



정면에 정방형주를 가진 원주의 항력저감 특성실험

Experiments of Drag Reduction of a Circular Cylinder Having a Front Square Prism

노기덕*† · 김재동**

Kii-Deok Ro*† and Jae-Dong Kim**

(Received 10 April 2017, Revision received 28 April 2017, Accepted 01 May 2017)

Abstract: The Characteristics of the drag reduction of a circular cylinder having a small square prism at the upstream side was investigated by measuring of drag on the circular cylinder and by visualization of the flow fields using PIV. The experimental parameters were the width ratios($H/B=0.2\sim 0.6$) of square prisms to the circular cylinder's diameter and the gap ratios($G/B=0\sim 3$) between the circular cylinder and the square prism. The drag reduction rate of the circular cylinder was increased and then decreased with G/B in case of the same H/B . The drag reduction rate was increased with H/B in case of the same G/B . The maximum drag reduction rate was represented by 90.8% at $H/B=0.6$ and $G/B=1.0$. In case of a circular cylinder having a small square prism, the stagnation regions were represented in the upstream and downstream sides of the circular cylinder, the size of that region in the upstream side was increased with H/B but that in the down stream side was almost same.

Key Words : Drag Reduction, Separated Flow, Circular Cylinder, Flow Control, Square Prism

1. 서 론

물체에 작용하는 유체력 중 유체흐름 방향의 힘의 성분을 항력이라 한다. 물체주위의 흐름을 제어해서 항력을 감소시키면 빌딩, 다리 등 구조물은 유체력에 의한 파괴를 막을 수 있고, 선박, 자동차, 비행기 등 수송체는 연료비를 절감시킬 수 있다. 이러한 이유로 다양한 방법으로 유체를 제어하여 물체에 작용하는 항력을 저감시키고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 이때 둔한 물체(Bluff body)는 물체 전, 후방의 압력차에 의한

압력 항력이 크게 대두되며, 특히 원주로 대표되는 구조물은 공장의 굴뚝, 다리교각, 안테나, 케이블, 열교환기 등 수없이 많다.

일반적으로 물체 주위의 흐름을 제어하는 방법으로 에너지가 부족한 경계층 영역에 대한 외부 에너지의 공급유무에 따라 능동적 기법과 수동적 기법으로 나눌 수 있다.¹⁾

전자는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 경계층이 박리하기 직전에 경계층 내에 유체의 운동 에너지를 보충하든지 아니면 에너지를 소실한 경계층을 흡입해서 하류에 새로운 경계층을 만드는 방법이

*† 노기덕(교신저자) : 경상대학교 기계시스템공학과
 E-mail : rokid@gnu.ac.kr, Tel : 055-772-9103
 **김재동 : 경상대학교 해양산업연구소

*† Ki-Deok Ro(corresponding author) : Department of Mechanical System Engineering, Gyeongsang National University.
 E-mail : rokid@gnu.ac.kr, Tel : 055-772-9103
 **Jae-Dong Kim : Institute of Marine Engineering, Gyeongsang National University.

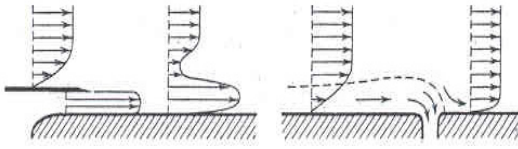


Fig. 1 Principle of active control

다. 반면 후자는 물체의 표면을 유선형으로 하여 압력상승을 완만하게 하는 소극적인 방법과 물체 표면에 부가물을 설치하여 경계층 부근의 흐름을 교란시켜 운동에너지가 부족한 물체표면의 흐름이 경계층 외측의 흐름과 혼합해서 박리에 견디는 능력을 증가시키는 적극적인 방법이 있다. 이 방법은 외부에너지 공급 없이 단순히 물체의 기하학적 형상을 변경하거나 간단히 부가장치를 부착하면 되기 때문에 산업현장에 응용하기 쉽다. 후자의 실용적인 예로서는 Fig. 2에 나타난 바와 같은 비행기 주 날개 배면의 와류발생기(vortex generator) 등을 들 수 있다.

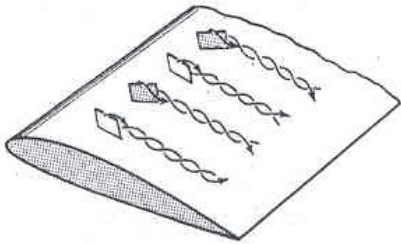


Fig. 2 Vortex generator

수동적 기법에 의한 원주의 항력저감에 관한 지금까지의 연구를 살펴보면 다음과 같다. Achenbach²⁾, Guven 등³⁾은 원주의 표면 거칠기가 항력계수 및 흐름의 천이에 미치는 영향을 조사했다. 임희창 등⁴⁾은 원주표면에 유동방향으로 홈을 파는 소위 U자형 리블렛(Riblet) 가공에 의해 원주의 항력을 최고 21% 정도 감소시켰다. Aoki 등⁵⁾은 원주표면에 규칙적인 원호형 홈을 가공, 항력계수를 측정하여 원호형 홈이 크게 항력을 감소시키고 있음을 명확히 했다. Ro 등은 원주표면에 원형 딴플⁶⁾ 또는 정방형 딴플⁷⁾을 설치하여 최고 25%의 항력감소를 보였고, 가시화 실험을 통

하여 딴플 설치에 의해 박리점이 원주 후방으로 이동하였음을 나타냈다. 이러한 연구는 기본적으로 원주표면에 다양한 형태로 거칠기를 가공하여 경계층 부근의 흐름을 교란시켜 운동에너지가 부족한 물체표면의 흐름이 경계층 외측의 흐름과 혼합해서 박리에 견디는 능력을 증가시키는 메커니즘을 갖고 있다.

Anderson 등⁸⁾ 및 Wu 등⁹⁾은 원주의 후방 중앙에 분리판을 부착하여 분리판이 항력감소에 미치는 영향을 수치계산을 통하여 조사했다. 분리판 부착에 의해 원주 후류측 소용돌이를 억제하여 항력이 감소했고, 분리판의 길이를 증가시킬수록 항력계수는 작아졌지만, 그 감소율은 분리판 길이가 짧았을 때 상대적으로 크게 나타났다. Ozono¹⁰⁾ 및 Ro 등¹¹⁾은 실험을 통하여, Sun 등¹²⁾은 수치해석적으로 원주의 후류측에 부착이 아닌 분리된 분할판(Detached splitter plate)을 설치하는 방법으로는 원주의 항력저감 특성을 조사했는데 분리된 분할판 설치에 의해 원주의 항력계수, 양력계수의 진폭 및 스트로할 수(Strouhal number)가 감소했음을 나타냈다. 이들 분리판의 설치는 기본적으로 원주 후류측 소용돌이를 억제하고, 상, 하 분리된 볼텍스의 역류에 의해 양력과 항력을 감소시키는 메커니즘을 갖고 있다.

Tsutsui 등¹³⁾은 공기유동에서 원주의 상류측에 직경이 작은 원주를, Prasad 등¹⁴⁾ 및 노 등¹⁵⁾은 원주의 상류측에 다양한 높이의 수직평판을 설치하여 원주에 작용하는 항력을 현저하게 감소시켰다. 그리고 항력이 감소한 주된 원인은 상류측에 놓인 작은 물체의 소위 차폐효과(Shielding effect)에 의해 하류측 원주의 항력저감을 가져왔다고 보고하고 있다.

이와는 별도로 Kim 등¹⁶⁾ 및 Lee 등¹⁷⁾은 사각 채널 내에 다양한 형태의 리브(Rib)를 설치함에 의해 마찰저항 감소와 열전달계수 증가의 효과를 얻었다고 보고했는데, 이 역시 리브(Rib)가 경계층 부근의 흐름을 교란시켰기 때문으로 추정된다.

한편 직렬배열 상태에 놓인 정방형주와 원주의 유동장 간섭은 다양한 형태의 둔한 물체 군의 유

동장 해석에 기초가 되고, 정방형주는 전면 모서리에서 1차박리, 후면 모서리에서 2차박리가 일어나 이 박리볼텍스가 후류층 물체의 항력을 대폭 감소시킬 것으로 예상된다.

따라서 본 연구에서는 원주의 상류측에 정방형주를 설치하여, 정방형주의 한 변 길이와 정방형주 후면에서부터 원주 전면까지의 간격을 변수로 하여 원주에 작용하는 항력 저감특성을 항력 측정실험으로 파악함과 동시에, 항력감소율이 비교적 큰 간격비에 초점을 맞추어 PIV를 이용한 가시화 실험을 통해 항력저감의 원인을 명확히 밝히고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험모델

Fig. 3에 실험모델을 나타내었다.

균일류 U중에 직경이 B인 원주가 놓여 있고, 그 상류측 중심에 한 변의 길이가 H인 정방형주가 원주 전면으로부터 G만큼 떨어진 곳에 놓여 있다. 이때 원주에 작용하는 항력 D는 균일류와 같은 방향으로 작용하는 유체력 성분, 양력 L은 균일류와 수직 상방향으로 작용하는 유체력 성분이다. 연구는 레이놀즈 수 $Re = 10,000$ 을 일정하게 한 상태에서 폭비 $H/B = 0.2, 0.4, 0.6$ 을 갖는 3가지의 정방형주에 대해 간격비 G/B 를 0.0에서부터 3.0까지 0.5씩 증가시켜 가며 원주에 작용하는 항력을 스트레인 게이지로 측정함과 동시에 원주 주위의 유동장을 PIV를 이용해 가시화하고자 한다.

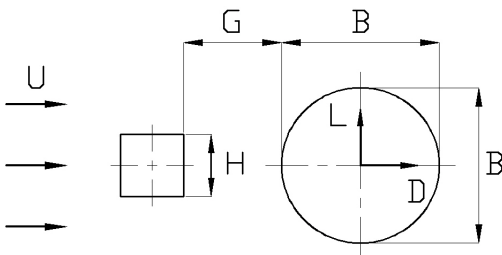
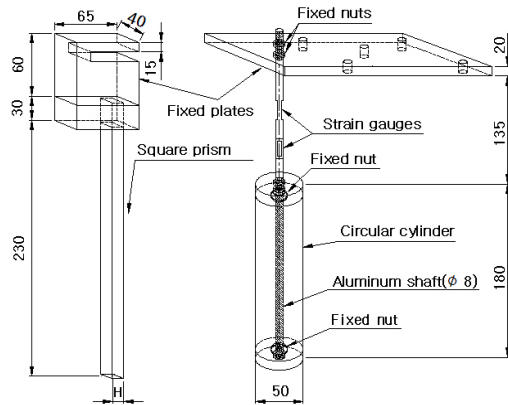


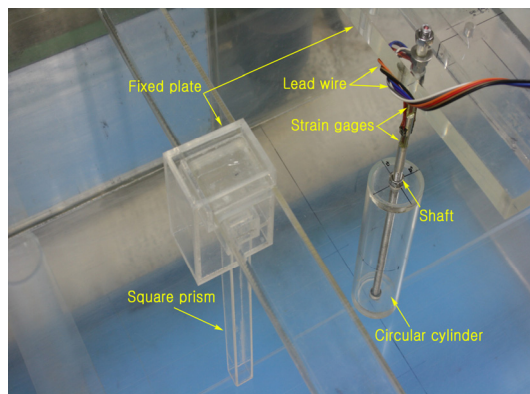
Fig. 3 Experimental model

2.2 항력측정실험

Fig. 4에 스트레인 게이지로 항력 측정실험을 위해 제작한 실험장치의 개략도 및 사진을 나타낸다. 실험 장치는 크게 정방형주, 고정판, 원주 및 측정 축으로 나누어 제작했다. 먼저 3개의 정방형주는 두께 2 mm, 길이 255 mm, 한변의 길이가 각각 10 mm, 20 mm 및 30 mm인 투명 아크릴 판으로 제작했으며 상부를 Fig. 4에서처럼 고정판에 끼워 고정시켰다. 원주는 두께 3 mm, 직경 50 mm인 투명 아크릴 관을, 길이 180 mm로 잘라 만들었으며, 상, 하 덮개는 두께 10 mm의 아크릴 판으로 만들었다. 또한 상, 하 덮개의 중앙에 직경 12 mm의 구멍을 뚫고, 측정 축을 장착하기 쉽게



(a) Schematic diagram



(b) Photograph

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

고정용 너트를 부착하였다. 측정 축의 상부는 균일류 중에서 양·항력을 용이하게 분리하여 측정할 수 있도록 그림에서와 같이 전후, 좌우 방향으로 두께 2 mm, 길이 15 mm로 평평하게 깎았다. 그리고 그곳에 각 방향으로 2매씩(계 4매) 스트레인이지를 부착하고 브릿지 회로를 결성하여 스트레인 양으로 양·항력을 측정했다. 각 채널(계 2채널)의 브릿지 회로에서 나온 출력파형은 스트레인앰프, AD변환기를 거친 다음 퍼스널 컴퓨터에서 미리 보정한 계수에 의해 양·항력 값으로 출력된다. 이때 회류수조 측정부의 균일류 유속은 $U = 0.18 \text{ m/s}$ 이며, 원주 직경을 길이로 잡아 환산한 레이놀즈 수 $Re = 1.0 \times 10^4$ 정도이다.

2.3 PIV를 이용한 가시화 실험

Fig. 5에 PIV를 이용한 가시화 실험을 위해 제작한 정방형주를 가진 원주의 사진을 나타낸다. 가시화 실험을 위한 원주는 직경 50 mm, 길이가 170 mm이며, 두께 2 mm인 투명 아크릴 판으로 제작했다. 3개의 정방형주는 두께 2mm, 길이 170 mm, 한 변의 길이가 각각 10 mm, 20 mm 및 30 mm인 투명 아크릴 판으로 만들었으며, 각 정방형주 아래쪽에 받침대를 부착했고, 이 받침대 뒤편에 나사용 구멍을 2곳 뚫어, 간격비 조정 시 이 받침대를 이동시켜서 나사로 고정판에 고정시켰다. 여기서 가시화 실험장치를 Fig. 4의 항력 측정장치와 분리하여 제작한 이유는 원주 주위의 유동장 사진을 쉽게 찍기 위해서이다.

Fig. 6에 PIV를 이용한 유동장 가시화 실험장치의 개략도를 나타내었다.

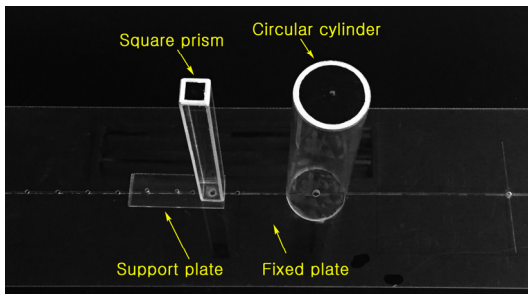


Fig. 5 Photograph of experimental device

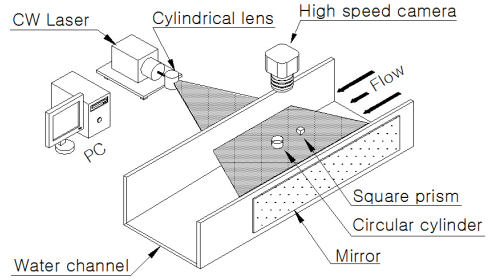


Fig. 6 Schematic structure of experimental device

실험은 Fig. 5에서 설명한 정방형주와 원주를 제작하여 Fig. 6에서와 같이 균일류가 흐르는 회류수조의 수로 내에 장착하고, 유동장을 가시화하였다. 구체적으로 각 실험모델을 수로 내에 설치한 후 회류수조 밖에서 Fig. 6에서와 같이 균일류와 수직, 수평방향으로 연속광 레이저에 의한 시트(sheet) 상의 조명광을 비추고 원주의 상부에서 수직하방으로 고속카메라로 유동장을 촬영하였다. 추적입자로는 평균직경이 $100 \mu\text{m}$ 이고, 비중이 1.02인 구형의 PVC(Poly Vinyl Chloride)를 사용했다. 이때 회류수조 가시화부의 균일류 유속은 $U = 0.18 \text{ m/s}$ 이며, 원주 한번의 길이를 대표길이로 잡아 환산한 레이놀즈 수 $Re = 1.0 \times 10^4$ 로 항력 측정실험에서와 같게 했다. 한 개의 실험변수에 대한 연속촬영시간은 16.37초이며, 1/125초 간격으로 2,048프레임의 화상을 얻어, 1/62.5초 간격으로 연속한 2프레임의 화상으로부터 각각 1,024장의 와도장, 속도분포 및 속도벡터장을 추적했다. 또한 후술하는 평균 유동장은 각각 1,024장의 유동장을 시간 평균한 것이다. 본 실험에 사용한 PIV 시스템의 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: $\varnothing 3.8 \times 11.4 \text{ mm}$
Resolution	1280×1024pixel
Software	CACTUS 3.2
Error vector(%)	Average: about 0.1%

3. 실험결과 및 고찰

3.1 원주의 항력특성

먼저 원주의 항력감소 특성을 나타내는 계수, 즉 항력계수 C_D 및 평균 항력감소율 $\overline{R_D}$ 은 다음과 같이 정의한다.

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

$$\overline{R_D} = \frac{\overline{C_{D0}} - \overline{C_D}}{\overline{C_{D0}}} \times 100 \quad (2)$$

여기서 D 는 원주에 작용하는 항력, U 는 균일류, ρ 는 유체의 밀도, S 는 수면 아래에 잠겨 있는 원주의 균일류 방향으로의 투영면적을 나타낸다. 또한 $\overline{C_{D0}}$ 및 $\overline{C_D}$ 는 각각 원주 단독 및 전방에 정방형주가 있는 원주의 평균항력계수이다.

Fig. 7에 정방형주의 폭비 $H/B = 0.40$, 간격비 $G/B = 1.0$ 에서의 원주의 항력계수 C_D 의 시간변화를 나타내었다.

그림에서 횡축은 균일류 U 및 측정시간 t 를 원주의 직경 B 로 나누어 무차원화한 값이다. 그림은 각 계수 모두 10.24초 동안 각각 1,024개의 데이터를 취해서 선으로 연결한 것이다. 원주의 항력계수 C_D 의 시간변화를 살펴보면 정방형주가 없는

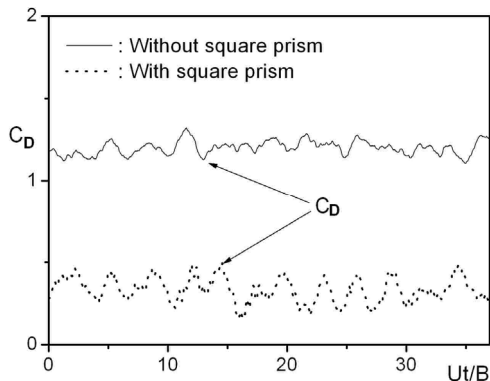


Fig. 7 Time variations of drag coefficient

실선은 그 값이 1.2 정도이나, 정방형주를 설치한 점선의 경우 그 값은 0.4 정도로 매우 작게 나타나 있다.

Fig. 8에 폭비 H/B 가 다양한 정방형주에 있어 간격비 G/B 에 따른 평균항력계수 $\overline{C_D}$ 및 평균항력감소율 $\overline{R_D}$ 의 변화를 나타낸다.

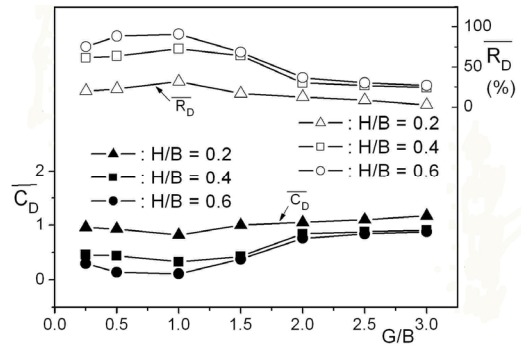


Fig. 8 Average drag coefficients and drag reduction rates with G/B and H/B

여기서 평균항력계수 $\overline{C_D}$ 의 각 점은 Fig. 7에 나타낸 1,024개의 항력계수 C_D 값을 평균한 값이다. 먼저 Fig. 8에서 간격비 G/B 에 따른 평균항력계수 $\overline{C_D}$ 의 변화를 거시적으로 살펴보면 세 가지 폭비에서 모두 간격비가 증가할수록 평균항력계수가 감소했다가 $G/B = 1.0$ 에서 최솟값을 가지며, 그 후 간격비가 증가함에 따라 다소 증가하는 특성을 보이고 있다. 이때 평균항력감소율 $\overline{R_D}$ 는 간격비가 증가함에 따라 증가하다가 $G/B=1.0$ 에서 세 경우 모두 최댓값을 나타내며, 그 후 간격비가 증가함에 따라 감소하고 있다. 한편 같은 간격비에 있어서는 정방형주의 폭비가 클수록 평균항력감소율이 크게 나타나 있으나 간격비 $G/B = 2.0$ 이후에는 폭비의 영향이 적게 나타나 있다.

Table 2에 각각의 작은 정방형주 폭비 H/B 에 있어 최적의 간격비 및 그곳에서의 평균항력계수 $\overline{C_D}$ 및 평균항력감소율 $\overline{R_D}$ 를 나타낸다. Table 2에 나타낸 바와 같이 폭비 $H/B = 0.2, 0.4$ 및 0.6 모두 간격비 $G/B = 1.0$ 일 때 평균항력감소율이 최대가 된다. 그리고 평균항력 감소율은 정방형주

폭비가 클수록 크게 나타나며, 폭비 $H/B = 0.6$ 일 때 최대 90.8%의 항력감소율을 보였다.

Table 2 The optimum average drag coefficients and drag reduction rates with H/B

H/B	$\overline{C_D}$ and $\overline{R_D}$ at the optimum G/B		
	G/B	$\overline{C_D}$	$\overline{R_D}(\%)$
0.2	1.0	0.82	31.7
0.4	1.0	0.33	72.5
0.6	1.0	0.11	90.8

3.2 원주 주위의 유동장 특성

Fig. 9에 나타난 바와 같이 원주 중심에서 후류 방향으로 $3.0 B$ 떨어진 곳에서 측정된 균일류와 수직방향의 속도 V 의 시간변화를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10(a)는 정방형주를 갖지 않는 경우이고, (b)는 폭비 $H/B = 0.4$ 및 간격비 $G/B = 1.0$ 인 정방형주를 갖는 경우이다.

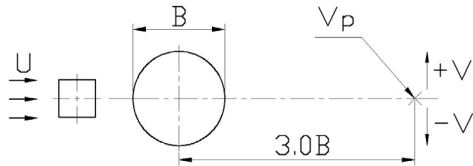
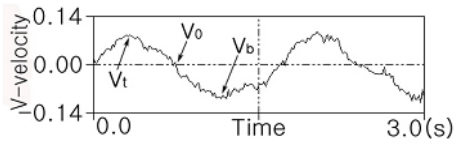
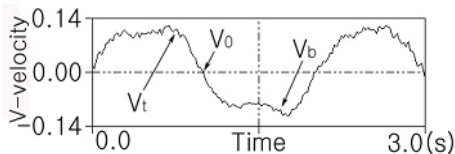


Fig. 9 Pick up point of V-velocity



(a) Without square prism



(b) $H/B=0.4, G/B=1.0$

Fig. 10 Time variations of V-velocity at the wake region of circular cylinder

Fig. 10(a) 및 (b)에 나타난 바와 같이 두 경우 모두 속도변화의 주기성이 명확하게 나타나 있다. 또한 그 주기를 살펴보면 대략 Fig. 10(a)의 경우 1.8초, (b)의 경우 2.0초 정도이다. 즉 정방형주를 설치함으로써 설치하지 않은 본래의 원주에 비해 주기가 약간 증가하며, 따라서 주파수는 다소 감소하고 있다.

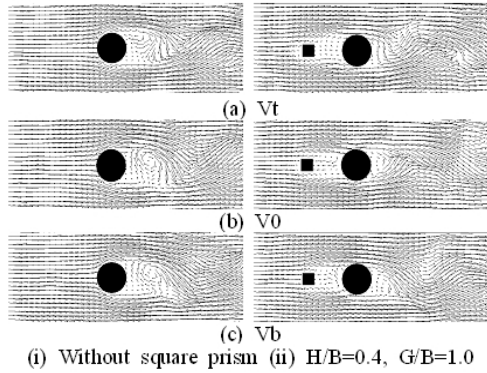


Fig. 11 Instantaneous velocity vectors around circular cylinder at V_t, V_o and V_b points of Fig. 10

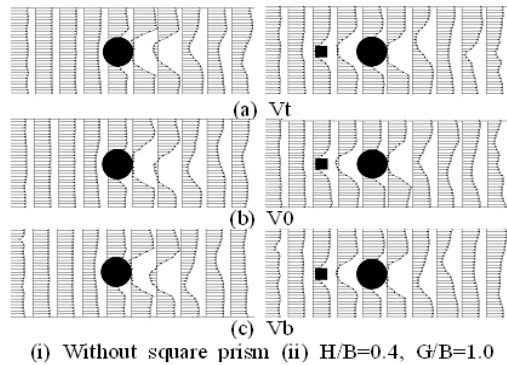


Fig. 12 Instantaneous velocity profiles around circular cylinder at V_t, V_o and V_b points of Fig. 10

Fig. 11에 Fig. 10의 V_t, V_o 및 V_b 점에서의 속도 벡터를 나타낸다. Fig. 11에서 (a) V_t (b) V_o 및 (c) V_b 는 각각 Fig. 9의 V_p 점에서 V 방향의 속도 값이 최대, 0, 최소인 점의 속도벡터를 나타낸다. 먼

저 정방형주가 없는 원주의 경우 Fig. 11(i)에서는 후류가 진동하고 있고, 그 흐름패턴은 시간에 따라 변하고 있다. 그리고 이 경우 (a)와 (c)에서의 후류패턴이 서로 반대방향으로 나타나 있어 흐름의 주기성을 확인할 수 있다. 다음으로 정방형주가 있는 원주의 경우 Fig. 9(ii)에서는 정방형주와 원주 사이에 흐름의 정체영역이 나타나 있고, 이것의 영향을 받아 원주 뒤편에도 시간에 관계없이 조그만 크기의 정체영역이 나타나 있다. 이 정체영역 뒤쪽에는 후류가 진동하고 있다.

Fig. 12에 Fig. 10의 V_t , V_o 및 V_b 점에서의 속도분포를 나타내었다.

정방형주 유무에 따른 원주 주위의 속도분포를 비교해 보면, 정방형주가 없는 경우는 세 경우 모두 원주 후류측에 정체영역이 크게 나타나 있으며, 속도분포가 크게 진동하는 데 비해, 정방형주가 있는 경우는 세 경우 모두 원주 상류측과 하류측에 비슷한 크기와 형태의 정체영역이 존재하고 있으며, 원주 후류측 속도분포의 진동은 단독 원주에 그것에 비해 다소 작다. 원주 상, 하류측 흐름의 정체영역이 원주 전, 후면의 압력차를 감소시켜 Fig. 7에 나타난 바와 같은 대폭적인 항력감소가 일어난 것으로 판단된다.

Fig. 13에 정방형주의 폭비 $H/B = 0.4$ 에 있어 간격비 G/B 에 따른 원주 주위의 시간평균 흐름패턴을 나타내었다.

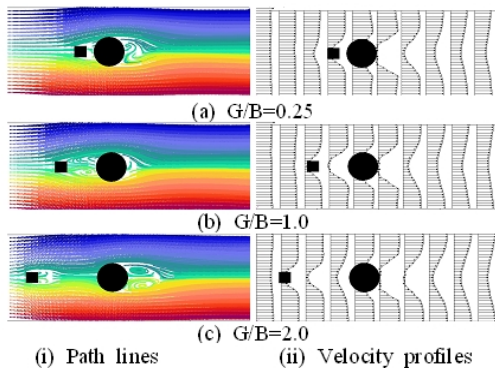


Fig. 13 Average flow patterns around circular cylinder with G/B ($H/B=0.4$)

Fig. 13(i)의 유적선을 살펴보면, 간격비 G/B 의 크기와 관계없이 정방형주와 원주 사이에는 정체영역이 존재하고 있고, Fig. 13(a) 및 (b)는 원주의 앞면이 이 정체영역에 직접 붙어 있는데, Fig. 13(c)의 경우 정방형주는 원주와 멀리 떨어져 있어 정방형주의 정체영역은 원주와 분리되어 있다. 그리고 원주 뒤쪽에는 세 경우 모두 상, 하면에 볼텍스가 생성되어 있는데, 볼텍스 영역의 크기는 $G/B = 1.0, 0.25, 2.0$ 순으로 크게 나타나 있다. 또한 Fig. 13(ii)의 속도분포에서도 알 수 있듯이 원주의 후류측 정체영역의 크기 역시 $G/B = 1.0$ 의 경우가 $G/B = 0.25$ 및 2.0 에 비해 작으나 원주 앞쪽의 정체영역크기는 $G/B = 1.0$ 의 경우가 제일 크다. 즉 $G/B = 1.0$ 의 경우가 $G/B = 0.25$ 및 2.0 에 비해 원주 전, 후부의 정체영역 크기의 차가 가장 작아 압력차도 적기 때문에 Fig. 8에 나타난 바와 같이 평균항력계수는 가장 작은 것으로 판단된다.

Fig. 14에 간격비 $G/B = 1.0$ 에서 정방형주의 폭비 H/B 에 따른 원주주위의 시간평균 유적선 및 속도분포를 나타내었다.

Fig. 14에서 먼저 (i) 유적선을 보면 네 경우 모두 원주의 후류측의 상, 하에는 볼텍스가 존재해 있으며, (ii) 속도분포에서 더 명확하게 알 수

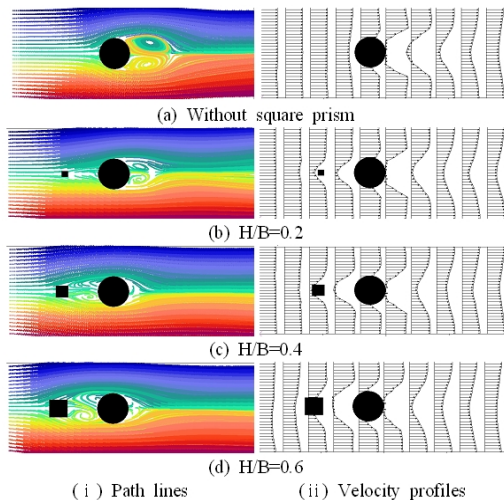


Fig. 14 Average flow patterns around circular cylinder with H/B ($G/B=1.0$)

있듯이 정방형주가 있는 경우는 원주의 전, 후방에 정체영역이 존재하고 있다. 그리고 이 정체영역의 크기는 원주 전방의 정체영역은 정방형주의 폭비가 클수록 증가하는데 비해, 원주 후방의 정체영역은 정방형주 폭비와 관계없이 거의 일정하다. 결과적으로 정방형주의 폭비가 증가할수록 원주 상류측 정체영역 크기가 증가하여 차폐효과에 의해 항력이 더욱 감소하게 된다. 따라서 Fig. 8에 나타난 바와 같이 같은 간격비에서는 정방형주의 폭비가 증가할수록 평균항력감소율이 증가한다.

4. 결 론

본 연구는 원주의 상류측에 작은 정방형주 (Square prism)를 설치했을 때 원주에 작용하는 항력을 측정함과 동시에 PIV를 이용한 가시화 실험으로 원주주위의 유동장을 파악한 것이다. 레이놀즈 수 $Re = 1.0 \times 10^4$ 로 고정시키고, 폭비 $H/B = 0.2, 0.4, 0.6$ 인 정방형주에 대해 간격비 G/B 를 $G/B = 0.0 \sim 3.0$ 범위 내에서 0.5씩 증가시켜 가면서 원주에 작용하는 항력의 저감특성 및 유동장 변화를 조사했다.

실험결과를 요약하면 다음과 같다.

1) $H/B = 0.4$, 간격비 $G/B = 1.0$ 일 때 항력의 시간변화를 측정해 본 결과, 원주의 상류측에 정방형주를 설치한 경우가 본래의 단독 원주에 비해 시간평균 72.5%의 항력감소율을 보였다.

2) 정방형주의 폭비를 고정시킨 경우, 원주의 항력감소율은 간격비가 증가할수록 증가하다 감소하는 특성을 보였으며, 간격비 $G/B = 1.0$ 에서 최댓값을 나타냈다.

3) 같은 간격비에서는 정방형주의 폭비가 클수록 원주의 항력감소율이 증가했으며, 폭비 $H/B = 0.6$, 간격비 $G/B = 1.0$ 일 때 최대 90.8%의 항력감소율을 보였다.

4) 정방형주를 설치한 경우, 원주의 상류측과 하류측에 정체영역이 나타났으며, 그 크기는 상류측은 정방형주의 폭비가 클수록 증가하는데 비해, 하류측은 거의 일정했다.

References

1. M. Gad-el-Hak, 1996, "Modern developments in flow control", Applied Mechanics, Reviews, Vol. 49, No. 7, pp. 365.
2. E. Achenbach, 1971, "Influence of Surface Roughness on the Cross-Flow around a Circular Cylinder", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 46, part 2, pp. 321-335
3. O. Guven, O., C. Farrell and V. C. Patel, 1980, "Surface Roughness Effects on the Mean Flow past Circular Cylinders", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 98, part 4, pp. 673-701.
4. H. C. Lim and S. J. Lee, 2001, "An Experimental Study on Drag Reduction of Grooved Cylinders", Trans(B). of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 25, No. 2, pp. 260-268.
5. K. Aoki, S. Lee and M. Oki, 1998, "Drag and Flow Characteristics around the Circular Cylinder with Grooves", Trans(B). of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 64, No. 617, pp. 18-24.
6. K. D. Ro, 2001, "Drag Reduction of Cylinder with Dimpled Surface", Journal of the Korean Society of Marine Engineers. Vol. 25, No. 1, pp. 155-161.
7. K. D. Ro. and J. T. Park, 2002, "Drag Reduction Characteristics of Cylinder Having Square Dimpled Surface", Journal of the Korean Society of Marine Engineers. Vol. 26, No. 3, pp. 233-239.
8. E. A. Anderson, and A. A. Szweczyk, 1997, "Effects of a Splitter Plate on the near Wake of a Circular Cylinder in 2 and 3-dimensional Flow Configurations", Experiments in Fluids Vol. 23, pp. 161-174.
9. J. Wu, C. Shu and N. Zhao, 2014, "Investigation of Flow Characteristics around a Stationary Circular Cylinder with an Undulatory Plate",

- European Journal of Mechanics B/Fluids Vol. 48, pp. 27-39.
10. S. Ozono, 1999, "Flow Control of Vortex Shedding by a Short Splitter plate Asymmetrically Arranged Downstream of a Cylinder", Physics of Fluids Vol. 11, pp. 1200-1205.
 11. K. D. Ro, H. G. Lee, J. H. Lee, J. M. Lee, J. H. Shin and K. B. Cheon, 2016, "Characteristics of Flowfield of a Circular Cylinder Having a Detached Splitter Plate with High Reynolds Number", Trans(B). of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 40, No. 6, pp. 373-381.
 12. S. H. Sun, J. Y. Hwang and K. S. Yang, 2001, "Drag Reduction on a Circular Cylinder using a Detached Splitter Plate", Trans(B). of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 25, No. 11, pp. 1632-1639.
 13. T. Tsutsui and T. Igarashi, 2002, "Drag Reduction of a Circular Cylinder in an Air-Stream", Journal Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Vol. 90, pp. 527-541.
 14. A. Prasad and C. H. K. Williamsion, 1997, "A method for the reduction of bluff body drag", Journal Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Vol. 69-71, pp. 155-167.
 15. K. D. Ro, 2016, "Experiments of Flow field of a Circular Cylinder Having a Front Vertical Plate", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 40, No. 3, pp. 198-204.
 16. W. C. Kim, M. S. Lee, S. T. Bae and S. W. Ahn, 2014, "Heat transfer and friction in rectangular convergent channels with ribs on one wall, Journal of the Korean Society for Power System Engineering", Vol. 18, No. 2, pp. 12-18.
 17. M. S. Lee and S. W. Ahn, 2015, "Heat transfer and friction in rectangular convergent channels with ribs on one wall, Journal of the Korean Society for Power System Engineering", Vol. 19, No. 5, pp. 32-37.