

KSTAR 중성빔 입사(NBI) 장치 배기계통 설계

오병훈 · 인상렬 · 조용섭 · 김계령 · 최병호

한국원자력연구소
(1999년 5월 29일 접수)

Design of the vacuum pumping system for the KSTAR NBI device

B. H. Oh, S. R. In, Y. S. Cho, K. R. Kim, and B. H. Choi

Korea Atomic Energy Research Institute

(Received May 29, 1999)

요 약 - KSTAR 중성빔 입사장치는 이온원 (ion source), 중성화실 (neutralizer), 휨용전자석 (bending magnet), 이온빔 덤프 (ion dump) 및 칼로리메타 (calorimeter)들로 구성되는데, 중성빔의 생성 및 수송을 최적화할 수 있도록 진공용기는 차동 배기계 (differential pumping system)로 되어있다. 배기계통의 설계를 위해 먼저 이온원의 정격 빔 출력 (120 kV, 65 A, 78 MW)에 필요한 수소 도입유량, 재전리 손실을 최소화할 수 있는 진공용기내의 압력분포 및 빔라인 부품들의 빔 손실율들을 결정한 후, 이 값들에 의해 각 용기에서 필요한 진공펌프의 배기속도들과 이온 빔의 중성화 효율을 최적화 할 수 있는 중성화실의 기체유량 등을 입자평형식 (particle balance equation)을 사용하여 계산하였다. 또한 배기계의 동특성을 해석하여 0.5초 이하의 빔인출 실험은 보조펌프인 터보 분자펌프 만에 의해 가능하도록 하는 단펄스 빔인출 시나리오를 완성하였다.

Abstract - The NBI (Neutral Beam Injection) System for the Korea Superconducting Tokamak Advanced Research (KSTAR) is composed of ion sources, neutralizers, bending magnets, ion dumps, and calorimeters. The vacuum chamber, in which all of the beam line components are enclosed, is composed of differential pumping system for the effective transfer of the neutral beams. The needed pumping speeds of each of the divided vacuum chamber and the optimized gas flow rate of the neutralizer were calculated with the help of the particle balance equations. The minimum gas flow rate to the ion sources for producing needed beam current (120 kV, 65A, 78 MW), the pressure distributions in the vacuum chamber for minimizing re-ionization loss, and the beam loss rate on the beam line components were used as the input in the calculation. Also the scenario for short pulse operation was determined by analysing the time dependent equations. It showed that beam extraction during less than 0.5 sec could be made only with TMP.

1. 서 론

중성빔 입사장치는 현재 토카막에서 사용되고 있는 가열장치 중 가장 신뢰성 있는 주가열 장치로 플라즈마 밀폐를 중점적으로 연구하는 중형 이상의 토카막에서는 기본적으로 갖추어야할 장비중의 하나이다. 저항가열에 의해 어느 정도 뜨거워진 플라즈마에 중성빔의 형태로 추가 에너지를 외부에서 가해줌으로서, 핵융합 반응에 의한 점화조건과 가까운 상태의 플라즈마를 만들어 이에 대한 연구를 수행할 수 있다. 이 외에도 중성빔 입사에 의해 전류구동, 플라즈마 밀도 및 전류의 분포제어 등의

효과가 얻어지고, 플라즈마에 입사된 후 나오는 입자들을 측정하여 플라즈마의 온도, 밀도 분포 등에 대한 정보도 알아낼 수 있다 [1].

중성빔 입사장치의 설계에서 가장 중요한 것 중 하나는 빔 수송중의 재전리 손실을 최소화 할 수 있는 진공 배기계를 구성하는 것이다. 최근의 핵융합 연구가 대형 장치 위주가 되면서 요구되는 중성빔의 에너지 및 전류가 증가하고, 이에 따른 개스의 도입유량이 증가함에 따라 대용량 고속 배기계가 중성빔 입사장치에서는 필수적인 것으로 여겨지고 있다. 본 연구에서는 KSTAR의 중성빔 입사장치 진공배기계의 설계를 위해

필요한 운전조건 및 진공펌프들의 용량 등을 입자평형방정식을 이용하여 계산하고, 단펄스 운전의 경우 보조 배기계만을 이용하여 실험을 수행할 수 있는 운전 시나리오를 동특성 해석에 의해 결정하였다. 2장에서는 KSTAR 중성빔 입사장치에 대해 전반적으로 설명하였고, 3장에서 빔 라인 부품들에서의 빔 손실률들을 계산한 방법과 그 결과에 의해 입자 평형식을 해석하여 배기계 운전 조건등을 결정하였으며, 4장에서는 동특성 해석에 의한 단펄스 운전 시나리오에 대해 논의하였다.

2. NBI 빔라인 진공계의 구성

KSTAR에서는 플라즈마 가열장치로서 뿐만 아니라, 전류구동 및 다양한 전류밀도 분포의 실험을 위해 그림 1과 같은 중성빔 입사장치 3개 라인을 계획 [2] 하고 있다. 계획된 장치는 한 개의 빔라인 당 8 MW의 중성빔을 플라즈마 내부에 공급할 수 있도록 하는 것으로 120 kV, 65 A (중수소의 경우)의 빔을 뽑아낼 수 있는 이온원 3개가 그림과 같이 한 개의 빔라인에 장착된다. 빔라인은 이온원에서 인출된 빔이 토카막의 자장에 영향을 받지 않도록 하기 위해 빔을 중성화시키는 중성화실, 중성화가 되지 않은 이온들을 제거시키기 위한 휘용 전자석 및 이온빔 덤프를 포함하여, 중성빔의 총에너지 및

분포를 측정하기 위한 칼로리메타 등으로 구성되는데, 그림 2에 중성빔 입사장치의 기본 구성도를 보였다.

KSTAR 중성빔 장치의 진공계는 중성화장치에서의 중성화 효율을 높히면서 중성빔 수송중 입자와의 충돌에 의한 재전리 손실을 최소화하기 위해 차동배기에 의해 방마다 서로 다른 진공도가 유지될 수 있도록 3개의 방으로 나누어 콘덕턴스를 조정할 수 있도록 설계되었다. 직육면체로 된 NBI 진공용기 안에는 모든 빔라인 부품들이 설치되기 때문에 그 크기가 3 m×4 m×5 m에 이르는 대형 구조물이고, 이온원 및 중성화 장치의 운전을 위해 개스 도입유량이 커서 배기속도가 큰 내장형 크라이오 펌프가 사용될 것이다.

3. 입자 평형방정식에 의한 배기계통 해석

정상 운전 상태에서 NBI 장치의 배기계통 관련 운전 조건들은 입자 평형식 [3]을 사용하여 계산해 낼 수 있다. 그림 3은 입자평형방정식을 적용하기 위해 KSTAR NBI 장치에서 기체의 흐름과 압력(P), 개스 도입유량(Q), 콘덕턴스(C), 빔손실율(L), 및 배기속도(S)들과의 관계를 도식적으로 표현한 것이다. 이온원 및 중성화장치들과 3개의 독립적인 방들이 직렬로 연결되어 있는데 각 부분의 압력분포를 자유롭게 조정하기 위해서 중성빔

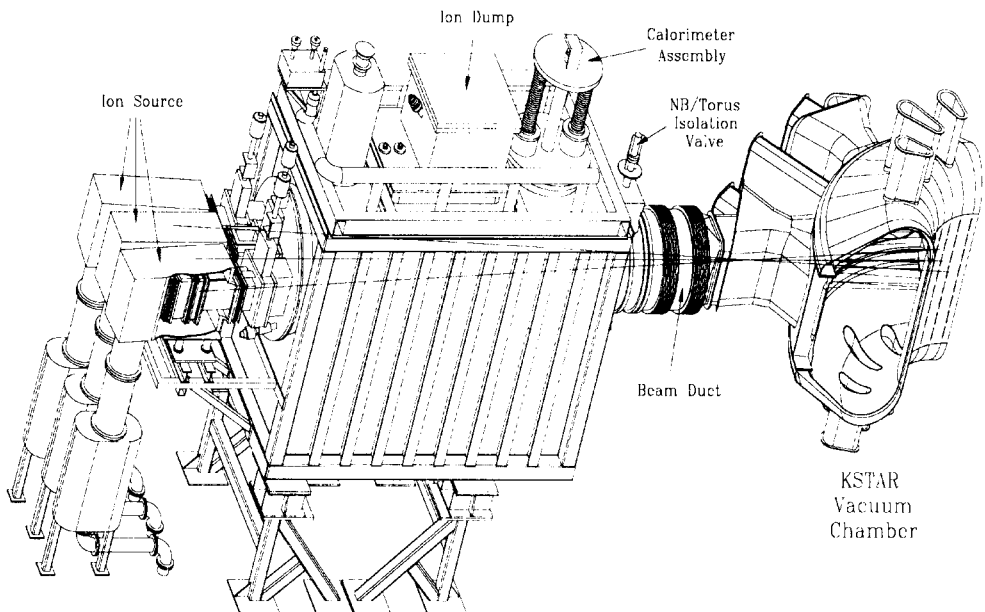


그림 1. KSTAR 중성빔 입사장치의 구성도.

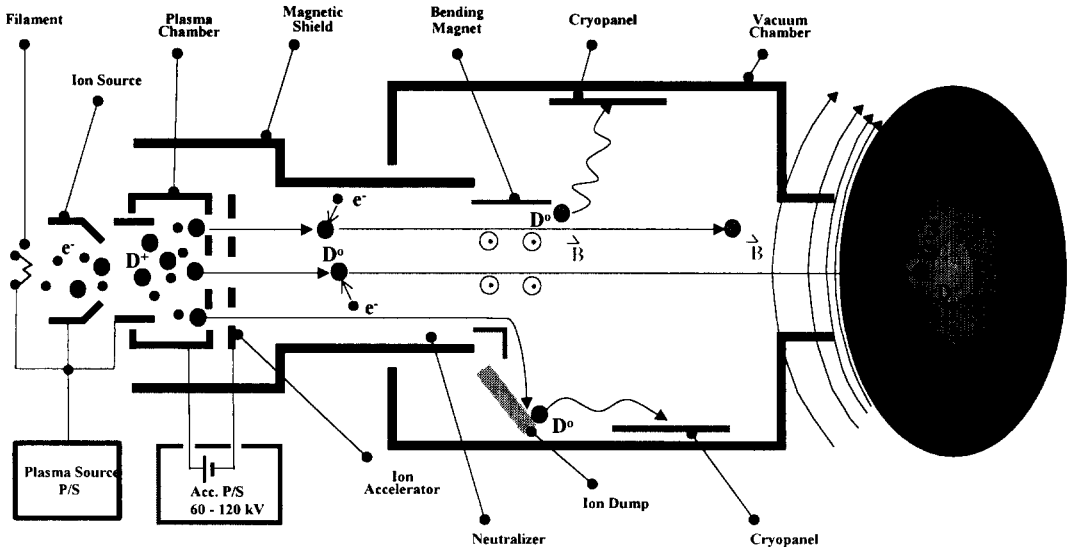


그림 2. 중성빔 입사장치의 원리.

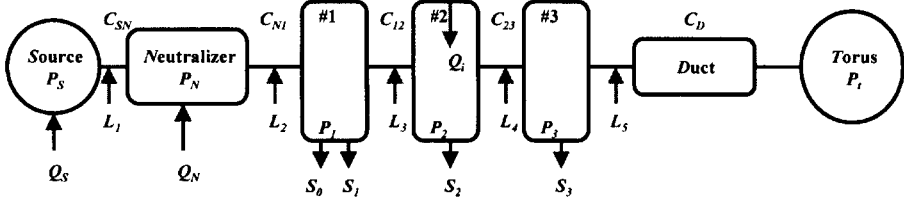


그림 3. KSTAR 중성빔 입사장치 배기계의 해석을 위한 모델 구성도.

을 차단하지 않는 범위 내에서 가능하면 작은 콘덕턴스를 갖는 도관들로 연결되어 있다. 이온원에서 빔으로 인출된 입자들은 배기계의 기체 부하로 작용하지 않지만, 이온빔 중에서 스크레이퍼(scraper) 등에 의해 빔으로부터 제거되는 입자들은 모두 배기계의 부하로 작용하게 된다. 따라서 이온원에서 인출된 빔의 이동경로를 따라 빔 손실율들은 다음과 같이 계산할 수 있다.

3.1. 빔손실을 계산

NBI 장치에서 빔손실은 대부분이 빔 스크레이퍼에서 이루어진다. 빔라인 부품들을 빔으로부터 보호하기 위해 빔라인 부품들의 입구에 스크레이퍼들이 설치되는데, 이들에 의해 빔의 크기가 제한되어져서 부품들이 빔에 의해 손상되는 일을 방지하고 있다. 본 연구에서는 이온원으로부터 인출된 입자들의 속도 분포에 의해 각 스크레이퍼에 충돌하는 입자들의 수를 계산하여 빔손실율을 구하였다.

KSTAR 중성빔 장치에서 사용될 이온원 [4]은 빔 단면의 크기가 43 cm×12 cm로 4세트의 그리드들에 의해 빔이 인출되도록 되어 있다. 인출된 빔은 이온원 그리드의 방향에 수평인 방향으로 1.2°, 수직 방향으로 0.5°의 발산각을 갖게 되는데, 여기서의 발산각은 그림 4에서 정의된 대로 가우시안 분포에서 분포의 최대값의 1/e의 분포 값을 갖는 각으로 정의된다. 빔 손실의 계산에는 발산각을 중심으로 주분포(main)와 테일(tail) 분포로 나누어서 각 경우마다 입자들의 위치와 각도들을 배정하고, 그 입자들을 따라가면서 손실이 일어나는 위치와 크기를 결정하였다. 표 1은 빔 스크레이퍼들의 위치 및 크기와 그 곳에서의 전체 빔 입자들에 대한 손실되는 입자들의 비율을 계산한 결과를 요약하였다. 주 분포의 경우 빔 입자의 각도 분포를 동일하게 주었으며, 테일에서의 분포는 가우시안 형태와 동일한 분포 두 경우를 모두 적용하여 계산하였다. 전자석을 통과한 중성빔은 중성 입자들과 충돌하면 재전리되면서 누설자장 등의 영

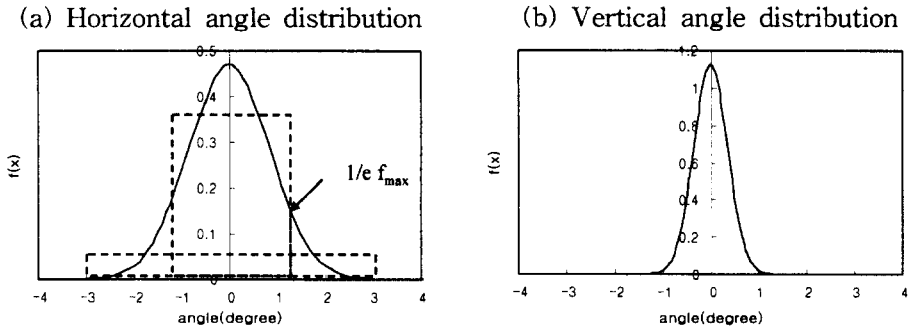


그림 4. 이온원 초기 발산각 분포.

표 1. 빔손실율((각 부품에서의 에너지 손실량)/(이온원에 공급된 총에너지)) 계산결과

	Main-square Tail-Gaussian	Main-square Tail-square	Reionization	Leakage Field Effects	Total(A)	Total(B)
Ion Source Exit Scraper	0.0376	0.0437			0.0376	0.0437
OMA Scraper	0.0019	0.0043			0.0019	0.0043
Neutralizer	0.0106	0.022		0.05	0.0606	0.072
Bending Magnet Scraper	0.0005	0.0018		0.01	0.0105	0.0118
Ion Dump	0.5336	0.5209			0.5336	0.5209
Pre-Calorimeter Scraper	0.005	0.0151	0.013		0.018	0.0281
Pre-Duct Scraper	0.0	0.001	0.0024		0.0024	0.0034
Total					0.6646	0.6842

항에 의해 빔라인 부품들과 충돌하므로써 기체 부하로 작용하게 되는데, 본 연구에서는 재전리된 입자들은 모두 재전리가 이루어진 곳에서 부하로 작용하는 것으로 계산하였다. 그림 5는 계산된 빔손실율을 이용하여 KSTAR 중성빔 장치의 에너지 흐름도를 구성해 본 것이다. NBI 장치에서 중성빔은 단일 에너지를 가지므로 빔출력의 손실율은 곧 입자손실 또는 기체부하와 대응되

는데, KSTAR NBI 장치의 경우 환산단위는 1 MW ≡ 1.48 Torr l/sec이다. 23 MW의 에너지를 입력했을 때 토카막 플라즈마 가열에 쓰이는 에너지는 약 8 MW 이고 나머지 15 MW는 입자 손실에 의한 기체부하 및 열부하로 작용하게 된다.

3.2. 입자 평형 방정식

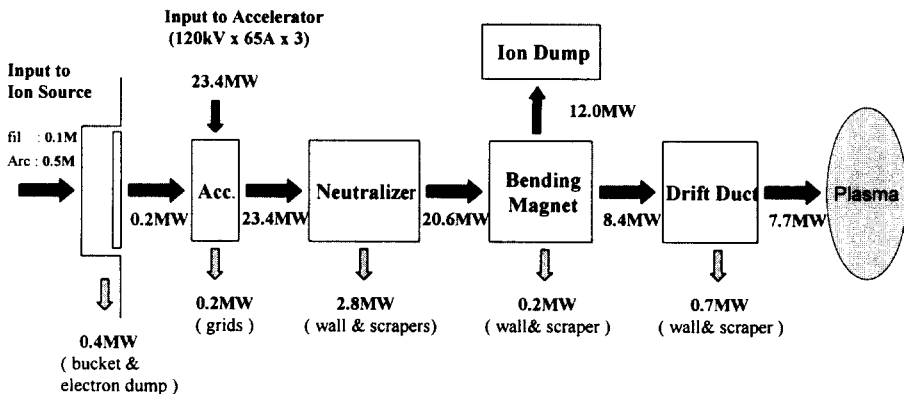


그림 5. KSTAR NBI 장치의 에너지 흐름도.

그림 3에서 서로 이웃하는 방들 사이의 입자 평형식을 세우면 아래와 같은 5개의 연립방정식이 얻어질 수 있다.

$$(1 - \alpha)Q_S + C_{SN}P_N + \frac{L_1}{2} - P_S C_{SN} = 0 \quad (1)$$

$$Q_N + P_S C_{SN} + P_1 C_{N1} + \frac{L_1}{2} + \frac{L_2}{2} - P_N C_{SN} - P_N C_{N1} = 0 \quad (2)$$

$$P_N C_{N1} + P_2 C_{12} + \frac{L_2}{2} + \frac{L_3}{3} - P_1 C_{N1} - P_1 C_{12} - P_1 S_1 = 0 \quad (3)$$

$$P_1 C_{12} + P_3 C_{23} + Q_i + \frac{L_3}{2} + \frac{L_4}{2} - P_2 C_{12} - P_2 C_{23} - P_2 S_2 = 0 \quad (4)$$

$$P_2 C_{23} + P_1 C_D + \frac{L_4}{2} + \frac{L_5}{2} - P_3 C_{23} - P_3 C_D - P_3 S_3 = 0 \quad (5)$$

이때 α 는 이온원에서 전리율을 나타내는데, $(1-\alpha)Q_S$ 는 플라즈마로 되지 않고 도입된 기체상태 그대로 이온원 밖으로 배출되는 기체의 양을 나타내게 되며,

나머지 기호들에 대한 설명은 표 2에 요약하였다. 위의 연립방정식들의 해석에 의해 필요한 운전 조건들을 계산하기 위해서는 배기계의 부하가 되는 입자 손실율(L) 값들 외에 이온원 및 중성화실의 개스공급 유량(Q), 각 도관들의 콘덕턴스(C), 최적의 운전을 위해 유지 되어야할 압력 값 등이 주어져야만 한다. 표 2에 입자 평형식을 위해 주어지는 입력 값들이 정리되어 있다. 이온원으로부터 65 A의 빔을 인출하기 위해 이온원에 공급해주어야 할 개스 공급량 Q_S 는 α 값에 따라 변하는데, 초기 계산에서 이 값은 0.5로 하였다. 중성화실은 중성화 효율을 위해 비교적 높은 압력을 유지해 주어야 하는 곳으로 기준 값을 2×10^{-3} Torr로 하였다. 방과 방을 연결하는 각 도관들의 콘덕턴스는 이온원의 경우는 구조가 복잡하기 때문에 Monte Carlo 방법을 사용하여 계산하였고, 그 이외의 값들은 기하학적 구조를 고려하여 계산할 수 있다. 또한 빔 손실에 의한 입자 부하는 두 개의 연결된 방에서 반씩 부담하는 것으로 하여 계산을

표 2. 배기계 상수의 정의 및 KSTAR NBI 장치의 실제 값

기호	의미	계산 값	기호	의미	계산 값
C_{SN}	이온원과 중성화장치 사이 도관의 콘덕턴스	2100(x3) l/sec	Q_S	이온원 개스 공급량	23 Torr l/sec
C_{N1}	중성화장치와 방 1 사이 콘덕턴스	6700(x3) l/sec	α	이온원에서의 전리율	0.5
C_{12}	방 1과 2 사이의 콘덕턴스	30000(x3) l/sec	L_1	방 1에서의 입자 손실량	$0.048\alpha Q_S$ Torr l/sec
C_{23}	방 2와 3 사이의 콘덕턴스	100000 l/sec	L_2	방 2에서의 입자 손실량	$0.048\alpha Q_S$ Torr l/sec
C_D	토러스와 연결되는 빔덕트의 콘덕턴스	13500 l/sec	L_3	방 3에서의 입자 손실량	$0.048\alpha Q_S$ Torr l/sec
P_N	중성화실 압력	3×10^{-3} Torr	L_4	방 4에서의 입자 손실량	$0.048\alpha Q_S$ Torr l/sec
P_1	방 1의 압력	9×10^{-5} Torr	L_5	방 5에서의 입자 손실량	$0.048\alpha Q_S$ Torr l/sec
P_2	방 2의 압력	2×10^{-5} Torr	Q_i	이온빔 덤프의 입자손실량	$0.048\alpha Q_S$ Torr l/sec
P_3	방 3의 압력	3×10^{-6} Torr	S_0	보조펌프 배기용량	5000 l/sec
P_i	토러스 압력	$10^{-6} \sim 10^{-8}$ Torr			

표 3. 배기계 해석에 의한 결정된 정상 운전조건

ion source 수	α	Q_S (Torr·l/sec)	P_S (torr)	Q_N (torr · l/sec)	S_1 (l/sec)	S_2 (l/sec)	S_3 (l/sec)
1	0.4	28.8	1.14×10^{-2}	1.1	2.0×10^5	3.9×10^5	2.4×10^5
1	0.5	23.1	8.7×10^{-3}	6.9	2.0×10^5	3.9×10^5	2.4×10^5
1	0.6	19.2	6.9×10^{-3}	10.7	2.0×10^5	3.9×10^5	2.4×10^5
3	0.4	28.8	5.8×10^{-3}	4.0	5.9×10^5	5.4×10^5	6.2×10^5
3	0.5	23.1	4.9×10^{-3}	4.6	5.9×10^5	5.4×10^5	6.2×10^5
3	0.6	19.2	4.3×10^{-3}	5.0	5.9×10^5	5.4×10^5	6.2×10^5

수행하였다. 각 방에서 유지되어야할 진공도는 빔의 재전리 손실과 배기계의 크기등을 고려하여 반복 계산에 의해 최종 값들을 결정할 수 있다. 또한 빔라인을 한 개의 이온원으로 운전할 때와 세 개의 이온원으로 운전할 때를 구별하여 계산을 수행하였는데, α 값에 따른 P_s , Q_N , S_1 , S_2 , S_3 들을 운전 조건으로 구한 결과를 표 3에 정리하였다.

3.3. 배기계 해석 결과 및 논의

계산 결과에 의하면 3개의 이온원이 동시에 운전될 때 필요한 배기량은 중수소의 경우 총 1.8×10^6 litter/sec이다. 이를 위해 온도 4.3 K로 액체 헬륨에 의해 냉각되는 크라이오 패널들이 진공용기의 양쪽 벽에 설치되는데, 일반적으로 크라이오 패널에 의한 단위면적 당 가능한 중수소 배기량이 5.0 K~4.2 K 사이에서 적어도 7 litter/sec-cm²이고, KSTAR NBI 진공용기에 패널의 설치가 가능한 면적이 30 m² (2×4 m×5 m×0.75)이므로, 진공함내에 설치 가능한 배기량은 2.1×10^6 l/sec로 필요한 배기량을 충분히 만족시키고 있다. 수소의 경우도 패널 표면적이 4.3 K로 계속 유지될 수 있다면 중수소의 경우와 거의 동일한 배기속도를 얻을 수 있으나, 수소의 포화증기압이 4.5 K 이상에서는 10^{-6} Torr 보다 크게 되기 때문에 운전 시나리오에 따른 패널설계 및 패널 재생주기에 대한 고려에 의해 패널 표면적의 온도가 4.5 K 이하에서 운전될 수 있도록 하여야한다. 반면 중수소의 경우에는 패널 표면의 온도가 6.0 K가 될 때까지 진공도를 10^{-6} Torr를 유지할 수 있으므로 수소운전에 대한 대책이 마련된다면 따로 고려할 필요가 없다.

이온원에서의 전리율에 따라 빔전류 65 A를 만들기 위한 필요한 개스 공급량이 달라지고, 동시에 중성화실 압력 3×10^{-3} Torr로 유지하기 위해 필요한 개스 공급양도 달라지게 된다. 중성화실의 효율을 위하여 이 곳을 일정한 압력으로 적절한 양의 개스를 공급하면서 제어하는 경우 이온원의 전리율은 빔라인의 진공도에 영향을

미치지 않기 때문에 빔의 수송에도 아무런 영향도 미치지 않지만, 개스 유량을 일정하게 제어하게 되면 이온원의 전리율에 따라 중성화실 압력이 달라지고 따라서 빔 수송과 관련된 진공도도 변화하게 된다. 따라서 중성화실의 압력을 제어하는 편이 개스의 유량을 제어하는 것보다 더 안정된 빔장치가 될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 동특성 해석에 의한 보조 배기계 설계

KSTAR 중성빔 장치의 배기계는 3장에서 계산된 결과처럼 대형 배기계를 구성해야만 한다. 이를 위해서 제공되어야 하는 크라이오 펌프는 고가의 액체 헬륨을 냉매로 사용하여야하기 때문에 장치 개발과정에서 반드시 요구되는 잦은 대기개방 및 재가동 등에 의해 부담해야 하는 크라이오 펌프의 운전비용을 무시할 수 없다. 따라서 장비의 개발과정에서 단 펄스 빔에 의한 실험이 가능한 범위에서는 고가의 비용이 드는 크라이오 시스템의 도움없이 보조 배기계로만 수행할 수 있는 운전 시나리오를 개발하게되면 운전비용 면에서 큰 부담이 없이 기초 실험들을 진행할 수 있을 것이다. 본 장에서는 진공계의 동특성을 계산하여 0.5초 이내의 빔은 보조 펌프인 터보 펌프만으로 만들어 낼 수 있는 가능성 등에 대해 논의한다.

4.1. 배기계의 동특성 해석 모델

배기계의 동특성은 용기내 압력의 시간 의존성을 말하는 것으로 등가회로 해석법[5]에 의해 간단히 계산해 낼 수 있다. 용기 내에서의 기체의 흐름을 전기회로에서의 전류와 같이 생각하면 진공 시스템의 요소들을 표 4에서와 같이 전기회로의 요소들로 대치시킬 수 있다.

표에서는 전기회로와의 단위를 맞추기위해 MKS 단위를 사용하고 있지만 실제 계산에서는 Pa과 m³ 대신 torr와 litter를 사용하였다. KSTAR 중성빔 장치 배기계의 동특성을 해석하기 위해 등가회로로 나타내면 그림

표 4. 진공시스템과 전기회로의 요소별 비교

진공시스템		전기회로		진공 시스템	전기회로
압력(P)	[Pa]	전압(V)	[V]		
유량(Q)	[Pa·m ³ /s]	전류(I)	[A]	P = Q/S	V = IR
콘덕턴스(C)	[m ³ /s]	1/저항(1/R)	[moh]	Q = CΔP	I = ΔV/R
배기속도(S)	[m ³ /s]	"	[moh]	dP/dt = Q/V	dV/dt = I/C
부피(V)	[m ³]	축전용량(C)	[F]	τ = V/S	τ = RC
도달압력(Pu)	[Pa]	기준전위(Vs)	[V]		

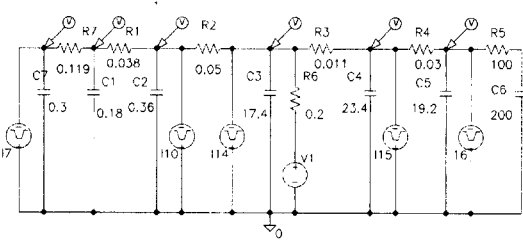


그림 6. KSTAR NBI 진공계의 등가회로.

6과 같이 나타낼 수 있는데, 여기서 R은 방과 방을 연결하는 각 도관들의 콘덕턴스를 나타내고, V는 정해진 위치에서의 압력을, C는 각 방들의 부피에 대응한다. 또한 I는 각 방에서의 배기 부하를 나타내고, V1은 기저 압력(base pressure)를 나타낸다. 보조 펌프는 R6 이고, 첨자 수자들은 이온원(7), 이온원 스크레이퍼(1), 중성화실(2), 진공함의 방 3개(3, 4, 5) 및 토카막 진공용기(6)를 각각 나타내는데, R5 값을 매우 큰 값으로 놓으면 중성빔 장치와 토카막과의 통로가 끊겨져 있는 상태를 재현할 수 있다. 그림 6의 등가회로에 의해 만들어지는 미분 방정식들은 상용 회로 해석 프로그램 등을 통하여 간단히 풀어낼 수 있다.

4.2. 동특성 계산결과 및 논의

이온원에 유량 23 Torr·liter/sec의 속도로 150초동안 흘러줄 때 배기속도 5000 liter/sec의 보조펌프에 의해

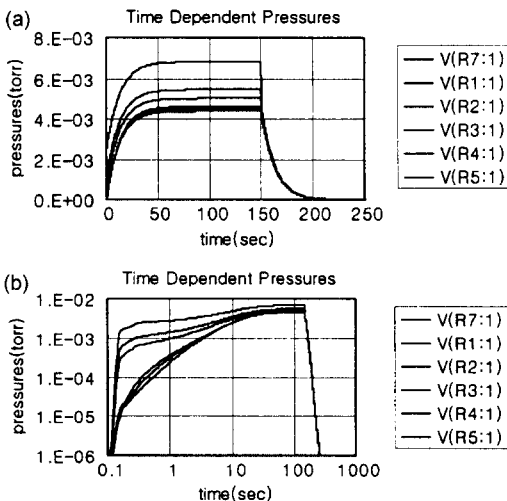


그림 7. KSTAR NBI 진공계의 동특성 해석 결과.

계산된 시간에 따른 압력 분포를 그림 7에 보였다. 보조 펌프만에 의해 100초 이내에 충분히 기저 압력까지 도달하고, 개스가 공급되는 상태에서 평형에 도달하는데 약 50초가 소요되며 그때 압력은 방의 위치에 따라 큰 차이 없이 10^{-3} Torr 정도를 유지하게 된다.

단펄스 운전을 위해 이온빔 인출이 수행되어야 하는 시간은 중성화 효율을 위해 중성화실의 압력이 10^{-3} Torr 정도를 유지하면서 재전리 손실을 최소화하기 위해 진공도가 10^{-5} Torr 이하로 유지될 수 있는 구간이어야 한다. 또한 이온빔 밀도분포를 균일하게 유지해주기 위해 이온원의 압력이 급격히 변화하지 않는 범위라야 할 것이다. 그림 7의 (b)를 참조할 때 이온원에 개스를 공급 개시한 후 0.3초에서 0.8초 사이에 빔을 인출하는 것이 보조 배기계에 의해서 0.5초의 단펄스 빔을 얻기 위한 최적의 시나리오가 된다. 단 진공도가 시간에 따라 악화되면서 만들어지는 재전리 입자들에 대한 대책은 반드시 마련되어야 할 것으로 판단된다.

5. 결 론

정상상태의 운전에서 KSTAR 중성빔 입사장치의 중성화효율을 극대화하고 재전리 손실을 최소화하기 위한 운전 조건들을 입자 평형식을 이용하여 구하였다. 이온원과 중성화실의 개스 주입량은 이온원의 전리율이 0.5 일 때 각각 23 Torr liter/sec와 7 Torr liter/sec이고 필요한 펌프의 배기속도는 이온원이 하나일 때 각각 2×10^5 liter/sec, 4×10^5 liter/sec, 2.4×10^5 liter/sec 이고, 이온원이 세 개일 때 각각 5.8×10^5 liter/sec, 5.4×10^5 liter/sec, 6.2×10^5 liter/sec이다. 이온원의 운전 압력은 이온원의 전리율에 따라 5×10^{-3} Torr에서 1×10^{-2} Torr 사이로 계산되었다. 이는 중수소 운전의 경우 4.3K로 유지되는 KSTAR NBI 크라이오 패널 30 m²의 면적에 의해 충분히 배기가 가능한 양이다.

동특성 해석에 의해 보조 펌프만에 의한 단펄스 이온빔 인출의 가능성을 검토한 결과 이온원에 개스를 공급한 후 0.3초에서 0.8초 사이가 가장 효과적으로 빔을 인출할 수 있는 시간임을 알 수 있었다. 이 동안 빔의 표적이 있는 칼로리메타에서의 진공도는 1×10^{-5} Torr에서 9×10^{-5} Torr까지 올라가기 때문에 진공도가 시간에 따라 악화되면서 만들어지는 재전리 입자들이 각 빔 라인 부품들에 줄 열부하에 대한 평가가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 특정연구개발 사업 중 「차세대 초전도 핵융합 연구장치 개발사업」의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] G. Schilling, T. A. Kozub, S. S. Medley, and K. M. Young, *Rev. Sci. Instrum.* **57**, 2060 (1986).
- [2] The KSTAR Team, in *Proceedings of the 17th IAEA Fusion Energy Conference (Yokohama, 1998)*, IAEA-F1-CN-69/FT1/1, P. 19.
- [3] J. E. A. John, "Gas Dynamics," Prentice Hall (1984) ch. 3.
- [4] B. H. Choi *et al.*, "NBI System Design for KSTAR Tokamak," KAERI/TR-1072/98 (1998).
- [5] S. R. Wilson, *J. Vac. Sci. Technol.* **A5**, 2479 (1987).
- [1] G. Schilling, T. A. Kozub, S. S. Medley, and K. M.