

수평원통관 내에서 원형 및 정사각 실린더의 후류에 관한 실험적 연구 An Experimental Study on Wakes behind a Circular and a Square Cylinder in a Horizontal Circular Tube

장 태 현*, 이명재**
Tae-Hyun Chang , Myung Jae Lee

< Abstract >

An experimental study was performed for turbulent flow behind a circular and a square cylinder by using 2-D PIV(Particle Image Velocimetry) technique in a cylindrical tube. The Reynolds number investigated were 10,000, 30,000 and 50,000. The measuring system consists of CCD camera, Ar-ion laser, image grabber and a host computer. The mean velocity vector, time mean axial velocity, turbulent intensity and Reynolds shear stress were measured along the test tube. The results are compared each other for the circular and the square cylinder.

Key Words : Particle Image Velocimetry, Bluff body, Acoustic Optical Modulator

Nomenclature

- A: Cross Section Area
- b: a side length of the square
- D: the diameter of the test section
- d: the diameter of the circular cylinder
- U: Axial Velocity
- V: Radial Velocity
- \bar{U} : Time mean Axial Velocity
- \bar{u} : Axial Fluctuation Velocity
- \bar{v} : Radial Fluctuation Velocity
- X: Axial Coordinate
- y: Radial Distance

1. 서론

원주나 사각 실린더 같은 구조물(bluff body) 주위의 유동현상은 유체역학이나 산업 현장에서 매우 중요하고 고전적인 관심사였다. 이와 같은 유동장 내에서 장애물에 의한 후류의 영향은 유동의 박리와 와(渦)를 형성하여 항공역학적인 항력, 구조물의 진동 그리고 난류

혼합과정에 직접적인 영향을 미치므로 지금까지 많은 연구가 진행되고 있다.

Coutanceau 등¹⁾은 원형실린더 후류에서 Reynolds 수 5~40 범위에서 속도를 측정하여 이론적 계산 결과와 비교하였고, Owen 과 Johnso 등²⁾은 위상평균법을 이용하여 난류구조를 해석하였다. Cantwell 과 Coles 등^{3,4)}은 실린더의 근접후류에서 Flying Hot-Wire를 이용하여 난류운동방정식중 레일놀즈 평균 항을 측정하여 난류구조를 설명하였다.

부정숙⁵⁾은 2차원 원주후류 유동을 통계학적인 방법을 이용하여 난류특성을 분석하였고, 사각 관에 관한 연구는 조자희⁶⁾는 열선풍속계를 이용하여 정사각관 후류에서 평균속도, 난류강도 및 운동에너지 등을 구하였다.

이와 같은 연구결과에서 보면 2000년대 이전은 열선풍속계나 LDV기법 그리고 스모그 등의 가시화 기법을 이용하여 각종 실린더의 후류에 관하여 연구하였다. 이 경우 그 결과는 한 점에서 점 측정에 불과하였고 열선풍속

* 정희원, 경남대학교 기계자동화공학부, 교수, 工博
E-mail : changtae@kyungnam.ac.kr

계등을 사용할 경우 프롱(prong)의 간섭을 배제할 수 없다.

근래에 와서 이 현 등⁷⁾은 Multivision PIV(Particle Image Velocimetry) 기법을 이용하여 단순 물체 후류에서 유동의 특성을 연구하였고, Daichin 등⁸⁾은 타원형의 구조물의 후류에서 PIV 기법을 사용하여 주 유동속도와 난류강도를 구하였다. 사각형의 실린더 후류에 대한 연구로는 Jang 등⁹⁾은 직사각형 실린더에서 수치해석 및 PIV기법으로 평균속도를 구하였으며, 이만복 등¹⁰⁾은 정사각 실린더에서 PIV 기법을 이용하여 근접후류에 대하여 연구하였고, Doh¹¹⁾는 3차원 PIV 기법을 이용하여 원형실린더 후류에 대하여 연구하였다.

2000년대에서부터 PIV기법을 사용하기 시작하였지만 국내에서는 이 분야에 대한 발표된 연구 결과가 적고, 특히 난류성분을 포함한 경우는 더욱 적은 편이다. 또한, 이들 연구가 대부분이 직사각형 수조를 사용하고 있고 원형관 내에서 연구는 드문 편이다.

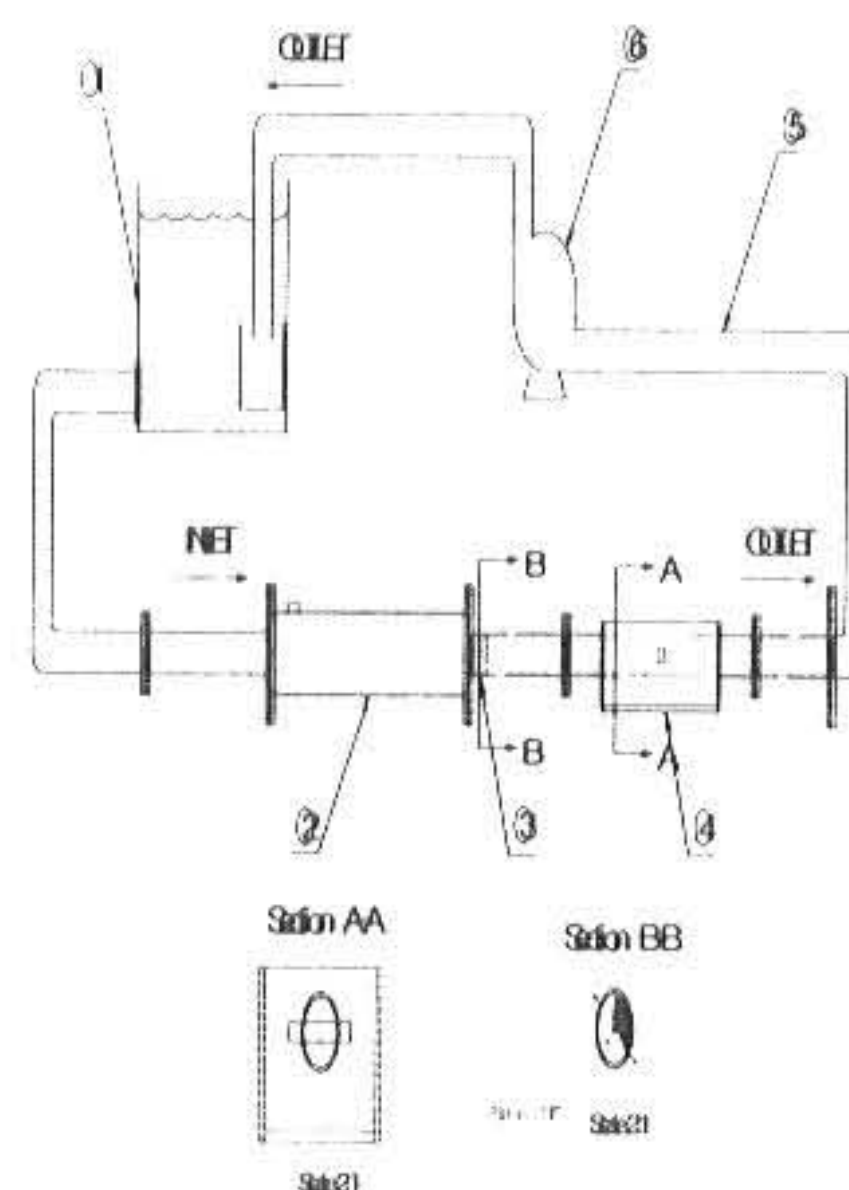
본 연구에서는 2차원 PIV 기법을 이용하여 수평 원형 관내에서 원형 관과 정사각 실린더의 후류의 난류유동에서 평균속도, 난류강도 등을 상호 비교 연구하여 간결하고 효율적인 열교환기의 설계에 기여하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험 장치이다. 이 실험장치는 선회유동(swirling flow)과 난류유동(turbulent flow)을 실험할 수 있도록 제작하였다. 테스트튜브는 $\varnothing 90\text{mm}$ 로 전체 길이는 3,000mm이고 두께 5mm의 아크릴 관으로 제작하였다. 테스트튜브 내에 설치한 원형실린더는 직경 20mm의 환봉을 설치하였고, 정사각 실린더는 15mm×15mm의 정사각 봉을 설치하였다. PIV시스템을 사용할 경우 원 관의 테스트 튜브 외면에서 발생할 수 있는 유체의 밀도 차로 인한 굴절에 의한 측정 오차를 줄이기 위하여 테스트튜브 외면에 $300\text{mm}^B \times 200\text{mm}^H \times 600\text{mm}^L$ 의 수조를 만들었다. 작동유체는 물을 사용하고, 물은 물탱크에서 펌프의 흡입에 의하여 선회를 발생시키는 와류실, 테스트튜브 그리고 220V×3.75kW의 펌프를 거쳐서 다시 물탱

크로 돌아가도록 제작하였다. 테스트튜브 내에서 Reynolds 수를 조절하기 위하여 물 펌프의 회전수 조절기를 사용하였다. 비선회인 난류유동인 경우는 균일 유속을 만들기 위하여 정류장치(honey comb)를 테스트튜브 입구에 설치하였다.



| No. | Parts | Material | No. | Parts | Material |
|-----|-----------|----------|-----|-----------|-----------------|
| 1 | Valve | Plastic | 2 | Solenoid | Alloy |
| 3 | Honeycomb | Aluminum | 4 | Test tube | Alloy |
| 5 | Filter | Filter | 6 | Valve | Stainless Steel |

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus

2.2 실험방법

Fig. 2는 본 연구에 사용된 PIV실험의 계통도이다. 본 연구에서 광원은 공냉식 500mW Ar-ion 레이저를 사용했다. 광원의 이동을 용이하게 하기 위해 광케이블로 빛을 이동시킬 수 있는 LLSP(laser light sheet probe)를 사용했으며 이 LLSP는 레이저 층의 두께를 약 1mm 정도로 조절할 수 있다. 광케이블의 길이는 약 10m이다. 펄스화된 광원을 얻기 위해서 AOM(Acoustic Optical Modulator)를 사용했다. 유동장의 획득을 위해서 1초에 30장의 이미지를 획득할 수 있는 Panasonic 사의 CCD(Charge couple device)카메라 WV3P310을 사용했다. 영상의 기록을 위해 디지털 레코더가 사용되었다. 그리고 획득된 이미지를 컴퓨터로 0에서 255단계의 gray 레벨로 전송하는 DT3155(640×480 pixel) 보드를 사용했다. 실험에 사용된 입자(particle)는 나일론 12(120 μm)이다. 작업유체는 증류수를 사용했고 실험당시의 온도는 20.8 $^{\circ}\text{C}$ 이었다.

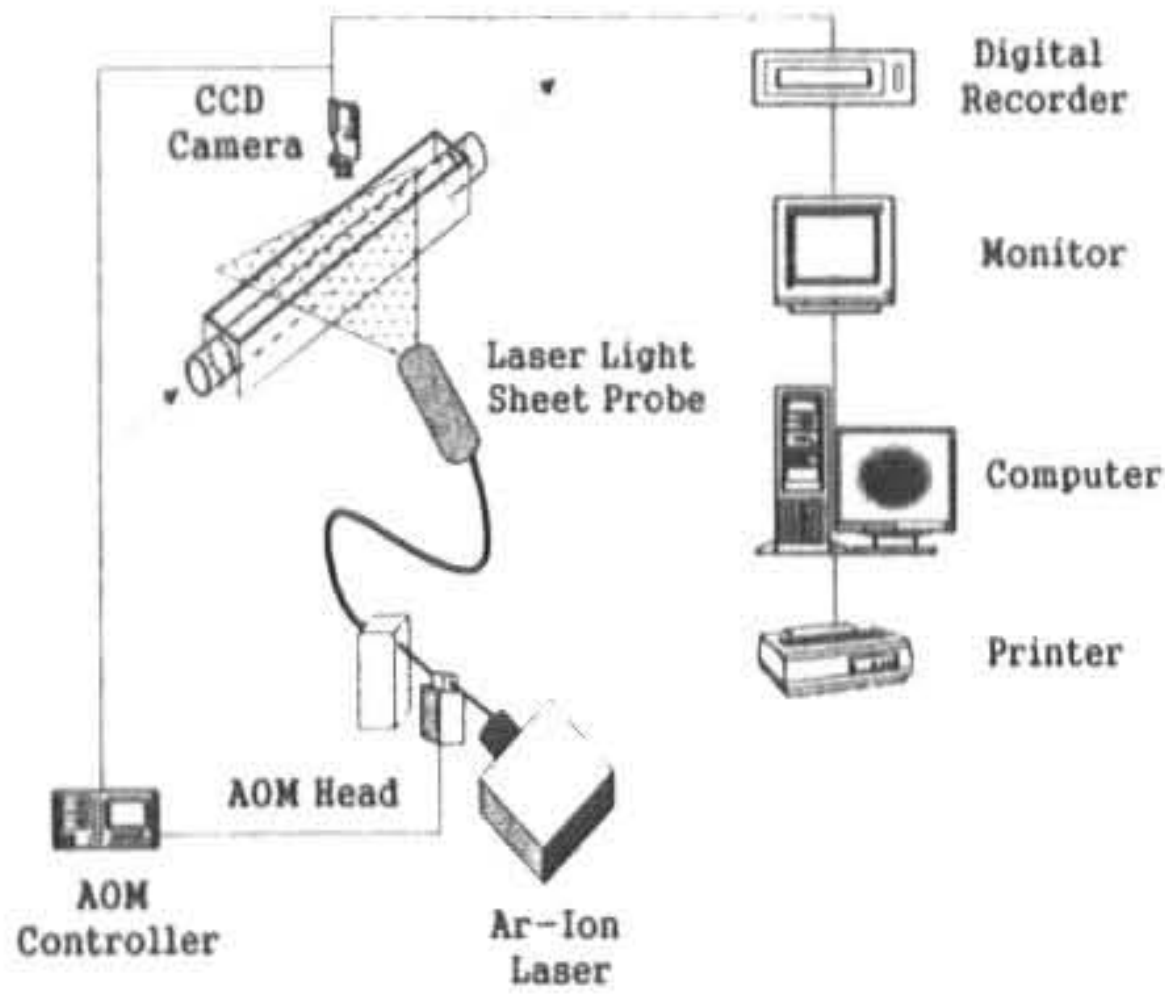


Fig. 2 Schematic arrangement of the PIV system

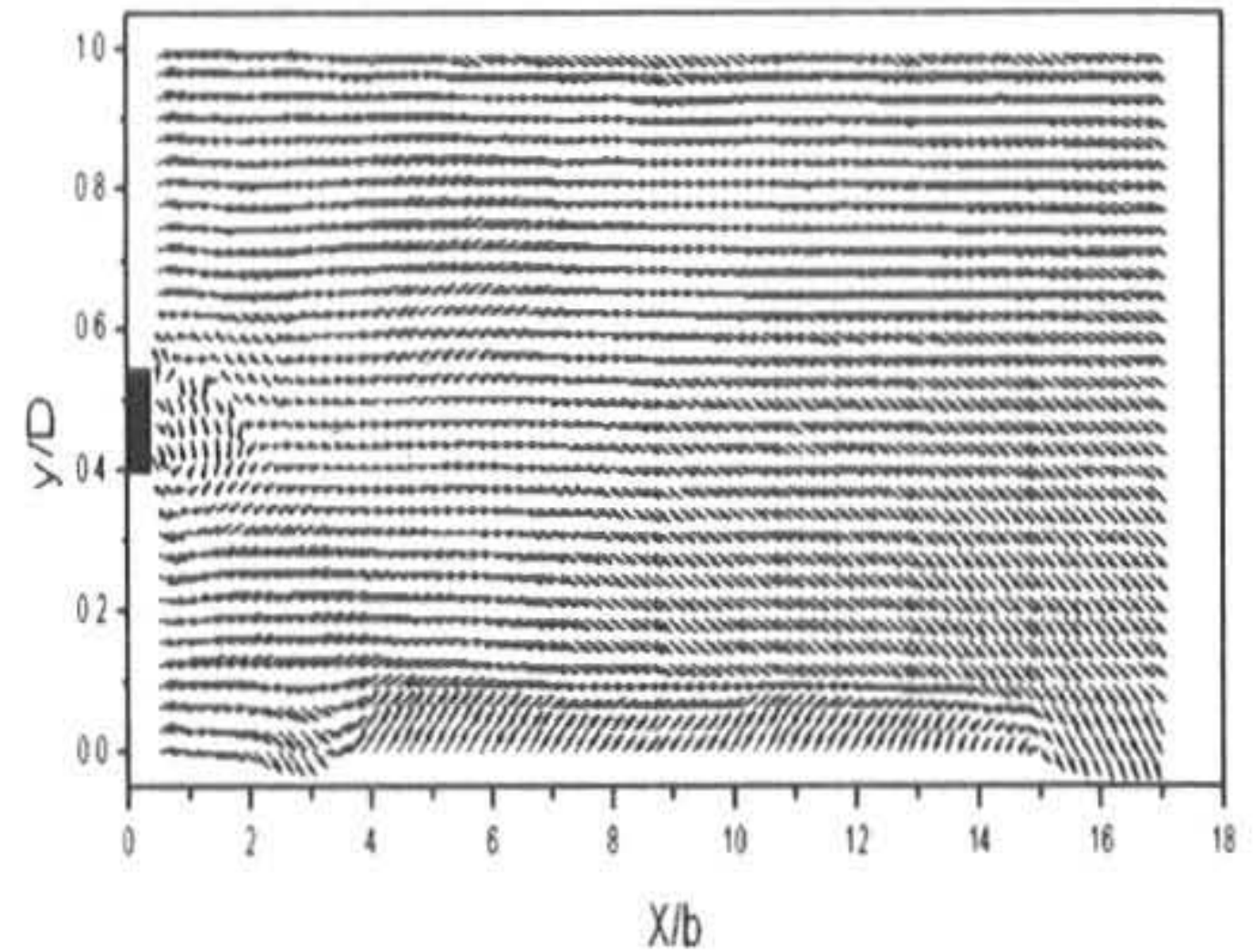


Fig. 4 Instantaneous Velocity Vector field behind the Square cylinder for $Re=10,000$.

3. 실험 결과 고찰

3.1 속도 벡터

Fig. 3은 원형 실린더의 후류에서 순간속도 벡터(Instantaneous Velocity Vector)를 $Re = 10,000$ 에서 나타낸다. 실린더 후류의 속도벡터 유동은 주기적인 형태를 보이고 있다. 초기의 전단층은 실린더의 양쪽으로부터 주기성을 갖고 교대로 박리 되며, 원형형태의 와류를 형성하면서 하류로 유동하고 있다. 이와 같은 현상은 지금까지 발표된 Roshko 등¹²⁾의 연구결과와 유사하다. 즉, Roshko 등¹²⁾에 의하면 이와 같은 와류는 $X/D = 50$ 근처에서 소멸된다고 보고하였다.

Fig. 4는 정사각 실린더의 후류에서 평균속도 벡터를 나타낸다. 원형실린더 보다 강한 재순환 영역이 나타남을 알 수 있다. 이것은 원형실린더에서 보다 박리점이 앞쪽으로 이동되는 원인으로 생각된다.

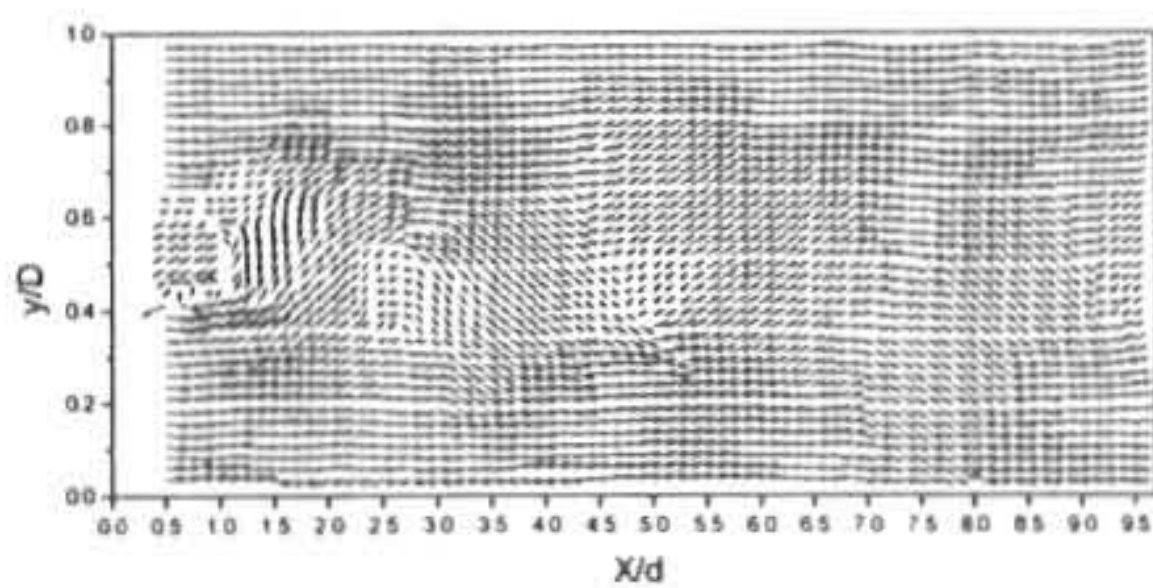


Fig.3 Instantaneous velocity vector field behind the circular cylinder for $Re = 10,000$

3.2 평균속도 분포

Mizota 와 Okajima 등¹³⁾은 열선 프로브를 일렬로 세움으로서 사각 실린더 뒤의 근접영역에서 유동이 역전하는 영역을 측정하였고 유동형태의 변화는 폭과 높이의 비, 경사각의 변화에서 항력과 양력 그리고 스트로울수와 밀접한 관련이 있음을 보였다. Cantwell³⁾은 원형 실린더 후류에서 레이놀즈수 $1.4 \times 100,000$ 일 때 유동이 역전하는 영역이 $1.1d$ 라고 하였고, Owen 등²⁾은 레이놀즈수 $1.67 \times 100,000$ 일 때 D형 모델의 경우는 약 $1.3d$ 라고 하였다.

Fig.5~Fig.7은 $Re=10,000 \sim 50,000$ 까지 원형실린더의 후류에서 축 방향속도를 나타낸다. Fig. 5는 $Re = 10,000$ 에서 축방향 속도를 나타내고 있고, 실린더로부터 $X/d = 0 \sim 2.5$ 근처까지 축 방향 속도는 음의 속도를 나타내고 있다. 그 후 $X/d = 3.0$ 에서 부터는 양의 속도분포로 바뀌고 있다. $Re = 30,000$ 과 $50,000$ 에서는 $X/d = 0.5 \sim 1.0$ 근처에서 음의 속도영역을 나타내고 있다. 이 결과는 Cantwell³⁾의 연구결과와 부합되었다. 즉, Cantwell³⁾은 역전영역이 $1.1d$ 라하였고, Owen 등²⁾은 이 영역이 $1.3d$ 라고 하였다. 그러나 본 연구에서는 이 영역이 $1.1d \sim 1.4d$ 로 나타남을 알 수 있다. 또한, 양 관 벽 으로부터 $y/D = 0.2$ 근처에서는 U/\bar{U} 가 1.5정도의 최고 속도를 지나 관 중심 즉, 실린더 후류에서는 낮은 값을 나타내었다. 이와 같이 최고 음의 속도(U/\bar{U})는 Re 수가 증가할수록 감소하였

고, 이 현상은 원형 실린더 후류에서 발생한 와류가 Re수가 증가할수록 혼합이 증가함으로써 발생한 것으로 생각된다.

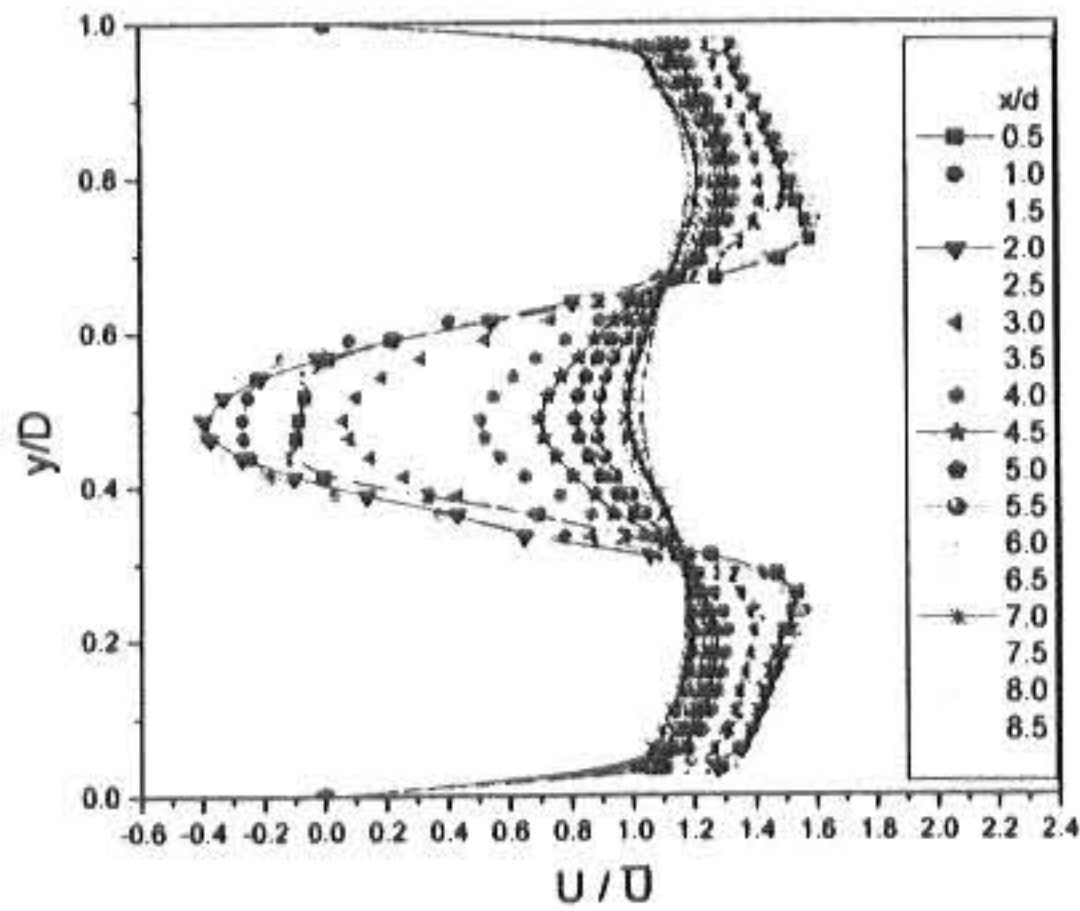


Fig. 5 Time mean axial velocity profiles behind the circular cylinder for Re = 10,000.

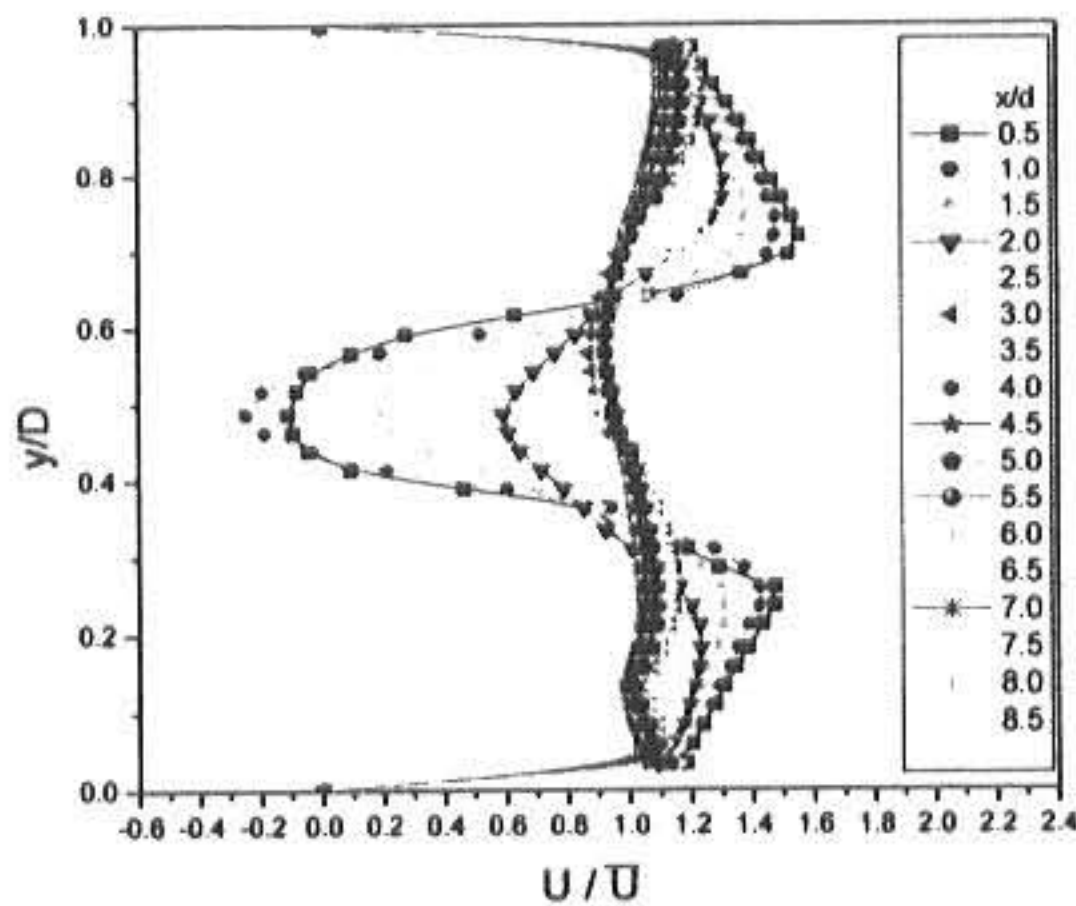


Fig. 6 Time mean axial velocity profiles behind the circular cylinder for Re = 30,000.

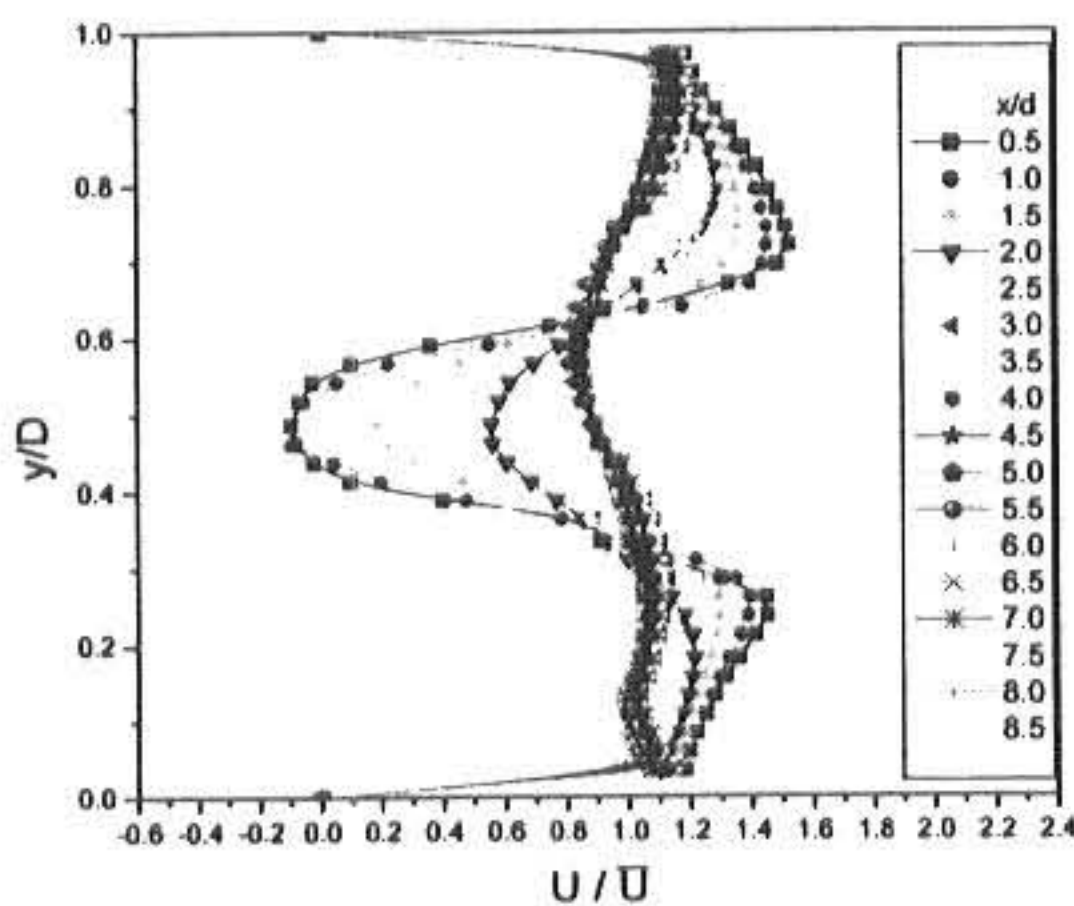


Fig. 7 Time mean axial velocity profiles behind the circular cylinder for Re = 50,000.

Fig. 8 ~ Fig. 10은 Re = 10,000, 30,000 그리고 50,000에서 정직사각 실린더의 후류에서 축방향속도를 나타낸다. Fig. 8은 Re = 10,000

에서 속도분포이고 $X/b = 0.5 \sim 1.0$ 범위에서 음의 속도를 나타내고 있다. 역전 영역은 $1.0b \sim 1.1b$ 정도로 원형 실린더의 경우 보다 짧음을 알 수 있다. U/\bar{U} 의 최고 속도의 위치는 양 벽으로부터 $y/D = 0.2 \sim 0.3$ 근처에서 나타나고 그 값은 $1.4 \bar{U}$ 정도 나타났다. 이와 같은 현상은 Re = 30,000에서도 유사한 결과를 보여주었다. 특이한 현상은 Reynolds 수가 증가 할수록 실린더 후류의 부의 속도영역이 좁아지고 U/\bar{U} 의 최고위치는 $y/D = 0.2 \sim 0.3$ 정도이었다.

Fig. 5 ~ Fig. 7의 원형 실린더의 축방향속도를 비교하면 Re = 10,000에서 원형실린더의 후류의 축방향속 영역이 U/\bar{U} 가 0.2 ~ 0.4 정도로 크게 나타났다.

Reynolds 수가 증가할수록 이 음의 영역이 감소하였지만, 정사각 실린더의 속도 분포가 훨씬 빠르게 감소하였다.

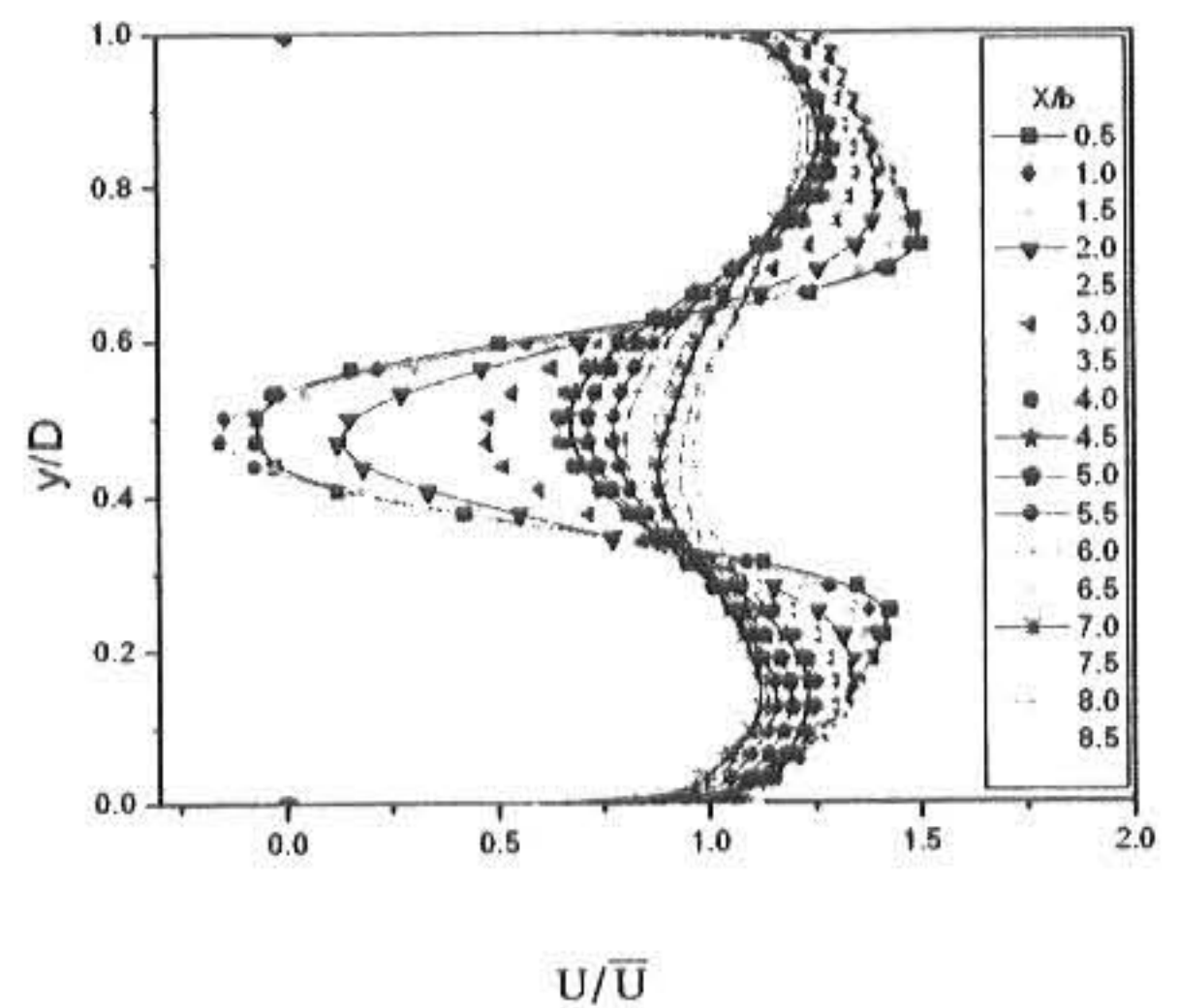


Fig. 8 Time mean axial velocity profiles behind the Square cylinder for Re = 10,000.

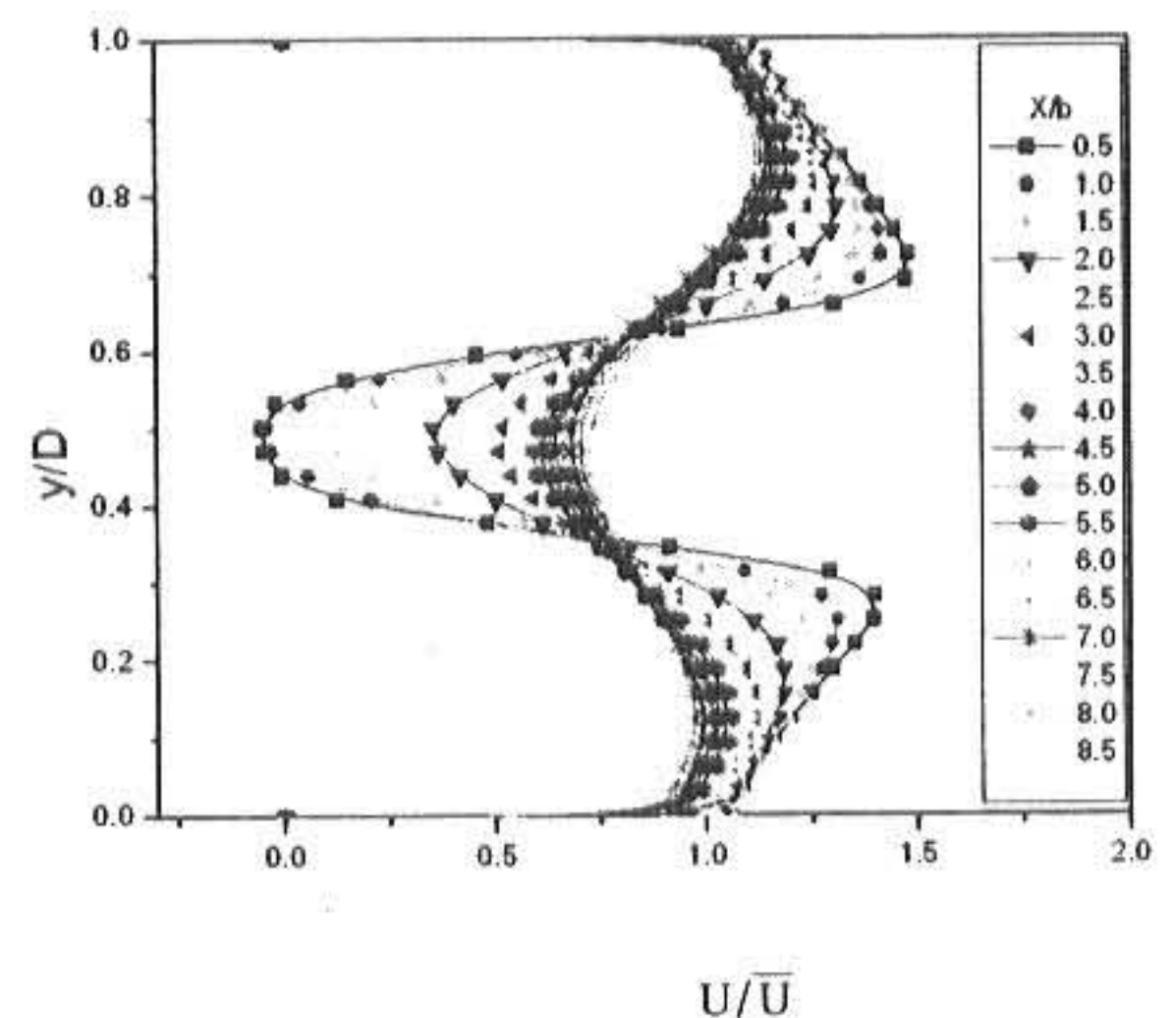


Fig. 9 Time mean axial velocity profiles behind the Square cylinder for Re = 30,000.

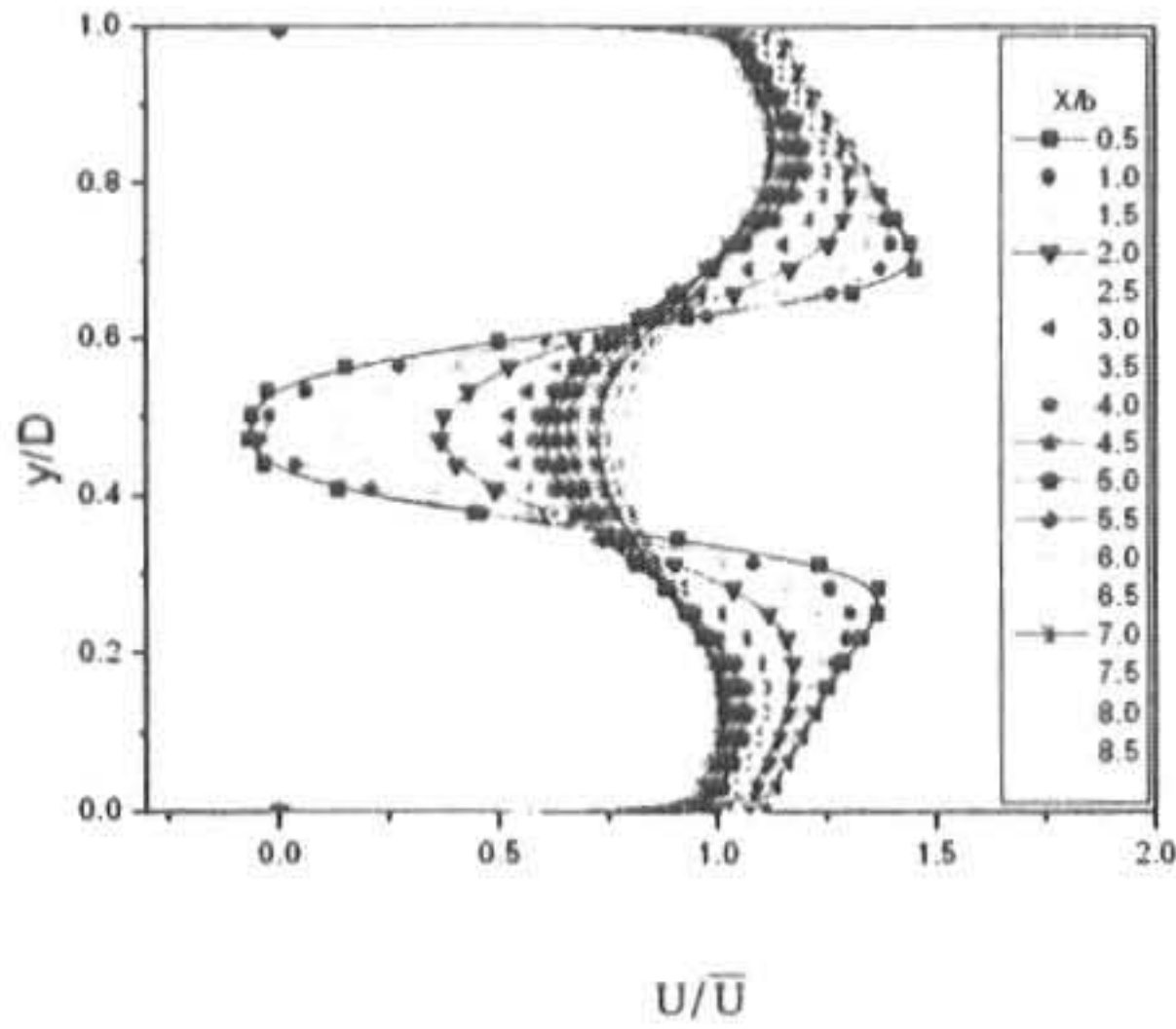


Fig. 10 Time mean axial velocity profiles behind the Square cylinder for Re = 50,000.

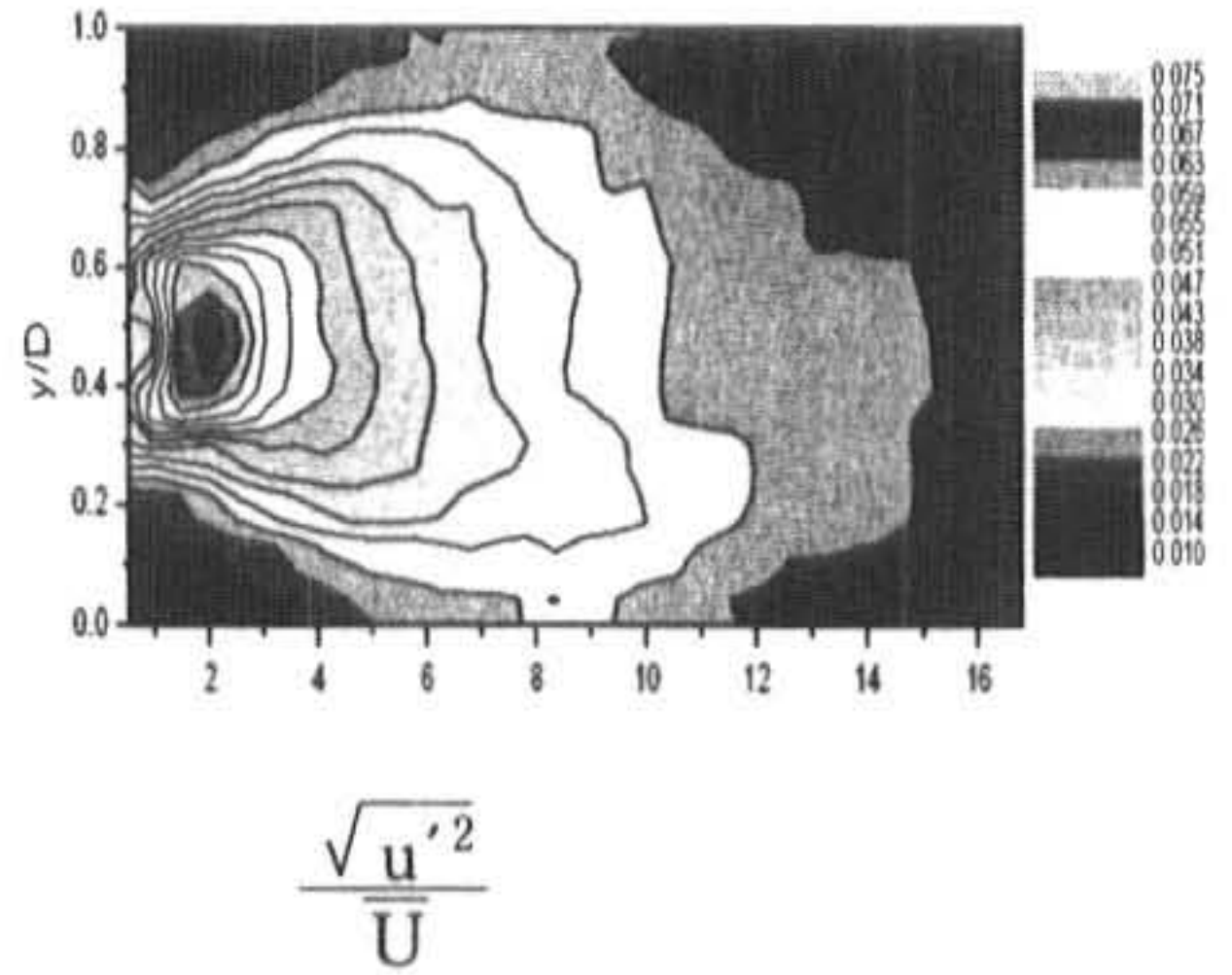


Fig. 12 Contour of axial turbulence intensity distributions behind the square cylinder for Re=30,000.

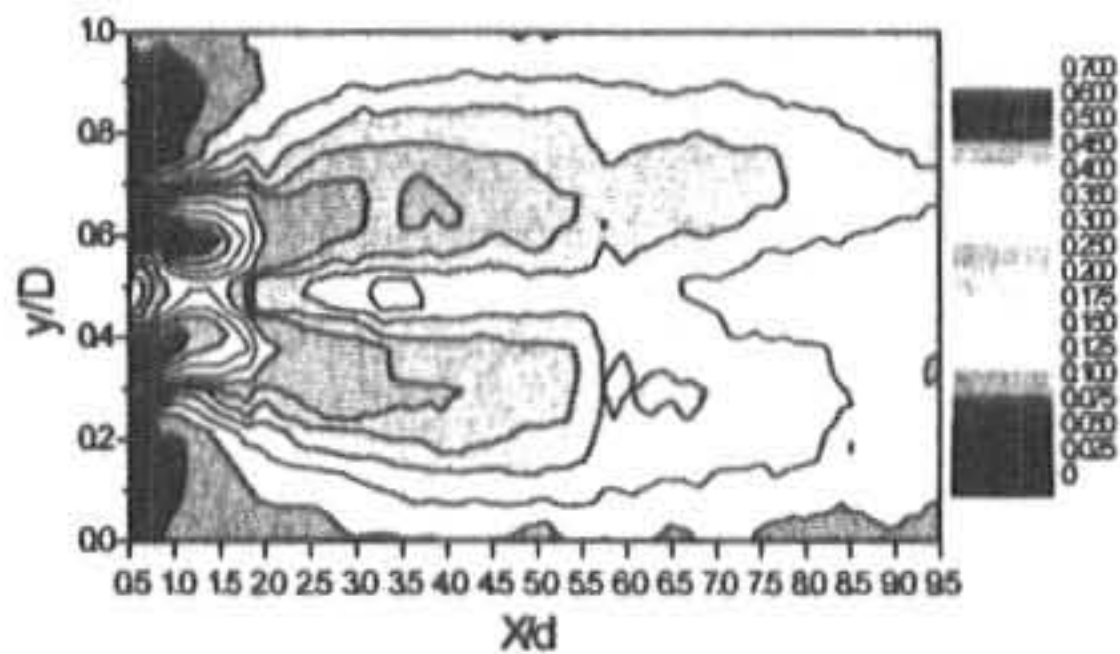


Fig. 11 Contour of turbulence intensity ($\frac{\sqrt{u'^2}}{U}$) distributions behind the cylinder for Re = 30,000

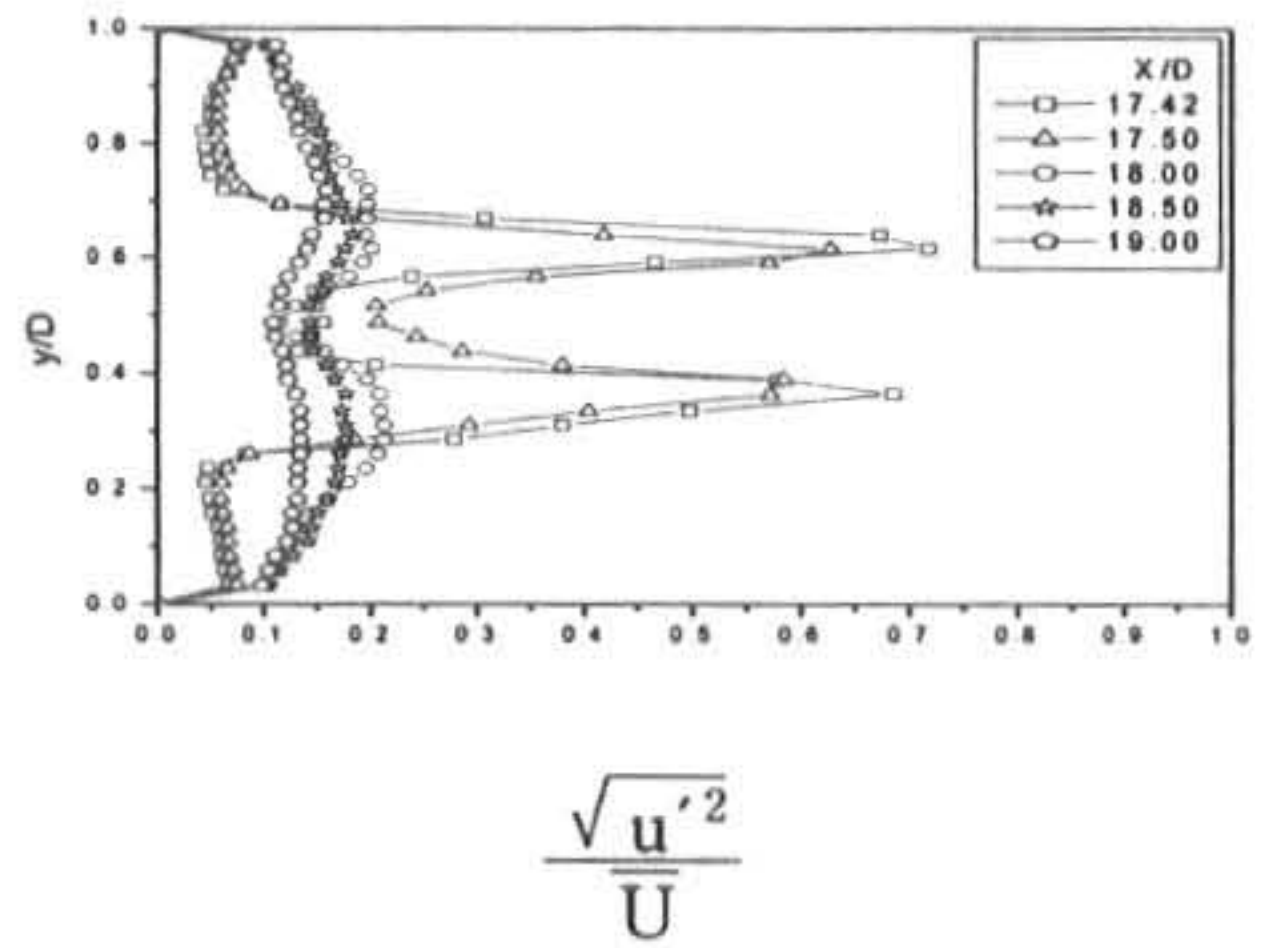


Fig. 13 Time-mean local turbulence intensity profiles behind the circular cylinder for Re = 30,000

3.3 난류강도 및 운동에너지

Fig. 11은 Re = 30,000에서 원형 실린더 후류의 축방향 난류강도의 분포를 나타내고 있다. 실린더 후류에서 난류 강도가 2-cell 현상이 나타남을 볼 수 있다. Fig.13은 Fig.11으로부터 국소 난류강도를 추출한 결과이다. X/d = 17 근처에서 2-cell 현상이 뚜렷이 나타남을 볼 수 있다.

$\frac{\sqrt{u'^2}}{U}$ 의 최고 값은 0.67 ~ 0.7로 나타나고 있다. 난류강도의 최고 값은 관벽으로부터 y/D = 0.37 ~ 0.4의 위치에서 나타났다. 즉, 이 위치는 축방향속도의 최값의 위치와 일치하고 있다

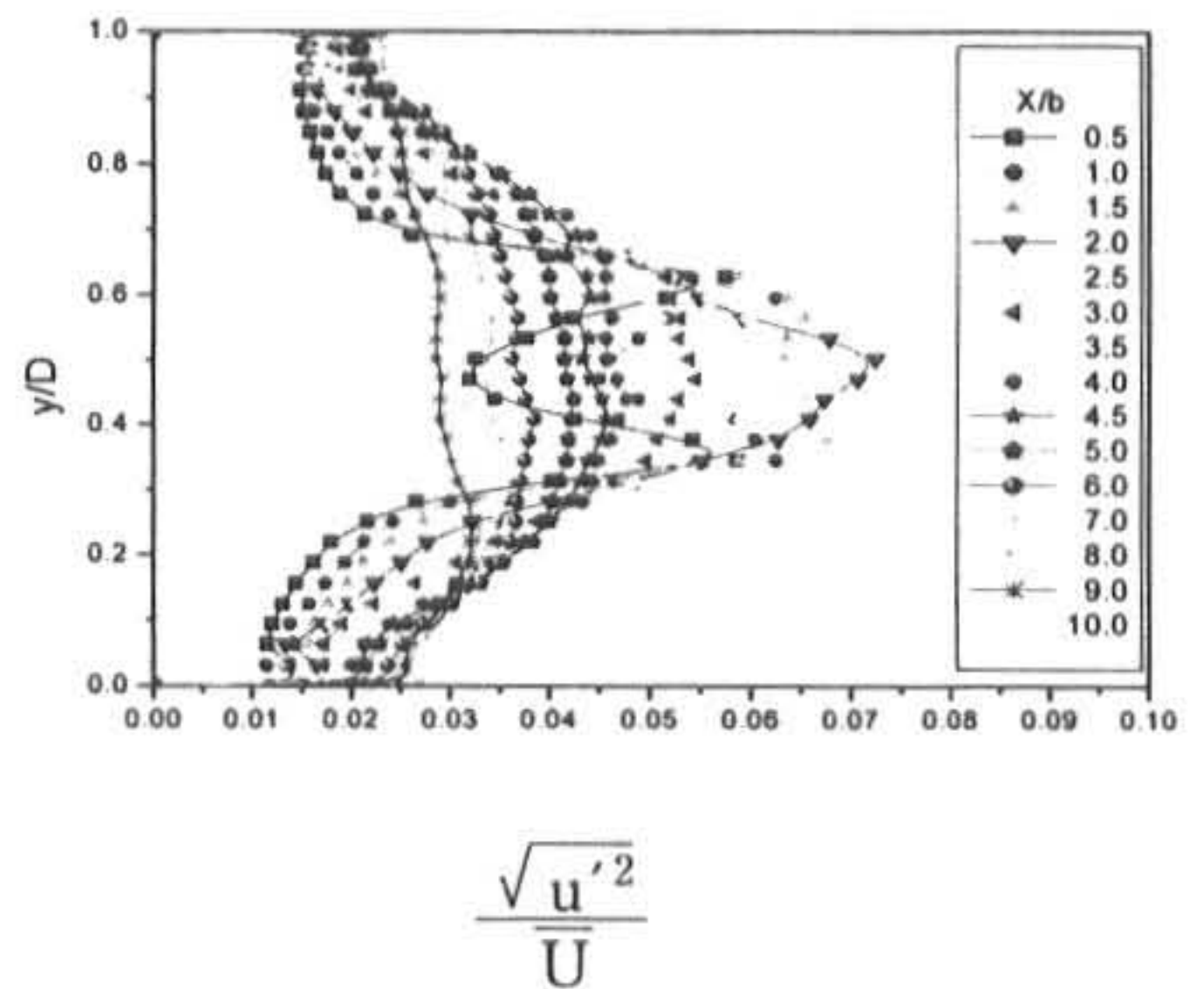


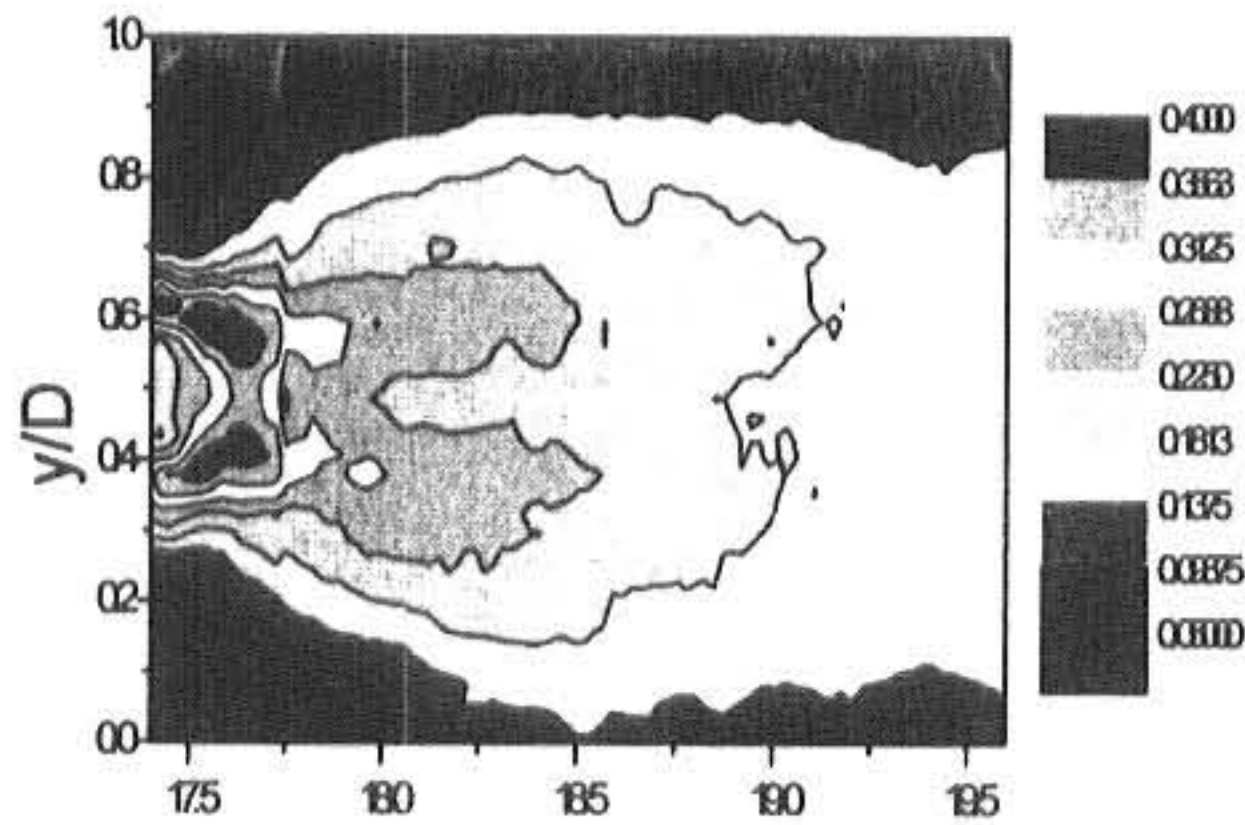
Fig. 14 Time-mean local axial turbulence intensity profiles behind the square cylinder for Re = 30,000.

Fig. 12는 정사각 실린더의 후류에서 축방향 난류강도의 분포이다. 원형실린더와 달리 one-cell 현상을 보여주고 있다. 이 결과로부터 계산한 결과가 Fig. 14의 국소 축방향 난류강도 분포이다. $X/b = 0.5 \sim 1.0$ 에서는 난류강도가 2-cell 현상을 나타내나, 그 외의 영역에서는 one-cell 로 돌아가고 있다.

결과로 생각된다.

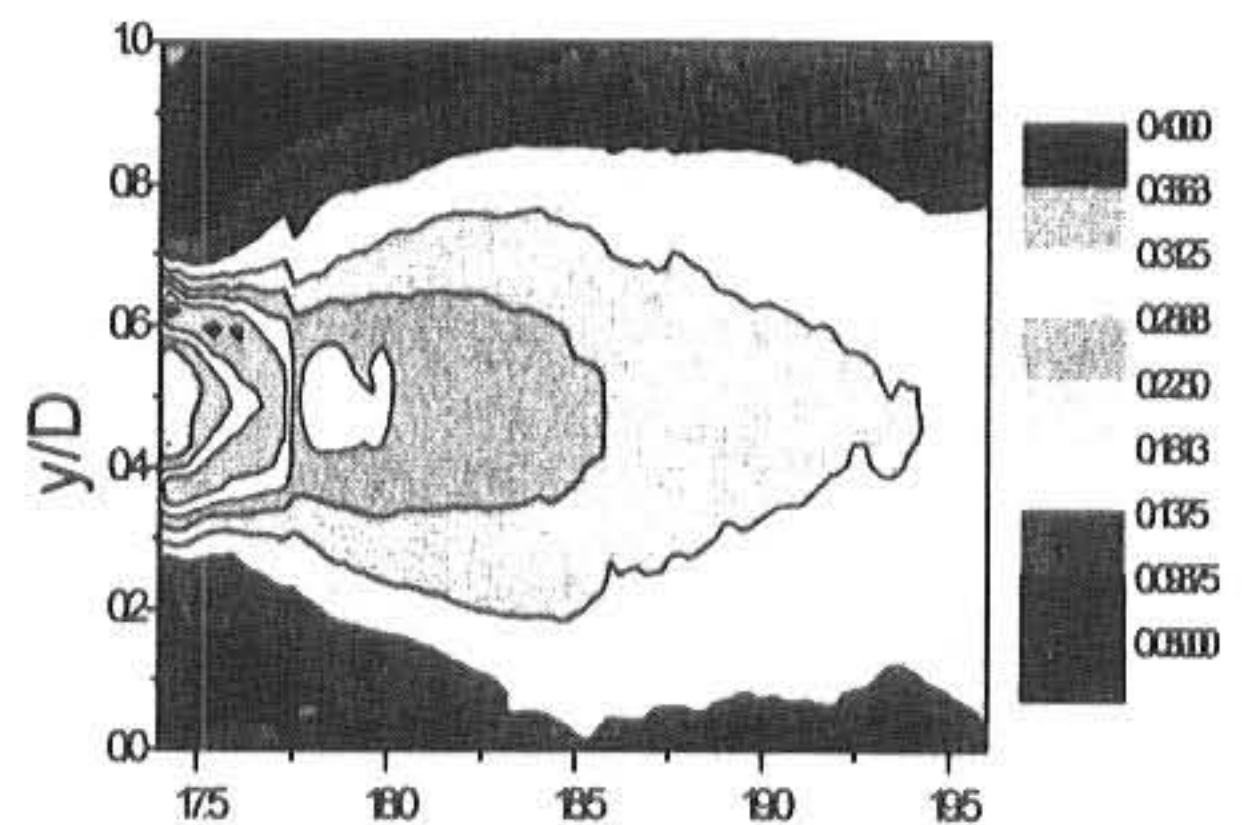
Fig.17과 Fig. 18은 $Re = 30,000$ 에서 운동 에너지를 원형실린더와 정사각 실린더에서 각각 나타내고 있다.

등 운동에너지 분포는 원형 및 정사각 모두가 one-cell 현상을 나타내지만 정사각 실린더의 후류가 넓게 확대되고있음을 알 수 있다. 이 현상 역시 박리 점과 연관이 있는 것으로 생각된다.



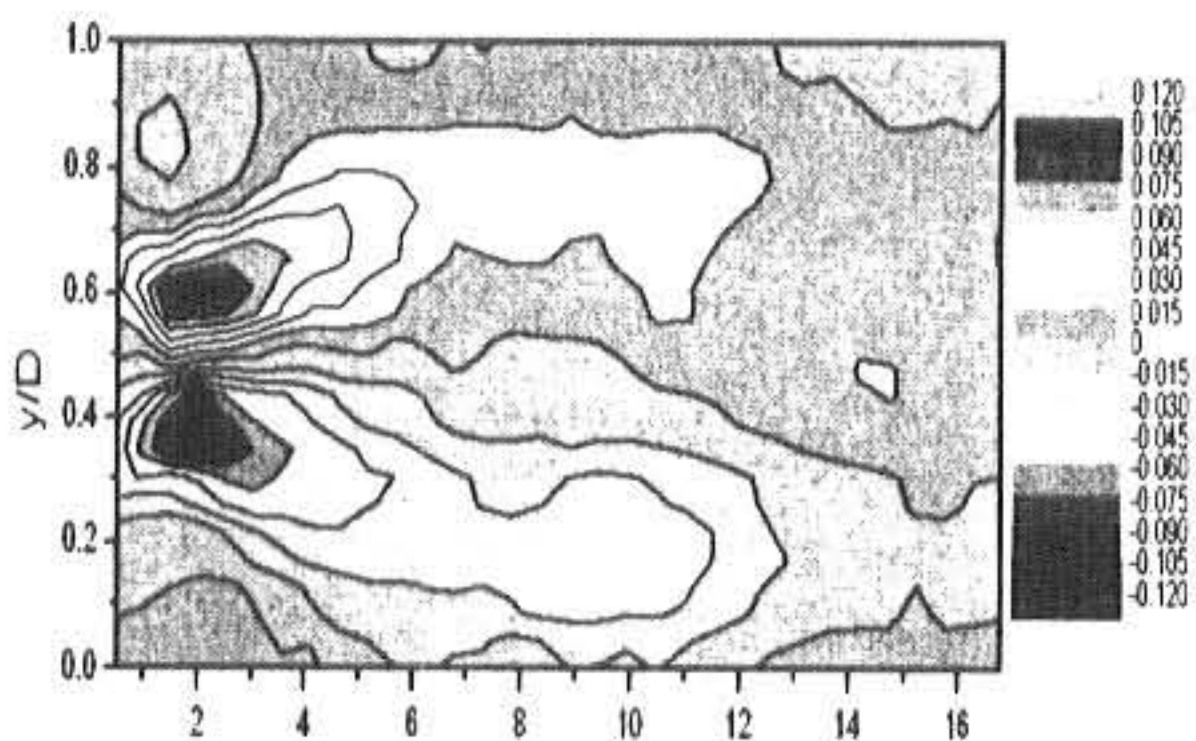
$$\frac{\sqrt{u'v'}}{\bar{U}}$$

Fig. 15 Contour of Reynolds Stress distributions behind the circular cylinder for $Re=30,000$.



$$\frac{\sqrt{u'^2 + v'^2}}{2\bar{U}}$$

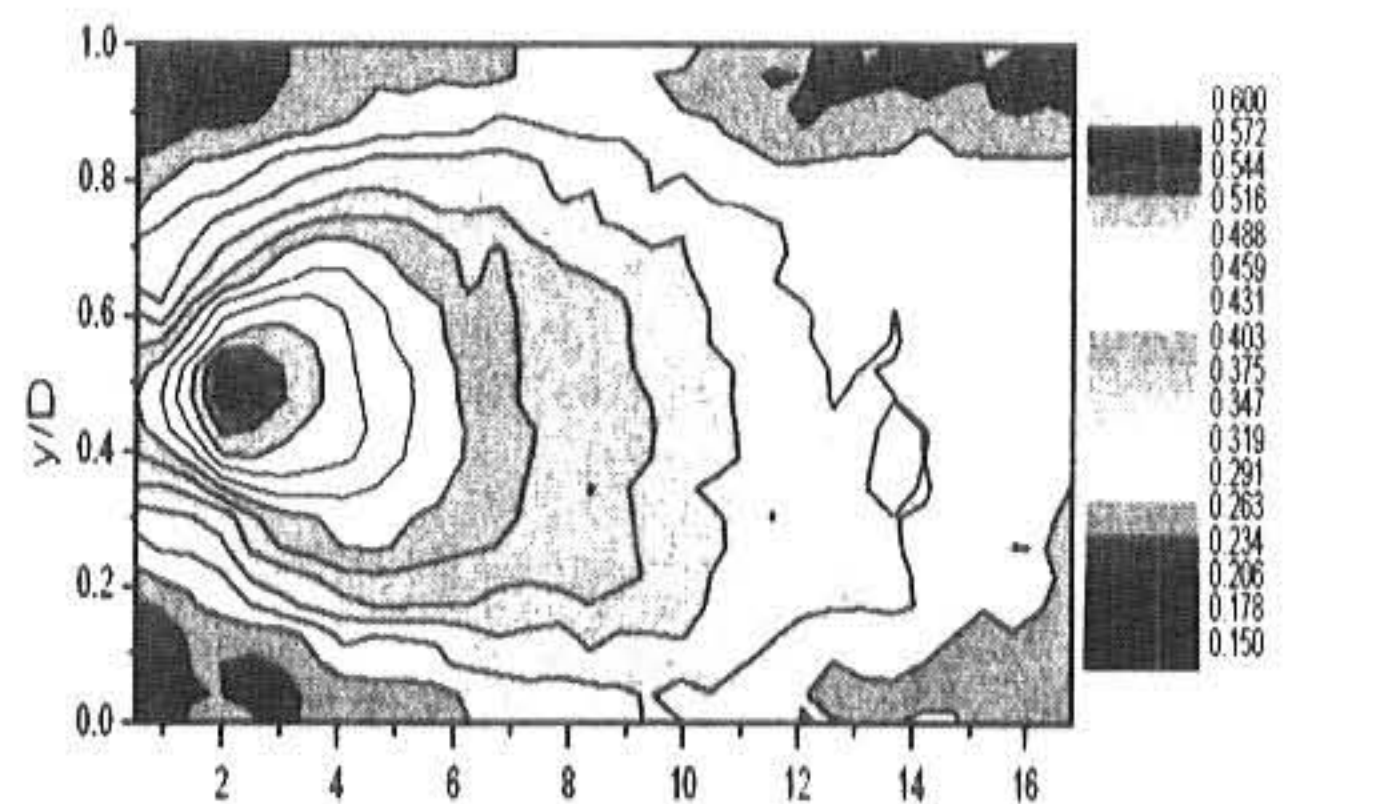
Fig. 17 Contour of kinetic energy distributions behind the circular cylinder for $Re = 30,000$



$$\frac{\sqrt{|u'v'|}}{\bar{U}}$$

Fig. 16 Contour of Reynolds stress distributions behind the square cylinder for $Re=30,000$.

Fig. 15와 Fig. 16은 $Re = 30,000$ 에서 원형실린더와 정사각 실린더의 후류에서 Reynolds 응력을 각각 나타내고 있다. 두 결과 모두 2-cell 현상을 나타내고있고, 그 강도는 정사각 실린더 보다 원형실린더가 3배이상 강하게 나타나고 있다. 이 결과 역시 정사각 실린더의 박리점이 원형실린더보다 앞쪽으로 이동된



$$\frac{\sqrt{u'^2 + v'^2}}{2\bar{U}}$$

Fig. 18 Contour of kinetic energy distributions behind the square cylinder for $Re=30,000$.

4. 결 론

수평원통관 내에서 원형 및 정사각 실린더의 후류에서 PIV기법을 이용하여 다음과 같

은 결론을 얻었다.

1) 원형 실린더 후류에서 재 순환 영역은 $X/d = 1.1 \sim 1.4$ 까지 존재하고, 축 방향 속도 (U/\bar{U})는 음(-)의 속도를 나타내었고, Cantwell의 연구결과와 잘 부합하나 $Re = 10,000$ 에서는 차이가 있었다. 이 것은 Re 수가 증가하면서 원주 후류에서 유동의 혼합에 기인된 것으로 생각된다. 난류강도는 2-cell 현상을 나타냈고, Reynolds 전단응력 역시 2-cell 현상을 나타내었다.

2) 정직사각 실린더의 후류에서 역전 영역은 1.0b ~ 1.1b 정도로 원형 실린더의 경우 보다 짧음을 알 수 있다. 이 것은 원형실린더에서 보다 박리점이 앞쪽으로 이동되는 원인으로 생각된다

3) 정직사각 실린더의 후류의 U/\bar{U} 의 최고 속도의 위치는 양 벽으로부터 $y/D = 0.2 \sim 0.3$ 근처에서 나타났고, 그 값은 $1.4 \bar{U}$ 정도 나타났다. 이와 같은 현상은 $Re = 30,000$ 에서도 유사한 결과를 보여주었다. 특이한 현상은 Reynolds 수가 증가할수록 실린더 후류의 음의 속도영역이 좁아지고 U/\bar{U} 의 최고위치는 $y/D = 0.2 \sim 0.3$ 이었다.

후 기

본 연구는 경남대학교 2003 학년도 학술논문 게재 연구비 지원으로 이루어졌습니다.

참 고 문 헌

1) M. Coutanceau and R. Bouard, "Experimental Determination of the Main Features of the Viscous Flow in the Wake of a Circular Clinder in Uniform Translation", Fluid mechanics, Vol. 79, No.2, pp. 231-259, 1969.

2) F. K. Owen, D. A. Johnson, "Measurments of Unsteady Vortex Flow Fields", AIAA, Vol. 18, pp. 1173-1179, 1980.

3) B. J. Cantwell, "A Flying Hot Wire Study of the Turbulent Near Wall of Circular Cylinder at a Reynolds Number of 140,000", California Institute of Technology, 1975.

4) Coles, D., "Prospects of useful research on coherent structure in turbulent shear flow", Proc. Indian Acad. Sci. (Engeering Sci.) 4: pp. 111-127.

5) 부정숙, 원주후류의 2차원 난류구조, 12월 경북대학교 박사학위논문, 1985.

6) 조자희, 정사각 실린더 후류의 난류유동 특성 연구, 10월 충남대학교 석사학위 논문, 1990.

7) 이 현, Multivision PIV에 의한 단순물체 후류에서의 유동특성에 관한 연구, 2월, 한국해양대학교 석사학위논문, 2001.

8) Daichin, Sang Joon Lee, "Flow Field Analysis of Wake behind an Elliptic Cylinder Close to a Free Surface", Proceeding of the 6th Asian Symposium on Visualization, pp.216-218, 2001.

9) D. S. Jang, Y. W. Lee, D. H. Doh, C. S. Kang, and T. Kobayashi, "Large Eddy of Flow around a Bluff Body of Vehicle shape", Proceeding of the 6th Asian Symposium on Visualization, pp. 335-340, 2001.

10) 이만복 PIV 기법을 이용한 정사각 실린더의 근접후류에 관한 연구, 2001, 부산대학교 석사학위논문, 2001.

11) D. H. Doh, "Probind 3-D Structures of the Wake Near a Circular Cylinder", Proceeding of the 6th Asian Symposium on Visualization, pp.335-340, 2001.

12) Rosko, A., "Experimentals on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds number", J. of Fluid Mech. 10, pp. 345-356, 1961.

13) T. Mizota, A. Okajima, "A Experimental Studies of Mean Flow around Rectangular Prisms", Japan, Soc. Civ. Engrs 312, pp. 39-47, 1981.

14) A. Okajima, "Strouhal Numbers of Rectangular Cylinders", Kyushu Univ. pp. 379-398, 1982.

15) Y. T. Chew, "Numerical Flow Visualization of Flow Over A Square Cylinder at Incidence", Proceeding of the 6th Asian Symposium on Visualization, pp.70-72, 2001.

(2003년 4월 12일 접수, 2003년 8월 20일 채택)