

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2016.40.6.373>

ISSN 1226-4881(Print)
2288-5324(Online)

고 레이놀즈 수에서 분리된 분할판을 가진 원주의 유동장 특성

노기덕^{**} · 이한균^{**} · 이종호^{**} · 이정민^{**} · 신진호^{**} · 천강빈^{**}

* 경상대학교 기계시스템공학과 · 해양산업연구소, ** 경상대학교 기계시스템공학과

Characteristics of Flowfield of a Circular Cylinder Having a Detached Splitter Plate with High Reynolds Number

Ki Deok Ro^{**}, Han Gyun Lee^{**}, Jong Ho Lee^{**}, Jeong Min Lee^{**}, Jin Ho Shin^{**} and Kang Bin Cheon^{**}

* Dept. of Mechanical System Engineering & Institute of Marine Engineering, Gyeongsang Nat'l Univ.,
** Dept. of Mechanical System Engineering, Gyeongsang Nat'l Univ.

(Received December 17, 2015 ; March 1, 2016 ; Accepted March 2, 2016)

Key Words: Drag Reduction(항력감소), PIV(입자영상속도계), Separated Flow(박리흐름), Unsteady Flow(비정상유동), Circular Cylinder(원주), Splitter Plate(분할판)

초록: 본 연구는 고 레이놀즈 영역에서 후류측에 분리된 분할판(Detached splitter plate)을 가진 원주의 유동장 특성을 양·항력측정 실험과 PIV를 이용한 가시화 실험으로 파악한 것이다. 실험파라미터는 원주 한변의 길이에 대한 분할판의 폭비($H/B=0.5\sim 1.5$) 및 원주 후면에서부터 분할판의 앞전까지의 거리 ($G/B=0\sim 2$)로 했다. 분할판의 폭비를 고정시킨 경우 원주의 항력감소율은 간격비가 증가할수록 증가한 후 감소하는 특성을 보였다. 또한 같은 간격비에서는 분할판의 폭비가 클수록 원주의 항력감소율이 컸다. 분리된 분할판의 설치에 의해 분할판의 상, 하부에는 서로 반대방향의 볼텍스가 발생되었고, 이 볼텍스가 원주 후류측에 역류를 발생시켜, 원주에 작용하는 항력을 감소시켰다.

Abstract: In this study, we investigate the characteristics of the drag reduction of a circular cylinder having a detached splitter plate at the wake side. We measure the fluid force on a circular cylinder and visualize the field using particle image velocimetry (PIV) with a high Reynolds number, $Re = 10,000$. The experimental parameters used were the width ratios ($H/B = 0.5\sim 1.5$) of splitters to the prism width and the gap ratios ($G/B = 0\sim 2$) between the prism and the splitter plate. The drag-reduction rate of the circular cylinder increased with H/B in the case of the same G/B , and it increased and then decreased with G/B in the case of the same H/B . The vortices of the opposite direction on the upper and lower sides of the detached splitter plate were generated by installing the plate. Reverse flow was caused by the vortices at the wake region of the circular cylinder, and the drag of the circular cylinder was decreased by the reverse flow.

1. 서 론

물체표면의 유동을 제어하여 물체에 작용하는 유체력 즉 항력과 양력의 진폭을 저감시키면 비행기, 자동차, 선박 등의 연료비 절감은 물론 유체력에 의한 물체의 동적안정성을 도모할 수 있어 다리, 빌딩 등의 구조물 파괴도 방지할 수 있

다. 이러한 연유로 다양한 방법으로 유동장을 제어하여 물체에 작용하는 유체력을 감소시키고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 이때 둔한 물체(Bluff Body)는 물체 전, 후방의 압력차에 의한 압력 항력이 크게 대두 되며, 특히 원주로 대표되는 구조물은 공장의 굴뚝, 다리교각, 안테나, 케이블, 열교환기 등 수 없이 많다. 일반적으로 물체 주위의 흐름을 제어하는 방법으로 에너지가 부족한 경계층 영역에 외부에너지의 공급유무에

† Corresponding Author, rokid@gnu.ac.kr

© 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

따라 능동적 기법과 수동적 기법으로 나눌 수 있다.⁽¹⁾ 특히 후자는 외부에너지 공급 없이 단순히 물체의 기하학적 형상을 변경하거나 간단히 부가장치를 부착하면 되기 때문에 산업현장에서 응용하기 쉽다. 수동적 기법에 의한 원주의 유체력저감에 관한 지금까지의 연구를 살펴보면 다음과 같다. Achenbach,⁽²⁾ Guven 등⁽³⁾은 원주의 표면 거칠기가 항력계수 및 흐름의 천이에 미치는 영향을 조사했다. 임과 이⁽⁴⁾는 원주표면에 유동방향으로 홈을 파는 소위 U자형 리블렛(Riblet) 가공에 의해 원주의 항력을 최고 21% 정도 감소시켰다. Aoki 등⁽⁵⁾은 원주표면에 규칙적인 원호형 홈을 가공, 항력계수를 측정하여 원호형 홈이 크게 항력을 감소시키고 있음을 명확히 했고, 홈 깊이가 깊을수록 항력계수의 최소치가 크게 됨을 보고했다. Ro 등은 원주표면에 원형 덤플⁽⁶⁾ 또는 정방형 덤플⁽⁷⁾을 설치하여 최고 25%의 항력감소를 보였고, 가시화 실험을 통하여 덤플 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 등⁽⁸⁾ 및 Wu 등⁽⁹⁾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. Sun 등⁽¹⁰⁾은 수치해석적으로 원주의 후류측에 부착이 아닌 분리된 분할판(Detached splitter plate)을 설치하는 방법으로는 원주의 항력저감 특성을 조사했는데 분리된 분할판 설치에 의해 원주의 항력계수 및 스트로할(Strouhal) 수가 감소했음을 나타냈다. 또한 원주와 분할판의 간격이 증가할수록 이들 계수는 감소하다가 간격비 2.3 부근에서 갑자기 증가함을 발견했다. 그러나 수치해석에서는 분할판의 폭을 원주의 직경과 같은 크기로 한정하였고, 또한 계산한 레이놀즈 수는 $Re = 160$ 이하로 매우 낮으며, 분리된 분할판의 실용적인 측면으로 보면 $Re = 10,000$ 이상의 고 레이놀즈 수 영역에서의 항력저감특성 파악이 무엇보다 중요하다.

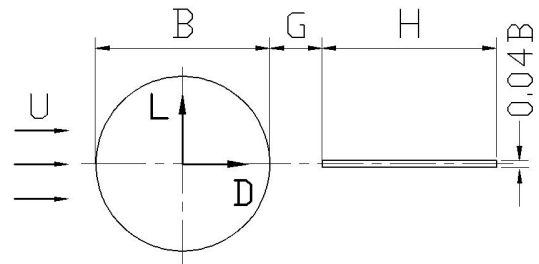


Fig. 1 Experimental model

따라서 본 연구에서는 고 레이놀즈 영역에서 원주의 후류측으로 분리된 분할판(Detached splitter plate)을 설치한 경우 원주의 항력저감특성을 분할판의 폭과 원주 후면에서부터 분할판까지의 간격을 변수로 하여 양·항력측정 실험으로 파악함과 동시에, 항력감소율이 최대가 되는 간격비에 초점을 맞추어 PIV를 이용한 가시화 실험을 통해 항력저감의 원인을 밝히고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

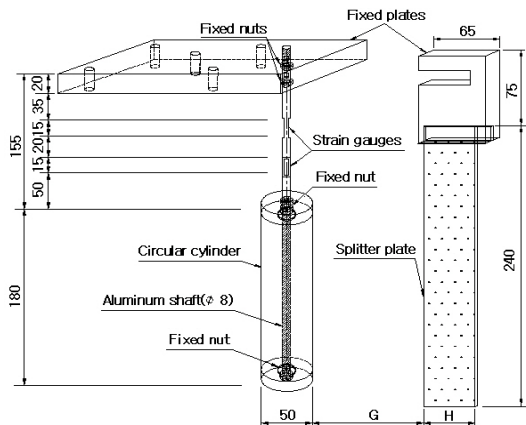
2.1 실험모델

Fig. 1에 실험모델을 나타낸다.

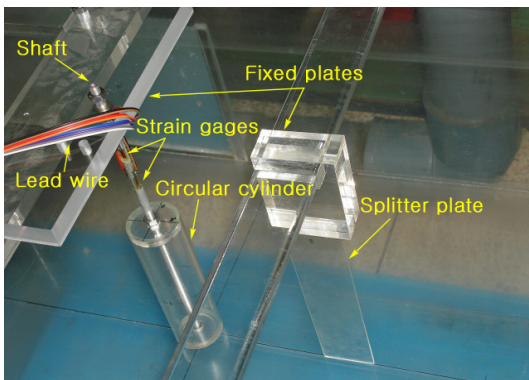
일정류 U 중에 직경이 B인 원주가 놓여 있고, 폭 H, 두께 0.04B인 분할판이 원주 후면으로부터 G만큼 떨어진 곳에 놓여 있다. 이때 원주에 작용하는 항력 D는 일정류와 같은 방향으로 작용하는 유체력 성분을, 양력 L은 일정류와 수직 상방향으로 작용하는 유체력 성분을 의미한다. 연구는 레이놀즈 수를 일정히 한 상태에서 폭비 $H/B = 0.5, 1.0, 1.5$ 를 갖는 3가지의 분할판에 대해 간격비 G/B 를 0.1에서부터 2.0까지 0.25씩 증가시켜가며 원주에 작용하는 양·항력을 측정함과 동시에 PIV에 의한 유동장을 가시화하였다.

2.2 양·항력의 측정실험

Fig. 2에 양·항력 측정실험을 위해 제작한 실험장치의 개략도 및 사진을 나타낸다. 실험 장치는 크게 원주, 측정 축, 고정판 및 분할판으로 나누어 제작했다. 원주, 고정판 및 분할판은 사용한 회류수조의 크기에 맞추어 투명아크릴 판으로 제작했다. 원주는 두께 3 mm, 직경 50 mm인 투명 아크릴판을, 길이 180 mm로 잘라 만들었으며, 상, 하 덮개는 두께 10 mm의 아크릴 판으로 만들었다. 또한 상, 하 덮개의 중앙에 직경 12 mm의 구



(a) Schematic diagram



(b) Photograph

Fig. 2 Schematic diagram and photograph of experimental device for measurement of lift and drag(unit : mm)

명을 뚫고, 측정 축을 장착하기 쉽게 고정용 너트를 부착하였다. 측정 축은 직경 8 mm, 길이 345 mm의 알루미늄의 봉을 가공하여 제작했다. 즉 봉의 하부 190 mm는 나사를 가공하여 원주를 너트로 고정시켰다. 봉의 상부는 일정류 중에서 양·항력을 용이하게 분리하여 측정할 수 있도록 그림에서와 같이 전후, 좌우 방향으로 두께 3.4 mm, 길이 15 mm로 평평하게 깎았다. 그리고 그곳에 각 방향으로 2매씩(계 4매), 크기 3×11mm, 저항 120Ω인 TML사의 스트레인게이지(FLA-5-11 type)를 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. 한편 분할판은 두께 2 mm, 길이 240 mm, 폭이 각각 25 mm, 50 mm 및 75 mm인 투명 아크

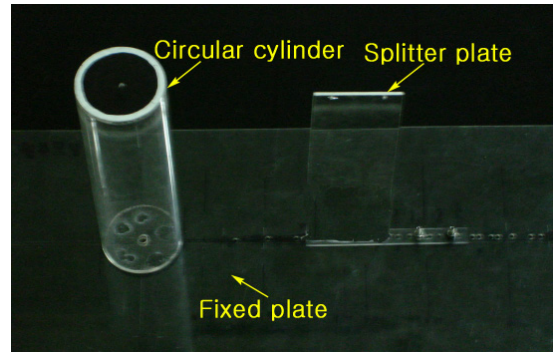


Fig. 3 Photograph of experimental device for visualization

릴 판으로 제작했으며 상부를 Fig. 2에서처럼 고정판에 끼워 고정시켰다. 그리고 이 고정판은 회류수조 지지대에 끼워져 있고, 이 지지대는 수조 채널을 따라 움직일 수 있게 제작했다. 이때 회류수조 측정부의 일정류 유속은 $U = 0.182 \text{ m/s}$ 이며, 원주 한변의 길이를 대표길이로 잡아 환산한 레이놀즈 수 $Re = 1.0 \times 10^4$ 이다. 실험은 레이놀즈 수를 고정시키고, 폭비 $H/B = 0.5, 1.0, 1.5$ 인 분할판에 대해 간격비 G/B 를 $G/B = 0.1 \sim 2.0$ 범위 내에서 일정간격으로 증가시켜가면서 유체력을 측정했다. 구체적으로 분할판을 원주 후면 중심에서부터 12.5 mm 간격으로 후류방향으로 이동시켜가며 양, 항력을 측정했다.

2.3 PIV를 이용한 가시화실험

Fig. 3에 PIV를 이용한 가시화 실험을 위해 제작한 실험장치의 사진을 나타낸다.

본 가시화를 위한 실험장치를 Fig. 2에 나타낸 양·항력 측정실험을 위한 실험장치와 다르게 제작한 것은 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 유동장을 고속도 카메라로 수직 하방향으로 촬영하기 때문에 원주 및 분할판 상부에는 다른 물체를 놓으면 촬영에 방해받기 때문이다. 가시화 실험을 위한 원주는 직경 50 mm, 길이가 170 mm이며, 두께 2 mm인 투명 아크릴 판으로 제작했다. 분할판은 두께 2 mm, 길이 150 mm, 폭이 각각 25 mm, 50 mm 및 75 mm인 투명 아크릴 판으로 만들었으며, 분할판 아래쪽에 폭 10 mm의 좁은 받침대 부착했고, 이 받침대 뒤편에 직경 2 mm의 나사용 구멍을 2곳 뚫어 간격비 조정 시 분할판을 고정판에 탈, 부착이 용이하도록 제작했다.

Fig. 4에 PIV를 이용한 유동장 가시화 실험장치의 개략도를 나타낸다.

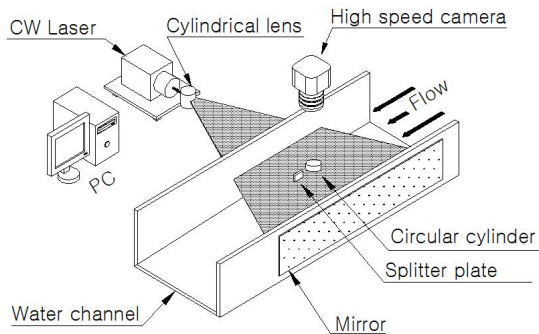


Fig. 4 Schematic structure of visualization experimental device using PIV

실험은 앞서 설명한 원주와 분할판을 제작하여 Fig. 4에서와 같이 일정류가 흐르는 회류수조의 수로 내에 장착하고, 유동장을 가시화 하였다. 구체적으로 각 실험모델을 수로 내에 설치한 후 회류수조 밖에서 Fig. 4에서와 같이 일정류와 수직, 수평방향으로 연속광 레이저에 의한 시트(sheet) 상의 조명광을 비추고 원주의 상부에서 수직하방으로 고속도 카메라로 유동장을 촬영하였다. 이때 회류수조의 수심은 160 mm이며, 수로 바닥에서 135 mm 지점에 레이저를 비추었고, 추적입자로는 평균직경이 100 μm 이고, 비중이 1.02인 구형의 PVC(Poly Vinyl Chloride)를 사용했으며, 스토크 수(Stokes number)로 환산한 값은 0.002 정도이다. 그리고 회류수조 가시화부에서 전자유속계(Alec 전자, ACM250-A)로 측정된 일정류 유속은 $U=0.182\text{m/s}$ 이며, 원주의 직경 50mm를 대표길이로 잡아 환산한 레이놀즈 수 $Re=1.0 \times 10^4$ 로, 2.2절 양·항력 측정실험에서와 같게 했다. 이때 회류수조의 가시화부를 50 mm 간격으로 유속분포를 측정하였는데 어느 단면에서도 유속분포는 평균치에 대한 오차가 $\pm 2\%$ 이내로 나타났다. 또한 이 영역에서의 난류강도는 0.012~0.06 정도였고, 경계두께는 5 mm 이하였다. 본 실험에 이용된 회류수조의 수로 폭은 500 mm이며 수로 폭에 대한 원주의 직경비는 0.1이다. 또한 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. 본 실험에 사용된 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: $\varnothing 3.8 \times 11.4\text{mm}$
Resolution	1280 \times 1024 pixel
Software	CACTUS 3.2
Error vector(%)	Average: about 0.1%

3. 실험결과 및 고찰

3.1 양·항력 특성

먼저 원주의 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 D는 각각 원주에 작용하는 일정류 U와 수직방향 및 같은 방향의 힘의 성분이다. 또한 ρ 는 유체의 밀도, S는 수면 아래에 잠겨있는 원주의 일정류 방향으로의 투영면적을 나타낸다.

Fig. 5에 분할판 폭비 $H/B=1.0$, 간극비 $G/B=0.75$ 에서의 원주의 양력계수 C_L 및 항력계수 C_D 의 시간변화를 나타낸다. 그림에서 횡축은 일정류 U 및 측정시간 t를 원주의 한 변의 길이 B로 나누어 무차원화한 값이다. 그림은 각 계수 모두 10.24초 동안 각각 1,024개의 데이터를 취해서 선으로 연결한 것이다. 먼저 항력계수 C_D 의 시간변화를 살펴보면 분할판이 없는 실선에 비해 분할판을 설치한 점선의 경우가 그 값은 작게 나타나 있다. 그러나 진동 폭은 그다지 큰 차이를 보이지 않고 있다. 한편 양력계수 C_L 의 변화를 살펴보면 실선, 점선 모두 0을 중심으로 진동하고 있으나, 그 진폭은 분할판이 있는 점선 쪽이 분할판이 없는 실선 쪽보다 훨씬 작게 나타나 있다. 즉 원주의 후류 쪽에 분리된 분할판을 설치함으로써 항력을 저감시킬 수 있고 또한 양력의

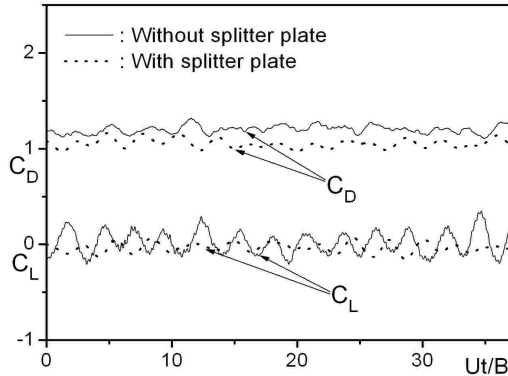


Fig. 5 Time variations of lift and drag coefficients (H/B=1.0, G/B=1.0)

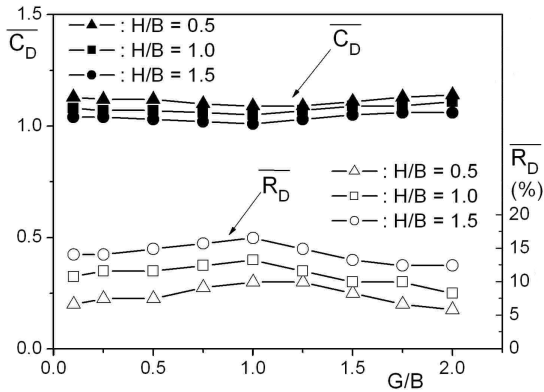


Fig. 6 Average drag coefficients and drag reduction rates with G/B and H/B

진폭을 대폭 줄일 수 있어 동적 안정성도 크게 향상시킬 수 있다.

Fig. 6에 다양한 분할판의 폭비 H/B에 있어 간격비 G/B에 따른 평균항력계수 $\overline{C_D}$ 및 평균항력감소율 $\overline{R_D}$ 의 변화를 나타낸다.

여기서 평균항력계수 $\overline{C_D}$ 의 각 점은 Fig. 5에 나타낸 10.24초 동안 취한 1,024개의 항력계수 C_D 값을 평균한 값이다. 또한 평균항력감소율 $\overline{R_D}$ 는 분할판 설치에 의한 평균항력계수 감소량을 분할판을 설치하지 않은 원주의 평균항력계수로 나눈 백분율을 의미한다. 먼저 Fig. 5에서 간격비 G/B에 따른 평균항력계수 $\overline{C_D}$ 의 변화를 거시적으로 살펴보면 세 가지 폭비에서 모두 간격비가 증가할수록 평균항력계수가 감소했다가 증가하는 특성을 보이고 있다. 이때 평균항력감소율 $\overline{R_D}$ 는 간격비가 증가함에 따라 증가하다가 G/B=1.0에서 세 경우 모두 최대 값을 나타내며, 그 후 간격비

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			Total average $\overline{C_D}$ and $\overline{R_D}$	
	G/B	$\overline{C_D}$	$\overline{R_D}$	$\overline{C_D}$	$\overline{R_D}$
0.5	1.0	1.09	9.92	1.11	7.90
1.0	1.0	1.05	13.22	1.08	11.01
1.5	1.0	1.01	16.53	1.04	14.23

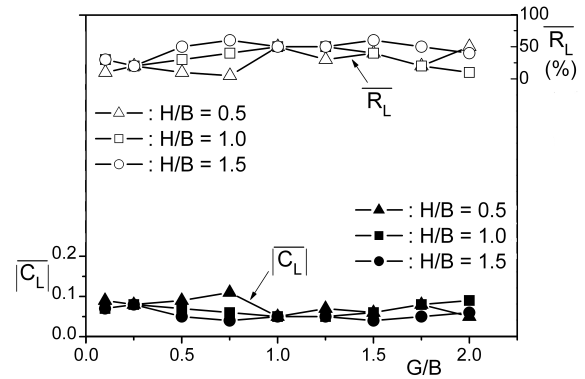


Fig. 7 Average lift coefficients and lift reduction rates with G/B and H/B

가 증가함에 따라 감소하고 있다. 실험 범위인 G/B=2.0 근방에서도 평균항력감소율이 5% 이상을 보이고 있어 분할판 설치가 전 간격비에 있어 유효함을 알 수 있다. 한편 같은 간격비에 있어서는 분할판 폭비가 클수록 항력감소율이 크게 나타남을 알 수 있다.

Table 2에 각각의 분할판 폭비 H/B에 있어 최적의 간격비 및 그곳에서의 평균항력계수 $\overline{C_D}$ 및 평균항력감소율 $\overline{R_D}$ 그리고 실험범위에서 각각 값의 전체 평균치를 나타낸다.

Table 2에서 각각의 분할판 폭비에 따른 평균항력감소율의 최대값 및 전체 평균값을 살펴보면 H/B=0.5에서 9.92% 및 7.90%, H/B=1.0에서는 각 13.22% 및 11.01% 그리고 H/B=1.5에서는 16.53% 및 14.23%를 나타내고 있다. 즉 분할판 이 큰 쪽이 두 값 모두 높게 나타나 있어, 여건이 된다면 분할판 폭을 크게 할수록 더 큰 항력 저감효과를 얻을 수 있다.

Fig. 7에 다양한 분할판의 폭비 H/B에 있어 간격비 G/B에 따른 양력계수 절대치의 평균값 $\overline{|C_L|}$ 및 이 값에 의한 평균양력감소율 $\overline{R_L}$ 의 변화를 나타낸다.

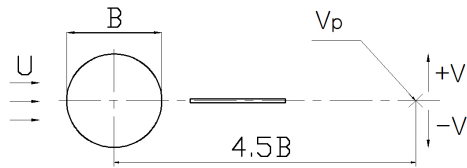


Fig. 8 Pick up point of V-velocity

Fig. 7에서 양력계수의 절대치를 평균한 $\overline{|C_L|}$ 의 각 점은 Fig. 5에 나타낸 10.24초 동안 취한 1,024 개의 양력계수 C_L 값의 절대치를 평균한 값이다. 여기서 양력계수는 0점을 중심으로 진동하기 때문 시간평균하면 거의 0에 가까운 값을 갖게 된다. 그래서 양력에 의한 원주의 진폭, 즉 동적안정성을 파악하기 위해 양력계수의 절대치를 평균하였다. 또한 양력감소율 $\overline{R_L}$ 는 분할판 설치에 의한 양력계수 절대치의 감소량을 분할판을 설치하지 않은 원주의 양력계수의 절대치를 평균한 양력계수로 나눈 백분율을 의미한다. Fig. 7에서 간격비 G/B 에 따른 평균양력감소율 $\overline{R_L}$ 의 변화를 살펴보면 세가지 폭비에서 모두 간격비에 따라 그 값의 차이는 있으나 양의 값을 유지하고 있다. 본 실험의 경우 세가지 폭비에서 평균양력감소율의 값을 전체 평균해 보면 $\overline{R_L}=35\%$ 를 나타내고 있어 원주의 하류측에 분할판을 설치하면 원주의 항력감소는 물론 양력의 진폭도 감소하여 동적안정성도 크게 개선됨을 알 수 있다.

3.2 유동장 특성

Fig. 8에 나타낸 바와 같이 원주 중심에서 후류 방향으로 $4.5B$ 떨어진 곳에서 측정한 일정류와 수직방향의 속도 V 의 시간변화를 Fig. 9에 나타낸다. 그림에서 (a)는 분할판을 갖지 않는 경우이고, (b)는 폭비 $H/B=1.0$ 및 간격비 $G/B=0.75$ 인 분할판을 갖는 경우이다. 이때 속도 V 의 측정점은 Fig. 8에 나타낸 바와 같이 원주 중심에서 후류방향으로 $4.5B$ 떨어진 곳이다.

Fig. 9(a) 및 (b)는 속도 V 의 시간변화 값 중, 비교적 주기성이 잘 나타나 있는 구간을 3초 동안 취하여 그린 것으로, 그림에서 그 주기 및 주파수를 살펴보면 대략 (a)의 경우 주기 1.7초, 주파수 0.58/초, (b)의 경우 주기 1.9초, 주파수 0.52/초 정도이다. 즉 분할판을 설치함으로써 설치하지 않은 본래의 원주에 비해 후류측 속도 V 의 진폭 변화는 거의 보이지 않으나, 주파수가 다소

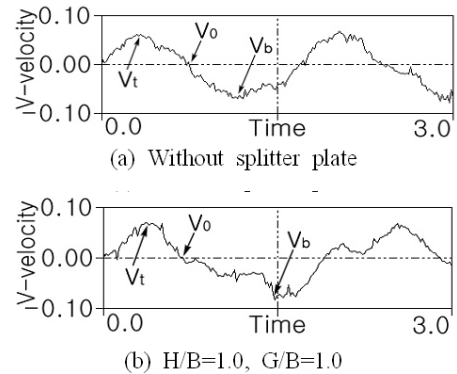


Fig. 9 Time variations of V-velocity at the wake region of circular cylinder

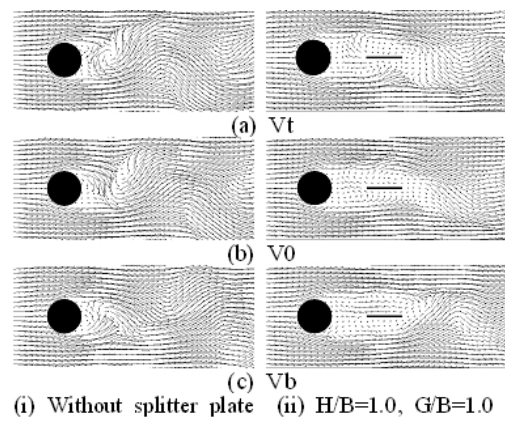


Fig. 10 Instantaneous velocity vectors around circular cylinder at V_t , V_o and V_b points of Fig. 9

감소함을 알 수 있다.

Fig. 10에 Fig. 9의 V_t , V_o 및 V_b 점에서의 속도 벡터를 나타낸다. Fig. 10에서 (a) V_t , (b) V_o 및 (c) V_b 는 각각 Fig. 8의 V_p 점에서 V 방향의 속도 값이 최대, 0, 최소인 점의 속도벡터를 나타낸다. 분할판의 유무에 따라 같은 위치임에도 불구하고 원주 후류의 흐름패턴은 전혀 다른 양상을 보이고 있다. 분할판의 유무에 따른 이러한 흐름패턴 변화가 Fig. 9에 나타낸 바와 같이 주파수 변화를 초래한 것으로 판단된다.

Fig. 11에 Fig. 9의 V_t , V_o 및 V_b 점에서 유동방향의 속도분포를 나타낸다.

원주 주위의 속도분포를 비교해보면 분할판이 유무와 관계없이 세 경우 모두 원주 후류측에 정체영역이 크게 나타나 있고, 후류의 흐름패턴도 시간에 따라 변화하고 있으나, Fig. 11의 (a) V_t 와 (c) V_b 는 그 흐름 패턴이 거의 대칭이다. 그러나 원주 후류측 두 번째 속도분포를 비교해 보면 분할판이 없는 단독 원주의 경우 (a) V_t 를 제외하고

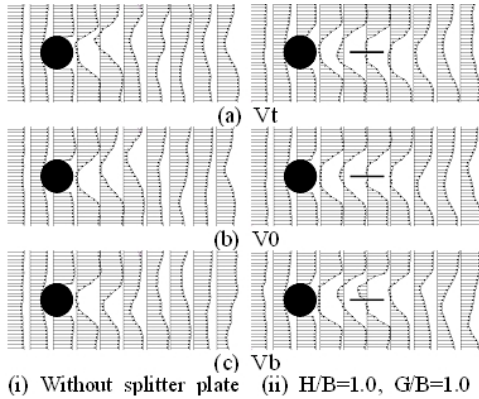


Fig. 11 Instantaneous velocity profiles around circular cylinder at Vt, Vo and Vb points of Fig. 9

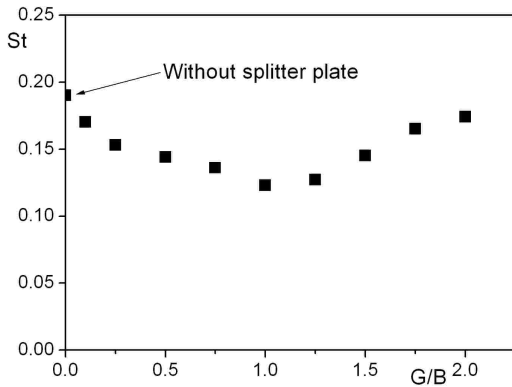


Fig. 12 Strouhal number with G/B(H/B=1.0)

는 일정류에 대하여 역류가 존재하고 있지 않으나 분할판을 가진 원주의 경우 (a) Vt, (b) Vo 및 (c) Vb 세 경우 모두 후류측 중심 부근에 일정류에 대하여 역류가 존재하고 있다.

Fig. 12에 분할판의 폭비 H/B=1.0에 있어 간격비 G/B에 따른 Strouhal 수를 나타낸다. 이때 대표주파수는 Fig. 8의 Vp점에서 측정된 값이며, Table 1에 나타낸 바와 같이 본 PIV유동장 해석에 사용된 소프트웨어(Software)는 CACTUS 3.2이며, 대표주파수를 FFT(Fast Fourier transform)로 계산해주는 기능이 포함되어 있다. 즉 2.3절에서 설명한 바와 같이 한 개의 실험변수에 대해 1/62.5 초 간격으로 얻은 1024장의 속도장으로부터 CACTUS 3.2를 이용하여 대표주파수를 얻었다.

여기서 Strouhal수 St는 대표주파수에 원주의 직경을 곱한 값을 그 때의 일정류 값으로 나눈 무차원 값이다. Fig. 12에 나타낸바와 같이 Strouhal 수는 간격비가 증가할수록 감소했다가 증가하는 특성을 보이고 있으며, Fig. 6에 나타낸 바와 같이

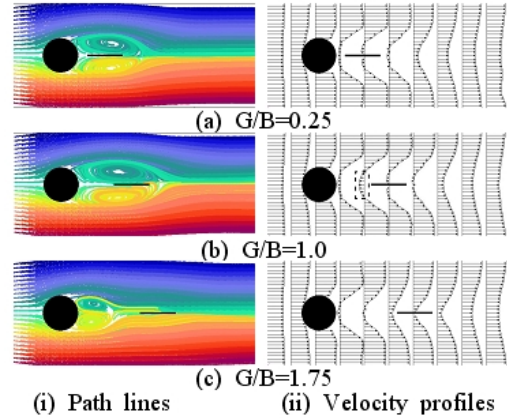


Fig. 13 Average flow patterns around circular cylinder with G/B at H/B=1.0

항력감소와 유사한 경향을 보이고 있다.

Fig. 13에 분할판의 폭비 H/B=1.0에 있어 간격비 G/B에 따른 원주주위의 시간평균 흐름패턴을 나타낸다.

Fig. 13(i) 유적선을 살펴보면 원주 후류측에 세 경우 모두 두 개의 볼텍스가 존재하고 있으며, Fig. 13(ii)의 속도분포로 유추해 볼 때 볼텍스의 방향은 분할판을 중심으로 위에는 시계방향, 아래에는 반시계방향을 알 수 있다. 또한 간격비 G/B에 따라 볼텍스 크기를 비교해보면 간격비 G/B=1.0인 경우가 제일 크며, G/B=0.25, G/B=1.75 순서이다. 그리고 이 볼텍스의 크기와 관련하여 원주 후류측 두 번째 속도분포를 살펴보면 세 경우에서 간격비 G/B=1.0인 경우가 가장 크게 일정류에 대하여 역류(Fig. 13(b)의 점선 부분)를 발생시키고 있음을 알 수 있다. Fig. 6에 나타낸바와 같이 이 큰 역류가 간격비 G/B=1.0에서 가장 크게 항력을 감소시키고 있는 것으로 판단된다.

Fig. 14에 3가지의 분할판 폭비 H/B에 있어 최대 항력감소율을 가지는 간격비에서 원주주위의 시간평균 흐름패턴을 나타낸다.

Fig. 14에서 먼저 (i) 유적선을 보면 분할판의 상, 하에는 볼텍스가 존재해 있고, 이 볼텍스 영역의 크기는 분할판의 폭이 클수록 증가함을 나타내고 있다. (ii) 속도분포에서 원주 후류측 흐름패턴을 비교해 보면 분할판이 존재하지 않은 (a)의 경우는 역류가 존재하지 않고 있으나, 그 밖에 분할판이 존재하는 Fig. 14(b), (c), (d)의 경우는 원주 후면 쪽으로 역류가 발생하며, 이 역류의 크기는 분할판의 폭이 클수록 더 크게 나타나고 있다. 그리고 이 역류는 일정류와 반대방향

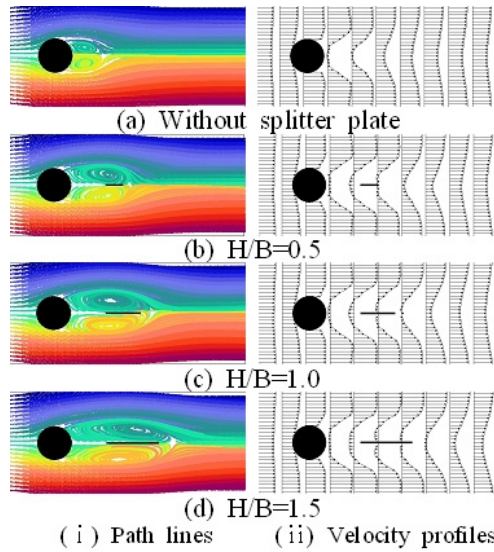


Fig. 14 Average flow patterns around circular cylinder with H/B at G/B=1.0

이므로 이 역류로 인해 항력과 반대방향의 힘이 작용하여 전체적으로 원주의 항력감소를 초래한 것으로 판단된다. 따라서 역류가 클수록 항력감소율이 증가하며, Fig. 14(ii)에 나타낸바와 같이 역류가 가장 큰 H/B=1.5, G/B=1.0에서 항력감소율이 최대이다. 또한 Fig. 14(i) 유적선과 비교해 보면 알 수 있듯이 분할판이 클수록 볼텍스가 크지며, 역류 역시 증가하는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구는 원주의 후류측에 분리된 분할판(Detached splitter plate)을 설치한 경우 원주의 주위의 유동장 특성을 양·항력측정 실험과 PIV를 이용한 가시화 실험으로 파악한 것이다. 레이놀즈 수 $Re = 1.0 \times 10^4$ 로 고정시키고, 폭비 H/B = 0.5, 1.0, 1.5인 분할판에 대해 간격비 G/B를 G/B = 0.1~2.0 범위 내에서 0.25씩 증가시켜가면서 원주에 작용하는 양, 항력의 감소특성 및 유동장 변화 특성을 조사했다. 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 양·항력의 시간변화를 측정해 본 결과 원주의 후류측에 분리된 분할판을 설치한 경우가 본래의 원주에 비해 양력의 진폭이 감소했다.

(2) 분할판의 폭비를 고정시킨 경우 원주의 항력감소율은 간격비가 증가할수록 증가하다 감소하는 특성을 보였다.

(3) 같은 간격비에서는 분할판의 폭비가 클수록

원주의 항력감소율이 컸다.

(4) 분할판의 상부에는 시계방향의, 하부에는 반시계방향의 볼텍스가 존재하였고, 이 볼텍스 영역의 크기는 분할판 폭비가 클수록 크게 나타났다.

(5) 분할판을 가진 원주 후류측에 역류가 존재하였고, 이 역류의 크기는 분할판 폭비가 클수록 증가했다.

참고문헌 (References)

- (1) Gad-el-Hak, M., 1996, "Modern Developments in Flow Control," *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 49, No.7, pp. 365~379
- (2) Achenbach, E., 1971, "Influence of Surface Roughness on the Cross-Flow Around a Circular Cylinder," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 46, No. 2, pp. 321~335.
- (3) Guven, O., Farell, C. and Patel, V. C., 1980, "Surface Roughness Effects on the Mean Flow past Circular Cylinders," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 98, No. 4, pp. 673~701.
- (4) Lim, H. C. and Lee, S. J., 2001, "An Experimental Study on Drag Reduction of Grooved Cylinders," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 25, No. 2, pp. 260~268.
- (5) Aoki, K., Lee, S. and Oki, M., 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) Ro, K. D., 2001, "Drag Reduction of Cylinder with Dimpled Surface," *Journal of the Korean Society of Marine Engineers*, Vol. 25, No. 1, pp. 155~161.
- (7) Ro, K. D. and Park, J. T., 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) Anderson, E. A. and Szewczyk, A. A., 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) Wu, J., Shu, C. and Zhao, N., 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) Sun, S. H., Hwang, J. Y. and Yang, K. S., 2001, "Drag Reduction on a Circular Cylinder using a Detached Splitter Plate," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 25, No. 11, pp. 1632~1639.