

희박기체 상태의 라디오미터릭 효과에 의해 구동되는 선형 마이크로 액추에이터의 성능해석

황영규[†] · 허중식^{*}

(2002년 2월 27일 접수, 2002년 7월 10일 심사완료)

Performance Analysis of a Linear Micro-actuator Operated by Radiometric Phenomena in Rarefied Gas Flow Field

Young-Kyu Hwang and Joong-Sik Heo

Key Words: Micro-Electro-Mechanical Systems(미소기전시스템), Micro-Actuator(마이크로 액추에이터), Rarefied Gas Flow(희박기체유동), Direct Simulation Monte Carlo Method(직접 모사법), Knudsen Number(누센수)

Abstract

The performance of micro-actuators utilizing radiometric forces are studied numerically. The Knudsen number based on gas density and characteristic dimension is varied from near-continuum to highly rarefied conditions. Direct simulation Monte Carlo(DSMC) calculations have been performed to estimate the performance of the micro-actuators. In the present DSMC method, the variable hard sphere molecular model and no time counter technique are used to simulate the molecular collision kinetics. For simulation of diatomic gas flows, the Borgnakke-Larsen phenomenological model is adopted to redistribute the translational and internal energies.

기호설명

a_o : 음속(speed of sound)

f : 속도분포함수

f_x : 축방향 힘

H : 액추에이터 날개의 높이

Kn : Knudsen number($= \lambda/H$)

l : 액추에이터 날개 사이의 거리

n : 수밀도(number density)

N : 분자속(molecular flux)

p_o : 압력

q_m : 최대 열플럭스

T_o : 온도

그리스문자

ξ : 내부자유도

θ : 날개의 경사각도

λ : 평균자유경로(mean free path)

σ : 충돌단면적

하첨자

fm : 자유분자(free molecular)

i : 입사

o : 기준상태

r : 반사

rot : 회전(rotation)

tr : 병진(translation)

[†] 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부

E-mail: ykhwang@yurim.skku.ac.kr

Tel: 031-290-7437

Fax: 031-290-5849

* 성균관대학교 기계공학부

1. 서론

최근 반도체 공정기술을 이용한 미세가공기술 (micromachining technology)은 눈부시게 발전하고 있으며, MEMS(micro-electro-mechanical systems)분야의 많은 응용분야들에 대한 연구가 진행되고 있다. 이러한 미세가공기술을 이용한 MEMS 소자들의 응용분야는 매우 다양하지만 크게 센서와 액추에이터로 구별된다. 센서로는 온도센서, 압력센서, 가속도 및 각속도센서 등이 있으며, 이들은 의료용, 군사용, 우주산업, 자동차 등의 많은 응용분야에 적용되고 있다. 액추에이터로는 초소형 밸브 및 펌프, 세포 및 DNA 조작기, 초소형 스위치, 광신호 변조기 및 초대형 평판 디스플레이를 위한 소자 등이 있으며, 유전공학 및 의료분야, 군사분야 등에 적용되고 있다.⁽¹⁾

마이크로 액추에이터를 구동하는 방법으로 정전(electrostatic)효과, 압전(piezoelectric)효과, 열공압(thermo-pneumatic)효과 등이 있으며, 본 연구에서는 희박기체상태의 라디오미터릭(radiometric) 효과⁽²⁾⁽⁵⁾에 의해 구동되는 선형 액추에이터에 대한 성능해석을 수행하고자 한다.

일반적으로 마이크로 시스템에서는 기체분자의 평균자유경로 λ 가 시스템의 특성길이 H 와 비슷할 정도로 커지게 된다. 이러한 희박기체유동에서는 무차원수인 Kn 수(Knudsen number, λ/H)가 비교적 크게 되며, 유동은 Kn 수가 작은 연속체 유동과는 매우 다르게 된다. 따라서 분자적인 관점의 해석이 요구된다.⁽⁶⁾

본 연구에서 수행하고자 하는 chevrons형의 선형 마이크로 액추에이터를 Fig. 1에 나타내었다. 그림과 같이 액추에이터의 팔(arm or armature)에 다수의 날개가 상하 대칭형으로 구성되어 있으며, 선형적인 좌우운동을 할 수 있다. 구동원리는 Fig. 1에서 면 ④의 표면이 높은 온도로 가열되면 라디오미터릭 효과에 의해 벽의 표면에서 열 크립(thermal creep) 현상이 나타나게 되어 결국 액추에이터가 Fig. 1과 같이 오른쪽으로 힘 F_x 가 작용하여 움직이게 된다. 만일 면 ②의 표면이 가열되면 액추에이터는 반대방향으로 움직이게 되어 왕복운동을 할 수 있게 된다.

Wadsworth와 Muntz⁽³⁾는 Fig. 1과 같은 마이크로 액추에이터를 이론적으로 제안하였으며, 날개의

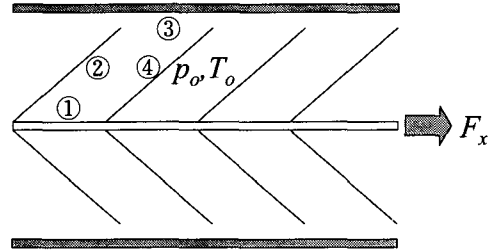


Fig. 1 Linear micro-actuator

형상변수들 변화에 따른 구동력을 DSMC(direct simulation Monte Carlo)법을 이용하여 계산하였다. 작동압력은 1기압으로 고정하였으며, 단위자분자인 아르곤을 대상으로 수치해석을 수행 하였다. 그러나 표면의 최고온도가 600 K 정도이고, 실제 작동환경이 공기중이라는 것을 감안한다면 해석 시 반드시 비탄성충돌을 고려해야만 한다.

Ota와 Kawata⁽⁵⁾는 레이저에 의해서 구동되는 마이크로 엔진에 대하여 연구하였으며, 실험결과와 DSMC 수치해석결과가 잘 일치하였다.

본 연구에서는 Wadsworth와 Muntz⁽³⁾가 제안한 Fig. 1과 같은 마이크로 액추에이터에 대하여 성능해석을 수행하였다. 실제 액추에이터의 작동환경은 공기중이기 때문에 DSMC 수치해석시 이원자분자인 질소를 대상으로 하였으며, 분자간 충돌시에는 기존의 연구⁽³⁾와는 달리 보다 실제적인 비탄성모델(inelastic model)을 이용하였다.

2. 수치해석방법

2.1 지배방정식

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

다음 식 (1)은 Boltzmann 방정식을 나타낸 것이다.

$$\frac{\partial(nf)}{\partial t} + c \cdot \frac{\partial(nf)}{\partial r} + \frac{F}{m} \cdot \frac{\partial(nf)}{\partial c} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{4\pi} n^2 (f^* f_1 - ff_1) c_1 \Omega d\Omega dc_1 \quad (1)$$

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

식 (1)의 Boltzmann 방정식은 비선형의 미적분 방정식으로서 해석적인 해는 극히 단순한 문제에만 존재하며, 식 (1) 우변항의 적분형으로 표현된 충돌항을 적절히 묘사하기가 어렵고, 독립 변수로서 속도 c 가 추가되기 때문에 직접적인 풀이가 아닌 분자들의 운동을 묘사하는 방법이 희박기체유동장 해석에 이용되기 시작하였다. 본 연구에서는 Bird⁽⁶⁾에 의해 개발된 DSMC(direct simulation Monte Carlo)법을 이용하여 해석하고자 한다.

DSMC법은 기체유동을 묘사하기 위하여 실제 유동에 존재하는 많은 수의 입자들을 대표하는 가상의 모사입자를 추적하게 된다. 계산영역에서 시간의 흐름에 따라 모사입자들이 이동하고 서로 충돌하여 내부에너지등을 교환하며, 경계면과 상호 작용한 후 최종적으로 모사입자들의 미시적인 물리량들을 통계적으로 처리하여 전체유동장의 거시적 물리량들을 계산하게 된다. DSMC법의 계산과정을 간략히 요약하면 다음과 같다.

- (1) 계산영역에 대한 격자계를 생성한다.
- (2) 계산영역내에서 모사입자들을 생성하며, 각각의 입자들에게 임의적인 초기위치와 속도를 부여한다.
- (3) 미소시간 Δt 동안 분자들 각각은 그 속도 성분에 의해 새로운 위치로 이동한다. 또한 경계면과 충돌을 겪게 되며, 만약 입·출구가 존재하면 계산영역내로 입·출구를 통하여 분자들의 유입이 이루어진다.
- (4) 분자모델과 충돌기법을 이용하여 분자간 충돌을 계산하고 필요에 따라 에너지교환 및 화학 반응등을 계산한다.
- (5) 정상상태에 도달되면 거시적 물리량들을 구하기 위한 샘플링을 시작한다.
- (6) 시간을 Δt 만큼 증가시키고 과정 (3)-(5)의 과정을 반복하여 단계 (5)에서 구한 거시적 물리량들이 일정한 값으로 수렴하게 되면 계산을 종료하게 된다.

2.2 해석모델

Fig. 2는 단순화된 마이크로 액추에이터를 나타낸 것이다. 기체는 압력 p_o , 온도 T_o 에 놓여 있으며, 윗면 ③과 아랫면 ①, 경사면 ②와 ④에 의해 갇혀져 있다.

작동압력은 1기압($n_o = 2.45 \times 10^{25}$)으로 고정하였으며, 높이 H 를 변화시킴으로써 Kn 수를 조절하였다.

면 ①, ②, ③의 온도는 300 K, 면 ④의 온도는 600 K로 고정하였다. 본 연구에서는 Kn 수를 0.027, 0.054, 0.108, 0.54, 1.08로 각각 변화시켜 계산하였으며, 상세한 계산조건은 Table 1과 같다. 한편 분자들이 벽면과 충돌하는 경우에는 완전반사 조건을 적용하였다.

2.3 분자모델

기체의 점성계수나 확산계수를 정확히 표현할 수 있는 분자모델에 대한 많은 연구들이 진행되었으며, 본 연구에서는 Bird에 의해 개발된 가변강구(VHS, variable hard sphere) 모델을 이용하여 해석하였다. VHS 모델인 경우 총 충돌단면적 σ_T 는 πd^2 이고, 여기서 d 는 분자간 상대속도의 함수로서 다음과 같이 표현된다.

$$d = d_{ref} \left\{ \frac{(2kT_{ref}/m_r c^2)^{\omega-1/2}}{\Gamma(5/2-\omega)} \right\}^{1/2} \quad (2)$$

여기서 ω 는 점성계수와 온도 사이의 관계식에서 나타나는 지수($\mu \propto T^\omega$)이며, 본 연구에서는 작동기체로 질소(N_2)를 이용하였고 지수 ω 는 0.74로 하였다.

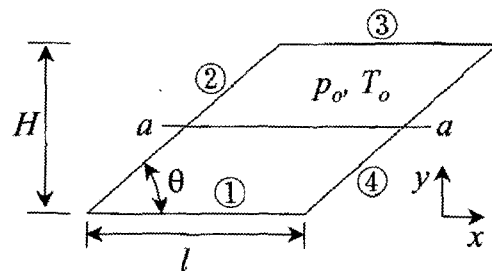


Fig. 2 Computational model of a micro-actuator

Table 1 Simulated cases and conditions

| Quantity | Case 1 | Case 2 | Case 3 | Case 4 | Case 5 |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $H(\mu m)$ | 2.0 | 1.0 | 0.5 | 0.1 | 0.05 |
| $l(\mu m)$ | 2.0 | 1.0 | 0.5 | 0.1 | 0.05 |
| $\theta(\text{deg})$ | 45 | | | | |
| $p_o(\text{kPa})$ | 101.5 | | | | |
| $T_o(\text{K})$ | 300 | | | | |
| Kn | 0.027 | 0.054 | 0.108 | 0.54 | 1.08 |

2.4 에너지교환 모델

이원자분자 이상의 경우에는 상온이라 할지라도 분자간의 충돌시 내부에너지의 변화를 고려해야 한다. Borgnakke-Larsen 현상학적 모델⁽⁷⁾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 이루어지게 된다.

분자간 충돌시 총에너지 E_c 는 다음과 같다.

$$E_c = E_t + E_i \tag{3}$$

여기서 E_t 는 병진에너지, E_i 는 내부에너지를 각각 나타낸다.

충돌전의 병진에너지와 총에너지의 비는 다음과 같은 정규확률로 주어진다.

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

여기서 ζ 는 분자의 내부자유도(internal degrees of freedom)를 나타낸다.

분자 충돌후의 병진에너지 E_t^* 는 0~1 사이의 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 0~1 사이의 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 병진에너지 E_t^* 를 이용하여 충돌후의 분자간 상대속도를 구하게 된다. 즉,

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

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

2.5 물리량의 계산

2.1절에서 언급한 바와 같이 DSMC 해석을 통해 얻게되는 유동장내의 최종적인 물리량들은 각 격자내에 있는 개개의 분자들의 속도값을 시간평균 함으로써 얻어지게 된다. 즉 한 격자내의 평균속도(stream velocity) c_o 와 수밀도 n 은 각각 다음과 같이 계산된다.

$$c_o = \bar{c} = \frac{\sum_{k=1}^{N_c} c_k}{N_c} \tag{6}$$

$$n = \frac{N_c}{V} \tag{7}$$

여기서 N_c 는 격자내의 총 분자수, V 는 격자의 체적을 각각 의미한다. 식 (6)에 의해 속도값을 얻게 되면 아래에 기술하는 바와 같이 온도값을 계산할 수 있으며, 결국에는 상태방정식 $p = nkT$ (여기서 k 는 Boltzmann 상수)를 통하여 압력값을 얻게 된다.

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

$$T = (3T_{tr} + \zeta_{rot} T_{rot}) / (3 + \zeta_{rot}) \tag{8}$$

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

병진온도와 회전온도는 다음과 같다.

$$\frac{3}{2} kT_{tr} = \overline{mc^2} - mc_o^2 \quad (9)$$

$$T_{rot} = (2/k) (\overline{\epsilon_{rot}} / \zeta_{rot}) \quad (10)$$

여기서 $\overline{\epsilon_{rot}}$ 는 평균 회전에너지를 나타낸다.

질소인 경우 $\zeta_{rot} = 2$ 이며, ϵ_{rot} 는 난수를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\epsilon_{rot} = -\ln(R_f)kT \quad (11)$$

여기서 R_f 는 난수로서 0과 1 사이의 임의의 수를 의미한다.

벽면에서의 정미 열유속(net heat flux)은 병진에너지와 회전에너지를 이용하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$q = \frac{[(\sum \epsilon_{tr} + \sum \epsilon_{rot})_i - (\sum \epsilon_{tr} + \sum \epsilon_{rot})_r] N_o}{\Delta t \cdot A} \quad (12)$$

여기서 하첨자 i 는 입사, r 은 반사, A 는 면적, N_o 는 모사분자 1개가 대표하는 실제분자수를 각각 의미한다.

한편 DSMC 수치해석결과는 사용하는 기체의 분자수가 많으면 많을수록 정확한 해를 갖지만, 실제적으로는 컴퓨터의 용량이나 계산시간, 해의 수렴정도등을 고려하여 결정하게 되며, 본 연구에서는 계산조건에 따라 약간의 차이는 있지만 대략 50,000개 정도의 분자를 이용하였다. 일반적으로 한 개의 계산격자내에 분자가 2개 이상만 존재하면 분자간 충돌과정을 DSMC법을 통하여 계산할 수 있다. 따라서 (계산격자×2) 만큼이 계산에 필요한 최소분자수가 되겠지만, 보다 정확한 계산결과를 얻기 위해서는 분자수에 따른 계산 결과의 수렴성을 파악한 후 최적의 분자수를 결정해야 할 것이다. 본 연구에서는 분자수에 따른 액추에이터 표면에서의 힘 f_x 의 변화를 살펴보고, 이를 Table 2에 나타내었다. 계산에 사용된 분자수가 약 50,000개 이상이 되면 해에 미치는 분자수의 영향은 점차적으로 줄어들게 됨을 알 수 있다.

Table 2 Effect of the number of molecules on the axial force f_x for $H=1 \mu\text{m}$

| Number of molecules | f_x |
|---------------------|---------|
| 10000 | 0.02212 |
| 18000 | 0.02451 |
| 31000 | 0.02643 |
| 49000 | 0.02702 |
| 65000 | 0.02713 |
| 83000 | 0.02709 |
| 100000 | 0.02711 |

Table 3 Comparison of the present axial force f_x with the previous ones

| | $H=0.1 \mu\text{m}$ | $H=1 \mu\text{m}$ | $H=10 \mu\text{m}$ |
|----------------------------------|---------------------|-------------------|--------------------|
| Wadsworth & Muntz ⁽³⁾ | 0.068 | 0.027 | 0.006 |
| Present | 0.06821 | 0.02702 | 0.00596 |

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 Wadsworth와 Muntz⁽³⁾가 제안한 Fig. 1과 같은 선형 마이크로 액추에이터에 대하여 내부에너지를 고려한 성능해석을 수행하였다. 수치해석시 사용한 계산조건은 Table 1과 같으며, Kn 수를 변화시키면서 액추에이터내의 유동장의 변화를 살펴보고, 이 때 각 표면에 작용하는 힘을 계산하였다. 먼저 본 연구에서 사용한 DSMC법의 타당성을 검증하기 위하여 탄성모델에 대하여 Wadsworth와 Muntz⁽³⁾가 해석한 결과와 상호 비교하였으며, 이를 Table 3에 나타내었다. Table 3에서 보듯이 상호 잘 일치함을 확인할 수 있다. 여기서 f_x 는 단위깊이당 작용하는 x 축 방향의 힘을 각각의 $p_o H$ 값으로 나눈 것이다.

3.1 충돌모델의 영향

비탄성모델을 이용한 해석결과와 탄성모델에 의해 계산된 결과를 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. 여기서 q_m 은 각 면에서의 열플럭스중 최대값을 각각의 $p_o a_o$ 값으로 나눈 것이며, 최대값은 면 ③에서 발생하였다. 여기서 a_o 는 기준온도 T_o 에서의 음속(speed of sound)을 나타낸다.

탄성모델을 이용한 경우와 비교해 보면 비탄성 모델을 이용하였을 때 축방향의 힘 f_x 는 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 그러나 열플럭스 q_m 은 Kn 수가 1.08일 때 59 %의 큰 차이를 보이고 있으며, Kn 수가 증가할수록 그 차이는 점차 증가하고 있음을 보여주고 있다. 또한 Kn 수가 증가할수록 회박기체상태의 라디오미터릭 효과에 의해 힘 f_x 는 증가함을 알 수 있으며, 열플럭스 q_m 도 Kn 수가 증가하게 되면 분자들간의 충돌보다는 분자들과 액추에이터 벽면과의 충돌횟수가 더 많아져 분자들과 벽면간에 더 많은 양의 열이 전달됨을 알 수 있다.

비탄성모델과 탄성모델의 열플럭스에 이와 같은 차이를 보이는 것은 다음에 설명하는 Fig. 4에서 명확히 알 수 있다. Fig. 4는 액추에이터의 면 ③에 입사되는 분자속(molecular number flux)을 나타낸 것이며, 다음 식 (13)과 같이 표현되는 자유분자유동(free molecular flow)인 경우의 분자속 N_{fm} 으로 무차원화 하였다.

$$N_{fm} = \frac{1}{4} n_o \sqrt{\frac{8RT_o}{\pi}} \quad (13)$$

여기서 n_o 는 수밀도, R 은 기체상수를 각각 나타낸다.

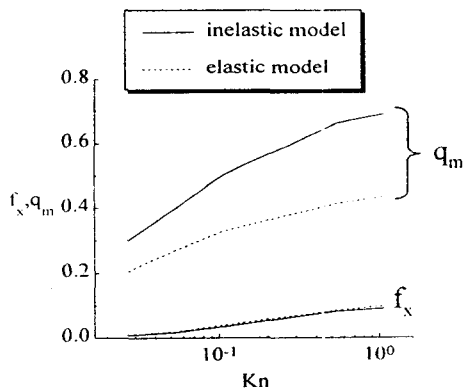


Fig. 3 Total axial force f_x and maximum average surface heat flux q_m versus Knudsen number

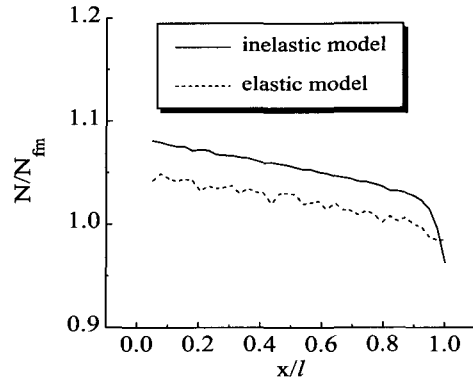


Fig. 4 Incident number flux on a surface 3 at $Kn=0.54$

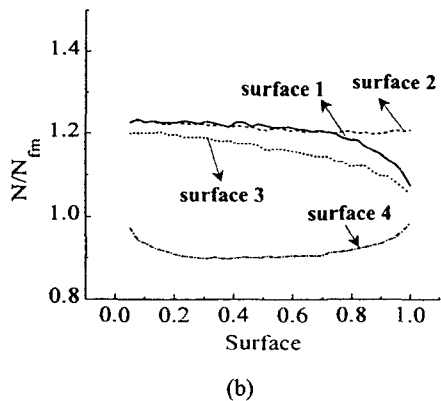
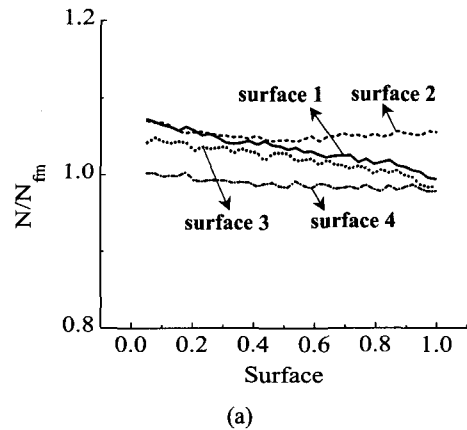


Fig. 5 Incident number flux on each surface: (a) $Kn=0.54$; (b) $Kn=0.027$

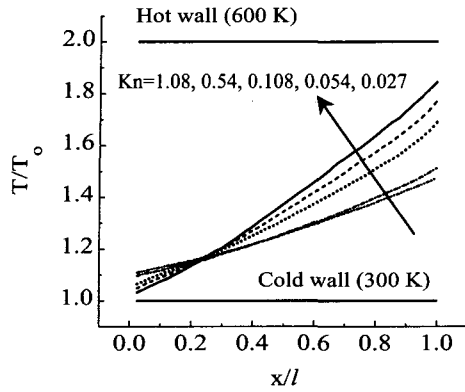


Fig. 6 Temperature distributions at various Knudsen number. The arrow indicates decreasing Kn

비탄성 충돌효과를 고려한 경우 더 많은 분자들이 면 ④와 충돌하여 얻은 높은 에너지를 반시계방향의 와류운동에 의해서(Fig. 8 참조) 면 ③에 전달하고 있음을 알 수 있다. 그리고 면 ③과 ④가 이루는 모서리 부분(즉 $x/l = 1.0$)으로 갈수록 분자들의 와류운동에 의한 bulk motion이 약해지기 때문에 면 ③으로의 분자속은 점차 줄어들게 됨을 볼 수 있다.

3.2 날개 각 면에서의 분자속, 온도 및 열플럭스 분포

Fig. 5는 Kn수가 각각 0.54, 0.027일 때 각 면에 입사되는 분자속의 분포를 나타낸 것이다. 여기서 x 축은 각 면의 길이로 무차원화한 값을 나타내며, 면 ①과 ③은 $+x$ 방향, 면 ②와 ④는 $+y$ 방향으로의 분자속을 나타내었다. 면 ④에 입사되는 분자속이 다른 면들과 비교할 때 상대적으로 가장 작음을 확인할 수 있다. 면 ④의 온도는 다른 면에 비해 2배 크기 때문에 면 근처의 분자밀도는 상대적으로 줄어들게 된다. 따라서 결과적으로 면에 입사하는 분자수는 다른 면에 비해 줄어들게 된다.

특히 Kn수가 0.027일 때에는 면 ④에 입사되는 분자속이 자유분자유동인 경우의 분자속 N_{fm} 보다도 훨씬 작음을 알 수 있으며, 면의 가열에 의한 희박효과(rarefaction effect)를 명확하게 보여

주고 있다. 또한 Kn수가 증가하면서 각 면의 분자속은 자유분자유동인 경우의 분자속에 가까워지고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 $H/2$ 지점에서의 단면 $a-a$ (Fig. 2 참조)에 대한 온도분포를 나타낸 것이며, Kn수가 증가함에 따라 벽면에서의 온도의 도약현상(temperature jump)이 증가함을 알 수 있다. 특히 고온측 벽면(면 ④)에서 이러한 현상이 더욱 두드러짐을 볼 수 있다. 이러한 온도 미끄러짐 현상은 속도 미끄러짐(velocity slip) 현상과 함께 희박기체유동(rarefied gas flow)의 특성으로 잘 알려져 있다.⁽²⁾

Fig. 7은 Kn수의 변화에 따른 각 면에서의 열플럭스 분포를 나타낸 것이다. 앞서 언급하였듯이 열플럭스의 최대값은 면 ③에서 발생함을 알 수 있다. 또한 면 ④에서 방출되는 열플럭스는 Kn수가 증가할수록 점차 커지고 있음을 알 수 있다.

3.3 액추에이터의 추력계산

Fig. 3에서 볼 수 있듯이 Kn수가 증가할수록 라디오미터릭 효과에 의해 축방향의 힘 f_x 는 점차 커지게 된다. 날개의 높이 H 가 $1.0 \mu\text{m}$ 인 경우(즉, $Kn=0.054$) Fig. 3으로부터 $f_x=0.0173$ (비탄성모델인 경우)이며, 따라서 액추에이터의 날개 1개에 작용하는 축방향의 힘 \vec{F}_x 는

$$\vec{F}_x = f_x p_0 H = 1.756 \times 10^{-3} \text{ N}$$

임을 알 수 있다. 만일 액추에이터의 날개를 $n_v = 50$ 개, 폭을 $w=100 \mu\text{m}$ 로 하여 액추에이터를 설계한다면 전체 힘 F_x 는

$$F_x = \vec{F}_x \cdot n_v w = 8.78 \times 10^{-6} \text{ N}$$

이 된다.

액추에이터에 작용하는 힘 F_x 는 액추에이터에 가속도 $a = F_x/m = 4.39 \times 10^8 \text{ m/s}^2$ 을 전달하게 된다. 여기서 m 은 액추에이터와 액추에이터 팔의 질량을 합한 총 질량이며, 기존의 연구⁽³⁾에 서와 같이 $2 \times 10^{-14} \text{ kg}$ 으로 가정하였다.

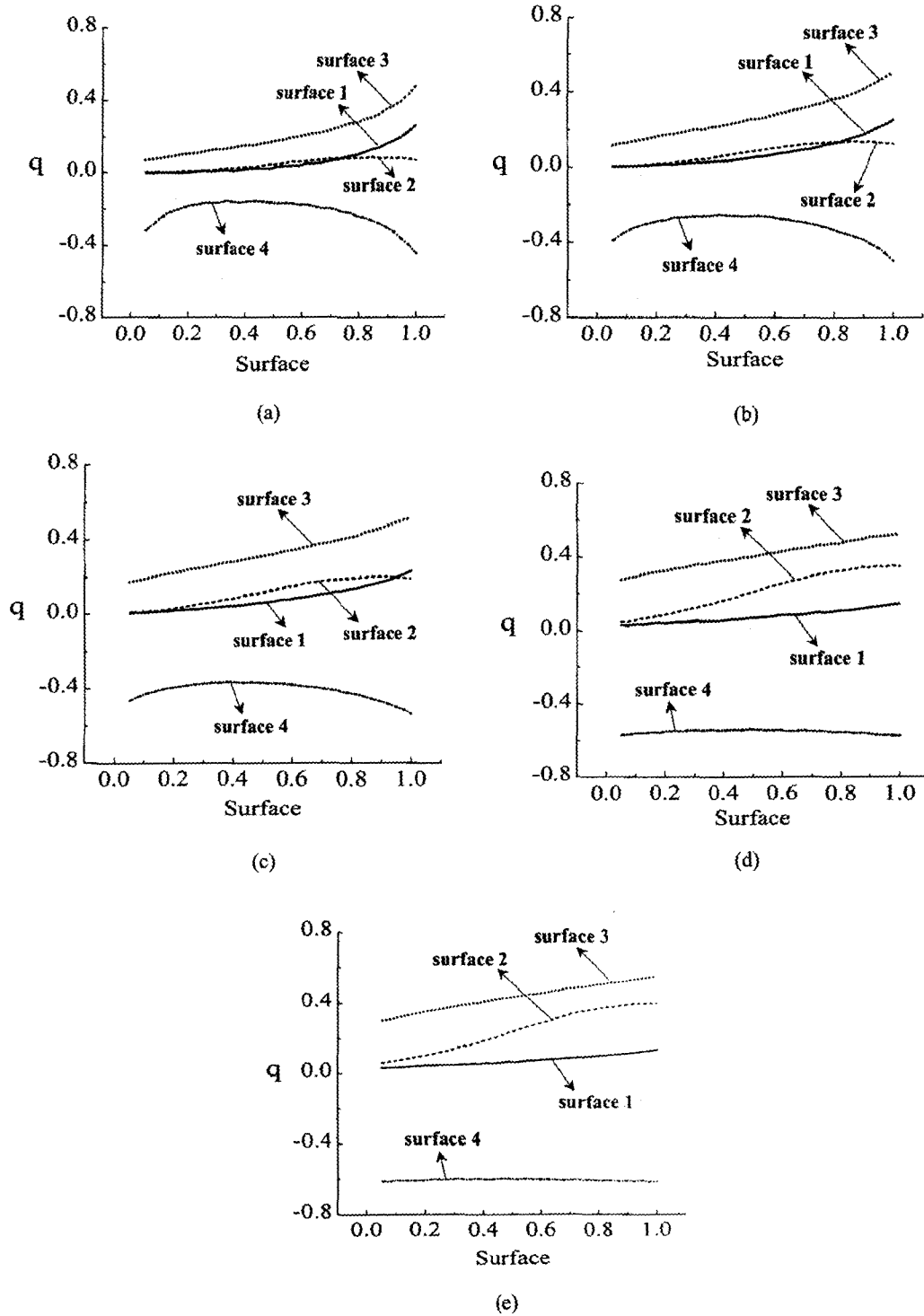


Fig. 7 Heat flux distributions: (a) $Kn=0.027$; (b) $Kn=0.054$; (c) $Kn=0.108$; (d) $Kn=0.54$; (e) $Kn=1.08$

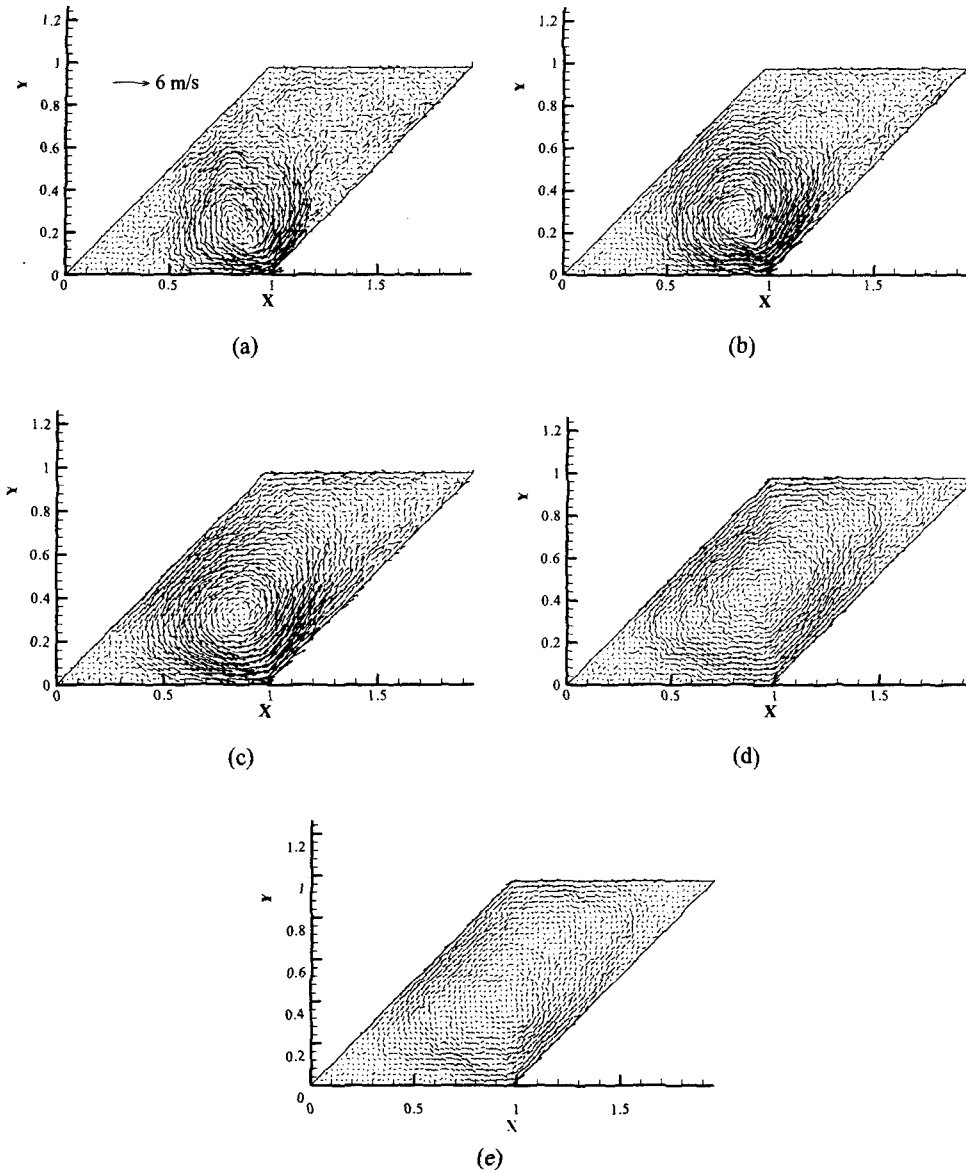


Fig. 8 Velocity vectors: (a) $Kn=0.027$ ($H=2 \mu m$); (b) $Kn=0.054$ ($H=1 \mu m$); (c) $Kn=0.108$ ($H=0.5 \mu m$); (d) $Kn=0.54$ ($H=0.1 \mu m$); (e) $Kn=1.08$ ($H=0.05 \mu m$)

만일 가속도 a 가 시간에 관계없이 일정하다고 가정한다면 다음 식 (14)로부터 액추에이터가 거리 x 만큼 움직이는데 소요되는 시간을 계산할 수 있다.

$$t_x = \sqrt{2x/a} \quad (14)$$

따라서 이 액추에이터가 1 mm 움직이는데 소요되는 시간은 위 식으로부터 약 $2.1 \mu s$ 임을 알 수 있다.

3.4 유동장 분포

Fig. 8은 Kn 수의 변화에 따른 속도벡터 분포를 나타낸 것이다. 여기서 x 축과 y 축은 각각 날

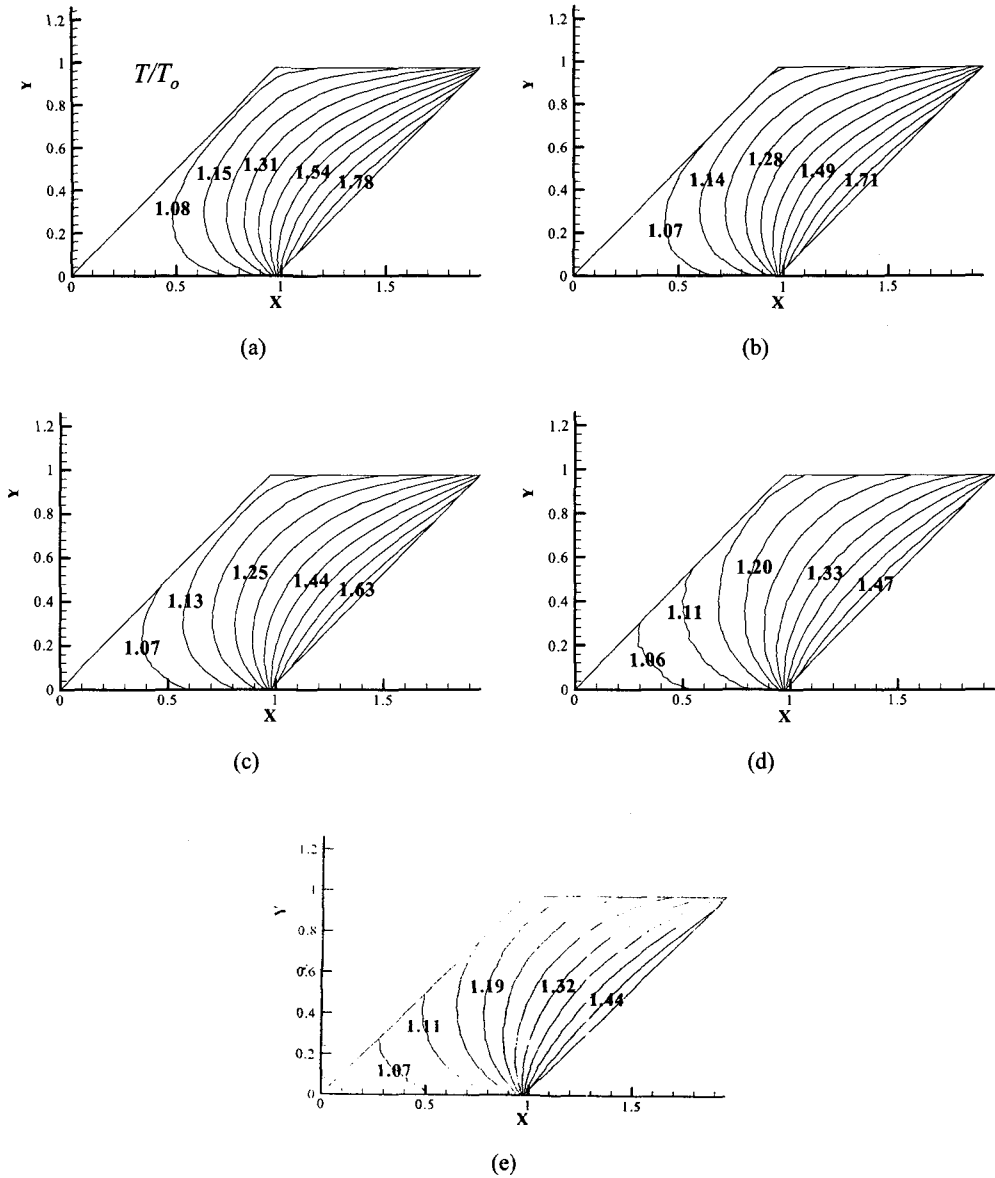


Fig. 9 Temperature contours: (a) $Kn=0.027$; (b) $Kn=0.054$; (c) $Kn=0.108$; (d) $Kn=0.54$; (e) $Kn=1.08$

개 사이의 거리 l 과 높이 H 로 무차원화 시켰다.

속도벡터의 크기는 Kn 수에 영향을 받음을 알 수 있다.

모든 경우에 있어서 회박기체류에서 나타나는 라디오미터릭 효과에 의해 생성된 반시계방향으로 회전하는 와류를 볼 수 있으며, 최대속도는 면 ④를 따라 발생하게 된다. 그리고 Kn 수가 증가함에 따라 와류의 중심이 위로 향하고 있

며, 와류의 형상이 점차 커지게 되지만 그 강도는 약하게 됨을 볼 수 있다. 만일 Kn 수가 훨씬 작아진다면($Kn \rightarrow 0$), 라디오미터릭 효과는 점차 무시할 수 있게 될 것이며, 결국에는 부력에 의한 자연대류 현상으로 바뀌게 될 것이다.

Fig. 9는 Kn 수의 변화에 따른 온도분포를 나타낸 것이다. 고온측 벽면(면 ④)에서 Kn 수가 증가함에 따라 온도 미끄러짐 현상에 의하여 최

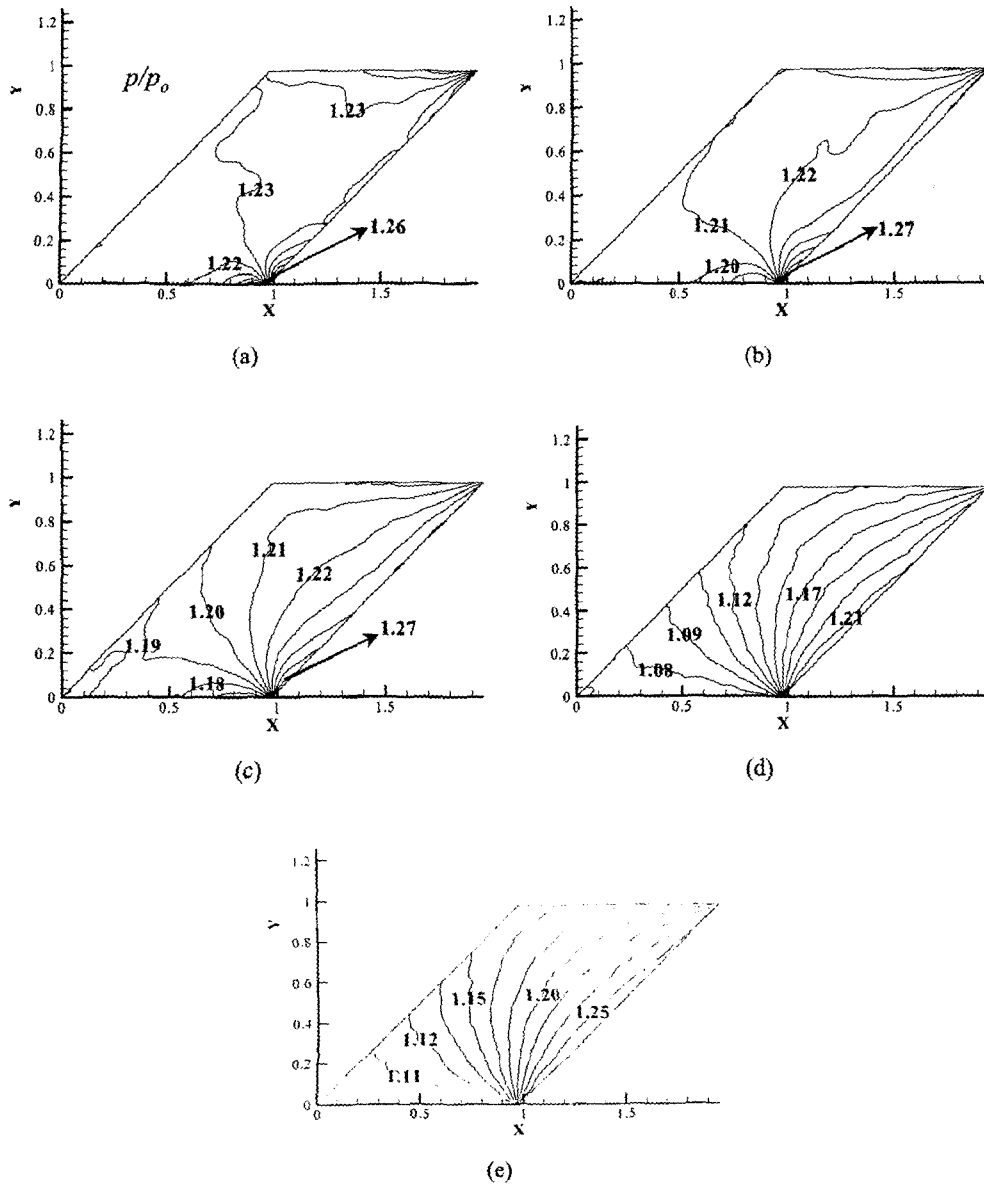


Fig. 10 Pressure contours: (a) $Kn=0.027$; (b) $Kn=0.054$; (c) $Kn=0.108$; (d) $Kn=0.54$; (e) $Kn=1.08$

대 온도가 작아지고 있음을 알 수 있다. 또한 Kn 수의 증가에 따라 등온선이 면 ②에 평행하게 분포하던 것이 점차 수직하게 바뀌고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 10은 Kn 수의 변화에 따른 압력분포를 나타낸 것이다. Kn 수가 증가함에 따라 점차 등온선의 분포와 비슷하게 변화함을 알 수 있다 (Fig. 9(e)와 Fig. 10(e) 참조). Fig. 8의 속도분포에

서 알 수 있듯이 비교적 와류의 형상이 뚜렷한 case 1, 2, 3 ($Kn=0.027, 0.054, 0.108$)인 경우에는 면 ①위를 지나는 분자들이 경사진 면 ④에 충돌하면서 비교적 높은 압력을 나타냄을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 마이크로 액추에이터에 대하여

회박기체유동의 수치해법으로 많이 이용되고 있는 DSMC법을 이용하여 성능해석을 수행하였으며, 비탄성모델을 이용한 해석결과와 탄성모델에 의해 계산된 결과를 비교하였다. 탄성모델을 이용한 경우와 비교해 보면 비탄성모델을 이용하였을 때 축방향의 힘에는 거의 변화가 없었으나, 열플럭스는 Kn 수가 1.08일 때 최대 59%의 큰 차이를 보여주었다. 또한 Kn 수가 0.027일 때에는 면의 가열에 의한 회박효과를 명확하게 보여주었다. 그리고 라디오미터릭 효과에 의해 반시계방향으로 회전하는 와류를 관찰할 수 있었다.

참고문헌

- (1) Ho, C. M. and Tai, Y. C., 1996, "REVIEW: MEMS and Its Applications for Flow Control," *J. Fluids Eng.*, Vol. 118, 437~447.
- (2) Kennard, E. H., 1938, *Kinetic Theory of Gases*, McGraw-Hill.
- (3) Wadsworth, D. C. and Muntz, E. P., 1996, "A Computational Study of Radiometric Phenomena for Powering Microactuators with Unlimited Displacements and Large Available Forces," *J. Microelectro-mechanical Syst.*, Vol. 5, No. 1, pp. 59~65.
- (4) Wadsworth, D. C., Muntz, E. P., Pham-Van-Diep, G. and Keeley, P., 1994, "Crookes' Radiometer and Micromechanical Actuators," *Proc. 19th Int. Symp. on Rarefied Gas Dynamics*, Oxford, pp. 708~714.
- (5) Ota, M. and Kawata, N., 1994, "Direct Simulation of Gas Flows around Rarefied Gas Dynamics Engines for a Micro-Machine," *Proc. 19th Int. Symp. on Rarefied Gas Dynamics*, Oxford, pp. 722~728.
- (6) Bird, G. A., 1994, *Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows*, Clarendon Press, Oxford.
- (7) 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.