

모서리에 펜스를 가진 정방형주의 유체력저감 특성

노기덕† · 김광석*

(원고접수일 : 2005년 2월 7일, 심사완료일 : 2005년 4월 24일)

Fluid Force Reduction Characteristics of a Square Prism Having Fences on the Corner

Ki-Deok Ro† · Kwang-Seok Kim*

Abstract : The fluid force reduction of a square prism having fences on the corner was studied by the measuring the drag and lift acting on the prism and by the visualization experiment of the flow around the prism. The height of the fence was 10% of the square width and the range of Reynolds number considered was from $Re=0.9 \times 10^4$ to $Re=2.1 \times 10^4$. The drag of the prism was reduced about 6.8% and the amplitude of the lift was reduced by attaching two normal fences on the rear corners of the prism. In this case, the separated flow at the front corners was reattached on the upper and lower sides of the prism and the vortex streets at the wake region were appeared more slowly than that of the prototype prism.

Key words : Passive control(수동제어), Square prism(정방형주), Drag reduction(항력감소), Separated shear layer(박리 전단층)

1. 서 론

유체 중을 움직이는 물체는 어떠한 물체라도 유체력을 받는다. 그 중에서도 항력이 주된 관심사이며 유체 중에서 물체를 움직이게 하는 에너지와 직접 관련이 있다. 그래서 어떻게 하면 항력을 줄일 수 있을까 하는 것이 유체공학자들의 중요한 연구 테마의 하나로 되어왔다.

일반적으로 물체주위의 유동을 제어해서 항력을 감소시키는 방법으로 에너지가 부족한 경계층 영역

에 외부에너지의 공급유무에 따라 능동적 기법과 수동적 기법으로 나눌 수 있다^[1]. 전자는 경계층이 박리하기 직전에 경계층 내에 운동에너지를 보충하던지 아니면 에너지를 소실한 경계층을 흡입해서 하류에 새로운 경계층을 만드는 방법이다. 반면 후자는 물체의 표면을 유선형으로 하여 압력상승을 완만하게 하는 소극적인 방법과 물체표면에 부가물을 설치하여 경계층 부근의 흐름을 교란시켜 운동 에너지가 부족한 물체표면의 흐름이 경계층 외측의 흐름과 혼합해서 박리에 견디는 능력을 증가시키는

† 경상대학교 기계항공공학부·해양산업연구소, E-mail : rokid@gaechuk.gsnu.ac.kr, Tel : (055) 640-3123

** 경상대학교 대학원 기계시스템공학과

적극적인 방법이 있다. 이 방법은 외부에너지 공급 없이 단순히 물체의 기하학적 형상을 변경하거나 간단히 부가장치를 부착하면 되기 때문에 산업현장에 응용하기 쉽다.

정방형주의 항력저감에 관한 지금까지의 연구를 살펴보면 다음과 같다. Igarashi^[2]는 정방형주의 상류측에 작은 원주봉을 설치하여 정방형주에 작용하는 항력을 현저하게 감소시켰고, 정방형주와 제어봉 사이에 항력이 대폭적으로 감소하는 경계간격이 존재함을 보고했다.

Sakamoto 등^[3]은 정방형주의 상류측에 수직평판을 설치함으로써 정방형주에 작용하는 유체력을 억제시킬 수 있음을 실험으로 보였고, Zhou 등^[4]은 다양한 수직평판의 높이 및 정방형주와의 거리에 대해 수치계산을 행하여 정방형주에 작용하는 항력이 최소가 되는 제어판의 최적 높이가 정방형주와 제어판 사이의 거리에 따라 존재함을 보였다. 또한 Khalighi 등^[5]은 후류영역에 4개의 수평판을 설치하여 난류강도 및 하부유동의 급격한 편향을 억제하는 방법으로 항력을 감소시켰다. Tamura 등^[6]은 사각주 네모서리의 형태를 세 가지로 가공하여 유동장 특성실험을 행한 결과 각진 모서리를 가진 경우는 모서리에서 박리가 발생하였으나, 둥근 모서리인 경우는 일단 박리한 후에 재부착하는 유동특성을 확인하였고, 후자인 경우가 항력, 양력특성이 가장 우수함을 보였다.

본 연구는 모서리에 여러 종류의 펜스를 부착한 정방형주의 유체력 저감 효과를 수소 기포법에 의한 가시화 실험과 양·항력측정 실험으로 파악한 것이다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 회류수조

먼저 일정류를 얻기 위해 제작한 회류수조의 개략도를 Fig. 1에 나타낸다.

이 수조는 펌프를 이용해서 하류측의 저수탱크에서 상류측의 저수탱크로 물을 회류시켜, 수로내로 일정류를 흐르게 한 것으로 상류측과 하류측에

각각 저수탱크를 가지고 있다. 상류측 저수탱크는 가로, 세로 960mm, 높이는 620mm이고, 하류측 저수탱크는 가로, 세로 560mm, 높이 620mm이다. 그리고 수로는 폭 500mm, 깊이 300mm, 길이는 2200mm이며, 수로 내에 일정류를 얻기 위하여 상류측 저수탱크내에 다공판을 설치했고, 수로의 입구에는 정류격자 및 10메시 정도의 그물망을 50mm간격으로 6장 설치했다. 또한 본 회류수조는 양·항력 측정실험과 유동장의 가시화 실험을 함께 할 수 있도록 투명한 아크릴 판으로 제작했다. 수로내의 유속은 펌프 구동용 모터(AC 3.7kW)의 회전수를 디지털 인버터로 제어하여 변속했는데 이때 수로내의 최대 유속은 0.36m/s였다. 수로내의 유동장의 균일성을 확보하기 위해 수로내 바닥에서 180mm까지 물을 채워 각 실험유속($U=0.17\sim 0.36\text{m/s}$)에 대해 수로길이 방향 및 단면방향으로 각각 200mm 및 25mm간격으로 유속분포를 측정했는데 수조 하류측에서는 특히 느린 유속에서 깊이 방향으로 속도차가 심하였으나 수로 상류측 입구에서 1100mm까지는 어느 단면에서도 유속분포는 평균치에 대한 오차가 $\pm 2\%$ 이내로 나타났다. 참고로 실험시 정방형주를 그 중심이 수로입구에서 550mm인 지점에 설치했다.

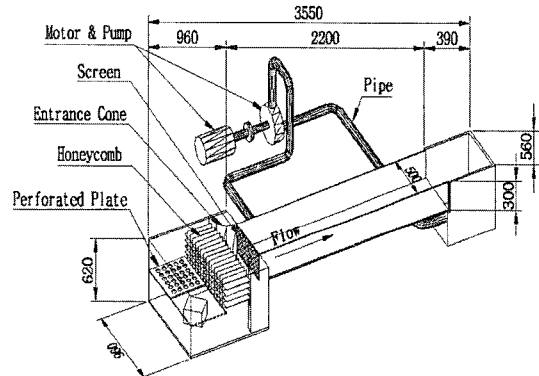


Fig. 1 A circulating water tank (unit : mm)

2.2 실험모델

실험모델을 Fig. 2에 나타낸다. 일정류 U 중에 한 변의 길이가 B 인 정방형주가 놓여 있다. 이때

항력 D는 일정류와 같은 방향으로 작용하는 유체력 성분을, 양력 L은 일정류와 수직 상방향으로 작용하는 유체력 성분을 의미한다.

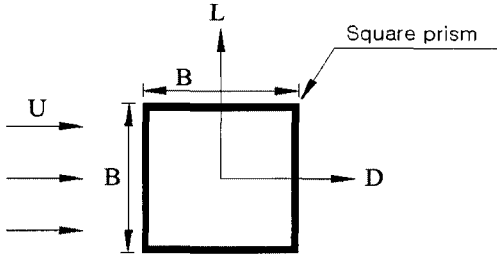


Fig. 2 Experimental model

연구는 정방형주의 모서리에 일정류에 대하여 수직 또는 수평 펜스를 설치하여 유체력 즉 항력과 양력의 저감을 시도한 것이며, 실험에 사용한 다양한 종류의 펜스가 부착된 정방형주의 모델들을 Fig. 3에 나타낸다.

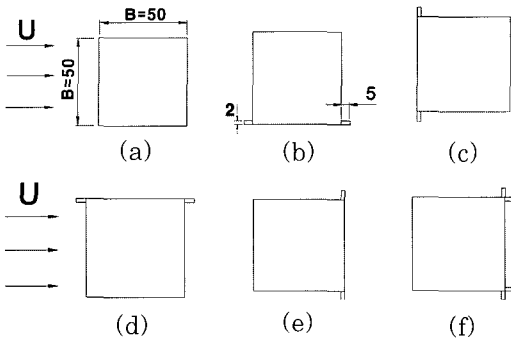


Fig. 3 Models of square prism having various fences (unit : mm)

기본이 되는 정방형주는 그 크기가 50×50×180 mm이고, 펜스는 높이가 정방형주 한 변의 길이의 10%에 상당하는 5mm이며 길이가 180mm로 두께 2mm인 투명아크릴 판으로 제작하여 아크릴 본드로 정방형주 모서리에 부착하였다. Fig. 3에 나타낸 바와 같이 모델 (a)는 펜스가 없는 경우이며, (b)는 아랫면에, (c)는 앞면에, (d)는 윗면에, (e)는 뒷면에 평행하여 정방형주 양쪽모서리에 펜스를 부착한 경우이고, (f)는 뒷면 상, 하부 모서리에 수

직, 수평펜스를 부착한 경우이다. 본 연구는 일정류가 얻어지는 회류수조 내에 상술한 다양한 종류의 펜스가 부착된 정방형주를 장착하여 양·항력측정 실험을 행하고, 양·항력이 최소가 되는 실험모델에 대해서는 수소기포법을 이용한 유동장의 가시화 실험을 행하여 유체력이 저감되는 원인을 조사한 것이다.

2.3 양·항력 측정실험

Fig. 4 및 Fig. 5는 양·항력 측정실험을 위해 제작한 실험장치의 개략도 및 사진을 나타낸다.

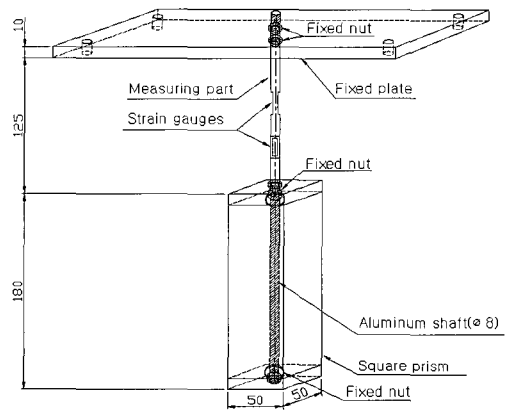


Fig. 4 Schematic diagram of experimental device (unit : mm)

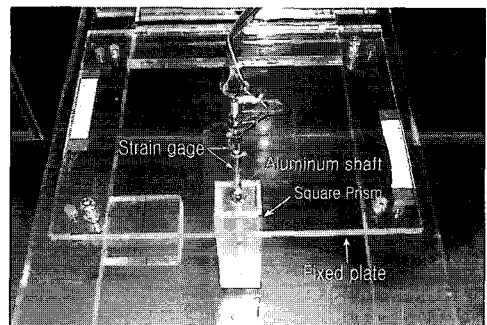


Fig. 5 Photograph of experimental device

측정장치는 크게 정방형주, 측정 축 및 고정판으로 나누어 제작했다. 정방형주와 고정판은 사용된 회류수조의 크기에 맞추어 가시화 실험시 조명광이 잘 투과할 수 있도록 투명아크릴 판으로 제작했다.

정방형주의 옆판은 3mm, 상, 하 덮개는 10mm 두께로 제작했으며, 상, 하 덮개의 중앙에 직경 12mm의 구멍을 뚫고, 측정 축을 장착하기 쉽도록 고정용 너트를 부착하였다. 측정 축은 직경 8mm, 길이 345mm의 알루미늄 봉을 가공하여 제작했다. 측 봉의 하부 190mm는 나사를 가공하여 정방형주에 너트로 고정시켰다. 봉의 상부는 일정류 중에서 양항력을 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 양항력을 측정했다. 즉 Fig. 6에 나타난 바와 같이 각 채널(계 2채널)의 브릿지 회로에서 나온 출력파형은 스트레인앰프, AD변환기를 거친 다음 퍼스널 컴퓨터에서 미리 보정한 계수에 의해 양항력 값으로 출력된다.

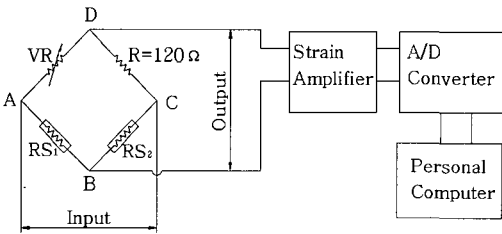


Fig. 6 Schematic diagram for the measurement of fluid force

2.4 수소기포법을 이용한 가시화 실험

수소기포법에 의한 정방형주 주위의 유동장 가시화 실험장치의 개략도를 Fig. 7에 나타낸다.

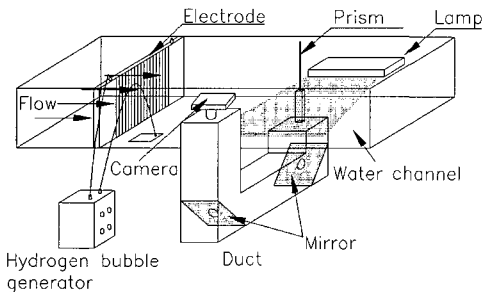


Fig. 7 Schematic structure of experimental apparatus for flow visualization

가시화 실험에 사용한 정방형주는 양·항력 측정실험에 사용한 Fig. 4의 것을 그대로 사용했다. 그러나 상부에 스트레인게이지 리이드 선 및 고정판 등 부가물이 많아 위에서 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 흐르도록 하였다. 그래서 수소기포발생장치의 -극은 이 전극에, +극은 동판에 연결하였다. 가시화사진은 회류수조의 밖에서 일정류와 수평, 수직방향으로 할로겐 램프(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 $U=0.18\text{m/s}$ 로 고정했다.

3. 실험결과 및 고찰

먼저 정방형주의 유체역학적 특성을 나타내는 계수, 즉 양력계수 C_L , 항력계수 C_D 는 다음과 같이 정의한다.

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho U^2 S} \quad (1)$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U^2 S} \quad (2)$$

여기서 양력 L 및 항력 D 는 각각 정방형주에 작용하는 일정류 U 와 수직방향 및 같은 방향의 힘의 성분이다. 또한 ρ 는 유체의 밀도, S 는 수면 아래에 잠겨있는 정방형주의 투영면적을 나타내며 펜스의 면적은 고려하지 않았다.

다음은 결과로 Fig. 8에 Fig. 3(a), (c), (e)모델의 양력계수 C_L 및 항력계수 C_D 의 시간변화를 나타낸다.

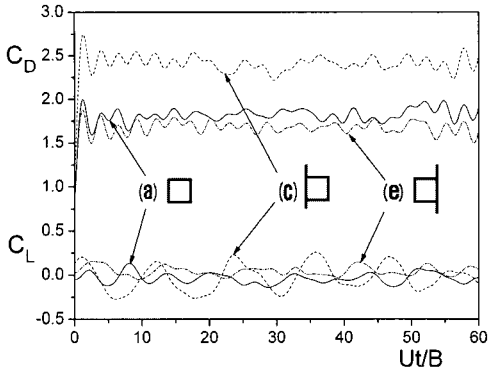


Fig. 8 Drag and lift coefficients with time of prisms in uniform flow ($Re=2.0 \times 10^4$)

그림에서 황축은 일정류 U 및 측정시간 t 를 정방형주의 한변의 길이 B 로 나누어 무차원화한 값이다. 그림은 각 계수 모두 9.2초 동안 1,000개의 데이터를 취해서 선으로 연결한 것이다. 먼저 양력 계수 C_L 을 보면 그 값이 0.0을 중심으로 크게 진동하고 있는데 이것은 정방형주 주위에서 발생한 칼만와의 영향으로 판단된다. 그러나 그 주기성이 일정하지 않은 것은 본 실험에 사용한 정방형주는 유한길이 이므로 사각주 끝단에서 발생한 와류가 칼만와에 간섭을 주었기 때문으로 사료된다. 양력 계수의 진폭을 살펴보면 (c)가 (a) 및 (e)에 비해 크게 나타나 있는데 이것은 (c)의 상하 펜스 끝단에서 생성된 박리전단층이 (a) 및 (e)의 정방형주 전방 모서리에서 생성된 박리전단층보다 큰 것을 의미한다. 다음으로 항력계수 C_D 의 시간변화를 살펴보면 그 값이 주기적으로 진동하고 있는데, 이 역시 사각주 주위의 칼만와 및 사각주 끝단에서 발생한 와류의 영향으로 판단된다. C_D 값의 크기를 비교해보면 (c)가 (a) 및 (e)에 비해 대폭적으로 크게 나타나 있고, 그 다음으로 (a), (e) 순으로 작게 나타나 있다.

Fig. 9에 다양한 펜스를 가진 정방형주의 레이놀즈 수 Re 의 변화에 따른 평균양력계수 $\overline{C_L}$ 을 나타낸다.

평균 양력계수는 레이놀즈 수에 관계없이 (a), (c), (e) 및 (f) 모델은 그 값이 거의 0.0을 나타내는데 비해, (b)와 (d) 모델은 각각 -0.2 및 +0.2 근방을 나타내며, 0.0을 기준으로 대칭으로 나타나

있다. 이러한 현상을 (b) 및 (d) 모델의 펜스 부착 위치와 관련해서 고찰해보면 펜스가 부착되어 있는 방향으로 양력이 발생함을 알 수 있다.

Fig. 10에 다양한 펜스를 가진 정방형주의 레이놀즈 수 Re 의 변화에 따른 평균항력계수 $\overline{C_D}$ 를 나타낸다.

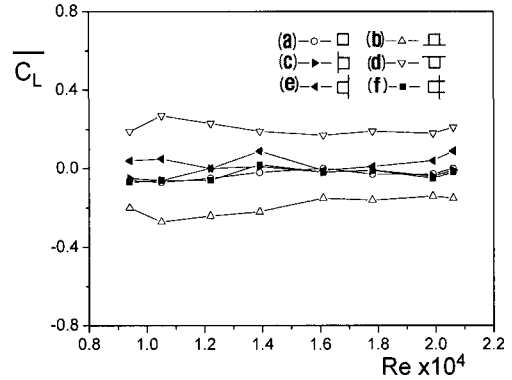


Fig. 9 Average lift coefficients of various prisms

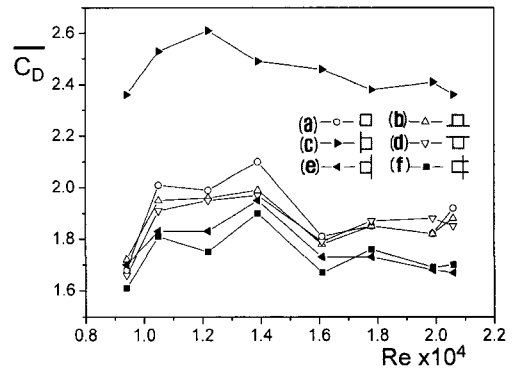


Fig. 10 Average drag coefficients of various prisms

그림에서 평균항력계수의 크기를 크게 세 가지로 분류해보면 레이놀즈 수와 관계없이 펜스가 정방형주의 위, 아랫면에 부착되어 있는 모델 (b)와 (d)는 펜스가 없는 정방형주 모델 (a)와 그 값이 비슷하게 나타나 있으나, 펜스가 앞면에 부착된 (c)모델은 대폭 크게 나타나 있고, 반면에 펜스가 뒷면에 부착되어 있는 (e)와 (f)는 작게 나타나 있다.

Fig. 11에 항력저감효과가 가장 큰 펜스를 부착한 정방형주의 항력감소율 R_D 의 레이놀즈 수에 따른 변화를 나타낸다.

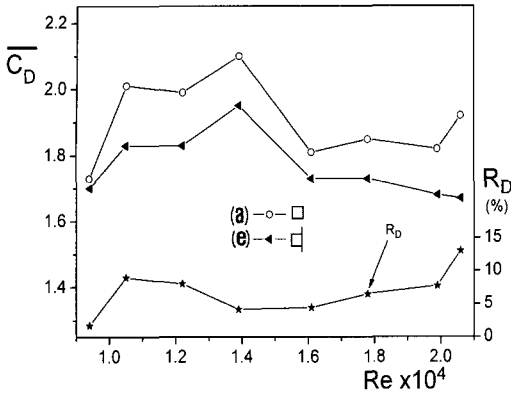


Fig. 11 Reduction rate of drag coefficient for the prisms having the optimum fence

여기서 항력감소율 R_D 는 펜스의 설치에 의한 항력계수 감소량을 펜스를 설치하지 않은 정방형주의 항력계수로 나눈 백분율을 의미한다. 레이놀즈 수에 따라 다소 차이가 있으나 정방형주 뒷면에 펜스를 설치한 모델 (e)의 경우가 펜스를 설치하지 않은 정방형주 (a)에 비해 항력감소율이 5~10%범위 내에 있으며, 각 레이놀즈 수 평균 항력감소율은 6.8%이었다. 상식적으로 생각하면 정방형주 뒷면에 일정류에 대해 수직방향으로 펜스를 설치하면 후류의 박리영역이 커져 항력이 증가할 것으로 판단되나, 그림에서와 같이 항력이 감소되었고, 펜스는 그 설치가 용이하므로 실용화가 크게 기대된다. 다음은 가시화실험의 결과로 Fig. 12에 모델 (a) 및 (e) 주위의 흐름패턴 비교를 나타낸다.

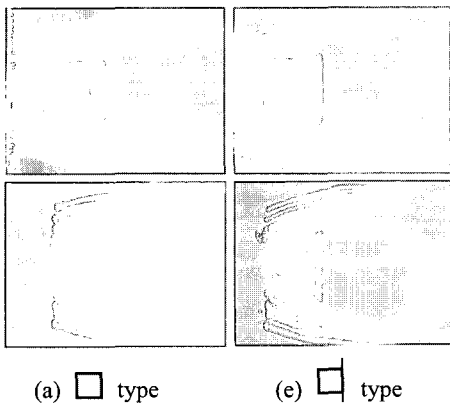


Fig. 12 Comparison between flow patterns in uniform flow ($Re=1.0 \times 10^4$)

그림에서 위쪽 사진은 정방형주 상류측에 수소 기포발생 전극을 설치한 경우이며, 아래쪽 사진은 정방형주 위, 아랫면의 흐름을 좀 더 상세하게 관찰하기위해 정방형주 앞면에 전극을 설치한 경우이다. 정방형주 뒷면의 흐름을 기준해서 고찰해보면 펜스가 없는 모델 (a)의 경우 앞쪽 모서리에서 흐름이 박리하여 뒤쪽 모서리는 완전히 박리영역 내에 들어 있다. 그러나 뒷면에 펜스가 설치되어 있는 모델 (e)의 경우 앞쪽 모서리에서 박리된 흐름이 윗면 펜스부근에 재부착하는 것을 볼 수 있다. 사진에는 명확하지 않으나 이러한 현상은 윗면의 흐름이 펜스에 의해 시계방향의 볼텍스를 형성하고, 이 볼텍스가 에너지가 부족한 경계층에 에너지를 공급하여 흐름을 재부착시켜 항력을 감소시키는 것으로 판단된다. 또한 Fig. 12 모델 (a)와 (e)의 후류를 거시적으로 비교해보면 모델 (e) 쪽이 모델 (a)에 비해 와열이 다소 완만하게 나타나 있다.

4. 결 론

본 연구는 모서리에 여러 종류의 펜스를 설치한 정방형주의 유체력저감 효과를 수소 기포법에 의한 가시화 실험과 양·항력측정 실험으로 파악한 것이다. 펜스의 높이는 정방형주 한 변 길이의 10%로 했으며, 실험은 레이놀즈 수 $Re=0.9 \times 10^4 \sim 2.1 \times 10^4$ 범위 내에서 행하였다. 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 정방형주의 뒤쪽 상·하부 모서리에 수직 펜스를 부착한 경우 항력 저감 효과가 가장 크게 나타났으며, 본래의 정방형주에 비해 각 레이놀즈 수 평균 6.8%의 항력 저감 효과를 얻었다.
- (2) 정방형주의 위, 아랫면에 수평 펜스를 부착한 경우 부착한 방향으로 양력이 발생하였다.
- (3) 양·항력의 시간변화를 측정해 본 결과 정방형주의 뒤쪽 위, 아래 모서리에 수직 펜스를 부착한 경우가 본래의 정방형주에 비해 양·항력의 진폭도 감소했다.
- (4) 가시화 실험을 해본 결과 정방형주의 뒤쪽 위, 아래 모서리에 수직 펜스를 부착한 경우 정방

형주 앞쪽 모서리에서 박리한 흐름이 위, 아랫면에 재부착하였으며, 후류에서의 와열도 본래의 정방형주에 비해 완만하게 나타났다.

후 기

이 논문은 2006년도 지방대학혁신역량강화사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

[1] Gad-el-Hak, M., "Modern developments in flow control," *Appl. Mech. Rev.*, 49, No. 7, pp. 365, 1996.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 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.

[5] Bahram Khalighi, S. Zang and C. Korokilas, S. R Balkanyi, et al., "Experimental and Computational Study of Unsteady Wake Flow Behind a Bluff Body with a drag Reduction Device," SAE 2001-01-1042, 2001.

[6] 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.

저 자 소 개



노기덕 (盧基德)

1953년 6월생, 1977년 부산수산대학교 기관공학과 졸업(학사), 1986년 Kobe Univ. 대학원 기계공학과 졸업(석사), 1989년 Kobe Univ. 대학원 기계공학과 졸업(박사), 현재 경상대학교 기계항공공학부 교수.



김광석 (金光石)

1980년 11월생, 2006년 경상대학교 기계항공공학부 졸업(학사), 현재 경상대학교 대학원 기계시스템공학과 석사과정 재학중.