

2-프레임 PTV를 이용한 수직벽 주위 유동장 해석

백 승 조*, 이 상 준**

(1999년 3월 30일 접수)

Velocity Field Measurement of Flow Around a Surface-Mounted Vertical Fence Using the Two-Frame PTV System

Seung-Jo Baek and Sang-Joon Lee

Key Words : 2-Frame PTV(2-프레임 입자추적속도계), Vertical Wall(수직벽), Velocity Field(속도장)

Abstract

The turbulent shear flow around a surface-mounted vertical fence was investigated using the two-frame PTV system. The Reynolds number based on the fence height(H) was 2950. From this study, it is revealed that at least 400 instantaneous velocity field data are required for ensemble average to get reliable turbulence statistics, but only 100 field data are sufficient for the time-averaged mean velocity information. Various turbulence statistics such as turbulent intensities, turbulence kinetic energy and Reynolds shear stress were calculated from 700 instantaneous velocity vector fields. The fence flow has an unsteady recirculation region behind the fence, followed by a slow relaxation to the flat-plate boundary layer flow. The time-averaged reattachment length estimated from the streamline distribution is about 11.2H. There exists a region of negative Reynolds shear stress near the fence top due to the highly convex (stabilizing) streamline-curvature of the upstream flow. The large eddy structure in the separated shear layer seems to have significant influence on the development of the separated shear layer and the reattachment process.

기호설명

- ΔT : 두 frame 화상사이의 시간간격
- x, y, z : 각각 흐름, 높이, 폭방향의 좌표계
- U, V : 흐름방향, 높이방향의 속도
- U_0 : 자유흐름속도
- P_{ij} : 각 변위들에 대한 일차확률
- P_i^* : 불일치확률
- x_1 : 첫번째 프레임에 있는 목적입자
- y_1 : 두번째 프레임의 입자
- F^1 : 첫번째 유동화상
- F^2 : 두번째 유동화상
- H : 수직벽의 높이
- N : 획득영상수
- δ : 경계층 두께
- ψ : 유동함수

$q^2/2U_0^2$: 난류운동에너지

1. 서론

유동의 박리와 재부착을 동반하는 난류전단층은 일반적으로 난류강도가 높고 역방향 속도성분이 크기 때문에 열선유속계와 같은 기존의 점측정(point-wise measurement)법으로는 정확한 유동해석에 어려운 점이 많다. 최근들어, 컴퓨터, 전자광학기술, 화상처리기법등의 발달로 인하여 기존 속도계측 기법들의 단점을 보완한 정량적인 유동가시화 기법들이 선진국을 중심으로 활발히 개발되고 있다. 이러한 화상처리를 이용한 유동가시화 기법은 LDV가 갖는 장점뿐만 아니라 비정상 유동장의 거시적인 해석 그리고 유동장의 공간적인 분포를 정량적으로 쉽게 계측할 수 있다. 이러한 속도장 측정기법은 빠른 속도로 발달되어가는 컴퓨터 및 화상처리 기술에 힘입어 유동현상의 규명에 있어서 강력한 계측방법이 되어가고 있다.

* LG 전자 홈어플라이언스 연구소

** 회원, 포항공과대학교 기계공학과

화상처리를 이용한 속도장 측정기법의 기본원리는 주어진 측정시간(ΔT)동안 움직인 유동입자 (particle)들의 변위정보를 CCD(charge coupled device) 카메라와 같은 영상입력장치를 이용하여 2차원 화상데이터로 저장한 후 디지털 화상처리기법을 이용하여 입자변위를 측정하는 것이다. 유동화상(flow image)으로부터 정량적인 속도장을 구하는 데에는 입자변위를 구하는 방법에 따라 PSV (Particle Streak Velocimetry), PIV (Particle Image Velocimetry),⁽¹⁾ PTV (Particle Tracking Velocimetry)⁽²⁾와 같은 여러가지 방법들이 있다.

본 연구에서는 PIV 방식보다 시스템 하드웨어의 가격이 저렴하고 유동입자의 정확한 속도추출이 가능하며, 2장의 입력영상만으로써 입자추적을 효율적으로 행할 수 있는 2-프레임 PTV를 이용하였다. 속도추적 알고리즘에서의 입자경로 (particle path) 결정과정은 2장의 연속 디지털 화상에 있는 입자의 가능한 변위벡터들을 모두 고려한 후, 각 변위벡터들에 대한 일치확률 (match probability)을 정의하고 이를 반복계산하여 일치확률밀도가 가장 높은 것을 속도벡터로 구하는 확률론적인 입자추적방법으로서, 기존의 4-프레임 PTV에 비해 측정정확도가 높으며 측정가능한 속도범위가 넓다.^(3,4)

또한 개발된 2-프레임 PTV 알고리즘을 실제 유동에 적용할 때 유동자체의 3차원성 및 입자화상의 노이즈 등과 같은 여러 요인때문에 발생하는 에러벡터를 처리하기 위한 에러벡터 처리부분을 개발하고, 순간 속도장으로부터 여러가지 난류통계치 분포를 구하기 위한 후처리(post-processing) 프로그램을 보완하였다. 이렇게 개발된 2-프레임 PTV 시스템을 유동구조가 복잡한 수직벽 후류 (vertical fence wake) 유동장에 적용시켜 순간 유동장을 구하고 이로부터 평균속도장, 변동속도장, 난류강도분포, 와도분포등의 난류통계치를 계산하고 해석하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

화상처리시스템은 크게 4W Ar-ion 레이저, 레이저 시트, CCD 카메라, 영상처리장치, 제어 및 계산용 컴퓨터등으로 이루어지며, 2-프레임 PTV 시스템의 개략도를 Fig.1에 나타내었다.

먼저 관심있는 유동을 레이저 시트로 조명하여 원하는 유동단면을 조명하게 되며, 조명된 유동단면내에 들어있는 입자들에 의해 산란된 빛이 CCD 카메라에 의해 획득된다. 레이저 시트 생성장치(LVS-170)는 유지보수 및 이동이 용이한 광케이블과 원주형 렌즈 헤드로 이루어져 있다. 개발

된 2-프레임 PTV 속도계는 임의의 순간에 획득된 영상을 짝수 영상과 홀수 영상으로 분할한 후, 각 필드영상을 보간하여 각각의 완전한 프레임 영상으로 만들어 2-프레임 입자추적을 행하였다. 사용된 CCD 카메라(Panasonic WV-BL600)는 682×492 화소를 갖는 인터라인 트랜스퍼형 CCD이며 1초에 30 프레임(even field와 odd field로 구성)을 RS-170 흑백 신호방식으로 전송한다. 영상분할(image splitting)을 사용한 이유는 시간간격 ΔT 를 1/60sec로 하여 시간분해능(temporal resolution)을 증가시킬 수 있기 때문이다. CCD 카메라로부터의 입자영상을 디지털화상으로 변환하는 프레임 그래버(DT2862)는 실시간(1/30sec)으로 512×512×8bit 화소의 유동화상을 저장할 수 있는 프레임 버퍼를 4개 가지고 있다. 따라서 한번에 연속적으로 획득할 수 있는 프레임 영상은 모두 4장이며, 이들을 영상분할을 하게 되면 이산 시간간격 $\Delta T=1/60sec$ 를 갖는 8장의 연속된 유동화상을 얻을 수 있다. 차후에 이 화상정보는 공학계산용 워크스테이션(DEC AlphaStation 4/233)을 이용하여 각 입자화상을 노이즈 제거, 영상 개선, 입자중심(centroid) 추출, 입자레이블링(labeling) 등의 전처리 과정과 개발된 2-프레임 입자추적 알고리즘을 통한 입자 경로 결정과정 및 AGW(adaptive Gaussian window), 다중 이차보간법을 이용한 속도보간 등의 후처리 과정을 거치게 된다.

알고리즘의 근간은 분할된 2장의 연속된 디지털 유동화상내에 있는 입자들의 가능한 모든 변위벡터를 고려한 후, 각 변위들에 대한 일치확률 (match probability P_{ij})을 정의하고, 불일치확률(no-

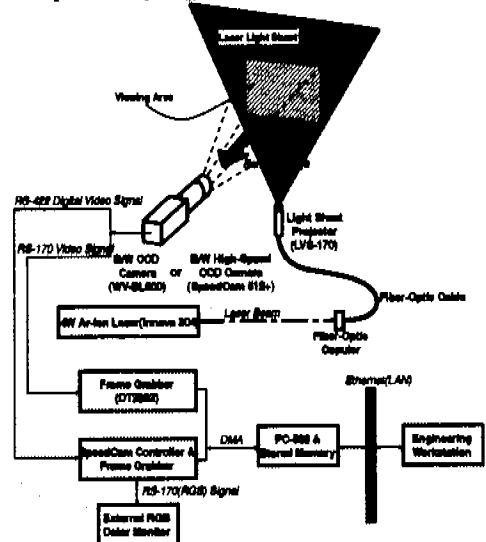


Fig. 1 Schematic diagram of the two-frame PTV system.

ch probability P_{ij})을 정의하고, 불일치확률(no-match probability P_i)과 함께 반복 계산함으로써 일치확률밀도가 가장 높은 것을 변위벡터로 채택하는 방식이다. 여기서 i 는 첫번째 화상의 입자중심의 번호를 나타내고 j 는 두번째 화상의 매칭(matching) 가능한 입자중심들의 번호를 의미한다. 본 연구에서는 영상분할된 2장의 유동화상(F^1 과 F^2)에 대해 기존의 추적알고리즘을 적용하여 첫번째 유동화상 F^1 에서 두번째 유동화상 F^2 로의 입자추적을 행한 후(forward tracking), 다시 F^2 에서 F^1 으로의 입자추적을 행하여(backward tracking) 공통된 속도벡터만을 유효벡터로 간주하였다.

수직벽 후류 속도장 측정에 사용된 회류수조는 시험부가 길이 1400mm, 너비 300mm, 깊이 200mm의 사각형태이다. 영상획득에 사용된 산란 입자는 평균직경 $150\mu\text{m}$ 인 폴리스티렌으로 비중은 약 1.02 정도이다. 두께 1mm인 레이저 시트는 광섬유 케이블에 연결된 원통형 렌즈 헤드에 의해 회류수조의 자유표면 위쪽으로부터 조사되며 시험부 전면에서 입자영상을 획득하였다. 너비 300mm, 높이(H) 25mm인 수직벽을 두께 20mm의 아크릴 판에 흡을 파 설치한 후, 이를 회류수조 시험부 바닥에 고정시켜 박리유동장을 생성하였으며 Fig.2에 실험장치의 개략도를 나타내었다. 수직벽의 설치위치는 회류수조 수축부 하류 500mm이며, 좌표축 x 는 유동방향, y 축은 회류수조의 깊이방향, z 축은 너비방향을 나타낸다. 일반적으로 수직벽의 형상비(두께/높이)가 0.33보다 작은 이차원 물체는 벽유동으로 간주되는데, 본 실험에서 사용된 수직벽은 형상비가 0.12, 종횡비(너비/높이)는 12.0이다. 따라서 형상비가 큰 이차원 물리 유동과는 달리 수직벽 선단에서 박리된 전단유동은 수직벽 뒷면에 재부착되지 않는다.

2-프레임 PTV 시스템을 이용한 속도장 측정은 수직벽 후류의 중앙단면($z/H=0$)에서 수행하였다. 난류구조의 성장, 변화 및 발달과정을 관찰하기 위하여 수직벽 전단의 자유흐름 영역, 수직벽 주위의 재순환 영역, 난류경계층 발달 영역을 포함하는 전영역($-6.2 \leq x/H \leq 19.8, 0 \leq y/H \leq 3.9$)에 걸쳐 속도장을 측정하였다. 이것은 관찰영역이 $5.0H \times 3.9H$ 인 측정단면 6개를 접친 것에 해당한다. 각각의 측정단면에서 400장의 유동영상을 획득하였으며, 난류통계치 계산시 좌우영역에서의 정확도 향상을 위하여 이웃하는 측정단면과 좌우 10mm의 영역이 서로 겹치도록 하였다. 임의의 입자위치에서 구한 라그랑지안(lagrangian) 순간속도벡터들은 AGW(adaptive Gaussian window) 보간법을 이용하여 일정 간격의 균일 사각격자(60×50)상에 보간된다.

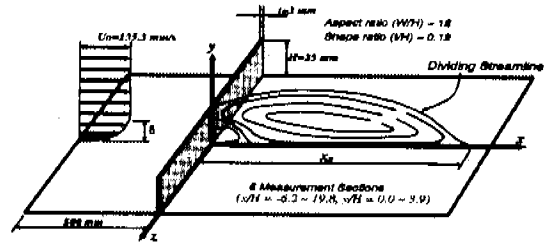


Fig. 2 A vertical fence model and coordinate system.

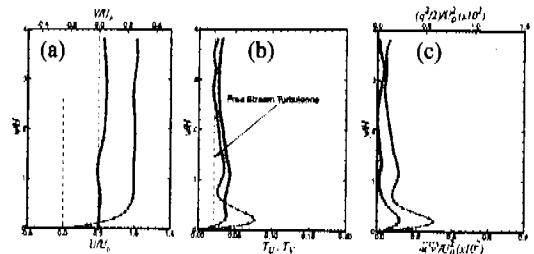


Fig. 3 Upstream flow conditions at $x/H=-5$; (a) Mean velocity; $\bullet, U/U_0$; $\circ, V/U_0$; (b) Turbulence intensity; \bullet, Tu ; \circ, Tv ; (c) Turbulence kinetic energy (\bullet) and Reynolds shear stress(\circ).

각 단면으로부터 동일유동조건에서 획득된 400장의 유동영상으로부터 700장의 속도장을 추출하였으며 이들 700장의 보간속도장을 앙상블평균하여 평균속도장, 난류강도 및 레이놀즈 전단응력 분포동을 계산하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

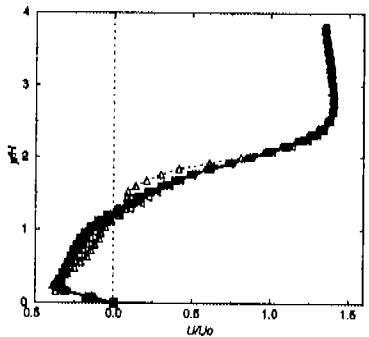
수직벽 상류의 자유흐름 영역인 $x/H=-5$ 에서의 평균속도, 난류강도 및 레이놀즈 전단응력 분포를 Fig.3에 나타내었다.

모든 난류통계치들은 자유흐름속도 $U_0=135.3 \text{ mm/s}$ 및 수직벽 높이 H 를 이용하여 정규화하였으며 수직벽 높이에 기준한 레이놀즈수는 약 2950이다. Fig.3(a)에서 보는바와 같이 수직벽 후류유동은 경계층 두께가 $0.5H$ 이므로 Bradshaw & Wong⁽⁵⁾의 난류박리 전단유동의 분류에 따라 강섭동 유동(strongly perturbed flow: $H/\delta = O(1)$)에 해당되며, 자유흐름 난류강도가 2%이므로 난류에 의한 유체 유입 및 혼합이 활발하리라 사료된다. 또한 경계층 바깥의 수직방향 속도성분 V/U_0 분포(Fig.3(a))로부터 수직벽에 의한 역압력구배가 경계층에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 다룬 수직벽유동은 압력구배가 없는 평면경계층의 경우와 약간의 차이를 보여주고 있다.

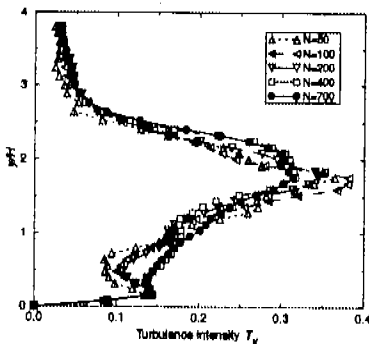
Fig. 4는 재순환 유동이 존재하는 $x/H = 4$ 인 위치단면에서 측정된 순간속도장 개수(N)에 따른 앙

상불 평균된 난류봉계치의 변화양상을 보여주고 있다. Fig. 4(a)에서 알 수 있듯이 양상불 평균에 사용된 순간속도장 갯수 N 에 따른 평균속도(U/U_0) 분포의 변화는 $N > 100$ 이상에서 하나의 속도분포 곡선으로 수렴하고 있다. 그러나, 유동방향 난류강도($\sqrt{u'}/u_0$) 분포의 경우에는 $N > 400$ 이상에서 수렴함을 알 수 있다. 난류상관함률이 고차(higher order)로 증가할수록 N 에 따른 통계치 변화는 증가하며, 펜스유동과 같이 복잡한 난류유동의 경우, 정확한 난류통계치를 구하기 위해선 보다 많은 유동화상이 필요함을 알 수 있다. 그러나 N 이 증가할수록 처리해야 할 영상수가 증가하므로, 난류통계치들을 얻는데 걸리는 전체 계산시간이 급격히 늘어나게 된다.

Fig. 5는 수직벽 주위의 여러 하류위치(x/H)에서 추출한 평균속도 U/U_0 , V/U_0 의 분포를 나타낸 것이다. 수직벽으로부터 박리된 전단층의 두께는 매우 얇으며 y 축상의 속도구배가 매우 크지만, 재부착지점의 하류로 진행됨에 따라 전단층은 확장되며 속도구배가 점차 감소함을 알 수 있다. 수직벽 뒤에는 시계방향으로 회전하는 재순환 유동이 존재하며, 재순환 영역에서의 주유동 속도는 바닥면



(a) Mean velocity



(b) Turbulence intensity

Fig.4 Effect of the number N of instantaneous velocity fields on the mean velocity and turbulence intensity distribution at $x/H=4$.

벽 근처에서 최대 $0.36U_0$ 의 역방향 속도성분을 갖는다. 또한 수직벽 직후 영역에서 약한 와도를 갖는 이차 재순환 유동이 반시계방향으로 회전하기 때문에 $x/H = 0.5$ 위치에서 주유동 속도성분 U 는 바닥면 벽 근처에서 양의 값을 갖는다. 수직벽에 의한 역압력 구배 때문에 벽 전면에서 경계층 두께는 매우 두꺼워지며, 후향단 유동에 비해 큰 유선곡률(streamline-curvature)을 나타낸다. 유선곡률이 나 과변형률(extra strain rate)은 전단층내 난류구조에 크게 영향을 주며, 일반적으로 유선곡률의 형태에 따라 난류경계층의 반응이 다르게 나타난다.⁽⁶⁾ 볼록한(convex) 유선곡률은 난류레벨을 감소시키는 작용을 하는 반면, 오목한(concave) 유선곡률은 Taylor-Görtler 와를 생성시켜 난류구조의 급격한 변화를 야기한다. 수직벽은 앞쪽에서 오목한 유선곡률을 크게함으로써 후향단 유동에 비해 수직벽 후류에서 난류 생성등이 더욱 활발하게 진행되며, 수직벽뒤에서는 재부착하는 전단층의 영향으로 볼록한 유선곡률이 커지므로 반대 효과가 나타난다. 재부착 지점을 지난 뒤 주유동방향 속도 분포는 평판 경계층으로 재발달하게 되지만, 이러한 재발달 과정(relaxation process)은 느리게 진행되기 때문에 $x/H=18$ 에서의 속도분포(Fig.5)는 평판경계층의 경우와 차이가 있다.

펜스 끝부분에서 박리된 유동은 넓은 영역에 걸쳐서 재순환 유동을 형성하며 바닥면에 재부착된 후 난류경계층으로 재발달하게 된다. 박리전단층이 바닥면 벽에 재부착되는 지점은 재순환 영역 내의 대규모 와(large-scale vortices)들의 유출(shedding) 및 대류(convection)에 의해 간헐적으로 전후 방향으로 움직인다. Fig.6은 2-프레임 PTV 시스템을 적용하여 구한 유동함수 $\psi/(U_0H)$ 의 분포를 나타낸 것이다. 각 x 위치에서의 유동함수(stream

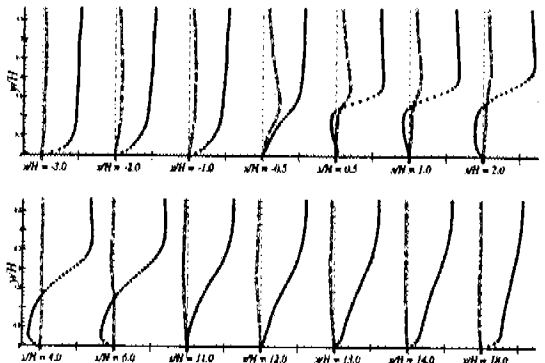


Fig. 5 Mean streamwise and vertical velocity profiles (U/U_0 , V/U_0).

function) ψ 는 다음의 식으로부터 구하였다.

$$\psi(y) = \psi(0) + \int_0^y V(y) dy$$

여기서 $y=0$ 은 벽이므로 $\psi(0)=0$ 으로 간주하여 각 x 위치에서 y 방향으로 적분하여 유선분포를 구한다. 시간평균된 재부착 지점은 유선함수 $\psi(y) = 0$ 가 바닥면에 닿는 점으로 정의할 수 있으며, 유선분포로부터 구한 재부착 지점 x_R 은 $11.2H$ 이었다. 유선함수는 $x/H=5.6, y/H=1.2$ 근처에서 -0.3 의 최소값을 가짐으로써 재순환 영역내부로 상당한 유체의 유입이 일어남을 알 수 있다. 또한 Fig.5의 평균속도분포에서 언급하였듯이, 수직벽 바로 뒷부분인 $x/H = 1$ 에서 박리가 발생하며 $x/H < 1$ 에서 큰 규모의 재순환 유동과는 반대방향으로 회전하는 작은 박리 기포(separation bubble)를 바닥면 가까이에서 볼 수 있다.

Fig.7은 임의의 순간에서의 순간 속도장을 나타낸 것인데, 전단층내부 와의 거동을 볼 수 있다. 유동박리가 일어난 뒤 전단층내에서는 Kelvin-Helmholtz 불안정성에 의한 준주기적(quasi-periodic) 와열(vortex train)들이 형성되어 와가 서로 쌍을 이루거나(vortex pairing)이나 결합(merging) 과정을 통해 점차 발달하게 되는데, 이러한 대규모 와들은 박리전단층내에서 유체의 유입 및 혼합에 많은 영향을 준다.

재부착지점을 포함하는 하나의 측정단면내 700장의 순간 속도장을 관찰한 결과, 재부착 지점은 $x/H=11.2$ 를 중심으로 앞뒤로 매우 불규칙하게 움직이며, 그 결과 박리기포의 크기 또한 변하게 된다. 즉, 대규모 와에 연계되어 전단층은 긴 시간척도와 저주파수의 비정상적(unsteady) 상하이동을 하기 때문에 박리거품의 수축과 팽창을 야기시킨다.

이러한 전체 박리 전단층의 비정상적 상하이동을 플레핑(flapping)현상이라 하며,^(7,8) Fig.8에 플레핑현상과 관련된 순간속도장, 와도장을 나타내었다.

플레핑현상은 전단층의 전체적인 상하이동 및 대규모 와들의 결합 및 팽창과 관련이 있으며, 재순환 영역의 급격한 축소를 야기시킴으로써 유동구조에 영향을 준다. 플레핑현상이 발생하기 전의

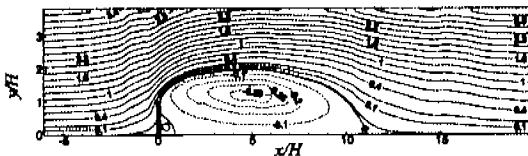


Fig. 6 Variation of normalized stream function ψ .

박리거품의 크기는 재부착 지점 근처에서 상류로 되돌아 들어오는 재순환 유동의 유입에 의해 점차 증가하지만, 박리거품이 형태를 유지하지 못할 때 대규모 와들로 이루어진 매우 큰 와구조에 의해 플레핑현상이 발생하는 것으로 사료된다.

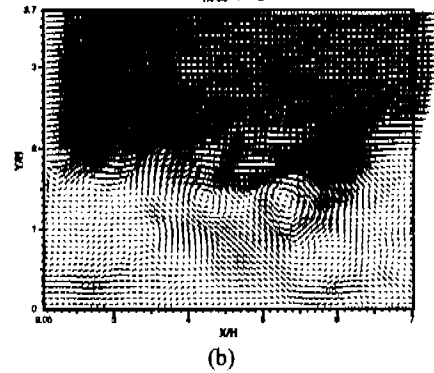
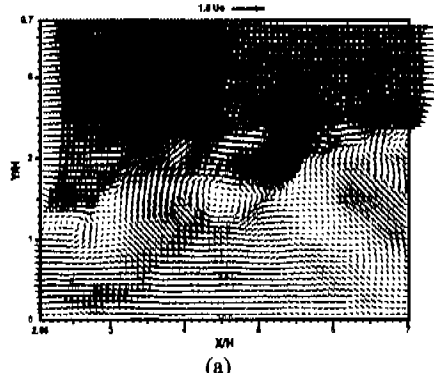
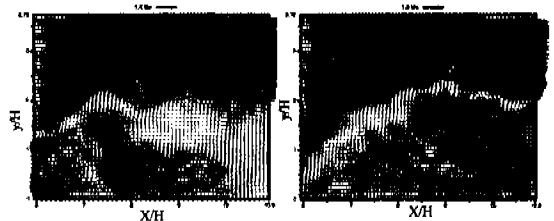
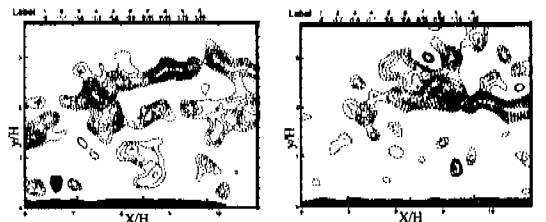


Fig. 7 Instantaneous velocity vector fields at random instants.



(a) Instantaneous velocity vector field



(b) Instantaneous vorticity

Fig. 8 Instantaneous flow fields showing the flapping phenomena.

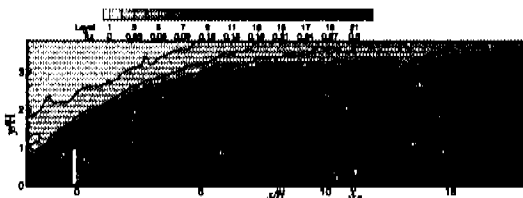
Fig. 9는 주유동방향과 수직방향 속도성분의 난류강도 $\sqrt{u'^2}/U_0, \sqrt{v'^2}/U_0$ 의 등고선도를 나타낸 것이다. 주유동방향 속도성분의 난류강도는 수직벽 전방에서 옅은 유선곡률의 영향으로 극부최대값을 가진다. 수직벽 끝단에서의 박리되어진 경계층유동이 박리전단층의 초기 발달과정에 영향을 미치게 되어, 전반적으로 후향단(backward-facing step)유동과는 다른 분포를 보여주고 있다. 수직방향 속도성분의 난류강도 $\sqrt{v'^2}/U_0$ 가 $\sqrt{u'^2}/U_0$ 에 비해 작은 값을 가지나, 전체적인 분포형태는 유사하다. 두가지 경우 모두 재부착점보다 상류인 $x/H=8.3, y/H=1.7$ 위치에서 최대난류강도값을 갖는다. 재부착점 부근에서 수직방향 난류강도 $\sqrt{v'^2}/U_0$ 분포는 극부정점을 가지나 $\sqrt{u'^2}/U_0$ 의 경우는 그렇지 못하다. 이것은 아마도 재부착점 부근에서 전단층이 플라잉현상에 기인하여 상하운동을 하기때문으로 생각되어 진다. Fig.10 과 11은 수직벽 주위 유동의 난류운동에너지($q^2/2U_0^2$)와 레이놀즈 전단응력($-\overline{u'v'}/U_0^2$)의 분포를 보여준다. 두 경우 모두 평균 재부착 지점의 앞부분인 $x/H=8.3$ 부근에서 최대값을 보이며, 재부착 지점 하류에서 점차 감소하게 되는데, 이는 후향단유동과 같은 기존의 박리전단층 연구에서도 확인된 바 있다. 이러한 현상의 구체적인 원인은 아직 알려지지 않았지만, 본 연구에서 얻어진 평균 재부착 지점 근처의 순간 유동장을 관찰한 결과, 박리유동의 재부착 현상과 깊은 관련이 있음을 알 수 있었다. 즉, 재순환 영역내에서 질량유동(mass flux)이 일정할 경우 박리기포의 크기는 일정하게 유지되지만, 매우 낮은 주파수로 발생하는 플라잉현상에 의해 박리전단층이 아래로 향하게

되며 전단층에 내재된 와류동이 함께 벽면쪽으로 이동한다. 그러나 플라잉현상이 발생하기 이전에 형성된 재부착지점을 중심으로 상류로 향하는 질량유동과 앞서 말한 와류동이 재부착 지점 부근에서 만나 정체유동(stagnation flow)형태를 띄게 된다. 따라서 수직벽을 향하는 와류동의 일부는 바닥면과 만나게 되어 순간 재부착지점을 형성하며 와류동의 나머지와 기존의 재순환 유동의 일부가 위로 치솟는 큰 와류동을 발생시킨다. 이렇게 발생한 강한 와류동은 시간평균화된 재부착지점의 상류에서 발생하며 그 부근에서 난류강도, 난류에너지와 레이놀즈전단응력을 크게 증가시킴을 유추할 수 있다.

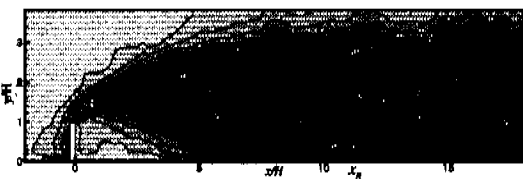
난류 운동에너지 분포와 비교하여 레이놀즈 전단응력 $-\overline{u'v'}/U_0^2$ 는 전단층의 중심속을 따라 빠르게 증가하며, 최대값에 이르기 전에 벽쪽으로 치우쳐 분포함을 알 수 있다. 또한 박리전단층의 초기영역에서 작지만 전단응력 $-\overline{u'v'}/U_0^2$ 가 음의 값을 가지는데, 이는 수직벽 끝단에서의 불룩한 유선곡률에 기인한 것으로 사료된다. 이러한 음의 $-\overline{u'v'}/U_0^2$ 는 20% 다공도를 갖는 다공성 수직벽후류⁽⁹⁾와 평판 박리 경계층 유동연구⁽¹⁰⁾에서도 관찰되었다.

4. 결론

2-프레임 PTV 시스템을 이차원 수직벽 주위 유동장에 적용하여 평균속도장, 난류운동에너지, 레이놀즈 응력들을 구하였다. 양상불 평균에 사용된 순간속도장의 수에 따른 난류통계치들의 변화를 조사한 결과, 안정적인 난류통계값을 얻기 위해서



(a) Streamwise turbulent intensity



(b) Vertical turbulent intensity

Fig. 9 Contour plot of turbulent intensities. $\sqrt{u'^2}/U_0, \sqrt{v'^2}/U_0$

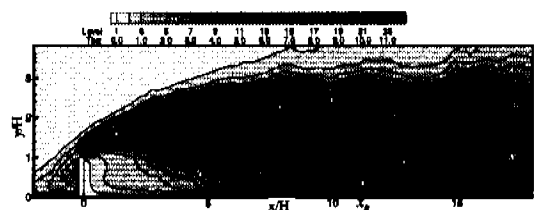


Fig. 10 Turbulence kinetic energy distribution. ($q^2/2U_0^2$)

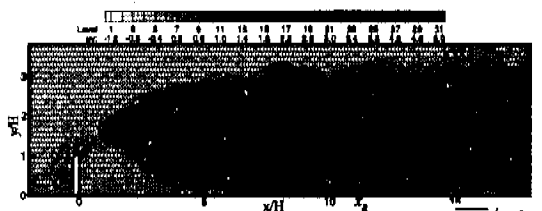


Fig. 11 Reynolds shear stress distribution. $-\overline{u'v'}/U_0^2$

는 본 실험조건에 한하여 최소한 400 장이상의 순간속도장을 필요로 하며 평균속도분포의 경우는 100 장의 순간속도장으로도 충분한 수렴성을 얻을 수 있었다. 수직벽 후류는 박리후 비정상적인(unsteady) 재순환영역의 형성, 약 $x=11.2H$ 위치에서의 전단층의 재부착, 난류경계층으로의 재발달과정을 보여주었다. 음의 값을 갖는 레이놀즈 응력이 수직벽 끝단주위에서 관찰되었다. 이는 박리초기영역에서 존재하는 큰 유선곡률(streamline-curvature)의 영향으로 생각되어진다.

수직벽 직전의 오목한(concave) 유선곡률과 수직벽후방의 볼록한(convex) 유선곡률의 영향은 수직벽 주위에서 가장 크게 나타나고 하류로 나아감에 따라 전단층 주위 유체의 유입등으로 그 영향이 감소한다. 순간속도장의 측정 결과를 관찰한 결과, 박리 전단층내에는 커다란 와구조가 연속적으로 발생하는데 이런 와구조는 재순환영역, 재부착 과정 및 난류경계층으로의 재발달과정 등에 직접적인 영향을 미치며, 전단층이 간헐적으로 상하운동을 하는 플래핑현상이 관찰되었다.

후 기

본 연구는 포항공대 첨단유체공학 연구센터(AFERC)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 논문 작성과정을 도와준 김 형범씨에게 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Willert, C. E. and Gharib, M., 1991, "Digital Particle Image Velocimetry," *Exp. in Fluids.*, Vol. 10, pp. 181~193
- (2) Kasagi, N. and Matsunaga, A., 1995, "Three-Dimensional Particle-Tracking Velocimetry Measurement of Turbulence Statistics and Energy Budget in a Backward-Facing Step Flow," *Int. J. Heat and Fluid Flows*, Vol. 16, pp. 477~485.
- (3) Back, S.J. and Lee, S. J., 1996, "A New Two-Frame Particle Tracking Algorithm Using Match Probability," *Exp. in Fluids.*, Vol. 22, pp. 23~32
- (4) Baek, S. J. 1997, "development of Two-Frame Particle Tracking Velocimetry System and Its Application to Turbulent Separated Flows," Ph.D Thesis, POSTECH, Korea
- (5) Bradshaw, P. and Wong, F. Y. F., 1972, "The Reattachment and Relaxation of a Turbulent Shear Layer," *J. Fluid Mech.*, Vol. 52, pp. 113~135
- (6) Basaran, V., Smits, A. J. and Joubert, P. N., 1991, "A Turbulent Flow over a Curved Hill. Part 2. Effects of Streamline Curvature and Streamwise Pressure Gradient," *J. Fluid Mech.*, Vol. 232, pp. 377~402
- (7) Kiya, M. and Sasaki, K., 1983, "Structure of a Turbulent Separation Bubble," *J. Fluid Mech.*, Vol. 137, pp. 83~113
- (8) Kiya, M., and Sasaki, K., 1985, "Structure of Large-Scale Vortices and Unsteady Reverse Flow in the Reattaching Zone of a Turbulent Separation Bubble," *J. Fluid Mech.*, Vol. 154, pp. 463~491
- (9) Lee, S. J., and Kim, H. B., 1998, "Velocity Field Measurements of Turbulent Wake behind Porous Wind Fence," *J. Wind Eng. & Ind. Aero.*, 80, No.3, pp. 1~16.
- (10) Dianat, M. and Castro, I. P., 1991, "Turbulence in a Separated Boundary Layers," *J. Fluid Mech.*, Vol. 226, pp. 91~123