

논문 21-4-15

구형 집속 빔 핵융합 장치에서 그리드 음극 구조의 최적 설계

Optimal Design of Grid Cathode Structure in Spherically Convergent Beam Fusion Device

주흥진¹, 박정호¹, 황휘동¹, 최승길², 고광철^{3a}

(Heung-Jin Ju¹, Jeong-Ho Park¹, Hwui-Dong Hwang¹, Seung-Kil Choi², and Kwang-Cheol Ko^{3a})

Abstract

Neutron production rate in spherically convergent beam fusion(SCBF) device as a portable neutron source strongly depends on the ion current and the grid cathode structure. In this paper, as the process of design and analysis, Design of Experiment(DOE) based on the results by Finite Element Method-Flux Corrected Transport(FEM-FCT) method is employed to calculate the ion current. This method is very useful to find optimal design conditions in a short time. Number of rings, radius of rings, and distance between the grid cathode and center are selected as control factors. From the results in the optimized model, the higher ion current is calculated and deeper potential well is also observed.

Key Words : Neutron production rate, SCBF device, Ion current, Design of experiment, Potential well

1. 서론

중성자빔 기술은 현재는 물론 21세기를 이끌고 가는 미래지향적 핵심기술로써, 핵폐기물 분석, 핵자료 생산, 비파괴시험, 수화물 검사, 방사화 분석 연구(Prompt-Gamma neutron Activation Analysis), 지뢰탐사, 붕소 중성자 포착요법(Boron Neutron Capture Therapy) 등 산업, 의학 분야에 이용되고 있으며, 그 이용범위를 점차 확대해 나아가고 있다. 그러나 국내의 중성자 빔 이용시설들은 규모가 거대하고, 설비가 고가이며, 운영에 막대한 비용이 소비된다. 또한 소규모 발생장치는 중성자속이 매우 낮고, 수명이 짧은 단점을 가지고 있어 그 활용범위가 극히 제한되고 있다. 이러한 이유로 최근에는 관성과 정전 밀폐를 이용한 플라즈마 집속 방식의 장치가 미국과 일본을 중심으로 활발히 연구

중이다. 특히 이러한 중성자 발생장치는 소형이며, 휴대가 용이하고, 높은 중성자속을 발생시킬 수 있으므로 중성자빔 응용연구를 위한 소규모의 중성자빔 시설 구축에 적합하고, 다양한 분야에서의 폭넓은 활용도 기대된다.

구형 집속 빔 핵융합 장치는 관성 정전 밀폐를 이용하여 핵융합을 실현하는 장치로써, 핵융합 과정에서 중성자가 발생된다. 이때 발생된 중성자 생성률은 보통 이온전류의 크기에 크게 의존한다. 한편, 구형 집속 빔 핵융합 장치의 음극 내부에서는 포텐셜 우물이 형성되는데, 이 우물 구조가 핵융합 반응을 발생시키는 빔-빔 충돌에 대단히 중요한 역할을 한다[1,2]. 따라서, 중성자 생성률을 효율적으로 증대시키기 위해서는 다양한 그리드 음극 구조에서 포텐셜 우물 구조와 이온전류와의 관계를 고찰하고, 최적의 음극 형상을 설계할 필요가 있다.

본 논문은 대표적 실험계획방법인 다구찌 실험계획법[3]을 이용하여 큰 이온전류를 발생시킬 수 있는 최적의 음극 구조를 설계한다. 최적화를 위해 그리드 음극 형상의 결정인자를 설계변수로 선택하여 설계변수가 이온전류의 크기에 미치는 영향을 분석하여 최적의 설계형상을 도출하였고, 예측된 최적 설계변수값을 적용하여 효과를 검증하였다.

1. 한양대학교 전기공학과
(서울시 성동구 행당1동 17)
 2. 안산공과대학 전기공학과
 3. 한양대학교 전기제어생체공학부
- a. Corresponding Author : kwang@hanyang.ac.kr
 접수일자 : 2007. 10. 10
 1차 심사 : 2008. 1. 7
 심사완료 : 2008. 3. 18

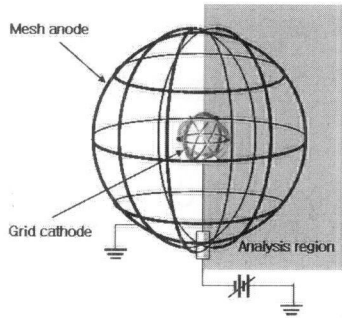


그림 1. 구형 집속 빔 핵융합 장치의 구성도.
Fig. 1. Schematic view of spherically convergent beam fusion device.

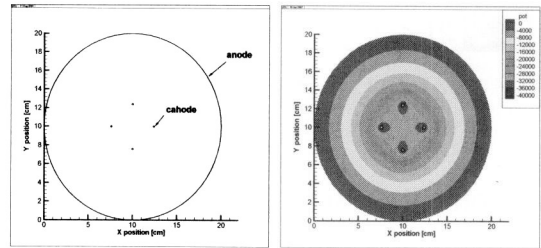
2. 구형 집속 빔 핵융합 장치

구형 집속 빔 핵융합 장치는 수십 mtorr의 낮은 압력에서 수십 kV의 인가전압에 의해 양극과 음극 사이에서 글로 방전이 발생하는 장치로써, 그림 1에서처럼 보통 접지된 구형의 양극 내부에 동심원의 그리드 모양의 음극을 설치하고, 두 전극 사이에 저기압 펄스 방전을 발생시킨다. 구형의 방전 챔버(chamber) 안에 중수소 플라즈마를 생성시켜, 챔버 중심의 음극에 높은 전위차를 일으키면, 중심부로 가속된 중수소 이온과 반대 방향에서 가속된 중수소 이온이 핵융합 반응을 발생시키며, 중성자가 생성된다. 이러한 원리는 1950년대에 미국의 텔레비전 개발자인 P. T. Farnsworth에 의해 처음으로 제안되었다[4]. 1960년대에는 R. L. Hirsch가 이온빔을 이용하여 플라즈마 밀도를 높이려는 실험을 하였고, 이온총을 이용한 장치에서 D-T 핵융합 반응에 의한 중성자를 관측하였다[5]. 이후 핵융합의 연구는 자기장을 이용하여 플라즈마를 밀폐시키는 핵융합 장치인 Tokamaks에 집중되면서 관성 정전을 이용한 핵융합 연구가 일시 중지되었다가, 소형의 중성자원으로써의 활용 가능성이 제기되면서 1990년대부터 다시 연구가 행해지고 있다.

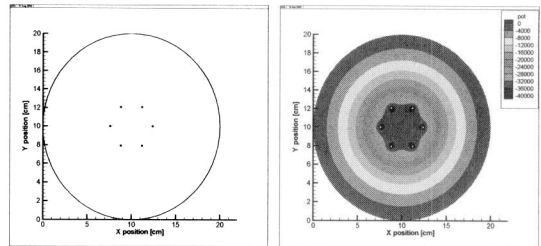
3. 그리드 음극 구조의 최적화 설계를 위한 실험계획법

3.1 구형 집속 빔 핵융합 장치의 해석모델

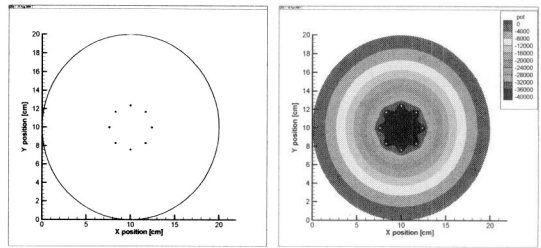
본 연구는 구형 집속 빔 핵융합 장치의 중심부를 자른 2차원 단면을 해석모델로 삼았다. 그리드 음극을 구성하는 링이 각각 3, 4, 5개일 때, 장치의 중심을 자른 단면을 그림 2에 나타내었다.



(a) 3 ring geometry



(b) 4 ring geometry



(c) 5 ring geometry

그림 2. 해석모델 및 진공에서 포텐셜 분포.

Fig. 2. Analysis model and potential distribution at vacuum.

그림 2에서 양극은 외부의 큰 원으로, 음극은 링의 개수에 따라 각각 4, 6, 8개의 작은 원으로 표현하였다. 전원연결부(feed-through)의 영향은 고려하지 않았고, 그리드 음극의 전압은 -40 "kV", 메쉬 양극은 접지시켰다.

본 연구의 목적은 최적의 그리드 음극 구조를 설계하기 위한 것으로써 이온전류 크기의 정성적인 계산을 위해 실제 장치에서 사용되는 D_2 기체를 주입기체로 사용하는 대신, 실험데이터가 이미 알려져 있는 N_2 기체를 사용하였다. 또한 저기압 조건 대신 1기압에서 수치해석을 하였다.

3.2 목적함수 및 설계변수의 설정

구형 집속 빔 핵융합 장치에서 중성자 생성률은 이온 전류의 크기에 의존하며, 이는 그리드 음극의 구조, 인가전압, 압력, 주입 이온전류, 펄스주기 등

여러 인자들에 의해 결정된다. 본 연구는 방전특성에 큰 영향을 미칠 수 있는 그리드 음극 구조의 최적설계를 목적으로 하기 때문에 음극의 구조에만 변화를 주면서 실험을 시행하였다. 먼저 목적함수를 30 "ns"에서의 이온전류로 하였으며, 제어인자로는 그리드 음극을 구성하는 링의 수(A), 링의 반경(B), 중심부에서 그리드 음극간 거리(C)를 선정하였다. 또한, 제어인자의 수준수는 각각 3개의 수준을 선택하였다. 표 1은 본 연구에서 사용한 설계변수와 그 수준수, 그리고 목적함수를 나타내었다.

표 1. 설계변수와 수준수 및 목적함수.

Table 1. Design variables, levels, and objective function.

설계변수 및 목적함수		수준1	수준2	수준3
제어인자	A. 링의 수 [개]	3	4	5
	B. 링의 반경[cm]	0.1	0.2	0.3
	C. 중심부에서 그리드 음극 간 거리[cm]	2.1	2.4	2.7
목적함수	이온전류[A]			

3.3 직교배열표

다구찌 실험계획법은 강건설계를 위한 인자설계의 방법론으로서 직교배열을 이용한 실험계획과 신호 대 잡음비를 이용한 자료분석이 특징이다. 또한 직교배열표는 전통적으로 사용되어온 부분요인 실험계획법(Fractional factorial design)의 일종으로 실험에서 각 열이 직교가 되게 만들어 놓은 표이다. 즉, 어떠한 수준에 대해서나 다른 열의 전체 수준이 같은 횟수씩 나타나도록 구성되어 인자가 많을 시에 일반 요인배치법으로는 모든 실험을 할 수가 없기 때문에 적은 수의 실험으로 많은 효과를 찾으려는 목적으로 만든 표이다. 직교배열법은 이 직교배열표를 이용하여 실험을 실시하여 실험이 목표로 하는 특성치에 대하여 각 인자들이 미치는 영향의 정도를 파악하고, 최적 조건을 결정하는 각 인자들의 값을 결정할 수 있다. 즉, 본 연구와 같이 인자가 A, B, C로서 3개이며, 수준수가 3개인 3인자 3수준의 경우에 대해 완전요인실험을 실시하면 27회의 실험을 실시하여야 하지만 L₉(3,3)

직교배열을 사용하여 인자를 배치하면 9회의 실험만으로도 가능하다. 표 2에서는 인자와 인자별 수준을 할당한 직교배열표를 나타내었다[6,7].

3.4 FEM-FCT 시뮬레이션

L₉(3,3) 직교배열표를 이용할 경우 필요한 실험회수는 총 9회로 이를 직접 제작하여 실험하기 위해서는 많은 비용과 시간이 소모되기 때문에 일반적으로 수치해석기법을 이용하여 실험을 대신하는 방법이 많이 이용되고 있다.

표 2. 직교배열표.

Table 2. Orthogonal array table.

실험번호	제어인자			실험조건	데이터
	A	B	C		
1	1	1	1	A ₁ B ₁ C ₁ = (1, 1, 1)	y ₁₁₁
2	1	2	2	A ₁ B ₂ C ₂ = (1, 2, 2)	y ₁₂₂
3	1	3	3	A ₁ B ₃ C ₃ = (1, 3, 3)	y ₁₃₃
4	2	1	2	A ₂ B ₁ C ₂ = (2, 1, 2)	y ₂₁₂
5	2	2	3	A ₂ B ₂ C ₃ = (2, 2, 3)	y ₂₂₃
6	2	3	1	A ₂ B ₃ C ₁ = (2, 3, 1)	y ₂₃₁
7	3	1	3	A ₃ B ₁ C ₃ = (3, 1, 3)	y ₃₁₃
8	3	2	1	A ₃ B ₂ C ₁ = (3, 2, 1)	y ₃₂₁
9	3	3	2	A ₃ B ₃ C ₂ = (3, 3, 2)	y ₃₃₂

본 연구에서는 수치해석기법으로 FEM-FCT법을 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[8].

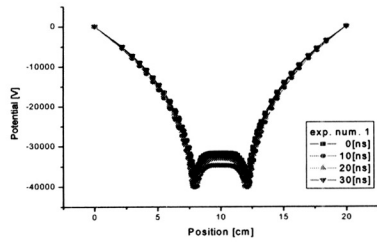
하전입자의 거동을 해석할 때 사용되는 전자 및 이온에 대한 연속방정식과 전계에 대한 Poisson 방정식은 다음과 같다.

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

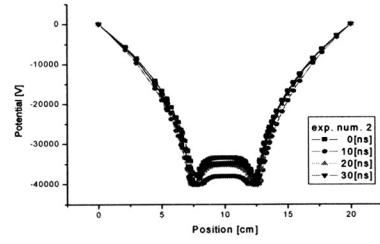
$$\frac{\partial \rho_p}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho_p \mathbf{W}_p) + \rho_c \alpha |\mathbf{W}_e|$$

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

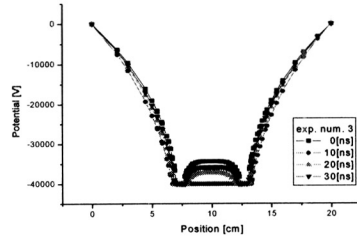
$$E = -\nabla V$$



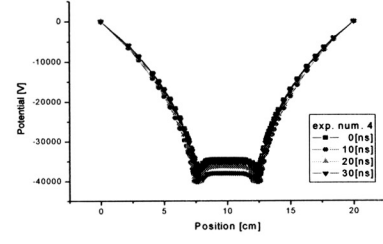
(a) Experiment No. 1



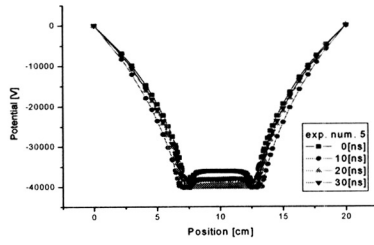
(b) Experiment No. 2



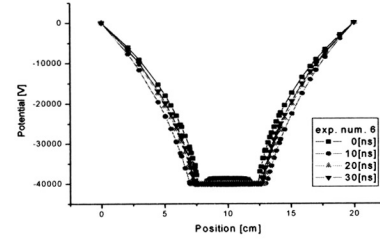
(c) Experiment No. 3



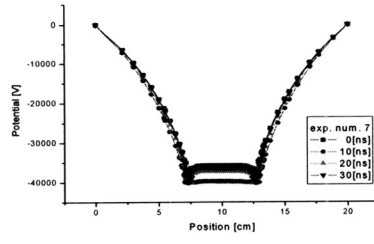
(d) Experiment No. 4



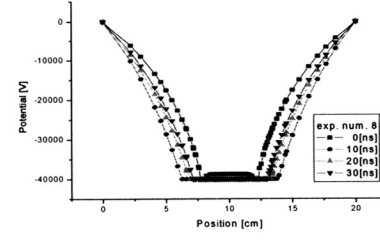
(e) Experiment No. 5



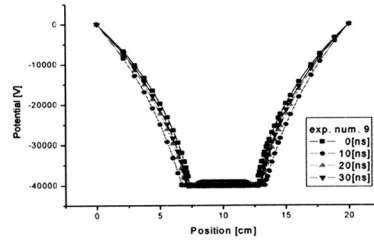
(f) Experiment No. 6



(g) Experiment No. 7



(h) Experiment No. 8



(i) Experiment No. 9

그림 3. 중심축에서 포텐셜 분포.
Fig. 3. Potential distribution on axis.

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[9].

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

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

계결합 및 이온의 확산은 고려하지 않았고, 고전압 저전류를 다루기 때문에 자계의 영향도 고려하지 않았다. 이차전자 방출계수는 방전의 자속성을 유지하기 위해 $\gamma_i = 0.1$ 로 하였고, 이온의 음극 충돌만 고려하였다. 또한 시간간격은 10 "ps"로 하였다. 전자 및 이온의 초기밀도로는 계산시간을 줄이기 위해 그리드 음극 근처에 10^{13} "cm⁻³"의 크기를, 그 외의 영역은 10^8 "cm⁻³"의 크기를 각각 부여하였다. 이것은 하전입자의 초기밀도가 방전의 형태에 크게 기여하지 않기 때문에 가능하며, 또한 광전리의 영향도 모의할 수 있게 한다[10].

4. 수치해석 결과 및 고찰

본 연구에서는 구형 집속 빔 핵융합 장치에서 장치의 최적 설계를 통해 중성자 생성률을 증대시키기 위한 방법으로 여러 인자들 중에서 목표 특성에 큰 영향을 미치는 중요 인자와 그 인자의 수준을 선정한 직교배열표를 이용한 실험계획법으로 총 9회의 수치해석을 수행하였다. 그림 3과 4는 각 실험을 통해 계산된 x=10 "cm"인 중심축에서의 포텐셜 분포와 시간에 따른 이온전류의 분포를 나타낸 것이다. 포텐셜 분포를 통해 알 수 있듯이 실험 1, 2, 3, 4, 5 및 7번의 경우 중심부에서 포텐셜 우물이 형성되는 것을 확인할 수 있으며, 또한 이 경우에 계산된 이온전류의 값이 큰 것을 알 수 있다. 실험 1번의 경우에는 가장 깊은 포텐셜 우물을 형성하고 있으며, 이온전류 또한 가장 크다. 즉, 이온전류의 크기가 포텐셜 우물의 깊이와 깊은 연관이 있음을 확인할 수 있다.

표 3은 각 실험에 따른 30 "ns"에서의 이온전류의 크기를 나타낸 것으로, 실험계산 보조표[7]의 방법을 이용하여 이온전류의 크기를 최대를 하는 최적 조건을 구하기 위해 A인자, B인자, C인자의 일원표를 계산하였고, 이를 그림 5에 나타내었다.

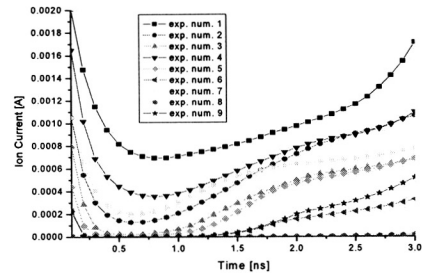


그림 4. 계산된 이온전류.
Fig. 4. Ion current calculated.

표 3. 3인자 3수준 실험결과.

Table 3. Result values of three levels-three factors experiments.

실험 번호	제어인자			이온 전류 [mA]	비고
	링의 수	링의 반경	중심-음극 거리		
1	3	0.1	2.1	1.711	y ₁₁₁
2	3	0.2	2.4	1.066	y ₁₂₂
3	3	0.3	2.7	0.683	y ₁₃₃
4	4	0.1	2.4	1.097	y ₂₁₂
5	4	0.2	2.7	0.688	y ₂₂₃
6	4	0.3	2.1	0.327	y ₂₃₁
7	5	0.1	2.7	0.779	y ₃₁₃
8	5	0.2	2.1	0.017	y ₃₂₁
9	5	0.3	2.4	0.518	y ₃₃₂

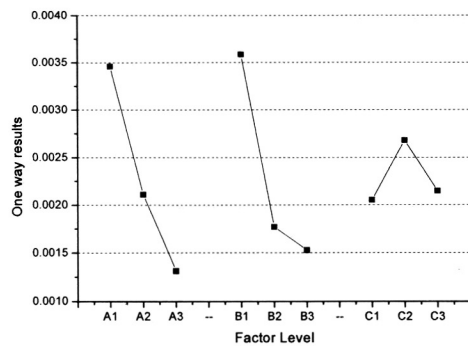


그림 5. 이온전류에 대한 인자수준의 효과.
Fig. 5. Effect of factor levels on ion current.

그림에서 보는 바와 같이 각각의 인자수준 중

최대의 값은 A_1 수준, B_1 수준, C_2 수준으로서 이들의 조합 $A_1B_1C_2$ 가 최적조건으로 나타났다. 즉, 본 실험을 통하여 그리드 음극의 링의 수를 3개, 링의 반경을 0.1 "cm", 중심부에서 음극간 거리를 2.4 "cm"로 하였을 때, 목표 특성치인 이온전류가 최대가 되는 최적조건이 도출되었다. 또한 그리드 음극 구조의 최적설계에서 이온전류의 크기를 최대화시키는데 가장 중요한 인자는 음극을 구성하는 링의 수(A 인자)와 링의 크기(B 인자)임을 확인할 수 있었다. 이를 토대로 얻어진 최적조건을 이용하여 다시 한차례 수치해석을 수행하여 예측 결과의 타당성을 검증하였다. 그림 6과 7에 최적화 조건이 적용된 모델에서 이온전류와 포텐셜 분포를 나타내었다.

9번의 실험값 중 가장 큰 값을 보인 실험 1번과 최적화된 모델의 비교를 통해 알 수 있듯이 최적

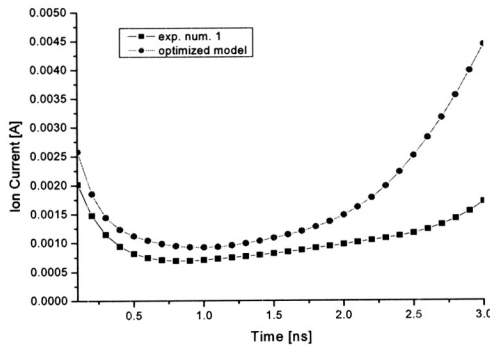


그림 6. 최적화된 모델의 이온전류.
Fig. 6. Ion current in the optimized model.

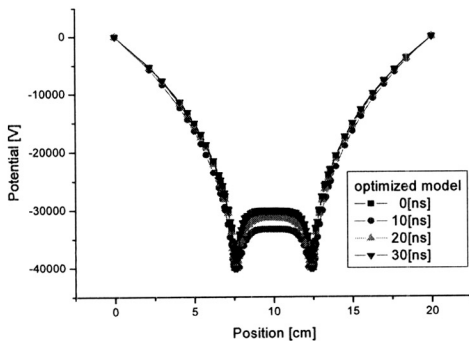


그림 7. 최적화된 모델의 포텐셜 분포.
Fig. 7. Potential distribution in the optimized model.

화된 모델에서 더 큰 이온전류를 얻을 수 있었으며, 음극의 중심부에서 더 깊은 포텐셜 우물이 관측되었다. 또한 30 "ns"에서 이온전류의 크기는 443.5 "mA"로 실험 1번에 비해 약 2.6 배 이상 증가된 값을 얻을 수 있었다. 따라서 구형 집속 빔 핵융합 장치에서 중성자 생성률은 이온전류에 의존하므로 최적의 구조 설계만으로도 훨씬 큰 중성자를 얻을 수 있을 것이다.

5. 결 론

구형 집속 빔 핵융합 장치의 응용에 가장 중요한 요소는 중성자 생성률로써, 이는 이온전류의 크기에 크게 의존한다. 본 연구는 다구찌 실험계획법과 FEM-FCT 해석을 이용하여 구형 집속 빔 핵융합 장치에서 이온전류의 크기를 최대화할 수 있는 그리드 음극 구조의 최적설계를 제안하였다.

해석결과로부터 이온전류의 크기는 음극내부의 포텐셜 우물의 깊이와 깊은 연관이 있음을 확인할 수 있었다. 또한 목적함수인 이온전류의 크기를 최대화하기 위해 그리드 음극을 구성하는 링의 수, 링의 크기, 중심부에서 음극까지의 거리와 관련한 최적 설계 변수를 도출하여 적용한 결과, 이온전류를 최대화시키는데 중요한 인자는 링의 수와 링의 크기임을 확인할 수 있었다. 마지막으로 최적의 음극 구조를 통해 큰 이온전류를 얻을 수 있었으며, 이때 많은 중성자의 발생을 예측할 수 있다.

차후 최적화된 구조에서의 중성자 발생실험을 통해 본 연구의 타당성을 검토할 예정이다.

참고 문헌

- [1] K. Yoshikawa, K. Takiyama, K. Masuda, M. Ohnishi, and N. Inoue, "Strongly localized potential profile measurements through stark effects in the central core region of an inertial electrostatic fusion device", Fusion Technology, Vol. 39, p. 1193, 2001.
- [2] 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, p. 611, 1997.
- [3] 이상복, "(Minitab을 이용한) 다구찌 기법 활용", 이레테크, 2001.
- [4] P. T. Farnsworth, "Electric Discharge

- Device for Producing Interactions Between Nuclei", U.S. Patent, 1966.
- [5] R. L. Hirsch, "Inertial-electrostatic confinement of ionized fusion gases", Journal of applied physics, Vol. 38, No. 11, p. 4522, 1967.
- [6] 최승길, 김규호, "진공 인터럽터의 쉘드 형상 최적설계", 전기전자재료학회논문지, 20권, 4호, p. 374, 2007.
- [7] 하덕용, "유한요소법 및 실험계획법에 의한 종자계형 진공 인터럽터의 최적설계", 한양대학교 박사학위논문, 2001.
- [8] 현정수, 최승길, 심재학, 강형부, "SF6 가스 방전 특성의 유한요소 해석", 전기전자재료학회논문지, 13권, 11호, p. 265, 2000.
- [9] N. Sato, "Discharge current induced by the motion of charged particles", Journal of Physics D, Applied Physics, Vol. 13, p. L3, 1980.
- [10] 민웅기, 김형석, 이석현, 한송엽, "FEM-FCT 기법을 이용한 코로나 방전 시뮬레이션에 대한 연구", 대한전기학회논문지, 48권, 3호, p. 200, 1999.