

PIV기법을 이용한 정사각 실린더의 근접후류에 관한 연구 (I)

- 평균유동장 -

이 만 복* · 김 경 천†

(2001년 2월 27일 접수, 2001년 7월 25일 심사완료)

A Study on the Near Wake of a Square Cylinder Using Particle Image Velocimetry (I)

- Mean Flow Field -

Man Bok Lee and Kyung Chun Kim

Key Words: Square Cylinder(정사각 실린더), Near Wake(근접후류), Mean Flow Field(평균유동장), Particle Image Velocimetry(입자영상유속계), Recirculating Region(재순환 영역)

Abstract

Mean flow fields in the near wake of a square cylinder have been studied experimentally using a Particle Image Velocimetry (PIV). Ensemble-averaged velocity fields are successfully measured for the square cylinder wake including the reverse flow region which arises many difficulties in accurate measurement by using conventional techniques. Experiments are performed at two free stream velocities of $U_\infty = 1.27\text{m/s}$ and 3.03m/s . The corresponding Reynolds numbers based on the free-stream velocity and cylinder diameter are 1600 and 3900, respectively. The intensity of free-stream turbulence is less than 1%, the blockage ratio (D/H) is 6.6% and the aspect ratio (W/D) is 40. The effect of Reynolds number on the near wake of a square cylinder has been investigated by the global mean velocity and instantaneous velocity fields. The most striking feature is that the length of the recirculating region increases with increasing Reynolds number, which turns out totally reverse trend compared with those observed in the circular cylinder wake at the same range of Reynolds number. For the case of higher Reynolds number, the mean velocity data agree well with those of relevant existing data obtained at much higher Reynolds numbers, which reflects the general aspect of sharp-edged bluff body wake.

기호설명

D : 정사각형 실린더의 한 변의 길이
 f : 와류출 주파수
 H, W : 풍동 시험부의 높이, 너비
 Re_D : 레이놀즈 수 ($= U_\infty D / \nu$)
 St_D : Strouhal 수 ($= fD / U_\infty$)
 U_∞ : 자유유동속도

u, v : x, y 방향의 속도성분
 u', v' : u, v 의 난류섭동성분
 U, V : u, v 의 전체평균속도
 u_{rms} : x 방향의 난류강도 ($= \sqrt{u'^2}$)
 v_{rms} : y 방향의 난류강도 ($= \sqrt{v'^2}$)
 x, y : 유동방향 및 수직방향 좌표

1. 서론

사각주 같은 뾰족한 물체(bluff body)주위의 유동현상은 유체역학에서 매우 고전적인 문제이다. 그러나 뾰족한 물체의 박리 유동과 후류 구조는

* 회원, 부산대학교 대학원
† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소
E-mail: kckim@pusan.ac.kr
TEL : (051)510-2324 FAX : (051)512-9835

기초 연구뿐만 아니라 기술적인 응용의 관점에서 중요한 주제라 할 수 있다. 이는 에너지 문제와 구조의 형상에 관계되는 공학적인 문제로서 특히 토목공학이나 풍력공학의 분야에서 매우 중요하다. 현대의 건축물들이 점점 높아지고 길어짐에 따라, 구조물에 작용하는 공기역학적 힘의 평가가 구조강도상 필요할 뿐만 아니라 주기적으로 유출되는 와류출(vortex shedding)과 같은 현상은 구조물의 진동에 관련되기 때문에 와의 생성 및 소멸과 같은 메카니즘을 이해하는 것은 실용적인 문제에서도 중요한 의미를 갖는다. 또한 후류의 소음문제와 오염물질의 확산범위와 관련되어 공학적인 문제뿐만 아니라 환경문제로서도 중요한 연구과제가 되고 있다.

사각 실린더 주위와 같이 전방의 날카로운 모서리에서 박리가 일어나는 경우, 공기역학적 특성은 레이놀즈 수에 비교적 영향을 받지 않는 것으로 알려져 있다. 또한 사각 실린더 주위의 흐름은 박리, 와류유출 그리고 재순환을 이루며 재부착상태에서 재순환영역내에서 각 실린더면 상의 압력이 변화하며, 후류의 유동은 실린더 양쪽 모서리에서 주기성을 갖고 교대로 박리되며 원형 실린더에서와 같은 형태의 와류를 형성하면서 하류로 유출한다.

선행연구들을 간단히 살펴보면, Roshko⁽¹⁾는 각종 2차원물체 후류에 작용하는 와류출주파수와 변동압력을 측정하여 유출주파수와 속도와의 관계 그리고 각 단면의 물체에 대한 항력을 측정 분석하였고, Nakaguchi⁽²⁾는 폭과 길이의 비가 다른 사각 실린더들에 대한 실험을 실시하여 폭과 길이의 비가 공기역학 특성에 중요한 인자로 작용하고 있음을 밝히고 있다. Okajima⁽³⁾는 다양한 사각 실린더에서 레이놀즈수가 $70 \sim 2 \times 10^4$ 로 변화할 때 박리의 발생위치와 재부착형상이 달라 나타남을 규명하기 위하여, 레이놀즈 수의 함수인 St_D 의 변화를 결정하고, 속도분포와 유동형태를 연구하였다. Sakamoto 등⁽⁴⁾은 와류의 형성에 대한 연구에서 원형 실린더의 경우 중형비가 2.5 이상, 사각 실린더의 경우는 2.0 이상에서 Karman형 와류가 그 이하에서는 arch형 와류가 형성됨을 밝히고 있다. Lyn 등⁽⁵⁾은 레이놀즈 수 2.1×10^4 에서 LDV를 이용하여 사각주 주위 후류 유동장내의 속도 분포를 측정하고, 실린더 측면의 중앙점에 위치시킨 압력센서로부터 얻은 신호를 기

준으로한 동일 위상에서 앙상블 평균한 통계치들을 구했으며, Saha 등⁽⁶⁾은 두 가지 높은 레이놀즈수 8,700과 17,625에서 열선유속계(HWA)를 이용하여 정사각실린더 후류의 두 성분의 속도를 측정하였다. Williamson⁽⁷⁾에 의해 레이놀즈 수 150에서 270,000까지 넓은 영역에 걸쳐 유동가시화로서 원주후류에서 와류출의 변화가 관찰된 바 있다. Yoon 등^(8,9)은 레이놀즈 수 1,300과 3,900에서 PIV를 이용하여 원주의 근접후류에 대해 상세히 서술하고 있다.

정사각 실린더 후류와 같은 비정상적이고 주기적인 유동에 대해, 평균유동은 실제로는 존재하지 않는 인공적인 구조이다. 하지만 평균유동장은 난류유동을 분석하는 도구로서 매우 유용하다. 와구조의 움직임이 매우 강하게 나타나는 근접후류의 앙상블평균 유동장은 LES나 DNS와 같이 엄밀한 수치적 연구결과들의 비교 자료로 사용될 수 있다. 근접후류에서의 신뢰도가 높은 데이터를 얻고 공간적인 해상도 등을 개선할 수 있는 PIV기법의 등장으로 순간적인 속도장을 얻을 수 있게 되었으며, 이를 앙상블 평균하여 재순환 유동장을 포함한 실린더후류의 상세한 평균유동 특성을 알 수 있게 되었다.⁽¹⁰⁾ 본 연구에서는 PIV 시스템에 의한 정사각주 후류의 보다 상세한 순간유동장과 앙상블 평균속도장을 획득하여 전반적인 평균유동특성을 파악하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치 및 조건

Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도 및 좌표계를 나타낸 것이다. 여기서 좌표계의 원점은 실린더중심에 있으며, x와 y는 각각 유동방향과 수직방향을 나타낸다. 본 실험은 소형 개회로 저속 풍동에서 시행하였으며 풍동의 시험구간은 폭(W)이 0.8m, 높이(H)가 0.3m, 길이(L)가 2.2m이며 유리 및 아크릴로 제작되어 있다. 3마력의 속도 가변형 원심팬에서 공급되는 공기는 정채실과 단면비 2.67:1의 2차원 수축노즐을 통과한 후 좁은 그물망을 거쳐서 시험부(Test section)로 유입된다. 시험부에서 유입되는 공기의 자유유동 난류강도는 1% 이내의 균일 유동으로 유지된다.

정사각 실린더는 투명한 아크릴을 사용하여 표면은 매우 매끄럽게 하고 모서리들은 가능한 한

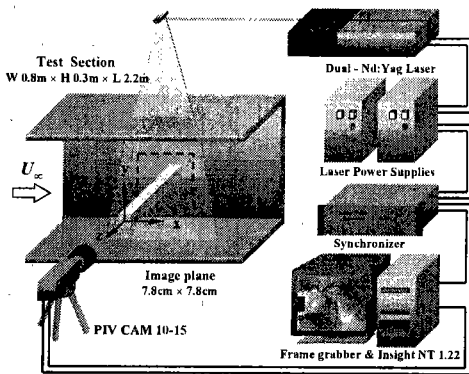


Fig. 1 Schematic of experimental setup

날카롭게 제작되었으며, 길이(L)는 80 cm, 한변의 길이는 20 mm 이다. 이 실린더는 풍동 시험부 입구로부터 30 cm(15D) 후방의 양벽면에 수평으로 설치하였다. 정사각실린더 한변의 길이에 대한 실린더 길이의 비를 나타내는 종횡비(Aspect ratio=W/D)는 40으로 매우 길며, 풍동 시험부의 높이에 대한 수평으로 놓인 정사각 실린더 한변의 길이의 비를 나타내는 폐쇄비(blockage ratio = D/H)는 6.6%이다. West & Apelt 등⁽¹¹⁾에 의하면 원형실린더에서 종횡비가 40이상이고, 폐쇄비 6% 이하일 때, 자유흐름에 대한 실린더주위의 압력 분포는 벽면영향이 무시되는 것으로 보고하고 있다. 그러므로, 본 실험의 종횡비(40)와 폐쇄비(6.6%)에서는 유동에 벽면의 영향은 거의 미치지 않는다고 생각된다.

자유유동 속도는 각각 $U_\infty=1.27$ m/s, $U_\infty=3.03$ m/s으로 고정시켰으며, 이때의 각각의 레이놀즈 수 Re_D 는 1600, 3900 이었다. 그리고 와유출주파수를 구하기 위해서 열선을 사각실린더의 후류경계면으로 고려되는 $x/D = 2.5D$, $y/D = 2D$ 에 위치시켰다. 샘플링 주기가 긴 PIV 시스템으로 와유출주파수를 측정하기가 불가능하기 때문이며, 와유출주파수는 대류속도를 유추하는데 있어서 시간정보를 얻기 위해 사용하였다.

2.2 PIV 측정시스템 및 계측방법

본 연구에서의 PIV 시스템은 250mJ/pulse의 이중 펄스 방식의 Nd:Yag 레이저 시스템과 1K×1K의 고해상도 CCD카메라(TSI, PIVCAM 10-15), 동기화장치(Synchronizer, TSI 610032), 화상처리 보드

(TSI, Frame grabber 610066) 및 구동용 팬티엄 컴퓨터로 구성되어있다. 사용된 입자는 올리브 오일 에어로졸이며, 입자의 평균 직경은 2 μ m이다.

본 실험에서의 PIV 측정영역(field of view)의 면적은 78 mm×78 mm이다. 속도벡터의 추출 알고리즘은 2화상 상호상관기법을 이용하였다. 탐색영역(interrogation window)의 크기는 24×24 pixels이고, 탐색영역의 실제크기는 1.8 mm 정도이며, 50%의 겹침(Overlap)이 허용되었다. 즉 실제 속도벡터간의 간격(grid size)은 12픽셀이 된다. 이는 전체 화상에서 6889(83×83)개의 속도벡터를 얻어내었고, 벡터간의 공간해상도는 0.93 mm이다. 구해진 속도벡터는 본 실험실에서 보유하고 있는 후처리프로그램을 사용하여 불량벡터의 제거, 속도계산, 보간, 앙상블평균 등의 통계적 처리를 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 순간 유동장

Fig. 2는 레이놀즈 수에 따른 정사각 실린더 후류의 순간속도장을 나타낸 것이다. 그림에서 상부의 속도벡터표시는 자유흐름속도 U_∞ 를 나타내는 기준속도벡터이고, 유동장은 좌측에서부터 균일하게 유입하여 우측으로 유출되고 있음을 나타낸다.

거의 같은 위상으로 보이는 레이놀즈 수가 다른 두 순간속도 벡터장은 전면부에서의 박리가 전단층의 대부분을 이루게 되며 이 전단층이 정사각실린더 하류로 큰 곡률을 유지하면서 유동하는 특징을 나타내고 있다. 두 레이놀즈 수의 경우 정사각 실린더의 근접한 후방에 큰 규모의 방출와류가 존재하는 전체적인 형상이 거의 유사하지만 레이놀즈 수가 높아짐에 따라 더 복잡해짐을 알 수 있다. 이 같은 주기적인 와류의 방출에 의한 후류의 유입과 박리전단층효과가 유동장의 특징을 지배하고 있음을 보이고 있다. 그리고 레이놀즈 수 3900의 경우, 박리 전단층내에 매우 많은 와가 포함되어 있음을 볼 수 있다. 이 작은 구조의 와는 대규모 와보다 빠른 주기를 가지며, 대규모와에 종속되거나 독립적으로 거동함을 알 수 있다. 이는 유동의 박리점이 전면부의 날카로운 모서리에 고정되어 있는 정사각 실린더에 있

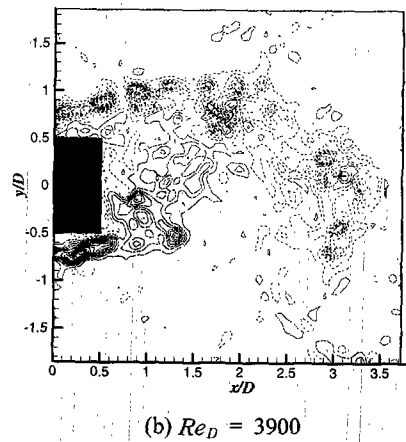
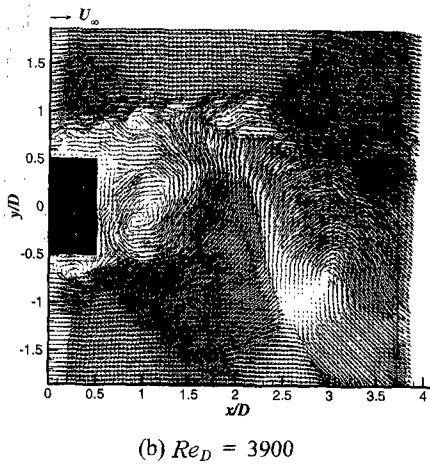
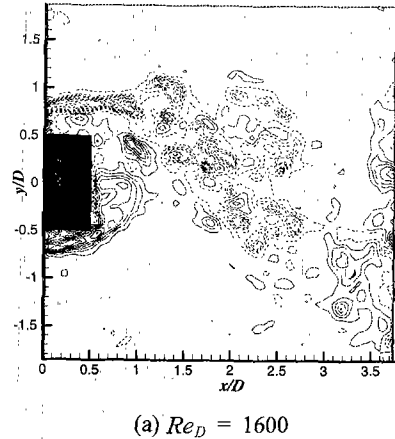
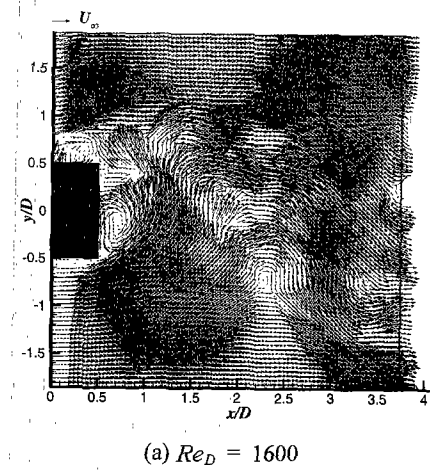


Fig. 2 Instantaneous velocity fields

Fig. 3 Instantaneous vorticity field

어서, 레이놀즈 수가 높아짐에 따라 박리전단층의 불안정성이 커짐을 보여주는 것이라 판단된다. 근접후류영역의 대규모 와류구조가 $Re_D = 3900$ 의 경우가 $Re_D = 1600$ 의 경우보다 더 크고, 대규모 와의 중심이 유동방향으로 조금 더 하류에 위치함을 알 수 있다. 또한 물체전면 모서리부에서는 일종의 불연속점을 형성하면서 속도가 크게 가속됨으로서 박리가 시작되는 물체의 상하면 모두에서의 압력이 크게 감소할 것으로 예상된다.

Fig. 3은 Fig. 2의 순간유동장의 속도벡터장으로부터 구한 와도분포를 나타내며 높은 레이놀즈수에서 조금 더 복잡한 구조를 보이고 있다. 두가지 레이놀즈 수 모두에 작은 와들이 대규모와속에 중속되어 있음을 볼 수 있고, 거대구조와

의 방향과는 반대방향의 와들이 속해 있는 데 이는 전단층 내에서 생성된 작은 구조의 와라고 판단되며, 이로부터 앞서 서술했던 전단층 내에서 생성되는 작은 구조의 와가 거대구조의 와보다 유출 주기가 빠름을 알 수 있으며, 독립적으로 움직인다는 것을 알 수 있다. 이 분포도에서 실린더 상하면으로 부터 와류의 유출이 명백하게 나타나고 있다. 유체덩어리의 되풀이되는 권입(roll-up) 또한 그림에서 볼 수 있다. 특히, $Re_D = 3900$ 의 경우 박리전단층의 Instability가 증가하여 정사각형 실린더의 상부에서 다수의 Kelvin-Helmholtz형 와구조를 보이고 있다.

3.2 전체 평균 속도장

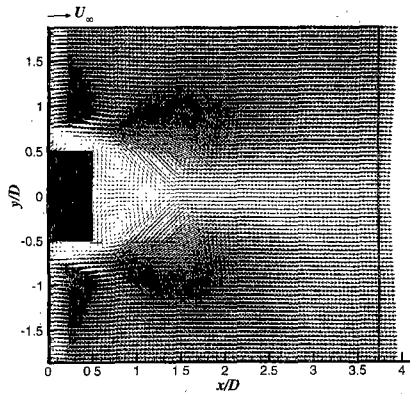
Fig. 4는 양상블 평균한 속도벡터장을, 그리고

Fig. 5은 평균한 속도장으로부터 구한 유선의 분포를 나타낸 그림이다. 레이놀즈 수 1600에서는 2010장, 레이놀즈수 3900에서는 2030장의 속도장 전체를 앙상블 평균한 결과이다.

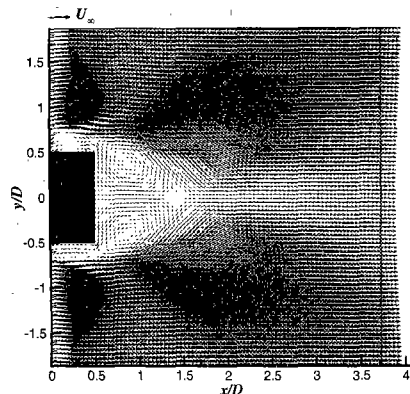
평균속도장에서 구한 유선의 분포로부터 유동의 구조가 상하 완벽한 대칭을 이루고 있음을 볼 수 있다. 원형실린더인 경우⁽⁶⁾ 레이놀즈 수가 1300일 때보다 3900일 때 재순환 버블의 길이가 훨씬 짧아진 반면, 정사각 실린더의 경우에는 레이놀즈 수 1600의 경우보다 높은 3900일 경우가 오히려 0.29D 정도 더 길어진다. 이처럼 레이놀즈 수 변화에 대해 원형 실린더의 경우와 정반대의 현상이 나타남은 주목할 만한 사실이다. 원형실린더인 경우 레이놀즈 수가 높아지면서 상하부 전단층의 불안정성이 커지고 난류혼합이 증대되면서 재순환 구간이 짧아지는 원인으로 알려져 있다. 그러나 정사각 실린더의 경우, 유동의 박리

점이 전방의 뾰족한 모서리에 고정되어 있고, 그곳에서 시작한 박리 전단층의 불안정성이 커짐과 동시에 박리유선이 벽면에서 멀리 이탈되고 와류가 후류방향으로 더 크게 발달함으로써 오히려 재순환 구역이 커지는 것으로 사료된다.

Lyn 등⁽⁵⁾이 아주 높은 레이놀즈 수 2.1×10^4 에서 LDV를 이용하여 사각주의 근접후류 유동장을 측정한 결과에서도 평균 재순환 영역이 $x = 1.4D$ 까지 확장됨을 보였다. 레이놀즈 수가 3900인 본 연구의 결과에서 평균 재순환 영역의 길이가 $x = 1.43D$ 정도임에 비취볼 때 Lyn 등⁽⁵⁾의 결과와 거의 일치함을 보인다. 레이놀즈 수가 상당히 차이가 있음에도 불구하고 재순환 길이가 유사한 것은 어느 정도의 레이놀즈 수 이상에서 재순환 영역의 길이에 미치는 레이놀즈 수의 영향이 미미해짐을 알 수 있고, 이는 사각주 후류의 특징중 하나이다.

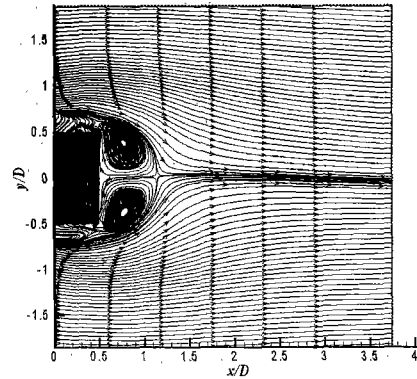


(a) $Re_D = 1600$

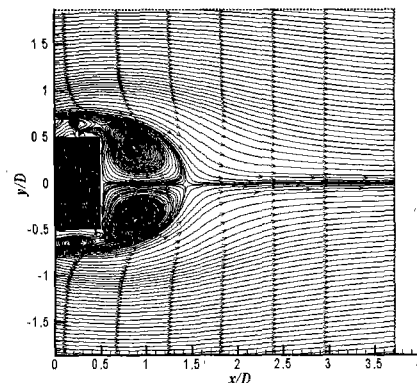


(b) $Re_D = 3900$

Fig. 4 Ensemble averaged velocity fields



(a) $Re_D = 1600$



(b) $Re_D = 3900$

Fig. 5 Streamlines from ensemble averaged velocity fields

본 연구에서 재순환 버블의 중심은 레이놀즈 수 1600에서는 $x = 0.77D$, $y = \pm 0.38D$ 이었고, 레이놀즈 수 3900에서는 $x = 0.87D$, $y = \pm 0.39D$ 로 x 방향으로는 후류방향으로 물러났고, 중심 간의 상하간격도 약간 늘어남을 알 수 있다.

Fig. 6는 양상블평균한 속도벡터장의 유동방향 중심선상에서 하류방향으로 U 속도성분을 추출한 그림이다. 일반적으로 hot-wire 실험에서는 v_{rms} , 또는 레이놀즈 응력이 최대인 지점을 재순환 영역의 끝지점으로 판단하나 본 연구에서는 유선의 분포와 중심선의 U 속도분포로서 정확히 판단하였다. U 성분이 역류되는 영역을 지나 0인 지점까지를 재순환영역의 끝지점으로 판단할 수 있다. 사각주인 경우 재순환영역의 길이는 본 실험에서 수행한 레이놀즈 수의 변화에 비교적 민감하게 변하고 있으며 $Re_D=3900$ 의 경우 약 1.43D 정도로 $Re_D=1600$ 의 경우 약 1.14D 정도임을 비교할 때 25% 이상의 증가를 보인다. 또한 최대역류 속도도 레이놀즈 수 3900경우에 $x=0.964D$ 에서 $-0.187 U_\infty$ 으로 레이놀즈 수 1600경우의 $x=0.795$ 에서 $-0.141 U_\infty$ 보다 33%정도 더 빨라졌다. 본 연구의 결과는 사각주의 경우에도 비교적 낮은 레이놀즈 수(4,000이하) 구간에서는 유동특성이 레이놀즈 수에 민감하게 변화함을 보여주고 있다. 이는 사각주 상·하면에서 형성되는 작은 박리구역과 연관되며, 향후 더욱 상세한 연구가 요구된다.

평균 속도벡터장의 중심선에서 유동방향 속도 성분의 x 위치에 따른 속도의 기울기는 레이놀즈 수의 차이에도 불구하고 $x/D < 2$ 정도까지는 거의 비슷한 크기로 감소 또는 증가를 보이다가 $x/D > 2$ 에서는 높은 레이놀즈 수($Re_D=3900$)의 경우가 조금 더 빨리 자유유동속도로 회복한다.

$Re_D = 3900$ 에서 평균유동장의 재순환 영역을 원형 실린더의 경우⁽⁸⁾와 비교해보면 같은 레이놀즈 수에 있어서 원형실린더가 1.5D로 조금 더 길게 나타났다. 그러나 최대 역류속도에서는 큰 차이를 보이며, 원형실린더의 경우($-0.27 U_\infty$)가 40%정도 더 큰 값을 보인다. 이는 후류의 폭이 원형실린더보다 사각일 경우가 더 넓으며, 이에 따라 재순환 유동의 속도는 동일한 운동량에 대해 낮은 값을 갖는다.

일반적으로 날카로운 모서리를 가진 뭉툭한 물체에 대한 경우, 레이놀즈 수의 영향이 훨씬 덜

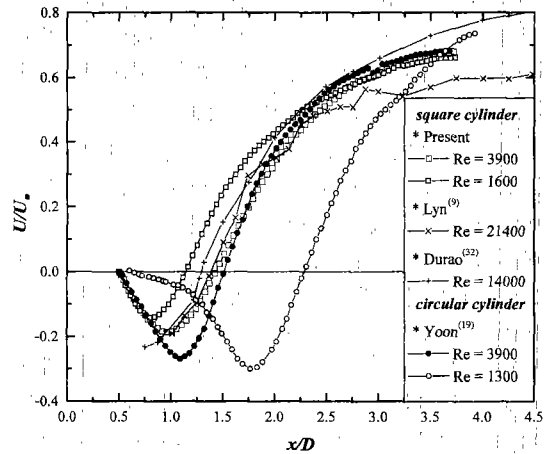


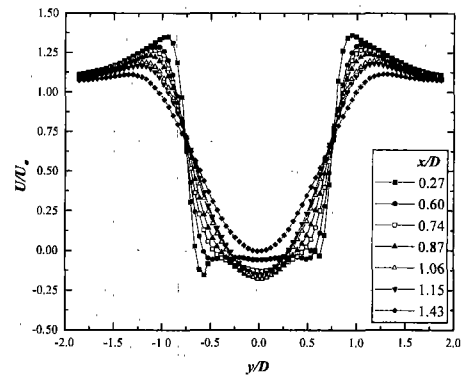
Fig. 6 Variation of the mean streamwise velocity along the centerline

효과적인 것으로 알려져 있다. $Re_D=3,900$ 에서의 본 연구 결과와 $Re_D=21,400$ 에서의 Lyn 등⁽⁵⁾의 결과는 레이놀즈 수가 많이 차이남에도 불구하고 거의 유사한 중심속도분포를 보이고 있다. 하지만, $Re_D=14,000$ 에서의 Durao 등⁽¹²⁾의 연구결과와 비교해보면 재순환 영역에서는 거의 비슷하나 속도회복구간에서는 큰 차이를 보인다. Durao의 경우 폐쇄비가 13%로 매우 높고 형상비가 6으로 상당히 작기 때문에 볼 수 있다. 또한 Durao의 경우 자유흐름의 난류강도가 6%로 매우 크다. West & Apelt⁽¹¹⁾는 원형 실린더 주위유동에 대해, 폐쇄비가 커지고 형상비가 작아지면 평균 배면 음압(negative mean base pressure)이 증가하며 항력계수가 더욱 커짐을 발견하였다. 또한 자유흐름 난류강도가 커지면 후류로의 유입(entrainment)이 커지며, 폐쇄비가 증가함으로써 수직방향의 속도구배가 커지게 되면서 유입을 촉진시킨다.

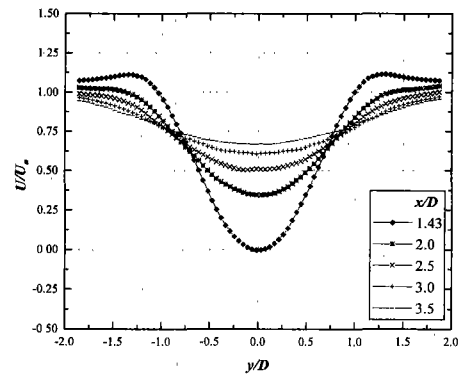
Fig. 7은 전체평균 속도장으로부터 U 속도성분을 각 지점에서 유동방향에 수직으로 추출한 그림을 도시한 것이다. 정사각실린더의 후류의 작용에 의한 운동량의 손실을 아주 잘 보여주고 있으며, 실린더를 중심으로 상하 대칭임을 알 수 있다. 정사각실린더의 후면에서 실린더에 매우 가까운 영역인 $x/D < 1.43$ ($Re_D=3900$, 재순환영역)까지의 후류에서는 역류현상이 관찰되고, $-1 < y/D < 1$ 인 영역에서 속도구배가 급격히 변화하는 경향을 나타내며, 후방으로 멀어질수록 속도구배

가 서서히 완만해짐으로서 운동량이 서서히 회복됨을 알 수 있다. 후류의 박리 경계층의 근적으로 추정되는 $y/D = \pm 1$ 에서는 자유유동속도 (U_∞)보다 큰 $U/U_\infty = 1.34$ 임을 나타내고 있다. 이것은 이 영역에서 사각실린더주위의 주류의 흐름과 Karman 와류의 상호작용과 같은 아주 강한 난류운동으로 인하여 외부유체가 실린더의 후방으로 큰 폭류를 이루면서 유입(entrainment)되어 혼합이 이루어지고 있기 때문이다. 또한, 날카로운 박리점과 폐쇄비(Blockage)의 영향으로 가속화됨을 간과할 수 없다. Hassan⁽¹³⁾은 실린더의 근접영역에서 자유유동속도보다 높게 나타나는 현상에 대하여 유동의 초기조건 즉 박리, 실린더 표면압력 그리고 경계층 내에서의 속도분포에 기인하는 것으로 설명하고 있다. 이러한 유동방향 평균속도 U 의 분포는 유동박리 전단층의 크기와 후류감소 속도분포를 나타낸다. Fig. 7(c)는 PIV로 측정된 본 실험 ($Re_D = 3,900$) 결과를 LDV측정실험(Lyn,⁵) $Re_D = 21,400$ 과 열선유속계 측정실험(Saha,⁶) $Re_D = 8,700$) 결과들을 비교한 것이다. 레이놀즈 수가 크게 차이남에도 불구하고, LDV로 측정된 Lyn의 결과와는 잘 일치함을 알 수 있다. 그러나, Saha의 결과는 많은 차이를 보이는데, 이는 열선유속계가 근접후류에서 발생하는 역류를 감지하지 못하기 때문이다.(Fig. 8(b)참조) 이와 같은 비교를 통해 정사각형 실린더의 후류유동은 어느정도 높은 레이놀즈 수 범위에서는 레이놀즈 수의 영향을 덜 받는다는 것을 알 수 있다.

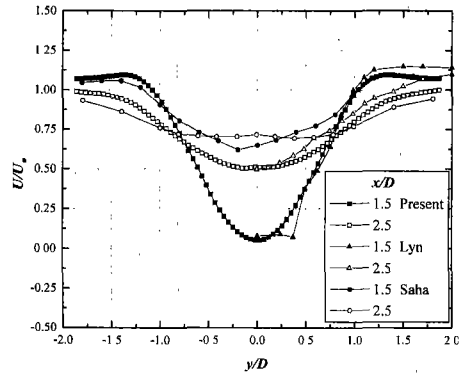
Fig. 8은 레이놀즈 수 3,900에서 $x/D=0.87$ 과 $x/D=1.43$ 에서 양상블평균속도와 80여개의 순간속도분포를 동시에 나타낸 것이다. 굵은 실선은 평균속도를 가리키고, 가는 실선은 순간속도 분포를 나타내는 것이다. 재순환 영역내의 최대역류속도 지점에서의 분포와 재순환 버블의 끝지점에서의 유동방향 속도분포를 나타내고 있으며, 전체적으로 상당량의 속도섭동이 존재함을 알 수 있다. 특히 재순환 영역의 끝지점은 자유유동의 속도정도의 크기로 속도섭동이 존재함을 볼 수 있다. 평균속도분포를 나타내는 굵은 실선은 난류섭동의 크기가 높을 때 V자형의 모양으로 발달하고, 난류섭동이 상대적으로 낮을 경우에 U자형의 모양을 이룬다. 두 그림에서 보듯 실린더 벽면에서 하류로 감에 따라 평균속도분포는 U자형



(a) $x/D = 0.27 \sim 1.43$



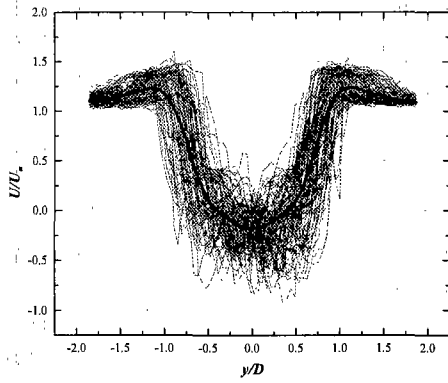
(b) $x/D = 1.43 \sim 3.5$



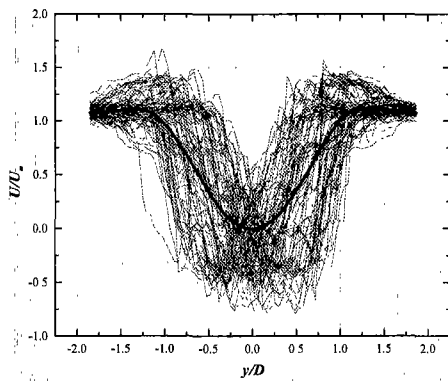
(c) $x/D = 1.5, 2.5$ (comparison)

Fig. 7 Profiles of the mean streamwise velocity at different x -locations ($Re_D = 3900$)

에서 V자형으로 변하고 있다. 이러한 형상은 Kravchenko & Moin⁽¹⁴⁾가 원형실린더의 유동에 대해 $Re_D = 3900$ 에서 LES로 연구한 결과와 일치하는 경향을 보이고 있다.



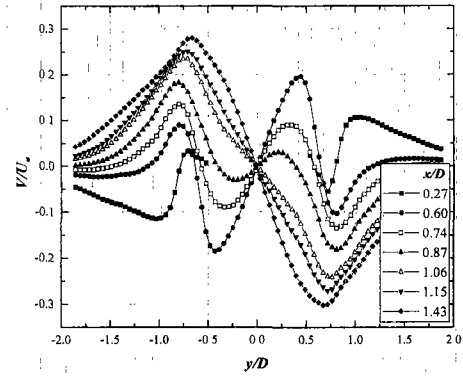
(a) $x/D = 0.87$ (bubble center-point)



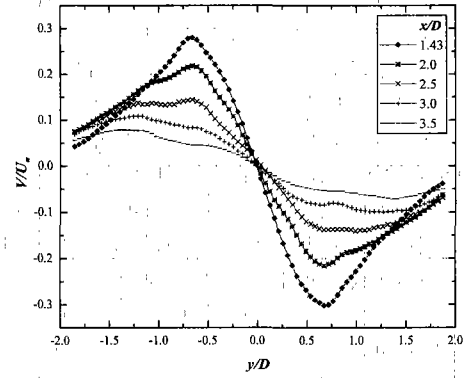
(b) $x/D = 1.43$ (bubble end-point)

Fig. 8 Profiles of instantaneous and mean streamwise velocity ($Re_D = 3900$)

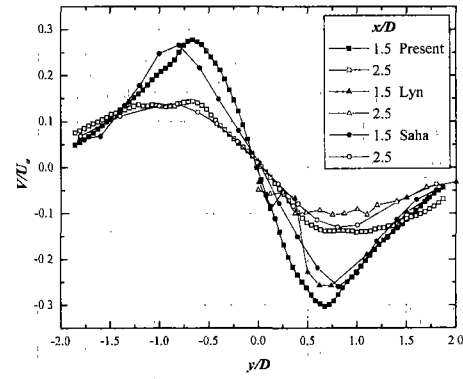
Fig. 9는 전체평균 속도장으로부터 V 속도성분을 각 지점에서 유동방향에 수직으로 추출한 그림을 도시한 것이다. 정사각실린더를 중심으로 후류의 상하부 분포는 역대칭분포를 보인다. 이는 $y/D > 0$ 인 상부영역에서는 재순환류가 시계방향으로, $y/D < 0$ 인 하부영역에서는 반시계 방향으로 회전함을 나타낸다. $x/D = 0.6, 0.74, 0.87$ 의 그래프에서는 재순환 버블중심의 내부영역($-0.39 \leq y/D \leq 0.39$)에서 또 다른 방향성분이 존재하고 있다. 이것은 실린더뒤 유동의 역전하는 영역을 나타내주고 있는 것이며, 평균 재순환버블 영역의 끝지점인 $x/D = 1.43$ 까지는 평균 수 직속도 성분(V)이 자유유동속도 U_∞ 의 거의 30% 정도 더 크게 나타나고 있어 이 영역에서 외부 유체의 유입과 혼합이 활발히 이루어지고 있을 것으로 추정된다. 그러나 Fig. 9(b)에서 보여주듯이 $x/D >$



(a) $x/D = 0.27 \sim 1.43$



(b) $x/D = 1.43 \sim 3.5$



(c) $x/D = 1.5, 2.5$ (comparison)

Fig. 9 Profiles of mean vertical velocity at different x -locations ($Re_D = 3900$)

1.43 이후에서는 더 이상 평균속도의 수직방향으로의 발달은 이루어지지 않고 약화되며 $x/D = 3.5$ 에서는 자유유동속도 U_∞ 의 약 7% 이내의 변화를 나타낸다. 이상에서 수평 및 수직평균속도

성분은 모두 하류로 갈수록 그 값들은 점점 감소한다. 이것은 와류형성이 하류로 갈수록 난류에 너지의 소산에 의해 그 강도가 점점 약해지기 때문으로 사료된다. Fig. 9(c)는 선행연구결과들과 본 실험의 수직방향 속도성분을 비교한 것이다. 측정기법들과 레이놀즈수의 차이가 남에도 불구하고 모두 좋은 일치를 보여주고 있다.

4. 결론

PIV측정기법을 이용하여 순간적인 역류를 가진 높은 난류의 근접 후류영역에서 믿을 만한 측정을 수행하여 높은 공간해상도를 가진 상세한 평균 데이터를 확보할 수 있었다. 이러한 정사각실린더 근접후류의 정량적 데이터가 계산의 결과 검증 시 좋은 비교자료로 활용될 수 있다.

정사각 실린더의 경우에는 레이놀즈 수가 1600에서 3900으로 높아짐에 따라 재순환영역의 길이가 $0.29D$ 정도 더 길어졌다. 이는 동일한 레이놀즈수 범위에서 원형 실린더의 경우와 정반대 되는 결과이다. 이러한 현상은 사각실린더의 경우 유동의 박리점이 전방의 뾰족한 모서리에 고정되어 있고, 레이놀즈수가 커질수록 박리전단층의 불안정성이 커짐과 동시에 박리유선이 벽면에서 멀리 이탈되고, 와류가 후류방향으로 커지는 원인으로 사료된다.

재순환 영역 내부에서의 후류 폭방향의 속도분포는 원형실린더와 같이 U-자 형에서 V-자 형으로 변하고 있으며, 이는 섭동유동의 강도와 연관됨을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) Roshko, A., 1961, "Experiment on the Flow Past a Circular Cylinder at very High Reynolds Numbers," *J. Fluid Mech.*, Vol. 10, pp. 345~356.
- (2) Nakaguchi, H., 1968, "An Experimental Study of Aerodynamic Drag of Rectangular Cylinder," *J. Japan Soc. Aero. Space Sci.* Vol. 16, pp. 1~5.
- (3) Okajima, A., 1982, "Strouhal Numbers of Rectangular Cylinders," *J. Fluid Mech.*, Vol. 123, pp. 379~398.
- (4) Sakamoto, H. and Arie, M., 1983, "Vortex Shedding from a Rectangular Prism and a Circular Cylinder Placed Vertically in a Turbulent Boundary Layer," *J. Fluid Mech.*, Vol. 126, pp. 147~165.
- (5) Lyn, D. A., Einav, S., Rodi, W. and Park, J. H., 1995, "A Laser-Doppler Velocimetry Study of the Ensemble-Averaged Characteristics of the turbulent Near Wake of a Square Cylinder," *J. Fluid Mech.*, Vol. 304, pp. 285~319.
- (6) Saha, A. K., Muralidhar, K., Biswas, G., "Experimental Study of Flow Past a Square Cylinder at High Reynolds Numbers," *Exps. Fluids.*, Vol. 29, pp. 553~563.
- (7) Williamson, C. H. K., 1996, "Vortex Dynamics in the Cylinder Wake," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 28, pp. 477~539.
- (8) Yoon, S. Y., 1999, "PIV Measurements in the Turbulent Near Wake of a Circular Cylinder," *M.S. Thesis, Mechanical Engineering, Pusan National University.*
- (9) 윤상열, 김상기, 김경천, 1999, "원주의 근접후류에 대한 레이놀즈수 영향 : PIV측정," *대한기계학회 추계학술대회논문집 B*, pp. 793~798
- (10) Lourenco, L. and Shih, C. 1993, "Characteristics of the Plane Turbulent Near Wake of a Circular Cylinder : A Particle Image Velocimetry Study," Not published.
- (11) West, G. S. and Apelt, C. J., 1982, "The Effects of Tunnel Blockage and Aspect Ratio on the Mean Flow Past a Circular Cylinder with Reynolds Numbers between 10^4 and 10^5 ," *J. Fluid Mech.*, Vol. 114, pp. 361~377.
- (12) Durao, D. F. G., Heitor, M. V. and Pereira, J. C. F., 1988, "Measurements of Turbulent and Periodic Flows around a Square Cross-Section Cylinder," *Exps. Fluids.*, Vol. 6, pp. 298~304.
- (13) Hassan, M. A. Z., 1989, "The Near Wake Structure of a Square Cylinder," *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 10, No. 4, pp. 339~348.
- (14) Kravchenko, G. and Moin, P., 2000, "Numerical Studies of Flow over a Circular Cylinder at $Re_D=3900$," *Physics of Fluids*, Vol. 12, No. 2, pp. 403~417.