

원판형 드래그펌프의 배기특성에 관한 연구

황영규* · 허중식** · 최욱진**
(1999년 11월 1일 접수)

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

Young Kyu Hwang, Joong Sik Heo and Wook Jin Choi

Key Words: Disk-type Drag Pump(원판형 드래그펌프), Direct Simulation Monte Carlo Method (DSMC법), Molecular Transition Region(분자전이영역), Compression Ratio(압축비), Throughput(유량)

Abstract

Numerical and experimental investigations are performed for the molecular transition and slip flows in pumping channels of a disk-type drag pump. The flow occurring in the pumping channel develops from the molecular transition to the slip flow traveling downstream. Two different numerical methods are used in this analysis: the first one is a continuum approach in solving the Navier-Stokes equations with slip boundary conditions, and the second one is a stochastic approach through the use of the direct simulation Monte Carlo method. In the experimental study, the inlet pressures are measured for various outlet pressures in the range of 0.1~4Torr. From the present study, the numerical results of predicting the performance, obtained by both methods, agree well with the experimental data for the range of Knudsen number $Kn \leq 0.1$ (i.e., the slip flow regime). But the results from the second method only agree with the experimental data for $Kn > 0.1$ (i.e., the molecular transition regime).

기호설명

a	: 채널폭
b	: 릿지폭(ridge width)
c	: 분자속도
c_r	: 분자상대속도
d	: 채널깊이
Δd	: 간극
f	: 속도분포함수
K	: 압축비

Kn	: Knudsen 수, λ/d
m	: 질량
P	: 압력
P_1	: 입구압력
P_d	: 후단압력
Q	: 유량(Torr· l/s)
R_1	: 원판 내경 반지름
R_2	: 원판 외경 반지름
R_3	: 반지름, Fig. 2 참조
R_c	: 반지름, Fig. 2 참조
u_s	: 미끄럼 속도

* 회원, 성균관대학교 기계공학부

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

TEL : (0331)290-7437 FAX : (0331)290-5849

** 성균관대학교 대학원 기계설계학과

그리스문자

λ : 평균자유경로

- σ : 충돌단면적; 적응계수
- ω : 각속도

- 하첨자
- 1 : 입구측
- d : 배기측
- w : 벽면

1. 서 론

근래에 들어와 진공기술의 비약적인 발전에 따른 과학 및 각종 산업분야에서의 고진공 이용의 증가와 더불어 오염물질이 전혀 없는 깨끗한 진공공간의 필요성이 대두되고 있으며, 진공을 이용한 연구개발 및 제품의 제조과정시 이러한 고진공 및 고정정 공간의 생성은 매우 필수적인 요소라고 할 수 있다. 과거 반도체 및 소재산업에 한정되어 있던 산업분야에서 근래에 들어서는 앞서 언급한 산업분야에 더하여 제약, 화학 등과 우주선개발시 연구시험장비 및 핵융합로, MEMS 등 첨단미래 산업분야 등에서도 적용되고 있다. 이런 증대되는 산업분야의 요구에 의한 펌프들의 수요 및 기술의 발달은 날로 괄목할만한 성장을 거두고 있다.

이런 성장하는 진공관련 기술중에서도 특히 발생장치인 진공펌프에 대한 관심이 증대되어 가고 있는데 최근 반도체산업 및 제조업 분야에서와 같이 고정정 및 큰 유량(throughput)이 요구되는 경우에 부합되는 펌프로써 터보형 진공펌프의 활용은 매우 활발한 실정이다. 이러한 터보형 펌프는 크게 Holweck 형태인 원통에 나선형 채널이 있는 헬리컬 드래그펌프와 Siegbahn 형태인 원판에 채널이 있는 원판형 드래그펌프로 구분된다. 터보형 펌프는 대유량에 적합할 뿐만 아니라 10^{-6} Torr 정도의 고진공으로부터 대기압까지 한대의 펌프로도 기체를 압축·배기할 수 있다. 또한 출구압을 상승시킴으로써 후단펌프로써 오일식이 아닌 다이아프램 펌프와 같은 무급유 기계식 펌프의 사용이 가능하기 때문에 깨끗한 진공공간을 생성할 수 있고, 펌핑시스템을 단순화시킬 수 있어서 유지·보수면에서도 유리한 점이 있다.^(1,2)

본 연구에서 다룰 원판형 드래그펌프에 관한

연구로서 Chu⁽³⁾는 $1 \sim 10^{-10}$ Torr에서 작동되는 10단의 TMP와 9단의 원판형 드래그펌프를 결합한 형태의 하이브리드형 펌프를 제작하여 실험적인 연구를 수행하였다. 펌핑채널의 형상은 대수나선(logarithmic spiral) 형태이며, 펌프의 성능은 수소인 경우 압축비가 700 이상이었고, 이것은 TMP로는 31단을 사용하여 도달할 수 있는 수치이다.

Tu 등⁽⁴⁾은 원판형의 터보형 펌프에 대한 성능을 향상시키기 위하여 기존의 모델과는 달리 회전익과 고정익에 나선채널을 만들어 이론 및 실험적 연구를 동시에 수행하였으며, 실험결과 기존의 펌프에 비해 성능이 향상됨을 보여주었다. 고정익에는 아르키메데스 나선형을, 회전익상에는 쌍곡선형의 유로형상을 각각 만들어 주었다.

Liu와 Pang⁽⁵⁾은 matrix-probability법을 이용하여 자유분자유동에서의 원판형 드래그펌프의 회전수 변화에 따른 압축비 및 펌핑효율을 구하였으며, 회전수가 높아짐에 따라 성능이 일정해짐을 보여주었다.

Shi 등⁽⁶⁾은 자유분자유동 영역에서 펌프의 성능을 향상시키기 위하여 고정익에 있던 채널대신 회전익에 채널을 만들어 실험하였다(고정익은 홈이 없는 원판형임). 실험결과 기존의 고정익에 채널을 만든 것 보다 성능이 향상됨을 보여주었다. 이론해석시 원판상의 유로를 구간구간으로 나누어 각각의 영역에 대한 기체분자의 통과확률을 Monte Carlo법을 이용하여 구하였으며, 이를 중첩하여 전체의 유로를 통과할 확률을 계산하였다. 또한 회전익과 고정익과의 간극이 압축비에는 크게 영향을 주었으나, 펌핑속도에는 그다지 영향이 미치지 않음을 밝혔다.⁽⁷⁾

Cheng 등⁽⁸⁾은 분자천이영역, 미끄럼영역, 연속체영역에서 원판형 유로상에 형성되는 유동장을 TVD(total variation diminishing) 기법을 이용하여 해석하였다. 연속체영역에서는 실험결과와 비교적 잘 일치하였으나, 경제조건으로서 벽에서의 점착조건(no-slip condition)을 사용하였기 때문에 분자천이영역과 미끄럼영역에서는 큰 차이를 보여 주었다. 채널의 출구부근에서는 기체분자의 역류현상이 뚜렷이 나타났으며, 특히 출구압력이 13.3mbar보다 커질 경우 압축비는 오히려 출구측으로 갈수록 감소함을 보였다.

그러나 실제 원판형 드래그펌프의 작동영역은 분자천이영역임에도 불구하고, 위에 언급한 기존

연구들^(3~8)은 모두 자유분자유동영역 혹은 연속체영역에 국한된 성능해석만을 다루었다. 따라서 현실적으로 분자들간의 충돌이 펌프의 성능에 미치는 영향을 파악해야만 한다.

또한, 실험적인 연구로서 Mase 등⁽⁹⁾은 반경류형 펌프와 원주류형 펌프를 결합시켜 직접 대기로 배출할 수 있는 펌프를 제안하였다. 반경류형은 원판위에 나선형 유로가 형성되어 있으며, 분자유동영역에서 우수한 성능을 나타내었다. 원주류형은 일반적인 재생펌프의 깃 형상과 동일하며, 대기압 부근에서 반경류형보다 압축특성이 우수하였다. 따라서 고진공측에는 반경류형, 배기구측에는 원주류형의 로터를 각각 설치하여 3×10^{-2} Pa의 입구압력으로부터 직접 대기로 기체를 압축·배기할 수 있었다.

Murakami 등⁽¹⁰⁾은 원판형 나선 펌핑채널이 있는 다단의 세라믹 회전익으로 구성된 터보형 펌프를 개발하였다. 입구측의 날개는 알루미늄 재질을 이용하였고, 출구측은 가스의 마찰열 때문에 세라믹으로 날개를 제작하였다. 작동압력은 대기압에서부터 10^3 Pa 까지의 영역이다.

본 연구에서는 분자친이 및 미끄럼유동에서의 원판형 드래그펌프의 성능특성을 수치해석 및 실험을 통하여 파악하고자 한다. 이론적으로는 회박기체영역에서의 해석방법인 DSMC(direct simulation Monte Carlo)법과 미끄럼 경계조건을 이용한 연속체 영역에서의 지배방정식인 Navier-Stokes 방정식을 사용하고자 한다. 실험적으로는 원판형 로터를 제작하여 펌프에 설치한 후 출구압력에 따른 압축 및 배기특성을 파악하고자 한다.

2. 수치해석방법

본 연구에서 해석하고자 하는 펌프내의 유동영역은 주로 중진공 영역이며, 이 경우 기체분자의 평균자유경로는 유동장내의 특성길이와 비슷한 크기를 갖는다. 이러한 유동조건하에서는 일반적인 연속체의 가정이 적용되지 않으며, 응력텐서(stress tensor)와 열유속 벡터를 결정하는 구성방정식(constitutive equations)들은 희박효과(rarefaction effect)를 표현하기 위해서 적절하게 수정되어야만 한다. 연속체라는 가정으로부터의 이탈정도는 유동의 희박정도를 나타내는 Kn 수(Knudsen number, λ/d)로 표현되며, Kn 수에 따라서 유

동은 크게 연속체, 미끄럼, 친이 및 자유분자유동영역으로 구분할 수 있다. 이러한 모든 영역에 적용가능한 지배방정식은 분자적 개념의 Boltzmann 방정식이다.

한편 Chapman-Enskog법에 의해 연속체영역에서의 지배방정식인 Navier-Stokes 방정식은 Boltzmann 방정식으로부터 유도된다.⁽¹¹⁾ 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.

2.1 DSMC simulations

다음 식 (1)은 Boltzmann 방정식을 나타낸 것이다.

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

여기서 f 는 속도분포함수(velocity distribution function), n 은 수밀도, c 는 속도, F 는 외력, m 은 질량, c_r 은 충돌분자간의 상대속도, σ 는 충돌단면적(collision cross-section)을 각각 나타낸다. 그리고 상첨자 *는 충돌후의 상태, 하첨자 1은 충돌쌍을 나타낸다.

기체의 희박도에 따라 구분되는 유동영역의 전체에 적용 가능한 지배방정식인 Boltzmann 방정식은 적분·미분형 방정식으로서 분자간 충돌을 묘사하는 적분항으로 인해 해석적인 해는 물론 기존의 수치적방법(FDM, FEM 등)도 많은 문제점을 가지고 있다. 따라서 Boltzmann 방정식의 직접적인 풀이가 아닌 분자들의 운동을 묘사하는 방법이 회박기체유동장 해석에 이용되기 시작하였으며, 본 연구에서는 Bird⁽¹¹⁾에 의해 개발된 DSMC법을 이용하여 해석하고자 한다.

DSMC법은 기체유동을 묘사하기 위하여 실제유동에 존재하는 많은 수의 입자들을 대표하는 가상의 모사입자를 추적하게 된다. 계산영역에서 시간의 흐름에 따라 입자는 이동하고 서로 충돌하여 내부에너지 등을 교환하며, 경계면과 상호

작용한 후 최종적으로 모사입자들의 미시적인 물리량들을 통계적으로 처리하여 전체유동장의 거시적 물리량들을 산출하여 분석하는 기법이다. DSMC법의 계산과정을 Fig. 1에서 나타내었으며, 간략히 요약하면 다음과 같다.

- (1) 계산영역에 대한 격자계를 구성한다.
- (2) 유동장내 또는 경계면에서 모사입자 생성
- (3) 미소시간 간격 Δt 동안 분자들 각각은 그 속도성분에 의해 새로운 위치로 이동한다. 또한 격자계의 경계면과 충돌을 겪게 되며, 계산영역내로 입·출구를 통하여 분자들의 유입을 고려한다.
- (4) 적절한 분자모델과 충돌 샘플링기법을 이용하여 분자간 충돌을 계산하고 필요에 따라 에너지교환 및 화학반응 등을 계산한다.
- (5) 거시적 물리량들을 구하기 위한 샘플링을 한다.
- (6) 시간을 Δt 만큼 증가시키고 과정 (3)~(5)를 반복하여 단계 (5)에서 구한 거시적 물리량들이 일정한 값으로 수렴하게 되면 계산을 종료한다.

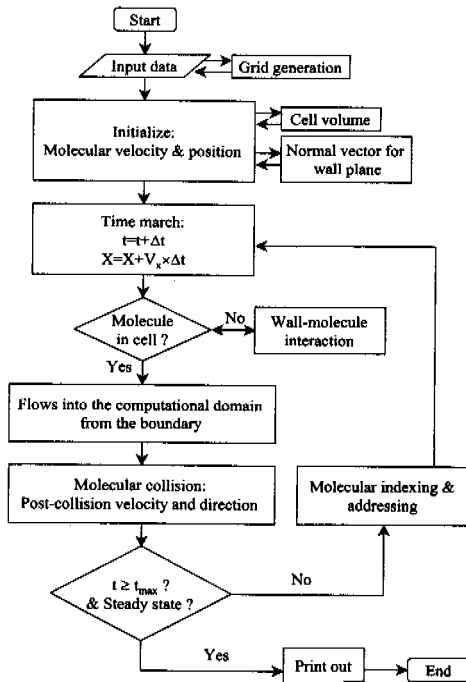


Fig. 1 Flow chart of the DSMC program

이와 같은 방법으로 DSMC 수치해석을 수행하였으며, 자세한 수치해석방법은 참고문헌 (12)에 잘 나타나 있다.

2.2 Navier-Stokes simulations

본 연구에서는 원통형 드래그펌프에 적용했던 기존의 연구⁽¹³⁾에서 수행한 연속체적인 접근방법을 원판형 드래그펌프에 적용시켜 펌프의 성능해석을 수행하였으며, 이 결과를 분자적 개념의 확률수치해법인 DSMC법을 이용한 성능해석결과와 상호 비교하였다.

즉, 원판상에 있는 채널을 N 등분하여 각각을 직선적인 헬리컬 채널로 간주하였다(Fig. 2 참조). 입구압력에 대하여 첫 번째 채널의 출구압력을 구하고, 계산된 출구압력을 두 번째 채널의 입구압력으로 하여 출구압력을 다시 계산하는 방식으로 마지막 N 번째 채널의 최종 출구압력을 계산하였다.⁽¹⁴⁾

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

실험장치는 성능해석을 수행할 원판형의 드래그펌프와 진공압 측정용 진공계이지, 후단펌프, 가스 유량측정을 위한 유량계, 펌프의 모터부분을 제어하기 위한 주파수 변환기 등으로 구성되어 있으며, 실험장치의 개략도를 Fig. 3에 도시하였다.

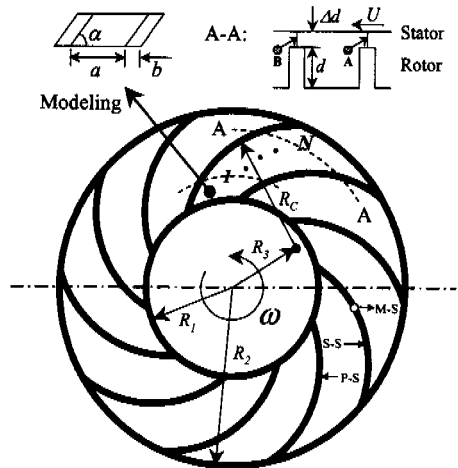


Fig. 2 Disk-type rotor

원판형 드래그펌프 내의 모터는 24,000rpm으로 회전하는 고주파 모터로서 입력전압은 3상 380V, 1.5kW의 용량을 가지고 있다. 로터는 고강도 알루미늄 합금으로 제작하였고 채널이 원판 위에 형성되어 있다.

로터의 상부에는 평판의 스테이터가, 하부에는 채널이 있는 스테이터가 구성되어 있으며, 로터와의 간극은 각각 0.5mm이다. 스테이터는 펌프의 케이싱 내측의 스페이스(spacer)에 의해 고정되어 있으며, 이를 Fig. 3에 나타내었다.

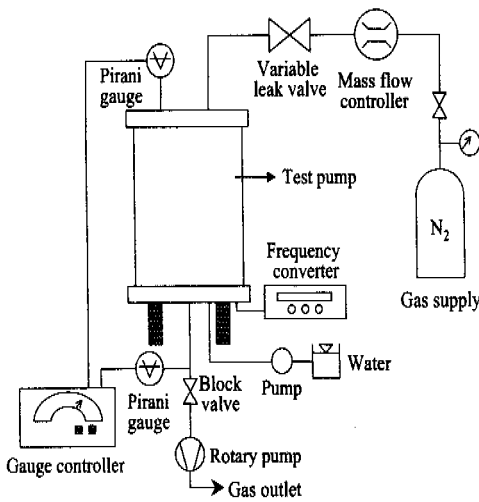


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental apparatus for performance test of the drag pump

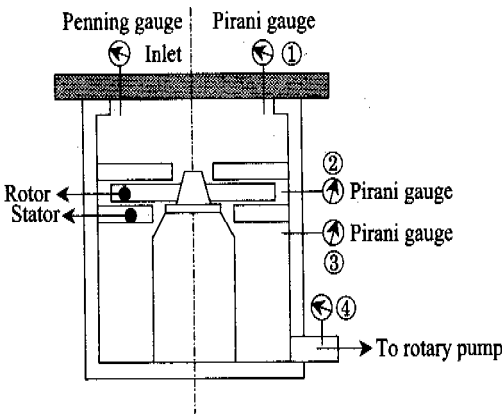


Fig. 4 Cross-section of the disk-type drag pump

또한, 로터는 고정도 볼 베어링(high precision ball bearing)을 각각 사용하여 로터의 고속회전을 지지하도록 하였다.

로터의 고속회전으로 인한 모터의 과열을 방지하기 위하여 펌프내부로 냉각수가 흐르도록 하였으며, 시스템의 온도는 $22 \pm 3^\circ\text{C}$ 로 유지시켰다. 로터의 구체적인 형상과 제원은 Fig. 2와 Table 1에 각각 나타내었다.

펌프의 압축특성을 파악하기 위해서 입구압력과 후단압력(즉, 로터리펌프의 입구압력)을 동시에 측정하였다. 펌프의 입구부분과 출구부분에 각각 피라니게이지(GP-2ARY, ULVAC JAPAN Ltd.)를 설치하였으며, 입구압이 낮은 경우에는 페닝게이지(CT-3PM, DIAVAC LIMITED)를 이용하였다.

피라니게이지의 작동영역은 $10 \sim 10^{-3}$ Torr이고, 페닝게이지는 $10^{-2} \sim 10^{-7}$ Torr이다. 또한 로터와 스테이터에서의 압축특성을 비교하기 위하여 Fig. 4의 ②번과 ③번 부분에 각각 피라니게이지를 설치하였다.

펌프내로 유입되는 테스트가스의 유량은 유량계(FC-780C, Aera Co.)를 사용하여 측정하였으며, 유량계에서는 질소기준으로 1,300sccm까지 유량을 주입할 수 있고 2.5bar의 일정한 압력으로 펌프입구부로 유입되도록 하였다.

본 연구에서는 펌프속도 960l/min, 최대도달압력 5×10^{-4} Torr의 2단 로터리펌프((주)우성진공)를 이용하였다. 후단압력의 조절을 위하여 로터리펌프의 입구부에 블록밸브(block valve)를 설치하였다.

3.2 실험방법

실험용 드래그펌프는 Fig. 3에 나타낸 로터리

Table 1 Geometrical dimensions of the disk-type rotor

R_1	43.0 mm
R_2	84.3 mm
Δd	0.5 mm
d	5.0 mm
R_3	32.0 mm
R_c	56.0 mm
Archimedes' spiral channel	$r = R_1 + m\theta$

펌프와 같은 별도의 후단 배기시스템을 필요로 한다. 펌프의 안정적인 작동을 위해서는 지나친 과열과 냉각을 막는 적절한 냉각 시스템과, 고속 회전으로 인한 고경도 불 베어링의 윤활도 중요한 문제이다. 펌프의 후단압력이 10Torr 가까이 되면 열발생이 매우 커지게 됨을 관찰하였으며, 본 연구에서는 압력범위를 0.1~4Torr로 제한하였다. 또한 드래그펌프는 고속회전을 하므로 작동하는 동안 충격이 방지되어야 한다.

먼저 후단펌프를 가동시켜 펌프내부의 압력이 드래그펌프가 작동할 수 있는 여건이 되도록 충분히 배기한다. 작동조건에 맞는 진공도에 도달되면 드래그펌프 및 펌프에 부착된 냉각시스템을 구동시킨다. 드래그펌프의 시동 및 정지시간은 각각 5분여가 소요된다. 시스템이 정상적인 작동 온도와 일정한 압력이 얻어지면 테스트가스를 주입한다.

본 연구에서는 테스트가스로 질소(N₂)를 사용하였으며, 유입가스의 유량조절은 유량계와 리크 밸브(variable leak valve)를 이용하여 제어하였다. 후단압력은 블록밸브를 이용하여 조절하였으며, 요구하는 압력에 도달하였을 경우 입구압, 로터와 스테이터에서의 압력들을 각각 측정하였다. 또한 후단압력을 고정하고 유량을 변화시켜 입구압력의 변화를 측정하였다. 회전속도의 변화시 성능측정은 후단압력을 0.14Torr로 고정하고 3000 rpm씩 증가시키면서 입구압력 변화를 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 원판형 드래그펌프의 배기특성을 로터를 직접 제작하여 성능실험을 수행하였으며, 이론적으로는 DSMC법과 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 펌프의 채널내에 형성되는 분자친이유동 및 미끄럼유동을 해석하였다.

유량 $Q = 0$ 일 때 로터의 출구압력에 따른 입구압력의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 출구압력이 낮아짐에 따라서 입구압력도 낮아지는 경향을 보이고 있으며, 입구 최저압력은 5.9×10^{-4} Torr에 도달함을 알 수 있다. 한편 Navier-Stokes 방정식과 1차 및 2차 미끄럼 경계조건을 이용하여 해석한 결과도 같이 나타내었다.

기존의 연구^(13,14)에서는 1차 미끄럼 경계조건을

이용하였으나 본 연구에서는 다음 식 (2)로 표현되는 2차 미끄럼 경계조건을 이용하여 해석하였다.

$$u_s = u_w + Kn \left(\frac{\partial u}{\partial n} \right)_w + \frac{Kn^2}{2} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial n^2} \right)_w \quad (2)$$

여기서 u_s 는 벽면에서의 미끄럼속도, u_w 는 벽면의 속도를 각각 나타낸다.

본 연구에서 도입한 2차 미끄럼 경계조건을 이용한 Navier-Stokes 방정식의 해석결과는 그림에서 보듯이 Kn 수가 0.1보다 작은 미끄럼영역에 가까운 부분에서는 1차 경계조건을 이용한 결과와 크게 차이는 없으나, 분자유동영역을 포함한 전 구간에서 정성적으로 실험결과를 따라가는 경향을 나타냄을 알 수 있다.

한편 그림에서 σ 는 분자가 벽면에 충돌할 때의 적응계수(accommodation coefficient)를 나타낸다. 또한 DSMC법의 해석결과는 전체 영역에서 실험결과와 잘 일치함을 보여주고 있다.

Fig. 6은 유량증가에 따른 로터의 출구압력과 입구압력의 변화를 나타낸 것이다. 유량의 증가에 따른 입구압력의 변화는 유량이 없을 때와 거의 유사하나 유량증가에 따라 입구압력이 조금씩 상승함을 알 수 있다. 또한 Navier-Stokes 해석결과와 실험값은 낮은 출구압력을 제외하고는 잘 일치하고 있다.

Fig. 7에는 후단압력의 변화에 따른 로터와 스테이터의 압축비를 각각 표시하였다. 즉 로터의 출구압력에 대한 펌프의 입구압력, 스테이터의 출구압력에 대한 로터 입구압력의 비를 각각 나타낸다. 압축비는 후단압력이 낮아질수록 급격하게 상승하는 경향을 나타내고 있다. 로터의 압축비는 최고 47까지 압축되었으며, 스테이터에서는 최고 1.8까지 압축되었다. 또한 출구압력이 0.1 Torr일 때 DSMC법을 이용하여 계산한 결과와도 잘 일치함을 알 수 있다.

입구압력 $P_1=0.076$ Torr일 때 로터에서의 유량과 압력차에 대한 실험결과 및 DSMC 수치해석 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 실험결과는 유량을 변화시키면서 입구압력을 고정시키고 그 때의 유량에 해당되는 출구압력을 측정하여 얻은 것이다.

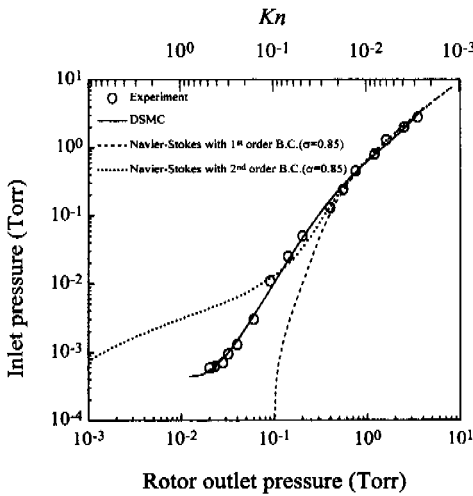


Fig. 5 Effect of the rotor on the inlet pressure at zero throughput

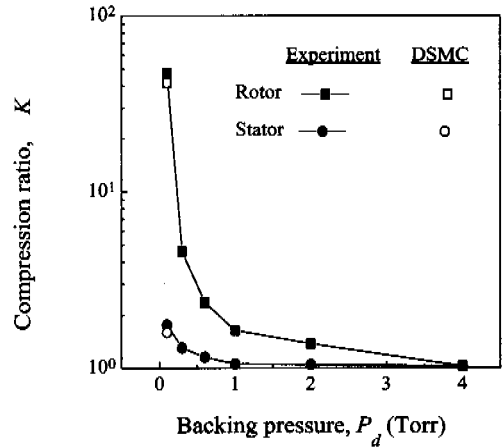


Fig. 7 Compression ratio vs. backing pressure at zero throughput

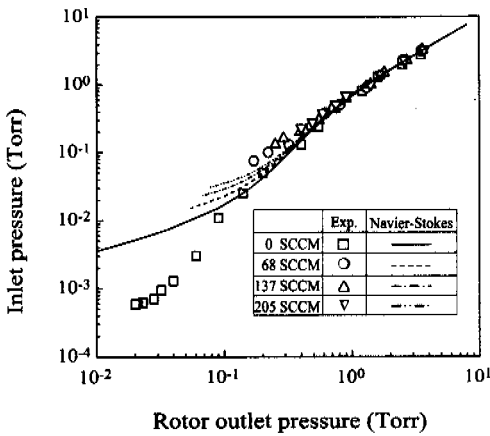


Fig. 6 Effect of the rotor on the inlet pressure at several volume flow rate

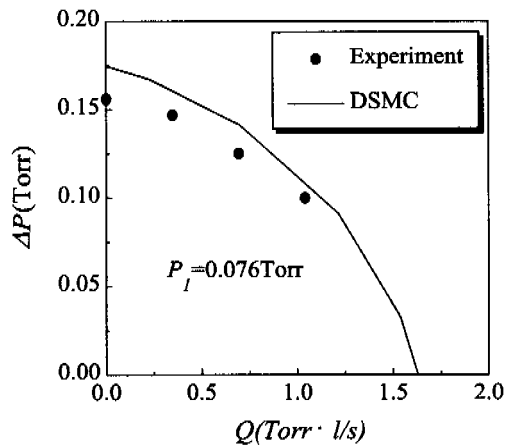


Fig. 8 Pressure difference vs. throughput at inlet pressure $P_1=0.076$ Torr

차압이 0.1Torr 이하인 경우에는 시스템의 유량을 증가시키면 후단압력을 더 이상 낮출 수 없는 한계상황에 도달하게 되어 Fig. 8에 보여지는 일부영역에 대해서만 실험을 수행하였다. DSMC 결과는 유량이 작은 영역에서 실험결과보다 약간 크게 성능을 예측하고는 있으나 전체적으로 수치해석결과와 실험결과는 잘 일치하고 있다.

배기되는 유로상의 각 위치에 따른 압력측정 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 그림에서 x 축상의 위치 1은 펌프의 입구부분 (회전익의 입구부분),

2는 회전익의 출구부분(고정익의 입구부분), 3은 고정익의 출구부분, 4는 후단압력(로터리펌프의 입구부분)을 각각 의미한다(Fig. 4 참조). 그림에서 보듯이 출구부분으로 진행하면서 압력이 높아지면서 기체가 압축되어 배기됨을 알 수 있다. 또한 후단압력이 감소함에 따라 회전익의 입구부분과 출구부분 사이의 압력차는 점점 증가함을 볼 수 있으며, 고정익에서의 압력차이는 매우 작다는 것을 알 수 있다.

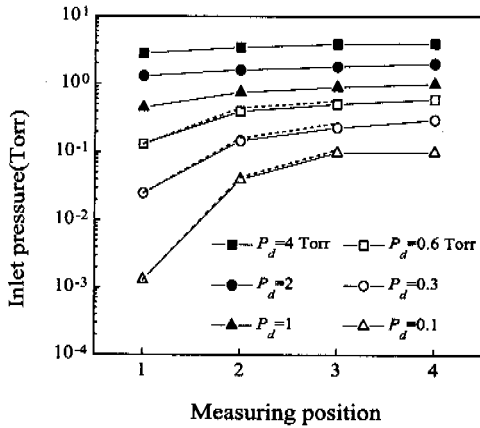


Fig. 9 Pressure distribution along the pumping passage

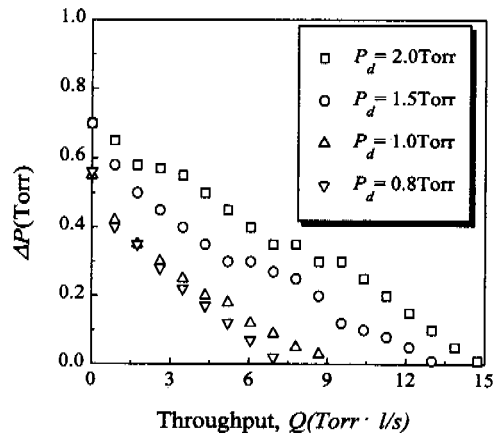


Fig. 11 Pressure difference vs. throughput at several backing pressure

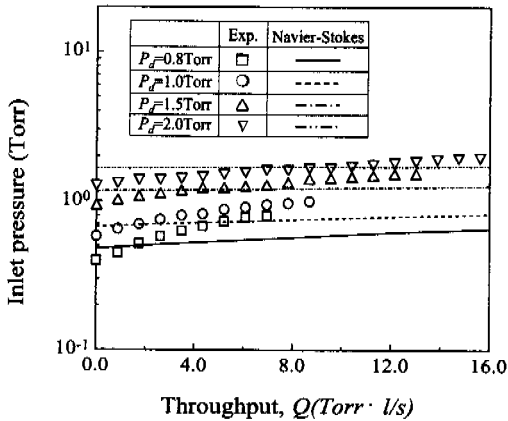


Fig. 10 Inlet pressure vs. volume flow rate at several backing pressure

Fig. 10에서는 후단압력을 2.0, 1.5, 1.0, 0.8Torr로 변화시켰을 경우 각 후단압에서의 유량에 따른 입구압 변화를 측정 한 것이다. 유량이 증가하면서 입구압은 점차 상승하고 있음을 보여주고 있으며, 그 증가의 폭은 후단압력이 높을 경우보다 낮은 경우 더욱 심하게 변화해 감을 알 수 있다.

Fig. 11은 펌프의 후단압력과 입구압력과의 압력차 ΔP 와 유량 Q 의 관계를 나타낸 그림이다. 유량이 증가함에 따라 거의 선형적으로 ΔP 가 감소함을 볼 수 있으며, 후단압력이 높아질수록 압력차와 유량이 모두 증가함을 알 수 있다.

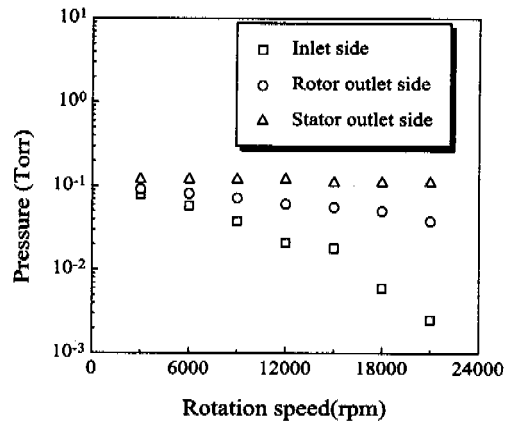


Fig. 12 Inlet pressure vs. rotation speed

Fig. 12는 회전속도에 따른 원판형 드래그 펌프의 각 위치별 압력변화에 대한 측정치이다. 이 때 후단압력은 0.14Torr로 고정하고 회전속도는 3,000rpm 단위로 변화시키면서 측정하였다. 회전속도가 증가하면 펌프의 입구압력이 회전속도에 의해 가장 급격히 감소함을 알 수 있으며, 이 부분의 압력은 약 $1.6 \times 10^{-3}\text{Torr}$ 까지 떨어짐을 알 수 있다. 한편 로터의 출구에서 측정한 압력은 회전수에 따른 압력변화가 입구부 보다는 작지만 대략 $3.4 \times 10^{-2}\text{Torr}$ 까지 떨어짐을 알 수 있다. 그리고 스테이터의 출구에서는 압력의 변화가 거의 관찰되지 않았다.

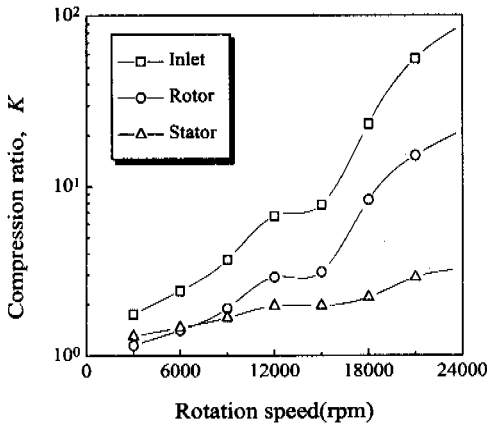


Fig. 13 Compression ratio vs. rotation speed

Fig. 13은 회전수의 변화에 따른 압축비의 변화를 나타낸 그림이다. 회전속도에 따라 압축비의 증가도 급격히 상승함을 알 수 있으며, 전 회전속도 구간에서 로터부가 스테이터부 보다는 압축비가 높고, 특히 회전속도가 증가할 경우 더욱 압축비의 차이가 커짐을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 원판형 드래그펌프에 대하여 미끄럼 및 분자천이영역에서 이론적 및 실험적으로 압축 및 배기특성을 해석하였다.

유량이 없이 측정된 경우 최대도달압력이 5.9×10^{-4} Torr, 최대압축비가 로터에서는 약 47정도, 스테이터에서는 약 1.8정도를 각각 나타내었다.

본 연구에서 새롭게 도입한 2차 미끄럼 경계조건을 이용한 Navier-Stokes 방적식의 해석결과는 Kn 수가 0.1보다 작은 미끄럼영역에 가까운 부분에서는 기존의 1차 경계조건을 이용한 결과와 크게 차이는 없었으나, 분자자유영역을 포함한 전 구간에서 정성적으로 실험결과와 잘 일치함을 관찰하였다.

원판형 드래그펌프는 미끄럼영역에서는 압축비가 낮지만 분자천이영역에서 작동할 경우 상대적으로 높은 압축비를 가짐을 알 수 있었다. 또한 회전속도가 변할 경우 입구압력은 회전속도의 증가에 따라 점차 감소함을 알 수 있었다. 그리고 회전속도에 따라 압축비의 증가도 급격히 상승함

을 알 수 있었고 전 회전속도 구간에서 로터부가 스테이터부보다 압축비가 높게 나타났다. 이에 따라 스테이터에 채널이 있는 것 보다는 로터에 채널이 있는 경우가 압축특성이 뛰어남을 알 수 있었다.

후 기

본 논문은 1997년도 한국학술진흥재단의 자유공모과제(1997-001-E00023) 연구비에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Hablani, M. H., 1990, *High-Vacuum Technology*, Marcel Dekker, Inc.
- (2) Hablani, M. H., 1994, in *Vacuum science and Technology: Pioneers of 20th Century*, edited by P. A. Redhead(AIP, New York), pp. 126~132.
- (3) Chu, J. G., 1987, "A New Hybrid Molecular Pump with Large Throughput," *J. Vac. Sci. Technol. A*, Vol. 6, No. 3, pp. 1202~1204.
- (4) Tu, J. Y., Zhu, Y. and Wang, X. Z., 1990, "A New Design for the Disk-Type Molecular Pump," *J. Vac. Sci. Technol. A*, Vol. 8, No. 5, pp. 3870~3873.
- (5) Liu, N. and Pang, S. J., 1990, "Microscopic Theory of Drag Molecular Dynamics in the Range of Free Molecular Flow," *Vacuum*, Vol. 41, No. 7~9, pp. 2015~2017.
- (6) 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.
- (7) Shi, L., Zhu, Y., Wang, X. Z. and Pang, S. J., 1993, "Influence of Clearance on the Pumping Performance of a Molecular Drag Pump," *J. Vac. Sci. Technol. A*, Vol. 11, No. 3, pp. 704~710.
- (8) Cheng, H. P., Jou, R. Y., Chen, F. Z., Chang, Y. W., Iwane, M. and Hanaoka, T., 1999, "Flow Investigation of Siegbahn Vacuum Pump by CFD Methodology," *Vacuum*, Vol. 53, pp. 227~231.
- (9) Mase, M., Gyoubu, I., Nagaoka, T. and

- Taniyama, M., 1988, "Development of a New Type of Oil-free Turbo Vacuum Pump," *J. Vac. Sci. Technol. A*, Vol. 6, No. 4, pp. 2518~2521.
- (10) 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.
- (11) Bird, G. A., 1994, *Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows*, Clarendon Press, Oxford.
- (12) 허중식, 김동권, 황영규, 1998, 회전날개 주위 분자천이유동에 관한 수치해석적 연구," 대한기계학회논문집 B, Vol. 22, No. 5, pp. 640~650.
- (13) Sawada, T., 1976, "Rarefied Gas Flow in a Rectangular Groove Facing a Moving Wall," *Sci. Papers of the Institute of Physical and Chemical Research*, Vol. 70, No. 4, pp. 79~86.
- (14) 허중식, 황영규, 박종윤, 1999, "회전날개 주위 분자천이유동의 수치해석방법에 관한 연구," 한국진공학회 논문집, Vol. 8, No. 2, pp. 83~92.