

벽면 근처에 놓인 정방형주의 수직 분할판에 의한 유동 제어 노기덕¹ · 조지룡² · 오세경[†]

(원고접수일 : 2011년 9월 1일, 원고수정일 : 2011년 11월 1일, 심사완료일 : 2011년 11월 2일)

The Flow Control by a Vertical Splitter Plate for a Square Prism near a Wall

Ki-Deok Ro¹ · Ji-Ryong Cho² · Se-Kyung Oh[†]

요약 : 본 연구는 벽면 근처에 놓인 정방형주의 모서리에 수직 분할판을 부착하여 유체력 제어 효과를 양향력 측정실험 및 PIV에 의한 가시화 실험으로 조사한 것이다. 분할판의 폭은 정방형주 폭의 10% 로 했다. 실험변수로서는 수직 분할판의 부착 위치 및 벽면과 사각주 사이의 간격으로 하였다. 정방형주 중심에서 후류방향으로 3.0B(B: 정방형주 한 변 길이) 떨어진 곳에서 와도의 변화가 가장 명확했다. 수직 분할판의 위치 및 유무와 관계없이 간격비 0.4~0.6에서 평균양력계수 및 Strouhal 수의 변곡점이 나타났다. 정방형주 윗면의 뒷 모서리에 수직 분할판을 설치한 경우 항력이 감소하였으며 각 간격비 평균 5.0%의 항력 저감 효과를 얻었다. 정방형주 윗면 박리영역의 크기는 앞쪽 모서리에 수직 분할판을 설치한 경우가 가장 컸고, 원형의 정방형주, 뒷쪽 모서리에 수직 분할판을 설치한 순서로 작았으며, 평균항력계수는 이 박리영역의 크기에 비례했다.

주제어 : 항력감소, 유동제어, 벽면효과, 정방형주, 분할판

Abstract: The passive control by vertical splitter plate of fluid force acting on a square prism near a plane wall was studied by measuring of fluid force on the prism and by visualization of the flow field using PIV. The height of the splitter plate was 10% of the square width. The experimental parameters were the attaching position of vertical splitter plate and the space ratios G/B to the prism height. Time variation of vorticity was most remarkable at 3.0B(B: prism height) position toward wake direction from the center of the prism. The point of inflection of average lift coefficient and Strouhal number on the prism were represented at the space ratio G/B=0.4~0.6 for the prism having vertical splitter plate. The drag of the prism was reduced average 5.0% with the space ratios by attaching the vertical splitter plate at the upper and rear corner on the prism. In this case, the size of the separated region on the upside of the prism was smaller than that of prism having no the splitter plate.

Key words: Drag reduction, Flow control, Wall effect, Square prism, Splitter plate

1. 서 론

벽면 근처에 놓인 사각주로 대표되는 유체역학 문제로서는 강풍에 노출된 빌딩, 교량, 철도차량 및 컨테이너 트럭과 같은 대형 구조물에서부터 냉각팬 앞에 놓인 반도체 주위의 흐름까지 수없이 많다. 특히 사각주 후면의 와류진동은 대형 구조물의 동적

안정성에 심각한 영향을 미치므로 동적안정성 향상과 항력감소를 위해 사각주 주위의 유동장을 제어하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 일정류 중에 놓인 사각주에 작용하는 유체력의 제어에 관한 그 동안의 연구를 살펴보면 정방형주 상류측에 제어봉[1] 또는 제어판[2,3] 설치하여 항력을 저감시키는 방법

[†] 교신저자(경상대학교 에너지기계공학과 · 농생명과학원, E-mail:ohsek@gnu.ac.kr, Tel: 055-772-9107)

1 경상대학교 기계시스템공학과 · 해양산업연구소

2 인제대학교 기계자동차공학부

과 정방형주 모서리에 펜스를 설치[4]하거나 둥글게 가공[5]하여 항력을 감소시키는 방법 등을 들 수 있다. 또한 벽면근처에 놓인 사각주 주위의 유체력 제어에 관한 연구로는 [6]에서는 수치해석을 통하여 고정 지면에 근접해 있는 사각주 하부의 앞, 뒤 모서리에 적절한 높이의 수직, 수평의 펜스를 설치함으로써 양·항력계수를 감소시킬 수 있음을 보였고, [7]에서는 고정 지면 근처의 사각주 후류에서 와류 배출 억제 효과가 있는 전술한 수직 및 수평펜스가 이동지면에서도 같은 효과가 나타내는지를 수치해석을 통하여 검토하였다. 최근 [8]에서는 벽면 근처에 놓인 정방형주 하부 모서리에 수평 분할판을 설치하여 간격비 평균 4.5%의 항력감소 보였다.

본 연구는 벽면근처에 놓인 정방형주 윗면의 앞 또는 뒷 모서리에 수직 분할판을 설치하여, 양·항력 측정 실험으로 항력저감 효과를 조사함과 동시에 PIV를 이용한 가시화 실험으로 항력이 저감되는 원인을 파악하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험모델

실험모델을 Figure 1에 나타낸다.

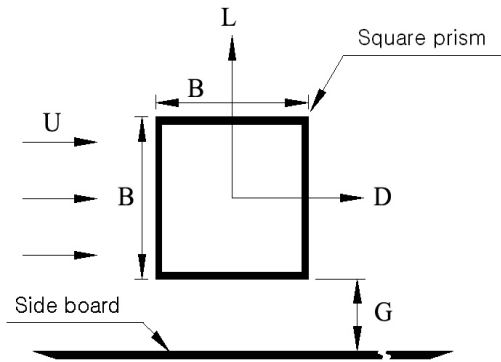


Figure 1: Experimental model

일정류 U중에 한 변의 길이가 B인 정방형주가 벽면으로부터 G만큼 떨어진 곳에 놓여 있다. 이때 항력 D는 일정류와 같은 방향으로 작용하는 유체력 성분, 양력 L은 일정류와 수직 상방향으로 작용하는 유체력 성분을 의미한다.

Figure 2에 실험에 사용한 앞, 뒤 모서리에 수직 분할판이 설치된 정방형주의 모델들을 나타낸다.

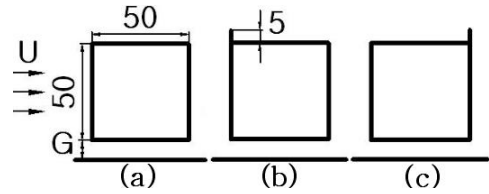


Figure 2: Models of square prism having vertical splitter plate

기본이 되는 정방형주는 그 단면이 50×50mm이고, 수직분할 판의 높이는 정방형주 한 변 길이의 10%인 5mm이다. 그림에서 모델 (a)는 분할판이 없는 경우이며, 모델 (b)는 위면 앞쪽 모서리에 수직 분할판을, 모델 (c)는 윗면 뒤쪽 모서리에 수직 분할판을 설치한 경우이다. 연구는 상술한 세가지 실험 모델을 제작하여 일정류가 얻어지는 회류수조에서 간격비에 따른 양, 항력 측정실험과 PIV를 이용한 가시화 실험을 나누어 행하였다.

2.2 양·항력의 측정

Figure 3에 양·항력 측정실험을 위해 제작한 실험장치의 개략도를 나타낸다.

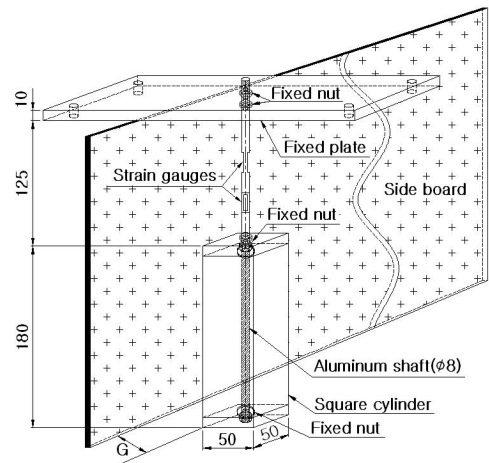


Figure 3: Schematic structure of experimental device (unit : mm)

실험 장치는 크게 정방형주, 측정 축, 고정판 및 측판으로 나누어 제작했다. 정방형주, 고정판 및 측판은 사용한 회류수조의 크기에 맞추어 투명아크릴 판으로 제작했다. 정방형주는 크기는 $50 \times 50 \times 180 \text{mm}$ 이며, 옆판은 3mm, 상, 하 덮개는 10mm 두께의 아크릴 판으로 만들었다. 또한 상, 하 덮개의 중앙에 직경 12mm의 구멍을 뚫고, 측정 축을 장착하기 쉽게 고정용 너트를 부착하였다.

측정 축은 직경 8mm, 길이 345mm의 알루미늄의 봉을 가공하여 제작했다. 즉 봉의 하부 190mm는 나사를 가공하여 정방형주에 너트로 고정시켰다. 봉의 상부는 일정류 중에서 양·항력을 용이하게 분리하여 측정할 수 있도록 그림에서와 같이 전후, 좌우 방향으로 두께 2mm, 길이 20mm로 평평하게 깎았다. 그리고 그곳에 각 방향으로 2매씩(계 4매) 스트레인 게이지를 부착하고 브릿지 회로를 결성하여 스트레인 양으로 양·항력을 측정했다. 각 채널(계 2채널)의 브릿지 회로에서 나온 출력파형은 스트레인앰프, AD변환기를 거친 다음 퍼서널 컴퓨터에서 미리 보정한 계수에 의해 양·항력 값으로 출력된다.

이때 회류수조 측정부의 일정류 유속은 $U=0.36 \text{ m/s}$ 이며, 정방형주 한 변의 길이를 대표길이(B)로 잡아 환산한 레이놀즈 수($Re = UB/\nu$, ν : 유체의 동점도) $Re=2.0 \times 10^4$ 이다. 실험은 레이놀즈 수를 고정시키고, 간격비 G/B 를 $G/B = 0.1 \sim 1.2$ 범위 내에서 일정간격으로 증가시켜가면서 양·항력을 측정했다.

2.3 PIV를 이용한 유동장 가시화

PIV를 이용한 유동장 가시화 실험장치의 개략도를 Figure 4에 나타낸다.

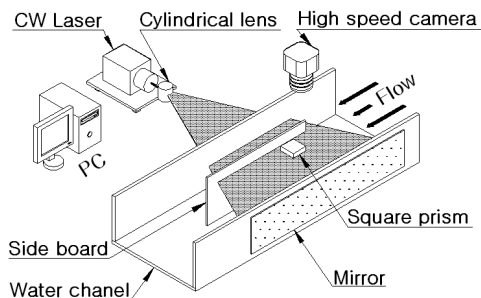


Figure 4: Schematic structure of experimental device

기본이 되는 정방형주는 그 크기가 $50 \times 50 \times 180 \text{mm}$ 이며, 벽면을 나타내는 측판은 그 크기가 $750 \times 180 \text{mm}$ 로 두 부품 모두 레이저 빛이 잘 투과할 수 있도록 두께 2mm의 투명아크릴 판으로 제작했다. 정방형주를 고정시키기 위한 밑판의 크기는 $750 \times 150 \times 2 \text{mm}$ 로 투명아크릴로 만들었으며, 실험 시 추적 입자가 잘 보이도록 검정색 도료로 칠했다. 한편 분할판의 부착위치는 Figure 2의 모델에서와 같은 위치에 부착하였으며, 높이는 정방형주 한 변의 길이의 10%에 상당하는 5mm이며, 길이는 180mm로 두께 2mm인 투명아크릴 판을 정밀 절단하여 아크릴 본드로 정방형주 모서리에 부착하였다.

실험은 앞서 Figure 2에 나타난 수직 분할판을 가진 정방형주를 제작하여 Figure 4에서와 같이 일정류가 흐르는 회류수조의 수로 내에 장착하여, 유동장을 가시화 하였다. 구체적으로 각 실험모델을 수로 내에 설치한 후 회류수조 밖에서 Figure 4에서와 같이 일정류와 수직, 수평방향으로 연속광 레이저에 의한 시트(sheet) 상의 조명광을 비추고 정방형주의 상부에서 수직하방으로 고속도 카메라로 유동장을 촬영하였다. 이때 추적입자로는 평균직경이 $100 \mu\text{m}$ 이고, 비중이 1.02인 구형의 PVC(Poly Vinyl Chloride)를 사용했다. PIV실험은 가시화 결과가 가장 명확한 $Re=1.0 \times 10^4$ ($U=0.18 \text{ m/s}$)을 중심으로 행하였다. 한 개의 실험변수에 대한 연속촬영시간은 16.37초이며, 1/125초 간격으로 2048 프레임의 화상을 얻어, 1/62.5초 간격으로 연속한 2 프레임의 화상으로부터 각각 1024장의 와도장, 속도분포 및 속도벡터장을 추적했다. 또한 후술하는 평균 유동장은 각각 1024장의 유동장을 시간 평균한 것이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 양, 항력 특성

Figure 5에 수직 분할판을 가진 정방형주의 간격비 G/B 에 따른 평균양력계수 $\overline{C_L}$ 의 변화를 나타낸다. 그림에서 (a)는 분할판이 없는 원형의 정방형주이고, (b)는 정방형주 윗면의 앞쪽 모서리에, (c)는 정방형주 윗면의 뒷쪽 모서리에 수직 분할판을 붙인 경우이다.

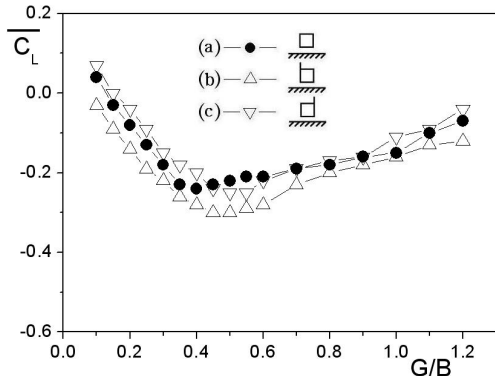


Figure 5: Average lift coefficients of square prism having vertical splitter plate with G/B

평균양력계수는 수직 분할판의 유무 또는 부착위치와 관계없이 간격비가 증가함에 따라 음의방향(벽면방향)으로 증가했다가 감소하는 변곡점을 가진다. 그리고 그 변곡점은 모델 (a)의 경우 G/B=0.4, 모델 (b) 및 (c)는 G/B=0.5 부근에 존재하고 있으나, 각 간격비에 있어 평균양력계수의 값은 세 모델에서 거의 같은 값을 보이고 있다.

Figure 6에 수직 분할판을 가진 정방형주의 간격비 G/B에 따른 평균항력계수 $\overline{C_D}$ 의 변화를 나타낸다. 여기서 항력감소율 R_D 는 같은 간격비에서 원형의 정방형주 모델 (a)의 평균항력계수 값과 정방형주 아랫면의 뒷쪽 모서리에 수평 분할판을 부착한 모델 (c)의 평균항력계수 값의 차를 모델 (a)의 평균항력계수 값으로 나눈 백분율을 의미한다.

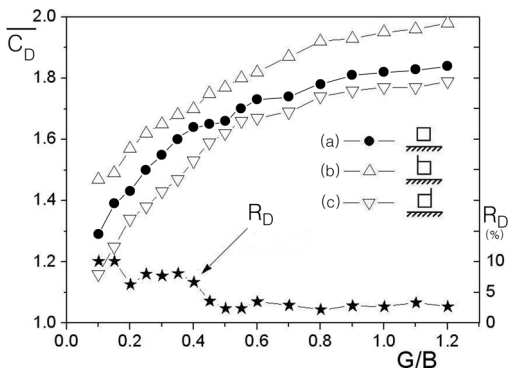


Figure 6: Average drag coefficients of square prism having vertical splitter plate with G/B

Figure 6을 거시적으로 살펴보면 수평 분할판의 유무 또는 부착위치와 관계없이 평균항력계수는 간격비가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 같은 간격비에서는 앞쪽에 수직 분할판을 설치한 모델 (b)의 값은 분할판이 없는 정방형주 모델 (a)에 비해 크게 나타나 있고, 뒷쪽에 수직 분할판을 설치한 모델(c)의 값은 반대로 모델 (a)에 비해 작게 나타나 있다. 한편 모델(c)의 항력감소율 R_D 를 살펴보면 간격비 $G/B \leq 0.4$ 에서는 8~10% 정도이나, $G/B > 0.4$ 에서는 2~3% 정도로 비교적 작다. 즉 수평 분할판은 간격비가 작은 작은 곳에서 항력감소 효과가 좋은 것을 의미한다. 이때 항력감소율을 간격비에 따라 평균하면 5.0%였다

3.2 유동장 특성

Figure 7에 일정류 중에 놓여 있는 정방형주 후류에서의 와도변화의 측정점 위치를 나타낸다.

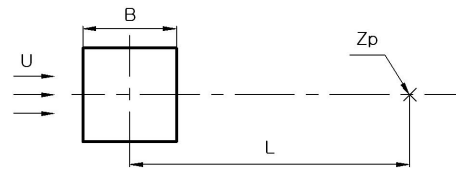


Figure 7: Pick up point of vorticity

와도변화를 측정하는 목적은 후류층의 칼만와의 대표 주파수를 측정하여 Strouhal 수를 계산하기 위해서이다. 와도의 변화는 측정점의 위치에 따라 다소 차이가 있으나 정방형주 중심에서 측정점 Z_p 까지의 거리 즉 Figure 7의 $L=3B$ 부근에서 비교적 명확하게 유동장 변화가 관측되어 이 근방에서 와도변화를 측정해 보았다.

Figure 8에 $L=2.5B, 3.0B$ 및 $3.5B$ 에서 와도의 시간 변화를 나타낸다. 그림에서 와도 측정점 3곳에서 모두 와도가 시간에 따라 +, -방향으로 진동하고 있어, 정방형주 후류층에 칼만 와가 발생하고 있음을 잘 나타내고 있다. 그러나 3곳을 비교 분석해보면 $L=3.0B$ 의 경우가 다른 2곳에 비해 주기성도 명확하고 노이즈(noise)도 적어 후술하는 간격비에 따른 와도 시간 변화 및 Strouhal 수($St = fB/U$, f :와도 대표주파수) 계산을 위한 대표주파수 측정은 이곳에서 행하였다.

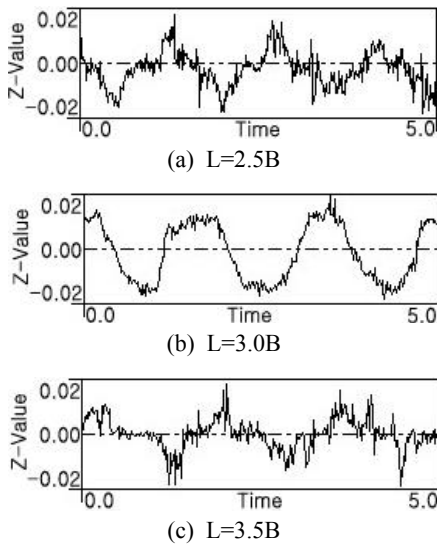


Figure 8: Time variation of vorticity with pick up point

Figure 9에 간격비 G/B 변화에 따른 정방형주 후류측 와도의 시간변화를 나타낸다.

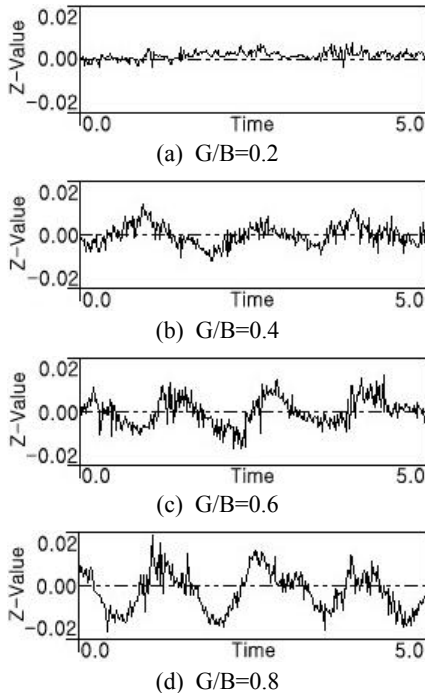


Figure 9: Time variation of vorticity of square prism with G/B

그림에서 간격비 $G/B=0.2$ 에서는 칼만와의 주기성이 불명확하나 $G/B=0.4$ 이후부터는 와도의 주기성이 명확하게 나타나고 있으며 이 후 간격비가 클수록 진폭도 증가함을 알 수 있다. 이는 간격비 $G/B=0.4$ 에서부터 정방형주의 아랫면과 벽면 사이의 흐름이 다소 원활하고, 이 간격비 이상에서는 간격비에 따라 유량이 증가하여 그 후류측에 칼만와가 크게 형성되고 있기 때문으로 판단된다.

Figure 10에 수직 분할판을 가진 정방형주의 간격비 G/B 에 따른 Strouhal 수(St) 변화를 나타낸다.

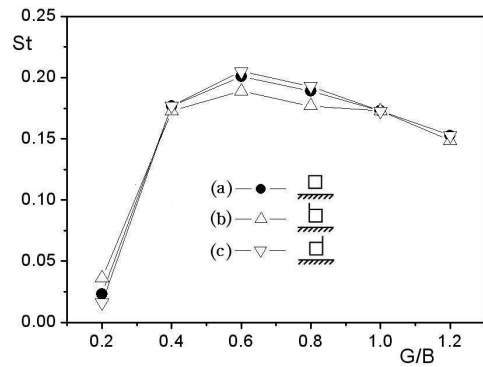
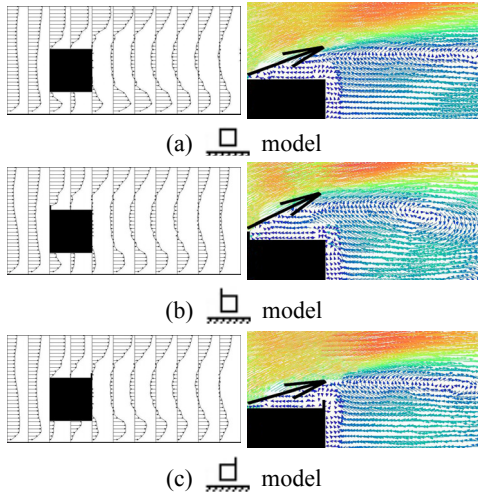


Figure 10: Strouhal number of square prism having vertical splitter plate with G/B

여기서 St 는 Figure 9에 나타낸 바와 같이 와도의 시간변화를 측정하여 대표주파수를 구하고, 대표주파수에 정방형주 한 면의 길이를 곱한 값을 그 때의 일정류 값으로 나눈 무차원 값이다. Figure 10을 거시적으로 보면 St 는 수평 분할판의 유무 또는 부착 위치와 관계없이 간격비가 증가함에 따라 증가하다가 간격비 $G/B=0.6$ 에서부터 차츰 감소하고 있다. 특히 간격비 $G/B=0.2\sim 0.4$ 사이에서 St 의 급격한 증가는 Figure 9에 나타낸 바와 같이 $G/B=0.2$ 에서는 정방형주의 아랫면과 벽면 사이에 유동이 거의 정체되어 있으나 $G/B=0.4$ 부터는 정방형주 후류측에 칼만와를 형성할 정도로 유동이 크게 증가했기 때문으로 판단된다. 또한 Figure 10에서 수직 분할판의 유, 무와 관계없이 $G/B=0.4\sim 0.6$ 에서 다소 큰 St 의 변곡점을 나타내고 있는데 이것은 Figure 5의 평균양력계수의 변곡점에서와 거의 같은 간격비를 나타내고 있어, 이 간격비에서 정방형주의 아랫면과 벽면 사이의 유량

이 급격히 증가하여, 압력이 급격히 내려가 음의 양력이 급격히 발생함과 동시에, 유량의 급격한 증가가 후류층 칼만와의 주파수 증가에 영향을 준 것으로 판단된다.

Figure 11에 간격비 $G/B=0.5$ 에서 수직 분할판의 위치에 따른 정방형주 주위의 (a)속도분포 및 (b) 확대한 속도벡터장을 나타낸다.



(i) Velocity profile (ii) Enlarged velocity vector

Figure 11: Velocity profiles and velocity vectors around square prism having vertical splitter plate ($G/B=0.5$)

먼저 Figure 11 (i)속도분포를 살펴보면 각 모델에 따라 후류 층 정체영역의 크기는 다소 차이가 있으나 각 모델 주위의 속도분포는 거의 동일한 모양을 나타내고 있다. 다만 각 모델에서 정방형주의 윗면의 속도분포에서 $\partial u/\partial y=0$ 인 박리전단층을 연결해보면 그 두께는 모델 (b)인 경우는 비교적 크게 보이나, 모델 (a) 및 모델 (c)는 거의 비슷한 크기이다. 그래서 Figure 11 (ii)에 이 부분을 정확하게 파악하기 위해 유동장을 보다 정밀하게 계산하여 각 모델의 상반부를 확대하여 나타낸다. 그림에서 화살표로 표시한 바와 같이 정방형주 윗면의 앞쪽 모서리에 수직 분할판을 설치한 모델 (b)의 경우가 박리영역이 가장 크고, 뒷쪽 모서리에 수직 분할판을 설치한

모델 (c)가 박리영역이 가장 작게 나타나 있다. 그리고 이 박리영역의 크기를 Figure 6의 평균항력계수와 비교해보면 박리영역이 클수록 항력계수가 크게 나타남을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 벽면근처에 놓인 정방형주 윗면의 앞 또는 뒷 모서리에 수직 분할판을 설치함으로써 어느 정도의 항력저감 효과를 얻을 수 있는지를 양·항력 측정 실험 및 PIV를 이용한 가시화 실험으로 파악한 것이다. 분할판의 높이는 정방형주 폭의 10% 정도로 했다. 이때 실험변수로서는 수직 분할판의 부착 위치 및 벽면과 정방형주 사이의 간격으로 했으며, 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 정방형주 중심에서 후류방향으로 $3.0B$ (B : 정방형주 한 변 길이) 떨어진 곳에서 와도의 변화가 가장 명확했다.
- (2) 수직 분할판의 위치 및 유류와 관계없이 간격비 $0.4\sim 0.6$ 에서 평균양력계수 및 Strouhal 수의 변곡점이 나타났다.
- (3) 정방형주 윗면의 뒷 모서리에 수직 분할판을 설치한 경우 항력이 감소하였으며 각 간격비 평균 5.0%의 항력 저감 효과를 얻었다.
- (4) 정방형주 윗면 박리영역의 크기는 앞쪽 모서리에 수직 분할판을 설치한 경우가 가장 컸고, 원형의 정방형주, 뒷쪽 모서리에 수직 분할판을 설치한 순서로 작았으며, 평균항력계수는 이 박리영역의 크기에 비례했다.

참고문헌

- [1] Igarashi, T., "Drag reduction of a square prism by flow control using a small rod", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 69-71, pp. 141-153, 1997.
- [2] Sakamoto, H., Tan, K., Takeuchi, N. and Haniu, H., "Suppression of fluid forces acting on a square prism by passive control", ASME Journal of Fluids Engineering 119, pp. 506-511, 1997.
- [3] L. Zhou, M. Cheng and K. C. Hung, "Suppression of fluid forces on a square cylinder

by flow control”, Journal of Fluids and Structures 21, pp.151-167, 2005.

- [4] 노기덕, 김광석, “모서리에 펜스를 가진 정방형 주의 유체력저감 특성” 한국마린엔지니어링학회지, 제30권, 3호, pp. 389-395, 2006.
- [5] T. Tamura and T. Miyagi, “The effect of Turbulence on aerodynamic forces on a square cylinder with various corner shapes”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 83, pp. 135-145, 1999.
- [6] 이보성, 김태윤, 이도형, 이동호, “벽면에 근접한 사각주 후면의 와류 유동장 수동제어”, 한국항공우주학회지, 제32권, 제6호, pp. 16-22, 2004.
- [7] 김태윤, 이보성, 이동호 and Y. Kohama, “지면 운동에 따른 정사각주 후류의 와류 유동장 수치해석 Part II. 수동제어 기법 연구”, 한국항공우주학회지, 제33권, 제6호, pp. 8-14, 2005.
- [8] 노기덕, 이상준, 이경운, 장재동, 정용길, “벽면 근처에 놓인 정방형주의 수평 분할판에 의한 유동제어”, 한국마린엔지니어링학회지, 제35권, 제5호, pp. 625-631, 2011.

저 자 소 개



노기덕(盧基德)

1977년 부산수산대학 기관학과 졸업, 1989년 코오베대학대학원 졸업(공학박사), 현재 경상대학교 기계시스템공학과 교수



조지룡(趙智龍)

1983년 부산대학교 기계공학과 졸업, 1992년 KAIST대학원 졸업(공학박사), 현재 인제대학교 기계자동차공학부 교수



오세경(吳世甯)

1972년 부경대학교 기관학과 졸업, 1989년 부경대학교대학원 졸업(공학박사), 현재 경상대학교 기계시스템 공학과 교수