

KSTAR 중성입자빔 수송라인 해석

임기학 · 김진춘* · 권경훈 · 조승연

기초과학지원연구소, *2621 Crislie Lane, Escondido, California 92025, U.S.A.
(1999년 6월 26일 접수)

An Analysis on the KSTAR neutral beam injection line

K. H. Im, J. Kim,* K. H. Kwon, and S. Y. Cho

Korea Basic Science Institute, *2621 Crislie Lane, Escondido, California 92025, U.S.A.
(Received June 26, 1999)

요 약 - KSTAR (Korea Superconducting Tokamak Advanced Research) 토카막 핵융합 실험 장치의 플라즈마 가열을 위한 수소 중성입자빔 수송라인 내에 설치되는 빔 스크레이퍼에 가해지는 열속 및 플라즈마에 전달되는 빔의 통과율을 해석하였다. $43\text{ cm} \times 12\text{ cm}$ 크기의 이온원으로부터 방출되는 이온빔의 공간적 분산(수직 방향으로 1.2° , 수평 방향으로 0.5°)은 이온 가속 전장의 공간적 불균일로 인해 가우스 분산에서 다소 벗어나는 형태를 띠게 되는데, 이러한 비가우스 분산의 영향을 고려할 수 있는 수학적 모델을 정립하였다. 비가우스 분산을 가정할 경우, 이온원에 가장 근접하여 설치되는 스크레이퍼에 가해지는 수직성분의 열속은 9.1 kW/cm^2 였으며, 빔통과율은 28% 정도로 가우스 분산의 경우(약 33%)보다 훨씬 낮은 값을 보였다. 설치상의 오차에 의한 영향도 고려되었는데, 이온원이 1° 기울어졌을 때 스크레이퍼에 가해지는 최대 열속 및 빔통과율은 약 15 kW/cm^2 , 16.6% 정도로 나타나 매우 심각한 결과를 초래함을 알 수 있었다. 이에 비해 스크레이퍼 설치상의 오차의 영향은 이보다 훨씬 작아 5 mm 오차가 발생했을 경우에도 최대 열속은 12 kW/cm^2 였으나, 빔 통과율의 변화는 거의 없었다.

Abstract - The analysis on heat fluxes on and transmission efficiencies by the collimators of neutral beam injection lines in KSTAR tokamak device has been carried out. And a mathematical model describing non-Gaussian beam distribution profile has been established. A neutral beam injection device is composed of 3 separate ion sources and corresponding beam transport lines, which deal with 7.8 MW of beam power, respectively. The divergence angles of ion beam are 1.2° and 0.5° , in vertical and horizontal directions, respectively. The maximum normal heat load on source exit scraper is 9.1 kW/cm^2 and net beam transmission efficiency is ~28%. The effect of misalignment of ion source and scrapers on the scraper heat load and beam transmission also has been analyzed.

1. 서 론

KSTAR 토카막 핵융합 실험 장치에는 수소 플라즈마를 가열하기 위한 보조 가열장치로서 8 MW의 중성입자빔을 플라즈마에 전달하는 수소 중성입자 빔 입사(Neutral Beam Injection, NBI) 장치가 설치될 계획으로 있다 [1,2]. 중성입자빔 입사 장치는 3개의 이온원으로 구성되며 각 이온원은 120 kV, 65 A의 용량을 가져 7.8 MW의 출력을 낼 수 있으나, 40% 안팎의 효율을 가지는 중성입자화 과정 및 빔 수송 라인 내의 잔류기체에 의한 재전리 손실 등으로 인해 최종적으로 약 8/3

MW 만이 각 이온원으로부터 플라즈마에 전달되게 된다.

그림 1에 각 이온원으로부터 토카막에 이르기까지의 빔 수송 라인이 도식적으로 그려져 있으며, 표 1에 그 크기를 나타내었다. $43\text{ cm} \times 12\text{ cm}$ 크기의 이온원으로부터 방출되는 이온빔은 수직 및 수평 방향으로 각각 1.2° 와 0.5° 의 발산각(divergence)을 갖는 기본적으로는 가우스(Gaussian) 분산의 형태를 가지므로 빔이 진행함에 따라 빔 진행 방향에 대해서 수직 방향으로 빔이 점차 퍼져나가는 성질을 띠게 되는데, 빔 중앙으로부터 많이 벗어난 빔 입자들은 여러 단계에 걸쳐 있는 조준기(collimator)에 의해 점차적으로 제거된다.

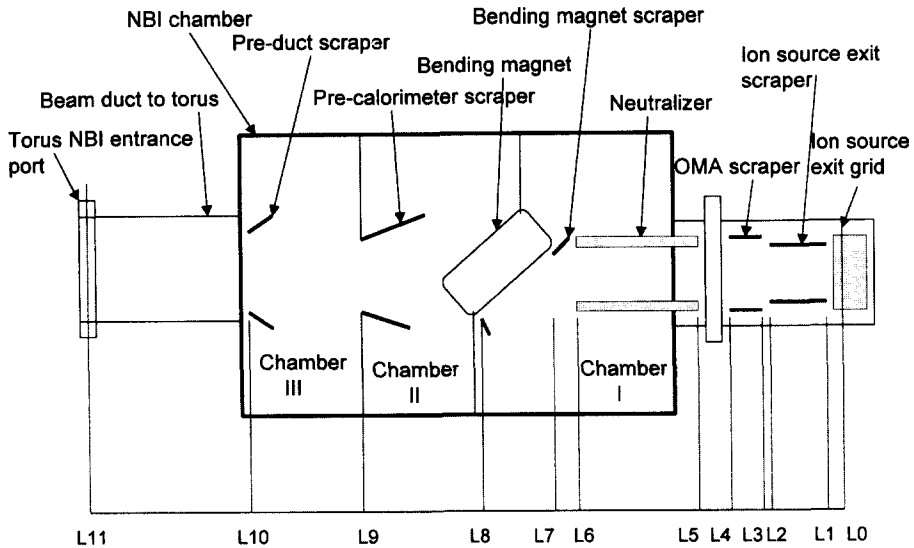


그림 1. KSTAR 중성입자빔 입사장치의 빔라인 구조 (I). 수직 및 수평 방향의 발산각은 1.2°와 0.5°이며, 빔 라인 사이의 각도는 4°이다.

한편, 실제 장치에서 이온 빔의 공간적 분포는, 이온원에서 생성된 이온들을 가속시키기 위한 가속 전장의 공간적 불균일로 인해 가우스 분산에서 다소 벗어나는 형태를 띠게 되는데, 이 논문에서는 이의 영향을 고려할 수 있는 수학적 모델을 정립하였다 [3].

이 모델에서는 다음과 같은 요소들을 고려하였다. 이온원을 수많은 점원의 집합으로 가정하여 각각의 점원으로부터 주어진 공간적 분산을 가지는 이온들이 방출되는 것으로 가정하였으며, 방출된 이온은 중성화 과정을 거

쳐 40%의 이온만이 중성입자화되며, 중성화되지 않은 60%의 이온들은 휨 자석(bending magnet)에서 이온 덩크(ion dump)로 유도되어 사라지며, 나머지 중성입자들은 직진 운동을 하게 된다. 빔 진행 도중 빔 중앙에서 크게 벗어나는 일부 중성입자들은 여러 겹으로 존재하는 빔 조준기에 의해 단계적으로 제거되며, 일부 중성입자들은 잔류 수소 기체에 의한 재이온화 [4] 과정을 거치기도 한다.

여기서는 정립된 수학적 모델을 이용하여 이들 조준기에 의해 제거되는 빔의 양 및 재이온화 손실들을 고려하여 최종적으로 플라즈마에 입사되는 중성입자 빔의 효율 및 조준기에 가해지는 수직 성분의 열속을 계산하였다. 또, 빔 수송라인 설치시에 발생할 수 있는 설치 오차를 이온원 설치시의 오차와 빔 조준기 설치상의 오차로 구분하여 이들에 의한 영향도 계산하였다.

표 1. KSTAR 중성입자빔 입사장치의 빔라인 구조 (II)

중앙 빔라인의 크기 (cm)	양 측면 빔라인의 크기 (cm)	구경 (aperture)의 크기 (cm)			
L0	0	L0	-19		
L1	24	L1	5		
L2	74	L2	55	source exit	43.0×12.0
L3	75	L3	56	source scraper(exit)	42.2×12.8
L4	120	L4	120	OMA scraper	43.2×14.6
L5	154	L5	154	neutralizer	50.0×15.2
L6	274	L6	274	bending magnet scraper	50.5×15.3
L7	300	L7	300	pre-calorimeter scraper	56.0×22.0
L8	380	L8	380	pre-duct scraper	72.0×72.0
L9	524	L9	524	NBI entrance port	106.0×74.9
L10	677	L10	677		
L11	930	L11	930		

2. 계산 모델

이 장에서는 중성입자빔 입사 장치의 이온원에서 방출되는 빔을 수학적으로 표시하기 위한 모델을 정립해 보기로 한다. 여기에서는 이온원에서 생성된 이온들이 가속 전장의 공간적 불균일로 인해 가우스 분산에서 다소 벗어나는 형태를 띠는 비가우스 분산(그림 2참조)도 기술할 수 있는 모델을 고려한다.

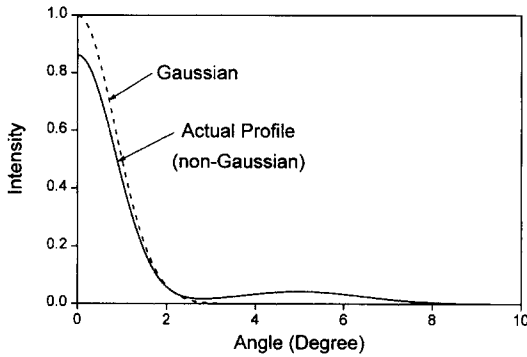


그림 2. 가우스 분포($\theta_x=1.2^\circ$)를 갖는 빔 요소와 비가우스 분포($\epsilon_x=0.05, \alpha_x=5^\circ, \omega_x=2^\circ$)를 갖는 빔요소의 비교. 두 곡선은 밀접적이 같도록 틀맞춤이 되어 있는(normalized) 상태이다.

2.1. 단일 빔 요소의 구조

우선 이온원을, 계산을 위한 여러 개의 요소로 나누어 다음에 각 요소에서 방출되는 빔요소(beamlet)의 각분포(angular distribution)를 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$i(\alpha, \beta) = i_0 i(\alpha) i(\beta) \tag{1}$$

여기서, α, β 는 직교좌표계에서 $x-, y$ -방향을 나타내는 각도이고, i_0 는 각 빔요소에 대한 틀맞춤 인자(normalization factor)이며, $i(\alpha), i(\beta)$ 는

$$i(\alpha) = \exp\left[-\frac{\alpha^2}{\theta_x^2}\right] + \epsilon_x \cdot \exp\left[-\frac{(|\alpha - \alpha_o|)^2}{\omega_x^2}\right] \tag{2}$$

$$i(\beta) = \exp\left[-\frac{\beta^2}{\theta_y^2}\right] + \epsilon_y \cdot \exp\left[-\frac{(|\beta - \beta_o|)^2}{\omega_y^2}\right] \tag{3}$$

와 같이 표시할 수 있다. 식 (2), (3)에서 첫 항은 발산각(divergence angle) θ_x, θ_y 를 갖는 가우스 분산에 해당하는 항이며, 뒷부분은 가우스 분포에서 벗어난 정도를 기술하는 항이다. ϵ_x, ϵ_y 는 비가우스 분산의 상대적인 크기를 나타낸다. $\alpha_o, \beta_o, \omega_x, \omega_y$ 각각 $x-, y$ -방향으로의 비가우스 분산의 위치 및 폭을 나타낸다. 틀맞춤 인자 i_0 는 식 (2), (3)을 식 (1)에 대입하여 α, β 에 대해서 각각 $[-\pi/2, \pi/2]$ 범위에서 적분함으로써 구할 수 있다.

$$i_{total} = i_0 \sqrt{\pi} \left\{ \theta_x \operatorname{Erf}\left(\frac{\pi}{2\theta_x}\right) + \epsilon_x \omega_x \left[\operatorname{Erf}\left(\frac{\alpha_o}{\omega_x}\right) + \operatorname{Erf}\left(\frac{\pi - \alpha_o}{\omega_x}\right) \right] \right\}$$

$$\cdot \sqrt{\pi} \left\{ \theta_y \operatorname{Erf}\left(\frac{\pi}{2\theta_y}\right) + \epsilon_y \omega_y \left[\operatorname{Erf}\left(\frac{\beta_o}{\omega_y}\right) + \operatorname{Erf}\left(\frac{\pi - \beta_o}{\omega_y}\right) \right] \right\} \tag{4}$$

i_{total} 은 각 빔요소의 세기(total intensity)이고, Erf는 다음과 같이 표시되는 오차 함수(error function)이다.

$$\operatorname{Erf}(\xi) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\xi e^{-x^2} dx$$

이 식들로부터 빔 라인 상의 임의의 지점에서 전체 빔요소에 의한 빔의 세기 분포를 구할 수 있는데, 이를 위해서는 앞 (2), (3)식의 각분포 대신에 아래 식 (5), (6)과 같은 공간적 분포식을 사용하는 것이 더 편리하다.

$$i(x) = \exp\left[-\frac{x^2}{a_x^2}\right] + \epsilon_x \cdot \exp\left[-\frac{(|x - x_o|)^2}{w_x^2}\right] \tag{5}$$

$$i(y) = \exp\left[-\frac{y^2}{a_y^2}\right] + \epsilon_y \cdot \exp\left[-\frac{(|y - y_o|)^2}{w_y^2}\right] \tag{6}$$

여기서, z 를 빔 세기 분포를 측정하고자 하는 지점의 빔 진행 방향으로의 위치라 하면, $a_x = z \tan \theta_x, x_o = z \tan \alpha_o, w_x = z \tan \omega_x$ 와 같은 관계가 성립하고, 식 (1)에서 유추하여, $i(x, y)$ 는 다음과 같이 된다.

$$i(x, y) = i_0 i(x) i(y) \tag{1'}$$

물론, 이 경우에 있어서 틀맞춤 인자 i_0 는 식 (4)와는 다소 다르게 표현된다.

$$i_{total} = i_0 \sqrt{\pi} \left\{ a_x + \epsilon_x w_x \left[1 + \operatorname{Erf}\left(\frac{x_o}{w_x}\right) \right] \right\} \cdot \sqrt{\pi} \left\{ a_y + \epsilon_y w_y \left[1 + \operatorname{Erf}\left(\frac{y_o}{w_y}\right) \right] \right\} \tag{7}$$

2.2. 빔통과율

(1)식을 각 빔요소에서 바라다 보이는 각 스크레이퍼(scrapers)의 구경각(aperture acceptance angle)에 대해서 적분함으로써, 각 빔요소가 구경(aperture)을 통과하는 양을 계산할 수 있고, 각 빔요소에 의한 통과량을 합치면 전체 빔에 대한 통과량을 알 수 있다. 그림 3에서처럼, 구경의 크기가 x -방향으로 $[-x_1, x_1]$ 이라 하면, 구경

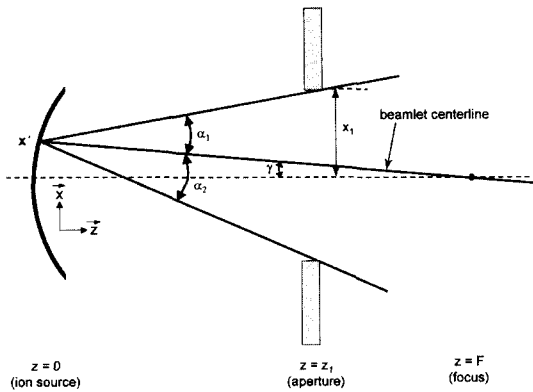


그림 3. 통과율 해석을 위한 기하학적 모델. 이온원 상에서 $x=x'$ 에 위치하는 빔요소에서 발생된 빔 입자들 중 $z=z_1$ 에 위치한 구경을 통과할 수 있는 빔은 $[\alpha_1, \alpha_2]$ 사이에 분포하는 빔입자들 뿐이며, 이 각도를 벗어나는 빔들은 스크레이퍼에 의해 소실된다. 일반적인 경우를 해석할 수 있도록 이온원은 일정한 초점 거리 F 를 가지는 곡면을 가정했으나, KSTAR 중성입자빔 이온원의 초점거리는 무한대($F = \infty$)이다.

각은 이온원($z=0$)에서의 빔요소의 위치 x' 에 의해서 정해진다. x -방향으로의 구경각 α_1, α_2 를 구해 보면,

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \tan^{-1} \left(\frac{x_1 + x'}{z_1} \right) - \gamma \\ \alpha_2 &= \tan^{-1} \left(\frac{x_1 - x'}{z_1} \right) + \gamma \\ \gamma &= \tan^{-1} \left(\frac{x'}{F} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

으로 표현되고, y -방향으로의 구경각 β_1, β_2 도 같은 형태로 표시될 수 있으나, 여기서는 생략한다.

이온원상에서, 점 (x', y') 에 위치한 빔요소의 주어진 구경에 대한 통과율 η' 는 아래 (9) 식으로 표시할 수 있는데,

$$\eta' = \frac{i_o \int_{-\alpha_2}^{\alpha_1} i(\alpha) d\alpha \int_{-\beta_2}^{\beta_1} i(\beta) d\beta}{i_{total}} \quad (9)$$

식 (2)를 이용하여 $\int_{-\alpha_2}^{\alpha_1} i(\alpha) d\alpha$ 를 구해보면,

$$\begin{aligned} \int_{\alpha_2}^{\alpha_1} i(\alpha) d\alpha &= \frac{\sqrt{\pi}}{2} \theta_x \left[\text{Erf} \left(\frac{\alpha_1}{\theta_x} \right) + \text{Erf} \left(\frac{\alpha_2}{\theta_x} \right) \right] \\ &+ \frac{\sqrt{\pi}}{2} \epsilon_x \omega_x \left[2\text{Erf} \left(\frac{\alpha_o}{\omega_x} \right) + \text{Erf} \left(\frac{\alpha_1 - \alpha_o}{\omega_x} \right) + \text{Erf} \left(\frac{\alpha_2 - \alpha_o}{\omega_x} \right) \right] \end{aligned}$$

로 되고, $\int_{-\beta_2}^{\beta_1} i(\beta) d\beta$ 역시 동일한 형태로 표시될 수 있다. 각각의 빔요소는 이온원 상에서 하나의 점으로 간주될 수 있으므로, 이온원은 이러한 점들의 집합(예를 들면, $N_x \times N_y$)으로 생각할 수 있고, 따라서, 빔의 총통과율(total beam transmission) η 는 (9) 식을 전체 이온원 면적(x', y')에 대해 적분하거나, 혹은 수치적인 합을 구함으로써 구할 수 있다.

$$\eta = \frac{1}{N_x N_y} \sum_x \sum_y \eta' \quad (10)$$

그리고, 대개의 경우에 그렇듯이, 여러 개의 조건기가 직렬로 존재할 때에는 각 조건기를 통과하는 통과율은 이보다 앞쪽에 존재하는 조건기들에 의한 차폐를 고려해 주어야 한다.

2.3. 빔 세기 분포

이온원 상의 (x', y') 지점에서 $z=F$ 에 위치하는 초점을 가지고 방출된 빔요소에 의한 (x, z) 지점의 빔의 세기는 식 (1)에 x 대신 $x-s$ (그림 4참조)를 대입함으로써 얻을 수 있다. 여기서 $s(x') = x'(1-z/F)$ 로 주어지고, x' 에서 방출된 빔요소에 의한 x 에서의 x -성분 세기는 아래와 같이 표시된다.

$$i(x, x') = \exp \left[-\frac{(x - s(x'))^2}{a_x^2} \right] + \epsilon_x \cdot \exp \left[-\frac{(|x - s(x')| - x_o)^2}{w_x^2} \right] \quad (11)$$

$i(y, y')$ 도 마찬가지로 쓰여질 수 있다. 계산하고자 하

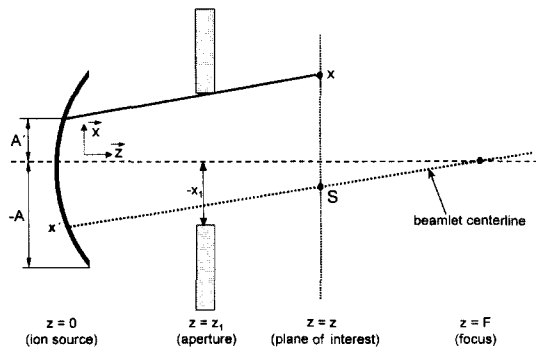


그림 4. 빔 세기 분포 계산을 위한 모델. x 지점에서의 빔 세기는 그보다 이전에 존재하는 구경에 의해 제한을 받는다. 예를 들어, $-A < x < A$ 영역에 존재하는 빔요소들만이 x 지점의 빔세기에 영향을 미치며, $x > A$ 영역에 위치하는 빔요소들은 x 지점의 빔세기에는 전혀 영향을 미치지 못한다.

는 지점 이전에 존재하는 구경의 영향을 물론 고려하여 야 하는데, 그림 4에서 A'를 벗어난 곳에서 방출된 빔 요소는 x 지점의 세기에는 영향을 끼치지 않는다. 그림 4에서 기하학적인 관계식을 유도해 보면,

$$A' = \frac{(zx_1 - z_1x)}{z - z_1}$$

가 성립한다. 따라서 어떤 지점 (x, y)의 빔세기는 다음 식처럼 영향을 끼치는 모든 빔요소의 기여분들을 모두 합함으로써 구할 수 있다.

$$I(x, y) = i_0 \int_{-A}^{A'} i(x, x') dx' \int_{-B'}^{B'} i(y, y') dy' \quad (12)$$

여기서, A, B'는 각각 x-, y- 방향으로의 이온원 크기의 절반에 해당하는 길이이다.

2.4. 재전리 손실

중성입자화 셀(neutralizer cell)을 통과한 후의 중성입자들은 빔수송라인 내의 잔류기체와의 충돌로 인해 중성입자가 다시 이온으로 바뀌는 재전리 과정을 거칠 수 있는데, 재전리된 이온들은 플라즈마에 전달되는 중성입자 빔 세기를 감소시킬 뿐만 아니라, 빔 수송 라인 주위에 존재하는 자장에 의해 휘어져 수송 라인의 벽면을 가격하여 열을 가하는 동시에 이온들이 벽면에서 중성입

자로 되어 다시 수송 라인 내로 확산되어 재전리 현상을 더욱 부추기는 악영향도 끼칠 수 있으므로 중요한 고려 요소이다.

이온원에서 방출되는 H⁺, H²⁺, H³⁺ (중수소의 경우에는 D⁺, D²⁺, D³⁺)의 비율을 각각 75%, 15%, 10% 라고 가정하고서, 빔 진행동안의 재전리 손실율을 계산하였다. 중성입자화 셀은 압력이 3×10⁻³ Torr, 길이가 120 cm로서 셀 내부 기체의 선밀도 (line density)는 1.27×10¹⁶ cm⁻²가 되며, 중성입자화 셀을 지났을 때 빔을 구성하는 입자들의 에너지 및 구성 비율은 표 2와

표 3. 수소 및 중수소의 에너지별 이온화 반응 단면적 데이터[4]. 어떤 에너지(예를 들면 120 keV)에서의 중수소의 이온화 반응 단면적은 그 절반의 에너지(60 keV)를 가진 수소의 반응 단면적과 같다.

수소 기체의 에너지 (keV)	중수소 기체의 에너지 (keV)	이온화 반응 단면적 (10 ⁻¹⁶ cm ²)
10	20	0.92
20	40	1.3
30	60	1.6
40	80	1.6
60	120	1.5
80	160	1.2
100	200	1.1
120	240	0.95

표 2. 120 keV의 에너지를 가지는 (a) 수소 및 (b) 중수소가 중성입자화 셀을 지난 이후에 보이는 입자의 종류와 해당 에너지[4]. E, E/2, E/3은 각각 이온원에서 방출된 에너지 (120 keV), 1/2에 해당하는 에너지 (60 keV), 1/3에 해당하는 에너지 (40 keV)를 나타낸다..

(a) 수소 120 keV의 경우							
이온원에서 방출된 입자		중성입자화 셀을 지나온 이후의 입자 종류					
종류	비율	H ⁰ (E)	H ⁺ (E)	H ⁰ (E/2)	H ⁺ (E/2)	H ⁰ (E/3)	H ⁺ (E/3)
H ⁺ (E)	0.75	0.17	0.83	-	-	-	-
H ²⁺ (E)	0.15	-	-	0.55	0.45	-	-
H ³⁺ (E)	0.10	-	-	-	-	0.65	0.35
중성입자화 셀을 거친 후의 H ⁰ (E) : H ⁰ (E/2) : H ⁰ (E/3) = 46.4% : 30 % : 23.6%							
(b) 중수소 120 keV의 경우							
이온원에서 방출된 입자		중성입자화 셀을 지나온 이후의 입자 종류					
종류	비율	D ⁰ (E)	D ⁺ (E)	D ⁰ (E/2)	D ⁺ (E/2)	D ⁰ (E/3)	D ⁺ (E/3)
D ⁺ (E)	0.75	0.4	0.6	-	-	-	-
D ²⁺ (E)	0.15	-	-	0.72	0.28	-	-
D ³⁺ (E)	0.10	-	-	-	-	0.82	0.18
중성입자화 셀을 거친 후의 D ⁰ (E) : D ⁰ (E/2) : D ⁰ (E/3) = 61.2% : 22.0% : 16.8%							

표 4. 각 챔버별 압력 및 중성입자 빔을 구성하는 수소 원자의 에너지별 재전리 손실율

	챔버 1	챔버 2	챔버 3	빔덕트	
압력 (Torr)	9×10^{-5}	2×10^{-5}	3×10^{-6}	2×10^{-5}	
밀도 (cm^{-3})	3.18×10^{12}	7.07×10^{11}	1.06×10^{11}	7.07×10^{11}	
길이 (cm)	106	144	153	253	
입자종류 (에너지)	재전리 반응 단면적(cm^2)	재전리 손실율			
H ₀ (E)	9.5×10^{-17}	3.15×10^{-2}	9.63×10^{-3}	1.54×10^{-3}	1.69×10^{-2}
H ₀ (E/2)	1.5×10^{-16}	4.93×10^{-2}	1.52×10^{-2}	2.43×10^{-3}	2.65×10^{-2}
H ₀ (E/3)	1.6×10^{-16}	5.25×10^{-2}	1.62×10^{-2}	2.59×10^{-3}	2.82×10^{-2}
D ₀ (E)	1.5×10^{-16}	4.93×10^{-2}	1.52×10^{-2}	2.43×10^{-3}	2.65×10^{-2}
D ₀ (E/2)	1.6×10^{-16}	5.25×10^{-2}	1.62×10^{-2}	2.59×10^{-3}	2.82×10^{-2}
D ₀ (E/3)	1.3×10^{-16}	4.29×10^{-2}	1.32×10^{-2}	2.11×10^{-3}	2.30×10^{-2}

같다[4].

표 3에 보인 재전리 반응 단면적 데이터를 이용하여 빔라인 내의 각 챔버의 압력 및 기하학적 정보로부터 각 챔버를 통과하면서 발생하는 재전리 손실율을 표 4 처럼 구할 수 있다. 빔 덕트 부분의 압력은 챔버 중에서 가장 높은 압력인 2×10^{-5} Torr로 가정하였지만, 플라즈마 운전 조건에 따라 변할 수 있는 값이다.

3. 해석 결과

3.1. 각 스크레이퍼에 의한 빔손실, 열속 및 빔 통과율

여기서 언급되는 열속은 스크레이퍼가 빔 진행 방향에 수직으로 설치되어 있다고 가정했을 때의 값이며, 실제 장치에서는 빔 진행 방향에 대해 비스듬히 설치될 것이므로, 코사인 함수만큼 감소될 것이다. 프리덕트 스크레이퍼 (pre-duct scraper)는 3개의 이온원으로부터 방출되어 나오는 3개의 빔에 공통으로 적용되는 것이므로, 이 스크레이퍼에 미치는 열속은 중앙 빔 라인(center beamline) 및 양 측면 빔 라인(side beam line)에 의한 열속을 합산해 주어야 한다.

그림 5(a), (b)에 가우스 분산 및 비가우스 분산의 경우, 각 스크레이퍼의 상단 및 측면 끝부분에 가해지는 열속을 나타내었다. 최대 열속은 이온원 출구 스크레이퍼(source exit scraper)에서 9 kW/cm^2 이상으로 나타났다.

빔의 공간적 분포에 대해서 가우스 분포를 가정했을 때, 중앙 빔 라인의 경우, 중성입자화 셀 효율을 40%라 할 때, 빔 라인의 효율은 32.7% (2.55 MW)였으며,

이는 이온원에서 방출되는 7.8 MW의 빔 중에서 플라즈마 내부로 입사되는 중성입자들의 세기가 32.7%인 2.55 MW임을 의미한다. 손실된 67.3%는 이온 덤프에서 51.7% (4.03 MW), 스크레이퍼에서 소실된 양이 10.3% (0.80 MW), 재전리 손실이 5.2% (0.41 MW)였다.

측면 빔 라인의 경우, 빔 효율은 32.3% (2.52 MW)였으며, 각 부분에서의 손실율은 이온 덤프에서 51.0%

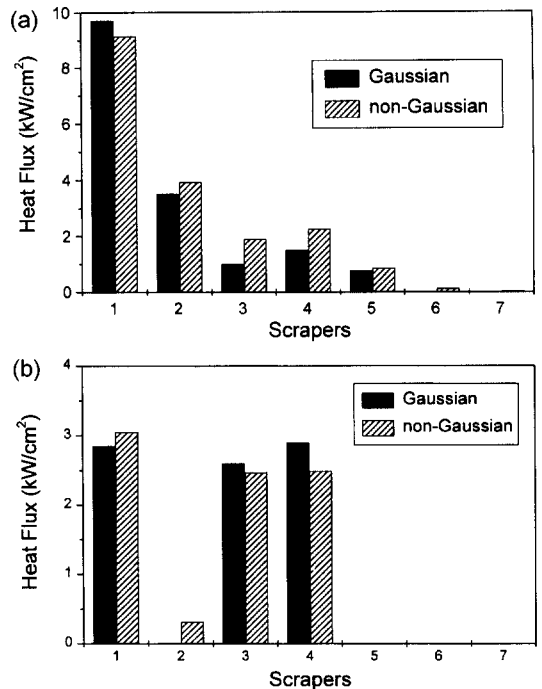


그림 5. 가우스 분산 및 비가우스 분산의 경우, 각 스크레이퍼의 (a) 상단 및 (b) 측면 끝부분에 가해지는 열속.

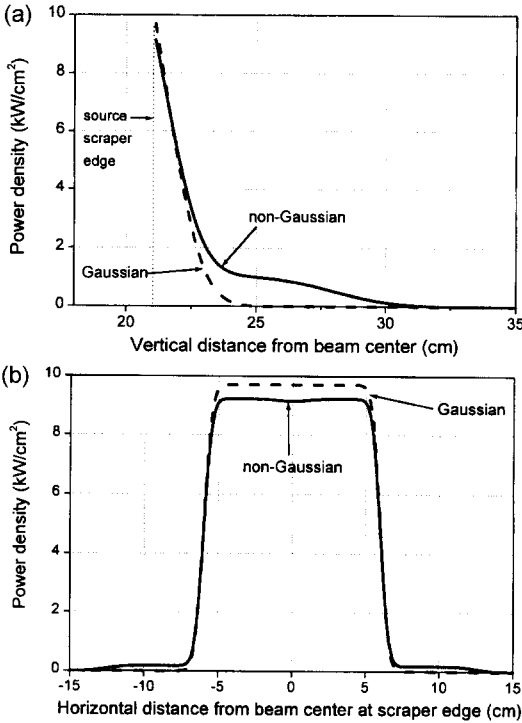


그림 6. 이온원 출구 스크레이퍼의 윗단에 가해지는 빔 세기의 (a) 수직 방향 분포 및 (b) 수평 방향 분포. 비가우스 분포의 경우에 있어서 수평 및 수직 방향의 분포 모두 최고치는 가우스 분포의 경우보다 작으나, 다소 넓게 퍼진 분포를 가진다.

(3.98 MW), 스크레이퍼에서 11.5% (0.89 MW), 재전리에 의한 손실이 5.1% (0.40 MW)였다.

한편, 비가우스 분포를 가정할 경우에는 가우스 분포에서 벗어난 정도를 예측하기가 사실상 불가능한 만큼 여기서는 DIII-D 장치의 경우에 해당하는 비가우스 분포($\epsilon_x = 0.05$, $\alpha_{ox} = 5^\circ$, $\omega_x = 2^\circ$, $\epsilon_y = 0.01$, $\alpha_{oy} = 5^\circ$, $\omega_y = 1^\circ$)를 가졌다고 가정하였다. 가우스 분포의 경우보다 스크레이퍼에서의 손실이 약 2.1배 정도 더 많았고, 그에 따라 플라즈마에 전달되는 빔 파워도 중앙 빔 라인의 경우, 27.9% (2.18 MW)로 감소했고, 측면 빔 라인의 경우는 27.6% (2.15 MW)로 감소하였다.

그림 6(a), (b)는 빔 가우스 및 비가우스 분산을 따를 때, 이온원 출구 스크레이퍼의 상단에 가해지는 빔 밀도의 분포를 나타낸다. 비가우스 분포의 경우에 있어서 수평 및 수직 방향의 분포 모두 최고치는 가우스 분포의 경우보다 작으나, 좀 더 넓게 퍼진 분포를 가짐을 알 수 있다.

3.2. 설치 오차의 영향

한편, 이온원 및 빔라인을 설치할 때 발생할 수 있는 설치 오차(alignment error)도 플라즈마에 입사되는 빔 파워 및 스크레이퍼에 미치는 열속에 큰 영향을 미칠 수 있는데, 발생 가능한 설치 오차로 이온원의 기울기에 있어서의 오차와 각 스크레이퍼의 위치상의 오차를 생각하여 그 영향을 계산하였다.

우선, 이온원이 수직 및 수평 방향으로부터 기울어진 각도에 따른 영향을 계산해 보았는데, 기울기는 x -, y -방향으로의 기울기를 동시에 고려하였다. 즉, 기울기가 0.5°라 하면, x -방향과 y -방향으로 각각 0.5°씩 기울어져 있음을 의미한다. 그림 7에 그 결과를 나타내었는데, 이 계산 결과로부터 아래와 같은 사실들을 알 수 있다.

i) 플라즈마에 입사되는 빔 파워는 설치 오차 각도가 커질수록 계속 감소하여, 기울기가 x -, y -방향으로 각각 1.8° 이상이라면, 플라즈마에 입사되는 파워는 거의 0이 된다. 하나의 이온원으로부터 플라즈마에 입사되어야 할 빔 파워의 목표치는 약 8/3 MW인데, 오차가 0.3°만 되어도 빔 파워는 10% 정도 줄어든다. 비가우스 분산일 때는 빔 파워의 감소가 더욱 심각한 양상을 나타내어, 0.2° 오차에서도 목표치의 20%를 손실하게 된다. 오차가 1.0°라면, 가우스 분산에서는 목표치의 56%의 빔이, 비가우스 분산에서는 목표치의 48%의 빔만이 플라즈마에 전달되게 된다.

ii) 오차 각도가 1.0° 이상이 되면, 이온원 출구 스크레이퍼의 상단에 가해지는 열속은 14 kW/cm² 이상으로 거의 최고값에 다다른다.

iii) 측면 끝부분에 가해지는 열속은 오차 각도의 증가

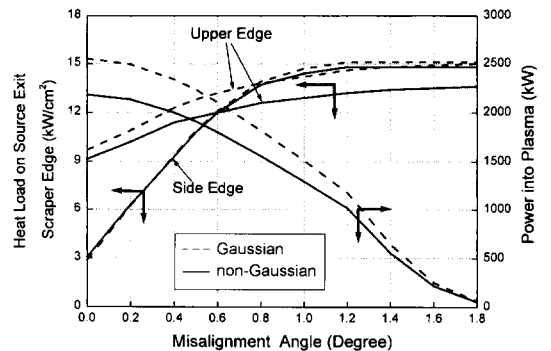


그림 7. 가우스 분산과 비가우스 분산의 경우에 이온원의 설치 오차 정도에 따른 이온원 출구 스크레이퍼의 윗단 및 측면 끝부분에 가해지는 열속과 플라즈마에 전달되는 빔의 세기.

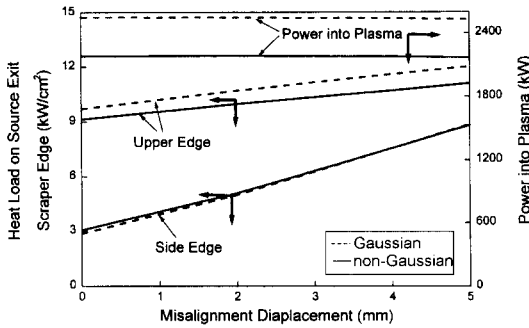


그림 8. 가우스 분산과 비가우스 분산의 경우에 스크레이퍼의 설치 오차에 따른 이온원 출구 스크레이퍼의 윗단 및 측면 끝부분에 가해지는 열속과 플라즈마에 전달되는 빔의 세기.

에 따라 급속히 증가하므로, y-방향으로의 오차가 더 중요하다 할 것이다.

스크레이퍼의 위치상의 오차에 의한 영향도 계산해 보았으며, 그 결과가 그림 8에 나타나 있다. 이 계산에서 오차가 5 mm라 하면 모든 스크레이퍼가 x-, y- 방향으로 5 mm씩 같은 방향으로 잘못 설치된 경우를 의미한다. 결론적으로 얘기하면, 5 mm 오차시에도 빔 파워의 손실은 1% 이내였고, 이온원 출구 스크레이퍼의 상단 및 측면 끝부분에 가해지는 열속도 가우스 및 비가우스 분산의 경우에 각각 12.0 kW/cm², 8.9 kW/cm² 및 11.1 kW/cm², 8.8 kW/cm²로 증가하여, 이온원의 설치 오차에 비해보면, 그 영향은 훨씬 덜 심각하다 할 수 있다.

3.3. 플라즈마에 입사되는 빔 밀도의 분포

마지막으로 그림 9(a), (b)에 중앙 빔 라인에 대해서 가우스 분산 및 비가우스 분산의 경우, 플라즈마 내로 전달되는 파워 분포를 3차원 및 2차원 그래프로 나타낸다. 비가우스 분산의 경우 가우스 분산의 경우에 비해 플라즈마로 전달되는 파워가 14% 정도 감소한다는 것을 앞에서 보았는데, 빔 세기의 최고치도 3.44 kW/cm²에서 2.88 kW/cm²로 15% 정도 감소된 것을 볼 수 있다. 대신 비가우스 분산의 경우 다소 넓게 퍼진 분포를 갖는 것을 알 수 있다. 플라즈마 내로 입사된 중성입자빔 중 일부는 플라즈마를 통과하여 플라즈마 대향 부품(plasma facing components)의 내벽 및 반대편 벽까지 도달할 수 있는데, 이 해석은 차후에 수행될 예정이다.

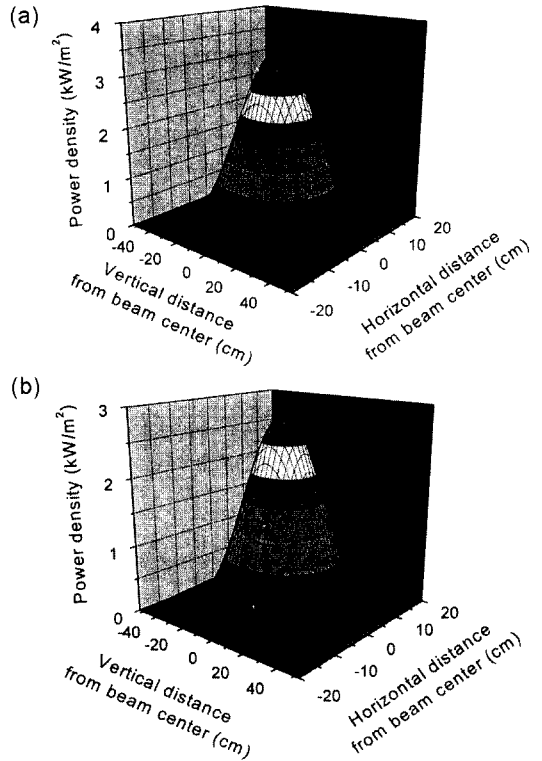


그림 9. 중앙 빔라인에 대한 플라즈마에 전달되는 빔 세기의 3차원 분포. (a) 가우스 분산 및 (b) 비가우스 분산의 경우.

4. 결 론

KSTAR 토카막 장치의 플라즈마 가열을 위한 수소 중성입자빔 수송라인 내에 설치되는 조준기에 가해지는 열속, 플라즈마에 전달되는 빔의 통과율 및 분포를 해석하였다. 이온원으로부터 방출되는 이온빔의 공간적 분산에 대해서는 가우스 분산과 이온 가속 전장의 공간적 불균일로 인해 발생할 수 있는 비가우스 분산을 고려하였고, 이의 영향을 고려할 수 있는 수학적 모델을 정립하였다.

가우스 분산을 가정하였을 경우, 이온원 출구 스크레이퍼에 가해지는 수직성분의 열속은 9.7 kW/cm²로 계산되었다. 이 열속을 제어 가능한 수준으로 낮추기 위해서 조준기는 빔 라인과 거의 나란하게 설치될 것이다. 빔의 통과율은 약 33%로서 하나의 이온원에서 방출된 7.8 MW중 2.5 MW만이 플라즈마에 전달되는 것을 알 수

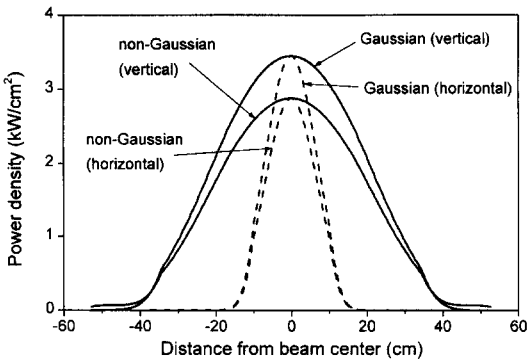


그림 10. 플라즈마에 전달되는 빔 세기의 분포 (중앙 빔라인의 경우). 비가우스 분산의 경우 가우스 분산의 경우에 비해 플라즈마로 전달되는 빔 세기의 최고치가 3.44 kW/cm^2 에서 2.88 kW/cm^2 로 15% 정도 감소된 것을 볼 수 있다.

있었다. 비가우스 분산의 경우, 최대 열속은 9.1 kW/cm^2 로 다소 낮아졌으나, 빔통과율은 28% (2.2 MW) 정도로 더욱 낮아졌다.

설치상의 오차에 의한 영향을 살펴 보면, 이온원이 1°

정도 기울어지게 설치된다면 스크레이퍼에 가해지는 최대 열속 및 빔통과율은 15 kW/cm^2 , 16.6% (1.3 MW)로 나타나 매우 심각한 결과를 초래함을 알 수 있었다. 이에 비해 조준기 설치상의 오차의 영향은 훨씬 작아 5 mm 오차가 발생했을 경우에도 최대 열속은 12 kW/cm^2 까지 증가했으나, 빔 통과율의 변화는 거의 없음을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] D.I. Choi, *et al.*, Proceedings for the 17th IEEE/NPSS Symposium on Fusion Engineering, pp. 215-220, San Diego, U.S.A., Oct. 5, 1997.
- [2] KSTAR Project Team, *KSTAR Ancillary Systems Engineering Review Documents*, National Fusion R&D Center, Korea Basic Science Institute, 1998.
- [3] J. Kim and J.H. Whealton, *Nucl. Instrum. and Methods* **141**, 187 (1977).
- [4] J. Kim and H.H. Haselton, *J. of Applied Physics* **50**, 3802-3807 (1979).