

〈 논문 〉

원형실린더를 지나는 균일전단 유동에 관한 수치연구

강 상 모[†] · 최 원 호^{*}
(2004년 10월 14일 접수, 2004년 11월 22일 심사완료)

Numerical Study on Uniform-Shear Flow Over a Circular Cylinder

Sangmo Kang and Wonho Choi

Key Words: Blockage Effect(막힘효과), Circular Cylinder(원형실린더), Uniform Shear(균일전단)

Abstract

The present study has numerically investigated two-dimensional laminar flow over a circular cylinder with a uniform planar shear, where the free-stream velocity varies linearly across the cylinder. Numerical simulations using the immersed boundary method are performed for the ranges of $50 \leq Re \leq 160$, $K \leq 0.2$, and $B = 0.1$ and 0.05 where Re , K and B are the Reynolds number, the non-dimensionalized velocity gradient and the blockage ratio, respectively. Results show that the flow depends significantly on B as well as Re and K . It is found, especially, that the blockage effect accounts for some causes of apparent discrepancies among previous studies on the flow. With increasing K , the vortex shedding frequency and the mean drag stay nearly constant or slightly decrease whereas the mean lift, acting from the higher-velocity side to the lower, increases linearly. Flow statistics as well as instantaneous flow fields are presented to identify the characteristics of the flow and then to understand the underlying mechanism.

기호설명

B : 막힘비율 (= D/W)
 C_D, C_L : 항력 및 양력계수
 D : 실린더 직경
 f : 보텍스 세딩 주파수
 G : 속도구배 또는 전단율 (= dU/dy)
 K : 무차원 전단율 (= GD/U_c)
 b, b_c : 압력 및 자유유동 중심압력
 Re : 레이놀즈 수 (= $U_c D/\nu$)
 St : 스트로할 수 (= fD/U_c)
 U, U_c : 자유유동 속도 및 중심속도

W : 유동영역의 y -방향 크기
 ν : 동점성 계수
 ω : 와도
 $\bar{\quad}$: 시간 평균량
 \cdot : 섭동량

1. 서론

몽푁한 물체를 지나는 유동에서 유동속도가 어느 이상이 되면, 후류(wake)에서 유동의 불안정성 때문에 보텍스 세딩(vortex shedding)이 발생한다. 동시에 물체 주위의 압력이 변동하고, 결과적으로 물체에 작용하는 항력(drag)과 양력(lift)이 진동하게 된다. 이와 같이 보텍스 세딩으로부터 발생하는 진동현상은 구조물의 진동, 유체 소음 또는 공진 등을 일으키며, 경우에 따라서는 구조물을 파괴하거나 후류에서 혼합현상을 가속화시킬 수 있다.⁽¹⁾

[†] 책임저자, 회원, 동아대학교 기계공학과
 E-mail : kangsm@daunet.donga.ac.kr
 TEL : (051)200-7636 FAX : (051)200-7656
^{*} 신영금속(주) 기술부

몽푁한 물체를 지나는 유동은 일반적으로 원형 실린더를 지나는 균일유동(uniform flow)으로 모델링 되며, 이에 대한 연구는 지금까지 많이 이루어져 왔다.^(1,2) 이는 기하학적인 형태가 간단하기도 하고 실제 응용 면에서도 매우 중요하기 때문이다. 그렇지만, 실제 공학적으로 관심이 있는 경우에는 물체에 접근하는 자유유동이 균일하지 않으며 대부분 전단 상태를 유지한다. 지상의 수송장치 및 구조물 등과 해저의 송유관 등이 여기에 해당하는 대표적인 예이다. 비균일 유동은 공간좌표 상에서 속도구배를 가지게 되며, 이 때문에 유동장에 와도(vorticity)가 존재한다. 그러나, 전단유동(shear flow)의 중요성에도 불구하고 이에 대한 연구는 균일유동에 비하여 그다지 많이 이루어지지 않았다. 따라서, 전단유동에 대한 체계적인 연구는 필수적이다. 이러한 연구에는 일차적으로 자유유동에 일정한 속도구배, 즉 실린더 직경방향으로 선형 속도분포를 부과한 것으로 가정한다.

Fig. 1에 도시하였듯이, $U = U_c + Gy$ 의 선형 속도분포를 가지는 자유유동이 직경 D 인 원형실린더를 지나고 있다. 여기서, U_c 와 G 는 각각 중심선($y=0$)에서의 속도와 y -방향에 대한 속도구배(dU/dy)이다. $G > 0$ 인 경우는 실린더 위쪽의 속도가 아래쪽보다 크다는 것을 의미하며, $G=0$ 이 되면 자유유동은 균일상태가 된다. 따라서, 본 유동은 세 개의 무차원 유동변수에 의해 지배를 받는다. 즉, 첫째는 레이놀즈 수(Reynolds number) $Re = U_c D / \nu$ 이며, 그리고 둘째는 무차원 속도구배 즉 전단율(shear rate) $K = GD / U_c$ 이다.

기존의 대부분 실험연구[Kiya 등,⁽³⁾ Kwon 등,⁽⁴⁾ Hayashi 등,⁽⁵⁾ Sumner & Akosile⁽⁶⁾]에서는 자유유동이 단지 한 방향으로만 흐를 수 있도록($U > 0$) 유동영역의 y -방향 크기 W 를 일정하게 제한하였다. 이 때문에 실험결과들은 필연적으로 막힘효과(blockage effect)를 수반하게 되었다.⁽⁶⁾ 본 연구에서도 실험연구와 마찬가지로 유동영역의 크기를 일정하게 제한하였으며, 따라서 $B = D/W$ 로 정의되는 막힘비율(blockage ratio)은 본 유동을 지배하는 세 번째 무차원 유동변수가 된다.

원형실린더를 지나고 균일한 전단을 가지는 자유유동에 대한 연구는 그 동안 일부 이루어졌으며, 그 중 대표적인 연구를 적용된 유동조건과

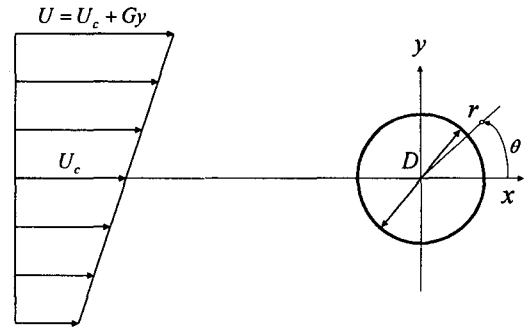


Fig. 1 Schematic diagram of uniform-shear flow over a circular cylinder

함께 Table 1에 정리하였다. 그들은 주로 레이놀즈 수와 전단율에 따라 보텍스 세딩 주파수, 평균 양력의 크기와 방향, 그리고 평균 항력 등이 어떻게 변하는지를 연구하였다.

그 동안 많은 성과에도 불구하고 전단유동 내의 실린더 후류에서 발생하는 보텍스 세딩과 실린더에 작용하는 수력학적 힘의 특성에 대해 확실히 규명되지 않은 부분이 아직 많이 남아있다. 특히, Lei 등⁽¹¹⁾과 Sumner & Akosile⁽⁶⁾은 기존의 연구결과들 사이에서 많은 모순 점들이 발견된다고 주장하였다. 그들은 그 모순 점들에 대한 원인을 체계적으로 규명하지 못하였으며, 오히려 기존의 연구결과에 또 하나의 결과만을 추가하는 것에 불과하였다. 같은 또는 유사한 유동조건에서 서로 다른 결과를 제시한 대표적인 연구사례들을 간단히 정리하면 다음과 같다.

보텍스 세딩 주파수 [$St = fD / U_c$; 스트로할 수(Strouhal number)]의 경우, Kiya 등,⁽³⁾ Kwon 등,⁽⁴⁾ 등은 전단율 K 가 증가함에 따라(주로 K 가 클 때) St 가 증가한다고 주장한 반면, Lei 등,⁽¹¹⁾ Sumner & Akosile⁽⁶⁾ 등은 거의 일정하거나 약간 감소한다고 서로 다른 주장을 하였다. 특히 Kiya 등⁽³⁾은 그들이 수행한 유동조건 $43 < Re < 220$ 에서 K 가 충분히 클 때 보텍스 세딩이 완전히 사라진다고 보고하였다. 그러나 Lei 등⁽¹¹⁾에 의해 수행된 비슷한 유동조건($Re > 80$)에서는 보텍스 세딩이 여전히 발생하였다.

평균 양력(\bar{C}_L)의 경우, Jordan & Fromm,⁽⁷⁾ Hayashi 등,⁽⁵⁾ Lei 등,⁽¹¹⁾ Sumner & Akosile⁽⁶⁾ 등은 \bar{C}_L 이 자유유동 속도가 높은 쪽에서 낮은 쪽으로 작용한다고 주장한 반면에, Tamura 등,⁽⁸⁾

Table 1 Flow conditions used in previous studies: NA=numerical analysis, EM=experimental measurement. Jordan & Fromm used the time-averaged flow of a turbulent jet for the uniform-shear flow

Researchers	Flow Conditions			Method
	Re	K	B(%)	
Jordan & Fromm (1972) ⁽⁷⁾	400	see caption	≈ 0	NA
Tamura <i>et al.</i> (1980) ⁽⁸⁾	40, 80	0~0.4	≈ 0	NA
Kiya <i>et al.</i> (1980) ⁽³⁾	35 ~ 1500	0~0.25	2.7~17	EM
Yoshino & Hayashi (1984) ⁽⁹⁾	80	0~0.4	≈ 0	NA
Kwon <i>et al.</i> (1992) ⁽⁴⁾	600 ~ 1600	0~0.25	6.7~16	EM
Hayashi <i>et al.</i> (1993) ⁽⁵⁾	6×10 ⁴	0~0.045, 0.15	6.7	EM
Wu & Chen (2000) ⁽¹⁰⁾	-	0~2.67	≈ 0	NA
Lei <i>et al.</i> (2000) ⁽¹¹⁾	80 ~ 1000	0~0.25	12.5	NA
Sumner & Akosile (2003) ⁽⁶⁾	4~9 × 10 ⁴	0.02 ~ 0.07	1.8 ~ 2.7	EM

Yoshino & Hayashi⁽⁹⁾ 등은 반대로 낮은 쪽에서 높은 쪽으로 작용한다고 주장하였다. 특히, Wu & Chen⁽¹⁰⁾은 양력의 방향이 K의 크기에 따라 결정된다고 주장하기도 하였다.

이 밖에도 기존 연구 결과들 사이에 여러 모순점들이 적지 않게 발견되고 있다. 이러한 모순점들은 원형실린더를 지나는 균일전단 유동에 대한 추가적인 연구가 더욱 필요함을 의미하며, 본 연구를 수행하게 된 주요 동기를 제공하였다.

Fig. 2는 지금까지 많은 연구가 이루어진 균일 유동(K=0)의 경우 레이놀즈 수가 Re=100일 때 막힘비율 B에 따른 평균 항력(\bar{C}_D), 양력 섭동량(C'_L), 그리고 보텍스 shedding 주파수의 변화량 Park 등⁽¹²⁾의 결과(B≈0)와 함께 보여준다(수치 해석 방법은 다음 절 참조). \bar{C}_D , C'_L 그리고 St는 B가 증가함에 따라 거의 일정하다 대략 B≥0.05에서 급격히 증가하였다. Zdravkovich⁽²⁾와 Chakraborty 등⁽¹³⁾도 비슷한 결과를 제시한 바 있다. 이러한 일련의 결과들은 전단이 존재하는 유동(K>0)에서도 막힘비율에 따라 유동 특성이 현저히 달라질 수 있음을 의미한다.

기존의 실험 연구[Kiya 등,⁽³⁾ Kwon 등⁽⁴⁾]에서는

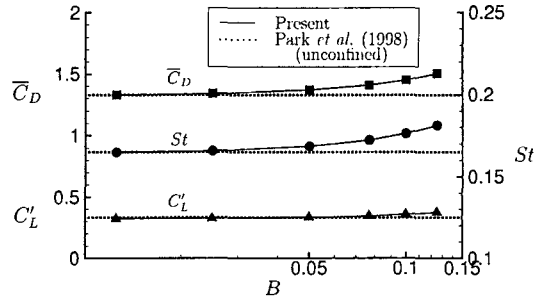


Fig. 2 Mean drag coefficient, amplitude of the lift-coefficient fluctuations, and the Strouhal number with respect to B for the flow at Re=100 and K=0

장비의 한계 때문에 유동영역의 폭을 고정시키고 자유유동의 속도분포(U_c 또는 G) 대신에 주로 실린더 직경을 변화시켜 다양한 레이놀즈 수($Re = U_c D/\nu$)와 전단율($K = GD/U_c$)을 얻었다. 이 과정에서 발생할 수 있는 심각한 문제는 D를 변화시킬 때 실린더 막힘비율($B = D/W$)이 일정하게 유지될 수 없다는 데에 있다. Sumner & Akosile⁽⁶⁾은 이럴 경우 막힘비율이 전단유동에 상당부분 영향을 미쳤을 가능성을 지적하였다. 그리고 그들은 기존의 실험연구[Kiya 등,⁽³⁾ Kwon 등⁽⁴⁾]와는 달리 막힘비율의 변화를 가능한 작게 하려고 노력하였다(Table 1 참조). 따라서 막힘비율이 유동장에 어떻게 영향을 미치는지를 철저히 연구할 필요가 있다. 이러한 중요성에도 불구하고 지금까지 막힘효과에 대한 연구는 저자가 알고 있는 한 전혀 이루어지지 않았다. 본 연구에서는 전단 자유유동에 대한 막힘비율의 영향을 고찰하여 기존 연구 결과들 사이에 존재하는 모순을 규명하는 데에 필요한 데이터를 제공할 것이다.

본 연구의 목적은 원형실린더를 지나고 균일한 전단을 가지는 유동의 특성을 수치적으로 연구하고 이에 해당하는 기본 메커니즘을 이해하는 데에 있다. 이를 위하여, 실린더 뒤에 발생하는 후류의 양식을 규명하고, 레이놀즈 수 Re, 전단율 K, 그리고 막힘비율 B가 유동에 미치는 영향을 상세히 분석하였다. 본 연구에서는 $50 \leq Re \leq 160$, $K \leq 0.2$, 그리고 $B = 0.1$ 과 0.05의 범위에 있는 유동에 대해 Kim 등⁽¹⁴⁾이 제안한 가상경계방법(immersed-boundary method)을 이용하여 수치해석

을 수행하였다.

2. 수치방법

이차원 비정상 비압축성 유동에 대한 적절한 무차원 지배방정식은 다음과 같다.

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

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} - q = 0 \quad (2)$$

그리고, $x^2 + y^2 = 0.5^2$ 로 표현되는 가상경계 위에 점착조건($u=0$ & $v=0$)을 부과하였다. 이산시간(discrete-time) 운동량 힘 f_i 를 가상경계에서 점착조건이 만족되도록 적용하고, 또한 질량 생성/소멸량 q 를 가상경계를 포함하는 단위 격자에서 질량보존이 만족되도록 적용하였다. 이차 반내재적 분할단계법(second-order semi-implicit fractional-step method)을 이용하여 지배방정식 (1)과 (2)에 대한 시간상 적분을 수행하고, 대류항에는 삼차 Runge-Kutta 법(RK3)을 그리고 확산항에는 이차 Crank-Nicolson 법을 각각 적용하였다. 반면에, 엇갈림 격자계를 채택한 유한체적법을 이용하여 지배방정식에 대한 공간상 차분화를 수행하며, 직각좌표계 (x, y) 를 가상경계방법의 적용을 위한 기본 좌표로 채택하였다. 가상경계방법과 관련된 자세한 사항은 Kim 등⁽¹⁴⁾에 서술되어 있다.

수치모사를 위한 계산영역의 크기는 $|x| \leq 40$ 과 $|y| \leq 1/(2B)$ 이며, 원형실린더는 $(0, 0)$ 에 중심을 두고 있다. 막힘비율에 따라 적용할 수 있는 전단율은 $K \leq 2B$ 이다. 예를 들면, $B=0.1$ 과 0.05 일 때 각각 적용할 수 있는 최대 전단율은 $K=0.2$ 와 0.1 이다. 경계조건으로 계산영역 입구($x=-40$)에는 Dirichlet 조건($u=1+Ky$ & $v=0$)을 그리고 출구($x=40$)에는 대류 유출조건($\partial u_i / \partial t + c \partial u_i / \partial x = 0$)을 적용하였다. 반면에 양 옆면 [$y = \pm 1/(2B)$]에는 등와도 조건 [$\omega = -K$ (또는 $\partial u / \partial y = K$) & $v=0$]^(11,15)과 Dirichlet 조건 [$u=1 \pm K/(2B)$ & $v=0$]을 각각 설정하여 계산결과를 서로 비교하였다. 두 조건 사이에는 결과

Table 2 Validation of the numerical method: parametric study for uniform-shear flow over a circular cylinder at $Re=100$ and $K=0.2$ ($B=0.1$)

	Present	Higher Resolution	Relative Error (%)
$M \times N$	513×193	705×289	-
$\Delta x_c(\Delta y_c)$	0.015625	0.010417	-
Δt	0.0100	0.0064	-
St	0.1696	0.1697	0.06
\bar{C}_L	-0.1732	-0.1721	0.64
\bar{C}_D	1.3943	1.3941	0.01
C'_L	0.3820	0.3824	0.10
C'_D	0.0394	0.0394	0.00

차이가 거의 없었으며, 따라서 본 논문에서는 전자의 결과만을 소개한다.

효율적인 수치계산을 위하여, 실린더 근처와 후류에는 보다 조밀한 격자들을 그리고 실린더로부터 멀리 떨어진 곳에는 보다 성근 격자들을 사용하였다. 본 연구에서 실린더 내에는 64×64 의 균일 격자를 적용하고 바깥영역에는 쌍곡탄젠트(tangential-hyperbolic) 격자분포를 각각 채택하였다. 공간 해상도는 B 의 크기에 따라 다르며, $B=0.1$ 과 0.05 일 때 각각 $M \times N = 513 \times 193$ 과 513×225 이다. 그리고, 본 연구에서 수행된 모든 계산에서는 $\Delta t = 0.008 \sim 0.01$ 의 시간 증분을 탄력적으로 적용하였다.

공간과 시간상의 수렴성을 확인하기 위하여, 레이놀즈 수와 전단율이 각각 $Re=100$ 과 $K=0.2$ 인 유동에 대하여 매개변수 연구를 수행하였으며, 대표적인 결과를 Table 2에 제시하였다. 도표에 제시된 상대오차를 보면, 채택된 매개변수를 이용하여 얻어진 수치 결과들은 공간과 시간 해상도에 대하여 수렴이 잘 된다는 사실을 알 수 있다. 이어, $Re=100$ 과 $K=0$ 인 유동(막힘 효과가 적음)에 대해 본 수치해석과 기존 연구들 사이에 결과를 비교하였으며, 그 내용을 Table 3에 제시하였다.

본 연구에 사용된 수치방법은 충분히 검증되었으며, 이를 토대로 $50 \leq Re \leq 160$, $K \leq 0.2$ 그리고 $B=0.1$ 과 0.05 의 상당히 넓은 범위에 있는 유동에 대하여 레이놀즈 수와 전단율 그리고 막힘비

Table 3 Validation of the numerical method: comparison study for unconfined flow over a circular cylinder at $Re=100$ and $K=0$ ($B=0.0125$)

	$\overline{C_D}$	C'_L	St
Present	1.33	0.32	0.165
Park <i>et al.</i> (1997)	1.33	0.33	0.165
Williamson(1996)	-	-	0.164

율을 체계적으로 변화시키면서 수치계산을 수행하였다. 수치계산을 수행한 결과 모든 유동 조건에서 유동이 초기조건과 상관없이 완전 발달되었고 주기 상태가 되었으며, 따라서 본 연구에서는 완전 발달된 유동만을 취급한다.

3. 결 과

3.1 유동 통계량(flow statistics)

3.1.1 보텍스 shedding 주파수

레이놀즈 수 Re , 전단율 K , 그리고 막힘비율 B 에 따른 보텍스 shedding 주파수 (St)의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 결과에 따르면 Re 가 증가함에 따라 St는 K 와 B 에 관계없이 현저하게 증가하였다. 그리고 K 가 증가하면 St는 거의 일정하게 유지되거나 약간 감소하였다. 반면에 B 가 증가하면 Re 와 K 에 관계없이 거의 균일하게 증가하였다. 전체적으로 보면, 본 연구에서 취급한 층류영역 ($Re < 200$)에서는 St에 대한 Re 의 영향이 B 와 K 에 비하여 매우 높은 편이다. Fig. 3(b)는 St와 K 의 상관관계를 보다 명확히 하기 위하여 $Re=100$ 인 경우에 대한 결과를 별도로 보여준다. K 가 증가함에 따라 St는 거의 일정하게 유지되거나 약간 감소하였다. 이러한 감소 관계는 Lei 등⁽¹⁾과 Sumner & Akosile⁽⁶⁾의 결과와 잘 일치하며, 이와 반대로 증가한다고 주장한 Kiya 등⁽³⁾과 Kwon 등⁽⁴⁾의 결과와는 서로 다르다.

비교적 낮은 레이놀즈 수에서 실험을 수행한 Kiya 등⁽³⁾과 Kwon 등⁽⁴⁾은 이전에 언급한 바와 같이 다양한 레이놀즈 수와 전단율을 얻기 위하여 주로 실린더 직경을 변화시켰으며, 따라서 막힘비율을 일정하게 유지할 수가 없었다. 예를 들어

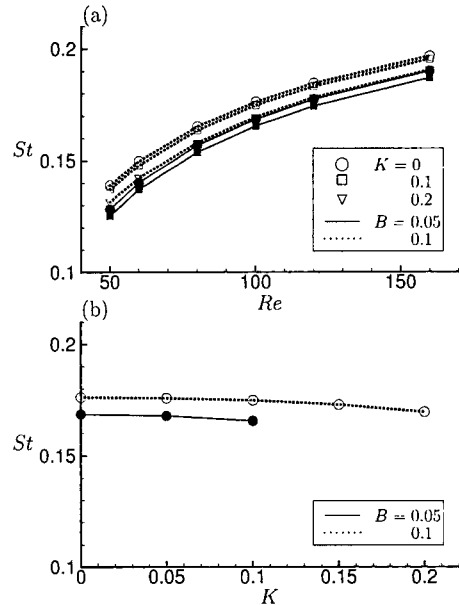


Fig. 3 Strouhal number with respect to Re , K and B : (a) St versus Re , and (b) St versus K (at $Re=100$)

Kiya 등⁽³⁾과 Kwon 등⁽⁴⁾이 사용한 막힘비율은 각각 $B=0.027\sim 0.17$ 과 $0.067\sim 0.16$ 으로 변화 폭이 상대적으로 큰 편이다(Table 1 참조). Fig. 3(b)에 따르면 shedding 주파수의 경우 ($Re=100$ 일 때) 막힘비율 $B=0.05$ 와 0.1 사이의 결과 차이가 전단율 $K=0$ 과 0.2 사이의 차이보다 크다. 이 때문에 막힘비율을 무시하고 주파수와 전단율과의 상관관계를 정확히 파악한다는 것은 거의 불가능하다. 따라서, 막힘비율의 변화가 본 연구결과와 기존 결과들 사이에 존재하는 모순 점들에 대하여 어느 정도 원인이 되었으리라고 판단된다. 실제로 최근 Sumner & Akosile⁽⁶⁾은 이러한 막힘효과에 따른 악영향을 피하기 위하여 막힘비율을 거의 일정하게 ($B=0.018\sim 0.027$) 유지하였다. 그들은 매우 높은 레이놀즈 수에서 실험을 수행하였음에도 불구하고 ($Re=4\sim 9\times 10^4$) K 가 증가함에 따라 St가 약간 감소하였으며, 이는 본 연구 결과와 잘 일치한다.

Kiya 등⁽³⁾은 그들이 채택한 유동조건 $43 < Re < 220$ 에서 K 가 충분히 클 때 보텍스 shedding이 완전히 사라진다고 보고하였다. 그리고 보텍스 shedding이 발생되기 시작하는 레이놀즈 수(임계

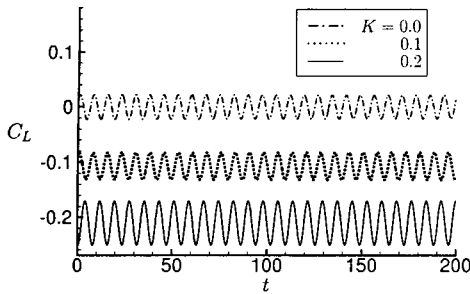


Fig. 4 Time evolution of the lift coefficient with respect to K for the flow at $Re=47$ and $B=0.1$

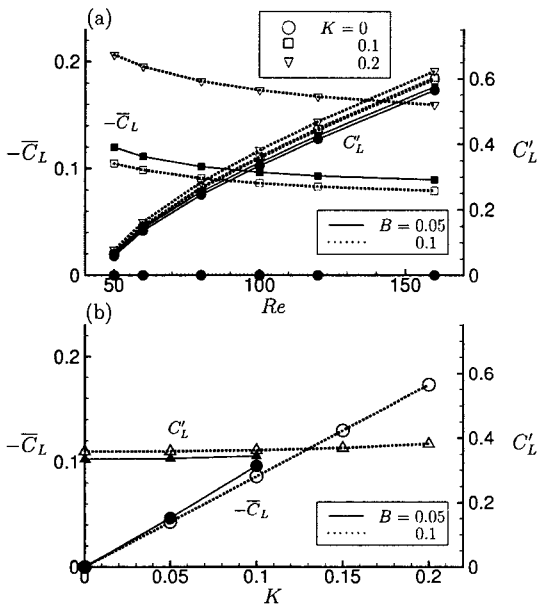


Fig. 5 Mean lift coefficient and amplitude of the lift-coefficient fluctuations with respect to Re , K and B : (a) $-\bar{C}_L$ and C'_L versus Re , and (b) $-\bar{C}_L$ and C'_L versus K (at $Re=100$)

레이놀즈 수, Re_c 는 $K(K \geq 0.06)$ 가 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가한다고 주장하였다. 그러나 Lei 등⁽¹¹⁾에 의해 수행된 비슷한 유동조건 ($Re > 80$)에서는 보텍스 세딩이 발생하였다. 본 연구에서 관찰한 유동조건 ($50 \leq Re \leq 160$ 과 $K \leq 0.2$)에서도 Kiya 등⁽³⁾의 실험결과와는 달리 보텍스 세딩이 사라지지 않았다. 일반적으로 전단이 없는 무한 유동장의 경우($K=0$ 과 $B \approx 0$)

$Re \geq Re_c \approx 47$ 에서 보텍스 세딩이 발생한다고 알려져 있다.^(12,16) 전단을 K 와 막힘비율 B 에 따른 임계 레이놀즈 수의 변화를 살펴보기 위하여 $Re=47$ 에서 수치해석을 수행하였다. 결과에 따르면, K 와 B 에 거의 관계없이 $Re=47$ 에서 보텍스 세딩이 여전히 발생하였다($B=0.1$ 인 경우는 Fig. 4 참조). 결과적으로 임계 레이놀즈 수는 K 와 B 의 영향을 거의 받지 않는다는 사실을(적어도 본 연구에서 수행한 유동조건에서는) 알 수 있다.

3.1.2 막힘비율과 양력방향

원형실린더를 지나는 균일전단 유동에서 양력의 방향은 공학적으로 매우 중요하며, 동시에 기존 연구결과들 사이에서 가장 큰 차이를 보이는 부분이다. 레이놀즈 수 Re , 전단을 K 그리고 막힘비율 B 에 따른 양력계수의 시간 평균량(\bar{C}_L)을 Fig. 5에 나타내었다. 전단이 작용하는 경우($K > 0$) Re 와 B 에 관계없이 양력 평균값은 모두 음의 값($\bar{C}_L < 0$)을 가지며, 이는 평균 양력이 자유유동 속도가 높은 쪽에서 낮은 쪽으로 작용한다는 것을 의미한다. 이 결과는 레이놀즈 수의 차이에도 불구하고 Jordan & Fromm,⁽⁷⁾ Hayashi 등,⁽⁵⁾ Lei 등,⁽¹¹⁾ Sumner & Akosile⁽⁶⁾ 등과는 잘 일치하나, Tamura 등,⁽⁸⁾ Yoshino & Hayashi,⁽⁹⁾ Wu & Chen⁽¹⁰⁾ 등과는 완전히 다르다. 이러한 차이는 Lei 등⁽¹¹⁾과 Sumner & Akosile⁽⁶⁾에 의해서도 역시 제기되었는데, 그들은 정확한 원인을 규명하지 못하였다.

양 그룹간에 양력방향이 서로 다르게 예측된 원인을 규명하기 위해서는 부과된 자유유동의 속도분포를 분석할 필요가 있다. 본 연구를 포함한 전자 그룹은 [Jordan & Fromm⁽⁷⁾과 Hayashi 등⁽⁵⁾은 제외] 선형 속도분포를 가지는 자유유동이 오직 한 방향으로만(Fig. 1에서 $+x$ 방향) 흐를 수 있도록 유동영역의 y -방향 크기를 제한하였다. 따라서 이 그룹에서 사용된 막힘비율은 전반적으로 높은 편이다(Table 1 참조). 비록 양력을 측정하지는 않았지만 Kiya 등⁽³⁾과 Kwon 등⁽⁴⁾도 이 그룹에 해당한다. 이와 반대로, 후자 그룹은 유동영역의 y -방향 크기를 매우 크게 하여($B \approx 0$) 자유유동이 주 유동방향뿐만 아니라 반대방향($-x$ 방향)으로도 흐를 수 있도록 하였다. 이렇게 되면

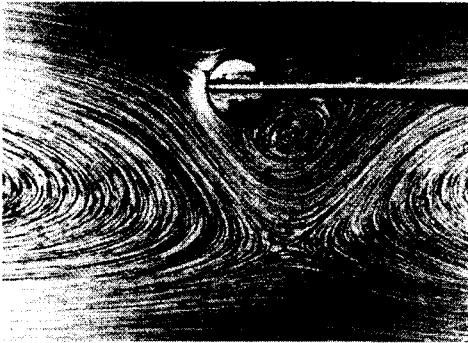


Fig. 6 Instantaneous flow field for uniform-shear flow at $K=0.4$ and $Re=40$ in case that the saddle point exists, cited from Zdravkovich(1997)⁽²⁾

실린더를 중심으로 자유유동 속도가 작은 쪽에 안장점(saddle point)이 형성된다. 이 안장점을 중심으로 자유유동은 쌍곡선 형태[또는 ‘()’ 형태]의 흐름을 가지게 된다. 결국 자유유동은 비록 전 유동장에서 일정한 와도를 가질 수는 있으나 모든 위치에서 같은 형태의 y -방향 선형 속도분포를 가지는 게 불가능하다[Zdravkovich,⁽²⁾ Wu & Chu⁽¹⁰⁾]. 한 예로 Fig. 6은 레이놀즈 수와 전단율이 각각 $Re=40$ 과 $K=0.4$ 인 경우의 가시화 결과를 보여주는데, 이를 잘 증명하고 있다.

Tsien^(2,17)은 비점성유동 이론(potential theory)에 의해 원형실린더를 지나며 균일 속도분포를 가지는 무한 자유유동을($B=0$) 해석하기 위하여 다음과 같은 무차원 유동함수(stream function) ψ 를 제안하였다(Fig. 1 참조).

$$\psi = \left(r - \frac{1}{4r} \right) \sin \theta + \frac{K}{2} \left(r^2 \sin^2 \theta + \frac{1}{32r^2} \cos 2\theta \right) \quad (3)$$

식 (3)으로부터 실린더 표면에서 속도분포와 이에 따른 압력분포를 구한 후 양력계수를 계산하면 다음과 같은 결과가 얻어진다.

$$C_L = \pi K \quad (4)$$

이는 전단율 K 가 양이면($K>0$) 양력은 양이 되어($C_L>0$) 속도가 낮은 쪽에서 높은 쪽(+ y 방향)으로 작용한다는 것을 의미한다. Tsien의 분석은 비록 비점성 유동을 대상으로 하였지만 유동

영역의 크기가 양력의 방향을 좌우할 수 있다는 가능성을 잘 설명해주고 있다.

Jordan & Fromm⁽⁷⁾의 경우는 비록 후자 그룹과 같은 종류의 유동영역을 가지고 있으나 자유유동에서 역류를 피하고 실린더 근처에서 선형 속도분포를 얻기 위하여 난류 제트의 평균 속도분포를 사용하고 제트의 위치와 강도를 조절하였다. Hayashi 등⁽⁵⁾도 역시 역류를 피할 목적으로 막힘 비율을 고정시킨 대신에 실린더 근처에만 선형속도를 유지하고 나머지는 균일유동으로 처리하였다($K=0.15$). 이들의 연구는 전 유동장에서 선형 속도분포를 유지하지는 않았지만, 자유유동이 단지 한 방향으로만 흐르도록 시도했다는 면에서 전자 그룹에 해당한다. 이와 같이 자유유동의 차이로 인하여 양 그룹간에 서로 다른 결과를 가져온 것으로 판단된다. 따라서 양 그룹간에 결과를 직접 비교하는 것은 의미가 없다. 본 논문에서는 이와 같은 결과 비교는 특별한 경우가 아니면 피하고자 한다.

3.1.3 양력과 항력계수

Fig. 5는 레이놀즈 수 Re , 전단율 K 그리고 막힘비율 B 에 따른 양력계수의 시간 평균량(\bar{C}_L)과 섭동량(C'_L)의 변화를 보여준다. 그림에 따르면 Re 와 B 가 각각 증가함에 따라 평균 양력의 크기($-\bar{C}_L$)는 약간 감소하는데 반하여, K 에 대해서는 거의 선형적으로 크게 증가하였다. 참고로 $Re=100$ 에서 얻은 평균 양력에 최소자승 오차법을 적용해보면[Fig. 5(b) 참조], $B=0.05$ 와 0.1 인 경우 각각 $\bar{C}_L \sim -0.96K$ 와 $-0.86K$ 를 얻었다. 반면에, 양력 섭동량은 Re 가 증가함에 따라 크게 증가하였으나, K 와 B 가 각각 증가하게 되면 약간 증가하거나 거의 일정하였다. 임계 레이놀즈 수($Re_c \approx 47$) 근처인 $Re=50$ 에서는 섭동량이 K 와 B 에 관계없이 매우 낮음을 알 수 있다.

Fig. 7은 레이놀즈 수 Re , 전단율 K 그리고 막힘비율 B 에 따른 항력계수의 시간 평균량(\bar{C}_D)과 섭동량(C'_D)의 변화를 보여준다. Re 가 증가함에 따라 \bar{C}_D 는 감소하였으며, 대략 $Re \geq 100$ 에서 그 감소율이 현저히 낮아졌다. 그리고 전단율에 대해서는 \bar{C}_D 가 거의 일정하게 유

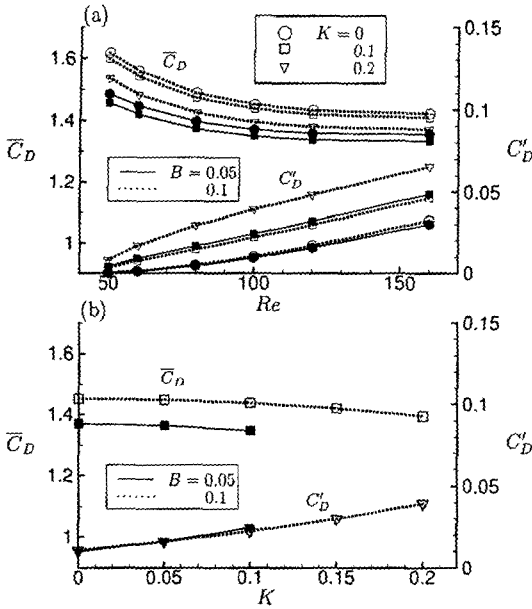


Fig. 7 Mean drag coefficient and amplitude of the drag-coefficient fluctuations with respect to Re , K and B : (a) \bar{C}_D and C'_D versus Re , and (b) \bar{C}_D and C'_D versus K (at $Re=100$)

지되거나 약간 감소하였다. 이 결과는 기존의 연구 결과[Kwon 등,⁽⁴⁾ Hayashi 등,⁽⁵⁾ Lei 등,⁽¹¹⁾ Sumner & Akosile⁽⁶⁾]와 대체로 일치하고 있다. 막힘비에 대해서는 B 가 증가할수록 \bar{C}_D 는 Re 와 K 에 관계없이 크게 증가하였다. 이는 B 가 유동장 특성에 중요한 역할을 한다는 사실을 잘 보여준다. 그러나 대부분의 기존 연구는 막힘효과를 무시하였기 때문에 \bar{C}_D 와 K 의 상관관계를 기존 연구결과와 비교하는 것은 무의미하다. 반면에, 항력 섭동량은 임계 레이놀즈 수 근처에서 매우 작았으며 이후 Re 가 증가함에 따라 거의 선형적으로 크게 증가하였다. 뿐만 아니라, K 에 대해서도 C'_D 는 거의 선형적으로 증가하였다. 그러나 C'_D 에 대한 B 의 영향은 그렇게 크지 않았다.

C_L 과 C_D 의 관계를 나타내는 위상선도(phase diagram)를 제시함으로써 Figs. 5와 7에 제시된 양력과 항력의 상태를 보다 명확하게 표현할 수 있다. 레이놀즈 수 $Re=100$ 에서 전단율 K 와 막힘비율 B 를 변화시키면서 얻어진 각 위상선도를

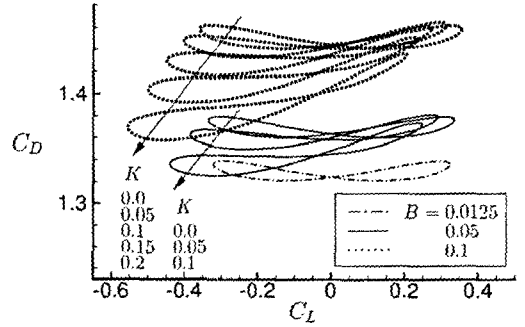


Fig. 8 Phase diagrams of C_D versus C_L with respect to K and B for the flow at $Re=100$

Fig. 8에 나타내었다. 모든 폐 선도들은 '∞'의 모양을 하고 있으며, 이는 각 유동이 시간상에서 완전히 주기 상태가 되었다는 사실을 알 수 있다. 위상선도의 위치는 양력과 항력의 평균량을 나타내며, 선도의 크기는 각기 해당하는 섭동량을 의미한다. Fig. 8로부터 다시 한번 K 와 B 의 변화에 대한 유동 통계량의 영향을 확인할 수 있다. B 가 변하게 되면 폐곡선의 위치가 크게 바뀌었다. 이는 B 가 K 보다 유동장의 특성을 더 크게 변화시킬 수 있다는 사실을 잘 보여준다. B 가 증가하면 C_D 의 위치가 C_L 보다는 크게 변화하였다. 반면에 K 가 증가하면 $C_L > 0$ 에서는 변화가 크지 않았으나 $C_L < 0$ 에서는 선도가 크게 변하게 되어 C_D 의 평균값이나 C_L 의 최소값이 작아지게 된다.

3.1.4 평균 압력계수

일반적으로 원형실린더를 지나는 유동에서 막힘의 영향이 압력에 비하여 양력의 경우에는 매우 작는데 반하여 항력의 경우에는 상대적으로 큰 편이다.^(12,15,16) 따라서 레이놀즈 수와 전단에 따른 양력의 변화를 이해하기 위해서는 실린더 표면에서의 압력 분포를 아는 것은 필수적이다. Fig. 9는 레이놀즈 수 Re 와 전단율 K 에 따른 평균 압력계수 \bar{C}_p 를 보여준다. 평균 압력계수는 $\bar{C}_p = 2(\bar{p} - p_c) / \rho U_c^2$ 로 정의되며, 이때 p_c 는 실린더로부터 매우 멀리 떨어진 위치에서의 자유 유동 중심속도 U_c 에 해당하는 압력이다. 결과에 따르면 전단이 없는 경우($K=0$)에는 평균 압력

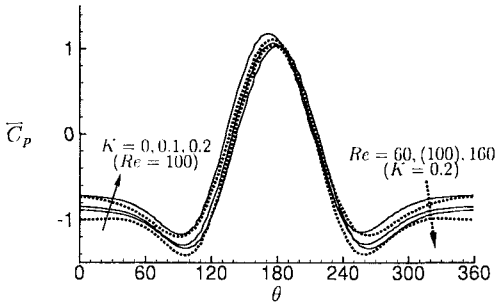


Fig. 9 Mean pressure coefficient around the cylinder surface according to Re and K at the flow ($B=0.1$)

분포가 $\theta=0\sim 180^\circ$ 를 중심으로 대칭이 되며, 따라서 평균 양력이 0이 되었다. 이어, 레이놀즈 수를 고정시키고($Re=100$) 전단율 K 를 증가시키면 $\theta\approx 180\sim 240^\circ$ 에서 압력 변화가 작은 대신에 그 외 영역에서는 압력이 크게 증가하였다. 결과적으로 힘의 균형으로부터 양력은 자유유동 속도가 큰 쪽에서 작은 쪽으로 작용하며, K 가 증가함에 그 크기는 크게 증가한다는 사실을 유추할 수 있다. 이와 반대로 전단율을 고정시키고($K=0.2$) 레이놀즈 수 Re 를 증가시키면 $\theta\approx 150\sim 240^\circ$ 에서는 압력변화가 작은 대신에 그 외 영역에서는 압력이 크게 감소하였다. 이 때문에 자유유동 속도가 작은 쪽으로 작용하는 양력의 크기는 감소한다. 이는 Fig. 5에서 관찰한 사항과 정확히 일치한다.

3.2 동적 특성

원형실린더를 지나는 균일전단 유동에서 전단율에 따른 보텍스 세팅과 이와 관련된 메커니즘을 파악하기 위하여 순간 유동장을 고찰하였다. 연구결과에 따르면 막힘비에 따른 순간 유동장의 모습은 거의 차이가 없었으며, 따라서 본 논문에서는 $B=0.1$ 인 경우에 대해서만 순간 유동장을 소개한다. Fig. 10은 레이놀즈 수가 $Re=100$ 인 유동조건에서 전단율 K 에 따른 등와도 선도(vorticity contours)의 변화를 보여준다. 각 조건에서 한 주기 안에 양력이 각각 최대와 최소가 될 때에 해당하는 선도를 제시하였으며, 각 선도의 배경 와도는 $\omega=-K$ 로 음의 값을 가진다.

전단이 없는 경우($K=0$)에는 서로 번갈아 가면서 양과 음의 부호를 가지는 보텍스들의 세팅

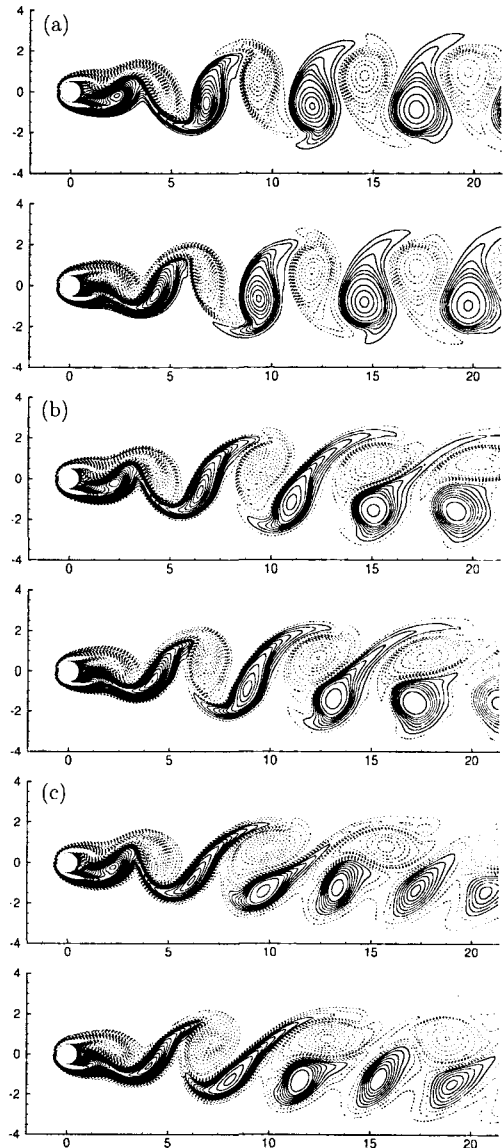


Fig. 10 Instantaneous vorticity contours at two times of the maximum (upper) and minimum (lower) lifts in a period with respect to K for the flow at $Re=100$ and $B=0.1$: $K=(a) 0$, (b) 0.1, and (c) 0.2. Note that the background vorticity corresponds to $-K$ in each case

이 발생하며, 이어 보텍스들은 하류로 흘러간다. 따라서, 유동의 상태는 평균적으로 실린더 양쪽이 서로 대칭이 된다. 전단이 존재하게 되면

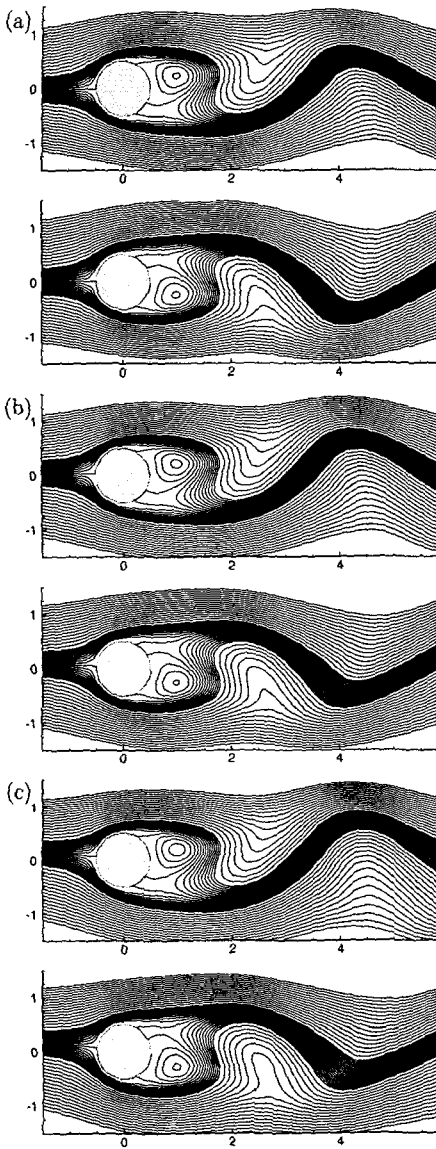


Fig. 11 Instantaneous streamlines at two times of the maximum (upper) and minimum (lower) lifts in a period with respect to K for the flow at $Re=100$ and $B=0.1$: $K=(a) 0, (b) 0.1, \text{ and } (c) 0.2$

($K > 0$) 보텍스 세딩이 역시 발생한다. 그러나 자유유동의 배경 와도가 음이 되기 때문에, 전체적으로 양의 보텍스들은 약화되고 반대로 음의 보텍스들은 강화된다. 실린더 근처 하류에서는 양

의 보텍스들은 길게 늘어지며 반면에 음의 보텍스들은 등글게 된다. K 가 증가하게 되면 자유유동 속도가 높은 부분(+ y 방향)에서는 속도가 더욱 높아지고 반대로 낮은 부분(- y 방향)에서는 더욱 낮아진다. 이럴 경우 + y 방향에서 음의 보텍스가 세딩이 되고, 이 보텍스의 선단 부분이 - y 방향으로 이동하게 된다. 이어 선단 부분의 속도가 낮아지게 되고, 따라서 선단과 후단의 속도 차이가 줄어들어 보텍스의 형태가 등글게 된다. 반면에 - y 방향에서 양의 보텍스가 발생하게 되면 이 보텍스의 선단 부분이 + y 방향으로 이동하게 된다. 따라서 선단 부분의 속도가 후단보다 더욱 빨라지기 때문에 보텍스의 형태가 길게 늘어지게 되는 것이다. 그러나 먼 하류로 가게 되면 양과 음의 보텍스들은 모양이 타원형으로 바뀐다.

음의 배경 와도 때문에 양과 음의 모든 보텍스들은 시계방향(배경 와도 벡터와 같은 방향)으로 이동하면서 흐르게 되며, 동시에 보텍스 열(vortex street)이 하류로 가면 갈수록 낮은 자유유동 속도 쪽으로 치우치게 된다. 하류로 흘러가면서 음의 보텍스들은 속도가 큰 쪽에 그리고 양의 보텍스들은 속도가 작은 쪽에 위치하게 된다. 따라서 K 가 증가하면서 음의 보텍스들 사이의 간격이 양의 경우보다는 더욱 넓어지게 된다. 이러한 현상은 Fig. 10(c)에서 명확히 관찰할 수 있다.

Fig. 11은 Fig. 10에서 제시한 등와도 선도에 해당하는 유선(등 유동함수)들을 보여준다. 전단을 K 가 증가하면 실린더 전면에 접근하는 자유유동의 입사각이 약간씩 증가하며, 따라서 정체점(stagnation point)의 위치는 표면 위에서 자유유동 속도가 높은 쪽으로 이동하게 된다. 계산결과에 따르면 $K=0, 0.1, 0.2$ 일 때($B=0.1$ 일 경우) 각각 $0^\circ, 3.7^\circ, 9.2^\circ$ 만큼 이동하였다. 이는 평균 양력의 크기 및 방향과 밀접한 관계가 있다. 실린더 후류에는 보텍스 세딩에 따른 버블(bubble)이 형성되는데 K 가 증가함에 따라 속도가 높은 쪽에서 발생한 버블의 강도와 크기는 반대편보다 미세하긴 하지만 점점 커지게 된다.

Fig. 12는 레이놀즈 수와 전단율이 각각 $Re=100$ 과 $K=0.2$ 인 유동조건에서 등와도 선도의 시간변이를 한 주기에 대해 보여준다. 이 결과는 보텍스들이 어떻게 세딩이 일어나고 하류로 흘러가는지를 보여준다. 한 주기동안 두 개의 보텍스가 형성되는데 음의 배경 와도($\omega = -K$) 때

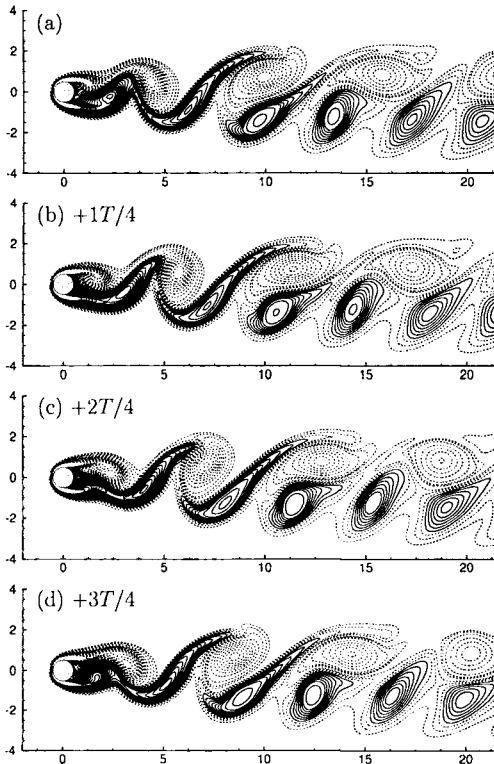


Fig. 12 Time evolution of the instantaneous vorticity contours for the flow at $Re = 100$, $K = 0.2$ and $B = 0.1$: T denotes the period. Note that the background vorticity corresponds to $-K$ in each case

문에 음의 보텍스는 강화되면서 둥근 모양이 된다. 이와 반대로 양의 보텍스는 상대적으로 음의 보텍스보다 약하게 되며 모양은 길게 늘어진다. 먼 하류로 흘러가게 되면 둥근 모양을 하고 있는 음의 보텍스는 음의 배경 와도 때문에 보텍스 상하의 대류속도가 달라져 서서히 타원형 모양으로 바뀐다. 이와 반대로 길게 늘어진 모양을 하는 양의 보텍스는 배경 와도 때문에 더욱 더 늘어지게 된다. 이후 선단 부분은 강도가 매우 약해지게 되어 소멸되며, 남은 후단 부분은 타원형 상태로 남아있게 되는 것이다.

4. 결론

본 논문에서는 원형실린더를 지나고 균일한 전단을 가지는 층류유동에 수반되는 수력학적 힘과

후류의 동특성을 파악하고 이에 따른 기본 메커니즘을 이해하였다. 이를 위하여 Kim 등⁽¹⁴⁾이 제안한 가상경계방법을 적용하여 레이놀즈 수, 전단을 및 막힘비율의 범위가 각각 $50 \leq Re \leq 160$, $K \leq 0.2$, 그리고 $B = 0.1$ 과 0.05 인 유동에 대하여 수치해석을 수행하였다. 특히 이 유동에 대한 기존 연구결과들 사이에 존재하는 차이점을 규명하기 위하여 막힘비율의 영향을 중점적으로 고찰하였다. 본 연구에서 도출한 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 보텍스 세딩 주파수 (St)는 Re 가 증가함에 따라 현저하게 증가하는데 반하여 K 가 증가하면 거의 일정하거나 약간 감소하였다. 그리고 B 에 대해서는 Re 와 K 에 관계없이 St 가 약간 증가하였다.

(2) 전단이 존재하면 ($K > 0$) 평균 양력은 자유유동 속도가 높은 쪽에서 낮은 쪽으로 작용하였다. 양력의 크기는 Re 와 B 가 각각 증가함에 따라 약간 감소하였으며 K 에 대해서는 거의 선형적으로 크게 증가하였다. 양력 섭동량은 Re 가 증가함에 따라 크게 증가하는데 반하여, B 와 K 가 각각 증가하면 약간 증가하거나 거의 일정하였다.

(3) 평균 항력은 Re 가 증가함에 따라 감소하며, K 에 대해서는 거의 일정하거나 약간 감소하였다. 반면에 B 가 증가할수록 항력은 크게 증가하였다. 항력 섭동량은 Re 와 K 가 각각 증가함에 따라 거의 선형적으로 크게 증가하였으나 B 의 영향은 그렇게 크지 않았다.

(4) 전단유동에서 유동 통계량과 전단율과의 상관관계에 대하여 기존 연구결과들 사이에 많은 모순 점들이 존재하였다. 본 연구결과에 따르면 전단유동에 대한 막힘비율의 영향은 전단율의 경우와 거의 맞먹는 정도였다. 따라서 막힘비율이 이러한 모순들에 대한 주요 원인 중의 하나가 될 수 있다.

(5) 전단이 존재하게 되면 ($K > 0$) 자유유동의 배경 와도가 음이 되기 때문에, 실린더 근처 후류에 존재하는 양의 보텍스들은 약화되고 길게 늘어지는 데 반하여 음의 보텍스들은 강화되면서 둥근 모양이 되었다.

후 기

본 논문은 2003년도 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2003-002-D00057)에 의하여 연구되었습니다.

그리고, 주요 계산은 한국과학기술정보연구원의 슈퍼컴퓨터 자원을 이용하여 수행되었습니다. 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Williamson, C.H.K., 1996, "Vortex Dynamics in the Cylinder Wake," *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 28, pp. 477~539.
- (2) Zdravkovich, M.M., 1997, *Flow around Circular Cylinders Vol 1: Fundamentals*, Oxford University Press, Oxford, pp. 458~496.
- (3) Kiya, M., Tamura, H. and Arie, M., 1980, "Vortex Shedding from a Circular Cylinder in Moderate-Reynolds-Number Shear Flow," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 141, pp. 721~735.
- (4) Kwon, T.S., Sung, H.J. and Hyun, J.M., 1992, "Experimental Investigation of Uniform-Shear Flow Past a Circular Cylinder," *Transactions of the ASME: Journal of Fluids Engineering*, Vol. 114, pp. 457~460.
- (5) Hayashi, T., Yoshino, F. and Waka, R., 1993, "The Aerodynamic Characteristics of a Circular Cylinder with Tangential Blowing in Uniform Shear Flows," *JSME International Journal Series B*, Vol. 36, pp. 101~112.
- (6) Summer, D. and Akosile, O.O., 2003, "On Uniform Planar Shear Flow Around a Circular Cylinder at Subcritical Reynolds Number," *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 18, pp. 441~454.
- (7) Jordan, S.K. and Fromm, J.E., 1972, "Laminar Flow past a Circle in Shear Flow," *Physics of Fluids*, Vol. 15, pp. 972~976.
- (8) Tamura, H., Kiya, M. and Arie, M., 1980, "Numerical Study on Viscous Shear Flow Past a Circular Cylinder," *Bulletin of the JSME*, Vol. 23, pp. 1952~1958.
- (9) Yoshino, F. and Hayashi, T., 1984, "Numerical Solution of Flow Around a Rotating Circular Cylinder in Uniform Shear Flow," *Bulletin of the JSME*, Vol. 27, pp. 1850~1857.
- (10) Wu, T. and Chen, C.-F., 2000, "Laminar Boundary-Layer Separation Over a Circular Cylinder in Uniform Shear Flow," *Acta Mechanica*, Vol. 144, pp. 71~82.
- (11) Lei, C., Cheng, L. and Kavanagh, K., 2000, "A Finite Difference Solution of the Shear Flow Over a Circular Cylinder," *Ocean Engineering*, Vol. 27, pp. 271~290.
- (12) Park, J., Kwon, K. and Choi, H., 1998, "Numerical Solutions of Flow Past a Circular Cylinder at Reynolds Numbers up to 160," *KSME International Journal*, Vol. 12, pp. 1200~1205.
- (13) Chakraborty, J., Verma, N. and Chhabra, R.P., 2004, "Wall Effects in Flow Past a Circular Cylinder in a Plane Channel: a Numerical Study," *Chemical Engineering and Processing*, Vol. 43, pp. 1529~1537.
- (14) Kim, J., Kim, D. and Choi, H., 2001, "An Immersed-Boundary Finite-Volume Method for Simulations of Flow in Complex Geometries," *Journal of Computational Physics*, Vol. 171, pp. 132~150.
- (15) Mittal, S. and Kumar, B., 2003, "Flow Past a Rotating Cylinder," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 476, pp. 303~334.
- (16) Fey, U., Konig, M. and Eckelmann, H., 1998, "A New Strouhal-Reynolds-Number Relationship for the Circular Cylinder in the Range $47 < Re < 2 \times 10^5$," *Physics of Fluids*, Vol. 10, pp. 1547~1549.
- (17) Tsien, H.S., 1943, "Symmetrical Zhukovski Airfoils in Shear Flow," *Quarterly of Applied Mathematics*, Vol. 1, pp. 130~148.