

## PIV기법을 이용한 정사각 실린더의 근접후류에 관한 연구 (II)

- 난류유동 특성 -

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 (II)

- Turbulence Characteristics -

Man Bok Lee and Kyung Chun Kim

**Key Words:** Square Cylinder(정사각 실린더), Near Wake(근접후류), Vortex Shedding(와류유출), Particle Image Velocimetry(입자영상유속계), Coherent Structure(코히런트 구조), Separated Shear Layers(박리 전단층), Turbulence Characteristics(난류 특성)

#### Abstract

Turbulent flow characteristics in the near wake of a square cylinder have been studied experimentally by using a Digital PIV method. Experiments are performed at the Reynolds numbers of 1600 and 3900 based on the free-stream velocity and the square height. The ensemble averaged turbulence statistics are acquired from 2030 realizations of instantaneous fluctuating velocity field after the conventional Reynolds decomposition. The differences in turbulent intensity and Reynolds shear stress profiles for both cases indicate that the effect of Reynolds number seems to be discernible mainly due to the occurrence of transition in the separated shear layer. Because of the periodic nature of vortex shedding process, transverse velocity fluctuations contribute dominantly to turbulent kinetic energy distribution. A comparison with previous LDV data obtained at much higher Reynolds number shows a fairly good agreement each other. It turns out that the effect of Reynolds number diminishes as increasing Reynolds number, which is a well-known feature of a sharp-edged bluff body wake. The streamwise variation of turbulence intensities are compared with those from a circular cylinder along the centerline at the same Reynolds number. The overall magnitudes and the decay rates of turbulence intensities are quite similar, but some differences are noticeable especially in the transverse intensity variation.

#### 기호설명

$D$  : 정사각형 실린더의 한변의 길이  
 $f$  : 와류유출 주파수  
 $k$  : 난류 운동에너지 (= T.K.E)  
 $Re_D$  : 레이놀즈 수 (=  $U_\infty D / \nu$ )  
 $St_D$  : Strouhal 수 (=  $fD / U_\infty$ )  
 $U_\infty$  : 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

뚱뚱한 물체 주위의 유동은 비행역학적 항력, 구조적 진동 그리고 난류 혼합과정에 직접적으로 영향을 미치고 있어 실린더 후류의 난류유동에

\* 회원, 부산대학교 대학원

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소

E-mail: kckim@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2324 FAX : (051)512-9835

대한 연구가 다양하게 진행되어 오고 있다.

Cantwell & Coles<sup>(1)</sup>은 레이놀즈 수가  $1.4 \times 10^5$ 일 때 원주의 근접후류에서 Flying-Hot-Wire를 이용하여 와류유출주파수에 의한 평균항기법으로 난류 운동방정식 중 난류특성에 크게 영향을 미치는 레이놀즈 평균항을 측정하여 난류구조를 설명하였다. 부정속 등<sup>(2)</sup>은 2차원 원주 후류 유동을 근접후류와 먼 후류로 나누어 통계학적 방법인 확률밀도함수, 자기상관계수 그리고 Power spectra 등을 측정하여 난류특성을 분석하였다. Lyn 등<sup>(3)</sup>은 LDV를 이용하여 레이놀즈 수  $2.1 \times 10^4$ 에서의 사각주 후류의 속도 분포를 측정하고, 이를 와류 유출이 발생하여 와동이 성장되는  $x=4D$ 까지의 영역과 와동이 충분히 자라서 확산되는  $x=4D$  이후 영역으로 나누어 설명하였으며, Saha 등<sup>(4)</sup>은 열선유속계(HWA)를 이용하여 두 가지 높은 레이놀즈 수 8,700과 17,625에서 정사각실린더 후류의 난류특성을 연구하였다. Yoon<sup>(5)</sup>은 섭동이 매우 큰 원주의 후류영역에서 PIV시스템에 의해 획득된 2000장의 순간속도장을 앙상블평균함으로써 정확한 평균 난류특성치들을 추출하였다.

정사각 실린더의 경우 높은 레이놀즈 수에서 날카로운 모서리가 고정적인 유동박리를 유발시킨다. 많은 선행연구에서 볼 수 있듯이 약간의 위상변화를 보이는  $x=4D$  이후의 먼 후류와는 대조적으로 근접후류의 유동은 shedding cycle 동안에 비정상 특성이 존재한다. 근접후류에는 실린더로부터 주기적으로 유출하는 칼만 와열의 존재, 역류영역의 공존, 전단층의 불안정성 등에 의해 종래의 측정기법으로는 정확한 측정이 불가능하다. 열선을 이용한 기존의 난류측정은 재순환버블 바깥 영역에서 이루어졌으며, 공간해상도가 많이 떨어진다. 강한 혼합이 발생하는  $x=4D$  이내에서의 정사각 실린더의 근접후류 특성이 연구된 바는 매우 드물며, 상세한 데이터 또한 부족한 실정이다.

최근 컴퓨터 하드웨어와 소프트웨어의 발달로 다양한 레이놀즈 수에 대해 DNS와 LES 등의 수치계산에 의한 물체의 근접후류해석이 많이 이뤄지고 있다.<sup>(6-9)</sup> 원형실린더의 경우  $Re_D=3900$ 에서 많은 이론해석이 수행되어 왔으며, 앞으로 정사각 실린더의 경우에도 LES와 같은 이론해석이 시도될 것으로 예상된다.

따라서, 정사각 실린더 후류의 유동 특성변화등에 대한 보다 체계적인 연구가 필요하다고 생각한다.

본 연구에서는 박리점이 모서리에 고정되어 발생하는 정사각주 후류의 유동형성에 대한 물리적 특성을 보다 더 깊이 이해하고, 이론연구를 위한 자료로 사용하기 위하여 풍동내 균일 유동장에 정사각 실린더를 설치하고 입자 영상 유속계를 이용하여 사각주 후류의 재순환 영역을 포함한 근접후류영역에서의 평균난류특성치들을 상세히 측정하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도 및 좌표계를 나타낸 것이다. 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 정체실과 단면비 2.67:1의 2차원 수축노즐을 통과한 후 시험부로 유입된다. 시험부에서 유입되는 공기의 자유유동 난류강도는 1% 이내의 균일 유동으로 유지된다.

정사각 실린더의 길이(L)는 80 cm, 한변의 길이(D)는 20 mm이다. 이 실린더는 풍동 시험부 입구로부터 30 cm(15D) 후방의 양벽면에 수평으로 설치하였다. 자유유동 속도는 각각 1.27 m/s, 3.03 m/s로 고정시켰으며, 이때의 각각의 레이놀즈 수  $Re_D$ 는 1600, 3900이었다.

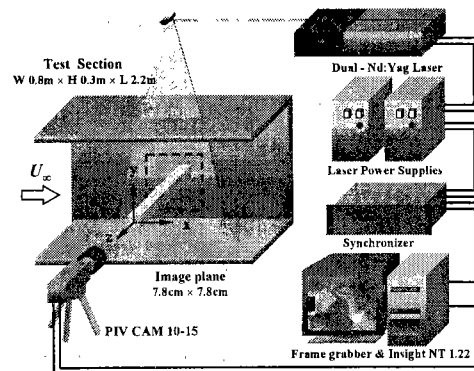


Fig. 1 Schematic of experimental setup

본 연구에서 사용된 PIV 시스템은 이중 펄스 방식의 Nd:Yag 레이저 시스템과 1K×1K의 고해상도 CCD카메라(TSI, PIVCAM10-15), 동기화장치 (TSI 610032) 및 구동용 팬티엄 컴퓨터로 구성되어 있다. 사용된 입자는 올리브 오일 에어로졸이며, 입자의 평균 직경은 2 μm이다.

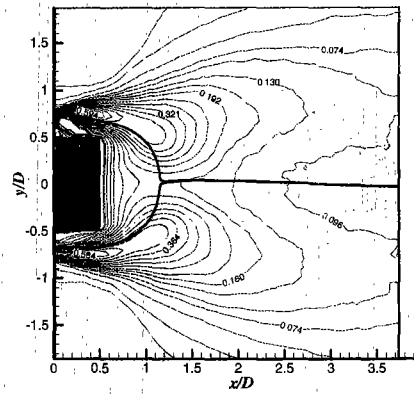
본 실험에서의 PIV 측정영역(field of view)의 면적은 78 mm×78 mm이다. 속도벡터의 추출 알고리즘은 2화상 상호상관기법을 이용하였다. 탐색영역(interrogation window)의 크기는 24×24 pixels이고, 탐색영역의 실제크기는 1.8 mm 정도이며, 50%의 겹침(Overlap)이 허용되었다. 전체 화상에서 6889(83×83)개의 속도벡터들을 얻어내었고, 벡터간의 공간해상도는 0.93 mm이다. 구해진 속도벡터는 본 실험실에서 보유하고 있는 후처리프로그램을 사용하여 불량벡터의 제거, 보간, 앙상블평균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

3. 결과 및 고찰

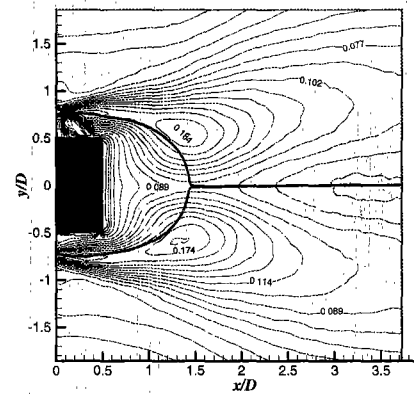
3.1. 평균 난류유동장

본 연구는 2010장( $Re_D=1600$ )과 2030장( $Re_D=3900$ )의 순간속도장을 Reynolds decomposition을 통해 얻은 평균물성치들이기 때문에 상당히 신뢰성이 있는 통계적 난류특성이 얻어질수 있다고 판단된다.

Fig. 2는 유동방향의 레이놀즈응력의 등분포를 도시한 것이다. 재순환영역 이후 y방향 양쪽의 상하 지점에서 유동방향의 레이놀즈 응력이 대칭적으로 쌍봉의 형태로 더 크게 작용하고 있음을 보여주고 있다. 물론 순간유동장에서는 나타나지 않는 경향이다. 주기적으로 상하에서 유출되어 대류되어 나가는 대규모 와의 거동이 원인이라 판단된다. 따라서 와의 유출이 없고 대류되는 후류의 중심인  $y=0$ 의 지점에서는 상대적으로 아주 작은 값을 가지게 된다.  $Re_D = 1600$ 의 경우 박리전단층이 유동방향으로 stretching하면서 피크치 ( $x/D=0.363, y/D=\pm 0.755$ )를 나타내고 다시 하류로 결합되면서 점점 줄어들고 있다.  $Re_D = 3900$ 의 경우 사각주의 상하부에 두 개씩의 피크를 가진다. 박리전단층에서 높은 값을 보이고 하류방향으로 점점 줄어들다가 재순환영역의 끝( $x/D=1.34, y/D=\pm 0.56$ )에서 다시 증가하고 있으며, 이는 박



(a)  $Re_D = 1600$

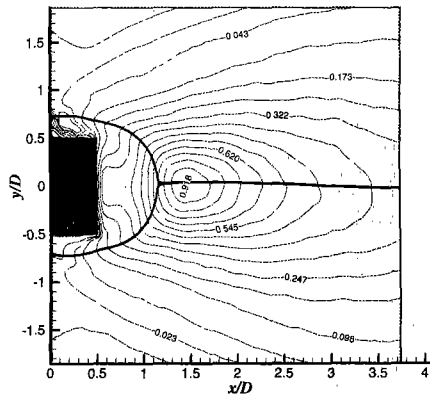


(b)  $Re_D = 3900$

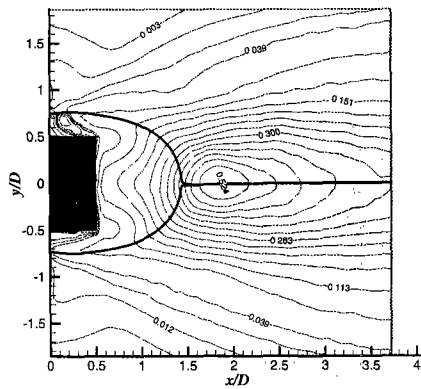
Fig. 2 Contours of the streamwise Reynolds normal stress :  $\overline{u'^2} / U_\infty^2$

리 전단층의 천이가 촉진된 결과로 사료된다.

Fig. 3은 유동에 수직방향으로의 레이놀즈응력의 등분포를 도시한 것이다. 일반적으로 원형실린더의 경우, 재순환영역 끝지점인 유선 분포의 교차점과  $v_{rms}$ 가 최대인 지점이 일치될 보이나, 사각 실린더의 경우는 유선분포의 교차점으로 찾은 재순환영역 끝지점보다 후류방향으로 뒤로 물러나서 가장 큰 피크가 형성되고 있다. 근접후류의 매우 높은  $v_{rms}$ 값은 유출된 와가 주기적으로 교차되면서 발생하는 유사난류(Pseudo-turbulence)에 의한 값이다. 원주에 비해 큰 규모로 형성된 사각주의 유출와로 인해 최대  $v_{rms}$ 값은 재순환 영역 뒷쪽에 위치한다. 또한  $y=0$ 인 지점에서 최대값을 가지는 이유는 칼만와열의 주기적인 대류가 원인이라 판단된다.  $Re_D=1600$ 의 경우는 실린더 후류



(a)  $Re_D = 1600$

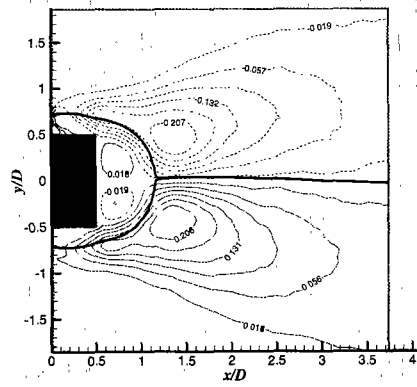


(b)  $Re_D = 3900$

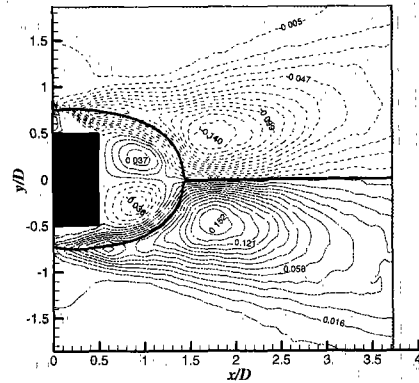
Fig. 3 Contours of the vertical Reynolds normal stress :  $\overline{v^2} / U_\infty^2$

의  $x/D = 1.441$ 인 중심영역에서  $Re_D=3900$ 보다 높은 피크치를 보이고 있으나 이는 거의가 주유동으로 부터의 주기적 와유출에 의한 유사난류이며 그 값이 0.918로서 주유동 모델값과 거의 같은 크기를 나타내고 있다. 또한  $Re_D=3900$ 의 경우  $x/D = 1.889$ 인 중심영역에서 수직방향의 난류강도가 크게 작용하고 있으며 이는 유동속에 실제 난류섭동성분이 많이 포함된 것이다

Fig. 4는 난류 레이놀즈 전단응력의 등분포를 도시한 것이다. 난류성분  $u, v$ 의 레이놀즈 전단응력은 같은 위치에서 각 방향 난류 성분중 2방향 ( $x, y$ 방향)성분간의 상관관계에 의하여 발생하는 것으로 유동장에서 운동량의 이동을 의미하는 것이다. 상하부 형태는 대칭이나 부호가 반대로 나타나고 있으며, 이는 상하의 와유출로 인해 수직



(a)  $Re_D = 1600$



(b)  $Re_D = 3900$

Fig. 4 Contours of the Reynolds shear stress :  $\overline{u'v'} / U_\infty^2$

방향 섭동성분  $v$ 의 부호가 반대로 나타나기 때문이다.  $Re_D=1600$ 의 경우 레이놀즈 전단응력의 가장 큰 값은 재순환 영역에서 조금 더 하류에 부호가 다른 두 개의 피크지점( $x/D=1.303, y/D=\pm 0.461$ )이 상하로 대칭을 이뤄 위치하고 있으며 그 피크치가  $Re_D=3900$ 의 경우보다 큰 이유는 박리 전단층의 천이가 충분히 진행되지 않은 상황에서 주기적으로 유출되는 와들이 교차하여 아주 큰 유사난류를 발생시켰기 때문이다.  $Re_D=3900$ 의 경우 레이놀즈 응력의 피크치가 상하부에 각각 2개씩 존재한다. 그 피크치들은 사각주 후면 모서리 근처와 재순환 영역에서 조금 더 하류영역( $x/D=1.758, y/D=\pm 0.466$ )에 위치한다. 이는 전단층의 천이가 촉진되어 박리 전단층은 난류전단 유동으로 발달되었음을 보여준다. 주기적 섭동의

영향으로 레이놀즈 응력의 피크 크기가  $Re_D=1600$ 보다 작은 값을 가지지만 재순환 영역내에 있는 피크는  $Re_D=1600$ 의 경우보다 2배 가량 큰 값을 가진다. 이는 난류가 재순환영역내에 매우 많이 증가됨을 나타내는 것이다. 또한 재순환영역 내에서 반대부호를 가진 작은 두 개의 작은 피크점은 실린더 후면과 벽 근처에서도 양 성분간의 상호작용이 일어나고 있음을 보여주는 것이다.

Fig. 5는 난류 운동에너지의 등분포를 나타낸 그림이다. 일반적으로 단위질량당 난류운동에너지는  $k = 0.5(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$ 로 정의되지만 Bradshaw 등<sup>(10)</sup>은  $\overline{v'^2}$ 과  $\overline{w'^2}$ 은 거의 같은 크기로 존재한다고 가정하였다. 본 연구에서는 2차원 PIV기법으로 수평, 수직의 난류섭동성분만 측정

하였으므로  $k = 0.75(\overline{u'^2} + \overline{v'^2})$ 의 식으로 구한 것이다.  $Re_D=3900$ 의 경우  $x/D=1.786$ 의 중심부에서,  $Re_D=1600$ 의 경우  $x/D=1.441$ 의 중심부에서 가장 큰 운동에너지의 분포를 보이고 있으며, 무차원화한 난류운동에너지의 피크치가  $Re_D=1600$ 에서 더 큰 이유는 주기적으로 교차하는 와로 인해 발생하는 유사난류의 영향으로 사료된다. 전체적으로 주유동에 대해 수직방향의 수직 전단응력과 유사한 형태를 나타내고 있음을 볼 수 있다. 이는 주유동 방향의 난류섭동성분보다 유동에 수직 방향의 난류섭동성분이 더욱 크게 작용함으로써 나타나는 것으로 예측되며 이는 운동량 전달에 있어서 수직 난류섭동성분이 다른 성분에 비해 크게 기여함을 알 수 있다.

앞의 세가지 응력을 볼 때 재순환영역의 경계 지점까지는 경사가 심하고 재순환영역을 벗어나면 완만해지는 경향을 볼 수 있으며, 최대지점도 재순환영역 경계의 근처에 있음을 알 수 있다. 그리고 수직방향의 난류값이 다른 두 값보다 더 큼을 알 수 있는데, 이는 순간유동의 수직속도성분은 대부분 난류섭동성분이고 또한 칼만와열의 비대칭적인 유출에 의해 증폭되었기 때문으로, 수직방향으로의 난류에 의한 운동량전달이 더욱 활발함을 의미한다.

3.2 통계적 난류 특성치의 분포형상

정사각 실린더 후류의 각지점에서 유동방향에 수직으로 유동의 난류 특성치들을 추출하였다. PIV기법을 이용한 유동장측정의 데이터는 정확하고 해상도가 높은 특징을 가지고 있다. 이같은 특징을 이용하여 정사각 실린더의 좁은 근접후류 영역을 재순환버블 영역(recirculation bubble)의 내부영역과 외부영역으로 나누어서 난류 특성치들을 나타내었다. 특히 재순환버블 영역의 내부영역은 유동의 변화가 급격한 영역이므로, 완만한 변화를 보이는 외부영역보다 더 세밀하게 x 방향 위치를 나누었다.

Fig. 6은 전체평균 속도장으로부터 유동방향의 레이놀즈응력( $\overline{u'u'}$ )을 각 지점에서 유동방향에 수직으로 추출한 그림을 도시한 것이다. 실린더 후류의  $-1 \leq y/D \leq 1$  영역에서 y축의 중심에서 보다 상하부의 양쪽 모두에서 최대치가 각각 나타나는 전형적인 쌍봉(Bimodal)형태를 이루고 있

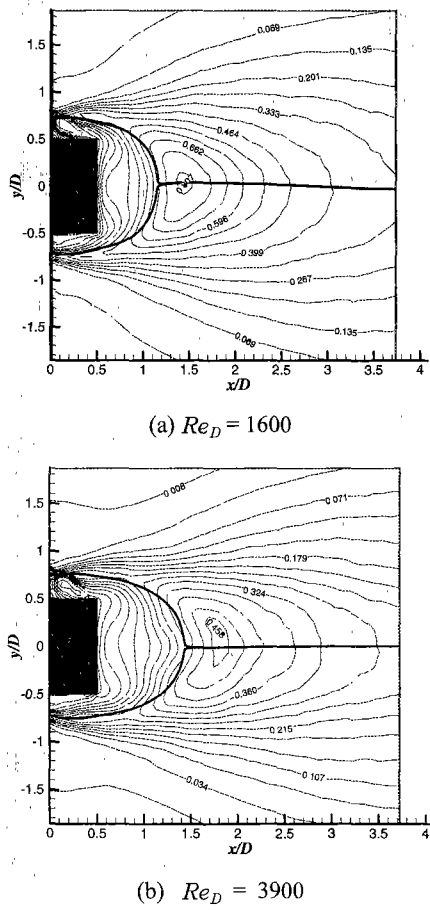
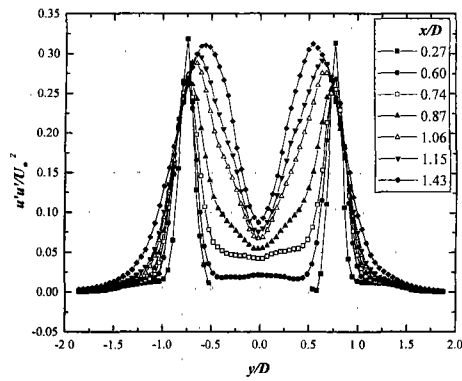
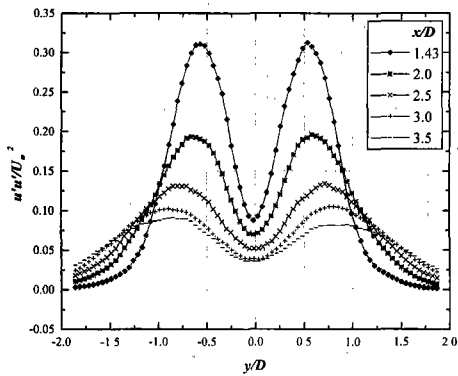


Fig. 5 Contours of the turbulent kinetic energy :  $0.75(\overline{u'^2} + \overline{v'^2}) / U_\infty^2$



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

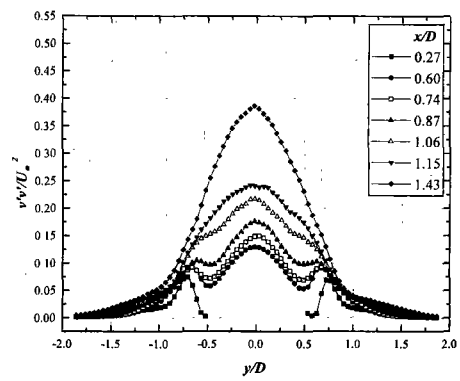


(b)  $x/D = 1.43 \sim 3.5$

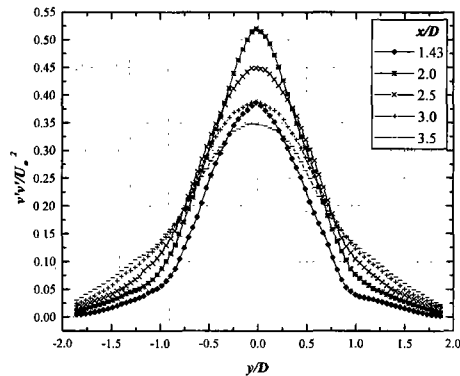
Fig. 6 Profiles of mean Reynolds normal stresses at different  $x$ -locations

는데, 유동방향으로  $x/D = 1.43$ 의 위치에서 약 0.31정도의 최대치를 나타낸다. 이러한 쌍봉 형태를 나타내는 것은 주기적인 와류 유출로 인한 현상으로 사료된다. Fig. 6(b)을 보면  $x/D = 3.5$ 에서는 쌍봉형태가 매우 낮고 더욱 넓게 자리잡고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향으로 보아 더 먼 후류로 갈수록 쌍봉형태가 사라지고 점차적으로 최대치가 감소하여 넓은 영역에서 작용할 것으로 예측된다.

Fig. 7은 전체평균 속도장으로부터 주유동에 수직방향의 레이놀즈응력( $\overline{v'v'}$ )을 각 지점에서 유동방향에 수직으로 추출한 그림을 도시한 것이다. 유동방향 레이놀즈응력과는 달리  $y$ 축의 중심부에서 단 하나의 피크치를 나타내고 있다.  $x$ 의 변화에 대하여  $x/D = 1.43$ 에서는 수직 레이놀즈응력이 약 0.385의 값을 나타내며 유동방향 성분의 쌍봉형태에서의 두 피크치(대략 0.31)보다 약



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



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

Fig. 7 Profiles of mean Reynolds vertical stresses at different  $x$ -locations

간 큰값을 보인다.  $x/D = 2$ 에서는 중심에서 0.087의 수평방향 레이놀즈응력보다 약 5.9배 큰 0.52의 수직 레이놀즈응력의 최대치를 보이고 있다. 이는 후류 핵심영역에서  $y$ 방향으로의 운동이 활발히 일어남으로 인하여 외부공기의 유입과 혼합이 강하게 이루어지고 있음을 나타내고 있다. 그러나 하류로 갈수록 소규모 난류가 우세하여 등방성이 이루어지므로 변동속도가 점차적으로 감소하여  $x$ 방향성분과 비슷한 크기로 변화할 것으로 사료된다.<sup>(2)</sup>

그리고,  $x/D \leq 0.87$  보다 이전 영역에 있어서,  $y/D = \pm 0.5$  근방에서는 주위보다 낮은 수직방향의 레이놀즈응력을 나타낸다. 이 영역은 정사각 실린더의 모서리 위치와 일치하는 곳으로서 아마도 유동의 박리와 Blockage effect로 인해 매우 빨라진 유동방향의 평균속도와 박리점이 모서리부분으로 고정되어진 물체 후류유동의 복잡함이 원

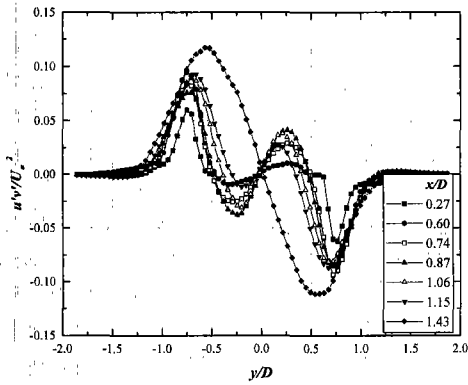
인으로 생각된다.

원형의 경우 일반적으로 재순환버블의 끝지점에서 수직방향의 난류섭동치가 최고치를 나타낸다.<sup>(5)</sup> 하지만 본 연구에서의 정사각실린더의 경우 최고치는 재순환 버블의 끝지점에서 조금 더 후류인  $x/D=2$  근방에 위치하고 있다. 또한 수직방향의 난류성분은 섭동의 폭이 크므로 양상불 횡수에 매우 민감하지만 본 연구에서는 2010번 이상의 충분한 양상불횡수로 인해 데이터의 정확성과 신빙성을 확보한 상태이다.

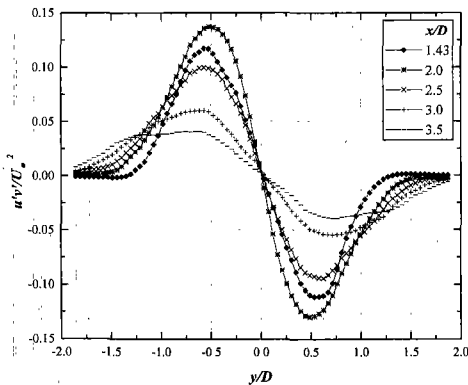
Fig. 8은 전체평균속도장으로 부터 추출한 레이놀즈응력( $\overline{uv}$ )을 각 지점별로 주유동에 수직한 방향으로 추출한 그림들을 도시한 것이다. 난류전단응력은 난류성분간의 상호작용과 운동량의 이동을 의미하는 것으로 재순환영역의 끝지점( $x/D=1.43$ )이 아닌 그 보다 조금 더 하류인  $x/D=2$

근방에서 최대값을 나타내고 하류로 갈수록 점차로 감소하면서 넓게 분포함을 보이고 있다. 이때 그 값들은  $y > 0$ 에서 부(-),  $y < 0$ 에서 정(+)이 되고,  $y/D = \pm 0.5$  근방에서 난류전단응력이 가장 크게 작용하고 있으며 모든 후류중심에서는 영(0)을 나타낸다. 이러한 경향은 와류의 방향이 후류중심을 기준으로 서로 반대가 되기 때문이다. 이 현상은 본 연구와 같은 레이놀즈 수에서의 Yoon<sup>(5)</sup>의 원형실린더에서도 동일한 현상을 확인할 수 있으며 원형의 경우 최대 피크치가 ( $x/D=1.54, y/D=\pm 0.4$ ) 더 좁은 영역에서 존재함을 알 수 있었다. 그리고, 본 연구에서 재순환영역의 끝지점보다 조금 더 하류인  $x/D = 2$  근처에서 가장 와가 발달해 있으며 난류에너지의 생성이 가장 활발하다고 판단된다.

세가지 난류응력의 시간평균한 양은 난류섭동

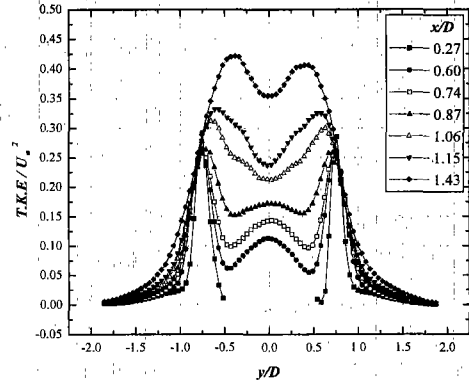


(a)  $x/D = 0.27 \sim 1.43$

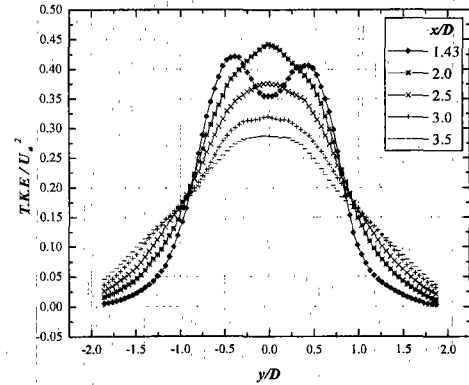


(b)  $x/D = 1.43 \sim 3.5$

Fig. 8 Profiles of mean Reynolds shear stresses at different  $x$ -locations



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



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

Fig. 9 Profiles of turbulent kinetic energy at different  $x$ -locations

으로부터 상당한 영향이 있음을 보여준다. 특히  $\overline{v'v'}$ 의 영향은 강조되고 있으며, 모두 후류 중심선에 대해 대칭임을 알 수 있다.

Fig. 9은 전체평균 속도장으로부터 난류 운동에너지(T.K.E)의 분포를  $x$ 의 각 지점에서 유동방향에 수직으로 추출한 그림을 도시한 것이다. 난류운동에너지는 정사각 실린더 후류  $-1 \leq y/D \leq 1$ 의 영역에서 보다 더 활발한 운동에너지 분포를 잘 나타내고 있다. 이는 수직방향의 레이놀즈 응력 분포와 거의 유사한 경향을 보이고있어 이 영역에서 수직방향성분이 크게 작용함을 알 수 있으며, 이 영역에서 난류혼합이 강하게 이루어지고 있음을 예측할 수 있다. 또한  $x$ 위치의 변화에 따라 점차적으로 증가하여  $x/D = 2$  근방에서 최대치 0.44를 보이다 점차적으로 감소하여 후류로 갈수록  $y$ 축의 넓은 영역에 고루 분포되어 감을 보이고 있다. 여기서  $x/D=1.43$ 영역까지는 수평방향 레이놀즈의 분포와 유사한 특징인 실린더의 상하부에 각각 피크치가 있는 쌍봉 형태를 보이고 있다. 이것은 주기적으로 상하에서 유출되어 대류되어 나가는 대규모 와의 거동이 원인으로 판단된다.

3.3 기존의 연구 결과들과의 비교

Fig. 10은 동일한  $Re_D=3900$ 에 대한 원주 및 정사각 실린더의 중심선상에서 얻어진 수평 및 수직방향의 난류강도 변화를 보여주고 있다. 이 그림에서 수직방향 섭동성분이 수평방향 성분보다 훨씬 크다는 것을 알 수 있다. 정사각실린더에 대한 본 연구결과와 두 난류섭동은 엇갈린 부분도 있지만 전체적으로 볼 때 동일 레이놀즈 수의 원형실린더의 경우보다 조금 더 크다. 좀 더 상세히 살펴보면 유동방향의 난류강도는 사각주의 경우 재순환 영역을 조금 지난 후류  $x/D = 1.47$ 에서 29.8%의 난류강도의 최대치를 보이고 이후  $x/D = 4$ 까지 점차적으로 감소하는 경향을 보이며, 원주의 경우 빠른 역류의 영향으로 최대 역류지점과 일치하는 피크지점을 보이고 있으며 1.5D이후 사각주와 원주후류의  $u_{rms}$ 의 변화는 거의 일치하고 있다. 수직방향의 난류강도는 사각주의 경우 유동방향성분과는 달리 실린더 근접후류에서 급격히 증가하여  $x/D=1.88$ 에서 72.4%의 난류강도를 보이고 있다. 이는 유동방향성분 최대치의 2.4배정도 큰 값을 나타내는 것이며 그

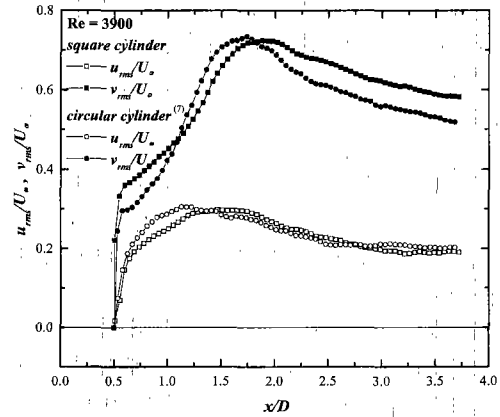
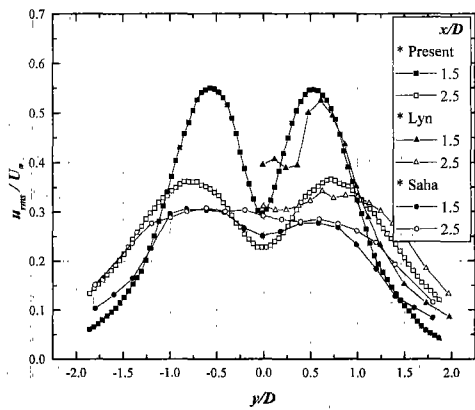


Fig. 10 Variation of turbulence intensities along the centerline

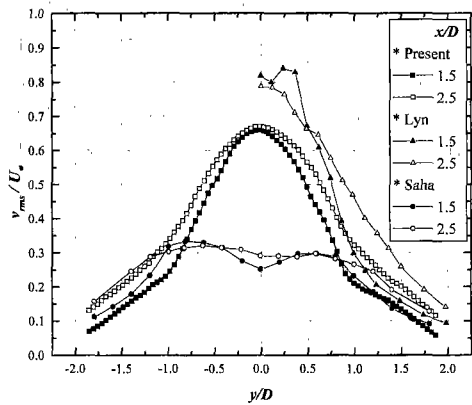
이후에도 유동방향 성분보다 크게 작용하고 있어 실린더 후류 중심선상에서 난류혼합이 활발히 이루어지고 있음을 알 수 있다. 이는  $x/D=1.88$ 영역에서 강한 외부유체의 유입과 혼합으로 인하여 유동방향 속도섭동보다 수직방향 속도섭동이 당연히 크게 나타나고 하류로 갈수록 단면적이 넓어지므로 속도가 점차로 감소한다. 또한 재순환 영역에서 사각주의  $v_{rms}$ 가 원주보다 높은 이유는 shedding freq.가 상대적으로 낮으므로 원주보다 큰 규모의 와가 교대로 유출하면서 v-fluctuation의 피크가 커지기 때문이며, 재순환 영역이후에는 원주와 사각주의  $v_{rms}$ 가 거의 같은 비율로 감소하나 사각주가 큰 값을 가지는 것은 wake의 폭이 넓기 때문으로 사료된다.

Fig. 11에는 정사각 실린더의 후류에 대한 선행 연구의 결과들과 본 연구의 결과를 비교한 그림이다. 유동방향 난류강도의 비교에서 Lyn 등<sup>(3)</sup>이 수행한 LDV 측정치는 비록 레이놀즈 수에서 3,900과 21,400으로 엄청난 차이가 있음에도 불구하고 상당히 잘 맞는다는 것을 알 수 있다. 반면에 Saha 등<sup>(4)</sup>의 열선풍속계 결과는 매우 큰 차이를 보이는데, 이는 열선이 국소적인 역류를 감지하지 못하기 때문이다. 유동에 수직방향의 난류강도 분포를 비교해 보면 Lyn의 LDV 데이터는 비록 조금 큰 값을 보이나 본 실험과 형상이 비슷하지만 Saha의 열선 풍속계 결과는 최대치에서 2배 이상의 차이를 보여주고 있다. 레이놀즈 전단응력 분포의 비교에서도 비슷한 경향이 나타나

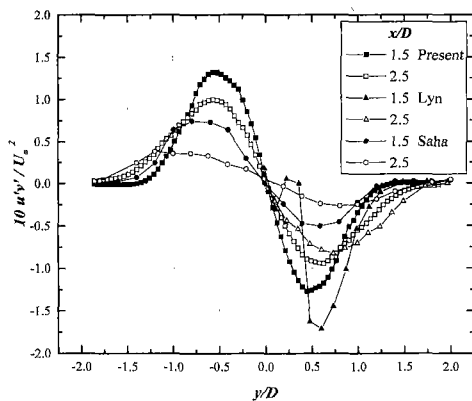




(a) Streamwise velocity fluctuations:  $\sqrt{u'^2} / U_\infty$



(b) Vertical velocity fluctuations:  $\sqrt{v'^2} / U_\infty$



(c) Turbulent shear stress:  $10 \overline{u'v'} / U_\infty^2$

Fig. 11 Comparison of turbulence characteristics

고 있다. 이상의 비교를 종합해 보면, 어느정도 높은 레이놀즈 수 영역에서는 난류특성이 레이놀즈 수에 크게 지배를 받지 않고 있다는 사실을

알 수 있으며, 이는 날카로운 모서리를 갖는 독특한 물체의 일반적인 후류 특성과 일치하는 경향이다.

4. 결론

입자 영상 유속계(Particle Image Velocimetry)를 이용하여 획득한 정사각 실린더의 근접후류영역에서의 난류특성치들을 상세히 분석 및 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 본 실험에서 수행된 두가지 레이놀즈수 1600 과 3900의 경우, 난류강도 및 레이놀즈 수력 분포에 상당한 차이가 있음이 발견되었다. 비록 날카로운 모서리에 의한 박리점은 같으나 박리 전단층의 천이의 유무에 따라 피이크치의 발생위치가 달라진 것으로 사료된다.

(2) Reynolds decomposition에 의한 난류운동에너지의 분포에는 수직방향의 섭동성분이 지배적인 것으로 나타났고, 이는 주기적 와류출에 따른 유사난류(pseudo turbulence)의 영향임을 알 수 있었다.

(3) 기존의 정사각 실린더의 실험치와 비교한 결과 LDV에 의한 측정치는 레이놀즈 수의 상당한 차이가 있음에도 불구하고 본 실험의 레이놀즈 수 3900의 결과와 비교적 잘 일치하고 있다. 이는 높은 레이놀즈 수에서 날카로운 모서리를 갖는 후류유동이 레이놀즈 수의 영향을 적게 받고 있음을 입증하는 것이다.

(4) 동일한 레이놀즈 수에서 유동방향 중심선을 따라 난류강도의 변화를 원형실린더의 경우와 비교해본 결과, 전반적인 크기는 비슷하나 흐름방향 난류강도는 재순환 영역 내부에서 차이를 보였고 흐름의 수직방향 난류강도는 재순환 영역 전후에서 차이를 보였다. 특히 수직방향의 섭동은 정사각주의 경우가 원주의 경우 보다 일률적으로 다소 높은값을 보여준다.

참고문헌

(1) Cantwell, B. and Coles, D., 1983, "An Experimental Study of Entrainment and Transport in the Turbulent Near Wake of a Circular Cylinder," *J. Fluid Mech.*, Vol. 136, pp. 321~374.

- (2) 부정숙, 윤순현, 이종춘, 강창수, 1985, "원주 뒤의 2차원 후류 유동 특성," 대한기계학회 논문집, 제 9권, 제 5호, pp. 555~563.
- (3) 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.
- (4) Saha, A. K., Muralidhar, K. and Biswas, G., "Experimental Study of Flow Past a Square Cylinder at High Reynolds Number," *Exps. Fluids.*, Vol. 29, pp. 553-563.
- (5) Yoon, S. Y., 1999, "PIV Measurements in the Turbulent Near Wake of a Circular Cylinder," *M.S. thesis*, Mechanical Engineering, Pusan National University.
- (6) Bosch, G. and Rodi, W., 1998, "Simulation of Vortex Shedding Past a Square Cylinder with Different Turbulence Models," *International journal for Numerical methods in fluids*, Vol. 28, pp. 601~616.
- (7) Saha, A. K., Muralidhar, K. and Biswas, G., 2000, "Vortex Structures and Kinetic Energy Budget in Two-Dimensional Flow Past a Square Cylinder," (*An international journal*) *Computers & fluids*, Vol. 29, No.6, pp. 669~694.
- (8) Sohankar, A., Davidson, L. and Norberg C., 2000, "Large Eddy Simulation of Flow Past a Square Cylinder: Comparison of Different Subgrid Scale Models," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 122, pp. 39~47.
- (9) Robichaux, J. , Balachandar, S. and Vanka, S. P., 1999, "Three-Dimensional Floquet Instability of the Wake of Square Cylinder.," *Physics of fluids A, Fluid dynamics*, Vol. 11, No. 3, pp. 560~578.
- (10) Bradshaw, P., 1968, "An Instruction to Turbulence and Its Measurement," Pergamon Press.