

터보 분자 펌프(Turbomolecular pump)내의 자유 분자 유동에 관한 수치 해석적 연구

A Numerical Study of a Free Molecular Flow in the Turbomolecular Pump

황 영 규*, 허 중 식**
Y. K. Hwang, J. S. Heo

Key words : Vacuum pump(진공 펌프), Turbomolecular pump(터보 분자 펌프), Molecular flow range(분자류 영역), Integral method(적분법), Monte-Carlo method(몬테칼로 법), Transmission probability(통과확률)

Abstract

In the free molecular flow range, the pumping performance of a turbomolecular pump has been predicted by calculation of the transmission probability employing the integral method and the test particle Monte-Carlo method. The velocities of molecules incident upon a moving blade are given by the random numbers, which are sampled from the Maxwell molecular velocity distribution function. The present results agree quantitatively with the previous known numerical results.

For a multi-stage pump, the velocity profile of molecules between two blade rows is not Maxwell distribution. In this case, 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 for the pump having six rows at $C=0.6$, the approximate method overestimates as much as 36% in the maximum compression ratio and 19% in the maximum pumping speed than does the Monte-Carlo method.

기 호 설 명

b : 날개 길이(Fig.2 참조)
 C : 무차원 날개속도비, V/V_m
 h : 날개 높이(Fig.3 참조)

K_{max} : 최대 압축비
 m_{12} : 날개와 충돌없이 직접 날개를 통과하는 확률
 n : 수밀도(number density, 즉 단위부피당 분자수)
 N_1 : TMP 날개 입구부에서의 유입 분자속(molecular flux)
 N_2 : TMP 날개 출구부에서의 유입 분자속(molecular flux)

* 정회원, 성균관대학교 기계설계학과

** 성균관대학교 대학원 기계설계학과

- N_{net} : TMP 날개를 통과하는 정미 분자속(net molecular flux)
- p : 압력
- P_{12} : 날개 입구부에서 출구부로의 통과확률
- P_{21} : 날개 출구부에서 입구부로의 통과확률
- P_{L2} : 날개 입구부에서 유입한 분자가 윗 쪽 날개와 처음 충돌하여 날개를 통과하게 되는 확률
- P_{L2} : 날개 입구부에서 유입한 분자가 아랫 쪽 날개와 처음 충돌하여 날개를 통과하게 되는 확률
- P_{1x} : 날개 입구부에서 유입한 분자가 처음 윗 날개와 충돌할 확률
- P_{1y} : 날개 입구부에서 유입한 분자가 처음 아랫 날개와 충돌할 확률
- Q : N_{net}/N_1
- Q_{max} : 무차원 최대 펌핑속도
- γ : 0~1 사이의 균일 분포 난수(random number)
- R : 기체상수
- s : 날개 피치(Fig.2 참조)
- S_x : 무차원화된 날개와 펌프하우징과의 간격, δ/h
- S_h : 무차원 날개높이, h/b
- S_o : 무차원 날개피치, s/b
- T : 절대온도
- u : 날개 입구부에서의 분자의 축방향 속도
- v : 날개 입구부에서의 분자의 원주방향 속도
- V : TMP 원주방향 날개 속도
- V_m : 기체 분자 속도($\sqrt{2RT}$)

그리스 문자

- α : 날개 각도(Fig.2 참조)
- δ : 날개와 펌프 하우징과의 간격(Fig.3 참조)
- ζ : 날개 입구부에서의 분자의 축방향 초기 위치
- η : 날개 입구부에서의 분자의 원주방향 초기 위치
- σ_x : 미소면적 dx 에서 나온 분자가 최종적으로 출구부에 도착할 확률
- σ_y : 미소면적 dy 에서 나온 분자가 최종적으로 출구부에 도착할 확률

하 첨 자

- 1 : TMP 날개 입구
- 2 : TMP 날개 출구
- i : i 번째 TMP 날개
- x : TMP 윗 쪽 날개
- y : TMP 아랫 쪽 날개

1. 서 론

현재 진공기술은 전기, 전자, 금속, 반도체 산업 등을 비롯하여 전자현미경, 분석장치, 핵융합, 입자 가속기, 항공 및 우주산업등과 같은 고도의 첨단 기술 개발의 핵심요소 기술로서 매우 다양한 분야에서 응용이 되고 있다. 이러한 고진공 상태를 달성하기 위한 진공펌프들중 근래 반도체 산업, 핵융합을 중심으로 오일확산펌프를 대신하여 연속배기가 가능한 터보분자펌프(Turbomolecular pump, TMP)가 많이 이용되고 있다. Fig.1과 같이 TMP는 로터와 스테이터가 결합된 축류 압축기 형태로 되어 있으며, 날개끝의 속도는 약 150~450m/s로 회전한다.

TMP는 Becker(1957)에 의해 처음 개발되었으며, 주된 장점은 확산 펌프(diffusion pump)와 비교할 때 진공도가 10^{-10} Torr 이하까지 가능하고, 더욱 깨끗한 진공상태를 생성할 수 있으며, 작동후 짧은 시간내에 정상적인 작동속도를 얻을 수 있기 때문에 그 사용범위는 더욱 더 증가하고 있다⁽¹⁾.

이러한 TMP의 분자류(molecular flow) 영역에서의 펌핑 메카니즘에 관하여 Kruger와 Shapiro⁽²⁾는 적분법(integral method)과 Monte-Carlo 법을 이용하여 날개 높이가 무한한 2차원 날개에 대하여 해석하였다. 이 때 그들은 무차원 날개속도비 $C=V/V_m$ (여기서, V 는 펌프 날개끝의 원주방향 속도이며 V_m 은 기체 분자의 속도임)을 정의하여 이를 주요함수로 사용하였다. 그러나, 그들이 설정한 속도조건은 C 값이 1 보다 매우 크며, 입구부에서 유입되는 분자들은 거의 윗 날개 입구부분과 충돌하여 통과한다는 가정을 하였다. 따라서, 작동 유체가 질소(N_2)나 수소(H_2)인 경우 C 값은 대략 0.1~0.8 범위의 값을 갖기 때문에 C 값이 1 보다

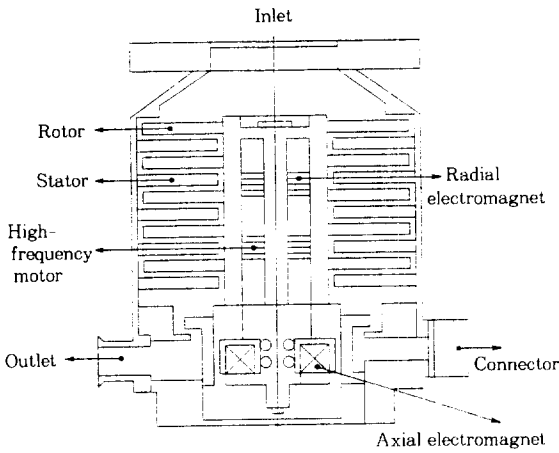


Fig.1 Turbomoleular pump

큰 경우는 비현실적이다.

Sawada 등⁽³⁾은 적분법을 이용하여 무한한 높이를 갖는 날개에 대해 해석하였으며, 유한한 높이를 갖는 날개에 대해서도 기체 분자와 펌프 하우징(housing)과의 충돌을 고려하여 무한한 높이를 갖는 날개의 해석 결과에 보정항을 추가함으로써 실험결과와 거의 일치함을 보여 주었다.

Tu 등⁽⁴⁾은 적분법을 이용하여 단단(single stage)에 대한 분자의 통과확률을 구하였으며, 단단의 결과에 수정계수(correction factor)를 적용함으로써 다단(multi-stage)을 해석하였다.

Tu 등⁽⁵⁾은 분자 이론(molecular theory)에 의해 유도된 기체 분자들의 속도 분포 함수로부터 날개 입구부로 유입되는 분자들의 각도를 결정하였으며, Monte-Carlo 법을 이용하여 단단에 대한 분자의 통과확률을 구하였다. 다단 해석시에는 TMP 날개를 통과한 분자들의 출구분포와 역류하는 분자들중 다시 출구로 되돌아오는 분자들의 분포를 중첩함으로써 다음 날개 입구부의 경계조건으로 이용하여 실험과의 오차를 줄일 수 있었다.

한편, Sekiya와 Kitora^{(6),(7)}는 TMP 날개 끝단과 펌프 하우징과의 간격이 압축비 및 펌핑속도에 미치는 영향을 규명하기 위하여 Monte-Carlo 법을 이용하여 3차원적 해석을 시도하였다. 3단(stage) TMP인 경우에 대해서 익렬(blade row)

간의 분자 속도를 수정하여 단단의 결과를 단순히 조합하는 방법을 이용하여 기체 분자의 통과확률을 구하였고, 전체 단을 Monte-Carlo법을 이용하여 구한 결과와 상호 비교하였다.

위의 연구들은 대부분 2차원 해석에 국한된 것으로서 단단 해석인 경우에만 3차원 해석을 시도하였으며⁽⁶⁾, 다단인 경우 3단 TMP에 대하여 2차원 Monte-Carlo 법을 적용하였다⁽⁷⁾. 그러나, 본 연구에서는 6단 TMP에 대하여 보다 현실적인 3차원 Monte-Carlo 해석을 수행하였으며, 이 때 날개 두께에 의한 영향도 고려하였다.

본 연구에서는 우선 적분법과 Monte-Carlo 법을 활용하여 얻은 수치해석 결과를 기존의 연구결과들⁽²⁾⁻⁽⁷⁾과 비교해 봄으로써 해석방법의 타당성을 검증하였다. 그리고, 펌프의 배기특성을 규명하기 위하여 2차원 TMP 날개의 형상변수(날개 길이, 날개 사이의 간격, 날개 각도)들을 변화시키면서 기체 분자의 통과확률(transmission probability)을 구하였고, 이러한 2차원 해석결과와 날개 끝단과 펌프 하우징과의 간격을 고려한 3차원 해석 결과를 상호 비교하였다.

다단인 경우에 대해서는 전체 단을 통과하는 기체 분자의 통과확률을 단단의 결과를 이용한 근사적 방법(approximate method)으로 구하였고, 6단 TMP에 대해 날개 두께에 의한 영향을 고려한 3차원 Monte-Carlo 해석을 수행하여 근사적 방법의 결과와 비교하였다. 펌프의 성능을 올바르게 예측하기 위해서는 Monte-Carlo 법을 적용해야 하지만 실제 TMP는 수십 단으로 구성되어 있으므로 해석시 많은 노력과 경비가 요구된다. 따라서, 근사적 방법에 많이 의존하게 되는데, 본 연구에서는 이러한 근사적 방법을 이용하여 해석하였을 때 그 결과에 대한 정확성 및 방법의 유용성에 대하여 고찰하고자 한다.

2. 수치 해석 방법

2.1 단단(single stage) 해석

본 연구의 해석대상인 2차원 자유 분자류(free-molecular flow) 영역에서 TMP 날개의 해석모델을 Fig.2에 나타내었다.

기체가 분자류 영역에 놓인 경우 기체 분자들 상호간의 충돌은 무시할 수 있으며, 날개 입구와 출구면의 면적이 같다고 가정하면 다음 식이 성립한다.⁽²⁾

$$N_1 Q = N_1 P_{12} - N_2 P_{21} \tag{1}$$

여기서, N_1, N_2 는 입구부 및 출구부의 유입 분자속(molecular flux), P_{12} 는 입구부에서 출구부로의 통과확률, P_{21} 은 출구부에서 입구부로의 통과확률을 각각 나타낸다. 그리고, N_{net} 를 날개를 통과하는 정미 분자속(net molecular flux)이라 하면, 위 식에서 Q 는 N_{net}/N_1 을 나타낸다.

또한, 유동이 등온상태(isothermal state)라고 가정하면 다음 식 (2)가 성립한다.

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{N_2}{N_1} \tag{2}$$

여기서, p 는 날개 입·출구에서의 압력, n 은 수 밀도(number density)을 나타낸다.

위 식 (1), (2)를 이용하면 다음과 같이 펌프의 압축비(K) 및 펌핑속도(Q)에 관한 식을 얻을 수 있다.

$$K = \frac{p_2}{p_1} = \frac{P_{12}}{P_{21}} - \frac{Q}{P_{21}} \tag{3}$$

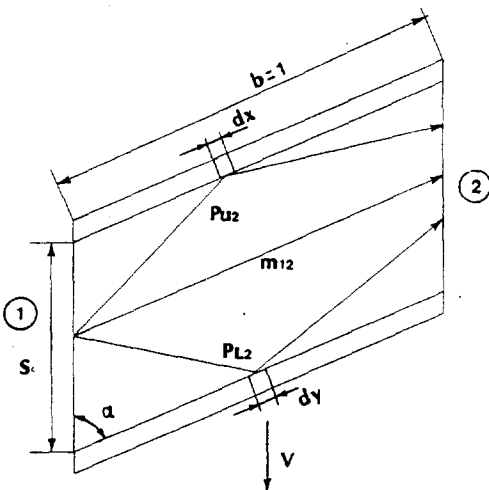


Fig.2 Geometry of the TMP blade row

결국, 식 (3)에서 최대 펌핑속도 및 최대 압축비는 다음과 같이 표현된다.

$$Q_{max} |_{K=K_2} = P_{12} - P_{21} \tag{4}$$

$$K_{max} |_{Q=0} = \frac{P_{12}}{P_{21}} \tag{5}$$

식 (4), (5)에서 알 수 있듯이 펌프의 성능을 나타내는 변수인 Q_{max} 및 K_{max} 를 구한다는 것은 TMP 날개 사이를 통과하게 되는 기체 분자의 통과확률을 구하는 것으로 요약된다.

2.1.1 적분법(Integral method)

TMP 날개 입구로 유입되는 기체 분자들은 다음과 같은 3가지 가능성을 갖는다.

- ① 위 쪽 날개와 충돌하는 경우(P_U)
- ② 아랫 쪽 날개와 충돌하는 경우(P_L)
- ③ 날개와 충돌하지 않고 직접 통과하는 경우(m_{12})

따라서, 다음 식(6)과 같이 표현할 수 있다.

$$P_U + P_L + m_{12} = 1 \tag{6}$$

한편, Fig.2에서와 같이 ①에서 ②로 통과하게 되는 기체 분자의 통과 확률 P_{12} 는 위 쪽 날개와 처음 충돌하여 통과하게 되는 경우(P_{U2}), 아랫 쪽 날개와 처음 충돌하여 통과하게 되는 경우(P_{L2}), 날개와 충돌하지 않고 직접 통과하게 되는 경우(m_{12})의 3가지로 분류된다.

$$P_{12} = P_{U2} + P_{L2} + m_{12} \tag{7}$$

결국, 날개 사이를 통과하는 기체 분자의 통과확률(P_{12})은 다음과 같은 적분형 방정식으로 표현할 수 있다.⁽²⁾

$$P_{12} = P_{U2} + P_{L2} + m_{12} = \int_0^b \sigma_{x2} P_{1x} dx + \int_0^b \sigma_{y2} P_{1y} dy + m_{12} \tag{8}$$

여기서, σ_{x2} 는 미소면적 dx 에서 나온 분자가 ② 지점에 최종적으로 도착할 확률, σ_{y2} 는 미소면적 dy 에서 나온 분자가 ② 지점에 최종적으로 도착할 확률을 각각 나타내고, P_{1x} 는 날개 입구부에서 유입한 분자가 처음 위 쪽 날개와 충돌할 확률, P_{1y} 는

날개 입구부에서 유입한 분자가 처음 아랫 날개와 충돌할 확률을 나타낸다.

식 (8)에서 윗 쪽 날개와 처음 충돌하여 통과하게 되는 확률(P_{U2})은 Simpson's rule을 이용하여 계산하였으며, Table 1은 적분구간의 절점수(number of nodes)에 따른 수치적분 결과를 나타낸 것이다. 절점수가 200 개 이상이면 적분결과에는 거의 변화가 없음을 알 수 있으며, 본 연구에서도 절점수를 200개 이상으로 하여 계산하였다.

2.1.2 Monte-Carlo 법

자유 분자 유동에서 날개 입구로 들어오는 분자들은 날개와 연속적인 충돌을 하게 되고, 최종적으로 날개의 출구에 도착하는 분자수를 계산하면 통과확률(P_{I2})을 구하게 된다.

해석대상이 되는 분자류 영역에서의 TMP 날개 입구부에서의 분자들의 분포는 Maxwell 분포를 갖는다. Maxwell 분포로부터 날개 입구부에서의 분자 속도 성분을 난수(random number, r)로 표시하면 다음과 같다⁽⁶⁾.

$$u = \sqrt{-\ln r} \quad (9)$$

$$v = A \cos B + C$$

여기서, $A = \sqrt{-\ln r}$, $B = 2\pi r$ 이다. 그리고, 분자의 초기위치는 다음 식으로 결정된다.

$$\zeta = 0, \eta = sr \quad (10)$$

식 (9) 및 (10)에 의해 초기운동이 결정된 분자

는 날개와 충돌하거나 혹은 날개와 충돌없이 통과하게 된다. 분자와 날개의 충돌은 코사인 반사법칙(cosine reflection law)을 따른다는 가정하에 통과확률을 구하였다.

한편, 날개의 끝단과 펌프 하우징과의 간격을 고려한 3차원 해석은 2차원 해석에 날개높이 방향의 분자운동을 추가해야 하며, 날개 끝단을 통과하는 분자는 Fig.3에 나타낸 것과 같이 분자 a를 b로 대체시켜 해석한다⁽⁶⁾.

Fig.4는 본 연구에서 사용한 Monte-Carlo법의 순서도를 나타낸 것이며, 수치해의 수렴성을 보장하기 위하여 반복해서 sampling 하였다.

본 연구에서는 분자수에 따른 오차를 최대한 줄이기 위해 분자수를 최대 400,000개 이상을 선택하여 해석하였으며, Fig.5에 $\alpha = 20^\circ$, $So = 1.0$, $C = 0.5$ 인 경우에 TMP 입구에서 유입되는 분자수에 따른 통과확률(P_{I2})의 수렴과정을 나타내었다.

2.2. 다단(multi-stage) 해석

2.2.1 근사적 해석방법(approximate method)

실제 TMP는 로터와 스테이터가 조합된 일련의 단(stage)으로 구성되어 있으므로 TMP의 전체적인 성능특성을 해석하기 위해서는 다단에 대한 총체적인 기체 분자의 통과확률(overall transmission probability)을 구해야 한다.

근사적 방법은 단단(single stage)의 해석결과를 단순히 조합하여 전체 단의 통과확률을 구하는 것으로서 본 연구에서는 Kruger와 Shapiro⁽²⁾가 제안한 방법을 이용하였으며 계산식은 다음과 같다.

Table 1 Effect of number of nodes on the transmission probability

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

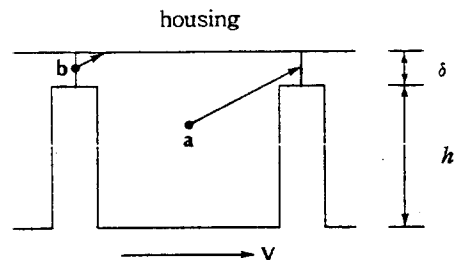


Fig.3 Periodic condition of the molecules flowing clearance between blade and housing

$$P_{1(i+1)} = \frac{P_{1i}P_{i(i+1)}}{1 - (1 - P_{i(i+1)})(1 - P_{1i})} \quad (i=2\sim6) \tag{11}$$

$$P_{i(i+1)} = \frac{P_{1i}P_{(i+1)i}}{1 - (1 - P_{i(i+1)})(1 - P_{1i})} \quad (i=2\sim6) \tag{12}$$

2.2.2 Monte-Carlo 법

위에서 언급한 근사적 방법에서는 날개 두께가 0인 경우이며, 날개의 열(row)과 열 사이의 기체 분자들의 분포는 평형상태의 Maxwell 분포라고 가정하였다. 그러나, 사실상 날개 두께는 유한하며, 날개사이의 분자 분포는 Maxwell 분포가 아니

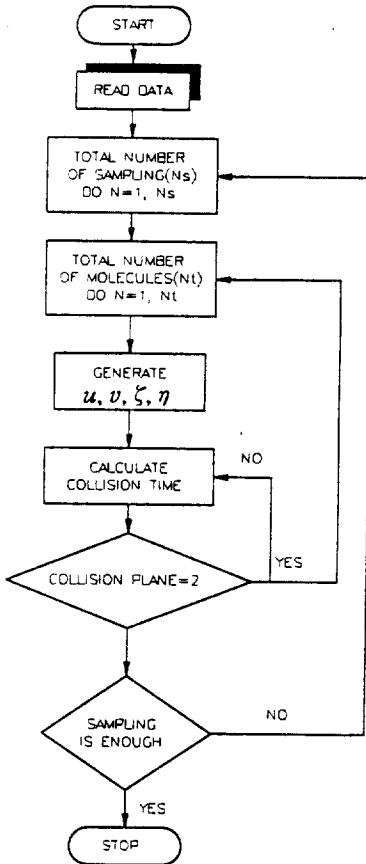


Fig.4 Simplified flow diagram of Monte-Carlo method

기 때문에 이러한 경우 전체 단을 Monte-Carlo 법으로 직접 해석하는 것이 Maxwell 분포가 아닌 경우에 대한 유일한 접근방법이 된다.

아래 Fig.6은 본 연구에서 해석한 6 단(stage)의 TMP 날개를 나타낸 것이며, 기존의 연구에서 고려되지 않았던 날개 두께부분과 충돌하는 분자들의 영향을 고려하였다.

3. 결과 및 고찰

적분법을 이용하여 $S_0(=s/b)$ 가 0.5이고, 날개 각 α 가 각각 $20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ 인 경우의 단단(single stage)에 대한 통과확률(P_{12})을 Fig.7에 나타내었다.

Fig.7은 $\alpha=20^\circ$ 인 경우에는 C값이 3일 때, $\alpha=30^\circ$ 인 경우에는 C값이 2일 때, $\alpha=40^\circ$ 인 경우에는 C값이 1.5일 때 각각 통과확률이 최대값을 가지며, α 가 커질수록 통과확률이 최대인 C의 값은 작아짐을 보여준다. 한편, C값이 커질수록 통과확률은 계속 증가하다가 다시 감소하는 경향을 나타낸다. 그리고, 분자의 통과확률은 계속 증가하다가 다시 감소하는 경향을 나타낸다. 그리고, 분자의 통과확률은 날개와 충돌하지 않고 직접 통과하는

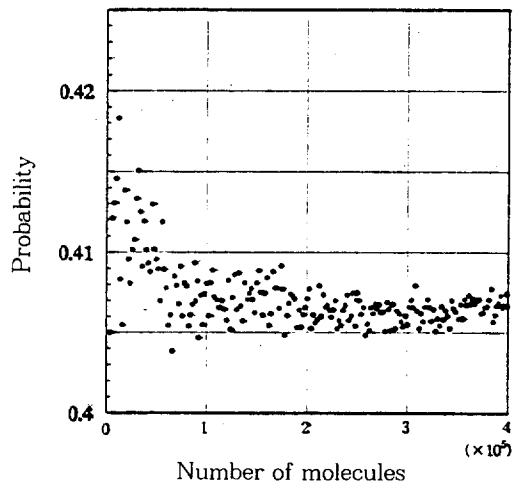


Fig.5 Effect of sample size on the scattering in a transmission probability

분자들(m_{12})에 주로 의존한다는 사실을 알 수 있다. 또한, C 값이 1 보다 작은 현실적인 경우에는 윗 날개와 충돌하여 통과할 확률(P_{U2}) 보다는 아랫 날개와 충돌하여 통과할 확률(P_{L2})이 더 크다는 것을 알 수 있다.

Fig.8은 $\alpha=20^\circ$ 이고, $S_o=1.0$ 일 때 본 연구의 적분법 결과와 Kruger와 Shapiro⁽²⁾의 연구결과를 확률 $P_{12}(P_{U2}+P_{L2}+m_{12})$ 에 대해 서로 비교한 것이다. 그들의 해석모델은⁽²⁾ C 값에 관계없이 윗 날개와 충돌하여 통과할 확률이 아랫 날개와 충돌하여 통과할 확률보다 크다는 조건을 설정하였으나 이것은 Fig.7의 본 연구결과와는 상반되며, 비록 각각의 확률(P_{U2} 및 P_{L2})에는 차이를 보이지만 전체적인 통과확률은 거의 일치함을 Fig.8에서 알 수 있다.

Fig.9~10은 Monte-Carlo 법을 이용하여 $C=0.5$ 인 경우 α 가 각각 $10^\circ, 50^\circ$ 일 때의 S_o 에 따른 최대 펌핑속도 및 최대 압축비를 나타낸 것이다. S_o 가 커진다는 것은 날개 길이(b)에 비해 상대적으로 날개사이의 간격(s)이 커진다는 것을 의미하므로 펌핑속도는 증가하고 압축비는 감소하는 경향을 보여주며, 날개각 α 가 작은 경우에 변화폭은 더 크다는 것을 알 수 있다.

R : rotor
S : stator
t : blade thickness

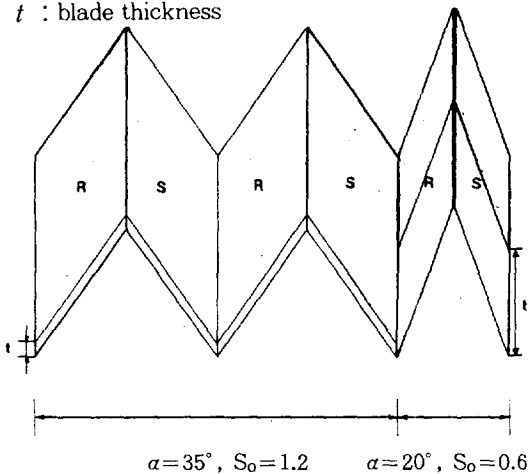


Fig.6 6-stage blade rows

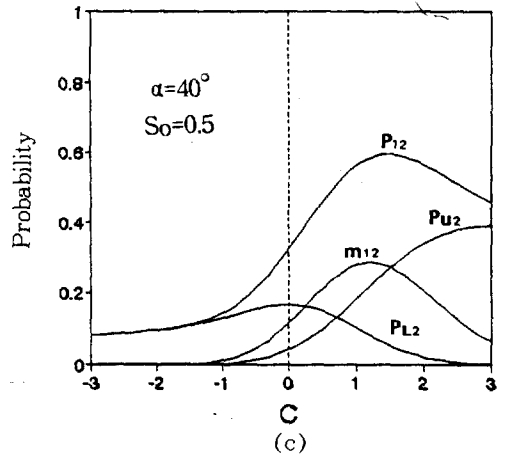
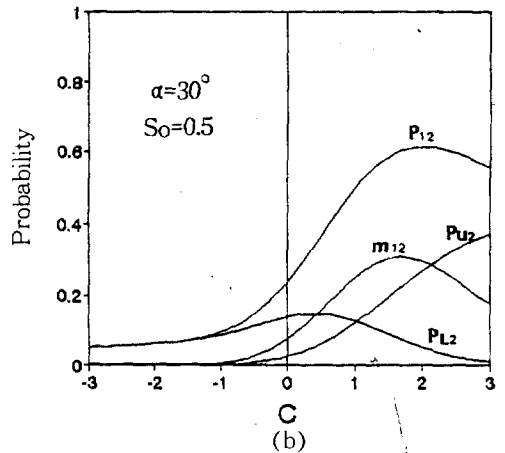
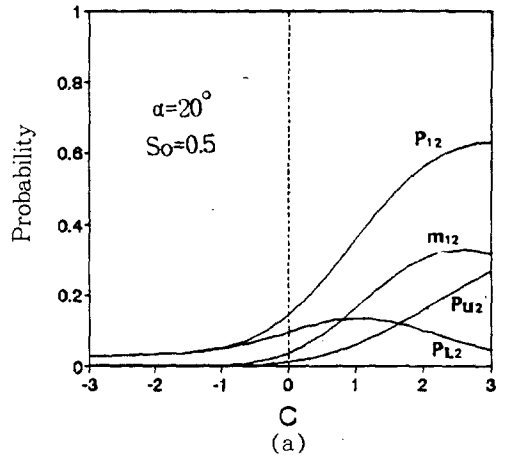


Fig.7 Each component of transmission probability as a function of C for $S_o=0.5$ (a) at $\alpha=20^\circ$ (b) at $\alpha=30^\circ$ (c) at $\alpha=40^\circ$

Table 2는 Tu등⁽⁴⁾의 적분법 결과와 본 연구에서 사용한 적분법과 Monte-Carlo 법의 계산결과를 서로 비교하여 나타낸 것이다.

case 1일 때 확률 P_0 는 약 50% 정도의 큰 차이를 나타내지만, 확률의 절대치가 확률 P_L 이나 m_{12} 에 비해 매우 작기 때문에 이를 무시한다면, Tu등⁽⁴⁾의 연구결과와 비교했을 때 최대 6% 미만의 오차를 나타냄으로써 비교적 정확한 결과를 얻었다고 할 수 있다.

Fig.11은 날개와 하우징과의 간격이 0인 경우(즉, $S_x = \delta/h = 0$)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 2 보다 커지게 되면 2차원 해석 결과에 점차적으로 접근함을 보여주고 있다. 따라서, 실제적인 TMP의 경우 보통 S_h 는 1보다 훨씬 크므로 S_h 의 영향을 고려하지 않은 2차원 해석은 가능하다고 생각된다.

Fig.12는 $C=0.4$, $S_h=3.0$ 일 때 날개와 하우징과의 간격 S_x 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_x 가 0.1보다는 훨

씬 작으므로 성능에 미치는 S_x 의 영향은 매우 작다고 할 수 있다.

Fig.13~14는 6단의 TMP에 대해 C 가 0.1~0.6인 범위에 대해서 근사적 방법과 Monte-Carlo 법에 의한 결과를 최대 펌프속도 및 최대 압축비에 대해 서로 비교하여 나타낸 것이다. 선행연구⁽⁷⁾에서는 3단 TMP를 2차원적으로 해석하였으나 본

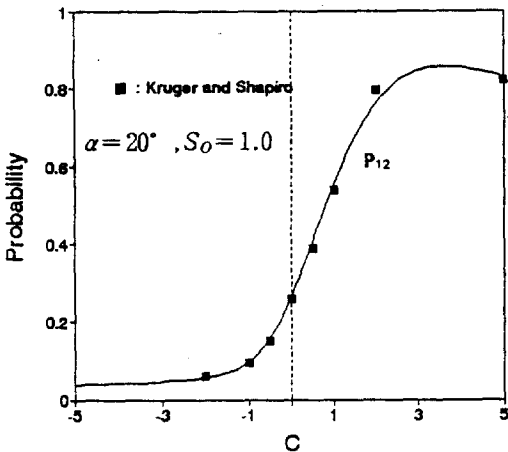


Fig.8 Comparison of present results with Kruger and Shapiro⁽²⁾

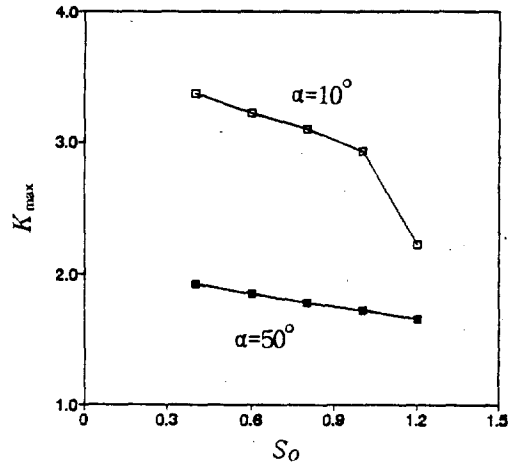


Fig.9 Calculated curves for K_{max} as a function of S_o

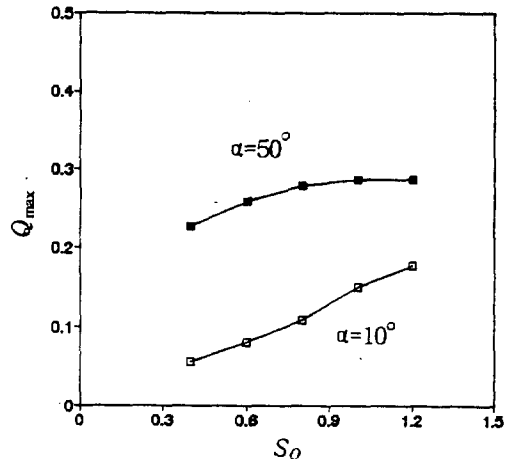


Fig.10 Calculated curves for Q_{max} as a function of S_o

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

case 1			case 2			case 3		
Tu et al. (1987)	Present study		Tu et al. (1987)	Present study		Tu et al. (1987)	Present study	
	Integral method	MC		Integral method	MC		Integral method	MC
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								
0.0750	0.0401, 0.0394		0.0847	0.0851, 0.0862		0.2297	0.2299, 0.2334	
P_L								
0.6348	0.6697, 0.6715		0.4958	0.4955, 0.4959		0.2768	0.2765, 0.2765	
m_{12}								
0.2902	0.2902, 0.2891		0.4195	0.4194, 0.4179		0.4935	0.4936, 0.4901	

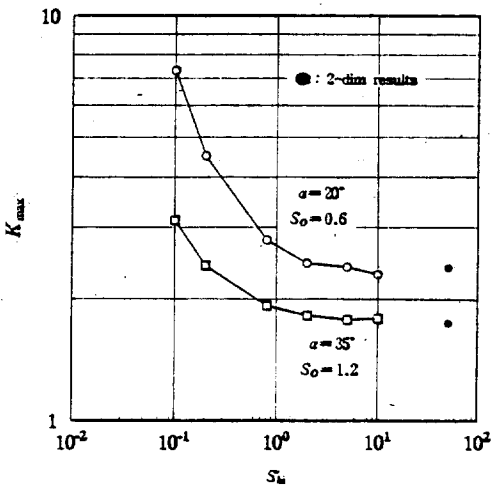


Fig.11 Calculated curves for K_{max} as a function of S_h

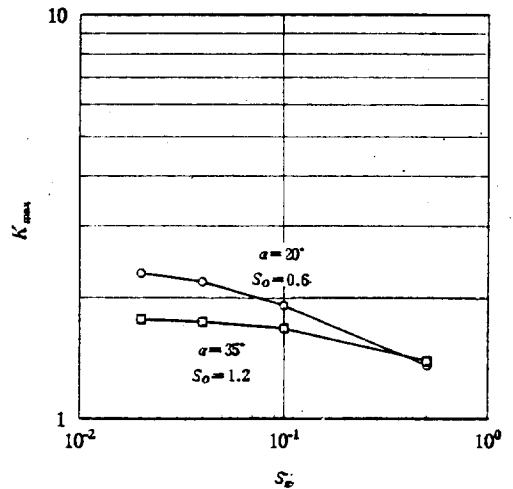


Fig.12 Calculated curves for K_{max} as a function of S_g

연구에서는 S_g 및 S_h 가 각각 0.02, 3.0인 6단의 TMP에 대해서 3차원 Monte-Carlo 해석을 수행하였으며, 날개 두께에 의한 영향도 고려하였다. 또한, 분자수에 따른 오차를 최대한 줄이기 위하여 분자수를 최대 400,000개 이상을 선택하여 해석하였으며, 날개 두께부분과 충돌하는 분자들은 코사인 반사법칙을 이용하였다.

Fig.13의 최대 압축비인 경우 C값이 증가함에 따라 두 방법의 상대오차는 커지고, C=0.6일 때 근사적 방법의 해석결과는 36% 정도 Monte-

Carlo법 보다 더 크게 예측됨을 알 수 있다. 압축비의 오차가 다소 크게 보이지만 TMP가 달성할 수 있는 압축비가 보통 $10^6 \sim 10^8$ 이므로 지수의 크기만 같다면 두 결과는 큰 차이를 보이는 것은 아니라고 생각된다. 따라서, 본 연구에서 이용한 6단의 TMP인 경우 Fig.13에서 보듯이 근사적 방법으로 해석한 결과는 만족할만 하다고 생각된다.

한편, Fig.14의 최대 펌핑속도인 경우에는 C=0.1일 때 최대 86% 정도의 오차를 나타내지만 각각의 절대치가 작으므로 근사적 방법을 이용하여도

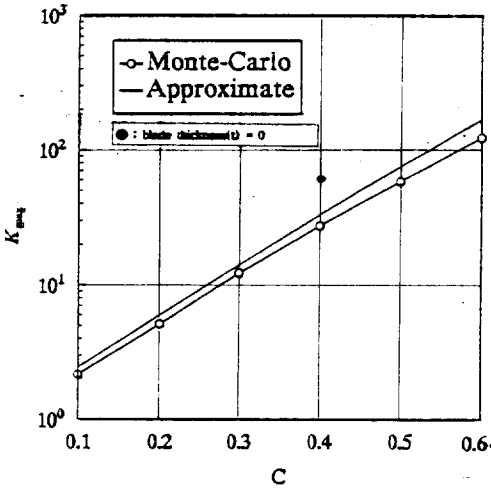


Fig.13 Calculated curves for K_{max} as a function of C in the case of 6-stage blade rows

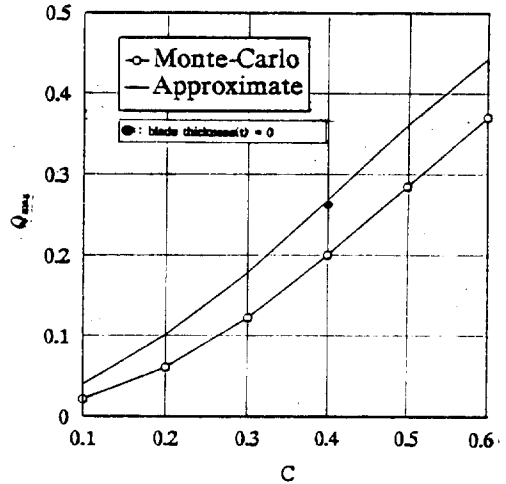


Fig.14 Calculated curves for Q_{max} as a function of C in the case of 6-stage blade rows

큰 차이는 아니라고 생각되며, C 값이 증가할수록 상대오차는 점점 줄어드는 경향을 보여준다.

날개 두께를 고려하지 않았을 때는 Fig.13~14와 같이 $C=0.4$ 에서 압축비인 경우 근사적 방법보다 45% 정도 크게 예측되고 있으나, 펌핑속도인 경우 근사적 방법과 거의 일치하는 결과를 보여준다. 그 이유는 날개 두께를 고려하지 않았을 경우 통과확률 P_{12} 는 커지고 상대적으로 P_{21} 은 작아지게 되므로 식 (4), (5)에서 알 수 있듯이 펌핑속도($P_{12} - P_{21}$)에서는 차이가 크게 나지 않지만, 압축비(P_{12}/P_{21})에서는 큰 차이를 보이게 되는 것이다.

결국, Monte-Carlo 법을 이용하여 TMP의 성능을 예측하는 것이 근사적 방법 보다는 정확한 방법이지만 TMP가 수십 단으로 구성되어 있는 경우에는 많은 노력과 경비가 요구되어 적용하기가 곤란해진다. 이 때 근사적 방법이 어느 정도 타당한 결과를 나타낸다면 이 방법은 매우 유용할 것이다. 따라서, 본 연구결과(Fig.13, 14)에서 알 수 있듯이 압축비 및 펌핑속도를 예측하는데 있어서 근사적 방법을 이용하는 것은 타당하다고 생각되어진다.

4. 결 론

터보 분자 펌프의 평편형 날개에 대한 분자류 영역에서의 기체 분자의 통과확률을 이용하여 최대 펌핑속도 및 최대 압축비를 단단(single stage) 및 다단(multi-stage)에 대해 적분법과 Monte-Carlo 법을 통해 수치해석한 결과 다음과 같은 몇 가지 결론을 얻었다.

1) Kruger와 Shapiro의 해석 모델과는 달리 C 값이 1보다 작은 현실적인 경우에는 윗 날개와 충돌하여 통과할 확률(P_{12})보다는 아랫 날개와 충돌하여 통과할 확률(P_{21})이 더 크다는 것을 알 수 있었다. 그러나, 각각의 통과확률에는 차이를 보이지만 전체적인 통과확률(P_{12})에는 차이가 없음을 알 수 있었다.

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

3) $S_h(=h/b)$ 가 증가하면 압축비는 현저히 감소함을 알 수 있었고, S_h 가 무한히 크다고 가정할 2차원 해석은 3차원 해석의 근사치임을 확인하였다. 그리고, S_h 가 1보다 훨씬 크고, S_b 가 0.1 보다

훨씬 작은 실제의 TMP에 있어서 성능에 미치는 S_h 및 S_g 의 영향은 매우 작다고 할 수 있다.

4) 6단 TMP 해석시 근사적 방법(approximate method)의 결과는 Monte-Carlo 법 보다 항상 크게 예측됨을 알 수 있었다. 펌핑속도에서는 C가 증가할수록 두 방법의 해석결과에 대한 상대오차가 감소하였으나, 반면에 압축비의 상대오차는 증가하는 경향을 보였다. 압축비의 오차가 $C=0.6$ 에서 36%로 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 유용하다.

후 기

이 논문은 성균관대학교의 1995년도 성균학술연구비에 의하여 연구되었음을 밝히며 깊은 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

- Hablanian, M. H., 1990, *High-Vacuum Technology(A Practical Guide)*, MARCEL DEKKER, Inc.
- Kruger, C. H. and Shapiro, A. H., 1961, In *Rarefied Gas Dynamics*, (Edited by L. Talbot), Academic Press, New York, pp. 117~140.
- Taniguchi, O., Suzuki, M., Sawada, T., 1968, "The axial flow molecular pump", *Trans. JSME*, Vol. 34, No. 260, pp. 708~716.
- Tu, J. Y. and Yang, N. H., 1987, "Theoretical studies of the modern turbomolecular pump", *Vacuum*, Vol. 37, No. 11/12, pp. 831~837.
- 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.
- Sekiya, S., Kitora, Y., 1990, "Study of The Performance of Turbomolecular Pumps : 1st Report, The Performance of Finite Height Blades", *Trans. JSME*, Vol. 56, No. 525, pp. 178~185.
- Sekiya, S., Kitora, Y., 1991, "Study of The Performance of Turbomolecular Pumps : 2nd Report, The Analysis of the Performance in the Multiple Stages", *Trans. JSME*, Vol. 57, No. 534, pp. 185~192.