

고주파 인가시의 KSTAR ICRF 안테나의 진공특성

배영덕* · 곽종구 · 홍봉근

한국원자력연구소 핵융합연구팀, 대전 305-353

(2005년 2월 20일 받음)

KSTAR ICRF 안테나의 진공특성을 실험적으로 조사하였다. 제작된 안테나를 총 유효배기속도 1015 l/s의 진공펌프가 장착된 시험용 진공용기에 설치하였으며, 고주파 시험하기 전에 시간에 따른 압력 변화, 충전체 부하, 도달 진공도 등을 측정하였다. 낮은 출력의 고주파를 반복적으로 인가함으로써 세정 효과를 확인하였다. 안테나에 고주파를 인가하여 시험하는 동안 진공도 변화를 측정하였으며, 압력 상승에 의해 방전이 유발되는 한계 압력을 조사하였다. 본 안테나의 경우 고주파 인가 중에 진공용기의 압력이 10^{-4} mbar 이상이 되면 방전이 일어났다. 장펄스 시험에서 안테나의 온도와 시험용 진공용기의 압력을 측정하여 안테나를 냉각하지 않은 상태에서 운전이 가능한 전압을 조사하였으며, 냉각했을 때의 결과와 비교하였다.

주제어 : ICRF 안테나, KSTAR, 고주파 시험, 진공 특성

I. 서 론

국가핵융합연구장치인 KSTAR(Korea Superconducting Tokamak Advanced Research) 토카막[1,2]의 플라즈마 가열 및 전류구동 장치 중의 하나인 ICRF(Ion Cyclotron Range of Frequency) 가열장치[3-5]는 주파수 영역 25~60 MHz에서 6 MW의 고주파를 300초 동안 공급하도록 설계, 제작되었다. 이러한 요구조건을 만족시키기 위해서는 35 kV의 고주파 전압이 인가될 때 안테나를 포함한 어떤 지점에서든 방전이 일어나지 않아야 하며, 고주파가 인가되는 300초 동안 고주파 전류에 의한 온도 상승에 따른 기계적, 전기적 특성이 정해진 범위 내에서 변하지 않아야 한다. 또한 KSTAR 토카막의 진공용기 내에 설치되는 안테나의 진공 특성은 토카막 전체의 성능에 영향을 미칠 수 있으므로 토카막에 설치하기 전에 고주파가 인가되는 동안의 안테나의 진공 특성을 파악하는 것은 필수적인 것이다. KSTAR 진공용기의 경우, 요구되는 진공도는 7×10^{-9} mbar이고, 총 기체부하는 7×10^{-5} mbar·l/s 이하이어야 하며[6], 진공용기의 누설량은 5×10^{-10} mbar·l/s 이하이다[7]. 안테나의 진공 특성을 조사하기 위해 제작된 안테나를 시험용 진

공용기(RFTC, RF Test Chamber)에 설치하여 고출력 고주파를 인가하는 실험을 수행하였다. 고주파가 인가되는 동안 시험용 진공용기의 압력 변화를 측정하였으며, 연속적인 고주파 펄스 인가에 따른 세정 효과[8]를 확인하였다. 장펄스 운전시 시간에 따른 안테나의 온도와 진공용기의 압력 변화를 측정하여 온도 상승에 의한 압력 변화를 검토하였다. 또한 고주파 인가시 압력 상승에 의한 시험용 진공용기 내에서의 방전현상을 실험적으로 조사하였다.

II. 안테나의 기본 진공 특성 계산 및 실험

KSTAR ICRF 안테나는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 양쪽 끝에 진공전송선이 연결된 중심 접지형 4개의 전류띠(current strap), 단일층 파라데이 차폐관(mono-layered Faraday shield tube), 4개로 분할된 공동(cavity)으로 이루어져 있으며, KSTAR 진공용기의 주수평포트에 삽입되는 구조이다. 진공용기내에서 파라데이 차폐관의 전방 표면은 표준 플라즈마 표면으로부터 +2 cm에 위치하며, 진공 상태에서 그 위치를 10 cm 바깥쪽으로 이동할 수 있다. 300초의 장펄스 운전을 위해 전류띠, 파라데이 차폐관, 공동벽 및 진공전송선에 냉각관로를 내

* [전자우편] ydbae@kaeri.re.kr

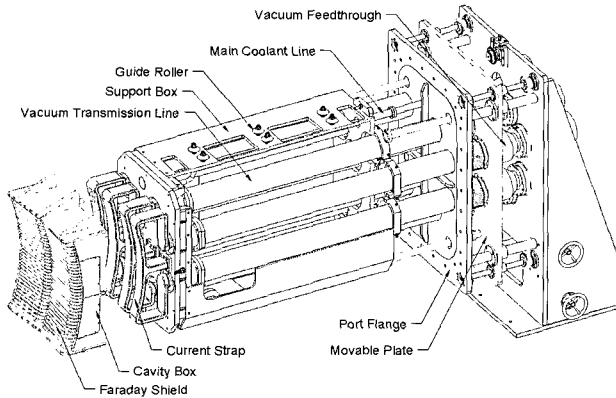


Fig. 1. 3-D drawing of KSTAR ICRF antenna.

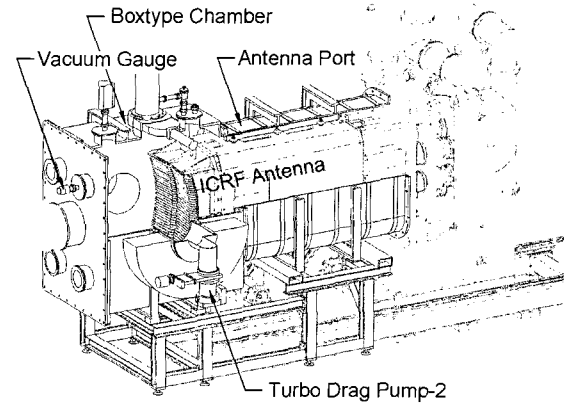


Fig. 2. Cutaway view of the RF test chamber in which the antenna is installed.

장하였으며, 물에 의한 강제냉각을 통해 고주파 및 플라즈마로부터의 최대 0.5 MW/m^2 열부하를 제거할 수 있도록 하였다. 파라데이 차폐관은 Cu 도금한 Inconel 625 관을 사용하였으며, 토카막에 설치하기 전에 플라즈마 쪽 앞면에 B_4C 를 코팅할 예정이다. 진공과 대기의 경계를 이루는 부품으로는 주 포트 플랜지가 있으며, 플랜지를 관통하고 있는 진공 전송선의 바깥은 진공용 벨로우즈가 있고, 진공 전송선의 안쪽은 고주파진공도입기(vacuum feedthrough)에서 그 경계를 이루고 있다. 또한 안테나에는 고출력에서 장펄스로 운전이 가능하도록 복잡하고도 많은 냉각 관로가 내장되어 있는데, 66개의 파라데이 차폐관, 4개의 전류띠, 8개의 진공전송선, 전류띠를 둘러싸고 있는 공동 등이 그것이다.

안테나가 설치된 시험용 진공용기는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 직육면체 형태의 진공용기에 안테나가 삽입되는 안테나 포트가 구성되어 있다. 직육면체 진공용기의 크기는 $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$ 이며, 두께 20 mm의 SUS304를 사용하여 제작하였다. 진공용기의 외벽에는 진공 배기시 휨 방지를 위해 'T'자형 보강재를 부착하였다. 보강재의 크기는 ANSYS 해석을 통하여 결정하였다. 진공 배기시 최대 변위는 2 mm 미만이었다. 직육면체 진공용기에 볼트로 부착되는 안테나 포트는 실제 KSTAR 진공용기의 안테나 포트와 같은 크기($0.75 \text{ mW} \times 1.2 \text{ mH} \times 1.8 \text{ mL}$, 모서리 곡률 반경 200 mm)를 가지며, 휨 방지를 위해 외벽에 'T'자형 보강재를 부착하였다. 안테나 포트를 포함한 전체 진공용기의 부피는 3.768 m^3 이다. 시험용 진공용기의 진공계통은

Fig. 3과 같으며, 두 개의 터보분자펌프(Pfeiffer Vacuum사의 TMU1601, TMU521)에 의해 배기된다. 두 개의 진공펌프는 직육면체 진공용기의 양쪽에 엘보우를 통해 연결되어 있으며, 각각의 배기속도는 질소기체에 대해 $S_1=1500 \text{ l/s}$ 와 $S_2=500 \text{ l/s}$ 이다. 진공계이지로는 full range gauge(Pfeiffer Vacuum사의 TPG252)를 사용하였다. 콘덕턴스, C를 고려한 진공펌프의 유효배기속도, S_e 를

$$S_e = \frac{S \times C}{S + C} \quad (1)$$

와 같이 계산하면, 각각 $S_{1e}=707 \text{ l/s}$ 및 $S_{2e}=308 \text{ l/s}$ 가 된다. 여기서 콘덕턴스 C는

$$\frac{1}{C} = \sum_i \frac{1}{C_i} - \frac{1}{C_{Op}} \quad (2)$$

와 같이 계산하였으며, C_{Op} 는 진공펌프의 입구 콘덕턴스, C_i 는 직렬 연결된 각 진공 부품들의 콘덕턴스이다. 따라서 본 진공배기시스템의 총 유효배기속도는 $S_e=1015 \text{ l/s}$ 이다.

ICRF 안테나의 진공특성을 파악하기 위해 우선 진공에 노출되는 표면적을 부품별로 계산하면 Table 1과 같다. 안테나의 전체 표면적은 44.08 m^2 로서 KSTAR 진공용기의 내부 표면적(1100 m^2)[9]의 약 4 %에 해당된다. 한편 본 안테나가 설치된 시험용 진공용기의 내부 표면적은 18.58 m^2 이다. 또한 안테나를 포함하여 진공용기의 모든 오링의 면적은 0.13 m^2 이다.

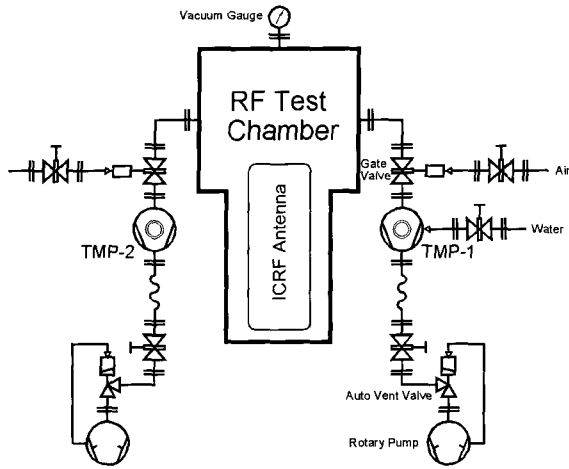


Fig. 3. Schematic diagram of the vacuum system for RF test chamber.

Table 1. Surface area of all components of the ICRF antenna.

Component	Material	Surface area [m ²]
Faraday shield	Cu-plated Inconel625	1.49
Current strap	Cu-plated SUS316L	1.75
Cavity box	Cu-plated SUS316L	6.40
Vacuum transmission line	SUS304	9.77
	Cu-plated area Teflon	12.14 0.42
Support box	SUS316L	11.16
Others	SUS304	0.95
Total surface area of the antenna		44.08

안테나 표면으로부터의 기체 방출량은 기체방출율과 면적에 의해 결정되는데, 본 안테나의 경우 일반적인 습식세정 후 전해연마과정을 거쳤으므로 10시간 배기했을 때의 해당되는 재질에 대한 기체 방출율, q_{10} [10]은

- SUS 5.7×10^{-9} mbar·m/s ($a_{10}=1.0$)
- Cu 4.75×10^{-9} mbar·m/s ($a_{10}=1.0$)
- Teflon 3.3×10^{-7} mbar·m/s ($a_{10}=0.2$)

와 같다. 이로부터 t 시간동안 배기를 계속하였을 때의 기체방출율은

$$q = q_{10} t^{-\alpha_{10}} \quad (3)$$

와 같으므로, 240시간(10일)동안 배기하였을 때의

기체방출율, q_{240} 은

- SUS 2.4×10^{-11} mbar·m/s
- Cu 2.0×10^{-11} mbar·m/s
- Teflon 1.1×10^{-7} mbar·m/s

와 같다. 240시간 배기시의 기체방출율을 계산한 것은 실제의 경우와 비교하기 위함이다. 위의 기체 방출율 값을 이용하여 안테나로부터의 총 기체방출량, $Q_{Antenna}$ 을 계산하면

$$\begin{aligned} Q_{Antenna} &= Q_{SUS} + Q_{Cu} + Q_{Teflon} = \sum q_{240i} \cdot A_i \quad (4) \\ &= 6.0 \times 10^{-7} + 3.0 \times 10^{-7} + 4.6 \times 10^{-5} \text{ mbar} \cdot \text{l/s} \\ &= 4.6 \times 10^{-5} \text{ mbar} \cdot \text{l/s} \end{aligned}$$

와 같으며, 테프론으로부터의 기체 방출의 영향이 크음을 알 수 있다. 또한 240시간 배기시의 바이톤 오링의 표면으로부터의 기체 방출량은, 바이톤 오링의 1시간 배기시의 기체방출율(1.52×10^{-4} mbar·m/s)[10]과 면적으로부터

$$Q_{O-ring} = 2.5 \times 10^{-5} \text{ mbar} \cdot \text{l/s} \quad (5)$$

이 된다. 한편 시험용 진공용기 자체의 내부 표면으로부터의 기체 방출량은

$$Q_{RFTC} = 4.4 \times 10^{-7} \text{ mbar} \cdot \text{l/s} \quad (6)$$

와 같다. 또 다른 기체 부하로는 오링을 통한 투과에 의한 기체 방출이 있는데, 바이톤 오링의 경우 물의 투과상수가 질소기체에 비해 약 800배이기 때문에 대기 중의 물의 투과만이 문제가 될 수 있다. 오링 양쪽의 압력차이 ΔP 가 1기압일 때 두께 $d=1$ mm의 바이톤 오링의 경우 물에 투과상수는 $q_p=4.0 \times 10^{-5}$ mbar·m/s[11]이므로, 투과에 의한 기체 방출량은

$$\begin{aligned} Q_{Permeation} &= q_p \Delta P \sum A/d \quad (7) \\ &= 8.7 \times 10^{-6} \text{ mbar} \cdot \text{l/s} \end{aligned}$$

와 같으며, 여기서 ΔP 는 물의 공기중 분압을 고려한 압력차로서 단위는 기압이며, d 는 오링의 두께로서 단위는 mm이다. 여기서 물의 분압은 공기중 수분의 양에 따라 달라지는데, 본 계산에서는 10 mbar로 하였다[12]. 따라서 안테나를 포함한 전체 진공시스템의 총 기체 부하는 (4), (5), (6), (7)식으로부터

$$Q_{Total} = Q_{Antenna} + Q_{O-ring} + Q_{RFEC} + Q_{Permeation} \quad (8)$$

$$= 8.0 \times 10^{-5} \text{ mbar} \cdot \text{l/s}$$

가 되며, 기체부하의 주된 요인으로는 안테나의 테프론 및 바이톤 오링 표면으로부터의 기체 방출임을 알 수 있다. 본 안테나를 KSTAR 토카막에 설치할 때에는 모든 테프론을 세라믹으로, 바이톤 오링은 금속 재질의 Helicoflex 개스킷[13]으로 교체할 예정이므로, 이 값은 현저히 감소할 것이다. 또한 누설에 의한 기체 부하가 있으나 본 안테나의 경우 그 값이 매우 작아서 고려 대상에서 제외하였다. 위에서 사용한 표면으로부터의 기체 방출량 및 투과량 값은 표면의 상태, 온도, 압력, 배기 시간 등에 여러 복잡한 요인에 따라 달라지므로 (8)식에서 구한 기체 부하 값은 실제 상황에 절대적으로 부합되는 값이라 할 수 없으나, 기체 부하의 정성적 해석에 유용하다 할 것이다.

(8)식의 기체부하가 일정하다고 가정하면 중진공, 고진공 영역에서의 시간에 따른 진공용기의 압력은

$$P(t) = (P_0 - P_\infty)e^{-t/\tau} + P_\infty \quad (9)$$

와 같다. 여기서 P_0 는 분자류 영역에서의 초기 압력이며, P_∞ 는 최종 도달압력으로서

$$P_\infty = \frac{Q_{Total}}{S_e} \quad (10)$$

와 같으며, τ 는 압력이 $1/e(=0.368)$ 로 낮아지는 시간을 나타내는 상수로서

$$\tau = \frac{V}{S_e} \quad (11)$$

와 같다. 본 진공시스템의 경우 도달압력은 $P_\infty = 7.8 \times 10^{-8} \text{ mbar}$, $\tau = 3.7 \text{ s}$ 로 계산된다.

ICRF 안테나 시험용 진공용기를 대기개방한 후 다시 밀폐하고 진공펌프를 가동하여 배기하였을 때 시간에 따른 압력 변화를 측정한 결과는 Fig. 4와 같다. 초기 20분까지는 유회전펌프(oil rotary pump)에 의해 배기되며, 그 이후 터보펌프의 회전속도가 증가하여 정상회전수에 도달하게 된다. 이때부터는 압력이 (9)식과 같이 $\exp(-t/\tau)$ 의 형태로 급속히 감소하게 되는데 이는 진공용기 내에 존재

하는 기체를 배기하는 과정에 있는 것이다. 그 이후에는 진공용기의 압력이 t^{-1} 의 형태로 감소하게 되며, 이는 시간에 따른 $1/P$ 의 변화를 나타낸 Fig. 5로부터 확실하게 알 수 있다. 즉, 이 경우 시간에 따른 $1/P$ 의 변화는 선형으로 증가하는 형태를 갖는 것이다. 그림에서 실선은 $t=0 \sim 40 \text{ hour}$ 영역에서 측정된 압력 값을 직선으로 피팅한 것이다. 이 영역에서의 압력 변화 형태는 실제 대부분의 진공용기에서 나타나는 함수꼴인데[14], 표면으로부터의 기체 방출과 재흡착의 복잡한 과정으로부터 나타나는 경향이다. 배기 시작 후 약 40시간 이후의 압력 변화는 Fig. 6에 나타나 있는 바와 같이 보다 복잡한 경향을 나타내는데, 이는 온도 변화의 영향이다. 즉, 이 영역에서도 기본적으로 압력이 t^{-1} 에 비례하게 감소하지만 압력이 충분히 낮아서 온도 변화에 따른 기체 방출율의 변화가 압력 변화에 상대적으로 영향을 크게 미치기 때문이다. Fig. 6에서 점선으로 나타낸 곡선은 Fig. 5의 피팅한 직선을 압력으로 나타낸 것이다. 측정된 압력 값이 점선으로부터 벗어나 있는 경향이 온도 변화의 경향을 그대로 따르고 있는 것을 알 수 있다. 점선으로부터 벗어나 있는 압력 차이와 온도를 비교한 Fig. 7을 살펴보면 압력 변화가 시험용 진공용기의 온도 변화를 그대로 따르고 있음을 알 수 있다. 그것은 표면으로부터의 기체 방출율이 온도에 일차적으로 비례하기 때문이다[15]. 외부 대기의 온도 변화에 따라 진공용기의 온도는 민감하게 변하는 반면 진공용기 속에 들어 있는 안테나는 열적으로 절연되어 있으므로 온도 변화의 폭이 매우 작다. 따라서 안테나의 표면적이 진공용기의 면적보다 더 넓음에도 불구하고 압력 변화에 미치는 영향이 거의 없다.

안테나를 포함하여 진공용기 전체의 기체 부하를 측정하기 위해 진공배기 중에 진공용기와 두 진공펌프 사이에 있는 모든 게이트 밸브를 닫고 압력 증가를 측정하였으며, 그 결과는 Fig. 8과 같다. 일정한 기체 부하로 인하여 압력은 선형으로 증가하였으며, 시간에 따른 증가율과 진공용기의 부피로부터 총 기체부하, Q_{Total} 를 구해보면

$$Q_{Total} = V \frac{dP}{dt} = 3.58 \times 10^{-6} \text{ mbar} \cdot \text{l/s} \quad (12)$$

와 같다. (8)식의 계산 결과보다 작은 값을 나타냈는데, 이는 Fig. 9의 잔류기체 분석 결과에서 알

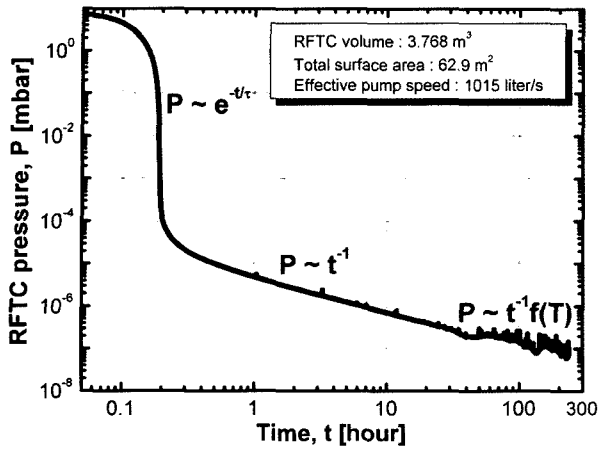


Fig. 4. Typical pumping down curve of the RFTC for the ICRF antenna.

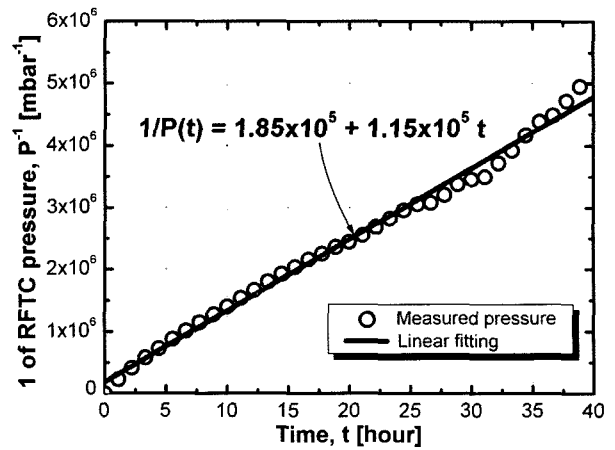


Fig. 5. Linear variation of $1/P$. The solid line shows a fitted value in the range of $t=0 \sim 40$ hour.

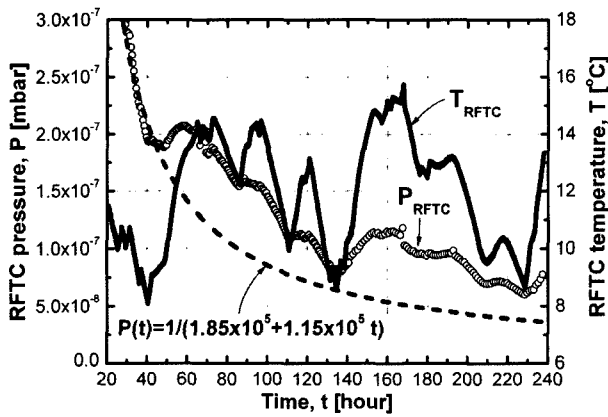


Fig. 6. The time variations of RFTC pressure and temperature of RFTC wall. The dash line shows a fitted value of the RFTC pressure.

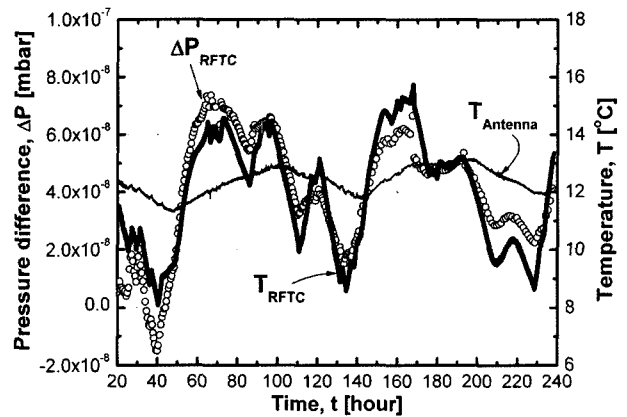


Fig. 7. The time variations of the difference between the measured and fitted pressures. It has quite similar profile of the RFTC temperature.

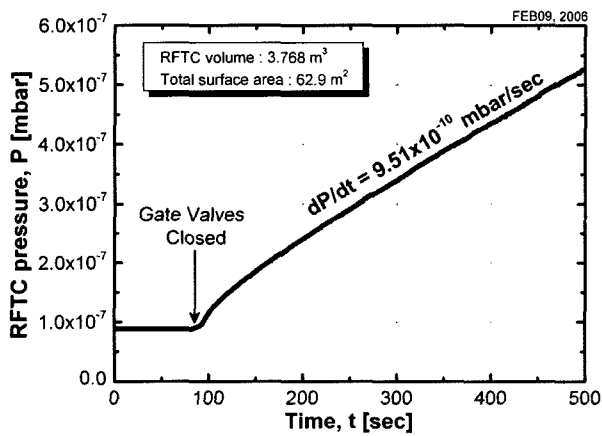


Fig. 8. The time variation of the RFTC pressure after closing of all gate valves.

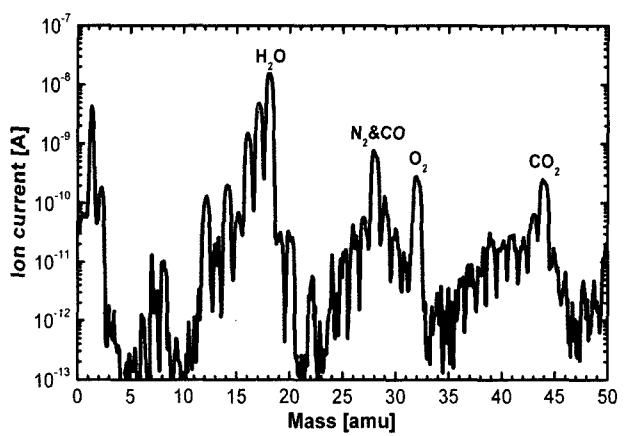


Fig. 9. Mass spectrum in RF test chamber.

수 있듯이 잔류기체 중에 물이 많은 양을 차지하고 있는바, 물의 재흡착계수가 큰 관계로 총 기체부하 값이 작게 나타난 것으로 판단된다.

III. 안테나에 고주파를 인가하였을 때의 진공특성 실험

KSTAR ICRF 안테나의 고주파 고전압에 대한 내전압 특성을 조사하고 장펄스 운전시 안테나의 거동을 살펴보기 위해 안테나를 Fig. 2와 같이 시험용 진공용기에 설치하고 Fig. 10과 같은 시험회로를 연결하여 고주파 시험을 수행하였다. 안테나 시험의 제5단계(RF Test Campaign-5)[16]에서는 안테나를 냉각하지 않는 상태에서 고주파를 인가하여 높은 온도 상승을 유발하여 온도에 따른 진공용기 내의 압력 변화를 조사하였으며, 제6단계에서는 안테나를 냉각하면서 동일한 시험을 수행하였다. 이 시험을 위해 전류띠-1(플라즈마에서 바라볼 때 왼쪽 첫 번째 전류띠)의 절반 하단에만 고주파를 인가하였으며, 나머지 3개 전류띠의 상, 하 입력단 모두 진공전송선의 끝단에서 접지하였다. 전류띠 4개 중 한 개의 절반에만 고주파를 공급하여 시험하는 것은, 안테나의 성능을 좌우하는 것은 고주파 고전압에 대한 내전압인데, 이는 모든 전류띠의 형상이 유사하기 때문에 내전압 특성 또한 동일하기 때문이다. 고주파가 공급되는 전류띠-1의 상, 하에 연결된 두 진공전송선 끝에는 진공과 대기의 경계를 형성하면서 고주파를 전달하는 고주파진공도입기가 연결되어 있으며, 이어서 일정한 길이의 전송선이 연결되어 있다. 전송선의 끝에는 접지 위치를 약 50 cm 조정할 수 있는 단락전송선 동조기(stub tuner)가 설치되어 있다. 고주파의 공급은 단락전송선 동조기의 접지 지점으로부터 약 5 m에 위치한 T-connector를 통해 이루어지며, 전류띠-1의 접지 지점으로부터 단락전송선 동조기의 접지 지점까지의 전기적 길이는 20 m로서 주파수 30 MHz에서 정상파(standing wave)가 형성된다. 이 때 전류띠와 진공전송선에는 고주파 전류가 흐르게 되며 안테나 공동을 비롯한 진공용기 표면에도 유도전류가 발생하여 저항 가열로 인해 온도가 상승하게 되고 기체 방출량이 증가하게 된다.

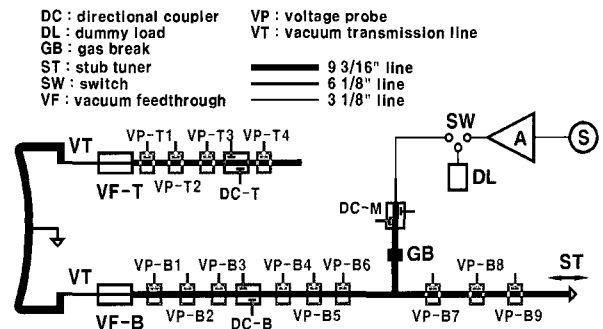


Fig. 10. Schematic diagram of the RF test circuit used during the RF Test Campaign-5 and 6.

ICRF 안테나에 대한 고주파 시험의 일반적인 과정으로서 초기에는 낮은 고주파의 출력으로 짧은 펄스동안 고주파를 인가하게 되는데, 이는 표면 세정을 통하여 기체 방출량을 감소시키기 위함이다. 고주파 출력 2.88 kW를 5초 동안 인가하였을 때의 진공용기의 전형적인 압력 변화는 Fig. 11과 같다.

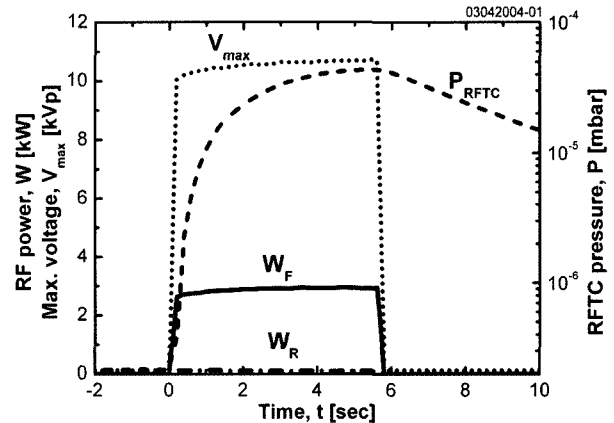


Fig. 11. Time evolutions of RF powers and RFTC pressure for the shot #03042004-01.

이 경우 전송선상의 최대 전압은 10.55 kVp 이었으며, 이 전압에 비례하는, 전류띠에 흐르는 최대 고주파 전류를 계산하면 238 A가 된다. 이 고주파 전류는 주어진 주파수와 물질의 종류에 의해 결정되는 skin depth 이내의 표면에만 흐르게 되므로 저항 손실에 의한 열부하는 Cu의 경우 30 MHz에서 12 μm 이내의 표면에서만 가해진다. 이 경우에 대해 자기장 계산을 통한 전류띠에서의 최대 열부하를 구하면 7.1 kW/m²이다[17]. 이러한 열부하가 표면에만 가해지게 되므로 표면의 온도는 즉각 상승하게 되며, 이에 따라 기체 방출량도 증가하게

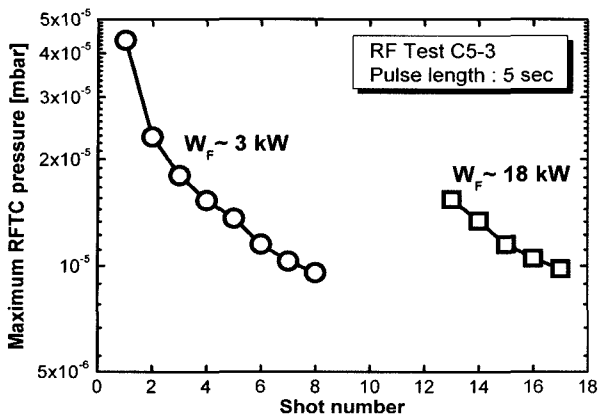


Fig. 12. Maximum RFTC pressure as a function of shot number for the RF powers of 3 and 18 kW with a pulse length of 5 s.

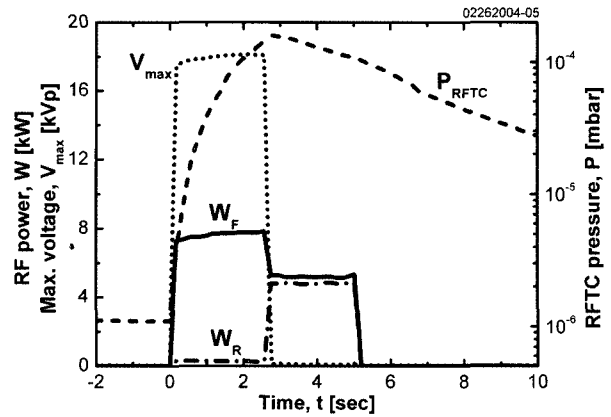


Fig. 13. Time evolutions of RF powers, and RFTC pressure for the shot #02262004-05. A breakdown occurred at $t=2.6$ s.

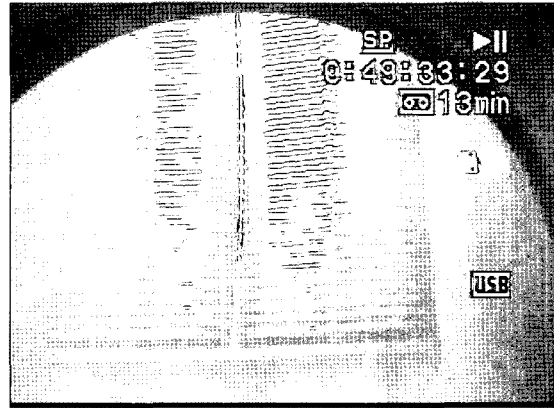
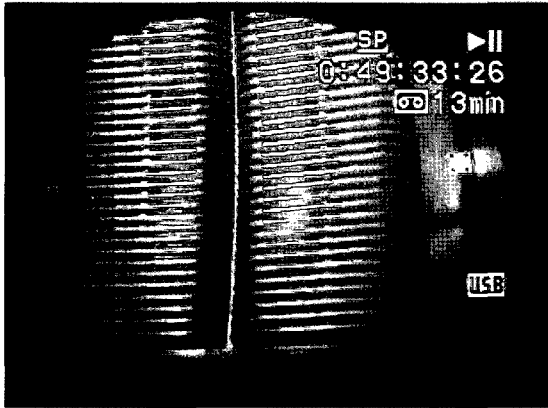


Fig. 14. Camcorder pictures of the antenna before(left) and during(right) a breakdown in RFTC.

되어 압력도 증가한다. 그 후 압력은 더 이상 증가하지 않고 포화되는데, 그 이유는 다음과 같다. 열부하가 가해지는 초기에 방출되는 기체는 대부분 van der Waals 힘에 의해 물리흡착(physisorption)[18]되어 있던 것으로서 고체표면과의 결합력이 낮기 때문에 열부하가 가해져서 일정한 온도가 되면 비교적 짧은 시간 내에 방출되어 나온다. 따라서 열부하가 직접적으로 가해지는 해당 표면에서의 방출량은 시간에 따라 피크를 이루며 다시 감소하게 된다. 하지만 열부하가 계속 가해지고 있으므로 표면에 물리흡착된 기체를 방출시킬 수 있을 정도의 높은 온도를 가지는 표면의 영역이 점차 확대된다. 따라서 기체 방출량을 열전달에 의한 고온 표면의 확대 속도에 따라 변하게 되며, 본 시험의 경우 거의 일정한 값을 갖게 되는 것이다. Fig. 11의 경우 고주파를 인가하기 전의 압력은 2.15×10^{-7} mbar이며, 고주파를 인가했을 때의 최대 압력은

4.35×10^{-5} mbar이었다. 이 최대 압력은 반복적으로 고주파를 인가함으로써 Fig. 12와 같이 감소하게 되는데, 이는 고주파에 의한 표면 세정효과 때문이다. 반복적인 고주파 인가를 통하여 최대 압력이 더 이상 감소하지 않고 포화되기 시작하면 다시 고주파 출력을 증가시켜 동일한 과정을 반복함으로써 세정 효과를 높일 수 있다. 고주파 출력을 18 kW로 증가시켜 5초의 펄스를 반복적으로 인가할 때 최대 압력의 변화도 Fig. 12에서 볼 수 있다. 이와 같은 과정을 거치는 이유는 고주파에 의한 표면 세정을 충분히 거치지 않고 높은 출력의 고주파를 인가하거나 장펄스 운전하는 경우 시험용 진공용기의 압력이 지나치게 상승하여 방전이 일어나게 된다. 방전이 일어나면 안테나의 기계적, 전기적 손상을 일으킬 뿐만 아니라 정합조건이 깨어져서 반사 고주파가 급증하게 되며, 이 경우 고주파 송출기의 회로 손상을 가져올 수 있다. 따라서 원하는 수준

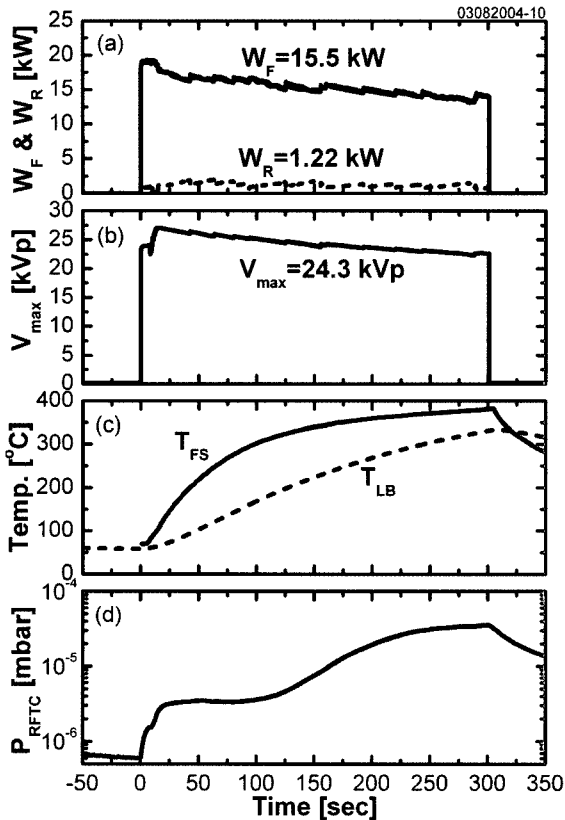


Fig. 15. Time evolutions of the RF test pulse for SHOT #03082004-10; RF powers at the input port of the test circuit (a), strap current (b), temperature on the Faraday shield and cavity wall (c) and vacuum pressure in RFTC (d). During the 300-s pulse length, the antenna was not water-cooled. The temperature on FS was measured using an IR camera.

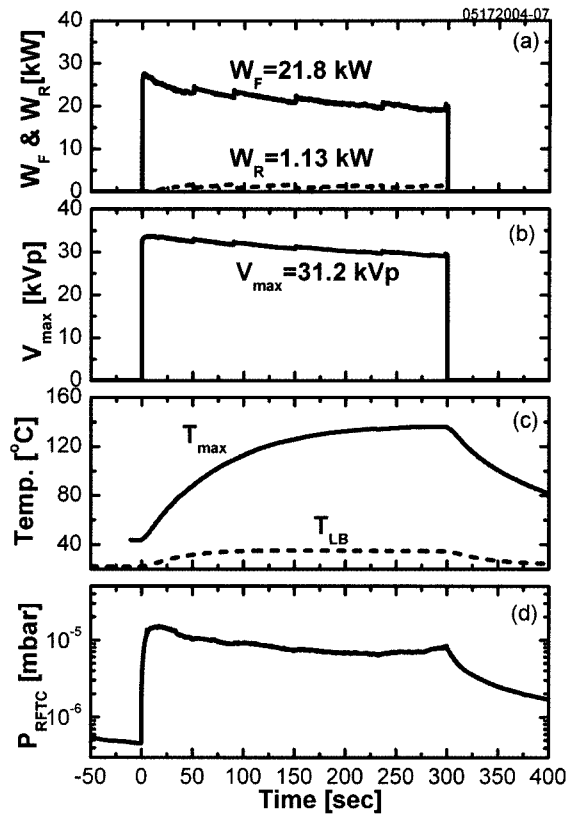


Fig. 16. Time evolutions of the RF test pulse for SHOT #05172004-07; RF powers at the input port of the test circuit (a), strap current (b), temperature on the Faraday shield and cavity wall (c) and vacuum pressure in RFTC (d). During the 300-s pulse length, the antenna was water-cooled.

의 높은 고주파를 인가하기 전에 낮은 고주파 출력에서 충분한 고주파 세정은 필수적이다. 충분한 고주파 세정을 거치지 않은 경우 방전이 일어났을 때의 고주파 출력 및 압력 변화는 Fig. 13과 같으며, 방전 중인 진공용기 내부의 모습은 Fig. 14의 오른쪽 사진과 같다. 방전이 일어나기 직전의 진공용기의 압력은 1.4×10^{-4} mbar이었으며, 항상 이 압력이 되었을 때에는 방전이 유발되었다. 따라서 고주파에 의해 압력이 상승하더라도 이 수준 이하로 유지해야만 방전이 일어나는 것을 방지할 수 있는 것이다. 일본의 LHD(Large Helical Device) 핵융합 장치의 ICRF 안테나 시험에서는 방전이 유발되는 한계값이 1.3×10^{-5} mbar이었다는 보고가 있으며 [19,20], 본 시험의 경우와 다른 이유는 방전 전압이 각 장치의 구조 및 사용 주파수에 따라 다르기

때문이다.

고주파 시험 제5단계 동안 충분한 사전의 고주파 세정을 거친 후에 실시한 300초 장펄스 시험의 전형적인 결과를 Fig. 15에 보이고 있다. Fig. 15(a)에 나타나 있듯이 300초의 장펄스 동안 평균 15.5 kW의 고주파를 인가하였으며, 반사된 고주파는 1.22 kW이었다. 따라서 14.3 kW의 고주파가 전송선 및 안테나, 진공용기 벽 등을 가열하는데 소모된 것이다. 이 때 전송선상의 정상파의 최대 전압은 Fig. 15(b)에서와 같이 24.3 kVp 이었으며, 이에 비례하는 전류비에 흐르는 고주파 전류를 계산하면 547 A가 된다. 이 전류로 인하여 안테나의 파라데이 차폐관의 온도는 382 °C까지 상승하였으며, 안테나 공동의 왼쪽 벽 바깥 표면의 최대 온도는 334 °C이었다(Fig. 15(c)). 고주파가 인가되기 전의

진공용기의 압력은 6.0×10^{-7} mbar 이었으며, 고주파가 인가되자 진공용기의 압력이 급격히 증가하였다. $t=10$ s 때에 압력이 다시 증가한 것은 이 시점에서 고주파 송출기의 주파수 조정을 통하여 반사되는 고주파를 감소시켰기 때문에 고주파 전류가 급격히 증가하였기 때문이다. 고주파를 인가한 후 20초 후에부터는 진공용기의 압력이 더 이상 증가하지 않고 포화되었으며, 이는 앞서 설명한 바와 같은 이유이다. 하지만 $t=100$ s 이후에는 다시 압력이 상승하기 시작하였는데, 이는 표면의 온도가 더욱 상승하면서 앞서 언급한 표면에 물리흡착된 기체보다 더 높은 결합에너지를 갖는 화학흡착(chemisorption)[18]된 기체들의 방출이 시작되기 때문이다. 따라서 이때부터는 온도의 증가에 따라 기체 방출량도 증가하는 것이다. 펄스가 종료되는 300초 때의 압력은 3.6×10^{-5} mbar로서 방전이 유발되는 한계 값에 가까워짐을 알 수 있다. 즉, 이 경우보다 높은 출력의 고주파를 인가하거나, 펄스의 길이를 증가시킨다면 진공용기 내에서 방전이 일어날 것임을 예측할 수 있다. 실제 shot #03042004-21에서 $W_F=20.7$ kW의 고주파를 인가하여 최대전압 $V_{max}=29.6$ kVp일 때 압력 증가에 의해 $t=72.7$ s때에 시험용 진공용기 내에서 방전이 발생하였다[16]. 제6단계 시험에서 실시한 300초 장펄스 시험의 결과를 Fig. 16에 나타내었다. 보다 높은 출력의 고주파를 인가하여 전송선상의 최대 전압을 31.2 kVp로 증가시켰으므로 열부하는 Fig. 15의 경우보다 1.6배 증가하였음에도 불구하고 냉각 효과로 인하여 안테나의 최대온도는 136 °C로 현저히 감소하였으며, 진공용기의 압력도 펄스 도중 더 이상 증가하지 않았다. 따라서 30 kVp 이상의 높은 전압에서 300초의 장펄스 운전을 하고자 한다면 냉각을 통하여 안테나의 온도를 감소시켜 표면으로부터의 기체 방출을 억제해야 함을 알 수 있었다.

IV. 결 론

KSTAR 토카막용으로 제작된 ICRF 안테나를 시험용 진공용기에 설치하여 실험적으로 진공 특성을 조사하였으며, 그 결과로서 시험용 진공용기를 포함한 전체 기체 부하는 3.58×10^{-6} mbar l/s임을 알 수 있었다. 앞으로 토카막에 설치하기 위해

현재 사용하고 있는 바이톤 오링을 Helicoflex로 교체하고 진공전송선의 중앙도체 지지용으로 사용되고 있는 테프론을 세라믹으로 교체할 예정이므로 기체 부하는 대폭 감소할 것으로 판단된다. 안테나에 고주파를 인가하여 압력 상승의 특성을 조사하였으며, 낮은 고주파 출력에서 반복적으로 고주파를 인가함으로써 고주파 인가시 증가하는 최대 압력을 충분히 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 충분한 세정이 이루어지지 않은 경우 시험용 진공용기에서 방전이 일어났는데, 그 한계 값은 10^{-4} mbar임을 확인하였다. 안테나를 냉각하지 않는 상태에서 15.5 kW의 고주파 출력으로 300초 장펄스 시험을 하는 동안 안테나의 온도와 진공용기의 압력 변화를 측정한 결과, 펄스의 중간 이후 다시 압력이 상승함을 알 수 있었다. 따라서 냉각을 하지 않은 상태에서는 인가하는 고주파 출력을 더 이상 높일 수 없음을 확인하였다. 안테나를 냉각하는 경우에는 고주파를 인가하는 도중에 압력이 다시 증가하는 현상이 사라졌으며, 300초 펄스 동안 방전이 발생하는 한계 값보다 훨씬 낮은 수준을 유지할 수 있었다. 결과적으로 운전 가능한 최대 전압을 24.3 kVp에서 31.2 kVp로 증가시킬 수 있었다. 추후 KSTAR 진공용기에 설치하기 위한 ICRF 안테나의 개선이 완료된 후 정해진 평가 방법에 따른 총 기체부하 및 누설에 대한 재평가 및 검증이 요구된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 KSTAR 프로젝트의 지원으로 수행되었다. 진공 해석에 있어 유익한 조언을 해주신 한국원자력연구소의 인상렬 박사님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] G. S. Lee et al., Fusion Engineering and Design **46**, 405 (1999).
- [2] G. S. Lee et. al., Nuclear Fusion **40**, 575 (2000).
- [3] Y. D. Bae, C. K. Hwang, and B. G. Hong, Fusion Engineering and Design **65**, 1 (2003).

- [4] Y. D. Bae, J. G. Kwak, S. K. Kim, J. S. Yoon, B. G. Hong, C. K. Hwang, S. J. Wang, and S. U. Jeong, *Nuclear Fusion* **43**, 805 (2003).
- [5] Y. D. Bae, J. G. Kwak, J. S. Yoon, S. J. Jeong, and B. G. Hong, *Journal of the Korean Physical Society* **44**, 1189 (2004).
- [6] I. Y. Lim, K. H. Chung, S. Y. Cho, S. K. Lee, Y. H. Shin, and S. S. Hong, *한국진공학회 제17회 학술발표회 논문개요집*, 38 (1999).
- [7] KSTAR 인터페이스 조정 회의록, 2006년 3월 8일.
- [8] T. Fujii, JAERI-M92-037, 65 (1992).
- [9] J. Y. Lim, K. H. Chung, J. Kim, Y. H. Shin, and S. S. Hong, *KSTAR Vacuum Pumping System* (KSTAR ASER presentation, July 8-10, 1998).
- [10] John F. O'Hanlon, *A User's Guide to Vacuum Technology* (2003), pp.479-485.
- [11] 배석희, 인상렬, 정광화, 이영백, 신용현, *진공공학* (한국경제신문, 2000), p.134.
- [12] M. H. Hablanian, *High-Vacuum Technology* (1997), p.38, p.521.
- [13] 유인근, 인상렬, *한국진공학회지* **11**, 81 (2002).
- [14] 배석희, 인상렬, 정광화, 이영백, 신용현, *진공공학* (한국경제신문, 2000), p.135.
- [15] A. Roth, *Vacuum Technology* (1990), p.189.
- [16] 배영덕, 곽종구, 왕선정, 윤재성, 홍봉근, KAERI/TR-3064/2005, 11 (2005).
- [17] 배영덕, 곽종구, 왕선정, 윤재성, 홍봉근, KAERI/TR-3130/2006, 49 (2006).
- [18] 배석희, 인상렬, 정광화, 이영백, 신용현, *진공공학* (한국경제신문, 2000), p.116.
- [19] R. Kumazawa, T. Mutoh, T. Seki, F. Shinpo, G. Nomura, T. Ido, T. Watari, J. M. Noterdaeme, and Y. Zhao, 'Steady state test at high RF voltage on transmission system for ion cyclotron heating'(This paper will be submitted to the Japan Society of Plasma Science and Nuclear Research, 1998), p.11.
- [20] R. Kumazawa, T. Mutoh, T. Watari, T. Seki, F. Shinbo, G. Nomura, T. Ido, and T. Kuroda, *Fusion Technology* (1996), p.617.

Vacuum Characteristics of KSTAR ICRF Antenna during RF Operation

Young-Dug Bae*, Jong-Gu Kwak, and Bong-Geon Hong

Nuclear Fusion Research Laboratory, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-353

(Received February 20, 2006)

The vacuum characteristics of the KSTAR ICRF antenna were experimentally investigated. The fabricated antenna was installed in the RF Test Chamber(RFTC) which has a vacuum system with an effective pumping speed of 1015 l/s. The time variations of RFTC pressure, total gas load and ultimate pressure were measured before the RF test. RF conditioning effect was studied by repeating RF pulses at low power level. A time variation of the RFTC pressure was measured during a RF power was applied to the antenna. Threshold pressure at which a RF breakdown occurs was investigated. Whenever the pressure was higher than 10^{-4} mbar, the RF breakdown occurred. During a long pulse testing, the temperature of the antenna and RFTC pressure were measured to investigate long pulse limitation of the maximum available voltage without any cooling, which were compared with testing results with a water cooling of the antenna.

Keywords : ICRF antenna, KSTAR, RF test, Vacuum characteristics

* [E-mail] ydbae@kaeri.re.kr