

인공위성용 홀 추력기의 중성기체에 대한 분자동역학 시뮬레이션

송인철 · 배효원 · 박정후 · 이호준 · 이해준*

부산대학교 전자전기공학과, 부산 609-735

(2010년 2월 18일 받음, 2010년 3월 16일 수정, 2010년 3월 18일 확정)

소형위성의 추력시스템으로 사용되어지는 홀 추력기의 중성 기체 시뮬레이션을 수행하였다. 홀 추력기의 채널 내부에서의 난 반사효과 및 초기 가스의 온도, 그리고 채널의 길이 등을 변수로 하여 계산되어진 밀도, 압력, 속도, 온도를 분석 하였다. 시뮬레이션에서 얻어진 결과를 통해 홀 추력기의 방전 시뮬레이션의 정확성을 높이는 동시에 실제 시스템의 이해에 기여할 것으로 예상되어 진다.

주제어 : 홀 추력기, 중성입자, 분자동역학 시뮬레이션

I. 서 론

소형위성의 궤도 보정 및 천이에 사용되는 추력시스템으로 홀 추력기가 가장 적합한 것으로 알려져 있다 [1]. 홀 추력기는 화학적 연소에 의한 추력기에 비해 낮은 추력(thrust)을 가지 나 1,000~2,000 (s)의 높은 비추력(specific impulse)을 가지고 있어 인공위성의 장시간 임무수행에 적합한 시스템이라 할 수 있다. 현재 러시아에서 가장 많은 홀 추력기 탑재 위성을 보유하고 있으며, 2000년대 들어 미국 및 유럽에서 사용이 시작되고 있다 [2,3].

홀 추력기의 원리는 전기장과 자기장이 수직할 때 전자가 E×B drift를 통해 방위각 방향으로 움직이게 함으로써 전자를 구속시키는 홀 효과(hall effect)를 이용한 것이다. 채널 내에 구속된 전자는 중성입자와 비탄성 충돌을 하게 되고, 충돌에 의해 발생된 이온이 전기장에 의해 채널 외부로 가속되어 추력을 얻게 된다. 이때 추진제로 Xenon 가스가 사용되는데, 입자의 질량이 크고 이온화 에너지가 낮다는 이점이 있다. 즉, 입자의 질량이 크면 이온이 자기장의 영향을 거의 받지 않으므로 전기장에 의해서만 가속 될 수 있게 된다. 그리고 낮은 이온화 에너지는 높은 방전 효율을 가질 수 있게 해준다. Fig. 1은 홀 추력기의 개략적인 모습이다. 양극은 300 (V)의 전압이 인가되고 가스 주입구가 위치하게 된다. 주입된 가스는 채널을 통해 외부로 분출 되어 지고 음극에서 방출 된 전자와

충돌하여 플라즈마를 생성시킨다. 이때, 채널의 끝부분에 반 지름 방향의 자기장이 형성되어 전자를 구속하게 된다. 생성된 이온은 전기장에 의해 가속되어 추력을 발생시킨다 [4-7].

홀 추력기는 구조와 동작 조건에 따라 매우 민감하게 반응하는 장치이기 때문에 이에 따른 면밀한 연구가 요구되어진다. 특히 홀 추력기의 기초 연구로서 중성입자의 분포 및 특성을 파악하는 것이 중요하다 [8]. 왜냐하면 정확도 높은 중성입자 프로파일을 통해서 방전 시뮬레이션의 정확도를 높일 수 있기 때문이다. 홀 추력기는 수십 mTorr의 낮은 압력에서 구동되기 때문에 유체 시뮬레이션으로는 모사를 할 수 없는데, 이는 유체 시뮬레이션에서 사용되는 가정이 저압에서는 유효하지 않기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 분자동역학 시뮬레이션을 통해 중성 입자의 특성을 분석하였다.

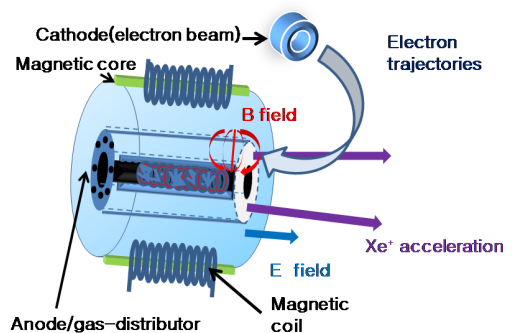


Figure 1. Schematic diagram of Hall thruster.

* [전자우편] haejune@pusan.ac.kr

II. 시뮬레이션 방법

홀 추력기의 분자 동역학 시뮬레이션은 Particle-In-Cell (PIC) 방법을 이용하였다. 그리고 중성 입자의 충돌 확률이 대략 1/~1000의 값을 가지기 때문에 입자간의 Monte Carlo Collision (MCC)은 고려하지 않았다. 시뮬레이션의 time step은 3×10^{-8} (s), 1개의 입자가 5×10^{10} 개의 입자를 대표하도록 설정하였다. 방위각 방향으로 대칭성을 가지므로 2차원 축 대칭 모델을 사용하였다.

가스 주입구에서 분사되는 중성 입자의량은 50 standard cubic centimeter per minute (SCCM)으로 가정하였고, mass flow rate으로 환산하면 4.88 (mg/s)의 값을 가진다. 그리고 주입구에서의 flux는 4.25×10^{23} ($m^{-2}s^{-1}$), 압력은 29.4 (mTorr)이다. 초기에 분출되는 가스의 속력은 300 (m/s)로 하였고, half-maxwellian 분포로 열 운동을 한다고 가정하였다. 분출된 중성입자는 채널내벽에 반사를 하게 되는데 입사되는 입자의 에너지는 보존된다고 가정하였고, 정반사하는 경우와 난반사되는 경우를 모두 고려하였다.

Fig. 2에서와 같이 난반사의 경우 반사되는 각도의 확률을 cosine 분포로 주어 입사되는 각도에 근접할수록 높은 확률을 가지도록 하였다. 그리고 랜덤 함수를 발생시켜 반사되는 각도를 결정하였다.

III. 시뮬레이션 결과

본 연구에서 수행한 내용은 입사되는 가스의 온도를 변화시켰을 경우, 채널의 길이를 변화 시켰을 경우, 그리고 채널내벽에서 정반사와 난반사가 일어나는 비율을 변화시켰을 경우에 대하여 물리량을 조사하였다. 이는 실제 시스템이 가지는 특성들과 비교를 통해 정교한 전산 모사를 하기위한 입력 값으로 사용될 것이다.

Fig. 3은 시간변화에 따른 입자의 변화 양상을 나타낸다. 분출된 입자가 채널내벽에 반사되는 양상과 난반사에 의해 분출구 입구까지 입자들이 분포하게 된 것을 알 수 있다. 그리고 Fig. 3(d)는 정상상태에 이르렀을 때의 분포를 보여준다.

Fig. 4는 주입되는 가스의 온도가 200 (K)인 경우에 대한

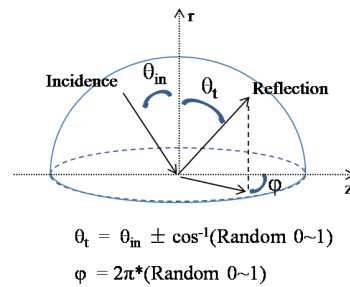


Figure 2. Diffusive reflection angle.

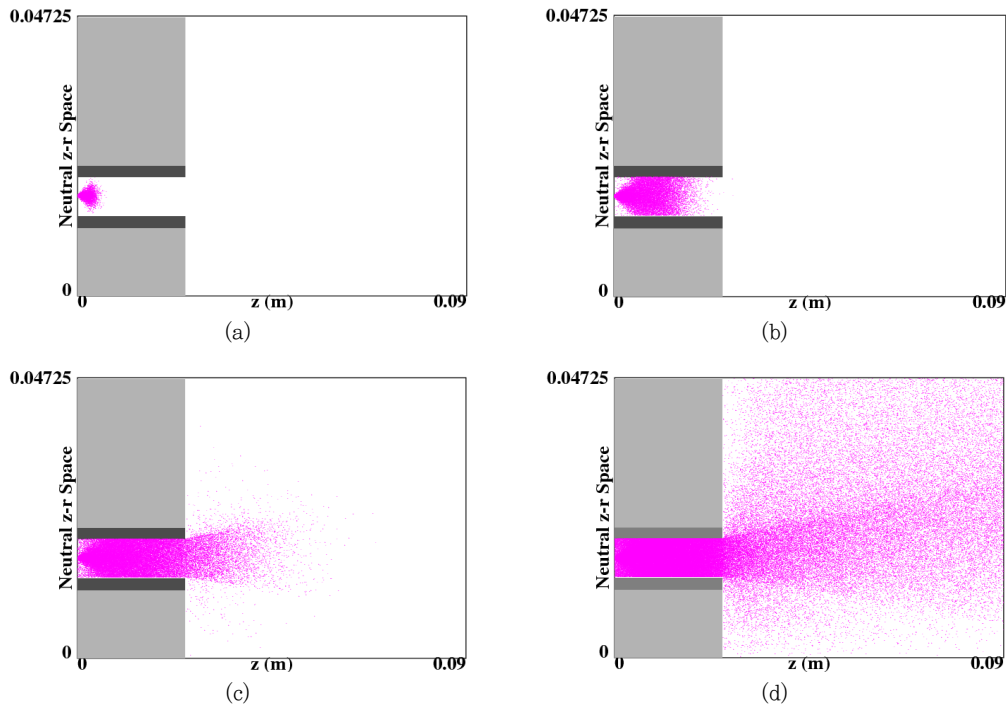


Figure 3. Time evolution of neutral z-r phase at (a) 10 μ s, (b) 40 μ s, (c) 100 μ s, (d) 1.2 ms.

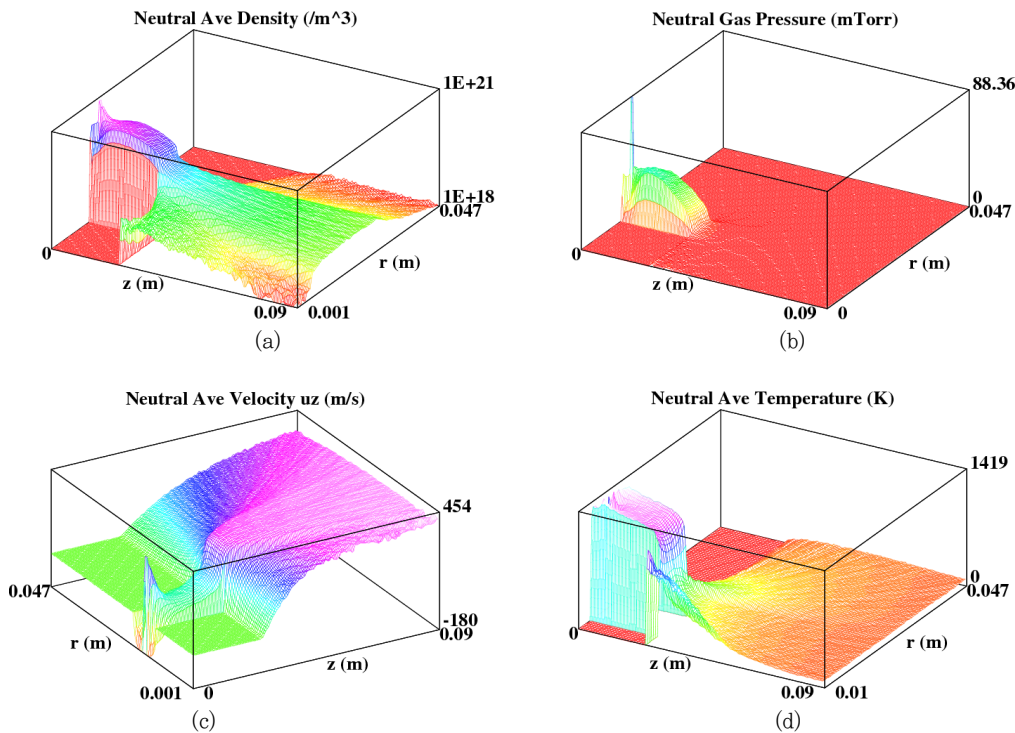


Figure 4. At $T_{init}=200$ (K), neutral (a) density, (b) pressure, (c) z-direction velocity, and (d) temperature.

여 2차원 공간에 분포하는 양을 나타내었다. Fig. 4(a)에서 볼 수 있듯이 밀도는 채널 내에서 $\sim 10^{20}$ (m^{-3}) 정도의 값을 가지고 있고 채널을 통과 하면서 밀도의 감소가 커짐을 알 수 있다. 그리고 Fig. 4(b)에서 채널내의 압력 분포는 대략 ~ 10 (mTorr)의 값을 나타내고 있다. Fig. 4(c)의 Z-방향 평균 속도에서, 난반사의 효과로 인해 채널내의 평균 속도가 감소하였다가 채널을 통과하면서부터 다시 평균속도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 채널에서 Z-방향으로 멀어질수록 다른 방향 성분을 가지는 입자들이 없어지기 때문이며, 초기 분사되는 속도가 300 (m/s)이므로, 열 운동 속도가 대략 150 (m/s)임을 알 수 있다.

채널 내부를 보호하기 위한 유전층으로는 질화 붕소(Boron Nitride)가 사용되어 지는데, 열에 강하고 화학적 안정성이 뛰어난 특성을 가진다. 우선 고려된 것으로, 이 보호층에서 중성 입자가 반사될 때 어떠한 양상을 보이는지를 조사하였다. Fig. 5에서, 난반사가 전체반사에서 차지하는 비율(D)을 변화시켰을 때 큰 변화가 있었다. Fig. 5(a)에서 보이듯이 난반사가 1%만 일어나도 채널내의 밀도가 2배가량 증가하고, 10%이상 증가하였을 때에는 5배가량 증가하는 것으로 나타났다. 이는 난반사를 통해 채널 내에 입자가 머무르는 시간이 증가하였음을 나타내고, 10%이상 난반사가 일어난

경우는 거의 대부분의 반사된 입자가 초기에 얻은 Z-방향 속도를 잃게 되었음을 유추할 수 있다. Fig. 5(b)의 압력 및 Fig. 5(c)의 Z-방향 평균 속도 그리고 Fig. 5(d)의 중성기체 온도는 채널 내에서의 난반사의 효과로 인해 압력과 온도는 증가하고 평균 속도는 감소하는 영향을 준다.

Fig. 6은 분사되는 가스의 온도를 변화시켰을 때의 채널의 중심부에서의 물리량을 나타낸 그림이다. Fig. 6(a)에서, 중성입자의 밀도는 채널 끝부분에서 대략 $T=50$ (K)인 경우와 $T=800$ (K)인 경우가 2배가량 차이를 보이지만 채널 내에서 크게 변화하지 않는다. 초기 가스 온도가 높을수록 Z-방향 열 운동 속도가 큰 값을 가지게 되므로 채널 밖으로 빠져나가는 양이 많아지게 된다. 하지만 이 경우는 채널내 벽에서 난반사 조건을 기본으로 하였으므로 채널 밖으로 나가는 입자의 수가 감소하기 때문에 밀도 차이가 크지 않게 되는 것이다. Fig. 6(c)의 Z-방향 평균 속도에서 채널 내부에서는 속도가 크게 감소하여 밀도가 커지게 되는 원인이 되며 $Z=0.09$ (m)의 시뮬레이션 경계부분에서는 Z-방향의 속도가 큰 입자들이 주로 존재하게 되므로 초기의 분사속도 300 (m/s)와 Z-방향 열 운동 속도가 더해져 초기 가스 온도가 큰 경우에 속도가 큼을 알 수 있다. 그리고 Fig. 6(c)의 온도는 초기 가스 온도의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다

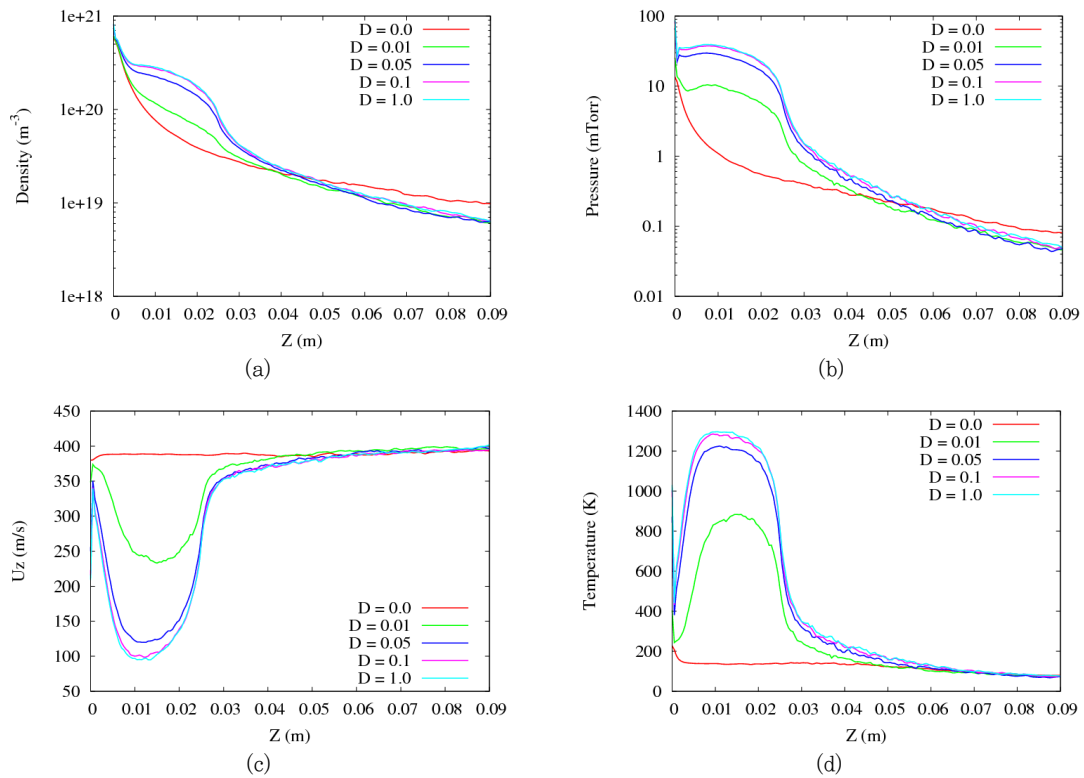


Figure 5. Variation of diffusive reflection ratio (D) : (a) density, (b) pressure, (c) z -direction average velocity, and (d) temperature.

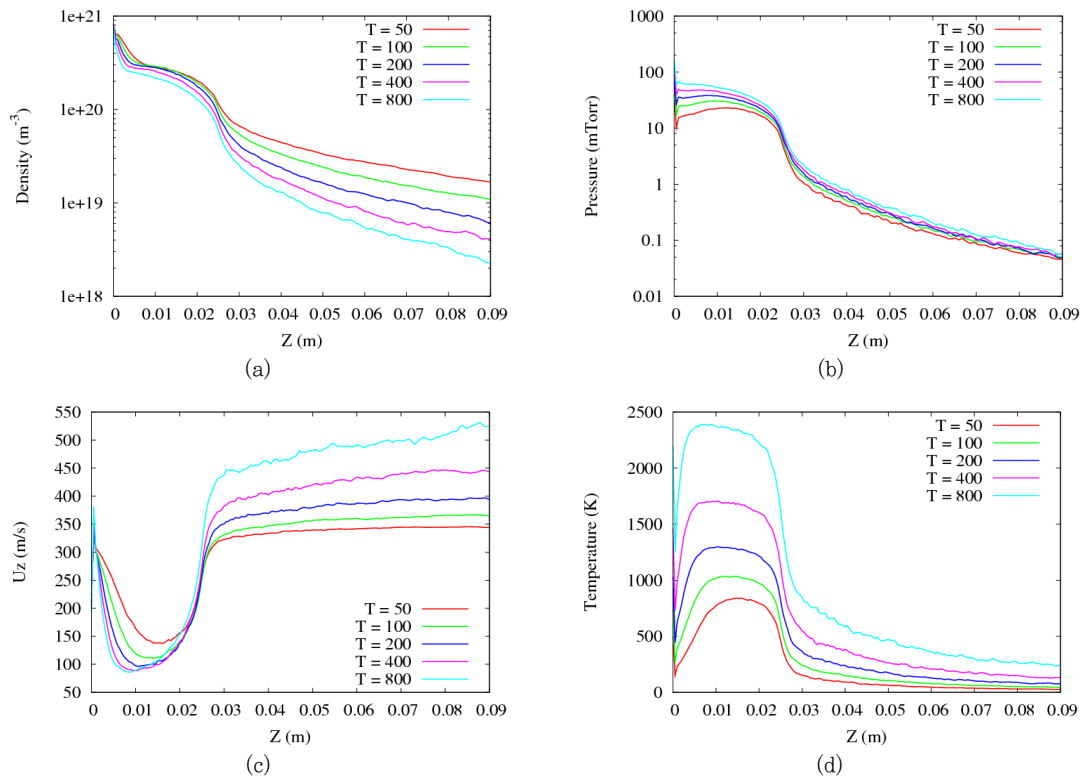


Figure 6. Variation of initial gas temperature : (a) density, (b) pressure, (c) z -direction average velocity, and (d) temperature.

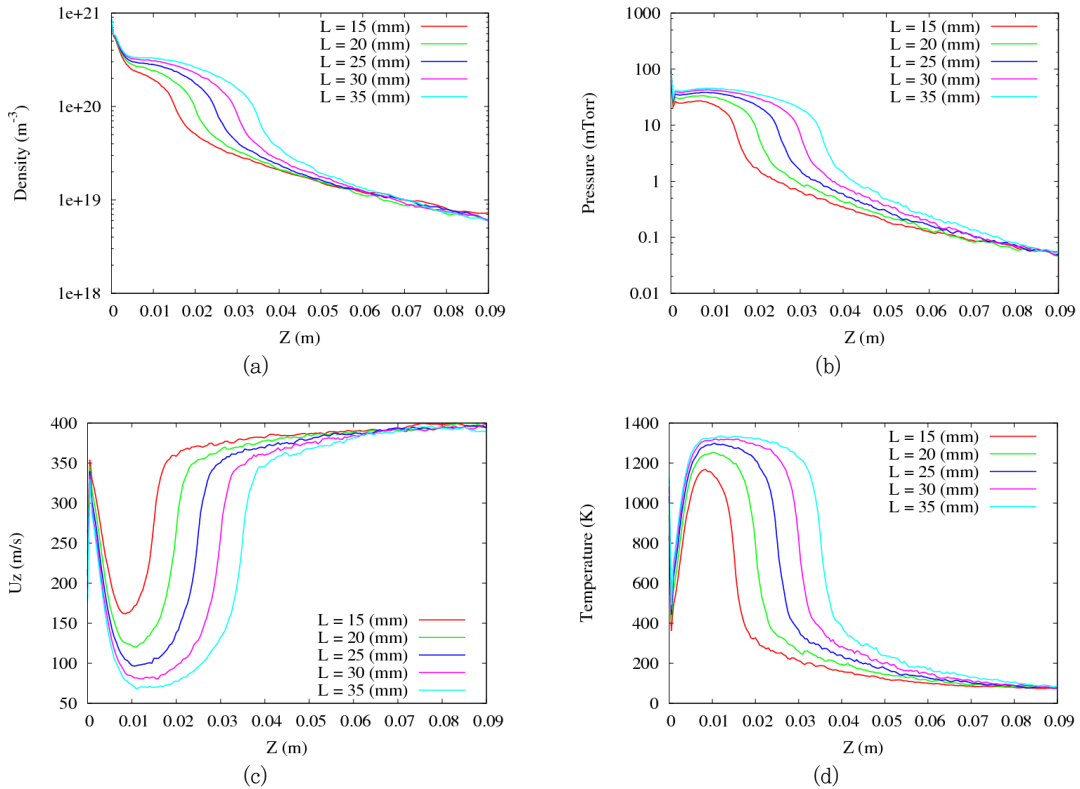


Figure 7. Variation of channel length : (a) density, (b) pressure, (c) z-direction average velocity, and (d) temperature.

기 때문에 실험결과와의 비교가 요구되어진다.

마지막으로, Fig. 7에서는 채널 길이에 따른 물리량 변화를 조사하였다. 채널의 길이에 따라 홀 추력기의 방전 효율이나 성능이 크게 영향을 받기 때문에 채널 길이에 따른 중성입자의 변화도 클 것임을 알 수 있다. Fig. 7(a)에서와 같이 채널의 길이가 변화하더라도 채널 출구 부분에서의 밀도는 거의 비슷하다. 하지만 채널이 길어질수록 채널 내의 밀도는 조금씩 높아진다. 이는 Fig. 7(c)에서와 같이 채널이 길어질수록 채널 내의 Z-방향 속도가 감소함으로써 채널 내에 중성 입자가 머무르는 시간이 증가하기 때문으로 이해할 수 있다. 그리고 Fig. 7(b),(c)의 경우에도 채널 길이의 증가로 인해 압력과 온도가 증가하는 양상을 보인다. 따라서 실제 시스템의 성능 향상을 위해 채널의 길이가 긴 것이 유리하지만 그에 따른 반작용도 존재하므로 적절한 타협점이 요구되어진다.

IV. 결 론

홀 추력기의 중성 기체에 대한 분자 동역학 시뮬레이션

을 수행하였다. 중성기체 시뮬레이션을 통해 얻어진 프로파일은 셀프-컨시스턴스(self-consistent)한 방법으로 방전 시뮬레이션에 적용되어진다. 홀 추력기의 채널 내에서의 난반사, 초기 가스의 온도, 채널의 길이를 변수로 하여 밀도, 압력, Z-방향 평균속도, 가스의 온도를 계산하여 결과를 분석하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 중성입자의 밀도를 높일 수 있는 조건들이 존재하였으며, 실제 시스템의 설계에 도움이 될 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구를 지원해주신 KAIST 최원호 교수님과 경희대학교 선종호 교수님께 감사드립니다.

이 논문은 2007년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2007-331-D00182).

참고문헌

- [1] 선중호, 강성민, 김연호, 전은용, 최원호, 이종섭, 서미희, 한국항공학회지 **37**, 490 (2009).
- [2] 강성민, 김연호, 선중호, 이종섭, 서미희, 최원호, 한국항공학회지 **37**, 496 (2009).
- [3] 이상훈, 서희준, 유성연, 한국진공학회지 **17**, 270 (2008).
- [4] F. Taggogna, S. Longo, M. Capitelli, and R. Schneider, *Computer Physics Communications* **164**, 160 (2004).
- [5] R. Schneider, K. Matyash, O. Kalentev, F. Taccogna, N. Koch, and M. Schirra, *Contrib. Plasma Phys.* **49**, 655 (2009).
- [6] Justin W. Koo and Iain D. Boyd, *Computer Physics Communications* **164**, 442 (2004).
- [7] L. Garrigues, G. J. M. Hagelaar, J. Bareilles, C. Boniface, and J. P. Boeuf, *Physics of Plasmas* **10**, 4886 (2003).
- [8] 홍승수, 와킬 칸, 홍기성, 한국진공학회지 **18**, 403 (2009).

Molecular Dynamics Simulation for the Neutral Particles in Hall Thrusters for Satellite Propulsion

In Cheol Song, Hyo-Won Bae, Chung-Hoo Park, Ho-Jun Lee, and Hae June Lee*

Department of Electrical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735

(Received February 18, 2010, Revised March 16, 2010, Accepted March 18, 2010)

Neutral gas in a Hall-effect thruster in a small satellite is simulated using a molecular dynamics code. Investigated are neutral density, pressure, axial average velocity, and temperature for the variation of diffusive reflection ratio, initial gas temperature, and channel length. Expected through this research are improving of discharge simulation through the neutral simulation and understanding of real system.

Keywords : Hall effect thruster, Neutral gas, Molecular dynamics simulation

* [E-mail] haejune@pusan.ac.kr