

# 장애물 주위의 비뉴턴 유체의 유동특성에 관한 수치적 연구

김형민\*

경기대학교 기계시스템공학과

## NUMERICAL STUDY ON THE CHARACTERISTICS OF NON-NEWTONIAN FLUID FLOW OVER OBSTACLE

Hyung Min Kim\*

Dept. of Mechanical System Engineering, Kyonggi University

*Since the most of the existing non-Newtonian models are not adequate to apply to the lattice Boltzmann method, it is a challenging task from both the theoretical and the numerical points of view. In this research the hydro-kinetic model was modified and applied to the 3-D moving sphere in the circular channel flow and the characteristics of the shear thinning effect by the HK-model was evaluated and the condition of  $\Gamma$  in the model was suggested for the stable simulation to generate non-trivial prediction in three dimension strong shear flows. On the wall boundaries of circular channel the curved wall surface treatment with constant velocity condition was applied and the bounceback condition was applied on the sphere wall to simulate the relative motion of the sphere. The condition is adequate at the less blockage than 0.7 but It may need to apply a multi-scale concept of grid refinement at the narrow flow region. to obtain the stable numerical results.*

**Key Words :** 격자 볼츠만법(Lattice Boltzmann Method), HK-모델(Hydro-kinetic model), 전단희박유동(Shear thinning flow)

### 1. 서 론

다중영역의 해석능력을 가지고 있는 새로운 유동해석법인 격자 볼츠만법(Lattice Boltzmann Method)이 소개된 1988년 이래로 그 활용영역과 해석정밀도를 검증하기 위한 연구[1-3] 이루어지고 있다. 이 해석법은 유한체적 및 유한요소법을 적용하여 얻은 이산화방정식의 해를 구하는 일반적인 유동해석 방법과 달리 확률적분포함수를 격자점에서 미리 정해놓은 방향으로 그 함수값을 이동시키는 스트리밍 과정과 충돌 과정의 반복적 계산을 통해 분포함수의 확률적 분포를 해석하는 방법으로, 다른 유동해석방법에 비해 상대적으로 코드작성과 병렬계산에 유리하다는 장점을 가지고 있다. 뿐만 아니라 격자 볼츠만법은 난센수가 0.01보다 큰 마이크로 영역까지 해석이 가능한 다중계 해석법으로 알려져 있어 이 해석법에 적용이 가능한 다중물리현상 모델의 개발을 통해 마이크로 영역

까지 그 물리적 현상의 수치모사를 가능하게 하고 있다.

한편 원형단면의 실린더 내에서 중력 등의 영향으로 이동하는 구형 물체 주위의 비뉴턴 유체의 유동특성을 평가하기 위한 연구로는 화학, 광물, 식품가공분야뿐만 아니라 고정층과 유동층 반응기를 포함한 낙구점도계, 진흙과 슬러리의 퇴적 등이 있다. 현재까지 관련분야의 많은 연구자[4-6] 의해서 수행된 해석적, 실험적 연구를 통해서 실질적인 공학 분야에서 공정의 설계변수를 결정하기 위한 기초자료를 구축해 오고 있다. 이들 중 Song et al.[5]과 Adachi et al.[7,8]은 Power-law 모델을 이용한 원형실린더 내에서 구 주위의 유동특성을 평가하였으며 특히 Adachi et al.[7,8]은 Power-Law모델의 유동지수  $n$ 의 범위를 0.8 ~ 1.0의 범위에서 레이놀즈수가 60일 때 구 주위에서 유동 특성을 모멘트 확장법을 적용하여 해석적으로 평가하였다. 하지만 이 연구에서 설정한 Power-Law모델의 유동지수  $n$ 의 범위가 좁아 뉴턴유체의 유동특성과 뚜렷이 구분되는 차이를 볼 수 없었다. Adachi et al.[7,8]은 4개의 인자를 가지고 있는 새로운 모델을 소개하고 이를 적용하여 해석한 결과와 비교하였지만 두 모델간의 차이를 극대화하기 위해 모델 인자에 과도한 값을 적용하여 실제적인 결과를 얻지 못했다는 평가를 받고 있다. Tripathi et

Received: November 3, 2014, Revised: December 15, 2014,

Accepted: December 15, 2014.

\* E-mail: pius@kgu.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2014.19.4.061>

© KSCFE 2014

al.[9]은 레이놀즈수가 100일 때 Power-Law 모델의 유동지수  $n$ 을 0.4 ~ 1.8 범위로 확장하여 전단희박과 전단농화의 특성을 평가했고, 이 연구에서 제한적이지만 전단희박 해석결과가 실험결과와 일치한다는 성과를 얻었다. 한편 Graham and Jones[10]와 Gabbanelli et al.[11]은 격자 볼츠만법에 Power-law 모델 적용하여 전단희박을 포함한 비뉴턴 유체의 유동특성을 분석하였고 이들 결과를 나비어-스토크스 방정식에 power-law를 적용한 해석 결과[9]와 비교하였다. 두 해석결과는 다소 차이를 보이지만 이는 실린더 표면에 적용한 경계조건의 차이에서 나타난 오차로 기존의 해석법과 비교해서 해석 정밀도에 문제가 없는 것으로 평가된다. Zhang[12]은 격자 볼츠만법을 적용하여 마이크로 영역에서의 유동특성을 분석했으며 이를 통해 뉴턴수에 비례한 미끄럼속도 조건을 적용한 나비어-스토크스 방정식의 해석에 비해 상대적으로 높은 정밀도를 가지는 것으로 평가되었다. 이처럼 비뉴턴 유체의 유동해석에 격자 볼츠만법을 적용하여 비뉴턴 유체의 해석영역을 마이크로 영역에까지 확장하려는 도전적인 연구가 진행되고 있다.

한편 격자 볼츠만법을 이용한 비뉴턴 유체의 유동해석을 위한 모델 개발 연구에서는 강한 비선형성과 점탄성적 거동을 포함한 모사가 가능한 비뉴턴 유체 모델 개발이 진행되고 있지만 이들은 주로 Power-Law 또는 이를 수정한 Carreau 모델과 유사한 모델들이다. 이들은 나비어-스토크스 방정식의 해를 구하는 보편적인 유동해석법에 유용하게 이용될 수 있지만 완화시간과 입자분포함수의 확률적 분포로부터 유체의 거동을 모사하는 격자 볼츠만법에서는 상대적으로 비효율적일 수 있다. 따라서 기존의 비뉴턴 유체 모델 보다 격자 볼츠만법에 적용이 용이하고 해석정밀도가 높은 격자 볼츠만법 전용모델 개발이 진행이 되고 있으며 이중 Yakot et al.[13]은 “열역학적 평형상태로 이르는 완화과정은 Bogoliubov의 위계에 따른 완화시간으로 그 현상을 정확하게 기술할 수 있다.”는 가정으로부터 변형률과 완화시간의 관계를 기술한 HK (Hydro-Kinetic) 모델을 개발하였으며 이를 이용하여 격자 볼츠만법으로 전단희박현상을 보다 효율적으로 모사할 수 있게 되었다. 이 모델을 축적비가 1/4로 급축소된 후 다시 4배로 확대되는 강한 전단변형을 갖는 급축소-확대관 유동에 적용한 해석적 연구[14,15]가 진행되었으며, 이 연구에서 HK-모델 유체의 유동특성분석을 통해 HK-모델을 적용한 격자 볼츠만법의 해석 안정성을 확보할 수 있는 제한조건이 제시되었다. 하지만 유동장에서 국소변형률로부터 격자점에서 완화시간을 계산하고 이를 충돌과정에 적용하는 과정에서 강한 국소 변형률에 따라 격자 볼츠만법의 해석이 불안정해지는 문제가 야기되기 때문에 유동문제에 따라 안정적인 해석결과를 얻기 위한 적절한 제한 조건을 제시할 필요가 있다. 따라서 이 연구에서는 기존의 HK-모델을 수정하여 원형관 내에서 구형

물체가 이동할 때 HK-모델 유체의 3차원 유동특성을 분석하고 이 분석결과를 통해 HK-모델을 장애물 주위의 유동해석에서 안정적인 해석결과를 확보할 수 있는 제한조건을 제시한다.

## 2. 수치해석방법

### 2.1 격자 볼츠만법

볼츠만 수송방정식 (Boltzmann Transport Equation : BTE)의 충돌항을 단일 완화시간으로 단순화한 BGK(Bhantnagar - Gros-Krook) 모델을 적용한 격자 볼츠만 방정식을 이용하여 계산영역에 구성된 격자점에서 입자분포함수의 확률적 확산을 계산하고 이로부터 유동의 거시적 물리량을 계산하는 해석법을 격자 볼츠만법이라고 하며, 격자 볼츠만 방정식의 이산화식은 식 (1)과 같다.

$$f_i(x + c_i \Delta t, t + \Delta t) = f_i(x, t) - \frac{\Delta t}{\tau} [f_i(x, t) - f_i^{eq}(x, t)] \quad (1)$$

위 식에서  $i$ 는 각 격자점에서 그 격자점 주위에 위치한 격자점의 방향을 나타내는 이산방향으로, 3차원의 경우 주로 19개 또는 27개의 이산방향을 설정하고 이산방향의 수에 따라 모델을 구별하고 있다. 이 연구에서는 19개의 이산방향을 가지고 있는 D3Q19모델을 적용하여 해석을 수행하였다.  $f_i^{eq}(x, t)$ 는 각 격자점에서 평형상태일 때  $i$  이산방향의 입자분포함수를 나타내며 이 값은 식 (2)와 같다.

$$f_i^{eq} = \omega_i \rho \left( 1 + \frac{3c_{i\alpha} u_\alpha}{c_s^2} + \frac{9(c_{i\alpha} u_\alpha)^2}{2c_s^4} - \frac{3(u_{i\alpha})^2}{2} \right) \quad (2)$$

$$\omega_i = 1/3 (i=0),$$

$$\omega_i = 1/18 (i=1, 2, \dots, 5, 6)$$

$$\omega_i = 1/36 (i=7, 8, \dots, 17, 18)$$

여기서  $c_{i\alpha}$ 는  $i$ 방향의 이산속도를 나타내며,  $c_s^2$ 는 D3Q19모델에서 1/3의 값을 갖는다. 각 격자점에서 입자분포함수 ( $f_i$ )와 유동속도( $u_\alpha$ ), 밀도( $\rho$ )와 같은 거시적물성치의 관계는 식 (3)과 같다.

$$\rho(x, t) = \sum_{i=0}^N f_i \rho u_\alpha, \quad \rho u_\alpha(x, t) = \sum_{i=0}^N c_{i\alpha} f_i \quad (3)$$

이 연구는 원형 실린더 내에 위치한 구형의 장애물이 일정한 속도로 이동하고 있을 때 이 장애물과 장애물 주위 유동을 모사하는 것이다. 하지만 격자 볼츠만법을 이용한 해석에서 기본적인 계산영역의 형태는 육면체로 고정되어 있어 원형실린더 형태의 계산영역을 구현하기 위해서 육면체형상의 기본 계산영역에 내접하는 삼각형 형태의 표면격자로 구성된 원형실린더 형상의 가상벽면을 설정하고 이 벽면을 따라 3차원 곡면경계처리법을 적용하여 원형실린더 형상의 계산영역을 구성하였으며 이 곡면에 일정한 속도 조건을 적용하였다. 또한 구형물체의 벽면에는 Bounceback 조건을 적용하여 접촉 조건을 적용하였다. 또한 원형 실린더의 입구와 출구 경계에서 입자분포함수로 주어진 속도분포와 압력 값을 갖는 Zou and He[16]가 제안한 경계조건 적용하였다.

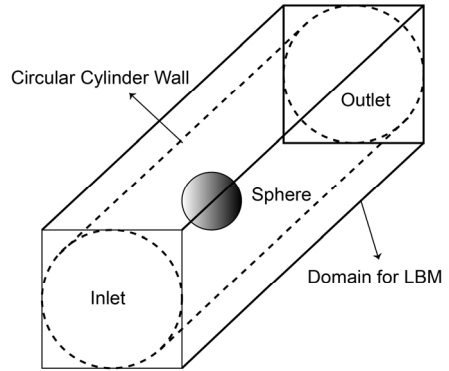


Fig. 1 Calculation domain for lattice boltzmann simulation

2.2 Hydro-Kinetic 모델

격자 볼츠만법을 유동해석에서 유동특성은 방정식의 충돌항에 있는 완화시간을 통해서 정의된다. 격자 볼츠만 방정식을 Chapman-Enskog법[1]로 확장하여 각 차수에 따라 정리한 식으로부터 식 (4)와 같은 동점성계수(ν)와 완화시간과의 관계를 얻을 수 있다.

$$\nu = \frac{2\tau_0 - 1}{6} \tag{4}$$

여기서 τ<sub>0</sub>는 유동의 완화시간이다. 비뉴턴 유체의 유동에서 전단유동의 비선형적 유변 상태방정식은 열역학적 평형상태로 진행되는 완화과정의 특성을 나타낸다는 Bogolubov 위계를 바탕으로 수정된 운동방정식을 기반으로 한 국소완화시간(τ)과 변형률사이의 관계를 나타낸 비뉴턴 유체 모델이 Hydro-Kinetic (HK)모델이며 이는 식 (5)와 같다.

$$\frac{1}{\tau} = \sqrt{\frac{1}{\tau_0^2} + \Gamma \left( \frac{\dot{\gamma}}{\tau_0} \right)^2} \tag{5}$$

여기서 변형률  $\dot{\gamma}$ 를 2차 불변량 (II<sub>II</sub>)으로부터 정의하면 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\gamma} = \sqrt{II_{II}}, \quad II_{II} = \sum_{\alpha, \beta=1}^3 S_{\alpha\beta} S_{\alpha\beta} \tag{6}$$

식 (6)의 국소 2차 불변량의 계산은 식 (7)에서와 같이 국속응력텐서를 비평형상태의 입자분포함수로부터 직접 계산할 수 있으므로 속도분포의 계산과정에서 포함되는 오차 등을 배제시킬 수 있어 보다 효율적이고 정밀한 해석 결과를 얻을

수 있다.

$$S_{\alpha\beta} = -\frac{3}{2\tau} \sum_i f_i^{\alpha\beta} c_{i\alpha} c_{i\beta} \tag{7}$$

비평형상태의 입자분포함수  $f_i^{\alpha\beta}$ 는 각 격자점에서 계산되는 입자분포함수에서 평형상태의 입자분포함수를 뺀 값이다. HK-모델의 무차원 인수인 Γ는 변형률의 변화에 따른 완화시간을 제어하는 인수이다. 이 HK-모델은 강한 전단 유동장에서 변형률이 증가함에 따라 완화시간이 급격하게 감소하는 경향이 있어 이를 그대로 격자 볼츠만법에 적용하는 경우 해석의 안정성을 확보하기 어려운 단점을 가지고 있다. 특히 격자 볼츠만법에서 유동의 완화시간이 작아져 0.5에 근접할수록 레이놀즈수가 큰 난류유동으로 천이되지만 0.5 미만이 될 때 수학적으로 음의 동점성계수를 갖게 되어 점성유동이라는 물리적인 의미를 상실할 뿐만 아니라 해석이 불안정해 진다. 또한 완화시간이 커져 20 이상이 되는 경우 유동은 점성력이 지배적인 클리핑 유동특성을 가지게 되어 이 상태 역시 안정적인 해석을 유지하기 어렵다[1-3].

3. 결 과

열역학적 평형상태로 이르는 완화과정을 격자 볼츠만 방정식의 완화시간과의 관계를 바탕으로 개발된 HK-모델은 유동장의 국소변형률과 Γ를 이용하여 전단회박효과의 정도를 조절할 수 있다. 또한 이 모델은 국소 전단변형률과 완화시간과의 직접적인 관계를 나타내고 있어 격자 볼츠만법에 적용이 용이하다는 장점이 있는 반면에 국소변형률이 강한 유동장에서 완화시간이 급격하게 변화하는 특성 때문에 적용하는 문제에 따라 해석 안정성을 확보하기 위한 제한 조건이 요구된

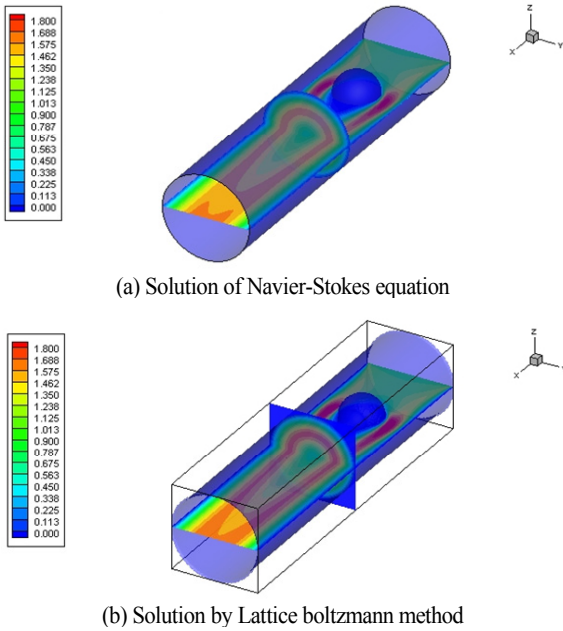


Fig. 2 Flow over spherical obstacle in a circular channel

다. 이 연구에서는 구형의 물체가 원형 실린더 안에서 일정한 속도로 이동할 때 실린더의 차단율(B)과 레이놀즈 수(Re), HK-모델의 인수  $\Gamma$ 의 변화에 따른 장애물의 항력 ( $C_D$ ) 그리고 구형장애물 후류에 형성되는 와류영역의 길이 ( $L_x$ )변화를 중심으로 HK-모델의 유동특성을 분석한 결과를 통해서 HK-모델을 적용한 격자 볼츠만 해석의 해석 안정성을 확보하기 위한 제한 조건을 제시하기 위하여 Fig. 1과 같이 계산영역을 설정하였다.

격자 볼츠만법은 계산영역을 육면체로 구성해야하는 제한 조건 때문에 원형실린더 형태의 계산영역을 만들기 위하여 육면체의 계산영역 내부에 삼각형 표면격자로 구성된 가상의 원형실린더 표면에 곡면경계처리법을 적용하였다. 구형 물체 주위의 유동해석에서 곡면처리법을 적용한 격자 볼츠만법의 해석결과와 나비에-스토크스 방정식을 이용한 해석결과를 비교하여 두 해석결과가 일치하는 것을 보였다. 이 비교해석에서 구형장애물의 위치와 장애물에 의한 원형실린더의 차단율 ( $B = 0.5$ ), 구의 직경을 기준으로 하는 레이놀즈수( $Re = 100$ ) 그리고 입출구 조건 및 실린더 벽면의 점착조건 등을 동일하게 적용하였고 나비에-스토크스 방정식의 해석에는 계산영역에 180만개의 사면체 격자를 구성하고 PISO법을 적용한 OpenFOAM의 pimpleFoam을 이용하였고 격자 볼츠만법을 적용한 해석에서는 (320 × 80 × 80)개의 육면체격자를 구성하여 해석을 수행하였다. Fig. 2와 Fig. 3는 3차원 등속도분포와

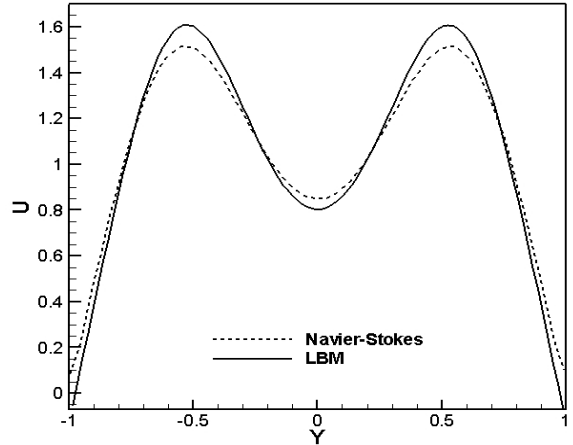


Fig. 3 Comparison of the stream wise direction velocities simulated by LBM and pimpleFoam

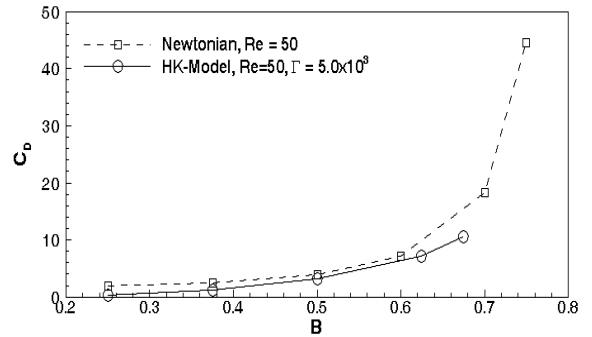


Fig. 4 Variation of the drag coefficients of the moving sphere in the circular pipe at  $Re = 50$  with the change of the blockage

구형장애물로 부터 일정거리 떨어진 후류에서 흐름방향 속도의 해석결과를 비교한 것이다. 두 해석결과와 속도분포에서 국소적으로 다소 차이를 보이지만 전반적으로 동일한 해석정밀도를 갖는다고 평가할 수 있어 곡면경계처리법을 적용한 격자볼츠만법 해석이 유효한 것으로 판단된다.

또한 구형의 이동물체가 원형관 내부를 일정한 속도로 이동할 때 관의 차단율 변화에 따른 뉴턴유체와 HK-모델 유체의 항력계수의 변화를 Fig. 4에서 비교하였다. pimpleFoam을 이용한 뉴턴 유체의 유동해석에서 0.7의 높은 차단율을 적용할 때 구형 이동물체와 관 벽면 사이에 격자 조밀화 방법을 적용하여 해석할 수 있었으나 곡면경계처리법을 적용한 격자 볼츠만법 해석의 경우 차단율이 높아질수록 구형 이동물체의 벽면과 관의 벽면 사이에 격자수가 상대적으로 적어져 해석이 불안정해져 해석결과를 얻을 수 없었다. 따라서 격자 볼츠만법 해석에서 차단율은 0.7 미만을 적용하여 해석을 수행하

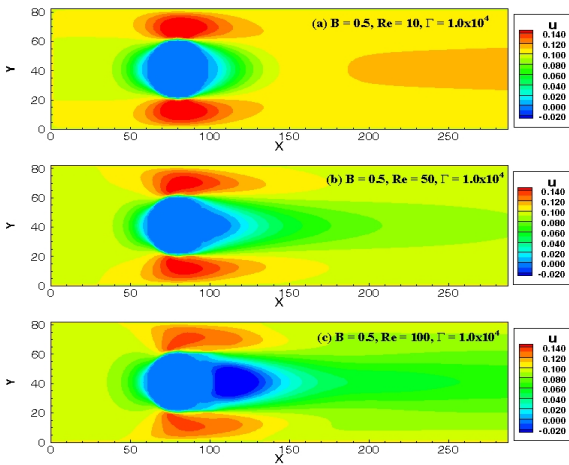


Fig. 5 Variation of the Stream wise direction velocities distribution at three different reynolds numbers (Re = 10, 50 and 100)

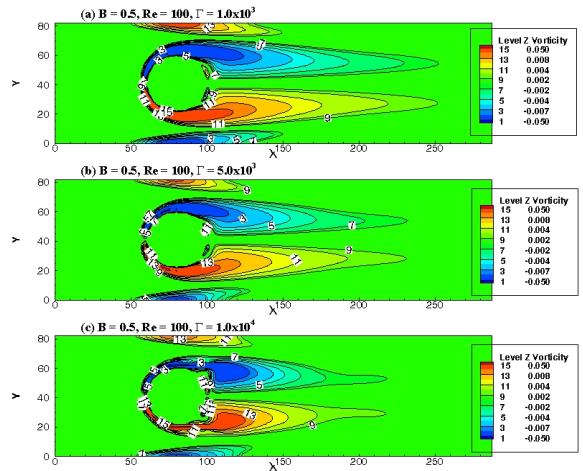


Fig. 7 Z-direction vorticity distribution on the center plane of the channel at Re = 100 and 0.5 of blockage

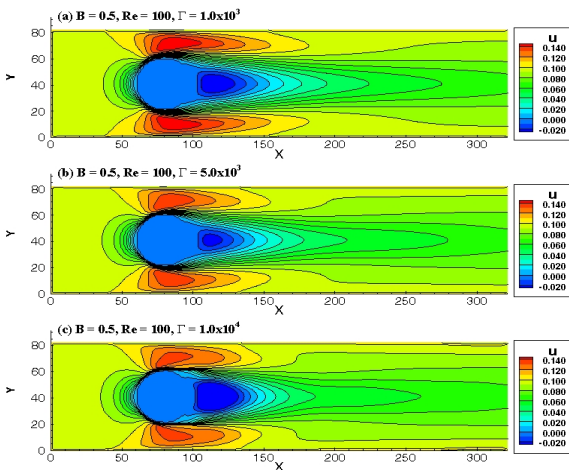


Fig. 6 The variations of the stream wise velocity distribution at Re = 100 and  $\Gamma = 1.0 \times 10^3, 5.0 \times 10^3$  and  $1.0 \times 10^4$

였다.

차단율이 0.7 미만인 구간에서 차단율이 증가함에 따라 뉴턴 유체에 의한 구의 항력계수의 변화와 마찬가지로 점진적으로 증가하는 경향을 보이지만  $\Gamma = 5.0 \times 10^3$ 을 적용한 HK-모델 유체는 전단희박의 영향으로 전체적으로 다소 작은 항력계수 값을 갖는다.

원형실린더의 50%를 차단하는 크기의 구형 물체가 일정한 속도로 이동할 때 HK-모델 유체의 유동특성을 분석하기 위하여 실린더 벽면에 일정한 속도조건을 적용하였으며 그 외 모든 조건은 비교 해석에서 적용한 조건과 동일한 조건을 적용하여 각 변수들이 구형 물체와 유동장에 미치는 영향을 분석

하였다. 먼저 레이놀즈 수를 제외한 모든 변수를 일정하게 하고 레이놀즈 수를 10, 50, 100으로 변화시켜 해석을 수행하였다. Fig. 5는 레이놀즈 수의 변화에 따른 유체의 흐름 방향의 속도분포를 비교한 그림이다. 레이놀즈 수가 10일 때는 전형적인 저 레이놀즈 수 유동 형태를 보이고 있고, 레이놀즈 수가 커지면서 구의 후류에 형성되는 와류영역이 길어지며 이로 인해 관의 출구 영역에 저속 영역이 넓게 확대되는 것을 확인할 수 있지만 이 해석결과는 전단희박 효과를 일정한 값으로 고정 한 상태에서 유동특성을 분석한 것으로 레이놀즈 수의 변화에 따른 전형적인 유동특성을 보이고 있어 HK-모델의 적용에 따른 전단희박 효과를 확인하는 데에는 다소 어려움이 있다.

보다 정확한 HK-모델의 전단희박효과를 확인하기 위하여 차단율과 레이놀즈 수를 각각 0.5와 100으로 고정하고  $\Gamma$ 를  $1.0 \times 10^3$ 에서부터  $1.0 \times 10^4$ 까지 증가시키면서 해석을 수행하였다. Fig. 6는 관의 중앙 단면에서 흐름 방향의 속도를  $\Gamma$ 의 변화에 따른 결과를 비교한 그림이다. 전반적인 유동형태에는 큰 차이를 보이지 않지만 국소적으로는 속도분포의 뚜렷한 차이를 보이고 있다. 특히 구형 이동물체와 관 벽면 사이의 속도분포와 구의 후류에 형성되는 와류영역은  $\Gamma$ 가 커짐에 따라 그 길이가 짧아져 전단희박 효과가 강해지는 유동 특성을 보이며 이동 물체로부터 멀리 떨어진 후류에서는 중심에서 속도의 기울기가 완만한 분포를 가지는 것을 확인할 수 있다.

HK-모델의  $\Gamma$ 의 변화에 따른 z-방향의 와도분포의 변화를 분석하기 위하여 Fig. 7에 중심면에서 등와도분포를 나타냈다. 이 그림에서도 마찬가지로 HK-모델의  $\Gamma$ 가 커짐에 따라 후류에 형성되는 등와도 영역의 길이가 짧아지는 것을 볼 수 있

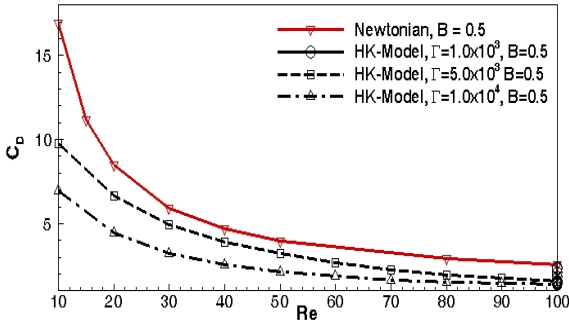


Fig. 8 The variations of the drag coefficient at blockage  $B = 0.5$

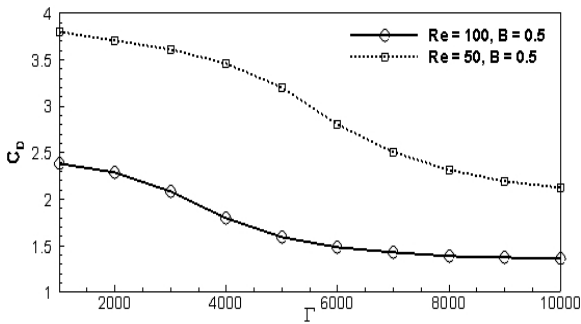


Fig. 9 Variation of the drag coefficient as  $\Gamma$  of HK-model varying

다. 이 두 결과로부터 HK-모델의  $\Gamma$ 가 커짐에 따라 와류영역 및 와도분포의 길이가 짧아지는 것으로 전단회박이 강해지는 것을 확인할 수 있다.

HK-모델 유체의 전단회박 효과를 항력계수의 변화로 분석하기 위하여 차단율을  $B = 0.5$ 로, 그리고  $\Gamma$ 를 일정한 값으로 고정하고 레이놀즈 수를 10에서 100까지 점진적으로 증가시켰을 때 이동물체의 항력계수의 변화를 비교하여 Fig. 8에 나타냈다.  $\Gamma$ 가 클 때 상대적으로 작은 항력계수를 갖고, 또 레이놀즈 수가 증가함에 따라 항력계수가 점진적으로 감소하고 레이놀즈 수가 커짐에 따라 감소율은 낮아지는 경향을 볼 수 있다.

레이놀즈 수를 50과 100으로 고정하고  $\Gamma$ 를  $1.0 \times 10^3$ 에서  $1.0 \times 10^4$ 까지 점진적으로 증가시켰을 때 구형이동체가 갖는 항력계수의 변화를 Fig. 9에 나타냈다. 전체적인 항력계수의 변화폭은  $Re = 50$ 일 때 1.5이고  $Re = 100$ 일 때는 0.85정도로 작아지는 것을 볼 수 있다. 그리고  $\Gamma$ 가 커짐에 따라 항력계수는 감소하는 경향을 갖지만  $Re = 50$ 일 때  $\Gamma < 7.0 \times 10^3$ 에서 그리고  $Re = 100$ 일 때는  $\Gamma < 5.0 \times 10^3$ 의 구간에서  $\Gamma$ 가 커짐에 따라 항력계수의 감소율이 커지고 이후로는 작아지는 특성을 보인다.

$\Gamma$ 의 변화에 따른 구의 후미에 형성되는 와류영역의 길이

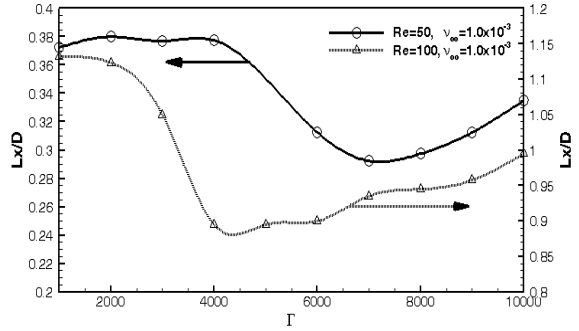


Fig. 10 Variation of the circulation length behind the sphere

변화는 Fig. 10에서 보는바와 같이  $\Gamma$ 가 커질수록 그 길이가 짧아지는 경향을 갖지만,  $Re = 50$ 일 때는  $\Gamma > 7000$ 에서는 그 길이가 길어지기 시작하며  $Re = 1000$ 에서는  $\Gamma > 4.0 \times 10^3$ 에서 동일한 현상을 볼 수 있다.  $Re = 1000$ 에서는 50일 때를 비교하여 전반적으로 와류의 길이가 3.5배정도 더 길어지는 것을 확인하였다. 그리고  $Re = 50$ 일 때  $4000 < \Gamma < 7000$ ,  $Re = 1000$ 일 때는  $2000 < \Gamma < 4000$ 의 구간에서 와류의 길이가 급격하게 감소하고 이후 점진적으로 길어지는 것으로 나타났다.

#### 4. 결론

열역학적 평형상태로 이르는 완화과정과 완화시간과의 관계를 바탕으로 개발된 HK-모델은 국소 전단변형률과 완화시간과의 관계를 나타낸 모델이다. 따라서 다른 비뉴턴 유체 모델에 비해 격자 불뜨만법에 적용이 용이하다는 장점을 가지고 있어 격자 불뜨만법을 비뉴턴 유체 유동해석 영역으로 확대하는데 기여할 수 있는 모델로 평가할 수 있다. 다만 격자 불뜨만법 해석에서 국소 완화시간이 제한조건을 벗어나는 경우 해석이 불안정해질 수 있어 HK-모델을 적용한 비뉴턴 유체의 격자 불뜨만법 해석의 안정성을 확보하기 위해서  $\Gamma$ 의 범위를 제한할 필요가 있다.

이 연구에서는 원형실린더 내에 구형 이동 물체가 일정한 속도로 이동할 때 HK-모델을 적용한 유체의 유동특성을 분석하고 또한 안정적인 해석을 위한  $\Gamma$ 의 조건을 제시하는데 목적을 두고 있다. 이를 위해서 곡면 경계처리법을 적용한 가상의 원형실린더 표면에 일정한 속도 경계조건을 적용하였으며 구형의 이동 물체 벽면에는 Bounceback 조건을 적용하여 상대적인 이동을 모사하였다. 곡면 경계처리법을 적용한 격자 불뜨만법 해석결과를 나비에-스토크스 방정식의 해와 비교하여 일치하는 것을 확인하였다. HK-모델의 유동특성 분석에서 레이놀즈 수의 범위는 100 이하로 고정하였으며, 또한 안정적

인 격자 볼츠만법 해석을 위해서 구형이동물체가 0.7의 차단율을 넘지 않도록 제한하였다.

HK-모델을 적용한 해석에서  $\Gamma$ 를 1000 ~ 10000의 범위에 서 전단희박 효과를 조절할 수 있으며  $\Gamma$ 가 커짐에 따라 후류에 형성되는 유동현상의 변화와 항력의 감소, 후류에 형성되는 와류길이가 짧아지는 등, 전단희박 효과가 강해지는 것을 확인할 수 있었다. 다만 차단율이 0.7 보다 클 때 구형물체 벽면과 관 벽면 사이에 유동장에 구성된 격자수가 급격히 줄어 안정적인 해석을 할 수 없었지만 이는 다중계해석법에 적용하는 점진적 격자조밀화법을 적용하여 극복할 수 있을 것으로 판단된다.

## 후 기

이 논문은 2013학년도 경기대학교 연구년 수혜로 연구되었음.

## References

- [1] 2000, Wolf-Galadrow, D., "Lattice gas cellular automata and lattice Boltzmann models: An introduction," *Springer-Verlag*, Berlin.
- [2] 2001, Succi, S., "Lattice Boltzmann equation for fluid dynamics and beyond," *Oxford university press*.
- [3] 1998, Chen, S. and Doolen, G., "Lattice Boltzmann method for fluid flow," *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol.30, pp.329-364.
- [4] 1981, Chhabra, R.P., Tiu, C. and Uhlherr, P.H.T., "A study of wall effects on the motion of a sphere in viscoelastic fluids," *Can. J. Chem. Eng.*, Vol.59, pp.771-775.
- [5] 2009, Song, D., Gupta, R.K. and Chhabra, R.P., "Wall effects on a sphere falling in quiescent powerlaw fluids," *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol.48, pp.5845-5856.
- [6] 2002, McKinley, G.H., "Steady and transient motion of spherical particles in viscoelastic liquids," *Transport processes in Bubble, Drops, and Particles*, Chapter.14, pp.338-375.
- [7] 1973, Adachi, K., Yoshioka, N. and Yamamoto, K., "On non-Newtonian flow past a sphere," *Chem. Eng. Sci.*, Vol.28, pp.2033-2043.
- [8] Adachi, K., Yoshioka, N. and Sakai, K., "An investigation of non-Newtonian flow past a sphere," *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, Vol.3, pp.107-125.
- [9] 1994, Tripathi, A., Chhabra, R.P. and Sundararajan, T., "Power-law fluid flow over spheroidal particles," *Ing. Eng. Chem. Res.*, Vol.33, pp.403-410.
- [10] 1994, Graham, D.I. and Jones, T.E.R., "Settling and transport of spherical particles in power law fluids at finite Reynolds number," *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, Vol.54, pp.465-488.
- [11] 2005, Gabbanelli, S., Drazer, G. and Koplik, J., "Lattice Boltzmann method for non-Newtonian (Power-law) fluid," *Phys. Rev. E.*, Vol.72, 046312.
- [12] 2010, Zhang, J.F., "Lattice Boltzmann method for microfluidics: models and applications," *Microfluidics and Nanofluidics*, Vol.10, pp.1-28.
- [13] 2006, Yakhot, V., Wanderer, J. and Chen, H., "Generalized Boltzmann equation : Slip-no-slip dynamic transition in flows of strongly non-linear fluids," *Physica A*, Vol.362, pp.146-150.
- [14] 2006, Kim, W.T., Chen, H. and Jhon, M.S., "Viscoelastic liquid bearing modeling via Lattice Boltzmann method," *J. App. Phys.*, Vol.99, 08N106.
- [15] 2011, Kim, H.M., Kang J.H. and Jhon, M.S., "Hydro-kinetic approach in non-Newtonian Lattice Boltzmann flow simulation," *JKPS*, Vol.58. No.3, pp.444-447.
- [16] 1997, Zou, Q. and He, X., "On pressure and velocity boundary conditions for the Lattice Boltzmann BGK model," *Phys. Fluids*, Vol.9, No.6, pp.1591-1598.