

技術論文

DOI:10.5139/JKSAS.2010.39.2.195

소형위성용 저전력 홀 추력기의 성능 비교 연구

강성민\*, 김연호\*, 정연황\*, 선종호\*\*, 이종섭\*\*\*, 서미희\*\*\*, 최원호\*\*\*

Comparison Study of the Low Power Hall Thrusters Performance

Seongmin Kang\*, Younho Kim\*, Yunhwang Jeong\*,  
Jongho Seon\*\*, Jongsub Lee\*\*\*, Mihui Seo\*\*\* and Wonho Choe\*\*\*

ABSTRACT

A low power Hall thruster is under development for orbit maintenance of a small Earth observing satellite. Both cylindrical and annular type thrusters were manufactured and tested to characterize the performance of cylindrical Hall thrusters. Results were described through comparative analyses. Cylindrical thrusters were manufactured in two different channel diameter dimensions, 28 mm and 50 mm. Thrust, ion velocity and ion current were measured in various operating conditions. The results show that cylindrical thrusters are more efficient in mass utilization and voltage utilization, but less efficient in current utilization than annular one.

초 록

소형 지구관측위성의 궤도 보정을 위한 저전력 홀 추력기를 개발하였다. 원통형 홀 추력기의 성능 특성을 파악하기 위해 원통형 홀 추력기와 고리형 홀 추력기를 제작하여 시험을 수행했고 그 결과를 비교 분석하였다. 원통형 추력기는 채널 내경에 따른 성능 변화를 보기 위해 28 mm, 50 mm 두 종류로 제작되었다. 다양한 방전 조건에서 추력과 이온 에너지, 이온 전류를 측정하였다. 결과는 원통형 추력기가 고리형 추력기에 비해 연료 효율과 전압 효율에서 더 뛰어나고, 전류 효율에서는 떨어짐을 보였다.

**Key Words** : Cylindrical Hall Thruster(원통형 홀 추력기), Annular Hall Thruster(고리형 홀 추력기), Small Satellite(소형 위성), Thrust(추력)

1. 서 론

원통형 홀 추력기는 소형 지구관측위성의 궤도 보정을 위한 저전력 추진체로 사용될 수 있다. 원통형 홀 추력기는 프린스턴 플라즈마 물리 연구실(PPPL)에서 최초로 고안되었으며, 소형화되고 저전력화되면서 발생하는 기존의 고리형 홀

추력기의 약점을 보완하기 위해 연구되고 있다 [1-4]. 홀 추력기의 작동 개념 및 전반적인 설계 내용은 선행 연구 논문에 기술하였다[5]. 현재 개발 중인 홀 추력기의 목표는 200 W 방전 전력에서 10 mN의 추력, 1200 s의 비추력 그리고 30%의 양극 효율을 얻는 것이다. 원통형 홀 추력기와 고리형 홀 추력기의 성능을 비교하기 위해 직경 28 mm, 50 mm의 원통형 홀 추력기(SI-200Cv1, SI200Cv2), 직경 50 mm의 고리형 홀 추력기(SI-200Av1)를 제작하여 성능 시험을 수행하였다. 본 연구에서 전자석에 의한 전력 소모는 효율 분석에서 제외하였다. 또한 음극 전력 및 연료 소모도 고려하지 않았다. 양극 효율은 세

† 2010년 8월 9일 접수 ~ 2011년 1월 10일 심사완료

\* 정희원, (주) 씨트렉아이

교신저자, E-mail : smkang@satreci.com

대전광역시 유성구 전민동 461-26번지

\*\* 정희원, 경희대학교 우주과학과

\*\*\* 정희원, KAIST 물리학과

개의 효율 즉, 연료 이용, 전류 이용 그리고 전압 이용으로 나누어 분석하였다. 각각의 이용 효율은 다음과 같이 정의하였다[6].

1. 연료 이용 효율은 중성 기체 유량을 이온 유량으로 변환한 것이다.
2. 전류 이용 효율은 방전 전류에서 이온 전류의 비이다.
3. 전압 이용 효율은 방전 전압을 이온 속도로 변환한 것이다.

## II. 시험

### 2.1 추력기

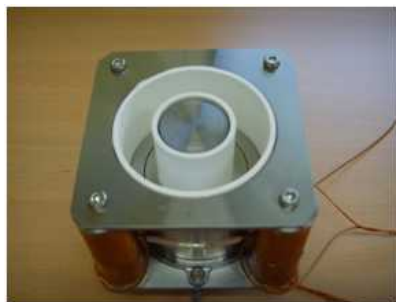
SI-200Cv1, SI-200Cv2, SI-200Av1의 실제 제작된 모습이 Fig. 1과 같다. SI-200Cv1은 방전 채널



(a) 28 mm 원통형 홀 추력기(SI-200Cv1)



(b) 50 mm 원통형 홀 추력기(SI-200Cv2)



(c) 50 mm 고리형 홀 추력기(SI-200Av1)

Fig. 1. 제작된 시험 모델

내부가 전체적으로 원통형이며 직경이 28 mm이다. SI-200Cv2는 원통형으로 직경이 50 mm이다. SI-200C 타입의 추력기는 자기 회로의 구성과 채널 형태가 동일하다. 내부 채널 속 철심을 돌려 감긴 내부 코일과 외부 채널을 돌려 감긴 외부 코일이 자기장을 형성한다. 외부 코일은 채널 내부의 자기장을 전체적으로 조절하는 반면, 내부 코일은 내부 채널 벽면 근처 즉, 자기 거울 효과에 의해 전자 구속이 일어나는 영역의 자기장을 국소적으로 조절한다. 자기 거울 효과는 원통형 홀 추력기의 전자 구속 방식 중 하나로 설명되고 있다[7].

SI-200Av1은 러시아의 홀 추력기인 SPT-50과 유사한 구조를 갖고 있는 기존의 고리형 홀 추력기이다[8-9]. 채널의 재료는 SI-200C 형과 동일하게 질화붕소이며, 채널의 외경이 50 mm, 내경이 28 mm이다. 양극은 채널 출구면으로 부터 25 mm 지점에 위치하고 있다. 전자석의 구조는 원통형과는 다르게 네 개의 측면 코일과 1개의 중심 코일로 이루어져 있다.

상용 중공 음극(Heatwave, HWPES-250)이 이온 빔을 중성화시키는데 사용된다. 이 음극은 채널 출구면에서 약 5 cm 아래에 위치시켰다. 시험은 공통적으로 0.5 ~ 0.7 mg/s의 제논 가스의 양극 유량과 0.1 mg의 음극 유량 그리고 150 ~ 250 V의 방전 전압 하에서 수행했고, 코일 전류는 각 모델의 성능 최적점으로 맞추었다.

### 2.2 진단 장치

모든 시험은 직경 1 m, 길이 1.9 m의 스테인리스 진공 챔버에서 수행되었다. 추력기의 정상 작동 중에 챔버 내의 압력은 두 개의 저온펌프와 4 개의 터보펌프로 약  $10^{-4}$  torr로 유지되었다. 플라즈마 방전, 전자석, 음극 키퍼 그리고 음극 히터를 위한 개별 DC 전원장치가 사용되었다. Fig. 2에서 보는 것과 같이 추력기 회로의 공통 접지

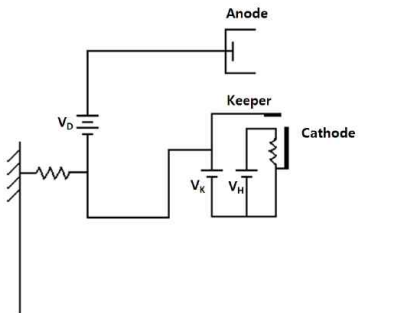


Fig. 2. 회로구성도. VD는 방전 전원, VK는 키퍼 전원, VH는 히터 전원을 나타낸다

는 진공 챔버와 저항을 통해 연결되어 있다. 이온 빔이 완전히 중성화될 때 공동 접지와 진공 챔버 사이에 전류는 흐르지 않는다. 추력기가 점화된 이후에 키퍼 전원은 음극에서 방출되는 전자의 양을 조절하는데 사용될 수 있다.

추력기의 추력은 진자 형태의 추력기 스탠드로 측정하였다. 추력 발생에 의한 추력기의 위치 변화량은 위치검출소자(PSD) 센서에 의해 그 크기에 비례하는 전압 신호로 변환된다. 힘과 전압 신호 간의 관계식을 얻기 위해 무게를 알고 있는 4 개의 추를 이용하여 교정하였다. 다양한 작동 조건에서 수행한 추력 측정 및 교정 측정의 결과에서 이 추력 측정 방식의 표준 편차는 0.1 mN 미만이었다.

Faraday Cup과 RPA(Retarding Potential Analyzer)를 이용하여 이온 전류 밀도와 이온 에너지를 측정하였다. 이 장치들은 추력기 출구면 아래로 38 cm에 위치하고 있고 -90 ~ +90도 범위에서 측정이 가능하다. 추력 효율을 분석하기 위해 추력과 이온 에너지, 전류 밀도 결과를 이용하여 효율을 연료 이용, 전류 이용, 전압 이용 효율로 세분화하였다. 그러나 정확한 값을 계산하는 정량적 분석이 아닌 정성적 분석으로 대략적인 경향을 파악하고자 하였다.

### III. 시험 결과

시험 결과는 크게 두 가지 관점에서 기술하였다. 하나는 원통형 추력기의 채널 크기에 대한 성능 의존성이며, 다른 하나는 원통형 추력기와 고리형 추력기의 성능 비교이다.

Figure 3은 채널 직경에 따라 분류한 원통형 추력기의 측정 결과이다. 방전 전류는 연료 유량에 따라 증가한다. 고정된 연료 유량에 대해 전류 분포는 일정 범위를 갖고 퍼져 있다. 이는 방전 전류가 방전 전압에 따라 변하기 때문이다. 모든 측정에서 SI-200Cv2의 방전 전류는 SI-200Cv1 보다 높다. 이는 50 mm 추력기(SI-200Cv2)의 연료 이용 효율이 28 mm 추력기(SI-200Cv1) 보다 높거나 SI-200Cv2의 전류 이용 효율이 SI-200Cv1 보다 낮음을 의미한다. 한편 추력과 비추력 결과에서 두 추력기가 전력에 대한 상승 경향이 동일한 것을 볼 때 전자가 옳음을 알 수 있다. 두 추력기의 추력 분포 및 비추력 분포가 동일 선상에 위치하고 있다. SI-200Cv2의 단위 유량 당 추력이 SI-200Cv1 보다 크다는 사실이 연료 이용 관점에서 SI-200Cv2의 성능이 우수하다는 것을 입증한다. 두 추력기

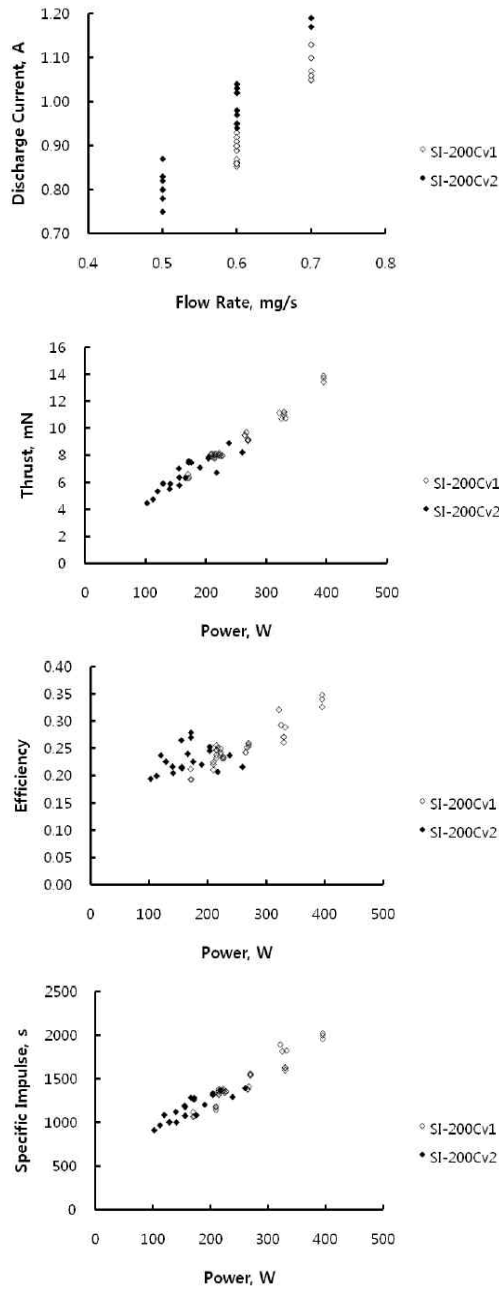


Fig. 3. 원통형 추력기의 채널 크기에 따른 성능 차이

의 분명한 차이는 효율 계산 결과에서 나타난다. 결론적으로 SI-200Cv2는 SI-200Cv1에 비해 200 W 보다 낮은 전력 영역에서 더 높은 효율을 보이고 있다.

Figure 4는 모든 추력기 모델에 대한 성능 시험 결과를 종합하여 보여준다. 원통형 추력기

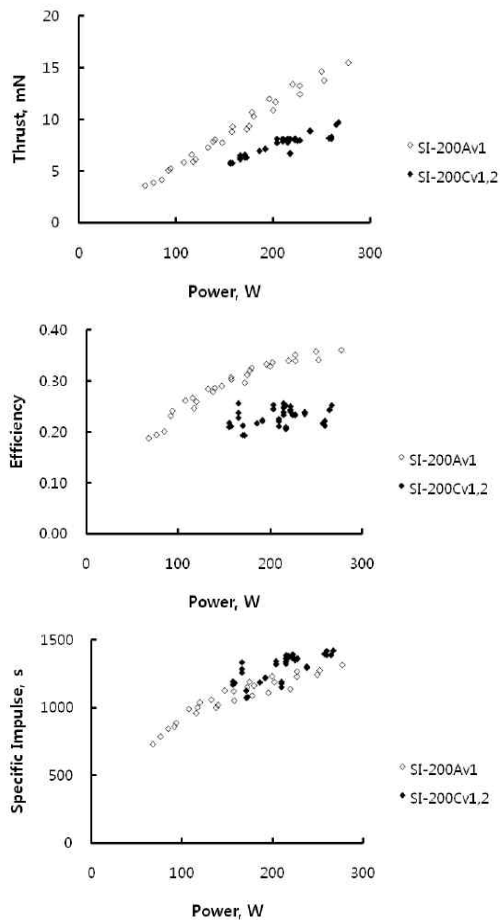


Fig. 4. 원통형, 고리형 추력기 성능 측정 결과 종합

(SI-200Cv)는 모든 성능 측면에서 고리형 추력기 (SI-200Av1)와 차이를 보인다. 추력 분포의 기울기 차이는 전압에 따라 방전 전류가 얼마나 변하는가의 차이이다. SI-200Av1의 경우 방전 전류가 방전 전압에 따라 변하지 않으므로 방전 전력의 증가는 오직 전압의 증가만을 의미한다. 그러나 SI-200Cv의 경우 전압의 증가는 전류의 증가를 만들기 때문에 전력 대비 추력 분포의 기울기가 SI-200Av1 보다 작다. 효율 결과도 동일하게 설명할 수 있다.

가장 큰 차이는 동일한 연료 유량에서 SI-200Cv의 방전 전류가 SI-200Av1의 전류 보다 두 배 가까이 크다는 것이다. 추력과 효율 결과로부터 판단할 때 SI-200Cv의 높은 전류는 전류 이용 효율이 낮은 것이 가장 큰 원인이라 할 수 있다. 전류 이용 효율이 낮다는 것은 방전 전류에서 전자에 의한 전류의 비율이 크음을 의미한다.

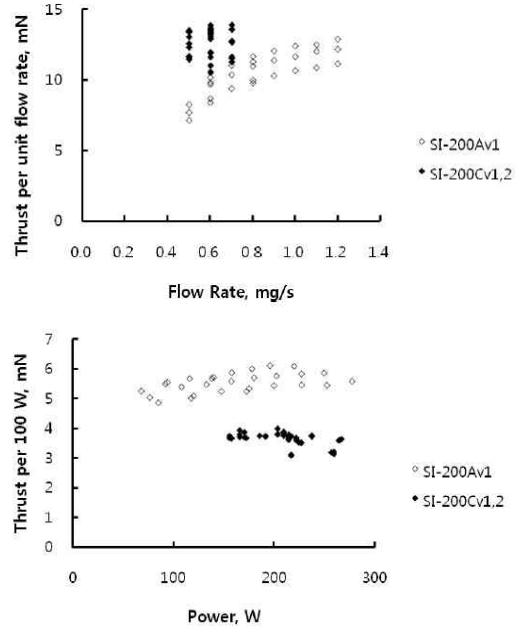


Fig. 5. 원통형, 고리형 추력기의 성능 비교

그러나 이것이 유일한 원인은 아니다. SI-200Cv의 비추력은 분명히 SI-200Av1 보다 높다. 이는 동일한 유량에서 SI-200Cv의 추력이 더 크음을 의미한다. 단위 유량 당 추력을 계산한 결과는 이를 보다 명확하게 보여준다(Fig. 5). 동일 유량에서 더 큰 추력을 낸다는 것은 그만큼 연료 이용 혹은 전압 이용 효율이 높다는 것을 나타낸다. Faraday Cup과 RPA로 측정된 이온 전류 및 이온 에너지 측정 결과는 연료 이용과 전압 이용 모두에서 SI-200Cv가 효율적라는 결론을 지지해 준다. Fig. 5의 오른쪽 도표는 방전 전력 100 W 당 추력을 비교하고 있다. 전력 소모 측면에서는 SI-200Av가 더 효율적임을 나타낸다. Fig. 5의 두 도표는 SI-200Av와 SI-200Cv 두 추력기 형태의 분명한 성능 특징을 대조적으로 보여준다.

Figure 6은 연료 유량 0.6 mg/s, 방전 전압 250 V에서 SI-200Cv2와 SI-200Av1의 이온 전류 밀도 분포를 측정한 결과이다. SI-200Cv2의 이온 빔의 분사 각도가 SI-200Av1에 비해 더 크고 SI-200Cv2의 근축 빔 전류가 SI-200Av1 보다 작다. 그러나 이 결과를 적분하여 계산해 보면 SI-200Cv2의 총 이온 전류가 SI-200Av1 보다 더 크다. 이것은 연료 이용 또는 이온화 효율 측면에서 SI-200Cv2가 SI-200Av1 보다 더 효율적임을 나타내고 이것은 비추력 계산 결과와 일치한다.

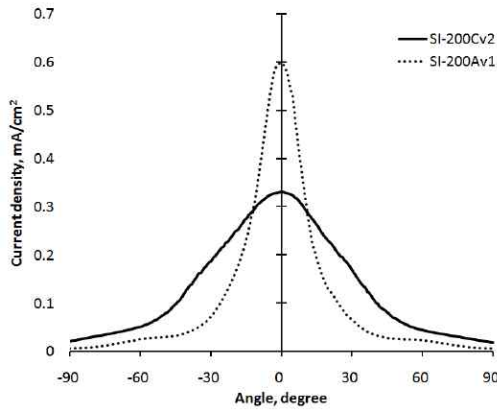


Fig. 6. 50 mm 원통형, 고리형 추력기의 이온 전류 밀도 측정

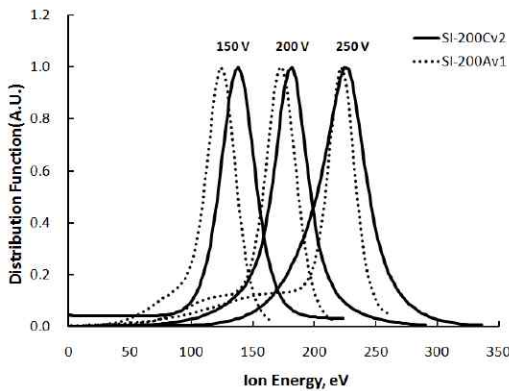


Fig. 7. 50 mm 원통형, 고리형 추력기의 이온 에너지 측정

Figure 7은 추력기 측상에서 측정한 두 타입 추력기의 이온 에너지 측정 결과를 비교한 것이다. 150, 200 250 V에서 측정한 결과는 최고점 위치 및 평균 에너지를 계산했을 때 전압 조건에서 SI-200Cv2의 에너지가 SI-200Av 보다 높았다. 이것은 SI-200Cv2의 전압 이용 효율 또한 SI-200Av1 보다 높음을 말해 준다. 이온 에너지 분포도에서 분포의 폭은 방전 채널 내 이온화 영역과 가속 영역에 대한 대략적인 정보를 담고 있다. 매우 뾰족한 분포는 이온화 영역과 가속 영역이 더 잘 구분되어 있음을 의미한다. 또한 넓은 폭은 이온 빔의 전하 밀도가 상대적으로 더 크음을 의미할 수 있다. 모든 전압 조건에서 이온 에너지 분포의 폭은 SI-200Cv2가 더 넓다. 이온 전류 측정 결과로부터 계산한 SI-200Cv2의 이온 효율은 대략 90%인 반면, 연료 이용 효율은 60% 정도로 예측된다. 이것은 다중 하전 이온이

전체 이온의 절반 이상임을 나타낸다. SI-200Av1의 이온 효율은 연료 이용 효율과 거의 같은 50% 정도이다. 다중 하전 이온의 증가는 이온 빔의 전하 밀도를 높이고 이온 빔 내 쿨롱 충돌을 더 증가시켜 이온 에너지 분포의 폭을 더 넓힐 수 있음을 예측할 수 있다. 한 예로서, 방전 전압 250 V에서 SI-200Cv2의 에너지 분포 폭은 SI-200Av1의 분포 보다 넓을 뿐만 아니라 방전 전압인 250 V 보다 더 높은 에너지를 갖는 이온의 양이 더 많다. SI-200Cv2의 이러한 과에너지 이온은 높은 연료 이용 효율과 더 많은 다중 하전 이온에 의한 것이라고 판단하였다.

#### IV. 결 론

본 연구에서, 우리는 추력, 방전 전류, 이온 전류 그리고 이온 에너지 측정 수치들을 통해 원통형 홀 추력기와 고리형 홀 추력기의 성능 특성을 정량적으로 기술했고 효율 분석에 있어서는 정성적으로 기술하였다. 두 타입 추력기에 대한 비교 연구는 분명히 인공위성의 임무와 추력기의 역할의 측면에서 하나의 통찰을 주었다. 저전력 영역에서 원통형 추력기 SI-200Cv는 연료 무게에 의해 제한되는 임무에 장점이 있는 반면, 고리형 추력기 SI-200Av는 전력에 의해 제한되는 임무에 장점이 있음을 확인하였다. 본 연구에서 두 타입의 추력기는 몇 가지 성능 지표에서 분명한 차이를 보였지만, 각 타입 추력기의 특징을 일반화하기 위해서는 더 다양한 조건에서 추가적인 실험이 요구된다.

#### 참고문헌

- 1) Smirnov, A., Raitses, Y., and Fisch, N. J., "Performance Studies of Miniaturized Cylindrical and Annular Hall Thrusters", Joint Propulsion Conference, 2002-3823, AIAA, Indianapolis, IN, 2002.
- 2) Polzin, K. A., "Performance of a Low-Power Cylindrical Hall Thruster", International Electric Propulsion Conference, 2005-011, IEPC, Princeton, NJ, 2005.
- 3) Shirasaki, A., and Tahara, H., "Operational Characteristics and Plasma Measurements in Cylindrical Hall Thrusters", Journal of Applied Physics, Vol. 101, No. 073307, 2007.

4) Jacobson, D. T., and Jankovsky, R. S., "Test Results of a 200 W Class Hall Thruster", NASA TM-209447, 1999.

5) 강성민, 김연호, 신중호, 이종섭, 서미희, 최원호, "소형위성용 300 W급 원통형 홀 추력기의 추력부 개발", 한국항공우주학회지, 제 37권 제 5호, 2009, pp. 496~501.

6) Hofer, R. R., Gallimore, A. D., "Efficiency Analysis of a High-Specific Impulse Hall Thruster", Joint Propulsion.

Conference, 2004-3602, AIAA, Lauderdale, FL, 2004.

7) Raitses, Y., Smirnov, A., Fisch, N. J.,

"Cylindrical Hall Thrusters", AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, 2006-3245, AIAA, San Francisco, CA, 2006.

8) Mazella, M., Oleson, S., Sankovic, J., Hass, T., Semenko, A., Kim, V., "Evaluation of Low Power Hall Thruster Propulsion", NASA TM-107326, 1996.

9) Guerrini, G., Michaut, C., Dudeck, M., Vesselovzorov, A. N., and Bacal, M., "Characterization of Plasma Inside the SPT-50 Channel by Electrostatic Probes", International Electric Propulsion Conference, 1997-053, IEPC, Cleveland, OH, 1997.