

技術論文

소형위성용 300 W급 원통형 홀 추력기의 추력부 개발

강성민*, 김연호*, 선종호*, 이종섭**, 서미희**, 최원호**

Development of the Head Unit of a 300 W Cylindrical Hall Thruster for Small Satellites

Seongmin Kang*, Younho Kim*, Jongho Seon*,
Jongsob Lee**, Mihui Seo** and Wonho Choe**

ABSTRACT

The thruster head unit of a 300 W cylindrical Hall thruster was developed for the propulsion system of small satellites. The magnetic topology in the thruster channel is a key parameter to achieve high performances. Two types of magnetic circuit structures were designed and manufactured to compare the thrust levels and efficiencies. Also the endurance test was conducted to measure the stable operation duration of the thruster head and to find degree of erosion after extended operation.

초 록

소형 인공위성에 적합한 300 W 급 원통형 홀 추력기의 추력부를 개발하였다. 추력부 채널 내부에서의 자기장 분포는 추력 성능을 좌우하는 주요한 변수이다. 자기장 구조가 다른 두 종류의 추력부를 설계하고 제작하여 추력 및 효율에 대한 비교 측정 시험을 수행하였다. 또한 내구성 시험을 수행하여 추력부의 안정된 작동 시간과 작동 후 발생하는 문제점에 대한 결과를 얻었다.

Key Words : Cylindrical Hall Thruster(원통형 홀 추력기), Electric Propulsion System(전기 추력 시스템), Small Satellite(소형위성), Performance Test(성능시험), Endurance Test(내구성 시험)

1. 서 론

지구 근궤도에서 임무를 수행하는 소형위성에 있어 위성체의 궤도 보정 및 천이를 위해서는 작은 크기를 가지면서 높은 비추력을 갖는 추력 시스템이 필요하다. 이러한 점에서 1000~2000sec의 큰 비추력을 갖는 홀 추력기는 다른 위성용 추력기와 비교하여 볼 때 소형 위성체에 가장 적

합한 추력 시스템이라고 할 수 있다[1, 2].

1970년대부터 러시아는 200기 이상의 위성체에 홀 추력기(SPT-100, STP-70 등)를 장착하여 발사했고, 미국은 2006년에 처음으로 홀 추력기(BHT-200)를 장착한 위성을 발사했다. 2003년 유럽우주국(ESA)도 달 탐사선 SMART-1에 홀 추력기(PPS-1350)를 사용하였다.

홀 추력기는 전력 및 요구 추력에 따라 다양한 크기로 제작이 가능한데 낮은 전력일수록 즉, 소형화될수록 효율이 떨어지는 경향을 보인다. 홀 추력기의 채널 내부에서 발생하는 플라즈마는 채널 벽면과 상호작용하여 발열 및 세라믹 재질인 벽면의 침식을 유발하는데 이러한 경향은 소형화될수록 더 커진다. 왜냐하면 소형화될수록

† 2009년 1월 5일 접수 ~ 2009년 4월 24일 심사완료

* 정희원, (주) 셋트렉아이

교신저자, E-mail : smkang@satreci.com

대전광역시 유성구 전민동 461-26번지

** 정희원, 한국과학기술원 물리학과

채널 내부의 부피 대비 면적의 비율이 커지기 때문이다.

Princeton Plasma Physics Laboratory(PPPL)에서 처음 제안한 원통형 홀 추력기는[3] 채널 내부의 부피 대비 표면적의 비율이 낮아 이러한 단점을 보완해 줄 수 있다. 현재 개발되고 있는 원통형 홀 추력기는 동급 전력의 기존 홀 추력기와 비슷한 효율을 나타내고 있다[4, 5].

채널이 기존의 고리 형태인 홀 추력기와 마찬가지로 원통형 추력기도 중성 플라즈마 내에서 전자의 E×B 표류를 주요 원리로 하고 있다. 그러나 채널 구조와 내부의 자기장 분포가 다르기 때문에 전자의 움직임과 이온을 가속시키는 힘에 있어서도 큰 차이를 만들고 따라서 기존 홀 추력기와는 다소 다른 방전 특성을 갖는다.

본 연구는 제논(Xe) 가스를 연료로 소모전력 300 W, 추력 10 mN, 비추력 1500 s, 양극 효율 30% 이상의 성능을 내는 것을 목표로 하고 있으며 본 논문에서는 원통형 추력부의 플라즈마 방전 특성, 새로운 형태의 추력부 채널 설계, 그리고 제작된 추력부의 성능 시험 및 내구성 시험에 대한 결과를 정리하였다.

II. 방전 특성과 추력부 설계

2.1 플라즈마 방전 특성

채널 내부에 형성된 자기장과 전기장에 의해 전자들은 자기장을 중심축으로 회전하는 빠른 운동과 E×B 표류에 의해 채널의 대칭축을 중심으로 회전하는 느린 운동을 한다. E×B 표류는 채널의 축을 중심으로 도는 운동이므로 전자들은 반경 방향에 대해 구속되게 된다. 기존 고리 형태의 홀 추력기와 차이점은 축 방향에 대해 전자가 채널 내부에 구속되는 원리인데, 전위차에 의해 양극으로 끌리는 힘과 자기 거울 효과에 의해 추력부 바깥으로 튕겨나는 힘이 균형을 이루

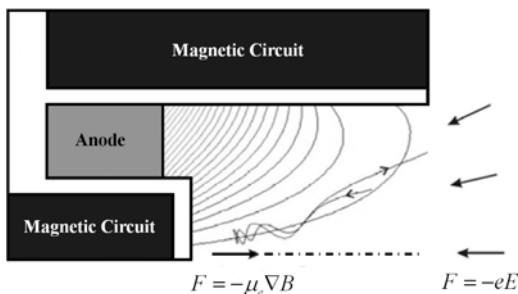


그림 1. 채널 내 전자의 구속 원리

표 1. 홀 추력기 내 플라즈마 물리량

Quantity	Value	Quantity	Value
m_e	9.1×10^{-31} kg	L	25 mm
m_{Xe}	2.2×10^{-25} kg	ρ_e	0.15 mm
T_e	10 eV	ρ_i	2870 mm
T_i	1 eV	$\lambda_{ei} \approx \lambda_{ee} \approx \lambda_{ii}$	2590 mm
B	0.07 T	ω_{ce}	1.23×10^{10} /s
$n_e \approx n_i$	1×10^{18} /m ³	ω_{ci}	5.14×10^4 /s
$v_{thermal,e}$	1.87×10^6 m/s	v_{ii}	1.3×10^5 /s
$v_{thermal,i}$	1.47×10^3 m/s	v_{ei}	8.7×10^5 /s
$v_{E \times B}$	1.6×10^4 m/s	v_{ee}	2.1×10^6 /s

$v_{thermal}$: thermal speed
 $v_{E \times B}$: drift speed
 L : channel length
 ρ : Larmor radius
 λ : collision mean free path
 ω_c : cyclotron frequency
 ν : collision frequency

게 된다[6]. 이러한 원리에 의해 채널 내에 구속된 전자들은 제논 중성 원자와 충돌하여 플라즈마 상태를 유지하게 된다. 그림 1은 원통형 홀 추력기 내에서 전자의 구속 원리를 설명해 주고 있다.

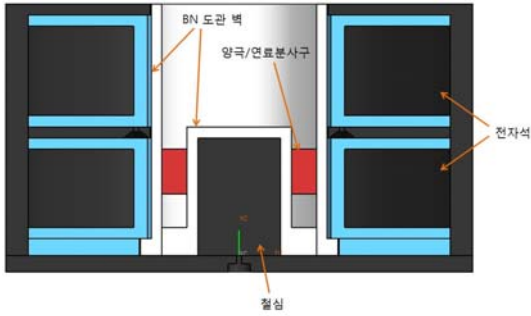
전자 보다 훨씬 무거운 이온은 자기장에 의해 거의 영향을 받지 않고 축 방향으로 형성된 전위차에 의해 가속하게 된다. 표 1에 정리된 플라즈마 물리량들은 전자와 이온의 이러한 차이를 설명하는 근거가 된다. 원통형 홀 추력기에서 가속 구간은 부피 대비 면적 비율이 큰 원통형 채널 내에 존재하므로[7] 채널 벽면의 침식과 발열이 적다.

2.2 추력부 자기장 설계

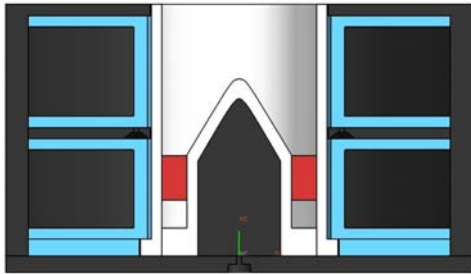
그림 2는 추력부의 설계 단면을 나타내고 있다. 원통형 홀 추력부는 질화붕소(Boron Nitride) 채널, 연료 분사구로 사용되는 링 모양의 양극, 전자석, 자기장 회로를 구성하는 철 구조물로 구성되어 있다.

추력부의 동작 특성을 결정하는 주요 요인은 채널의 기하학적 구조와 내부의 자기장 세기와 분포, 방전 전압, 연료 분사량(중성 Xe의 밀도) 등이다.

자기장의 변화는 채널 내 전자의 분포에 영향을 주어 추력기가 최적의 성능을 갖는 점을 찾는데 변수로 작용한다. 자기장 분포를 변화시키기 위해 전자석을 두 개의 코일로 제작하여 코일에 흐르는 전류를 조절할 수 있도록 했다. 또한 추력부 중심에 있는 철심의 모양을 바꾸어 자기장의 분포를 변화시킬 수 있도록 했다. 그림 3은



(a) 원기둥형 철심 사용



(b) 원뿔형 철심 사용

그림 2. 철심형태에 따른 추력부 단면도

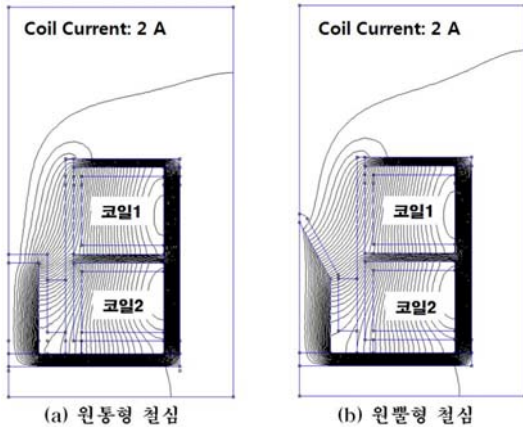


그림 3. 자기장 설계

두 코일의 전류를 2 A로 했을 때 철심 모양에 따른 자기장 모양을 Finite Element Methode Magnetics(FEMM)을 사용하여 모사한 그림이다.

그림 3(a)에 나타난 자기장 분포는 원기둥형 철심을 사용한 추력부의 것으로서 채널의 중심 부근에서 자기장의 축 방향 성분이 가장 강하고 양극 근처 고리 형태의 채널 부분에서 반경 방향 성분이 700 G 정도의 강한 자기장을 갖도록 설계하였고, 그림 3(b)에 나타난 자기장 분포는 중



그림 4. 제작된 원통형 홀 추력부

심에 놓인 철심을 원뿔형으로 만듦으로써 채널 내부 전체에 걸쳐 자기장의 반경 방향 성분이 좀 더 강하도록 설계하여 두 경우에서 방전 전류 및 추력이 어떻게 차이를 보이는지 보고자 하였다.

그림 4는 원통형 철심을 사용하여 제작한 추력부의 모습이다.

III. 성능 측정

3.1 추력 시험

원기둥형 철심을 사용한 추력기에 대해서 진공 챔버 초기 압력 2×10^{-7} torr, 동작 압력 5×10^{-5} torr 하에서, 음극 연료 공급량을 2 sccm으로 고정하고 양극의 연료 공급량을 4~6 sccm으로 변화시키면서 추력을 측정하였다. 방전 후 코일 2의 전류를 조절하여 방전 전류 값이 최소가 되도록 하여 운전했고, 방전 특성을 살펴보기 위해 비교적 열이 적게 발생하는 4 sccm 조건에서 코일 1, 코일 2, 방전 전압에 대한 의존성을 확인했다.

그림 5는 4 sccm, 방전 전압 350 V에서 코일 1과 코일 2의 전류에 따라 방전 전류의 변화를 보여주고 있다. 먼저 코일 2의 전류를 2.5 A로 고정하고 코일 1의 전류를 -2 A~2 A로 변화시켰으며 전류가 흐르지 않을 때 방전 전류가 가장 낮았다. 코일 2는 코일 1의 방전 전류가 가장 낮은 0 A를 기준으로 변화시켰을 때 3 A에서 가장 낮은 방전 전류를 나타냈다. 코일의 전류에 따라 방전 전류의 최소점이 있다는 것은 코일 1과 코일 2의 변화에 따라 채널 내 자기장의 축 방향 성분과 반경 방향 성분이 균형을 이루어 전자의 구속을 극대화 하는 지점이 있음을 말해 준다. 코일 1이 코일 2보다 방전 전류에 미치는 영

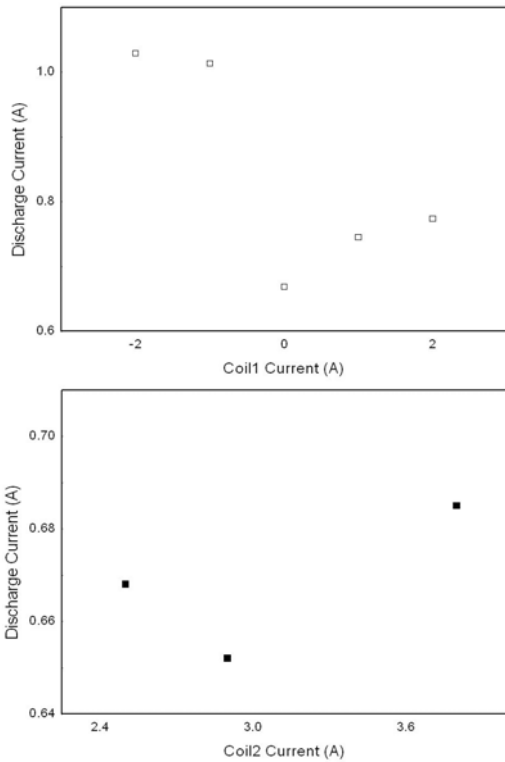


그림 5. 코일 전류에 따른 방전 전류의 변화

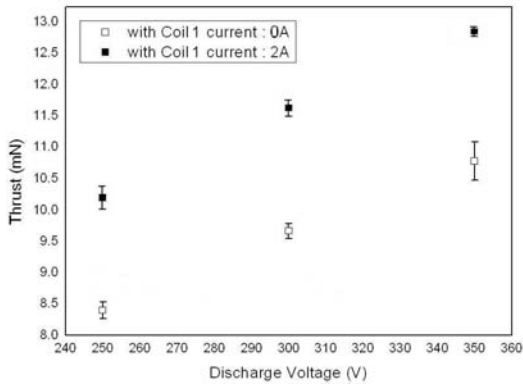


그림 6. 코일 1 전류에 따른 추력의 변화

향이 더 큰 것을 확인할 수 있다. 그림 6은 코일 1의 전류에 따라 추력 세기의 변화를 보여 주고 있다. 코일 1에 전류를 흘려주었을 때 방전 전류는 증가하지만 추력도 같이 증가하였다. 그림 5와 그림 6의 결과를 종합하면 코일 1과 코일 2의 전류에 따라 방전 전류 및 추력이 변하며 요구 소모 전력 300 W에서 가장 효율적인 지점은 방전 전압 300 V에서 코일 1과 코일 2가 각각 0 A, 3 A일 때로 판단된다.

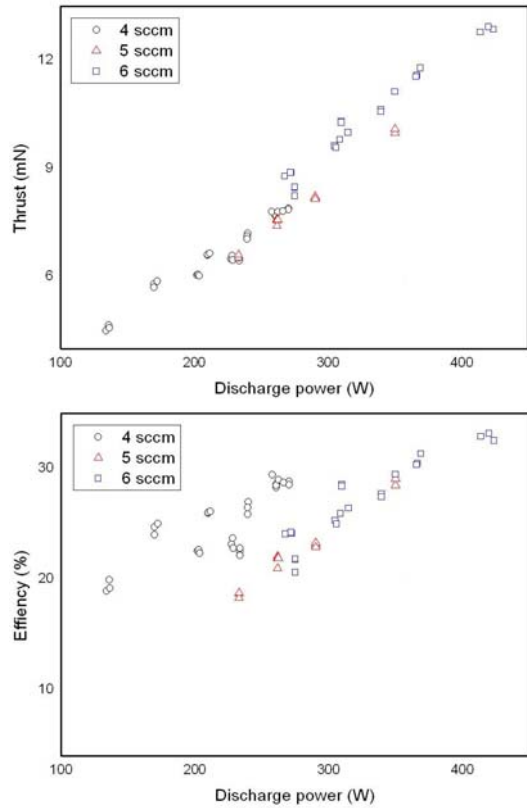


그림 7. 원기동형 철심, 추력 및 효율 측정

양극 연료 공급량을 5 sccm, 6 sccm으로 늘여 가며 동일한 측정을 반복했다. 그림 7은 방전 전류에 대한 추력과 효율에 대한 결과를 종합적으로 나타내고 있다.

원뿔형 철심으로 교체한 후에는 진공 챔버 초기 압력 1.4×10^{-7} torr, 동작 압력 5×10^{-5} torr, 음극연료 공급량 1 sccm으로 고정하고 양극의 연료 공급량을 6~7 sccm으로 변화시키면서 측정하였다. 방전 후 코일 2의 전류를 조절하여 방전 전류 값이 최소가 되도록 하여 운전하였고 방전 특성을 살펴보기 위해 6 sccm 조건에서 코일 1과 방전 전압에 대한 변화를 확인하였다. 이를 바탕으로 양극 연료 공급량 7 sccm에 대해서도 추력을 측정하였다.

측정 결과 방전 전류가 코일 1의 전류 값에 크게 의존하였다. 이것은 자기장이 양극 근처에서 반경 방향의 성분이 강하게 설계되었으므로 코일 1의 전류 변화에 의해 양극 근처에서 자기장의 분포가 크게 변한 것이다. 코일 1과 코일 2의 전류 방향을 같은 방향으로 했을 때 성능이 가장 좋게 나타났다. 코일 전류 방향을 같은 방

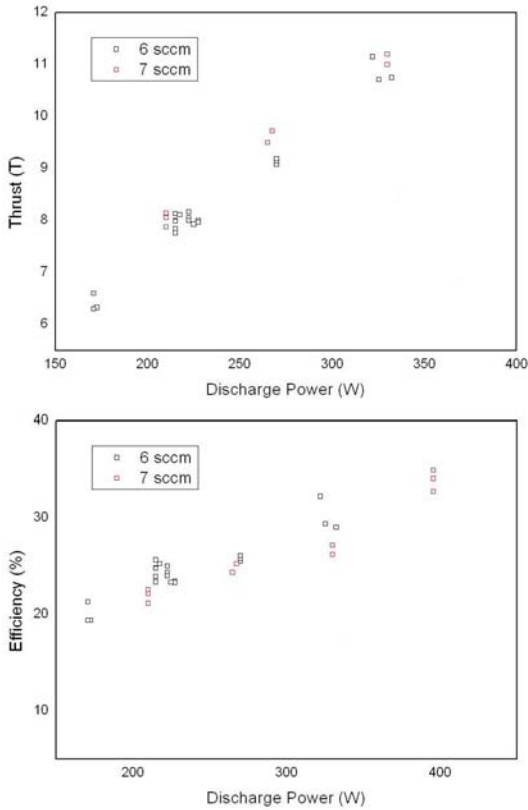


그림 8. 원뿔형 철심, 추력 및 효율 측정

향으로 하면 채널 내부 전체적으로 자기장의 세기가 증가하여 전자의 구속이 더 많이 이루어짐을 알 수 있다. 그림 7, 그림 8의 결과에서 보듯이 추력과 양극 효율은 방전 전력이 비례하여 증가하였다. 반면에 방전 전압은 방전 전류에는 거의 영향을 주지 않았다. 양극의 연료 공급량의 증가는 전체적으로 추력과 효율을 높여주지만 방전 전류의 증가를 가져와 소비 전력도 같이 증가하게 만들었다.

두 철심 형태에 따른 성능 측정 결과를 비교해 보면 전력 300 W, 연료 분사량 6 sccm에서 원기둥형 철심의 경우 9 mN, 24%의 성능을 보였고, 원뿔형 철심의 경우 10 mN, 28%로 원통형 철심 보다 다소 향상된 성능을 보였다.

3.2 내구성 시험

연속적인 방전을 통해 발생하는 문제점과 추력기가 안정적으로 운전이 가능한 시간을 확인하기 위해 내구성 시험을 수행하였다. 기존 원통형 철심의 추력부 설계를 바탕으로 하였고 열 제어를 위해 열 해석 수행 결과를 적용하여 라디에이

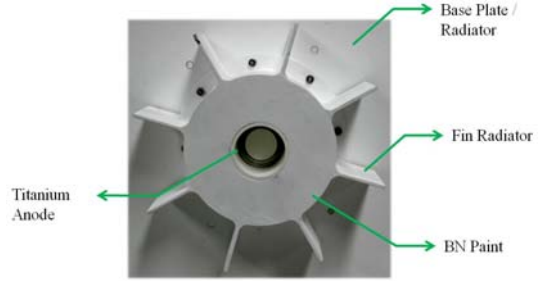


그림 9. 내구성 시험을 위해 제작된 추력부

터와 표면처리를 추가하여 제작하였다. 그림 9에서 보는 바와 같이 추력부 옆쪽으로 라디에이터를 달고 바닥판의 크기를 확장하였다. 또한 표면을 채널과 같은 물질인 질화붕소 페인트로 도포하여 열 방사율을 높여주었고 열이 가장 많이 발생할 것으로 생각되는 양극을 또한 열 방사율이 높은 타이타늄으로 제작하였다.

양극 유량 6 sccm, 음극 유량 1 sccm, 방전 전압 225 V로 고정하였고 추력 측정 시험에서와 마찬가지로 코일1과 코일2의 전류를 방전 전류가 가장 낮게 흐르는 지점에 맞추고 방전 전류의 변화와 온도 변화를 기록하였다.

그림 10은 방전 시간에 따라 방전 전류의 변화를 보여주고 있다. 약 100 시간 동안 연속적인 운전을 했다. 방전 후 10 시간 동안은 안정적인 방전이 이루어져 방전 전류가 비교적 낮게 유지되었다. 10 시간 이후에는 방전 전류가 서서히 증가했으며 70 시간 이후에는 방전 전류가 흔들리면서 급격히 증가하였다. 90 시간 이후에는 양극이 허용하는 전류 한계에 걸리며 방전이 불안정하다가 약 100 시간 이후 방전이 종료되었다.

추력부에 온도 센서를 부착하여 운전 중 온도의 변화를 측정하였다. 추력부 바닥판 뒷면에서

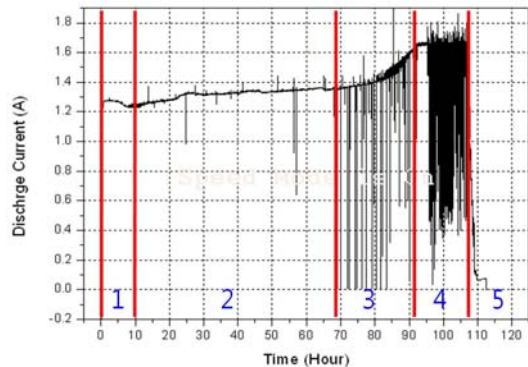


그림 10. 시간에 따른 방전 전류의 변화

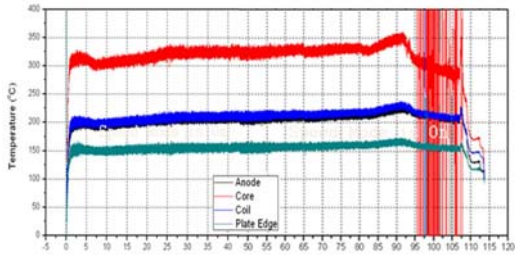


그림 11. 시간에 따른 온도의 변화

철심 및 코일이 위치하는 부분과 바닥판 끝 부분, 양극의 연료 공급관에 각각 센서를 부착했다. 그림 11은 시간에 따른 온도 변화 측정 결과이다. 철심이 위치한 부분에서 온도가 가장 높고 이 부분의 온도 변화에 따라 다른 부분의 온도도 같이 변화했다. 이는 철심을 덮고 있는 안쪽 채널이 주요 열원임을 보여준다. 또한 온도 변화가 방전 전류의 변화와 시간적으로 일치하는 것을 볼 수 있다. 이것은 전류의 세기가 온도 변화의 원인이 됨을 보여주는 것이다.

향후 내구성 시험에는 가속된 입자로부터 진공 챔버와 추력기를 보호하여 오염 등 성능에 영향을 줄 수 있는 외부 요인을 줄일 필요가 있음을 실험을 통해 확인하였다.

IV. 결 론

코일1, 코일2 및 자기장 회로를 구성하는 철심의 모양을 다르게 함으로써 채널 내부의 자기장 구조에 따른 추력 성능의 변화를 측정하였다. 새로운 원뿔 형태의 철심을 사용하여 제작한 원통형 홀 추력부는 기존 원기둥 형태의 철심을 사용했을 때 보다 약간 높은 추력과 효율을 나타냈으며 좀 더 안정적으로 작동했음이 실험을 통해 확인되었다. 이는 채널 내 자기장 분포의 변화가

성능에 직접적으로 영향을 주는 요인임을 보여주는 결과이며 향후 자기장 최적화를 위한 자기 회로 설계에 중요하게 고려될 만한 결과이다. 또한 내구성 시험을 통해 방전 전류 및 추력부 각 부분의 온도를 측정하고 현 개발 단계에서의 운전 가능 시간을 확인하였다. 측정 결과를 바탕으로 향후에는 보다 내구성이 우수한 추력부를 제작할 계획이다.

참고문헌

- 1) 선중호, 강성민, 김연호, 전은용, 최원호, 이종섭, 서미희, “소형위성의 궤도천이 및 보정을 위한 홀 추력기의 제작”, 한국항공우주학회지, 2009년 4월 심사진행.
- 2) 김연호, 선중호, 강성민, 위정현, 윤호성, 최원호, 이종섭, 서미희, “300 W급 홀 추력기를 위한 제논연료공급장치 개발”, 한국항공우주학회지, 37권 4호, 2009, pp. 419-424.
- 3) Y. Raiteses, N. J. Fisch, K. Ertmer, C. B. Burlingame, “A Study of Cylindrical Hall Thruster for Low Power Space Application”, AIAA, 2000.
- 4) Y. Raiteses, N. J. Fisch, “Parametric investigations of a nonconventional Hall thruster”, Phys. Plasmas 8, 2579, 2001.
- 5) 선중호, 전은용, 이종섭, 임유봉, 최원호, “소형위성용 10mN급 홀 방식 전기추력기의 개발”, 한국항공우주학회 춘계학술대회 논문집, 2007.
- 6) Y. Raiteses, A. Smirnov, N. J. Fisch, “Cylindrical Hall Thrusters”, AIAA 2006-3245, 2006.
- 7) A. Smirnov, Y. Raiteses, N. J. Fisch, “Plasma measurements in a 100 W cylindrical Hall thruster”, J. Appl. Phys. 95, 2283, 2004.