

# 두 개의 원형 실린더에 작용하는 유체력

이경준<sup>†</sup> · 양경수\* · 윤동혁\*\*

## 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 평균 값
$C_{D, rms}^{\prime}$	: $C_D$ 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 평균 값
$C_{L, rms}^{\prime}$	: $C_L$ 의 RMS 값(= $\sqrt{(C_L - \bar{C}_L)^2}$ )
$C_p$	: 압력 계수(= $(p - p_{\infty}) / \frac{1}{2} \rho U^2$ )
$D$	: 실린더 지름
$f$	: 와홀림 진동수
$f_i$	: 운동량 부가
$L$	: 두 실린더 중심의 주 유동방향 거리
$p$	: 순간 압력
$p_{\infty}$	: 입구에서의 압력
$q$	: 질량 원천/흡입
$Re$	: 레이놀즈 수(= $UD/\nu$ )
$St$	: Strouhal 수(= $fD/U$ )
$T$	: 두 실린더 중심의 주 유동에 수직거리
$u_i$	: 2차원 직교 좌표계 속도 성분
$U$	: 균일한 입구속도
$\phi$	: 경사각 (주 유동방향에 대한 두 실린더 중심을 이은 선의 각도)
$\nu$	: 동점성 계수
$\theta$	: 실린더 표면각
$\rho$	: 유체밀도

---

<sup>†</sup> 회원, 인하대학교 대학원  
E-mail : ekj1034@hanafos.com  
TEL : (032)860-8771 FAX : (032)868-1716  
\* 회원, 인하대학교 대학원 기계공학과  
\*\* 회원, 인하대학교 대학원

## 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 개의 실린더가 주 유동 방향과 수직으로 위치에 있을 때(side-by-side), 떨어진 거리에 따라 유동 패턴과, 두 실린더에 작용하는 힘들이 각각 달라지게 된다. 이때, 레이놀즈 수 ( $Re$ )의 영향보다는 떨어진 거리의 영향이 더 크다.<sup>(1)</sup> 떨어진 거리(표면에서 표면 까지 거리)가  $5D$  이상일 때는 마치 독립적인 실린더처럼 유동 간섭이 사라진다. Williamson<sup>(2)</sup>은 유동 가시화 실험을 통하여 두 실린더가 주 유동 방향으로 수직으로 정렬된 위치에 있을 때의 와흐림 구조를 분류하였다.

두 개의 실린더가 주 유동 방향으로 정렬되어 있을 때(tandem), Main 실린더가 와흐림 구조를 가지지 않는 임계거리가 존재 하게 되며, 임계거리는  $Re$  수 에 따라서 조금씩 변한다. Mizushima 와 Suehiro<sup>(3)</sup>, Sharman 등<sup>(4)</sup>은  $Re=100$  일 때 두 실린더에 작용하는 힘에 대하여 수치적으로 연구를 수행하였다. Sumner 등<sup>(5)(6)</sup>은 난류 영역에서 두 실린더에 작용하는 힘과, 유동 패턴에 대하여 연구하였다. 그들은 유동 패턴을 총 9 개로 분류하여, 유동 특징을 파악 하였다.

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 가상 경계법(Immersed boundary method)<sup>(7)</sup>을 이용하여 수치적으로 수행 되었다.

## 2. 수치 해석 기법

### 2.1 지배 방정식

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

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} - q = 0 \quad j=1,2 \quad (1)$$

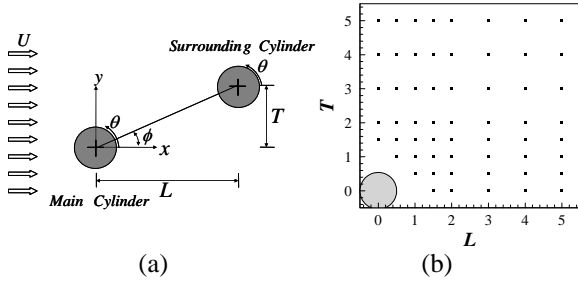
$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + f_i \quad (2)$$

식 (1), (2)는 입구 속도  $U$ , 실린더 지름  $D$  로 무차원화된 식이며, 가상 경계법에 의해 추가된  $f_i$ ,  $q$  는 각각 운동량 부가, 질량 보존을 만족시키기 위한 질량 원천/흡입을 의미한다.  $u_i$  는 흐름방향(streamwise,  $x$ ), 수직방향(normal,  $y$ )의 속도 성분이 각각  $u_1$ ,  $u_2$  인 속도벡터이다.  $p$  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-Nicolson 의 음해법(implicit)으로 적분이 수행되었다. 연속 방정식과 운동량 방정식을 분리하기 위하여 Fractional Step<sup>(8)</sup> 기법이 사용 되었다.

### 2.2 계산 영역과 경계 조건

Main 실린더를 좌표계 원점에 고정시키고, surrounding 실린더의 위치를 바꾸어 가면서 계산을 수행하였다. (Fig. 1 (a)) 두 개의 원형 실린더 중심들의 주 유동 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 하지 않았다. Main 실린더에 대한 surrounding 실린더의 위치는 총 58 가지 경우가 있으며, Fig. 1 (b)에 잘 나타나 있다. 전체 계산 영역은 main 실린더를 기준으로  $-35D \leq x \leq 35D$ ,  $-50D \leq y \leq 50D$  로 고정시킨 뒤 surrounding 실린더 중심의 위치를 Fig. 1(b)와 같이 바꾸어가며 계산하였다. 각 실린더에 접하는 정사각형 영역 안에는  $32 \times 32$  개의 균일하게 분포된 격자를 사용하였으며, 전체 격자는  $x$



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

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

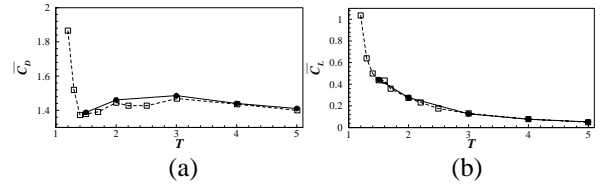
	$Re$	$\bar{C}_D$	$C'_L$	$St$
Present	100	1.34	0.33	0.165
Kang <sup>(1)</sup>	100	1.33	0.32	0.165
Park et al. <sup>(9)</sup>	100	1.33	0.33	0.165
Williamson <sup>(10)</sup>	100	-	-	0.164

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.

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 실린더에 접하는 정사각형 영역 안에  $32 \times 32$  개, 전체  $320 \times 192$  개의 격자를 사용하였다. 그 결과는 Table 1 에 나타내었으며, 다른 연구자들과 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.



**Fig. 2** (a)  $\bar{C}_D$ , (b)  $\bar{C}_L$  of surrounding cylinder in side-by-side arrangement,  $Re=100$ ;  $\text{---}\bullet\text{---}$ , present study;  $\text{-}\square\text{-}$ , Kang<sup>(1)</sup>.

## 4. 결과

4.1 주 유동 방향에 대하여 수직 방향으로 정렬된 경우

본 연구에서는 두 개의 원형 실린더가 주 유동 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. 2(a)는 수직 방향 중심거리( $T$ )에 따른 surrounding 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 하나 일 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. 2 (b)는 수직 방향 중심거리( $T$ )에 따른 surrounding 실린더의  $\bar{C}_L$  값의 변화를 보여준다.  $\bar{C}_L$  값은  $T$  가 커질수록 0 으로 수렴하는 것을 알 수 있다. 이는 곧 수직 방향으로 떨어진 거리가 가까울수록 실린더간의 서로 밀어내는 힘의 크기가 커지며, 멀어질수록 실린더간의 밀어내는 힘의 크기가 작아진다는 것을 의미한다.

Fig. 2 (c)는 수직 방향 중심거리( $T$ )에 따른 surrounding 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.  $T=3.0$  근처에서 항력 계수와  $C'_{L, rms}$  값이 급변하는 것을 Fig. 2 에서 확인 할 수 있었다. 시간 평균된 유체력 계수와  $C'_{L, rms}$  값은 Kang<sup>(1)</sup>의 연구 결과와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

#### 4.2 주 유동 방향으로 정렬된 경우

본 연구에서는 두 개의 원형 실린더가 주 유동 방향으로 정렬되어 있을 때 ( $T=0.0$ ),  $L=1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0$  인 경우에 대하여만 연구를 수행하였다. 두 개의 실린더가 주 유동 방향으로 정렬되어 있는 경우, 떨어진 거리에 따라서 main 실린더가 와흐림을 생성하지 않는 임계값이 존재하게 되며, 임계값을 기준으로 하여 유체력 또한 급변하는 것은 이미 잘 알려져 있다.

Fig. 3 은 두 개의 실린더가 주 유동 방향으로 정렬되어 있을 때, 실린더의 주 유동 방향 중심거리 ( $L$ )의 변화에 따른 main 실린더와 surrounding 실린더의  $\overline{C}_D$  값과  $C'_{L, rms}$  값의 변화를 나타내었다. main 실린더와 surrounding 실린더의  $\overline{C}_D$ ,  $C'_{L, rms}$  값이  $3.0 < L < 4.0$  구간에서 급변하는 것을 알 수 있다. 이것은 곧 이 구간에서 main 실린더가 와흐림을 생성하지 않는 임계  $L$  값이 존재하는 것을 의미한다.

Fig. 3 (a)와 (b)를 보면, main 실린더와 surrounding 실린더 모두  $\overline{C}_D$  값은  $1.5 \leq L \leq 5.0$  구간에서 하나의 실린더의  $\overline{C}_D$  값(1.34)보다 작게 계산되었다. 두 개의 실린더가 주 유동 방향으로 정렬된 경우 surrounding 실린더뿐만 아니라 main 실린더 또한 하나의 실린더에 비해 항력이 감소하는 효과가 있다는 것을 알 수 있다. Main 실린더의  $\overline{C}_D$  값은  $L \leq 3.0$  구간에서  $L$ 이 커질수록  $\overline{C}_D$  값은 작아지다가  $L \geq 4.0$  구간에서는  $L$ 이 커질수록 커졌다. surrounding 실린더의  $\overline{C}_D$  값은  $L$ 이 커질수록  $\overline{C}_D$  값 또한 커지는 경향이 있으며 임계 거리 보다 작은 영역( $L \leq 3.0$ )에서는 음의 값을 가지는 것을 확인 할 수 있다. Fig. 3 (c)와(d)를 보면 main 실린더와 surrounding 실린더의  $C'_{L, rms}$  값의 변화 양상이 유사하며 surrounding 실린더의  $C'_{L, rms}$  값의 변화폭이  $L \geq 4.0$  구간에서 더 크다는 것을 알 수 있다. 수치 해석의 결과는 Sharman 등<sup>(4)</sup>의 논문 결과와 잘 일치하는 것 또한 확인 할 수 있었다.

#### 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.

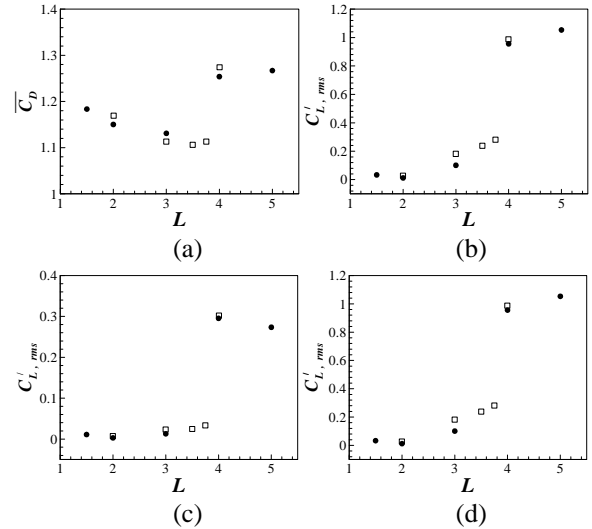
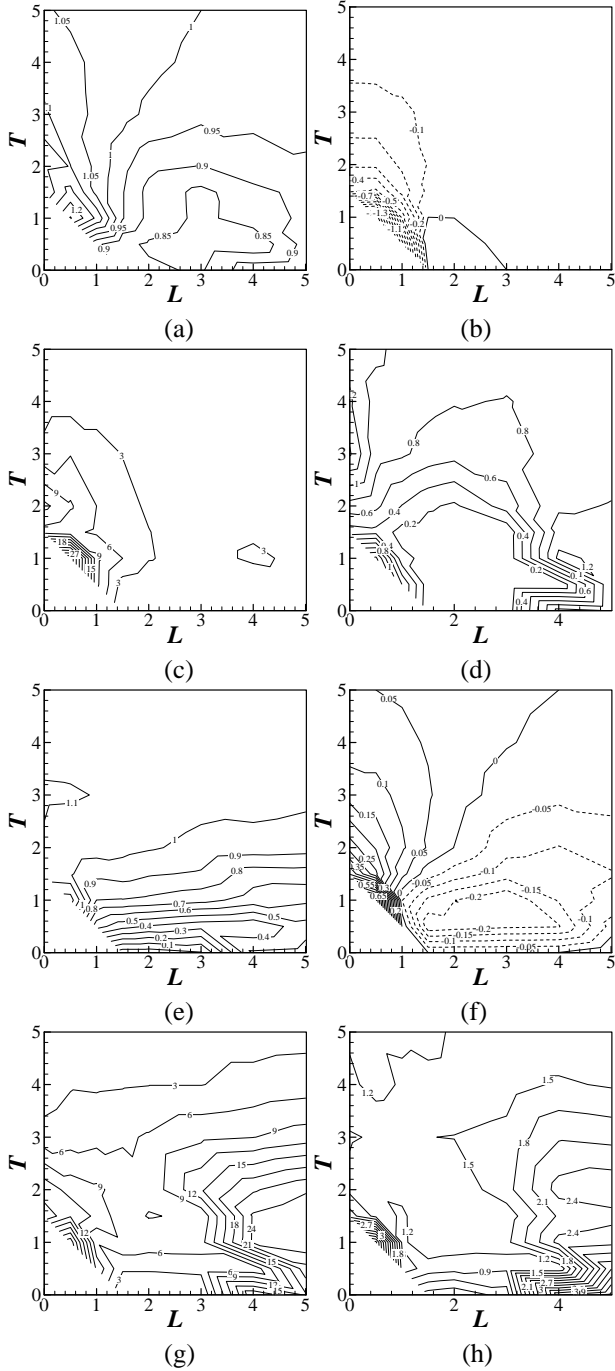


Fig. 3 Two circular cylinders arranged in tandem,  $Re=100$ : (a)  $\overline{C}_D$  of main cylinder, (b)  $\overline{C}_D$  of surrounding cylinder, (c)  $C'_{L, rms}$  of main cylinder, (d)  $C'_{L, rms}$  of surrounding cylinder ;  $\bullet$ , present study ;  $\square$ , Sharman<sup>(4)</sup>.

Fig. 4 는 두 개의 실린더가 임의의 위치에 배열되어 있을 때, 두 실린더에 작용하는 유체력,  $C'_{D, rms}$ ,  $C'_{L, rms}$  값들을 등분포선(contour)으로 나타내었다. 이때  $\overline{C}_L$  값을 제외한 각각의 값들은 하나의 실린더에서의 값으로 표준화(normalization)하였다. 하나의 실린더에서의  $\overline{C}_D$ ,  $\overline{C}_L$ ,  $C'_{D, rms}$ ,  $C'_{L, rms}$  값들은 각각 1.34, 0.0, 0.0065, 0.23 이다.

Fig. 4 (a)는 main 실린더의  $\overline{C}_D$  값의 등분포선(contour)을 나타내었다.  $\overline{C}_D$  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 주 유동 방향에 수직인 방향으로 있는 경우가 주 유동 방향으로 있는 것에 비해 더 큰  $\overline{C}_D$  값을 가지는 것을 알 수 있다. 이는 주 유동 방향에 수직으로 정렬되어 있는 경우, 실린더 사이에 발생하는 정압이 받는 면적이 커지기 때문이다. 경사각( $\phi$ )이 대략  $60^\circ$ 을 기준으로 하여, 이보다 클 때는 main 실린더의  $\overline{C}_D$  값은 하나의 실린더에서의  $\overline{C}_D$  값보다 커지며, 작아질 때는 하나의 실린더에서의  $\overline{C}_D$  값보다 작아지는 것을 알 수 있다.



**Fig. 4** 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.

Fig. 4 (b)는 main 실린더의  $\bar{C}_L$  값의 등분포선(contour)을 나타내었다. 계산 영역 안에서 main 실린더의 위치는 surrounding 실린더에 비해 항상 같거나 낮게( $-y$  방향) 위치하게 된다. 이러한 기하학적인 원인으로 인하여 전체 계산 영역에서  $\bar{C}_L$  값은 음의 값을 가진다. 즉 surrounding 실린더의 존재로 인하여,  $-y$  방향으로 힘을 받는다. Surrounding 실린더의 존재는 main 실린더의 위쪽을 지나는 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. 4 (c)와 (d)는 main 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 언급 하였듯이 두 개의 실린더가 주 유동방향으로 정렬되어 있을 때  $L \leq 3.0$  구간에서는 main 실린더에서 와류현상이 발생하지 않는다. 이 구간에서는 main 실린더의 후류가 안정화(stable)되어 있어  $C_{L, rms}'$  값이 최소가 된다.

Fig. 4 (e)는 surrounding 실린더의  $\bar{C}_D$  값의 등분포선(contour)을 나타내었다.  $\bar{C}_D$  값의 변화의 폭은 main 실린더 보다 확연히 크다. 대략  $L \geq 0.5, T \leq 2.0$  구간에서는 하나의 실린더에서의  $\bar{C}_D$  값보다 항력이 작아진다. 항력감소 효과는  $T$  이 작아 질수록 더 커지며,  $L$  의 변화 보다는  $T$  의 변화에 민감한 것을 알 수 있다.

Fig. 4 (f)는 surrounding 실린더의  $\bar{C}_L$  값의 등분포선(contour)을 나타내었다. 경사각( $\phi$ )이 대략  $50^\circ$  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 절대값은 작아지게 된다.

Fig. 4 (g)와 (h)는 surrounding 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.  $T = 0.0$ ,  $L \geq 4.0$  구간에서 상대적으로 큰 값을 가진다.

## 5. 결론

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

두 개의 실린더가 가장 가까운 위치에 있을 때 두 실린더의  $\bar{C}_D$  와  $\bar{C}_L$  값들이 최대값을 가졌고, 거리가 멀어짐에 따라 감소 하는 것을 알 수 있었다. Main 실린더의 경우, 경사각( $\phi$ )이 대략  $60^\circ$  을 기준으로 이보다 크면 항력증가 효과가 있고, 작으면 항력 감소 효과가 있는 것을 알 수 있었다. Surrounding 실린더는 대략  $L \geq 0.5$ ,  $T \leq 2.0$  구간에서 항력 감소 효과가 있는 것을 알 수 있었으며, 이 구간에서는  $L$  의 변화보다는  $T$  의 변화에 항력 감소효과가 크다는 것을 알 수 있었다. Main 실린더의  $\bar{C}_L$  은 두 실린더의 기하학적인 위치로 인하여 음의 값을 가지는 것을 알 수 있었다. surrounding 실린더는 경사각( $\phi$ )이 대략  $50^\circ$  을 기준으로 크면 양의  $\bar{C}_L$  값을, 작으면 음의  $\bar{C}_L$  값을 가지는 것을 알 수 있었다.

Main 실린더와 surrounding 실린더 모두 두 실린더가 가장 가까울 때 최대의  $C'_{D, rms}$  와  $C'_{L, rms}$  값을 가지는 것을 알 수 있었다. surrounding 실린더의  $C'_{D, rms}$  값은  $4.0 \leq L \leq 5.0$ ,  $T \leq 1.5$  구간에서  $C'_{L, rms}$  값은  $T = 0.0$ ,  $L \geq 4.0$  구간에서 두 번째로 큰 값을 가진다.

## 후 기

본 연구는 수중 운동체 특화 연구센터의 지원에 의하여 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-.
- (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) 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.
- (8) Kim, J. and Moin, P., 1985, "Application of a fractional-step method to incompressible Navier-Stokes equations," *J. Comp. Phys.*, Vol. 59, pp. 308
- (9) 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.
- (10) 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.