

분리된 분할판에 의한 원형단면 실린더의 항력감소

선승한* · 황종연** · 양경수†

(2001년 4월 19일 접수, 2001년 8월 31일 심사완료)

Drag Reduction on a Circular Cylinder using a Detached Splitter Plate

Seung-Han Sun, Jong-Yeon Hwang and Kyung-Soo Yang

Key Words: Vortex Shedding(와홀림), Strouhal Number(스트롤 수), Drag Coefficient(항력계수), Numerical Simulation (수치모사), Detached Splitter Plate(분리된 분할판)

Abstract

Control of drag force on a circular cylinder using a detached splitter plate is numerically studied for laminar flow. A splitter plate with the same length as the cylinder diameter(d) is placed horizontally in the wake region. Its position is described by the gap ratio(G/d), where G represents the gap between the cylinder base point and the leading edge of the plate. The drag varies with the gap ratio; it has the minimum value at a certain gap ratio for each Reynolds number. The drag sharply increases past the optimum gap ratio; this seems to be related to the sudden change in bubble size in the wake region. This trend is consistent with the experimental observation currently available in case of turbulent flow. It is also found that the net drag coefficient significantly depends on the variation of base suction coefficient.

1. 서론

원형단면 실린더 후류에서의 vortex shedding (와홀림)에 대하여 지금까지 많은 연구가 이루어졌다. 실린더 표면에 발생하는 박리에 의한 압력강하에 의해 실린더의 항력은 증가하게 되므로, 많은 공학 문제에 있어서 항력을 제어하기 위하여 수동적인 방법과 능동적인 방법이 제기되어져 왔다. 그 중에서 가장 효과가 좋은 분할판(splitter plate)을 이용하는 수동적인 방법이 많이 연구되어 지고 있다.^(1~6) 그러나 대부분의 연구가 실린더에 부착된 분할판을 연구하는데 제한되

어져 왔으나 최근에 와서 분할판을 실린더에서 점차적으로 분리시키면서 후류에서의 와홀림을 제어하는 연구가 실험적으로 수행되었다.⁽⁷⁾

Ozono⁽⁷⁾는 원형 실린더에서 분할판을 수평적으로 분리시키면서 유동장의 변화에 대하여 실험적 연구를 수행하였다. 분할판이 실린더에 부착되었을 때보다 분할판에 의해 나뉘어진 2개의 상, 하 전단층이 서로 상호교환을 하지 못하게 된다. 분할판이 실린더에서 멀어질수록 항력이 감소하다가 St (strouhal number)와 $-C_{pb}$ (base suction coefficient)가 간극비 $G/d=2.3$ (여기서 G 는 실린더 base point와 분할판 선단과의 거리, d 는 실린더 직경)인 부근에서 갑자기 증가하는 현상이 일어남을 발견하였다. 이 지점을 지나서 St , $-C_{pb}$ 의 급격한 변화는 둔화된다.

본 연구에서는 2차원 원형 단면 실린더의 후류 쪽으로 실린더에서 분리되어 분할판(Detached splitter plate)이 있을 경우 실린더에 작용하는 항력에 대한 전산 해석적 연구를 수행하였다. 이 연구의 목적은 원형 실린더로부터 분할판을 점차적으로 하류쪽으로 이동시키면서 실린더의 후류

* 인하대학교 대학원

** 회원, 인하대학교 대학원

† 책임저자, 회원, 인하대학교 기계공학과

E-mail : ksyang@inha.ac.kr

TEL : (032)860-7322 FAX : (032)863-3997

영역에서의 분할판의 역할을 규명하여 실린더의 항력제어 방법을 수치 해석적으로 모색하는 것이다. 먼저 분할판이 없는 경우와 분할판이 실린더에 부착된 경우($G/d=0$)에 대해 기존 연구 결과와^(5,8) 비교하여 코드를 검증하였고, 분할판이 실린더에서 분리되는 경우에 대하여 난류 실험치⁽⁷⁾와 비교하였다. 원형 실린더 뒤의 분할판은 실린더 근처에서의 와홀림을 억제하여 원형 실린더 위에서의 박리점과 재순환 구역을 변화시킨다. 변화된 박리점과 재순환 구역의 크기 변화로 인하여 항력값과 St 가 G/d 의 최적값(optimal value)까지는 점차 감소함을 보였다. 분할판이 실린더에 부착되었을 때보다는 항력이 감소되고, 분할판을 최저 항력 지점을 지나 위치시키면 갑자기 항력값과 St 와 $-C_{pb}$ 값이 급증하는 현상도 나타났다. 정확한 최적값을 찾기 위해 G/d 를 0부터 5까지 0.5씩 변화시켜 가면서 값들을 구했고 G/d 가 0.5보다 작은 구역과 G/d 의 최적값 근처에서는 좀 더 정확한 값을 구하기 위해 0.1씩 증가시키면서 연구를 수행하였다. 레이놀즈 수(Re)는 정상 유동인 30과 비정상 유동인 100, 160으로 선택하였다.

2. 수치 해석 기법

2.1 지배방정식

본 연구에서는 2차원 비압축성 유체에 대하여 다음과 같은 연속 방정식과 비정상 모멘텀 방정식이 사용되었다.

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (j=1,2) \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2)$$

식 (1), (2)에서의 u_i 는 유체의 속도로 흐름 방향(streamwise, x 혹은 x_1), 수직방향(normal, y 혹은 x_2)의 속도 성분이 각각 u, v (혹은 u_1, u_2)인 속도 벡터이고, p 는 압력, Re 는 레이놀즈 수이다. 사용된 모든 변수들은 길이 스케일로서는 실린더 직경 d , 속도 스케일로서는 자유류의 속도 U_∞ 으로 무차원화 되었다. Re 는 ν 를 동점성 계

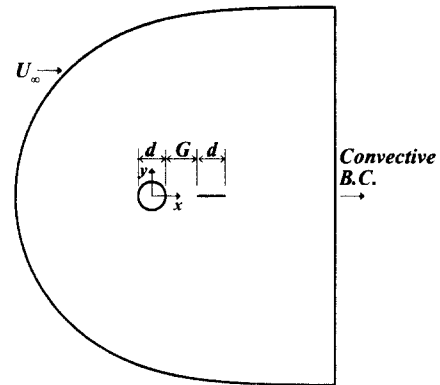


Fig. 1 Computational domain

수라 할 때 $u_\infty d/\nu$ 로 정의되었다.

공간에서의 차분은 Finite Volume Method가 이용되었고 사용된 변수는 일반 좌표계에서 엇갈린(staggered) 형태로 배열되었다. 시간에 따르는 적분은 혼합적인 형태로서 대류항에 대해서는 3차 정확도를 가지는 Runge-Kutta 방법으로 explicit하게, 점성항은 Crank-Nicolson 방법을 이용하여 semi-implicit하게, 압력항은 fully implicit하게 수행되었고, 연속방정식과 모멘텀 방정식을 분리(decouple)하기 위해 fractional step method^{(9),(10)}가 사용되었다. Poisson 방정식의 해를 구할 때는 가속화를 위하여 다격자법(Multigrid method)을 이용하여 계산하였다. 사용된 수치해석 기법의 상세한 사항들은 Rosenfeld *et al*⁽¹⁰⁾의 논문을 참조하기 바란다.

2.2 경계조건 및 유동 파라미터

모든 고체면에서는 no-slip 조건을 적용하였다. 본 연구에서 사용된 격자계는 C형태의 격자계로서 유동 변화가 심한 후류 영역을 관찰하기에 적합하다고 알려져 있다. 출구 영역을 제외한 바깥 유동 경계에서는 $u = u_\infty, v = 0$ 인 Dirichlet 조건을 사용했으며 출구 영역에서는 대류 경계조건⁽¹¹⁾이 사용되었다. 분할판의 길이는 실린더의 직경과 같게 하였고, 분할판을 주 유동방향으로 이동하면서 연구를 수행하였다.(Fig. 1)

Table 1 Comparison with other simulations at various Re ; a:present study, b:Kwon and Choi⁽⁵⁾, c:Park *et al.*⁽⁸⁾

	cylinder with splitter ($G/d=0$)				cylinder without splitter	
	$Re=100$		$Re=160$		$Re=100$	
	a	b	a	b	a	c
C_D	1.17	1.18	1.08	1.10	1.34	1.34
St	0.137	0.137	0.156	0.155	0.167	0.164
B_s	3.21	3.21	2.75	2.74	1.36	1.37

Figure 1의 계산 영역 크기는 $-50d \leq x \leq 60d$, $-50d \leq y \leq 50d$ 이다. 사용된 격자수는 격자 세분화 연구를 수행하여 결정하였고 branch-cut 및 실린더의 접선방향, 실린더의 수직방향으로 각각 609×121 이 사용되었다. 계산 영역의 크기를 결정하기 위해서 유동장의 크기를 다양하게 변화시키면서 유동장의 변화를 관찰한 결과, 본 논문에서 고려한 Re 에서는 원점으로부터 Dirichlet 조건을 적용하는 바깥 경계까지의 거리는 최소한 $50d$ 이상이 되어야 항력 및 St 값에 큰 영향이 없었고, 대류 조건을 주는 후류영역의 크기는 $60d$ 이상이 되면 출구에서의 유동장이 실린더에 영향을 주지 않음을 알 수 있었다

3. 결과

3.1 Code의 검증

본 연구에서 사용한 코드를 검증하기 위해서 먼저 분할판이 없는 경우에 대해서 기존에 수치해석적으로 수행되었던 연구 결과⁽⁸⁾와 실린더 표면의 항력 계수 ($C_D = Drag / (0.5 \rho U_\infty^2 d)$), St , Bubble 길이(B_s) 값 등을 비교하였고 분할판을 실린더에 붙였을 경우에 대하여도 다른 연구 결과⁽⁵⁾의 값들과 비교하여 만족할 만한 결과를 얻었다. (Table 1)

3.2 유동장 변화

원형 실린더의 후류에 실린더 직경과 같은 길이의 분할판을 주 유동방향으로 점점 멀리 하면서 Re 와 G/d 에 따른 실린더 표면의 항력 계수를 관찰하였다.

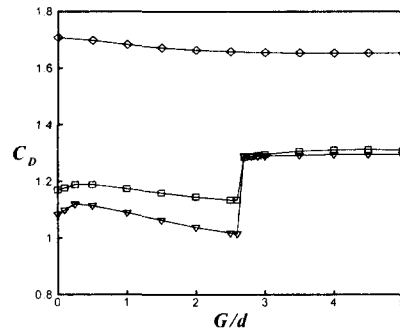


Fig. 2 Variation of drag coefficient with G/d ; $Re=30(\diamond)$, $Re=100(\square)$, $Re=160(\nabla)$

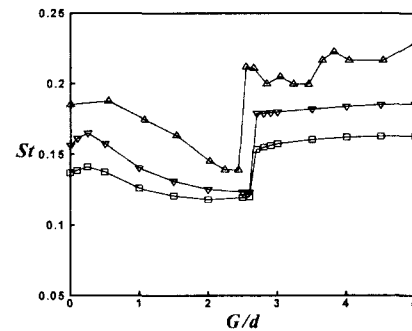


Fig. 3 Variation of Strouhal number with G/d ; $Re=100(\square)$, $Re=160(\nabla)$. Experimental data of Ozono⁽⁷⁾; $Re=6.7 \times 10^3(\triangle)$, the length of the splitter plate is the same as the diameter of the cylinder

Figure 2에서 보듯이 정상 유동인 $Re=30$ 일 때와 비정상 유동인 $Re=100, 160$ 에서 모두 분할판을 실린더에 붙였을 때보다 G/d 를 조금씩 증가시킬 때 항력계수가 감소함을 볼 수 있다. 다만, 정상 유동에서는 변화가 작게 나타나고, 최적값 이후 항력 계수가 급증하는 현상은 나타나지 않는다. 비정상 유동인 $Re=100, 160$ 에서는 G/d 가 0.25까지는 오히려 항력 계수가 증가하는데, 이것은 분할판과 실린더의 간격이 너무 좁을 경우 실린더 후면의 압력이 더 낮아져서 전, 후면 압력차의 증가로 항력이 증가하게 되는 것이다. G/d 가 0.25보다 커지면 항력 계수가 서서히 줄어들

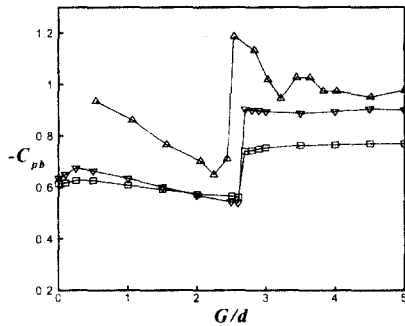


Fig. 4 Variation of $-C_{pb}$ with G/d ; $Re=100(\square)$, $Re=160(\nabla)$. Experimental data of Ozono⁽⁷⁾; $Re=6.7 \times 10^3(\triangle)$, the length of the splitter plate is the same as the diameter of the cylinder

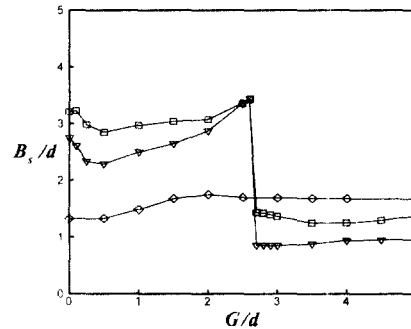


Fig. 5 Variation of bubble length with G/d ; $Re=30(\diamond)$, $Re=100(\square)$, $Re=160(\nabla)$

기 시작해서 두 경우 모두 $G/d=2.6$ 에서 항력계수가 최소였고 이 최저점들을 지나서는 갑자기 증가하는 현상이 두 경우 모두에서 공통적으로 관찰되었다. 분할판이 계속 멀어지면 실린더에 미치는 영향이 점점 작아지므로 분할판이 없는 경우의 값으로 접근됨을 알 수 있었다. 스트로울 수도 C_D 와 비슷한 양상을 보이며 난류에서의 실험 데이터⁽⁷⁾ 역시 최저점 이후에 급격한 증가를 보여준다. 즉 실린더 주위에서의 vortex shedding이 억제되어 스트로울 수가 감소하며 또한 실린더 후면에서의 압력이 증가하여 결국 C_D 의 감소로 나타나게 된다.(Fig. 3)

Figure 4는 실린더 후면의 base point에서의 압력계수(C_{pb})를 나타낸 것이다. 여기서 C_{pb} 는 다음과 같이 정의된다.

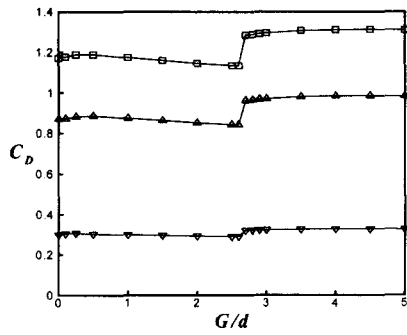
$$C_{pb} = (P_b - P_0 + \frac{1}{2} \rho U_\infty^2) / \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 \quad (3)$$

P_0 는 실린더 앞의 정체점에서의 압력이고, P_b 는 base point에서의 압력이다. $-C_{pb}$ 는 C_D (Fig. 2), St (Fig. 3)와 비슷한 경향을 보이고 있고, Ozono⁽⁷⁾의 실험 결과 중 분할판의 길이와 실린더 직경이 같은 결과 값을 비교해보면 매우 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 난류실험에서는 G/d 의 최적값까지의 $-C_{pb}$ 감소율이 2차원 층류로 계산한 결과보다는 훨씬 크게 나왔지만(Fig.

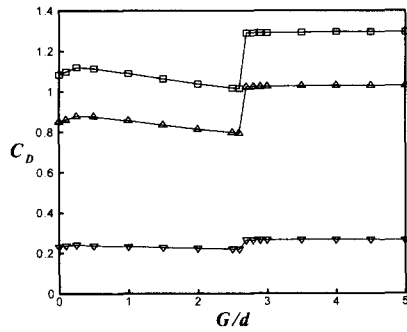
4), 본 연구에서도 Re 가 증가하면서 $-C_{pb}$, St 값의 감소율이 점점 커지는 결과를 보이기 때문에 실험으로 얻은 난류 경향과 비슷함을 알 수 있다.

실린더에 대한 항력 발생의 주원인은 형상 항력인데, 분할판은 실린더의 base pressure(P_b)를 증가시켜 실린더 전, 후면 사이의 압력차를 감소시키는 역할을 한다. Figure 4의 C_{pb} 값과 Fig. 2의 항력계수를 비교해보면 C_{pb} 가 커질수록 C_D 가 작아지고, C_{pb} 가 줄어들면 C_D 가 증가하는 현상을 볼 수 있다. $-C_{pb}$ 가 $G/d=0.25$ 까지 증가하는 현상은 C_D 의 변화와 일치한다. 또한 실린더와 분할판의 간격이 일정간격 이상($G/d > 0.25$) 되어야 항력이 감소함을 알 수 있다. 난류 실험의 경우에도 Ozono⁽⁷⁾의 결과 값을 보면 Fig. 3에서의 St 가 분할판이 실린더에 가깝게 인접해 있을 때 본 연구 결과와 같이 증가하는 현상을 볼 수 있다. 분할판은 실린더 후류의 wake 영역을 2개의 전단층으로 분리하는 역할을 하고, 여기서 발생하는 와류를 억제시켜 주는데 최적값 이후에는 이러한 역할이 줄어들어서 St 가 증가한다.

Figure 5는 G/d 에 따른 실린더 후류에서의 Bubble 길이를 보여준다. 여기서 B_s/d 는 Bubble 길이(B_s)를 실린더 직경 d 로 무차원화한 것이다. G/d 의 변화에 따라서 B_s/d 또한 서서히 증가하다가 최적값 이후에 급격히 감소하는 현상을 볼 수 있다. 즉 최적값까지 재순환 구역의 크기를 분할판이 계속 연장시켜주는 역할을 하지만, 그 이후에는 분할판의 영향력이 감소하여 급격히 줄어들게 된다. 이러한 현상은 Re 가 커질수록 더



(a)



(b)

Fig. 6 Variation of drag coefficient with G/d ; net drag(\square), form drag(\triangle), skin-friction drag (∇). (a) $Re=100$, (b) $Re=160$

뚜렷이 나타난다. 또한, 2차원 층류 유동에서는 난류에서의 경우와는 달리 최적값이 실린더에서 더 먼 지점에서 발생됨을 볼 수 있었는데, 이것은 분할판이 없을 때 층류인 경우의 bubble 크기가 난류인 경우보다 일반적으로 더 크게 나타나기 때문이다.

실린더의 항력은 압력차에 의한 형상 항력과, 마찰에 의한 점성 항력으로 나눌 수 있다. Fig. 6(a)는 $Re=100$ 인 경우에, (b)는 $Re=160$ 인 경우에 대하여 C_D 를 형상 항력, 점성 항력에 의한 항력 계수로 분리하여 G/d 에 따른 변화를 보여준다. Figure 6에서 보듯이 실린더 항력의 대부분은 마찰력보다는 압력에 의한 영향이 더 크고, 압력 변화에 C_D 가 상당히 민감하게 의존하는 것을 볼 수 있다. 반면에 마찰력에 의한 점성 항력계수는

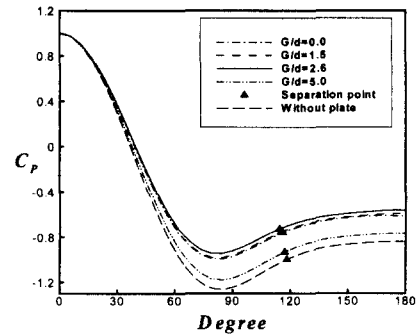


Fig. 7 Time-averaged pressure distributions around a circular cylinder, $Re=100$; Separation points are indicated by \blacktriangle

상대적으로 작은 값을 나타내었고 G/d 에 따른 값의 변화가 작았다. 항력계수의 최적값이 나타나는 현상도 실린더의 점성 항력보다는 압력에 의한 형상 항력이 최적값에서 갑자기 증가하는 것으로 설명될 수 있다. 전체 항력(net drag)에 대한 형상 항력의 영향 역시 Re 가 커질수록 증가하는데 (a), (b)의 형상 항력계수를 비교하면 (b)의 경우가 더욱 net drag에 접근되어 있음을 볼 수 있다. 이런 현상은 Park *et al.*⁽⁸⁾의 연구결과에서도 확인될 수 있다. 앞의 Fig. 4에서는 G/d 에 따른 base pressure의 변화를 보였지만, 실린더에서 항력계수 변화에 지배적인 역할을 하는 압력 변화를 보기 위해 Fig. 7에 실린더 표면에서 시간 평균된 압력 분포(C_p)를 G/d 를 변화시키면서 나타내었다. 다음과 같이 정의되는 C_p 는 실린더 앞의 정체점으로부터(0°) 원주방향으로의 각에 따라 계산되었다.

$$C_p = (P - P_0 + \frac{1}{2} \rho U_\infty^2) / \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 \quad (4)$$

0° 에서와 180° 일 때의 차이를 비교하면 G/d 가 최적값으로 갈수록(실선) 그 차이가 줄어들고 이후에는 다시 차이가 커지고 있다. 즉 $G/d=0.0$ 보다는 최적값까지 G/d 를 증가시켰을 때 실린더 후면의 C_p 값이 많이 상승하여 실린더 전, 후면 압력차가 감소되는 것을 확인할 수 있다. 또한 분할판의 위치가 최적점을 지나 실린더에서 더욱 멀어질수록 실린더 표면에서의 압력분포가 분할

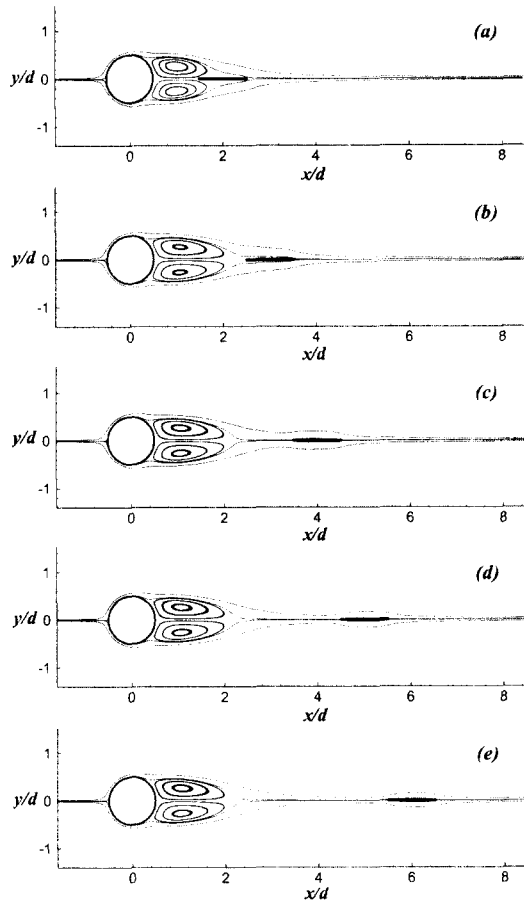


Fig. 8 Streamlines, $Re=30$; (a) $G/d=1.0$, (b) $G/d=2.0$, (c) $G/d=3.0$, (d) $G/d=4.0$, (e) $G/d=5.0$

판이 없을 때의 압력분포에 접근하게 됨을 알 수 있다. 여기서 박리점 역시 B_s 의 증가와 더불어 항력이 감소할 수록 실린더의 전면 쪽으로 점점 이동하다가 다시 항력이 증가하는 부분에서는 실린더 후면으로 이동함을 볼 수 있다. 일반적으로 분할판이 없을 경우에는 실린더의 박리점이 후면부로 이동할수록 형상 항력이 작아지지만, 분할판으로 실린더의 항력을 제어하는 경우에는 박리점이 실린더의 전면으로 이동할수록 형상 항력이 작아진다. 이러한 현상은 이전의 연구 결과에서도 확인되었다.^(1,4,7)

Figure 8은 정상 유동인 $Re=30$ 인 경우에 G/d 에 따른 유선을 나타내고, Fig. 9는 $Re=100$ 인 경우에 시간 평균된 유선을 나타낸다. $Re=30$ 인 경우에는 분할판이 실린더에서 점점 멀어져도 재순

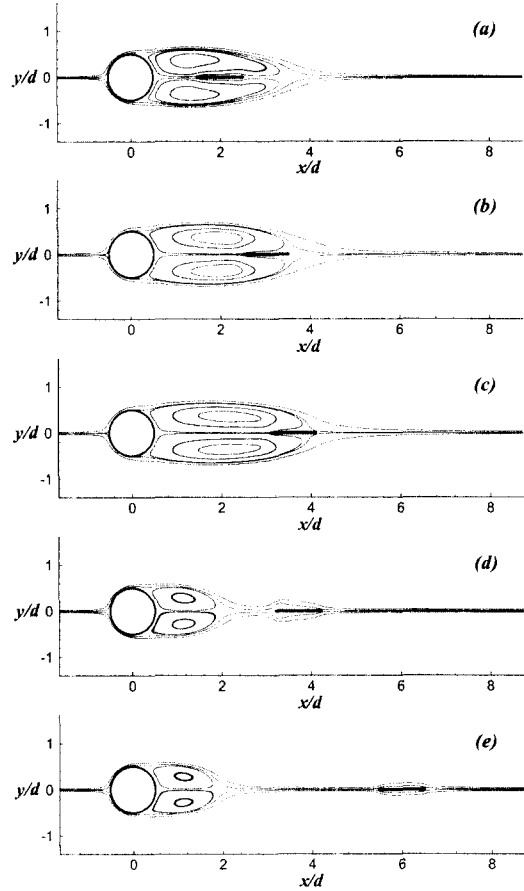


Fig. 9 Time-averaged streamlines, $Re=100$; (a) $G/d=1.0$, (b) $G/d=2.0$, (c) $G/d=2.6$, (d) $G/d=2.7$, (e) $G/d=5.0$

환 구역의 크기 및 주 유동장에 큰 영향을 거의 주지 않는 것을 확인할 수 있고, $Re=100$ 인 경우는 $G/d=2.6$ 일 때(최적값) 재순환 구역이 가장 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 그 이후에는 분할판이 재순환 구역의 크기를 더 연장시키지 못하고 한쪽 끝 부분이 분리되면서 소멸되어 급격히 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이는 앞서 제시된 최적점 직후에서의 C_D 나 St 의 급증과 밀접한 관계가 있음을 암시한다. 재순환 구역이 크게 줄어든 후에는 분할판이 더욱 멀어져도 실린더 주변의 유동장 변화에 영향을 거의 주지 않는 것을 확인할 수 있고, 따라서 $G/d=5$ 까지만 변화시키면서 연구를 수행하였다.

Figure 10은 $Re=160$ 인 경우에 $G/d=2.6$ 일 때(최적값) 한 주기 동안의 횡방향 vorticity의 변화

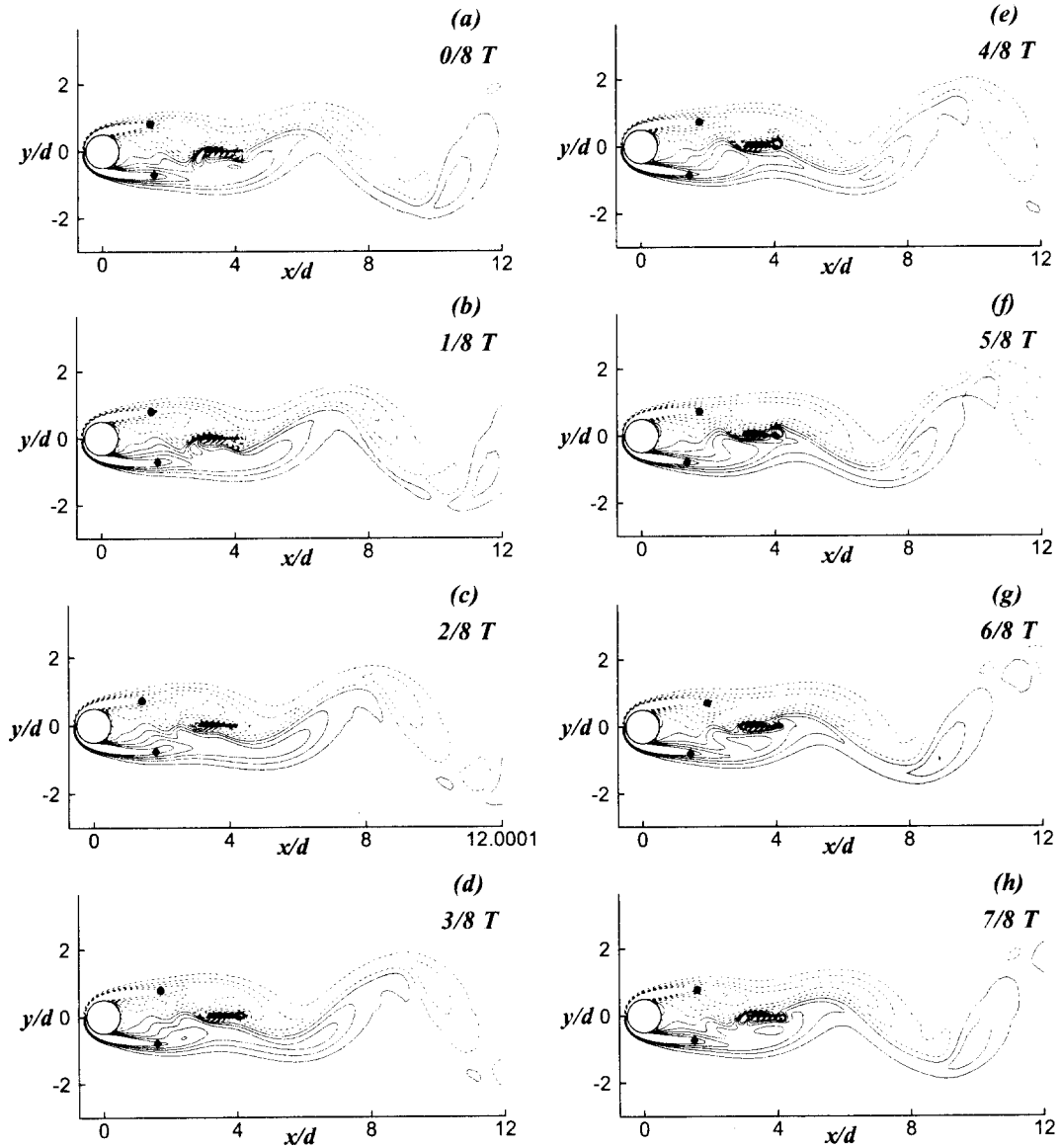


Fig. 10 Spanwise vorticity contours at equal intervals during one period of vortex shedding ; $Re=160$, $G/d=2.6$, ●:minimum, ◆:maximum. Here, T is the period of vortex shedding

를 보인 것이다. 여기서 실선은 양의 값, 점선은 음의 값이고 무차원된 vorticity contour의 간격은 0.56이다. 실린더에서 분할판까지는 shedding이 조금씩 발생하는 경향이 있으나 분할판으로 인해 shedding의 성장이 억제되는 양상을 보여주고 있고, 이것은 St 를 작게 만든다. 또한 이 shedding이 억제되어 재순환 구역의 크기를 최대

로 만들고, 이로 인해 실린더 base point에서의 압력이 증가하고 실린더 전, 후면 압력 차이를 작게 하여 원형단면 실린더의 항력 값을 최소값으로 떨어뜨리게 된다. (a)~(h)의 횡방향 vorticity contour를 보면, 실린더에서 분할판까지는 2개의 전단층이 비슷한 크기의 와도를 대칭적으로 나타내고 있는 것을 볼 수 있다. 특히 분할판이 실린

더 후류에서 와홀림이 발생하는 것을 억제하게 되므로 횡방향 vorticity의 크기가 가장 큰 위치 (●,◆)가 한 주기 동안 변하지 않으면서 대칭적으로 계속 일정한 크기를 나타내고 있다. 분할판을 지나서는 대칭적인 큰 크기의 와도는 사라지면서 주기적으로 shedding이 발생됨을 볼 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 2차원 원형 단면 실린더의 후류에서 실린더 직경과 같은 길이의 분할판을 주 유동방향으로 점점 분리시키면서 실린더에 작용하는 항력의 변화에 대해 수치해석적 연구를 수행하였다. 분할판을 실린더에 부착했을 때에는 분할판이 없을 때 보다 실린더의 항력이 감소했지만, 분할판의 위치가 실린더에서 멀어질수록 항력값은 더욱 감소하였다. $Re=100$ 과 $Re=160$ 일 때는 $G/d=2.6$ 에서 항력값이 최소가 되고 이 지점보다 더 멀어지면 항력계수가 갑자기 증가하는 현상을 보였다. 실린더와 분할판 사이의 wake 영역은 최적값까지는 2개의 전단층으로 분리되었고, 유동장이 상호 교환하여 shedding을 발생시키는 경향을 분할판이 최대한 억제하는 기능을 하였다. 이로 인해 실린더 후류에서의 재순환 구역의 크기가 최대가 되었고 실린더의 박리점 또한 전면부로 이동하였다. 결국 분할판으로 인하여 실린더 후면의 압력값이 높아져서 실린더의 전, 후면 압력 차이가 줄어들어 항력값이 감소하는 경향을 보인 것이다. 또한 실린더에 분할판을 부착했을 때보다 최적지점까지 분리시킬 때 실린더의 항력이 $Re=100$ 일 때는 3%, $Re=160$ 일 때는 6.3% 더 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

실린더의 항력을 감소시키는 방법으로서, 주 유동방향으로 분할판을 실린더 후류의 최적점에 위치시키면 좋은 결과를 얻을 수 있다는 것을 알았고, 이는 앞으로 항력제어를 필요로 하는 여러 공학 문제에 있어서 많은 도움이 될 것이다.

참고문헌

(1) Anderson, E. A., Szewczyk, A. A., 1997, "Effect of a Splitter on the Near Wake of a Circular Cylinder in 2 and 3-Dimensional Flow Configurations," *Experiments in Fluids*, Vol. 23,

pp. 161~174.

- (2) Apelt, C. J. and West, G. S., 1975, "The Effect 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, pp. 145~160.
- (3) Unal, M. F. and Rockwell, D., 1987, "On Vortex Formation from a Cylinder. Part 2. Control by Splitter-plate Interference," *J. Fluid Mech.*, Vol. 190, pp. 513~529.
- (4) Apelt, C. J., West, G. S. and Szewczyk, A., 1973 "The Effect of Wake Splitter Plates on the Flow past a Circular Cylinder in the Range $10^4 < R < 5 \times 10^4$," *J. Fluid Mech.*, Vol. 61, pp. 187~198.
- (5) Kwon, K., Choi, H., 1995, "Control of Laminar Vortex Shedding behind a Circular Cylinder Using Splitter Plates," *Phys. of Fluids*, Vol. 8, pp. 479~486.
- (6) Rathakrishnan, E., 1999, "Effect of Splitter Plate on Bluff Body Drag," *AIAA*, Vol. 37, No. 9, pp. 1125~1126.
- (7) Ozono, S., 1999, "Flow Control of Vortex Shedding by a Short Splitter Plate Asymmetrically Arranged Downstream of a Cylinder," *Phys. of Fluids*, Vol. 11, pp. 2928~2934.
- (8) Park, J., Kwon, K., Choi, H., 1998, "Numerical Solutions of Flow past a Circular Cylinder at Reynolds Numbers up to 160," *KSME International J.* Vol. 12, pp. 1200~1205.
- (9) Kim, J., Moin, P., 1985, "Application of a Fractional-Step Method to Incompressible Navier-Stokes Equations," *J. of comp. Phys.*, Vol. 59, pp. 308~323.
- (10) Rosenfeld, M., Kwak, D., and Vinokur, M., 1994, "A Fractional-Step Method for the Unsteady Incompressible Navier-Stokes Equations in Generalized Coordinate Systems," *J. of comp. Phys.*, Vol. 94, pp. 102~137.
- (11) Pauley, L. L., Moin, P., Reynolds, W. C., 1988, "A Numerical Study of Unsteady Laminar Boundary Layer Separation," Report No. TF-34, Thermo-sciences Division, Department of Mechanical Engineering, Stanford University.