

## DSMC(Direct Simulation Monte Carlo)방법을 이용한 마이크로관 내에서의 2 상유동에 관한 연구

이진호<sup>†</sup> · 유동훈\* · 이태홍\*\*

(2003 년 3 월 22 일 접수, 2003 년 10 월 20 일 심사완료)

### The Study on the Two-Phase Flow in the Microchannel Using DSMC(Direct Simulation Monte Carlo) Method

Jinho Lee, Donghun Ryu and Taehong Lee

**Key Words :** DSMC(몬테카를로 직접모사), 2-Phase(2 상), Evaporation(증발), Condensation(응축)

#### Abstract

In contrast to the high demand for MEMS devices, microflow analysis is not feasible even for single-phase flow with conventional Navier-Stokes equation because of non-continuum effect when characteristic dimension is comparable with local mean free path. DSMC is one of particle based DNS(Direct Numerical Simulation) methods that uses no continuum assumption. In this paper, gas flow in microchannel is studied using DSMC. Interfacial shear and flow characteristics are observed and compared with the results of gas flow that is in contact with liquid case and solid wall case. The simulation is limited to the case of equilibrium steady state and evaporation/condensation coefficient is assumed to be the same and unity. System temperature remains constant and the interfacial shear appears to be small compared to the result with solid wall. This is because particles evaporated and reflected from the liquid surface form high density layer near the interface with liquid flow.

기호설명	
c	: 상대속력 또는 분자의 속도
d	: 분자 직경
P	: 압력
T	: 온도
n	: 숫자밀도
F	: 대표입자의 실제분자 대표수
f	: 속도 분포 함수
k	: 볼츠만 상수
U	: 거시 속도
m	: 분자의 질량
E	: 분자의 에너지

---

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학과  
E-mail : jinholee@yonsei.ac.kr  
TEL : (02)2123-2816 FAX : (02)312-2159  
\* 회원, 연세대학교 부설 자동차기술연구소  
\*\* 회원, 연세대학교 기계공학과 열공학연구소

그리스문자	
$\mu$	: 점성계수
$\rho$	: 밀도
$\lambda$	: mean free path
$\sigma$	: 응축/증발 계수
$\sigma_T$	: 충돌 단면적
$\tau$	: 전단응력
$\Gamma$	: 감마함수

하첨자	
g	: 기상
l	: 액상
c	: 응축
e	: 증발
r	: 반사
i	: 유입
o	: 유출
x,y,z	: 좌표

## 1. 서론

반도체의 고집적화와 마이크로 프로세서의 성능 향상에 따른 소비전력 증대와 발열 문제를 해결하기 위해 초소형·고효율 냉각기술이 연구되고 있다. 이에 기존의 공냉식 열교환이 가진 성능의 한계와 소음, 그리고 안정성 등의 문제를 향상시키기 위해 상변화시의 잠열을 이용하는 열교환기의 연구가 이루어지고 있으나, 이러한 미소기기에서 일어나는 열유동현상에 대한 이해는 아직 정립되어 있지 않아 제품을 제작하기 전에 많은 시제품의 제작과 실험을 통한 설계가 필요하다. 기존의 Navier-Stokes 방정식은 연속체 가정에 기반하고 있어 마이크로 기기에서의 열유동을 예측하기에는 부적합하다는 의견이 많다. 이는 기기의 소형화로 인하여 물질치의 구배가 나타나는 특성길이가 분자의 자유경로에 비하여 충분히 크지 않게 되면서 기존의 연속체 가정이 깨어지는 상황이 발생하기 때문이다. 직경이 수  $\mu\text{m}$  에 불과한 마이크로관내에 센서를 장착하여 측정을 해야 하는 실험의 어려움 때문에 여러가지 수치해석 연구가 이루어지고 있다. 기존의 연속체 가정에 기반한 방정식을 이용하지 않고 입자들의 운동역학을 고려하여 유동을 모사하는 대표적인 방법으로 몬테카를로 직접모사(Direct Simulation Monte Carlo; 이하 DSMC) 방법이 있다. DSMC 방법은 초소형 기기에서 자유경로와 특성길이의 비인 Knudsen 수(이하 Kn)가 큰 경우에 응용될 수 있으며 천이영역에 해당하는 기기 내의 유동해석을 위해 주로 사용하고 있다. Mavriplis 등<sup>(2)</sup>이 연속체 영역과 천이영역에 걸쳐 짧은 마이크로관의 열유동 해석에 DSMC 방법을 사용하여 Kn 수가 slip-flow 영역보다 큰 경우에는 해석결과가 기존의 N-S 방정식을 이용한 예측결과와 다르다고 보고하였다. Piekos 등<sup>(3)</sup>은 마이크로관과 초음속 마이크로 노즐의 해석에 비정렬격자를 이용하여 slip-flow 영역과 천이영역에서의 유동을 해석했다. Wu 등<sup>(4)</sup>은 독자적인 경계조건을 이용하여 마이크로 노즐, 에어 베어링등의 다양한 마이크로 기기에서의 유동을 해석하였다. 마이크로관에서의 2 상유동에 대한 실험적인 연구는 Stanley 등<sup>(5)</sup>이 수력직경이 56  $\mu\text{m}$  에서 256  $\mu\text{m}$  인 사각 알루미늄 마이크로관을 이용하여 실험을 행하였고 결과는 압력강하가 기존의 2 상유동에 대한 준실험식으로 예측된 값보다 작게 나타났다. Peng 등<sup>(6)</sup>은 마이크로관에서의 증발현상을 관찰했으며 기포의 발생이 나타나지 않는 것에 대하여 마이크로관의 직경이 작으면 이로 인한 수력학적

힘이 커져서 높은 열유속에서도 기포가 발생하지 않는다고 이론적으로 해석하였다. 분자동력학을 이용하여 액체와 기체간의 상변화를 해석하는 연구로서 Tsuruta 등<sup>(7)</sup>이 Ar 분자에 대하여 MD 를 이용한 상변화 연구를 행하였다. 해석영역은 수십 nm 로 입자가 고체상에 충돌할 때 가지고 있는 충돌면에 수직인 성분의 에너지량이 응축과 증발에 연관이 있다는 결과를 보였다. Tsuruta 등<sup>(8)</sup>은 MD 를 이용한 연구결과를 응용하여 상변화 경계면에서 입자들이 응축과 증발을 행하는 비정상상태에서의 물질전달을 DSMC 방법을 사용하여 1 차원으로 해석하여 비정상상태에서의 입자들의 응축계수와 증발계수의 상관관계식을 구하였다.

본 연구자들은 입자직접모사로 마이크로관에서의 2 상유동을 시뮬레이트하여 유동장과 압력강하를 구하는 연구를 하였다. 본 논문에서는 기초연구단계로 먼저 기본적인 형상에 대하여 정상상태 유동에 상변화면과 접한 경계조건과 벽면과 접한 경계조건을 적용하여 마이크로채널에서의 단상유동과 2 상유동의 결과를 제시하고 정성적으로 고찰해 보았다. 곧 Argon 의 기상과 액상이 층을 이루어 진행하는 유동을 대상으로 기체측이 고체벽면과 접하여 진행하는 경우와 상변화를 일으키는 액상과 접하여 진행하는 경우를 속도, 밀도, 압력, 전단력장을 구하여 비교하였다.

## 2. 연구내용 및 방법

### 2.1 DSMC 방법의 개요

Navier-Stokes 방정식은 통상적으로  $Kn < 0.01$  인 범위에서 연속체 가정이 성립한다는 조건하에 사용되며  $0.01 < Kn < 0.1$  정도의 영역은 기존의 방정식에 slip-flow 경계조건을 적용하면 해석할 수 있는 것으로 알려져 있다. 그러나  $0.1 < Kn < 3$  인 영역은 transition regime 으로 불리며 더 이상 기존의 방정식을 적용하여 해석하는 것이 어렵다. 이를 대체할 수 있는 이론적인 방정식은 Boltzmann 방정식이지만 이론적으로나 수치적으로나 해석이 곤란하며 따라서 분자의 운동역학을 모사하여 유동을 해석하는 직접모사방법(Direct Numerical Simulation)을 이용한다. DSMC 는 기체 운동론과 마찬가지로 회박기체라는 가정하에 이루어지며 따라서 분자의 이동시 분자간력의 영향을 고려하지 않는다. 또한 입자들간의 거리가 상대적으로 멀기 때문에 입자들의 속도 좌표계에서의 분포가 다른 기체입자들의 분포와 독립되어 있으며 단일분포로 나타낼 수 있다는 가정

(molecular chaos)이 성립하게 된다. 이러한 가정을 바탕으로 Boltzmann 방정식의 단일분포함수 정상상태해를 구하면 Maxwell 분포함수를 얻게 된다. 이것을 입자들의 평형속도분포로 가정하여 초기 속도 상태를 정하고 시뮬레이션을 하게 된다. 입자들은 실제 존재하는 분자의 수가 너무 크기 때문에 많은 수의 실제 분자들을 대표하는 대표입자를 이용하여 시뮬레이션한다. DSMC 방법은 크게 이동, 충돌, 샘플링의 3 단계로 나누어진다. 초기에 셀들에 입자들을 임의로 배치하고 속도분포를 준 후에 입자들은 이동을 하게 된다. 이 때 입자들은 서로간의 충돌을 고려하지 않고 이동을 하게 되며 따라서 한 timestep 의 크기는 평균충돌시간보다 작게 설정해야 한다. 그 후 입자들의 충돌을 모사하며 이러한 방법으로 시간의 경과에 따른 입자들의 이동과 충돌을 모사하다가 일정한 간격으로 유동장의 거시적 물성치를 샘플링한다. DSMC 방법에 대한 자세한 설명은 처음 이 방법을 제시한 G. A. Bird 의 저서<sup>(1)</sup>에서 찾을 수 있다.

2.2 해석모델

본 연구에서는 입자들의 모사를 통해서 상변화 경계면에서의 작용이 유동에 미치는 효과를 고려하기 위하여 Fig. 1 과 같은 시스템을 해석한다.

전체 시스템은 직사각형 단면의 마이크로관으로 왼쪽 경계를 유입면, 오른쪽 경계를 유출면으로 하여 압력비를 주어 유동이 발생하도록 한다. 윗면은 벽과의 경계면이며 아랫면은 벽인 경우와 액체면과의 경계로 응축과 증발이 일어나는 경우로 나누어 해석하였다. 마이크로관에서의 2 상유동은 annular flow 의 형태로 나타나는 것으로 알려져 있으며 DSMC 방법은 액체상에 대한 직접해석에 부적합하기 때문에 기상과 액상이 나뉘어 진행되는 정상상태의 annular flow 의 기상인 부분에 대하여 해석을 행하며 셀의 구조는 Fig. 2 와 같다.

셀의 개수는 30x30 이며 이는 계산에는 사용되지 않고 물성치의 추출과 출력에만 이용된다. 셀의 각 면에는 경계조건이 주어져서 입자들이 이동 단계에서 셀의 경계에 도달하면 경계조건에 따라 반응한다. 해석영역은 20μm(L) × 5μm(H) × 1m(W)로서 2 차원 해석이기 때문에 z 방향으로의 길이는 단위 m 이며 길이가 수치해석부하의 문제로 인하여 짧게 주어졌다. 본 논문에서는 실제적인 형상에 대한 수치해석의 전초단계로 DSMC 방법의 적용을 시험하는데 목적을 두어 짧은 관에 대하여 해석하였다. 아랫면이 액체상과의 경계면으로 주어졌던 경우의 물질전달은 Fig. 3 과 같다.

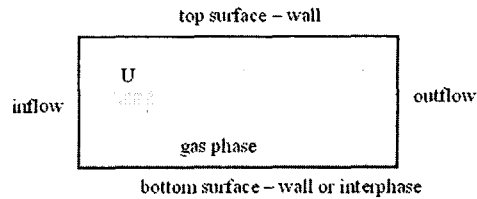


Fig. 1 Schematics of simulation domain

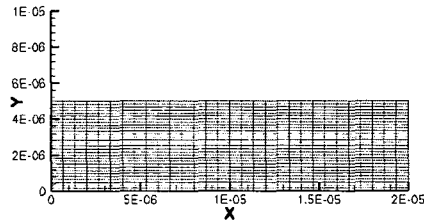


Fig. 2 cell structure of simulation domain

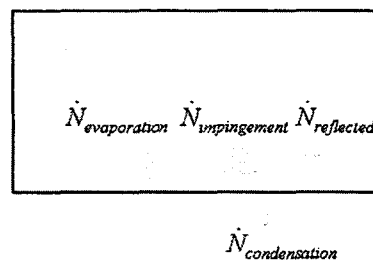


Fig. 3 Schematics of evaporation/condensation particle flux at interface

2.3 입자의 이동과 경계조건

이동 단계에서 입자들은 속도에 비례하여 움직이며 이때 각 입자들의 움직임은 독자적으로 이루어진다. 또한 입자들간의 충돌이나 중첩에 대한 것도 고려되지 않으며 따라서 시간단계의 크기는 평균충돌시간의 최대 1/3 이하로 설정되어야 한다. 입자들은 이동방향에 따라서 가장 가까운 경계까지의 거리를 계산하고 이를 비교하여 이동한 후에 경계에 도달한 입자는 경계조건에 따라서 처리되게 된다. 인접 셀이 같은 기체 영역인 경우에 입자들은 셀 위치를 바꾸고 상대위치를 계산하여 계속 진행하게 된다. 이러한 방법으로 입자들의 이동은 셀 단위로 실시간으로 반영되며 이러한 방법은 충돌모사 단계에서 셀을 설정하고 입자들의 색인을 하는 과정을 생략할 수 있으며 셀단위로 경계조건을 설정해 줄 수 있어 복잡한 형상을 쉽게 반영할 수 있는 장점이 있는 반면 입자들의 셀 위치를 할당하는 과정에서 이동의 계산부하가 약간 증가하는 단점이 있다. 벽에 도달한 입자는 반사되어 나오는데 반사된 입자는 충돌 전의 진행방향과 관계 없이 벽과 열적인 평형을 이루고 반사되

어 나온다는 확산 반사 모델이 사용된다. 유체의 입구와 출구에 도달한 입자는 시뮬레이션에서 제외된다. 매 시간단계마다 시스템의 양단에서의 압력을 유지시키기 위해 이를 계산하여 입자들이 유입된다. 압력경계조건을 실현하기 위해 유입되는 입자의 수는 반대편으로 유출된 입자의 수에서 압력비를 만족시키기 위한 필요입자수와 현재 존재하는 입자수의 차를 제한 것이 되며 나머지는 재유입되는 것으로 가정하여 반대편으로 유입되게 된다. 벽에 충돌한 입자는 벽의 온도와 평형을 이루어 평형상태에서의 속도분포에 맞도록 임의의 속도와 방향이 결정되어 반사되어 나온다. 액체의 경계면인 경우에 입자는 응축되거나 반사되며 평형상태를 유지하기 위해 응축된 입자수와 같은 수의 입자가 증발된다. Tsuruta 등<sup>(7)</sup>이 행한 입자의 충돌면에 수직인 속도성분이 응축계수에 미치는 영향에 대한 MD 시뮬레이션의 결과로부터 입자의 운동에너지와 응축계수와의 관계식은 다음과 같다.

$$\alpha_c = \alpha \left\{ 1 - \beta \exp\left(-\frac{E_{normal,z}}{kT_c}\right) \right\} \quad (1)$$

여기서  $\alpha$ ,  $\beta$ 는 온도에 따라 주어지는 상수이며  $E_{normal}$ 은 입자의 충돌면에 수직인 속도성분으로 계산한 운동에너지이며  $k$ 는 Boltzmann 상수,  $T_c$ 는 응축온도,  $\alpha_c$ 는 응축계수이다. 이러한 결과를 이용하여 입자의 응축확률은 충돌하는 입자의 수직속도성분에 따라 변화하며 이러한 확률에 따라 입자들의 응축과 반사가 결정되게 된다. 증발하는 입자의 평행속도성분은 액체상의 속도를 가지고 유입되며 이는 질량유량의 평형으로부터 기체상 속도에 비하여 매우 작은 속도가 된다. 충돌면에 수직인 속도성분은 Tsuruta 등의 연구에 따라 평형상태의 Maxwellian 속도 분포로부터 약간씩 어긋난 아래와 같은 분포함수를 갖는다.

$$f_{z,e} = \frac{1 - \beta \exp(-mV_z^2/2kT_c)}{1 - \beta/2} \left(\frac{m}{kT_c}\right) V_z \exp\left(-\frac{mV_z^2}{2kT_c}\right) \quad (2)$$

$$f_{z,r} = \frac{1 - \alpha + \alpha\beta \exp(-mV_z^2/2kT_c)}{1 - \alpha + \alpha\beta/2} \left(\frac{m}{kT_c}\right) V_z \exp\left(-\frac{mV_z^2}{2kT_c}\right) \quad (3)$$

따라서 반사되는 입자와 충돌하는 입자의 속도성분은 위의 식에 준하여 주어지도록 한다.

2.4 입자의 충돌

DSMC 방법은 확률론적인 개념을 도입한 수치 해석방법으로 분자동력학에서는 입자들간의 상호 충돌여부의 판정 계산수가 입자수의 제공에 비례하며 이동과정에서 입자간력을 고려하여 충돌 후 이동경로의 적분이 필요하기 때문에 많은 수의 입자를 사용하는 것이 어렵다. 그러나 DSMC 방법

서는 이러한 입자들에 대한 충돌여부판정을 개개의 셀내부에서 충돌가능한 최대충돌입자수를 계산해내고 이 개수만큼만 입자들을 무작위로 선정하여 그들간의 충돌가능성을 고려하기 때문에 계산 시간이 입자의 수에 선형적으로 비례하게 된다. 본 연구에서는 VSS 모델을 사용하여 충돌을 모사하였는데 VSS 모델은 충돌하는 두 입자의 상대속도에 따라 충돌단면적의 변화를 고려하여 점성계수와 확산계수를 정확하게 예측할 수 있도록 입자의 충돌 후 진행방향과 속도를 결정하는 충돌모델의 하나이다. 보다 자세한 수식과 설명은 참고문헌[1]에 제시되어 있다.

2.5 물성치 추출

입자들의 위치와 속도정보로부터 유동장의 거시적 물성치를 추출하는 과정은 다음과 같다.

밀도  $\rho = nm$  (4)

평균유속  $\mathbf{c}_0 = \bar{\mathbf{c}}$  (5)

압력  $p_{ij} = \rho \overline{c_i'c_j'}$  (6)

점성응력텐서  $\tau_{ij} = -(\rho \overline{c_i'c_j'} - \delta_{ij}p)$  (7)

병진동온도

$$\frac{3}{2}kT_r = \frac{1}{2}m(\overline{c^2} - c_0^2) = \frac{1}{2}m(\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2} - u_0^2 - v_0^2 - w_0^2) \quad (8)$$

열유속벡터  $\mathbf{q} = \frac{1}{2}\rho \overline{c'^2 \mathbf{c}} + n\overline{\epsilon_{int} \mathbf{c}'}$  (9)

위와 같은 식들을 이용하여 거시적인 유동장의 정보를 추출하는데, 이 때 분산오차의 크기는 사용되는 입자들의 수의 제곱근에 반비례하여 작아진다. 따라서 셀 내부의 입자수가 적은 셀은 이러한 오차가 크며 모사에 사용되는 입자들의 수는 계산부하에 직접적으로 연결되어 있다. 또한 입자들의 수가 늘어남에 따라서 이러한 오차는 계속 줄어드는 것이 아니고  $10^9$  이상이 되면 오히려 증가하는 경향을 보인 것으로 나타났다<sup>(9)</sup>. 따라서 시간평균이나 조화평균의 방법이 사용된다. 본 연구에서는 정상유동에 대한 해석을 행하고 있기 때문에 시간평균의 방법을 사용하였으며 2 차원 배열을 사용하고  $10^3$  단계의 시간평균을 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

해석영역은 바닥면이 고체인 경우와 액체와의 상변화경계면인 두 경우 모두 높이가  $5\mu\text{m}$ , 길이가  $20\mu\text{m}$ 인 마이크로 채널이다. 폭은 기준값인  $1\text{m}$ 이며 z 방향으로는 거시적인 유동구배는 무시되고 분자의 속도성분만 사용된다. 사용된 기체는 Argon 이며 기준온도 273K 에서의 값인 분자직경  $4.11 \times 10^{-10}\text{m}$ , 분자질량

$6.63 \times 10^{-26}$  kg 이 사용되었다. 실제분자의 대표분자수인  $F$  는  $2.5 \times 10^{11}$  이고 숫자밀도는  $7.10078 \times 10^{25}$  이며 이에 따라 모사 입자들이 초기에 28403 개가 분포되고 정상상태에서 분포하는 입자의 수는 단상의 경우 약 17400 개, 2 상의 경우는 21000 개가 사용되었다. 해석 영역은  $30 \times 30$  개의 셀로 나뉘어지며 시간단계는  $1 \times 10^{-9}$  초가 사용된다. 온도장은 Ar 의 응축온도인 80K 으로 일정하게 분포하는 것으로 가정한다. Fig. 4 부터 Fig. 7.은 바닥면의 경계조건이 고체벽인 경우에  $4 \times 10^{-5}$  s 동안 진행후 1000 개의 샘플에서 평균한 속도, 밀도, 압력, 전단력의 분포결과이다. 온도장은 기준온도 80K 에서 0.5K 이내로 변화하며 이는 전체유동장에 걸쳐 등온으로 가정한 것이 타당하다는 것을 보여주었으며 온도변화의 폭이 적고 구배가 없어 표시하지 않았다. Fig. 4 는 유동장의 속도분포로 결과로부터 마이크로관의 후류 부분에서 속도가 가속하는 것을 볼 수 있다. 이는 Fig. 5 의 밀도분포와 Fig. 6 의 압력분포를 보면 경계조건으로 압력비가 입구에서 높게 주어졌고 이에 따라 후방에서 밀도가 낮아지면서 희박해진 유동이 희박효과(Rarefaction effect)에 의해 가속한 것이라고 볼 수 있다. 본 연구에 사용한 압력의 비는  $P_i:P_o = 3:1$  이며 Fig. 6.의 압력장 결과로부터 입출구 압력경계조건이 만족되고 있으며 후방에서 압력감소가 약간 크게 일어나는 것을 알 수 있다. 이에 따른 속도의 증가는 12.5 m/s 정도까지 이루어졌는데 12.5 m/s 에 해당하는 Re 수는 4.64 이며 Piekos 등<sup>(3)</sup>의 연구결과와 비교하여 속도증가가 약간 크다. 이는 형상적으로 관의 길이가 너무 짧아서 출구에서 급속한 가속이 일어나는 것으로 생각되며 이후에 형상조건을 변화시켜 해석하면서 살펴보아야 할 것이다.

Fig. 7 은 전단응력장으로  $\tau_{xy}$  가 바닥에서는 양의 값이며 상부에서는 음의 값이 된다.  $\tau_{xy}$  는 샘플링 단계에서 속도성분들의 곱으로부터 산출되기 때문에 다른 물성치에 비해 오차가 크고 높이방향으로 존재하는 구배의 경향만을 확인할 수 있을뿐이다. 다음으로 아랫면이 증발과 응축이 일어나고 있는 액체경계면인 경우에 대하여 해석을 행하였다. 모든 수치해석조건은 앞의 경우와 같으며 아래쪽의 경계조건만 변화하게 된다. 액체경계면을 포함한 유동장의 온도는 80K 으로 가정되며 기존의 MD 해석결과로부터 응축계수는 1로 주어진다. Fig. 8 은 속도장 결과이며 Fig. 4 의 유동장보다 약간 저속이라는 것을 알 수 있다. 액체경계면에 충돌하는 입자들이 응축하며 같은 수의 입자들이 매우 느린 액체상의 속도를 가지고 증발하여 액체와의 경계영역부근에서는 밀도가 매우 높아 기체의 slip 속도 효과가 거의 없어지게 된다. 아랫면에서의 속도감소로 경계층이 두꺼워져 유동이 y 방향으로 약간 상승하는 형태로 나타난다. Fig. 9 은 밀도장이며 상변화하는 입자들 때문에 액체경계면 근처에 밀도가 높아지는 것을 볼 수 있다. Fig. 10 은

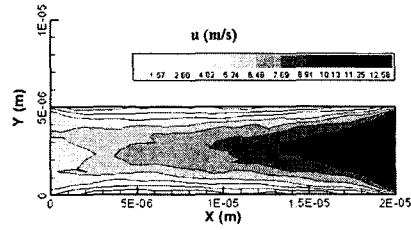


Fig. 4 Velocity distribution of flowfield,  $P_i:P_o=3:1$

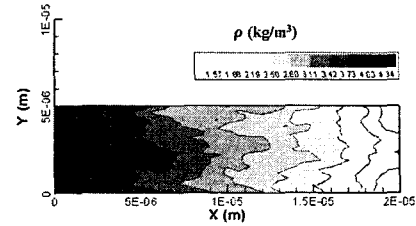


Fig. 5 Density distribution of flowfield,  $P_i:P_o=3:1$

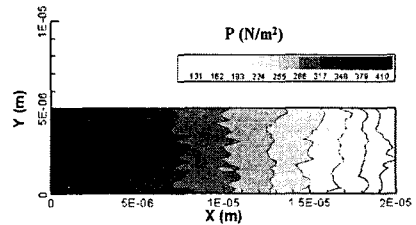


Fig. 6 Pressure distribution of flowfield,  $P_i:P_o=3:1$

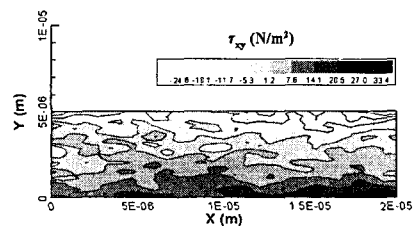


Fig. 7 Shear stress distribution of flowfield,  $P_i:P_o=3:1$

압력장으로 3:1 의 압력비는 단상유동의 결과와 비슷하지만 그 형태가 입출구근처에서 급하게 변화하는 형태로 바뀐 것을 알 수 있다. Fig. 11 은 전단응력장으로  $\tau_{xy}$  가 첫번째 경우보다 음의 방향으로 증가하였고 이는 전체적인 유동의 감소와 관련이 있다. 또한 출구 근처에서는 바닥면으로부터 양의 전단력장이 넓게 분포하고 속도장의 감소가 상부에서 크게 일어나 경계층이 성장한 것을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 같은 압력비의 경우에 2 상유동의 가속이 더 적으며 총 압력강하는 액상측 압력강하를 고려하면 더 커질 것이다.

실제적인 MEMS 응용기기에서는 중평비가 크고 관의 수력직경에 비해 매우 긴 관이 사용된다. 현

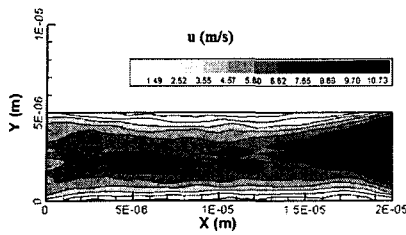


Fig. 8 Velocity distribution of flowfield,  $P_1:P_0=3:1$ , 2-phase

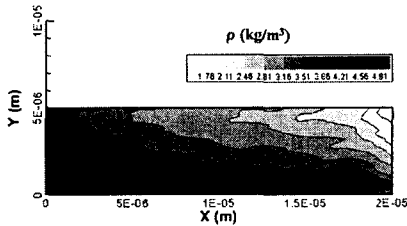


Fig. 9 Density distribution of flowfield,  $P_1:P_0=3:1$ , 2-phase

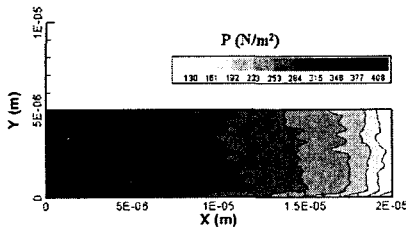


Fig. 10 Pressure distribution of flowfield,  $P_1:P_0=3:1$ , 2-phase

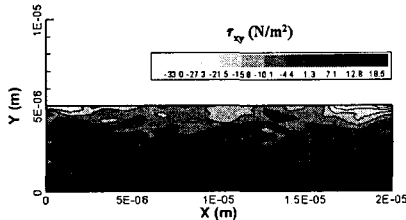


Fig. 11 Shear Stress distribution of flowfield,  $P_1:P_0=3:1$ , 2-phase

제의 연구결과는 길이가 매우 짧지만 DSMC 방법을 적용한 실제 MEMS 기기의 마이크로채널 2 상 유동해석에 적용하는 연구의 초기단계 결과로서 앞으로 실제적인 형상의 비정상상태유동의 해석까지 추후 연구를 진행시킬 예정이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 DSMC 방법을 이용하여 마이크로채널의 2 상유동에서 유동특성에 관하여 정성적으로 해석하였다. 하판은 고체벽인 경우와 상변화가 일어나는 유체와의 경계면인 경우로 경계조건

을 적용하였으며 양단 경계에서는 압력경계조건을 적용하였다. 두 경우 모두 온도는 일정하게 유지되며 압력과 밀도의 감소로 인한 희박효과로 하류에서 유동이 가속된다. 단상유동의 경우에 전단응력은 높이방향으로 일정하게 감소하며 2 상유동의 경우에는 바닥에서 유동의 감속이 커져 전체적인 전단응력이 음의 방향으로 이동하여 벽과 접촉하고 있던 경우보다 속도의 가속이 작게 나타나는 결과를 보였다

#### 후 기

이 논문은 2001 년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구 되었음 (KRF-2001-041-E00005)

#### 참고문헌

- (1) Bird, G. A., 1994, "Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows," Oxford University Press, New York.
- (2) Mavriplis, C., Ahn, J. C. and Goulard, R., 1997, "Heat Transfer and Flowfields in Short Microchannels Using Direct Simulation Monte Carlo," *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 11, No. 4, pp. 489-496.
- (3) Piekos, E. S. and Breuer, K. S., 1996, "Numerical Modeling of Micromechanical Devices Using the Direct Simulation Monte Carlo Method," *Transactions of the ASME*, Vol. 118, pp. 464-469.
- (4) Wu, J. -S. and Tseng, K.-C. 2001, "Analysis of micro-scale gas flows with pressure boundaries using direct simulation Monte Carlo method," *computers & fluids*, Vol. 30, pp. 711-735.
- (5) Stanley, R. S., Barron, R. F. and Ameel, T. A. 1997, "Two-phase Flow in Microchannels," *Microelectro mechanical Systems(MEMS)*, ASME DSC-Vol. 62, HTD-Vol. 354, pp. 143-152.
- (6) Peng, X. F. Hu, H. Y. and Wang, B. X., 1998, "Boiling Nucleation in Liquid Flow in Microchannels," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 41, No. 1, pp. 101-106.
- (7) Tsuruta, T. and Tanaka, H. and Masuoka, T. 1999, "Condensation/Evaporation Coefficient and Velocity Distributions at Liquid-Vapor Interface," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 42, pp. 4107-4116.
- (8) Tsuruta, T. and Nagayama, G. 2002, "DSMC Analysis of Interface Mass Transfer in Evaporation / Condensation Based on Molecular Dynamics Study," *Thermal Science and Engineering*, Vol. 10, No. 1, pp. 9-15.
- (9) Pan, L. S., Liu, G. R., Khoo, B. C. and Song, B. 2000, "A Modified Direct Simulation Monte Carlo Method for Low-Speed Microflows," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 10, pp. 21-27.