

PIV에 의한 정면에 삼각주를 가진 정방형주 주위의 유동장 특성분석

노기덕[†] · 김재동[‡]

(Received November 6, 2015 ; Revised February 2, 2016 ; Accepted February 5, 2016)

Investigation of flowfield characteristics of a square prism having a front triangular prism by PIV

Ki-Deok Ro[†] · Jae-Dong Kim[‡]

요약: 본 연구는 상류측에 작은 삼각주를 가진 정방형주의 유동장 특성을 정방형주 한 변의 길이에 대한 삼각주의 폭비 및 정방형주 전면에서부터 삼각주 후면까지의 간격을 변수로 하여 PIV를 이용한 가시화실험으로 파악한 것이다. 그 결과 요약하면 다음과 같다. 정방형주 후류측 스트로할 수는 항력감소율과 같은 특성을 나타내었는데, 간격비가 증가할 수록 증가한 후 감소하는 특성을 보였다. 삼각주를 설치한 경우 정방형주 상류측과 하류측에 정체영역이 나타났으며, 그 정체영역의 크기는 정방형주의 상류측은 삼각주의 폭비가 클수록 증가하는데 비해, 하류측은 오히려 감소했다.

주제어: 유체력 저감, 입자영상유속계, 정방형주, 유동제어, 삼각주

Abstract: The flowfield characteristics of a square prism having a small triangular prism at the upstream side were investigated by visualizing the flow field using PIV. The ratio of the width of the triangular prism to that of the square prism and the gap ratios between the square and triangular prisms were selected as the experimental parameters. The results are summarized as follows. The Strouhal number measured on the wake side of the square prism, which had the same characteristics as the drag reduction rate, increased, and then decreased with the gap ratio for the same width ratio. For a square prism having a small triangular prism, the stagnation regions were represented at the upstream and downstream sides of the square prism. The size of the stagnation region increased with the width ratio at the upstream side of the square prism, and decreased at the downstream side.

Keywords: Fluid force reduction, PIV, Square prism, Flow control, Triangular prism

1. 서론

일반적으로 물체주위의 유동을 제어해서 항력을 감소시키는 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 산업현장에 응용하기 쉽다. 한편 정방형주로 대표되는 유체역학적 문제로서는 강풍에 노출된 빌딩, 교량, 철도차량 및 컨테이너 트럭과 같은 대형 구조물에서부터 냉각팬 앞에 놓인 반도체 주위의 흐름 등 수없이 많다. 정방형주 후류측의 와류진동은 이것으로 대표되는 구조물의 동적안정성에 심각한 영향을 미치므로 동적안정성 향상과 항력감소를 위해 정방형주 주위의 유동장을 제어하는 연구가 활발히 진행되고 있으며, 특히 수동적 기법에 의한 정방형주의 유체력 저감에 관한 지금까지의 연구를 살펴보면 다음과 같다.

Tamura *et al.* [2]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.

Ro *et al.* [3]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.

Park [4]은 정방형주 뒷면 중앙에 분할판을 부착하여 분할판이 항력감소에 미치는 영향을 와류추적법으로 수치계산하였다. 분할판 부착에 의해 정방형주 후류측 소용돌이를 억제하여 항력이 감소했고, 분할판의 길이를 증가시킬 수록 항력계수는 작아졌지만, 그 감소율은 분할판 길이가

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

[‡] Institute of Marine Engineering, E-mail: jdkim@gnu.ac.kr, Tel: 055-772-9042

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 나타났다고 보고했다.

Doolan[5]은 정방형주의 후류측에 부착이 아닌 분리된 분할판(Detached splitter plate)을 설치하는 방법으로는 처음으로 정방형주의 항력저감을 시도했다.

Ro *et al.* [6] 정방형주의 후류측으로 분리된 분할판(Detached splitter plate)을 설치한 후, 양·항력변화를 측정하여, 최대 24.2%의 항력감소율을 보였고, PIV에 의한 가시화 실험 [7] 및 와법에 의한 유동장 특성계산 [8]을 통해 분할판에 의해 항력감소가 생기는 이유를 명확하게 파악하였다.

Igarashi [9]는 정방형주의 상류측에 작은 원주봉을, Sakamoto *et al.* [10] 및 Ro *et al.* [11]은 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.

최근 Ro [12]는 정방형주의 상류 측에 작은 삼각주를 설치하여 정방형주에 작용하는 양·항력 측정된 결과, 최대 78.5%의 항력감소율과 평균 52.4%의 양력감소율을 보였다. 이는 삼각주의 한 모서리를 상류 측으로 향하게 하면 뒷모서리에서 박리하기 쉬워, 후류의 정체영역이 쉽게 만들어지므로 유체력 저감특성이 우수한 것으로 추정되나 그 구체적인 이유는 유동장 가시화 실험을 통하여 알 수 있다.

따라서 본 연구에서는 정방형주의 상류측에 작은 삼각주를 설치하여, 삼각주한 변 길이와 정방형주 후면에서부터 삼각주까지의 간격을 변수로 하여 정방형주 주위의 유동장을 PIV를 이용한 특성해석으로 정방형주에 작용하는 유체력 저감특성의 원인을 정확하게 파악하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험모델

Figure 1에 실험모델을 나타낸다. 균일류 U중에 한 변의 길이가 B인 정방형주가 놓여 있고, 그 상류측 중심에 한 변의 길이가 H인 정삼각주가 정방형주 전면으로부터 G만큼 떨어진 곳에 놓여 있다. 이때 정방형주에 작용하는 항력 D는 균일류와 같은 방향으로 작용하는 유체력 성분은, 양력 L은 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 증가시켜가며 정방형주 주위의 유동장 특성을 PIV를 이용한 가시화 실험으로 정확하게 파악하고자 한다.

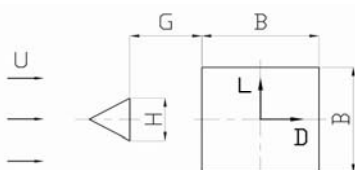


Figure 1: Experimental model

2.2 PIV를 이용한 가시화 실험

Figure 2에 PIV를 이용한 가시화 실험을 위해 제작한 정면에 삼각주를 가진 정방형주의 사진을 나타낸다.

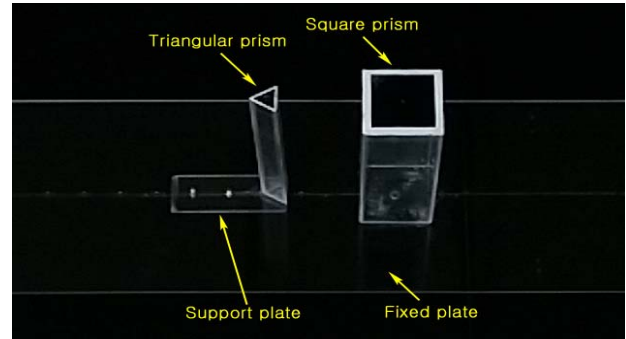


Figure 2: Photograph of a square prism having a front triangular prism

실험 장치는 크게 정방형주, 삼각주 및 고정판으로 나누어 제작했고, 가시화할 때 레이저 빛이 잘 통과할 수 있도록 투명아크릴 판으로 만들었다. 정방형주는 크기가 $50 \times 50 \times 150 \text{mm}$ 이며 각 면은 두께 2mm인 아크릴 판으로 제작했다. 3개의 정삼각주는 두께 2mm, 길이 150mm, 한 변의 길이가 각각 10mm, 20mm 및 30mm인 투명 아크릴 판으로 만들었으며, 각 삼각주 아래쪽에 폭 30mm, 길이 80mm의 받침대를 부착했고, 이 받침대 뒤면에 직경2mm의 나사용 구멍을 2곳 뚫어, 간격비 조정 시 이 받침대를 이동시켜서 나사로 받침대를 Figure 2에서처럼 고정판에 고정시켰다.

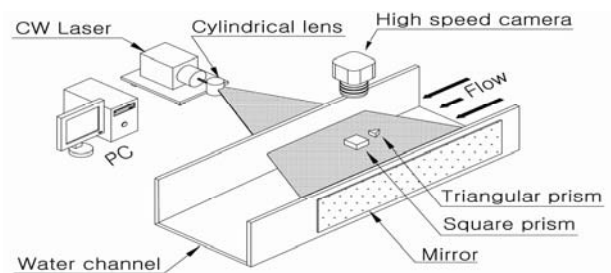


Figure 3: Schematic structure of experimental device

Figure 3에 PIV를 이용한 유동장 가시화 실험장치의 개략도를 나타낸다. 실험은 앞서 설명한 정방형주와 삼각주를 제작하여 Figure 3에서와 같이 균일류가 흐르는 회류수조의 수로 내에 장착하고, 유동장을 가시화 하였다. 구체적으로 각 실험모델을 수로 내에 설치한 후 회류수조 밖에서 Figure 3에서와 같이 균일류와 수직, 수평방향으로 연속광 레이저에 의한 시트(sheet)상의 조명광을 비추고 정방형주의 상부에서 수직하방으로 고속도 카메라로 유동장을 촬영하였다. 추적입자로는 평균직경이 $100 \mu\text{m}$ 이고, 비중이 1.02인 구형의 PVC(Poly Vinyl Chloride)를 사용했다. 이때 회류수조 가시화부의 균일류 유속은 $U=0.182 \text{m/s}$ 이며, 정방형주

에서 한번의 길이를 대표길이로 설정하여 환산한 레이놀즈 수는 $Re=1.0 \times 10^4$ 로, 양항력 측정실험[12]에서와 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 ~ 0.06 정도였다. 한 개의 실험변수에 대한 연속 촬영시간은 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 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 1024pixel
Software	CACTUS 3.2
Error vector(%)	Average: about 0.1%

3. 실험결과 및 고찰

Figure 4에 나타난 바와 같이 정방형주 중심에서 후류방향으로 $3.0B$ 떨어진 곳에서 측정한 균일류와 수직방향의 속도 V 의 시간변화를 Figure 5에 나타낸다. Figure 5(a)는 삼각주를 갖지 않는 경우이고, (b)는 폭비 $H/B=0.4$ 및 간격비 $G/B=1.5$ 인 삼각주를 갖는 경우이다. 이때 속도 V 의 측정점은 Figure 5에 나타난 바와 같이 정방형주 중심에서 후류방향으로 $3.0B$ 떨어진 곳이다. Figure 5(a) 및 (b)에 나타난 바와 같이 두 경우 모두 속도변화의 주기성이 명확하게 나타나 있다. 또한 그 주기를 살펴보면 대략 Figure 5(a)의 경우 2.3초, (b)의 경우 1.2초 정도이다. 또한 Figure 5(a)에 비해 (b)의 경우가 다소 진폭도 감소하고 있다. 즉 삼각주를 설치함으로써 설치하지 않은 본래의 정방형주에 비해 후류측 속도 V 의 진폭은 다소 감소하였으나, 주파수는 거의 2배로 증가하였음을 알 수 있다.

Figure 6에 Figure 5의 V_t , V_o 및 V_b 점에서의 속도벡터를 나타낸다. Figure 6에서 (a) V_t , (b) V_o 및 (c) V_b 는 각각의 V_p 점에서 V 방향의 속도 값이 최대, 0, 최소인 점의 속도벡터를 나타낸다. 먼저 삼각주가 없는 정방형주의 경우 Figure 6(i)에서는 후류가 크게 진동하고 있으며, 후류측 정체영역은 보이지 않고 있다. 그리고 이 경우 (a)와 (c)에서의 후류의 패턴이 서로 반대방향으로 나타나 있어 흐름의 주기성을 확인할 수 있다. 다음으로 삼각주가 있는 정방형주의 경우 Figure 6(ii)에서는 삼각주와 정방형주 사이에 흐름의 정체영역이 나타나 있고, 정방형주 뒤편에도 시간에 관계없이 일정한 크기의 정체영역이 나타나 있다. 정체영역 뒤편에는 후류가 진동하고 있으나, Figure 6(i)에 비해 그 진폭

은 작게 나타나 있다. 삼각주의 유무에 따른 이러한 흐름패턴의 변화가 Figure 5에 나타난 바와 같이 정방형주의 주파수와 진폭 변화를 초래한 것으로 판단된다.



Figure 4: Pick up point of V-velocity

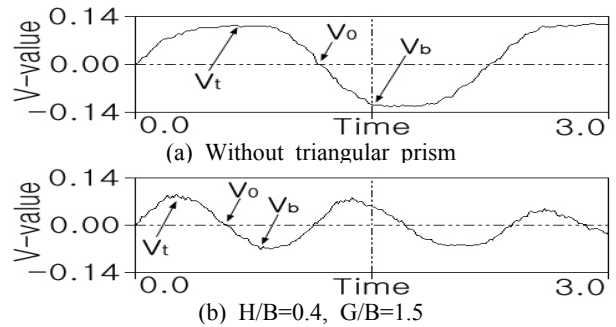


Figure 5: Time variations of V-velocity at the wake region of square prism

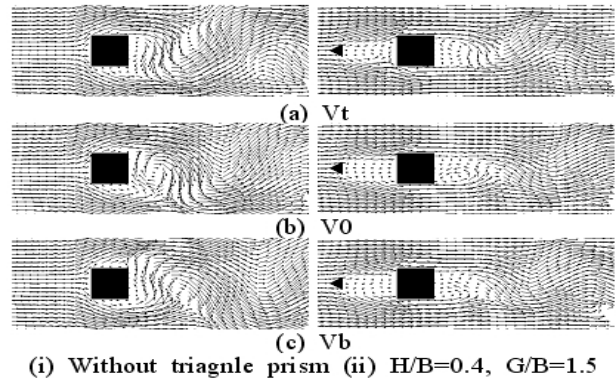


Figure 6: Instantaneous velocity vectors around square prism at V_t , V_o and V_b points of Figure 5

Figure 7에 Figure 5의 V_t , V_o 및 V_b 점에서의 속도분포를 나타낸다.

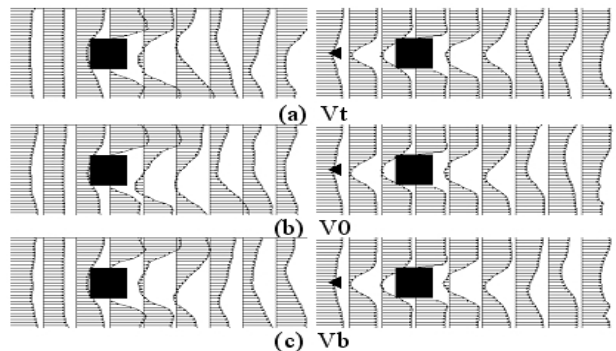


Figure 7: Instantaneous velocity profiles around square prism at V_t , V_o and V_b points of Figure 5

삼각주 유무에 따른 정방형주 주위의 속도분포를 비교해보면 삼각주가 없는 경우는 정방형주 후류측 속도분포가 크게 진동하는 데 비해, 삼각주가 있는 경우 Figure 6에서 언급한 바와 같이 정방형주 상류측과 하류측에 세 경우 모두 유사한 크기와 형태의 정체영역이 존재하고 있다. 또한 정방형주 중심을 수직으로 지나는 속도분포선을 비교해보면 삼각주가 없는 경우가 있는 경우에 비해 세 경우 모두 경계층 두께가 두껍게 나타나 있다. 이는 삼각주의 후류가 정방형주의 상, 하면의 경계층에 에너지를 공급해서, 경계층이 얇아진 것으로 판단된다.

Figure 8에 삼각주의 폭비 $H/B=0.4$ 에 있어 간격비 G/B 에 따른 스트로할 수를 나타낸다. 이때 대표주파수는 Figure 4의 V_p 점에서 측정된 값이다. 여기서 스트로할 수 St 는 대표주파수에 정방형주 한 번의 길이를 곱한 값을 그 때의 균일류 값으로 나눈 무차원 값이다. Figure 8에 나타낸 바와 같이 스트로할 수는 간격비가 증가함에 따라 증가하다가 $G/B=1.0\sim 1.5$ 에서 최대가 되며, 그 후 간격비가 증가할수록 감소하고 있다. 이는 Figure 9의 평균항력감소율과 같은 특성을 나타내는데, Figure 7에서 설명한 바와 같이 $G/B = 1.0\sim 1.5$ 에서 삼각주의 후류가 가장 높은 주파수로 정방형주 상, 하면에 에너지를 공급하여 이 간격비 범위에서 항력감소율이 크게 나타난 것으로 판단된다.

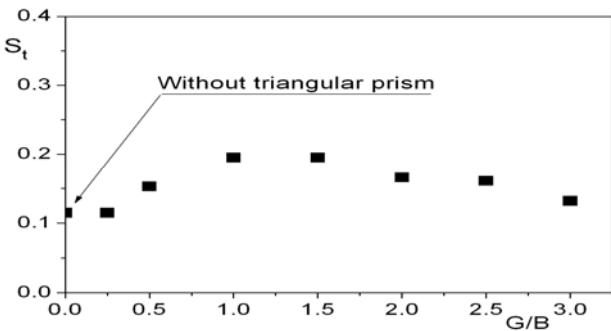


Figure 8: Strouhal number with G/B ($H/B=0.4$)

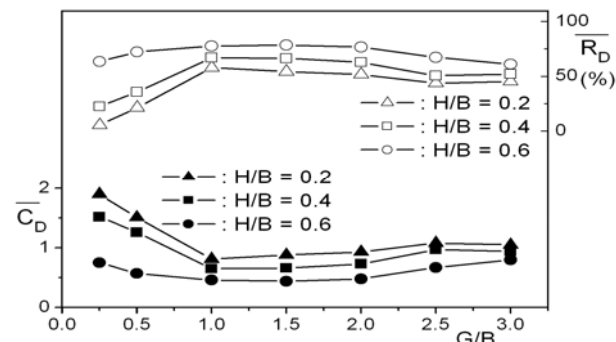


Figure 9: Average drag coefficients and drag reduction rates with G/B and H/B [12]

Figure 10에 삼각주의 폭비 $H/B=0.4$ 에 있어 간격비 G/B 에 따른 정방형주 주위의 시간평균 흐름패턴을 나타낸다.

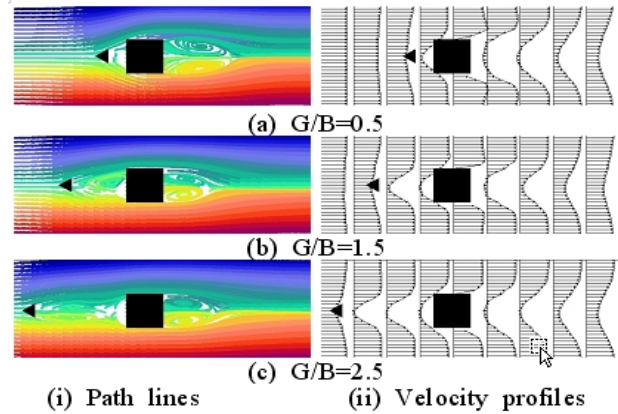


Figure 10 Average flow patterns around square prism with G/B at $H/B=0.4$

Figure 10(i) 유적선을 살펴보면 간격비 G/B 의 크기와 관계 없이 삼각주와 정방형주 사이에는 정체영역이 존재하고 있다. 그리고 정방형주 뒤쪽에는 상, 하면에 볼텍스가 생성되었다. 또한 Figure 10(ii)의 속도분포에서도 알 수 있듯이 정방형주의 후류측 정체영역의 크기는 $G/B=0.5$ 의 경우가 가장 크고, $G/B=2.5, 1.5$ 순서로 작다. Figure 9에 나타낸 바와 같이 평균항력계수는 이 정체영역의 크기에 따라 커진다.

Figure 11에 간격비 $G/B=1.5$ 에서 삼각주 폭비 H/B 에 따른 정방형주 주위의 시간평균 흐름패턴을 나타낸다.

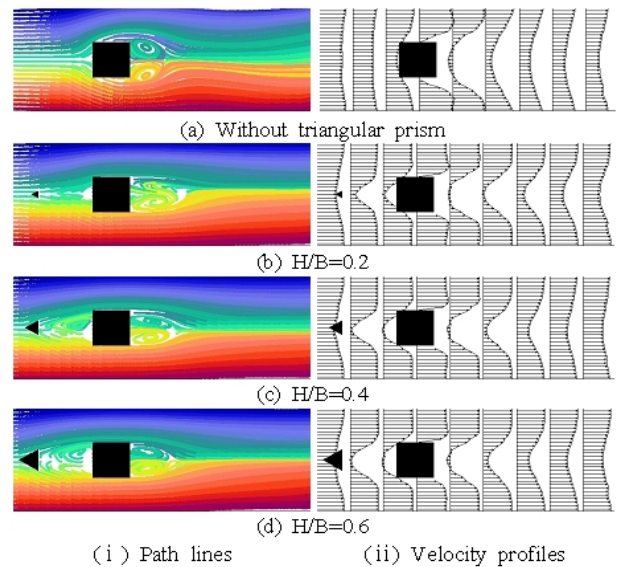


Figure 11 Average flow patterns around square prism with H/B at $G/B=1.5$

Figure 11에서 먼저 Figure 11(i) 유적선을 보면 네 경우 모두 정방형주의 후류측의 상, 하에는 볼텍스가 존재해 있음을 알 수 있다. Figure 11(ii) 속도분포에서 더 명확하게 알 수 있는 데 삼각주를 설치한 경우 정방형주 상류측과 하류측에 정체영역이 나타나 있다. 그리고 이 정체영역의 크기는 상류측은 삼각주의 폭비가 클수록 증가하는데 비

해, 하류측은 오히려 감소하고 있다. 결과적으로 삼각주의 폭비가 증가할수록 정방형주 상, 하류측 정체영역 크기의 차이가 줄어들어 압력차도 감소하게 된다. 따라서 **Figure 9**에 나타난 바와 같이 삼각주의 폭비가 증가할수록 평균항력감소율이 증가하는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 정방형주의 상류측에 작은 삼각주(Triangle cylinder)를 설치한 경우 정방형주의 주위의 유동장 특성을 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 정방형주에 작용하는 유동장 변화 특성을 조사했다. 실험결과를 요약하면 다음과 같다. 정방형주 후류측 스트로할 수는 항력감소율과 같은 특성을 나타내었으며, 간격비가 증가할수록 증가한 후 감소하는 특성을 보였다. 삼각주를 설치한 경우 정방형주 상류측과 하류측에 정체영역이 나타났으며, 정체영역의 크기는 정방형주의 상류측은 삼각주의 폭비가 클수록 증가하는데 비해, 하류측은 오히려 감소했다. 즉 이 경우 정방형주 하류측 정체영역이 작을수록 정방형주 전, 후 압력차가 적어져 정방형주의 항력이 감소하여 항력감소율은 증가한다. 반면에 삼각주와 정방형주 사이의 정체영역은 클수록 차폐효과(Shielding effect)에 의해 정방형주의 항력감소율이 증가한다.

References

- [1] M. Gad-el-Hak, "Modern developments in flow control," *Applied Mechanics, Reviews*, vol. 49, no. 7, p. 365, 1996.
- [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, pp. 135-145, 1999.
- [3] K. D. Ro and 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] 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).
- [5] C. J. Doolan, "Flat-Plate interaction with the near wake of a square cylinder," *The American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, vol. 47, no. 2 pp. 475-478, 2009.
- [6] 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).
- [7] K. D. Ro, "Characteristic analysis of flowfield around a square prism having a detached splitter plate using the PIV," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 37, no. 4, pp. 338-343, 2013 (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).
- [12] K. D. Ro, "Characteristics of fluid force reduction of a square prism with a small triangular prism," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 39, no. 3, pp. 338-343, 2015 (in Korean).