

## PIV기법을 이용한 정사각실린더의 근접후류에 관한 연구 (III)

- 위상평균유동장 -

이 만 복\* · 김 경 천†

(2001년 2월 27일 접수, 2001년 8월 30일 심사완료)

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

- Phase Average -

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), Phase Average(위상평균), Strouhal Number(스트로할 수)

#### Abstract

Phase averaged velocity fields in the near wake region behind a square cylinder have been (successfully) obtained using randomly sampled PIV data sets. The Reynolds number based on the flow velocity and the vertex height was 3,900. To identify the phase information, we examined the magnitude of circulation and the center of peak vorticity. The center of vorticity was estimated from lowpass filtered vorticity contours (LES decomposition) adopting a sub-pixel searching algorithm. Due to the sinusoidal nature of circulation which is closely related to the instantaneous vorticity, the location of peak vorticity fits well with a sine curve of the circulation magnitude. Conditionally-averaged velocity fields represent the Karman vortex shedding phenomenon very well within 5 degrees phase uncertainty. The oscillating nature of the separated shear layer and the separation bubble at the top surface are clearly observed. With the hot-wire measurements of Strouhal frequency, we found that the convection velocity changes its magnitude very rapidly from 25 to 75 percent of the free stream velocity along the streamwise direction when the flow passes by the recirculation region.

기호설명	
$D$	: 정사각형 실린더의 한변의 길이
$N$	: 모든 속도장의 개수
$N_x$	: $X$ 조건에 해당하는 속도장의 수
$Re_D$	: 레이놀즈 수( = $U_\infty D / \nu$ )
$St_D$	: Strouhal 수( = $fD / U_\infty$ )
$U_\infty$	: 자유유동속도

$\vec{V}$	: 속도장
$X$	: 와 중심의 $x$ 축상의 위치
$x, y, z$	: Cartesian 좌표계
$f$	: 와류출 주파수
$\omega_z$	: 와도( = $\partial v / \partial x - \partial u / \partial y$ )
$\Gamma$	: 순환

#### 1. 서론

조직적인 난류구조에 관한 연구는 조건부 샘플링기법이 가능해지면서 매우 활기를 띄었고, 컴퓨터의 발달로 더욱 발전하였다. 실린더의 후류

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

유동 중에는 칼만와열과 같은 조직적인 난류구조가 존재하며 주기적으로 상하에서 와유출이 발생되기 때문에, 순간유동장과 평균유동장의 형태가 다르다. 주기적인 유동장 해석에서 시간평균과 위상평균에 대한 관계에 대해 Reynolds & Hussain<sup>(1)</sup>에 의해 제안되었으며, 전체평균유동장은 주기적인특징의 유동특성과 구조적 특성을 정확히 알 수가 없다. 이러한 특성을 고려한 위상평균법이 일반적인 앙상블평균 통계치의 측정 대비 난류장 해석에 기여하는 바가 크다.

또한, 와유출은 주기적으로 시간에 따라 변하는 유동이므로 시간의 변화에 따른 유동특성을 파악할 필요가 있다. 시간에 의존하는 와도장을 구하기 위한 방법으로는 위상평균기법이 사용되어 왔다.<sup>(2~5)</sup> PIV계측은 순간적으로 유동장 전체를 계측할 수 있는 반면에 샘플링 주기가 매우 길기 때문에 시간에 의존한 위상평가를 수행하기에는 많은 한계를 지니고 있다. 하드웨어 동기화에 의한 샘플링 기법이 위상평가를 위한 기존의 시도이었으며, 초고속카메라를 이용하여 샘플링 주기를 높이는 방법이 또 하나의 대안으로 나서고 있다. 하지만 하드웨어적으로 유동장과 동기시키는 방법은 유동의 불안정성과 불확실성이 큰 후류영역에서는 상당한 어려움이 있으며, 고가의 부가적인 장치를 필요로 한다. 따라서 PIV에서의 위상평균 방식에 있어 이러한 단점을 극복하고자 PIV를 통해 구한 속도장내에서 주기적인 물리량을 산출하여 위상평가를 수행하고자 한다. 이미 Lourenco 등<sup>(6)</sup>은 PIV 시스템으로 구한 속도장내에서의 순환과 화상획득 시간을 조합함으로써 시간 시리트로 속도장을 재구성하여 원주후류의 위상평가가 가능함을 보였으나, PIV가 샘플링 주기가 3Hz이하로 아주 길다는 것을 감안하면 이들이 시도한 방식은 와유출주파수가 1Hz이하의 아주 작은 경우에만 한정됨을 알 수 있다. 실제 이들이 적용한 유동은 와유출주파수가 약 0.25Hz인 저속유동이었다. Kim 등<sup>(7)</sup>은 PIV시스템이 샘플링 주기가 길어 시간정보에 의존한 위상평균에 많은 어려움이 있으므로, 시간정보에 의존하지 않고 램덤샘플링으로부터 얻은 속도장에서 와 중심위치와 기준선호인 순환의 크기를 조합함으로써 주기와 위상을 추출하는 기법을 제시하였다.

사각주 후류와 같이 주기적인 성질이 강하게 존재하는 난류전단 흐름에서는 대규모 조직적 난

류구조가 존재하여 혼합, 유입 및 열전달에 크게 영향을 주게 된다. 이의 영향을 평가하기 위하여는 위상평균법이 필수적이며, 이는 실제유동을 더욱 잘 설명해 줄 수 있을 것이다. 본 연구에서는 PIV계측에서의 위상평균의 가능성을 보여준 Kim 등<sup>(7)</sup>이 개발한 “와추적 위상평균기법”을 이용하여 위상평가를 수행하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

Fig. 1는 본 연구에 사용된 정사각 실린더의 후류유동에 대한 계략도 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 2.2m이다. 3마력의 속도가 변형 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, 한 변의 길이(D)는 20 mm이다. 이 실린더는 풍동 시험부 입구로부터 30 cm(15D) 후방의 양벽면에 수평으로 설치하였다. 자유유동 속도( $U_\infty$ )는 3.03 m/s로 고정시켰으며, 이때의 레이놀즈 수는 3900이었다.

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.

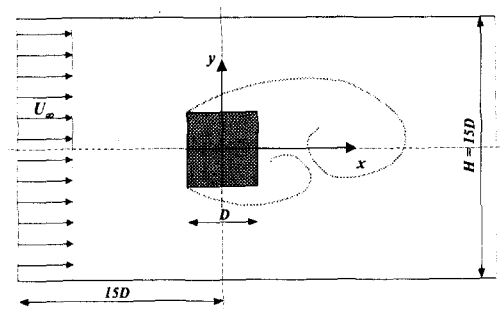


Fig. 1 Definition sketch of the flow around a square cylinder

본 연구에서 사용한 PIV 시스템은 이중 펄스 방식의 Nd:Yag 레이저 시스템과  $1K \times 1K$ 의 고해상도 CCD카메라(TSI, PIVCAM10-15), 동기화장치(TSI 610032) 및 구동용 팬티엄 컴퓨터로 구성되어 있다. 사용된 입자는 올리브 오일 에어로졸이며, 입자의 평균 직경은  $2 \mu m$ 이다.

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

### 3. 와류 유출특성

Fig. 2는 레이놀즈 수 3900에서 열선풍속계로 측정된 유동방향의 섭동속도성분에 대한 파워 스펙트럼분석을 보여 주고 있다. 확률이 큰 주파수에서 단 하나의 피크를 이루며, 위치에 따라 그 크기는 다르게 나타나지만 주파수는 거의 같게 나타난다. 이 스펙트럼을 통해  $Re_D = 3900$  인 경우 지배적인 와류유출 주파수는  $f = 20.75$  Hz임을 알수 있고, 이 때의 Strouhal 수( $St_D = fD/U_{\infty}$ )는 0.136이다.

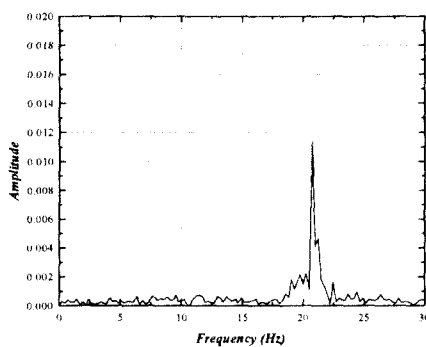


Fig. 2 Power spectra of streamwise velocity fluctuation

Okajima<sup>(8)</sup>는 정사각 실린더를 지나는 유동에서 자유흐름 난류강도가 0.5%이고,  $1 \times 10^3 < Re_D < 2 \times 10^4$  범위의 레이놀즈 수 영역일 때 스트로울 수는 약 0.133으로 일정하게 나타난다고 보고하였고, Lyn 등<sup>(9)</sup>은 높은 레이놀즈 수 21,400 에서  $St_D = 0.132 \pm 0.004$ 임을 보였다. 이들의 결과는 본 실험에서 측정된 값들과 잘 일치함을 알 수 있다. 참고로 원형 실린더의 경우 Yoon<sup>(10)</sup>는 본 연구와 같은  $Re_D = 3900$ 에서 구한 스트로울 수는 0.21이었다.

## 4. 위상평균

### 4.1 와추적 위상평균기법

와추적 위상평균기법은 후류영역에서 PIV 시스템에 의해 랜덤하게 샘플링된 각각의 속도장에서 위상을 대표하는 변수(거대구조 와)와 이에 종속되는 주기적인 두 물리량(와도의 중심위치, 순환)의 추출과 조합을 통해 위상을 결정하는 통계적인 방법으로, 와도의 중심추적, 고정된 검사체적에서의 순환추출, 와도의 중심과 순환의 조합을 통한 주기와 위상결정, 같은 위상의 순간속도장의 평균으로 크게 4가지 단계를 가진다.<sup>(7)</sup>

#### 4.1.1 거대구조 와의 중심 추적

PIV계측은 순간유동장 전체를 같은 시간대에 획득할 수 있음에도 불구하고, 기술적인 한계로 인해 화상획득시간이 길다. 따라서 Nyquist 조건을 만족시키지 못하기 때문에 위상평가를 위한 하나의 개념인 시간을 포기할 수 밖에 없으며, Kim 등<sup>(7)</sup>은 시간을 대신할 개념으로 거대구조 와의 위치를 선정하였다. 주기적으로 유출되는 와는 서로 다른 공간적인 위치를 점하고 있으며, 따라서 시간의 개념을 대신할 수 있다고 사료된다.

위상에 따른 와의 구조는 거대구조 와에 의존하기 때문에, 위상평가를 위해서 거대구조 와의 중심을 추적하여야 한다. 본 연구에서는 LES 기법에서 사용하는 low pass filter를 이용하여 복잡한 순간유동장에서 거대구조를 찾아내었다. Fig. 3에서 보듯이 필터링하지 않은 순간와도장에서는 매우 다양한 스케일의 와가 존재하여 매우 불규칙적이기 때문에 이러한 거대구조를 가진 와의 중심을 찾는 것은 불가능하다. 하지만, 필터링을

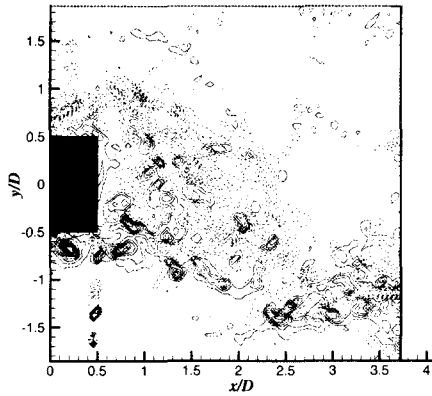


Fig. 3 Instantaneous vorticity field

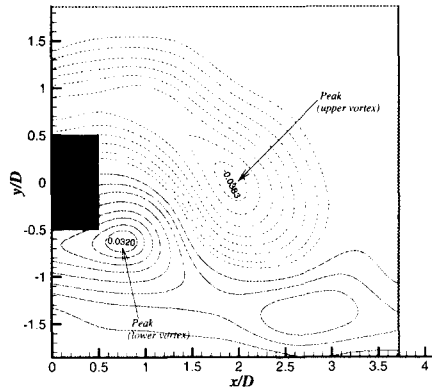


Fig. 4 Filtered instantaneous vorticity field

수행함에 따라 작은 구조의 와는 사라지고 거대 구조 와의 거동만이 남게 되어 Fig. 4에서처럼 와 중심의 판단이 가능하게 된다. 이때, 거대구조 와의 중심은 절대적인 와도가 가장 큰 지점으로 판단한다.

또한 추적된 와도 중심은 grid 격자 정도의 해상도 밖에 가지지 못하므로, 고해상도 sub-grid까지의 추적이 요구된다. 와도의 분포가 Gaussian 형태입에 착안하여, 와도의 최대지점, 그리고 피크의 좌우상하에 있는 와도값으로 Gaussian 근사식 (1)을 사용하여 sub-grid peak를 추적하였다.<sup>(11)</sup>

$$\epsilon = \frac{\ln \omega_{-1} - \ln \omega_{+1}}{2(\ln \omega_{-1} + \ln \omega_{+1} - 2 \ln \omega_0)} \quad (1)$$

여기서  $\epsilon$  은 피크지점에서부터 Gaussian 피팅 함수로 추적된 피크까지의 차이이고 단위는 grid

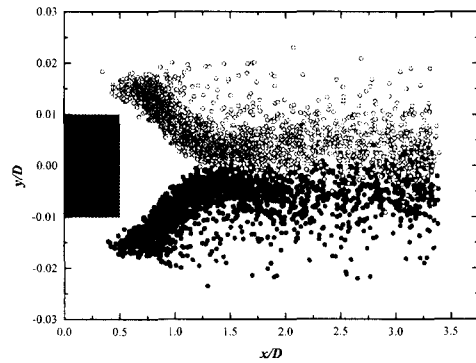


Fig. 5 Vortex center trajectory  
(○ : upper vortex, ● : lower vortex)

단위이다. 그리고 첨자 “-1”은 피크 이전의 값, “+1”은 피크 이후, “0”은 피크를 나타낸다.

Fig. 5는 2030여개의 순간속도장을 필터링한 후 구한 와도장으로부터 원주 상하에서 유출되는 와의 중심위치를 sub-grid까지 추적하여 도시한 것이다. 상하 와의 중심에 대한 전체궤적은  $y=0$ 인 지점에서 교차되며,  $y=0$ 에 이르는  $x$ 축 방향의 거리는 약  $1.4D$  정도이고, 이것은 재순환영역의 끝지점과 거의 일치한다.

또한 와중심이 전체적인 궤적은 유지하지만 상하로의 분산이 극심함을 볼 수 있다. 이것은 기존의 하드웨어 동기화에 의한 위상평균을 수행하기에는 상당한 어려움이 따른다는 것을 보여준다. 따라서 얻어진 순간속도장들에서 위상에 대한 정보를 직접 추출할 수 있는 와추적 위상평균 기법은 PIV시스템에서 매우 용이함을 알 수 있다.

4.1.2 순환 추출

실린더후류는 와유출이 일정한 주기를 가지면서 일어나는 현상이기 때문에 각 순간속도장의 특정한 영역에서의 물리량 또한 주기적으로 변한다. 따라서 이러한 주기적으로 변화하는 물리량들 중 순환(circulation)을 기준신호로 선택하였으며, 순환의 경우는 적분형태를 가지기 때문에 불확실성이 작은 물리량이라 판단된다. 순환은  $1.1D \leq x \leq 1.745D$ ,  $-0.34D \leq y \leq 0.305D$ 의 영역을 선택하여 각각의 순간속도장을 필터링한 후 식 (2)에 의해 계산되어진다.

$$\Gamma = \oint \vec{V} \cdot d\vec{s} \quad (2)$$

순환이 계산된 영역은 전체평균 속도장에서의 재순환영역의 끝지점 주변으로, 상하 와의 중심이 주기적으로 교차함으로써, 유동장의 주기성이 매우 강하게 나타나는 영역이다.

#### 4.1.3 위상결정

Fig. 6은 레이놀즈 수 3900에서 와 중심의  $x$  위치와 순환을 조합해서 도시한 것이다. 점선과 실선은 각 속도장으로부터 계산된 순환데이터를 필터링을 거쳐 sine함수로 근사한 것이며 순환이 와의 중심위치에 따라 아주 주기적임을 보여주고 있다. 따라서 이러한 조합 데이터로부터 거대구조 와의 중심 위치가 조건이 되는 일종의 조건부 샘플링으로써, 식 (3)과 같은 조건부 위상평균을 하였다. 또한 sine함수와 잘 일치한다는 것은 측정영역 내에서  $x$ 방향으로의 대류속도가 거의 일정하다는 것을 의미하며,  $1.4D$  이후부터 조금씩 어긋나기 시작하는데 이것은 실린더후류가 재순환 영역을 벗어나므로써 와의 대류속도가 변화하고 있기 때문인 것으로 판단된다.

$$\langle \vec{V} | X \rangle = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N_X} \sum_{n \in N_X} \vec{V} \quad (3)$$

본 연구에서는 순환이 최대에 이르는 지점을 위상  $0^\circ$ 로 정의하였다. 이것은 순환추출영역을 재순환영역의 끝지점으로 선택했었기 때문에 실린더 하부에서 형성된 와가 한 주기 내에서 최대

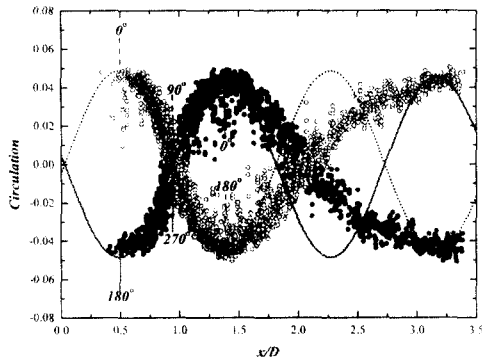


Fig. 6 Variation of the circulation  
(○: upper vortex, ●: lower vortex)

로 발달된 시점을 의미하며, 반면 실린더 상부에서는 와의 발달이 시작되는 시점을 나타낸다. 그리고, 나머지 위상들은 sine함수의 위상에 따라 정의하였다.

#### 4.2 위상평균 속도장

조건부 추출법은 표본을 일정한 시간 간격으로 취하는 것이 아니라 주어진 조건에 적합할 경우만 표본으로 취하는 기법을 의미하며, 특히 위상평균이라는 것은 주기적으로 와가 유출될 때의 신호에 있어서 일정한 위상을 그 조건으로하여 데이터를 처리하는 것을 의미한다.

거대구조 와 중심의  $x$  위치와 순환의 조합에서 sine함수의 근사를 통한  $x$ 방향으로의 공간적 주기는 레이놀즈 수 3900의 경우 약  $35.71 \text{ mm}$ 이고 이 주기와 열선으로부터 얻은 와유출주파수를 곱하면 근접후류의  $x$ 방향의 평균대류속도를 구할 수 있으며, 또한  $y$ 방향의 공간적 주기는 와가 실린더의 상하부에서 주기적으로 유출되므로 실린더의 직경과 거의 일치한다. 열선으로 측정된 와유출주파수는  $20.75 \text{ Hz}$ 였으며 이때의  $St_D$ 수는  $0.136$ 이었다. 따라서 시간평균한 재순환영역에서 해당하는  $0.5D \leq x \leq 1.5D$  구간에서의 조직적 구조의  $x$ 방향의 평균대류속도는 대략  $0.741 \text{ m/s}$  ( $\approx 0.245 U_\infty$ ),  $y$ 방향의 평균대류속도는 대략  $0.415 \text{ m/s}$  ( $\approx 0.137 U_\infty$ )로 기존의 알려진 재순환영역 밖에서의 대류속도,  $0.7 \sim 0.8 U_\infty$ 와는 많은 차이가 난다. 이것은 근접후류의 재순환영역에 의해 와의 중심케적이 주류를 따라 충분히 대류되지 못하기 때문으로 판단된다.

Fig. 7은 앞서 정의된 위상에서  $\pm 5^\circ$  (공간적인 거리로 환산하면 약  $\pm 0.50 \text{ mm}$ )내의 속도장을 위상평균한 결과를 보여주는 것이며, Fig. 8은 위상평균된 와도장들을 나열한 것이다. 이로부터 Karman 와열이 유출되는 위상평균거동의 주기가 잘 형성됨을 알 수 있다. 각 위상에서 평균한 속도장의 개수는  $60 \sim 70$ 개 정도였기 때문에 평균속도는 어느 정도 신뢰를 할 수 있으나 난류의 정보를 얻기에는 미흡한 개수이다. 위상  $0^\circ$ 의 경우, 순간속도장의 위상결정할 때의 정의에서처럼 실린더 하부에서 한 주기내의 가장 발달한 와를 형성하고 있으며, 이때 와중심은 재순환 영역의 끝지점과 거의 일치함을 볼 수 있다. 위상이 바

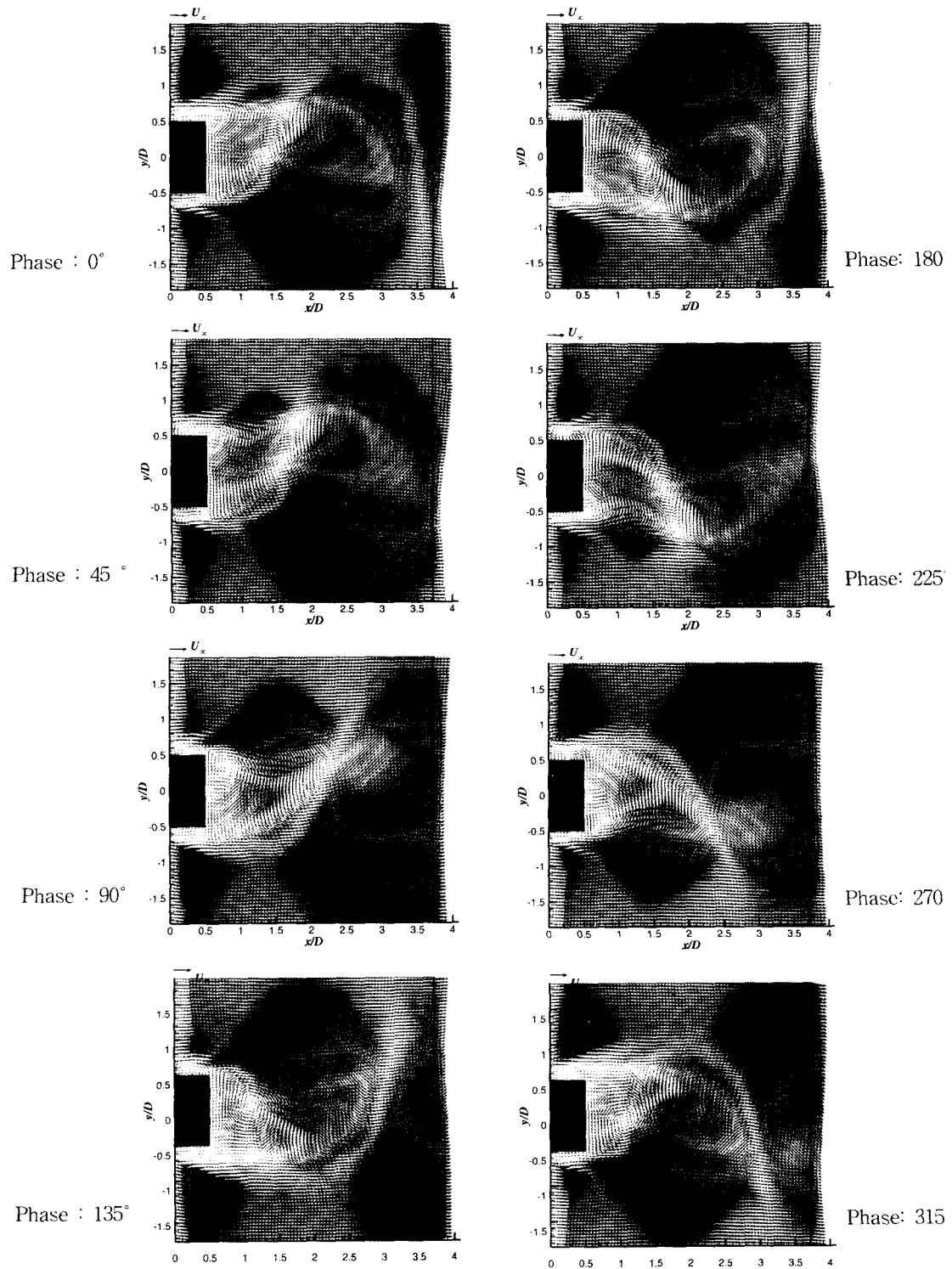


Fig. 7 Phase averaged velocity fields according to phases

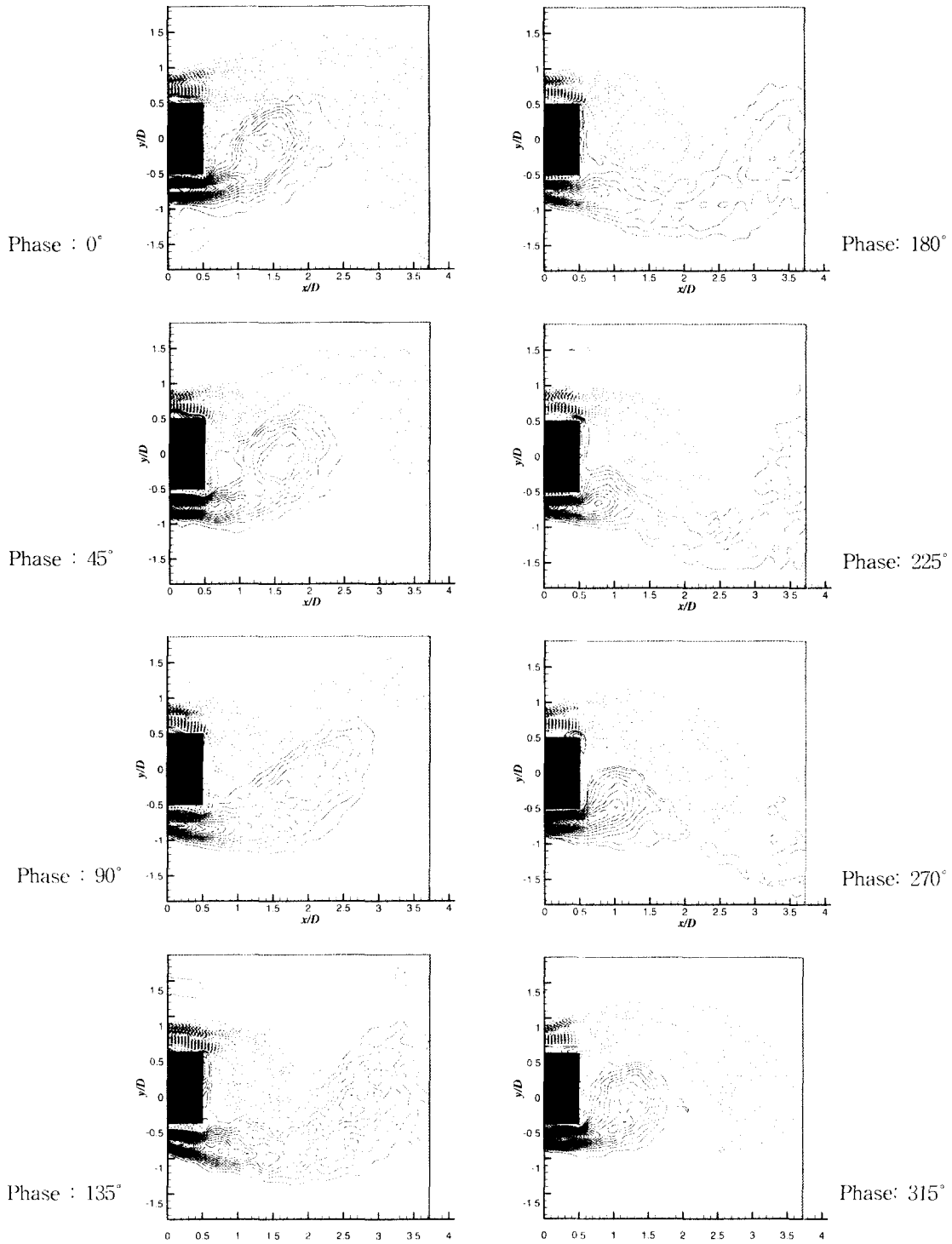


Fig. 8 Phase averaged vorticity fields according to phases

끝에 따라 그 형상이 타원형상을 하면서 하류로 흘러 떨어져 나가고 다시 새로운 와의 형성이 시작하고 있으며, 이러한 과정동안 상부에서는 정반대의 패턴을 유지하고 있다. 즉, 실린더 뒷면에 있는 두 개의 와동이 주기적으로 꼬리를 물고 박리되어 유동과 함께 떠내려가는 것을 확인할 수 있다. 새로운 와동이 교대로 형성되며 계속해서 박리되고, 정상유동과는 대조적인 새로운 주기적 비대칭 유동이 생성되므로 양력과 회전력이 항력에 추가되어 나타날 것으로 유추된다. 또한, Fig. 8을 보면 실린더 상하부에서 생성되는 와의 형태가 대각선으로 타원형태임과 스트레칭이 이루어지는 축을 확인할 수 있으며, 수평방향에 대한 스트레칭 축의 각도가 와의 형성을 시작할 때가 가장 크고 위상이 바깥에 따라 점차 각도가 작아짐과 동시에 하류방향으로 늘어짐을 알 수 있다. 원주의 위상평균유동장과 다른점은 날카로운 모서리를 갖는 사각주의 상,하면에서 발생하는 박리구역의 존재이다. 위상에 따라 이들 박리구역의 길이가 변하고 있으며, Phase에 따라 상면의 박리전단층이 재부착하는 경향이 잘 관찰된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 PIV 시스템을 이용하여 램덤샘플링을 통해 얻은 순간속도장으로부터 거대구조 와의 중심위치와 기준선호인 순환의 조합에 의한 통계적인 방법인 와추적 위상평균기법<sup>(7)</sup>을 통하여 복잡한 정사각실린더의 근집후류에서의 위상평균 속도장을 성공적으로 획득하였으며, 정사각실린더의 상하부에서 주기적으로 와유출이 발생하는 것을 명확히 확인할 수 있었다.

열선으로 측정된 와류유출 주파수와 최대와도의 위치로부터 대류속도를 추출한 결과, 재순환 영역 내부에서는 자유유동 속도의 25% 정도의 대류속도를 보였으며, 재순환 영역을 벗어나면서 잘 알려진 Karman 와열의 대류속도인 75% 정도의 자유유동 속도로 급격히 변화함을 알 수 있었다. 또한 사각주의 상면에 형성되는 박리구역이 위상에 따라 재부착 현상이 일어나고 있음도 관찰되었다. 본 연구 결과는 LES 등 사각주 후류의 비정상 유동 특성을 계산할 수 있는 수치해석 결과를 검증하는데, 좋은 데이터를 제공할 수 있으리라 사료된다.

## 참고문헌

- (1) Reynolds, W. C. and Hussain, A. K. M. F., 1972, "The Mechanics of an Organized Wave in Turbulent Shear Flow, Part 3. Theoretical Models and Comparison with Experiments.," *J. Fluid Mech.*, Vol. 54, pp. 263~288.
- (2) Perry, A. E. and Watmuff, J. H., 1981, "The Phase-Averaged Large-Scale Structures in Three Dimensional Turbulent Wakes.," *J. Fluid Mech.*, Vol. 103, pp. 33~51.
- (3) Owen, F. K. and Johnson, D. A., 1980, "Measurements of Unsteady Vortex Flow Fields.," *AIAA J.*, Vol. 18, No. 10, pp. 1173~1179.
- (4) 김경천, 정양범, 1994, "가열된 원주후류의 열성층 영향에 대한 연구," *대한기계학회 논문집*, 제18권, 제6호, pp. 2454~2464.
- (5) Kim, K. C., 1997, *Proceedings of the 11th International Heat Transfer Conference*, Vol. 3, pp. 305~310.
- (6) Lourenco, L., Subramanian, S. and Ding, Z., 1997, "Time Series Velocity Field Reconstruction from PIV Data.," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 8, pp. 1533~1538.
- (7) Kim, K. C., Yoon, S. Y., Kim, S. K. and Boo, J. S., 2000, "Phase Averaged Velocity Field Reconstruction from PIV Data Using a Vortex Tracking Method : Near Wake of a Circular Cylinder," *ASME Fluids Engineering Conference*, Boston, June 11-15, USA.
- (8) Okajima, A., 1982, "Strouhal Numbers of Rectangular Cylinders," *J. Fluid Mech.*, Vol. 123, pp. 379~398.
- (9) 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.
- (10) Yoon, S. Y., 1999, "PIV Measurements in the Turbulent Near Wake of a Circular Cylinder," *M.S. Thesis*, Pusan National University.
- (11) Westerweel, J., 1993, "Digital Particle Image Velocimetry-Theory and Application.," *PhD thesis*, Delft University of Technology, The Netherlands.