소형위성의 궤도 천이 및 보정을 위한 홀 방식 전기추력기의 수치모사

선종호*,** · 이종섭** · 임유봉** · 최원호** · 이해준***

Numerical simulation of a hall thruster for orbit transfer and correction of small satellites

Jongho Seon*,** · Jongsub Lee** · Yubong Lim** · Wonho Choe** · HaeJune Lee***

ABSTRACT

A two-dimensional Particle-In-Cell (PIC) simulation of a Hall thruster is presented. The thruster is being developed for orbit transfer and correction of a small satellite. Preliminary investigation of the simulation result finds well separated acceleration and ionization layers. The simulation further shows that collisional ionization of the xenon neutrals allows sufficient acceleration of the ionized plasmas that is adequate for the intended correction and transfer of small satellite orbits. Anticipated performance of the thruster based upon the present results will be calculated

초 록

소형 위성용 궤도천이 및 보정을 위한 홀 방식 전기추력기의 초기 설계를 위한 2-D Particle-In-Cell (PIC) 수치모사 (Simulation) 결과를 분석하였다. 수치해석에 의한 결과를 분석해 본 결과 주입된 중성 Xe Gas는 전자와의 충돌을 통해 이온화 된 후 가속지역을 통과하게 되며, 이들 두 지역은 추력기 채널에서 잘 분리되어 존재 하는 걸로 나타났다. 또한 본 해석을 통하여 본 논문에서 고려된 추력기가 원래의 임무인 소형위성의 궤도 천이 및 보정을 수행할 수 있는 충분한 추력과 비추력을 갖출 수 있는 것으로 판단된다.

Key Words: Electric Propulsion (전기추력기), Small Satellite (소형위성), Orbit Transfer and Correction (궤도천이 및 보정)

1. 서 론

우리나라는 우주 분야의 집중적인 투자로 다목적 실용위성 1호, 우리별 1, 2, 3호, 과학위성 1호등을 보유 운영하였으며 향후 10년 동안 10기 이상의 위성을 추가로 발사할 예정이다. 정부주도 우주기술개발의 성과로 저궤도 지구관측위성 위성인 MACSAT (2006년 하반기 발사 예정)의 상용화도 이루어졌다[1].

* (주)쎄트렉아이 우주기술연구소
** 한국과학기술원 물리학과
*** 부산대학교 전자전기정보컴퓨터공학부
연락저자, E-mail: jhseon@satreci.com

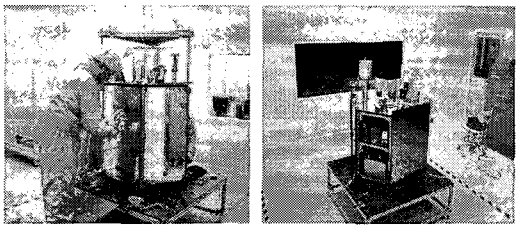

Fig. 1 저궤도지구관측위성 MACSAT

소형위성 기술은 향후 편대비행 (Formation Flying) 이나 위성군 (Constellation)등의 "분산화"를 통하여 고난이도의 임무를 수행할 수 있도록 발전할 것이며 소형위성 (200-300 kg)용 전기 추력기는 우리나라가 보유한 소형위성 기술의 발전에 필요한 핵심 부품이다.

지금까지 주로 사용된 추력기는 화학식 추력기로써 구조가 간단한 단일추진제 방식과 추력 레벨이 비교적 높은 이원추진제 방식이 있다. 이들 추력기는 높은 추력 (Thrust)을 낼 수 있고 비교적 간단한 장점이 있으나 낮은 비추력 (Specific Impulse)에 기인하여 연료의 소모가 많아 무게나 부피에 제약을 많이 받는 소형위성에는 부적합 하다. 위성의 궤도 보정을 위한 임무 (△V=200-500 m/s)에서 전기 추력기는 화학식 추력기에 비해 연료 사용량을 10-50 kg 까지 절약해 주고 이는 탑재체 (Payload)의 수용능력을 증대시키는 효과를 낼 수 있다. 본 논문은 소형위성의 궤도를 보정하고 천이시킬 수 있는 용도의 추력기 종류 중 소형위성에 가장 적합하다고 판단되는 홀 (Hall) 방식 전기추력기의 설계를 위한 수치해석에 관한 연구이다. 제 2장에서 홀 추력기의 작동원리 및 수치모사에 대한 내용을 기술하고 제 3장에서는 2장의 수치해석을 통하여 얻어진 초기 결과에 대한 간단히 논의하겠다.

2. 본 론

2.1 홀 추력기의 동작원리

홀 추력기는 크게 추력부, 전력부 및 연료부로 구성된다. 전력부는 태양 전지판에서 발생한 전기를 대전된 입자를 가속시켜주는 전기적인 힘으로 바꾸는데 사용되며, 연료부는 추력기에 필요한 연료를 저장하고 제어 공급해 주는 기능을 수행한다. 추력부는 공급된 전기와 연료를 바탕으로 실제 추력을 발생 시킬 수 있는 기능을 구현해 주는 장치로 다음의 항목으로 구성된다.

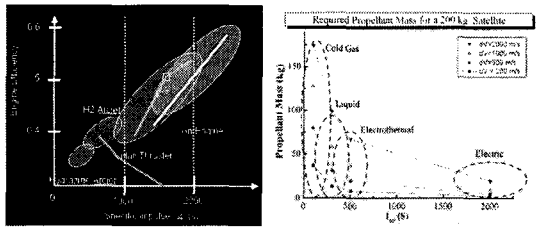

Fig. 2 추력방식에 따른 비추력과 소형위성의 연료 소모량의 비교

- 양극 (Anode): 중성 Gas인 Xenon을 공급해 주는 역할을 하며 약 +300V의 전압이 인가된다. 이 전압은 충돌 이온화를 거쳐 생성된 Xe 이온을 가속해 주는 기준 전압이다.
- 음극 (Cathode): 가열된 Heater를 통하여 열전자 (Thermal Electron)를 방출하며, 여기서 방출된 전자의 일부는 양극에 가해진 +전압에 반응하여 가속되며, 양극에서 방출된 중성 Xe Gas와 충돌하여 추력을 발생시키는 Xe+를 발생시키는 주요 역할을 한다. 주로 Hollow Cathode형태를 사용한다.
- 가속 Channel (Acceleration Channel): 양극을 기준으로 하여 Xe+가 진행하는 방향으로 형성된 물리적 공간으로 중성 Gas인 Xe의 이온화와 이온화된 Xe+ 가 가속되는 물리적 공간이다. 보통 가속 Channel의 벽은 Xe+등의 충돌로 발생되는 이차방출전자를 줄일 수 있는 물질로 선택하여 가공한다.
- 전자석 (Magnet): 홀 추력기가 동작하기 위해서는 가속 채널 및 그 주변의 자기장의 형태가 매우 중요하며, 홀 추력기의 전자석은 전자의 포획시간 (Trapping Time)을 늘려서 많은 중성 Xe가 이온화 될 수 있도록 설계되어야 한다.

홀 추력기 추력부의 물리적 특징은 그림3과 같다. 음극에서 나온 전자는 양극에 가해진 양전압

을 보고 가속부 채널을 지나 양극 쪽으로 이동하게 되고 양극에서 방출된 중성 Xe Gas와 충돌을 통해 이온화가 이루어진다. 이온화된 양이온은 순차적으로 양전압에 의해 양극의 반대쪽으로 가속되게 되며, 이 가속을 통해 위성은 추력을 얻을 수 있다. 가속 채널 내부의 물리적인 구조는 크게 이온화 지역 (Ionization Zone)과 가속화 지역 (Acceleration Zone)으로 구성되며 이들 두 지역은 분리되어 채널에 존재한다. 홀 추력기가 동작하기 위해서는 양극에 가까운 쪽으로 이온화 지역이 형성되고 채널의 끝 부분에 가속화 지역이 존재하여야 한다.

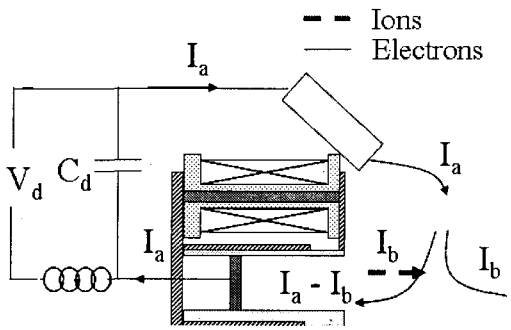

Fig. 3 전기 추력기 가속부의 물리적 특징

2.2 XOOPIC을 이용한 수치모사

본 논문에서 수행한 전자 및 이온의 운동 수치해석을 하기 위해서 Particle-In-Cell (PIC) 수치해석이 가장 적합하다고 판단하였으며 이를 위해 UC, Berkeley가 개발한 XOOPIC을 이용하여 설계를 진행하였다. XOOPIC의 주요 특징은 다음과 같다 [Verboncoeur et al. 1995, Computer Phys. Comm. Vol. 87, 199-211].

- Object Oriented PIC Code with XGRAFIX
- 2-D Relativistic EM PIC code
- 사용자의 다양한 경계조건 및 초기조건을 최소한의 Code 수정을 통해 수용
- Leap Frog방식을 통한 TM and TE fields advance

XOOPIC을 이용하여 전기추력기를 simulation하기 위해서는 추력기의 Geometry를 입력하고 이를 설계에 반영하여야 하는데 다음과 같은 Modeling을 통해 추력기를 모사하였다. 아래의 그림에서처럼 홀 추력기를 4.5 cm x 5 cm의 크기로 모델링하고 각각 0.1cm x 0.1 cm의 cell로 나누었다. 따라서 전체 simulation cell의 수는 45 x 50 = 2250개 이다.

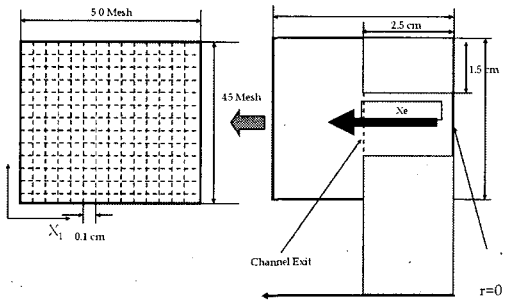

Fig. 4 홀 추력기 채널의 모델링

본과제에서 사용한 XOOPIC 수치해석의 초기조건은 다음과 같다.

- B-field (2.3의 계산을 통해 사용)
- Cartesian Coordinate
- Initial Plasma Density = 1×10^{17} ($/m^3$)
- # of Real Plasma/ # of Simulation Particle= 1×10^7
- Neutral Density = $2.5 \times 10^19 \sim 2.5 \times 10^{20}$ ($/m^3$)
- # of Simulation Grids = 50 × 45
- Simulation $\Delta t = 1 \times 10^{-12}$ s ($\omega_p e \sim 1.8 \times 10^{12}$)
- # of Particles / Cell = 50 (intial total # of particles ~ 10^5)
- $M_{xe} = 100\ M_e$
- $T_e = T_b = 3$ eV, $T_i = 0.1$ eV
- Beam Current = 0.5A

2.3 자기장 계산

홀 추력기의 설계에 있어 고려해야 할 사항 중 가장 중요한 것은 자기장의 구조 및 세기이다. 3차년도 까지 계속될 추력기 개발의 전자기장 해석의 시작으로 Poisson 코드를 이용한 전산모사를 통해 SPT-100 및 설계될 홀 추력기의 자기장의 구조를 계산해 보았다. 수치해석을 통해 구한 추력과 비추력을 이미 진행된 다른 그

룹의 연구결과와 비교해 봄으로써 모델링의 타당성을 조사하기 위해 홀 추력기로 잘 알려진 SPT-100을 선정하여 해석해 보았다. SPT-100은 그림 5 (a)와 같이 내경 7 cm, 외경 10 cm의 방전채널을 가지고 있으며, 플라즈마가 발생하는 방전채널의 외부에 위치한 네 개의 코일과 내부 중앙에 있는 하나의 코일이 자기장을 인가하는 구조로 알려져 있다. 조사한 문헌에서 자세히 알려지지 않은 코일들의 위치와 모양, 코일의 권선수 및 전류, 투자율이 높은 코어 부분과 외부 틀의 모양을 바꾸어 가며 그림5 (b)와 같이 잘 알려진 SPT100의 자기장 구조와 같게 되도록 Poisson 코드를 이용하여 전산모사를 수행하였다.

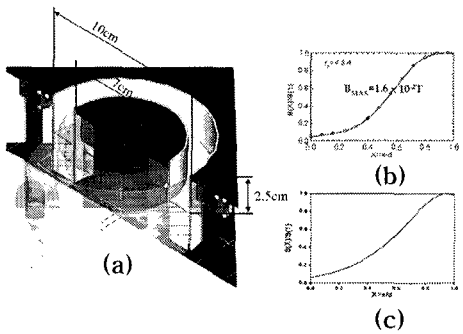

Fig. 5 (a) SPT100 홀 추력기의 구조, (b) 논문을 통해 알려진 SPT100의 BR (자기장의 반경방향 성분)세기의 축 방향 분포. (c) Poisson 코드를 이용한 SPT100의 BR의 축 방향 분포

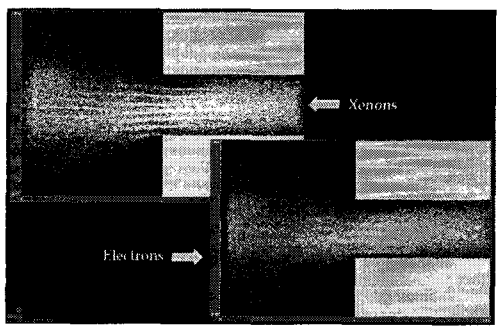

Fig. 6 XOOPIC으로 계산한 대전입자의 공간분포 ($t=7.9 \times 10^{-8}$s)

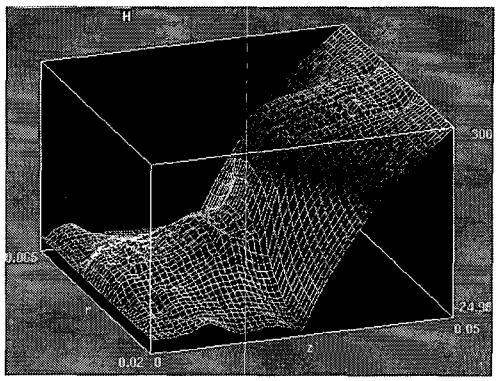

Fig. 7 XOOPIC으로 계산한 정전기 Potential ($t=7.9 \times 10^{-8}$s)

3. 결 과

본론에 기술한 내용을 바탕으로 XOOPIC 수치모사를 수행한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다. 아래의 결과는 3.2 GHz Clock 및 1GB Memory를 보유한 Pentium CPU를 장착한 표준 PC의 CPU Time을 약 3일 정도 사용하였을 때 얻어진 결과이다. Figure 6 및 7에 대전입자의 공간 분포와 정전기 전압 (Potential)의 결과를 요약하였다. 여기서 추력기의 성능을 예측하는 주요 변수인 추력 및 비추력은 수치모사 지역 중 음극에 해당하는 좌측 경계면을 통과하는 입자들을 기준으로 하여 계산하며, 계산을 결과를 분석한 결과 비추력 > 1500 s, 추력 > 10 mN에 해당하는 결과를 얻을 수 있으며, 이는 추력기의 목표 성능에 준하는 결과이다.

참 고 문 헌

1. B. J. Kim et al., MACSAT-A mini satellite approach to high resolution spae imaging, USU 17th Small Sat. Conference 2003.
2. Verboncoeur et al. 1995, Computer Phys. Comm. Vol. 87, 199-211.