

Cinematic PIV에 의한 실린더 후류의 위상평균된 3차원 구조

성재용* · 박강국** · 유정열***

Phase-Locked Three-Dimensional Structures in the Cylinder Wake Observed from Cinematic PIV Data

Jaeyong Sung, Kang Kuk Park and Jung Yul Yoo

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

Abstract

Near-wake flow field of a circular cylinder is studied by means of a cinematic PIV system with high sampling rate and large internal memory block. Experiments are conducted in a closed-cycle water tunnel system and a cross-correlation algorithm in conjunction with FFT (Fast Fourier Transform) analysis and an offset correlation technique is used for vector processing. With the help of very high sampling frequency compared to the shedding frequency, it is possible to obtain phase-averaged information of the three-dimensional wake, even though the shedding is not forced but natural. Phase-locked vortical structures observed simultaneously from the spanwise and cross-stream planes are displayed in the wake-transition regime where fine-scale secondary vortices have a spanwise wavelength of around one diameter. Spatial relations and temporal evolutions of the primary Karman vortex and the secondary vortex are also discussed schematically.

기호설명

D : 실린더 직경
 L : 실린더 길이
 x, y, z : 주유동, 수직, 길이 방향 좌표

1. 서론

원형실린더 후류의 보텍스 형성 및 발달과정은 주기적이면서도 매우 복잡한 구조를 가지고 있어 방대한 연구들이 수행되었다.⁽¹⁻²⁾ 이러한 연구결과들을 종합하여 Williamson⁽³⁾은 그의 review 논문에서 넓은 범위의 레이놀즈수에서의 유동 특성에 대하여 논하였는데, 특히 레이놀즈수 190에서

1000까지를 후류 천이(wake transition) 영역으로 분류하면서 레이놀즈수와 스트롤수의 관계에서 2개의 불연속적인 점이 존재하고 불안정성이 증가하여 와류가 3차원 구조를 가지고 있음을 보였다. 이 두 개의 불연속점은 레이놀즈수 190 근처에서 A 모드, 260 근처에서 B 모드로의 전환하는 점으로, 두 모드는 2차 와류(secondary vortex)의 공간적 구조 및 불안정성 발생 원리에 있어 차이를 보인다. 이러한 와 구조의 발달과정에 대한 정량적 계측은 실린더 후류 유동이 비정상적이며 강제 유동이 아닌 자연 발생적이라는 점에서 매우 어려운 일이다. 또한 와류 형태의 임의적인 변화 가능성이 있어 기존의 열선유속계와 LDV 같은 점 측정방법으로는 전체적인 유동구조를 파악하기에 한계를 지니고 있다.

최근 PIV 계측 기법의 발달과 함께 와 구조의 공간적 분포형태에 대한 연구가 이루어지고 있다. Chyu와 Rockwell⁽⁴⁾은 난류 유동에서의 주유동

* 회원, 서울대 대학원 기계항공공학부

** 서울대 대학원 기계항공공학부

*** 회원, 서울대 기계항공공학부

방향 와의 형태를 제시하였고, Wu 등⁽⁵⁾은 종방향 와 구조를 계측하였다. 하지만 이들의 연구는 모두 순간 유동장의 결과를 바탕으로 하였다. Lourenco 등⁽⁶⁾은 처음으로 PIV 데이터를 이용하여 위상평균 유동장을 측정하였다. 그들은 낮은 샘플링 주기로 인해 유동장 내의 순환과 시간 정보를 이용하여 Whittaker 보간법으로 재구성된 속도장을 위상 평균에 사용하였다. 또한 김경천 등⁽⁷⁾은 시간 정보에 의존하지 않고 랜덤 샘플링으로 얻은 속도장을 와 중심과 순환으로부터 위상을 추출하는 기법을 제시하였다. 그러나 2차원성이 강한 x-y 평면에서의 위상평균 유동장만 제시되어 3차원 와 구조를 파악하는데는 한계를 지닌다.

본 연구에서는 Cinematic PIV 기법을 이용하여 x-y 평면뿐만 아니라 z-x 평면에서도 위상평균 속도장을 구하여 공간, 시간에 따른 근접 후류의 3차원 유동 특성을 파악하고자 한다. 두 평면에서 동일한 위상의 평균속도장을 얻기 위하여 공통으로 존재하는 주유동 속도 성분을 기준 주기 신호로 채택하였다. 특히 z-x 평면에서는 2차 와류의 위치가 z축에 대해 고정되어 있지 않고 불규칙적으로 변하기 때문에 기존의 위상평균기법으로는 이를 포착할 수 없어 와도 상관 (vorticity correlation)에 의한 z축 방향의 위치 교정기법을 추가하였다. 모든 결과는 z방향 특성 길이가 1D 정도로 작은 스케일의 2차 유동이 존재하는 레이놀즈수 386 (B 모드)에 대하여 제시되었으며, Karman 와류와 2차 와류의 공간적 관계 및 시간적 변화과정에 대하여 논의되었다.

2. 실험장치 및 PIV 계측기법

실린더 후류 유동장 계측은 수동에서 이루어졌으며, 물에 의한 부식을 방지하기 위하여 모든 재료는 아크릴과 스텐레스 스틸로 제작되었다. 실험부의 크기는 가로 15 cm, 세로 10 cm, 길이 100 cm이다. 펌프에서 발생하는 압력 요동을 줄이기 위하여 서지 탱크를 설치하였으며, 유동 안정화를 위한 챔버와 6:1 contraction을 두었다. 30 - 100 mm/s의 자유류 속도를 가지며 난류강도는 1.5% 이내로 유지되었다. 원형 실린더는 5 mm 직경의 아크릴봉으로 제작되었으며 형상비 (L/D)는 30이다. 좌표계는 실린더 중심을 원점으로 하

여 주유동 방향을 x, 실린더 길이 방향을 z, 이에 수직이 방향을 y로 두었다.

Cinematic PIV 계측은 10 μ m의 silver coated hollow glass 입자를 유동장 내에 주입하고 5W 아르곤 이온 레이저로 조사하여 산란된 입자영상을 고속 디지털 CCD로 획득하는 방법을 사용하였다. 이 고속 카메라는 480 x 420 픽셀 해상도에 픽셀당 8 비트의 grey level을 가지며, 부분 해상도에서는 최대 2000 frame/s, 전체 해상도에서는 최대 250 frame/s의 속도로 촬영이 가능하다. 또한 카메라 자체에 512 MB의 대용량 메모리를 가지고 있어 2048 frame을 연속적으로 저장할 수 있다. 연속광의 레이저는 전기적인 편광원리를 이용한 electro-optic 셔터에 의해 최대 50 kHz의 펄스광을 만들 수 있다. 이 셔터는 TTL 신호에 의해 제어가 가능하며, 자체 제작한 PLD (Programmable Logic Device)에 의해 고속카메라와 동기화 된다. frame straddling 방식의 카메라와 레이저의 동기신호가 Fig. 1에 나타나 있으며, 각각의 이미지가 전송되는데 필요한 시간은 약 100 μ s이다. 본 연구에서는 250 frame/s의 속도로 입자영상을 획득하였으며, 총 2048 장의 연속된 입자영상으로부터 1024 장의 속도장이 얻어진다.

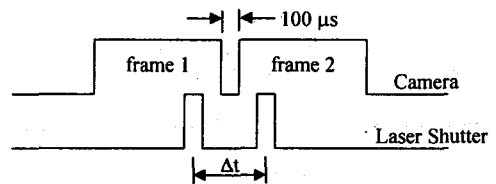


Fig. 1 Frame straddling signal of a cinematic PIV system.

속도 벡터는 FFT 방식의 상호상관법에 의해 계산되었으며, 상관 영역은 32 x 32로 하였으며 75%의 overlap을 사용하여 총 2688 개의 벡터를 얻었다. 분해능을 향상시키기 위하여 64 x 64 상관영역에서 계산된 속도 벡터를 이용하여 두 번째 영상의 상관영역을 offset 시키는 방식⁽⁸⁻⁹⁾을 사용하였고, 픽셀 단위 이하의 정밀도를 얻을 수 있도록 상호상관 계수의 peak를 Gaussian 보간법으로 보간하였다. 실린더 후류 유동은 3차원성이 강하므로 2차원 단면에서의 유동장 측정시 레이저 펄스의 간격을 줄이더라도 많은 예러 벡터를 수반한다. 이를 해소하기 위하여 상호상관계수를

구하는 과정에서 영상데이터에 90%의 Top-Hat 원도우를 취하고 얻어진 상관계수를 Low-pass 필터링하여 peak의 위치를 구하였다. 에러 벡터의 판단은 세가지 기준을 사용하였으며, 상관계수의 첫 번째 peak과 두 번째 peak의 비, 최대 픽셀 변위, 그리고 국소 divergence가 허용값 이상이면 에러 벡터로 판단하였다. 본 실험 결과에서는 1% 미만의 에러 벡터가 검출되었다.

3. 결과 및 고찰

레이놀즈수 386 (B mode)에서 x-y 평면과 z-x 평면에서의 양상불 위상 평균된 속도장을 계측하였다. 와류 shedding 주기는 3.326 Hz이며, 스트로울수는 0.207로 기존의 다른 연구 결과와 잘 일치함을 확인하였다. 이 주기는 62.5 Hz로 샘플링한 4096개의 PIV 데이터를 스펙트럼 분석하여 얻었으며 오차는 0.5% 이내이다. 장시간 평균된 후류 유동장의 결과로부터 재순환 영역의 크기를 측정할 수 있으며, 본 연구에서는 Fig. 2에서 약 1.7D로 나타났다.

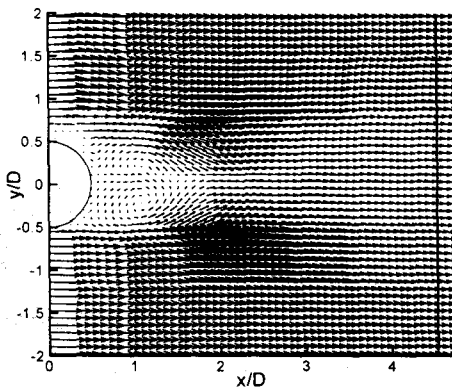


Fig. 2 Long-time averaged velocity field

위상에 고정된 3차원 유동 구조를 파악하기 위하여 기준 주기 신호로서 $x/D = 2$, $y/D = -0.5$ 에서의 주유동 속도를 사용하였다. Fig. 3에 시간에 따른 주유동 속도 신호와 Low-pass 필터링한 속도 신호를 나타내었다. 실시간 데이터는 많은 고주파 성분을 포함하고 있어 기준 신호로 사용하기 힘들기 때문에 필터링된 신호를 이용하였다. 하지만 이 신호도 위상의 jitter 현상이 있어 음수

에서 양수로 변하는 모든 지점을 기준점 (phase = 0°)로 지정하고 그 기준점으로부터 일정한 위치에서 위상 평균을 수행하였다. 위상 평균에 사용된 데이터는 125 Hz로 샘플링하였기 때문에 위상 에러가 약 2.7%이다. 따라서 이를 선형 보간하여 위상 에러를 최소화하였다.

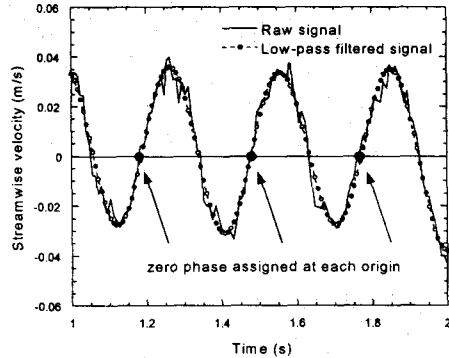


Fig. 3 Reference signal for phase-averaging

Fig. 4에서는 x-y 평면에서의 위상 평균된 속도장과 그로부터 구한 와도 분포를 보였다. 위상 평균에 사용된 데이터는 약 50 - 60 개 정도이며, 전형적이 Karman 와류 shedding의 2차원 단면을 보여주고 있다.

3차원 와류의 구조를 명확하게 파악하기 위해서는 y-z 평면 또는 z-x 평면에서의 속도장을 필요로 하며, 본 연구에서는 z-x 평면에서의 2차 와류의 형태를 살펴보았다. Fig. 5에서는 가시화를 통해 이러한 3차원 구조의 존재를 확인하였고 Fig. 6의 순간 속도장 결과에서도 마찬가지로 현상이 나타났다. 하지만 불안정성에 의해 나타나는 2차 와류는 실린더 길이 방향으로 dislocation 현상을 보이며, x-y 평면에서와 같은 방법으로 위상 평균을 하면 순간 속도장에서는 볼 수 있던 와가 나타나지 않는다. 따라서 본 연구에서는 동일한 위상에서 실린더 길이 방향의 와도 상관(vorticity correlation)을 구하여 최대 peak의 위치 만큼 움직인 상태에서 위상 평균을 구하였다. 이는 동일한 위상이라도 2차 와류의 위치가 조금씩 변하기 때문에 그 양을 보정한 것이다.

이상의 방법으로 z-x 평면에서의 위상 평균한 속도장 및 와도분포를 Fig. 7에 나타내었다. 측정된 평면의 위치는 2차 와류의 구조가 가장 명확

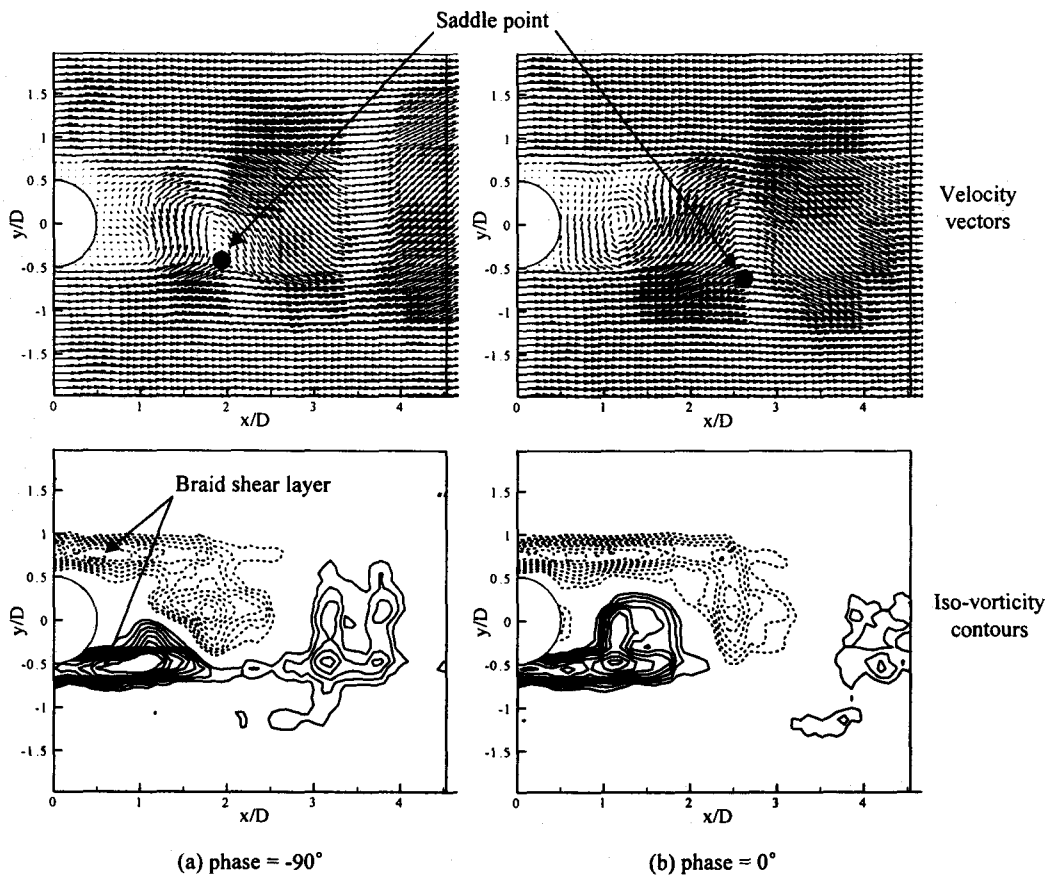


Fig. 4 Phase-averaged velocity and vorticity fields in the x-y plane



Fig. 5 Flow visualization in the z-x plane

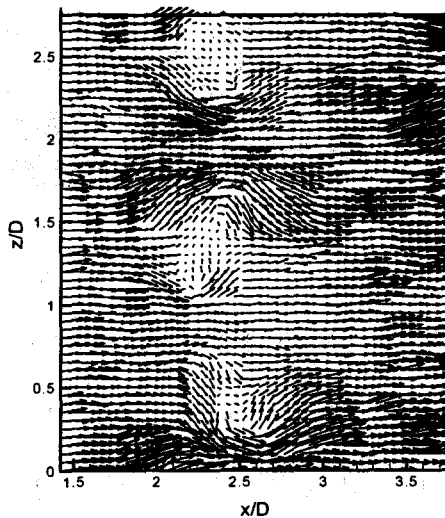


Fig. 6 Instantaneous flow field in the z-x plane

하게 보이는 $y/D = -0.5$ 를 택하였으며, 위상 평균을 위한 기준 신호는 $x/D = 2$ 에서 길이 방향으로 평균된 주유동 속도를 사용하였다. 1024개의 속도장을 4 세트를 얻어 각 위상에 대해 약 100개 이상의 데이터를 사용하여 앙상블 평균을 구하였다. Fig. 4의 x-y 평면에서의 결과와 비교해볼 때 2차 와류의 위치는 안장점(saddle point) 바로 직전 상류에 존재함을 볼 수 있다. 이는 2차 유동의 와 튜브가 이 지점에서 수직방향을 놓여있음을 의미하며, Williamson⁽²⁾과 Brede 등⁽¹⁰⁾이 제시한 2차 와류 모델로부터도 확인할 수 있다. z-x 단면에서의 안장점의 위치는 길이 방향으로 평균된 주유동 방향의 속도가 최소가 되는 지점으로부터 구할 수 있으며 x-y 단면에서 나타난 안장점의 위치와 동일함을 확인할 수 있었다. 이로써 두 단면에서의 위상이 서로 일치한다는 사실이 증명된다. 또한 실린더 길이 방향으로 2차 와류의 특성 길이는 약 $1D$ 정도였으며, 이전의 연구 결과^(2,5,10)와 잘 일치한다.

Fig. 7의 상단에 스케치한 2차 와류의 유선에서 볼 수 있듯이, 2차 와류는 항상 부호가 반대인 와류쌍으로 존재하며, 초기에는 내부에 두 개의 회전 유동이 명확히 보이나 하류로 진행할수록 두 개가 합쳐지면서 점점 소산되어 나가는 시간적 거동을 볼 수 있다. B 모드 영역에서의 2차 와류는 Karman 와류의 braid shear layer 영역의 불안정성에 의해 발생하며 와 튜브를 형성하고 있음이 알려져 있다. 따라서 이 영역에서는 주유동 방향의 와도 성분을 가지고 있어 위상평균된 z-y 평면에서는 나타나지 않는다. 하지만 이러한 사실을 바탕으로 각각의 위상에서의 Karman 와류와 2차 와류의 공간적 분포를 종합하면 Fig. 8에와 같은 구성도를 도출할 수 있다. 즉 실린더 윗면과 아래면에서 생긴 각각의 2차 와 튜브는 근접 후류에서 합쳐져 Karman 와류를 타고 하류로 진행하면서 점점 소멸해 나간다.

4. 결론

작은 스케일의 3차원 유동 구조를 갖는 후류 천이(wake transition) 영역에서의 실린더 근접 후류를 Cinematic PIV 기법을 이용하여 계속하였다. 위상에 고정된 3차원 구조를 파악하기 위하여 동일한 기준 주기 신호에 대하여 x-y 평면과 z-x 평

면에서의 앙상블 위상 평균된 유동장을 제시하였으며, 두 단면에서의 위상이 서로 잘 일치함을 확인하였다. z-x 평면에서 나타나는 2차 와류는 길이 방향으로 불규칙적인 dislocation이 존재하여 일반적인 위상평균기법으로는 이러한 구조가 나타나지 않으나 본 연구에서는 와도 상관에 의한 위치 교정을 통하여 성공적인 결과를 얻을 수 있었으며, 2차 와류의 특성 길이도 기존의 연구결과와 잘 일치하였다.

위상이 동일한 두 단면에서의 속도장을 연속적으로 얻음으로써 Karman 와류와 2차 와류의 공간적 배치를 이해하는 물론 이 두 와류의 시간에 따른 변화과정을 밝힐 수 있었다. 우선 Karman 와류의 braid 영역에서 불안정성에 의해 실린더 윗면과 아래면에서 발생된 두 개의 2차 와류 튜브는 Karman 와류가 생성되는 근접 후류에서 하나로 합쳐져 Karman 와류를 타고 동일한 속도로 하류로 대류된다. 이 과정에서 튜브 내에 쌍으로 존재하던 회전 유동은 하류로 진행하면서 점점 소산되는 모습을 보인다.

후기

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

참고문헌

- (1) Mansy, H., Yang, P. M. and Williams, D. R., 1994, "Quantitative Measurement of Three-Dimensional Structures in the Wake of a Circular Cylinder," *J. Fluid Mech.*, Vol. 270, pp. 277-296.
- (2) Williamson, C. H. K., 1996, "Three-Dimensional Wake Transition," *J. Fluid Mech.*, Vol. 328, pp. 345-407.
- (3) Williamson, C. H. K., 1996, "Vortex Dynamics in the Cylinder Wake," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 28, pp. 477-539.
- (4) 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.
- (5) Wu, J., Sheridan, J., Welsh, M. C., Hourigan, K. and Thompson, M., 1994,

"Longitudinal Vortex Structures in a Cylinder Wake," *Phys. Fluids*, Vol. 6, pp. 2883-2885.

- (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) 김경천, 윤상열, 김상기, 1999, "와추적 위상평균 기법을 이용한 원주후류의 PIV 측정," 대한기계학회 유체공학부문 1999년도 추계학술대회 논문집, pp. 55-60.
- (8) 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.

- (9) Hart, D. P., 1999, "Super-Resolution PIV by Recursive Local-Correlation," *J. of Visualization*, Vol. 10.
- (10) Brede, M., Eckelmann, H. and Rockwell, D. 1996, "On Secondary Vortices in the Cylinder Wake," *Phys. Fluids*, Vol. 8, pp. 2117-2124.

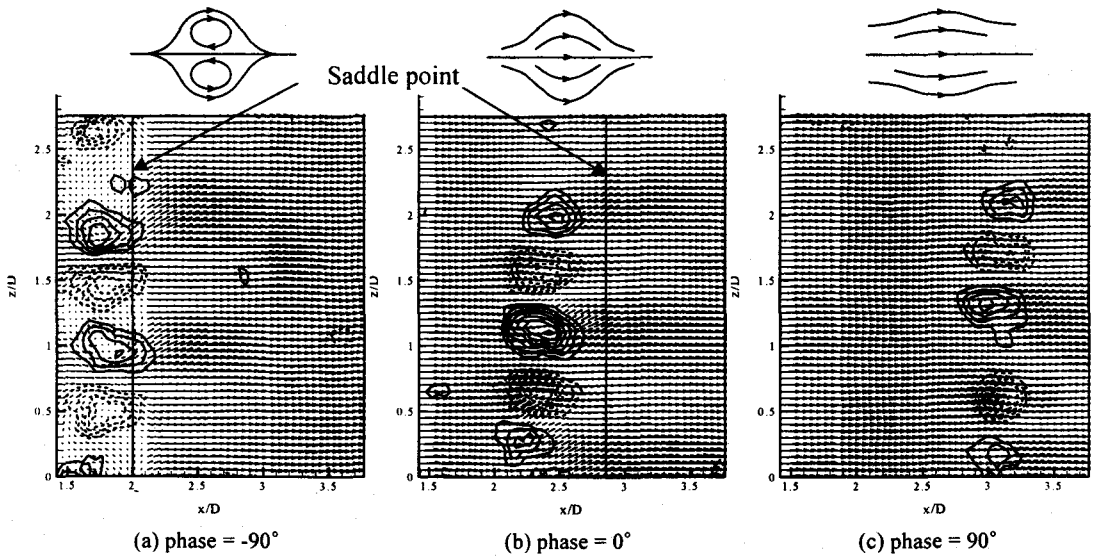


Fig. 7 Phase-averaged velocity and vorticity fields in the z-x plane

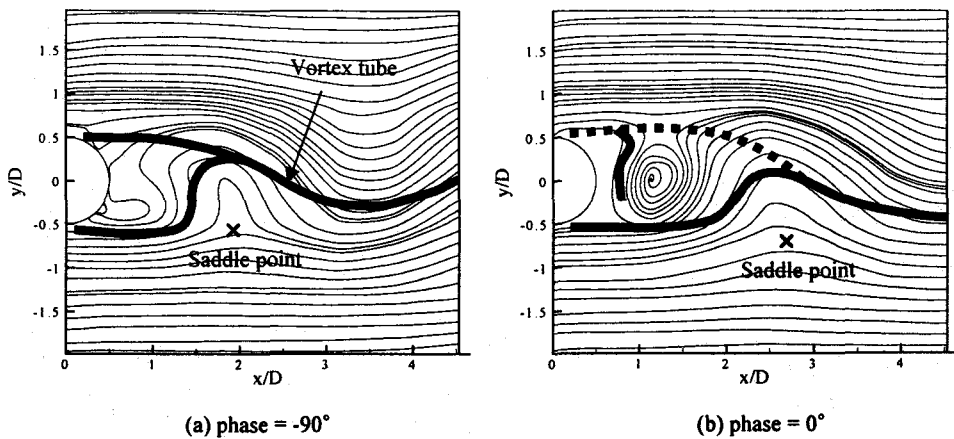


Fig. 8 Schematic description of the Karman vortex and secondary vortex