

<학술논문>

곡선경계처리법을 이용한 주기적으로 진동하는 실린더주위의 유동해석

김형민* · Myung S. Jhon*

(2007년 3월 14일 접수, 2007년 8월 30일 심사완료)

Numerical Study on Flow Over Oscillating Circular Cylinder Using Curved Moving Boundary Treatment

Hyung Min Kim and Myung S. Jhon

Key Words: Lattice Boltzmann Method(레티스볼츠만법), Curved Moving Boundary Treatment(곡선경계처리법), Oscillating Cylinder(주기적 진동 실린더), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학)

Abstract

CMBT(Curved Moving Boundary Treatment) is a newly developed scheme for the treatment of a no slip condition on the curved solid wall of moving obstacle in a flow field. In our research, CMBT 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 CMBT on the complex shape of the obstacle, 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 Navier-Stokes equation with deforming mesh technique. 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 coefficients of the cylinder were calculated from the simulation results. We have numerically confirmed that the critical reynolds number for vortex shedding is ar $Re=250$ and the result is the same as the case of fixed cylinder. As the cylinder approaching to one wall, the 2nd vortex is developed by interacting with the wall boundary-layer vorticity. As the velocity ratio increase the third vortex are generated by interacting with the 2nd vortexes developed on the upper and lower wall boundary layer. The resultant C_d decrease as reynolds number increasing and the Cd approached to a value when $Re>1000$.

1. 서론

복잡한 형상의 운동하는 물체 주위의 비압축성 유동장 해석은 학문적으로는 운동 물체 주위의 유동장에 대한 물리적인 현상을 규명하는데 이용될 수 있으며, 거시적으로는 플레핑타입 소형비행체 개발을 위한 최적날개운동 도출, 가속되는 자동차의 항력, 해류와 해안선의 구조에 따른 해류의 변화, 하구의 침적 유동 해석분야에 적용될 수 있고, 미시적으로는 나노 또는 마이크로 크기의 입자의 거동을 규명하기 위한 연구에 이용될

수 있다. 물체의 이동을 구현하기위한 수치해석적 방법으로는 물체의 이동에 따라 격자의 변형과 재생성과정을 수행하는 방법과 고정된 격자에 물체의 형상과 이동이 유동장에 주는 영향을 고려하여 해석하는 방법이 있다. 고정격자계를 이용한 해석은 격자의 변형과 재생성과정에 소요되는 막대한 처리시간을 줄이기 위해 개발되기 시작한 수치해석방법으로, 이동물체를 계산영역에 구성된 격자와 독립적으로 이동시킬 수 있어 이동물체의 운동영역이 제한되지 않는다는 장점이 있지만 해석결과의 정확도가 낮다는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점은 정밀한 수치해석법과 물체의 운동이 유동장에 미치는 영향을 보다 정확하게 처리할 수 있는 경계처리법의 개발로 극복이 가능하다고 판단되어 이 연구에서는 곡선경계처리법을 적용한 레티스볼츠만법 (LBM: Lattice

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

* Carnegie Mellon University, Chemical Engineering

Boltzmann Method)을 이용하였다.

연속체에서 마이크로영역까지 적용할 수 있는 다중계 (Multi-Scale)해석법으로 LBM은 1980년대 후반 이산격자 상에서 입자들의 상호작용을 바탕으로 한 Navier-Stokes 방정식의 해를 구하는 새로운 수치 해석법으로 개발되었다. 이 방법은 계산영역에 일정한 모양의 격자유체(Lattice Gas Cellular Automata)를 구성하고, 각 격자점에 존재하는 입자 간의 상호작용에 의한 입자의 확률적 분포를 계산하여 유동을 해석하는 것으로, 이 방정식을 연속체 이론을 따라 전개하면 유체의 유동방정식을 얻을 수 있다. 또한 LBM은 난센수가 0.01 보다 큰 미세 공간에서 희박기체의 유동해석, 다공질의 특성해석 그리고 이상유체의 유동해석 뿐만 아니라 거시 및 미시적 유동장의 해석에 적용이 가능한 다중계 해석법으로 그 적용분야가 한층 더 넓어지고 있으며, 저 레이놀즈 수 영역의 해석에 있어서 Monte Carlo Cellular Automata법에 비해 해석 효율이 더 우수하다는 평가를 받고 있다.

LBM을 이용한 2차원 해석의 경우, 최근에는 Chen과 Doolen⁽¹⁾에 의해서 개발된 한 격자점에서 9개의 방향을 갖는 사각형 모델(D2Q9)이 주로 이용되고 있지만 이 모델은 계산영역에 일정한 크기의 정사각형 격자를 구성해야 하기 때문에 곡선의 복잡한 형상을 한 계산영역에 대한 해석에 있어서 그 형상을 계단형태의 근사적 형상으로 표현해야 한다는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 유한체적법이나 유한요소법을 적용한 레티스볼츠만방정식 (LBE; Lattice Boltzmann Equation)의 해석법(FVLBM, FELBM)이 개발되고 있으나 이 방법은 LBE를 Pre-Streaming, Streaming 그리고 충돌(Collision)을 나타내는 세 개의 방정식으로 분리하고, 계산영역에 구성된 각 격자점에 대한 세 개의 이산화방정식의 수치 해를 통해 각 격자점에서 입자의 확률적 분포를 구하는 것이다. 이러한 접근은 선형대수행렬식의 해를 구하는 과정에서 막대한 해석시간이 요구되며, 병렬처리에 있어서도 영역분할 등에 따르는 코드 제작의 복잡성으로 LBM 자체가 가지고 있는 장점을 희석시키는 요인이 된다.

단순한 해석과정과 병렬처리의 용이성 등 LBM의 장점을 유지하면서 복잡한 형상의 장애물을 포함한 계산영역의 해석을 수행할 수 있는 경계처리법의 개발은 LBM의 단점을 보완할 수 있는 최선의 해결책으로, 곡선경계처리법,^(2,3) 가상경계 유한

차분법⁽⁴⁾ 그리고 에너지 비평형 1차외삽경계조건⁽⁵⁾ 등이 개발되어 왔다.

이 연구에서 제시하는 경계처리법은 곡선의 외형을 가진 고체 장애물이 D2Q9격자로 구성된 계산영역 내부에서 이동할 때 이 물체가 유동장에 미치는 영향을 고려한 반사조건(Bounce Back condition)으로, 물체의 형상과 이동에 따라 나타나는 유동특성을 상대적으로 간단하게 해석할 수 있을 뿐만 아니라 물체의 이동을 구성된 격자와 독립적으로 자유롭게 이동시킬 수 있다는 장점을 가지고 있다. 이와 관련된 연구로는 Renwei⁽²⁾와 Lallemand⁽³⁾가 제시한 경계처리법이 대표적이다. 이들 처리법은정사각형이나 정육각형의 격자점 중 물체의 경계면에 근접한 격자점에 물체의 형상에 의해서 나타나는 영향을 고려한 분포함수값을 보정하는 방법으로, Renwei⁽²⁾는 유동장에 존재하는 고체 장애물 내부에 위치한 경계 근접 격자점에 장애물에 의해서 나타나는 영향을 고려한 가상의 입자분포함수값을 경계값으로 주는 방법을 제시한 반면에 Lallemand⁽³⁾는 고체 장애물에 근접한 유체 격자점에 입자분포함수값을 보간법을 이용하여 보정하는 방법을 제시하고 있다. 이 두 방법을 이용한 해석결과는 모두 기존의 해석 결과와 일치한 결과를 보이고 있지만, Lallemand가 제시한 방법은 유동장에 위치한 벽면 근접 격자점에서 Streaming과정 수행 전의 입자분포함수값으로부터 Streaming 이 후의 값을 예측, 정의하는 것으로 유동장 전체에 대하여 이루어지는 Streaming 과정에서 예측 처리된 격자점을 배제시켜야 하는 어려움이 있다.

이 연구는 기존에 제시된 경계처리법의 문제점을 보완하기 위하여 Lallemand와 Renwei가 제시한 방법을 융합하여 새로운 경계처리법을 제시하고, 이를 이용하여 두 평판 사이에서 주기적으로 운동하는 원형실린더 주위 유동해석을 수행하였다. 이를 통하여 주기적으로 운동하는 원형실린더 주위의 유동특성과 실린더의 공력특성을 수치적으로 해석하였고, 이들 중 정지된 실린더에 대한 해석결과를 기존의 연구결과와 비교하여 제시한 경계처리법의 신뢰도를 간접적으로 검증하였다.

2. LBM 유동해석법

2.1 레티스볼츠만법

거시유동장의 해석에서 Navier-Stokes방정식의

해로부터 얻어지는 속도, 압력을 레티스볼츠만법(Lattice Boltzmann Method)에서는 각 격자점에 설정된 9개의 방향의 속도벡터 \vec{c}_α 와 시간의 함수로 표현되는 각 방향의 확률적 입자밀도분포 함수 $f(\vec{x}, \vec{c}, t)$ 로부터 계산할 수 있다. 이와 같은 해석법은 1986년 Frisch⁽⁶⁾ 등에 의해서 고안된 것을 시작으로 하여 McNamara,⁽⁷⁾ Higuera,⁽⁸⁾ Koelman⁽⁹⁾ 그리고 Qian⁽¹⁰⁾ 등에 의해서 이론적으로 발전되었으며, 이들이 개발한 방법 중 가장 많이 이용되고 있는 것은 Bhatnagar-Gross-Krook(BGK)⁽¹¹⁾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 τ 는 완화시간이며, $f^{(eq)}$ 는 평형상태의 분포함수로 식 (1)을 9개의 방향을 갖는 정사각형의 격자계에서 각 방향의 속도 \vec{c}_α 를 이용하여 이산화한 것이 식 (2)다. (Chen,⁽¹²⁾ He⁽¹³⁾)

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

식 (2)에서 f_α 는 입자의 이동방향, α 에 따른 분포함수를 나타내며, 격자간 이동 거리 $\Delta\vec{x} = \vec{c}_\alpha \Delta t$ 가 된다. D2Q9의 2차원 격자계에서 평형상태의 입자분포함수($f^{(eq)}$)는 Maxwell-Boltzmann분포함수를 적용하여 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-Stokes방정식에서 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, 이산 속도장에서 유체의 밀도와 운동량은 다음의 정의에 따라 계산할 수 있다.

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

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

BGK완화법 (Bhatnagar⁽¹¹⁾)을 적용한 이산격자 볼츠만(McNamara,⁽⁷⁾ Higuera,⁽⁸⁾ Chen⁽¹¹⁾)방정식 [식 (2)]은 각방향의 입자분포함수값을 이동, 분산시키는 Streaming과정과 각 격자점에서 점성계수에 의해 결정된 완화시간에 의한 충돌(Collision)과정으로 나누어 해석되며, 점착, Periodic, 미끄럼을 구현한 경계조건의 적용으로 각 격자점에서의 입자분포함수값이 계산된다.

2.2 경계처리법

LBM을 이용한 유동해석에 있어서 가장 중요한 것 중의 하나가 경계조건이다. LBM에서 주로 이용되는 경계조건으로는 고체벽면경계와 입출구 경계에 적용되는 조건으로 나눌 수 있다. LBM은 Navier-Stokes방정식을 이용한 유동해석과 달리 입자의 밀도분포함수를 구하는 것으로, 각 경계에서 입자분포함수에 관한 경계조건을 적용하여야 한다. 입구경계에서는 유입되는 유체의 밀도와 속도를 이용하여 경계에서의 입자밀도분포함수를 계산하여 그 값을 경계조건으로 적용하게 되지만, 고체 벽면에 적용되는 점착조건의 경우 유체와 고체 경계에서 이루어지는 입자의 반사(Bounce-Back)를 이용하여 점착을 유도하게 된다. 하지만 이 반사조건을 적용하기 위해서는 구성된 격자 형상과 고체의 경계가 일치되어야 하기 때문에 복잡한 형상의 장애물이 유동장에 존재하는 경우 구성된 격자형상을 따르는 계단형태로 그 경계가 표현되어야 한다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 이 연구에서는 유동장에 위치한 복잡한 형상의 장애물 경계에 적용할 수 있는 경계처리법을 제시한다. Fig. 1은 D2Q9 격자계와 곡선의 외형을 한 장애물의 경계를 나타낸 그림으로, 굵은 선은 장애물의 외형을 나타내며, 원형심볼은 유체 내부, 사각심볼은 고체내부에 위치한 격자점을 나타내며, 검은원형심볼은 유체와 고체의

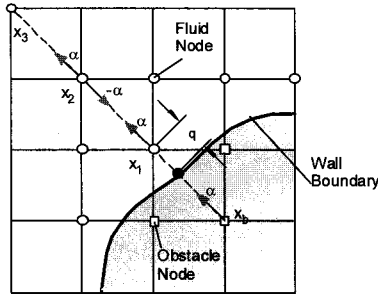


Fig. 1 Layout of the regularly spaced lattices and curved wall boundary

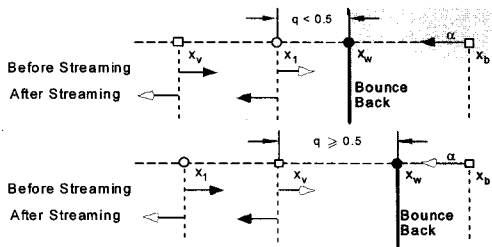


Fig. 2 Illustration of the boundary conditions for an obstacle wall located arbitrarily between two node sites in one dimension

경계사이에서 반사가 일어나는 지점을 표시하고 있다. Fig. 2는 고체경계에서 반사조건의 처리를 도식적으로 나타낸 그림이다. 고체 경계와 근접 격자점 사이의 거리의 비가 0.5보다 작은 경우 ($q < 0.5$), 경계에 근접한 격자점의 위치인 \vec{x}_1 에서 빈 화살표 방향의 입자의 분포함수, $f_{-\alpha}(\vec{x}_1)$,는 streaming과 반사조건 처리과정을 통해서 \vec{x}_1 으로부터 $(1-2q)$ 떨어진 격자점, \vec{x}_v ,에서의 분포함수 값으로 치환되고, 이 값을 Streaming과 반사조건 처리과정 후, \vec{x}_v 에서의 입자밀도분포함수, $f_{\alpha}(\vec{x}_v)$,가 된다. 같은 방법으로 \vec{x}_v 에서의 입자분포함수, $f_{-\alpha}(\vec{x}_v)$,는 Streaming과 반사조건 처리과정 후 \vec{x}_1 에서의 입자분포함수, $f_{\alpha}(\vec{x}_1)$,이 되며, 이들의 관계는 식 (9), (10)과 같다.

$$f_{\alpha}(\vec{x}_1 + \delta\vec{x}) = f_{-\alpha}(\vec{x}_v) \quad (9)$$

$$f_{\alpha}(\vec{x}_v + \delta\vec{x}) = f_{-\alpha}(\vec{x}_1) \quad (10)$$

반사가 발생하는 \vec{x}_v 는 격자점과 격자점사이의

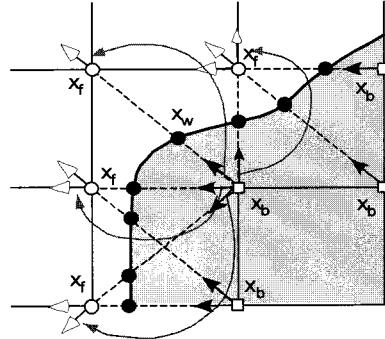


Fig. 3 Streaming process between nodes in fluid and solid sites

위치로, 이 지점에서의 입자밀도분포함수 $f_{-\alpha}(\vec{x}_v)$ 를 \vec{x}_v 에 근접한 격자점 $\vec{x}_1, \vec{x}_2, \vec{x}_3$ 에서의 입자밀도분포함수 값으로부터 2차 보간법으로 계산하면 식 (11)과 같다.

$$f_{-\alpha}(\vec{x}_v) = q(1+2q)f_{-\alpha}(\vec{x}_1) + (1-4q^2)f_{-\alpha}(\vec{x}_2) - q(1-2q)f_{-\alpha}(\vec{x}_3) + 3\rho w_{\alpha}(c_{\alpha} \cdot \vec{u}_w) \quad (11)$$

$q \geq 0.5$ 인 경우 \vec{x}_v 에서의 입자밀도분포함수, $f_{-\alpha}(\vec{x}_v)$ 는 Streaming과정을 거친 \vec{x}_1 에서의 입자밀도분포함수, $\hat{f}_{\alpha}(\vec{x}_1)$,을 2차보간법으로 계산하면 식 (12)와 같다.

$$\hat{f}_{\alpha}(\vec{x}_1) = \frac{1}{q(2q+1)}\hat{f}_{\alpha}(\vec{x}_v) + \frac{2q-1}{q}\hat{f}_{\alpha}(\vec{x}_2) - \frac{2q-1}{2q+1}\hat{f}_{\alpha}(\vec{x}_3) + \frac{3\rho w_{\alpha}}{q(2q+1)}(c_{\alpha} \cdot \vec{u}_w) \quad (12)$$

식 (11)과 (12)를 다시 Streaming 이후와 이전의 관계로 정리하면 식 (13)과 (14)와 같다.

$$\hat{f}_{\alpha}(\vec{x}_1) = q(1+2q)f_{-\alpha}(\vec{x}_1) + (1-4q^2)f_{\alpha}(\vec{x}_2) - q(1-2q)f_{-\alpha}(\vec{x}_3) + 3\rho w_{\alpha}(c_{\alpha} \cdot \vec{u}_w) \quad (13)$$

$$\hat{f}_{\alpha}(\vec{x}_1) = \frac{1}{q(2q+1)}f_{\alpha}(\vec{x}_v) + \frac{2q-1}{q}f_{\alpha}(\vec{x}_2) - \frac{2q-1}{2q+1}f_{\alpha}(\vec{x}_3) + \frac{3\rho w_{\alpha}}{q(2q+1)}(c_{\alpha} \cdot \vec{u}_w) \quad (14)$$

식 (13)과 (14)는 두 격자점 사이의 거리와 장애물과 격자점 사이의 거리의 비인 q 값에 따라 장애물에 근접한 유체 격자점인 \vec{x}_1 에서 반사와 Streaming과정을 적용한 이 후의 분포함수 값을 나타낸다.

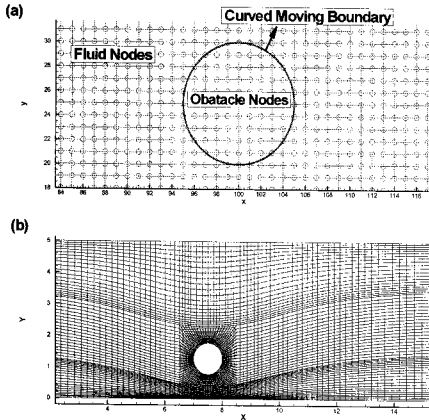


Fig. 4 Formations of the grid in LBM and NS Simulation

계산영역 전체의 Streaming과정은 계산영역에 구성된 각각의 격자점에서 분포함수 값을 켈레위치 (Conjugate Site location)의 함수값으로 치환하는 과정으로 장애물의 경계에 근접한 격자점의 분포함수값도 그 켈레위치의 분포함수 값으로 치환시키게 된다. 이들 중 일부의 켈레위치는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 장애물 내부의 격자점, \vec{x}_b 에 위치하고 있다. 따라서 식 (13)과 (14)의 분포함수 값을 \vec{x}_b 위치의 분포함수 값으로 정의하여 전체 유동장의 Streaming과정과 고체경계에 의한 반사 조건을 동시에 만족시킬 수 있다.

3. 해석결과

두 평판 사이에서 주기적인 운동하는 원형실린더 주위 유동특성과 실린더의 공력특성해석을 위하여 이 연구에서 제시한 경계처리법을 적용한 LBM해석과 변형격자를 이용한 Navier-Stokes 방정식의 해석을 병행하였다.

Navier-Stokes방정식의 해석은 Foam⁽¹⁴⁾을 이용해 제작한 icoDyMfoam을 이용하였으며, 두 해석결과의 비교를 통해 LBM해석 결과를 검증하였다. Fig. 4는 LBE와 Navier-Stokes방정식의 해석을 위한 계산영역의 격자형상을 나타낸 것으로 LBE해석의 경우, (250x50)개의 정사각형 격자를 균일하게 구성하였으며, 이 영역에 일정한 크기의 반지름을 갖는 실린더를 구성된 격자와는 독립적으로 위치시켰다. Fig. 4(b)는 Navier-Stokes방정식의

Table 1 List of applying parameters for LBM and NS simulation. (*denotes NS simulation)

Re	R_v	Frequency	Y_{max}	V_{max}	U_{in}	Viscosity
50	0	-	0.0	0.0	0.1	0.1
	0.5	0.00053	15	0.05	0.1	0.1
	1	0.00106	15	0.1	0.1	0.1
	2	0.00212	15	0.2	0.1	0.1
100	0	-	0	0	0.1	0.05
	0.5	0.00053	15	0.05	0.1	0.05
		1/8 *	5	2.375	4.75	0.2375
	1	0.00106	15	0.1	0.1	0.05
		1/8 *	5	2.375	2.375	0.11875
	2	0.00212	15	0.2	0.1	0.05
1/8 *		5	2.375	1.1875	0.0593	
200	0	-	0	0	0.1	0.025
	0.5	0.00053	15	0.05	0.1	0.025
	0.5	0.001	15	0.0942	0.1884	0.0471
	0.5	0.0005	15	0.0471	0.0942	0.0235
	0.5	0.00033	15	0.0314	0.0628	0.0157
	0.5	0.00025	15	0.0235	0.0471	0.0117
	0.5	0.0002	15	0.018	0.0376	0.0094
	1	0.001	15	0.1	0.1	0.025
500	0	-	0	0	0.1	0.01
	0.5	0.00053	15	0.05	0.1	0.01
		1/8 *	5	2.375	4.75	0.0475
	1	0.001	15	0.1	0.1	0.01
		1/8 *	5	2.375	2.375	0.0237
	2	0.0021	15	0.2	0.1	0.01
1/8 *		5	2.375	1.1875	0.0118	
1000	0	-	0	0	0.1	0.005
	0.5	0.00053	15	0.05	0.1	0.005
	1	0.00106	15	0.1	0.1	0.005
	2	0.00212	15	0.2	0.1	0.005

해를 구하기 위한 격자형상으로, 실린더의 형상을 따라 구성된 총 14000개의 격자가 실린더의 이동에 따라 변형된 격자의 형상을 보여주고 있다. 격자의 변형이 심한 실린더 주위에 격자를 집중시켜 격자의 변형에 따라 나타나는 오차를 감소시켰다. 해석시간을 감소시키기 위하여 격자의 재생성과정은 배제하였으므로 실린더의 이동은 일정한 구간으로 제한된다.

y방향으로 주기적인 운동을 하고 있는 원형실린더 주위의 유동해석을 위하여 실린더의 x위치는 고정시켰다. 이때 y방향의 이동 속도는 최대 이동 폭 A_{cir} 과 이동주파수 ω 에 의해서 정의하였으며 이들은 식 (15)-(17)과 같다.

$$y_{obst} = A_{cir} \sin(2\pi\omega t) \quad (15)$$

$$v_{obst} = V_{max} \cos(2\pi\omega t) \quad (16)$$

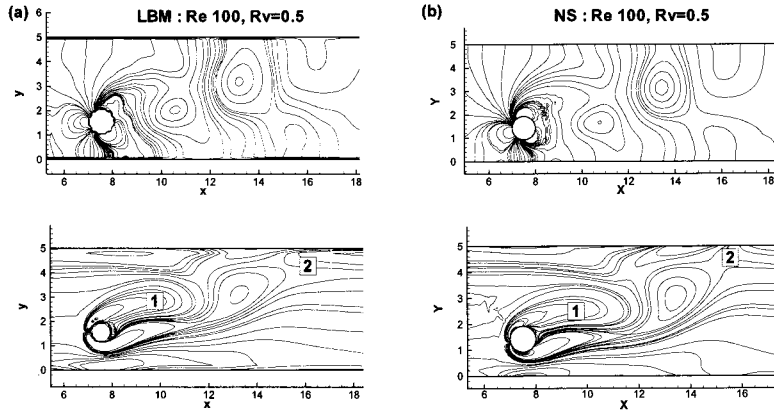


Fig. 5 Pressure and vorticity contour plots simulated by LBM and NS at Re=100, Rv=0.5 (The first and second vortex are marked by ① and ②)

$$\omega = \frac{U_{in} R_v}{2\pi A_{cir}} \quad (17)$$

여기서 V_{max} 는 원형실린더의 최대속도이며, $R_v = V_{max}/U_{in}$ 은 입구에서 유입되는 유체의 속도와 원형실린더의 최대이동속도의 비를 나타낸다. 이동속도의 비와 레이놀즈수의 변화에 따라 나타나는 실린더의 공력특성 해석은 레이놀즈 수를 50~1000, 속도비를 0.0~2.0으로 그 변화 폭을 고정하여 수행하였다.

Navier-Stokes방정식의 해석은 LBM해석 결과의 비교를 위한 것으로 고정실린더 후류에 와홀림(Vortex shedding)이 발생하기 시작하는 레이놀즈 수(250)를 전후로 두 경우에 대해서만 해석하였으며, 각 해석에 이용된 변수들은 Table 1에서 보는 바와 같다.

Fig. 5는 레이놀즈 수가 100이고 입구와 실린더의 최대이동속도의 비가 0.5일 때 실린더의 주기적인 상하 운동 중 하강하고 있는 순간의 압력과 와도의 분포이다. 실린더의 이동으로 후류에 형성된 압력과 와도 분포에서 두 해석 결과가 서로 일치하고 있는 것을 볼 수 있다.

레이놀즈 수가 250이하인 고정 실린더 주위 유동에서는 후류에 와홀림이 형성되지 않지만, 실린더가 주기적으로 운동하는 경우 실린더의 주기적인 운동의 영향으로 후류에 와홀림이 형성된다. 후류에 생성된 와류는 평판의 근접 영역에서 생성된 와류와

결합하여 2차와류가 형성되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6은 실린더 중심으로부터 1.0과 2.5 떨어진 후류에서 유동방향의 속도분포를 나타낸 그림이다. 두 해석의 속도분포는 평판의 근접영역을 제외한 대부분의 영역에서 다소의 차이는 있지만 일치하는 것으로 나타났다. LBM 해석에서는 실린더의 운동 폭을 고정시키고 그 실린더의 위치를 주기적으로 변화시켜 해석을 수행한 반면에 icoDyMFoam에서는 실린더의 이동 속도를 주기적으로 변화시켜 그 위치를 결정하기 때문에 두 해석의 시간스텝과 운동 주파수를 정확하게 일치시킬 수 없었다. 따라서 평판의 근접영역에서 Fig. 6과 차이가 발생한 것으로 판단된다.

실린더의 운동 주파수의 변화에 따라 나타나는 유동현상의 차이를 검토하기 위하여 레이놀즈 수와 속도비를 각각 200, 0.5로 고정시키고 세 개의 다른 주파수에 대한 해석을 수행하였다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 후류에 발생한 와류는 낮은 주파수의 경우 평판을 따라 길게 형성되지만, 주파수가 높아질수록 그 형상이 짧아지는 경향을 보이고 있다. 실린더의 운동 주파수가 높아진다는 것은 실린더의 운동이 빨라진다는 것으로, 빠르게 운동하는 실린더는 후류의 유동을 빠르게 단절시키고 이로 인해 와류의 형상이 짧아진다고 할 수 있다. 이렇게 형성된 와류는 후류로 이동함에 따라 평판에서 형성된 와류와 결합하여 뚜렷한 2차 와류를 형성하게 된다.

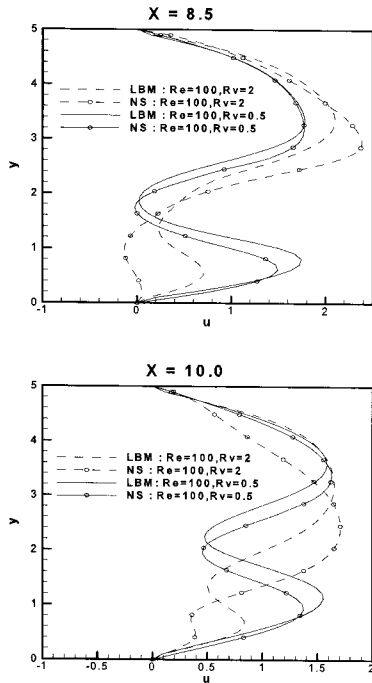


Fig. 6 Comparison of x-dir velocity distributions simulated by LBM and NS

Fig. 8은 레이놀즈 수가 200이고, 속도비가 0~2 일 때 실린더 주위의 유동을 비교한 그림이다. 레이놀즈 수가 250이하인 유동으로 고정된 실린더의 경우($R_v = 0.0$) 후류에 와홀림이 발생하지 않는 것을 볼 수 있다. 속도비가 증가함에 따라 실린더 후류에 발생한 유동이 복잡해지며, 특히 실린더의 주기적인 운동으로 후류에 발생한 와류는 두 평판 주위에서 발생한 와류와 결합하여 새로운 2차와류를 생성시키는 것을 볼 수 있다. 속도비가 2일 때 즉 입구속도보다 실린더의 최대 이동 속도가 2배 큰 경우에는 실린더의 이동에 의한 유동이 상류에도 영향을 미치고 있는 것을 볼 수 있다. 레이놀즈 수가 500일 때 고정된 실린더 후류에 와홀림이 나타나지만 속도비의 변화에 따라 나타나는 유동현상은 레이놀즈 수가 200일 때와 마찬가지로 후류와 상류에 실린더의 이동이 영향을 주고 있으며, 평판에서 발생한 와류와 서로 결합하여 2차와류를 형성시키는 것을 Fig. 9에서 볼 수 있다. 속도비가 커짐에 따라 후류에 생성된 와류는 더욱 복잡해져, 실린더 후류

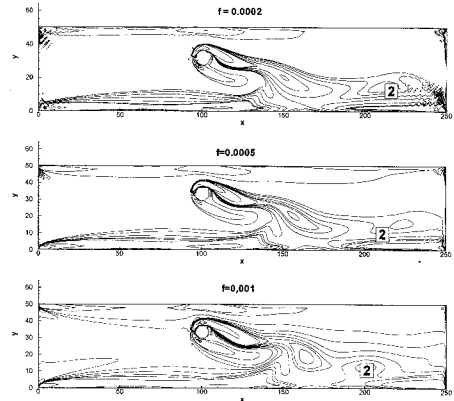


Fig. 7 Comparison of vortex shedding with different moving frequency (the second vortex is marked by ②)

에 발생한 와류와 한쪽평판에서 생성된 와류가 결합한 2차 와류는 다른 한쪽에서 생성된 와류와 재결합하여 3차 와류를 형성하고 있음을 볼 수 있다. 주기적인 운동을 하는 실린더의 공력특성은 주로 유동장에 위치한 실린더에 발생하는 항력계수로 이를 대표하고 있다. 이 연구에서 실린더는 유체의 주 흐름 방향(x방향)의 수직방향(y방향)으로 운동하고 있어 주 흐름 방향으로 작용하는 힘을 항력으로 정의하였으며 이는 식 (18)과 같다.

$$C_D = \frac{F_D}{0.5\rho U_{in}^2 D} \quad (18)$$

실린더의 운동속도와 레이놀즈 수의 변화에 따른 실린더의 항력계수의 변화를 Fig. 10에 나타냈으며, 이들 중 고정실린더의 항력계수를 Zovatto⁽¹⁵⁾의 직접수치모사의 결과와 비교하여 해석결과의 신뢰도를 간접적으로 검증하였다.

레이놀즈수의 증가에 따라 실린더의 항력계수는 감소하며 레이놀즈수가 1000이상에서는 일정한 항력계수를 유지하는 것으로 나타났었다. 이는 Zovatto⁽¹⁵⁾의 연구결과와도 일치한다. 속도비가 증가함에 따라 비례하여 항력계수는 커지지만, 레이놀즈수가 1000이상에서 일정한 값을 갖는 경향은 그대로 유지된다. 또한 속도비의 증가는 실린더의 이동 주파수가 커지는 것을 의미하며, 이동 주파수의 증가가 항력계수를 증가시키는 것으로 판단된다.

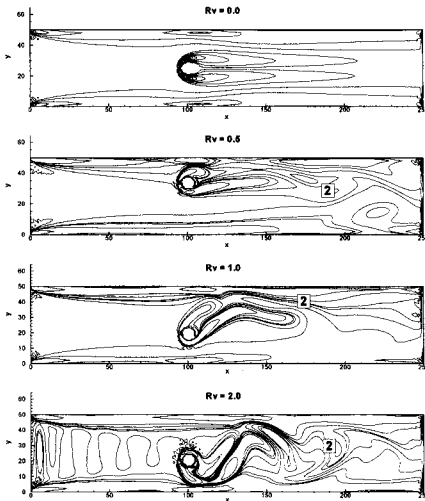


Fig. 8 Contour plots of vortex shedding at $Re = 200$ and various velocity ratio (the second vortex is marked by [2])

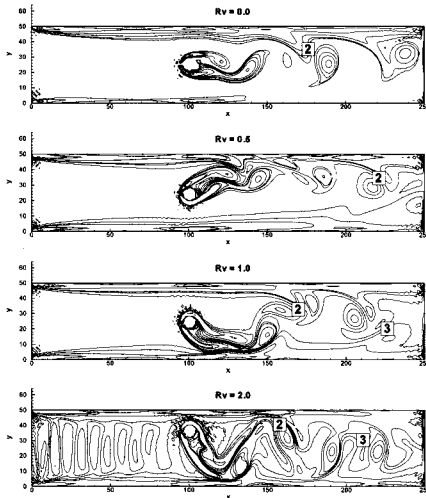


Fig. 9 Contour plots of vortex shedding at $Re = 500$ and various velocity ratio (the second and third vortex are marked by [2], [3])

4. 결론

LBM은 다중계의 해석이 가능하고 광범위한 적용분야를 가지고 있어 현재 여러 가지 물리현상의 해석에 그 적용이 확대되고 있는 해석법이다. 이 연구에서는 계산영역을 일정한 모양의 격자형

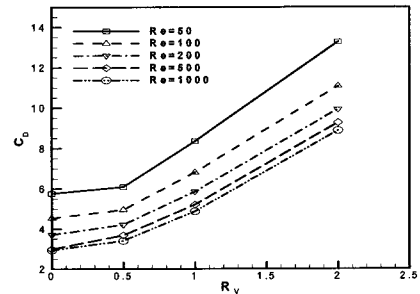
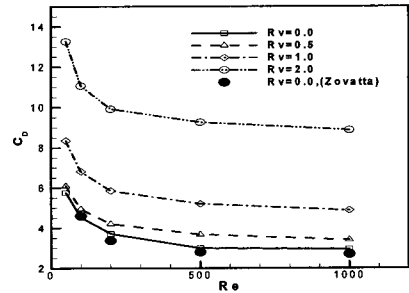


Fig. 10 Mean drag coefficient of oscillating circular cylinder dependence on the Reynolds number and velocity ratio

상으로 구성함에 따르는 단점을 보완하기 위한 곡선경계처리법(Curved Moving Boundary Treatment)을 이용하여 두 평판 사이에 존재하는 실린더의 주기적인 운동에 따른 유동장의 변화를 해석하였으며 이 결과를 기존의 해석결과와 비교하여 경계처리법을 간접적으로 검증하였다. 유동장에서 주기적으로 운동하고 있는 실린더 주위의 유동의 경우도 $Re=250$ 을 기준으로 레이놀즈 수의 변화에 따라 후류에 나타나는 와류의 구조에 큰 차이를 보이고 있다. 유체의 유입속도와 실린더의 운동 속도의 비인 속도비가 증가함에 따라 후류에 발생하는 와류는 더욱 더 복잡한 구조를 가져, 실린더가 상하의 벽면에 접근한 후 다시 벽면으로부터 멀리 이동할 때 벽면의 경계층에서 발생한 와류와 실린더 후류에서 발생한 와류가 결합하여 2차 와류를 발생시키고, 특히 속도비 클 때 ($R_v = 2.0$) 상 하 벽면에서 발생한 2차 와류가 서로 결합하여 3차 와류를 형성시킨다.

항력계수는 레이놀즈수가 증가함에 따라 감소하며 레이놀즈수가 1000보다 큰 영역에서는 일정한 값을 갖는 것으로 나타났다. 속도비의 변화에

따른 항력계수의 변화는 속도비가 0.5보다 클 때 ($R_0 > 0.5$) 일정한 구배를 가지고 증가하는 것으로 나타났다. 이 연구는 입구의 속도를 일정하게 고정하고, 실린더의 주기적인 이동을 코사인 함수로 나타내 두 평판의 중심에서 가장 빠른 이동속도를 갖는 경우의 항력계수를 나타낸 것이다. 이후에 실린더 이동 주파수와 운동함수의 변화에 따라 나타나는 실린더의 공력특성에 대한 연구의 수행을 계획하고 있다.

후 기

이 논문은 2006학년도 경기대학교 교원 교비해외과건 연구비 지원에 의해 연구되었음.

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) Yang, Hui-Ju, Jeon, Hae-Kwon, Kim, Lae-Sune. and Ha, Man-Yeong, 2007, "A Numerical Study of the Incompressible Flow Over a Circular Cylinder Near a Plane Wall Using the Immersed Boundary - Finite Difference Lattice Boltzmann Method," *KSME Spring Meeting*.
- (5) Jeong, Hae Kwon., Ha, Man Yeong., Kim, Lae sung., Lee, Hyun Goo. and Lee, Jae Ryong., 2007, "Numerical Simulation of Thermal Lattice Boltzmann Model with a Modified InTernal Energy Non-Equilibrium First-Order Extrapolation Boundary Condition," *KSME Journal B*, Vol. 31, No. 7, pp. 620~627.
- (6) Frisch, U., Hasslacher, B. and Pomeau, Y., 1986, "Lattice-Gas Automata for the Navier-Stokes Equations," *Phys. Rev. Lett.* Vol.56, pp. 1505~1508.
- (7) McNamara, G. and Zanetti, G., 1988, "Use of the Boltzmann Equation to Simulate Lattice-Gas Automata," *Phys. Rev. Lett*, Vol. 61, pp. 2332~2335.
- (8) Higuera, F. and Jimenez, J., 1989, "Boltzmann Approach to Lattice Gas Simulations," *Europhys. Lett.*, Vol. 9, pp. 663~668.
- (9) Koelman, JMVA., 1991, "A Simple Lattice Boltzmann Scheme for Navier-Stokes Fluid Flow," *Europhys. Lett.*, Vol.15, pp. 603~607
- (10) Qian, YH., 1990, "Lattice Gas and Lattice Kinetic Theory Apply to Navier-Stokes Equation," *PhD Thesis, University et Peirre Marie Curie, Paris*.
- (11) Bhatnagar, PL., Gross, EP. and 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.
- (12) Chen, H., 1993, "Discrete Boltzmann Systems and Fluid Flow," *Comp. Phys.*, Vol. 7, pp. 632~637.
- (13) 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.
- (14) FOAM, "www.openfoam.org."
- (15) Zovatto, L. and Pedrizzetti, G., 2001, "Flow About a Circular Cylinder Between Parallel Walls," *J. Fluid Mech.* Vol. 440, pp. 1~17.