



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2007 年 8 月

碩士學位論文

분사펌프의 구동관로의 위치변화에
따른 유동특성 연구

朝鮮大學校 大學院

機 械 工 學 科

張 玹 準

분사펌프의 구동관로의 위치변화에 따른 유동특성 연구

A Study on the Flow Characteristics of Driven Duct
of Position Change of Jet Pump

2007 年 8 月 24 日

朝鮮大學校 大學院

機 械 工 學 科

張 玹 準

분사펌프의 구동관로의 위치변화에 따른 유동특성 연구

指導教授：李 行 男

이 論文을 工學碩士 學位 論文으로 提出함

2007 年 4 月 日

朝 鮮 大 學 校 大 學 院

機 械 工 學 科

張 玹 準

張 玆 準의 碩士學位 論文을 認准함

主審 朝鮮大學校 教授 工學博士 朴 吉 文 印

委員 朝鮮大學校 教授 工學博士 牟 洋 佑 印

委員 朝鮮大學校 教授 工學博士 李 行 男 印

2007 年 6 月

朝鮮大學校 大學院

目 次

目次	i
List of Tables	iii
List of Figures	iii
Nomenclature	v
Abstract	vii
第 1 章 序 論	1
第1節 연구 배경	1
第2節 연구의 목적	3
第 2 章 理論的 背景	5
第1節 Jet pump의 이론식	5
1. Jet pump내의 유동 지배방정식	5
第2節 CFD 이론적 배경 및 이론식	8
1. CFD 이론적 배경	9
2. 유한체적법	10
第3節 PIV 실험의 이론적 배경 및 이론식	18
1. PIV의 개요	18
2. PIV 시스템의 구성	20
3. 영상처리	22

第 3 章 實 驗 및 數 值 解 析	27
第1節 실험장치	27
第2節 CFD 수치해석	29
第3節 PIV 계측실험	33
第 4 章 結 果 및 考 察	36
第1節 CFD 결과	36
1. 속도분포	37
2. 전압력 분포	49
第2節 속도 및 압력분포 특성 분석	60
第3節 PIV 결과 및 고찰	75
第4節 유량효율	82
第 5 章 結 論	84
REFERENCES	85

LIST OF TABLE

Table. 3-1 CFD Condition of Driving Flow	30
Table. 3-2 PIV System of Visualization Equipment	33
Table. 3-3 Experiment Condition of Driving Flow	34
Table. 4-1 Units of Physical Property	36
Table. 4-2 Mean Total Pressure of Distribution ($p = [N/m^2]$)	79

LIST OF FIGURES

Fig. 1-1 Jet pump Model	3
Fig. 2-1 Velocity Components in jet pump	5
Fig. 2-2 Discretization Diagram of X-Direction Momentum Equation ..	10
Fig. 2-3 Discretization Diagram of Y-Direction Momentum Equation ..	13
Fig. 2-4 Discretization Diagram of Continuity Equation	14
Fig. 2-5 Calculation of velocity vector by PIV	19
Fig. 2-6 Pulse arrangement in video signal	20
Fig. 2-7 Rotated angle of square cavity	23
Fig. 2-8 Diagram of cross-correlation method	25
Fig. 3-1 Design Drawing	27
Fig. 3-2 CFD Grid of Ejector	31
Fig. 3-3 Schematic Arrangement of PIV System	32
Fig. 3-4 Photograph of Experimental Equipment	35
Fig. 4-1 Mean Velocity Vector of Distribution ($1 : 3.21 V = 1 \text{ m/s}$)	40
Fig. 4-2 Mean Velocity Vector of Distribution ($1 : 3.21 V = 2.08 \text{ m/s}$)	41
Fig. 4-3 Mean Velocity Vector of Distribution ($1 : 3.21 V = 2.54 \text{ m/s}$)	42
Fig. 4-4 Mean Velocity Vector of Distribution ($1 : 2.25 V = 1 \text{ m/s}$)	43
Fig. 4-5 Mean Velocity Vector of Distribution ($1 : 2.25 V = 2.08 \text{ m/s}$)	44
Fig. 4-6 Mean Velocity Vector of Distribution ($1 : 2.25 V = 2.54 \text{ m/s}$)	45

Fig. 4-7 Mean Velocity Vector of Distribution (1 : 1.86 V = 1 m/s)	46
Fig. 4-8 Mean Velocity Vector of Distribution (1 : 1.86 V = 2.08 m/s)	47
Fig. 4-9 Mean Velocity Vector of Distribution (1 : 1.86 V = 2.54 m/s)	48
Fig. 4-10 Total Pressure of Distribution (1 : 3.21 V = 1 m/s)	51
Fig. 4-11 Total Pressure of Distribution (1 : 3.21 V = 2.08 m/s)	52
Fig. 4-12 Total Pressure of Distribution (1 : 3.21 V = 2.54 m/s)	53
Fig. 4-13 Total Pressure of Distribution (1 : 2.25 V = 1 m/s)	54
Fig. 4-14 Total Pressure of Distribution (1 : 2.25 V = 2.08 m/s)	55
Fig. 4-15 Total Pressure of Distribution (1 : 2.25 V = 2.54 m/s)	56
Fig. 4-16 Total Pressure of Distribution (1 : 1.86 V = 1 m/s)	57
Fig. 4-17 Total Pressure of Distribution (1 : 1.86 V = 2.08 m/s)	58
Fig. 4-18 Total Pressure of Distribution (1 : 1.86 V = 2.54 m/s)	59
Fig. 4-19 Mean Velocity Vector of Distribution (L = 130mm D _s : D _h = 1 : 3.21)	63
Fig. 4-20 Mean Velocity Vector of Distribution (L = 350mm D _s : D _h = 1 : 3.21)	64
Fig. 4-21 Total Pressure of Distribution (L = 130mm D _s : D _h = 1 : 3.21)	65
Fig. 4-22 Total Pressure of Distribution (L = 350mm D _s : D _h = 1 : 3.21)	66
Fig. 4-23 Mean Velocity Vector of Distribution (L = 130mm D _s : D _h = 1 : 2.25)	67
Fig. 4-24 Total Pressure of Distribution (L = 130mm D _s : D _h = 1 : 2.25)	68
Fig. 4-25 Mean Velocity Vector of Distribution (L = 350mm D _s : D _h = 1 : 2.25)	69
Fig. 4-26 Total Pressure of Distribution (L = 350mm D _s : D _h = 1 : 2.25)	70
Fig. 4-27 Mean Velocity Vector of Distribution (L = 130mm D _s : D _h = 1 : 1.86)	71
Fig. 4-28 Total Pressure of Distribution (L = 130mm D _s : D _h = 1 : 1.86)	72
Fig. 4-29 Mean Velocity Vector of Distribution (L = 350mm D _s : D _h = 1 : 1.86)	73
Fig. 4-30 Total Pressure of Distribution (L = 350mm D _s : D _h = 1 : 1.86)	74
Fig. 4-31 Mean Velocity Vector by PIV	78
Fig. 4-32 Mean Total Kinematic Energy by PIV	80
Fig. 4-33 Turbulent Kinetic Energy by PIV	81
Fig. 4-34 Flux Efficiency	83

Nomenclature

a	: Duct half-width (mm)
b	: Duct half-height (mm)
D_s	: Pipe diameter (mm)
D_h	: Hydraulic diameter ($4ab/2(a+b)$ mm)
f	: Frequency of oscillation
g	: Gravitation (m/sec^2)
L_e	: Entrance length (mm)
$M \times N$: Length of test section (mm \times mm)
p	: Pressure (N/m^2)
$f(i,j)$: Grey level in the 1st frame
\bar{f}	: Average Grey level in the 1st frame
$g(i,j)$: Grey level in the 2nd frame
\bar{g}	: Average grey level in the 2nd frame
Re	: Reynolds number
t	: Time (sec)
u, v, w	: Velocity components in x, y and z-axis
x, y, z	: Rectangular coordinates of test section
Q	: Flow rate of volume (l/s)
\dot{m}	: Mass flow rate (m^3/s)
v	: volume (m^3)

Greeks

γ_{air}	: Specific weight of air (N/m^3)
μ	: Coefficient of viscosity ($N \cdot sec/m^2$)
ν	: Coefficient kinematic viscosity (m^2/sec)
ρ	: Density (Kg/m^3)
τ	: Shearing stress (N/m^2)

Subscripts

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

Superscripts and others

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

ABSTRACT

A Study on the Flow Characteristics of Driven Duct of Position Change of Jet Pump

Jang Hyun-jun

Advisor : Prof. Lee Haeng-nam

Department of Mechanical Engineering

Graduate School of Chosun University

A jet pump is a fluid carrying device which spouts fluid of high pressure from a driving engine pipe and absorbs fluid of high pressure whose pressure is increased through exchange of momentum with surrounding gas of low pressure.

It is applied for various types of industries such as heat engines, water power and thermal power plants, ducts for air conditioning, chemical and petroleum chemistry, food and environment industry in that it provides smooth operation in absorbing solid as well as fluid and gas.

Vapor-vapor jet pump are widely used for absorption, mixing and dehydration in industrial fields and fluid-gas jet pumps have been considered most important for air conditioners to control a variety of harmful gases and to create pleasant environment of structures.

Jet pumps can be easily constructed and installed irregardless of size of systems, can be easily used at the places involved in fluid and have little need of maintenance, and its expense is reasonable.

This study is to identify floating characteristics of jet pumps, mean velocity, distribution of total pressure through CFD analysis. For the purpose, it changed the ends of driving duct with diameter ratio of 1 : 3.21, 1 : 2.25, and 1 : 1.86, found optimal points of driving engine ducts in each diameter ratio and conducted the analysis through PIV

experiment. The results are presented as follows:

- (1). When the ends of each driving duct with diameter ratios of 1:3.21, 1:2.25 and 1:1.86 were placed in 1.333, 1.213 and 1.133, the largest effect of absorption was found, but the effect was not related to velocity change.
- (2). For velocity distribution of the main duct when driving duct were placed at optimal points according to diameter ratios, more than 33% the velocity at the wall increased
- (3). This study analysed PIV at optimal points according to diameter ratios of jet pumps and found that CFD flowing is consistent with PIV flowing. As the diameter of driving duct increased, a large eddy flow occurred, which caused decreased efficiency. It was found that the efficiency decreased as the size of driving duct increased in the results of CFD. Through this result, we found that the results of CFD were consistent with those of actual PIV test.
- (4). For increased efficiency of flow quantity of jet pumps, we have to find optimal points of driving duct at each diameter ratio. At optimal points, flow quantity efficiency as well as absorption effect was the highest.
- (5). When the end of driving duct was located in the center of the absorption duct, average 11% of efficiency decreased compared to the case that it was placed at the optimal point. When it was extended over optimal point, mean 23% of efficiency deceased. As the driving duct was longer, flow quantity efficiency was lower, and when the end of driving duct was placed at optimal point, flow quantity efficiency was the best.
- (6) When a diameter condition of driving duct was 1 : 3.21, the efficiency was the best, and as inlet velocity was faster, the efficiency increased. The flow quantity efficiency of 1 : 3.21 was 32% higher than that of 1 : 2.25, and the flow quantity efficiency of 1 : 3.21 was 46% higher than that of. As the ratio of the expanded duct to driving duct increased, the efficiency decreased.

第 1 章 序 論

第1節 연구 배경

에너지 효율을 증대시키기 위한 노력은 오늘날과 같은 산업사회를 구축하였으며 이에 대한 연구는 끊임없이 계속되고 있다. 에너지 효율을 증가시키기 위한 한 예로서 분사펌프(jet pump)는 산업현장에서 흡수, 혼합, 탈수 등의 목적으로 사용되고 있을 뿐 아니라, 주거환경의 90%를 차지하고 있는 건축물은 초고층, 대형화로 인해 쾌적한 환경을 조성하기 위한 공기조화 기술에서도 가장 중요한 사항으로 연구되고 있다.

분사펌프(jet pump)는 고압의 유체를 구동관로에서 분출시켜, 그 주변의 저압기체와 운동량 교환을 통하여 저압의 유체를 보다 높은 압력까지 상승시켜 흡인되는 원리를 이용한 수송장치로서 기계적 운동부분이 없기 때문에 고장이 거의 없다. 액체, 기체는 물론 고체가 혼입하여도 작동상 별다른 무리가 없다는 점에서 열기관, 수력·화력 발전소, 공기조화 덕트, 석유화학, 식품공업, 환경산업 등 많은 산업분야에 적용되고 있다. 분사펌프는 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.

이러한 분사펌프에 관한 사용으로서, Chen과 Hsu¹⁾는 냉동장치에 적용하여 높은 온도 쪽에 보일러를 첨가하여 분사펌프를 압축기 대신 사용하였다. Fluegel²⁾은 액체-액체 분사펌프의 유동특성을 베르누이 방정식과 운동량 방정식을 적용하여 기본적인 해석방법을 제시하였으며 증기-증기 분사펌프의 각각의 상태점을 엔탈피-엔트로피 선도로 나타내었다. Sun and Eames³⁾는 냉동시스템에서 이중 증발기의 출구에 분사펌프를 설치하여 압축일을 줄여 성적계수를 향상 시킬수 있음을 이론과 실험을 통해 분석하였다. 구동유체와 흡입유체의 혼합에 관한 이론적 연구를 중점적으로 수행하였다. 그 외 Witte⁴⁾에 의한 액체-가스 분사펌프에 대한 이론적인 설계방법, Biswas and Mitra⁵⁾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 행하여지는 문제점을 가지고 있다. 실험적인 방법으로서, 피도관, 열선유속계, 유량계, LDV 등이

사용되어왔는데, 이러한 실험 방법들은 국부적인 몇몇 위치에서 속도나 압력 값을 제공하였고, 유동전반에 대해 어떠한 영향을 미치지 않았다고는 생각할 수는 없으며, 자연계에서 거의 일어나는 비정상, 난류유동에 대한 공간변화와 이에 대한 유동 패턴의 해석을 하기에는 거의 불가능하다고 볼 수 있다. 하지만 컴퓨터를 비롯한 하드웨어의 급속한 발달과 디지털 화상 처리기법의 발전에 힘입어 최근의 실험 방법으로 입자 영상유속(Particle Image Velocimetry, PIV) 실험 기법이 개발되어 유동장 정보를 정량적으로 얻을 수 있으며, 유체의 기본 물리량을 동시다점으로 측정하여 연구할 수 있게 되었을 뿐만 아니라 비정상적인 유동패턴을 가시화시킴으로서 유체 유동에 대한 전반적인 해석이 가능하게 되었다.

CFD란 유체역학과 수치해석을 병합시켜 수학적으로 풀기 어려운 비선형 편미분 방정식들의 근사 해를 구하는 학문으로서 컴퓨터의 처리속도와 용량이 증가함에 따라 발달된 수치해법을 조합하여 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)은 다양한 정식화 기법을 적용하였다. 모든 유동장 해석 연구에 수행되어지며 실험으로 얻기 어려운 유체역학 문제를 해결하고, 실험값과 비교 / 분석할 수 있는 미래의 해석 기법으로 인식되고 있다. 컴퓨터를 이용한 수치 해석적 방법은 많은 비용과 장시간이 사용되는 반면 실험에 의한 방법에 비해 빠르고 경제적인 장점이 많아 산업분야에 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.

따라서, 본 연구에서는 기존의 방법보다 더욱 발달된 실험기법을 이용하여 전산유체역학을 이용하여 데이터를 획득하여 유체유동에 대한 전반적인 내용을 분석하고, 이 데이터값을 검증할 만한 자료로서 PIV실험 이용하여 데이터 값의 타당성을 점검하여 주어진 문제인 분사펌프의 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 분사펌프 장치는 단순 압축이나 진공장치로서가 아닌 펌프 및 기계장치들을 대응할 수 있는 장치로 적용하는데 필요한 자료를 제공하고자 한다.

第2節 연구의 목적

디퓨저(Diffuser)를 사용하는 일반적인 확산펌프설비의 확산부분 및 챔버(Chamber)를 개발하여 기존 펌프에 적용시켜, 펌프의 효율을 증대함은 물론, 슬러지를 여과하고, 송출구경이 큰 경우에도 적용이 가능하게 하는데 있다. 유체의 이송에 대한 이론 및 기술적인 발전은 압력수두와 속도수두를 변환하는 방법과 펌프의 여러 효율을 증가시키는 방법으로 제트펌프와 확산펌프가 이용되고 있다. 분사펌프(jet pump)의 경우 압력을 증가시켜 속도를 배가시키면 전수두는 속도의 제곱에 비례하므로 전양정 또한 속도의 제곱에 비례하게 된다. 그러나 이 경우 제트효과를 만족시키기 위하여는 반드시 일정한 운동에너지 지식에 따른 관내경을 작게하여야 하므로 대구경에서는 송출압력을 높게하는 데는 많은 동력을 필요로 하기 때문에 무리가 따른다. 종래의 확산펌프의 유체이송은 L자형 구조로 인하여 양정효율이 저하되며, 기포발생 및 슬러지가 증가될 경우에는 관내 송수가 원활치 못하며, 특히 2곳 이상에서 원수를 취수하는 경우, 취수량에 따라 펌프의 특성곡선이 다른 2개의 펌프를 연합 운전시 압력의 차이가 생길 경우 저압측의 펌프에 역류가 생겨 성능에 큰 영향을 미친다. 이러한 L자형 구조의 송수관을 직선형으로 바꿔 기포 및 슬러지가 많이 포함된 유체의 이송을 원활하게 하고, 특히 취수량의 차이로 배관내의 차압이 발생하는 경우에도 입구측 플랜지 내부에 장착된 확대관 주변의 jet slide에 형성되는 진공압으로 상호다른 차압의 배관수도 원활히 혼입되었다. 과부하로 저압측의 펌프가 멈추거나 캐비테이션 현상이 발생되지 않아 효율을 증대시킬 수 있을 것이며, 여기에 슬러지 분리장치를 부착하여 슬러지 및 부유물을 처리할 수 있는 장치를 부가적으로 설치할 수도 있을 것이다. 이 장치는 종래의 원심 분리식 슬러지 분리장치가 부유물이나 모래가 자주 막히는 단점을 보완하여 원통형 챔버의 내벽을 따라 수류가 회전되게 펌핑시켜, 원심 속도가 느린 챔버의 중심수류에 배치된 확대관을 통해 정수된 유체만 챔버 상층으로 분리해 낼 수 있는 슬러지 분리장치이다. 이 장치를 확산펌프에 부착한 것으로서, 확산펌프 본체는 입구측 플랜지로 유입하게되는 배관수가 확산펌프 몸체 내경의 출구측 플랜지에 근접된 확대관을 통해 배출되는 순간 배관수의 수압이 확산되어 진공상태가 되고, 이러한 진공상태는 확대관 송출구경 주변의 제트 슬릿 주변 배관수가 자기흡입 방식으로 수류가 형성되었다. 확산 펌프 몸체에 직각으로 분기 형성된 흡입관을 통해 유입되어, 입구측 플랜지와 동일선상에 있는 출구측 플랜지로 배출되는 배관수와 혼입되어 일반 급수펌프의 양정력을 크게 증진하는 효과가 있다. 확산펌프에 부착할 슬러지 분리는 별도의 구동장치

를 공급하지 않고, 챔버로 유입된 수류가 일정방향으로 관내벽을 따라 회전되게 유도시켜, 비중이 무거운 현탁 슬러지는 아래로 퇴적 분리시킴과 동시에 비중이 가벼운 부유물은 챔버 상부의 스크린과 여과재에 의해 여과 흡수되어 배출 되게 하였다. 챔버의 중심수류에 배치된 확대관에 의해 정수된 물은 챔버 상승으로 흡입분리하는 장치로서 내부구조가 간단하며 역세척이 필요치 않으며, 슬러지 및 부유물을 처리하기 위해 별도의 응집재를 사용하지 않게 하며, 설치면적이 적으면서도 유지 가동비가 거의 들지 않게하고 경제적으로 운전되는 특징을 가진다. 이와 같은 장치를 사용할 때 산업상 미치는 효과는 기존 펌프와 비교시 단위 무게당 발생 수동력 증대로 설비 면적이 축소되어 설비비가 절감 되고 있다. 유지관리 및 기기의 소형화에 따른 비용의 절감으로 가격 경쟁력을 향상시키고, 펌프 뿐만 아니라 공기조화에 응용이 가능하여 건축구조물의 획기적인 에너지 절감으로 모든 경제 분야에 크나큰 영향을 미칠 것으로 생각된다. 학문적 가치로서는 분사펌프 원리를 이용한 슬러지 분리형 확대관로에 대한 이론적 뒷받침과 전산유체역학을 통해 Pipe의 최적위치를 찾고, 그에 따른 데이터 값을 표준화하고, PIV를 통해 실제실험을 통해 데이터값의 타당성을 규명하여 유체이론을 보다 체계적으로 습득하여 능률적이고 체계적으로 확산펌프에 대한 이해를 도울수 있을 것으로 확신한다.

본 실험에 사용된 분사펌프(jet pump)의 모델은 Fig. 1-1과 같다.

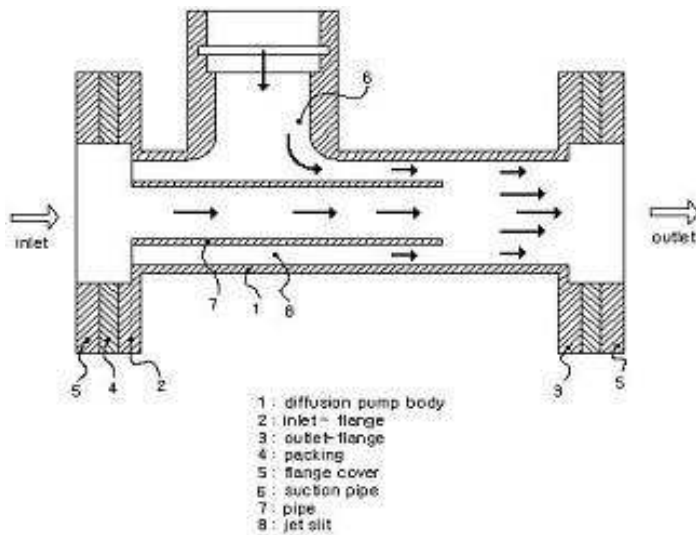


Fig. 1-1 Jet pump Model

第 2 章 理論的 背景

第1節 Jet pump의 이론식

1. Jet pump내의 유동 지배방정식

Fig. 2-1은 이론에 적용하게 될 분사펌프 내의 관로 명명에서 속도 V_1 을 운반하는 관로를 구동관로, 분지부 형태를 가지고 있고 V_2 를 유발하는 관로를 흡입관로, V_1 , V_2 가 서로 혼합되는 관로를 확대관로로 정하면, 혼합(확대)관로와 흡입관로, 구동관로의 조합인 Jet pump에 연결된 혼합영역(Mixing Area)에 대한 유동특성을 이론적으로 규명했다. 본 연구에 적용한 좌표계를 Fig 2-1에서와 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 , 압력 p_2 는 p_1 보다 크다.

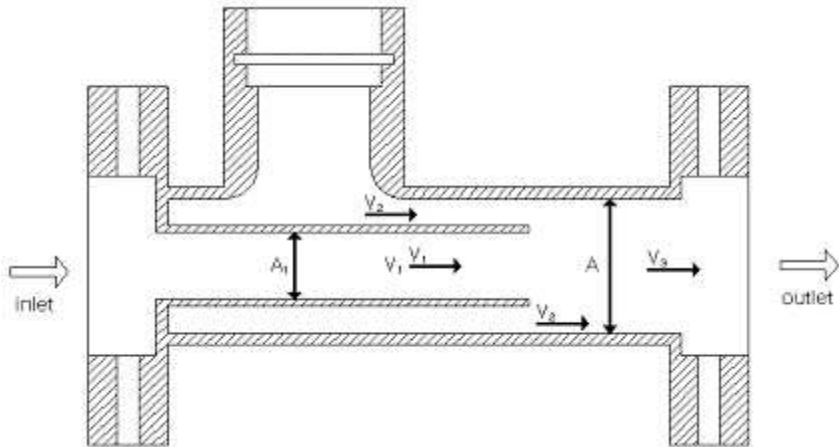


Fig. 2-1 Velocity Components in jet pump

압력상승의 크기 $p_2 - p_1$ 은 Fig 2-1에 보여진 검사체적 내에 있는 유체에 질량과 운동량 보존을 적용함으로써 얻어지며, 속도 V_2 와 V_1 및 면적비 A_1 / A 에 의존한다.

구동유체와 흡입되는 유체가 비압축성이고 같은 밀도를 가진 경우를 고려해 보면, 검사표면을 가로지르는 유체의 정상유동에 대해서 질량보존의 법칙을 적용하면,

$$\rho A V_3 = \rho(A - A_1) V_2 + \rho A_1 V_1 \dots\dots\dots(2-1)$$

이 된다.

분사펌프 내의 검사체적에 대하여 선형 운동량 방정식을 적용하면,

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

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 유체의 외력을 가한다. 이러한 힘 외력 F_{ex} 를 우변에 $\sum F_{ex}$ 항을 더해야만 한다.

따라서 위의 선형운동량 식은

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

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,

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

이 된다.

이때 최대 압력상승은 V_1 의 속도로부터 $V_3 = V_1 A_1 / A$ 로 감속하는 제트의 비점

성 유동에 대한 것과 $(\rho V_1^2 / 2) (1 - A_1^2 / A^2)$ 의 압력상승이다. 이 압력상승으로 식(2-3)을 나누면 Ejector 식에 대한 무차원 형태를 얻는다.

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

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

Jet pump는, 제트 공급에 필요한 것보다 낮은 압력이지만, 제트에 의한 유량 ($V_1 A_1$)을 공급하는데 필요한 것보다 더 큰 체적유량 ($V_2 [A - A_1]$)을 낼 수 있다.

第2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, $1G(=10^9)$ FLOPS (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 와운동구조(Structure of vortex motion)를 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 stokes근사나, 그 점근 전개를 이용하는 Oseen 근사를 생각해내게 되었다. 큰 레이놀즈수의 유동을 명확하게 하기위해 점성의 영향을 벽면 가까이에 한정시킨 경계층 이론(Boundary Layer Theory)을 만들어 내었다. 이 경계층과 그 외측 유동을 표현하는 이상유체(理想流體, Ideal fluid)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 이다.

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(FVM)

유한체적법은 운동량 및 질량보존법칙(Conservation Principle)을 만족시키기 위해 용이하도록 적분으로 기초방정식을 이산화하는 방법이다. 구체적으로는 고려하고 있는 격자점을 중심으로 한 미소영역 내에서 방정식을 적분하고, 그 경계의 값을 인근 격자점을 이용하여 요구되는 정확도로 주어 적분식을 이산화 하는 것이다. 미소영역에서 보존법칙을 만족하는 것은 Navier-Stokes방정식 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

운동량방정식을 속도 u 를 미지수로 하여 유한체적법으로 이산화 하도록 한다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho v \cdot u) = \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu \frac{\partial u}{\partial y}) - \frac{\partial p}{\partial x} \dots\dots\dots(2-6)$$

Fig. 2-2는 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, v_J 를 정의한다. 엇갈림 격자를 취하고 있기 때문에 압력 p 는 제어체적의 경계점 w, e에서 주어지고, 속도 u 는 경계의 모서리에서 주어진다. 이때 압력과 속도

v 의 x 방향 첨자 I 는 그것들의 왼쪽에 있는 속도 u 와 일치된다. y 방향에 대해서는 압력의 위치는 속도 u 와 같으나 속도 v 는 위쪽에 있는 속도 u 의 첨자 J 에 대응된다. 비 균일한 격자간격에 대해서 도용될 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.

$$\begin{aligned}
 \int \int \frac{\partial}{\partial x} (\rho u \cdot u) dx dy &= \Delta y \int \frac{\partial}{\partial x} (\rho u u) dx = SNS(J) * [(\rho u u)_e - (\rho u u)_w] \\
 &= SNS(J) * \{0.5 * [DEN * U(I, J) + DEN * U(I+1, J)] * u_e \\
 &\quad - 0.5 * [DEN * U(I-1, J) + DEN * U(I, J)] * u_w\} \\
 &= SNS(J) * 0.5 * (GP+ \geq) * u_e - SNS(J) * 0.5 * (GW+ GP) * u_w \\
 &= CE * u_e - CW * u_w = CE * 0.5 * [U(I+1, J) + (I-1, J)] \\
 &\quad - CW * 0.5 * [U(I, J) + U(I-1, J)] \dots\dots\dots(2-7)
 \end{aligned}$$

즉 y 방향의 적분에 대해서는 평균값 y 방향의 구폭간 $SNS(J)$ 를 곱한 것으로 나타내고, x 방향의 적분은 원시함수(原始函數) $\rho u u$ 가 주어져 있기 때문에 그 적분구간의 차로써 표현되어 있다. 여기서 DEN 은 ρ 의 변수값으로 주어져 있다.

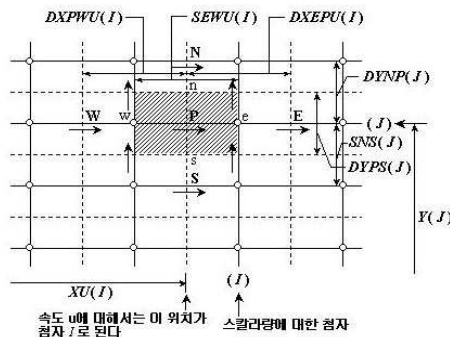


Fig. 2-2 Discretization Diagram of X-Direction Momentum Equation
 미지수인 속도 u 의 선형방정식을 얻기 위해 $\rho u u$ 의 한쪽 u 는 이미 알고 있는 값을

이용하여 계수에 포함시켜서 최종 식(2-15)을 얻는다.

대류항의 제2항도 같은 방법으로 유한체적법에 의한 이산화방정식 (2-8)을 얻는다. 속도 v 는 이 방정식에서 미지수로 취급하지 않기 때문에 계수에 포함되어 있다.

$$\begin{aligned}
 \int \int \frac{\partial}{\partial y}(\rho v u) dx dy &= \Delta x \int \frac{\partial}{\partial y}(\rho v u) dy = SWEM(\Delta) * [(\rho v u)_n - (\rho v u)_s] \\
 &= SWEM(\Delta) * [(\rho v u)_n - (\rho v u)_s] \\
 &= SEWU(\Delta) * \{0.5 * [DEN * U(I, J+1) + DEN * U(I-1, J+1)] * u_n \\
 &\quad - 0.5 * [DEN * U(I, J) + DEN * U(I-1, J)] * u_s\} \\
 &= SEWU(\Delta) * 0.5 * (GN + GNW) * u_n - SEWU(\Delta) * 0.5 * (GS + GSW) * u_s \\
 &= CN * u_n - CS * u_s = CN * 0.5 * [U(I, J+1) + U(I, J)] \\
 &\quad - CS * 0.5 * [U(I, J) + U(I, J-1)] \dots\dots\dots(2-8)
 \end{aligned}$$

점성항의 제1항에서 y 방향의 적분은 평균값에 구간간격을 곱하여 나타내고 x 방향은 원시함수 $u \partial u / \partial x$ 의 차로 나타낸다. 이 미분항의 동쪽 경계 e에서의 값은 속도 u 의 점 E, P의 차를 이 두 점간의 거리 $DXEPU(\Delta)$ 로 나눈 것으로 주어지며, 2차 정확도를 가진다. 식(2-9)은 점성항의 제1항에 대해 이산화된 식을 나타내며, 식(2-10)는 같은 방법으로 하여 얻어지는 점성항의 제2항에 대한 이산화된 식을 나타낸다

$$\begin{aligned}
 \int \int \frac{\partial}{\partial x} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} \right) dx dy &= \Delta y \int \frac{\partial}{\partial x} dx = \Delta y \left[\left(u \frac{\partial u}{\partial x} \right)_e - \left(u \frac{\partial u}{\partial x} \right)_w \right] \\
 &= SNS(\Delta) * \left[VIS * \frac{1}{DXEPU(\Delta)} * (\partial u)_e - VIS * \frac{1}{DXEPU(\Delta)} * (\partial u)_w \right] \\
 &= DE * (\partial u)_e - DW * (\partial u)_w = DE * [u(I+1, J) - U(I, J)] \\
 &\quad - DW * [U(I, J) - U(I-1, J)] \dots\dots\dots(2-9)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \int \int \frac{\partial}{\partial y} \left(u \frac{\partial u}{\partial y} \right) dx dy &= \Delta x \int \frac{\partial}{\partial y} \left(u \frac{\partial u}{\partial y} \right) dy = \Delta x \left[\left(u \frac{\partial u}{\partial y} \right)_n - \left(u \frac{\partial u}{\partial y} \right)_s \right] \\
 &= SEWU(\Delta) * \left[VIS * \frac{1}{DYNP(\Delta)} * (\partial u)_e - VIS * \frac{1}{DYPS(\Delta)} * (\partial u)_s \right] \\
 &= DN * (\partial u)_n - DS * (\partial u)_s = DN * [U(I, J+1) + U(I, J)] \\
 &\quad - DS * [U(I, J) - U(I, J-1)] \dots\dots\dots(2-10)
 \end{aligned}$$

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

$$\int \int \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) dx dy = -\Delta_y \int \frac{\partial p}{\partial x} dx = -\Delta_y [p_e - p_w]$$

$$= SNS(I, J) * [P(I-1, J) - P(I, J)] \dots\dots\dots(2-11)$$

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

$$AP(I, J) * U(I, J) = AM(I, J) * U(I, J+1)$$

$$+ AS(I, J) * U(I, J-1) + AE(I, J) * U(I+1, J)$$

$$+ AW(I, J) * U(I-1, J) + SP(I, J) * U(I, J) + SU(I, J) \dots\dots\dots(2-12)$$

$$AN(I, J) = -0.5 * CN + DN \rightarrow DN + [-CN, 0]$$

(상류차분 도식)

$$\rightarrow [-CN, DN - 0.5 * CN, 0] \dots\dots\dots(2-13)$$

(하이브리드 도식)

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

$$\rightarrow [CS, DS + 0.5 * CS, 0] \dots\dots\dots(2-14)$$

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

$$\rightarrow [-CE, DE - 0.5 * CE, 0] \dots\dots\dots(2-15)$$

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

$$\rightarrow [CW, DW + 0.5 * CW, 0] \dots\dots\dots(2-16)$$

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

$$+ (CN - CS + CE - CW) \dots\dots\dots(2-17)$$

$$SU(I, J) = SNS(I, J) * [P(I-1, J) - P(I, J)] \dots\dots\dots(2-18)$$

나. y방향 운동량방정식의 이산화

식 (2-19)의 y방향에 대한 운동량방정식으로부터 속도 v 를 구하는 이산화방정식을 전절과 마찬가지로 방법으로 만든다.

$$-\frac{\partial}{\partial y}(pv \cdot v) = \frac{\partial}{\partial x}(u \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial x}(u \frac{\partial v}{\partial y}) - \frac{\partial p}{\partial y} \dots\dots\dots(2-19)$$

Fig. 2-3과 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 x방향의 운동량방정식과 같다. 여기서는 식의 상세한 유도과정은 생략한다.

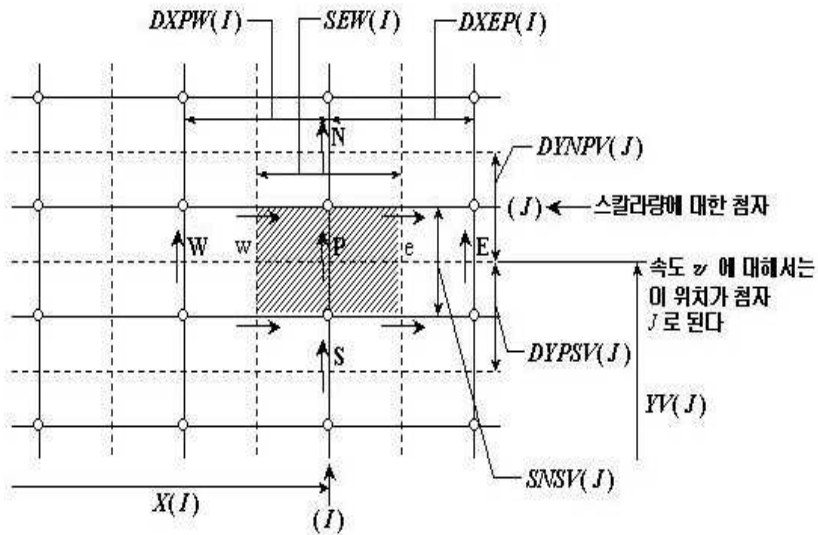


Fig. 2-3 Discretization Diagram of Y-Direction Momentum Equation

나. 연속방정식과 운동량방정식의 결합-SIMPLE 해법

연속방정식은 전술한 바와 같이 2차원 정상유동인 경우

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) = 0 \quad \text{.....(2-20)}$$

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 불리는 방법을 채용한다.

속도 u 를 구하는 x 방향의 운동량방정식의 이산화방정식(2-12)을

$$a_e u_e = \sum a_{nb} u_{nb} + b + A_e(p_P - p_E) \quad \text{.....(2-21)}$$

로 고쳐쓴다. 첨자는 연속방정식에 대한 제어체적을 설명하는 Fig. 2-4에 대응하고 있다. 속도 v 를 구하는 y 방향의 운동량방정식에 대해서도 다음과 같이 나타낸다.

$$a_n v_n = \sum a_{nb} v_{nb} + b + A_n(p_P - p_N) \quad \text{.....(2-22)}$$

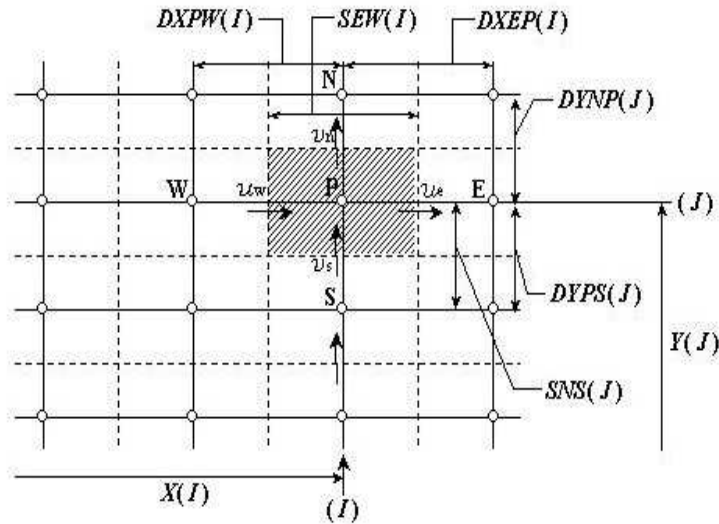


Fig. 2-4 Discretization Diagram of Continuity Equation

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

$$a_e u_e^* = \sum a_{nb} u_{nb}^* + b + A_e(p_P^* - p_E^*) \quad \text{.....(2-23)}$$

$$a_n v_n^* = \sum a_{nb} v_{nb}^* + b + A_n (\dot{p}_P^* - \dot{p}_N^*) \quad \text{.....(2-24)}$$

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

$$p = p^* + p' \quad \text{.....(2-25)}$$

$$u = u^* + u' \quad \text{.....(2-26)}$$

$$v = v^* + v' \quad \text{.....(2-27)}$$

의 관계식을 정의한다. 이 세 식을 식(2-21), (2-22)에 대입하여 각각 식(2-23), 식(2-24)로 빼면

$$a_e u_e' = \sum a_{nb} u_{nb}' + A_e (\dot{p}_P' - \dot{p}_E') \quad \text{.....(2-28)}$$

$$a_n v_n' = \sum a_{nb} v_{nb}' + A_n (\dot{p}_P' - \dot{p}_N') \quad \text{.....(2-29)}$$

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

$$u_e' = d_e (\dot{p}_P' - \dot{p}_E'), \quad d_e \equiv A_e / a_e \quad \text{.....(2-30)}$$

$$u_n' = d_n (\dot{p}_P' - \dot{p}_N'), \quad d_n \equiv A_n / a_n \quad \text{.....(2-31)}$$

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

$$u_e = u_e^* + d_e (\dot{p}_P' - \dot{p}_E') \quad \text{.....(2-32)}$$

$$u_n = u_n^* + d_n (\dot{p}_P' - \dot{p}_N') \quad \text{.....(2-33)}$$

연속방정식(2-21)을 제어체적에 걸쳐서 적분하면

$$[(pu)_e - (pu)_w] \Delta y + [(pu)_n - (pu)_s] \Delta x = 0 \quad \text{.....(2-34)}$$

으로 되고, 이 식에 식(2-30), 식(2-31) 및 u_w, u_s 에 관한 동등한 식을 대입하여, 다음 식과 같은 압력 보정량 p' 에 관한 압력 보정식을 얻는다.

$$a_p \dot{p}_P' = a_E \dot{p}_E' = a_w \dot{p}_w' + a_n \dot{p}_n' + a_s \dot{p}_s' + b \quad \text{.....(2-35)}$$

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

$$a_p = a_E + a_w + a_n + a_s \quad \text{.....(2-36)}$$

$$b = [(p u^*)_w - (p u^*)_e] \Delta y + [(p v^*)_s - (p v^*)_n] \Delta x$$

속도를 구할 때와 같이 적당한 완화법으로 p' 가 얻어질 수 있다면 식(2-35), 식(2-32), 식(2-331) 등을 이용하여 새로운 p' , u' , v' 를 구할 수 있다.

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

SIMPLE 해법에서는 정상해를 구하기 위한 시간간격을 무한대로 취해 비정상항을 생략하고 그 무한대 시각에서 음적(音的)해법으로 미지수를 구하도록 정식화되어 있다. 그러나 식(2-36), 식(2-37)에서 어떤 항을 생략한다는 근사적 방법을 도입하여 압력보정식을 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 하향이완을 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.

$$\frac{(\rho_p - \rho^0) \Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} + [(\rho u)_e - (\rho u)_w] \Delta y \Delta z + [(\rho v)_n - (\rho v)_s] \Delta z \Delta x + [(\rho v)_t - (\rho v)_b] \Delta x \Delta y = 0 \dots\dots\dots(2-37)$$

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

$$a_p P'_p = a_E P'_E + a_w P'_w + a_N P'_N + a_s P'_s + a_T P'_T + a_B P'_B + b \dots\dots\dots(2-38)$$

각각의 계수 값을 대입하면 다음과 같은 SIMPLE 알고리즘의 수식이 된다.

$$\begin{aligned}
 a_E &= \rho_e d_e \Delta y \Delta z, & a_w &= \rho_w d_w \Delta y \Delta z, & a_n &= \rho_n d_n \Delta z \Delta x \\
 a_s &= \rho_s d_s \Delta z \Delta x, & a_t &= \rho_t d_t \Delta x \Delta y, & a_B &= \rho_b d_b \Delta x \Delta y \\
 a_P &= a_E + a_w + a_N + a_s + a_T + a_B \\
 b &= \frac{(\rho_P^0 - \rho_P) \Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} + [(\rho u^*)_w - (\rho u^*)_e] \Delta y \Delta z + [(\rho v^*)_s - (\rho v^*)_n] \Delta z \Delta x \\
 &\quad + [(\rho w^*)_b - (\rho w^*)_t] \Delta x \Delta y \dots\dots\dots(2-39)
 \end{aligned}$$

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

第3節 PIV 실험의 이론적 배경 및 이론식

1. PIV의 개요

유체공학에 관련된 기기의 설계나 성능향상을 위해 기본적인 전제조건은 유체의 유동특성을 파악하는 것이다. 그리고 유체계측에 있어서 속도의 계측에는 LDV, 피토크, 열선유속계 사용해 왔으며, 벽면의 정압 및 공간의 온도분포를 구하기 위해서는 압력계와 열전대를 사용하여 왔다. 점계측 속도측정기법은 신뢰성과 정도성면에서 우수한 성능을 입증되었으나 계측기법의 고유의 문제점 때문에 유동현상의 기본특성인 비정상 동시다점계측이 원리적으로 불가능하다.

유동장의 거동을 파악하기 위해서는 종래에는 눈에 잘 보이지 않는 흐름중에 추적입자를 넣고 적당한 조명을 가한 뒤에 카메라 등으로 순시 또는 시간평균 유동장을 기록하여 유체역학적인 특성을 고찰하는 작업을 가시화(visualization)라고 하는데, 지금까지의 유동가시화기법은 이해하기 쉬운 영상을 제공함으로써 비정상적인 유동장도 쉽게 이해 할 수 있는 정성적인 정보를 가지고 있지만 정량적인 정보 부족으로 역학적 해석을 하는데 어려움을 가지고 있다.

이러한 배경에서 종래의 정성적인 가시화 기법과 디지털 영상 처리기법(digital image processing)을 접목한 유체의 기본물리량을 동시다점 계측할 수 있으며, 추적입자를 감온액정입자(thermo-sensitive crystal particle)를 같이 온도에 감응하는 추적입자를 사용할 경우에는 공간의 온도분포까지 동시에 구할수 있는 PIV(Particle Image Velocimetry)가 최근에 각광 받고 있으며, 전산유체역학과 함께 유동제반 문제를 비교· 분석하여 풀어나갈 수 있는 대표적인 계측기법이라고 인식되고 있다.

PIV기본 원리는 유동장의 국소속도는 어느 한 점을 통과하는 추적입자가 미소 시간 간격동안 이동한 미소 직선거리와 방향을 알면 쉽게 구해진다. 임의의 입자운동에 요하는 시간간격 및 벡터변위의 관계로부터 구할 수 있다. 유동장에 유체와 동일한 비중을 갖는 추적입자(tracer particle)을 분포시키고 이들 입자의 순간적 위치를 시간차를 가진 두 영상 상에서 공간대응 시키는 방법에 의하여 속도벡터를 동시다점으로 구한다. 이것을 Fig. 2-5에서 보여주고 있다.

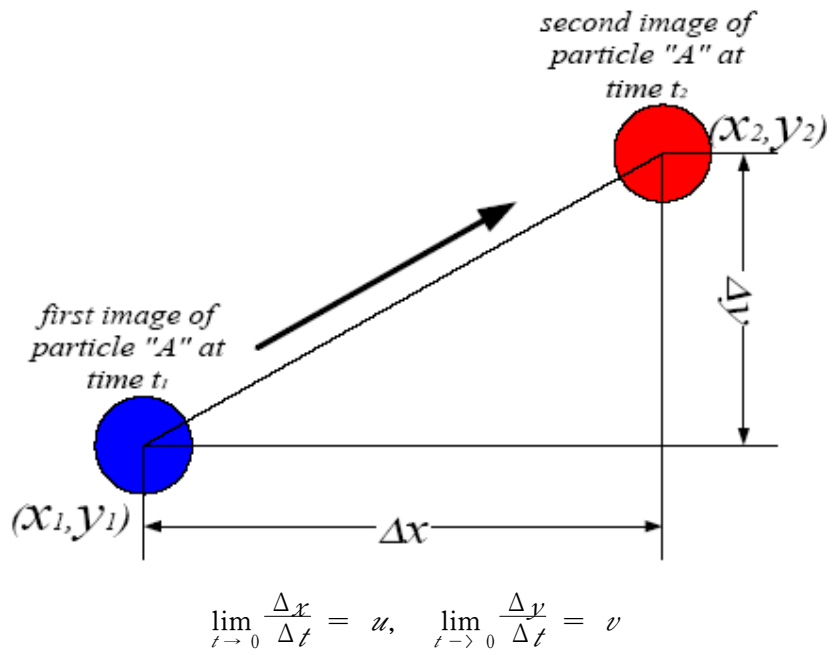


Fig. 2-5 Calculation of velocity vector by PIV

2. PIV 시스템의 구성

가. 영상의 입력 및 저장장치

본 실험에서는 영상입력장치로 1008(H)× 1018(V)의 해상도를 갖는 두 대의 CCD 카메라를 사용하였다. CCD 카메라 (charge-coupled device camera) 는 디지털 카메라의 하나로, 전하 결합 소자(CCD)를 사용하여 렌즈로 통하여 들어오는 영상의 빛에너지를 0과 1의 전기 신호로 변환함으로써 디지털 데이터 와 플래시 메모리 등의 기억 매체에 저장하는 장치로서 빛의 세기에 따라 전하의 양이 달라져 빛의 양을 검출할 수 있다.

얻어진 아날로그 신호 이미지는 DT3155 보오드를 통하여 디지털 신호화 되었다.

Fig. 2-6은 비디오 신호에서의 펄스간격과 펄스폭의 설정관계를 보여주고 있다. NTSC 방식의 TV주사에서 1초간 영상은 30프레임의 연속화면으로 구성되어 있고 한 개의 프레임은 1/60초간의 시간간격을 갖는 짝수 필드와 홀수 필드의 화면으로 구성되어 있다.

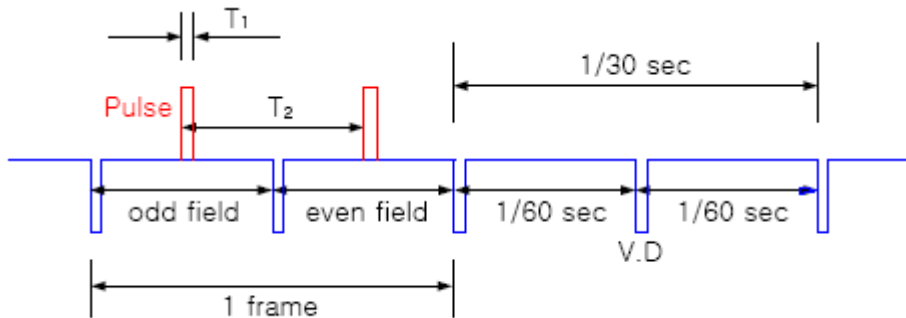


Fig. 2-6 Pulse arrangement in video signal

나. 조명 및 입자추적

유동장에서 깨끗한 영상을 얻기 위해서 출력이 높은 광원을 필요하며, 이러한 조명은 유동장에 투입된 입자를 주위의 배경보다 높은 계조치(gray level)을 갖게 하여 초기 영상을 얻는데 중요한 자료를 제공한다. 광원으로는 최대 5W 출력을 갖는 공냉식 반도체레이저 사용되었으며, 여기에서 나오는 직진광을 cylindrical 렌즈를 통하여 두께 1~3mm 전후의 sheetlight를 생성하여 측정하고자 하는 유동장에 직접 조사하였다.

PIV는 유동장에 분포된 입자의 미소시간 간격의 영상을 컴퓨터로 분석하여 속도벡터에 대한 데이터를 얻는 방법이므로 작동유체 및 계측속도의 범위에 따라서 입자를 선정하여야 하며, 입자와 작동유체의 밀도를 가능한 일치시켜 추종성(traceability)을 가져야 한다. 입자의 선택시 유동입자의 유체역학적 특성을 다음과 같이 고려해야 한다. 유체와의 밀도차가 적어 유동장에 손상을 주지 않아야 한다. 입자의 직경은 추종성을 좋게 하기 위하여 작을수록 좋으나, 입자 직경은 빛의 산란에 의해 입자 영상을 영상 입력장치로 취득할 수 있는 정도의 크기를 가져야 한다. 본 연구에서는 물과 비중이 비슷한 1.02 전후의 비중과 110 μm 직경을 가지는 폴리염화비닐(PVC)을 추적입자로 사용하여 본 실험을 수행하였다.

3. 영상처리

가. 전처리(Pre-Processing)

전처리는 영상의 질을 개선하거나 영상을 특정한 목적에 알맞도록 변화시키는 등의 영상처리를 의미하며, 배경영상 추출, 회전각 계산, 배경영상 회전보정, 해석영역 설정 및 장애물 설정 등의 동일입자추적에 필요한 제반과정을 의미한다. 동일입자추적을 하고자 하는 영상에 잡음이 포함되어 있을 경우 오류백터 발생을 유발시키는 가장 큰 원인이 된다. 잡음을 제거하는 다양한 필터링 처리가 제안되고 있으나, 배경 감산에 의한 처리가 가장 큰 효과를 얻을 수 있다. 원리적으로는 실험을 시작하기 전(입자를 유동장에 주입하기 전)에 촬영된 유동장을 배경영상으로 사용하는 것이 가장 이상적이거나, 실질적으로 실험에 임하면 불가능한 경우가 많고, 많은 시간과 노력이 요구된다. 이에 대한 대안으로 랜덤(Random)하게 기록된 수백 개의 영상을 합산 후 산술 평균하여 실제의 배경과 유사한 영상을 얻는 방법이 있다.

해석하고자 하는 순간의 영상으로부터 이 배경영상을 감산하게 되면 움직임이 없는 배경이 제거된 영상을 추출할 수 있다. 이렇게 해서 얻어진 배경영상은 배경감산(잡음 제거)과 회전각계산, 해석영역설정 및 장애물설정 등에 다양하게 사용된다.

비디오 촬영 시에 정확히 수평을 유지할 수 없으므로 대부분 카메라 축을 중심으로 약간의 회전 각도를 갖게 되며 이미지보드는 이때의 화면의 영상을 그대로 보존하게 된다. 한편, 화면의 왜곡은 좌표변환을 이용하여 보정된 영상을 구할 수 있으나 실제의 처리과정에서 화면의 팽창에 따른 불확실성 성분은 무시할 수 있을 정도로 미소하므로 고려하지 않기로 한다. 그러나 입력영상의 회전화면은 반드시 보정해 줄 필요가 없다.

회전영상의 보정방법은 Fig. 2-7과 같은 정방형 물체가 반시계 방향으로 α 만큼 회전되어 있다면, (x_1, y_1) 점을 중심으로 하여 회전된 각도 α 만큼 회전 이동시켜 주면 된다. 이 때 대상 유동장이 가로축 또는 세로축으로 하여 직선성분의 형상(예를 들면 촬영된 눈금자)을 가지고 있다면 윤곽선 검출을 한 후 최소자승법등으로 간단히 회전량을 검출할 수 있다.

만일 실험 장치에 지면과 수평 혹은 수직을 이루는 직선성분이 존재 하지 않는다면 유동장의 촬영시 선명하게 나타날 수 있는 물체(예를 들면 흰색의 눈금자등)를 부착할

필요가 있다.

식 2-40, 2-41, 2-42는 이에 관련된 좌표변환식이다.

$$\tan(\alpha) = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} , \quad \alpha = \tan^{-1}\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right) \dots\dots\dots(2-40)$$

$$x'_2 = x_1 + (x_2 - x_1)\cos(\alpha) - (y_2 - y_1)\sin(\alpha) \dots\dots\dots(2-41)$$

$$y'_2 = y_1 + (y_2 - y_1)\cos(\alpha) + (x_2 - x_1)\sin(\alpha) \dots\dots\dots(2-42)$$

(단, α : 회전각도, x'_2, y'_2 : 회전보정후의 x_2, y_2)

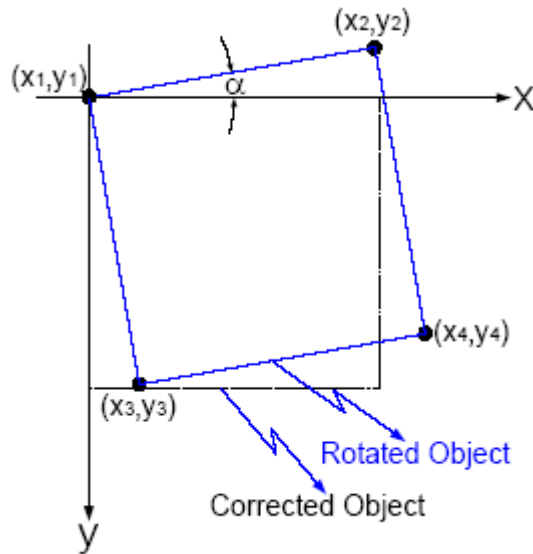


Fig. 2-7 Rotated angle of square cavity

나. 동일입자추적

Fig. 2-8과 같은 영역에서 2차원 이산 상호상관함수(Cross-Correlation Function, CCF)의 식은 다음과 같다.

$$c(s, t) = \sum_x \sum_y f(x, y) w(x-s, y-t) \quad \text{.....(2-43)}$$

단, 여기에서 미소영역 $w(x, y)$ 의 크기는 $J \times K$ 이며 $f(x, y)$ 의 크기는 $M \times N$ 이다. 또한 $s = 0, 1, 2, \dots, M-1, t = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 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.

$$\gamma(s, t) = \frac{\sum_x \sum_y [f(x, y) - \bar{f}(x, y)][w(x-s, y-t) - \bar{w}]}{\left\{ \sum_x \sum_y [f(x, y) - \bar{f}(x, y)]^2 \sum_x \sum_y [w(x-s, y-t) - \bar{w}]^2 \right\}^{1/2}} \quad \text{.....(2-44)}$$

여기에서 \bar{w} 는 $w(x, y)$ 영역내의 평균치(1회계산)이며 $\bar{f}(x, y)$ 는 w 가 현재 위치하는 곳의 평균값을 의미한다. 이 때 상관계수 $\gamma(s, t)$ 는 -1 과 1 사이의 값을 갖게 된다. 상관에 관한 식 (2-41)으로부터 알 수 있는 바와 같이 상관함수 또는 상관계수는 주파수 영역에서 FFT에 의해 구해질 수가 있다. 상호상관

PIV에서는 그림의 (x, y) 의 원점이 제 1 프레임 상에서 속도벡터를 구하기 위한 가상 격자의 중심에 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.

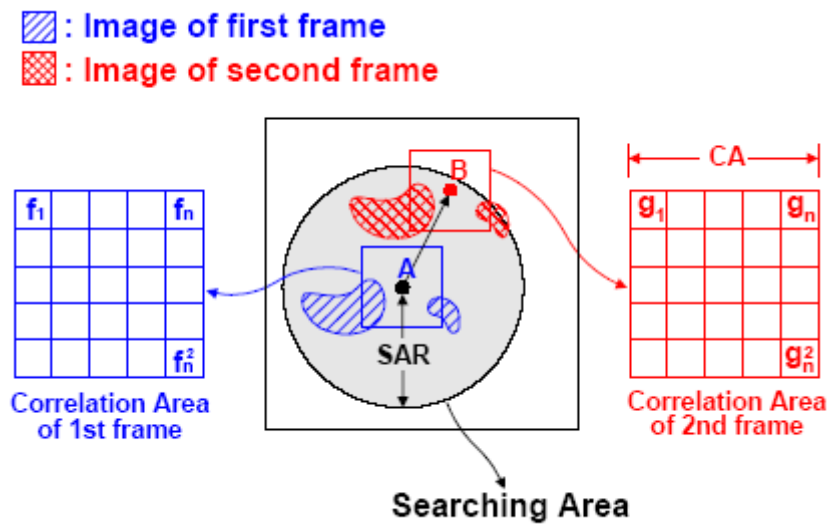


Fig. 2-8 Diagram of cross-correlation method

다. 후처리

후처리과정에서는 이상치를 판별하여 과오벡터를 제거하는 에러저거, 격자점 재배치, 픽셀 단위의 속도벡터를 m/sec 단위로 바꾸는 단위환산 등을 하였다.

에러를 제거할 때는 통계적으로 자동 에러처리를 한 후 대화형으로 수동 에러처리를 하였다.

수동 에러처리방식은 자동 에러처리방식보다 훨씬 주관적인 것으로 유동장의 분위기를 살피면서 과오벡터의 제거 및 보간을 실시하는 방식이다. 불확실성 해석시에는 수동에러처리 방식이 충분히 검토되어야 하므로 후처리에 있어서 에러제거를 원칙적으로 하였다.

PIV에서 에러를 처리하는 알고리즘은 “만약에 얻어진 벡터가 이상치 라면 국소적인 흐름은 연속의 식을 만족시킬 수 없다.” 라는 발상에서 출발하였다. 연속의 방정식을 얼마만큼 만족시키는가를 나타내는 평가함수를 의미하여 오류벡터를 분별해 내는 알고리즘 이다.

3 章 數 值 解 析 및 實 驗

第1節 실험 장치

Fig. 3-1은 본 실험을 위해 사용된 분사펌프를 보여주고 있다. 본 실험에서는 구동관로의 직경과 구동관로의 끝단의 위치 및 입구속도를 변화시키면서 구동관로로부터 나오는 유체의 속도에 의해 분지관로의 유체가 확대관로로 흡입되는 양을 분석하여 분사펌프의 유동특성을 규명하고 효율을 최적화 시키는데 그 목적이 있다. 본 실험에 사용된 구동관로는 두께 5 mm인 원형관으로서 투명 아크릴로 제작하였으며 실험시 완전발달영역 조건을 만족시켜주기 위해 입구길이 $L_e=450$ mm로 설정하였으며, 실험 조건 각각의 원형관 지름 D_h 는 14 mm, 20 mm, 24 mm이다. 흡입관로 및 확대관로

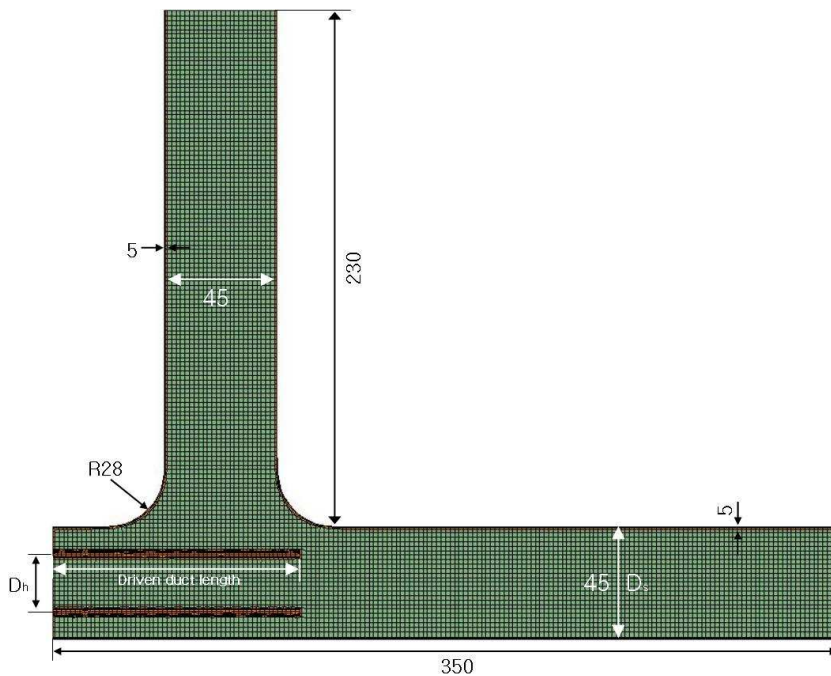


Fig. 3-1 Design Drawing는 PIV (Particle Image Velocimetry)

실험시 유동가시화를 위해 두께 5 mm, 수력직경 $D_s = 45$ mm인 정사각 덕트로 제작하였고, 확대관로의 길이는 350 mm이다.

유동특성을 규명하기 위한 실험 측정 영역은 입구에서 길이 130 mm지점, 라운딩 부분이 끝나는 지점과 출구지점, 입구에서 350 mm지점의 속도와 전압력 값을 사각덕트의 중간지점인 22.5 mm를 기준으로 평면을 측정하였으며, 입구영역에서의 유체를 일정한 유량으로 유지시키기 위해 10 W의 크기에 수조펌프를 사용하였다.

第2節 CFD 수치해석

본 연구에서는 PIV 실험과 동일한 조건으로 CFD(Computation Fluid Dynamics)분석을 이용하여 분사펌프의 구동관로의 끝단의 위치를 변화 시켜가면서 속도분포, 압력분포를 비교 및 연구하였다.

동일한 속도 조건으로부터 구동관로의 직경비를 변화시켜 흡인되는 관로내의 유량과, 출구 유량을 분석하여 주어진 조건하에서의 각각의 구동관로의 최적위치를 얻어내고자 한다.

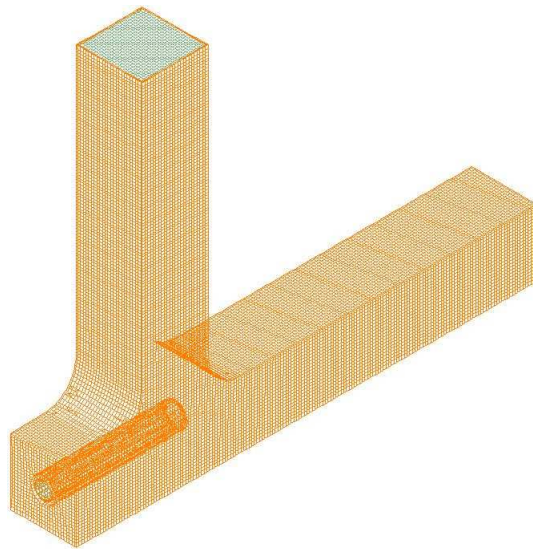
본 계산은 유체운동의 전반적 지배방정식인 연속방정식(질량보존의 법칙)과 운동량방정식의 편미분 방정식들로부터 수치해를 구하기 위하여 유체 유동해석에 많이 쓰이고 있는 유한체적법(Finite Volume Method)을 사용한 상용 코드 프로그램인 STAR-CD를 이용하여 수치해석을 수행하였으며, 주어진 관로내의 유동에 대한 Reynolds 수의 기준에 근거하여 난류로 가정하여 계산하였다. 난류모델은 k- ϵ /High Reynolds Number를 적용하였고, 해석 알고리즘은 SIMPLE 해법을 사용하였다. 계산조건은 정상상태로서 열전달과 압축성 효과를 무시하였으며, 작동 유체는 공기이며 열역학적 특성치는 물온도 20℃를 기준으로 밀도 $\rho = 997.561 \text{ kg/m}^3$, 점성계수 $\mu = 8.87 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$ 를 하였다.

본 CFD 수치해석에서 사용된 Grid는 Fig. 3-2와 같으며 주관부의 길이는 총 350 mm, 지관부 총 230 mm이며, 구동관로의 직경비와 구동관로의 길이에 따라 메시의 정도를 각각 다르게 설정하였다. 구동관로로부터 유입된유량이 흡인관로와 확대관로 사이에서 흡인이 유도되는지 단지 분지부로 유량이 흘러나가는지 알지 못하므로, 출구 쪽과 흡입 관로 쪽은 이러한 경계조건을 감안하여 Pressure Boundary를 사용하였다.

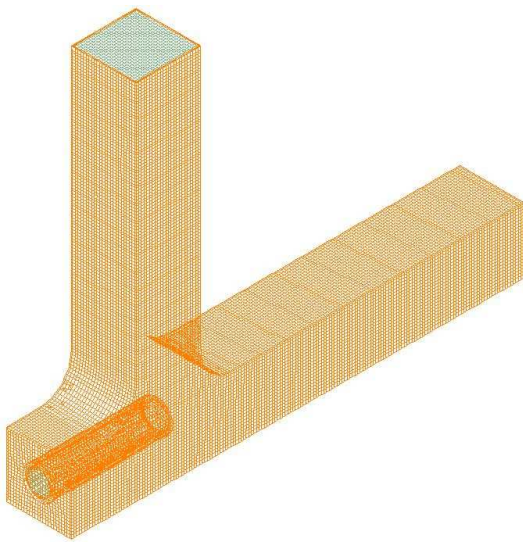
Table. 3-1은 CFD(Computation Fluid Dynamics) 해석에 적용한 해석조건으로서 확대관로의 수력직경에 대한 구동관로의 유량, 속도, Re 수 및 격자의 수를 나타내고 있다.

Table. 3-1 CFD Condition of Driving Flow

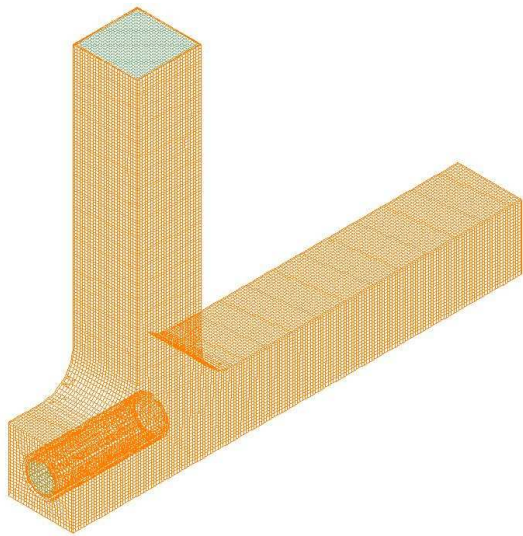
D_s/D_h	Q (m ³ / sec)	V (m / s)	Re.	Driven Duct of Position	Grid Count
1.86	4.52×10 ⁻⁴	1	26991	1	236000
				1.133	236000
				1.333	237000
				1.467	237000
	9.40×10 ⁻⁴	2.08	56142	1	236000
				1.133	236000
				1.333	237000
				1.467	237000
	1.15×10 ⁻³	2.54	68558	1	236000
				1.133	236000
				1.333	237000
				1.467	237000
2.25	3.14×10 ⁻⁴	1	22492	1	235000
				1.213	236000
				1.333	236000
				1.467	236000
	6.53×10 ⁻⁴	2.08	46785	1	235000
				1.213	236000
				1.333	236000
				1.467	236000
	7.98×10 ⁻⁴	2.54	57132	1	235000
				1.213	236000
				1.333	236000
				1.467	236000
3.21	1.54×10 ⁻⁴	1	7872	1	234000
				1.253	235000
				1.333	235000
				1.467	235000
	3.20×10 ⁻⁴	2.08	16374	1	234000
				1.253	235000
				1.333	235000
				1.467	235000
	3.91×10 ⁻⁴	2.54	19996	1	234000
				1.253	235000
				1.333	235000
				1.467	235000



(a) $D_s : D_h = 1 : 3.21$



(b) $D_s : D_h = 1 : 2.25$



(c) $D_s : D_h = 1 : 1.86$

Fig. 3-2 CFD Grid of Ejector

第3節 PIV 계측실험

Fig. 3-3은 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 유지 시켰으며 구동관로의 팬에 초음파 입자 발생기를 이용해서 수증기 입자를 송풍기에 주입시켰다. Test Section에 산란되는 입자를 가시화 시키고, 계측영역을 Sheet화 시켜 평면광을 만들어 내기 위

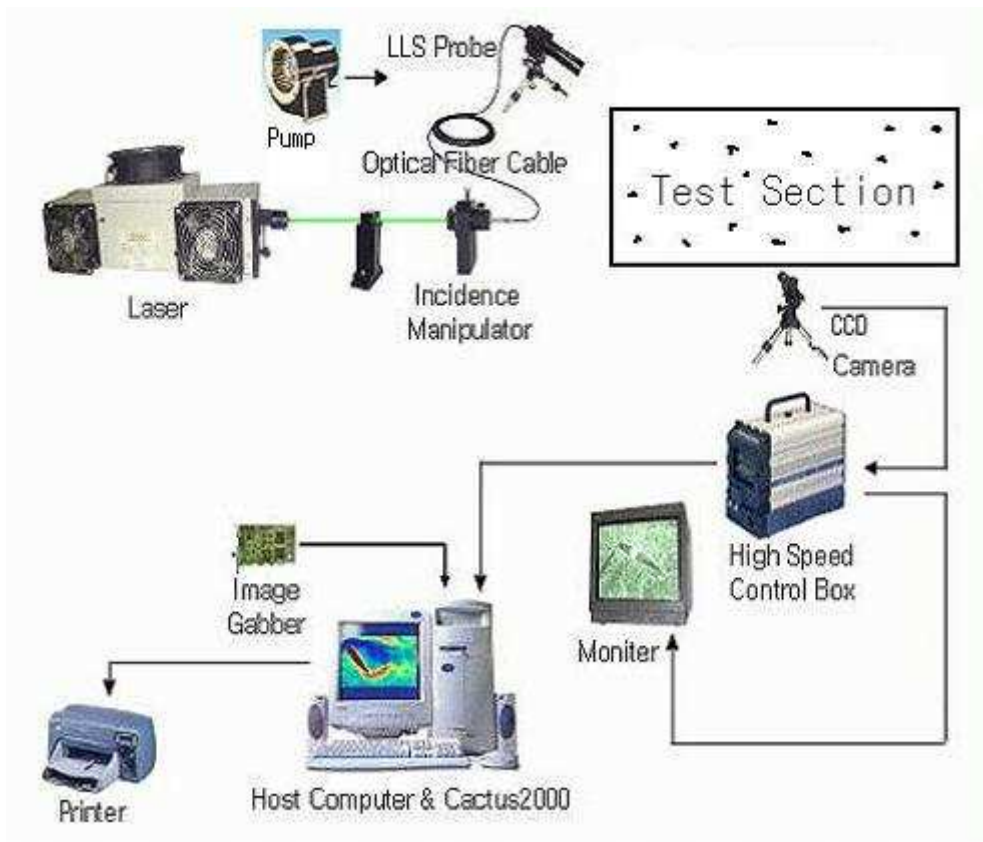


Fig. 3-3 Schematic Arrangement of PIV System

해 다이오드 레이저와 LLS Probe(Laser Light Sheet Probe)를 사용하여 두께 약 3mm의 Sheet Light를 해석영역 구간 내에 조명시켰다. 조명시킨 Test Section 구간은 고속도 카메라를 이용하여 프레임 시간을 적절히 조정하여 영상을 얻어 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 3-2에 도시하였다.

실험 온도는 상온 20℃에서 ±1℃의 온도차를 유지시켰고, 구동 유체는 물을 이용하였으며 구동관로에 수증펌프를 이용하여 유동시켰다. 고속도 카메라에 측정된 Test Section 부분은 Mixing Area 350 × 300 mm²으로 잡았으며, 속도에 대한 영향을 고려하여 고속도 카메라의 Frame 속도를 60 fps 로 설정하여 촬영하였다.

실험조건은 실제 제품에 설계되어있는 구동관로의 직경(D = 14 mm, 20 mm, 24 mm)

Table. 3-2 PIV System Visualization Equipment

	Item	Specification
PIV System Equipments	Pump	AC 220V/60Hz 10W
	Probe	KANOMAX LLS Probe
	Laser	Diode Laser
	CAMERA	KODAK ES 1.0
	Image Grabber	Radeon X1600
	Computer	Pentium IV PC (CPU 3.2 GHz RAM 256M)
	Software	CACTUS'2000 (Cross-Correlation Algorithm)

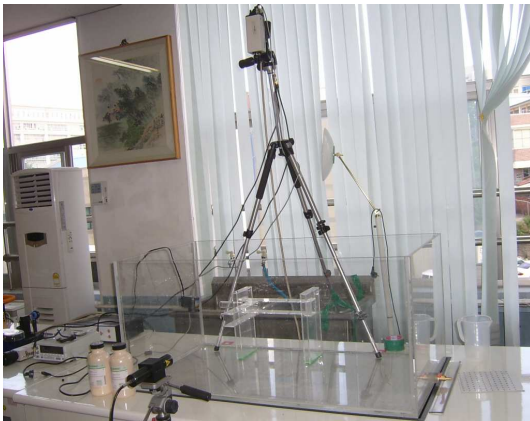
에 대해서 실행하였고, 속도에 대한 조건은 3가지로 나누어서 분석하였는데, 각각의 속도조건은 흡입되는 현상을 직접 가지적으로 확인한 후, 입구속도 조건을 각각 $V_1 = 1\text{m/s}$, $V_2 = 2.08\text{m/s}$, $V_3 = 2.54\text{ m/s}$ 로 속도를 변화시켜 가면서 Mixing Area 영역의 영상을 취득하였다. 이 때의 계산영역에 적용한 시간 평균 프레임 수는 60프레임으로 촬영된 영상은 컴퓨터 램에 일시 저장 후, 다시 컴퓨터 하드에 저장하였다. Host-Computer에 연결하여 CACTUS 3.2을 이용하여 유동특성을 해석하였다. Table. 3-3은 PIV 실험에 적용한 확대관로의 수력직경에 대한 구동관로의 유량, 속도 및 Re 수를 나타내고 있고, Fig. 3-4는 실제 설치된 분사펌프 실험장치의 사진을 보여주고 있다.

Table. 3-3 Experiment Condition of Driving Flow

D_h / D_s	Q (m ³ /s)	V_i (m/s)	Re. No
1.86	4.52×10^{-4}	1	26991
2.25	3.14×10^{-4}	1	22492
3.21	1.54×10^{-4}	1	7872



(a)



(b)



(c)

Fig. 3-4 Photograph of Experimental Equipment

第 4 章 結 果 및 考 察

第1節 CFD 결과 및 고찰

수치해석 조건으로 분사펌프 효율증가를 규명하기 위해 사용된 구동관로에 대한 확대관로의 조건비는 1 : 1.86, 1 : 1.25, 1 : 3.21으로 설정하였으며, 각각의 구동관로의 길이를 조정하여 수치해석을 수행하였다. 분사펌프의 직경비와 구동관로의 끝단의 위치변화, 입구조건을 변경하여 총 90번의 실험을 통해 각각의 직경비의 구동관로의 최적위치와 분사펌프의 최적설계를 알아 낼 수 있었다. 해석결과와 데이터 출력 구간은 입구지점으로부터 라운딩부분이 끝나는 지점인 입구지점으로 부터 130 mm Mixing Area 부분의 45×2 mm² 지점과 입구지점으로 부터 350 mm 지점인 출구부분 45 ×2 mm², 단면의 중간부분인 22.5 mm 구간의 면의 데이터 값을 출력 하였으며, 수치해석의 TEST SECTION 구간은 유동장 전영역에 걸쳐 해석을 수행하여 평균속도, 전압력 등을 연구하였다.

직경비 1 : 1.86, 1 : 1.25, 1 : 3.21에 사용된 각각의 계산결과 값은 SI 단위를 Table. 4-1과 같이 사용되었으며, 모든 영역구간은 계산의 정확성을 더 향상시키기 위해 Trimmed cell로 설계하였고, 수치해석에 소모된 계산시간은 Pentium IV PC(CPU 3.01GHz, RAM 4G)를 사용하여 3시간 정도의 시간이 소요되었으며, Solver Iteration Number는 반복변수는 1000회, 최대수렴조건 1×10^{-6} 를 기준으로 각각 실험하였다.

Table. 4-1 Units of Physical Property

Physical Property	Unit
Velocity	m/s
Pressure	Pa

1. 속도 분포

Fig. 4-1 ~ Fig. 4-9는 주관부와 구동관로의 비가 1:3.21, 1:2.25, 1:1.86 크기에 각각 구동관로의 끝단의 위치와 속도 1 m/s, 2.08 m/s, 2.54 m/s로 변화 시켰을 때, 분사펌프 관로의 중간부분인 22.5 mm를 기준으로 각각의 속도분포도의 유동특성을 나타내고 있다.

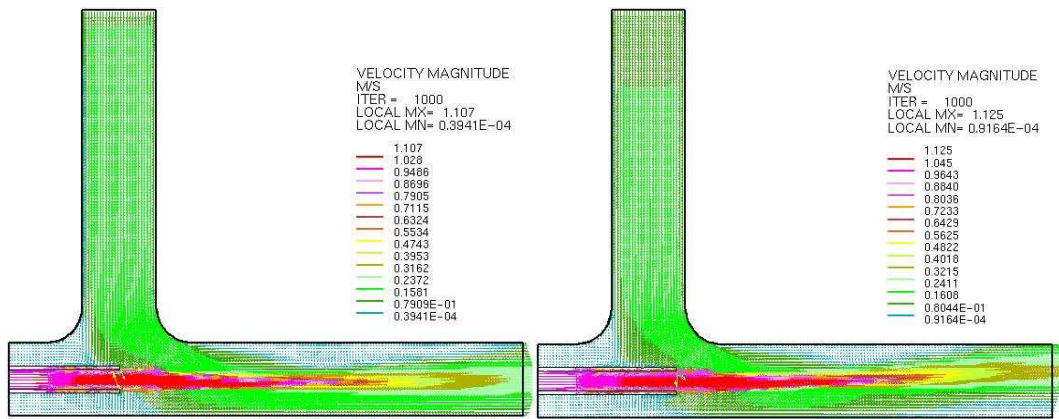
Fig. 4-1 ~ Fig. 4-3은 주관부와 구동관로의 비가 1:3.21인 분사펌프를 구동관로의 끝단의 위치와 입구속도를 변화시켜 나타낸 속도벡터분포도이다. Fig. 4-1은 입구속도가 1m/s이고, 구동관로의 위치변화에 따른 각각의 평균 속도벡터를 나타내고 있다. 속도는 동일한 입구 조건에서 구동관로의 위치가 각각 (a) 1, (b) 1.253, (c) 1.333, (d) 1.467이다. 이는 (a) 1을 구동관로의 끝단이 흡입관의 중앙에 위치하였을 때를 기준으로 하여 무차원으로 표현한 값으로 1보다 크면 구동관로가 길어진다. (c) 1.333은 구동관로의 끝단이 흡입관로의 끝단과 같다. 구동관로의 끝단의 위치가 중앙에서 길어질수록 흡입되어지는 속도벡터의 값은 커짐을 알 수 있다. 그리고 구동관로의 끝단의 위치가 출구 쪽으로 갈수록 출구 쪽의 속도가 상대적으로 위쪽으로 올라가는 것을 볼 수 있는데, 이것은 흡입관의 라운딩 처리된 부분에서 속도가 상대적으로 높아져서 출구 쪽에서는 위쪽으로 증가되는 것으로 사료된다. 구동관로의 위치가 (c) 1.333 위치 구동관로가 흡입관로의 끝단에 위치하였을 때 다른 위치에 있을 때보다 현저히 흡입되는 속도가 빨라지는 것을 볼 수 있다. 구동관로의 길이가 증가하여도 출구 쪽의 속도가 위쪽으로 올라가는 현상이 거의 없는 것으로 확인되었다. Fig. 4-2에서는 입구속도가 2.08 m/s이고, 구동관로의 위치변화에 따른 각각의 평균 속도벡터를 나타내고 있다. 속도가 증가함에 따라 흡입관을 통한 흡입되는 속도 역시 빨라지는 것을 볼 수 있다. 여기서도 구동관로의 위치가 길어질수록 출구 쪽의 속도가 상대적으로 위쪽으로 올라가는 것을 더 정확하게 확인 할 수 있다. 구동관로의 위치가 (c) 1.333 위치에서는 다른 구동관로의 위치보다 흡입되는 속도가 훨씬 크다는 것을 확인 할 수 있었고, 출구에서의 위쪽으로 올라가는 현상은 거의 나타나지 않았다. Fig 4-3에서는 입구속도가 2.54 m/s이고, 동일하게 구동관로의 위치변화에 따른 평균속도벡터를 보여주고 있다. 여기 역시 (c) 1.333 위치에서 흡입되는 속도 빠른 것을 확인 할 수 있었으며, 출구에서의 속도 분포 역시 중앙으로 균등하게 분포되는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 4-1 ~ Fig. 4-3는 분사펌프의 주관부와 구동관로의 비가 1:3.21에서의 속도와 구동관로의 위치를 변화 시켜가며 실험에 보았는데, 구동관로의 위치가 1.333인 위치에서 흡입되는 속도와 출구에서의 속도분포가 제일 좋은 것으로 확인되었다.

Fig. 4-4 ~ Fig. 4-6은 주관부와 구동관로의 비가 1:2.25인 분사펌프를 구동관로와 입구속도를 변화시켜 나타낸 속도벡터분포도이다. Fig 4-4은 입구속도가 1 m/s에 구동관로의 길이를 변화시킨 속도벡터분포도이다. 구동관로 크기가 커짐에 따라 구동관로의 끝단의 위치변화에 따른 속도벡터분포 역시 달라지는 것을 볼 수 있다. 구동관로 끝단의 위치가 (b) 1.213에서 흡인되는 속도가 구동관로 끝단이 다른 위치에서 보다 빠른 것을 확인 할 수 있다. 출구에서의 속도분포 역시 구동관로가 길어지면서 위쪽으로 올라가는 현상도 (b) 1.213에는 중앙으로 분포되는 것을 확인 할 수 있다. Fig. 4-5는 입구속도가 2.08 m/s에 구동관로의 길이를 변화시킨 속도벡터분포도이다. 위와 동일하게 (b) 1.213에 구동관로의 끝단이 위치하였을 때 흡인되는 속도벡터가 가장 크게 나타났고, 출구에서 속도벡터가 위쪽으로 올라가는 현상도 구동관로 끝단의 위치가 (b) 1.213에서 중앙으로 분포되는 것을 확인 할 수 있다. Fig. 4-6은 입구속도가 2.54 m/s에 구동관로의 길이를 변화시킨 속도벡터분포도이다. 역시 동일하게 구동관로의 끝단의 위치가 (b) 1.213이었을 때 흡인되는 속도벡터가 가장 크게 나타났고, 출구에서 속도 벡터가 위쪽으로 올라가는 현상으로 중앙으로 분포되는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 4-7 ~ Fig. 4-9는 주관부와 구동관로의 비가 1:1.86인 분사펌프를 구동관로와 입구속도를 변화시켜 나타낸 속도벡터분포도이다. Fig 4-7은 입구속도가 1 m/s에 구동관로의 길이를 변화시킨 속도벡터분포도이다. 구동관로의 크기가 커짐에 따라 구동관로의 끝단의 위치변화에 따른 속도벡터분포도 달라지는 것을 확인 할 수 있다. 여기서 구동관로의 끝단의 위치가 (b) 1.133에서의 흡인되는 속도가 구동관로 끝단이 다른 위치에서 보다 빠른 것을 확인 할 수 있다. 그에 따른 출구에서의 속도분포 역시 구동관로가 길어질수록 위쪽으로 올라가는 현상과 (b) 1.133에서도 중앙으로 분포되는 것을 확인 할 수 있다. Fig 4-8은 입구속도가 2.08m/s에 구동관로의 길이를 변화시킨 속도벡터분포도이다. 속도가 변하여도 구동관로의 끝단이 (b) 1.133인 위치에서 흡인 상태가 가장 양호한 것을 속도벡터분포를 통해 확인 할 수 있다. 마찬가지로 출구에서도 속도분포가 중앙으로 나타나는 것을 확인 할 수 있다. Fig. 4-9 역시 구동관로의 끝단이 (b) 1.133인 위치에서 흡인이 가장 빠르게 나타난 것을 확인 할 수 있었으며, 출구에서도 속도분포가 중앙에서 나타나는 것을 확인 할 수 있다.

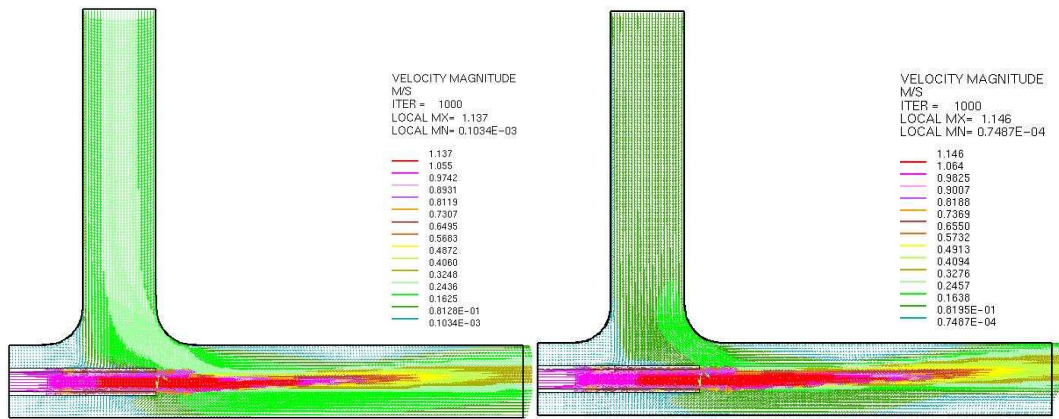
구동관로의 크기와 입구속도, 구동관로의 끝단의 위치를 변화 시키면서 유동현상을 확인하였는데, 각각의 구동관로의 크기에 흡인이 가장 좋은 구동관로의 끝단의 위치는 1:3.21는 구동관로의 끝단의 위치가 1.333이 가장 좋았고, 1:2.25에서는 구동관의 끝단의 위치가 1.213이 가장 좋았다. 그리고 1:1.86에서는 구동관로의 끝단의 위치가 1.133이 가장 좋았다. 입구 속도를 변경하여도 흡인양이 많은 구동관로의 끝단의 위치

는 같은 것을 알 수 있었다. 이는 구동관로가 길어질수록 흡인 될 때에 구동관로가 장애물의 역할이 하는 것과, 구동관로가 길어질수록 흡인되는 단면적 역시 좁아져서 상대적으로 흡인되는 양이 적어지 것으로 사료된다. 뒤로 갈수록 흡인되는 양이 적은 이유는 구동관로에서 나온 유체가 갑자기 단면적이 커지면서 속도의 손실을 많이 받아 흡인되는 양이 적어지는 것으로 사료된다. 구동관로의 끝단의 위치가 속도에서의 손실을 적게 받고, 흡인될 때의 단면적의 적당한 크기를 찾는게 중요한 것으로 생각되어 본 실험에서는 최적의 위치를 확인 할 수 있었다.



(a) 1

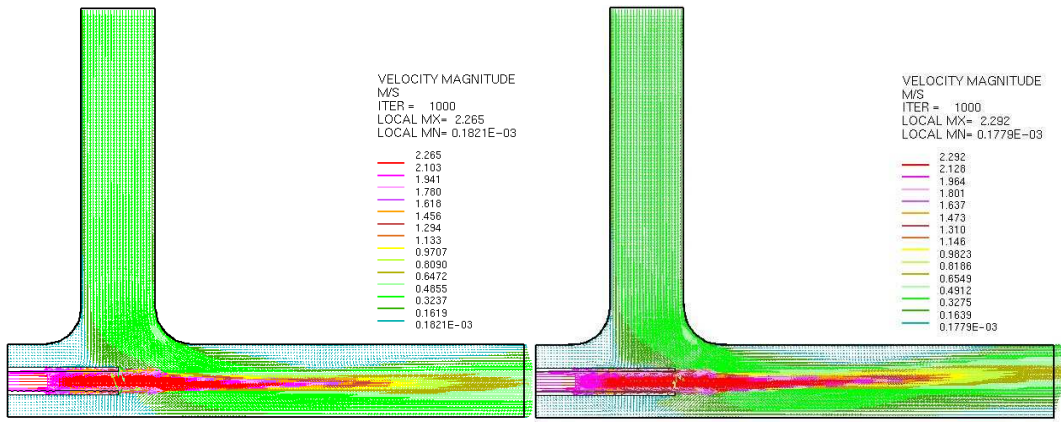
(b) 1.253



(c) 1.333

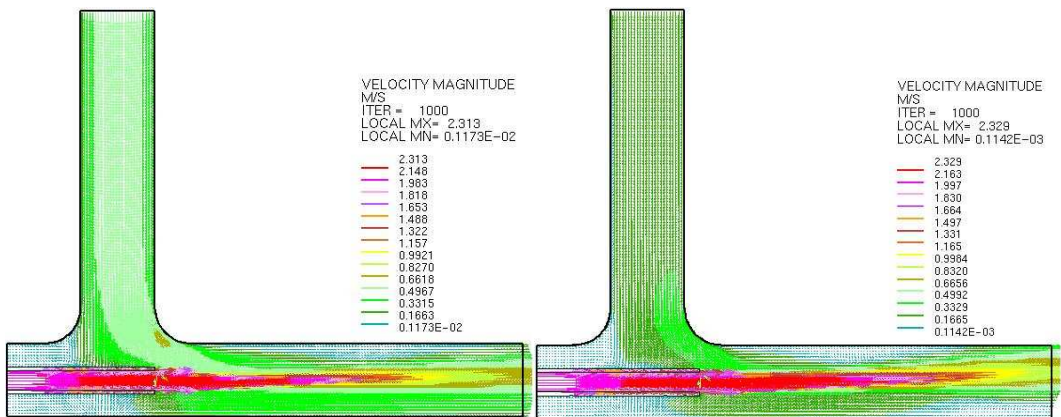
(d) 1.467

Fig. 4-1 Mean Velocity Vector of Distribution (1 : 3.21 V = 1 m/s)



(a) 1

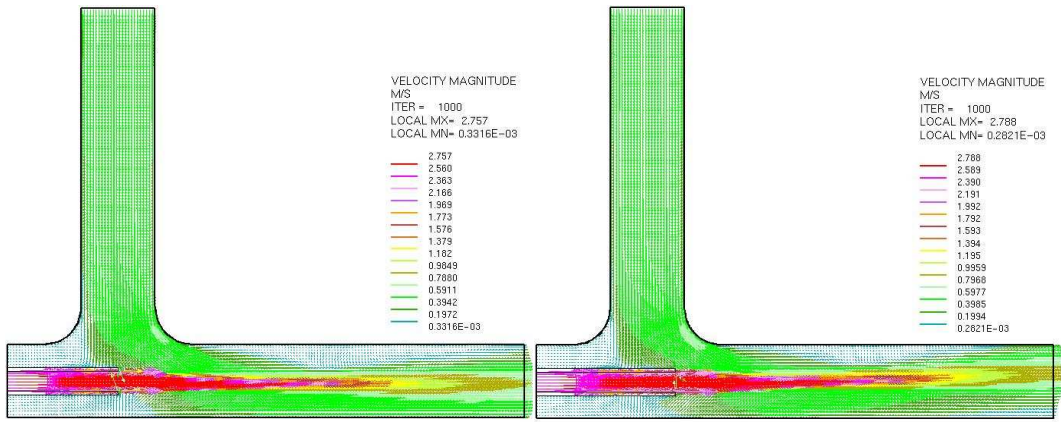
(b) 1.253



(c) 1.333

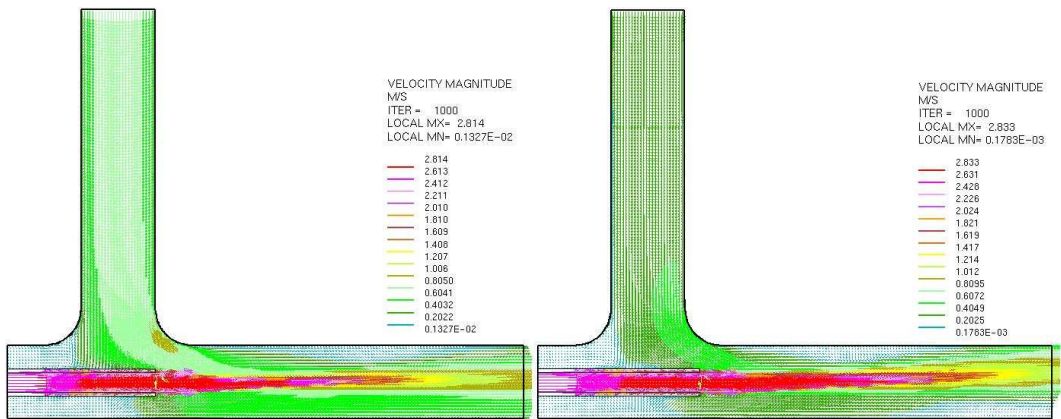
(d) 1.467

Fig. 4-2 Mean Velocity Vector of Distribution (1 : 3.21 V = 2.08 m/s)



(a) 1

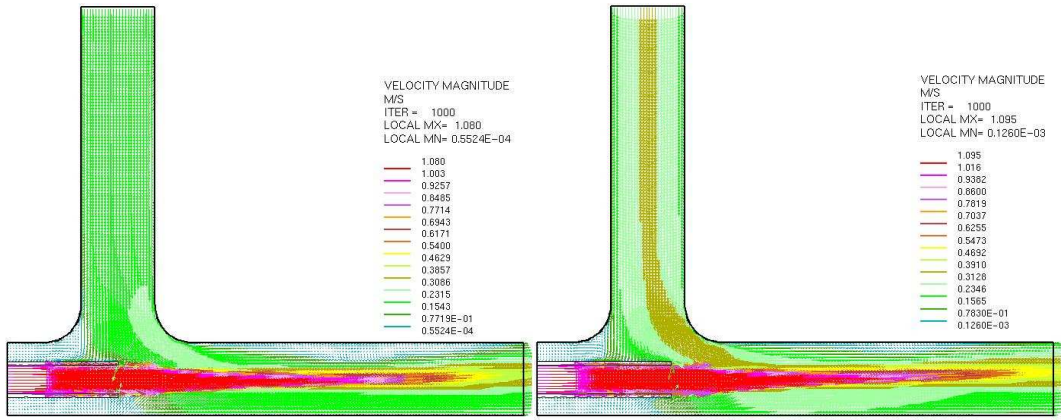
(b) 1.253



(c) 1.333

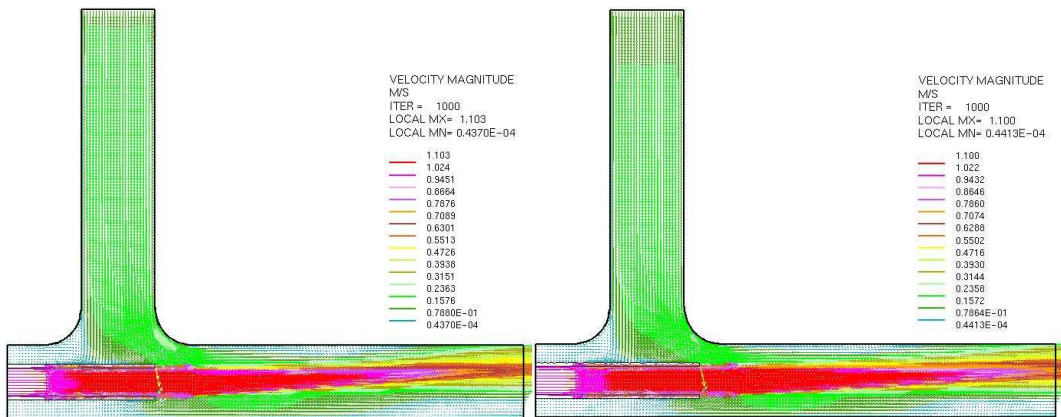
(d) 1.467

Fig. 4-3 Mean Velocity Vector of Distribution (1 : 3.21 V = 2.54 m/s)



(a) 1

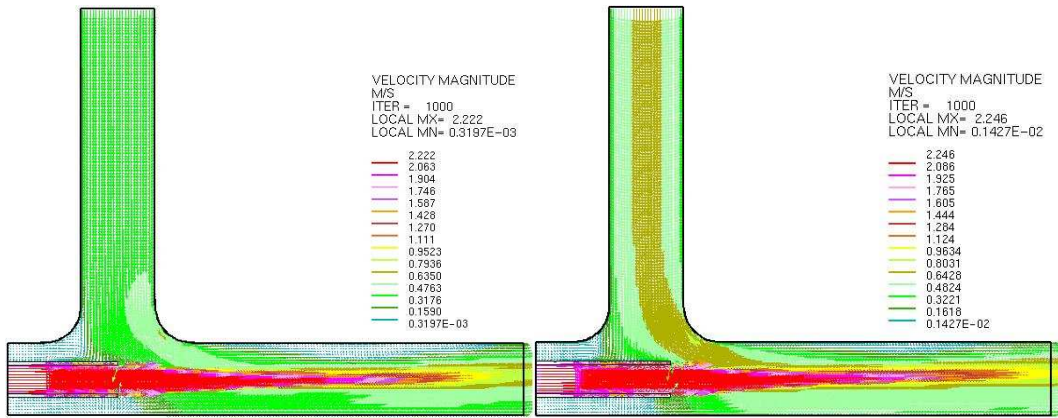
(b) 1.213



(c) 1.333

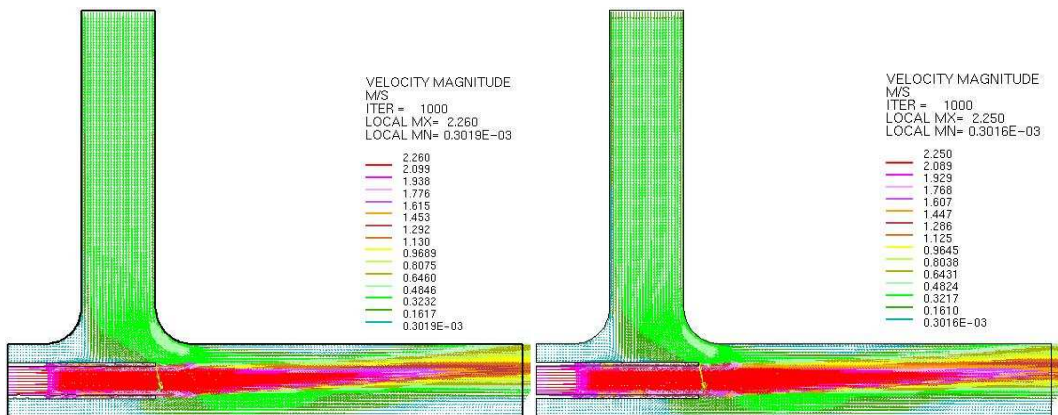
(d) 1.467

Fig. 4-4 Mean Velocity Vector of Distribution (1 : 2.25 V = 1 m/s)



(a) 1

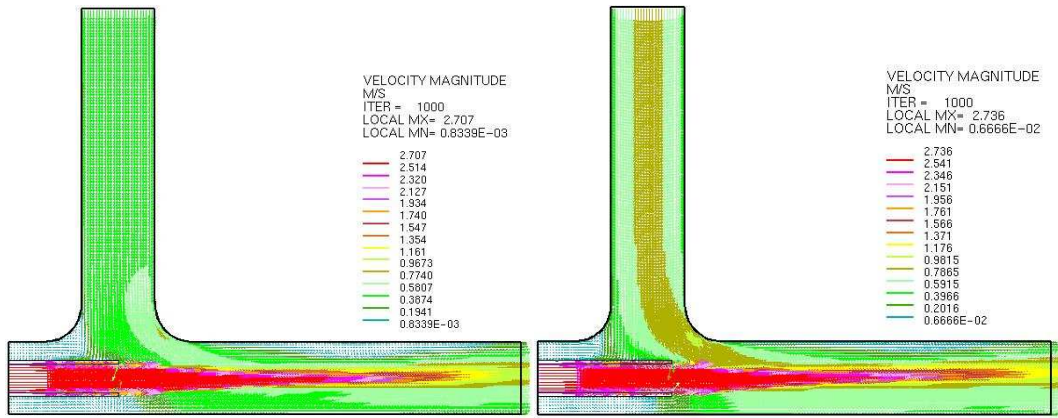
(b) 1.213



(c) 1.333

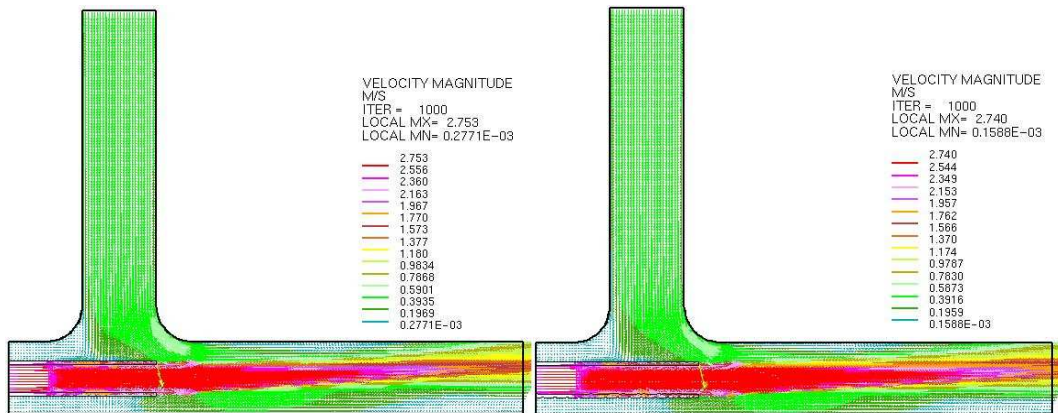
(d) 1.467

Fig. 4-5 Mean Velocity Vector of Distribution (1 : 2.25 V = 2.08 m/s)



(a) 1

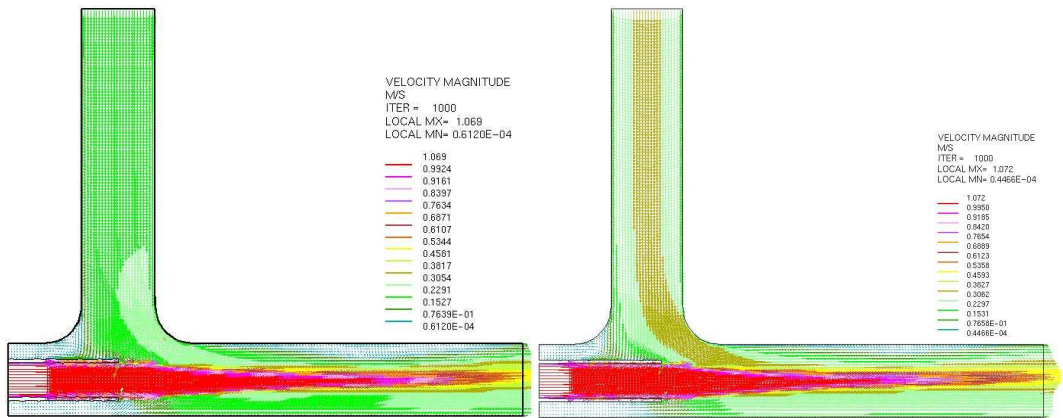
(b) 1.213



(c) 1.333

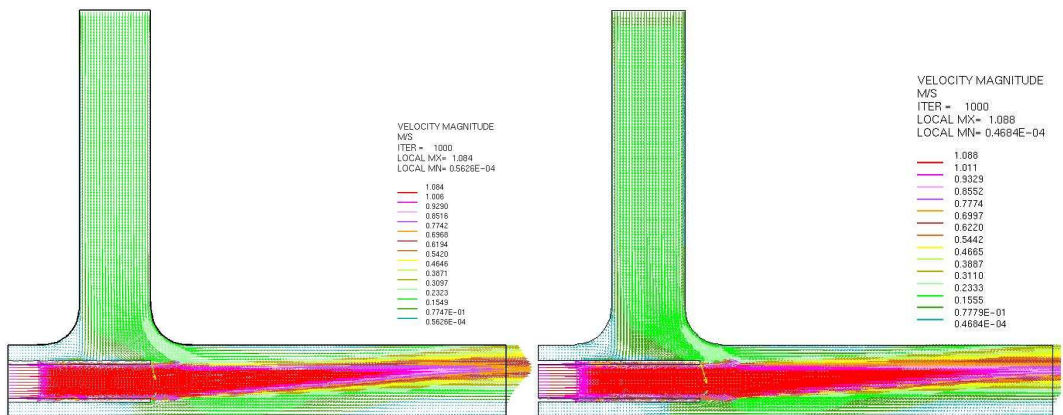
(d) 1.467

Fig. 4-6 Mean Velocity Vector of Distribution (1 : 2.25 V = 2.54 m/s)



(a) 1

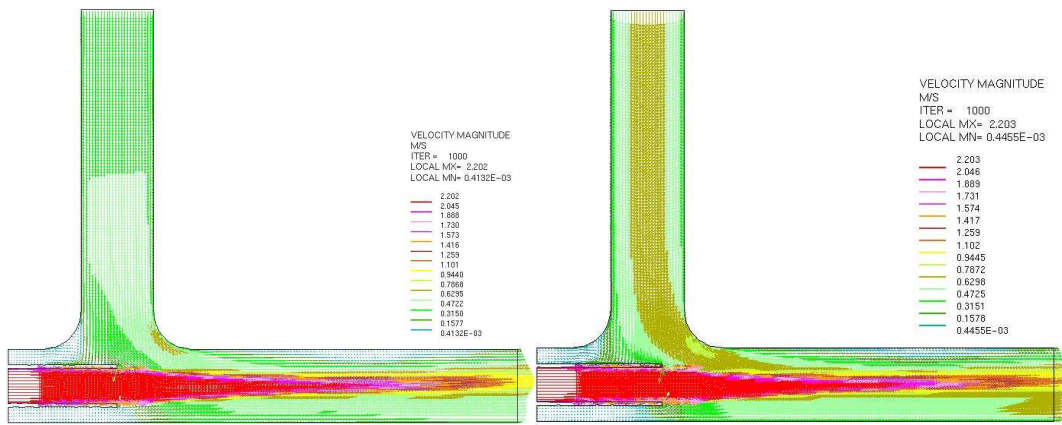
(b) 1.133



(c) 1.333

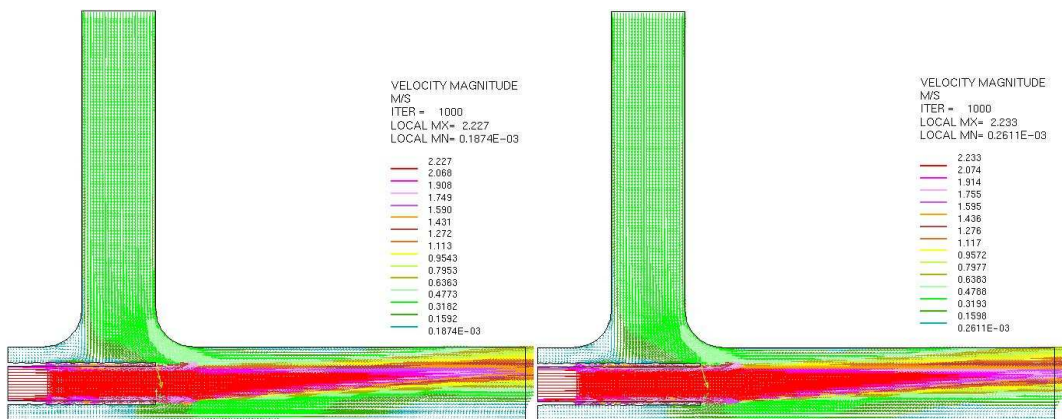
(d) 1.467

Fig. 4-7 Mean Velocity Vector of Distribution (1 : 1.86 V = 1 m/s)



(a) 1

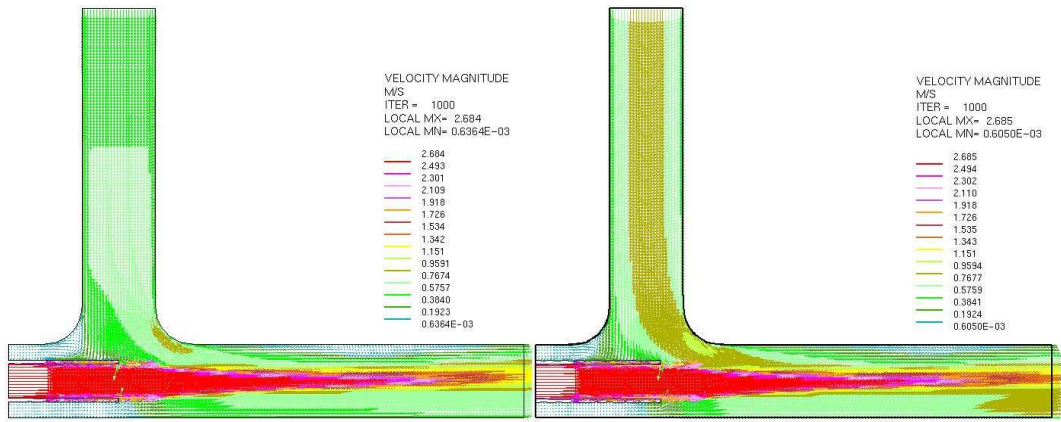
(b) 1.133



(c) 1.333

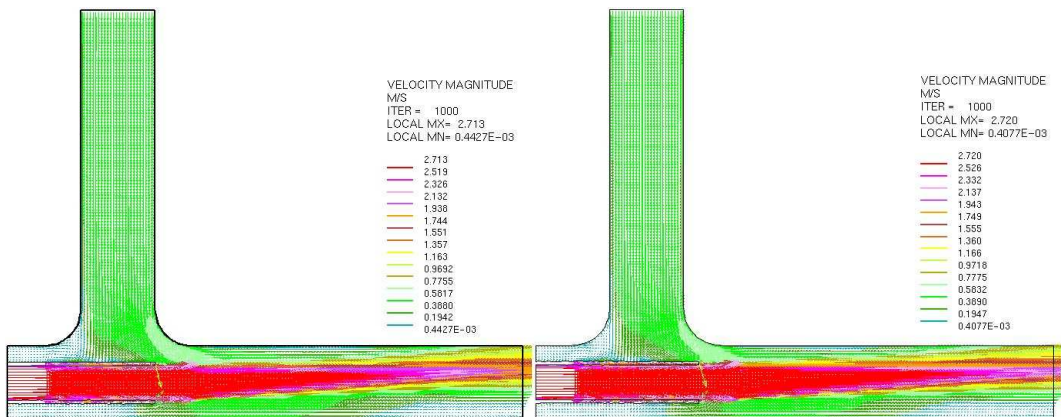
(d) 1.467

Fig. 4-8 Mean Velocity Vector of Distribution (1 : 1.86 V = 2.08 m/s)



(a) 1

(b) 1.133



(c) 1.333

(d) 1.467

Fig. 4-9 Mean Velocity Vector of Distribution (1 : 1.86 V = 2.54 m/s)

2. 전압력 분포

Fig. 4-10 ~ Fig. 4-18은 주관부와 구동관로의 비가 1:3.21, 1:2.25, 1:1.86 크기에 각각 구동관로의 끝단의 위치와 속도 1 m/s, 2.08 m/s, 2.54 m/s로 변화 시켰을 때, 분사펌프 관로의 중간부분인 22.5 mm를 기준으로 각각의 전압력분포도의 유동특성을 나타내고 있다.

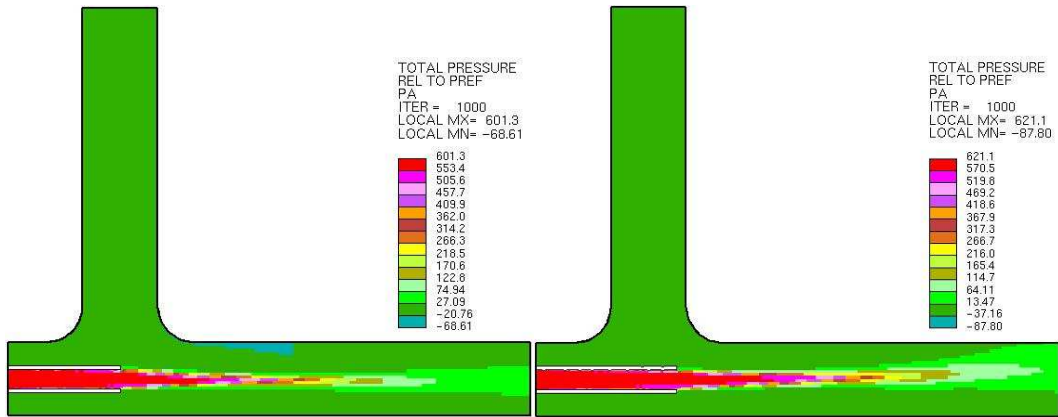
Fig. 4-10 ~ Fig. 4-12는 주관부와 구동관로의 비가 1:3.21인 분사펌프를 구동관로의 끝단의 위치와 입구속도를 변화시켜 나타낸 전압력분포도이다. Fig. 4-10에서와 Fig. 4-11, Fig. 4-12에서 보는 바와 같이 구동관로의 끝단의 위치가 (c) 1.333에서 흡입관에서의 전압력이 높게 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 이는 흡인되는 속도가 높다는 것으로 앞의 속도벡터분포도에서 확인 할 수 있다. 구동관로가 다른 위치에 있을 때 압력분포도를 보면 라운딩부분이 끝나는 지점부터 주관부의 중앙 위쪽으로는 전압력분포도가 낮게 나타나는데, 이는 입구에서 들어오는 유체에 비해 흡입에서 들어오는 유체의 양이 혼합되면서 흡입관에서 들어올 때의 압력이 저압이 형성 되면서 주관부 위쪽 역시 저압으로 형성되는 것으로 생각된다. 출구 위쪽부분으로 유체가 올라가는 현상은 흡입관에서 흡인될 때 라운딩된 부분에서의 흡입속도가 빨라지면서 저압을 형성한다. 상대적으로 출구 아래쪽이 고압이 형성되어 출구 쪽 위쪽으로 유체가 올라가는 것을 볼 수 있다.

Fig. 4-13 ~ Fig. 4-15은 주관부와 구동관로의 비가 1:2.25인 분사펌프를 구동관로 끝단의 위치와 입구속도를 변화시켜 나타낸 전압력분포도이다. Fig. 4-13, 4-14, 4-15에서 보는 바와 같이 구동관로의 끝단이 (b) 1.213에서 흡인되는 전압력분포가 가장 높게 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 주관부와 구동관로의 비가 1:3.21인 분사펌프에서의 전압력분포도와 비교해보면, 주관부 위쪽에서 저압이 생기는 부분이 구동관로가 커지면서 주관부 위쪽의 저압이 많이 사라지는 것을 볼 수 있다. 구동관로의 길이가 길어질수록 주관부의 위쪽의 저압부분은 적어지나 상대적으로 주관부 아래쪽의 저압부분이 커지는 것을 확인 할 수 있다. (b) 1.213에서는 주관부의 위쪽과 아래쪽의 저압부분이 어느 한쪽으로 치우치지 않는 것을 확인 할 수 있는데, 이것은 유체가 균등하게 흐르면서 마찰손실은 최소화 되는 것으로 사료된다.

Fig. 4-16 ~ Fig. 4-18은 주관부와 구동관로의 비가 1:1.86인 분사펌프를 구동관로의 위치와 입구속도를 변화시켜 나타낸 전압력분포도이다. Fig. 4-16, 4-17, 4-18에서 보는 바와 같이 구동관로의 끝단이 (b) 1.133에서 흡인되는 전압력분포가 가장 높게 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 주관부와 구동관로의 비가 1:2.5인 분사펌프에서의 전

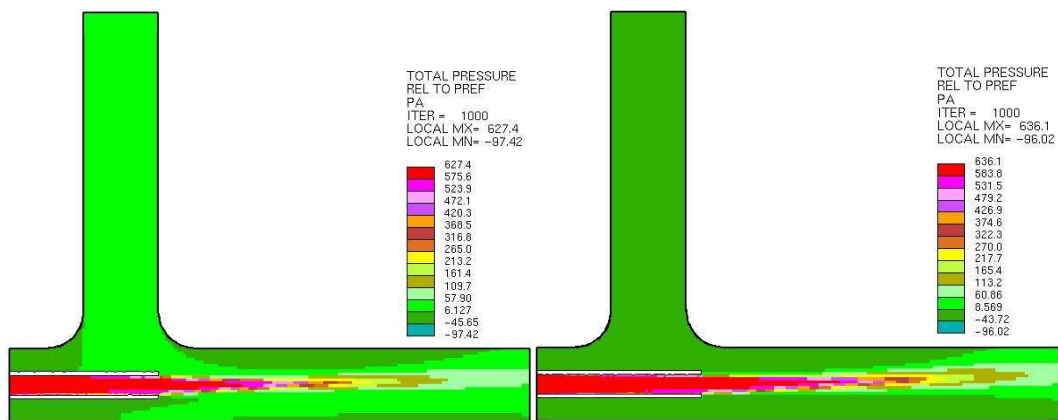
압력분포도와 비교해보면, 주관부 위쪽에서 저압이 생기는 부분이 구동관로가 커지면서 주관부 위쪽의 저압이 많이 사라지는 것을 볼 수 있다. 구동관로가 길어지면서 흡인되는 단면적이 감소되고, 흡인될 때의 구동관로가 장애물 역할을 하여 흡인되는 유량은 적다. 그에 반하여 (b) 1.133은 전압력분포가 고르게 분포되어있어 손실의 양이 조금 밖에 되지 않음을 알 수 있다.

구동관로의 크기와 입구속도, 구동관로의 끝단의 위치를 변화 시키면서 전압력분포를 확인하였는데, 흡인이 가장 좋은 구동관로의 끝단의 위치는 1:3.21은 구동관로의 끝단의 위치가 1.333이 가장 좋았고, 1:2.25에서는 구동관의 끝단의 위치가 1.213이 가장 좋았다. 그리고 1:1.86에서는 구동관로의 끝단의 위치가 1.133이 가장 좋았다. 이는 속도벡터분포도와 동일한 결과를 확인할 수 있었다. 입구속도를 변경하여도 구동관로의 각각 크기의 구동관로의 끝단의 최적위치는 동일한 것으로 확인되었다. 구동관로가 길어질수록 흡인되는 전압력분포는 커지나, 단면적이 작아지면서 흡인되는 유량은 적어지고, 유체가 흡인될 때 구동관로가 장애물의 역할을 하여 효율이 감소되는 것을 확인 할 수 있었다. 그리고 주관부의 전압력분포 역시 구동관로의 끝단이 최적인 위치에서 전압력분포가 고르게 분포되어, 출구 쪽에서 전압력분포가 중앙으로 분포되는 것을 확인 할 수 있었고, 이점에서 손실이 적을 것으로 사료된다.



(a) 1

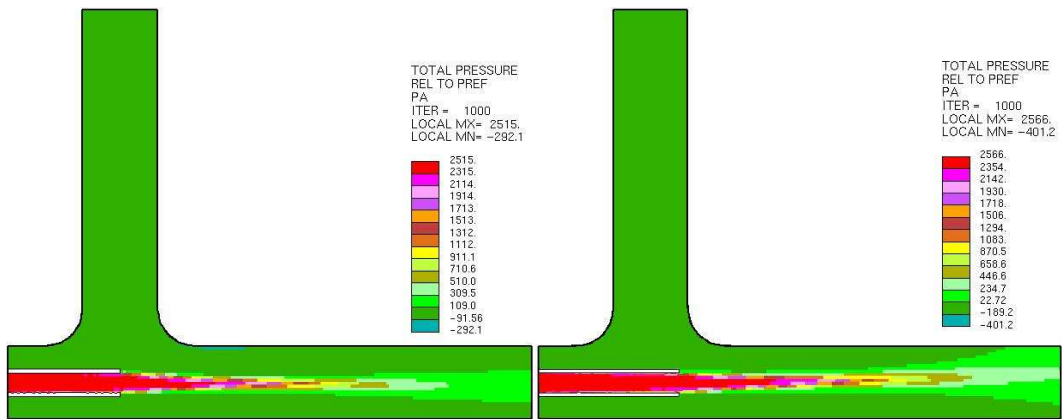
(b) 1.253



(c) 1.333

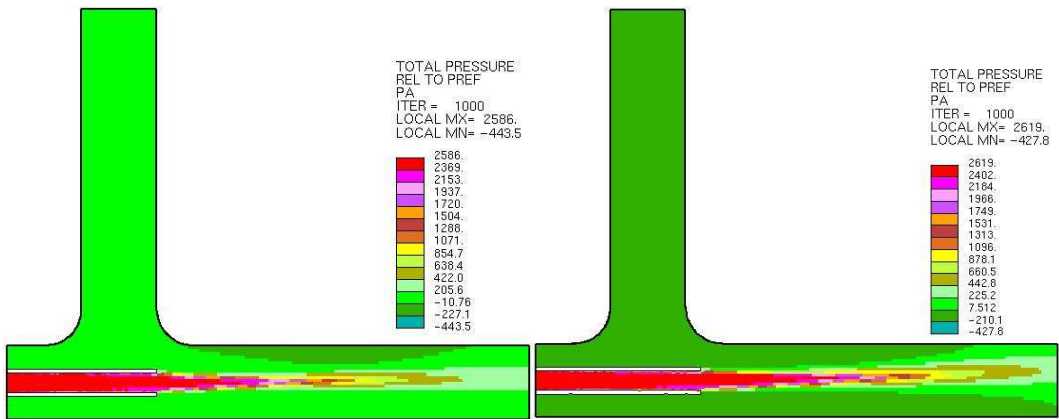
(d) 1.467

Fig. 4-10 Total Pressure of Distribution (1 : 3.21 V = 1 m/s)



(a) 1

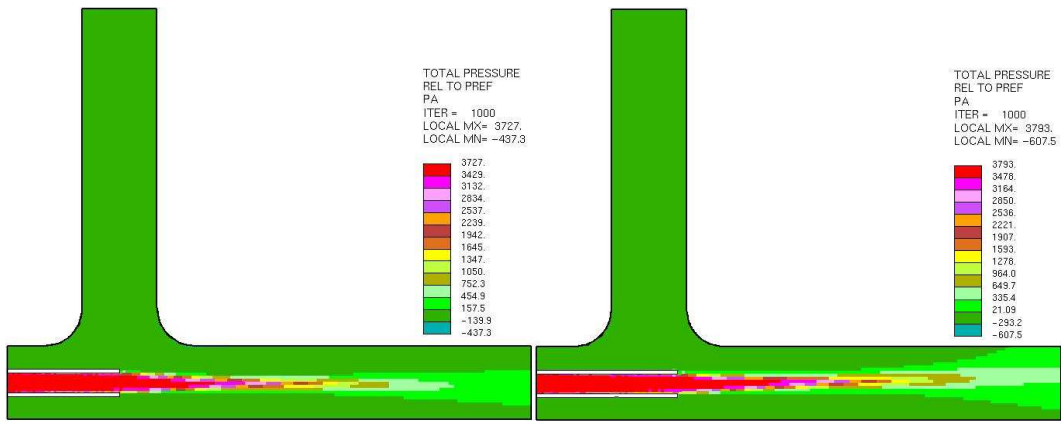
(b) 1.253



(c) 1.333

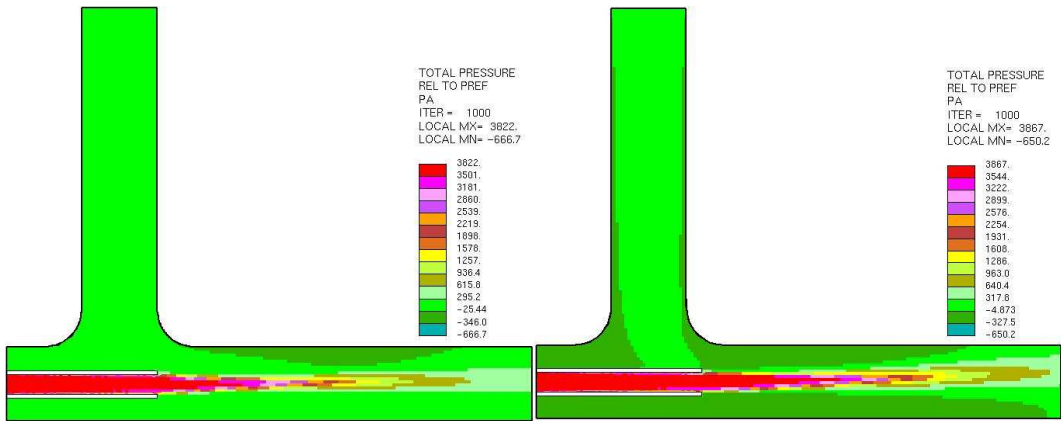
(d) 1.467

Fig. 4-11 Total Pressure of Distribution (1 : 3.21 V = 2.08 m/s)



(a) 1

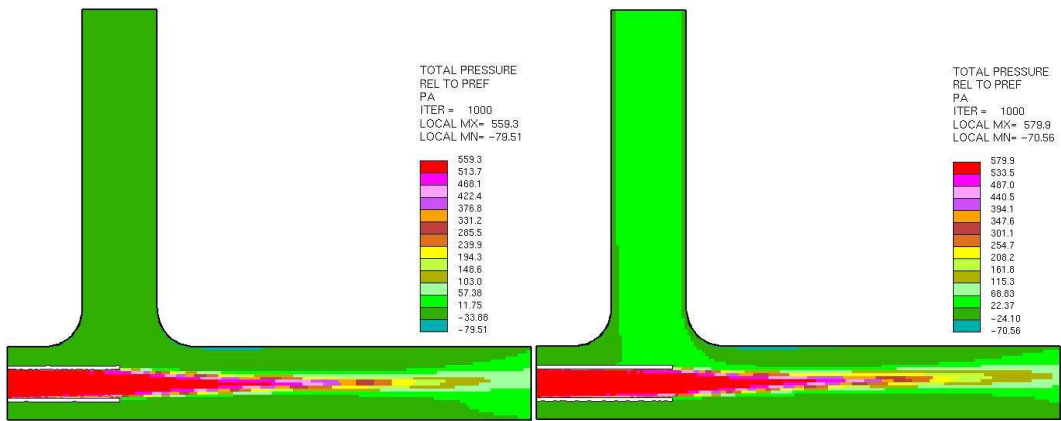
(b) 1.253



(c) 1.333

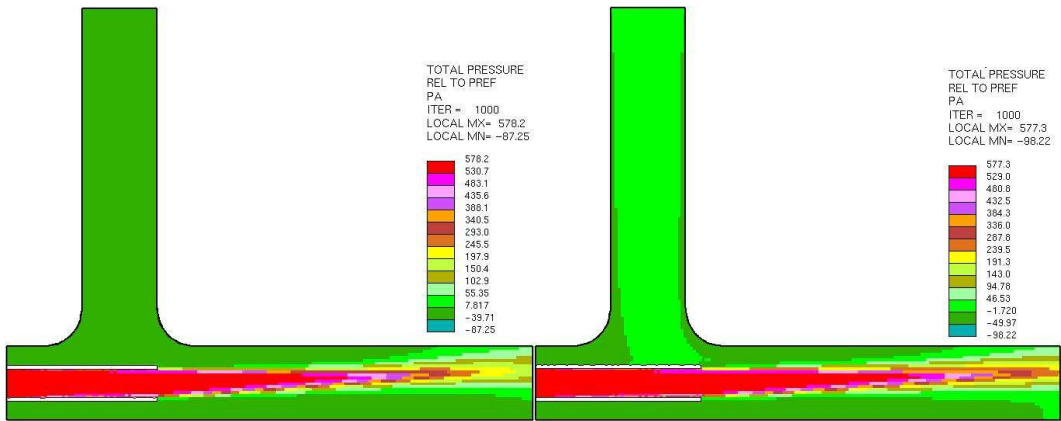
(d) 1.467

Fig. 4-12 Total Pressure of Distribution (1 : 3.21 V = 2.54 m/s)



(a) 1

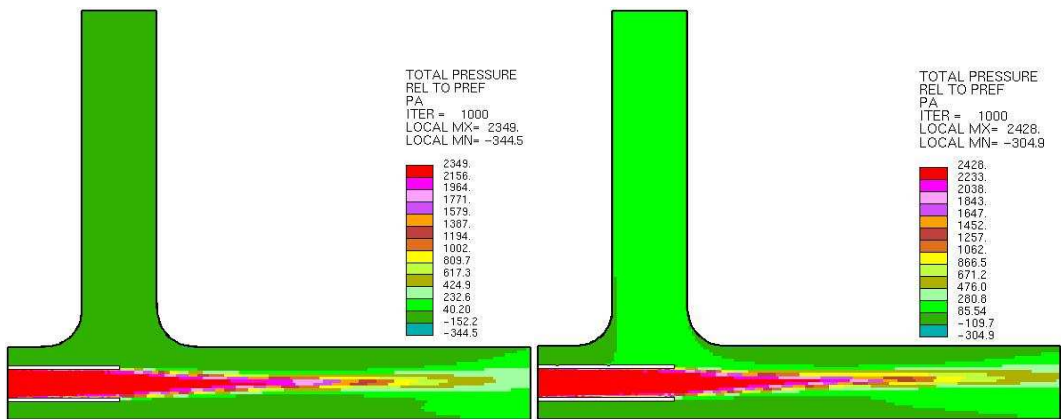
(b) 1.213



(c) 1.333

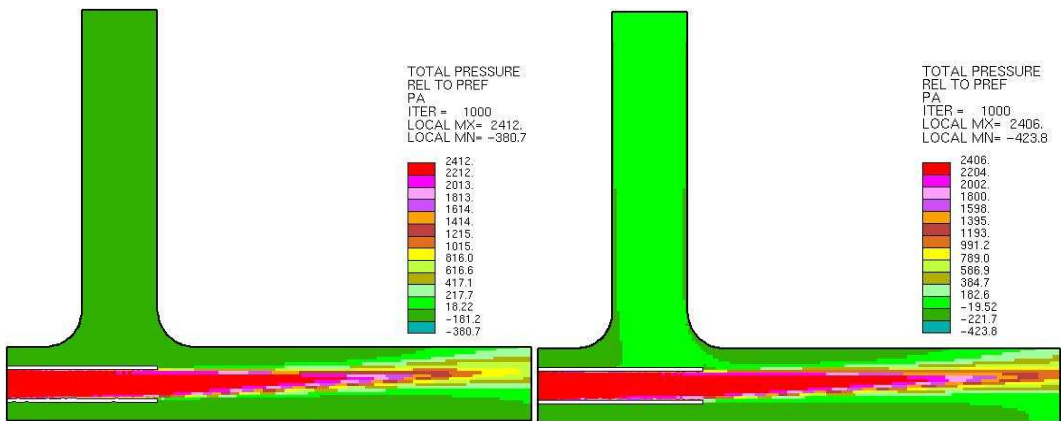
(d) 1.467

Fig. 4-13 Total Pressure of Distribution (1 : 2.25 V = 1 m/s)



(a) 1

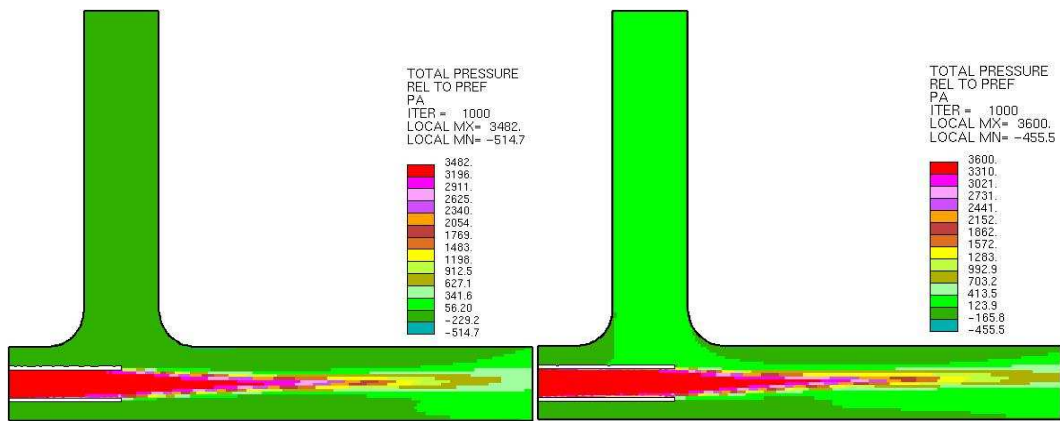
(b) 1.213



(c) 1.333

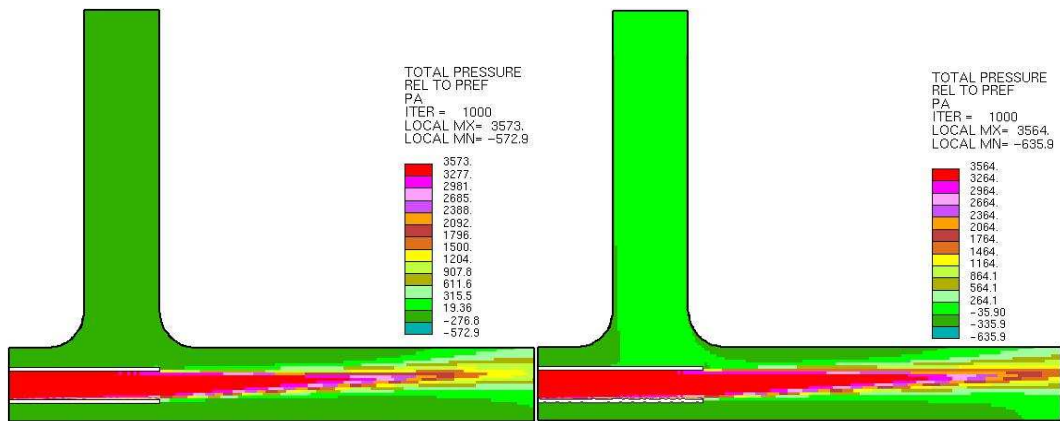
(d) 1.467

Fig. 4-14 Total Pressure of Distribution (1 : 2.25 V = 2.08 m/s)



(a) 1

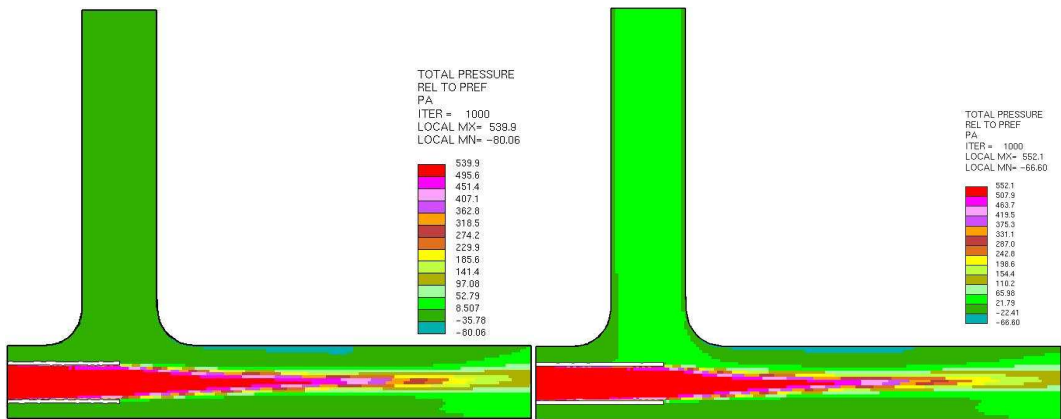
(b) 1.213



(c) 1.333

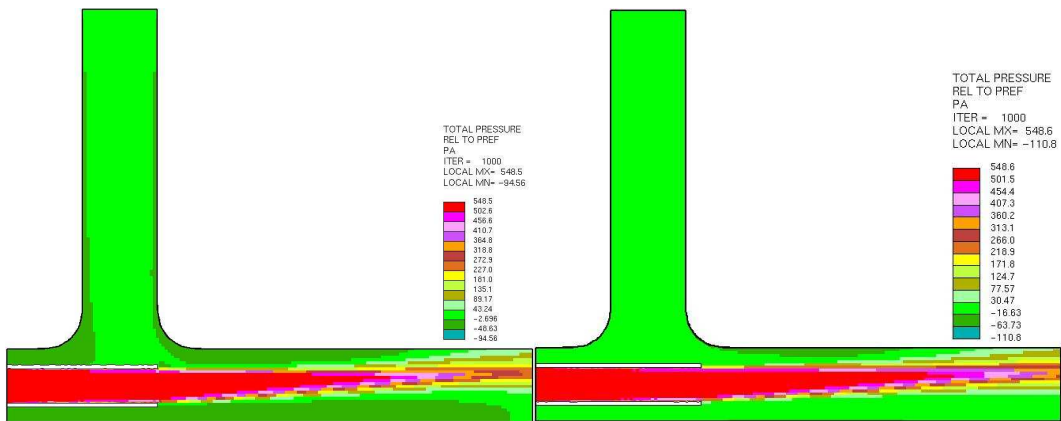
(d) 1.467

Fig. 4-15 Total Pressure of Distribution (1 : 2.25 V = 2.54 m/s)



(a) 1

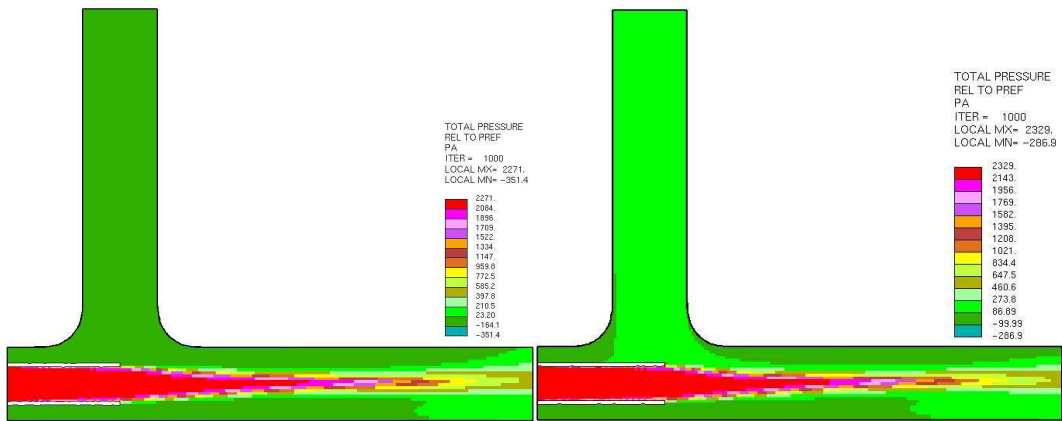
(b) 1.133



(c) 1.333

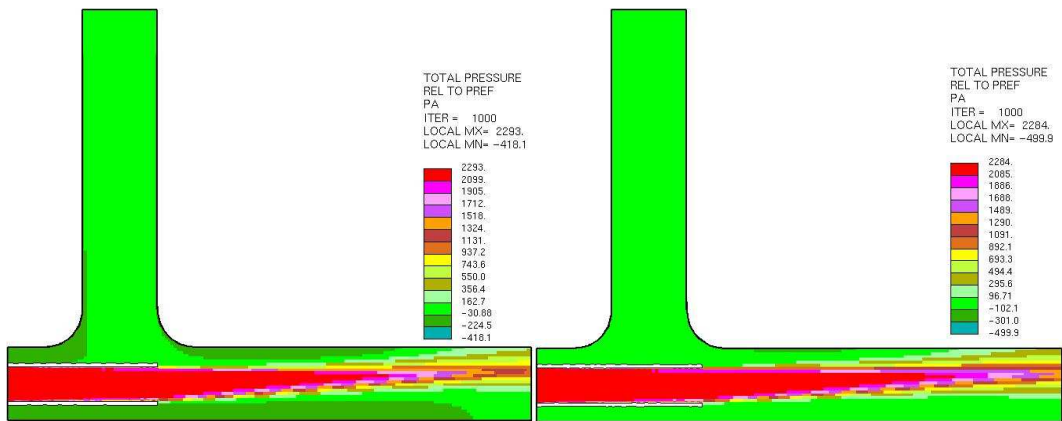
(d) 1.467

Fig. 4-16 Total Pressure of Distribution (1 : 1.86 V = 1 m/s)



(a) 1

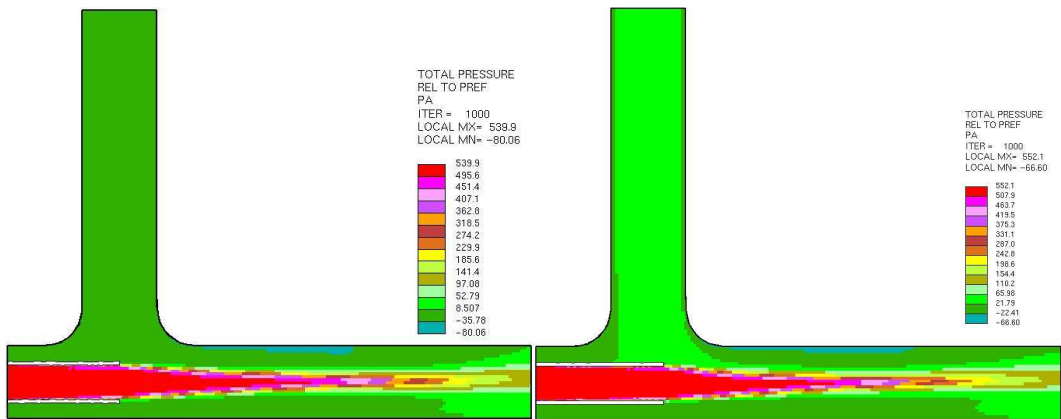
(b) 1.133



(c) 1.333

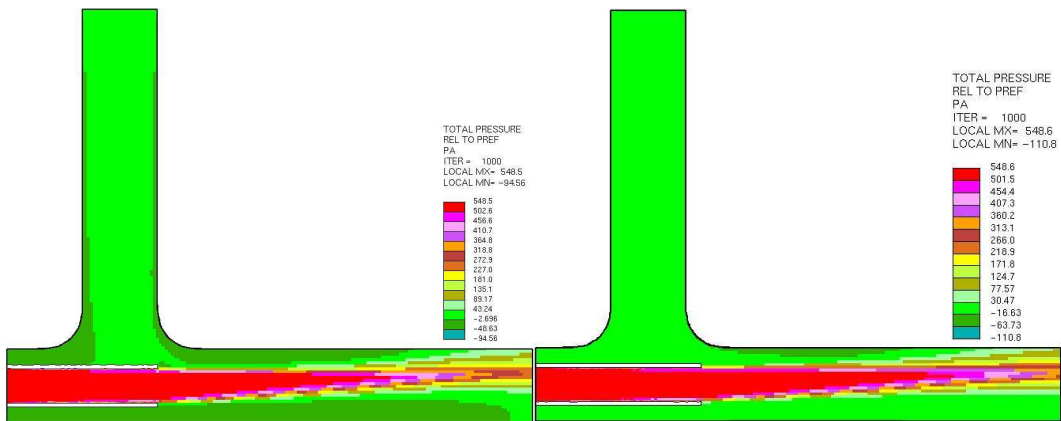
(d) 1.467

Fig. 4-17 Total Pressure of Distribution (1 : 1.86 V = 2.08 m/s)



(a) 1

(b) 1.133



(c) 1.333

(d) 1.467

Fig. 4-18 Total Pressure of Distribution (1 : 1.86 V = 2.54 m/s)

第2節 속도 및 압력분포 특성 분석

Fig. 4-19 ~ Fig. 4-30은 주관부와 구동관로의 비가 1:3.21, 1:2.25, 1:1.86 크기에 각각 구동관로의 끝단의 위치와 속도 1 m/s, 2.08 m/s, 2.54 m/s로 변화 시켰을 때, 분사펌프 관로의 중간부분인 22.5 mm를 기준으로 흡입관의 라운딩이 끝나는 부분, 입구에서 130 mm 지점, 출구부분, 350 mm 지점의 평균속도 값과 전압력 값을 그래프로 나타낸 것이다. 여기서 x 축은 거리로, 22.5 mm로 나누어 무차원 시킨 값으로, 1을 22.5 mm인 중앙을 이고, 1보다 크면 22.5 mm보다 큰 것으로 주관부의 위쪽 이고, 1보다 작으면, 22.5 mm인 중앙보다 작은 주관부의 아래쪽이다.

Fig. 4-19 ~ Fig. 4-22는 주관부와 구동관로의 비가 1:3.21인 분사펌프를 입구속도에 따른 구동관로 끝단의 위치변화를 하였을 때, 흡입관의 라운딩 부분이 끝나는 지점, 입구에서 130 mm지점의 속도와, 전압력 그래프와 출구 쪽, 입구에서 350 mm지점의 속도와 전압력을 그래프로 나타내었다. 속도그래프는 x 축은 거리를 22.5 mm로 나누어 무차원한 값이고, y 축은 각 지점의 속도를 입구속도로 나누어 무차원한 값을 그래프로 나타낸 것이다. 전압력 그래프는 x 축은 거리를 22.5 mm로 나누어 무차원한 값

이고, y 축은 각 지점의 전압력 값을 동압인 $\frac{\rho v^2}{2}$ 으로 나누어 무차원한 값으로 여기서, v 는 입구속도로 하였다. Fig. 4-19은 입구속도가 변하여도 무차원 시킨 속도는 비슷한 것을 알 수 있다. 130 mm 지점의 속도 분포를 보면 중앙에서의 속도가 가장 빠른 것을 볼 수 있다. 이는 입구에서 속도가 구동관로를 통해 나온 속도의 영향 때문이다. 그리고 벽면 쪽에서의 속도 분포를 보면, 대부분 낮은 속도분포를 볼 수 있는데, 구동관로의 끝단이 1.333인 지점에서 벽면에서의 속도가 가장 빠른 것을 볼 수 있다. 이는 흡입 될 때의 속도가 빠르다는 것을 알 수 있다. 앞서 확인한 보와 같이 속도벡터분포와 압력분포가 1.333인 지점에서 가장 빠르게 나타나는 것을 다시 한번 확인 할 수 있다. 주관부의 아래쪽에서는 최고 30%이상 속도가 차이 나고, 주관부 위쪽에서는 최고 47%까지 속도가 차이 나는 것을 확인 할 수 있다. 이것은 Fig. 4-20 전압력분포 그래프에서도 확인 할 수 있다. Fig. 4-21은 350 mm지점, 출구 쪽의 속도 분포를 그래프로 나타낸 것이다. 그래프에서 알 수 있듯이 구동관로의 끝단이 1.333지점은 다른 지점에 비해 출구 속도분포가 고르게 되어있고, 주관부의 중앙에서의 속도가 가장 빠르게 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 이것은 흡입관에서 유체가 흡입하였을 때 일정하게 혼합되어 고른 속도분포를 나타낸 것으로, 다른 구동관로의 끝단 보다 손실 값이 적다는 것을 의미하기도 한다. 출구에서의 최고 속도는 구동관로의 끝단이 가장 긴

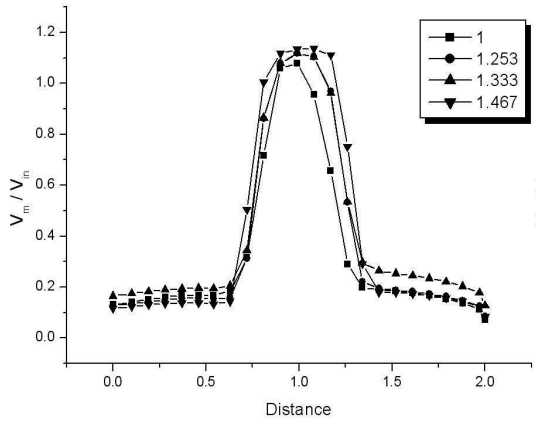
1.467지점에서 가장 높게 나타는 것을 확인 할 수 있으나, 평균 속도를 구해보면, 1.333지점이 가장 높은 것을 확인 할 수 있었고, 다른 지점 보다 최고 15% 높은 출구 속도를 확인 할 수 있었다. 이러한 특성은 Fig. 4-22에서 전압력 분포도를 다시 한번 확인 할 수 있다.

Fig. 4-23 ~ Fig. 4-26은 주관부와 구동관로의 비가 1:2.25인 분사펌프를 입구속도에 따른 구동관로 끝단의 위치변화를 하였을 때, 흡입관의 라운딩 부분이 끝나는 지점, 입구에서 130 mm지점의 속도와, 전압력 그래프와 출구 쪽, 입구에서 350 mm지점의 속도와 전압력을 그래프로 나타내었다. Fig. 4-23은 입구속도가 변하여도 무차원 시킨 속도는 비슷한 것을 알 수 있다. 130 mm 지점의 속도 분포를 보면 중앙에서의 속도가 가장 빠른 것은 입구에서 속도가 구동관로를 통해 나온 속도의 영향 때문이다. 벽면 쪽에서의 속도를 보면, 대부분 낮은 속도를 볼 수 있는데, 구동관로의 끝단이 1.213지점에서 벽면에서의 속도가 가장 빠른 것을 볼 수 있다. 벽면에서의 속도가 빠르다는 것은 흡인 될 때의 속도가 빠르다는 것을 알 수 있는 것으로 앞서 확인한 봐와 같이 속도벡터분포와 압력분포가 1.213인 지점에서 가장 빠르게 나타나는 것을 다시 한번 확인 할 수 있다. 주관부의 아래쪽에서는 최고 38%이상 속도가 차이가 나고, 주관부 위쪽에서는 최고 35%까지 속도가 차이 나는 것을 확인 할 수 있다. 이것은 Fig. 4-24의 전압력분포 그래프에서도 확인 할 수 있다. Fig. 4-25는 출구 쪽의 속도 분포, 350 mm지점을 그래프로 나타낸 것이다. 그래프에서 보듯이 구동관로의 끝단이 1.213 지점은 다른 지점에 비해 출구 속도가 고르게 분포되어 있고, 주관부의 출구 쪽 중앙에서 속도가 가장 빠르게 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 이것은 흡입관에서 유체가 흡인하였을 때 일정하고 고르게 섞여 이러한 속도분포를 나타낸 것으로, 다른 구동관로의 끝단 보다 손실 값이 적다는 것을 의미하기도 한다. 이것은 Fig. 4-22의 전압력 분포도에서 한번 더 확인 할 수 있다.

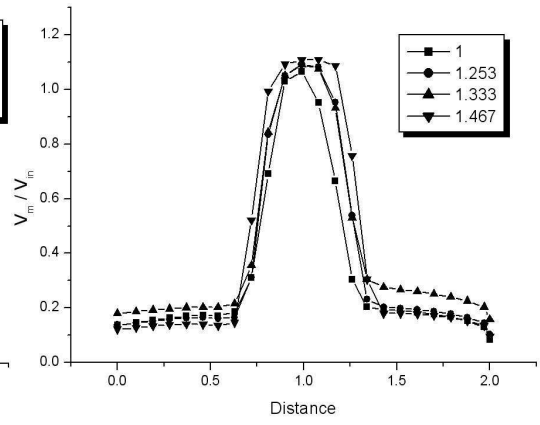
Fig. 4-27 ~ Fig. 4-30은 주관부와 구동관로의 비가 1:1.86인 분사펌프를 입구속도에 따른 구동관로 끝단의 위치변화를 하였을 때, 흡입관의 라운딩 부분이 끝나는 지점, 입구에서 130 mm지점의 속도와 전압력 그래프, 출구 쪽, 입구에서 350 mm지점의 속도와 전압력을 그래프로 나타내었다. Fig. 4-27 역시 입구속도가 변하여도 무차원 시킨 속도는 비슷한 것을 알 수 있다. 130 mm 지점의 속도 분포를 보면 중앙에서의 속도가 가장 빠른 것을 볼 수 있다. 이는 입구에서 속도가 구동관로를 통해 나온 속도의 영향 때문이다. 입구속도의 단면적이 증가함에 따라 주관부 중앙에서의 높은 속도들이 넓게 분포되어 있는 것을 확인 할 수 있다. 구동관로의 끝단이 1.133인 지점에서 벽면에서의 속도가 가장 빠른 것을 볼 수 있다. 이것은 구동관로의 끝단이 1.133 위치하였

을 때 흡인 될 때의 속도가 빠르다는 것을 알 수 있다. 앞서 확인한 봐와 같이 속도벡터분포와 전압력분포에서 보았듯이 같은 결과를 확인 할 수 있다. 주관부의 아래쪽에서는 최고 36%이상 속도가 차이하고, 주관부 위쪽에서는 최고 30%까지 속도가 차이 나는 것을 확인 할 수 있다. 이것은 Fig. 3-30 전압력분포 그래프에서도 확인 할 수 있다. Fig. 4-29는 350 mm지점, 출구 쪽의 속도 분포를 그래프로 나타낸 것이다. 그래프에서 보듯이 구동관로의 끝단이 1.133지점은 다른 지점에 비해 출구 속도가 고르게 분포되어 있고, 주관부의 중앙에서의 속도가 가장 빠르게 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 이것은 흡입관에서 유체가 흡인하였을 때 일정하게 섞여 고른 속도분포를 나타낸 것으로, 다른 구동관로의 끝단 보다 손실 값이 적다는 것을 의미하기도 한다. 이것은 Fig. 4-30의 전압력 분포도에서 확인 할 수 있다.

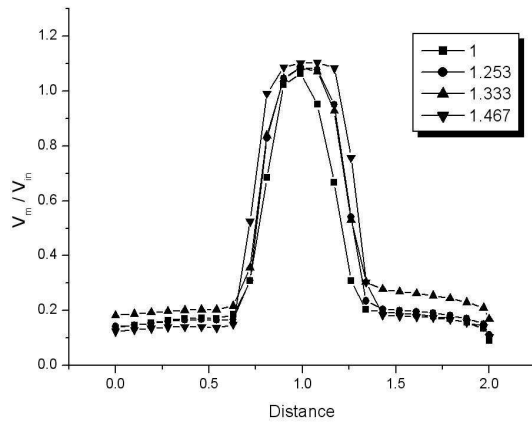
구동관로의 크기와 입구속도, 구동관로의 끝단의 위치를 변화 시키면서 흡입관의 라운딩이 끝나는 부분인 130 mm지점과 입구에서 350 mm 지점인 출구에서의 속도와 전압력분포를 그래프로 확인하였다. 벽면에서의 흡인이 속도가 가장 좋은 구동관로의 끝단의 위치는 분사펌프의 구동관로와 주관부의 비가 1:3.21에서는 구동관로의 끝단의 위치가 1.333이 가장 좋았고, 분사펌프의 구동관로와 주관부의 비가 1:2.25에서는 구동관의 끝단의 위치가 1.213이 가장 좋았다. 분사펌프의 구동관로와 주관부의 비가 1:1.86에서는 구동관로의 끝단의 위치가 1.133이 가장 좋았다. 주관부의 아래쪽에서는 속도가 구동관로가 다른 위치에 있을 때 보다 평균 30%이상 빨랐고, 주관부 위쪽에서는 35%이상 속도가 빠른 것을 확인 할 수 있다. 이는 속도벡터분포도와 전압력분포도에서의 흡인이 가장 좋은 결과를 수치적으로 확인 할 수 있었다. 입구속도를 변경하여도 구동관로의 각각 크기의 구동관로의 끝단의 최적위치는 동일한 것으로 다시 한번 확인되었다. 구동관로가 길어질수록 출구에서의 속도는 커지나, 속도가 위쪽으로 올라가는 현상이 발생하여 손실이 많이 일어나는 것을 확인 할 수 있었고, 그 현상으로 효율이 감소되는 것으로 사료된다. 주관부의 전압력분포 역시 구동관로의 끝단이 최적인 위치에서 전압력분포가 고르게 분포되어, 출구 쪽에서 전압력분포가 중앙으로 분포되는 것을 확인 할 수 있었고, 이는 손실이 적을 것으로 사료된다.



(a) $V = 1$ m/s

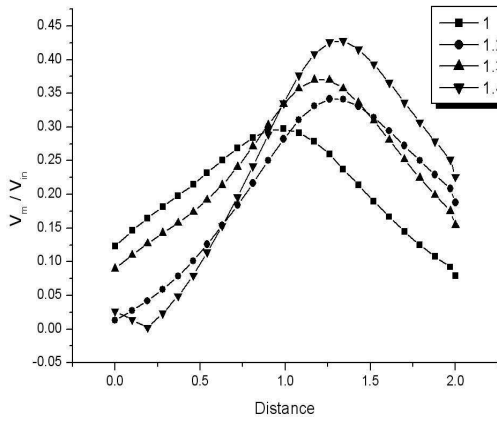


(b) $V = 2.08$ m/s

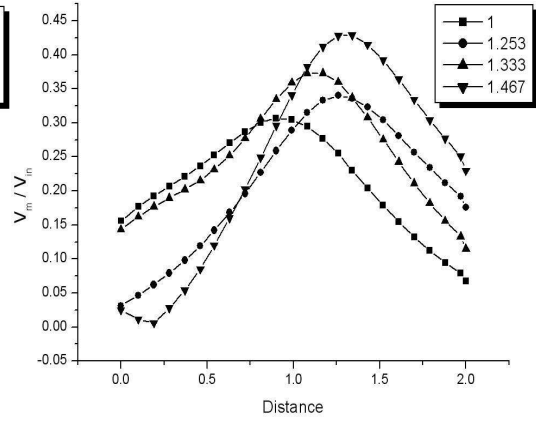


(c) $V = 2.54$ m/s

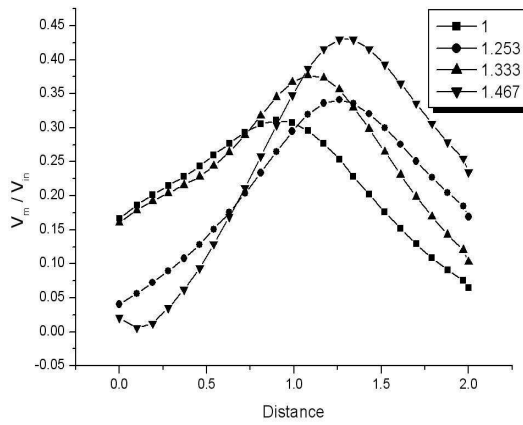
Fig. 4-19 Mean Velocity Vector of Distribution
 ($L = 130\text{mm}$ $D_s : D_h = 1 : 3.21$)



(a) $V = 1$ m/s

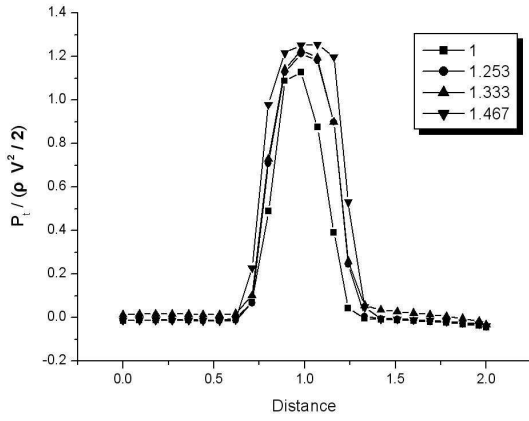


(b) $V = 2.08$ m/s

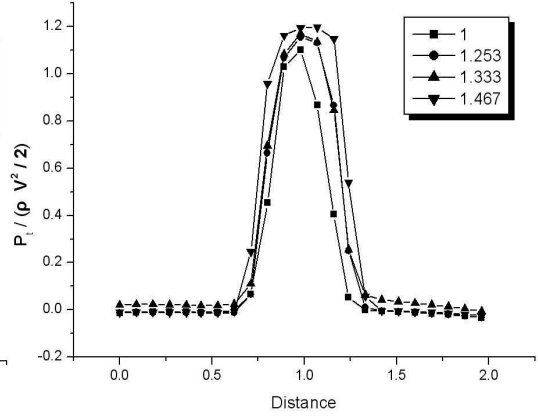


(c) $V = 2.54$ m/s

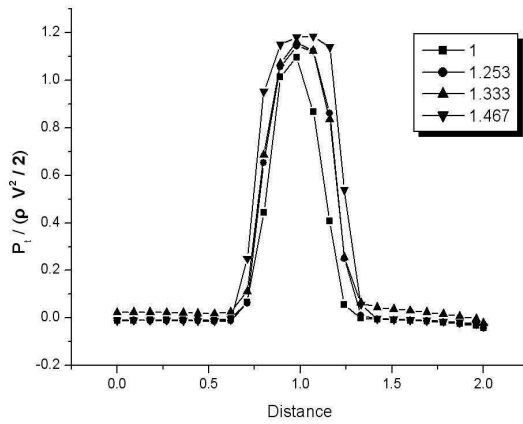
Fig. 4-20 Mean Velocity Vector of Distribution
 ($L = 350\text{mm}$ $D_s : D_h = 1 : 3.21$)



(a) $V = 1 \text{ m/s}$

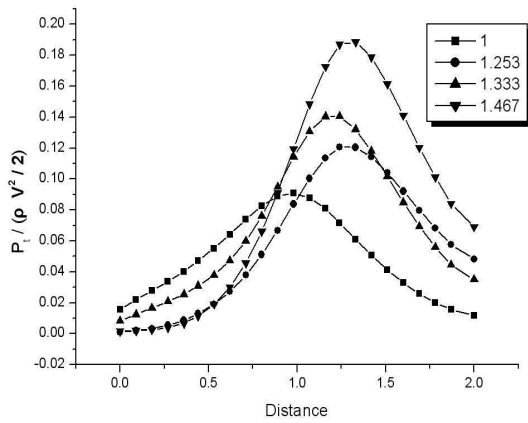


(b) $V = 2.08 \text{ m/s}$

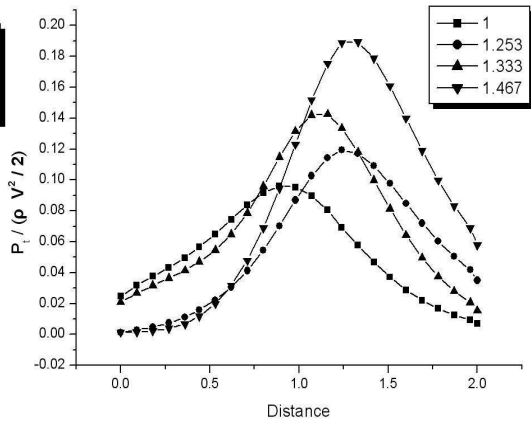


(c) $V = 2.54 \text{ m/s}$

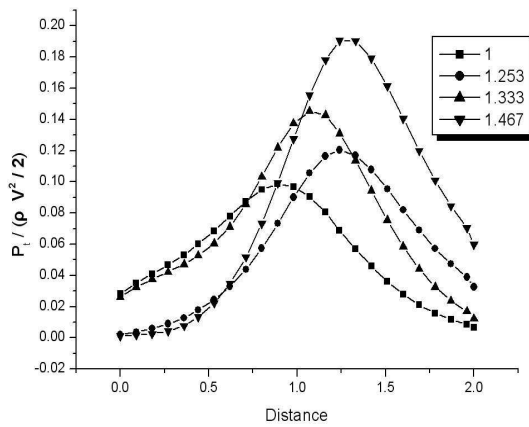
Fig. 4-21 Total Pressure of Distribution
 ($L = 130\text{mm}$ $D_s : D_h = 1 : 3.21$)



(a) $V = 1 \text{ m/s}$

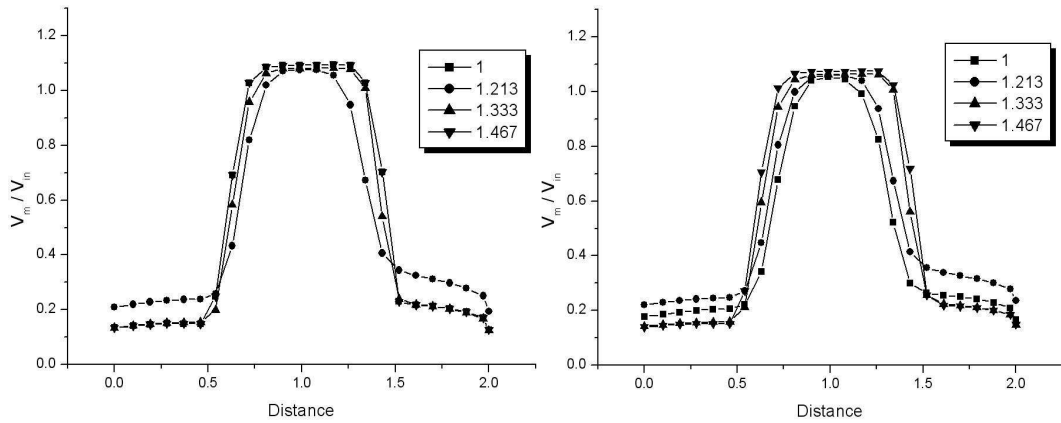


(b) $V = 2.08 \text{ m/s}$



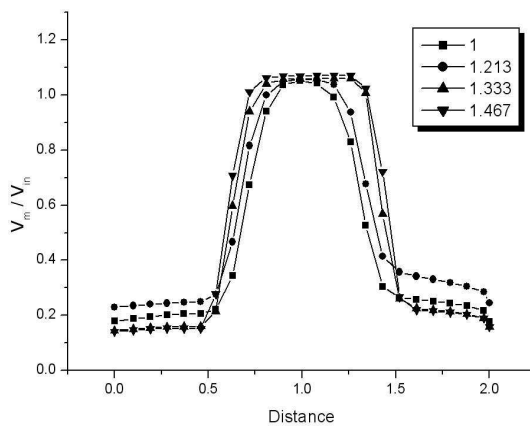
(c) $V = 2.54 \text{ m/s}$

Fig. 4-22 Total Pressure of Distribution
 ($L = 350\text{mm}$ $D_s : D_h = 1 : 3.21$)



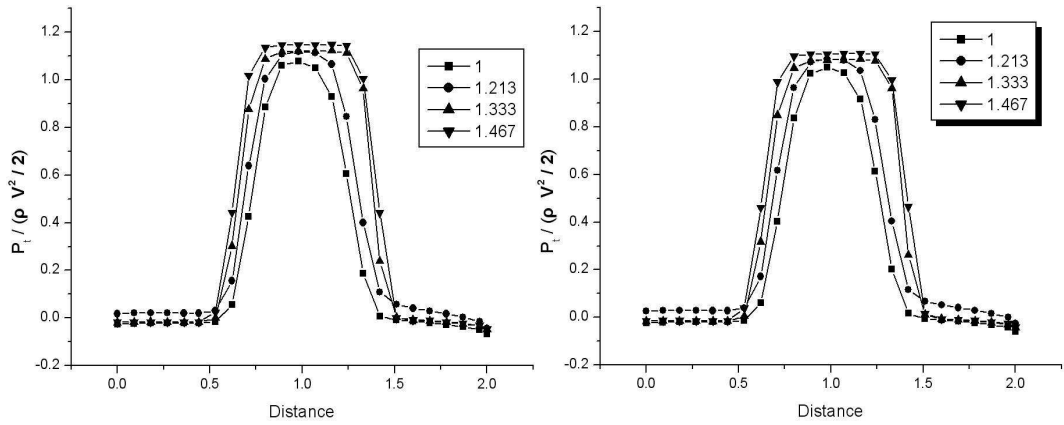
(a) $V = 1 \text{ m/s}$

(b) $V = 2.08 \text{ m/s}$



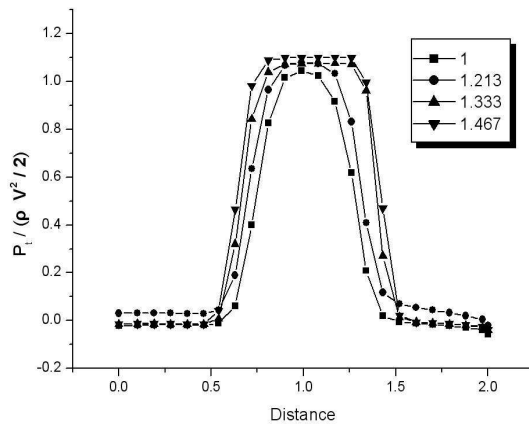
(c) $V = 2.54 \text{ m/s}$

Fig. 4-23 Mean Velocity Vector of Distribution
 ($L = 130\text{mm}$ $D_s : D_h = 1 : 2.25$)



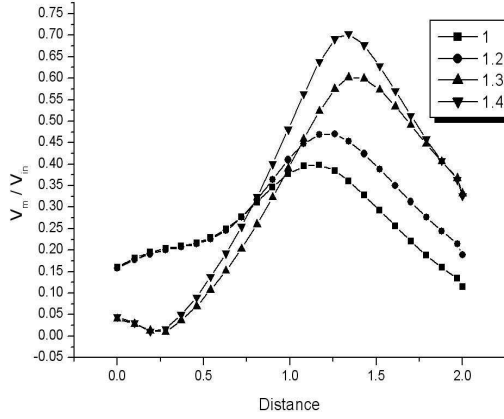
(a) $V = 1$ m/s

(b) $V = 2.08$ m/s

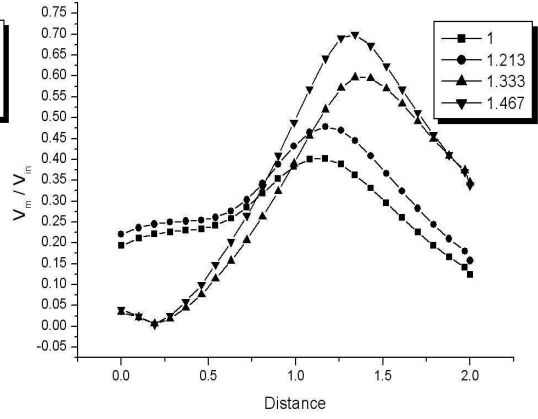


(c) $V = 2.54$ m/s

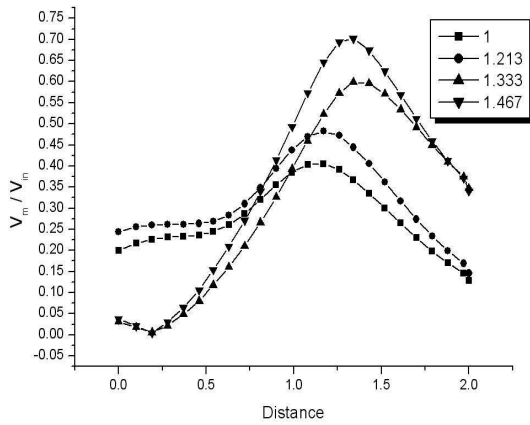
Fig. 4-24 Total Pressure of Distribution
 ($L = 130\text{mm}$ $D_s : D_h = 1 : 2.25$)



(a) $V = 1 \text{ m/s}$

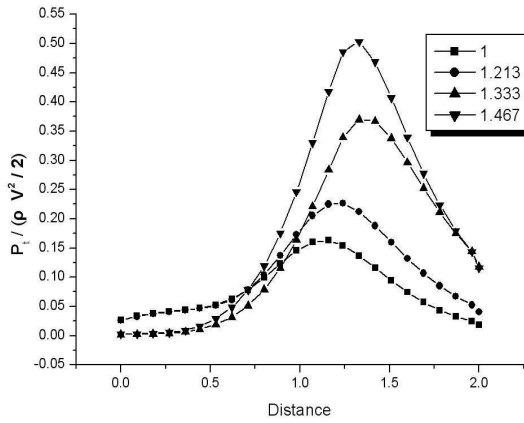


(b) $V = 2.08 \text{ m/s}$

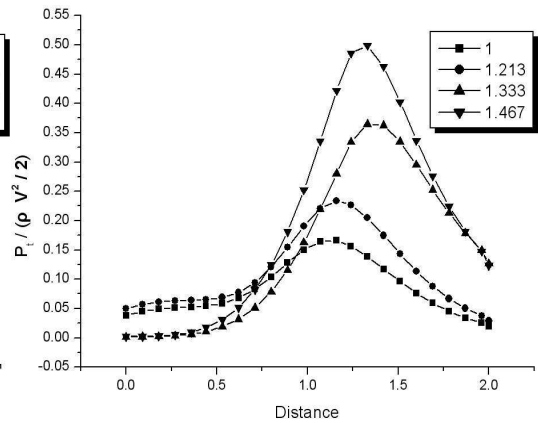


(c) $V = 2.54 \text{ m/s}$

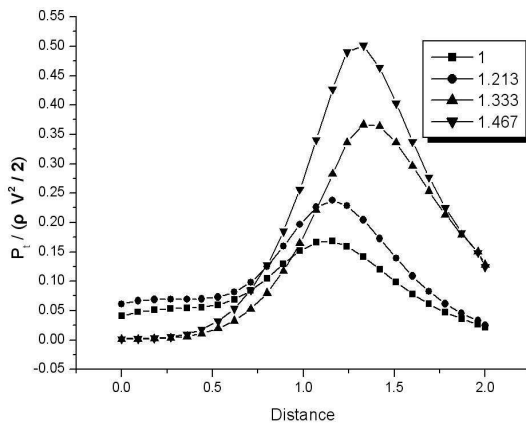
Fig. 4-25 Mean Velocity Vector of Distribution
 ($L = 350\text{mm}$ $D_s : D_h = 1 : 2.25$)



(a) $V = 1 \text{ m/s}$

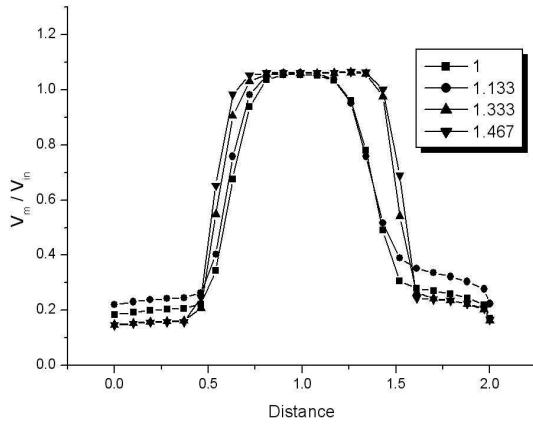


(b) $V = 2.08 \text{ m/s}$

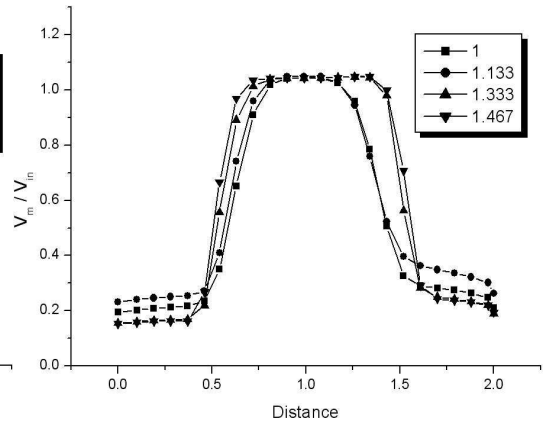


(c) $V = 2.54 \text{ m/s}$

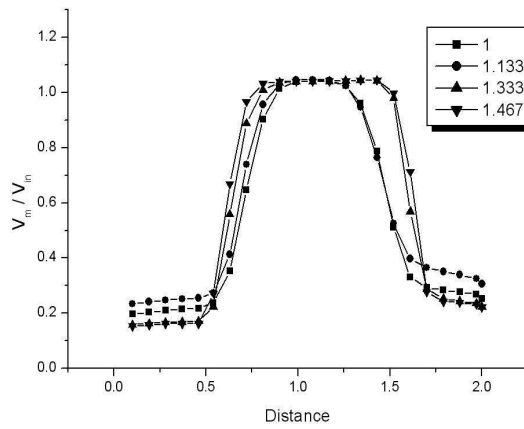
Fig. 4-26 Total Pressure of Distribution
 ($L = 350\text{mm}$ $D_s : D_h = 1 : 2.25$)



(a) $V = 1 \text{ m/s}$

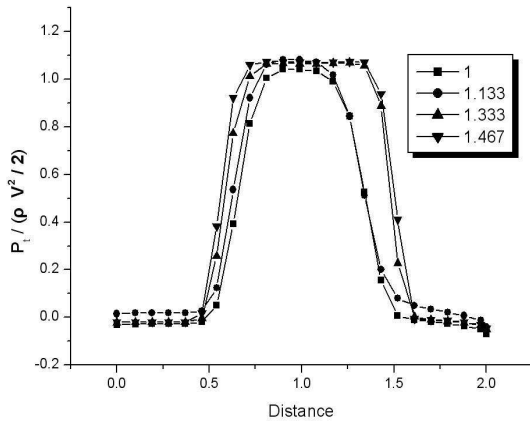


(b) $V = 2.08 \text{ m/s}$

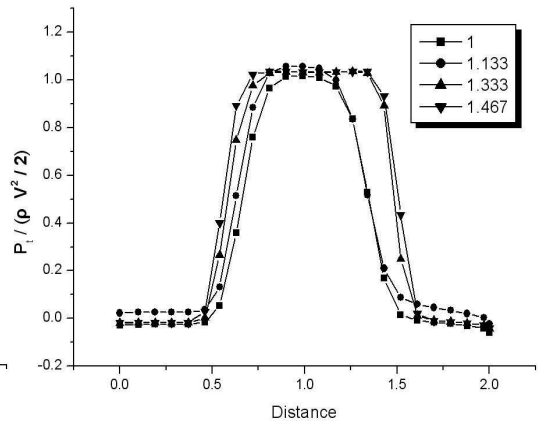


(c) $V = 2.54 \text{ m/s}$

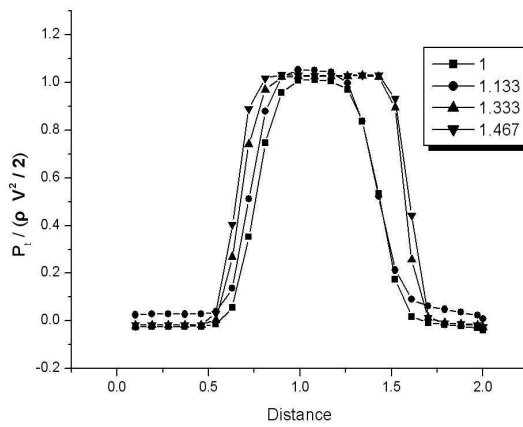
Fig. 4-27 Mean Velocity Vector of Distribution
 ($L = 130\text{mm}$ $D_s : D_h = 1 : 1.86$)



(a) $V = 1 \text{ m/s}$

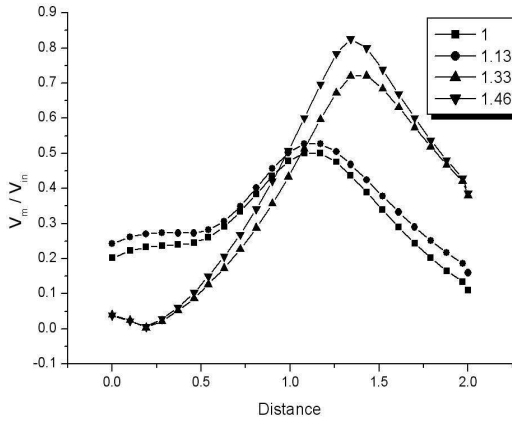


(b) $V = 2.08 \text{ m/s}$

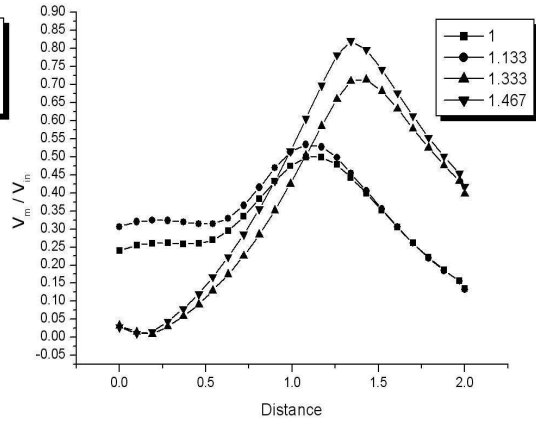


(c) $V = 2.54 \text{ m/s}$

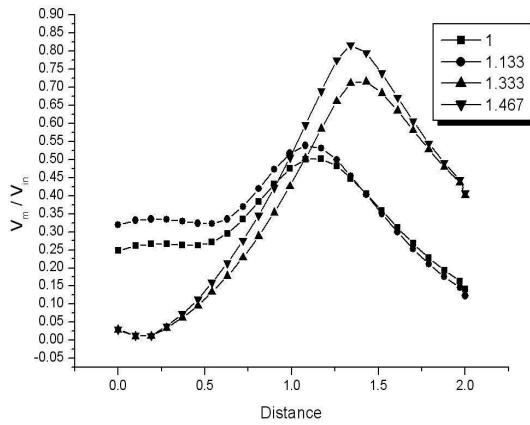
Fig. 4-28 Total Pressure of Distribution
 ($L = 130\text{mm}$ $D_s : D_h = 1 : 1.86$)



(a) $V = 1 \text{ m/s}$

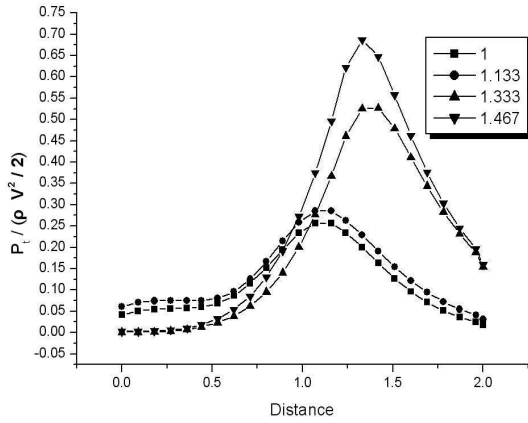


(b) $V = 2.08 \text{ m/s}$

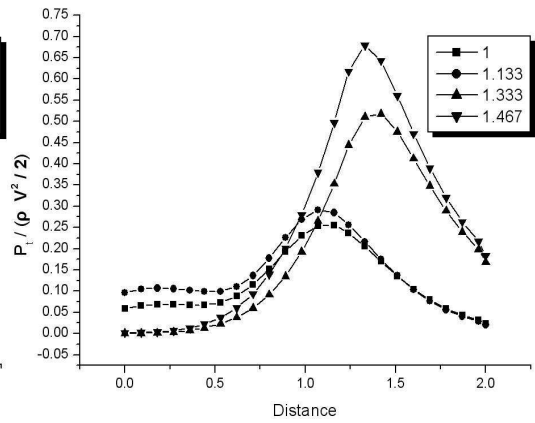


(c) $V = 2.54 \text{ m/s}$

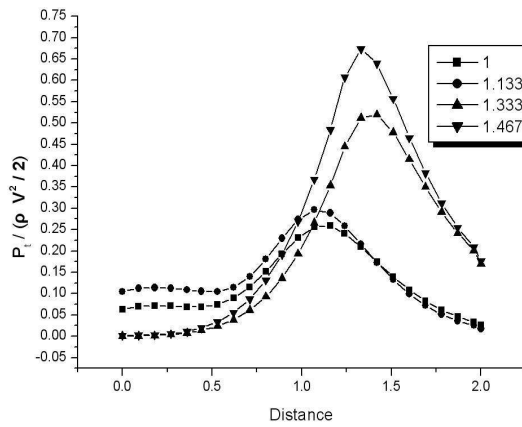
Fig. 4-29 Mean Velocity Vector of Distribution
 ($L = 350\text{mm}$ $D_s : D_h = 1 : 1.86$)



(a) $V = 1 \text{ m/s}$



(b) $V = 2.08 \text{ m/s}$



(c) $V = 2.54 \text{ m/s}$

Fig. 4-30 Total Pressure of Distribution
 ($L = 350\text{mm}$ $D_s : D_h = 1 : 1.86$)

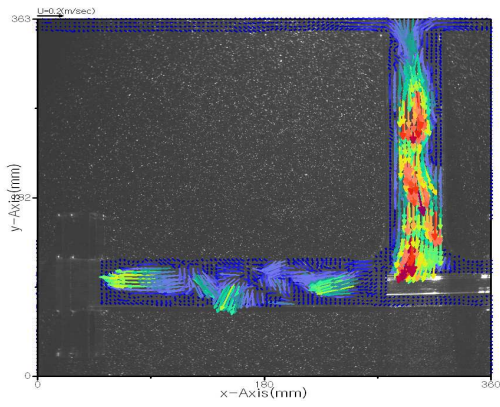
第3節 PIV 결과 및 고찰

구동관로에 대한 확대 관로의 비는 1 : 3.21, 1 : 2.25, 1 : 1.86 으로서 구동관로를 통과한 후, 확대관로를 지나는 유동에 관해 확산효과를 고려하여 설계하였다. 입구 쪽 속도는 1 m/s 로 하였고, 발생하는 분 평균속도벡터를 CACTUS 3.2를 사용하여 분석하였다.

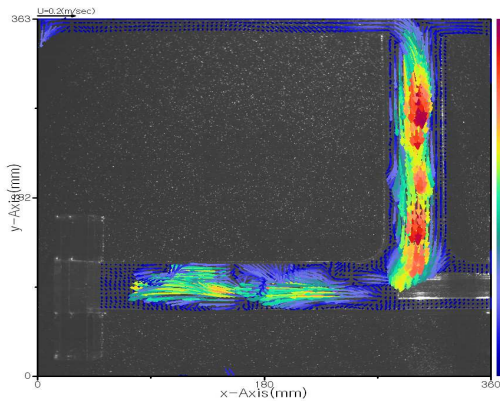
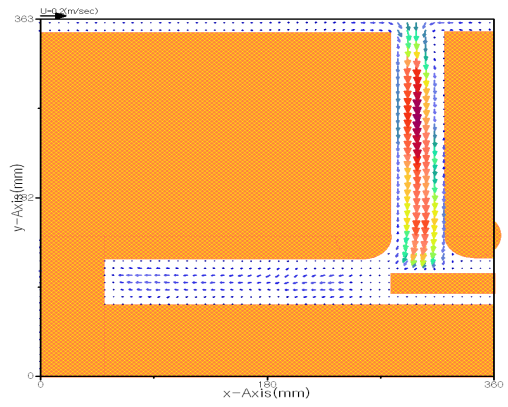
Fig. 4-31은 CFD에서 얻은 결과 값을 통해 각각의 직경비에 따른 구동관로의 끝단의 최적위치에서의 PIV실험을 통해 분석된 영상을 보여주고 있으며, 입구속도는 1 m/s이고, 분사펌프의 전영역을 해석하였다. 왼쪽에 있는 그림은 분석한 값을 보여주는 것이고, 오른쪽 그림은 분석한 값에 대한 확실한 유맥선을 보기위해 평균속도벡터로 입자를 보정하였다. (a)는 구동관로에 대한 확대 관로의 비가 1 : 3.21을 CFD결과에서 효율이 가장 좋은 구동관로의 끝단이 1.333인 위치에서의 분사펌프를 PIV로 분석하여 유동분포를 보여준 것이다. 오른쪽 그림은 보면 흡입관에서 유체가 빨려 들어가는 것을 확실히 볼 수 있다. 주관부에서는 입구에서 들어오는 유체와 흡입관에서 들어오는 유체가 만나는 부분인 주관부의 중앙부분에서 와류가 일어나는 것을 볼 수 있는데, 이것은 입구에서의 나가는 유체와 출구에서의 압력이 서로 관성이 작용하여 생기는 와류현상으로 생각된다. 평균속도벡터에서 유동현상을 확실히 보기 위해 보정한 왼쪽 그림을 보면 주관부에의 와류현상이 일어나는 것을 확인 할 수 없다. 이것은 평균속도벡터를 나타내는 것이기 때문에 와류현상은 실제 유체의 유동에서는 크게 발생하지 않은 것으로 볼 수 있다. 출구에서 유체의 유동분포는 중앙으로 흐르는 것을 확인 할 수 있었고, 전체적인 유동현상이 CFD에서의 평균속도벡터의 분포와 같은 것을 볼 수 있다. (b)는 구동관로에 대한 확대 관로의 비가 1 : 2.25를 CFD 결과에서 효율이 가장 좋은 구동관로의 끝단이 1.213인 위치에서의 분사펌프를 PIV로 분석하여 유동분포를 보여준 것이다. 오른쪽의 그림은 실제 유체가 움직이는 현상을 속도벡터로 보여준 것으로 흡입관에서 유체가 흡인현상을 확인 할 수 있다. 입구에서 들어오는 유체와 흡입관에서 들어오는 유체가 만나는 부분인 주관부의 중앙부분에서 와류가 일어나는 것을 볼 수 있다. 이 현상 또한 입구에서의 나가는 유체와 출구에서의 압력이 서로 관성이 작용하여 생기는 와류현상으로 (a) 1 : 3.21에서 보다 입구 쪽에 가까운 부분에서 와류가 생성되고, 와류현상이 더 많이 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 이것은 구동관로의 직경이 커지면서 입구에서 들어오는 유체가 많아져 이러한 유동현상이 나타나는 것으로 생각된다. 평균속도벡터에서 유동현상을 확실히 보기 위해 보정한 왼쪽 그림을 보면 주관부에의 와류현상이 일어나는 주관부의 중앙위쪽에서 조금 발생하는

것을 확인 할 수 있다. 이것은 평균속도벡터를 나타내는 것이기 때문에 와류현상은 실제 유체의 유동에서는 크게 발생하지 않은 것으로 볼 수 있다. 그리고 출구에서 유체의 유동분포는 중앙으로 흐르는 것을 확인 할 수 있고, 전체적인 PIV의 평균속도분포는 CFD에서의 평균속도벡터의 분포와 같은 것을 확인 할 수 있다. (c)는 구동관로에 대한 확대 관로의 비가 1 : 1.86을 CFD결과에서 효율이 가장 좋은 구동관로의 끝단이 1.133인 위치에서의 분사펌프를 PIV로 분석하여 유동분포를 보여준 것이다. 오른쪽의 그림은 실제 유체가 움직이는 현상을 속도벡터로 보여준 것으로 흡입관에서 유체가 빨려들어 오는 현상을 확인 할 수 있다. 입구에서 들어오는 유체와 흡입관에서 들어오는 유체가 만나는 부분인 주관부의 중앙부분에서 와류가 일어나는 것을 볼 수 있다. 이 현상 또한 입구에서의 나가는 유체와 출구에서의 압력이 서로 관성이 작용하여 생기는 와류현상으로 (b) 1 : 2.25에서 보다 입구 쪽에 가까운 부분에서 와류가 생성되고, 와류현상이 더 많이 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 이것은 구동관로의 직경이 커지면서 구동관로에서 주관부로 유체가 나올 때 유체에 상대적으로 압력이 증가하면서 유체의 속도가 작아져서 이러한 유동현상이 나타나는 것으로 생각된다. 평균속도벡터에서 유동현상을 확실히 보기 위해 보정한 왼쪽 그림을 보면 주관부의 와류현상이 일어나는 것을 확인 할 수 없다. 이것은 평균속도벡터를 나타내는 것이기 때문에 와류현상은 실제 유체의 유동에서는 크게 발생하지 않으나 1 : 1.86에서는 와류의 발생 현상이 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 구동관로가 커짐에 따라 구동관로에서 유체 나올 때 주관부에서 압력이 크게 발생하여 속도가 줄어들어 생기는 현상으로 생각된다. 출구에서 유체의 유동분포는 중앙으로 흐르는 것을 확인 할 수 있고, 전체적인 PIV의 평균속도분포는 CFD에서의 평균속도벡터의 분포와 같은 것을 확인 할 수 있다.

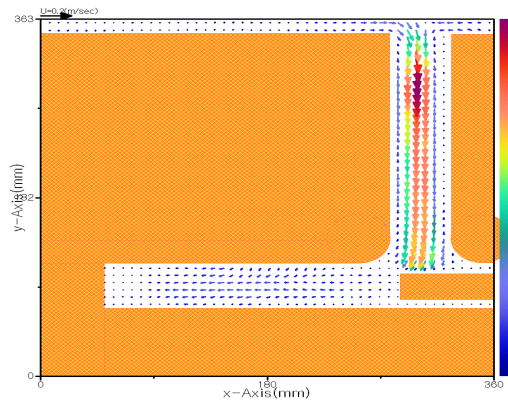
분사펌프를 CFD에서 구동관로에 대한 확대관로의 각각의 직경비와 속도변화, 구동관로의 끝단의 위치를 분석하여 효율이 가장 좋은 1 : 3.21에서 구동관로의 끝단의 위치가 1.333, 1 : 2.25에서 구동관로의 끝단의 위치가 1.213, 1 : 1.86에서 구동관로의 끝단의 위치가 1.333인 분사펌프를 입구속도를 1 m/s로 하여 PIV를 실험하다. CFD 유동현상과 PIV 유동현상이 일치하는 것을 확인 할 수 있었고, 구동관로의 직경이 커짐에 따라 와류현상이 크게 발생되어 효율이 떨어지는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 CFD 결과에서도 구동관로의 크기가 커짐에 따라 효율이 좋지 않은 결과를 얻을 수 있었다. 이 결과로 CFD 결과는 실제 PIV실험과 일치하는 것을 확인 할 수 있었다.

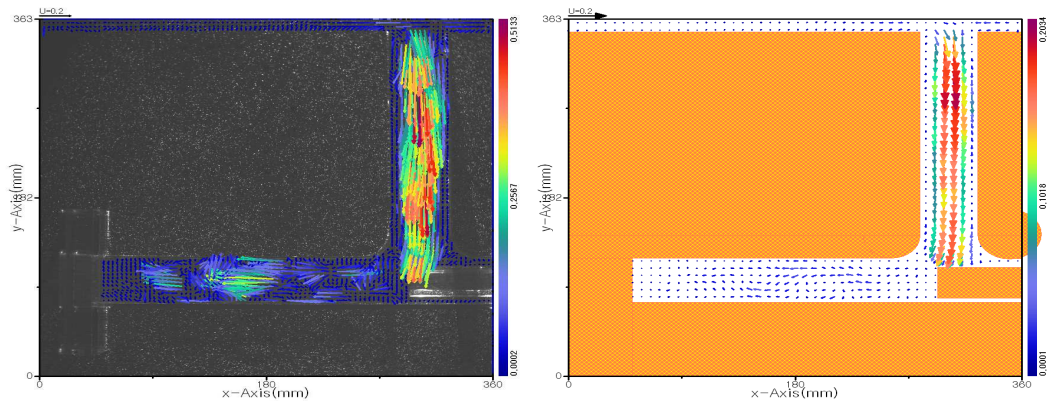


(a) 1 : 3.21



(b) 1 : 2.25

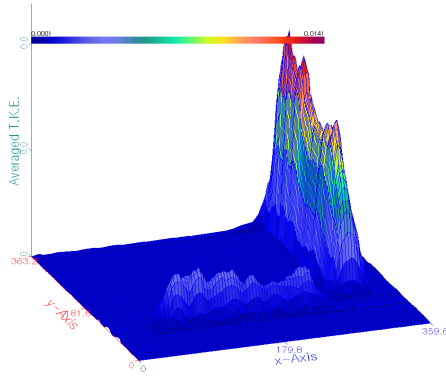




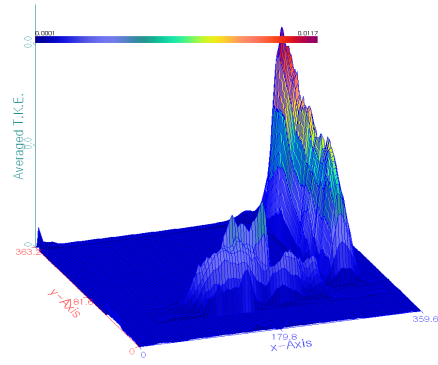
(c) 1 : 1.86

Fig. 4-31 Mean Velocity Vector by PIV

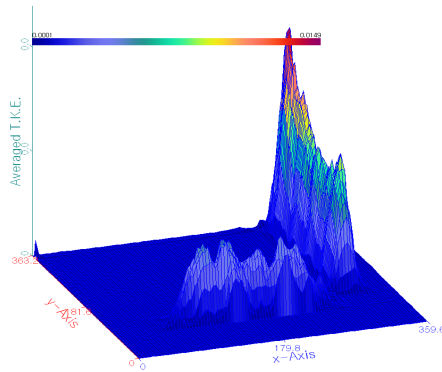
Fig. 4-32는 PIV실험을 분석한 운동에너지 값이다. 그림에서 보면 흡입관에서의 운동에너지 값은 크게 나타나는 것으로 보인다. 이것은 흡입관에서 흡이 잘되고 있다는 것을 의미한다. 흡입관에서의 운동에너지는 (a) 1 : 3.21에서 가장 높게 나타나는 것을 확인 할 수 있고, (b) 1 : 2.25, (c) 1 : 1.86 순으로 나타난다. 그래서 (a) 1 : 3.21에서 흡인이 가장 좋을 것을 알 수 있다. 주관부에서는 (a) 1 : 3.21에서 운동에너지가 가장 작게 나오고, (b) 1 : 2.25, (c) 1 : 1.86 순으로 크게 나타난다. 운동에너지가 높다는 말은 입자의 운동이 활발하게 이루어진 다는 의미로 볼 수 있다. 이것을 다른 말로 하면 와류의 속도가 크다는 의미로 해석 할 수 있다. Fig. 4-33에서 이 말을 뒷받침할 수 있다. 흡입관에서 난류 크기를 보면 흡입관과 주관부가 만나는 부분에서 난류가 갑자기 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 흡인되는 유체와 주관부의 유체가 만나면서 생기는 현상인 것을 알 수 있다. 주관부에서의 난류가 크다는 의미는 손실양이 크다는 것을 의미한다. (a) 1 : 3.21에서 난류의 분포가 가장 적게 나타나는 것이 확인되고, (b) 1 : 2.25, (c) 1 : 1.86 순으로 크게 나타난다. 이것은 PIV의 속도 벡터 분포도와 CFD의 결과 값과 동일한 결과를 볼 수 있다.



(a) 1 : 3.21

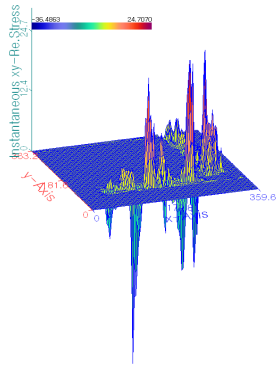


(b) 1 : 2.25

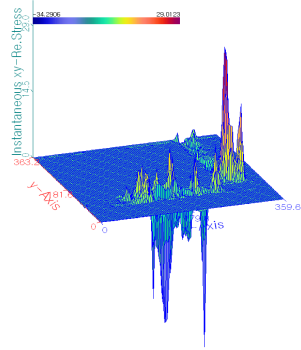


(c) 1 : 1.86

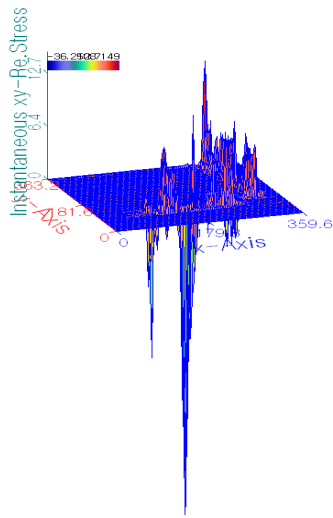
Fig. 4-32 Mean Total Kinematic Energy by PIV



(a) 1 : 3.21



(b) 1 : 2.25

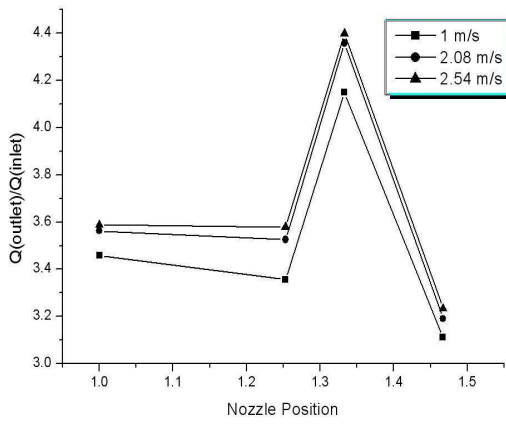


(c) 1 : 1.86

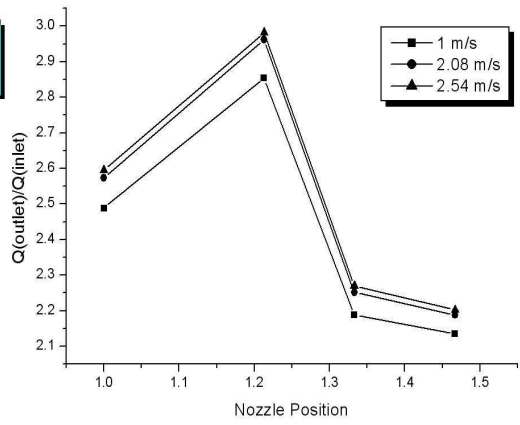
Fig. 4-33 Turbulent Kinetic Energy by PIV

第4節 유 량 효 율

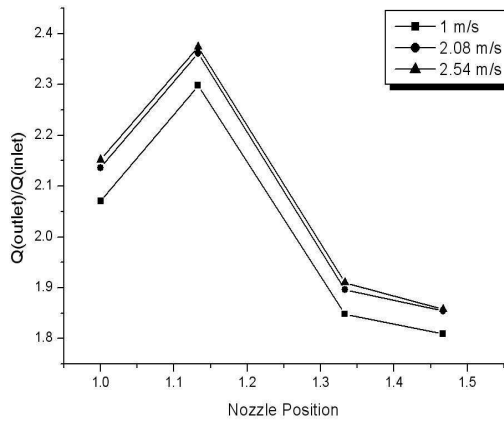
Fig. 4-34은 직경비의 변화와 구동관로의 끝단의 위치변화, 그리고 입구속도의 변화에 따라 출구유량의 비를 무차원화 시켜 유량효율을 나타 낸 것이다. 직경비의 조건이 (a) 1:3.21에서의 입구속도 조건은 $V_1 = 1$ m/s, $V_2 = 2.08$ m/s, $V_3 = 2.54$ m/s 이었을 때, 유량효율이 가장 좋은 구동관로의 위치는 1.133에서 $\eta_1 = 4.150$, $\eta_2 = 4.358$, $\eta_3 = 4.399$ 값을 나타냈으며, 직경비 조건이 (b) 1:2.25인 경우에 유량효율이 가장 좋은 구동관로의 위치는 1.213에서 유량효율은 $\eta_1 = 2.854$, $\eta_2 = 2.962$, $\eta_3 = 2.982$ 값으로 나타났고, 직경비 (c) 1:1.86인 경우에 유량효율이 가장 좋은 구동관로의 위치는 1.133에서 유량효율은 $\eta_1 = 2.298$, $\eta_2 = 2.362$, $\eta_3 = 2.374$ 값을 나타내었다. 구동관로의 직경이 작을수록 같은 유량조건을 부여하였을 때, 유량효율이 가장 높은 값을 가지는 관로는 직경비 1:3.21 이었으며, 입구조건이 유량이 증가 할수록 속도는 빨라져서 분지관에서 흡입되는 유량은 더 높아짐을 확인 할 수 있었다. 구동관로가 길어진 경우에 분지관의 영향이 오히려 유량효율을 떨어뜨리는 현상을 일으켰다. 구동관로의 크기가 커질수록 유입되는 유량에 비해 유량의 효율은 떨어지는 것을 확인 할 수 있었다. 따라서 각각의 직경비에 유량효율을 높이려면 최적의 구동관로를 찾아야하며, 구동관로가 작을수록 구동관로의 위치는 흡입관의 중앙보다 길게 위치해야하고, 구동관로가 클수록 구동관로의 위치는 흡입관의 중앙에 가까워야한다. 구동관로의 직경이 작고 속도가 빨라질수록 흡입되는 효율은 증가한다.



(a) 1 : 3.21



(b) 1 : 2.25



(c) 1 : 1.86

Fig. 4-34 Flux Efficiency

第 5 章 結 論

직경비 1:3.21, 1:2.25, 1:1.86에 대한 분사펌프의 유동특성을 입구조건과 구동관로의 끝단의 위치를 변화시켜가면서, 평균속도, 전압력분포를 CFD 분석을 통해 각각의 직경비의 구동관로의 최적위치를 찾아 PIV 실험을 통해 다시 분석 및 고찰하여 본 실험의 결론은 다음과 같았다.

- (1) 직경비 1:3.21, 1:2.25, 1:1.86의 각 구동관로의 끝단의 위치가 각각 1.333, 1.213, 1.133에 위치했을 때 흡인효과가 가장 크게 나타났고, 이때 흡인효과는 속도변화와는 무관하다.
- (2) 직경비에 따른 구동관로의 최적 위치에 있을 때 주관부의 속도분포를 보면 벽면에서의 속도가 33%이상 높게 나타났다.
- (3) 분사펌프의 직경비에 따른 구동관로의 최적위치에서 PIV를 실험하여 분석한 결과 CFD 유동현상과 PIV 유동현상이 일치하는 것을 확인 할 수 있었고, 구동관로의 직경이 커짐에 따라 와류현상이 크게 발생되어 효율이 떨어지는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 CFD 결과에서도 구동관로의 크기가 커짐에 따라 효율이 저하됨을 알 수 있다. 이 결과로 CFD 결과는 실제 PIV실험과 정성적으로 일치하는 것을 알 수 있었다.
- (4) 분사펌프의 유량효율을 높이려면 각각의 직경비에 구동관로의 최적위치를 찾아야 한다. 최적의 위치에서는 흡인효과는 물론 유량효율도 제일 좋았다.
- (5) 구동관로의 끝단이 흡입관에 중앙에 위치하였을 때 최적의 위치보다 평균 11% 효율이 정도 낮았으며, 최적의 위치보다 길어지면 평균 23% 효율이 감소되었다. 이는 구동관로가 길수록 유량 효율이 낮을 뿐만 아니라, 구동관로의 끝단이 최적의 위치였을 때 유량효율은 가장 좋았다.
- (6) 구동관로의 직경비 조건이 1 : 3.21일 때 효율이 가장 좋게 나왔으며, 입구속도가 빠를수록 효율이 증가하였다. 1 : 3.21은 1 : 2.25보다 유량 효율이 좋게 32% 이상이었으며, 1 : 3.21은 1 : 1.86보다 46% 유량효율이 42% 정도였다. 이것은 구동관로에 대한 확대 관로의 비가 작을수록 구동관로가 클수록 유량효율은 나빠진다.

REFERENCE

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 - ch emical 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 기포뿔의 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 제2호, 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" 한국박용기관학회지, 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
16. 예제로 배우는 STAR CD Version 3.22, 인터비전
17. Pro-STAR/am Automatic Mesh Generation New User Training.
18. STAR-CD BASIC TRAINING COURSE
19. User's Guide CATUS 3.2 for Windows XP and Windows 2000.

저작물 이용 허락서

학 과	기계공학과	학 번	20067068	과 정	석사
성 명	한글 : 장 현 준 한문 : 張 洙 準		영문 : Jang Hyun-jun		
주 소	전남 담양군 담양읍 오계리 1구 193번지				
연락처	E-mail : janghyunjun1@nate.com				
논문제목	한글 : 분사펌프의 구동관로의 위치변화에 따른 유동특성 연구				
	영문 : A Study on the Flow Characteristics of Driven Duct of Position Change of Jet Pump				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건 아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함.
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집과 형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물 이용의 허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음.
7. 소속 대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의() 반대()

2007년 8월 일

저작자: 장 현 준 (인)

조선대학교 총장 귀하