

論文

마이크로 노즐 성능평가

문성환*, 오화영*, 허환일**

Performance test of micronozzle

Seonghwan Moon*, Hwayoung Oh* and Hwanil Huh**

ABSTRACT

We conducted the performance test of micronozzle having nozzle throat diameter of 1.0, 0.5, 0.25 mm in an ambient pressure. We used N₂ gas as a cold gas propellant. We varied chamber pressure from 2 to 20 bar and measured the thrust and mass flow rate. Through the test, we concluded that viscous losses were increased with decreasing chamber pressure. We found that micronozzle performance was higher than orifice performance through thrust comparison.

초 록

대기압 하에서 노즐목 직경이 1.0, 0.5, 0.25 mm인 마이크로노즐을 이용하여 성능시험을 하였다. 냉가스 추진제로는 질소를 사용하였다. 성능평가를 위하여 챔버내 전압력을 2~20 bar까지 변화시키면서 추력과 질유량을 측정하였다. 실험결과 압력이 낮아질수록 점성에 의한 손실이 크다는 것을 비추력을 비교해 봄으로써 알 수 있었다. 그리고 오리피스와 노즐의 추력 비교를 통해 노즐의 효율이 더 좋다는 것을 확인할 수 있었다.

Key Words : Micronozzle(마이크로노즐), Cold gas thruster(냉기체 추진기), Thrust measurement(추력측정), Viscous loss(점성 손실)

1. 서 론

최근의 마이크로 가공기술의 발달은 여러 산업분야에 걸쳐 많은 영향을 끼치고 있다. 우주 산업 분야도 예외는 아니다. 세계적으로 발사 비용과 임무 위험도를 줄이기 위해 인공위성의 소형화에 많은 관심을 가지고 있다. 이러한 소형 인공위성의 자세제어, 궤도유지 등을 위해서는 통상적인 추진시스템의 사용이 불가하다. 이는 통상적 추진시스템의 갖는 추력수준, 무게, 부피 등이 소형 즉 마이크로 위성이 필요로 하는 조건을 만족시키지 못하기 때문이다. 이에 마이크로

추진 장치에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만 국내에서는 아직까지 마이크로 추진 장치에 관한 연구가 활발히 진행되고 있지 않다.

전형적으로 마이크로 추진기는 밀리 뉴턴급의 추력을 발생하며 100 kg까지의 위성의 정밀 궤도 수정 추진 장치로, 그 이하의 위성에서는 주 추진 장치로 사용된다. Table 1에 마이크로 위성을 분류해 놓았다[1].

대부분의 마이크로 추진 장치는 마이크로 노즐을 통한 추진제 가스의 팽창을 필요로 한다. 그런데 노즐이 마이크로 단위로 작아짐에 따라 대형 로켓의 노즐에서는 큰 영향을 미치지 않았던 점성에 의한 손실이 매우 중요하게 된다. 실제로 대형 로켓에서는 노즐의 유동을 비점성 유동이라 가정하고 설계하여도 점성에 의한 손실은 1% 미만으로 거의 영향이 없다. 점성에 의한 손실을 알아보기 위해 Rothe는 일렉트론 빔을 사용하여 다음과 같은 사실을 알아냈다. 이때 사용된 노즐

† 2004년 12월 24일 접수 ~ 2005년 3월 11일 심사완료

* 정희원, 충남대학교 항공우주공학과 대학원

** 정희원, 충남대학교 항공우주공학과
연락처, E-mail : hwanil@cnu.ac.kr
대전광역시 유성구 궁동 220번지

Table 1. Classification of Microspacecraft

Designation	Spacecraft mass [kg]	Spacecraft power [W]	Spacecraft dimension [m]
Microspacecraft (Air Force/European definition)	10 - 100	10 - 100	0.3 - 1
Class I microspacecraft (≤10kg, nanosat)	5 - 20	5 - 20	0.2 - 0.4
Class II microspacecraft	1 - 5	1 - 5	0.1 - 0.2
Class III microspacecraft	< 1	< 1	< 0.1

은 그라파이트를 사용하여 노즐목 지름이 2.5 와 5.1 mm인 노즐을 사용하였다. 추진제는 질소가스를 사용하였고, 전온도는 300 K, 챔버압은 88~200 Pa의 조건에서 실험을 수행하였다. 실험결과 노즐목에서의 레이놀즈 수가 500이면 비점성 영역이 매우작고, 300에 가까워지면 거의 점성 유동이 된다[2]. Grisnik은 노즐목 직경이 654~711 μm인 네 개의 노즐을 이용하여 실험을 수행하였다. 실험에서 레이놀즈수가 1000~9000 사이에서 4.59~45 mN의 추력을 보였다. 이 노즐들은 레이놀즈수가 3000 이상에서 비추력이 85%의 효율을 보였으나 레이놀즈수가 500으로 감소함에 따라 비추력이 70%까지 감소하였는데 이는 레이놀즈수가 감소함에 따라 노즐의 유효면적비가 감소하기 때문이다[3]. 이 밖에도 마이크로 유동의 특성을 알아보기 위한 많은 수치해석과 실험이 행해졌고, 현재 국내에서도 서울대학교 등에서 마이크로 노즐 가공관련의 많은 연구가 수행되고 있다[4]. 이에 본 논문에서는 마이크로 노즐 유동에 관한 기초 실험으로 노즐목 지름이 1.0, 0.5, 0.25 mm인 노즐을 이용하여 마이크로 노즐의 특성을 살펴보도록 하겠다.

II. 마이크로 노즐

2.1 마이크로 노즐의 유동 특성

마이크로 추력기에서 낮은 추력을 발생시키기 위해서 밀리미터 이하의 노즐목을 갖는 노즐을 사용한다. 하지만 노즐목이 작아질수록 레이놀즈 수가 작아지게 되고 이로 인해 점성에 의한 손실은 점점 커지게 된다. 노즐목에서의 레이놀즈 수는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$R_e = \frac{\rho u d_t}{\mu_t} \propto \frac{P_o d_t}{T_o^x} \tag{1}$$

ρ_t 는 밀도, u_t 는 속도, d_t 는 노즐직경, μ_t 는 점성 계수이다. P_o 와 T_o 는 각각 챔버의 전압력과 전 온도이다. 지수 x는 추진제에 따라 1.2 ~ 1.5사이의 값을 갖는다[5]. 마이크로 노즐에서 레이놀즈 수가 낮아지는 이유는 식 (1)에서 나타나 있는 바와 같이 낮은 작동압력, 작은 노즐목과 연소나 히터에 의한 추진제 온도 상승에 기인한다.

추력은 원뿔형 축대칭 노즐인 경우 레이놀즈수를 이용하여 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$F \propto \mu_e = \frac{1}{4} R_e \mu_t d_t \pi u_e \propto P_o d_t^2 \tag{2}$$

챔버 압력과 온도가 일정할 때, 노즐목 직경을 1/10로 감소시키면 추력은 1/100로 감소시킬 수 있다. 이때 레이놀즈수는 1/10로 감소된다. 노즐 크기를 감소시키지 않고 챔버 압력의 감소만으로 추력을 1/100로 감소시키려면 압력 역시 1/100로 감소하게 되고 레이놀즈수를 1/100로 감소시키게 되고 이는 높은 점성 손실을 일으키게 된다. 즉 낮은 추력 수준을 얻기 위해서는 챔버 압력을 낮추는 것보다 노즐 크기를 줄이는 것이 마이크로 추력기의 효율을 높이는 방법이다.

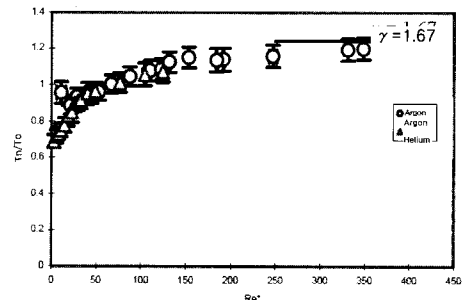


Fig. 1. Thrust ratio for argon and helium propellant [6]

레이놀즈수가 충분히 낮아지게 되면 마이크로 노즐 안은 점성손실이 상당히 커지게 되고, 노즐의 중심을 따라 노즐목에서 출구까지 비추력이 감소하게 된다. 이는 노즐 확산부가 쓸모없게 됨을 나타낸다. 레이놀즈수가 어느 수준까지 떨어지면 오리피스가 더 나은 성능을 보인다. Fig. 1은 오리피스의 추력에 대한 노즐의 추력비를 나타낸다[6]. 레이놀즈수가 약 70 이하에서는 노즐과 오리피스의 추력비 T_n/T_o 가 1보다 작다. 실험에 사용된 노즐목과 오리피스의 크기는 1.0 mm이다.

2.2 마이크로 노즐 제작

밀리 뉴턴(mN) 수준의 추력을 얻기 위한 노즐을 제작하는 것은 기술적으로 쉽지 않은 일이다. 또한 마이크로노즐의 표면을 매끄럽게 만드는 것은 마이크로노즐 제작의 또 다른 기술적 도전이다. 마이크로노즐의 성능은 유동의 저항을 증가시키는 미소 굽힘이나 손상에 매우 민감하다. 확산부 표면이 거칠게 되면 충격파가 생기게 되고 이는 마이크로 노즐의 성능 저하를 가져오게 된다. 현재 원뿔형 원형 단면 노즐(3D) 가공 기술로는 마이크로밀링, 레이저 가공과 방전 가공 등이 사용된다. 원뿔형 또는 벨형 사각 단면 노즐(2D) 생산 기술로는 에칭기술이 주로 사용된다.

본 논문에서는 마이크로노즐을 제작하기 위하여 방전 가공을 사용하였다. 방전 가공이란 스파크 방전으로 인한 금속의 침식을 이용해서 가공하는 방법이다. 방전가공은 가공 시 기계적 힘을 가하지 않기 때문에 기계적 응력에 의한 잔류 응력이 없다. Fig. 2는 디자인한 노즐의 2D 개략도이고, Fig. 3은 가공된 원뿔형 노즐 형상이다. 노즐의 수축각은 30°, 확산각은 15°로 설계하였다. 마이크로 노즐의 성능평가에 대한 기초 실험으로

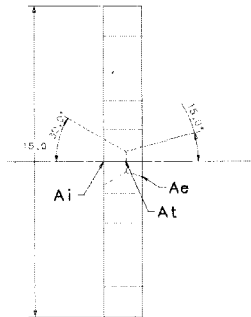
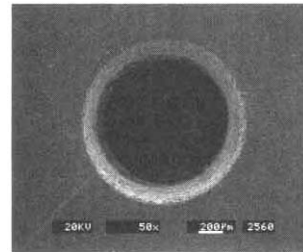


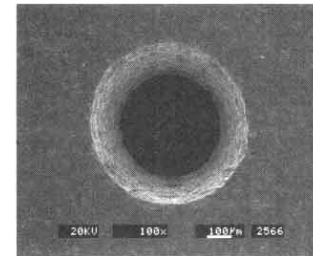
Fig. 2. Schematic of 2D micro nozzle design



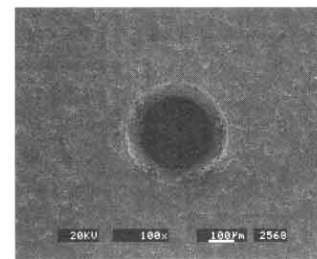
a) Micro nozzle and chamber



b) Nozzle throat 1mm



c) Nozzle throat 0.5mm



d) Nozzle throat 0.25mm

Fig. 3. Diverging part of micro nozzle

저압부분에서의 마이크로 노즐의 특성을 살펴보기 위해 노즐의 팽창비를 2로 설계하였다. 노즐목 직경은 각각 1.0, 0.5, 0.25 mm로 설계하였으나 실제 제작된 노즐은 측정 결과 설계치와 차이를 확인할 수 있었다. 챔버의 직경은 5 mm이며 제작된 노즐의 측정 결과를 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Difference of dimensions between designed and manufactured micronozzle

노즐목 직경(d) [mm]		노즐출구 직경(de) [mm]		노즐 팽창비 (제작)
설계	제작	설계	제작	
1.0	1.07	1.414	1.376	1.654
0.5	0.414	0.707	0.664	2.572
0.25	0.298	0.354	0.416	1.949

그리고 제작된 노즐을 살펴보면 노즐 내부가 매끄럽지 않음을 볼 수 있다. 이는 유동의 저항을 증가시키게 되고 결국 마이크로 노즐 성능의 저하를 가져오게 된다.

III. 실험

3.1 실험 장비

본 실험은 대기압 하에서 진행 되었다. 실험 개략도가 Fig. 4에 있다. 챔버의 압력을 2~20 bar까지 조절하기 위하여 압력조절기(Pressure Regulator TESCO, 44-2200 Series)를 사용 하였다. 이물질 유입을 방지하기 위해 10 μ m 필터를 사용하였다. 추진제를 제어하기 위하여 솔레노이드 밸브 (Parker, Skinner valve)를 장착하였다. 노즐을 통한 추진제의 질유량을 측정하기 위하여 열식 전자 유량계 (노즐목이 1.0, 0.5 mm인 경우: AALBORG, GFM 57, 0.25 mm인 경우: SIERRA, Smart-Track series 100)를 사용하였다. 챔버 압력 (SENSYS, PMHC0020BAAA)과 온도(Thermocouple, K

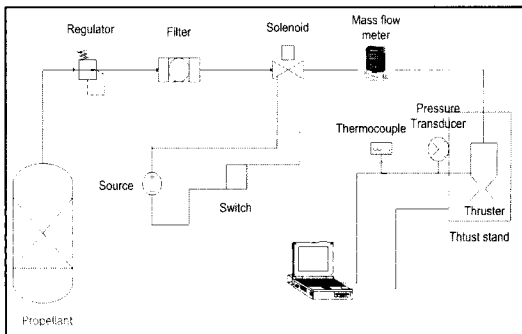


Fig. 4. Schematic of experimental set-up

type)는 노즐목 상부 7 mm 지점에서 측정하였다. 추진제로는 질소 가스를 사용하였다.

3.2 추력 측정 장치

마이크로 노즐의 성능을 파악함에 있어 추력의 측정은 상당히 중요하다. 미소 추력의 측정에 통상적인 추력 측정 방법은 적합하지 않다. 현재 미소 추력을 측정하기 위한 많은 추력 측정 장치가 개발되었다. 대표적으로 고체 추진제 마이크로 추진기의 추력을 측정하기 위하여 토션 발란스 (torsion balance)를 이용한 추력 측정기[6]와 단진자(pendulum)를 이용한 추력 측정기[7] 등이 있다.

본 논문에서는 미소 추력을 측정하기 위하여 스트레인게이지를 이용한 추력 측정기(Fig. 5)를 제작하였다[8]. 스트레인게이지를 이용한 추력 측정기는 다른 추력 측정기에 비하여 다음과 같은 특징을 지닌다.

- ① 구조적 단순함
- ② 제작비용의 저렴성
- ③ 신호의 선형성, 반복성과 안정성
- ④ 빠른 응답성

본 추력 측정기의 추력 측정원리는 아주 간단하다. 4개의 기둥(column)에 하중(P)을 가하고 횡 방향으로 추력을 가하면 기둥은 변위가 발생하고 이는 스트레인게이지의 저항을 변화시켜 전압차가 발생하게 된다. 기둥에 가하는 하중이 증가할수록 추력 측정기는 더 미소한 추력을 측정할 수 있다. 하지만 그 하중은 임계 하중 이상일 수는 없다. 임계하중은 다음과 같이 표현된다.

$$P = 4\pi^2 EI/L^2 \quad (3)$$

E는 탄성계수(Young's modulus)이고, I는 2차 관성모멘트(moment of inertia)이며 L은 기둥의

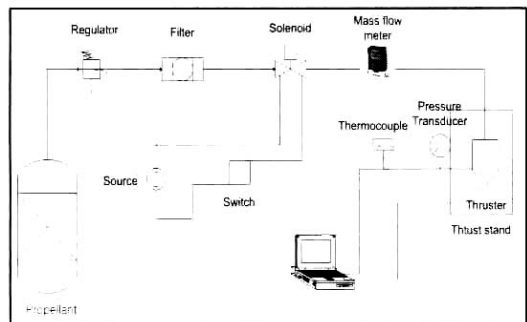


Fig. 5. Schematic of thrust stand [8]

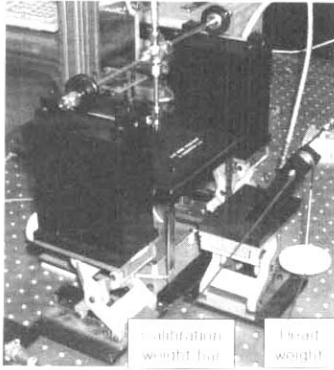


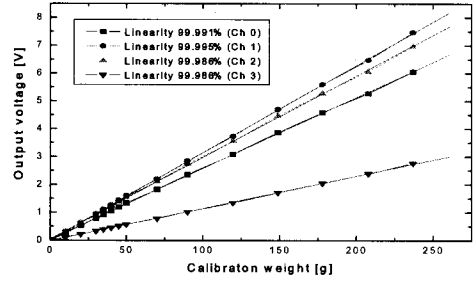
Fig. 6. Thrust measurement stand

길이이다. 즉, 기둥의 강성이 작거나 두께가 얇거나 길이가 길어지면 더 작은 하중으로도 미소 추력을 측정할 수 있다. 스트레인게이지는 게이지 팩터가 2.085이고 저항이 350 Ω이며, 기둥의 밑부분으로부터 25 % 지점에 부착하였다.

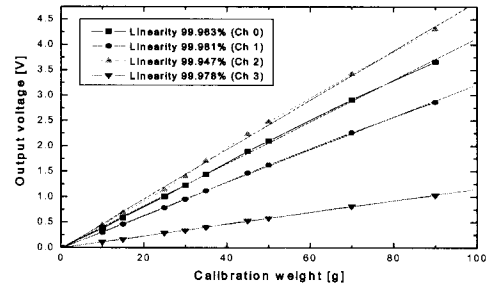
추력 측정기에 하중을 가하기 위하여 알루미늄과 스테인리스스틸 판(180×230 mm)을 사용하였고 4개의 기둥은 스테인리스 스틸(길이:150 mm, 폭:15 mm, 두께:0.5 mm)을 사용하였다. 4개의 기둥을 고정시키기 위하여 8개의 알루미늄 바(10×10×180 mm)를 이용하였다. 제작된 형상이 Fig. 6에 있다.

3.2 실험 결과

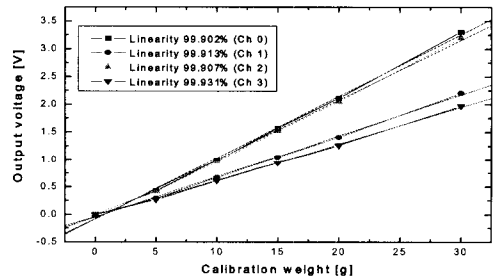
추력을 측정하기 위하여 노즐목 직경이 1.0, 0.5 mm인 경우 3903 g의 하중을 가하였고, 0.25 mm인 노즐은 4850 g의 하중을 가하여 F₂급 분동을 사용하여 추력 측정 장치에 대한 보정 실험을 수행한 결과 Fig. 7과 같이 매우 높은 선형성을 가지고 있음을 확인할 수 있었다. 마이크로노즐의 크기에 따른 성능을 파악하기 위하여 실험 장비를 Fig. 8와 같이 구성하였다. 추력 측정을 하기 전 추력이 mN이하로 낮아짐에 따라 추력 측정 장치는 외부의 진동효과 뿐만 아니라 측정 장치의 고유진동수(eigen frequency)와 같은 고유한 특성에 매우 민감하다. 따라서 추력 측정 장치의 고유 진동수를 측정하기 위해 기둥에 가속도계를 부착하여 특성 시험을 수행하였으며 이를 통해 추후 성능 시험 시 이 주파수 대역을 저역필터를 사용하여 필터링 하였다. 실험 결과 Fig. 9에서 볼 수 있듯이 고유 주파수가 115 Hz가 됨을 알 수 있었다. 또한 하중을 증가시키면서 측정한 결과 하중에 관계없이 고유 주파수는 일정하다는 것을 알 수 있었다. 4개의 기둥에서



a) Calibration data of 1 mm nozzle



b) Calibration data of 0.5 mm nozzle



c) Calibration data of 0.25 mm nozzle

Fig. 7. Calibration data of the TMS

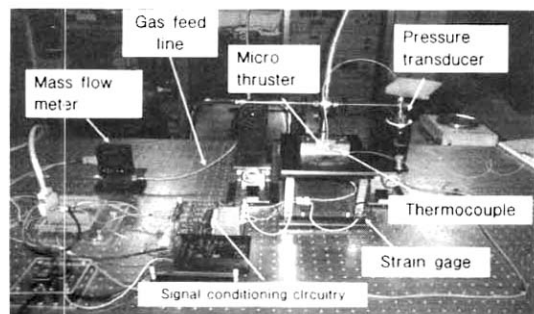
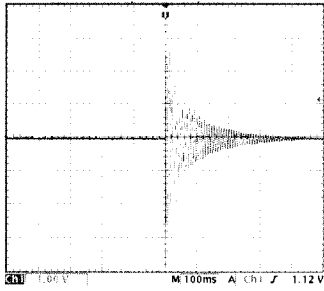
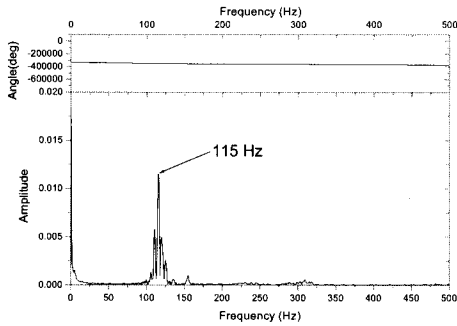


Fig. 8. Experimental setup of micronozzle



a) Oscilloscope graph



b) FFT graph

Fig. 9. Eigen frequency of TMS

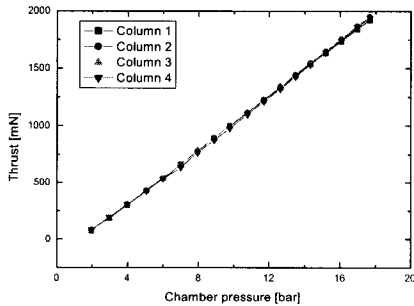


Fig. 10. Measured thrust of each column

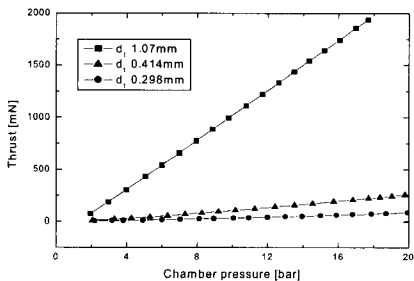


Fig. 11. Measured thrust of each micronozzle

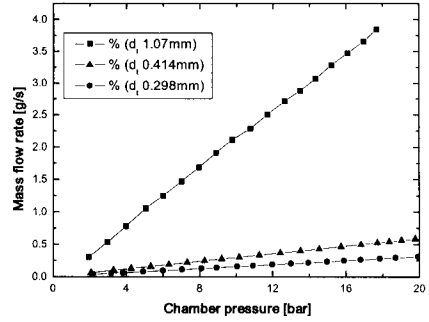


Fig. 12. Variation of mass flow rate

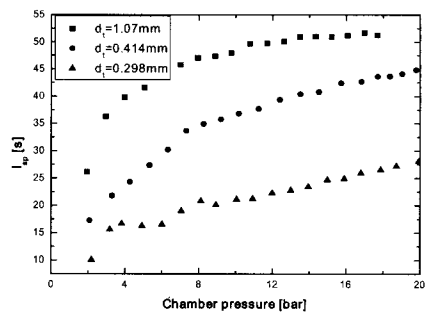


Fig. 13. Variation of specific impulse

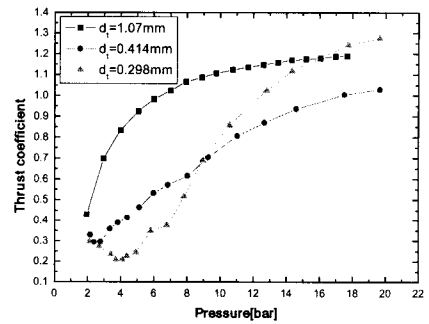


Fig. 14. Variation of thrust coefficient

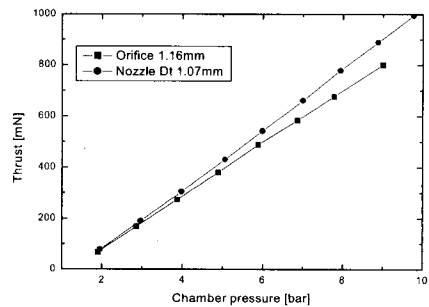


Fig. 15. Thrust of nozzle compared to orifice

의 추력 측정 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 그래프에서 볼 수 있는 바와 같이 각각의 기둥에서의 추력 측정 결과가 일치하는 것을 볼 수 있다. 각각의 마이크로 노즐에 대한 추력 곡선은 Fig. 11에 나타내었다. 챔버 압력이 17.7 bar인 경우 노즐목이 1.0 mm인 경우 약 1936 mN, 0.5 mm인 경우 224 mN, 0.25 mm인 경우 72 mN의 추력이 발생하였다. 각 노즐에서의 질유량은 Fig. 12와 같다. 그래프를 살펴보면 압력이 증가함에 따라 곡선의 형태가 선형적으로 증가하므로 추력곡선과 거의 일치하는 경향을 볼 수 있다.

각 노즐의 성능을 비교해보기 위하여 챔버압에 따른 비추력과 추력계수를 구해 보았다(Fig. 13-14). 비추력의 변화를 보면 노즐목 직경이 1.07 mm인 경우 26~51 s, 0.414 mm인 경우 17~44 s, 0.298 mm인 경우 10~28 s이다. 노즐목 직경이 1.07 mm인 경우 챔버압이 14 bar 이상이 되면 비추력이 51 s에서 더 이상 증가하지 않음을 볼 수 있다. 하지만 다른 노즐에서는 압력이 증가할수록 계속적으로 비추력이 증가하는 것을 볼 수 있다. 그리고 압력이 8 bar 이하에서는 노즐목 직경이 1.07 mm인 노즐과 다른 노즐의 비추력 차가 큰 것을 볼 수 있다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 압력이 낮아지면 점성에 의한 손실이 크기 때문이다. 다시 말하면 압력이 높아질수록 점성에 의한 손실은 감소하게 되고, 이에 따라 추력계수의 값은 노즐목 직경에 관계없이 비슷한 값으로 수렴하는 경향을 보임을 확인할 수 있었다.

마이크로노즐의 확산부가 유용한지를 알아보기 위하여 노즐목이 각각 1.0 mm인 노즐과 오리피스를 제작하였다. 노즐과 오리피스의 추력 곡선을 Fig. 15에 나타내었다. 하지만 제작된 오리피스의 실제 노즐목 직경은 1.16 mm 이었다. 이는 노즐의 1.07 mm보다 0.09 mm 크다. Fig. 15에서 보면 압력이 높아질수록 오리피스의 추력보다 노즐의 추력이 크고 그 차이 또한 커진다는 것을 알 수 있다. 단순 추력 측정을 통해 동일한 노즐목 일 경우 압력이 같으면 추력이 같아야 하는데 노즐의 직경이 오리피스의 직경보다 작음에도 더 큰 추력을 발생하는 것을 통해 노즐의 확산부가 유용함을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 대기압 하에서 마이크로노즐의 성능을 평가하기 위해 챔버 압력을 2~20 bar까지 변화시켜가면서 추력, 질유량을 측정하였다. 그 결과 낮은 압력에서는 점성에 의한 손실이 많음을 확인할 수 있었다. 또한 압력이 높아질수록

오리피스보다 노즐의 효율이 더 좋아진다는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 목적기초 연구지원(과제번호 : KOSEF R01-2003-000-11735-0(2004))으로 수행된 연구 결과의 일부이며 연구비를 지원해 주신 한국과학재단에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Jeffrey Robert Hammel, "Development of Unstructured 3-D Direct Simulation Monte Carlo/Particle-in-Cell Code and the Simulation of Microthruster Flows", March 2002, pp. 1~10.
- 2) Robert L. Bayt, "Analysis, Fabrication and Testing of a MEMS-based Micropropulsion System", Ph. D. thesis, MIT, 1999.
- 3) Grisnik, S.P., Smith, T.A., Salz, L.E., "Experimental Study of Low Reynolds Number Nozzles", AIAA Paper 87-0092, May 1987.
- 4) 백창일, 추원식, 안성훈, "기계식 마이크로 가공을 이용한 마이크로 로켓의 개발", 한국항공우주학회지, 제31권, 제9호, 2003, pp. 32~37.
- 5) Andrew D. Ketsdever, "Microfluidics Research in MEMS Propulsion System", AIAA Paper. 2003-783, January 2003.
- 6) A. Jamison and Am Ketsdever, "Low Reynolds Number Performance Comparison of an Underexpanded Orifice and a DeLaval Nozzle", Proceeding of the 23rd International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, July 2002.
- 7) S. Orioux, C. Rossi and D. Esteve, "Thrust stand for ground tests of solid propellant microthruster", REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS, Vol. 73, No. 7, JULY 2002, pp. 2694-2698.
- 8) R John Stephen, K Rajanna, Vivek Dhar, K G Kalyan Kumer and S Nafabushanam, "Strain gauge based thrust measurement system for a stationary plasma thruster", MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY, 12, 2001, pp. 1568-1575.
- 9) 문성환, 오화영, 허환일, "마이크로 콜드 가스 추력기의 선행 연구", 한국추진공학회지, 제 8 권 2호, 2004, pp. 54-61.