

## 우주진공환경에서의 마이크로 추진

정성철\* · 허환일\*\*

### Micro Propulsion under High Altitude Space Environments

Sungchul Jung\*, Hwanil Huh\*\*

**Key Words** : Micro-Propulsion(마이크로추진), Thermal Transpiration(열적발산원리), Knudsen Pump(누셀펌프), Knudsen Number(누셀수), Vacuum Condition(진공조건)

#### Abstract

From the previous researches about flow characteristic of micro-nozzle, we found that viscosity and back pressure induced heavy losses in micro nozzle. To overcome these losses, we began to study new conceptual micro propulsion system that is thermal transpiration based micro propulsion system. It has no moving parts and can pump the gaseous propellant by temperature gradient only (cold to hot). Most of previous research on thermal transpiration is in its early stage and mainly studied for application to small vacuum facility or gas chromatography in ambient condition using nanoporous material like aerogel. In this study, we focus on basic research of propulsion system based on thermal transpiration using polyimide material in vacuum conditions.

#### 1. 서론

마이크로 인공위성의 자세제어를 위한 마이크로 추진장치에 대한 연구는 대부분 기존의 추진장치를 소형화하는 방향으로 진행되고 있다. 하지만 미소추력 발생을 위한 노즐의 소형화는 점성손실, 배압에 의한 손실 등을 야기하며 선행연구에서 대기압실험, 진공환경실험, CFD 해석을 통하여 검증하였다[1].

본 연구에서는 마이크로 노즐에서의 유동 손실을 극복하기 위한 방법으로 열적발산원리를 제안하며, 이에 대한 이론적 접근을 시도하고 실험을 통해 효율을 분석하였다. 마이크로 추진장치에 적용을 위한 열적발산원리는 움직이는 부품 없이 오직 온도구배만으로 유동을 제어할 수 있기 때문에 추진장치의 소형화로 야기되는 손실을 극복할 수 있을 것으로 기대되며, 기체의 회박효과를 이용하기 때문에 점성에 의한 추력손실을 극복할 수 있을 것으로 예상된다[2].

열적발산원리에 대한 연구는 세계적으로 많은 발전을 거듭해 왔으며, 대부분이 대기압 환경에서 소형진공설비나 가스 크로마토그래피에 적용을 위한 목적으로 연구 중에 있다[3]. 즉 추진장치에 적용을 위한 목적으로는 처음 시도되었으며, 본 연구에서는 타 연구에서와 다르게 에어로젤과 같은 나노 다공물질을 사용하지 않고 폴리이미드 재질의 멤브레인을 이용하여

진공환경에서 배압에 따른 열적발산원리의 효율을 분석하였다.

#### 2. 마이크로 노즐의 효율 분석

마이크로 노즐의 유동특성을 분석하기 위해 선행연구에서는 CFD 해석, 대기압실험, 진공환경실험을 진행하였다.

##### 2.1 마이크로노즐의 형상에 따른 효율

마이크로 노즐의 유동 특성에 대한 실험에 앞서 마이크로 노즐의 형상(원형, 정사각 노즐)에 따른 유동특성을 FLUENT를 통해 분석하였다. 해석 결과 원형 노즐의 경우 노즐 단면 전체에서 속도분포가 일정한 반면에 정사각 노즐의 경우는 전체적으로 포물선 형태를 보였다. 이는 원형노즐이 정사각 노즐보다 벽면에서 점성에 의한 경계층 효과가 작아 효율이 뛰어난 것을 의미한다[4].

##### 2.2 노즐의 소형화에 따른 유동 손실

노즐의 소형화에 따른 유동특성 분석을 위해 추진 장치의 노즐 목 직경을 1, 0.5, 0.25 mm, 팽창비를 2, 4로 각각 제작하였으며, 미소추력 측정을 위해 7.6 mN ~ 1000 mN의 추력을 측정할 수 있는 미소추력 측정 장치를 설계, 제작하였다.

Table 1. 마이크로 노즐의 시험조건

추진제	질소, 아르곤
시험환경	대기압 환경, 저진공 환경(100 Pa)

\* 두산중공업, zezeout@naver.com

\*\* 충남대학교 항공우주공학과, hwanil@cnu.ac.kr

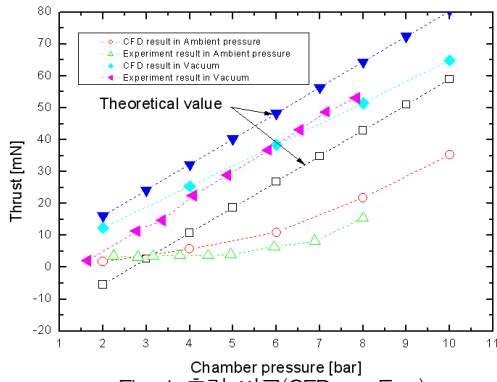


Fig. 1 추력 비교(CFD vs. Exp.)

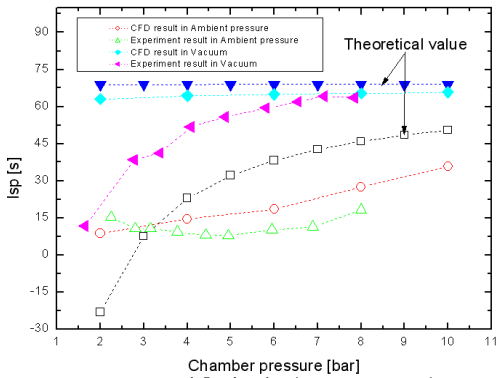


Fig. 2 비추력 비교(CFD vs. Exp.)

Figure 1, 2 결과를 보면 대기압 환경에서 추력값이 저압부에서 선형적으로 증가하지 못하고, 진공상태의 경우 압력 증가에 따른 추력 값이 거의 선형적으로 증가하지만 비추력 결과가 곡선 형태를 보이는 것을 알 수 있다. 즉 노즐의 소형화에 따라 노즐 출구의 배압과 유체의 점성에 의한 손실이 증가한다는 사실을 선행 연구를 통해 확인할 수 있었다.

### 3. 진공환경에서의 열적발산원리

#### 3.1 열적발산원리를 이용한 마이크로 추진장치

열적발산원리(일명:누센펌프)는 Reynolds(1879)에 의해 최초로 연구되었고 현재는 미 남가주 대학(USC)과 NASA 산하의 Jet Propulsion Lab.에서 소형진공설비와 가스 크로마토그래피에 적용을 위한 목적으로 활발히 연구되고 있다[5]. 하지만 본 연구에서는 진공환경에서 배압에 따른 멤브레인의 효율을 분석하여 열적발산원리의 추진장치에 적용 가능성을 확인하고자 한다.

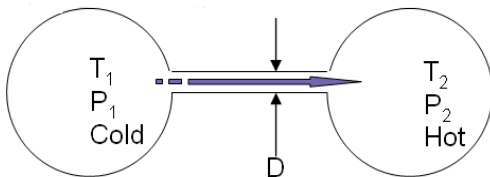


Fig. 3 누센펌프의 원리

열적발산원리는 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 가스분자의 평균자유행정 보다 작은 직경을 가진 멤브레인에 의해 챔버가 연결되어 있을 때 멤브레인 좌우의 온도구배는 압력구배를 유발하고 온도가 낮은 쪽에서

높은 쪽으로 유동이 발생하는 원리를 말한다. 이는 온도차에 의한 기체의 입사빈도의 차이로 발생하며, 최대 효율에서 유동은 압력이 온도구배의 제공근이 될 때까지 지속된다.

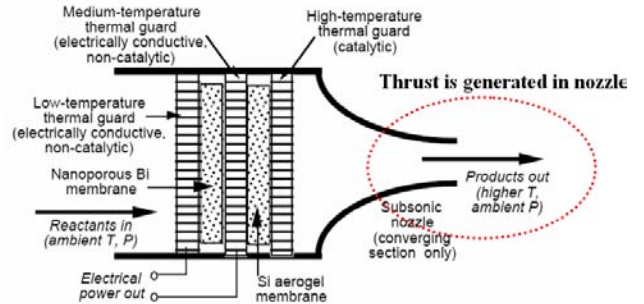


Fig. 4 열적발산원리를 이용한 추진장치 개념

Figure 4는 열적발산원리를 이용한 마이크로 추진장치에 대한 개념도를 모사하고 있다.

#### 3.2 실험장치 구성

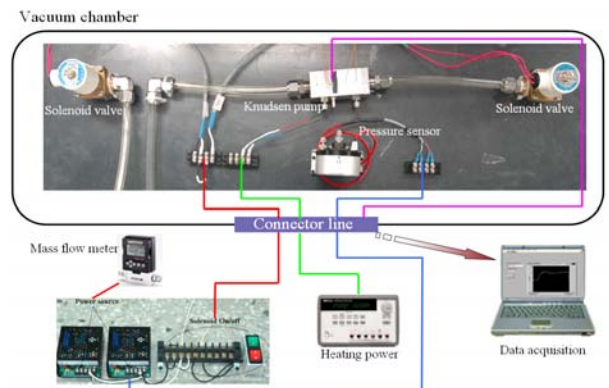


Fig. 5 누센펌프 실험장치 개략도

Figure 5는 진공환경에서 배압에 따른 열적발산원리의 효율분석을 위한 실험장치의 모습을 보여주고 있다. 온도구배는 파워서플라이로 제어를 할 수 있도록 하였으며, 최대 124 Pa 까지의 차압을 측정할 수 있는 차압계를 사용하였다.

멤브레인의 재료로는 열전도율(0.29 W/mK)이 낮고 고온(300°C)에서 연속 사용이 가능한 플라스틱 계열의 폴리이미드(Polyimide)를 사용하고, 정밀가공을 통해 직경 1 mm, 0.5 mm, 0.25 mm, 0.1 mm 의 홀(hole)을 가공하였다.(홀 개수 : 121개)

Thickness / Design hole Dia.	2.0 mm	1.0 mm	0.5 mm
1.0 mm	0.97 mm X 40	0.97 mm X 40	0.99 mm X 40
0.5 mm	0.48 mm X 40	0.49 mm X 40	0.47 mm X 40
0.2 mm	0.22 mm X 100	0.21 mm X 100	0.21 mm X 100
0.1 mm			0.11 mm X 100

Fig. 6 Manufactured membrane (Material : Polyimide)

Figure 6은 본 연구에서 사용된 Polyimide 재질의 Membrane으로 hole 직경이 각각 1.0, 0.5, 0.2 mm이고 두께는 각 직경에 대하여 2.0, 1.0, 0.5 mm로 제작하였다.

진공환경에서의 실험을 위한 열적발산장치인 누센 펌프는 크게 전단부, 멤브레인, 후단부로 구성되며, 온도구배 형성을 위한 가열장치와 온도측정을 위한 열전대, 그리고 차압측정을 위한 차압센서로 구성되었다. 피팅류와 멤브레인을 제외한 모든 재질은 알루미늄으로 제작하였으며, 전단부, 후단부로 이어지는 공간은 진공환경에서 역방향 열적발산현상이 일어나지 않도록 가로×세로를 17×17 mm 로 구성하였다. 각 파트별로 제작된 형상은 Fig. 7과 같다.

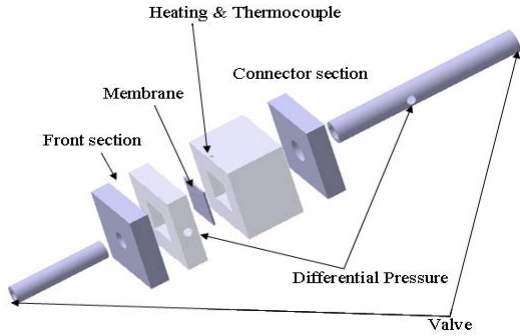


Fig. 7 Schematic of Knudsen pump

열적발산장치의 온도구배 형성을 위한 가열장치는 세라믹 튜브(ceramic tube)와 열선(hot wire)을 사용하였다. 전원공급은 진공챔버 외부에서 파워서플라이를 통해 이루어 졌으며, 동시에 멤브레인 전단에서 1채널의 온도 그리고 후단에서 3채널의 온도를 측정하여 이론적인 압력구배 값을 계산하였다. 실제 실험에 앞서 멤브레인 후단의 온도 대표값으로 가운데 3개 지점의 온도 평균값을 사용이 가능한지를 판단하기 위한 실험을 수행하였다. 가열장치의 파워를 조절해 가며 멤브레인 후단에서 9개 지점의 온도를 측정하여 평균값을 계산하였고, 별도로 가운데 3개 지점의 평균값을 계산하여 비교하였다. 실험결과 가운데 3개 지점의 온도 평균값은 멤브레인 후단의 전체 온도 대표값으로 사용하기에 충분하다는 결론을 얻게 되었으며, 이를 멤브레인 후단온도로 간주하였다.

#### 4. 실험결과

누센펌프의 효율은 Fig. 8과 식 (1)에서 볼 수 있듯이 기체의 누센수와 온도구배에 영향을 받는다. 즉, 열적발산원리의 효율은 멤브레인 좌우의 온도구배가 클수록 그리고 유체의 누센수가 증가할수록 증가한다.

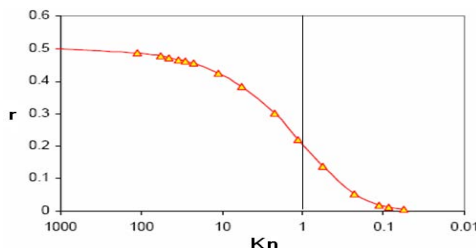


Fig. 8 누센수에 따른 누센펌프의 최대압력구배

$$\frac{P_2}{P_1} = \left\{ \frac{T_2}{T_1} \right\}^r \quad (1)$$

이러한 조건을 형성하기 위해 나노 스케일의 다

공물질(멤브레인)이 필요하며, 온도구배가 클수록 압력 구배도 커지기 때문에 열전도율이 작은 물질을 멤브레인으로 사용하여야 한다. 그러나 비록 나노 스케일의 멤브레인이 아니더라도 진공설비를 이용하여 가스분자의 평균자유행정을 오히려 증가시키면 비교적 가공이 가능한 수준에서 이와 같은 효과를 평가할 수 있다.

진공챔버 내부에서 배압을 40, 67, 107 Pa로 설정한 상태로 시험한 결과를 Fig. 9, Fig. 10에 나타내었다.

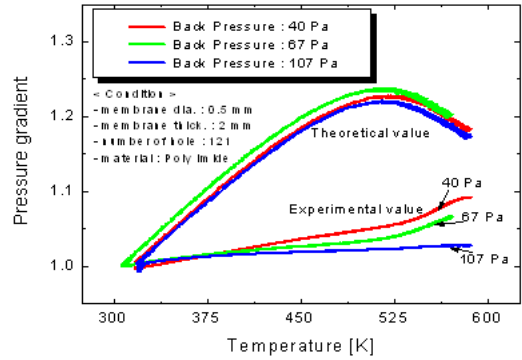


Fig. 9 Variation of pressure gradient

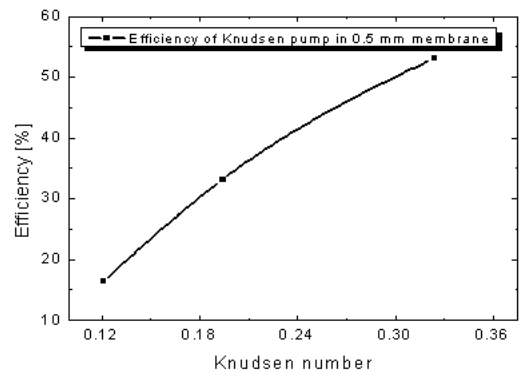


Fig. 10 Variation of pressure efficiency

누센수와 배압의 변화에 따른 압력구배 효율 분석으로 전체적으로 누센수의 증가에 따라 멤브레인의 압력 효율이 최대 82% 까지 증가함을 확인할 수 있었다. 또한 천이영역에서는 같은 누센수에서 두꺼운 멤브레인이 보다 높은 효율을 보였으며, 누센수가 증가함에 따라 두께에 관계없이 비슷한 값으로 수렴하는 경향을 보였다. 즉 완벽한 분자흐름( $Kn > 1$ )에서 누센펌프 멤브레인의 두께에 의한 영향은 전체 시스템 효율 면에서 무시가능할 것으로 판단된다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 마이크로 추진장치에서 발생하는 유동 손실을 극복하기 위해 열적발산원리를 추진장치에 적용하는 방안을 제시하였다. 전체적으로 열적발산원리의 배압환경에 따른 멤브레인의 압력구배 효율을 분석하여 누센수가 증가함에 따라 열적발산장치의 효율이 증가함을 확인할 수 있었다. 즉 멤브레인 좌우

에서 기체의 희박효과로 유동이 발생하는 열적발산원리는 오직 온도구배만으로 유동을 제어할 수 있기 때문에 추진장치의 소형화로 야기되는 손실을 극복할 수 있을 것으로 기대된다.

### 후 기

이 논문은 2006년 정부재원 (교육인적자원부 학술 연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원(과제 번호: KRF-2006-311-D00043)으로 연구임.

### 참고문헌

[1] 문성환, 오화영, 허환일, “마이크로 노즐 성능평가”, 한국우주공학회지, 제33권, 제5호, (2005), pp.72-78.  
[2] 정성철, 신강창, 김연호, 김혜환, 이용우, 허환일,

“열적발산원리를 이용한 마이크로 추진장치에 대한 연구”, 2007년 한국추진공학회 춘계학술대회 논문집, pp.25~29.

[3] G. Pham-Van-Diep, P. Keeley, P. Muntz, E. and P. Weaver, D. “A micromechanical Knudsen compressor,” In Rarefied Gas Dynamics. eds. J. Harvey, G. Lord, Oxford University Press, Oxford.  
[4] 한명신, 서지한, 명노신, 허환일, “Navier-Stokes CFD 모델을 이용한 소형 노즐 유동장 해석,” 2004년 한국항공우주학회 추계학술발표회 논문집(II), pp. 699-702.  
[5] G. Pham-Van-Diep, P. Keeley, P. Muntz, E. and P. Weaver, D. “A micromechanical Knudsen compressor,” In Rarefied Gas Dynamics. eds. J. Harvey, G. Lord, Oxford Univ. Press, 1999.