

# 열전이 현상을 이용한 마이크로 펌프내의 희박기체유동 해석

허중식\* · 이종철\*\* · 황영규\*\*\* · 김윤제\*\*\*

## Numerical Analysis on Thermal Transpiration Flows for a Micro Pump

Joong-Sik Heo\*, Jong-Chul Lee\*\*, Young-Kyu Hwang\*\*\*, Youn J. Kim\*\*\*

*Key Words* : Knudsen compressor(누센 압축기), Thermal transpiration(열전이), Rarefied gas(희박기체), Thermal creep flow(열크립 유동)

### ABSTRACT

Rarefied gas flows through two-dimensional micro channels are studied numerically for the performance optimization of a nanomembrane-based Knudsen compressor. The effects of the wall temperature distributions on the thermal transpiration flow patterns are examined. The flow has a pumping effect, and the mass flow rates through the channel are calculated. The results show that a steady one-way flow is induced for a wide range of the Knudsen number. The DSMC(direct simulation Monte Carlo) method with VHS(variable hard sphere) model and NTC(no time counter) techniques has been applied in this work to obtain numerical solutions. A critical element that drives Knudsen compressor is the thermal transpiration membrane. The membranes are based on aerogel or machined aerogel. The aerogel is modeled as a single micro flow channel.

### 1. 서론

일반적으로 유동상태가 연속체유동을 벗어나 미끄럼 유동 (slip flow), 전이유동 (transition flow), 자유분자유동 (free molecular flow)으로 갈수록 기체분자들 사이의 상호충돌에 의한 영향보다는 점점 더 기체분자들과 벽면과의 충돌에 의해 유동특성이 변하게 된다.

이러한 희박기체유동 (rarefied gas flow) 영역에서는

고체표면을 따라 온도구배가 형성된 경우에 벽면 근처의 기체에 대한 평균자유행정 거리의 누센층 (Knudsen layer)에서는 열크립 (thermal creep) 현상이 발생된다.

이것이 유체유동의 구동력으로 작용하여 결과적으로 한 방향으로의 유동이 발생된다. 이와 같은 열전이 (thermal transpiration) 현상은 고체표면을 따라 온도구배가 형성된 경우에 발생하는 유동현상이며, 이를 이용하면 마이크로 시스템에서의 진공 (또는 압력) 생성 및 제어를 가능하게 한다.

대량생산과 디바이스의 소형화 등 여러 측면의 이점 때문에 MEMS 기술은 많은 산업분야에 응용되고 있다. MEMS 기술은 분석시간이 매우 짧고 소형인 질량분석

\* 한국기체유화시험연구원 유체기계평가팀

\*\* 강릉대학교 기계자동차공학부

\*\*\* 성균관대학교 기계공학부

E-mail : jsheo@mpi.or.kr

기, 광분석기, 기체분석기 (gas chromatograph), 전자현미경 등에 요구되는 마이크로 스케일 단위의 분석용 센서의 제작을 가능하게 하였다. 이러한 마이크로 장치들은 각종 기체의 샘플을 채취하기 위해서 저진공 또는 고진공 상태를 필요로 하며, 기존의 진공펌프는 필요한 유량에 비해 크기가 과대하기 때문에 일반적인 펌프를 대신한 새로운 형태의 마이크로 진공펌프가 요구된다. 이러한 마이크로 진공펌프는 마이크로 밸브, 액추에이터, Lab-on-a-Chip 등에 필요한 진공이 아닌 높은 압력 (10 atm 이상)이 요구되는 경우에도 마이크로 센서 장치와 직접 연결되어 마이크로 압축기로서 활용된다<sup>(1)</sup>.

열천이 현상을 이용한 마이크로 진공펌프의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 두 개의 서로 다른 챔버를 작동 압력에서의 분자 평균자유경로 (mean free path) 보다 작은 채널 (수십 nm에서 수백  $\mu\text{m}$  범위)로 연결시키면 평형상태에서 마이크로 채널을 통해 유동이 발생되며, 식 (1)과 같이 두 챔버 사이에 압력차가 발생된다. 일반적인 유체유동에서는 압력이 높은 부분에서 낮은 부분으로 유동이 발생되지만 (유동방향으로 압력이 낮아짐) 열천이 현상을 이용한 마이크로 펌프의 경우에는 저온 표면에서 고온표면으로의 유동발생 현상에 의해 유동방향으로 압력이 점차적으로 높아지게 된다. 따라서 이것을 직렬로 서로 연결하여 수십 단으로 구성하게 되면 압력차는 더욱 커져 진공펌프로서의 역할을 하게 된다. 이러한 열천이 현상은 분자간의 충돌이 분자와 벽면과의 충돌보다 훨씬 많은 연속체 유동영역에서는 발생되지 않는다. 일반적으로 작동 가능한 압력범위는 약 10 mTorr에서 760 Torr이다.

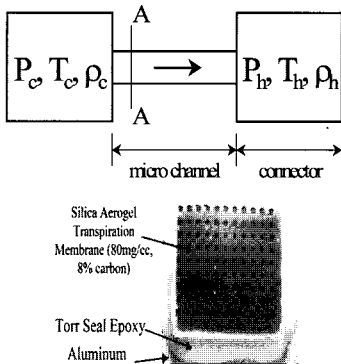


Fig. 1 Two chambers at different temperatures connected by a micro channel with a radius smaller than the mean free path of gas molecules

$$\Delta P = P_c \left( \left( \frac{T_h}{T_c} \right)^{1/2} - 1 \right) \quad (1)$$

1910년 Knudsen<sup>(2)</sup>에 의해 열천이 현상이 발견된 이래, 비교적 최근에 와서야 이에 대한 본격적인 연구가 진행되었다. Pham-Van-Diep<sup>(3)</sup>은 열천이 현상을 이용한 마이크로 진공펌프에 대한 개념적인 설계를 수행하여 이론적으로 압축비 100을 달성할 수 있음을 보여주었다. Young<sup>(4)</sup>은 MEMS 기술을 이용하여 수 백  $\mu\text{m}$  크기의 마이크로 칩 위에 진공펌프를 제작할 수 있는 기술에 대해 보여주었고, 이론적인 설계를 통해 3 Torr에서 152 Torr 압력까지 압축되고 유량이  $2 \times 10^{-3}$  sccm인 마이크로 진공펌프를 설계하였다. Vargo와 Muntz<sup>(5)</sup>는 DRIE (deep reactive ion etching) 공정을 통해 20  $\mu\text{m}$ 의 미세한 구멍이 가공된 실리콘 칩에 열전도도가 매우 낮은 에어로젤 막 (aerogel membrane)을 접합한 형태의 마이크로 진공펌프를 제작하였으며, 약 12 Torr 정도의 압력차를 발생시켰다.

지금까지의 기존 연구에서는 이론적인 해석시 마이크로 채널 (Fig. 1 참조)내의 유동은 1차원 자유분자유동, 연결부 (Fig. 1의 connector)에서는 연속체유동이라고 가정하여 진공펌프의 압축성능과 유량을 예측하였다. 그러나 다단 (multi-stage) 마이크로 진공펌프의 경우 유동상태에 따라 연속체유동, 미끄럼유동, 천이유동, 자유분자유동이 공존하게 된다. 따라서 아직까지 다단 펌프에 대한 정확한 성능예측 및 설계가 이루어지지 않았으며, 실험결과와도 큰 차이를 보여주고 있다. 기체의 희박도에 따른 마이크로 채널에서의 압축성능을 단순히 분자간 충돌을 무시한 자유분자유동에서 해석하는 것은 상당한 무리가 있으며, 열천이 현상 자체가 근본적으로 고체 표면과의 접촉에 의해 발생되기 때문에 마이크로 스케일 관점에서의 2차원 및 3차원 유동해석이 요구된다.

각종 기체에 대한 채널 내부에서의 희박기체유동에 대한 실험적, 이론적인 연구들은 광범위하게 이루어졌으며, 마이크로 채널에 대한 수치적, 해석적인 연구는 Sharipov와 Seleznev<sup>(6)</sup>에 의해 수행되었다. 그러나 등은 벽면이 아닌 유한한 길이를 갖는, 임의의 압력에 대한 온도변화가 존재하는 마이크로 채널에 대한 정량적인 연구는 아직까지 수행되지 않았으며, 특히 기체의 희박도를 나타내는 누센수 (Knudsen number, Kn)에 따른 열천이 유동해석과 이를 이용한 다단 마이크로 진공펌프에 대한 최적화된 연구도 지금까지 전혀 이루어지지

않았다.

본 연구에서는 마이크로 채널내의 열전이 유동을 DSMC (direct simulation Monte Carlo)법을 이용하여 해석하고자 한다. 우선 단단 (single-stage)에 대한 희박기체 유동해석을 먼저 수행하고자 하며, 향후 이를 이용하여 마이크로 다단펌프의 설계에 대한 기초자료로 활용하고자 한다. 이를 위해 채널내의 희박기체 유동장에 미치는 누셀수의 영향을 파악하고자 한다. 수백  $\mu\text{m}$  정도의 크기를 갖는 채널은 기계적으로 가공이 가능하지만 nm에서부터 수  $\mu\text{m}$  정도의 크기를 갖는 채널은 가공상 어려움이 있기 때문에 실험적으로는 에어로젤 (aerosol)을 많이 이용하고 있다. 따라서 수십 nm 크기를 갖는 다공성 물질인 에어로젤을 수치적으로 모델링 한다는 것은 매우 어렵기 때문에 본 논문에서는 균일한 직경을 갖는 직선형 단순 채널로 가정하여 수치해석을 수행하고자 한다.

## 2. 수치해석

### 2.1. 마이크로펌프

열전이 현상은 차가운 저온의 표면으로부터 고온의 표면으로 기체가 이동하는 현상이다. 고체 표면의 일부 분이 가열되면 이곳으로부터 반사되는 분자들은 저온의 표면으로부터 반사되는 분자들 보다 더 큰 운동량을 가지고 저온의 고체 표면과 충돌하게 되며, 결과적으로 고온의 표면 방향으로 더 큰 운동량 가지게 되어 열전이 현상이 발생하게 된다. 본 연구에서는 이러한 열전이 현상을 이용한 낮은 압력 (1 Torr에서 10 mTorr 까지)에서 작동하는 마이크로 펌프내의 압력, 온도, 속도 및 밀도 분포를 계산하였다. Fig. 2는 마이크로 펌프의 단순화된 모델을 나타낸 것이다. 그림에서 H는 마이크로 채널의 높이 (목 지름), L은 길이를 각각 나타낸다.

### 2.2. 수치해석방법

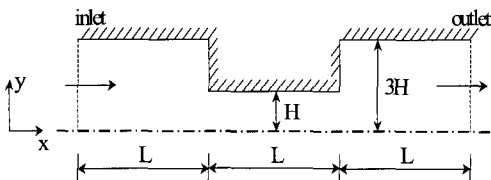


Fig. 2 Single stage Knudsen compressor

Table 1은 본 계산에서 사용한 유동조건을 보여주고 있다.

모든 유체유동영역에서의 지배방정식은 분자적 개념의 Boltzmann 방정식이며, 연속체 개념의 Navier-Stokes 방정식은 Chapman-Enskog 전개에 의해 Boltzmann 방정식으로부터 유도된다. Kn수가 0.01보다 커지게 되면 Navier-Stokes 방정식은 점차 그 타당성을 잃게 되고, 보다 고차의 항들이 추가된 Burnett 방정식으로 대체된다.

다음 식 (2)는 Boltzmann 방정식을 나타낸 것이다.

$$\frac{\partial(nf)}{\partial t} + c \cdot \frac{\partial(nf)}{\partial r} + \frac{F}{m} \cdot \frac{\partial(nf)}{\partial c} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{4\pi} n^2 (f^* f_1^* - f f_1) c_r \sigma d\Omega dc_1 \quad (2)$$

여기서  $f$ 는 속도분포함수 (velocity distribution function),  $n$ 은 수밀도 (number density),  $c$ 는 속도,  $F$ 는 외력 (external force),  $c_r$ 은 충돌분자간의 상대속도,  $m$ 은 분자의 질량,  $\sigma$ 는 충돌단면적 (collision cross-section),  $d\Omega$ 는 solid angle, 상첨자 \*는 충돌후의 상태를 각각 나타낸다.

Table 1 Flow conditions for micro-channel simulation

Geometry	$L=5 \mu\text{m}, H=1 \mu\text{m}$			
	Case-I	Case-II	Case-III	Case-IV
Inlet ( $P_i, T_i$ )	27 000 Pa 300 K	27 000 Pa 300 K	2 700 Pa 300 K	270 Pa 300 K
Outlet ( $P_o, T_o$ )	10 800 Pa 300 K	29 700 Pa 900 K	4 050 Pa 900 K	405 Pa 900 K
Pressure ratio	$P_o/P_i=0.4$	$P_o/P_i=1.1$	$P_o/P_i=1.5$	$P_o/P_i=1.5$
$Kn$	0.2	0.2	2.0	20
Wall temp., $T_w(x)$	isothermal 300 K		Linear distribution 	

식 (2)의 Boltzmann 방정식은 비선형의 적분·미분 방정식으로서 해석적인 해는 극히 단순한 문제에만 존재하며, 식 (2) 우변항의 적분형으로 표현된 충돌항을 적절히 묘사하기가 어렵고, 독립변수로서 속도  $c$ 가 추가 되기 때문에 직접적인 풀이가 아닌 분자들의 운동을 묘사하는 방법이 희박기체유동장 해석에 이용되기 시작하였다. 본 연구에서는 Bird<sup>(7)</sup>에 의해 개발된 DSMC법을 이용하여 해석하고자 한다.

### 2.3. 에너지교환 모델

이원자분자 이상의 경우에는 상온이라 할지라도 분자간의 충돌시 내부에너지의 변화를 고려해야 한다. Borgnakke-Larsen 현상학적 모델<sup>(8)</sup>은 충돌의 일부분은 비탄성충돌로 가정하고, 나머지는 모두 탄성충돌로 간주하는 것이다. 비탄성충돌에 의한 병진에너지와 내부에너지는 평형상태분포를 따르도록 샘플링하게 된다. 이러한 에너지의 재분배는 다음과 같은 과정을 거쳐 이루어진다.

분자간 충돌시 총에너지  $E_c$ 는 다음과 같다.

$$E_c = E_t + E_i \quad (3)$$

여기서  $E_t$ 는 병진에너지,  $E_i$ 는 내부에너지를 각각 나타낸다.

충돌전의 병진에너지와 총에너지의 비는 다음과 같은 정규확률로 주어진다.

$$f\left(\frac{E_t}{E_c}\right) = \left\{ \frac{\zeta + 1/2 - \omega}{3/2 - \omega} \left( \frac{E_t}{E_c} \right) \right\}^{3/2 - \omega} \times \left\{ \frac{\zeta + 1/2 - \omega}{\zeta - 1} \left( 1 - \frac{E_t}{E_c} \right) \right\}^{\zeta - 1} \quad (4)$$

여기서  $\zeta$ 는 분자의 내부자유도 (internal degrees of freedom)를 나타낸다.

분자 충돌후의 병진에너지  $E_t^*$ 는 0~1사이의 임의값으로 선택한다. 그리고 식 (4)로 계산된 값이 만일 난수 (random number)값보다 크면 임의적으로 선택된  $E_t^*$ 를 받아들이고, 그렇지 않으면 다시  $E_t^*$ 를 0~1사이의 임의값으로 선택하여 위의 과정을 반복하게 된다. 충돌후 내부에너지의 변화는 총에너지에서 병진에너지를 빼고 2개 분자에 대하여 동일하게 나누어지게 된다.

한편 위와 같은 과정을 통하여 선택된 충돌후의 병진

에너지  $E_t^*$ 를 이용하여 충돌후의 분자간 상대속도를 구하게 된다. 즉,

$$c_r^* = (2E_t^*/m_r)^{1/2} \quad (5)$$

이며,  $m_r$ 은 reduced mass  $(= (m_1+m_2)/m_1m_2)$ 를 나타낸다.

본 연구에서는 병진운동과 회전운동에 의한 에너지만을 고려하였으며, 평형상태에서 진동에너지를 무시하면 총 온도 (overall temperature)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T = (3T_{tr} + \zeta_{rot} T_{rot}) / (3 + \zeta_{rot}) \quad (6)$$

여기서  $T_{tr}$ 은 병진온도 (translational temperature),  $T_{rot}$ 은 회전온도 (rotational temperature),  $\zeta_{rot}$ 는 회전자유도 (number of rotational degrees of freedom)를 각각 나타낸다.

병진온도와 회전온도는 다음과 같다.

$$\frac{3}{2} k T_{tr} = \overline{mc^2} - mc_o^2 \quad (7)$$

$$T_{rot} = (2/k) (\overline{\epsilon_{rot}} / \zeta_{rot}) \quad (8)$$

여기서  $k$ 는 Boltzmann 상수,  $\overline{\epsilon_{rot}}$ 는 평균 회전에너지,  $c_o$ 는 평균속도 (stream velocity)를 각각 나타낸다.

질소인 경우  $\zeta_{rot}$ 이며,  $\epsilon_{rot}$ 는 난수를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\epsilon_{rot} = -\ln(R_f) k T \quad (9)$$

여기서  $R_f$ 는 난수로서 0과 1사이의 임의의 수를 의미한다.

분자와 벽면과의 충돌은 난반사 모델을 이용하였다. 입구와 출구 속도는 분자속 (number flux) 보존 이론을 이용하여 계산하였다. 계산격자는 사각형 셀을 이용하였고, 셀 크기 및 시간간격은 각각 평균자유경로와 평균 충돌시간의 1/10로 하였다.

### 3. 수치해석결과

Table 1에서 Case-I은 채널의 입구압력이 27,000 Pa, 출구압력이 10,800 Pa인 경우의 마이크로 채널 유동에 대한 것이다. 계산된 결과를 Fig. 3과 4에 나타내었다.

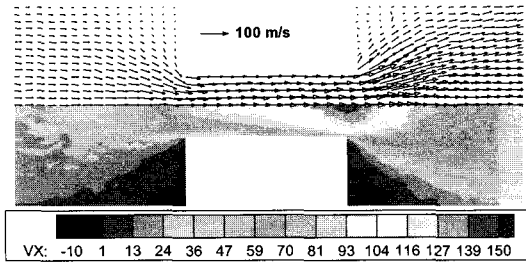


Fig. 3 Velocity vector (upper) and  $x$ -component velocity (lower) contours for Case-I

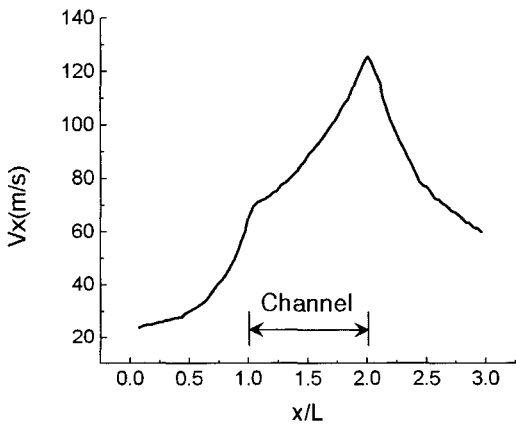


Fig. 4  $X$ -component velocity profile along the centerline of the channel for Case-I

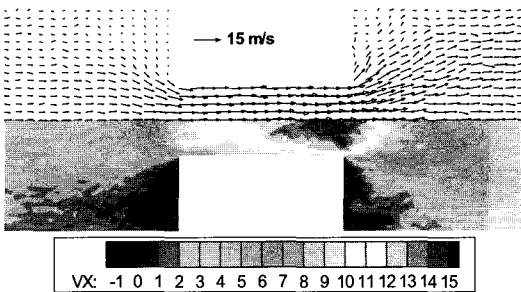


Fig. 5 Velocity vector (upper) and  $x$ -component velocity (lower) contours for Case-IV

Fig. 3은 채널내부의 속도 벡터와  $x$  방향의 등속도 분포를 보여주고 있다. 채널을 따라 속도가 점차적으로 증가함을 볼 수 있으며, 채널 출구에서 최대속도 (125 m/s)를 나타내고 있다. Fig. 4는 채널 중심선을 따른  $x$  방향 속도 분포를 나타낸 것이다.

Figure 5는 Case-IV인 경우에 대한 채널내부의 속도

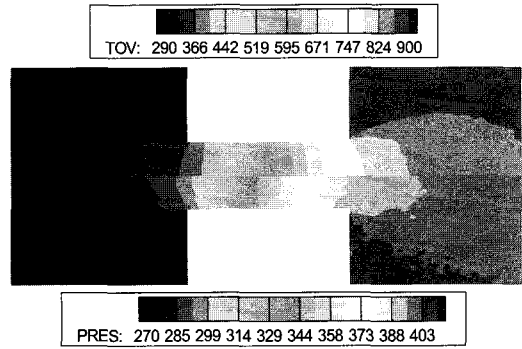


Fig. 6 Temperature (upper) and pressure (lower) field for Case-IV

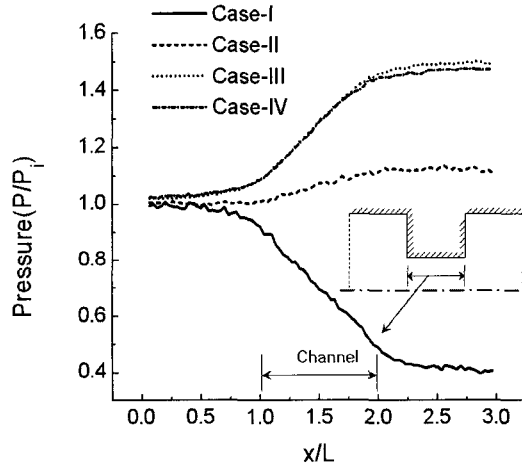


Fig. 7 Pressure distributions along the channel centerline for Case-IV

벡터와  $x$  방향의 등속도 분포를 보여주고 있다. 출구방향으로 진행하면서 속도가 점차적으로 증가되고 있음을 볼 수 있다.

Figure 6은 Case-IV인 경우에 대한 채널내부의 온도 및 압력 분포를 각각 나타낸 것이다. 채널 출구로 진행하면서 압력과 온도 모두 상승하고 있음을 알 수 있으며, 열전이 유동에 의해 압축기로서의 기능이 작동되고 있음을 확인할 수 있다.

Figures 7과 8은 Case-IV에 대해 채널 중심선을 따라 계산한 압력과 수밀도 변화를 나타낸 것이다. 각각 입구측 압력과 수밀도로 나눈 값을 나타내었다. 수밀도 분포에서는 벽면 근처에서의 수밀도를 동시에 비교하여 나타내었다. 채널중심선을 따라 압력이 상승하고 있음을 알 수 있다. Fig. 8은 채널의 중심선에서의 수밀도가

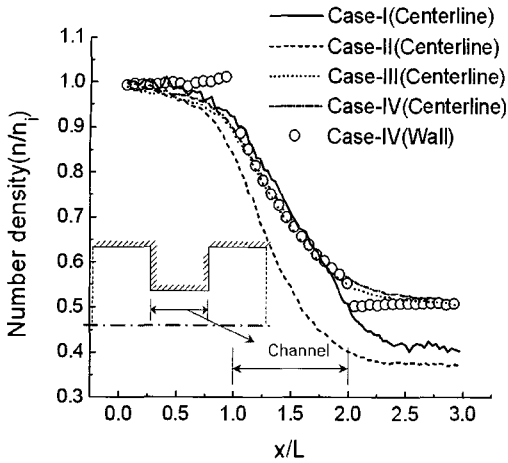


Fig. 8 Number density distributions along the channel center line and wall for Case-IV

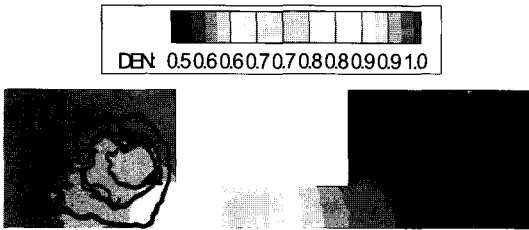


Fig. 9 Density contours and streamlines for Case-III

채널 입구에서는 벽면근처에서의 수밀도 보다는 작고, 채널 출구에서는 벽면근처에서의 수밀도 보다는 크다는 것을 보여주고 있으며, 마이크로 채널의 중심부에서는 벽면과 중심선에서의 수밀도에 차이를 보이지 않는다.

특히 마이크로 채널의 입구와 출구에서 상대적으로 큰 차이를 보여주고 있다. 이곳은 connector (Fig. 1 참조)의 모서리 부분이기 때문에 분자들의 유동이 상대적으로 정체되어 있어서 나타난 결과라고 판단된다. 한편 계산된 온도와 수밀도로부터 압력을 계산하였으며, 이를 Fig. 7에 나타내었다.

Figure 9는 Case-III인 경우에 대한 채널내부의 밀도 및 유선 분포를 각각 나타낸 것이다. 두 개의 챔버에서 시계방향으로의 큰 와류가 각각 형성되어 있음을 볼 수 있다.

열전이 유동에 대한 유동형태를 보다 정확히 파악하기 위해 입·출구의 온도차이를 700 K로 설정하여 해석하였으며, 초기 압력 100 mTorr,  $Kn=2.2$ 인 경우에 대한

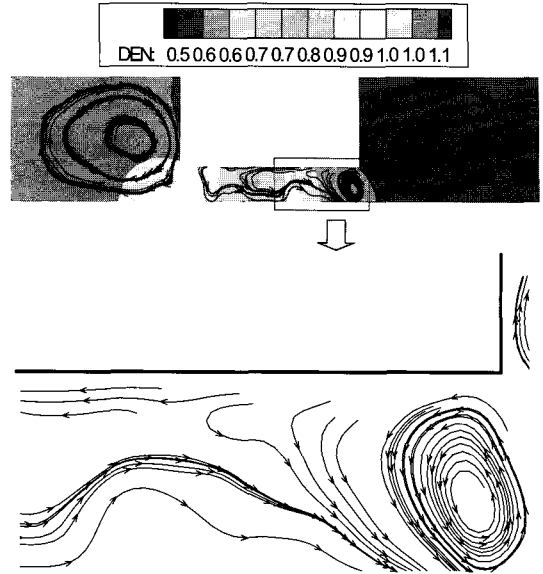


Fig. 10 Density contours and streamlines:  $T_i=300$  K,  $T_o=1000$  K,  $Kn=2.2$

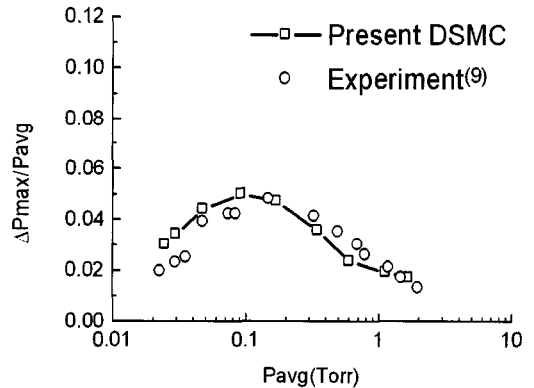


Fig. 11 Comparison of  $\Delta P_{max}/P_{avg}$

채널내부의 밀도 및 유선 분포를 각각 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 9에서와 같이 두 개의 챔버에서 시계방향으로의 큰 와류가 형성되어 있음을 볼 수 있으며, 이 경우 채널의 출구 부근에서도 작은 형태의 와류가 존재함을 볼 수 있다.

또한 두 챔버를 연결하는 마이크로 채널의 벽면에서는 압력차에 의한 역류현상이 일어나고 있으며, 채널의 중심부근에서는 열전이 유동의 결과로 인해 압력이 낮은 곳에서 높은 곳으로의 유동이 발생하고 있음을 확인할 수 있다.

Figure 11은 채널의 입·출구 압력차에 대해 기존의 실험결과<sup>(9)</sup>와 본 연구의 DSMC 해석결과를 상호 비교한 것이다. 여기서  $P_{avg}$ 는 채널내부에서의 평균압력,  $\Delta P$ 는 저온 및 고온 챔버간의 압력차를 각각 나타낸다. 압력이 0.1 Torr 이상에서는 수치해석 결과와 Han<sup>(9)</sup>의 실험결과가 약 5~9%의 오차를 보이며 작게 예측되었으나, 0.1 Torr 보다 낮은 압력에서는 최대 약 30%로 크게 예측되었다.

에어로젤은 대략 20 mW/mK의 낮은 열전도율을 지니며, 구멍 (pore)의 평균직경이 약 10 nm 정도이다. 이 물질을 마이크로 채널로 이용하면 대기압 근처의 높은 압력영역에서는 매우 효과적으로 작동이 된다. 그러나 본 연구에서와 같이 낮은 압력에서는 구멍의 직경이 이보다 훨씬 커야 되며, Han<sup>(9)</sup>은 에어로젤에 마이크로 드릴을 이용하여 직접 구멍을 가공하였다. Fig. 11의 실험 결과는 두께 1.5 mm의 에어로젤에 210  $\mu$ m의 구멍을 99개 가공하여 실험한 결과이며, 수치해석에서는 10 nm 크기의 다공성 에어로젤을 생략했기 때문에 실험결과와 차이를 보이는 것으로 예측된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 낮은 압력에서 작동하는 마이크로 펌프내의 압력, 온도, 속도 및 밀도 분포를 계산하였다.

열전이 유동에 대한 DSMC 수치해석 결과 채널 내부에서의 복잡한 유동형태를 파악할 수 있었으며, 기존의 실험결과와도 비교하였다. 실험결과와의 오차를 줄이기 위해서는 에어로젤을 이루고 있는 나노 크기의 pore에 대한 새로운 모델링이 요구되며, 향후 이를 이용한 다단 해석이 요구된다.

고온 및 저온의 두 챔버를 연결하는 마이크로 채널의 벽면에서는 압력차에 의한 역류가 발생되고, 채널의 중심부근에서는 열전이 유동의 결과로 인해 압력이 낮은 곳에서 높은 곳으로의 유동이 발생하고 있음을 알 수 있었다.

#### 참고문헌

- (1) Brian D'souza, 2002, "MEMS Technology Demonstration on Traveler-I," 16th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, pp. 1~12.
- (2) Knudsen, M., 1910, "Eine Revision der Gleichgewichts-bedingung der Gase. Thermische Molekular-stromung," Ann. Physik, Vol. 31, pp. 205~229.
- (3) Pham-Van-Diep, G., Keeley, P., Muntz, E. P., and Weaver, D. P., 1994, "A Micromechanical Knudsen Compressor," Proceedings of 19th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, pp. 715~721.
- (4) Young, R. M., 1999, "Analysis of a Micromachine Based Vacuum Pump on a Chip Actuated by the Thermal Transpiration Effect," J. Vac. Sci. Technol. A, Vol. 17, No. 2, pp. 280~287.
- (5) Vargo, S. E. and Muntz, E. P., 2000, "Initial Results From the First MEMS Fabricated Thermal Transpiration-Driven Vacuum Pump," Proceedings of 22nd International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, pp. 502~509.
- (6) Sharipov, F. and Seleznev, V., 1998, "Data on Internal Rarefied Gas Flows," J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol. 27, No. 3, pp. 657~706.
- (7) Bird, G. A., 1994, Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows, Clarendon Press, Oxford.
- (8) Borgnakke, C. and Larsen, P. S., 1975, "Statistical Collision Model for Monte Carlo Simulation of Polyatomic Gas Mixture," J. Comput. Phys., Vol. 18, pp. 405~420.
- (9) Han, Y. -L., 2006, Investigation of Micro/Meso-Scale Knudsen Compressors at Low Pressures, Ph.D. Thesis, University of Southern California.