

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 45(11), 932-938(2017)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2017.45.11.932

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

Particle-in-cell 기법을 이용한 전자기장내 플라즈마 입자의 거동 해석

한두희*, 조민경*, 신준수*, 성홍계**, 김수겸***

Numerical Analysis on Plasma Particles inside Electro-magnetic Field Using Particle-in-cell Method

Doo-Hee Han*, Min-Kyung Joe*, Junsu Shin*, Hong-Gye Sung** and Su-Kyum Kim***

Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University*

School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University**

Korea Aerospace Research Institute***

ABSTRACT

Particle-in-cell method which blends Eulerian grids and Lagrangian particle is utilized to solve simplified hall-effect thruster. Since this study individually tracks not only neutrons and ions but also electrons, message passing interface(mpi) scheme is adopted for parallel computer cluster. Helical movement of an electron cloud in constant magnetic field is validated comparing with an exact solution. A plasma in radial magnetic field and axial electric field in a reaction cylinder is established. Electrons do double helix movement and are well anchored in a cylinder. Ionization of neutrons by impact with high-speed electrons generates ion particles. They are accelerated by axial electric field, which forms a plume of a plasma-effect thruster.

초 록

플라즈마의 거동을 오일러리안 격자와 라그랑지안 입자를 혼합하여 해석하는 Particle-in-cell 기법을 적용하여 간략화된 홀추력기를 해석하였다. 본 연구는 중성입자, 이온입자 뿐만 아니라 전자도 라그랑지안 기법으로 개별추적 계산하기 때문에 message passing interface 기법을 이용해 대용량 계산이 가능한 병렬클러스터링을 적용하였다. 계산에 앞서 일정한 벡터의 자기장에서 전자군의 나선형 거동을 해석하였고, 절대해와 일치함을 확인하여 코드를 검증하였다. 실린더 내부에 반경방향으로 일정한 자기장과 축방향으로 일정한 전기장을 고정시켜 플라즈마의 거동을 PIC 모델을 이용하여 해석하였다. 반응실린더 내부에 전자가 로렌츠 힘에 의해 이중나선을 그리며 구속되는 현상이 잘 포착되었고, 고속 회전하는 전자와 주입된 중성입자가 충돌하여 이온화 되었고, 대전된 입자가 축방향의 전기장에 의해 급 가속하는 현상 또한 잘 묘사되어 플라즈마의 플룸 거동을 묘사하였다.

Key Words : Particle-in-cell method(PIC), Hall-effect thruster(홀추력기), Ionization rate(이온화율), Eulerian-Lagrangian method(오일러리안-라그랑지안 기법)

† Received : May 12, 2017 Revised : October 27, 2017 Accepted : November 1, 2017

** Corresponding author, E-mail : hgsung@kau.ac.kr

I. 서론

Particle-in-cell 기법은 기본적으로 오일러리안-라그랑지안 기법을 이용한 이상유동(Two phase flow) 해석이다. 오일러리안 기법은 연속체를 해석하는데 주로 사용되며, 격자를 기반으로 계산한다. 이 기법은 수많은 분자들의 거동을 추적 계산할 수 없으므로 분자 군집의 특성, 즉 유체의 점성과 같은 거시적 물성치를 실험적인 방법으로 측정해 유체역학적 모델링에 대입하여 큰 군집 단위를 수치적으로 계산하는 것이다. 이미 많은 이론이 정립되어 전산유체 (Computational fluid dynamics: CFD)에 널리 사용되고 있다[1]. 반면 라그랑지안 기법은 모든 입자단위를 각각 추적하며 계산하기 때문에 각 입자의 물리적인 힘을 계산하면 거동을 매우 정확하게 예측할 수 있다[2]. 따라서 군집 단위의 물리적 특성을 실험적으로 측정하기 어렵거나 모델링이 까다롭지만 그 개수가 유체와 같이 많지 않을 경우 사용할 수 있다. 만약 구분 가능한 입자가 주변 연속체와 힘, 질량을 주고받으며 거동한다면 유체와 입자를 모두 풀어나가며 데이터를 주고받아야 하는데, 이러한 것이 오일러리안-라그랑지안 기법이다. Particle-in-cell (PIC)은 오일러리안-라그랑지안 기법으로 플라즈마 해석 시 사용 가능하다. 이는 연속체인 전자기장을 오일러리안 격자를 사용하여 계산하고 플라즈마 입자는 라그랑지안 기법으로 계산한다.

최근 매사추세츠공대(MIT)에서는 PIC 기반의 플라즈마 추력기 유동 해석의 정확도 향상을 위한 입자 이온화 모델과 전자기장 포텐셜 함수 모델 개선을 수행하고 있으며[3] 미시건대 (University of Michigan)의 경우 홀추력기(Hall Thruster)의 성능 측정에 대한 실험적 연구[4]와 함께 이차원 PIC-MCC 모델을 적용한 홀추력기 내부에서의 이온 거동 해석에 대한 연구가 진행되고 있다[5]. 유럽의 경우도 플라즈마 추력기 개발을 위해 플럭스(flux) 개념의 플라즈마 유동 해석 연구[7]가 진행되고 있다. 중국 베이징 대학에서는 SPT(Stational plasma thruster) 해석을 위해 PIC 모델과 DSMC(direct simulation Monte Carlo)모델을 이용하여 추력기 내부 유동장을 해석 하였다[8]. 국내의 경우 추력기 개발을 위한 연구가 진행되고 있지만[9, 10, 11] 추력기 성능 해석을 위한 수치해석 모델에 대한 연구는 아직 미흡한 상황이다.

본 연구는 홀추력기 내부를 간략화한 형상 및

전자기장 조건하에 PIC 기법을 사용하여 전자, 중성입자 및 양성자의 거동을 해석하였다. 입자 움직임은 전자기장에 의한 로렌츠 힘만을 고려하였다. 많은 입자의 추적계산을 위해 병렬컴퓨팅을 사용하여 연속체 및 입자의 계산을 분산하였다. 코드검증을 위해 자기장 내 주입된 전자의 나선형 거동을 계산하여 검증하였으며, 전자기장이 걸린 간략화된 홀추력기 내부의 전자, 이온 및 중성입자의 거동을 해석하였다.

II. 수학적 모델링

2.1 Particle-in-cell 기법

Figure 1은 PIC 기법의 기본 개념을 도식화한 것이다. 격자는 전자기장 벡터량을 가지고 있고 전하량을 띤 입자는 이에 따라 운동을 한다. 각 입자는 특정 격자에 속해있고 하나의 격자에는 각 입자종류별 개수 및 입자의 총 물리량 등이 저장될 수 있다. 모사하고자 하는 전자 및 이온 입자를 모두 개별 추적하는 것은 현 시대 컴퓨터 하드웨어의 한계로 불가능하기 때문에, 입자간 충돌에 의한 이온화 현상은 추적되는 입자간 실제 거리를 사용하는 것이 아니라 한 격자에 있는 입자의 수밀도를 사용하여 확률적 충돌량을 계산하고 이론식을 통해 이온화율을 계산할 수 있다. 계산상 추적하는 하나의 입자는 전자 또는 이온의 군집체이다. 따라서 계산상으로는 하나의 격자에 5-10 개 정도의 입자가 분포 되더라도 전자, 이온의 수밀도는 수만, 수십만이 될 수 있다.

계산 입자의 속도 및 이동거리는 뉴턴의 제 2 법칙으로 아래와 같이 구해진다.

$$\frac{dV_p}{dt} = \frac{F_p}{M_p} \tag{1}$$

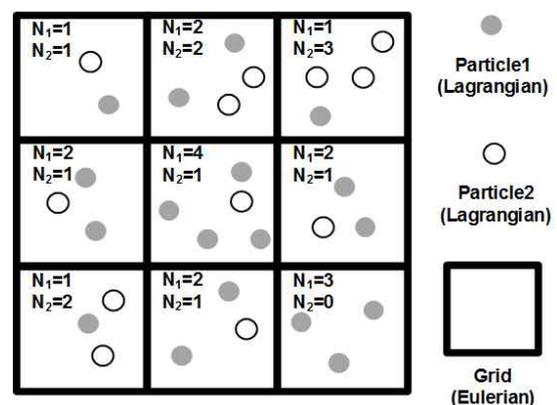


Fig. 1. Schematics of particle-in-cell

$$\frac{dx_p}{dt} = V_p \quad (2)$$

$$F_p = q(E + V_p \times B) \quad (3)$$

V_p , F_p , M_p 및 x_p 는 각각 입자의 속도, 합력, 질량 및 이동거리를 의미한다. 전하를 띤 입자가 전자기장이 걸린 공간 내에서 움직이기 때문에 수식(3)과 같이 로렌츠 힘이 적용된다. 수식 (3)에서 전기장 E의 단위는 v/m 이고 자기장 B의 단위는 T 이다. 입자의 시간 전진은 4차 Runge-Kutta 기법을 이용하여 정확도를 높였다.

중성입자의 이온화는 전자와 충돌로 인해 발생한다. 본 연구는 중성입자의 이온화 확률을 해당 셀 내부의 전자 수밀도를 이용해 계산 하였으며, 모델식은 다음과 같다.

$$P_i = k \frac{3\pi\sigma_r^3}{4V_{cell}} n_{elec/cell} \Delta t \quad (4)$$

여기서 σ_r 는 전자와 중성입자의 유효 충돌반경이며 전자온도[eV]의 함수이다. 즉 입자가 높은 에너지를 가지고 있으면 σ_r 값 또한 증가하여 충돌에 의한 이온화 확률이 증가한다. 하지만 본 연구는 전자온도를 풀지 않고 상수로 고정하였다. V_{cell} 은 해당 셀의 부피이고 $n_{elec/cell}$ 은 해당 셀에 존재하는 전자의 개수이다. k 는 보정 상수이고 Δt 는 물리적 시간 전진 간격을 의미한다. 수식(4)는 전자와 중성입자 모두 라그랑지안 기법으로 개별 추적될 때 적용이 유리하다. 위 충돌확률은 각 중성입자가 주어진 시간간격에서 이온화될 확률을 의미한다. 본 연구의 계산에 사용된 σ_r 의 값은 $3.5e-12$ 이고 상수 k 는 $1e+20$ 이다. 계산에 사용된 시간간격은 $3e-12$ sec 이다. 사용된 상수는 이온화가 적절히 일어나는 임의의 상수를 임시적으로 사용하였으며, 차후 실제 문제를 풀 때는 적절한 값을 이용해야한다. 본 연구는 계산의 간단화를 위해 전자-중성입자의 충돌만 고려하고, 전자-이온, 이온-중성입자 및 이온-중성입자의 충돌은 무시하였고, 차후 연구를 통해 같은 방법을 이용해 충돌모사가 가능하다.

중성입자의 이온화 확률을 계산하는 방법은 두 가지가 있다. 물리적 전진 계산스텝마다 중성입자 파셀에서 이온화 확률만큼의 입자가 이온화되어 분리되는 방법과 파셀 전체가 계산스텝마다 이온화 확률로 변환되는 방법이다. 전자는 계산하는 파셀의 숫자가 적어도 정확한 확률을 적용할 수 있지만 시간 전진 스텝이 작아짐에 따라

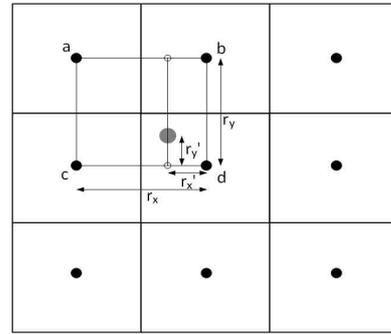


Fig. 2. Particle interpolation for Eulerian source term

매우 많은 이온 파셀이 생성된다는 단점이 있다. 후자는 입자가 일대일로 변환되기 때문에 전자와 같은 문제는 없지만 입자가 충분히 많아야 정확한 확률이 계산된다. 일반적으로 플라즈마는 작은 공간에서 수십만 개 이상의 입자가 발생되므로 본 논문은 후자의 방법을 택하였다.

입자는 격자로부터 전자기장 정보를 읽어 힘을 계산한다. 하지만 격자에 저장된 벡터량은 셀 중앙 위치의 값만 저장된 상태로 입자가 셀의 중앙이 아닌 다른 위치에 있을 때는 주변 셀의 중앙 데이터 들을 사용하여 데이터를 보간 해주어야 한다. Fig. 2는 이해를 돕기 위하여 이차원 격자에서의 선형 보간법을 나타낸 그림이다. 만약 입자가 d 셀의 좌상단에 있다면 그림 상의 a, b 및 c의 격자 중앙 데이터가 추가적으로 필요하다. 각 축 방향으로 선형 보간법을 아래와 같이 순차적으로 적용한다.

$$\phi(ab) = \phi(b) + \frac{\phi(a) - \phi(b)}{r_x} r'_x \quad (5)$$

$$\phi(cd) = \phi(d) + \frac{\phi(c) - \phi(d)}{r_x} r'_x \quad (6)$$

$$\phi(p) = \phi(cd) + \frac{\phi(ab) - \phi(cd)}{r_y} r'_y \quad (7)$$

2.2 병렬컴퓨팅

기존 연구자들은 홀추력기를 모사하기 위해 이온입자만 추적계산 하고 전자는 연속체로 가정하여 오일러리안으로 해석하였다. 하지만 본 연구는 전자의 구체적인 거동을 해석하기 위해 라그랑지안 기법으로 추적하기 때문에 매우 많은 컴퓨터 리소스가 요구된다. 이에 따라 Fig. 3과 같이 CPU 개수에 따라 계산량을 분배할 수 있는 병렬클러스터링을 수행하였다. 계산 도메인을 CPU 개수와 동일한 수의 블록으로 구분하고, 해당 블록 내의 입자만 해당 CPU가 계산한다. 입

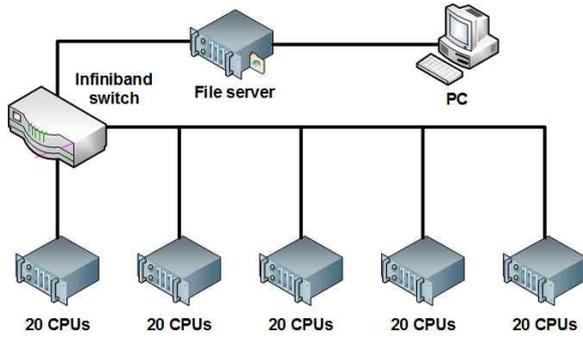


Fig. 3. Schematics of HPC cluster system

자간 통신이 없기 때문에 블록경계면의 격자와 격자의 통신만 수행하고 전 타입스텝에서 블록경계면을 넘어가는 입자만 카운트 하여 이웃하는 블록에 같은 입자 정보를 넘겨준다. 실제 계산에는 총 36개의 CPU가 사용되었고, 종류는 Intel사의 E5-260V4 모델이다. 위 시스템을 사용하여 Fig. 9의 홀추력기 형상 해석을 위해 약 14 시간이 소요되었다.

III. 수치해석 결과 및 분석

3.1 입자 거동의 검증

Figure 4는 z축 방향으로 일정한 방향의 자기장이 걸린 사각 덕트 내에 나선형 거동을 하는 전자군을 나타낸다. 전자군은 원형 면적으로 일정한 속도와 각도로 주입된다. Fig. 4의 왼쪽은 z축 방향으로 일정한 자속이 걸려있고 오른쪽은 위쪽 방향으로 자속이 점점 조밀해지는 경우이다. 자속이 일정하게 걸려있으면 전자는 반경과 피치가 일정한 나선형 거동을 하지만 자기장의 방향은 일정하지만 점진적으로 조밀해지는 오른쪽 결과는 입자가 받는 힘이 강해지면서 나선 반경과 피치가 위로 갈수록 감소한다. 나선직경의 이론적 절대해는 그림의 검정색 점선으로 표시되었으며 수치해와 거의 일치하는 결과를 보인다. 절대해는 Larmor 반경과 비교하였고, 수식 (8)과 같다.

$$r_L = \frac{M_p v_{\perp}}{|q|B} \quad (8)$$

여기서 v_{\perp} 는 초기 입자의 주입 속도의 수직 성분 크기이다. 높이에 따른 Larmor 반경값과 수치해석의 중심 반경값의 결과 비교는 Table 1과 같이 오차 0.5% 이내로 매우 정확하다. 위치에 따른 정확한 전자기장 값을 계산함에

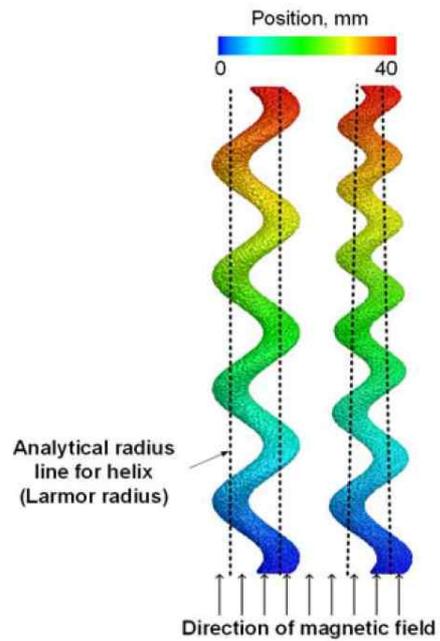


Fig. 4. Helical motion of electrons in a magnetic field

Table 1. Comparison of analytical and numerical result of helix radius

Height [mm]	Uniform B		Incremental B	
	Larmor rad. [mm]	PIC result [mm]	Larmor rad. [mm]	PIC result [mm]
10	2.070	2.0712	1.703	1.7122
20	2.070	2.0720	1.523	1.5329
30	2.070	2.0741	1.343	1.3442
40	2.070	2.0767	1.163	1.1578

도 불구하고 오차가 발생하는 이유는 quasi-steady 가정의 수치적 시간전진을 함에 따라 발생하는 오차이다.

추적 입자는 실제 물리적 입자 하나가 아닌 군집의 대푯값을 나타낸다. 추적 입자에 포함된 실제 입자의 개수를 파셀(parcel) 이라고 하며, 같은 물리량을 계산하더라도 파셀 값을 크게 함에 따라 추적 입자량을 크게 감소시키는 것이 가능하다. 하지만 파셀값에 따라 결과값이 변하면 안되기 때문에 검증을 하였고, 그 결과는 Fig. 5에 표시되어있다. Fig. 4와 같은 조건에서 전자 입자군의 나선형 거동을 계산하였고, 입자의 파셀 수를 1, 2 및 4로 계산하였다. 각 격자에 존재하는 입자의 개수를 누적하여 수밀도 값을 오일러리안 격자에 넣어 계산하였으며, 그림의 평면 컨투어에 표시하였다. Fig. 5는 입자의 파셀수가

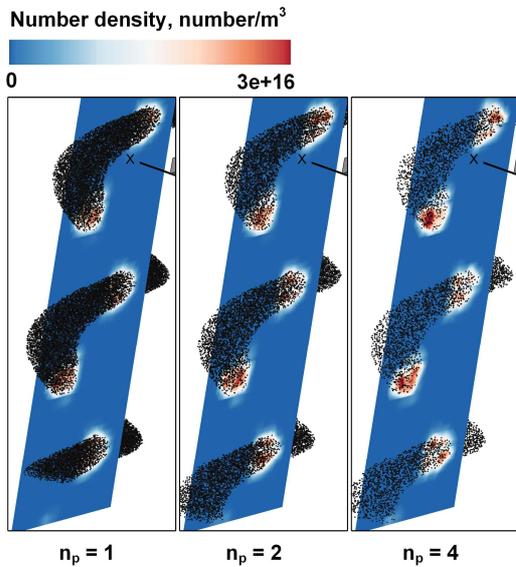


Fig. 5. Particle number density with different parcel number

증가함에 따라 추적 입자가 현저히 감소하지만 권투어에 나타난 전자의 수밀도 값은 유지되는 현상을 보인다. 전자의 거동 또한 파셀수에 영향을 받지 않는다.

3.2 계산 도메인 및 전자기장 형상

홀 추력기는 제논 가스의 중성입자가 반응 실린더 내부로 유입되면 반응 실린더 내부에 구속된 전자와의 충돌로 인해 이온화되며, 캐소드와 아노드로 인해 생성된 전기장에 의해 이온이 급가속하며 반응 실린더를 빠져 나갈 때 생기는 반작용으로 추진하는 추력기이다. 본 연구는 PIC 기법을 이용해 중성입자, 전자 및 이온 입자 모두 라그랑지안 기법으로 추적계산 하는 것을 목표로 한다. 따라서 시스템에 걸려있는 전자기장을 일정하게 유지하여 계산을 간단화 하였다. 계산 영역의 형상은 Fig. 6에 표시되어있다. 전자

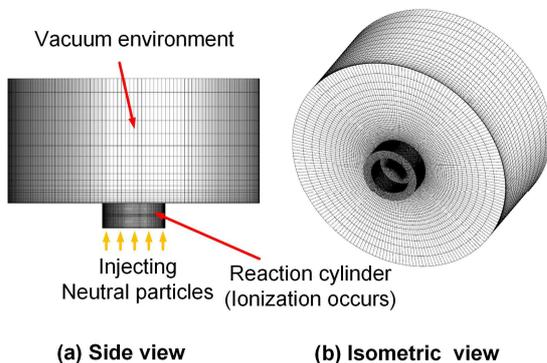


Fig. 6. Computational domain

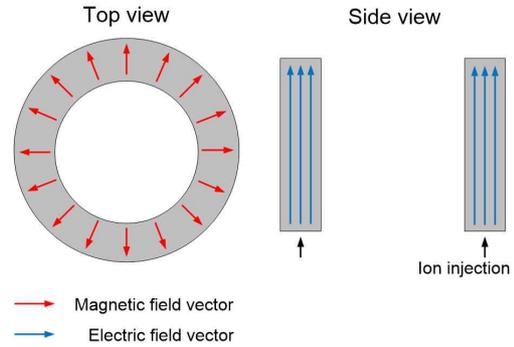


Fig. 7. Fixed magnetic and electric field vectors in the reaction cylinder

기장이 걸린 반응 실린더는 하부에 위치하며 상단부의 큰 진공 공간은 가속된 이온의 거동을 보기 위함으로, 전자기장은 없다. 반응 실린더 내부의 전자기장 형상은 Fig. 7과 같다. 전자기장에 의해 구속되어 있는 반응 실린더는 내경 35 mm, 외경 50 mm, 높이 40 mm의 실린더 형상이며 반응 실린더 내부에 반경 방향으로 0.016 T의 자기장이 일정하게 걸려있고 축 방향으로 6000 V/m의 전기장이 일정하게 걸려있다.

3.3 PIC를 이용한 수치해석 결과

Figures 8, 9는 간략화된 홀추력기 형상에서 중성입자, 전자 및 이온의 거동 및 분포를 격자와 입자의 형태로 각각 나타내고 있다. 하단에 중성입자를 주입하기 전에 실린더 내부에 전자를 무작위적 위치와 속도로 주입하여 전자기장에 의해 자연스럽게 구속되는 전자만 남도록 하였다. 전자의 밀도는 최대 약 $3e^{14} \text{ cm}^{-3}$ 이고 평균 약 $1.6e^{13} \text{ cm}^{-3}$ 이다. 구속전자는 Fig. 9에서 표시된 것과 같이 반응 실린더의 접선 방향으로 회전한다. Fig. 10은 전자의 움직임을 확대하여 시간에 따른 움직임을 나타낸 것이고, 빨간색 원으로 특정 입자의 궤적을 볼 수 있다. 전자는 크게 두 가지 원운동을 한다. 크게는 실린더의 접선 방향으로 회전 하는 것이고, 작게는 큰 원형궤적 중심으로 작고 빠른 나선형 운동을 하는 것이다. 이는 직교하는 전자기장에 의해 유도된 거동이다.

반응 실린더 내부에 전자 구속이 안정화된 후 중성입자를 실린더 하단에서 주입하였다. 중성입자가 고속으로 운동하는 전자와 일정 확률로 충돌하여 이온화되며, 이 때 셀 내부의 전자가 사라지고 중성입자 입자는 이온 입자로 변환된다. 실제 홀추력기는 아노드로부터 전자가 지속적으로 주입되지만 본 연구의 계산은 전자를 일정량 유지시키기 위해 한 번의 이온화가 발생하면 다른 하나의 전자를 주입해 주는 방법을 택했다.

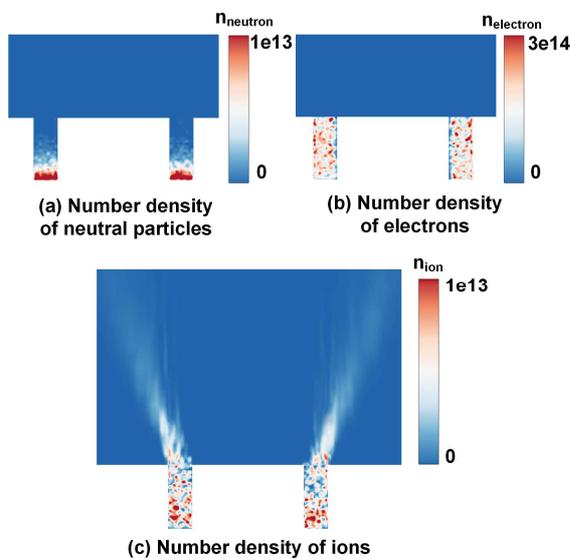


Fig. 8. Number density of particle expressed in Eulerian phase

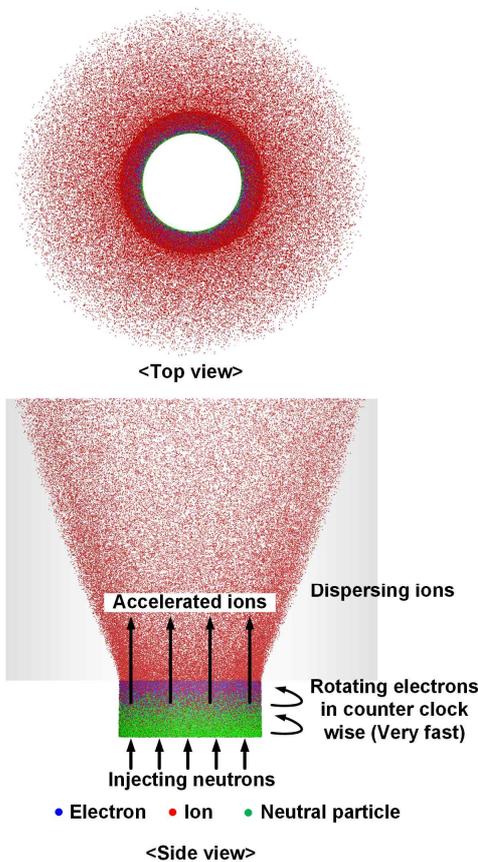


Fig. 9. Overall behavior of neutrals, ions and electrons expressed in Lagrangian particles

변환된 이온입자는 중성입자에 비해 매우 가볍기 때문에 전기장에 의한 가속 효과가 매우 커서 실

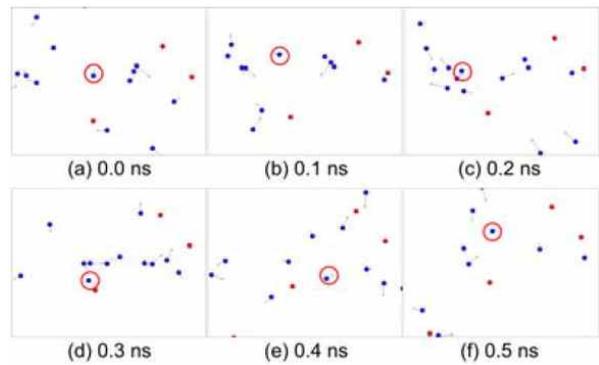


Fig. 10. Helical motion of electrons by electric and magnetic fields

린더를 탈출하기 전까지 약 3.78×10^5 m/s의 속도로 가속된다. 반면 이온은 전자 질량에 비하면 매우 무겁기 때문에 전자와 같이 이중나선형 거동을 하지 않고 실린더의 접선 방향으로 느린 원운동을 하며 축 방향으로 가속된다. 이온 입자가 실린더를 탈출하면 반경 방향의 자기장 및 축방향의 전기장이 더 이상 존재하지 않기 때문에 탈출 시 속도를 유지하며 원심력에 의해 부채꼴 모양으로 확산되며 플룸이 형성된다.

IV. 결 론

전자기장내 플라즈마의 거동을 모사하기 위한 오일러리안 격자와 라그랑지안 입자를 혼합하여 해석하는 Particle-in-cell 기법의 프로그램을 개발하여 해석해가 존재하는 일정한 방향의 자기장이 걸린 사각 덕트 내에 나선형 거동을 하는 전자군을 계산하여 해석해와 매우 유사함을 검증하였다.

PIC 기법을 사용하여 간략화된 홀추력기 내부의 플라즈마 거동을 해석하였다. 중성입자, 이온 뿐만 아니라 전자까지 모두 추적계산 하였다. 전자가 반응 실린더 내부의 전기장에 의해 나선 거동을 그리며 구속된 상태에서 실린더 하단부에 중성입자 입자를 주입하였다. 각 격자에 존재하는 전자의 수밀도를 이용하여 중성입자의 이온화를 계산하였고, 대전된 이온입자는 전기장에 의해 축방향으로 빠르게 가속함과 동시에 자기장에 의해 실린더 축을 중심으로 느린 회전속도도 가지게 되어 실린더 탈출 시 부채꼴 모양으로 확산되며 홀추력기의 플룸 형태를 잘 모사하는 현상을 관측하였다.

본 연구는 전자, 중성입자, 이온입자를 모두 개별 추적하는 PIC 기법을 이용하여 홀추력기의 해석 가능성을 판별하기 위한 연구로 전자온도를

직접 풀지 않고 적절한 값을 대입하였다. 따라서 후속 연구를 통해 이온화율의 물리적 검증이 요구된다.

후 기

본 연구는 항공우주연구원 “NRF-2016M1A3A4 A039 13835”과 연구재단 “NRF-2015M1A3A3A0 2014484”에 의해 수행되었습니다.

References

- 1) Wendt, J. F., Computational Fluid Dynamics, int. ed., Springer Berlin Heidelberg, Heidelberg, Germany, 2009.
- 2) Kolaitis, D. I. and Founti, M. A., "A Comparative Study of Numerical Models for Eulerian-Lagrangian Simulations of Turbulent Evaporating Sprays," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 17, No. 1, pp. 18-25, 2013.
- 3) Gildea S. R., "Development of the Plasma Thruster Particle-in-Cell Simulator to Complement Empirical Studies of a Low-Power Cusped-Field Thruster," Doctor thesis, MIT, 2012
- 4) Richard R.H., Peterson P.Y., Gallimore A.D. "Characterizing Vacuum Facility Back pressure Effects on the Performance of a Hall Thruster," *IEPC*, 2001
- 5) Justin W. Koo, Iain D. Boyd, "Computational model of a Hall thruster", *Computer Physics Communications*, Vol. 164, pp. 442-447, 2004.
- 6) Serge B., "Numerical studies of Hall thrusters based on fluid equations for plasma," Thesis for a Doctor degree, 200
- 7) Colonna G., Pietanza L.D., Capitelli M., "A Collisional Radiative Model for Xe Electrical Thruster," *31th AOAA Plasmadynamics and Lasers Conference, 19-22 June, Denver, Co, AIAA 2000-2349*
- 8) Bijiao H., Jianhua Z., Guobiao C. "Numerical Simulation of Stationary Plasma Thruster Plume," *56th International Astronautical Congress of the International Astronautical Federation*, 2005
- 9) Lee, S. H., Joe, H. G., and Yoo J., "Development of a Hall-thruster Propulsion Controller for Science Technology Satellite-3," *Journal of The Korean Society Aeronautical & Space Science*, Vol. 38, No. 10, pp. 992-1348, 2010.
- 10) Kim, H. L., Lim Y. B., Choe W. H., Seon J. H. "Effect of Multiply Charged Ions on the Performance and Beam Characteristics in Annular and Cylindrical Type Hall Thruster plasmas," *Applied Physics Letters*, Vol. 105, No. 14, 2014.
- 11) Cho, M. K. and Sung H. G. "Theoretical Modeling of Pulsed Plasma Thruster Performance with Teflon Ablation," *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 18, No. 1, pp 138-143, 2017.