

## 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\*\*\* and Youn J. Kim\*\*\*

**Keywords :** Knudsen compressor(누센압축기), Thermal transpiration(열전이), Rarefied gas(희박기체)

#### 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.

#### 1. 서론

일반적으로 유동상태가 연속체유동을 벗어나 미끄럼유동, 전이유동, 자유분자유동으로 갈수록 기체분자들 사이의 상호충돌에 의한 영향보다는 점점 더 기체분자들과 벽면과의 충돌에 의해 유동특성이 변하게 된다. 이러한 희박기체유동 영역에서 고체표면을 따라 온도구배가 형성된 경우에 벽면근처의 누센층(Knudsen layer)에서는 열크립(thermal creep) 현상이 발생되며, 이것이 유체유동의 구동력으로 작용하여 한 방향으로 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 질량분석기, 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

로 센서 장치와 직접 연결되어 마이크로 압축기로서 활용된다.<sup>[1]</sup>

열전이 현상을 이용한 마이크로 진공펌프의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 두 개의 서로 다른 챔버를 작동압력에서의 분자평균자유경로(mean free path) 보다 작은 채널(수십 nm에서 수백 μm 범위)로 연결시키면 평형상태에서 마이크로 채널을 통해 유동이 발생되며, 식 (1)과 같이 두 챔버 사이에 압력차가 발생된다. 이것을 직렬로 서로 연결하여 수십 단으로 구성하게 되면 압력차는 더욱 커져 진공펌프로서의 역할을 하게 된다. 이러한 열전이 현상은 분자간의 충돌이 분자와 벽면과의 충돌보다 훨씬 많은 연속체 유동영역에서는 발생되지 않는다. 일반적으로 작동 가능한 압력범위는 약 10 mTorr에서 760 Torr 이다.

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

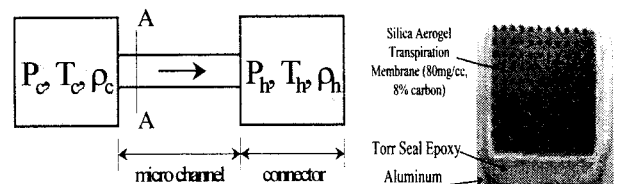


Fig. 1 Two chambers at different temperatures connected by a micro channel with a radius smaller than the mean free path of gas molecules.

1910년 Knudsen<sup>[2]</sup>에 의해 열전이 현상이 발견된 이래, 비교적 최근에 와서야 이에 대한 본격적인 연구가 진행되었다. Pham-Van-Diep등<sup>[3]</sup>은 열전이 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 μm 크기의 마이크로 칩 위에 진공펌프를 제작할 수 있

\* 한국기체유화시험연구원, jshseo@mpi.or.kr

\*\* 국립원주대학 자동차서비스과, jcllee@wonju.ac.kr

\*\*\* 성균관대학교 기계공학부, ykhwang@skku.edu

\*\*\* 성균관대학교 기계공학부, ykim@skku.edu

는 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 에어로겔 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, 열원이 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 이루어 졌으며, 마이크로 채널에 대한 수치적, 해석적인 연구는 Sharipov와 Seleznev<sup>[6]</sup>에 의해 수행되었다. 그러나 등온벽면이 아닌 유한한 길이를 갖는, 임의의 압력에 대한 온도변화가 존재하는 마이크로 채널에 대한 정량적인 연구는 아직까지 수행되지 않았으며, 특히 기체의 희박도를 나타내는 누센수(Knudsen number)에 따른 열원이 유동해석과 이를 이용한 다단 마이크로 진공펌프에 대한 최적화된 연구도 지금까지 전혀 이루어지지 않았다. 본 연구에서는 마이크로 채널내의 열원이 유동을 DSMC(direct simulation Monte Carlo)법을 이용하여 해석하고자 하며, 단단(single-stage)의 해석결과를 확장하여 채널내의 희박기체 유동장에 미치는 벽면의 온도분포 및 유량, 그리고 유량에 미치는 기체의 희박도 등을 광범위하게 해석함으로써 다단 마이크로 진공펌프에 대한 핵심 설계기술을 확보하고자 한다.

## 2. 마이크로 펌프

본 연구에서는 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. Table 1은 본 계산에서 사용한 유동조건을 보여주고 있다. 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 평균충돌시간의 1/10로 하였다.

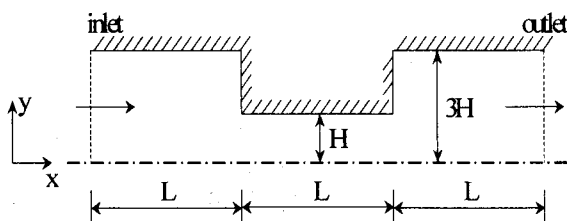
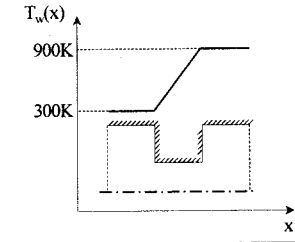


Fig. 2 Single stage Knudsen compressor

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



## 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. 3은 채널내부의 속도벡터와 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.

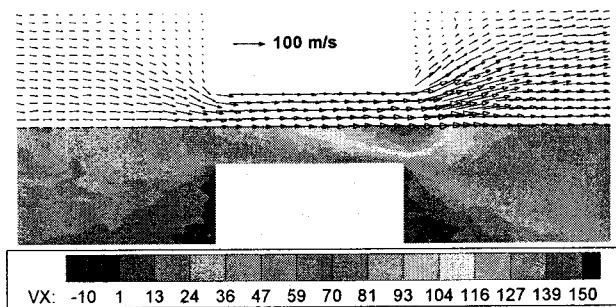


Fig. 3 Velocity vector(upper) and x-component velocity(lower) contours for Case-I

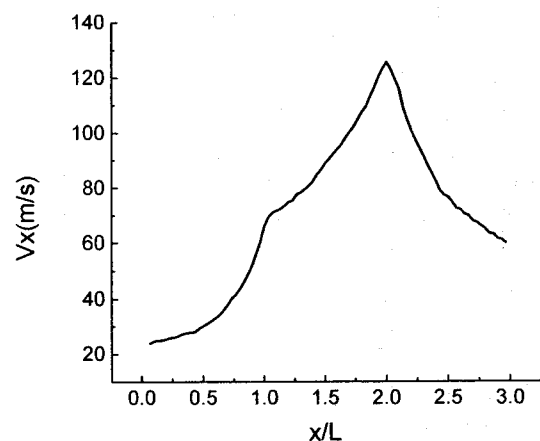


Fig. 4 X-component velocity profile along the channel for Case-I

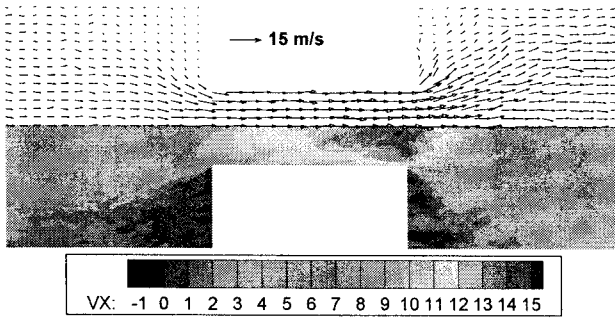


Fig. 5 Velocity vector(upper) and x-component velocity(lower) contours for Case-IV

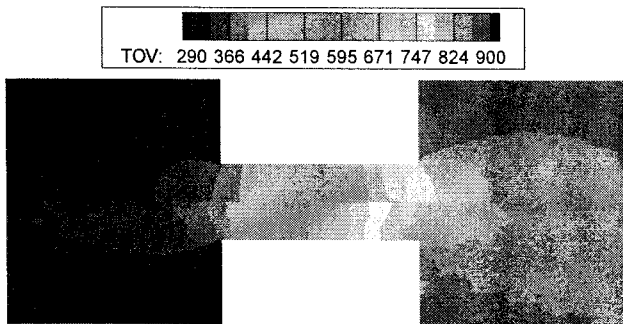


Fig. 6 Temperature(upper) and pressure(lower) field for Case-IV

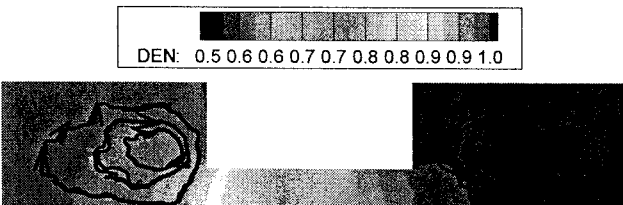


Fig. 7 Density contours and streamlines for Case-III

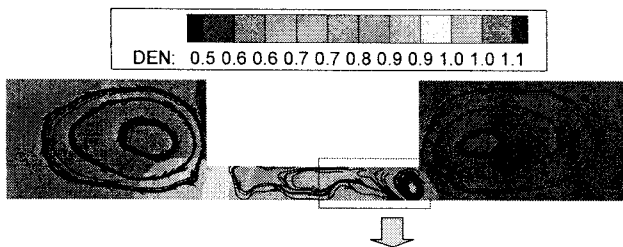


Fig. 8 Density contours and streamlines:  $T_i=300$  K,  $T_o=1000$  K,  $Kn=2.2$

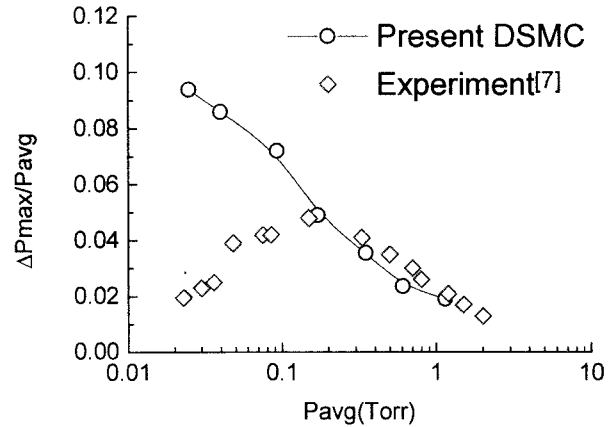


Fig. 9 Comparison of  $\Delta P_{max}/P_{avg}$

Fig. 5는 Case-IV인 경우에 대한 채널내부의 속도 벡터와 x 방향의 등속도 분포를 보여주고 있다. 출구방향으로 진행하면서 속도가 선형적으로 증가되고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 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 압축 기로서의 기능이 작동되고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 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 입출구의 온도차이를 700 K로 설정하여 해석하였으며, 초기 압력 100 mTorr,  $Kn=2.2$ 인 경우에 대한 채널내부의 밀도 및 유선 분포를 각각 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 7에서와 같이 두 개의 챔버에서 시계방향으로의 큰 와류가 형성되어 있음을 볼 수 있으며, 이 경우 채널의 출구 부근에서도 작은 형태의 와류가 존재함을 볼 수 있다. 두 챔버를 연결하는 마이크로 채널의 벽면에서는 압력차에 의한 역류현상이 일어나고 있으며, 채널의 중심 부근에서는 열전이 유동의 결과로 인해 압력이 낮은 곳에서 높은 곳으로의 유동이 발생하고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 채널의 입출구 압력차에 대해 기존의 실험결과<sup>[7]</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>[7]</sup>의 실험결과가 어느 정도는 근접하고 있으나 0.1 Torr 보다 낮은 압력에서는 서로 상반된 결과를 보여주고 있다.

에어로젤(aerogel)은 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 이 보다 훨씬 커야 되며, Han<sup>[7]</sup>은 에어로젤에 마이크로 드릴을 이용하여 직접 구멍을 가공하였다. Fig. 9의 실험결과는 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. 결 론

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-1", 16th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, pp. 1-12.
- [2] Knudsen, M., 1910, "Eine Revision der Gleichgewichtsbedingung der Gase. Thermische Molekularstromung", 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] Han, Y. -L., 2006, *Investigation of Micro/Meso-Scale Knudsen Compressors at Low Pressures*, Ph.D. Thesis, University of Southern California.