

SCBF 장치에서 중성자 생성률 증대를 위한 수치해석

주흥진, 박정호, 고광철\*

한양대학교 전기공학과, 한양대학교 전기제어생체공학부\*

Numerical simulation for increment of neutron production rate in SCBF device

Heung-Jin Ju, Jeong-Ho Park, Kwang-Cheol Ko\*

Dept. of Electrical Eng., Hanyang University, Electricity & Control Biomedical Eng., Hanyang University\*

**Abstract** - Neutron production is very important to apply fusion energy through SCBF(Spherically Convergent Beam Fusion) device and its rate is proportional to the square of the ion current( $\propto I^2$ ). Also the ion current has a close relation with the potential well structure in grid cathode.

In this paper, the ion current is calculated for the increment of neutron production rate in a variety of grid cathode geometry. The atomic and molecular collision are taken into account by Monte Carlo Method and Potential is calculated by Finite Element Method. Main processes of the discharge is the ionization of  $D_2$  by fast  $D_2^+$  ion. As the number of a cathode ring is small and gap distance decreases, the ion current increases and neutron production rate will increase.

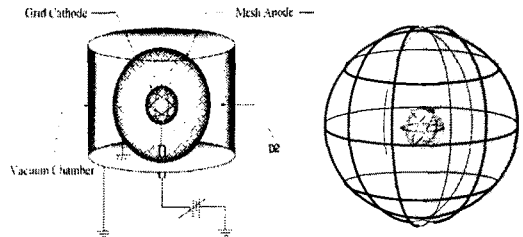


그림 1. SCBF 장치 및 수치해석 영역

1. 서 론

SCBF 장치는 구의 중심을 향해 주입된 이온 및 전자들이 정전계에 의해 그리드 음극의 중심부에 감금되어 고밀도의 코어(core)에서 핵융합반응을 발생시키는 장치이다. 보통 수십 mTorr의 압력에서 수십 kV의 인가전압에 의해 글로 방전모드에서 동작하며, 음극은 그리드 형태로 구성되어 있다. 이 장치는 기존의 핵융합장치(Tokamaks, Laser fusion 등)에 비해 구조가 간단하고, 소형이며, 휴대가 용이하다. 따라서 방사능 측정기(dosimeter calibrator), 수화물검사, 비파괴시험, 붕소 중성자 포획법(BNCT) 등과 같은 용도의 휴대용 중성자 발생자원으로 이용될 수 있다.[1][2][3]

본 논문에서는 수치해석을 통해 SCBF 장치의 방전특성인 star 모드 방전현상을 확인하였다. 또한 그리드 음극 중심부에서의 포텐셜 분포의 시간변화를 살펴보기 위해 전자, 이온 및 빠른 중성입자의 충돌현상을 해석하였으며, 중성자 생성률을 높이기 위한 방안으로 다양한 음극 그리드 구조에서의 D-D 핵융합 반응에 의한 이온전류를 계산하여 최적의 음극 그리드의 형상을 설계하였다.

2. 해석 모델 및 수치적 방법

2.1 해석모델

본 연구에서 해석하기 위한 2차원 SCBF 장치 모델은 그림 1과 같다. 양극과 음극은 각각 메쉬와 그리드 형태로 구성되어 있으며, 중심부에서 양극까지의 반경은 10[cm], 음극까지의 반경은 2.3[cm], 그리드 음극의 반경은 0.1[cm]이다. 그리드 음극에 -25[kV]의 전압을 인가하였고, 7[mTorr]에서,  $D_2$  기체를 사용하였다.

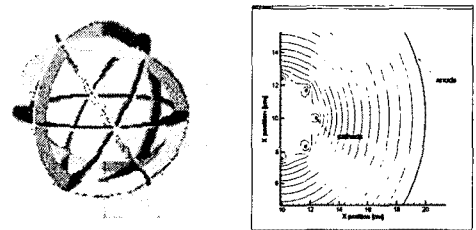


그림 2. 5링 구조의 그리드 음극 상세도 및 수치해석을 위한 2차원 단면도의 포텐셜 분포

2.2 수치적 방법

수치해석 방법으로 유한요소법을 이용하여 전체를 계산하였고, 방전의 개시를 시뮬레이션하기 위해 atomic process를 포함한 3차원 몬테칼로법을 사용하여 입자의 운동을 계산하였다. 전자( $e^-$ )와 중수소 이온( $D^+$ ,  $D_2^+$ ) 및 빠른 중성입자( $D^0$ ,  $D_2^0$ )가 주입자로 사용되었으며, 초기조건으로 에너지가 0[eV]인 1000개의 전자 및 중수소이온들을 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 스핀에 대한 몬테칼로 시뮬레이션은 전자의 경우와 같은 순서로 행해지나, 이온은 기체분자와 같은 정도의 성질을 가지기 때문에 기체분자의 속도에 주는 영향을 고려해야 한다. 이온의 충돌현상을 계산할 때, 탄성충돌의 경우에 입사이온의 에너지 및 산란에너지는 다음과 같다.[4][5]

$$\epsilon_{i, scat} = \epsilon_{i, inci} \cos^2 \chi \tag{1}$$

여기서  $\epsilon_{i, scat}$ ,  $\epsilon_{i, inci}$ 는 각각 입사 이온의 에너지 및 산란 에너지이다. 또한 등방산란의 경우에 편향각  $\chi$ 와 방위각  $\phi$ 는 각각 다음과 같다.

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

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

전하교환충돌의 경우, 빠른 입사이온은 느린 기체분자로부터 전자를 방출시키고(빠른 분자가 된다), 자신은 느린 산란이온이 된다. 느린 이온은 등방산란을 하며, 편향각  $\chi$ 와 방위각  $\phi$ 는 다음과 같다.

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

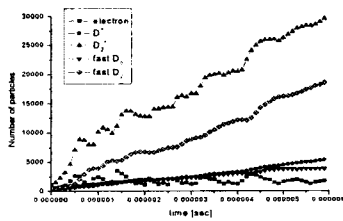
$$\phi = 2\pi r_4 \quad (5)$$

여기서,  $r_1, r_2, r_3, r_4$ 는 0과 1사이에서 균일하게 분포된 난수이다. 또한 산란된 이온의 속도는 Maxwellian 속도분포를 통해 수치적으로 결정된다.

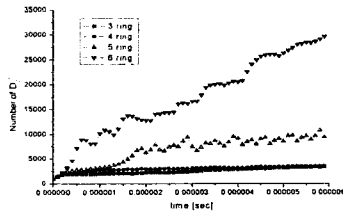
Time step은 전자운동 계산 시에는 10[ps]로, 이온 및 중성입자는 1[ns]로 하였으며, 또한 포텐셜의 급격한 변화는 거의 없으므로 10[ns]마다 유한요소법을 이용하여 전계 값을 갱신하였다.

### 3. 해석 결과

본 연구에서는 방전특성에 큰 영향을 미치는 요소인 그리드 음극의 형태를 변화시키며 수치해석을 하였다. 그리드 음극을 구성하는 링이 각각 3, 4, 5, 6개 일 때, SCBF 장치의 중심을 자른 단면은, 양극은 원으로 나타나며, 음극은 링의 개수에 따라 4, 6, 8, 12개의 작은 원으로 구성된다. (그림 2 참조) 또한 음극 그리드의 크기의 변화에 따른 방전 현상도 해석하였다.



(a) 6링 구조에서 입자 수

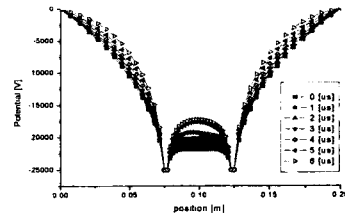


(b)  $D_2^+$  이온의 수

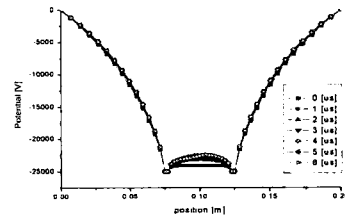
그림 3. 6링 구조에서의 입자의 수 및 다양한 음극 구조에서의  $D_2^+$  이온의 수

그림 3(a)는 6링 구조에서 입자들의 수를 나타낸 것으로, 방전에 가장 큰 영향을 미치는 것은  $D_2^+$ 과 빠른  $D_2^0$  입자이다. 또한 그림 3(b)는 링의 개수에 따른  $D_2^+$  이온의 수를 나타낸 것으로 링의 수가 많을수록 더

많은  $D_2^+$  이온이 생성된다.



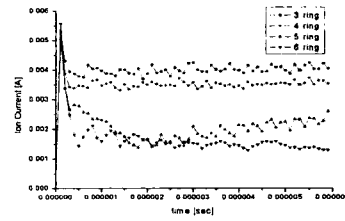
(a) 4링 구조



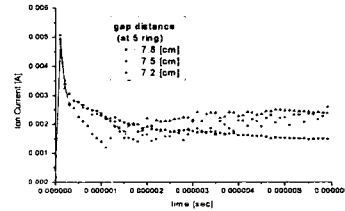
(b) 6링 구조

그림 4. 시간에 따른 포텐셜 분포

그림 4는 4링 및 6링 구조에서 x축 위치가 0.1[m]일 때 y축에서의 시간에 따른 포텐셜 분포를 보인 것이다. 시간의 경과에 따라 중심축에서의 포텐셜이 증가하게 있으며, 포텐셜 우물 구조를 확인 할 수 있다. 링의 개수가 많아질수록 음극의 중심부에 포획되는 전자의 수가 늘어나게 되고, 전자에 의한 충돌은 주로 음극의 중심부에서만 발생된다. 따라서 링의 개수가 많을 때에는 포텐셜 분포에 큰 변화가 없게 된다.



(a) 링의 개수에 따라

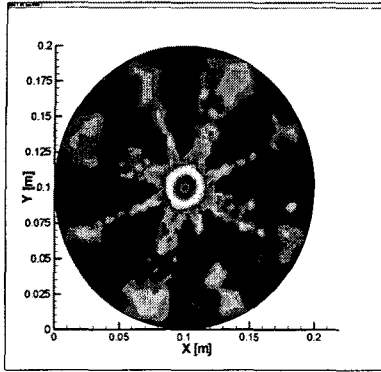


(b) 갭 간격에 따라

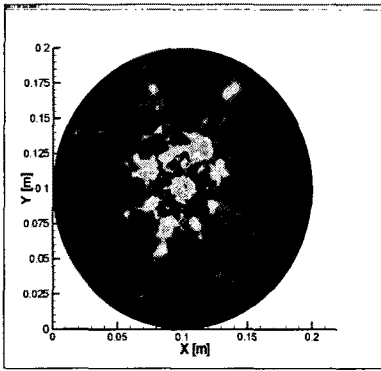
그림 5. 이온전류 분포

그림 5는 Sato 방정식[6]을 통해 계산된 이온전류분포를 나타낸 것이다. 그림 5(a)에서 이온전류는 링의 개수가 작을수록 더 크게 되는데, 이것은 비록 링의 개수가 작을 때 적은 이온의 수에도 불구하고, 음극 내부의 전계가 훨씬 크게 되기 때문이다. 즉, 이온전류는 포텐셜 우물구조와 밀접한 관계를 가짐을 알 수 있다. 그림

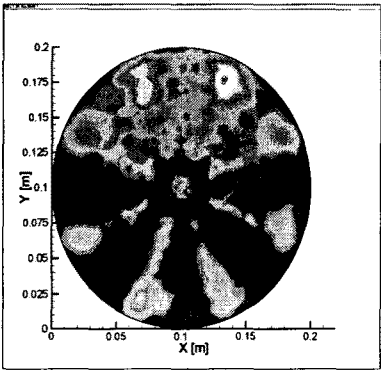
5(b)는 5링 구조에서 그리드 음극과 양극의 간격의 변화에 따른 이온전류를 나타낸 것으로, 갭 길이가 작을수록 거의 동일한 전계에서 음극 내부의 많은 이온에 의해 이온전류가 더 크게 나타난다.



(a) 전자



(b) 이온



(c) 빠른 중성입자

그림 6. 5링 구조에서 각 입자의 전리위치

그림 6은 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 그리드 음극 근처 및 중심부에서, 빠른 중성입자는 양극 근처에서 전리충돌이 주로 발생하는 것을 볼 수 있으며, 이것을 통해 SCBF 장치의 star 모드 방전현상을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

SCBF 장치는 구 중심부에서의 핵융합 반응에 의해 중성자가 발생되는데, 발생률이 이온 전류의 제곱에 비례해서 나타나게 된다.[1] 본 연구에서는 중성자 발생률을 증대하는 방향으로 다양한 음극 구조 및 gap 길이의 변화에 따른 이온전류 분포를 정성적으로 계산하였다. 주요결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 방전에 가장 큰 영향을 미치는 입자는  $D_+^2$ 이다.
  - 2) 그리드 음극의 중심부에서 단일 포텐셜우물 구조를 확인할 수 있었으며, 링의 개수가 많을수록 포텐셜우물이 더 작아진다.
  - 3) 그리드 음극을 구성하는 링의 개수가 더 적을수록, gap 길이가 더 작을수록 더 큰 이온전류를 얻게 되며, 중성자 발생률이 증대될 것이다.
  - 4) SCBF 장치의 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, "Study on an Inertial Electrostatic Confinement Fusion as a Portable Neutron Source", *Fusion engineering and design*, Vol. 42, pp. 207, 1998
- [2] Y.Gu, G.H.Miley, "Experimental Study of Potential Structure in a Spherical IEC Fusion Device", *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, Vol. 28, pp. 331, 2000
- [3] M.Ohnishi, K.H.Sato, "Correlation Between Potential Well Structure and Neutron Production in Inertial Electrostatic Confinement Fusion", *Nuclear Fusion*, Vol. 37, pp. 611, 1997
- [4] 日本電氣學會編, "氣體放電 シミュレーション技法", 第 140 号, 1974
- [5] 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, pp. 65, 1991
- [6] N.Sato, "Discharge current induced by the motion of charged particles", *J. Phys. D*, Vol. 13, pp. L3, 1980