

技術論文

300 W급 홀 추력기를 위한 제논연료공급장치 개발

김연호*, 선종호*, 강성민*, 위정현**, 윤호성**, 최원호***, 이종섭***, 서미희***

Development of Xenon feed system for a 300 W
Hall-effect ThrusterYounho Kim*, Jongho Seon*, Seongmin Kang*, Junghyun Wee**, Hosung Yoon**,
Wonho Choe***, Jongsub Lee*** and Mihui Seo***

ABSTRACT

A Xenon feed system has been developed for a 300 W Hall-effect thruster intended for orbit maintenance of small satellite. The system can store about 2 kg of xenon gas at 150 bar and is capable of controlling the mass flow rate of the gas at 0.5 SCCM resolution. The performance of the system is verified with a laboratory experiment. It is confirmed that the operation of the feed system is successful at a pressure level of 1.0×10^{-6} torr in the vacuum chamber.

초 록

소형 인공위성의 궤도 보정을 위한 300 W급 홀 추력기의 제논연료공급장치를 개발하였다. 가스 상태의 제논 연료를 150 bar에서 2 kg을 저장할 수 있으며, 0.5 SCCM의 미세 유량을 제어할 수 있다. 미세 유량을 제어할 수 있는 유량 제어밸브의 구동을 위해 시스템을 구성하고, 시험을 통해 성능검증을 수행하였다. 이를 통해 1.0×10^{-6} torr압력의 진공에서 연료공급장치가 성공적으로 동작함을 확인하였다.

Key Words : 소형위성(Small Satellite), 홀 추력기(Hall-Effect Thruster), 제논연료공급장치(Xenon Feed System), 미세유량제어(Micro Flow Control)

1. 서 론

소형 위성의 임무 다양화에 따른 추진시스템의 필요성이 증대되고 있으며, 소형화된 전기추진 시스템이 높은 연료 효율과 시스템 무게 및 부피 절감 등의 장점으로 적합성이 대두되고 있다. 특히 홀(Hall) 방식의 전기추력기는 소형화가 용이하고, 비교적 간단한 장점이 있어 활용도가

높아지고 있다[1]. 이러한 홀 추력기(Hall thruster)는 극히 적은양의 연료를 사용하기 때문에 미세하게 연료를 공급해 주는 연료공급시스템이 필요하다. 이에 필요한 연료공급시스템은 고압의 연료를 저장하고 필요시에 정확한 양을 공급해 주는 역할을 우주공간에서 수행하여야 하므로 정밀하고 완벽한 제어기술이 필요하다. 이러한 연료공급시스템은 국외에서 활발히 개발되어 활용되고 있으며, 대표적으로는 유럽 ESA의 20 mN급 Ion thruster를 위한 Xenon feed assembly가 있다[2,3]. 영국의 SSTL에서는 10-50 mN급 전기추력기에 적용할 수 있는 Xenon propulsion system을 개발하였다[4]. 특히 미국의 MOOG사에서는 200 W급 홀 추력기용 Xenon feed system 및 우주용 부품을 직접 개발하여 임무수행을

† 2009년 1월 5일 접수 ~ 2009년 2월 11일 심사완료

* 정희원, (주)세트렉아이 우주기술연구소

교신저자, E-mail : yhk@satreci.com

대전시 유성구 전민동 461-26

** 정희원, (주)스페이스솔루션스 기술연구소

*** 정희원, 한국과학기술원 물리학과

통해 검증을 하고 있다[5].

이에 반해 국내에서의 전기추력기 개발경험은 상대적으로 빈약하여 관련 기술의 축적이 충분치 이루어지지 않고 있는 실정이다.

본 논문은 전기추력기 개발을 위한 핵심기술의 확보 방안으로 국내 기술로 전기추력기용 연료공급 장치의 시스템 통합조립을 수행하고, 성능검증을 통해 우주공간에서 안정적으로 작동할 수 있는 연료공급 장치를 개발하는 것을 목표로 한다.

II. 본 론

2.1 300 W급 hall thruster

소형 인공위성의 궤도수정임무에 적합한 전기 추진 방식인 홀 추력기(Hall-effect thruster)의 개발이 국내에서도 활발히 진행되고 있다. (주)썬트렉아이와 KAIST의 연구로 진행되고 있는 홀 추력기는 추력과 크기, 무게 면에서 소형으로 분류할 수 있다. 추력기는 원통형(cylindrical) 형태이며 여러 연구 과정을 거쳐 비교적 효율이 좋은 장점을 확인하였으며, 지속적인 연구개발을 통해 성능향상을 목표로 하고 있다. 현재 연구중인 추력기의 주요 성능목표를 Table 1에 요약 하였다.

Fig. 1의 (a)는 개발중인 홀 추력기의 제작된 모습이며, (b)는 진공환경 내에서 방전에 의해 발생하는 플라즈마의 화염을 보여주고 있다. 양극 효율(Anode efficiency)을 높이기 위해 낮은 소모 전력으로 높은 추력을 발생시킬 수 있는 방안에 대한 연구가 이루어지고 있는 상황이다. 추력기 시스템의

Table 1. 10 mN급 Hall thruster performance target

Power	Thrust	Specific Impulse	Anode Efficiency	Propellant
~ 300 [W]	~ 10 [mN]	> 1500 [S]	~ 30 [%]	Xenon Gas

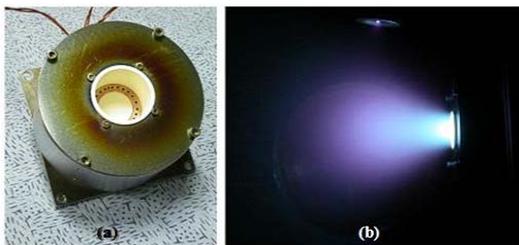


Fig. 1. Satreci/KAIST Hall thruster

설계와 추력기의 설계에 관해서는 본 논문과 같이 제출된 다른 논문들에 자세히 기술되어 있다[6,7].

2.2 Xenon feed system의 요구도

제논연료공급장치(Xenon feed system)는 추력기의 작동 시간 동안 양극(Anode)과 음극(Cathode)에 연료를 지속적으로 공급해 주어야 한다. 추력기가 요구하는 연료의 공급양이 매우 적으므로 미세한 유량 제어가 필요하며, 가능한 많은 양의 연료를 저장할 수 있어야 한다. 연료의 저장 압력이 < 150 bar이며, 유량제어 밸브 전단 압력을 1.7 bar로 안정적으로 공급하기 위한 압력 제어가 반드시 필요한 상황이다. 따라서 밸브 및 압력조절기의 구동에 따른 각 구간별 압력을 지속적으로 확인하여 시스템의 안정성을 확인할 수 있어야 한다. 소형 위성에 적합하도록 시스템의 무게와 부피를 최대한 절감하여야 하며, 고진공상태에서의 안정적인 작동 및 기밀이 유지 되어야 한다.

본 연구에서 개발중인 제논연료공급장치는 진공챔버 내부에 위치한 추력기와 연결하여 연료를 공급하는 실험까지 진행하였다. 홀 추력기의 작동은 고진공 상태에서 이루어지므로 진공 챔버 내부의 추력기에 연료를 안정적으로 공급할 수 있어야 하기 때문이다. 현재 연구 과정에서 제논 연료공급장치가 갖추어야 할 요구사항을 정리하여 Table 2에 나열 하였다.

2.3 Xenon feed system의 구성

홀 추력기(Hall thruster) 시스템은 Fig. 2와 같이 구성되며, 각각의 구성품에 대한 특성과 역할을 아래에 정리하였다.

Table 2. Requirement of Xenon feed system

Item	Classification	Value
Performance	Inlet Pressure Range	150 to 5 bar
	Outlet Pressure Range	1.7 ± 0.05 bar
Flow rate	Anode	4 ~ 7 sccm
	Cathode	0 ~ 3 sccm
Flow Response	Original target	< 2 sec
System Mass	Dry mass	< 4 kg
System Volume		< 350 × 250 × 150 mm ³
Destination		To Thruster head unit in vacuum

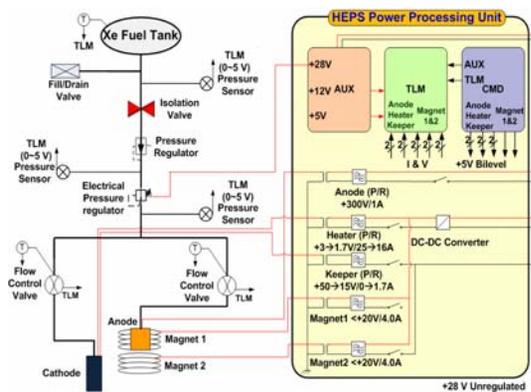


Fig. 2. Schematic diagram of Hall thruster system

제논 연료탱크(Xenon Propellant Tank)

연료로 사용되는 제논을 가스상태로 장기간 저장하여야 하므로, 고압에 안전하고 우주공간에서 기밀이 유지될 수 있는 탱크를 사용하여야 한다[8]. 이러한 연료탱크는 자체 무게가 많이 나가며 가격이 비싸다는 큰 단점을 가지고 있었으나, 최근 국내의 기업에서 복합소재로 제작 및 검증에 성공하여 무게 및 가격에 대한 부담을 덜 수 있게 되었다.

차단밸브(Isolation Valve)

고압의 연료가 연료탱크로부터 시스템으로 유입되는 것을 차단하여 시스템의 기밀을 유지하기 위해 차단밸브(Isolation Valve)를 사용하였다.

지상시험구현용으로 개발된 본 시스템에서는 수동밸브를 이용하여 On/Off를 수행하였다.

압력조절기(Pressure Regulator)

연료저장탱크로부터 유입된 연료는 고압용 압력조절기를 지나 후단압력이 4.17 ~ 5.14 bar로 유지되며 전기식 압력조절기로 유입되게 된다.

전기식 압력조절기는 1 V의 전압을 인가받아 후단 압력을 1.7 bar로 일정하게 유지하며 유량 제어밸브로 연료를 공급해 준다.

압력센서(Pressure Transducer)

본 시스템에서는 고압용 압력센서와 저압용 압력센서가 사용되었다. 각 센서에서 측정된 압력은 시스템의 상태를 확인 할 수 있도록 해준다. 고압용 압력센서를 통해 잔여 연료량을 점검할 수 있고, 저압용 센서들은 유량을 제어하는데 중요한 압력을 점검할 수 있다.

유량조절밸브(Proportional Valves)

유량조절밸브로 사용되고 있는 proportional valve는 0 ~ 6.5 DCV의 전압을 인가받아 작동

된다. 유량조절밸브 전단의 압력이 일정하게 유지된다면 전압을 인가하는 것만으로 유량을 제어할 수 있어 간편한 제어에 큰 장점이 있다.

하니콤 바닥판(Aluminium Honeycomb Plate)

시스템의 무게를 절감하기 위해 바닥판으로 Aluminium honeycomb plate를 사용하였다. 결과적으로 알루미늄 하니콤 바닥판을 사용하였을 때보다 무게를 2.5 kg정도 줄일 수 있었다.

조립시에는 발생할 수 있는 변형을 줄이기 위해 Aluminium plate를 이용해 가조립 후 honeycomb plate로 교체하였다.

Table 3에는 본 시스템의 구성품들에 대한 특성을 정리하였다.

시스템 제작을 위해 3-D 배치설계를 수행하였으며, 이를 통해 조립성 및 구조적 안정성을 점검하고 구성품의 조립을 수행 하였다.

Table 3. Component specification

Component	Specification
Propellant Tank	Volume : 1.1 [l] Service Pressure : 310 [bar]
Fill and Vent Valve	Method : "Quick" Connector Metal to Metal connection
Isolation Valve	Temp. Range : 10°C to 65°C Pressure Rating : 207 [bar]
Pressure Regulator	Inlet Pressure : 410 [bar] Outlet Pressure : 0~5.5 [bar]
Pressure Sensors	0 ~ 210, 0 ~ 7, 0 ~ 1.7 [bar] Rated Voltage : 28±4 [DCV]
Proportional Valve	Valve Type : 2-Way N.C Control Voltage : 6.5 [DCV]
Manifold	Material : Aluminium 1/4" fitting joint
Honeycomb plate	Material : Aluminium Mass : < 300 g

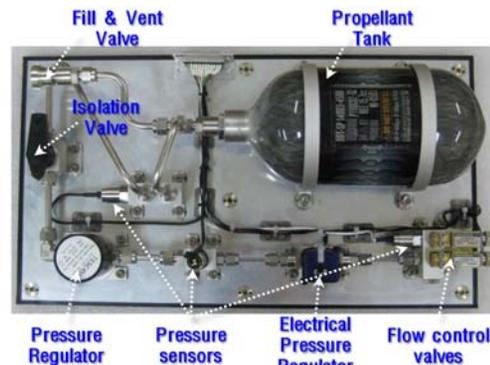


Fig. 3. Xenon feed system integration

제작된 시스템의 무게는 3.2 kg이고 부피는 $350 \times 250 \times 150 \text{ mm}^3$ 으로, Fig. 3에서 제작이 완료된 모습을 나타내고 있다.

2.4 System Integration Test

Xenon feed system의 기능적 측면에서 성능분석을 위해 다음과 같은 실험을 수행하였다.

- 기밀 시험(Leakage test)
- 기능 시험(Functional test)
- 보정 시험(Calibration test)
- 반복성 시험(Repeatability test)

위의 모든 실험에는 질소가스를 활용하였다. XFU 연료탱크에 145 bar의 질소가스를 충전 하여 시스템 전체의 기밀유지를 확인하기 위해 Bubble을 이용하였다. Fig. 4와 같이 시험 장치를 구성하고 위와 같은 실험을 진행하였다.

각 실험은 배압이 대기압인 상태에서 진행되었으며 유량계의 출력신호를 측정하여 유량을 확인하였다. Agilent DAQ장비를 활용하여 압력센서, 센서공급전압, 공급전원, 유량계의 출력신호를 저장하였다.

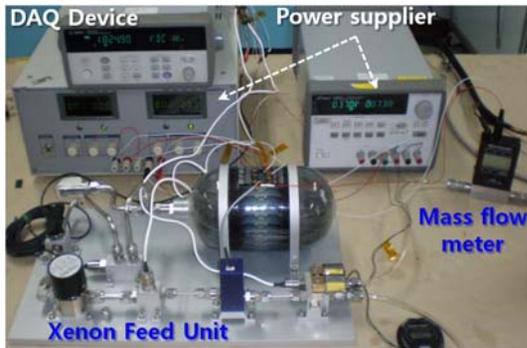


Fig. 4. Experimental setup

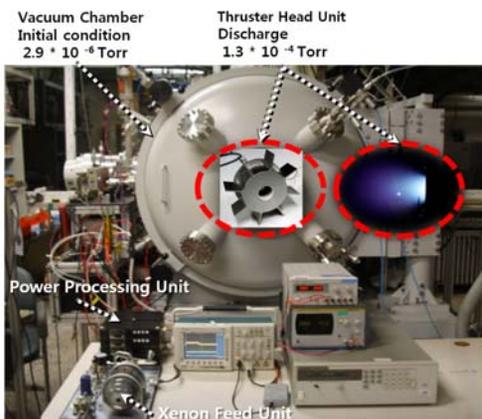


Fig. 5. Thruster system integration test

홀추력기 시스템을 구성하는 추력기, 제논연료 공급 장치, 전력부 개발품의 통합시험을 Fig. 5와 같이 구성하여 시험하였다.

2.5 실험결과

a. Functional Test

시스템의 정상적인 작동을 확인하기 위해 반복적으로 구성품들의 출력신호를 확인하였다. 실험결과 센서와 밸브들은 각각 요구하는 범위에 맞게 신호가 출력되는 것을 확인하였으며, 유량 제어밸브에 전압을 인가함에 따라 출력되는 유량이 변화하는 것을 유량계를 통해 확인하였다.

b. Calibration Test

시스템 보정을 위해 유량제어밸브에 전압을 2.2 V에서 0.1 V 단위로 6.5 V 까지 증가시키면서 인가하여 유량을 확인하였다. 다시 6.5 V에서 2.2 V까지 0.1 V 단위로 감소시키면서 유량을 확인하였다. 실험결과 Fig. 6과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 유량제어밸브의 hysteresis error가 < 20 % 범위이며 센서의 사양과 부합함을 확인하였다.

Fig. 7의 실험결과를 통해 입력전압의 변화에 따라 유량이 변하는 것을 확인함으로써 유량 제어 가 용이함을 확인할 수 있었다.

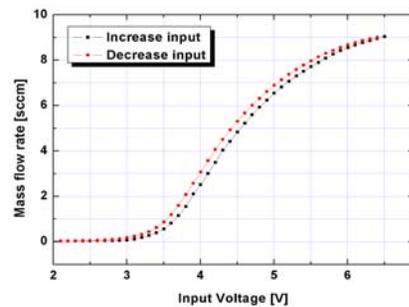


Fig. 6. XFS Calibration test result

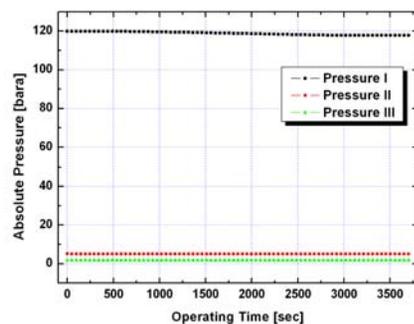


Fig. 7. Pressure gradient during operation

Fig. 7은 시스템이 작동하는 동안 각각의 압력 센서서 측정된 압력변화를 나타내며, 이를 통해 시스템의 상태를 파악할 수 있다.

압력센서 I에서 측정되는 압력을 통해 연료탱크에 잔여 연료량을 확인할 수 있으며, 작동시간 동안 소모된 연료량을 계산할 수 있다. 압력센서 II를 통해 측정된 압력은 전기식 압력조절기의 전단 압력을 확인함으로써, 압력조절기의 정상적인 작동이 이루어지도록 압력이 4.17 ~ 5.14 bar 상태로 유지 되는지를 확인할 수 있다. 압력센서 III를 통해 유량제어밸브가 정확한 유량을 흘려보내기 위해 설정된 압력 1.7 bar를 유지하는지 여부를 확인할 수 있다.

Fig. 8은 유량제어밸브가 작동하는 동안에 밸브전단의 압력을 측정할 것으로 밸브의 안정적인 작동여부를 확인할 수 있다. 밸브전단 압력에 따라 유량이 변화하게 되므로 밸브의 안정적인 동작을 위해 일정압력을 유지할 수 있어야 한다.

c. Repeatability Test

시스템이 반복적으로 같은 성능을 유지하는 특성을 확인하기 위해 동일한 시험조건으로 각 유량제어밸브에 대하여 보정시험을 반복하여 수행하였다. Fig. 9, 10을 통해 각 센서의 반복성

이 < 15 %의 오차율을 가짐을 확인할 수 있다. 결과를 통해 밸브의 반복성이 낮음을 확인하였으며, 향후 오차율을 줄일 수 있는 방안을 모색할 필요성이 있다.

Fig. 11은 유량제어밸브가 작동하는 동안 안정적인 일정한 유량이 공급되는지 여부를 확인한 실험결과이다. 설정 유량으로 안정적인 공급이 이루어짐을 알 수 있으며, < 2 sec의 반응시간을 가짐을 확인할 수 있다.

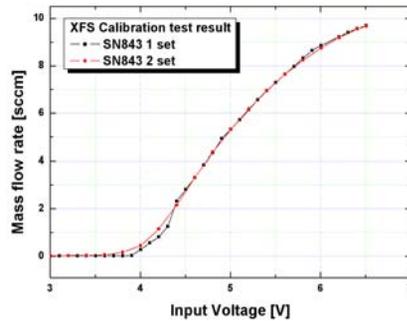


Fig. 10. Repeatability Test result [Valve II]

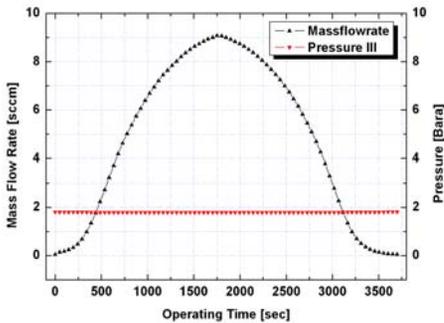


Fig. 8. Pressure gradient during operation

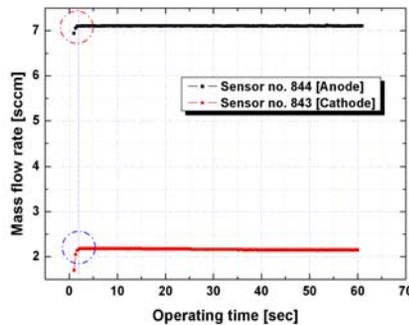


Fig. 11. System stability during operation

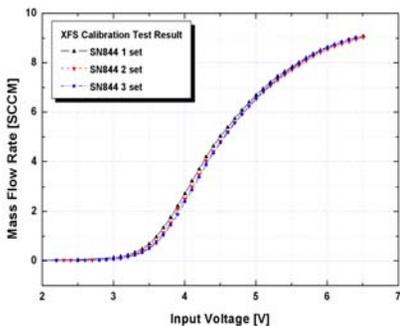


Fig. 9. Repeatability Test result [Valve I]

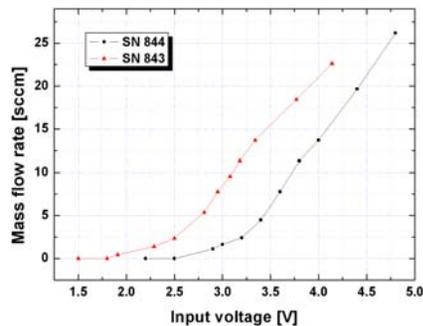


Fig. 12. Calibration result on vacuum condition

Fig. 12는 추력기 동작조건인 진공환경에서 연료공급장치의 작동성을 확인하기 위한 보정시험 결과이며, 제논연료공급장치 출력부를 진공챔버에 연결하여 실험하였다. 진공도 1.0×10^{-6} torr에서 내부누설이 없음을 확인하고 보정시험을 수행한 결과 입력전압으로 유량제어가 가능함을 확인하고 방전시험을 수행하였다. 추력기 동작 조건에 맞게 유량을 설정하고, 방전조건을 기준실험과 동일하게 설정하여 실험한 결과 추력기가 정상작동 함을 확인할 수 있었다. 실험을 통해서 연료공급장치가 추력기의 동작조건인 진공환경에서도 정상적으로 작동함을 확인할 수 있었다.

III. 결 론

300W, 10 mN급 홀 추력기를 위한 제논연료공급 장치를 지상시험 구현용으로 제작하여, 통합시험을 통해 성능을 검증 하였다. 시스템 보정시험을 통해 얻어진 결과로 전압을 인가함으로써 양극(Anode)과 음극(Cathode)에 각각 요구되는 유량을 제어할 수 있음을 알았다. 또한 각각의 압력센서와 전자식 압력제어기 입력전압을 모니터 함으로써 시스템의 상태를 점검할 수 있음을 확인하였다. 이를 통해 홀 추력기를 위한 제논연료공급시스템의 개념을 이해할 수 있었으며, 향후 시스템의 신뢰도를 높이는 방안에 대한 연구를 통해 Flight Model개발을 진행할 것이다.

참고문헌

- 1) 선종호, 전은용, 이종섭, 임유봉, 최원호, "소형위성용 10mN급 홀 방식 전기추력기의 개발", 한국항공우주학회 춘계학술대회 논문집, 2007.
- 2) P. van Put, et al., "Development of an advanced proportional xenon feed assembly for the GOCE spacecraft", ISPC June 2004.
- 3) M.C.A.M. van der list, "NEXT generation electrical propulsion feed system and spin-off micro-propulsion components", ISPC June 2004.
- 4) G. Saccoccia, J. Gonzalez, "European activities in electric propulsion", AIAA-5271 July 2003.
- 5) Joseph K. Barbarits, Edward D. Bushway III, "Xenon Feed System Development", AIAA-4879 July 2003.
- 6) 선종호, 강성민, 김연호, 전은용, 최원호, 이종섭, 서미희, "소형위성의 궤도천이 및 보정을 위한 홀 추력기의 제작", 한국항공우주학회지, 2008년 12월 심사진행
- 7) 강성민, 김연호, 선종호, 이종섭, 서미희, 최원호, "소형위성용 300 W 급 원통형 홀 추력기의 추력부 개발", 한국항공우주학회지, 2008년 12월 심사진행
- 8) Walter H. Tam, Ian Ballinger, Don E. Jaekle, "Conceptual design of space efficient tanks", AIAA-5058 2006.