

< 논문 >

## 두 개의 원형 실린더 주위의 유동 패턴

이 경 준\* · 양 경 수 †

(2007년 6월 11일 접수, 2007년 7월 18일 심사완료)

### Flow Pattern in the Presence of Two Nearby Circular Cylinders

Kyongjun Lee, Kyung-Soo Yang

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

#### Abstract

Flow patterns in the presence of two identical nearby circular cylinders at  $Re=100$  were numerically studied. We considered all possible arrangements of the two circular cylinders in terms of the distance between the two cylinders and the inclination angle with respect to the direction of the main flow. Eight distinct flow patterns were identified based on vorticity contours and streamlines, which are Base-Bleed, Biased-Base-Bleed, Shear-Layer-Reattachment, Induced-Separation, Vortex-Impingement, Flip-Flopping, Modulated Periodic, and Synchronized-Vortex-Shedding. Collecting all the numerical results, we propose a general flow pattern diagram for flows past two nearby cylinders. The perfect geometrical symmetry implied in the flow configuration allows one to use this diagram to distinguish flow patterns in the presence of two identical circular cylinders arbitrarily positioned in physical space with respect to the main flow direction.

#### 기호설명

$A$  : 실린더의 유효단면적

$C_D$  : 항력계수(=  $Drag / (\frac{1}{2} \rho U^2 A)$ )

$C_L$  : 양력계수(=  $Lift / (\frac{1}{2} \rho U^2 A)$ )

$\bar{C}_L$  :  $C_L$ 의 시간 평균값

$D$  : 실린더 지름

$f$  : 와플림 진동수

$f_x, f_y$  : 운동량 부가

$L$  : 두 실린더 중심의 주유동 방향 거리

$p$  : 순간 압력

$p_\infty$  : 입구에서의 압력

$q$  : 질량 원천/흡입

$R$  : 실린더 중심 거리(=  $\sqrt{L^2 + T^2}$ )

$Re$  : 레이놀즈 수(=  $UD/\nu$ )

$St$  : Strouhal 수(=  $fD/U$ )

$T$  : 두 실린더 중심의 주유동에 수직거리

$T_p$  : 와플림 주기

$U$  : 균일한 입구속도

$u$  : 흐름방향(streamwise) 속도 벡터

$v$  : 수직방향(normal) 속도 벡터

$\phi$  : 경사각 (주유동 방향에 대한 두

실린더 중심을 이은 선의 각도)

$\nu$  : 동점성 계수

$\rho$  : 유체밀도

$\omega$  : 와류도 (=  $0.5(\partial v / \partial x - \partial u / \partial y)$ )

† 회원, 인하대학교 기계공학부

E-mail : ksyang@inha.ac.kr

TEL : (032)860-7322 FAX : (032)868-1716

\* 인하대학교 대학원 기계공학과

1. 서론

여러 개의 인접한 원형 실린더 주위의 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 변화게 되며, 이로 인해 와홀림 진동수도 변화게 된다. 이렇게 변화된 와홀림 진동수는 유동 소음에 많은 영향을 미치게 된다. 각 실린더의 후류는 인접한 다른 실린더 후류와의 상호 간섭으로 인하여 유동 특성이 변화게 되는데, 본 논문에서는 이러한 유동 간섭의 가장 기본적인 모델로서 두 개의 동일한 크기의 실린더가 유동장 안에 인접해 있는 경우를 고려하였다.

두 개의 실린더가 주유동 방향과 수직으로 위치에 있을 때, 떨어진 거리에 따라 유동 패턴이 달라지게 된다. Kang<sup>(1)</sup>은  $Re=100$  에서 떨어진 거리에 따라 유동 패턴을 6 가지로 분류 하였다. 거리 (gap)가  $5D$  이상일 때는 마치 독립적인 실린더처럼 유동 간섭이 사라진다.<sup>(1)</sup> Williamson<sup>(2)</sup>은 유동 가시화 실험을 통하여 와홀림 구조를 분류하였다. 두 실린더의 떨어진 거리가  $1D$  이상에서는 두 실린더의 와류는 같은 위상을 가지거나 또는 반대 위상을 가지면서 동시에 두 실린더가 각각 와홀림 하는데 반해 거리가  $1D$  보다 가까울 때는 두 실린더는 비대칭적이며 불규칙한 유동 패턴을 가진다.<sup>(2)</sup>

두 개의 실린더가 주유동 방향으로 정렬되어 있을 때 Mizushima and Suehiro,<sup>(3)</sup> Carmo and Meneghini,<sup>(4)</sup> Mittal and Kumar<sup>(5)</sup>에 의하여 많은 연구가 진행 되었다. 두 실린더의 떨어진 거리에 따라서 상류 쪽 실린더가 와홀림 구조를 가지지 않는 임계거리가 존재하게 되며, 임계거리는  $Re$  수에 따라서 조금씩 변한다.

두 실린더가 임의의 위치에 배열 되어 있을 때 유동 패턴은 난류의 경우 많은 연구가 진행 되었다. Sumner 등<sup>(6)</sup>은 난류 영역 ( $850 \leq Re \leq 1900$ ) 에서 두 실린더가 임의의 위치에 배열 되어 있을 때, 중심거리( $R$ )와 경사각( $\phi$ )에 따라서 총 9 가지로 분류하고 유동 패턴을 연구 하였다. Akbari and Price<sup>(7)</sup>는  $Re=800$  에서 5 가지로 유동 패턴을 분류 하였다. Gu and Sun,<sup>(8)</sup> Keser and Unal,<sup>(9)</sup> Ng and Ko<sup>(10)</sup> 들에 의해서 난류영역에서의 유동 패턴에 대하여 많은 연구가 진행 되었다.

이러한 선행 연구에도 불구하고 층류 영역에서

임의의 배열 구조에 놓인 두 실린더를 지나는 유동의 유동 패턴에 관한 연구는 거의 수행되지 않았다. 본 연구에서는  $Re=100$  일 때 주유동에 수직으로 가능한 모든 위치에 놓인 두 개의 실린더 주위의 유동 패턴에 관해서 가상 경계법 (Immersed boundary method)<sup>(11)</sup>을 이용하여 수치적으로 연구를 수행 하였다.

2. 수치 해석 기법

2.1 지배 방정식

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

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

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

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

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

각 지배 방정식은 직교좌표계에서 유한체적법(Finite Volume Method)으로 차분되었다. 공간 차분은 중앙차분법을 사용하였다. 시간 차분은 운동량 방정식의 경우 대류항에 대하여 3 차 정확도의 Runge-Kutta 양해법(explicit)으로 적분하였고 점성항에 대하여 Crank-Nicolson의 음해법(implicit)으로 적분이 수행되었다. 연속 방정식과 운동량 방정식을 분리하기 위하여 Fractional Step<sup>(12)</sup> 기법이 사용되었다.

2.2 계산 영역과 경계 조건

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 수행

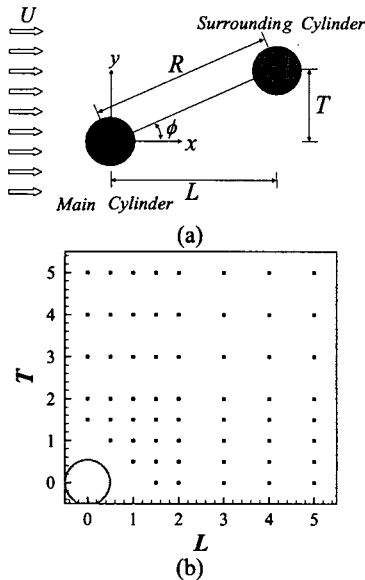


Fig. 1 Physical configuration: (a) staggered position of two circular cylinders, (b) locations of surrounding circular cylinder, indicated by dots

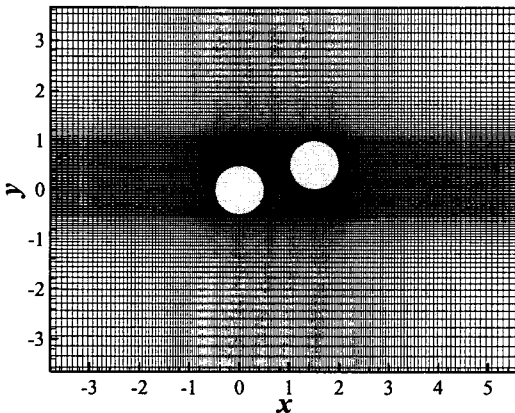


Fig. 2 Computational mesh for the case of  $L=1.5$ ,  $T=0.5$

하지 않았다. 주 실린더에 대한 주위 실린더의 위치는 총 58 가지 경우가 있으며, Fig. 1(b)에 잘 나타나 있다.

두 실린더가 가장 가까울 때는  $L=0.5$ ,  $T=1.0$  이며, 중심 사이의 거리( $R=\sqrt{L^2+T^2}$ )는 1.12 이며, 경사각은  $63.43^\circ$  이다.

전체 계산 영역은 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 바꾸어가며 계산하였다. 각 실린더에 접하는 정사각형 영역 안에는  $32 \times 32$  개의 균일하게 분포된 격자를

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 <sup>(1)</sup>	100	1.33	0.32	0.165
Park et al. <sup>(13)</sup>	100	1.33	0.33	0.165
Williamson <sup>(14)</sup>	100	-	-	0.164

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  $368 \times 208$  이다(Fig. 2 참조). 두 개의 실린더가 가장 멀리 떨어져 있을 때( $L=5.0$ ,  $T=5.0$ ) 사용된 격자점 수는  $480 \times 352$  이다.

입구와 출구에서는 각각 Dirichlet( $u=U$ ,  $v=0$ ) 경계 조건과 대류 경계 조건이 사용되었으며 계산 영역 윗면과 아랫면에서는 slip 조건( $\partial u/\partial y=0$ ,  $\partial v/\partial y=0$ )을 사용하였다. 물체 표면에서는 유동장에 대해 no-slip 조건을 사용하였다.

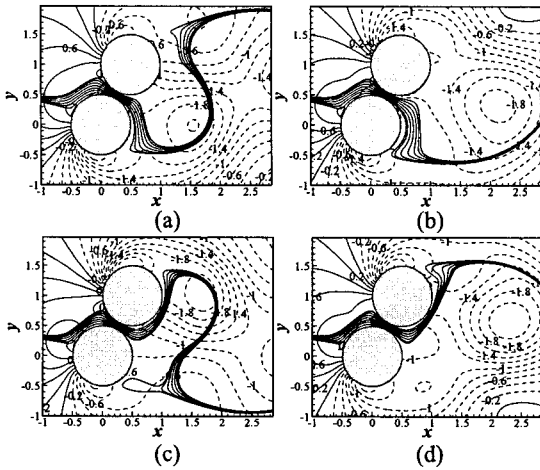
### 3. 수치 해석 기법의 검증

코드의 검증을 위해서  $Re=100$  에서 하나의 실린더에 대하여 계산을 수행하였다. 이는 많은 연구자들이 이미 연구를 수행한 바 있는 경우이다. 전체 계산 영역과 경계 조건은 2.2 절에서 기술된 것과 동일하다. 사용한 격자점 수는 실린더 내부에  $32 \times 32$  개, 전체  $320 \times 192$  개의 격자를 사용하였다. 그 결과는 Table 1 에 나타내었으며, 다른 연구자들과 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.

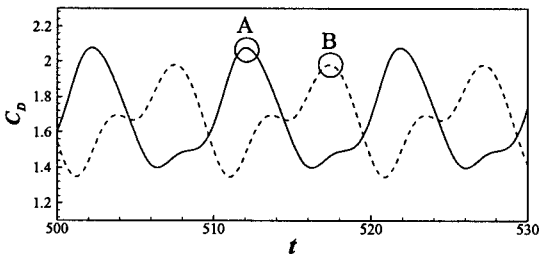
### 4. 유동 패턴

본 연구에서는 두 원형 실린더가 임의의 위치에 배열 되어 있을 때의 유동 패턴을 총 8 가지로 분류 하였다. 이러한 패턴들은 유선(streamlines)과, 와류도 등분포선(vorticity contours)를 기준으로 하여 분류 하였다. 와류도는  $0.5(\partial v/\partial x - \partial u/\partial y)$  로 정의 되며,  $-4.0$  에서  $+4.0$  까지 0.1 간격으로 나타내었다.

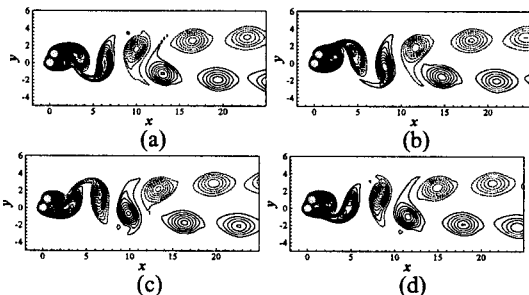
두 실린더 사이의 거리가 아주 가까울 때는 마치 독립된 하나의 장애물을 지나는 유동처럼 와류림을 하지만, 거리가 멀어지게 되면 두 실린더를 지나가는 유동의 상호작용으로 인하여 복잡한 형태의 유동 구조를 가지는 것을 알 수 있었다. 두 실린더 사이의 거리가 더 멀어 지게 되면, 두 실린더를 지나가는 유동의 상호 작용이 약해지고 각각 독립적으로 와류림 한다.



**Fig. 3** Instantaneous streamlines of gap flow and pressure contours during one period,  $L=0.5$ ,  $T=1.0$ ,  $Re=100$ : Base Bleed flow(BB); (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. 4** Time history of  $C_D$  at  $L=0.5$ ,  $T=1.0$ ,  $Re=100$ : Base Bleed flow(BB); —, main cylinder; ---, surrounding cylinder



**Fig. 5** Instantaneous vorticity contours during one period  $L=0.5$ ,  $T=1.0$ ,  $Re=100$ : Base Bleed flow(BB); (a)  $t=1/4 T_p$ , (b)  $t=2/4 T_p$ , (c)  $t=3/4 T_p$ , (d)  $t=4/4 T_p$

**4.1 BB (Base Bleed flow)**

$L=0.5$ ,  $T=1.0$  에서 관찰되는 유동 패턴이다.

두 실린더 거리가 매우 가깝지만( $R=1.12$ ), 경사각이 커서 두 실린더의 사이로 어느 정도의 유동(gap flow)이 흐를 수 있다.

Fig. 3 은  $L=0.5$ ,  $T=1.0$  일 때 한 주기를 4 등분하여 순간적인 압력 등분포선(pressure contours)과 두 실린더 사이를 흐르는 유선을 나타내었으며, Fig. 4 는  $L=0.5$ ,  $T=1.0$  일 때 시간에 따른  $C_D$  값의 변화를 나타내었다. Fig. 3 (a)에서 관찰할 수 있듯이 주 실린더의 후류에서 압력이 주변보다 낮아진다. 이러한 압력 분포는 두 실린더 사이를 지나는 유동을 주 실린더 쪽으로 치우치게 하고, 주 실린더의 항력이 주위 실린더의 항력보다 커지게 만든다(Fig. 4, A). 이와는 반대로 Fig. 3(c)에서는 주위 실린더의 후류에서 압력이 주변보다 낮아지는 것을 볼 수 있다. 이러한 압력 분포는 두 실린더 사이를 흐르는 유동을 주위 실린더 쪽으로 치우치게 하고, 주위 실린더의 항력이 주 실린더의 항력보다 커지게 만든다(Fig. 4, B).

Fig. 5 는 한 주기를 4 등분하여 와류도를 나타내었다. 두 실린더의 거리가 매우 가깝기 때문에 마치 독립된 하나의 장애물을 지나는 유동처럼 와류림 하는 것을 볼 수 있다.

**4.2 BBB (Biased Base Bleed flow)**

$L=1.0$ ,  $T=0.5$  에서 관찰되는 유동 패턴이다. 두 실린더 사이의 거리가 매우 가까울 때 발생하는 패턴으로 BB 패턴 보다는 작은 경사각에서 발생한다.

Fig. 6 은 한 주기를 4 등분하여 압력 등분포선들과 두 실린더 사이를 흐르는 유선을 나타내었다. BB 패턴에서는 두 실린더 사이를 흐르는 유동이 주 실린더와 주위 실린더 쪽으로 교대로 규칙적으로 치우치는데 반해 Fig. 6 에서 관찰할 수 있듯이, BBB 패턴에서는 주 실린더 쪽으로만 치우쳐서 흐르게 된다. 경사각이 작기 때문에 두 실린더 사이를 통과하는 유동은  $-y$  방향으로 들어가게 되며, 주 실린더 쪽으로만 치우쳐 흐르게 된다.

Fig. 7 은 한 주기를 4 등분하여 와류도를 나타내었다. 두 실린더의 거리가 매우 가깝기 때문에 마치 독립된 하나의 장애물을 지나는 유동처럼 와류림 하는 것을 볼 수 있다.

**4.3 SLR (Shear Layer Reattachment flow)**

$1.5 \leq L \leq 4.0$ ,  $T \leq 0.5$  에서 발생하는 유동 패턴이다. 대략  $20^\circ$  이하의 경사각에서 발생한다.

Fig. 8 은  $L=3.0$ ,  $T=0.5$  일 때 순간적인 유선을 나타내었다. 주 실린더의 위쪽에서 박리된 유선은 주위 실린더에 의해서 급격히  $-y$  방향으로

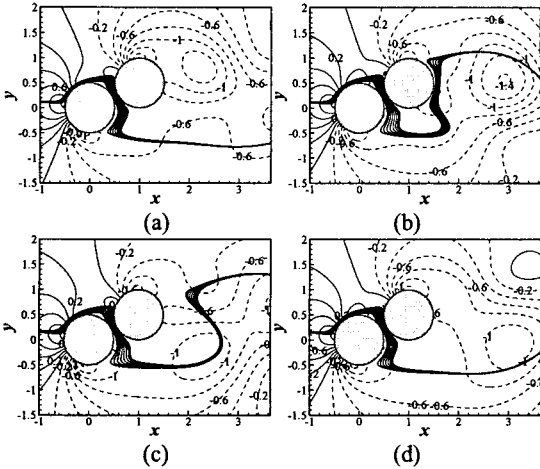


Fig. 6 Instantaneous streamlines of gap flow and pressure contours during one period,  $L=1.0$ ,  $T=0.5$ ,  $Re=100$ : Biased Base Bleed flow(BBB); (a)  $t=1/4 T_p$ , (b)  $t=2/4 T_p$ , (c)  $t=3/4 T_p$ , (d)  $t=4/4 T_p$ .

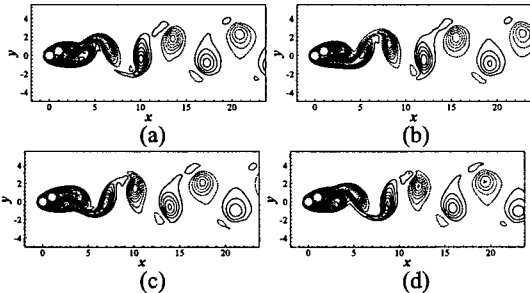


Fig. 7 Instantaneous vorticity contours during one period,  $L=1.0$ ,  $T=0.5$ ,  $Re=100$ : Biased Base Bleed flow(BBB); (a)  $t=1/4 T_p$ , (b)  $t=2/4 T_p$ , (c)  $t=3/4 T_p$ , (d)  $t=4/4 T_p$ .

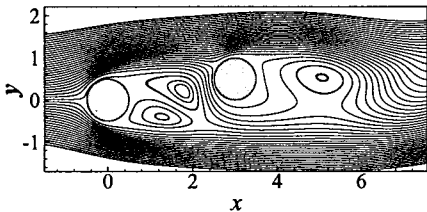


Fig. 8 Instantaneous streamlines at  $L=3.0$ ,  $T=0.5$ ,  $Re=100$ : Shear Layer Reattachment flow(SLR).

지나게 되며, 주 실린더의 아래 쪽을 지나가는 유선과 함께 주 실린더 뒤의 재순환 구역을 둘러싼다. 또한 주 실린더 후류의 유체는 대부분 정체 되는 것을 알 수 있다.

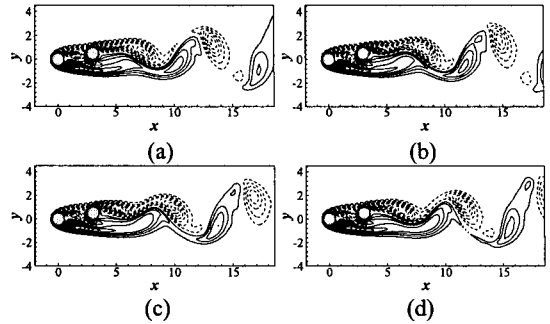


Fig. 9 Instantaneous vorticity contours during one period,  $L=3.0$ ,  $T=0.5$ ,  $Re=100$ : Shear Layer Reattachment flow(SLR); (a)  $t=1/4 T_p$ , (b)  $t=2/4 T_p$ , (c)  $t=3/4 T_p$ , (d)  $t=4/4 T_p$ .

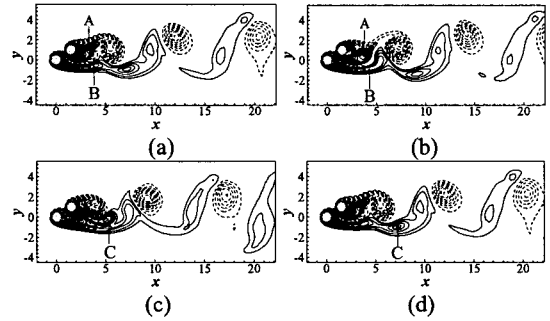


Fig. 10 Instantaneous Vorticity contours during one period,  $L=1.5$ ,  $T=1.0$ ,  $Re=100$ : Induced Separation flow(IS) (a)  $t=1/4 T_p$ , (b)  $t=2/4 T_p$ , (c)  $t=3/4 T_p$ , (d)  $t=4/4 T_p$ .

Fig. 9는  $L=3.0$ ,  $T=0.5$  에서 한 주기를 4 등분하여 와류도를 나타내었다. 주 실린더의 전단층(shear layer) 안에 주위 실린더가 잠겨 있으며, 상대적으로 긴 전단층이 나타나는 것을 관찰할 수 있다. Mizushima and Suehiro,<sup>(3)</sup> Sharman 등<sup>(15)</sup>의 연구 결과에 의하면, 두실린더가 주유동 방향으로 배열되어 있을 때 주 실린더가 와흘림 하기 위해서는 일정한 거리(대략  $3.5 \leq L \leq 4.0$ )가 필요하다. 그러나 SLR 패턴의 경우 주 실린더가 와흘림 할 수 있는 일정한 거리보다 두 실린더의 떨어진 거리가 더 가까워, 주 실린더는 와흘림 하지 못하고 주위 실린더만 와흘림 한다.

#### 4.4 IS (Induced Separation flow)

$1.0 \leq L \leq 3.0$ ,  $1.0 \leq T \leq 1.5$  에서 발생하는 패턴이다. SLR 패턴과 비슷한  $L$  영역에서 발견되지만, 더 높은 경사각에서 발견된다.

Fig. 10 은  $L=1.5$ ,  $T=1.0$  에서 한 주기를 4 등분하여 와류도를 나타내었다. SLR 패턴에서는 주

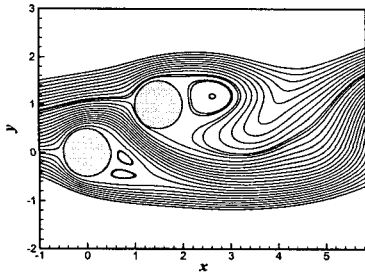


Fig. 11 Instantaneous streamlines at  $L=1.5$ ,  $T=1.0$ ,  $Re=100$ : Induced Separation flow(IS)

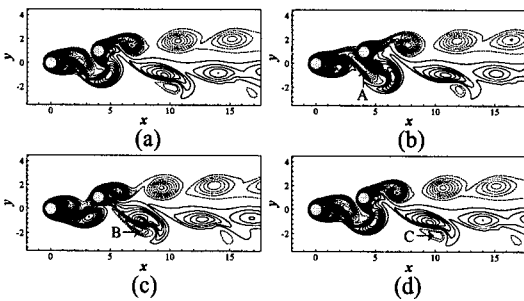


Fig. 12 Instantaneous vorticity contours during one period,  $L=4.0$ ,  $T=1.0$ ,  $Re=100$ : Vortex Impingement flow(VI); (a)  $t=1/4 T_p$ , (b)  $t=2/4 T_p$ , (c)  $t=3/4 T_p$ , (d)  $t=4/4 T_p$

실린더의 위 쪽을 지나가는 유동의 전단층 안에 주위 실린더가 잠겨 있는데 반해, IS 패턴은 주 실린더의 위 쪽을 지나가는 유동의 전단층은 주위 실린더에 의해 아래쪽으로 치우쳐 지며 주위 실린더에 부딪히게 되고 한 쌍의 와류가 발생하게 되는 것을 Fig. 10 에서 관찰할 수 있다. 주위 실린더의 위 쪽을 흐르는 유동의 와류는 하나의 실린더에서처럼 와홀림 하지만, 주위 실린더의 아래 쪽으로 흐르는 유동의 와류(Fig. 10, A)는 주 실린더의 아래 쪽을 흐르는 유동의 와류(Fig. 10, B)와 합쳐져(Fig. 10, C) 와홀림 한다.

Fig. 11 은  $L=1.5$ ,  $T=1.0$  일 때 순간적인 유선을 나타내었다. SLR 패턴과 유사하게 두 실린더 사이를 흐르는 유선과, 주 실린더의 아래 부분을 흐르는 유선에 의해서 주 실린더의 후류에서 상당부분의 유체가 빠져 나가지 못하고 정체되는 것을 관찰 할 수 있다.

4.5 VI (Vortex Impingement flow)

$L \geq 4.0$ ,  $T \leq 1.5$  에서 발생하는 패턴이다. 두 실린더의 거리가 멀며 ( $R \geq 4.0$ ), 경사각은  $20^\circ$  이하에서 발생한다.

두 실린더가 주유동 방향으로 정렬된 경우,

$T=0.0$ ,  $L \leq 3.0$  에서는 주 실린더가 와홀림 하지 않고 주위 실린더만 와홀림 하였다. 그러나,  $L=4.0$ ,  $T=0.0$  과  $L=5.0$ ,  $T=0.0$  에서는 두 실린더 모두 와홀림 하는 것을 알 수 있었다. 이는 SLR 패턴보다 두 실린더의 위치가 멀어 주 실린더의 와홀림을 주위 실린더가 억제 하지 못 하기 때문이다.

Fig. 12 는  $L=4.0$ ,  $T=1.0$  일 때 한 주기를 4 등분 하여 와류도를 나타내었다. 실린더의 위치가 주유동 방향으로 정렬된 경우, 주 실린더 후류에서 발생하는 시계 방향으로 회전하는 와류와, 반시계 방향으로 회전하는 와류가 교대로 주위 실린더와 부딪히게 된다. 그러나  $T \geq 0.5$  일 때는 두 실린더의 기하학적 위치로 인하여 주 실린더의 아래쪽으로 흐르는 유동의 와류는 그냥 빠져 나가게 되며 주 실린더의 위쪽을 흐르는 유동의 와류만 주위 실린더에 부딪히게 된다[Fig. 12(b)의 A]. 부딪힌 와류는 Fig. 12(c)의 B 와 같이 일부의 와류는 아래쪽으로 분리되어 가고, 일부의 와류는 주위 실린더의 위쪽의 와류와 합류 하게 된다. Fig. 12(d)의 C 에서 관찰할 수 있듯이 한 쌍의 와홀림 구조에 3 번째의 크기가 약한 와류를 관찰할 수 있다.

4.6 FF(Flip Flopping flow)

$L \leq 2.0$ ,  $1.5 \leq T \leq 2.0$  에서 관찰되는 유동 패턴이다. 두 실린더의 중심거리는 BB, BBB 패턴 보다는 멀며( $1.5 \leq R \leq 2.82$ ) 경사각은  $45^\circ$  이상에서 관찰된다.

두 실린더 사이를 흐르는 유동은 두 실린더 사이의 간격이 어느 정도 있기 때문에 어느 정도 자유롭다. 두 실린더는 각각 와홀림 하며 두 쌍의 와류를 형성하게 된다. 두 실린더 사이를 흐르는 유동은 BB, BBB 패턴에서 발견되었던, 규칙적인 패턴을 가지지 않고, 불규칙 적이다. Kang<sup>(1)</sup> 의 연구 결과를 비교해 보면, 두 실린더가 주유동 방향에 수직으로 정렬된 경우,  $1.4 \leq T \leq 2.2$  구간에서 불규칙적으로 와류가 형성 된다는 것과 일치한다.

Fig. 13 은  $L=0.0$ ,  $T=2.0$  일 때 시간에 따른  $C_D$ ,  $C_L$  값의 변화를 나타내었다. 불규칙한 와류 형성으로 인하여  $C_D$  와  $C_L$  값이 불규칙적으로 변한다는 것을 알 수 있다.

4.7 MP (Modulated Periodic flow)

$0.5 \leq L \leq 3.0$ ,  $2.0 \leq T \leq 5.0$  구간에서 발생하는 유동 패턴이다. 두 실린더 사이의 중심 거리가 멀며 ( $3.0 \leq R \leq 5.1$ ), 경사각이 대략  $30^\circ$  이상에서 발견된다.

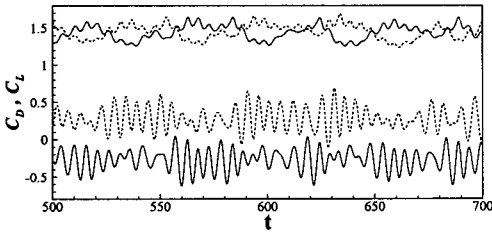


Fig. 13 Time history of  $C_D$  at  $L=0.0$ ,  $T=2.0$ ,  $Re=100$ : Flip Flopping flow (FF). Upper two lines,  $C_D$ ; lower two lines,  $C_L$ : —, main cylinder; ----, surrounding cylinder

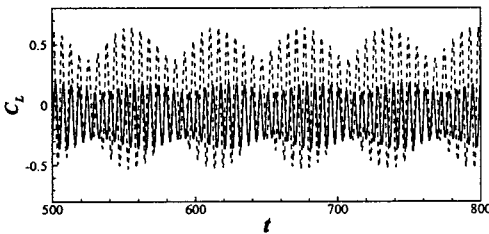


Fig. 14 Time history of  $C_L$  at  $L=1.5$ ,  $T=3.0$ ,  $Re=100$ : Modulated Periodic flow (MP); —, main cylinder; ---, surrounding cylinder

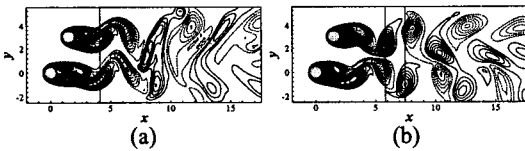


Fig. 15 Instantaneous vorticity contours at  $L=1.5$ ,  $T=3.0$ ,  $Re=100$ : Modulated Periodic flow (MP)

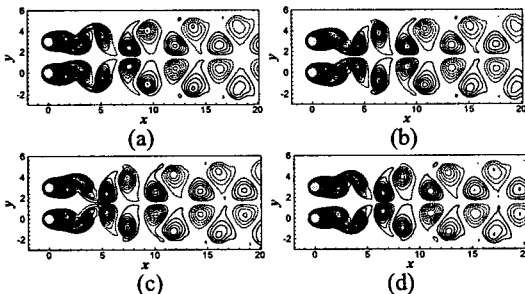


Fig. 16 Instant vorticity contours during one period,  $L=0.0$ ,  $T=3.0$ ,  $Re=100$ : Synchronized Vortex Shedding flow (SVS); (a)  $t=1/4 T_p$ , (b)  $t=2/4 T_p$ , (c)  $t=3/4 T_p$ , (d)  $t=4/4 T_p$

두 실린더 사이의 거리가 어느 정도 멀고 경사각이 크기 때문에 두 실린더 사이의 상호 작용이

약해 지게 되어 두 실린더가 각각 독립적으로 와 흘림하는 것처럼 보인다. 그러나, 주 실린더와 주 위 실린더의  $St$  수가 달라진다. 즉 주 실린더의 와 흘림 진동수가 주위 실린더보다 더 빠르다. Fig. 14 는  $L=1.5$ ,  $T=3.0$  일 때 시간에 따른  $C_L$  값의 변화를 나타내었다. Fig. 14 에서 알 수 있듯이 주 실린더와 주위 실린더의 와 흘림 진동수가 다르다.

Fig. 15 는 순간적인 와류도를 나타내었다. Fig. 15 (a) 에서 관찰 할 수 있듯이 두 실린더의 반 시계방향으로 회전하는 와류가 거의 동일 지점에 위치한 것을 알 수 있다. 그러나 시간이 지나게 되면, 두 실린더의 반 시계방향으로 회전하는 와류가 동일선상에 있지 않고, 위치가 변한 것을 관찰할 수 있다(Fig. 15 (b)). Summer 등<sup>(6)</sup> 의 연구 결과에 따르면,  $850 \leq Re \leq 1900$  에서 발생하는 ‘VPE’, ‘VPSE’ 패턴과 유사하다. Summer 등<sup>(6)</sup> 은 주 실린더의 위 아래를 흐르는 와류의 와 흘림 진동수와 주위 실린더의 아래를 흐르는 와류의 와 흘림 진동수는 같고, 주위 실린더의 위를 흐르는 와류의 와 흘림 진동수 보다 높다고 하는데, 이번 연구 에서는 주 실린더의 위, 아래를 흐르는 와류의 와 흘림 진동수는 같고, 그와는 별도로 주위 실린더의 위, 아래를 흐르는 와류의 진동수도 같았다.

#### 4.8 SVS (Synchronized Vortex Shedding flow)

두 실린더 사이의 거리가 가장 멀며 ( $R \geq 3.0$ ), 경사각은  $20^\circ$  이상에서 발견되는 유동 패턴이다. 두 실린더 사이가 멀기 때문에 상호작용 약해 지며, 경사각이 크기 때문에 두 실린더는 각각 하나의 독립적인 실린더처럼 와 흘림 한다.

Fig. 16 은  $L=0.0$ ,  $T=3.0$  일 때 한 주기를 4 등분하여 와류도를 나타내었다. 두 실린더가 유동 방향과 수직으로 위치 해 있을 때 기하학적 대칭성으로 인해 두 실린더 후류들의 위상이 완전히 반대가 되는 것을 관찰 할 수 있었다(Fig. 16). 기하학적 위치의 변화에 따라서 두 실린더 후류들의 위상 차이가 발생 할 수 있지만, 상호간섭은 거의 없는 것을 관찰 할 수 있었다.

### 5. 와 흘림 진동수

두 원형 실린더가 임의의 위치에 배열되어 있을 때 두 실린더의 와 흘림 진동수를 비교해 보았다. 와 흘림 진동수는 물체의 소음과 진동에 많은 영향을 미치게 된다. 두 실린더에서의 와 흘림 진동수는 각각의  $C_L$  값을 이용하여 계산 하였다. FF 패턴의 경우 불규칙한 유동 패턴으로 인하여 여러 개의 와 흘림 진동수가 존재하지만, 가장 큰 세기를

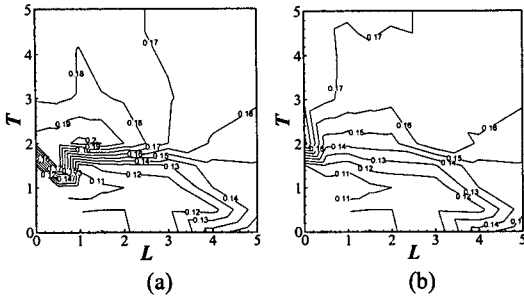


Fig. 17  $St$  contours of two staggered circular cylinder at  $Re=100$ : (a) main cylinder, (b) surrounding cylinder

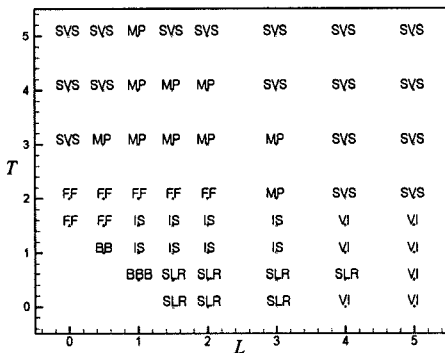


Fig. 18 Flow patterns of two staggered circular cylinder at  $Re=100$

가지는 와홀림 진동수만 고려 하였다. Fig. 17 은 두 개의 실린더가 임의의 위치에 배열되어 있을 때, 주 실린더와 주위 실린더의  $St$  수의 등분포선을 각각 나타내었다. Fig. 17(a)는 주 실린더의  $St$  수의 등분포선을 나타내었다.  $L=1.0, T=2.0$  일 때 가장 큰  $St$  수(0.213)를 가지는 것을 알 수 있다. 대략  $T \leq 2.0$  인 구역에서는 하나의 실린더에서의  $St$  수 (0.165)보다 작았고,  $T \geq 2.0$  인 구간에서는 하나의 실린더에서의  $St$  수 (0.165)보다 크다. Fig. 17(b)는 주위 실린더의  $St$  수의 등분포선이다. 대략  $T \leq 1.5$  구간에서는 주 실린더와 주위 실린더의  $St$  수가 같은 것을 관찰할 수 있다. 주위 실린더의 경우  $L=0.0, T=2.0$  일 때 가장 큰  $St$  수(0.175)를 가지며 주 실린더보다 전체적으로 작은  $St$  수를 가지는 것을 알 수 있다.

4.1 절과 4.2 절에서 언급하였듯이, 두 실린더의 위치가 가장 가까운 경우(BB, BBB 패턴)는 하나의 실린더처럼 와홀림 한다. BB 패턴( $L=0.5, T=1.0$ )의  $St$  수는 0.101, BBB 패턴( $L=1.0, T=0.5$ )의  $St$  수는 0.119 이었다. 이는 하나의 실린더에서의  $St$

수(0.165)보다 작게 계산되었다. 두 실린더가 아주 가까운 위치에 배열되어 있어 마치 하나의 실린더처럼 여겨지며, 특성길이(characteristic length)의 증가 효과를 가져 온다. 이는 곧 실질적인  $Re$  수의 증가로 나타나고 이로 인해  $D$ 로 무차원화된  $St$  수가 작아지게 된다. BB 패턴과 BBB 패턴의 중심 간 떨어진 거리는 1.12 로 같지만, BB 패턴의 경우 경사각이 더 커서 특성길이의 증가 효과가 더 크며, 이로 인해 BB 패턴은 BBB 패턴에 비해 더 작은 와홀림 진동수를 가진다.

두 실린더의 경사각이  $45^\circ$  보다 작은 SLR, IS, VI 패턴의 경우, 주 실린더와 주위 실린더의 와홀림 진동수가 같으며, 하나의 실린더에서의 와홀림 진동수보다는 작았다. 이는 작은 경사각으로 인한 주 실린더의 전단층의 영향으로 인하여 두 실린더 모두 하나의 실린더에서의 와홀림 진동수 보다 작게 나타났을 것이라 추측한다. 두 실린더 사이의 거리가 먼 VI 패턴이 SLR, IS 패턴에 비해 하나의 실린더에서의 와홀림 진동수와 가깝게 계산 되었다. 이는 거리가 멀어짐에 따라 상호 작용이 약해 진다는 것을 의미 한다.

두 실린더의 경사각이 큰 FF, MP 패턴의 경우는 주 실린더의 와홀림 진동수가 주위 실린더의 와홀림 진동수보다 더 크게 계산 되었다. 경사각이 큰 경우 두 실린더는 각각 와홀림을 하지만, 주 실린더의 위 쪽을 흐르는 와류와 주위 실린더의 아래 쪽을 흐르는 와류와의 상호 작용으로 인하여, 주 실린더는 주위 실린더 보다 더 큰 와홀림 진동수를 가진다. SVS 패턴에서 알 수 있듯이, 두 실린더의 거리가 더 멀어지게 되면 상호 간섭이 약해지고, 다시 두 실린더의 와홀림 진동수가 같아진다.

## 6. 결론

본 연구에서는 임의의 위치에 정렬되어 있는 두 원형 실린더의 유동 패턴을 8 가지로 분류하였으며 이를 Fig. 18 에 나타내었다. 두 실린더의 거리가 아주 가까운 때의 패턴(BB, BBB), 거리가 아주 가깝지 않고, 경사각이  $45^\circ$  보다 작은 영역에서의 패턴(SLR, IS, VI), 거리가 아주 가깝지 않고 경사각이  $45^\circ$  보다 큰 영역에서의 패턴(FF, MP, SVS)으로 크게 분류 할 수 있다.

두 실린더의 거리가 아주 가까울 때는 마치 하나의 실린더처럼 와홀림 하는 것을 알 수 있으며, 하나의 실린더에서의 와홀림 진동수 보다 작은 와



홀림 진동수를 가지는 것을 알 수 있었다. 두 실린더 사이의 거리가 멀어 질수록 복잡한 형태의 유동 패턴을 보이며, 거리가 더욱 멀어지면 두 실린더 사이의 상호 간섭이 약해지고, 마치 각각의 독립적인 하나의 실린더처럼 와흘림 하였다.

경사각이  $45^\circ$  보다 작은 영역에서는 두 실린더의 와흘림 진동수가 일치하였고, 하나의 실린더에서의 와흘림 진동수 보다 작게 계산 되었다. 경사각이  $45^\circ$  보다 큰 FF, MP 패턴에서는 주 실린더의 와흘림 진동수가 주위 실린더의 와흘림 진동수 보다 크며, 거리가 멀어지면, 다시 두 실린더의 와흘림 진동수가 일치 하는 것을 알 수 있었다.

### 후 기

이 논문은 2006 년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음 (KRF-2006-311-D00357)

### 참고문헌

- (1) 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.
- (2) Williamson, C. H. K., 1985, "Evolution of a Single Wake Behind a Pair of Bluff Bodies," *J. Fluid Mech.*, Vol. 159, pp. 1~18.
- (3) Mizushima, J. and Suehiro, N., 2005, "Instability and Transition of Flow Past Two Tandem Circular Cylinders," *Phys. Fluids*, Vol. 17, pp. 104107-.
- (4) Carmo, B. S. and Meneghini, J. R., 2006, "Numerical Investigation of the Flow Around Two Circular Cylinders in Tandem," *J. of Fluids and Structures*, Vol. 22, pp. 979~988.
- (5) Mittal, S. and Kumar, V., 2001, "Flow-Induced Oscillations of Two Cylinders in Tandem and Staggered Arrangements," *J. of Fluids and Structures*, Vol. 15, pp. 717~736.
- (6) Sumner, D., Price, S. J. and Paidoussis, M. P., 2000, "Flow-pattern Identification for Two staggered Circular Cylinders in Cross-Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 411, pp. 263~303.
- (7) Akbari, M. H. and Price, S. J., 2005, "Numerical Investigation of Flow Patterns for Staggered Cylinder Pairs in Cross-Flow," *J. of Fluids and Structures*, Vol. 20, pp. 533~554.
- (8) Gu, Z. F. and Sun, T. F., 1999, "On Interference Between Two Circular Cylinders in Staggered Arrangement at High Subcritical Reynolds Numbers," *J. Wind Engng. Indust. Aerodyn.*, Vol. 80, pp. 287~309.
- (9) Keser, H. I. and Unal, M. F., 2003, "Flow Around a Circular Cylinder Downstream of a Blunt-Based Flat Plate in Tandem and Staggered Arrangements," *J. of Fluids and Structures*, Vol. 17, pp.783~791.
- (10) Ng, C. W. and Ko, N. W. M., 1995, "Flow Interaction Behind Two Circular Cylinders of Equal Diameter- a Numerical Study," *J. Wind Engng. Indust. Aerodyn.*, Vol. 54/55, pp. 277~287.
- (11) 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.
- (12) 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.
- (13) 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.
- (14) Williamson, 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.
- (15) Sharman, B., Lien, F. S., Davidson, L. and Norberg, C., 2005, "Numerical Predictions of Low Reynolds Number Flows over Two Tandem Circular Cylinders," *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, Vol. 47, pp. 423~447.