

두 개의 분할판을 이용한 원형 단면 실린더의 유동제어

황종연*·양경수†

(2003년 5월 7일 접수, 2004년 1월 5일 심사완료)

Flow Control Around a Circular Cylinder Using Two Splitter Plates

Jong-Yeon Hwang and Kyung-Soo Yang

Key Words: Vortex Shedding(와플림), Strouhal Number(스트롤 수), Drag Coefficient(항력 계수), Splitter Plate(분할판)

Abstract

Control of drag force on a circular cylinder using multiple detached splitter plates is numerically studied for laminar flow. Two splitter plates with the same length as the cylinder diameter (d) are placed horizontally in the upstream of the cylinder and in the near-wake region, respectively. Their positions are described by the gap ratios (G_1/d , G_2/d), where G_1 represents the gap between the cylinder stagnation point and the rear edge of the upstream splitter plate, and G_2 represents the gap between the cylinder base point and the leading edge of the rear splitter plate. The drag varies with the two gap ratios; it has the minimum value at a certain set of gap ratios for each Reynolds number. The upstream splitter plate decreases the stagnation pressure, while the rear splitter plate increases the base pressure by suppressing vortex shedding. This combined effect causes a significant drag reduction on the cylinder. Particularly, the drag sharply increases past an optimum G_2/d ; this seems to be related to a sudden change in bubble size in the wake region.

1. 서론

원형단면 실린더 후류에서의 와플림(vortex shedding) 현상에 대한 연구는 여러 가지 유동이 혼재되어 있는 흥미로운 유동현상이 발견될 뿐만 아니라 공학적으로도 응용성이 높아 많은 연구자들에 의해서 수행되어왔다. 실린더 뒷부분의 표면에서 발생하는 박리에 의한 압력강하는 실린더의 항력을 증가시키는 원인이 되므로, 많

은 공학 문제에 있어서 항력을 제어하기 위하여 수동적인 방법과 능동적인 방법이 제기되어져 왔다. 그 중에서 비교적 효과가 좋은 분할판(splitter plate)을 이용하는 수동적인 방법이 많이 연구되었다.^(1~7) 그러나 대부분의 연구가 실린더의 후면(base suction point)에 부착된 분리판에 의한 항력감소 효과를 연구하는데 제한 되어져 왔으나 최근에 와서 실린더의 직경(d)과 동일한 길이의 분할판을 실린더의 후면에서 점차적으로 분리시키면서 후류에서의 와플림을 제어하는 연구가 실험⁽⁶⁾과 전산해석적 방법⁽⁷⁾으로 수행되었다. Ozono⁽⁶⁾는 후난류(wake turbulence)상태의 원형 실린더 유동에서 실린더 후면과 분할판의 선단까지의 거리(간극, G_2)를 점차적으로 증가시키면서 유동장의 변화에 대하여 실험적 연구를 수행하였다. G_2 가 증가함에 따라 실린더 표면에서의 항력계수(C_D), Strouhal 수(St), 실린더 후면에서의 음의 압력계수($-C_{pb}$)는 점점 감소하였다. 하지

* 회원, 인하대학교 대학원

† 책임저자, 회원, 인하대학교 기계공학부

E-mail : ksyang@inha.ac.kr

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

만 이러한 물리량들이 간극비 $G_2/d=2.3$ 인 부근에서 갑자기 증가하고 이 지점을 지나서 급격한 변화는 둔화됨이 밝혀졌다. Hwang et al.⁽⁷⁾은 전산해석적 연구를 수행하여 층류유동인 경우에도 이와 유사한 현상이 일어남을 보였고 레이놀즈수 (Re)가 100과 160인 경우 $G_2/d=2.6$ 부근에서 위와같이 물리량이 갑자기 증가하는 현상이 일어남을 보고하였다. 또한 순간 및 평균 유동장을 토대로 이러한 현상을 더욱 상세하게 관찰하였다.

본 연구에서는 2차원 원형 단면 실린더의 후류뿐만 아니라 실린더의 상류에도 분할판을 위치시켜 실린더에 작용하는 항력을 더욱 감소시키기 위한 전산 해석적 연구를 수행하였다. 상, 하류에 동시에 분할판을 설치할 경우 최대의 항력 감소를 얻게 되는 분할판들의 간극비(G_1/d , G_2/d)를 구하고 그때의 유동현상을 관찰하였다. 여기서 G_1 은 상류에 있는 분할판의 후단으로부터 실린더의 정체점까지의 거리이다. 분할판을 실린더의 상류에 설치할 경우 유동이 분할판을 지나는 동안 마찰에 의해 압력이 감소되어 실린더 정체점 근처에서는 분할판이 없는 경우보다 작은 정체압력이 형성된다. 한편 후류에 있는 분할판은 와류를 억제하여 실린더 후면에서의 압력을 높인다. 따라서 이 두 분할판의 복합적인 효과에 의해 실린더에 작용하는 항력을 크게 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다.

우선 코드의 검증작업을 수행한 후 분할판을 실린더의 상류에만 설치하여 G_1 을 변화시켜 항력이 최소가 되는 G_1 을 구하였다. 그리고 나서 이렇게 구한 G_1 을 유지시키고 후류 분할판의 G_2 를 변화시켜 항력이 최소가 되는 G_2 를 찾아 내었다.

2. 연구방법 및 이론

사용된 격자계로는 본 연구의 형상에 가장 적합한 H-형태의 격자계를 도입하였다. 선행연구⁽⁷⁾에서 사용되었던 C-형태의 격자계는 실린더 후류에서 격자점의 집중이 용이하여 실린더 후류의 물리량들을 효율적으로 해상할 수 있으나 실린더 앞에 위치되는 분할판에는 격자를 집중시키기 힘들다는 단점이 있다. 반면에 H-형태의 격자계는 실린더 후류 영역뿐만 아니라 실린더 상류에서도 격자를 집중시키기가 용이하여 본 연구에 가장

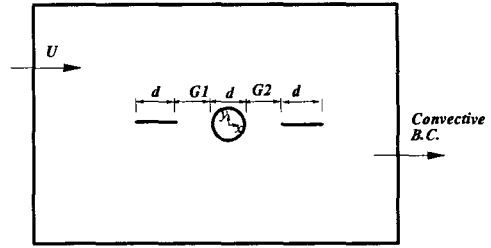


Fig. 1 Computational domain with both front and rear splitters

적합하다고 판단된다. 모든 고체면에서는 no-slip 조건이 적용되었고 출구 영역을 제외한 바깥 유동 경계에서는 $u=U$, $v=0$ 인 (여기서 u , v 는 각각 주유동방향 및 수직방향 속도성분을, U 는 자유류의 속도를 각각 의미함.) Dirichlet 조건이, 출구 영역에서는 대류 경계조건이 적용되었다.⁽⁸⁾ 우선적으로 실린더의 상류에만 분할판을 설치하였다. 분할판의 길이는 실린더의 직경과 같게 하고, G_1 을 변화시키면서 연구를 수행하였다. (Fig. 1) 먼저 $G_1/d=0$, 즉 실린더에 부착된 상태에서 계산을 수행한 후 G_1/d 를 점차로 증가시킨다. 가령 G_1/d 가 매우 크다면 분할판은 실린더 주위의 유동현상에 영향을 거의 미치지 않을 것이다. 분할판의 역할은 실린더 앞에서 마찰을 유발하여 정체압을 감소시키는데 있으므로 압력계수(C_p)는 중요한 물리량으로 간주될 수 있으며 다음과 같이 정의된다.

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (1)$$

여기서 p 는 압력이고 p_∞ 는 실린더에서 멀리 떨어진 부분에서의 압력이며 ρ 는 유체의 밀도이다. 본 연구의 첫 단계에서는 $Re=30, 100, 160$ 에 대하여 G_1/d 를 다양하게 변화시키며 각 Re 에 대하여 G_1/d 에 따른 여러 물리량들의 변화와 항력이 최소가 되는 간극비를 도출하는데 주안점을 두었다. 그 다음 단계로 위에서 구한 데이터를 근간으로 CD가 최소가 되는 위치에 상류 분할판을 고정시키고 실린더 하류에도 분할판을 설치하여

Table 1 Computational cases

Test cases		Re	A	B	C	NX	NY
G ₁	G ₂						
0.0	×	30, 100, 160	-15.5	20.5	25.0	224	160
0.2	×	30, 100, 160					
0.5	×	30, 100, 160					
1.0	×	30, 100, 160	-16.0	20.5	25.0	232	160
1.5	×	30, 100, 160					
2.0	×	30, 100, 160					
4.0	×	30, 100, 160	-18.0	20.5	25.0	256	160
7.0	×	30, 100, 160					
15.0	×	100, 160	-28.0			368	
1.5	1.5	100	-16.0	27.0		288	
1.5	2.0	100		27.5			
1.5	2.3	100		27.8			
1.5	2.5	100		28.0			
1.5	2.8	100		28.3	296		
1.5	3.0	100		28.5	296		

G2/d를 다양하게 변화시켜 계산을 수행하였다. 분할판이 실린더의 상류에만 있는 경우와 실린더의 후류에만 있는 경우⁽⁷⁾ 모두 Re=100일 때와 Re=160일 때의 경향이 정성적으로 큰 차이를 보이지 않으므로 본 연구에서는 Re=100인 경우에만 계산을 수행하였다. 계산 영역의 크기는 분할판의 위치에 따라 다르게 설정하였으며 관심되는 물리량들이 계산영역의 크기에 의존하지 않도록 영역의 크기를 설정하였고 사용된 격자수는 격자세분화 연구를 수행하여 결정하였다. Table 1에 본 연구에서 계산된 모든 경우에 대한 정보가 요약되어있다. 여기서 A, B, C는 입구의 x좌표, 출구의 x좌표, 바깥유동경계의 y좌표로서 실린더 직경에 대한 비를 의미하고, NX, NY는 x방향, y방향의 격자점수를 각각 의미한다.

3. 지배방정식과 수치해석 기법

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

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

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (3)$$

Table 2 Comparison with other simulations

	cylinder without splitter		cylinder with a rear splitter only (G ₂ /d=2.0)	
	Park <i>et al.</i> ⁽¹¹⁾	present	Hwang <i>et al.</i> ⁽⁷⁾ (C-type)	present (H-type)
C _D	1.34	1.34	1.14	1.14
St	0.167	0.165	0.118	0.119
B _s	1.36	1.35	2.94	2.94

여기서 x_i는 직교 좌표계를, u_i는 각 방향으로의 속도 성분을 나타내며 Re는 레이놀즈 수이다. 사용된 모든 변수들은 길이 스케일로서는 실린더 직경 d, 속도 스케일로서는 U로 무차원화 되었다.

공간에서의 차분은 유한체적법(Finite Volume Method)가 이용되었고 사용된 변수는 일반화 좌표계에서 엇갈린(staggered) 형태로 배열되었다. 시간에 따르는 적분은 혼합적인 형태로서 대류항에 대해서는 3차 정확도를 가지는 Runge-Kutta 방법으로 explicit하게, 점성항은 Crank-Nicolson 방법을 이용하여 implicit하게 수행되었고, 연속방정식과 모멘텀 방정식을 분리(decouple)하기 위해 fractional step method^(9,10)가 사용되었다. 사용된 수치해석 기법의 상세한 사항들은 Rosenfeld *et al.*⁽¹⁰⁾의 논문을 참조하기 바란다.

4. 결과 및 토론

4.1 Code의 검증

본 연구에서 작성한 코드를 검증하기 위해서 우선적으로 분할판이 없는 경우에 대해서 Re=100 일 때 기존의 수치해석적 연구로 수행된 결과와 C_D, St, B_s(재순환 영역에서 실린더 후면으로부터 재부착점까지의 거리)값 등을 비교하였다. 또한 선행연구⁽⁷⁾에서 작성한 C-형태의 코드에서 실린더의 후류에 분할판을 설치한 결과와 본 연구에서 작성한 H-형태의 코드에서 실린더의 후류에 분할판을 설치한 경우의 결과를 비교하여 Table 2에 나타내었다. 후류에 설치한 분할판은 G2/d=2.0인 경우이고 Re=100이다. 비교결과가 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

4.2 분할판을 실린더 상류에 위치시킨 경우

상류에 설치한 분할판의 중요한 역할은 분할판을 지나는 유동과 분할판과의 마찰에 의해서 실린더 정체점에서의 압력을 감소 시키는 것이다. 따라서 만일 분할판의 길이를 매우 길게 증가시키면 실린더 정체점에서의 압력은 더욱 더 감소할 수 있음을 기대할 수 있다. 하지만 그런 경우에는 분할판을 지난 직후 실린더의 상류 대부분의 영역에 경계층이 형성되고 이 경계층에 의해서 과도한 운동량 결핍이 발생하게 되어 실린더 주위의 유동을 근본적으로 변화시킬 수 있다. 운동량 두께는 다음과 같이 분할판의 유동방향 길이에 비례한다.⁽¹²⁾

$$\frac{\theta}{x} \approx \frac{0.664}{Re_x^{1/2}} \quad (4)$$

여기서 θ 는 운동량 두께이고 Re_x 는 분할판의 선단으로부터 주유동 방향으로의 거리 x 를 특성 길이로 정의된 레이놀즈 수이다. 또한 분할판의 길이를 더욱 더 증가시키면 분할판을 지나서 유동장은 난류로 천이 될 수도 있다. 본 연구에서는 상류 분할판에 의해 실린더 주위에서의 유동 상태가 심각하게 변질되지 않는 경우에 국한해서 분할판과 실린더 정체점의 거리에 대한 파라메트릭 연구를 수행하였다. 즉 비교적 짧은 길이의 분할판을 상류에 위치시켜 실린더 주위의 유동이 분할판이 없을 때와 동일한 topology를 유지하는 상황에서 최대한의 항력감소를 얻는 것이 주목적이다. 따라서 분할판의 길이를 실린더의 길이와 같은 d 로 결정하게 되었으며 이에 대한 정당성은 다음과 같다.

(1) '분할판을 지난 유동장이 층류이다.'

평판을 지나서 유동장에서 난류로 천이되는 Re_x 는 보통 10^5 정도에서 발생한다.⁽¹²⁾ 분할판의 길이를 d 로 결정할 경우 본 연구에서 수행한 $Re=30, 100, 160$ 인 경우 $Re_d=Re$ 가 되므로 층류 유동장으로 볼 수 있다.

(2) '분할판을 지났을 경우의 운동량 두께가 크지 않다.' 따라서 분할판의 후단부과 실린더의 정체점 사이에서 적절한 운동량 두께를 확보하여 운동량의 회복 정도와 항력감소의 연관성을 살펴볼 수 있다. 본 연구에서 수행한 경우의 운동량 두께가 대략 어느 정도인지 살펴보면 식 (4)에 의해 $Re=30, 100, 160$ 인 경우 θ 는 각각 0.121,

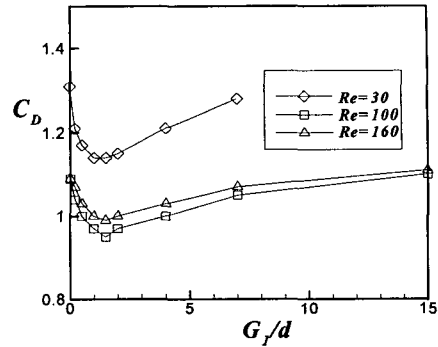


Fig. 2 Variation of drag coefficient with G_1/d

0.0664, 0.0525 정도가 된다. 하지만 본 연구에서는 분할판의 하류에 실린더가 존재하고 분할판의 길이가 짧으므로 식 (4)은 정확히 성립하지 않는다. 가령, $Re=100$ 이고 $G_1/d=1.0$ 인 경우 본 수치모사로부터 계산된 운동량 두께는 $\theta=0.0864$ 로 식 (3)의 결과인 0.0664보다 다소 크지만 이는 실린더의 직경에 대해서 8.64%에 불과하다.

Fig. 2는 $Re=30, 100, 160$ 인 경우에 대하여 간극비의 변화에 따른 실린더 표면에서의 항력계수를 보여준다. 여기서 $Re=30$ 은 정상(steady)층류유동인 경우이고 $Re=100, 160$ 은 비정상(unsteady) 층류유동인 경우이다. 그림에서 보듯이 세 경우 모두 항력이 최소가 되는 간극비가 존재하고 각 경우 모두 $G_1/d=1.5$ 인 경우에 C_D 가 최소가 된다. 특히 정상인 경우와 비정상인 경우의 경향이 유사한 형태를 보이는데 이는 분할판을 앞에 설치한 경우는 항력의 감소 메커니즘이 실린더 후류의 상태보다 실린더 상류에서의 모멘텀 감소에 큰 영향을 받고 있음을 간접적으로 시사하고 있다. 여기서 간극비의 최적값이 존재하는 이유를 밝히려면 다음과 같은 두가지 메커니즘을 분리해서 살펴볼 필요가 있다. (1) 간극비가 증가함에 따라 유동이 분할판을 지났을 때 감소된 모멘텀이 회복될 수 있는 공간이 더욱 충분히 확보되고 압력 또한 실린더 정체점에 이르는 동안 증가할 수 있는 공간적 여유가 더욱 확보된다. 이를 정량적으로 살펴보기 위하여 실린더 정체점에서의 압력계수 (C_{po})와 분할판 후단(trailing edge)에서의 압력계수 (C_{ps}), 그리고 이

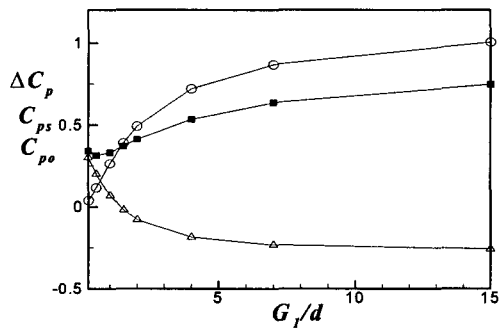


Fig. 3 Variation of pressure coefficients with G_1/d ; ΔC_p (O), C_{ps} (Δ) and C_{po} (\blacksquare)

두 항 사이의 차이 $\Delta C_p (= C_{po} - C_{ps})$ 를 간극비의 변화에 따라 나타내었다 (Fig. 3). 간극비가 증가함에 따라 ΔC_p 역시 단조롭게 증가하고 있음을 알 수 있다. (2) 간극비가 증가함에 따라 C_{ps} 는 감소한다 (Fig. 3). 이는 유동이 분할판을 지날 때의 압력감소가 간극비와 반비례함을 보여 주고 있으며 이 원인은 분할판의 하류에 위치하는 실린더의 영향 때문이다. 즉 역으로 실린더가 유동의 정체를 유발하는 한 원인이 되므로 간극비가 작을수록 C_{ps} 는 큰 값을 보이게 된다.

이 두가지의 물리량 즉 C_{ps} 와 ΔC_p 의 합은 결국 C_D 를 결정하는 중요한 요인인 C_{po} 가 된다 (Fig. 3). 간극비에 따른 C_D 의 양상 (Fig. 2)과 그 형태가 매우 흡사함을 알 수 있다. 즉 간극비가 최적값보다 작은 경우에는 상대적으로 감소가 작은 C_{ps} 가 우세하고 반대로 간극비가 최적값보다 큰 경우에는 모멘텀 확보의 정도가 상대적으로 더 큼을 나타내는 지표인 ΔC_p 가 더 우세하게 된다. 또한 분할판이 실린더 후류에 위치한 경우⁽⁷⁾와는 달리 양력계수의 크기나 St 등은 간극비에 따라서 크게 변하지 않음이 확인되었다. 이는 분할판이 실린더 상류에 있는 경우와 하류에 있는 경우의 유동 메카니즘이 매우 다르기 때문이고 각각의 메카니즘은 상호간에 큰 영향을 미치지 않고 있음을 암시하고 있다. 따라서 다음 절에서 설명할 주제인 분할판이 상, 하류 동시에

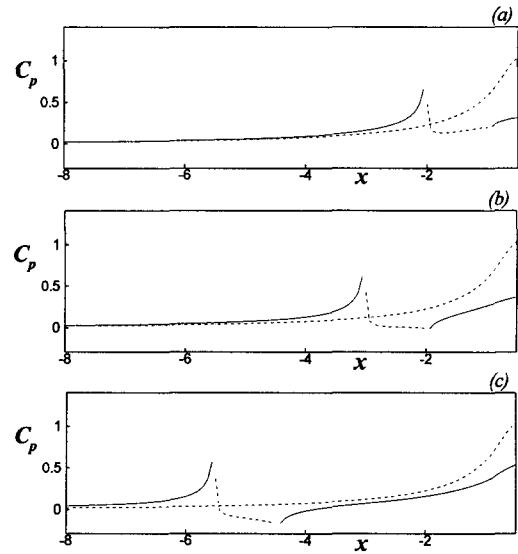


Fig. 4 Variation of C_p along the upstream centerline with G_1/d ; (a) $G_1/d=0.5$, (b) $G_1/d=1.5$, (c) $G_1/d=4.0$

있는 경우에 대한 파라미터적 연구를 보다 쉽고 용이하게 해 줄 수 있는 단서를 제공하고 있다.

Fig. 4는 각각의 간극비에 대해서 실린더 상류 중앙선을 따른 C_p 를 보여준다. 여기서 실선은 유체내에서의, 이점쇄선은 분할판에서의 C_p 를 각각 의미하고 일점쇄선은 분할판이 없는 경우를 나타낸다. 간극비에 관계없이 모든 경우 유동이 분할판에 가까워지면서 압력계수가 분할판이 없는 경우보다 더 가파르게 증가함을 볼 수 있다. 이는 분할판이 모멘텀을 감소시키는 역할을 하기 때문에 상대적으로 압력은 증가하게 된 것이다. 분할판을 지나면서 압력은 급격히 하강하고 분할판을 지난 뒤 압력계수가 다시 증가하게 된다. 간극비가 클수록 압력계수가 증가하게 되는 공간이 더 많이 확보되어 결과적으로 더 큰 압력계수의 상승을 뚜렷이 볼 수 있다 (Fig. 3의 ΔC_p 참조). 또한 각각의 간극비에 대해서 C_{ps} 를 비교하면 간극비가 증가함에 따라 C_{ps} 는 감소함을 볼 수 있으며 이는 Fig. 3의 C_{ps} 의 변화를 설명할 수 있다. 간극비의 증가에 따른 C_{ps} 의 감소 현상은 분할판에서의 C_p 의 변화를 관찰하면 쉽게 설명된

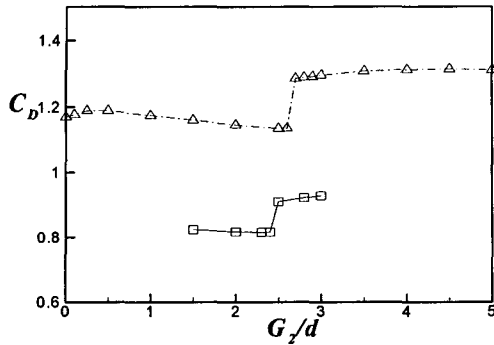


Fig. 5 Variation of drag coefficient with G_2/d ; Δ , using a down-stream splitter⁽⁷⁾, \square , present

다. 모든 간극비에서 분할판 선단을 지나면서 C_p 는 급격히 감소하지만 그 이후의 분할판에서의 상황은 간극비에 따라 다르다. 즉 C_p 가 급격히 감소한 후 주 주동방향 (x)에 대한 C_p 의 기울기는 간극비가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다. 가령, Fig. 4 (a)의 경우는 기울기가 양(positive)이고 Fig. 4 (b)는 기울기가 거의 0이며 Fig. 4 (c)는 기울기가 음(negative)인 형태를 보이고 있다. 여기서 기울기가 크다는 것은 실린더의 영향을 많이 받고 있음을 의미한다. 이를 설명하기 위하여 분할판 위에서의 x -방향 2차원 모델링 방정식을 도입한다.

$$\mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)_{y=0} = \frac{\partial p}{\partial x} \quad (5)$$

즉 압력계수의 x 방향으로의 구배가 양인 경우는 역압력 구배를 나타내며 이는 분할판 위에서 속도의 변곡점(inflexion point)이 존재할 수 있음을 의미한다. 이 변곡점의 생성은 실린더의 영향으로 간주할 수 있으며 간극비가 큰 경우에는 압력구배가 음이므로 발견되지 않는다.

4.3 분할판을 실린더 상, 하류 동시에 위치시킨 경우

본 절에서는 더욱 향상된 항력 감소를 얻고자 분할판을 실린더의 상, 하류 동시에 위치시켜 연구를 수행하였다. 분할판을 상류에 위치시킨 경우에 얻어진 최적 간극비($G_1/d=-1.5$)에 상류의

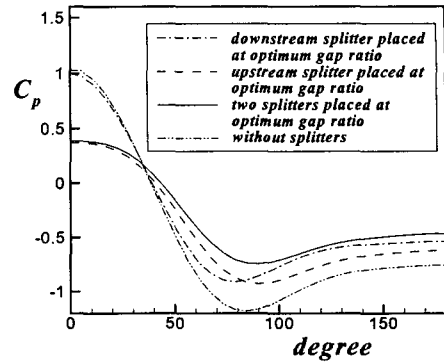


Fig. 6 Time-averaged pressure distributions along circumferential direction of a circular cylinder

분할판을 위치시키고 후류의 분할판을 변화시켜 항력계수가 최소가 되는 G_2/d 를 결정하였다. 계산이 수행된 경우에 관한 계산정보는 Table 1을 참조하기 바란다.

Fig. 5는 후류에서의 분할판의 간극의 변화에 따른 항력계수를 보여준다. 일점쇄선은 상류에 분할판이 없는 경우⁽⁷⁾이며 이와 비교하여 관찰하면 그 양상이 매우 흡사함을 볼 수 있다. 하지만 상류의 분할판에 의해 항력계수의 크기는 더욱 작아졌고 최적 간극비는 $G_2/d=2.4$ 로서 상류에 분할판이 없는 경우($G_2/d=2.6$)와 약간의 차이를 보이고 있다. Fig. 6은 분할판이 없는 경우, 분할판이 상류에만 위치한 경우, 분할판이 하류에만 위치한 경우, 분할판이 상, 하류 동시에 위치한 경우 실린더 표면에서의 압력계수를 각각 보여준다. 제시된 모든 경우는 항력이 최소가 되는 최적 간극비에 분할판이 위치한 경우이다. 정체점 ($\theta=0^\circ$)에서는 분할판이 실린더 상류에 위치한 경우(상, 하류 동시에 위치한 경우도 포함) 정체압이 매우 크게 감소했고 실린더 후면($\theta=180^\circ$)에서는 분할판이 실린더 후류에 위치한 경우(상, 하류 동시에 위치한 경우도 포함) 압력계수가 증가했음을 볼 수 있다. 따라서 분할판이 상, 하류 동시에 위치한 경우에는 정체압이 감소하고 게다가 실린더 후면에서의 압력이 증가함으로 가장 크게 항력이 감소하게 된다. 분할판이 없는 경우

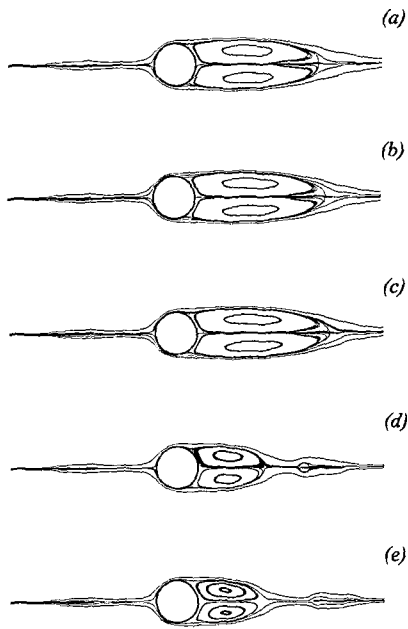


Fig. 7 Time-averaged streamlines, $Re=100$; (a) $G_2/d=2.0$, (b) $G_2/d=2.3$, (c) $G_2/d=2.4$, (d) $G_2/d=2.5$, (e) $G_2/d=2.8$

에 비하여 후류에 분할판이 위치한 경우 14.7%의 항력 감소⁽⁷⁾를, 상류에 분할판이 위치한 경우 28.4%의 항력 감소를, 분할판을 상, 하류 동시에 위치시킨 경우 38.6%의 항력 감소를 얻을 수 있었다.

Fig. 7은 후류에 위치한 분할판 간극비의 변화에 따른 시간 평균된 유선을 보여준다. 후류에만 분할판을 위치시킨 경우⁽⁷⁾와 매우 흡사함을 볼 수 있다. 즉 최적 간극비인 $G_2/d=2.4$ 일 때(Fig. 7(c)) 재순환 구역의 주유동 방향의 길이가 가장 길게 나타나며 G_2/d 가 더욱 증가함에 따라 분할판이 재순환 구역의 크기를 더 연장시키지 못하고 분할판의 선단부분이 분리되면서 급격히 줄어든다. 이는 실린더 후면에서 압력 하강을 유발하며 항력계수는 갑자기 증가하게 된다.

Fig. 8은 $G_2/d=2.4$ 와 $G_2/d=2.5$ 에 대하여 횡방향 와도(ω) 등고선을 각각 보여준다. 여기서 실선과 점선은 양의 와도와 음의 와도를 각각 의미하고 T 는 와홀림의 한 주기이다. 하류에만 분할판을 설치한 경우와 흡사함을 볼 수 있다.⁽⁷⁾

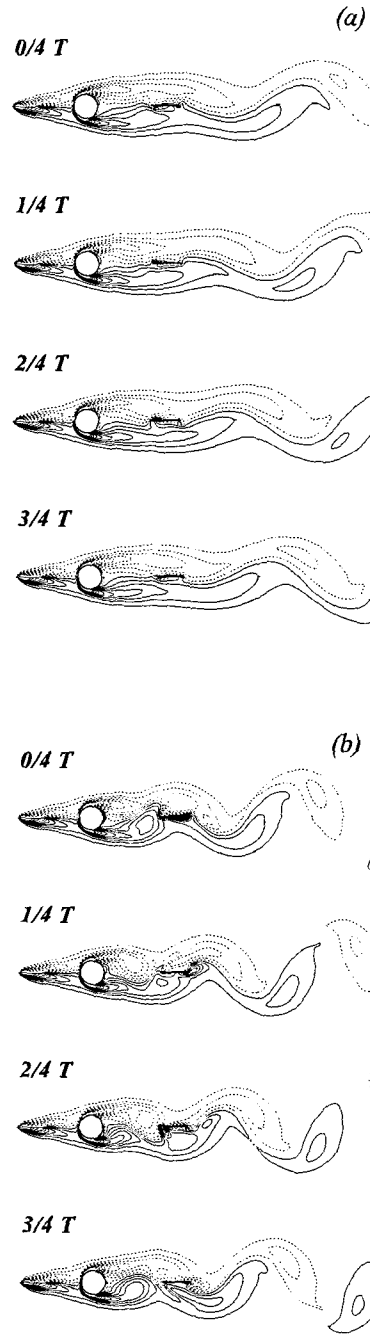


Fig. 8 Instantaneous spanwise vorticity contours at equal intervals during one period of vortex shedding, $Re=100$; (a) $G_2/d=2.4$, (b) $G_2/d=2.5$

즉 Fig. 8(a)에서와 같이 분할판이 최적의 간극비에 위치한 경우 와플림을 효과적으로 억제하여 실린더 상, 하에서 생성된 자유 전단층들의 상호작용을 거의 볼 수 없다. 특히 실린더 상류에 위치한 분할판에 의해 생성된 전단층이 하류로 이동하면서 후류에서 생성된 자유전단층에 약간의 영향을 주고 있음이 발견된다. 이는 실린더 상류에 분할판이 설치된 경우에서만 발견되는 현상으로 이 전단층은 후류에서의 와플림을 주유동 방향에 대하여 수직방향으로 약간 억제하게 된다. 따라서 분할판이 없는 경우에 비하여 상류에 분할판이 있는 경우, 또한 분할판이 하류에만 있는 경우에 비하여 분할판이 상, 하류 동시에 위치한 경우 각각 St 가 약간(10%이내) 감소함이 밝혀졌다.

5. 결 론

본 연구에서는 2차원 원형단면 실린더의 상, 하류에 실린더의 직경과 같은 길이의 분할판을 수평방향으로 실린더로부터 점차적으로 분리시키면서 실린더에 작용하는 항력의 감소를 관찰하기 위한 유동해석을 수행하였다. 실린더의 후류에 위치시킨 분할판은 선행 연구에서와 마찬가지로 후류에서의 와플림을 억제하고 후면에서의 압력을 상승시키는 역할을 하였다.

한편 실린더 상류에 위치시킨 분할판은 마찰에 의해서 실린더 정체점에서의 압력을 감소 시켜 분할판을 상, 하류 동시에 위치시킨 경우 분할판이 없는 경우보다 38.6%의 항력 감소를 얻을 수 있었으며 그때의 분할판의 최적 간극비는 $G_1/d=1.5$, $G_2/d=2.4$ 임이 밝혀졌다. 따라서 실린더의 항력을 감소시키는 방법으로 주 유동 방향으로 분할판을 실린더 상, 하류에 동시에 설치하면 매우 좋은 결과를 얻을 수 있음이 확인되었다.

참고문헌

- (1) Anderson, E. A. and 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) Rathakrishnan, E., 1999, "Effect of Splitter Plate on Bluff Body Drag," *AIAA*, Vol. 37, No. 9, pp. 1125~1126.
- (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. and Choi, H., 1995, "Control of Laminar Vortex Shedding Behind a Circular Cylinder Using Splitter Plates," *Phys. of Fluids*, Vol. 8, pp. 479~486.
- (6) 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.
- (7) Hwang, J. Y., Yang, K. S. and Sun, S. H., 2003, "Reduction of Flow-Induced Forces on a Circular Cylinder Using a Detached Splitter Plate," *Phys. of Fluids*, in print
- (8) Pauley, L. L., Moin, P. and 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.
- (9) Kim, J. and 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) Park, J., Kwon, K. and 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.
- (12) Schlichting, 1979, "Boundary Layer Theory," McGraw-Hill Book Company.