

PIV에 의한 분리된 분할판을 가진 정방형주 주위의 유동장 특성 분석 노기덕[†]

(원고접수일 : 2012년 11월 13일, 원고수정일 : 2013년 2월 15일, 심사완료일 : 2013년 3월 5일)

Characteristic analysis of flowfield around a square prism having a detached splitter plate using the PIV

Ki-Deok Ro[†]

요약: 본 연구는 후류측에 분리된 분할판(Detached splitter plate)을 설치한 경우 정방형주의 주위의 유동장 특성을 분할판의 폭과 정방형주 후면에서부터 분할판까지의 간격을 변수로 하여 PIV를 이용한 가시화실험으로 파악한 것이다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다. 분할판 후류측에서 측정된 Strouhal 수는 분할판의 폭비 및 간격비가 증가할수록 감소했다. 분할판의 상부에는 시계방향의, 하부에는 반시계방향의 볼텍스가 존재하였고, 이 볼텍스 영역의 크기는 분할판 폭비가 클수록 크게 나타났다. 분할판을 가진 정방형주 후류측에는 역류가 존재하였고, 이 역류의 크기는 분할판 폭비가 클수록 증가했다.

주제어: 항력감소, 입자영상유속계, 비정상 유동, 정방형주, 분할판

Abstract: The Flowfield characteristics of a square prism having a detached splitter plate at the wake region were investigated by visualization of the flow field using PIV. The experimental parameters were the width ratios($H/B=0.5\sim 1.5$) of the splitter plate to the prism width and the gap ratios ($G/B=0\sim 2$) between the prism and the splitter plate. As the results the Strouhal number measured at the wake region of the detached splitter plate was decreased with the width ratio and the gap ratio. The clockwise vortex at the upside of the splitter plate and counterclockwise vortex at the downside were represented, the size of these vortices were increased with the width of the splitter plate. The reverse flow was represented at the wake region of the square prism having a detached splitter plate, the size of this reverse flow was increased with the width of the splitter plate.

Keywords: Drag reduction, PIV, Unsteady flow, Square prism, Splitter plate

1. 서론

정방형주로 대표되는 유체역학적 문제로서는 강풍에 노출된 빌딩, 교량, 철도차량 및 컨테이너 트럭과 같은 대형 구조물에서부터 냉각팬 앞에 놓인 반도체 주위의 흐름 등 수없이 많다. 일정류 중에 놓인 정방형주 주위의 흐름은 정체, 박리, 2차 박리 현상과 후류에서의 주기적인 칼만 볼텍스로 특정지어진다. 특히 정방형주 후류측의 와류진동은 이것으

로 대표되는 대형 구조물의 동적안정성에 심각한 영향을 미치므로 동적안정성 향상과 항력 감소에 의한 에너지 절감을 위해 정방형주 주위의 유동장을 제어하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 정방형주의 항력저감에 관한 지금까지의 연구를 살펴보면,

Igarashi [1]는 정방형주의 상류측에 작은 원주봉을 설치하여 정방형주에 작용하는 항력을 현저하게 감소시켰고, 정방형주와 제어봉 사이에 항력이 대폭적

[†] 교신저자: (650-160) 경남 통영시 천대국치-길 38번지,

경상대학교 기계시스템공학과 · 농업생명과학연구원, E-mail: rokid@gnu.ac.kr, Tel: 055-772-9103

으로 감소하는 경계간격이 존재함을 보고했다.

Khalighi et al. [2]는 후류영역에 4개의 수평관을 설치하여 난류강도 및 하부유동의 급격한 편향을 억제하는 방법으로 항력을 감소시켰다.

Tamura et al. [3]는 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. [4]는 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[5].

Park [6]은 정방형주 뒷면 중앙에 분리판을 부착하여 분리판이 항력감소에 미치는 영향을 와류측적법으로 수치계산하였다. 분리판 부착에 의해 정방형주 후류측 소용돌이를 억제하여 항력이 감소했고, 분리판의 길이를 증가시킬수록 항력계수는 작아졌지만, 그 감소율은 분리판 길이가 짧았을 때 상대적으로 크게 나타났다.

Doolan [7]은 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 수가 감소했음을 수치 해석적으로 나타냈다.

최근 Ro et al. [8]는 레이놀즈 수 $Re=10,000$ 의 고 레이놀즈 수 영역에서 정방형주의 후류측에 분리된 분할판을 설치하여, 정방형주의 항력저감특성을 양, 항력 측정실험으로 파악하였으며, 폭비 $H/B=1.5$, 간격비 $G/B=0.5$ 에서 최대 24.2%의 항력감소율을 얻었다. 그러나 분할판의 설치함으로써 왜

항력이 감소하는지 그 원인을 파악하지 못했다.

본 연구는 정방형주의 후류측에 분리된 분할판을 설치한 경우 정방형주의 주위의 유동장 특성을 분할판의 폭과 정방형주 후면에서부터 분할판까지의 간격을 변수로 하여 PIV를 이용하여 조사한 것이다. 특히 항력감소율이 최대가 되는 간격비에 초점을 맞추어 가시화 실험을 통해 항력저감의 원인을 밝히고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험모델

Figure 1에 실험모델을 나타낸다.

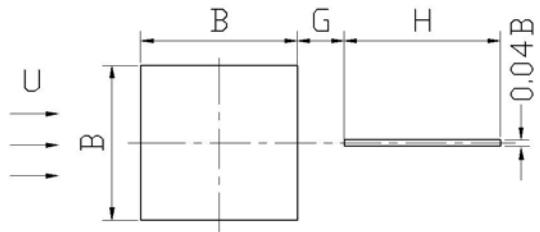


Figure 1: Experimental model

실험모델은 이전의 유체력 측정실험[8]에서와 유사한 모델을 사용했다. 즉 일정류 U 중에 한 변의 길이가 B 인 정방형주가 놓여 있고, 폭 H , 두께 $0.04B$ 인 분할판이 정방형주 후면으로부터 G 만큼 떨어진 곳에 놓여 있다. 실험은 레이놀즈 수를 일정한 상태에서 폭비 $H/B=0.5, 1.0, 1.5$ 을 갖는 3가지의 분할판에 대해 간격비 G/B 를 0.1에서부터 2.0까지 0.25를 증가시켜가며 정방형주 주위의 유동특성을 PIV를 이용하여 가시화하는 방법으로 진행하였다.

2.2 PIV를 이용한 가시화 실험

Figure 2에 PIV를 이용한 가시화 실험을 위해 제작한 실험장치의 사진을 나타낸다.

실험 장치는 크게 정방형주, 분할판 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 2mm 인 아크릴 판으로 제작했다. 분할판은 두께

2mm, 길이 150mm, 폭이 각각 50mm, 100mm 및 150mm인 투명 아크릴 판으로 만들었으며 **Figure 2** 에서처럼 아래쪽에 폭 10mm의 좁은 받침대 부착했고, 이 받침대 뒤편에 직경2mm의 나사용 구멍을 2곳 뚫어 간격비 조정 시 분할판을 고정판에 탈, 부착이 용이하도록 제작했다. 한편 정방형주와 분할판을 고정시키는 고정판은 164×600mm로 두께 2mm인 아크릴 판으로 제작했으며, **Figure 2**에서처럼 그 상류측에는 정방형주를 순간접착제로 고정시켰고, 하류측 중심선상에는 일정 간격으로 직경 2mm의 구멍을 뚫어 분할판을 나사로서 고정시켰다. 그리고 이 고정판을 검정색의 밑판에 고정시켜 회류수조에 장착하였다.

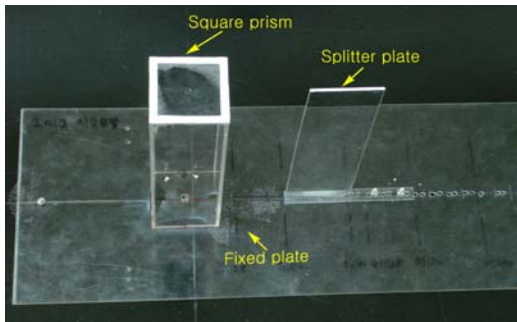


Figure 2: Photograph of experimental device

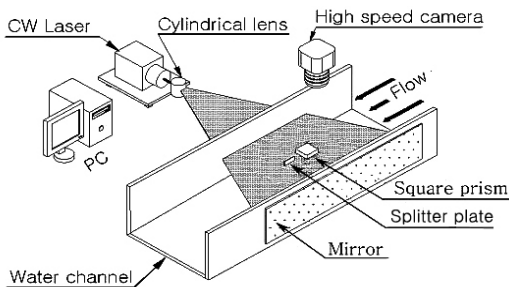


Figure 3: Schematic structure of experimental device

Figure 3에 PIV를 이용한 유동장 가시화 실험장치의 개략도를 나타낸다. 실험은 앞서 **Figure 2**에 나타난 분리된 분할판을 가진 정방형주를 제작하여 **Figure 3**에서와 같이 일정류가 흐르는 회류수조의

수로 내에 장착하고, 유동장을 가시화 하였다. 구체적으로 각 실험모델을 수로 내에 설치한 후 회류수조 밖에서 **Figure 3**에서와 같이 일정류와 수직, 수평 방향으로 연속광 레이저에 의한 시트(sheet)상의 조명광을 비추고 정방형주의 상부에서 수직하방으로 고속도 카메라로 유동장을 촬영하였다. 이때 추적입자로는 평균직경이 100 μ m이고, 비중이 1.02인 구형의 PVC(Poly Vinyl Chloride)를 사용했다. 이때 회류수조 가시화부의 일정류 유속은 $U=0.182\text{m/s}$ 이며, 정방형주 한번의 길이를 대표길이로 잡아 환산한 레이놀즈 수 $Re=1.0 \times 10^4$ 로, 이전의 유체력 측정실험[8]에서와 같다. 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.

3. 실험결과 및 고찰

Figure 4에 정방형주 후류영역에서 측정된 일정류와 수직방향의 속도 V 의 시간변화를 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 **Figure 5**에 나타낸 바와 같이 정방형주 중심에서 후류방향으로 4.5B 떨어진 곳이다. **Figure 4** (a) 및 (b)에 나타낸바와 같이 두 경우 모두 속도변화의 주기성이 명확하게 나타나 있고, 그 주기를 살펴보면 대략 (a)의 경우 2.5초, (b)의 경우 3.0초 정도이다. 즉 분할판을 설치함으로써 설치하지 않은 본래의 정방형주에 비해 후류측 속도 V 의 진폭 변화는 거의 보이지 않으나, 주파수가 다소 감소함을 알 수 있다.

Figure 6에 분할판의 폭비 $H/B=1.0$ 에 있어 간격비 G/B 에 따른 Strouhal 수를 나타낸다. 이때 대표주파수는 **Figure 5**의 V_p 점에서 상술한 **Figure 4**의 방법으로 측정된 값이다. 여기서 Strouhal 수 St 는 상술한 대표주파수에 정방형주 한 면의 길이를 곱한 값을 그 때의 일정류 값으로 나눈 무차원 값이다. **Figure 6**에 나타낸바와 같이 Strouhal

수는 간격비가 증가할수록 감소하고 있다. 단, 간격비 $G/B=1.25$ 부근의 데이터가 다소 선형적이지 못한 것은 실험오차에 기인한 것으로 판단된다.

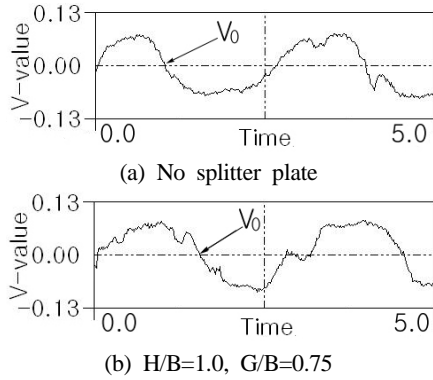


Figure 4: Time variations of V-velocity at the wake region of square prism

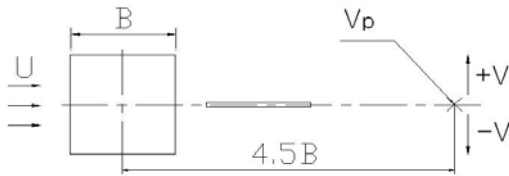


Figure 5: Pick up point of V-velocity

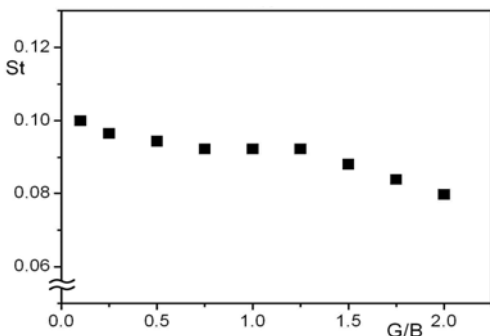


Figure 6: Strouhal number with G/B(H/B=1.0)

Table 1에 3가지의 분할판 폭비 H/B에 있어 최적의 간격비 G/B에서의 Strouhal 수를 나타낸다. 이때 대표주파수 역시 Figure 5의 V_p 점에서 측정된 값이다.

Table 1: Strouhal number at the optimum G/B of each H/B

H/B	No splitter	0.5	1.0	1.5
G/B	∞	1.0	0.75	0.5
St.	0.100	0.096	0.092	0.042

여기서 최적의 간격비라 함은 이전의 힘측정 연구 [8]의 결과로 Figure 7에 나타낸바와 같이 항력감소율이 최대인 간격비를 말한다. Table 1에 나타낸 바와 같이 분할판의 폭비가 클수록 비록 간격비 작음에도 불구하고 Strouhal 수는 작은 값을 가진다. 이것을 Figure 6과 비교해서 고찰하면 분리판 후방에서의 Strouhal 수는 간격비 및 폭비가 클수록 그 값이 작아짐을 알 수 있다.

Figure 8에 Figure 4의 V_0 점 즉 V방향 속도가 0인 점에서의 (i)속도벡터 및 (ii)속도분포를 나타낸다.

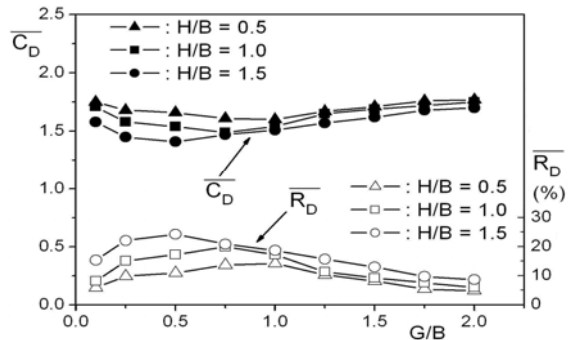
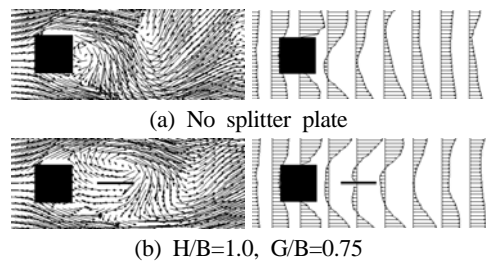


Figure 7: Average drag coefficients and drag reduction rates with G/B and H/B [8]



(i) Velocity vectors (ii) Velocity profiles

Figure 8: Instantaneous flow patterns around square prism at V-velocity=0 (V_0 points of Figure 4)

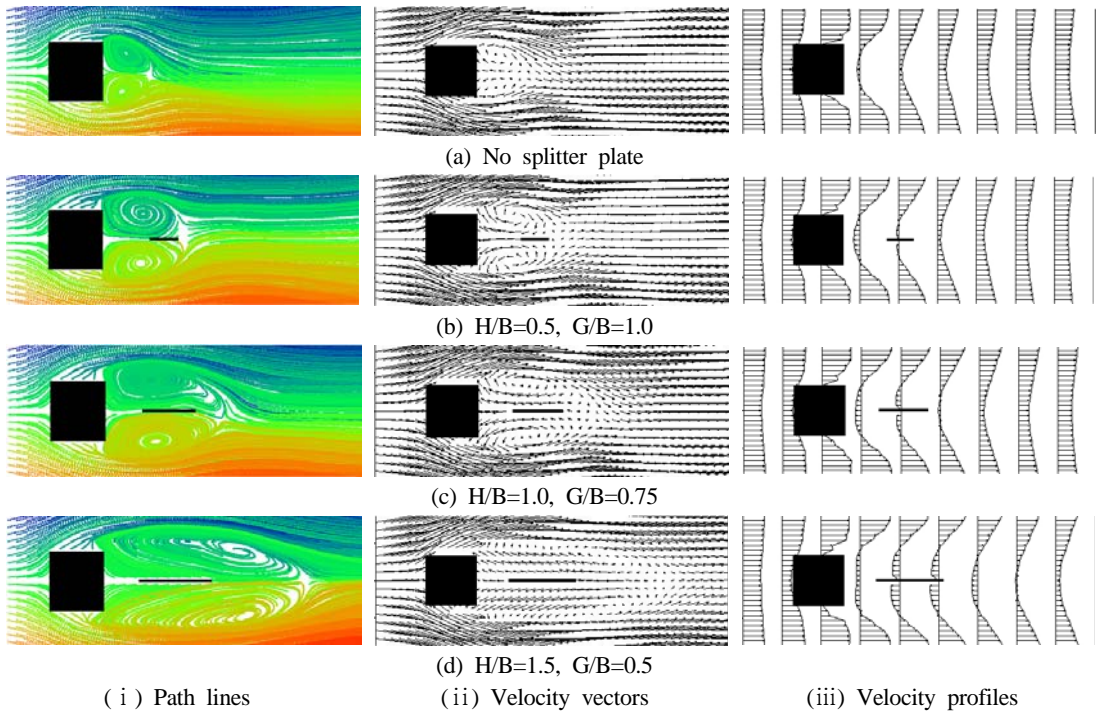


Figure 9: Average flow patterns around square prism at gap ratio having the maximum drag reduction rate

Figure 8에 나타난 바와 같이 (a) 및 (b) 모두 Figure 5의 V_p 점에서 V방향의 속도 값이 0인 경우이나 분할판의 유무에 따라 정방형주 주위의 흐름패턴은 전혀 다른 양상을 보이고 있다. 분할판의 유무에 따른 이러한 흐름패턴 변화가 Table 1에 나타난 바와 같이 Strouhal 수 변화를 초래한 것으로 판단된다.

Figure 9에 3가지의 분할판 폭비 H/B에 있어 최대 항력감소율을 가지는 간격비에서 정방형주 주위의 시간평균 흐름패턴을 나타낸다. Figure 9에서 먼저 (i)유적선을 보면 분할판의 상, 하에는 볼텍스가 존재해 있고, 이 볼텍스 영역의 크기는 분할판의 폭이 클수록 증가함을 나타내고 있다. (ii)속터벡터장을 살펴보면 분할판 상부의 볼텍스는 시계방향, 하부의 볼텍스는 반시계방향임을 알 수 있다. (iii)속도분포에서 정방형주 후류측 흐름패턴을 비교해 보면 분할판이 존재하지 않은 (a)의 경우는 역류가 존재하지 않고 있으나, 그 밖에 분할판이 존재하는 (b), (c), (d)의 경우

는 정방형주 후면 쪽으로 역류가 발생하며, 이 역류의 크기는 분할판의 폭이 클수록 더 크게 나타나고 있다. 그리고 이 역류로 인해 항력과 반대방향의 힘이 작용하여 전체적으로 정방형주의 항력 감소를 초래한 것으로 판단되며, 따라서 Figure 7에 나타난바와 같이 역류가 가장 큰 H/B=1.5, G/B=0.5에서 항력감소율이 최대이다.

4. 결론

본 연구는 정방형주의 후류측에 분리된 분할판 (Detached splitter plate)을 설치한 경우 정방형주의 주위의 유동장 특성을 PIV를 이용하여 조사한 것이다. 레이놀즈 수 $Re=1.0 \times 10^4$ 로 고정시키고, 폭비 H/B=0.5, 1.0, 1.5인 세가지 분할판에 대해 간격비 G/B를 G/B=0.1~2.0범위 내에서 0.25씩 증가시켜가면서 정방형주에 주위의 순간 및 평균 흐름패턴을 가시화 하였고, 분리판 후류에서의 Strouhal 수를 측정하였다. 특히 항력감소율이 최대인 간격비에 초점을 맞추어 유동장을 파악하였으며, 그 결과를

요약하면 다음과 같다.

(1) 분할판 후류측에서 측정된 Strouhal 수는 분할판의 폭비 및 간격이 증가할수록 감소했다.

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

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

특히 분할판 상, 하부에 생성된 서로 반대방향의 볼텍스가 정방형주 후류측에 역류를 발생시키고, 이 역류가 항력저감의 원인이 됨을 명확하게 밝혔다.

참고문헌

[1] 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.

[2] B. Khalighi, S. Zang, C. Korokilas, S. R. Balkanyi, Luis P. Bernal, G. Iaccarino, and P. Moin, "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.

[3] 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.

[4] 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).

[5] 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 (in Korean).

[6] 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).

[7] Con 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.

[8] 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).