

## 원판형 드래그펌프내의 희박기체유동

황영규\* · 허중식\*\*

### Rarefied Gas Flows in Spiral Channels of a Disk-Type Drag Pump

Young-Kyu Hwang\*, Joong-Sik Heo\*\*

*Key Words: Disk-type Drag Pump(원판형 드래그펌프), Direct Simulation Monte Carlo Method(직접모사법), Variable Hard Sphere Model(가변강구 모델), No Time Counter Method(비시계수법)*

#### ABSTRACT

The direct simulation Monte Carlo (DSMC) method is applied to investigate the flow field of a disk-type drag pump. The pumping channels are cut on both sides of a rotating disk. The rotor has 10 Archimedes' spiral blades. 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 Larsen-Borgnakke phenomenological model is adopted to redistribute the translational and internal energies.

#### 1. 서 론

반도체산업 및 재료산업분야에서 최근 고청정 및 큰 유량(throughput)이 요구되는 CVD(chemical vapor deposition), 이온주입(ion implantation), 에칭(etching), 스퍼터링(sputtering)등의 작업공정에 터보형태의 드래그펌프(drag pump)가 많이 이용되고 있다. 드래그펌프는 고속으로 회전하는 날개에 의해 기체분자들이 매우 큰 운동량을 전달받아 연속적으로 진공공간으로부터 출구측으로 압축·배기되게 하는 펌프이다.<sup>(1)</sup>

이러한 드래그펌프는 크게 Holweck 형태인 원통에 나선형 홈이 있는 것과 Siegbahn 형태인 원판에 홈이

있는 것으로 구분된다.

최근 일본의 Daikin사<sup>(2)</sup>에서는 원통형의 드래그펌프 단독으로써  $10^{-9}$ Torr의 고진공에서부터 1Torr정도까지 배기할 수 있는 펌프를 개발하여 시판하고 있다. 또한 원통형과 원판형을 결합한 드래그펌프를 개발하였으며, 이것은 용량 20l의 용기를 대기압에서부터  $10^{-5}$ Torr까지 배기하는 데 약 8분 정도 소요된다. Mitsubishi사<sup>(3)</sup>에서는 세라믹으로 날개를 제작하여 25000rpm에서 약 280l/s의 펌핑속도를 갖는 원판형의 터보형 펌프를 개발하였다.

결국 드래그펌프는 출구압력을 상승시킴으로써 후단 펌프로써 오일식이 아닌 다이아프램 펌프와 같은 무급유 기계식 펌프의 사용이 가능하기 때문에 깨끗한 진공공간을 생성할 수 있다는 장점이 있다. 또한 최근 반도체산업에서 웨이퍼(wafer)의 크기가 12inch이상으로 대형화되고 있는 추세여서 생산성을 높이기 위해서

\* 성균관대학교 기계공학부 교수

\*\* 성균관대학교 기계공학부 연구원

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

는 드래그펌프와 같은 대유량의 펌프가 요구된다. 그리고 이러한 반도체 공정용 진공챔버의 초기 배기시 챔버내에 공기의 급속팽창으로 인한 수증기의 응결현상이 발생되고 있어서 웨이퍼상에 심각한 결함을 발생시키고 있다. 이 경우 러핑초기시 배기시간이 약간 지연되더라도 펌핑속도가 지속적으로 매우 큰 드래그펌프를 이용하게 되면 이러한 문제점을 완벽히 해결할 수 있다. 또한 특기할 점은 드래그펌프가 터보형이므로 진동 및 소음이 60dB이하로 작아 챔버 가까이 설치할 수 있기 때문에 기존의 드라이식 진공펌프류에 비해 배관라인등의 시스템 설치비용을 절감할 수 있다.

원판형 드래그펌프에 대하여 Shi등<sup>(4)</sup>은 이론적 및 실험적으로 성능특성을 파악하였으며, 펌프의 작동압력을 0.133Pa 정도로 제한하여 자유분자유동(free molecular flow)영역을 대상으로 하였다. 그러나 이것은 실제의 작동영역인 분자전이영역(molecular transition region)과는 거리가 멀다.

Heo와 Hwang<sup>(5)</sup>은 DSMC(direct simulation Monte Carlo)법을 이용하여 분자전이영역에서의 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<sup>(5)</sup>에서는 분자들간의 충돌을 완전한 탄성충돌로 가정하였고, 분자간의 에너지교환은 고려하지 않았다. 희박기체유동에서 매우 중요한 무차원수인 누센수( $Kn = \lambda/L$ )는 분자의 평균자유경로  $\lambda$ 에 대한 유동장의 특성길이  $L$ 의 비를 표현하며, 누센수가 커짐에 따라 유동장의 비평형영역은 매우 커지게 된다. 따라서 본 연구에서는 비탄성충돌모델을 이용한 분자간 에너지교환을 고려하여 원판형 드래그펌프의 채널내 유동장을 해석하였다.

## 2. DSMC법

본 연구에서 해석한 원판형 드래그펌프의 구조는 로터의 양면에 채널이 형성되어 있으며 Fig. 1과 같다.

본 연구에서 해석하고자 하는 펌프내의 유동영역은 중진공 영역이며, 이때 펌프입구의 누센수는 대략 0.1로서 분자천이영역이 된다. 이러한 유동조건하에서는 일반적인 연속체의 가정이 적용되지 않는다. 연속체라는 가정으로부터의 이탈정도는 유동의 희박정도를 나

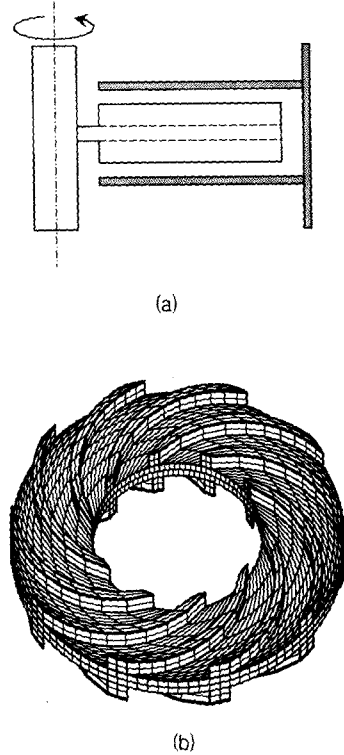


Fig. 1 Disk-type drag pump:  
(a) side view; (b) solid model

타내는 누센수로 표현되며, 누센수에 따라서 유동은 연속체, 미끄럼, 천이 및 자유분자유동으로 나뉜다.

본 연구에서는 분자적 개념의 Boltzmann 방정식을 이용하여 수치해석하고자 한다. 다음 식(1)은 Boltzmann 방정식을 나타낸 것이다.<sup>(6)</sup>

$$\frac{\partial(nf)}{\partial t} + \vec{c} \cdot \frac{\partial(nf)}{\partial r} + \frac{F}{m} \cdot \frac{\partial(nf)}{\partial c} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{4\pi} n^2 (f^* f_1 - ff_1) c_1 \sin \theta d\theta d\vec{c}_1 \quad (1)$$

여기서  $f$ 는 속도분포함수(velocity distribution function),  $n$ 은 분자의 수밀도(number density)를 각각 나타낸다.

Boltzmann 방정식은 식(1)과 같이 비선형의 적분·미분방정식으로서 해석적인 해는 극히 단순한 문제에만 존재하며, 특히 식(1) 우변항의 적분형으로 표현

된 충돌항을 적절히 묘사하기가 어렵고, 독립변수로서 속도  $\vec{c}$ 가 추가되기 때문에 기존의 수치적방법(FDM, FEM등)은 많은 문제점을 가지고 있다. 따라서 Boltzmann 방정식의 직접적인 풀이가 아닌 분자들의 운동을 묘사하는 방법이 희박기체유동장 해석에 이용되기 시작하였으며, 본 연구에서는 Bird<sup>(6)</sup>에 의해 개발된 DSMC법을 이용하고자 한다.

DSMC법은 기체유동을 묘사하기 위하여 실제유동에 존재하는 많은 수의 입자들을 대표하는 가상의 모사입자를 추적하게 된다. 계산영역에서 시간의 흐름에 따라 모사입자들이 이동하고 서로 충돌하여 내부에너지 등을 교환하며, 경계면과 상호 작용한 후 최종적으로 모사입자들의 미시적인 물리량들을 통계적으로 처리하여 전체유동장의 거시적 물리량들을 계산하게 된다.

## 2.1 격자계

유동장을 해석하기 위하여 3차원 원판형 채널내부를 Fig. 2와 같이 분할하였으며, 전체적인 형상은 Fig. 1(b)와 같다. DSMC 수치해석에서의 격자(grid)는 단순히 셀(cell)내의 거시적인 물리량들을 샘플링하고 충돌쌍의 표본추출을 위해 필요하다. 셀의 크기는 일반적으로 유동장의 평균자유행정보다 작게 잡는다. 본 연구에서는 가장 일반적인 형태인 육면체(hexahedron) 셀을 이용하였으며, 압력이 출구측으로 갈수록 증가하기 때문에 유동방향으로는 비균일 격자계를 이용하였다.

## 2.2 분자모델(molecular model)

기체의 점성계수나 확산계수를 정확히 표현할 수 있는 분자모델에 대한 많은 연구들이 진행되었으며, 본 연구에서는 Bird<sup>(6)</sup>에 의해 개발된 가변강구(VHS, variable hard sphere) 모델을 이용하여 해석하였다.

VHS 모델인 경우 총충돌단면적(total collision cross-section)  $\sigma_T$ 는  $\pi d^2$  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  $\omega$ 는 점성계수와 온도사이의 관계식에서 나타

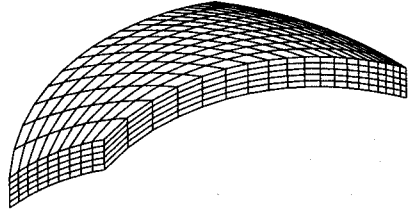


Fig. 2 Computational cells

는 지수( $\mu \propto T^\omega$ )이며, 본 연구에서는 작동기체로 질소( $N_2$ )를 이용하였고 지수  $\omega$ 는 0.74로 하였다.

## 2.3 분자의 자유운동 및 벽면과의 충돌

시간  $\Delta t$  동안 기체분자는 주어진 속도로 운동하여 이웃한 벽면과의 충돌, 분자간의 충돌 및 입·출구를 통한 유입, 유출이 이루어진다. 벽면과의 충돌은 거울반사(specular reflection)와 난반사(diffuse reflection) 모델을 각각 이용하였다.

## 2.4 충돌표본채취기법

충돌표본채취기법(collision sampling technique)은 각 격자별로 시간간격  $\Delta t$  동안 선택된 분자들을 충돌시키고, 충돌후 속도를 계산하는 과정에 이용된다. 본 연구에서는 Bird<sup>(6)</sup>에 의해 개발된 비시계수법(NTC, no time counter method)을 이용하였다.

NTC 기법에서는 시간간격  $\Delta t$  동안 한 격자내에서의 충돌횟수를 다음과 같이 계산한다.

$$N_c = 0.5N \langle N \rangle F_N (\sigma_T c_r)_{\max} \Delta t / V_c \quad (3)$$

여기서  $N$ 은 한 셀내의 분자수,  $\langle N \rangle$ 은 셀내 분자수의 평균치,  $F_N$ 은 한 개의 분자가 나타내는 실제 분자수,  $V_c$ 는 셀의 체적을 각각 나타낸다.

## 2.5 에너지교환 모델

이원자분자이상의 경우에는 분자간의 충돌시 내부에너지를 변화시켜야 한다. 현재까지는 이에 대한 해석적인 모델은 제시된 바 없으며, 현상학적인 모델

만 발표되었다. Borgnakke-Larsen 현상학적 모델은 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.

$$E_c = E_t + E_i \quad (4)$$

여기서  $E_t$  는 병진에너지,  $E_i$  는 내부에너지를 각각 나타낸다. 충돌전의 병진에너지와 총에너지의 비는 다음과 같은 정규확률로 주어진다.

$$f\left(\frac{E_t}{E_c}\right) = \left\{ \frac{\xi + 1/2 - \omega}{3/2 - \omega} \left( \frac{E_t}{E_c} \right) \right\}^{3/2 - \omega} \times \left\{ \frac{\xi + 1/2 - \omega}{\xi - 1} \left( 1 - \frac{E_t}{E_c} \right) \right\}^{\xi - 1} \quad (5)$$

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

충돌후의 병진에너지  $E_t^*$  는 0~1사이의 임의값으로 선택한다. 그리고 식(5)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,

$$c_r^* = (2 E_t^* / m_r)^{1/2} \quad (6)$$

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

## 2.6 펌핑속도 및 유량의 계산

정상상태의 판정기준으로서 입구측에서 유입된 분자중 샘플링시간( $t_s$ )동안 출구로 빠져나가는 분자수를

$N_{12}$ , 출구측에서 유입된 분자중 입구로 되돌아오는 분자수를  $N_{21}$ , 입구측으로 유입된 총 분자수를  $N_1$  이라고 할 때, 다음 식(7)로 정의되는 펌핑효율  $w$  가 오차범위(0.1%)에 도달하는 순간으로 택하였다.

$$w = \frac{N_{12} - N_{21}}{(t_s / \Delta t) N_1} \quad (7)$$

그리고 펌핑속도  $S$  ( $l/s$ )와 유량  $Q$  ( $Pa \cdot l/s$ )는 다음과 같다.

$$S = w \cdot A_1 \cdot \sqrt{8RT/\pi} \cdot K(s_1) / 4.0 \quad (8)$$

$$Q = P_1 \cdot S \quad (9)$$

## 3. 결과 및 고찰

아래의 Table 1은 본 연구에서 사용한 계산조건을 나타낸 것이며, 비탄성충돌모델인 경우에 한하여 벽면반사조건인 영향을 알아보기 위하여 완전거울반사(FS), 20% 거울반사(PS), 완전난반사모델(FD)을 각각 이용하여 계산하였다. Table 2는 Table 1과 같은 조건으로 계산된 펌핑효율과 유량을 각각의 경우에 대하여 비교한 것이다. 유량을 비교해보면 완전난반사모델인 경우 탄성충돌모델을 이용했을 때 약 22.6%정도 비탄성충돌모델보다 작게 예측되었음을 알 수 있다. 또한 완전거울반사모델인 경우 펌핑효율 및 유량이 완전난반사모델인 경우에 비해 매우 크게 예측되었다.

채널내부의 계산된 유동장을 Fig. 3과 4에 나타내었다. Fig. 3(b)는 완전거울반사모델을 이용했을 때의 해석결과를 나타낸 것이며, Fig. 3(a)의 완전난반사모델인 경우와 비교했을 때 상당히 큰 속도로 펌핑되는 것을 볼 수 있으며, 특히 출구부근에서 역류하는 분자들이 매우 적다는 것을 알 수 있다. 결국 이러한 현상으로 인하여 거울반사모델인 경우 유량이 매우 커졌다는 것을 알 수 있다 (Table 2 참조).

Fig. 4는 채널내부의 압력분포를 나타낸 것이다. 완전거울반사모델을 이용했을 때 채널의 중간부근까지 압력이 거의 일정함을 볼 수 있다.

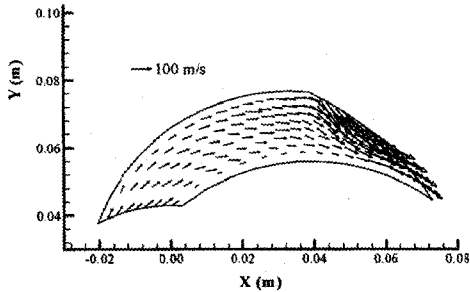
이상의 결과는 1개의 채널만을 해석한 경우이다. 그러나 실제로는 Fig. 1(b)와 같이 10개의 채널로 구성되

Table 1 Boundary conditions for the present calculations

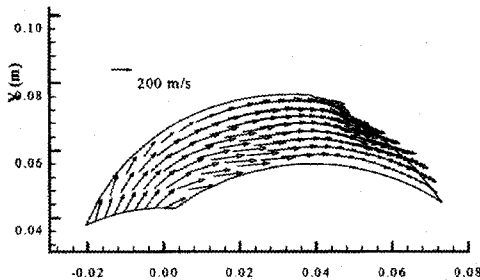
$Kn$		0.09
Temperature	inlet	273K
	outlet	273K
	wall	273K
Pressure	inlet	10Pa
	outlet	20Pa

Table 2 Comparison of the numerical results between collision models

	elastic model	inelastic model
$w$	0.181	0.186 (FD)
		0.824 (FS)
		0.620 (PS)
$Q$	76.18	73.99 (FD)
		735.34 (FS)
		330.70 (PS)

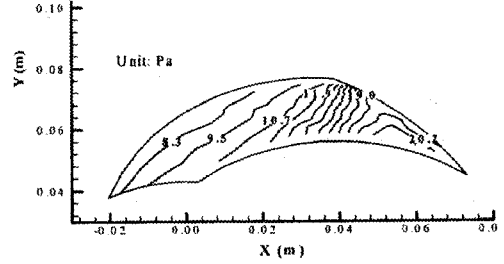


(a)

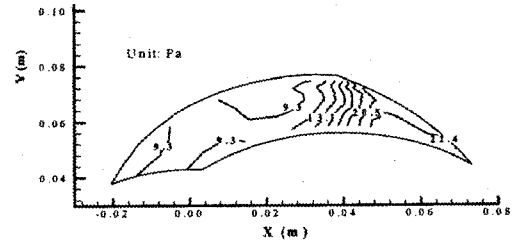


(b)

Fig. 3 Velocity vectors: (a) inelastic collision model (b) in-elastic collision model(FS)



(a)



(b)

Fig. 4 Pressure distributions: (a) inelastic collision model(FD); (b) inelastic collision model(FS)

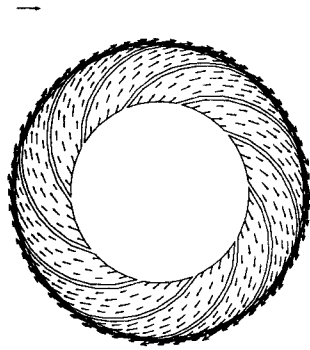
어 있으며, 채널이 위, 아래에 각각 형성되어 있다. 따라서 보다 정확히 유동현상을 파악하기 위하여 본 연구에서는 로터 전체를 해석대상으로 하여 수치모사하였다.

Fig. 5와 6은 입구압력이 67.4Pa, 출구압력이 120Pa 일 때 채널을 따른 속도 및 압력분포를 위, 아랫면에 대하여 각각 나타낸 것이다. 속도장을 보면 윗면의 출구측에서 속도가 커짐을 알 수 있다.

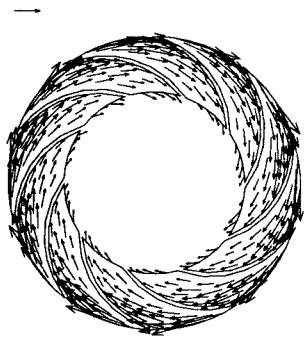
Fig. 7은 입구압력이 67.4Pa, 출구압력이 120Pa일 때 채널을 따른 평균압력분포를 나타낸 것이다. 압력이 윗날개의 입구측에서 감소하였다가 점차적으로 증가함을 볼 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 회박기체상태에 놓여있는 원판형 드래그펌프내의 유동현상을 DSMC법을 이용하여 수치해석하였다. 비탄성충돌모델을 이용한 경우 기존의 결과보다 유량이 작게 예측되었으며, 벽면반사조건에 따라 계산결과에 큰 차이가 발생하였다.



(a)



(b)

Fig. 5 Velocity vectors: (a) upper blades;  
(b) lower blades

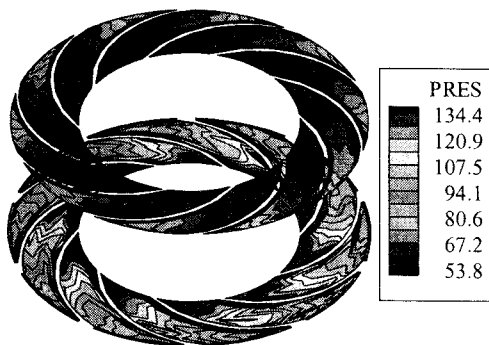


Fig. 6 Pressure distributions

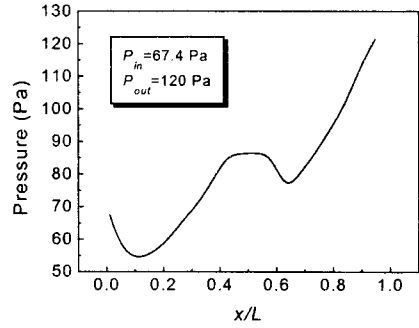


Fig. 7 Pressure distributions along the pump channel

## 후 기

이 논문은 1999년도 두뇌한국21사업 핵심분야 사업비에 의하여 지원되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고 문헌

- (1) Hablani, M. H., 1994, In *Vacuum Science and Technology: Pioneers of 20th Century*, edited by P. A. Redhead(AIP, New York), pp. 126-132.
- (2) Dry Pump, VC95-04C, Catalog, DAIKIN.
- (3) Murakami, Y., Abe, T., Ohsawa, H. and Hata, S., 1991, "Development of Turbo-Viscous Pump with Ceramic Rotor Assembly and Oil-Free Driving Unit," *J. Vac. Sci. Technol. A*, Vol. 9, No. 3, pp. 2053-2057.
- (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) Bird, G. A., 1994, *Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows*, Clarendon Press, Oxford.