

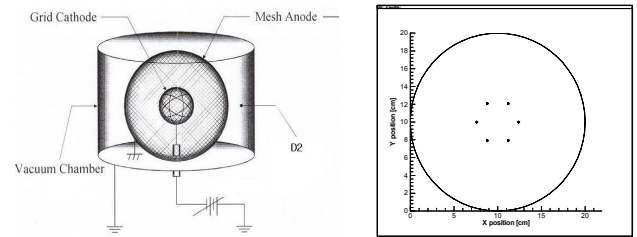
이온전류 증대를 위한 구형 집속 빔 핵융합 장치의 최적 설계

주흥진*, 김봉석*, 황휘동*, 박정호*, 최승길**, 고광철*
한양대학교*, 안산공과대**

Optimal Design for the Increment of Ion Current in Spherically Convergent Beam Fusion Device

Heung-Jin Ju*, Bong-Seok Kim*, Hui-Dong Hwang*, Jeong-Ho Park*, Seung-Kil Choi**, Kwang-Cheol Ko*
Hanyang University*, Ansan College of Technology**

Abstract - 구형 집속 빔 핵융합 장치에서 발생하는 중성자 생성률은 이온전류의 크기에 크게 의존한다. 본 논문에서는 이온전류의 크기를 증가시키기 위해 구조 설계에 주로 이용되는 다구체 실험계획법을 이용하여 최적의 설계 조건을 계산하였다. 최적화를 위해 그리드 음극 형상의 결정인자 및 압력을 설계 변수로 선택하였고, 설계변수가 이온전류의 크기에 미치는 영향력을 분석하여 최적의 조건을 도출하였으며, 예측된 최적 조건 변수값을 적용하여 효과를 검증하였다. 최적 모델로부터 더 큰 이온전류를 얻을 수 있었으며, 이는 더 깊은 포텐셜 우물에서 측정되었다.



〈그림 1〉 장치의 구성도 및 4링 구조의 해석모델

1. 서 론

구형 집속 빔 핵융합 장치(SCBF device)는 정전계에 의해 그리드 음극에서 구의 중심부를 향해 주입된 하전입자들을 밀폐시켜 고밀도의 중심영역에서 핵융합 반응을 발생시키는 장치이다. 보통 수십 mtorr의 압력과 수십 kV의 인가 전압에 의해 갭 사이에서 글로방전이 발생되며, 배경기체로는 중수소 기체가 이용된다. 주입된 전자들은 양극으로 이동하여 사라지고, 중수소 이온들은 음극을 향해 가속된다. 이들 이온 중 일부는 음극에 도달되지만, 대부분은 중공형태의 음극을 통과하여 수차례 횡단하게 된다. 이러한 왕복운동을 하는 동안 음극의 내부영역에서 다른 이온들이나 또는 배경기체들과 핵융합 반응을 일으키며, 이때 반응의 결과로써 중성자가 발생된다.

SCBF 장치는 기존의 다른 핵융합 장치와는 달리 구조가 간단하고, 소형이며, 휴대가 용이하므로 산업, 의료 분야 등 다양한 영역에서 활용될 수 있다. 핵융합 에너지를 위해 구형 집속 빔 핵융합 장치를 활용할 때 가장 중요한 요소는 주입된 이온전류에 대한 중성자 생성률이며, 이것은 그리드 음극 내부의 포텐셜 우물 구조와 밀접한 관계를 가지고 있다[1]. 이 포텐셜 우물 구조는 핵융합 반응을 발생시키는 빔-빔 충돌에 중요한 역할을 하므로 중성자 생성률을 효율적으로 증대시키기 위해서는 다양한 그리드 음극 구조에서 포텐셜 우물 구조와 이온전류와의 관계를 고찰하고, 최대 이온전류가 흐르는 조건을 구할 필요가 있다.

본 논문에서는 중성자 생성률을 높이기 위한 방안으로 대표적 실험계획법인 다구체 실험계획법을 그리드 음극의 구조 설계에 적용하여 큰 이온전류를 발생시킬 수 있는 최적의 조건을 도출하였으며, 포텐셜 우물 구조의 형상과 이온전류와의 관계를 고찰하였다.

2. 그리드 음극 구조의 최적화 설계를 위한 실험계획법

2.1 구형 집속 빔 핵융합 장치의 해석모델 및 설계변수 설정

그림 1에서처럼 구형 집속 빔 핵융합 장치의 중심을 자른 2차원 단면을 해석모델로 삼았다. 메쉬 형태로 구성된 양극의 직경은 20[cm]이고, 직경 0.2[cm]의 와이어로 만들어진 음극은 그리드 형태로 구성되어 있다. 본 논문에서는 그리드 음극을 구성하는 링의 개수가 각각 4, 5, 6개일 때, 장치의 중심을 자른 단면을 양극은 외부의 큰 원으로, 음극은 링의 개수에 따라 각각 6, 8, 12개의 작은 원으로 표현하였다. 전원 연결부(feed-through)의 영향은 고려하지 않았고, 그리드 음극의 전압은 -1[kV], 메쉬 양극은 0[V]로 하였다. 이 수치해석의 목적은 최적의 조건을 설계하기 위한 것이므로 이온전류 크기의 정성적인 계산을 위해 실제 장치에서 사용되는 D₂ 기체를 배경기체로 사용하는 대신, 실험 데이터가 이미 알려져 있는 Ar 기체를 사용하였다.

구형 집속 빔 핵융합 장치에서의 중성자 생성률은 이온 전류의 크기에 의존하며, 이는 그리드 음극의 구조, 인가전압, 압력, 주입 이온전류, 펄스주기 등 여러 인자들에 의해 결정된다. 본 연구에서는 방전특성에 큰 영향을 미치는 그리드 음극의 구조와 압력에 변화를 주면서 실험을 시행하였다. 목적함수를 10[ns]에서의 이온전류로 하였고, 제어인자로 그리드 음극을 구성하는 링의 수(A), 중심부에서 그리드 음극간 거리(B), 압력(C)을 선정하였으며, 제어인자의 수준수는 각각 3개의 수준을 선택하였다. 표 1은 설계변수와 그 수준수 그리고 목적함수를 나타내었다.

〈표 1〉 설계변수와 수준 수 및 목적함수

설계변수 및 목적함수		수준1	수준2	수준3
제어인자	A. 링의 수 [개]	4	5	6
	B. 중심부에서 그리드 음극간 거리[cm]	2.5	3.0	3.5
	C. 압력[mtorr]	10	15	20
목적함수	이온전류[A]			

2.2 수치적 방법

최적화 설계기법으로 사용한 다구체 실험계획법[2]은 직교배열을 이용한 실험계획과 신호 대 잡음비를 이용한 자료 분석이 특징이다. 직교배열표는 전통적으로 사용되어온 부분요인 실험계획법의 일종으로 실험에서 각 열이 직교가 되게 만들어 놓은 표로써, 어떠한 수준에 대해서나 다른 열의 전체 수준이 같은 횡수씩 나타나도록 구성되어 적은 수의 실험으로 많은 효과를 찾으려는 목적으로 만든 표이다. 본 논문에서는 L₉(3,3) 직교배열표를 이용하여 총 9회의 실험회수를 통해 최적 조건을 계산하였다.

본 논문에서 사용한 시뮬레이션 기법으로는 하전입자의 거동 및 포텐셜 분포를 해석하기 위해 Finite Element Method-Flux Corrected Transport Method를 이용하여 연속방정식을 계산하였고, 또한 Poisson 방정식의 해석기법으로는 여러 전극 형상에 유연하게 대처할 수 있고, 특성변화가 심한 영역을 세분화하여 보다 더 정확히 기술할 수 있는 유한요소법을 이용하였다. 또한 Ar 기체의 수송계수는 환산전계(E/P)의 함수로써 ref[3]을 통해 계산하였다. 한편 이온전류는 Sato 방정식을 이용하여 계산된다. 지배방정식(1)-(4) 및 Sato 방정식(5)은 다음과 같다.

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

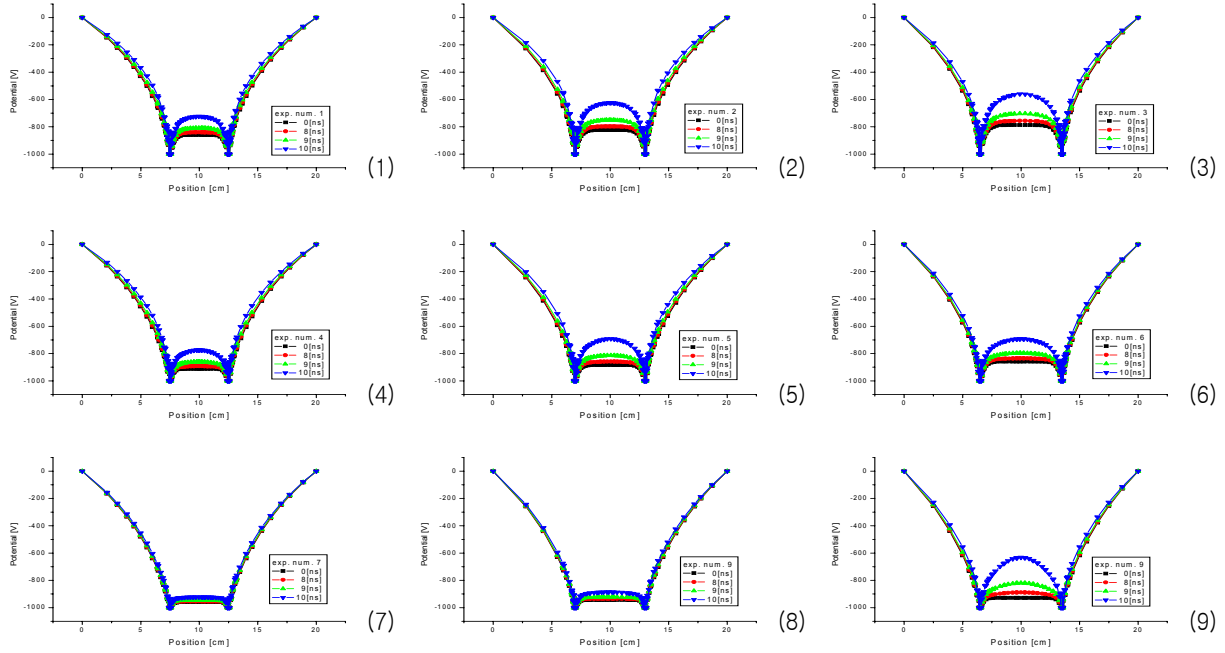
$$\frac{\partial \rho_p}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho_p \mathbf{W}_p) + \rho_e \alpha |\mathbf{W}_e| \quad (2)$$

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

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

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

여기서, ρ , \mathbf{W} 는 하전입자 밀도 및 속도를, D_e , α 는 전자의 확산계수 및 전리계수, I , V 는 전류밀도 및 인가전압, E , E_L 는 각각 포아송 전계 및 라플라스 전계의 크기이다. 재결합, 이온의 확산 및 자체의 영향은 고려하지 않았다. 이차전자 방출계수는 방전의 지속성을 유지하기 위해 $\gamma_i = 0.05$ 로 하였으며, 이온의 음극 충돌만 고려하였다. 또한 시간간격은 1[ps]로 하였다. 전자 및 이온의 초기밀도로는 계산시간을 줄이고, 광전리의 영향도 모의하기 위해 그리드 음극 근처에 10⁸[cm⁻³]의 크기를, 그 외의 영역은 10⁴[cm⁻³]의 크기를 각각 부여하였다.



〈그림 2〉 중심축에서 포텐셜 분포(왼쪽 위부터 실험 1~9)

3. 수치적 결과

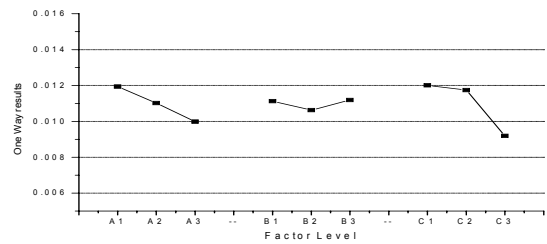
구형 집속 빔 핵융합 장치의 최적 설계를 위해 직교배열표를 이용한 실험계획법으로 총 9회의 수치해석이 수행되었다. 그림 2 및 표 2는 각 실험을 통해 얻어진 $x=10[\text{cm}]$ 인 중심축에서 포텐셜 분포 및 10[ns]에서의 이온전류의 크기이다. 이 결과를 통해 실험 1, 2, 3, 6, 9번의 중심부에서 큰 포텐셜 우물이 형성됨을 확인할 수 있고, 이 경우에 큰 이온전류를 얻을 수 있었다. 즉 이온전류의 크기는 포텐셜 우물의 깊이와 연관이 있음을 알 수 있다.

이온전류의 크기를 최대화 하는 최적조건을 구하기 위해 A인자, B인자, C인자의 일원표를 계산하여 그림 3에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 각각의 인자수준 중 최대의 값인 A₁ 수준, B₃ 수준, C₁수준이 최적조건으로 나타났다. 즉, 그리드 음극의 링의 수를 4개, 중심부에서 음극간 거리를 3.5[cm], 압력을 10[mtorr]로 하였을 때, 목표 특성치인 이온전류가 최대가 되는 최적조건이 도출되었다. 또한 그리드 음극 구조에서 이온전류의 크기를 최대로 향상시키는데 가장 중요한 인자는 음극을 구성하는 링의 수(A 인자)와 압력(C 인자)이었다. 이를 토대로 얻어진 최적조건을 이용하여 다시 한차례 수치해석을 수행하여 예측 결과의 타당성을 검증하였다.

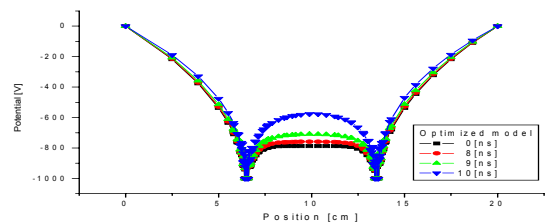
그림 4에 최적화 조건이 적용된 경우의 포텐셜 분포를 나타내었다. 최적화된 모델을 적용한 경우, 음극의 중심부에서 더 깊은 포텐셜 우물이 관측되었다. 또한 이 때 10[ns]에서 이온전류의 크기는 5.5956[mA]로 실험 1번에 비해 약 20% 증가된 값을 얻을 수 있었다. 따라서 구형 집속 빔 핵융합 장치에서 최적의 그리드 음극 구조의 설계를 통해서 훨씬 큰 증성자를 얻을 수 있을 것이다.

〈표 2〉 3인자 3수준 실험결과

실험 번호	제어인자			이온전류 [mA]	비고
	링의 수 (A)	중심-음극 거리 (B)	압력 (C)		
1	4	2.5	10	4.7060	y_{111}
2	4	3.0	15	4.0051	y_{122}
3	4	3.5	20	3.2276	y_{133}
4	5	2.5	15	3.2264	y_{212}
5	5	3.0	20	3.2926	y_{223}
6	5	3.5	10	3.9760	y_{231}
7	6	2.5	20	2.6707	y_{313}
8	6	3.0	10	3.3284	y_{321}
9	6	3.5	15	3.9917	y_{332}



〈그림 3〉 이온전류에 대한 인자수준의 효과



〈그림 4〉 최적화된 조건의 포텐셜 분포

4. 결 론

본 연구는 다구저 실험계획법과 FEM-FCT 해석을 이용하여 구형 집속 빔 핵융합 장치에서 이온전류의 크기를 최대화 할 수 있는 그리드 음극 구조의 최적설계를 제안하였다.

해석결과로부터 이온전류의 크기는 음극내부의 포텐셜 우물의 깊이와 연관이 있음을 확인할 수 있었으며, 최적 설계 변수를 도출하여 적용한 결과, 이온전류를 최대화 향상시키는데 중요한 인자는 링의 수와 압력을 확인할 수 있었다. 또한 최적의 음극 구조에서 큰 이온전류가 계산되었다.

[참 고 문 헌]

[1] M. Ohnishi et al., "Correlation Between Potential Well Structure and Neutron Production in Inertial Electrostatic Confinement Fusion", Nuclear Fusion, Vol. 37, pp .611, 1997
 [2] 이상복, "다구저 기법 활용", 이레테크, 2001
 [3] A. L. Ward, "Calculated of Cathode-Fall Characteristics", J. appl. phys., vol. 33, no. 9, pp. 2789, 1962