

선회가 있는 수평원통관에서 원형실린더의 후류에 관한 실험적 연구

장 태 현†

(원고접수일 : 2005년 2월 15일, 심사완료일 : 2005년 3월 21일)

An Experimental Study on the Wake behind a Round Cylinder with Swirling Flow in the Horizontal Circular Tube

Tae-Hyun Chang†

Abstract : An experimental study is performed on the turbulent swirling flow behind a circular cylinder using 2-D PIV technique. The Reynolds numbers investigated are 10,000, 15,000, 20,000 and 25,000. The mean velocity vector, time mean axial velocity, turbulence intensity, kinetic energy and Reynolds shear stress behind the cylinder are measured before and behind the cylinder along the test tube. A comparison is included without swirling flow behind a circular and square cylinder. The recirculation zones are shown unsymmetric profiles.

Key words : Swirl intensity(선회강도), Particle image velocimetry(입자영상유속계), Bluff body(각진 물체), Bimodal(쌍봉), Recirculating region(재순환 영역)

Nomenclature

A : the cross section area
b : height of the square cylinder
D : diameter of the test section
d : diameter of the cylinder
U : axial velocity
 \bar{U} : time mean axial velocity
 u'' , v'' : fluctuating velocity
Re : Reynolds number
St : Strouhal number
X : axial coordinate
y : radial distance

1. 서 론

후류에 관한 연구는 구조물(bluff body) 주위의 유동현상 해석이나, 유체역학적 및 산업 현장에서 열교환기 설계에 매우 중요하여 고전적인 관심사였다. 이와 같은 유동장 내에서 장애물에 의한 후류의 영향은 유동의 박리와 와(渦)를 형성하여 항공 역학적인 항력, 구조물의 진동 그리고 난류 혼합과정에 직접적인 영향을 미치므로 지금까지 많은 연구가 진행되고 있다.

Coutanceau 등^[1]은 원형실린더 후류에서 Reynolds 수 5~40 범위에서 속도를 측정하여 이론적 계산 결과와 비교하였고, Owen 등^[2]은 위

† 책임저자(경남대학교 기계자동차공학부), E-mail : changtae@kyungnam.ac.kr, Tel : 055)249-2613

상평균법을 이용하여 난류구조를 해석하였다. Cantwell^[3] 과 Coles^[4]는 실린더의 근접후류에서 Flying Hot-Wire를 이용하여 난류운동방정식중 레이놀즈 평균 항을 측정하여 난류구조를 설명하였다.

국내의 연구로는 부정숙^[5]은 2차원 원주후류 유동을 통계학적인 방법을 이용하여 난류특성을 분석하였다. 조자희^[6]은 열선풍속계를 이용하여 정사각관 후류에서 평균속도, 난류강도 및 운동에너지 등을 구하였다. 김경천 등^[7]은 온도구배가있는 유동장내에서 원주의 가열량을 변화하면서 속도와 온도신호를 동시에 측정하여 유동특성을 분석하였고, 최상호 등^[8]은 외부음향기를 이용하여 후류의 유동특성과 와구조에 미치는 영향을 연구하였다. 열전달과 관련된 연구로는 윤순현 등^[9]은 사각주후류가 가스터빈 익렬의 유동 및 열전달에 미치는 영향을 연구하였다.

이와 같은 연구결과를 보면 지금까지 열선풍속계나 LDV기법 그리고 스모크 등의 가시화 기법을 이용하여 각종 실린더의 후류에 대하여 연구하였다. 이 경우 그 결과는 한 점에서 점 측정에 불과하였고 열선풍속계등을 사용할 경우 지지부(prong)의 간섭을 배제할 수 없다.

근래에 와서 이 현 등^[10]은 Multivision PIV (Particle Image Velocimetry) 기법을 이용하여 단순 물체 후류에서 유동의 특성을 연구하였고, Daichin 등^[11]은 타원형의 구조물의 후류에서 PIV 기법을 사용하여 주 유동속도와 난류강도를 구하였다. 사각형의 실린더 후류에 대한 연구로는 Jang 등^[12]은 직사각형 실린더에서 수치해석 및 PIV기법으로 평균속도를 구하였으며, 이만복 등^{[13][14]}은 정사각 실린더에서 PIV 기법을 이용하여 근접후류에 대하여 연구하였고,

저자^[15] 또한 원형 및 사각 실린더에서 PIV 기법을 이용하여 비교 연구하였고, Doh^[16]는 3차원 PIV 기법을 이용하여 원형실린더 후류에 대하여 연구하였다.

그러나 이와 같은 연구는 대부분이 실린더의 입구유동이 균일 유동인 경우이다. 특히, 팬이 부착된 증기 및 온수 히터나 팬코일 유닛터 등의 경우

는 코일의 입구유동은 선회유동에 가깝다.

본 연구에서는 2차원 PIV 기법을 이용하여 수평 원형 관내에서 선회가 있는 원형 실린더의 후류의 난류유동에서 평균속도, 난류강도 그리고 Reynolds 응력 및 난류운동에너지 등을 구하여, 학문적 연구나, 기술적으로 간결하고 효율적인 열교환기의 설계에 기여하고자 한다.

2. 실험장치

Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험 장치의 개략도이다. 테스트 튜브는 $\phi 90$ 로 전체 길이는 3,000mm 이고 두께 5mm의 아크릴 관으로 제작하였고, 원형 실린더의 크기는 $\phi 20$ mm의 아크릴 봉으로 제작하였다. PIV시스템을 사용할 경우 원관의 테스트 튜브 외면에서 발생할 수 있는 유체의 밀도 차로 인한 굴절에 의한 측정 오차를 줄이기 위하여 테스트 튜브 외면에 300mm×600mm×200mm의 수조를 만들었다. 작동유체는 물을 사용하고, 와류실, 선회발생기, 테스트 튜브 그리고 순환수 펌프(220V×3.75kW)로 다시 물탱크로 돌아갈 수 있도록 제작하였다. 테스트 튜브 내에서 Reynolds 수를 조절하기 위하여 물 펌프의 회전수 조절기를 사용하였다. 비 선회인 경우는 균일 유속을 만들기 위하여 정류장치(honey-comb)를 테스트 튜브 입구에 설치하였다.

선회발생기는 $\phi 150$ mm의 아크릴 관의 외벽에서 접선방향으로 $\phi 3$ mm의 구멍을 45°간격으로 8줄로 뚫어서 제작하였다. Fig. 2에서 선회발생기의 단면도를 나타내고 있다.

2.1 실험방법

PIV용 광원은 공냉식 500mW Ar-ion 레이저를 사용했다. 광원의 이동을 용이하게 하기 위해 광케이블로 빛을 이동시킬 수 있는 LLSP(Laser Light Sheet Probe)를 사용했다. 또한 이 LLSP는 레이저 층의 두께를 약 1mm 정도 조절을 할 수도 있다. 광케이블의 길이는 약 10m이다. 펄스화된 광원을 얻기 위해서 AOM (Acoustic

Optical Modulator)를 사용했다. 유동장의 특성을 파악하기 위해서 1초에 30장의 이미지를 획득할 수 있는 Panasonic 사의 CCD(Charge Couple Device) 카메라 (WV3P310)를 사용하였고, 영상의 기록을 위해 디지털 레코더가 이용되었다. 그리고 획득된 이미지를 컴퓨터로 0에서 255단계의 gray 레벨로 전송하는 DT3155 (640×480 pixel) 보드를 사용했다. 실험에 사용된 입자(particle)는 나일론12(80 μ m)이다. 작업 유체는 증류수를 사용했고 실험시의 온도는 18℃ 이었다. Fig. 3은 본 실험에 사용된 PIV 시스템을 나타낸다.

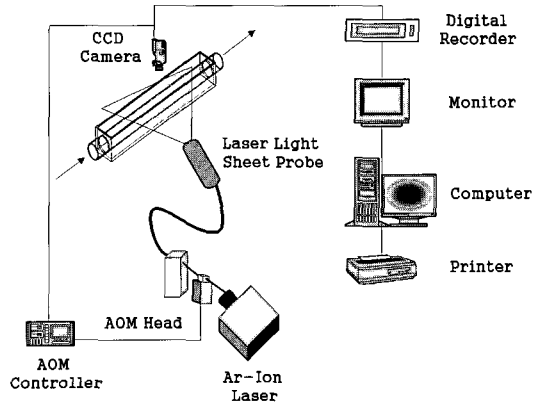


Fig. 3 Schematic arrangement of the PIV system

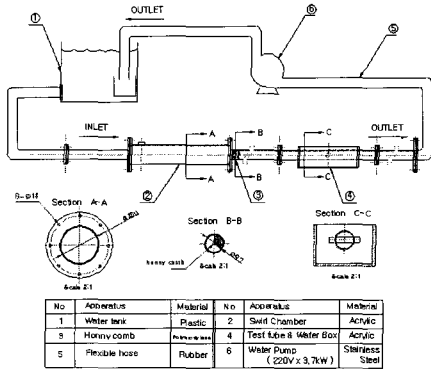


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

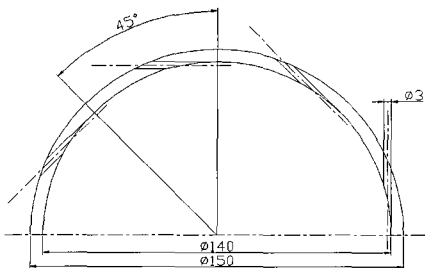


Fig. 2 Cross section view through the swirl generator

3. 결과 및 고찰

3.1 속도 벡터

Fig. 4는 원형 실린더의 입구에서 $Re=20,000$ 일 때의 순간속도벡터(Instantaneous Velocity Vector)를 나타낸다. 선회유동의 순간 벡터는 지금까지 발표된 연구 결과와 같이 테스트 튜브의 중심부에서는 음의 속도 벡터를 나타내고 관벽 근처에서는 양의 속도벡터를 나타내었다. Fig. 5는 원형실린더 후류에서 $Re=20,000$ 인 경우 순간속도 벡터를 나타낸다. 초기의 전단층은 선회의 영향으로 실린더의 양쪽으로부터 교대로 박리 되며, 원형형태의 와류를 형성하면서 하류로 큰 곡률을 이루면서 유동하는 특징을 나타내고있다. 실린더 입구의 유동과 비교하여 크게 차이가 나는 것을 볼 수 있다.

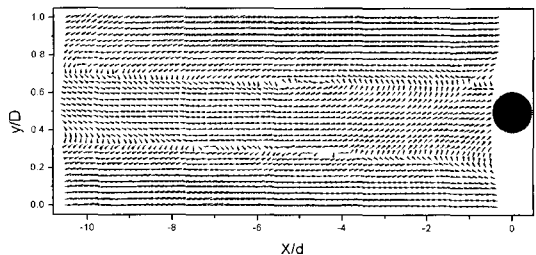


Fig. 4 Velocity vector distribution with swirl for $Re=20,000$ the entry of the round cylinder.

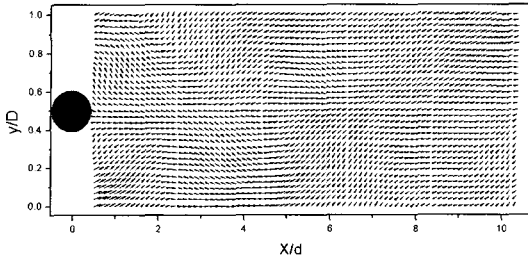


Fig. 5 Velocity vector profiles with swirl for $Re=20,000$ behind the round cylinder.

3.2 평균속도

Mizota 등^[18] 과 Okajima 등^[19]은 열선 프로브를 일렬로 세움으로써 사각 실린더 뒤의 근접영역에서 유동이 역류하는 영역을 측정하였고 유동 형태의 변화는 폭과 높이의 비, 경사각의 변화에서 항력과 양력 그리고 스트로울(Strouhal) 수와 밀접한 관련이 있음을 보였다. Cantwell^[3]은 원형 실린더 후류에서 Reynolds 수 1.4×10^5 일 때 유동의 재순환 영역(Recirculating Region)이 $1.1d$ 라고 하였고, Owen 등^[2]는 Reynolds 수 1.67×10^5 일 때 반구형태의 모델의 경우는 이 영역이 약 $1.3d$ 라고 하였다.

Fig. 6은 원형실린더 입구에서 선회각이 있는 경우 국소 축방향 속도분포를 Fig. 4의 순간 속도 벡터로부터 계산한 결과이다. 이 속도 분포는 관 중심부에서 음의 속도를 보이고 관벽 근처에서 양의 최고 속도를 나타낸다. 이 결과는 지금까지 발표된 선회유동의 결과와 잘 부합된다.

Fig. 7은 비 선회유동에서 원형 실린더의 후류를 $Re=10,000$ 에서 측정된 결과이다. 원형실린더의 후류의 재순환영역의 길이는 $1.5d$ 정도이고, Fig. 8의 비 선회에서 사각실린더의 결과는 x/b 가 $1 \sim 1.5$ 로 Cantwell^[3] 과 Owen 등^[2]의 결과와 부합되는 것을 알 수 있다.

Fig. 9~Fig. 12는 $Re=10,000, 15,000, 20,000$ 그리고 $25,000$ 에서 선회각이 있는 경우 축방향 속도분포를 나타내었다. 비 선회유동과는 달리 $x/d = 0.5$ 에서 비대칭된 영역을 보이고 있고, x/d 가 증가할수록 이 영역이 짧아짐을 볼 수 있다. 이 현상은 선회유동에서 집선방향속도가 회전하는 방향에 기인하는 것으로 생각된다.

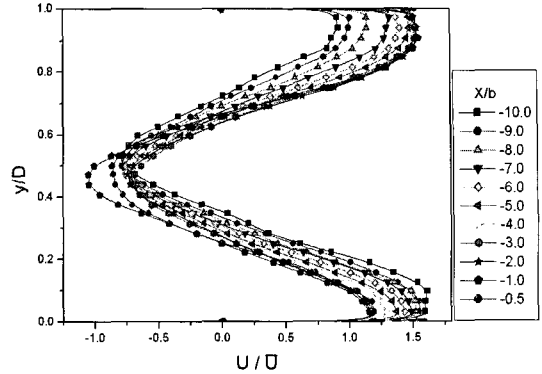


Fig. 6 Local axial velocity profiles with swirl for $Re=20,000$ at the entry of the round cylinder.

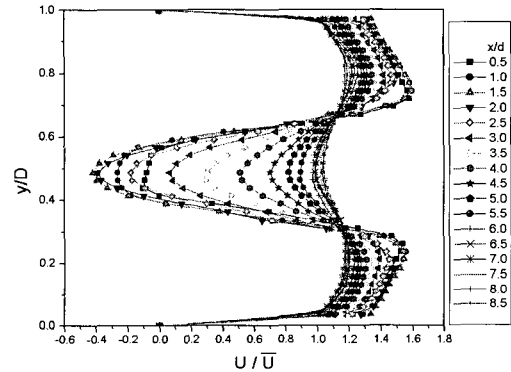


Fig. 7 Axial velocity profiles without swirl for $Re=10,000$ behind the round cylinder.

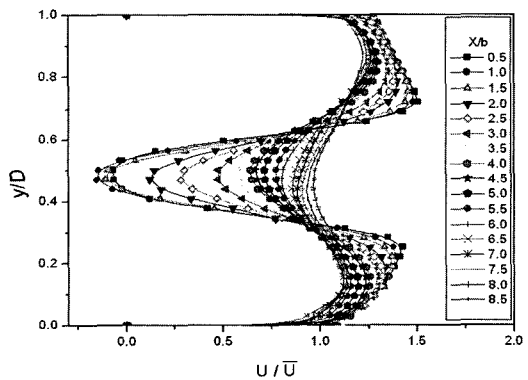


Fig. 8 Axial velocity profiles without swirl behind the square cylinder for $Re=10,000$.

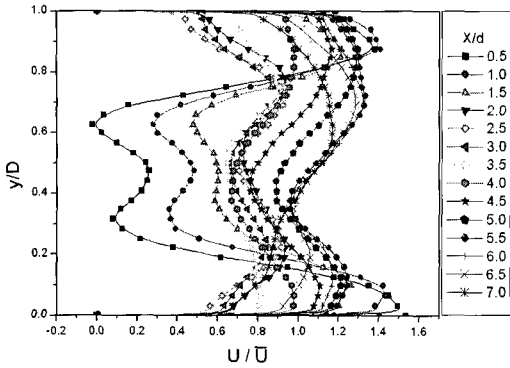


Fig. 9 Local axial velocity profiles with swirl for $Re=10,000$ behind the round cylinder.

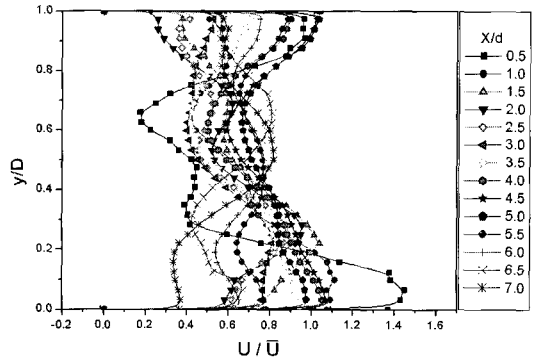


Fig. 12 Local axial velocity profiles with swirl for $Re=25,000$ behind the round cylinder.

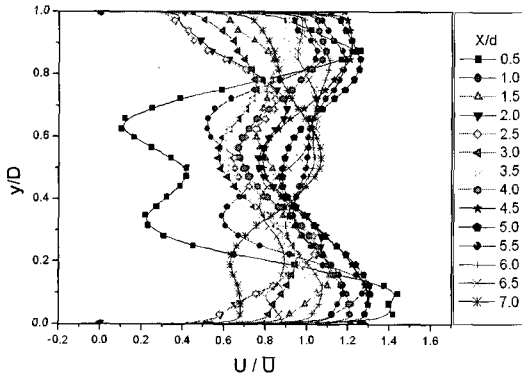


Fig. 10 Local axial velocity profiles with swirl for $Re=15,000$ behind the round cylinder.

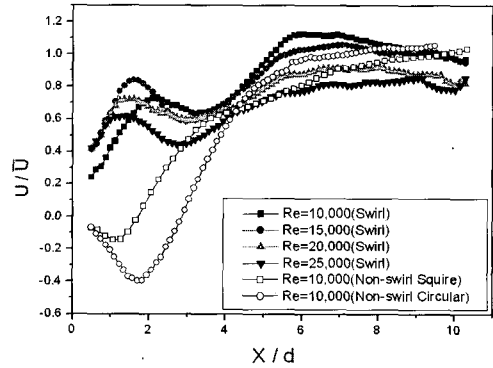


Fig. 13 Local axial velocity profiles with and without swirl at the center Line behind the round and squire cylinder.

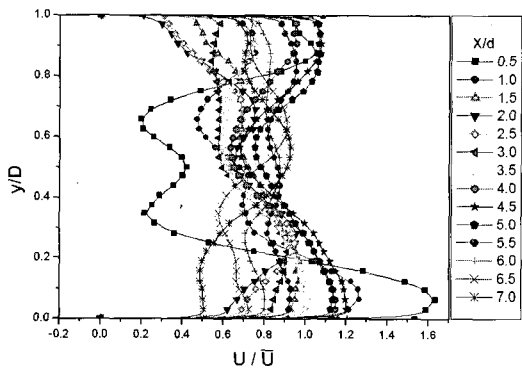


Fig. 11 Local axial velocity profiles with swirl for $Re=20,000$ behind the round cylinder.

Fig. 9에서 $Re=10,000$ 의 경우 재순환 영역이 $x/d=0.5$ 로 Fig. 7의 비 선회유동의 결과와 비교하여 아주 짧은 것을 알 수 있고, 재 순환영역이 비대칭 쌍봉(Bimodal) 형태를 나타내는 것을 볼 수 있다. 선회가 소멸되면서 이 영역은 점차 감소하여 양 벽에서 최대 값을 보이고 있다.

특이한 현상은 Re 수에 관계없이 $x/d=0.5$ 에서 최대 비대칭 재 순환 영역을 나타내고 테스트 튜브 양 벽에서 또한 최대 양의 속도분포를 나타내었다. 그러나 선회가 소멸되면서 이 영역은 점차 감소하였다.

Fig. 13은 $Re=10,000, 15,000, 20,000$ 그리고 $25,000$ 일 때의 유동방향의 중심선상에서 선

회유동과 $Re=10,000$ 에서 비 선회유동의 축방향 속도를 원형실린더와 사각실린더의 결과를 비교한 것이다. 선회유동의 경우는 비 선회유동에 비하여 U/\bar{U} 가 0.2~0.86으로 높게 나타났고 비 선회의 경우는 0.0 ~ -0.4로 낮게 나타났다.

그러나 $x/d=3.0$ 이후부터 선회가 소멸되면서 U/\bar{U} 는 비 선회유동의 속도와 유사한 속도분포를 보이고 있다. 이 현상은 선회유동의 접선방향속도의 소멸에 기인된 것으로 생각된다.

3.3 난류강도

Fig. 14는 $Re=20,000$ 에서 실린더 입구에서의 선회가 있는 경우의 난류강도이고, Fig. 15는 원형실린더 후류에서 축 방향난류강도이다. Fig. 16은 $Re=20,000$ 에서 원형실린더 후류의 반경방향 난류강도를 나타내고 있다. Fig. 14의 실린더 입구에서의 난류강도분포는 관벽 근처와 $y/D=0.3\sim 0.6$ 에서 최소 값을 보이고 있다. 이 현상은 지금까지 선회유동에서 나타나는 강 선회의 결과로 생각된다. 그러나 Fig. 15에서 원형실린더의 후류에서 축 방향 난류강도는 관벽 근처 $x/d=0.1\sim 0.8$ 에서 최소 값을 나타내고 테스트 튜브 입구와 출구의 관벽에서 최대값을 보여주고 있다. Fig. 16의 반경방향 난류강도는 $x/d=0.2\sim 0.8$ 에서 최대 값을 보이나, 테스트 튜브 근처에서 최대 값을 나타내고 있다. 이 것은 선회로 인한 반경방향 속도의 증가에 기인된 것으로 생각된다.

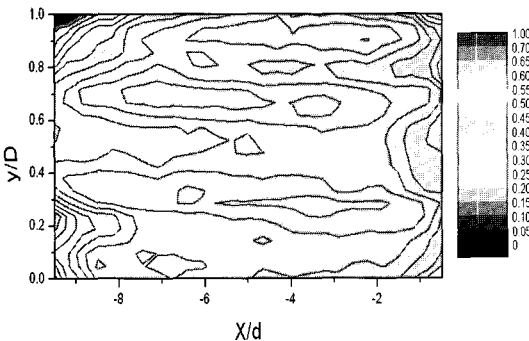


Fig. 14 Contour of axial turbulent intensity profiles with swirl for $Re=20,000$ at the entry of the round cylinder.

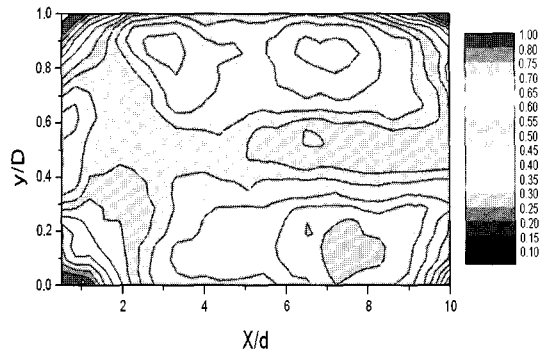


Fig. 15 Contour of axial turbulent intensity profiles with swirl for $Re=20,000$ behind the round cylinder.

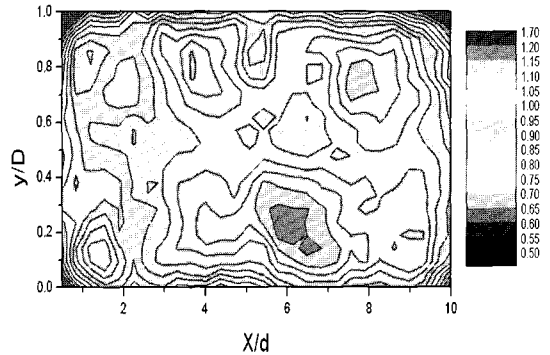


Fig. 16 Contour of radial turbulent intensity profiles with swirl for $Re=20,000$ behind the round cylinder.

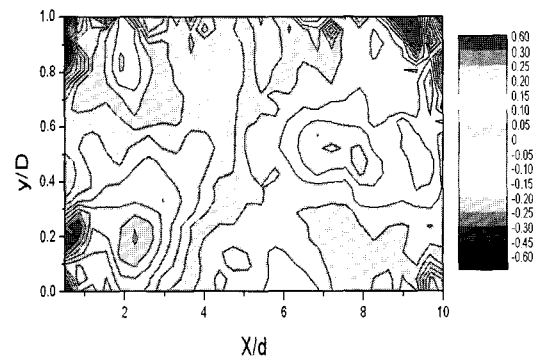


Fig. 17 Contour of Reynolds shear stress profiles τ_{xy} with swirl for $Re=20,000$ behind the round cylinder.

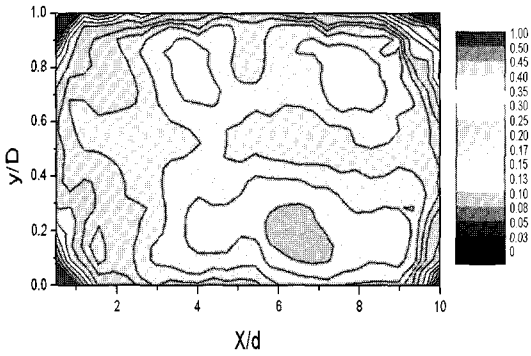


Fig. 18 Contour of kinetic energy profiles with swirl for $Re=20,000$ behind the round cylinder.

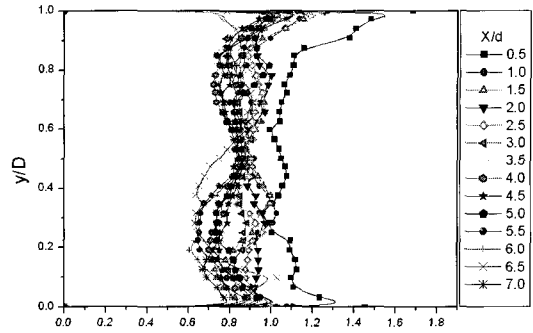


Fig. 21 Local radial turbulent intensity profile with swirl for $Re=20,000$ behind the round cylinder.

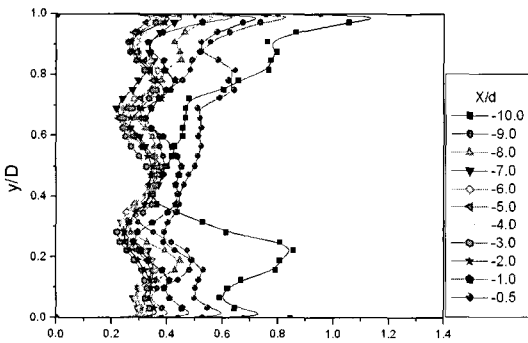


Fig. 19 Local axial turbulent intensity profile with swirl for $Re=20,000$ at the entry of the round cylinder.

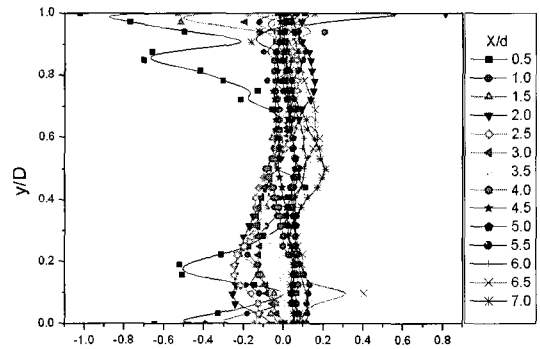


Fig. 22 Local Reynolds shear stress profile with swirl for $Re=20,000$ behind the round cylinder.

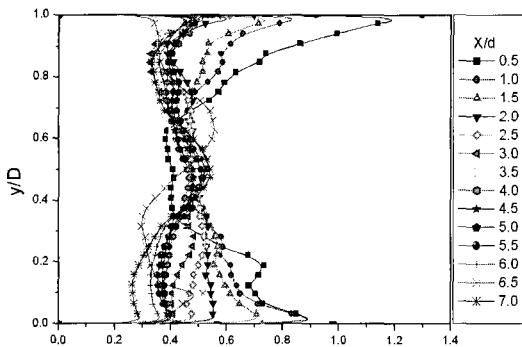


Fig. 20 Local axial turbulent intensity profile with swirl for $Re=20,000$ behind the round cylinder.

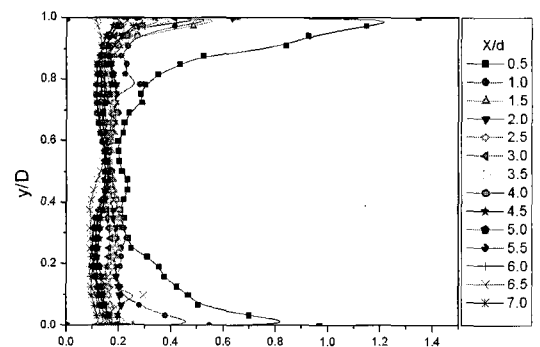


Fig. 23 Local kinetic energy profile with swirl for $Re=20,000$ behind the round cylinder.

Fig. 17의 난류 전단응력은 $Re=20,000$ 에서 나타내고 있다. 난류강도의 분포와 같이 $y/d=0.2, 0.8\sim 0.98$ 근처에서 최소 음의 난류 전단응력 값을 나타내는 것을 알 수 있다.

Fig. 18은 $Re=20,000$ 에서 난류운동에너지 분포를 나타낸다. 난류강도분포와 유사하게 $y/D=0.2, 0.8$ 부근에서 최소 값을 나타내었다.

Fig. 19는 $Re=20,000$ 에서 원형실린더 입구의 국소 축방향 난류강도를 나타내고있고, 비 선회유동과는 달리 비대칭 현상을 보이고 있다.

Fig. 20은 원형실린더 후류에서 국소 축방향 난류강도이다. Fig. 19의 난류강도와 유사하지만 편심된 현상을 보여주고, 후류의 중심에서는 0.4~0.5에 접근하고 있다. 있다.

Fig. 21은 반경방향 난류강도이다. 축방향 난류강도에 비하여 비대칭 된 정도가 적고 관 중심부에서는 축방향 보다 0.8~1.1 정도의 높은 값을 보이고 있다. 이 것은 후류에서 축방향 난류강도는 반경방향에 비하여 소멸이 크다는 것을 알 수 있다.

Fig. 22는 $Re=20,000$ 에서 난류 전단응력을 나타내고 있다. $y/D=0, 0.2$ 그리고 0.8~1.0에서 음의 전단응력을 나타내고 비대칭 현상을 보이나, 선회가 소멸되면서 $x/d=3.0$ 이 후부터 "0"의 값에 접근하고 있다. 지금까지 저자^[15]와 Kiy^[21]등 이 발표한 내용과는 아주 다른 결과를 보이고 있다. 즉, 비 선회에서 원형이나 사각실린더의 경우는 실린더의 중심선을 기준으로 음의 난류 전단응력을 나타내지만, 선회가 있는 경우는 실린더의 가장자리 근처에서부터 음의 값을 보이고, 비대칭을 나타내었다.

Fig. 23은 $Re=20,000$ 에서 운동에너지 분포이다. 난류강도의 분포와 유사하게 관벽 근처에서 0.8~1.2의 최대 값을 가지고 비대칭 형태를 나타내고있다. 이 현상 역시 선회유동의 결과로 생각된다.

5. 결 론

선회가 있는 원형 실린더 후류에서 PIV기법을 이용하여 유동실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 선회가 있는 경우 축 방향 속도분포는 비 선회 유동과는 달리 $x/d=0.5$ 에서 비대칭 된 영역을 보이고 있고, 또한, x/d 가 증가할수록 이 영역이 좁아짐을 볼 수 있다. 이 현상은 선회유동에서 접선방향 속도가 회전하는 방향에 기인된 것으로 생각된다.

2) 유동방향의 중심선상에서 선회유동의 후류는 U/\bar{U} 가 0.2~0.8로 높게 나타났고 비 선회의 경우는 0.0~-0.4로 낮게 나타나고, 그러나 $x/d=3.0$ 이후부터 선회가 소멸되면서 비 선회유동의 속도와 유사한 분포를 보였다.

3) 반경방향 난류강도는 축 방향 난류강도에 비하여 비대칭 정도가 적고 관 중심부에서는 0.8~1.1 정도의 높은 값을 나타내었다.

4) 난류 전단응력은 $y/D=0, 0.2$ 그리고 0.8~1.0에서 음의 전단응력을 나타내고 비대칭 현상을 보이나, 선회가 소멸되면서 $x/d=3.0$ 이 후부터 "0"의 값에 접근하였다.

후 기

본 논문은 2004년도 경남대학교 학술진흥연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] M. Coutanceau and R. Bouard, "Experimental Determination of the Main Features of the Viscous Flow in the Wake of a Circular Cylinder in Uniform Translation", Fluid mechanics, Vol. 79, No.2, pp. 231-259, 1969.
- [2] F. K. Owen, D. A. Johnson, "Measurements 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. (Engineering Sci.) 4: pp. 111-127, 1983.
- [5] 부정숙, 원주후류의 2차원 난류구조, 경북대학교 박사학위논문, 1985.
- [6] 조자희, 정사각 실린더 후류의 난류유동 특성 연구, 10월 충남대학교 석사학위 논문, 1990.
- [7] 김경천, 정양범, "열성층유동장에 놓인 원주 후류의 특성에 대한 연구(4)", 대한기계학회 논문집 제19권 제5호, pp. 1340-1350, 1995.
- [8] 최재호, 이상준, "외부 음향기가 원주 후류 유동에 미치는 효과에 관한 연구", 대한기계학회 논문집 B권, 제23권 제5호, pp. 603-609, 1999.
- [9] 윤순현, 심재경, 우창수, 이대희, "사각주 후류가 선형터빈익렬의 유동 및 열전달에 미치는 영향에 관한 연구", 대한기계학회논문집 B권 제23권 제7호, pp. 864-870, 1999.
- [10] 이 현, Multivision PIV에 의한 단순물체 후류에서의 유동특성에 관한 연구, 2월, 한국해양대 학교 석사학위논문, 2001.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 이만복, PIV 기법을 이용한 정사각 실린더의 근접 후류에 관한 연구, 2001, 부산대학교 석사학위논문, 2001.
- [14] 이만복, 김경천, "PIV기법을 이용한 정사각 실린더의 근접후류에 관한 연구(I, II, III)", 대한기계학회 논문집 B권, 제25권 제10호, pp. 1408-1416, 2001.
- [15] 장 태현, 이종봉, "PIV 기법을 이용한 정사각 실린더의 후류에 관한 실험적 연구 '한국박용기관학회 논문집 제28권 제1호 pp. 124-135, 2004.
- [16] 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.
- [17] Rosko, A., "Experimentals on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds number", J. of Fluid Mech. 10, pp. 345-356, 1961.
- [18] T. Mizota, A. Okajima, "A Experimental Studies of Mean Flow around Rectangular Prisms", Japan, Soc. Civ. Engrs 312, pp. 39-47, 1981.
- [19] A. Okajima, "Strouhal Numbers of Rectangular Cylinders", Kyushu Univ. pp. 379-398, 1982.
- [20] 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.
- [21] M. Kiya, M. Matsumura, "Turbulent Structure in Intermediate Wake of a Circular Cylinder", JSME, pp. 451-463, 1985.

저 자 소 개



장태현 (張泰鉉)

1942년 2월생, 1969년 동아대학교 기계공학과 졸업, 1971년 동대학대학원 기계과 졸업(공학석사), 1991년 12월 University of Wales(Swansea, U.K.) 대학원 기계공학과 졸업(Ph.D), 2001년 5월 제6차 ASV/6(Asian Symposium on Visualization) 조직위원장 역임, 공조·냉동기계 기술사, 현재 경남대학교 기계자동차공학부 교수