

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2009.33.2.107

과형벽면에 근접하여 이동하는 원형실린더의 공력특성의 수치해석

김 형 민^{*}

(2008년 9월 22일 접수, 2008년 12월 19일 수정, 2009년 1월 21일 심사완료)

Numerical Study on Aerodynamic Characteristic of the Moving Circular Cylinder Near the Wavy Wall

Hyung Min Kim

Key Words: Lattice Boltzmann Method(격자볼츠만법), Immersed Boundary Method(가상경계법), Ground Effect(지면효과), Wavy Wall(과형 벽면)

Abstract

A Computational study was carried out in order to investigate the aerodynamic characteristics of circular cylinder moving near the wavy wall at a low Reynolds number of 50. Lattice Boltzmann method was used to simulate the flow field and immersed boundary method was combined to represent the moving cylinder and wavy wall regardless of the constructed grid in the domain. The aerodynamics characteristics of the cylinder moving near the wavy wall were represented by the comparing the lifting coefficients with various altitudes (H/D) and wave length and amplitudes of wavy wall. It indicated that the twice of increasing-decreasing variations of lifting coefficient are obtained while the cylinder moves near the wavy wall. The first variation is obtained where the cylinder locates near the peak of the wavy wall. Another variation occurs when the distance to the wavy wall becomes longer after passing the peak. It was also classified that three different patterns of relation between the lifting and drag coefficient of the cylinder. However, the classification is limited to the case of the same order of altitude, amplitude and wave length of the wavy wall.

1. 서 론

지면효과는 날개가 지면에 근접하여 이동할 때 날개의 양력이 증가하고 항력이 감소하는 현상을 이르며 이런 현상을 이용한 운송체를 WIG(Wing in Ground Effect) 선이라 한다. 차세대 고속화 운송수단인 WIG(Wing in Ground Effect)선은 1980년대에 러시아에서 군사목적으로 개발하기 시작하여 현재 중국, 일본을 비롯한 선진국에서는 상용화되고 있다. 국내에서도 1993년에 개발에 착수하여 2002년에 시제선을 건조하였으며, 현재 상

용화를 위한 연구 개발이 진행되고 있다. 이와 관련된 연구로는 양력을 극대화하고 항력을 줄이기 위한 익의 공력특성 및 형상최적화 연구^(1,2)와 익의 종적안정성을 확보하기 위한 수치적 또는 실험적 연구가 주를 이루고 있다. 익의 공력특성, 형상최적화 및 종적안정성과 관련된 수치적 연구는 익 주위의 유동해석이 선행되어야 하는데 이동하는 익 주위의 유동해석의 대부분은 익을 이동시키는 대신 유체를 익의 이동속도와 같은 속도로 유동시켜 그 익 주위에 나타나는 유동을 분석하고 있다. 또한 익이 평판을 근접하여 이동하는 경우도 평판을 유체와 같은 속도로 이동시켜 익의 이동에 의한 유체와 평판의 상대적인 운동을 만들어 해석하게 된다. 하지만 익과 근접한 면이 과형의 벽면과 같이 평판이 아닌 경우, 상

^{*} 책임저자, 회원, 경기대학교 기계시스템공학과
E-mail : pius@kyonggi.ac.kr
TEL : (031)249-9815 FAX : (031)244-6300

대적인 유동을 만들기 위해서는 근접면을 유동과 같은 속도로 이동시켜야하며 이것은 구성된 격자의 변형 및 재생성이 불가피하고 또 이를 구현하는 데에는 막대한 해석시간이 요구되어 익을 직접 이동시켜 해석하는 것과 비교할 때 효과적이지 못하다. 따라서 최근에는 익의 이동을 구성된 격자와 독립적으로 구현할 수 있는 가상경계법(Immersed Boundary Method)이 널리 이용되고 있다.

계산영역에 구성된 각 격자점에서 입자 간의 상호작용에 의한 입자의 확률적 분포를 계산하여 유동을 해석하는 방법인 격자볼츠만법은 다중스케일해석법으로 그 적용분야가 확대되고 있지만 한 격자점에서 9개의 방향을 갖는 D2Q9⁽³⁾모형을 적용하기위해서 계산영역을 일정한 크기의 정사각형 격자로 구성해야하는 단점을 가지고 있어 계산영역에 불규칙한 형상의 장애물이 포함된 경우 그 형상을 계단형태의 근사적 형상으로 표현하거나, 장애물의 경계에서 확률분포함수 값을 유동장 격자점의 함수 값으로부터 근사하여 결정하는 곡선경계처리법^(4,5)을 이용하고 있다. 이 곡선경계처리법은 일정속도 이상으로 이동하는 물체 주위의 유동해석에 있어서 그 결과의 정도를 확보하기 어렵다. 따라서 구성된 격자와 독립적으로 물체의 형상을 표현하고, 이동시킬 수 있는 가상경계법은 단순한 해석과정과 병렬처리의 용이성 등 LBM의 장점을 그대로 유지하면서 격자와 관련된 단점을 보완해 줄 수 있는 가장 효과적인 해석법으로 판단된다.

가상경계법과 LBM을 접목한 유동해석법인 IBLBM은 가상경계로 표현된 형상의 변형 정도에 따른 스프링 복원력을 유동장에 반영하는 Feedback Forcing⁽⁶⁾법과 운동량방정식을 이용하여 유동장에 위치한 실린더와 그 실린더의 이동이 유동장에 미치는 힘을 계산하여 유동장에 반영하는 Direct Forcing⁽⁷⁾법이 대표적이며, 최근에는 Direct Forcing법에 다중볼트⁽⁸⁾를 적용하여 정밀도를 높인 해석법이 개발되었다.

WIG선은 주로 해수면에 근접하여 이동하는 운송체로 근접면이 평판이라기보다는 파형의 벽면으로 보는 것이 타당하다. 이런 파형의 벽면에 근접하여 이동하는 익의 공력특성 역시 파형의 벽면 형상에 영향을 받게 된다. 따라서 이 연구에서는 Feng⁽⁶⁾의 Feedback Forcing법을 이용한

IBLBM을 이용하여 정현파로 표현된 파형벽면의 진폭과 파장의 변화 그리고 실린더와 벽면사이의 근접거리의 변화에 따른 유동현상과 실린더의 공력특성을 수치적으로 해석하여 실제 WIG선에 적용될 익이 해수면에 근접하여 이동할 때 나타나는 공력특성과 안정성 해석에 이 방법이 적용할 수 있음을 보였다.

2. IBLBM 유동해석법

2.1 레티스볼츠만법

거시유동장의 해석에서 Navier-Stokes방정식의 해로부터 얻어지는 속도, 압력을 LBM에서는 각 격자점에 설정된 9개 방향의 속도벡터 \vec{c}_α 와 시간의 함수로 표현되는 각 방향의 확률적 입자밀도 분포함수 $f(\vec{x}, \vec{c}, t)$ 로부터 계산할 수 있다. 이와 같은 해석법은 1986년 Frisch⁽⁹⁾ 등에 의해서 고안된 것을 시작으로 하여 McNamara,⁽¹⁰⁾ Higuera,⁽¹¹⁾ Koelman⁽¹²⁾ 그리고 Qian⁽¹³⁾ 등에 의해서 이론적으로 발전되었으며, 이들이 개발한 방법 중 가장 많이 이용되고 있는 것은 Bhatnagar-Gross-Krook(BGK)⁽¹⁴⁾완화법이라고 불리는 시간에 대한 1차 완화법이다.

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

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

여기서 τ 는 완화시간이며, $f^{(eq)}$ 는 평형상태의 분포함수이다. 식 (1)을 9개의 방향을 갖는 정사각형의 D2Q9격자계에서 각 방향의 속도 \vec{c}_α 를 이용하여 이산화한 방정식이 식 (2) 이다.(Chen,⁽¹⁵⁾ He⁽¹⁶⁾)

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

식 (2)에서 f_α 는 α 방향의 입자밀도분포함수를 나타내며, 격자간 이동거리 $\Delta\vec{x} = \vec{c}_\alpha \Delta t$ 가 된다. 2차원 D2Q9격자계에서 평형상태의 입자밀도분포함수($f^{(eq)}$)는 Maxwell-Boltzmann분포함수로부터 다음과 같이 정의할 수 있다.

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

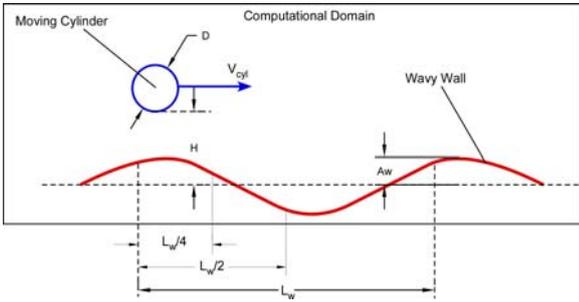


Fig. 1 Calculation domain and boundary condition

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

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

일반적으로 Navier-Stokes 방정식에서 유동특성을 결정짓는 점성계수는 LBM에서 충돌완화시간, τ ,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, 이산속도장에서 유체의 밀도와 운동량은 다음과 같이 정의된다.

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

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

BGK완화법⁽¹⁴⁾을 적용한 이산격자 Boltzmann (McNamara,⁽¹⁰⁾ Higuera,⁽¹¹⁾ Chen⁽³⁾)방정식 (식 (2))은 각 방향의 입자밀도분포함수 값을 이동, 분산시키는 Streaming과정과 각 격자점에서 점성계수에 의해 결정된 완화시간에 의한 Collision과정으로 나누어 해석된다. 경계조건으로는 벽면에서 점착을 유도하는 Bounce-Back조건과 입구에서 일정한 속도로 유체를 유입시키는 속도조건 등이 주로 이용된다. 이 연구는 실린더의 이동에 의한 유동해석으로 계산영역을 이루는 경계에 Zou와 He⁽¹⁷⁾가 제안한 일정한 압력조건을 적용하였다.

2.2 가상경계법

가상경계법은 유동방정식에 외력항을 추가하여

유동장에 위치한 물체의 형상과 이동을 계산영역에 구성된 격자의 변형이나 재생성 없이 구현할 수 있는 방법이다. 이 연구에서는 Buick와 Greated⁽¹⁸⁾가 제안한 LBE방정식의 우항에 체적력항, $3/2\omega_i \vec{g}_{\alpha} \cdot \vec{c}_{\alpha}$,를 추가하는 방법을 이용하였으며 여기서 \vec{g}_{α} 는 가상경계와 유동장 사이의 관계를 나타내는 것으로 식 (9)와 같다.

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

여기서 $\vec{G}(s, t)$ 는 라그랑지 관점의 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.

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

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

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}_{α} 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 Δs_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, κ_1 는 κ_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

3.1 평판의 근접면

파형의 벽면에 근접하여 이동하는 실린더에 대한 해석에 앞서 해석코드를 검증하기 위하여 두

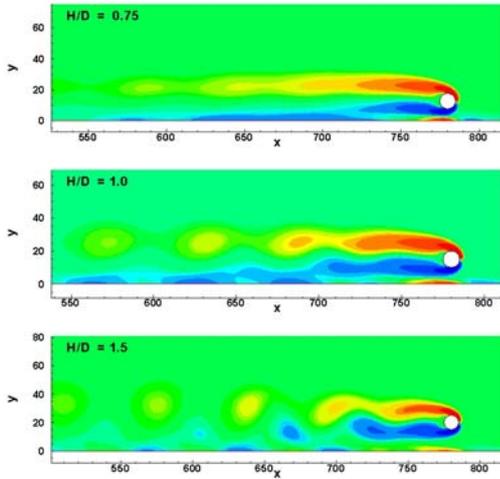


Fig. 2 Vortex contour plot of flow over moving cylinder near a flat plate

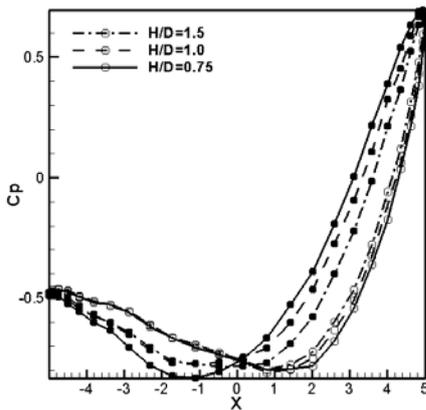


Fig. 3 Surface pressure distribution of the cylinder (○ : upper and ● : lower cylinder wall)

평판의 중앙에서 이동하는 실린더와 평판에 근접하여 이동하는 실린더의 유동해석을 수행하였다. 두 평판의 중앙에 위치한 실린더의 항력계수를 실린더가 이동할 때와 고정되어 있을 때 두 경우에 대하여 이 연구에서 제시한 IBLBM으로 해석한 결과를 기존의 해석결과와 비교하였다. $Mei^{(19)}$ 의 해석결과에 의하면 레이놀즈수가 100일 때 실린더의 항력계수 $C_D = 3.22$ 를 가지며 이 연구에서도 고정실린더의 경우 $C_D = 3.21$ 를 갖는 것으로 나타나 일치하지만, 이동실린더의 경우 다소 작은 2.99가 계산되었다. 이는 실린더를 이동속도에 따라 단계적으로 이동 시킨 후 해석한 결과로부터 항력을 계산하는 과정에서 발생한 오차로 판

Table 1 Lift and Drag force of moving cylinder near a flat plate

H/D	C_D	C_L
1.5	3.260	0.327
1.0	3.380	0.530
0.75	3.507	0.720

단된다.

평판에 근접하여 이동하는 실린더 주위의 유동 해석을 수행하여 실린더 주위의 유동과 지면효과에 의해 실린더 표면에 나타나는 압력분포의 변화를 살펴보았다. 이를 위하여 Fig. 1과 같이 계산영역을 각 방향으로 1000x100개의 격자를 구성하였고, 계산영역의 오른쪽, 왼쪽 위쪽 경계에는 일정한 압력조건을 주어 계산영역 내부의 압력변화에 따라 유체가 자유롭게 유출,입 되도록 경계조건을 설정하였다. 일반적으로 근접거리가 익의 코드보다 짧은 거리에 위치할 때 지면효과 영향이 큰 것으로 알려져 있어 이 연구에서는 실린더의 지름(D)를 기준으로 한 고도(H/D)가 1.5, 1.0, 0.75일 때 실린더 주위의 유동과 실린더 벽면의 압력분포의 차이를 비교하였다. 이때 실린더의 지름(D=10)과 속도($v_{cyl} = 0.1$)를 기준으로 계산한 레이놀즈수를 50으로 설정하여 충돌완화 시간, τ 는 0.56로 고정하였다.

Fig. 2는 평판 벽면에 근접하여 이동하는 실린더 주위의 와도를 실린더와 평판의 근접거리에 따라 나타낸 그림이다. 실린더의 후류에는 주기적으로 진동하는 와류가 발생하며 이는 실린더가 평판에 근접할수록 그 형상은 더 길어진다. 그리고 $H/D=0.75$ 일 때 진동하던 와류는 사라져 마치 차단벽을 넘어 흐르는 후류 형상을 보인다. 익의 경우 상, 하면의 유동의 변화는 세류각(Downwash angle)을 감소시켜 설정된 영각을 증가시키는 효과를 가져와 양, 항력을 변화시키며, 이 유동의 변화에 의한 익의 상, 하면의 표면압력분포의 변화는 익의 핏칭모멘트를 변화시켜 익을 불안정하게 만든다. 따라서 고도에 따른 표면압력분포의 변화를 확인하는 것은 안정적인 익을 설계하기 위한 중요한 요소가 된다. Fig. 3은 실린더의 고도에 따른 실린더의 표면압력분포를 나타낸 그림으로, 평판에 근접할수록 실린더 하면의 앞, 뒤쪽의 압력차는 증가되는 반면에 상면의 표

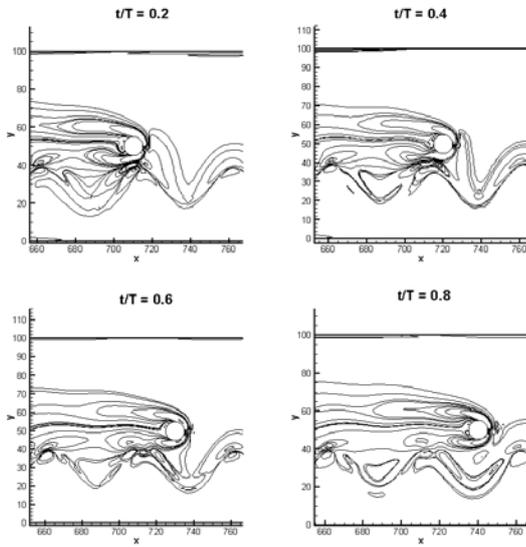


Fig. 4 Vorticity distribution over the moving cylinder near the wavy wall at $t/T = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ ($A_w/D = 1.0, L_w/D = 5.0, H/D = 1.5$)

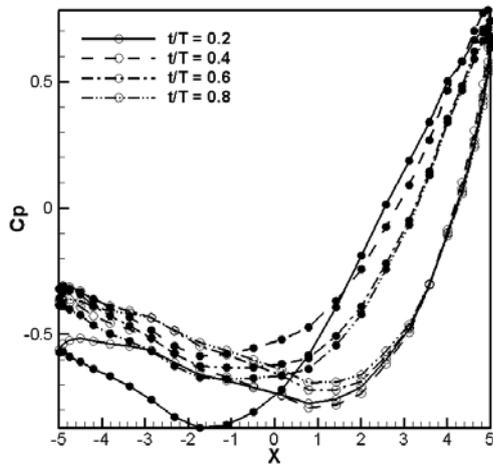


Fig. 5 Surface pressure distribution of the cylinder near the wavy wall (○ : upper and ● : lower cylinder wall)

면압력분포는 변화가 거의 없다는 것을 확인할 수 있다. 실린더 하면에 발생된 상대적으로 큰 압력차는 실린더의 양, 항력을 변화시켜 Table 1에서 보는 바와 같이 고도가 낮아질수록 지면효과 영향이 커져 양, 항력 모두 증가하는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 지면효과를 받는 익의 양력은 증가하며, 유기저항(induced drag)은 감소하지만 2차원 해석의 경우 유기저항을 고려할 수

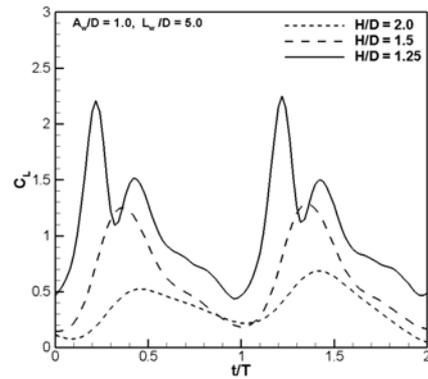


Fig. 6 Lift coefficients variations in a period with different gap between cylinder and wavy wall

없어 양, 항력 모두 증가⁽²⁰⁾하게 된다.

3.2 파형의 근접면

일정한 속도로 파형벽면에 근접하여 이동하고 있는 원형실린더 주위의 유동과 공력특성을 해석하기 위하여 Fig. 1에 도시한 것과 같이 Sin 함수의 정현파형의 벽면을 계산영역의 아래 부분에 수평면과 평행하게 위치시켰으며, 파형벽면의 형상을 결정하는 진폭(A_w/D)과 파장(L_w/D)을 각각 (0.5, 1.0, 2.0) 그리고 (2.5, 5.0, 10.0)로 제한하였다. 실린더가 계산영역의 왼쪽에서 오른쪽으로 설정된 고도($H/D = 1.0, 0.5, 0.25$)를 유지하며 일정한 속도로 이동할 때 유동해석을 수행하였다.

파형벽면의 중심선으로부터 일정한 고도를 유지하면서 이동하는 실린더 주위의 유동이 정상상태에 도달한 후, 한 주기의 파형벽면을 통과하는 동안, 유동의 변화를 나타낸 그림이 Fig. 4이며, Fig. 5는 Fig. 4의 각 실린더의 표면에 분포한 압력을 나타낸 그림이다. $t/T = 0.6 \sim 0.8$ 일 때 실린더와 파형벽면 사이의 거리는 $1.0D$ 보다 큰 상태로, 실린더의 상, 하면에 형성된 표면압력분포에는 큰 변화가 없지만 $t/T = 0.2 \sim 0.4$ 일 때 실린더는 파형벽면과 가장 근접하여 이동하는 구간으로, $H/D < 1.0$ 인 상태를 유지하게 된다. 실린더와 벽면의 근접거리가 짧아질수록 이 사이의 유동을 차단시키는 효과가 커져 상, 하면의 후류에 형성된 와류형상의 차이를 보인다. $t/T = 0.2$ 일 때는 실린더 하면의 앞, 뒤 쪽의 압력차가 더욱 커져 실린더의 양, 항력이 크게 증가함을 예측할 수 있다.

파형벽면에 근접하여 이동하는 동안 실린더의

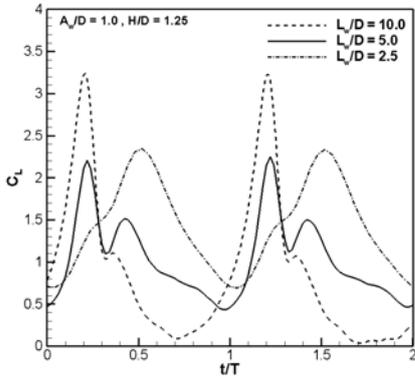


Fig. 7 Lift coefficients variations in a period with different wave length of wavy wall

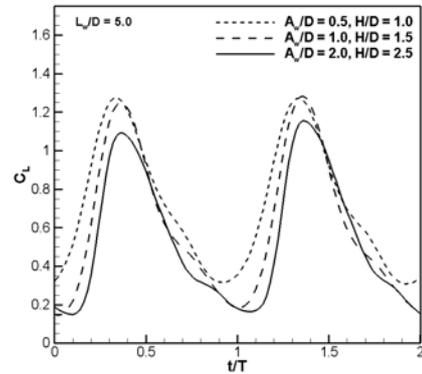


Fig. 8 Lift coefficients variations in a period with different amplitudes of the wavy wall

양력의 변화를 실린더의 고도에 따라 나타낸 것이 Fig. 6이다. 파형의 형상, 실린더의 속도 등 실린더의 고도를 제외한 모든 조건은 Fig. 4와 5의 해석조건과 동일하다. 실린더가 고도 $H/D=1.25$ 를 유지하며 이동할 때, $t/T=0.22$ 에서 파형벽면과 가장 근접하며, 이 때 근접거리는 $0.25D$ 이고, 실린더는 최대 양력계수 2.2를 갖는다. 하지만 고도 $H/D=1.5, 2.0$ 을 유지하며 이동하는 실린더는 벽면과 최 근접지점을 통과한 후 근접거리가 길어지는 $t/T=0.35$ 와 0.44 에서 최대 양력계수 1.25, 0.52를 갖는 것으로 나타났다. 이는 고도가 높아져 지면효과가 상대적으로 약해진 경우, 최대 양력을 갖는 지점은 최 근접점을 지난 후 하강 경사면에서 발생한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7는 진폭 $A_w/D=1.0$, 파장, $L_w/D=10.0, 5.0, 2.5$ 인 파형벽면과 고도 $H/D=1.25$ 를 유지하며 일정한 속도로 $2L_w$ 의 거리를 이동하는 동안 실린더의 양력계수의 변화를 나타낸 그림이다. 파형벽면의 파장이 짧아질수록 경사면의 기울기가 커지고, 최 근접점을 통과한 후 실린더와 벽면의 거리가 빠르게 멀어지는 특성을 가진다.

파장이 $10D$ 과 $5D$ 일 때 양력의 변화는 비슷한 양상을 보이지만 파장이 $2.5D$ 일 때에는 큰 차이를 보인다. 파장이 긴($L_w/D=10, 5$) 경우, 지면효과의 영향으로 실린더와 벽면의 거리가 가까울 때 가장 큰 양력계수를 가지며 최 근접점을 통과한 후 감소하던 양력은 다시 증가한 후 감소하는 양력의 2차 증감현상이 나타난다. 파장이 길어져 경사면이 완만해지면 양력의 2차 증감현상은 미

약해지지만 파장이 상대적으로 짧은 $L_w/D=2.5$ 일 때는 최 근접점을 통과한 후 하강 경사면에서 양력의 2차 증감현상이 극대화되는 것을 볼 수 있다.

2차원 유동에서 평판에 의한 지면효과는 실린더의 고도에 따라 상, 하부의 유동 및 표면압력 분포의 차이에 따라 나타나는 효과이다. 파형벽면에 근접하여 이동하는 실린더 역시 근접면에 의한 지면효과와 최 근접점을 통과한 후 실린더의 후미에 위치하게 되는 경사면이 실린더 아래 영역에 형성된 유동을 차단시키는 효과가 나타나며, 이 두가지 효과로 인하여 양력의 1, 2차 증감현상이 주기적으로 나타난다.

파형의 형상을 결정하는 또 다른 하나의 변수인 진폭의 변화에 따른 실린더의 양력계수 변화를 살펴보기 위하여 파장, $L_w/D=5.0$ 으로 고정하였고 파형벽면과 실린더의 최 근접거리가 일정하도록 고도를 설정하였다. 그리고 진폭, A_w/D 가 0.5, 1.0 그리고 2.0일 때 양력계수의 2주기 동안의 변화를 비교한 것이 Fig. 8이다. 진폭의 변화에 따라 최대, 최소 양력계수가 다소 차이를 보이지만 전체적인 변화에는 큰 차이가 없다. 따라서 파형벽면의 진폭 자체가 실린더의 공력특성에 미치는 영향은 파장과 근접거리가 미치는 영향에 비해 크지 않은 것으로 판단된다.

Fig. 9는 파형벽면을 따라 이동하는 실린더의 공력특성을 양, 항력계수의 관계로 나타낸 그림이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 실린더가 파형벽면을 따라 이동하는 동안 양, 항력계수의

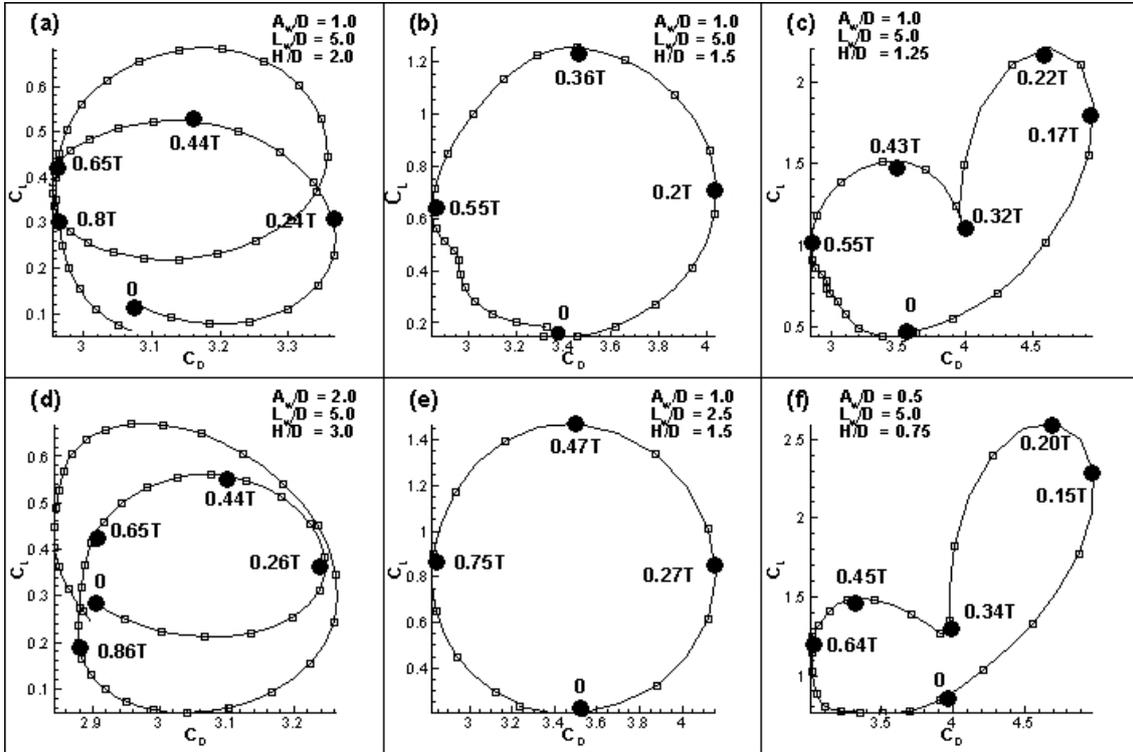


Fig. 9 Variations of drag and lifting coefficient of the cylinder while it moves 1 or 2(a, d) wave length of the wavy wall

주기적인 반복 형태를 다음의 세 가지로 분류했다. Fig. 7의 (b), (e)와 같이 양, 항력 계수의 변화가 일정한 크기의 원형을 유지하는 경우와 (c), (f)와 같이 하트모양을 그리며 주기적으로 반복되는 경우 그리고 양, 항력계수의 변화가 다른 두 경우와 달리 2T의 주기로 그 현상이 반복되는 Fig. 9의 (a)와 (d)의 경우가 그것이다.

실린더의 양, 항력계수의 변화는 실린더와 파형벽면 사이의 근접거리가 가까워질수록 Fig. 9의 (a)→(b)→(c)의 형태로 변화하는 것을 볼 수 있다. 또한 Fig. 9의 (b)와 (e)를 비교해 볼 때, 양, 항력계수 관계의 전체적인 형상은 파형벽면의 파장의 변화에 큰 영향을 받지 않지만, 실린더의 위치에 따른 양, 항력 계수에는 다소 차이를 보인다.

Fig. 9의 (a)와 (d)는 진폭이 다른 두 파형벽면으로부터 상대적으로 멀리 떨어져 이동하는 실린더의 양, 항력계수 관계를 나타낸 그림으로 실린더와 벽면의 최 근접거리가 일정하도록 고도 (H/D)를 설정하였다. 실린더가 지면으로부터 2D와 3D만큼 멀리 떨어져 있어 벽면의 진폭의 변

화가 실린더의 공력특성에 미치는 영향은 다른 변수들과 비교할 때 상대적으로 작다.

Fig. 9의 (c)와 (f)는 (b)와 (e)보다 실린더가 파형벽면에 더 근접하여 이동할 때, 양, 항력 계수의 변화를 나타낸 그림이다. 실린더가 파형벽면의 최고지점에 근접하면서 양력이 극대화되고, 최고점을 지난 이후 경사면의 영향으로 실린더는 지면과 멀어져 양력이 급격히 감소되는 것을 볼 수 있다. 이후 벽면의 최저 지점에서 양력이 다소 증가한 후 감소하고, 벽면과의 근접거리가 다시 짧아지면서 양, 항력 모두 다시 증가하는 특성을 보인다. 이와 같은 세 가지 특성은 파형벽면의 파장이나 진폭의 변화 보다는 실린더와 벽면의 근접거리에 따른 지면효과와 경사면이 실린더의 후미에 위치할 때 실린더 아래영역에 형성된 유동을 차단하는 효과에 따라 구분되는 것으로 판단된다.

4. 결 론

유동장에 위치한 물체의 이동에 의해서 나타나는 유동장의 특성과 공력특성 해석은 주로 고정

된 실린더의 주위를 흐르는 유동장의 해석으로 일관해 오고 있다. 평판의 벽면에 근접하여 이동하는 실린더의 경우에는 실린더를 고정시키고 상대적인 유동을 만들어 해석하더라도 그 결과에는 차이가 없다. 하지만 벽면의 형상이 평판이 아닌 벽면에 근접하여 이동하는 실린더 주위의 유동 및 실린더의 공력특성 해석은 실린더를 직접 이동시켜 해석하는 것이 보다 효율적이다.

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 파형벽면에 근접한 원형실린더의 직접적인 이동으로 나타나는 유동현상과 공력특성을 해석하였다.

일정한 고도를 유지하며 이동하는 실린더와 파형벽면사이의 근접거리는 파장과 진폭에 따라 주기적으로 변화하며 이로 인하여 실린더가 갖는 양력계수도 변화함을 알 수 있었다. 파형벽면의 형상을 결정 짓는 요소 중 파장은 실린더의 양력계수에 가장 큰 영향을 미치며, 파장이 짧을수록 최 근접점을 통과 한 후 하강 경사면에서 양력계수의 2차 증감현상이 강하게 나타난다. 이는 최 근접점을 통과 한 후 경사면이 실린더의 후미 아래쪽에 위치하게 되어 실린더 하부에서 형성된 유동을 차단하기 때문으로 판단된다. 파형벽면에 근접하여 이동하는 실린더의 양, 항력계수의 관계는 근접거리에 따라 세 가지 형태로 구분되지만 이 분류가 적용되는 범위는 실린더의 지름과 동일한 차수의 진폭, 파장, 근접거리를 갖는 유동의 경우로 제한된다.

참고문헌

- (1) Lee, J, Kim, B, Park, K W, 2006, "Aerodynamic Characteristics and Shape Optimization of Airfoils in WIG Craft Considered Ground Effect," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 30, No. 11, pp. 1084~1092.
- (2) Joh, C Y, Kim, Y J, 2004, "Computational Aerodynamic Analysis of Airfoils for WIG-Craft," *Journal of KSASS*, Vol. 32, No. 8, pp. 37~46.
- (3) Chen, S. and Doolen, G., 1998, "Lattice Boltzmann Method for Fluid Flows," *Ann. rev. Fluid Mech.*, Vol. 30, pp. 329~364.
- (4) Renwei M, Luo L-S, Wei S, 2000, "An Accurate Curved Boundary Treatment in the Lattice Boltzmann Method," ICASE Report, No. 2000-6.
- (5) Lallemand, P and Luo L-S., 2003, "Lattice Boltzmann Method for Moving Boundary," *J of Comp. Phys.*, Vol. 184, pp. 406~421.
- (6) Feng Z-G, Michaelides, E.E., 2004, "The Immersed Boundary-Lattice Boltzmann Method for Solving Fluid-Particles Interaction Problems," *J. of Comp. Phys.*, Vol. 195, pp. 602~628.
- (7) Feng Z-G, Michaelides, E. E., 2006, "Proteus: a Direct Forcing Method in the Simulations of Particulate Flows," *J of Comp Phys.*, Vol. 202, pp. 20~51.
- (8) Yi S, Chew, Y-T, Rartha R and Low H-T, 2007, "A Hybrid Immersed-Boundary and Multi-Block Lattice Boltzmann Method for Simulating Fluid and Moving-Boundaries Interactions," *Int. J. Num. Meth. in Fluid*, Vol. 53, pp. 1727~1754.
- (9) Frisch U, Hasslacher B, Pomeau Y. 1986, "Lattice-gas Automata for the Navier-Stokes Equations," *Phys. Rev. Lett.* Vol. 56, pp. 1505~1508.
- (10) McNamara G. and Zanetti G., 1988, "Use of the Boltzmann Equation to Simulate Lattice-Gas Automata," *Phys. Rev. Lett*, Vol. 61, pp. 2332~2335.
- (11) Higuera F and Jimenez J., 1989, "Boltzmann Approach to Lattice Gas Simulations," *Europhys. Lett.*, Vol. 9, pp. 663~668.
- (12) Koelman JMVA, 1991, "A simple lattice Boltzmann Scheme for Navier-Stokes Fluid Flow," *Europhys. Lett.*, Vol. 15, pp. 603~607
- (13) Qian, Y-H., 1990, "Lattice Gas and Lattice Kinetic Theory Apply to Navier-Stokes Equation," Ph'D Thesis, University et Peirre Marie Curie, Paris.
- (14) 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.

- (15) Chen, H., 1993, "Discrete Boltzmann Systems and Fluid Flow," *Comp. Phys.*, Vol. 7, pp. 632~637.
- (16) He, X., Zou, Q., Luo, L.-S., 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.
- (17) Zou, Q. 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.
- (18) Buick, J.M. and Grated C.A., 2000, "Gravity in a Lattice Boltzmann Model," *Phys. Rev. E*, Vol. 61(5), pp. 5307~5320.
- (19) Renwei, M., Luo, L.-S. and Shyy W., 2000, "An Accurate Curved Boundary Treatment in the Lattice Boltzmann Method," ICASE Report NO.2000-6.
- (20) Kim, Y.-S., Shin, M. and Cho, Y.-J., 2007, "Comparative Study on Numerical Analysis Methods on the 2D Ground Effect," *J of KSOE*, Vol. 21, No. 3, pp. 16~25.