

원판형 드래그펌프의 성능특성에 관한 연구

황영규* · 허중식**

A Study on the Performance Characteristics of a Disk-type Drag Pump

Young-Kyu Hwang and Joong-Sik Heo

Key Words: Rarefied gas flow(희박기체유동), Direct simulation Monte Carlo method(직접모사법), Disk-type drag pump(원판형 드래그펌프), Knudsen number(누센수)

Abstract

The direct simulation Monte Carlo(DSMC) method is applied to investigate steady and unsteady flow fields of a single-stage disk-type drag pump. Two different kinds of pumps are considered: the first one is a rotor-rotor combination, and the second one is a rotor-stator combination. The pumping channels are cut on a rotor and stator. The rotor and stator have 10 Archimedes' spiral blades, respectively. In the present DSMC method, the variable hard sphere model is used as a molecular model, and the no time counter method is employed as a collision sampling technique. For simulation of diatomic gas flows, the Borgnakke-Larsen phenomenological model is adopted to redistribute the translational and internal energies. The DSMC results are in good agreement with the experimental data.

기호설명

c_r	분자의 상대속도
f	속도분포함수
Kn	Knudsen number(= λ/L)
L	특성길이
m_r	reduced mass
n	수밀도(number density)
Q	유량(throughput)

그리스문자

λ	평균자유경로
ζ	내부자유도

1. 서론

기체의 압력이 낮아져서 분자들간의 충돌거리인 평균자유경로(mean free path, λ)의 크기가 유동장내에 존재하는 물체의 특성길이(L)에 근접하게 되면 일반적인 연속체의 가정은 무너지게 된다. 예를 들면 대기압상태일 때 λ 는 약 6.5×10^{-6} cm인 반면 압력이 이 보다 충분히 낮은 10^{-9} Torr인 경우에 λ 는 대략 5×10^6 cm 정도까지 커지게 된다. 기체의 희박정도를 나타내는 무차원 변수인 누센수(Knudsen number, $Kn = \lambda/L$)는 기체의 평균자유경로에 대한 물체의 특성길이의 비로서 표현되며, 일반적으로 희박기체역학(rarefied gas dynamics)에서는 Kn 수가 큰 유동을 다루게 된다. Kn 수가 큰 경우는 대기압보다 압력이 낮아져 기체의 평균자유경로가 상대적으로 큰 저밀도 기체유동과 이와는 대조적으로 기체의 평균자유경로에 비해 유동의 특성길이가 매우 작은

* 성균관대 기계공학부 교수
 ** 성균관대 기계공학부 연구원

두 가지 경우로 크게 나눌 수 있다. 후자의 경우는 최근 각광을 받고 있는 MEMS 분야가 포함된다.⁽¹⁾⁽³⁾

이것은 극히 극단적인 분류의 예에 불과하며, 기체의 불연속을 무시할 수 없는 상황들인 높은 고도 비행으로부터 마이크로 기전시스템에 이르기까지 희박기체역학의 취급범주는 매우 다양하다. 본 연구에서는 희박기체역학의 한 응용분야인 터보형 진공펌프중 원판형 드래그펌프내의 기체유동특성을 파악하고자 한다.

최근 CVD, 스퍼터링등의 작업공정을 필요로 하는 반도체산업 및 재료산업분야에서 고정정의 환경과 큰 유량이 요구되는 경우에 부합되는 펌프로써 터보형 드래그펌프의 활용이 매우 활발하다.

원판형 드래그펌프에 대하여 Shi등⁽⁴⁾은 이론적 및 실험적으로 성능특성을 파악하였으며, 펌프의 작동압력을 0.133Pa 정도로 제한하여 자유분자유동영역을 대상으로 하였다. 그러나 이것은 실제의 작동영역인 분자천이영역과는 거리가 멀다.

최근 Heo와 Hwang⁽⁵⁾은 DSMC(direct simulation Monte Carlo)법을 이용하여 분자천이영역에서의 원판형 드래그펌프에 대한 성능을 해석하였다. 또한 그들은 원판상 나선형 유로내의 분자천이유동을 근사적으로 미끄럼영역이라 가정하였으며, Navier-Stokes 방정식과 미끄럼 경계조건을 이용하여 성능특성을 해석하였고 이를 DSMC법의 결과와 상호 비교하였다.

그러나 기존의 연구⁽⁵⁾에서는 분자들간의 충돌을 완전한 탄성충돌로 가정하였고, 분자간의 에너지교환은 고려하지 않았다. 본 연구에서는 비탄성충돌모델을 이용한 분자간 에너지교환을 고려하여 원판형 드래그펌프의 체내내 유동장을 해석하였다.

2. 수치해석방법

2.1 지배방정식

모든 유체유동영역에서의 지배방정식은 분자적 개념의 Boltzmann 방정식이며, 연속체 개념의 Navier-Stokes 방정식은 Chapman-Enskog 전개에 의해 Boltzmann 방정식으로부터 유도된다. 일반적으로 Kn 수가 0.01보다 커지게 되면 Navier-

Stokes 방정식은 점차 그 타당성을 잃게 되고, 보다 고차의 항들이 추가된 Burnett 방정식으로 대체된다. 본 연구에서는 분자적 개념의 Boltzmann 방정식과 연속체 개념의 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 수치해석하고자 한다.

다음 식(1)은 Boltzmann 방정식을 나타낸 것이다.

$$\frac{\partial(nf)}{\partial t} + \vec{c} \cdot \frac{\partial(nf)}{\partial \vec{r}} + \frac{\vec{F}}{m} \cdot \frac{\partial(nf)}{\partial \vec{c}} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{4\pi} n^2 (f^* f_1 - ff_1) c_r \sigma d\Omega d\vec{c}_1 \quad (1)$$

여기서 f 는 속도분포함수, n 은 수밀도(number density), \vec{c} 는 속도, c_r 은 충돌분자간의 상대속도, σ 는 충돌단면적을 각각 나타낸다.

식(1)의 Boltzmann 방정식은 비선형의 적분·미분 방정식으로서 해석적인 해는 극히 단순한 문제에만 존재하며, 식(1) 우변항의 적분형으로 표현된 충돌항을 적절히 묘사하기가 어렵고, 독립변수로서 속도 \vec{c} 가 추가되기 때문에 직접적인 풀이가 아닌 분자들의 운동을 묘사하는 방법이 희박기체유동장 해석에 이용되기 시작하였다. 본 연구에서는 Bird⁽²⁾에 의해 개발된 DSMC법을 이용하여 해석하고자 한다.

2.2 분자모델(molecular model)

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.

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

여기서 ω 는 점성계수와 온도사이의 관계식에서 나타나는 지수($\mu \propto T^\omega$)이며, 본 연구에서는 작동기체로 질소를 이용하였고, 지수 ω 는 0.74로 하였다.

2.3 에너지교환모델

이원자분자 이상의 경우에는 분자간의 충돌시 내부에너지의 변화를 고려해야 한다. Borgnakke-Larsen 현상학적 모델⁽⁶⁾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.

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

여기서 ξ 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 병진에너지 E_t^* 를 이용하여 충돌후의 분자간 상대속도를 구하게 된다. 즉,

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

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

2.4 격자계

유동장을 해석하기 위하여 3차원 원관형 채널 내부를 Fig. 1과 같이 분할하였다. DSMC 수치해석에서의 격자는 단순히 셀내의 거시적인 물리량들을 샘플링하고 충돌쌍의 표본추출을 위해 필요하다. 셀의 크기는 일반적으로 유동장의 평균자유행정보다 작게 잡는다.

Fig. 1(a)와 (b)는 각각 로터와 로터, 로터와 스테이터로 구성된 1단을 나타낸 것이다. 로터와 로터가 짝으로 구성된 경우에는 전체영역을 회전좌표계로 선택하여 해석하게 된다. 그러나 로터와 스테이터로 구성된 경우에는 둘 사이의 상대운동을 고려해야 하며, 절대좌표계와 회전좌표계 사이에 물리량들이 적절히 교환되어야만 한다. 본 연구에서는 이를 위해 clicking mesh 기법을 이용하여 해석하였다.⁽⁷⁾

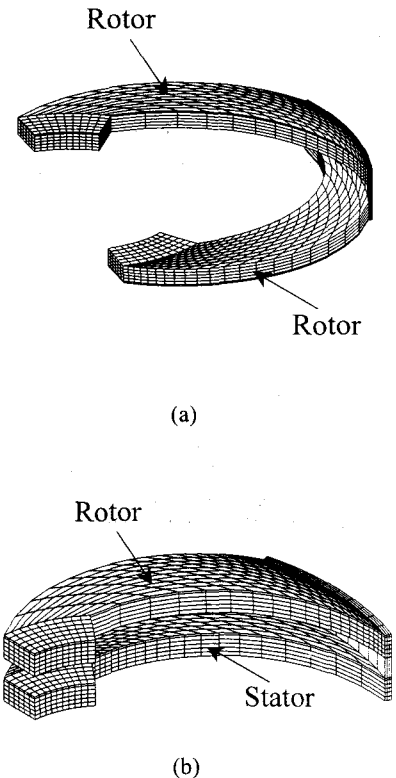


Fig. 1 Computational grid systems for single-stage drag pump : (a) rotor-rotor; (b) rotor-stator.

3. 결과 및 고찰

계산의 수렴성을 위해 초기조건으로서 채널내의 압력은 입구에서부터 출구까지 지수함수적으로 변화한다고 가정하였으며, 분자수는 압력에 비례하여 분포시켰다.

로터와 스테이터가 연결된 경우 출구압력이 131.6 Pa일 때 채널을 따르는 압력분포를 Fig. 2에 나타내었다. 점으로 표시한 것은 각각 실험을 통해 측정된 입구와 출구, 간극부분에서의 압력이다. 로터의 출구부분(로터와 케이싱간의 간극부분)에서 수치결과와 거의 일치하는 결과를 보여주고 있으며, 간극부분에서는 압력이 급격히 감소함을 알 수 있다. 이는 급격한 단면변화에 기인하는 것으로 판단된다.

Fig. 3은 로터와 로터가 연결된 경우의 압력분포를 나타낸 것이다. 로터와 스테이터가 연결된 경우와 전체적인 압력상승경향은 유사함을 보여주고 있다. 그러나 로터와 스테이터가 연결된 경우에는 윗 로터부분에서 압력상승이 거의 대부분 일어나고 있으나, 로터와 로터가 연결된 경우에는 아래쪽 로터에서 더 많은 압력상승이 이루어지고 있음을 알 수 있다. 또한 입구압력이 상승함에 따라서 간극부분에서의 압력저하가 더욱 두드러짐을 보여준다.

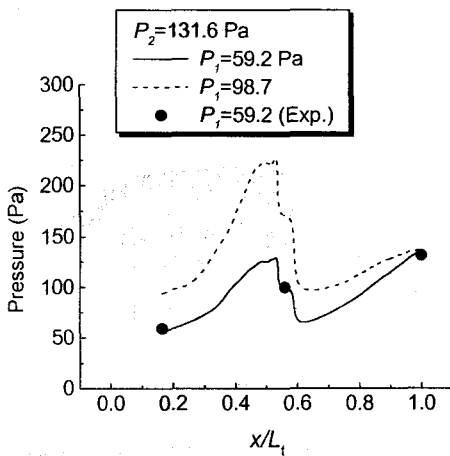


Fig. 2 Pressure distribution for rotor+stator.

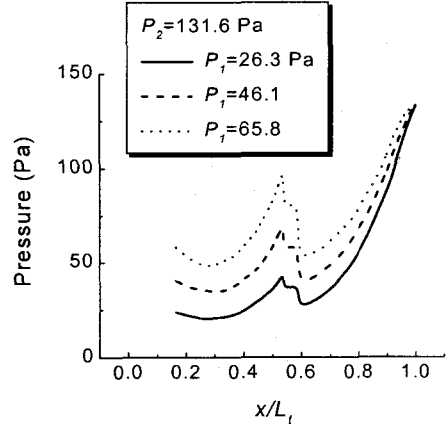


Fig. 3 Pressure distribution for rotor+rotor.

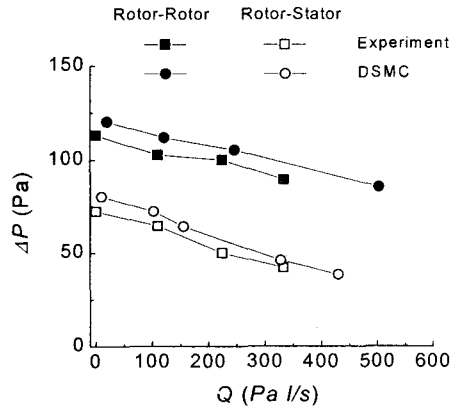


Fig. 4 Pressure difference vs throughput.

Fig. 4는 실험결과와 DSMC 수치해석결과를 상호 비교한 것으로서 유량변화에 따른 압력차를 나타낸 것이다. 이 때 출구압력은 131.6 Pa로 고정시켰다. 수치해석결과가 약간은 크게 예측되고 있다. 로터와 로터가 결합된 경우 더욱 향상된 성능을 보여줌을 알 수 있다.

Fig. 5는 비정상유동인 경우(로터와 스테이터가 결합된 경우)에 대한 상부 로터의 출구부분(A 부분)에서의 압력변화를 반복계산횟수에 대하여 도시한 것이다. 이 경우 약 40000번 반복계산이후 주기적인 압력변동을 보여주고 있다.

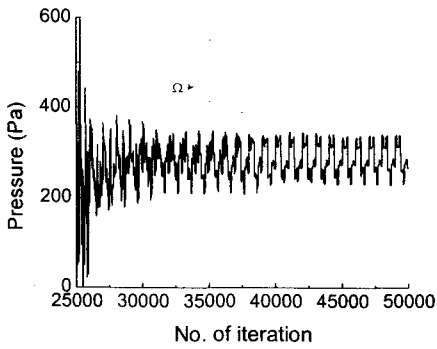


Fig. 5 Convergence history.

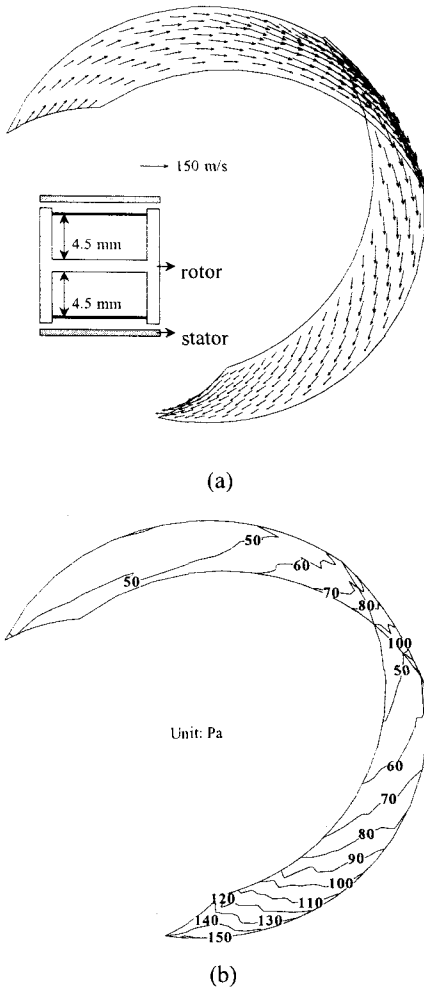


Fig. 6 Flow fields for rotor+rotor.

Fig. 6은 로터와 로터가 연결된 경우의 속도분포 및 압력분포를 간극 근처에서 각각 나타낸 것이다. 입구에서 유입된 기체는 상부 로터에서 출구부분으로 높은 속도를 가지고 무리없이 잘 빠져나가고 있으며, 하단부에서도 압력면(pressure surface)을 따라 펌핑이 대부분 이루어지고 있음을 알 수 있다.

반면 하단부의 로터 출구에서는 부압면(suction surface)을 따라서 약간의 역류가 발생하고 있음을 알 수 있다. 또한 압력은 출구부분에서 급격히 상승함을 볼 수 있다.

Fig. 7과 8은 로터와 스테이터가 연결된 경우에 대한 속도분포 및 압력분포를 서로 다른 두 로터 위치에서 각각 나타낸 것이다. 비정상상태의 계산시 초기값으로는 로터와 스테이터가 일치하는 지점에서 계산된 정상상태의 값을 사용하였다. DSMC 계산시 시간간격은 회전방향으로의 셀의 크기를 고려하여 각 격자선이 각 블록의 경계에서 일치하도록 조정하였다. 계산결과 약 4번의 로터회전에 의해 주기적인 유동양상이 얻어짐을 확인하였다.

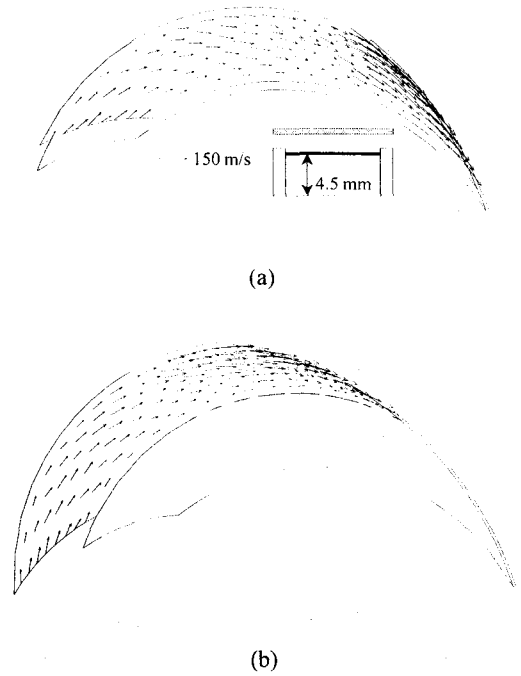


Fig. 7 Velocity vectors for rotor+stator.

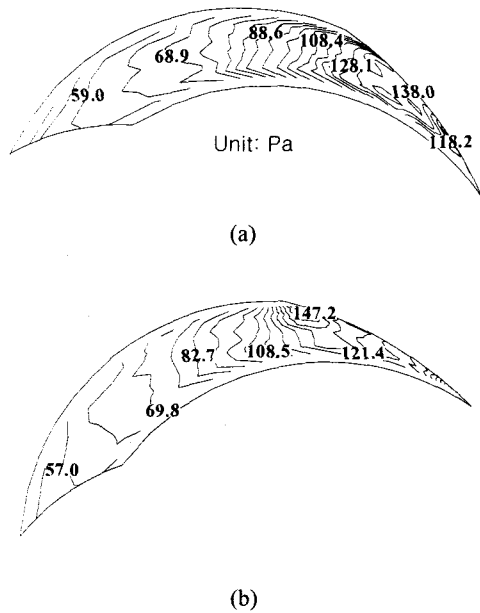


Fig. 8 Pressure contours for rotor+stator.

4. 결론

본 연구에서는 원판형 드래그펌프내의 정상/비정상 희박기체유동을 DSMC법을 이용하여 해석하였으며, 실험결과와 상호 잘 일치하였다. 로터와 스테이터가 결합된 비정상유동인 경우에는 로터의 출구부분에서 시간의 변화에 따른 주기적인 압력변동을 관찰할 수 있었다. 또한 케이싱과의 간극부분에서는 압력이 급격히 감소함을 알 수 있었다.

후 기

본 논문은 2000년도 한국과학재단 목적기초연구(2000-1-30400-014-3) 연구비에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

(1) Hablanian, M. H., 1994, In *Vacuum Science and Technology: Pioneers of 20th Century*, edited by P. A. Redhead(AIP, New York), pp. 126-132.

(2) Bird, G. A., 1994, *Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows*, Clarendon Press, Oxford.

(3) Muntz, E. P., 1996, *Research Trends in Fluid Dynamics*, edited by J. L. Lumley et al.(AIP, New York), pp. 209-219.

(4) Shi, L., Wang, X. Z., Zhu, Y. and Pang, S. J., 1993, "Design of Disk Molecular Pumps for Hybrid Molecular Pumps," *J. Vac. Sci. Technol. A*, Vol. 11, No. 2, pp. 426-431.

(5) Heo, J. S. and Hwang, Y. K., 2000, "Molecular Transition and Slip Flows in the Pumping Channels of Drag Pumps," *J. Vac. Sci. Technol. A*, Vol. 18, No. 3, pp. 1025-1034.

(6) 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.

(7) Wechsler, K., Breuer, M., and Durst, F., 1999, "Steady and Unsteady Computations of Turbulent Flows Induced by a 4/45 Pitched-Blade Impeller," *J. Fluids Eng.*, Vol. 121, pp. 318-329.