

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2008.32.12.924

## 가상경계 격자볼츠만법을 이용한 벽면에 근접하여 이동하는 실린더주위의 유동해석

김 형 민<sup>\*</sup>

(2008년 7월 22일 접수, 2008년 11월 6일 수정, 2008년 11월 15일 심사완료)

### Numerical Study on Flow over Moving Circular Cylinder Near the Wall Using Immersed Boundary Lattice Boltzmann Method

Hyung Min Kim

**Key Words:** Lattice Boltzmann Method(격자볼츠만법), Immersed Boundary Method(가상경계법), Flow over Cylinder(실린더주위유동), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학)

#### Abstract

Immersed boundary method (IBM) is the most effective method to overcome the disadvantage of LBM (Lattice Boltzmann Method) related to the limitation of the grid shape. IBM also make LBM possible to simulate flow over complex shape of obstacle without any treatment on the curved boundary. In the research, IBLBM was used to perform LBM simulation of a flow over a moving circular cylinder to determine the flow feature and aerodynamics characteristic of the cylinder. To ascertain the applicability of IBLBM on the moving obstacle near the wall, it was first simulated for the case of the flow over a fixed circular cylinder in a channel and the results were compared against the solution of moving cylinder in the channel using IBLBM. The simulations were performed in a moderate range of Reynolds number at each moving cylinder to identify the flow feature and aerodynamic characteristics of circular cylinder in a channel. The drag and lift coefficients of the cylinder were calculated from the simulation results. We have numerically confirmed that the critical Reynolds number for vortex shedding is  $Re=50$  and the result is the same as the case of fixed cylinder. As the cylinder approaching to a wall ( $\gamma < 2.5$ ), the 2nd vortex is developed by interacting with the wall boundary-layer vorticity. When the cylinder is very closed to the wall,  $\gamma < 0.6$ , the cylinder acts like blockage to block the flow between the cylinder and wall so that the vortex developed on the upper cylinder elongated and time averaged lifting and drag coefficients abruptly increase.

#### 1. 서 론

유체 내에서 운동하는 물체 주위의 비압축성유동장에 관한 연구는 물체 주위의 유동장에 대한 물리적인 현상이나 물체의 공력특성을 규명하는데 이용되어 왔고, 최근에는 유동장 내에 분포한 작은 입자들의 거동을 분석하여 분체이송에 따른 물리적 현상이나 나노유체의 유동특성을 규명하는데 이용되고 있다. 이와 관련된 공학적 연구로는 플레핑 타입 소형비행체 개발을 위한 최적의 날개운동

도출 그리고 지면효과에 의한 익의 공력특성 해석 등이 있다. 특히 유체 내에서 일정한 속도로 이동하는 물체의 공력특성을 도출하기 위한 수치적 또는 실험적 연구의 대부분은 물체를 이동시키는 대신 유체를 일정속도로 유동시켜 그 물체 주위 나타나는 유동을 분석하여 물체의 공력특성을 도출하고 있다. 그러므로 물체가 평판을 근접하여 이동하는 경우에도 평판을 유체와 같은 속도를 이동시켜 물체의 이동에 의한 유체와 평판의 상대적인 운동을 만들어 해석하게 된다. 하지만 물체에 근접한 면이 평판이 아닌 경우에 상대적인 유동을 만들기 위해서는 근접 면을 유동과 같은 속도로 이동시켜야 하는데 이는 구성된 격자의 변형 등이 요구되므로 물체를 직접 운동시켜 해석하는 것과 비교하여 효과

<sup>\*</sup> 회원, 경기대학교 기계시스템공학과  
E-mail : pius@kyonggi.ac.kr  
TEL : (031)249-9815 FAX : (031)244-6300

적이지 못하다. 물체의 직접적인 이동 또는 경계면의 변형을 필요로 하는 해석의 경우 구성된 격자의 변형과 재 생성과정이 불가피하며, 이를 구현하는 데에는 막대한 해석시간이 요구된다. 따라서 최근에는 물체의 이동이나 경계의 변형을 구성된 격자와 독립적으로 구현할 수 있는 가상경계법(Immersed Boundary Method)이 널리 이용되고 있다.

1980년대 후반 이산격자 상에서 입자들의 상호작용을 바탕으로 한 Navier-Stokes 방정식의 해를 구하는 새로운 수치 해석법으로 개발된 격자볼츠만법(Lattice Boltzmann Method)은 계산영역에 일정한 모양의 격자유체(Lattice Gas Cellular Automata)를 구성하고, 각 격자점에 존재하는 입자 간의 상호작용에 의한 입자의 확률적 분포를 계산하여 유동을 해석하는 방법이다. LBM을 이용한 2차원 해석의 경우, 최근에는 Chen과 Doolen<sup>(1)</sup>에 의해서 개발된 한 격자점에서 9개의 방향을 갖는 사각형 모델(D2Q9)이 주로 이용되고 있지만 이 모델은 계산영역에 일정한 크기의 정사각형 격자를 구성해야하는 단점을 가지고 있다. 따라서 곡선의 복잡한 형상을 가진 계산영역에 대한 해석에 있어서 그 형상을 계단형태의 근사적 형상으로 표현해 왔다. 이러한 단점을 보완하기 위해 불규칙한 형상의 경계에서 확률분포함수 값을 유동장 격자점의 함수 값으로부터 외삽법으로 근사하여 결정하는 곡선경계처리법<sup>(2-4)</sup>이 개발되어 유동장에 위치된 정지 또는 저속으로 이동하는 곡선형상의 물체 주위의 유동해석에 이용되고 있다, 하지만 곡선경계처리법은 일정속도 이상으로 이동하는 물체 주위의 해석에 있어서 그 결과의 정도를 확보하기 어렵다는 단점을 가지고 있다. 반면에 구성된 격자와 독립적으로 물체의 형상을 표현하고, 이동시킬 수 있는 가상경계법은 단순한 해석과정과 병렬처리의 용이성등 LBM의 장점을 그대로 유지하면서 격자와 관련된 단점을 보완해 줄 수 있는 가장 효과적인 해석법이라고 판단된다.

이 연구는 두 평판 사이에서 이동하는 원형실린더의 공력특성 해석에 관한 것으로 고정실린더와 이동실린더 주위의 유동현상의 차이와 벽면에 근접하여 이동하는 실린더 주위에 나타나는 유동특성을 가상경계격자볼츠만법을 이용하여 해석하였다. 이를 통해 평판이 아닌 파형의 벽면에 근접하여 이동하는 실린더의 공력특성해석과 입자의 거동 해석에 LBM이 적용될 수 있음을 확인할

수 있었다.

## 2. LBM 유동해석법

### 2.1 레티스볼츠만법

거시유동장의 해석에서 Navier-Stokes 방정식의 해로부터 얻어지는 속도, 압력을 LBM에서는 각 격자점에 설정된 9개 방향의 속도벡터  $\vec{c}_\alpha$ 와 시간의 함수로 표현되는 각 방향의 확률적 입자밀도 분포함수  $f(\vec{x}, \vec{c}, t)$ 로부터 계산할 수 있다. 이와 같은 해석법은 1986년 Frisch<sup>(5)</sup> 등에 의해서 고안된 것을 시작으로 하여 McNamara,<sup>(6)</sup> Higuera,<sup>(7)</sup> Koelman<sup>(8)</sup> 그리고 Qian<sup>(9)</sup> 등에 의해서 이론적으로 발전되었으며, 이들이 개발한 방법 중 가장 많이 이용되고 있는 것은 Bhatnagar-Gross-Krook (BGK)<sup>(10)</sup> 완화법이라고 불리는 시간에 대한 1차 완화법이다.

입자밀도분포함수의 기본 지배방정식은 식 (1)에서 보는 바와 같은 BGK완화법을 적용한 볼츠만방정식이다.

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \vec{c} \cdot \nabla f = -\frac{1}{\tau}(f - f^{(eq)}) \quad (1)$$

여기서  $\tau$ 는 완화시간이며,  $f^{(eq)}$ 는 평형상태의 분포함수로, 식 (1)을 9개의 방향을 갖는 정사각형의 격자계인 D2Q9모델에서 각 방향의 속도  $\vec{c}_\alpha$ 를 이용하여 이산화한 것이 식 (2)다. (Chen,<sup>(11)</sup> He<sup>(12)</sup>)

$$f_\alpha(\vec{x} + \Delta\vec{x}, t + \Delta t) - f_\alpha(\vec{x}, t) = -\frac{\Delta t}{\tau}(f_\alpha(\vec{x}, t) - f_\alpha^{(eq)}(\vec{x}, t)) \quad (2)$$

식 (2)에서  $f_\alpha$ 는  $\alpha$ 방향의 입자밀도분포함수를 나타내며, 격자간 이동 거리  $\Delta\vec{x} = \vec{c}_\alpha \Delta t$ 가 된다. 2차원 격자계인 D2Q9모델에서 평형상태의 입자 밀도분포함수( $f^{(eq)}$ )는 Maxwell-Boltzmann 분포함수를 이용하여 다음과 같이 정의하였다.

$$f_\alpha^{(eq)} = \rho w_\alpha \left(1 + \frac{c_{\alpha a} u_a}{C_s^2} + \frac{Q_{\alpha ab} u_a u_b}{2C_s^4}\right) \quad (3)$$

$$Q_{\alpha ab} = c_{\alpha a} c_{\alpha b} - C_s^2 \delta_{ab} \quad (4)$$

$$w_\alpha = \begin{cases} \frac{4}{9} & \alpha = 0 \\ \frac{1}{36} & \alpha = 1, 2, 3, 4 \\ \frac{1}{9} & \alpha = 5, 6, 7, 8 \end{cases} \quad (5)$$

일반적으로 Navier-Stokes 방정식에서 유동특성을 결정짓는 점성계수는 LBM에서 충돌완화시간,  $\tau$ ,와 관련이 있으며, 이들의 관계는 다음과 같다.

$$\nu = C_s^2(\tau - \Delta t/2) \quad (6)$$

여기서  $C_s = c/\sqrt{3}$ 으로 격자유체 내에서의 음속을 나타내고, 기체의 상태방정식으로부터 압력  $p = \rho C_s^2$ 이 되며, 이산 속도장에서 유체의 밀도와 운동량은 다음과 같이 정의된다.

$$\rho = \sum_{\alpha=0}^8 f_{\alpha} \quad (7)$$

$$\vec{\rho u} = \sum_{\alpha=0}^8 c_{\alpha} f_{\alpha} \quad (8)$$

BGK완화법 (Bhatnagar<sup>(10)</sup>)을 적용한 이산격자볼츠만(McNamara,<sup>(6)</sup> Higuera,<sup>(7)</sup> Chen<sup>(1)</sup>)방정식 (식 (2))은 각 방향의 입자밀도분포함수 값을 이동, 분산시키는 Streaming과정과 각 격자점에서 점성계수에 의해 결정된 완화시간에 의한 Collision과정으로 나누어 해석된다. 경계조건으로는 고체벽면에서 점착을 유도하는 Bounce Back조건과 일정한 압력을 갖는 출구조건 그리고 유체를 일정한 속도로 유입시키는 속도경계조건이 대표적이며, 이 연구에서는 Zou<sup>(13)</sup>가 제시한 방법을 적용하였다.

## 2.2 가상경계법

가상경계법은 유동방정식에 외력항을 추가하여 유동장에 위치한 물체의 형상과 이동을 모사하는 방법으로, 계산영역에 구성된 격자의 변형이나 재생성 없이 이를 구현할 수 있다. 이 연구에서는 Buick와 Greated<sup>(14)</sup>가 제안한 LBE방정식의 유형에 체적력항,  $3/2\omega_{\alpha}g_{\alpha} \cdot \vec{c}_{\alpha}$ ,를 추가하는 방법을 이용하였다. 여기서  $\vec{g}_{\alpha}$ 는 가상경계와 유동장 사이의 관계를 나타내는 것으로 식 (9)와 같으며

$$g_i(\vec{x}, t) = \int_{\Omega} \vec{G}(s, t) \delta(\vec{x} - \vec{X}(s, t)) ds \quad (9)$$

여기서  $\vec{G}(s, t)$ 는 라그랑지관점의 외력밀도이고  $\delta(\vec{x} - \vec{X})$ 는 델타함수이다.  $\vec{x}$ ,  $\vec{X}$ 는 각각 좌표계와 물체의 외형을 이루는 경계점들의 위치벡터이다. 유동장 내의 구성된 격자계에 델타함수는  $D_{mn}$ 으로 나타내고 이는 식 (10), (11)과 같다.

$$D_{mn}(\vec{x}_{mn} - \vec{X}_l) = \frac{1}{h^2} \delta_h\left(\frac{x_{mn} - X_l}{h}\right) \delta_h\left(\frac{y_{mn} - Y_l}{h}\right) \quad (10)$$

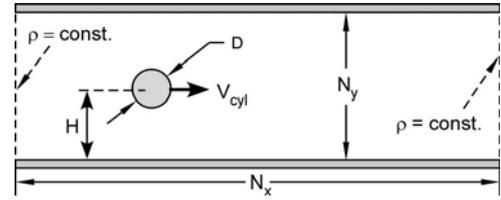


Fig. 1 Calculation domain and boundary conditions

$$\delta_h(a) = \begin{cases} \frac{1}{4} \left(1 + \cos\left(\frac{\pi a}{2}\right)\right) & |a| \leq 2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

여기서  $h = \delta_x$ 는 격자간격, 아래첨자  $m, n$ 은 격자점을, 그리고  $l$ 은 라그랑지 관점에서 물체의 외형 경계점을 나타낸다. 결과적으로 IBLBM에 첨가될 외력항  $\vec{g}_{\alpha}$ 는 식 (12)와 같다.

$$g_i(\vec{x}_{mn}, t) = \sum_l G_i(s, t) D_{mn}(\vec{x}_{mn} - \vec{X}_l) \Delta s_l \quad (12)$$

여기서  $\Delta s_l$ 은 물체의 외형을 구성하는 경계점들의 간격이다. 가상경계로 표현된 물체의 외형 및 이 물체의 이동이 유동장에 미치는 영향은 가상의 경계를 이루는 요소점들 사이에 스프링상수를 이용한 복원력에 탄성체의 변형을 고려한 탄성력을 포함시켜 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

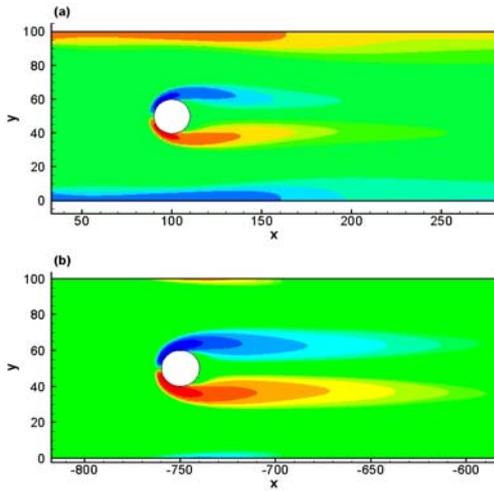
$$G_i(s, t) = -\kappa_1(X_i(s, t) - Z_i(s, t)) + \kappa_2 \left( \frac{\partial^2 X_i(s, t)}{\partial s^2} \right) \quad (13)$$

$\vec{Z}(s, t)$ 는 물체의 가상 경계요소점의 목표점을 나타내며,  $\kappa_1$ 는  $\kappa_2$ 상수이다. 라그랑지관점의 경계 요소점들의 속도는 식 (14)와 같이 정의된다.

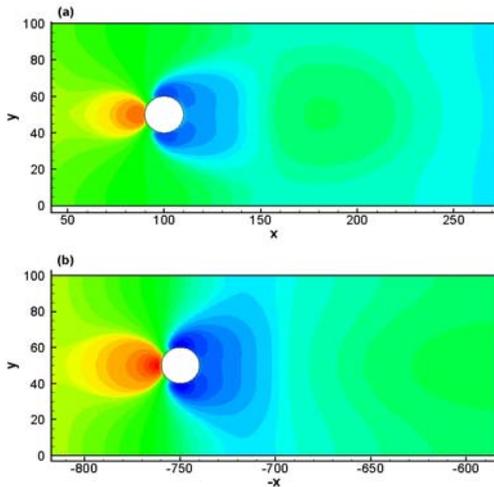
$$\frac{\partial X_i(s, t)}{\partial t} = U_i(s, t) \quad (14)$$

## 3. 해석결과

두 평판 사이를 일정한 속도로 이동하고 있는 원형실린더 주위의 유동과 공력특성을 해석하기 위하여 Fig. 1과 같이 계산영역을 각 방향의 격자수( $N_x, N_y$ )를 (1000, 100)개로 구성하였으며, 실린더의 중심과 아래 평판 사이의 거리( $H$ )와 실린더 지름( $D=20$ )의 비를  $\gamma (=H/D)$ 라고 정의하였다. 따라서  $\gamma (=H/D)=0.5$ 일 때 실린더 하부와 아래평판은 접촉하며,  $\gamma=0.5N_y/D$ 일 때 실린더는 두 평판의 중앙에 위치하게 된다. 이 연구에서는  $\gamma (=H/D)=2.5$ 일 때 실린더는 두 평판의 중앙

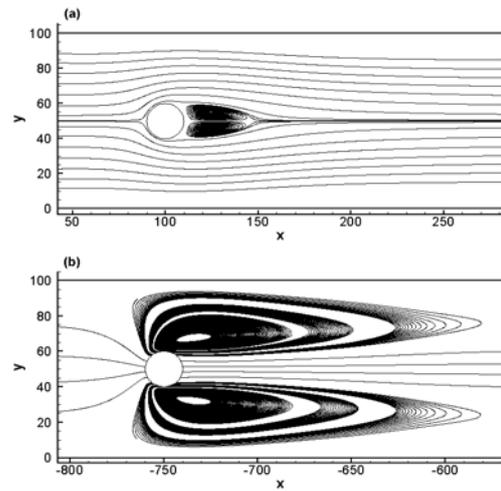


**Fig. 2** Vorticity contour of flow over fixed cylinder(a) and moving cylinder(b) at  $Re = 50$

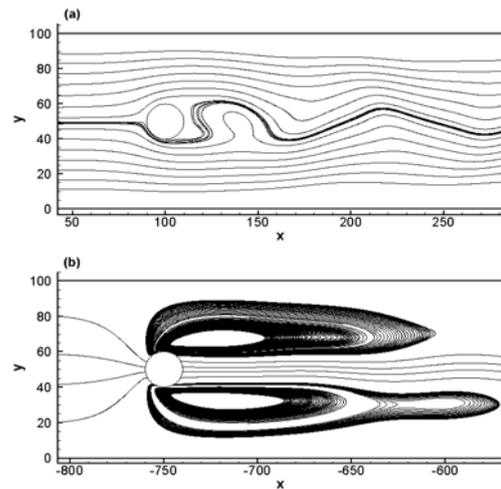


**Fig. 3** Pressure contour of flow over fixed cylinder(a) and moving cylinder(b) at  $Re = 50$

에 위치하므로  $0.5 < \gamma \leq 2.5$ 인 구간에서 고정실린더와 일정속도로 이동하는 실린더 주위의 유동해석을 수행하여 두 유동의 특성을 비교하였다.  $Re = v_{cyl}D/\nu = 50$ 일 때 두 경우를 비교한 것이 Fig. 2와 Fig. 3이다. 입구에서 일정한 속도로 유입되는 유동장에 위치한 고정실린더 주위의 압력분포는 일정한 속도로 이동하고 있는 실린더 주위에 형성된 압력 분포와 흡사하지만, 이동실린더의 후미에 형성된 저압 영역은 부채꼴모양으로 고정실린더 후미에 형성된 압력분포와 비교하여 더 넓게 퍼져있는 것을 볼 수 있다. 뿐만 아니라



**Fig. 4** Streamlines of flow over fixed(a) and moving(b) cylinder at  $Re = 50$



**Fig. 5** Streamlines of flow over fixed (a) and moving (b) cylinder at  $Re = 100$

후류에 형성된 유동도 그 전체적인 형상은 두 해석 결과가 흡사하지만 압력분포와 마찬가지로 이동 실린더 주위의 유동이 더 넓게 퍼져있다. 이런 차이는 고정실린더 주위의 유동해석에서 평판역시 고정되어 있어 평판의 근접 영역에 상대적으로 높은 압력이 형성되고, 이로 인하여 실린더 주위에 형성된 유동의 확산을 막기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 4와 5는 두 해석의 유선을 비교한 그림으로 실린더의 이동에 의해서 나타나는 유동과 유체의 유입에 의한 유동의 차이를 확실하게 보여주고 있다. 고정된 실린더 주위를 흐르는 유동의 유선은 Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이 레이놀즈

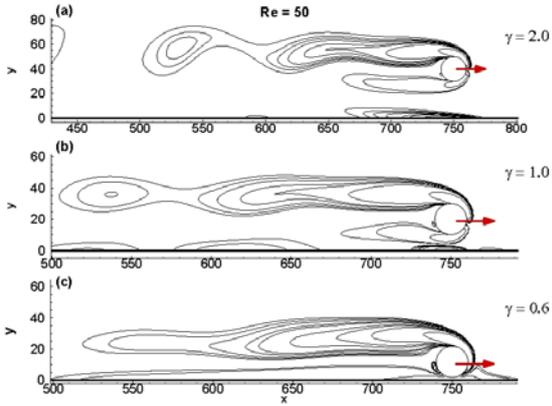


Fig. 6 Vorticity contour plots over moving cylinder at Re=50 with various  $\gamma$

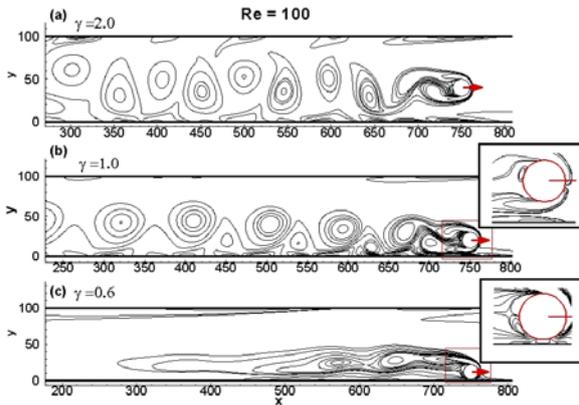


Fig. 7 Vorticity contour plots over moving cylinder at Re=100 with various  $\gamma$

수가 50 이하에서는 실린더의 후미에 상하 대칭적 구조를 갖는 와류가 형성되며, Re=100일 때 Fig. 5(a)에서 보는 바와 같이 후류에 주기적으로 반복되는 와가 발생된다. 반면에 실린더의 이동으로 형성된 유동은 Fig. 5(b)에서 보는 바와 같이 실린더의 전 후 영역에 실린더의 이동 방향과 같은 방향의 유동과 실린더를 중심으로 상하 영역에 큰 와류가 형성되는 것을 볼 수 있다. Re=100일 때 상하에 발생된 와류는 초기에 대칭적으로 형성되지만 완전히 발달한 후에는 주기적으로 변화한다.

벽면에 근접하여 이동하는 실린더의 공력특성은 지면효과로 인하여 벽에 근접한 정도에 따라 변하게 된다. 실린더와 벽면의 근접 정도를 나타내는  $\gamma(=H/D)$ 의 변화에 따라 후류에 나타나는 유동특성을 등와 선도로 나타낸 것이 Fig. 6과 7이다. 레이놀즈수가 50이고, 실린더를 평판에 근

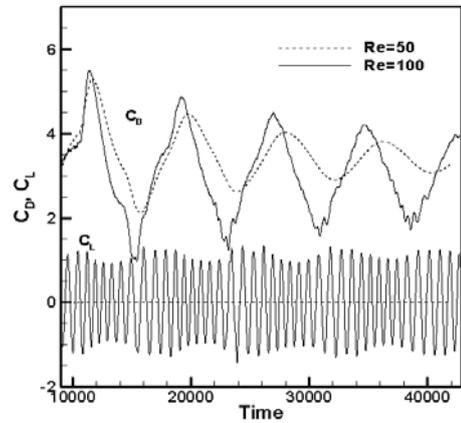


Fig. 8 Variation of lifting and drag coefficients of flow over fixed cylinder at  $\gamma(=H/D)=2.5$

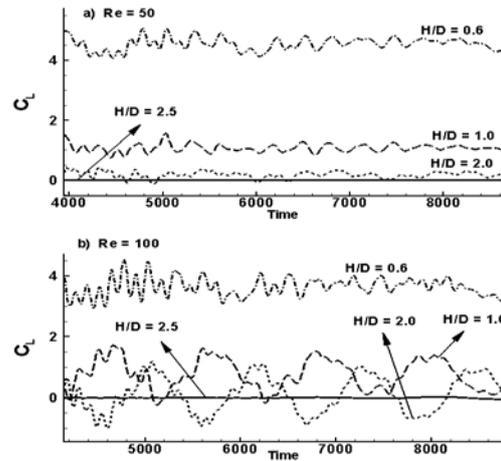


Fig. 9 Variations of lifting coefficient of flow over moving cylinder at Re=50 and 100

접시켰을 때 후류에 주기적으로 진동하는 와가 발생하는 것을 Fig. 6에서 볼 수 있다. 벽면에 근접할수록 후류에 형성되는 와는 길어지며,  $\gamma(=H/D)=0.6$ 일 때는 실린더와 근접 면 사이의 간격이 더욱 좁아져 이 사이를 흐르는 유동이 거의 차단된다. 따라서 후류에 형성된 와류는 차단 벽면을 넘어 흐르는 와류와 비슷한 형상을 갖는다. 레이놀즈수가 100일 때(Fig. 7)도 같은 경향을 보이지만 벽면에 근접할수록 실린더 위쪽에서 시작한 와와 근접 벽면에서 발생한 와에 의해서 2차 와류가 발생하며,  $\gamma=0.6$ 일 때는 Re=50일 때와 마찬가지로 차단벽을 넘어 흐르는 유동과 비슷한 형상이 나타난다.

**Table 1** Comparison of drag coefficients of fixed and moved cylinder at  $\gamma = 2.5$  (\* denotes Mei<sup>(15)</sup> and Schafer<sup>(16)</sup>'s results)

Re	Drag Coefficient	
	Fixed Cylinder	Moving Cylinder
50	3.39	3.45
100	3.21 (3.22, 3.24)*	2.99

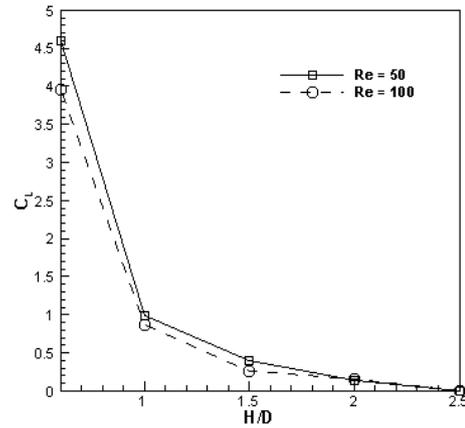
시간변화에 따른 고정 실린더의 양력과 항력계수의 변화를 Fig. 8에 그리고 이동 실린더의 양력계수의 변화를 Fig. 9에 나타냈다. 고정실린더의 유동 특성에 따른 양, 항력계수의 변화는 Fig. 8에서 보는 바와 같이 그 특성이 뚜렷하게 구분되며, 이동 실린더의 경우도 Fig. 9에서 보는 바와 같이 평판과의 근접거리에 따른 양력계수의 변화와 실린더의 이동에 따른 양력계수의 주기적인 변화 등 그 경향을 충분히 파악할 수 있다.

시간 평균 항력계수는 Table 1에서 보는 바와 같이 고정실린더를 이용하여 해석한 항력계수와 비교하여 다소 차이를 보이지만 이는 실린더를 이동 또는 고정시킴에 따라 나타나는 상, 하 평판의 상대적인 운동에 차이와 이동 실린더를 이용한 해석의 경우, 실린더를 이동속도와 시간스텝에 따라 단계적으로 이동시킨 후 해석된 결과로부터 양, 항력을 계산하는 과정에서 발생한 오차라고 판단된다.

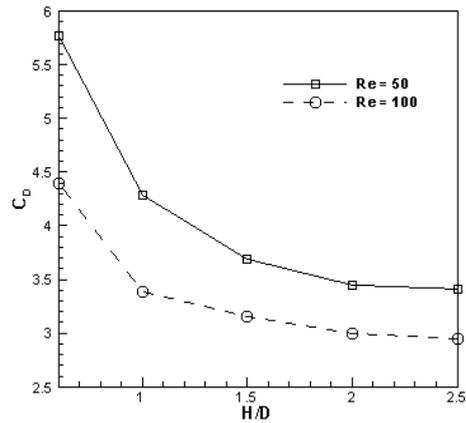
$Re \leq 50$  일 때 평판의 중앙에 위치하여 이동하는 원형 실린더는 양력을 갖지 않아 시간평균 양력의 크기는 "0"이 된다. 하지만 평판에 근접하여 이동하는 원형실린더는 지면효과에 의해 평판에 근접할수록 양력계수와 항력계수는 커진다. 실린더의 근접정도인  $\gamma (= H/D)$ 의 변화에 따른 시간 평균 양력과 항력계수는 Fig. 10과 11에서 보는 바와 같다. Mei<sup>(15)</sup>와 Schafer<sup>(16)</sup>가 고정실린더를 이용하여 해석한 결과에 의하면  $Re=100$ 일 때 두 평판의 중앙에 위치한 실린더의 항력계수는 3.22~3.24의 범위에 있다고 하였으며 이 연구에서는 고정실린더를 이용하여 해석한 결과는 이들과 일치하였지만 이동실린더를 이용하여 해석한 결과는 다소 작게 나타났다.

4. 결론

유동장에 위치한 물체의 이동에 의해서 나타나는 유동장의 특성과 공력특성 해석은 여러 연구



**Fig. 10** Variations of time averaged lifting coefficient of moving cylinder with various  $\gamma$  at  $Re=50$  and  $100$



**Fig. 11** Variations of time averaged drag coefficient of moving cylinder with various  $\gamma$  at  $Re=50$  and  $100$

자들에 의해서 연구되어 왔지만 주로 고정된 실린더의 주위를 흐르는 유동장의 해석으로 일관해 오고 있다. 벽면으로부터 충분히 멀리 떨어져 있고, 평판인 경우에는 실린더를 이동시키는 대신, 유체의 유동과 평판을 이동시켜 해석할 수 있지만, 이동물체가 곡형의 벽면에 근접하여 이동하는 경우 가능하다면 실린더를 직접 이동시켜 해석하는 것이 더 효과적이다. 따라서 이 연구에서는 최근 새로운 유동해석법으로 그 적용범위가 확대되고 있는 격자볼츠만법과 물체의 외형과 그 물체의 이동을 구성된 격자와 독립적으로 자유롭게 모사할 수 있는 가상경계법을 접목시킨 가상경계격자볼츠만법을 이용하여 두 평판 사이에 위치한 원형실린더의 직접적인 이동에 따라 나타나

는 실린더의 주위의 유동 및 공력특성을 해석하였다.

실린더 주위의 유동특성은  $Re > 50$ 에서 후류에 주기적으로 진동하는 와를 형성하며, 이는 이동하는 실린더에서도 같은 현상을 보임을 확인하였다. 벽면에 근접할수록 실린더 위쪽에서 형성된 와는 실린더의 뒤쪽으로 길게 늘어지며, 실린더와 근접벽면 사이의 유속이 느려져 양력계수가 완만하게 증가하다가 벽면과 실린더 사이의 간격이 아주 작은,  $H/D < 1$ 에서는 근접 평판과 실린더 사이의 유동은 거의 차단되고, 지면효과는 극대화 되어 양력이 급격하게 증가하게 된다.

고정된 실린더를 이용한 해석과 달리 이동하는 실린더의 공력특성은 시간간격에 따라 실린더를 단계적으로 이동시켜 얻은 결과로부터 계산하였기 때문에 연속적인 결과를 얻지는 못했지만 그 경향을 확실히 파악할 수 있었다. 따라서 가상경계자볼츠만법은 격자볼츠만법의 장점을 그대로 유지하며 단점을 보완해 줄 수 있는 가장 효과적인 해석법임을 확인할 수 있었으며, 이 방법은 순수한 유동장 해석뿐만 아니라 유동장에 분포한 고체 및 탄성체 입자들의 거동해석과 유동과 구조의 상호작용 (Fluid-Structure Interaction) 해석에도 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

### 참고문헌

- (1) Chen, S. and Doolen, G., 1998, "Lattice Boltzmann Method for Fluid Flows," *Ann. rev. Fluid Mech.*, Vol. 30, pp. 329~364.
- (2) Renwei Mei, Li-shi Luo and Wei Shyy, 2000, "An Accurate Curved Boundary Treatment in the Lattice Boltzmann Method," ICASE Report, No. 2000-6.
- (3) Lallemand, P. and Luo, L.-S., 2003, "Lattice Boltzmann Method for Moving Boundary," *Journal of Computational Physics*, Vol. 184, pp. 406~421.
- (4) Kim, H. M. and Jhon, M. S., 2007, "Numerical Study on Flow Over Oscillating Circular Cylinder Using Curved Moving Boundary Treatment," *KSME Journal B*, Vol. 31, No. 11, pp. 895~903.
- (5) Frisch, U., Hasslacher, B. and Pomeau, Y. 1986, "Lattice-gas Automata for The Navier-Stokes Equations," *Phys. Rev. Lett.* Vol. 56, pp. 1505~1508.
- (6) McNamara, G. and Zanetti, G., 1988, "Use of the Boltzmann Equation to Simulate Lattice-Gas Automata," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 61, pp. 2332~2335.
- (7) Higuera, F. and Jimenez, J., 1989, "Boltzmann Approach to Lattice Gas Simulations," *Europhys. Lett.*, Vol. 9, pp. 663~668.
- (8) Koelman, JMVA, 1991, "A Simple Lattice Boltzmann Scheme for Navier-Stokes Fluid Flow," *Europhys. Lett.*, Vol. 15, pp. 603~607.
- (9) Qian, YH., 1990, "Lattice Gas and Lattice Kinetic Theory Apply to Navier-Stokes Equation," Ph'D Thesis, University et Peirre Marie Curie, Paris.
- (10) Bhatnagar PL, Gross EP, Krook M., 1954, "A Model for Collision Processes in Gases. I: Small Amplitude Processes in Charged and Neutral One-Component System," *Phys. Rev.* Vol. 94, pp. 511~525.
- (11) Chen, H., 1993, "Discrete Boltzmann Systems and Fluid Flow," *Comp. Phys.*, Vol. 7, pp. 632~637.
- (12) He, X., Zou, Q., Luo, L.-S. and Dembo, M., 1997, "Analytic Solutions of Simple Flow and Analysis of Non-Slip Boundary Conditions for the Lattice Boltzmann BGK Model," *J. Stat. Phys.*, Vol. 87, pp. 115~136.
- (13) Zou Qisu and He Xiaoyi, 1997, "On Pressure and Velocity Boundary Conditions For The Lattice Boltzmann BGK Model," *Phys. Fluids*, Vol. 9, No. 6, pp. 1591~1598
- (14) Buick, JM and Grated CA. 2000, "Gravity in a Lattice Boltzmann Model," *Physical Review E*, Vol. 61(5), pp. 5307~5320.
- (15) Mei, R., Yu, D., Shyy, W. and Luo, L.S., 2002, "Force Evaluation in the Lattice Boltzmann Method Involving Curved Geometry," *Phys.Rev. E*, Vol. 65, No.041203.
- (16) Schafer, M. and Turek, S., 1996, "Flow Simulation with High-Performance Computer II," *Notes in Numerical Fluid Mechanics*, Vol. 52, p. 547.