

나란히 배열된 한 쌍의 원형실린더를 지나는 유동 특성

강 상 모*

(2003년 1월 3일 접수, 2003년 5월 9일 심사완료)

Characteristics of Flow over a Pair of Circular Cylinders in a Side-by-Side Arrangement

Sangmo Kang

Key Words: Side-by-Side Arrangement(나란한 배열), Antiphase-Synchronized(반대위상동조), Inphase-Synchronized(동일위상동조), Flip-Flopping(임의교번)

Abstract

Two-dimensional flow over a pair of circular cylinders in a side-by-side arrangement at low Reynolds numbers has been numerically investigated in this study. Numerical simulations are performed, using the immersed boundary method, for the ranges of $40 \leq Re \leq 160$ and $g^* < 5$, where Re and g^* are, respectively, the Reynolds number and the spacing between the two cylinder surfaces divided by the cylinder diameter. Results show that a total of six kinds of wake patterns are observed over the ranges: antiphase-synchronized, inphase-synchronized, flip-flopping, single bluff-body, deflected, and steady wake patterns. It is found that the characteristics of the flow significantly depends both on the Reynolds number and gap spacing, with the latter much stronger than the former. Instantaneous flow fields, time traces, flow statistics and so on are presented to identify the wake patterns and then to understand the underlying mechanism. Moreover, the bifurcation phenomenon where either of two wake patterns can occur is found at certain flow conditions.

기호설명

C_D : 항력계수 (drag coefficient)
 C_L : 양력계수 (lift coefficient)
 d : 실린더 직경
 f_i : 운동량 힘 (momentum forcing)
 g, g^* : 실린더 간격 ($g^* = g/d$)
 M, N : 공간 해상도
 p : 압력
 q : 질량 생성/소멸 (mass source/sink)

Re : 레이놀즈 수 ($= u_\infty d/\nu$)
 St : 보텍스 shedding의 무차원 주파수
 $t, \Delta t$: 시간, 시간 증분
 u_i, u, v : 속도 성분
 u_∞ : 자유유동 속도
 x_i, x, y : 직각좌표 성분
 $(0, \pm y_c)$: 실린더 중심 ($y_c = (g^* + 1)d/2$)
 ν : 동점성 계수
 $\bar{\quad}$: 시간 평균량
 $'$: 섭동량

* 회원, 대구대학교 자동차산업기계공학부
 E-mail : kangsm@daegu.ac.kr
 TEL : (053)850-6673 FAX : (053)850-6689

1. 서론

유동이 하나 또는 여러 개의 뒤편한 물체(bluff

bodies)를 지나게 되면, 유동의 불안정성 때문에 후류(wake)에 보텍스 shedding(vortex shedding)이 발생하게 된다. 결과적으로 유동장이 흔들리게 되며, 항력(drag)과 양력(lift)이 요동을 친다. 따라서, 이러한 유동들은 유체역학 분야에서 학문적 및 공학적인 중요성 때문에 오랫동안 주 관심의 대상이 되어 왔다. 본 논문에서는 이 중 나란히 배열된 한 쌍의 원형 실린더를 지나는 유동에 관한 연구를 수행한다. 이 유동은 많은 공학적인 적용예를 가지고 있는데, 대표적으로는 열 교환기 내의 관다발, 원자핵 반응기 내의 연료와 제어봉, 교각, 기름과 가스의 수송관, 냉각탑 배열, 현수교 및 고층 건물 등이 있다.⁽¹⁾ 뿐만 아니라, 이 유동은 보통 두 개의 무차원 유동변수에 의해 지배를 받는다. 즉, 하나는 레이놀즈 수 $Re = u_{\infty}d/\nu$ 이며 다른 하나는 무차원화 된 실린더 간격 $g^* = g/d$ 이다.

나란히 배열된 두 원형실린더를 지나는 유동에 대한 실험적 연구는 초기의 Spivack⁽²⁾과 Bearman & Wadcock⁽³⁾ 이래로 많이 이루어졌으며, 상세한 내용은 Zdravkovich⁽⁴⁾와 Sumner 등⁽⁵⁾을 참고 바란다. Williamson⁽⁶⁾은 유동가시화를 이용하여 $Re = 50 - 150, 200$ 과 $0.5 < g^* \leq 5$ 의 범위에 있는 유동에 대한 실험연구를 수행하였다. 그들의 관찰에 따르면, 실린더 간격이 대략 실린더 직경보다 클 때에는 각 실린더에서 일어나는 두 보텍스 shedding 사이에 동조화(synchronization)가 동일위상(inphase)과 반대위상(antiphase) 중 어느 하나로 발생하였다. 반대로, 작을 때에는 두 후류가 서로 다르게 되어 유동의 상태가 비대칭이 되었다. 이어, Kim & Durbin⁽⁷⁾은 $g^* < 1$ 일 때 발생하는 비대칭 비정상 후류를 상세히 연구하기 위하여, 실린더 간격을 $g^* = 0.75$ 에 고정시켜 놓고 $Re = 2 - 7 \times 10^3$ 의 범위에 있는 유동에 대하여 실험연구를 수행하였다. 유동은 두 개의 비대칭 상태를 수반하였으며, 이들 사이를 불규칙적이지만 수시로 변환하였다. 그리고, 평균 변환주기는 보텍스 shedding 주기보다 매우 길었다. 최근에는 Sumner 등⁽⁵⁾이 $Re = 500 - 3000$ 과 $g^* = 0 - 5$ 의 범위를 가지는 유동에 대하여 체계적인 실험 연구를 수행하였다.

이와 반대로, 수치연구의 경우 매우 적은 수의 연구만⁽⁸⁻¹⁰⁾이 수행되었다. 뿐만 아니라, 그들 대

부분은 Williamson⁽⁶⁾의 실험결과와 비교를 통하여 자신들이 개발한 수치기법의 성능을 평가하는 데에 주목적이 있었으며, 유동의 물리적인 특성을 세밀하게 파악하는 노력은 거의 시도하지 않았다. 따라서, 수치연구는 실험연구에 의해 쉽게 제공받을 수 없는 풍부한 정보를 제공할 수 있기 때문에, 유동에 대한 철저한 이해를 위해서는 보다 체계적인 수치연구가 필요하다.

본 연구의 목적은 나란히 배열된 한 쌍의 원형 실린더를 지나며 낮은 레이놀즈 수를 가지는 유동의 특성을 수치적으로 연구하고 이에 해당하는 기본적인 메커니즘을 좀더 이해하는 데에 있다. 이를 위하여, 실린더 뒤의 두 후류 사이에 존재하는 상호작용 때문에 발생하는 여러 가지 종류의 후류양식(wake pattern)을 규명하고, 레이놀즈 수와 실린더 간격이 유동에 미치는 영향을 상세히 분석할 것이다. 이를 위하여, $40 \leq Re \leq 160$ 과 $g^* < 5$ 의 범위에 있는 유동에 대해 Kim 등⁽¹¹⁾이 개발한 가상경계방법(immersed-boundary method)을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 가상경계방법은 가상경계 위나 주위에서 점착조건(no-slip condition)과 연속성(continuity)을 만족하기 위하여 운동량 힘(momentum forcing)과 질량 생성/소멸량(mass source/sink)을 동시에 물체 표면 위나 물체 내부에 부가하는 수치방법이다.

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, $x^2 + (y \pm y_c)^2 = 1$ 로 표현되는 두 가상경계 위에 점착조건이 부과된다. 이산시간(discrete-time) 운동량 힘 f_i 는 가상경계에서 점착조건을 만족하도록 적용되고, 반면에 질량 생성/소멸량 q 는 가상경계를 포함하는 단위 격자(cell)에서 질량보존

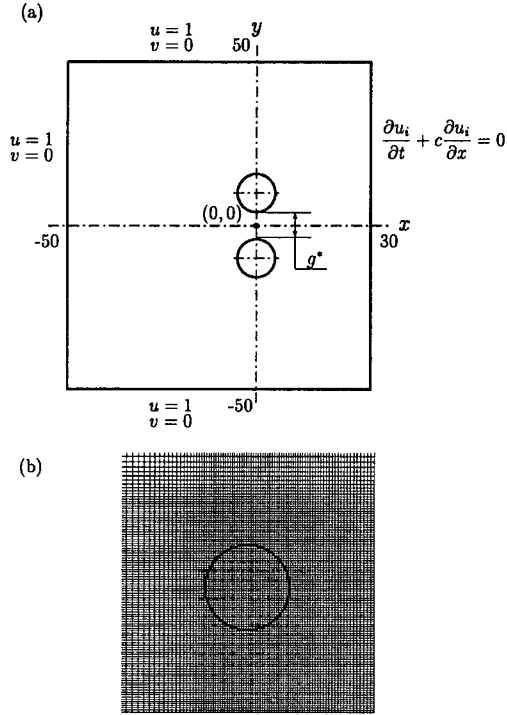


Fig. 1 (a) Schematic diagram of the present computational domain and (b) the computational mesh around the upper cylinder for the case of $g^*=1.5$ ($M \times N=351 \times 273$)

을 만족하도록 적용된다. 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 확산항에는 이차 Crank-Nicolson 법을 각각 적용한다. 반면에, 엇갈림 격자제를 채택한 유한체적법을 이용하여 지배방정식에 대한 공간상 차분화(이산화)를 수행하며, 직각좌표계 (x, y) 를 가상경계방법의 적용을 위한 기본 좌표로 채택한다. 그리고, 가상경계위에서 점착조건이 만족되도록 이차(second-order) 선형(linear) 또는 접선형(bilinear) 보간법을 적용한다. 가상경계방법과 관련된 사항은 Kim 등⁽¹¹⁾에 상세히 서술되어 있다.

Fig. 1(a)는 수치모사를 위하여 채택된 계산영역을 적용된 경계조건과 함께 도식적으로 보여주고 있다. 계산영역은 $-50 < x < 30$ 과 $-50 < y < 50$ 이

Table 1 Validation of the numerical method : parametric study for flow over two side-by-side circular cylinders at $Re=100$ and $g^*=1.5$ Here, parenthesized are the relative errors (%) with respect to the result from $M \times N=351 \times 273$ and $\Delta t=0.02$ Δx_c and Δy_c denote the magnitudes of grid spacings inside and around both the cylinders

Re	g^*	$M \times N$	$\Delta x_c (\Delta y_c)$	Δt	$\overline{C_D}$	C_L'	St
		351 × 273	0.0278	0.02	1.434	0.271	0.164
100	1.5	449 × 449	0.0139	0.01	1.433	0.272	0.164
					(0.07)	(0.37)	(0.00)

며, 두 원형실린더는 각각 $(0, \pm y_c)$ 에 중심을 두고 있다. 효율적인 수치계산을 위하여, 두 실린더 근처에, 즉 실린더 사이와 후류영역에는 보다 조밀한 격자들을 적용하고 반면에 실린더로부터 멀리 떨어진 곳에는 보다 성근 격자들을 사용한다. 본 연구에서 실린더 내에는 36×36 의 균일 격자를 바깥영역에는 쌍곡탄젠트(tangential-hyperbolic) 격자분포를 각각 채택하였다. 실린더 간격이 변함에 따라 두 실린더 사이에 균일 또는 비균일 격자분포를 탄력적으로 적용하여 두 실린더 근처의 해상도가 유지되도록 하였다. 따라서, y 방향으로의 총 격자수는 실린더 간격에 따라 다소 변할 수 있다. 한 예로, Fig. 1(b)는 $g^*=1.5$ 인 경우에 한 실린더 주위의 계산 격자를 보여주며, 이때 공간 해상도는 $M \times N=351 \times 273$ 이다. 그리고, 본 연구에서 수행된 모든 계산에서는 $\Delta t=0.02$ 의 시간 증분을 사용하였다.

공간과 시간상의 수렴성을 확인하기 위하여, $Re=100$ 과 $g^*=1.5$ 인 유동에 대하여 매개변수 연구를 수행하였으며, 대표적인 결과를 Table 1에 제시하였다. 도표에 제시된 상대오차를 보면, 선택된 매개변수를 이용하여 얻어진 수치 결과들은 공간과 시간 해상도에 대하여 수렴이 잘 된다는 사실을 알 수 있다. 수치방법을 검증한 후, $40 \leq Re \leq 160$ 과 $g^* < 5$ 의 상당히 넓은 범위에 있는 유동에 대하여 레이놀즈 수와 실린더 간격을 체계적으로 변화시키면서 수치계산을 수행하였다.

3. 결 과

3.1 후류양식(wake pattern)

3.1.1 낮은 레이놀즈 수에서 관찰된 후류양식

나란히 배열된 두 원형실린더를 지나며 낮은 레이놀즈 수를 가지는 유동은 실린더 간격뿐만 아니라 레이놀즈 수에 따라 여러 종류의 후류양식을 수반한다. 먼저, 임의로 교란된(randomly disturbed) 균일상태, 즉 $|u-1| \leq 0.05$ & $|v| \leq 0.05$ 에서 출발한 유동이 서로 다른 유동조건 (Re 와 g^*)에서 어떻게 전개되어 가는지를 살펴보기 위하여 같은 수치모사를 수행하였다. 그리고, Figs. 2와 3은 유동조건에 따른 양력과 항력계수의 시간 변이와 이에 해당하는 순간 등와도선과 유선을 각각 보여준다. 결과에 의하면, 모든 유동은 초기조건에 영향을 완전히 사라진 후 결국에는 완전 발달된(fully developed) 상태에 이르렀으며, 이어 그 상태가 충분히 오랫동안 지속되었다. 본 연구에서는 완전 발달된 상태가 충분히 지속되는가를 확인하기 위하여 적어도 무차원 시간으로 500이상 동안 수치모사를 수행하였다. 그리고, 본 논문에서 특별한 언급이 없으면 완전 발달된 상태에서만 분석하였음을 밝힌다.

Figs. 2(a-d)와 3(a-d)는 같은 레이놀즈 수인 $Re=100$ 에서 실린더 간격이 서로 다른 경우에 관찰된 네 가지 종류의 후류양식을 보여주고 있다. 이러한 결과는 후류양식이 실린더 간격에 강하게 의존한다는 사실을 잘 보여주며, 이는 기존의 연구결과와 잘 일치한다.^(1,3-6,8-10) $g^*=3$ 인 경우, 각 원형실린더 뒤에 존재하는 두 후류 사이에 서로 동조화가 이루어지며, 결과적으로 유동은 완전히 주기적(periodic)인 특징을 가지게 된다. 두 실린더의 항력계수는 서로 거의 같아지는데 반하여, 양력계수는 서로 반대위상(180° 위상차)을 가진다. 양력계수의 이러한 특징 때문에 이를 반대위상동조(antiphase-synchronized) 후류양식이라 부른다. 유동장은 먼 하류까지 줄곧 중심선($y=0$)에 대하여 완전 대칭이 된다. 반면에, $g^*=1.5$ 인 경우에는 두 후류 역시 동조화가 이루어지나 그 형태는 반대위상동조와 근본적으로 다르다. 두 실린더에서의 보텍스 shedding은 거의 같은 위상으로 발생하게 되며, 따라서 두 실린더의 항력계수는 위상이 서로 다르나 양력계수는 같은 위상(동일위상)을 가진다. 이러한 특징 때문에 이를 동일위상동조(inphase-synchronized) 후류양식이

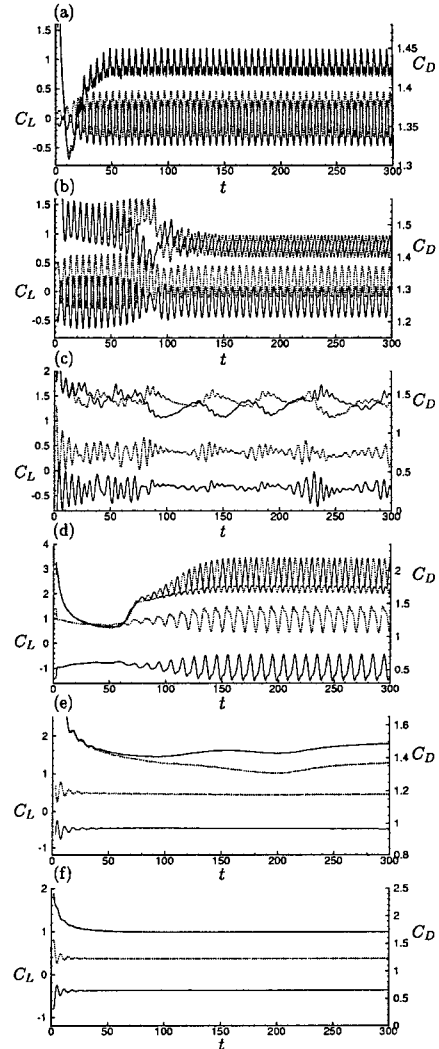


Fig. 2 Time evolutions of the lift and drag coefficients according to the wake pattern: (a) antiphase-synchronized ($Re=100$ and $g^*=3$); (b) inphase-synchronized ($Re=100$ and $g^*=1.5$); (c) flip-flopping ($Re=100$ and $g^*=0.7$); (d) single bluff-body ($Re=100$ and $g^*=0.2$); (e) deflected ($Re=70$ and $g^*=0.5$); (f) steady ($Re=40$ and $g^*=1$) patterns. All the flows start from the randomly-disturbed uniform state, $|u-1| \leq 0.05$ and $|v| \leq 0.05$. —, lower cylinder; ·····, upper cylinder

라 부른다. 유동장에서는, 같은 부호를 가지는 보텍스의 쌍들이 병합을 하여 하나의 보텍스 흐름선(vortex street)을 형성한다. 이어, 하류의 어느 정도 위치에서 그 병합과정이 중단되며 그 이후에는 유동장이 불규칙적으로 변한다.

실린더 간격이 $g^*=0.7$ 이 되면, 유동은 더 이상 주기적인 특징을 가지지 않으며 심한 비정상 유동으로 바뀐다. 기존의 실험연구^(1,3~6)에 따르면, 두 실린더 표면 사이의 유동(틈새유동: gap flow)은 더 높은 항력을 가지는 실린더 방향으로 편향된다. 틈새유동의 방향과 두 항력 사이에 일어나는 이러한 관계는 본 수치해석 결과에 의해서도 명확히 증명된다. 시간변이 결과를 살펴보면, 두 실린더는 불규칙적으로 번갈아 가면서 좀 더 높은 항력을 경험하게 되는데, 이는 두 후류가 두 비대칭 상태(틈새유동의 방향이 위 또는 아래로 향하는 상태) 사이에서 교대로 그리고 임의로 서로 변환하게 된다는 것을 의미한다. 따라서, 이러한 특징 때문에 이를 임의교번(flip-flopping) 후류양식이라 부른다. 이어, 두 실린더가 매우 가까운 경우($g^*=0.2$), 유동은 다시 주기적인 특징을 가진다. 이 경우 틈새유동은 후류양식에 영향이 미치지 않을 정도로 매우 약하며, 결과적으로 두 나란한 원형실린더를 지나는 유동은 마치 특성길이가 늘어난 물체 하나만이 존재하는 것처럼 작용하여 단 하나의 보텍스 흐름선만을 수반하게 된다. 따라서, 이를 단일물체(single bluff-body) 후류양식이라 부른다.

실린더 간격뿐만 아니라 레이놀즈 수를 추가로 변화시키면 또 다른 후류양식을 관찰할 수 있다. 먼저, $Re=70$ 과 $g^*=0.5$ 인 경우에(Figs. 2(e)와 3(e)를 참고), 한 실린더의 항력계수는 다른 실린더의 계수보다 항상 높다. 결국, 틈새유동은 높은 항력계수를 가지는 실린더 쪽으로 향하게 되며, 이러한 흐름 방향은 이후 변하지 않는다. 이러한 특징 때문에 본 후류양식은 앞서 관찰한 임의교번 양식과 뚜렷하게 구분된다. 따라서, 이를 편향(deflected) 후류양식이라 부른다. 이 경우, 보다 높은 항력을 가지는 실린더의 틈새 쪽에서 발생하는 보텍스는 반대부호를 가지는 보텍스 들에 의해 웨딩이 완전히 억제되며, 반면에 하류에서는 매우 큰 스케일의 보텍스들이 형성된다. 마지막으로, $Re=40$ 과 $g^*=1$ 의 경우에(Figs. 2(f)와 3(f)를 참고), 유동은 보텍스 세딩 발생 없이 정상

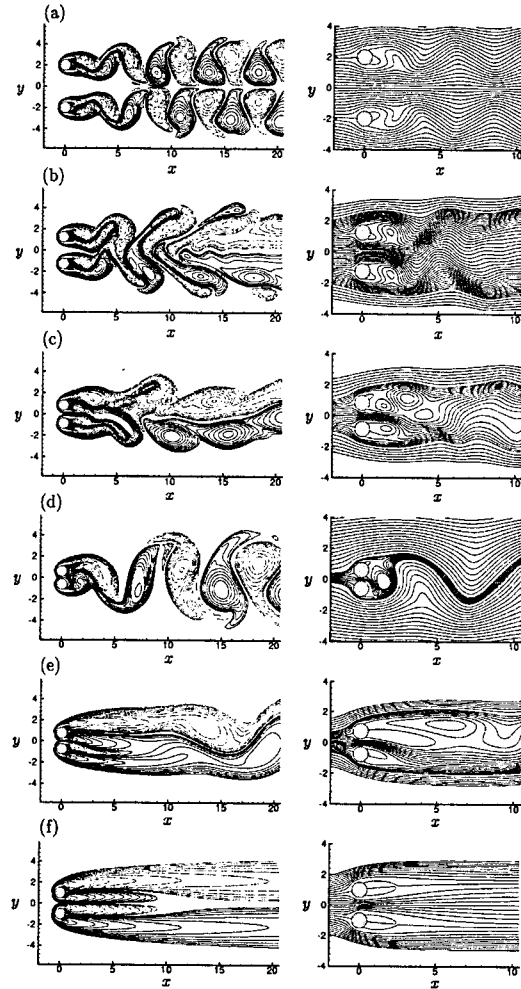


Fig. 3 Instantaneous vorticity contours (left) and streamlines (right) according to the wake pattern: (a) antiphase-synchronized pattern ($Re=100$ and $g^*=3$); (b) inphase-synchronized pattern ($Re=100$ and $g^*=1.5$); (c) flip-flopping pattern ($Re=100$ and $g^*=0.7$); (d) single bluff-body pattern ($Re=100$ and $g^*=0.2$); (e) deflected pattern ($Re=70$ and $g^*=0.5$); (f) steady pattern ($Re=40$ and $g^*=1$)

상태가 되며 중심선에 대해 대칭이 된다. 따라서, 이를 정상(steady) 후류양식이라 부른다.

3.1.2 동일 유동조건에서 쌍갈림되는 유동양식
어느 유동조건에서는 초기조건 등에 따라 완전 발달된 유동이 서로 다른 두 가지 형태로 나타날

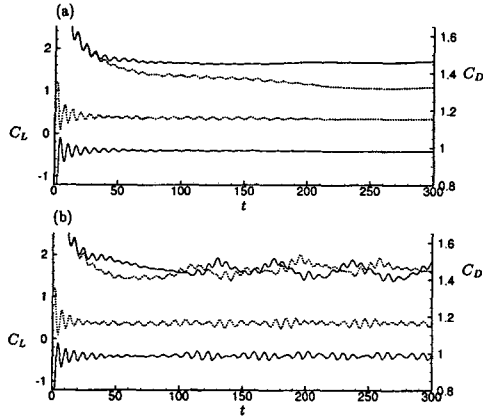


Fig. 4 Time evolutions of the lift and drag coefficients according to the wake pattern at $Re = 70$ and $g^* = 0.7$: (a) deflected pattern; (b) flip-flopping pattern. The flows start from two different randomly-disturbed uniform states: (a) $|u-1| \leq 0.01$ and $|d| \leq 0.01$; (b) $|u-1| \leq 0.05$ and $|d| \leq 0.05$

수 있다는 사실은 주목할만하다. 예를 들어, 유동 조건 $Re = 70$ 과 $g^* = 0.7$ 에서 교란강도가 서로 다른 두 균일유동($|u-1| \leq 0.05$ & $|d| \leq 0.05$ 과 $|u-1| \leq 0.01$ & $|d| \leq 0.01$)을 초기조건으로 하여 수치모사를 수행하였으며, 각 경우에 대한 양력과 항력계수의 시간변이를 Fig. 4에 제시하였다. 두 유동은 동일한 유동조건임에도 불구하고 명백히 서로 다른 완전 발달된 상태에 도달한다. 즉, 낮은 교란의 경우는 편향 후류양식에, 높은 교란의 경우는 임의교변 양식에 각각 이르게 된다. 따라서, 이 유동조건에서는 쌍갈림(bifurcation) 현상이 일어난다는 사실을 알 수 있다. 이어, Fig. 5는 $Re = 70$ 과 $g^* = 1.5$ 인 경우에 대하여 양력과 항력계수의 시간변이를 보여준다. 임의로 교란된 균일상태 $|u-1| \leq 0.05$ & $|d| \leq 0.05$ 로부터 시작된 유동은 최종적으로 임의교변 상태에 도달한다. 반면에, $Re = 100$ 과 $g^* = 1.5$ 에서 얻어진 완전 발달된 유동장(Figs. 2(b)와 3(b)를 참고)으로부터 시작된 유동은 동일위상동조 상태에 도달한다. 위에서 언급한 두 쌍갈림 현상과 관련된 어떠한 자료도 기존의 연구에서는 보고된 바가 없다.

또 다른 쌍갈림 현상, 즉 반대위상동조와 동일

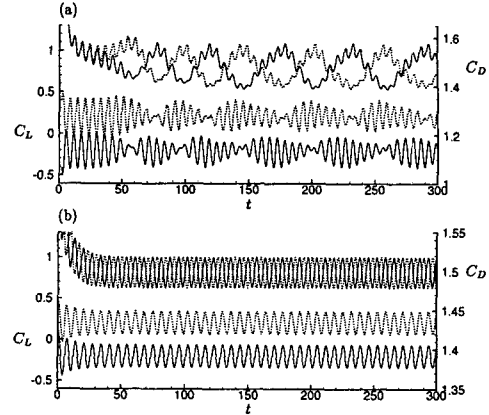


Fig. 5 Time evolutions of the lift and drag coefficients according to the wake pattern at $Re = 70$ and $g^* = 1.5$: (a) flip-flopping pattern; (b) antisymmetric pattern. The flows start from (a) the randomly-disturbed uniform state, $|u-1| \leq 0.05$ and $|d| \leq 0.05$, and (b) an inphase-synchronized state attained at $Re = 100$ and $g^* = 1.5$ (see Fig. 2(b))

위상동조 후류양식은 $Re = 120$ 과 $g^* = 2$ 인 유동에서 관찰할 수 있으며, 이에 해당하는 양력과 항력계수의 시간변이를 Fig. 6에 제시하였다. 여기서, 반대위상동조 양식은 임의로 교란된 균일상태 $|u-1| \leq 0.05$ & $|d| \leq 0.05$ 에서 수치모사를 시작함으로써 얻어지나, 동일위상동조 양식은 그렇게 쉽게 얻어지지 않는다. 이러한 쌍갈림 현상은 기존 실험연구^(1,3-6)에서 쉽게 찾을 수 있다. 기존의 연구 결과에 따르면, 동조화는 반대위상과 동일위상 중 어느 하나의 형태로 일어났으며, 유동이 두 동조화 상태 사이를 간헐적으로 변환하였다. 뿐만 아니라, 각 동조화 된 상태는 매우 오랫동안 지속되었다. 이와 같은 관찰을 기초로 할 때, 수치적으로 반대위상에서 동일위상동조 상태로 변환하기 위해서는 매우 긴 컴퓨터 작동 시간을 필요로 한다. 따라서, 본 연구에서는 두 실린더 주위의 유동장을 동일위상 상태와 유사하도록 인위적으로 수정한 후, 수치모사를 수행함으로써 동일위상동조 후류양식을 얻으려고 시도하였다. Fig. 6(b)에서 보여주듯이, 인위적인 초기조건에도 불구하고 초기영향이 완전히 사라지며 유동은 결국 동일위상동조 상태로 완전히 발달된다.

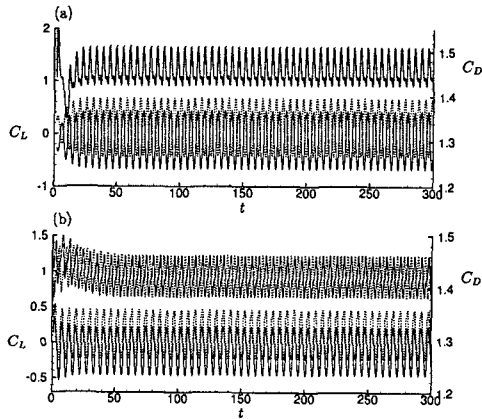


Fig. 6 Time evolutions of the lift and drag coefficients according to the wake pattern at $Re=120$ and $g^*=2$: (a) antiphase-synchronized pattern; (b) inphase-synchronized pattern. The flows start from (a) the randomly-disturbed uniform state, $|u-1|\leq 0.05$ and $|d|\leq 0.05$, and (b) an artificial state achieved by mapping the flow field near one cylinder in (a) on near the other

3.1.3 레이놀즈 수와 간격에 따른 후류양식

지금까지 살펴본 바와 같이, 나란히 배열된 두 원형실린더를 지나며 낮은 레이놀즈 수를 가지는 이차원 유동에서 수반되는 후류양식은 레이놀즈 수와 실린더 간격에 강하게 의존하였다. 게다가, 어느 유동조건에서는 두 후류양식이 일어나는 쌍갈림 현상이 관찰되었다. 이러한 발견들을 좀더 체계화하기 위하여, 각 유동조건에서 어떠한 후류양식이 일어날 수 있는지를 결정하고 그 결과를 Fig. 7의 $Re-g^*$ 평면에 부호로 표시하였다. 평면에 표시된 부호 중 이중으로 표시된 부분은 쌍갈림 현상을 가리킨다. 후류양식의 결정은 항력과 양력의 시간변이와 등와도선 및 유선과 같은 순간 유동장을 기준으로 하여 완전 발달된 상태에서 이루어졌다.

Fig. 7에서 명확히 알 수 있듯이, 수치해석을 수행한 유동조건 $Re\leq 160$ 과 $g^*<5$ 의 범위에서 총 여섯 가지 종류의 후류양식을 관찰하였다. 이에는 반대위상동조, 동일위상동조, 임의교번, 단일물체, 편향 그리고 정상 후류양식들이 있으며, 각각의 후류양식이 존재할 수 있는 유동조건은

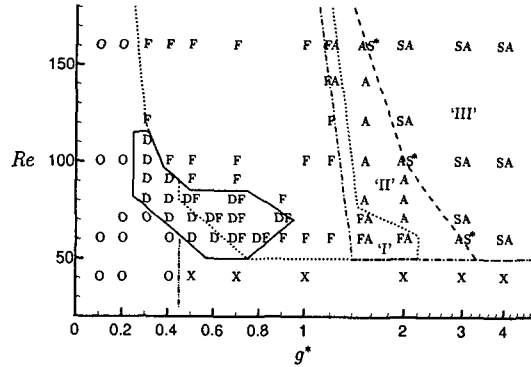


Fig. 7 Wake patterns observed behind two side-by-side circular cylinders with varying Re and g^* : S (---), antiphase-synchronized pattern; A (- · - ·), inphase-synchronized pattern; F (-----), flip-flopping pattern; O (- · · - ·), single bluff-body pattern; D (—), deflected pattern; X, steady pattern. Note that the superscripts '*' (S^*) denote marginal states

$Re-g^*$ 평면 위에서 유한한 크기(finite extent)의 범위를 차지하고 있다. 따라서, 어느 후류양식의 영역을 다른 영역과 명확히 구분하기 위하여 Fig. 7의 선도에 근사적인 경계선을 함께 그려 넣었다. 낮은 레이놀즈 수의 경우 ($Re\approx 40$), $g^*\geq 0.5$ 에서는 유동이 정상상태가 되며 $g^*<0.5$ 에서는 단 하나의 물체(특성길이 증가됨)를 지나는 유동처럼 주기적인 특징을 가진다. 반면에, 높은 레이놀즈 수의 경우는 보다 다양한 후류양식이 주로 실린더 간격에 따라 나타난다. 즉, 유동은 간격이 증가하는 순서대로 단일물체, 편향, 임의교번, 동일위상동조, 그리고 반대위상동조 후류양식이 차례로 나타난다. 한편, 레이놀즈 수는 후류양식에 상대적으로 약하게 영향을 미치며, 그 영향도 또한 레이놀즈 수가 증가함에 따라 감소한다. 게다가, 편향 후류양식이 대략 $50 < Re < 110$ 과 $0.2 < g^* < 1$ 의 유한한 범위에서 일어난다는 사실은 매우 흥미롭다.

Fig. 7은 $Re-g^*$ 평면에서 이웃하는 두 개의 후류양식 영역이 서로 겹치는 세 개의 지역이 존재하는 것을 역시 보여준다. 이는 Figs. 4~6에서 언급된 쌍갈림 현상들이 일어나는 지역이다. 편향과 임의교번 후류양식으로 구성된 쌍갈림 현상은 대략 $50 < Re < 90$ 과 $0.4 < g^* < 1$ 의 유한한 범위

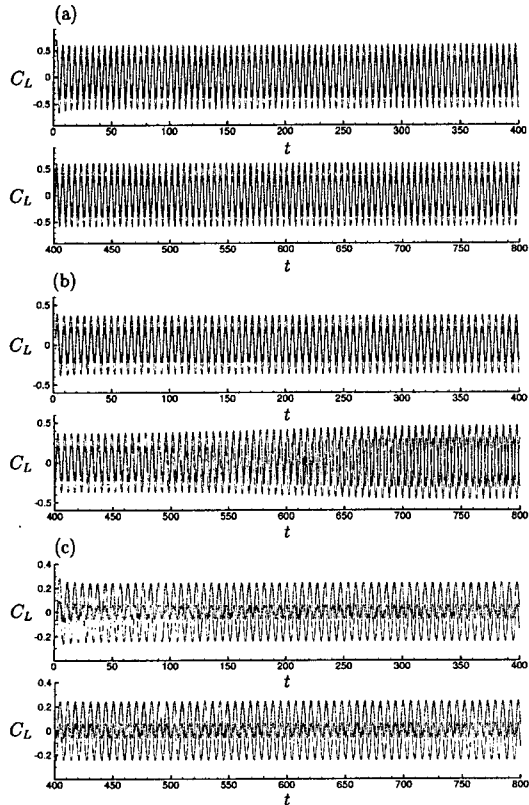


Fig. 8 Time evolutions of the lift coefficient for illustrating the inphase-synchronized pattern generated in the regime of the antiphase-synchronized wake pattern: (a) $Re = 160$ and $g^* = 2$; (b) $Re = 100$ and $g^* = 3$; (c) $Re = 70$ and $g^* = 3$. Each flow starts from an artificial state achieved after making flow fields near both cylinders like enough

에서 일어나고, 반면에 임의교번과 동일위상동조 양식으로 구성된 쌍갈림 현상은 두 후류양식 영역 사이의 매우 긴 영역에서(I로 표시) 일어난다. 이와는 별도로, 반대위상동조와 동일위상동조 양식으로 구성된 쌍갈림 현상은 실린더 간격이 큰 곳에서(III으로 표시) 일어난다.

Fig. 7에서 I, II 및 III으로 표시된 바와 같이, 동일위상동조 후류양식에 해당하는 $Re-g^*$ 영역은 세 부분으로 나누어진다. 영역 I에서는 앞서 설명한 바와 같이 임의교번 후류양식과의 쌍갈림 현상이 일어나며, 영역 II에서는 단지 동일위상동조 양식만이 존재한다. 뿐만 아니라, 영역 II는 레

이놀즈 수가 증가함에 따라 좁아지는데, 이는 난류영역($Re > 200$)에서는 사라질 수 있음을 의미한다. 반면에, 영역 III에서는 반대위상동조 후류양식과 함께 발생한다. 기존의 실험결과^(1,3~6)에 따르면, 동일위상동조 후류양식은 반대위상동조 양식이 발생하는 유동조건에서도 역시 일어날 수 있다. 따라서, 반대위상동조 영역에서 동일위상동조 유동의 재현은 Fig. 6(b)에서 사용된 같은 방법을 적용하여 시도하였으며, 대표적인 결과를 Fig. 8에 제시하였다. 수치모사 결과, 모든 경우에 유동은 동일위상으로 동조화 되었으며, 그 완전 발달된 상태는 오랫동안 지속되었다. 이는 영역 III에서 두 동조양식으로 이루어진 쌍갈림 현상이 일어난다는 사실을 잘 증명해주고 있다. 그렇지만, 어떤 경우에는 유동이 어느 일정 시간이 지난 후 서서히 반대위상동조 상태로 다시 변환하게 된다. 예를 들어, 완전 발달된 동일위상동조 상태는 $Re = 160$ 과 $g^* = 2$ 의 경우에 무차원 시간으로 약 600, 그리고 $Re = 100$ 과 $g^* = 3$ 의 경우에 약 300 정도 안정적으로 지속된다(Figs. 8(b)와 (c)를 참조). 이는 다른 유동조건에서도 유사한 변환과정이 일어난다는 것을 강하게 시사한다. Williamson⁽⁶⁾은 $1 < g^* < 5$ 의 범위에 해당하는 실린더 간격을 가지는 두 실린더 사이에서 반대위상의 보텍스 세딩이 동일위상의 경우보다 우세하다고 주장하였는데, 이는 본 결과와 잘 일치한다.

3.2 유동 통계(flow statistics)

3.2.1 보텍스 세딩 주파수

실린더 간격에 따른 보텍스 세딩 주파수의 특성을 파악하기 위하여, $Re = 100$ 인 유동에서 두 실린더에 작용하는 양력계수에 대한 푸리에(Fourier) 분석을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 9(a)에 제시하였다. 여기서, 임의교번 양식에 해당하는 실린더 간격($g^* = 0.4, 0.5, 0.7, 1.0$ 및 1.2)을 제외하고는 완전 발달된 유동이 주기적인 특징을 가지기 때문에, 단지 기본 주파수(fundamental frequency)만을 표시하였다. 이와 반대로, 임의교번 양식에서는 유동이 더 이상 주기적인 특징을 가지지 않는다. 한 예로, Fig. 9(b)는 $Re = 100$ 과 $g^* = 0.7$ 인 유동에 대한 주파수 스펙트럼 결과를 보여준다. 스펙트럼 분석을 위하여,

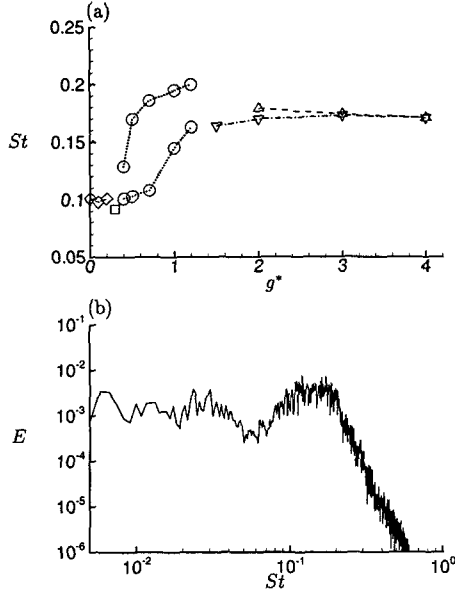


Fig. 9 Frequency characteristics on the lift coefficient at $Re=100$ (a) Vortex-shedding frequencies (Strouhal numbers) with respect to g^* : Δ , antiphase-synchronized pattern; ∇ , inphase-synchronized pattern; \circ , flip-flopping pattern; \diamond , single bluff-body pattern; \square , deflected pattern. Here, the two dotted lines with open circles approximately denote the upper and lower bounds of the dominant-frequency range for the flip-flopping wake pattern. (b) frequency spectrum of the lift coefficient at $g^*=0.7$

완전 발달된 이후에 무차원 시간으로 1200이상 동안 양력계수에 대한 데이터를 모았다. 결과에 따르면, 우세 주파수들(dominant frequencies)이 상당히 넓은 주파수 범위에 걸쳐 불규칙적으로 분포되어 있으며, 이는 다수의 주파수들이 복잡하게 얽혀 있다는 것을 의미한다. 이러한 이유 때문에, 임의교번 후류양식의 경우 우세 주파수 범위의 상한과 하한을 Fig. 9(a)에 빈 원(open circle)을 이용하여 근사적으로 표시하였다. 실린더 간격과 우세 주파수 사이의 이러한 관계는 보다 높은 레이놀즈 수에서 수행된 기존의 실험 결과^(3,5,7)와 잘 일치한다.

Fig. 9(a)를 보면 보텍스 shedding 주파수는 특히 $g^* < 1.5$ 에서 실린더 간격에 강하게 의존한다는 사실을 알 수 있다. 동조 후류양식의 범위에서는 shedding 주파수가 실린더 간격에 상관없이 거의 일정하며, 그 값은 단일 실린더 경우($St=0.165$)와 매우 유사하다. 그럼에도 불구하고, 반대위상의 shedding 주파수는 동일위상의 경우보다 약간 크다. 이어, (기본) 주파수는 임의교번 양식의 범위에서는 실린더 간격이 감소함에 따라 현저히 감소하며, 편향 양식에서 극소(local minimum)에 이르고, 이어 단일물체 양식에서 약간 증가한다. 다른 레이놀즈 수를 가지는 유동도 이와 비슷한 경향을 보여주고 있다.

3.2.2 항력과 양력계수

Fig. 10은 $Re=100$ 과 160 에서 실린더 간격에 따른 항력과 양력계수의 시간 평균과 양력계수의 섭동 rms 값의 변화를 보여준다. 그림에서 보여준 모든 계수들은 두 실린더에 해당하는 값을 평균하여 얻어졌다. 결과에 따르면, 평균 유동량은 주로 실린더 간격에 의존하며, 즉 Re 에는 상대적으로 무관하다. 반면에, 유동 섭동량은 레이놀즈 수와 실린더 간격 둘 다에 강하게 의존한다. 항력계수의 시간 평균은 단일 실린더의 경우보다 약간 큰 값을 가지며, $g^* \geq 0.3 \sim 0.4$ 의 범위에서는 실린더 간격에 상관없이 거의 일정하게 유지된다. 그리고, 항력계수는 $g^* < 0.3 \sim 0.4$ 의 범위(단일 물체 후류양식)에서 g^* 가 감소함에 따라 가파르게 증가한다. Bearman & Wadcock⁽³⁾은 실린더 간격이 매우 작을 때 틈새유동에 의한 기저분출 효과(base-bleed effect) 때문에 항력계수는 실린더가 하나일 때보다 작다고 주장하였다. 그렇지만, 이는 본 결과와 명백히 일치하지 않는다. 그 차이는 확실하지는 않지만 레이놀즈 수에서의 차이 ($Re < 200$ 대 $Re = 2.5 \times 10^4$)뿐만 아니라 실험장치 때문일 수도 있다고 유추할 수 있다. 실제로 기저분출 효과는 층류영역에서 구체적인 항력감소를 얻기에는 너무 약한 것으로 보인다(Fig. 3(d)를 참고). 마찬가지로, 양력계수의 시간 평균은 레이놀즈 수보다는 실린더 간격에 역시 강하게 의존한다. 즉, 두 원형실린더 사이에는 평균적으로 서로 반발하는 양력(repulsive lift)이 작용하며, 이 양력은 실린더 간격 전 범위에 걸쳐 g^* 가 감

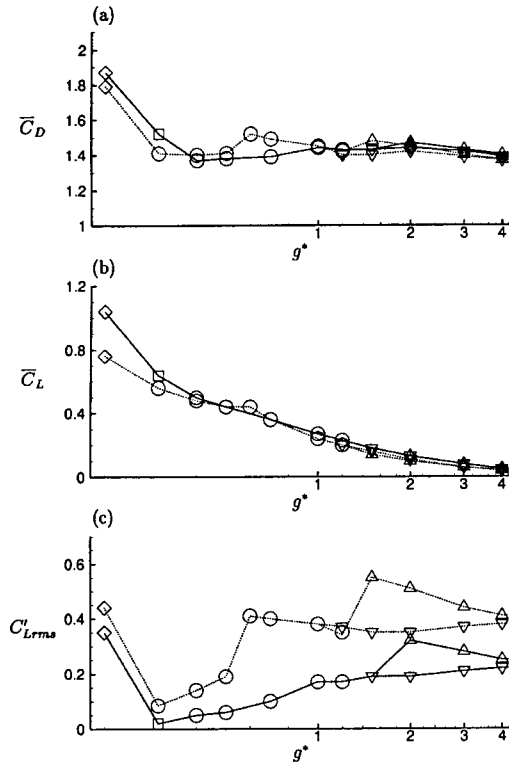


Fig. 10 Variations of the drag and lift coefficients with g^* at $Re = 100$ and 160 : (a) time-averaged drag coefficient, (b) time-averaged lift coefficient and (c) rms value of the lift-coefficient fluctuations. Δ , antiphase-synchronized pattern; ∇ , inphase-synchronized pattern; \circ , flip-flopping pattern; \diamond , single bluff-body pattern; \square , deflected pattern; —, $Re = 100$; ·····, $Re = 160$

소함에 따라 꾸준히 증가한다. 이는 기존의 연구 결과^(3,6,9,10)와 정확하게 일치한다. 그렇지만, 단일 물체 양식의 범위에서는 실린더 간격뿐만 아니라 레이놀즈 수가 양력계수에 강한 영향을 미친다. 즉, 레이놀즈 수가 감소함에 따라 양력계수는 증가한다.

양력 섭동은 레이놀즈 수와 실린더 간격 두 매개변수에 상당히 강하게 의존한다. 전체적으로 레이놀즈 수가 증가하면 양력 섭동은 좀더 활발해진다. 두 동조 후류양식으로 구성된 쌍갈림 범위에서, 반대위상의 경우 섭동량은 동일위상의 경우보다 훨씬 크다. 즉, 반대위상의 경우 양력 섭동은 모든 실린더 간격에 대하여 거의 일정하

게 유지되는데 반하여, 동일위상의 경우 양력 섭동은 g^* 가 감소함에 따라 증가하며 반대위상동조 영역 바로 안에서 극대(local maximum)에 이르게 된다. 이어, 임의교번 범위에서 g^* 가 좀더 감소하면, 양력 섭동은 전반부에서 거의 일정하게 유지되다 후반부에서 현저하게 감소한다. 결과적으로, 양력 섭동은 $Re = 160$ 일 때 임의교번 양식 영역 바로 안에서 극소가 되며, $Re = 100$ 일 때 편향 후류양식 영역의 $g^* \approx 0.3$ 에서 극소가 된다. 끝으로, 양력 섭동은 단일물체 양식 구간에서 g^* 가 감소함에 따라 급격히 증가한다.

4. 결론

본 논문에서는, 나란히 배열된 한 쌍의 원형실린더를 지나며 낮은 레이놀즈 수를 가지는 이차원 유동에 수반되는 후류양식을 파악하고 이에 따른 기본 메커니즘을 이해하였다. 이를 위하여, $40 \leq Re \leq 160$ 과 $g^* < 5$ 의 유동조건에서 가상경계방법⁽¹¹⁾을 적용하여 수치해석을 수행하였다.

(1) 낮은 레이놀즈 수를 가지는 유동에서 총 여섯 가지 종류의 후류양식이 관찰되었다. 즉, 반대위상동조 ($g^* \geq 2$), 동일위상동조 ($g^* \geq 1.5$), 임의교번 ($0.4 \leq g^* \leq 1.5$), 단일물체 ($g^* \leq 0.4$), 편향 ($50 \leq Re \leq 110$ 및 $0.2 \leq g^* \leq 1$) 그리고 정상 ($Re \approx 40$ 과 $g^* \geq 0.5$) 후류양식들이 이에 해당하였다. 후류양식은 실린더 간격과 레이놀즈 수에 의존하였으나, 의존 정도는 전자가 후자보다 매우 강하였다.

(2) 같은 유동조건에서 세 가지 종류의 쌍갈림 현상이 관찰되었다. 즉, 편향과 임의교번, 임의교번과 동일위상, 그리고 반대위상동조와 동일위상동조 후류양식이 이에 해당한다. 특히, 반대위상과 동일위상의 경우에는 전자의 양식이 후자보다 우세(predominant)하였다.

(3) 보텍스 shedding 주파수는 실린더 간격에 강하게 의존하였다. 동조 후류양식의 구간에서는 shedding 주파수가 g^* 에 상관없이 거의 일정하였다. 이어 g^* 가 감소함에 따라, 주파수는 임의교번 구간에서 급격히 감소하다, 편향 양식 구간에서 극소가 되며 ($Re = 100$), 그리고 단일물체 양식 구간에

서 약간 증가하였다.

(4) 항력과 양력의 시간 평균값은 주로 실린더 간격에 의존하였다. 항력계수는 $g^* > 0.3 \sim 0.4$ 에서 g^* 에 상관없이 거의 일정하며, $g^* \leq 0.3 \sim 0.4$ 에서 g^* 가 감소함에 따라 가파르게 증가하였다. 그리고, 양 실린더 사이에는 반발 양력이 존재하며, 그 양력은 모든 구간에서 g^* 가 감소함에 따라 꾸준히 증가하였다.

(5) 양력의 섭동량은 레이놀즈 수와 실린더 간격 모두에 강하게 의존하였다. Re 가 증가함에 따라 양력 섭동의 강도는 증가하였으며, g^* 가 단 일물체와 임의교번 후류양식 사이에서 극소가 되었다($Re = 160$ 의 경우).

후 기

본 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2002-003-D00054)에 의하여 연구되었습니다. 그리고, 주요 계산은 한국과학기술정보연구원의 슈퍼컴퓨터 자원을 이용하여 수행되었습니다. 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Zhou, Y., So, R. M. C., Liu, M. H. & Zhang, H. J. 2000, "Complex Turbulent Wakes Generated by Two and Three Side-by-side Cylinders," *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol. 21, pp. 125~133.
- (2) Spivack, H. M. 1946, "Vortex Frequency and Flow Pattern in the Wake of Two Parallel Cylinders at Varied Spacings Normal to an Airstream," *J. Aero. Sci.*, Vol. 13, 289~297.
- (3) Bearman, P. W. & Wadcock, A. J. 1973, "The Interaction between a Pair of Circular Cylinders Normal to a Stream," *J. Fluid Mech.*, Vol. 61, pp. 499~511.
- (4) Zdravkovich, M. M. 1977, "Review of Flow Interference between Two Circular Cylinders in Various Arrangements," *J. Fluids Eng.*, Vol. 99, pp. 618~633.
- (5) Sumner, D., Wong, S. S. T., Price, S. J. & Paidoussis, M. P. 1999, "Fluid Behavior of Side-by-side Circular Cylinders in Steady Cross-flow," *J. Fluids Struct.*, Vol. 13, pp. 309~338.
- (6) Williamson, C. H. K. 1985, "Evolution of a Single Wake behind a Pair of Bluff Bodies," *J. Fluid Mech.*, Vol. 159, pp. 1~18.
- (7) Kim, H. J. & Durbin, P. A. 1988, "Investigation of the Flow between a Pair of Circular Cylinders in the Flopping Regime," *J. Fluid Mech.*, Vol. 196, pp. 431~448.
- (8) Chang, K. & Song, C. 1990, "Interactive Vortex Shedding from a Pair of Circular Cylinders in a Transverse Arrangement," *Int. J. Numer. Methods Fluids*, Vol. 11, pp. 317~329.
- (9) Farrant, T., Tan, M. & Price, W. G. 2001, "A Cell Boundary Element Method Applied to Laminar Vortex Shedding from Circular Cylinders," *Comput. Fluids*, Vol. 30, pp. 211~236.
- (10) Meneghini, J. R., Saltara, F., Siqueira, C. L. R. & Ferrari Jr, J. A. 2001, "Numerical Simulation of Flow Interference between Two Circular Cylinders in Tandem and Side-by-side Arrangements," *J. Fluids Struct.*, Vol. 15, pp. 327~350.
- (11) Kim, J., Kim, D. & Choi, H. 2001, "An Immersed-Boundary Finite-Volume Method for Simulations of Flow in Complex Geometries," *J. Comput. Phys.*, Vol. 171, pp. 132~150.