

〈 논문 〉

## 진동하는 두 개의 실린더 주위의 유동특성에 관한 연구

이대성\* · 하만영† · 윤현식\*\*  
(2007년 2월 15일 접수, 2007년 5월 11일 심사완료)

### A Study of Flow Characteristics of Two Oscillating Cylinders

Dae Sung Lee, Man Yeong Ha and Hyun Sik Yoon

**Key Words :** Oscillating Cylinders (진동하는 실린더), Wake (후류), Immersed Boundary Method (가상경계법)

#### Abstract

Flows around two oscillating cylinders in side-by-side arrangement at  $Re=185$  are simulated using an immersed boundary method. The cylinders oscillate vertically in opposite directions in uniform cross-flow. We describe flow patterns, drag and lift forces by varying distance between two cylinders ( $1.4 \leq g \leq 2.2$ ,  $1.0 \leq g \leq 1.8$ ) and oscillating frequency ratios ( $f_e/f_o=0.8$ ,  $f_e/f_o=1.0$  and  $f_e/f_o=1.2$ ). Wake patterns, drag and lift coefficients are affected by both of frequency ratio and gap between two cylinders. Near wakes of each case are classified with the definition of previous studies.

#### 1. 서 론

자유흐름에 수직하게 진동하는 실린더 주위의 유동은 해양 구조물, 전력선 주위의 흐름과 같이 고체와 유체의 상호작용이 일어나는 구조물에서 많이 경험하는 문제이다.

Williamson과 Roshko<sup>(1)</sup>, Gu 등,<sup>(2)</sup> Guilmineau와 Queutey<sup>(3)</sup>를 비롯한 많은 연구자들이 실험적, 수치적으로 균일 유동장에 수직한 방향으로 진동하는 한 개의 실린더에 대해 유동 특성을 분석하였다.

Williamson과 Roshko<sup>(1)</sup>는 낮은 레이놀즈 수 영역에서 진동 폭과 진동주파수의 변화에 따라 생성되는 후류의 형상을 분석하고, 그 메커니즘에 대한 연구를 수행하였다. 한 쌍(pair)의 와의 거동을 기호 'P'를 사용하여 나타내고, 하나

(single)의 와를 지칭하기 위하여 기호 'S'를 사용하여 나타내었다. 이러한 기호의 조합을 통하여 후류 패턴을 분류하였다.

Gu 등<sup>(2)</sup>은 저 레이놀즈 수 영역( $Re=185$ ) 과 고 레이놀즈 수 영역( $Re=5000$ )에서 진동하는 실린더 후류에 형성되는 유동의 형태를 실험적 연구를 통하여 조사하였다. 이 연구에서 각각의 레이놀즈 수 영역에서 진동주파수가 동기화 영역을 지날 때 실린더에서 유출되는 와의 방향이 변하는 것을 실험적으로 확인하였다.

Guilmineau와 Queutey<sup>(3)</sup>는 실린더가 진동할 때 실린더 주위에 형성되는 유동의 특성을 규명하였다. 이 때 진동 주파수 비의 변화에 따른 실린더 후류의 형태 및 항력과 양력의 변화를 조사하였다. 그들은 동기화 영역 부근에서 실린더의 와 유출의 방향이 바뀌는 것을 확인하였고, 관련 변수들의 변화에 따른 압력계수, 와도 등의 분포를 상세하게 규명하였다.

두 개의 정지한 실린더는 Kim과 Durbin,<sup>(4)</sup> Sumner 등<sup>(5)</sup>과 Kang<sup>(6)</sup>에 의해 연구되었다.

Kang<sup>(6)</sup>은  $40 \leq Re \leq 160$  영역에서, 주 유동에 수직

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부

E-mail : myha@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2440 FAX : (051)515-3101

\* 부산대학교 대학원 기계공학과

\*\* 부산대학교 첨단조선공학연구센터

인 방향으로 나란히 놓인 두 개의 정지한 실린더를 지나는 유동에 대해 연구 하였다. 그는 실린더의 후류 패턴을 실린더 간격과 레이놀즈 수에 따라 “반대위상동조(anti-phase synchronized)” ( $g \geq 2$ ), “동일위상동조(in-phase synchronized)” ( $g \geq 1.5$ ), “임의교번(flip-flopping)” ( $0.4 \leq g \leq 1.5$ ), “단일물체(single bluff-body)” ( $g \leq 0.4$ ), “편향(deflected)” ( $50 \leq Re \leq 110$  과  $0.2 \leq g \leq 1$ ) 그리고 “정상상태(steady)” ( $Re \leq 40$  과  $g \geq 0.5$ ) 로 분류 하였다. 그는 레이놀즈 수와 실린더 간격을 인자로 하여 후류 패턴을 나타내는 지도(map)를 제시하였다. 층류 영역에서는 레이놀즈 수 보다 실린더 사이의 간격이 후류 패턴에 더 많은 영향을 준다고 밝혔다. 그에 따르면, 본 연구에서 고려하는 실린더 사이의 간격과 레이놀즈 수에서는,  $1.4 \leq g \leq 2.2$  인 경우, 동일 혹은 반대위상동조 패턴이 나타나고  $1.0 \leq g \leq 1.8$  인 경우에는 임의교번이나 동일 혹은 반대위상동조 패턴이 나타난다.

두 개의 실린더가 진동하는 경우에 대해서는 아직 많은 연구가 이루어지지 않았다.

Mahir와 Rockwell<sup>(7)</sup>은 두 개의 실린더가 자유 흐름에 수직하게 배열되어 각각 다른 방향으로 독립적으로 진동하는 경우의 유동 특성을 규명하는 실험적 연구를 실행하였다. 실린더의 진동주파수와 진폭을 변화시켜, 실린더를 지나는 후류의 특정 지점의 속도를 시간에 대해 측정하고 속도 스펙트럼을 구하였다. 속도 스펙트럼에서 나타나는 주요 주파수를, 실린더의 진동주파수, 고정된 실린더의 와 유출 주파수 등과 비교하여 Locked-On과 Non-Locked-On을 구분하였다.

Jester와 Kallinderis<sup>(8)</sup>는 두 개의 실린더가 유동 방향에 대해 수평, 수직으로 배열된 경우에 대해 실린더 주위의 유동을 수치해석적으로 연구하였다. 실린더가 유동 방향에 수평으로 배열된 경우는 실린더가 유동에 의해 유동에 수직한 방향으로 진동한다고 가정하였다. Navier-Stokes 식의 해로부터 실린더 주위의 유동장 분포를 구하고, 유동이 실린더에 가하는 힘을 구해서 실린더의 위치와 속도를 결정하였다. 실린더가 유동 방향에 수평인 경우는 실린더가 강제진동을 한다고 가정하여 실린더의 위치와 속도를 시간에 대한 함수 주었다. 그들은 두 실린더가 각각 반대 방향으로(out-of-phase) 진동할 경우는 상부

실린더와 하부 실린더의 와 유출이 대칭적으로 발생하고, 실린더가 같은 방향으로(in-phase) 진동할 경우는 상부 실린더와 하부 실린더의 와 유출이 같은 방향으로 발생하는 것을 확인하고 실험 결과<sup>(7)</sup>와 비교하였다.

본 연구에서는 낮은 레이놀즈 수,  $Re=185$  에서 각각 독립적으로 반대 방향으로(out-of-phase) 진동하는 두 개의 실린더의 거리와 진동 주파수를 변화시켜 후류의 형상 및 항력, 양력의 분포를 조사하고 특징을 파악하였다.

## 2. 수치해석 방법

### 2.1 지배방정식

적교좌표계에서 진동하는 실린더를 구현하기 위하여 Kim<sup>(9)</sup> 등이 제안한 가상경계법 (Immersed Boundary Method)을 사용하였다. 자유흐름 속도,  $U$  와 실린더 직경  $D$  로 무차원화 된 비압축성 연속 방정식, 운동량 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} - q = 0 \quad (1)$$

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

여기서,  $Re$  는 레이놀즈 수,  $q$  는 질량 흡수/원천 (mass sink/source),  $f_i$  는 운동량 부가 함수이다.

본 연구에서는 유한 체적법을 이용하여 이산화하였으며, 비 균일 집중 격자 계를 사용하였다.<sup>(10)</sup> 시간에 대한 적분은, 대류항은 3차 정확도의 Adams-Bashforth 법을, 확산항은 2차 정확도의 Crank-Nicolson법을 사용하였다. 공간에 대한 적분은 중앙차분법을 사용하였다. Fractional step 법<sup>(11)</sup>을 사용하여 매 시간 단계에서 속도장이 연속 방정식을 만족하도록 하였다.

### 2.2 실린더의 진동

본 연구에서는  $Re=185$  에서, Fig. 1과 같이 y-방향으로 반대 위상을 가지고 주기적으로 진동하는 두 개의 실린더 주위의 유동장을 전산 해석 하였다. Fig. 1에 정의된 주기운동을 모사하는 방정식에서  $g_0$ ,  $A_e$  와  $f_e$  는 각각 초기 실린더 간격, 진폭과 가진 주파수이다. 여기서,  $A_e$  는 0.2로 고정하였다. 본 연구에서  $Re=185$ 일 때 고정된 한 개의 실린더를 해석하여 구한 와 유출 주파수는 0.192이고, 이를 주파수 비의 기준,  $f_0$  으로 사용하였다.

Table 1 Grid dependency test

	$\bar{C}_D$	r.m.s of $C_D$	r.m.s. of $C_L$
450×341	1.679	0.202	1.692
900×682	1.686	0.231	1.703
1350×1023	1.626	0.248	1.644

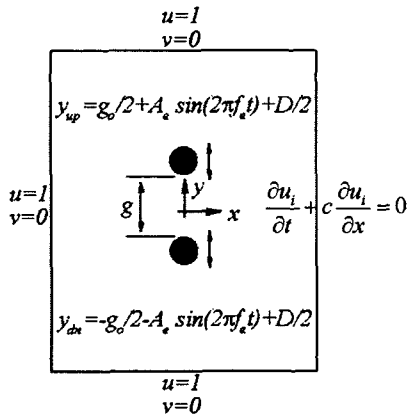
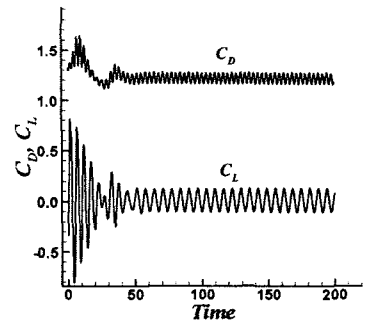


Fig. 1 Computational domain and boundary conditions

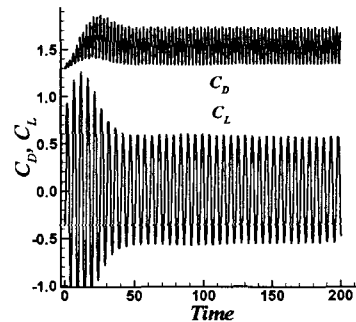
2.3 수치해석 검증

본 연구에서 사용한 수치해석 방법의 검증을 위해서 한 개의 진동하는 실린더와 두 개의 진동하는 실린더를 선행 연구 결과[3, 7]와 비교하였다. Fig. 2 에  $Re=185$ ,  $A_e=0.2$ , 주파수 비가 각각 0.8, 1.0 그리고 1.2 인 경우에 한 개의 진동하는 실린더에 대해 수치해석을 실행하여 시간에 대한 항력계수 ( $C_D$ )와 양력계수 ( $C_L$ ) 를 도시하였고 이는 Guilmineau와 Queuety<sup>(3)</sup>의 결과와 잘 일치한다. 여기서  $C_D$ ,  $C_L$  은 운동량 부가 값을 더한 값에 가상경계 내부 속도의 시간에 대한 변화 값을 빼서 구하였다. 경험적으로, 이 방법으로 계산한  $C_D$ ,  $C_L$  에서는, 일반적으로 가상경계법을 사용해서 움직이는 물체를 모사할 경우에 나타나는 시간에 대한 요동이 현저히 줄어들었다. 격자 수 도 요동에 영향을 주며 격자를 많이 사용할수록 요동이 줄어들었다.

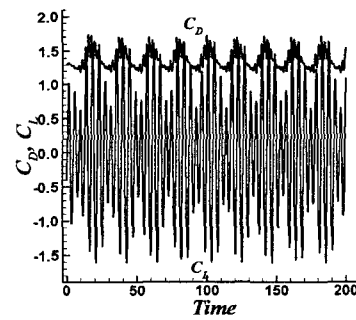
Fig. 3 에는 주파수비 0.8, 0.9, 1.0, 1.1 그리고 1.2 에 대한 항력계수의 시간 평균값과 항력계수와 양력계수의 r.m.s. 값을 표시하고 Guilmineau와 Queuety<sup>(3)</sup>와 비교 하고 잘 일치하는 것을 확인하였다. Fig. 4 는  $Re=160$ ,  $A_e=0.2$ ,  $f_e/f_o^{**}=1.0$  의 조건에서, 두 개의 진동하는 실린더의 순간 와도장을 나타내었다. 여기서  $f_o^{**}$  는 정지한 두 개의 실린더의 와 유출 주파수



(a)  $f_e/f_o=0.8$



(b)  $f_e/f_o=1.0$



(c)  $f_e/f_o=1.2$

Fig. 2 Drag and lift coefficients as a function of time for one oscillating cylinder.

이다. Fig. 4(a)는 본 연구의 결과이며 (b)는 Mahir와 Rockwell<sup>(7)</sup>의 실험 결과이다. 실험에서 나타난 후류의 모습을 잘 나타내고 있다.

격자의 의존성 확인을 위하여  $f_e/f_o=1.2$ ,  $1.0 \leq g \leq 1.8$  의 경우를 450×341 ( $\Delta x = \Delta y = 0.02$ ), 900×682 ( $\Delta x = \Delta y = 0.01$ ) 그리고 1350×1023 ( $\Delta x = \Delta y = 0.0066$ )의 격자를 사용하여 계산하였다. 여기서, 팔호 안의 값은 실린더 내부와 근처에서의 격자 간격이다. Table 1 에 나타난 시간 평균 항력계수의 경우 450×341 와 900×682 는 유사하고 1350×1023 에서는 0.06 차이가 나지만, 후류 패턴은

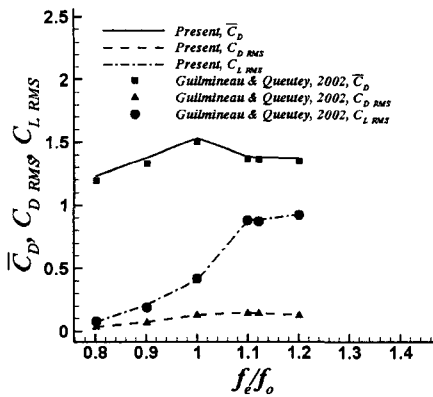


Fig. 3 Time-averaged drag and r.m.s. of drag & lift coefficients for one oscillating cylinder at  $Re=185$ . Present results are compared with Guilmineau and Queutey<sup>(3)</sup>

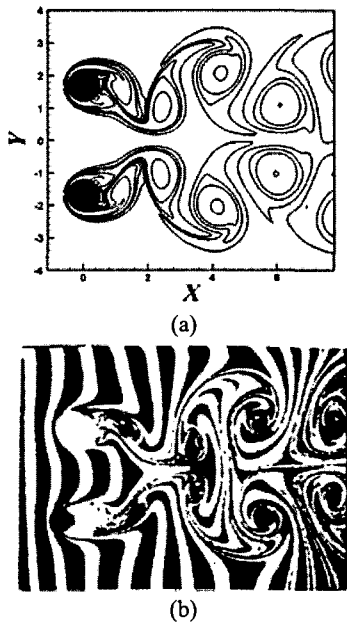


Fig. 4 Instantaneous vorticity contours of two oscillating cylinders at  $Re=160$ ,  $1.6 \leq g \leq 2.4$ ,  $A_e=0.2$ ,  $f_e/f_o=1.0$ . (a) present result, (b) result from Mahir and Rockwell<sup>(7)</sup>

450×341 와 900×682 는 다르고 900×682 와 1350 ×1023 는 일치 하였으므로 계산 비용을 고려하여 900×682 의 격자계를 이용하여 계산하였다. 일반적으로 실린더 유동에서 레이놀즈 수가 185 이상이면 실린더 유동은 3 차원이라고 간주한다. 그러나, Blackburn과 Henderson<sup>(12)</sup>에

따르면 실린더의 진폭이 증가하면 힘이나 후류 속도등의 폭 방향 상관관계가 증가하여 3 차원성이 감소하여 적어도 실린더에 가까운 후류에 대하여는 2 차원으로 해석 하여도 큰 오류가 없다고 밝히고 있다. Kang<sup>(6)</sup>에 따르면  $g>0.4$  인 경우에 두 개의 실린더의 경우 2 차원으로 가정하여도 중대한 오류는 없다고 보고한다. 언급한 내용에 근거하여, 본 연구에서는 레이놀즈 수 185 에서 진동하는 실린더를 2 차원 유동이라고 가정하고 2 차원 해석을 하였다.

#### 2.4 계산영역과 경계조건

계산영역은  $-60 < x < 40$  과  $-60 < y < 60$  이다 경계조건은, 입구는 Dirichlet 조건으로  $u=1$  과  $v=0$  이고 아래, 위는 Dirichlet 조건으로  $u=0$  과  $v=0$  사용하였다. 그리고 출구경계는 대류 경계 조건(convective outflow condition),  $\partial u_i / \partial t + c \partial u_i / \partial x = 0$ , ( $c$ 는 주 유동 방향의 평균 출구 속도)을 사용하였다.

### 3. 결과

본 연구에서는 항력과 양력 계수들이 통계적으로 정상상태에 도달할 때까지 계산을 수행한 후, 완전히 발달된 유동만을 고려하였다. 또한, 완전히 발달한 유동상태에 도달하는데 초기조건이 계산시간에 미치는 영향도 고려하였다. 통계적으로 정상상태에 도달하는데 계산시간이 미치는 영향을 최소화하기 위하여 본 연구에서 고려한 모든 경우들에 대하여 계산은 무차원 시간 500 이상 수행하였다. 항력과 양력을 나타낸 그림에서 실선은 상부 실린더의 값이고 점선은 하부 실린더의 값이다.

#### 3.1 $f_e/f_o=0.8$

Fig. 5 에  $1.4 \leq g \leq 2.2$  인 경우의 시간에 따른 항력과 양력 계수를 나타내었다. 상, 하부 실린더의 항력은 일치하고 양력 계수는  $y=0$  에 대하여 대칭이다. 항력계수는 (a)~(d) 사이의 요동이 있는 구간과 (e)~(g) 사이의 완만한 구간으로 구성되어 한 주기를 이룬다. Fig. 6 은 Fig. 5 에 각 시간에 해당하는 각 순간의 와 유동장을 순서대로 나타내었다. Fig. 6 의 좌측 그림은 두 개의 실린더가 가장 멀리 떨어져 있을 때, 우측 그림은 가장 가까이 있을 경우의 순간 와도장을 나타낸다.  $1.4 \leq g \leq 2.2$  인 경우, 후류는  $y=0$  에 대칭으로 나타나고 반대위상동조 패턴이다. Fig. 6(a)의 두 실린더의 바깥 쪽에 실린더를 따라 발달하는 와는

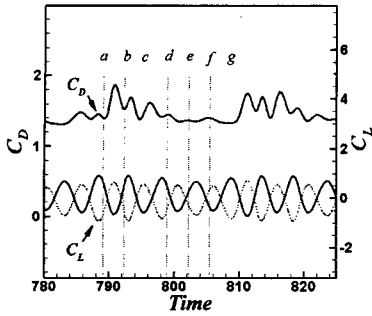


Fig. 5 Drag and lift coefficients of  $f_e/f_o = 0.8$  and  $1.4 \leq g \leq 2.2$

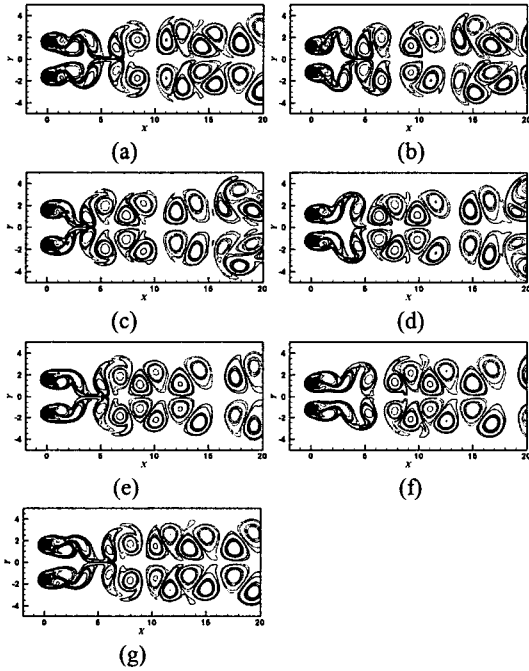


Fig. 6 Times series of instantaneous vorticity fields for  $f_e/f_o = 0.8$  and  $1.4 \leq g \leq 2.2$

$x \approx 1.7$  까지 늘어져 있다. Fig. 6 (a), (c), (e)와 (g)에서 바깥쪽 와는 시간이 지남에 따라 계속 길이가 길어진다. 그러다가 Fig. 6 (i)에서 실린더 바깥쪽에 부착되어 발달하던 와의 길이가 갑자기 짧아진다. 이 변화는 Fig. 5에 나타나는 항력의 변화와 연결 지을 수 있으며 Fig. 6의 (a)-(g)까지가 한 주기가 됨을 알 수 있다. Fig. 5에 나타나는 modulation은 실린더가 한 개인 경우,  $f_e/f_o = 0.8$ 에서는 나타나지 않는다. (Fig. 2 참조) 이것은 두 실린더에서 흘러져 나오는 와의 상호간섭 때문에 와의 길이가 주기적으로 변화하면서 나타나는 특성으로 보인다.

$1.0 \leq g \leq 1.8$ 인 경우의 시간에 따른 항력과 양력

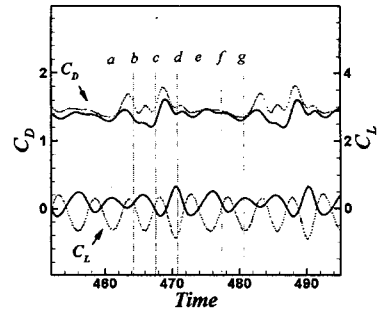


Fig. 7 Drag and lift coefficients of  $f_e/f_o = 0.8$  and  $1.0 \leq g \leq 1.8$

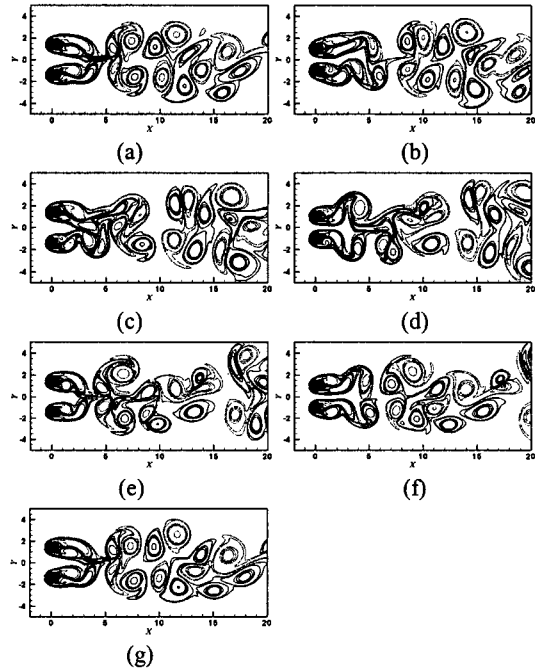


Fig. 8 Times series of instantaneous vorticity fields for  $f_e/f_o = 0.8$  and  $1.0 \leq g \leq 1.8$

계수는 Fig. 7에 나타내었고 그에 해당하는 순간 와도장은 Fig. 8에 나타내었다. 상, 하부 실린더의 항력계수는 일치하지 않고 양력도 대칭이지 않다. Kang<sup>(6)</sup>에 따르면 실린더 사이의 유동은 항력이 큰 쪽의 실린더로 굽어진다고 하였다. Fig. 8에서 대체로 와가 하부 실린더 쪽으로 굽어져 있는 것을 알 수 있고 Fig. 7에서 하부 실린더의 항력계수가 더 큰 것을 확인할 수 있다. 정지한 두 개의 실린더가  $1.0 \leq g \leq 1.8$ 에서 상, 하부 실린더의 항력이 일치하지 않는 임의교번 패턴을 가지므로 두 개의 진동하는 실린더에서 상, 하부 실린더의 양력이 서로 다를 수 있다. Fig. 7과 Fig. 8에서 알 수 있듯이 (a)와 (g)가 유사하므로, (a)에서 (f)까지가

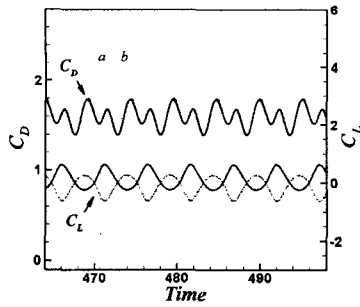


Fig. 9 Drag and lift coefficients of  $f_e/f_o = 1.0$  and  $1.4 \leq g \leq 2.2$

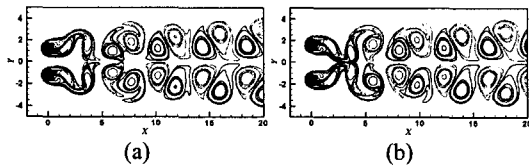


Fig. 10 Times series of instantaneous vorticity fields for  $f_e/f_o = 1.0$  and  $1.4 \leq g \leq 2.2$

하나의 주기를 이루고 있다. 이전의  $1.4 \leq g \leq 2.2$  에서 보았던 주기적인 모습 보다는 다소 불규칙적이거나 전체적으로 유사한 경향이 반복되고 있다. 상부 실린더에서는 한 쌍의 와가 떨어져 나오는 동안 하부 실린더는 두 쌍의 실린더가 떨어져 나온다. 이로 인해 상, 하부 실린더의 항력이 달라지고 양력은 상, 하 부의 대칭이 깨어진다. 비대칭은 Fig. 8(d)에서 다시 실린더에 근접한 후류에서 다시 대칭으로 모습이 바뀐다. 실린더에 근접한 후류는 편향 혹은 반대위상동조 패턴이 나타난다.

### 3.2 $f_e/f_o = 1.0$

$1.4 \leq g \leq 2.2$  인 경우의 시간에 따른 항력계수와 양력계수는 Fig. 9 에 나타나있고, 그에 해당하는 순간 와도장은 Fig. 10 에 나타내었다. 주파수비가 1.0 인 경우 유동장이 매우 규칙적으로 주기가 나타난다. Fig. 10 의 (a)와 (b)는 각각 두 실린더가 가장 멀리 떨어져 있을 경우와 가장 가까이 있을 경우를 나타내며 Fig. 9 의 다른 순간들도 모두 같은 형태이고 순간 와도장도 동일하다.  $1.0 \leq g \leq 1.8$  의 경우는  $1.4 \leq g \leq 2.2$  경우와 항력계수와 양력계수, 순간 와도장이 유사하므로 그림을 생략한다. 공진 주파수 이므로 주파수 비의 영향이 우세하여 실린더 간격의 유동에 대한 영향이 거의 없는 것으로 판단된다.  $1.4 \leq g \leq 2.2$  와  $1.0 \leq g \leq 1.8$  모두 반대위상동조 패턴이 나타난다.

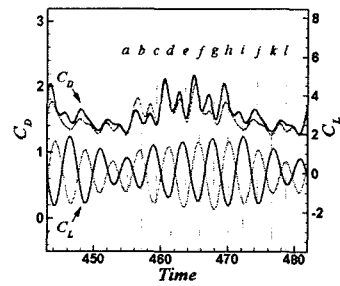


Fig. 11 Drag and lift coefficients of  $f_e/f_o = 1.2$  and  $1.4 \leq g \leq 2.2$

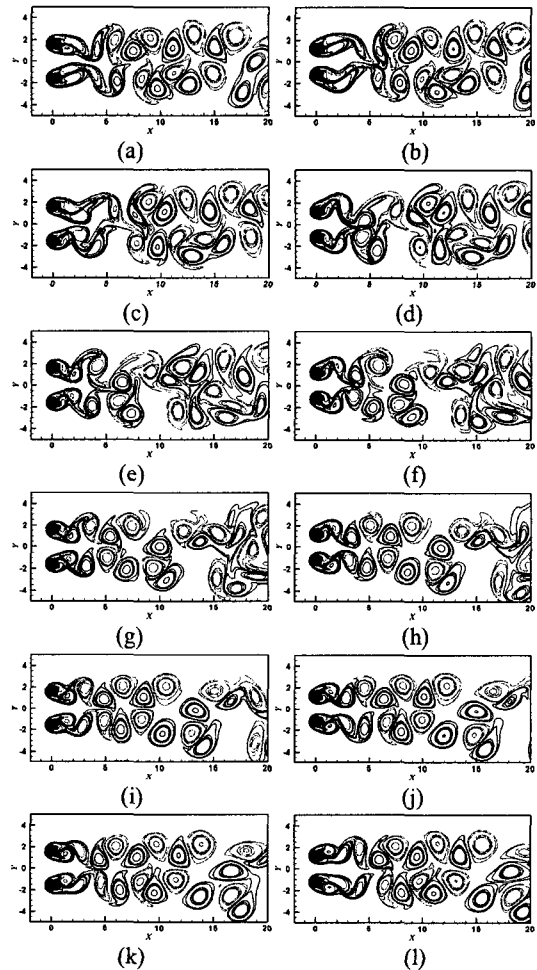


Fig. 12 Times series of instantaneous vorticity fields for  $f_e/f_o = 1.2$  and  $1.4 \leq g \leq 2.2$

### 3.3 $f_e/f_o = 1.2$

주파수 비가 1.2 로 증가한 경우, Fig. 2(c)에서 나타난 것처럼 두 개의 진동하는 실린더의 경우에서도 modulation과 맥놀이가 나타나고 있다.

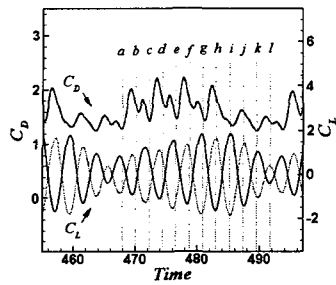


Fig. 13 Drag and lift coefficients of  $f_e/f_o = 1.2$  and  $1.0 \leq g \leq 1.8$

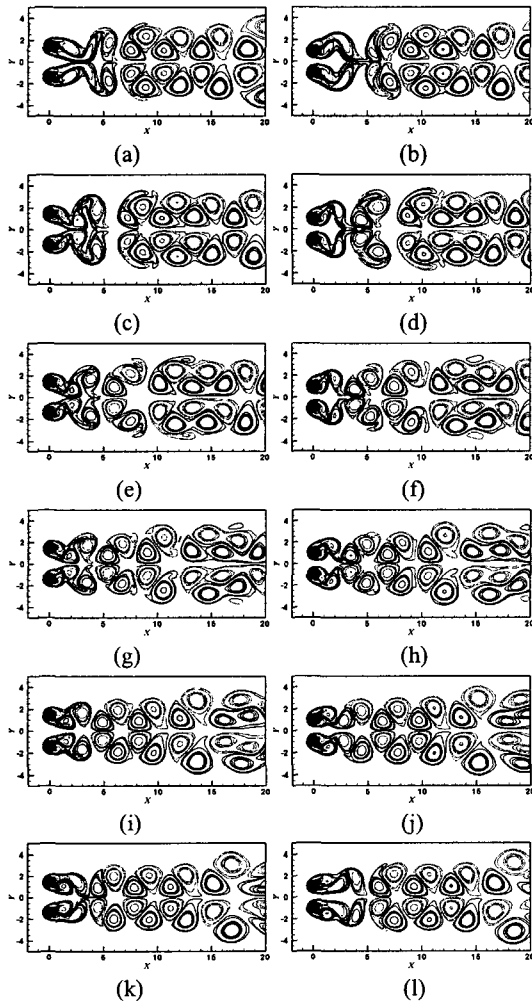


Fig. 14 Times series of instantaneous vorticity fields for  $f_e/f_o = 1.2$  and  $1.0 \leq g \leq 1.8$

$1.4 \leq g \leq 2.2$ 의 항력 및 양력 계수는 Fig. 11에 나타내고 그에 해당하는 순간 와도장은 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 11에 나타난 상, 하부 실린더의 항력계수는 일치하지 않는다. Fig. 12에서 (a)에서

(l)까지가 한 주기를 나타내고, 이는 Fig. 11에서도 확인 할 수 있다. 주파수비가 작은  $f_e/f_o = 0.8$ ,  $f_e/f_o = 1.0$ 의 경우와는 달리 후류에서 와들은 서로 뭉치고 변형하여 하류로 갈수록 원래의 모양을 잃고 복잡한 형상을 띄고 있다. 주파수 비가 0.8인 경우처럼, 실린더에 부착되어 발달되는 와의 길이 변화도 Fig. 12에 나타나있다. Fig. 12 (b)와 (d)에는 바깥쪽 실린더에 부착된 와의 길이가 길지만 다른 경우에는 더 짧고, 이 같은 길이의 변화가 주기적으로 일어난다. 실린더에 근접한 후류는 임의교번과 반대위상동조 패턴으로 분류할 수 있다.

$1.0 \leq g \leq 1.8$ 의 경우, Fig 13의 상, 하부 실린더의 항력은 일치하고 양력은 대칭이 된다. 순간 와도장에서도 상, 하부 실린더에서 떨어져 나온 와들이  $y=0$ 에 대해 대칭을 이루는 모습을 Fig. 14에서 찾아볼 수 있다.  $1.0 \leq g \leq 1.8$ 에서도  $1.4 \leq g \leq 2.2$ 와 마찬가지로 modulation을 찾아 볼 수 있고, 후류는 반대위상동조 패턴으로 분류 할 수 있다.  $1.4 \leq g \leq 2.2$ 와는 달리 하류에서 와가 변형이나 합침이 심하지 않고 대칭 형태를 유지하며 흘러가고 있다.

#### 4. 결론

가상경계법을 이용하여 두 개의 진동하는 실린더 주위의 유동을 계산하였다.  $Re=185$ 에서  $A_e=0.2$ 로 고정하고 실린더 간격 ( $1.0 \leq g \leq 1.8$ ,  $1.4 \leq g \leq 2.2$ )과 주파수 비 ( $f_e/f_o = 0.8, 1.0$ 과  $1.2$ )를 변화시켜 계산하였다.

시간에 따른 항력과 양력 계수를 보이고 거기에 따른 순간 와도장을 나타내었다. 본 연구에서 고려한 모든 경우에 대하여 주기성을 찾을 수 있었다. 각 경우의 유동 주기는 항력계수에 FFT를 적용하여,  $f_e/f_o = 0.8$ ,  $f_e/f_o = 1.0$ 과  $f_e/f_o = 1.2$ 에 대해 각각  $3.46/f_e$ ,  $1/f_e$ 와  $6.295/f_e$ 로 나타났다.

주파수 비와 실린더 사이의 간격 모두에 영향을 받는 실린더에 근접한 후류는 Kang<sup>(6)</sup>의 분류와 그 조합에 따라 분류할 수 있었다.

(1)  $f_e/f_o = 0.8$ ,  $1.4 \leq g \leq 2.2$ 의 경우 바깥쪽 실린더에서 발달하는 와의 길이와 항력계수의 패턴과 관계가 있고,  $1.4 \leq g \leq 2.2$ 와  $1.0 \leq g \leq 1.8$ 에서 상, 하부 실린더에서 떨어져 나온 와들의 상호 간섭에 의한 것으로 판단되는 modulation 현상이 나타났다. 실린더의 간격에 따라 반대위상동조 패턴과 편향 혹은 반대위상동조 패턴이 나타난다.

2)  $f_e/f_o = 1.0$  인 경우는 공진의 영향으로 유동이 실린더의 간격에 대한 영향은 거의 받지 않아  $1.4 \leq g \leq 2.2$ ,  $1.0 \leq g \leq 1.8$  두 경우에 대해 거의 같은 특성을 나타내었고 반대위상동조 패턴이 나타났다.

3)  $f_e/f_o = 1.2$  인 경우에는 실린더 사이의 거리에 따라 후류의 패턴이 달라졌지만 항력과 양력 계수의 패턴은 modulation과 맥놀이가 유사하게 나타났다. 실린더의 간격에 따라 임의교번과 반대위상동조 패턴과 반대위상동조 패턴으로 나타났다.

### 후기

본 연구는 BK21 2 단계사업의 지원을 받았습니다.

### 참고문헌

- (1) Williamson, C. H. K. and Roshko, A., 1988, "Vortex Formation in the Wake of an Oscillating Cylinder," *Journal of Fluids and Structures*, 2, 355, pp. 355~381.
- (2) Gu, W., Chyu, C. and Rockwell, D., 1994, "Timing of Vortex Formation from an Oscillating Cylinder," *Physics of Fluids*, 6, 11, pp. 3677~3682.
- (3) Guilmineau, E. and Queutey, P., 2002, "A Numerical Simulation of Vortex Shedding from an Oscillating Circular Cylinder," *Journal of Fluids and Structures*, 16, 6, pp. 773~794.
- (4) Kim, H. J. and Durbin, P. A., 1988, "Investigation of the Flow Between a Pair of Circular Cylinders in the Flopping Regime," *Journal of Fluid Mechanics*, 196, pp. 431~448.
- (5) Sumner, D., Wong, S. S. T., Price, S. J. and Paidoussis, M. P., 1999, "Fluid Behavior of Side-by-Side Circular Cylinders in Steady Cross-Flow," *Journal of Fluids and Structures*, 13, pp. 309~338.
- (6) Kang, S., 2003, "Characteristics of Flow over Two Circular Cylinders in a Side-by-Side Arrangement at Low Reynolds Numbers," *Physics of Fluids*, 19, 9, pp. 2486~2498.
- (7) Mahir, N. and Rockwell, D., 1996, "Vortex Formation from a Forced System of Two Cylinders. Part II: Side-by-Side Arrangement," *Journal of Fluids and Structures*, 10, pp. 491~500.
- (8) Jester, W. and Kallinderis, Y., 2004, "Numerical Study of Incompressible Flow About Transversely Oscillating Cylinder Pairs," *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 126, 4, pp. 310~317.
- (9) Kim, J., Kim, D. and Choi, H., 2001, "An Immersed Boundary Finite-Volume Method for Simulations of Flow in Complex Geometries," *Journal of Computational Physics*, 171, pp. 132~150.
- (10) Zang, Y., Street, R. L. and Koseff, J. R., 1994, "A Non-Staggered Grid, Fractional Step Method for Time-Dependent Incompressible Navier-Stokes Equations in Curvilinear Coordinates," *Journal of Computational Physics*, 114, pp. 18~33.
- (11) Kim, J. and Moin, P., 1985, "Application of a Fractional-Step Method to Incompressible Navier-Stokes Equation," *Journal of Computational Physics*, 59, pp. 308~323.
- (12) Blackburn, H. M. and Henderson, R. D., 1999, "A Study of Two-Dimensional Flow Past an Oscillating Cylinder," *Journal of Fluid Mechanics*, 385, pp. 255~286.