

PIV를 이용한 펜스를 가진 정방형주 주위의 유동장 가시화

노기덕* · 김광석** · 오세경†

(원고접수일 : 2007년 8월 13일, 심사완료일 : 2007년 10월 30일)

The Visualization of the Flowfield around Square Prism Having Fences Using the PIV

Ki-Deok Ro* · Kwang-Seok Kim** · Se-Kyung Oh†

Abstract : The characteristics of the flowfield of a square prism having fences on the corner was investigated by the PIV. Strouhal numbers, velocity vectors and velocity profiles around the square prism were observed at various positions of the fences, and Reynolds number of $Re=0.6 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^4$. As the results in case of the prism having fences the Strouhal numbers were all smaller than in case of the prototype prism. In case of the prism having vertical fences on the front corners the concentrated intensity of the vorticity was the strongest and the size of separated shear layer was the largest. While in case of the prism having vertical fences on the rear corners the concentrated intensity of the vorticity was the weakest and the size of separated shear layer was the smallest. Also in this case, the flow separated in front corner was reattached around the rear corner and made circulation.

Key words : Fluid mechanics(유체역학), Flow visualization(유동의 가시화), PIV(입자영상유속계), Unsteady flow(비정상 유동), Square prism(정방형주), Separated shear layer(박리 전단층)

1. 서 론

일반적으로 물체에 작용하는 유체력 중에서 유체가 흘러가는 방향으로 작용하는 힘을 항력, 흐름에 수직인 방향으로 작용하는 힘을 양력이라 한다. 물체표면의 유동을 제어하여 물체에 작용하는 항력, 양력 즉 유체력을 저감시키면 유체력에 의한 구조물 파괴의 방지는 물론, 비행기, 자동차, 선박 등은 추진효율이 증가하여 에너지 절감에도 효과가 크

다. 따라서 다양한 방법으로 물체주위의 유동장을 제어해서 유체력을 저감시키는 연구가 진행되어 왔다. 정방형주의 항력저감에 관한 지금까지의 연구를 살펴보면 다음과 같다. Igarashi⁽¹⁾는 정방형주의 상류측에 작은 원주봉을 설치하여 정방형주에 작용하는 항력을 현저하게 감소시켰고, Sakamoto 등⁽²⁾과 Zhou 등⁽³⁾은 상류측에 수직평판을 설치함으로써 정방형주에 작용하는 유체력을 억제시킬 수 있음을 실험과 수치해석으로 보였으며, Khalighi

† 교신저자(경상대학교 기계항공공학부·농생명과학연구원), E-mail : ohsek@gaechuk.gsnu.ac.kr, Tel : (055)640-3127

* 경상대학교 기계항공공학부·해양산업연구소

** 경상대학교 대학원 기계시스템공학과

등⁽⁴⁾은 후류영역에 4개의 수평판을 설치하여 정방형주의 항력을 감소시켰다. 그러나 이들이 제안한 연구는 정방형주와 별도로 상류측 또는 하류측에 작은 봉 또는 평판을 설치하는 방법으로 정방형주의 유체력을 저감시켰는데 별도의 물체를 설치하는 자체가 실용화를 위해서는 어려움이 있다. 이를 위해 Tamura 등⁽⁵⁾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. 최근 노등⁽⁶⁾은 모서리에 여러 종류의 펜스를 부착하는 방법으로 정방형주의 유체력 저감 효과를 시도했는데, 연구결과를 살펴보면 정방형주의 뒤쪽 상·하부 모서리에 수직 펜스를 부착한 경우 항력 저감 효과가 가장 크게 나타났으며, 본래의 정방형주에 비해 각 레이놀즈 수 평균 약 6.8%의 항력 저감 효과를 얻었다. 그러나 실험에서는 펜스에 의한 항력의 감소원인을 가지적으로 명확하게 제시하지 못했고, 그래서 본 연구에서는 유체력이 최대 및 최소가 되는 펜스의 위치에 목표를 집중시켜, PIV를 이용한 유동장 가시화 실험으로 펜스에 의한 정방형주의 유체력 감소원인을 명확하게 파악하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 정방형주의 모델 및 구조

먼저 실험에 사용한 다양한 종류의 펜스가 부착된 정방형주의 모델들을 Fig. 1에 나타낸다.

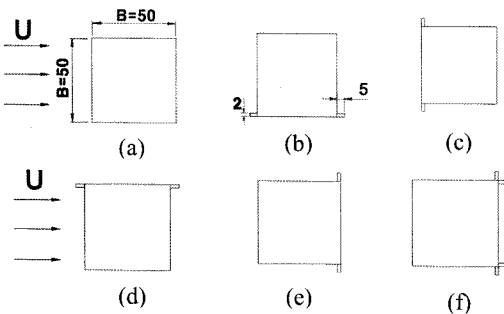


Fig. 1 Models of square prism having various fences (unit : mm)

다음으로 본 실험에 사용한 정방형주의 구조를 Fig. 2에 나타낸다.

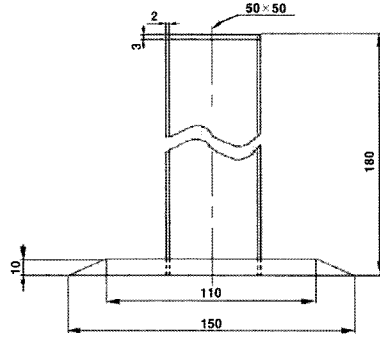


Fig. 2 Structure of square prism

기본이 되는 정방형주는 그 크기가 50×50×180mm이며, 두께 2mm의 투명아크릴 판으로 제작했다. 또한 정방형주를 고정시키기 위한 고정판은 직경 150mm, 두께 10mm의 목판으로 만들었으며 흐름에 영향을 주지 않도록 그림에서와 같이 가장자리를 그라인딩하여 경사를 주었다. 또한 고정판은 두께 2mm의 아크릴 밀판에 나사못으로 고정시켰으며, 실험 시 추적 입자가 잘 보이도록 정방형주의 모델과 고정판 및 밀판을 검정색 도료로 칠했다. 한편 펜스의 높이는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 정방형주 한 변의 길이의 10%에 상당하는 5mm이며, 길이는 180mm로 두께 2mm인 투명아크릴 판을 정밀 절단하여 만들어 아크릴 본드로 정방형주 모서리에 부착하였다.

2.2 PIV 계측

Fig. 3에 PIV 계측을 위한 실험장치의 개략도를 나타낸다. 실험은 위의 Fig. 1에 나타낸 다양한 펜스를 가진 정방형주를 Fig. 2에서와 같이 제작하여 일정류가 흐르는 회류수조⁽⁶⁾의 수로 내에 Fig. 3에서와 같이 장착하여, 유동장을 가시화 하였다. 구체적으로 각 실험모델을 수로 내에 설치한 후 회류수조 밖에서 일정류와 수직, 수평방향으로 연속광 레이저에 의한 시트(sheet)상의 조명광을 비추고 정방형주의 상부에서 수직하방으로 고속도 카메라로 유동장을 촬영하였다. 실험 시 회류수조

수로바닥에서 170mm까지 물을 채웠으며, 2차원 흐름을 가시화하기 위해 조명광 위치는 바닥에서 140mm 즉 수면 하 30mm인 곳으로 하였다. 이때 추적 입자로는 평균직경이 100 μ m이고, 비중이 1.02인 구형의 PVC(Poly Vinyl Chloride)를 사용했다.

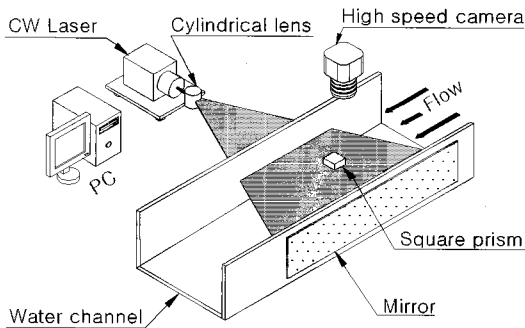


Fig. 3 Schematic structure of experimental device

고속카메라는 PHOTRON사의 FASTCAM 1280 PCI 모델을, 레이저는 JENOPTIK사의 JenlasD 2.8 모델을 사용했으며 본 실험에 사용한 PIV시스템의 주요규격은 Table 1과 같다.

Table 1 Main specification of PIV system

Item	Specification
Image board	Fast Cam-X panel link board drive
Light source	8W continuous wave laser
Sheet light	Cylindrical lens: $\varnothing 3.8 \times 11.4$ mm
Resolution	1280 \times 512pixel
Software	CACTUS 3.2
Error vector(%)	Average: about 0.1%

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 4에 펜스를 부착하지 않은 정방형주 후류 측에서의 와도 스펙트럼을 나타낸다.

이때 연속촬영시간은 16.37초이며, 고속도 카메라의 시간 간격을 1/62.5초로 설정하여 1024프레임의 화상을 얻었다. 와도변화의 측정위치는 정방형주의 중심에서 후류방향으로 3.0B 떨어진 곳으로 했으며, 그 이유는 이곳에서 칼만와의 주기성이 가장 명확하게 감지되었기 때문이다. 그림에 나타난 바와 같이 와도변화를 미루어 보아 칼만 와는 주기적으로 발생하고 있음을 알 수 있고, 이때 그 대표주파수(predominant frequency)는 0.49이었다.

Fig. 5는 Fig. 4의 "I" 부분을 확대한 그림으로 그림에서 A~E 점은 와도변화의 1주기를 4등분한 점을 나타낸다.

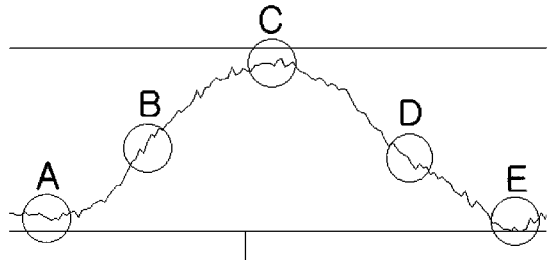


Fig. 5 The enlargement of part "I" in the Fig. 4

Fig. 6은 Fig. 5의 A ~ E 점에서의 순간 속도벡터 및 속도분포를 나타낸다. Fig. 6(a)에서 후류측의 속도벡터를 관찰해보면 A와 E는 같은 방향, B와 D는 서로 반대방향의 속도벡터가 존재하

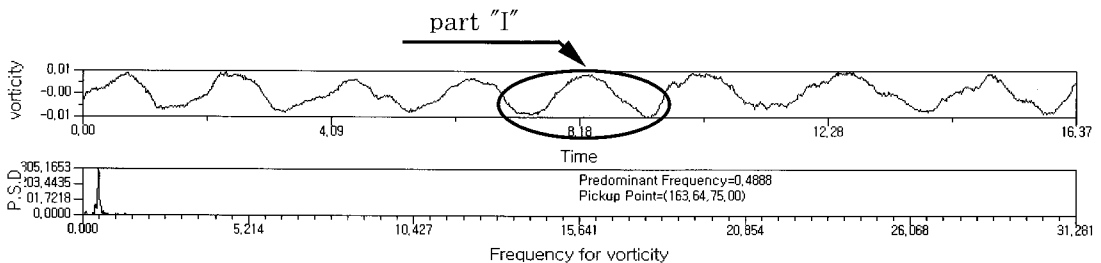
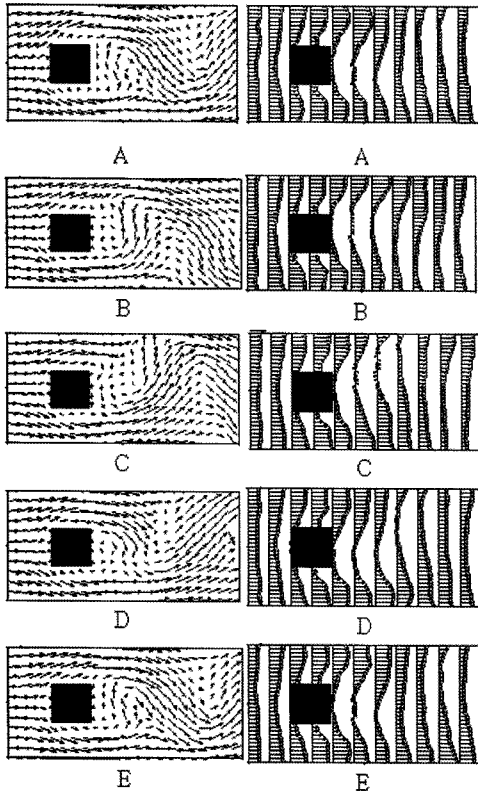


Fig. 4 Spectral analysis of vorticity for the wake of a square prism

여 후류패턴의 주기성을 잘 보여주고 있다. 또한 Fig. 6(b)의 속도분포를 살펴보면 정방형주 근방에서의 속도 경계층이 명확하게 구분되며, 후류측 사수영역도 비교적 잘 나타나 있다. 또한 속도분포 역시 A와 E는 같은 방향, B와 D는 반대방향으로 나타나 있어 그 주기성을 잘 보여주고 있다.



(a) Velocity vectors (b) Velocity profiles

Fig. 6 Flow patterns around a square prism for one cycle($Re=1.0 \times 10^4$, A~E on the figure correspond to the points A~E on Fig. 5)

Fig. 7에 다양한 펜스를 가진 정방형주의 레이놀즈 수 변화에 따른 Strouhal 수($f \times D/U$) 변화를 나타낸다.

이때 주파수 측정점은 Fig. 4에서와 마찬가지로 정방형주 중심에서 후류방향으로 3B 떨어진 곳이다. 그림에 나타낸바와 같이 각 정방형주의 Strouhal 수는 레이놀즈 수 변화에는 큰 영향을 받지 않고 있으나 펜스의 부착위치 따라서는 그 변

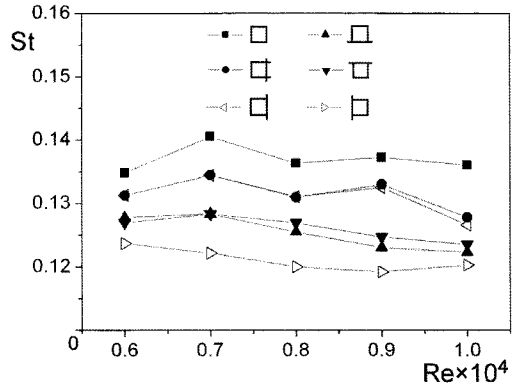


Fig. 7 Strouhal number with Reynolds number

화가 명확하며, 펜스를 부착하지 않은 정방형주가 그 값이 가장 크고, 앞면에 수직 펜스를 부착한 정방형주의 경우가 그 값이 가장 작게 나타나 있다. 이전의 연구^[6]에서 양력계수의 시간변화를 살펴보면 앞면에 수직 펜스를 부착한 정방형주의 경우가 펜스를 부착하지 않는 정방형주의 경우보다 양력의 주파수는 적으나 그 진폭이 매우 크게 나타나 있기 때문 Strouhal 수가 작다고 해서 동적 안전성이 좋다고는 할 수 없다. 또한 Fig. 7에서 펜스가 없는 정방형주의 경우 Strouhal 수가 0.14 정도로 Igarashi^[11]의 연구결과와 일치하고 있어 본 실험의 정확성을 잘 나타내고 있다.

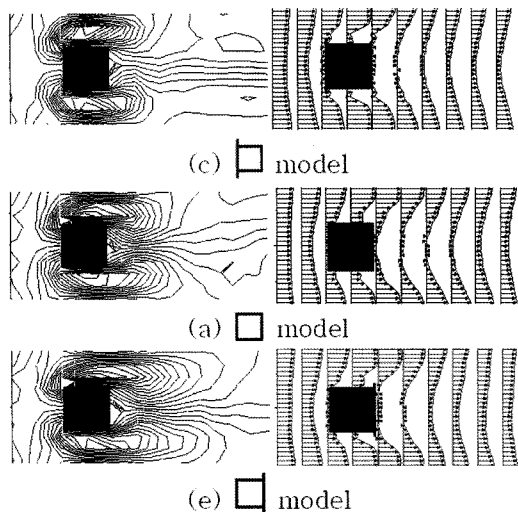


Fig. 8 Vorticity contours and velocity profiles around square prisms($Re=1.0 \times 10^4$)

Fig. 8 (c), (a), (e)에 평균항력계수 값⁽⁶⁾이 큰 순서대로 각 모델의 시간평균 등 와도선 및 속도분포를 나타낸다.

먼저 등 와도선을 살펴보면 Fig. 8 (c), (a), (e) 모델 모두 정방향주 주위에 와도선이 밀집되어 있으나 항력계수가 가장 큰 (c) 모델의 경우가 그 밀집도가 가장 크며, (a), (e) 모델로 갈수록 후류 방향의 와도선 간격이 크게 나타나 있다. 즉 항력 계수가 클수록 등 와도선 분포가 물체 주위에 집중되어 있음을 알 수 있다. 다음으로 속도분포를 살펴보면 항력계수가 가장 큰 (c) 모델이 가장 작은 (e) 모델에 비해 전체적으로 사수영역의 범위가 넓으며, 물체에서 후류방향으로 가장 멀리 떨어진 속도 분포선에서 알 수 있듯이 일정류로의 유속회복도 늦어지고 있다.

Fig. 9 (c), (a), (e)에 평균항력계수 값⁽⁶⁾이 큰 순서대로 각 모델의 상반부를 클로즈업(close up) 촬영한 시간평균 속도벡터선 및 흐름패턴 스케치를 나타낸다.

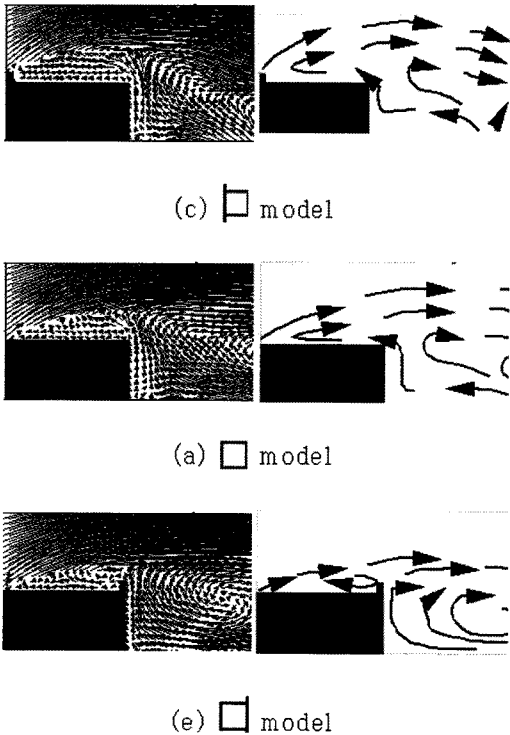


Fig. 9 Velocity vectors and sketches of the flow pattern around square prisms (Re=1.0×10⁴)

각 모델의 뒤쪽 상부 모서리에서 수직방향으로 박리전단층(separated shear layer)까지의 높이를 살펴보면 항력계수가 가장 큰 (c) 모델의 경우가 가장 높으며, (a), (e) 모델로 갈수록 그 높이가 낮게, 그리고 물체 상부의 박리전단층 넓이도 작게 나타나 있다. 특히 (e) 모델의 경우 흐름패턴의 스케치에 표시한 것처럼 앞 모서리에서 박리한 흐름은 뒤 모서리 부근에서 재부착하여 시계방향의 순환을 형성하고 있다.

4. 결 론

본 연구는 항력저감을 위해 모서리에 여러 종류의 펜스를 설치한 정방향주 모델 주위의 유동장을 PIV를 이용하여 가시화한 것이다. 펜스의 높이는 정방향주 한 변 길이의 10%로 했으며, 실험은 레이놀즈 수 Re=0.6×10⁴~1.0×10⁴ 범위 내에서 행하였다. 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 정방향주 후류측 Strouhal 수는 펜스의 부착위치에 따라 다르며, 펜스를 부착한 경우는 모두 원형의 정방향주에 비해 그 값이 작았다.
- (2) 항력계수가 가장 큰 정방향주 앞쪽 상·하부 모서리에 수직 펜스를 부착한 경우가 와도의 집중도가 가장 크게 나타났으며, 박리영역의 크기도 가장 컸다.
- (3) 항력계수가 가장 작은 정방향주 뒤쪽 상·하부 모서리에 수직 펜스를 부착한 경우가 와도의 집중도가 가장 약하게 나타났으며, 박리영역의 크기도 가장 작았다. 또한 이 경우 앞 모서리에서 박리한 흐름은 뒷모서리 부근에 재부착하여 순환을 형성했다.

참고문헌

[1] Igarashi, T., "Drag reduction of a square prism by flow control using a small rod," Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.69, No.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, Vol. 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, Vol. 21, pp.151-167, 2005.
- [4] 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.
- [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, Vol. 83, pp. 135-145, 1999.
- [6] 노기덕, 김광석, "모서리에 펜스를 가진 정방형 주의 유체력저감 특성" 한국마린엔지니어링학회지, 제30권, 3호, pp. 389-395, 2006.

저 자 소 개



노기덕 (盧基德)

1953년 6월생, 1977년 부산수산대학 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



오세경 (吳世鏡)

1948년 3월생, 1973년 부산수산대학 기관공학과 졸업(학사), 1988년 부경대학교 대학원 기관공학과 졸업(석사), 2000년 부경대학교 대학원 기관공학과 졸업(박사), 현재 경상대학교 기계항공공학부 교수