

Langmuir 미끄럼 모형을 사용한 미소채널 유동의 수치해석

최형일* · 이도형** · 맹주성†

(2001년 10월 8일 접수, 2002년 2월 21일 심사완료)

Numerical Analysis of Microchannel Flows Using Langmuir Slip Model

Hyung-il Choi, Dohyung Lee and Joo-sung Maeng

Key Words : MEMS(미소전자기계시스템), Slip Flow(미끄럼 유동), Rarefaction(희박도), Slip Boundary Condition(미끄럼 경계조건), Microchannel(미소채널)

Abstract

The present research proposes a pressure based approach along with Langmuir slip condition for predicting microscale fluid flows. Using this method, gaseous slip flows in 2-dimensional microchannels are numerically investigated. Compared to the DSMC simulation, statistical errors could be avoided and computing time is much less than that of the aforementioned molecular approach. Maxwell slip boundary condition is also studied in this research. These two slip conditions give similar results except for the pressure nonlinearity at high Knudsen number regime. However, Langmuir slip condition seems to be more promising because this does not need to calculate the streamwise velocity gradient accurately and to calibrate the empirical accommodation coefficient. The simulation results show that the proposed method using Langmuir slip condition is an effective tool for predicting compressibility and rarefaction in microscale slip flows.

1. 서론

최근 10 여년 동안 미소전자기계시스템(MEMS)의 가공기술은 괄목할만한 발전을 이루었다. 이러한 미소기구(micro devices)의 성능향상을 위한 설계와 최적화를 위하여, 유체역학의 이해가 필수적이라 할 수 있다. 그러나, 전형적인 기구에서 나타나지 않는 유동 현상들이 관측되며 여기에 관한 연구는 아직 부족한 실정이다.⁽¹⁾

미소유동(microflow)에서 물체의 특성길이는 마이크로미터 정도의 크기가 되고 따라서, 분자평균 자유행로(mean free path)와 물체특성길이의 비인 Knudsen 수(이하 Kn 수)가 커지게 된다. 이는 유동의 희박도(rarefaction)가 커지게 되어, 열역학적으로 평형에 가까운 연속류 영역(continuum flow regime)을 벗어나는 것을 의미한다. 이 유동은 대

부분 미끄럼 유동영역(slip flow regime)에 해당되며 벽면에서의 속도의 미끄럼(velocity slip), 압축성 효과(compressibility effect) 등이 중요한 현상이 된다. 따라서, 전형적인 고착경계조건(no-slip boundary condition)을 이용한 CFD 기법의 적용이 불가능하게 된다. 이러한 미소크기의 유동을 해석하기 위한 해석적 또는 실험적 연구가 여러 연구자들⁽²⁻¹¹⁾에 의해 이루어졌으며, 수치해석 기법들에는 DSMC(Direct Simulation Monte Carlo)기법^(6,9)과 Navier-Stokes 방정식에 미끄럼 경계조건(slip boundary condition)을 적용하는 기법⁽⁵⁾ 등이 연구되어 왔다.

DSMC 기법은 자유분자류(free molecular flow) 영역인 고속 희박기체 유동(rarefied gas flow)을 해석하기 위해 널리 사용되어온 방법으로 입자간 충돌(intermolecular collision)을 통계적으로 처리하는 모사기법(simulation method)이다.^(1,10) 이 기법을 저속의 미소유동에 적용할 경우 유동의 속도에 비해 입자의 자유속도(random velocity)가 상대적으로 커지게 되어 통계적 교란(statistical fluctuation)이 매우 커지게 된다. 또한, 이 방법은 외재적 시간전진법

* 회원, 한양대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 한양대학교 안산캠퍼스 기계산업공학부
E-mail : dohyung@hanyang.ac.kr

† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부
E-mail : jsmaeng@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2290-0439 FAX : (02)2298-4634

(explicit time marching method)으로서, 시간간격을 분자간 평균충돌시간(mean collision time)보다 작게 해야 하는 제약조건으로 인해 아주 작은 평균충돌 시간을 갖는 미소유동의 경우 막대한 연산시간이 요구되어진다.^(10,12)

이에 비하여 Navier-Stokes 방정식에 미끄럼 경계조건을 부과한 CFD 기법은 벽면의 미끄럼현상을 잘 예측하는 경제적인 방법이라 할 수 있다. Myong⁽¹⁰⁾에 따르면, 유동내부의 비평형도(degree of nonequilibrium effect in a bulk region)는 복합 무차원수(composite number)의 크기로 나타낼 수 있다. 이 무차원수가 커지면, Navier-Stokes 방정식을 이용할 수 없으며 따라서, 분자적 접근법(molecular based approach)이나 Boltzmann 방정식으로부터 유도되는 고차의 유체방정식(high-order moment equation)을 적용하여야 한다. 그러나, 미소유동의 경우 이 수는 아주 작게 되어 고차의 유체방정식의 도움 없이 Navier-Stokes 방정식을 이용할 수 있다. 아울러 높은 Kn 수에 의한 벽면의 미끄럼 현상은 적절한 미끄럼 경계조건을 부과로 해결되어질 수 있다. 이것은 기존의 Navier-Stokes 방정식에 미끄럼 경계조건을 부과한 해석방법의 타당성을 보여준다고 할 수 있다.

한편 이러한 미끄럼 경계조건에는 널리 쓰이는 Maxwell 미끄럼 경계조건⁽⁶⁻⁸⁾, 고차 미끄럼 경계조건⁽⁵⁾ 등이 있다. 이 조건들은 벽면에서의 속도 구배를 정확히 계산하여야 하며 경험적인 조절계수(accommodation coefficient)에 따라 유동이 달라지는 등의 단점을 가지고 있다.⁽¹⁰⁾ 최근에 Myong^(11,12)은 이러한 단점 없이 벽면의 미끄럼현상을 예측할 수 있도록, 표면화학이론⁽¹³⁾을 원용한 Langmuir 미끄럼 경계조건을 개발하였으며, 미소 채널에 대해 해석해(analytic solution)를 구하였다.

본 연구에서는 미소유동을 해석할 수 있는 미끄럼 경계조건을 고려한 수치해석기법을 개발하였다. Navier-Stokes 방정식에 적용되는 수치기법은 크게 밀도기반 해법(density based approach)⁽¹⁴⁾과 압력기반 해법(pressure based approach)^(15,16)으로 나눌 수 있다. 밀도기반 해법은 고속의 압축성 유동에 적합한 방법으로 저속유동의 경우 예조건화 알고리즘(preconditioning algorithm)⁽¹⁷⁾의 적용 등이 필요하다. 이에 비해 압력기반 해법은 저속의 비압축성 유동을 해석하기 위해 개발되었으며, 압축성 유동을 해석할 수 있는 알고리즘으로 성공적으로 확장되었다. 따라서, 본 연구에서는 저속의 미소유동에 유리하고 실제 복잡한 형상에 쉽게 적용할 수 있는 압력기반해법과 비정렬격자 알고리즘(unstructured grid algorithm)^(15,16,18)을 사용하였으며,

Demirdzic 와 Muzaferija⁽¹⁵⁾가 제안한 이산화기법을 격자점 중심법(cell-vertex scheme)에 적용하였다. 미끄럼 경계조건으로는 널리 쓰이는 Maxwell 미끄럼 조건 그리고 Myong 에 의해 개발된 Langmuir 미끄럼 조건을 압력기반해법(pressure based method)에 새롭게 적용하였다. 제안된 수치기법을 이용하여 미소채널 내부의 미끄럼유동에 대해 수치계산을 수행하였다. 압력, 유선방향 속도분포 등을 기존의 DSMC 기법⁽⁹⁾, Maxwell 미끄럼 경계조건을 사용한 수치해석, 그리고, 해석해에 의한 결과들과 비교하였으며 제안된 기법의 타당성을 검증하였다

2. 미끄럼 경계조건

고체 벽면의 미끄럼 현상을 예측하기 위해 Maxwell 경계조건이 널리 사용되어 왔다. 이 조건은 기체운동학(gas kinetics)이론⁽¹⁹⁾에서 벽면-입자의 상호작용(surface-gas molecular interaction)에 관한 근사해법에 기초한 것으로 기체입자의 비탄성 충돌 정도를 조절계수(accommodation coefficient)를 통해 나타낸다. 등은 유동인 경우에 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$U_g = \sigma Kn \frac{dU}{dy} \quad (1)$$

여기에서, 하첨자 g 는 벽면에서의 기체를 나타낸다. 즉, 벽면에서의 기체의 미끄럼속도는 Kn 수, 벽면에 평행한 속도성분의 구배, 그리고, 조절계수 σ 에 의해 결정된다. 그러나, 식 (1)로 표현되는 일차근사식은 벽면에서의 미끄럼 정도가 경험적인 조절계수의 값에 따라 달라지며, 이 조절계수가 단위자, 또는 이원자 기체를 정확히 묘사할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 또한 수치계산 시에 벽면에서의 속도구배를 정확히 얻어내야 한다. 한편, 식 (1)의 일차근사식을 고차항까지 전개하여 고차의 경계조건을 사용할 수 있으나, 이 조건 역시 위에서 기술한 Maxwell 경계조건과 단점을 그대로 포함하고 있고, 수치적으로 고차항을 정확히 계산해야 하는 어려움이 있다.^(10,11) Beskok 등⁽⁵⁾은 2차 정확도의 경계조건을 개발하였으나 Kn 수의 1차 근사식인 Navier-Stokes 방정식에 적용하는 것이 논리적으로 맞지 않다 할 수 있다.

이러한 기존 경계조건의 단점을 극복하기 위하여 Myong 은 표면화학(surface chemistry)이론을 원용한 Langmuir 경계조건을 개발하였다. 표면화학 분야에서 기체-벽면의 상호작용은 흡착(adsorption)이론으로 설명되어질 수 있다. 기체 입자는 고체

표면에 부딪칠 때 완전히 탄성적으로 반사하지 않고 표면의 에너지 상태에 따라 짧은 시간동안 흡착된 다음 발산하는 데 이 과정에서 시간차가 거시적 관점의 속도 미끄럼으로 나타나게 된다. 이것은 아래의 표면 덮힘비율(the fraction of covered surface) α 에 관한 식으로 나타낼 수 있다.^(10,13)

$$\alpha = \frac{bp}{1+bp} \quad (2)$$

여기에서, b 는 벽면의 특성과 기체의 특성에 따라 결정되는 상수이다. 식 (2)에서 α 가 정해지면 아래식에서 미끄럼 속도를 결정할 수 있다.

$$U_g = (1-\alpha) U_r \quad (3)$$

여기에서, U_r 은 기준속도(reference velocity)이다. Maxwell 경계조건과는 달리 조절계수나 속도의 구배가 필요하지 않다는 장점이 있다. 식 (2)는 단원자 기체(monatomic gas)에 대한 경우로 Myong⁽¹¹⁾은 이원자 기체(diatomic gas)에 대해서도 경계조건을 도출하였으며, 미소채널에서의 단원자 기체 유동에 대해 해석해를 구하였다.

본 연구에서는 널리 알려진 Maxwell 경계조건과 식 (2)와 (3)으로 표현되는 단원자 기체에 대한 Langmuir 경계조건을 전산유체역학 기법에 적용하였다. 여기에서, 상수 b 는 완전확산반사(fully diffuse reflection)일 경우인 $0.25 / Kn$ 을 사용하였으며, Maxwell 경계조건과의 결과와 상호 비교하였다. 반복 계산과정중의 수치적 안정성을 위하여 다음과 같은 이완기법을 사용하였다.

$$U_g^{new} = (1-\omega) U_g^{old} + \omega U_g^{cal} \quad (4)$$

여기에서, 이완계수, ω 는 0.8~1.0 정도를 사용하여 계산하였다.

3. 수치해석기법

실제 미소유동은 레이놀즈수가 아주 작은 저속 유동이나 압축성 효과를 무시할 수 없으므로 여기에서는 저속 유동에 유리하며 압축성 효과를 고려하는 수정된 SIMPLE 법^(15,20,21)을 적용하였다. SIMPLE 법 등의 압력기반 해법은 몇몇 연구자들에 의해 비정렬 격자로 확장되었으며 본 연구에서는 Demirdzic 와 Muzaferija⁽¹⁵⁾가 제안한 방법을 격자점 중심법에 적용하였다.

분리형 압력기반해법(segregated pressure based method)^(15,16,18)에서, 운동량방정식과 연속방정식, 그리고 에너지방정식은 각각 순차적으로 계산하게 된다. 운동량과 에너지 보존방정식은 각각 다음과 같은 일반적인 형태로 나타낼 수 있다.

$$\int_V \rho \vec{V} \phi \cdot \vec{n} dS - \int_V \lambda_\phi \vec{\nabla} \phi \cdot \vec{n} dS = S_\phi \quad (5)$$

여기에서, ϕ 는 종속변수 u, v, h_0 를 나타내고 λ_ϕ 는 각각의 방정식에 대하여 확산계수들을 의미한다. 식 (5)의 좌변의 첫번째 항은 대류항을 나타내고, 두 번째 항은 확산항을 나타낸다. 그리고, 우변은 원천항(source term)을 나타낸다. 운동량방정식에서, 이 항은 나머지 속도구배항과 압력항, 그리고 체력항을 포함한다. 또한 연속방정식 역시 확산항이 없는 형태의 식 (5)로 표현될 수 있으며 압력수정방정식을 도출하는 데 이용되어진다.

복잡한 형상에 대해서도 쉽게 적용 가능한 복합 비정렬격자 해법(hybrid unstructured grid solver)을 개발하였다. 기억장소면에서 유리한 격자점 중심법(node centered scheme)을 사용하였으며, 플럭스의 계산은 효율적인 계산을 할 수 있도록 모서리(edge)를 중심으로 계산하였다.^(14,16) 또한, 공간에 대해 2 차 이상의 정확도를 얻기 위해서 본 연구에서는 제어체적내의 해의 분포를 선형의 1 차 함수로 가정하는 부분 선형 재구성기법(piecewise linear reconstruction)⁽¹⁴⁾을 적용하였으며, 수치적 효율이 좋은 modified Gram-Schmidt 직교화를 사용하여 구배를 계산하였다. 대류항과 확산항의 이산화는 Demirdzic 와 Muzaferija⁽¹⁵⁾가 제안한 방법을 적용하였다. 대류항은 중앙차분법이라 할 수 있으며 확산항의 계산은 다양한 격자에 일관되게 적용할 수 있는 정렬 격자계의 이산화방법을 비정렬 격자에 맞게 변형시킨 방법을 사용하였다.

4. 미소채널 유동

미소채널 유동은 전단력 센서나 가속도계등의 미소기구에서 볼 수 있는 좁은 통로의 유동을 대표할 수 있다. 또한, 희박도 효과(rarefaction effect)를 연구하는 데 있어서, 가장 기본적인 형상으로 여러 연구자들에 의해 수치 또는 실험을 통해 연구되어 왔다. 본 연구에서는 기존의 연구에서와 유사한 2 차원 미소채널 내부의 정상상태, 등은 저속유동에 대해 수치계산을 수행하였다.

제안된 수치기법의 검증을 위하여 먼저 Maxwell 미끄럼 조건을 사용하여 기존의 결과와 비교하였다. 채널의 높이(H)는 $1.04\mu\text{m}$, 길이(L)는 $31.14\mu\text{m}$ 이며, 채널 내부의 유체는 각각 질소와 헬륨에 대해 계산하였다. 격자는 18000 개의 요소를 가진 벽면으로 당겨진 사각격자(quadrilateral grids)를 구성하였다. 첫번째로 질소에 대하여 출

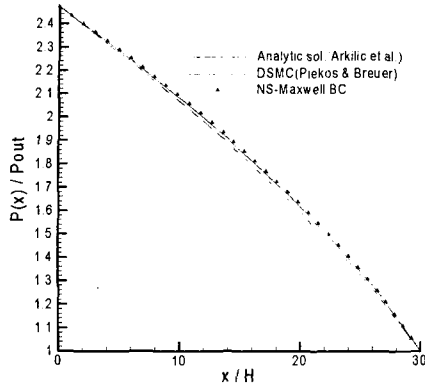


Fig. 1 Comparison of computed and analytical pressure distributions

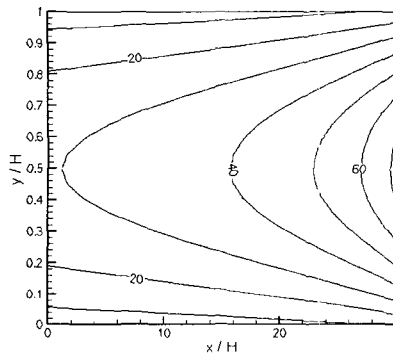


Fig. 2 Streamwise velocity distribution

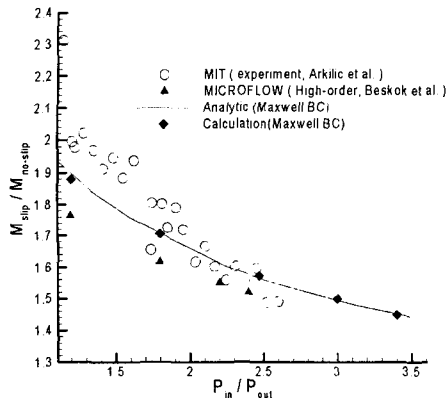


Fig. 3 Variation of normalized mass flow rate as a function of pressure ratio

구 Kn 수가 0.05 이고, 출구와 입구의 압력비가 2.47 인 경우에 대하여 Maxwell 경계조건을 적용하여 계산을 수행하였다. 먼저 Arkilic 등(7,8)은 Maxwell 경계조건인 식 (1)을 적용하여 Navier-

Stokes 방정식을 섭동법(perturbation expansion)을 이용하여 해석해를 구하였으며, 압력분포는 다음과 같다.

$$p = \sqrt{(6\sigma Kn_o)^2 + (p_i^2 + 12\sigma Kn_o p_i)(1 - \frac{x}{L})} + (1 + 12\sigma Kn_o) \frac{x}{L} - 6\sigma Kn_o \quad (6)$$

여기에서 p_i 는 입구의 압력, Kn_o 는 출구의 Knudsen 수를 나타낸다. Fig. 1 이서 식 (6)을 이용한 해석해와 Piekos 와 Breuer(6)의 DSMC 결과를 본 수치기법의 계산결과와 비교하였다. 본 연구의 수치해석 결과가 DSMC 기법보다 해석해에 좀 더 일치하며, 큰 압력차로 인해 발생하는 압력의 비선형성(nonlinearity)이 나타남을 볼 수 있다. 이러한 압력강하는 밀도를 감소시키게 되며, 질량보존 법칙에 의해 유동의 가속을 가져온다. 따라서, 출구쪽으로 갈수록 벽면에서의 전단응력이 증가하며 이에 따라 압력구배도 더욱 커지게 된다. Fig. 2 는 채널 내부의 유선방향 속도를 도시한 것으로 DSMC 기법을 사용한 연구결과(6,9)에서 나타나는 통계적 교란(statistical fluctuation)의 영향은 나타나지 않는다. 출구에 가까워질수록 압력이 감소하고 이에 따라 벽면에서의 희박도(rarefaction)가 커지게 되어 미끄럼속도가 증가됨을 보여주고 있다. 두 번째로 헬륨에 대하여 출구 Kn 수가 0.165 일 경우에 대해 계산을 수행하였다. 출구와 입구의 압력비에 따른 정규화 유량(normalized mass flow rate)의 변화를 기존의 실험, 해석결과와 비교하였다. Fig. 3 에서, 본 연구에서 계산한 결과가 해석해와 Arkilic 등(2)의 실험결과와 비교적 잘 일치함을 볼 수 있다. Beskok 등(5)이 제안한 고차 경계조건은 압력비가 높을수록 실험결과와 일치하나, 일차의 Maxwell 경계조건을 사용한 경우에 압력비가 낮은 부분에서 더 잘 일치함을 볼 수 있다. 이상에서 Maxwell 미끄럼 경계조건을 사용한 본 수치기법이 기존의 연구결과와 잘 일치함을 알 수 있었다.

다음으로 본 연구에서 새롭게 적용한 Langmuir 경계조건을 이용하여 Kn 수가 0.06 이고 입구와 출구의 압력비가 2.5 인 헬륨 유동에 대해 계산을 수행하였다. 채널의 높이(H)는 1.12μm, 길이(L)는 30μm 이며 18000 개의 벽면으로 당겨진 사각격자를 구성하였다. 먼저, 해석해는 Myong(11)이 Arkilic 등과 동일한 방법으로 Langmuir 미끄럼 조건인 식 (3)을 적용하여 구하였다. 이에 따르면, 속도분포는 다음과 같이 주어진다.

$$u(x, y) = -\frac{3}{\delta} \left[\frac{dp}{dx} (1 - 4(y - 0.5)^2) + \frac{1+b}{b(1+bp)} \left(\frac{dp}{dx} \right)_{x=L} \right] \quad (7)$$

여기에서, $\delta = 24 \frac{\gamma M^2 L}{\text{Re} H}$ 이며 Re 는 Reynolds 수, M 은 Mach 수이다. 또한, 압력분포는

$$1 - \frac{x}{L} = \frac{f(p) - f(p_L)}{f(p_i) - f(p_L)} \quad (8)$$

여기에서 $f(p)$ 는 압력에 대한 함수로 다음과 같이 표현된다.

$$f(p) = \frac{ap}{b^2} + \frac{p^2}{2} - \frac{a}{b^2} \left[\frac{1}{b} - \frac{a}{b^2} \right] \times \ln(b^2 p + b - a) \quad (9)$$

본 연구에서 수치계산을 통하여 구한 유선방향 속도분포와 압력을 식 (7)과 (8)로 표현되는 해석해와 비교하여 정확도를 검토하였다. 먼저 출구의 채널중심에서의 유선 방향 속도와 벽면의 미끄럼 속도를 Maxwell 조건과 Langmuir 조건에 대해서 해석해와의 상대오차를 계산하였다. Maxwell 미끄럼 조건의 경우, 벽면에서 1.40%, 채널 중심에서는 0.52%의 오차를 보였으며, Langmuir 조건의 경우 벽면에서 0.11%, 채널 중심에서는 0.11%의 오차를 얻었다. 따라서, 두 경계 조건 모두 해석해와 잘 일치함을 볼 수 있다. Fig. 4는 본 연구에서 계산한 유선방향 속도분포를 도시한 것이다. 질량보존 법칙을 만족시키기 위하여 채널 방향의 압력감소로 인한 밀도의 감소가 속도의 증가를 가져옴을 볼 수 있다. 따라서, 압축성 효과에 의한 유동의 가속(acceleration)을 볼 수 있으며, 희박도 효과에 의한 벽면의 미끄럼 현상도 예측됨을 볼 수 있다.

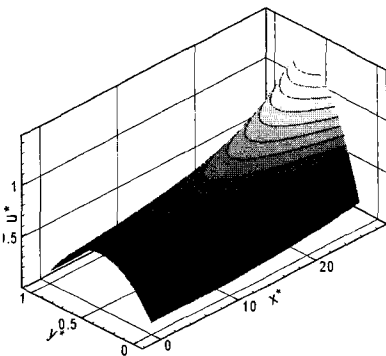
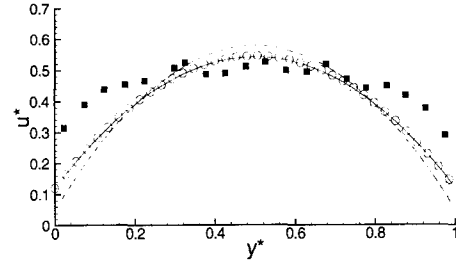
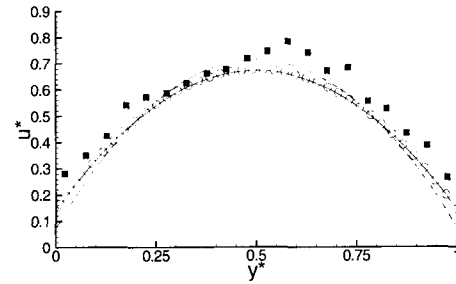


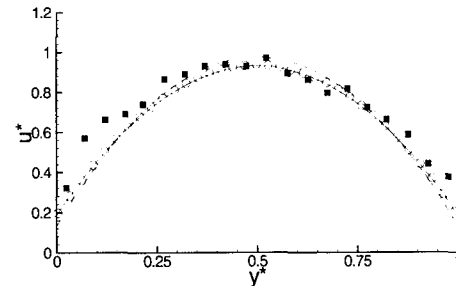
Fig. 4 Computed streamwise velocity distribution (Kn=0.06)



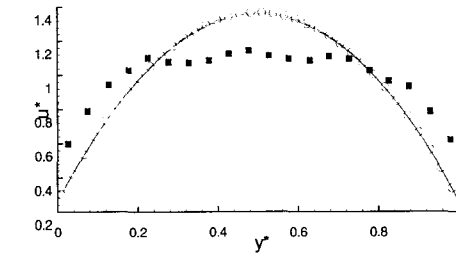
(a) At inlet, $x^* = 0$.



(b) $x^* = 10$.



(c) $x^* = 20$.



(d) Near outlet, $x^* = 26.7$.

Fig. 5 Comparison of predicted and analytical velocity distributions at different cross sections of the microchannel (solid line : Analytic sol., dashed line : Maxwell slip condition, square symbol : DSMC results, circle symbol : Langmuir slip condition)

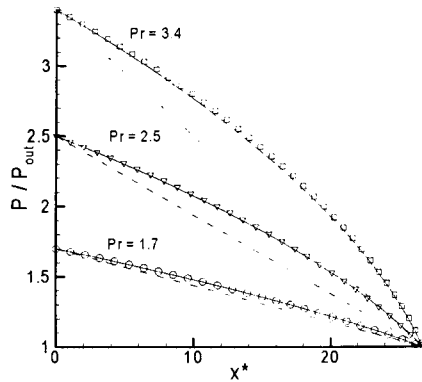


Fig. 6 Computed and analytical pressure distribution along the channel center (solid line : analytic, dashed line : linear, symbols : calculation)

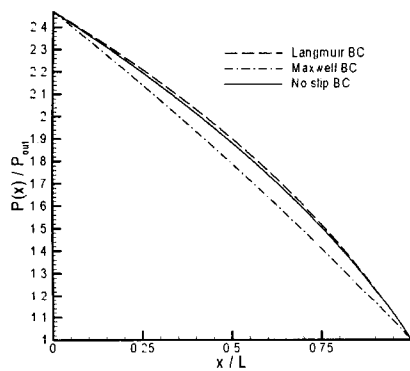


Fig. 7 Comparison of pressure distributions for noslip and slip boundary conditions(Kn=0.4)

미소채널의 각 단면의 유선방향 속도 분포를 Fig. 5에 도시하였다. 식 (7)에 의한 해석해 결과와 Xue 등⁽⁹⁾의 DSMC 결과, 그리고, Maxwell 미끄럼조건을 사용한 결과와 비교하였다. 각 단면의 유선방향속도는 Myong⁽¹¹⁾의 해석해와 정확히 일치함을 볼 수 있다. DSMC 결과는 입구와 출구 부분에서 상당한 차이를 보이는 데 이는 Xue 등의 계산에서 완전발달유동(fully developed flow)의 가정 없이 입구에서 일정한 상태량(uniform properties)를 이용하여 속도분포를 구하였기 때문이다.⁽⁹⁾ 또한, 각 단면에서 통계적 오차(statistical error)가 명백히 나타남을 볼 수 있으며 저속 미소유동에 DSMC 기법을 적용할 경우 피할 수 없게 된다. Maxwell 미끄럼 조건을 이용한 결과는 Langmuir 미끄럼 조건에 의한 결과와 잘 일치하나 입구쪽으로 갈수록 벽면의 미끄럼 속도가 좀 더 작게 예측됨을 볼 수 있다.

다음으로 입구와 출구의 압력비가 3.4, 2.5, 그리고 1.7 일때의 채널 중심을 따르는 압력분포를 Fig. 6에 도시하였다. 본 연구의 계산결과가 식 (8)에

의한 해석해의 결과와 잘 일치함을 볼 수 있다. 압력비가 작아질수록 압력의 비선형성이 더 감소하며, 압력비가 1.7 보다 작아질수록 비압축성유동과 유사한 선형에 가까운 압력분포를 갖게 된다. 이것은 Pong 등⁽³⁾의 실험결과와 동일한 경향을 보인다.

끝으로 Kn 수가 0.4 일 때의 압력분포를 고착경계조건과 Maxwell 경계조건을 사용한 결과와 비교하였다. Fig. 7에 보인 바와 같이 Langmuir 미끄럼 조건을 적용할 경우, 고착경계조건에 비해 압력의 비선형성이 증가하며, Maxwell 미끄럼조건인 경우 더 감소하게 된다. Pong 등의 실험결과(Ref. 3, Fig. 9)에 의하면, Kn 수가 증가할수록 압력의 비선형성이 증가하며 이것은 본 연구에 도입한 Langmuir 미끄럼조건과 일치한다.

5. 결론

본 연구에서는 Maxwell 미끄럼 조건과 더불어 Langmuir 미끄럼 조건을 수치기법에 새롭게 적용하였으며, 이를 이용하여 미소채널 내부의 미끄럼 유동을 해석하였다.

본 연구에서 Navier-Stokes 수치기법에 미끄럼 조건을 부과한 방법은 DSMC 기법을 저속유동이 적용할 경우에 나타나는 통계 오차(statistical error)를 피할 수 있었다. 또한, Langmuir 미끄럼 조건을 적용한 경우에 Maxwell 미끄럼 조건의 적용시 필요한 속도 구배의 계산 없이 벽면의 미끄럼 현상을 적절히 예측할 수 있었다.

Langmuir 미끄럼조건을 적용한 해석결과에서, 유선방향 속도분포와 압력의 비선형성이 해석해와 정확히 일치하였으며 Maxwell 미끄럼 조건과 유사한 경향을 보였다. 한편, 전반적으로 높은 Kn 수에서 Maxwell 미끄럼 조건은 압력의 비선형성이 감소하나 Langmuir 미끄럼 조건은 압력의 비선형성이 증가하는 경향을 보인다.

후 기

이 논문은 2001년 한양대학교 교내연구비 지원으로 연구되었습니다. 또한 본 연구를 수행하는데 아낌없는 조언을 해주신 경상대학교 명노신 교수님께 깊이 감사 드립니다.

참고문헌

(1) Gad-el-Hak, M., 1999, "The Fluid Mechanics of

- Microdevices – The Freeman Scholar Lecture,” *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 121, pp. 5~33.
- (2) Arkilic, E. B., Breuer, K. S., and Schmidt, M. A., 1994, “Gaseous Flow in Microchannels,” *ASME, FED-Vol. 197, Application of Microfabrication to Fluid Mechanics*, pp. 57~66.
- (3) Pong, K. C., Ho, C. M., Liu, J., and Tai, Y. C., 1994, “Non-linear Pressure Distribution in Uniform Microchannels,” *App. Of Microfabrication to Fluid Mechanics, ASME Winter Annu. Meet.*, pp. 51~56.
- (4) Harley, J. C., Huang, Y., Bau, H. H., and Zemel, J. N., 1995, “Gas flow in micro-channels,” *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 284, pp. 257~274.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) Arkilic, E. B., 1997, “Measurement of the Mass Flow and Tangential Momentum Accommodation Coefficient in Silicon Micromachined Channels,” *Ph.D. Dissertation, MIT, Cambridge*.
- (8) 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.
- (9) Xue, H., Fan, Q., and Shu, C., 2000, “Prediction of Micro-Channel Flows Using Direct Simulation Monte Carlo,” *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol. 15, pp. 213~219.
- (10) 명노신, 2000, “열역학 층속 비평형 유체역학 모델을 이용한 희박기체 및 MEMS 유동장 해석,” *한국항공우주학회지 제 28 권 4 호*, pp. 35~47.
- (11) Myong, R. S., 2001, “Velocity-Slip Effect in Low-Speed Microscale Gas Flows,” *AIAA 2001-3076, 35th AIAA Thermophysics Conference*, Anaheim, CA.
- (12) Myong, R. S., 1999, “Thermodynamically Consistent Hydrodynamic Computational Models for High-Knudsen-Number Gas Flows,” *Phys. Fluids*, Vol. 11, No. 9, pp.2788~2802.
- (13) Adamson, A. W. and Gast, A. P., 1997, *Physical Chemistry of Surfaces*, 6th ed., John Wiley & Sons, Inc.
- (14) Anderson, W. K., and Bonhaus, D. L., 1994, “An Implicit Upwind Algorithm for Computing Turbulent Flows on Unstructured Grids,” *Computers Fluids*, Vol. 23, No. 1, pp. 1~21.
- (15) Demirdzic, I. and Muzaferija, 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.
- (16) 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.
- (17) Lee, D., 1996, “Local Preconditioning of the Euler and Navier-Stokes Equations,” *Ph.D. Dissertation, University of Michigan*.
- (18) Davidson, L., 1996, “A Pressure Correction Method for Unstructured Meshes with Arbitrary Control Volumes,” *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, Vol. 22, pp.265~281.
- (19) Gombosi, T., I., 1994, *Gaskinetic Theory*, Cambridge University Press, New York.
- (20) Demirdzic, I., Lilek, Z. and Peric, M., 1993, “A Collocated Finite Volume Method for Predicting Flows at All Speeds,” *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, Vol. 16, pp.1029~1050.
- (21) Rincon, J. and Elder, R., 1997, “A High-Resolution Pressure-based Method for Compressible Flows,” *Comput. Fluids*, Vol. 26, No. 3, pp.217~231.