

IEC 장치에서 이중 그리드 음극의 영향

주흥진¹, 김봉석¹, 황휘동¹, 박정호¹, 최승길², 고광철^{1,a}

¹ 한양대학교 전기·생체공학부

² 안산공과대학 전기공학과

Effect of Double Grid Cathode in IEC Device

Heung-Jin Ju¹, Bong-Seok Kim¹, Hui-Dong Hwang¹, Jeong-Ho Park¹, Seung-Kil Choi², and Kwang-Cheol Ko^{1,a}

¹ Department of Electrical and Biomedical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

² Department of Electrical Engineering, Ansan College of Technology, Ansan 425-792, Korea

(Received July 2, 2010; Revised August 18, 2010; Accepted August 23, 2010)

Abstract: We have proposed a new configuration on the cathode structure to improve a neutron yield without the application of external ion sources in an inertial electrostatic confinement (IEC) device. A neutron yield in the IEC device is closely related to the potential well structure generated inside the cathode and is proportional to the ion current. Therefore, the application of a double grid cathode structure to the IEC device is expected to produce a higher ion current and neutron yield than at a single grid cathode due to a high electric field strength generated around the cathode. These possibilities were verified as compared with the ion current calculated from both shape of the single and double grid cathode. Additionally from the results of ion's lives and trajectories examined at various outer cathode voltages and grid cathode configurations by using particle simulations, the validity of the double grid cathode was confirmed.

Keywords: Neutron yield, Inertial electrostatic confinement device, Double grid cathode, Ion current

1. 서 론

IEC (inertial electrostatic confinement) 장치는 구의 중심부를 향해 주입된 이온과 전자가 정전계에 의해 그리드 음극 내부에 포집되어 핵융합에 의해 중성자를 발생시키는 장치로써, 수십 kV의 인가전압 및 수 mTorr의 압력에서 글로방전을 일으킨다 [1]. 이 장치는 구조가 간단하고, 소형이며, 휴대가 가능하므로 다양한 분야에 응용될 수 있다. IEC 장치에서 전자들은 양극으로 이동하여 사라지고, 중수소 이온들은 음극을 향해 가속된다. 이들 이온 중 일부는 음극에 도달되고, 일부는 중공음극을 통과하여 수차례 횡단하게 된다. 많은

이온들이 음극 중심부에서 발생한 퍼텐셜 우물로부터 높은 에너지를 얻게 되고, 왕복운동을 하는 동안 음극의 내부영역에서 다른 이온들이나 또는 배경기체들과 핵융합 반응을 발생시키며, 이때 반응의 결과로써 중성자가 발생된다 [1,2].

관성 정전 밀폐 방식을 이용한 중성자 발생장치는 1950년대 미국의 텔레비전 개발자인 P. T. Fansworth [3]에 의해 처음 고안되었으며, 1960년대에 들어와서는 R. L. Hirsch [4]에 의해 전자빔을 대신한 이온빔을 이용하여 플라즈마 밀도를 높이려는 실험이 행하여졌고, 이온총을 이용한 장치에서 D-T 핵융합 반응에 의한 중성자가 관측되었다. 이후 핵융합의 연구가 자기장을 이용하여 플라즈마를 밀폐시키는 핵융합 장

a. Corresponding author; kwang@hanyang.ac.kr

치인 Tokamaks에 집중되면서 관성정전을 이용한 핵융합 연구가 일시 중지되었다가, 소형의 중성자원으로써의 활용 가능성이 제기되면서 1990년대부터 다시 연구가 행해지고 있다.

최근 환경, 산업 및 의료분야에서 중성자 응용에 대한 수요가 급증하고 있으며, 그와 더불어 높은 중성자 수율을 요구하고 있다. 그러나 비교적 간단한 중성자 발생 구조 및 원리에 비해 IEC 방식의 중성자 발생 장치는 중성자 수율이 낮은 문제점이 있다. 이를 개선하기 위해 플라즈마 이온원의 주입, 이중 그리드 형상의 도입, 전극의 티타늄 코팅, 자계를 이용한 IEC 장치 등 다양한 기술이 시도되고 있다 [5]. 그러나 이러한 기술들은 장치의 구조를 복잡하게 하여 형상 설계의 유용성을 제한하며, IEC 장치의 가장 큰 특성인 소형, 휴대성을 어렵게 한다.

본 연구에서는 IEC 장치의 응용에서 중요한 요소인 중성자 생성률을 높이기 위해 기존에 주로 이용된 외부 이온원을 주입하는 방식 대신 새로운 음극 형상으로 이중 그리드 음극을 제안한다. 대칭적으로 배치된 이중 그리드 음극이 적용된 IEC 장치는 기존의 장치에 비해 음극 주위에 발생된 고전계에 의해 큰 이온전류의 발생이 가능할 것으로 예상되며, 수치해석을 통해 이러한 사실을 검증할 것이다. 또한 다양한 이중 그리드 음극 구조에서 높은 이온 전류를 발생시킬 수 있는 인가전압 및 음극의 형상이 모의되었으며, 이온 궤적 및 수명을 계산하여 빔-빔 충돌에 의한 중성자 생성 가능성을 확인하였다.

2. 해석 모델 및 수치적 방법

2.1 해석 모델

기본적인 IEC 방식의 중성자 발생장치는 메쉬 형태로 되어 있는 양극과 그리드로 구성되는 음극, 음극에 인가되는 전원 및 진공장치로 구성되어 있다. 양극은 진공용기 내의 압력조절 및 작용기체의 유동을 쉽게 하고, 방전현상의 관측을 용이하게 하기 위하여 메쉬 형태의 스테인리스 스틸 망으로 제작된다. 또한 음극은 줄열과 이온들의 충돌에 의한 발열현상과 마모에 견딜 수 있도록 스테인리스 와이어로 사용되며, 기본적으로 90% 이상의 투과성 (transparency)을 가지기 위해 와이어 여러 개를 교차시켜 최장살 모양의 구형 그리드 형태로 구성된다.

본 연구에서는 그림 1에서처럼 대칭적으로 배치된 이중 와이어 그리드 음극을 가지는 2차원 원통형 IEC 장치의 단면을 해석모델로 하여 수치해석을 수

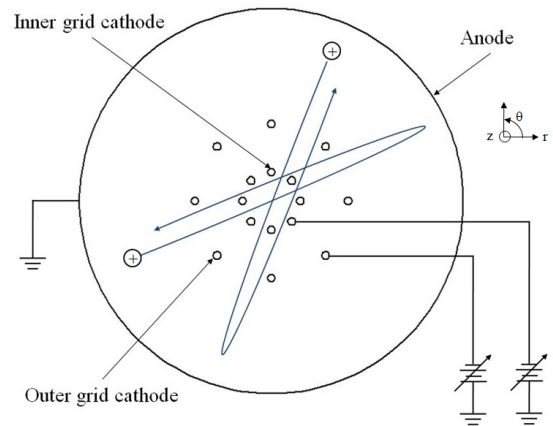


Fig. 1. 2-D cylindrical IEC device with a double grid cathode structure.

행하였다. 기본적으로 양극의 반경은 10 cm, 그리드 음극의 와이어 반경은 0.2 cm로 설정하였다. 그리드 음극 사이의 거리, 양극과 외부 음극 사이의 갭 길이 및 두 음극 사이의 거리는 각 실험에 따라 가변시켰다.

2.2 유체 시뮬레이션

본 연구에서는 하전입자의 거동을 해석하고, 퍼텐셜 분포 등의 확인을 위해서 전자와 이온의 운동을 일종의 유동현상으로 해석하는 유체법을 이용하여, IEC 장치에 이온과 전자를 모두 주입했을 때 장치에서 발생하는 퍼텐셜 우물 구조의 시간에 따른 거동과 이온 전류를 계산하였다.

수치해석기법으로 FE-FCT (finite-element flux-corrected transport) [6]법을 이용하여 연속방정식을 계산하였고, 또한 Poisson 방정식의 해석기법으로는 여러 전극 형상에 유연하게 대처할 수 있고, 특성변화가 심한 영역을 세분화하여 보다 더 정확히 기술할 수 있는 FEM법을 이용하였다.

하전입자의 거동을 해석할 때 사용되는 전자 및 이온에 대한 연속방정식과 전계에 대한 Poisson 방정식은 다음과 같다 [7].

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

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

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

$$E = -\nabla V$$

여기서, ρ , W 는 각각 하전입자의 밀도 및 속도이고, 첨자 e , p 는 각각 전자 및 이온을 나타낸다. D_e , α 는 전자의 확산계수 및 전리계수이다. 또한, 이온전류의 계산은 Sato 방정식을 이용하여 다음과 같이 계산하였다 [8].

$$I = \frac{e}{V} \int_S [(\rho_p W_{px}) E_{Lx} + (\rho_p W_{py}) E_{Ly}] dx dy \quad (2)$$

여기서, I , V 는 각각 이온 전류밀도 및 인가전압을 E_{Lx} , E_{Ly} 는 x , y 성분의 라플라스 전계의 크기이다.

재결합 및 이온의 확산은 고려하지 않았고, 고전압 저전류를 다루기 때문에 자계의 영향도 고려하지 않았다. 이차전자 방출계수는 방전의 지속성을 유지하기 위해 $\gamma_i = 0.01$ 로 하였고, 이온의 음극 충돌만 고려하였다. 또한 시간간격은 10 ps로 하였다. 전자 및 이온의 초기밀도로는 계산시간을 줄이기 위해 그리드 음극 근처에 10^8 cm^{-3} 의 크기를, 그 외의 영역은 10^4 cm^{-3} 의 크기를 각각 부여하였다.

2.3 입자 시뮬레이션

다양한 음극 구조 및 인가전압에서 atomic processes 및 탄성 충돌을 고려하지 않은 중수소 이온 빔(D_2^+)의 궤적이 조사되었으며, 궤적운동 동안의 이온들의 평균수명을 계산하였다 [9]. 양극 근처에 무작위로 배치된 1,000개의 중수소 이온이 1 μs 까지의 비행시간 동안 추적되었으며, 이온은 전극과의 충돌에 의해서만 소멸된다고 가정하였다.

전계에 의해 가속된 이온들은 다음과 같은 궤적 운동을 하게 된다 [10].

$$v_i(t + \Delta t) = v_i(t) + a \Delta t \quad (3)$$

$$r_i(t + \Delta t) = r_i(t) + v_i \Delta t$$

여기서 가속도 a 는 eZE/M_i 이다. 또한 eZ 는 이온 전하량, E 는 전계 세기, M_i 는 이온의 질량이다. 또한 시간간격 Δt 는 1 ps로 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유체 시뮬레이션

본 연구의 목적은 이중 그리드 음극이 중성자 수율에 미치는 영향을 조사하기 위한 것으로 이온전류의

Table 1. Ion current according to a variation of voltages applied to the outer cathode.

Outer cathode voltage [V]	Single grid cathode	Double grid cathode		
		-300	-500	-700
Ion current [A]	0.10564	6.84725	3.79699	2.49308

Table 2. Ion current according to a variation of gap distances.

Gap distance [cm]	Single grid cathode	Double grid cathode		
		5.3	5.8	6.3
Ion current [A]	0.10564	5.07549	6.84725	8.62569

Table 3. Ion current according to a variation of distances between two cathodes.

Distance between two cathodes [cm]	Single grid cathode	Double grid cathode		
		2.0	2.5	3.0
Ion current [A]	0.10564	8.78344	8.62569	8.48926

정성적인 계산을 위해 실제 장치에서 사용되는 D_2 기체를 주입기체로 사용하는 대신, 실험데이터가 이미 알려져 있는 Ar 기체를 사용하였다 [11]. 또한 10 mTorr의 압력에서 양극에는 0 V, 내부 음극에는 -1,000 V의 일정한 전압을 인가하였으며, 외부 음극에는 다양한 음전압을 인가하여 그 특성을 확인하고, 단일 그리드 음극이 적용된 IEC 장치와 비교하였다. 이 때 크기를 비교하기 위해 이용된 단일 그리드 음극은 음극의 중심과 장치의 중심사이의 거리가 1.5 cm인 위치에 존재한다.

먼저, 이중 그리드 음극에서 내부 음극의 위치를 단일 그리드 음극의 경우와 같은 위치에, 외부 음극의 위치는 두 음극의 중심사이의 거리가 2.5 cm인 위치에 있다고 가정한 후, 외부 음극에 각각 -300, -500 및 -700 V의 전압을 인가하였을 때, 12 ns에서의 이온 전류를 계산하여 표 1에 나타내었다. 다음으로 두 음극 사이의 거리를 일정하게 유지하고, 외부 그리드 음극에 -300 V의 전압을 인가했을 때, 그리드 음극의 위치 변화(즉, 양극과 외부 음극 사이의 갭 길이 변화)에 따른 결과를 표 2에 나타내었다. 표 1과 2에서 외부 음극에 -300 V를 인가한 경우와 갭 길이가 더 긴 경우에서 높은 이온전류가 발생하는 이유는 내부

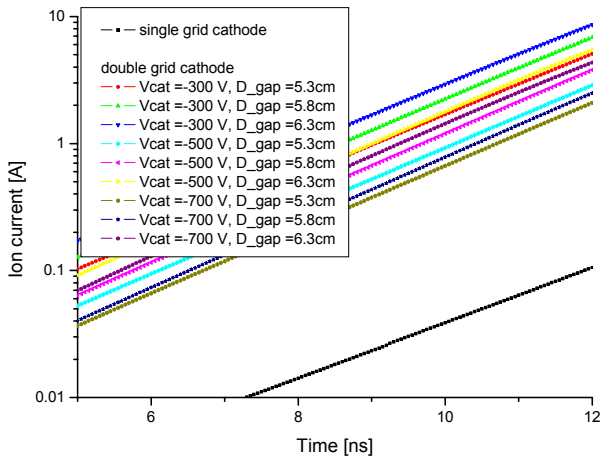


Fig. 2. Ion current as a function of time according to a variation of outer cathode voltages and gap distances.

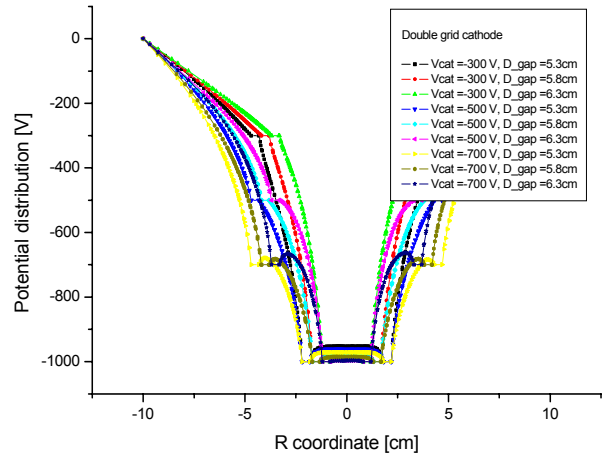


Fig. 3. Potential distribution in each condition at 12 ns.

음극 근처에서 고전계가 발생되며, 특히 식 (2)에 주어진 Sato 방정식에 의해 계산된 이온전류는 전계와 이온속도의 곱에 비례해서 결정되기 때문이다. 마지막으로 외부 그리드 음극에 -300 V를 인가하고, 내부 음극의 위치는 고정(중심부와 내부 음극의 중심간 거리 : 1.0 cm)시키며, 외부 음극의 위치만 변화시킨 경우, 즉, 두 음극 중심사이의 거리의 변화에 따른 이온전류를 계산하여 표 3에 나타내었다. 내부 음극 근처의 전계는 그 크기가 거의 일정하지만, 외부 음극 근처에 존재하는 작은 전계의 영향으로 이온전류에서 약간의 차이를 보인다. 표 3에서 볼 수 있듯이 이중 그리드 음극이 적용된 IEC 장치에서 발생한 이온전류는 단일 그리드 음극의 경우와 비교하여 그 크기가 최대 약 83배나 달할 정도로 크게 나타난다.

그림 2는 12 ns까지 시간의 함수로써 주어지는 이온전류의 크기를 나타낸 것으로 이온전류는 시간이 경과함에 따라 지수적으로 상승함을 확인할 수 있으며, 그 분포가 각 조건에서 일정한 경향을 보인다. 그림 3은 12 ns에서 퍼텐셜 분포를 나타낸 것이다. 음극 내부에서 얇은 퍼텐셜 우물 구조를 확인할 수 있으나, 단일 음극 구조에서보다 깊지 않으며, 두 음극 사이에서도 우물 구조도 확인할 수 있다. 특히 외부 음극에 높은 전압이 인가된 경우, 갭 길이가 긴 경우 두 음극 사이에서 더 깊은 우물이 관측되는데, 이러한 사실로부터 단일 그리드 음극구조와는 다르게 이중 그리드 음극의 경우에는 퍼텐셜 우물의 깊이가 이온전류에 큰 영향을 주지 못한다는 것을 알 수 있다 [7].

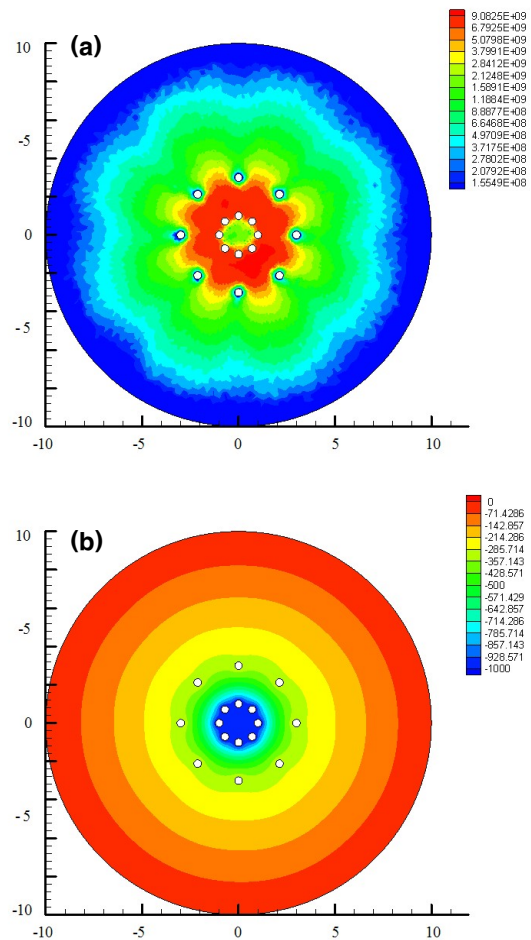


Fig. 4. Ion density (a) and potential (b) distributions. (outer cathode voltage : -300 V, gap distance : 6.3 cm, distance between two cathodes : 2.0 cm)

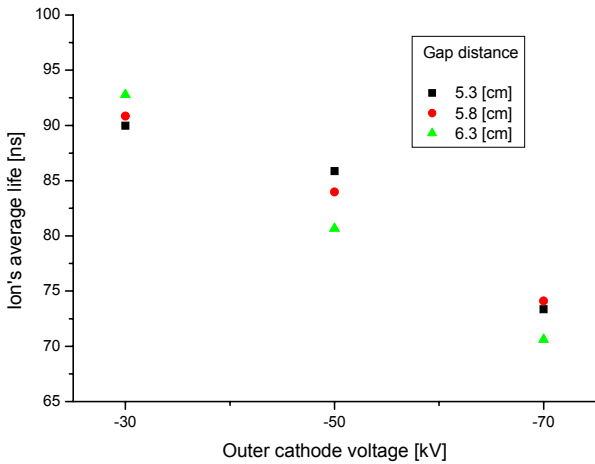


Fig. 5. Ion's average lives according to a variation of voltages applied to the outer grid cathode and gap distances.

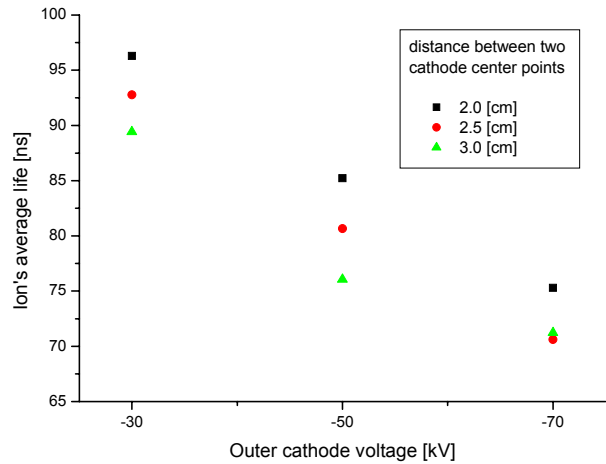


Fig. 6. Ion's average lives according to a variation of voltages applied to the outer grid cathode and distances between two cathodes.

그림 4는 12 ns에서 퍼텐셜 및 이온밀도의 공간적 분포를 나타낸 것이다. 음극 내부에서 이온 밀도가 집중되는 단일 그리드 음극 구조와는 다르게, 이중 그리드 음극 구조에서는 두 음극 사이에서 높은 이온 밀도 분포가 형성되며, 이에 따라 두 음극 사이의 얇은 퍼텐셜 우물이 생성됨을 확인할 수 있다. 따라서 음극을 향해 가속된 이온이 두 음극 사이의 퍼텐셜 우물에 갇힌 이온과의 핵융합 반응의 결과로 중성자를 발생시킬 것으로 예상된다.

3.2 입자 시뮬레이션

1 mTorr의 압력에서 양극에는 0 V, 내부 음극에는 -100 kV의 전압을 인가하였다. 그림 5와 6은 외부 음극 전압 및 음극의 위치를 변화시켰을 때, 음극에 충돌할 때까지 이온의 평균 수명을 나타낸 것이다. 음극 형상의 가변 조건은 유체해석 시와 동일하며, 단일 그리드 음극 구조에서 계산된 이온의 평균 수명은 87.945 ns이다. 이중 그리드 음극 구조에서 계산된 이온의 평균 수명 결과는 인가전압이 낮고, 갭 길이가 길 때, 또한 두 음극간 거리가 짧은 경우 높은 값을 보이는데, 이는 유체해석에서 보인 결과와 유사하다.

이중 음극 구조는 음극의 투명성이 작고, 또한 음극 근처의 고전계에 의해 중수소 이온이 음극과의 충돌 가능성이 크기 때문에 -30 kV를 인가한 경우를 제외하고는 단일 음극 구조에 비해 이온의 수명이 작지만

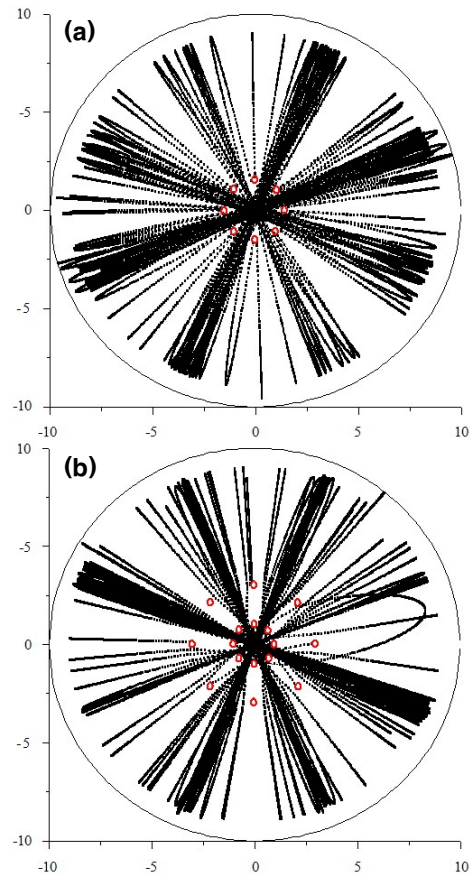


Fig. 7. Ion trajectories in (a) the single grid cathode and (b) double grid cathode. (outer cathode voltage : -30 kV, gap distance : 6.3 cm, distance between two cathodes : 2.0 cm)

그림 7에서 보는 바와 같이 이온빔의 음극 내부로의 집중도가 크므로, IEC 장치의 특성인 스타모드 방전 특성을 더 명확하게 확인할 수 있으며, 높은 전계에 의해 가속된 이온들의 빔-빔 충돌에 의한 중성자 발생 가능성은 더 높다고 볼 수 있다.

4. 결 론

수치적 해석방법을 이용하여 IEC 장치에서 중성자 수율 증대를 위해 다양한 인가전압 및 음극 형상의 변화에 따른 이중 그리드 음극 구조의 영향을 검증하였다.

먼저 유체해석 결과, 이중 그리드 음극 구조에서 더 큰 이온전류를 얻을 수 있었으며, 이 때 발생하는 이온전류의 크기는 단일 그리드 음극 구조와 달리 퍼텐셜 우물의 깊이에 무관함을 확인하였다. 또한 입자 해석을 통해 이중 그리드 음극 구조에서 이온의 평균 수명이 더 길고, 이온빔이 음극 내부로 더 집중됨을 확인할 수 있었다. 특히 유체해석에서 최대 이온전류의 발생 조건과 동일한 조건에서 가장 긴 이온의 평균 수명을 얻을 수 있었다.

결론적으로 이중 그리드 음극이 적용된 IEC 장치에서 중성자가 더 효율적으로 발생될 수 있을 것이며, 이때 생성되는 중성자는 두 음극사이 및 음극의

중심부에서 발생된 빔-빔 핵융합 반응의 결과일 것으로 판단된다.

REFERENCES

- [1] A. L. Wehmeyer, R. F. Radel, and G. L. Kulcinski, *Fusion Sci. Tech.* **47**, 1260 (2005).
- [2] T. Takamatsu, K. Masuda, T. Kyunai, and K. Yoshikawa, *Nucl. Fusion* **46**, 142 (2006).
- [3] P. T. Farnsworth, US Patent 3,258,402 (1966).
- [4] R. L. Hirsch, *Appl. Phys.* **38**, 4522 (1969).
- [5] J. F. Santarius, *10th US-Japan Workshop on Inertial Electrostatic Confinement Fusion* (Kyoto University, Kyoto, Japan, 2008) p. 107.
- [6] R. Löhner, K. Morgan, J. peraire, and M. Vahdati, *Int'l J. Num. Method in Fluids* **7**, 1093 (1987).
- [7] H.-J. Ju, J.-H. Park, and K.-C. Ko, *J. KIEEME* **20**, 471 (2007).
- [8] N. Sato, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **13**, L3 (1980).
- [9] G. H. Miley, Y. Gu, J. M. DeMora, R. A. Stubbers, T. A. Hochberg, J. H. Nadler, and R. A. Anderl, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **25**, 733 (1997).
- [10] C. K. Birdsall and A. B. Langdon, *Plasma Physics via Computer Simulation* (McGraw-Hill, NY, 1985).
- [11] A. L. Ward, *J. Appl. Phys.* **33**, 2789 (1962).