

< 논문 >

회전하는 원형실린더를 지나는 균일전단 유동에 관한 수치연구

강 상 모*

(2004년 11월 22일 접수, 2005년 3월 28일 심사완료)

Numerical Study on Uniform-Shear Flow over a Rotating Circular Cylinder

Sangmo Kang

Key Words: Rotating Cylinder(회전하는 실린더), Uniform Shear(균일전단), Vortex Shedding(보텍스 세딩), Shedding Frequency(세딩 주파수)

Abstract

The present study has numerically investigated two-dimensional laminar flow over a steadily rotating circular cylinder with a uniform planar shear, where the free-stream velocity varies linearly across the cylinder. It aims to find the combined effect of rotation and shear on the flow. Numerical simulations using the immersed boundary method are performed for the ranges of $-2.5 \leq \alpha \leq 2.5$ and $0 \leq K \leq 0.2$ at a fixed Reynolds number of $Re = 100$, where α and K are respectively the dimensionless rotational speed and velocity gradient. Results show that the positive shear, with the upper side having the higher free-stream velocity than the lower one, favors the effect of the counter-clockwise rotation ($\alpha > 0$) but countervails that of the clockwise rotation ($\alpha < 0$). Accordingly, the absolute critical rotational speed, below which vortex shedding occurs, decreases with increasing K for $\alpha > 0$, but increases for $\alpha < 0$. The vortex shedding frequency increases with increasing α (including the negative) and the variation becomes steeper with increasing K . The mean lift slightly decreases with increasing K regardless of the rotational direction. However, the mean drag and the amplitudes of the lift- and drag-fluctuations strongly depend on the direction. They all decrease with increasing K for $\alpha > 0$, but increase for $\alpha < 0$. 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, C_p : 항력, 양력 및 압력계수
 D : 실린더 직경
 f : 보텍스 세딩 주파수
 G : 자유유동 속도구배(= dU/dy)
 K : 무차원 전단율(= GD/U_c)

p, p_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
 α : 무차원 회전속도(= $\Theta D/2U_c$)
 α_{Lm}, α_{Lb} : 임계 회전속도
 ω : 와도
 $\bar{\quad}$: 시간 평균량
 \cdot : 섭동량

* 회원, 동아대학교 기계공학과
 E-mail : kangsm@daunet.donga.ac.kr
 TEL : (051)200-7636 FAX : (051)200-7656

1. 서론

벽 운동(wall motion)은 뚱뚱한 물체를 지나는 유동에서 유동박리 발생을 지연시켜 형상항력을 감소시키는 일종의 경계층 제어이다.^(1,2) 고체 벽이 하류로 움직이면 벽과 자유유동 사이의 상대 운동은 작아지게 되어 경계층 성장이 억제되며, 동시에 벽 근처 유동은 벽으로부터 운동량을 공급받는다. 결과적으로 벽 운동 때문에 유동박리가 지연되어 형상항력이 감소하고 실속(stall)이 억제되며 양력이 증가한다.

회전하는 원형실린더를 지나가는 유동은 이러한 벽 운동을 이용한 경계층 제어의 일종으로 그동안 부단한 연구 대상이 되어왔다. 균일 유동 안에 잠겨있는 원형실린더가 일정한 속도로 회전하면 Magnus 효과에 의해 양력이 발생하고, 그 양력의 크기는 회전속도가 증가할수록 더욱 커진다.^(3~8) 그리고 원주속도가 자유유동 속도보다 대략 두 배 이상이 되면 보텍스 shedding이 중단되어 유체 진동 현상은 더 이상 발생되지 않는다. 그러나 현실적인 관점에서 보면 원형실린더나 구 이외의 뚱뚱한 물체는 회전을 통한 벽 운동을 효율적으로 얻기에는 거의 불가능하다. 따라서 익형이나 트레일러의 경우에는 물체를 직접 회전시킬 수 없기 때문에 전연이나 후연 또는 제어 면 등에 회전하는 별도의 실린더를 직접 장착하여 성공적으로 유동박리를 지연시키고 항력을 감소시킨 예가 있다[자세한 설명은 Gad-El-Hak⁽¹⁾을 참조 바람].

회전하는 원형실린더를 지나가는 유동에 대한 지금까지의 연구는 주로 자유유동이 균일할 때를 대상으로 이루어져왔다.^(3~8) 그렇지만, 공학적으로 보다 중요한 경우에는 물체에 접근하는 자유유동이 균일하지 않으며 대부분 전단 상태를 유지한다. 지상의 수송장치 및 구조물 등과 해저의 송유관 등이 여기에 해당하는 대표적인 예이다. 지상과 해저에는 각각 대기(또는 바람)와 해류(또는 조수)에 의한 경계층이 형성되기 때문에 속도 분포가 균일하지 않다. 이와 같은 비균일 유동은 속도구배를 가지게 되어 유동장에 와도(vorticity)가 존재한다. 이 와도 현상은 고체 벽에서 유동박리가 발생하는 경계층과 복잡한 상호작용을 일으키며, 결과적으로 보텍스 shedding 구조가 현저하게 달라진다. 이처럼 전단유동의 중요성에도 불

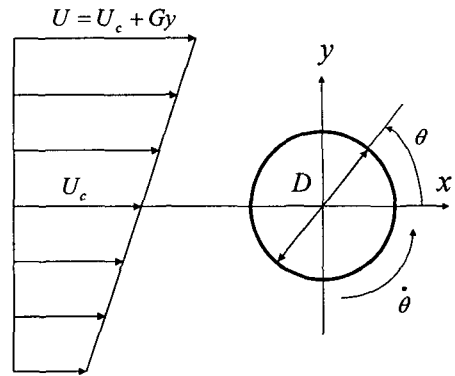


Fig. 1 Schematic diagram of uniform-shear flow over a rotating circular cylinder

구하고 회전하는 원형실린더의 경우에는 그 동안 균일 유동에 비하여 그다지 많은 연구가 이루어지지 않았다. 따라서, 전단유동에 대한 체계적인 연구는 필수적이다. 이러한 유동의 연구에는 일차적으로 자유유동에 일정한 속도구배, 즉 실린더 직경방향으로 선형 속도 분포를 부과하는 것으로 가정한다(Fig. 1 참조).

회전하는 원형실린더를 지나가는 균일전단 유동은 고정된 원형실린더를 지나가는 균일 유동에 회전과 전단을 동시에 부과하는 것으로 이해할 수 있다. 여기서 부과된 두 작용사이에 유사성이 있음을 기존의 연구로부터 아는 것은 매우 흥미롭다. 유동이 왼쪽(-x 방향)에서 오른쪽(+x 방향)으로 균일하게 흐르고 원형실린더가 반 시계 방향(양의 회전방향)으로 회전하면, 실린더 위쪽(+y 방향)은 실린더 표면에 대한 자유유동의 상대속도가 높아지게 되어 높은 전단 현상이 발생한다. 반대로 아래쪽(-y 방향)은 상대속도가 낮아지게 되어 비교적 낮은 전단 상태가 된다. 따라서 실린더에 작용하는 양력은 위쪽에서 아래쪽으로, 즉 높은 전단이 발생하는 쪽에서 낮은 쪽으로 작용하며, 그 양력의 크기는 회전속도가 낮을 때 회전속도에 거의 비례한다.^(5~7) 반면에 실린더를 고정시키고 자유유동에 양의 전단(실린더의 위쪽이 아래쪽보다 속도가 높음)을 부과하는 경우에는 실린더 표면에 대한 상대속도가 실린더 위쪽이 아래쪽보다 높아진다. 따라서 양력은 높은 전단이 발생하는 실린더 위쪽에서 낮은 전단의 아래쪽으로 역시 작용하게 되며, 그 양력의 크기는 속도구배에 거의 비례한다.^(9~12) 물론 유동에 대한 전단의 영향은 실린더 회전의 경우보

다 매우 작은 편이다. 그럼에도 불구하고 실린더를 양의 방향으로 회전하는 방법과 자유유동에 양의 전단을 부과하는 방법 사이에 유사성이 존재한다는 사실을 명백히 알 수 있다. 결과적으로 회전과 전단을 동시에 부과할 때 회전방향과 전단방향이 같으면 서로의 효과를 강화시킬 것이며 그 반대로 방향이 다르면 서로의 효과를 상쇄시킬 것으로 예상된다.⁽¹³⁾ 따라서 회전하는 원형실린더를 지나는 균일전단 유동에서 회전과 전단의 복합효과를 명확히 규명할 필요가 있다.

Fig. 1에 도시하였듯이, $U = U_c + Gy$ 의 선형 속도 분포를 가지는 자유유동이 직경 D 인 원형실린더를 지나며, 동시에 실린더는 θ 의 각속도로 회전하고 있다. 여기서, U_c 와 G 는 각각 중심선 ($y=0$)에서의 속도와 y -방향에 대한 속도구배 (dU/dy)이다. 따라서, 본 유동은 네 개의 무차원 유동변수에 의해 지배를 받는다. 즉, 첫째는 레이놀즈 수(Reynolds number) $Re = U_c D/\nu$ 이고, 둘째는 무차원 속도구배 즉 전단율(shear rate) $K = GD/U_c$ 이며, 그리고 셋째는 무차원 회전속도 $\alpha = \theta D/2U_c$ 이다. 전단유동을 연구하는 대부분의 기존 실험연구^(9,11,14~16)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.^(11,12) 본 연구에서도 실험연구와 마찬가지로 유동영역의 폭을 일정하게 제한하였으며, 따라서 $B = D/W \leq 1$ 로 정의되는 막힘비율(blockage ratio)은 본 유동을 지배하는 네 번째 무차원 유동변수가 된다.

회전하는 원형실린더를 지나고 균일한 전단을 가지는 자유유동에 대한 연구는 그 동안 극히 일부에서 이루어졌으며, 그 중 대표적인 연구를 적용된 유동조건과 함께 Table 1에 정리하였다. 수치연구는 Yoshino & Hayashi⁽¹⁷⁾와 Chew 등⁽¹³⁾에 의해 이루어졌으며, 반면에 실험연구는 저자가 아는 한 유일하게 Sung 등⁽¹⁶⁾에 의하여 이루어졌다. Sung 등⁽¹⁶⁾은 회전속도, 전단을 그리고 레이놀즈 수가 각각 $-2 \leq \alpha \leq 2$, $K \leq 0.15$ 및 $Re = 600 \sim 1200$ 의 범위 안에 있는 유동에 대하여 실험연구를 수행하였다. 그들은 $|a|$ 와 K 가 각각 증가하면 보텍스-세당 우세 주파수도 역시 증가하며, 회전속도가 어느 임계값($|a| \approx 1.5$)을 넘어서

Table 1 Flow conditions used in previous studies. NA=numerical analysis, EM=experimental measurement

Researchers	Flow Conditions				Method
	Re	K	α	B(%)	
Yoshino & Hayashi (1984) ⁽¹⁷⁾	80	0~0.4	-2~0	≈ 0	NA
Sung <i>et al.</i> (1995) ⁽¹⁶⁾	600~1200	0~0.15	-2~2	10	EM
Chew <i>et al.</i> (1997) ⁽¹³⁾	1000	-0.3~0.3	0.5	≈ 0	NA

게 되면 우세 주파수는 뚜렷하지 않게 된다고 주장하였다. 이상과 같이 회전과 전단이 동시에 부과된 실린더 유동에 대한 기존의 연구는 매우 적은 편이다. 뿐만 아니라 기존의 실험연구와 수치연구 사이에는 서로 다른 막힘비율이 사용되었다. Sung 등⁽¹⁶⁾의 실험연구는 자유유동이 단지 한 방향으로만 흐를 수 있도록 유동영역 폭을 제한하였다($B=0.1$). 반대로 두 수치해석 연구^(13,17)는 매우 큰 유동영역의 폭을 사용하여 막힘효과를 무시할 수 있었으나($B \approx 0$), 대신 자유유동은 역류($U < 0$)를 포함하게 되어 결과적으로 안장점(saddle point)을 가지게 되었다.⁽¹²⁾ 따라서 기존의 실험연구와 두 수치연구는 근본적으로 다른 연구이며, 이 점이 본 연구의 주요 동기이기도 하다.

본 연구의 목적은 회전하는 원형실린더를 지나고 균일한 전단을 가지는 유동의 특성을 수치적으로 연구하고, 이에 해당하는 기본 메커니즘을 이해하는 데에 있다. 이를 위하여 실린더 뒤에 발생하는 후류의 특성을 규명하고, 회전속도, 전단을 그리고 막힘비율이 유동에 미치는 영향을 상세히 분석하였다. 본 연구에서는 레이놀즈 수를 $Re = 100$ 에 고정하고 회전속도, 전단을 그리고 막힘비율이 각각 $-2.5 \leq \alpha \leq 2.5$, $0 \leq K \leq 0.2$ 및 $B = 0.1$ 과 0.05 의 범위에 있는 유동에 대하여 Kim 등⁽¹⁸⁾이 제안한 가상경계방법(immersed-boundary method)을 이용하여 수치해석을 수행하였다.

2. 수치방법

이차원 비정상 비압축성 유동에 대한 적절한 무차원 지배방정식은 다음과 같다.

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

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

그리고 $x^2 + y^2 = 0.5^2$ 으로 표현되며 실린더 표면에 해당하는 가상경계는 일정한 속도로 회전을 한다($u_r = 0$ & $u_\theta = a$). 따라서 가상경계 또는 이를 포함한 단위 격자에서 회전조건과 질량보존이 만족되도록 각각 이산시간 운동량 힘 f_i 와 질량 생성/소멸 량 q 를 조정하였다. 이차 반내제적 분할단계법(second-order semi-implicit fractional-step method)을 이용하여 지배방정식 (1)과 (2)에 대한 시간상 적분을 수행하였으며, 그리고 대류항과 확산항에는 삼차 Runge-Kutta 법(RK3)과 이차 Crank-Nicolson 법을 각각 적용하였다. 엇갈림 격자계를 채택한 유한체적법을 이용하여 지배방정식에 대한 공간상 차분화를 수행하였으며, 직각 좌표계 (x, y) 를 가상경계방법의 적용을 위한 기본 좌표로 선정하였다. 가상경계에 속도가 존재하는 경우를 포함하여 가상경계방법과 관련된 자세한 사항은 Kim 등⁽¹³⁾에 서술되어 있다.

수치계산을 위한 영역은 $|x| \leq 40$ 과 $|y| \leq 1/(2B)$ 으로 채택되었으며, 원형실린더는 계산영역 중심에 위치하고 있다. 따라서, 주어진 막힘비율에 대하여 적용할 수 있는 전단율은 $0 \leq K \leq 2B$ 이다. 예를 들어, 막힘비율이 $B=0.1$ 과 0.05 일 때 적용할 수 있는 최대 전단율은 각각 $K_{\max} = 0.2$ 와 0.1 이다. 수치계산을 위한 경계조건으로 입구($x=-40$)와 출구($x=40$)에 Dirichlet 조건($u=1+Ky$ & $v=0$)과 대류 유출조건($\partial u_i / \partial t + c \partial u_i / \partial x = 0$)을 각각 적용하였다. 반면에 양 옆면 [$y = \pm 1/(2B)$]에는 등와도 조건 [$\omega = -K$ (또는 $\partial u / \partial y = K$) & $v=0$]과^(7,10) Dirichlet 조건 [$u=1 \pm K/(2B)$ & $v=0$]을 각각 설정하여 계산을 수행하였다. 결과적으로 유동 통계량과 동적 특성 관점에서 두 조건 사이에는 차이가 거의 없었으며, 따라서 본 논문에서는 전자의 결과만을 소개하였다.

실린더 근처와 후류에는 보다 조밀한 격자들을

Table 2 Validation of the numerical method: parametric study for uniform-shear flow over a rotating circular cylinder at $a=-1.0$, $K=0.2$ and $\text{Re}=100$ ($B=0.1$)

	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	0.1436	0.1436	0.00
$\overline{C_L}$	2.3031	2.3195	0.71
$\overline{C_D}$	1.3007	1.2949	0.45
C'_L	0.5995	0.5940	0.92
C'_D	0.1771	0.1758	0.73

그리고 실린더로부터 멀리 떨어진 곳에는 보다 성균 격자들을 사용하여, 수치계산에 대한 효율성을 추구하였다. 본 연구에서는 실린더 안과 바깥영역에 각각 64×64 의 균일 격자와 쌍곡탄젠트(tangential-hyperbolic) 격자 분포를 적용하였다. 따라서 공간 해상도는 막힘비율의 크기에 따라 다르다. 예를 들면 공간 해상도는 막힘비율이 $B=0.1$ 과 0.05 일 때 각각 $M \times N = 513 \times 193$ 과 513×225 이었다. 그리고, 본 연구에서 수행된 모든 계산에서는 $\text{CFL} \approx 1$ 이 되도록 시간 증분을 탄력적으로 적용하였다.

공간과 시간에 대한 수렴성을 확인하기 위하여 회전속도와 전단율이 각각 $a=-1$ 과 $K=0.2$ 인 유동($\text{Re}=100$ 과 $B=0.1$)에 대해서 매개변수 연구를 수행하였으며, 그 대표적인 결과를 Table 2에 제시하였다. 표에 제시된 상대오차를 보면, 선정된 매개변수를 이용하여 얻어진 수치 결과들은 공간과 시간상에서 수렴이 잘 된다는 사실을 알 수 있다. 이어, 전단율이 $K=0$ 인 유동($\text{Re}=100$ 과 $B=0.0125$)에 대하여 회전속도가 $a=1$ 과 2 일 때 수치해석을 수행하였다. 그리고 얻어진 유동 통계량을 Table 3에 제시하여 기존 연구 결과와 비교하였다.

Tables 2와 3에서 살펴본 바와 같이 본 연구에서 채택된 수치방법과 이에 따른 매개변수들은 충분히 검증되었다고 판단된다. 이어 레이놀즈수를 $\text{Re}=100$ 에 고정시키고 $-2.5 \leq a \leq 2.5$, $0 \leq K \leq 0.2$ 및 $B=0.1$ 과 0.05 의 상당히 넓은 범

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

	Present		Kang <i>et al.</i> (1999) ⁽⁵⁾		Stojkovic <i>et al.</i> (2002) ⁽⁶⁾	
	1.0	2.0	1.0	2.0	1.0	2.0
St	0.1654	-	0.1655	-	0.1658	-
\overline{C}_L	-2.4787	-5.4327	-2.4881	-5.4931	-2.504	-5.48
\overline{C}_D	1.1120	0.4579	1.1040	0.4682	1.1080	0.46
C'_L	0.3675	-	0.3631	-	0.3616	-
C'_D	0.0997	-	0.0993	-	0.0986	-

위에 있는 유동에 대하여 회전속도와 전단을 그리고 막힘비율을 체계적으로 변화시키면서 수치 계산을 수행하였다. 계산 결과 본 연구에서 선정된 모든 유동 조건에서 유동은 초기조건과 상관 없이 완전 발달되었고 주기 상태가 되었다. 따라서 본 연구에서는 단지 완전 발달된 유동만을 취급하였다.

3. 결과

3.1 유동 통계량(flow statistics)

3.1.1 보텍스 shedding 주파수

Fig. 2는 레이놀즈 수가 $Re=100$ 인 유동에서 전단을 K 와 막힘비율 B 가 주어졌을 때 회전속도에 따른 보텍스 shedding 주파수 ($St = fD/U_\infty$; Strouhal number)의 변화를 보여준다. 회전속도 ($|\alpha|$)가 낮으면 양과 음의 부호를 가진 보텍스들이 서로 번갈아 가면서 shedding을 일으키기 때문에 유동은 주기 상태가 되었다. 회전속도가 증가하면 보텍스 shedding이 계속 발생되다가, 속도가 어느 임계값 이상이 되면 shedding이 더 이상 발생되지 않았으며 유동은 정상 상태가 되었다. 다시 말하면, 회전속도가 $\alpha_{Lm} \leq \alpha \leq \alpha_{Lp}$ 구간에 있으면 보텍스 shedding이 발생되었고, 그 외 구간에서는 shedding이 더 이상 발생되지 않았다. 이때 α_{Lm} 과 α_{Lp} 는 시계방향($\alpha < 0$)과 반 시계방향($\alpha > 0$)으로 회전할 때 각각 해당하는 임계 회전속도이다. 전단이 작용하지 않으면 ($K=0$) 회전방향에 따른 대칭성이

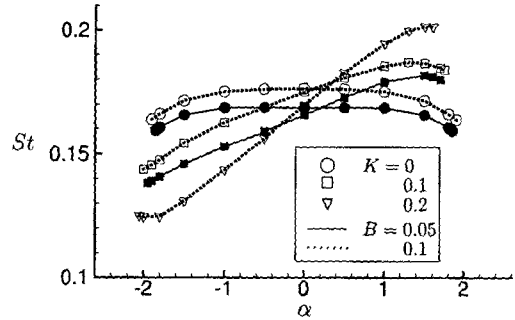


Fig. 2 Variation of St with α according to K and B for the flow at $Re=100$

존재하기 때문에 두 임계 회전속도의 크기는 같아진다 ($|\alpha_{Lm}| = \alpha_{Lp}$). 반면에 전단이 작용하면 ($K > 0$) 대칭성이 더 이상 존재하지 않기 때문에 두 임계 회전속도는 서로 달라진다 ($|\alpha_{Lm}| \neq \alpha_{Lp}$). 본 연구에서는 주어진 조건에서 임계 회전속도를 파악하기 위하여 $\Delta\alpha = 0.05$ 단위로 유동을 관찰하였다. 본 연구결과에 따르면, 레이놀즈 수가 $Re=100$ 일 때 전단이 작용하지 않는 경우 ($K=0$) 두 임계 회전속도는 서로 같았으며, 대략 $|\alpha_{Lm}| = \alpha_{Lp} \approx 1.85$ 로 관찰되었다 ($B=0.0125$). 이는 같은 레이놀즈 수 ($Re=100$)에서 Kang 등⁽⁵⁾과 Stojkovic 등^(6,8)의 연구결과인 $|\alpha_L| \approx 1.8$ 과 잘 일치한다.

전단이 작용하지 않는 경우 ($K=0$) 회전속도에 따른 shedding 주파수의 변화는 Fig. 2로부터 알 수 있다. 보텍스 shedding이 발생하는 동안 ($|\alpha| \leq |\alpha_{Lm}| = \alpha_{Lp}$) 회전속도가 증가하여도 보텍스 shedding 주파수는 거의 바뀌지 않았다. 다시 말하면 낮은 회전속도에서 ($|\alpha| \leq 1$) 주파수는 거의 일정하게 유지되었으며, $|\alpha|$ 가 $|\alpha_{Lm}|$ 에 접근함에 따라 약간 감소하다 $|\alpha| \approx |\alpha_{Lm}|$ 일 때 급격히 0(zero)이 되었다. 이는 Hu 등 ($Re=60$),⁽⁴⁾ Kang 등 ($Re=60 \sim 160$)⁽⁵⁾ 그리고 Mittal & Kumar ($Re=200$)⁽⁷⁾의 결과와 잘 일치한다. 그러나, $|\alpha|$ 가 증가함에 따라 St 는 증가한다고 주장한 Diaz 등 ($Re=9000$),⁽¹⁹⁾ Kimura & Tsutahara ($Re=280$ & 370),⁽²⁰⁾ Sung 등 ($Re=900$)⁽¹⁶⁾의 결과와는 다르다. Mittal & Kumar⁽⁷⁾은 이러한 차이가 보텍스 shedding과 원심 불안정성 (centrifugal instability) 사이의 상호 작용 때문일 것으로 추정하기도 하였으나, 그 차이에 대한 정확한 원인은 아직 밝혀지지 않았다.

Table 4 Critical rotational speeds, α_{Lm} and α_{Lb} according to K and B for the flow at $Re = 100$. This shows that vortex shedding occurs for $\alpha_{Lm} \leq \alpha \leq \alpha_{Lb}$ whereas otherwise it does not

B	0.0125		0.05		0.1	
K	0	0	0.1	0	0.1	0.2
α_{Lm}	-1.85	-1.85	-1.95	-1.90	-2.00	-2.05
α_{Lb}	1.85	1.85	1.70	1.90	1.75	1.60

이와 반대로 전단이 작용하는 경우에 ($K > 0$) 회전방향이 다르면 서로 다른 임계 회전속도가 존재하였다. 두 임계 회전속도 α_{Lm} 과 α_{Lb} 는 전단을 K 와 막힘비율 B 에 따라 달랐으며, 그 결과를 Table 4에 제시하였다. Table에 따르면, K 가 증가함에 따라 반 시계방향 임계 회전속도 α_{Lb} 는 감소하는데 반하여 시계방향 임계 속도 $|\alpha_{Lm}|$ 은 증가하였다. 이는 양의 전단이 작용할 때 반 시계방향의 회전 효과는 더욱 강화되고 반면에 시계방향의 회전 효과는 약화된다는 것을 의미한다. 뿐만 아니라 B 가 증가하면, 즉 유동영역의 y -방향 크기가 작아지면 α_{Lb} 와 $|\alpha_{Lm}|$ 은 약간씩 증가하였다.

Fig. 2는 보텍스 세딩이 발생하는 동안 ($\alpha_{Lm} \leq \alpha \leq \alpha_{Lb}$) 회전속도에 따른 세딩 주파수의 변화를 보여준다. 양의 전단이 작용할 때 양의 방향(반 시계방향)으로 회전속도 ($|\alpha|$)가 증가하면 세딩 주파수는 거의 선형적으로 증가하였다. 이와 반대로 음의 방향(시계방향)으로 속도가 증가하면 세딩 주파수는 거의 선형적으로 감소하였다. 이는 양과 음의 회전속도 구간을 모두 고려할 때 a 가 증가함에 따라 St 는 거의 선형적으로 증가한다는 것을 의미한다. 그리고 이 변화 기울기 $[d(St)/da]$ 는 K 가 증가함에 따라 현저하게 증가하였다. 임계 회전속도 α_{Lm} 과 α_{Lb} 근처에서는 세딩 주파수의 값이 거의 일정하거나 약간 감소하였다. Sung 등⁽¹⁶⁾은 전단이 작용할 때 회전속도 ($|\alpha|$)가 증가하면 회전방향에 상관없이 세딩 주파수가 증가한다고 실험 ($K=0.1$ 과 $Re=900$)을 통하여 주장하였다. 이는 본 결과와 명확히 다르며, 이 차이는 앞서 설명한 보텍스 세딩과 원심 불안정성 사이의 상호작용 때문일 것으로 추정된다.⁽⁷⁾

막힘비율에 따른 세딩 주파수의 변화도 비교적 큰 편이다. 전단을 K 를 고정하고 막힘비율 B 를 증가시키면 회전속도에 따른 세딩 주파수 변화율 $[d(St)/da]$ 은 그대로 유지되었으며, 단지 세딩 주파수 크기만 거의 일정한 양만큼 상승하였다. 예를 들어 막힘비율이 $B=0.05$ 에서 0.1로 증가할 때 세딩 주파수는 거의 모든 세딩 구간에서 대략 $\Delta St \approx 0.01$ 만큼 증가하였다.

3.1.2 양력과 항력계수

레이놀즈 수가 $Re=100$ 일 때 전단을 K 와 막힘비율 B 의 조건을 바꾸어 가면서 회전속도 α 에 따른 양력과 항력계수의 시간 평균량 ($\overline{C_L}$ 과 $\overline{C_D}$)의 변화를 고찰하였다. 그리고 그 결과를 Fig. 3에 제시하였다. Fig. 3(a)에 따르면 전단이 작용하지 않는 경우에는 ($K=0$) 보텍스 세딩이 발생하는 회전속도 구간 ($|\alpha| \leq 1.85$)에서 속도가 증가함에 따라 평균 양력이 거의 선형적으로 감소하였다. 그리고 반 시계(시계)방향으로 회전할 때 평균 양력은 실린더 위(아래)쪽에서 아래쪽(위쪽)으로 작용하였다. 이는 Kang 등,⁽⁵⁾ Stojkovic 등⁽⁶⁾ 그리고 Mittal & Kumar⁽⁷⁾의 결과와 정확히 일치한다. Stojkovic 등⁽⁶⁾과 Mittal & Kumar⁽⁷⁾은 낮은 회전속도 ($|\alpha| < 2$)에서 평균양력과 회전속도가 거의 선형 관계 ($\overline{C_L} \approx b \cdot a$)를 그리고 높은 속도 ($2 < |\alpha| \leq 5$)에서 포물선 관계 ($\overline{C_L} \approx a + b \cdot a^2$)를 유지하며, 양력의 변화 기울기 $[d(\overline{C_L})/da]$ 가 대략 $|\alpha| \approx 2$ 에서 현저하게 변한다고 주장하였다. 이는 Fig. 3(a)에 제시한 결과와 잘 일치한다.

반면에 전단이 작용하는 경우에는 ($K > 0$) 보텍스 세딩 발생구간에서 평균 양력과 회전속도 사이에 존재하는 선형 관계가 전단율과 막힘비율의 변화에도 불구하고 거의 달라지지 않았다. 이는 양력계수의 절대값이 항력계수보다 매우 커서 [Fig. 3(b) 참조] 전단을 K 와 막힘비율 B 에 따른 양력계수의 상대적인 변화가 무시될 만큼 작기 때문이다. 따라서 K 와 B 에 따른 $\overline{C_L}$ 의 영향을 상세히 살펴보기 위하여 $|\alpha| \leq 1$ 일 때 $\overline{C_L}$ 과 a 가 선형 관계를 유지한다고 가정하고 최소 자승 오차법을 적용하였다. 그리고 근사 관계식을 유도한 후 이를 Table 5에 제시하였다. 회전을 하지

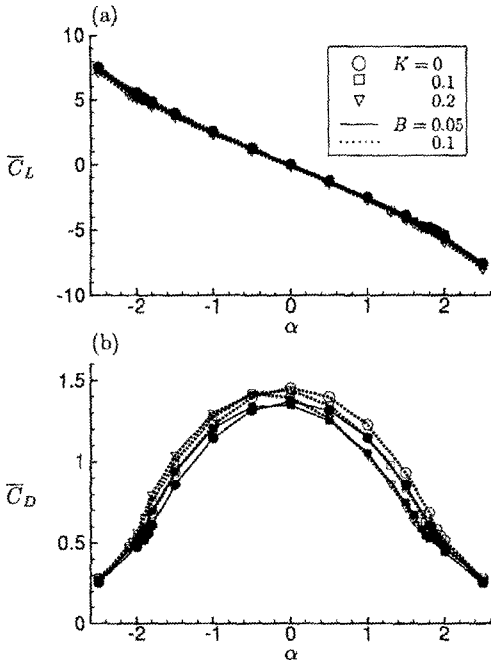


Fig. 3 Variations of \bar{C}_L and \bar{C}_D with α according to K and B for the flow at $Re=100$

않는 경우에($\alpha=0$) K 가 증가하면 \bar{C}_L 은 감소하고(음의 방향으로 절대값이 커짐을 의미) 반대로 B 에 대해서는 증가하였다. 이는 Kang & Choi⁽¹²⁾의 결과와 정확히 일치한다. 반면에 회전을 하는 경우에는($\alpha \neq 0$) K 가 증가함에 따라 회전속도에 대한 평균 양력의 변화율 크기($|d\bar{C}_L/d\alpha|$)가 감소하였으며 반대로 B 에 대해서는 증가하였다. 보텍스 세덩이 억제되는 임계 회전속도 근처($|\alpha| \approx 1.5 \sim 2$)에서 회전속도에 대한 양력계수의 기울기가 현저하게 변함을 알 수 있다.

Fig. 3(b)는 회전속도 α , 전단율 K 그리고 막힘비율 B 에 따른 평균 항력계수의 변화를 보여준다. 전단이 작용하지 않는 경우에는($K=0$) 회전이 없을 때 항력이 최대가 되었으며 회전속도의 절대값($|\alpha|$)이 증가하면 항력은 점점 감소하였다. 이는 Kang 등,⁽⁵⁾ Stojkovic 등,⁽⁶⁾ Mittal & Kumar⁽⁷⁾의 수치결과와 정확히 일치한다. 반면에 전단이 작용하는 경우에는($K>0$) K 가 증가할수록 최대 항력을 가지는 회전속도가 음의 방향으로 이동하였다. 그리고 K 가 증가하면 반시계방

Table 5 Variations of \bar{C}_L with α according to K and B for the flow at $Re=100$, provided by the least-square fit for $-1 \leq \alpha \leq 1$

B	K	Present	Kang <i>et al.</i> (1999) ⁽⁵⁾
0.0125	0	$\bar{C}_L = -2.468\alpha$	$\bar{C}_L = -2.475\alpha$ ($B \approx 0$)
	0	$\bar{C}_L = -2.497\alpha$	
0.05	0.1	$\bar{C}_L = -2.483\alpha - 0.11$	
	0	$\bar{C}_L = -2.556\alpha$	
0.1	0.1	$\bar{C}_L = -2.549\alpha - 0.10$	
	0.2	$\bar{C}_L = -2.529\alpha - 0.20$	

향으로 회전할 때에는($\alpha \geq -0.5$) 평균 항력 \bar{C}_D 가 감소하였고, 반대로 시계방향으로 회전할 때에는($\alpha \leq -0.5$) \bar{C}_D 가 증가하였다. K 에 따른 \bar{C}_D 의 변화 폭은 반시계방향으로 회전할 때가 그 반대의 경우보다 더 크다. 그리고 K 가 일정하고 B 가 증가하면 \bar{C}_D 는 회전방향과 크기에 상관없이 거의 일정량만큼 증가하였다. 회전속도에 대한 항력계수의 변화율이 임계 회전속도 근처($|\alpha| \approx 1.5 \sim 2$)에서 양력계수와 마찬가지로 급격히 변화하였다.

Fig. 4(a)와 (b)는 레이놀즈 수가 $Re=100$ 일 때 회전속도 α , 전단율 K 그리고 막힘비율 B 에 따른 양력과 항력계수의 섭동량(C'_L 과 C'_D) 변화를 각각 보여준다. 섭동량은 유동이 완전히 주기 상태가 되었을 때 각 계수의 최대 진폭으로부터 구하였다. 전단이 작용하지 않는 경우($K=0$), 양력계수의 섭동량은 회전속도($|\alpha|$)가 증가함에 따라 서서히 증가하다 $|\alpha| \approx 1$ 근처에서 최대값을 가진 후 곧장 감소하였다. 이 결과는 Kang 등,⁽⁵⁾ Stojkovic 등,⁽⁶⁾ Mittal & Kumar⁽⁷⁾의 결과와 정확히 일치한다. 전단이 작용하는 경우에는($K>0$) 회전방향에 따라 그 특성이 현저하게 달라졌다. 반시계방향으로 회전할 때 K 가 증가하면 C'_L 이 약간 감소하는데 반하여 시계방향으로 회전할 때에는 크게 증가하였다. 결과적으로 반 시계방향으로 회전할 때 K 가 상대적으로 높으면($K \geq 0.1$) 전단이 작용하지 않는 경우($K=0$)와 달리 α 가 증가함에 따라 C'_L 이 오히려 감소하였다. 이와 반대로 시계방향으로 회전할 때 K 가 증가하면

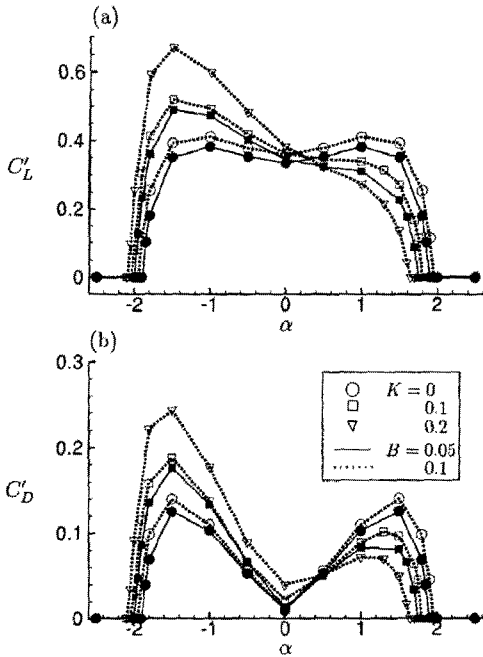


Fig. 4 Variations of C_L and C_D with α according to K and B for the flow at $Re=100$

회전속도에 따른 양력 섭동량의 증가율($|dC_L/d\alpha|$)이 더욱 증가하였다. 막힘비율의 영향은 회전방향에 따라서는 크게 달라지지 않았다. 즉, B 가 증가하면 회전방향에 상관없이 C_L 이 약간씩 증가하였다.

Fig. 4(b)에 따르면 항력 섭동량의 경향은 양력의 경우와 매우 유사하다. 전단이 작용하지 않는 경우($K=0$) 회전속도가 증가하면 거의 선형적으로 증가하다 $\alpha \approx 1.5$ 이후에 급격히 감소하였다. 이 결과는 Kang 등,⁽⁵⁾ Stojkovic 등,⁽⁶⁾ Mittal & Kumar⁽⁷⁾의 결과와 정확히 일치한다. 반면에 전단이 존재하는 경우에는($K \neq 0$) 회전방향에 따라 그 특성이 현저하게 달라진다. 반 시계방향으로 회전할 때 전단을 K 가 증가하면 C_D 는 뚜렷하게 감소하는데 반하여 시계방향으로 회전할 때에는 크게 증가하였다. 뿐만 아니라 막힘비율 B 가 증가하면 회전방향에 상관없이 C_D 는 증가하였다. 이는 전단 작용방향이 회전방향과 동일하면 보텍스 세당의 활동성을 약화시켜 섭동량을 감소시킨다는 것을 의미한다. 반대로 전단 작용방향이 회전방향과 서로 다르면 보텍스 세당의 활동성을

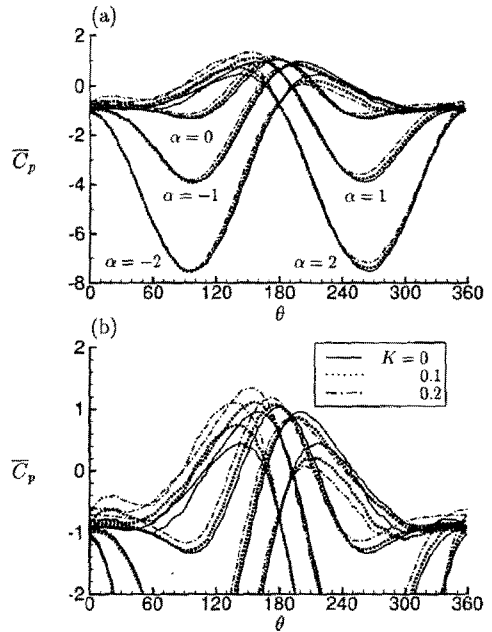


Fig. 5 Mean pressure coefficient around the cylinder surface according to α and K for the flow at $Re=100$ ($B=0.1$). Note that (b) is the enlargement of (a)

강화시켜 섭동량을 한층 증가시킨다.

3.1.3 평균 유동 통계량

레이놀즈 수와 막힘비율이 각각 $Re=100$ 과 $B=0.1$ 일 때 주어진 전단율과 회전속도에 대하여 실린더 표면 위에 존재하는 평균 압력계수 (\bar{C}_p)와 와도($\bar{\omega}$)의 분포를 Figs. 5와 6에 보여준다. 평균 유동 통계량은 유동이 완전 발달된 이후에 완전한 한 주기 위에서 시간 평균을 수행하여 얻어졌다.

일반적으로 실린더를 지나는 유동에서 양력의 구성 비율 중 압력의 영향이 마찰보다는 절대적이다.⁽⁵⁻⁸⁾ 따라서 실린더 표면에서의 압력 분포는 회전속도와 전단에 따른 양력의 변화를 이해하는데 필수적이다. Fig. 5는 실린더 표면 위에 대한 평균 압력계수 \bar{C}_p 를 보여준다. 평균 압력수는 $\bar{C}_p = 2(\bar{p} - p_\infty) / \rho U_\infty^2$ 로 정의되며, 이때 실린더로부터 매우 멀리 떨어진 위치에서 유동 중심속도 U_∞ 에 해당하는 압력을 전단이 작용하지 않는 경우에($K=0$)

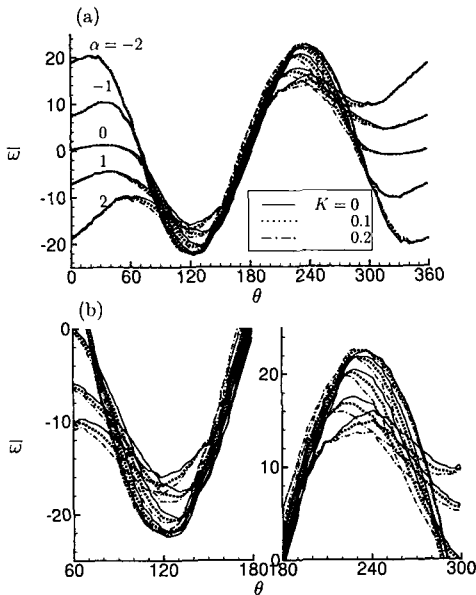


Fig. 6 Mean vorticity around the cylinder surface according to α and K for the flow at $Re=100$ ($B=0.1$). Note that (b) is the enlargement of (a)

으면 $\theta=0-180^\circ$ 를 중심으로 평균 압력 분포는 서로 대칭이 되었으며, 결과적으로 평균 양력이 0이 되었다. 반 시계방향으로 회전속도가 증가하면 ($\alpha>0$) 실린더 아래쪽 ($\theta\approx 270^\circ$ 근처)에서 압력이 급격히 낮아졌으며, 결과적으로 평균 양력이 실린더 아래쪽으로 증가하였다. 이는 Kang 등⁽⁶⁾과 Mittal & Kumar⁽⁷⁾의 결과와 정확히 일치한다. 회전이 없는 경우에 ($\alpha=0$) 전단율 K 가 증가하면 $\theta\approx 180\sim 240^\circ$ 을 제외한 전 실린더 표면에서 압력이 상승하였다. 따라서 힘의 평형관계를 고려하면 평균 양력은 음의 방향($-y$ 방향)으로 조금씩 증가함을 쉽게 알 수 있다.

그러나 실린더가 회전하게 되면 ($\alpha\neq 0$) 자유유동에 부과된 전단($K>0$)이 회전 방향에 따라 다르게 영향을 미친다는 사실을 실린더 표면에서의 압력 분포로부터 확인할 수 있다. 실린더가 반 시계방향으로 회전할 때 ($\alpha>0$) 전단율 K 가 증가함에 따라 압력이 $\theta\approx 0\sim 180^\circ$ 와 $\theta\approx 240\sim 360^\circ$ 구간에서 전체적으로 상승하였다. 반면에 실린더가 시계방향으로 회전할 때에는 ($\alpha<0$) 압력이 $\theta\approx 90\sim 180^\circ$ 구간에서 약간 상승하였고 반대로

$\theta\approx 180\sim 360^\circ$ 구간에서 보다 큰 폭으로 감소하였다. 결과적으로 힘의 평형을 고려할 때 반 시계방향으로 회전하는 경우 양력은 $-y$ 방향으로 작용하였고, K 가 증가함에 따라 그 크기는 증가하였다. 이와 반대로 시계방향으로 회전할 경우에는 양력이 $+y$ 방향으로 작용하였고, 양력의 크기는 K 가 증가함에 따라 감소하였다. 그러나 전체적인 변화 폭은 반 시계방향으로 회전할 때가 그 반대보다 더 컸다.

Fig. 6은 회전속도와 전단율에 따른 실린더 표면 위에서 평균 와도 분포를 보여준다. 전단이 작용하지 않는 경우($K=0$), 회전이 없으면($\alpha=0$) 평균 와도는 양과 음의 최대점이 각각 $\theta\approx 230^\circ$ 와 $\theta\approx 130^\circ$ 에서 존재하였으며, 후류 영역에서의 평균 와도는 거의 0에 가까웠다. 이어 $K=0$ 인 상태에서 반 시계방향으로 회전속도가 증가하면 ($\alpha>0$) 양의 최대값은 점점 증가하였고 반면에 음의 최대값은 그 크기가 감소하였다. 후류 영역에서 ($-60^\circ\leq\theta\leq 80^\circ$)는 음의 와도가 존재하였으며, 동시에 새로운 극대점과 극소점이 형성되었다. 그리고 회전속도($|\alpha|$)가 커질수록 이 극대점과 극소점은 실린더가 회전하는 방향으로 이동하였다. 이는 Kang 등⁽⁶⁾과 Mittal & Kumar⁽⁷⁾의 결과와 잘 일치한다.

자유유동에 전단이 작용하는 경우에 ($K>0$) 실린더가 회전하면 주로 와도의 양과 음의 최대점 주변에서 많은 변화가 관찰되었다. 전단율 K 가 증가함에 따라 양의 최대 값은 회전방향에 거의 상관없이 감소하였으며 반면에 음의 최대 값은 그 크기가 증가하였다. 그리고 $150^\circ\leq\theta\leq 210^\circ$ 구간에서 와도는 양의 방향으로($\omega>0$) 거의 균일하게 증가하였다.

3.2 유동 동적 특성(flow dynamics)

일정한 속도로 회전하는 원형실린더를 지나는 균일전단 유동에서 회전속도와 전단율에 따른 보텍스 세딩의 변화와 이와 관련된 메커니즘을 파악하기 위하여 순간 유동장을 고찰하였다. 연구 결과에 따르면 막힘비율에 따른 순간 유동장의 변화는 거의 없었으며, 따라서 본 논문에서는 레이놀즈 수가 $Re=100$ 이고 막힘비율이 $B=0.1$ 인 경우에 대해서만 순간 유동장을 소개하였다.

Fig. 7은 전단율이 $K=0.2$ 인 유동에서 회전속

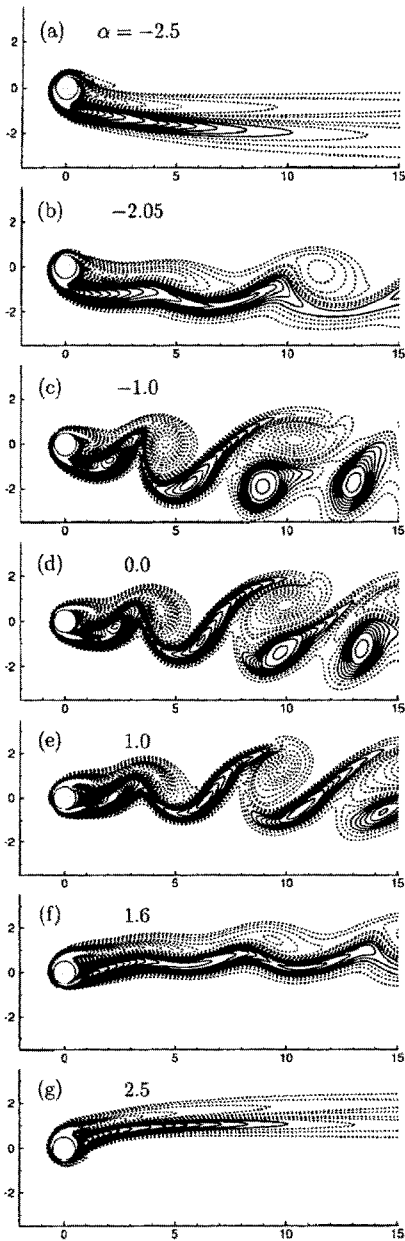


Fig. 7 Instantaneous vorticity contours at the time of the maximum lift according to α for the flow at $K=0.2$ and $Re=100$ ($B=0.1$)

다른 등와도 선도의 변화를 보여준다. 각 제시된 선도는 양력이 한 주기 안에 최대 1을 선택하였으며, 각 선도의 배경 와도 K 으로 음의 값을 가진다. Table 4에 따

르면 전단율이 $K=0.2$ ($B=0.1$)일 때 $-2.05 \leq \alpha \leq 1.60$ 구간 안에 있으면 보딩이 발생하고 그렇지 않으면 세딩이 더 발생되지 않아 유동이 정상 상태가 되었다. 1에 제시된 순간 유동장들은 이를 다시 한번 시켜준다. 특히, Figs. 7(b)와 (f)는 각각 시계방향과 반 시계방향으로 회전할 때 해당하는 임계 회전속도 근처에서의 유동장이다.

회전이 없는 경우에는 ($\alpha=0$) 서로 번갈아 가면서 양과 음의 부호를 가지는 보텍스들이 세딩을 일으키며, 이어 보텍스들은 하류로 흘러간다[Fig. 7(d) 참조]. 그러나 작용하는 전단 때문에 ($K>0$) 유동의 상태는 평균적으로 실린더 양쪽이 서로 비대칭이 된다. 전단에 의한 음의 배경 와도 때문에, 실린더 근처 후류에 있는 음의 보텍스는 강화되면서 둥근 모양이 되는데 반하여 양의 보텍스는 상대적으로 약화되면서 길게 늘어진 모양을 하였다. 이는 Kang & Choi⁽¹²⁾의 결과와 일치한다.

반시계방향으로 ($\alpha>0$) 회전속도가 증가하면 양과 음의 보텍스들은 회전을 하지 않는 경우와 비교하여 보다 가늘어진 모양을 하고 있으며, 결과적으로 후류의 상하 폭이 줄어들었다[Fig. 7(e) 참조]. 반대로 시계방향($\alpha<0$)으로 회전속도가 증가하면 양과 음의 보텍스들은 보다 두꺼워지면서 동시에 후류 폭이 증가하였다[Fig. 7(c) 참조]. 이와 같이 회전속도에 따른 후류 폭의 변화는 정상 상태 조건인 $\alpha=\pm 2.5$ 에서의 등와도 선도를 살펴 보면 시계방향 회전의 경우가 그 반대보다 훨씬 폭이 넓은 사실에서도 알 수 있다. 전체적으로 보면 보텍스 세딩이 발생하는 동안 회전속도가 반 시계방향으로 증가하면 후류 폭이 점점 작아지며, 반대로 속도가 시계방향으로 증가하면 폭이 점점 커지는 것을 관찰할 수 있다. Sumner 등,⁽²¹⁾ Sumner & Akosile,⁽¹¹⁾ Mittal & Kumar⁽⁷⁾ 등은 실린더 유동에서 세딩 주파수가 커지면 세딩이 일어난 이후의 보텍스들 크기, 즉 후류 폭이 감소한다고 주장하였다. 따라서 Fig. 7에서 관찰된 내용은 회전속도가 증가함에 따라(음의 회전속도 포함) 보텍스 세딩 주파수가 증가한다는 Fig. 2에서의 결과와 정확히 일치하고 있다.

Fig. 8은 실린더가 회전할 때 전단이 후류에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 회전속도가 각각 $\alpha=-1.5$ 와 1.0 인 경우 전단율 K 에 따른 등와

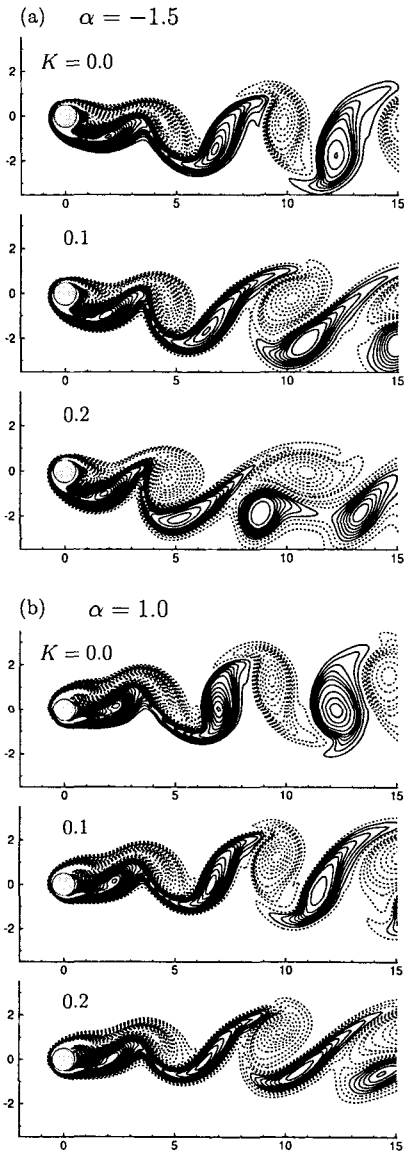


Fig. 8 Instantaneous vorticity contours at the time of the maximum lift according to α and K for the flow at $Re=100$ ($B=0.1$)

도 선도의 변화를 보여준다. 전단이 존재하지 않는 경우($K=0$) 시계방향으로 회전할 때[Fig. 8(a) 참조] 양의 부호를 가지는 보텍스는 반 시계방향으로의 회전에 비하여[Fig. 8(b) 참조] 길게 늘어졌으며, 이와 반대로 음의 보텍스는 둥근 모양을 하였다. 반면에 전단이 작용하는 경우에는($K>0$)

음의 배경 와도 때문에 회전방향에 상관없이 K 가 증가함에 따라 실린더 후류 근처에 있는 음의 보텍스는 보다 강화되면서 둥글게 변화하였다. 동시에 양의 보텍스는 보다 약화되면서 길게 늘어졌다. 그리고 보텍스들이 하류로 흘러가면서 자유유동의 대류속도 차이 때문에 양의 보텍스들 사이의 거리가 음의 경우보다 좁아졌다. 동시에 보텍스들은 시계방향으로 회전하였다. 그러나 세딩 주파수와 밀접한 관계가 있는 후류의 상하 폭과 전단의 관계는 회전방향에 따라 다르게 나타났다. 예를 들어 시계방향으로 회전할 때에는 전단을 K 가 증가함에 따라 후류 폭이 증가하였으며, 따라서 보텍스 세딩 주파수는 감소하였다. 이와 반대로 반 시계방향으로 회전할 때에는 후류 폭이 감소하였고, 동시에 세딩 주파수는 증가하였다.

4. 결론

본 논문에서는 회전하는 원형실린더를 지나고 균일한 전단을 가지는 층류유동에 수반되는 수력학적 힘과 후류의 동적 특성을 파악하고, 이에 따른 기본 메커니즘을 이해하였다. 이를 위하여 Kim 등⁽¹⁸⁾이 제안한 가상경계방법을 적용하여 레이놀즈 수를 $Re=100$ 에 고정하고 회전속도, 전단을 그리고 막힘비율이 각각 $-2.5 \leq \alpha \leq 2.5$, $0 \leq K \leq 0.2$, 및 $B=0.1$ 과 0.05 의 범위에 있는 유동에 대하여 수치해석을 수행하였다. 자유유동은 왼쪽에서 오른쪽($+x$ 방향)으로 흐르며, 양의 전단($K>0$)은 위쪽($+y$ 방향)의 자유유동 속도가 아래쪽보다 높음을 의미한다. 그리고 양($\alpha>0$)과 음($\alpha<0$)의 회전속도는 각각 반 시계방향과 시계방향의 속도를 나타낸다. 본 연구에서 도출한 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 회전속도가 낮으면($\alpha_{Lm} \leq \alpha \leq \alpha_{Lp}$) 보텍스 세딩이 발생하고 반면에 어느 임계값 이상이 되면 세딩 현상이 완전히 억제되었다. 그리고 $K=0$ 일 때 $|a_{Lm}|$ 과 a_{Lp} 는 서로 동일하였으나(≈ 1.85), K 가 증가함에 따라 a_{Lp} 는 감소하고 반대로 $|a_{Lm}|$ 은 증가하였다. 이는 양의 전단이 작용할 때 반시계방향의 회전효과는 강화되는데 반하여 시계방향의 회전효과는 약화된다는 것을 의미한다.

(2) 보텍스 세딩이 발생하는 동안 회전속도가 증가함에 따라 세딩 주파수(St)는 거의 선형적으로 증가하였다. 그리고 K 가 증가하면 그 변화 기울기 [$d(St)/da$]도 현저하게 증가하였다.

(3) 평균 양력($\overline{C_L}$)은 K 가 증가하면 회전방향에 관계없이 약간 증가하였다. 반면에 평균 항력($\overline{C_D}$)은 회전방향에 따라 K 의 영향이 달랐다. 예를 들어 K 가 증가함에 따라 $\overline{C_D}$ 는 반 시계방향 회전($\alpha \geq -0.5$)일 때 감소하였고, 반대로 시계방향 회전($\alpha \leq -0.5$)일 때 약간 증가하였다.

(4) 전단율에 따른 양력과 항력의 섭동량은 회전방향에 따라 그 특성이 현저하게 달라졌다. K 가 증가하면 반 시계방향으로 회전($\alpha \geq 0.5$)할 때 섭동량이 약간 감소하는데 반하여 시계방향으로 회전($\alpha \leq 0.5$)할 때 크게 증가하였다. 다시 말하면, 전단 작용방향과 회전방향이 동일하면 보텍스 세딩의 활동성이 약화되고 섭동량이 감소하는데 반하여, 방향이 서로 다르면 세딩의 활동성이 강화되어 섭동량이 한층 증가하였다.

(5) 전단이 작용하는 동안 회전속도($|a|$)가 반 시계방향으로 증가하면 후류 영역의 폭이 점점 작아졌으며, 반대로 속도가 시계방향으로 증가하면 그 폭이 점점 커졌다. 이는 α 가 증가함에 따라(음의 회전속도 포함) 세딩 주파수가 증가한다는 사실과 밀접한 관계가 있다.

후 기

본 논문은 2004학년도 동아대학교 학술연구비(신진과제)에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

- (1) Gad-El-Hak, M., 2000, *Flow Control: Passive, Active, and Reactive Flow Management*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 168~170.
- (2) Mittal, S., 2001, "Control of Flow Past Bluff Bodies using Rotating Control Cylinders," *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 15, pp. 291~326.
- (3) Tokumaru, P.T. and Dimotakis, P.E., 1993, "The Lift of a Cylinder Executing Rotary Motions in a Uniform Flow," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 255, pp. 1~10.
- (4) Hu, G., Sun, D., Yin, X. and Tong, B., 1996, "Hopf Bifurcation in Wakes behind a Rotating and Translating Circular Cylinder," *Physics of Fluids*, Vol. 8, pp. 1972~1974.
- (5) Kang, S., Choi, H. and Lee, S., 1999, "Laminar Flow Past a Rotating Circular Cylinder," *Physics of Fluids*, Vol. 11, pp. 3312~3321.
- (6) Stojkovic, D., Breuer, M. and Durst, F., 2002, "Effect of High Rotation Rates on the Laminar Flow Around a Circular Cylinder," *Physics of Fluids*, Vol. 14, pp. 3160~3178.
- (7) Mittal, S. and Kumar, B., 2003, "Flow past a Rotating Cylinder," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 476, pp. 303~334.
- (8) Stojkovic, D., Schon, P., Breuer, M. and Durst, F., 2003, "On the New Vortex Shedding Mode Past a Rotating Circular Cylinder," *Physics of Fluids*, Vol. 15, pp. 1257~1260.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) Sumner, 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.
- (12) Kang, S. and Choi, W., 2004, "Numerical Study on Uniform-Shear Flow over a Circular Cylinder," *Tran. of the KSME B*, Vol. 29, No. 1, pp. 139~150.
- (13) Chew, Y.T., Luo, S.C. and Cheng, M., 1997, "Numerical Study of a Linearly Shear Flow past a Rotating Cylinder," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 66, pp. 107~125.
- (14) 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.
- (15) 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.
- (16) Sung, H.J., Chun, C.K. and Hyun, J.M., 1995, "Experimental Study of Uniform-Shear Flow Past a Rotating Cylinder," *Transactions of the ASME: Journal of Fluids Engineering*, Vol. 117, pp. 62~67.
- (17) Yoshino, F. and Hayashi, T., 1984, "The Numerical Solution of Flow around a Rotating Circular Cylinder in Uniform Shear Flow," *Bulletin of the JSME*, Vol. 27, pp. 1850~1857.
- (18) 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.
- (19) Diaz, F., Gavaldà, J., Kawall, J.G., Keller, J.F. and Giralt, F., 1983, "Vortex Shedding from a Spinning Cylinder," *Physics of Fluids*, Vol. 26, pp. 3454~3460.
- (20) Kimura, T. and Tsutahara, M., 1991, "Wake of a Rotating Circular Cylinder," *AIAA Journal*, Vol. 30, pp. 555~556.
- (21) Sumner, D., Wong, S.S.T., Price, S.J. and Paidoussis, M.P., 1999, "Fluid Behavior of Side-by-Side Circular Cylinders in Steady Cross-Flow," *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 13, pp. 309~338.