

벽면에 근처에 놓인 정방형주의 수평 분할판에 의한 유동 제어

노기덕¹ · 이상준² · 이경윤² · 장재동² · 정용길[†]

(원고접수일 : 2011년 6월 3일, 원고수정일 : 2011년 6월 29일, 심사완료일 : 2011년 7월 4일)

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

Ki-Deok Ro¹ · Sang-Jun Lee² · Gyeong-Yun Lee² · Jae-Dong Jang² · Yong-Gil Jung[†]

요약 : 본 연구는 벽면근처에 놓인 정방형주의 모서리에 수평 분할판을 부착하여 유체력 제어 효과를 양항력 측정실험 및 PIV에 의한 가시화 실험으로 조사한 것이다. 분할판의 폭은 정방형주 폭의 10% 로 했다. 실험변수로서는 수평 분할판의 부착 위치 및 벽면과 사각주 사이의 간격으로 하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다. 간격비 0.4 이상에서 벽면과 정방형주 사이에 흐름이 명확했고, 후류측 칼만 와도 뚜렷이 나타났다. 원형의 정방형주는 간격비 0.4에서 수평 분할판을 가진 정방형주는 간격비 0.6에서 평균양력계수 및 Strouhal 수의 변곡점이 나타났다. 정방형주 아랫면의 뒷 모서리에 수평 분할판을 설치한 경우 항력이 감소하였으며 각 간격비 평균 4.5%의 항력 저감 효과를 얻었다. 이 경우 정방형주 윗면 박리영역의 크기는 분할판이 없는 정방형주에 비해 작았다.

주제어 : 항력감소, 유동제어, 벽면효과, 정방형주, 분할판

Abstract: The passive control of fluid force acting on a square prism near a plane wall was studied by attaching horizontal splitter plate on the corner of the prism. The width of the splitter plate was 10% of the square width. The experiments were performed by measuring of fluid force on the prism and by visualization of the flow field using PIV. The experimental parameters were the attaching position and the space ratios G/B between the prism and wall. The flow between the prism and wall was remarkable and Karman vortex in the wake of the prism was considerable in the space ratio over 0.4. The point of inflection of average lift coefficient and Strouhal number on the prism were represented at the space ratio $G/B=0.4$ for the prototype prism and $G/B=0.6$ for the prism having horizontal splitter plate. The drag of the prism was reduced average 4.5% with the space ratios by attaching the horizontal splitter plate at the rear and lower 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 without the splitter plate.

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

1. 서 론

벽면 근처에 놓인 사각주 주위의 흐름은 벽면의 영향을 받아 벽면과 사각주 사이의 간격에 따라 다른 흐름 특성을 보이고 있어 많은 연구자들의 관심의 대상이 되고 있다. 벽면 근처에 놓인 사각주로 대표되는 유체역학 문제로서는 강풍에 노출

된 빌딩, 교량, 철도차량 및 컨테이너 트럭과 같은 대형 구조물에서부터 냉각팬 앞에 놓인 반도체 주위의 흐름까지 수없이 많다. 특히 사각주 후면의 와류진동은 대형 구조물의 동적안정성에 심각한 영향을 미치므로 동적안정성 향상과 항력감소를 위해 사각주 주위의 유동장을 제어하는 연구가 활

[†] 교신저자(경상대학교 에너지기계공학과 · 해양산업연구소, E-mail:ygjung@gnu.ac.kr, Tel: 055-772-9112)

¹ 경상대학교 기계시스템공학과 · 해양산업연구소

² 경상대학교 기계시스템공학과

발히 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 방법과 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]은 수치해석을 통하여 고정 지면에 근접해 있는 사각주 하부의 앞, 뒤 모서리에 적절한 높이의 수직, 수평의 펜스를 설치함으로써 양·항력계수를 감소시킬 수 있음을 보였고, [7]은 고정 지면 근처의 사각주 후류에서 와류 배출 억제 효과가 있는 전술한 수직 및 수평펜스가 이동지면에서도 같은 효과가 나타나는지를 수치해석을 통하여 검토하였다.

본 연구는 벽면근처에 놓인 정방형주 아랫면의 앞 또는 뒤 모서리에 수평 분할판을 설치함으로써 어느 정도의 항력저감 효과를 얻을 수 있는지를 양·항력측정 실험 및 PIV를 이용한 가시화 실험으로 파악한 것이다. 이때 실험변수로서는 수평 분할판의 부착 위치 및 벽면과 정방형주 사이의 간격으로 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험모델

실험모델을 Figure 1에 나타낸다.

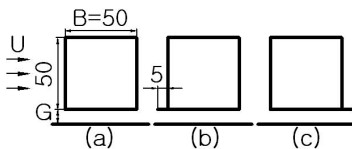


Figure 1: Models of square prism having splitter plate

일정류 U중에 한 변의 길이 B=50mm인 정방형주가 벽면으로부터 G만큼 떨어진 곳에 놓여 있다. 그리고 수평 분할판의 길이는 정방형주 한 변 길이의 10%인 5mm로 했다. 이때 항력은 일정류와 같은 방향으로 작용하는 유체력 성분을, 양력은 일정류와 수직 상방향으로 작용하는 유체력 성분을

의미한다. 그림에서 모델 (a)는 분할판이 없는 경우이며, (b)는 아랫면 앞쪽 모서리에 수평 분할판을, (c)는 아랫면 뒤쪽 모서리에 수평 분할판을 부착한 경우이다.

본 연구는 일정류가 얻어지는 회류수조 내에 상술한 Figure 1(a), (b), (c) 모델에 대해 양·항력측정 실험을 행하여 간격비 G/B 변화에 따른 양·항력 증감 특성을 파악하고, PIV를 이용한 가시화 이용한 유동장의 가시화 실험을 행하여 유체력이 저감되는 원인을 조사한 것이다.

2.2 양·항력 측정실험

Figure 2에 양·항력 측정실험을 위해 제작한 실험장치의 개략도를 나타낸다.

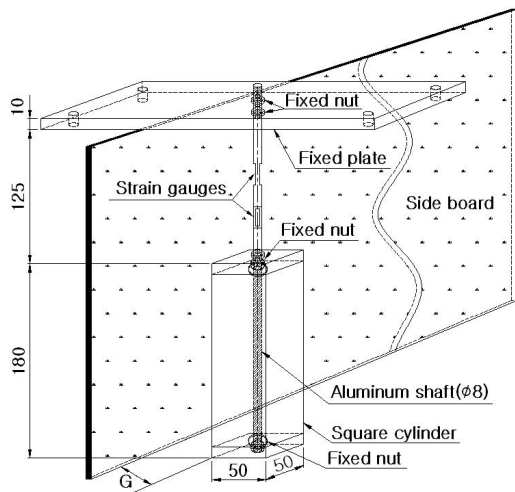


Figure 2: Schematic structure of experimental device (unit : mm)

실험 장치는 크게 정방형주, 측정 축, 고정판 및 측판으로 나누어 제작했다. 정방형주, 고정판 및 측판은 사용한 회류수조의 크기에 맞추어 투명아크릴 판으로 제작했다. 정방형주는 크기는 50×50×180mm이며, 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 알루미늄

의 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) 스트레인게이지를 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 한변의 길이를 대표길이로 잡아 환산한 레이놀즈 수 $Re=2.0 \times 10^4$ 이다. 실험은 레이놀즈 수를 고정시키고, 간격비 G/B 를 $G/B=0.1 \sim 1.2$ 범위 내에서 일정간격으로 증가시켜가면서 양, 항력을 측정했다. 구체적으로 정방형주와 정지벽면과의 거리 5~30mm까지는 2.5mm 간격으로, 30~60mm까지는 5mm 간격으로 유체력을 측정했다.

2.3 PIV를 이용한 가시화 실험

PIV 실험에 사용된 벽면 근처에 놓인 정방형주 구조를 Figure 3에 나타낸다.

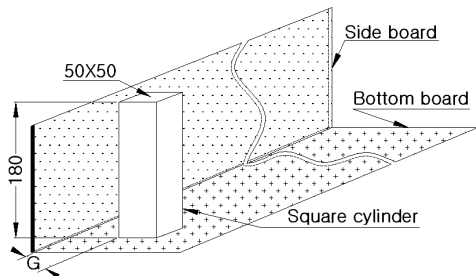


Figure 3: Structure of square prism near a plane wall(unit : mm)

기본이 되는 정방형주는 그 크기가 50×50×180mm이며, 레이저 빛이 잘 투과할 수 있도록 두께 2mm의 투명아크릴 판으로 제작했다. 정방형주를 고정시키기 위한 밑판의 크기는 750×150×2mm로 투명아크릴로 만들었으며 흐름에 영향을 주지

않도록 그림에서와 같이 가장자리를 그라인더로 갈아 경사를 주었다. 또한 벽면에 상당하는 측판은 그 크기가 750×180×4mm로 역시 레이저 빛이 잘 투과할 수 있도록 투명 아크릴로 제작하였다. 측판은 잘 휘지 않도록 두께가 4mm인 다소 두꺼운 아크릴 판을 사용하였으며 그 상단에 고정정치를 부착하였다. 실험 시 추적 입자가 잘 보이도록 정방형주 윗면 및 밑판은 검정색 도료로 칠했다. 한편 분할판의 부착위치는 Fig. 1의 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.

PIV를 이용한 유동장 가시화 실험장치의 개략도를 Figure 4에 나타낸다.

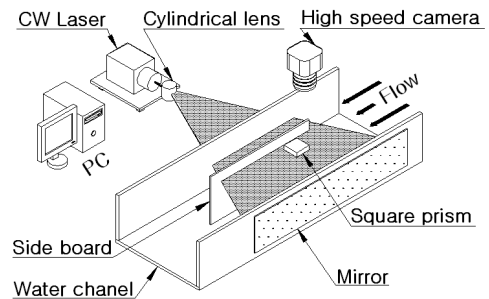


Figure 4: Schematic structure of experimental device

실험은 앞서 Figure 1에 나타낸 수평 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 고속 카메라로 유동장을 촬영하였다. 이때 추적입자로는 평균직경이 100 μm 이고, 비중이 1.02인 구형의 PVC(Poly Vinyl Chloride)를 사용했다. 본 실험에서 일정류 U의 범위는 $U=0.13 \sim 0.24\text{m/s}$ 이며, 정방형주 한 변의 길이로 계산한 레이놀즈 수 Re의 범위는 $Re=7.0 \times 10^3 \sim 1.3 \times 10^4$ 이다. 그러나 이 레이놀즈 수

범위에서는 각각의 실험변수의 대해 거의 같은 유동특성을 보였으므로, PIV실험은 가시화 결과가 가장 명확한 $Re=1.0 \times 10^4$ ($U=0.18m/s$)을 중심으로 행하였다. 한 개의 실험변수에 대한 연속촬영시간은 16.37초이며, 1/125초 간격으로 2048프레임의 화상을 얻어, 1/62.5초 간격으로 연속한 2프레임의 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 수평 분할판을 가진 정방형주의 간격비 G/B 에 따른 평균양력계수 $\overline{C_L}$ 의 변화를 나타낸다.

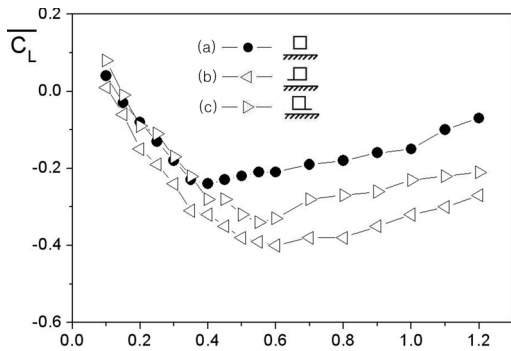


Figure 5: Average lift coefficients of square prism having horizontal splitter plate with G/B

그림에서 (a)는 분할판이 없는 원형의 정방형주이고, (b)는 정방형주 아랫면의 앞쪽 모서리에, (c)는 정방형주 아랫면의 뒷쪽 모서리에 수평 분할판을 붙인 경우이다. 평균양력계수는 수평 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 $G/B=0.6$ 부근에 존재하고 있다. 또한 평균양력계수의 절대치는 수평 분할판이 있는 경우가 없는 경우보다 크며, 하류측보다 상류측에 분할판을 설치하는 것이 더 효과적으로 양력을 발생시키고 있음을 보여주

고 있다.

Figure 6에 수평 분할판을 가진 정방형주의 간격비 G/B 에 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 6을 거시적으로 살펴보면 수평 분할판의 유무 또는 부착위치와 관계없이 평균항력계수는 간격비가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 같은 간격비에서는 앞면에 수평 분할판을 설치한 모델 (b)의 값은 분할판이 없는 정방형주 모델 (a)에 비해 크게 나타나 있고, 뒷면에 수평 분할판을 설치한 모델(c)의 값은 반대로 모델 (a)에 비해 작게 나타나 있다. 한편 모델(c)의 항력감소율 R_D 는 간격비 G/B 에 따라 다소 차이는 있으나 대략 2.0~8.0% 정도이며, 간격비 평균 4.6%의 항력감소율을 보였다.

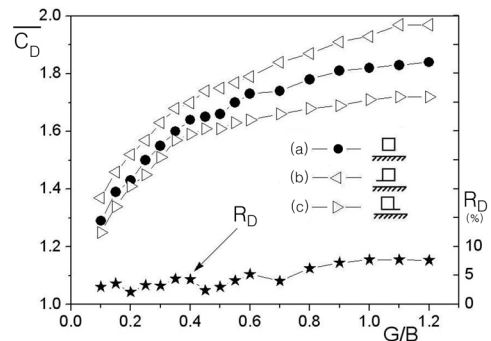
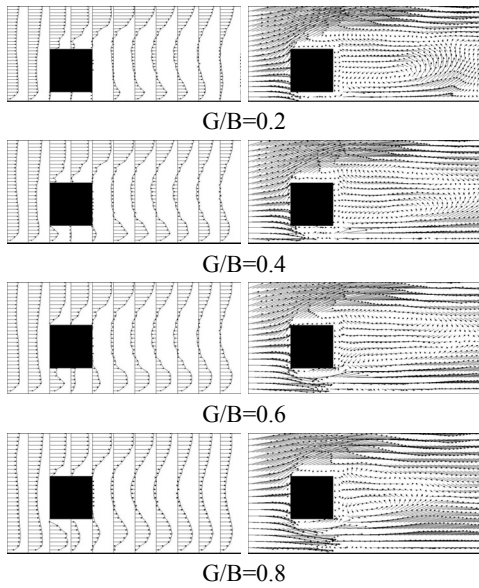


Figure 6: Average drag coefficients of square prism having horizontal splitter plate with G/B

3.2 유동장 특성

Figure 7에 간격비 G/B 변화에 따른 정방형주 주위의 (a)속도분포 및 (b)속도벡터장을 나타낸다. 속도분포에서 먼저 정방형주의 아랫면과 벽면 사이의 유속분포를 살펴보면 간격비 $G/B=0.2$ 의 경우는 유속이 거의 나타나지 않고 있으나 $G/B=0.4$ 이후부터는 간격비가 증가할수록 유속이 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한 정방형주 윗면 속도경계

층을 살펴보면 $G/B=0.2, 0.4$ 경우는 윗면 중앙 근방에서 박리점이 관찰되나 $G/B=0.6, 0.8$ 경우는 윗면 앞 모서리 부근에서 박리점이 존재함을 알 수 있다. 즉 간격비 증가에 따른 박리점의 상류측 이동이 **Figure 7**의 모델(a)에 나타난 간격비에 따른 항력계수 증가의 원인으로 판단된다. 또한 정방형주 후류측 속도분포 및 속도벡터장을 살펴보면 후류측 정체영역이 정방형주 중심의 일정류 방향에 비대칭적이며 위쪽으로 경사되어 있다. 특히 간격비가 작을수록 비대칭성이 크게 나타나 있는데 이는 정방형주의 아래면과 벽면의 수로저항으로 인하여 정방형주의 상류측 유동이 정방형주 상방향으로 쏠렸기 때문으로 판단된다.



(a) Velocity profiles (b) Velocity vectors

Figure 7: Velocity profiles and velocity vectors around square prism with G/B

Figure 8에 간격비 G/B 변화에 따른 정방형주 후류측 와도의 시간변화를 나타낸다. 그림에서 와도는 정방형주 중심에서 하류방향으로 $3.0B$ 떨어진 곳에서 측정했다. **Figure 8**에서 간격비 $G/B=0.2$ 에서는 칼만와의 주기성이 불명확하나 $G/B=0.4$ 이후부터는 와도의 주기성이 명확하게 나타나고 있

으며 이 후 간격비가 클수록 진폭도 증가함을 알 수 있다. 이는 **Figure 7(a)** 속도분포에서 알 수 있듯이 $G/B=0.4$ 에서 정방형주의 아래면과 벽면 사이에 속도분포가 뚜렷이 형성되며, 그 간격비 이상에서는 간격비에 따라 유속이 증가하여 그 후류측에 칼만와가 크게 형성되고 있기 때문으로 판단된다.

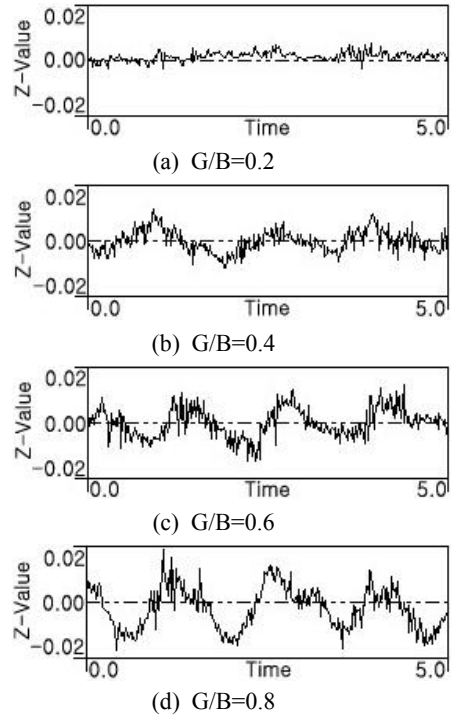


Figure 8: Time variation of vorticity of square prism with G/B

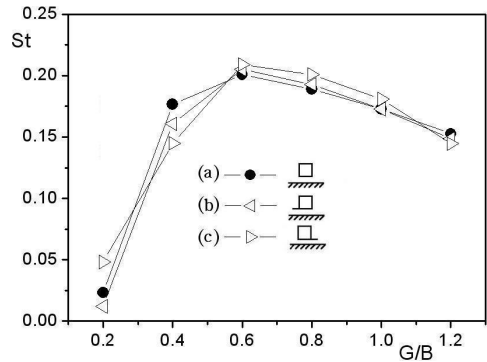
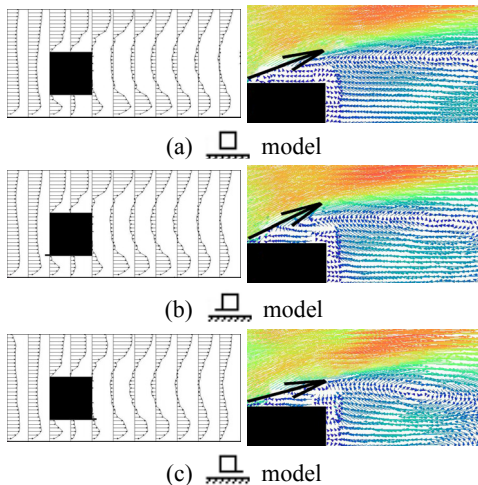


Figure 9: Strouhal number of square prism having horizontal splitter plate with G/B

Figure 9에 수평 분할판을 가진 정방형주의 간격비 G/B 에 따른 Strouhal 수 St 변화를 나타낸다.

여기서 Strouhal 수 St 는 Figure 8에 나타낸 바와 같이 와도의 시간변화를 계측하여 대표주파수를 구하고, 대표주파수에 정방형주 한 면의 길이를 곱한 값을 그 때의 일정류 값으로 나눈 무차원 값이다. Figure 9를 거시적으로 보면 Strouhal 수 St 는 수평 분할판의 유무 또는 부착위치와 관계없이 간격비가 증가함에 따라 증가하다가 간격비 $G/B=0.6$ 에서부터 차츰 감소하고 있다. 특히 간격비 $G/B=0.2\sim 0.4$ 사이에서 Strouhal 수 St 의 급격한 증가는 Figure 7, 8에 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 9에서 분할판이 없는 정방형주 모델(a)의 경우 $G/B=0.4$ 에서, 수평 분할판이 있는 모델(b), (c)의 경우 $G/B=0.6$ 에서 다소 큰 Strouhal 수의 변곡점을 보이고 있는데 이것은 Figure 5의 평균양력계수의 변곡점에서와 같은 간격비를 나타내고 있어, 이 간격비에서 정방형주의 아랫면과 벽면 사이의 유속이 급격히 증가하여,



(a) Velocity profile (b) Enlarged velocity vector

Figure 10: Velocity profiles and velocity vectors around square prism having horizontal splitter plate ($G/B=0.5$)

압력이 급격히 내려가 음의 양력이 급격히 발생함과 동시에, 유속의 급격한 증가가 후류측 칼만와의 주파수 증가에 영향을 준 것으로 판단된다.

Figure 10에 간격비 $G/B=0.5$ 에서 수평 분할판의 위치에 따른 정방형주 주위의 (a) 속도분포 및 (b) 확대한 속도벡터장을 나타낸다. 먼저 Figure 10(a) 속도분포를 살펴보면 각 모델에 따라 후류측 정체영역의 크기는 다소 차이가 있으나 각 모델 주위의 속도분포는 거의 동일한 모양을 나타내고 있다. 유동장을 보다 정밀하게 계산하여 각 모델의 상반부를 확대한 속도벡터장 Figure 10(b)를 보면 화살표로 나타낸 바와 같이 정방형주 아랫면의 앞쪽 모서리에 분할판을 설치한 모델 (b)의 경우가 박리영역이 가장 크고, 정방형주 아랫면의 뒷쪽 모서리에 수평 분할판을 설치한 모델 (c)가 박리영역이 가장 작게 나타나 있다. 그리고 이 박리영역의 크기를 Figure 6에서 각 모델에서의 평균양력계수를 비교해보면 서로 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

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

(1) 간격비 0.4 이상에서 벽면과 정방형주 사이에 흐름이 명확했고, 후류측 칼만 와도 뚜렷이 나타났다.

(2) 원형의 정방형주는 간격비 0.4에서 수평 분할판을 가진 정방형주는 간격비 0.6에서 평균양력계수 및 Strouhal 수의 변곡점이 나타났다.

(3) 정방형주 아랫면의 뒷 모서리에 수평 분할판을 설치한 경우 항력이 감소하였으며 각 간격비 평균 4.5%의 항력 저감 효과를 얻었다.

(4) 정방형주 윗면 박리영역의 크기는 앞쪽 모서

리에 수평 분할판을 설치한 경우가 가장 컸고, 원형의 정방형주, 뒷쪽 모서리에 수평 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* vol. 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*, vol. 21, pp. 151-167, 2005.
- [4] 노기덕, 김광석, "모서리에 펜스를 가진 정방형주의 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* vol. 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, Y. Kohama, "지면 운동에 따른 정사각주 후류의 와류 유동장 수치 해석 Part II. 수동제어 기법 연구", *한국항공우주학회지*, 제33권, 제6호, pp. 8-14, 2005.

저 자 소 개



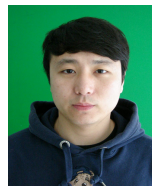
노기덕(盧基德)

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



이상준(李尙俊)

2011년 현재 경상대학교 해양과학대학 기계시스템공학과 학부생



이경운(李京潤)

2011년 현재 경상대학교 해양과학대학 기계시스템공학과 학부생



장재동(張在東)

2011년 현재 경상대학교 해양과학대학 기계시스템공학과 학부생



정용길(鄭容吉)

1978년 부산수산대학 기관학과 졸업, 1994년 부경대학교대학원 졸업(공학박사), 현재 경상대학교 에너지기계공학과 교수