

< 논문 >

두 개의 원형 실린더에 작용하는 유체력

이경준* · 양경수† · 윤동혁*
(2007년 4월 5일 접수, 2007년 7월 24일 심사완료)

Forces Induced by Flows Past Two Nearby Circular Cylinders

Kyongjun Lee, Kyung-Soo Yang and Dong-Hyeog Yoon

Key Words : Circular Cylinder(원형실린더), Immersed Boundary Method(가상경계법), Flow-Induced Force(유체력), Drag(항력)

Abstract

Flow-induced forces on two identical nearby circular cylinders immersed in the cross flow at $Re=100$ were numerically studied. We consider 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. It turns out that significant changes in the characteristics of flow-induced forces are noticed depending on how the two circular cylinders are positioned, resulting in quantitative changes of force coefficients on both cylinders. Collecting all the numerical results obtained, we propose a contour diagram for drag coefficient and lift coefficient for each of the two cylinders. The perfect geometrical symmetry implied in the flow configuration allows one to use those diagrams to estimate flow-induced forces on two identical circular cylinders arbitrarily positioned in physical space with respect to the main flow direction.

기호설명

A : 실린더의 유효단면적
 C_D : 항력계수 ($= Drag / (\frac{1}{2} \rho U^2 A)$)
 \bar{C}_D : C_D 의 시간 평균값
 $C'_{D,rms}$: C_D 의 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 의 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 : 두 실린더 중심의 주유동 방향 거리
 p : 순간 압력
 p_∞ : 입구에서의 압력
 q : 질량 원천/흡입
 Re : 레이놀즈 수 ($= UD/\nu$)
 St : Strouhal 수 ($= fD/U$)
 T : 두 실린더 중심의 주유동에 수직거리
 u : 흐름 방향(streamwise) 속도 벡터
 v : 수직 방향(normal) 속도 벡터
 U : 균일한 입구속도
 ϕ : 경사각
 ν : 동점성 계수
 θ : 실린더 표면각
 ρ : 유체밀도

† 책임저자, 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 실린더들이 유동장 안에서 받는 힘은 공학적으로 많은 관심의 대상이 되고 있다. 예를 들면, 해안 연안의 파이프들에 작용하는 힘, 열전달 원형 튜브들이 유동장 안에서 받는 힘, 공장 굴뚝들이 공기 중에서 받는 힘 등은 이러한 설비나 건축물의 중요한 설계자료로 인식되고 있다. 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.

두 실린더의 위치는 크게 주유동 방향으로 정렬된 경우(tandem), 주유동 방향과 수직으로 정렬된 경우(side-by-side), 두 개의 실린더가 엇갈린 위치에 있는 경우(staggered)로 구분할 수 있다. 두 개의 실린더가 주유동 방향과 수직으로 위치에 있을 때, 떨어진 거리에 따라 유동 패턴과, 두 실린더에 작용하는 힘들이 각각 달라지게 된다. 이때, 레이놀즈 수(Re)의 영향보다는 떨어진 거리의 영향이 더 크다.⁽¹⁾ 떨어진 거리(표면에서 표면까지 거리)가 $5D$ 이상일 때는 마치 독립적인 실린더처럼 유동 간섭이 사라진다. Williamson⁽²⁾은 유동 가시화 실험을 통하여 두 실린더가 주유동 방향에 수직으로 정렬된 위치에 있을 때의 와흐림 구조를 분류하였다.

두 개의 실린더가 주유동 방향으로 정렬되어 있을 때 상류 쪽 실린더가 와흐림 구조를 가지지 않는 임계거리가 존재하게 되며, 임계거리는 Re 수에 따라서 조금씩 변한다. Mizushima 와 Suehiro,⁽³⁾ Sharman 등⁽⁴⁾은 $Re=100$ 일 때 두 실린더에 작용하는 힘에 대하여 수치적으로 연구를 수행하였다. Sumner 등^(5,6)은 난류 영역에서 두 실린더에 작용하는 힘과, 유동 패턴에 대하여 연구하였다. 그들은 유동 패턴을 총 9 개로 분류하여, 유동 특징을 파악하였다.

또한 원형 실린더의 위치를 고정시키고, 작은 실린더의 위치를 바꾸어 가면서, 실린더의 항력을 줄이는 연구 또한 진행되었다.⁽⁷⁾

이러한 선행 연구에도 불구하고 층류 영역에서 일반적인 위치에 놓인 두 실린더가 받는 힘에 관한 연구는 거의 수행되지 않았다. 본 연구는

$Re=100$ 일 때 가능한 모든 위치에 놓인 두 개의 실린더가 받는 힘에 관해서 가상경계법(Immersed boundary method)⁽⁸⁾을 이용하여 수치적으로 해석되었다.

2. 수치 해석 기법

2.1 지배 방정식

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

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

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

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

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 수직 방향(normal, y)의 속도 벡터이다. 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 3 차 정확도의 Runge-Kutta 양해법(explicit)으로 적분하였고 점성항에 대하여 Crank-Nicolson 의 음해법(implicit)으로 적분되었다. 연속 방정식과 운동량 방정식을 분리하기 위하여 Fractional Step⁽⁹⁾ 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.

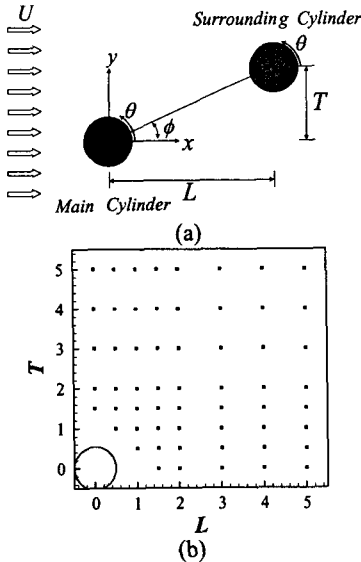


Fig. 1 Physical configuration: (a) staggered position of two circular cylinders, (b) locations of surrounding circular cylinder, indicated by dots

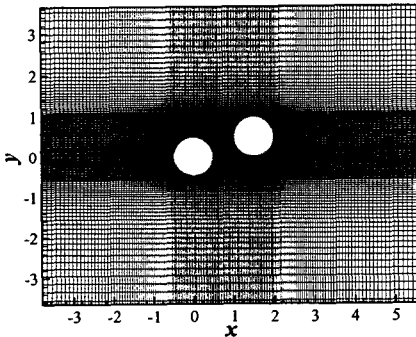


Fig. 2 Computational mesh for the case of $L=1.5$, $T=0.5$

두 실린더가 가장 가까울 때는 $L=0.5$, $T=1.0$ 이며, 중심 사이의 거리($=\sqrt{L^2+T^2}$)는 1.12 이며, 경사각(ϕ)은 63.43° 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 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

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 ⁽¹⁾	100	1.33	0.32	0.165
Park et al. ⁽¹⁰⁾	100	1.33	0.33	0.165
Williamson ⁽¹¹⁾	100	-	-	0.164

($L=5.0$, $T=5.0$) 사용된 격자점 수는 480×352 이다.

입구와 출구에서는 각각 Dirichlet ($u=U$, $v=0$) 경계조건과 대류 경계조건이 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 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. 결과

4.1 주유동 방향에 대하여 수직 방향으로 정렬된 경우

두 개의 원형 실린더가 주유동 방향에 정렬되어 있는 경우 두 실린더에 작용하는 유체력에 대해서 몇몇 연구자들에 의해 수치적으로나, ⁽¹⁾ 실험적으로 연구되었다.^(2,5,6) 본 연구에서는 두 개의 원형 실린더가 주유동 방향에 수직으로 정렬되어 있을 때($L=0.0$), $T=1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0$ 인 경우에 대하여만 연구를 수행하였다.

Fig. 3 은 두 개의 실린더가 주유동 방향에 수직 방향으로 정렬되어 있을 때 시간에 따른 C_D 와 C_L 값의 변화를 보여준다. T 가 1.5 와 2.0 일 때는 C_D 와 C_L 값들이 각각의 평균값을 기준으로 하여 불규칙하게 진동하는 것을 볼 수 있었으며, 이는 Kang⁽¹⁾의 연구 결과와도 일치한다. T 가 3.0 이상 일 때에는 주 실린더와 주위 실린더의 C_D 값이 일치하는 것을 볼 수 있으며(그림에서는 하나의

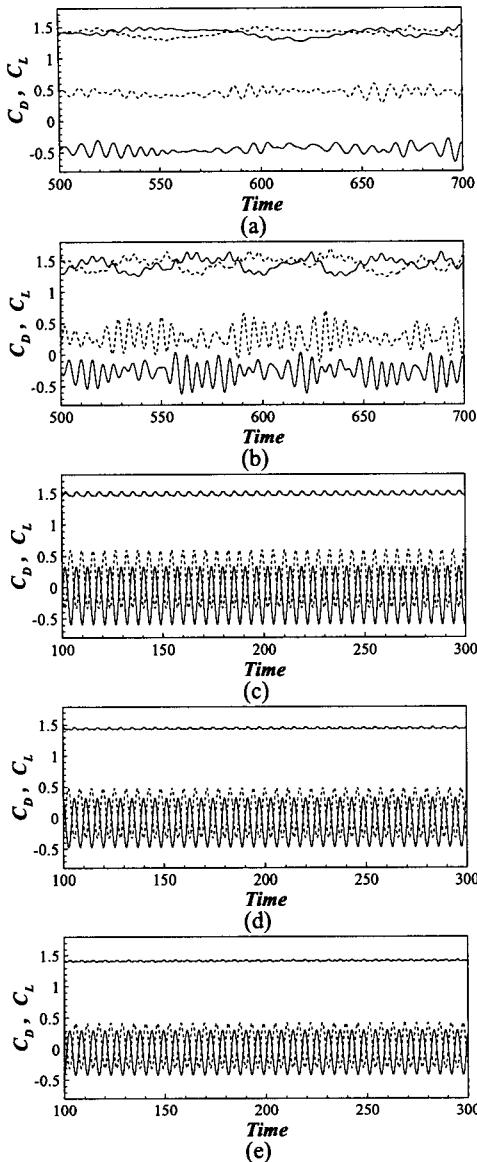


Fig. 3 Time history of C_D and C_L , $L=0.0$, $Re=100$: (a) $T=1.5$; (b) $T=2.0$; (c) $T=3.0$; (d) $T=4.0$; (e) $T=5.0$. Upper two lines, C_D ; lower two lines, C_L : —, main cylinder; ---, surrounding cylinder

선으로 보임), C_L 값은 일정한 주기를 가지며 진동하는 것을 볼 수 있다. 이 때 주 실린더의 C_L 값이 최대가 되었을 때 주위 실린더의 C_L 값은 최소가 되는, 즉 180° 의 위상차이가 있음을 알 수 있다. T 가 3.0 이상인 구간에서는 실린더들의 기하학적 대칭성으로 인하여 주 실린더와 주위 실린더의

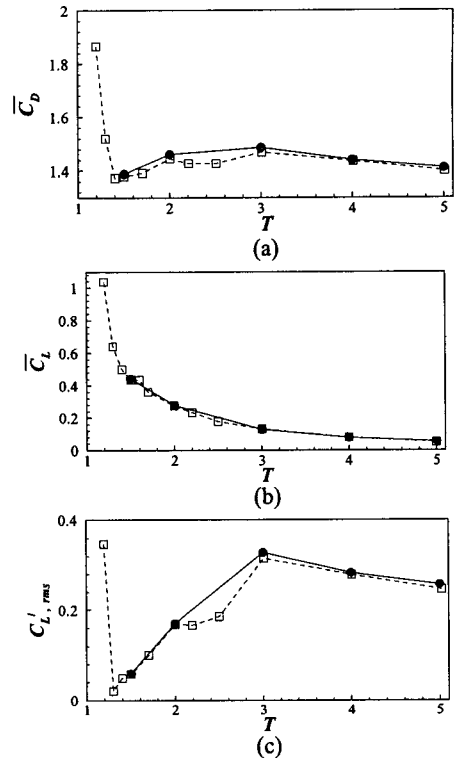


Fig. 4 (a) \bar{C}_D , (b) \bar{C}_L , (c) $C'_{L,rms}$ of surrounding cylinder in side-by-side arrangement, $Re=100$; —●—, present study; - -□-, Kang⁽¹⁾

C_D 값이 일치하고, C_L 값은 일정한 주기를 가진다. 반면에 T 가 2.0 이하인 구간에서는 기하학적 대칭성에도 불구하고 두 실린더의 거리가 가까워 상호 간섭으로 인한 유동 불안정성이 증가된다. $T=3.0$ 을 기준으로 하여 유체력 계수들이 급변하는 것은 $T=3.0$ 을 기준으로 하여 유동 패턴이 달라진다는 것을 의미한다.

Fig. 4(a)는 수직 방향 중심거리(T)에 따른 주위 실린더의 \bar{C}_D 값의 변화를 보여준다. \bar{C}_D 값은 T 가 커지면서 점점 증가하다가 T 가 3.0 일 때 최대의 값을 가진다. T 가 3.0 보다 커지면 \bar{C}_D 값은 줄어들어, 실린더 하나일 때의 $\bar{C}_D=1.34$ 값으로 다가가는 것을 알 수 있다. 이는 곧 실린더의 떨어진 거리가 멀어질수록 두 실린더 사이의 상호간섭이 약해진다는 것을 의미한다.

Fig. 4 (b)는 수직 방향 중심거리(T)에 따른 주위 실린더의 \bar{C}_L 값의 변화를 보여준다. \bar{C}_L 값은 T 가 커질수록 0으로 수렴하는 것을 알 수 있다. 이는 곧 수직 방향으로 떨어진 거리가 가까울수록 실린더

간의 서로 밀어내는 힘의 크기가 커지며, 멀어질수록 실린더간의 밀어내는 힘의 크기가 작아진다는 것을 의미한다.

Fig. 4(c)는 수직 방향 중심거리(T)에 따른 주위 실린더의 $C'_{L,rms}$ 값의 변화를 나타내었다. 전체적인 경향은 \bar{C}_D 와 유사하다. \bar{C}_D 값의 경향처럼, $T=3.0$ 일 때 $C'_{L,rms}$ 값이 최대가 되었다. 앞에서 언급하였듯이, $T=3.0$ 근처에서 항력 계수와 $C'_{L,rms}$ 값이 급변하는 것을 Fig. 4에서 확인할 수 있었다. 시간 평균된 유체력 계수와 $C'_{L,rms}$ 값은 Kang⁽¹⁾의 연구 결과와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

4.2 주유동 방향으로 정렬된 경우

두 개의 원형 실린더가 주유동 방향으로 정렬된 경우 두 실린더에 작용하는 유체력에 대해서 몇몇 연구자들에 의해 수치적으로나,^(3,4) 실험적으로 연구되었다.^(5,6)

본 연구에서는 두 개의 원형 실린더가 주유동 방향으로 정렬되어 있을 때($T=0.0$), 주유동 방향 중심거리(L)의 변화에 따른 두 실린더가 받는 유체력의 변화에 대한 수치적 해석을 수행하였다. 두 실린더가 만나거나 접하는 경우는 계산을 수행하지 않기 때문에, $L=1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0$ 인 경우에 대하여만 연구를 수행하였다.

두 개의 실린더가 주유동 방향으로 정렬되어 있는 경우, 떨어진 거리에 따라서 주 실린더가 와류를 생성하지 않는 임계값이 존재하게 되며, 임계값을 기준으로 하여 유체력 또한 급변하는 것은 이미 잘 알려져 있다.

Fig. 5는 두 개의 실린더가 주유동 방향으로 정렬되어 있을 때, 실린더의 주유동 방향 중심거리(L)의 변화에 따른 주 실린더와 주위 실린더의 \bar{C}_D 값과 $C'_{L,rms}$ 값의 변화를 나타내었다. 주 실린더와 주위 실린더의 \bar{C}_D , $C'_{L,rms}$ 값이 $3.0 < L < 4.0$ 구간에서 급변하는 것을 알 수 있다. 이것은 곧 이 구간에서 주 실린더가 와류를 생성하지 않는 임계 L 값이 존재하는 것을 의미한다.

Fig. 5 (a)와 (b)를 보면, 주 실린더와 주위 실린더 모두 \bar{C}_D 값은 $1.5 \leq L \leq 5.0$ 구간에서 하나의 실린더의 \bar{C}_D 값(1.34)보다 작게 계산되었다. 두 개의 실린더가 주유동 방향으로 정렬된 경우 주위 실린더뿐만 아니라 주 실린더 또한 하나의 실린더에 비해 항력이 감소하는 효과가 있다는 것을 알 수

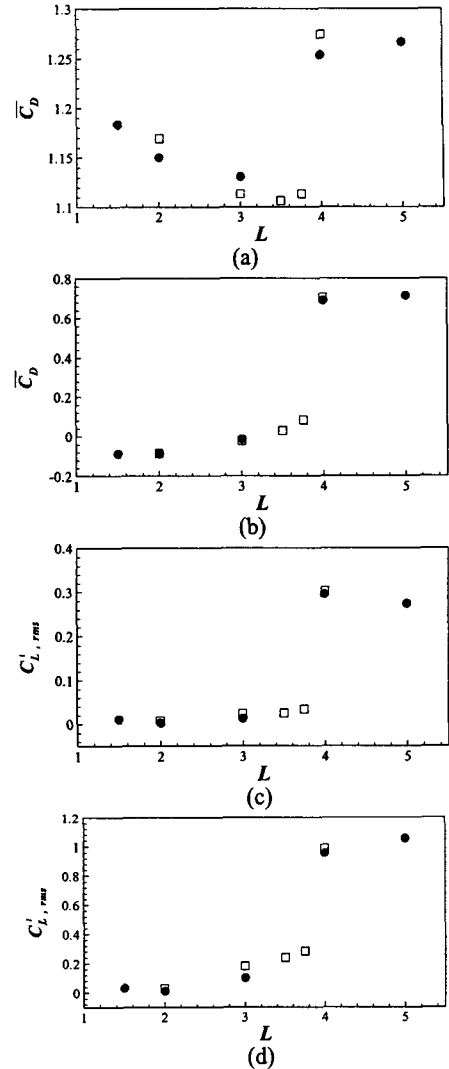


Fig. 5 Two circular cylinders arranged in tandem, $Re=100$: (a) \bar{C}_D of main cylinder, (b) \bar{C}_D of surrounding cylinder, (c) $C'_{L,rms}$ of main cylinder, (d) $C'_{L,rms}$ of surrounding cylinder ; ●, present study ; □, Sharman⁽⁴⁾

있다. 주 실린더의 \bar{C}_D 값은 $L \leq 3.0$ 구간에서 L 이 커질수록 \bar{C}_D 값은 작아지다가 $L \geq 4.0$ 구간에서는 L 이 커질수록 커졌다. 주위 실린더의 \bar{C}_D 값은 L 이 커질수록 \bar{C}_D 값 또한 커지는 경향이 있으며 임계거리보다 작은 영역($L \leq 3.0$)에서는 음의 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 5의 (c)와 (d)를 보면 주 실린더와 주위 실린더의 $C'_{L,rms}$ 값의 변화

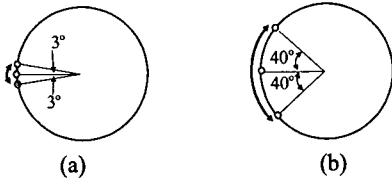


Fig. 6 Variation of stagnation points at $L=4.0$, $T=0.0$: (a) main cylinder, (b) surrounding cylinder

Table 2 Force coefficients at $L=0.5$, $T=1.0$

	\bar{C}_D	\bar{C}_L	$C'_{D,rms}$	$C'_{L,rms}$
Main	1.682	-1.694	0.233	0.334
Surrounding	1.679	0.816	0.190	0.668

양상이 유사하며 주위 실린더의 $C'_{L,rms}$ 값의 변화폭이 $L \geq 4.0$ 구간에서 더 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 정체점(stagnation point)의 변화로 확인할 수 있으며, Fig. 6 에서 설명된다.

수치 해석의 결과는 Sharman 등⁽⁴⁾의 논문 결과와 잘 일치하는 것 또한 확인할 수 있었다.

Fig. 6 은 $L=4.0$ 일 때 주 실린더와 주위 실린더의 정체점(stagnation point)의 변화를 보여준다. 정체점은 압력이 최대인 곳으로 주 실린더에서는 변화가 작으나 주위 실린더에서는 $\pm 40^\circ$ 로 크게 변하는 것을 알 수 있다. 이것은 주 실린더의 와홀림으로 인하여 주위 실린더의 상류 유동을 복잡하게 만들어서 주위 실린더의 $C'_{L,rms}$ 값의 변화폭을 크게 만든다.

4.3 임의의 위치에 배열된 경우

두 개의 원형 실린더가 임의의 위치에 배열되어 있을 때, 중심거리를 나타내는 두 변수(L , T)의 변화에 따른 두 실린더가 받는 유체력의 변화에 대한 수치적 해석을 수행하였다.

두 개의 실린더가 가장 근접한 $L=0.5$, $T=1.0$ 일 때 두 실린더에 작용하는 유체력의 크기가 가장 크게 계산되었다. 이는 두 실린더 사이가 매우 가까워 실린더 사이의 상호간섭이 가장 크게 발생을 하였을 것이다. 이 위치에서 시간 평균된 유체력 계수, $C'_{D,rms}$, $C'_{L,rms}$ 값들의 크기는 Table 2 에 나타내었다.

Fig. 7 은 T 를 1.0 으로 고정시키고 L 이 0.5, 1.0, 1.5 으로 변화될 때 실린더 표면에서의 시간 평균된 압력계수(\bar{C}_p)값의 분포를 표면각(θ)을 이용하여 나타내었다. C_D 의 관점에서 보면 $L=0.5$, $T=1.0$ 일 때 주 실린더의 \bar{C}_p 값은 나머지 두 경우에 비해

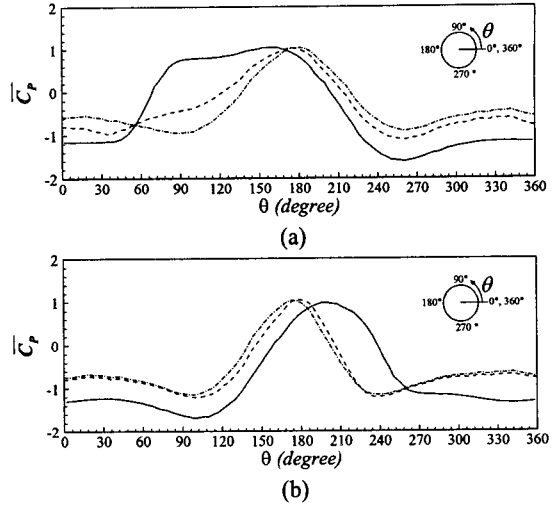


Fig. 7 Distribution of the averaged pressure coefficient around the circular cylinders, $Re=100$: (a) main cylinder, (b) surrounding cylinder ; —, $L=0.5$, $T=1.0$; ----, $L=1.0$, $T=1.0$; - · - · -, $L=1.5$, $T=1.0$

$170^\circ \leq \theta \leq 270^\circ$ 구간에서 약간 낮지만, $90^\circ \leq \theta \leq 170^\circ$ 구간에서는 많이 높은 것을 알 수 있다. 따라서 주 실린더의 앞쪽(up-stream)부분의 압력이 대체로 높게 된다. 또한 $60^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ 구간에서는 압력이 높지만, 구간의 길이가 짧고, $0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$, $270^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$ 구간에서는 압력이 낮아져, 전체적으로 주 실린더의 뒤쪽(down-stream)부분의 압력이 낮다. 한편 C_L 의 관점에서 보면 $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ 구간에서는 압력이 높고($0^\circ \leq \theta \leq 55^\circ$ 구간에서 압력이 낮지만 구간의 길이가 짧고, 압력차이가 크지 않다), $180^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$ 구간에서는 압력이 낮다. 이러한 \bar{C}_p 값의 분포는 $L=0.5$, $T=1.0$ 일 때 주 실린더의 \bar{C}_D 와 \bar{C}_L 값이 가장 커지는 이유가 된다. 주위 실린더의 표면에서 \bar{C}_p 값은 $190^\circ \leq \theta \leq 260^\circ$ 구간에서 다른 경우에 비해 크게 계산되었으며, 나머지 각도에서는 상대적으로 더 작게 측정되었다. 이 또한 주위 실린더의 \bar{C}_D , \bar{C}_L 값이 가장 커지는데 영향을 미친다. $T=1.0$ 으로 고정시키고 $L=2.0, 3.0, 4.0, 5.0$ 일 때는 $L=1.5$, $T=1.0$ 일 때와 \bar{C}_p 값의 분포가 유사하여 Fig. 7 에 나타내지 않았다.

Fig. 8 은 $T=1.0$ 으로 고정시키고, L 의 변화에 따른 시간 평균된 압력계수(\bar{C}_p)의 최대값이 발생하는 지점의 위치를 나타내었다. 거리가 멀어짐에

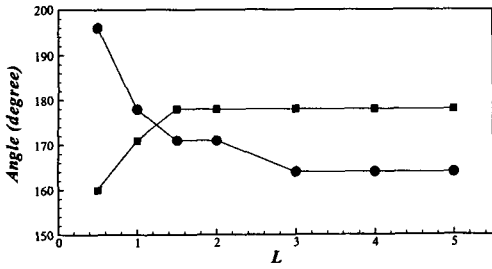


Fig. 8 Location of maximum \bar{C}_p ; $T=1.0$, $Re=100$; \blacksquare —, main cylinder ; \bullet —, surrounding cylinder

따라 최대 \bar{C}_p 가 발생하는 위치가 주 실린더의 경우 $\theta=178^\circ$, 주위 실린더의 경우 $\theta=164^\circ$ 로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 즉 거리가 멀어짐에 따라 주 실린더의 최대 \bar{C}_p 값이 발생하는 위치가 하나의 실린더에서의 위치로 다가가는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 두 개의 실린더가 임의의 위치에 배열되어 있을 때, 두 실린더에 작용하는 유체력, $C'_{D,rms}$, $C'_{L,rms}$ 값들을 등분포선(contour)으로 나타내었다. 이때 \bar{C}_L 을 제외한 각각의 값들은 하나의 실린더에서의 값으로 표준화(normalization)하였다. 하나의 실린더에서의 \bar{C}_D , \bar{C}_L , $C'_{D,rms}$, $C'_{L,rms}$ 값들은 각각 1.34, 0.0, 0.0065, 0.23이다.

Fig. 9(a)는 주 실린더의 \bar{C}_D 값의 등분포선(contour)을 나타내었다. \bar{C}_D 값은 실린더의 위치가 가장 가까울 때($L=0.5$, $T=1.0$)를 최대값으로 하여 실린더 사이의 떨어진 중심거리가 멀어짐에 따라서 작게 계산되었다. 같은 거리만큼 떨어져 있다면, 두 실린더 위치가 주유동 방향으로 수직인 방향으로 있는 경우가 주유동 방향으로 있는 것에 비해 더 큰 \bar{C}_D 값을 가지는 것을 알 수 있다. 이는 주유동 방향에 수직으로 정렬되어 있는 경우, 실린더 사이에 발생하는 정압이 받는 면적이 커지기 때문이다. 경사각(ϕ)이 대략 60° 을 기준으로 하여, 이보다 클 때는 주 실린더의 \bar{C}_D 값은 하나의 실린더에서의 \bar{C}_D 값보다 커지며, 작아질 때는 하나의 실린더에서의 \bar{C}_D 값보다 작아지는 것을 알 수 있다.

Fig. 9(b)는 주 실린더의 \bar{C}_L 값의 등분포선(contour)을 나타내었다. 계산영역 안에서 주 실린더의 위치는 주위 실린더에 비해 항상 같거나 낮게 ($-y$ 방향) 위치하게 된다. 이러한 기하학적인 원인

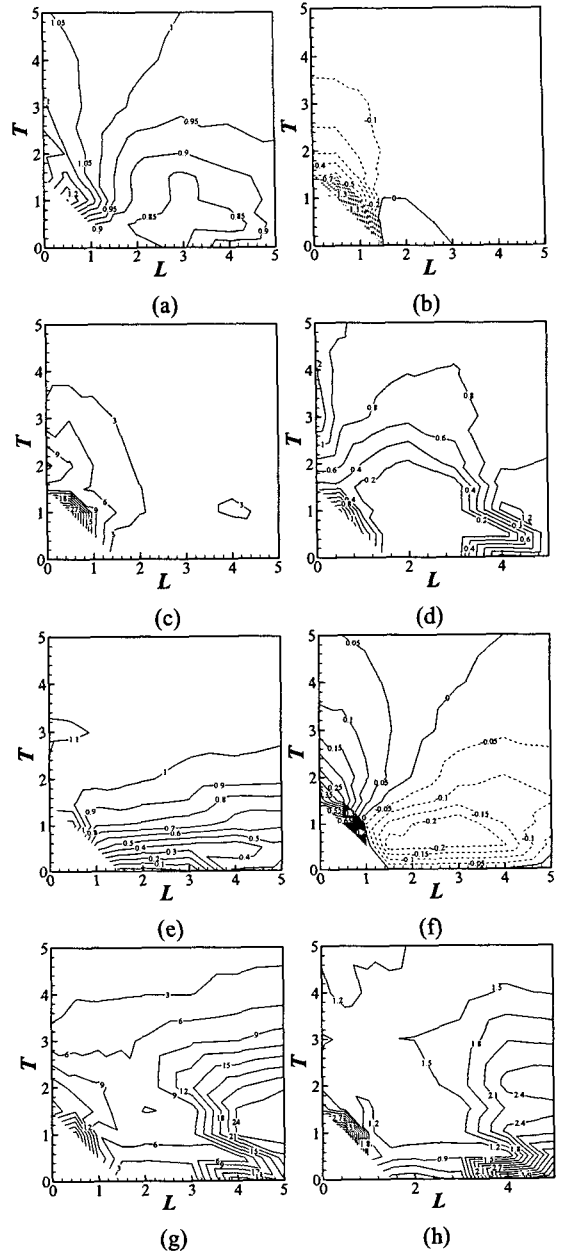


Fig. 9 Contours of two staggered circular cylinders at $Re=100$, normalized by single cylinder values: (a) \bar{C}_D of main cylinder ; (b) \bar{C}_L of main cylinder ; (c) $C'_{D,rms}$ of main cylinder ; (d) $C'_{L,rms}$ of main cylinder ; (e) \bar{C}_D of surrounding cylinder ; (f) \bar{C}_L of surrounding cylinder ; (g) $C'_{D,rms}$ of surrounding cylinder ; (h) $C'_{L,rms}$ of surrounding cylinder

으로 인하여 전체 계산영역에서 \bar{C}_L 값은 음의 값을 가진다. 즉 주위 실린더의 존재로 인하여, $-y$ 방향으로 힘을 받는다. Fig. 7(a)에서 확인할 수 있듯이, 세 경우에 대하여 $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ 에서의 압력계수 값이 $180^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$ 에서의 압력계수보다 상대적으로 큰 값을 가짐을 보아도 알 수 있다. 주위 실린더의 존재는 주 실린더의 위쪽을 지나가는 유동의 저항의 역할을 하게 되고, 이로 인해 압력이 커진 것을 알 수 있다. \bar{C}_D 값의 변화 양상과 유사하게 두 실린더의 위치가 가장 가까울 때를 기준으로 하여 거리가 멀어지면 멀어질수록, \bar{C}_L 값의 절대값이 점점 작아지게 된다.

Fig. 9의 (c)와 (d)는 주 실린더의 $C'_{D,rms}$ 와 $C'_{L,rms}$ 값의 등분포선(contour)을 각각 나타내었다. $C'_{D,rms}$ 의 경우 가장 가까운 위치에 있을 때($L=0.5, T=1.0$)의 값이 가장 크게 계산되었고, 거리가 멀어질수록 작은 값을 가진다는 것을 확인할 수 있었다. $C'_{L,rms}$ 값은 $L=0.5, T=1.0$ 와 $L=0.0, T=3.0$ 일 때 가장 크게 계산되었고, $1.5 \leq L \leq 3.0, T \leq 1.5$ 구간에서의 값이 작게 계산되었다. 4.2 절에서 언급하였듯이 두 개의 실린더가 주유동 방향으로 정렬되어 있을 때 $L \leq 3.0$ 구간에서는 주 실린더에서 와플림 현상이 발생하지 않는다. 이 구간에서는 주 실린더의 후류가 안정화(stable)되어 있어 $C'_{L,rms}$ 값이 최소가 된다.

Fig. 9(e)는 주위 실린더의 \bar{C}_D 값의 등분포선(contour)을 나타내었다. \bar{C}_D 값의 변화의 폭은 주 실린더보다 확연히 크다. 대략 $L \geq 0.5, T \leq 2.0$ 구간에서는 하나의 실린더에서의 \bar{C}_D 값보다 항력이 작아진다. 항력감소 효과는 T 가 작아질수록 더 커지며, L 의 변화보다 T 의 변화에 민감한 것을 알 수 있다. 두 개의 실린더가 주유동 방향으로 정렬된 경우($T=0.0$) 4.2 절에서 언급하였듯이 $L \leq 3.0$ 구간에서 음의 \bar{C}_D 값을 가지는데, 절대값의 크기가 작아서 등분포선에는 표시되지 않았다.

Fig. 9(f)는 주위 실린더의 \bar{C}_L 값의 등분포선(contour)을 나타내었다. 경사각(ϕ)이 대략 50° 을 기준으로 하여 이 각보다 커지면 양의 값을 가지고, 작아지면 음의 값을 가지는 것을 알 수 있다. $\phi \geq 50^\circ$ 구간에서는 가장 가까운 거리($L=0.5, T=1.0$)를 기준으로 하여 멀어지면 멀어질수록 \bar{C}_L 값이 점점 작아진다. $\phi \leq 50^\circ$ 구간에서는 $1.5 \leq L \leq 3.0, 0.5 \leq T \leq 1.0$ 일 때 \bar{C}_L 값의 절대값은 가장 크며, 두 실린더간의 거리가 멀어질수록

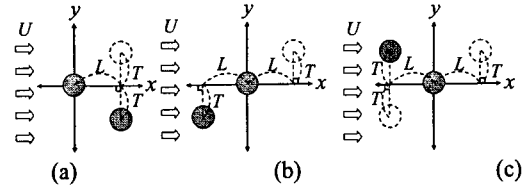


Fig. 10 Examples of arbitrary position of surrounding cylinder with the main cylinder fixed at origin: (a) 4-quadrant, (b) 3-quadrant, (c) 2-quadrant

절대값은 작아지게 된다.

Fig. 9의 (g)와 (h)는 주위 실린더의 $C'_{D,rms}$ 와 $C'_{L,rms}$ 값의 등분포선(contour)을 각각 나타내었다. $C'_{D,rms}$ 값은 두 개의 실린더가 가장 가까울 때 가장 큰 값을 가지며, $4.0 \leq L \leq 5.0, T \leq 1.5$ 일 때 상대적으로 큰 값을 가진다. 4.2 절 Fig. 6에서 언급하였듯이 두 개의 실린더가 주유동 방향으로 정렬되어 있을 때 $L \geq 4.0$ 구간에서 정체점(stagnation point)의 변화가 x 축에 대칭이었다. 그러나 $4.0 \leq L \leq 5.0, T \leq 1.5$ 일 때는 정체점들이 두 실린더의 위치 때문에 x 축에 대칭적이지 않아서 주위 실린더의 $C'_{D,rms}$ 값을 증가시킨다. $C'_{L,rms}$ 값은 두 개의 실린더가 가장 가까울 때 가장 큰 값을 가지며, 4.2 절에 언급하였듯이 $T=0.0, L \geq 4.0$ 구간에서 상대적으로 큰 값을 가진다.

본 연구에서는 주 실린더를 원점에 고정시키고 주위 실린더의 임의의 위치를 xy 평면의 1 사분면으로 제한하였다. 왜냐하면 두 실린더의 기하학적 대칭성으로 인하여, 각각의 실린더가 어떤 임의의 위치에 놓여있더라도 기 결과를 토대로 유체력을 계산할 수 있기 때문이다. 균일한 입구 속도(U) 때문에 x 축 대칭이동이 가능하며, 두 실린더의 크기가 같기 때문에 원점 대칭이동을 할 수 있다. 주 실린더를 원점에 고정하고, 주위 실린더의 위치를 x 축 대칭이동과 원점 대칭이동을 이용하여 1 사분면으로 옮긴다. 1 사분면상의 L 과 T 에서의 유체력은 이미 계산되어 있기 때문에 임의의 위치에서의 유체력을 쉽게 예상할 수 있다. 이때 x 축 대칭이동을 이용하면, 두 실린더 모두 \bar{C}_L 값의 부호를 바꾸어 주어야 하며, 원점 대칭이동을 이용하면 주 실린더의 값은 주위 실린더에서의 값을 이용하고 주위 실린더의 값은 주 실린더에서의 값을 이용해야 한다. Fig. 10(a)와 같이 주위 실린더가 4 사분면에 위치해 있으면 x 축에 대칭이동을 이용하고, Fig. 10(b)와 같이 주위 실린더가 3 사분면에 위치해 있으면 원점 대칭이동을 이용하며,

Fig. 10(c)처럼 2 사분면에 있으면 x 축 대칭이동 후 다시 원점 대칭이동을 이용한다.

5. 결론

본 연구에서는 $Re=100$ 에서 두 개의 실린더가 일반적인 위치에 있을 때 주 실린더와 주위 실린더에 작용하는 각각의 유체력에 관한 연구를 수치적으로 수행하였다.

두 개의 실린더가 주유동 방향에 수직으로 정렬되어 있을 때 실린더의 중심 거리가 $T \leq 2$ 일 때는 주 실린더와 주위 실린더에서 모두 시간에 따른 불규칙한 C_D 와 C_L 값의 결과를 얻었으나, $T \geq 3.0$ 일 때는 규칙적인 결과를 얻을 수 있었다. 이는 Kang⁽¹⁾의 연구결과와 일치하였다. \bar{C}_L 값의 결과를 통하여 두 실린더가 가까울수록 두 실린더간 배척하는 힘이 증가되며, 거리가 멀어지면 질수록 배척하는 힘이 약해지는 것을 알 수 있었다.

두 개의 실린더가 주유동 방향으로 정렬되어 있을 때는 주 실린더가 와플림 구조를 가지지 않는 임계거리가 존재한다는 잘 알려진 사실을 유체력 계수값들의 변화로 확인할 수 있었다. $L \leq 3.0$ 일 때는 주위 실린더는 음의 \bar{C}_D 값을 가지게 되며, 주 실린더와 주위 실린더의 \bar{C}_D 값들이 모두 하나의 실린더에서의 \bar{C}_D 값보다 작게 계산되었다. 두 개의 실린더가 주유동 방향으로 정렬되어 있을 때는 항력감소 효과가 있음을 알 수 있었다.

두 개의 실린더가 임의의 방향으로 정렬되어 있을 때 중심거리(L , T)의 변화에 따른 유체력의 크기를 등분포선(contour)을 이용하여 지도를 만들었다.

두 개의 실린더가 가장 가까운 위치에 있을 때 두 실린더의 \bar{C}_D 와 \bar{C}_L 값들이 최대값을 가졌고, 거리가 멀어짐에 따라 감소하는 것을 알 수 있었다. 주 실린더의 경우, 경사각(ϕ)이 대략 60° 을 기준으로 이보다 크면 항력증가 효과가 있고, 작으면 항력감소 효과가 있는 것을 알 수 있었다. 주위 실린더는 대략 $L \geq 0.5$, $T \leq 2.0$ 구간에서 항력감소 효과가 있는 것을 알 수 있었으며, 이 구간에서는 L 의 변화보다는 T 의 변화에 항력감소 효과가 크다는 것을 알 수 있었다. 주 실린더의 \bar{C}_L 은 두 실린더의 기하학적인 위치로 인하여 음의 값을 가지는 것을 알

수 있었다. 주위 실린더는 경사각(ϕ)이 대략 50° 을 기준으로 크면 양의 \bar{C}_L 값을, 작으면 음의 \bar{C}_L 값을 가지는 것을 알 수 있었다.

주 실린더와 주위 실린더 모두 두 실린더가 가장 가까울 때 최대의 $C_{D,rms}$ 와 $C_{L,rms}$ 값을 가지는 것을 알 수 있었다. 주위 실린더의 $C'_{D,rms}$ 값은 $4.0 \leq L \leq 5.0$, $T \leq 1.5$ 구간에서 $C'_{L,rms}$ 값은 $T=0.0$, $L \geq 3.0$ 구간에서 두 번째로 큰 값을 가지며, 이것을 정체점(stagnation point)을 이용하여 설명하였다.

본 연구에서는 주 실린더를 원점에 고정시키고, 주위 실린더의 임의의 위치를 xy 평면의 1 사분면으로 한정하였다. 왜냐하면 주위 실린더의 임의의 위치를 x 축 대칭이동과 원점 대칭이동을 이용하여 1 사분면으로 옮길 수 있기 때문이다. 이때 주의할 점은 x 축 대칭이동을 하면 \bar{C}_L 의 부호를 바꾸어 주어야 하고, 원점 대칭을 하면 주 실린더와 주위 실린더의 유체력 계수값을 바꾸어 주어야 한다. 이러한 대칭성을 이용하면, 임의의 위치에 놓인 두 원형 실린더에 작용하는 유체력을 쉽게 예상할 수 있다.

후 기

이 논문은 2006년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2006-311-D00357) 또한 이 연구의 주요 계산은 한국과학기술정보연구원(KISTI)이 무상으로 제공한 슈퍼 컴퓨팅 자원을 이용하여 수행되었음.

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. 104107-1~11.
- (4) 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.

- (5) Sumner, D., Richards, M. D. And Akosile, O. O., 2005, "Two Staggered Circular Cylinders of Equal Diameter in Cross-Flow," *J. of Fluids And Structures*, Vol. 20, pp. 255~276.
- (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) Mittal, S. and Raghuvanshi, A., 2001, "Control Of Vortex Shedding Behind Circular Cylinder for Flows at Low Reynolds Numbers," *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, Vol. 35, pp. 421~447.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) 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.