

헬리컬 채널내부의 3차원 희박기체유동

황영규* · 허중식**

Three-dimensional Rarefied Flows in Rotating Helical Channels

Y. K. Hwang*, J. S. Heo**

Key Words: Rarefied gas flows(희박기체유동), DSMC method(직접모사법), Slip velocity(미끄럼 속도), Molecular transition region(분자전이영역), Helical channel(헬리컬 채널)

Abstract

Numerical and experimental investigations are performed for the rarefied gas flows in pumping channels of a helical-type drag pump. Modern turbomolecular pumps include a drag stage in the discharge side, operating roughly in $10^{-2} \sim 10$ Torr. The flow occurring in the pumping channel develops from the molecular transition to 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 particle approach through the use of the direct simulation Monte Carlo(DSMC) method. The flow in a pumping channel is three-dimensional(3D), and the main difficulty in modeling a 3D case comes from the rotating frame of reference. Thus, trajectories of particles are no longer straight lines. In the present DSMC method, trajectories of particles are calculated by integrating a system of differential equations including the Coriolis and centrifugal forces. Our study is the first instance to analyze the rarefied gas flows in rotating frame in the presence of noninertial effects.

1. 서론

터보분자펌프(turbomolecular pump, TMP)는 매우 낮은 압력영역에서 효과적으로 기체를 압축하여 배기하는 고진공펌프의 일종이다. 최근 TMP와 드래그펌프를 결합한 새로운 형태들이 등장하고 있으며, 그들 중 복합형 혹은 하이브리드형 분자펌프들이 많은 각광을 받고 있다.⁽¹⁾ TMP에 부착되는 드래그펌프로는 일반적으로

헬리컬 형태와 원판형이 많이 이용되고 있다. 본 연구에서는 헬리컬 드래그펌프(helical-type drag pump, HTDP)에 대하여 이론적으로 배기 성능을 해석하고자 한다. HTDP의 펌핑채널 내부유동은 작동압력에 따라 미끄럼유동영역(slip flow region)에서 분자전이영역(molecular transition region)까지 변화한다. 본 연구에서는 미끄럼 경계조건을 사용한 Navier-Stokes 방정식과 희박기체의 수치해석방법인 DSMC(direct simulation Monte Carlo)법을 이용하고자 한다.

이러한 HTDP의 채널유동은 많은 연구자들에 의해 연구되었다. Nanbu등⁽²⁾은 DSMC법을 이용하여 미끄럼 및 분자전이영역에서의 성능

* 성균관대학교 기계공학부

** 성균관대학교 대학원

특성을 파악하였으며, 대부분의 압력상승은 채널의 출구부근에서 형성됨을 규명하였다.

Sawada⁽³⁾ 및 Sawada와 Nakamura⁽⁴⁾는 미끄럼 경계조건과 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 HTDP의 펌핑 메커니즘을 규명하였으며, 다양한 채널 형상변수들의 변화에 따른 펌프의 압축성능을 파악하였다. 또한 분자천이영역에서 채널내부에 난류의 발생으로 인한 와(vortex)의 형성으로 이 영역에서 성능이 향상됨을 보여 주었다. Panos등⁽⁵⁾은 점성영역과 자유분자영역(free molecular region)을 구분하는 압력(separation pressure)를 새롭게 정의하여 채널내부 유동장을 위의 두 영역으로 나누어 각각 성능을 해석하였다.

그러나, 기존의 연구들⁽²⁾⁻⁽⁵⁾은 모두 준3차원(quasi three-dimensional, Q3D) 모델에 국한하였다. 즉, 3차원적으로 회전하는 원통형 헬리컬 채널을 그루브(groove)위에 평판이 움직이는 현상으로 단순화시켜 해석하였다(Fig. 1 참조). 본 연구에서는 펌프의 배기성능에 미치는 코리올리(Coriolis) 및 원심력의 영향을 고찰하기 위하여 헬리컬 채널을 기존의 연구와는 달리 3차원적으로 모델링하여 수치해석을 수행하였다.

우선 Q3D 및 3D 모델에 대한 해석결과를 기존의 연구⁽²⁾와 비교하여 그 타당성을 검증하였으며, 3D 모델이 더 정확한 결과를 가져옴을 확인하였다. 또한 출구압력 0.02~4Torr인 범위에서 실험한 이전의 결과⁽⁶⁾와 수치해석결과를 상호 비교하였다. DSMC 수치해석을 통하여 채널내부의 속도 및 밀도장을 각각 구하였으며, 분자천이영역에서의 Navier-Stokes 방정식의 타당성에 대하여 고찰하였다.

2. Q3D, 3D 모델

HTDP는 회전하는 원통의 주변에 헬리컬 채널이 일정한 간격으로 배열되어 있는 형태이며, 원주방향으로 펼쳐진 형태(Q3D 모델)를 Fig. 1에 나타내었다. 여기서, U 는 주속도를 나타내며, A-A 단면으로 잘랐을 때 도시된 Fig. 1(b)에서 α 는 채널의 경사각, a 는 채널의 폭,

b 는 채널벽면의 두께, a 는 채널의 높이, Δa 는 로터와 스테이터간의 간극을 각각 나타낸다. 본 연구에서는 Fig. 1(a)의 로터 1인 경우는 해석을 단순화하기 위하여 깊이가 일정하다고 가정하였으며, Fig. 1(b)의 로터 2인 경우에는 입구측으로부터 출구측까지 깊이를 연속적으로 변화시켰다. 즉, 입구측에서 8mm로 시작하여 출구측의 4mm까지 연속적으로 깊이가 변화한다. 수치해석에 사용된 주요 해석변수는 Table 1과 같다.

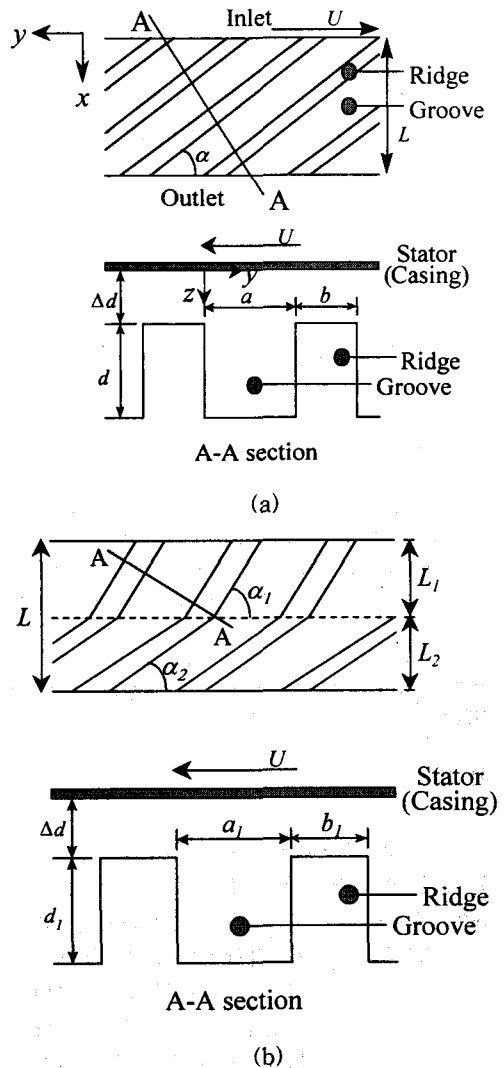


Fig. 1 Geometry of helical-type drag pump (Q3D): (a) rotor 1; (b) rotor 2.

Table 1. Geometrical dimensions of helical-type rotors

Rotor		1	2
Rotor diameter	D	168.6 mm	168.6 mm
Rotor axial length	L	132.0 mm	$L_1 = 66.0$ mm
			$L_2 = 66.0$ mm
Helix angle	α	15°	$\alpha_1 = 40^\circ$
			$\alpha_2 = 15^\circ$
Channel width	a	13.6 mm	$a_1 = 42.2$ mm
			$a_2 = 13.6$ mm
Ridge width	b	5.4 mm	$b_1 = 5.4$ mm
			$b_2 = 5.4$ mm
Channel depth	d	4.0 mm	$d_1 = 8.0$ mm
			$d_2 = 4.0$ mm
Clearance	Δd	0.9 mm	0.9 mm
No. of grooves	N_g	7	7
Rotational speed	rpm	24000	24000

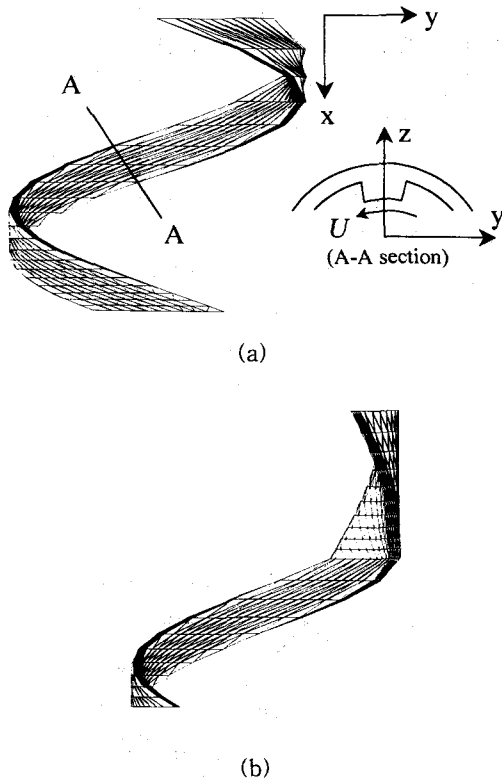


Fig. 2 Computational grid system of 3D helical channel: (a) rotor 1; (b) rotor 2.

원통형 드래그펌프인 경우 현재까지 수행된 기존연구들은 모두 Fig. 1과 같은 Q3D 모델에 국한되었다. 그러나 엄밀하게 이러한 해석에서

는 회전하는 3차원 원통좌표계에서 나타나는 코리올리 및 원심력을 고려할 수 없으므로 이에 대한 수정이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 2와 같은 3D 해석모델을 적용하여 성능해석을 수행하였으며, Q3D 모델의 결과와 상호 비교하였다.

3. 수치해석방법

3.1 DSMC simulations

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, FEM등)도 많은 문제점을 가지고 있다.⁽⁷⁾

따라서 Boltzmann 방정식의 직접적인 풀이가 아닌 분자들의 운동을 묘사하는 방법이 희박기체유동장 해석에 이용되기 시작하였으며, 본 연구에서는 Bird⁽⁷⁾에 의해 개발된 DSMC법을 이용하여 해석하고자 한다.

격자계

유동장을 해석하기 위하여 채널내부를 3D 모델인 경우 Fig. 2와 같이 분할하였으며, Q3D 모델인 경우에는 Fig. 3의 격자계를 이용하였다. 본 연구에서는 Q3D 모델인 경우 Fig. 3과 같이 일반적인 형태인 육면체(hexahedron) 셀을 이용하였다.

수치해석시 기체분자와 육면체의 각 면과의 충돌시간을 계산하여 분자의 궤적을 추적하기 때문에 육면체의 각 면은 평면이어야 한다. 그러나 3D 모델인 경우에는(Fig. 2 참조) 육면체의 셀을 이루는 각 면이 평면이 아닌 휘어진 곡면이기 때문에 평면으로 구성된 5개의 사면체(tetrahedron) 셀로 분할하여 계산하였다. 또한 압력이 출구측으로 갈수록 증가하기 때문에 축방향으로는 비균일 격자계를 이용하였다.

3.2 Navier-Stokes simulations

본 연구에서 다루고자 하는 분자천이영역 혹은 미끄럼영역에서 정확한 유동해석을 통하여

펌프의 성능을 예측하기 위해서는 연속체 개념이 아닌 분자적 개념의 해석이 반드시 필요하다. 그러나 근사적으로는 이러한 영역에서도 연속체 개념의 Navier-Stokes 방정식과 미끄럼 경계조건을 이용하여 해석이 가능하다. 회박기체와 고체벽과의 경계면에서는 연속체영역에서의 경계층(boundary layer) 및 점착(no-slip)조건은 적용되지 않으며, 벽면과 인접한 기체층(Knudsen layer)에서는 유한한 크기의 미끄럼이 발생하게 된다. 본 연구에서는 기존의 연구^{(3),(4)}에서 수행한 연속체적인 접근방법을 이용하여 펌프의 성능해석을 수행하였으며, 분자적 개념의 확률수치해법인 DSMC법을 이용한 성능해석결과와 상호 비교하였다.

4. 결과 및 고찰

회전수 600rpm, 출구압력 $P_2=0.3\text{Torr}$ 인 경우 로터와 펌프 케이싱과의 간극이 0.88mm일 때의 성능해석 결과를 Fig. 4에 나타내었으며, Q3D 모델에 대한 DSMC 결과는 Nanbu 등⁽²⁾의 해석결과와 잘 일치함을 볼 수 있다. 그러나 본 연구에서 수행한 Navier-Stokes 방정식과 미끄럼 경계조건을 이용한 해석결과는 DSMC 및 실험결과보다 모두 작게 예측됨을 알 수 있다. Q3D 해석모델은 Fig. 3에서와 같이 원통형이 아닌 평판형으로 가정하였기 때문에 이러한 오차가 발생된다고 판단된다. 한편 본 연구에서 새롭게 채택한 3D 모델에 대한 DSMC 해석결과는 실험결과에 매우 근접하고 있음을 알 수 있다.

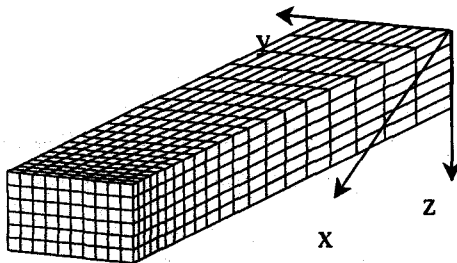


Fig. 3 Computational cells for Q3D model.

기존의 Q3D 모델은 헬리컬 채널을 원통형이 아닌 평판형으로 가정하였기 때문에 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 채널과 접한 평판이 움직이는 경우와 평판이 고정되어 있고 채널이 움직이는 경우 사이에 해석결과의 차이점이 전혀 존재하지 않는다. 따라서 실제로는 채널이 있는 원통형 로터가 회전한다 하더라도 Q3D 모델로는 해석결과에 이와 같은 오차가 수반하게 된다.

헬리컬 채널을 따른 압력변화 추세를 Fig. 5에 나타내었다. 계산결과는 입구압 $P_1=0.023\text{Torr}$, 출구압 $P_2=0.1\text{Torr}$ 에 대한 것이며, 압력은 P_1 으로, 길이는 원통형 로터의 축방향 길이 L 로 각각 무차원화 하였다. 그림으로부터 로터 1인 경우 압력은 거의 대부분 출구측 부근에서 상승하고 있음을 알 수 있고, 3D 해석결과가 Q3D인 경우보다 압력구배가 더욱 가파르게 상승하고 있다. 한편 로터 2는 형상이 바뀌는 중간부분(즉 $x/L=0.5$)에서 압력상승이 잠시 멈추었다가 다시 상승하기 시작하여 15° 각도의 채널 중간부분($x/L=0.75$)에서 오히려 압력이 저하하는 현상이 나타난다.

입구압력이 0.023Torr, 출구압력이 0.1Torr일 때 로터 1에 대한 3D 채널내부의 속도와 밀도 분포를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 보듯이 밀도의 구배는 출구부근에서만 형성됨을 알 수 있다.

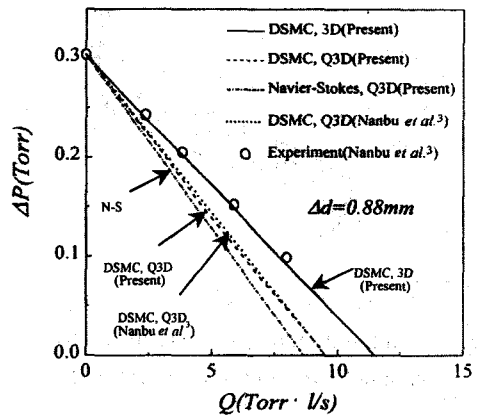


Fig. 4 Comparison of the present numerical results with the previously known ones at $P_2=0.3\text{Torr}$.

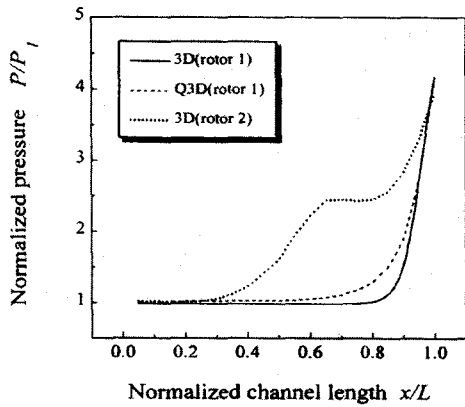
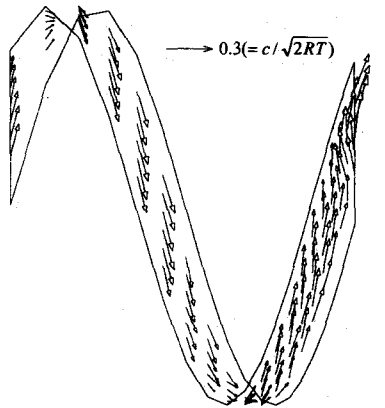
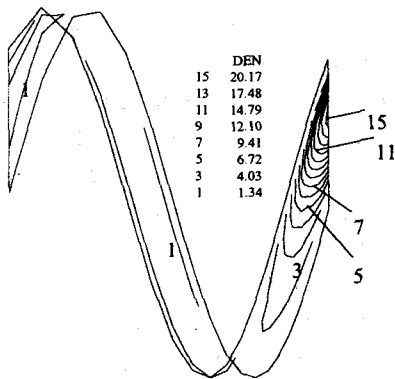


Fig. 5 Pressure distribution along the pumping channel at $P_2=0.1\text{Torr}$.

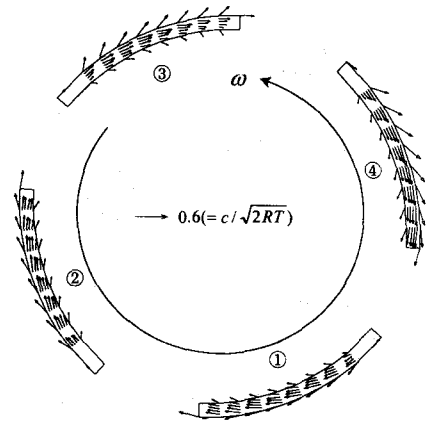


(a)

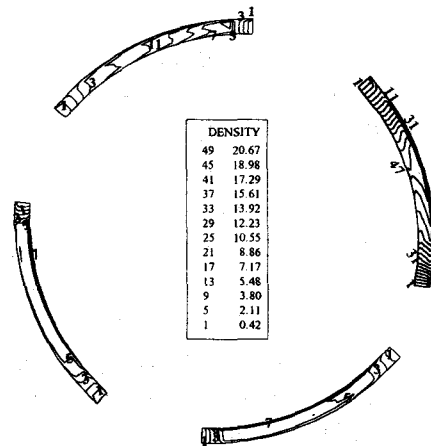


(b)

Fig. 6 Flow field of 3D helical channel: (a) velocity vectors; (b) density contours.



(a)



(b)

Fig. 7 Flow field of 3D helical channel: (a) velocity vectors; (b) density contours.

유동방향에 직각인 $y-z$ 단면(Fig. 2(a) 참조)에서 입구압력이 0.023Torr, 출구압력이 0.1 Torr일 때 로터 1에 대한 3D 채널내부의 속도와 밀도분포를 Fig. 7에 나타내었으며, 펌핑방향으로의 유동장 변화를 관찰할 수 있다. 그림에서 ①, ②, ③, ④는 $x=L/4, L/2, 3L/4, L$ 에서의 단면을 각각 의미한다. 밀도분포로부터 흡입면(suction side) 보다는 압력면(pressure side)에서의 밀도구배가 더욱 커짐을 알 수 있다.

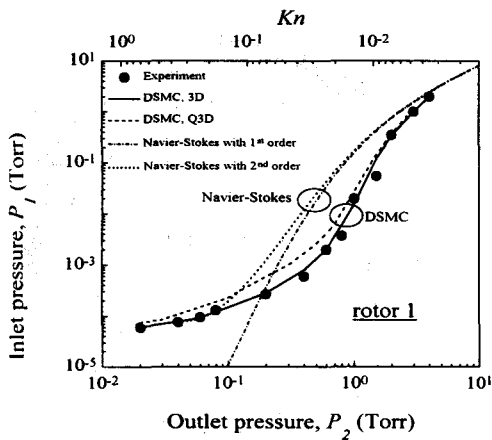


Fig. 8 Effect of the outlet pressure on the inlet pressure at zero throughput.

Fig. 8은 로터 1의 형상을 가진 원통형 드래그펌프의 출구압과 입구압의 관계를 나타낸 것이다. $P_2 \geq 2\text{Torr}$ 에서는 Navier-Stokes 결과와 실험결과가 서로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러나 압력이 2Torr보다 작아지면서 점차 분자류 영역으로 접근할수록 Navier-Stokes 방정식과 1차 미끄럼 경계조건을 이용한 해석 결과는 실험결과와 전혀 다른 양상을 보여주고 있다. 한편 3D 해석모델을 이용한 DSMC 수치 해석결과는 실험치와 잘 일치함을 볼 수 있다.

계산시간을 비교하면 Fig. 8의 성능곡선을 구하는데 Silicon Graphics O2(MIPS R10000 processor) 워크스테이션에서 Navier-Stokes 해석은 run-time이 약 30초, DSMC 해석은 약 48시간정도 소요되었다.

5. 결론

본 연구에서는 HTDP의 헬리컬 채널내부에 형성되는 분자천이유동 및 미끄럼유동을 해석하였으며, 해석방법으로는 Navier-Stokes 방정식과 DSMC법을 이용하였다.

Kn 수가 0.01보다 작은 미끄럼영역에서는 위의 두 가지 방법으로 얻어진 성능해석결과는 기존의 실험결과와 잘 일치하였다. 그러나

Kn 수가 0.01보다 큰 분자천이영역에서는 DSMC법을 이용한 해석결과만이 실험결과와 정성적으로 잘 일치하였다. 또한, 본 연구에서 새롭게 도입한 3D 모델은 기존의 Q3D 모델보다 더 정확한 해를 제공할 수 있었다.

후 기

본 논문은 1998년도 학술진흥재단 과학기술 기초중점연구(기계공학연구:1998-018-E00035) 연구비에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Hucknall, D. J., 1991, *Vacuum Technology and Applications*, Butterworth-Heinemann.
- (2) Nanbu, K., Kubota, H., Igarashi, S., Urano, C. and Enosawa, H., 1991, "Performance of Spiral Grooves on a Rotor of Turbomolecular Pump," *Trans. JSME*, Vol. 57, No. 533, pp. 172-177.
- (3) Sawada, T., 1976, "Rarefied Gas Flow in a Rectangular Groove Facing a Moving Wall," *Sci. Papers of IPCR*, Vol. 70, No. 4, pp. 79-86.
- (4) Sawada, T. and Nakamura, M., 1990, "Spiral Grooved Visco-Vacuum Pumps with Various Groove Shapes," *Vacuum*, Vol. 41, No. 7-9, pp. 1833-1836.
- (5) Panos, C. N., Antoniou, A. G. and Valamontes, S. E., 1994, "The Helicoid Multi-Groove Vacuum Pump in Both Viscous and Molecular States," *Vacuum*, Vol. 45, No. 8, pp. 841-847.
- (6) 황영규, 허중식, 우남섭, 최육진, 1999, "분자천이영역에서 헬리컬 드래그펌프의 배기특성", 대한기계학회 춘계학술대회논문집 B, pp. 189-194.
- (7) Bird, G. A., 1994, *Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows*, Clarendon Press, Oxford.