

플라즈마 발생을 위한 도너츠형 대형 진공용기의 내벽 세정

김 경민
국가핵융합연구소 KSTAR 운영사업단

1. 서 론

10^{-8} mbar 영역의 초고진공으로 유지되는 핵융합 장치의 진공용기는 고효율의 플라즈마 발생과 유지를 위해서 진공용기 내벽 세정이 필수적이며, 플라즈마 운전 중 수소 가스의 순환을 제어하기 위해서도 진공용기 내부의 불순물이 최소화 되도록 유지하여야 한다[1].

KSTAR[2] 진공용기는 초기 진공배기 단계에서 약 100 °C의 가열 탈리(baking) 과정을 거치며 초기 내벽 세정이 이루어 졌다. 하지만 많은 탄소 및 산소 화합물들이 진공용기 내벽을 덮고 있으며, 이들은 플라즈마 발생 시 플라즈마에 의해 이온화되고 해리되면서 결국 불순물의 원천이 된다. 따라서 플라즈마 실험 이전에 이들 불순물을 제거하기 위해 진공용기 내벽을 방전 세정하는 과정은 필수적이다. 이에 따라 KSTAR 토카막에서는 고주파 유도 DC 방전 방식(RF-assisted glow discharge cleaning)을 사용하였으며, 플라즈마 발생 운전 중에는 이온공명가열장치(ICRH)를 이용한 방전 세정이 함께 수행되었다[3].

이 논문은 KSTAR 최초 플라즈마 실험시 실시하였던 진공용기의 내벽 세정의 전반적인 내용과 그 결과를 요약한 것이다.

2. 가열 탈리

도우넛 모양의 KSTAR 진공용기의 높이는 약 3.39 m, 내측 반지름은 약 1.11 m, 외측 반지름은 약 2.99 m이며, 진공용기 내벽의 표면적은 약 80 m^2 이다. 진공용기는 고온수 및 냉각수가 순환할 수 있는 이중벽 구조로 되어 있으며, 이 방법을 이용해 진공용기를 가열하고 냉각할 수 있다. 또한, 극저온으로 냉각된 초전도 자석을 중성자로부터 보호하는 역할도 수행한다[4].

최초 플라즈마 운전에서는 최고 130 °C의

가열된 물을 사용하여 진공용기 내벽을 가열하였으며, 추가적으로 500 W 할로겐 램프 16개를 초기 가동용 플라즈마 대향 장치로 설치한 인보드 리미트 뒷면에 설치하여, 인보드 리미트의 탄소 타일을 가열하여 불순물을 제거하게 하였다. 그림 1은 인보드 리미트가 설치된 KSTAR 진공용기 내부를 나타낸 그림이다.

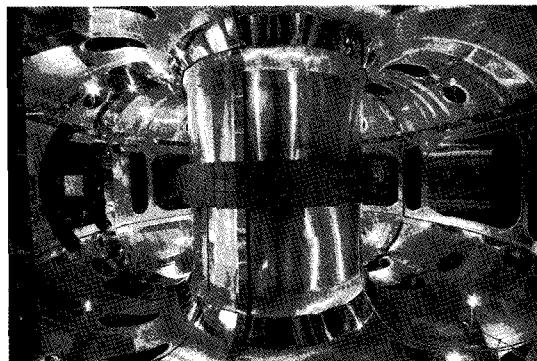


그림 1. KSTAR 진공용기 내부.

KSTAR 장치가 냉각 단계에 들어가기 전에는 진공용기 내벽의 표면 온도를 약 100 °C에서 약 200 시간 가열함과 동시에 인보드 리미트의 탄소 타일은 같은 시간으로 약 115 °C로 가열하였다. 그림 2는 진공용기 내벽과 탄소 타일의 온도 변화를 나타낸 그림이다.

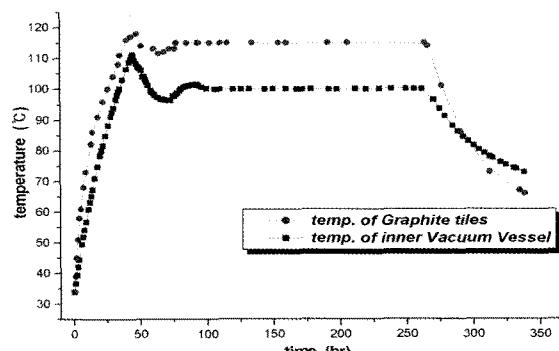


그림 2. 진공용기 내벽과 탄소 타일의 온도 변화.

3. R-GDC

KSTAR 최초 플라즈마 실험에 적용한 고주파 유도 DC 방전 세정(R-GDC) 방식은 상대적으로 작은 가스 분압으로도 초기 방전이 가능한 고주파 유도 방식의 DC 방전 시스템이다. 고주파 안테나는 초기 방전이 이루어진 후 DC 방전시 양극(anode)으로 사용하는 진공용기 표면으로 수백 볼트의 직류 전압이 인가되도록 하였으며, 가능한 낮은 압력에서 방전이 시작되고 유지할 수 있도록 인덕턴스와 임피던스 정합을 적절히 고려해서 직경 8 cm, 권선 수 10 회의 인덕션 코일(induction coil)형으로 제작되었다. 또한, 13.56 MHz 급의 RF generator 와 최대 6 kW 출력의 DC power supply, 안테나 및 안테나 구동부 등으로 구성되어 있으며, 진공용기의 A, I 포트에 각각 한 세트씩 설치되어 있다[5].

그림 3은 KSTAR 방전 세정계의 3 차원 구성을 나타낸 그림이다.

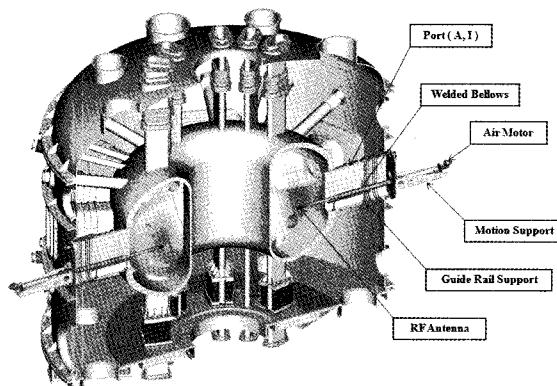


그림 3. KSTAR 방전세정계의 3 차원 구성도.

KSTAR 방전세정은 진공용기 가열 탈리 이후, 수소 가스를 이용해 약 24 시간, 헬륨 가스를 이용해 약 80 시간 연속 세정을 실시하였고, KSTAR 장치의 냉각 기간 동안에는 헬륨 가스를 이용해 하루 4~5 시간 상시 운전을 실시하여 세정을 하였고, 플라즈마 실험 기간에는 플라즈마 실험 전/후 약 2~4 시간 수소와 헬륨 가스를 병행하며 세정 운전을 실시하였다.

방전세정은 진공용기의 유효면적(80 m^2)에 적정한 배기속도 0.1 m/s 를 유지하기 위하여

KSTAR 진공용기 진공배기계에 장착된 8 개의 터보분자펌프(TMP) 중 4 기만 가동하여 실시하였으며, 1 기의 TMP 배기 속도는 약 $2,800 \ell/\text{s}$ 이다. 표 1은 최초 플라즈마 운전시 적용한 방전 세정 운전 조건을 정리한 것이다.

표 1. 방전 세정 운전 조건.

		Helium	Hydrogen
RF	forward[W]	300	250
	전압[V]	230	410
	전류[A]	9	6
	전력[kW]	2.07	2.46
Gas feeding rate [sccm]		2,000	1,000
Pumping speed	$11,200 \ell/\text{s}$ ($2,800 \ell/\text{s} \times 4\text{TMP}$)		
Vacuum pressure [mbar]	$2.4 \sim 2.7 \times 10^{-3}$		$6.0 \sim 7.5 \times 10^{-3}$

4. ICRH 방전 세정

KSTAR 이온공명가열장치(ICRH)는 고주파 주파수의 영역이 30~60 MHz이며, 2 MW 급의 RF 송출기, 6 MW 급의 안테나와 2 MW 사양의 고주파 전송튜브로 구성되어 있어 최종적으로 300초 운전이 가능하도록 설계되어 있다[6]. 그림 4는 ICRH 방전 세정에 사용된 시스템 구성도이며, 오른편 위의 그림은 진공용기에 장착된 안테나이다.

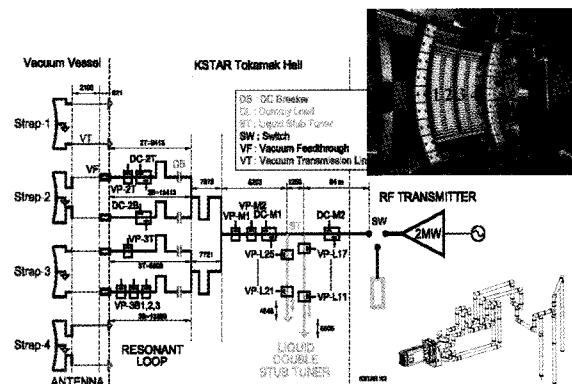


그림 4. ICRH 시스템 및 안테나.

안테나의 4 개 스트랩 중 2번과 3번 스트랩에 고주파를 공급하였고, 스트랩 간의 위상 차이는 0 도이며, 주파수는 30~33 MHz

이다. ICRH 방전 세정은 플라즈마 운전과 운전 사이의 약 10 분 정도의 시간동안에 펄스방전(1s/10s, Duty cycle 10%)으로 실시하였다. RF 출력은 낮은 안테나 부하저항에 의하여 나타나는 안테나와 전송선상의 고전압에 의하여 30 kW 내외로 제한되었으며, 운전유지시간은 안테나 냉각라인의 미비로 인하여 1 초 이내로 유지하였다.

방전 압력은 10^{-4} 에서 10^{-5} mbar이고, TF 자장은 0.5 T에서 1.4 T이다. 자장이 낮아질수록 안테나 부하저항이 조금 증가하였으며 플라즈마 밀도는 크게 증가하였다. 주파수와 TF 자장 조건에 따라 2 차 고주파 이온가열이나 전자가열모드를 방전에 이용할 수 있었는데, 큰 어려움이 없이 플라즈마를 발생할 수 있었다.

5. 세정 결과

세정효과를 분석하기 위하여 차등 진공 배기되는 잔류가스분석기(RGA)와 진공용기와 배기 덕트(pumping duct)에 각각 붙어있는 cold cathode/pirani, hot cathode/pirani 압력계를 사용하여 기체 분압 및 전체 압력을 측정하였다.

그림 5-(a)는 진공용기 내벽을 가열 탈리를 실시한 후 RGA로 진공용기 내부의 가스 분압을 측정하여 나타낸 그림이다.

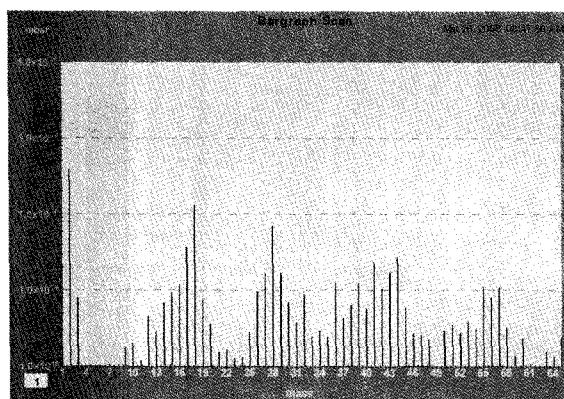


그림 5-(a). 가열 탈리 후 진공용기 내에서의 잔류가스.

상태적으로 낮은 가열 온도이지만 진공용기 내에서 물의 분압을 10^{-8} mbar 이하로 유지할 수 있었다. 하지만, 표면적이 대략 40 m^2 에 달하는 진공용기 배기 덕트를 가열 탈

리하지 않았기 때문에 물 분압을 그 이상으로 낮게 유지하는 데는 한계가 있었다.

그림 5-(b)는 진공용기 가열 탈리 후, 장시간 방전 세정을 실시하고 진공용기 내부의 잔류 가스를 측정하여 나타낸 그림이다. 방전 세정 이후에도 물과 분자량 44 등은 크게 줄진 않았지만, 분자량 50 이상의 고분자 번호의 불순물은 크게 줄었음을 알 수 있다.

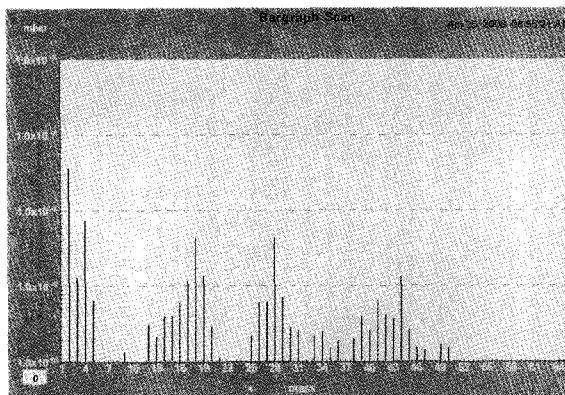


그림 5-(b). 방전 세정 후 진공용기 내에서의 잔류 가스.

ICRH 방전 세정을 하는 경우 연속적인 플라즈마 발생에 대해서 flat-top에서 전자밀도가 감소하였으나 방전세정이 없는 경우는 전자밀도가 감소하지 않았다. 진공용기 내 수소 제거 효과를 계산해 본 결과 $10 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{h}$ 이하로서 타 장치에 비하여 낮은 값을 보여주었다. 이는 ICRH에 의한 세정 효과가 관측되었지만 좀더 정량화된 연구와 RGA 측정 장비의 보완이 필요하다고 판단된다. 그림 6은 ICRH 방전 세정시 진공용기 내의 기체 분압 변화를 나타낸 그림이다.

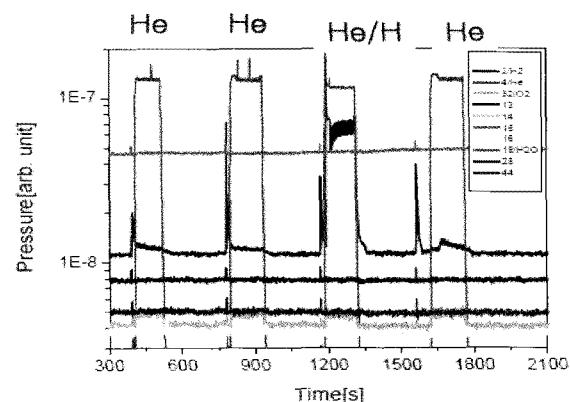


그림 6. ICRH 방전 세정 중 기체 분압 변화.

6. 결 론

주장치 진공 배기 이후 저온헬륨장치의 배기, 진공용기에 대한 100 °C 내외의 가열 탈리 과정과 한 달여에 걸친 방전 세정을 통하여 진공용기의 기저 압력을 10^{-7} mbar 이하로 유지하였다.

KSTAR 최초 플라즈마 운전에 적용되었던 방전 세정계는 최초 플라즈마 운전을 위한 진공용기 내벽 세정을 성공적으로 수행되었으며, 특히 진공용기 내부에서 고분자 번호의 불순물을 줄이는데 효과적이었다.

방전 세정계에 필요한 보완사항으로는 RF 코일의 이동과 방전 세정 운전시 안정성과 용이성을 향상시키기 위해 전체 리모트(remote) 운전이 가능할 수 있게 성능 향상이 필요하다. 또한, 차후의 KSTAR 플라즈마 실험에서는 보다 향상된 진공 환경을 얻기 위해서 진공용기 내벽의 보론(B) 코팅을 적극적으로 고려할 필요성이 있으며, 차동 진공계의 가열 탈리를 통해 기체 분압 측정 시스템의 정확도를 높이면서 실시간 모니터링이 가능할 수 있게 보완이 필요하다.

참고문헌

- [1] J. Winter, Wall conditioning in fusion devices and its influence on plasma performance, *Plasma Physics Control. Fusion* 38 (1996) 1503–1542.
- [2] J.S.Bak, H.L.Yang, Y.K.Oh, Y.M.Park, K.R.Park, C.H.Choi, W.C.Kim, J.W.Sa, H.K.Kim, G.S.Lee, Status of the KSTAR tokamak construction, *Fusion Engineering and Design* 81 (2006) 2315–2324.
- [3] H.F.Dylla, A review of the wall problem and conditioning techniques for tokamaks, *Journal of Nuclear Materials*, Volumes 93–94, Part 1, October 1980, Pages 61–74.
- [4] S.Cho, K.H.Im, Y.C.Chang, J.B.Kim, B.J.Yoon, C.J.Do, N.I.Her, S.R.In, K.S.Kim, Y.C.Kim, M.Kwon, K.H.Lee, Thermohydraulic design of the KSTAR vacuum vessel, *Fusion Engineering and Design* 58–59 (2001) 851–855.
- [5] K.S.Lee, H.T.Kim, K.M.Kim, K.P.Kim,

H.K.Kim, G.H.Kim, J.S.Kim, H.L.Yang, J.S.Bak, S.J.Wang, J.G.Kwak, Operational characteristics of the KSTAR gas fueling and wall conditioning system, KAPRA & KPS/DPP, July 3–4, 2008.

[6] Y.D.Bae, J.G.Kwak, S.K.Kim, J.S.Yoon, B.G.Hong, C.K.Hwang, S.J.Wang, S.U.Jeong, Development of a KSTAR ICRF antenna for long pulse operation, *Nuclear Fusion* 43 (2003) 805–811.

저자이력



김경민(金敬旼)

2003년 경북대학교 기계공학과 석사, 현재 국가핵융합연구소 KSTAR운영사업단 연구원.