

## 미소채널내의 Langmuir 미끄럼 경계조건을 통한 미끄럼 속도 및 급격한 온도변화에 관한 수치해석

김상우\* · 김현구\* · 이도형†

(2008년 6월 3일 접수, 2009년 2월 4일 수정, 2009년 2월 9일 심사완료)

### Numerical Analysis of the Slip Velocity and Temperature-Jump in Microchannel Using Langmuir Slip Boundary Condition

Sang-woo Kim, Hyun-goo Kim and Dohyung Lee

**Key Words:** Micro-Channel(미소 채널), Slip Velocity(미끄럼 속도), Temperature Jump(온도 점프), Slip Boundary Condition(미끄럼 경계조건).

#### Abstract

The slip velocity and the temperature jumps for low-speed flow in microchannels are investigated using Langmuir slip boundary condition. This slip boundary condition is suggested to simulate micro flow. The current study analyzes Langmuir slip boundary condition theoretically and it analyzed numerically micro-Couette flow, micro-Poiseuille flow and grooved microchannel flow. First, to prove validity for Langmuir slip condition, an analytical solution for micro-Couette flow is derived from Navier-Stokes equations with Langmuir slip conditions and is compared with DSMC and an analytical solution with Maxwell slip boundary condition. Second, the numerical analysis is performed for micro-Poiseuille flow and grooved microchannel flow. The slip velocity and temperature distribution are compared with results of DSMC or Maxwell slip condition and those are shown in good agreement.

#### 1. 서 론

MEMS(Micro-Electro-Mechanical-Systems)는 미래에 커다란 성장 잠재력을 가진 떠오르는 기술이다. MEMS기구는 optical-lithography와 etching과 같은 마이크로프로세서 제작에 사용되는 것과 유사한 과정을 통해 제작된다. MEMS는 마이크로 단위의 물리적 현상들을 감지하고, 제어할 수 있다. 이런 MEMS 장치로서 마이크로채널, 마이크로펌프, 마이크로밸브 등이 있다.

그러나 MEMS장치에서는 벽면 점착 경계조건

을 이용하는 기존의 유동 모델인 Navier-Stokes 방정식으로는 설명하기 어려운 유동현상이 발생한다. 이는 유체 밀도가 희박해짐에 따라 Kn수의 증가에 함으로써 유체 유동이 연속체영역에서 벗어나기 때문이다. 따라서 MEMS장치에서의 유동 특성을 잘 이해하고, 적절한 해석방법을 찾는 것이 중요하다.

MEMS유동을 해석하기 위한 수치적 연구로는 크게 2가지로 나눌 수 있는데 DSMC(Direct simulation Monte Carlo)기법<sup>(1)</sup>과 Navier-Stokes 방정식에 미끄럼 경계조건을 사용하는 방법<sup>(2)</sup>이 있다. Bird<sup>(1)</sup>에 의해 입자간 충돌을 처리하는 기법인 DSMC기법이 개발되어 고속 희박 기체유동계산에 사용되어져 왔고, 최근 저속 MEMS 유동장 계산에도 사용되어지고 있으나, 통계적 교란에 의한 오차가 발생하며 연산과정에 있어서 막대한

† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계정보공학부

E-mail : dohyung@hanyang.ac.kr

TEL : (031)400-5289 FAX : (031)406-5550

\* 한양대학교 대학원 기계공학과

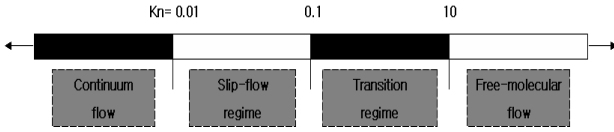


Fig. 1 Knudsen number regimes

시간이 소요되어지므로 적합하지 않다. 이에 비해 Navier-Stokes방정식에 미끄럼 경계조건을 적용하는 방법은 DSMC기법보다 연산시간이 빠르기 때문에 보다 효율적인 장점을 가지고 있다.

대부분의 MEMS유동에서 물체 특성길이에 대한 기체 입자의 평균자유행로의 비를 나타내는 Kn수가 언급된다. MEMS유동에서 영역을 구분하는 척도로서 Kn이 사용되는데 Kn의 값에 따라 유동영역은 Fig. 1과 같이 연속체 유동영역, 미끄럼 유동영역, 천이유동 영역, 자유분자 유동영역으로 나뉠 수 있다.  $Kn \leq 0.01$  인 연속체 유동의 경우, 고착 경계조건(no-slip boundary condition)을 사용하는 Navier-Stokes방정식에 의해 설명되어질 수 있으며,  $0.01 \leq Kn \leq 0.1$  인 미끄럼 유동 영역(slip flow regime)의 경우, 미끄럼 경계조건(slip boundary condition)을 사용하는 Navier-Stokes방정식이 적용될 수 있다.  $0.1 \leq Kn \leq 10$  인 천이유동(transient flow)영역과  $Kn \geq 10$  인 자유분자유동(free molecular flow)영역의 경우, 미끄럼 경계 조건을 사용하는 Navier-Stokes방정식으로 설명되어질 수 없는 영역이 된다.

전 유동에 대해 Boltzmann 방정식으로 해석이 가능하지만 방정식의 전개가 복잡하고, 계산시간이 오래 소요된다는 단점이 있어서, 실제 MEMS 영역의 해를 구하는데 있어서 부적절하다.

벽면의 미끄럼 현상을 적절히 해석하기 위한 미끄럼 경계조건으로서 Maxwell 경계조건<sup>(3-5)</sup>과 고차 미끄럼 경계조건<sup>(2)</sup>이 널리 쓰인다. 하지만 이 조건은 벽면에서의 속도구배에 대한 정확한 계산이 요구되며, 경험적인 조절 계수 (accommodation coefficient)값에 따라 결과 값이 달라지는 단점을 가지고 있다. 최근에 Myong<sup>(6)</sup>에 의해 이러한 단점 없이 벽면의 미끄럼 현상을 예측할 수 있도록, 표면화학 이론<sup>(7)</sup>을 원용한 Langmuir 미끄럼 경계조건이 개발되었고, Choi<sup>(8,12,13)</sup>에 의해 Langmuir 경계 조건을 Navier-Stokes방정식에 적용한 수치기법이 개발되어 미소채널에 대한 타당성을 검증하였다. 하지만, 마이크로 채널내의 유동에 따른 벽면에서

의 미끄럼 속도(slip-velocity)와 온도 점프 현상(temperature jump)에 대한 해석 및 타당성의 검증이 제대로 이루어지지 않았다. 따라서 이에 대한 수치모델의 검증이 필요하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 기존 수치모델을 이원자 기체 Langmuir 미끄럼 조건을 적용하여, 벽면근처에서의 미끄럼 속도와 온도 점프 현상에 대한 수치해석을 수행하고, 연구 결과에 대해 위해 기존의 수치모델인 DSMC기법, Maxwell 미끄럼 경계조건과의 비교·분석을 수행하고, Langmuir경계조건에 대한 타당성을 검증 하고자 한다.

## 2. 미끄럼 경계조건

### 2.1 Maxwell 경계조건

1879년 Maxwell에 의해 소개되어 고체 벽면에서의 미끄럼 현상을 예측하기 위해 널리 사용된 Maxwell 경계조건은 기체운동학이론에서 벽면-입자의 상호작용에 관한 근사해법에 기초한다. 벽면 근처에서 등은 유동의 경우 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$U_g - U_w = \frac{2 - \sigma_v}{\sigma_v} \lambda \left( \frac{dU}{dy} \right)_w \quad (1)$$

$\lambda$ 는 평균 자유행로,  $\sigma_v$ 는 조절계수를 나타낸다. Maxwell 경계조건은 벽면 수직 방향으로 온도 구배가 있는 유동의 경우 다음과 같이 무차원화 된 형태로 나타내어 질 수 있다.

$$u_g^* - u_w^* = \frac{2 - \sigma_v}{\sigma_v} Kn \left( \frac{\partial u^*}{\partial y^*} \right)_w \quad (2)$$

$$T_g^* - T_w^* = \frac{2 - \sigma_T}{\sigma_T} \left[ \frac{2\gamma}{\gamma + 1} \right] \frac{Kn}{Pr} \left( \frac{\partial T^*}{\partial y^*} \right)_w \quad (3)$$

\*는 무차원 상태량,  $\gamma$ 는 비열비  $\sigma_T$ 는 열 조절계수(thermal-accommodation coefficient)를 나타낸다. 위의 식에서 벽면의 미끄럼 정도는 평균자유행로, 속도 및 온도 구배, 조절계수의 값에 따라 달라지는데, 조절계수가 단원자, 또는 이원자 기체에 대해 명확히 구분되어 기술되어지지 않았으며, 특정 물질 표면의 특정 기체가 아닌 임의로 정해졌기 때문에 이 조절계수에 따라 미끄럼 현상의 차이가 발생하는 단점을 가지고 있다.

2.2 Langmuir 경계조건

기존의 Maxwell 경계조건의 문제점을 극복하고자 Myong은 표면화학(surface chemistry)이론을 바탕으로 하는 Langmuir 경계조건을 개발하였다.

이 원자 기체인 질소 가스에 대한 미끄럼 현상을 해석하기 위해 (4)과 (5)을 이용하여 아래와 같은 속도와 온도에 대한 경계조건을 얻을 수 있다.

$$u = \alpha u_w + (1 - \alpha)u_0 \tag{6}$$

$$T = \alpha T_w + (1 - \alpha)T_0 \tag{7}$$

여기에서  $u_0$ 는 기준속도이고  $T_0$ 는 기준온도이다. 벽면과 열적 평형을 이루는 입자의 퍼센트인 표면 덮인 비율(the fraction of covered surface)을  $\alpha$ 라 하고, 질소 가스와 같이 이원자 기체일 경우에는 다음과 같이 나타내어진다.

$$\alpha = \frac{\sqrt{\beta p}}{1 + \sqrt{\beta p}} \tag{4}$$

위의 식에서,  $\beta$ 는 화학반응 상수와 같은 역할을 하고 다음과 같이 정의된다.

$$\beta = \frac{A l_r / K n}{k_B T_w} \exp\left(\frac{D_e}{k_B T_w}\right) \tag{5}$$

위의 식에서,  $k_B$ 는 볼츠만 상수,  $A$ 는 평균면적,  $D_e$ 는 퍼텐셜 변수,  $l$ 은 평균 자유 행로를 나타낸다.  $\beta$ 값은 벽면의 특성과 기체의 특성에 따라 결정되며,  $D_e$ 는 실험을 통해 결정해야 한다.

Maxwell 경계조건과는 달리 조절계수나 속도의 구배가 필요하지 않으며, 단원자, 이원자, 나아가 혼합기체를 이론적으로 명확히 기술하는 장점이 있다.

2.3 비 정렬 격자 압력 기반 해법

벽면 근처에서의 미끄럼 속도 및 온도 점프 현상에 대한 미끄럼 현상의 해석을 위해 비정렬격자 압력기반해법을 적용한 해석프로그램을 이용, Micro-Poiseuille 유동 및 Grooved Micro-channel에 관한 수치해석을 수행하였는데 해석프로그램에 사용된 수치기법특징은 다음과 같다.

복잡한 형상에 쉽게 적용 가능한 비 정렬격자 해법이 사용되었고 기억장소에 유리한 격자 점 중심법이 사용되었다. 플럭스 계산에 있어서 효율적인 계산을 위해 모서리 중심으로 계산되었다.<sup>(11)</sup>

마이크로 유동에서 레이놀즈 수는 아주 작으나 압축성 효과를 무시할 수 없으므로 저속유동에 적합하며 압축성 효과를 적절히 예측할 수 있는 Modified simple법을 적용하였다.<sup>(7)</sup>

대류항과 확산항의 이산화는 Demirdzic와 Muzaferija<sup>(10)</sup>가 제안한 방법이 사용되었는데 대류항은 중앙차분법으로 확산항은 정렬격자계의 이산화 방법을 비정렬격자에 맞게 변형시킨 방법이다.

3. 수치해석

Micro-Couette 유동, micro-Poiseuille 유동 및 복잡한 형상인 grooved micro-channel의 미끄럼 속도와 온도 점프현상에 대한 수치해석을 수행하였고, Maxwell 경계조건 및 DSMC기법<sup>(2)</sup>을 이용한 결과 값과의 비교분석을 수행하였다.

3.1 Micro-Couette flow

질소 가스에 대한 Micro-Couette flow에 대한 형상은 Fig. 2와 같다. 상부 평판의 초기 속도는 100m/s로 움직이며 하부면벽면은 정지해 있다. 입구 온도와 벽면 온도는 300K의 등온이다. 채널의 높이  $h$ 는  $0.8\mu m$ 이고, 채널의 길이  $L$ 은  $4.0\mu m$ 이다.  $Kn$ 은 0.08이고, 채널의 입구의 압력과 출구의 압력은 0.83atm으로 같게 설정하였다.

이러한 유동의 속도 및 온도에 관한 지배방정식은 다음과 같이 나타낸다.

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial y} = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \tag{8}$$

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = -\mu U^2 \alpha^2 \tag{9}$$

이상의 방정식에 Maxwell 경계조건 (2), (3)을 또는 Langmuir 경계조건 (6), (7)을 적용하면 다음과 같은 온도 분포에 관한 엄밀 해를 구할 수 있다.

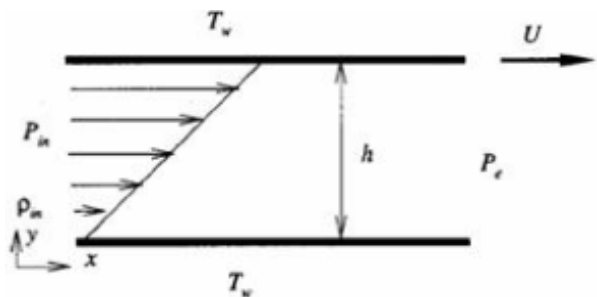


Fig. 2 Schematic of the Micro-Couette Flow geometry

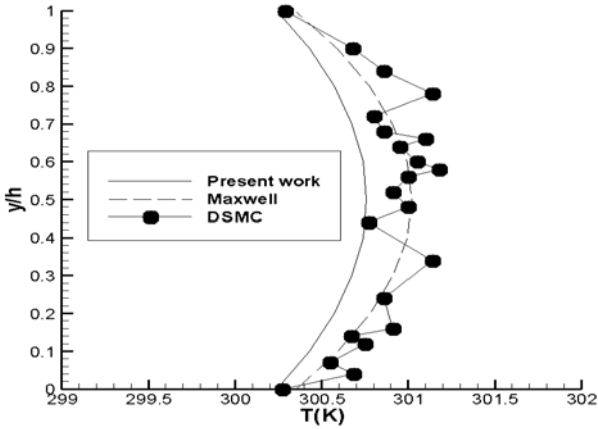


Fig. 3 Comparison of the temperature profile for micro-Couette flow

$$T = T_w + \frac{1}{2} \frac{\mu U^2}{k} \left( \frac{1}{2\alpha + 1} \right)^2 \left( -\left(\frac{y}{h}\right)^2 + \frac{y}{h} + \frac{2\gamma}{\gamma + 1} \frac{\alpha}{Pr} \right) \quad (10)$$

for Maxwell BC

$$T = -\frac{\mu U^2}{2k} \alpha^2 \left( -\left(\frac{y}{h}\right)^2 + \left(\frac{y}{h}\right) \right) + \alpha T_w + (1 - \alpha) T_r \quad (11)$$

for Langmuir BC

Fig. 3에서 Maxwell 경계조건<sup>(12)</sup>과 Langmuir 경계조건을 이용한 온도분포 수치해석 결과와 또한 DSMC방법<sup>(11)</sup>을 이용한 수치해를 나타내었다. 이때 Langmuir 방법에서는 표면 조절 계수  $\alpha$ 를 식 (4)와 (5)를 이용하여 0.758로 지정되었다. 기준 속도  $u_r$  및  $T_r$ 은 채널 중심부에서의 물성치 값으로 정하여 각각 50m/s와 301K로 지정되었다. 한편 Maxwell 모델에서는  $\sigma_v$ 와  $T$ 를 1과 300K로 지정하였다.

Maxwell 경계조건과 DSMC의 경우 벽면근처에서 약 0.3K의 온도 점프 현상이 발생하였으며, Langmuir 경계조건의 경우 0.26K의 온도 점프 현상이 발생하였다. Langmuir 경계조건은 온도 점프현상에서 두 수치모델과 근소한 차이 보이며, 온도 분포에 있어서 전체적으로 잘 일치한다.

### 3.2 Micro-Poiseuille flow

질소 가스에 대한 Micro-Poiseuille 유동에 대한 형상은 Fig. 4과 같다. 입구 온도는 300K이고, 벽면 온도는 323K의 등온이다. 채널의 높이  $h$ 는 0.4 $\mu$ m이고, 채널의 길이  $L$ 은 2.0 $\mu$ m이다. 입구와 출구의 압력비는 2.5로, 채널의 입구의 압력은 2.5atm로 설정하였다.

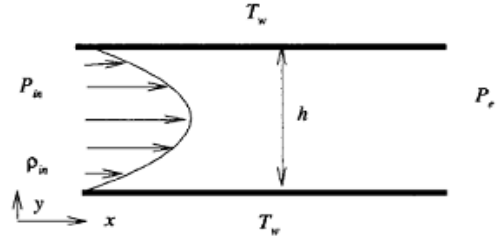


Fig. 4 Schematic of the Micro-Poiseuille Flow geometry

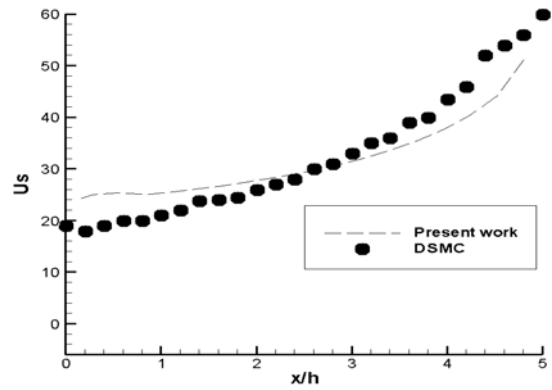


Fig. 5 slip velocity on the wall

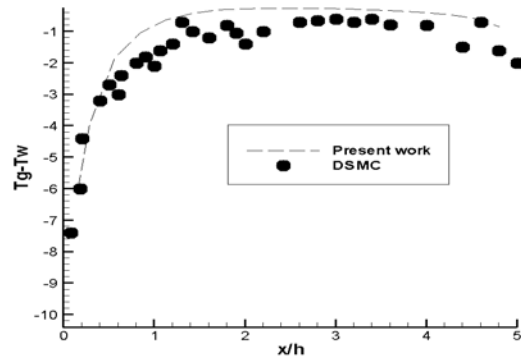


Fig. 6 wall temperature-jump

Fig. 5는 벽면근처의 미끄럼 속도에 대한 해석 결과이다. 벽면에서의 미끄럼 속도는 입구부터 중간지점까지는 Langmuir 경계조건이 DSMC보다 미끄럼 속도가 크게 나타나지만, 중간지점에서 출구쪽으로 갈수록 DSMC보다 낮게 예측되는 것을 볼 수 있는데 DSMC의 경우가 Langmuir 경계조건의 경우보다 더 큰 미끄럼 속도의 기울기를 보이며, 출구로 갈수록 벽면에서 미끄럼 현상이 더욱 두드러지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6은 벽면근처의 온도 점프 현상에 대한 해석 결과이다. 벽면에서의 온도 점프현상에서

DSMC의 경우 온도 분포에 있어서 교란 현상으로 인한 통계적 오차가 발생하는데 이는 저속 유동에 DSMC 기법을 적용하였을 경우 나타나는 현상이다. Langmuir 경계조건에서의 온도 점프 현상은 입구에 중간까지 약 -6K에서 -1.31K까지 감소를 보이며, 중간에서 출구까지는 약 -1.23K에서 -1.47K까지 점진적인 증가를 보이고 있다. DSMC 기법을 이용한 결과의 경우, 입구에 중간까지 약 -10K에서 -1K까지 감소를 보이며, 중간에서 출구까지는 약 -1K에서 -2K까지 점진적인 증가를 보이고 있다. 따라서 모든 영역에서 DSMC와 Langmuir 모델은 전반적으로 온도분포가 큰 차이 없이 거의 일치한다.

3.3 Grooved Micro-channel flow

이 원자기체인 질소 가스에 대한 그루브 채널의 유동에 대한 형상은 Fig. 7과 같다. 입구 온도는 300K이고, 벽면 온도는 323K의 등온이다. 채널의 입구의 높이는  $1.0\mu m$ , 중반부 높이는  $1.5\mu m$ 이고, 채널의 길이 L은  $6.0\mu m$ 이다. 압력 비는 2.5로, 채널의 입구의 압력은 2.5atm로 설정하였고, 이에 대한 결과 값을 Maxwell 경계조건과 비교하였다.

Fig. 8은 벽면근처의 미끄럼속도에 대한 해석 결과이다. 미끄럼속도의 경우 윗 벽면의 경우 중간지점까지 완만한 감소세를 보이며, 중간지점부터 출구까지 두드러진 증가를 볼 수 있다.

아래 벽면의 경우 입구에서 그루브 전반부까지는 완만한 형태를 이루며, 그루브 후반부부터 출구까지는 두드러진 증가를 나타낸다. 하지만 그루브 전·후 부근에서의 급격한 변화를 보이는 것을 볼 수 있다.

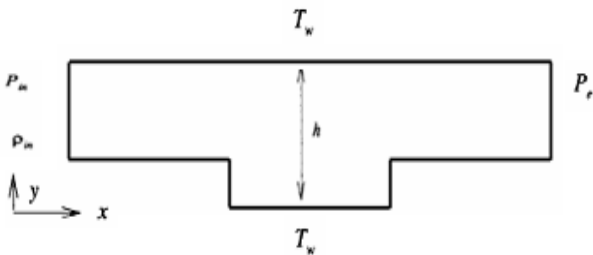


Fig. 7 Schematic of the grooved Micro channel Flow geometry

Langmuir 경계조건의 경우 그루브 전반부에서의 미끄럼 속도가 Maxwell 경계조건보다 크게 예측되었으며 전체적인 속도 분포는 근소한 차이를 보이며 유사한 형태를 나타내고 있다. Fig. 9는 벽면근처의 온도 점프 현상에 대한 해석결과이다. 온도점프현상의 경우 윗 벽면에서는 약 5.4K에서 3.8K사이의 값을 나타내며, 중간지점까지는 점진적으로 감소하며, 중간지점에서 출구까지 점진적인 증가를 보인다. 아래 벽면의 경우는 입구에서 그루브 전반부까지는 약 -6.5K에서 2.5K까지 점진적으로 감소하며, 그루브 전·후반부 지점에서 약 4K로의 급격한 변화를 보인다. 그루브내에서는 완만한 변화를 이루고, 그루브 후반부에서 출구까지는 점진적인 증가를 한다. Langmuir 경계조건의 경우 그루브 전반부에서의 온도 점프가 Fig. 8의 미끄럼 속도와 마찬가지로 Maxwell 경계조건보다 크게 예측되었으며 전체적인 속도 분포는 근소한 차이를 보이며 유사한 형태를 나타내었다.

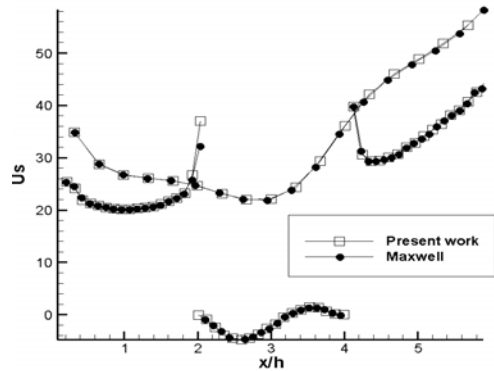


Fig. 8 slip velocity on the upper wall and lower wall

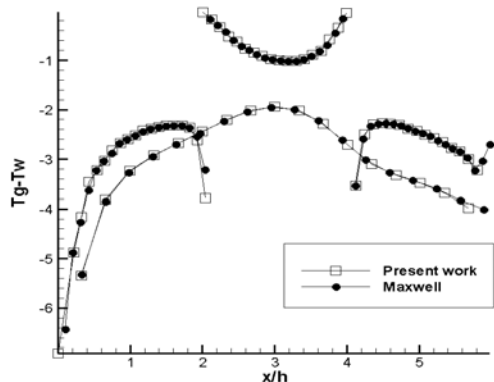


Fig. 9 temperature-jump on the upper wall and lower wall

#### 4. 결론

본 연구에서는 질소 유동에 대해 Langmuir 미끄럼 경계조건을 적용하여 Micro-Couette 유동, Micro-Poiseuille 유동 및 복잡한 형상인 Grooved Micro-channel내의 미끄럼 속도와 온도 점프 현상에 대한 수치해석을 수행하였다.

(1) Micro-Couette 유동에서 Langmuir 경계조건은 온도 점프현상에서 두 수치모델보다 0.3~0.4K의 낮은 온도 점프가 예측되었으며, 온도 분포에 있어서는 근소한 차이를 보이며 잘 일치한다.

(2) Micro-Poiseuille 유동해석에서 벽면근처에서의 미끄럼 속도의 경우 Langmuir 경계조건인 경우 전반부에서 DSMC보다 크게 예측되었지만 후반부에서 DSMC보다 작게 예측된다. DSMC기법의 경우 Langmuir 경계조건 보다 큰 미끄럼 속도의 기울기를 보이며 출구쪽으로 갈수록 미끄럼 현상이 두드러진다. 벽면근처에서의 온도 점프현상의 경우 Micro-Couette 유동에서와 같이 Langmuir 경계조건인 경우 기존의 방법들에 비해 다소 낮은 온도 점프 현상을 보였다.

(3) 복잡한 형상의 Grooved Micro-channel 유동해석에서 벽면근처에서의 미끄럼 속도와 온도 점프현상에 있어서 전반적으로 잘 일치했으나, 그루브 전반부 근처에서 Langmuir 경계조건인 경우 Maxwell 경계조건보다 큰 값을 예측하였다.

(4) Langmuir 경계조건은 Micro-Couette 유동, Micro-Poiseuille 유동 및 복잡한 형상인 Grooved Micro-channel 내의 미끄럼 속도와 온도 점프현상의 해석에 있어서 기존 모델보다 다소 낮은 미끄럼 현상을 보입니다. 한편 DSMC는 수치 noise가 너무 많고 계산시간이 길어 slip regime 영역에서는 적절한 방법이라고 볼 수 없습니다.

#### 참고문헌

(1) Brid, G., 1994, "Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows," *Oxford Science Publications*, Midsomer Norton, Avon, UK.  
 (2) Beskok, A., Karniadakis, G. E., and Trimmer, W., 1996, "Rarefaction and Compressibility Effects in Gas Microflows," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 118, pp. 448~456.

(3) Piekos, E. S. and Breuer, K. S., 1996, "Numerical Modeling of Micromechanical Devices Using the Direct Simulation Monte Carlo Method," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 118, pp. 464~469.  
 (4) Arkilic, E. B., 1997, "Measurement of the Mass Flow and Tangential Momentum Accommodation Coefficient in Silicon Micromachined Channels," Ph.D. Dissertation, MIT, Cambridge.  
 (5) Arkilic, E. B., Schmidt, M. A., and Breuer, K. S., 1997, "Gaseous Slip Flow in Long Microchannels," *J. of Microelectromechanical Systems*, Vol. 6, No. 2, pp. 167~178.  
 (6) Myong, R. S., 2001, "Velocity-Slip Effect in Low-Speed Microscale Gas Flows," *AIAA 2001-3076*, 35th AIAA Thermophysics Conference, Anaheim, CA.  
 (7) Adamson, A. W. and Gast, A. P., 1997, *Physical Chemistry of Surfaces*, 6th ed., John Wiley & Sons, Inc.  
 (8) Myong, R. S., Lockerby, D. A. and Reese, J. M., 2006, "The Effect of Gaseous Slip on Microscale Heat Transfer: An Extended Graetz Problem," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, Issues 15-16, pp. 2502~2513.  
 (9) Demirdzic, I. and Muzafferija, S., 1995, "Numerical Method for Coupled Fluid Flow, Heat Transfer and Stress Analysis Using Unstructured Moving Meshes with Cells Of Arbitrary Topology," *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, Vol. 125, pp. 235~255.  
 (10) Jessee, J. P. and Fiveland, W. A., 1996, "A Cell Vertex Algorithm for the Incompressible Navier-Stokes Equations on Non-orthogonal Grids," *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, Vol. 23, pp.271~293.  
 (11) Yichuan Fang and William W. L., 2005, "Microfluid Mechanics," MacGraw-Hill.  
 (12) Choi Hyung-il and Lee Dong-ho, Lee Dohyung, 2005, "Complex Microscale Flow Simulations Using Langmuir Slip Condition," *Numerical Heat Transfer, Part A*, pp. 407~425.  
 (13) Hyung-il, Dohyung, 2008, "Computations of Gas Microflows Using Pressure Correction Method with Langmuir Slip Model," *Computers & Fluids*, Vol. 37, pp. 1309~1319