

벽면근처에 놓인 정방형주의 펜스에 의한 항력저감

노기덕[†] · 김광석^{*}

Drag Reduction by Fence of a Square Prism near Plane Wall

Ki-deok Ro and Kwang-Seok Kim

Key Words: Passive Control(수동제어), Square Cylinder(정방형주), Ground Effect(지면효과), Stationary Ground(고정지면), Drag Reduction(항력감소), Separated Share Layer(박리 전단층)

Abstract

The suppression of fluid force acting on a square prism near plane wall was studied by attaching fences on the corners of the prism. The height of the fence was 10% of the square width and the range of Reynolds number considered was $Re = 2.0 \times 10^4$. The experimental parameters were the attaching position and numbers of fences, the space ratios G/B ($G/B=0.1 \sim 1.2$) between prism and plane wall. The average drag coefficients were increased and the average lift coefficients were decreased and increased with the space ratios toward plane wall. The drag of the prism was reduced average 7.6% with the space ratios by attaching the normal fence at the rear and upper corner and the horizontal normal fence at the rear and lower corner on the prism. In this case, the separated flow at the front and upper corner was reattached on the upper side of the prism and the vortex streets between the prism and plane wall were appeared more slowly than that of prism without fences.

1. 서론

일정류 중에 놓인 사각주 주위의 흐름은 정체, 박리, 재 부착, 2차 박리 현상과 후류에서의 주기적인 칼만 볼텍스로 특정 지어진다. 특히 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 노출된 빌딩, 교량, 철도차량 및 컨테이너 트럭과 같은 대형 구조물에서부터 냉각팬 앞에 놓인 반도체 주위의 흐름까지 수없이 많다. 특히 사각주 후면

의 와류진동은 대형 구조물의 동적안정성에 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 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 이 등^[6]은 수치 해석을 통하여 고정 지면에 근접해 있는 사각주 하부의 앞, 뒤 모서리에 적절한 높이의 수직, 수평의 펜스를 설치함으로써 양·항력계수를 감소시킬 수 있음을 보였고, 김 등^[7]은 고정 지면 근처의 사각주 후류에서 와류 배출 억제 효과가 있는 전술한 수직 및 수평펜스가 이동지면에서도 같은 효과가 나타내는지를 수치해석을 통하여 확인하였다.

본 연구는 벽면근처에 놓인 정방형주에 대해

[†] 노기덕, 경상대학교

E-mail : rokid@gaechuk.gsnu.ac.kr

TEL : (055)640-3123 FAX : (055)640-3128

^{*} 김광석, 경상대학교 대학원 기계시스템공학과

모서리에 여러 종류의 펜스를 설치함으로써 어느 정도의 항력저감 효과를 얻을 수 있는지를 수조 기포법에 의한 가시화 실험과 양·항력측정 실험으로 파악한 것이다. 이때 실험변수로서는 펜스의 수, 부착 위치 및 방향, 벽면과 정방형주 사이의 간격으로 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험모델

실험모델을 Fig. 1에 나타낸다. 일정류 U중에 한 변의 길이가 B인 정방형주가 벽면으로부터 G만큼 떨어진 곳에 놓여 있다. 이때 항력 D는 일정류와 같은 방향으로 작용하는 유체력 성분을, 양력 L은 일정류와 수직 상방향으로 작용하는 유체력 성분을 의미한다.

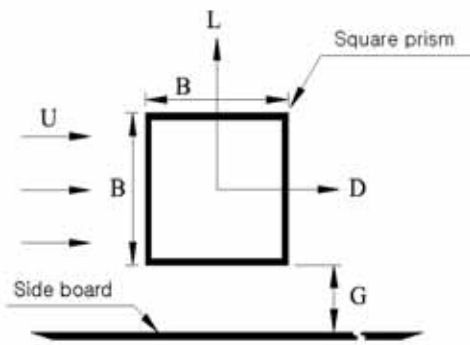


Fig. 1 Experimental model

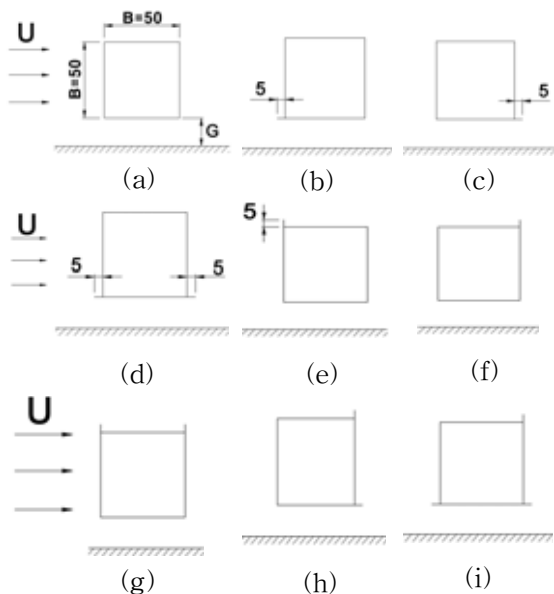


Fig. 2 Models of a square prism having various fences near a plane wall (unit : mm)

본 실험은 정방형주에 다양한 종류의 펜스를 부착하여 유체력 저감을 시도한 것이며, Fig. 2에 실험에 사용한 다양한 종류의 펜스가 부착된 정방형주의 모델들을 나타낸다. 기본이 되는 정방형주는 그 단면이 50×50mm이고, 펜스의 높이는 5mm이다. 그림에서 모델 (a)는 펜스가 없는 경우이며, (b)는 아랫면 앞쪽에, (c)는 아랫면 뒤쪽, (d)는 아랫면 앞, 뒤쪽, (e)는 윗면 앞쪽 (f)는 윗면 뒤쪽, (g)는 윗면 앞, 뒤쪽모서리에 면과 수평 또는 수직으로 펜스를 설치한 경우이다. (h) 및 (i)는 윗면과 아랫면에 수직 및 수평펜스를 부착한 경우이다. 본 연구는 일정류가 얻어지는 회류수조 내에 상술한 다양한 종류의 펜스가 부착된 정방형주를 장착하여 양·항력측정실험을 행하고, 양·항력이 최소가 되는 실험모델에 대해서는 수조기포법을 이용한 유동장의 가시화 실험을 행하여 유체력이 저감되는 원인을 파악한 것이다.

2.2 양·항력 측정실험

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

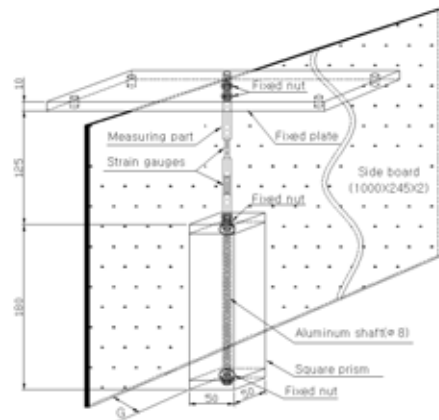


Fig. 3 Schematic structure of system of experimental device (unit : mm)

일정류가 얻어지는 회류수조 내에 Fig. 3의 실험장치를 장착하고 다양한 실험모델에 대해 간격비 (Fig. 1에서 G/B를 말한다)를 변화시켜가며 유체력 측정실험과 유동장 가시화 실험을 행한다. 실험 장치는 크게 정방형주, 측정 축, 고정판 및 측판으로 나누어 제작했다. 정방형주, 고정판 및 측판은 사용한 회류수조의 크기에 맞추어 제작했으며, 가시화 실험시 조명이 잘 투과할 수 있도록 투명아크릴 판을 재료로 했다. 정방형주는 크기는 50×50×180mm이며, 옆판은 3mm, 상, 하 덮개는 10mm 두께로 제작했다. 또한 상, 하 덮개의 중앙에 직경 12mm의 구멍을 뚫고, 측정 축을 장착하기 쉽도록 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) 스트레인이케지를 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 $U=0.36$ m/s이며, 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 수소기포법을 이용한 가시화 실험

수소기포법에 의한 정방형주 주위의 유동장 가시화 실험장치의 개략도를 Fig. 4에 나타낸다.

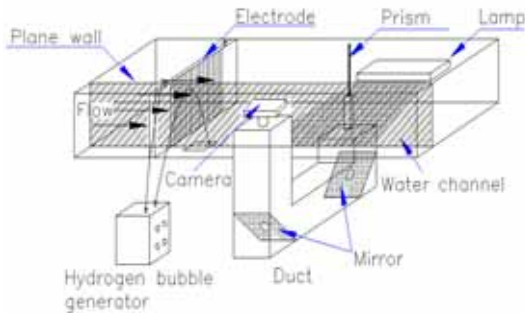


Fig. 4 Schematic structure of experimental apparatus for flow visualization

가시화 실험에 사용한 실험장치는 양·항력 측정시 사용한 실험장치 Fig. 3을 그대로 사용했다. 그러나 상부에 스트레인이케지 리드선 및 고정판 등 부가물이 많아 상부에서 아래로 정방형주 주위의 흐름을 사진 촬영하는 데는 한계가 있어 그림에서와 같이 회류수조 아래쪽으로 ㄷ자형 덕트를 설치하고, 그 내부에 45°각도로 거울을 2장 설치하여 거울에 반사된 영상을 사진 촬영하였다. 전극은 직경 0.2mm의 에나멜선을 5mm 간격으로 설치하여 만들었고 그 중간부분의 피복을 벗겨 전기가 통하도록 하였다. 그래서 수소기포발생장

치의 -극은 이 전극에, +극은 동판에 연결하였다. 가시화사진은 회류수조의 밖에서 일정류와 수평, 수직방향으로 할로겐램프(150W×2대)에 의한 슬릿상의 조명광을 비추고 앞서 설명한 바와 같이 거울에 반사된 정방형주 주위의 유맥선을 촬영했다. 이때 필름은 감도가 좋은 ILFORD HP5 Plus 400을 사용했으며, 가시화부의 유속은 수소기포가 가장 잘 보이는 $U=0.18$ m/s로 고정했다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 5에 아랫면에 다양한 수평펜스를 가진 정방형주의 간격비 G/B 의 변화에 따른 평균양력계수 $\overline{C_L}$ 을 나타낸다.

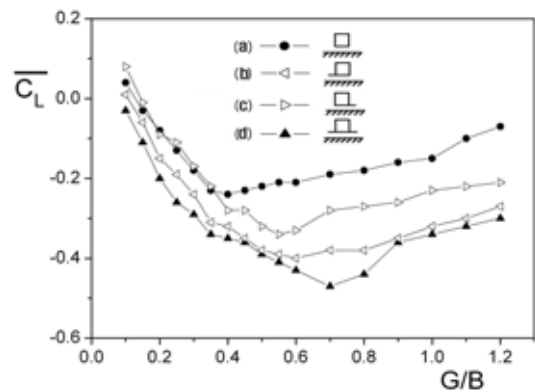


Fig. 5 Average lift coefficients of square prisms having horizontal fence with G/B

평균양력계수는 수평펜스의 유무 또는 부착위치와 관계없이 간격비가 증가함에 따라 음의방향(벽면방향)으로 증가했다가 감소하는 변곡점을 가진다. 그리고 모델 (a), (c), (b), (d) 순으로 변곡점에서의 평균양력계수의 절대치 및 간격비의 값이 증가하고 있음을 보이고 있다.

또한 수평펜스의 크기가 클수록 양력의 절대치가 크게 나타나며, 하류측보다 상류측에 수평펜스를 설치하는 것이 더 효과적으로 양력을 발생시키고 있음을 보여주고 있다.

Fig. 6에 아랫면에 다양한 수평펜스를 가진 정방형주의 간격비 G/B 의 변화에 따른 평균항력계수 $\overline{C_D}$ 를 나타낸다. 수평펜스의 유무 또는 부착위치와 관계없이 평균항력계수는 간격비가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 같은 간격비에서는 앞면에 수평펜스를 설치한 모델 (b)의 값이 펜스가 없는 정방형주(a)에 비해 크게 나타나 있고, (c)와 (d)의 경우는 작게 나타나 있다. 특히 (d)의 경우 아랫면에 수평펜스를 설치함으로써 항력을 감소시킬 수 있다는 이^[6] 등의 계산

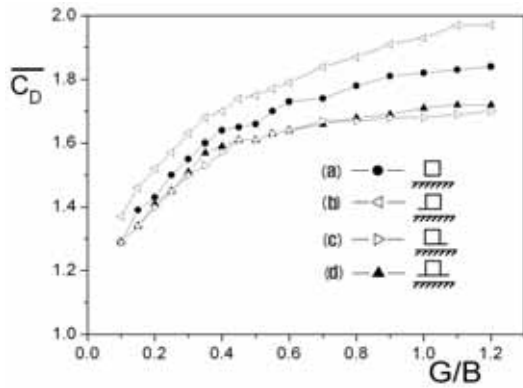


Fig. 6 Average drag coefficients of square prisms having horizontal fence with G/B

결과와 일치하고 있다.

Fig. 7에 윗면에 다양한 수직펜스를 가진 정방형주의 간격비 G/B 의 변화에 따른 평균양력계수 $\overline{C_L}$ 을 나타낸다.

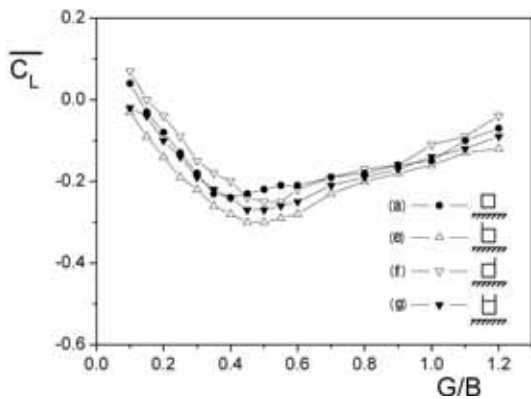


Fig. 7 Average lift coefficients of square prisms having vertical fence with G/B

평균양력계수는 Fig. 5의 수평펜스에서와 같이 수직펜스의 유무 또는 부착위치와 관계없이 간격비가 증가함에 따라 음의 방향으로 증가했다가 감소하는 경향을 나타내고 있다. 그리고 같은 간격비에서는 윗면 앞쪽에 하나의 수직펜스를 가진 모델 (e)의 경우가 그 절대 값이 가장 크게 나타나 있다. 이것은 앞쪽의 수직펜스가 정방형주 위쪽으로 통과해가는 흐름을 방해하여 벽면과 정방형주 사이의 흐름을 증가시키고 있기 때문으로 판단된다.

Fig. 8에 윗면에 다양한 수직펜스를 가진 정방형주의 간격비 G/B 의 변화에 따른 평균항력계수 $\overline{C_D}$ 를 나타낸다. 수직펜스의 유무 또는 부착위치와 관계없이 평균항력계수는 간격비가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내고 있다. 또한 같은 간격비에서 항력계수의 값은 펜스가 없는 정방형

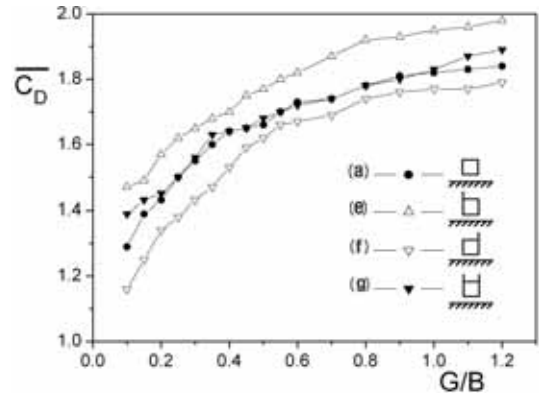


Fig. 8 Average drag coefficients of square prisms having vertical fence with G/B

주(a) 를 기준으로해서 비교해 보면 앞면에 수직펜스를 설치한 모델 (e)는 그 값이 크고, 뒷면에 수직펜스를 설치한 모델 (f)는 반대로 작으며, 양쪽에 수직펜스를 설치한 (g)는 거의 같게 나타남을 보여주고 있다.

Fig. 9에 모델 (a) 및 (f) 주위의 흐름패턴 비교를 나타낸다.

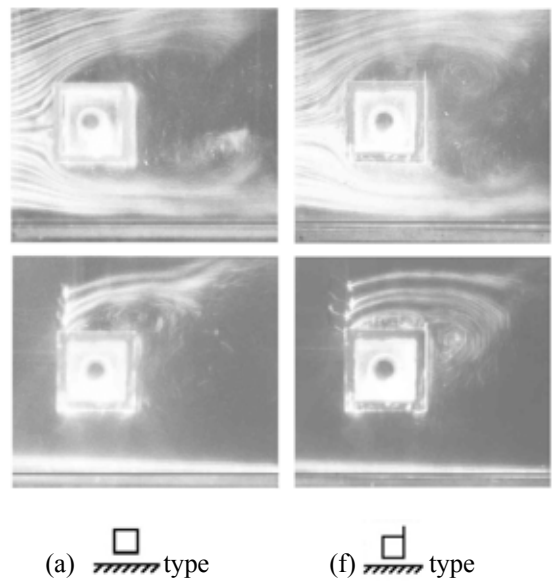


Fig. 9 Comparison between flow patterns near a plane wall ($G/B=0.8$, $Re=1.0 \times 10^4$)

그림에서 위쪽 사진은 정방형주 상류측에 수소기포발생 전극을 설치한 경우이며, 아래쪽 사진은 정방형주 상부의 흐름을 좀 더 상세하게 관찰하기 위해 정방형주 앞면 상부에 전극을 설치한 경우이다.

정방형주 윗면의 흐름을 기준해서 고찰해보면 펜스가 없는 모델 (a)의 경우 앞쪽 모서리에서 흐름이 크게 박리하여 뒤쪽 모서리는 완전히 이 박

리영역 내에 들어 있다. 그러나 뒷면에 펜스가 설치되어 있는 모델 (f)형의 경우 앞쪽 모서리에서 박리된 흐름이 위면 펜스부근에 재부착하는 것을 볼 수 있다. 모델 (f)형의 아래쪽 사진을 자세히 관찰하면 이러한 현상은 윗면의 흐름이 펜스에 의해 시계방향의 볼텍스를 형성하고, 이 볼텍스가 에너지가 부족한 경계층에 에너지를 공급하여 흐름을 재부착시키고, 박리영역을 감소시켜 항력을 감소시키는 것으로 판단된다.

Fig. 10에 Fig. 6과 Fig. 8에서 가장 항력저감효과가 큰 모델들을 조합한 수평, 수직펜스를 가진 정방형주의 간격비 G/B 의 변화에 따른 평균양력계수 $\overline{C_L}$ 을 나타낸다.

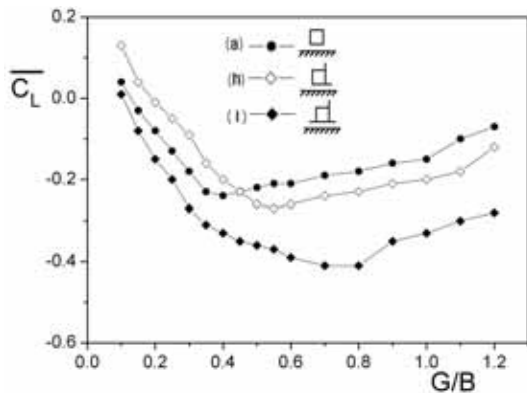


Fig. 10 Average lift coefficients of square prisms having horizontal and vertical fences with G/B

모델 (h) 및 (i) 역시 평균양력계수는 펜스가 없는 정방형주에서와 같이 간격비가 증가함에 따라 음의 방향으로 증가했다가 감소하는 변곡점을 가진다. 그리고 모델 (a), (h), (i) 순으로 변곡점에서의 평균양력계수의 절대치 및 간격비의 값이 증가하고 있으며, 같은 간격비에서는 모델 (i)가 벽면방향으로 가장 크게 양력을 발생시키고 있음을 보이고 있다.

Fig. 11에 Fig. 6과 Fig. 8에서 가장 항력저감효과가 큰 모델들을 조합한 수평, 수직펜스를 가진 정방형주의 간격비 G/B 의 변화에 따른 평균항력계수 $\overline{C_D}$ 를 나타낸다. 펜스의 유무 및 종류와 관계없이 평균항력계수는 간격비가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내고 있다. 또한 같은 간격비에서 평균항력계수의 값은 펜스가 없는 정방형주(a)를 기준으로해서 비교해 보면 앞, 뒤쪽에 수평펜스를 설치한 모델 (i)는 거의 같은 값을 가지나, 뒤쪽 모서리에만 수평펜스를 설치한 모델 (h)는 대폭적으로 그 값이 감소하고 있어 효율 좋게 항력을 감소시킬 수 있다.

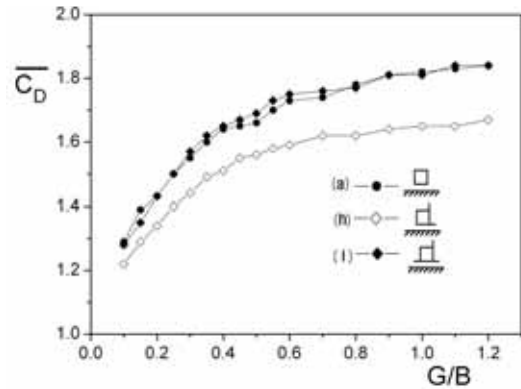


Fig. 11 Average drag coefficients of square prisms having horizontal and vertical fences with G/B

Fig. 12에 항력저감효과가 가장 큰 펜스를 부착한 정방형주의 간격비 G/B 의 변화에 따른 항력감소율 R_D 나타낸다.

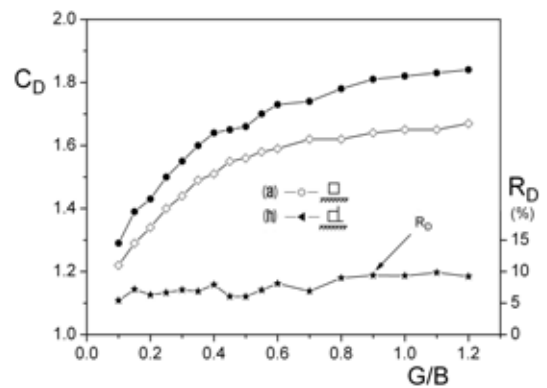


Fig. 12 Reduction rate of drag coefficient for square prism having the optimum fence

여기서 항력감소율 R_D 는 펜스의 설치에 의한 항력계수 감소량을 펜스를 설치하지 않은 정방형주의 항력계수로 나눈 백분율을 의미한다. 간격비에 따라 다소 차이가 있으나 정방형주 뒤쪽 상부 모서리에 수직 펜스, 하부모서리에 수평 펜스를 설치한 모델 (h)의 경우가 펜스를 설치하지 않는 정방형주 모델 (a)에 비해 항력감소율이 5~10%범위 내에 있으며, 각 간격비 평균 7.6%의 항력감소율을 얻었다.

Fig. 13에 모델 (a) 및 (h)의 양력계수 C_L 및 항력계수 C_D 의 시간변화를 나타낸다. 그림에서 횡축은 일정류 U 및 측정시간 t 를 정방형주의 한 변의 길이 B 로 나누어 무차원화한 값이다. 그림은 각 계수 모두 9.2초 동안 1,000개의 데이터를 취해서 선으로 연결한 것이다. 먼저 항력계수 C_D 의 시간변화를 살펴보면 펜스가 없는 모델

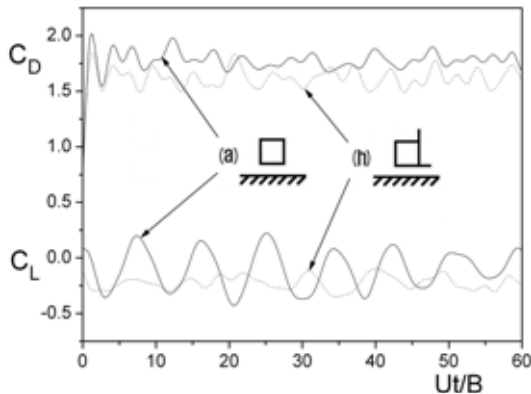


Fig. 13 Drag and Lift coefficients with time of square prisms near a plane wall($G/B=0.8$)

(a)에 비해 모델 (b)가 그 값은 작으나 진동 폭은 큰 차이를 보이지 않고 있다. 그러나 양력계수 C_L 을 보면 펜스가 없는 모델 (a)는 그 값이 -0.2를, 모델 (h)는 -0.25를 중심으로 진동하고 있으나, 그 진폭을 비교해보면 펜스가 없는 쪽이 있는 쪽보다 훨씬 크다. 즉 정방형주의 뒤쪽 상부 모서리에 수직 펜스, 하부모서리에 수평 펜스를 설치함으로써 항력을 저감시킬 수 있고 또한 동적 안정성도 크게 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구는 벽면근처에 놓인 정방형주에 대해 모서리에 여러 종류의 펜스를 설치함으로써 어느 정도의 유체력 제어효과를 얻을 수 있는지를 수 소기포법에 의한 가시화 실험과 양·항력측정 실험으로 파악한 것이다. 실험변수로서는 펜스의 수, 부착 위치 및 방향, 벽면과 정방형주 사이의 간격으로 하였으며, 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 간격비가 증가할수록 평균항력계수는 증가했으며, 평균양력계수는 벽면 방향으로 증가하였다가 감소하는 특성을 보였다.

(2) 정방형주의 뒤쪽 상부 모서리에 수직 펜스, 하부모서리에 수평 펜스를 설치한 경우가 항력감소율이 가장 크게 나타났으며, 각 간격비 평균 7.6%의 항력 저감 효과를 얻었다.

(3) 양·항력의 시간변화를 측정해 본 결과 정방형주의 뒤쪽 상부 모서리에 수직펜스, 하부모서리에 수평 펜스를 설치한 경우가 본래의 정방형주에 비해 양력의 진폭이 대폭 감소했다.

(4) 가시화 실험을 해본 결과 정방형주의 뒤쪽 상부 모서리에 수직 펜스를 설치함으로써 정방형주 앞쪽 상부모서리에서 박리한 흐름이 정방형주 상면에 재부착하여 항력이 감소됨을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2007년도 지방대학혁신역량강화사업에 의하여 지원되었음

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., 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, 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] 김광석, 안재민, 김효봉, 강명훈, 노기덕, "모서리에 펜스를 가진 정방형주의 항력저감 특성" 한국동력기계학회, 추계학술대회 논문집, pp. 84-89. 2005.
- [5] T. Tamura, 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, Y. Kohama, "지면 운동에 따른 정사각주 후류의 와류 유동장 수치해석 Part II. 수동제어 기법 연구", 한국항공우주학회지, 제33권, 제6호, pp. 8-14, 2005.