

충남대학교 고고도 우주환경모사 진공실험 장치

신강창* · 이민재* · 정성철* · 김연호* · 김혜환* · 허환일**

Vacuum Facility at the CNU for High Altitude Space Environment Test

Kangchang Shin* · Minjae Lee* · Sungchul Jung* · Younho Kim* · Hyehwan Kim* · Hwanil Huh**

ABSTRACT

Vacuum facility is required for high altitude space environment test to develop small thruster. We, at Chungnam National University, developed vacuum test facility up to 10^5 torr to simulate 100 ~ 120 km altitude environment. Prior to operation, we predict vacuum pump performances and present preliminary calculation and experiments.

초 록

마이크로 인공위성에 적용가능한 마이크로 추력기를 개발하기 위해서는 우주환경을 모사할 수 있는 진공설비가 요구된다. 본 논문에서는 10^5 torr의 진공도를 유지할 수 있는 진공설비를 구축하였고, 이 장비는 100 ~ 120 km의 고도를 모사할 것으로 기대된다. 실제 장비운용에 앞서 사용할 펌프의 성능을 예측하고 저진공 펌프를 작동시켜 이론에 의한 예상 진공도와 실험을 통한 진공도를 비교 분석하였다.

Key Words: Vacuum Test Facility(진공실험장치), Hight Altitude Space Environment (고고도 우주 환경), Prediction(예측)

1. 서 론

모든 인공위성이 그렇듯 인공위성의 수명은 자체 자세제어용 추력기와 궤도 천이용 추력기의 수명과 같이 한다. 즉 추력기의 연료가 모두 소모되면 인공위성의 수명이 다 되었다고 말할

수 있다. 이렇듯 인공위성에서 추력기 개발은 매우 중요한 요소이며 인공위성의 소형화 추세에 맞춰 그에 적합한 마이크로 급의 추력기의 개발이 요구되며 현재 전 세계적으로 활발히 연구 중이다. 마이크로 추력기의 개발을 위해서는 고고도 환경모사 진공실험 장치가 필수적이다. 인공위성은 지상이 아닌 진공환경에서 운용이 되기 때문에 진공상태에서의 미소 추력을 측정하는 기술의 축적은 매우 중요한 요소이다[1].

* 충남대학교 항공우주공학과 석사과정

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

2. 고고도 환경모사 진공실험장치 구축

2.1 목적

마이크로 인공위성의 운용은 고고도에서 이루어진다. 마이크로 추력기의 개발을 위해 고고도 우주환경 모사를 위한 진공실험장치가 필요할 이유도 여기에 있다. 더욱이 마이크로 추력기의 성능을 파악하기 위해 미소 추력을 측정하는 것은 매우 중요한 요소인데, 이러한 미소추력이 진공설비에서 가능하도록 설비를 꾸미는 것은 연구에 매우 중요한 포인트로 작용한다. 현재 충남대학교는 자체 연구개발한 마이크로 콜드가스 추력기와 마이크로 추력측정장치(TMS)를 개발한 상태이다. 이러한 두 가지 기술과 고진공 설비를 결합하여 자체적으로 마이크로 인공위성에 적용 가능한 마이크로 추력기 개발을 목표로 하고 있다. 선행연구로 진공환경에서 마이크로 노즐의 성능을 평가하기 위해 (주)한화의 저진공 설비를 이용하였고, 당시 실험을 위한 최적의 진공환경은 1×10^0 mbar였다. 현재 자체적으로 구축하고자 하는 진공 설비의 최대 진공도는 10^5 torr 로 100 km ~ 120 km의 고도를 모사하고자 한다. 비록 인공위성의 운용고도(600 km ~ 800 km)에서의 진공도 10^{-9} torr에는 미치지 못하지만 추력기의 추력 값을 비교할 경우 이는 실제 운용고도에서의 추력 값과 큰 차이를 보이지 않는다.

2.2 진공시스템 구성

본 시스템 전체 구성은 크게 메인챔버, 로터리 펌프, 디퓨저 펌프, 에어 컴프레셔로 구성하였다. 모든 동작 및 작동 상태는 컨트롤 박스에서 확인되며, 두 개의 진공 압력 게이지를 통하여 진공 챔버와 배관의 압력을 실시간으로 확인할 수 있다.

2.2.1 진공챔버

자체개발한 미소 추력측정장치를 장착하기 위해서는 800 mm × 550 mm의 지지대가 들어갈 수 있어야 한다. 그렇기 때문에 챔버의 크기는 직경 1200 mm, 길이 2200 mm로 선정하였다. Figure 1은 챔버 도면이며, Fig. 2는 추력측정장

치를 장착한 챔버의 3D 형상이다.

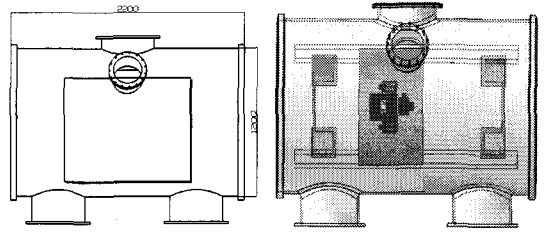


Fig. 1 Vacuum Chamber Drawing

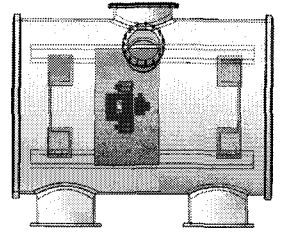


Fig. 2 Vacuum Chamber 3D Drawing

2.2.2 저진공 펌프 성능 예측

저진공 펌프를 선정하기 위해서는 먼저 저진공 배기시간을 기준으로 대략적인 펌프의 사양을 결정하여야 한다. Eq. 1은 배기속도에 관한 수식이다.

$$S_n = 2.3 \left(\frac{V}{t} \right) \log \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \quad (1)$$

V : 용기부피 (l)

t : 배기시간 (min)

P_1 : 대기압 (760 Torr)

P_2 : 도달압력 (10^{-2} Torr)

Equation 1에 배기시간 20 min을 대입하면 배기속도 $S_n = 1090$ liter/min으로, 선정될 저진공 펌프는 1×10^{-2} torr에서 최소한 1090 liter/min의 배기속도를 갖춰야 한다. Rotary pump(E2M275)의 경우 10^{-2} torr에서 1415 liter/min의 배기속도를 가진다. 진공펌프를 결정했다면 각 구간별 배기시간을 구해야 한다. Rotary pump(E2M275)의 배기곡선 그래프는 다음과 같다.

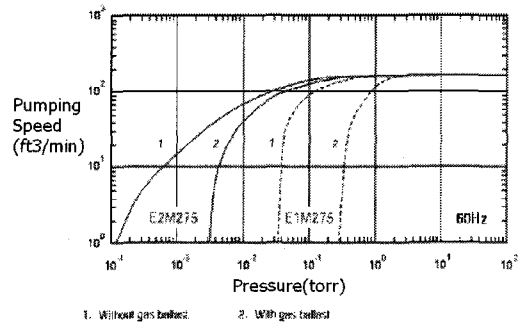


Fig. 3 E2M275 Pumping Speed Graph

Figure 3에서 K값과 구간별 평균 배기속도를 알 수 있다.

Table 1. K and Pumping Speed

진공 범위(torr)	Sn(liter/min)	K
760 ~ 1	5097	1.1
1 ~ 0.1	4672	1.5
0.1 ~ 0.01	2831	4.0

Equation 2는 배기시간에 관한 수식이다.

$$t = 2.303K \left(\frac{V}{S} \right) \log \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \quad (2)$$

Table 1의 값을 Eq. 2에 대입하여 계산을 수행하면 Table 2와 같은 결과를 얻을 수 있다.

Table 2. Pumping Down Time

t1(min)	2.8
t2(min)	1.4
t3(min)	6.3
total t(min)	10.5

펌프의 유효배기속도를 알기 위해서는 챔버와 저진공 펌프를 연결하는 파이프까지 고려하여 Conductance(전도도)를 알아야 한다. Eq. 3은 저진공(760 torr ~ 10⁻² torr)에서의 Conductance에 관한 수식이고, Eq. 4는 유효배기속도에 관한 수식이다.

$$C_{air} = 182 \frac{D^4}{L} \bar{P} \quad (l/sec) \quad (3)$$

D : 파이프 직경 (cm)

L : 파이프 길이 (cm)

$\bar{P} = \frac{P_1 + P_2}{2}$: 평균압력

Table 3. Pipe's Diameter and Length

직경(cm)	길이(cm)
5.5	121

파이프라인은 플랜지와 게이트밸브를 포함해 일체형으로 보고 계산하였다.

$$S_p = \frac{CS_n}{(C + S_n)} \quad (4)$$

Sn : 펌프의 배기속도

C : 파이프의 conductance

Sp : 유효배기속도

파이프의 conductance $C_{air} = 523029.4$ liter/sec, 유효배기속도 $S_p = 1414.9$ liter/min으로 1×10⁻² torr에서 Rotary pump(E2M275)를 이용하여 저진공 배기에 걸리는 시간 $t = 15.4$ min으로 초기에 가정한 20 min보다 시간이 단축된다는 것을 알 수 있다

2.2.3 고진공 펌프 성능 예측

시스템에서 요구하는 최종 진공도 $P = 10^{-5}$ torr로 10⁻³ torr에 도달하면 챔버 내부에서는 outgassing이 발생하기 시작한다. 챔버의 재질은 Sus로 1시간후 outgassing rate = 2×10⁻⁷ torr liter/sec cm², 방출유량 $Q = 1.8 \times 10^{-2}$ torr liter/sec이다. 1시간동안 최종진공도에 도달하기 위해서는 유효배기속도 $S_n = 1817.3$ liter/sec가 되어야 한다. 선정된 고진공펌프는 오일확산펌프(DP-22)로 Fig. 4와 Table 4는 펌프의 외관과 성능을 나타낸 것이다.

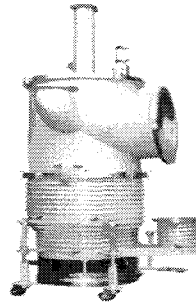


Fig. 4 DP-22

Table 4. DP-22 Spec

Model	DP-22
배기속도(L/sec)	12000
도달압력(torr)	10 ⁻⁷
임계배압(torr)	0.3
흡입구(inch)	22
배기구(inch)	6
소요전력(kW)	6(8)
펌프오일(l)	5
냉각수량(L/min)	12
시동시간(min)	35

Diffusion pump의 유효배기속도를 알기 위해서는 분자류에서의 conductance를 알아야 한다. Eq. 5는 분자류에서의 conductance에 관한 수식이다.

$$C = \frac{12.1D^3}{L + 1.33D} \quad (5)$$

Diffusion pump의 flange가 6 inch, $S_n =$

12000 liter/sec, 파이프 길이가 200 cm로 conductance $C = 224.0$ liter/sec, 유효 배기속도 $S_p = 219.9$ liter/sec이다. 즉 Diffusion pump 한 대당 10^5 torr에 도달하기 위해 요구되는 시간은 $1 \text{ hr} \times (1817.3/219.9) = 8.3 \text{ hr}$ 이다. 사용할 Diffusion pump가 두 대이므로 배기시간 $t = 4.1 \text{ hr}$ 이 된다.

23 메인 챔버의 진공도 실험

모든 설비가 조립되면 가장 먼저 로타리 진공 펌프를 사용하여 일정수준까지 진공도를 확보하게 되고, 이후 오일확산펌프를 작동시켜 고진공 영역으로 올라가게 된다. Table 5는 로타리 펌프를 작동하여 얻은 진공도 실험결과이다.

Table 5. Experimental Result

경과시간(min)	진공도 (torr)
0	760
5	1.1
10	6.4×10^{-2}
15	3.4×10^{-2}
20	2.7×10^{-2}
25	2.4×10^{-2}
35	2.2×10^{-2}
70	1.9×10^{-2}

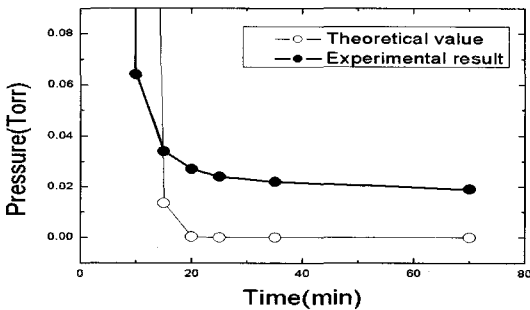


Fig. 6 Theoretical Value and Experimental Result

Figure 5는 이론값[3]과 실험결과를 비교한 것이며, 이론값에서 도달압력인 1×10^2 torr까지 배기속도는 약 15분 정도 걸리는 것을 알 수 있다. 실제 진공설비의 실험결과는 작업 압력까지 도달하지 못하였으며, 2×10^2 torr까지의 배기속도는 약 35분 걸리는 것을 알 수 있어 이론값과 비교하면 실제 진공설비의 배기속도가 2배 이상 걸리는 것을 알 수 있었다. 이론값은 진공펌프의 최적화로 계산된 것으로 진공용기의 오염도와

표면적도 최적값으로 계산되어 배기속도가 실제와 다른 것을 알 수 있다[2]. 또한 조립과정에서의 오류와 접촉부위에서의 리크, 챔버 내 오염도 등을 고려하지 않았기에 배기속도는 더욱 차이가 발생할 것으로 예상된다.

3. 결 론

실제 인공위성에 적용이 가능한 마이크로 추력기 개발을 위해 고진공 설비를 구축하였다. 충남대학교의 진공설비는 진공 챔버(vacuum chamber), 디퓨저 펌프(diffusion pump) X 2, 로타리 펌프(rotary pump), 에어컴프레서(air compressor)로 구성되어 있다. 진공 설비의 최대 진공도는 10^5 torr 로 100 ~ 120 km의 고도를 모사할 수 있다. 실제 운용을 하기 앞서 저진공펌프와 고진공펌프의 성능을 예측하였으며 실제 로타리 펌프를 작동시켜 진공도를 실험하였다. 실험결과 원하는 진공도에 도달하지 못하고 배기속도도 많은 차이가 발행하였는데 그에 대한 원인은 (1) 조립과정에서 발행되었을 챔버 플랜지 연결부위와 볼트 체결부위 오류, (2) 용접부위, 캐스킷과 오링 접촉부위에서의 리크, (3) 용기 내 오염도로 분석된다. 이에 각 원인별 점검 및 수리과정을 거쳐 저진공 상태를 확보한 후 고진공 펌프를 작동시켜 진공도 실험을 수행할 계획이다.

후 기

이 논문은 2006년 정부재원 (교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원 (과제번호: KRF-2006-311-D00043)으로 연구되었음.

참 고 문 헌

1. 정성철, 신강창, 이민재, 김혜환, 허환일, "우주환경모사 진공실험 시설에서의 미소추력 측정방법", 한국추진공학회 추계학술대회 논문집, 2004, pp. 67-70
2. 유성만, "접속이온빔 장치의 고진공 설계에 관한 연구", 2006, pp. 47-64
3. 주장현, "진공챔버에 대한 펌프 용량과 배기기간의 계산", 제 1회 진공실무수련회, 2003, pp. 2-9