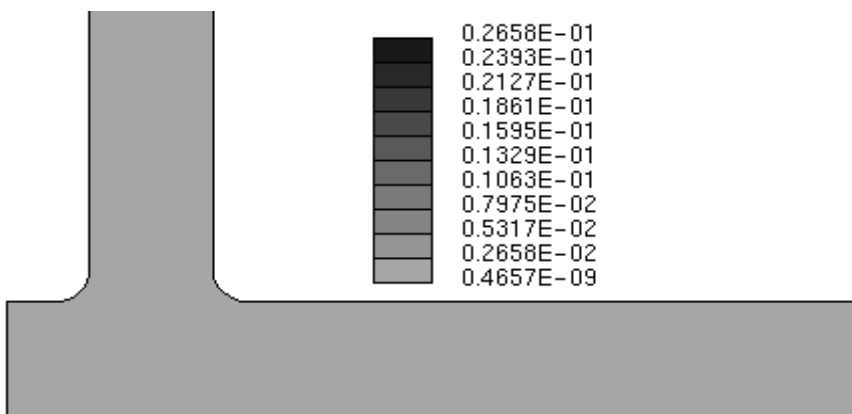
Fig. 4-7 Total Pressure Distribution(  $Q = 1.1355 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  )



( a )  $D_s : D_h = 1 : 2.3$



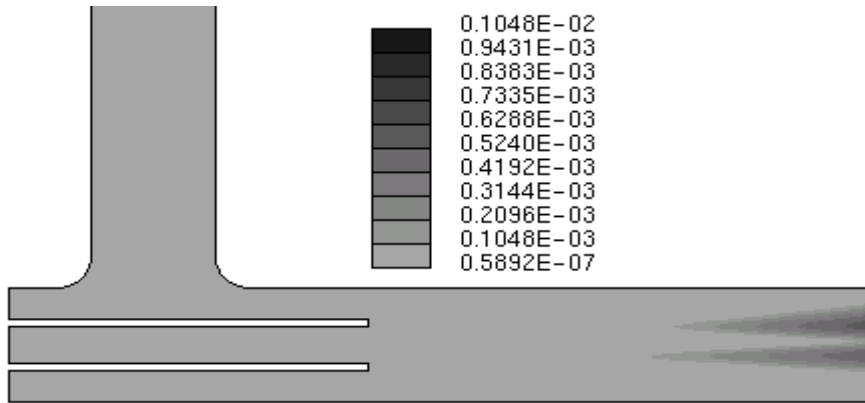
( b )  $D_s : D_h = 1 : 1.9$



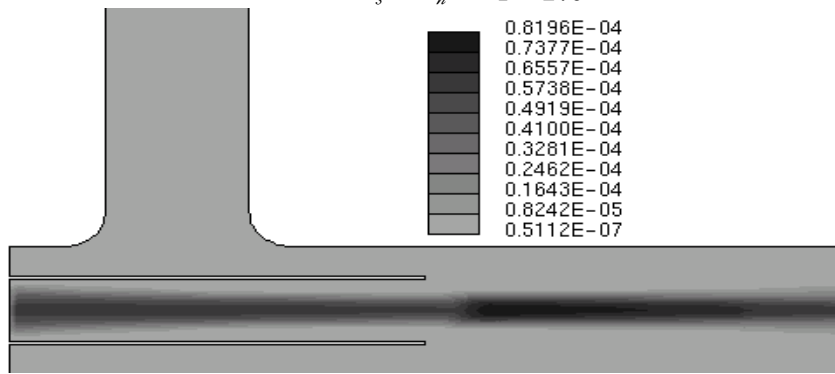
( c )  $D_s : D_h = 1 : 1.5$

Fig. 4-8 Turbulent Kinetic Energy(  $Q = 1.1355 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  )

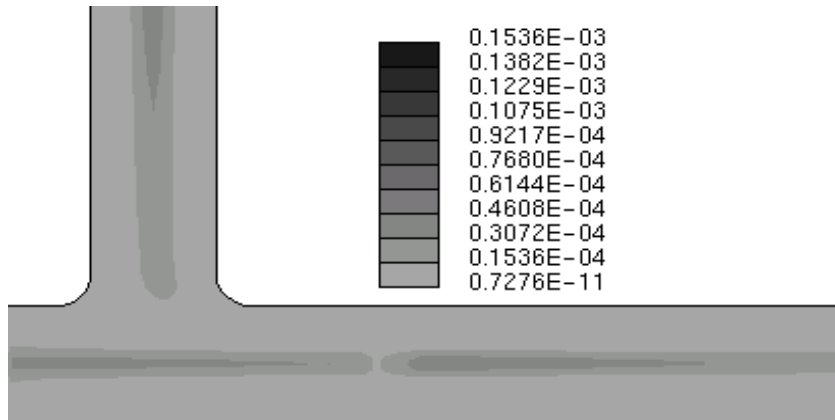




( a )  $D_s : D_h = 1 : 2.3$

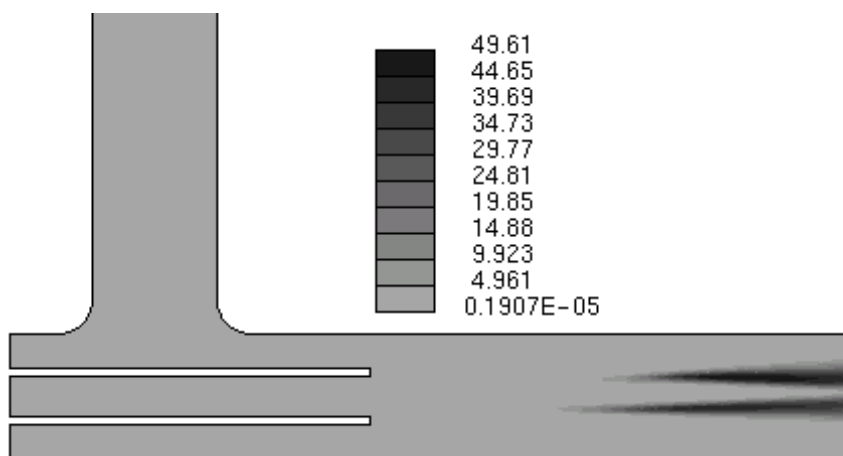


( b )  $D_s : D_h = 1 : 1.9$

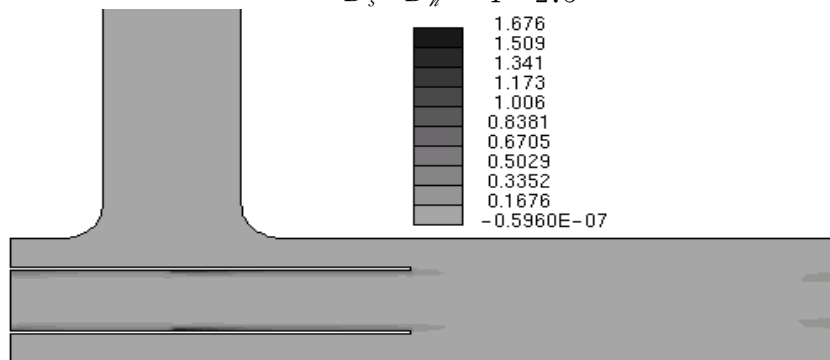


( c )  $D_s : D_h = 1 : 1.5$

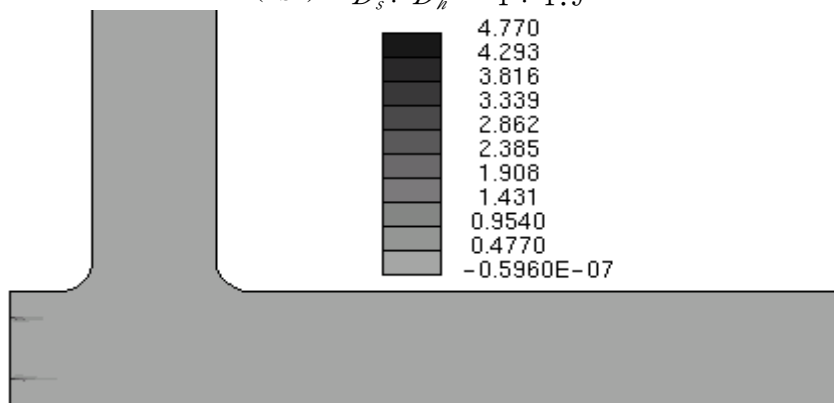
Fig. 4-9 Turbulent Viscosity(  $Q = 1.1355 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  )



( a )  $D_s : D_h = 1 : 2.3$



( b )  $D_s : D_h = 1 : 1.9$

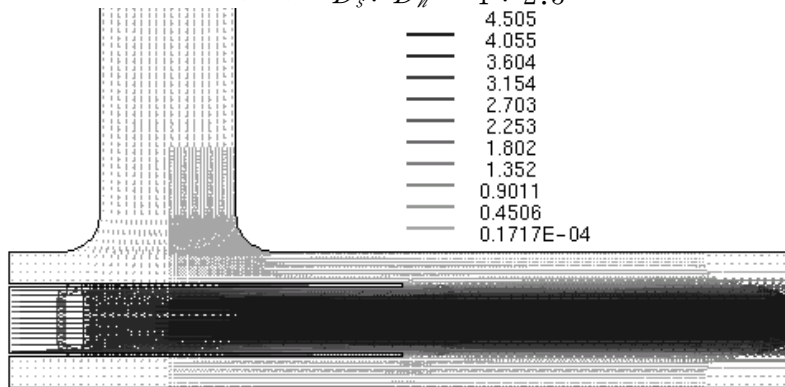


( c )  $D_s : D_h = 1 : 1.5$

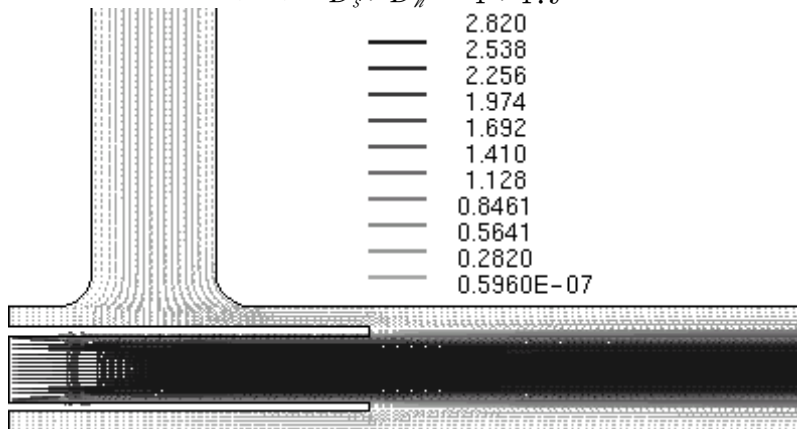
Fig. 4-10 Dissipation (  $Q = 1.1355 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  )



( a )  $D_s : D_h = 1 : 2.3$

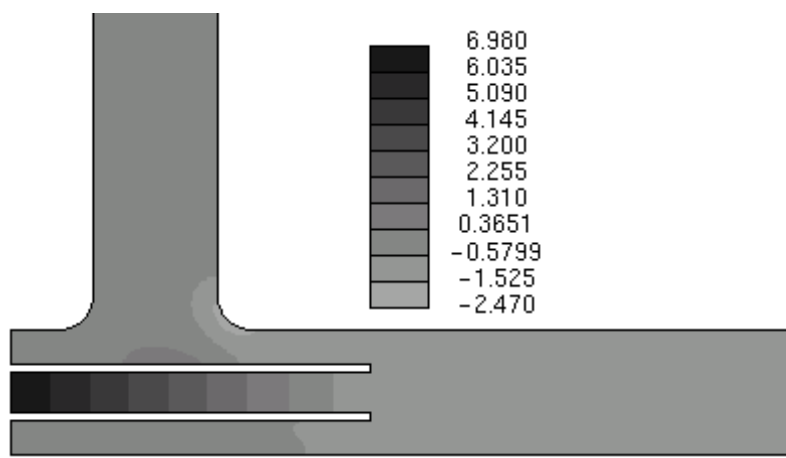


( b )  $D_s : D_h = 1 : 1.9$

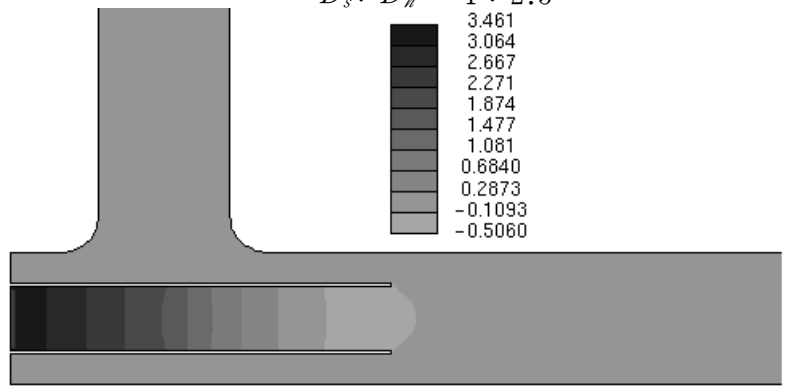


( c )  $D_s : D_h = 1 : 1.5$

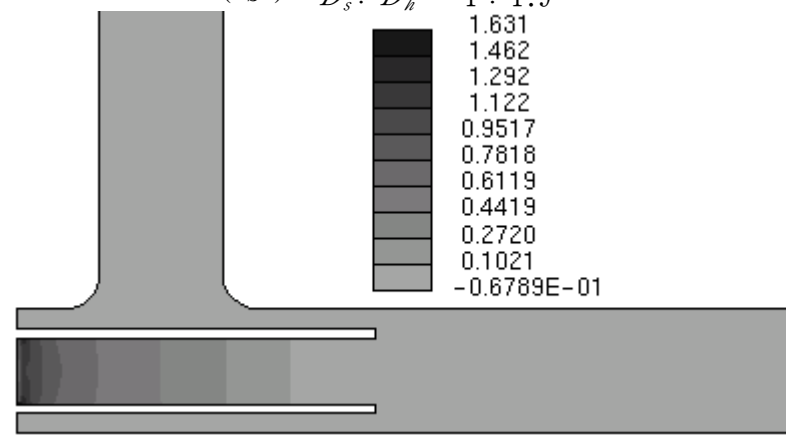
Fig. 4-11 Mean Velocity Vector Distribution (  $Q = 1.7055 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  )



( a )  $D_s : D_h = 1 : 2.3$

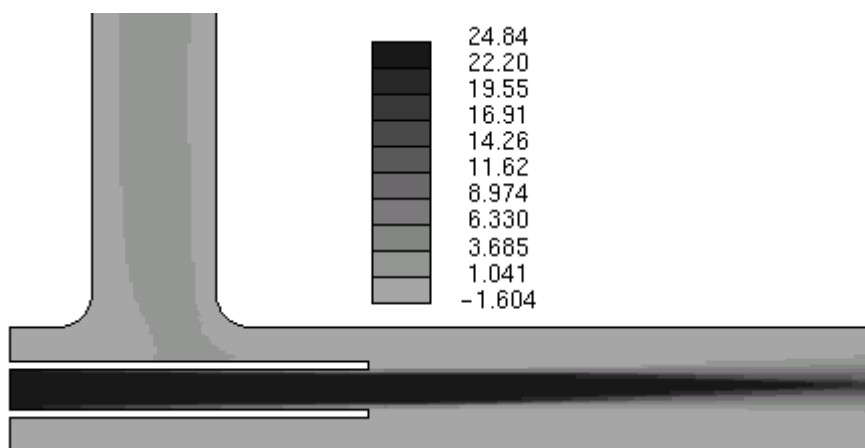


( b )  $D_s : D_h = 1 : 1.9$

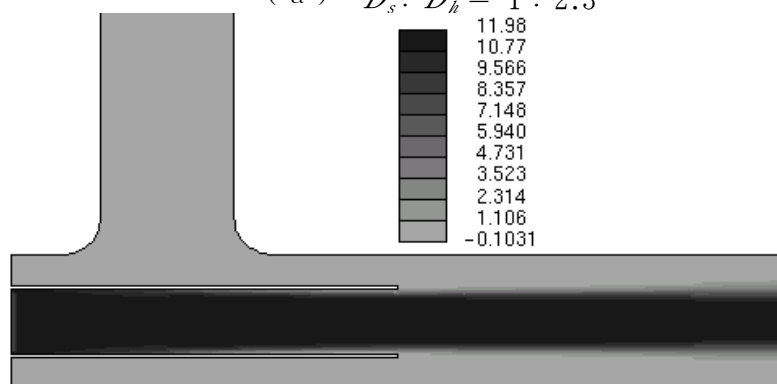


( c )  $D_s : D_h = 1 : 1.5$

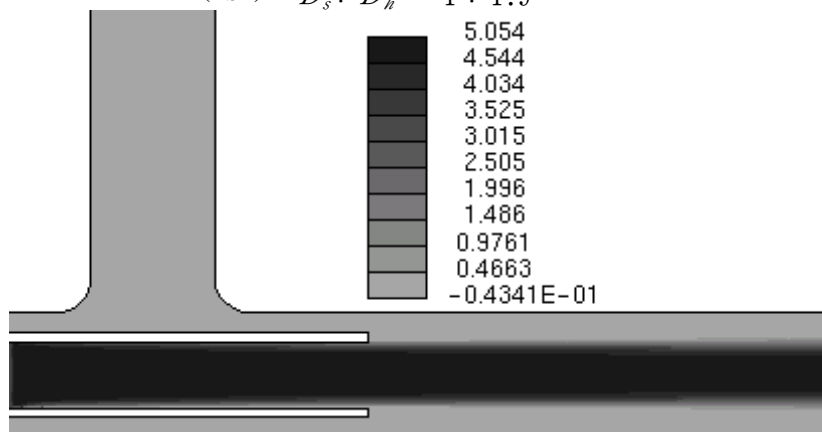
Fig. 4-12 Static Pressure Distribution(  $Q = 1.7055 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  )



( a )  $D_s : D_h = 1 : 2.3$

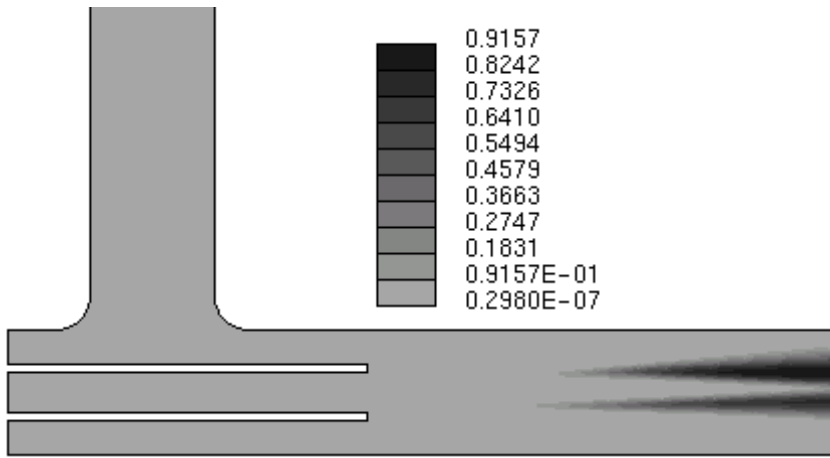


( b )  $D_s : D_h = 1 : 1.9$

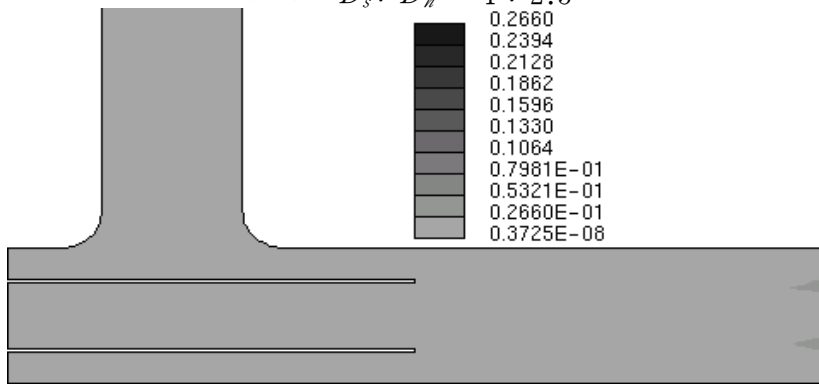


( c )  $D_s : D_h = 1 : 1.5$

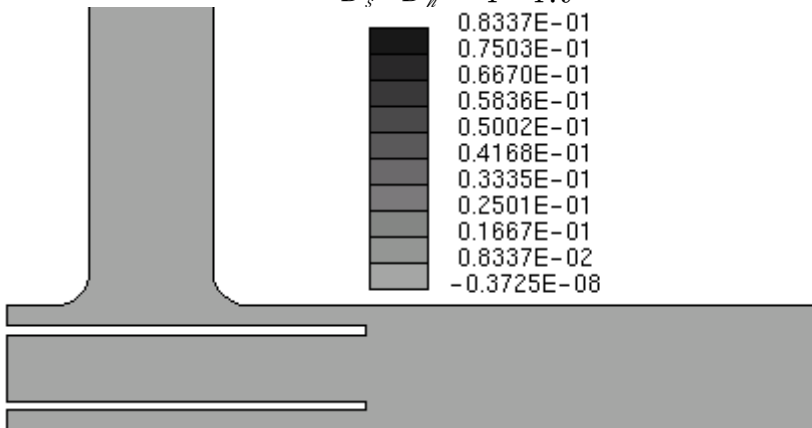
Fig. 4-13 Total Pressure Distribution(  $Q = 1.7055 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  )



( a )  $D_s : D_h = 1 : 2.3$

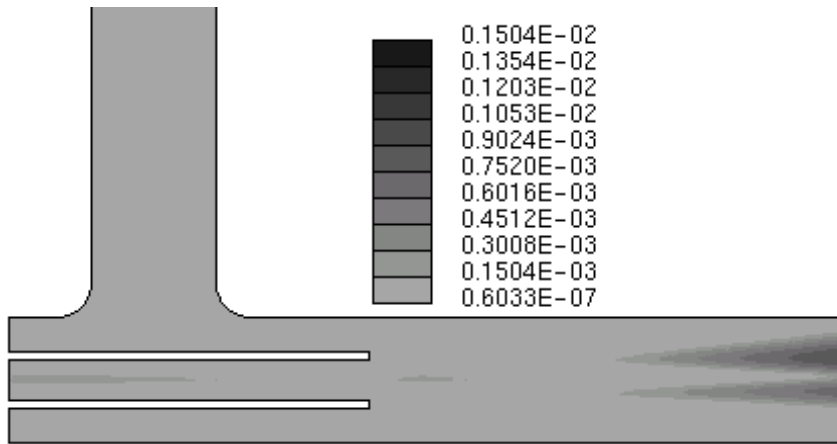


( b )  $D_s : D_h = 1 : 1.9$

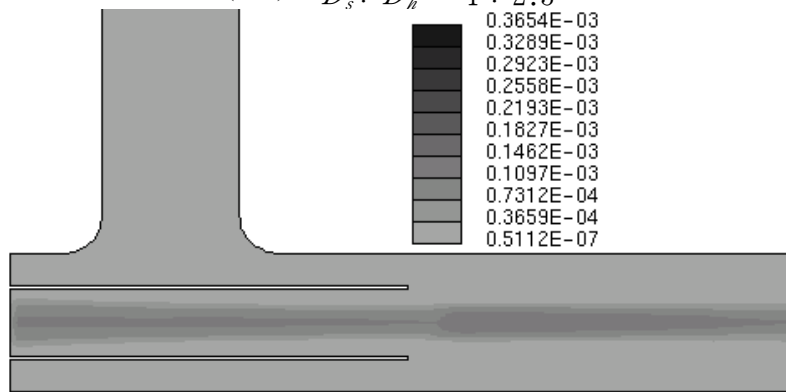


( c )  $D_s : D_h = 1 : 1.5$

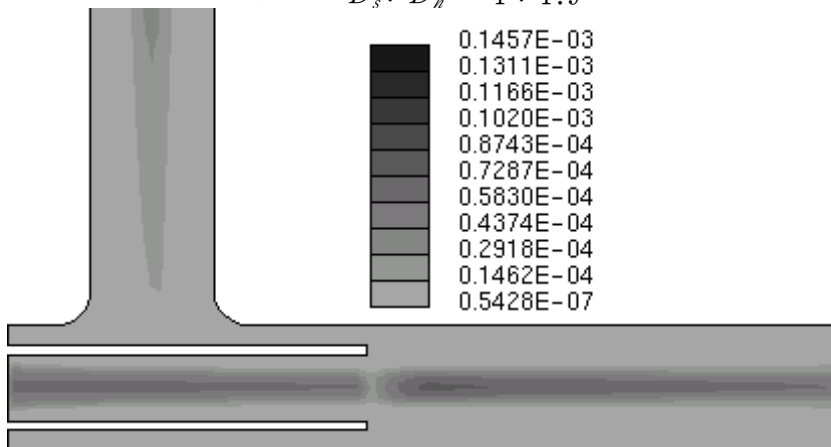
Fig. 4-14 Turbulent Kinetic Energy(  $Q = 1.7055 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  )



( a )  $D_s : D_h = 1 : 2.3$

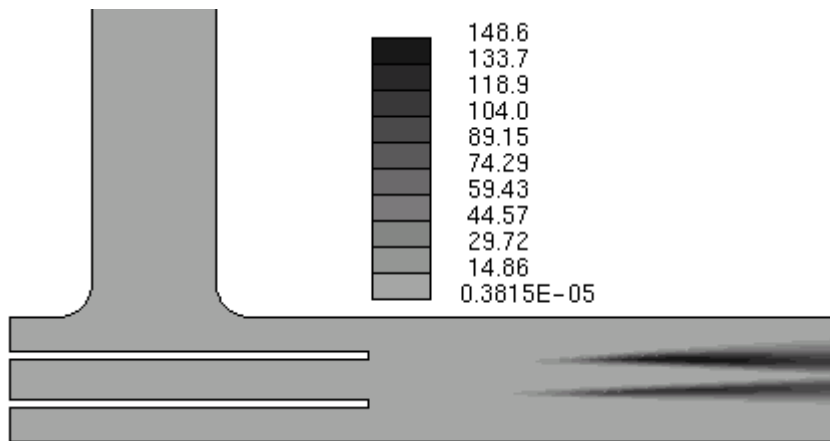


( b )  $D_s : D_h = 1 : 1.9$

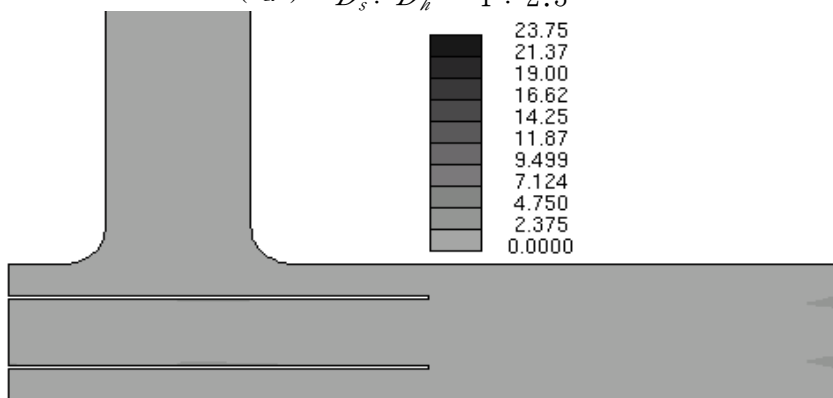


( c )  $D_s : D_h = 1 : 1.5$

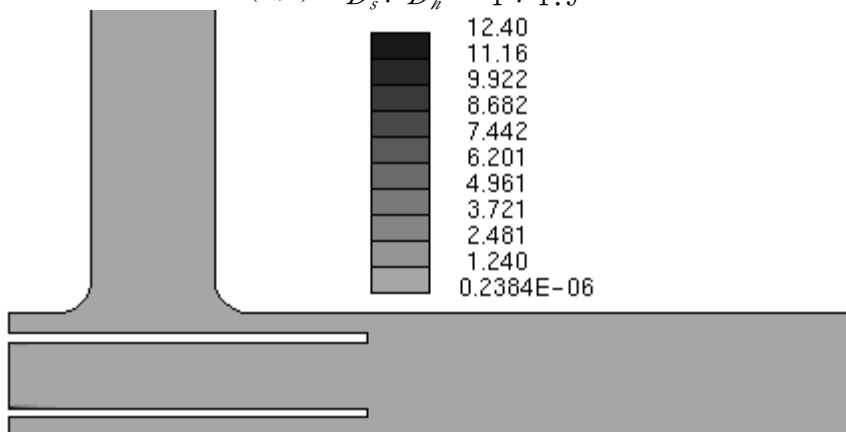
Fig. 4-15 Turbulent Viscosity(  $Q = 1.7055 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  )



( a )  $D_s : D_h = 1 : 2.3$



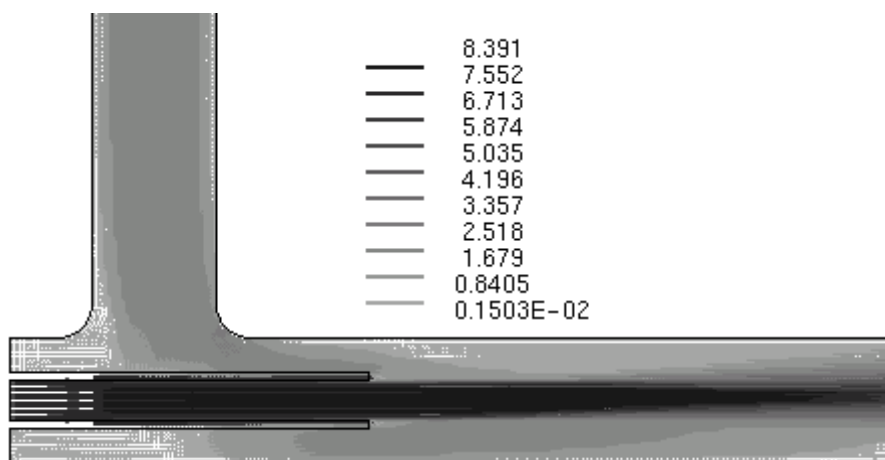
( b )  $D_s : D_h = 1 : 1.9$



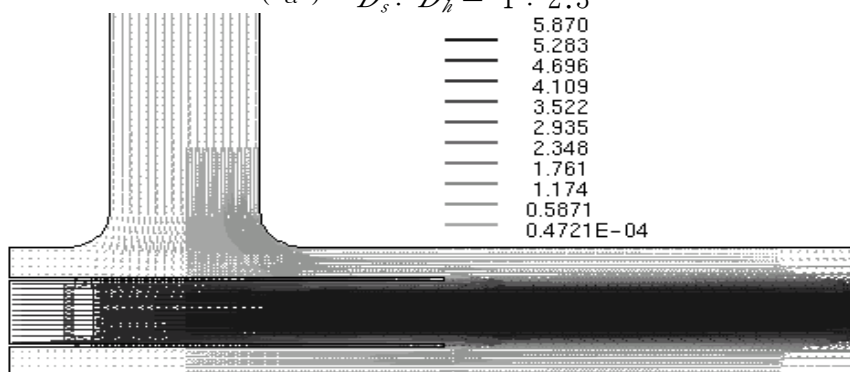
( c )  $D_s : D_h = 1 : 1.5$

Fig. 4-16 Dissipation ( $Q = 1.7055 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ )

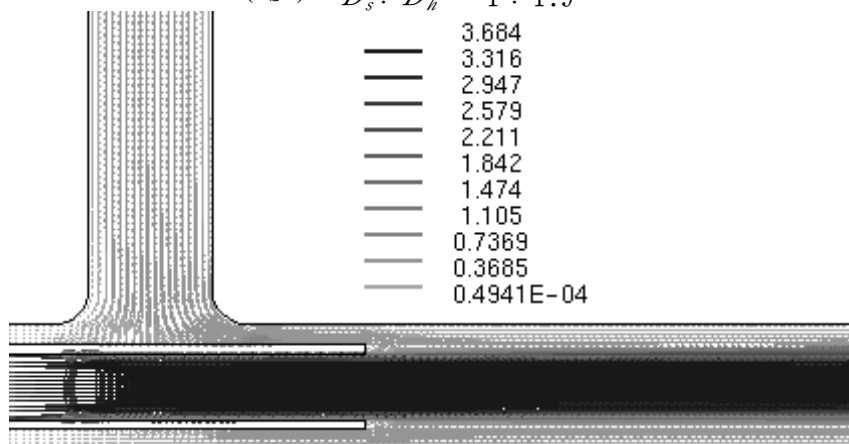




( a )  $D_s : D_h = 1 : 2.3$

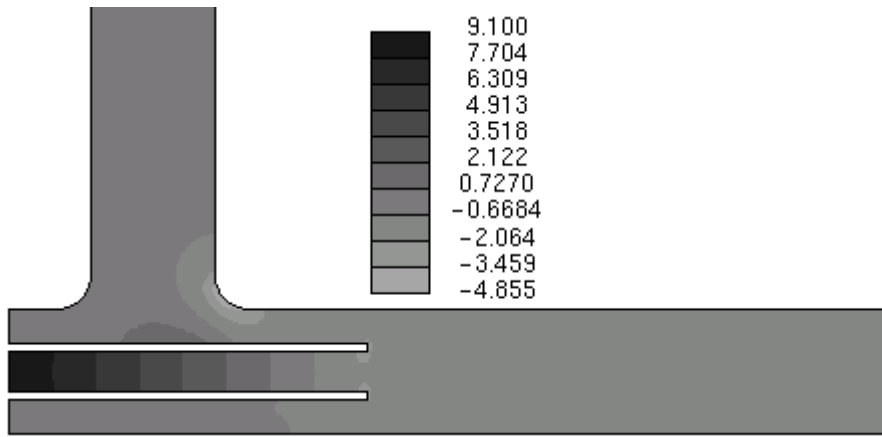


( b )  $D_s : D_h = 1 : 1.9$

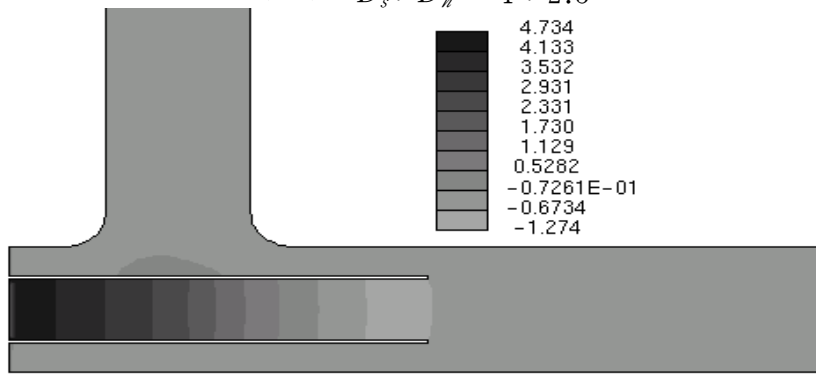


( c )  $D_s : D_h = 1 : 1.5$

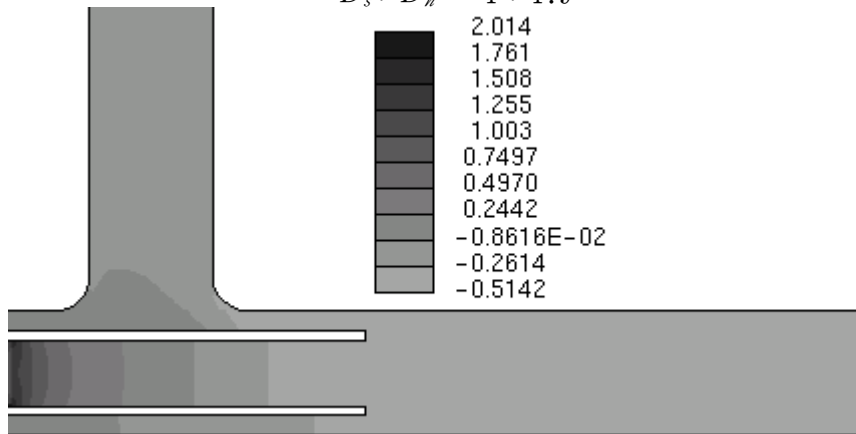
Fig. 4-17 Mean Velocity Vector Distribution (  $Q = 2.2755 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  )



( a )  $D_s : D_h = 1 : 2.3$

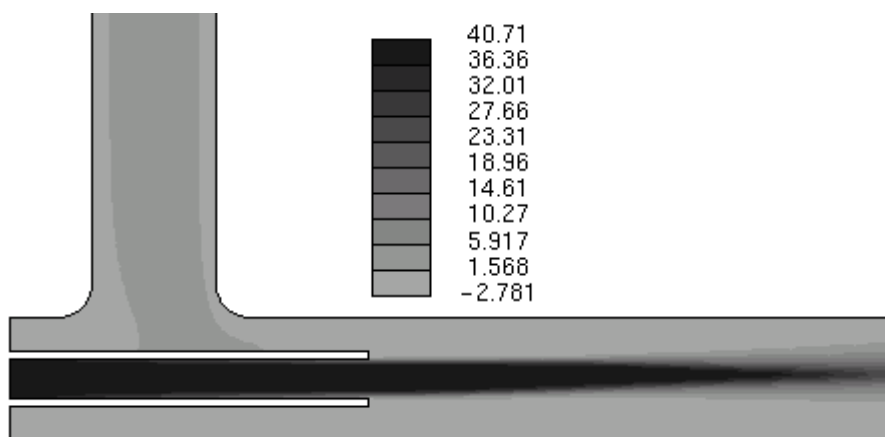


( b )  $D_s : D_h = 1 : 1.9$

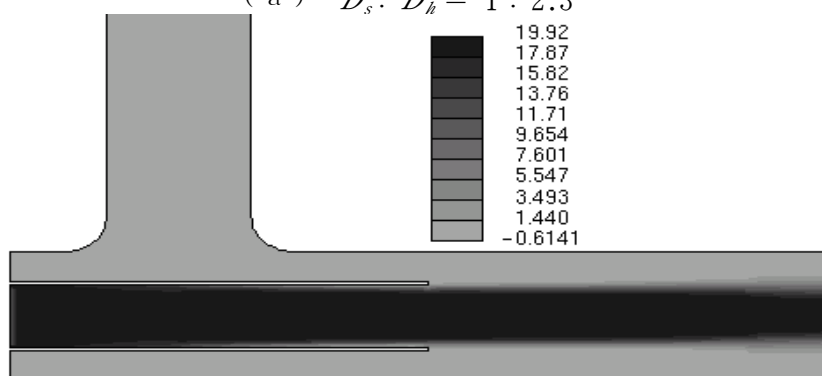


( c )  $D_s : D_h = 1 : 1.5$

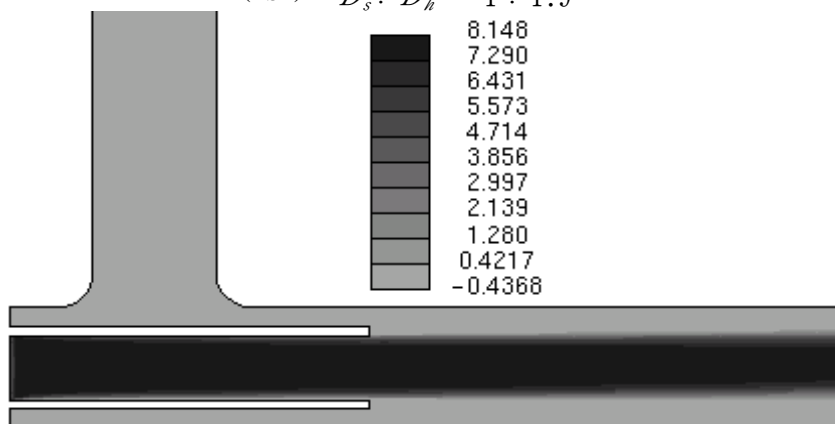
Fig. 4-18 Static Pressure Distribution(  $Q = 2.2755 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  )



( a )  $D_s : D_h = 1 : 2.3$

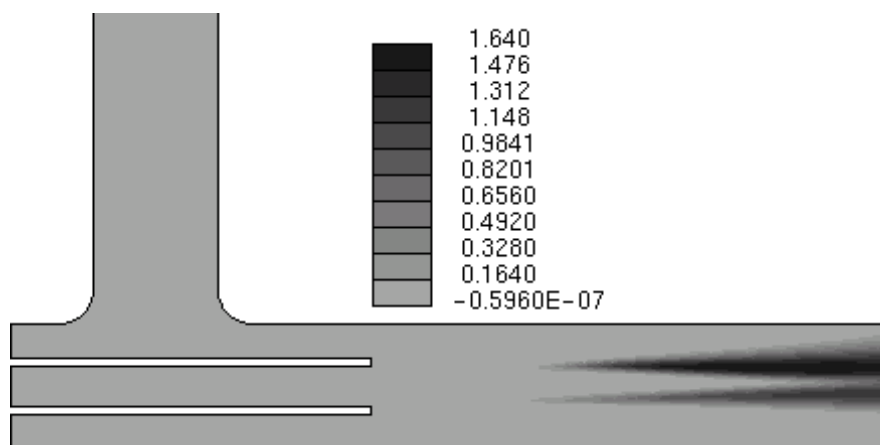


( b )  $D_s : D_h = 1 : 1.9$

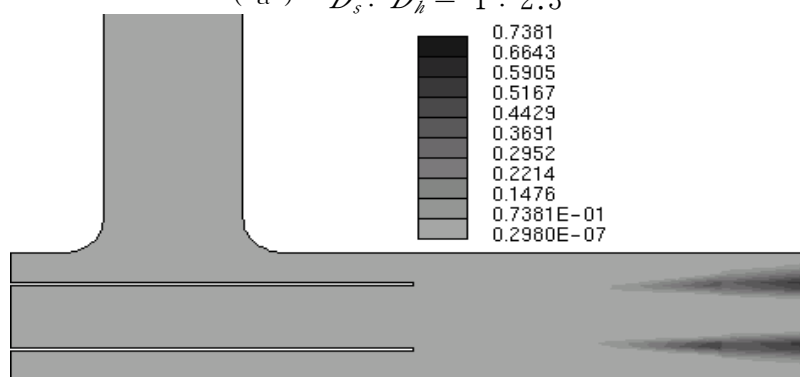


( c )  $D_s : D_h = 1 : 1.5$

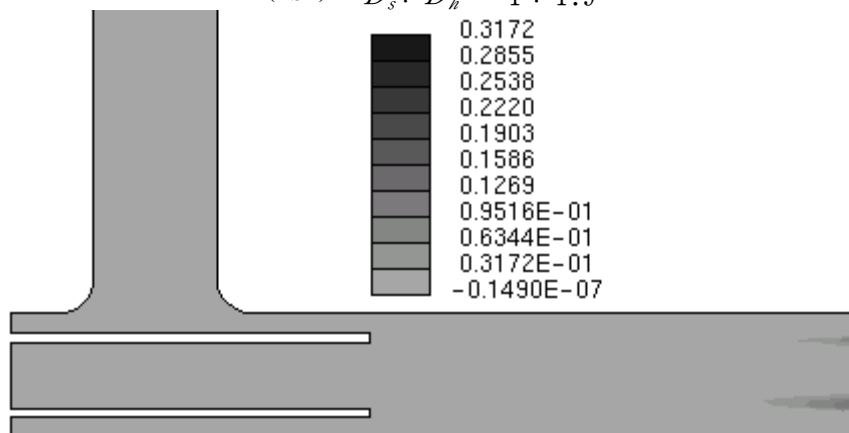
Fig. 4-19 Total Pressure Distribution(  $Q = 2.2755 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  )



( a )  $D_s : D_h = 1 : 2.3$

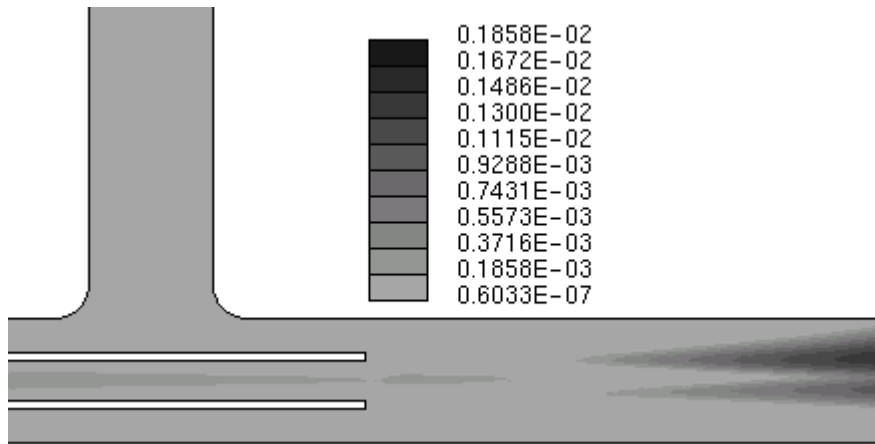


( b )  $D_s : D_h = 1 : 1.9$

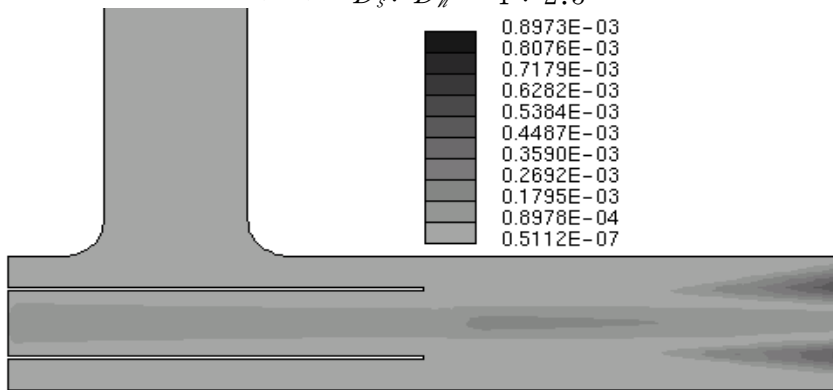


( c )  $D_s : D_h = 1 : 1.5$

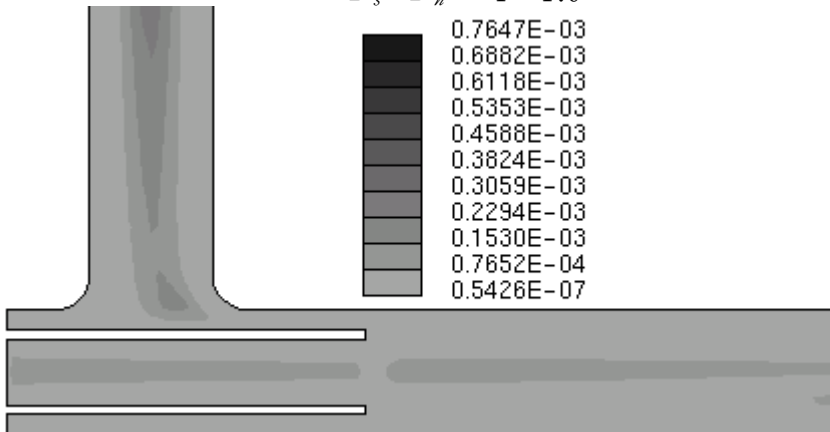
Fig. 4-20 Turbulent Kinetic Energy(  $Q = 2.2755 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  )



( a )  $D_s : D_h = 1 : 2.3$

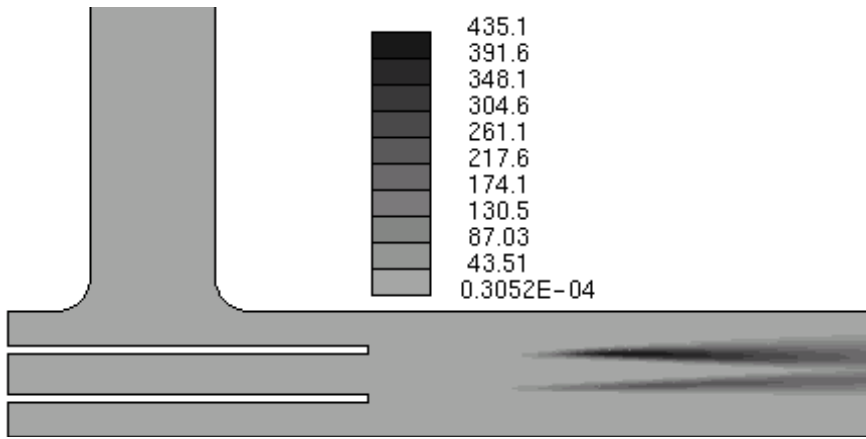


( b )  $D_s : D_h = 1 : 1.9$

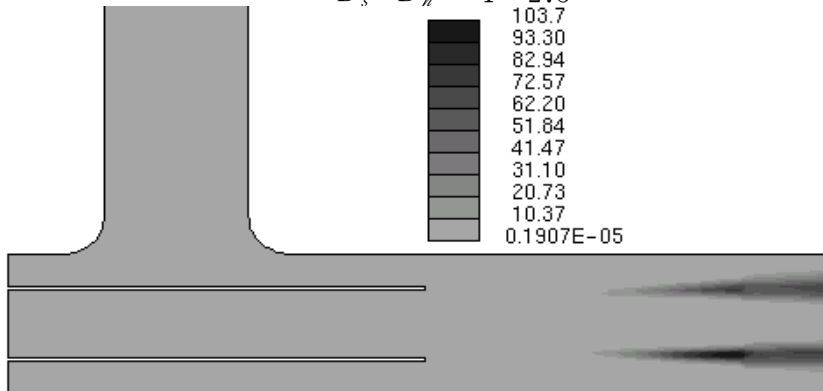


( c )  $D_s : D_h = 1 : 1.5$

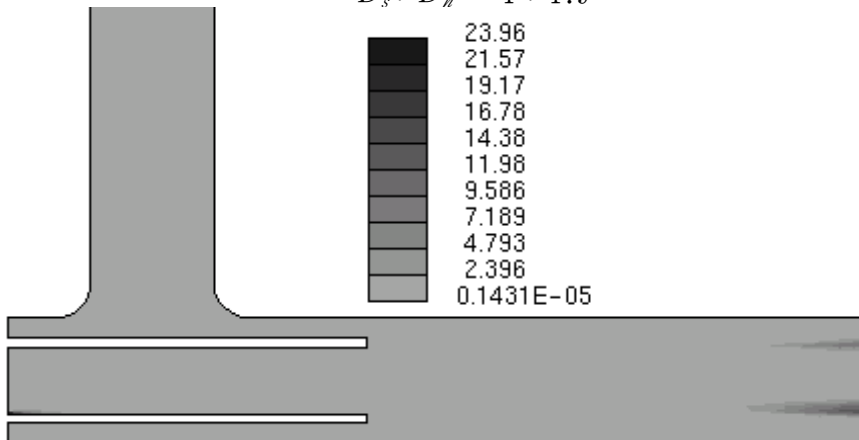
Fig. 4-21 Turbulent Viscosity(  $Q = 2.2755 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  )



( a )  $D_s : D_h = 1 : 2.3$



( b )  $D_s : D_h = 1 : 1.9$



( c )  $D_s : D_h = 1 : 1.5$

Fig. 4-22 Dissipation (  $Q = 2.2755 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  )

Fig. 4-5 ~ Fig. 4-10은 입구조건에 동일한 유량조건  $Q = 1.1355 \ell / \text{sec}$ 를 주었을 때, 이젝터 관로의 중간부분인 22.5mm를 기준으로 직경비 1 : 1.5, 1 : 1.9, 1 : 2.3 에 대한 각각의 유동특성을 나타내고 있다.

Fig. 4-5은 각각의 평균 속도벡터 분포를 나타내고 있다. 유량이 동일한 입구조건에서 입구 관로의 지름이 각각  $D_1 = 20 \text{ mm}$ ,  $D_2 = 24 \text{ mm}$ ,  $D_3 = 30 \text{ mm}$  일 때, 입구속도는  $V_1 = 3.6144 \text{ m/s}$ ,  $V_2 = 2.51 \text{ m/s}$ ,  $V_3 = 1.6064 \text{ m/s}$  이며, 각각의 레이놀즈 수는  $Re_1 = 4,787$ ,  $Re_2 = 3,989$ ,  $Re_3 = 3,191$  이다. 구동 관로에 대한 확대관로의 비가 커질수록 분지관로에서 흡입되어지는 속도 벡터의 값은 커짐을 알 수가 있고, 직경비가 커짐에 따라 레이놀즈 수가 크지 않는 난류일 때에는 흡입현상이 떨어지는 것으로 나타났으며, ( a ), ( b ), ( c ) 최고속도는 4.611, 3.106, 1.952 m/s 이었다. Fig. 4-6, 4-7은 정압력 분포와 전압력 분포를 나타내고 있는데, 입구속도가 증가할수록 전압력 분포는 커짐을 알 수 있으며, ( b ), ( c )에서 전압력 분포와, 정압력 분포는 별다른 영향 없이 출구까지 유지되지만, ( a )에서는 흡인에 의한 영향과 속도의 크기 영향으로 출구에 가까워질수록 전압력 분포의 폭의 크기는 좁아졌다. 정압력 분포는 분지관의 라운딩 처리된 부분에서 음압이 발생하는 것을 알 수 있는데, 분지관로에서 확대관로로 유체가 흡인되어 질 때, 속도 크기의 영향과 속도 방향의 변화로 인해 와류 부착점이 생성되는 것으로 사료된다. Fig. 4-8, 4-9, 4-10은 난류운동에너지, 난류점도, 소산을 나타내고 있다. 구동관로의 속도가 빨라질수록 난류 운동 에너지는 출구에 가까워질수록 에너지 증가를 보이고 있으며, 레이놀즈 수가 3,191이고,  $R=15\text{mm}$  에서는 난류 운동성분은 거의 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다. 소산값은 ( b ), ( c )와 비교했을 때, 레이놀즈 수가 큰 값인 ( a )에서 크게 증가된 것을 확인할 수 있는데, 이는 구동관로의 속도의 증가로 인한 분지 관로에서 흡입되는 양도 증가하지만 출구에 가까워질수록 난류운동성분도 증가함을 나타내고 있다.

분지관에서 흡입되는 양을 합한 출구 유량을 계산한 결과 ( a )에서의 유량  $Q_1 = 1.7007 \ell/s$ , ( b )에서  $Q_2 = 1.0901 \ell/s$ , ( c )에서  $Q_3 = 0.9067 \ell/s$

를 나타내었는데, ( b ), ( c )에서는 분지관의 영향으로 인한 출구유량은 적어짐을 나타내고 있어 효율이 떨어진 반면, ( a )에서는 흡인 유량의 증가로 인한 출구유량이 증가함으로서 효율이 증가함이 나타났다.

Fig. 4-11은 유량 값을  $Q = 1.7055 \text{ l/s}$ 로 증가시켰을 때 각 직경비에 대한 속도벡터를 나타내고 있으며. 이 때의 입구 속도는 각각  $V_1 = 3.6144 \text{ m/s}$ ,

$V_2 = 3.77 \text{ m/s}$ ,  $V_3 = 2.4128 \text{ m/s}$ 이다. 구동관로에서 확대관로로 빠져나온 속도의 영향으로 분지관으로부터 흡인되는 속도의 크기는 더 커짐을 알 수가 있으며, ( a )의 경우는 분지관에서 빠져 나올 때 라운딩 처리된 부분으로 벽면 부착이 발생함을 확인할 수 있다. 이 때의 각각의 출구에서 나오는 유량 값을 조사했을 때, 그 값들은 각각 ( a )의 경우,

$Q_1 = 3.4691 \text{ l/s}$ ( b )의 경우,  $Q_2 = 2.0250 \text{ l/s}$ , 그리고 ( c )의 경우는  $Q_3 = 1.2914 \text{ l/s}$  값을 나타냈다. 여기에서도 ( a )의 경우에 유량의 효율이 다른 두 조건에서 보다 더 많이 증가함을 나타내었고, ( b )에서도 흡입유량이 발생하지만 그 값은 ( a )의 경우보다는 더 적은 값이며, ( c )의 경우는 오히려 분지관의 영향으로 인한 출구유량이 더 낮아짐을 확인했을 때, 이는 비효율적이라는 분석이 나왔다.

Fig. 4-12과 Fig. 4-13는 각각 정압력 분포와 전압력 분포를 나타내고 있다.

( b )와 ( c )에서는 정압력 분포의 별다른 특이점을 발견할 수 없지만, ( a )에서는 라운딩 처리된 부분에서, 기존의 조건  $v_1 = 3.6144 \text{ m/s}$ 를 주었을 때 보다 더 큰 음의 값으로 정압력이 발생하는 것을 확인했을 때, 와류 부착점이 형성됨을 알 수 있고 이로 인해 흡입 효율을 저하시키는 원인이 된다고 생각된다. 전압력 분포는 각각 구동 관로의 유속 증가로 인해 그 값은 커졌지만, 특이점이 발생하지 않았다.

Fig. 4-14 ~ Fig. 4-16는 각각 난류 운동에너지, 난류 점도, 소산을 나타내고 있다. ( a )에서는 흡인된 효율이 높은 반면에 출구로 빠져 나가는 부분에서 에너지 값이 증가함을 나타낸 것은 저속의 유량을 주었을



때와 같은 현상을 나타냈으며, 에너지 값은 출구에 가까워질수록 커짐을 알 수가 있으며, 소산값 또한 증가했다. 이러한 현상은 마지막 조건을 분석한 Fig. 4-17 ~ Fig. 4-22를 분석한 이후 설명을 추가하고자 한다.

Fig. 4-17 ~ Fig. 4-22은 구동관로의 유량조건을  $Q = 2.2755 \text{ l/s}$ 로 주었을 때의 수치해석 결과를 나타내고 있다.

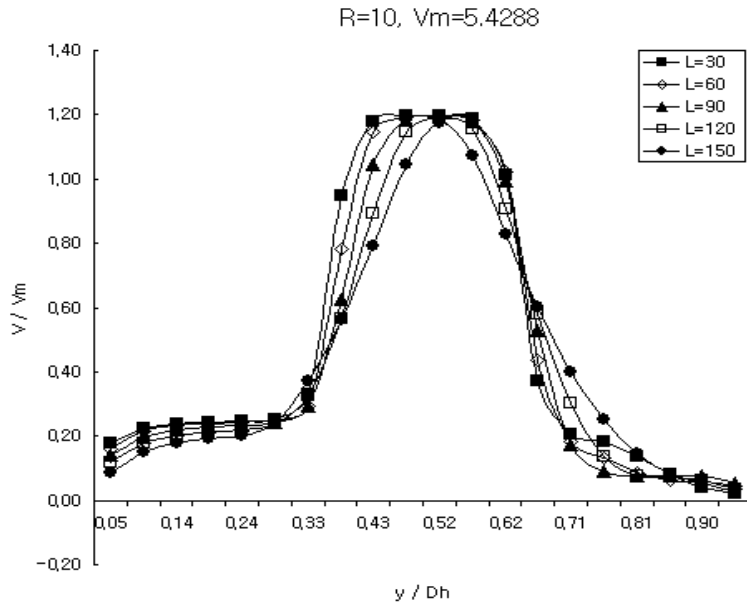
이 때의 각각의 입구조건의 속도는 각각 ( a )일 때  $V_1 = 7.2432 \text{ m/s}$ , ( b )일 때  $V_2 = 5.03 \text{ m/sec}$ , ( c )일 때,  $V_3 = 3.2192 \text{ m/sec}$  이다.

Fig. 4-17은 각각의 평균 속도 벡터를 나타내고 있는데, 각각의 출구에서 빠져나온 유량 값을 계산한 결과, ( a )에서  $Q_1 = 2.9770 \text{ l/s}$ , ( b )에서  $Q_2 = 2.7621 \text{ l/s}$ , ( c )에서  $Q_3 = 2.2330 \text{ l/s}$ 를 나타내었다. ( a )에서는 이젝터 관로의 효율이 속도가 증가함에 따라 흡인 효율이 증가함을 나타나고 있으며, 이는 구동관로의 지름에 대한 유량조건 3가지 중에서 가장 좋은 효율을 타내었으며, ( b ), ( c )에서는 분지관로의 효율이 유량 조건은 같지만 지름의 크기가 증가함으로써 속도가 저속인 조건을 부여했을 때, 분지관이 흡인되는 유량 값은 구동관로에 저항을 주어 출구로 빠져나온 유량의 값이 오히려 더 떨어지는 결과를 초래하였다. 속도를 증가시켜줌으로써 각각의 출구유량은 점점 회복되는 것을 확인했을 때, 이젝터의 효율을 증가시키기 위해서는 구동관로의 속도 조건과 관계가 있음을 알 수 있다. 이는 곧 속도의 증가는 압력강하를 일으키는 중요한 원인이 됨으로서 흡입효율을 증가시키는 것이라 하겠다.

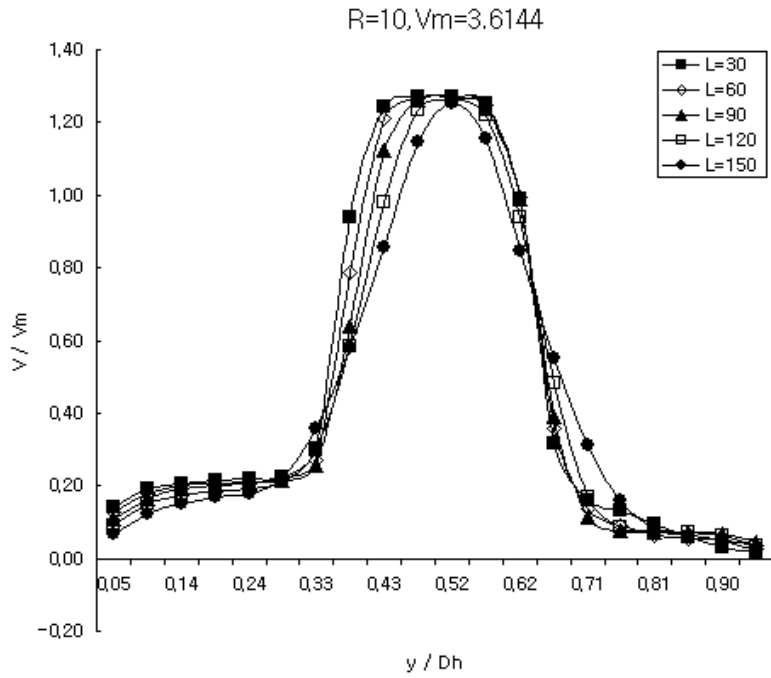
Fig. 4-18, Fig. 4-19는 각각 정압력 분포와 전압력 분포를 나타내고 있다. 흡입효율이 세가지 조건 중에서, 가장 좋은 ( a )의 경우에 정압력 분포의 특이점은 역시 라운딩 처리된 분지관로와 확대관로의 연결부분이다. 여기에서 정압력은 음의 값을 나타내고 있으며, 흡입 속도의 증가로 인한 와류의 형성이 커지고 있음을 확인할 수 있다. 차후 속도조건에 대한 분지관에 대한 곡률의 설계조건도 고려되어야 할 중요한 사항이라 사료

된다.

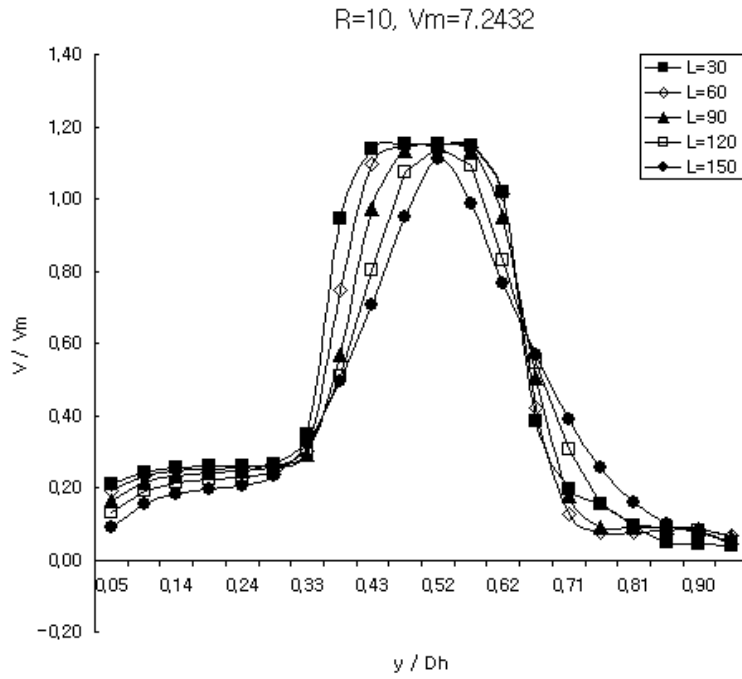
Fig. 4-20은 난류 운동에너지를 나타내고 있다. ( b )와 ( c )에서는 난류 운동 에너지 값이 크게 변화되지 않는 반면, ( a )에서는 난류 운동에너지가 어느 지점을 시작으로 크게 변화된다는 것을 세가지 조건을 비교했을 때 확인할 수 있는데, 각각의 조건에서 구동관로와 확대관로가 만나는 지점을 기준으로 난류운동에너지의 변화 크기가 커지는 시작점은  $V_1 = 3.6144\text{m/s}$  일 때,  $L_1 = 77.5\text{mm}$ ,  $V_2 = 5.4288\text{ m/s}$  일 때,  $L_2 = 71.9\text{mm}$ ,  $V_3 = 7.2432\text{ m/s}$  일 때,  $L_3 = 60.8\text{mm}$  지점에서 난류 운동에너지의 크기는 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 4-22의 난류운동에너지와 소산과도 밀접한 관련이 있어, 난류 운동에너지가 증가할 때, 소산값이 증가하게 되어 에너지 손실이 초래되고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 에너지 손실은 내부에너지로 변환되어 분자의 임의의 열적운동과 관계되므로 소산은 점성에 의한 식과 관련됨을 확인할 수 있다. 이러한 에너지 손실을 감소시키기 위해서는 난류 운동에너지의 값이 커지는 시점으로부터 노즐형상을 이용하여 난류 운동에너지 값을 줄이는 방법도 가능하리라 사료된다.



( a )  $R = 10\text{mm}, V_m = 5.4288 \text{ m/s}$

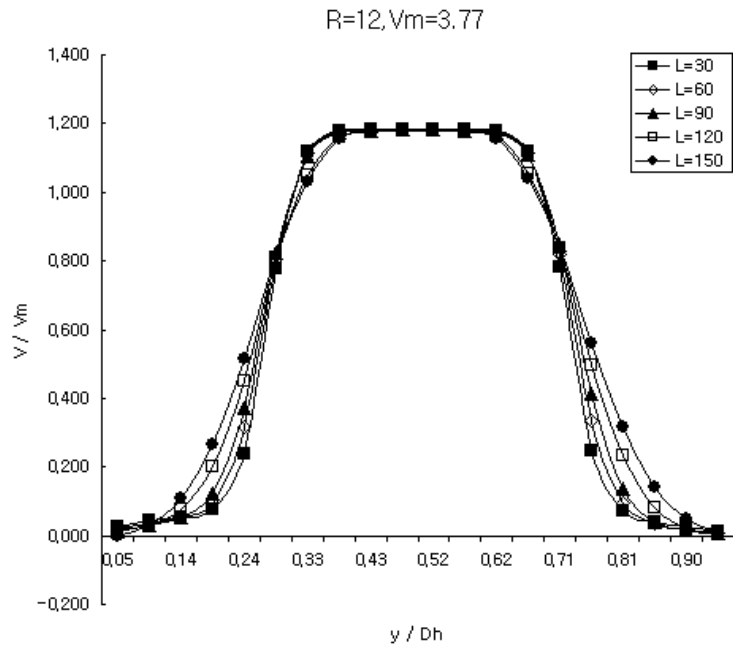
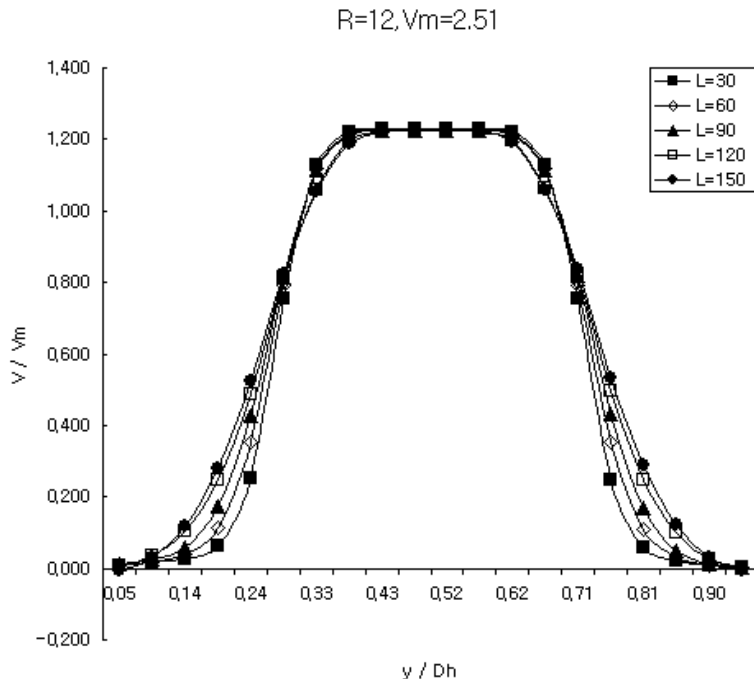


( b )  $R = 10\text{mm}, V_m = 3.6144 \text{ m/s}$



( c )  $R = 10\text{mm}$ ,  $V_m = 7.2432 \text{ m/s}$

Fig. 4-23 Velocity Distribution (  $D_s : D_h = 1 : 2.3$  )



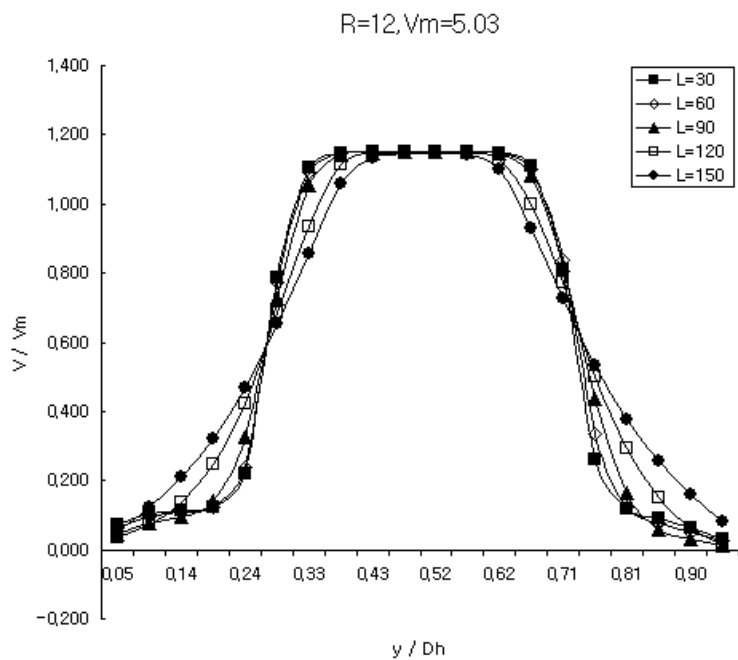
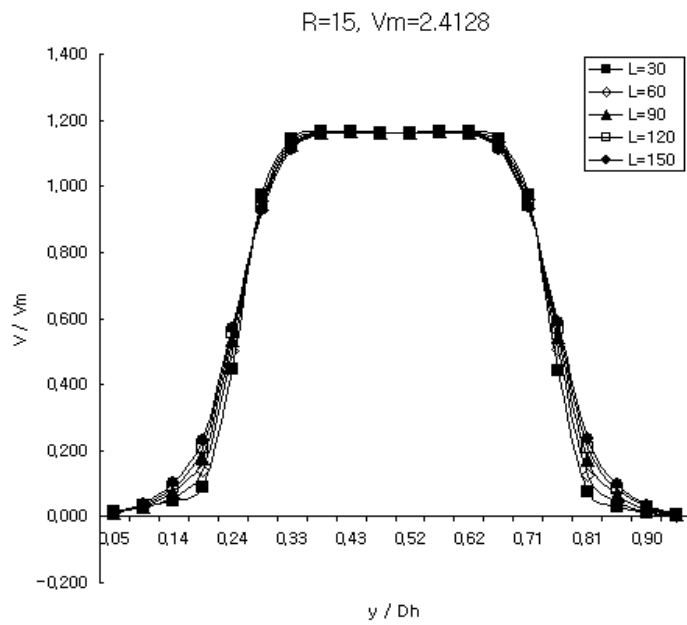
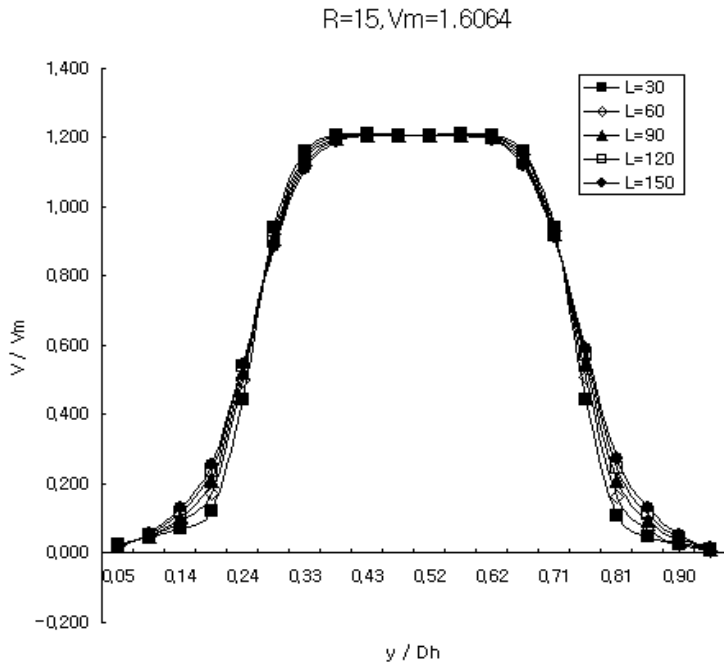


Fig. 4-24 Velocity Distribution (  $D_s : D_h = 1 : 1.9$  )



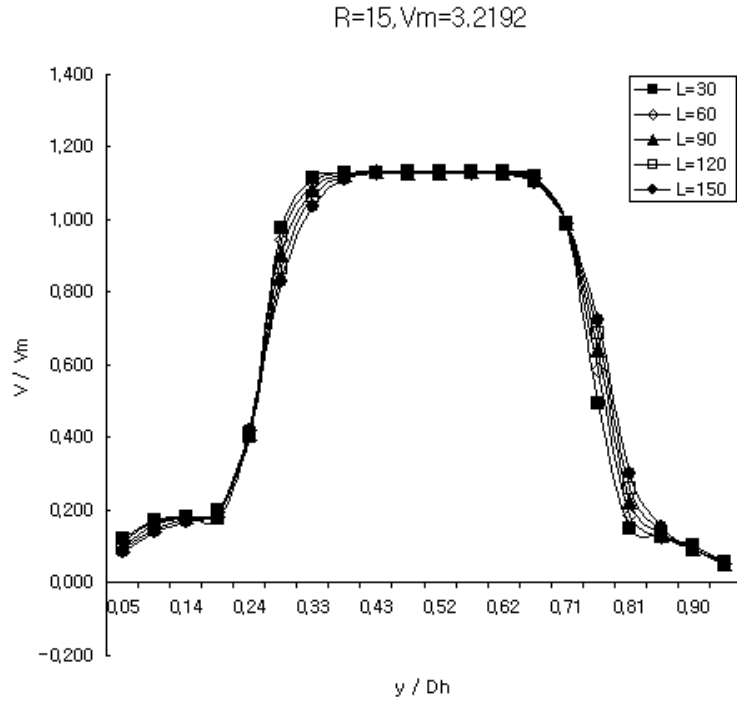
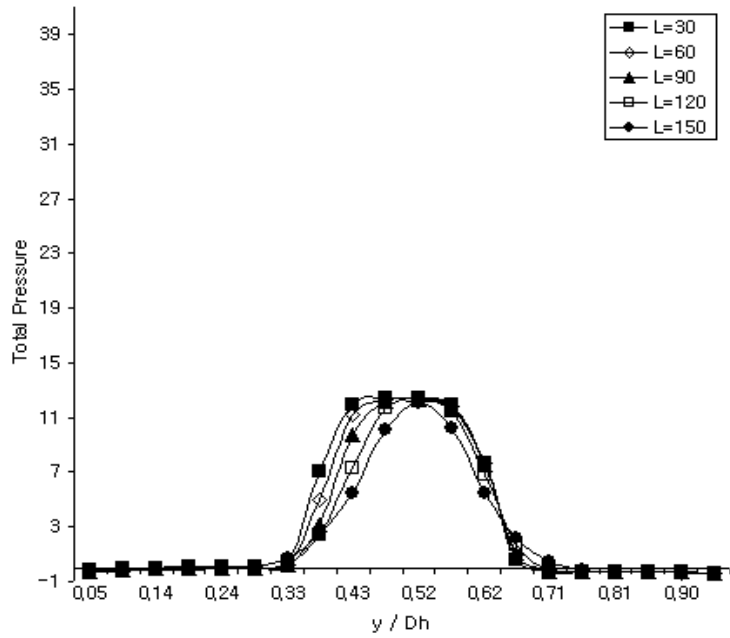


Fig. 4-25 Velocity Distribution (  $D_s : D_h = 1 : 1.5$  )

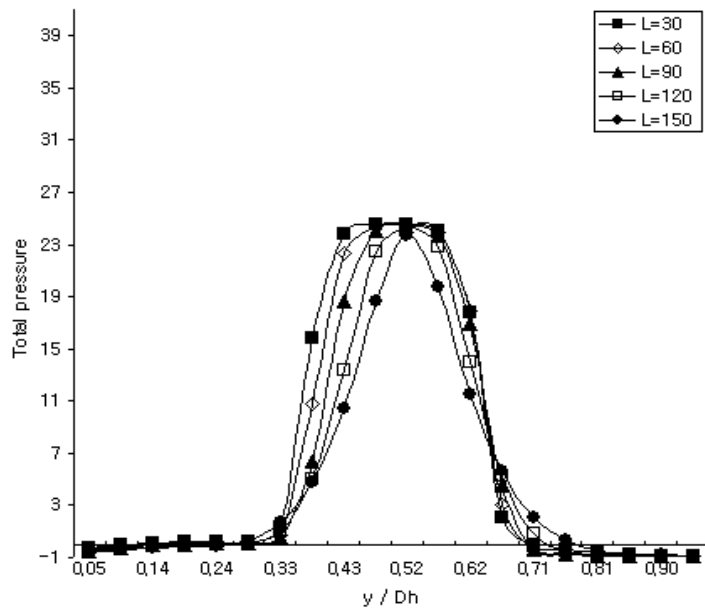


R=10, V=3.6144



( a )  $R = 10\text{mm}$ ,  $V_m = 3.6144$  m/s

R=10,  $V_m=5.4288$



( b )  $R = 10\text{mm}$ ,  $V_m = 5.4288$  m/s

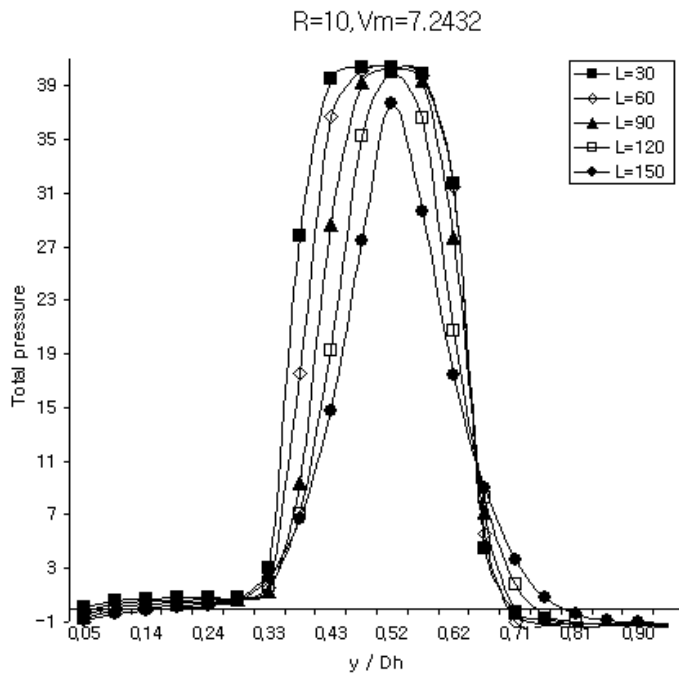
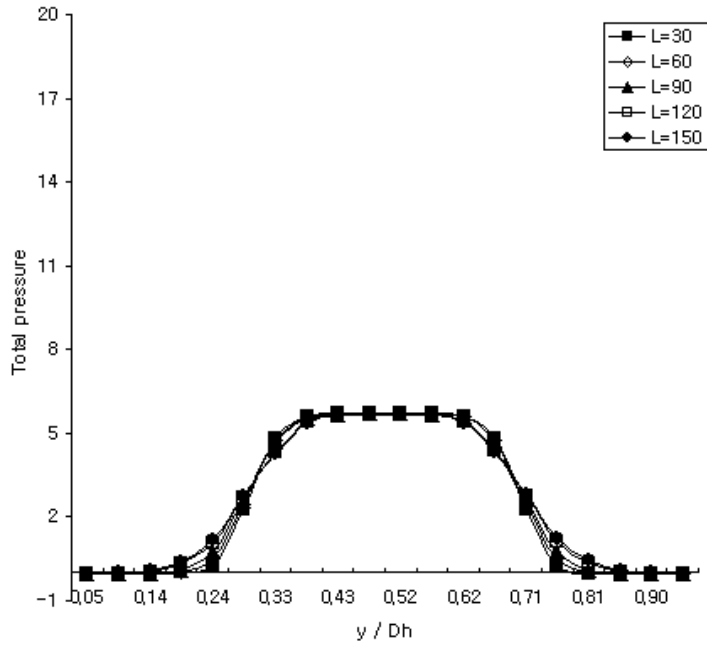
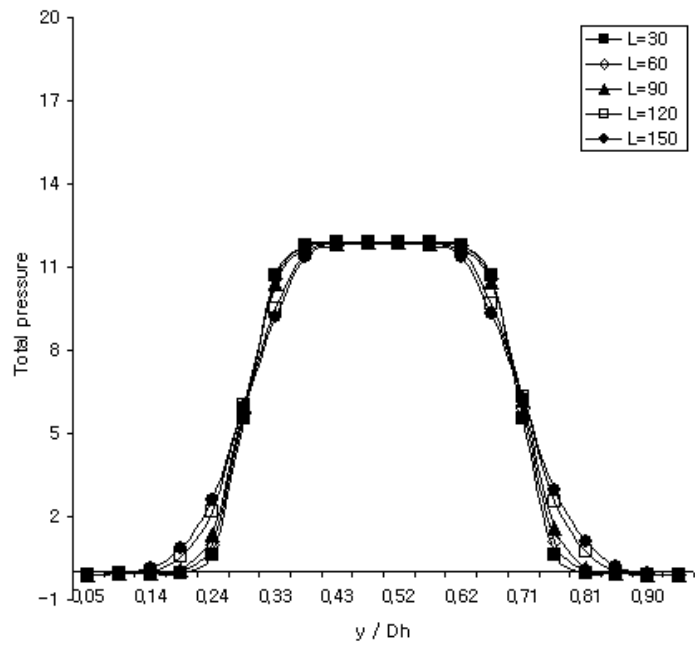


Fig. 4-26 Total Pressure Distribution (  $D_s : D_h = 1 : 2.3$  )

R=12, Vm=2.51



( a )  $R = 12\text{mm}$ ,  $V_m = 2.51$  m/s  
 $R=12, V_m=3.77$



( b )  $R = 12\text{mm}$ ,  $V_m = 3.77$  m/s

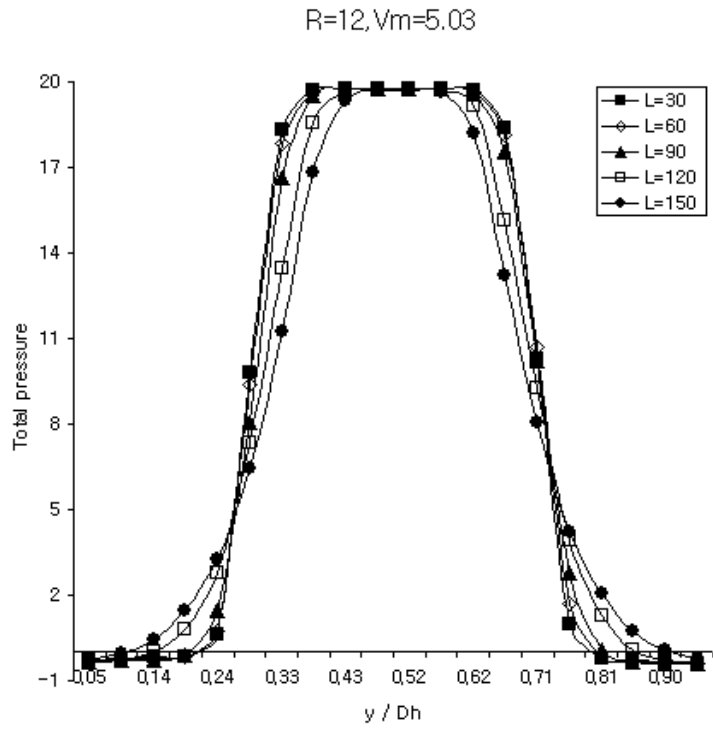
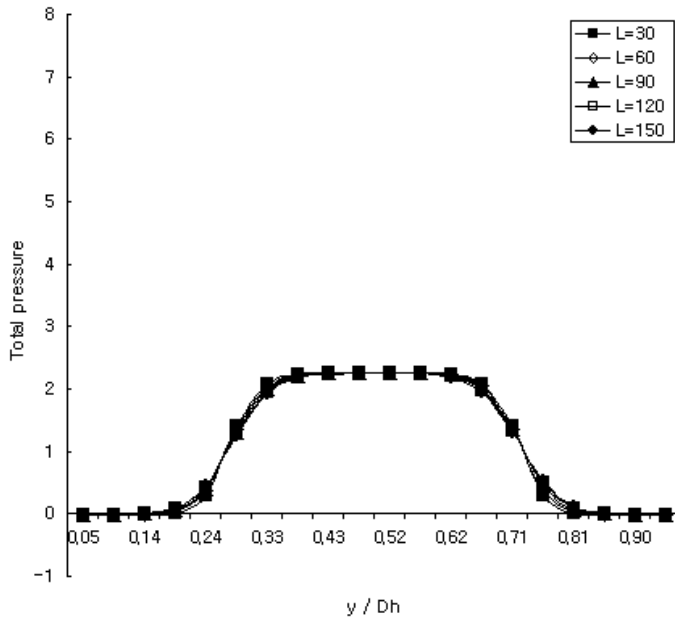
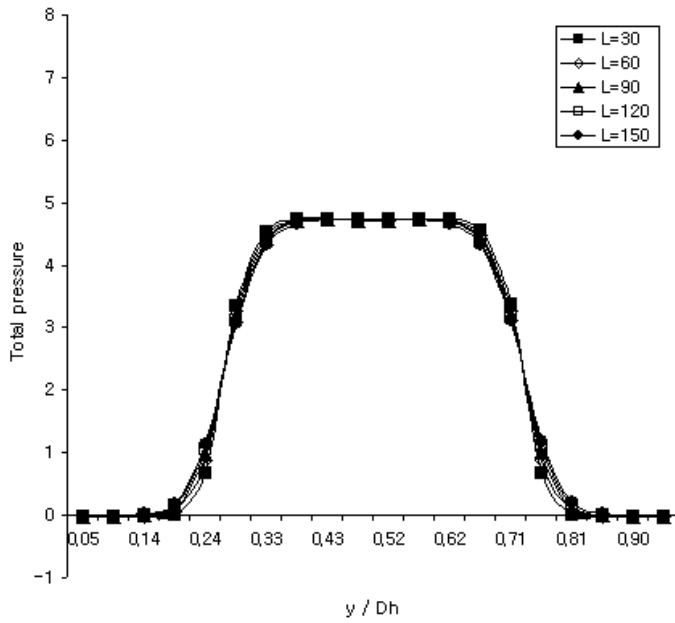


Fig. 4-27 Total Pressure Distribution (  $D_s : D_h = 1 : 1.9$  )

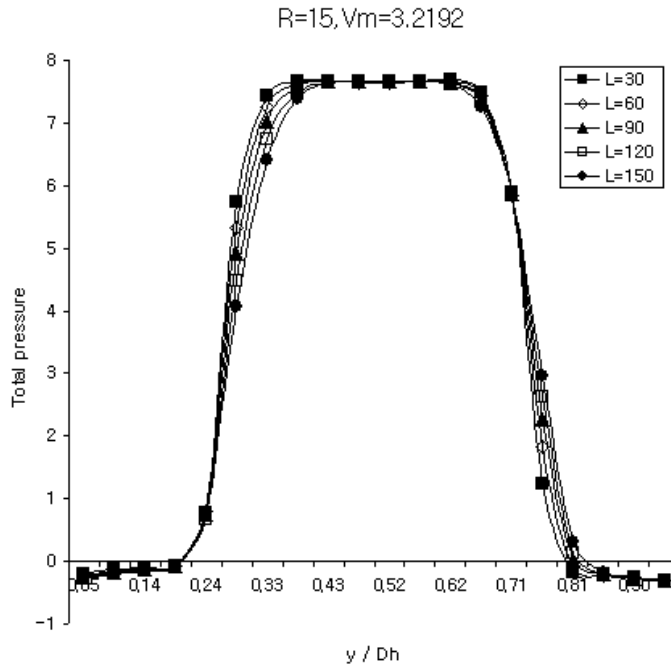
R=15, Vm=1.6064



( a )  $R = 15\text{mm}$ ,  $V_m = 1.6064 \text{ m/s}$   
 $R=15, V_m=2.4128$



( b )  $R = 15\text{mm}$ ,  $V_m = 2.4128 \text{ m/s}$



( c ) R = 15mm, V<sub>m</sub> = 3.2192 m/s

Fig. 4-28 Total Pressure Distribution ( D<sub>s</sub> : D<sub>h</sub> = 1 : 1.5 )

Fig. 4-23 ~ Fig.4-25는 직경비가 각각 1 : 2.3, 1 : 1.9, 1 : 1.5 일 때, 구동관로와 확대관로가 만나는 지점(L=0mm)을 기준으로 30mm, 60mm, 90mm, 120mm, 150mm 지점에 대해 입구 쪽 속도조건에 대한 확대관로의 각 각의 높이에 대한 속도분포의 비로 무차원화 시킨 값을 나타내고 있다. Re 수가 큰 값을 가지는 Fig. 4-23의 직경비 1 : 2.3 에서는 각각의 속도 조건에 대해서 구동관로의 상·하 부분에서 속도 값이 차이가 발생함을 알 수 있는데, 이러한 원인은 분지관로가 부착된 부분과 가까이 위치한  $y / D_h > 0.5$  지점에서는 흡인에 의한 영향으로 벽면 가까이 속도 값은 반대쪽 속도 값보다 더 작은 값을 나타내지만, 벽면에서 멀어질수록 속도벡터 값은 더 큰 값으로 회복됨으로서 유량의 효율을 증가시키고 있으며 이러한 현상은 입구속도가 증가함에 따라 회복구간의 폭이 증가됨을 알 수 있다.

이러한 현상은 흡인에 의한 영향이 유동의 효율에 긍정적인 영향을 미칠 때, 더 뚜렷하게 나타나고 있음을 직경비 1 : 1.9, 1 : 1.5인 Fig. 4-24, Fig. 4-25와 비교했을 때 확인할 수 있다. 분지관의 영향이 오히려 효율을 떨어뜨리는 직경비 1 : 1.5인 Fig. 4-25에서는 흡인의 영향이 발생하지 않으므로 구동관로가 상, 하가 별다른 차이가 없음을 알 수가 있다.

Fig. 4-26 ~ Fig. 4-28에서는 CFD를 통해 분석한 전압력 분포를 혼합관로의 전체높이에 대한 각 지점의 높이의 비로 나타내고 있다. 유동이 진행함에 따라 압력분포가 어떠한 형태로 변화되어 가는가를 알아보기 위해 전압력 분포 또한 구동관로가 확대관로와 만나는 지점(L=0mm)을 기준으로 30mm, 60mm, 90mm, 120mm, 150mm 인 부분의 전압력 분포를 나타냈다.

조건에 대한 각 지점의 전압력 평균값은 Table. 4-2와 같다.

구동관로의 반지름이  $R=10\text{mm}$  인 조건하에서는 전압력 분포의 값이 입구 속도조건을 크게 줄수록 전압력 분포 값은 증가되는데, 이 때의 특이점은 분지관과 가까운 확대관로의 지점  $y / D_h > 0.5$ 에서 흡입의 영향으로 인한 전압력 분포값의 소멸정도는 반대 부분에 비해 작으나, 벽면에

가까워질수록, 속도가 커질수록 음압이 발생하게 되는데, 이러한 원인은 흡입 되어진 유동이 벽면 전단력에 의해 와류의 발생을 야기 시켰기 때문에 발생된 것이라 생각되며, 이러한 현상은 유량의 효율을 저하시키는 원인이 되므로, 구동관로를 빠져 나온 후, 적정한 위치를 선정하여 확대관로에 노즐형상을 구현하여 유량손실을 최소화 할 수 있으리라 사료된다.

Table. 4-2 Mean Total Pressure Distribution (  $P[N/m^2]$  )

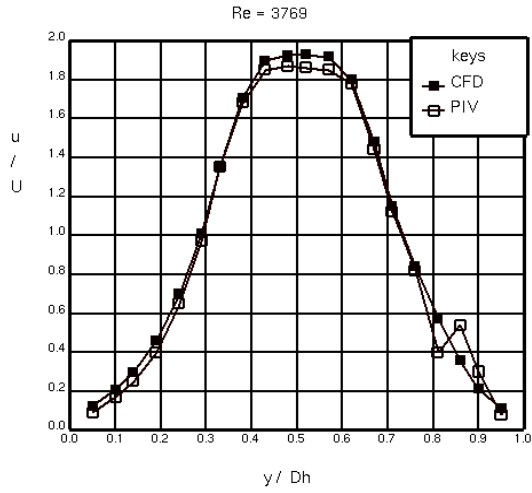
$D_s : D_h$	$V_m$ (m/s)	L=30mm	L=60mm	L=90mm	L=120mm	L=150mm
1 : 2.3	3.6144	3.141	2.973	2.780	2.578	2.343
	5.4288	6.542	6.159	5.710	5.218	4.711
	7.2432	11.22	10.428	9.436	8.311	7.269
1 : 1.9	2.51	2.439	2.476	2.508	2.529	2.546
	3.77	5.216	5.277	5.334	5.384	5.413
	5.03	8.735	8.732	8.640	8.469	8.199
1 : 1.5	1.6064	1.046	1.049	1.049	1.048	1.046
	2.4128	2.266	2.277	2.283	2.286	2.287
	3.2192	3.654	3.651	3.634	3.610	3.587

분지관의 설치가 오히려 유량손실을 초래하는 직경비 1 : 1.9의 조건 Fig. 4-27 ( a ), 1 : 1.5의 조건 Fig. 4-28 ( a ), ( b ), ( c )의 경우에서 알 수 있듯이, 입구유동조건이 레이놀즈 수를 기준으로 고려했을 때, 입구 관로의 직경이 커짐에 따라 흡인현상을 유도하기 위해서는 입구관로의 직경이 커질수록 더 작은 입구관로에 비하여 더 큰 수의 레이놀즈 값이 필요하게 됨을 알 수 있다.

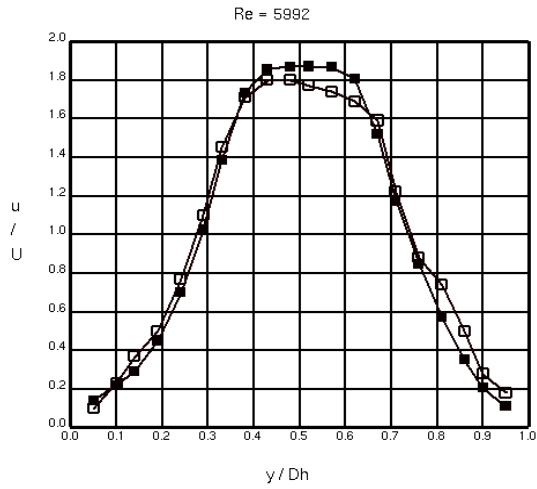
주어진 조건하에서, 흡인 현상을 유도하지 않은 직경비 1 : 1.5인 경우에는 전압력 분포 값은 분지관 부분과 비교하였을 때, 양측의 값은 큰 차이를 보이지 않았으며, 이러한 현상은 흡인현상이 일어나지 않은 직경비 1 : 1.9의 Fig. 4-27 ( a )의 경우에서도 같은 현상이 나타남을 알 수 있다.



### 第3節 PIV / CFD 결과 비교분석



( a ) Re = 3,989



( b ) Re = 5,992

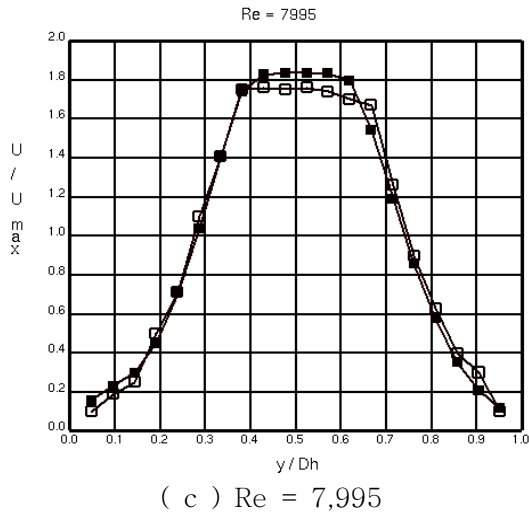


Fig. 4-29 Velocity Distribution by PIV and CFD (  $D_s : D_h = 1 : 1.9$  )

Fig. 4-29에서는 직경비 1 : 1.9의 조건에서 속도 조건  $V_1 = 2.51$  m/s,  $V_2 = 3.77$  m/s,  $V_3 = 5.03$  m/s에서 PIV 실험 분석값과 CFD 수치 해석값의 차이를 확인하고, 결과의 검증을 나타내기 위해 두 가지 값을 임의의 지점을 선정하여 비교 / 분석하였다. 비교 지점은 구동관로와 확대관로가 만나는 지점을 지점(L = 0mm)을 시작으로, 구동관로에서 빠져 나온 지점으로부터 확대관로의 거리 L = 70mm인 지점에 대한 평균속도 분포를 비교 및 분석하였는데, 이 부분을 선정한 이유는 수치해석에서 정상상태로 가정하였고, 구동관로에서 빠져나온 부분이 분지관의 영향으로 인한 유동패턴의 영향이 어느 정도 안정성을 찾아가는 구간이라 생각하였기 때문에 이 부분을 선정하였다. 확대관로의 높이에 대한 각 지점의 비 ( $\frac{y}{D_h}$ )가 벽면에 가까워지는 0.3 ~ 0.1, 0.75 ~ 0.9 구간에서 두 값에 대해 비교할만한 오차가 발생하는데, 이에 대한 원인은 벽면에 대한 점성력의 영향과 정상상태로의 가정, 평균 속도 벡터분포를 나타내었기 때문이며, 또한 구동관로에 유출되는 최대유속지점들에 대한 PIV 실험값과 CFD 수치해석값과 비교해 볼 때, 실험값이 수치해석 값보다 더 작은 값을 나타내는 것도 이러한 이유 때문이라 생각된다. 이는 곧 실험조건하에서 발생하는 여러 가지 제반 손실이 발생됨을 감안하지 않았기 때문이다. PIV에 의한 평균속도 값은  $Re_1, Re_2, Re_3$ 의 값이 3,989, 5,992, 7,995 일 때, 각각의 평균속도 값은  $V_{m1} = 1.59$  m/s,  $V_{m2} = 2.46$  m/s,  $V_{m3} = 3.19$  m/s 이며, CFD에 의한 평균속도값은  $V_{m1} = 1.63$  m/s,  $V_{m2} = 2.41$  m/s,  $V_{m3} = 3.19$  m/s이다. L = 70mm인 지점에서 얻어진 PIV, CFD의 평균속도 값에 관한 일치도는 평균 93%이며, 이 이결과는 실험결과와 수치해석결과가 어느 정도 일치함을 나타내고 있어, 수치해석을 통해 얻어진 R=10mm, R=15mm의 결과 값도 신뢰도가 인정된다고 사료되며, 이젝터 유동특성 및 유량효율의 증가에 대한 분석을 수치해석을 이용하여 이젝터 장치에 대한 최적설계 구현이 가능하리라 생각된다.

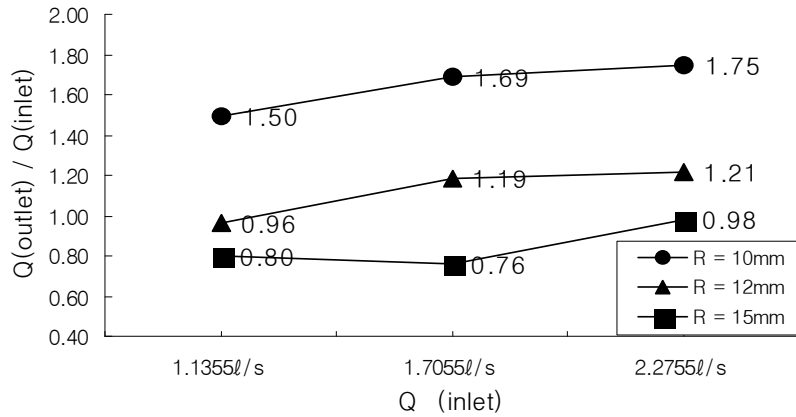


Fig. 4-30 Flux Efficiency

Fig. 4-30은 직경비의 변화와 입구조건의 유량변화에 따라 출구유량의 비를 무차원화 시켜 유량효율을 나타낸 것이다. 입구유량의 조건  $Q_1 = 1.1355 \text{ l/s}$ ,  $Q_2 = 1.7055 \text{ l/s}$ ,  $Q_3 = 2.2755 \text{ l/s}$  이었을 때, 직경비 1 : 2.3인 경우에 유량효율은  $n_1 = 1.5$ ,  $n_2 = 1.69$ ,  $n_3 = 1.75$  값으로 나타났으며, 직경비 1 : 1.9인 경우에 유량효율은  $n_1 = 0.96$ ,  $n_2 = 1.19$ ,  $n_3 = 1.21$  값으로 나타났고, 직경비 1 : 1.5인 경우에는  $n_1 = 0.80$ ,  $n_2 = 0.76$ ,  $n_3 = 0.98$  값을 나타내었다. 구동관로의 직경이 작을수록 같은 유량조건을 부여하였을 때, 유량효율이 가장 높은 값을 가지는 관로는 직경비 1 : 2.3 이었으며, 입구조건의 유량을 증가시킬수록 속도는 빨라져서 분지관에서 흡입되는 유량은 더 높아짐을 확인할 수 있었다. 직경비 1 : 1.9, 1 : 1.5인 경우에는 저속인 경우에 분지관의 영향이 오히려 유량효율을 떨어뜨리는 현상을 일으켰지만, 속도가 증가할수록 출구유량이 회복되는 것으로 나타났다. 구동관로의 지름이 작고 속도가 빨라질수록 흡입되는 효율은 증가하고, 구동관로의 직경이 커질수록 흡입효과를 얻기 위해서는 입구조건의 속도가 커져야만 흡입효율을 얻을 수 있다는 것을 확인하였다.

## 第 5 章 結 論

직경비( 1 : 2.3, 1 : 1.9, 1 : 1.5 ) 에 대한 이젝터 유동특성을 입구조건을 변화시켜가면서, 혼합관로의 TEST SECTION에 대한 평균속도, 평균운동에너지, 평균x-y축 응력분포를 PIV 실험을 통해 분석하였고, 최적설계구현을 위해 CFD를 이용하여 구동 관로의 직경비를 변화시켜가면서 평균속도, 정압력분포, 전압력분포, 난류운동에너지, 난류점도, 소산 값, 유량효율을 비교, 분석 및 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- ( 1 ) PIV 계측결과 벽면전단력에 의한 영향으로 레이놀즈 수가 증가할 때 벽면 가까이에서 속도벡터의 와류가 형성되었다.
- ( 2 ) 분지관에서 발생된 흡입현상은 곡률 처리(R=28mm)된 분지관로와 확대관로가 교차점에서 형성된 와류 발생은 속도가 증가할수록 커진다.
- ( 3 ) 흡입효율을 증가시키기 위해 에너지 소산을 줄이기 위한 방법으로 확대관로의 적정 지점에서 노즐형상을 구현하는 것이 필요하다.
- ( 4 ) PIV 계측실험과 CFD 수치해석에 의한 무차원 속도분포 값은 주어진구간 내에서 평균 93%정도 일치하였다.
- ( 5 ) 유량효율은 구동관로의 직경이 커질수록 감소하고, 반면 레이놀즈 수가 커지면 증가한다.
- ( 6 ) 구동관로의 직경비가 1 : 2.3일 경우 유량효율이 가장 높았으며, 속도비에 따른 효율은 각각  $n_1 = 50%$ ,  $n_2 = 69%$ ,  $n_3 = 75%$  유량효율을 증가하였다.

## REFERENCES

1. Chen, F. C., Hsu, C. T., "Performance of ejector heat pumps", Energy Research, Vol. 11, pp.289~300, 1987.
2. Fluegel, G., March/April, Berechnung von strahlapparaten, VDI Forschungsheft 395 Ausgabe B Band 10, 1939.
3. Sun, D.W, and Eames, I.E., "Recent developments in the design the -oreis and applications of Ejectors-a review" Journal of the Institute Energy, Vol. 68, June, pp.665~676, 1995.
4. Witte, J.h., Efficiency and design of liquid-gas ejector, British - chemical Engineering, Vol. 10, No. 9, pp. 602~607, 1995.
5. Biswas, M.N., and Mitra, A.K., Momentum Transfer in a Horizontal multi-Jet liquid-gas ejector, The Canadian Journal of Chemical Engineering. Vol. 59, pp. 634~637, 1989.
6. 이형남, 박길문, 이덕구, "90° 분기덕트에서 분기부의 내·외벽의 압력분포", 대한설비공학회, pp. 115~119, 2002.
7. 이형남, 박길문, 이덕구, "PIV 기법을 이용한 분기사각덕트내의 유동특성에 관한 실험적 연구" 한국박용기관학회 논문집, 25권 6호, 2001.
8. 이형남, 박길문, 박지만, 이덕구, 설재림, "PIV와 CFD를 의한 Ejector 내의 유동특성연구, 대한기계학회 추계학술대회 논문집, pp723~728, 2003.
9. 이영호, 조대환, 김미영, "PIV에 의한 기포뿜의 기본성능특성에 관한 연구", 한국해양환경공학회, pp, 47~53, 1997.
10. 윤석훈, 이원형, 전현필, "각종 이젝터를 이용한 진공냉각장치", 한국박용기관학회지, pp. 229~304, 1995.
11. 최보규, 구병수, 김희동, 김덕줄, "추기 펌프형 아음속/음속 이젝터

- 유동에 관한 수치해석적 연구” 대한기계학회논문집 B권, 제25권 제 2호, pp.269~276, 2001
12. 최보규, 권오식, 김희동, “음속/초음속 이젝터 유동에 관한 실험적 연구” 대한기계학회논문집 B권, 제26권 제5호, pp. 640~647, 2002.
  13. 고상철, “LES에 의한 원관 내 난류의 유동해석” 한국박용기관학회 지, 제27권, 제3호, pp. 437~446, 2003.
  14. 이상준, “PIV Velocity Field Measurement Techniques And Application" National Research Laboratory, POSTECH, 2002.
  15. CDAK, "STAR-CD USER GUIDE", CDAK-KOREA, 2002