

분리판이 설치된 정사각주 주위의 유동특성에 관한 연구

박종규† · 서성호* · 부정숙**

(원고접수일 : 2005년 7월 22일, 심사완료일 : 2005년 9월 15일)

Experimental Study on the Flow around a Square Prism with a Splitter Plate

Jong-Kyu Park† · Seong-Ho Seo* · Jung-Sook Boo**

Abstract : This experimental study is conducted to investigate effects of a splitter plate, which is set on the back side of a square prism in the uniform flow, The Reynolds number is 1.44×10^4 based on the width of the square prism. The measurement of velocity vector and pressure distribution are carried out 4 cases of length in the range of 0.5L to 2.0L with 0.5L interval and 3 cases of position at 0L, 0.25L, 0.5L. Flow visualization is also executed by smoke-wire method to understand the mechanism of vortex formation. The results show the strong vortex shedding patterns and drags are decreased effectively, when the position of splitter plate is 0L. And the drag reduction rate is in inverse proportion to the splitter plate length

Key words : Splitter plate(분리판), Square prism(정사각주), Vortex shedding(와류출), Drag(항력), Conditional phase average technique(조건부 위상평균법)

기호설명

D : 분리판의 길이 (mm)
L : 정사각주의 폭 (mm)
H : 분리판의 위치 (mm)
 U_0 : 자유유동 평균속도(m/s)
 u_{rms} : X 방향의 난류강도
 v_{rms} : Y 방향의 난류강도
X, Y, Z : 직교 좌표계

F_D : 항력
 ΔP : 게이지압력 (mmH₂O)
 C_P (압력계수) : $\Delta P / \frac{1}{2} \rho U_0^2$
 C_D (항력계수) : $F_D / \frac{1}{2} \rho U_0 A$

1. 서 론

대부분의 공학적 내부, 외부유동은 난류유동이

† 책임저자(부산대학교 기계공학과 대학원), E-mail: pjk3067@hotmail.com, Tel: 051)510-3221

* 부산대학교 기계공학과 대학원

** 부산대학교 기계공학부, 부산대학교 기계기술연구소

며 와류를 수반하고 있다. 뭉툭한 물체(bluff body)는 물체 표면으로부터 유동이 박리하는 각종 구조물의 일반적인 형태이며, 여기에 작용하는 유체력을 감소시키기 위한 연구는 매우 중요하다고 할수 있다^[1]. 또한 건축물이나 각종 구조물 및 고속차량에 작용하는 유체력의 평가는 구조강도상 필요할 뿐 아니라 주기적으로 유출되는 와열이 구조물 등의 진동에 관련되기 때문에, 와의 생성 및 억제에 관한 메카니즘을 이해하는 것은 실용적인 문제에 있어서 중요한 의미를 갖는다. 유동제어에 따른 파급효과는 상당히 중요한 문제이며 공학적 및 산업적으로도 그 응용 가능성이 상당하며 얻어질 수 있는 이익 또한 매우 크다.

유동의 제어방법은 제어영역에 따라서 크게 표면 경계층 제어, 박리전단층 제어 그리고 후류 제어로 나눌 수 있으며 와류의 유출을 억제하거나 형성(formation)을 제어하기 위해 많은 연구가 이루어져 왔으며 현재까지도 활발하게 연구가 진행되고 있다. 분할판을 이용한 후류 제어에 관한 기존연구를 정리하면 다음과 같다. Bearman & Trueman^[1]은 실험을 통해 분리판을 정사각주 뒷면 중앙에 설치 하였을 때 후류에서의 와성장 억제되어 항력이 크게 감소하고 흐름에 의한 진동 역시 감소함을 밝혔다. Rathakrishnan E.^[2]은 기존의 연구들과는 다르게 분할판을 설치하였을 때 모델의 형상이 상,하 비대칭인 경우에 대해 연구하였다. 그 결과 분할판을 중앙(0.5L)에 설치할때는 앞면보다 뒷면에 부착될 때 항력의 감소율이 높고, 분리판을 0.25L의 위치에 설치했을 때는 분리판을 뒷면보다 앞면에 부착 했을 때 항력의 감소율이 높음을 밝혔다. 또한 분리판의 위치가 중앙에서 벗어날 때 항력의 감소효과가 크다고 하였고 영각(angle of attack)은 0° 일때 가장 효과적임을 보였다. 박의철^[3]은 분리판이 설치된 정사각주 주위의 비정상흐름을 와류추적법으로 계산한 결과 실린더 앞면은 영향이 거의 없고, 뒷면은 분리판이 와의 생성과 성장을 억제하여 압력의 감소가 현저하게 줄어 항력이 감소함을 발견하였고 그 길이가 짧을때 감소율이 크다는 것을 밝혀내었다. 본 연구에서는 기존의 연구결과를 토대로 하여 분리판의 길이와 위치변화에 따른 유동특성을 조건부 위상

평균법을 일부 이용하여 대규모 와의 응집구조의 형태 및 변화를 체계적으로 조사하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에서 사용한 풍동은 전체길이가 6,375 mm이고 시험구간의 크기가 305 mm(폭)× 305 mm(높이)× 3,200 mm(길이)인 개회로 노즐형의 흡입식 아음속 풍동을 사용하였다.

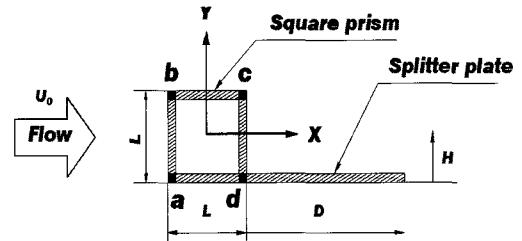


Fig. 1 Schematic diagram of model

Fig. 1은 본 실험에 사용된 모델의 형상으로써, X와 Y는 각각 유동방향과 수직방향을 나타낸다. 정사각주는 한 변의 폭(L)이 25 mm인 알루미늄 정사각봉으로 표면이 아주 매끈하게 가공되었으며, 분할판도 알루미늄의 매끈한 평판으로 판의 두께는 2.5mm이다. 이 실험모델은 자유흐름의 방향에 수직이 되게 Z방향으로 설치하였다. 분할판의 길이(D)는 0.5L, 1.0L, 1.5L, 2.0L 4가지이며, 분할판의 위치(H)는 0L, 0.25L, 0.5L 3곳이다. 분할판 각각의 위치에 길이를 변화시킨 12가지의 모델과 분할판이 없는 정사각주 모델까지 포함하여 총 13가지 모델에 대하여 실험을 하였다. 자유유동속도 U_0 는 9 m/s로 이때의 레이놀즈 수(Re)는 약 1.44×10^4 이며, 후류의 유동측정에는 정온형 열선풍속계(C.T.A, model TSI사의 IFA300)를 사용하였고, X형의 열선을 사용하였다. 정사각주의 정압을 측정하기 위하여 정사각주 한 면당 6개 씩 외경 1.8mm, 내경 1.0mm의 스테인레스 파이프를 일정 간격으로 심고 비닐튜브를 연결하여, 미세압력계로 신호를 받아들여 측정하였다. 압력측정은 각 지점에서 10번씩 획득하

여 평균을 취하였다. 이상의 실험조건을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Conditions of experiment

Free stream velocity(U_0)	9.0 m/s ($Re=1.44 \times 10^4$)
Width of square prism(L)	25 mm
Thickness of splitter plate	2.5 mm
Blockage ratio	8.2 %
Measuring point	X/L=5.0 Y/L=-3.0~3.0 (Interval:0.2L, 31points)
Length of splitter plate	D=0.5L, 1.0L, 1.5L, 2.0L
Position of splitter plate	H=0L, 0.25L, 0.5L
Sampling condition	Sampling frequency : 10 kHz Data number : 4,096 Ensemble number : 10

후류유동장의 변화를 관찰하기 위해 X/L=5.0, -3.0≤Y/L≤3.0 범위에서 난류신호를 측정하였다. Fig. 2는 측정시스템이다.

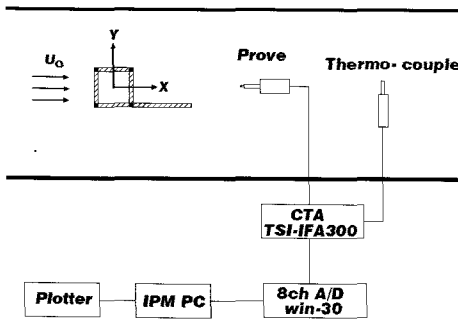


Fig. 2 Measuring and data processing system.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 평균속도 및 난류강도분포

Fig. 3은 자유유동속도(U_0) 9 m/s에서 측정된 평균속도분포이다. 속도분포는 후류중심선(X축)에서 분리판이 설치된 쪽으로 조금 치우쳐져 있다. 속도분포의 양 끝부분(Y/L=-3, 3)에서 측정된 속도값이 자유유속도 값보다 증가하는데 이

는 정사각주에 의해 유체가 흘러가는 단면적이 줄어들는데 유량은 일정하므로 속도가 증가한 것으로 생각된다.

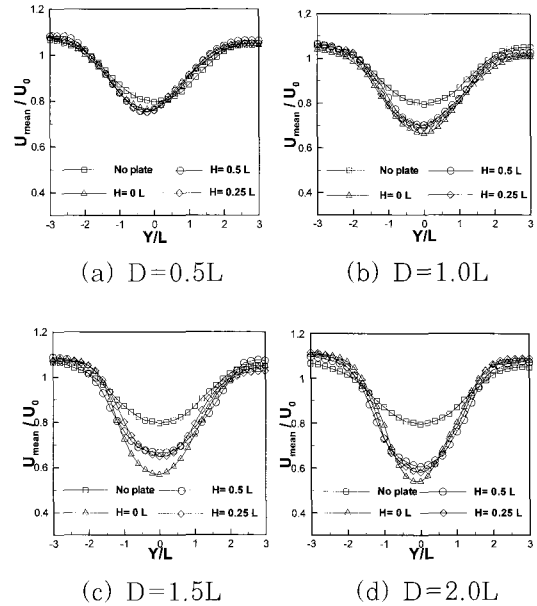


Fig. 3 Mean velocity distributions in Y-direction

분리판이 설치된 경우에는 와(vortex)가 분리판에 의해 완전히 분리된 채로 이동하고 규칙적으로 형성되지 않아서 하류에는 와열의 형성이 분명하지 않다^[3]. 또한 분리판이 재순환을 억제하고 두 박리 전단층의 상호작용을 차단하기 때문에 분리판이 없는 경우에 비해 속도결손이 커지고 후류폭이 좁아진다. D가 길어짐에 따라서 후류폭이 점점 더 좁아짐을 볼 수 있으며 와열의 형성이 더욱 억제될 것이라고 예상 할 수 있다. H에 대한 영향을 살펴보면 동일한 D에서 H=0L일때 후류폭이 가장 좁고 속도 결손량도 가장 크다. 이러한 경향은 D가 길어질수록 증가하며 Fig. 3(c), Fig. 3(d)에서 잘 확인 할 수 있다. H=0.25L, 0.5L로 갈수록 속도 결손량이 적어지며 후류폭도 조금씩 증가한다.

Fig. 4은 V-속도성분의 난류강도를 나타낸다. Fig. 4(a)는 D=0.5L인 경우로 분리판이 설치되지 않은 경우와 큰 차이를 보이지 않는다. Fig. 4(b)는 D=1.0L인 경우로 H=0L인 경우 난류의 폭과 세기가 감소한 것을 볼 수 있지만 0.25L,

0.5L 인 경우에는 큰차이를 보이지 않는다. Fig. 4(c)는 $D=1.5L$ 인 경우로 난류강도의 세기와 폭이 상당히 많이 감소하였다. $H=0L, 0.25L, 0.5L$ 순으로 난류강도의 세기와 난류의 폭이 감소함을 명확하게 볼 수 있다.

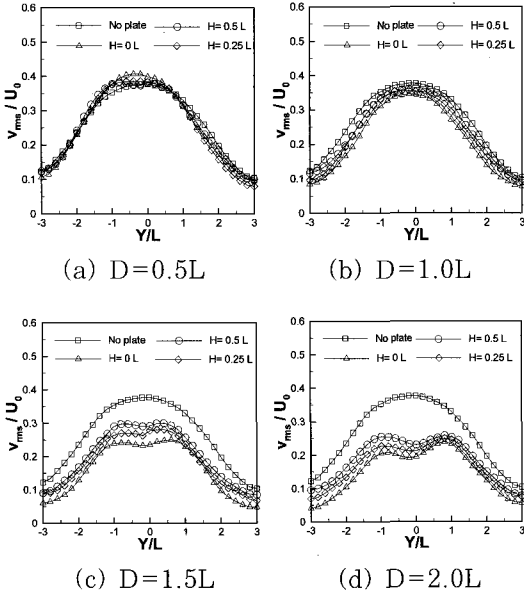


Fig. 4 The lateral turbulent intensity

중심축 $Y/L=0$ 부근에서 난류강도의 세기가 떨어짐을 볼 수 있는데 이는 정사각주 후면에 분리판이 설치된 지점으로써 유체가 분리판에서 상호간의 운동량 교환이 활발하게 일어나지 못하기 때문이라고 생각이 된다. Fig. 4(d)에서 보다 확실하게 이와 같은 경향이 나타나는데 중심축 $Y/L=0$ 부근에서 난류강도의 세기가 뚜렷하게 감소하였으며 난류의 폭 또한 감소하였음을 알 수 있다. H 에 대한 영향은 $H=0L, 0.25L, 0.5L$ 순으로 난류강도의 세기와 난류의 폭이 감소하는 경향을 보이고 있다. 평균속도 분포와 같이 D 가 길어질 때 H 에 따른 영향을 많이 받는다는 것을 확인할 수 있었다.

3.2 후류구조 특성 및 와류출 특성

Fig. 5는 $H=0L$ 일 때 D 의 변화에 따른 위상

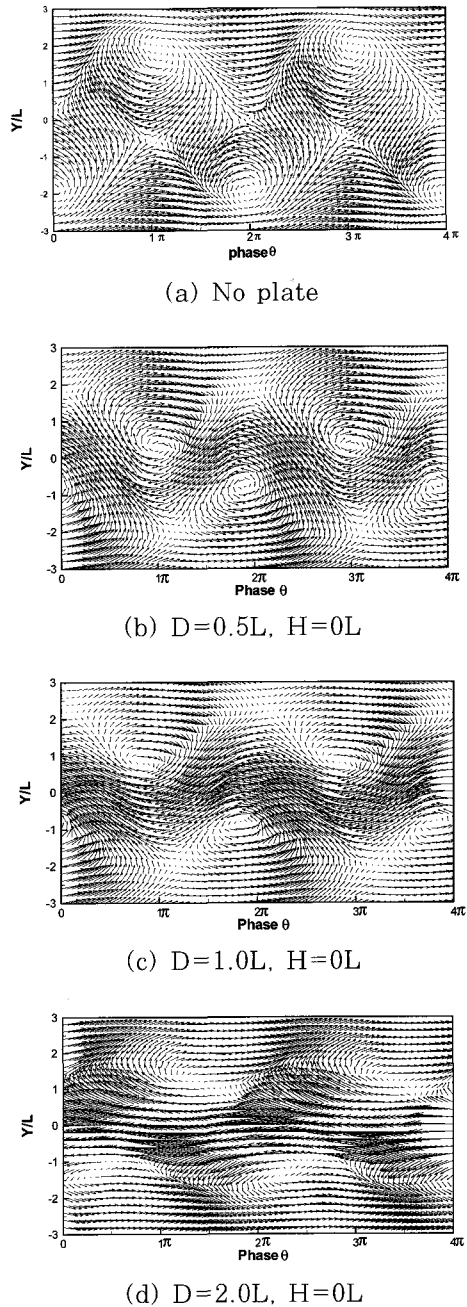


Fig. 5 Velocity vector field $\langle U-U_c \rangle, \langle V \rangle$ of the large scale structure

평균된 속도를 와이동속도 U_c 로 관찰자가 이동하면서 관찰한 위상평균 속도의 벡터장(vector field)을 도시화 한 것이다. 와이동 속도는 후류

중심선 상하의 가속부와 감속부에 있는 응집와의 중심속도를 구해 이의 평균값을 취하였다. 벡터장에서 보면 응집과 중심 주위를 후류중심선 상하에서 각각 서로 반대방향으로 회전하는 응집와를 볼 수 있다. $D=0.5L, 1.0L$ 일 때 응집와가 변형되는 것을 볼 수 있으며 와의 상하 중심간의 거리가 가까워지고 후류폭이 줄어들었음을 확인 할 수 있다. $D=2.0L$ 일 때는 와의 응집구조를 잘 볼 수 없다. 이는 Fig. 4에서 확인한 바와 같이 유체가 분리판에 의해 운동량 교환이 활발하게 일어나지 못했기 때문이라 생각된다. Fig. 6은 $D=2.0L$ 일 때 H 에 따른 와유출 주파수를 $X/L=5, -3.0 \leq Y/L \leq 3.0$ 범위에서 V속도를 F.F.T하여 구하였다. 분리판이 설치되지 않았을 때 와유출이 넓고 강하게 형성됨을 볼 수 있다. 반면에 분리판이 설치되었을 경우 전체적으로 와유출이 좁고 약하게 나타나는데 특히 $H=0L$ 인 경우 와유출이 아주 약하게 나타나고 있으며 탁월주파수 영역도 좁아짐을 볼 수 있다. 이는 앞서 언급한 후류폭의 감소와 깊은 관련이 있는 것으로 생각된다. $H=0L$ 일 때 와유출의 주기성이 떨어지는 것을 볼 수 있으며, H 가 $0.25L, 0.5L$ 로 증가하면서 탁월주파수 영역이 증가하고 와유출도 강하게 나타남을 확인 할 수 있다.

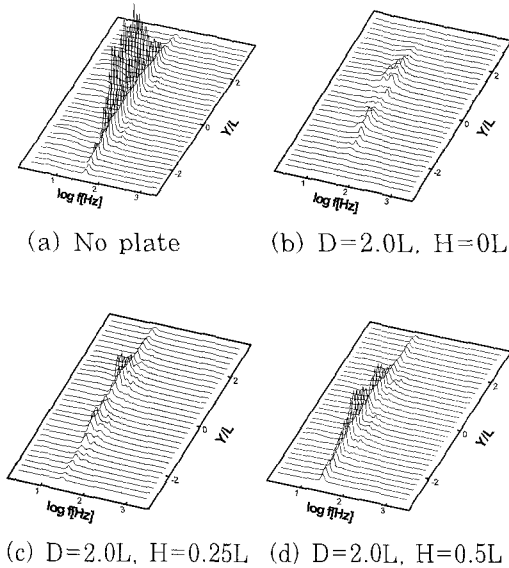


Fig. 6 Power spectrum of lateral velocity

3.3 평균압력 분포

Fig. 7은 각각의 D 에 따른 H 를 변화시켰을 때 정사각주 표면의 평균압력분포를 나타낸 것이다. 분리판이 설치되었을 때 정사각주의 앞면, 즉 a-b 영역에서의 압력분포를 살펴보면 분리판의 영향이 거의 없었으나 정사각주 뒷면, 즉 c-d 영역에서는 분리판의 설치로 압력이 상승하는 것을 확인 할 수 있다. Bearman & Truman^[1]은 항력은 주기적인 와의 유출과 관계있다고 하였는데 이것으로 미루어 볼 때 박리전 단층이 정사각주 뒷면 근처로 감겨 와를 형성하는 것이 분리판에 의해 차단되어 유속이 낮아지고, 후류폭이 감소하여 압력이 상승 되어진 것으로 생각이 된다. c-d 영역에서 압력 상승폭은 D 가 길어짐에 따라 커졌으며 D 가 같을 때는 $H=0L$ 일 때가 가장 압력이 상승하는 것을 볼 수 있지만 $0.25L, 0.5L$ 일 때 구체적인 상승폭을 구분하기는 힘들다. b-c 영역은 $D=0.5L, 1.0L$ 일 때는 구체적인 상승폭의 구분이 명확하지 않고 $D=1.5, 2.0$ 일 때 $H=0L$ 일 때가 압력이 가장 많이 상승한 것을 볼 수 있다. d-a 영역에서도 $D=0.5L, 1.0L$ 일 때는 구체적인 상승폭의

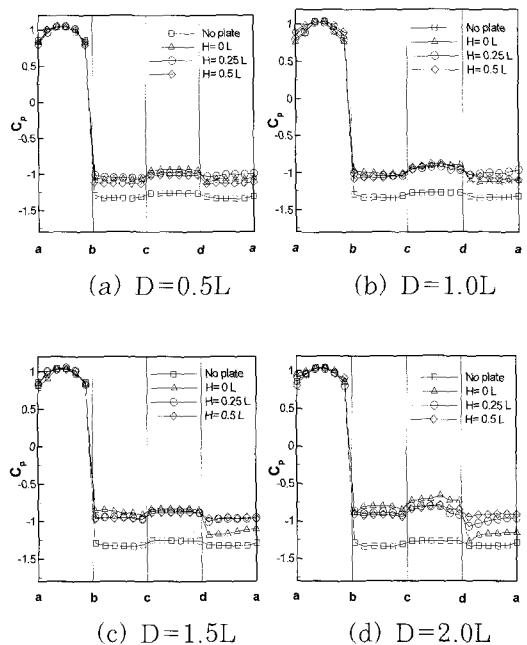


Fig. 7 Pressure coefficient distribution

구분이 명확하지 않고 $D=1.5L$ 일 때는 $H=0L$ 일 때 압력 하강이 가장 크며 $D=2.0L$ 일 때는 $H=0L, 0.25L, 0.5L$ 순으로 압력이 하강하였다.

Fig. 8은 측정된 압력계수를 이용하여 계산한 항력계수를 나타내었다. $D=0.5L$ 일때 항력계수의 값이 분리판이 없을 때 보다 급격하게 감소되었으며 D 가 $1.0L, 1.5L, 2.0L$ 로 증가함에 따라 감소율이 점차적으로 감소하고 있다. 선행연구에서 박외철⁽³⁾은 분리판의 길이가 짧을때 항력의 상대적 감소율이 크다고 하였는데 이는 본 연구에서의 결과와 일치한다. 또한 항력계수는 $H=0L, 0.25L, 0.5L$ 순으로 감소하였다. 따라서 항력의 상대적인 감소율은 분리판의 길이가 짧고 $H=0L$ 일 때 가장 큰 것으로 나타났다.

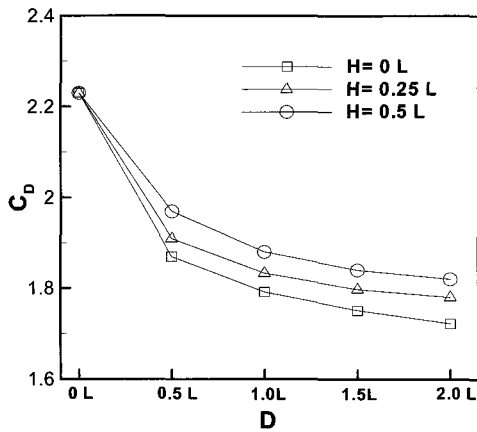


Fig. 8 Drag coefficient

3.4 유동의 가시화

Fig. 9는 스모크와이어를 이용한 유동가시화 결과를 나타낸 것이다. D 와 H 변화에 따라서 상부와 하부의 자유유선 사이의 길이인 후류폭과 후류중심선을 가로지르는 유입류의 위치가 차이 나는 것을 볼 수 있다.

D 가 길어질수록 또한 $H=0L$ 일때 후류폭이 좁아지며 와형성이 억제되는 것을 확인 할 수 있다. 이는 앞서 속도벡터장과 속도분포 및 와유출 특성에서 확인한 바와 잘 일치한다.

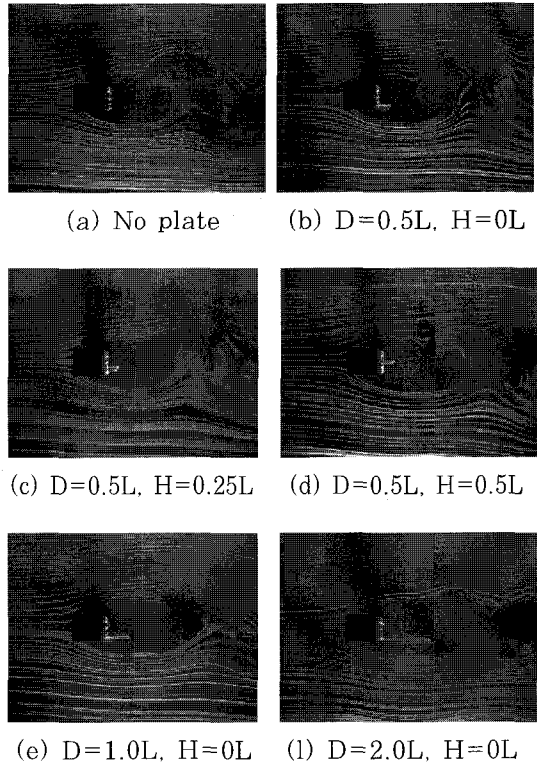


Fig. 9 Flow visualization

4. 결 론

후류 제어를 위해 정사각주의 뒷면에 분리판을 설치하여 레이놀즈수, $Re=1.44 \times 10^4$ 에서 분리판의 길이를 $D=0.5L, 1.0L, 1.5L, 2.0L$, 설치위치를 $H=0L, 0.25L, 0.5L$ 로 변화시켜 속도장과 압력을 측정하여 데이터를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 정사각주 앞면에서는 분리판의 영향이 거의 없었으나, 뒷면에서는 분리판이 와형성을 억제시키고 후류폭을 감소시켜 압력이 상승하였다.
2. 분리판의 길이(D)가 길어질수록 위치(H)에 따른 유동변화가 크게 나타나며, 응집와 중심간의 거리는 좁아지고 와형성이 억제되어 항력이 감소하였으며 단위길이당 항력 감소율은 분리판이 짧을수록 높았다.
3. 분리판의 길이(D)가 동일하면 분리판의 위치

(H)가 0L일때 와류출의 주기성이 가장 희박하고 후류폭 또한 가장 많이 감소하여 항력의 감소율이 컸다.

4. 분할판 위치(H)에 따른 보다 구체적인 유동특성을 규명하기 위해서는 분할판의 위치를 다양하게 변화시켜서 연구해 볼 필요가 있다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비 (2년)에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Bearman, P. W. and Trueman, D. M., "An Investigation of the Flow around Rectangular Cylinder", *Aeronaut. Q.*, Vol. 23, pp.229-237, 1972.
- [2] E. Rathakrishnan, "Effect of Splitter Plate on Bluff Body Drag", *AIAA Vol.* 37 No. 9, pp.1125-1126, 1999.
- [3] 박외철 "분리판의 길이가 항력감소에 미치는 영향" 대한기계학회 추계학술대회 논문집 B 44-47, 1992.
- [4] V. Mansingh and P. H. Oosthuizen, "Effect of Splitter Plates on the wake Flow Behind a Bluff Body, *AIAA Vol.* 28, No5, pp.778-783, 1990.
- [5] J. M. Cimbalá and S. Grag, "Flow in the wake of a Freely Rotatable Cylinder with Splitter Plate, *AIAA Vol.* 29, No. 6, pp.1001-1003, 1991.
- [6] J. S. Boo, C. S. Kim, S. H. Seo, and H. T. Seo. "Effects of Spinning Control Cylinder set in the Leading Edge of a Square Prism on the Flows, *KSME, Fall annual meeting B.* pp.569-574, 1998.
- [7] J. S. Boo, J. P. Yang, and Y. B. Jung, "Flow Characteristic of the Wake Behind a Square Prism by Controlling the Separated Shear Layer", *KSME, Vol.* 17, No. 11, pp.2840-2849, 1993.
- [8] J. S. Boo, K. C. Kim, and B. N. Ryu. "Characteristics of Vortex Shedding behind a Circular Cylinder with Serrated Fins" *KSME, Vol.* 25, No. 8, pp.1077-1086, 2001.
- [9] 부정숙, 류병남, 조민기, "트리핑와이어가 설치된 원형실린더 주위의 유동현상연구", *한국박용기관학회지*, 제28권, 제3호, pp.413-422, 2004.
- [10] S. I. Lee and S. J. Lee, "Drag Reduction of a Circular Cylinder with a Front Small Control Rot" *KSAS, Vol.* 30, No. 3, pp.87-95, 2004.
- [11] K. Y. Kwon, and H. C. Choi, "A Passive Control of Vortex Shedding Using a Splitter Plate Attached to a Circular Cylinder", *KSME, Fall annual meeting B.* pp.502-507, 1994.
- [12] 부정숙, 김경천, 류병남, "회전하는 원주 후류의 2차원 난류구조", *한국박용기관학회지* 제 16권 제4호, pp.39-49, 1992.
- [13] 부정숙, 류병남, 김정훈 "엇갈림 배열에서 회전원주에 의한 정지원주의 공력 및 후류유동 제어", *한국박용기관학회지*, 제25권, 제4호, pp.2601-2610, 2001.
- [14] 신승환, 황중연, 양경수, "분리된 분할판에 의한 원형단면 실린더의 항력감소", *대학기계학회 논문집 B권*, 제25권 제11호, pp.1632-1639, 2001.
- [15] J. H. Gerrard, "The mechanism of the formation region of vortices behind bluff bodies," *Journal of Fluid mechanics.* Vol. 25, pp.401-403, 1996.
- [16] O. M. Griffin, "A note on bluff body vortex formation," *Journal of Fluid mechanics.* Vol. 284, pp.217-224, 1982.

- [17] H. Tennekes, J. L. Lumley, "A first course in turbulence", MIT press, 1972.

저 자 소 개



박종규 (朴鍾圭)

1979년 12월생, 2004년 인제대학교 기계공학과 졸업(학사), 현재 부산대학교 기계공학과 대학원(석사과정)



서성호 (徐成昊)

1971년 10월생, 1997년 부산대학교 기계공학과 졸업(학사), 1999년 동대학원 대학원 졸업(석사), 2004년 동대학원 박사과정, 현재 한국과학기술정보연구원



부정숙 (夫禎淑)

1944년 7월생. 1968년 부산대학교, 기계공학과 졸업. 1975년 경북대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1986년 경북대학교 대학원 기계공학과 졸업(박사). 1972년~현재 부산대학교 기계공학부 교수.