

## 움직이는 벽 위의 실린더 주위의 유동장에 관한 수치적 연구

이재봉\*, 윤현식†\*\*, 전호환\*

부산대학교 조선해양공학과\*, 부산대학교 첨단조선공학연구센터\*\*

### A Numerical Study on the Fluid Flow around a Circular Cylinder near a Moving Wall

Jae Bong Lee\*, Hyun Sik Yoon†\*\* and Ho Hwan Chun\*\*

Department of Naval Architecture and, Ocean Engineering, Pusan National University\*  
Advanced Ship Engineering Research Center, Pusan National University\*\*

#### Abstract

The present study numerically investigates two-dimensional laminar fluid flow past a circular cylinder near a moving wall. For the purpose of a careful analysis of the modification of flow fields around a cylinder by a moving wall, numerical simulations to calculate the fluid flow past a circular cylinder are performed for different Reynolds numbers of 100, 140 and 180 in the range of  $0.1 \leq G/D \leq 4$ , where  $G/D$  is the ratio of the gap between the cylinder and a moving wall,  $G$  and the cylinder diameter,  $D$ . The present study reports the detailed information of flow quantities on the cylinder surface at different gap ratios. As the gap ratio decreases, the vortex shedding formed in the wake is suppressed and the oscillating amplitude of lift coefficient decreases. Thus the drag and lift coefficients representing the fluid flow characteristics also vary as a function of the gap ratio with the dependence of Reynolds number.

※Keywords: Vortex shedding(와의 분계), Circular cylinder(원형주상체), Moving wall(움직이는 벽면), Immersed-boundary method(가상경계법)

#### 1. 서론

유체와 구조물의 연성관계를 해석하고자, 공학적 단순함과 응용 면에서 실린더 후류(Wake)의 와

(Vortex)의 형상 및 분계(shedding)에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다(김광수와 서정천 1998, 신영섭 2000, 윤현식과 전호환 2004, 윤현식 등 2006, 김정후 등 2006).

특히, 실린더 하단의 정지 또는 움직이는 벽이 실린더 주위의 유동에 미치는 영향에 대한 연구는 해상 및 지상 구조물과 관련해서 중요한 분야로

접수일: 2006년 10월 7일, 승인일: 2007년 3월 2일

†교신저자: lesmodel@pusan.ac.kr, 051-510-3685

인식되어 왔다.

실린더 주위의 유동에 정지한 벽이 미치는 영향은 크게 다음의 세가지 요소로 분류되어진다 (Zovatto and Pedrizzetti (2001)). 첫째, 정지한 벽의 점착(no-slip)과 비투과(no-penetration)조건들은 실린더 후류의 발달을 저해하고, 실린더에 반발력을 생성한다. 둘째, 정지된 벽에 의해 실린더 상류에 형성된 전단속도는 비대칭 유입속도 조건을 생성한다. 마지막으로, 정지한 벽의 점착조건은 실린더 후류 부의 벽에서 유동박리를 일으켜 유동의 안정성에 큰 영향을 끼치게 된다.

정지한 벽 위의 실린더 주위의 유동에 대한 선행 연구들은 실린더와 벽과의 간격( $G/D$ , 여기서  $D$ 는 실린더 직경)에 따른 vortex shedding 주기, 항력 및 양력과 유동의 패턴에 주로 초점을 맞추고 있다 (Taneda 1965, Lei et al. 1999, 2000, Price et al. 2002, Zovatto and Pedrizzetti 2001). 또한, 관련 선행 연구들이 고려한 레이놀즈 수(Reynolds number,  $Re$ )는 sub-critical regime에 해당하는  $300 \leq Re \leq 1.4 \times 10^5$  이다.

본 연구에서는 자유 유동(free-stream) 속도와 같은 속도로 움직이는 벽 위의 원형 실린더 주위의 유동장을 수치 해석하였다. 따라서, 유입류에 의한 바닥에서 경계층은 고려되어지지 않다. 본 연구에서는 레이놀즈 수를 2 차원에서 3 차원 유동으로 천이되는 임계 값인 194(Williamson(1996)) 이하로 제한하였고, 실린더와 벽과의 간격( $G/D$ )의 변화에 따른 유동의 정량적인 값인 항력과 양력 계수, Strouhal 수, 벽 와도 등에 관해서 상세한 연구를 수행하였다.

## 2. 수치 해석 방법

### 2.1 지배방정식

Kim et al.(2001)이 제안한 가상경계법을 적용한 2 차원 원형 실린더 주위의 비정상 유동을 지배하는 무차원화된 질량 및 운동량 보존 방정식은 다음과 같다.

$$\int_{CS} \bar{u} \cdot \hat{n} dS - q = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \bar{u} dV + \int_{CS} (\bar{u} \cdot \hat{n}) dS \\ = - \int_{CS} p \hat{n} dS + \frac{1}{Re} \int_{CS} \nabla \bar{u} \cdot \hat{n} dS + \bar{f} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $\hat{n}$  검사체적 표면에 수직한 단위 벡터이고  $\bar{u} = (u, v)$  는  $x, y$  방향의 속도벡터를 나타낸다. 무차원 지배방정식 (2)에 사용된 무차원변수  $Re = U_\infty D / \nu$  은 레이놀즈 수이며, 여기서  $U_\infty$  는 자유 유동 (free-stream) 속도,  $D$  는 실린더의 직경,  $\nu$  는 동점성계수(kinematic viscosity)이다. 작동 유체는 비압축성이며 물성치는 일정하다고 가정하였다. 식(1)의  $q$  는 질량 원천(mass source)을, 식(2)의  $\bar{f}$  는 운동량 부가(momentum forcing)를 각각 나타낸다.

### 2.2 수치해석 방법

위의 지배 방정식 (1), (2)를 수치해석하기 위하여, 공간에 대한 이산화는 비정규 직교 좌표계에서 2차 정확도를 가지는 중앙차분법(central-difference scheme)을 사용하였다. 시간항에 대해서는 Kim and Moin(1985)이 사용한 속도장 계산을 압력 계산으로부터 분리하는 second-order two-step method을 사용하였다. 첫번째 단계로, 속도는 대류-확산항을 풀어 'n' 시간 레벨에서 중간 시간 레벨인 '\*'로 진행된다. 여기서 대류항은 3차의 Adams-Bashforth scheme을, 확산항은 Crank-Nicolson scheme 을 사용하였다.

압력에 관해서 Poisson 방정식을 풀어서, 'n+1' 시간 레벨에서의 압력  $p^{n+1}$  을 얻는다. 마지막 단계로 압력보정 방정식과 질량 보존 방정식을 만족하는 'n+1' 시간 레벨에서의 최종적인 속도  $\bar{u}^{n+1}$  를 구한다.

$$\int_{CV} \frac{\bar{u}^{n+1} - \bar{u}^*}{\Delta t} dV = - \int_{CV} \nabla p^{n+1} dV \quad (3)$$

$$\int_{CS} (\nabla p^{n+1}) \cdot \hat{n} dS = \frac{1}{\Delta t} \int_{CS} (\bar{u}^* \cdot \hat{n}) dS \quad (4)$$

$$\bar{u}^{n+1} = \bar{u}^* - \Delta t(\nabla p^{n+1}) \quad (5)$$

### 2.3 운동량 부가(momentum forcing)와 질량 원천(mass source)

식 (3)에서  $\bar{u}^*$ 를 구하기 위해서 운동량 부가  $\bar{f}$ 를 먼저 구하고,  $\bar{f}$ 는 속도  $\bar{u}^n$ 가 물체 표면에서 점착조건을 만족하도록 결정해야 한다.  $\bar{f}$ 은 격자가 물체 표면과 일치할 경우에는, 운동량 부가를 가하는 점에서 얻고자 하는 속도는 0이지만, 일치하지 않는 경우에는 2 차 정확도의 일차(Linear)와 쌍일차(Bilinear) 내삽 과정으로 구한다. 내삽의 과정에서 물체 표면에 인접하는 유체의 속도는 식(2)에서 운동량 부가  $\bar{f}=0$ 으로 두고 구한다.

질량 원천은 식(1)을 이산화 하여, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q^{n+1} = \frac{1}{\Delta x \Delta y} (-u^* \Delta y - v^* \Delta x) \quad (6)$$

여기서  $\Delta x, \Delta y$ 는  $x, y$  방향의 격자 간격이다

### 2.4 경계조건 및 검증

Fig. 1 에는 수치 계산에 사용된 경계조건들, 계산영역 및 좌표계를 나타내었다. 입구 조건으로 속도  $u = U_\infty = 1, v = 0$ 로 일정하다고 가정하였다. 출구조건으로  $\partial u / \partial t + C \partial u / \partial x = 0$ 의 대류경계조건을 사용하였으며, 여기서 convective velocity인  $C$ 는 출구평균속도를 사용하였다. 아래 벽의 경계조건으로  $u = U_\infty = 1, v = 0$ 이 부가되어졌다. 전 계산 영역에 걸쳐  $310 \times 260(x \times y)$ 의 격자를 사용하였으며, 실린더 주위에  $100 \times 100(x \times y)$ 의 균일한 격자를 분포시켰다.

수치해석 방법의 타당성을 검증하기 위하여 벽이 존재하지 않는 고립된 실린더 주위의 유동장의 계산 값들을 선행 연구들과 비교하였다. Strouhal 수( $St$ ),  $\bar{C}_D$  (평균 항력 계수) 및  $C_{L, r.m.s}$  (양력계수의 RMS(Root Mean Square) 값) 들은 기존의 수치 및 실험 결과 값들과 잘 일치함을 Fig. 2 에서 확인할 수 있다.

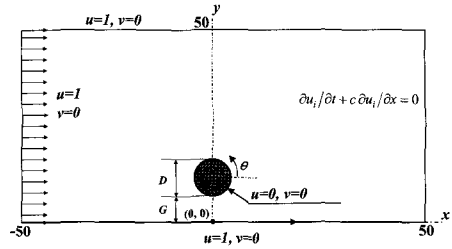


Fig. 1 Schematic diagram for computational domain and coordinate system.

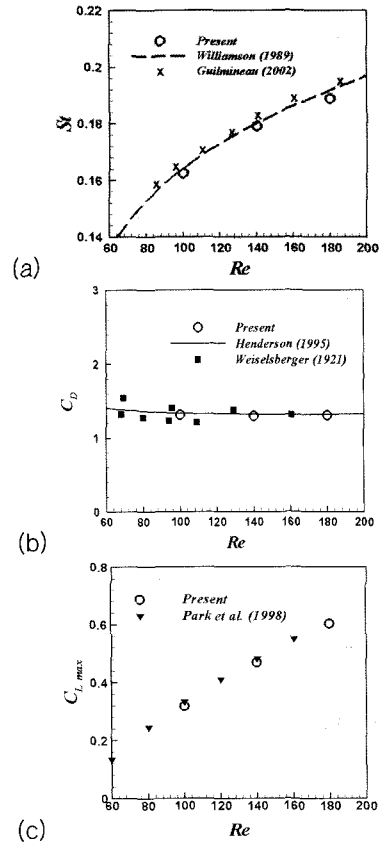


Fig. 2 Comparisons of the present study and references for the cases of an unbounded circular cylinder. (a) Strouhal number, (b) drag coefficient, (c) RMS of lift coefficient

여기서 사용된 각각의 계수들( $St$ ,  $C_D$ 와  $C_L$ )은 다음과 같이 정의되어진다.

$$St = fU_\infty/D$$

$$C_D = \frac{F_x}{1/2\rho U_\infty^2 D} \quad (7)$$

$$C_L = \frac{F_y}{1/2\rho U_\infty^2 D}$$

여기서,  $f$  는 vortex shedding 의 주기를 나타내고,  $F_x$  와  $F_y$  는 주유동방향 ( $x$ )와 여기에 수직인 방향 ( $y$ )으로 실린더가 받는 전체 힘들을 각각 나타낸다.  $F_x$  와  $F_y$  는 식(2)의  $\vec{f}$  (momentum forcing)의 각각의 성분인  $f_x$  와  $f_y$  를 적분함으로써 얻을 수가 있다.

$$F_x = - \int_{\Omega} f_x dx dy, \quad F_y = - \int_{\Omega} f_y dx dy \quad (8)$$

여기서,  $\Omega$  는 계산 영역을 나타낸다.

### 3. 결과 및 고찰

거리차가 시간에 따른 항력, 양력 및 실린더 매우 근처 유동장에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 본 연구에서는 대표적으로  $Re=100$  에서  $G/D=4$  와  $0.5$  의 두가지 거리차들을 고려하였다.

먼저  $Re=100$ 에서  $G/D=4$ 인 경우에 관해서, Fig. 3(a)는 시간에 따른  $C_D$  와  $C_L$  의 변화를 보여주고, Fig. 3(b)는 Fig. 3(a)에 A, B, C, D에 해당하는 순간 와도 등고선을 보여주고 있다. 여기서, 실선과 점선은 양과 음의 와도를 각각 나타낸다. 고립된 실린더 경우와 같이 실린더 상부와 하부에서는 음과 양의 와도가 시간에 따라서 주기적으로 형성되는 것을 Fig. 3(b)에서 확인할 수가 있다. 따라서, Fig. 3(a)에서 보이는 것처럼 vortex shedding의 한 주기 동안  $C_L$  은 0을 기준으로 거의 같은 양과 음의 최대값들을 가지면서 시간에 따라 주기적으로 변화는 것을 확인할 수가 있다. 하지만, Fig. 3(a)에서 보이는 것처럼 vortex shedding의 한 주기 동안  $C_D$  의 두 최고치들이 서로 다른 값을 가지는 것은 이 거리차에서도 이미 실린더 주위의 유동이 벽면의 영향을 받는 것으로 추정되어 진다.

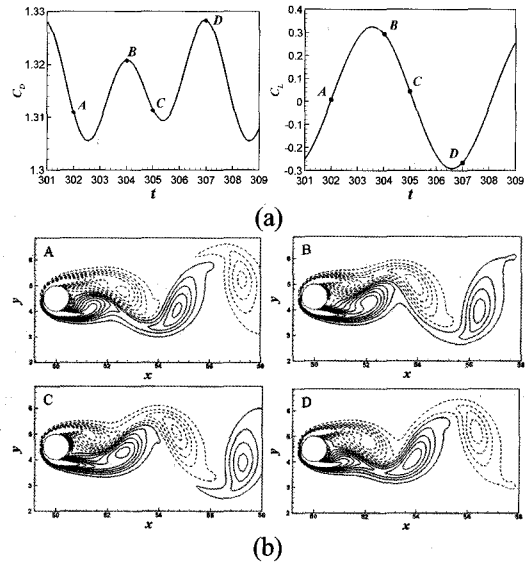


Fig. 3 (a) Time histories of drag and lift coefficients (left and right) and (b) Instantaneous vorticity contours (Contour values range from  $-3$  to  $3$  with 16 levels; Positive solid, Negative dashed)) for  $G/D=4$  at  $Re=100$

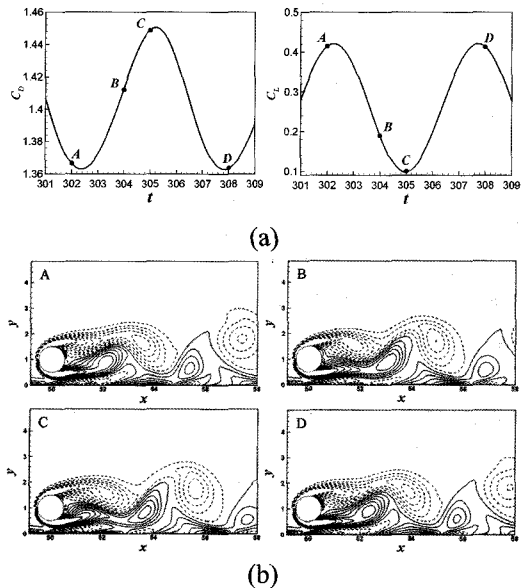


Fig. 4 (a) Time histories of drag and lift coefficients (left and right) and (b) Instantaneous vorticity contours (Contour values range from  $-3$  to  $3$  with 16 levels; Positive solid, Negative dashed)) for  $G/D=0.5$  at  $Re=100$

$G/D=0.5$  가 되면, 실린더 하부의 양의 와의 움직이는 벽의 음의 와와 강하게 상호작용하여 빠르게 자연소산 되어지는 것을 Fig. 4(b)에서 관찰할 수가 있다. 이로 인해,  $C_D$  와  $C_L$  이 같은 주파수를 가지고 시간에 따라 변화게 되는 것을 Fig. 4(a)에서 확인할 수 있다. 이 거리차에서는 실린더 하부의 압력이 상부의 압력보다 커지므로  $C_L$  은 양의 값을 가지고 주기적으로 진동한다.

실린더에서 떨어진 후류의 패턴을 관찰하기 위해서, Fig. 5에서는  $Re=100$ 에서 서로 다른 간격들에서의 순간 와도 등고선을 보여주고 있다. 여기서, 실선과 점선은 양과 음의 와도를 각각 나타낸다. 가장 큰 간격인  $G/D=4.0$ 에서는, 실린더 상부와 하부에서는 음과 양의 와도가 형성되고 (Fig. 3(b)), 후류에서는 two-row street of vortices가 생성된다.  $G/D=2.0$ 일 때도 실린더 후류 영역에서는 two-row vortex street를 유지하지만, 벽 위에서는 실린더 후류의 와들의 영향으로 전단층이 생성된 것을 Fig. 5(b)에서 확인할 수가 있다. 간격이 더욱 줄어들면 실린더 하부의 양의 와가 움직이는 벽의 음의 와와 강하게 상호작용한다. 따라서, 실린더 하부의 vortex의 roll-up이 지연되고 vorticity shedding은 움직이는 벽에서 발달된 반대 방향으로 회전하는 와와 상호작용으로 와의 길이는 늘어나고 궁극적으로 자연소산 되어진다.  $G/D=0.5$ 일 때, two-row vortex structure는 결국 Fig. 5(d)처럼 one-row structure로 변하게 된다. 이 현상은  $G/D=0.3$ 까지 지속된다. 거리차가 0.2가 되면 후류에서 vortex shedding은 더 이상 일어나지 않는 것을 Fig. 5(g)에서 볼 수 있다. 가장 작은 간격인  $G/D=0.1$ 에서 유동은 실린더 중심에 대하여 비대칭적인 와의 형상을 유지하는 정상상태가 된다. 이때, 실린더 후류 영역에서 실린더 하부의 와의 길이는 실린더 상부의 와의 길이보다 짧아진다. 이는, 실린더와 움직이는 벽 사이의 유동(gap flow)은 점성영역의 증가에 의해 실린더 상부의 유동보다 약해지기 때문이다.

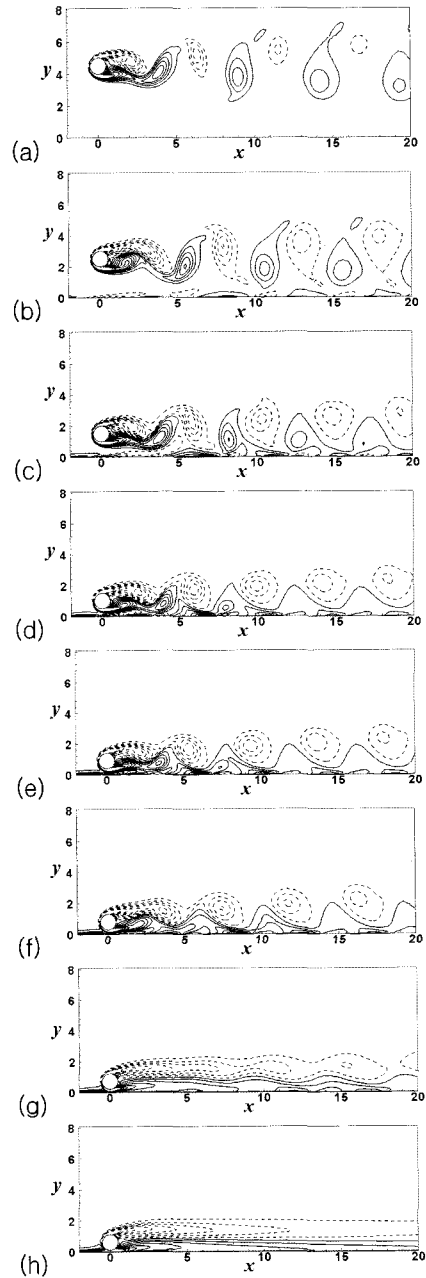


Fig. 5 Instantaneous vorticity contours for the different  $G/D$ s of (a)4, (b)2, (c)1, (d)0.5, (e)0.4, (f)0.3, (g)0.2 and (h)0.1 at  $Re=100$  (Contour values range from  $-3$  to  $3$  with 16 levels; Positive solid, Negative dashed).

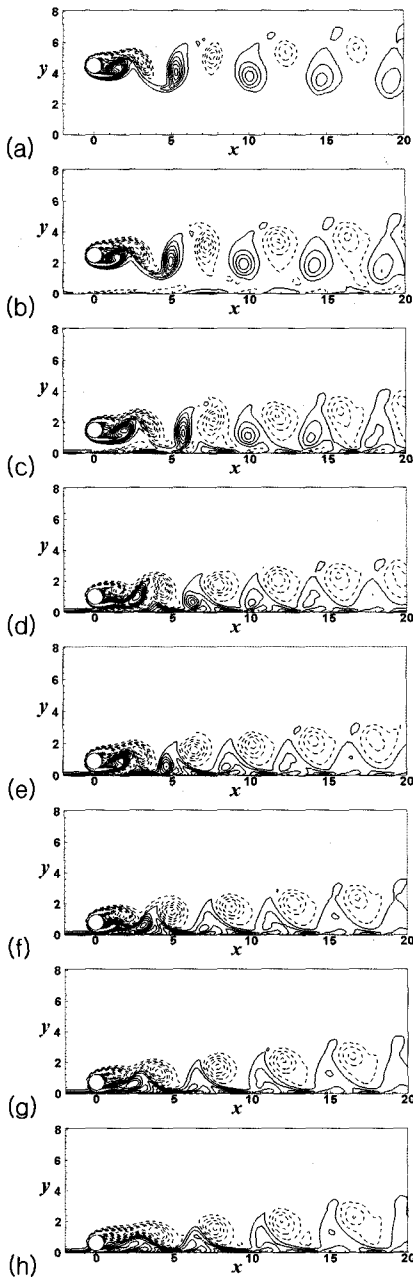


Fig. 6 Instantaneous vorticity contours for the different  $G/D$ s of (a)4, (b)2, (c)1, (d)0.5, (e)0.4, (f)0.3, (g)0.2 and (h)0.1 at  $Re=140$  (Contour values range from  $-3$  to  $3$  with 16 levels; Positive solid, Negative dashed)

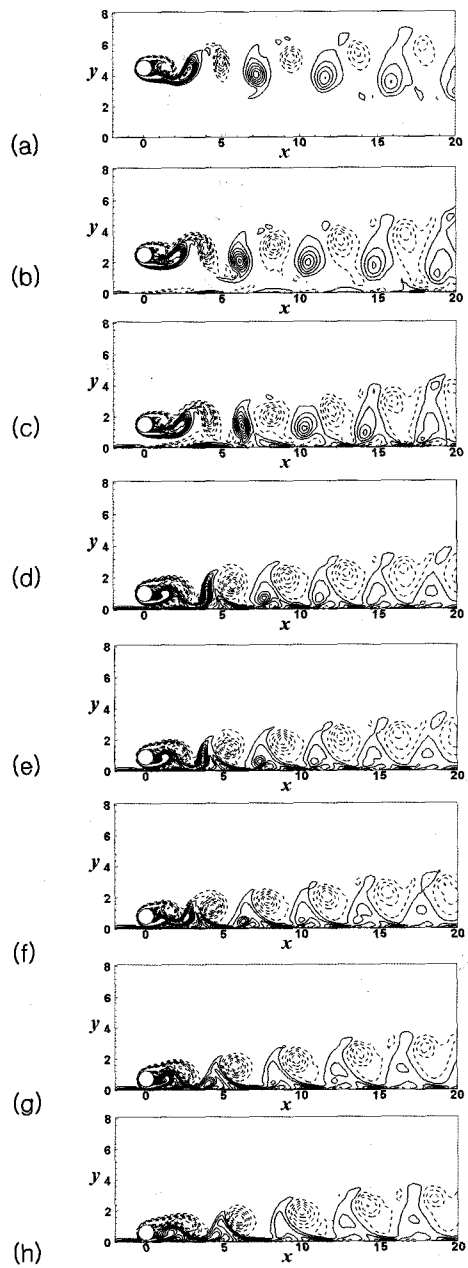


Fig. 7 Instantaneous vorticity contours for the different  $G/D$ s of (a)4, (b)2, (c)1, (d)0.5, (e)0.4, (f)0.3, (g)0.2 and (h)0.1 at  $Re=180$  (Contour values range from  $-3$  to  $3$  with 16 levels; Positive solid, Negative dashed)

Fig. 6과 7은  $Re=140$ 과  $180$ 에서 서로 다른 간격들에서의 순간 와도 등고선의 분포를 각각 보여주고 있다.  $Re$ 가 증가함에 따라 대응하는 각각의 간격에서 후류 영역에서 와의 길이는 짧아지는 반면 강도의 증가로 인해 등고선의 밀도는 증가한다. 특히,  $Re=140$ 과  $180$ 에서는 가장 작은 간격  $G/D=0.1$ 에서  $Re=100$ 과 달리 여전히 비정상상태의 유동을 보여주고 있는 것을 Fig. 5(h), 6(h)와 7(h)의 비교를 통해 확인할 수 있다.

Fig. 8에는  $Re=100, 140$ 과  $180$ 일 때 간격에 따른 Strouhal 수( $St$ )의 변화를 나타내었다. Fig. 8 (a)와 (b)는 각각 절대 Strouhal 수와  $St_0$  ( $G/D=4$ 에서 Strouhal 수)에 의해 일반화되어진 Strouhal 수를 보여준다.

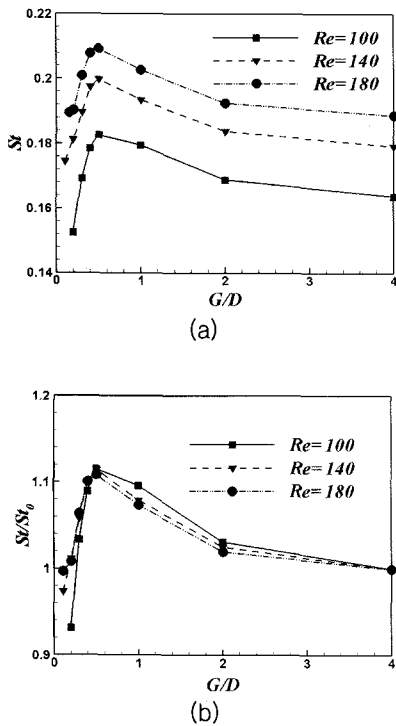


Fig. 8 Strouhal number as a function of gap ratio at three different Reynolds numbers of 100, 140 and 180; (a) Absolute Strouhal numbers, (b) Normalized Strouhal numbers in terms of the Strouhal number  $St_0$  obtained at  $G/D=4$

본 연구에서 고려되어진  $Re$ 들에서, 간격에 따른  $St$ 의 변화 양상은 매우 유사하다.  $G/D$ 가 증가할수록  $St$ 는 급격히 증가하다가  $G/D=0.5$ 에 최대값에 도달한다.  $G/D$ 를 더욱 증가시키면  $St$ 는 감소하기 시작하고  $G/D$ 가 2 이상인 구간에서는 매우 완만하게 감소하며, 4가 되면 고립된 실린더에서의  $St$ 와 거의 같아진다.

Fig. 8(b)에서 확인할 수 있듯이  $G/D=0.5$ 일 때  $St$ 는  $Re$ 의 변화와 관계없이  $St_0$ 에 대해서 약 12% 증가율을 보여준다. 작은 간격에서  $St$ 의 감소율은  $Re$ 가 작을수록 더 커지는 것을 알 수가 있다.

세가지 다른  $Re$ 들에서 시간 평균된 양력 계수,  $\overline{C_L}$ 와 양력 계수의 RMS(root mean square),  $C_{L,rms}$ 의 간격에 따른 변화를 Fig. 9(a)와 (b)에 각각 나타내었다.

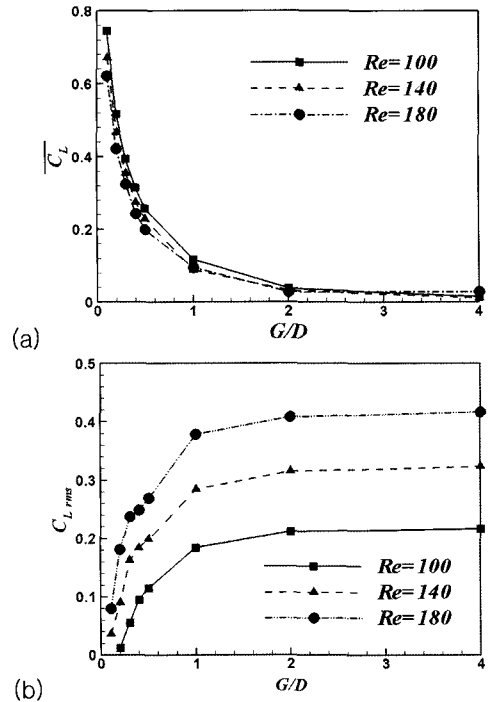


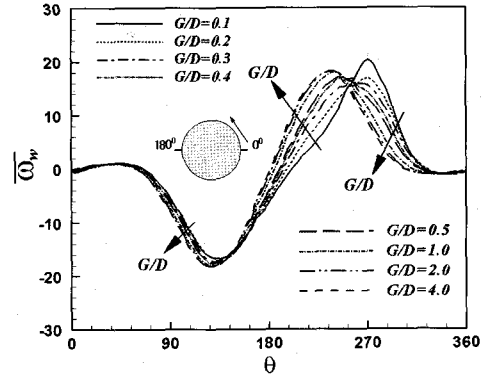
Fig. 9 (a) Time-averaged and (b) root-mean-square(RMS) values of lift coefficient as a function of gap ratio ( $G/D$ ) for three different Reynolds numbers of 100, 140 and 180

본 연구에서 고려한 Re들에서 간격에 따른  $\overline{C_L}$ 의 변화 양상은 동일하다. 움직이는 벽의 영향이 거의 없다고 판단되는 가장 큰 간격인  $G/D=4$ 에서  $\overline{C_L}$ 은 '0'에 가까운 값을 가진다. 본 논문에서 나타내지는 않았지만,  $G/D=4$ 에서 순간 항력계수의 시간에 따른 변화는 고정된 실린더에서 변화와 거의 같다. 즉,  $G/D=4$ 에서는 고정된 실린더와 같은 주기적인 vortex shedding이 일어나므로 '0'을 기준으로 거의 같은 크기의 양과 음의 진동 폭을 가지고 시간에 따라 주기적으로 진동하는 것을 확인할 수가 있다. 간격이 감소할수록 실린더 하부의 압력이 상부의 압력보다 커지므로  $\overline{C_L}$ 은 양의 값을 가지고 급격히 증가한다. 즉, 실린더가 벽에 다가갈수록 순간 항력계수는 양의 값을 가지고 시간에 따라서 주기적으로 진동하는 것을 Fig. 4(a)에서 확인할 수가 있었다.

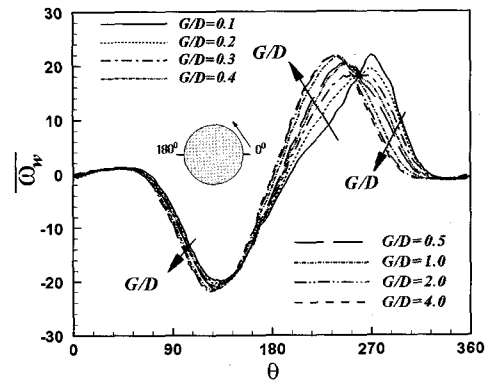
Fig. 5, 6과 7의 서로 다른 Re들에서의 순간 와도의 등고선에서 확인한 바와 같이, 실린더가 움직이는 벽에서 멀어질수록 고정된 실린더에서와 같은 주기적인 vortex shedding이 일어나기 때문에 양력계수의 RMS값은 간격이 커질수록 증가하는 것을 Fig. 9(b)에서 알 수가 있다. 고정된 실린더에서 Re가 증가할수록 관성력이 증가하므로 양력계수의 RMS값도 증가한다. 이와 같이, 움직이는 벽면과 같은 거리에 있는 실린더의 양력계수의 RMS값도 Re가 증가할수록 증가하는 것을 알 수가 있다.

Fig. 10은 세가지 다른 Re들에 대해 간격에 따른 원주 방향 ( $\theta$ )의 함수로서 시간 평균된 벽 와도(wall vorticity,  $\overline{\omega_w} = 2\alpha\overline{u_\theta}/\alpha r$ , 여기서  $u_\theta$ 와  $r$ 은 회전방향 속도와 반경방향 길이를 각각 나타낸다)를 보여준다.  $\theta=0^\circ$ 와  $\theta=180^\circ$ 는 고정된 실린더의 전방과 후방 정체점들을 각각 나타내고,  $180^\circ \leq \theta < 360^\circ$ 의 영역은 벽면쪽, 즉 실린더 하부를 나타낸다.

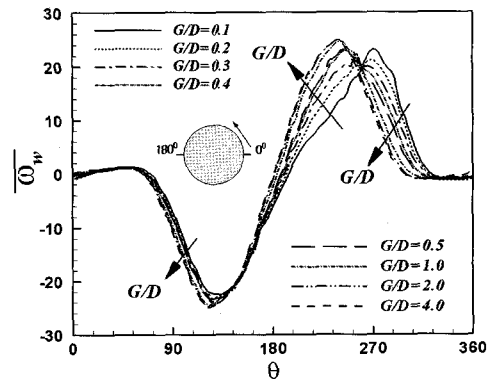
Re=100, 140과 180에서 간격에 따른 원주방향으로  $\overline{\omega_w}$ 가 거의 동일한 변화 양상을 보이는 것을 각 Re들에 해당하는 Fig. 10(a), 10(b)와 10(c)의 비교를 통해 확인할 수가 있다. 전반적인  $\overline{\omega_w}$ 의 변화 양상은 다음과 같이 설명 되어진다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 10 Time-averaged wall vorticity as a function of  $\theta$  at different gap ratios for (a) Re=100, (b) Re=140 and (c) 180



움직이는 벽이 영향이 가장 적은  $G/D=4$ 인 경우 전방 정체점( $\overline{\omega_w}=0$ )은  $\theta=180^\circ$ 에 위치하고 있다.  $G/D$ 가 작아질수록 전방 정체점은  $\theta > 180^\circ$ 인 위치에 존재한다. 즉 실린더의 하부 벽면(움직이는 벽과 가까운 방향)쪽으로 이동한다. 따라서,  $G/D$ 가 작아질수록 전방 정체점에서 실린더 상부쪽으로 흐르는 유동은 점수면적 즉, 점성영역의 증가로 인해 속도가 감소하게 된다. 이로 인해, 실린더 상부 영역( $0^\circ < \theta < 180^\circ$ )에서  $\overline{\omega_w}$ 의 절대값은  $G/D$ 가 작아질수록 감소한다.

실린더 하부에서  $\overline{\omega_w}$ 의 최대값의 위치는  $G/D$ 가 감소할수록 후류쪽으로 이동한다. 그러나, 이 위치의 변화는 움직이는 벽과 실린더 간의 최소 거리를 형성하는 지점인  $\theta=270^\circ$ 로 제한되어진다. 또한, 가장 작은 간격인  $G/D=0.1$ 에서는  $Re$ 에 관계없이 실린더 하부에서  $\overline{\omega_w}$ 의 최대값은 위에서 정의된  $\omega_w$ 에 의해 움직이는 벽의 운동학적 조건(벽속도,  $U_{wall}$ )과 간격 ( $G/D$ )에 의한  $O(U_{wall}/(G/D)) \approx 20$ 의 값을 가짐을 Fig. 10(a-c)에서 확인할 수가 있다.

Fig. 11은 세가지 다른  $Re$ 들에서 시간 평균된 항력 계수,  $\overline{C_D}$ 의 간격에 따른 변화를 보여준다.  $Re=140$ 과  $180$ 에서  $\overline{C_D}$ 는  $G/D$ 가 증가함에 따라 감소하는 유사한 경향을 보인다.

$Re=100$ 에서는  $\overline{C_D}$ 는  $G/D$ 가 0.1에서 0.2로 증가하면 감소했다가  $G/D$ 가 0.3로 증가하면 다시 증가한 후  $G/D$ 가 증가할수록 감소하는 경향을 보인다. 이러한  $\overline{C_D}$ 의  $G/D$ 에 따른 변화는 Fig. 6에서 보여진 유동의 변화에 기인한다고 볼 수 있다.  $G/D=0.1$ 일 때 실린더와 움직이는 벽사이의 유동(간격유동, gap flow)은 실린더 하부에 형성되는 점성 경계층 안으로 제한되고 좁은 간격을 지나면서 강한 저항을 받기에  $\overline{C_D}$ 가 큰 값을 가진다.

하지만,  $G/D=0.2$ 일 때는 유동이 Fig. 5 (g)에서 보듯이 정상상태에서 매우 약간 비정상상태로 천이되고 있다. 증가된 거리차에 의해 점성 및 압력의 영향이 줄어들고 실린더의 윗부분에는 vortex shedding이 나타나지 않기 때문에  $\overline{C_D}$ 가 갑자기 감소하게 된다. 실린더가  $G/D=0.3$ 에 위치할 때는

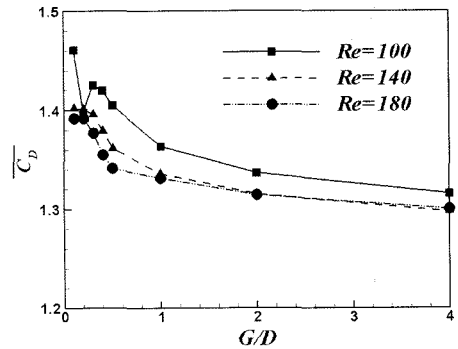


Fig. 11 Time-averaged drag coefficient as a function of gap ratio ( $G/D$ ) for three different Reynolds of 100, 140 and 180

$G/D$ 의 증가에 의한 점성 및 압력의 저항의 감소보다 실린더 상부의 vortex shedding에 의한 저항의 증가로 인해  $\overline{C_D}$ 가 다시 증가한다.

#### 4. 결론

운동량 부가와 질량원천 개념을 도입한 가상경계법을 사용하여, 움직이는 벽으로부터 다양한 거리 차를 가진 실린더 주위의 유동장을 수치해석하였다. 본 연구에서 고려한 움직이는 벽과 실린더 사이간격( $G/D$ )은  $0.1 \leq G/D \leq 4.0$  이고 레이놀즈수( $Re$ )는 100, 140과 180의 세가지이다.

세 가지  $Re$ 들 모두에서,  $G/D$ 가 0.5에서 two-row vortex street에서 one-row vortex street로 천이가 일어남을 확인할 수가 있었다.

$Re=140$ 과  $180$ 에서는 본 연구에서 고려된 모든  $G/D$ 들에서 비정상 상태의 유동을 유지하지만,  $Re=100$ 에서는  $G/D=0.2$ 일 때 vortex shedding이 일어나지 않고  $G/D=0.1$ 에서는 실린더 중심선에 관해서 비대칭적인 와의 형상을 유지하면서 정상 상태가 됨을 알 수 있다.

실린더가 움직이는 벽으로 접근할수록 vortex shedding 주파수와 관련된  $S$ 는 증가하고 single-row에서 two-row로 천이되는  $G/D=0.5$ 에서 최대 값을 가진 후 더 급격히 감소한다.

양력은 간격과 Re가 감소함에 따라 증가하고, 반면에 양력 RMS는 감소한다.

항력은 Re=140과 180에서는 G/D가 증가함에 따라 감소하는 유사한 경향을 보였다. Re=100에서는 유동의 천이와 관련된 G/D가 0.1과 0.3사이에서 급격한 변화를 보임을 확인할 수가 있었다.

이상의 결과로부터, 낮은 Re에서 간격이 유동의 안정화에 미치는 영향이 더 크울 예상할 수 있다.

### 후 기

본 연구는 2004 년도 부산대학교 교내학술연구비(신임교수연구정착금)에 의한 연구임.

### 참 고 문 헌

- 김광수, 서정천, 1998, "와도를 기조로 한 초기 순간 출발하는 실린더 주위의 점성유동해석," 대한조선학회 논문집, 제 35 권, 제 4 호, pp. 1-10.
- 김정후, 윤현식, H.A.Tuan, 전호환, 2006, "가상 경계법을 사용한 횡단 진동하는 실린더 주위의 유동 해석," 대한조선학회 논문집, 제 43 권, 제 3 호, pp. 322-330.
- 신영섭, 2000, "스펙트럴법을 이용한 원형주상체 주위 층난류해석," 대한조선학회 논문집, 제 37 권, 제 4 호, pp. 31-39.
- 윤현식, 전호환, 2004, "자기장을 사용한 원형주상체 주위의 유동 제어 및 저항감소," 대한조선학회 논문집, 제 41 권, 제 2 호, pp. 70-78.
- 윤현식, 전호환, 이동혁, 2006, "원형 핀이 부착된 실린더 주위의 유동 및 열전달에 관한 수치적 연구," 대한조선학회 논문집, 제 43 권, 제 3 호, pp. 285-293.
- Guilmineau, E. and Queutey, P., 2002, "A Numerical simulation of vortex shedding from an oscillating circular cylinder," J. Fluids and Structures, Vol. 16, pp. 773-794.
- Henderson, R.D., 1995, "Details of the Drag Curve Near the Onset of Vortex Shedding," Phys. Fluids, Vol. 6, pp. 3677-3682.
- Kim, J., Kim, D. and Choi, H., 2001, "An Immersed-Boundary Finite-Volume Method for Simulations of flow in Complex Geometries," J. Comp. Physics, Vol. 171, pp. 132-150.
- Kim, J. and Moin, P., 1985, "Application of a Fractional-step Method to Incompressible Navier-Stokes Equation," J. Comp. Phys., Vol. 59, pp. 308-323.
- Lei, C., Cheng, L. and Kavanagh, K., 1999, "Re-examination of the Effects of a Plane Boundary on Force and Vortex Shedding of a Circular Cylinder," J. Wind Eng. Ind. Aer., Vol. 80, pp. 263-286.
- Lei, C., Cheng, L., Armfield, S.W. and Kavanagh, K., 2000, "Vortex Shedding Suppression for Flow over a Circular Cylinder Near a Plane Boundary," Ocean Engineering, Vol. 27, pp. 1109-1127.
- Park, J., Kwon, K. and Choi, H., 1998, "Numerical Solution of Flow Past a Circular Cylinder at Reynolds Number Up to 160," KSME Int. J., Vol. 12, pp. 1200-1205.
- Price, S.J., Sumner, D., Leong, J.G. and Paidoussis, M.P., 2002, "Flow Visualization around a Circular Cylinder Near to Plane Wall," J. Fluids and Structures, Vol. 16, pp. 175-191.
- Taneda, S., 1965, "Experimental Investigation of Vortex Streets," J. Phys. Soc. Japan, Vol. 20, pp. 1714-1721.
- Wieselsberger, C., 1921, "Neue feststellungen uber die gesetze des flussigkeits- und luftwiderstands," Phys. Z., Vol. 22, pp. 321-328.
- 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. 579-628.
- Williamson, C.H.K., 1996, "Vortex Dynamics in the Cylinder Wake," Ann. Rev. Fluid Mech., pp. 477-539.
- Zovatto, L. and Pedrizzetti, G., 2001, "Flow

about a Circular Cylinder Between Parallel Walls," J. Fluid Mech., Vol. 440, pp. 1-25.



< 이 재 봉 >



< 윤 현 식 >



< 전 호 환 >