

KSTAR ICRF 가열장치 개발을 위한
Prototype 안테나의 고주파 시험
- Campaign-4 고주파 시험 결과 -

RF Test of the Prototype ICRF Antenna for the Development of the
KSTAR ICRF Heating System
- Experimental Result of the RF Test Campaign-4 -

배영덕, 곽종구, 왕선정, 윤재성
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

KSTAR ICRF 가열장치의 개발을 위해, prototype 안테나에 대한 고주파 고전압 및 장 펄스 시험을 수행하였다. 총 길이 30 m의 시험 회로를 구성하였으며, 안테나의 전류터-1의 아래쪽에 주파수 30 MHz의 고주파를 인가하여 시험하였다. 고주파를 인가하는 동안 고주파 출력, 고주파 전압, 안테나의 온도 및 RFTC내의 압력을 측정하였다. 시험 결과로서 냉각을 하지 않은 상태에서 고주파 고전압 40.4 kVp에서 5 sec 운전이 가능하였으며, 더 높은 고전압에서 운전할 수 없었던 것은 전송선로상에서 방전이 일어났기 때문이다. 장펄스 시험으로는 15.2 kVp에서 300 sec동안 시험하였으며, 펄스폭을 더 늘리지 못한 것은 cavity box 벽의 과열에 기인한다. 40.4 kVp의 내전압은 플라즈마 부하저항이 6 Ω /m일 때 플라즈마를 가열할 수 있는 고주파 출력 7.2 MW에 해당되며, 요구조건인 6 MW를 훨씬 증가하는 성능이다.

Abstract

For the development of the KSTAR ICRF heating system, high voltage and long pulse tests were carried out for the prototype ICRF antenna. The test circuit of 30 m was constructed at the RF test stand in KAERI. Several RF tests were carried out at $f=30$ MHz in order to ascertain standoff capability of the antenna. High power RF tests gave a standoff voltage of 40.4 kVp for a pulse length of 5 sec, and the standoff voltage was limited by the breakdown on the insulator of the transmission line. The long pulse test gave a voltage of 15.2 kVp for a pulse length of 300 sec,

the pulse length was limited by an overheating of the cavity box. The maximum RF voltage of 40.4 kVp is equivalent to the heating power of 7.2 MW with the plasma loading of $6 \Omega/m$, which is higher than the required power of 6 MW.

1. 서론

KSTAR(Korea Superconducting Tokamak Advanced Research, 국가핵융합연구장치) 토카막[1]의 ICRF(Ion Cyclotron Range of Frequency) 가열장치는 KSTAR의 보조 가열장치 중의 하나로서, 주파수 영역 25~60 MHz에서 300초 동안 6 MW의 고주파로 플라즈마를 가열시키거나 전류구동을 하게 된다. 고주파 출력 6 MW를 공급하기 위해서는 가열장치의 안테나 및 전송선로가 고주파 고전압 35 kV 이상에서 방전이 일어나지 않는 상태로 동작이 가능해야 한다. 이러한 성능을 검증하기 위해, 1999년도에 제작한 prototype 안테나에 대해 지금까지 여러 단계에 걸쳐 고주파 시험을 수행하여 왔으며[2, 3], 본 논문에서는 prototype 안테나에 대해 생각을 하지 않은 상태에서 도달 가능한 최고 고전압 및 최장 펄스 시험에 대해 논의하였다. 본 시험은 'RF Test Campaign-4'로서 prototype 안테나에 대한 마지막 시험이다. Campaign-5부터는 prototype 안테나를 개선하여 baking 및 강제 냉각이 가능한 준본제품(KSTAR 진공용기에 설치하여 플라즈마가 있는 상태에서 시험이 가능한 제품) 안테나에 대한 시험으로서 현재 진행 중에 있다.

2. 안테나에 대한 고주파 시험 장치 구성

4개의 전류띠(current strap)를 가진 안테나에 대한 고주파 시험을 위해 Fig. 1과 같은 시험 회로를 구성하였으며, 설치된 시험 시설은 Fig. 2와 같다. 고주파 고전압 및 장펄스 시험을 위해 전류띠-1의 아래 절반부분에만 정합회로를 통해 고주파를 공급하여 시험하였다. 이는 전류띠의 중앙이 접지되어 있고 4개의 전류띠 모두 유사한 형상을 가지고 있으므로, half strap에 대한 시험만으로도 성능을 평가할 수 있기 때문이다. Prototype 안테나를 KSTAR 진공용기의 RF port와 동일한 규격의 port를 가진 RFTC(RF Test Chamber)에 설치하고, 전류띠-1(플라즈마에서 바라볼 때 왼쪽 첫 번째 전류띠)에 정합회로를 구성하였다. 정합회로의 구성은 전류띠에 이어져 있는 6" 진공전송선($Z_0=39 \Omega$), 진공창(vacuum feedthrough)[4], reducer, 9·3/16" 전송선($Z_0=50 \Omega$), 그리고 맨 끝에는 50 cm 가변 길이를 갖는 short stub tuner를 설치하였다. 전류띠로부터 stub tuner의 접지까지의 길이는 약 20 m이며, 이는 시험주파수인 30 MHz에서 2배의 파장에 해당되도록 하여 공명이 일어나도록 한 것이다. 이 회로에 고주파를 공급하기 위해 stub tuner의 접지로부터 약 반 파장의 위치에 tee를 두어 고주파 송출기와 연결하였다. 전류띠-1의 상단 쪽에는 진공전송선, 진공창, reducer, 9·3/16" 전송선 순으로

연결하여 끝이 전기적으로 open되도록 하였으며, 전체길이는 약 10 m이다. 이러한 회로에 대해 정밀한 정합조건은 stub tuner의 길이를 조정하여 결정하였다. 또한 진공창 후단의 전송선로에는 고순도 질소 기체를 2기압으로 충전하여 방전에 대한 내전압을 높였다. 상, 하 전송선로 및 주전송선로에는 양방향 방향성결합기를 설치하여 진행파와 반사파의 고주파 출력을 측정하였으며, 또한 전압탐침을 상단 전송선로에 2개, 하단 전송선로에 9개를 설치하여 고주파 전압을 측정하였다. 고주파 인가시 온도 상승을 측정하기 위해 안테나의 cavity box 외부 벽면에 열전대를 설치하였으며, 적외선 카메라를 이용하여 안테나 전면의 온도분포를 측정하였다. 고주파가 인가되는 동안 RFTC 내의 압력 변화를 측정하였으며, 방전 현상이나, 안테나가 가열되는 영상을 camcorder를 이용하여 촬영하였다.

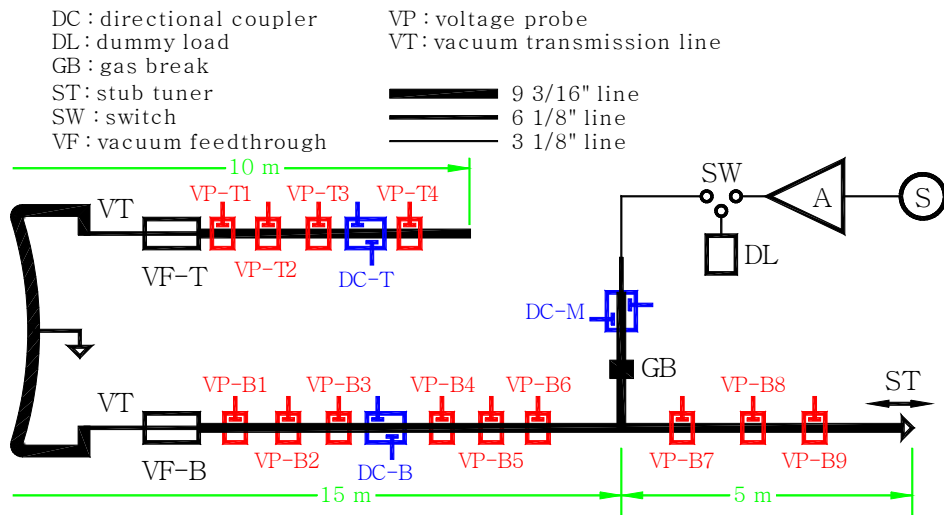


Fig. 1. Schematic diagram of the RF test circuit.

3. 고주파 시험

고주파 시험장치를 건설한 후, 시험을 위해 시험 주파수인 30 MHz에서 정합조건을 맞추고, 모두 6차례의 고주파 시험을 수행하였다. 각각의 시험에서 8~18회의 고주파 펄스 (shot)로 시험하였으며, shot를 계속함에 따라 입력 고주파의 출력을 점차 증가시켰다. 시험에 요구되는 고출력 운전을 하기 전에 낮은 출력에서 여러 횟수의 고주파 펄스를 인가함으로써 안테나에 대한 conditioning이 이루어지며, 따라서 고전압 또는 장펄스 운전시 Faraday shield 및 cavity box 등의 안테나 표면에서 발생하는 기체 방출량을 현저히 줄일 수 있다. 충분한 conditioning 과정을 거치지 않은 경우, 고주파를 인가하는 동안 RFTC 내의 압력이 10^{-4} mbar 이상이 되면 고주파 방전이 일어나게 된다. 고주파 시험 campaign-4에서 시행한 shot number는 모두 94회이며, 도달한 최고 전압은 40.4 kVp이었으며 이때의 펄스폭은 5 sec이었다. 또한 최장펄스 운전으로는 고주파 전압 15.2 kVp

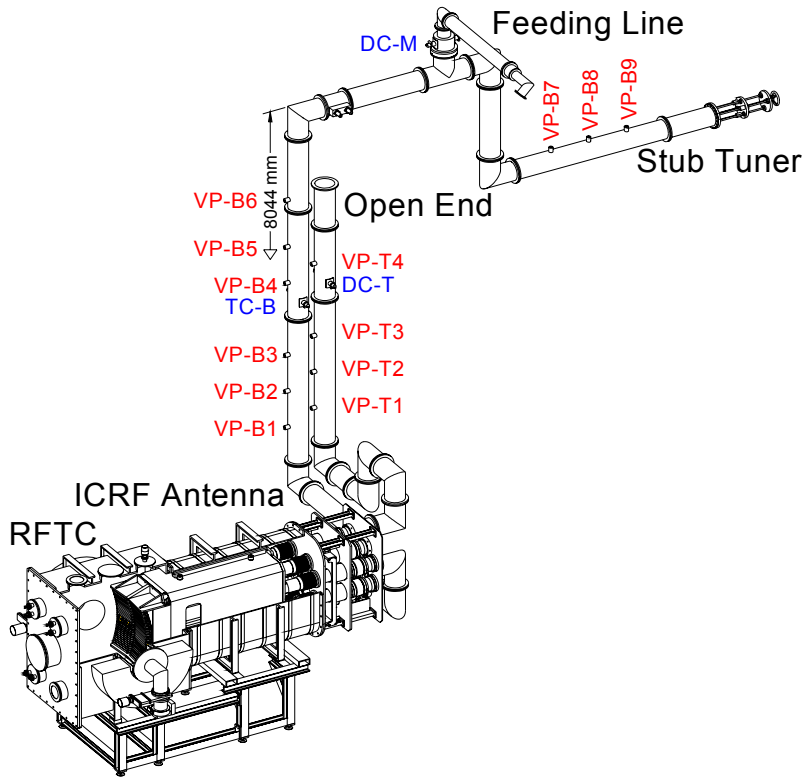


Fig. 2. 3D view of the RF test circuit for the campaign-4.

효과로 고주파가 인가되는 동안 RFTC 내의 압력이 1.0×10^{-4} mbar 이하로 유지되었으며, 따라서 고주파 방전이 유발되지 않았다. 고주파 방전이 일어나는 경우에는 반사 고주파의 출력이 급격히 증가하게 되며 송출기의 보호회로에 의해 고주파 송출을 차단하게 된다. 본 shot의 경우 Fig. 3(a)에서 보는 바와 같이 진행 고주파 출력 49.3 kW에 대해 반사 고주파가 1.76 kW로서 매우 작았으며, VSWR(voltage standing wave ratio)은 1.47이었다. Fig. 3(b)에서 알 수 있듯이, 고주파가 인가되는 하단 전송선로 상의 최대전압 40.4 kVp에 대해 상단 전송선로 상의 최대전압은 5.06 kVp이었으며, 이로부터 하단 전류피에 대한 상단 전류피의 상호결합상수(mutual coupling coefficient)가 12.5 %임을 알 수 있다. 플라즈마가 없는 상태에서 시험한 결과로서 최대전압 40.4 kVp는 플라즈마가 있는 경우, 플라즈마 부하저항이 6 Ω /m이면 4개의 전류피에 모두 고주파를 공급하여 7.2 MW의 고주파로 플라즈마를 가열할 수 있는 성능에 해당된다. 이는 본 가열장치의 요구조건인 6 MW을 훨씬 능가하는 성능이다. 더 높은 전압에서 시험을 계속하였으나, 전송선로 상에서 방전이 발생하여 고주파 고전압 시험을 종료하였다.

300 sec 장펄스 시험의 경우인 shot#11182003-13에서는 고주파가 인가되는 동안 고주파송출기를 포함한 전체 시험계통의 온도 상승에 의해 정합조건이 변하였으며, 따라서 반

에서 300 sec이다. 이 두 경우에 대해 고주파가 인가되는 동안 고주파 출력, 고주파 전압, 안테나 온도 및 RFTC 압력의 변화를 측정된 결과는 Figs. 3&4와 같다. 최대 전압 40.4 kVp에 도달에 shot#1113003-16의 경우, 앞서 15회의 conditioning shots를 시행하였으며, 그 결과 Fig. 3(c)에서 보는 바와 같이 안테나의 cavity 온도가 128.5 $^{\circ}$ C로 올라가 있는 상태에서 시험하였다. Cavity box의 외벽 중앙에서 측정된 안테나의 온도는 5 sec의 고주파 펄스동안에는 거의 증가하지 않았으나, 열전달에 의해 250 sec 후에 최대 136 $^{\circ}$ C까지 증가하였다. 앞서 실시한 conditioning shots의

사 고주파의 출력이 증가하였다. 이에 고주파 송출기에서 여러 차례에 걸쳐 수동으로 주파수를 미세 조정하여 반사파를 감소시켰다(Fig. 4(a) 참조). 따라서 반사파의 비율이 Fig. 3의 경우보다 다소 높았으며, VSWR은 1.62이었다. 고주파가 인가되는 동안 적외선 카메라를 이용하여 안테나 전면의 온도를 측정하였다. 그 결과로서 Faraday shield의 최대 온도 지점에 대한 시간에 따른 온도 변화는 Fig. 4(c)와 같으며, 최고 온도는 287 °C 이었다. Cavity box의 외벽 중간의 온도는 펄스가 끝난 후 290 sec 때에 최고 145 °C까지 증가하였다. 이 온도는 cavity box 벽 내부의 진공 밀폐 재료인 viton O-ring의 사용 온도 한계에 근접한 온도이다. 따라서 본 시험과 같이 냉각을 하지 않는 상태에서 300 초 이상의 장펄스 운전시 진공 파괴가 우려된다. 고주파가 인가되는 동안의 RFTC 내의 압력 변화는 Fig. 4(d)와 같으며, 2.4×10^{-4} mbar 이하로 유지되었다. 고주파가 인가되는 초기 200 sec까지 압력이 감소하는 이유는 고주파에 의한 conditioning이 진행되어 기체방출률이 감소하기 때문이며,, 후반부에 다시 증가하는 것은 온도 상승에 따른 기체 방출률 증가에 기인한다.

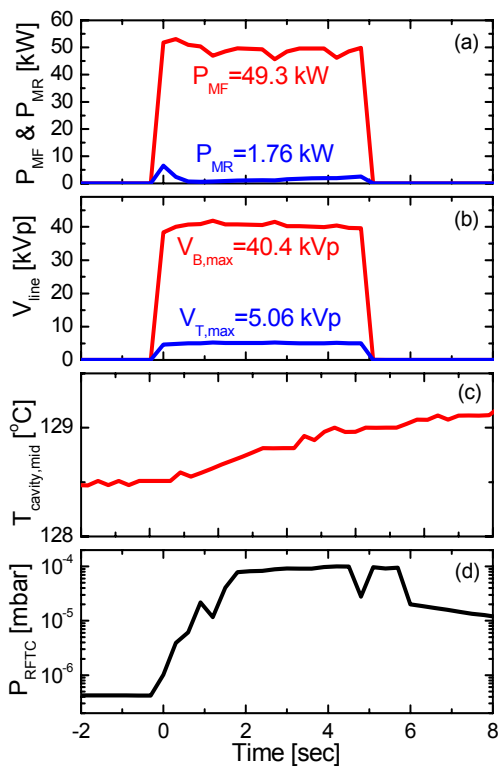


Fig. 3. High voltage test; time evolutions of the RF powers, RF voltages, temperatures, and RFTC pressure for the shot#11132003-16.

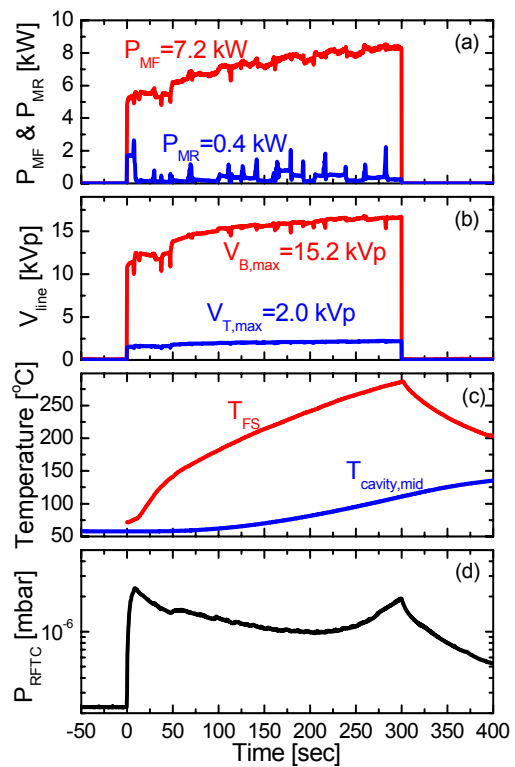


Fig. 4. Long pulse test; time evolutions of the RF powers, RF voltages, temperatures, and RFTC pressure for the shot#11182003-13.

4. 결론

Prototype 안테나에 대한 고주파 성능 시험의 결과, 고주파 고전압 40.4 kVp에서 5 sec동안 운전이 가능하였으며, 이는 플라즈마 부하저항이 6 Ω /m일 때 7.2 MW의 고주파로 플라즈마를 가열할 수 있음을 나타낸다. 고주파 전압을 더 이상 높일 수 없었던 것은 전송선로 상의 절연체를 통한 방전에 기인한다. 장펄스 운전으로는 15.2 kVp에서 300 sec 운전이 가능하였으며, 펄스 폭의 한계는 cavity box의 온도 상승 때문이었다. 이러한 시험 결과는 냉각을 하지 않는 prototype 안테나의 성능이며, 냉각이 가능한 준본제품 안테나에 대한 시험에서는 KSTAR 토카막의 요구조건인 35 kV, 300 sec 운전이 가능하리라 사료된다.

참고문헌

- [1] G.S. Lee et. al., The KSTAR project: Advanced steady-state superconducting tokamak experiment, *Nuclear Fusion* **40** (2000) 575-582.
- [2] Y.D. Bae, C.K. Hwang, and B.G. Hong, 'Fabrication of prototype ICRF antenna for KSTAR and first RF test', *Fusion Engineering and Design* **65** (2003) 1-9.
- [3] 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, 'Development of a KSTAR ICRF antenna for long pulse operation', *Nuclear Fusion* **43** (2003) 805-811.
- [4] Y.D. Bae, C.K. Hwang, and J.G. Kwak, 'Development and high power RF test of the vacuum feedthrough for KSTAR ICRF antenna', *Journal of the Korean Nuclear Society* **34-3** (2002) 211-217.