

Cinematic PIV 데이터의 3 차원 위상평균 기법을 이용한 실린더 후류의 2 차 와류 측정

성재용* · 유정열**
(2000년 5월 29일 접수)

Measurements of Secondary Vortices in the Cylinder Wake by Three-Dimensional Phase-Averaging Technique Using Cinematic PIV Data

Jaeyong Sung and Jung Yul Yoo

Key Words : Phase-Averaging(위상평균), Secondary Vortex(2 차 와류), Cinematic PIV, Wake Transition(후류 천이), Karman Vortex(Karman 와류)

Abstract

Near-wake flow field downstream of a circular cylinder in the wake-transition regime where fine-scale secondary vortices have a spanwise wavelength of around one diameter has been studied by means of phase-averaging from cinematic PIV data. A cross-correlation algorithm in conjunction with the FFT (Fast Fourier Transform) analysis and an offset correlation technique is used for obtaining the velocity vectors. With the help of very high sampling rate compared to the shedding frequency, it is possible to obtain phase-averaged flow fields although the shedding is not forced but natural. Phase-locked three-dimensional vortical structures are reconstructed from the phase-averaged data in one x-y (cross-sectional) and several z-x (spanwise-streamwise) planes. In the process of phase-averaging in a z-x plane, a technique to freeze the secondary vortices relative to the centerline is applied. The formation process of the secondary vortices is shown by considering spatial relations between the primary Karman and the secondary vortices and their temporal evolutions.

기호설명

- D : 실린더 직경
- L : 실린더 길이
- t : 시간
- T : 세딩 주기
- u, v : x, y 방향의 속도 성분
- u_m : 주유동 방향 속도의 시간 평균
- x, y, z : 주유동, 수직, 길이 방향 좌표
- ω_x, ω_z : y, z 방향의 와도 성분

1. 서론

균일한 흐름 속에 놓여있는 실린더 후류의 유동은 레이놀즈수가 증가함에 따라 다양한 형태를 보인다. 우선 레이놀즈수가 50 이상이 되면 2 차원 층류 와 세딩이 나타나고, 레이놀즈수가 190 근처에서는 3 차원 와 구조가 형성된다.^(1, 2) 이때부터 유동은 천이 과정을 거치면서 난류 유동으로 발전한다. Williamson⁽³⁾은 기존의 연구결과들을 종합하여 천이 영역을 크게 세가지로 분류하였는데, 첫째 레이놀즈수 190 에서 1000 까지는 후류 천이(wake transition) 영역으로 Karman 와류의 불안정성으로 인해 2 차 와류(secondary vortex)가 형성되는 영역이고, 레이놀즈수 2×10^5 까지는 전단층 천이(shear layer transition) 영역으로 박리점 근처에서 전단층의 불안정성으로 인해 작은 스케일의 Kelvin-Helmholtz 와가 발생한다. 이보다 레이놀즈수가 더욱 커지면 실린더 표면의 경계층에서 천이 현상이 나타나는 경계층 천이(boundary layer

* 회원, 서울대학교 대학원 기계항공공학부

** 회원, 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : jyyoo@plaza.snu.ac.kr

TEL : (02)880-7112 FAX : (02)883-0179

transition) 영역으로 분류된다.

본 연구에서 중점적으로 다루고자 하는 후류 천이 영역은 레이놀즈수와 스트로울수의 관계에서 두 개의 불연속적인 점이 존재하며 그 점을 기준으로 상이한 2 차 유동의 구조를 가지고 있다. Williamson⁽⁴⁾은 레이놀즈수 190 근처의 첫번째 불연속 점에서 A 모드가 나타나고, 두번째 불연속점인 260 이상에서는 B 모드가 지배적인 현상을 보인다고 밝혔다. A 모드는 Karman 와류가 변형되면서 와 루프(vortex loop)를 형성하며, 2 차 와류의 실린더 길이 방향 분포가 실린더 직경의 3-4 배 정도이다. 반면 B 모드에서는 Karman 와류의 braid 영역에서 와의 연신 (vortex stretching) 현상에 의해 길이 방향으로 실린더 직경 크기의 2 차 와류가 형성된다. 이러한 와 구조의 발달과정에 대한 정량적 계측은 실린더 후류의 주기적 유동이 외력에 의한 강제 유동⁽⁵⁾과 같이 잘 정의된 위상 신호를 얻을 수 없고, 유동 자체로부터 이를 추출해야 하는 자연발생적 현상이라는 점에서 높은 샘플링 속도가 요구된다. 또한 레이놀즈수가 증가하면서 2 차 와류는 크기, 형태 및 위치에 있어 불규칙성이 증가하므로 기존의 열선유속계와 LDV 같은 점 측정방법^(6, 7)은 전체적인 유동구조를 파악하기에 한계를 지니고 있다.

최근 PIV 계측 기법의 발달과 함께 와 구조의 공간적 분포형태에 대한 연구가 이루어지고 있다. Wu 등⁽⁸⁾은 후류 천이 영역에서 종방향 와의 거동을 고찰하였고, Chyu 와 Rockwell⁽⁹⁾은 전단층 천이 영역에서 주유동 방향 와의 형태를 논하였으며, Brede 등⁽¹⁰⁾은 종방향 와의 계측을 통하여 A, B 모드에 대한 3 차원 모델을 제시하였다. 그러나 이들의 연구는 모두 순간 유동장의 결과를 바탕으로 하였다. Lourenco 등⁽¹¹⁾은 최초로 PIV 데이터를 이용하여 위상평균 유동장을 측정하였다. 그들은 유

동장 내의 순환(circulation)으로부터 위상 정보를 얻고 낮은 샘플링 속도를 보완하기 위하여 시간에 대한 Whittaker 보간법을 사용하였다. 또한 김정천 등⁽¹²⁾은 시간 정보에 의존하지 않고 랜덤 샘플링으로 얻은 속도장에서 와 중심과 순환으로부터 위상을 추출하는 기법을 제시하였다. 그러나 2 차원 특성을 가진 Karman 와류의 위상평균 유동장만 제시되었고, 3 차원 와 구조를 가진 2 차 와류의 위상평균 유동장은 아직 보고된 바가 없다.

본 연구에서는 Cinematic PIV 기법을 이용하여 한 개의 수직단면(cross-sectional or x-y plane)과 여러 개의 수평단면(spanwise-streamwise or z-x plane)에서 위상평균된 속도장을 구하여 공간 및 시간에 따른 근접 후류의 3 차원 유동 특성을 파악하고자 한다. 두 종류의 평면에서 동일한 위상의 평균 속도장을 얻기 위하여 공통으로 존재하는 주유동 속도 성분을 기준 주기 신호로 채택하였다. 특히 수평단면에서는 2 차 와류의 위치가 실린더 길이 방향으로 고정되어 있지 않고 불규칙적으로 변하기 때문에 기존의 위상평균기법으로는 이를 포착할 수 없다. 따라서 주유동 방향으로 평균된 속도 분포로부터 2 차 와류의 위치를 구하고 위상평균 과정에서 이를 교정하는 기법을 사용하였다. 그 결과 z 축을 따른 v 속도 성분의 정보를 제외한 3 차원 공간 및 시간에 대한 3 차원 유동장을 얻을 수 있다. 이를 3 차원으로 재구성한 모든 결과는 레이놀즈수 360 (B 모드)에 대하여 제시되며, 2 차 와류의 생성과정, Karman 와류와 2 차 와류의 공간적 관계 및 시간적 변화과정에 대하여 논의한다.

2. 실험장치 및 PIV 계측기법

실린더 후류 유동장 계측은 수동(water tunnel)에서 이루어졌으며, 물에 의한 부식을 방지하기 위

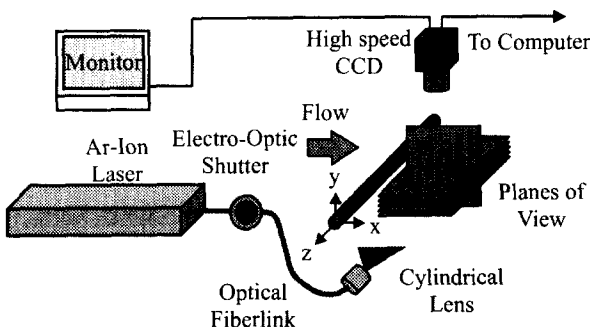


Fig. 1 Schematic of cinematic PIV system

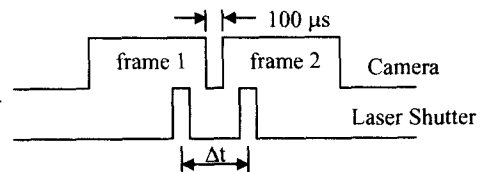


Fig. 2 Signal diagram for synchronizing laser shutter with camera

하여 모든 재료는 아크릴과 스테인리스강으로 제작되었다. 실험부의 크기는 가로 15 cm, 세로 10 cm, 길이 100 cm 이다. 펌프에서 발생하는 압력 요동을 줄이기 위하여 서지 탱크를 설치하였으며, 유동 안정화를 위한 챔버와 6:1 수축부를 두었다. 30 - 100 mm/s 의 자유류 속도를 가지며 난류강도는 1.5% 이내로 유지되었다. 원형 실린더는 5 mm 직경의 아크릴봉으로 제작되었으며 형상비 (L/D) 는 30 이다. 좌표계는 Fig. 1 에 나타난 바와 같이 실린더 중심을 원점으로 하여 주유동 방향을 x , 실린더 길이 방향을 z , 이에 수직인 방향을 y 로 두었다. 측정 단면들은 한 개의 수직단면과 5 개의 수평단면이다. 이들의 위치는 $y/D = 0, -0.25, -0.5, -0.75, -1$ 로서 실린더 중심보다 아래에 위치하고 있으며 위쪽 유동의 정보는 180° 위상 차를 가진 아래쪽 유동장으로부터 얻을 수 있다. 따라서 와구조의 3 차원 배치는 총 9 개의 수평단면으로 이루어진다.

Cinematic PIV 계측은 직경 $10 \mu\text{m}$, 비중 1.5 의 hollow glass 입자를 유동장 내에 주입하고 5W 아르곤 이온 레이저로 조사하여 산란된 입자영상을 고속 디지털 CCD 로 획득하는 방법을 사용하였다. 이 고속 카메라는 480×420 픽셀 해상도에 픽셀당 8 비트의 그레이 레벨을 가지며, 부분 해상도(160×140)에서는 최대 2000 frames/s, 전체 해상도에서는 최대 250 frames/s 의 속도로 촬영이 가능하다. 또한 카메라 자체에 512 MB 의 대용량 메모리를 가지고 있어 2048 장의 입자영상을 연속적으로 저장할 수 있다. 연속광의 레이저는 전기편광 셔터(80X41, DANTEC)에 의해 최대 50 kHz 의 펄스광을 만들 수 있다. 이 셔터는 TTL 신호에 의해 제어 가능하며, 자체 제작한 $1 \mu\text{s}$ 정밀도의 PLD (Programmable Logic Device)에 의해 고속카메라와 동기화된다. 카메라와 레이저의 동기신호도가 Fig. 2 에 나타나 있으며, 각각의 이미지가 전송되는데 필요한 시간은 약 $100 \mu\text{s}$ 이다. 본 연구에서는 250 frames/s 의 속도로 입자영상을 획득하였으며, 총 2048 장의 연속된 입자영상으로부터 125 Hz 로 획득된 1024 장의 속도장이 얻어진다.

속도 벡터는 FFT 방식의 상호상관법에 의해 계산되었으며, 상관 영역은 32×32 로 하고 75%의 overlap 을 사용하여 총 2688 개의 벡터를 얻었다. 75%의 overlap 을 사용한 이유는 3 장에서 설명하는 와류 중심의 위치를 구하는 과정에서 오차를 줄이기 위해서이다. 분해능을 향상시키기 위하여 64×64 상관영역에서 계산된 속도 벡터를 이용하여 두 번째 영상의 상관영역을 오프셋시키는 방식(13, 14)을 사용하였고, 픽셀 단위 이하의 정밀도를

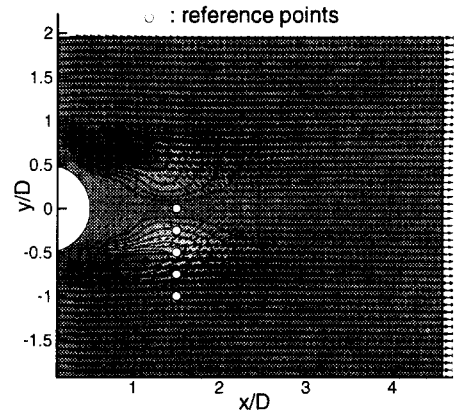


Fig. 3 Long-time averaged flow field and locations of reference phase signals on each transverse plane

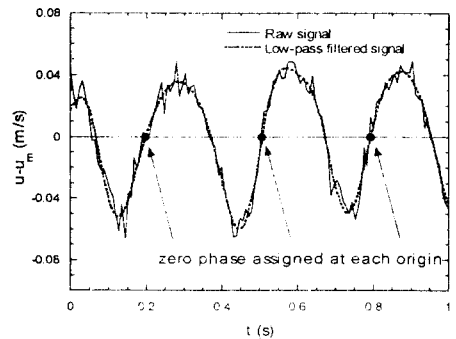


Fig. 4 Reference signal for phase-averaging at $x/D = 1.5$ and $y/D = -0.5$

얻을 수 있도록 상호상관 계수의 극대치를 Gaussian 보간법으로 보간하였다. 실린더 후류 유동은 3 차원성이 강하므로 2 차원 단면에서의 유동장 측정시 레이저 펄스의 간격을 줄이더라도 많은 에러 벡터를 수반한다. 이를 해소하기 위하여 상호상관계수를 구하는 과정에서 영상데이터에 90%의 top-hat 윈도우를 취하고 얻어진 상관계수를 저대역 필터링하여 극대치의 위치를 구하였다. 에러 벡터의 판단은 세가지 기준을 사용하였으며, 상관계수의 첫 번째 극대치와 두 번째 극대치의 비, 최대 픽셀 변위, 그리고 국소 발산(local divergence)이 허용값 이상이면 에러 벡터로 판단하였다. 세가지 판단 기준에 대하여 적절한 기준값을 사용한 결과 본 연구에서는 약 1% 정도가 에러 벡터로 판명되었다. 에러 벡터로 판정되어 제거된 위치에서는 주위 속도를 Gauss 가중함수(weight function)로 보간하여 새로운 벡터로 대체하였다. 벡터 추출 알고리즘의 불확실성은 약 0.7%이며, 엄밀해가

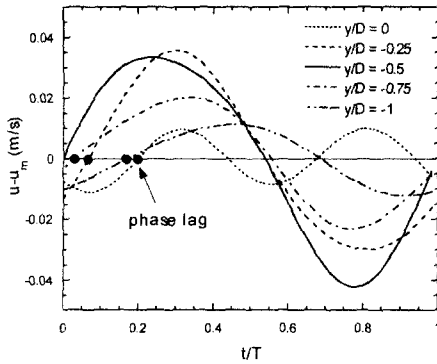


Fig. 5 Phase lags between reference signals at $x/D = 1.5$

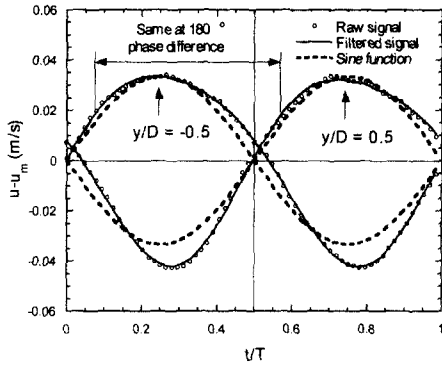


Fig. 6 Characteristics of streamwise velocity compared with sine function

존재하는 층류 파이프 유동 실험을 통하여 PIV 계측기법상의 평균유동장에 대한 데이터의 오차는 약 4.8% 이내임이 확인되었다.⁽¹⁵⁾

3. 결과 및 고찰

레이놀즈수 360 (B 모드)에서 수직단면과 수평 단면에서의 양상불 위상 평균된 속도장을 계측하였다. 와류 세딩 주기는 3.282 Hz 이며, 스트롤수는 0.204 이다. 이는 Roshko⁽¹¹⁾와 Fey 등⁽¹⁶⁾이 제시한 스트롤수-레이놀즈수 관계식으로부터 각각 얻은 0.2045 및 0.2025 와 비교할 때 잘 일치함을 볼 수 있다. 세딩 주기 측정시에는 정밀도를 높이기 위하여 특별히 62.5 Hz 로 샘플링하였다. 또한 이 주기는 카메라의 확장모드를 이용하여 동일한 확대비로 4096 개의 연속적인 속도 데이터를 스펙트럼 분석하여 얻었으며 오차는 0.5% 이내이다. 재순환 영역은 Fig. 3 의 장시간 평균된 후류 유동장의 결과로부터 실린더 중심면을 따른 주유동 방향 속도



Fig. 7 Flow visualization of the transverse plane. Left side of the photograph is the trailing edge of the cylinder and the flow direction is from left to right

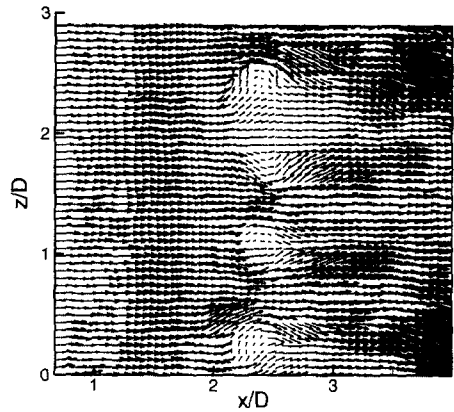


Fig. 8 Instantaneous flow field on the transverse plane

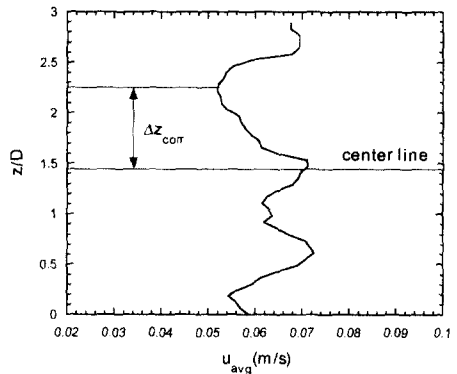


Fig. 9 Averaged streamwise velocity profile which is obtained from the velocity field of Fig. 8 and related to vortex location in the spanwise direction

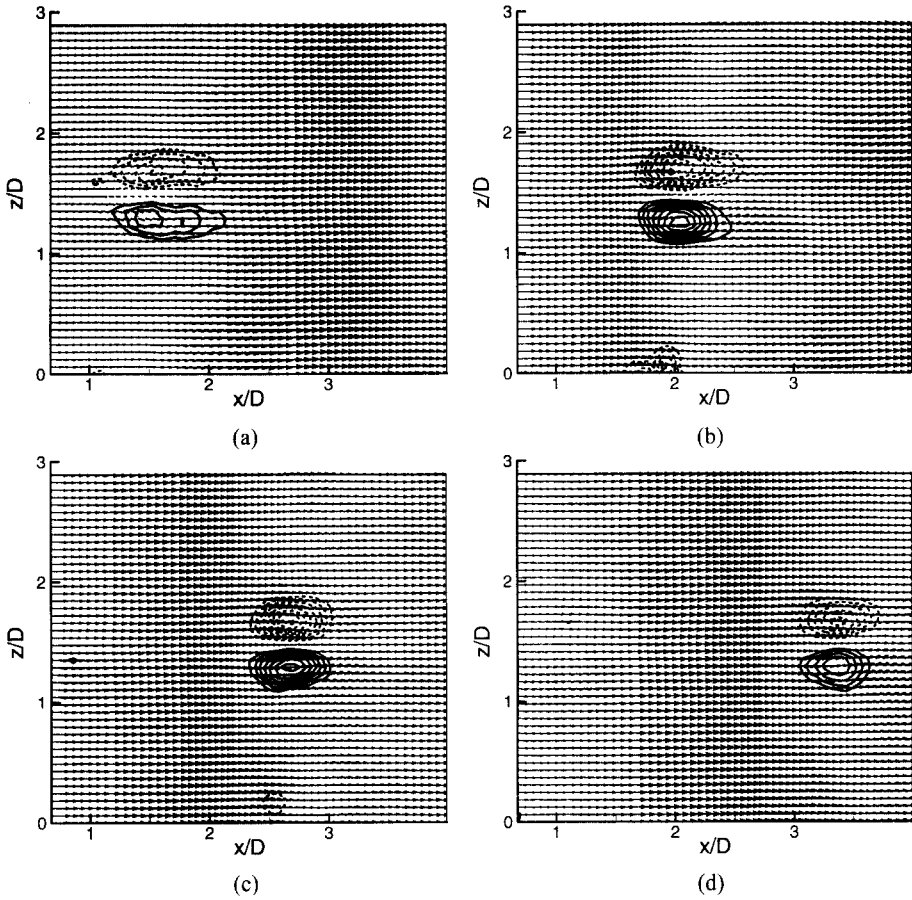


Fig. 10 Phase-averaged velocity and vorticity fields on the transverse plane at $y/D = -0.5$. Origin of the z -axis is arbitrary. Minimum contour level $|\omega_{z, \min}| = 7.5 \text{ s}^{-1}$ and contour increment $\Delta\omega_z = 2.5 \text{ s}^{-1}$: (a) phase = -90° , (b) phase = 0° , (c) phase = 90° , (d) phase = 180°

성분이 0 인 지점으로 정의할 수 있으며, 본 연구에서는 실린더 중심으로부터의 거리가 약 1.71D 로 나타났다.

3.1 위상평균 기법

위상에 고정된 3 차원 유동구조를 파악하기 위하여 기준 신호로서 $x/D = 1.5, y/D = -0.5$ 에서의 주유동 속도를 사용하였다. Fig. 4 에 시간에 따른 주유동 속도 신호와 저대역 필터링한 속도 신호를 나타내었다. 실시간 데이터는 많은 고주파 성분을 포함하고 있어 기준 신호로 사용하기 힘들기 때문에 필터링된 신호를 이용하였다. 그러나 이 신호도 위상의 jitter 현상이 있어 음수에서 양수로 변하는 모든 지점을 기준점(phase = 0°)으로 정하고 그 기준점으로부터 일정한 위치에서 위상 평균을

수행하였다. 위상 평균에 사용된 데이터는 125 Hz 로 샘플링된 1024 개의 속도장을 4 세트를 얻었으며, 각 위상에 대하여 100 개 이상의 데이터를 사용하여 앙상블 평균을 구하였다. 각각의 순간 속도장에 대한 샘플링 시간 분해능이 한 주기에 대해 약 2.7%이며, 그 사이의 데이터는 시간에 대하여 선형 보간하여 위상평균에 사용하였다.

또한 수평단면에서는 기준신호로서 Fig. 3 에 보여진 바와 같이 각각의 평면상에서 $x/D = 1.5$ 인 지점에서의 주유동 속도를 사용하였다. 이때 주유동 속도는 길이 방향으로 평균된 값을 사용하였으며, 각각의 기준 신호는 Fig. 4 와 같은 방식으로 기준점을 지정하였다. 기준 신호로서 평균된 값이 아닌 z 축 상의 임의의 지점에서의 속도를 사용하더라도 기준점의 위치는 크게 영향을 받지 않으나

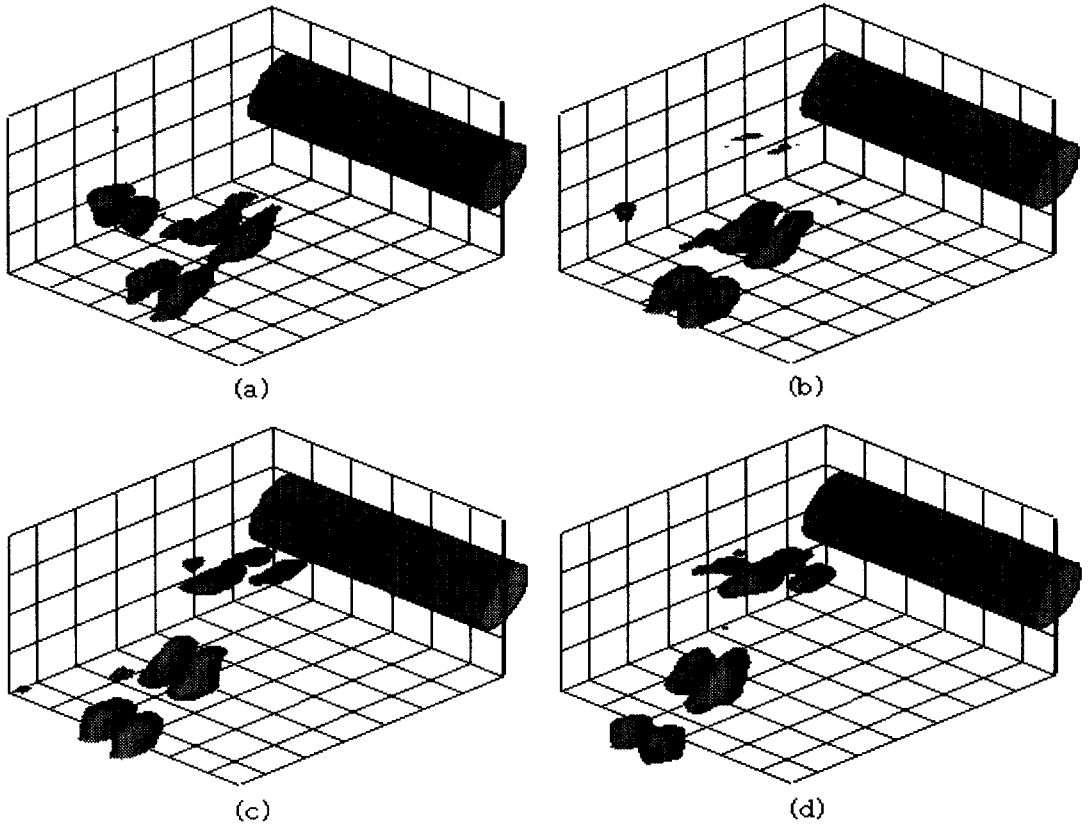


Fig. 11 Iso-vorticity surfaces of the secondary vortex (ω_s). Origin of the z-axis is arbitrary. The left and right surfaces of pair vortices correspond to $\omega_s = 9$ and -9 s^{-1} , respectively: (a) phase = 0° , (b) phase = 45° , (c) phase = 90° , (d) phase = 135°

수직단면에서의 위상평균 유동장이 z 축 방향의 변화가 모두 제거된 유동이므로 평균속도를 사용하는 것이 물리적으로 타당하며, 이는 저대역 필터링의 역할도 한다. 수평단면의 각 위치에서의 기준신호들은 Fig. 5 에서 볼 수 있듯이 서로 위상에 있어 차이가 있다. 따라서 이를 동기화할 필요가 있으며, 본 연구에서는 수직단면에서의 위상평균 유동장의 결과로부터 $y/D = -0.5$ 에서의 신호에 대한 다른 신호들의 위상 지연(phase lag) 양을 구하고 수평단면에서의 위상평균 과정에서 그 양을 보정하였다. Fig. 6 은 중심면에서 상하로 동일한 수직 거리에 있는 두 점에서의 위상 평균된 신호를 한 주기에 대하여 나타내었다. 이 두 점에서의 주유동 속도는 180° 의 위상차이를 가지고 동일한 파형을 이루고 있다. 그러나 두 신호는 모두가 가속 구간이 길고 감속 구간이 짧아 사인 함수와는 다른 형태의 특성을 가지고 있음이 확인되었다.

Fig. 7 에 보여진 가시화와 Fig. 8 의 순간속도장

의 결과로부터 길이 방향의 2 차 와류의 존재를 확인할 수 있고, 실린더 길이 방향으로 2 차 와류의 특성 길이는 수평단면에서 와도의 자기상관함수로부터 통계적으로 구할 수 있다. 본 연구에서는 약 0.93D 로 나타났으며 Williamson⁽³⁾의 Fig. 14 에서 $0.8 \sim 1.2D$ 와 비교할 때 잘 일치한다. 그러나 유동의 불안정성에 의해 나타나는 2 차 와류는 실린더 길이 방향으로 발생위치가 불규칙적이기 때문에 수직단면에서와 같은 방법으로 위상 평균을 하면 이러한 구조를 전혀 볼 수가 없다. 따라서 본 연구에서는 주어진 위상에서 주유동 방향으로 평균된 속도(u_{avg})의 실린더 길이 방향 분포로부터 와의 위치를 구하고 그 위치를 중심으로 하여 위상 평균을 구하였다. 주어진 시간 t 에서의 위상 평균된 속도장 $\langle u \rangle$ 는 충분히 큰 샘플의 개수 N 에 대하여 다음과 같이 주어진다.

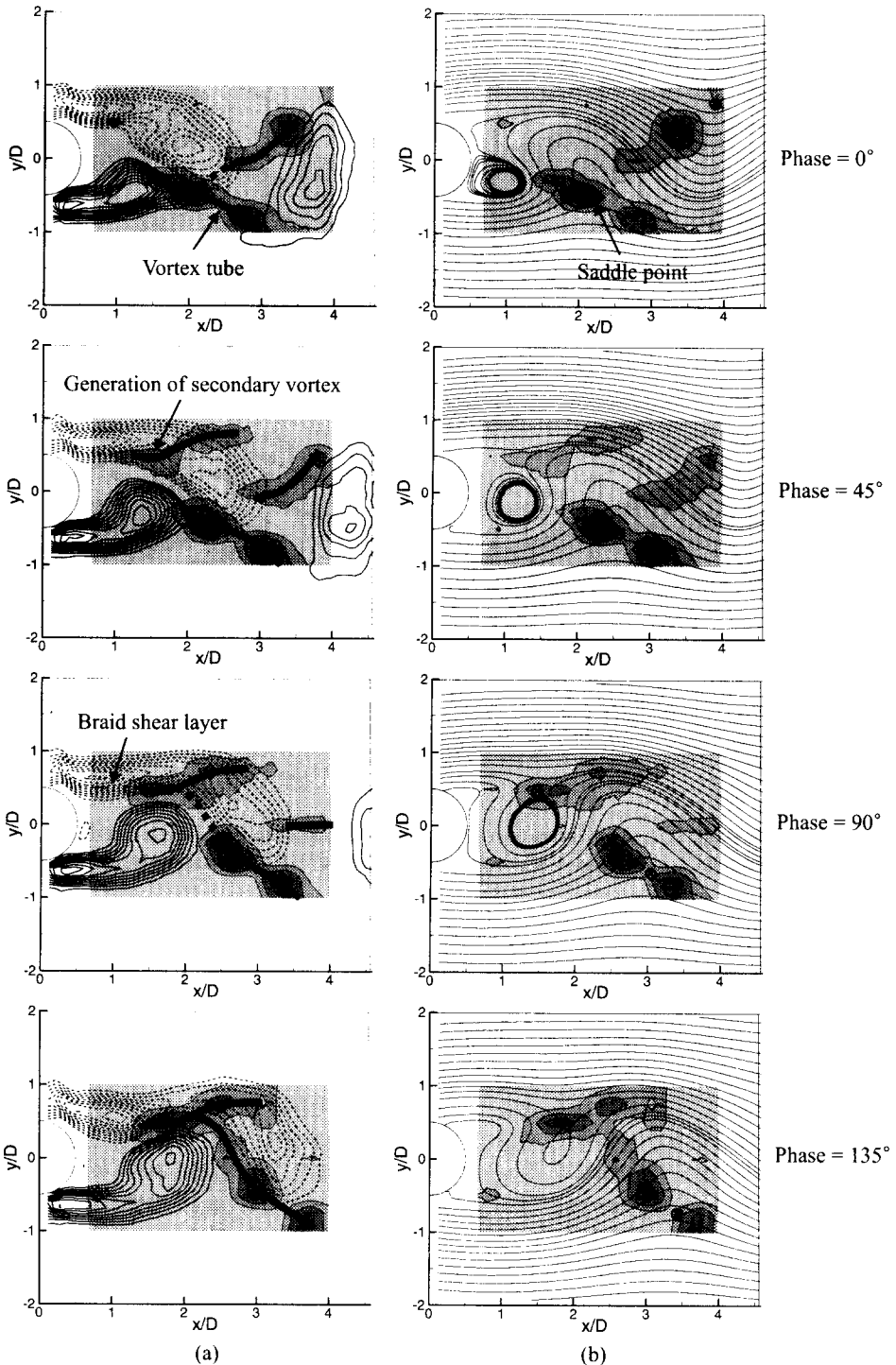


Fig. 12 Spatial relation and temporal evolution of the primary Karman (ω_z) and secondary (ω_y) vortices. The solid/dashed line contours correspond to ω_z with minimum level $|\omega_{z, \min}| = 12 \text{ s}^{-1}$ and increment $\Delta\omega_z = 6 \text{ s}^{-1}$. The shaded contours correspond to ω_y with minimum level $\omega_{y, \min} = 5 \text{ s}^{-1}$ and increment $\Delta\omega_y = 5 \text{ s}^{-1}$; (a) vorticity contours of primary and secondary vortices. (b) streamlines of primary vortex and vorticity contours of secondary vortex

$$\langle u(x, z, t) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u(x, z + \Delta z_{corr}, t + nT) \quad (1)$$

여기서 Δz_{corr} 는 측정 영역의 중심으로부터 와류 중심까지의 거리로서 u_{avg} 가 최소의 극소값을 가지는 지점으로 정의하였다. Fig. 9 는 Fig. 8 의 순간 속도장으로부터 얻어진 u_{avg} 의 분포와 그에 따른 와류 중심의 위치를 보여주고 있다. 이와 같이 와류 중심을 측정 영역의 중심에 고정시킴으로써 5 개의 수평단면의 결과를 3 차원으로 재구성할 수 있다.

3.2 2 차 와류의 시간 및 공간 구조

각각의 위상에 대한 수평단면에서의 앙상블 평균한 속도장 및 2 차 와도(ω_y)의 분포를 Fig. 10 에 나타내었다. 여기서 와도는 속도의 최소자승(least-square) 미분기법으로 구하였다. Fig. 8 의 순간속도장과 비교할 때 순간속도장에서는 와의 구조가 분명하게 나타나나 위상평균된 속도장에서는 그 구조가 상당히 약화된 모습을 볼 수 있으며, 길이 방향으로 규칙적으로 존재하던 와가 중앙에서의 한 개의 와 쌍으로 대체되었다. 이는 2 차 와류의 형태 및 크기 뿐만아니라 길이 방향으로 와류들 간의 상호 거리도 매우 불규칙적으로 변하기 때문이다. 성재용 등⁽¹⁷⁾이 제시한 와도 상관(vorticity correlation)에 의한 위치조정 기법을 적용하면 이러한 문제를 어느 정도 해결할 수 있다. 그러나 이 기법은 각각의 수평단면에서의 와 구조가 z 축에 대하여 고정되지 않아 3 차원 공간에서의 유동 구조를 고찰하기 위한 본 연구의 목적에는 부합하지 않다. 그럼에도 불구하고 Fig. 10 에 나타난 와도의 분포는 2 차 와류의 거동에 대한 많은 정보를 제공한다. 여기서 2 차 와류는 항상 크기가 같고 부호가 반대인 두개의 쌍을 이루고 있으며, 시간에 따라 하류로 진행해나감을 확인할 수 있다. Fig. 10(a)는 2 차 와류가 생성되는 단계이고 Fig. 10(b)-(c)는 점차 발달하여 그 강도가 커지고 있음을 보여준다. Fig. 10(d)에서는 강도가 점차 약해지면서 소멸되는 과정이다.

Fig. 11 은 각각의 위상에서 앙상블 평균된 5 개의 수평단면의 유동장을 3 차원으로 재구성한 2 차 와류의 형상을 보여주고 있다. $y > 0$ 인 부분의 데이터는 $y < 0$ 인 부분의 데이터에서 위상이 180° 지난 유동장을 사용하였다. 실린더 하부에서 생성된 2 차 와류는 시간이 지남에 따라 하류로 진행해나가고 있으며, 위상이 90°에서는 상부에서 또 다른 와 쌍이 생성되고 있다. Karman 와류와의 공간적 위치관계를 살펴보기 위하여 Fig. 12(a)에서는

Fig. 11 의 3 차원 구조로부터 양의 값을 갖는 와의 중심을 수직으로 자른 단면에서의 2 차 와도(ω_y)의 분포와 수직단면에서의 위상평균된 속도장으로부터 얻은 1 차 와도(ω_x)의 분포를 함께 나타내었다. 여기서 1 차 와도의 분포는 실선/점선으로 나타내었고 2 차 와도의 분포는 음영/실선으로 표현되었다. 2 차 와류는 실질적으로 주유동방향 성분(ω_x)과 수직방향 성분(ω_y)을 가지고 있으나 본 연구에서는 수직방향 성분의 계측을 통하여 와관(vortex tube) 모델의 형상을 예측하였다. 이는 Wu 등⁽⁸⁾이 사용한 2 차 와류의 공간적 형태를 예측하는 방법과 같은 원리이며, 이로부터 와관의 상대적인 연결 정도를 파악할 수 있다. 전체적으로 2 차 와류에 의한 와관은 부호가 반대인 두 개의 Karman 와류의 경계면에서 형성되고 있으며, 이는 Williamson⁽⁷⁾과 Brede 등⁽¹⁰⁾이 제시한 2 차 와류 모델과 일치한다. B 모드 영역에서의 2 차 와류는 Karman 와류가 braid 영역의 불안정성에 의해 변형되면서 발생하는 것으로 알려져 있으며, Fig. 12(a)에서 위상이 45°인 경우 braid 영역에서 상부의 Karman 와류가 하부의 와류와 부딪히면서 분리되는 과정에서 연신(stretching) 유동이 일어나고 이와 함께 2 차 와류가 강하게 형성되고 있음을 확인할 수 있다. 이 과정에서 와관은 이전 단계에서 가지고 있던 연결 강도가 점점 약해지고 Karman 와류의 경계면을 따라 새로 발생한 2 차 와류와의 연결이 강화됨을 볼 수 있다. 실린더 근접 후류에서 이러한 와관의 비정상 거동에 대한 계측은 아직 이루어진 바가 없으며 본 연구에서 최초로 시도되었다. Karman 와류의 안장점(saddle point)은 3 차원 유동의 존재 가능성을 가장 잘 나타내기 때문에 Fig. 12(b)에서는 유선과 2 차 와류의 위치 관계를 살펴보았다. 위상이 90°와 135°의 경우, 근접 후류에서의 안장점의 위치와 2 차 와류의 최대값이 존재하는 위치가 서로 동일함을 볼 수 있다. 이는 안장점에서 와류의 3 차원성이 가장 강하게 나타남을 의미한다. 그러나 하류로 진행하면서 2 차 와류의 강도가 최대가 되는 위치는 안장점에 대해 상류로 편이되고 그 강도가 약해지는 현상을 보인다. 즉 안장점의 대류속도 보다 2 차 와류의 대류속도가 느리다고 볼 수 있다. 반면 안장점 하류에 있던 2 차 와류는 상대적으로 강도가 커지는 결과를 보인다.

4. 결론

작은 스케일의 3 차원 유동 구조를 갖는 후류 천이(wake transition) 영역에서의 실린더 근접 후류

를 Cinematic PIV 기법으로 계측하여 위상평균 유동장을 구하였다. 스트롤수와 2 차 와류의 특성길이 기존의 연구 결과와 잘 일치함을 확인하였다.

위상에 고정된 3 차원 유동구조를 파악하기 위하여 동일한 기준 주기 신호에 대하여 하나의 수직단면과 5 개의 수평단면에서의 앙상블 위상 평균된 유동장을 구하였으며, 이를 3 차원으로 재구성하여 Karman 와류와 2 차 와류의 상호 관계에 대하여 고찰하였다. 수평단면에서 나타나는 2 차 와류는 길이 방향으로 불규칙적으로 존재하여 일반적인 위상평균기법으로는 그 구조가 나타나지 않으나, 본 연구에서는 주유동 방향으로 평균된 속도 분포로부터 와류 중심 위치를 구하고 이를 보정해주는 기법을 통하여 3 차원 공간에서의 2 차 와류의 특성에 대한 구체적인 해석이 가능하였다.

와도 분포에 의한 2 차 와류의 형상은 항상 쌍으로 존재하며, 하류로 진행하면서 생성, 발달, 소멸의 비정상 과정을 겪게 된다. 또한 공간적으로 부호가 다른 Karman 와류들의 경계면을 따라 위치하고 있으며, 이는 기존 연구에 의해 밝혀진 와류 모델과 일치한다. 2 차 와류는 근접 후류 영역의 한쪽에서 생성된 Karman 와류가 다른쪽에서 생성된 Karman 와류를 끊어 내는 과정에서 불안정성이 증가하여 형성된다. 이 때 braid 영역에서 연신유동이 일어나는데 이는 유선에서 안장점으로 나타나며, 이 지점에서 Karman 와류의 변형이 일어나고 2 차 와류의 강도가 최대값을 가진다. 또한, 와관은 기존의 결합 상태가 약화되고 새롭게 강화된 와관과 결합이 강화된다. 그러나 안장점의 대류 속도에 비해 2 차 와류의 대류 속도가 느리게 나타났으며, 안장점에 있던 2 차 와류의 강도는 약해지는 반면 안장점 하류에 있던 2 차 와류의 강도는 상대적으로 증가하였다.

후 기

본 연구는 BK21 사업 서울대/한양대 기계분야 연구인력양성사업단의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Roshko, A., 1954, "On the Development of Turbulent Wakes from Vortex Streets," *NACA Rep.* 1191.
- (2) Bloor, M. S., 1964, "The Transition to Turbulence in the Wake of a Circular Cylinder," *J. Fluid Mech.*, Vol. 19, pp. 290 ~ 303.
- (3) Williamson, C. H. K., 1996, "Vortex Dynamics in the Cylinder Wake," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 28, pp. 477 ~ 539.
- (4) Williamson, C. H. K., 1988, "The Existence of Two Stages in the Transition to Three-Dimensionality of a Cylinder Wake," *Phys. Fluids*, Vol. 31, No. 11, pp. 3165 ~ 3168.
- (5) 최재호, 김형범, 이상준, 이인섭, 2000, "위상평균 PTV 기법을 이용한 축류 쉐인 주위 유동의 속도장 측정 연구," 대한기계학회논문집 B, 제 24 권, 제 1 호, pp. 114 ~ 123.
- (6) Mansy, H., Yang, P. M. and Williams, D. R., 1994, "Quantitative Measurements of Three-Dimensional Structures in the Wake of a Circular Cylinder," *J. Fluid Mech.*, Vol. 270, pp. 277 ~ 296.
- (7) Williamson, C. H. K., 1996, "Three-Dimensional Wake Transition," *J. Fluid Mech.*, Vol. 328, pp. 345 ~ 407.
- (8) Wu, J., Sheridan, J., Welsh, M. C. and Hourigan, K., 1996, "Three-dimensional Vortex Structures in a Cylinder Wake," *J. Fluid Mech.*, Vol. 312, pp. 201 ~ 222.
- (9) Chyu, C. and Rockwell, D., 1996, "Evolution of Patterns of Streamwise Vorticity in the Turbulent Near Wake of a Circular Cylinder," *J. Fluid Mech.*, Vol. 320, pp. 117 ~ 137.
- (10) Brede, M., Eckelmann, H. and Rockwell, D., 1996, "On Secondary Vortices in the Cylinder Wake," *Phys. Fluids*, Vol. 8, No. 8, pp. 2117 ~ 2124.
- (11) Lourenco, L., Subramanian, S. and Ding, Z., 1997, "Time Series Velocity Field Reconstruction from PIV Data," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 8, pp. 1533 ~ 1538.
- (12) 김경천, 윤상열, 김상기, 1999, "와추적 위상평균 기법을 이용한 원주후류의 PIV 측정," 대한기계학회 유체공학부문 1999 년도 추계학술대회 논문집 B, pp. 55 ~ 60.
- (13) Scarano, F. and Riethmuller, M. L., 1999, "Iterative Multigrid Approach in PIV Image Processing with Discrete Window Offset," *Exp. in Fluids*, Vol. 26, pp. 513 ~ 523.
- (14) Hart, D. P., 1998, "Super-Resolution PIV by Recursive Local-Correlation," *Proc. VSJ-SPIE98*, AB149.
- (15) Kim, J. K., Sung, J., Chang, J. K., Min, B. G. and Yoo, J. Y., 1998, "In-Vitro Measurements of Fluid Dynamic Characteristics of Polyurethane Heart Valve Prostheses Using Particle Image Velocimetry," *10th International Conference on Mechanics in Medicine and Biology*, pp. 141 ~ 144.
- (16) Fey, U., K̄nig, M. and Eckelmann, H., 1998, "A new Strouhal-Reynolds-Number Relationship for the Circular Cylinder in the Range $47 < Re < 2 \times 10^5$," *Phys. Fluids*, Vol. 10, No. 7, pp. 1547 ~ 1549.
- (17) 성재용, 박강국, 유정열, 2000, "Cinematic PIV 에 의한 실린더 후류의 위상평균된 3 차원 구조," 대한기계학회 2000 년도 추계학술대회논문집 B, pp. 661 ~ 666.