

論 文

수직벽 하부에 있는 틈새 후방의 유동특성에 관한 실험적 연구

조대환* · 이경우** · 오경근***

*목포해양대학교 기관시스템공학부, **목포해양대학교 해양시스템공학부, ***목포해양대학교 대학원

An Experimental Study of Flow Characteristics Past vertical wall with Bottom Gap

Dae-Hwan Cho* · Gyoung-Woo Lee** · Kyoung-gun Oh***

* Division of Marine System Engineering, MMU, Mokpo, 530-729, Korea

** Division of Ocean System Engineering, MMU, Mokpo, 530-729, Korea

*** Graduate School of Mokpo Maritime Uni., MMU Mokpo, 530-729, Korea

요 약 : 표면에 부착된 수직벽 후방의 난류전단흐름을 입자영상유속계를 이용하여 조사하였다. 하부 틈새를 갖는 수직벽 후류영역에서는 박리 후 비정상적인(unsteady) 재순환 영역이 형성되었으며, 약 $x=3H$ 위치에서 전단층의 재부착 및 난류경계층으로의 재발달 과정이 나타났다. 수직벽 직전의 오목한(concave) 유선곡률과 수직벽 후방의 볼록한(convex)유선곡률의 영향은 수직벽 주위에서 가장 크게 나타나고, 하류로 나아감에 따라 전단층 주위 유체의 유입 등으로 그 영향이 박리 전단층 내에서 커다란 와구조가 연속적으로 발생하였다.

핵심용어 : 수직벽, 입자영상유속계, 비정상흐름, 재순환영역

ABSTRACT : *The turbulent shear flow around a surface-mounted vertical wall was investigated using the two-frame PIV(CACTUS 3.1) system. From this study, it is revealed that at least 500 instantaneous velocity field data are required for ensemble average to get reliable turbulence statistics, but only 200 field data are sufficient for the time-averaged mean velocity information. The flow has an unsteady recirculation region past vertical wall with bottom gap, followed by a slow relaxation to the flat-plate boundary layer flow. The time-averaged reattachment length estimated from the streamline distribution is about $x/H=3H$. The large eddy structure in the separated shear layer seems to have signification influence on the development of the separated shear layer and the reattachment process.*

KEY WORDS : Vertical Wall, Particle Image Velocimetry, Unsteady Flow, Recirculation Region

1. 서 론

수직벽 유동은 기하학적으로 모양이 간단하고, 박리점이 모서리에 고정되어 있으며, 박리선이 거의 직선이지만 유동형태는 대단히 복잡하다. 특히 재부착 영역 및 재발달 경계층 유동에 관해서는 물리적인 완벽한 이해가 이루어지지 않고 있다. 이와 같은 특성과 높은 레이놀즈수에서의 수치해석의 결과는 실험값과 상당한 차이를 보이기 때문에 실험적 연구는 매우 중요하다.

Lee등은 본 연구에서는 대기경계층 내에 놓여진 2차원 삼각프리즘 야적모형 앞에 다공성 방풍펜스를 설치하고, 이 방풍펜스의 다공도, 높이가 프리즘의 표면 압력과 주위 유동특성에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였다. 그 결과 다공도 $\varepsilon=40\%$ 의 방풍펜스가 요면압력 감소에 효과적이며 이보다 다공도가

작을 경우 펜스를 통과하는 유량이 감소하고 차폐효과가 증대되어 펜스와 삼각프리즘 사이에 큰 재순환영역이 형성되어 표면 압력의 실효값(rms)이 증대함을 보였다. 그리고 다공도 $\varepsilon=40\%$ 의 방풍펜스를 프리즘 전방에 설치한 경우 야적모형 주위 유동의 평균 속도를 현저하게 감소시킬 수 있으며, 입자비산 방지에 효과적임을 나타내었다.

Bang등은 다단 플래시 증발장치 내부의 형태와 유사한 기하학적 경계조건을 가진 개수로 유동에 관해서 여러 유동 조건에 따른 속도 분포를 실험적인 측면에서 정성적으로 연구하였다. 그 결과 배플이 존재하지 않는 개수로 유동은 비교적 단순한 잠수벽면제트(submerged plane wall jet)의 형태로서 입구 게이트 가까운 부분은 평면벽면 분류의 형태를 갖는 반면에 하류 부분은 수면의 영향을 받아서 분류 영역의 경계가 급격히 수면 쪽으로 휘어지는 결과를 얻었다. 그리고 이러한 현상을 수면의 존재가 분류로의 주위 유체 유입을 방해하는 역할을 하여 코안다 현상과 유사한 효과가 나타나기 때문으로 설명하였다. 그러나 배플 유동의 경우에는 입구 유속, 수위, 배플의 위치 및

*대표저자 : 정희원, kwlee@mmu.ac.kr, 011)9339-3589

**정희원, pivmp@mmu.ac.kr, 061)240-7104

**정희원, 984117@mmu.ac.kr, 016)871-2178

높이 그리고 입구 게이트의 높이 등 여러 변수들이 모두 속도 분포(유동형태)에 영향을 미치므로 이들 변수 간에 정량적인 관계식을 얻기 위한 실험이 추가로 진행되어야 한다.

Yoon 등은 복잡한 난류유동의 한 범주에 속하는 단이 진 2차원 벽면제트 유동의 예측을 위한 수치해석을 위해, 표준 $k-\epsilon$ 모델과 2가지의 유선곡률 수정모델을 적용하고 실험결과와 비교하였다. 그 결과 재부착 길이에 대한 예측결과도 모델의 개선보다 수치해석에 의한 개선효과가 뚜렷하나, 포텐셜 코어 길이의 경우에는 유선곡률 효과에 대한 물리적 의미가 가미된 수정 모델(박상우 모델)에서 실험과 약 8% 오차의 좋은 결과를 보였다.

Kim 등은 다공도가 서로 다른 4가지 ($\epsilon=0, 20, 40, 65\%$) 방풍벽을 사용하여 다공도변화가 펜스후류의 유동특성에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다. 펜스후류의 속도장은 2-프레임 PTV(Particle Tracking Velocimetry) 시스템을 사용하여 측정하였으며, 펜스높이(H)와 자유흐름속도에 기초한 레이놀즈수(Reynolds Number)는 약 8.4×10^3 이다. 연구결과, 다공벽에 의한 속도 감소효과는 다공도가 $\epsilon=20\%$ 인 수직벽에서 가장 크게 나타난 결과를 보였다. 이는 이상준의 결과와는 다른 결과이다.

Kim 등은 수직벽 흐름의 난류구조에 대한 실험적 연구를 통하여 유선의 곡률 효과가 중 변형률과 더불어 압력 변형률 영향을 미치고 또한 곡률로 인한 난류 생성항이 재부착과 더불어 레이놀즈 전단 응력 및 난류 강도를 감소시키는 결과를 얻었다. 또한 적분 길이 척도는 박리 전단층이 자유 전단층과는 흐름의 수직방향 분포 형상이 전혀 다른 점과 재부착 이후에서는 유동 방향의 변화율보다 수직 방향의 변화율이 더 신속히 발생함을 보고하였다.

Park 등은 도시외곽 지형에 해당하는 대기경계층 내에 놓여진 2차원 원로아적모형 전방에 조합된 다공도를 가진 방풍펜스를 설치한 후, 펜스의 다공도 및 하부틈새를 변화시켜 가면서 아적모형의 표면압력 변화를 측정하였다. 그 결과 다공성 방풍펜스와 지면사이의 하부틈새가 증가함에 따라 유입유동이 증가하여 펜스의 차폐효과가 점차 감소하게 되어 프리즘 전후면에서의 표면압력변동성분은 하부틈새가 $G/H=0.125$ 인 경우가 하부틈새가 없는 경우에 비해 최소값이 낮음을 보였다. 그리고 $G/H=0.125$ 정도의 하부틈새는 다공성 펜스의 방풍효과에 영향이 크지 않음을 설명하였다.

Lim 등은 대기경계층 내에 설치된 다공성 방풍펜스의 후류 유동 및 펜스 후방에 놓인 2차원 삼각프리즘 표면압력 및 주위 유동을 수치해석 적으로 연구하였으며, 실험결과와 비교함으로써 수치모델을 검증하고 수치해석으로 구한 평균속도와 표면압력분포는 실험결과와 잘 일치함을 보였다.

이 연구에서는 하부틈새를 갖는 수직벽은 개도율에 따라 네 가지의 경우에 대하여 실험하였다. 수직벽 후류는 박리후 비정상적인(unsteady) 재순환 영역의 형성, 약 $x/H=3$ 위치에서의 전단층의 재부착, 난류경계층으로의 재발달과정이 나타났다. 수직벽 직전의 오목한(concave) 유선곡률과 수직벽 후방의 볼

록한(convex)유선곡률의 영향은 수직벽 주위에서 가장 크게 나타나고, 하류로 나아감에 따라 전단층 주위 유체의 유입 등으로 그 영향이 박리 전단층내에서 커다란 와구조가 연속적으로 발생하였다.

2. 실험

Fig. 1은 PIV 시스템의 개략도이다. 영상처리시스템은 크게 아르곤-이온 레이저(Argon-ion laser, 5W), 레이저 시트, 고속 카메라(Fast Cam), 영상처리장치(CACTUS 3.1), 제어 및 계산용 컴퓨터 등으로 구성되며, 2-프레임 수직벽 후류 속도장 측정에 사용된 회류수조의 시험 부는 길이 $l=37.14H$, 너비 $b=8.57H$ 깊이 $d=8.57H$ ($H=35\text{mm}$)의 사각형 형태이다. 수조 안에 수직벽을 설치하고 수면파에 의한 빛의 굴절현상을 없애기 위하여 상부를 얇은 유리를 설치하여 채널형 유로를 만들었다. 수직벽은 $0.014H \times 28.57H \times 8.28H$ 의 강판 중앙에 수직벽을 고정할 수 있는 부분을 만들고 다양한 형태의 수직벽을 교환할 수 있도록 하였다. 수직벽의 형태는 크게 4가지 즉, 전체 막힘, 그리고 개도율에 따른 하부 분류로 나뉜다. 상류로 유입되는 유속은 회류수조 하부에 부착된 측류펌프의 회전수를 제어하여 조정하였다.

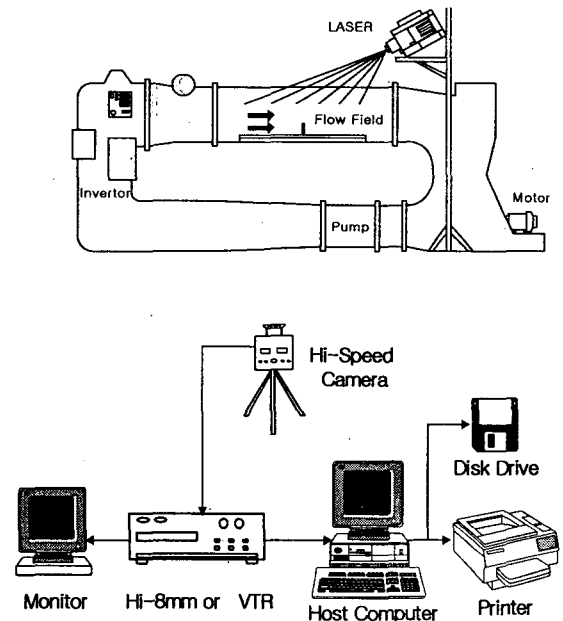


Fig. 1 Arrangement of experiment system

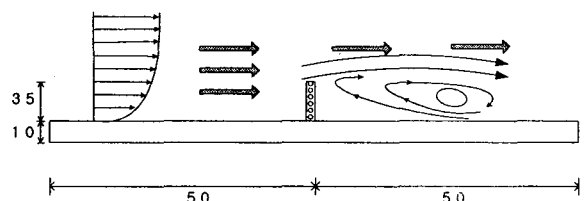


Fig. 2 Schematic diagram of flow field

Table 1 Experiment condition

	Item	Specification
Visualization equipment	Light source	5W Argon-Ion laser
	Sheet light	Cylindrical lens(width : 2mm)
Measuring condition	Working fluid	Water (19.0 °C)
	Particle	PVC(specific gravity : 1.02, diameter : 150 μ m)
	Time resolution	250pps
Image processing	Host computer	Pentium IV PC(CPU speed : 2.00GHz)
	Calculation time	5 sec/frame
	Number of time- mean data	500Frames
	Identification	Two-frame grey-level cross correlation algorithm Calculation Grid : 60 \times 40
	Ratio of error vector(%)	under 1%/frame, average : about 0.5%

회전수는 축류펌프를 구동하는 전력변환 장치인 인버터(YASKAWA사 모델: CIMR -XCAA2094)의 주파수에 따라 결정되고, 실험에서 채택한 주파수는 8Hz와 10Hz의 두 가지이며, 이때 속도는 각각 0.25m/sec와 0.31m/sec이다.

Fig. 2는 대상 유동장의 개략을 보여 주고 있다. 유로 내부 흐름은 좌측에서 우측으로 흐르며 유동장의 폭은 8.28H이다. 수직벽이 소형회류수조내의 수직벽 고정대에 설치되고, 아크릴 평판내 수면깊이는 5.43H, 소형회류수조내의 아크릴평판 입구에서 하류방향으로 14.3H 위치에 너비 8.28H, 높이1H, 두께 0.043H의 수직벽이 있다. 좌표축 x는 유동방향, y축은 회류수조의 깊이방향, z축은 너비방향을 나타낸다. 일반적으로 수직벽의 형상비(Asspect Ratio, 두께/높이)가 0.33보다 작은 이차원 물체는 벽유동으로 간주될 수 있으며, 본 실험에서 사용된 수직벽은 형상비가 0.04, 종횡비(Asspect Ratio, 너비/높이)는 8.3이다.

Table 2 Shape of Vertical wall

구 분	수직벽 형상	개 도 율
Case 1.		0 %
Case 2.		10 %
Case 3.		20 %
Case 4.		30 %

따라서 형상비가 큰 이차원 블록 유동과는 달리 수직벽 선단에서 박리된 전단유동은 수직벽 윗면에 재부착되지 않는다고 간주한다. PIV 시스템을 이용한 속도장 측정은 수직벽 후류의 중앙단면($z/H=0$)에서 수행하였다.

Table 2는 실험에 적용된 수직벽의 형상과 개도율을 표시하고 있다.

3. 결과 및 고찰

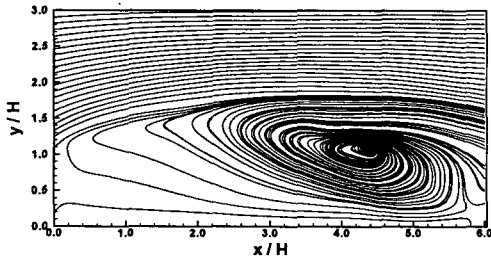
Fig. 3은 PIV 계측으로 얻어진 유선도이며 개도율 $\epsilon=0\%$ 에서 $\epsilon=30\%$ 까지를 나타내고 있다. 유선도는 기록한 영상을 연속적으로 재생하여 샘플링한 500회의 영상에 대해 동일입자 추적을 행하여 얻은 순간 속도 벡터를 산술평균한 평균값을 이용하였다. 계측결과는 평균유입평균유속인 대표속도와 수직벽의 높이를 대표 길이로 하여 무차원화 하였다. $x/H=4.5$ 의 기준 선상에서 $y/H=0$ 에서 $y/H=3.0$ 까지 0.16간격으로 트레이서(Tracer)를 분포하고 그 결과를 도시한 것으로 전체적인 유동특성은 수직벽의 상부영역과 후류영역으로 구분된다.

Fig. 3(a)에서 보면 수직벽의 후방에 대규모의 주와류가 형성되어 있음을 알 수 있다. 와류의 중심위치는 $x/h=4.38$, $y/h=1.5$ 이며, 크기는 수직벽의 약 2배의 규모이다. 그러나 $y/h=1.8$ 이상에서의 흐름은 균일하게 유지되고 있으며 수직벽의 직하부에서는 작은 규모의 와류가 발생되고 있다. 따라서 약 3m정도의 수직벽을 가정한다면 그 영향은 30m이상의 후방까지 미칠 것으로 판단된다. 하부 틈새를 갖는 수직벽 후방의 유동특성은 수직벽의 하부에서 유입되는 흐름의 영향으로 $x/H=2.0 \sim x/H=4.0$ 범위 내에 유체벽이 형성되고 유체벽의 후방하류부분에 주와류, 유체벽의 좌측상부에 2차와류가 생성되어 있는 특징을 보이고 있다. 또한 수직벽과 유체벽의 사이에 형성된 2차와류는 상하로 구분된 2개의 와류가 개도율에 따라 그 크기가 커지고 위치도 하류방향으로 이동하여 있음을 알 수 있다.

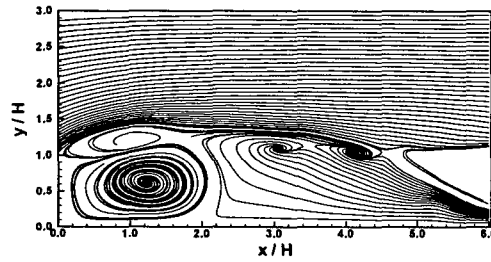
Fig. 3(b)경우는 개도율 10%인 경우이다. 실험에서 수직벽

상부유동은 수직벽 높이를 기준하여 약 8배 이상이며 $y/h=1.5$ 기준으로 상부흐름과 수직벽 후방의 재순환 흐름으로 뚜렷하게 구분되어 나타나 있다. 그리고 수직벽과 후방에 $2H$ 정도의 길이의 2차 와류가 형성되어 있다. 와류의 중심위치는 $x/H=1.2$, $y/H=0.5$ 이며 $x/H=2.2$ 이후로 $y/H=1.2$ 근방에 작은 규모의 와류들이 생성 발달하여 하류로 이동하고 있다.

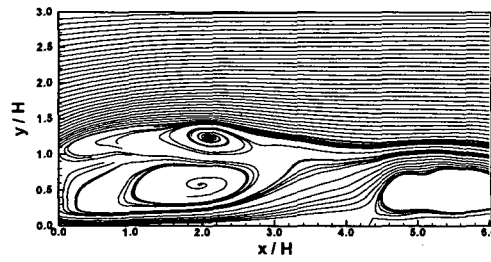
또한 개도율이 20%에서 30%로 커짐에 따라 수직벽 후방에 형성되는 와류의 크기도 약 15%정도 커지고 상부와 하부로 나뉜 2차 와류도 비슷한 규모를 유지하고 있다. 유체벽의 하류에 형성되는 주와류는 개도율 10%에서는 $x/h=5.0$ 이후에서 나타나기 시작하지만 개도율 20%로 증가하여 유체벽이 형성되면서 상류 측으로 이동하고 개도율이 증가함에 따라 규모가 감소하는 경향을 보이고 있다.



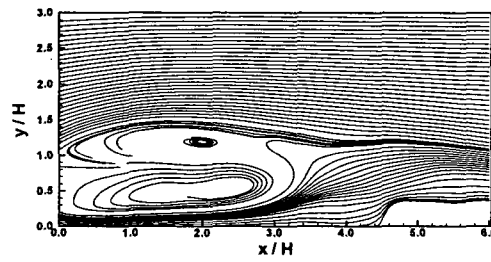
(a) $H_d/H=0.0$



(b) $H_d/H=0.1$

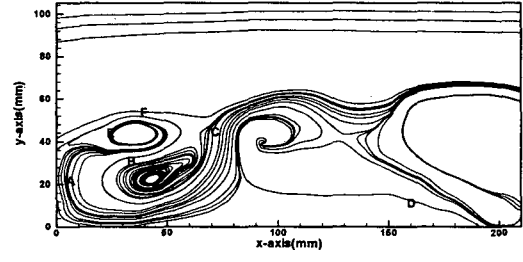


(c) $H_d/H=0.2$

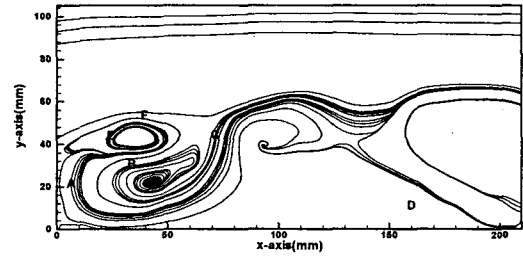


(d) $H_d/H=0.3$

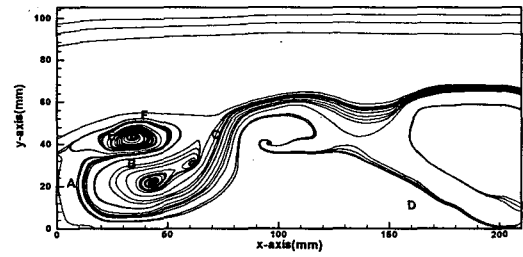
Fig. 3 Stream lines at bottom gab



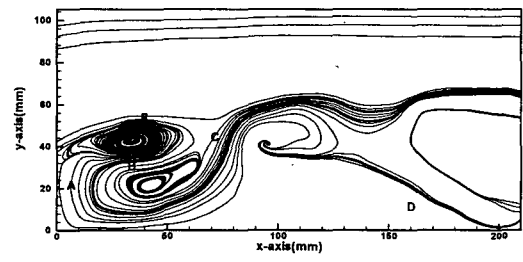
(a) $1/250$ sec



(b) $3/250$ sec



(c) $5/250$ sec



(d) $7/250$ sec

Fig. 4 Instantaneous Stream lines

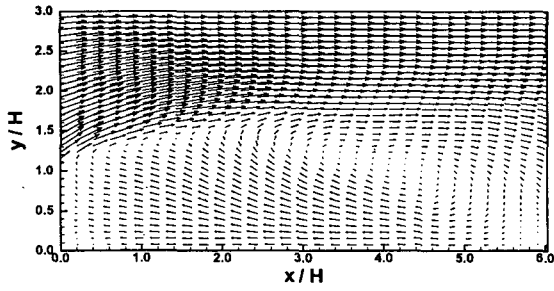
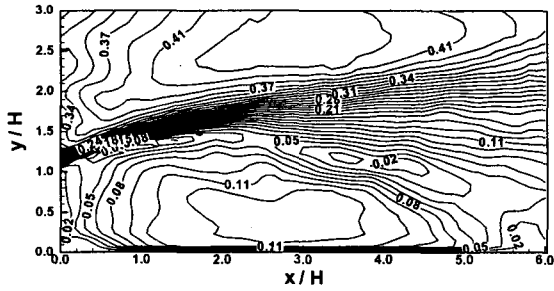
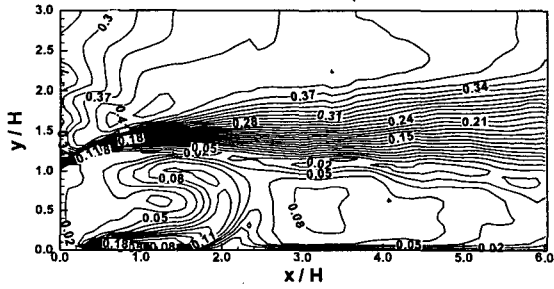


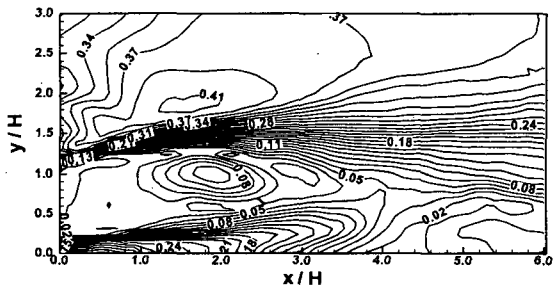
Fig. 5 Time-mean Velocity Distribution



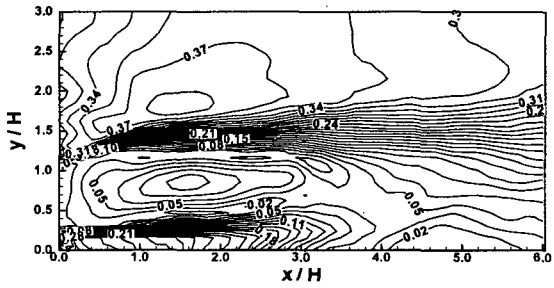
(a) $H_d/H=0.0$



(b) $H_d/H=0.0$



(c) $H_d/H=0.0$



(d) $H_d/H=0.0$

Fig. 6 Time mean Equi-Velocity distribution

따라서 수직벽을 기준으로 2차와류의 영향은 약 $x=3H$ 후방까지 미치고, 그 이후의 영역에서의 속도분포가 유입속도에 비해 80%이상 감소할 것으로 예상된다.

Fig. 4는 임의의 순간에서의 시계열의 순간 속도장을 나타낸 것으로 전단층내부 와류의 거동을 볼 수 있다. 유동박리가 일어난 뒤 전단층 내에서는 Kelvin-Helmholtz 불안정성에 의한 준주기적(quasiperiodic) 와열(vortex train)들이 형성되어 와가 서로 쌍을 이루거나(vortex pairing)나 결합(merging) 과정을 통해 점차 발달하게 되는데, 이러한 대규모 와들은 박리전단층 내에서 유체의 유입 및 혼합에 많은 영향을 보이고 있다.

재부착지점을 포함하는 하나의 측정단면내 500장의 순간 속도장을 관찰한 결과, 재부착 지점은 $x/H=3$ 을 중심으로 앞뒤로 매우 불규칙하게 움직이며, 그 결과 박리거품의 크기 또한 변하게 된다. 즉, 대규모 와에 연계되어 전단층은 긴 시간 척도와 저주파수의 비정상적(unsteady) 상하이동을 하기 때문에 박리거품의 수축과 팽창을 야기시킨다. 이러한 전체 박리 전단층의 비정상적 상하 운동을 플레핑(flapping)현상이라 하며, 플레핑 현상은 전단층의 전체적인 상하이동 및 대규모 와들의 결합 및 팽창과 관련이 있으며, 재순환 영역의 급격한 축소를 야기시킴으로써 유동구조에 영향을 준다. 그리고 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. 5는 시간 평균의 유동 특성을 알아보기 위하여 레이놀즈수 8.7×10^3 에 대해 기록한 영상을 연속적으로 재생하여 샘플링한 500회의 영상에 대해 동일일자 추적을 행하여 얻은 순간 속도 벡터를 산술 평균한 것으로 개도를 0%에 대한 결과이다. 전체적으로 정연한 모습을 보이고 있으며 와류의 중심위치 등이 확연하게 나타나 있다. 계측결과는 대표속도에 의해 무차원화 하여 도시한 결과이며 좌측상부의 대표속도에 대해 내부속도벡터의 크기를 비례적으로 나타내었다. 상부의 전단층혼합영역의 영향으로 수직벽의 후류에서 재순환 흐름이 나타나고 있다. 그리고 수직벽에 근접한 모서리에서 고차와류의 특징이 나타나고 있다.

Fig. 5(a)는 개도를 0%의 등속도분포를 도시한 결과이며, Fig. 5(b)에서 fig. 5(d)는 각각의 개도율은 10%에서 30%이다. 개도를 0%의 경우와 비교하여 보면 재순환영역의 재부착점은 하부유동의 영향으로 크게 감소하고 있으나 하부로 유입되는 유동이 상부로 상승하면서 발생한 전단층에 의한 새로운 재순환흐름이 우측에 생성되고 있음을 알 수 있다. 또한 중앙부분에 틈새가 있는 경우와 비교하여 보면 수직벽의 상부우측의 재순환영역이 하부까지 확대되어 나타나고 있음을 알 수 있다.

전체적으로 재순환흐름의 형태는 타원형의 패턴을 유지하고 있다. 시간평균의 속도분포에서 보면 재부착점은 레이놀즈수의 증가에 따라 수직벽의 횡방향으로 이동하고 수직벽 우측영역의 전체 평균속도는 개도를 0%의 경우가 가장 낮게 나타났다.

5. 결 론

다양한 형태의 수직벽 주위 유동장에 대해 PIV기법을 적용하여 순간속도장, 시간평균속도장, 등속도 분포 등을 구하여 내부 유동특성을 고찰하였다. 하부틈새를 갖는 수직벽은 개도율에 따라 네 가지의 경우에 대하여 실험하였다. 수직벽 후류는 박리후 비정상적인(unsteady) 재순환 영역의 형성, 약 $x/H=3H$ 근방에서의 전단층의 재부착, 난류경계층으로의 재발달과정이 나타났다. 수직벽 직전의 오목한(convex) 유선곡률과 수직벽 후방의 볼록한(convex)유선곡률의 영향은 수직벽 주위에서 가장 크게 나타나고, 하류로 나아감에 따라 전단층 주위 유체의 유입 등으로 그 영향이 박리 전단층내에서 커다란 와구조가 연속적으로 발생하였다. 이러한 와구조는 재순환영역, 재부착 과정 및 난류경계층으로의 재발달 과정 등에 직접적인 영향을 미치는 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

[1] Wilert, C.E. and Gharib, M.(1991) "Digital Particle Image Velocimetry," *Exp. Fluid.* Vol. 10, pp. 181~193.

[2] Kasagi, N. and Matsunga. 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. (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.*, 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), "Turbulent in a Separated Boundary Layers," *J.Field Mech.*, Vol. 226, pp.91~123

[11] 이상준, (1997), "방풍벽을 이용한 야적원료의 비산억제에 관한 풍공학적 연구", 한국풍공학회지, pp.106-115.

[12] 부정숙, 김정천, 박진호, 강찬수, (1985), "2차원 난류 Stepped Wall Jet의 유동특성", 대한기계학회논문집, pp.732-742.

[13] 방병렬, 설광원, 이상용, (1988), "평면벽면분류의 유입 경계조건을 가지는 개수로 유동 및 배플의 영향에 관한 실험적 연구", 대한기계학회논문집, pp.1399-146.

[14] 윤순현, 엄운섭, 정명균, (1988), "단이 진 2차원 벽면 분류에 대한 수치 해석", 대한기계학회논문집, pp.865-875.

[15] 김정천, 정명균, (1987), "2차원 수직벽을 지나는 재부착 박리전단층의 난류 구조에 관한연구(II)", 대한기계학회논문집, pp.681-689.

[16] 김형범, 이상준, (1998), "다공성 방풍벽의 다공도가 펜스후류 속도장에 미치는 영향에 관한 연구", 대한기계학회논문집 B권, pp.915-926.

[17] 박철우, 이상준, (1999), "다공성펜스의 하부틈새와 다공도 조합이 후방에 놓인 야적원료의 표면압력에 미치는 영향에 관한 연구", 한국풍공학회지, pp.70-79.

[18] 임희창, 이상준, (2000), "다공성 방풍펜스의 방풍효과에 관한 수치해석적 연구", 한국풍공학회지, pp.74-81.

[19] 김정천, 정명균, (1985), "2차원 수직벽을 지나는 재부착 박리전단층의 난류 구조에 관한연구(I)", 대한기계학회논문집, pp.403-413.

[20] H.B.Kim, S.J.Lee, (2002), "The Structure of Turbulent Shear Flow Around a Two-Dimensional Porous Fence Having a Bottom Gap", *Journal of Fluids and Structures*, Vol.16 No.3, pp.317-329.

[21] 백승조, 이상준, (1999), "2-프레임 PIV를 이용한 수직벽 주위 유동장 해석", 대한기계학회논문집 B권, pp.1340-1346.

[22] Sang-Joon Lee, Hyong-Bum Kim, (1998), "Velocity field measurements of flow around a triangular prism behind a porous fence", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 77&78, (1998), pp.521-530.

[23] 박기철, 이상준, (2000), "방풍펜스가 후방에 놓인 야적모래입자의 비산에 미치는 영향에 관한 연구", 대한기계학회논문집 B권, pp.1175-1184.

[24] 박철우, 이상준, "광양제철소 원료야적장 야적원료의 비산방지를 위한 방풍펜스의 풍공학적 실험연구", 한국풍공학회지, 1998, pp.115-126.