

2차원 흐름 중에 놓인 틈새를 갖는 수직벽 후류 특성에 관한 실험적 연구

조대환* · 오경근** · 이경우***

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

Experimental Study on the Wake Characteristics of a Perforated Vertical Wall with Gap in the 2-Dimensional Flow

Dae-Hwan Jo* · Kyoung-Gun Oh** · Gyoung-Woo Lee***

*Division of Marine System Engineering, MMU, Chukkyo-dong 571-2, Korea
**Graduate School of Mokpo Maritime University, Chukkyo-dong 571-2, Korea
***Division of Ocean System Engineering, MMU, Chukkyo-dong 571-2, Korea

요 약 : 항만과 해역에 설치되는 수직벽의 일례로 육상 및 유입되는 오염수의 오염 유출 방지를 위한 차수기능을 갖는 차수벽과 교량이나 댐, 갑문 등의 하천 또는 해양구조물을 축조하는 동안 물이 들어오는 것을 방지하기 위하여 임시로 설치되는 가물막이(cofferdam)벽 등이 있다. 이들 차단벽의 구조역학적인 설계 인자 중 유입수 유동 특성과 설치 지역의 지반 특성이 중요한 의미를 가진다고 판단된다. 본 연구에서는 이러한 수직 차단벽 주위의 유체역학적 특성 파악의 일례로 수직벽의 하단에 틈새를 갖는 파공(perforation)이 발생하였을 때 이들 파공의 개도를 변화에 따른 유동특성을 고찰하는 하나의 방안으로 입자영상유속계(Particle Image Velocimetry)를 이용하여 수직벽 후류 특성을 실험적으로 고찰하였다.

핵심용어 : 수직벽, 개도율, 입자영상유속계

ABSTRACT : There are cofferdam and watertight wall to prevent of circulation or pollution during building of ocean structures like a dam and bridge in the harbors area and the sea. Inflow fluid and base of structure is important thing as one of the structural design factors for this interception wall like a cofferdam and watertight wall. In this study, it is revealed that at least 500 instantaneous velocity field data are required for ensemble average to get reliable turbulence statistics. The turbulent shear flow around a surface-mounted vertical wall was investigated by using the two-frame PIV(CACTUS 3.1) system and Mean velocity distributions have also been measured in the whole flow field.

KEY WORDS : vertical wall, center gap, Particle Image Velocimetry

1. 서 론

항만과 해역에 설치되는 수직벽의 일례로 육상 및 유입되는 오염수의 오염 유출 방지를 위한 차수(遮水)기능을 갖는 차수벽(遮水壁;물막이 벽)과 교량이나 댐, 갑문 등의 하천 또는 해양구조물을 축조하는 동안 물이 들어오는 것을 방지하기 위하여 임시로 설치되는 가물막이(cofferdam)벽 등이 있다. 이들 차단벽의 구조역학적인 설계 인자 중 유입수 유동 특성과 설치 지역의 지반 특성이 중요한 의미

를 가진다고 판단된다.

이러한 수직벽에서의 유동은 전단층의 박리 및 재순환 유동 이에 따른 재부착과 새로운 전단층이 발달하는 유동현상을 포함하고 있다. 수직벽 유동은 기하학적으로 모양이 간단하고, 박리점이 모서리에 고정되어 박리선이 거의 직선적이지만 유동형태는 대단히 복잡하다.

특히 재부착 영역 및 재발달 경계층 유동에 관한 물리적인 메커니즘은 아직도 명확히 해명되어 있지 않아 이와 관련한 실험적 연구가 다수 행해지고 있다. 그리고 공학적으로 중요한 개도를 변화에 따른 수직벽 후류 유동특성을 고찰한 연구는 많지 않은 실정이다.

Raine 등[6]은 난류경계층에 잠긴 다공도 $\varepsilon=40\%$ 인 수직

* 정희원, pivmp@mmu.ac.kr 061)240-7104
** 학생회원, 984117@mmu.ac.kr 016)871-2178
*** 종신회원, kwlee@mmu.ac.kr 011)9339-3589

벽의 경우 후방 $x/H < 5$ 인 근접후류에서 난류강도의 국부 최대값이 두 곳에서 존재함을 보여주었다. 대기경계층 혹은 난류경계층에 잠기지 않고 균일유동 속에 놓여있는 다공벽의 후류에 관해서는 Castro에 의해 수행되었는데, 그는 수직벽의 다공도가 증가함에 따라 박리 기포가 뒤로 후퇴하다가 다공도가 $\epsilon=30\%$ 보다 크게 되면 박리 기포가 사라진다고 하였다. Perera[7]의 연구에서도 다공도가 30%이상의 수직벽 후류영역에서 박리 기포가 존재하지 않았다. Kiya 등[8,9]은 전단층의 비정상적인 상하운동, 플래핑(Flapping) 현상에 대한 결과를 제시하고 이는 대규모와 연계되어 전단층이 긴 시간 척도와 저주파수의 비정상적 상하운동을 하기 때문이며, 이러한 원인으로 박리 기포가 수축과 팽창 현상이 나타남을 설명하였다. Bradshaw 등[10]은 난류전단층에 박리 경계층에 대한 연구결과 유선곡률과 곡률형울은 전단층 내의 난류구조에 큰 영향을 주며 일반적으로 유선곡률의 형태에 따라 난류경계층이 다르게 나타남을 보였다. Kim 등[1]은 수직벽 흐름의 난류구조에 대한 실험적 연구를 통하여 유선의 곡률 효과가 중 변형률과 더불어 압력 변형률에 영향을 미치고, 또한 곡률로 인한 난류 생성량이 재부착과 더불어 레이놀즈 전단 응력 및 난류 강도를 감소시킨다고 기술하고 있다. 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 발생한다고 보고하고 있다. Bang 등[2]은 다단 후래시 증발장치 내부의 형태와 유사한 기하학적 경계조건을 가진 개수로 유동에 관해서 여러 유동 조건에 따른 속도 분포를 실험적인 측면에서 정성적으로 연구하였다. 그 결과 베플이 존재하지 않는 개수로 유동은 비교적 단순한 잠수벽면제트(submerged plane wall jet)의 형태로서 입구 게이트에 가까운 부분은 평면벽면 분류의 형태를 갖는 반면에 하류 부분은 수면의 영향을 받아서 분류 영역의 경계가 급격히 수면 쪽으로 휘어지는 결과를 제시하고 있다. Kim 등[11]은 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. 그들은 다공벽에 의한 속도 감소효과는 다공도가 $\epsilon=20\%$ 인 수직벽에서 가장 크게 나타난다고 기술하고 있다.

이 연구에서는 개도를 변화에 따른 유동특성을 고찰하는 하나의 방안으로 파공(perforation)과 같은 틈새를 갖는 다양한 형태의 수직벽 후류에 대해 파공의 개도에 따른 유동특성을 상호상관에 의한 이중프레임법에 의한 입자영상유속계(Particle Image Velocimetry)[3~5]를 이용하여 실험적으로 고찰하였다.

2. 실험

그림 1은 PIV 시스템의 개략도이다. 영상처리시스템은 크게 아르곤-이온 레이저(Argon-ion laser, 5W), 레이저 시트, 고속카메라(Fast Cam), 영상처리장치(CACTUS 3.1), 제어 및 계산용 컴퓨터 등으로 구성되며, 2-프레임 수직벽 후류 속도장 측정에 사용된 회류수조의 시험부는 길이 $l=37.14H$, 너비 $b=8.57H$ 깊이 $d=8.57H$ ($H=35\text{mm}$)의 사각형태이다. 수조 안에 수직벽을 설치하고 수면면에 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 3가지 즉, 전체 막힘, 중앙 분류 및 하부 분류로 나뉜다. 상류로 유입되는 유속은 회류수조 하부에 부착된 축류펌프의 회전수를 제어하여 조정하였다.

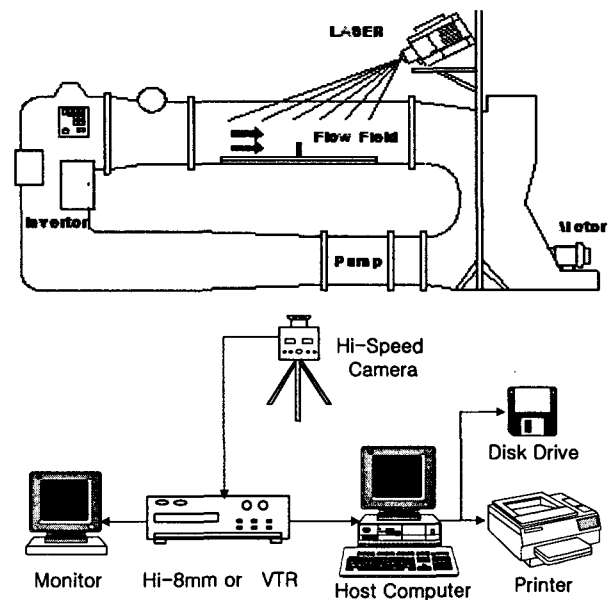


Fig. 1 Arrangement of experiment system

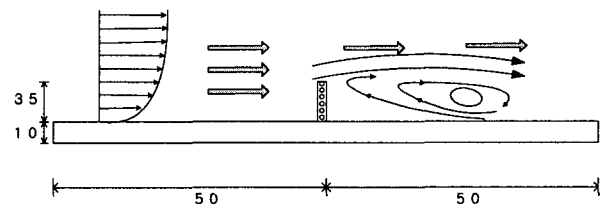


Fig. 2 Schematic diagram of flow field

회전수는 축류펌프를 구동하는 전력변환 장치인 인버터(YASKAWA사 모델: CIMR-XCAA2094)의 주파수에 따라 결정되고, 실험에서 채택한 주파수는 8Hz와 10Hz의 두

Table 2.1 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%

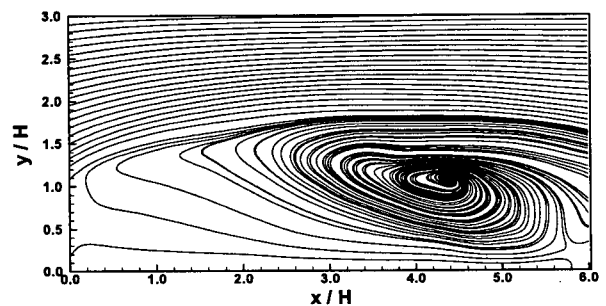
가지이며, 이때 속도는 각각 0.25m/sec와 0.31m/sec이다. 그림 2는 대상 유동장의 개략을 보여 주고 있다. 유로 내부 흐름은 좌측에서 우측으로 흐르며 유동장의 폭은 8.28H이다. 수직벽이 소형회류수조내의 수직벽 고정 대에 설치되고, 아크릴평판내 수면깊이는 5.43H, 소형회류수조의 아크릴평판 입구에서 하류방향으로 14.3H 위치에 너비 8.28H, 높이 1H, 두께 0.043H의 수직벽이 있다. 좌표축 x는 유동방향, y축은 회류수조의 깊이방향, z축은 너비방향을 나타낸다. 일반적으로 수직벽의 형상비(Aspect Ratio, 두께/높이)가 0.33보다 작은 이차원 물체는 벽 유동으로 간주될 수 있으며, 본 실험에서 사용된 수직벽은 형상비가 0.04, 종횡비(Aspect Ratio, 너비/높이)는 8.3이다. 따라서 형상비가 큰 이차원 블록 유동과는 달리 수직벽 선단에서 박리된 전단유동은 수직벽 윗면에 재 부착되지 않는다고 간주한다. PIV 시스템을 이용한 속도장 측정은 수직벽 후류의 중앙단면($z/H=0$)에서 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

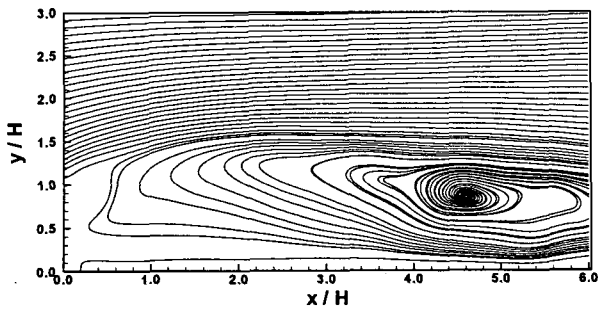
3.1 중앙분류의 특성

그림 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. 전체적인 유동특성은 수직벽의 상부영역과 후류영역으로 구분되며, 중앙분류에 따른 2차 와류가 나타나 있다. 그림 3은 $x/H=4.5$ 의 기준 선상에서 $y/H=0$ 에서 $y/H=3.0$ 까

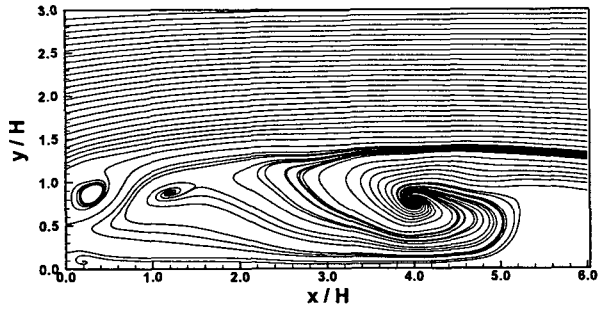
지 0.16간격으로 트레이서(Tracer)를 분포하고 그 결과를 도시한 것이다. 그림 3(a)에서 보면 수직벽의 후방에 대규모의 주 와류가 형성되어 있음을 알 수 있다. 와류의 중심 위치는 $x/h=4.38$, $y/h=1.5$ 이며, 수직벽의 높이를 계략적으로 수직벽의 2배의 규모이다. 그러나 $y/h=1.8$ 이상에서의 흐름은 균일하게 유지되고 있으며, 수직벽의 직하부에서는 작은 규모의 와류가 발생되고 있다. 따라서 약 3m정도의 수직벽을 가정한다면 그 영향은 30m이상의 후방까지 미칠 것으로 판단된다. 그림 3(b)의 경우는 개도율 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. 개도율 0%인 그림 3(a)과 비교하여 보면, 주 와류의 형상이 x방향으로 치우쳐 나타나 있다. 이것은 분류의 영향으로 추정된다. 또한 주 와류의 중심위치는 좌측상부로 이동되었으며, 전단혼합층도 감소됨을 알 수 있다. 그림 3(c)는 개도율 20%인 경우이다. 개도율이 증가한 만큼 분류상부의 2차 와류도 발생됨을 알 수 있다. 이러한 현상은 그림 3(d)에서는 더욱 크게 나타난다.



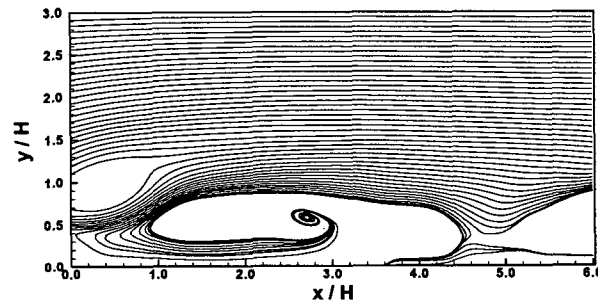
(a) $H_c/H=0.0$



(b) $H_c/H=0.1$



(c) $H_c/H=0.2$

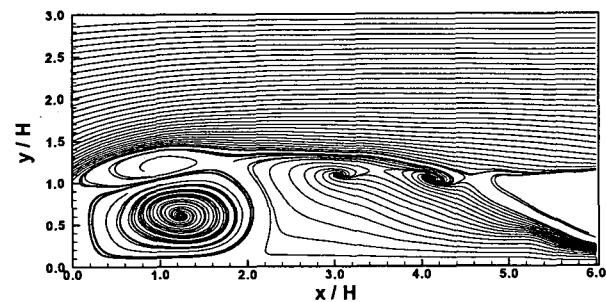


(d) $H_c/H=0.3$

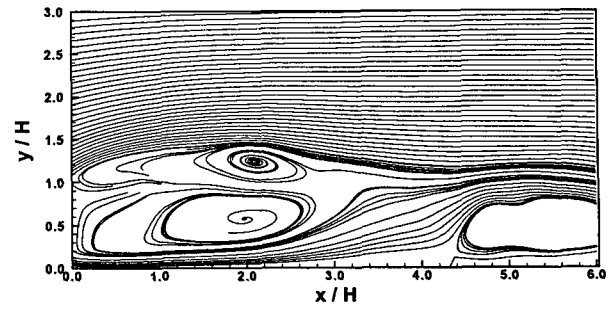
Fig. 3 Stream lines at center gap

3.2 하부분류의 특성

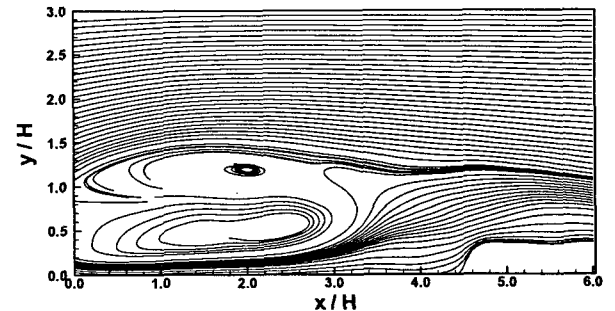
전체적인 유동특성은 수직벽의 하부에서 유입되는 흐름의 영향으로 $x/H=2.0 \sim x/H=4.0$ 범위 내에 유체벽이 형성되고 유체벽의 후측하류부분에 주 와류, 유체벽의 좌측상부에 2차 와류가 생성되어 있는 특징을 보이고 있다. 또한 수직벽과 유체벽의 사이에 형성된 2차 와류는 상하로 구분된 2개의 와류가 개도율에 따라 그 크기가 커지고 위치도



(a) $H_c/H=0.1$



(b) $H_c/H=0.2$



(c) $H_c/H=0.3$

Fig. 4 Stream lines at bottom gap

하류 방향으로 이동하여 있음을 알 수 있다. 그림 4는 $x/H=4.5$ 의 기준 선상에서 $y/H=0$ 에서 $y/H=3.0$ 까지 0.16간격으로 트레이서를 분포하고 그 결과를 도시한 것이다. 그림 4(a)에서 보면 수직벽과 후방에 2H정도 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. 그러나 개도율 10%에서는 그림 3.8에서 확연히 나타난 유체벽의 모습은 보이지 않고 있다. 그림 4(b), 그림 4(c)에서 보면 $x/H=3.5$ 를 전후하여 유체벽이 형성되어 있으며 하부분류의 크기가 증가 할수록 그 상승하는 흐름의 세기도 커짐을 알 수 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. 따라서 수직벽을 기준으로 2차와류의 영향은 약 $x=3H$ 후방까지 미치고, 그 이후의 영역에서의 속도분포가 유입 속도에 비해 80%이상 감소할 것으로 예상된다.

3.3 분류위치에 따른 유동특성

그림 5와 그림 6은 분류위치에 따른 와류의 위치 및 크기를 분석한 것이다. 중앙분류의 경우 재순환 흐름의 중심위치는 개도율이 커질수록 하류 측으로 이동하며 바닥면으로 근접하는 경향을 보였다. 중앙분류의 경우 개도율 20%

와 10%의 경우가 유입속도에 비해 60%이상 낮은 속도분포를 보이는 영역은 가장 크게 나타났으며 하부분류의 경우 개도율 10%이상에서 결과는 큰 변화를 보이지 않았다. 따라서 수직벽을 이용한 후류의 속도제어에는 중앙분류의 경우 20%가 가장 적합한 것으로 판단되며 하부분류의 경우 개도율 10%의 경우가 가장 양호한 결과를 보였다.

그림 7은 $y/H=0$ 에서 $y/H=3.0$ 까지 $x/H=1.2$ 의 간격으로 수평속도분포를 PIV계측에 적용된 7가지 경우에 대해 도시한 것이다. $y/H=1.8$ 이상에서는 유사한 결과를 보이고 있으며 하부분류와 중앙분류의 특징이 잘 나타나 있다.

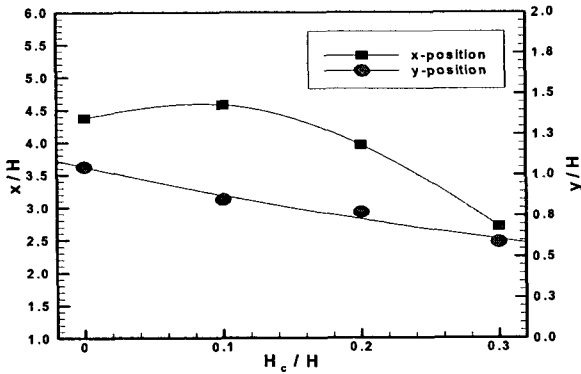


Fig. 5 movement of vortex center

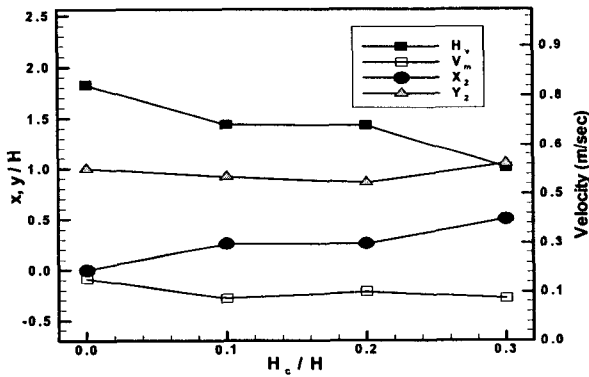
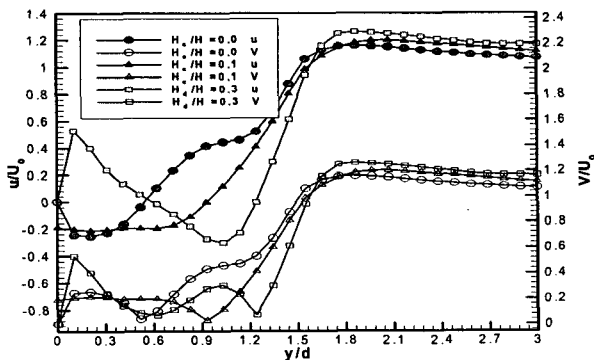
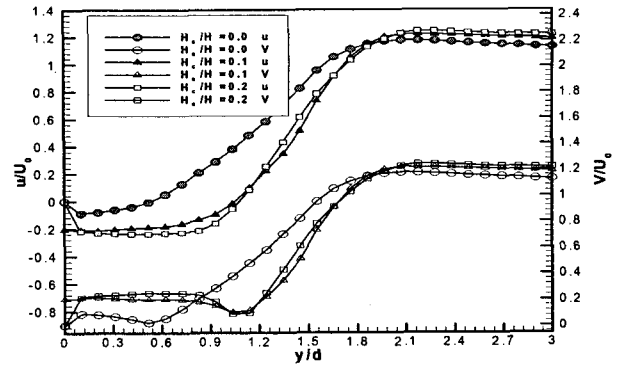


Fig. 6 Comparison of vortex size



(a) $x/d=1.6$



(b) $x/d = 2.8$

Fig. 7 Horizontal Velocity distribution

4. 결 론

틈새를 갖는 수직벽 후류 유동장을 대상으로 PIV기법을 이용하여, 개도율에 따른 7가지 조건에 대해 후류특성을 고찰하였다. 그 결과 다음의 결론을 얻었다.

수직벽의 후방에 형성되는 저속영역의 규모는 개략적으로 수직벽의 2배의 높이와 수평방향으로 10배의 규모이다. 그리고 수직벽 후방의 저속영역은 중앙분류의 경우 20%이고, 하부분류의 경우 개도율 10%의 경우가 가장 크고 낮은 속도분포를 보였다. 하부분류의 경우 수직벽의 하부에서 유입되는 흐름의 영향으로 $x/H=3.5$ 전후에 유체벽이 형성되었다. 개도율 10%의 경우 $x/H=5.0$ 후방에서 주와류가 형성되며, 개도율이 증가함에 따라 상류 측으로 이동하였다.

참 고 문 헌

- [1] 김경천, 정명균, "2차원 수직벽을 지나는 재부착 박리 전단층의 난류 구조에 관한연구(II)", 대한기계학회논문집, 1987, pp.681-689.
- [2] 방병렬, 설광원, 이상용, "평면벽면분류의 유입경계조건을 가지는 개수로 유동 및 배플의 영향에 관한 실험적 연구", 대한기계학회논문집, 1988, pp.139-146.
- [3] Wilert, C.E. and Gharib, M., 1991, "Digital Particle Image Velocimetry," Exp. in Fluids., Vol. 10, pp. 181~193.
- [4] 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.
- [5] Back, S.J. 1997, "development of Two-Frame Particle Tracking Velocimetry System and Its Application to Turbulent Separated Flows," Ph.D Thesis, POSTECH

- [6] Raine, J.K. and Stevenson, D.C., 1977. Wind protection by model fences in simulated atmospheric boundary layer. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 2, pp. 159~180
- [7] Castro, I.P., 1971. Wake characteristics of two-dimensional perforated plates normal to an air-stream. *J. Fluid Mech.* 46, pp. 599~609
- [8] Kiya, M. and Sasaki, K. 1983, "Structure of a Turbulent Separation Bubble," *J. Fluid.*, Vol. 137, pp.83~113
- [9] 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
- [10] Dianat, M. and Castro, I. P., 1991, "Turbulent in a Separated Boundary Layers," *J. Fluid Mech.*, Vol. 226, pp.91~123
- [11] H.B.Kim, S.J.Lee, "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, 2002, pp.317-329.