

## 분리된 분할판에 의한 정방형주의 항력감소

노기덕<sup>†</sup> · 윤성민<sup>1</sup> · 최동현<sup>2</sup> · 김재현<sup>3</sup> · 심은총<sup>4</sup>

(원고접수일 : 2012년 6월 8일, 원고수정일 : 2012년 8월 31일, 심사완료일 : 2012년 9월 17일)

### Drag Reduction on a Square Prism Using a Detached Splitter Plate

Ki-Deok Ro<sup>†</sup> · Seong-Min Yoon<sup>1</sup> · Dong-Hyeon Choi<sup>2</sup> · Jae-Hyeon Kim<sup>3</sup> and Eun-Chong Sim<sup>4</sup>

**요약** : 본 연구는 정방형주의 후류측으로 분리된 분할판(Detached splitter plate)을 설치한 경우 정방형주의 항력저감특성을 분할판의 폭과 정방형주 후면에서부터 분할판까지의 간격을 변수로 하여 양·항력측 정 실험으로 파악한 것이다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다. 양·항력의 시간변화를 측정해 본 결과 정방형주의 후류측에 분리된 분할판을 설치한 경우가 본래의 정방형주에 비해 양력의 진폭이 대폭 감소했다. 분할판의 폭비를 고정시킨 경우 정방형주의 항력감소율은 간격비가 증가할수록 증가하다 감소하는 특성을 보였다. 같은 간격비에서는 분할판의 폭비가 클수록 정방형주의 항력감소율이 컸으며, 폭비 H/B=1.5, 간격비 G/B=0.5에서 최대 24.2%의 항력감소율을 보였다.

**주제어** : 항력감소, 박리유동, 비정상 유동, 정방형주, 분할판

**Abstract**: The Characteristics of the drag reduction of a square prism having a detached splitter plate at the wake side were investigated by measuring of lift and drag on the square prism. The experimental parameters were the width ratios(H/B=0.5~1.5) of splitters to the prism width and the gap ratios (G/B=0~2) between the prism and the splitter plate. As the results the amplitude of the lift on the square prism having a detached splitter plate was remarkably decreased by comparison with the prototypical square prism. The drag reduction rate of the square prism was increased with H/B in case of the same G/B, and was increased and decreased with G/B in case of the same H/B. The maximum drag reduction rate was represented by 24.2% at H/B=1.5 and G/B=0.5.

**Key words**: Drag reduction, Separated flow, Unsteady flow, Square prism, Splitter plate

## 1. 서 론

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.

후자를 이용한 정방형주의 항력저감에 관한 연구를 살펴보면, Khalighi 등[2]은 후류영역에 4개의 수평판을 설치하여 난류강도 및 하부유동의 급격한 편향을 억제하는 방법으로 항력을 감소시켰다.

Tamura 등[3]은 사각주 네모서리의 형태를 세 가지로 가공하여 유동장 특성실험을 행한 결과 각진 모서리를 가진 경우는 모서리에서 박리가 발생하였으나, 둥근 모서리인 경우는 일단 박리한 후에

<sup>†</sup> 교신저자(경상대학교 기계시스템공학과 · 해양산업연구소, E-mail: rokid@gnu.ac.kr, Tel: 055-772-9103)

1 경상대학교 기계시스템공학과, E-mail: yoon21y@naver.com, Tel: 010-3848-6226

2 경상대학교 기계시스템공학과, E-mail: bii206@nate.com, Tel: 010-9798-9535

3 경상대학교 기계시스템공학과, E-mail: coo1702@nate.com, Tel: 010-3705-9461

4 경상대학교 기계시스템공학과, E-mail: ocs1419@naver.com, Tel: 010-8423-4503

재부착하는 유동특성을 확인하였고, 후자인 경우가 항력, 양력특성이 가장 우수함을 보였다.

Ro 등[4]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[5]은 정방형주 뒷면 중앙에 분할판을 부착하여 분할판이 항력감소에 미치는 영향을 와류추적법으로 수치계산하였다. 분할판 부착에 의해 정방형주 후류측 소용돌이를 억제하여 항력이 감소했고, 분할판의 길이를 증가시킬수록 항력계수는 작아졌지만, 그 감소율은 분리판 길이가 짧았을 때 상대적으로 크게 나타났다고 보고했다.

Apelt 등[6]은 여러 가지 형태의 뭉뚝한 물체(bluff-body) 뒷면 중앙에 분할판을 부착하여 고 레이놀즈 영역에서 분할판 길이에 따른 항력저감 특성을 실험적으로 조사했는데, 특히 원주의 경우 분할판의 길이(L)가 원주 직경(D)의 1배 즉  $L/D=1$ 까지는 항력이 급격히 감소하다가 그 후 증가하는 양상을 보이며  $L/D=2.0$  이상에서는 분리판 길이에 따라 다시 항력이 서서히 감소하는 특성을 나타냈다.

Doolan[7]은 정방형주의 후류측에 부착이 아닌 분리된 분할판(Detached splitter plate)을 설치하는 방법으로는 처음으로 정방형주의 항력저감을 시도했다. 그러나 수치해석은 분할판 폭(H)을 정방형주 한 변 길이(B)의 0.834배로 한정하였고, 정방형주 후면과 분할판 앞전(G)까지의 간격도  $G/B=1.87$ 로 고정시켜 행하였다. 또한 계산한 레이놀즈 수는  $Re=150$ 으로 매우 낮으며, 분리된 분할판의 실용적인 측면으로 보면  $Re=10,000$  이상의 고 레이놀즈 수 영역에서의 항력저감특성 파악이 무엇보다 중요하다.

따라서 본 연구에서는 고 레이놀즈 영역에서 정방형주의 후류측으로 분리된 분할판(Detached splitter plate)을 설치한 경우 정방형주의 항력저감 특성을 분할판의 폭과 정방형주 후면에서부터 분

할판까지의 간격을 변수로 하여 양·항력측정 실험으로 파악하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험모델

Figure 1에 실험모델을 나타낸다.

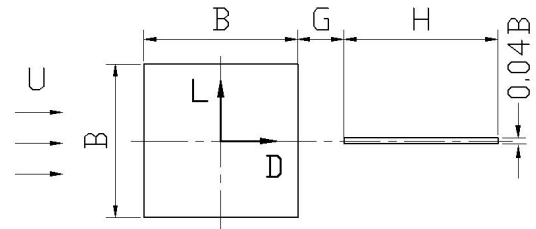


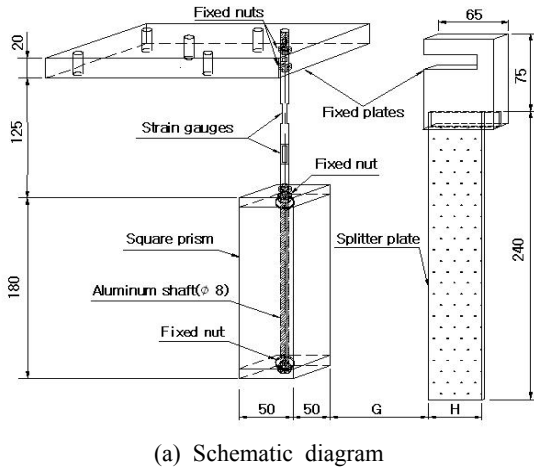
Figure 1: Experimental model

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. 이때 정방형주에 작용하는 항력  $D$ 는 일정류와 같은 방향으로 작용하는 유체력 성분을, 양력  $L$ 은 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 간극비  $G/B$ 를 0.1에서부터 2.0까지 0.25씩 증가시켜가며 정방형주에 작용하는 양, 항력을 측정하는 방법으로 진행하였다.

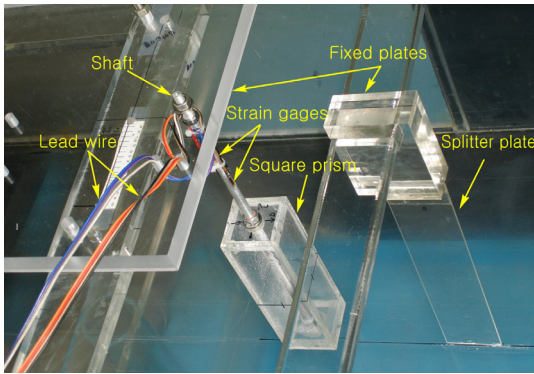
### 2.2 양·항력의 측정

Figure 2에 양·항력 측정실험을 위해 제작한 실험장치의 개략도 및 사진을 나타낸다. 실험 장치는 크게 정방형주, 측정 축, 고정판 및 분할판으로 나누어 제작했다. 정방형주, 고정판 및 분할판은 사용한 회류수조의 크기에 맞추어 투명아크릴 판으로 제작했다. 정방형주는 크기가  $50 \times 50 \times 180\text{mm}$ 이며 각 면은 두께 3mm, 상, 하 덮개는 10mm 두께의 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



(a) Schematic diagram



(b) Photograph

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

190mm는 나사를 가공하여 정방형주를 너트로 고정시켰다. 봉의 상부는 일정류 중에서 양·항력을 용이하게 분리하여 측정할 수 있도록 그림에서와 같이 전후, 좌우 방향으로 두께 3.4mm, 길이 15mm로 평평하게 깎았다. 그리고 그곳에 각 방향으로 2매씩(계 4매) 스트레인지지를 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 2mm, 길이 240mm, 폭이 각각 50mm, 100mm 및 150mm인 투명 아크릴 판으로 제작했으며 상부

를 Figure 2(a)에서 처럼 고정판에 끼워 고정시켰다. 그리고 이 고정판은 Figure 2(b)에서 처럼 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, 정방형주 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 정방형주 후면 중심에서부터 12.5mm간격으로 후류방향으로 이동시켜가며 양, 항력을 측정했다.

### 3. 실험결과 및 고찰

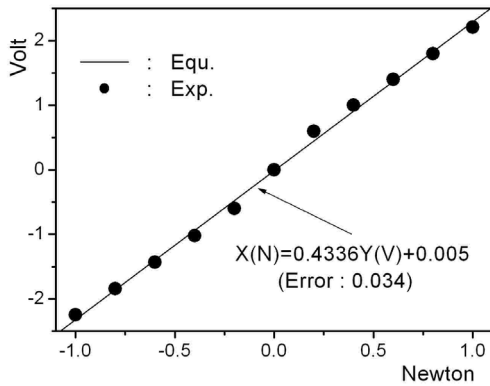
먼저 정방형주의 유체역학적 특성을 나타내는 계수, 즉 양력계수  $C_L$ , 항력계수  $C_D$ 는 다음과 같이 정의한다.

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

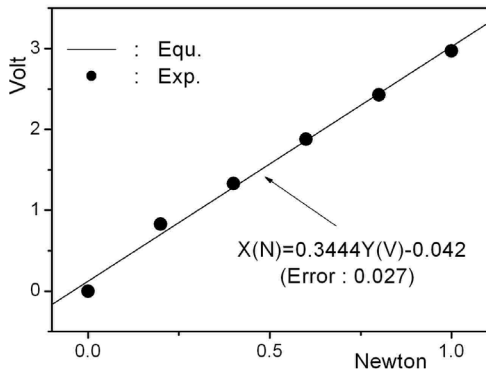
$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U^2 S} \quad (2)$$

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

다음으로 Figure 3에 Figure 2의 측정 축에 대하여 실시한 양력 및 항력의 캘리브레이션 결과를 나타낸다. 양력 및 항력의 캘리브레이션은 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 출력



(a) Lift



(b) Drag

Figure 3: Calibrations of lift and drag

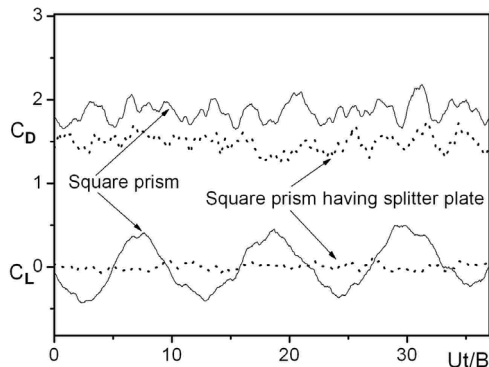


Figure 4: Time variations of lift and drag coefficients (H/B=1.0, G/B=0.75)

전압을 구하였다. 그리고 이 자료를 이용하여 선형 최소자승근사법으로 하중과 출력전압 관계식을 구하였다. Figure 3에 나타난 바와 같이 캘리브레이

션 결과는 양력, 항력 모두 직선선상에 있었으며, 실험값과 선형관계식에서 구한 값에서의 평균제곱근(root-meansquare) 오차는 양력, 항력 모두 0.04 이내였다. 즉 등근 측정 축을 Figure 2에서와 같이 전후, 좌우 방향으로 평평하게 가공하면 그 곳에 스트레인 게이지를 쉽게 부착할 수 있고, 축에 작용하는 힘을 x, y방향으로 용이하게 분리시킬 수 있다.

Figure 4에 분할판 폭비 H/B=1.0, 간격비 G/B=0.75에서의 정방형주의 양력계수  $C_L$  및 항력계수  $C_D$ 의 시간변화를 나타낸다. 그림에서 횡축은 일정류 U 및 측정시간 t를 정방형주의 한 변의 길이 B로 나누어 무차원화한 값이다. 그림은 각 계수 모두 10초 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 정방형주의 후류 쪽에 분리된 분할판을 설치함으로써 항력을 저감시킬 수 있고 또한 양력의 진폭을 대폭 줄일 수 있어 동적 안정성도 크게 향상시킬 수 있다.

Figure 5에 폭비 H/B=1.0의 분리된 분할판을 설치한 정방형주의 간격비 G/B에 따른 평균항력계수  $\overline{C_D}$  및 평균항력 감소율  $\overline{R_D}$ 의 변화를 나타낸다.

여기서 평균항력계수  $\overline{C_D}$ 의 각 점은 Figure 4에 나타난 1,024개의 항력계수  $C_D$  값을 평균한 값이다. 또한 평균항력감소율  $\overline{R_D}$ 는 분할판 설치에 의한 평균항력계수 감소량을 분할판을 설치하지 않은 정방형주의 평균항력계수로 나눈 백분율을 의미한다. 먼저 간격비 G/B에 따른 평균항력계수  $\overline{C_D}$ 의 변화를 살펴보면 간격비가 증가할수록 평균항력계수가 감소했다가 증가하는 특성을 보이고 있다. 이때 평균항력감소율  $\overline{R_D}$ 의 변화를 보면 간

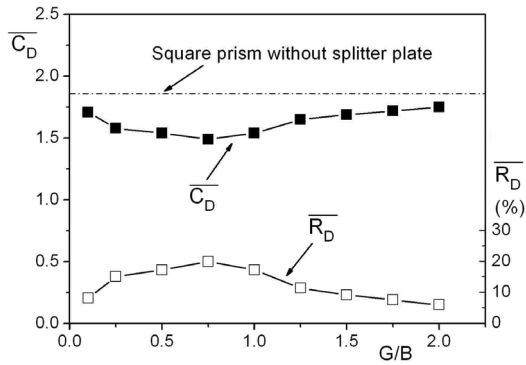


Figure 5: Average drag coefficients and drag reduction rates with G/B (H/B=1.0)

격비가 증가함에 따라 평균항력감소율은 증가하다가 G/B=0.75 근방에서 최대치를 나타내며, 그 후로는 간격비에 따라 감소하고 있으나 실험 범위인 G/B=2.0 근방에서도 평균항력감소율 5%를 보이고 있어 분할판 설치 전 간격비에서 유효함을 알 수 있다.

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

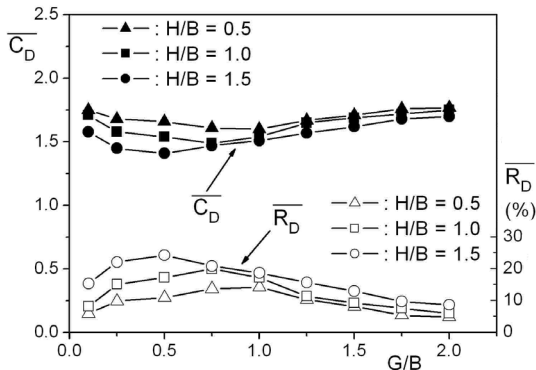


Figure 6: Average drag coefficients and drag reduction rates with G/B and H/B

Figure 6을 거시적으로 살펴보면 간격비에 따른 평균항력계수 및 평균항력 감소율의 증감 특성곡선은 세가지 폭비에서 모두 유사함을 알 수 있다. 그러나 각 곡선을 미시적으로 살펴보면 H/B=0.5의

경우 G/B=1.0, H/B=1.0의 경우 G/B=0.75, H/B=1.5의 경우 G/B=0.5 근방에서 평균항력감소율의 최대값을 보이고 있다. 그리고 이들 최대값을 갖는 간격비를 각각의 폭비와 연계해서 고찰해보면 세 경우 모두 정방향주 후면 중심에서 후류 방향으로 1.25B 떨어진 곳에 분할판의 중심이 위치하고 있음을 알 수 있다. 한편 같은 간격비에 있어서는 분할판 폭비가 클수록 평균항력감소율이 크게 나타남을 알 수 있다.

Table 1에 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 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			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	1.60	14.0	1.69	9.1
1.0	0.75	1.49	19.9	1.63	12.4
1.5	0.5	1.41	24.2	1.55	16.7

Table 1에서 각각의 분할판 폭비에 따른 평균항력감소율의 최대값 및 전체 평균값을 살펴보면 H/B=0.5에서 14.0% 및 9.1%, H/B=1.0에서는 각각 19.9% 및 12.4% 그리고 H/B=1.5에서는 24.2% 및 16.7%를 나타내고 있다. 즉 분할판 폭이 큰 쪽이 두 값 모두 높게 나타나 있어, 여건이 된다면 분할판 폭을 크게 할수록 더 큰 항력 저감효과를 얻을 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구는 일정류 중에 놓인 정방향주 후류측에 중심에 분리된 분할판을 설치함으로써 어느 정도의 항력저감 효과를 얻을 수 있는지를 양·항력측정 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=0.1~2.0범위

내에서 0.25씩 증가시켜가면서 정방형주에 작용하는 양, 항력의 감소특성을 조사했다. 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

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

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

(3) 같은 간격비에서는 분할판의 폭비가 클수록 정방형주의 항력감소율이 컸으며, 폭비  $H/B=1.5$ , 간격비  $G/B=0.5$ 에서 최대 24.2%의 항력감소율을 보였다.

측정 축 원봉을 전후, 좌우방향으로 평평하게 각 음으로서 그곳에 스트레인 게이지 부착이 쉬웠고, 양·항력 분리도 용이했다. 향후 유동장 가시화 실험 등을 통하여 분리된 분할판 설치에 의한 정방형주 항력저감 메커니즘을 규명하는 연구가 필요하다.

## 후 기

이 연구는 2011년도 경상대학교 학술진흥지원사업 연구비에 의하여 수행되었음.

## 참고문헌

- [1] M. Gad-el-Hak, "Modern developments in flow control," Applied Mechanics Reviews, 49, No. 7, pp. 365, 1996.
- [2] B. Khalighi, S. Zang, C. Korokilas et al., "Experimental and computational study of unsteady wake flow behind a bluff body with a drag reduction device," Society of Automotive Engineers, 2001-01-1042, 2001.
- [3] T. Tamura, T. Miyagi, "The effect of turbulence on aerodynamic forces on a square cylinder with various corner shapes," Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 83, pp. 135-145, 1999.
- [4] 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).

- [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] C. J. Apelt and G. S. West, "The effects of wake splitter plates on bluff-body flow in the range  $10^4 < R < 5 \times 10^4$ . Part 2," J. Fluid Mech., vol. 71, part 1, pp. 145-160, 1975.
- [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.