

SCBF 장치에서 그리드 음극 구조의 영향에 대한 입자 시뮬레이션

Particle Simulation on the Effect of Grid Cathode Geometry in SCBF Device

주흥진¹, 박정호¹, 고광철^{2,a}

(Heung-Jin Ju¹, Jeong-Ho Park¹, and Kwang-Cheol Ko^{2,a})

Abstract

In 2-dimensional SCBF (Spherically Convergent Beam Fusion) device, the effect on neutron production rate of the grid cathode geometry was simulated. The motion of Particles was tracked using Monte Carlo Method including the atomic and molecular collision processes and potential distribution was calculated by Finite Element Method. Main processes of the discharge were the ionization of D₂ by fast D₂⁺ ion. As the number of cathode rings was small and the size of grid cathode decreased, the ion current increased and neutron production rate will also increase. The star mode discharge which is a very important characteristic in SCBF device, was confirmed by the ionization position.

Key Words : SCBF device, Neutron production rate, Grid cathode geometry, Monte Carlo method, Star mode discharge

1. 서론

최근 중성자 응용에 대한 수요의 급증으로 중성자 발생장치에 대한 기술 개발이 활발히 진행 중이다. 하지만 국내의 중성자 빔 이용시설은 규모가 크고 막대한 비용이 소비되거나, 또는 소규모의 발생장치의 경우 중성자속이 낮고, 운전시간이 짧기 때문에 활용범위가 극히 제한된다. 그러나, 구형 집속 빔 핵융합 장치(SCBF 장치)는 비교적 구조가 간단하고, 소형이며, 후대가 용이하므로 방사능 측정기(dosimeter calibrator), 수화물검사, 비파괴 시험, 붕소 중성자 포획료법(BNCT) 등과 같은 용도의 휴대용 중성자 발생자원으로 이용될 수 있다.

SCBF 장치는 구의 중심을 향해 주입된 이온 및 전자들이 그리드 음극의 중심부에 감금되어 핵융합 반응을 발생시키는 장치로, 글로방전이 양극과 음극

사이에서 발생된다. 전자들은 양극으로 이동하여 사라지고, 중수소 이온들은 음극을 향해 가속된다. 이들 이온 중 일부는 음극에 도달되지만, 대부분은 중공음극을 통과하여 수차례 횡단하게 된다. 이러한 왕복운동을 하는 동안 음극의 내부영역에서 다른 이온들이나 또는 배경기체들과 핵융합 반응을 발생시키며, 이때 반응의 결과로써 중성자가 발생된다.

일반적으로 관성 및 정전계 현상을 이용한 핵융합 장치에서 중성자 생성률과 그리드 음극내부의 포텐셜 우물 구조는 밀접한 관계를 가지고 있다고 여겨진다. 이러한 현상을 규명하기 위해 음극의 구조 특성이 중성자 생성률에 미치는 영향을 알아보기 위한 연구가 진행 중이지만, 아직까지 atomic processes를 포함한 단계의 연구는 극히 미진한 상태이며, 특히 대부분의 연구가 1차원 해석에 국한되어 있어 정확한 해석이 거의 이뤄지지 않고 있는 실정이다[1-3].

본 논문에서는 atomic process를 포함한 3차원 몬테칼로법을 사용하여 다음과 같은 현상을 해석하였다. 그리드 음극 중심부에서 포텐셜 분포의 시간변화를 살펴보기 위해 전자, 이온 및 빠른 중성 입자의 충돌현상을 해석하였고, 중성자 생성률을 높이기 위한 방안으로 다양한 음극 그리드 구조에

1. 한양대학교 전기공학과
(서울시 성동구 행당1동 17)
2. 한양대학교 전기제어생체공학부
a. Corresponding Author : kwang@hanyang.ac.kr
접수일자 : 2007. 3. 19
1차 심사 : 2007. 7. 16
심사완료 : 2007. 7. 20

서의 D-D 핵융합 반응에 의한 이온전류를 계산하였다. 또한 SCBF 장치의 방전특성인 star 모드 방전현상을 확인하기 위해 각 입자에 의한 전리위치를 확인하였다.

2. 해석 모델 및 수치적 방법

2.1 해석모델

그림 1은 본 연구에서 해석하기 위한 2차원 SCBF 장치 모델을 나타낸 것으로, 양극과 음극은 각각 메쉬와 그리드 형태로 구성되어 있다. 메쉬 양극의 직경은 20 "cm"이고, 직경 0.2 "cm"의 와이어로 만들어진 그리드 음극의 직경은 4.6 "cm"이다. 그리드 음극에 -25 "kV"의 전압을 인가하였고, 7 "mtorr"의 압력에서, D₂ 기체를 배경기체로 사용하였다.

2.2 수치적 방법

수치해석 방법으로 전계를 계산하기 위해 유한요소법을 이용하였고, 방전의 개시를 시뮬레이션하기 위해 atomic processes를 포함한 3차원 몬테칼로법을 사용하여 입자의 운동을 추적하였다. 추적 입자로는 전자(e⁻)와 중수소 이온(D⁺, D₂⁺) 및 빠른 중성입자(D⁰, D₂⁰)가 사용되었으며, 초기조건으로는 에너지가 0 "eV"인 1000개의 전자 및 중수소 이온들을 장치 내에 무작위로 분포시켰다. 방전은 이온이 음극에 유입될 때마다 이차전자를 발생시켜 방전이 지속되도록 하였으며, atomic processes로 전자는 탄성충돌과 전리충돌만을, 이온 및 빠른 중성입자는 탄성충돌과 전하교환충돌(charge exchange collision)만을 고려하였다.

이온 스위에 대한 몬테칼로 시뮬레이션은 전자의 경우와 같은 순서로 행해지지만, 이온은 기체분자와 같은 정도의 성질을 가지기 때문에 전자의 경우와는 다르게, 이온의 충돌이 기체분자속도에 주는 영향을 무시하지 않을 수 없다. 이온의 충돌 현상을 계산할 때, 탄성충돌의 경우에 산란에너지는 다음과 같다[4,5].

$$\epsilon_{i, scat} = \epsilon_{i, inci} \cos^2 \chi \quad (1)$$

여기서, $\epsilon_{i, scat}$, $\epsilon_{i, inci}$ 는 각각 입사 이온의 에너지 및 산란에너지이다. 또한 등방산란의 경우에 편향각 χ 와 방위각 ϕ 는 각각 다음과 같다.

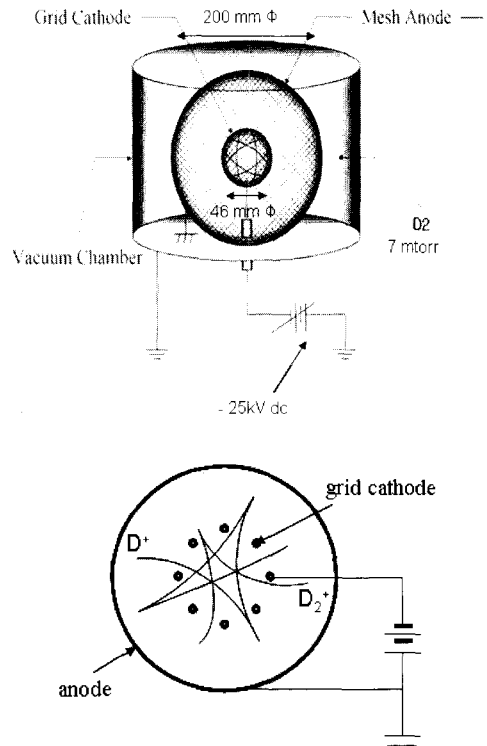


그림 1. SCBF 장치의 구성도 및 이온의 운동.
Fig. 1. Schematic of SCBF device and the motion of ions.

$$\chi = r_1 (\pi/2) \quad (2)$$

$$\phi = 2\pi r_2 \quad (3)$$

전하교환충돌의 경우, 빠른 입사이온은 느린 기체분자로부터 전자를 가져가서 자신은 빠른 분자가, 느린 기체분자는 느린 이온이 된다. 느린 이온은 등방산란을 하며, 편향각 χ 와 방위각 ϕ 는 다음과 같다.

$$\chi = \pi r_3 \quad (4)$$

$$\phi = 2\pi r_4 \quad (5)$$

여기서, r_1, r_2, r_3, r_4 는 각각 0과 1사이에서 균일하게 분포된 난수이다. 산란된 이온의 속도는 Maxwellian 속도분포를 통해 수치적으로 결정된다. 또한 빠른 입사이온의 충돌 후 속도 및 산란각은 운동량 보존식에 의해 결정된다.

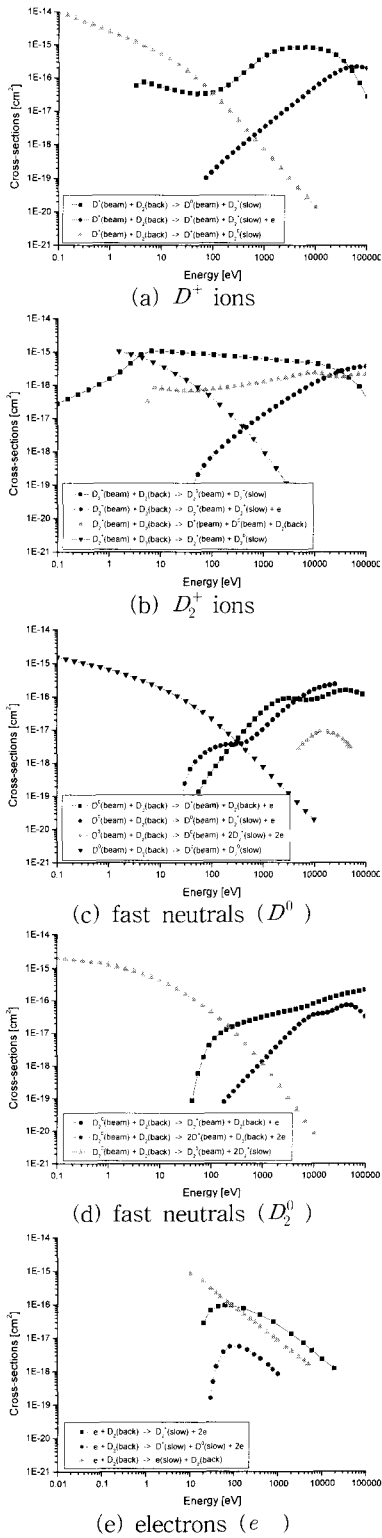


그림 2. 입자들의 충돌단면적[6].
Fig. 2. Cross-sections of particles[6].

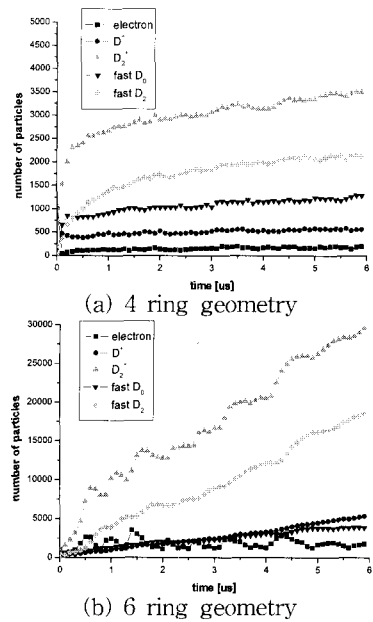


그림 3. 다양한 음극 구조에서 입자의 수.
Fig. 3. The number of particles.

한편, Time step은 전자운동 계산 시에는 10 "ps", 이온 및 중성입자는 1 "ns"로 하였으며, 또한 포텐셜의 급격한 변화는 거의 없으므로 10 "ns"마다 유탄요소법을 이용하여 전계 값을 갱신하였다.

3. 수치적 결과

본 연구에서는 그리드 음극의 형태를 변화를 주면서 수치해석을 수행하였다. 먼저 그리드 음극을 구성하는 링의 수를 변화시켰다. [7]에서처럼 그리드 음극을 구성하는 링이 각각 3, 4, 5, 6개 일 때, SCBF 장치의 중심을 자른 단면을, 양극은 원으로 나타내었으며, 음극은 링의 개수에 따라 4, 6, 8, 12개의 작은 원으로 구성시켰다. 또한 그리드 음극의 크기의 변화에 따른 방전 현상도 해석하였다[7].

그림 3은 4링 및 6링 구조에서 각 입자들의 수를 나타낸 것이다. 링의 수에 상관없이 방전에 가장 큰 영향을 미치는 것은 D_2^+ 이온으로, 주로 D_2^+ 이온과 중수소 기체와의 핵융합 반응의 결과로 중성자가 발생되리라 예측할 수 있다.

그림 4에서는 링의 수에 따른 D_2^+ 이온의 수를 나타내었으며, 링의 수가 많을수록 더 많은 D_2^+ 이온이 생성된다. 이것은 링의 수가 많아질수록(그리드 음극의 투명도가 낮아질수록) 고에너지 전자들

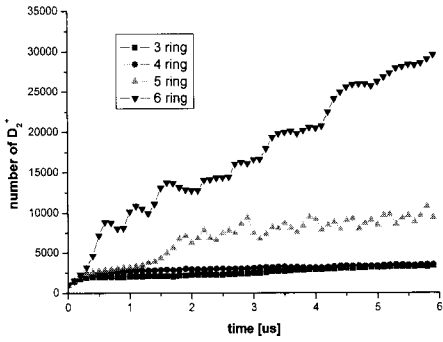
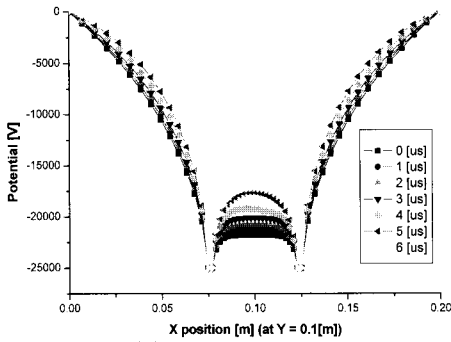
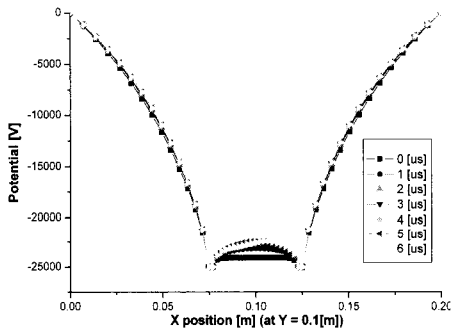


그림 4. D_2^+ 이온의 수.

Fig. 4. The number of D_2^+ .



(a) 4 ring geometry

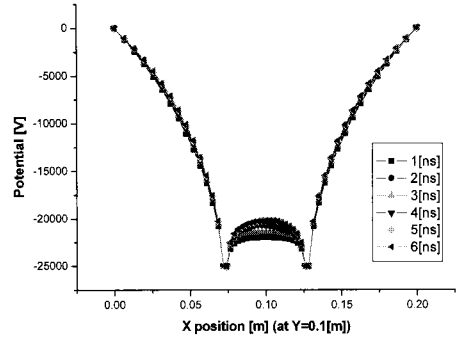


(b) 6 ring geometry

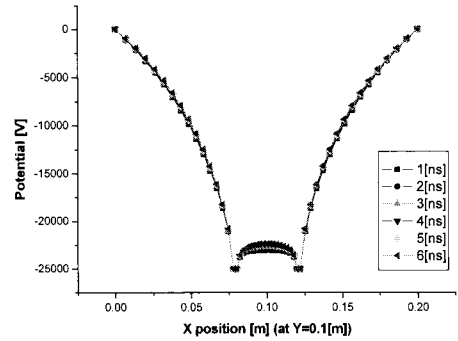
그림 5. 다양한 음극 구조의 중심축에서 포텐셜 분포.

Fig. 5. Potential distribution at various geometries on axis.

제외한 나머지 전자들은 장치의 형상에 의해 밀폐되어 음극 내부에서 빈번한 충돌이 발생되기 때문이다. 링의 개수가 작은 경우에는 음극 근처의 높은 전계에 의해 가속된 고에너지 전자들이 포텐셜 우물을 넘어 갭에서 약간의 충돌을 경험하고 그대로 양극에 흡수되므로 발생하는 D_2^+ 이온이 적다. 이는



(a) 5.2 cm diam. grid cathode



(b) 4.0 cm diam. grid cathode

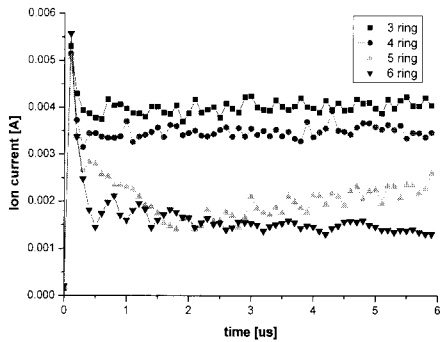
그림 6. 그리드 음극의 크기를 변화시킬 때 5링 구조의 중심축에서 포텐셜 분포.

Fig. 6. Potential distribution with changing the size of grid cathode at 5 ring geometry on axis.

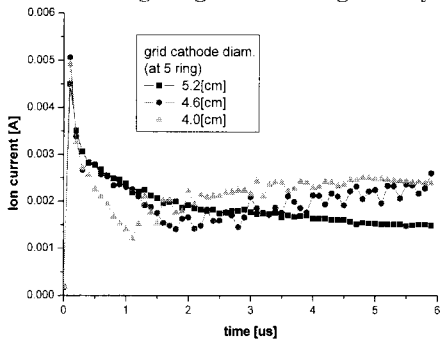
유체해석[7]에서 보인 것과는 반대가 된다. 유체해석은 전자 및 이온을 흐름으로 다루므로 장치의 투명도는 무시할 수 있지만, 입자해석에서는 개개의 입자들을 다루므로 장치의 형상이 큰 역할을 차지하게 된다.

그림 5는 4링 및 6링 구조에서 y축 위치가 0.1 m 일 때 x축에서의 시간에 따른 포텐셜 분포를 보인 것이다. 시간이 경과함에 따라 4링 구조에서는 음극을 탈출한 고에너지 전자에 의해 발생된 이온들 중 일부는 음극에 흡수되고, 일부는 그리드 사이로 왕복운동을 하며 음극 내부에 이온 공간전하를 형성시키므로 큰 포텐셜 변화가 발생되며, 포텐셜 우물 구조를 확인할 수 있다. 링의 개수가 많은 경우에는 음극의 중심부에 포획되는 전자의 수가 늘어나게 되고, 전자에 의한 충돌은 주로 음극의 중심부에서만 발생된다. 따라서 링의 수가 많을 때에는 포텐셜 분포에 큰 변화가 없게 된다.

그림 6은 그리드 음극의 크기의 변화에 따른 포텐셜 분포이다. 음극의 직경이 더 클수록 투명도가



(a) according to grid cathode geometry



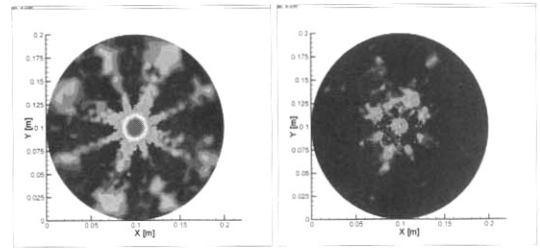
(b) according to the size of grid cathode

그림 7. 그리드 음극 구조 및 5링 구조에서 그리드 음극 크기를 변화시킬 때 이온전류.

Fig. 7. Ion current with changing grid cathode geometry and the size of grid cathode at 5 ring geometry.

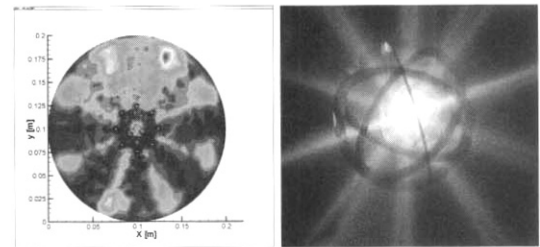
높아져 탈출하는 고에너지 전자가 많아진다. 이 전자의 전리충돌로 생성된 이온이 음극 내부에 공간 전하를 형성시켜 포텐셜을 증가시킨다. 즉, 음극의 직경이 더 큰 경우는 링의 개수를 감소시키는 것과 같은 효과를 볼 수 있다.

그림 7은 Sato 방정식[8]을 통해 계산된 이온전류 분포를 나타낸 것이다. 그림 7(a)에서 이온전류는 링의 수가 작을수록 더 크게 되는데, 이것은 비록 링의 수가 작을 때 생성된 이온의 수는 적지만, 포텐셜 우물에 의한 음극 근처의 전계가 훨씬 크게 되기 때문이다. 그림 7(b)는 5링 구조에서 그리드 음극 크기의 변화에 따른 이온전류를 나타낸 것으로, 그리드 음극의 직경이 클수록 더 넓은 음극 내부에 존재하는 많은 이온에 의해 이온전류가 더 크게 나타난다. 즉, 링의 수가 작을수록, 그리드 음극의 직경이 클수록 더 큰 이온전류를 얻을 수 있다. 이것은 유체해석에서 보인 결과[7]와 유사하며, 유체해석의 타당성을 확인할 수 있다.



(a) electrons

(b) ions



(c) fast neutrals

(d) the photograph of the star mode [9]

그림 8. 5링 구조에서 각 입자의 전리위치 및 그리드 음극 근처에서의 star mode 사진.

Fig. 8. The ionization position of particles at 5 ring geometry and the photograph of the star mode near the grid cathode[9].

그림 8은 5링 구조에서 각각 전자, 이온, 및 중성입자에 의한 전리 위치를 나타낸 것이다. 전자의 경우에는 링의 개수가 많아질수록 처음에는 갭 사이에서 많은 충돌을 보이다가 점차 음극 중심부에 포획된 전자가 많아지게 됨에 따라 음극의 중심부에서 전리충돌이 빈번히 발생된다. 이온 및 빠른 중성입자는 링의 개수에 상관없이 비슷한 분포를 보이며, 이온은 음극의 중심부와 전계가 강한 그리드 음극 근처에서 주로 전리충돌이 발생되며, 빠른 중성입자는 전계의 영향을 받지 않고, 갭 사이에서 전리충돌이 주로 발생하는 것을 볼 수 있으며, 이것을 통해 SCBF 장치의 star 모드 방전현상을 확인할 수 있다.

그림 9는 각 입자들이 전리충돌을 발생시킨 수를 나타낸 것이다. 전자에 의한 전리충돌이 가장 빈번히 발생하며, 방전에 가장 큰 영향을 미치는 D_2^+ 이온은 주로 전자와 중수소 분자와의 전리충돌로 발생된다. 이 이온이 중수소 분자와의 핵융합 반응을 일으켜 중성자를 발생시킬 것이다.

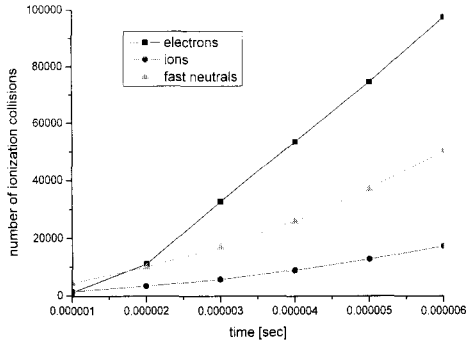


그림 9. 5링 구조에서 각 입자들의 전리충돌 수.
Fig. 9. The number of ionization collisions at 5 ring geometry.

4. 결 론

본 연구에서는 그리드 음극을 구성하는 링의 개수 및 갭 길이의 변화에 따라 다음과 같은 방전현상을 해석하였다. 음극 내부에서의 포텐셜 우물 구조를 확인하였고, 중성자 발생률을 예측하기 위해 이온 전류를 계산하였다.

주요결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 방전에 가장 큰 영향을 미치는 입자는 D_2^+ 이온이며, 주로 D_2^+ 이온과 중수소 기체와의 핵융합 반응에 의해 중성자가 발생될 것이다.
- 2) 단일 포텐셜 우물 구조가 그리드 음극 중심부에서 확인되었다.
- 3) 그리드 음극을 구성하는 링의 수가 적을수록, 또한 그리드 음극의 크기가 작을수록, 깊은 포텐셜 우물 구조가 형성된다. 이때 더 큰 이온전류를 얻게 되고, 중성자 발생률이 증대될 것이다.
- 4) 각 입자들의 전리충돌의 위치를 통해 SCBF 장치의 중요한 특성인 star 모드 방전현상을 확인하였다.

향후 다양한 조건하에서 중성자 생성률이 계산되면, 이온전류와의 비교를 통해 최적의 음극 구조를 설계할 수 있을 것이다.

참고 문헌

- [1] M. Ohnishi, Y. Yamamoto, M. Hasegawa, K. Yoshikawa, and G. H. Miley, "Study on an inertial electrostatic confinement fusion as a portable neutron source", *Fusion Engineering and Design*, Vol. 42, p. 207, 1998.
- [2] M. Ohnishi, K. H. Sato, Y. Yamamoto, and K. Yoshikawa, "Correlation between potential well structure and neutron production in inertial electrostatic confinement fusion", *Nuclear Fusion*, Vol. 37, p. 611, 1997.
- [3] K. Tomiyasu, J. F. Santarius, and G. L. Kulcinski, "Numerical Simulation for UW-IEC Device", *The 6th U.S.-Japan IEC Workshop*, 2003.
- [4] C. K. Birdsall, "Particle in cell charged particle simulations, plus Monte Carlo collisions with neutral atoms, PIC-MCC", *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, Vol. 19, p. 65, 1991.
- [5] 日本電氣學會編, "気体放電 シミュレーション技法", 第 140号, 1974.
- [6] T. Tabata and T. Shirai, "Analytic cross sections for collisions of H^+ , H_2^+ , H_3^+ , H , H_2 , and H^- with hydrogen molecules", *Atomic Data and Nuclear Tables*, Vol. 76, p. 1, 2000.
- [7] 주흥진, 박정호, 고평철, "SCBF 장치에서 이온 전류에 대한 포텐셜 우물 구조의 영향", *전기전자재료학회논문지*, 20권, 5호, p. 471, 2007.
- [8] N. Sato, "Discharge current induced by the motion of charged particles", *J. Phys. D*, Vol. 13, p. L3, 1980.
- [9] T. Takamatsu, T. Mizutani, M. Imoto, K. Masuda, H. Toku, K. Nagasaki, and K. Yoshikawa, "Improvement of an IEC Device Performance by Use of Magnetron Ion Sources", *The 6th U.S.-Japan IEC Workshop*, 2003.