

작은 삼각주에 의한 정방형주의 유체력 저감특성

노기덕[†]

(Received September 19, 2014 ; Revised November 13, 2014 ; Accepted November 27, 2014)

Characteristics of Fluid Force Reduction of a Square Prism With a Small Triangular Prism

Ki-Deok Ro[†]

요약: 본 연구는 상류측에 작은 삼각주를 가진 정방형주의 유체력 저감 특성을 양·항력 측정 실험으로 파악한 것이다. 실험파라미터는 정방형주 한 변의 길이에 대한 삼각주의 폭비($H/B=0.2\sim0.6$) 및 정방형주 전면에서부터 삼각주까지의 거리 ($G/B=0\sim3$) 로 했다. 삼각주의 폭비를 고정시킨 경우 정방형주의 항력감소율은 간격비가 증가할수록 증가하다 감소하는 특성을 보였다. 또한 같은 간격비에서는 삼각주의 폭비가 클수록 정방형주의 항력감소율이 증가했으며, 폭비 $H/B=0.6$, 간격비 $G/B=1.5$ 일 때 최대 78.5%의 항력감소율을 보였다. 정방형주의 양력감소율은 수직평판의 폭비 및 간격비에 거의 영향을 받지 않았으며, 양력감소율의 평균치는 52.4% 정도였다.

주제어: 유체력 저감, 박리흐름, 비정상유동, 정방형주, 유동제어, 삼각주

Abstract: The characteristics of the fluid force reduction of a square prism having a small triangular prism at the upstream side was investigated by measuring of lift and drag on the square prism. The experimental parameters were the width ratios ($H/B=0.2\sim0.6$) of triangular prisms to the prism width and the gap ratios ($G/B=0\sim3$) between the square prism and the triangular prism. The drag reduction rate of the square prism was increased and then decreased with G/B in case of the same H/B , and was increased with H/B in case of the same G/B . The maximum drag reduction rate was represented by 78.5% at $H/B=0.6$ and $G/B=1.5$. The lift reduction rate of the square prism was hardly not affected by the width and gaps ratios, the average value was about 52.4%.

Keywords: Fluid force reduction, Separated flow, Unsteady flow, Square prism, Flow control, Triangular prism

1. 서론

균일류 중에 놓인 정방형주 주위의 흐름은 정체, 박리, 2차 박리 현상과 후류에서의 주기적인 갈만 볼텍스로 특징지어진다. 특히 정방형주 후류측의 와류진동은 이것으로 대표되는 대형 구조물의 동적안정성에 심각한 영향을 미치므로 동적안정성 향상과 항력감소를 위해 정방형주 주위의 유동장을 제어하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 정방형주의 유체력저감에 관한 지금까지의 연구를 살펴보면 다음과 같다.

[1]에서는 후류영역에 4개의 수평판을 설치하여 난류강도 및 하부유동의 급격한 편향을 억제하는 방법으로 항력을 감소시켰다.

[2]에서는 사각주 네모서리의 형태를 세 가지로 가공하여 유동장 특성실험을 행한 결과 각진 모서리를 가진 경우는 모서리에서 박리가 발생하였으나, 둥근 모서리인 경우

는 일단 박리한 후에 재부착하는 유동특성을 확인하였고, 후자인 경우가 항력, 양력특성이 가장 우수함을 보였다.

[3]에서는 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. 또한 이 경우 앞 모서리에서 박리한 흐름은 뒷모서리 부근에 재부착하여 순환을 형성했고, 박리역의 크기도 감소했음을 가시화 실험으로 확인하였다[4].

[5]에서는 정방형주 뒷면 중앙에 분리판을 부착하여 분리판이 항력감소에 미치는 영향을 와류추적법으로 수치계산하였다. 분리판 부착에 의해 정방형주 후류측 소용돌이를 억제하여 항력이 감소했고, 분리판의 길이를 증가시킬수록 항력계수는 작아졌지만, 그 감소율은 분리판 길이가

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8824-838X>): Department of Mechanical System Engineering · Institute of Agriculture & Life Science, Gyeongsang National University, 38 Cheondaegukchi-gil, Tongyeong, Gyeongnam, 650-160, Korea, E-mail: rokid@gnu.ac.kr, Tel: 055-772-9103

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

짧았을 때 상대적으로 크게 나타났다.

[6]에서는 레이놀즈 수 $Re=150$ 의 저 레이놀즈 수 영역에서 정방형주의 후류측에 부착이 아닌 분리된 분할판(Detached splitter plate)을 설치하는 방법으로는 처음으로 정방형주의 항력저감을 시도했는데 분리판 설치에 의해 정방형주의 항력계수, 양력계수의 진폭 및 스트로할(Strouhal) 수가 감소했음을 수치해석적으로 나타냈다.

[7]에서는 레이놀즈 수 $Re=10,000$ 의 고 레이놀즈 수 영역에서 정방형주의 후류측에 분리된 분할판을 설치하여, 간격비 $G/B=0.75$ 에서 최대 19.9%의 항력감소율을 얻었고, 최신 와법을 이용하여 분할판의 유, 무에 따른 정방형주 주위의 속도장 및 압력장의 변화를 계산했다[8].

[10]에서는 정방형주의 상류측에 작은 원주봉을, [10] 및 [11]에서는 작은 수직평판을 설치하여 정방형주에 작용하는 항력을 현저하게 감소시켰다. 그리고 항력이 감소한 주된 원인은 상류측에 놓인 원주봉 또는 수직평판의 후류의 정체영역이 정방형주 항력저감에 영향을 미쳤다고 보고하고 있다.

한편 삼각주는 Figure 1에서와 같이 배치하면 뒷 모서리에서 박리하기 쉬워, 후류의 정체영역이 쉽게 만들어지며, 항력계수도 정방형주에 비해 적다.

따라서 본 연구에서는 정방형주의 상류측에 작은 삼각주를 설치하여, 삼각주한 변 길이와 정방형주 후면에서부터 삼각주까지의 간격을 변수로 하여 정방형주에 작용하는 양·항력 저감특성을 유체력 측정실험으로 파악하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험모델

Figure 1에 실험모델을 나타낸다.

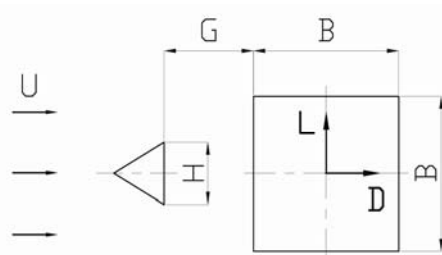


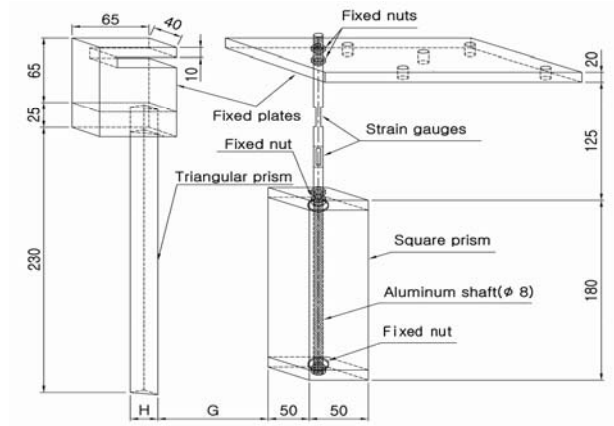
Figure 1: Experimental model

균일류 U 중에 한 변의 길이가 B 인 정방형주가 놓여 있고, 그 상류측 중심에 한 변의 길이가 H 인 정삼각주가 정방형주 전면으로부터 G 만큼 떨어진 곳에 놓여 있다. 이때 정방형주에 작용하는 항력 D 는 균일류와 같은 방향으로 작용하는 유체력 성분을, 양력 L 은 균일류와 수직 상방향으로 작용하는 유체력 성분을 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 증

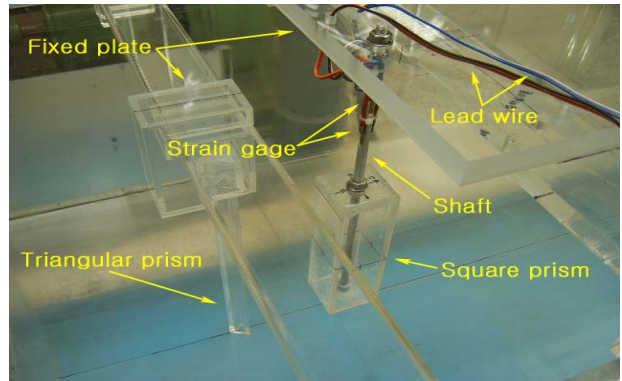
가시켜가며 정방형주에 작용하는 양·항력을 측정하여 그 저감특성을 파악하고자 한다.

2.2 양·항력의 측정

Figure 2에 양·항력 측정실험을 위해 제작한 실험장치의 개략도 및 사진을 나타낸다.



(a) Schematic diagram



(b) Photograph

Figure 2: Schematic diagram and photograph experimental device (unit : mm)

실험 장치는 크게 삼각주, 고정판, 정방형주 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 회류수조 지지대에 끼워져 있고, 이 지지대는 수조 채널을 따라 움직일 수 있게 제작했다. 정방형주는 크기가 $50 \times 50 \times 180$ mm이며 각 면은 두께 3mm, 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 정방형주를 너트로 고정시켰다. 봉의 상부는 균일류 중에서 양·항력을 용이하게 분리하여 측정할 수 있도록 그림에서와 같이 전후, 좌우 방향으로 두께 3.4mm, 길

이 15mm로 평평하게 깎았다. 그리고 그곳에 각 방향으로 2매씩(계 4매) 스트레인이케지를 부착하고 브릿지 회로를 결성하여 스트레인 양으로 양·항력을 측정했다. 각 채널(계 2채널)의 브릿지 회로에서 나온 출력파형은 스트레인 앰프, AD변환기를 거친 다음 퍼서널 컴퓨터에서 미리 보정한 계수에 의해 양·항력 값으로 출력된다. 이때 회류수조 측정부의 균일류 유속은 $U=0.182\text{m/s}$ 이며, 정방형주 한변의 길이를 대표길이로 잡아 환산한 레이놀즈 수 $Re=1.0 \times 10^4$ 이다. 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 Figure 1에서와 같이 삼각주를 배치하고, 삼각주를 정방형주 전면 중심에서부터 25mm간격으로 상류방향으로 이동시켜가며 양·항력을 측정했다.

3. 실험결과 및 고찰

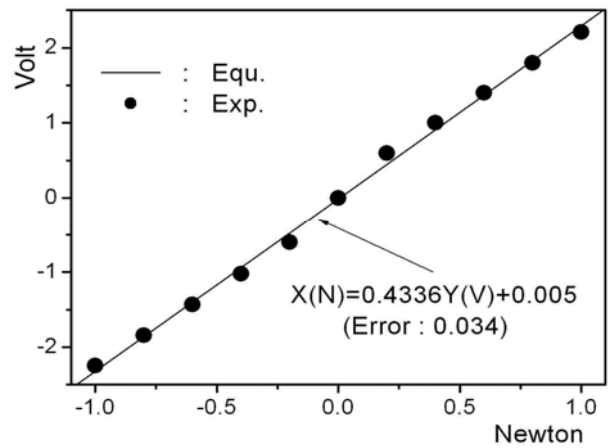
먼저 정방형주의 유체역학적 특성을 나타내는 계수, 즉 양력계수 C_L , 항력계수 C_D 는 다음과 같이 정의한다.

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

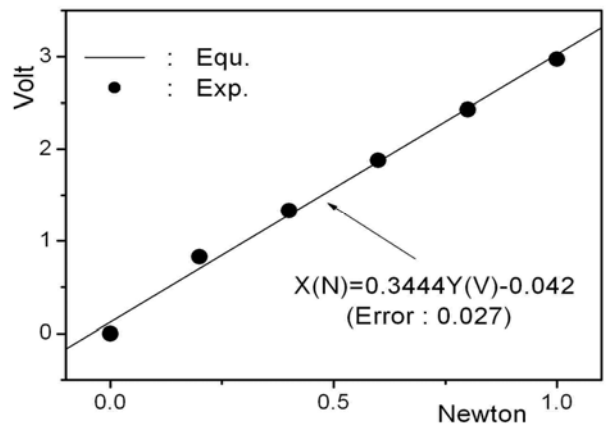
$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U^2 S} \quad (2)$$

여기서 양력 L 및 항력 D 는 각각 정방형주에 작용하는 균일류 U 와 수직방향 및 같은 방향의 힘의 성분이다. 또한 ρ 는 유체의 밀도, S 는 수면 아래에 잠겨있는 정방형주의 균일류 방향으로의 투영면적을 나타낸다.

다음으로 Figure 3에 Figure 2의 측정 축에 대하여 실시한 양력 및 항력의 보정(calibration) 결과를 나타낸다. 양력 및 항력의 보정은 물을 채우지 않은 회류수조의 수로에 Figure 2의 정방형주를 설치하고 정방형주 길이의 1/2되는 지점에서 양력의 \pm 방향, 항력은 +방향으로 정하중을 가하여 행하였다. 구체적으로 양력은 $\pm 1.0\text{N}$ 의 범위 내에서 0.2N씩, 항력은 +1.0N의 범위 내에서 0.2N씩 정하중을 증가시켜가며, 각각의 하중에 대응하는 출력전압을 구하였다. 그리고 이 자료를 이용하여 선형최소자승근사법으로 하중과 출력전압 관계식을 구하였다. Figure 3에 나타낸 바와 같이 보정 결과는 양력, 항력 모두 직선선상에 있었으며, 실험값과 선형관계식에서 구한 값에서의 평균제곱근(RMS, root-mean square) 오차는 양력, 항력 모두 0.04이내였다. 즉 등근 측정 축을 Figure 2에서와 같이 전후, 좌우방향으로 평평하게 가공하면 그 곳에 스트레인 게이지를 쉽게 부착할 수 있고, 축에 작용하는 힘을 x, y방향으로 용이하게 분리시킬 수 있다.



(a) Lift



(b) Drag

Figure 3: Calibrations of lift and drag

Figure 4에 삼각주 폭비 $H/B=0.40$, 간격비 $G/B=1.5$ 에서의 정방형주의 양력계수 C_L 및 항력계수 C_D 의 시간변화를 나타낸다. 그림에서 횡축은 균일류 U 및 측정시간 t 를 정방형주의 한 변의 길이 B 로 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 진폭은 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 훨씬 작게 나타나 있다. 즉 정방형주의 삼류측에 분리된 삼각주를 설치함으로써 항력을 저감시킬 수 있고 또한 양력의 진폭을 대폭 줄일 수 있어 동적 안정성도 크게 향상시킬 수 있다.

Figure 5에 다양한 삼각주의 폭비 H/B 에 있어 간격비 G/B 에 따른 평균항력계수 $\overline{C_D}$ 및 평균항력감소를 $\overline{R_D}$ 의 변화를 나타낸다.

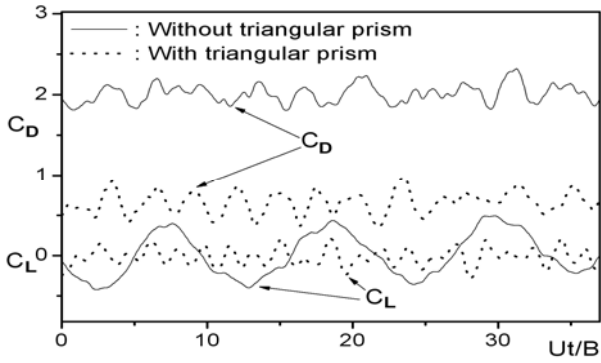


Figure 4: Time variations of lift and drag coefficients (H/B=0.4, G/B=1.5)

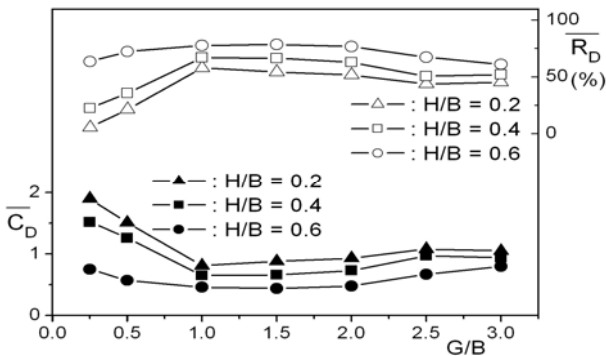


Figure 5 Average drag coefficients and drag reduction rates with G/B and H/B

여기서 평균항력계수 $\overline{C_D}$ 의 각 점은 Figure 4에 나타난 1,024개의 항력계수 C_D 값을 평균한 값이다. 또한 평균항력 감소율 $\overline{R_D}$ 는 삼각주 설치에 의한 평균항력계수 감소량을 삼각주를 설치하지 않은 정방형주의 평균항력계수로 나눈 백분율을 의미한다. 먼저 Figure 5에서 간격비 G/B에 따른 평균항력계수 $\overline{C_D}$ 의 변화를 거시적으로 살펴보면 세가지 폭비에서 모두 간격비가 증가할수록 평균항력계수가 감소했다가 G/B=1.0~1.5에서 최소값을 갖으며, 그 후 간격비가 증가함에 따라 다소 증가하는 특성을 보이고 있다. 이때 평균항력감소율 $\overline{R_D}$ 는 간격비가 증가함에 따라 증가하다가 G/B=1.0~1.5 범위에서 세 경우 모두 최대값을 나타내며, 그 후 간격비가 증가함에 따라 감소하고 있다. 한편 같은 간격비에 있어서는 삼각주의 폭비가 클수록 평균항력감소율이 크게 나타나 있다.

Table 1에 각각의 분할판 폭비 H/B에 있어 최적의 간격비 및 그곳에서의 평균항력계수 $\overline{C_D}$ 및 평균항력감소율 $\overline{R_D}$ 를 나타낸다. Table 1에 나타난 바와 같이 폭비 H/B=0.2 및 0.4에서는 간격비 G/B=1.0일 때, H/B=0.6일 때는 G/B=1.5일 때 평균항력감소율이 최대가 된다. 그리고 평균항력 감소율은 삼각주 폭비가 클수록 크게 나타나며, 폭비

H/B=0.6일 때 최대 78.5%의 항력감소율을 보였다.

Table 1: 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	0.81	57.8
0.4	1.0	0.65	66.8
0.6	1.5	0.44	78.5

Figure 6에 다양한 삼각주의 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.

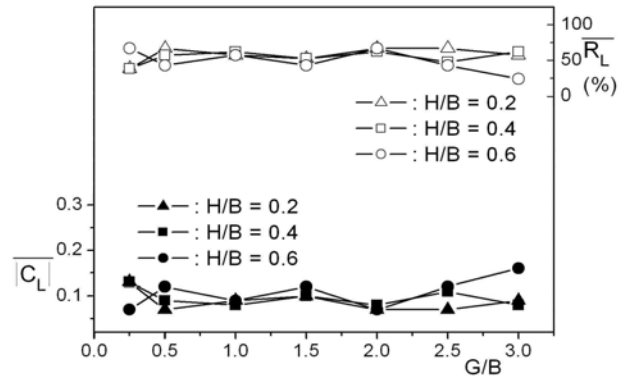


Figure 6 Average lift coefficients and lift reduction rates with G/B and H/B

Figure 6에서 양력계수의 절대치를 평균한 $\overline{C_L}$ 의 각 점은 Figure 4에 나타난 1,024개의 양력계수 C_L 값의 절대치를 평균한 값이다. 여기서 양력계수는 0점을 중심으로 진동하기 때문 시간평균하면 거의 0에 가까운 값을 갖게 된다. 그래서 양력에 의한 정방형주의 진폭, 즉 동적안정성을 파악하기 위해 양력계수의 절대치를 평균하였다. 또한 양력감소율 $\overline{R_L}$ 는 삼각주 설치에 의한 양력계수 절대치의 감소량을 삼각주를 설치하지 않은 정방형주의 양력계수의 절대치를 평균한 양력계수로 나눈 백분율을 의미한다. Figure 6에서 간격비 G/B에 따른 평균양력계수 $\overline{C_L}$ 및 평균양력감소율 $\overline{R_L}$ 의 변화를 살펴보면 세가지 폭비에서 모두 간격비가 증가하더라도 두 값 모두 거의 일정한 값을 유지하고 있다. 정방형주의 양력은 상류측에 설치한 삼각주 후류의 진동에 영향을 받는 데, 이는 삼각주의 크기 및 정방형주와의 거리에 그다지 영향을 받지 않고 있음을 의미하고 있다. 세가지 폭비에서 평균양력계수 및 평균양력감소율의 값을 각각 전체 평균해 보면 $\overline{C_L}$ =0.10 및 $\overline{R_L}$ =52.4%를 나타내고 있어 정방형주 상류측에 삼각주를 설치하면 정방형주의 항력감

소는 물론 양력의 진폭도 대폭 감소하여 동적안정성도 크게 개선됨을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구는 정방형주의 상류측에 작은 삼각주(Triangle cylinder)를 설치한 경우 정방형주의 주위의 유동장 특성을 양·항력측정으로 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 정방형주에 작용하는 양, 항력의 감소특성을 조사했다. 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 양·항력의 시간변화를 측정해 본 결과 정방형주의 상류측에 삼각주를 설치한 경우가 본래의 정방형주에 비해 항력의 크기와 양력의 진폭이 대폭 감소했다.

(2) 삼각주의 폭비를 고정시킨 경우 정방형주의 항력감소율은 간격비가 증가할수록 증가하다 감소하는 특성을 보였다.

(3) 같은 간격비에서는 삼각주의 폭비가 클수록 정방형주의 항력감소율이 증가했으며, 폭비 $H/B=0.6$, 간격비 $G/B=1.5$ 일 때 최대 78.5%의 항력감소율을 보였다.

(4) 정방형주의 양력감소율은 삼각주의 폭비 및 간격비에 거의 영향을 받지 않았으며, 양력감소율의 평균치는 52.4% 정도였다.

참고문헌

[1] B. Khalighi, S. Zang, C. Koromilas, S. R. Balkanyi, and Luis P. Bernal, "Experimental and computational study of unsteady wake flow behind a bluff body with a drag reduction device," Society of Automotive Engineers, 2001-01B-207, pp. 1-15, 2001.

[2] T. Tamura and 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, no. 1-3, pp. 135-145, 1999.

[3] K. D. Ro, K. S. Kim, "Fluid force reduction characteristics of a square prism having fences on the corner," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 30, no. 3, pp. 389-395, 2006 (in Korean).

[4] K. D. Ro, K. S. Kim, and S. K. Oh, "The visualization of the flowfield around square prism having fences using the PIV," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 32, no. 1, pp. 94-99, 2008.

[5] W. C. Park, "Effect of the length of a splitter plate on drag reduction," Transactions of the Korean

Society of Mechanical Engineers B, vol. 17, no. 11, pp. 2809-2815, 1993 (in Korean).

[6] Con J. Doolan, "Flat-plate interaction with the near wake of a square cylinder," Journal of the American Institute of Aeronautics and Astronautics, vol. 47, no. 2 pp. 475-478, 2009.

[7] K. D. Ro, S. M. Yoon, D. H. Choi, J. H. Kim, and E. C. Sim, "Drag reduction on a square prism using a detached splitter plate," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 36, no. 6, pp. 808-813, 2012 (in Korean).

[8] K. D. Ro, "Characteristic calculation of flowfield around a square prism having a detached splitter plate using vortex method," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 37, no. 2, pp. 156-162, 2013.

[9] T. Igarashi, "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.

[10] H. Sakamoto, K. Tan, N. Takeuchi, and H. Haniu, "Suppression of fluid forces acting on a square prism by passive control," Journal of Fluids Engineering, vol. 119, pp. 506-511, 1997.

[11] K. D. Ro, D. B. Jo, Y. J. Yoon, and S. J. Park, "Experiments of flowfield of a square prism having a small vertical plate," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 38, no. 6, pp. 900-908, 2014 (in Korean).