

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.5.539

미소 채널에서의 표면 거칠기 영향에 대한 수치적 연구

신명섭* · 변성준* · 윤준용**†

* 한양대학교 기계공학부, ** 한양대학교 기계정보경영공학부

Numerical Investigation of Effect of Surface Roughness in a Microchannel

Myung Seob Shin*, Sung Jun Byun* and Joon Yong Yoon**†

* School of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.,

** Division of Mechanical and Management Engineering, Hanyang Univ.

(Received January 15, 2010 ; Revised March 3, 2010 ; Accepted March 4, 2010)

Key Words: Microchannel Flow(미소채널 유동), Surface Roughness(표면 거칠기), Friction Factor(마찰계수), Lattice Boltzmann Method(격자 볼츠만 방법)

초록: 본 연구에서는 격자볼츠만 방법(LBM)을 이용하여 미소채널 내의 유동이 완전 발달 층류유동일 때, 미소 채널 내에서의 표면 거칠기 영향에 대하여 수치계산을 수행하였다. 미소채널 내에서 표면 거칠기의 영향을 분석하기 위하여 표면 거칠기의 높이(e), 폭(w), 간격(s)을 조절하여 미소채널에서의 마찰계수(f), 포와이즈수(Po)와 거시적 이론값과 비교하였다. 미소채널에서의 표면 거칠기의 높이가 증가함에 따라 거시적 이론값($Po=24$)에 비해서 수치해석으로부터 예측된 값($25 \leq Po \leq 29$)이 높게 나타났으며, 표면 거칠기의 폭과 간격은 표면 거칠기의 높이에 비해 미소채널 내부 유동의 변화에 큰 영향을 주지 않는 것을 알 수 있었다. 이 결과로부터 미소채널 내부 유동에서는 표면 거칠기의 영향으로 거시적 층류유동과는 다른 유동현상이 나타난다는 것을 알 수 있었다.

Abstract: In this paper, lattice Boltzmann method(LBM) results for a laminar flow in a microchannel with rough surface are presented. The surface roughness is modeled as an array of rectangular modules placed on the top and bottom surface of a parallel-plate channel. The effects of relative surface roughness, roughness distribution, and roughness size are presented in terms of the Poiseuille number. The roughness distribution characterized by the ratio of the roughness height to the spacing between the modules has a negligible effect on the flow and friction factors. Finally, a significant increase in the Poiseuille number is observed when the surface roughness is considered, and the effects of roughness on the microflow field mainly depend on the surface roughness.

- 기호설명 -

1. 서론

- f_i : 분포함수
- f_i^{eq} : 평형분포 함수
- Ω_i : 충돌 연산자
- τ : 완화 시간
- ω_i : 가중치 상수
- c_i : LBM에서의 속도 벡터
- c : LBM에서의 격자 속도
- D_h : 미소채널의 수력지름
- ε : 표면 거칠기의 높이
- s : 표면 거칠기 사이의 간격
- w : 표면 거칠기의 폭

최근 BT(Bio Technology), NT(Nano Technology)에 관한 관심이 높아짐에 따라 MEMS(Micro Electro Mechanical System)기술을 이용하여 바이오 기술과 마이크로 제작기술이 융합된 미소유체소자(Micro fluidics)에 관한 많은 연구가 이루어지고 있으며, μ -TAS(Micro-Total Analysis System) 등에 많이 응용되고 있다. 마이크로 열교환기(micro-heat exchanger), 마이크로 펌프(micro-pump), 마이크로 믹서(micro-mixer) 등의 미소유체소자를 제작하고 제어함에 있어 미소채널 내에서의 유동에 대한 분석은 매우 중요하다.

이러한 미소채널에서의 유동은 주로 층류유동 영역에서 이루어지고 있다. 그러나 많은 실험적

† Corresponding Author, joyoon@hanyang.ac.kr

연구에 의하여 미소채널에서의 유동은 기존의 거시적 영역에서의 층류유동과는 다른 현상을 보이고 있다.⁽¹⁾ 거시적 층류유동에서는 중요하게 여겨지지 않는 점성력(shear force), 표면효과(surface effect), 유체속도(fluid velocity), 온도구배(temperature gradient)와 미소회전유동(micro-rotational fluid) 등이 미소유동(micro-flow)에 영향을 미치며, 그 중 표면 거칠기로 인한 영향은 점성력과 표면효과에 결정적인 인자이기 때문에 미소채널 내부 유동에서 표면 거칠기는 매우 중요하게 고려해야 할 인자이다.⁽²⁾ 특히 표면 거칠기의 영향은 미소 유체소자의 성능과 효율을 저감시키는 하나의 원인이다. 거시적 층류영역에서는 충분히 무시할 수 있는 표면 거칠기의 영향이 미소유동에서는 채널을 설계함에 있어 주요한 설계 인자임을 많은 실험적 연구⁽³⁾를 통해 알 수 있다. Wu와 Little^(4,5)는 미소채널에서 질소 가스를 이용하여 층류와 난류 영역에서의 열전달 현상과 Darcy 마찰계수를 실험적으로 측정하여 거시영역에서의 이론값보다는 Darcy 마찰계수가 더 크게 나타났다는 것을 보였으며, Wilding 등⁽⁶⁾과 Mala 등⁽⁷⁾은 사다리꼴, 사각형 미소채널에 물을 이용하여 Darcy 마찰계수가 이론적 값보다는 약 50% 더 증가한다는 것을 보여주고 있다.

미소채널 내에서의 표면 거칠기 영향에 대한 수치적 연구로는 유한체적법(FVM)을 이용하여 3차원 형상으로 표면 거칠기의 영향을 연구한 Hu 등⁽⁸⁾과 DSMC (Direct Simulation Monte Carlo) 방법을 이용하여 질소가스에 대한 미소채널 내에서의 표면 거칠기 영향에 대한 유동현상을 분석한 Sun 등⁽⁹⁾의 연구도 실험적 연구를 수행한 연구자들과 비슷하게 거시적 영역에서의 이론값과 마찰계수와의 차이를 보여주고 있다.

본 연구에서는 격자볼츠만 방법(LBM)을 이용하여 미소채널 내의 유동이 완전 발달 층류유동일 때, 미소채널 내에서의 표면 거칠기 영향에 대하여 수치계산을 수행하였다. 미소채널 내에서 표면 거칠기의 영향을 분석하기 위하여 표면 거칠기의 높이(ε), 폭(w), 간격(s)을 조절하여 미소채널에서의 마찰계수(f)와 거시적 이론값과의 비교를 통하여, 미소채널 내에서의 표면 거칠기의 영향으로 인해 기존의 거시적 층류유동과는 다른 유동형태를 나타낸다는 것을 격자볼츠만 방법을 이용하여 분석하였다.

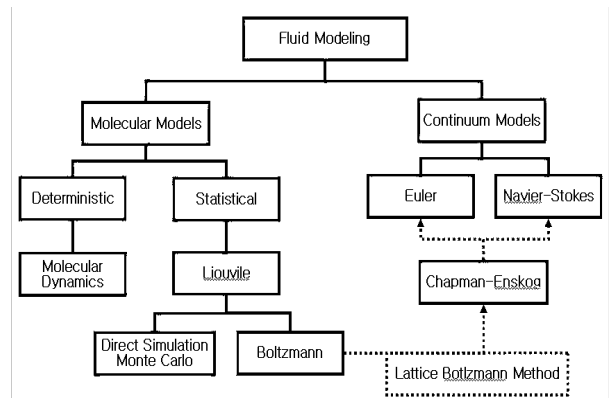


Fig. 1 Molecular and continuum flow models

2. 격자 볼츠만 방법(LBM)

2.1 격자 볼츠만 방법(Lattice Boltzmann method)

미소채널 내에서의 유동현상에 대한 수치적 연구는 Fig. 1과 같이 유체를 보는 관점에 따라서 여러 가지 방법들로 연구가 진행되어 왔다. 기존의 거시적 유동해석 모델들은 연속체라는 가정 하에 유체를 묘사하는 식을 이산화하는 방법을 사용하는데, 미시적 관점을 다루는 미소채널에서의 유동에 대해서는 많은 문제점을 나타내고 있다.⁽¹⁰⁾ 그래서 미소유동에 대한 수치해석 방법으로는 분자운동을 해석하는 MD(Molecular Dynamics)방법, 주로 가스유동을 해석하는 DSMC (Direct Simulation Monte Carlo) 방법 혹은 미시적 관점과 거시적 관점의 중간 형태(mesoscopic)인 격자 볼츠만 방법(LBM)이 미소채널에서의 유동해석 연구에 많이 이용되고 있다.

격자볼츠만 방법(LBM)은 미소영역에 기초를 두고 거시영역의 복잡한 유동을 표현하고 있는데 이것은 LBM에 있어서 중요한 장점이다.⁽¹¹⁾ 기존의 거시적 관점의 유동해석 모델들은 비선형적인 편미분방정식(P.D.E)을 이산화하여 수치해석을 수행한다. 반면에 LBM은 선형적인 형태로 이루어져 있어서, 기존의 방법보다는 계산과정이 매우 간단한 장점이 있다. 그리고 각각의 분자들을 계산하는 DSMC 방법보다는 계산량이나 계산시간, 컴퓨팅 파워가 적어 매우 경제적인 모델이고, 압력을 상태방정식으로 구할 수 있기 때문에 포와송(Poisson) 식을 이용해야 하는 기존의 CFD방법보다는 매우 간단하다. 또한, 계산과정이 각각의 격자점에서 이루어지므로 다수의 컴퓨터를 병렬화하여 사용하는데 용이하다. 이러한 특징을 가지고 있는 격자 볼츠만 방법은 다상유동(multi-phase

flow)⁽¹²⁾ 분야와 같은 복잡한 유동을 다루는 분야에 대해 많은 연구가 이루어지고 있다.

2.2 격자 볼츠만 방정식(LBE)

본 연구에서는 많은 격자볼츠만 방법 중 lattice BGK D2Q9 모델을 사용하였다. D2Q9은 2차원이며 위치는 Fig. 2처럼 각 격자점에만 있을 수 있으며, 속도벡터는 정지되어 있는 것을 포함하여 총 9개의 성분으로 이루어져 있다.

$$f_i(x + c_i \Delta t, t + \Delta t) - f_i(x, t) = \Omega_i(x, t) \quad (1)$$

$$\Omega_i(x, t) = -\frac{1}{\tau} [f_i(x, t) - f_i^{eq}(x, t)] \quad (2)$$

여기에서 f_i 는 i 방향의 분포이고, τ 는 완화시간(relaxation time), f_i^{eq} 는 각 격자점의 평형 분포 함수를 뜻한다. $\Omega_i(x, t)$ 는 충돌식이며 Bhatnagar, Gross, Krook⁽¹³⁾은 single-time relaxation(SRT)을 사용하여 단순한 형태의 충돌 식을 제안하였다.

식 (1)과 식 (2)을 통하여, 식 (3)과 같은 lattice BGK D2Q9 식⁽¹⁴⁾을 표현할 수 있다.

$$f_i(x + c_i \Delta t, t + \Delta t) - f_i(x, t) = -\frac{1}{\tau} [f_i(x, t) - f_i^{eq}(x, t)] \quad (3)$$

식 (3)에서 속도벡터 c_i 는 다음과 같다.

$$c_i = \begin{cases} c \left[\cos\left(\frac{i-1}{2}\pi\right), \sin\left(\frac{i-1}{2}\pi\right) \right] & \text{for } i = 1 \sim 4 \\ \sqrt{2}c \left[\cos\left(\frac{i-1}{2}\pi\right), \sin\left(\frac{i-1}{2}\pi\right) \right] & \text{for } i = 5 \sim 8 \end{cases} \quad (4)$$

여기에서 c 는 격자의 속도이며, 보통 1로 가정한다. 식 (3)에서의 평형분포 함수 $f_i^{eq}(x, t)$ 는 Maxwell 분포를 속도에 대해 Taylor 전개하여, 속도의 2차항까지 나타내며 식 (5)와 같은 형태로 정의한다.

$$f_i^{eq}(x, t) = \omega_i \rho \left[1 + 3 \frac{c_i \cdot \vec{u}}{c^2} + \frac{9}{2} \frac{(c_i \cdot \vec{u})^2}{c^4} - \frac{3}{2} \frac{\vec{u} \cdot \vec{u}}{c^2} \right] \quad (5)$$

식 (5)의 ρ 는 유체의 밀도이며, u 는 유동속도를 뜻하며, 각 지점의 ω_i 는 가중치(weighting) 상수로서 다음과 같은 값을 갖는다.

$$\omega_i = \begin{pmatrix} \omega_0 = 4/9 \\ \omega_{1 \sim 4} = 1/9 \\ \omega_{5 \sim 8} = 1/36 \end{pmatrix} \quad (6)$$

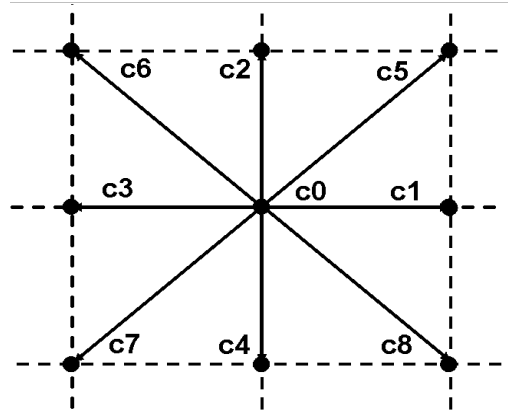


Fig. 2 Velocities vector of D2Q9 Model.

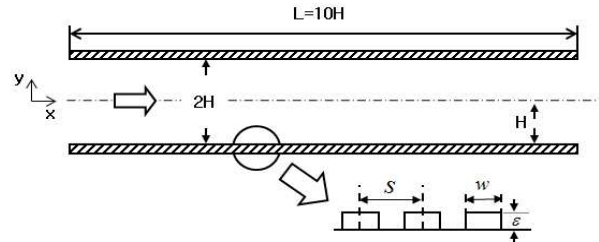


Fig. 3 Schematic diagram of Microchannel with Surface Roughness

각 격자점에서의 유체 밀도와 운동량은 다음과 같이 분포함수의 합으로 나타낸다.

$$\rho(x, t) = \sum_i f_i(x, t) \quad (7)$$

$$\rho(x, t) \vec{u}(x, t) = \sum_i c_i f_i(x, t) \quad (8)$$

LBM에서의 압력은 식 (9)와 같은 상태방정식으로 표현되며, 동점성계수는 식 (10)과 같이 완화시간(τ)의 함수로 정의된다.

$$p(x, t) = C_s^2 \rho, \quad C_s^2 = c^2/3 \quad (9)$$

$$\nu = \frac{2\tau - 1}{6} \quad (10)$$

그리고 LBM에서의 한 계산시간(t)에 대한 계산 단계는 충돌(collision) 단계와 이류(stream) 단계로 구분할 수 있다. 충돌은 식 (2)의 충돌 연산자를 계산하는 단계이며, 이류는 충돌 연산자에서 구해진 새로운 분포함수를 다음 격자점으로 분산시켜 주는 단계이다. 이 두 단계가 끝나고 계산영역의 경계에서 경계조건을 계산하는 것으로 격자볼츠만 방법의 계산이 마무리 된다.

3. 수치계산 방법

3.1 미소채널 설계

본 연구에서는 미소채널 내에서의 표면 거칠기의 영향을 분석하기 위하여 미소채널 형상은 Fig. 3과 같은 모양으로 미소채널의 아래 면과 윗면에 사각형 형태의 고정물을 설치한 경우에 대하여 수치계산을 수행하였다. 미소채널 내에서의 표면 거칠기의 영향을 고려하기 위하여, 고정물인 표면 거칠기의 높이(ε), 폭(w), 간격(s)을 변화시켜 수치계산을 수행하였다. 실제의 미소유체소자(microfluidics)에서는 표면 거칠기의 크기가 채널 높이에 비해 약 0.1% ~ 6% 정도로 나타난다는 것을 많은 실험적 연구에서 보여주고 있다.^(1-7,15) 따라서 본 연구에서는 표면 거칠기의 높이, 폭, 간격을 무차원화한 비율로 다음과 같이 변화하여 각 경우에 대하여 수치계산을 수행하였다.

- (1) 표면 거칠기 높이(ε/H)
: 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06,
- (2) 표면 거칠기의 폭(w/ε)
: 0.60, 0.80, 1.00, 1.20, 1.40
- (3) 표면 거칠기의 간격(s/ε)
: 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0

미소채널의 길이는 평행평판에서 완전발달 층류 유동일 때의 유동 현상을 나타내기 위하여, 미소채널 높이(H)와 채널 길이(L)의 비를 1:10의 비율로 구성하여 수치계산을 수행하였다.

3.2 마찰계수 계산방법

평행평판 층류유동에서의 마찰계수(f) 이론식인 식 (11)과 같이 레이놀즈(Reynolds, Re) 수만의 함수로 정의하며, 마찰계수(f)와 Re 수의 곱으로 무차원 수인 포와이즈(Poiseuille, Po) 수를 다음과 같이 표현한다.

$$f = \frac{24}{Re} \quad (11)$$

$$Po = fRe = 24 \quad (12)$$

그리고 격자볼츠만 방법에서 계산된 마찰계수는 다음과 같이 식 (13)으로 표현된다.

$$f_{LBM} = \frac{D_h}{\Delta s} \frac{\Delta p}{1/2(\rho U_{avg}^2)} \quad (13)$$

여기에서 D_h 는 수력지름이며, s 는 표면 거칠기 사이의 길이, ΔP 는 압력차, ρ 는 밀도, U_{avg} 는 미소채널에서의 평균속도이다.

3.3 경계 조건

벽면에 점착(No-Slip)하는 조건으로 LBM에서 사용하는 2차 정확도를 가진 “mid-grid bounce-back scheme”⁽¹⁶⁾을 사용하였으며, 평행평판에서의 완전발달 층류유동을 구현하기 위하여 입·출구 경계 조건으로 첫 번째 열의 값을 마지막 열의 값에서 가져오게 되는 주기적인(periodic) 조건을 사용하여 미소채널의 내부 유동이 정상상태(steady state)로 유지될 때까지 50,000번 반복 수치 계산을 하였다.

4. 수치계산 결과 및 고찰

4.1 단순(smooth) 채널에서의 계산결과

Lattice BGK D2Q9 모델을 검증하기 위하여, Re 수가 0.1 ~ 100인 층류영역에서의 표면 거칠기가 없는 단순 채널에 대하여 계산을 수행하였다.

Fig. 4은 단순 채널에서 Re 수가 증가함에 따른 마찰계수(f)의 값을 나타내고 있다. 평행평판에서 완전발달 층류유동일 때의 이론식인 식 (11)과 격자볼츠만 방법이 예측한 결과가 서로 잘 일치하였다. 이것을 통해 lattice BGK D2Q9 모델이 단순 채널에서의 완전발달 유동을 잘 모사하고 있다고 할 수 있다.

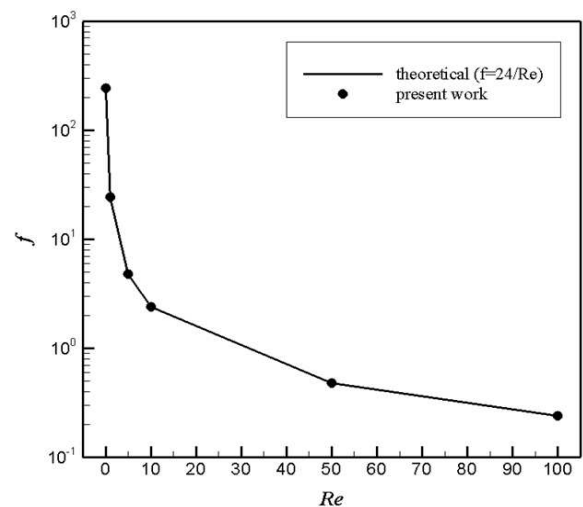
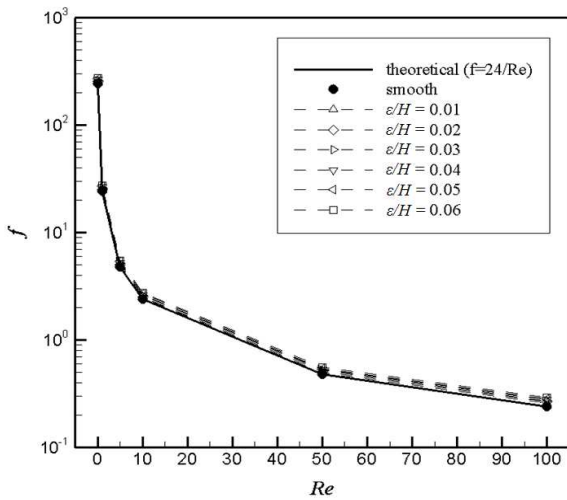
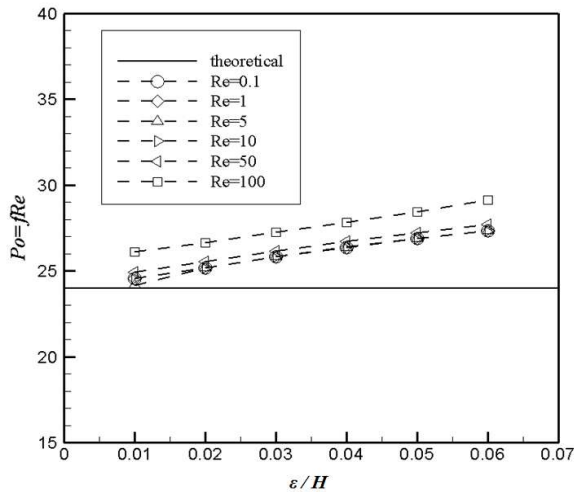


Fig. 4 Comparison between numerical results and analytical expressions



(a) Friction factor



(b) Poiseuille number

Fig. 5 Effect of relative surface roughness height

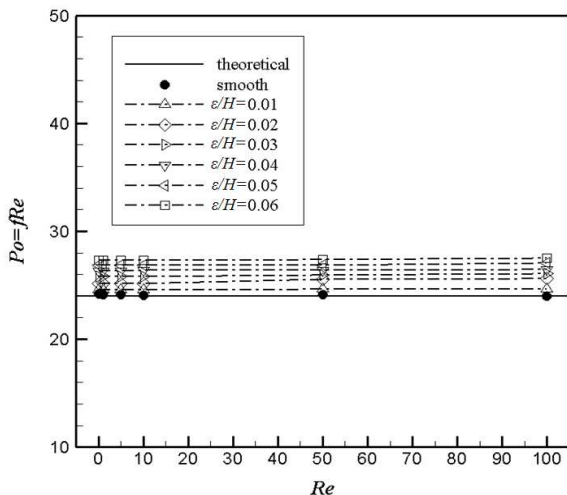


Fig. 6 Effects of Reynolds number for different relative surface roughness height

4.2 표면 거칠기의 높이(ϵ/H)에 대한 영향

미소채널에서의 표면 거칠기 높이에 대한 영향을 분석하기 위하여, 단순 채널과 동일한 계산조건으로 Re 수가 0.1 ~ 100인 층류영역에서 수치계산을 수행하였으며, 미소채널 높이에 대하여 무차원화한 표면 거칠기 높이(ϵ/H)를 0.01~0.06으로 변화하여, 기존 이론식과 수치해석을 이용한 결과를 비교하였다.

Fig. 5~8에서는 표면 거칠기 폭(w/ϵ)이 1.0이고 간격(s/ϵ)이 2.0일 때의 표면 거칠기 높이에 대한 영향을 보여주고 있다. Fig. 5(a)은 거칠기 높이에 따른 Re수와 마찰계수(f)의 결과를 보여주고 있다. 표면 거칠기의 높이가 증가함으로써 단순채널과의 차이를 볼 수 있으며, Fig. 5(b)에서 무차원 수인 포와이즈 수($Po=fRe$)를 이용하여 각 표면 거칠기 높이에 대하여 정량적으로 비교하였다. 같은 Re수에서는 거칠기의 높이가 증가함에 따라 Po수도 증가함을 알 수 있다. 이것은 미소채널에서 표면 거칠기의 높이가 높아짐에 따라 미소채널 유동에 저항하는 표면 거칠기의 면적도 커져서 미소채널 내부의 압력강하가 증가하게 되는 것으로 사료된다. Re수가 10이고, $\epsilon/H=0.06$ 인 경우, Po수가 27.3으로 기존의 거시적 이론값인 24보다는 14 % 정도가 증가함을 알 수 있다. 또한, 각각의 높이에 따라서 Po수의 변화율은 같은 기울기를 갖는다. 이것을 통해서 미소채널 내부 유동에서 Re수의 변화가 유동에 미치는 영향은 적으며, 거칠기 높이의 영향이 내부 유동을 지배한다고 할 수 있다.

Fig. 6은 각 거칠기의 높이에 따른 Re수와 Po수를 비교한 그림이다. 같은 거칠기의 높이(ϵ/H)에서는 Re수가 증가함에도 Po수는 거의 일정한 양상을 보이고 있다. 이것을 통해 Re수의 영향보다는 표면 거칠기 높이의 영향이 미소채널의 내부유동을 지배한다고 사료된다.

Fig. 7은 Re수가 10일 때의 표면 거칠기의 높이에 따른 압력장과 속도벡터를 보여주고 있다. 표면 거칠기 주변에서는 표면 거칠기가 미소유동의 진행에 저항하는 것으로서 국부적인 압력강하 (pressure drop, ΔP)가 나타나게 된다. 이것은 표면 거칠기의 높이가 증가할수록 미소채널 내의 유동 진행에 저항하는 면적이 커짐으로써 표면 거칠기 주변에 국부적인 압력증가로 인해 벽면에서의 속도가 감소하기 때문이다. 그리고 표면 거칠기

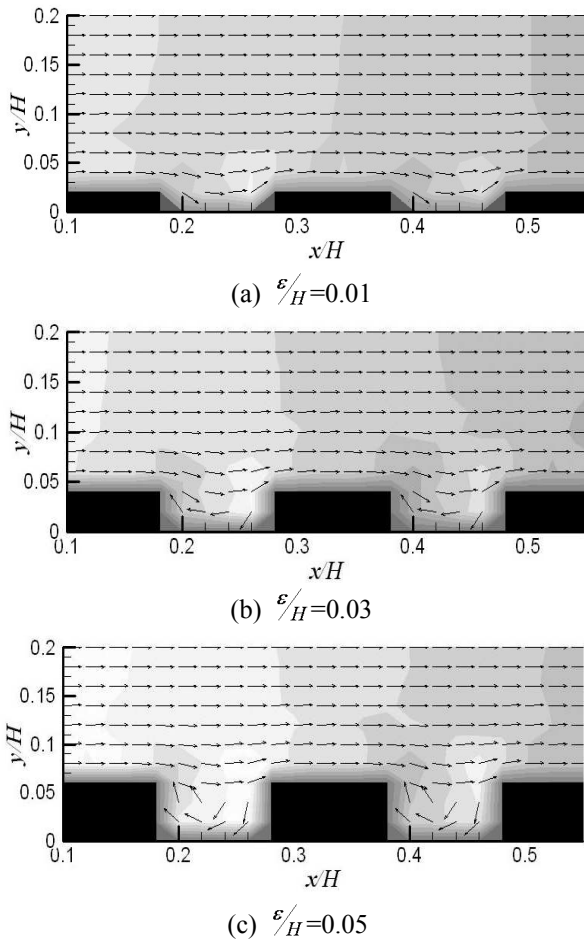


Fig. 7 The Pressure fields and velocity vector with Re=10

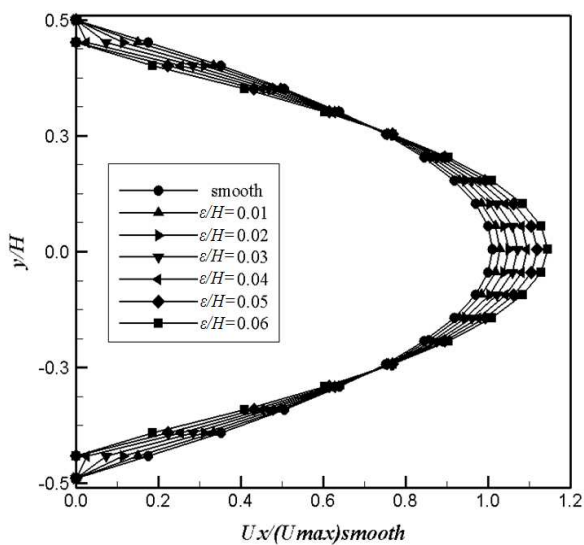


Fig. 8 Velocity profiles for different relative surface roughness height with Re=10

높이(ϵ/H)가 0.01 ~ 0.04인 경우는 표면 거칠기 사이에 와류가 생기는 현상을 볼 수 없지만 표면

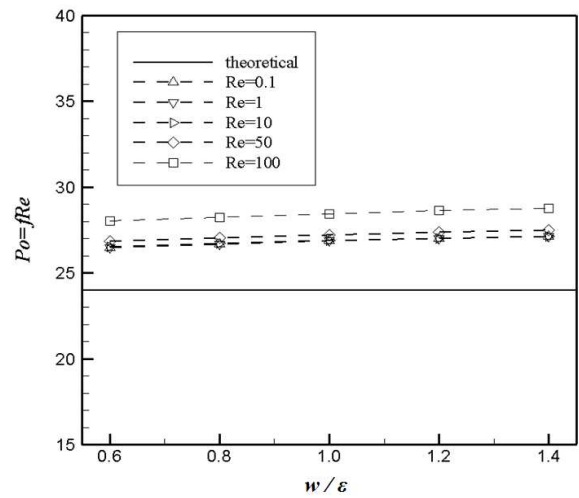


Fig. 9 Effect of relative wall roughness width ($\epsilon/H=0.04, s/\epsilon=3.0$)

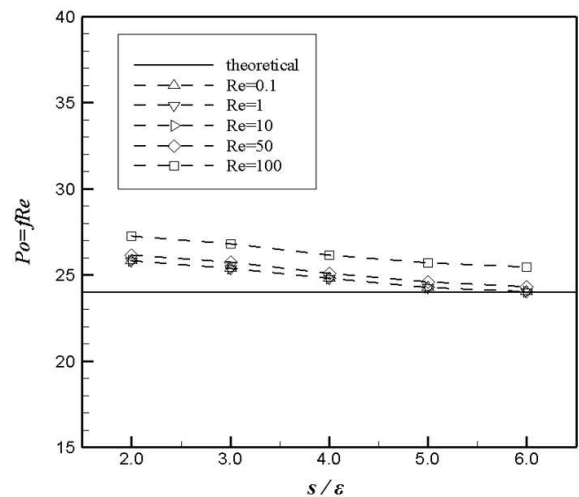


Fig. 10 Effect of relative wall roughness spacing ($\epsilon/H=0.04, w/\epsilon=3.0$)

거칠기 높이(ϵ/H)가 0.05일 때, 표면 거칠기 사이에 와류가 존재한다. 이것은 표면 거칠기 높이의 증가에 따라 유동 진행에 저항하는 면적이 커져 유동이 표면 거칠기 사이에 정체하기 때문이라고 사료된다. 또한 표면 거칠기 근처의 압력 증가로 인해 표면 거칠기 사이에 미소 공동유동(micro cavity flow) 현상이 나타나고 있다.

Fig. 8은 Re수가 10일 때의 미소채널 내에서의 무차원화 된 x방향의 속도분포를 보여주고 있다. x축은 각 거칠기 높이의 속도분포를 단순채널의 최대속도로 무차원화한 결과이다. 단순채널에 비해 표면 거칠기 높이가 증가함으로써 미소채널의 중심부분에서의 속도는 증가하고 벽면 근처의 속도는 감소하는 것을 보여주고 있다. 이것은 Fig.

7에서 본 것과 같이 표면 거칠기 높이가 증가함으로써 유동이 표면 거칠기 근처에서 정체하여 발생하는 국부적인 압력강하의 증가로 인해 미소 채널 중심부에서의 속도가 단순채널에 비해 증가하는 것을 보여주고 있다.

4.3 표면 거칠기의 폭(w/ϵ)과 간격(s/ϵ)에 대한 영향

Fig. 9는 표면 거칠기의 높이(ϵ/H)가 0.04이고, 간격(s/ϵ)이 3.0일 때의 표면 거칠기 폭(w/ϵ)과 Po 수와의 관계를 보여주고 있다. 표면 거칠기의 폭(w/ϵ)이 증가함으로써 Po 수가 거의 일정한 형태를 보이고 있다. 이것은 표면 거칠기의 높이에 비해서, 표면 거칠기의 폭은 미소채널 유동에 큰 영향을 미치지 못한다는 것을 보여주고 있다.

Fig. 10은 표면 거칠기의 높이(ϵ/H)가 0.04이고, 폭(w/ϵ)이 3.0일 때의 표면 거칠기 사이의 간격(s/ϵ)과 Po 수와의 관계를 보여주고 있다. 표면 거칠기 사이의 간격 또한 표면 거칠기 폭과 같이 미소 채널에서의 유동은 거의 변화가 없음을 알 수 있으며, Re 수가 100인 경우를 제외하고는 표면 거칠기 사이의 간격이 멀어지면서 표면 거칠기가 없는 단순 채널과 거의 비슷한 유동 현상을 보여주며, 이것은 표면 거칠기의 영향이 매우 저하되어 발생하는 양상이라고 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 격자 볼츠만 방법(LBM)을 이용하여 미소채널 내에서의 표면 거칠기 영향에 대하여 수치계산을 수행하였다. 미소채널 내에서의 표면 거칠기의 영향을 분석하기 위하여 표면 거칠기의 높이(ϵ/H), 폭(w/ϵ)과 간격(s/ϵ)을 조절하여 포와이즈 수(Po)와 거시적 이론값과의 비교를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 표면 거칠기의 높이가 증가함에 따라 거시적 이론값($Po=24$)에 비해서 수치해석으로부터 예측된 값($25 \leq Po \leq 29$)이 높게 나타났으며, 이 결과로부터 미소채널 내부 유동에서는 거시적 층류유동에서 예측되는 값보다 큰 압력손실이 발생함을 알 수 있다.

(2) 표면 거칠기의 폭과 간격은 표면 거칠기의 높이에 비해 미소채널 내부 유동의 변화에 큰 영향을 주지 않는 것을 알 수 있었으며, 특히 표면 거칠기의 간격이 멀어지면 단순 채널과 같은 유동형태를 보인다.

(3) 일반적으로 채널의 수력직경(D_h)이 수 mm 단위 이상인 경우에는 표면 거칠기의 영향을 무시할 수 있으나, 미소채널 유동인 경우에는 채널 수력직경에 비해 상대적으로 표면 거칠기가 약 0.1에서 6%정도이므로 표면 거칠기의 영향을 무시할 수 없으며 이에 대한 고려가 필요하다.

후 기

이 논문은 2009년도 2단계 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- (1) Rosa, P., Karayiannis, T.G. and Collins, M.W, 2009, "Single-Phase Heat Transfer in Microchannels : The Importance of Scaling Effects," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, No. 17-18, pp. 3447~3468.
- (2) Papautsky, I., Brazzle, J., Ameal, T. and Frazier., A. B., 1998, "Laminar Fluid Behavior in Microchannels Using Micropolar Fluid Theory," *Sensors and Actuators*, Vol. 73, No. 1-2, pp. 101~108.
- (3) Morini, G.L, 2004, "Single-Phase Convective Heat Transfer in Microchannels : A Review of Experimental Results," *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 43, No. 7, pp. 631~651.
- (4) Wu, P. and Little, W.A, 1983, "Measurement of Friction Factors for the Flow of Gases in Very Fine Channels Used for Microminiature Joule-Thomson Refrigerators," *Cryogenics*, Vol. 23, No. 5, pp. 273~277.
- (5) Wu, P. and Little, W.A, 1984, "Measurement of the Heat Transfer Characteristics of Gas Flow in Fine Channel Heat Exchangers Used for Microminiature Refrigerators," *Cryogenics*, Vol. 24, No. 8, pp. 415~419.
- (6) Wilding, P., Shoffner, M.A. and Kircka, L.J., 1994, "Manipulation and Flow of Biological Fluids in Straight Channels Micromachined in Silicon," *Clinical Chemistry*, Vol. 40, pp. 43~47.
- (7) Mala, G.M. and Li, D., 1999, "Flow Characteristics of Water in Microtubes," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol.20, No.2, pp. 142~148.
- (8) Hu, Y., Werner, C. and Li, D., 2003, "Influence of Three-Dimensional Roughness on Pressure-Driven Flow Through Microchannels," *Trans. ASME Journal of*

- Fluids Engineering*, Vol. 125, No. 5, pp. 871~879.
- (9) Sun, H. and Faghri, M., 2003, "Effect of Surface Roughness on Nitrogen flow in a Microchannel Using the Direct Simulation Monte Carlo Method," *Numerical Heat Transfer - Part A*, Vol. 43, No. 1, pp. 1~8.
- (10) Gad-el-Hak, M., 1999 "The Fluid Mechanics of Microdevices : The Freeman Scholar Lecture," *Trans. ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 121, No. 1, pp. 5~33.
- (11) Chen, S. and Doolen, G.D., 1998, "Lattice Boltzmann Method for Fluid Flows," *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 30, pp.329~364.
- (12) Yoon, J.Y., Han, G.S. and Byun, S.J., 2005, "Optimization of Passive Mixer for Enhanced Mixing in a Micro-channel by Using Lattice Boltzmann Method," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 29, No. 5, pp.707~715.
- (13) Bhatnagar, P.L, Gross, E.P. and Krook, M., 1954, "A Model for Collision Processes in Gases. I : Small Amplitude Processes in Charged and Neutral One-Component System," *Physical Review*, Vol. 94, No. 5, pp. 511~525.
- (14) Qian, Y.H, d'Humieres, D. and Lallemand, P., 1992, "Lattice BGK Models for Navier-Stokes Equation," *Europhysics Letters*, Vol. 17, No. 6, pp. 479~484.
- (15) Li, Z., Du, D. and Guo, Z., 2003, "Experimental Study on Flow Characteristics of Liquid in Circular Microtubes," *Microscale Thermophysical Engineering*, Vol. 7, No. 3, pp. 253~265.
- (16) Succi, S., 2001, *The Lattice Boltzmann Equation for Fluid Dynamics and Beyond*, Clarendon Press-Oxford, New York, pp. 77~96.