

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2015.39.9.751>

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

정면에 정삼각주를 가진 원주의 유동장 특성실험

노기덕*† · 한상윤** · 주형관** · 강좌운** · 배태범** · 노우균**

* 경상대학교 기계시스템공학과 · 해양산업연구소, ** 경상대학교 기계시스템공학과

Flowfield Experiments for a Circular Cylinder Having a Front Triangular Prism

Ki Deok Ro*†, Sang Yun Han**, Hyung Gwan Ju**, Ja Un Kang**, Tae Beom Bae**
and Woo Kyun Noh**

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

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

(Received May 20, 2015 ; Revised July 10, 2015 ; Accepted July 11, 2015)

Key Words: Drag Reduction(항력 저감), Circular Cylinder(원주), PIV(입자영상속도계), Flow Control(유동제어), Triangular Prism(정삼각주)

초록: 본 연구는 상류측에 작은 정삼각주를 가진 원주의 유동장 특성을 양·항력측정 실험과 PIV를 이용한 가시화 실험으로 파악한 것이다. 실험 파라미터는 원주의 직경에 대한 정삼각주의 폭비($H/B=0.2\sim0.6$) 및 원주의 전면에서부터 정삼각주까지의 거리 ($G/B=0\sim3$) 로 했다. 정삼각주의 폭비를 고정시킨 경우 원주의 항력감소율은 간격비가 증가할수록 증가하다 감소하는 특성을 보였다. 또한 같은 간격비에서는 정삼각주의 폭비가 클수록 원주의 항력감소율이 컸다. 원주의 Strouhal 수는 간격비가 증가할수록 증가하다 감소하는 특성을 보였다. 정삼각주를 설치한 경우 원주 상류측과 하류측에 정체영역이 나타났으며, 그 크기는 상류측은 삼각주의 폭비가 클수록 증가하는데 비해, 하류측은 거의 일정했다.

Abstract: In this study, we investigate the Characteristics of the flowfields of a circular cylinder having a small triangular prism at the upstream side. We measure the fluid force on the circular cylinder and obtain a visualization of the flow fields using particle image velocimetry (PIV). The experimental parameters employed were the width ratios ($H/B = 0.2\sim0.6$) of the triangular prisms to the circular cylinder's diameter, and the gap ratios ($G/B = 0\sim3$) between the circular cylinder and the triangular prism. We observed that the drag reduction rate and Strouhal number of the circular cylinder increased and then decreased with G/B in the case of the same H/B . The drag reduction rate increased with H/B in the case of the same G/B . In the case where the circular cylinder had a small triangular prism, the stagnation regions were represented in the upstream and downstream sides of the circular cylinder.

1. 서 론

물체에 작용하는 유체력 중 균일류 방향의 힘의 성분을 항력, 균일류와 수직방향의 힘의 성분을 양력이라 한다. 물체주위의 흐름을 제어해서 항력을 감소시키면 빌딩, 다리 등 구조물은 유체

력에 의한 파괴를 막을 수 있고, 선박, 자동차, 비행기 등 수송체는 연료비를 절감시킬 수 있다. 또한 물체의 양력의 진동은 칼만 와에 기인하며 따라서 진폭을 감소시키면 상술한 구조물 및 수송체는 동적안정성을 크게 높일 수 있다. 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 항

† Corresponding Author, rokid@gnu.ac.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

력이 크게 대두 되며, 특히 원주로 대표되는 구조물은 공장의 굴뚝, 다리교각, 안테나, 케이בל, 열교환기 등 수 없이 많다. 일반적으로 물체 주위의 흐름을 제어하는 방법으로 에너지가 부족한 경계층 영역에 외부에너지의 공급유무에 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 유체력 저감에 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 딥플⁽⁶⁾ 또는 정방형 딥플⁽⁷⁾을 설치하여 최고 25%의 항력감소를 보였고, 가시화 실험을 통하여 딥플 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 후류층 소용돌이를 억제하여 항력이 감소했고, 분리판의 길이를 증가시킬수록 항력계수는 작아졌지만, 그 감소율은 분리판 길이가 짧았을 때 상대적으로 크게 나타났다. Ozono⁽¹⁰⁾는 실험을 통하여, Sun 등⁽¹¹⁾은 수치해석적으로 원주의 후류층에 부착이 아닌 분리된 분할판(Detached splitter plate)을 설치하는 방법으로는 원주의 항력저감 특성을 조사했는데 분리된 분할판 설치에 의해 원주의 항력계수, 양력계수의 진폭 및 스트로할(Strouhal) 수가 감소했음을 나타냈다. 또한 원주와 분할판의 간격이 증가할수록 이들 계수는 감소하다가 간격비 2.3 부근에

서 갑자기 증가함을 발견했다. 이들 분리판의 설치는 기본적으로 원주 후류층 소용돌이를 억제하고, 상, 하 분리된 와류의 역류에 의해 양력과 항력을 감소시키는 메커니즘을 갖고 있다.

Prasad 등⁽¹²⁾은 원주의 상류층에 다양한 높이의 수직평판을 설치하여 이들의 효과를 조사했는데 원주 직경의 1/3 높이의 수직평판을 원주 상류층에 설치했을 때 전체 항력은 원주 단독항력의 38%로 감소했다고 보고하고 있다. Tsutsui 등⁽¹³⁾은 공기유동에서 원주의 상류층에 직경이 작은 원주를 설치하여 최적 조건에서 전체 항력은 원주 단독항력의 63%로 감소했다고 보고하고 있다. 원주의 상류층에 작은 수직평판 또는 원봉의 설치에 의해 원주의 상류층에 와류를 발생시켜 이로 인해 원주 주위의 박리는 층류박리에서 난류박리로 바뀌어 박리점이 후방으로 이동하며, 상류층 물체와 원주사이의 간격이 작을 때는 상류층 물체의 정체 영역에 하류층 원주가 영향을 받아 소위 차폐효과(Shielding effect)에 의해 원주의 항력을 감소시키는 메커니즘을 갖고 있다.

상술한 3종류의 유동제어 메커니즘에서 마지막의 차폐효과(Shielding effect)에 의한 방법이 가장 효과적이고, 한편 삼각주는 한 모서리를 상류층으로 향하게 하면 하류층 두 모서리에서 쉽게 박리가 일어나 그 정체영역이 클 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 원주의 상류층에 수직평판 혹은 원봉 대신에 작은 삼각주를 설치하여, 삼각주 한 변 길이와 삼각주에서부터 원주 전면까지의 간격을 변수로 하여 원주에 작용하는 양·항력 저감특성을 유체력 측정실험으로 파악함과 동시에, 항력감소율이 비교적 큰 간격비에 초점을 맞추어 PIV를 이용한 가시화 실험을 통해 항력저감의 원인을 가시적으로 밝히고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험모델

Fig. 1에 실험모델을 나타낸다. 균일류 U중에 한 변의 길이가 B인 원주가 놓여 있고, 그 상류층 중심에 한 변의 길이가 H인 정삼각주가 원주 전면으로부터 G만큼 떨어진 곳에 놓여 있다. 이때 원주에 작용하는 항력 D는 균일류와 같은 방향으로 작용하는 유체력 성분을, 양력 L은 균일류와 수직 상방향으로 작용하는 유체력 성분을

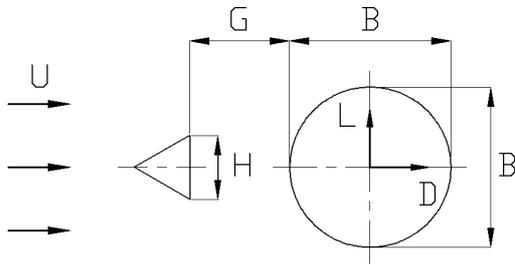
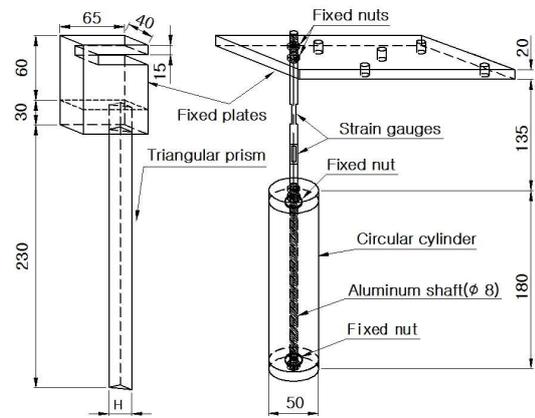


Fig. 1 Experimental model

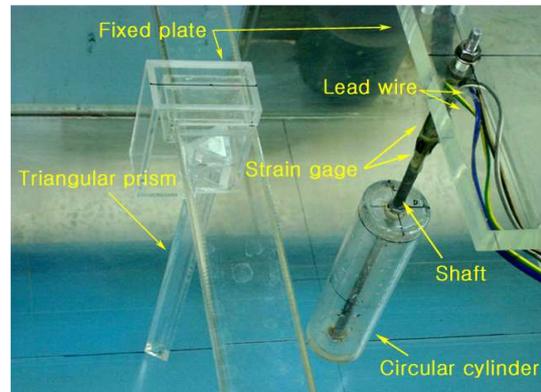
의미한다. 연구는 레이놀즈 수를 일정하게 한 상태에서 폭비 $H/B = 0.2, 0.4, 0.6$ 을 갖는 3가지의 삼각주에 대해 간격비 G/B 를 0.0에서부터 3.0까지 0.5씩 증가시켜가며 원주에 작용하는 양·항력을 측정함과 동시에 PIV에 의한 유동장을 가시화하였다.

2.2 양·항력의 측정실험

Fig. 2에 양·항력 측정실험을 위해 제작한 실험장치의 개략도 및 사진을 나타낸다. 실험 장치는 크게 삼각주, 고정판, 원주 및 측정 축으로 나누어 제작했다. 먼저 3개의 정삼각주는 두께 2mm, 길이 255mm, 한 변의 길이가 각각 10mm, 20mm 및 30mm인 투명 아크릴 판으로 제작했으며 상부를 Fig. 2에서처럼 고정판에 끼워 고정시켰다. 그리고 이 고정판은 Fig. 2(b)에 나타낸 바와 같이 회류수조 지지대에 끼워져 있고, 이 지지대는 수조 채널을 따라 움직일 수 있게 제작했다. 원주는 두께 3mm, 직경 50mm인 투명 아크릴 관을, 길이 180mm로 잘라 만들었으며, 상, 하 덮개는 두께 10mm의 아크릴 판으로 만들었다. 또한 상, 하 덮개의 중앙에 직경 12mm의 구멍을 뚫고, 측정 축을 장착하기 쉽게 고정용 너트를 부착하였다. 측정 축은 직경 8mm, 길이 345mm의 알루미늄의 봉을 가공하여 제작했다. 즉 봉의 하부 190mm는 나사를 가공하여 봉과 원주를 너트로 고정시켰다. 봉의 상부는 균일류 중에서 양·항력을 용이하게 분리하여 측정할 수 있도록 그림에서와 같이 전후, 좌우 방향으로 두께 2mm, 길이 15mm로 평평하게 깎았다. 그리고 그곳에 각 방향으로 2매씩(계 4매) 스트레인게이지를 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 보정



(a) Schematic diagram



(b) Photograph

Fig. 2 Schematic diagram and photograph of experimental device (unit : mm)

한 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. 실험은 레이놀즈 수를 고정시키고, 폭비 $H/B=0.2, 0.4, 0.6$ 인 정삼각주에 대해 간격비 G/B 를 $G/B=0.25\sim 3.0$ 범위 내에서 일정간격으로 증가시켜가면서 유체력을 측정했다. 구체적으로 Fig. 1에서와 같이 삼각주를 배치하고, 삼각주를 원주 전면 중심에서부터 25mm간격으로 상류방향으로 이동시켜가며 양·항력을 측정했다.

2.3 PIV를 이용한 가시화실험

Fig. 3에 PIV를 이용한 가시화 실험을 위해 제작한 실험장치의 사진을 나타낸다. 가시화 실험을 위한 원주는 직경 50mm, 길이가 170mm이며, 두께 2mm인 투명 아크릴 관으로 제작했다. 3개의 정삼각주는 두께 2mm, 길이 170mm, 한 변의

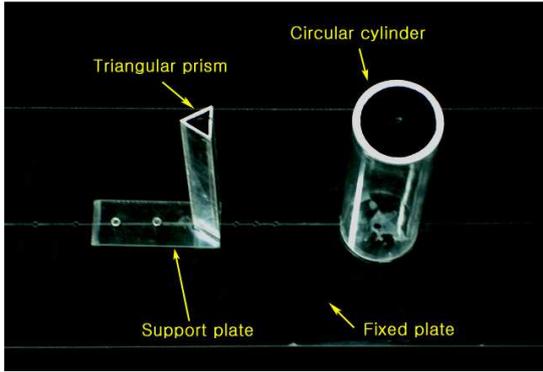


Fig. 3 Photograph of experimental device

길이가 각각 10mm, 20mm 및 30mm인 투명 아크릴 판으로 만들었으며, 각 삼각주 아래쪽에 폭 30mm, 길이 80mm의 받침대를 부착했고, 이 받침대 뒤편에 직경2mm의 나사용 구멍을 2곳 뚫어, 간격비 조정 시 이 받침대를 이동시켜서 나사로 받침대를 고정판에 고정시켰다.

Fig. 4에 PIV를 이용한 유동장 가시화 실험 장치의 개략도를 나타낸다. 실험은 Fig. 3에서 설명한 원주와 삼각주를 제작하여 Fig. 4에서와 같이 균일류가 흐르는 회류수조의 수로 내에 장착하고, 유동장을 가시화 하였다. 구체적으로 각 실험 모델을 수로 내에 설치한 후 회류수조 밖에서 Fig. 4에서와 같이 균일류와 수직, 수평방향으로 연속광 레이저에 의한 시트(sheet)상의 조명광을 비추고 원주의 상부에서 수직하방으로 고속도 카메라로 유동장을 촬영하였다.

추적 입자로는 평균직경이 100 μ m이고, 비중이 1.02인 구형의 PVC(Poly Vinyl Chloride)를 사용했다. 이때 회류수조 가시화부의 균일류 유속은 $U=0.18\text{m/s}$ 이며, 원주 한 변의 길이를 대표 길이로 잡아 환산한 레이놀즈 수 $Re=1.0 \times 10^4$ 로, 2.2절 양·항력 측정실험에서와 같게 했다. 이때 회류수조의 가시화부를 50mm 간격으로 유속분포를 측정하였는데 어느 단면에서도 유속분포는 평균치에 대한 오차가 $\pm 2\%$ 이내로 나타났다. 또한 이 영역에서의 난류강도는 0.012~0.06정도였다. 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

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: $\text{Ø}3.8 \times 11.4\text{mm}$
Resolution	1280 \times 1024pixel
Software	CACTUS 3.2
Error vector(%)	Average: about 0.1%

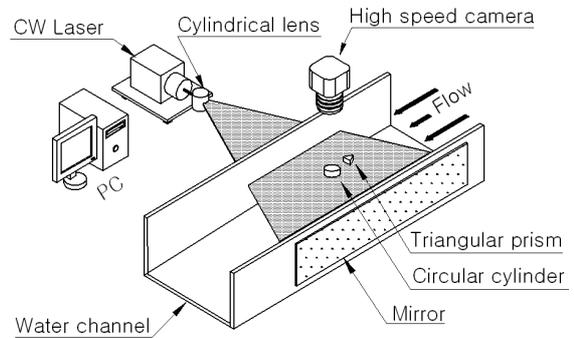


Fig. 4 Schematic structure of experimental device

실험에 사용한 PIV시스템의 주요규격은 Table 1과 같다.

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.

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho U^2 S} \tag{1}$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho U^2 S} \tag{2}$$

여기서 양력 L 및 항력 D는 각각 원주에 작용하는 균일류 U 와 수직방향 및 같은 방향의 힘의 성분이다. 또한 ρ 는 유체의 밀도, S는 수면 아래에 잠겨있는 원주의 균일류 방향으로의 투영

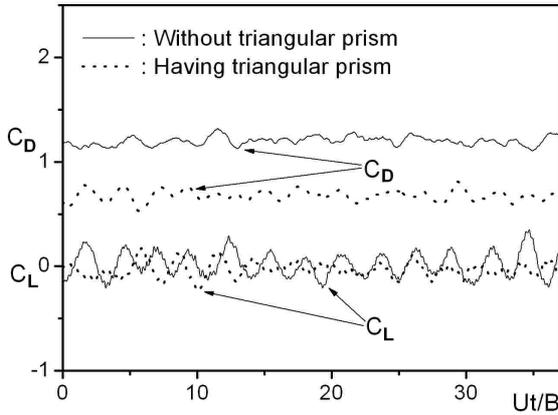


Fig. 5 Time variations of lift and drag coefficients (H/B=0.4, G/B=1.0)

면적을 나타낸다.

Fig. 5에 삼각주 폭비 H/B=0.4, 간격비 G/B=1.0에서의 원주의 양력계수 C_L 및 항력계수 C_D 의 시간변화를 나타낸다. 그림에서 횡축은 균일류 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 삼각주가 없는 실선에 비해 삼각주를 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 삼각주가 있는 점선 쪽이 삼각주가 없는 실선 쪽보다 작게 나타나 있다. 즉 원주의 상류측에 분리된 삼각주를 설치함으로써 항력을 저감시킬 수 있고 또한 양력의 진폭을 줄일 수 있어 동적 안정성도 향상시킬 수 있다.

Fig. 6에 다양한 삼각주의 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 1,024개의 항력계수 C_D 값을 평균한 값이다. 또한 평균항력감소율 $\overline{R_D}$ 는 삼각주 설치에 의한 평균항력계수 감소량을 삼각주를 설치하지 않은 원주의 평균항력계수로 나눈 백분율을 의미한다. 먼저 Fig. 6에서 간격비 G/B에 따른 평균항력계수 $\overline{C_D}$ 의 변화를 거시적으로 살펴보면 세가지 폭비에서 모두 간격

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

H/B	Optimum drag (G/B=1.0)		Total average drag	
	$\overline{C_D}$	$\overline{R_D}$ (%)	$\overline{C_D}$	$\overline{R_D}$ (%)
0.2	1.02	15.0	1.09	9.5
0.4	0.68	39.2	0.87	27.4
0.6	0.29	71.6	0.57	52.3

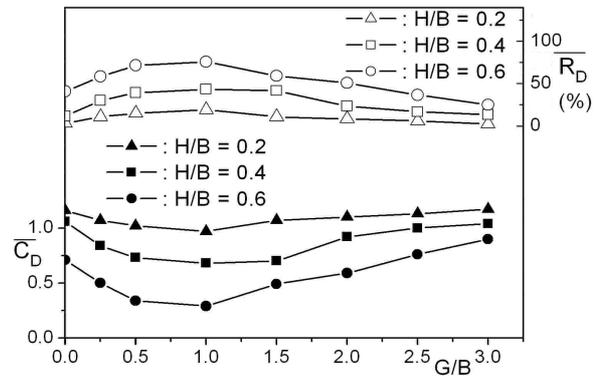


Fig. 6 Average drag coefficients and drag reduction rates with G/B and H/B

비가 증가할수록 평균항력계수가 감소했다가 G/B=1.0 부근에서 최소값을 갖으며, 그 후 간격비가 증가함에 따라 다소 증가하는 특성을 보이고 있다. 이때 평균항력감소율 $\overline{R_D}$ 는 간격비가 증가함에 따라 증가하다가 G/B=1.0 부근에서 세 경우 모두 최대값을 나타내며, 그 후 간격비가 증가함에 따라 감소하고 있다. 한편 같은 간격비에 있어서는 삼각주의 폭비가 클수록 평균항력감소율이 크게 나타나 있다.

Table 2에 각각의 분할판 폭비 H/B에 있어 최적 및 전체의 평균항력계수 $\overline{C_D}$ 및 평균항력감소율 $\overline{R_D}$ 을 나타낸다. Table 2에 나타낸 바와 같이 폭비 H/B=0.2, 0.4, 0.6에서 모두 간격비 G/B=1.0일 때, 최적으로 평균항력감소율이 최대가 되며, 또한 같은 간격비에서 평균항력 감소율은 삼각주 폭비가 클수록 크게 나타나며, 폭비 H/B=0.6일 때 최대 71.6%의 항력감소율을 보였다. 또한 본 실험구간에서 전체

평균항력감소를 역시 삼각주 폭비가 클수록 크게 나타났으며, 폭비 $H/B=0.6$ 일 때 전체 평균 52.3%의 항력감소율을 나타내고 있다. 한편 양력계수는 비정상적이고, 시간에 따라 그 평균값의 편차가 너무 크게 나타나 여기서는 생략하였다.

3.2 유동장 특성

Fig. 7에 나타낸 바와 같이 원주 중심에서 후류 방향으로 $3.0B$ 떨어진 곳에서 측정된 균일류와 수직방향의 속도 V 의 시간변화를 Fig. 8에 나타낸다. Fig. 8(a)는 삼각주를 갖지 않는 경우이고, (b)는 폭비 $H/B=0.4$ 및 간격비 $G/B=1.0$ 인 삼각주를 갖는 경우이다. 이때 속도 V 의 측정점은 Fig. 8에 나타낸 바와 같이 원주 중심에서 후류방향으로 $3.0B$ 떨어진 곳이다. Fig. 8(a) 및 (b)에 나타낸 바와 같이 두 경우 모두 속도변화의 주기성이 명확하게 나타나 있다. 또한 그 주기를 살펴보면 대략 Fig. 8(a)의 경우 1.8초, (b)의 경우 1.5초 정도이다. 또한 Fig. 8(a)와 (b)에서 진폭을 비교해보면 그 차이를 거의 없다. 즉 삼각주를 설치함으로써 설치하지 않은 본래의 원주에 비해 후류측 속도 V 의 진폭은 거의 차이가 없으나, 주파수는 20% 증가하였음을 알 수 있다.

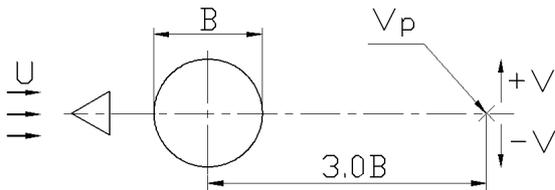


Fig. 7 Pick up point of V-velocity

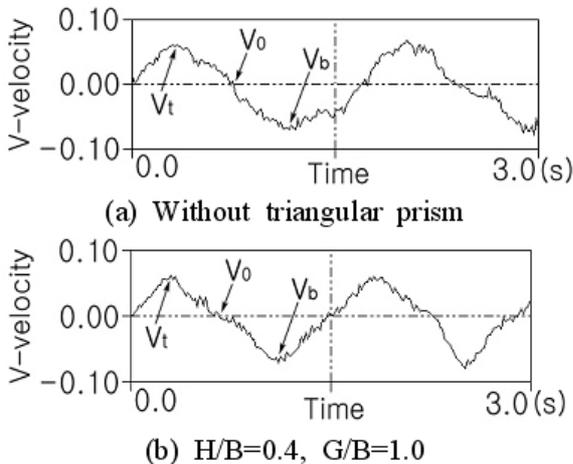
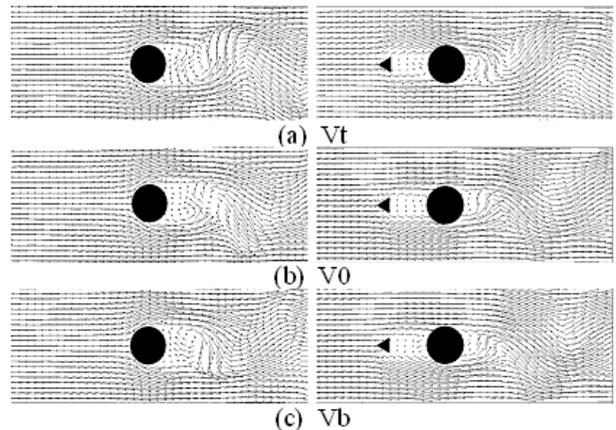


Fig. 8 Time variations of V-velocity at the wake region of circular cylinder

Fig. 9에 Fig. 8의 V_t , V_0 및 V_b 점에서의 속도 벡터를 나타낸다. Fig. 9에서 (a) V_t , (b) V_0 및 V_b 는 각각 Fig. 8의 V_p 점에서 V 방향의 속도 값이 최대, 0, 최소인 점의 속도벡터를 나타낸다. 먼저 삼각주가 없는 원주의 경우 Fig. 9(i)에서는 후류가 크게 진동하고 있으며, 그 흐름패턴은 시간에 따라 변하고 있다. 그리고 이 경우 (a)와 (c)에서의 후류패턴이 서로 반대방향으로 나타나 있어 흐름의 주기성을 확인할 수 있다. 다음으로 삼각주가 있는 원주의 경우 Fig. 9(ii)에서는 삼각주와 원주 사이에 흐름의 정체영역이 나타나 있고, 이것의 영향을 받아 원주 뒤편에도 시간에 관계없이 조그만 크기의 정체영역이 나타나 있다. 이 정체영역 뒤쪽에는 후류가 진동하고 있으나, 그 진폭은 Fig. 9(i)에서 보다 다소 작다. 삼각주의 유무에 따른 이러한 흐름패턴의 변화가 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 이 간격비에서 원주의 양, 항력감소를 초래한 것으로 판단된다.

Fig. 10에 Fig. 8의 V_t , V_0 및 V_b 점에서의 속도 분포를 나타낸다. 삼각주 유무에 따른 원주 주위의 속도분포를 비교해보면 삼각주가 없는 경우는 세 경우 모두 원주 후류측에 정체영역이 크게 나타나 있으며, 속도분포가 크게 진동하는 데 비해, 삼각주가 있는 경우는 세 경우 모두 원주 상류측과 하류측에 유사한 크기와 형태의 정체영역이 존재하고 있으며, 원주 후류측 속도분포의 진동은 단독 원주에 비해 작다. 또한 원주 뒤 부분을 수직으로 지나는 속도 분포선을 비교해보면 삼각주가 있는 경우가 없는 경우에 비해 세 경우



(i) Without triangular prism (ii) $H/B=0.4, G/B=1.0$

Fig. 9 Instantaneous velocity vectors around circular cylinder at V_t , V_0 and V_b points of Fig. 8 ($H/B=0.4, G/B=1.0$)

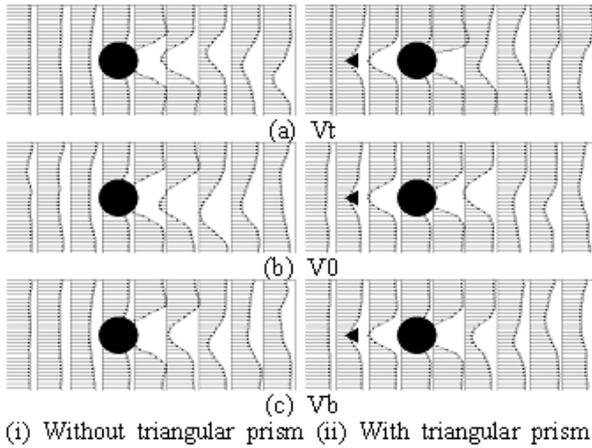


Fig. 10 Instantaneous velocity profiles around circular cylinder at V_t , V_0 and V_b points of Fig. 8 ($H/B=0.4$, $G/B=1.0$)

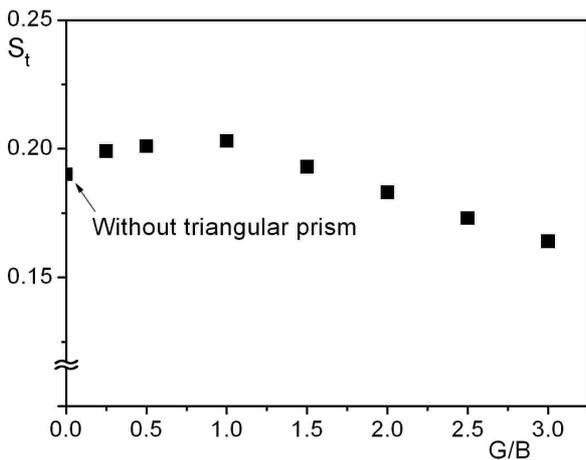


Fig. 11 Strouhal number with G/B ($H/B=0.4$)

모두 박리점이 원주 후방으로 이동해 있다. 이는 삼각주의 후류가 원주의 상, 하면의 경계층에 에너지를 공급해서, 이로 인해 원주의 박리점이 뒤쪽으로 이동했고 후류측 박리역을 감소시킨 것으로 판단된다. 특히 원주 상, 하류측 흐름의 정체영역이 원주 전, 후면의 압력차를 감소시켜 Fig. 5에 나타낸바와 같은 대폭적인 항력감소가 일어난 것으로 판단된다.

Fig. 11에 삼각주의 폭비 $H/B=0.4$ 에 있어 간격비 G/B 에 따른 Strouhal 수를 나타낸다. 이때 대표 주파수는 Fig. 7의 V_p 점에서 측정된 값이다. 여기서 Strouhal 수 St 는 대표주파수에 원주 지름을 곱한 값을 그 때의 균일류 값으로 나눈 무차원 값이다. Fig. 11에 나타낸바와 같이 Strouhal 수는 간격비가 증가함에 따라 다소 증가하다가 $G/B=1.0$ 에서 최대가 되며, 그 후 간격비가 증가할수록

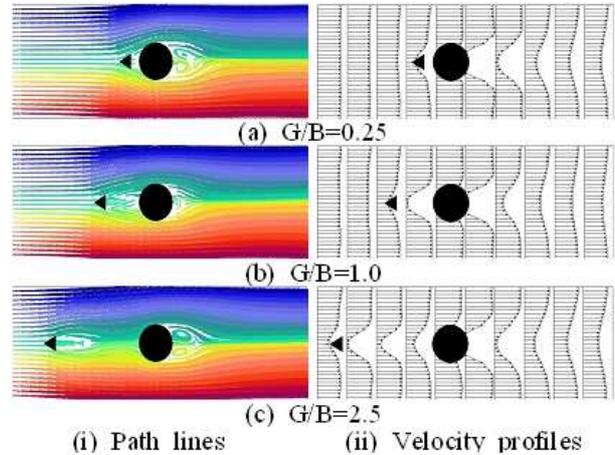


Fig. 12 Average flow patterns around circular cylinder with G/B ($H/B=0.4$)

감소하고 있다. 이는 Fig. 6의 평균항력감소율과 같은 특성을 나타내는데, Fig. 10에서 설명한 바와 같이 $G/B=1.0$ 에서 삼각주의 후류가 가장 높은 주파수로 원주 상, 하면에 에너지 공급을 하여 이 간격비 범위에서 항력감소율이 크게 나타난 것으로 판단된다.

Fig. 12에 삼각주의 폭비 $H/B=0.4$ 에 있어 간격비 G/B 에 따른 원주 주위의 시간평균 흐름패턴을 나타낸다. Fig. 12(i) 유적선을 살펴보면 간격비 G/B 의 크기와 관계없이 삼각주와 원주 사이에는 정체영역이 존재하고 있다. 그리고 원주 뒤쪽에는 상, 하면에 볼텍스가 생성되었다. 또한 Fig. 12(ii)의 속도분포에서도 알 수 있듯이 원주의 후류측 정체영역의 크기는 $G/B=1.0$ 의 경우가 $G/B=0.25$ 및 2.5 비해 매우 작다. Fig. 6에 나타낸 바와 같이 평균항력계수는 이 정체영역의 크기에 비례한다.

Fig. 13에 간격비 $G/B=1.0$ 에서 삼각주 폭비 H/B 에 따른 원주주위의 시간평균 흐름패턴을 나타낸다. Fig. 13에서 먼저 (i) 유적선을 보면 네 경우 모두 원주의 후류측의 상, 하에는 볼텍스가 존재해 있고, (ii) 속도벡터장을 살펴보면 삼각주가 있는 경우는 원주의 전, 후방에 정체영역이 존재하고 있다. 그리고 이 정체영역의 크기는 (iii)속도분포에서 더 명확하게 알 수 있는데, 원주의 상류측 정체영역은 삼각주의 폭비가 클수록 증가하는데 비해, 하류측은 정체영역은 삼각주 폭비와 관계없이 거의 일정하다. 결과적으로 삼각주의 폭비가 증가할수록 원주 상류측 정체영역 크기가 증가하여 항력이 더욱 감소하게 된다.

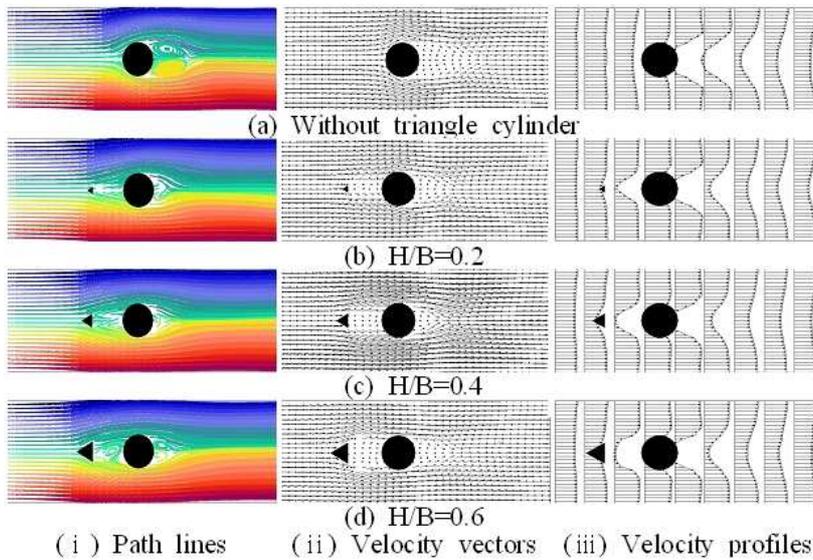


Fig. 13 Average flow patterns around circular cylinder with H/B at G/B=1.0

따라서 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 같은 간격비에서는 삼각주의 폭비가 증가할수록 평균항력감소율이 증가한다.

4. 결 론

본 연구는 원주의 상류측에 작은 삼각주 (Triangular prism)를 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 $H/B=0.2, 0.4, 0.6$ 인 삼각주에 대해 간격비 G/B 를 $G/B=0.0 \sim 3.0$ 범위 내에서 0.5씩 증가시켜가면서 원주에 작용하는 양, 항력의 감소특성 및 유동장 변화 특성을 조사했다.

실험결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 양·항력의 시간변화를 측정해 본 결과 원주의 상류측에 삼각주를 설치한 경우가 본래의 원주에 비해 항력의 크기와 양력의 진폭이 감소했다.
- (2) 삼각주의 폭비를 고정시킨 경우 원주의 항력감소율은 간격비가 증가할수록 증가하다 감소하는 특성을 보였다.
- (3) 같은 간격비에서는 삼각주의 폭비가 클수록 원주의 항력감소율이 증가했으며, 폭비 $H/B=0.6$ 일 때 최대 71.6%의 항력감소율을 보였다.
- (4) 원주의 Strouhal 수는 간격비가 증가할수록 증가하다 감소하는 특성을 보였다.

- (5) 삼각주를 설치한 경우 원주 상류측과 하류측에 정체영역이 나타났으며, 그 크기는 상류측은 삼각주의 폭비가 클수록 증가하는데 비해, 하류측은 거의 일정했다.

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, Part 2, pp. 321~335.
- (3) Guven, O., Farrell, C. and Patel, V. C., 1980, "Surface Roughness Effects on the Mean Flow Past Circular Cylinders," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 98, Part 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) Ozono, S., 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) 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.
- (12) Prasad, A. and Williamsion, C.H.K., 1997, "A method for the reduction of bluff body drag," *Journal Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 69-71, pp. 155~167.
- (13) Tsutsui, T. and Igarashi, T., 2002, "Drag Reduction of a Circular Cylinder in an Air-Stream," *Journal Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 90, pp. 527~541.