

고고도 우주환경 모사용 진공챔버를 이용한 누센펌프의 연구와 열진공챔버로의 개선 방향

김혜환* · 허환일**

Study of Knudsen Pump using Vacuum Chamber and It's Upgrade Plan to Thermal Vacuum Chamber

Hye-hwan Kim* · Hwanil Huh**

ABSTRACT

Vacuum facility is required for high altitude space environment test to develop small thruster to be applied for micro-satellite. After selecting vacuum equipment and integrating the chamber to simulate 100-120km attitude with max, 10^{-5} torr. We tested the performance of high vacuum chamber. We designed, fabricated the knudsen pump and analyzed pressure gradient efficiency of membrane according to Knudsen number under vacuum conditions. We described the upgrade plan to a thermal vacuum chamber

초 록

마이크로 인공위성에 적용가능한 마이크로 추력기를 개발하기 위해서는 우주환경을 모사할 수 있는 진공설비가 요구된다. 본 논문에서는 10^{-5} torr의 진공도를 목표로 정하고 진공설비를 구축하였고, 100 ~ 120 km의 고도를 모사한다. 장치 선정 및 실제 장치 구축 후 진공도 성능 실험을 수행하였고 저진공 펌프를 작동시켜 누센펌프의 멤브레인에 따른 특성연구를 진행하였다. 또한 향후 열진공챔버로의 전환을 위한 계획을 서술하였다.

Key Words: Micro-Propulsion(마이크로 추진), Thermal Transpiration(열적발산원리), Knudsen Pump(누센펌프), Knudsen Number(누센수), Vacuum Condition(진공 조건), Thermal Vacuum(열진공)

1. 서 론

모든 인공위성이 그렇듯 인공위성의 수명은 자세제어용 추력기의 수명과 같이 한다. 즉 자세제어용 추력기에 공급되는 인공위성 탑재 연료가 모두 소모되면 인공위성의 수명이 다 되었다고 말할 수 있다. 이런 점에서 볼 때, 인공위성 개발에 있어서 연료를 효율적으로 사용하는 추

력기 개발은 매우 중요한 요소이다. 또한 새로운 종류의 임무를 수행하기 위해 인공위성의 마이크로화(100 kg 급), 나노화(10 kg 급), 피코화(1 kg 급) 추세에 맞춰 그에 적합한 0.1 마이크로 뉴턴 이하의 추력 노이즈를 가지는 마이크로 ~ 밀리 뉴턴급의 추력기의 개발이 요구되며[1], 현재 전 세계적으로 활발히 연구 중이다. 본 연구는 마이크로급 이하의 인공위성에 적용 가능한 마이크로 추력기의 개발을 위한 마이크로 콜드 가스 추력기와 미소추력 측정장치를 개발하였다 [2]. 또한 마이크로 인공위성에 적용을 위한 새로운 개념의 추진장치인 누센펌프의 가능성을

* 충남대학교 항공우주공학과 석사과정

** 종신회원, 충남대학교 항공우주공학과
연락처, E-mail: hwanil@cnu.ac.kr

실험하기 위해 누선편프의 제작을 하였다[3]. 본 실험실에서는 마이크로 인공위성에 적용 가능한 마이크로 추력기의 개발과 누선편프의 작동 환경을 위해서는 우주환경을 모사할 수 있는 진공 설비가 요구되어서 진공실험장치를 구축하였다 [4]. 진공실험장치를 이용한 실험의 환경을 고려할 때 목표 진공도는 1.0×10^{-5} torr로 약 120 km의 고도를 모사할 수 있다. 하지만 실제 진공실험장치의 구축 후 시간에 따른 진공도를 확인한 결과 6.5×10^{-5} torr의 진공도에 도달하여 목표로 했던 진공도에는 도달하지 못하였지만 고도로 보았을 때는 10 km 정도의 차이밖에 발생하지 않으므로 향후 진공실험장치를 이용한 실험을 진행 시 무리가 없을 것으로 예상된다.

본 논문은 본 실험실에서 구축한 진공실험장치를 중심으로 누선편프의 연구 결과를 기술하며, 향후 열진공챔버로의 개선 방안에 대해 기술하였다.

2. 고고도 환경 모사용 진공실험장치

2.1 진공시스템

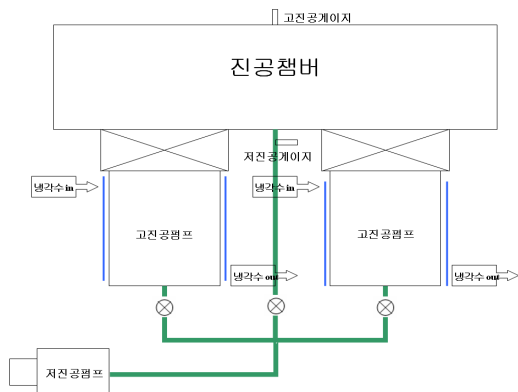


Fig. 1 진공실험장치 구성도

진공장치는 Fig. 1에서 알 수 있듯이 크게 진공챔버와 진공펌프로 구성된다. 진공은 진공펌프를 사용하여 진공챔버와 진공펌프간의 압력 차이를 생성시켜 진공챔버로부터 공기와 기체를 제거하여 만든다.

2.2 충남대학교 진공 실험장비 구축

충남대학교에서는 위의 계산결과를 이용하여 Fig. 2와 같은 진공실험장치를 구축하였다. 진공실험장치 규격은 Table 1로 나타내었다.

컨트롤 박스는 펌프의 On/Off, 진공계지를 통한 용기내 진공도 측정, 파이프 내 밸브 개폐를 컴퓨터로 제어 가능하도록 제작하였다. 진공

용기내 추력기에 추진제를 공급하는 배관과 추력측정장치로부터 신호를 받기 위한 데이터 라인인 진공을 유지할 수 있도록 제작된 플랜지에 연결하여 누설에 의한 기체유입을 차단하였다.

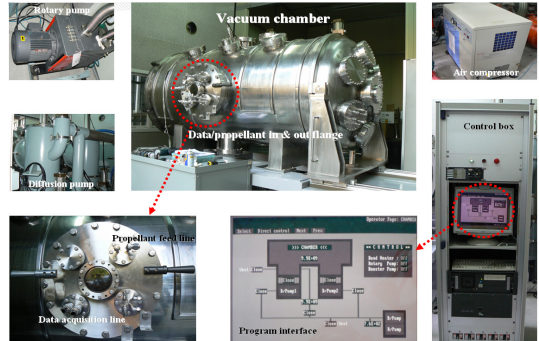


Fig. 2 충남대학교 진공실험장치

Table 1. 장비별 특성

장 비 명	규 격
진공용기	외경 : 1.2m, 길이 : 1.8m 재질 : SUS 304L
저진공펌프 (오일회전펌프)	모델명 : E2M275 배기속도 : 4876 l / min 기본압력(U/P) : 3.8×10^{-3} torr
고진공펌프 (오일확산펌프)	모델명 : DDP-22 배기속도 : 12000 l / sec 기본압력(U/P) : 1.0×10^{-7} torr
저진공계이지 (피라니계이지)	측정방법 : 기체의 열특성 이용 측정영역 : $760 \sim 10^{-3}$ torr
고진공계이지 (냉음극계이지)	측정방법 : 기체의 이온을 이용 측정영역 : $10^{-2} \sim 10^{-12}$ torr

2.3 진공용기 내 진공도 실험

진공환경에서의 실험에 앞서 진공장치가 예상 진공도를 만족하는지 평가하고 최적의 실험 절차를 찾기 위하여 여러 번의 진공도 측정실험을 수행하였다. Fig. 3과 Table 2는 저진공 펌프와 고진공 펌프 모두를 작동하여 얻은 진공 용기내 진공도 측정결과이다.

로터리 펌프 사용 시 예상 진공도인 1.0×10^{-2} torr까지 30분이 걸렸는데 이는 예상시간의 3배에 해당하는 시간이다. 확산펌프는 진공도가 5×10^{-2} torr에 도달하였을 때 사용하여도 되나 최적의 상태에서 진공도를 낮추고자 예열시간으로 30분을 사용하였다. 그 결과 확산펌프 사용시간 30분 만에 6.5×10^{-5} torr에 도달하였다.

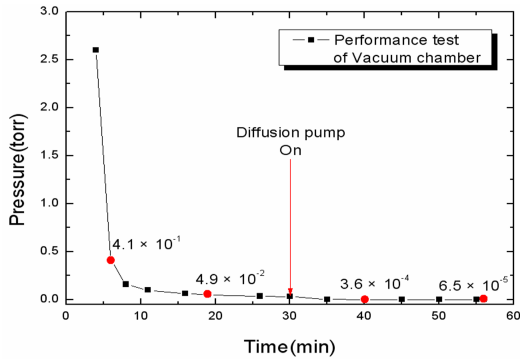


Fig. 3 진공도 측정결과

Table. 2 압력별 고도

시간(분)	Pressure(torr)	Altitude(km)
6	4.1×10^{-1}	52
19	4.9×10^{-2}	70
30	오일확산펌프 작동	
40	3.6×10^{-4}	97
45	7.5×10^{-5}	108

실제 진공펌프의 성능이 이론적 성능에 미치지 못하는 결과를 보이는데 이에 대한 원인으로서는 ① 저진공 펌프의 유효배기속도는 압력이 감소하면 감소하며, 저진공 펌프시스템의 배관 전도도에 대한 검토가 충분히 수행되지 못하였다.

② 고진공펌프의 배기속도는 압력이 충분히 낮아져야 제 배기속도를 낸다.

③ 압력이 낮아지면 표면에 흡착되어 있던 기체분자들이 방출되기 시작한다.

④ 공간에 있는 기체분자들이 배기되지 않고 다시 표면에 흡착된다.

실험결과 목표진공도 1.0×10^{-5} torr에는 도달하지 못하였지만 고도로 보았을 때는 10 km 정도의 차이밖에 발생하지 않으므로 진공 성능실험에는 무리가 없을 것으로 예상된다.

3. 진공실험장치를 이용한 누센펌프 실험

3.1 실험장치 구성

Figure 4는 진공환경에서 배압에 따른 열적발산원리의 효율분석을 위한 실험장치의 모습을 보여주고 있다. 온도구배는 파워서플라이로 제어할 수 있도록 하였으며, 최대 124 Pa까지의 차압을 측정할 수 있는 차압계를 사용하였다.

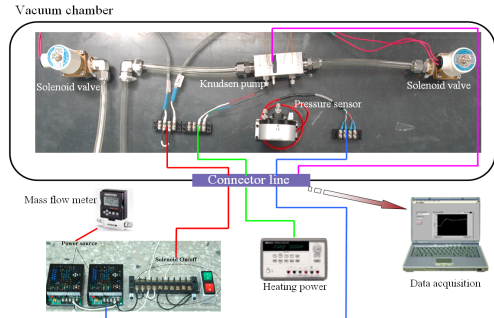


Fig. 4 누센펌프 실험장치 개략도

3.2 누센펌프의 효율 분석

Figure 5은 두께가 2 mm이고 홀 직경이 0.5 mm 인 멤브레인의 전단부 온도(Hot-section) 변화에 따른 누센펌프의 압력구배에 대한 실험결과를 보여주고 있다. 40, 67, 107 Pa 의 배압환경에서 실험적으로 측정된 압력구배와 K-type 열전대로 측정된 멤브레인 전단부와 후단부의 온도를 기준으로 계산된 이론적 값을 비교하였다.

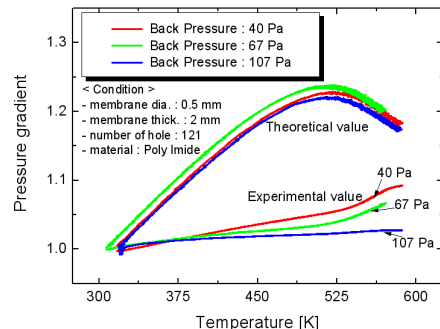


Fig. 5 전단부 온도에 따른 압력구배

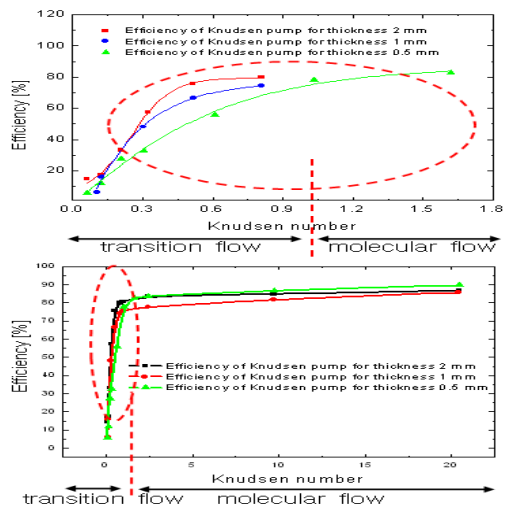


Fig. 6 천이흐름과 분자흐름에서의 압력효율

누센수가 1보다 커지며 최대효율을 보이는 분자흐름에서의 특성을 확인할 필요가 있다. 따라서 배압 1.3, 13, 40, 67, 107 Pa 환경에서의 실험을 진행하였으며 Fig. 6에서 천이흐름과 분자흐름에서의 압력구배 효율을 확인하였다.

4. 진공챔버의 열진공챔버로의 개선 방안

누센펌프의 효율 증대를 위한 방안으로 진공도의 변화를 주는 방법이 있으며, 진공환경의 실험시 상온의 온도를 변화 줌으로서 멤브레인의 전단과 후단의 온도 차이를 확대하는 방안이 있다. 또한 향후 마이크로 추력기의 연구를 위한 환경 모사용 열진공 챔버로의 개선방안을 제시한다.

4.1 열교환장치

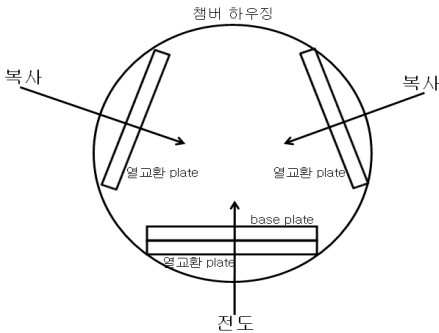


Fig. 7 용기 내부에 열교환방식 적용

충남대학교에서 보유하고 있는 진공용기 내부에 적절한 shroud를 만들어 장착하는 것은 실질적으로 어려운 방법이다. 순수 열전도방식은 우주환경시험조건을 만족시킬 수 있는 온도변화율을 구현할 수 있으나, 우주 조건과는 약간 동떨어진 방식이다. 그러므로 피시험물로의 전도 열전달과 부수적으로 복사 열전달을 활용하는 방식을 적용하기로 결정하였다(Fig. 7, Table 3).

Table 3. 열교환시스템의 기본요구조건

구분	조건
온도조절범위	-60 ~ 100 °C
온도변화율	최대 5 °C/min
온도조절오차	± 0.5 °C

4.2 온도 및 데이터 획득 장치

피시험물의 온도측정 및 데이터 획득을 위한 장치가 필요하다. Fig. 8은 데이터 획득장치의 구조를 보여준다.

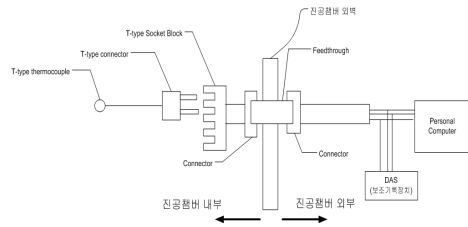


Fig. 8 데이터 획득장치 구조도

5. 결 론

우주환경을 모사하기 위해서는 진공환경 뿐만 아니라 열적 환경 또한 모사할 수 있어야 한다. 충남대학교에서는 저진공 및 고진공 펌프를 이용하여 6.5×10⁻⁵ torr의 진공환경을 모사할 수 있는 진공실험장치를 구축하였다. 이를 이용하여 누센펌프의 작동환경을 모사 하였으며, 누센펌프의 멤브레인에 따른 압력효율 특성을 확인할 수 있었다. 이번에 구축한 진공실험장치는 인공위성에 탑재되는 부품의 신뢰성 및 안전성 실험 등 그동안 기업과 연구소에서만 가능했던 실험을 대학 실험실에서도 가능하게 한다는 점에서 다양한 응용이 예상된다. 또한 보다 더 높은 진공도를 구현하기 위한 진공시스템 개선작업과 진공상태에서의 열환경을 구현하기 위한 열순환시스템을 구축 할 예정이다.

후 기

이 논문은 누리사업의 산학기회 공동연구 '우주환경모사 미세추력측정장치 연구, 한국학술진흥재단의 지원 (과제번호: KRF-2006-311-D00043) 지원으로 연구되었음.

참 고 문 헌

1. Juergen Mueller, Colleen Marrese, John Ziemer, Amanda Green, Eui-Hyeok Yang, Mohammad Mojarraddi, Travis Johnson, Victor White, and David Bame, "JPL Micro-Thrust Propulsion Activities", AIAA-2002-5714
2. 문성환, 오화영, 허환일, "마이크로 노즐 성능평가", 한국항공우주공학회지, 제33권, 제5호, 2005, pp.72-78.
3. 정성철, 허환일, "마이크로 추진장치에 적용을 위한 누센수에 따른 열적발산원리의 효율 분석", 2005년 한국항공우주학회지, 제36권, 제5호, 2008, pp.483-490.
4. 신강창, 이민재, 정성철, 김연호, 김혜환, 허환일, "충남대학교 고고도 우주환경모사 진공실험장치", 한국추진공학회 춘계학술발표회 논문집, 2007, pp. 49-52