

〈논 문〉

터보분자펌프의 성능해석에 관한 수치해석적 연구

황영규* · 허중식**

(1996년 2월 1일 접수)

A Numerical Study of the Performance of a Turbomolecular Pump

Y. K. Hwang and J. S. Heo

Key Words : Free Molecular Flow Range(자유 분자 유동영역), Turbo Molecular Pump(터보 분자 펌프), Transmission Probability(통과 확률), Integral Method(적분법), Monte-Carlo Method(몬테카를로법), Double Approximation(이중근사)

Abstract

In the free molecular flow range, the pumping performance of a turbomolecular pump has been predicted by calculation of the transmission probability which employs the integral method and the test particle Monte-Carlo method. Also, new approximate method combining the double stage solutions, so called double-approximation, is presented here. The calculated values of transmission probability for the single stage agree quantitatively with the previous known numerical results. For a six-stage pump, the Monte-Carlo method is employed to calculate the overall transmission probability for the entire set of blade rows. When the results of the approximate method combining the single stage solutions are compared with those of the Monte-Carlo method at dimensionless blade velocity ratio $C=0.4$, the previous known approximate method overestimates as much as 34% than does the Monte-Carlo method. But, the new approximate method gives more accurate results, whose relative error is 10% compared to the Monte-Carlo method, than does the previous approximate method.

기 호 설 명	
b : 날개 길이	N_{net} : TMP 날개를 통과하는 정미 분자속 (net molecular flux)
C : 무차원 날개속도비, V/V_m	p : 압력
h : 날개 높이	P_{12} : 날개 입구부에서 출구부로의 통과확률
K_{max} : 최대 압축비	P_{21} : 날개 출구부에서 입구부로의 통과확률
m_{12} : 날개와 충돌 없이 직접 날개를 통과하는 확률	P_{U2} : 날개 입구부에서 유입한 분자가 위쪽 날개와 처음 충돌하여 날개를 통과하게 되는 확률
N_1 : TMP 날개 입구부에서의 유입 분자속 (molecular flux)	P_{L2} : 날개 입구부에서 유입한 분자가 아래쪽 날개와 처음 충돌하여 날개를 통과하게 되는 확률

*회원, 성균관대학교 기계설계학과

**회원, 성균관대학교 대학원 기계설계학과

- Q : N_{net}/N_1
- Q_{max} : 무차원 최대 펌핑속도
- R : 기체상수
- S : 날개 피치
- S_g : 무차원화된 날개와 펌프하우징과의 간격,
 δ/h
- S_n : 무차원 날개높이, h/b
- S_0 : 무차원 날개 피치, s/b
- T : 절대온도
- V : TMP 원주방향 날개 속도
- V_m : 기체분자 속도 ($\sqrt{2RT}$)

그리스문자

- α : 날개 각도
- δ : 날개와 펌프 하우징과의 간격

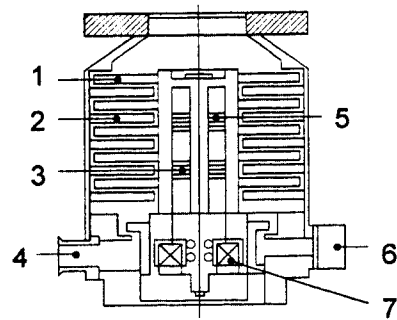
하첨자

- 1 : TMP 날개 입구
- 2 : TMP 날개 출구
- i : i 번째 TMP 날개
- U : TMP 위쪽 날개
- L : TMP 아래쪽 날개

1. 서 론

최근 진공기술(vacuum technology)은 활용분야의 다양성과 산업기술상의 중요성으로 인하여 급진적인 발전을 보이고 있다. 즉, 우리들의 생활에 필수적인 식품, 약품등에서부터 전자부품, 각종 공업 재료, 반도체 산업, 생체공학 등을 비롯하여 표면물리학, 핵융합로, 가속기, 항공 및 우주산업 등과 같은 첨단산업에 이르기까지 폭넓게 이용되고 있다. 이러한 과학 및 산업분야에서의 고진공이용의 증가와 더불어 더욱 깨끗한 진공공간의 필요성이 대두되고 있으며, 근래 반도체 산업 및 핵융합을 중심으로 오일을 이용하지 않는 터보분자펌프(turbomolecular pump, TMP)가 많이 보급되고 있다.

TMP는 로터(rotor)와 스테이터(stator)가 결합된 축류 압축기 형태이며(Fig. 1), 로터 날개끝의 속도는 약 150~450m/s의 고속으로 회전한다. 펌



1 : rotor 2 : stator 3 : motor 4 : outlet
5 : radial electromagnet 6 : connector
7 : axial electromagnet

(a)

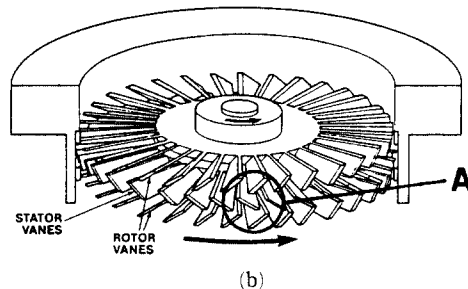


Fig. 1 Turbomolecular pump

프가 달성할 수 있는 최대 진공도는 대략 10^{-10} Torr 정도이며, 오일확산펌프(oil-diffusion pump)에서와 같은 기름을 사용하지 않아 기름이 진공공간으로 역류하는 가능성이 없으므로 깨끗한 진공상태를 생성할 수 있다. 또한, cryogenic 펌프에 비해 부대설비 및 대체설비등이 거의 필요가 없고, 작동 후 짧은 시간내에 정상적인 작동 속도를 얻을 수 있어서 그 사용범위는 매우 확대되고 있다.^(1,2)

TMP의 성능해석은 Kruger와 Shapiro⁽³⁾에 의해 이론적 및 실험적으로 처음 시도되었으며, 이후 무한한 높이를 갖는 날개(2차원 해석)^(4,5) 및 날개 끝단과 펌프 하우징과의 간격을 고려한 유한한 높이를 갖는 날개(3차원 해석)⁽⁶⁻⁹⁾에 대한 성능특성을 적분법(integral method)과 Monte-Carlo법을 이용하여 해석하였다.

Tu 등^(4,5)은 다단(multi-stage)해석시 기체분자가 익렬(blade row)사이를 날개와 충돌하지 않고 직접 통과하는 경우를 고려한 다단 관계식을 유도하여 실험과의 오차를 줄였다. Sawada 등^(6,7)은 유한한 높이를 갖는 날개의 해석시 무한한 높이를 갖

는 날개에 대한 계산결과에 보정항을 추가함으로써 실험값과 거의 일치한 결과를 얻었으며, 다단 해석 시에는 날개뚜껑 및 날개사이의 분자유동 등을 고려하여 보다 실제에 가까운 펌프의 성능을 해석하였다.

Sekiya와 Kitora^(8,9)는 TMP 날개 끝단과 하우징과의 간격이 펌프의 성능에 미치는 영향을 규명하기 위하여 Monte-Carlo법을 이용한 3차원 해석을 시도하였다. 그리고, 3단(stage) TMP인 경우에 대해서 익렬간의 기체분자 속도를 수정하여 얻은 단단(single stage)의 결과를 단순히 조합하는 방법으로 전체 단을 통과하는 기체분자의 통과확률(transmission probability)을 구하였고, 이를 Monte-Carlo법을 이용하여 구한 결과와 상호 비교하였다.

그러나, 위의 연구들은 대부분 2차원 해석으로서 다단 해석인 경우에만 Sekiya와 Kitora⁽⁸⁾가 3차원 해석을 시도하였으며, 단단인 경우 3단 TMP에 대하여 Sekiya와 Kitora⁽⁹⁾는 2차원 Monte-Carlo법을 적용하였다. 따라서, 본 연구에서는 6단 TMP에 대하여 날개 두께를 고려한 보다 현실적인 3차원 Monte-Carlo 해석을 수행하였으며, 이러한 6단에 대한 해석은 본 연구가 처음이라고 판단된다.

본 연구에서는 우선 해석방법의 타당성을 검증하기 위하여 적분법과 Monte-Carlo법을 활용하여 얻은 수치해석 결과를 Kruger와 Shapiro,⁽³⁾ Tu 등,⁽⁴⁾ Sekiya와 Kitora⁽⁸⁾의 연구결과 및 Sawada 등⁽¹⁰⁾의 실험결과와 비교해 보았다. 그리고, 펌프의 성능특성을 규명하기 위하여 2차원 날개의 형상 변수(날개 길이, 날개 사이의 간격, 날개 각도)들을 변화시키면서 TMP 날개 사이를 통과하는 기체분자의 통과확률(transmission probability)을 구하였고, 이러한 2차원 해석결과와 날개 끝단과 펌프 하우징과의 간격을 고려한 3차원 해석결과를 상호 비교하였다.

다단인 경우에 대해서 전체 단을 통과하는 기체분자의 통과확률을 단단의 결과를 이용한 기존의 근사적 방법(approximate method)^(3~11)으로 구하였고, 6단 TMP에 대해 날개 두께에 의한 영향을 고려한 3차원 Monte-Carlo 해석을 전 단에 대해 정확하게 얻은 결과와 근사적 방법의 결과를 서로 비교하였다. 근사적 방법의 해석시 본 연구에서는 기존의 방법과는 달리 보다 정확히 다단의 성능을 예측하기 위하여 2단을 Monte-Carlo법으로 해석

한 후 이 결과들을 중첩하여 다단해석에 적용하였다.

TMP의 성능을 보다 정확히 예측하기 위해서는 전체 단에 대해서 Monte-Carlo법을 적용해야 하지만 실제 TMP는 수십 단으로 구성되어 있기 때문에 해석시 많은 노력과 경비가 요구된다. 따라서, 근사적 방법에 많이 의존하며, 본 연구에서는 이러한 근사적 방법을 이용하여 해석하였을 경우 그 결과에 대한 정확성 및 방법의 유용성에 대하여 고찰하고자 한다.

2. 수치 해석 방법

2.1 단단(single stage)해석

본 연구에서 다루고자 하는 해석대상인 2차원 자유분자유동(free molecular flow) 영역에서 TMP 날개의 해석모델을 Fig. 2에 나타내었다.

기체가 분자유 영역에 놓인 경우 기체분자들 상호간의 충돌은 무시할 수 있으며, 날개 입구와 출구면의 면적이 같다고 가정하면 다음과 같이 펌프의 압축비(K) 및 펌핑속도(Q)에 관한 식을 얻을 수 있다.⁽³⁾

$$K = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_{12}}{P_{21}} - \frac{Q}{P_{21}} \quad (1)$$

여기서, P_{12} 는 입구부에서 출구부로의 통과확률(transmission probability), P_{21} 은 출구부에서 입구부로의 통과확률을 각각 나타내며, μ_1 , μ_2 는 날개 입·출구에서의 압력을 나타낸다.

결국, 식 (1)에서 펌핑속도 및 최대 압축비는 다

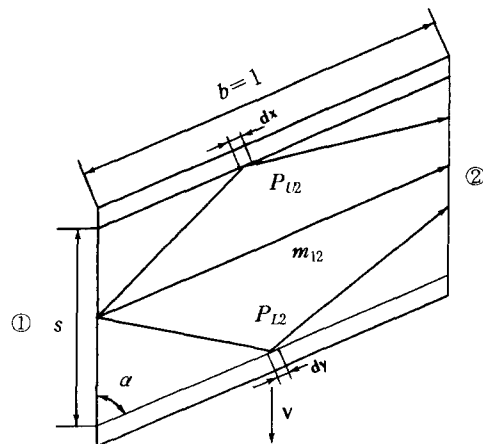


Fig. 2 Geometry of the TMP blade row

음과 같이 표현된다.

$$Q_{\max}|_{\rho_1=\rho_2} = P_{12} - P_{21} \quad (2)$$

$$K_{\max}|_{q=0} = \frac{P_{12}}{P_{21}} \quad (3)$$

2.1.1 적분법 (integral method)

TMP의 날개 입구로 유입되는 분자들은 위쪽 날개와 충돌할 확률(P_U), 아래쪽 날개와 충돌할 확률(P_L), 날개와 충돌하지 않고 직접 날개 사이를 통과할 확률(m_{12})의 세 가지 가능성을 갖는다.

즉,

$$P_U + P_L + m_{12} = 1 \quad (4)$$

한편, Fig. 2에서와 같이 ①에서 ②로 통과하게 되는 기체분자의 통과확률 P_{12} 는 위쪽 날개와 처음 충돌하여 최종적으로 날개를 통과하게 되는 확률(P_{U2}), 아래쪽 날개와 처음 충돌하여 최종적으로 날개를 통과하게 되는 확률(P_{L2}), 날개와 충돌하지 않고 직접 날개를 통과하게 되는 확률(m_{12})의 세 가지로 분류된다.

$$P_{12} = P_{U2} + P_{L2} + m_{12} \quad (5)$$

식 (5)에서 각 항은 참고문헌 (11)과 같은 방법으로 구하였으며, 위쪽 날개와 처음 충돌하여 통과하게 되는 확률 P_{U2} 는 Simpson's rule을 이용하여 계산하였다. Table 1은 적분구간의 절점수(number of nodes)에 따른 수치적분 결과를 나타낸 것이다. 절점수가 200개 이상이면 적분결과에는 거의 변화가 없음을 알 수 있으며, 본 연구에서도 절점수를 200개 이상으로 하여 계산하였다.

Table 1 Effect of number of nodes on the transmission probability

No. of nodes	$\alpha=20^\circ, S_o=1.0, C=0.5$	$\alpha=40^\circ, S_o=1.0, C=0.5$
	P_{U2}	P_{U2}
10	0.031499	0.098821
50	.032661	.102696
100	.032789	.103114
150	.032807	.103204
200	.032816	.103231
250	.032819	.103241

2.1.2 Monte-Carlo법

본 연구에서 다루고자 하는 해석영역은 자유 분자 유동영역이며, 이러한 경우에 대한 수치해법의 일종인 분자들 상호간의 충돌을 무시하는 전형적인 test particle Monte-Carlo법을 이용하였다. 이 경우 개개의 기체분자들의 유동은 상호 독립적이 되며, 날개 입구로 들어오는 분자들은 날개와 연속적인 충돌을 하게 되고, 최종적으로 날개의 출구에 도착하는 분자수를 계산하면 통과확률(P_{12})을 구하게 된다.

TMP 날개 입구부에서의 분자들의 속도분포는 평형상태의 Maxwell 분포를 갖는다고 가정하고 입구에서 분자들의 속도 및 초기위치는 참고문헌 (11)과 같이 구하였다. 또한, 본 연구에서는 분자수에 따른 오차를 최대한 줄이기 위해 분자수를 최대 400,000개 이상을 선택하여 해석하였다.

TMP는 출구측으로 갈수록 압력이 상승되며, 날개의 끝단과 펌프 하우징과의 간격(δ)을 통한 기체분자의 역류(back-streaming) 발생은 펌프의 성능에 심각한 문제로 제기된다. 따라서, 보다 정확한 펌프의 성능예측을 위해서는 이러한 날개의 끝단과 펌프 하우징과의 간격을 고려한 3차원 해석이 필요하며, 실험과의 오차를 최대한 줄여줄 것으로 예상된다.

Fig. 3은 TMP 회전축 방향에 직각인 단면형상을 나타낸 것이며, 날개의 높이가 크지 않다고 가정하여 높이방향으로 피치(s)변화는 무시하였다. 3차원 해석은 2차원 해석에 날개높이 방향의 분자운동을 추가해야 하며, 날개 및 하우징, hub 부분과

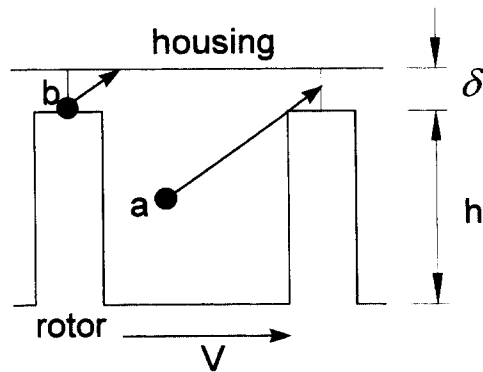


Fig. 3 Periodic condition of the molecules flowing clearance between blade and housing

충돌한 분자들은 난반사(diffuse reflection)⁽³⁾를 적용하여 충돌후 속도와 위치를 결정하였다. 한편, 2차원 해석에서는 고려하지 않았던 펌프 하우스와 날개끝의 간격(δ)을 통과하여 해석영역을 벗어나는 기체분자에 대해서는 Sekiya와 Kitora⁽⁶⁾의 연구에서와 같이 분자 a 를 b 로 대체시켜 이웃한 날개에서 유입되는 분자라고 가정하여 해석하였다(Fig. 3).

2.2 다단(multi-stage)해석

2.2.1 근사적 방법(approximate method)

실제 TMP는 로터와 스테이터가 조합된 수십 개의 단(stage)으로 구성되어 있으므로 TMP의 성능 특성을 해석하기 위해서는 전체 단을 통과하게 되는 기체분자의 통과확률(overall transmission probability)을 구해야 한다.

근사적 방법은 단단(single stage)의 통과확률을 단순히 조합하여 전체 단을 통과하는 기체분자의 통과확률을 구하는 것이다. 본 연구에서는 이것을 단일근사(single approximation)라고 하였으며, 기존의 선행연구들^(3~11)은 모두 이러한 방법을 이용하였다. 그러나, 보다 정확히 다단의 성능을 예측하기 위하여 본 연구에서는 2단을 통과하는 분자의 통과확률을 Monte-Carlo법으로 먼저 구하였다. 그리고, 이 결과를 조합함으로써 다단해석을 수행하였으며, 이를 이중근사(double approximation)라 하였다. 즉, 기존연구에서는 Kruger와 Shapiro⁽³⁾가 제안한 다음의 다단 계산식을 이용한 해석시 $i=1, 2, 3, 4, \dots$ 로서 다단의 결과를 적용시켰으나, 본 연구에서는 $i=2, 4, 6, \dots$ 로서 2단의 결과를 중첩시킴으로써 보다 정확한 성능을 예측하고자 하였다.

$$P_{i(i+1)} = \frac{P_i P_{i(i+1)}}{1 - (1 - P_{i(i+1)}) (1 - P_i)} \quad (6)$$

$(i=2, 4, 6)$

$$P_{i(i+1)} = \frac{P_i P_{i(i+1)i}}{1 - (1 - P_{i(i+1)}) (1 - P_i)} \quad (7)$$

$(i=2, 4, 6)$

단일근사에서는 단단에 대한 결과를 이용하기 때문에 다단 해석시 날개의 열(row)과 열 사이의 분자유동을 무시하였다. 그러나 본 연구에서 도입한 이중근사에 의한 해석은 2단을 Monte-Carlo법으로 직접 해석하므로 열사이의 분자유동을 최소한 2

단까지는 고려하게 된다. 따라서, 단일근사 보다는 더욱 정확하게 성능을 예측할 수 있으며, 계산에 필요한 중첩횟수도 줄어들게 된다.

2.2.2 Monte-Carlo법

위에서 언급한 바와 같이 Kruger와 Shapiro⁽³⁾에 의한 근사적 방법(단일근사)이 적용된 경우에는 날개 두께가 0인 경우이며, 날개의 열(row)과 열 사이의 기체분자들의 분포는 평형상태의 Maxwell 분포라고 가정하였다. 그러나, 사실상 날개 두께는 유한하며, 날개의 열과 열 사이의 기체분자 분포는 Maxwell 분포가 아니기 때문에 이러한 경우 전체 단을 Monte-Carlo법으로 직접 해석하는 것이 Maxwell 분포가 아닌 경우에 대한 유일한 접근방법이 된다.

Fig. 4는 본 연구에서 해석한 6열(row)의 TMP 날개이며, Fig. 1(b)의 A부분을 상세히 나타낸 것이다. 로터는 V 의 속도로 회전하게 되고 로터 사이에 있는 스테이터는 로터와 반대되는 구조로 고정되어 있다.

본 연구에서는 Monte-Carlo 해석시 날개 두께에 의한 영향을 고려한 3차원 해석을 수행하였다. 또한, 근사적 방법인 경우 날개 두께가 0인 경우에 대해 Kruger와 Shapiro⁽³⁾가 제안한 방법 및 날개 두께를 고려한 경우에 대해 Sawada 등⁽⁷⁾이 제시한 방법을 모두 이용하였다.

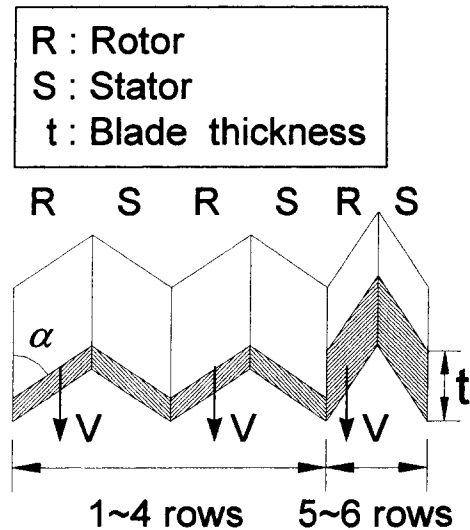


Fig. 4 The model for Monte-Carlo analysis(in the case of 6-rows)

3. 결과 및 고찰

3.1 단단(single stage)에 대한 결과 및 고찰

TMP 날개 사이를 통과하는 기체분자의 통과확률 P_{12} 를 $S_o(=s/b)$ 가 0.8이고, 날개각 α 가 각각 $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ 인 경우에 대해서 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5는 α 가 커질수록 통과확률이 최대인 C의 값은 작아짐을 보여주며, C값이 커질수록 통과확률은 계속 증가하다가 다시 감소하는 경향을 나타낸다. Fig. 6은 $\alpha=20^\circ$ 이고, S_o 가 각각 0.5, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5일 때의 통과확률 P_{12} 를 나타낸 것이며, S_o 가 커질수록 통과확률은 커짐을 알 수 있다.

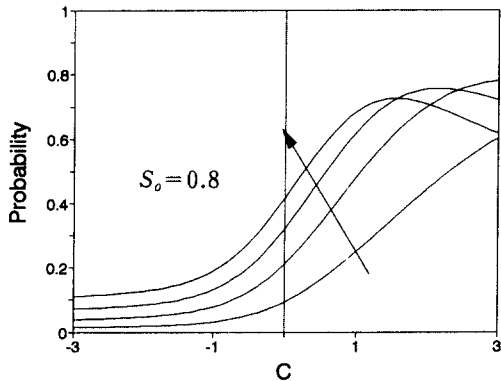


Fig. 5 Transmission probability as a function of C at $S_o=0.8$. The arrow indicates increasing α for $\alpha=10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$, and 40°

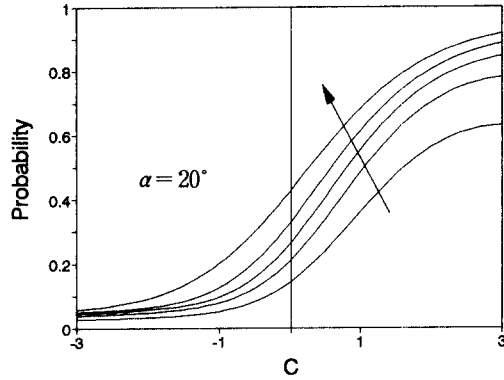


Fig. 6 Transmission probability as a function of C at $\alpha=20^\circ$. The arrow indicates increasing S_o for $S_o=0.5, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5$

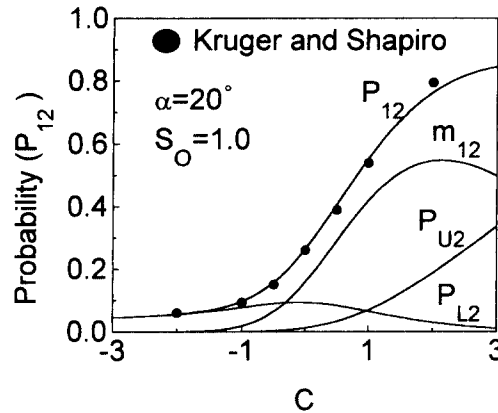


Fig. 7 Comparison of present results with Kruger and Shapiro⁽³⁾

Table 2 Compared numerical values of P_u, P_L, m_{12}

Case 1		Case 2			Case 3			
Tu et al. ⁽⁴⁾	Present study		Tu et al. ⁽⁴⁾	Present study		Tu et al. ⁽⁴⁾	Present study	
	Integral method	Monte-Carlo		Integral method	Monte-Carlo		Integral method	Monte-carlo
$C=0.5, S_o=1.0, \alpha=20^\circ$		$C=1.0, S_o=1.0, \alpha=20^\circ$			$C=1.0, S_o=1.0, \alpha=35^\circ$			
P_u	0.0401, 0.0394		0.0847	0.0851, 0.0862		0.2297	0.2299, 0.2334	
P_L	0.6697, 0.6715		0.4958	0.4955, 0.4959		0.2768	0.2765, 0.2765	
m_{12}	0.2902, 0.2891		0.4195	0.4194, 0.4179		0.4935	0.4936, 0.4901	

Fig. 7은 $\alpha=20^\circ$ 이고, $S_o=1.0$ 일 때 본 연구의 적분법 결과와 Kruger와 Shapiro⁽³⁾의 연구결과를 확률 $P_{12}(=P_{V2}+P_{L2}+m_{12})$ 에 대해 서로 비교한 것이다. 그들의 해석모델⁽³⁾은 C 값에 관계 없이 윗날개와 충돌하여 통과할 확률이 아랫날개와 충돌하여 통과할 확률보다 크다는 조건을 설정하였으나 이것은 Fig. 7의 본 연구결과와는 상반된다. 그러나, 비록 각각의 확률(P_{V2} 및 P_{L2})에는 차이를 보이지만 전체적인 통과확률은 거의 일치함을 Fig. 7에서 알 수 있다.

Table 2는 Tu 등⁽⁴⁾의 적분법 결과와 본 연구에서 사용한 적분법과 Monte-Carlo법의 계산결과를 서로 비교하여 나타낸 것이다. case 1일 때 확률 P_V 는 약 50% 정도의 큰 차이를 나타내지만, 확률의 절대치가 확률 P_L 이나 m_{12} 에 비해 매우 작기

때문에 이를 무시한다면, Tu 등⁽⁴⁾의 연구결과와 비교했을 때 최대 6% 미만의 오차를 나타냄으로써 비교적 정확한 결과를 얻었다고 할 수 있다.

Fig. 8은 α 가 30° 이고, $C=0.5$ 인 경우에 S_o 값에 따른 성능곡선을 본 연구에서 이용한 Monte-Carlo법의 결과와 Sekiya와 Kitora⁽⁶⁾의 연구결과를 상호 비교한 것이다. 비교한 결과 4% 정도 본 연구의 결과가 크게 예측됨을 알 수 있다.

Fig. 9~10은 Monte-Carlo법을 이용하여 $C=0.5$ 이고, α 가 각각 10° , 50° 일 때의 S_o 에 따른 최대 펌핑속도 및 최대 압축비를 나타낸 것이다. S_o 가 커진다는 것은 날개 길이(b)에 비해 상대적으로 날개 사이의 간격(s)이 커진다는 것을 의미하므로 펌핑속도는 증가하고 압축비는 감소하는 경향을 보여주며, 날개각 α 가 작은 경우에 변화폭은 더

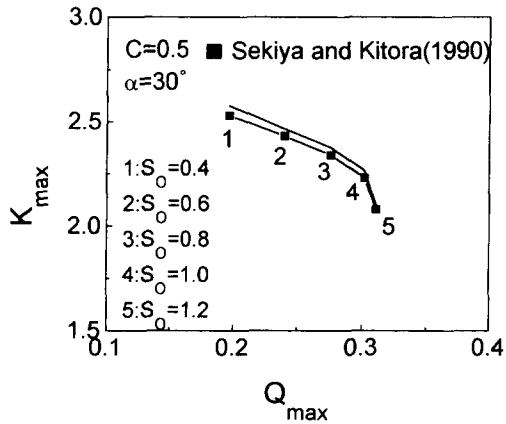


Fig. 8 Comparison of present Monte-Carlo results with Sekiya and Kitora⁽⁶⁾

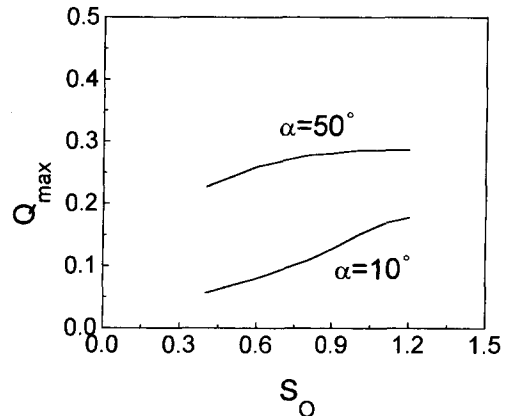


Fig. 10 Calculated curves for Q_{max} as a function of S_o at $\alpha=10^\circ$, 50°

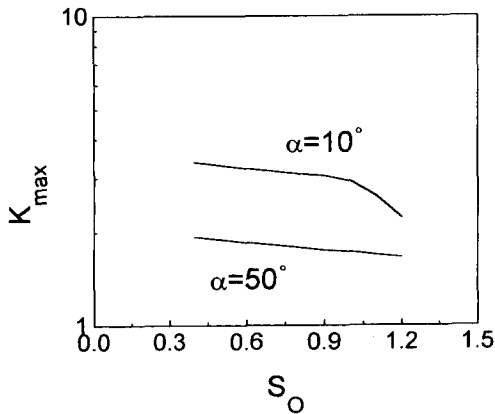


Fig. 9 Calculated curves for K_{max} as a function of S_o at $\alpha=10^\circ$, 50°

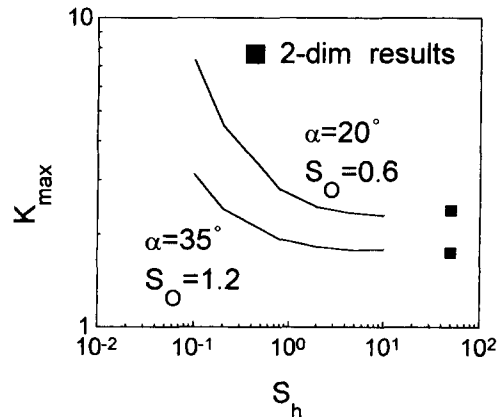


Fig. 11 Calculated curves for K_{max} as function of S_h

크다는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 날개와 하우징과의 간격이 0인 경우 (즉, $S_g = \delta/h = 0$)에 대해 날개 높이 $S_h (=h/b)$ 에 따른 압축비의 변화를 나타낸 것이다. 계산은 모두 $C=0.4$ 에 대해서 수행하였다. 그림에서 날개 높이가 커지면 압축비는 급격히 감소함을 알 수 있으며, S_h 값이 대략 2보다 커지게 되면 2차원 해석결과에 점차적으로 접근함을 보여주고 있다. 따라서, 실제적인 TMP의 경우 보통 S_h 는 1보다 훨씬 크므로 S_h 의 영향을 고려하지 않은 2차원 해석은 가능하다고 판단된다.

Fig. 12는 $C=0.4$, $S_h=3.0$ 일 때 날개와 하우징과의 간격 S_g 에 따른 압축비를 나타낸 것이다. 간격이 커지면 압축비는 감소하며, $\alpha=35^\circ$ 인 경우보다 $\alpha=20^\circ$ 인 경우 감소폭은 더 큼을 알 수 있다. 이 경우에도 TMP는 보통 S_g 가 0.1보다는 훨씬 작으므로 성능에 미치는 S_g 의 영향은 매우 작다고 할 수 있다.

3.2 다단(multi-stage)에 대한 결과 및 고찰

본 연구에서는 수치해의 타당성을 검증하기 위하여 Sawada 등⁽¹⁰⁾의 실험결과와 비교하였으며, Table 3은 실험에서 사용된 펌프의 제원이다.

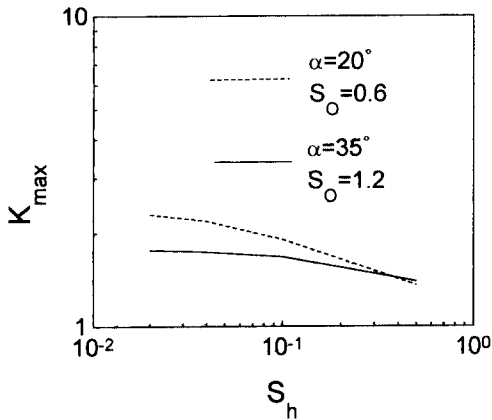


Fig. 12 Calculated curves for K_{max} as a function of S_h

Fig. 13은 2차원 및 3차원 Monte-Carlo법을 적용하여 얻어진 결과를 단일근사 방법을 이용하여 구한 압축비를 나타낸 것이며, Table 3에 제시한 펌프의 실험결과⁽¹⁰⁾를 함께 도시하였다. C 값이 작

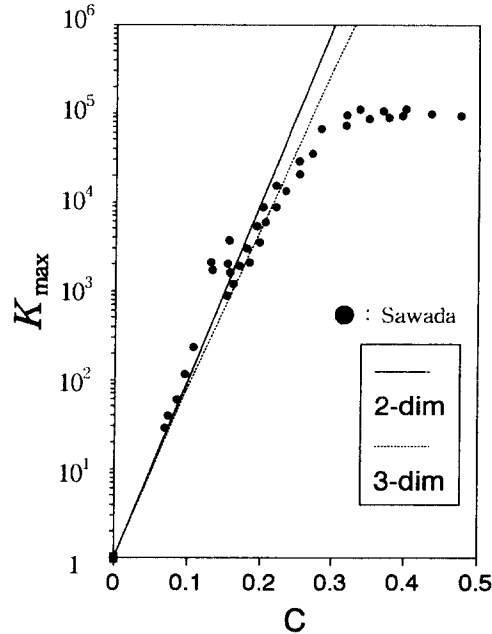


Fig. 13 Comparison of present numerical results with experimental data of Sawada⁽¹⁰⁾ for K_{max}

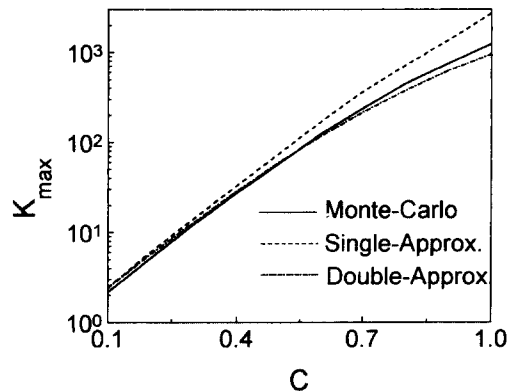


Fig. 14 Calculated curves for K_{max} as a function of C in the case of 6-stage blade rows

Table 3 Data of the multi-stage TMP

Blade row number	α	S_o	Diameter of rotor tip	C	S_h	S_g
1~9	30°	1.0	300mm	0~0.5	4.0	0.04
10~25	20°	1.0	300mm	0~0.5	4.0	0.04

은 경우($C < 0.1$)에는 2차원 해석결과가 비교적 실험치와 일치함을 알 수 있으며, C 값이 증가할수록 2차원 해석은 실험치와 멀어지며, 3차원 해석결과가 더 정확히 실험값에 가깝다는 것을 알 수 있다. 한편, C 값이 0.3보다 큰 경우에는 펌프의 벽면으로부터 기체방출(outgassing)효과로 인하여 압축비는 더 이상 증가하지 않음을 실험결과로부터 알 수 있다.⁽¹⁰⁾

Fig. 14~15는 6단의 TMP에 대해 C 가 0.1~1.0인 범위에 대해서 근사적 방법과 Monte-Carlo법에 의한 결과를 최대 펌핑속도 및 최대 압축비에 대해 서로 비교하여 나타낸 것이다. Sekiya와 Kitora⁽⁹⁾는 3단 TMP를 2차원적으로 해석하였으나 본 연구에서는 S_g 및 S_h 가 각각 0.02, 3.0인 6단의 TMP에 대해서 3차원 Monte-Carlo 해석을 수행하였다. 또한, 분자수에 따른 오차를 최대한 줄이기 위하여 분자수를 최대 400,000개 이상을 선택하여 해석하였다.

Fig. 14의 최대 압축비인 경우 C 값이 증가함에 따라 Monte-Carlo 법과 단일근사 방법과의 상대 오차는 점점 커지고 있음을 알 수 있다. 압축비의 오차가 다소 크게 보이지만 TMP가 달성할 수 있는 압축비가 보통 $10^6 \sim 10^8$ 이므로 지수의 크기가 같다면 두 결과는 큰 차이를 보이는 것은 아니라고 생각된다. 따라서, 본 연구에서 이용한 6단의 TMP인 경우 Fig. 14에서 보듯이 단일근사 방법으로 해석한 결과는 만족할만 하다고 판단된다.

한편 Fig. 15의 펌핑속도인 경우에는 $C=0.1$ 일 때 최대 86% 정도의 오차를 나타낸다. 그러나, 각각의 절대치가 작으므로 단일근사 방법을 이용하여

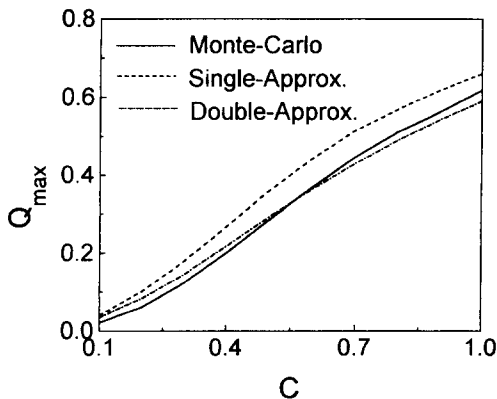


Fig. 15 Calculated curves for Q_{max} as a function of C in the case of 6 stage blade rows

해석하여도 큰 차이는 아니라고 생각되며, C 값이 증가할수록 상대오차는 점점 줄어드는 경향을 보여 준다.

위의 단일근사 방법은 단단(single stage)의 통과 확률을 조합하여 전체 단의 통과확률을 근사적으로 구하는 것으로서 기존의 선행연구들은 이러한 방법을 이용하였으나, 본 연구에서는 2단을 Monte-Carlo 법으로 해석한 후 이 결과를 이용한 이중근사 방법을 수행하였다. 두 결과를 비교해 보면, Fig. 14~15에서 보듯이 기존의 단일근사인 경우 $C=0.4$ 에서 Monte-Carlo 법과의 상대오차가 대략 34% 정도이며, 본 연구에서 제시한 이중근사는 상대오차 10% 이내로써 Monte-Carlo 법의 결과에 더욱 근접함을 알 수 있다.

결국, Monte-Carlo 법을 이용하여 TMP의 성능을 예측하는 것이 근사적 방법보다는 정확한 방법이지만 TMP가 수십 단으로 구성되어 있는 경우에는 많은 노력과 경비가 요구되어 적용하기가 곤란해진다. 이때 근사적 방법이 어느 정도 타당한 결과를 나타낸다면 이 방법은 매우 유용할 것이다. 따라서, 본 연구결과(Fig. 14~15)에서 알 수 있듯이 압축비 및 펌핑속도를 예측하는데 있어서 근사적 방법을 이용하는 것은 매우 타당하다고 판단되어 지며, 특히 단단 보다는 2단의 결과를 이용하는 것이 보다 더 정확한 결과를 얻을 수 있다.

4. 결 론

터보분자펌프의, 자유분자유동 영역에 대한 기체 분자의 통과확률을 이용하여 펌핑속도 및 압축비를 단단(single stage) 및 다단(multi-stage)에 대해 적분법과 Monte-Carlo법을 통해 수치해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Kruger와 shapiro의 해석모델과는 달리 C 값이 1보다 작은 현실적인 경우에는 뒷날개와 충돌하여 통과할 확률(P_{V2})보다는 앞날개와 충돌하여 통과할 확률(P_{L2})이 더 크다는 것을 알 수 있었다. 그러나, 각각의 확률에는 차이를 보이지만 전체적인 통과확률(P_{L2})에는 차이가 없음을 확인하였다.

(2) $S_o(=s/b)$ 값이 증가하면 펌핑속도는 증가하는 반면, 압축비는 감소하는 경향을 보였으며, 날개각 α 가 작은 경우에 그 변화폭은 더 크다는 것을 알 수 있다.

(3) $S_n (=h/b)$ 가 커지면 압축비는 급격히 감소함을 알 수 있었고, S_n 가 무한히 크다고 가정한 2차원 해석은 3차원 해석의 근사치임을 확인하였다. 그리고, S_n 가 1보다 훨씬 크고, S_g 가 0.1보다 훨씬 작은 실제의 TMP에 있어서 성능에 미치는 S_n 및 S_g 의 영향은 매우 작다고 할 수 있다.

(4) 6단 TMP 해석시 단단(single stage)의 통과확률을 조합한 단일근사 방법의 결과는 Monte-Carlo 법보다 항상 크게 압축비 및 펌핑속도를 예측함을 알 수 있었다. 펌핑속도에서는 C 가 증가할수록 두 방법의 해석결과에 대한 상대오차가 감소한 반면 압축비의 상대오차는 증가하는 경향을 보였다. 압축비의 오차가 다소 크게 보이지만 TMP가 달성할 수 있는 압축비가 보통 $10^6 \sim 10^8$ 이라고 했을 때 큰 차이는 아니라고 생각되며, 경제적인 면을 고려하면 근사적 방법으로 해석하는 것이 더 유용하다고 판단된다.

또한, 근사적 방법의 이용시 단단의 통과확률을 조합하는 단일근사 방법보다는 2단을 Monte-Carlo법으로 해석한 후 이 결과를 이용하는 이중근사 방법이 보다 정확한 결과를 얻을 수 있었다.

참고문헌

- (1) Hablani, M. H., 1990, *High-Vacuum Technology (A Practical Guide)*, MARCEL, DEKKER, Inc.
- (2) Hucknall, D. J., 1991, *Vacuum Technology and Applications*, Butterworth-Heinemann.
- (3) Kruger, C. H. and Shapiro, A. H., 1961, In *Rarefied Gas Dynamics* (Edited by L. Talbot), Academic Press, New York, pp. 117~140.
- (4) Tu, J. Y. and Yang, N. H., 1987, "Theoretical Studies of the Modern Turbomolecular Pump," *Vacuum*, pp. 831~837.
- (5) Tu, J. Y., Yang, N. H., Pang, S. J., Zu, Y., 1988, "A Further Exploration of an Important Factor Affecting the Pumping Performance of Turbomolecular Pumps," *J. Vac. Sci. Technol.*, pp. 2535~2540.
- (6) Sawada, T., Taniguchi, O. and Suzuki, M., 1968, "The Axial Flow Molecular Pump," *Trans. JSME*, Vol. 34, No. 260, pp. 708~716.
- (7) Sawada, T., Suzuki, M. and Taniguchi, O., 1971, "The Axial Flow Molecular Pump," *Bull. JSME*, Vol. 14, No. 67, pp. 48~57.
- (8) Sekiya, S. and Kitora, Y., 1990, "Study of the Performance of Turbomolecular Pumps: 1st Report, The Performance of Finite-Height Blades," *Trans. JSME*, Vol. 525, pp. 178~185.
- (9) Sekiya, S. and Kitora, Y., 1991, "Study of the Performance of Turbomolecular Pump: 2nd Report, The Analysis of the Performance in the Multiple Stages," *Trans. JSME*, Vol. 534, pp. 185~192.
- (10) Sawada, T. and Taniguchi, O., 1973, "The Axial Flow Molecular Pump," *Bull. JSME*, Vol. 16, No. 92, pp. 312~318.
- (11) 황영규, 허중식, 1995, "터보분자펌프(Turbomolecular pump)내의 자유분자유동에 관한 수치해석적 연구," 대한기계학회 '95 추계학술대회논문집(II), pp. 1~6.