

KSTAR 토카막 기본운전을 위한 연료주입 모의실험

인상렬^{1*} · 김태성² · 정승호¹

¹한국원자력연구원 핵융합공학기술개발센터 대전 305-353,

²연합대학원대학교, 대전 305-333

(2007년 9월 7일 받음)

KSTAR 토카막은 현재 주장치 조립을 완료하고 “최초 플라즈마” 발생과 시운전을 준비하고 있다. 이를 위해 설치되어 있는 연료주입계는 배기 덕트 반대 쪽 한 곳만 주입구로 사용하기 때문에 균일하고 신속한 입자공급이 어렵다. 시운전이 끝나고 기본 운전 단계가 되면 단순한 플라즈마 생성이 아니라 일정한 고밀도 토카막 플라즈마 상태를 일정시간 고르게 유지해야 하므로 공간적으로 균일한 입자공급과 플라즈마 밀도 변화에 따른 신속한 제어가 가능한 연료공급계로 개선되어야 한다. 이런 개선점을 찾는 작업의 일환으로 우선 D-형 진공용기 및 플라즈마 컬럼을 사각단면 토러스로 묘사하는 모델을 만들고 연료공급 위치와 플라즈마의 전리율 및 배기확률에 따라 공간적인 입자분포가 어떻게 바뀌는지 몬테카를로 계산을 통해 분석했다.

주제어 : KSTAR, 연료주입계, 몬테카를로 계산, 입자분포

I. 서 론

KSTAR (Korea Superconducting Tokamak Advanced Research) 토카막은 주장치 조립이 끝나고 누설검사, 진공 배기 시험, 방전세정 등 여러 가지 시험검사를 하면서 소위 "최초 플라즈마 (1st plasma)" 발생과 시운전을 준비하고 있다. 이후 플라즈마 대향부품과 부가가열설비들을 포함해서 보완이 필요한 부분들을 계획대로 완성하면 본격적인 토카막 실험을 위한 기본운전 단계로 이행할 수 있을 것이다.

현재 초기 플라즈마 발생과 시운전까지 사용하는 것을 목표로 설치되어 있는 KSTAR 1 세대 연료주입계는 [1,2]

플라즈마 생성에 관한 가상 운전 시나리오를 통해 미리 예측된 플라즈마 밀도 변화에 따라 거시적으로 필요한 입자 공급량만 맞추어줄 목적으로 배기 덕트 반대 쪽 한 곳만 주입구로 사용하기 때문에 균일하고 신속한 입자공급이 어렵다. 플라즈마가 존재할 때 연료입자들은 플라즈마의 전리 작용 때문에 연료 주입구 근처에서 빠르게 소모되고 거리가 떨어진 곳까지 전달이 안 되어 공간적인 균일성을 유지하기 힘들 가능성이 높기 때문이다.

시운전이 끝나고 기본운전 단계가 되면 단순한 플라즈마 생성에서 끝나는 것이 아니라 일정한 고밀도 토카막 플라

표 1. 몬테카를로 계산조건

No. of Injection			Pumping Probability α	Mean Free Path λ [mm]	
Angular		Direction			
N	Step (deg)				
				59940	1
				14985	2
				3746	3
3	120	top	0.1	937	4
6	60	bottom	0.3	234	5
9	40	outer	0.5	58.5	6
12	30	inner	0.7	14.6	7
			0.9	3.66	8
				0.915	9
				0.229	10

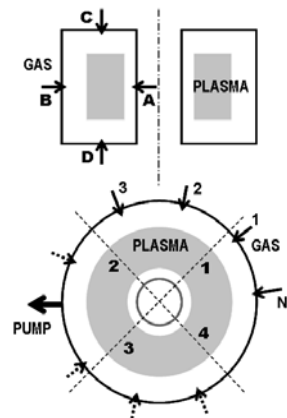


그림 1. KSTAR 연료주입 시뮬레이션을 위한 진공용기 및 플라즈마 모델

* [전자우편] srin@kaeri.re.kr

즈마 상태를 정해진 시간동안 고르게 유지해야 하므로 공간적으로 균일한 입자공급과 플라즈마 밀도 변화에 따른 신속한 제어가 가능한 2 세대 연료주입계로 개선되어야 한다. 플라즈마 발생이 진행되어 일정시간이 흐르면 플라즈마 입자의 확산에 따른 용기 벽에서의 재순환이 가장 큰 기체공급원이 될 가능성이 크므로 어떤 인공적인 연료주입보다 균일하고 신속한 연료공급이 이루어지겠지만, 플라즈마 밀도가 빠르게 변하는 시점이라든지 외부요인에 의해 변하는 플라즈마 밀도를 일정한 값으로 환원시키는 과정에서는 외부 연료공급계의 기능이 중요해진다. 더군다나 연료입자의 재순환은 자칫 불순물의 혼입을 조장할 수 있어서 이 또한 세심한 제어가 필요하므로 정밀한 연료주입계 설치의 필수사항이라고 말할 수 있다.

기본운전용 연료주입계 개발을 위해 고안되고 개선되어야 할 점이 많이 있겠지만 장치의 상세한 설계와 구성에 앞서 우선 전체적인 연료주입계의 골격과 규모를 추산하기 위해 플라즈마 밀도에 따라 연료주입구수 및 위치가 입자 분포에 미치는 영향을 조사했다. 자세한 계산을 하지 않고 상식적으로도 알 수 있는 바와 같이 연료주입구수와 위치는 가능하면 많이, 또 균등하게 있으면 좋다고 말할 수 있다. 그러나 토카막이 비록 많은 포트들을 보유하고 있어도 위치가 이미 특정 목적에 맞춰 한정되어 있고, 또 항상 수요가 더 많기 때문에 한 목적을 위해 충분한 개수의 포트를 필요한 여러 곳에 확보하는 것은 사실상 불가능하다. 따라서 시뮬레이션을 통해 무엇이 최소한의 조건이고 어느 정도가 최적인지 범위를 정하고 추후에 실제 확보 가능한 공간을 활용하여 이를 가능하면 공학적으로 최대한 구현하는 방향으로 가는 것이 필요하다.

이 논문에서는 플라즈마 밀폐 진공용기 및 플라즈마 컬럼을 사각단면 토러스로 묘사하는 모델을 만들고 연료공급 위치와 개수, 플라즈마의 전리율 및 배기확률에 따라 공간적인 입자분포가 어떻게 바뀌는지 몬테카를로 계산을 통해 비교 분석했다.

II. 계산 모델

토카막의 토러스형 플라즈마 밀폐용기는 단면 테두리가 몇 개의 직선과 원주로 이루어진 유사 D형에 가깝다. 또 플라즈마 컬럼은 수학적으로 훨씬 난해한 단면형상을 가진

다. 이를 그대로 모델화하는 것은 매우 복잡하므로 기하학적인 기본형상과 물리적인 환경을 유지하면서 가장 단순한 형태로 묘사하기 위해 두 단면을 모두 사각형으로 가정했다. 이런 모델의 또 하나의 장점은 토로이달 좌표계에서 계산이 진행되는 것이 아니라 원통 좌표계에서 이루어진다는 점이다. 모델은 4 개의 원통면과 4 개의 평면으로 구성되며

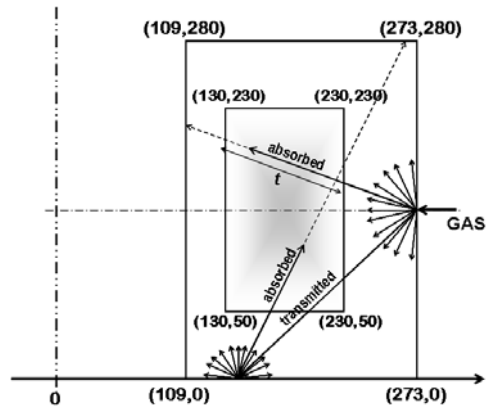
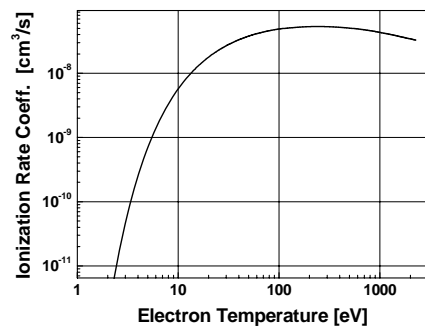
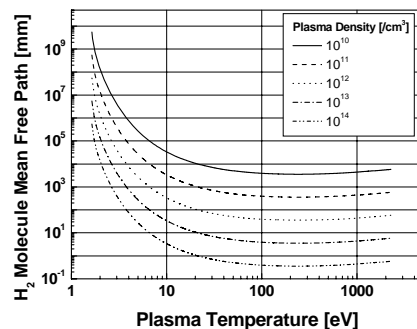


그림 2. 몬테카를로 계산모델 및 좌표



a)



b)

그림 3. 플라즈마(전자) 온도의 함수로 주어진 수소분자의 a) 총 전리반응계수와 b) 평균자유거리

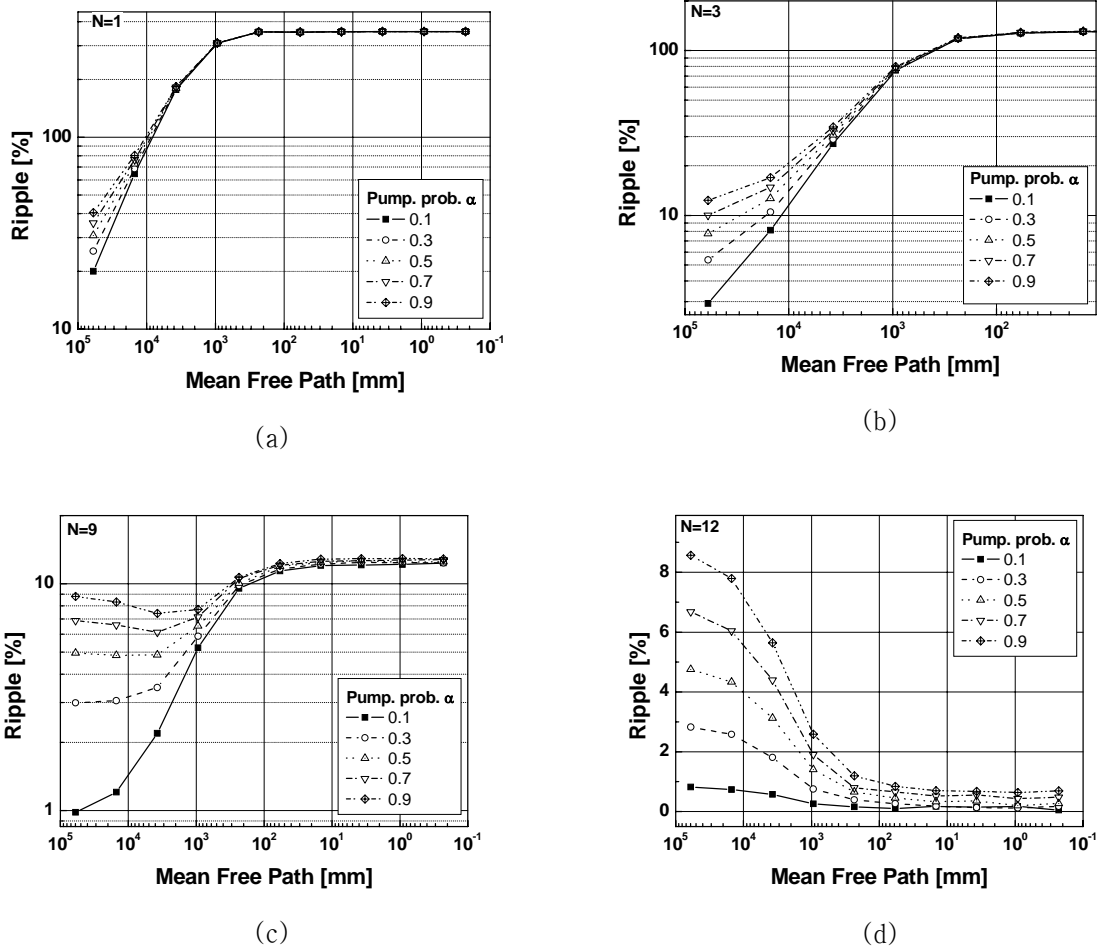


그림 4. 입자밀도의 변동률에 미치는 평균자유거리와 배기확률의 영향. a) N=1, b) N=3, c) N=9, d) N=12

로 수도 적고 수학적으로 묘사하기 쉬운 면들로 되어 있어서 몬테카를로 프로그램 작성과 계산이 수월하고 계산 시간도 단축할 수 있다. 그림 1은 몬테카를로 계산을 위한 모델을 나타내고 있다.

연료 주입구는 한 곳, 세 곳, 여섯 곳, 아홉 곳, 열두 곳으로 놓고 입자의 분포와 연료소모율을 비교했다. 각 변 1.2 m의 정사각형 배기구가 주원주 방향으로 180도에 하나 있다고 하면 연료 주입구는 40도에서 처음 출발해서 개수에 따라 균등한 각도로 놓이고 각 각도마다 상하좌우 네 곳에 있는 것으로 가정했다. 연료입자는 플라즈마에 수직한 방향으로 투입되지만 각 입자들의 상세한 운동방향은 여현 법칙(cosine law)을 따르는 것으로 가정했다. 연료입자의 주원주방향 분포를 구하기 위해 90도 씩 떨어져 있는 1, 2, 3, 4번 네 면에 부딪히는 입자수를 계수하여 비교했고 한 단면을 100 개의 조각으로 잘라 각 단면 안에서 압력분포

도 구했다. (표 1 참조)

연료 주입구를 떠난 입자들이 플라즈마 영역을 지나면서 전리될 확률은 $1 - e^{-t/\lambda}$ 로 계산된다. 이때 t는 입자가 지나야 할 플라즈마의 두께이고 λ 는 전리되지 않고 진행할 평균자유거리이다. (그림 2 참조) λ 는 전리반응율계수 $\langle\sigma v_e\rangle$ 과 플라즈마 밀도 n을 곱한 값의 역수에 연료입자의 평균 속도 v_{av} 를 곱하면 구할 수 있다. 즉 $\lambda = v_{av}/n\langle\sigma v_e\rangle$ 다. 이때 $\langle\sigma v_e\rangle$ 는 전리반응 총단면적과 전자의 속도를 곱한 값의 전자속도분포에 대한 평균값을 나타낸다. 그림 3은 수소분자에 대해 플라즈마 온도에 따라 계산한 전리반응율계수 [cm^3/s]와 평균자유거리[mm]를 나타낸 그래프다. 이때 연료입자의 질량수는 2이고, 기체의 온도 T는 0.043 eV(500 K)로 가정했다.

각 면에 입사되는 입자들의 수는 온도가 일정하다고 가정하면 입자밀도 또는 압력에 비례한다. 면에서 계수되는

입자수와 입자밀도와의 관계식을 구해보자. 먼저 상온에서 시스템에 투입된 단위 기체유입량 $1 \text{ mbar}\cdot\text{L}/\text{s} \equiv 2.5 \times 10^{19} \text{ 입자}/\text{s}$ (20°C)이고 입자수를 계수하는 한 단위요소 면적은 $16.4 \times 28 = 459.2 \text{ cm}^2$ 이다.

몬테카를로 계산에서 연료주입구당 투입 입자수를 10^6 개로 고정하였으므로 실제 한 계산에서 투입된 총입자량은 이것에 총 주입구수 $4N$ 을 곱한 것이다. 기체 투입량이 $q \text{ mbar}\cdot\text{L}/\text{s}$ 일 때 한 단위요소에서 계수한 입자수를 10^6 으로 나눈 값 N_{count} 를 다음과 같은 과정을 거쳐 입자밀도 $n_p [\text{cm}^{-3}]$ 로 환산할 수 있다. 먼저 어떤 면에 단위시간 단위 면적당 부딪히는 입자수는 다음과 같이 표현된다.

$$n_p v_{\text{av}}/4 = 2.5 \times 10^{19} \times q N_{\text{count}} / 4N / 459.2 = 1.361 \times 10^{16} \times q N_{\text{count}} / N \quad (1)$$

이 식을 n_p 에 관해 정리하면 다음과 같다.

$$n_p = 3.74 \times 10^{12} (M/T)^{1/2} \times q N_{\text{count}} / N = 2.36 \times 10^{11} \times q N_{\text{count}} / N \quad (2)$$

예를 들어 만일 $N_{\text{count}} = 0.1$ 이고 $q = 10 \text{ mbar}\cdot\text{L}/\text{s}$ 라면 $N = 3$ 또는 9 일 때 $n = 7.88 \times 10^{10} \text{ 개}/\text{cm}^3$ 또는 $2.63 \times 10^{10} \text{ 개}/\text{cm}^3$ 가 된다.

III. 계산결과 및 논의

그림 4는 연료주입구수 $N = 1, 3, 9, 12$ 일 때 평균자유거리 λ 와 펌프의 배기확률 α 에 따라 네 개의 관측면 위에서 계수된 입자들의 변동률을 그린 것이다. 이때 변동률 R 은 최대값과 최저값의 차이를 평균값으로 나눈 것이다. 우선 눈에 띄는 것은 어느 경우나 λ 가 어느 정도 짧아지면 연료 입자가 투입구 근처에서만 소모되어 α 와 상관없이 비슷한 값을 가진다는 것과 N 이 작을 때 비해 N 이 커지면 전반적으로 변동률이 낮아진다는 것이다. λ 가 짧아지면 결국 연료주입구의 위치와 관측면과의 기하학적인 관계에 의해서만 영향을 받는다. $N = 12$ 일 때만 유독 λ 에 따라 변동률이 계속 급격히 줄어드는 것은 배기구와의 관계를 제외하면 바로 연료주입구들이 네 관측면에 대해 대칭적이기 때문인데, 이때 변동률이 실제 입자분포 성향과는 상관없이 항상 거의 0으로 가는 결과가 나오는 것이 당연하지만 이런 점을 고려하더라도 N 이 클 때 변동률이 줄어드는 전체적인 추세를 호도하는 것은 아니라고 판단된다. (그림 5 참조) 한편 λ 가 길 때는 α 의 효과가 잘 나타나는데 특별히 α 가

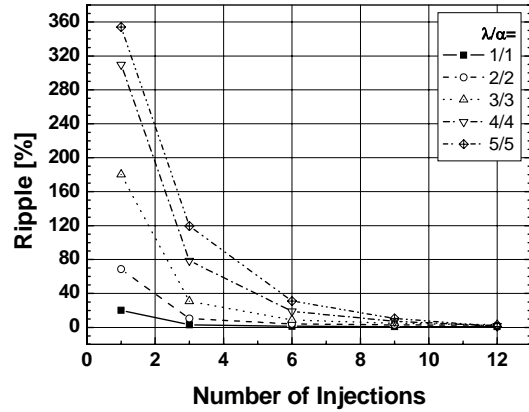


그림 5. 연료주입구 수와 입자밀도 변동률의 관계

작을 때는 변동률이 N 에 따라 상대적으로 훨씬 큰 폭으로 줄어든다. 그 만큼 배기되거나 전리되지 않고 공간을 돌아다니는 거리가 크게 늘어나기 때문이다.

그림 5는 α 와 λ 의 몇 가지 조합에 대해 변동률을 N 의 함수로 그린 것이다. 표시를 간단하게 하기 위해 α 와 λ 는 실제 값 대신 표 1의 번호로 나타냈다. 예상할 수 있는 대로 변동률은 α 와 λ 의 어떤 조합에 대해서도 N 에 따라 큰 폭으로 줄어든다. N 이 늘어나는 것보다 더 큰 폭으로 변동률이 줄어든다는 것은 고무적이다. N 이 커질수록 R 이 줄어드는 비율도 더 커진다. 물론 절대적인 값은 N 이 어느 정도 이상 커지면 충분히 작은 값을 나타낸다. 계산결과로 볼 때 연료 입자 분포의 균일성을 보장하기 위해 주입구를 주원주 방향으로 많이 설치할수록 좋겠지만 최소한 여섯 군데 이상은 되어야 하고 대부분의 조건에서 변동률이 10% 아래로 떨어지는 아홉 군데 정도가 최적이라고 생각된다.

지금까지 계산결과를 한 N 값에 대해 모든 연료주입을 통틀어 합산하여 나온 것이지만 만일 각도나 방향의 영향을 고려한다면 비교적 간단한 $N = 3, \lambda = 5, \alpha = 3$ 일 때의 한 예를 들어 그림 6과 같은 결과를 얻을 수 있다. 주입구 각도에 따라 특정 관측면에 미치는 영향이 엄청나게 큰 차이를 보인다. 이 차이는 여러 각도의 값들을 점점 합산해 나가면 (그림에서 마지막 기호 *에 해당하는 선 참조) 완화되기는 하지만 N 값이 작다면 미처 그 차이를 서로 상쇄할 수 없기 때문에 큰 변동률 값으로 나타난다. 한편 플라즈마 컬럼이 진공용기에 대해 장치 중심 즉 작은 주 반경 쪽으로 편재하고 있으며 용기와 플라즈마가 아래위로 길므로 (그림 2 참조) A 위치가 플라즈마 표면과 가장 가깝고 B와 C

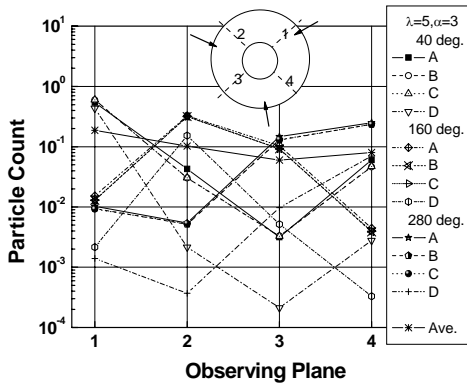


그림 6. 주입구가 위치한 각도와 방향에 따른 연료주입의 기여도 변화

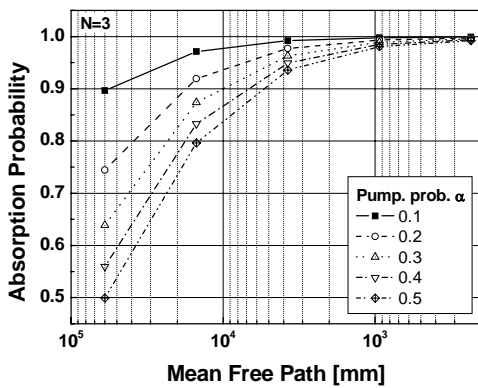


그림 7. 평균자유거리와 연료입자 소모율과의 관계

및 D는 같다. 연료기체가 주입구 끝에서 여현법칙에 따라 퍼지는 것으로 가정하고 있으므로 주입구와 플라즈마 사이의 거리가 연료기체의 퍼짐을 결정하는 인자라고 볼 수 있고 그림 6에서 알 수 있는 바와 같이 A에서 투입된 입자들은 바로 근처에서만 소모되어서 거리가 조금만 떨어져도 다른 방향에서 투입된 것들보다 훨씬 적게 기여하는 현상을 만들어낸다. 그렇다고 이 말이 A에서 들어간 연료입자들이 비효율적으로 소모되고 있다는 뜻은 아니다. 큰 차이는 아니지만 그 만큼 플라즈마에서 전리되어 흡수될 확률이 높기 때문이다. 그러나 실용적인 면에서 보면 나머지 세 방향에 비해 A방향으로 연료 주입관을 설치하는 것은 매우 번거로우므로 굳이 그곳에 꼭 주입구를 마련할 필요는 없다고 생각한다.

이 결과를 통해 보완책을 생각해 볼 수 있는데, 만일 연료 주입구를 플라즈마 표면에 작은 각도를 가지도록 기울

여서 설치하면 수직으로 투입할 때보다 주원주 방향으로의 공간적인 불균일을 해소하는 데는 더 도움이 될 수 있을 것이다. 반면에 이 경우 연료입자가 플라즈마에 침투하는 깊이가 줄어들 것이므로 종단면에서 표면과 중심부에서 연료입자 분포가 많은 차이를 보일 수 있다고 생각된다. 이 문제는 결국 연료입자 분포의 균일성이 아니라 플라즈마 밀도의 균일성에 귀착하므로 단순히 중성 입자와 전리작용만으로 해석하기는 힘들고 플라즈마의 거동도 같이 고려해야 한다. 물론 이 논문의 취지는 연료입자 자체의 분포를 균일화 하는 것이 플라즈마 생성을 원활하게 만든다는 전제에 근거를 두고 있다. 따라서 이곳에서는 일단 연료입자가 플라즈마에 수직으로 입사시키면서 주원주 방향 및 종단면에서 주입구 개수를 몇 개로 할 것인지 기본적인 원칙을 마련하는 데 목적이 있다고 보면 좋을 것이다.

그림 7은 전리되어 플라즈마에 흡수되는 연료비율을 평균자유거리의 함수로 그린 것이다. λ 가 조금만 짧아지면 소모율은 거의 1이 된다. 이 결과는 $N=3$ 일 때이지만 N 의 값에 거의 상관없이 유사한 경향을 보인다. 그림 8은 바로 N 값에 따라 소모율을 정리한 것으로 펌프를 통해 시스템 밖으로 배기되지 않고 플라즈마 내에서 소모되는 연료비율은 주입구가 하나일 때를 제외하면 주입구 수에 크게 관련이 없다는 사실을 잘 말해주고 있다. 그림 9는 입자분포의 변동률과 연료소모율을 배기확률의 함수로 그려 본 것이다. 진공펌프의 배기확률이 높아지면 입자분포의 불균일성을 증가시키고 연료효율을 떨어뜨리지만 평균자유행정이 길 때만 그 효과가 두드러진다.

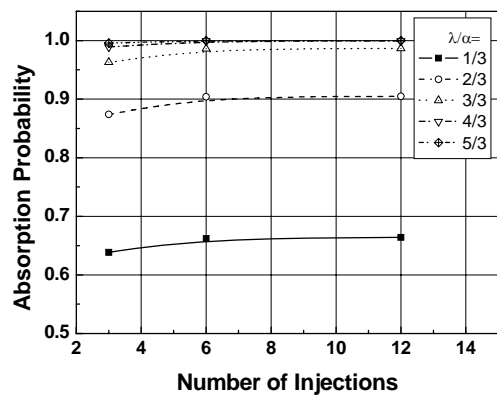
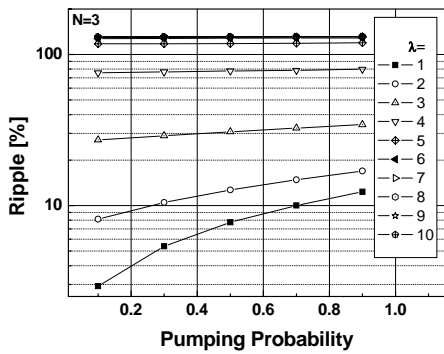
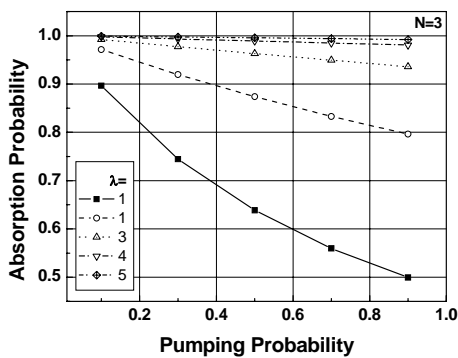


그림 8. 연료주입구 수에 따른 연료입자 소모율의 변화



(a)



(b)

그림 9. 배기확률의 함수로 주어진 a) 입자밀도 변동률과 b) 연료입자 소모율

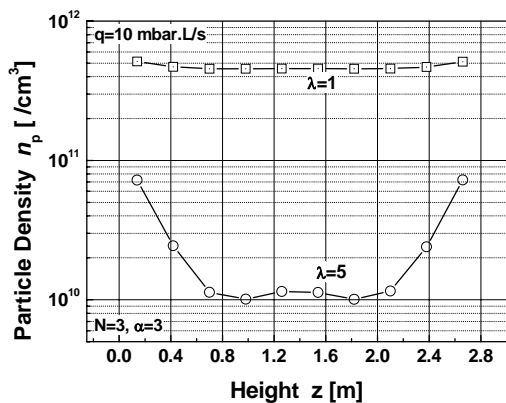


그림 10. 1번 관측면에서 중심 수직축을 따라 나타나는 입자밀도의 변화

끝으로 한 종단면에서 입자밀도분포가 어떻게 되는지 살펴보자. 그림 10은 $N=3$, $\alpha=3$ 일 때 $\lambda=1$ 및 5에 대해 1번 면에서 종단면 중심을 지나는 수직축을 따라 입자밀도 분포를 그린 것이다. 이때 주입구당 연료주입량은 $10 \text{ mbar} \cdot \text{L/s}$ 로 가정했다. λ 가 충분히 길 때는 절대값도 크고 종단면에서 표면과 중심부의 입자밀도 차이는 15% 이내이지만 λ 가 짧은 경우 7 배까지 차이가 나고 있다. 연료입자가 거의 플라즈마 표면 근처에만 머문다는 뜻이다. 중심에서 약간 상승하는 것은 주입구 A와 B가 중심 대칭면에 위치하기 때문이다. 플라즈마 밀도가 높아지면 기체 주입만으로 중심부까지 연료를 공급하는 것이 불가능하다는 것을 쉽게 알 수 있다.

IV. 결 론

KSTAR 토카막의 기본운전 단계를 대비한 연료주입계 개발의 출발점으로 연료주입 시뮬레이션을 수행했다. 우선 D-형 진공용기 및 플라즈마 컬럼을 사각단면 토러스로 묘사하는 모델을 만들고 연료주입 위치와 개수, 플라즈마의 전리율 및 배기확률에 따라 공간적인 입자밀도 분포가 어떻게 바뀌는지 몬테카를로 계산을 통해 비교 분석했다.

계산결과로 볼 때 토카막 장치와 같이 토러스형 플라즈마 밀폐용기에서 연료입자 분포의 균일성을 보장하기 위해 주입구를 주 원주 방향으로 많이 설치할수록 좋겠지만 최소한 6군데 이상은 되어야 한다고 생각한다. 만일 포트의 여유가 없다면 한 포트에서 들어간 연료 공급관에 가지를 치는 형식이라도 최소한의 주입구 수를 확보하는 것이 필요하다.

연료효율은 주입구 수에 크게 관련이 없으며 플라즈마 밀도 및 온도가 상승하여 평균자유행정이 어느 정도 짧아지면 거의 1에 가까워진다.

참고문헌

[1] S. R. IN, J. Kor. Vac. Soc. **15**, 594 (2006)
 [2] 김상태 외, KSTAR 가스 연료주입계 및 방전세정계, Proc. 2007 KAPRA, KPS/DPP Conference (2007)

Simulation on the gas fueling for the base operation of the KSTAR tokamak

S. R. IN¹, T. S. Kim², S. H. Jeong¹

¹*Fusion Engineering Center, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-353,*

²*University of Science and Technology, Daejeon 305-333*

(Received September 7 2007)

The assembly of the main system of the KSTAR tokamak has been recently completed, and the preparation for the 1st plasma and test operations is progressed. The fueling system established for these purposes uses only one port placed at the opposite side of the pumping duct, and has a difficulty of attaining a uniform and fast supply of fuel particles to the plasma. At the base operation stage after finishing the test operation, the fueling system must be improved to provide a uniform fueling and a feed-back control in accordance with a high-density tokamak plasma maintained for a long period. As a part for understanding the points to be improved in the fueling system, a Monte Carlo simulation on the gas fueling into the tokamak plasma has been executed. After modeling the vacuum vessel and the plasma of quasi-D shapes as tori of rectangular cross-sections, the influences of the position and the number of the fueling inputs on the particle density distribution for a given pumping probability and mean free path were investigated.

Keywords : KSTAR, fueling, Monte Carlo simulation, particle distribution

*[E-mail] : srin@kaeri.re.kr