

PIV 및 CFD에 의한 오리피스 제트의 유동특성에 관한 연구

최 장 운¹⁾, 이 영 호²⁾

A Study on Flow Characteristics of Orifice-Jet by PIV and CFD

Jang-Woon Choi, Young-Ho Lee

Abstract

The present study is aimed to investigate flow characteristics of orifice-jet by experimental(PIV) and numerical(CFD) approach. Characteristics of pipe orifice-jet flow are studied for two ratios($\beta=0.5, 0.75$) of orifice hole to pipe diameter and also two Reynolds numbers($Re_d=1 \times 10^3, 2.5 \times 10^3$), based on orifice diameter and its mean velocity. Numerical calculations are carried out for the same geometric specification cited in experimental case.

In orifice flow field, behaviors of vortex streets and jet-flow are observed and flow reattachment do not occur in the present study. Vortices shed from the square-edged orifice plate migrate downstream along the pipe wall and affect greatly the jet-flow development.

1. 서론

오리피스유량계는 오리피스판 전후의 압력차를 이용하여 관내에 흐르는 유체의 유량을 측정하는데 사용된다. 오리피스는 형상이 간단함에도 불구하고 유동의 박리, 재순환영역, 압력강하, 와류 등의 유동현상이 복잡하게 나타난다. 축류부에서 유선은 직선으로 되어 제트류가 통과하는 유로의 횡단면에 걸쳐 균등한 압력이 분포하게 된다. 또한 오리피스공을 통과하면서 유체가 급속하게 가속되기 때문에

1) 한국해양대학교 기계공학과 석사과정 일유체 전공

2) 한국해양대학교 기계공학과 부교수

판 전후에 높은 압력차가 발생하여 손실을 수반하게 된다. 동시에 관벽을 따라서 하류측으로 이동하는 다수의 와열이 발생하며, 오리피스레이놀즈수와 오리피스공의 관경에 대한 비(β)에 따라서 특정한 속도 및 압력변동 주파수특성을 보이고 있다.

본 연구에서는 실험대상으로서 원관오리피스흐름을 채택하여 실험장치를 구성하고 가시화실험을 행하여 유동장으로부터 정량적인 정보를 얻기 위한 PIV시스템 구성을 구성하였다. 직각(square-edged) 오리피스관을 대상으로 하여 $Re_d=1 \times 10^3$, 2.5×10^3 및 $\beta=0.5, 0.75$ 에 대하여 실험을 수행하였고, $Re_d=1 \times 10^3, 2.5 \times 10^3, 5 \times 10^3, 1 \times 10^4$ 및 $\beta=0.25, 0.5, 0.75$ 의 유동조건에 대하여 수치해석을 행하였다. PIV에 있어서는 오리피스가 설치된 원관에 있어서 입자추적법 중 패턴상관법을 적용하여 전유동장 및 임의 단면에서의 속도분포를 구하였다. 수치해석에 있어서는 SOLA알고리즘을 사용하였으며, 유량계수, 속도, 압력분포 및 주파수분석을 통한 유동특성을 체계적으로 고찰하였다.

2. PIV

2-1. 동일입자추적

본 연구에서 여기에서 기술하는 상관법은 농도패턴상관법^{(1),(2)}이다. 그림2.1은 상관법의 원리도를 나타낸다. 2개의 상관영역 간의 농도레벨 f, g 에 대한 상관계수를 다음 식으로부터 구한다.

$$C_{fg} = \frac{\sum_{i=1}^{n^2} (f_i - \bar{f})(g_i - \bar{g})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n^2} (f_i - \bar{f})^2 \sum_{i=1}^{n^2} (g_i - \bar{g})^2}} \quad (2.1)$$

단 \bar{f}, \bar{g} 는 f_i, g_i 각각의 상관영역 내의 평균치이다. 탐색영역 내에 존재하는 2프레임의 입자도심위치에서 모든 경우에 대하여 상관연산을 행한다. 구해진 상관값 중 가장 큰 값을 가지는 2프레임 상관영역의 중심점을 속도벡터의 종점으로 정하고 이와 같은 과정을 1프레임에 존재하는 모든 입자에 대하여 행함으로써 전 영역의 속도벡터를 구할 수 있게 된다.

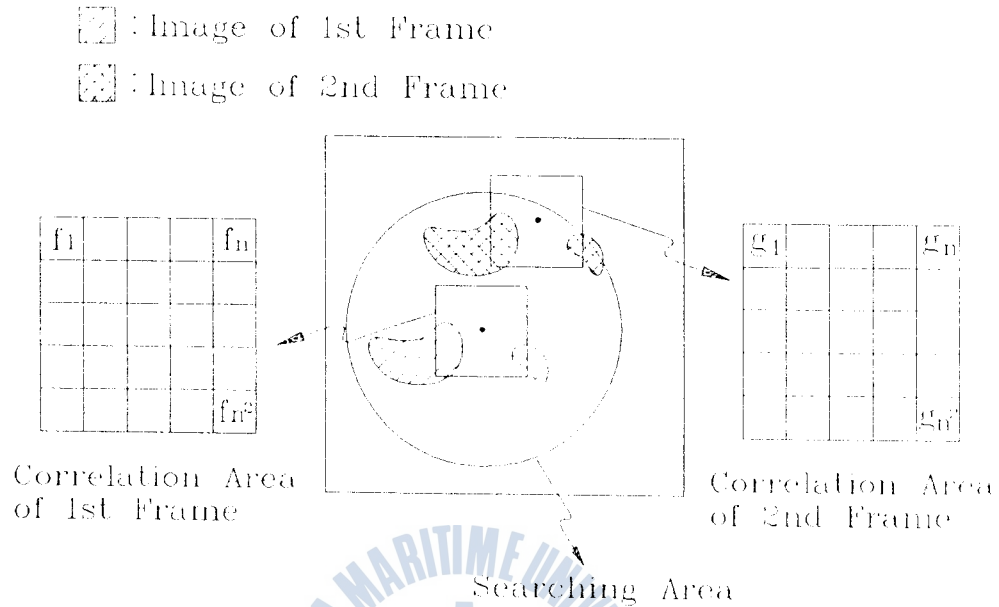


Fig.2.1 Principle Diagram of Gray Level Correlation Method

2-2. 결과 및 고찰

Table 2.1 Experimental Conditions

Pipe Length	980mm	Downstream Pipe Length	615mm
Pipe Diameter	90mm	Orifice Reynolds Number	1×10^3 , 2.5×10^3
Orifice Thickness	5mm	Orifice Diameter	45mm, 67.5mm
Orifice Location from Pipe Inlet	360mm	Ratio of Orifice Hole to Pipe Diameter	0.5, 0.75

표2.1은 원관 및 오리피스의 규격을 나타낸다. 그림2.2는 오리피스유동장 및 화학처리시스템을 포함한 실험장치 구성을 보여주고 있다.

계측된 순간속도벡터를 임의의 5사각분을 평균하여 시간평균속도장을 구하였으며, 39×39 의 크기를 갖는 정방격자상에 배치하여 표시하였다. 대상영역은 오리피스관을 전후로 직경만큼 떨어진 위치에서의 단면으로 정하였다. 그림2.3(a), (b)는 $Re_d=2.5 \times 10^3$, $\beta=0.5$ 에서의 순시속도벡터와 시간평균 속도벡터를 오리피스 전방 1D, 후방 1D의 영역에서 동일입자추적으로 얻어진 결과를 나타낸다. 여기서 D는

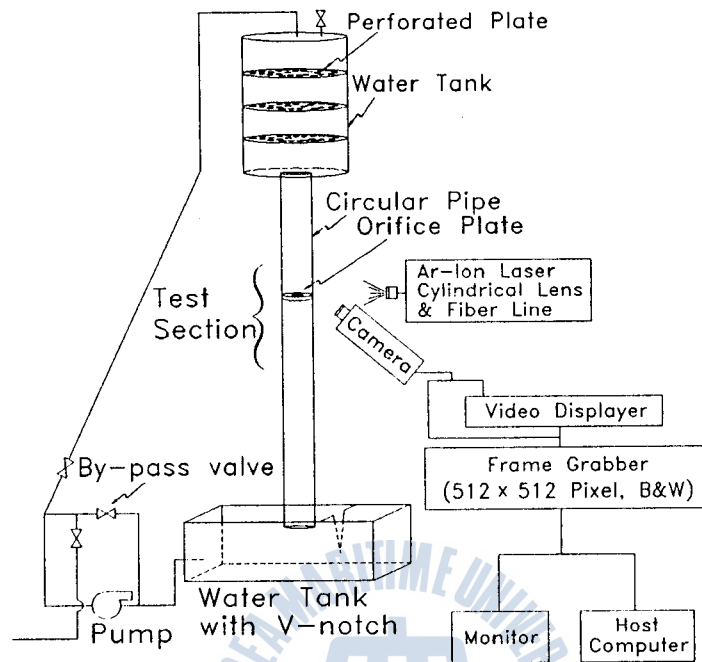


Fig.2.2 Schematic Diagram of Experimental System

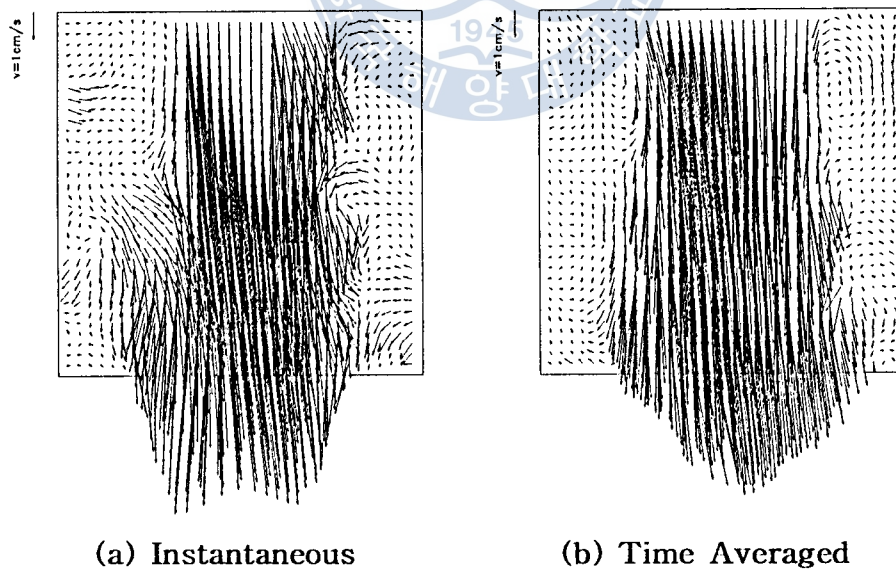


Fig.2.3 Velocity Vectors at 1D Section downstream from the Orifice Plate ($Re=2.5 \times 10^3$, $\beta=0.5$)

관경을 나타낸다.

오리피스 상류측의 유속이 관 중심부에서 높아지고 있다는 것을 그림2.4 및 그림2.5로부터 알 수 있다. 그림2.5(b)를 보면 유체가 오리피스공에 접근하면서 가속되기 시작하여 오리피스공을 통과한 후 제트류를 형성한 흐름이 하류측으로 가면서 급히 관전체로 확대되어 가고 있음을 보이고 있다. 또한 오리피스를 통과한 직후에는 제트류의 코아부분에서보다 오리피스관의 끝단과 제트류코아의 중간부분에서 유속이 가장 높게 나타나고 있으며, 오리피스관으로부터 약 1D부근에서 코아부분의 유속이 가속되고 있음을 볼 수 있다.

3. 수치해석

비압축성, 비정상, 점성흐름에 대하여 선회류가 없는 축대칭흐름의 원통좌표계상의 2차원 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식을 보존형으로 나타내면 다음과 같다^{(3),(4)}.

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{v_r}{r} = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} + \frac{\partial (v_r v_x)}{\partial r} + \frac{\partial (v_x v_x)}{\partial x} + \frac{v_x v_r}{r} \quad (3.2)$$

$$= -\frac{\partial p}{\partial x} + g_x + \frac{1}{\text{Re}} \left[\frac{\partial^2 v_x}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_x}{\partial r} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} \right]$$

$$\frac{\partial v_r}{\partial t} + \frac{\partial (v_r v_r)}{\partial r} + \frac{\partial (v_x v_r)}{\partial x} + \frac{v_r^2}{r} \quad (3.3)$$

$$= -\frac{\partial p}{\partial r} + g_r + \frac{1}{\text{Re}} \left[\frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial x^2} - \frac{v_r}{r^2} \right]$$

여기서 압력 p 는 밀도 ρ 으로 나누어진 값이고, (g_x, g_r) 은 각각 (x, r) 방향의 중력가속도를 표시한다.

그림3.1은 수치해석을 위한 계산영역을 보이며, 표3.1은 계산조건을 나타낸다. 반경방향으로는 등간격격자를 사용하고, 오리피스관 부근에서의 해상도를 높이기 위하여 축방향으로는 부등간격격자를 사용하였다.

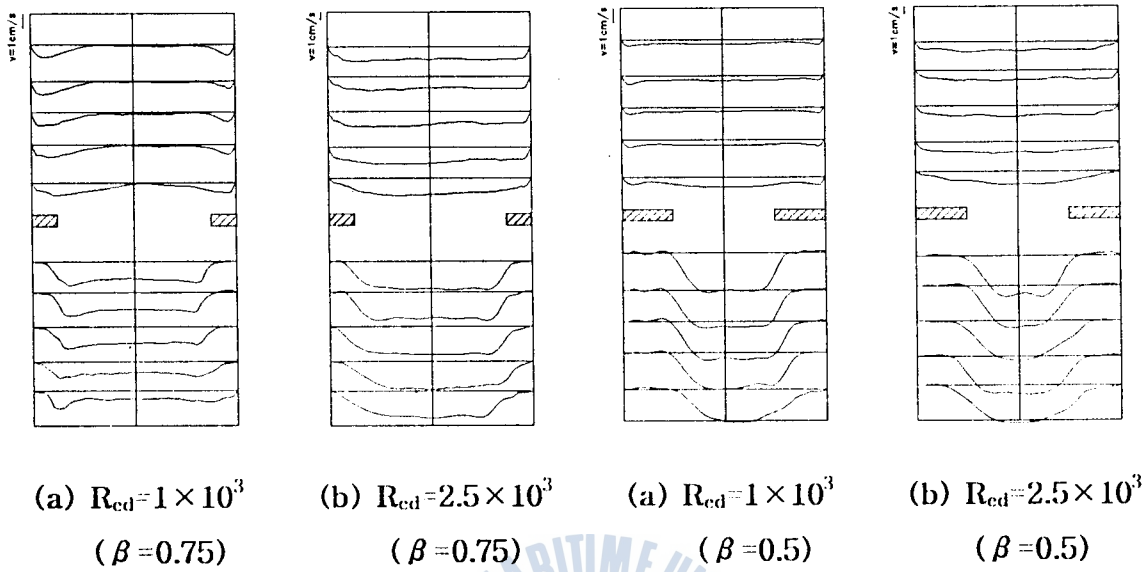


Fig.2.4 Velocity Distributions Fig.2.5 Velocity Distributions

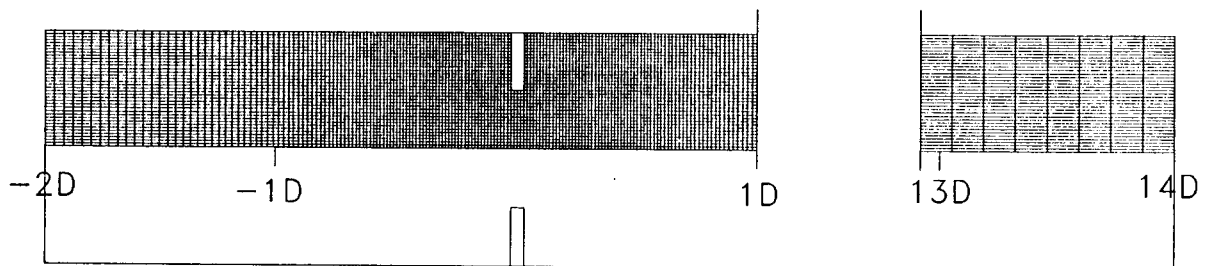


Fig.3.1 Calculation Domain(D =Pipe Diameter)

Table 3.1 Computation Conditions

Pipe Diameter	D		Orifice Radius	r_o	0.25R, 0.5R, 0.75R
Pipe Radius	R		Orifice Reynolds Number	Re_d	1×10^3 , 2.5×10^3 , 5×10^3 , 1×10^4
Pipe Length	L	16D	Grid Number	$N_x \times N_r$	338 × 38
Orifice Location	L_1	2D from Inlet	Max. Grid Size		0.27
Downstream Pipe Length	L_2	14D	Min. Grid Size		0.028
Orifice Thickness	t	D/18			

3-1. 오리피스제트의 유동특성

그림3.2(a)를 보면 오리피스에서 급속하게 가속되면서 제트류를 동반한 강한 전단류가 형성되고 다수의 작은 와열의 거동이 나타나고 있다. 같은 레이놀즈수에서 그림3.3 및 그림3.4와 같이 개구비를 증가시켰을 경우, 와의 운동영역은 보다 넓어지고 있으며, 오리피스 하류측의 압력분포가 와를 중심으로 형성되어 있고, $\beta = 0.25$ 에서 이 경향은 더욱 크게 나타난다. 그림3.5(a), (b), (c)는 $Re_d = 5 \times 10^3$, $\beta = 0.5$ 에 있어서 무차원시간 100-150까지를 시간평균한 속도벡터, 유선도, 와도 및 압력분포를 각각 나타내고 있다. 순시적인 특성과는 달리 제트류 주변에 다수 형성되었던 와의 거동은 보이지 않고 있으며, 일정한 구조를 갖는 균일한 유동패턴을 보이고 있다.

그림3.6(a)는 관중심에서의 시간평균 속도를 나타낸 것이다. 오리피스공을 통과하면서 급격히 흐름이 변한 후의 유동은 변동은 보이지 않고 하류로 흘러가고 있다. 그림(b)는 축방향으로 벽면에서의 압력을 나타낸다.

3-2. 주파수특성

그림3.7은 $Re_d = 5 \times 10^3$, $\beta = 0.25, 0.5, 0.75$ 에 대한 주파수특성을 나타낸다. $\beta = 0.5$ 에서는 약 1D에서 같은 크기의 두개의 와가 합류함으로써 주파수가 약 1/2 떨어

Table 3.1 Computation Conditions

Pipe Diameter	D		Orifice Radius	r_o	0.25R, 0.5R, 0.75R
Pipe Radius	R		Orifice Reynolds Number	Re_d	1×10^3 , 2.5×10^3 , 5×10^3 , 1×10^4
Pipe Length	L	16D	Grid Number	$N_x \times N_r$	338 × 38
Orifice Location	L_1	2D from Inlet	Max. Grid Size		0.27
Downstream Pipe Length	L_2	14D	Min. Grid Size		0.028
Orifice Thickness	t	D/18			

3-1. 오리피스제트의 유동특성

그림3.2(a)를 보면 오리피스에서 급속하게 가속되면서 제트류를 동반한 강한 전단류가 형성되고 다수의 작은 와열의 거동이 나타나고 있다. 같은 레이놀즈수에서 그림3.3 및 그림3.4와 같이 개구비를 증가시켰을 경우, 와의 운동영역은 보다 넓어지고 있으며, 오리피스 하류측의 압력분포가 와를 중심으로 형성되어 있고, $\beta = 0.25$ 에서 이 경향은 더욱 크게 나타난다. 그림3.5(a), (b), (c)는 $Re_d = 5 \times 10^3$, $\beta = 0.5$ 에 있어서 무차원시간 100-150까지를 시간평균한 속도벡터, 유선도, 와도 및 압력분포를 각각 나타내고 있다. 순시적인 특성과는 달리 제트류 주변에 다수 형성되었던 와의 거동은 보이지 않고 있으며, 일정한 구조를 갖는 균일한 유동패턴을 보이고 있다.

그림3.6(a)는 관중심에서의 시간평균 속도를 나타낸 것이다. 오리피스공을 통과하면서 급격히 흐름이 변한 후의 유동은 변동을 보이지 않고 하류로 흘러가고 있다. 그림(b)는 축방향으로 벽면에서의 압력을 나타낸다.

3-2. 주파수특성

그림3.7은 $Re_d = 5 \times 10^3$, $\beta = 0.25, 0.5, 0.75$ 에 대한 주파수특성을 나타낸다. $\beta = 0.5$ 에서는 약 1D에서 같은 크기의 두개의 와가 합류함으로써 주파수가 약 1/2 떨어

PIV 및 CFD에 의한 오리피스제트의 유동특성에 관한 연구

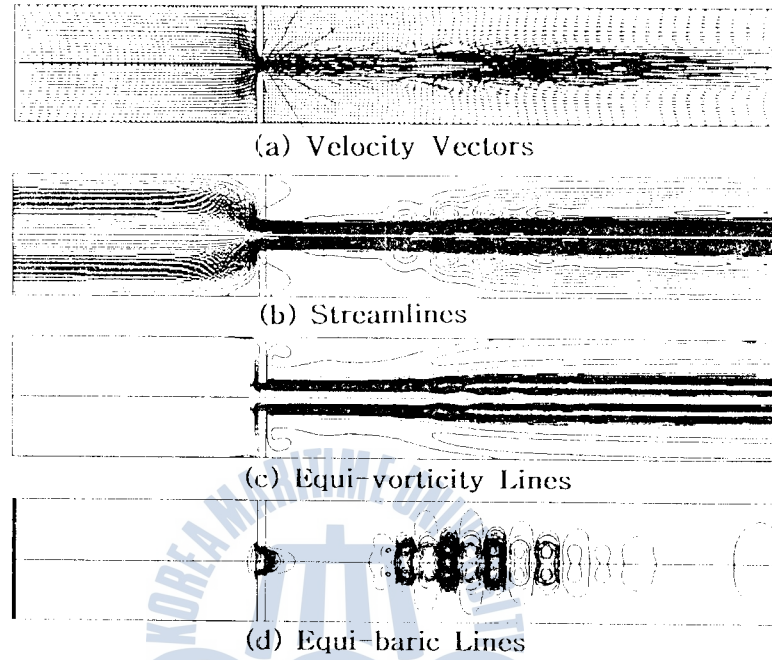


Fig.3.2 Instantaneous Velocity Vectors, Streamlines, Equi-Vorticity Contours and Pressure Distributions ($Re = 5 \times 10^3$, $\beta = 0.25$, $T = 100$)

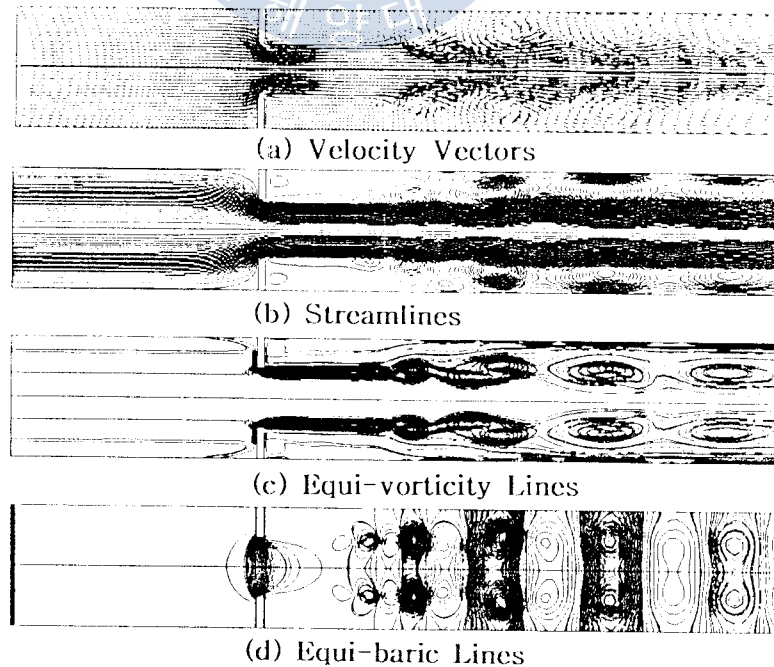


Fig.3.3 Instantaneous Velocity Vectors, Streamlines, Equi-Vorticity Contours and Pressure Distributions ($Re = 5 \times 10^3$, $\beta = 0.5$, $T = 100$)

韓國海洋大學校 大學院 論文集 第17輯

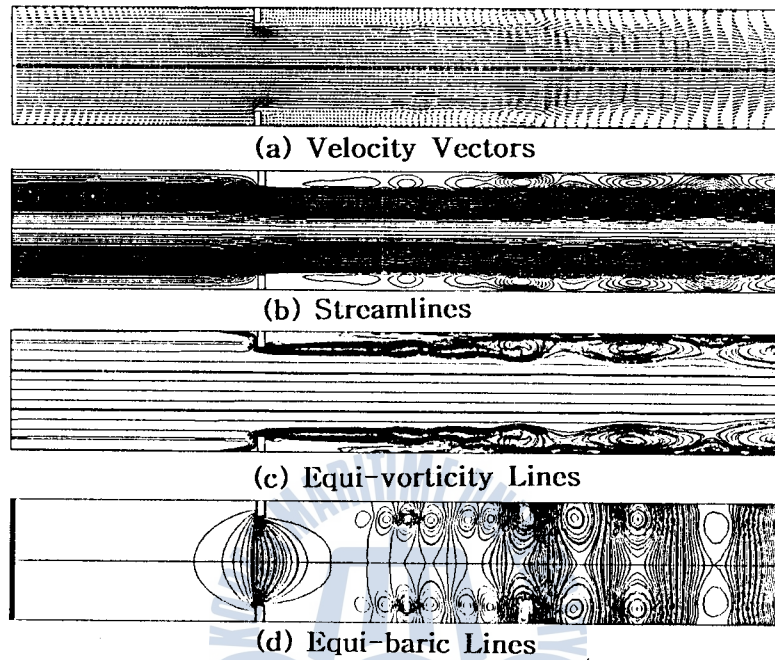


Fig.3.4 Instantaneous Velocity Vectors, Streamlines, Equi-Vorticity Contours and Pressure Distributions ($Re=5 \times 10^3$, $\beta=0.75$, $T=100$)

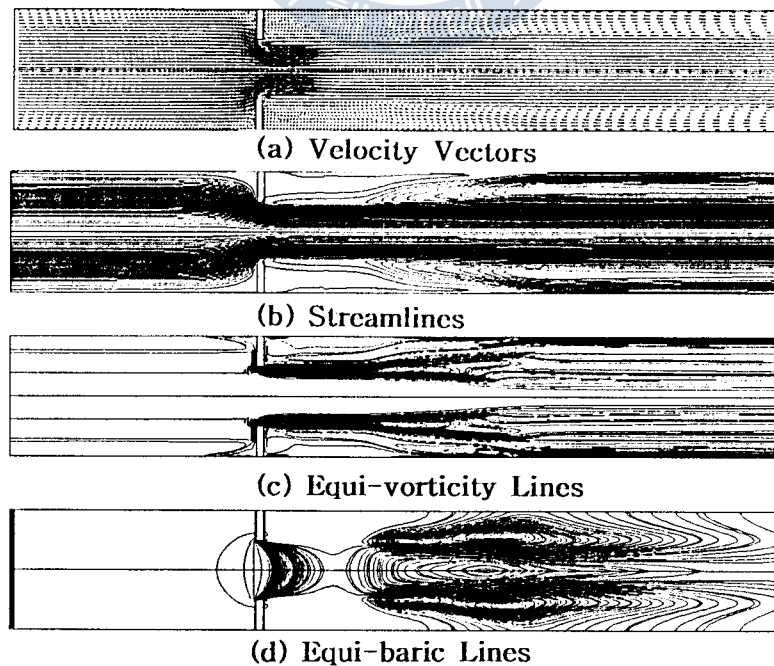


Fig.3.5 Time Averaged Velocity Vectors, Streamlines, Equi-Vorticity Contours and Pressure Distributions ($Re=5 \times 10^3$, $\beta=0.25$, $T=100$)

PIV 및 CFD에 의한 오리피스제트의 유동특성에 관한 연구

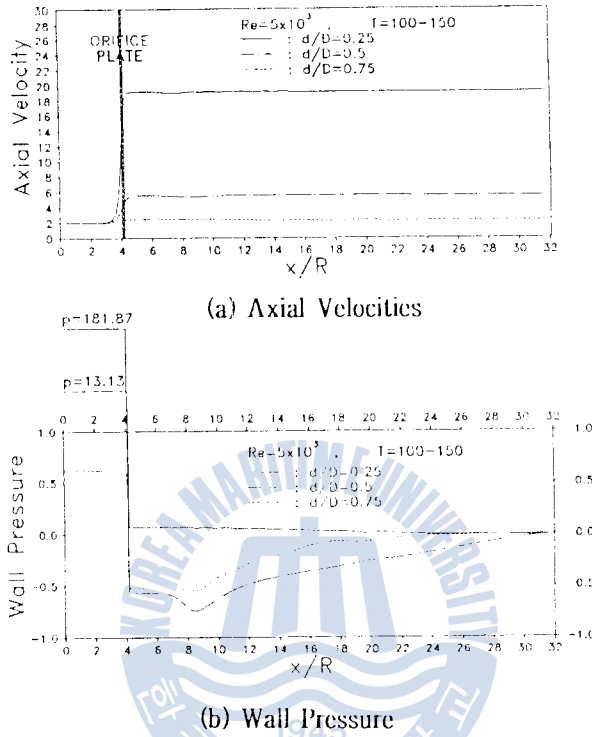


Fig.3.6 Time Averaged Axial Velocity along the Centerline and Time Averaged Wall Pressure

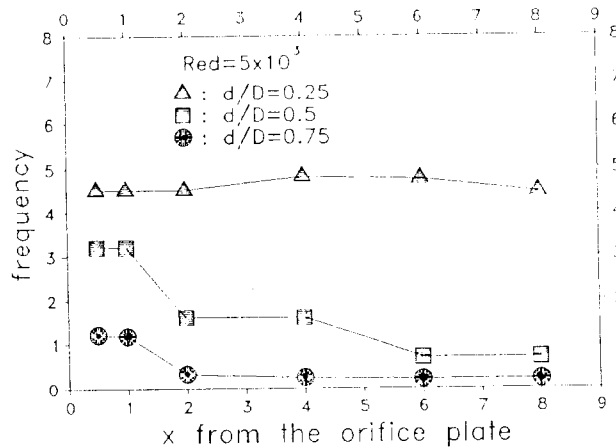


Fig.3.7 Frequency Characteristics for Re_d and β

지게 되고, 다시 6D에서 같은 크기의 두개의 와가 합류함으로써 변동주파수가 약 1/4 떨어지게 된다. $\beta=0.75$ 에서는 1D에서 와가 방출하여 2D에서 같은 크기의 두개의 와와 방출와의 두배 규모의 와가 합류하여 변동주파수가 약 1/4로 떨어지게 되며, $\beta=0.5$ 에서와 같이 6D에서 다시 합류하지 않고 하류측으로 관벽을 따라 이동하고 있다.

4. 결론

본연구의 목적은 실험 및 수치해석을 통하여 오리피스제트의 유동특성을 고찰하는데 있다. PIV의 적용예로서 오리피스가 설치된 원관류에 적용하여 유동을 고찰하였다. 대상 레이놀즈수는 1×10^3 , 2.5×10^3 이며, $\beta=0.5$, 0.75 이다. PIV에 의해 얻어진 속도벡터분포 및 임의 단면에서의 유속분포는 오리피스 주위의 유동특성을 잘 보여주고 있으며 관벽을 따라서 이동하는 와를 확인할 수 있었다.

한편 CFD에 있어서는 2차원의 축대칭 원통좌표계에서 SOLA알고리즘을 채택하였다. 오리피스레이놀즈수 $Re_d=1 \times 10^3$, 2.5×10^3 , 5×10^3 , 1×10^4 및 개구비 $\beta=0.25$, 0.5 , 0.75 에 대하여 계산을 행하였다. 그 결과 오리피스가 설치된 원관은 기하학적으로 단순한 형상을 하고 있으나 유동패턴이 급변하는 임계레이놀즈수를 넘게 되면 대단히 복잡한 흐름으로 변함을 알 수 있었다. 오리피스판 직후의 박리역으로부터 방출하여 원관벽면을 따라서 움직이는 다수의 와가 관찰되었으며, 순시적으로는 불규칙한 유동을 보이고 있으나 시간평균적으로는 단순한 유동구조를 나타내었다.

5. 참고문헌

- (1) 速水洋, 濃度パターン解析, 畫像解析技術を利用した流動解析講習會教材, 日本機械學會, 1993, pp.7-14.
- (2) 加賀, 輝度差の累積法(パターン相關のバリエーション), 第3回手法別講習會教材, 可視化情報學會, 1992, pp.18-22.

- (3) 최장운, 김춘식, 이영호, 고레이놀즈수에 대한 대류항 개선 및 응용, 한국박용기관학회 춘계학술강연회 초록집, 1994, pp.23-31.
- (4) Y.H.Lee, C.S.Kim, J.W.Choi, A Revised Convective Scheme for High Reynolds Number and Its Application, Proc. of the Third JSME-KSME Fluids Engineering Conference, 1994, pp.312-316.



