

와추적 위상평균 기법을 이용한 원주후류의 PIV측정

윤상열* · 김경천* · 김상기* · 부정숙**
(2000년 10월 23일 접수, 2001년 5월 8일 심사완료)

PIV Measurement of Circular Cylinder Wake Using Vortex Tracking Phase-Average Technique

Sang Youl Yoon, Kyung Chun Kim, Sang Ki Kim and Jung Sook Boo

Key Words: Cylinder Wake(원주후류), Phase-Average(위상평균), Particle Image Velocimetry(입자 영상유속계), Vortex Tracking(와추적)

Abstract

A new phase-average technique using instantaneous velocity fields obtained by a PIV method has been developed. The technique tracks vorticity centers and estimates the value of circulation for a chosen domain. The locations of vortex-centers and the magnitudes of circulation are matched together then showing a sine wave feature due to the periodic vortex shedding from the circular cylinder. Ensemble averaged and phase averaged velocity fields are successfully measured for the circular cylinder wake where Reynolds number is 3900 based on free stream velocity and cylinder diameter. The convection velocities of the vortices center and the vortex shedding frequency were measured by a single hot-wire probe.

1. 서론

기호설명

- ω : 와도
- Γ : 순환
- D : 원주지름
- f : 와유출 주파수
- N : 샘플군의 개수
- $Re_D (= U_\infty D/\nu)$: 레이놀즈 수
- $St_D (= fD/U_\infty)$: Strouhal 수
- u, v : 유동방향 및 수직방향의 속도성분
- $\langle \vec{V} \rangle$: 임의의 속도 \vec{V} 의 위상평균속도
- U_∞ : 자유유동속도
- x, y : 원주중심에서의 유동방향 및 수직 거리

Brown과 Roshko에 의해 전단유동에 있어서의 거대구조가 밝혀진 이후로 몽푁한 물체 후류에 있어 이의 적용과 연구가 활발하게 이루어져왔다. 특히 원주 주위의 유동은 단순한 형상에 비해 경계층, 유동박리, 유동천이, 칼만와열, 전단층 등 풍부한 여러 가지 정형적인 유동형태를 포함하고 있기 때문에 많은 연구가 수행되었다. 그러나 근접후류영역에서는 복잡성과 불안정성으로 인해 이에 대한 연구를 수행하기에는 많은 어려움이 있었으며, 원주로부터 주기적으로 유출하는 칼만 와열과 역류영역의 공존은 종래의 측정기법으로의 정확한 측정을 어렵게 하는 요소가 되었다. 최근 PIV기법의 등장으로 이러한 근접후류영역에서의 순간적인 속도장의 획득을 가능하게 하고 있다.⁽¹⁻⁶⁾

한편, 와유출은 주기적으로 시간에 따라 변하는 유동이므로 시간의 변화에 따른 유동특성을 파악할 필요가 있으며 이러한 시간에 의존하는

* 회원, 부산대학교 대학원 기계공학과
 ** 회원, 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소
 † 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소
 E-mail : kckim@pusan.ac.kr
 TEL : (051)510-1464 FAX : (051)582-8581

와도장을 구하기 위한 방법으로는 위상평균기법이 사용되어 왔다. 그러나 PIV계측은 순간적으로 유동장 전체를 계측할 수 있는 장점을 지닌 반면에 샘플링 주기가 매우 길다는 단점 또한 가지고 있어 위상평균의 수행에는 많은 한계를 지니고 있다. 하드웨어 동기화에 의한 샘플링 기법이 위상평균을 위한 기존의 시도였으며, 초고속카메라를 이용하여 샘플링 주기를 높이는 방법이 또 하나의 대안으로 나서고 있다. 하지만 하드웨어적으로 유동장과 동기시키는 방법은 유동의 불안정성과 불확실성이 큰 후류영역에서는 상당한 어려움이 있다. 또한 초고속카메라의 이용에도 샘플링 주기의 한계와 화상해상도 등의 문제가 있다. 또한 두 방법 모두 많은 비용과 부가적인 장치가 필요한 것이다.

L.Lourenco 등은 PIV 시스템으로 구한 속도장 내에서의 순환과 화상획득시간을 조합함으로써 시간시리즈로 속도장을 재구성하여 원주후류의 위상평균이 가능함을 보였다.⁽⁴⁾ 그러나 PIV의 샘플링 주기가 3Hz이하로 아주 길다는 것을 감안하면 L.Lourenco 등이 시도한 방식은 와유출주파수가 1Hz이하의 아주 작은 경우에만 한정됨을 알 수 있다. 실제 이들이 적용한 유동은 와유출주파수가 약 0.25Hz인 저속유동이었다.⁽⁴⁾

따라서 화상획득 주기가 긴 PIV 계측을 이용한 위상평균을 위해서는 시간을 대신한 물리적인 개념이 필요하다는 것이 본 연구의 동기이다. 본 연구는 후류영역에서 PIV 시스템에 의해 랜덤샘플링된 속도장 각각에서 위상을 대표하는 변수와 이에 종속되는 두 물리량의 추출과 조합에 의한 위상결정을 통해 통계적인 방법으로 위상평균이 가능함을 보고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 실험장치의 개략도 및 좌표계를 나타낸다. 본 실험은 소형 개회로 저속 풍동에서 시행하였고, 풍동의 시험구간은 폭이 80 cm, 높이가 30 cm, 길이가 2 m이며 유리 및 아크릴로 제작되어 있다. 3마력의 속도 가변형 원심팬에서 공급되는 공기는 정체실과 단면비 2.67:1의 2차원 수축노즐을 통과한 후 시험구간으로 유입된다.

원주는 원형의 투명한 파이렉스튜브를 사용하

였고, 직경은 20mm 였다. 원주의 위치는 수축부의 출구 또는 시험부 입구로부터 30cm(15D) 후방에 위치시켰다.

실험조건으로는 자유유동 속도, $U_{\infty}=3.03$ m/s로 고정시켰고, 이때의 레이놀즈수, Re_D 는 3900 이었다. 또한 시험구간으로 유입되는 공기의 자유유동 난류강도는 1% 이내로 유지된다.

본 연구에서 사용된 PIV 시스템은 레이저 시스템과 고해상도 CCD카메라, 동기화장치(TSI 610032) 및 구동용 팬티엄 컴퓨터로 구성되어 있다. 광원으로 사용한 레이저는 이중펄스 방식의 Nd:Yag 레이저이고, 파워는 250mJ/pulse이었다. 광원으로부터의 레이저는 구형렌즈와 원통형렌즈를 거치면서 평면빔으로 만들어져 시험부로 조사된다. 화상획득을 위한 CCD카메라는 1K×1K의 해상도를 가진 PIVCAM 10-15 CCD카메라를 사용하였고, 2 frame 간의 시간 간격은 최소 35 μ s 미만으로 고속유동의 계측이 가능하다. 부착된 렌즈는 NIKON 50mm 표준렌즈를 사용하였고, f2.8의 조리개 값을 화상획득 시 사용하였다. 사용된 입자는 라스킨노즐을 이용한 올리브 오일 에어로졸이고 입자의 평균 직경은 2 μ m로서, 이전연구에 의해 알려진 바 PIV계측에 적당한 크기이다. PIV 측정영역의 크기는 79 mm×79 mm이다. 본 연구에서 사용한 속도벡터의 계산과 후처리는 실험실에서 자체 개발한 프로그램 (PIV-ACE v.1.0)을 사용하였고, 이의 검증은 충분히 이루어졌다. 속도벡터의 추출 알고리즘은 2화상 상호상관기법을 이용하였다.

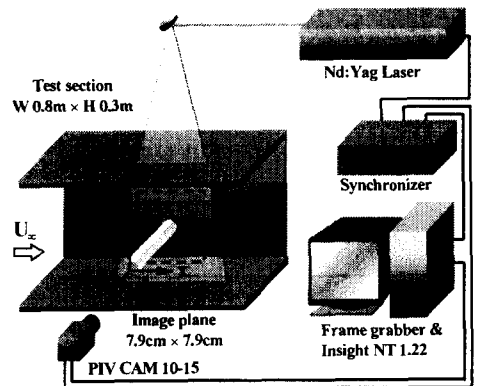


Fig. 1 Schematic of experimental setup

속도벡터의 격자수는 모두 6889 개이고 벡터간의 공간해상도는 0.93 mm이다. 소프트웨어에 의한 오차는 sub-pixel로의 추적시에 발생하며 화상의 해상도의 한계로부터 기인한다. 오차에 대한 r.m.s 값은 0.01픽셀 정도이다.

속도를 계산하기 위한 탐색영역(interrogation window)의 크기는 24×24픽셀이고, 50%의 겹침이 허용되었다. 구해진 속도벡터는 본 실험실에서 보유하고 있는 후처리 프로그램으로 불량벡터의 제거, 중심추적, 앙상블평균, 위상평균 등의 통계적 처리를 수행하였다. 화상획득은 4000장(속도장 2000개)을 획득하여 후처리하였다. 이러한 앙상블의 개수는 기존연구에서 밝혀진 바 난류값의 평균이 일정한 값으로 유지될 수 있는 개수이다. 와유출주파수를 구하기 위해서 열선을 실린더 후류방향으로 1.5D에 위치시켰고, 열선은 “T”형이다.

3. 와추적 위상평균 기법

3.1 와도의 중심추적

앞에서도 언급한 바 있지만 PIV 계측에서는 위상평균이 상당히 난해한 문제 중의 하나이다. PIV계측의 장점인 순간유동장 전체를 같은 시간대에 획득할 수 있음에도 불구하고, 기술적인 한계로 인해 화상획득시간이 길다. 따라서 Nyquist 조건을 만족시키지 못하기 때문에 위상평균을 위한 하나의 개념인 시간을 포기할 수 밖에 없으며, 이를 대신한 개념이 도입되어야 한다. 본 연구에서는 시간을 대신할 개념으로 거대구조 와의 위치를 선정하였다. 주기적으로 유출되는 와는 서로 다른 공간적인 위치를 점하고 있으며, 따라서 시간의 개념을 대신할 수 있다고 판단된다.

Fig. 2는 원주후류의 순간와도장이며 점선은 음의 값을, 실선은 양의 값을 나타낸다. 그림에서 와 같이 순간와도장은 매우 불규칙하며 불안정함을 알 수 있고, 다양한 스케일의 와가 존재하는 것을 볼 수 있다. 한편 위상에 따른 와의 구조는 거대구조 와에 의존하기 때문에, 위상평균을 위해서 거대구조 와의 중심을 추적하여야 한다. 하지만 이러한 순간와도장에서 거대구조를 가진 와의 중심을 찾기란 매우 어려운 일이며 사실상 불가능에 가까운 일이다. Fig. 3은 Fig. 2의 순간속도장의 저주파 필터된 와도장을 나타내었다. 작

은 구조의 와는 사라지고 거대구조 와의 거동만이 남아 있으며 와 중심의 판단이 가능함을 알 수 있다. “+” 표시는 와의 중심을 추적한 위치를 나타낸다. 와의 중심은 절대적인 와도가 가장 큰 지점으로 판단하였다. 또한 추적된 와도 중심은 grid 격자 정도의 해상도 밖에 가지지 못한다. 한 위상의 간격이 아주 짧기 때문에 이러한 와중심의 위치에 기반한 위상평균 시 많은 오차를 받게 된다. 따라서 sub-grid까지의 추적이 필요하며, 본 연구에서는 와도의 최대지점, 그리고 피크의 좌우상하에 있는 와도값으로 Gaussian 근사를 사용하여 추적하였다. 근사식은 다음과 같다.

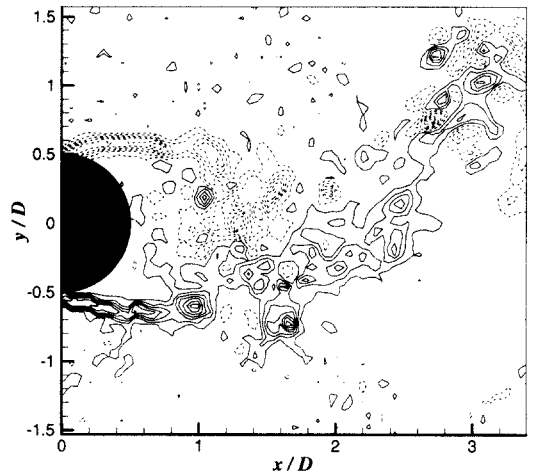


Fig. 2 The instantaneous vorticity field

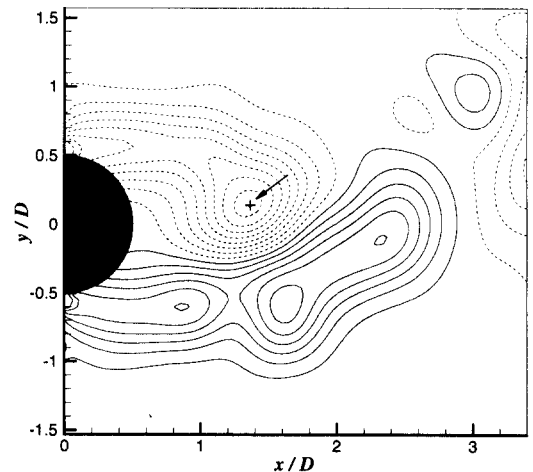


Fig. 3 The low-pass filtered vorticity field

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

여기서 ϵ 은 피크지점에서부터 Gaussian 피팅 함수로 추적된 피크까지의 차이이고 단위는 grid 단위이다. 그리고 첨자 “-1”은 피크 이전의 값, “+1”은 피크 이후, “0”은 피크를 나타낸다.

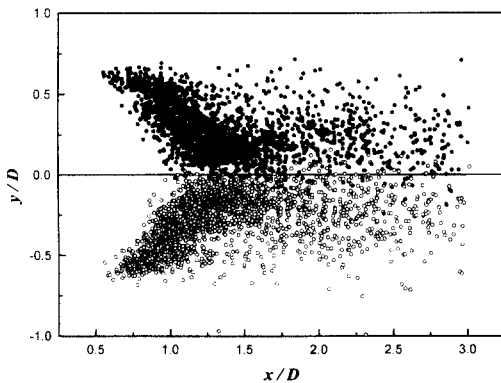
Fig. 4는 순간속도장 각각에서 위의 정의에 따라 와의 중심을 추적하여 나타낸 그림이다. 2000 개의 순간속도장 각각을 필터링한 후 구한 와도 장으로부터 상하에서 유출되는 와의 중심위치를 sub-grid까지 추적하여 나타낸 그림이다. 상하 와의 중심에 대한 전체체적은 $y=0$ 인 지점에서 교차되며, 직선의 형태는 아님을 알 수 있다. $y=0$ 에 이르는 x 축 방향의 거리는 약 $1.5D$ 정도이고, 이것은 재순환영역의 끝지점과 일치한다.

또한 와중심이 전체적인 궤적을 유지하지만 상하로의 분산이 극심함을 볼 수 있다. 이것은 기존의 하드웨어 동기화에 의한 위상평균을 하기에는 상당한 어려움이 따른다는 것을 보여준다. 따라서 얻어진 순간속도장들에서 위상에 대한 정보를 직접 추출할 수 있다면 PIV시스템에서는 보다 쉬운 위상평균이 가능하게 된다.

3.2 순환추출

원주후류는 와유출이 일정한 주기를 가지면서 일어나는 현상이기 때문에 각 순간속도장의 특정한 영역에서의 물리량 또한 주기적으로 변한다.

따라서 이러한 주기적으로 변화하는 물리량은 기준신호로 이용될 수 있으며 특히 순환의 경우는



(●: upper vortex, ○: lower vortex)

Fig. 4 The vortex center trajectory

적분형태를 가지기 때문에 불확실성이 작은 물리량이라 판단된다. 따라서 본 연구에서는 순환(circulation)을 기준신호로 택하였다. 순환을 구하는 영역은 $1.32D \leq x \leq 1.785D$, $-0.255D \leq y \leq 0.21D$ 을 선택하여 식 (2)에 의해 구한 순환을 기준 신호로 택하였다.

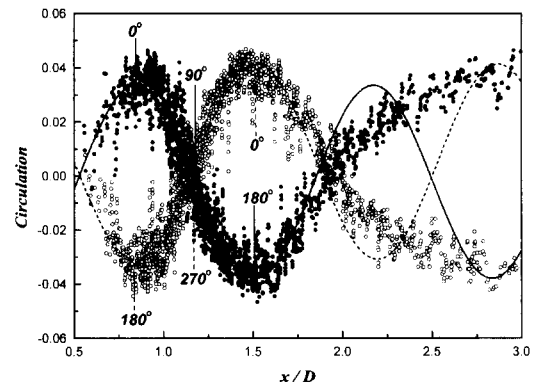
$$\Gamma = \oint \vec{V} \cdot d\vec{s} \quad (2)$$

순환이 계산된 영역은 전체평균 속도장에서의 재순환영역의 끝지점 또는 상하 와의 중심이 주기적으로 교차되는 영역과 일치하며, 유동장의 주기성을 가장 잘 나타내는 영역이라 할 수 있다. 순환은 각각의 순간속도장을 필터링한 이후의 속도장으로부터 추출되었다.

3.3 위상결정

Fig. 5는 각각의 레이놀즈수에서 와 중심의 x 위치와 순환을 조합해서 나타낸 그림이다. 점선과 실선은 각 속도장으로부터 계산된 순환데이터를 필터링을 거쳐 sine함수로 근사한 것이다. 이들 순환과 와 중심위치의 조합은 sine함수와 잘 일치하고 있으며, 순환이 와의 중심위치에 따라 아주 주기적임을 보여주고 있다. 이러한 위치와 순환의 조합 데이터로부터 와의 위치가 조건이 되는 일종의 조건부 집합으로써 위상평균이 가능함을 알 수 있다.

따라서 위상평균은 식 (3)과 같은 조건부 평균이 된다.



(●: upper vortex, ○: lower vortex)

Fig. 5 Combining vortex center with the circulation

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

여기서 \vec{V} : 속도장, X : 와 중심의 x 축상의 위치, N_X : X 조건에 해당하는 속도장의 수, N : 모든 속도장의 수이다.

본 연구에서는 순환이 최대에 이르는 지점을 위상 0° 로 정의하였다. 즉, 순환을 구하는 영역과 가장 발달된 와(반시계 방향)의 위치가 거의 일치하는 곳이라 할 수 있다. 이것은 순환추출영역이 재순환영역의 끝지점으로 선택되었기 때문에 원주 하부에서 형성된 와가 한 주기 내에서

최대한 발달된 시점을 의미하며, 반면 원주 상부에서는 와의 발달이 시작되는 시점을 나타낸다. 나머지 위상들은 sine함수의 위상에 따라 정의하였다. Fig. 6은 위상의 정의에 따라 각 위상별로의 순간속도장을 추출하여 나열한 그림이다. 주기가 잘 형성되고 있음을 알 수 있다. 또한 Fig. 5에서 sine함수와 잘 일치한다는 것은 측정영역 내에서 x 방향으로의 대류속도가 거의 일정하다는 것을 의미하며, $1.5D$ 이후부터는 조금씩 어긋나기 시작하는데 이것은 원주후류가 재순환영역을 벗어남으로써 와의 대류속도가 서서히 빨라지고 있기 때문인 것으로 판단된다.

근사를 통한 x 방향으로의 주기는 약 27.0 mm ,

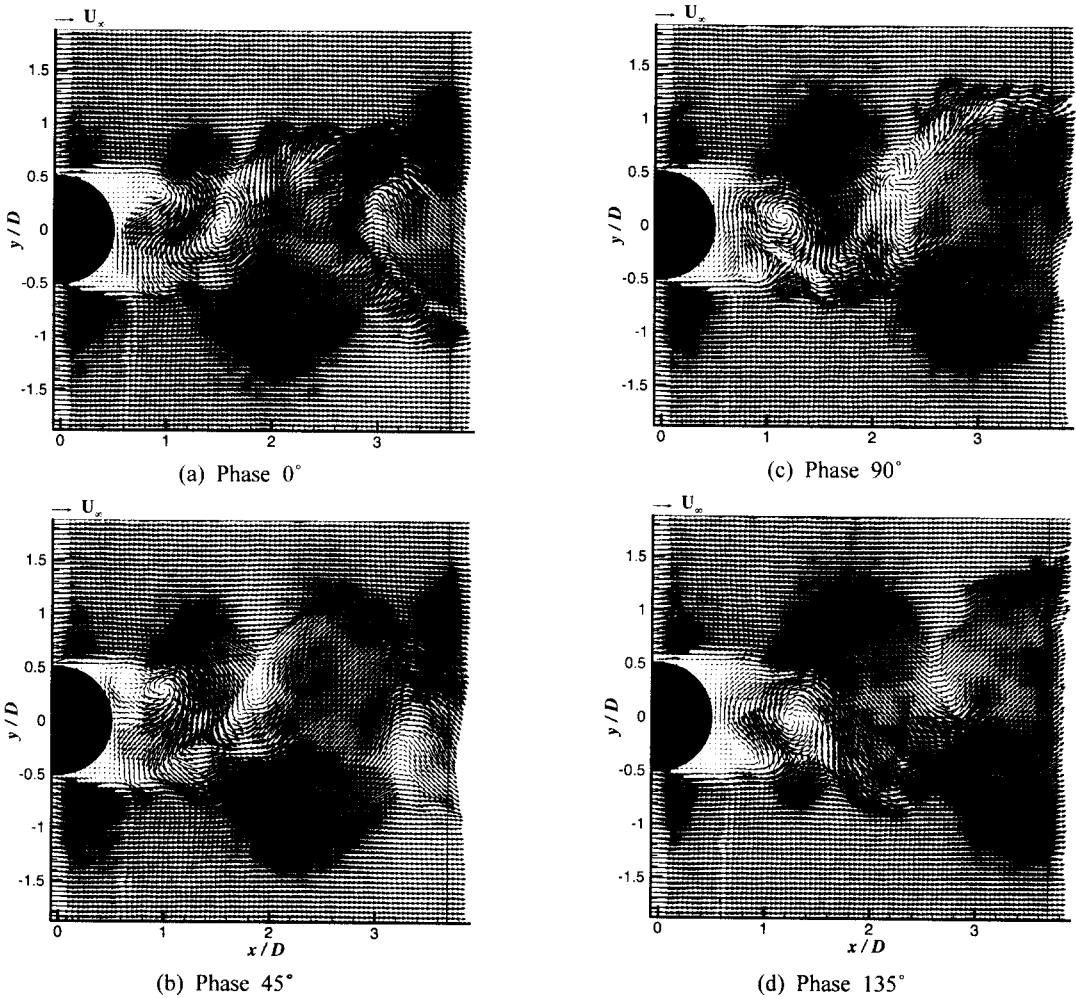


Fig. 6 Instantaneous velocity fields according to phases

주기와 열선으로부터 얻은 와유출주파수를 곱하면 근점후류의 x 방향의 평균대류속도를 구할 수 있다. 열선으로 측정된 와유출주파수는 31.7 Hz였으며 이때의 St_D 수는 0.21이었다. 따라서 재순환영역 내에서 x 방향의 평균대류속도는 약 $0.86 \text{ m/s}(=0.28 U_\infty)$, y 방향의 평균대류속도는 약 $0.63 \text{ m/s}(=0.21 U_\infty)$ 로 기존의 알려진 재순환영역 밖에서의 대류속도, $0.7 \sim 0.8 U_\infty$ 와는 많은 차이가 난다.

3.4 위상평균된 두 측정영역의 결합

PIV 측정은 입자의 크기와 분포, 화상의 해상도 등을 고려할 때 이미지 크기가 한정될 수 밖에 없기 때문에, 넓은 영역을 계측할 경우 여러 카메라로 공간을 나누어 측정을 할 수 밖에 없다. 만일 여러 카메라의 동기화에 의해 동시에 계측을 한다면 문제는 없겠지만 한 대의 카메라에 의한 계측이나 넓은 영역의 계측 시 각 위치별로 동일한 위상을 연결시켜야 하는 필요성이 있다. 이 경우 연결변수를 고려해야 하기 때문에 계측 시 공통부분을 두어 계측이 되어야 한다.

Fig. 7은 이러한 두 측정영역과 순환을 구한 영역을 각각 나타내었다. Fig. 8은 측정영역1에서 수행한 각 위상평균에서 공유부분의 순환을 추출하여 위상별로 나타낸 것이며, 5차 다항식 근사와 피크치일 때의 위상을 나타내었다. Fig. 9는 측정영역2에서의 순환과 와중심 위치의 조합, 5차 다항식 근사와 피크치를 나타낸 그림이다.

Fig. 8과 Fig. 9는 공통부분에서의 순환을 구한 것이기 때문에 이들을 통해 두 번째 측정영역에

서 측정영역1과 동일한 기준위상의 정의가 가능해진다. 즉 피크치는 동일한 위상을 나타내기 때문이다. 그러나 Fig. 9에서 주기적인 형태를 보이고는 있으나 정확한 주기를 예측하기 어렵다. 이 영역에서 정확한 sine wave 형태가 나오지 않는 이유는 순환을 구하는 영역이 좁아 와

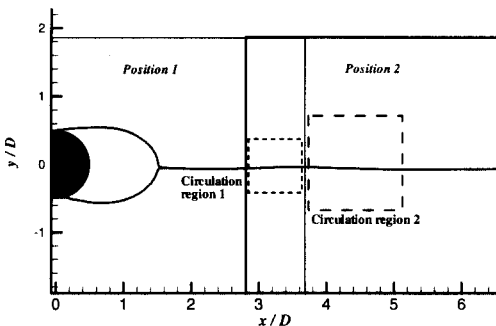


Fig. 7 Schematic of measurements and circulations regions

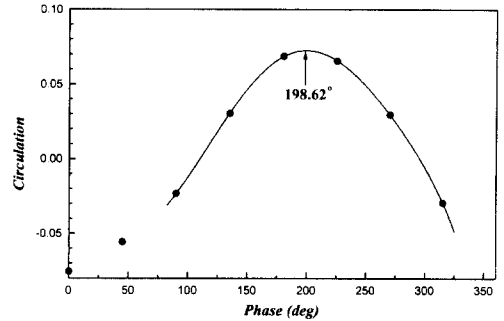


Fig. 8 Circulations from phase-averaged velocity fields of position 1 (region 1)

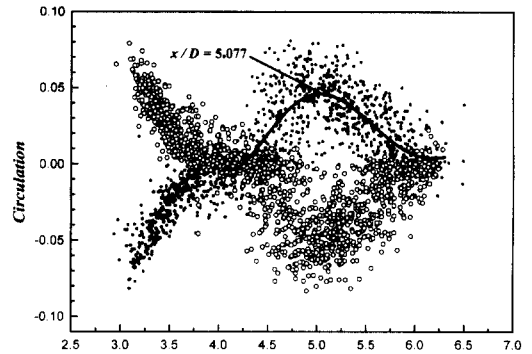


Fig. 9 Circulations and vortex centers of position 2 (circulation region 1)

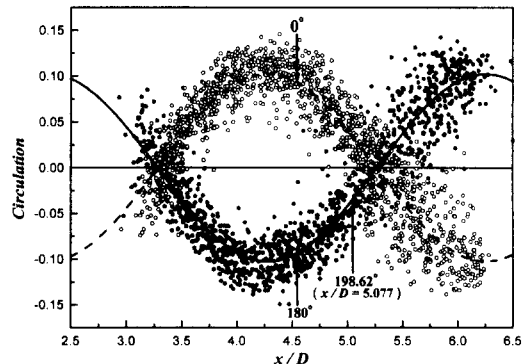


Fig. 10 Circulations and vortex centers of position 2 (circulation region 2)

(vortex) 사이의 거리보다 작아 순환이 거의 0인 지점이 일정구간 지속이 되기 때문이다. 따라서 또 다른 순환을 측정위치 2에서 구해야 하며, 영역을 좀 더 넓게 정하여야 한다. 두 번째 측정영역에서 또 다른 순환을 구하여 주기를 구하고, 앞서 구한 기준위상의 정의를 사용하면 측정영역 1에서의 위상과 동일한 위상을 두 번째 측정영역에서 정의할 수 있게 된다. Fig. 10은 순환영역2에서 구한 순환과 와중심 위치의 조합, 주기함수로의 근사, 위상의 정의를 나타낸 그림이다. 와중심의 위치는 거의 유동방향을 따라 수평으로 나아가고 있으며, 순환과의 조합은 전체적으로 주기함수의 형태를 잘 따르고 있음을 볼 수 있다.

3.5 위상평균

Fig. 11은 앞서 정의된 위상에서 $\pm 5^\circ$ (공간적인 거리로 환산하면 약 $\pm 0.375\text{mm}$)내의 속도장을 위상평균한 결과를 보여주고 있다. 일정한 y 에서의 x 위치에 대한 표준편차는 $\sigma = 0.35\text{mm}$ 정도였다. 따라서 $x \pm \sigma$ 의 영역을 위상평균을 위한 영역으로 취했으며, 이에 해당하는 위상영역은 약 $\pm 5^\circ$ 이다. 평균한 속도장의 개수는 50~60개 정도였기 때문에 평균속도는 어느 정도 신뢰할 수 있으나 난류의 정보를 얻기에는 미흡하다. 위상평균거동이 순간유동장들의 거동과 거의 일치하고 있으며, 주기가 잘 형성됨을 알 수 있다.

Fig. 12(a)와 (b)는 두 측정위치의 결합을 통한

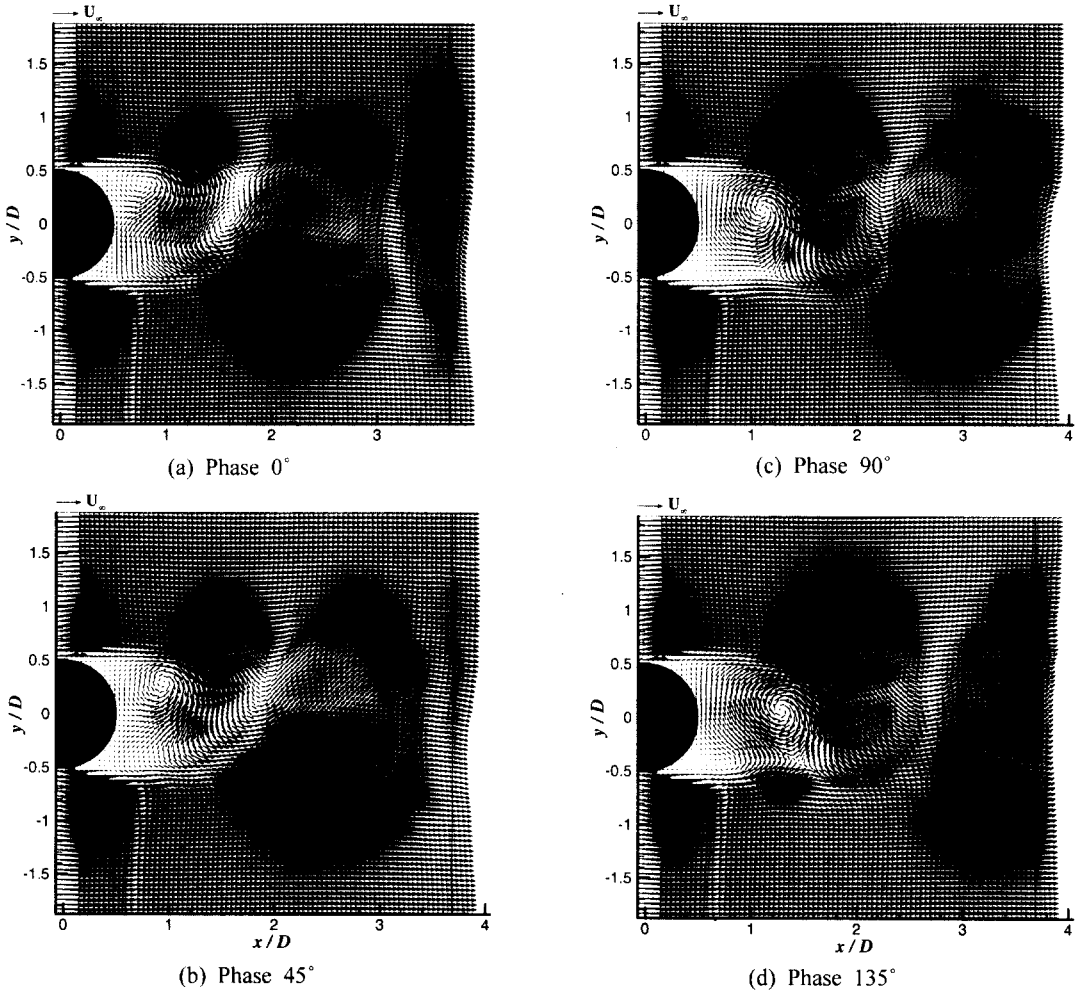


Fig. 11 Phase averaged velocity fields.

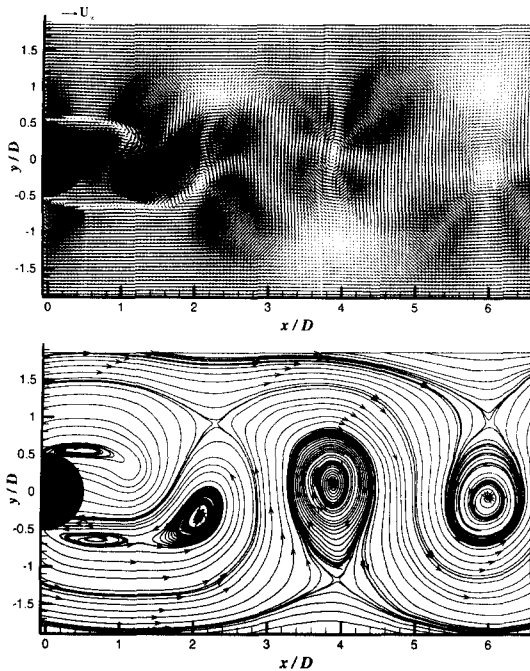


Fig. 12 Combined Phase averaged field
(Phase 03 : 90°)

대류속도($0.759 U_\infty$)를 뺀 속도장 및 유선의 분포를 나타내었다. 두 측정위치의 조합이 잘 이루어짐을 알 수 있다. 또한 유선의 분포를 통해 와의 형태, 크기, 서로간의 간격 등을 알 수 있다. 재순환 영역을 벗어난 지점에서의 와의 형태는 상하로 길쭉한 타원의 형태를 그리고 있으며, 크기는 상하 약 $1.6\sim 1.8D$, 좌우 약 $1.2D$ 정도이며, 반대로 회전하는 와들의 사이 간격은 약 $2D$ 정도이다. 위상평균을 위한 공간주기가 $3.96D$ 정도였음을 감안한다면, 공간주기의 반과 와들사이 간격이 거의 일치함을 알 수 있으며, 따라서 와의 위치와 순환의 조합에 의한 주기의 결정이 타당함을 알 수 있다.

4. 결 론

랜덤 샘플링에 의한 통계적 방법으로 PIV시스템에서 위상평균이 가능함을 알 수 있었다. 원주후류에서는 와의 중심의 추적을 통한 중심의 위치를 조건으로 특정위치의 기준신호를 조합하는 조건부 집합의 개념을 적용하여 위상평균을 구하

는 방식이 타당함을 알 수 있었다. 와유출이 일어나는 유동의 경우 이러한 방식은 일반적으로 적용이 가능할 것으로 예상된다. 유동에의 'locking'이 필요하지 않아 하드웨어적인 부가장치가 필요없기 때문에 쉽게 위상평균을 할 수 있다는 장점과, 또한 모든 주기의 위상결과들을 산출할 수 있으며 유속에 제한을 받지 않는 장점이 있다. 또한 와의 중심위치 뿐만 아니라 시간 개념을 대신할 물리량과, 위상에 따라 변하는 물리량의 조합을 이용하면 위상평균은 가능하리라 예상되기 때문에 이 방식의 적용범위가 넓을 것이라 판단된다. 특히 와유출이 일어나는 유동의 경우 순환이 주기성을 잘 나타내며, 불확실성이 낮아 위상평균시 기준신호로써 적합함을 알 수 있었다.

위상평균한 속도장은 50~60개 정도이며 이는 2000개의 전체 속도장으로부터 얻어진 결과이다. 따라서 동일 위상에서 위상평균을 제거한 순수한 난류장의 분석을 위해서는 10배 이상의 전체 시간 속도장이 필요하다.

참고문헌

- (1) 김경천, 정양범, 1994, 대한기계학회논문집, 제 18권, 제6호, pp. 2454~2464.
- (2) Kim, K. C., 1997, Proceedings of the 11th International Heat Transfer Conference, Vol. 3, pp. 305~310.
- (3) Lourenco, L. and Shih, C., 1993, Characteristics of the plane turbulent near wake of a circular cylinder : A Particle image velocimetry study, Not published.
- (4) A. E. Perry and J. H. Watmuff, 1981, *J. Fluid Mech.*, Vol. 103, pp. 33-51.
- (5) C. H. K. Williamson, 1996, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 28, pp. 477-539.
- (6) 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.
- (7) L. Lourenco, S. Subramanian, S., and Z. Ding, 1997, *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 8, pp. 1533~1538.