

입자모사를 통한 HALL EFFECT THRUSTER의 플라즈마 운동 이해

이재진^{1†}, 정성일¹, 최원호², 이종섭², 임유봉², 서미희², 김형명¹

¹한국과학기술원 인공위성연구센터

²한국과학기술원 물리학과

A VIEW OF PLASMA MOTION OF HALL EFFECT THRUSTER WITH PARTICLE SIMULATION

J. J. Lee^{1†}, S. I. Jeong¹, W. Choe², J. S. Lee², Y. B. Lim²,
M. H. Seo², and H. M. Kim¹

¹Satellite Technology Research Center, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

²Department of Physics, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

E-mail: jjlee@satrec.kaist.ac.kr

(Received September 20, 2007; Accepted October 10, 2007)

요 약

전기 추진시스템은 저렴한 개발비와 높은 신뢰성을 제공하는 추진 장치로 많은 분야에서 응용되어 왔다. 특히 최근에 발사된 SMART-1과 MUSES-C는 우리에게 시사하는 바가 크다. 각각 European Space Agency(ESA)와 Japan Aerospace Exploration Agency(JAXA)에서 개발한 행성 탐사선으로, SMART-1은 달 탐사를 목적으로 하고 MUSES-C는 소행성 Itokawa의 토양을 채취해오는 것을 목적으로 한다. 이 두 탐사선에는 각각 Hall effect thruster와 Micro wave ion engine이 탑재되었는데, 작고 저렴한 비용의 탐사선을 이용해서 충분히 행성 탐사가 가능하다는 좋은 선례를 남겼다. 현재 개발되고 있는 과학기술위성 3호(STSAT-3)에도 전기추진 장치가 탑재되는데, SMART-1에 탑재되었던 것과 유사한 Hall effect thruster가 인공위성연구센터와 KAIST 물리학과와 GDPL과 공동으로 개발되고 있다. 성능이 좋은 전기 추력 장치를 개발하기 위해 추력기 내부에서 발생하는 플라즈마의 물리적 특성을 파악하는 것은 매우 중요한 일이다. 이 논문에서는 이러한 플라즈마의 특성을 모사하는 방법으로 Particle In Cell 모사와 더불어 독립적인 개개 입자의 운동을 기술하는 입자모사(particle simulation)를 이용하는 방법을 제시하고자 한다. 이러한 접근 방법은 실제 전기추력장치를 설계하고 실험하는 담당자에게 플라즈마 운동에 대한 명료한 지식을 제공해 줄 수 있을 것으로 생각된다.

ABSTRACT

Electric propulsion has become a cost effective and sound engineering solution for many space applications. The success of SMART-1 and MUSES-C developed by European Space Agency (ESA) and Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) each proved that even small spacecraft could accomplish planetary mission with electric propulsion systems. A small electric propulsion system which is Hall effect thruster like SMART-1 is under development by SaTReC and GDPL (Glow Discharge Plasma Lab.) in KAIST for the next microsatellite, STSAT-3. To achieve optimized propulsion system, it is very necessary to understand plasma motions of Hall effect thruster.

[†]corresponding author

In this paper, we try to approach comprehensive plasma model with the particle simulation complementary to Particle In Cell (PIC) simulation. We think these two different approaches will help experimenters to optimize Hall effect thruster performances.

Keywords: satellite, electric propulsion, particle simulation

1. 서 론

Hall effect thruster는 $E \times B$ effect에 의해 전자는 챔버 안에 포획시키고 이온은 전기장에 의해 가속시키는 전기 추력 장치다. 1960년대부터 연구되기 시작하였는데, 서구권에서는 별다른 관심을 끌지 못하고 연구가 중단되었지만, 구소련에서는 활발히 연구되었다. 지금까지 100여기가 넘는 Hall effect thruster가 개발되어 소련의 위성 탐재된 것으로 알려져 있다. 1990년대 소련의 붕괴 후 서구 과학자들은 소련에서 개발한 Hall effect thruster의 성능에 대해 의구심을 가졌지만, 지금은 서구권에서도 많은 정지궤도 위성에 이 thruster가 장착되어 있으며, ESA에서 개발한 달탐사선 SMART-1에 탑재되어 성공적으로 임무를 수행하였다(Kozubskii 2003). 그리고 최근 시작한 과학기술위성 3호에 이러한 Hall effect thruster가 개발되어 탑재될 예정으로 있다.

Hall effect thruster의 장치 구성은 간단하지만, 이것에 의한 플라즈마의 동력학은 아직 잘 이해되고 있지 않다. 이것은 우리가 플라즈마를 이해하기 위해 사용하는 두 가지 방법, 즉 거시적인 방법으로 플라즈마를 유체로 해석하는 방법과 개개의 입자적 특성을 파악하는 방법 모두 실제 상황에 대입하는데 문제점을 갖고 있기 때문이라고 할 수 있다. 최근에는 이 두 방법의 중간단계라고 할 수 있는 PIC(Particle In Cell) 모사를 통해 Hall effect thruster의 최적화된 조건을 찾아 보려는 노력이 시도되고 있지만, 현재 어떠한 방법으로도 실제 플라즈마 운동을 완벽하게 모사할 수 있는 기법은 개발되어 있지 못하며 전기추력장치의 성능을 향상시키기 위해서는 무엇보다 추력기를 개발하는 실험자가 플라즈마의 운동에 대한 폭 넓은 이해를 갖고 다양한 시도를 통해 최적화 방법을 찾는 것이 최선의 방법이라고 생각한다. 이러한 믿음의 연장선상에서 이 논문에서는 PIC 모사와 함께 각각의 입자 모사(particle simulation)를 통한 접근 방법이 어떻게 Hall effect thruster의 원리를 이해하는데 적용될 수 있는지에 대해 논하고자 한다.

2. HALL EFFECT THRUSTER의 동작 원리

Hall effect thruster의 구조는 매우 간단하다. 몇 개의 자기극(magnetic pole)을 이용하여 지름(radial) 방향의 자기장을 만들어 준다. 그리고 자기장과 수직인 축 방향으로 전기장을 걸어 주면 전자들은 자이로(gyro) 반지름이 작기 때문에 $E \times B$ 표류(drift)에 의해 그림 1에서 보인 것과 같이 원 운동을 하게 된다. 전자들은 이런 원운동을 하면서 연료로 공급된 중성종 입자들과 충돌하여 이들을 이온화 시킨다. 이렇게 생성된 이온들은 자이로 반지름이 크기 때문에 $E \times B$ 표류 운동을 할 수 없고 전기장에 의해 가속되어 분사된다(Kim 1999). 따라서 이론적으로 분사되는 이온의 속도는 축 방향으로 걸어준 전압의 세기에 의해 결정된다.

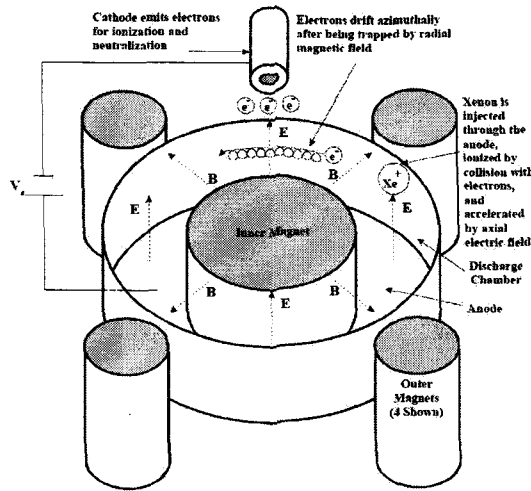


그림 1. 네 개의 outer magnetic pole과 한 개의 Inner magnetic pole로 구성된 Hall effect thruster의 개념도(Gulczinski 1999).

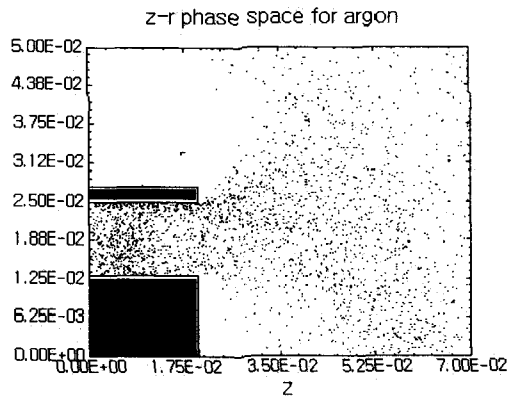


그림 2. 상용 code인 OOPIC pro를 이용하여 Hall effect thruster에서 연료가 분사되는 것을 모사한 그림.

3. PIC(Particle In Cell) 모사에 의한 HALL EFFECT THRUSTER 분석

Hall effect thruster를 개발하는데 있어서의 최종 목표는 효율이 뛰어난 전기 추력 장치를 만들기 위한 최적화된 조건을 찾는 것이다. 이러한 최적화 조건은 끊임 없는 실험을 통하여 이루어 지지만, 컴퓨터를 이용한 모사 실험을 이용하여 보다 효과적으로 thruster의 성능 향상을 도모할 수 있다. 문제는 plasma를 완벽하게 모사할 수 있는 모델이 없다는 것이다. 입자 하나하나를 미시적으로 관찰하면 가장 좋겠지만 수 많은 플라즈마 입자를 이렇게 모사하는 것은 현실적으로 불가능하다. 그나마 실제 플라즈마 상태를 유사하게 모사할 수 있다고 여겨지는 것이 모사하고자 하는 계를 여러 개의 세포(cell)로 나누어서 세포 단위로 만들어 지는 물리 parameter를 적용하여 플라즈마의 운동을 관찰하는 것인데, 이 논문에서는 상용으로 개발된 OOPIC pro code를 이용하여 모사 실험을 수행하였다.

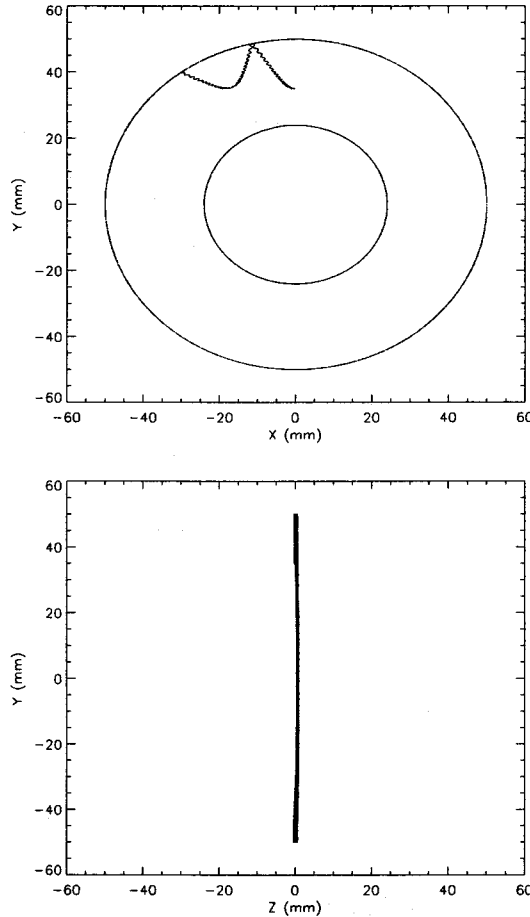


그림 3. 입자 모사를 통하여 전자 한 개의 운동을 모사한 결과. X, Y 평면에서 나타낸 결과(위)와 Y, Z 평면에서 나타낸 결과(아래). 전기장은 Z축을 따라 존재고 자기장은 XY 평면상에 존재 한다.

그림 2는 그 결과를 보여 주고 있다.

이 모사 실험에서는 챔버의 바깥 쪽 지름이 50mm, 안 쪽을 25mm라고 가정하였다. 자기장은 지름 방향으로 200Gauss 세기로 존재하며 양극(anode)에는 150V의 전압이 인가된 상황에 대해 모사 실험을 수행하였다. 모사 결과 중성종 기체로 사용된 아르곤(argon)이 전기장에 의해 가속되며 분사 되는 모습을 그림 2에서와 같이 확인할 수 있었다.

4. PARTICLE SIMULATION을 통한 HALL EFFECT THRUSTER 고찰

PIC 모사 방법이 플라즈마의 상태를 가장 가깝게 모사할 수 있는 모델로 알려져 있지만, 이러한 모사 실험이 실제 실험자에게 물리적 영감을 주고 이것을 통하여 이상적인 전기 추력 장치 개발에 일조할 수 있는가는 또 다른 문제이다. 실제 실험 결과와 모사 실험이 서로 다를 때 우리는 code의 부정확성을 의심하게 된다. 이 논문에서는 PIC 모사와 함께 단순하고 이상적인 상황에서 한 개의 전자

가 어떠한 운동을 하는지 입자 모사를 이용하여 살펴 보았다. 이러한 입자 모사는 단순히 자기장과 전기장에 의한 다음의 운동 방정식을 푼 것으로 정확한 입자의 운동을 기술하게 된다.

$$m \frac{dv}{dt} = q(\nu \times B + E) \quad (1)$$

물론 수 많은 입자들로 구성된 실제 플라즈마 계에서 이러한 이상적인 조건은 더 이상 유효하지 않지만, 적어도 실험자에게 단순하고 직관적인 영감을 줄 수 있다고 생각한다.

모사 실험을 위해 우선 바깥쪽 지름이 50mm이고 안쪽 지름이 26mm인 원통형 챔버를 가정하였다. 자기장은 지름 방향 성분만 존재하고, 전기장은 축방향으로 1000V/m가 존재한다고 가정하였다. 이러한 계에 1eV의 에너지를 갖는 전자가 입사할 경우 어떠한 운동을 하는지 관찰하였다. 그 결과를 그림 3에 나타내었다.

이러한 입자 모사가 말해주는 결과는 앞에서 설명한 것과 같이 전자들이 $E \times B$ 표류에 의해 챔버 안에서 이상적인 원운동을 하는 것이 아니라, 바깥쪽 챔버 벽과 충돌하여 챔버 벽을 따라 운동하고 있다는 것이다. 이렇게 입자들이 바깥으로 나가려고 하는 현상은 원심력에 의한 것으로 생각된다. 이러한 전자의 운동은 실제 중성종 입자와 충돌할 수 있는 기회를 줄여주기 때문에 실제 Hall effect thruster를 설계할 때 이러한 점이 고려 되어야 한다.

5. 결 론

만일 Hall effect thruster에 의한 플라즈마의 운동을 완벽하게 모사할 수 있는 모델이 개발된다면, 이 모델을 바탕으로 가장 효율적인 전기 추력기의 조건을 쉽게 찾을 수 있을 것이다. 그러나 아직 이러한 모델은 존재하지 않으며 따라서 전기추력기의 성능을 향상시키기 위한 노력들이 전세계적으로 계속되고 있다. 이러한 어려움에도 불구하고 플라즈마의 동역학을 이해하는 것은 우수한 성능을 갖는 전기추력기를 개발하는 것과 직결된 문제이다. 따라서 보다 다양한 모사와 실제 실험 조건을 이용하여 조금씩 전기추력기 플라즈마에 대한 이해도를 높이는 것이 매우 중요하다. 이 논문에서 제시한 두 가지 모델은 실제 전기 추력기를 설계하는 사람에게 보다 유용한 접근 방법을 제시해 줄 것으로 생각한다.

감사의 글: 이 논문은 과학기술위성 3호 ‘홀 추력기 추진계 개발’ 과제의 지원을 받아 작성되었으며 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- Gulczinski, F. S. 1999, Ph.D. Thesis, University of Michigan
 Kim, S. W. 1999, Ph.D. Thesis, University of Michigan
 Kozubskii, K. N., Murashko, Yu. V. M., Rylov, Yu. P., Trifonov, V., Khodnenko, V. P., Kim, V., Popov, G. A., & Obukhov, V. A. 2003, Plasma Physics Reports, 29, 277