

구형 집속 빔 핵융합 장치의 방전특성 연구

박 정호, 주 흥진, 김 봉석, *고 광철
 한양대학교 전기공학과, *한양대 전자전기컴퓨터공학부

A Study on Discharge Characteristics of Spherically Convergent Beam Fusion Device

Park Jeong-Ho, Ju Heung-Jin, Kim Bong-Seok, *Ko Kwang-Cheol
 Dept. of Electrical Eng., Han-yang University, * Div. of Electrical and Computer Eng., Han-yang University

Abstract - Spherically convergent beam fusion device accelerate ions, which are generated between outer anode and inner grid cathode, toward the spherical center. The collision of opposite direction ions give rise to fusion reactions. Spherically convergent beam fusion device is very simple and compact, therefore the device has a potential that is applied to a portable neutron source. An experimental device consist of a 20cm-diameter spherical mesh-type anode and 7cm-diameter open spherical grid cathode and was maintained at a constant pressure of about 1333 Pa by feeding argon gas.

한 의존도가 높지만, 계산시간이 훨씬 짧고 전체적인 현상을 살필 수 있는 장점이 있다[3]. 본 연구에서는 FCT법을 이용하여 연속방정식을 해석하였다. 유체법을 지배하는 연속방정식은 대류항이 지배적인 1차의 hyperbolic 형태를 가지며, 공간적 변화가 매우 커서 저차의 근사를 통해서 해석하면 지나친 수치 확산이 발생하며, 고차의 방법으로 접근하면 변화율이 큰 영역에서 수치 진동이 발생하여 해가 음의 값이 나오는 경우도 있다. 이와 같은 오류를 방지하기 위해 저차해와 고차해를 적절히 사용하여 해를 얻을 수 있는 FCT법을 이용하면 수치 확산과 수치 진동이 없는 해를 얻을 수 있다[4]. 또한 해석 기법으로는 여러 전극 형상에 유연하게 대처할 수 있고, 특성변화가 심한 영역을 세분화하여 보다 더 정확히 기술할 수 있는 FEM법을 이용하였다.

1. 서 론

구형 집속 빔 핵융합은 텔레비전 발명자인 Farnsworth에 의해 1950년대에 최초로 제안되었고[1], 1970년대에 Hirsch에 의해 실험적으로 연구되었다. Farnsworth는 구의 중심에 전자 빔을 집속함으로써 전자 빔과 장치내의 중성 분자들 사이의 충돌에 의해 발생된 이온들이 빔에 의해 형성된 전기에 의해 구의 중심을 향하여 가속되어, 구의 중심에서 핵융합 반응이 야기될 것이라고 생각하였다. Hirsch는 전자 빔이 아닌 이온 빔을 사용한 실험을 통하여 초당 10²개의 D-T 중성자 발생을 관측하였다. 1990년대 일리노이 대학에서는 이온원 없이 글로방진을 기초로 grid 형태의 음극을 갖는 간단한 장치를 이용하여 초당 10⁷ 정도의 정상상태 D-D 중성자 발생을 입증하였다[2].

본 논문에서는 시뮬레이션을 통하여 구형 집속 빔 핵융합 장치의 방전특성을 조사함으로써 장치 내에서의 동작 메커니즘을 파악하고 중성자 발생률 증대방안을 모색하였다.

2. 본 론

2.1 구형 집속 핵융합 장치

본 논문에서는 직경 22cm, 높이 20cm의 진공용기 안에 0.5mm pitch stainless steel mesh로 만들어진 직경 20cm의 구형 양극과 동심원적으로 놓여진 2mm stainless steel wire로 제작된 직경 7cm의 grid 음극으로 구성된 장치를 사용하였다. 장치 내에는 Ar 가스를 주입함으로써 1333Pa의 일정 압력을 유지하고, grid 음극에 -40kV의 전압을 인가하였을 때 방전특성을 연구하였다.

2.2 구형 집속 핵융합 장치의 전산모사

하전입자의 거동을 해석하고, potential 분포 등의 확인을 위해서 전자와 이온의 운동을 일종의 유동현상으로 해석하는 유체법을 이용하여 거시적으로 접근하였다. 이러한 접근 방법은 운동을 모의할 수 없고, 실험식에 대

2.2.1 지배방정식

유체법으로 하전입자를 해석할 때 사용되는 연속방정식과 Poisson 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho_e}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho_e W_e) + \nabla^2(D\rho_e) + \rho\alpha |W_e|$$

$$\frac{\partial \rho_p}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho_p W_p) + \nabla^2(D\rho_p) + \rho\alpha |W_e|$$

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

$$E = -\nabla V$$

여기서 ρ_e , ρ_p , W_e , W_p 는 각각 전자, 이온의 밀도 및 속도를, D , α 는 확산계수, 전리계수, e , ϵ_0 는 전자의 전하량, 유전율을 나타낸다.

2.2.2 FCT 알고리즘

특성이 급변하는 현상의 해석을 위해 본 연구에서는 FCT법을 아래와 같은 과정으로 구현하였다[5]

1. 임의의 저차의 방법을 통해 Low-order element contribution (LEC) 계산
2. 임의의 고차의 방법을 통해 High-order element contribution (HEC) 계산
3. Anti-diffusive element contribution (AEC) 계산
 $AEC = HEC - LEC$
4. 저차해 계산

$$U^L = U^n + \sum_{el} LEC = U^n + \Delta U^L$$

5. 새로운 최대 또는 최소가 발생되지 않도록 AEC 가중

$$AEC^c = C_{el} \times AEC, \quad 0 \leq C_{el} \leq 1$$

6. 가중된 AEC를 이용하여 해를 갱신

$$U^{n+1} = U^L + \sum_{el} AEC^c$$

2.2.3 수치해석 결과

양극과 음극 사이의 거리가 일정한 경우, 압력이 낮아질수록 이온밀도가 증가한다.

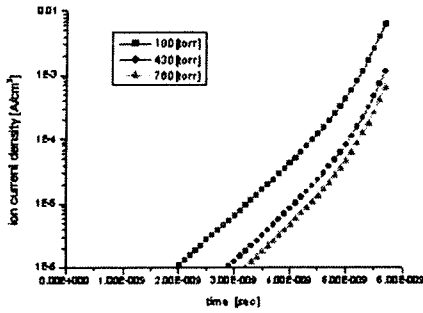


그림 1. 압력의 변화에 따른 이온밀도의 변화 (양극과 음극사이의 거리가 7.5cm인 경우)

압력이 일정한 경우 양극과 음극사이의 거리를 변화시키면, 시간이 경과할수록 거리가 먼 경우 이온밀도가 커진다.

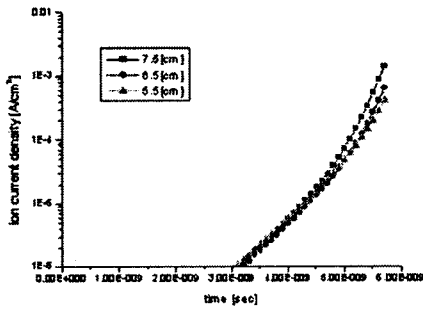
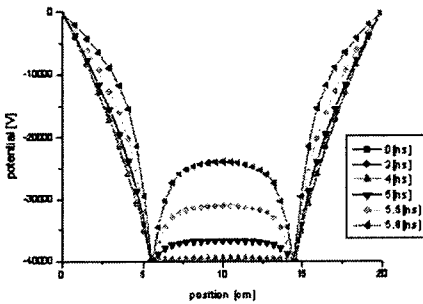
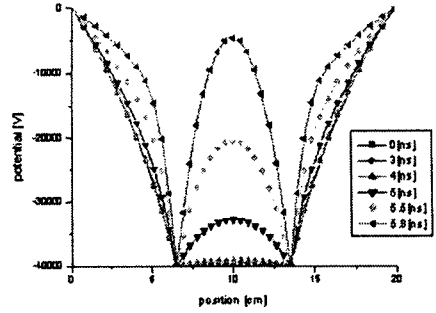


그림 2. 양극과 음극사이의 거리를 변화시킬 때 이온밀도의 변화 (압력이 101325 Pa일 경우)

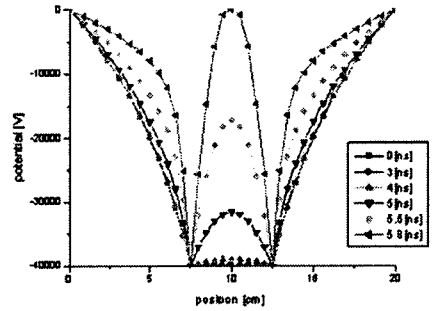
일정한 압력 하에서 양극과 음극사이의 거리를 변화시킬 때, 전위분포를 보면 음극 부근의 전위가 가장 높고 구의 중심부에서의 전위는 시간이 지날수록 작아짐을 알 수 있다. 구 중심부에서의 전위는 양극과 음극사이의 거리가 클수록 시간에 따른 변화량이 급격하다.



(a) 양극과 음극사이의 거리가 5.5cm일 경우



(b) 양극과 음극사이의 거리가 6.5cm일 경우



(c) 양극과 음극사이의 거리가 7.5cm일 경우

그림 3. 대칭축 상에서 시간에 따른 potential의 변화 (압력이 101325 Pa일 경우)

압력과 두 전극사이의 거리가 일정할 때, 시간에 따른 이온 밀도의 변화를 보면 시간이 경과할수록 구 중심부의 이온밀도가 증가해 음극 근처의 밀도와 거의 같아짐을 알 수 있다. 즉, 구의 중심부에 이온이 집중함을 알 수 있다.

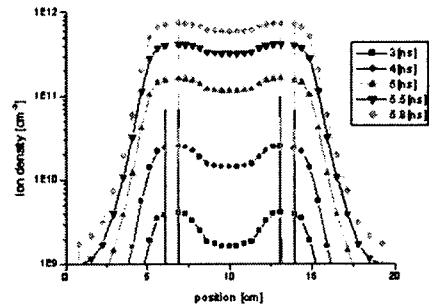


그림 4. 대칭축 상에서 시간에 따른 이온밀도의 변화 (두 전극사이의 거리 6.5cm, 압력 101325 Pa인 경우)

2.2.4 중성자 발생량 증대방안

구형 집속 빔 핵융합 장치에서 Ar 기체 대신에 중수소 기체를 사용하면 구 중심부에서의 핵융합 반응에 의하여 중성자가 발생한다. 핵융합 반응은 빔과 빔 사이의 반응과 빔과 주변기체 사이의 반응이 있는데, 두 경우 모두 방전 전류에 비례하여 핵융합 반응이 발생한다. 즉, 중성자 발생률이 방전 전류에 비례한다고 볼 수 있다.

따라서, 중성자 발생률을 높이기 위해서는 방전 전류를 증대하여야 한다. 수치해석의 결과에 의하면 실험장치 내 압력을 낮추고 양극과 음극사이의 거리를 크게 하

면 방전 전류가 증가할 것이다.

3. 결 론

수치적 해석 방법을 통하여 직경 20cm의 구형 양극과 동심원의 구형 grid 음극으로 구성된 구형 집속 빔 핵융합 장치의 방전특성을 조사하였다. 압력, 두 전극사이의 거리 및 시간의 변화에 따른 이온밀도의 변화를 모의하였고, 대칭축 상에서 시간에 따른 potential의 변화를 양극과 음극사이의 거리가 5.5, 6.5, 7.5cm인 경우로 나누어 모의하였다. 모의실험 결과 구형 집속 핵융합 장치의 경우 중성자 발생률은 장치 내 압력과 두 전극사이의 거리와 관계가 있음을 알 수 있었다.

본 논문에서는 구형 집속 핵융합 장치에 있어서 하전 입자의 운동을 거시적으로 접근하였지만, 더욱 명확한 방전특성을 파악하기 위해서는 하전입자의 운동에 대한 해석과 grid 음극 형태에 따른 방전특성도 함께 연구될 필요성이 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] P. Farnsworth, "Electric discharge device for producing interactions between nuclei", U.S. Patent 3258402, June 28, 1966.
- [2] G. H. MILEY et al, "Inertial-Electrostatic Confinement Neutron/Proton Source", Proc. 3rd Int. Conf. Dense Z-Pinches, 1994, p. 675, American Institution of Physics, New York, 1994.
- [3] 심재학, "코로나 및 유사스파크 방전 현상에 대한 시뮬레이션", 한양대학교 박사학위 논문, 1999.
- [4] D. L. Book, J. P. Boris and K. Hain, "Flux-Corrected Transport II, Generalizations of the method", Journal of Computational Physics, Vol. 18, pp. 248-283, 1975.
- [5] RAINALD L. HNER, "Finite Element Flux-Corrected Transport(FEM-FCT) for the Euler and Navier-Stokes Equations", International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 7, pp. 1093-1109, 1987.