

<학술논문>

두 개의 원형 실린더를 지나는 유동의 레이놀즈 수 효과

이경준* · 양경수† · 최춘범*
(2007년 8월 24일 접수, 2007년 11월 13일 심사완료)

Reynolds-number Effect on the Flow Past Two Nearby Circular Cylinders

Kyongjun Lee, Kyung-Soo Yang and Choon-Bum Choi

Key Words : Circular Cylinder(원형실린더), Immersed Boundary Method(가상경계법), Staggered Position(엇갈린위치), Vortex Shedding(와홀림)

Abstract

As a follow-up of our previous studies on flow-induced forces on two identical nearby circular cylinders immersed in the cross flow at $Re=100$ and flow patterns past them,^(1,2) we present Reynolds-number effects on the forces and patterns by further computing flows with $Re=40, 50, 160$. We consider all possible arrangements of the two circular cylinders in terms of the distance between the two cylinders and the angle inclined with respect to the main flow direction. Collecting all the numerical results obtained, we propose contour diagrams for mean force coefficients and their rms of fluctuation as well as for flow patterns and Strouhal number for each Re . These diagrams shed light on a comprehensive picture on how the wake interaction between the two cylinders alters depending on Re .

기호설명

A : 실린더의 유효단면적
 C_d : 항력계수(= $Drag / (\frac{1}{2} \rho U^2 A)$)
 \bar{C}_d : C_d 의 시간 평균값
 $C'_{d,rms}$: C_d 섭동성분의 RMS 값(= $\sqrt{(C_d - \bar{C}_d)^2}$)
 C_l : 양력계수(= $Lift / (\frac{1}{2} \rho U^2 A)$)
 \bar{C}_l : C_l 의 시간 평균값
 $C_{l,max}$: C_l 의 최대값
 $C'_{l,rms}$: C_l 섭동성분의 RMS 값(= $\sqrt{(C_l - \bar{C}_l)^2}$)
 C_p : 압력계수(= $(p - p_\infty) / \frac{1}{2} \rho U^2$)
 D : 실린더 지름

f : 와홀림 진동수
 f_x, f_y : 운동량 부가
 L : 실린더 직경으로 무차원된 두 실린더 중심의 주유동 방향 거리
 p : 순간 압력
 p_∞ : 입구에서의 압력
 q : 질량 원천/흡입
 R : 실린더 중심 거리(= $\sqrt{L^2 + T^2}$)
 Re : 레이놀즈 수(= UD/ν)
 St : Strouhal 수(= fD/U)
 T : 실린더 직경으로 무차원된 두 실린더 중심의 주유동에 수직거리
 T_p : 와홀림 주기
 u : 흐름 방향(streamwise) 속도 벡터
 U : 균일한 입구속도
 ν : 수직 방향(normal) 속도 벡터
 ϕ : 경사각
 ν : 동점성 계수
 θ : 실린더 표면각

† 회원, 책임저자, 인하대학교 기계공학과
 E-mail : ksyang@inha.ac.kr
 TEL : (032)860-7322 FAX : (032)868-1716
 * 인하대학교 대학원 기계공학과

ρ : 유체밀도
 ω : 와류도 ($=0.5(\partial v/\partial x - \partial u/\partial y)$)

1. 서론

여러 개의 인접한 원형 실린더들이 유동장 안에서 받는 힘과 유동 특성은 공학적으로 많은 관심의 대상이 되고 있다. 예를 들면, 해안 연안의 파이프들, 열전달 원형 튜브들, 공장 굴뚝들이나 원형 구조물들에서 많이 관찰된다. 이러한 설비나 건축물의 상대적인 위치에 따라서 유동 패턴이 변하게 되며, 이로 인해 유체력 또한 변하게 된다. 각 실린더의 후류는 인접한 다른 실린더 후류와의 상호 간섭으로 유동 특성이 변하게 된다. 그에 따라 유체력(flow-induced force)도 변하게 되는데, 이렇게 변화된 힘은 소음이나 실린더의 진동에 많은 영향을 미치게 된다. 본 논문에서는 이러한 유동 간섭의 가장 기본적인 모델로서 두 개의 동일한 크기의 실린더가 유동장 안에 인접해 있는 경우를 고려하였다.

본 연구는 레이놀즈 수 $Re=100$ 에서 두 개의 원형 실린더들이 일반적인 위치에 정렬되어 있을 때 두 실린더 주위에서 발생하는 유동 패턴⁽¹⁾과 두 실린더에 작용하는 유체력⁽²⁾에 대한 선행연구의 후속연구로서 Re 를 변수(parameter)로 하여 Re 의 변화에 따라서 두 실린더가 유동장 안에서 받는 힘과 유동 패턴의 변화에 대해 연구를 하였다. 두 개의 원형 실린더가 같은 위치에 정렬되어 있어도, Re 의 변화에 따라서 유동 패턴이 변하게 되며, 그로 인해 유체력 또한 변하게 된다. 이번 연구에서 사용한 Re 는 40, 50, 160 이며, $Re=100$ 과 비교하여 Re 의 변화에 따라서 유동 패턴과 유체력이 어떻게 변화하는지를 가상경계법(Immersed boundary method)⁽³⁾을 이용하여 연구하였다.

2. 수치 해석 기법

2.1 지배 방정식

지배 방정식은 비압축성 2 차원 유동에 대한 연속 방정식, 운동량 방정식으로 구성된다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} - q = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + f_x \tag{2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial vv}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + f_y \tag{3}$$

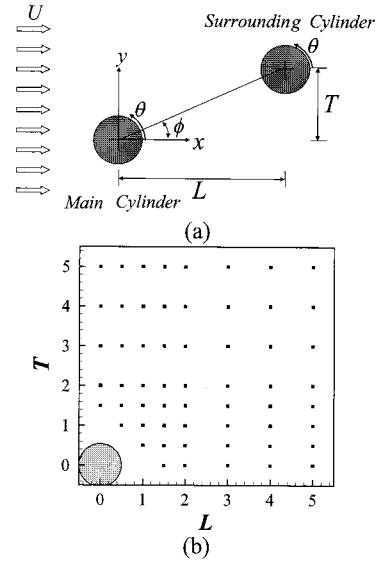


Fig. 1 Physical configuration: (a) staggered position of two circular cylinders, (b) locations of surrounding circular cylinder, indicated by dots

식 (1), (2), (3)은 입구 속도 U , 실린더 지름 D 로 무차원화된 식이며, 가상경계법에 의해 추가된 f_x 와 f_y 는 운동량 부가, q 는 질량 보존을 만족시키기 위한 질량 원천/흡입을 각각 의미한다. u 는 흐름방향(streamwise, x) 속도 성분이며, v 는 수직방향(normal, y)의 속도 성분이다. p 는 순간 압력이다. Re 는 UD/ν 로 정의된다.

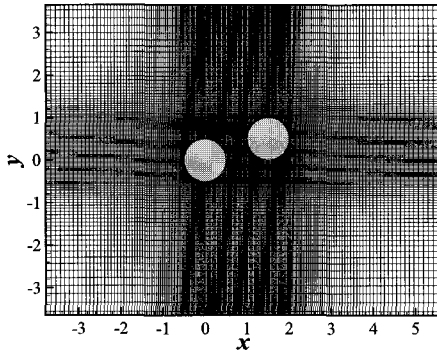
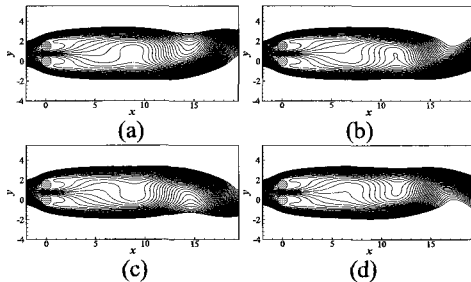
각 지배 방정식은 직교좌표계에서 유한체적법(Finite Volume Method)으로 차분되었다. 공간 차분은 중앙차분법을 사용하였다. 시간 차분은 운동량 방정식의 경우 대류항에 대하여 3차 정확도의 Runge-Kutta 양해법(explicit)으로 적분하였고 점성항에 대하여 Crank-Nicolson 의 음해법(implicit)으로 적분하였다. 연속 방정식과 운동량 방정식을 분리하기 위하여 Fractional Step⁽⁴⁾ 기법이 사용되었다.

2.2 계산영역과 경계조건

주(main) 실린더를 좌표계 원점에 고정시키고, 주위(surrounding) 실린더의 위치를 바꾸어 가면서 계산을 수행하였다 [Fig. 1(a)]. 두 개의 원형 실린더 중심들의 주유동 방향(x 방향)으로 떨어진 거리(L)와 수직 방향(y 방향)으로 떨어진 거리(T)는 실린더 지름(D)으로 무차원하여, 각각 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 이다. 이때 두 개의 원형 실린더가 겹치거나, 접하는 경우는 계산을 수행하지 않았다. 주 실린더에 대한 주위 실린더의 위치는 총 58 가지 경우가 있으며, Fig. 1(b)에 잘 나타나 있다. 두 실린더가 가장 가까울 때는 $L=0.5, T=1.0$

Table 1 Validation of numerical method: flow past single cylinder at $Re=100$

	Re	\bar{C}_d	$C_{l,max} - \bar{C}_l$	St
Present	100	1.34	0.33	0.165
Kang ⁽⁵⁾	100	1.33	0.32	0.165
Park et al. ⁽⁶⁾	100	1.33	0.33	0.165
Williamson ⁽⁷⁾	100	-	-	0.164

**Fig. 2** Computational mesh for the case of $L=1.5, T=0.5$ **Fig. 3** Instantaneous streamlines during one period, $L=0.0, T=1.5, Re=50$: Near Steady(NS) flow; (a) $t=1/4 T_p$, (b) $t=2/4 T_p$, (c) $t=3/4 T_p$, (d) $t=4/4 T_p$

이며, 중심 사이의 거리(R)는 1.12 이고, 경사각(ϕ)은 63.43° 이다.

전체 계산영역은 주 실린더를 기준으로 $-35D \leq x \leq 35D$, $-50D \leq y \leq 50D$ 로 고정시킨 뒤 주위 실린더 중심의 위치를 Fig. 1(b)와 같이 바꾸어 가며 계산하였다. 각 실린더에 접하는 정사각형 영역 안에는 32×32 개의 균일하게 분포된 격자를 사용하였으며, 전체 격자는 x 방향과, y 방향으로 불균일(non-uniform)하게 확장되었다. 실린더 사이의 영역에는 실린더 내부와 같은 격자 간격을 사용하였다. 예를 들어, $L=1.5, T=0.5$ 일 때 사용된 전체 격자점 수는 368×208 이다(Fig. 2 참조). 두 개의 실린더가 가장 멀리 떨어져 있을 때 ($L=5.0, T=5.0$) 사용된 격자점 수는 480×352 이다.

입구와 출구에서는 각각 Dirichlet($u=U, v=0$)

경계조건과 대류 경계조건이 사용되었으며 계산영역 윗면과 아랫면에서는 slip 조건($\partial u/\partial y=0, v=0$)을 사용하였다. 물체 표면에서는 유동장에 대해 no-slip 조건을 사용하였다.

3. 수치 해석 기법의 검증

코드의 검증을 위해서 $Re=100$ 에서 하나의 실린더에 대하여 계산을 수행하였다. 이는 많은 연구자들이 이미 연구를 수행한 바 있는 경우이다. 전체 계산영역과 경계조건은 2.2 절에서 기술된 것과 동일하다. 사용한 격자점 수는 실린더에 접하는 정사각형 영역 안에 32×32 개, 전체 320×192 개의 격자를 사용하였다. 그 결과는 Table 1 에 나타내었으며, 다른 연구자들과 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.

4. 유동 패턴의 변화

4.1 Near Steady(NS)

NS 패턴은 낮은 $Re(=40, 50)$ 에서 $L=0.0, T=1.5$ 와 $L=0.5, T=1.5$ 에서 발생하는 유동 패턴이다. 두 실린더 사이의 경사각이 크기 때문에 두 실린더 사이를 흐르는 유선은 x 축에 거의 평행하게 들어간다.

Fig. 3 은 $Re=50$ 에서 $L=0.0, T=1.5$ 일 때 한 주기를 4 등분하여 순간적인 유선을 나타내었다. 두 실린더 사이의 거리가 어느 정도 있기 때문에 두 실린더 사이로 어느 정도 유체가 흐를 수 있다. 두 실린더 사이를 흐르는 유체의 일부는 주 실린더 후류와 주위 실린더 후류로 흐른다. 이때 주 실린더 후류의 유선과 주위 실린더 후류의 유선이 시간에 따라 변하지 않고 대칭적이다. 두 실린더 사이를 흐르는 유선은 대략 $x=4$ 위치까지는 모든 유선이 시간에 따라 변하지 않지만, $x=4$ 이상에서는 대칭성이 깨지고, 주 실린더와 주위 실린더 쪽으로 교대로 치우쳐진다.

Fig. 4 는 $Re=50$ 에서 $L=0.0, T=1.5$ 일 때 한 주기를 4 등분하여 순간적인 와류도를 나타내었다. 두 실린더가 각각 한 쌍의 와류를 생성하지만, 독립된 하나의 실린더처럼 실린더 후류에서 와류림이 발생하지 않고 상당히 뒤에서 와류림이 발생한다. 이는 Fig. 3 의 유선을 통해 알 수 있다. 두 실린더 후류에서 유선들이 거의 변하지 않고 대략 $x=4$ 이후 지점에서 두 실린더 사이의 유선이 비대칭적인 것을 통해서 알 수 있다.

$Re=100$ 과 $Re=160$ 에서는 $L=0.0, T=1.5$ 와 $L=0.5, T=1.5$ 에서 불규칙한 FF 패턴이 발생하였지만, 낮은 Re 에서는 유동 불안정성이 약해지며, 규칙적인

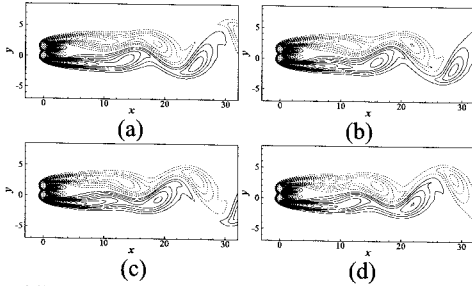


Fig. 4 Instantaneous vorticity contours during one period, $L=0.0$, $T=1.5$, $Re=50$: Near Steady(NS) flow; (a) $t=1/4 T_p$, (b) $t=2/4 T_p$, (c) $t=3/4 T_p$, (d) $t=4/4 T_p$

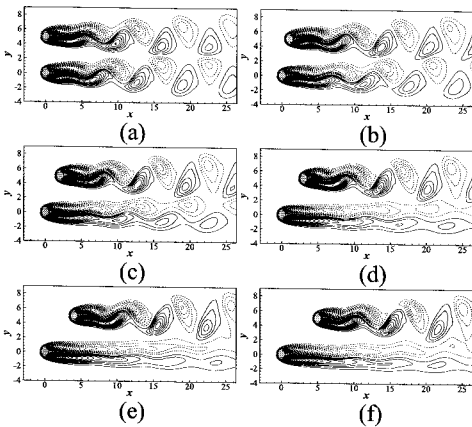


Fig. 5 Instantaneous vorticity contours of two staggered circular cylinders at $T=5.0$, $Re=50$: (a) $L=0.0$, (b) $L=1.0$, (c) $L=2.0$, (d) $L=3.0$, (e) $L=4.0$, (f) $L=5.0$

NS 패턴이 발생한다. $L=0.0$, $T=1.5$ 에 비해 $L=0.5$, $T=1.5$ 에서는 기하학적 비대칭성으로 인해 두 실린더 사이를 흐르는 유선은 주 실린더 쪽으로 치우쳐지지만, $L=0.0$, $T=1.5$ 와 같은 특징을 보인다. 한편 $Re=40$ 에서 하나의 실린더만 존재할 경우에는 유동장이 정상적(steady)이지만 같은 Re 라도 두 개의 실린더가 인접해 있을 때는 비정상(unsteady) 유동장이 발생함을 알 수 있다.

4.2 SVS 패턴의 변화

두 실린더 사이의 경사각이 크고, 떨어진 거리가 멀어지게 되면 두 실린더 사이의 상호 작용이 약해지며, 두 실린더 후류에서 각각 와류림이 발생하는 SVS 패턴이 발생한다. Fig. 5 는 $Re=50$ 에서 T 를 5.0 으로 고정시키고 L 의 변화에 따라 순간적인 와류도를 나타내었다. Fig. 5 에서 알 수 있듯이 $L=0.0$, $T=5.0$ 에서는 두 실린더의 기하학적 대칭으로 인하여 두 실린더의 와류가 $y=2.5$ 를 기준으로 대칭적으로 와류림한다. 그러나 L 이 증가하면 할수록 이러한 대칭성은 깨어지며, 주위 실린더의 경우 독립적으로 와류림하지만, 주

실린더의 경우 L 이 증가할수록 와류림이 억제되며 상대적으로 긴 전단층을 가지는 것을 확인할 수 있다. 상대적으로 L 이 증가하면 할수록 두 실린더 사이를 흐르는 유체는 $-y$ 방향으로 치우쳐지며 주 실린더 쪽으로 흐른다. 높은 $Re(=100, 160)$ 에서는 모멘텀이 크기 때문에 상대적으로 $-y$ 방향으로 덜 치우치게 되고 두 실린더 모두 각각 와류림을 발생시킨다.

4.3 Steady(S)

S 패턴은 $Re=100, 160$ 에서는 발생하지 않으며, 낮은 Re 에서 발생한다. 하나의 독립된 원형 실린더의 경우 와류림이 발생하는 최소 Re 는 46 이다. 따라서 하나의 실린더의 경우 $Re=40$ 에서는 와류림이 발생하지 않고 $Re=50$ 에서는 와류림이 발생한다. $Re=50$ 에서는 대략 L 값이 3.0 이상, T 값이 1.0 이하에서 두 실린더 모두 와류림을 발생시키지 않는다(Fig. 6(b)). 또한 두 실린더가 주 유동 방향으로 정렬된 경우와, $L=0.0$, $T=2.0$ 에서 와류림이 발생하지 않는 S 패턴이 발생한다.(Fig. 6(b)) $Re=50$ 에서는 하나의 실린더의 경우 와류림을 하지만 두 실린더의 위치에 따라서 주 실린더와 주위 실린더 모두 와류림을 발생시키지 않는 영역이 존재하는 것을 알 수 있다. $Re=40$ 에서는 대부분의 위치에서 S 패턴이 발생한다(Fig. 6(a)). 그러나 $Re=40$ 에서 S 패턴이 발생하지 않는 구역은 세 군데 존재한다. 첫 번째 구역은 두 실린더의 위치가 아주 가깝게 위치한 경우로서(BB, BBB) 이는 두 실린더 사이의 거리가 가까워 마치 하나의 실린더처럼 인식되며, 상대적으로 Re 증가효과가 발생한 것이다. 또한 $T=2.0$, $L=1.5$ 와 $T=2.0$, $L=2.0$ 에서 와류림이 발생하는 것을 알 수 있다. 세 번째 구역으로 $L=0$, $T=1.5$ 와 $L=0.5$, $T=1.5$ 에서는 NS 가 발생한다.

4.4 Re 변화에 따른 패턴 변화

Re 에 따른 유동 패턴을 Fig. 6 에 종합적으로 나타내었다. 기 발표된⁽¹⁾ $Re=100$ [Fig. 6(c)]을 기준으로 하여 $Re=160$ 인 경우에는 새로 추가된 패턴은 없고 패턴의 경계만 변한다. 전체적으로 불규칙한 패턴인 FF 패턴의 영역이 증가하며, MP 패턴 영역의 크기가 더 커진다. $Re=100$ 에서, $L=4.0$, $T=0.5$ 일 때는 SLR 패턴이었던 것이 Re 가 증가함으로 인하여 VI 패턴으로 변하게 된다. Fig. 7 은 $L=4.0$, $T=0.5$ 일 때 $Re=100, 160$ 인 경우의 순간적인 유선을 비교하였다. Fig. 7 에서 알 수 있듯이 $Re=100$ 일 경우 주 실린더 후류의 와류림이 억제되었던 것이 Re 가 증가하게 되면 주 실린더가 와류림을 발생시키는 것을 알 수 있다. 이는 주 실린더가 와류림을 발생시키기 위해서 필요한 거리는 Re 가 증가하게 되면 줄어든다는 것을 의미한다. 낮은 Re 에서는

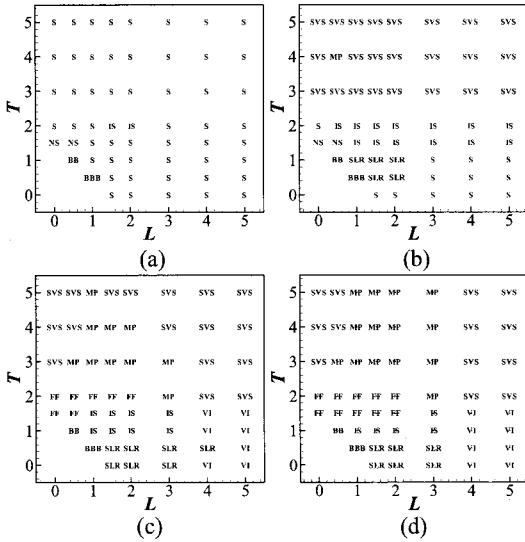


Fig. 6 Flow patterns past two staggered circular cylinders: (a) $Re=40$, (b) $Re=50$, (c) $Re=100$, (d) $Re=160$; BB(Base Bleed flow), BBB(Biased Base Bleed flow), SLR(Shear Layer Reattachment flow), IS(Induced Separation flow), VI(Vortex Impingement flow), FF(Flip Flopping flow), MP(Modulated Periodic flow), SVS(Synchronized Vortex Shedding flow), NS(Near Steady flow), S(Steady flow); except Ns and S patterns, detailed description of these patterns can be found in reference (1)

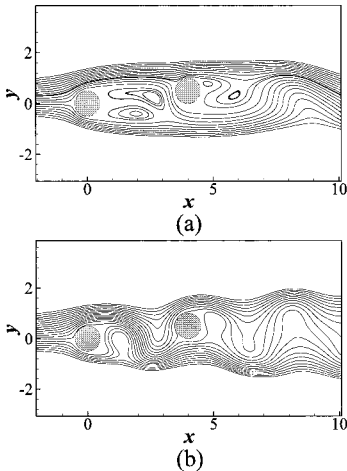


Fig. 7 Instantaneous streamlines, $L=4.0$, $T=0.5$: (a) $Re=100$, (b) $Re=160$

NS 패턴과 S 패턴이 추가되며, $Re=40$ [Fig. 6(a)], 50 [Fig. 6(b)]에서 두 실린더가 주 유동 방향으로 정렬된 경우 두 실린더 모두 와흐림을 발생시키지 않는 S 패턴이 발생하며, 높은 Re 에서 관찰할 수 있었던 불규칙한 MP 패턴이 발생하지 않는다.

5. 힘의 변화

Fig. 8 은 $Re=40$ 에서 두 개의 실린더가 임의의 위치에 배열되어 있을 때, 두 실린더에 해당하는 \bar{C}_d , \bar{C}_l , $C'_{d,rms}$, $C'_{l,rms}$ 값들을 등분포선(contour)으로 나타내었다. \bar{C}_d 값은 하나의 실린더에서의 \bar{C}_d 값(1.52)으로 표준화(normalization)하였다.

Fig. 8(a)는 주 실린더의 \bar{C}_d 값의 등분포선으로 $L=0.5$, $T=1.5$ 일 때 최대의 값(1.40)을 가진다. 높은 Re 인 경우 두 실린더가 가장 가까이 위치한 $L=0.5$, $T=1.0$ 에서 최대의 \bar{C}_d 값을 가지는데 비해 낮은 Re 에서는 이보다 더 높은 T 구역인 $L=0.5$, $T=1.5$ 에서 발생한다. 이는 유동 패턴과 연관이 있다. $L=0.5$, $T=1.5$ 에서의 유동 패턴은 NS 패턴으로 두 실린더 사이를 흐르는 유동은 주 실린더 쪽으로 치우쳐지며 이는 곧 주 실린더 후류의 압력이 낮아지는 것을 의미한다. 대략 경사각 40° 를 기준으로 이보다 크게 되면 하나의 실린더보다 항력이 커지며, 40° 보다 작아지게 되면, 하나의 실린더보다 항력이 작아진다. Fig. 8(b)는 주 실린더의 \bar{C}_l 의 등분포선을 나타낸 것이다. $Re=100$ 과 유사하게 전 영역에서 음의 값을 가지며, $L=0.5$, $T=1.0$ 에서 최대의 음의 값(-1.73)을 가진다.

Fig. 8(c)와 (d)는 각각 주 실린더의 $C'_{d,rms}$, $C'_{l,rms}$ 의 등분포선을 나타낸 것이다. 하나의 실린더에서 $Re=40$ 일 때는 와흐림이 발생하지 않기 때문에 하나의 실린더에서의 값으로 표준화하지 않았다. 유동 패턴에서 알 수 있듯이 대부분의 영역에서 와흐림이 발생하지 않는 S 패턴에서는 0 의 값을 가진다. $L=0.5$, $T=1.0$ 에서 최대의 값($C'_{d,rms}=0.093$, $C'_{l,rms}=0.166$) 을 가지며, $L=1.5$, $T=2.0$ 과 $L=2.0$, $T=2.0$ 에서 값은 0 에 가까워 표시되지 않았다. 전체적으로 볼 때 높은 Re 에 비해(2) 절대값이 작은 것을 알 수 있었다.

Fig. 8(e)는 주위 실린더의 \bar{C}_d 값의 등분포선으로 $L=0.5$, $T=1.5$ 에서 최대의 값(1.17)을 가진다. 대략 L 이 0.5 이상 T 가 2.5 이하에서는 하나의 실린더보다 항력이 작아지며, 항력 감소 효과는 이 구간에서는 L 의 변화보다 T 의 변화에 더 민감한 것을 알 수 있다. 두 실린더가 주유동 방향으로 정렬되어 있는 경우 $Re=100$ 에서는 L 이 3.0 이하에서 음의 값을 가지는데 반해 $Re=40$ 에서는 다른 영역에 비해 최소값을 가지지만 양의 값을 가지는 것을 알 수 있다.

Fig. 8(f)는 주위 실린더의 \bar{C}_l 의 등분포선을 나타낸 것이다. 대략 경사각 45° 를 기준으로 하여 이보다 낮은 위치에서는 음의 값을 높은 각에서는 양의 값을 가지는 것을 알 수 있다. 양의 최대값(0.90)은

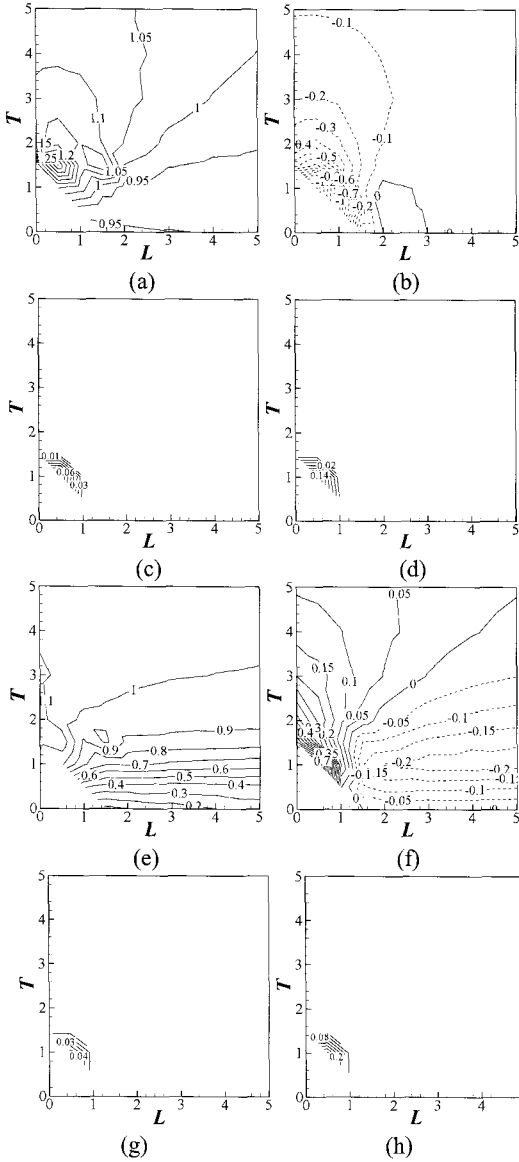


Fig. 8 Contours of two staggered circular cylinders at $Re=40$: (a) \bar{C}_d of main cylinder normalized by single cylinder value; (b) \bar{C}_l of main cylinder; (c) $C'_{d,rms}$ of main cylinder; (d) $C'_{l,rms}$ of main cylinder; (e) \bar{C}_d of surrounding cylinder normalized by single cylinder value; (f) \bar{C}_l of surrounding cylinder; (g) $C'_{d,rms}$ of surrounding cylinder; (h) $C'_{l,rms}$ of surrounding cylinder

두 실린더 사이의 거리가 가장 가까운 $L=0.5, T=1.0$ 에서 발생하며, 음의 최대영역은 $T=1.0, L$ 이 3.0 이 상에서 발생한다. Fig. 8(g)와 (h)는 주위 실린더의 $C'_{d,rms}$ 와 $C'_{l,rms}$ 값의 등분포선을 나타낸 것이다.

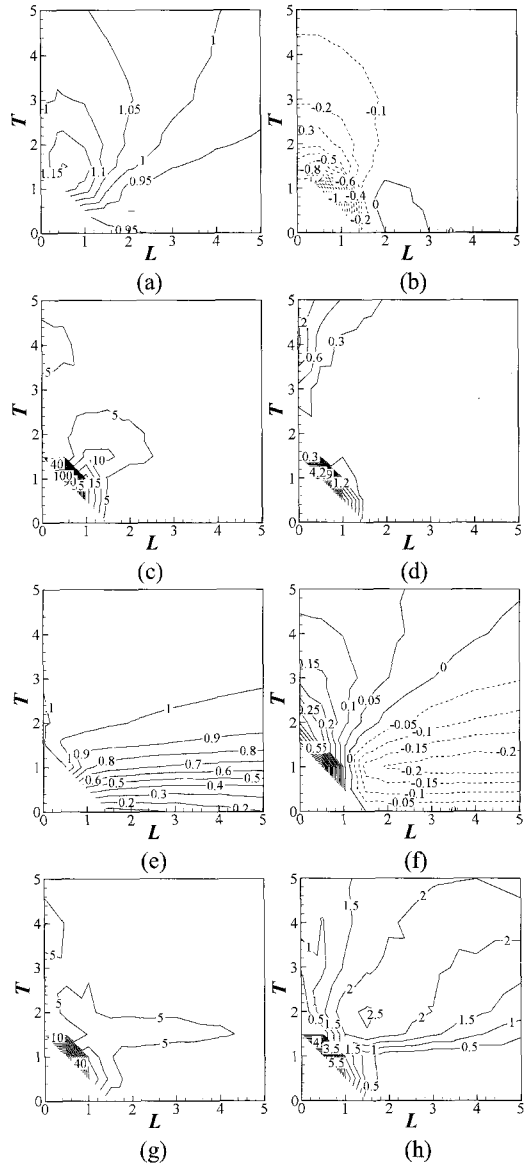


Fig. 9 Contours of two staggered circular cylinders at $Re=50$, normalized by single cylinder values except \bar{C}_l : (a) \bar{C}_d , (b) \bar{C}_l , (c) $C'_{d,rms}$, (d) $C'_{l,rms}$ of main cylinder; (e) \bar{C}_d , (f) \bar{C}_l , (g) $C'_{d,rms}$, (h) $C'_{l,rms}$ of surrounding cylinder

주 실린더와 유사하게 $L=0.5, T=1.0$ 에서 최대의 값 ($C'_{d,rms}=0.055, C'_{l,rms}=0.285$)을 가지며, $L=1.5, T=2.0$ 과 $L=2.0, T=2.0$ 에서 값은 0 에 가까워 표시되지 않았다.

Fig. 9 는 $Re=50$ 에서 두 개의 실린더가 임의의 위치에 배열되어 있을 때, 두 실린더에 해당되는 $\bar{C}_d, \bar{C}_l, C'_{d,rms}, C'_{l,rms}$ 값들을 등분포선으로 나타내었다.

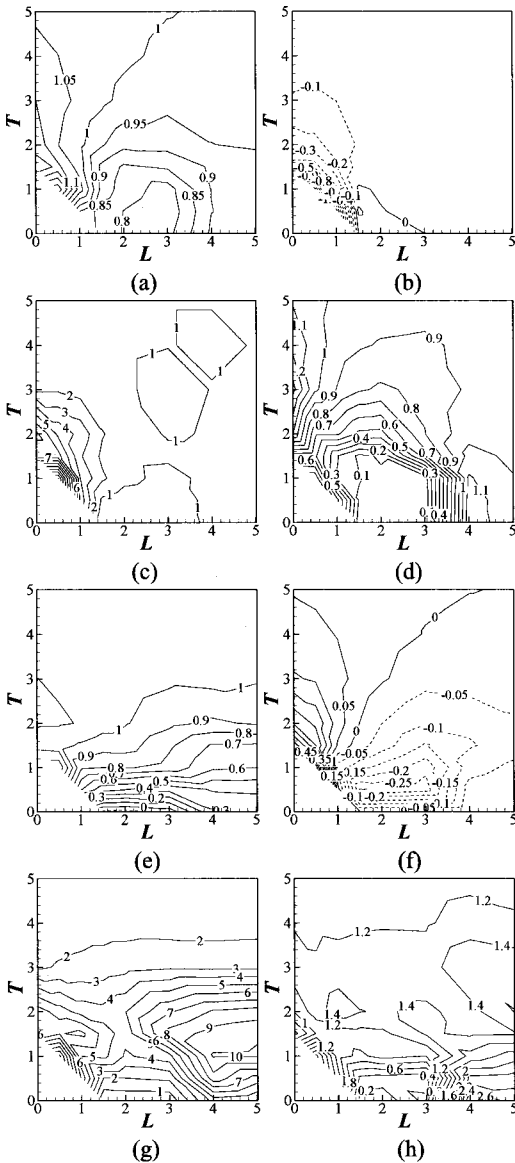


Fig. 10 Contours of two staggered circular cylinders at $Re=160$, normalized by single cylinder values except \bar{C}_l : (a) \bar{C}_d , (b) \bar{C}_l , (c) $C'_{d,rms}$, (d) $C'_{l,rms}$ of main cylinder; (e) \bar{C}_d , (f) \bar{C}_l , (g) $C'_{d,rms}$, (h) $C'_{l,rms}$ of surrounding cylinder.

\bar{C}_l 을 제외한 나머지 값들은 $Re=50$ 에서 하나의 실린더에 대한 값으로 표준화되었다. 하나의 실린더에서의 \bar{C}_d , \bar{C}_l , $C'_{d,rms}$, $C'_{l,rms}$ 값들은 각각 1.43, 0.0, 0.00011, 0.039이다.

Fig. 9(a)와 (b)는 주 실린더의 \bar{C}_d 와 \bar{C}_l 값의 등분포선으로서 전체적으로 $Re=40$ 에서의 등분포선과 유사하다. \bar{C}_d 값의 경우 $L=0.5, T=1.5$ 에서 최대값

(1.20)을 가지며 \bar{C}_l 값의 경우 $L=0.5, T=1.0$ 에서 최대의 음의 값(-1.75)을 가진다. Fig. 9(c)와 (d)는 주 실린더의 $C'_{d,rms}$, $C'_{l,rms}$ 값들의 등분포선을 나타내었다. $C'_{d,rms}$ 값의 분포는 $L=0.5, T=1.0$ 에서 최대의 값(114)을 가지며 두 실린더 사이의 거리가 멀어 질수록 작아진다. 주 실린더보다는 주위 실린더의 값이 전체적으로 크며(Fig. 9(g)), $C'_{l,rms}$ 값보다는 $C'_{d,rms}$ 값이 더 큰 값을 가지는 것을 알 수 있다.

Fig. 9(e)와 (f)는 주위 실린더의 \bar{C}_d 와 \bar{C}_l 값의 등분포선으로 $Re=40$ 과 거의 유사하다. \bar{C}_d 의 최대 값(1.12)은 $L=0.0, T=2.0$ 에서 발생하며, \bar{C}_l 값의 최대값(0.57)은 두 실린더가 가장 가까운 $L=0.0, T=1.5$ 에서 발생한다.

Fig. 9(g)와 (h)는 주위 실린더의 $C'_{d,rms}$, $C'_{l,rms}$ 값의 등분포선을 나타낸 것으로 두 경우 모두 $L=0.5, T=1.0$ 에서 최대의 값($C'_{d,rms}=74.5, C'_{l,rms}=5.58$)을 가지며 $C'_{d,rms}$ 값이 $C'_{l,rms}$ 보다 크게 계산되었다.

Fig. 10은 $Re=160$ 에서 두 개의 실린더가 임의의 위치에 배열되어 있을 때, 두 실린더의 \bar{C}_d , \bar{C}_l , $C'_{d,rms}$, $C'_{l,rms}$ 값들을 등분포선으로 나타낸 것이며, 전체적으로 $Re=100$ 과 유사하다. \bar{C}_l 을 제외한 나머지 값들은 $Re=160$ 에서 하나의 실린더에 대한 값으로 표준화되었다. 하나의 실린더에서의 \bar{C}_d , \bar{C}_l , $C'_{d,rms}$, $C'_{l,rms}$ 값들은 각각 1.32, 0.0, 0.0021, 0.39이다.

Fig. 10(a)와 (b)는 주 실린더의 \bar{C}_d 와 \bar{C}_l 값의 등분포선으로 $L=0.5, T=1.0$ 에서 두 값이 크기면에서 모두 최대 값($\bar{C}_d=1.29, \bar{C}_l=-1.55$)을 가진다.

Fig. 10(c)와 (d)는 주 실린더의 $C'_{d,rms}$ 와 $C'_{l,rms}$ 값의 등분포선을 나타낸 것이다. $C'_{d,rms}$ 와 $C'_{l,rms}$ 값의 최소 구역은 SLR 패턴에서 발생하며 $Re=100$ 일 때는 $L=4.0, T=0.5$ 일 때 SLR 패턴이었던 것이($Re=160$ 에서는 VI 패턴으로 바뀐다. 이로 인해 $C'_{l,rms}$ 값의 최소가 되는 구역이 $Re=100$ 에 비해 줄어들는다.

Fig. 10(e), (f), (g), (h)는 주위 실린더의 경우로 $Re=100$ 일 때의 값과 유사한 분포를 가진다. 이때 $C'_{d,rms}$ 값은 $Re=100$ 일 때 비해서(²⁾ 더 작은 값을 가짐을 알 수 있다.

6. Strouhal 수의 변화

Table 2는 $Re=40$ 일 때의 주 실린더와 주위 실린더의 Strouhal 수(St)를 나타내었다. 대부분의 영역에서 두 실린더가 모두 와류를 발생시키지 않으며, 발생하는 위치와 그때의 St 를 나타내었다. 두 실린더의 St 가 같으며, Re 가 낮기 때문에

Table 2 Strouhal number at different positions, $Re=40$

position	St	position	St
$L=0.0, T=1.5$	0.056	$L=1.0, T=0.5$	0.089
$L=0.5, T=1.0$	0.082	$L=1.0, T=1.0$	0.075
$L=0.5, T=1.5$	0.053	$L=1.5, T=2.0$	0.087
		$L=2.0, T=2.0$	0.090

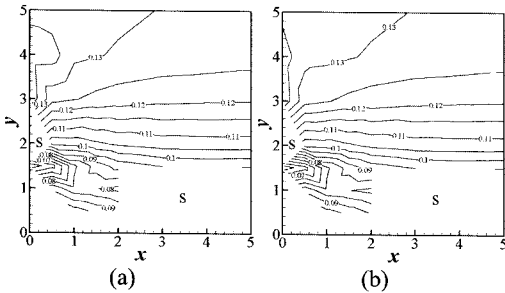


Fig. 11 St contours of two staggered circular cylinders at $Re=50$: (a) main cylinder, (b) surrounding cylinder

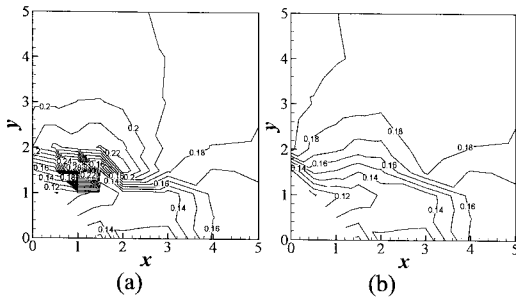


Fig. 12 St contours of two staggered circular cylinders at $Re=160$: (a) main cylinder, (b) surrounding cylinder

다른 Re 일 때의 St 보다 작다. $L=2.0, T=2.0$ 에서 최대의 St 를 가진다.

Fig. 11 은 $Re=50$ 일 때의 St 의 등분포선을 나타내었다. $L=0.5, T=4.0$ (MP 패턴)을 제외한 나머지 경우에는 주 실린더와 주위 실린더의 St 는 같다. $Re=50$ 에서의 하나의 실린더의 St 는 0.123 이다. 대략 $T=3.0$ 을 기준으로 이보다 높은 경우는 하나의 실린더에서의 St 보다 커지며, 이보다 작은 경우는 하나의 실린더에서의 St 보다 작아지게 된다.

$Re=50$ 일 때는 두 실린더 모두 와흐림을 발생시키지 않는 구역이 존재하게 된다[Fig. 11(a), (b) S 패턴]. St 는 T 값이 낮아지게 될수록 작아지며 T 값이 커질수록 커지는 경향을 가지고 있다. L 값의 변화보다는 T 값의 변화에 더 민감하게 변하는 것 또한 관찰할 수 있다.

Fig. 12 는 $Re=160$ 일 때 St 의 등분포선을 나타내었다. 와흐림 패턴이 FF 와 MP 에서는 주 실린더의 St 가 주위 실린더의 St 보다 크며, 그 외의 패

턴에서는 주 실린더와 주위 실린더의 St 는 같아진다. 주 실린더의 경우 $L=1.0, T=1.5$ 에서 최대의 값(0.296)을 가지며, 두 실린더가 가장 가까운 위치인 $L=0.5, T=1.0$ 에서 최소의 값(0.109)을 가진다. 두 실린더가 주유동 방향으로 정렬되어 있는 경우에 비해 주유동 방향과 수직으로 정렬되어 있는 경우가 더 큰 St 를 가지는 것을 확인할 수 있었다. 주위 실린더의 경우 $L=0.0, T=3.0$ 일 때 최대의 값(0.197)을 가지며, 주유동 방향과 수직으로 정렬되어 있는 경우가 상대적으로 큰 값을, 주유동 방향으로 정렬되어 있는 경우가 상대적으로 작은 값을 가짐을 알 수 있었다. 두 실린더의 거리가 더 멀어지게 되면 하나의 실린더에서의 St (0.186)로 다가가는 것을 알 수 있었다.

7. 결론

본 논문에서는 기 발표된 $Re=100$ 에서의 유동 패턴⁽¹⁾과 유체력⁽²⁾을 기준으로 하여, Re 가 변함에 따라 유동 패턴과 유체력이 어떻게 변하는지에 중점을 두었다. 낮은 Re 에서는 $Re=100$ 에서 발생하지 않았던 NS 패턴이 발생하였으며, 두 실린더 모두 와흐림을 발생시키지 않는 구역이 존재하는 것을 알 수 있었다. $Re=40$ 일 때 하나의 실린더에서는 와흐림을 하지 않았지만, 두 실린더의 위치가 가까울 때는 두 실린더 모두 와흐림을 발생시킨다. 또한 $L=1.5, T=2.0$ 과 $L=2.0, T=2.0$ 에서 두 실린더 모두 와흐림을 발생시킨다.

$Re=50$ 에서는 하나의 실린더의 경우 와흐림이 발생하지만, 두 실린더의 경사각이 작은 경우에 대하여 두 실린더가 모두 와흐림을 발생시키지 않는 구역이 존재하였으며, 두 실린더가 거리가 멀어질수록 유동 간섭이 줄어들어 SVS 패턴이 되지만 L 값이 증가할수록 주 실린더 후류의 와흐림이 억제되는 현상이 발생하였다.

$Re=160$ 에서는 $Re=100$ 에서 발생하는 유동 패턴이 그대로 발생하지만, Re 의 증가로 인한 유동 불안정성이 증가하여, 불규칙한 FF, MP 패턴이 발생하는 영역이 증가하였다.

두 실린더의 평균된 유체력 값은 하나의 실린더에서의 평균된 유체력으로 표준화하면 Re 가 변하여도 유사한 형태를 가지는 것을 알 수 있었다. 즉 일반적인 위치에 있을 때 두 실린더에 작용하는 유체력의 크기는 Re 의 영향보다는 두 실린더의 떨어진 위치에 영향을 많이 받는다는 것을 알 수 있었다.

주 실린더와 주위 실린더의 St 는 FF 와 MP 패턴을 제외하고는 두 실린더 모두 같은 St 를 가지는 것을 알 수 있었으며, 낮은 Re 에서는 FF, MP 패턴이 발생하지 않기 때문에($Re=50$ 에서는 $L=0.5, T=4.0$ 에서 MP 가 발생하므로 이 경우는 예외) 두 실린더의 St 가 일치하였다. 두 실린더의 와흐림

주기는 경사각이 작을 때 작은 값을 가지며, 경사각이 커지면 큰 값을 가진다.

후 기

본 연구는 수중운동체특화연구센터의 지원에 의하여 수행되었음.

참고문헌

- (1) Lee, K. and Yang, K., S., 2007, "Flow Pattern in the Presence of Two Nearby Circular Cylinders," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 31, No. 8, pp. 724~732.
- (2) Lee, K., Yang, K., S. and Yoon, D., H., 2007, "Forces Induced by Flows Past Two Nearby Circular Cylinders," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 31, No. 9, pp. 754~763.
- (3) Kim, J., Kim, D. and Choi, H., 2001, "An Immersed-Boundary Finite-Volume Method for Simulations of Flow in Complex Geometries," *J. Comp. Phys.*, Vol. 171, pp. 132~150.
- (4) Kim, J. and Moin, P., 1985, "Application of a Fractional-step Method to Incompressible Navier-Stokes Equations," *J. Comp. Phys.*, Vol. 59, pp. 308~323.
- (5) Kang, S. M., 2003, "Characteristics of Flow Over Two Circular Cylinders in a Side-by-side Arrangement at Low Reynolds Numbers," *Phys. Fluids*, Vol. 15, pp. 2486~2498.
- (6) Park, J., Kwon, K. and Choi, H., 1998, "Numerical Simulations of Flow Past a Circular Cylinder at Reynolds Numbers Up to 160," *KSME Int. J.*, Vol. 12, pp. 1200~1205.
- (7) Williamson and C. H. K., 1989, "Oblique and Parallel Modes of Vortex Shedding in the Wake of a Circular Cylinder at Low Reynolds Numbers," *J. Fluid Mech.*, Vol. 206, pp. 579~627.