

공학박사학위논문

협착부를 가지는 T-합류관의
유동특성

지도교수 권오봉

이 논문은 공학박사학위논문으로 제출함



2004년 2월

부경대학교대학원

기계공학과

김명관

김명관의 공학박사 학위논문을 인준함

2003년 12 월 17 일

주 심 공학박사 김 남 식



부 심 공학박사 한 규 일



위 원 공학박사 배 대 석



위 원 공학박사 손 영 석



위 원 공학박사 권 오 봉



목 차

| | |
|---|-------------|
| 목차 | I |
| LIST OF FIGURES AND TABLES | IV |
| NOMENCLATURE | X |
| ABSTRACT | XIII |
| | |
| 제 1 장 서론 | 1 |
| 1.1 연구 배경 및 동향 | 3 |
| 1.2 연구 목적 | 6 |
| 1.3 연구 개요 | 8 |
| | |
| 제 2 장 합류관 유동과 에너지 손실 | 11 |
| 2.1 합류관 유동 양상 | 13 |
| 2.2 에너지 손실 계수의 정의 | 15 |
| | |
| 제 3 장 유동 특성 실험 | 17 |
| 3.1 실험 장치 | 19 |
| 3.2 실험 방법 | 26 |
| 3.3 동일 압력에서의 유동특성 | 28 |
| 3.4 결과 및 고찰 | 33 |
| | |
| 제 4 장 수치 SIMULATION | 35 |
| 4.1 지배방정식 | 39 |
| 4.2 난류모델 | 42 |
| 4.2.1 Eddy-viscosity 모델 | 43 |
| 4.2.2 0-방정식 모델 | 44 |
| 4.2.3 1-방정식 모델 | 46 |

목 차

| | |
|-------------------------------------|------------|
| 4.2.4 2-방정식 모델 | 47 |
| 4.2.5 표준 $k-\epsilon$ 모델 | 49 |
| 4.2.6 RNG $k-\epsilon$ 모델 | 51 |
| 4.3 수치해석 방법 | 52 |
| 4.3.1 경계조건 | 52 |
| 4.3.2 격자계 | 54 |
| 4.3.3 계산방법 및 수렴조건 | 58 |
| 4.4 결과 및 고찰 | 60 |
| 4.4.1 동일 압력에서의 유량변화 | 61 |
| 4.4.2 동일 유량에서의 에너지 손실 | 86 |
| 4.4.3 오리피스 설치 위치에 따른 유동변화 | 100 |
| 4.4.4 이형 직경 오리피스가 설치된 관에서의 유동 | 106 |
| 4.5 결론 | 114 |
| | |
| 제 5 장 PIV 가시화 | 117 |
| 5.1 입자영상유속계의 기본원리 | 121 |
| 5.2 입자영상유속계의 분류 | 123 |
| 5.2.1 개별입자추적 PIV와 입자분포상관 PIV | 127 |
| 5.2.2 조명부포 PIV | 129 |
| 5.2.3 개별 도심좌표 PIV | 130 |
| 5.2.4 자기 상관 PIV | 132 |
| 5.2.5 상호상관 PIV | 133 |
| 5.3 입자영상유속계의 구성장치 | 135 |
| 5.3.1 영상입력 및 저장장치 | 135 |
| 5.3.2 영상처리 장치 | 136 |
| 5.3.3 주변기기 및 소프트웨어 | 137 |
| 5.3.4 영상출력장치 | 137 |
| 5.4 속도벡터의 검출 알고리즘 | 138 |

| | |
|------------------------------------|-----|
| 5.4.1 4-frame 입자추적법 | 138 |
| 5.4.2 2-frame법 | 139 |
| 5.4.3 1-frame법 | 140 |
| 5.4.4 계조치상관법 | 140 |
| 5.5 PIV 가시화 실험장치 및 방법 | 142 |
| 5.5.1 시뮬레이션에 의한 실험장치 예측 | 144 |
| 5.5.2 실험장치 | 155 |
| 5.6 결과 및 고찰 | 159 |
| 5.6.1 오리피스를 설치하지 않은 덕트에서의 유동 | 159 |
| 5.6.2 오리피스를 설치한 덕트에서의 유동 | 165 |
| 5.7 결론 | 169 |
| | |
| 제 6 장 결론 | 171 |
| | |
| 참고문헌 | 177 |

LIST OF FIGURES AND TABLES

Figures

- Fig. 2.1 Combination of flow at pipe junction
- Fig. 3.1 Schematic diagram of experimental apparatus
- Fig. 3.2 Enlarged view of the main test section and orifices
- Fig. 3.3 Flow rate vs. pressure without orifice
- Fig. 3.4 Flow rate vs. pressure with orifice diameter of 30mm
- Fig. 3.5 Flow rate vs. pressure with orifice diameter of 25mm
- Fig. 3.6 Flow rate vs. pressure with orifice diameter of 20mm
- Fig. 3.7 Flow rate vs. pressure with orifice diameter of 15mm
- Fig. 4.1 Grid distribution for whole calculation domain
- Fig. 4.2 Grid distribution around the orifice
- Fig. 4.3 Grid distribution in a circular section
- Fig. 4.4 Grid distribution around the T-junction
- Fig. 4.5 Sensitivity of mesh system
- Fig. 4.6 Flow rate vs. pressure without orifice
- Fig. 4.7 Contours of velocity magnitude without orifice
- Fig. 4.8 Filled contours of velocity magnitude without orifice
- Fig. 4.9 Overall and enlarged streamline without orifice
- Fig. 4.10 Flow rate vs. pressure with orifice diameter of 30mm
- Fig. 4.11 Contours of velocity magnitude with orifice diameter of 30mm

- Fig. 4.12 Filled contours of velocity magnitude with orifice diameter of 30mm
- Fig. 4.13 Overall and enlarged streamlines with orifice diameter of 30mm
- Fig. 4.14 Flow rate vs. pressure with orifice diameter of 25mm
- Fig. 4.15 Contours of velocity magnitude with orifice diameter of 25mm
- Fig. 4.16 Filled contours of velocity magnitude with orifice diameter of 25mm
- Fig. 4.17 Overall and enlarged streamlines with orifice diameter of 25mm
- Fig. 4.18 Flow rate vs. pressure with orifice diameter of 20mm
- Fig. 4.19 Contours of velocity magnitude with orifice diameter of 20mm
- Fig. 4.20 Filled contours of velocity magnitude with orifice diameter of 20mm
- Fig. 4.21 Overall and enlarged streamlines with orifice diameter of 20mm
- Fig. 4.22 Flow rate vs. pressure with orifice diameter of 15mm
- Fig. 4.23 Contours of velocity magnitude with orifice diameter of 15mm
- Fig. 4.24 Filled contours of velocity magnitude with orifice diameter of 15mm
- Fig. 4.25 Overall and enlarged streamlines with orifice diameter of 15mm

LIST OF FIGURES AND TABLES

- Fig. 4.26 Flow ratio vs. diameter ratio
- Fig. 4.27 Velocity vectors around the orifice
- Fig. 4.28 Velocity vectors at T-junction(side view)
- Fig. 4.29 Velocity vectors at T-junction(top view)
- Fig. 4.30 Velocity vectors at T-junction(front view)
- Fig. 4.31 Loss coefficient vs. flow rate without orifice
- Fig. 4.32 Contours of total pressure without orifice
- Fig. 4.33 Filled contours of total pressure without orifice
- Fig. 4.34 Loss coefficient vs. flow rate with orifice diameter of 30mm
- Fig. 4.35 Contours of total pressure with orifice diameter of 30mm
- Fig. 4.36 Filled contours of total pressure with orifice diameter of 30mm
- Fig. 4.37 Loss coefficient vs. flow rate with orifice diameter of 25mm
- Fig. 4.38 Contours of total pressure with orifice diameter of 25mm
- Fig. 4.39 Filled contours of total pressure with orifice diameter of 25mm
- Fig. 4.40 Loss coefficient vs. flow rate with orifice diameter of 20mm
- Fig. 4.41 Contours of total pressure with orifice diameter of 20mm
- Fig. 4.42 Filled contours of total pressure with orifice diameter of 20mm
- Fig. 4.43 Loss coefficient vs. flow rate with orifice diameter of 15mm

- Fig. 4.44 Contours of total pressure with orifice diameter of 15mm
- Fig. 4.45 Filled contours of total pressure with orifice diameter of 15mm
- Fig. 4.46 Loss coefficient ratio vs. flow rate
- Fig. 4.47 Loss coefficient ratio vs. diameter ratio
- Fig. 4.48 Loss coefficient vs. flow rate with orifice diameter of 30mm
- Fig. 4.49 Loss coefficient vs. flow rate with orifice diameter of 25mm
- Fig. 4.50 Loss coefficient vs. flow rate with orifice diameter of 20mm
- Fig. 4.51 Loss coefficient vs. flow rate with orifice diameter of 15mm
- Fig. 4.52 Loss coefficient ratio vs. flow rate
- Fig. 4.53 Flow ratio vs. Re ($d_l / D_l = 1$)
- Fig. 4.54 Flow ratio vs. Re ($d_l / D_l = 0.882$)
- Fig. 4.55 Flow ratio vs. Re ($d_l / D_l = 0.735$)
- Fig. 4.56 Flow ratio vs. Re ($d_l / D_l = 0.588$)
- Fig. 4.57 Diameter ratio of lateral pipe vs. diameter ratio of main pipe to match flow rates
- Fig. 4.58 Conditions for the same flow rates of the main and the lateral
- Fig. 5.1 Basic concept of particle image velocimetry
- Fig. 5.2 Classification of image velocimetry
- Fig. 5.3 Classification by pursuit algorithm of velocity vector

LIST OF FIGURES AND TABLES

- Fig. 5.4 A concept of cross-correlation function
- Fig. 5.5 Computational grid
- Fig. 5.6 Computational geometry ($Ar = 0.25$)
- Fig. 5.7 Computational geometry ($Ar = 0.5$)
- Fig. 5.8 Computational geometry ($Ar = 1$)
- Fig. 5.9 Computational geometry ($Ar = 2$)
- Fig. 5.10 Computational geometry ($Ar = 4$)
- Fig. 5.11 Contours of pressure and velocity (2D)
- Fig. 5.12 Contours of pressure and velocity ($Ar = 0.25$)
- Fig. 5.13 Contours of pressure and velocity ($Ar = 0.5$)
- Fig. 5.14 Contours of pressure and velocity ($Ar = 1$)
- Fig. 5.15 Contours of pressure and velocity ($Ar = 2$)
- Fig. 5.16 Contours of pressure and velocity ($Ar = 4$)
- Fig. 5.17 Schematic diagram of experimental apparatus
- Fig. 5.18 Original image
- Fig. 5.19 Background image
- Fig. 5.20 Velocity vectors
- Fig. 5.21 Velocity distribution
- Fig. 5.22 Streamlines
- Fig. 5.23 Velocity profile
- Fig. 5.24 Enlarged velocity vectors
- Fig. 5.25 Original image
- Fig. 5.26 Background image
- Fig. 5.27 Velocity vectors
- Fig. 5.28 Velocity distribution

Fig. 5.29 Enlarged velocity vectors

Photographs

Photo. 3.1 Photograph of experimental apparatus

Photo. 3.2 Float type flowmeter

Photo. 3.3 Pressure gage

Photo. 3.4 Main test section and orifices

Photo. 5.1 Photograph of high speed camera

Photo. 5.2 Photograph of halogen lamp

Photo. 5.3 Test section of PIV

Tables

Table 4.1 Boundary conditions

Table 4.2 Diameter ratio and flow ratio

Table 4.3 Diameter ratio and loss coefficient ratio

Table 4.4 Diameter ratios of the main and lateral pipes to
match flow rates

NOMENCLATURE

Symbols

| | |
|---------------------|---|
| A | : Area |
| Ar | : Aspect ratio |
| b | : Constant term in the discretization equation |
| CCC | : Cross correlation coefficient |
| CIV | : Concentration image velocimetry |
| CCIV | : Continuous CIV |
| $c_{\varepsilon 1}$ | : Experiential constant of $k-\varepsilon$ 2-equation model |
| $c_{\varepsilon 2}$ | : Experiential constant of $k-\varepsilon$ 2-equation model |
| c_u | : Experiential constant of $k-\varepsilon$ 2-equation model |
| d | : Diameter of orifice |
| D | : Diameter of pipe |
| f | : Friction factor |
| g | : Gravitational acceleration |
| h | : Head |
| I | : Turbulence intensity |
| IV | : Image velocimetry |
| K | : Power loss coefficient |
| k | : Turbulent kinetic energy |
| L | : Length |

| | |
|------------|--|
| l | : Length from joint to orifice |
| LDV | : Laser doppler velocimetry |
| PIV | : Particle image velocimetry |
| PCIV | : Particle concentration image velocimetry |
| PTV | : Particle tracking velocimetry |
| P_L | : Power loss |
| p | : Pressure |
| Q | : Flow rate |
| Re | : Reynolds number |
| u | : x-direction velocity |
| V | : Mean velocity |
| v | : y-direction velocity |
| w | : z-direction velocity |
| x | : x-coordinate |
| Δx | : x-direction width of the control volume |
| y | : y-coordinate |
| Δy | : y-direction width of the control volume |
| z | : z-coordinate |
| Δz | : z-direction width of the control volume |

Greek Symbols

NOMENCLATURE

| | |
|---------------|--------------------------------------|
| γ | : Specific weight |
| ε | : Dissipation rate |
| ζ | : Loss coefficient |
| μ | : Viscosity |
| μ_t | : Coefficient of turbulent viscosity |
| ν | : Kinematic viscosity |
| ρ | : Density |

Subscripts

| | |
|---|--------------------------------|
| 1 | : Upstream part of main pipe |
| 2 | : Lateral pipe |
| 3 | : Downstream part of main pipe |
| L | : Loss |
| t | : Total |
| s | : Static |

Superscripts

| | |
|---|--|
| * | : Previous-iteration value of a variable |
| - | : Average value of a variable |
| ' | : Corrected valued of a variable |

Flow Characteristics of T-Junction with Stenosis

Myong Kwan Kim

Department of Mechanical Engineering, Graduate School.

Pukyong National University

abstract

Energy losses and flow rates at pipe junctions have been a main topic for many researchers, because they play very important roles in the design and analysis of piping systems. Piping systems can not be consisted of just all straight pipes. There usually are elbows, crosses, bushings, reducers, return bends, unions, and tees. So it is very important to study the flow characteristics in these fittings. Most of these fittings have branch flows and junction flows. When pipes and fittings are used for a while, area at a certain location reduces due to scales. These stenoses usually occur near sudden area changing part, junctions, and branches and cause some additional pressure losses.

Characteristics of flows at T-junction pipes with orifices are investigated in this dissertation. Experiments were carried out for several flow rates, orifice sizes, and pressure differences. Numerical simulations were also done to get more data for the wide range of flow rates. Experimental results and numerical ones are generally in a good agreement. PIV visualization was also coded to visualize flow fields at junctions for two-dimensional case.

ABSTRACT

The experimental apparatus used in this study consists of storage tank, pump, upper tank, flow meters, test section, and pressure gages. Water stored in the storage tank is pumped up into the upper tank. With this water level, same total pressures were maintained at a upstream main pipe and a lateral pipe, while checking the pressures and flow rates at both pipes. The water level of the upper tank was varied between 1m and 1.5m for each set of tests in order to maintain same pressure at the inlets of the upstream main pipe and lateral pipes. Both the diameter of the main pipe and the lateral pipe are 34mm. Tested Orifice diameters are 30mm, 25mm, 20mm, 15mm, respectively.

A finite volume method was used for the discretization of the continuity equation and the momentum equations, and the hybrid scheme was used for the convection-diffusion terms and standard $k-\epsilon$ model was used as a turbulent model. Instead of using dense grid at the entire computational domain to get accurate solutions, irregular grid system was used. Denser grids were used near the center of the junction and near the orifices. Total number of the nodes used in this simulation is about 250000. FLUENT was used for the computations. Total pressures were given at the inlet of both main pipe and lateral pipe and static pressure are given at the outlet of the main pipe as boundary conditions.

For the PIV visualization system, Grey-Level Cross-Correlation particle tracking algorithm was used to calculate the flow fields. Vinyl chloride polymer particles of 100 - 150 μm of diameter are used in this visualization. Very wide rectangular type T-junctions

are used to visualize two-dimensional flow, because it is almost impossible to visualize flows for T-junctions with circular sections.

The computational results show relatively good agreements with the experimental data. Flow rates for several inlet total pressures with and without orifices are shown in this dissertation. On the contrary to branch flows, the flow rates at the lateral pipes are larger than those at the upstream main pipes for a given same inlet total pressure. The difference between the flow rate at a lateral pipe and the flow rate at an upstream main pipe become smaller and smaller as the diameter of orifice becomes smaller. The flow rates at both a later pipe and a upstream main pipe are almost the same when orifices are very small.

From the numerical simulations and PIV visualization, some flow patterns at the T-junction are shown for several cases. Separated flows are observed near the upper wall at the downstream of main pipe, while secondary flows are observed at the main pipe.

Finally, conditions where two flow rates at the lateral pipe and the upstream main pipe are the same, were searched and are shown in this dissertation.

제 1 장

서 론

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 동향

동력기계의 물질전달 및 유체를 이송하는 수단은 대부분 배관계로 이루어진다. 이 배관계는 원류를 수송하는 거대한 송유관에서부터 우리 인체 내의 혈액을 이송하는 모세혈관에 이르기까지 아주 다양하고 매우 복잡하게 구성되어있다. 특히 공업용, 산업용 배관은 위치, 장소 등의 제약을 많이 받으므로 배관계를 반드시 직선만으로 구성할 수가 없게 된다. 따라서 엘보(elbow), 크로스(cross), 부싱(bushing), 리듀서(reducer), 리턴벤드(return bends), 유니언(union), 티(tees) 등과 같은 관 부속품을 이용하여 복잡한 배관계가 형성된다. 이러한 복잡한 연결 때문에 배관계의 유동특성 또한 매우 다양하게 변하게 된다¹⁻²⁾.

골프장의 경우 스프링클러를 작동하기 위하여 골프장 속에 대부분 엘보, 티, 레듀서 등으로 구성되어진 매우 복잡한 배관망이 형성되어져있으며, 이 배관망을 통해서 유체는 분류 또는 합류에 의해서 스프링클러를 통해서 밖으로 배출된다. 하지만, 분류 또는 합류의 과정에서 배관내의 많은 압력손실이 발생하고, 이로 인해서 유량 또한 많은 변동이 생기므로 스프링클러가 제대로 작동되지 않는 경우가 생긴다. 따라서, 필요 이상의 펌핑 에너지를 제공하여야 한다.

인체의 경우에서도 비뉴턴유체인 혈액이 혈관을 따라 흐를 때 분류, 합류가 수 없이 생긴다. 최근에는 F. J. Walburn 등³⁾은 분기관 내에서 관벽에 미치는 전단응력은 분기점 근처에서 증가하며, 생체 혈관의 경우는 분기점 근처에서 동맥경화가 발생할 경향이 있음을 임상수술에서

수집한 혈관의 실험을 통하여 연구를 했으며, C. M. Rodkiewicz 와 D. H. Howell⁴⁾은 동맥 분기관에서의 유동상태를 연구하여 인체의 특정 부위에 혈류량을 증가시킬 수 있는가를 고찰하였다. 이와 같이 순환계통의 질병 치료에 응용하기 위하여, 혈관을 통하여 흐르는 혈류의 복잡한 관내유동 현상 규명에 많은 노력이 행해지고 있다.

J. W. Shim⁵⁾은 입자영상유속계를 이용한 분기형 덕트내 뉴턴유체의 유동가시화에 대해서 연구를 하였으며, M. H. Ko⁶⁾은 분기관에서의 유체유동에 관한 연구를 통해서 분기관의 각도변화에 따른 유동현상을 연구했고, M. Ensworth⁷⁾는 엘보가 있는 배관계의 유동해석을 통해서 엘보내의 유동손실을 줄이는 방법을 수치적으로 해석했다. 고석보, 전용두⁸⁾는 90° 사각곡관 내 입자 이상유동을 수치적으로 모사했으며, 이용화, 박정원⁹⁾은 배수관내의 압력 및 유동특성에 대해서 연구했으며, K. Oka 와 H. Ito¹⁰⁾는 합류지점의 배관결합과정에서 곡률 반지름에 따른 에너지 손실에 관해서 실험적으로 연구했고, O. N. Ha¹¹⁾는 비-뉴턴 유체인 점탄성 유체를 사용하여 분기관의 증류 영역에서 분기 유동 특성을 연구하였다. Y. U. Min 와 Y. G. Kim¹²⁾은 2단 오리피스에서의 난류유동을 맥동유동에 대하여 수치해석적으로 고찰하였으며, J. S. Maeng 등¹³⁾은 오리피스 링이 부착된 원관 내 정상 및 맥동 난류유동에 대하여 수치적으로 해석하였다.

특히, 공업용, 산업용으로 사용빈도가 높은 엘보, 밴드, 티 등을 갖는 배관계의 유동은 직선만으로 구성된 배관계와는 달리, 원심력이 작용하게 되어 배관 내측벽과, 외측벽에 압력차가 발생하게 된다. 이 때문에 축방향에는 박리유동(separated flow)이 생기고, 축방향에 수직인 단면 내에는 2차 유동(secondary flow)이 발생하여 새로운 유동현상으로 바뀌게 된다. 이와 같이 엘보와 티 등에 의해서 직선부에 급격하게 곡관

으로 변화하는 유동영역에서 있어서 매우 복잡한 유동특성을 나타내고 있음에도 불구하고, 이러한 영역에서의 유동에 대한 연구는 그리 활발하지 않는 것이 현실이다¹⁴⁻¹⁶⁾.

배관계에 있어서 이러한 유동특성들에 대한 자료들은 배관설비, 공기 조화의 덕트설비, 유체기계의 설계에 기초자료가 될 뿐 아니라, 압축기, 가스터빈 등의 유동특성을 이해하는데 매우 유용할 것이다.

1.2 연구 목적

물질전달과 유체수동의 통로가 되는 배관시스템은 수많은 합류관, 분기관, 곡관 등으로 구성된다. 이러한 액체배관을 장기간 사용하면 액체 중에 포함되어 있는 부유물이 관벽에 침착하고 액체와 관벽의 화학작용에 의해서 관벽에 스케일이 쌓이게 되어 관로를 좁게하는 협착현상(stenosis) 현상이 생긴다. 이러한 협착현상은 관의 단면과 형태가 급격히 변하는 지점 즉, 유동방향을 조절하기 위하여 설치된 산업용 배관장치 또는 인체혈관의 분기점, 합류점과 같이 유동박리에 의한 재순환영역이 발생하는 곳에서 주로 형성되는 것으로 알려져 있다. 협착현상이 일단 발생되면, 시간이 경과될수록 협착정도가 심해지면서 압력손실이 커지고 유량도 크게 감소된다. 합류관과 분류관 유동은 유동방향의 급격한 변화로 인해 배관계나 혈관내의 원활한 유량수송을 저해하고, 압력손실을 증가시킨다. 따라서 뉴턴 유체와 비 뉴턴유체의 합류관, 분류관 내의 유동에 관한 연구는 공학적 해석과 인체의 동맥혈관에서 발생하는 병적 원인을 규명하는데 매우 중요하다.

공기 조화 측면에서 본다면 쾌적한 실내 온도분포 유지를 위하여 적절한 유량분배가 필요하며, 제습(demist)덕트와 제상(defrost)덕트 사이에서도 적절한 유량분배가 필요하다. 특히 자동차, 항공기, 선박 등의 좌석과 좌석사이의 쾌적한 실내를 위하여 적절한 유량분배가 필요하다고 볼 수 있다¹⁷⁾.

또 반도체나 LCD를 만드는 공정은 청정가스를 공급하여 정밀작업을 하는 시스템이므로 가스공급을 위해 많은 합류관과 분류관이 있다. 이 시스템에서 합류관과 분류관의 본관과 지관에 유량의 변화를 주기 위해서 밸브를 부착하는 경우도 있지만, 시스템이 매우 복잡하고 유량조절이 불필요할 때는 밸브대

신 관의 내부에 오리피스를 설치하는 경우도 있다.

일반적으로 배관계는 이송물체를 사용목적에 맞도록 적절하게 이송시키고 분배할 수 있는 최적의 조건으로 설계되어야 하는데, 실제의 설계에서는 각종 부속 설비와 연결부를 포함하는 복합 구조로 인한 손실 등을 고려해야 하기 때문에 최적 설계조건 설정이 매우 어렵다. 일반적으로는 숙련된 설계자의 know-how에 의존하는 실정이다. 그러나 화학플랜트 내에서는 배관이 그물망처럼 연결되어 각종 부속장치나 저장탱크에 이송물체를 유입, 유출시키는 복합 배관계로 되어있어 유동특성의 복잡성, 압력분포의 불균일성 등으로 인해 숙련자의 know-how에 의존하는 설계방법에는 한계가 있다. 또한 각종 부속장치나 저장탱크에서의 운동량의 변화, 관마찰과 압력손실의 발생 등으로 유동역학에 의한 해석적 설계도 용이하지 않다. 따라서 화학플랜트 설비 내의 배관계가 최적 조건으로 설계되지 못하면 배관계 내에서는 국부적으로 고온부가 발생되거나 전열계수가 저감될 수 있고, 합류관이나 분류관으로 유입, 유출되는 유동의 불안정성으로 인해 제품에 결함을 초래할 수 있다.

본 연구에서는 실험과 CFD 그리고 입자영상유속계를 이용하여 T형 합류관에서 협착부가 발생한 경우, 협착부에 따른 유동현상과 합류지점에서의 유동현상을 해석하여 배관계에서 합류부의 영향에 의한 최적설계에 필요한 정성적 자료를 제공하는 것을 목적으로 한다.

1.3 연구개요

본 논문은 총 6장으로 구성되었다.

제 1 장은 연구를 하게된 배경 과 연구개요, 본 논문의 연구 목표를 서술하였다. 그리고 이전의 몇몇 연구자들의 연구내용을 간략하게 기술하였다.

제 2 장은 본 논문에서 다루게 될 일반적인 합류관에서의 유동양상과 유동의 기초지식, 유동형태 그리고 에너지 손실의 정의를 소개하였다.

제 3 장은 논문의 주요실험장치에 대하여 자세히 설명하였고, 실제 실험장치의 사진과 개략도가 실려있다. 본관과 지관에 동일한 종류의 오리피스를 설치하여 동일한 압력을 가했을 때 오리피스의 직경변화에 따른 유량변화와 유량비에 대해서 다루었다.

제 4 장은 수치해석의 기초지식과 수치해석방법 등을 기술하였고, 실험장치의 제작을 대신한 수치 시뮬레이션의 결과를 보여준다. 동일압력에서의 유량변화는 실험을 통해서 알 수 있었던 여러 결과들과 비교하였으며, 동일유량에서의 에너지 손실, 오리피스 위치에 따른 유동변화, 이형 직경 오리피스가 있는 관에서의 유동 등이 수록되어 있다.

제 5 장은 PIV가시화의 기본 원리, 분류, 구성 장치, 속도벡터의 검출 알고리즘, 실험 장치도, 시뮬레이션에 의한 실험장치의 모형선정, 실험 장비의 사진 그리고, 실험결과들을 정리하였으며, 오리피스가 설치되지

얇은 덕트에서의 유동과 10mm의 오리피스를 설치한 덕트에서의 유동으로 실험결과는 2가지의 경우에 대해서 다루었다.

마지막으로 제 6 장은 본 논문의 결론을 정리하였다.

제 2 장
합류관 유동과
에너지 손실

제 2 장 합류관 유동과 에너지 손실

2.1 합류관 유동 양상

유체의 유동은 유체 분자의 병진 운동에 의한 유동, 회전 운동에 의한 와류, 주기 운동에 의한 파동의 3가지 형태로 대별할 수 있으며, 이들은 각각 독립하여 존재하는 일은 드물고, 보통 세 개의 형태가 복합하여, 복잡한 유동을 한다.

Fig. 2.1은 합류부 유동분포를 나타내기 위한 그림으로 관의 직경은 모두 동일하다. 그림과 같이 합류관의 합류부는 벽에서 박리유동 (Separated flow)이 생기거나, 원심력에 의하여 2차유동(Secondary flow)이 일어나기 때문에 단순한 Moody의 마찰손실보다는 항상 큰 손실이 있게 된다. 합류부 직후에는 유동박리가 생겨서 유체가 흘러갈 수 있는 유로가 상당히 줄어들었으며, A-B단면에서 보면 2차 유동과 박리가 많이 발생하는 것을 볼 수 있다¹⁸⁻²¹⁾.

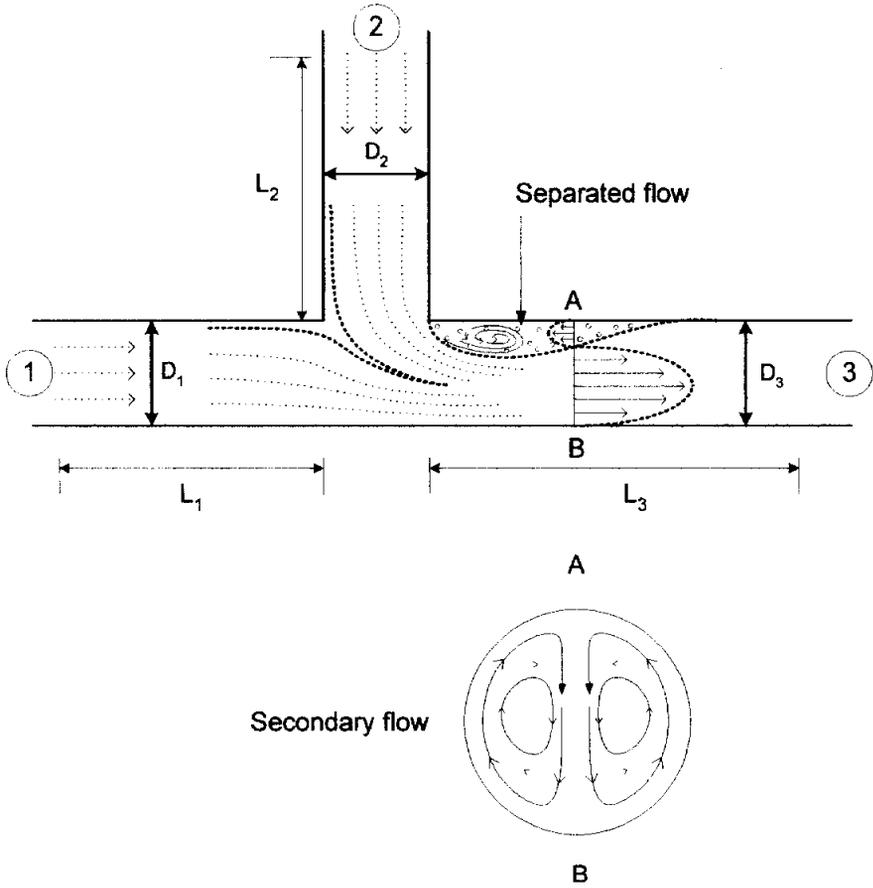


Fig. 2.1 Combination of flow at pipe junction

2.2 에너지 손실 계수의 정의

Fig. 2.1에서 보는 것과 같이 유동의 합류부 중 본관 상류부와 본관 하류부인 1과 3사이의 파이프 손실수두 h_{L13} 은 아래의 에너지 방정식에 의해서 표현되었다^{22, 23)}.

$$h_{L13} = \left(\frac{p_1}{\gamma} + \frac{1}{2g} V_1^2 \right) - \left(\frac{p_3}{\gamma} + \frac{1}{2g} V_3^2 \right) - f_1 \frac{L_1}{D_1} \frac{1}{2g} V_1^2 - f_3 \frac{L_3}{D_3} \frac{1}{2g} V_3^2 \quad (1)$$

본관 직선 흐름 손실계수 ζ_{13} 은 다음과 같다.

$$\zeta_{13} = h_{L13} / \left(\frac{1}{2g} V_3^2 \right) \quad (2)$$

지관으로부터 본관으로의 유동에 대한 손실수두 h_{L23} 과 손실계수 ζ_{23} 은 각각 방정식 (1)과 (2)에서 아래첨자 1을 2로 대체함으로써 얻어질 수 있고, 연속방정식은 아래와 같다^{10, 11, 24-31)}.

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 \quad (3)$$

제 3 장
유동 특성
실험

제 3 장 유동특성 실험

3.1 실험장치

Fig. 3.1은 본 실험장치의 개략도를 나타내고 있다. 대표적으로 저장 탱크, 펌프, 상부수조(upper tank), 유량계, 합류관, 압력계 등으로 구성 되어져있다.

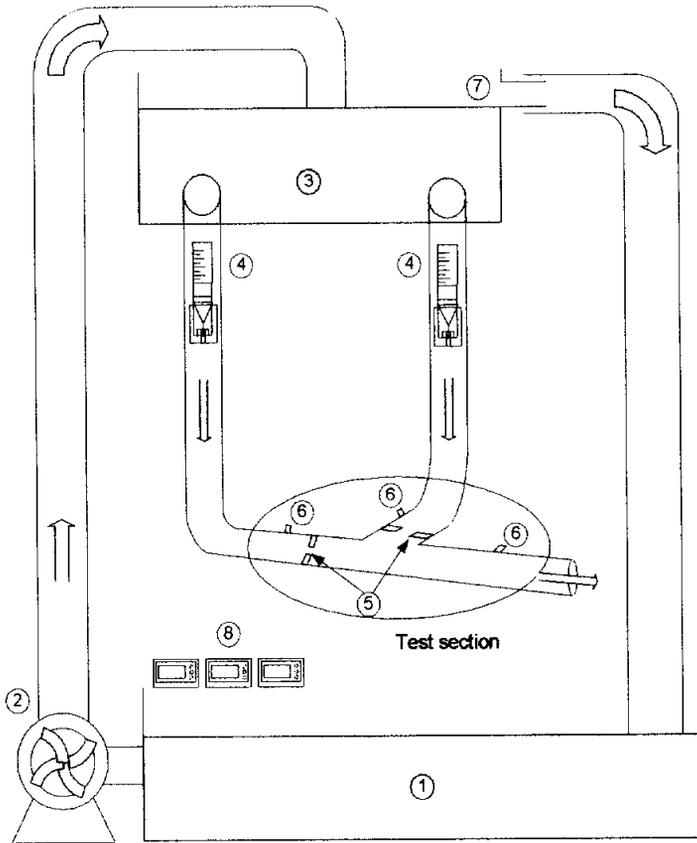
저장탱크는 가로 1m, 세로 1m, 높이 0.8m인 사각수조이며, 실험실 바닥에 위치하며 실험유체를 저장한다. 유체 공급펌프는 최대유량 $18\text{m}^3/\text{h}$ 인 원심펌프를 이용하여, 상부수조까지 공급한다. 상부수조의 크기는 가로 0.6m, 세로 0.6m, 높이 0.6m이며, 시험구역(test section)에 유체의 압력이 가해지도록 하기 위해 상부수조에서 시험부까지 최소 높이를 1m로 하였으며, 최대 높이는 실험실의 여건상 1.4m까지 제안되어졌고, 상부수조는 높이를 0.1m씩 가변 할 수 있도록 제작되어져 있다. 또 펌프에서 보내지는 파이프 유량에 의해서 상부수조에서 발생하는 수위변화를 줄이고, 시험부에 균일한 압력이 가해지도록 하기 위해서 상부수조의 상층부위에 가로 0.5m, 세로 0.1m 사각모양의 일수관(overflow pipe)을 설치하여 시험부에 유체를 정숙하게 공급하였다. 일수관을 통과한 파이프유체는 다시 지상의 저장수조로 보내지게 되어있다. Photo. 3.1은 실험장치 사진이다.

실험이 진행되는 동안 본관(main pipe)과 지관(lateral pipe)의 유량은 차압식의 유량계로 측정되어지며, 본관 상류부, 지관, 본관 하류부의 정압측정은 전자압력계로 1/100(psi)까지 측정하였다. 압력탭은 안지름이 3mm정도이며, 실험유체의 유동에 영향을 미치지 않도록 설치하였고,

유량계와 같이 완벽한 밀봉작업이 되어져 있다. 본관 상류부의 압력탭과 지관의 압력탭은 오리피스 이전에 설치하였고, 본관 하류부의 압력탭은 합류에 의한 유동의 영향을 받는 않는 위치에 설치하였다. Photo. 3.2는 실험에 사용된 유량계를 보이며, Photo. 3.3은 압력계를 보이고 있다.

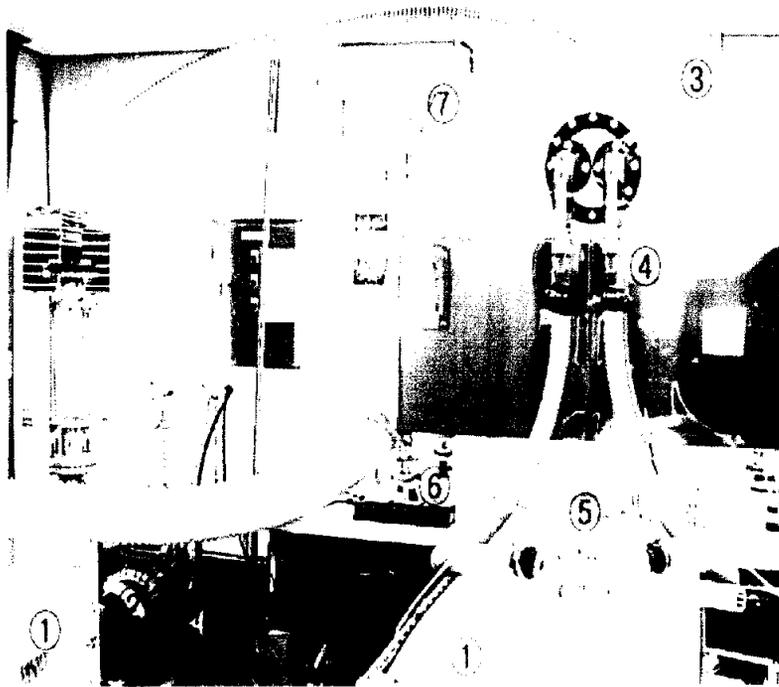
Fig. 3.2는 본 논문의 시험부인 합류관을 상세히 나타낸 것으로 본관, 지관, 오리피스로 구성되어져있다. 시험부는 두께3mm의 투명아크릴을 이용하여 제작하였으며, 본관과 지관은 직경이 34mm이고, 본관과 지관의 길이는 합류점에서부터 전방 약 1.5m이다. 시험부에서는 불안정한 유동이 발생하므로 합류점을 기준으로 수평이 되게 설치하였으며, 본관과 지관의 오리피스는 합류점에서 파이프 직경의 2배 거리 전방에 설치되었다.

본관과 지관에 설치된 오리피스는 직경이 30mm, 25mm, 20mm, 15mm로 제작되었으며, 오리피스를 설치하지 않으면 직경과 같은 34mm이므로 총5종류라 볼 수 있다. Photo. 3.4는 시험부의 사진을 보여주고 있다. 합류관 유로의 구분을 위해서 본관상류를 ①, 지관을 ②, 본관하류를 ③이라 지정하였다. 예를 들어 본관상류유량은 Q_1 , 지관유량은 Q_2 , 본관하류의 유량은 Q_3 과 같이 숫자는 첨자로 사용되었다.



- ① Storage tank ② Pump ③ Upper tank ④ Flowmeter
⑤ Orifice ⑥ Pressure tap ⑦ Overflow pipe ⑧ Pressure gage

Fig. 3.1 Schematic diagram of experimental apparatus



- ① Storage tank ② Pump ③ Upper tank
④ Flowmeter ⑤ Test section ⑥ Pressure gage
⑦ Overflow pipe

Photo. 3.1 Photograph of experimental apparatus

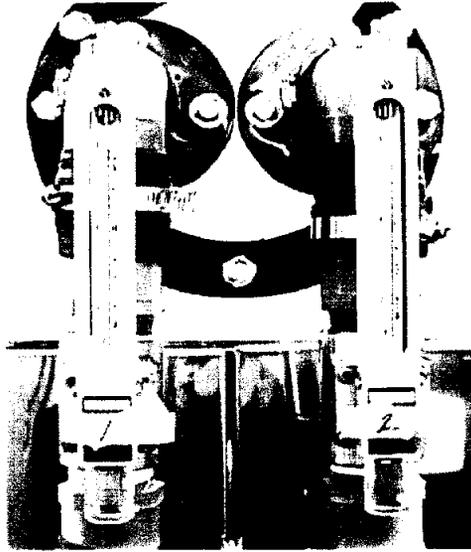


Photo. 3.2 Float type flowmeter



Photo. 3.3 Pressure gage

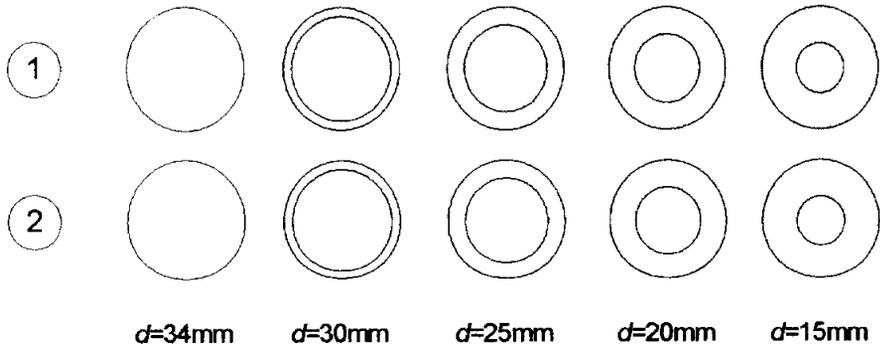
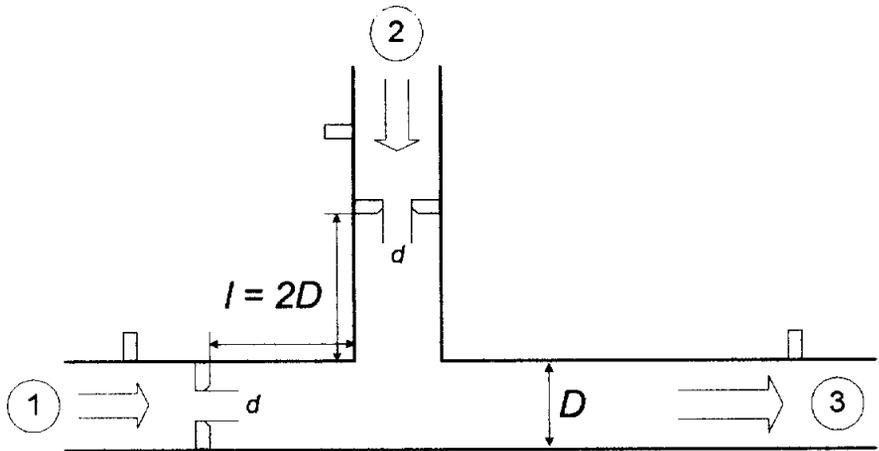
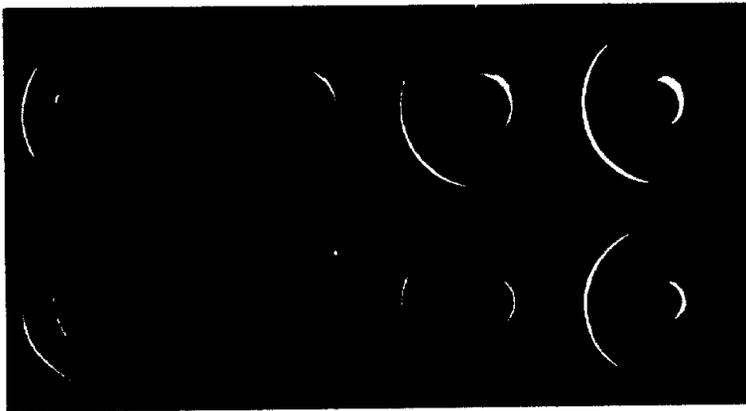
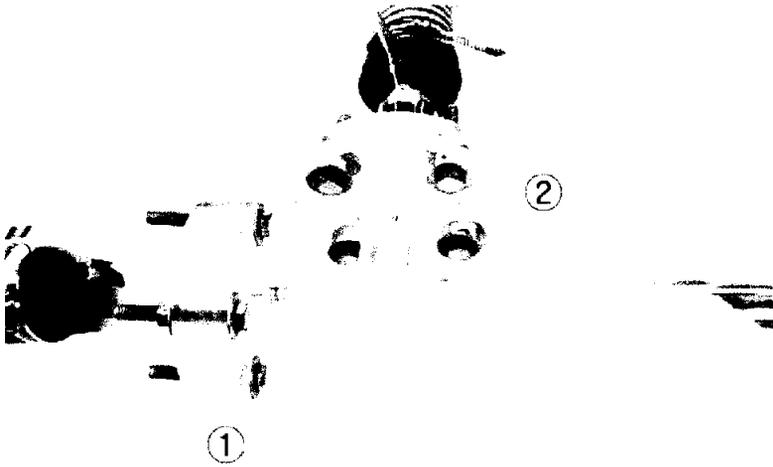


Fig. 3.2 Enlarged view of the main test section and orifices



$d=30\text{mm}$ $d=25\text{mm}$ $d=20\text{mm}$ $d=15\text{mm}$

Photo. 3.4 Main test section and orifices

3.2 실험 방법

실험유체는 상온의 순수 물을 이용하였으며, 이때 물의 밀도는 998.2 kg/m^3 의 값을 사용했다.

저장탱크에 실험유체를 채우고, 원심펌프를 이용하여 상부수조로 실험유체를 이송시키며, 유량조절 밸브를 이용하여 대략적인 유량을 제어하였다. 상부수조에서는 실험유체의 수위가 변화할 수 있으므로 실험유체의 수위를 일정하게 유지시킬 수 있는 방안으로 직사각형 ($600\text{mm} \times 150\text{mm}$)의 일수관(overflow pipe)을 설치하였고, 일수관을 통한 물은 다시 지상에 있는 저장 수조로 되돌아가게 되어있다.

유동상태의 가시화를 위해서 시험부와 오리피스는 모두 아크릴로 제작되었다.

먼저 유량계 정밀도를 측정하기 위한 방법으로 시험부를 설치하지 않은 상태에서 실험유체를 공급하여 유량계의 정밀도와 두 유량계의 오차를 확인하였으며, 합류부 하류의 유량은 유량계 설치에 의한 부차적 손실이 나타나므로 시험부 이외의 다른 부차적 손실을 최대한 줄이기 위해서 유량계를 설치하지 않았으며, 합류부 상류의 유량과 지관의 유량을 합하여 계산하는 방법을 취했다.

시험부 본관과 지관의 압력측정은 $1/100(\text{psi})$ 까지 측정할 수 있는 압력 트랜스듀스(transducer)로 측정을 하였고, 트랜스듀스와 압력탭의 연결은 지름 5mm 의 비닐관을 사용했으며, 디지털 압력 표시기(digital pressure indicator)로 측정했다. 초기값은 대기압 상태이므로 14.7psi 로 설정되어져 있다.

실험은 상부수조에서 동일한 압력으로 본관과 지관으로 공급된다는

가정하에 진행되며, Fig. 3.2에서 보듯이 본관에 오리피스 5가지 가운데 하나를 설치하고, 지관에도 같은 직경을 가진 오리피스를 설치한다. 즉, 본관에 15mm, 20mm, 25mm, 30mm의 오리피스를 설치하면, 지관도 15mm, 20mm, 25mm, 30mm의 오리피스를 설치하여 각각의 오리피스 직경에 대해서 상부수조의 위치를 최저 1m에서 최고 1.4m까지 0.1m씩 변화를 주어가면서 본관상류의 유량 및 압력, 지관의 유량 및 압력, 본관하류의 압력을 측정하는 방법으로 실험을 진행하였다.

3.3 동일 압력에서의 유동특성

Fig. 3.3은 레이놀즈 수의 변화에 따른 유량을 그래프로 나타낸 것이다. 그래프에서 오리피스 직경 d 와 관의 직경 D 비가 1로 나타나 있으므로 지관과 본관에 오리피스를 설치하지 않은 경우를 나타내고, 본관 상류, 지관, 본관하류의 직경은 모두 같다. 그래프에서 나타낸 삼각형의 기호 중 내부가 채워지지 않은 그래프는 본관을 나타내고, 내부가 채워진 삼각형의 기호는 지관을 나타낸다. 그림에서 지관의 유량이 본관의 유량보다 훨씬 크다는 것을 나타내고 있다. 또 낮은 압력보다는 압력이 높을수록 지관과 본관과의 유량이 점점 증가함을 알 수 있고, 본관과 지관의 유량차 또한 점점 커지고 있음을 알 수 있다. 지관과 본관의 유량비는 지관이 약 10% 큰 것으로 나타났다.

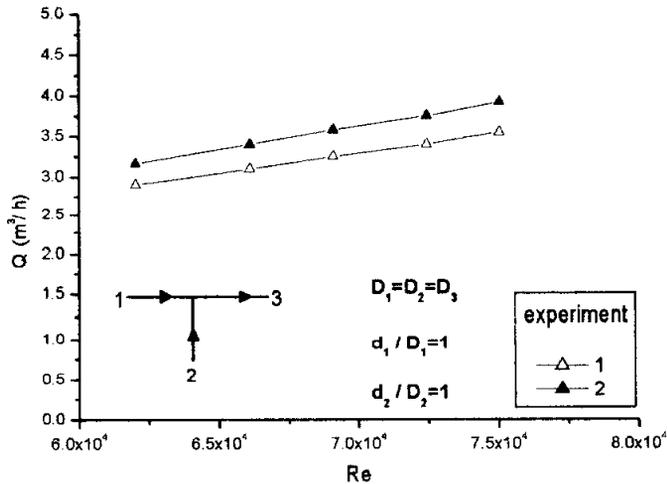


Fig. 3.3 Flow rate vs. Re without orifice

Fig. 3.4는 직경이 34mm인 관에 직경이 30mm인 오리피스를 본관과 지관에 각각 설치하였다. 그러므로, d/D 가 0.882인 경우의 지관과 본관의 유량을 나타낸 것이다. 레이놀즈 수가 커질수록 본관과 지관의 유량차가 점점 증가함을 나타내고 있으며, 지관의 유량이 본관의 유량보다 많이 흘러감을 나타내고 있다. Fig. 3.3과 비교했을 때 레이놀즈 수는 약 7000정도 작게 나타나고 있으며, 레이놀즈 수가 점점 커질수록 본관과 지관의 유량도 점점 커지고, 유량차도 점점 커지는 것을 볼 수 있다. 이것은 앞의 Fig. 3.3과 매우 비슷한 경향을 보이고 있다. 지관과 본관의 유량비는 약 7% 정도로 나타났다.

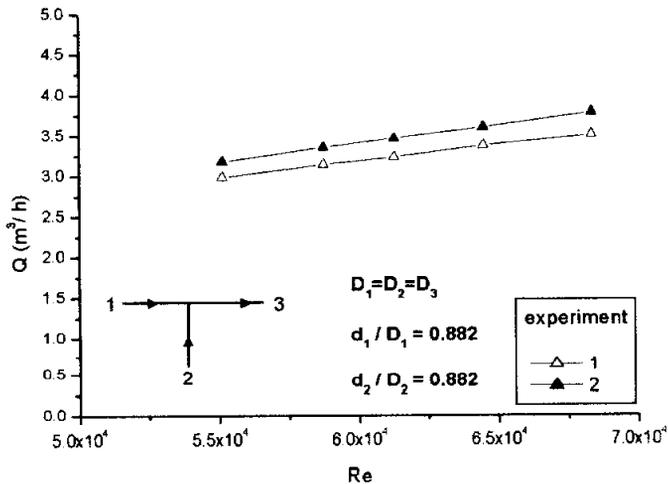


Fig. 3.4 Flow rate vs. Re with orifice diameter of 30mm

d/D 가 0.735이므로 34mm의 관에 직경 25mm의 오리피스를 설치한 경우의 레이놀즈 수 변화에 의한 유량을 나타낸 그래프가 Fig. 3.5이다. 직경이 작은 오리피스를 설치할수록 레이놀즈 수가 줄어들고 있다는 것을 나타내고 있고, 본관과 지관의 유량 차는 현저히 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또 레이놀즈 수가 증가할수록 증가하였던 지관과 본관의 유량차는 거의 일정하게 나타나고 있다. 여기서는 지관의 유량이 본관의 유량보다 약 5% 많이 흐름을 나타낸다고 볼 수 있다.

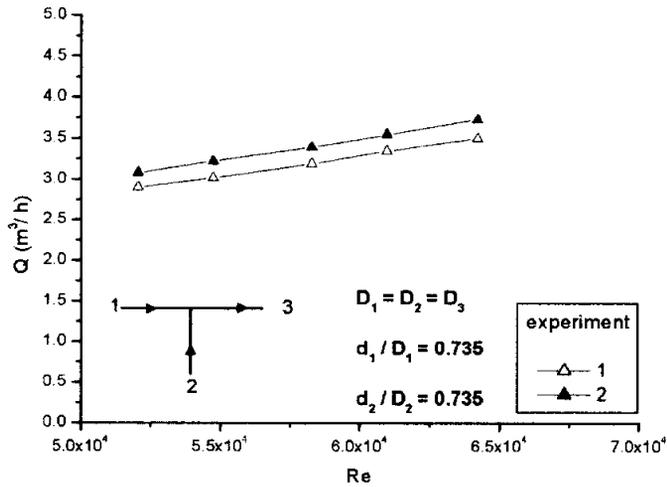


Fig. 3.5 Flow rate vs. Re with orifice diameter of 25mm

Fig. 3.6은 직경34mm의 관에 20mm의 직경을 가진 오리피스를 본관과 지관에 설치하여 레이놀즈 수에 따른 유량을 나타내었다. 레이놀즈 수가 증가함에 따른 지관과 본관의 유량은 점점 증가하는 것을 볼 수 있다. 그래프에서 보듯이 지관의 유량이 본관의 유량보다 많다는 것을 알 수 있지만, 그 차이는 미미하다 볼 수 있다. 그리고, 레이놀즈 변화에 의한 지관과 본관의 유량차는 거의 일정하다 볼 수 있다.

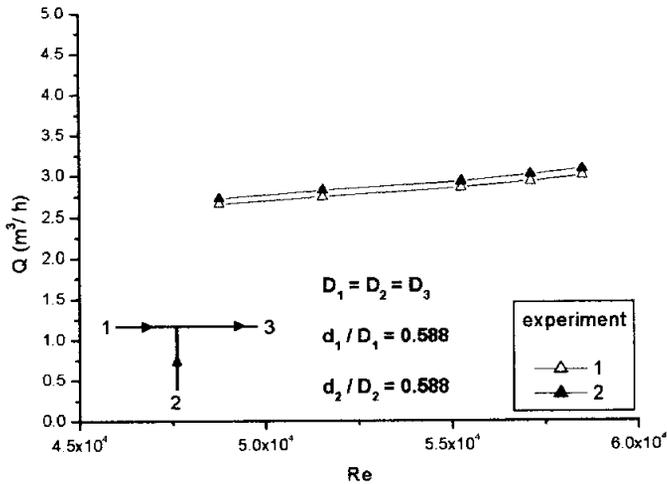


Fig. 3.6 Flow rate vs. Re with orifice diameter of 20mm

Fig. 3.7은 레이놀즈 수의 변화에 따른 유량을 나타낸 것으로, d/D 가 0.441이므로 직경34mm의 관에 직경15mm의 오리피스를 설치한 경우이다. 직경이 작은 오리피스가 설치되어졌기에 레이놀즈 수는 매우 작게 나타나고 있으며, 유량 또한 매우 적게 나타나고 있다. 본관과 지관의 유량차는 레이놀즈 수의 변화에 따라서는 변화가 거의 없어 보이고 있다. 이것은 직경이 작은 오리피스가 설치될수록 오리피스 자체에 의한 손실이 증가하여지고, 합류부에 의한 유량의 변화는 매우 작다고 판단되어진다. 따라서 합류부의 영향은 거의 없다고 볼 수 있다.

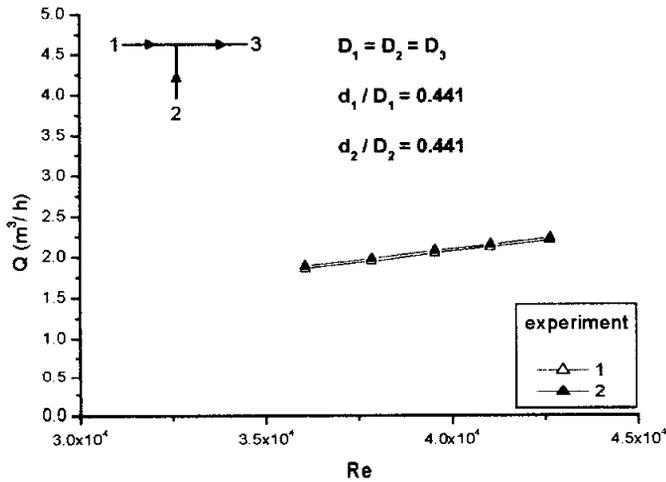


Fig. 3.7 Flow rate vs. Re with orifice diameter of 15mm

3.4 결과 및 고찰

지관과 본관에 동일한 직경을 가진 오리피스를 각각 설치하였고, 작동유체를 지관과 본관에 동일한 압력으로 공급하여 실험을 한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 지관과 본관에 오리피스가 설치되어진 경우와 오리피스가 설치되지 않은 경우에 있어서 동일한 압력이 가해질 때 합류부의 영향에 의해 지관의 유량이 본관의 유량보다 큰 것으로 나타났다.
- (2) 본관과 지관에 동일한 직경을 가진 오리피스가 설치된 경우에서는 직경이 작은 오리피스가 설치될수록 본관과 지관의 유량비는 점점 줄어들었으며, $(d_1 / D_1, d_2 / D_2)$ 가 0.441이하에서는 지관과 본관의 유량이 매우 비슷하게 나타났다. 즉, 관의 직경과, 오리피스 직경비가 1, 0.882, 0.735, 0.588, 0.441로 줄어들 때 지관과 본관의 유량비도 10%, 7%, 5%, 3%, 1.5%로 줄어드는 것으로 나타났다.
- (3) 본관과 지관에 동일한 직경을 가진 오리피스가 설치된 경우 오리피스 직경이 커질수록 합류부에 의한 영향 때문에 손실이 커지는 것으로 보이고, 반면 오리피스 직경이 작을수록 합류부에 의한 영향 보다는 오리피스 자체에 의한 손실이 커진다는 것으로 나타났다.

제 4 장

시뮬레이션

제 4 장 시뮬레이션

많은 공업장치 중에 열전달, 상변화, 물질전달, 화학반응 등의 과정을 동반하는 유체의 유동현상을 볼 수 있다. 이러한 열 및 유체유동에 관한 연구는 이론적 연구와 실험적 연구의 양면으로 발전하여 왔다. 그러나 우리들이 매일 접하는 일기예보를 보듯이 이러한 열 및 유체의 거동을 알려고 하는 것이 용이하지 않다는 것을 알 것이다. 공업분야만 보더라도 복잡한 공업장치의 냉각 및 고성능 유체기계의 내부유동은 측정 자체가 쉽지 않으며, 설계개발단계에서 최적값을 찾아내는 것은 막대한 시간과 비용, 그리고 고도의 실험기술을 필요로 한다. 그러나 그와 같은 실험의 전부 또는 일부를 컴퓨터를 사용하여 정확하게 예측할 수 있다면 그 효과는 매우 클 것이라는 것을 알 수 있다.

현대에는 컴퓨터의 급속한 발달에 힘입어 과거에는 이론적으로 해석할 수 없었던 복잡한 열 및 유체 유동의 해석을 소형 컴퓨터로도 수치해석적으로 가능하게 되었다.

우리가 일상 체험하는 대부분의 흐름은 난류이다. 이 난류의 특징은 시간적 공간적 불규칙성에 있으며, 그 속도변동을 속도의 흐트러짐이라 부른다. 흐름에 이와 같은 흐트러짐의 성분이 있으면, 이것에 의해 운동량과 열에너지의 수송 그리고 이들과 동반된 운동에너지가 비가역적인 열에너지로 변환이 일어나며 이를 소산(dissipation)이라 부른다. 하지만, 불규칙적인 난류이더라도, 그 운동은 Navier-Stokes 방정식에 따르고 있기 때문에, 유동장을 이론적으로 구하는데는 Navier-Stokes 방정식을 수치적으로 풀면 된다³²⁻³⁵⁾.

그러나 난류를 수치계산으로 직접 구할 수 있는 것은 저 레이놀즈 수

의 채널 유동(channel flow)과 같은 단순한 경우에 국한되며, 공학적으로 흥미있는 일반적인 유동인 고 레이놀즈 수 유동에서 발생하는 난류의 수치계산은 불가능하다. 따라서 현재의 계산기 능력으로 난류를 계산하기 위해서는 난류 모델(turbulence model)을 도입할 필요가 있다.

본 논문의 제 3 장에서는 동일한 압력을 공급하였을 때 본관과 지관의 유동변화에 대해서 실험적으로 연구하였다. 하지만, 실험으로 모든 결과를 결론짓기에는 다소 무리한 점이 있다. 실험장치에서 본관과 지관에 동일한 압력을 공급하기 위해서 상부수조를 높은 곳에 설치해 보았지만, 지관의 유량과 본관의 유량은 약간의 차이가 있고, 실험장치의 여건상 전압은 동일하게 공급된다고 볼 수 없다. 따라서 본관과 지관에 전압을 동일하게 가했을 때 유동의 변화를 알아보기 위해서는 수치해석이 해결책이라 볼 수 있다.

4.1 지배방정식

비압축성유동에 대한 연속방정식과 난류 모델의 도입에 필요한 기초식을 텐서로 표시하면 다음과 같다³⁶⁻⁴⁵⁾.

연속방정식

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4.1)$$

운동량보존방정식

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (4.2)$$

여기서 u 는 속도벡터, p 는 압력, μ 는 점성계수, ρ 는 밀도이다.

난류의 시간적으로 변동하는 속도 u_i 를 시간평균(time average) 속도 $\overline{u_i}$ 와 변동분(fluctuation component)의 속도로 나누면, $u_i = \overline{u_i} + u'_i$ 로 되고, 변동성분 u'_i 의 시간평균이 0인 사실을 이용하여 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식에 대입하여 시간평균을 취하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_i} = 0 \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right] \quad (4.4)$$

기초식과 시간평균한 식의 가장 큰 차이점은 시간평균 중에 $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ 라는 새로운 항이 생긴다. 이것은 난류에 의해서 발생하는 응력으로 레이놀즈 응력항이라 부른다. 이것을 분자점성에 의한 응력과 같은 구배확산형으로 나타내면 다음과 같다.

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (4.5)$$

이 레이놀즈 응력은 크기가 평균속도의 변형률량(속도구배)에 비례한다고 브시네스크(boussinesq)가 가정했다.

우변의 제 2항에 있는 k 는 난류운동에너지(turbulent kinetic energy)로서

$$k = \frac{1}{2} \left[\overline{u_1'^2} + \overline{u_2'^2} + \overline{u_3'^2} \right] \text{ 이고, } \delta_{ij} \text{는 Kronecker } \delta \text{ 이다.}$$

우변 1항은 평균속도의 변형률량, 즉 속도구배이며, 비례계수 μ_t 는 난류점성계수(turbulent eddy viscosity) 또는 와점성계수라고 하며, 이 난류점성계수를 구하기 위해서는 여러 가지 난류모델들이 사용되어진다.

일반적으로 레이놀즈 응력의 수송방정식을 만족시키는 난류모델은 두 가지가 있으며, 브시네스크의 가정을 적용하면 난류점성 모델(turbulent viscosity model)이라 하고, 0-방정식 모델, 1-방정식 모델, 2-방정식

모델로 나눌 수 있다.

반면, 브시네스크의 가정없이 레이놀즈 응력방정식을 성립시키는 유형의 모델을 레이놀즈 응력방정식 모델(Reynolds stress equation model)이라 한다.

4.2 난류모델

일반적으로 거의 모든 공학적인 유동현상에 있어서 레이놀즈 수가 매우 큰 경우 그 유동은 난류유동이 되며, 이 난류유동을 직접 시뮬레이션하기에는 매우 비실용적이다. 왜냐하면 large scale부터 아주 작은 length scale까지 모두를 시뮬레이션하기 위해서는 방대한 계산 시간이 필요하기 때문이다. 그러므로 일반적으로 난류유동을 해석하는 방법은 순간적인 유동장을 시간에 대해 평균을 취하며, 적당한 length scale(혹은 격자간 거리)에서 유동을 시뮬레이션 하는 방법을 주로 취하고 있다. 즉, 난류유동을 시간에 대해 평균한 값과 변동(fluctuation)양의 합으로 나타낸다⁴⁶⁻⁵¹⁾.

예를 들면,

$$\begin{aligned}
 u &= \bar{u} + u' \\
 v &= \bar{v} + v' \\
 w &= \bar{w} + w'
 \end{aligned}
 \tag{4.6}$$

또한,

$$\overline{u^2} = (\bar{u})^2 + \overline{u'u'}$$

이다. 여기서 ' - ' 은 순간적인 난류속도의 시간에 대해 평균된 값을 의미하며 ' ' ' 은 변동량을 의미한다. 이렇게 순간적인 양을 시간에 대한 평균값과 섭동량으로 구별해 놓을 때 생기는 단점은 일반적인 유선의 개념과 일치하지 않는다는 것이다. 이러한 순간속도의 시간평균 개념을 Navier-Stokes 방정식에 적용한 식을 Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) 방정식이라 한다. RANS 방정식에서는 방정식의 수보다 더 많은 미지수 레이놀즈 응력 ($-\rho \overline{u_i' u_j'}$)을 가진다. 시간평균의 결과로 생긴 이러한 새로운 미지수를 모델링하는 것을 난류모델링이라 한다. 난류모델은 Eddy-viscosity 모델, 레이놀즈 응력 모델, LES(Large Eddy Simulation), DNS(Direct Numerical Simulation) 등으로 분류할 수 있다.

4.2.1 Eddy-Viscosity 모델

Eddy-viscosity 모델은 브시데스크의 개념에 바탕을 둔 것으로 레이놀즈 전단 응력은 mean strain rate와 turbulent eddy viscosity를 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$-\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (4.7)$$

여기서 μ_t 를 eddy-viscosity라 부르며, μ_t 를 구하는데 있어 다시 새로운 편미분 방정식이 필요한 숫자에 따라 0-방정식 모델, 1-방정식 모델, 2-방정식 모델 등으로 나눌 수 있다. 이러한 모델은 μ_t 의 계산이

비교적 간단하여 공학적인 응용에 유용하다.

4.2.2 0-방정식 모델

0-방정식 모델은 새로운 편미분 방정식의 첨가없이 대수적 방정식 형태로 eddy-viscosity를 구하는 것으로, Prandtl의 mixing length 이론에 의해 eddy-viscosity는 다음과 같이 표현된다.

$$\mu_t = \rho l^2 \frac{\partial u}{\partial y} \quad (4.8)$$

여기서 l 은 mixing length로써 length scale을 의미한다. velocity scale을 $u_t = l \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|$ 로 놓으면, μ_t 를 다음과 같이 쓸 수 있게 된다.

$$\mu_t = \rho l u_t \quad (4.9)$$

여기서 일반적으로 l 은 벽면의 거리에 비례한다고 가정하며, 여기에 Van Driest damping function D 가 곱하여 진다. Cebeci와 Smith는 식 (4.9)를 내부영역(inner region)이라 불리는 벽면 근처에만 적용하며, 외부영역(outer region)에서는 다음과 같은 가정을 하여 eddy-viscosity model을 향상시켰다.

$$l \sim \theta(\delta^*) \quad (4.10)$$

여기서 δ^* 는 경계층(boundary layer)의 배제두께(displacement thickness)이며,

$$u_t = \theta(u_e) \quad (4.11)$$

로하여 u_e 는 경계층 edge에서의 속도로 표현하였다. 그러므로

$$\mu_t \sim \rho u_e \delta^* \quad (4.12)$$

와 같은 비례식이 성립한다.

이러한 난류모델들은 유동박리가 없는 부착유동(attached flow)이거나 완곡한 역압력구배(mild adverse pressure gradient)가 있는 유동에 많이 사용되어져 왔으며, 컴퓨터 프로그램에의 적용이 매우 쉽다는 장점을 가지고 있다. 이 모델은 난류점성계수가 벽면으로부터의 거리 등으로 대수적으로 주어지므로, 이른바 새로운 수송방정식을 풀 필요가 없다. 따라서, 0-방정식 모델(zero-equation model)로 불리며, 계산시간이 필요없고, 모델의 이해가 쉬운 장점이 있는 반면 국소적인 평형상태에서 경험상수를 정하고 있기 때문에 대류, 확산 및 이력(history effect)이 중요한 역할을 하는 복잡한 유동에는 부적합하다.

4.2.3 1-방정식 모델

1-방정식 모델은 0-방정식 난류모델에서 사용한 국부평형상태(local equilibrium)의 가정을 없앤 것으로서, 난류 kinetic energy의 생성과 전달과정을 모델에 포함시켜 난류속도 스케일인 u_t 를 다음과 같이 바꾼 것이다.

$$u_t = k^{1/2} = \sqrt{\frac{1}{2}(\overline{u'u'})} \quad (4.13)$$

여기서 k 는 난류의 kinetic energy이며 eddy-viscosity는 다음과 같이 정의된다.

$$\mu_t = \rho l k^{1/2} \quad (4.14)$$

여기서 u_t 를 구하려면 k 를 알아야 하므로, k 를 구하기 위해 k 에 대한 1개의 편미분 방정식이 필요하며 1-방정식 모델이란 명칭이 붙여지게 된 것이다. 그리고 난류의 length scale인 l 은 여기서도 역시 대수적 방법으로 표현된다. 이러한 1-방정식 모델은 유동박리영역에서 length scale과 국소 유동 파라미터에 대한 영향을 표현하기 힘들며, 0-방정식 모델에 비해 계산시간이 많이 소요됨에도 불구하고 해의 정확도가 그렇게 많이 향상되지 않는다는 단점을 가지고 있다. 최근, Johnson과 King은 1-방정식 모델을 이용하여 2차원 박리유동을 해석하였다.

이 모델은 유동방향의 최대 레이놀즈 응력을 구하기 위하여 난류에너

지 방정식으로부터 상미분방정식을 유도한다. 이 방정식은 최대 레이놀즈 응력과 관련된 속도스케일을 가지는 eddy viscosity 와 관련하여 계산한다. 이 모델을 사용하여 2차원 박리유동을 계산한 속도분포 및 전단응력은 algebraic eddy viscosity models를 사용한 결과보다 실험결과와 잘 일치한다.

4.2.4 2-방정식 모델

2-방정식 모델은 1-방정식 모델이 가지고 있는 k 에 대한 편미분방정식 외에, 난류의 length scale인 l 에 대한 대수적 표현을 사용하지 않고 편미분방정식을 풀어서 l 을 구하는 모델이다. 즉, 다음의 관계식에 의해 난류에너지 소산률(dissipation rate)인 ϵ 을 구하거나 비 난류에너지 소산률(specific turbulent dissipation)인 w_t 에 대한 또 하나의 편미분방정식이 필요하게 된다.

$$l \sim \frac{k^{1/2}}{\epsilon} \quad \text{혹은} \quad \frac{k^{1/2}}{w_t} \quad (4.15)$$

이런 length scale과 난류속도 스케일 u_t 에 의해 eddy-viscosity는 다음과 같이 정의된다.

$$\mu_t \sim \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad \text{혹은} \quad \rho \frac{k}{w_t} \quad (4.16)$$

k -equation과 l 을 위해 ϵ 을 푸는 것은 보통 $k - \epsilon$ model이라 일컬어지며, 고 레이놀즈 수의 유동에서 이를 위한 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u k)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v k)}{\partial y} \\ & = \frac{\partial}{\partial x}(\mu_t \frac{\partial k}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_k \frac{\partial k}{\partial y}) + P - \rho \epsilon - D \end{aligned} \quad (4.17)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial(\rho u \epsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \epsilon)}{\partial y} \\ & = \frac{\partial}{\partial x}(\mu_\epsilon \frac{\partial \epsilon}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_\epsilon \frac{\partial \epsilon}{\partial y}) + \frac{c_1 f_1 \epsilon P}{k} - \frac{c_2 f_2 \rho \epsilon^2}{k} + E \end{aligned} \quad (4.18)$$

$$\mu_t = \rho c_\mu f_\mu k^2 / \epsilon$$

$$\mu_k = \mu + \mu_t / \sigma_k$$

$$\mu_\epsilon = \mu + \mu_t / \sigma_\epsilon$$

여기서 P 는 난류 kinetic energy의 생성을 의미하며, D 와 E 는 벽 근처에서 ϵ 의 급격한 변화를 모델하기 위해 첨가되는 항이다. 그리고 저 레이놀즈 수 함수로 일컬어지는 f_1 , f_2 , 와 f_μ 는 벽 근처에서 실험치와 더욱 일치하게 하기 위해 수정을 가하는 항이며, c_μ 와 c_2 는 실험에 의해 주어지는 값이며, c_1 , k , ϵ 은 수치해석에서 얻어지는 값이다. Patel 등은 저 레이놀즈 수 함수와 $k - \epsilon$ 모델의 실험상수에 대하여 요약하

였다. 또한 그들은 벽 근처 지역에서 난류모델의 상대적 성능을 비교하였다. 고 레이놀즈 수의 유동에서 사용되는 표준 $k-\epsilon$ 모델에서는 $f_\mu = f_1 = f_2 = 1$, $D_T = E_T = 0$ 을 놓고 벽에서 멀리 떨어진 영역에서 해석하면 된다. k 방정식은 RANS 방정식으로부터 유도된 운동에너지에 대한 수송방정식으로 근사화 시킨다. ϵ 방정식도 k 방정식과 유사한 방법으로 유도되며, 많은 가정을 하여야 하고, 또한 ϵ 의 결과방정식은 고도의 실험적 특성을 가진다.

4.2.5 표준 $k-\epsilon$ 모델

난류점성계수 ν_t 는 점도와 같은 물성값이 아니고 난류운동의 양상이나 이력에 따라 변하는 값이다. 이 난류점성계수는 현재까지는 난류에 관한 많은 계통적인 실험이나 고찰로부터 난류운동의 특성길이(characteristic length)와 특성속도(characteristic velocity)에 의해 결정되는 값이라고 알려져 있다. 공학적으로 많이 이용되고 있는 표준 $k-\epsilon$ 모델³²⁻⁴⁴⁾은 난류운동에너지로부터 특성속도를 구하고, 난류에너지 소산율을 이용하여 간접적으로 특성길이를 구하는 모델이다. 난류점성계수 ν_t 는 다음과 같이 주어진다.

$$\nu_t = \frac{c_\mu k^2}{\epsilon} \quad (4.19)$$

여기서, c_μ 는 모델 상수로서 표준 $k-\epsilon$ 모델에서는 일정하다고 가정되

어있고, k 는 난류운동에너지(turbulent kinetic energy), ε 은 난류운동 에너지 소산율(dissipation rate)이다.

그리고 난류운동에너지 k 와 소산률 ε 은 다음의 식에 의해서 결정된다.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + P - \varepsilon \quad (4.20)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (c_{\varepsilon 1} P - c_{\varepsilon 2} \varepsilon) \quad (4.21)$$

여기서 P 는 k 방정식에서의 난류에너지 응력생성항으로서 다음과 같이 정의한다.

$$P = \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (4.22)$$

식(4.19), (4.20), (4.21)에서 알 수 있듯이 5개의 경험정수 c_μ , σ_k , $c_{\varepsilon 1}$, $c_{\varepsilon 2}$, σ_ε 를 포함한다. 이들 정수에 있어서는 c_μ 가 격자 난류의 실험과의 검정에 의해 선정되며, 또 $c_{\varepsilon 1}$, $c_{\varepsilon 2}$, 과 c_μ 등과의 관계가 벽 근방에서의 대수적인 속도 분포의 기술에 관련하여 관계 지워진다. 정수 σ_k , σ_ε 및 $c_{\varepsilon 2}$ 에 관해서 컴퓨터에 의한 최적화의 작업이 행해지며, 본 논문에서는 Launder-Spalding(1974)이 제안한 다음의 계수들을 사용한다³⁸⁾.

$$c_\mu = 0.09, \quad \sigma_k = 1.0, \quad c_{\varepsilon 1} = 1.44, \quad c_{\varepsilon 2} = 1.92, \quad \sigma_\varepsilon = 1.3$$

4.2.6 RNG $k-\varepsilon$ 모델

표준 $k-\varepsilon$ model 에서는 난류점성계수 ν_t 를 구하기 위해서 난류운동 에너지 k 와 난류운동에너지 소산율 ε 에서 생기는 계수들을 모두 상수 처리 하였지만, RNG(renormalization group) $k-\varepsilon$ model에서는 아래와 같이 정의한다⁵²⁻⁶⁰.

$$c_\mu=0.0845, \quad \sigma_k = 0.72, \quad c_{\varepsilon 2} = 1.68, \quad \sigma_\varepsilon = 0.72$$

$$c_{\varepsilon 1} = 1.42 - \frac{\eta \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0}\right)}{(1 + \beta \eta^3)} \quad (4.22)$$

여기서, $\beta=0.012$, $\eta_0 = 4.38$, $\eta = S \kappa / \varepsilon$, $S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$

그리고, 변형률 S_{ij} 는 다음과 같다.

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4.23)$$

4.3 수치해석 방법

4.3.1 경계조건

경계조건으로 입구에는 실험에서 얻은 정압(static pressure)과 유량을 통해서 알 수 있는 동압(dynamic pressure)을 합하여 전압력(total pressure)으로 주었고, 완전발달유동(fully developed flow)을 위해 입구 영역은 관 직경의 15배가되며, 단면적에 비해 매우 길게 계산 영역을 잡았다.

출구조건은 관의 끝에서 정압으로 하였으며, 대기이므로 게이지 압력으로 0이다. 출구도 입구와 같이 완전발달유동을 위해 관직경의 15배가 되게 계산영역을 잡았다.

나머지 벽면에 대해서는 점착조건(no slip condition)으로 하였다.

계산을 수행하기 위한 경계조건을 요약하면 Table 4.1과 같다.

Table 4.1 Boundary conditions

| | Main pipe(Pa) | Lateral pipe(Pa) |
|----------------------------------|------------------------------------|------------------|
| Inlet total pressure, gage | 3923 | 3923 |
| | 5884 | 5884 |
| | 7846 | 7846 |
| | 9807 | 9807 |
| | 10788 | 10788 |
| | 11768 | 11768 |
| | 12749 | 12749 |
| | 13730 | 13730 |
| | 14710 | 14710 |
| | Outlet static pressure, gage | 0(Pa) |

4.3.2 격자계

T형 분지관이나 합류관은 기본적으로 3차원 유동이다. 원형의 단면을 가진 T-합류관에서의 내부유동을 계산하기 위한 계산모형은 실험장치의 시험부를 고려하였으며, 격자는 모두 사각격자를 사용했다⁶¹⁻⁶⁵⁾.

Fig. 4.1에 보인 바와 같이 오리피스 주변과 합류부 근처에 유동이 급격하게 변하기 때문에 격자를 집중시켜서 계산의 정밀도를 한층 더 크게 하였고, 대칭 되어지는 부분이 없으므로 전체를 모델링 하였다. 총 격자 수는 약 250,000개 정도이며, 완전발달유동(fully developed flow)을 만들기 위해 입구영역을 관 직경의 15배가 되게 계산영역을 잡았다. 또한 출구의 영향을 최소화하기 위해 출구 길이도 관직경의 15배가 되게 하였다.

Fig. 4.2는 오리피스 주위의 격자를 보여주고 있다. 오리피스 근처에서의 유동은 매우 복잡할 것으로 예상되므로 오리피스와 오리피스 주위는 격자를 매우 조밀하게 부여하였다.

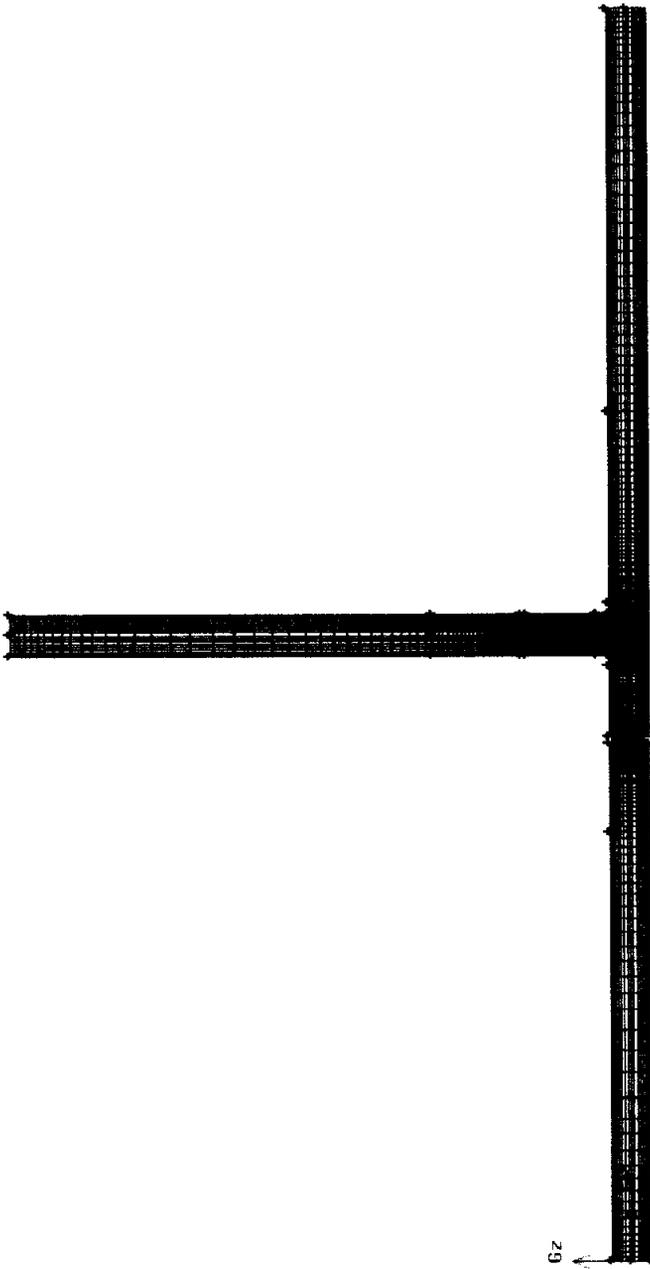


Fig. 4.1 Grid distribution for whole calculation domain

Fig. 4.3은 원형관 내의 격자를 보여주고 있다. 원 주위로 격자를 조밀하게 부여하였고, 원형으로는 사각 격자를 만들기 어려우므로 가운데 부분에는 격자를 따로 부여하였다. Fig. 4.4는 합류부의 격자를 보여주고 있다. 지관과 본관이 만나는 부분에서는 와류가 심하게 발생할 것으로 예상되어지므로 격자를 조밀하게 부여하였다.

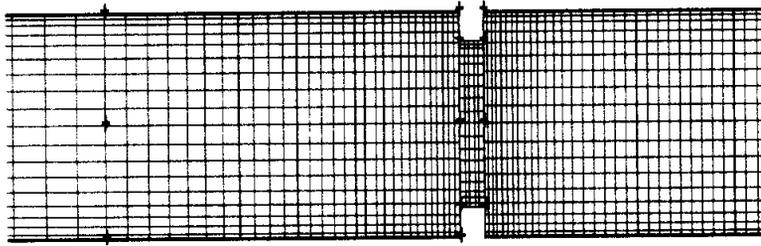


Fig. 4.2 Grid distribution around the orifice

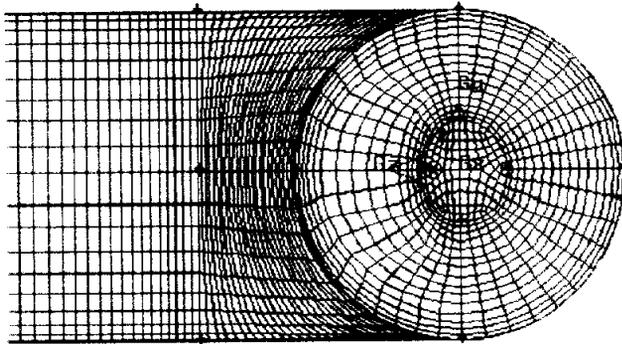


Fig. 4.3 Grid distribution in a circular section

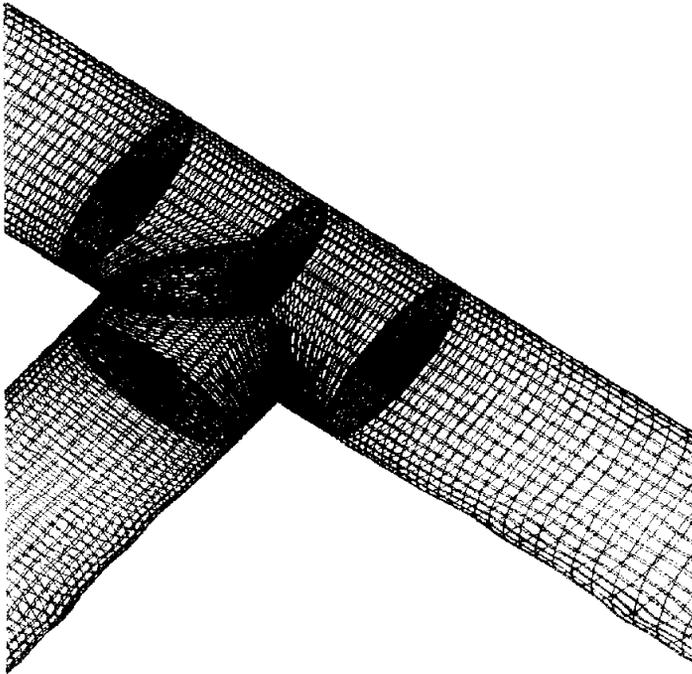
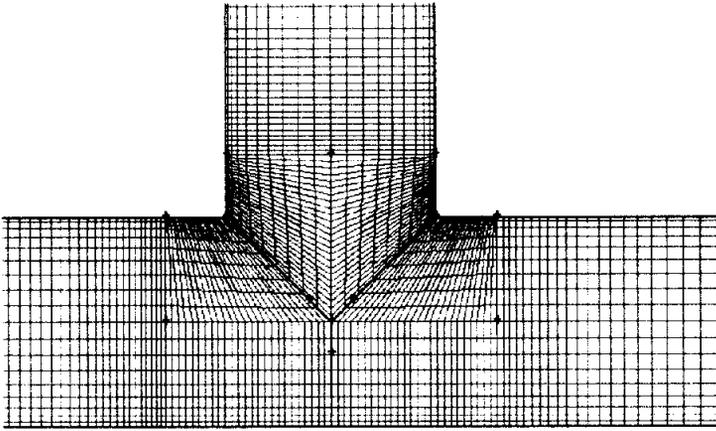


Fig. 4.4 Grid distribution around the T-junction

4.3.3 계산방법 및 수렴조건

수치해석을 하기 위한 CFD 코드로 FLUENT를 사용하였다. FLUENT는 유한체적법(FVM)을 사용하여 질량, 운동량, 에너지보존방정식의 해를 구하는 CFD 코드로 층류 및 난류, 압축성 및 비압축성, 열전달 그리고 화학반응식이 있는 유동을 포함하여 다양한 범위의 유체 유동해석을 수행하는 프로그램이다.

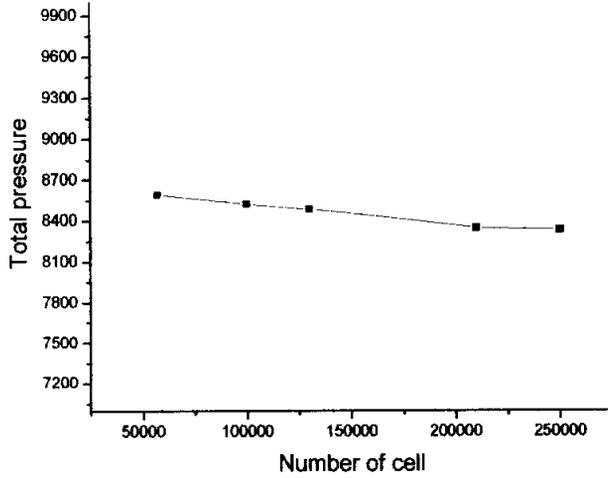
계산에 사용된 지배방정식은 정상상태, 비압축성 유체의 연속방정식, 운동량방정식 및 에너지보존방정식이며, 난류모델로는 간편하고 폭넓게 응용할 수 있는 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였고, 난류강도(turbulence intensity)는 5%를 적용한다. 수치해석에 선택된 해법은 상류차분(upwind difference), SIMPLE 알고리즘을 사용하였다.

계산에 사용된 컴퓨터는 CPU가 1.9GHz인 Intel PentiumIV이고, 격자수가 250,000개일 때 하나의 해를 구하는데 약 6시간이 소요되었다.

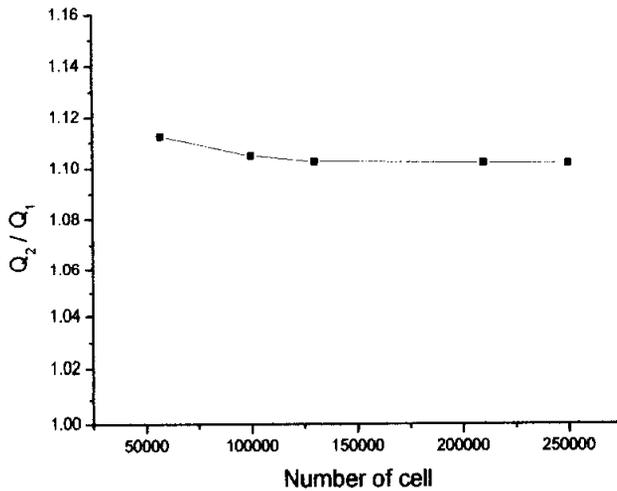
수렴판정은 연속방정식 및 운동량방정식의 Residual이 더 이상 감소하지 않는 구간의 값에 도달할 때 수렴한 것으로 판정하였으며, 대략 10^{-4} 이하가 된다. 수렴 판정 이후 더 많은 계산결과와 비교하였을 때 차이가 없음을 확인하였다.

Fig. 4.5는 격자수를 달리 하였을 때 계산결과를 나타내는 그래프이다. (a)는 합류부 직후의 평균압력을 나타내는 그래프로 격자수가 57000, 100000, 130000, 210000, 250000개일 때 평균압력은 8594, 8525, 8484, 8347, 8333(Pa)으로 나타내고 있으며, 격자수가 210000개와 250000개에서 압력 차는 0.1% 이내로 볼 수 있다. (b)는 본관과 지관의 유량비를 나타낸 것으로 격자수가 210000개 보다 많을 때 유량차이는

없는 것으로 나타났다. 따라서 격자수를 210000개로 하여도 되지만, 계산의 안정을 위해 격자 수를 약 250000개로 하여 계산하였다.



(a) Total pressure vs. number of cell



(b) Flow ratio vs. number of cell

Fig. 4.5 Sensitivity of mesh system

4.4 결과 및 고찰

본 장에서는 합류관의 본관과 지관에 동일한 크기의 오리피스와 있고, 동일한 압력을 본관과 지관에 가했을 때 유량에 어떠한 변화가 발생하는가에 대해서 이전의 실험결과와 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 본관과 지관에 동일한 유량을 공급하였을 때 에너지 손실이 어떻게 나타나는가에 대해서도 연구하였다.

또 합류관에 협착부가 발생하였을 때 협착부의 발생위치에 따라 유동에 많은 변화가 있을 것으로 판단된다. 그러므로 오리피스 위치가 합류부를 기준으로 직경과 동일한 위치에 있는 것과 합류부를 기준으로 직경의 2배의 위치에 오리피스가 있는 것을 비교하여 협착부의 발생위치에 따른 유동의 변화에 대해서 연구하였다.

합류관에서 지관과 본관에 동일한 압력을 가했을 때 지관과 본관에 동일한 유량이 흐르지 않는다는 것을 앞의 실험을 통해서 알 수 있었다. 따라서 지관과 본관에 동일한 유량을 흐르게 하기 위한 각각의 오리피스 직경 변화에 대해서도 연구하였다.

4.4.1 동일 압력에서의 유량변화

본관과 지관에 동일한 압력으로 작동유체를 공급하여 본관과 지관에서의 유량과 압력을 측정했다. 본관과 지관 그리고 합류관의 직경은 모두 같으며, 수치 시뮬레이션의 입구조건은 실험에서 얻은 본관과 지관의 압력을 그대로 입구조건으로 주었으며, 압력을 3500(Pa)에서 15000(Pa)까지 실험보다 넓은 범위에서 계산했다. 실험과 시뮬레이션의 결과를 비교 검토하기 위해서, 결과그림에서 삼각형과 원 기호는 각각 실험결과와 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 각 기호의 내부가 채워진 것은 지관을 나타내고 내부가 채워지지 않은 것은 본관을 나타낸다.

Fig. 4.6는 관의 직경 D 와 오리피스 직경 d 의 비가 1이므로 오리피스를 설치하지 않은 경우 본관과 지관의 유량을 그래프로 나타낸 것이다. 따라서 오리피스에 의한 영향은 없는 것으로 보이며, 합류부의 영향만을 나타낸다고 볼 수 있다. 그래프에서 실험과 시뮬레이션이 정성적인 면에서 매우 일치한다고 볼 수 있으며, 정량적인 값에 대해서는 시뮬레이션의 정량적인 값들이 실험의 정량적인 값보다 약간 높게 나타났다.

실험과 시뮬레이션 모두 지관의 유량이 본관의 유량보다 크게 나타나고 있음을 알 수 있고, 또 낮은 압력보다는 압력이 높을수록 지관과 본관의 유량차 또한 점점 커지고 있음을 알 수 있다. Fig. 4.7과 Fig. 4.8은 유속을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 것과 같이 지관에서의 등속선이 본관의 등속선 보다 넓게 나타나고 있으며, 특히 합류부 지점 가까이 갈수록 등속선이 본관보다는 지관쪽으로 훨씬 넓게 분포하고 있음을 보여주고 있다. 또 Fig. 4.9에는 유선을 나타내었다. 오리피스 설치부

분과 합류를 확대해서 나타내었고, 확대된 합류부 이후의 부분에서 박리유동과 이차유동이 생기는 것을 확인할 수 있다.

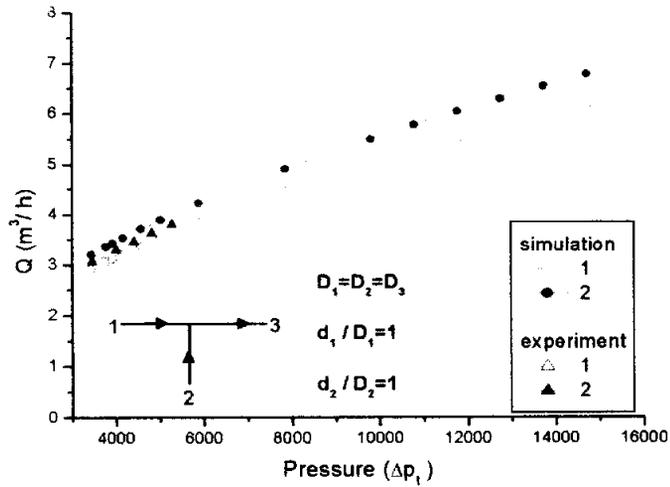


Fig. 4.6 Flow rate vs. pressure without orifice

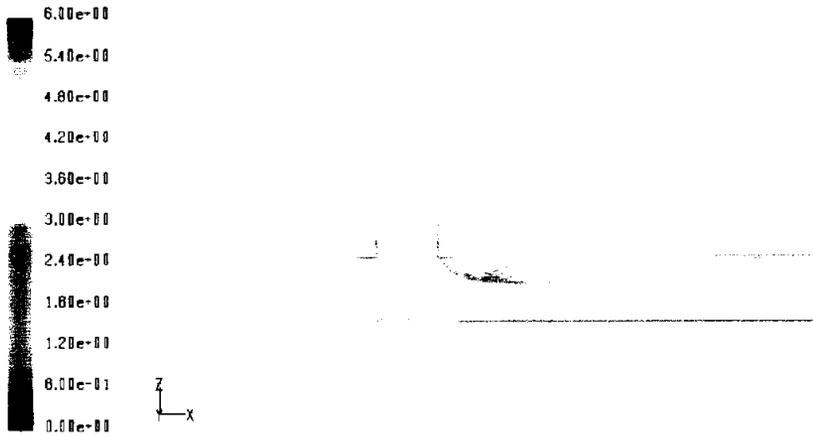


Fig. 4.7 Contours of velocity magnitude without orifice

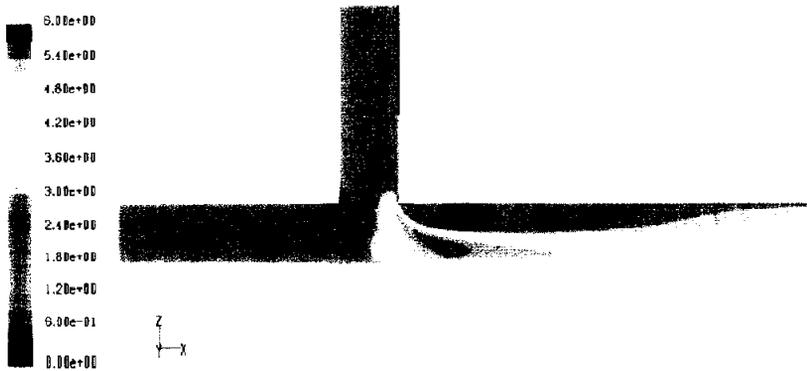


Fig. 4.8 Filled contours of velocity magnitude without orifice

제 4 장 시뮬레이션

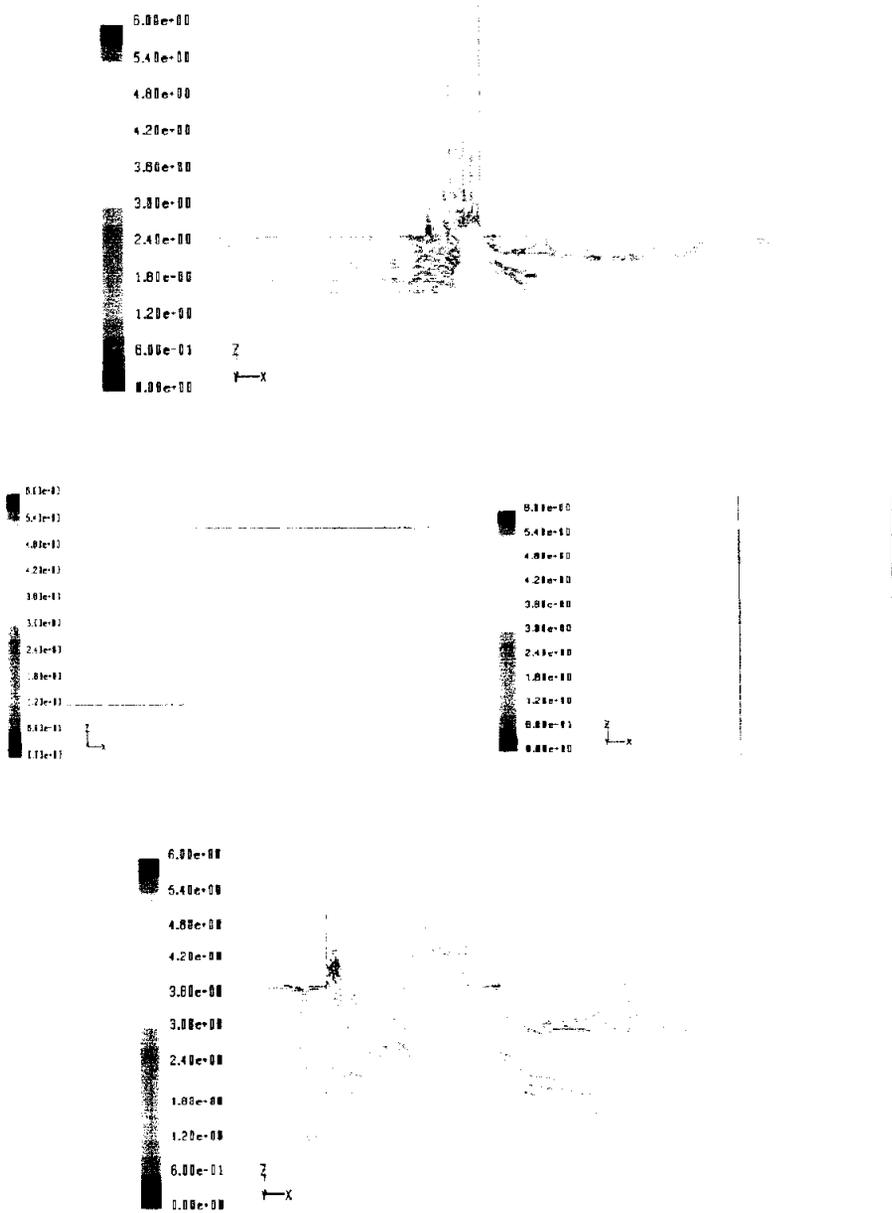


Fig. 4.9 Overall and enlarged streamline without orifice

Fig. 4.10은 d/D 가 0.882, 즉 직경이 34mm인 본관과 지관에 직경이 30mm인 오리피스를 각각 설치하여 동일한 압력을 가했을 때 본관과 지관의 유량을 그래프로 나타낸 것이다. 직경30mm의 오리피스가 설치되어 있으므로 실험 그래프에서의 압력은 Fig. 4.6보다 약간 높게 나타나고 있다.

실험과 시뮬레이션이 잘 일치한다고 볼 수 있으며, 실험과 시뮬레이션 모두 지관의 유량이 본관의 유량보다 많음을 나타내고 있으며, 지관과 본관의 유량차이는 Fig. 4.6보다는 작게 나타나고 있다.

Fig. 4.11과 Fig. 4.12에서 지관과 본관의 오리피스 이전에서 등속도 분포 곡선을 보면, 지관의 등속선이 본관의 등속선보다 넓게 분포하고 있으며, 오리피스 직후에서도 지관의 유속이 본관보다 빠르게 나타나고 있다. 특히 지관과 본관이 만나는 합류부에서는 지관에서의 등속선이 본관의 등속선보다 빠르고 넓게 분포하고 있음을 다시 확인할 수 있다. 여기서는 합류부의 영향뿐만 아니라, 적게나마 오리피스에 의한 유속변화도 관찰 할 수 있다.

Fig. 4.13에는 유선을 나타내었다. 확대된 것을 보면 오리피스 이후부분에 작은 와류가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

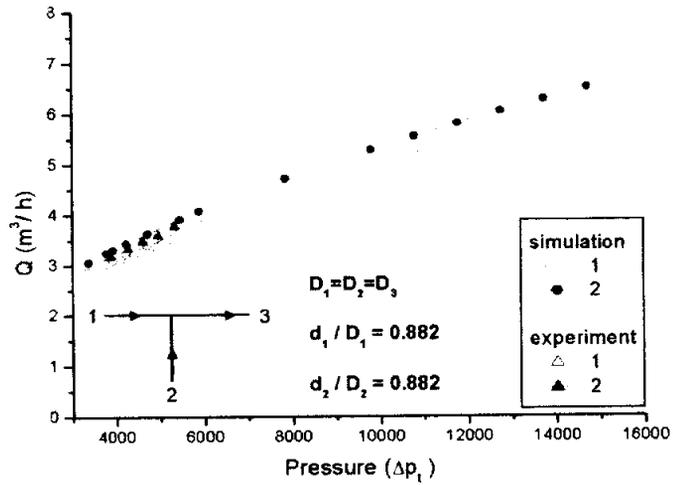


Fig. 4.10 Flow rate vs. pressure with orifice diameter of 30mm



Fig. 4.11 Contours of velocity magnitude with orifice diameter of 30mm

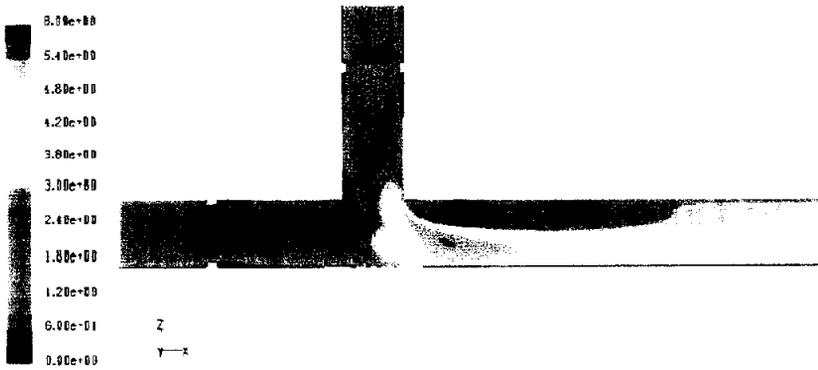


Fig. 4.12 Filled contours of velocity magnitude with orifice diameter of 30mm

제 4 장 시뮬레이션

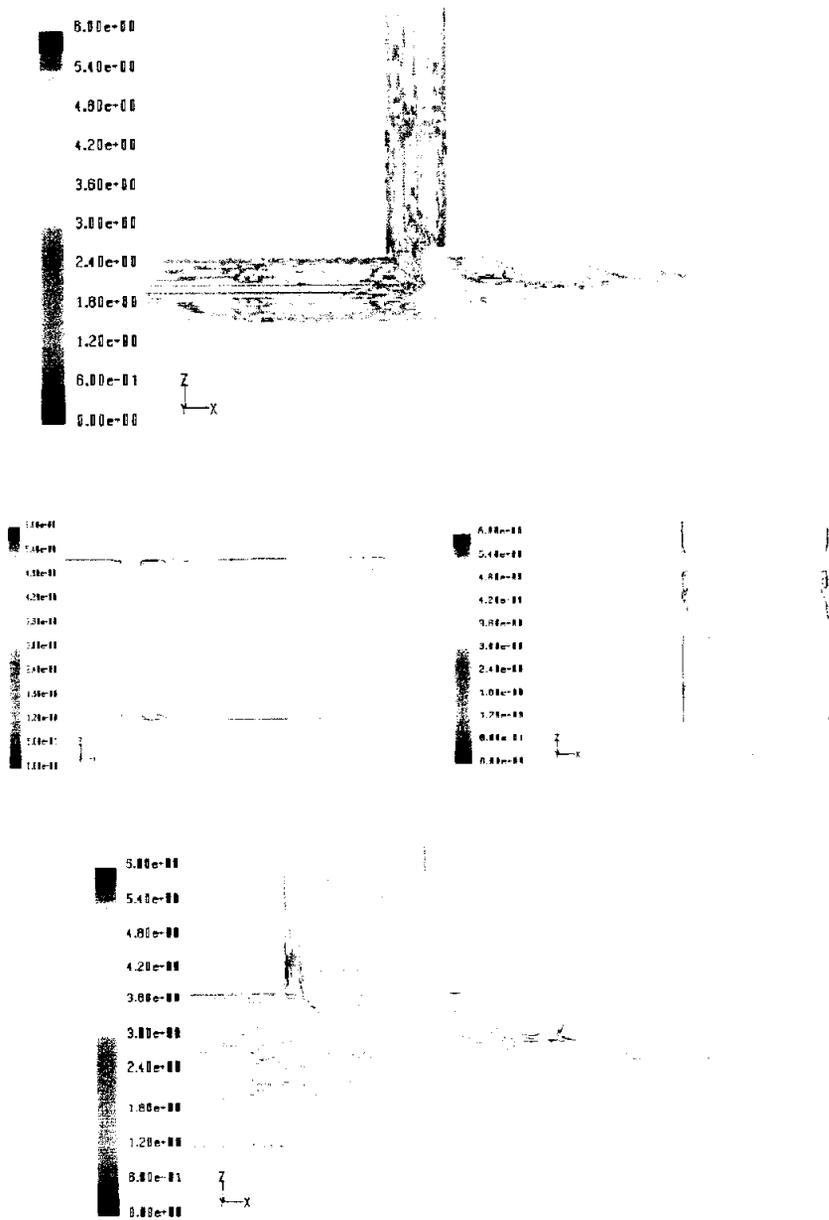


Fig. 4.13 Overall and enlarged streamlines with orifice diameter of 30mm

Fig. 4.14는 직경이 34mm인 관에 직경이 25mm인 오리피스를 설치하였으므로, d/D 가 0.735인 경우의 지관과 본관의 유량을 나타낸 것이다. Fig. 4.6, 및 Fig. 4.10과 비슷한 결과로 지관의 유량이 본관의 유량보다는 많이 흐름을 보여주고 있으며, 본관과 지관의 유량차이가 위의 두 그래프보다 크지 않은 것으로 보아 합류부의 영향에 의한 유량변화가 많이 줄어들었다고 볼 수 있다.

Fig. 4.15는 등속선을 나타내고 있다. 합류지점에 가까워질수록 본관의 유속은 점점 느려지고, 지관의 유속은 반대로 점점 증가하는 현상이 나타난다. 통상적인 생각으로 지관에서의 유체흐름은 직각으로의 방향 전환이 필요하고, 본관의 유체흐름은 직선흐름이므로 지관에서는 본관의 유체흐름에 의해서 막힘 현상이 발생하여 본관에서의 유량이 많을 것으로 생각되어진다. 하지만, 동일한 압력을 본관과 지관에 가한 결과, 오히려 반대의 현상이 발생되었다. 즉, 본관에서의 유동은 지관의 유동 때문에 흐름의 방해를 받으며, 지관의 유동은 본관의 유동에 의해서 오히려 속도가 증가하는 것이다. Fig. 4.16에서 지관의 유량이 많이 흐른다는 것을 더욱더 자세히 볼 수 있다.

Fig. 4.17은 유선을 나타내고 있고, 지관과 본관의 오리피스에서는 발생된 와류를 볼 수가 있으며, 합류부 직전에서도 약간의 와류가 발생됨을 알 수 있다.

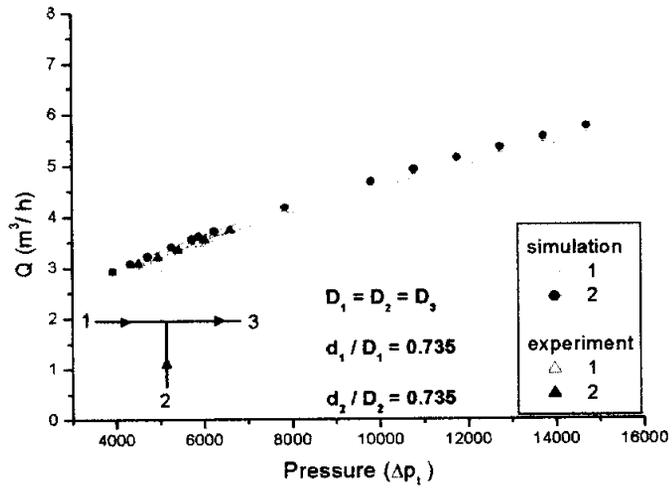


Fig. 4.14 Flow rate vs. pressure with orifice diameter of 25mm



Fig. 4.15 Contours of velocity magnitude with orifice diameter of 25mm

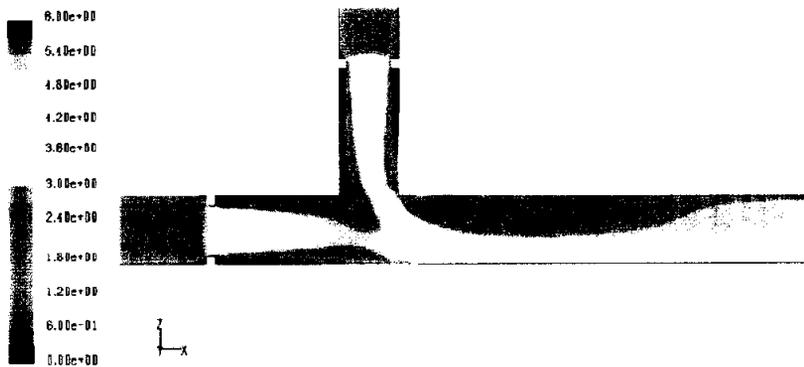


Fig. 4.16 Filled contours of velocity magnitude with orifice diameter of 25mm

제 4 장 시뮬레이션

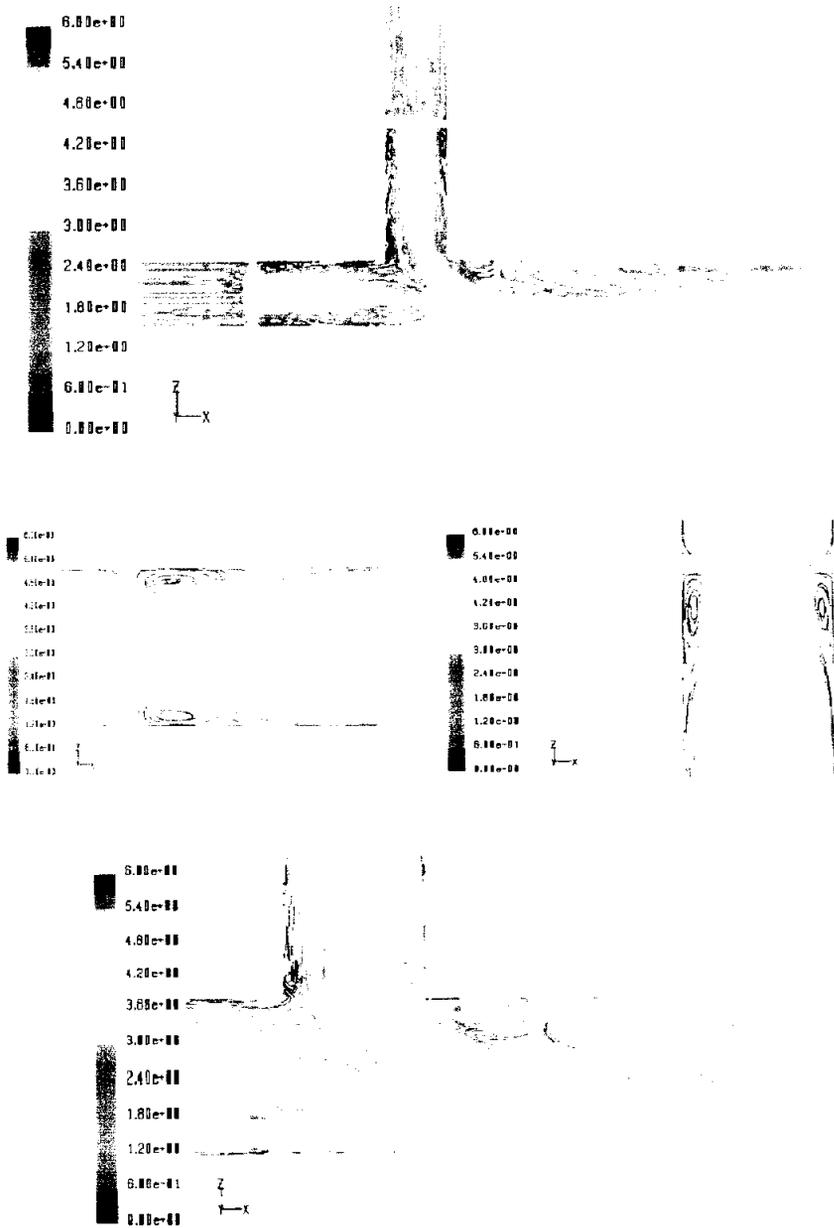


Fig. 4.17 Overall and enlarged streamlines with orifice diameter of 25mm

Fig. 4.18은 d/D 가 0.588이므로 직경이 34mm의 관에 직경이 20mm인 오리피스를 설치한 경우의 지관과 본관의 유량을 그래프로 나타낸 것이다. 20mm의 오리피스를 설치하였기 때문에 전체적인 유량은 많이 줄어들었으며, 실험과 시뮬레이션 모두 지관의 유량이 본관의 유량보다 많지만, 지관과 본관의 유량차이는 매우 적게 나타나고 있다. 저압부분 뿐만 아니라 고압부분에서의 유량차도 많이 줄어들었다.

Fig. 4.19의 등속도 분포를 보면 오리피스 이후부터 합류지점까지의 유동 형태는 Fig. 4.7, Fig. 4.11, Fig. 4.15와 비슷한 형태로 지관의 유속이 본관의 유속보다 크다는 것을 알 수 있으며, Fig. 4.20을 보면 합류부에서 지관이 본관보다 유속이 빠르게 나타나고 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 앞의 결과들에 대해서 보다 더 자세히 뒷받침함을 알 수 있다.

유선을 나타낸 Fig. 4.21을 보면 지관과 본관의 오리피스 직후에 와류를 볼 수가 있고, 오리피스에서 발생된 와류는 합류부까지 영향을 미치고 있음을 나타내고 있다.

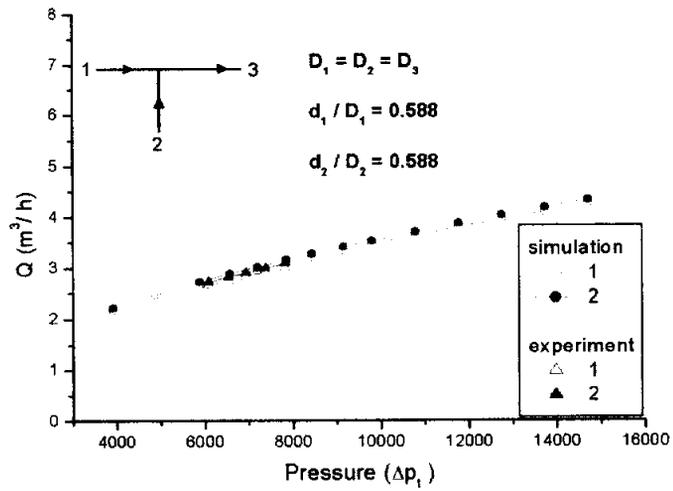


Fig. 4.18 Flow rate vs. pressure with orifice diameter of 20mm

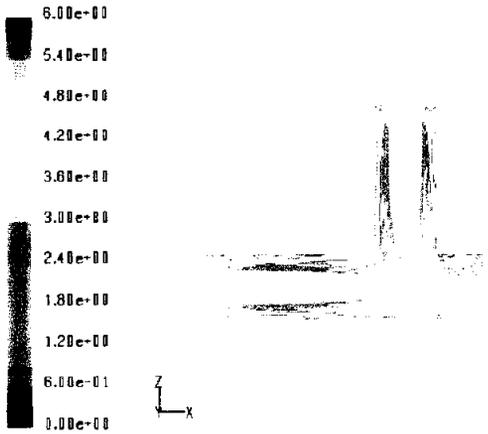


Fig. 4.19 Contours of velocity magnitude with orifice diameter of 20mm

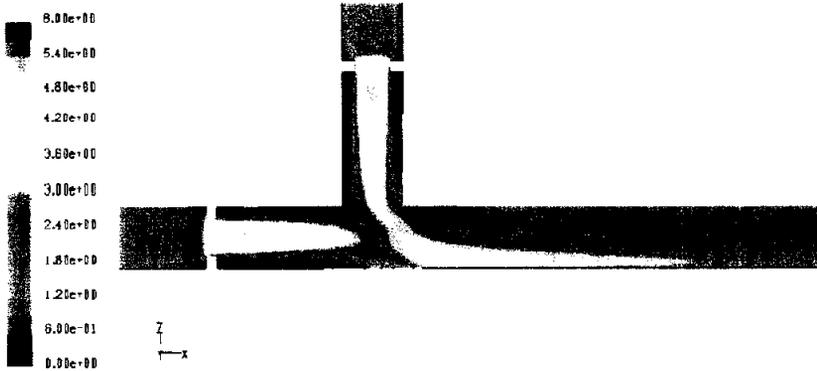


Fig. 4.20 Filled contours of velocity magnitude with orifice diameter of 20mm

제 4 장 시뮬레이션

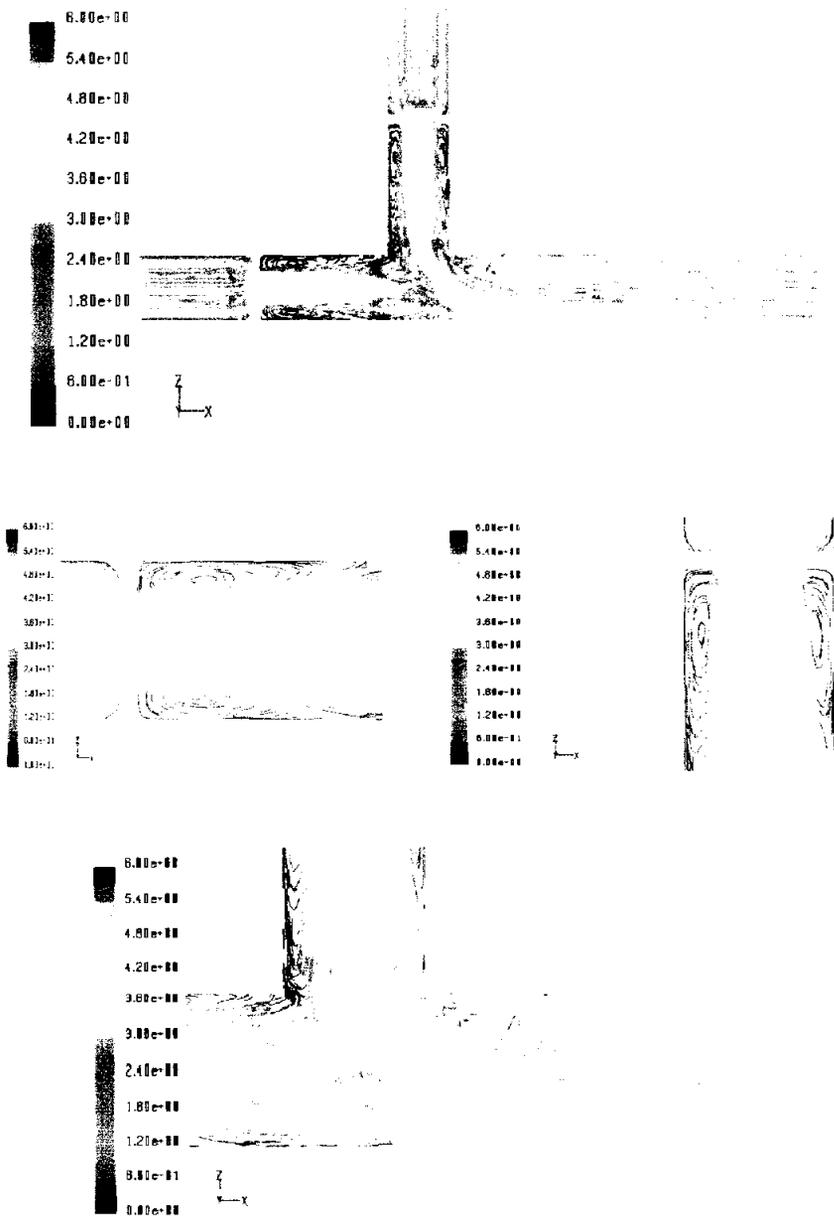


Fig. 4.21 Overall and enlarged streamlines with orifice diameter of 20mm

Fig. 4.22는 d/D 가 0.441이므로 직경의 크기가 34mm인 관에 직경이 15mm인 오리피스를 설치한 경우의 지관과 본관의 유량을 그래프로 나타낸 것이다. 직경이 작은 오리피스가 설치되어져 있기 때문에 유량은 아주 작게 나타나고 있다.

직경이 작은 오리피스가 설치되어질수록 오리피스 이전에서는 오리피스에 의한 영향을 많이 받는 반면, 오리피스를 통과한 이후의 있어서는 합류부의 영향이 조금씩 적게 나타난다는 것을 이전의 실험과 시뮬레이션에서 확인이 되어졌다. 하지만, 직경이 15mm인 오리피스를 설치한 경우에는 오리피스 이후의 합류부의 영향이 거의 나타나지 않는 것이 특징이다. 따라서 본관과 지관의 유량차이는 거의 나타나지 않는 것으로 보인다.

합류부의 영향이 거의 없기 때문에 지관과 본관의 등속도 분포도를 나타낸 Fig. 4.23을 보면 지관의 등속도 분포와 본관의 등속도 분포가 매우 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있다. Fig. 4.24에서도 지관과 본관의 유동이 매우 비슷함을 알 수 있다. Fig. 4.25는 15mm의 오리피스를 설치한 합류관의 유동을 유선으로 보여주고 있다.

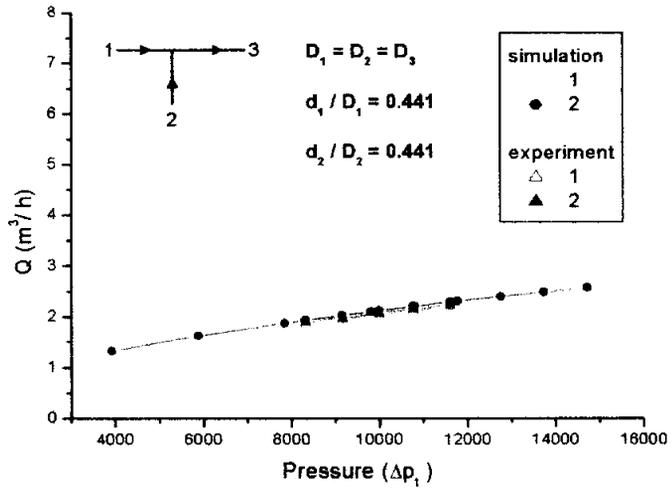


Fig. 4.22 Flow rate vs. pressure with orifice diameter of 15mm

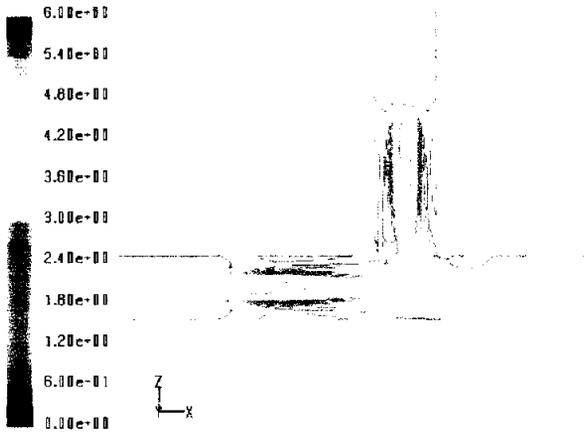


Fig. 4.23 Contours of velocity magnitude with orifice diameter of 15mm

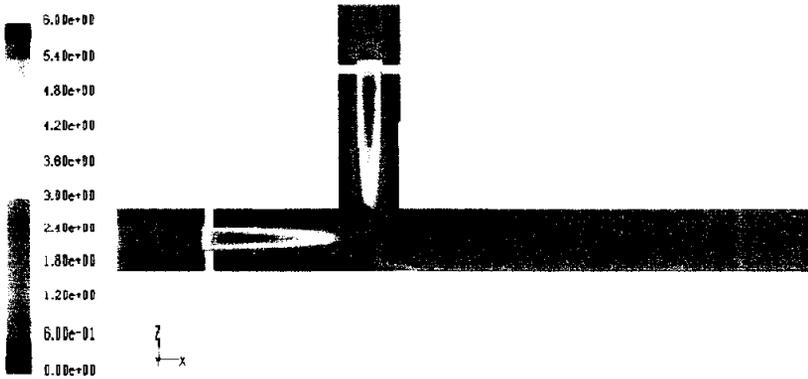


Fig. 4.24 Filled contours of velocity magnitude with orifice diameter of 15mm

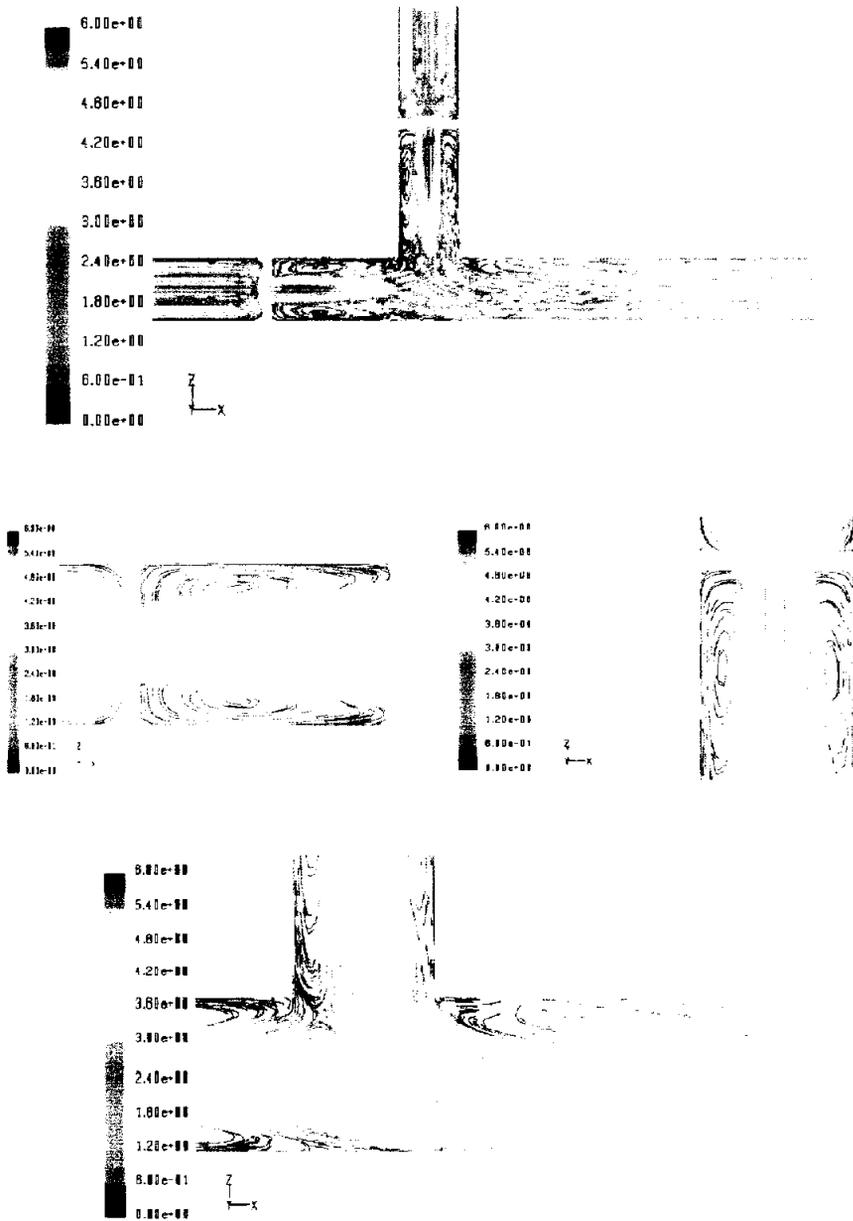


Fig. 4.25 Overall and enlarged streamlines with orifice diameter of 15mm

Table 4.2는 직경비에 대한 유량비를 나타낸 표이다. 즉, 지관과 본관에 오리피스를 설치하지 않은 경우인 오리피스 직경과 관 직경비가 1인 경우 부터 15mm의 오리피스를 설치한 0.441까지 직경비에 대한 본관과 지관의 유량비를 표로 나타낸 것이다.

오리피스를 설치하지 않은 경우는 합류부만의 영향을 받기 때문에 본관보다는 지관의 유량이 약 10%정도 많이 흘러가고, 오리피스를 설치한 경우 직경비가 작아지면 작아질수록 오리피스 자체에 의한 손실이 커지기 때문에 합류부의 영향이 점점 줄어들고 있으며, 그에 따른 유량비도 점점 줄어들고 있다.

직경비 0.441이하에서는 지관과 본관의 유량차이는 1% 미만으로 유량차이는 거의 나타나지 않는다고 볼 수 있다.

Fig. 4.26는 Table 4.2를 그래프로 나타낸 것이다.

Table 4.2 Diameter ratio and flow ratio

| Diameter ratio (d_1 / D_1 , d_2 / D_2) | Flow ratio (Q_2 / Q_1) |
|---|-------------------------------|
| 1.000 | 1.10 |
| 0.882 | 1.07 |
| 0.735 | 1.04 |
| 0.588 | 1.02 |
| 0.441 | 1.01 |

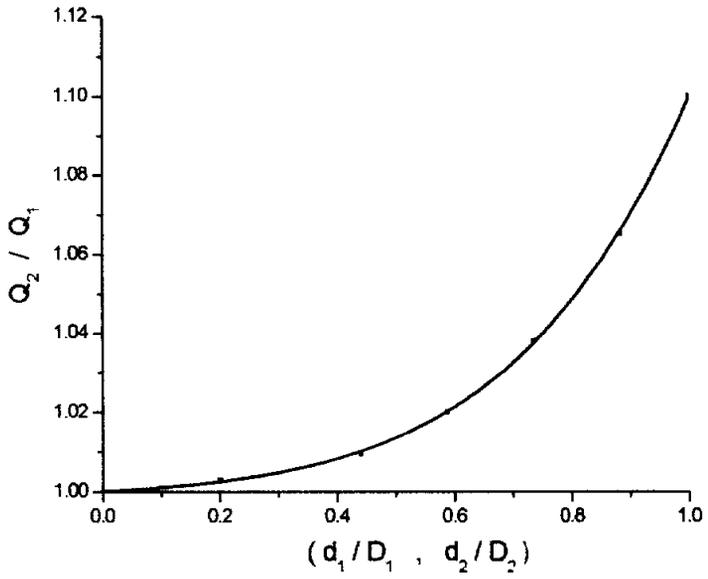


Fig. 4.26 Flow ratio vs. diameter ratio

Fig. 4.27은 오리피스 근처에서 나타나는 박리유동을 속도벡터로 나타낸 것이다. $Y=0$ 인 단면을 나타낸 것으로 오리피스 이전의 계산영역은 그 길이가 직경의 15배 이상으로 매우 안정적으로 흐르고 있는 것을 볼 수 있으며, 오리피스를 지나서는 와류가 심하게 발생됨을 관찰할 수 있다.

Fig. 4.28은 합류부에서 나타나는 박리유동을 속도벡터로 나타낸 것이다. 아래쪽은 와류현상이 나타나지 않고 있지만, 위쪽으로 갈수록 와류현상이 점점 크게 나타나고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 4.29와 Fig. 4.30은 합류부 직후의 단면에서 나타나는 이차유동을 나타내고 있다. Fig. 4.30은 원형단면에서의 이차유동을 나타내고 있으며, Fig. 4.29에서 자세히 볼 수 없었던 이차유동을 자세히 나타내고 있다.

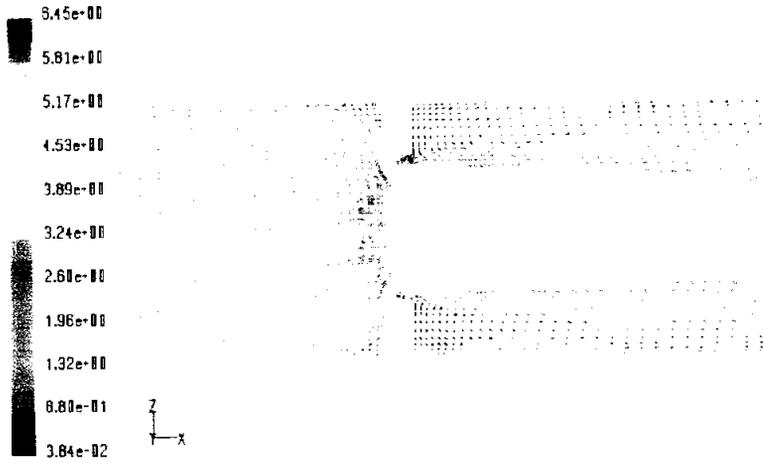


Fig. 4.27 Velocity vectors around the orifice



Fig. 4.28 Velocity vectors at T-junction
(side view)



Fig. 4.29 Velocity vectors at T-junction
(top view)

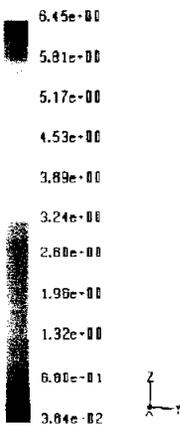


Fig. 4.30 Velocity vectors at T-junction
(front view)

4.4.2 동일 유량에서의 에너지 손실

앞의 4.4.1절에서는 지관과 본관에 동일한 압력을 가하여 지관과 본관에서의 유량변화에 대해서 알아보았다. 실험과 시뮬레이션의 결과는 매우 비슷한 경향으로 나타났다.

지관과 본관에 동일한 압력으로 작동유체를 공급하게 되면 유량에 있어서 많고 적음은 알 수 있지만, 본관과 지관에 대한 손실의 크기가 얼마인지를 파악하기는 약간의 어려움이 있다. 따라서 동일한 유량을 본관과 지관에 유입하여 압력을 측정하면 손실을 쉽게 계산할 수 있다

따라서 본 절에서는 지관과 본관에 동일한 유량을 공급하고 각각의 압력을 측정하여, 손실계수(ζ)의 크기가 얼마나 되는지에 대해서 알아보았다.

그래프내에서 Q_1 , Q_2 의 비가 1이므로 지관과 본관의 유량이 같다는 것을 나타내고 있으며, ζ_{13} 는 합류부를 중심으로 본관 상류지역과 본관 하류지역 사이에서의 손실계수를 나타내고, 기호는 사각으로 표현되어졌으며, ζ_{23} 은 지관과 본관 하류지역 사이에서의 손실계수를 나타내며, 기호는 원으로 나타내었다.

T형 합류관에서 지관과 본관의 유량에 따른 손실계수의 관계를 그래프로 나타낸 것이 Fig. 4.31이고, d/D 가 1이므로 오리피스를 설치하지 않은 경우이다.

저유량에서부터 고유량까지 지관과 본관의 손실계수 비는 거의 일정하다 볼 수 있으며, 공급유량이 증가되어질수록 모든 손실계수는 점점 줄어들고 있다. 오리피스가 없기 때문에 오리피스에 의한 손실은 없으며, 다만 합류부의 영향에 의해서 나타나는 손실만 나타낸다. 직선 유동

인 본관상류에서 본관 하류로의 유동이 지관이 접하는 합류부에서 지관 유동과 합류되면서 본관의 손실계수 ζ_{13} 은 지관의 손실계수 ζ_{23} 보다 크게 나타나고 있다.

Fig. 4.32 및 Fig. 4.33은 압력분포를 나타낸 것이다. 그림에서 본관의 압력은 합류부 이전부터 지관의 압력보다 높게 나타내고 있는 것을 확인할 수 있으며, 합류한 이후까지 높은 압력을 유지하고 있는 것으로 보인다.

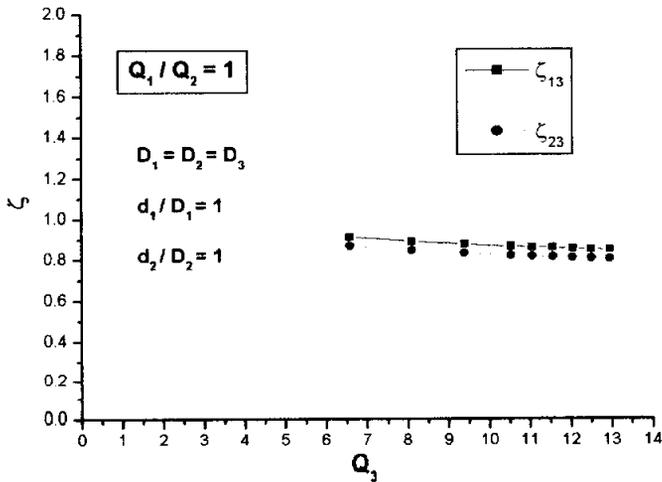


Fig. 4.31 Loss coefficient vs. flow rate without orifice

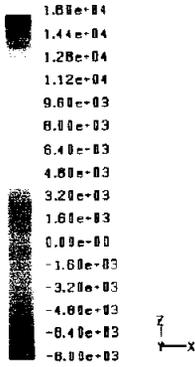


Fig. 4.32 Contours of total pressure without orifice

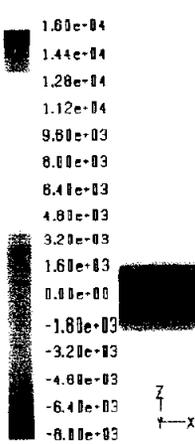


Fig. 4.33 Filled contours of total pressure without orifice

Fig. 4.34는 $d/D=0.882$ 이므로 본관과 지관에 직경이 30mm인 오리피스를 각각 설치하여 지관과 본관의 손실계수를 나타낸 것이다. 그래프의 전체적인 구성에 있어서는 Fig. 4.31과 큰 변화가 없어 보인다. 하지만, ζ_{13} 과 ζ_{23} 은 Fig. 4.31 보다 전반적으로 0.05정도 높게 나타나고 있다.

Fig. 4.35 및 Fig. 4.36의 압력분포를 보면 본관의 등압분포가 지관보다 넓게 분포하고 있으며, 합류부의 압력분포에서도 본관의 압력이 지관보다 높게 나타나고 있다.

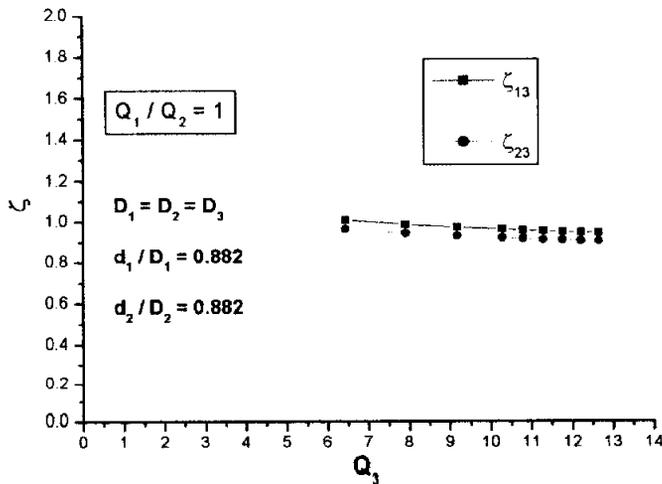


Fig. 4.34 Loss coefficient vs. flow rate with orifice diameter of 30mm

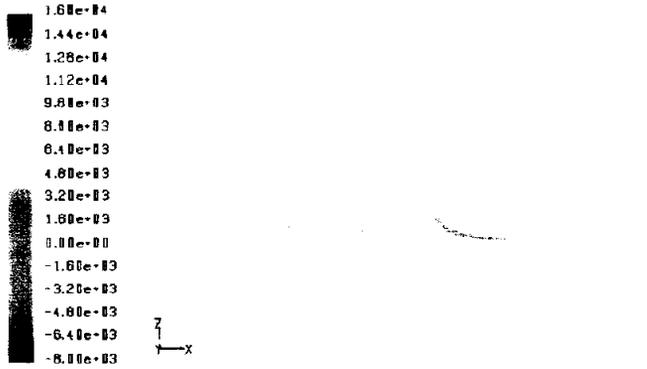


Fig. 4.35 Contours of total pressure with orifice diameter of 30mm

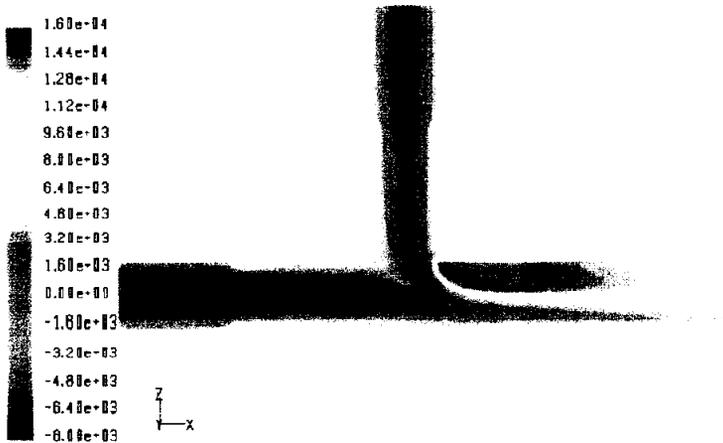


Fig. 4.36 Filled contours of total pressure with orifice diameter of 30mm

Fig. 4.37은 직경 34mm의 관에 직경 25mm인 오리피스를 설치한 경우의 지관과 본관의 손실계수를 나타낸 것이다. 따라서 d/D 는 0.735이다. 오리피스의 영향에 의해서 본관과 지관의 손실계수는 전반적으로 높아졌으며, 그에 따른 유량은 많이 줄어들었고, 고유량으로 갈수록 손실계수가 조금씩 줄어들고 있는 것을 확인할 수 있다.

등압분포로 나타낸 Fig. 4.38을 보게 되면 지관의 압력은 오리피스를 지나면서 본관의 압력보다 낮아졌다는 것을 뚜렷이 알 수 있다. 하지만, 합류부에서는 지관과 본관의 압력차가 크게 나지 않는 것을 볼 수 있다. Fig. 4.38을 완전 컬러로 나타낸 Fig. 4.39에서 보듯이 합류부의 압력차가 크게 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다.

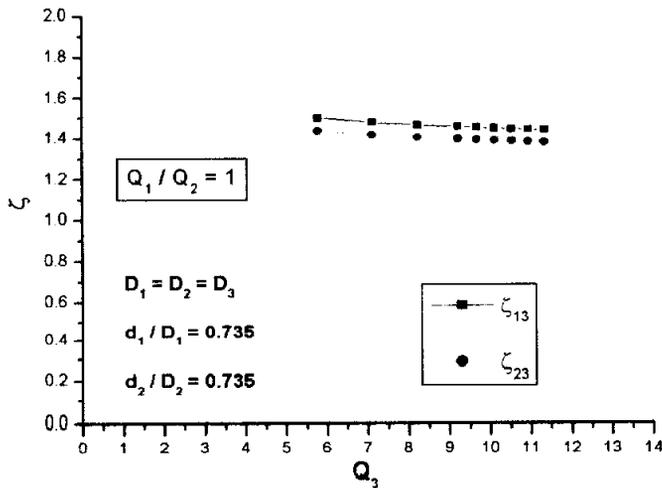


Fig. 4.37 Loss coefficient vs. flow rate with orifice diameter of 25mm

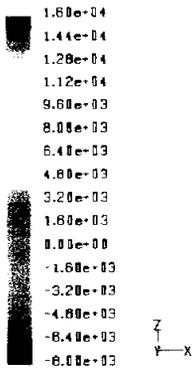


Fig. 4.38 Contours of total pressure with orifice diameter of 25mm

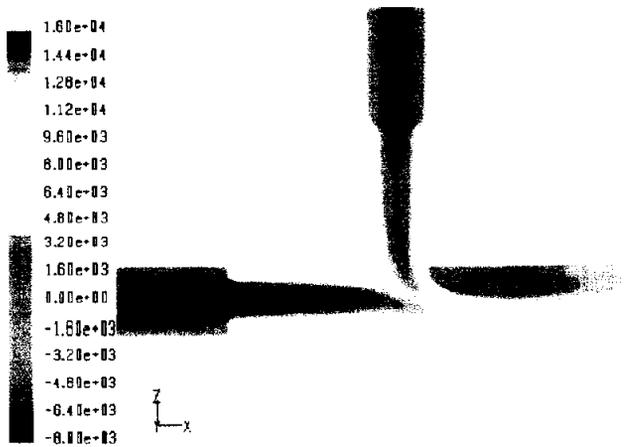


Fig. 4.39 Filled contours of total pressure with orifice diameter of 25mm

직경 20mm인 오리피스를 설치하여 d/D 가 0.588인 경우 유량에 따른 손실계수를 Fig. 4.40에 나타내었다. 오리피스 직경이 작아질수록 오리피스 자체 영향에 의한 손실이 커졌으며, 본관의 손실이 지관의 손실보다 다소 크게 나타났다. 또 d/D 가 0.588에서는 본관과 지관의 유량변화에 따른 손실계수의 변화가 매우 적게 나타나고 있다.

Fig. 4.41의 등압선에서도 보듯이 오리피스 이전에서는 본관의 등압분포가 지관의 등압분포보다 넓게 분포하여 압력이 높음을 나타내고 있는 반면, 오리피스를 지나고 합류부에서는 압력차가 거의 나타나지 않고 있음을 볼 수 있다. 이는 Fig. 4.42에서도 확인할 수 있다.

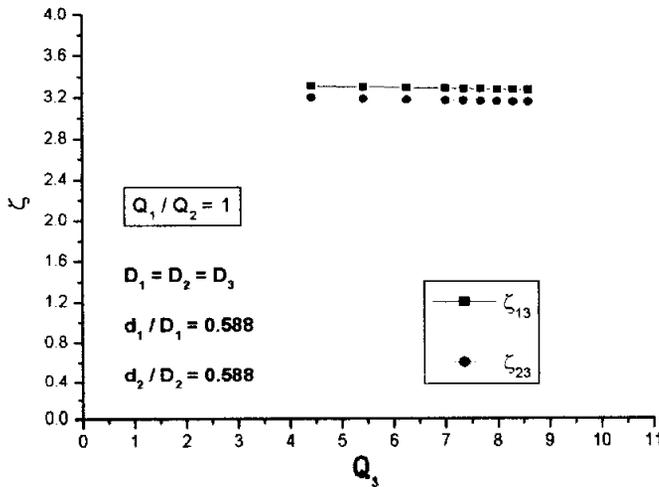


Fig. 4.40 Loss coefficient vs. flow rate with orifice diameter of 20mm

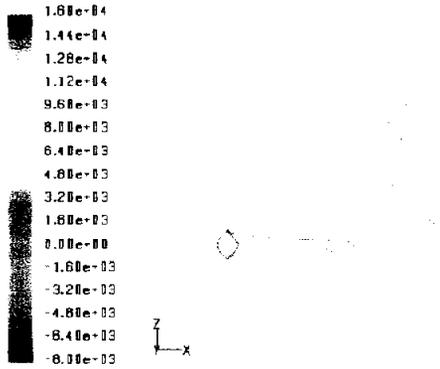


Fig. 4.41 Contours of total pressure with orifice diameter of 20mm

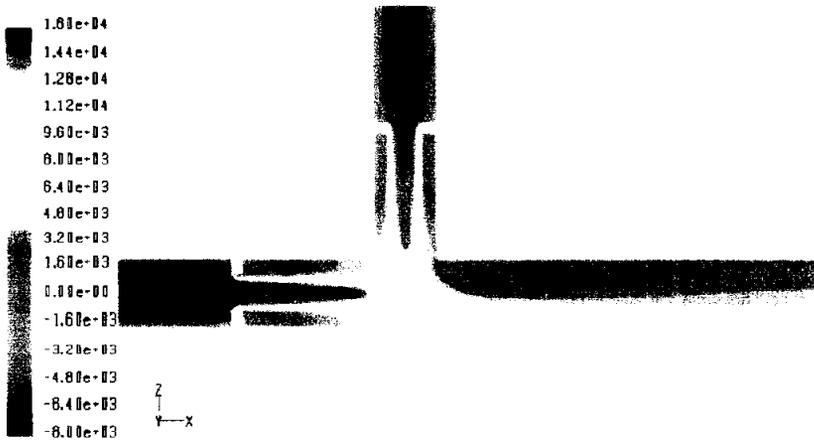


Fig. 4.42 Filled contours of total pressure with orifice diameter of 20mm

Fig. 4.43은 직경15mm의 오리피스를 직경 34mm의 관에 설치하여 유량에 따른 손실계수를 나타낸 그래프이다. 따라서 d/D 는 0.441이다.

그래프에서 보듯이 본관과 지관의 손실계수는 매우 높게 나타나고 있다. 이것은 오리피스 설치에 의한 손실이라 볼 수 있으며, 합류부 영향에 의한 손실은 본관이 지관보다 다소 높게 나타나고 있지만, 손실차이는 그다지 크지 않다. 또, 유량에 따른 손실은 거의 일정하게 나타낸다고 볼 수 있다.

Fig. 4.44 및 Fig. 4.45의 압력분포를 보면 오리피스 이전에서 압력이 매우 높게 나타나고 있으며, 오리피스에 의한 손실이 매우 크게 나타났다. 반면 오리피스 이후의 합류부에서는 등압분포 형태는 매우 비슷하게 나타나고 있어 합류부에 의한 손실은 거의 없다고 볼 수 있다.

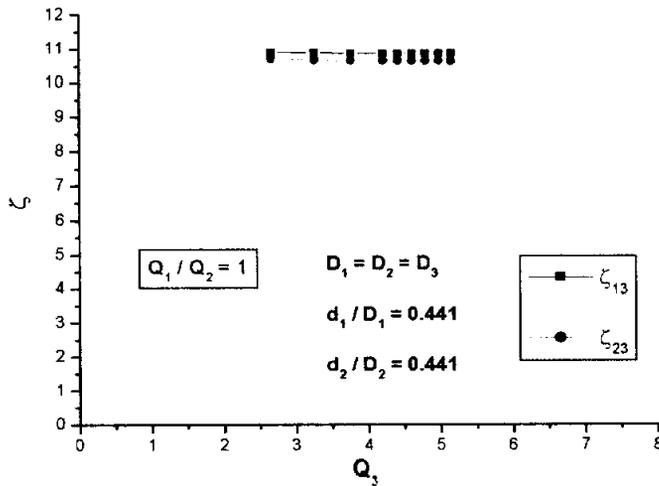


Fig. 4.43 Loss coefficient vs. flow rate with orifice diameter of 15mm

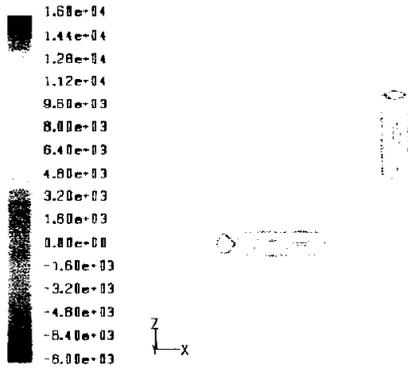


Fig. 4.44 Contours of total pressure with orifice diameter of 15mm

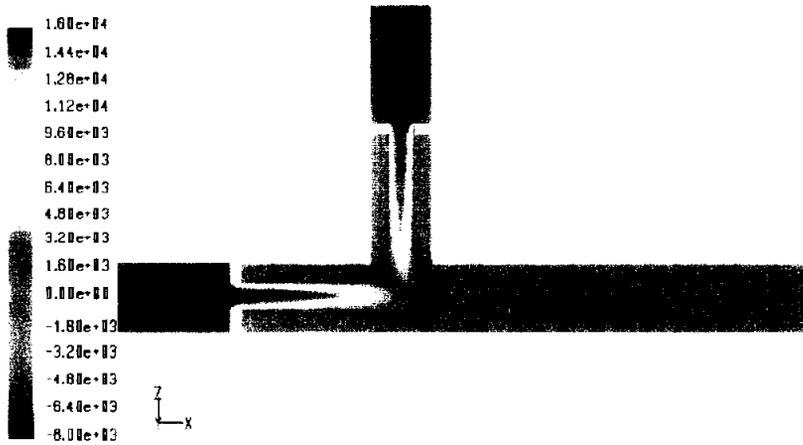


Fig. 4.45 Filled contours of total pressure with orifice diameter of 15mm

Fig. 4.46은 합류관에서의 유량(Q_3)에 대해서 본관과 지관의 손실계수비를 나타낸 것이다. 지관과 본관에 동일한 유량이 공급되었기 때문에 Q_2/Q_3 는 0.5이다.

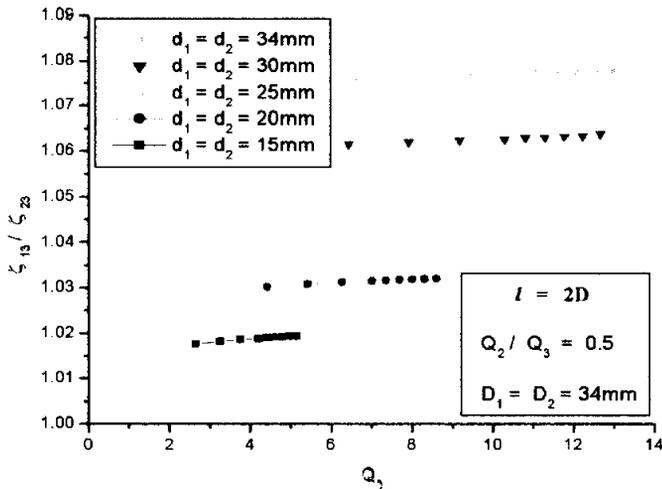


Fig. 4.46 Loss coefficient ratio vs. flow rate

본관과 지관의 손실계수비를 나타내는 y축이 1이상이므로 본관의 손실계수가 지관의 손실계수보다 크다는 것을 나타내고 있다.

$D_1 = D_2 = 34\text{mm}$ 이므로 본관과 지관의 배관 직경이 34mm임을 나타내며, $d_1 = d_2$ 는 지관과 본관에 설치된 오리피스 직경을 나타낸다. 따라서 $d_1 = d_2 = 34\text{mm}$ 인 것은 배관 직경과 같으므로 오리피스를 설치하지 않은 경우를 나타낸다. 이 경우 저유량에서는 고유량으로 갈수록 손실계수비가 약간 증가하는 것처럼 보이지만, 고유량 부분에서는 그래프 기울기가 더 이상 증가하지 않고 일정하게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 본관

과 지관의 손실계수비는 7% 이상임을 보이고 있다.

본관과 지관에 직경 30mm인 오리피스를 설치한 경우에는 본관의 손실계수가 지관의 손실계수보다 약 6%정도 크게 나타남을 알 수 있고, 고유량으로 갈수록 그래프의 기울기는 수평에 가깝게 나타나고 있음을 알 수 있다.

직경 25mm, 20mm, 15mm의 오리피스를 설치한 경우는 오리피스 때문에 Q_3 의 유량은 점점 줄어들고 있는 것을 볼 수 있으며, 각각 그래프의 고유량부에서는 기울기가 수평에 가깝게 나타나고 있으며, 오리피스 직경이 줄어들수록 손실계수비도 점점 줄어드는 것을 볼 수 있다.

Table 4.3은 지관과 본관의 대표적인 손실계수비를 직경비에 따라 나타내었다. 오리피스를 설치하지 않은 직경비 1인 경우는 본관의 손실계수가 지관의 손실계수보다 약 7.7% 정도 많게 나타나고 있다. 또 관의 직경과 오리피스의 직경비가 점점 줄어들수록 손실계수도 점점 줄어들고 있는 것을 볼 수가 있으며, 직경비가 0.441인 경우 본관의 손실계수는 지관의 손실계수에 비해 약 1.8% 크게 나타나고 있다. 따라서 직경비가 0.441이하인 경우에는 본관의 손실계수와 지관의 손실계수는 큰 차이가 없다고 볼 수 있으며, 직경비가 작아지면 작아질수록 손실계수비도 점점 줄어들고, 결국에는 손실계수비가 1에 가까워짐을 간접적으로 알 수 있다.

Fig. 4.47은 Table 4.3을 그래프로 나타낸 것이다.

Table 4.3 Diameter ratio and loss coefficient ratio

| Diameter ratio ($d_1 / D_1, d_2 / D_2$) | Loss coefficient ratio (ζ_{13} / ζ_{23}) |
|--|---|
| 1.000 | 1.077 |
| 0.882 | 1.063 |
| 0.735 | 1.046 |
| 0.588 | 1.031 |
| 0.441 | 1.018 |

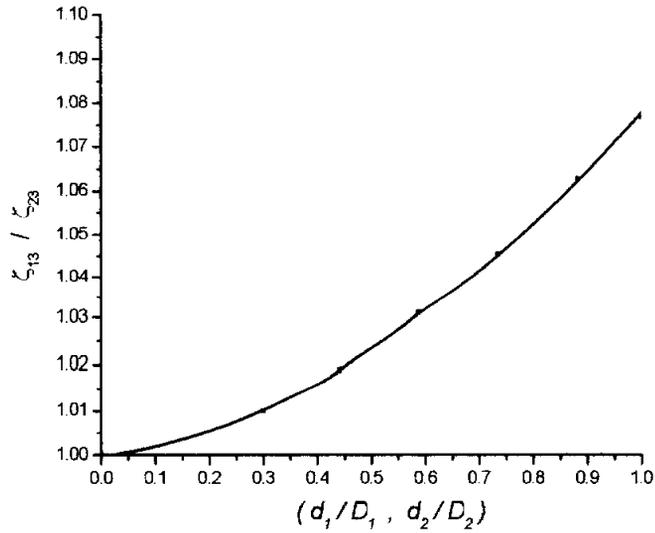


Fig. 4.47 Loss coefficient ratio vs. diameter ratio

4.4.3 오리피스 설치 위치에 따른 유동변화

합류관뿐만 아니라 분기관, 엘보 등에 오리피스가 설치된 경우에는 오리피스가 설치된 위치에 따라 유동에도 변화가 생길 수 있다. 앞의 4.4.1, 4.4.2 절에서는 합류지점을 기준으로 관 직경의 2배 위치에 오리피스를 설치하여 실험과 시뮬레이션의 결과를 비교 검토하였다.

하지만, 본 절에서는 합류지점을 기준으로 관직경과 동일한 위치에 오리피스가 있는 경우에 대해서 유동의 변화를 연구하였다.

오리피스의 직경은 30mm, 25mm, 20mm, 15mm인 경우를 고려하였고, 작동유체는 지관과 본관에 동일 유량으로 가해지게되며, 배관의 직경은 34mm로 모두 같고, 지관과 본관에는 동일한 오리피스가 존재하게 된다.

그래프 내의 사각형 기호는 합류지점을 기준으로 관 직경의 2배 위치에 오리피스가 있는 것이고, 원 기호는 합류지점을 기준으로 관 직경의 위치에 오리피스가 있는 것이며, 각 기호의 내부가 채워진 것은 지관을 나타내고 내부가 채워지지 않은 것은 본관을 나타낸다. 즉, ζ_{13} 는 본관 상류와 본관하류의 손실을 나타내고, ζ_{23} 은 지관과 본관의 손실을 나타내고 있다.

Fig. 4.48은 34mm의 관에 30mm의 오리피스를 설치한 경우 오리피스 설치 위치에 따른 손실계수를 나타내고 있다. 직경의 2배 위치에 오리피스를 설치한 경우 보다 직경과 같은 위치에 오리피스를 설치한 경우의 손실이 지관과 본관 모두 작게 나타나고 있다. 전체적인 경향을 살펴보면, 오리피스를 직경의 2배 길이에 설치한 경우와 직경과 같은 길이에 설치한 경우 모두 본관의 손실이 지관의 손실보다 크게 나타나고 있으며, 두 경우의 그래프는 매우 비슷하다고 볼 수 있다.

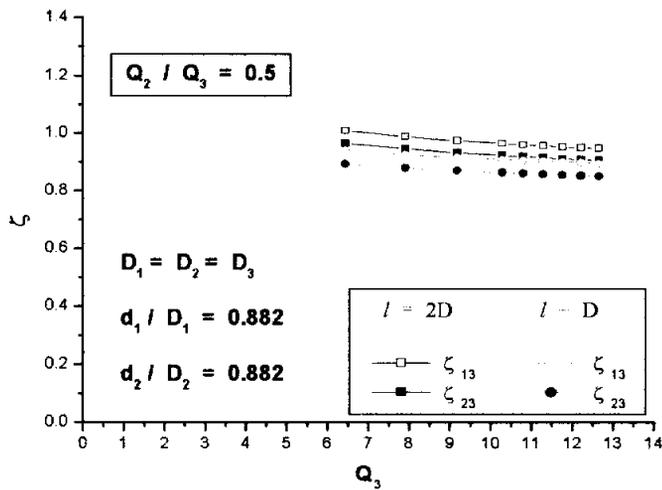


Fig. 4.48 Loss coefficient vs. flow rate with orifice diameter of 30mm

Fig. 4.49는 $d / D = 0.735$ 이므로 관 직경이 34mm이고 오리피스 직경이 25mm인 경우의 손실을 나타내고 있다. 오리피스 설치위치가 직경과 같은 위치인 $l = D$ 인 경우의 지관과 본관의 손실이 $l = 2D$ 인 경우보다 전체적으로 작게 나타나고 있으며, 오리피스 설치 위치에 따른 본관과 지관의 손실 관계를 보면, 비슷한 경향으로 나타나고 있다고 볼 수 있다.

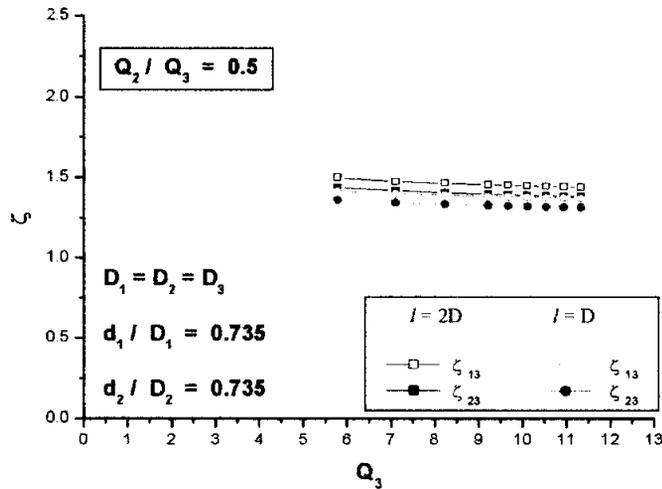


Fig. 4.49 Loss coefficient vs. flow rate with orifice diameter of 25mm

34mm의 관에 20mm의 오리피스를 설치한 경우의 손실계수를 Fig. 4.50에 나타내었다. 오리피스를 직경의 2배 위치에 설치한 경우와 직경의 위치에 설치한 경우, 손실계수의 차이가 Fig. 4.48보다 많이 줄어든 것을 볼 수 있을 뿐만 아니라 지관과 본관의 손실계수 차도 많이 줄어든 것을 확인할 수 있다.

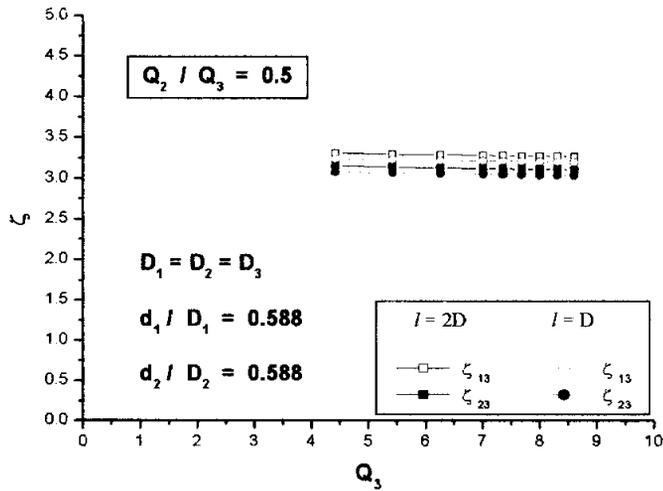


Fig. 4.50 Loss coefficient vs. flow rate with orifice diameter of 20mm

Fig. 4.51은 15mm의 오리피스를 설치했으므로 $d / D = 0.441$ 인 경우이다. $l = 2D$ 와 $l = D$ 모두 본관의 손실이 지관의 손실보다 미세하게나마 크게 나타나고 있다. 설치한 오리피스 직경이 작아질수록 지관과 본관의 손실계수 차가 적게 나타나고 있으며, 오리피스를 설치한 위치가 $l = 2D$ 와 $l = D$ 인 경우 모두 손실계수 차가 거의 없음을 나타내고 있다.

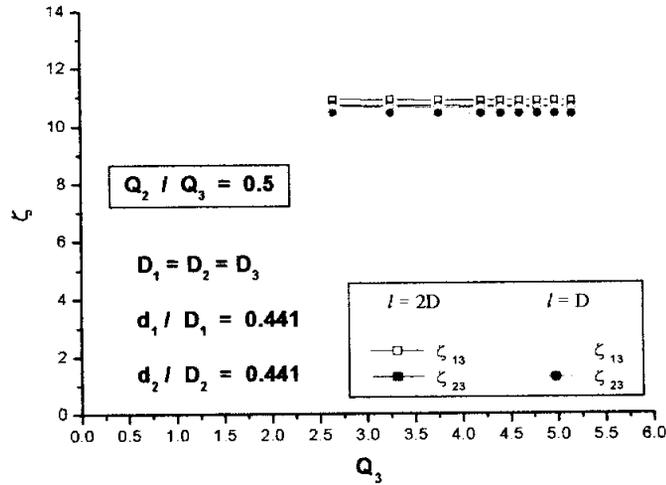


Fig. 4.51 Loss coefficient vs. flow rate with orifice diameter of 15mm

Fig. 4.52는 본관과 지관의 손실계수비를 합류유량에 따라 나타내었으며, $l = D$ 이므로 오리피스 설치위치는 관의 직경과 동일한 위치에 설치했다.

손실계수비가 1 이상이므로 본관의 손실계수가 지관보다 크다고 볼 수 있으며, 직경이 작은 오리피스가 설치될수록 본관과 지관의 손실계수비가 작아지는 것을 볼 수 있다.

$l = 2D$ 인 경우의 손실계수비를 나타낸 그래프 Fig. 4.46과 비교하면 Fig. 4.52에서 본관과 지관의 손실계수비가 조금 커진 것을 관찰 할 수 있지만, 그 크기는 매우 미미하다 볼 수 있다. 따라서 오리피스의 설치 위치가 $l = D$ 에서부터 $l = 2D$ 의 위치까지는 본관과 지관의 유동에 영향을 거의 주지 않는다고 볼 수 있다.

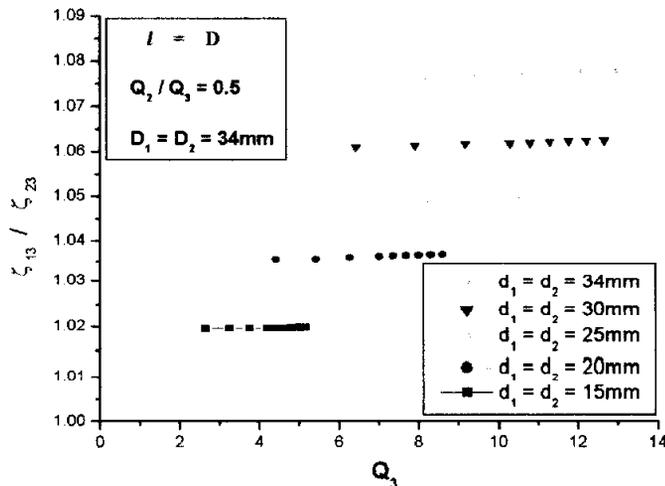


Fig. 4.52 Loss coefficient ratio vs flow rate

4.4.4 이형 직경 오리피스가 설치된 관에서의 유동

앞의 4.4.1 ~ 4.4.3 절에서는 본관과 지관에 각각 동일한 크기의 오리피스를 설치하여 유동의 변화 등을 살펴본 결과, 지관의 유량이 본관의 유량보다 다소 많이 흐른다는 사실을 알 수 있었다.

하지만, 관을 설계할 때 어쩔 수 없이 T 합류관만을 사용하여야할 상황이 발생했을 때, 종류가 다른 두 유체를 같은 유량으로 혼합해야하는 경우나 본관과 지관에서 동일한 유량으로 신속히 배출을 시켜야하는 경우가 발생할 수 있다.

따라서 본 절에서는 지관과 본관에 동일한 압력을 가했을 때 본관과 지관에 동일한 유량을 흘려보낼 수 있는 방법을 찾는 것을 주목적으로 한다. 즉, 본관에 오리피스를 설치하지 않은 경우, 지관에 여러 가지의 직경을 가진 오리피스를 설치하여 본관과 지관의 유량이 같아지는 지관의 오리피스를 찾는다는 것이다. 또 본관에 직경이 30mm, 25mm, 20mm, 15mm의 직경을 가진 오리피스를 설치한 경우에 있어서도, 지관에 동일한 유량을 흐르게 할 수 있는 최적의 직경을 가진 오리피스를 찾고자 한다.

Fig. 4.53은 레이놀즈 수에 따른 지관과 본관의 유량비를 그래프로 나타낸 것으로, $d_1 / D_1 = 1$ 이므로 직경 34mm의 본관에 오리피스가 없는 경우를 나타내고 있다. 본관과 지관에 동일한 압력을 가했을 때 본관과 지관에 동일한 유량이 흘러갈 수 있도록 하기 위해서, 직경 34mm의 지관에 33mm, 32.5mm, 32mm, 31.5mm, 31mm, 30mm의 직경을 가진 오리피스를 설치하였다. 즉, 직경 34mm의 지관에 직경 33mm의 오리피스를 설치한 경우 오리피스의 직경과 관의 직경을 무차원하면 $d_2 / D_2 =$

0.971이고, 직경 32.5mm의 오리피스를 설치한 경우는 $d_2 / D_2 = 0.956$ 이고, 이하 모두를 나타내면, d_2 / D_2 가 0.941, 0.926, 0.912, 0.882가 되는 것이다. 본관과 동일한 지관일 경우 즉, $d_2 / D_2 = 1$ 일 때는 지관의 유량이 본관보다 약 10% 정도 많이 흘러가는 것을 볼 수 있다. 또 d_2 / D_2 가 0.941보다 큰 경우 일 때 지관의 유량이 본관보다 많이 흘러가고 있으며, d_2 / D_2 가 0.941 보다 작은 경우 본관의 유량이 지관보다 많이 흘러가는 것을 볼 수 있다. 다시 말해서 지관에 32mm의 직경을 가진 오리피스를 설치해야 지관과 본관의 유량이 매우 유사하게 흘러간다는 것을 나타낸다.

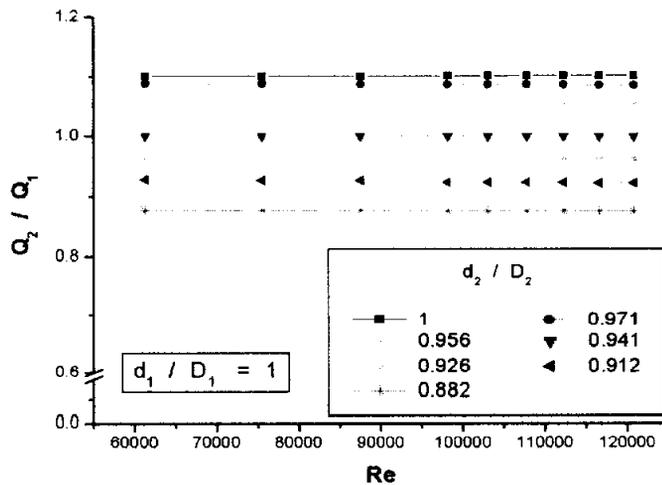


Fig. 4.53 Flow ratio vs. Re ($d_1 / D_1 = 1$)

Fig. 4.54는 직경 34mm의 본관에 30mm의 오리피스가 설치된 경우 ($d_1 / D_1 = 0.882$)에서의 레이놀즈 수에 따른 유량비를 나타낸 것이다. 지관에도 34mm의 관에 직경 30mm의 오리피스에 있는 경우에서부터 29.5mm, 28.8mm, 28.5mm, 28mm, 25mm까지의 오리피스가 있다. 이는 각각 d_2/D_2 가 0.882부터 0.868, 0.847, 0.838, 0.824, 0.735에 해당한다. 지관에 직경 30mm와 29.5mm의 오리피스가 만들어져 있는 경우에는 지관의 유량이 많이 흘러가고 있는 것으로 보이며, 직경 28.5mm, 28mm, 25mm의 오리피스가 있는 경우에는 본관의 유량이 지관보다 많이 흘러가는 것을 볼 수 있다. 즉, 본관에 있어서 관의 직경과 오리피스의 직경비가 0.882인 경우, 지관의 d_2 / D_2 가 0.847인 직경 28.8mm의 오리피스가 지관에 설치될 때 본관과 지관의 유량이 매우 유사하다는 것을 나타내고 있다.

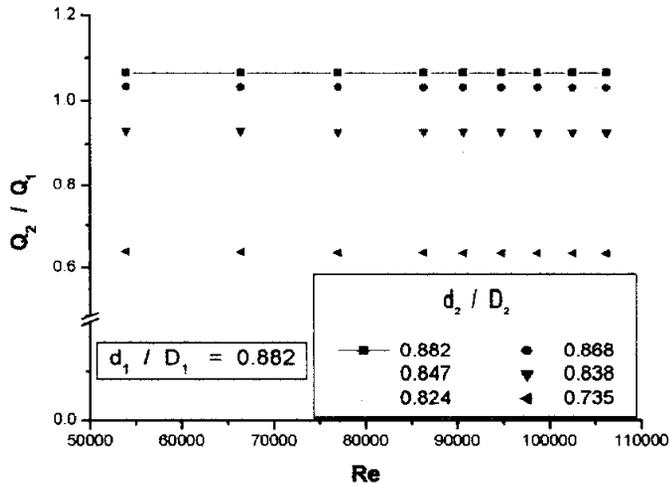


Fig. 4.54 Flow ratio vs. Re ($d_1 / D_1 = 0.882$)

Fig. 4.55는 본관의 $d_1 / D_1 = 0.735$ 이므로 직경 34mm의 관에 직경 25mm의 오리피스를 설치한 경우에 있어서 레이놀즈 수의 변화에 따른 본관과 지관의 유량비를 나타낸다. 그림 내에 있는 d_2 / D_2 가 0.735, 0.721, 0.706, 0.691, 0.676, 0.588이므로 지관의 오리피스 직경은 25mm, 24.5mm, 24mm, 23.5mm, 23mm, 20mm가 된다고 볼 수 있다.

지관의 $d_2 / D_2 = 0.721$ 보다 큰 경우에는 지관의 유량이 본관보다 많이 흐르고, $d_2 / D_2 = 0.721$ 보다 작은 경우에는 본관의 유량이 지관의 유량보다 많이 흐른다는 것을 확인 할 수 있다. 다시 말하면 $d_1 / D_1 = 0.735$ 인 경우에 d_2 / D_2 가 0.721, 즉, 지관 오리피스의 직경이 24.5mm 일 때 본관과 지관의 유량이 서로 비슷하다는 것을 나타낸다.

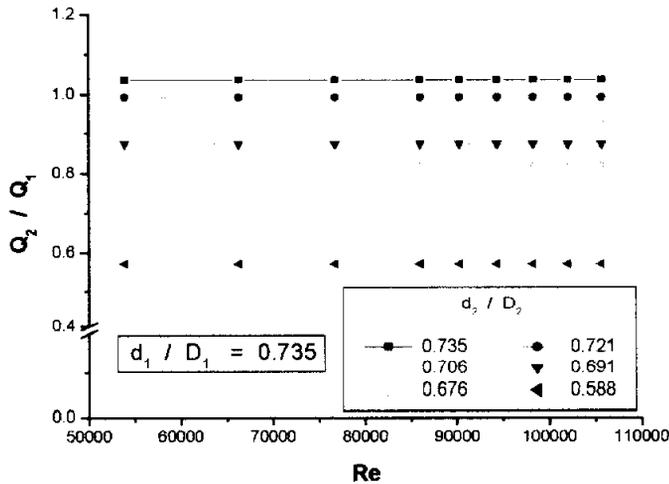


Fig. 4.55 Flow ratio vs. Re ($d_1 / D_1 = 0.735$)

Fig. 4.56은 직경 34mm의 본관에 직경 20mm의 오리피스를 설치하였으므로 $d_1 / D_1 = 0.588$ 인 경우에 있어서 레이놀즈 수의 변화에 대한 유량비를 나타낸 그래프이다. 직경이 34mm인 지관에 있어서 직경이 20mm, 19.7mm, 19.5mm, 19mm, 18.5mm, 18mm, 15mm인 오리피스가 있는 경우이다. 따라서 지관의 d_2 / D_2 는 0.588, 0.579, 0.574, 0.559, 0.544, 0.529, 0.441이 되는 것이다.

그래프에서 본관의 직경과 본관 오리피스 직경과의 비가 0.588인 경우일 때, 지관의 직경과 지관 오리피스 직경과의 비가 0.579 즉, 지관 오리피스 직경이 19.7mm가 되어야만 지관과 본관의 유량이 매우 비슷해짐을 알 수 있다.

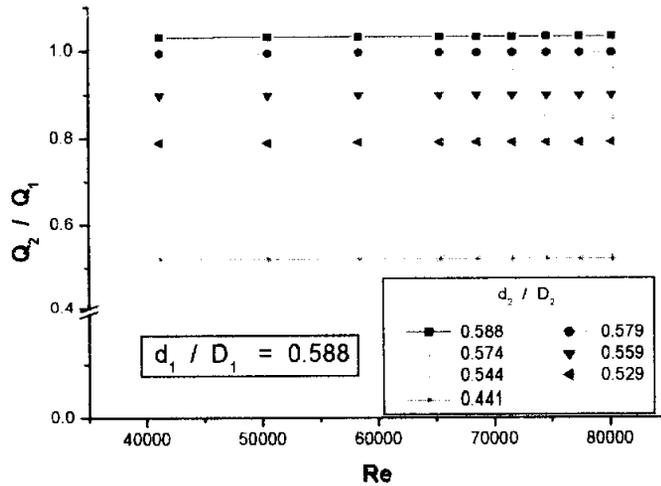


Fig. 4.56 Flow ratio vs. Re ($d_1 / D_1 = 0.588$)

Table 4.4는 위의 시뮬레이션 결과들을 표로 나타낸 것이다. 본관에 오리피스를 설치하지 않은 경우 즉, 본관의 관과 본관 오리피스의 직경비가 1인 경우에 있어서 본관과 지관에 동일한 유량을 흐르게 하기 위해서는 지관의 관과 지관 오리피스의 직경비가 0.941이 되어야 한다는 것을 나타낸다. 또 본관에 있어서 직경비가 작아질수록 지관에서의 직경비 또한 점점 줄어들고 있으며, 본관의 직경비가 0.441이하에서 같은 유량이 흐르는 지관의 직경비 또한 0.44이므로 거의 같은 직경에서 같은 유량이 흐르는 것을 알 수 있다.

Table 4.4 Diameter ratios of the main and lateral pipes to match flow rates

| d_1 / D_1 | d_2 / D_2 |
|-------------|-------------|
| 1 | 0.941 |
| 0.882 | 0.847 |
| 0.735 | 0.721 |
| 0.588 | 0.579 |
| 0.441 | 0.440 |

Fig. 4.57은 본관과 지관에 같은 유량이 흐르도록 하기 위한 본관 직경과 본관 오리피스 직경 비에 대해서 지관 직경과 지관 오리피스 직경 비를 그래프로 나타낸 것이다. 대표적으로 몇몇에 대해서는 실험을 행하여 본관과 동일한 유량을 흐르게 하는 지관의 직경과 오리피스 비를 구하였지만, 실험 외의 범위에서는 지관의 직경비를 알 수가 없었다. 따라서 시뮬레이션을 행하여 본관과 본관의 오리피스 직경과의 비에 대해서 지관과 지관 오리피스 직경의 비를 구하여 아래 그래프로 나타내었다. 즉, 그래프를 이용하여 본관의 d_1 / D_1 에 대해서 동일한 유량을 흐르게 하는 지관의 d_2 / D_2 의 값을 찾아 낼 수 있는 것이다.

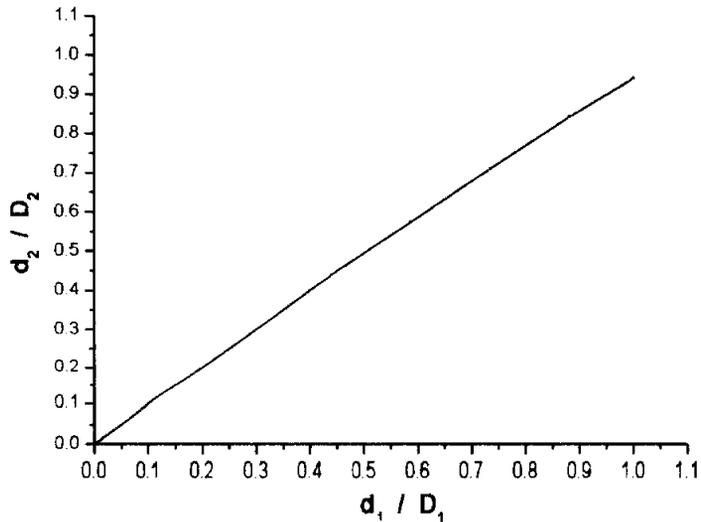


Fig. 4.57 Diameter ratio of lateral pipe vs. diameter ratio of main pipe to match flow rates

Fig. 4.57로는 직경비를 찾는 데 있어서 정확도가 많이 떨어지므로 아래 Fig. 4.58과 같이 약간 변형하였다. Fig. 4.58에서는 본관 오리피스 직경과 본관 직경비(d_1 / D_1)에 대하여 지관 오리피스 직경과 본관 오리피스 직경비(d_2 / d_1)를 나타내었다.

d_1 / D_1 가 0.4이하인 경우에는 d_1 / D_1 와 d_2 / D_2 가 같은 크기에서도 즉, 본관과 지관에 같은 크기의 오리피스를 설치하여도 지관과 본관의 유량이 매우 비슷하게 흐른다는 것을 알 수 있다.

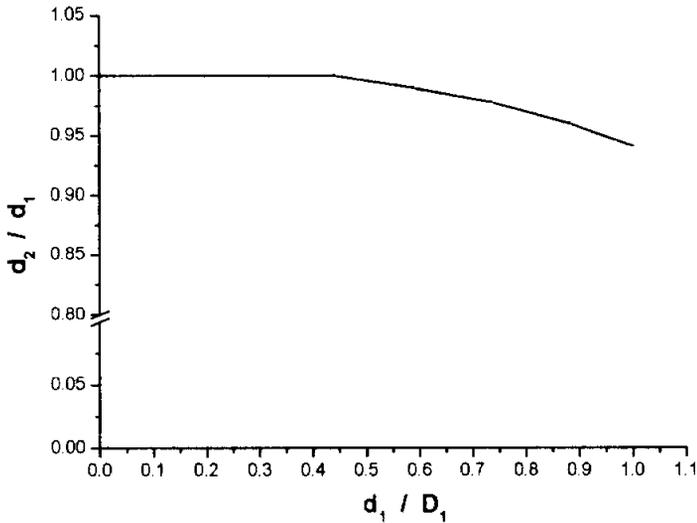


Fig. 4.58 Conditions for the same flow rates of the main and the lateral

4.5 결 론

본 절에서는 실험을 통해서 얻은 여러 가지 결과들과 수치해석을 수행하여 얻은 시뮬레이션 결과를 서로 비교하여 검증하였으며, 장치 제작 등 현실적으로 수행하기 어려운 실험 조건에 대해 다양한 수치해석을 수행한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 오리피스가 설치되지 않은 경우 본관과 지관에 동일한 압력이 가해질 때의 유량변화에 대해서 수치해석한 결과 지관의 유량이 본관의 유량보다 약 10% 많이 흐르는 것으로 나타났다. 그리고 지관과 본관에 동일한 직경을 가진 오리피스가 있을 때 직경이 작은 오리피스가 설치되어질수록 본관과 지관의 유량비도 점점 줄어드는 것으로 나타났으며, 직경비 0.441이하부터는 본관과 지관의 유량비도 매우 비슷하게 나타났다. 이와 같은 결과는 실험을 통해서도 확인을 했으며, 실험과 수치해석의 결과가 매우 비슷하게 나타났다.
- (2) 지관과 본관에 동일한 유량이 흐를 경우 손실계수비를 알아본 결과, 오리피스가 설치되지 않은 경우 본관에서의 손실이 지관에서의 손실보다 약 7.7% 크게 나타났으며, 오리피스 직경과 관의 직경비가 0.882, 0.735, 0.588, 0.441로 작아질 경우, 손실계수비도 6.3%, 4.6%, 3.1%, 1.8%로 줄어드는 것으로 나타났다.
- (3) 본관과 지관의 오리피스 설치위치에 따른 유동의 변화가 있을 것으로 판단되어 직경과 동일한 위치에 오리피스를 설치한 경우와 직경의 2배 위치에 오리피스를 설치한 경우에 대해서 유동의 변화를 알아본 결과, $l=D$ 에서 $l=2D$ 사이에서의 유동변화는 매우 미미하게 나타났다. 따라서 지관과 본관의 오리피스 설치위치가 $l=D$ 에서 $l=2D$

사이에서는 유동에 거의 영향을 주지 않는다고 볼 수 있다.

- (4) 지관과 본관에 동일한 압력을 가했을 때 동일한 유량이 흐르게 하기 위해서 본관의 관과 오리피스 직경비를 고정하고 지관의 관과 오리피스 직경비를 변경해 가면서 시뮬레이션한 결과, 본관에서 본관과 오리피스 직경비가 1, 0.882, 0.735, 0.588, 0.441일 때 지관과 지관의 오리피스 직경비가 0.941, 0.847, 0.721, 0.579, 0.440이면 동일한 유량이 흐른다는 것을 알 수 있었다. 또한 본관에서 본관과 오리피스 직경비가 0.4 이하인 경우에는, 본관과 지관에 같은 크기의 오리피스를 설치하여도 각 관에 같은 유량이 흐른다는 것도 알 수 있었다.

제 5 장

PIV 가시화

제 5 장 PIV 가시화

오늘날 컴퓨터의 급속한 발전으로 인하여, 유동해석 분야에서는 실험에 의한 방법과 CFD(Computational Fluid Dynamics)에 의한 방법이 있다. 일반적으로 실험적 해석을 위한 유체의 속도계측법으로는 피토크, 열선유속계(hot wire), LDV(Laser Doppler Velocimetry) 등이 있고, 압력계측방법으로는 프로브, 온도계측방법으로는 열전대(thermo couplers) 등이 사용되고 있으나 이들 계측방법들로부터 얻어낸 정보는 점계측에 의한 것이기 때문에 유동장 전체의 거동을 해석에는 도움을 주지 못할 뿐 아니라 특히 기액2상의 경우는 기포로 인하여 속도나 압력계측이 어려운 실정이다. 이를 보완하기 위한 실험적 방법이 유동가시화(flow visualization)방법이다. 유동가시화 방법은 유동현상을 직접 관찰함으로써 유동장 전체에 걸쳐서 정성적 특성을 해석할 수 있는 가장 기본적인 실험기법으로 염료 추적자(Dye tracer), 수소 거품(hydrogen bubble), 연기(smoke) 등을 유동장에 직접 투입하여 유동장을 가시화하며 전체 유동장의 정성적인 정보를 제공한다. 그러나 정확한 유동해석에 요구되는 정량적인 결과를 얻을 수 없다는 단점이 있었다. 이를 보완하기 위한 방법으로 최근에는 유체의 기본 물리량을 동시다점으로 계측할 수 있는 PIV(Particle Image Velocimetry)가 각광받고 있다. PIV는 컴퓨터를 비롯 하드웨어의 발전과 더불어 디지털 화상처리기법(digital image processing)의 발전으로 유체유동현상의 규명에 많이 적용되고 있다 (66-69).

따라서 본 논문에서는 90° 로 연결된 덕트형 합류관에서 본관과 지관에 오리피스가 설치된 경우 오리피스 전후의 유동과, 합류부에서의 유

동이 실제로 어떻게 일어나고 있는가에 대해서 시험부 전체를 가시화할 필요가 있다고 판단된다. 이 PIV가시화 실험을 통해서 얻어진 영상과, 데이터들은 실제 덕트 설계시 좋은 참고 자료가 될 것으로 판단된다.

5.1 입자영상유속계의 기본원리

유동장의 국소 속도는 어느 한 점을 통과하는 추적입자가 미소 시간 간격동안 이동한 미소 직선거리 및 방향을 알면 쉽게 구해진다. 즉 질점역학에서와 마찬가지로 입자의 입자운동에 요하는 시간간격 및 벡터변위의 관계로부터 구할 수 있다. 기본원리는 간단하나 $\Delta x/\Delta t$ 를 실제의 유동속도에 근사 시키려면 이동 변위가 충분히 작아야 한다. 다시 말하면 입자가 그리는 궤적은 직선성과 등간격성이 보장되어야 한다. Fig. 5.1은 PIV의 기본원리를 나타낸 것이다⁶⁶⁻⁶⁹.

유동장에 추종성(traceability)이 우수한 입자를 분포시키고 이들 입자의 순서적인 위치를 미소 시간간격을 두고 기록한 다음 각각의 입자의 변위를 계산하면 되나 수동의 인위적인 방법으로는 정도 및 처리능력 등의 문제가 발생한다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 대용량의 고속처리능력을 갖는 컴퓨터를 활용하면 된다.

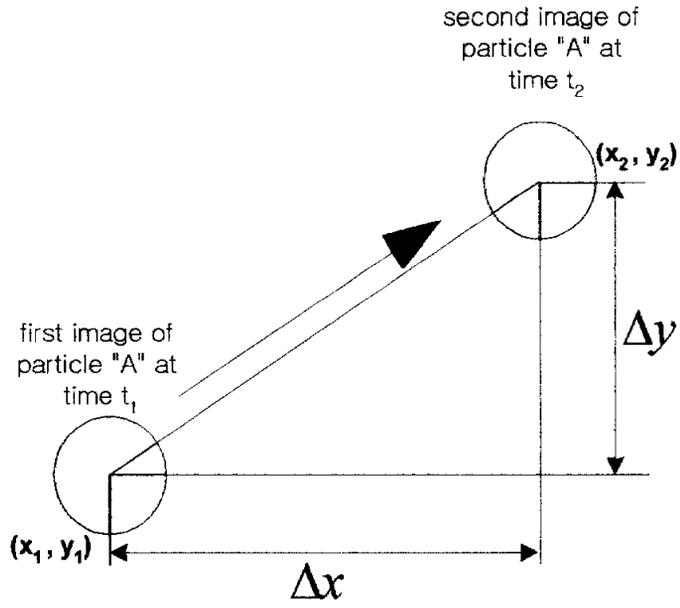


Fig. 5.1 Basic concept of particle image velocimetry

$$u = \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad , \quad v = \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \frac{y_2 - y_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta y}{\Delta t}$$

5.2 입자영상유속계의 분류

유체의 유동속도를 측정하는데 디지털 영상처리(digital image processing)기법이 도입되어 본격적으로 발전할 수 있었던 것은 1970년대 후반에 대규모 기억소자의 발달로 마이크로 컴퓨터가 널리 보급되어 영상처리전용장치가 개발됨으로써 가능하게 되었다. 즉, 영상처리를 전용하드웨어를 저렴한 비용으로 구입할 수 있고, CCD(charge coupled device)카메라와 비디오 모니터(video monitor)등과 같은 영상처리용 입출력장치를 쉽게 사용할 수 있게 됨으로써 입자영상유속계를 이용한 측정방법은 비약적으로 발전하게 되었다.

1980년대 중반에 Hesselink가 유동가시화의 기법으로 LSV(laser speckle velocimetry) 및 LIF(laser-induced fluorescence)와 함께 입자영상유속계를 소개한 뒤 미국과 유럽, 그리고 일본에 파급되어 현재까지 LDV와 함께 가장 강력한 유속측정방법으로 인정받고 있는 중이다. 특히 일본에서는 입자영상유속계를 21세기 차세대 속도측정기법으로 선정하여 이 분야에 관한 연구에 더욱 박차를 가하고 있는 중이다. 현재 입자영상유속계를 이용한 속도계측은 3차원 난류유동장 문제에까지 적용되어, 영상처리장치 및 주변기기의 성능개선을 위한 기술적인 연구와 함께 영상처리의 정도향상을 위한 알고리즘의 개선, 입자의 추종성 해석, 그리고 오차해석 등에 관한 연구로 확장되고 있다.

영상처리를 이용한 유동가시화 기법을 추종입자에 따라 분류해 보면 Fig. 5.2와 같다. 그림에서 CIV(concentration image velocimetry)계열의 유동가시화기법은 주로 일본에서 개발된 것으로 추종입자를 영상의 밝기(brightness)의 농도로써 식별하여 속도를 계산하는 방법이다. 이때

염료(dye)가 분포된 영상의 밝기로써 그 경로를 추적하여 유동을 가시화하는 방법을 CCIV(continuous concentration image velocimetry)라 하고, 입자가 분포된 영상의 밝기로써 유동패턴을 식별할 때 PCIV(particle concentration image velocimetry)로 구분할 수 있다. PTV(particle tracking velocimetry)는 연속된 영상으로부터 각 입자들의 운동을 추적하고, 입자들의 도심을 구한 뒤 그 입자들의 미소시간 동안의 변위로부터 속도를 계산하는 방법으로 입자의 영상밀도가 비교적 낮은 경우에 적용되므로 흔히 저영상밀도(low image density) 입자 영상유속계라고 불리어진다. 일반적으로 입자영상유속계는 PTV와 PCIV를 통칭하고 있다. PTV는 현재 3차원유동장의 측정에 쉽게 적용될 수 있고, 영상의 분해능이 CIV 기법에 비해 우수한 것으로 알려져 국내에서도 이와 관련된 연구가 진행되어 있다⁷⁰⁾.

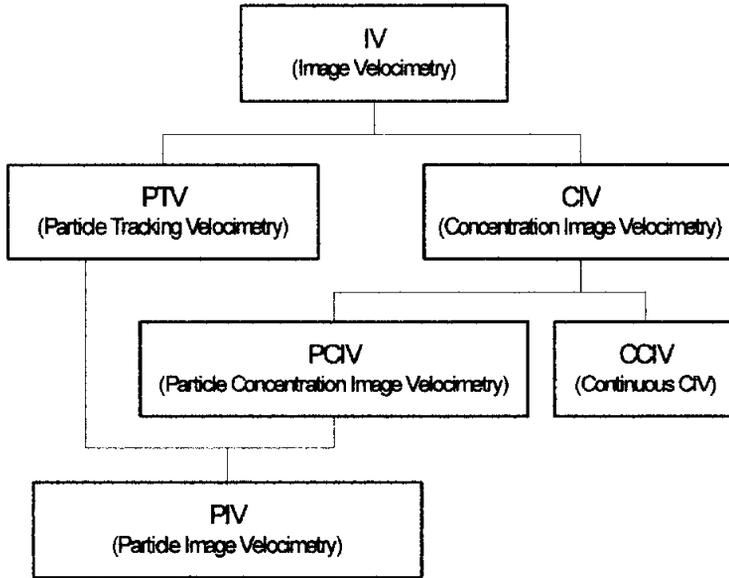


Fig. 5.2 Classification of image velocimetry

Fig. 5.2에서 본 것과 같이 PIV를 분류하는 기준에 따라서 여러 가지로 정의될 수 있다. 이것은 CFD(computational fluid dynamics)에서 제안되고 있는 정식화방법, 수많은 알고리즘 또는 대류항 스킴의 분류에서 보는 바와 같이 PIV에서도 속도 벡터를 추출하기 위한 기법이 다양하고 각각의 방법에서도 여러 가지로 성능의 개선에 여지가 남아있기 때문이다. 여기에서는 또 다른 PIV의 분류기준으로 속도벡터의 추출 알고리즘에 따른 구분을 시도해 보기로 한다. Fig. 5.3 은 이와 같은 관점에서 분류한 것이다.

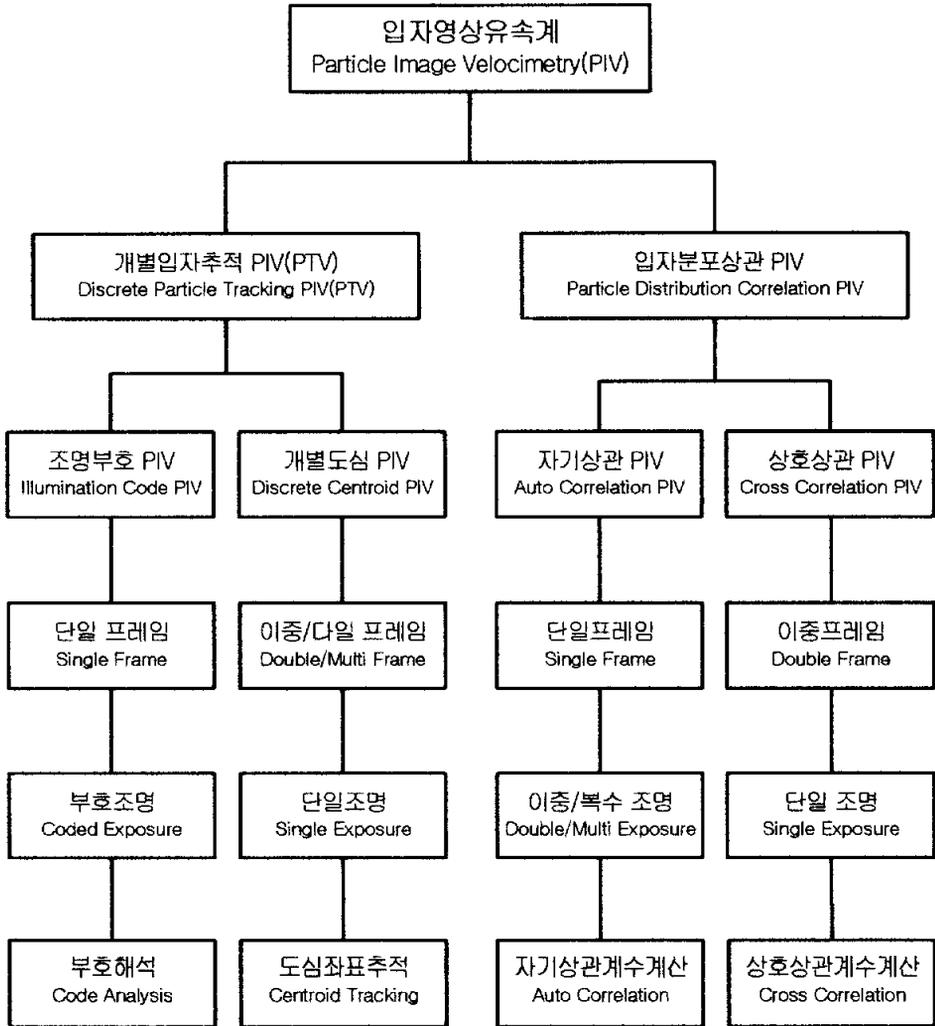


Fig. 5.3 Classification by pursuit algorithm of velocity vector

5.2.1 개별입자추적 PIV와 입자분포상관 PIV

Fig. 5.3에서 보면 우선 속도벡터의 추출에 이용되는 입자의 종류가 개별입자인가 아니면, 임의의 검사영역(interrogation region)내의 입자군(중복되거나 독립적으로 존재함)인가의 여부에 따른 구분이 가능하다. 즉 개별 입자를 독립적으로 인식하고 이들에 대하여 순서 또는 변지수를 부여하는 라벨링(labeling)작업과 함께 개별입자의 미소궤적을 추적하는 개별입자 추적(discrete particle tracking, DPT)PIV(총래의 PTV)와 검사영역내의 입자군의 분포에 대한 상관관계로부터 속도벡터를 추출하는 입자분포상관역내의 입자군의 분포에 대한 상관관계로부터 속도벡터를 추출하는 입자분포상관(particle distribution correlation, PDC)PIV로 대별할 수 있다. 이 경우에 DPT-PIV는 PTV와 같은 특성을 나타낸다. 즉 임의로 분포된 위치에서 랜덤벡터가 얻어지며 후처리 과정에서 격자보간이 필요하다. 그러나 PDC-PIV에서는 처음부터 정의된 격자점의 위치에서 속도벡터가 구해지기 때문에 격자간 보간이 필요가 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 동일 입자의 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(outlier)의 발생이 억제된다. 그러나 유동장 전체에 걸쳐 추적입자가 독

립적으로 균일하게 분포하여야 하며, 양호한 산란광의 영상을 제공하여야 한다. 이것은 조명을 비롯한 실험환경 및 실험기법에 크게 의존하게 되며 일반적으로 한 장의 화면에서 얻을 수 있는 유효벡터의 수가 많지 않게 된다.

한편 PDC-PIV에서는 Adrian의 고영상밀도 PIV방식을 제외하고는 스펙클(LSV) 또는 픽셀 계조치의 밝기정보 (intensity, grey-level)를 이용하기 때문에 유동장에 분포된 입자가 개별적으로 인식이 되지 않아도 문제가 되지 않는다. 따라서 입자에 대한 제한조건이 크게 완화가 되어 유동장의 생성이 비교적 용이하게 이루어진다. 또한 얻어지는 벡터 수는 검사영역의 격자수로 정해지므로 많은 수의 벡터가 얻어질 수 있다. 그러나 이 방식에서는 상관계수의 산출에 번거로운 광학적인 배치가 필요하거나 FFT연산, 또는 상관계수의 계산에 매우 큰 컴퓨터부하를 요구한다. 한편 유동장의 변형에 대하여 상관계수의 최고치가 민감하게 변함으로 이상치의 발생에 주의를 하여야 한다.

요약하면 DPT-PIV에서는 PIV에 적합한 입자의 공급 및 조명등의 문제에 유의하여야 하지만, 대신 속도벡터 추출에 필요한 컴퓨터 연산 속도가 빠르다. 그러나 PDC-PIV에서는 이와 반대로 유동장의 입자조건이 까다롭지 않은 반면 상관계수의 계산에 번거로운 작업이 요구된다.

5.2.2 조명부호 PIV

이 방법은 Adrian의 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 line) 입자영상을 기록한 뒤에 개별 입자의 궤적을 추적한다. 가장 기본적인 방법은 사진을 확대하여 디지털저상에서 사람의 눈으로 구별하는 것이나 번거로운 작업이 필요하며 무엇보다 역류영역에서 벡터의 방향을 제대로 파악하는 것이 매우 어렵다. 또한 벡터의 시점과 종점의 정확한 위치산정이 어려워 계측정도가 떨어진다.

한편 컴퓨터는 전용의 영상처리장치(image processor) 또는 영상보오드(image grabber, image board)로부터 이들의 입자의 궤적의 밝기정보를 2차원의 위치(예를 들어 640×480픽셀) 및 각 픽셀에서의 계조치(보통256단계)의 값으로 데이터파일을 받아서 영상처리를 하게 된다. 보통 필터처리들 통한 잡음제거 및 입자영상의 강조, 윤곽선의 검출, 세선화, 라벨링(labeling), 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, Korayashi와 Yoshitake는 카메라의 셔터가 개방되는 초기시점에 스트로스코프에 의한 짧은 조명펄스를 첨가하여 벡터의 시점을 구별하는 기법을 제시하였다. 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 시간간격이 크다는 점이 제약이 될 수가 있다. 즉 레이저의 2차원 시이트광(sheet light)내에 입자가 계속 머물러야만 유효벡터가 산출될 수가 있으나 추적입자가 주어진 미소 시간동안 2차원의 조명 영역(in-plane)내에 머물지 않고 이 단면을 이탈하는(out-of-plane)문제를 발생시키며 특히 고속의 3차원 유동장 해석에는 계층의 다이내믹 레인지가 크게 떨어질 수가 있다.

5.2.3 개별 도심좌표 PIV

이 방법은 PTV중에서 가장 보편적으로 이용되는 기법이다. 추적 알고리즘에 따라 연속된 두 프레임 또는 그 이상의 프레임에서 개별추적 입자의 도심좌표를 구하고 이렇게 구해진 2차원의 정수형(integer)위치 정보(x, y 좌표)를 이용하여 벡터의 시점과 종점을 찾아내는 방식을 취하고 있다. 이 기법은 조명부호 PIV와 유동장의 영상을 기록하는 프레임입수에서 가장 큰 차이점을 나타낸다. 즉 조명부호법에서는 입자의 모든 이동정보가 한 프레임상에 들어가 있다. 따라서 벡터의 크기는 비교적 간단하게 알아낼 수가 있으나 방향판별이 어렵기 때문에 조명부호를 부여하여 이 문제를 해결하고 있다. 그러나 도심좌표법에서는 유동장의 영상이 일정한 시간간격을 갖는 연속된 프레임에 기록이 된다. 따라서 벡터의 방향은 기록장치의 기계적인 순서에 의해 자동으로 판별되며 이렇게 주어진 방향성을 적극적으로 이용하여 동일입자의 확인 작업을 행하고 있다. 이와 같은 기법을 본격적으로 3차원의 유동장에 적용하여 3

프레임 이상의 연속 입자분포 화면에 대하여 영상처리를 행하여 모든 입자의 도심좌표를 자동으로 구한 다음 이들 좌표에 대하여 미소 시간 동안 이동할 수 있는 최대거리 및 등 간격 이동조건과 이동각 최소조건 등을 평가함수로 산정하여 유효벡터를 찾아내고 있다. PTV관련 연구로서는 선구적인 내용으로 평가되고 있다. 도심좌표 PIV에 이용되는 프레임 입수는 3장 이상이 필요하다. 그러나 이 값이 클수록 이상치의 발생확률은 감소하나 단면이탈 문제로 최종적으로 얻어지는 유효벡터의 수가 줄어들게 된다. 최근에는 두 프레임의 도심데이터만을 가지고 이들의 정수형 좌표값에 대하여 통계처리를 하거나 이차화(binanzation)된 도심좌표에 대하여 상호상관계수를 구하기도 한다.

5.2.4 자기상관 PIV

이 방법은 지금까지 많은 연구자들이 채택을 하여 왔으며 대부분의 상용제품이 이 기법에 따라서 개발되었다. 이것은 우선 PIV의 1970년대 후반부터 LSV기법이 새롭게 제시되면서 이를 시발로 하여 PIV가 발전해왔던 것이 가장 큰 이유로 보여진다. 따라서 벡터추적 알고리즘이 LSP에서 파생될 수 있었으며 이를 위한 광원용 펄스 레이저의 단속조명기능을 그대로 활용할 수 있고 고해상도의 사진이 용이하게 얻어질 수 있었다. 또 자기상관계수의 산출에 될 수 있으면 FFT연산 등을 피하고 광학적인 기법에 의존하여 컴퓨터의 계산시간을 줄이고자 하는 목적과 그 당시에 이용되었던 영상기록장치(CCD카메라 등)의 공간해상도가 너무 낮아서 실용상 적극적인 활용이 어려웠던 점 등을 들 수가 있다. 현재에는 고해상도의 CCD 카메라와 영상보오드, 그리고 고성능의 PC가 쉽게 구해질 수가 있어서 표준적인 Young의 프린지 해석기법에도 여러 가지의 방법이 제안되고 있다. LSV와 고영상밀도 PIV는 같은 원리로 상관함수를 구하기 때문에 앞으로 이에 관한 구분은 행하지 않고 자기상관PIV로 통칭하기로 한다.

5.2.5 상호상관 PIV

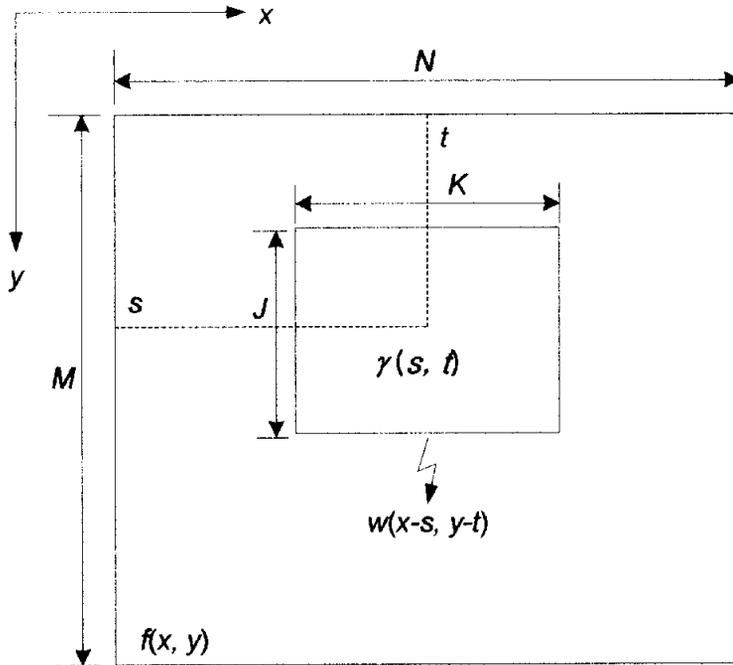


Fig. 5.4 A concept of cross-correlation function

Fig. 5.4에서 상호상관PIV는 (x,y) 의 원점이 제 1프레임상에서 속도벡터를 구하기 위한 가상격자의 중심 즉, 벡터의 시점을 나타낸다. 이 점을 중심으로 제 2프레임상에서 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 2프레임에서의 벡터의

중점이 된다. 위 그림과 같은 영역에서 이차원 이산 상호상관함수 (cross-correlation function, CCF)는 다음의 식으로 계산된다.

$$c(s, t) = \sum_x \sum_y f(x, y) w(x-s, y-t) \quad (5.1)$$

단, 여기서 미소영역 $w(x, y)$ 의 크기는 $J \times K$ 이며 전체영역 $f(x, y)$ 의 크기는 $M \times N$ 이다. 또한 $s=0, 1, 2, \dots, M-1, t=0, 1, 2, \dots, N-1$ 이다. 그러나 식(5.1)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.

$$\gamma(s, t) = \frac{\sum_x \sum_y [f(x, y) - \bar{f}(x, y)][w(x-s, y-t) - \bar{w}]}{\left\{ \sum_x \sum_y [f(x, y) - \bar{f}(x, y)]^2 \sum_x \sum_y [w(x-s, y-t) - \bar{w}]^2 \right\}^{1/2}} \quad (5.2)$$

여기서 \bar{w} 는 $w(x, y)$ 영역내의 평균치(1회계산)이며, $\bar{f}(x, y)$ 는 w 가 현재 위치하는 곳의 평균값을 의미한다. 이때 상관계수 $\gamma(s, t)$ 는 -1과 1사이의 값을 갖게 된다. 보통 f 와 w 의 크기가 같은 경우에는 FFT의 계산이 훨씬 빠르게 되나 식(5.1) 및 식(5.2)의 경우에 w 가 f 보다 작게 된다. 이때의 판단기준으로서 w 영역내의 영이 아닌 픽셀의 수가 132(13×13 크기의 서브이미지 중)이하이면 식(5.1)이 FFT보다 효율적임을 보이고 있다. 그러나 상호상관계수에서는 주파수영역의 접근이 아주 어렵기 때문에 보통 식(5.2)를 이용하여 직접 계산한다.

5.3 입자영상유속계의 장치구성

디지털 영상처리를 이용한 입자영상유속계는 일반적으로 영상 입출력 장치, 영상처리장치, 그리고 주변기기 및 영상처리를 수행하기 위한 소프트웨어로 구성된다.

5.3.1 영상입력 및 저장장치

유동장의 정지사진을 적절한 시간간격으로 촬영한 다음 이를 대형인 화지에 현상하거나 각각의 입자의 위치를 컴퓨터에 입력하는 장치를 영상입력장치라고 하며, 영상입력장치는 PIV계측의 종류에 따라 미캐니컬스캐너, CCD카메라, 캠코더(cam corder), 고속도 비디오카메라 등 다양하게 결정된다. 영상입력의 형태는 유동장의 실시간 정보를 직접 입력하는 경우와 사진으로 먼저 유동장의 정보를 수록한 후 미캐니컬스캐너 등에 의해 입력하는 경우로 나눌 수 있다. 비디오 카메라는 미캐니컬스캐너에 비하여 분해능에서는 뒤떨어지지만 가격, 변환성 및 조작성 등의 면에서 우수하고 유동장으로부터 정보를 직접 받아들인다는 이점을 갖는다.

시간분해능은 카메라의 프레임속도에 의존하는데 최근에는 고속카메라가 시판되고 있으며 또한 고해상도를 갖춘 HDTV카메라, 디지털카메라도 보급되고 있어 시·공간의 해상도 문제는 점차 해결되어가고 있다.

분기관 유동실험과 같이 수백 μm 정도 크기의 미소입자를 추적입자로 사용하는 경우에는 CCD카메라 또는 가정용 캠코더가 널리 사용되고

있다. CCD카메라에서 찍은 영상을 디지털 신호로 변환하여 영상처리장치에 직접 공급하거나 비디오 테이프 등에 수록한 뒤 재생장치를 통해 영상을 재현한다. 입자영상유속계를 이용한 계측기법의 궁극적 목적이 유동장내의 정보를 직접 실시간으로 입력·분석하여 필요한 유동특성을 구하는데 있으므로 일관된 고속처리방식이 바람직하다.

5.3.2 영상처리장치

영상처리장치는 이미지 프로세서(image processor)를 말하는데 영상 입력장치를 통해 입력된 영상자료를 처리하기 위한 전용의 주프로세서 및 보조프로세서를 가리킨다. 영상처리장치는 저장된 이미지 파일을 아스키 파일로 바꾸고, 윤곽선을 검출하여 공간필터링 및 영상분리 그리고 프레임간의 연산을 수행하는 기능을 갖는다. 그러나 이러한 전용의 영상처리 장치는 고가이므로 다른 대안으로 이미지 보오드(image board)를 PC와 결합하여 영상처리를 하는 방법을 이용한다. 이미지 보오드는 프레임 그래버(frame grabber)라고도 하는데 영상신호(아날로그 신호)를 샘플 당 정의된 비트로 디지털화하여 PC가 처리할 수 있는 신호로 바꾸어 주고 산술, 논리연산 및 영상처리조작을 행하여 정보를 분석하기 위한 하드웨어이다.

5.3.3 주변기기 및 소프트웨어

영상처리장치에 부속되어 성능을 향상시키기 위한 주변기기로서 대표적으로 A/D 변환기, 대규모 영상메모리, 디지털타이저, 애니메이션 시스템 등이 있다. 이중 대규모 영상메모리는 외부기억장치로도 사용할 수 있다. 영상이 갖는 대규모의 자료처리를 위해서는 자료의 입·출력 속도와 함께 영상처리의 효율에도 유의해야 한다.

영상처리용의 소프트웨어로서는 입·출력관리, 영상처리 자체를 위한 처리알고리즘 등이 있다. 대개의 시스템에서는 서브루틴 팩키지형의 대화식기법을 채택하고 있으므로 메뉴방식에 선택 또는 매크로 명령(macro command)을 이용하여 영상처리의 효율화를 도모하고 있다. 아울러 자료의 교환을 용이하게 하기 위한 영상데이터 포맷(format)의 표준화도 진행되고 있다. 입자영상유속계에 의한 속도계측은 주로 동일입자의 추적에 관한 소프트웨어가 개발되었다.

5.3.4 영상출력장치

영상자료의 보존을 하기 위한 것으로는 디지털 광, 자기디스크, 마그네틱테이프 등이 있고, 비디오 신호의 기록을 위해서는 VTR, 아날로그 광디스크가 있다. 그리고 신호의 방식변환을 위한 스캔컨버터, NTSC 인코더가 있고, 하드카피 작성용으로 필름 디코더, 잉크젯프린터, 칼라 이미지 프린터 등이 있다. 또, 소프트카피용으로는 비디오 모니터, 칼라 비디오 프로젝트 등이 있다.

5.4 속도벡터의 검출 알고리즘

속도를 계산하기 위한 유속측정 알고리즘은 영상입력장치로 획득한 영상으로부터 processing 과정을 거친 다음 행해지며, 입자추적법 (particle tracking method)과 계조치상관법(grey level correlation method)로 나눌 수 있다. 입자추적법은 연속된 영상으로부터 각 입자들의 운동을 추적하고, 그 입자들의 미소시간동안의 변위를 식별하여 속도를 계산하는 방법이다. 1-frame 입자추적법, 2-frame 입자추적법, 4-frame 입자추적법이 있다⁷¹⁻⁷²⁾.

5.4.1 4-frame 입자추적법

다프레임의 입자추적법의 추적원리는 제 1프레임에 위치한 입자가 제 2프레임까지 이동할 수 있는 최대거리를 유동장의 특성으로부터 미리 파악한다. 이 범위 내에 존재하는 입자는 이동하여 제 2프레임상에 존재할 수 있는 이동 위치점 후보들이 될 수 있다. 같은 원리로 제 2프레임의 입자가 제 3프레임상의 예상 이동위치는 제 2프레임까지의 이동거리와 같은 곳의 동일한 방향에 위치한다고 볼 수 있다. 이때에 후보 탐사범위를 제 1, 2프레임의 것보다 축소하면 처리속도를 향상시킬 수 있으며, 오류벡터의 발생을 억제할 수 있다. 제 4프레임에서의 입자 이동위치 및 탐사범위는 같은 요령으로 구해진다. 이와 같은 방법으로 구해진 하나의 입자에 대한 이동경로는 일종의 계층구조를 형성하여 수많은 궤적후보들이 얻어진다. 이렇게 얻어진 궤적후보 중에서 한 입자의 참된 이동경로를 얻기 위해서 각각의 이동거리를 이용한 평가함수를 비

교한다. PIV에서는 미소시간동안 추적입자가 직선, 등속도로 이동한다는 가정이 필요하므로 이 값이 최소가 되는 조합을 참된 입자경로로 택할 수 있다. 종래의 연구에서는 이동거리 및 각도변화의 표준편차가 최소가 되는 경로를 택하고 처리속도가 다소 느린 결점이 있다. 3프레임 또는 5프레임 이상을 이용하여도 무방하나 3프레임의 경우에는 이상치의 발생이 증가하며, 4프레임을 초과하면 2차원 시이트라이트의 폭방향으로 이탈하는 입자의 수가 많아져서 유효벡터의 수가 감소하는 경향이 있다.

5.4.2 2-frame법

두 프레임이 연속되어 있고, 입자도심좌표의 분포특성에 대한 상호상관계수를 구하여 동일입자를 판별하는 방법이다. 먼저 제 1프레임과 제 2프레임의 좌표중 입자도심이 구해진 곳에서 어느 한 점의 값을 1이라 하면, 다른 곳에서는 0의 값을 부여한다. 다음으로 제 1프레임에 존재하는 입자가 이동할 수 있는 최대 위치를 유동장의 대표속도를 감안하여 제 2프레임에 설정한다. 다음으로 제 1프레임의 입자도심좌표 및 제 2프레임의 입자도심좌표를 중심으로 하여 같은 크기의 상관계수의 계산영역을 설정한 뒤 양쪽영역의 대응위치에서의 이 값(0,1)들을 곱한다. 이때에 같은 위치에서 동시에 1의 값을 갖는 경우에만 정수값을 갖게 되며 다른 조합의 경우에는 0의 값이 된다. 이와 같은 조작을 상관영역 전체에 걸쳐 행하여 그 합을 구하여 비교하면 이 값이 최대가 되는 좌표가 동일입자의 이동위치로 판정된다.

5.4.3 1-frame법

1-frame법은 하나의 프레임만을 이용하여 속도벡터를 구하는 방법을 말한다. 1-frame법은 광(light)의 노출시간을 길게 하여 입자들의 streak을 형성시키는 streak법과 여러 개의 pulse로 coding 하는 multi pulse coding법, 그리고 streak법과 pulse coding을 혼합한 방법 등이 있다. 획득된 영상에 대하여 영상이분화(thresholding), 노이즈제거, 경계탐색, 도심계산과 같은 영상처리는 속도를 계산하기 전에 연속적으로 실행한다.

5.4.4 계조치상관법

입자의 크기 및 농도분포의 영향을 받는 어려움을 해결하기 위해서 입자 개개의 도심좌표를 구하는 것보다 계조치의 분포특성을 비교하여 벡터의 종점을 구하는 방법이 필요하게 된다. 미소시간동안 유동장의 입자영상의 계조패턴은 크게 변하지 않는다고 가정하면, 제1프레임에서의 상관영역내의 계조치분포와 미소시간 후의 제2프레임에서의 계조치분포는 유사한 특성을 나타낸다. 그러므로, 제1프레임의 임의의 위치를 중심으로 하여 제2프레임상의 같은 크기를 갖는 영역과의 계조치에 대하여 상호상관계수값을 구하여 비교하면 그 중 가장 큰 값을 동일입자의 이동위치로 간주할 수 있게 된다. 컴퓨터 상에서 이와 같은 조작을 빠른 속도로 행할 수 있으면 가상의 중심입자(속도벡터의 시점)에 대하여 벡터의 종점을 용이하게 구할 수 있게 된다. 연속된 두 프레임간의 상호상관계수는 다음의 식으로 구해진다.

$$C_{fg} = \frac{\sum_{i=1}^{n^2} (f_i - \bar{f}_i) (g_i - \bar{g}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n^2} (f_i - \bar{f}_i)^2 \sum_{i=1}^{n^2} (g_i - \bar{g}_i)^2}} \quad (5.3)$$

여기서 f_i 와 g_i 는 상관영역내 각 픽셀의 계조치이다. 후처리 과정에서는 이상치를 판별하여 오류벡터를 제거하는 오류벡터 제거과정과 격자점 재배치, 실제단위로 환산, 평균벡터 계산 등이 있다⁷³⁻⁷⁶⁾.

5.5 PIV 가시화 실험장치 및 방법

최근에는 유체유동을 가시화 하기 위한 실험, 수치 시뮬레이션 연구가 각광을 받고 있다. 유체유동속도를 실험으로 계측하기 위한 방법으로 기존의 열선유속계(hot wire anemometer)와 레이저도플러유속계(LDV : laser doppler velocimetry) 이후 나타난 것이 입자영상유속계(PIV : particle image velocimetry)이다. 열선유속계는 측정하고자 하는 대상의 유동장에 탐침자(probe)를 사용해야 하는 경우, 유동장과 탐침자의 접촉으로 인해 교란 또는 간섭이 발생되기 때문에 바람직하지 못한 실험결과를 초래할 수 있다. 레이저도플러유속계 또한 속도측정에 많이 사용되어 왔지만, 단일점 측정만 가능하므로 시간에 따라 유동패턴이 바뀌는 비정상유동의 동시다점 측정에는 제약이 많이 따른다.

따라서 속도측정 방법에 대한 새로운 대안으로 등장한 입자영상유속계의 장점은 공간속도 분포를 동시다점계측할 수 있고, 유동장의 재현성이 우수하며, 비정상유동장의 유동속도, 압력분포, 전단응력분포의 계산이 가능하다는 것이다. 따라서 입자영상유속계를 이용할 수 있는 응용범위를 확대하고 있는 중이다. 하지만, 고속 및 난류유동에 대한 불확실성 해석은 보완되어야 할 부분이 많이 남아 있다.

본 연구에서는 획득된 가시화 영상에 속도계측을 위해 사용한 계조치 상호-상관법(grey-level cross-correlation)의 입자추적 알고리즘은 복수의 추적입자가 만든 소영역의 농도패턴으로써 처리되며, 촬영된 영상은 이미지 보드(IEEE 1394 card)를 통해 PC에 저장되고, 속도벡터를 구하기 위한 영상처리 과정 중에는 배경감산에 의한 영상의 노이즈제거, 장애물제거, 해석영역 설정 등의 전처리 과정이 필요하다. 전처리과정을

거친 화상에 계조치 상호 상관법의 추적 알고리즘을 사용하여 수분 동안의 영상을 처리한다. 획득된 영상에 노이즈가 있을 경우 오류벡터가 발생할 확률이 크므로 배경영상을 만들어 각 영상으로부터 감산하게 되면 배경영상이 제거된 영상을 추출할 수 있다. 본 논문에서는 Thinkers eyes(TNTech Co. Ltd) 상용프로그램을 사용하였다.

5.5.1 시뮬레이션에 의한 실험장치 예측

단면이 원형으로 제작되어진 실험장치에서 본관과 지관이 만나는 합류부에서의 유동은 균일 파이프와 다르게 벽에서 박리유동이 발생하고 또 원심력에 의하여 이차유동이 발생한다. 이것은 2차원 계산하는 입자영상유속계에 의한 계산 결과와 다른 결과를 나타내기 때문에 적합하지 않다고 볼 수 있다. 따라서 입자영상유속계에 의한 실험을 하기 위해서는 또 다른 실험장치 하나가 필요하다고 볼 수 있다. 입자영상유속계의 2차원 계산을 위한 이 실험장치는 사각형의 덕트형으로 제작되어졌다. 하지만, 사각덕트형이라 하더라도 유선 형상이 2차원이 아닌 3차원의 형상이 나타날 수 있다고 볼 수 있다. 따라서 첫 번째 작업으로 시뮬레이션을 통한 2차원의 유선 형태를 먼저 파악하고, 두 번째로 덕트형 실험장치의 종횡비를 변경해 가면서 시뮬레이션 한다. 그리고 2차원의 계산 결과와 덕트형의 계산결과를 비교하여, 2차원의 계산 결과에 가장 가깝게 나타내는 종횡비를 찾아서 실험장치로 제작하기로 한다.

Fig. 5.5는 2차원 계산을 위한 격자를 나타내고 있다. 합류부에 가까이 갈수록 격자의 간격을 좁혀서 계산의 정밀도를 높게 하였다. 총 격자 수는 약 10000개다.

Fig. 5.6부터 Fig. 5.10은 사각덕트로서 가운데 단면의 유동이 2D에 가까운 실험장치를 만들기 위해서 종횡비(Ar)를 0.25, 0.5, 1, 2, 4로 변형시켜 가면서 시뮬레이션한 형상을 보여주고 있다.

Fig. 5.11은 2차원을 시뮬레이션한 결과를 압력장과 속도장으로 나타낸 것으로, (a)는 등압력선을 나타낸 것이고, (b)는 등속도선을 나타낸 것으로 원관과 같이 지관의 유속이 더 빠르게 나타나고 있다.

Fig. 5.12 ~ Fig. 5.16은 3차원 덕트형을 시뮬레이션한 결과를 나타낸다. Fig. 5.12는 종횡비가 0.25인 경우에 있어서 등압력선과 등속도선을 나타내고 있다. Fig. 5.13은 종횡비가 0.5인 경우이고, Fig. 5.14는 종횡비가 1인 경우, Fig. 5.15는 종횡비가 2인 경우, Fig. 5.16은 종횡비가 4인 경우의 시뮬레이션 결과를 등압력선과 등속도선을 나타낸 것이다. Fig. 5.12~Fig. 5.16중 Fig. 5.11과 가장 잘 일치하는 것은 Fig. 5.16과 Fig. 5.15로 나타났다. 따라서 입자영상유속계의 실험장치로는 종횡비 4인 경우를 선택하여야 한다. 하지만, 종횡비 4인 경우를 실험장치를 제작할 경우 실험장치는 사각형의 덕트형이고, 실험장치 이전까지는 원형의 배관이므로 서로 결합하는데 상당한 어려움이 있기 때문에 종횡비가 2인 Fig. 5.15를 선택하여 입자영상유속계의 실험장치로 제작하였다.

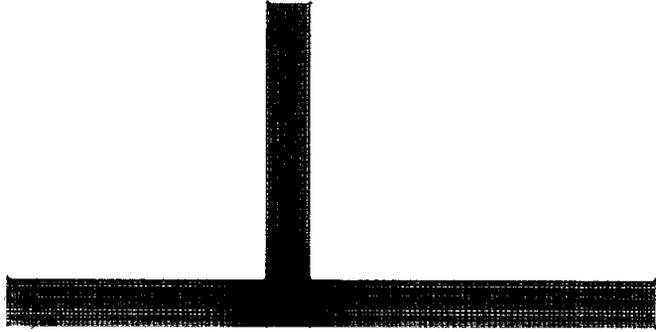


Fig. 5.5 Computational grid

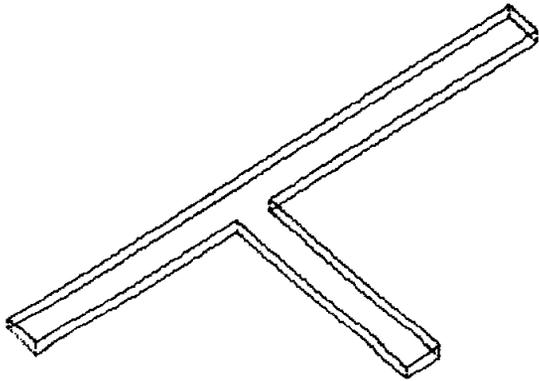


Fig. 5.6 Computational geometry
($Ar = 0.25$)

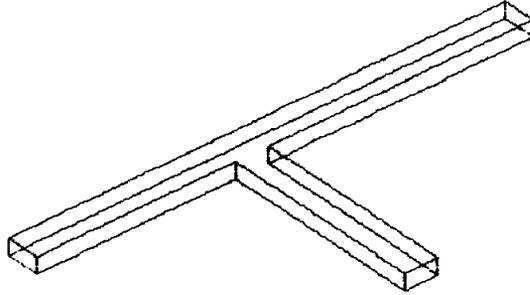


Fig.5.7 Computational geometry
(Ar = 0.5)

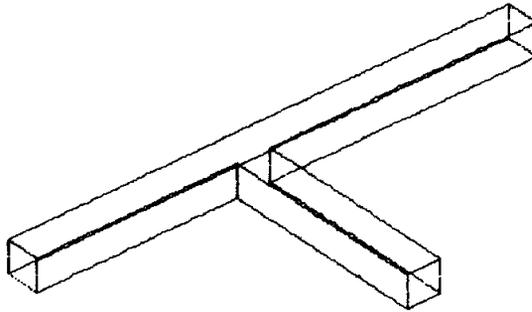


Fig. 5.8 Computational geometry
(Ar = 1)

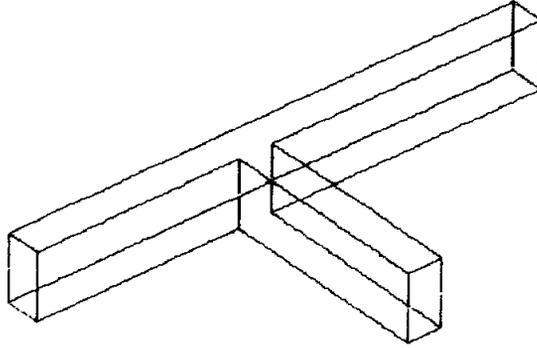


Fig. 5.9 Computational geometry
(Ar = 2)

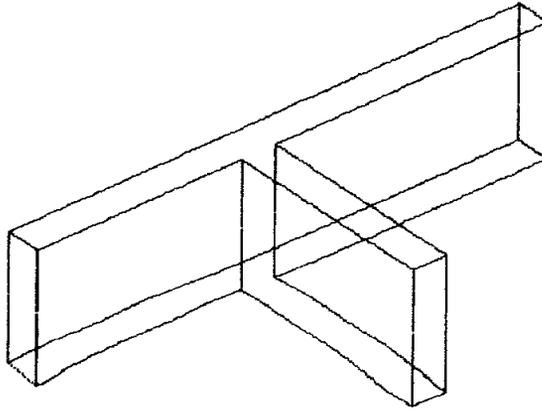
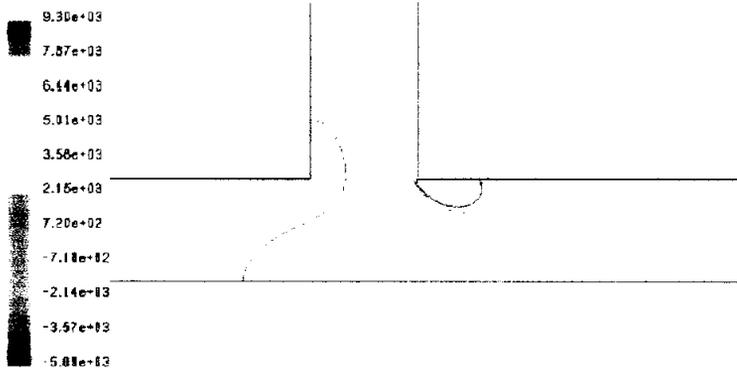
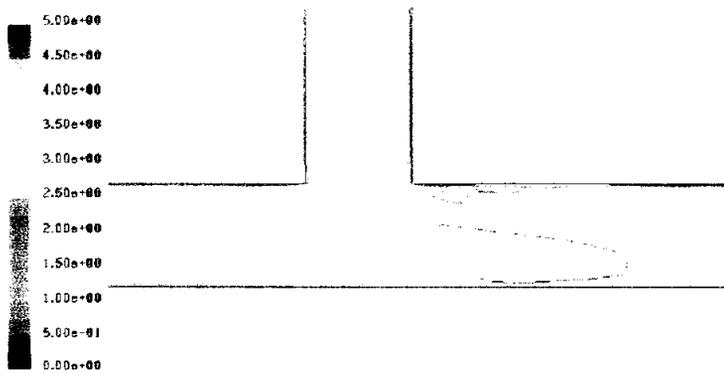


Fig. 5.10 Computational geometry
(Ar = 4)

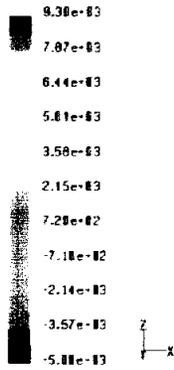


(a) Pressure (Pa)

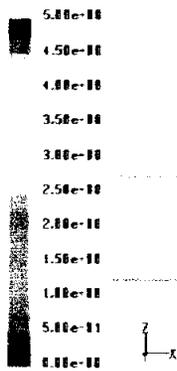


(b) Velocity (m/s)

Fig. 5.11 Contours of pressure and velocity (2D)

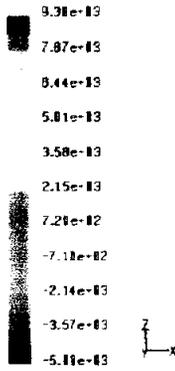


(a) Pressure (Pa)

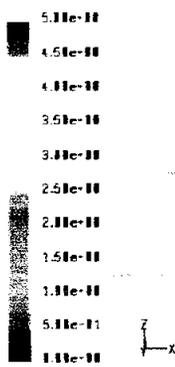


(b) Velocity (m/s)

Fig. 5.12 Contours of pressure and velocity
(Ar = 0.25)

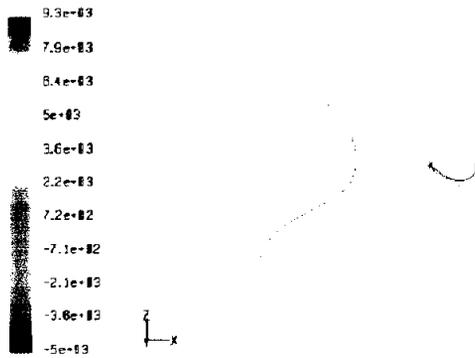


(a) Pressure (Pa)

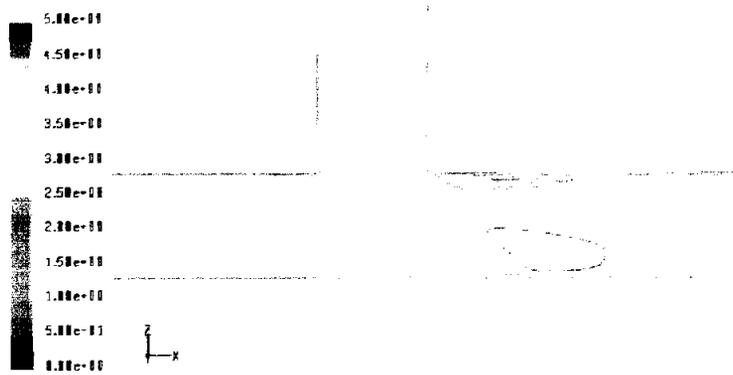


(b) Velocity (m/s)

Fig. 5.13 Contours of pressure and velocity
(Ar = 0.5)

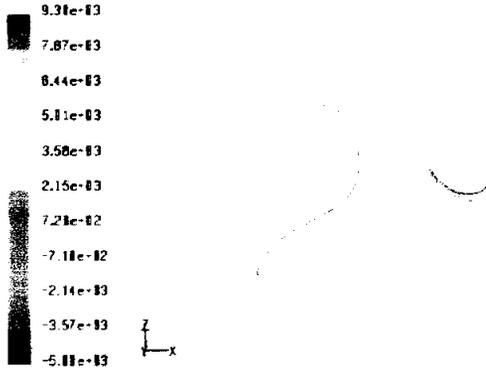


(a) Pressure (Pa)

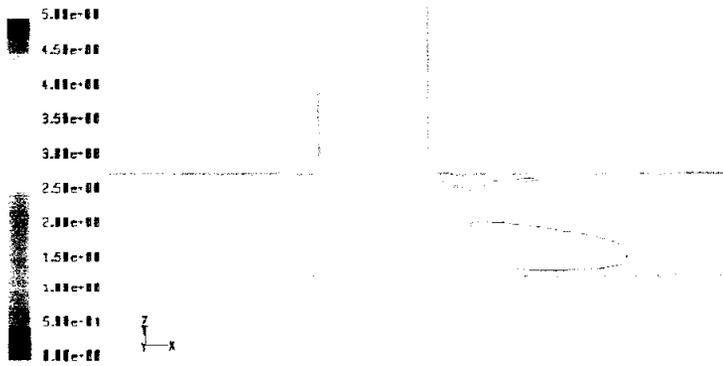


(b) Velocity (m/s)

Fig. 5.14 Contours of pressure and velocity
(Ar = 1)

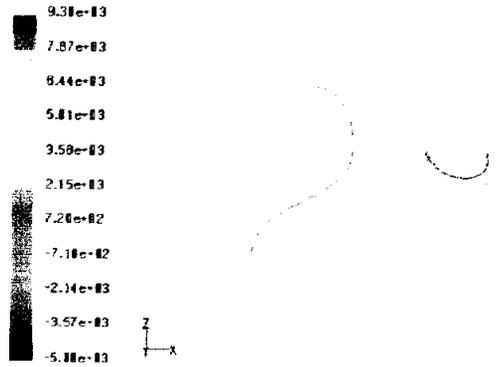


(a) Pressure (Pa)

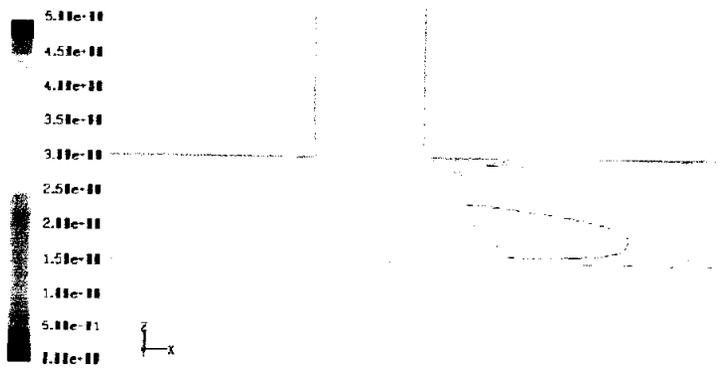


(b) Velocity (m/s)

Fig. 5.15 Contours of pressure and velocity
(Ar = 2)



(a) Pressure (Pa)

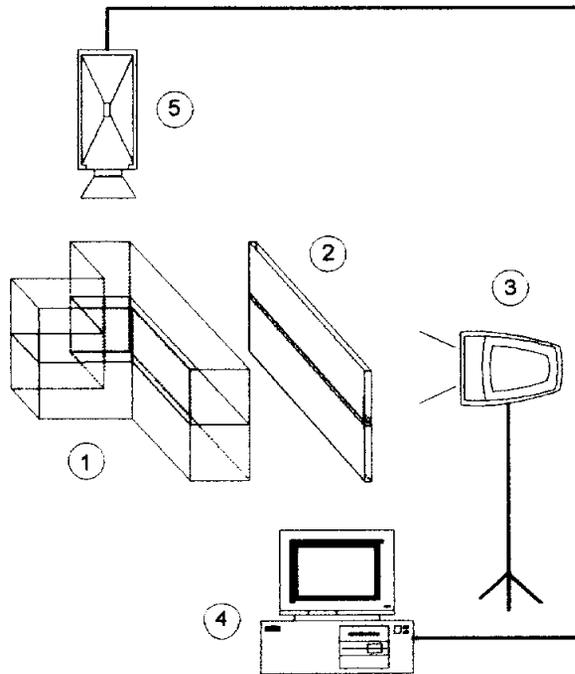


(b) Velocity (m/s)

Fig. 5.16 Contours of pressure and velocity
(Ar = 4)

5.5.2 실험 장치

Fig. 5.17는 PIV 가시화 실험 장치도를 보여주고 있다. 실험장치는 고속카메라(high speed camera), 실험부(test section), 시이터광(sheet light), 조명(light source), 컴퓨터 등으로 구성되어 있다. 그리고, 상부수조, 하부수조, 펌프 등은 이전의 실험장치와 동일하다.



- ① test section ② sheet light ③ light source
 ④ computer ⑤ high speed camera

Fig. 5.17 Schematic diagram of experimental apparatus

영상입력장치는 PIV계측의 종류에 따라 미캐니컬스캐너, 고속카메라, 캠코더, 고속비디오카메라 등 다양하게 결정된다. 실험에서는 고속카메라를 사용하였고 Photo. 5.1에 나타내었다. 고속카메라와 비디오카메라는 미캐니컬스캐너보다 분해능은 뒤떨어지지만, 조작성, 변환성이 우수하고 유동장으로부터 정보를 직접 받아들이는 장점이 있다. 최근 들어 CCD 카메라 기술이 크게 발전함에 따라 고해상도, 고속도를 가진 제품들이 많이 사용되고 있다. 본 실험에서는 사용된 고속카메라는 Fastcam-pci 2k, photron회사 제품이다.

Photo. 5.2은 본 실험에 사용된 할로겐 램프를 보여주고 있으며, Photo. 5.3은 PIV가시화에 사용된 시험부의 사진을 보여주고 있다. PIV가시화 실험에서는 오리피스가 설치되지 않은 경우와 10mm의 오리피스가 설치된 2가지의 경우에서만 실험을 하였다. (a)는 오리피스가 없으며, 가로 25mm, 세로 50mm의 사각단면을 가진 것이고, (b)는 10mm의 오리피스가 설치된 시험부이므로 오리피스가 설치된 부분은 가로 15mm, 세로 50mm이다.

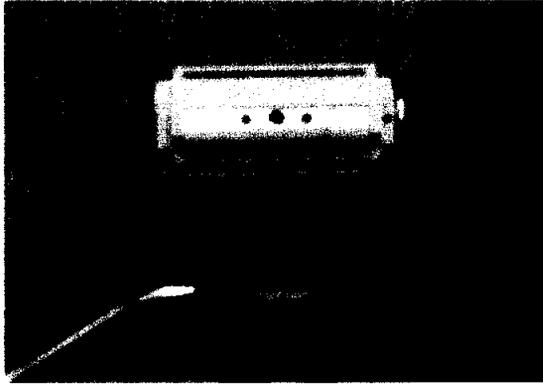


Photo. 5.1 Photograph of high speed camera

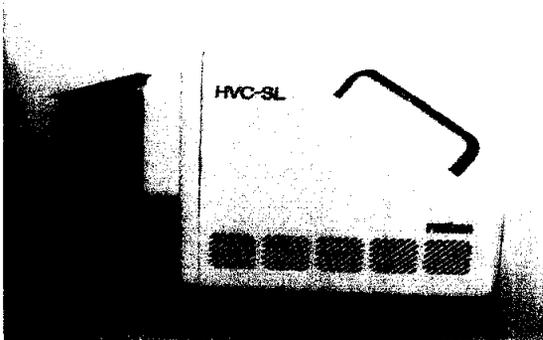
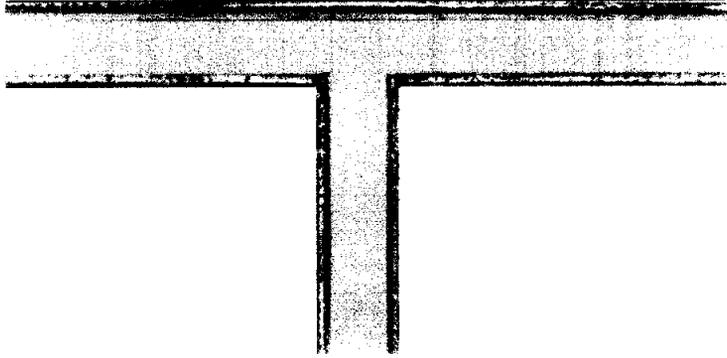
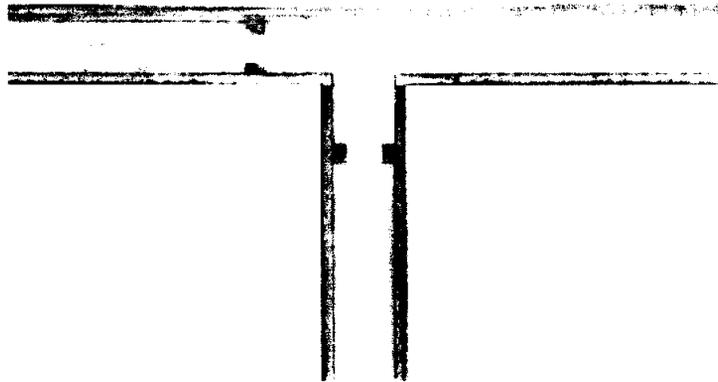


Photo. 5.2 Photograph of halogen lamp



(a) without orifice



(b) with orifice

Photo. 5.3 Test section of PIV

5.6 결과 및 토의

5.6.1 오리피스를 설치하지 않은 덕트에서의 유동

Fig. 5.18은 사각단면을 가진 90° 합류형 덕트를 통해 물과 함께 유동하는 입자들을 고속카메라를 이용하여 획득한 원시 영상을 보여주고 있다. 화소영역은 500 fps일 때 512×240 이며, 유동 가시화를 위하여 합류관 모델에 투입된 입자는 밀도가 작동유체인 물과 거의 유사하고 크기가 $100 \sim 150 \mu\text{m}$ 인 플라스틱 분말(vinyl chloride polymer)을 사용하였다.

Fig. 5.19은 영상에 노이즈가 있을 경우 오류벡터가 발생할 확률이 크므로 각 영상으로부터 감산하게 될 배경영상을 보여주고 있다.



Fig. 5.18 Original image

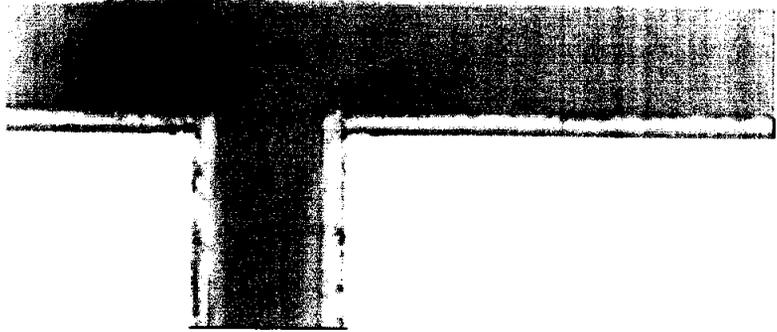


Fig. 5.19 Background image

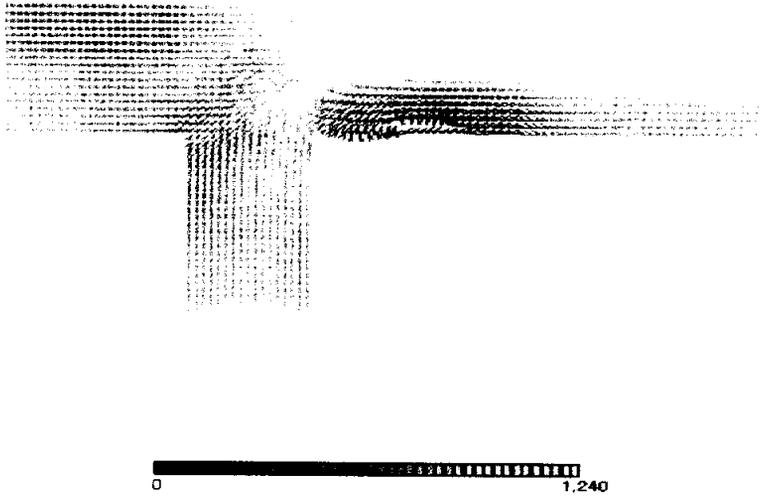


Fig. 5.20 Velocity vectors

Fig. 5.20은 촬영영상에 계조치 상호 상관법을 적용하여 속도장을 속도벡터로 나타낸 것이다. 합류지점 이후의 안쪽 내벽에서 심한 와류현상(separated flow)이 발생하는 것을 볼 수 있고, 합류관 이후에는 와류현상에 의해서 유관이 많이 좁아졌기 때문에 유속이 빨라진 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5.21은 속도 분포를 평면이 아닌 입체의 형상으로 나타낸 것이다.

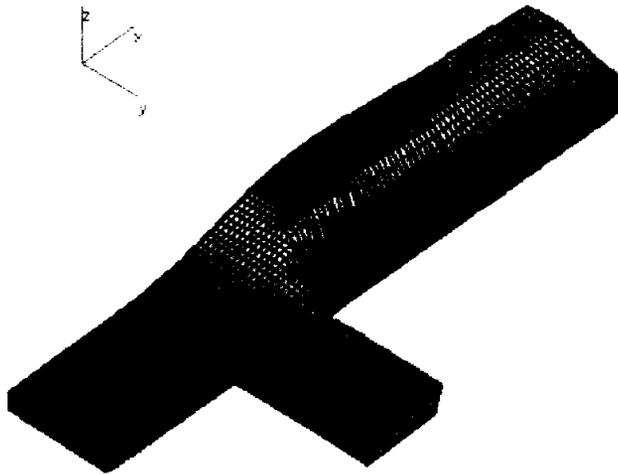


Fig. 5.21 Velocity distribution

Fig. 5.22는 계측된 유동의 유선을 나타낸 것이다. Fig. 5.20과 같이 합류부 이후에서 와류가 크게 발생하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 5.23은 Fig. 5.20에서 알기 어려웠던 속도분포를 원하는 위치에서 속도크기를 확인할 수 있는 속도 윤곽을 나타낸 것이다.

Fig. 5.24 (a)는 본관의 속도벡터를 나타낸 것이고, (b)는 지관의 속도 벡터를 나타낸 것이다. 각 포인트의 대표속도를 표시하여 보았다. 본관의 평균유속은 0.674m/s 이고, 지관의 평균유속은 0.769m/s 로 나타났다. 따라서 지관의 유속이 본관의 유속보다 약 0.095m/s 정도 높게 나타나고 있다. 다시 말해서 동일한 압력이 가해졌을 때 지관의 유량이 본관의 유량보다 약 14% 많이 흘러간다는 것을 나타나고 있다. 이것은 앞의 원관으로 실험한 실험결과와 같이 덕트형의 합류관에서도 지관이 본관보다 유량이 많이 흐름을 확인할 수 있다.

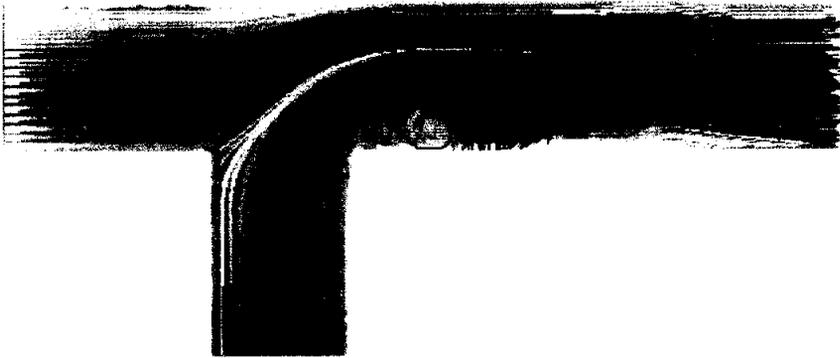


Fig. 5.22 Streamlines

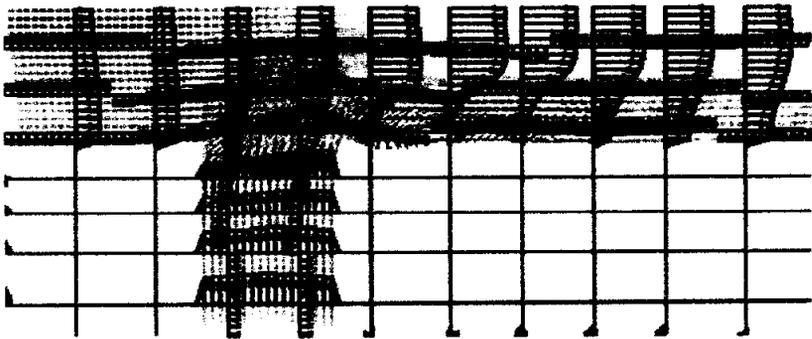
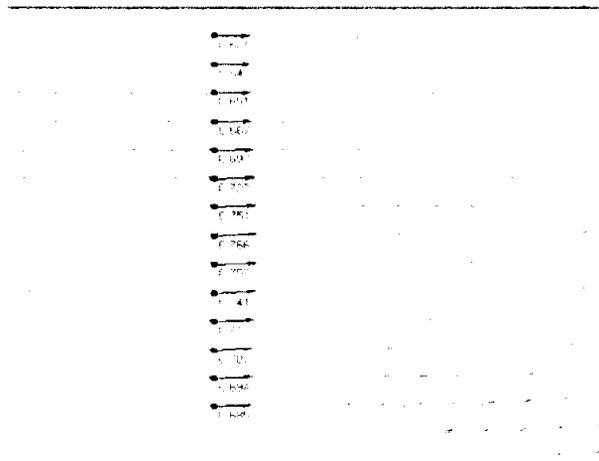
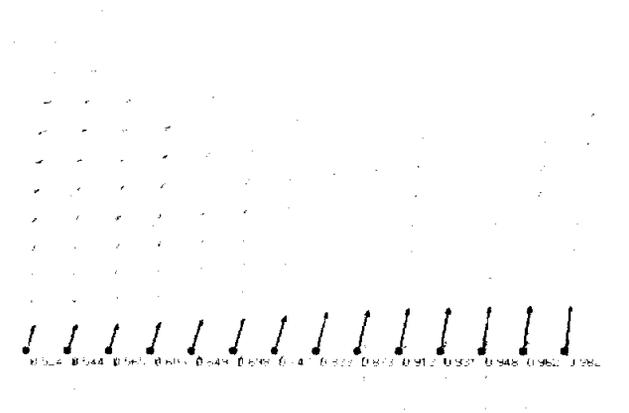


Fig. 5.23 Velocity profile ($Re = 28900$)



(a) main pipe ($V = 0.674$ m/s)



(b) lateral pipe ($V = 0.769$ m/s)

Fig. 5.24 Enlarged velocity vectors

5.6.2 오리피스를 설치한 덕트에서의 유동

Fig. 5.25는 오리피스가 설치된 시험부를 고속카메라로부터 획득한 원시영상을 보여주고 있다. 그림에서 오리피스의 위치가 명확하게 나타나지 않아서 화살표로 표시해 두었다.

Fig. 5.26은 Fig. 5.19와 같이 영상으로부터 감산하게 될 배경영상을 보여주고 있다.

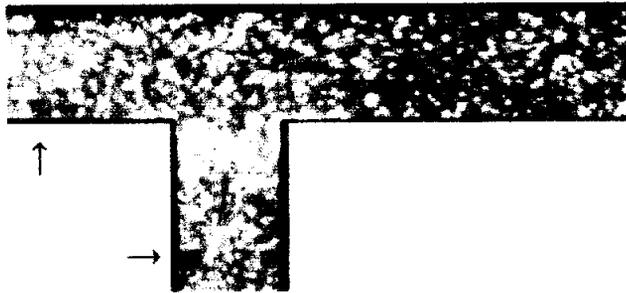


Fig. 5.25 Original image



Fig. 5.26 Background image

오리피스가 설치된 덕트에서의 속도벡터를 Fig. 5.27에 나타내었다. 오리피스 직후에서 많은 와류가 발생하는 것을 볼 수 있으며, 합류부 이후의 유동은 오리피스가 설치되지 않은 덕트에서의 유동과 같이 와류가 발생되고 있는 것을 확인할 수 있다.

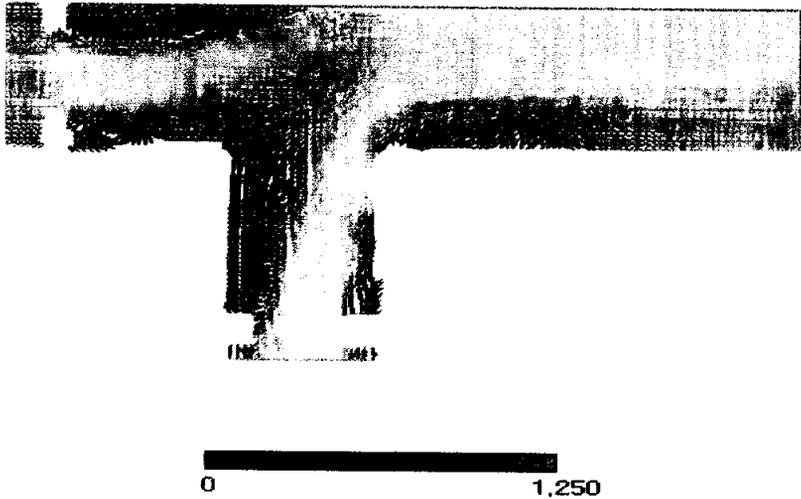


Fig. 5.27 Velocity vectors

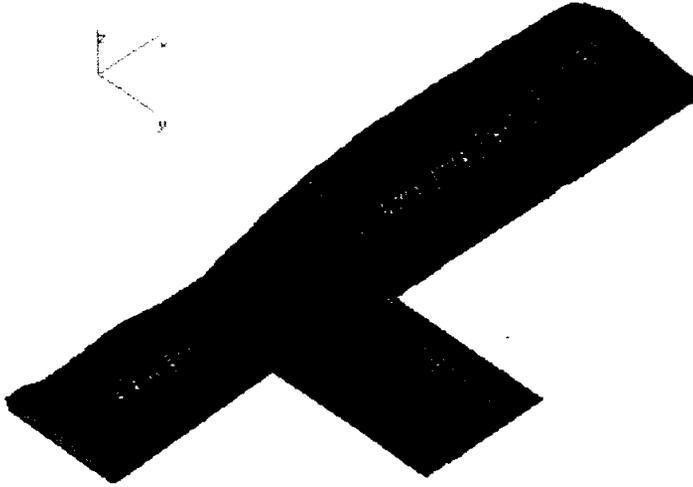
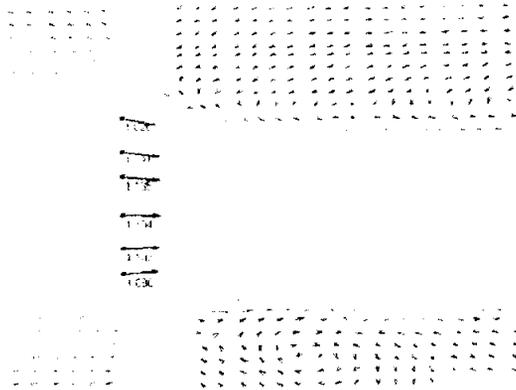


Fig. 5.28 Velocity distribution

(Re = 47100)

Fig. 5.28은 fig. 5.27의 속도분포를 입체적으로 나타낸 것이다.

Fig. 5.29는 오리피스가 설치된 합류관의 속도벡터를 확대해서 나타낸 것으로 오리피스 직후의 와류현상까지 상세히 관찰할 수 있다. (a)의 본관의 평균유속은 약 1.102m/s로 나타났고, (b)의 지관 평균유속은 약 1.185m/s로 나타났다.



(a) main pipe ($V = 0.102$ m/s)



(b) lateral pipe ($V = 1.185$ m/s)

Fig. 5.29 Enlarged velocity vectors

5.7 결 론

입자영상유속계를 이용하여 합류관에서의 유동을 실험한 결과 다음과 같은 결과가 나타났다.

PIV가시화 실험의 계산은 2차원으로 행해지고, 실험장치는 사각덕트이다. 따라서 PIV가시화 계산결과와 가장 잘 일치하는 실험장치를 구성하기 위해서 먼저, 2차원의 합류관을 모델링하여 수치해석 하였고, 사각덕트의 종횡비를 0.25, 0.5, 1, 2, 4로 변경해 가면서 수치해석한 결과, 사각덕트의 종횡비가 4, 2, 1의 순서로 2차원의 수치해석 결과와 가장 잘 일치하는 것으로 나타났다.

종횡비가 2이고 오리피스를 설치하지 않은 경우 즉, 본관과 지관의 $(d_1 / D_1, d_2 / D_2) = 1$ 일 때는 지관의 유속이 본관의 유속보다 약 14% 크게 나타났다. 또 여기에 10mm의 오리피스를 설치한 경우 즉, 본관과 지관의 $(d_1 / D_1, d_2 / D_2) = 0.6$ 일 때 지관의 유속이 본관의 유속보다 약 7.5% 가 크게 나타났다.

오리피스를 설치하지 않은 경우에 있어서 지관과 본관의 유속 차이는 오리피스를 설치한 경우의 지관과 본관의 유속 차보다 크게 나타나고 있다. 다시 말해서 직경이 작은 오리피스를 설치하면 할수록 지관과 본관의 유량차가 줄어드는 것을 나타낸다고 볼 수 있다.

제 6 장

결 론

제 6 장 결 론

일반적으로 배관계는 이송물체를 사용목적에 맞도록 적절하게 이송시키고 분배할 수 있는 최적의 조건으로 설계되어야 하는데, 실제의 설계에서는 각종 부속 설비와 연결부를 포함하는 복합 구조로 인한 손실 등을 고려해야 하기 때문에 최적 설계가 매우 어렵다.

따라서 본 연구에서는 T형 합류관에서 협착부가 있을 때 협착부에 따른 유동현상과 합류지점에서의 유동현상을 규명하여 T형 합류관의 최적설계에 필요한 정성적 자료를 제공하는 것을 목적으로 한다. 따라서 실험과, CFD 그리고 PIV(particle image velocimetry)가시화를 통해서 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 지관과 본관에 동일한 직경을 가진 오리피스가 설치된 경우와 설치되지 않은 경우, 동일한 압력이 가해질 때 합류부의 영향에 의해 지관의 유량이 본관의 유량보다 큰 것으로 나타났다.
- (2) 본관과 지관에 동일한 직경을 가진 오리피스가 설치된 경우에서는 직경이 작은 오리피스가 설치될수록 본관과 지관의 유량비는 점점 줄어들었으며, $(d_1 / D_1, d_2 / D_2)$ 가 0.441 이하에서는 지관과 본관의 유량이 매우 비슷하게 나타났다.
- (3) 본관과 지관에 동일한 직경을 가진 오리피스가 설치된 경우 오리피스 직경이 커질수록 합류부에 의한 영향 때문에 손실이 커지고, 반면 오리피스 직경이 작을수록 합류부에 의한 영향보다는 오리피스 자체에 의한 손실이 커진다는 것으로 나타났다.
- (4) 오리피스가 설치되지 않은 경우 본관과 지관에 동일한 압력이 가해

질 때의 유량변화에 대해서 수치해석한 결과 지관의 유량이 본관의 유량보다 약 10% 많이 흐르는 것으로 나타났다. 그리고 지관과 본관에 동일한 직경을 가진 오리피스가 설치되어질 때 직경이 작은 오리피스가 설치되어질수록 본관과 지관의 유량비도 점점 줄어드는 것으로 나타났으며, 직경비 0.441 이하부터는 본관과 지관의 유량비도 매우 비슷하게 나타났다. 이와 같은 결과는 실험을 통해서도 확인을 했으며, 실험과 수치해석의 결과가 매우 비슷하게 나타났다.

- (5) 지관과 본관에 동일한 유량이 흐를 경우 손실계수비를 알아본 결과, 오리피스가 설치되지 않은 경우 본관에서의 손실이 지관에서의 손실보다 약 7.7% 크게 나타났으며, 오리피스 직경과 관의 직경비가 0.882, 0.735, 0.588, 0.441로 작아질 경우, 손실계수비도 6.3%, 4.6%, 3.1%, 1.8%로 줄어드는 것으로 나타났다.
- (6) 합류관에서 유동에 영향을 많이 미치는 오리피스가 설치될 경우에 오리피스 설치위치에 의한 영향도 고려되어야 한다고 보여진다. 따라서 본관과 지관의 오리피스 설치위치에 따른 유동의 변화가 있을 것으로 판단되어 직경과 동일한 위치에 오리피스를 설치한 경우와 직경의 2배 위치에 오리피스를 설치한 경우에 대해서 유동의 변화를 알아본 결과, $l = D$ 에서 $l = 2D$ 사이에서의 유동변화는 매우 미미하게 나타났다. 이것은 지관과 본관의 오리피스 설치위치가 $l = D$ 에서 $l = 2D$ 사이에서는 유동에 거의 영향을 주지 않는다고 볼 수 있다
- (7) 지관과 본관에 동일한 압력을 가했을 때 동일한 유량이 흐르게 하기 위해서 본관의 관과 오리피스 직경비를 고정하고 지관의 관과 오리피스 직경비를 변경해가면서 시뮬레이션한 결과, 본관에서 본관과 오리피스 직경비가 1, 0.882, 0.735, 0.588, 0.441일 때, 지관과

지관의 오리피스 직경비가 0.941, 0.847, 0.721, 0.579, 0.440 이면 동일한 유량이 흐른다는 것을 알았다. 또한 본관에서 본관과 오리피스 직경비가 0.4 이하인 경우에는, 본관과 지관에 같은 크기의 오리피스를 설치하여도 각 관에 같은 유량이 흐른다는 것도 알 수 있었다.

- (8) PIV가시화 실험의 계산은 2차원으로 행해지고, 실험장치는 사각덕트이다. 따라서 PIV가시화 계산결과와 가장 잘 일치하는 실험장치를 구성하기 위해서 먼저, 2차원의 합류관을 모델링하여 수치해석하였고, 사각덕트의 종횡비를 0.25, 0.5, 1, 2, 4로 변경해 가면서 수치해석 해본 결과, 사각덕트의 종횡비가 4, 2, 1의 순서로 2차원의 수치해석 결과와 가장 잘 일치하는 것으로 나타났다.
- (9) 종횡비가 2 이고 오리피스를 설치하지 않은 경우 즉, 본관과 지관의 $(d_1 / D_1, d_2 / D_2) = 1$ 일 때는 지관의 유속이 본관의 유속보다 약 14% 크게 나타났다. 또 여기에 10mm의 오리피스를 설치한 경우 즉, 본관과 지관의 $(d_1 / D_1, d_2 / D_2) = 0.6$ 일 때 지관의 유속이 본관의 유속보다 약 7.5% 가 크게 나타났다. 오리피스를 설치하지 않은 경우에 있어서 지관과 본관의 유속 차이는 오리피스를 설치한 경우의 지관과 본관의 유속 차보다 크게 나타나고 있다. 다시 말해서 직경이 작은 오리피스를 설치하면 할수록 지관과 본관의 유량차는 줄어드는 것을 나타낸다고 볼 수 있다. 이 PIV 가시화 실험 결과는 덕트형의 합류관이지만, 앞의 실험과 시뮬레이션의 결과와 같이 지관의 유량이 본관의 유량보다 많이 흐름을 재차 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. 노균화, 1990, “소방배관 설계를 위한 기본 지식”, 한국 화재 학술지, 제4권, 제2호, pp. 27~28.
2. K. Kim, 2002, “Flow Simulation of the Piping System with Elbows”, Yosu National University, Yosu.
3. F. J. Walburn, H. N. Sabbah and P. D. Stein, 1981, “Flow visualization Aorta”, ASME Journal of Biomechanical Engineering, Vol. 103, pp. 168~170.
4. C. M. Rodkiewicz and D. H. Howell, 1971, “Fluid dynamics in a Large Arterial Bifurcation”, AIAA Journal, Vol. 9, No. 11, pp. 2284~2286.
5. J. W. Shim, 1995, “Flow Visualization of a Newtonian Fluid in the Branching Duct Using Particle Imaging Velocimetry”, Soongsil University, Seoul.
6. M. H. Ko, 1990, “The study on the fluid flow in the branched tubes”, Kum-oh National Institute of Technology, Gumi.
7. M. Ensworth, 2000, “Simulation helps improve performance by over 50% in irrigation components”, Journal articles by fluent software users, pp. 1~4.
8. 고석보, 전용두, 2000, “90° 사각곡관내 입자 이상유동에 관한 수치적 모사”, 공기조화 냉동공학회 학술발표회 논문집, pp. 1226~1233.
9. 이용화, 박정원, 1997, “배수관내의 압력 및 유동특성”, 공기조화 냉동공학, 제26호, 제5호, pp. 375~382.

10. K. Oka and H. Ito, 1995, "60° および 120° 合流管のエネルギー損失", 일본기계학회논문집 B, 제61권, 제583호, pp. 44~52.
11. O. N. Ha, 1997, "A study on the flow characteristics of non-Newtonian fluid in dividing tubes", Kook Min University, Seoul.
12. Y. U. Min and Y. G. Kim, 1999, "A Numerical analysis of the pipe flow past the orifices", KSME, pp. 530~535.
13. J. S. Maeng, S. Y. Yang and H. C. Seo, 1993, "Numerical Study of Periodic Turbulet Flow for a Pipe with an Orifice Ring", KSME, Vol 17, No 9, pp. 2294~2303.
14. F. M. White, 1997, "Fluid Mechanics", Mcgraw-Hill, INC., New York, p. 395.
15. 고흥중, 권오봉, 사종엽, 이연원, 정희택, 주상우, 2000, "쉽게 배우는 유체역학", 인터비전, pp. 413~469.
16. 박아동, 1992, "기본 유체역학", 보성문화사, pp. 145~180.
17. 윤영환, 배택희, 박원구, 2002, "두개의 분지관을 가진 직사각형 덕트 내의 유량배분에 관한 실험 및 수치계산 연구", 설비공학논문집, 제14권, 제9호, pp. 766~773.
18. 조강래, 류정열, 강신형, 1997, "유체역학", 회중당, pp. 395.
19. J. E. Huilkey, A. R. Kerstein, P. A. Mcmurtry and J. C. Klewicki, 1997, "Mixing mechanisms in turbulent pipe flow", American Institute of Physics, Vol. 9, No. 3, pp. 717~723.
20. 김상녕, 장완호, 1992, "배관내 자유수면에서 와류현상에 대한 연구", Journal of the Korean Nuclear Society, Vol. 24, No. 3, pp. 311~318.

21. 김철환, 하삼철, 김은필, 김경천, 2000, “기액2상 유동에서 합지관에 대한 해석”, 공기조화냉동공학회 하계학술발표회 논문집, pp. 268~272.
22. 김성은, 김부기, 손성진, “배관망 Friction Loss 해석 프로그램 개발”, 대우조선기술.
23. 한승탁, 전경란, 김수원, 1998, “최적의 오리피스 설계를 위한 프로그램 개발”, POWER ENGINEERING, Vol 9, No 1, pp. 142~153.
24. K. OKA, T. NOZAKI and H. ITO, 1996, “Energy Losses Due to Combination of Flow at Tees”, JSME, Series B, Vol. 39, No. 3.
25. 이중세, 전성화, 김명종, 권순범, 2000, “오리피스 두께 변화에 따른 전압손실”, Proceedings of The First National Congress on Fluids Engineering, Muju, Korea.
26. 최종민, 김용찬, 1999, “바이패스 오리피스 팽창장치의 유동 특성에 관한 실험적 연구”, 공기조화냉동공학논문집, 제11권, 제1호, pp. 109~116.
27. 박병서, 1989, “확대 축소 연결부 주위의 관내 난류 유동구조에 대한 실험적 연구”, 한국과학기술원.
28. 조성환, 최진희, 1984, “PVC 배관부품의 마찰 손실”, 공기조화 냉동 공조, 제13권, 제4호, pp. 209~214.
29. 유동훈, 한상호, 윤계섭, “상용관 마찰흐름 실험연구”.
30. L. M. Sroka and L. J. Forney, 1989, “Fluid Mixing with a Pipeline Tee : Theory and Experiment”, AIChE Journal, Vol. 35, No. 3, pp. 406~414.
31. W. J. McBride, G. S. Woods, G. F. Donnelly and P. L. Spedding, 1995, “Characterization of multiphase pressure-change

- phenomena, as observer across a bifurcating horizontal 90° tee-junction”, ASME, FED-Vol. 233, pp. 479~486.
32. 명현국, 1999, “전산열유체공학”, 문운당.
33. 신철수, 1992, “수치해법을 이용한 층류 및 난류 유동문제의 해석”, 숭실대학교.
34. 이동원, 김광용, 1995, “원관내 난류 선회류의 수치해석”, 공기조화 냉동공학논문집, 제7권, 제3호, pp. 396~405.
35. 이재현, 이승갑, 윤정인, 1998, “컴퓨터로 풀이한 열유체공학”, 태훈출판사.
36. S. V. Patankar, “Numerical Heat Transfer and Fluid Flow”, McGraw-Hill, INC.
37. 김진국, “직선배관에서 균일한 공기 흡입을 하는 오리피스 직경변화에 대한 연구”, 방재기술, 제24호, pp. 17~22.
38. M. Yasuhara and H. Daiguji, 2002, “수치유체역학 기초와 응용”, 원기술. pp. 345~361.
39. 이동원, 김광용, 1995, “원관내 난류 선회류의 수치해석”, 공기조화 냉동공학 논문집, 제7권, 제3호, pp. 396~405.
40. 맹주성, 이종신, 1991, “사각단면을 갖는 90° 급곡관의 3차원 난류유동 해석”, 공기조화 냉동공학논문집, 제3권, 제1권, pp. 11~25.
41. S. Y. Chung, G. H. Rhee and G. J. Sung, 2002, “Direct numerical simulation of turbulent concentric annular pipe flow”, International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 23, pp. 426~440.
42. 민영위, 김유곤, 1999, “관내 오리피스를 지나는 유동에 관한 수치해석”, 대한기계학회 학술대회논문집, pp. 530~535.

43. 최영돈, 분찬, 1994, “직사각단면을 갖는 180° 곡관내의 난류 유동 및 열전달에 관한 수치해석적 연구”, 공기조화 냉동공학 논문집, 제6권, 제4호, pp. 325~336.
44. 맹주성, 양시영, 서현철, 1993, “오리피스 링이 부착된 원관내 주기적인 난류운동에 대한 수치해석”, 대한기계학회논문집, 제17호, 제9호, pp. 2294~2303.
45. 채은미, 사종엽, 1999, “배관망 내의 정상상태 유동 해석”, 공기조화 냉동공학 논문집, 제11권, 제3호, pp. 281~291.
46. 조장근, 1998, “난류 모델을 이용한 3차원 제트펌프 내부 유동의 수치적 해석”, 부산대학교.
47. 김성준, 1987, “새 유한차분법의 개발과 난류 재순환 유동해석”, 강원대학교.
48. 김원갑, 최영돈, 2002, “단면의 폭이 감소하는 180° 곡덕트 내 난류 유동의 수치해석적 연구”, 설비공학논문집, 제14권, 제12호, pp. 1056~1062.
49. 김정환, 2000, “CFD에 의한 파력발전용 웰즈터빈의 3차원 유동특성에 관한 연구”, 부경대학교.
50. 박일규, 2001, “CFD에 의한 웰즈터빈의 비정상 유동특성”, 부경대학교.
51. 김태훈, 2003, “웰즈터빈의 히스테리시스 특성에 대한 연구”, 부경대학교.
52. 최동규, 최도형, 신현동, 김문언, 1990, “난류선회제트 계산에 관한 난류모델 비교 연구”, 대한기계학회논문집, 제14권, 제2호, pp. 440~452.
53. 장동식, 2000, “LES에 의한 단순화된 자동차주위 유동장의 수치해

- 석”, 부경대학교.
54. 양희천, 유홍선, 임종한, 1997, “RNG $k-\epsilon$ 모델의 적용성에 대한 연구”, 대한기계학회논문집B, 제21권, 제9호, pp. 1149~1164.
55. 명현국, 진은주, 박희경, 1997, “Ahmed Body 주위의 3차원 난류유동 해석”, 대한기계학회논문집, 제21권, 제7호, pp. 873~881.
56. 전원대, 유근중, 2001, “Analysis of Unsteady Turbulent Flow in Pipes with T-Junction”, 한국원자력학회 추계학술발표회 논문집.
57. F. Z. Sierra-Espinosa, C. J. Bates and T. O’Doherty, 2000, “Turbulent flow in a 90° pipe junction (part 1 : decay of fluctuations upstream the flow bifurcation)”, Computers and Fluids, Vol. 29, pp. 197~213.
58. L. M. Portela, P. Cota and V. A. Oliemans, 2002, “Numerical study of the near-wall behaviour of particles in turbulent pipe flows”, Powder Technology, Vol. 125, pp. 149~157.
59. F. Z. Sierra-Espinosa, C. J. Bates and T. O’Doherty, 2000, “Turbulent flow in a 90° pipe junction (part 2 : revers flow at the branch exit)”, Computers and Fluids, Vol. 29, pp. 215~233.
60. 태상진, 최용화, 조금남, 2000, “T형 분지관내 상분리 및 압력강하에 관한 해석”, 공기조화 냉동공학회 학술발표회 논문집, pp. 1241~1246.
61. S. Chapuliot and D. Moulim, 1998, “Experimental and numerical study on the behavior of cracked branch pipes”, ASME, PVP-Vol. 365, pp. 115~120.
62. 권혁중, 2000, “평면변형을 조건 하의 회전하는 90° 곡덕트 내 난류 유동의 전산해석”, 고려대학교.

63. L. J. Forney, N. Nafia and H. X. Vo, 1996, "Optimum Jet Mixing in a Tubular Reactor", *AICHE Journal*, Vol. 42, No. 11, pp. 3113~3122.
64. 박장혁, 조성만, 홍성태, 구자예, 1996, "급격축소단면을 가진 연료노즐 오리피스의 유동특성", *대한기계학회 춘계학술대회논문집*, pp. 580~585.
65. 안수환, 1999, "거친 외벽면을 가진 동심환형관내에서 완전히 발달된 유동의 난류구조", *공기조화 냉동공학 논문집*, 제11권, 제1호, pp. 1~9.
66. 도덕희, "PIV계측 기술", 한국해양대학교.
67. 편용범, "PIV계측 기술", (주)티엔텍.
68. G. Pan and H. Meng, 2001, "Experimental Study of Turbulent Mixing in a Tee Mixer Using PIV and PLIF", *AICHE journal*, Vol. 47, No. 12, pp. 2653~2665.
69. 이영호, "PIV에 의한 유동장 계측", *대한조선학회*, 제32권, 제2호, pp. 43~46.
70. 서상호, 1995, "입자영상유속계를 이용한 분기형 덕트내 뉴턴유체의 유동가시화", *숭실대학교*.
71. 임인호, 2002, "4각덕트 분지관의 유동특성에 관한 연구", *조선대학교*.
72. 이영호, 김춘식, 최장운, 1994, "PIV의 성능개선에 관한 연구", *한국박용기관학회지*, 제18호, 제3호, pp. 284~292.
73. 서상호, 최을, 노형운, 도덕희, 1999, "입자영상유속계와 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 분기관내 유동해석", *대한기계학회논문집*, 제23권, 제1호, pp. 123~130.

74. 김영목, 손호재, 오승협, 1998, “정사각단면을 갖는 90° T-분지관의 유동특성 해석”, 한국항공우주학술지, 제26호, 제1호, pp. 52~57.
75. 배택희, 2002, “사각덕트형 분지관의 유량분배에 대한 수치해석 인자의 영향에 관한 연구”, 창원대학교.
76. 장태현, 이해수, 2002, “PIV기법을 이용한 원주 후류의 난류유동에 관한 실험적 연구”, 경남대학교 특설 공업기술연구소, Vol. 20, pp. 233~244.

감사의 글

이 논문이 완성되기까지 지난 세월을 되돌아보니 부족한 저에게 관심과 성원을 보내어 주셨던 분들이 너무나 많습니다. 그 분들께 짧은 글로나마 이렇게 감사의 마음을 전합니다.

먼저, 학문적 지도와 어려움이 있을 때마다 항상 격려와 용기를 주신 지도교수 권오봉 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 아울러, 본 논문의 심사를 통하여 많은 조언으로 논문의 완성도 및 품위를 높여주신 김남식 교수님, 한규일 교수님, 백대식 교수님 그리고 동의대학교 손영석 교수님께 진심으로 감사드립니다.

또한, 연구기간동안 실험실에서 도움을 준 하재성 군을 비롯한 연구실 조원들에게도 고마운 마음을 전하며, 가시화 실험에서 많은 도움을 주었던 김현호 대학원생을 비롯한 가시화정보 실험실 조원에게도 고마움을 전합니다. 언제나 따뜻한 말씀과 관심을 보여주신 연소공학연구실의 이도형 교수님께도 감사드립니다. 그리고 연소공학실험실의 대학원생, 이진석, 이용후, 윤봉식, 박준홍, 오세원 군에게도 고마운 마음이며, 어려움을 함께 나누었던 부식환경공학연구실의 윤병두 동기에게도 고마운 마음입니다. 어려움이 있을 때 언제나 조언해주신 냉동공학과 김종률 선배님께도 고마움을 전합니다.

특히, 오빠이 있기까지 뜨거운 성원으로 지켜봐 주신 할머니, 어머니, 어려움이 있을 때 언젠가 되어주신 작은아버지 내외분, 큰고모 내외분, 둘째고모 내외분, 막내고모 내외분, 누님 내외분께 고개 숙여 감사드립니다. 딸이 고생하는 줄 알면서 저를 믿고 꿋꿋히 지켜봐 주셨던 장인, 장모님, 살아가는데 많은 도움이 되고 있는 처형내외분께도 감사드립니다. 그리고 학업을 계속할 수 있도록 사회생활을 대신 하며 항상 내 옆자리를 지켜준 아내 정미와 땀방울 흘리며 나를 밝히는 사랑하는 딸 수연이와 함께 이 작은 결실을 나누고자 합니다.

일일이 거명하지 못하였지만 저에게 많은 도움이 되어주셨던 분들께 고마움을 전합니다.

끝으로 저의 결실을 보지 못하신 아버지 영전에 고개 숙여 이 영광을 올립니다.

2004년 2월

김영관 拜上