

SCBF 장치에서 이온전류에 대한 포텐셜 우물 구조의 영향

Effect of Potential Well Structure on Ion Current in SCBF Device

주흥진¹, 박정호¹, 고광철^{2,a}

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

Abstract

SCBF(Spherically Convergent Beam Fusion) device has been studied as a neutron source. Neutron production rate is a most important factor for the application of SCBF device and is proportional to the square of the ion current[1]. It is regarded generally that some correlations between the potential well structure and the ion current exist. In this paper, the ion current and potential distribution were calculated in a variety of grid cathode geometries using FEM-FCT method. Single potential well structure was certified inside the grid cathode. The deeper the potential well became, the higher the ion current due to the high electric field near the grid cathode became.

Key Words : SCBF device, Neutron production rate, Ion current, Potential well structure, FEM-FCT method, Grid cathode

1. 서론

소규모의 중성자 발생장치는 이미 1960년대에 상용화되어 석유탐사, 광물탐지, 표준 중성자원 등을 위한 여러 분야에서 사용되고 있다. 그러나 이러한 제품들은 중성자속이 낮고, 수명이 짧기 때문에 새로운 연구가 진행 중이다. 이중 관성과 정전계를 이용한 플라즈마 집속 방식의 장치가 미국과 일본에서 각광을 받고 있다. 최근 위스콘신 대학에서 관성 정전 감금 핵융합장치를 이용하여 중성자 생성률을 1×10^8 neutrons/second까지 달성하였지만, 아직까지 많은 응용분야에서 사용되기에는 충분하지 않다[2].

SCBF장치는 구의 중심을 향해 주입된 이온 및 전자들이 정전계에 의해 그리드 음극의 중심부에 감금되어 핵융합 반응을 발생시키는 장치로써, 음극은 그리드 형태로 구성되어 있다. 수십 "mTorr"

의 D_2 기체가 사용되며, 수십 "kV"의 인가전압에 의해 글로 방전모드에서 동작한다. 이 장치는 기존의 핵융합장치(Tokamaks, Laser fusion 등)에 비해 구조가 간단하고, 소형이며, 휴대가 용이하다. 따라서 휴대용 중성자 발생자원으로 이용될 수 있을 것이다.

정전기 플라즈마 형성 및 감금에 대한 개념은 1950년대에 P. T. Farnsworth에 의해 처음 제안되었고, 그 후 R. L. Hirsh[3]는 다중 포텐셜 우물 구조 및 관성 정전 감금 장치에서 중성자 생성률을 연구하였다. 또한 S. K. Wong와 N. A. Krall[4]은 전자 주입에 의해 형성된 포텐셜 우물 구조를 이론적으로 연구하였다. 하지만 이러한 연구들은 단일 종(전자 또는 이온)에 의해 생성된 포텐셜에 제한되어 있다.

핵융합 에너지를 위해 SCBF 장치를 활용할 때 가장 중요한 요소는 주입된 이온전류에 대한 중성자 생성률이며, 이것은 그리드 음극 내부의 포텐셜 우물 구조와 밀접한 관계를 가지고 있다[5]. 본 논문에서는 중성자 생성률을 높이기 위한 방안으로 음극 그리드 구조 및 갭 길이의 변화에 따라 이온전류를 계산하였다. 또한 포텐셜 우물구조의 형성 과정 및 이온전류와의 관계를 고찰하고자 한다.

1. 한양대학교 전기공학과

2. 한양대학교 전기제어생체공학부

(서울시 성동구 행당1동 17)

a. Corresponding Author : kwang@ahpe.hanyang.ac.kr

접수일자 : 2007. 3. 19

1차 심사 : 2007. 4. 12

심사완료 : 2007. 4. 23

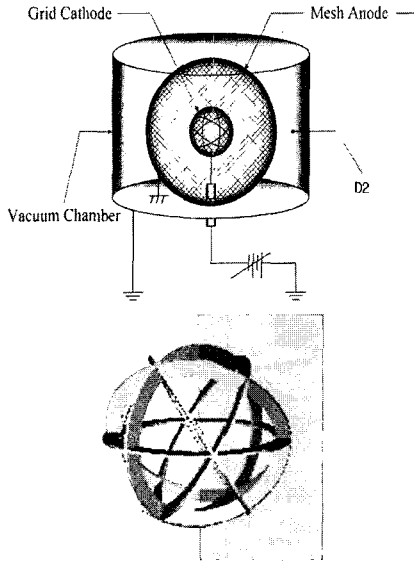


그림 1. SCBF 장치 및 5링으로 구성된 그리드 음극의 구조.

Fig. 1. SCBF device and the grid cathode geometry consisted of 5 rings.

2. 해석 모델 및 수치적 방법

본 연구에서는 하전입자의 거동을 해석하고, 포텐셜 분포 등의 확인을 위해서 전자와 이온의 운동을 일종의 유동현상으로 해석하는 유체법을 이용하여, SCBF 장치에 이온과 전자를 모두 주입했을 때 장치에서 발생하는 포텐셜 우물 구조의 시간에 따른 거동과 이온전류를 계산하였다. 본 연구에서 해석하기 위한 2차원 SCBF 장치 모델은 그림 1과 같다.

양극과 음극은 각각 메쉬와 그리드 형태로 구성되어 있으며, 중심부에서 양극까지의 반경은 10 cm, 중심부에서 음극까지의 반경은 2.3 cm, 그리드 음극의 반경은 0.1 cm이다. 그리드 음극에 -40 kV의 전압을 인가하였고, 메쉬 양극은 0 V로 하였다. 본 연구는 SCBF 장치의 음극 내부에서 발생하는 포텐셜 우물 구조의 생성과정 및 이온전류와의 관계를 고찰하기 위한 연구이므로 방전형태의 정성적 현상만을 해석하기 위해 1기압, N_2 기체를 사용하였다.

하전입자를 해석할 때 사용되는 전자 및 이온에 대한 연속방정식과 전계에 대한 Poisson 방정식은 다음과 같다[6].

$$\frac{\partial \rho_e}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho_e \mathbf{W}_e) + \nabla^2 (D_e \rho_e) + \rho_e \alpha |\mathbf{W}_e| \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_p}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho_p \mathbf{W}_p) + \rho_e \alpha |\mathbf{W}_e| \quad (2)$$

$$\nabla^2 V = -\frac{e}{\epsilon_0} (\rho_p - \rho_e) \quad (3)$$

$$E = -\nabla V \quad (4)$$

여기서, ρ_e , ρ_p , W_e , W_p 는 각각 전자, 이온의 밀도 및 속도이고, D_e , α 는 전자의 확산계수 및 전리계수, e , ϵ_0 는 전자의 전하량과 유전율을 나타낸다.

본 논문에서는 연속방정식 및 Poisson 방정식의 해석을 위해 FEM-FCT법을 이용하였다[7]. 유체법을 지배하는 연속방정식은 대류항이 지배적인 1차의 hyperbolic 형태를 가지며, 공간적 변화가 매우 커서 저차의 근사를 통해서 해석하면 지나친 수치확산이 발생하며, 고차의 방법으로 접근하면 변화율이 큰 영역에서 수치진동이 발생하여 해가 음의 값이 나오는 경우도 있다. 이와 같은 오류를 방지하기 위해 저차해와 고차해를 적절히 사용하여 해를 얻을 수 있는 FCT법을 이용하면 수치확산과 수치진동이 없는 결과를 얻을 수 있다. 또한 해석기법으로는 여러 전극 형상에 유연하게 대처할 수 있고, 특성변화가 심한 영역을 세분화하여 보다 더 정확히 기술할 수 있는 FEM법을 이용하였다. 이온전류의 계산은 Sato 방정식을 이용하여 다음과 같이 계산하였다[8].

$$I = \frac{e}{V} \int_S [(\rho_p W_{px}) E_x + (\rho_p W_{py}) E_y] dx dy \quad (5)$$

여기서, I , V , E 는 각각 전류밀도, 인가전압 및 전계의 세기를 나타낸다.

3. 수치적 결과

전자 및 이온의 초기밀도로는 그리드 음극 근처에 10^{13} cm^{-3} 의 크기를, 그 외의 영역은 10^8 cm^{-3} 의 크기를 각각 부여하였다. 이러한 높은 초기 값을 부여한 이유는 전자사태의 성장 및 스트리머로의 전이 단계를 포함시키지 않음으로써 계산 시간을 크게 줄이기 위함이며, 초기 하전입자의 밀도는 방전의 형태에 크게 기여하지 않기 때문이다. 배경기체로 사용된 N_2 가스에 대한 수송계수는 다음과 같다[9].

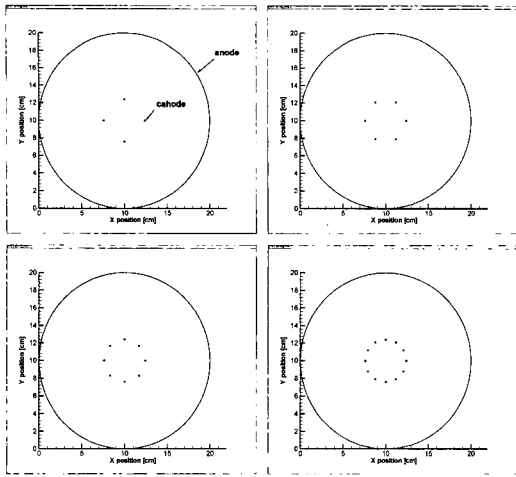


그림 2. 링의 개수에 따른 SCBF 장치의 해석모델 (왼쪽 위부터 3링, 4링, 5링, 6링 구조).
 Fig. 2. Analysis model according to the number of rings.

$$\alpha = \begin{cases} 5.7 \times P \times \exp(-260 \times P/E), & E/P < 100 \\ 12 \times P \times \exp(-335 \times P/E), & E/P \geq 100 \end{cases} \quad \text{"cm}^{-3}\text{"} \quad (6)$$

$$\mu_e = 2.9 \times 10^5 / P, \quad \mu_p = 2.6 \times 10^3 / P \quad \text{"cm}^2/\text{Vs"} \quad (7)$$

$$D_e = 1800 \quad \text{"cm}^2/\text{s"} \quad (8)$$

여기서, μ_e, μ_p 는 각각 전자 및 이온의 이동도이고, P 는 배경기체의 압력 "torr"이다. 이온의 확산 및 광전리는 고려하지 않았으며, 고전압 저전류를 다루므로 자계의 영향도 고려하지 않았다.

본 연구에서는 방전특성에 큰 영향을 미치는 그리드 음극의 구조 및 갭 길이를 변화시키면서 수치해석을 하였다. 그리드 음극을 구성하는 링이 각각 3, 4, 5, 6개일 때, SCBF 장치의 중심을 자른 단면은, 양극은 원으로 표현되며 음극은 링의 개수에 따라 4, 6, 8, 12개의 작은 원으로 구성된다. 또한 갭 길이는 링의 개수가 5개인 구조에서 7.2 cm, 7.5 cm, 7.8 cm로 변화시켰다.

그림 3은 진공에서 장치의 형상에 대한 포텐셜 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 그리드를 구성하는 링의 수가 적은 경우, 음극 내부로 침투하는 포텐셜이 더 크므로 음극 근처에 더 큰 전계가 형성된다. 내부 포텐셜 우물은 가상양극으로 동작하며 전자를 포획한다.

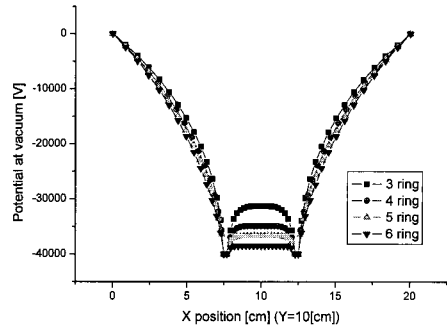
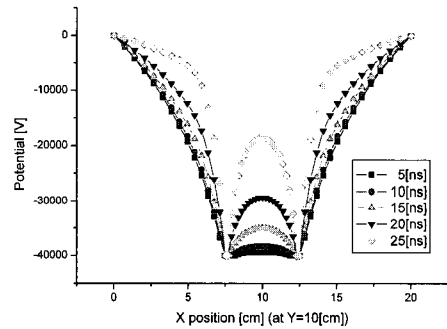
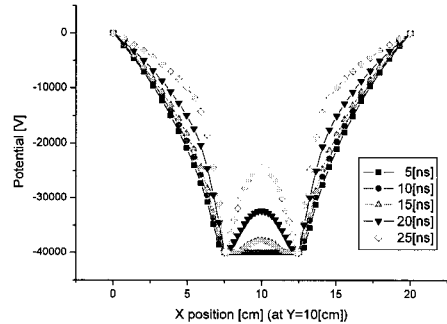


그림 3. 링의 개수에 따른 진공에서 포텐셜 분포.
 Fig. 3. Potential distribution with changing the number of ring at vacuum.



(a) 4 ring geometry



(b) 6 ring geometry

그림 4. 음극 구조의 중심축에서 포텐셜 분포.
 Fig. 4. Potential distribution on axis.

그림 4는 4링과 6링 구조의 중심축에서 시간에 따른 포텐셜 분포를 보인 것으로, 포텐셜 우물의 형성과정을 확인할 수 있다. 두 구조 모두에서 10 "ns"의 시간까지는 포텐셜 우물이 거의 사라지는데, 이온은 음극에 흡수되고, 전자만 내부에 포획되어 전자공간전하를 형성하기 때문이다. 시간이

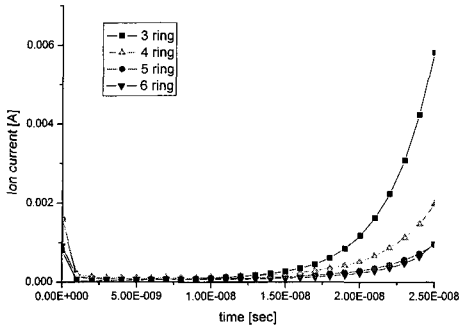


그림 5. 다양한 그리드 음극 구조에서 이온전류.
Fig. 5. Ion current at various grid cathode geometries.

경과함에 따라 포획된 전자는 음극의 중심부에서 충돌전리를 일으키므로 이온의 수는 증가되고, 이 이온공간전하에 의해 내부의 포텐셜이 점점 더 커지게 된다. 포텐셜 우물을 탈출한 일부의 전자는 음극 근처의 큰 전계에 의해 제차 음극 근처에서 충돌전리를 일으킨 후 양극에 흡수된다.

그림 4에서 4링 구조가 6링 구조보다 포텐셜 우물의 깊이가 더 깊어지는데, 그 이유는 장치의 구조적 문제 때문이다. 즉, 초기의 깊은 포텐셜 우물 때문에 전자는 쉽게 탈출하지 못하고, 음극 내부에서 많은 충돌전리를 일으켜 큰 이온공간전하를 형성한다. 이와 반대로 링의 개수가 많아지면, 전자가 그리드 음극을 보다 더 쉽게 탈출하므로 내부에서 충돌이 발생할 기회가 적어진다.

그림 5는 다양한 그리드 음극의 형태에 따른 이온전류를 보인 것으로, 초기의 높은 이온전류는 큰 초기밀도 값에 기인하며, 그리드 음극을 구성하는 링의 개수가 적을수록 이온전류는 더 커지게 된다. 이것은 그림 3 및 그림 4의 potential 분포와 밀접한 관계를 가진다. 이온전류가 링의 수가 작은 경우 더 큰 이유는 음극 내부의 깊은 포텐셜 우물에 의해 생성된 큰 전계의 영향 때문으로, 식 (5)를 통해 확인할 수 있다. 한편 10 ns를 지나면서 포텐셜 우물이 재형성되고, 우물의 깊이가 깊어질수록 이온전류는 점차 증가하다가 진공에서의 포텐셜 우물보다 더 깊어지는 15 ns부터 급격히 증가한다.

그림 6과 7은 5링 구조에서 시간의 변화에 따른 공간적인 포텐셜 분포 및 전자, 이온분포를 나타낸 것으로, 다른 링 구조에도 이와 유사한 결과를 보인다. 그리드 음극 내부에서의 이온공간전하의 영향으로 포텐셜이 점차 커지는 것을 확인할 수 있다. 그림 7에서 전자는 그리드 음극내부에 포획되어 충돌전리를 발생시키는데, 중심부에서의 이온의

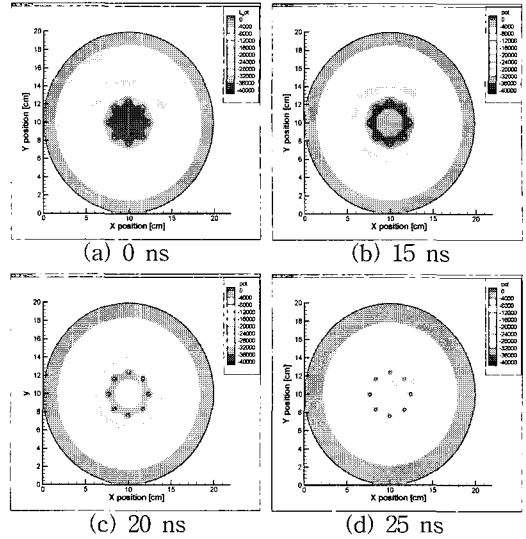


그림 6. 5링 구조에서 포텐셜 분포.
Fig. 6. Potential distribution at 5 ring geometry.

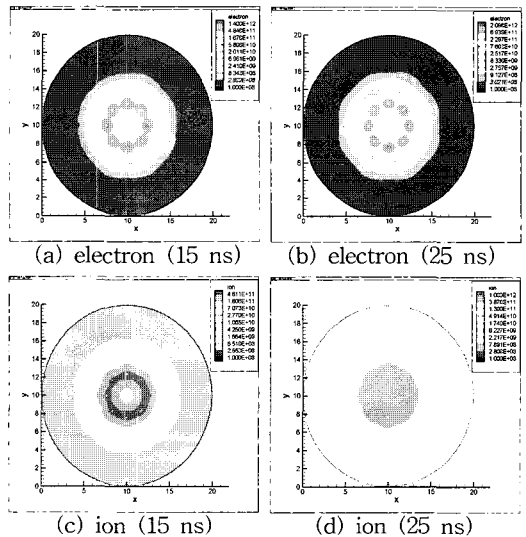


그림 7. 5링 구조에서 전자밀도 및 이온밀도 분포.
Fig. 7. Electron and ion density distribution at 5 ring geometry.

밀도가 점차 음극근처의 밀도만큼 커지게 되는 것을 볼 수 있다. SCBF 장치에서의 핵융합 반응은 그리드 음극 근처의 큰 전계에 의해 가속된 이온이 음극내부에 생성된 이온 군과 충돌하면서 발생된다. 따라서 음극 내부의 이온 공간전하와 음극 근처의 고전계는 큰 이온전류 및 중성자 생성에 중요한 역할을 할 것으로 사료된다.

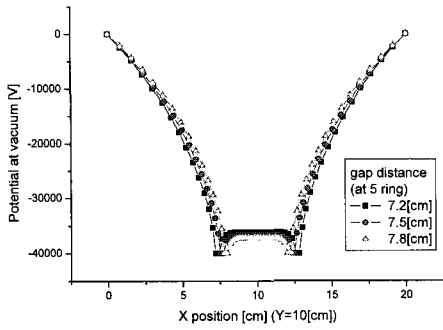


그림 8. 갭 길이의 변화에 따른 진공에서 포텐셜 분포.
 Fig. 8. Potential distribution with changing gap distance at vacuum.

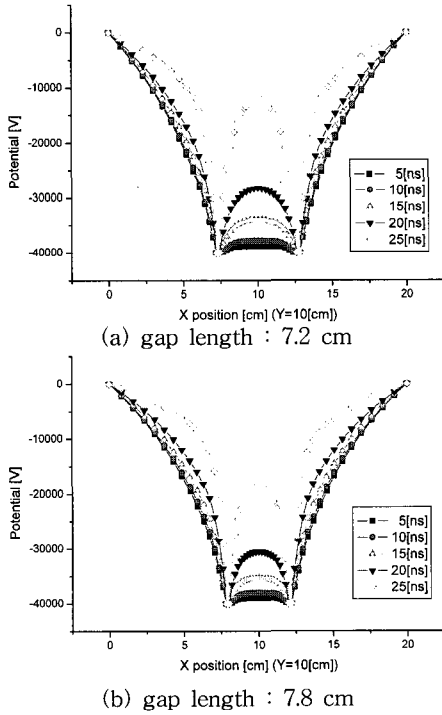
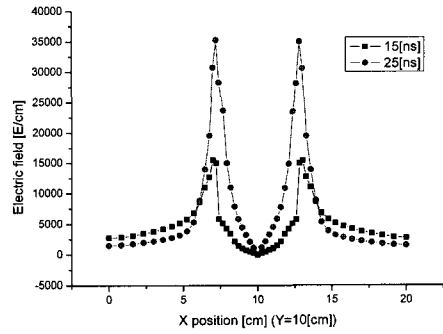
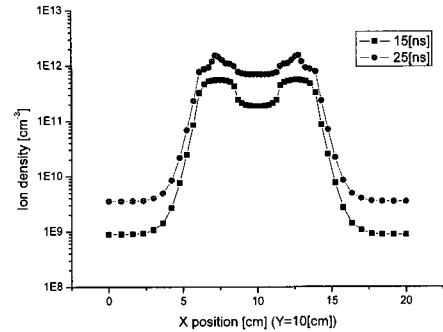


그림 9. 갭 길이를 변화시킬 때 5링 구조의 중심 축에서 포텐셜 분포.
 Fig. 9. Potential distribution at 5 ring geometry on axis.

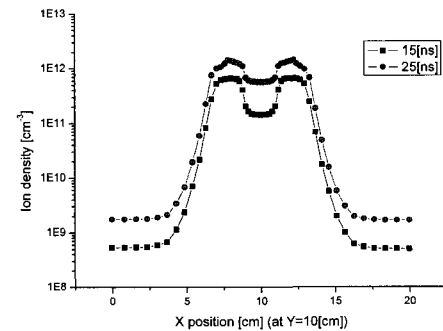
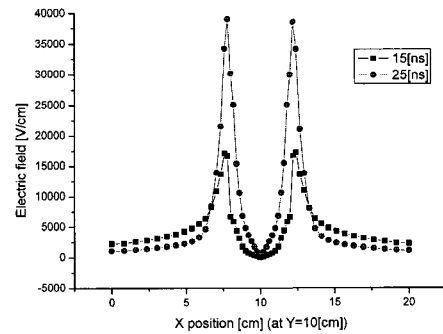
그림 8과 9는 5링 구조에서 양극과 음극사이 갭의 길이를 변화시켰을 때의 포텐셜 분포를 나타낸 것으로써, 갭 길이가 변화하는 초기 포텐셜 분포에 큰 영향을 미치지 않는다. 시간의 경과에 따라 역시



(a) gap length : 7.2 cm



(b) gap length : 7.8 cm



(b) gap length : 7.8 cm

그림 10. 갭 길이를 변화시킬 때 5링 구조의 중심 축에서 전기 분포 및 이온밀도 분포.
 Fig. 10. Electric field and Ion density distribution at 5 ring geometry on axis.

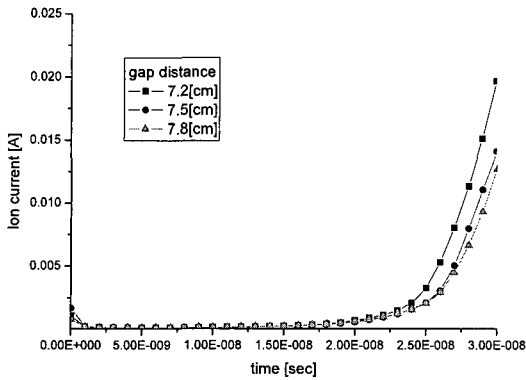


그림 11. gap 길이를 변화시킬 때 5링 구조에서 이온전류.

Fig. 11. Ion current with changing gap distance at 5 ring geometry.

포텐셜 우물의 깊이가 깊어짐을 확인할 수 있으며, 갭 길이가 작은 경우 더 깊은 포텐셜 우물을 형성한다.

그림 10은 갭 길이의 변화에 따른 15 ns와 25 ns에서의 전계 분포 및 이온밀도 분포를 보인 것이다. 갭 길이가 더 작을수록 더 깊은 포텐셜 우물이 형성되지만, 오히려 그리드 음극 근처에서의 전계는 거의 동일한 분포를 보였다. 또한 이온밀도도 비슷한 분포를 보인다. 갭 길이가 작을수록 음극내부가 넓어지기 때문에 더 많은 이온들이 존재하며, 시간이 경과하면서 중심부에 더 큰 이온공간전하가 형성된다. 따라서 그림 11에서 볼 수 있듯이 갭 길이와 변화가 초기에는 이온밀도와 전계의 곱으로 계산되는 이온전류에는 큰 영향을 주지 못한다. 하지만 시간이 지남에 따라 포텐셜 우물의 깊이 및 중심부에서의 이온밀도에 차이에 의해 이온전류도 많은 차이를 보인다.

4. 결론

SCBF 장치는 붕입 기체로 중수소 기체를 사용하며, 구 중심부에서의 핵융합 반응에 의해 중성자가 발생된다. 본 연구에서는 그리드 음극 구조를 변화시켰을 때 음극내부에서의 포텐셜 우물의 형성 및 이온전류의 관계를 알아보기 위해 1기압 N_2 기체에서 FEM-FCT법을 이용하여 정성적으로 해석하였다.

그리드 음극 중심부에서 단일 포텐셜 우물 구조에 대한 형성과정을 해석하였다. 그리드 음극을 구성하는 링의 개수가 더 적을수록, 갭 길이를 작게 할수록, 더 깊은 포텐셜 우물구조가 형성됨을 확인할 수 있었다. 또한 이 때 이온전류가 더 커짐을 확인할 수 있었다. 실제 SCBF 장치는 수 [mTorr]의 압력에서 D_2 기체가 이용된다. 추후에 이러한 조건하에서 충돌현상이 포함된 입자 해석을 통해 위의 현상을 확인할 필요가 있다.

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] A. L. Wehmeyer, R. F. Radel, G. L. Kulcinski, "Optimizing neutron production rates form D-D fusion in an inertial electrostatic confinement device", Fusion Sci. Technol., Vol. 47, No. 4, p. 1260, 2005.
- [3] R. L. Hirsch, "Inertial-electrostatic confinement of ionized fusion gases", Appl. Phys., Vol. 38, No. 11, p. 4522, 1969.
- [4] S. K. Wong and N. A. Krall, "Potential well formation by injection of electrons with various energy distributions into a sphere or a slab", Phys. Fluids, B4, p. 4140, 1992.
- [5] 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, No. 5, p. 611, 1997.
- [6] 현정수, 최승길, 심재학, 강형부, "SF6 가스 방전 특성의 유한요소해석", 전기전자재료학회는 문지, 13권, 3호, p. 265, 2000.
- [7] R. Löhner, "Finite element flux-corrected transport(FEM-FCT) for the euler and navier-stokes equation", Int'l J. Num. method in fluid, Vol. 7, p. 1093, 1987.

[8] N. Sato, "Discharge current induced by the motion of charged particles", J. Phys. D, Vol. 13, p. L3, 1980.

[9] S. K. Dhali and P. F. Williams, "Two-dimensional studies of streamer in gases", J. Appl. Phys., Vol. 62, No. 12, p. 4696, 1987.