

1MA 급 구형또까마크의 중성립자묶음입사기 이온원천의 가열출력계산

김용제, 채광일

위대한 령도자 김정일 동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《과학연구사업을 더욱 강화하여 세포공학과 유전자공학, 초고압물리학, 극저온물리학을 발전시키며 레이자와 플라즈마기술, 원자에너지와 태양에너지를 개발하여 인민경제에 받아들이는데서 나서는 과학기술적문제를 적극 풀어나가야 하겠습니다.》(《김정일선집》증보판 제11권 139페이지)

선행연구들에서는 $R=0.8\text{m}$, $A=1.25$ 인 구형또까마크플라즈마가열에 리용할수 있는 빠른중성립자묶음입사기의 물리설계를 위한 정성적인 이온원천파라미터해석이 진행되었을뿐 구체적인 이온원천플라즈마모의해석과 그에 따르는 원천의 가열출력은 해석하지 못하였다.[1]

우리는 계산류체력학모의프로그램 CFD를 리용하여 $R=0.8\text{m}$, $A=1.25$ 인 1MA급 구형또까마크에서 중성립자묶음입사기의 이온원천방전실물리모형을 설계하고 방전실에서의 플라즈마밀도분포특성과 원천의 가열출력을 해석하였다.

1. 이온원천방전실에서의 플라즈마분포모의를 위한 모형작성

최근에 많이 리용되고있는 계산류체력학모의프로그램 CFD는 반복법에 의한 수값계산을 통하여 복잡한 플라즈마모의해석도 보다 쉽게 진행할수 있게 하는 우월한 플라즈마모의프로그램으로 평가되고있다.

우리는 1MA급 구형또까마크에서 중성립자묶음입사기의 이온원천플라즈마가 저압력호광방전플라즈마로서 충분히 CFD의 플라즈마모의대상으로 된다고 보고 계산류체력학모의프로그램 CFD를 $R=0.8\text{m}$, $A=1.25$ 인 구형또까마크에서 중성립자묶음입사기의 이온원천실에서의 립자분포에 대한 모의해석에 리용하였다.

먼저 선행연구에서 평가된 이온원천의 구조적특성량에 기초하여 CFD-GEOM에서 기체방전실의 물리모형을 설계하였다.

기체방전실의 양극과 음극, 절연체들의 두께는 모두 1mm로 설계하고 음극쪽 벽에는 1개의 중수소기체주입구를 주었으며 방전실에서의 압력은 1Pa로 설정하였다.[2] 양극 및 추출전극재료는 불수강, 음극재료는 월프람으로 선택하고 방전전압은 70V, 추출전극전압은 35V로 주었다.

한편 이온원천플라즈마가 저압력호광방전플라즈마라는것을 고려하면 방전실에서의 플라즈마분포모의를 위한 모형작성에 류체력학적근사를 적용할수 있으며 여기로부터 이미 방전플라즈마모의에서 널리 리용되고있는 이온확산-표류근사를 리용하여 $R=0.8\text{m}$, $A=1.25$ 인 구형또까마크에서 중성립자묶음입사기의 이온원천방전실에서의 플라즈마분포모의를 위한 모형방정식계를 다음과 같이 작성하였다.

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{\Gamma}_e = S, \quad \mathbf{\Gamma}_e = \mu_e n_e \nabla \phi - D_e \nabla n_e \quad (1)$$

$$\frac{3}{2} \cdot \frac{\partial}{\partial t} (n_e T_e) + \nabla \cdot \left(\frac{5}{2} T_e \mathbf{\Gamma}_e - \chi \nabla T_e \right) = p - n_e \sum_i n_i k_i \varepsilon_i \quad (2)$$

$$-\nabla \cdot \varepsilon \nabla \phi = e \left(\sum_i q_i n_i - n_e \right) \quad (3)$$

$$n_e = \sum_i q_i n_i \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{\Gamma} = 0 \quad (5)$$

$$\mathbf{E} = -\frac{D_e \nabla n_e}{\mu_e n_e} = -T_e \nabla \ln n_e \quad (6)$$

$$\mathbf{J}_i = -\rho D_i \nabla Y_i + \rho \mathbf{U}_{di} Y_i + \mathbf{J}_i^c \quad (7)$$

$$\mathbf{U}_{di} = \left(q_i \mu_i - \sum_i q_i \mu_i Y_i \right) \mathbf{E} \quad (8)$$

여기서 n_e 는 전자밀도, S 는 전자원천, $\mathbf{\Gamma}_e$ 는 전자밀도흐름, χ 는 에네르기수송결수, T_e 는 전자온도, \mathbf{E} 는 전기마당세기이다. 그리고 Y 는 립자질량몹, ρ 는 질량밀도, D 는 확산결수, J 는 립자질량흐름, 첨자 i 는 립자종류를 표시한다.

방정식풀이를 위한 계산구역을 방전실안으로 제한하고 방전플라즈마가 표류-확산플라즈마라는것을 고려하여 경계조건을 다음과 같이 주었다.

$$\Gamma_{e,n} = \frac{1}{4} n_3 v_{e,\text{열}} - \gamma \sum_i (q_i \Gamma_{i,n}) \quad (9)$$

$$\frac{5}{2} T_e \Gamma_{e,n} - \chi \frac{\partial T_e}{\partial n} = 2 T_e \left(\frac{1}{4} n_e v_{e,\text{열}} - \gamma \sum_i q_i \Gamma_{i,n} \right) \quad (10)$$

$$p = p_i + n_e k_B T_e \quad (11)$$

$$\frac{\partial \sigma_s}{\partial t} = e \left(\sum_i q_i \Gamma_{i,n} - \Gamma_{e,n} \right) \quad (12)$$

$$J_{i,n} = m_i S_i \quad (13)$$

$$\varepsilon \mathbf{E} \cdot \mathbf{e}_t - \varepsilon_d \mathbf{E}_d \cdot \mathbf{e}_t = -\sigma_s \quad (14)$$

$$\mathbf{\Gamma} = 0 \quad (15)$$

여기서 $v_{e,\text{열}}$ 은 전자의 열운동속도이고 첨자 n 은 경계면에 대한 법선방향성분, \mathbf{e}_t 는 접선방향의 단위벡토르를 나타내며 S_i 는 립자종의 결면발생결수, σ_s 는 결면전하밀도이다.

2. 1MA급 구형또까마크의 중성립자뿔음입사기이온원천의 가열출력계산

1MA급 구형또까마크의 중성립자뿔음입사기의 이온원천의 가열출력을 계산하기 위하여 먼저 CFD에 의한 플라즈마모형방정식계 (1)-(8)의 수값풀이를 진행하고 방전실에서의 플라즈마밀도분포를 결정하였다.

모형방정식계의 수값풀이를 위한 계산자리표계는 방전실이 직6면체라는것을 고려하여 직각자리표계로 선정하였으며 추출방향을 x 축, 그것에 수직인 평면을 y - z 평면(세로축은 y 축, 가로축은 z 축)으로 취하였다. 여러가지 반복수에 따르는 CFD의 오차수렴성평가에 따라 풀이반복회수는 15로 결정하였다.

계산결과로부터 얻은 $z=0$ 인 x - y 평면에서 방전실내부의 중수소, 2원자분자중수소, 3원자분자중수소양이온들의 분포특성은 그림 1-3과 같다. 그림 1-3에서 보는것처럼 모든 양이온들은 예리한 음극근방을 제외하고는 추출전극근방에 거의 균일하게 집중되어있고 양극쪽에서는 매우 희박하다.

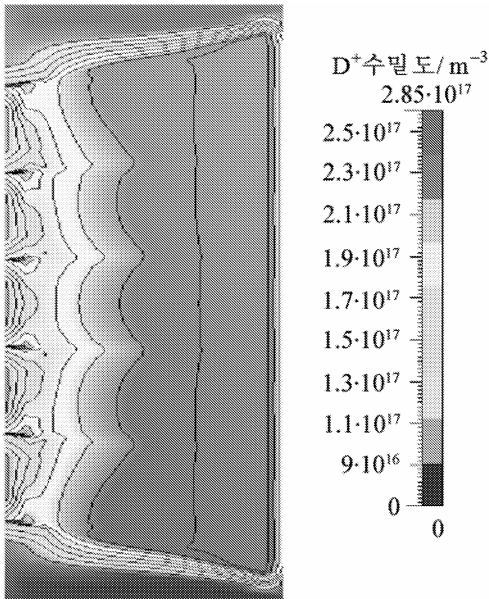


그림 1. 방전실내부의 D^+ 분포

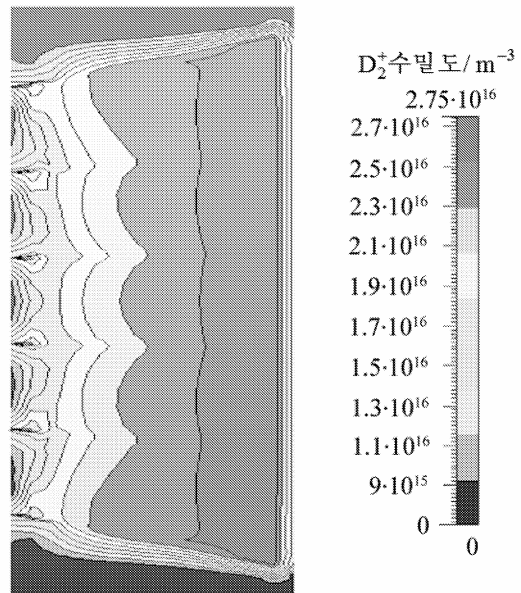


그림 2. 방전실내부의 D_2^+ 분포

방전실에 접하고있는 추출전극면우에서 y 축방향에 따르는 중수소원자, 2원자분자중수소, 3원자분자중수소양이온들의 분포는 그림 4-6과 같다.

그림들을 통하여 중수소원자밀도프로필은 거의 균일하지만 2원자분자중수소나 3원자분자중수소밀도프로필은 추출전극들의 영향으로 불균일하며 특히 3원자분자중수소의 밀도프로필은 매우 불균일하다는것 다시말하여 3원자분자중수소가 추출전극들에 의한 경계의 영향을 쉽게 받는다는것을 알수 있다.

그림 4-6의 분포들로부터 추출전극면우에서의 중수소원자, 2원자분자중수소, 3원자분자중수소양이온들의 평균밀도를 평가하면 각각 $2.85 \cdot 10^{17}$, $2.75 \cdot 10^{16}$, $3.3 \cdot 10^{15} \text{ m}^{-3}$ 이다.

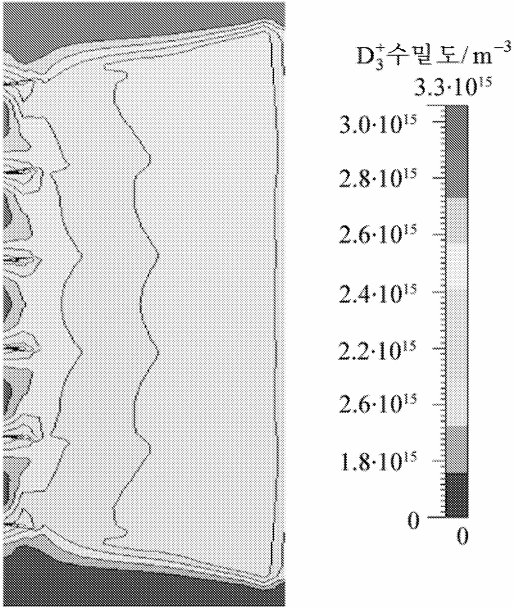
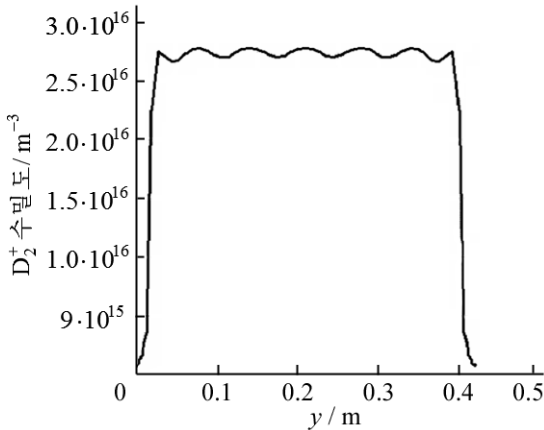
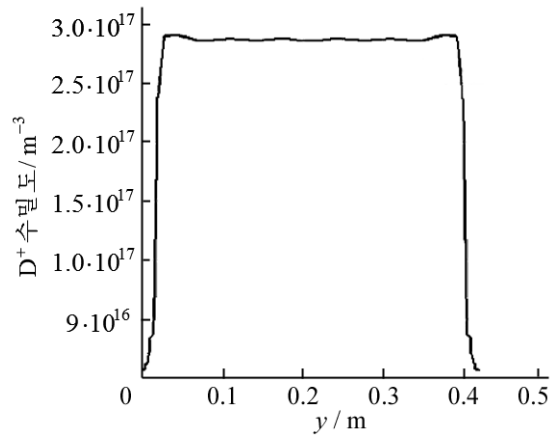
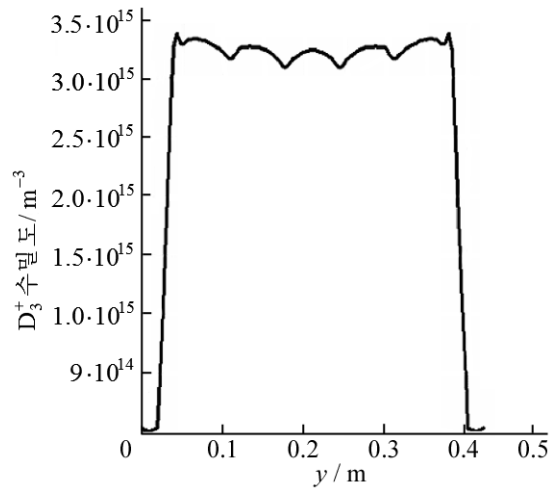
1MA급 구형또까마크에서 중성립자묶음입사기는 추출전극, 가속전극, 접지전극으로 구성되는 3극형이온광학계를 리용하며 그것의 묶음투과를 $\eta_{\text{투}}$ 는 일반적으로 48%정도이다.[3]

한편 중수소이온의 경우 중성립자생성률은 다음식에 의하여 결정된다.

$$F_0 = \sigma_{10} / (\sigma_{10} + \sigma_{01}) \{1 - \exp[-\pi(\sigma_{10} + \sigma_{01})]\} \quad (16)$$

여기서 σ 는 전하교환차름면적, 첨수 10은 이온-중성립자전환, 01은 중성립자-이온전환,

$\pi = \int_0^1 n(x) dx \equiv \langle nl \rangle$, $n(x)$ 는 기체밀도, l 은 묶음축을 따르는 길이이다.[3]

그림 3. 방전실내부의 D_3^+ 분포그림 5. 추출전극면우에서 y 축방향에 따르는 D_2^+ 분포그림 4. 추출전극면우에서 y 축방향에 따르는 D^+ 분포그림 6. 추출전극면우에서 y 축방향에 따르는 D_3^+ 분포

중수소이온에 대하여 평형생성률은 에너기가 20keV일 때 0.8이지만 에너기가 증가할 때 σ_{10} 이 감소하는데 따라 34keV에서 0.7에 도달한다. 결국 중수소원자생성률은 0.7로 된다.

한편 저압력호광방전플라즈마에서 이온온도가 300K이므로 원천추출전극면에서의 이온추출속도는 $\bar{v} \approx 1.6 \cdot 10^3$ m/s 이며 이온광학계를 통하여 가속된 후에는 이온의 에너지가 34keV이므로 이온속도는 약 $\bar{v}_b \approx 1.8 \cdot 10^6$ m/s 로 된다. 추출전극면에서의 밀도에 대한 빠른 이온뭉침에서의 밀도비는 속도비의 2차뿌리에 거꾸비례하므로 빠른 중수소이온뭉침밀도는

$$n_b \approx \sqrt{\frac{1.6}{1.8}} \cdot 10^{-3} n_{추} \approx 8.6 \cdot 10^{15} \text{ m}^{-3}$$

으로 된다.

추출창의 면적($s_{추} = 12 \times 38 \text{ cm}^2$)과 이온광학계의 묶음투과률, 중성립자생성률, 수송통로에서의 립자손실률을 고려하여 실제적인 구형또까마크플라즈마가열에 리용되는 이온원천의 출력은 다음과 같이 결정할수 있다.

$$P_b = \eta_{전} \eta_{투} \eta_{손} n_b \bar{v}_b s_{추} E_b \approx 1.1 \text{ MW}$$

여기서 수송통로에서의 손실률 $\eta_{손} \approx 0.85$ 이다.

우리가 진행한 CFD에 의한 이온원천가열출력계산의 믿음성을 검증하기 위하여 이온원천 ИПМ-2의 기본특성량들과 기하학적모형[3]에 기초하여 CFD에 의한 이온원천 ИПМ-2의 가열출력계산을 진행하였다. 계산결과 이온원천 ИПМ-2의 가열출력은 0.74MW로서 선행한 실험측정자료(0.7MW)와 오차범위에서 일치하였다.

맺 는 말

첫째로, 계산류체력학모의프로그램 CFD를 리용하여 1MA급 구형또까마크의 중성립자 묶음입사기의 이온원천방전실에서의 립자분포모의를 실현하기 위한 방전플라즈마의 표류-확산모형을 작성하고 방전실에서의 이온분포특성을 밝혔다.

둘째로, 1MA급의 $R=0.8\text{m}$, $A=1.25$ 인 구형또까마크에서 중성립자묶음입사기의 이온원천의 플라즈마가열출력을 계산하였다.

참 고 문 헌

- [1] 김일성종합대학학보(자연과학), 62, 9, 70, 주체105(2016).
- [2] Zhong Jing Chen et al.; Fusion Engineering and Design, 87, 325, 2012.
- [3] Серокин А. В. и др.; ЖТФ, 86, 7, 46, 2016.

주체106(2017)년 9월 5일 원고접수

The Heating Power Calculation of Neutral Beam Injector of Ion Source at ST on 1MA Level

Kim Yong Je, Chae Kwang Il

In this paper we performed a simulation of particle distribution of low-pressure arc discharge plasma in ion source discharge chamber of neutral beam injector in ST with $R=0.8\text{m}$, $A=1.25$, $I_p=1\text{MA}$ by CFD. We illuminated the characteristics of deuterium ions distribution in the discharge chamber by draft-diffusion model of discharge plasma and calculated NBI power injected from ion source into ST plasma.

Key words: nuclear fusion, tokamak, NBI heating, plasma simulation