

KSTAR를 위한 시험용 ICRF 가열장치의 건설 및 고주파 시험

Construction and RF Test of the ICRF Heating System for KSTAR

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

요약

KSTAR ICRF 가열장치의 개발을 위해, prototype 안테나와 1개의 공명루프 및 정합회로로 구성된 ICRF 가열장치를 한국원자력연구소 고주파 시험시설에 건설하였다. 공명루프의 전체 전기적 길이는 주파수에 따라 45~51 m 사이에서 변화가 가능하다. 주파수에 따른 공명 조건과 정합 조건을 실험적으로 결정하였으며, 용이하게 조정이 가능하였다. 건설된 가열장치의 고주파 내전압 성능 시험을 위해 주파수 30 MHz에서 여러 차례의 고주파 시험을 수행하였다. 시험의 결과로서 5초의 펄스에 대해 21.3 kVp, 300초의 장펄스에 대해 9.95 kVp의 전압으로 운전이 가능하였다. 21.3 kVp의 내전압은 플라즈마 부하 저항이 6 Ω /m일 때 플라즈마를 가열할 수 있는 고주파 출력 2.0 MW에 해당된다. 또한 본 시험을 통해 baking과 고주파 conditioning이 내전압 성능에 미치는 영향을 평가할 수 있었으며, 고주파 방전을 유발하는 한계 압력이 $1\sim 3\times 10^{-4}$ mbar임을 확인하였다.

Abstract

For the development of the KSTAR ICRF heating system, an ICRF heating system including one resonant loop with the prototype antenna and one matching circuit is built at the RF test stand in KAERI. The electrical length of the resonant loop is changeable from 45 to 51 m. Resonant and matching conditions are experimentally investigated for various frequencies. Several RF tests are carried out at $f=30$ MHz in order to ascertain standoff capability of the heating system. High power RF tests give a standoff voltage of 21.3 kVp for a pulse length of 5 sec and 9.95 kVp for 300 sec. The RF voltage of 21.3 kVp is equivalent to the heating power of 2.0 MW with the plasma loading of 6 Ω /m. The baking and RF conditioning effects on the standoff voltage and the vacuum pressure are investigated. The threshold pressure, at which the RF breakdown is induced, is found to $1\sim 3\times 10^{-4}$ mbar.

1. 서론

KSTAR(Korea Superconducting Tokamak Advanced Research, 국가핵융합연구장치) 토카막[1]은 차세대 초전도 토카막으로서, 핵융합 발전로 개발의 전제 조건인 연속 운전 연구를 위해 운전시간 300초의 준 연속운전 실현을 목표로 하고 있다. 준 연속운전 능력을 갖는 토카막에서는 장펄스로 전류를 구동할 수 있는 가열 및 전류구동장치가 반드시 필요하며, ICRF(Ion Cyclotron Range of Frequency) 가열장치도 그 중의 하나이다.[2,3]

본 ICRF 가열장치는 KSTAR의 보조 가열장치 중의 하나로서, 주파수 영역 25~60 MHz에서 6 MW의 고주파로 플라즈마를 가열시키거나 전류구동을 하게 된다. 안테나는 중앙이 접지된 4개의 전류띠로 구성되어 있으며, 각각의 전류띠는 공명루프(resonant loop)를 형성하여 tee connector를 통해 1개의 고주파 송출기로부터 고주파를 공급받는다. 전류띠와 tee 사이에는 전류띠와 연결된 진공전송선, 진공과 대기의 경계를 이루는 진공창(vacuum feedthrough), 위상변환기 및 이들을 연결하는 각종 전송부품들로 이루어져 있다. 고주파 송출기로부터 나온 고주파는 주전송선로를 따라 전달되어 정합계통을 통해 tee에 연결되며, 정합계통은 위상변환기와 stub tuner로 구성되어 있다.

위와 같은 성능을 지닌 ICRF 가열장치 개발을 위해, 본 핵융합연구LAB에서는 1996년부터 고출력 장펄스용 안테나, 정합계통 및 고주파 송출계 등을 연구 개발하여 왔으며, 그동안의 연구와 공학 설계를 바탕으로 1999년에 본제품과 동일한 크기의 prototype 안테나를 제작하였다.[4] 또한 고출력의 고주파를 진공 속에 들어있는 안테나에 전달할 수 있는 1 MW, 300초 운전용 진공창을 설계 제작하였다. 제작된 prototype 안테나와 진공창에 대한 고주파 시험을 수행하였으며, 설계 조건을 만족시키는 성능을 지니고 있음을 확인하였다.[5,6] 이러한 각각의 시험 결과를 바탕으로, ICRF 안테나의 4개 전류띠 중 1개에 고주파를 공급할 수 있는 가열장치계통을 구성하였으며, 고주파 성능을 시험하기 위해 여러 차례에 걸쳐 고주파 시험을 수행하였다.

2. ICRF 가열장치의 건설

제작된 prototype ICRF 안테나를 포함한 실제와 동일한 규격의 가열장치를 구성하여 동작특성을 시험하고, 고출력 고주파 성능 시험을 위해 본 연구소 핵융합연구LAB의 고주파시험시설 내에 1개의 공명루프와 이와 연결된 정합회로를 **Fig.1**과 같이 건설하였다. 건설된 장치의 최고 높이는 약 8 m이며, 10 m×4 m의 공간을 차지한다. 제작된 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 공명루프를 구성하였다. 나머지 3개 전류띠의 상, 하 입력단 모두 진공전송선의 끝단에서 접지하였다. 전류띠-1의 상, 하 두 진공전송선 끝에는 진공창이 연결되어 있으며, 바로 다음에는 6·1/8" 전송선과 9·3/16" 전송선을 연결하는 reducer를 연결하였다. 공명루프 상, 하의 위상변환기와 정합회로의 위상변환기 및 stub tuner는 DIELECTRIC사의 제품을 사용

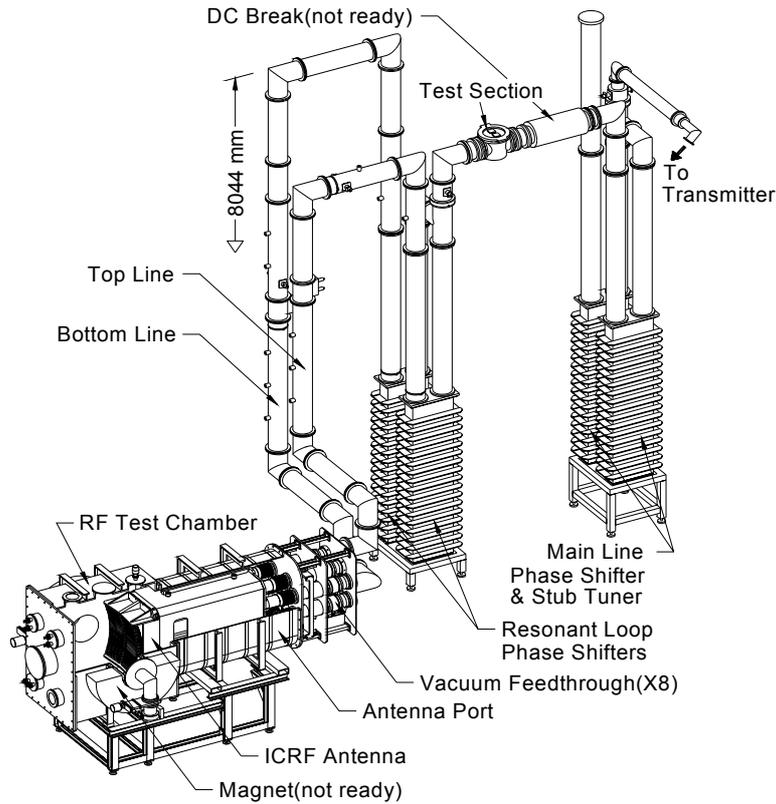


Fig. 1. 3D view of the ICRF heating system at the KAERI test facility.

하였으며, 분해·조립과 접근의 용이성을 위해 수직으로 설치하였다. 이들은 주파수 25 MHz에서 위상을 0~90°사이에서 연속적으로 변화시킬 수 있으며, 순간출력 2 MW, 연속출력 20 kW에서 운전이 가능하다. 전송선은 모두 특성임피던스 50 Ω의 9·3/16" 전송선을 사용하였다. 주로 DIELECTRIC사와 MYAT사의 상용 전송선이며, 일부 길이 조정이 필요한 전송선은 국내 제작하였다. 공명루프와 정합회로를 이루는 전송선 내부에는 내전압을 높이기 위해 절연기체를 충전하였으며, 공명루프 입력단 가까이에 설치된 gas breaker를 기준으로 두 공간으로 독립되어 있다. 이는 방전이 일어날 경우 오염된 절연기체의 확산을 막기 위함이다. 또한 공명루프의 입력단에는 SPINNER사의 test section을 설치하여, 필요한 경우 전송선을 분해하지 않고 공명루프의 입력단에서 임피던스 등의 전기적 특성을 측정할 수 있게 하였다. 전류띠 중앙 접지로부터 공명루프의 길이는 상단 전송선의 경우 19.8(+0~3.0) m이며, 하단의 경우 24.6(+0~3.0) m로서 공명루프의 최대 길이는 50.3 m이다. 공명루프의 공명조건은 상, 하의 두 위상변환기에 의해 조정되는데, 위상변환기의 전기적 길이는 직육면체 형태의 도체 통 속에서 직선으로 움직이는 'U'자 관의 위치에 따라 결정된다. 이 관의 위치는 직선운동에 연동되어 있는 가변저항의 양단에 걸리는 전압으로 표시된다. 따라서 이 전압에 대한 공명루프의 길이를 교정하여야 하며,

이를 위해 공명루프의 중간 부분을 분해하고 test section과 분해된 지점까지의 위상차를 측정하여 길이를 교정하였다. 공명루프의 상단의 길이를 측정하는 동안에 하단 끝에 50 Ω 저항을 연결하였으며, 하단의 길이도 동일한 방법으로 교정하였다.

정합회로의 등가회로는 Fig. 2와 같다. 끝에 루프 임피던스의 부하가 있고, 위상변환기 부분(L_{PS})은 공명루프에 연결된 tee, gas breaker, 방향성결합기, elbow, test section, 위상변환기로 되어 있으며, stub tuner 부분(L_{ST})은 tee, 위상변환기, 끝이 접지된 전송선으로 구성되어 있다. 각 부분의 길이는 $L_{PS}=10.2(+0\sim 3.0)$ m, $L_{ST}=8.3(+0\sim 3.0)$ m이다.

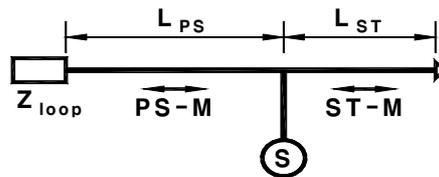


Fig. 2. Equivalent circuit of the matching system.

공명루프 및 정합회로에는 각 지점에 고주파 출력 및 전압 측정을 위해 방향성결합기(8개)와 전압탐침(14개)을 설치하였다. 각각의 방향성결합기와 전압탐침은 설치 전에 Network Analyzer(HP4396A)를 이용하여 교정하였으며, 주파수 영역 25~60 MHz에서 직선성이 우수하였다. 또한 고주파 인가시 온도 상승을 측정하기 위해 안테나의 cavity box, 공명루프의 전송선 및 RFTC의 표면에 23개의 thermocouple을 설치하였다. 이러한 각각의 측정기로부터 신호를 수집하기 위해 VXI 기반의 자료 획득 장치를 구성하였으며, 전압 신호의 경우 48 ch, 온도 신호의 경우 32 ch의 자료 수집이 가능하다. 이 장치의 최소 sampling period는 171 msec이다.

3. ICRF 가열장치에 대한 고주파 시험

위와 같이 ICRF 가열장치를 건설한 후, 고주파 시험을 위해 시험 주파수인 30 MHz에서 공명조건을 맞추고, 전체 회로에 대해 정합조건을 실험적으로 도출하였다. 공명조건을 맞추고 정합이 된 상태에서 모두 6차례의 고주파 시험을 수행하였으며, ‘고주파 시험-0, 1, 2, 3, 4, 5’로 분류하여 설명하고자 한다. 고주파 시험-0은 본격적인 시험에 앞서, 설치된 모든 가열장치 계통과 각 진단계통의 확인(연결 상태, 측정 range 등) 및 이상 유무를 검사하기 위한 예비 시험으로서 수행하였다. 또한 이어진 고주파 시험-1의 내용과 유사하므로, 고주파 시험-0에 대한 자세한 내용은 생략하였다. 고주파 시험-1은 전체 가열장치가 조립된 후 본격적으로 수행한 첫 시험으로서 고주파 내전압 및 운전 가능한 펄스의 길이를 확인하는 시험이었다. 고주파 시험-2는 안테나 및 RFTC에 대한 baking을 한 후에 실시하여 baking 효과를 확인할 수 있었으며, 고주파 시험-3에서는 고주파 펄스의 누적에 따른 conditioning 효과를 확인하였다. 고주파 시험-2, 3을 수행한 후 확인되었는 바, 주파수 설정에 오류가 있어 의도했던 30 MHz로부터 23.2 kHz 벗어나 있었다. 고주

파 시험-4, 5에서는 주파수를 30 MHz로 재설정 한 후 같은 방법으로 시험하였다. 이 때 보다 높은 전압에서 시험하기 위해 공명루프와 정합회로에 건조공기(또는 고순도 질소)를 3 기압으로 충전하였다. 고주파 시험-4, 5를 수행하기 직전에 baking을 다시 하였다.

시험 주파수인 30 MHz에서 공명루프를 공명조건을 맞추기 위해 test section에서 입력 임피던스를 측정하면서 공명루프 상, 하의 두 위상변환기를 조정하였다. 임피던스 측정은 Network Analyzer를 이용하였다. 우선 계산으로 구한 공명조건을 만족하는 길이($L_B=27.5$ m, $L_T=22.5$ m)로 맞춘 후 루프 임피던스의 허수 부분이 0이 되도록 미세 조정하였다. 최종적으로 $L_B=27.6$ m($V_{BPS}=7.35$ V), $L_T=22.6$ m($V_{TPS}=6.65$ V)일 때 공명조건을 만족하였으며, 루프 임피던스를 측정한 결과는 Fig. 3과 같다. 공명조건을 만족하는 상태에서 루프 임피던스는 실수 부분만 남았으며, 그 값은 2.7 k Ω 이었다. 이 값은 플라즈마 부하저항 1.5 Ω /m에 해당되는데, 이것은 공명루프를 이루는 전송선(50 m)의 저항 손실에 의한 것이다. 공명조건을 결정한 후, test section을 고주파가 진행하도록 연결한 후 정합 조건을 도출하였다. 우선 계산으로 구한 정합조건으로 위상변환기와 stub tuner의 길이를 맞춘 후, 전체 가열장치 회로의 입력 임피던스를 측정하여 50 Ω 이 되도록 정합회로의 위상변환기와 stub tuner를 미세 조정하였다. 조정 완료된 후 측정한 임피던스는 Fig. 4와 같으며, 위상변환기의 위치 표시 전압은 8.13 V, stub tuner의 위치 표시 전압은 6.34 V였다.

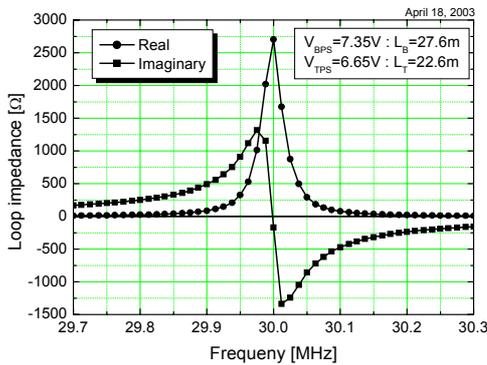


Fig. 3. Measured loop impedance.

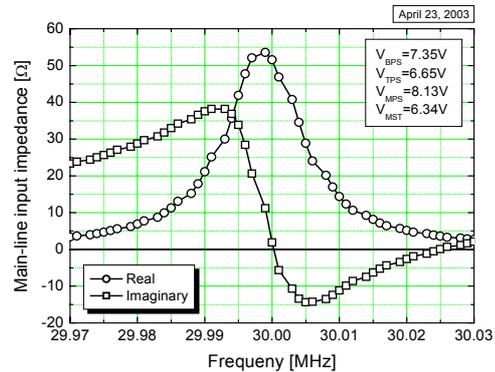


Fig. 4. Main-line input impedance

고주파 시험-1에서는 모두 34회의 펄스로 고주파 시험을 수행하였다. 1 kW 출력의 고주파를 5초 동안 인가하는 것으로 시험을 시작하였으며, 점차 출력을 높여 나갔다. 고주파 펄스의 시간폭은 기본적으로 5초로 하였다. 시험하기 전 RFTC의 진공도는 5.8×10^{-7} mbar이었으며, 고주파 펄스를 인가한 후 진공도가 10^{-7} mbar 영역에 들면 다음 펄스를 인가하였다. 펄스를 인가하면서 정합회로 입력단, 및 공명루프 입력단에서 진행파와 반사파의 출력을 측정하였으며, 공명루프 상의 전압 및 RFTC 내의 진공도 변화도 측정하였다. SHOT #1-7에서는 고주파 출력이 4 kW 미만으로서 multipactor 방전이 일어난 영역이다. SHOT #8이후에는 고주파 출력을 증가시킴으로서 multipactor 방전 영역은 벗어났으며, 여러 차례의 고주파 방전을 겪으면서 고주파 출력을 증가시켜나갔다. SHOT #32에

서 방전이 일어나지 않은 상태로 시험-1의 최대 전압으로 시험하였으며, 이 때의 공명루프 상의 최대 전압은 12.0 kVp, 전류피에서 최대 전류는 270 A이었다. SHOT #34에서 펄스의 길이를 10 sec로 증가시키자 Fig. 5에서 보는 바와 같이 고주파 인가 후 t=6.7 sec에 압력 증가로 인해 고주파 방전이 발생하였다. 고주파 시험-1을 통해 이와 같은 고주파 방전이 일어나는 한계 압력이 10^{-4} mbar 임을 확인할 수 있었다. 방전이 일어나지 않은 상태에서의 고주파를 인가하는 동안 증가하는 RFTC 내의 최대 압력은 $4 \sim 10 \times 10^{-5}$ mbar이었다. LHD(Large Helical Device)의 ICRF 가열장치의 경우 threshold 압력이 1×10^{-5} torr로 보고한 바 있다.[7]

고주파 시험-1을 통해 고주파 방전으로 발전하는 threshold 압력을 확인할 수 있었으며, 고주파 출력을 증가시킬 때마다 쉽게 이 압력을 넘어서서 방전이 발생하였다. 고주파 시험-2를 수행하기 전에 고주파 인가시 outgassing을 억제하기 위해 RFTC와 안테나에 대한 baking을 실시하였다. 이를 위해 RFTC의 사각 진공함 속에 4개의 1 kW급 할로젠 램프를 설치하여 내부 표면과 안테나 전면을 baking하였다. 또한 RFTC의 안테나 포트에는 외부에 띠 형태의 열선(220 V, 1 kW)을 일정한 간격으로 부착하여 baking하였다. Baking 중 최대 온도는 138°C이었으며, 약 40시간 동안 baking하였다.

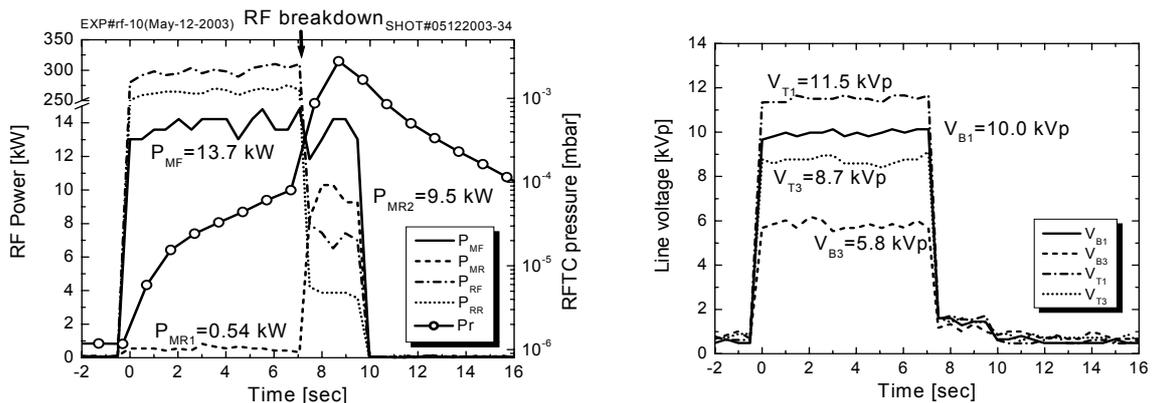


Fig. 5. Time evolution of the RF powers, RFTC pressure, and the line voltages at VP-B1, B3, T1, T3 (SHOT #34).

Baking 후 고주파 시험-2를 수행하였으며, 37회의 펄스로 고주파 시험을 수행하였다. 시험 과정은 고주파 시험-1과 동일하며, 낮은 출력의 펄스부터 인가하여 RFTC 내의 압력 상승을 관찰하며 출력을 높여 나갔다. 방전이 일어나지 않은 상태로 도달한 최고 장펄스와 최고 전압은 SHOT #37의 경우로서, 40.4 kW의 고주파 출력을 인가하여 20 sec 펄스에서 6.87 kVp에 도달하였다. 37회의 SHOT를 거치는 동안 단 1회의 고주파 방전이 일어났는데 SHOT #15의 경우로서, 이 경우에도 한계 압력은 고주파 시험-1때와 마찬가지로 진공 압력이 10^{-4} mbar 이상이 되었기 때문이다. 고주파 방전이 일어나지 않은 상태에서의 고주파를 인가하는 동안 증가하는 최대 압력은 $1 \sim 4 \times 10^{-5}$ mbar이었으며, 이

값은 고주파 시험-1의 경우에 비해 현저히 낮아진 값이다. 이렇게 고전압 특성이 현저히 향상된 것은 고주파 시험-1 이후에 실시한 baking에 기인한 것으로 사료된다. 즉, baking에 의해 outgassing이 충분히 되어 고주파 인가시 증가하는 outgassing이 현저히 감소하여 RFTC 내의 압력을 낮게 유지할 수 있었으며, 따라서 고주파 방전이 일어날 확률도 줄어든 것이다. 본 시험을 통해 baking 효과를 확인할 수 있었으며, 고주파 시험-1에 비해 보다 긴 장펄스로 보다 높은 전압에서 운전이 가능하였다.

고주파 시험-2를 통해 baking 효과를 확인할 수 있었으며, 고주파 시험-3에서는 300 sec의 장펄스 운전을 목표로 하였다. 본 시험은 고주파 시험-2에 곧이어 실시하였으며, baking 효과 및 고주파 시험-2를 통한 conditioning 효과도 남아있는 상태이어서 장펄스 운전이 가능하였다. 모두 18회의 펄스로 고주파 시험을 수행하였다. 방전이 일어나지 않은 상태로 도달한 최고 장펄스와 최고 전압은 SHOT #18의 경우로서 300 sec의 장펄스에서 $V_{B,max}=7.93$ kVp이었다. 18회의 SHOT을 인가하는 동안 고주파 방전은 한번도 발생하지 않았으며, 고주파 시험-2에 비해 훨씬 적은 횟수의 SHOT을 거쳐 더 높은 전압, 더 긴 장펄스에 도달하였다. 이것은 그동안의 SHOT에 의해 conditioning이 충분히 되었기 때문이다. 고주파를 인가하는 동안 증가하는 최대 압력은 $3\sim 5\times 10^{-5}$ mbar이었으며, 이 값은 SHOT의 횟수를 증가시킴으로서 더 감소시킬 수 있을 것이다.

고주파 시험-2, 3을 수행한 후 확인되었는 바, 주파수 설정에 오류가 있어 의도했던 30 MHz로부터 23.2 kHz 벗어나 있었다. 이로 인해 방전이 일어나지 않은 경우에도 반사가 매우 컸으며($\rho=0.84$), 정합 및 공명 조건이 맞지 않아 고주파 고전압의 전압 분포가 정상과의 경우로부터 벗어나 있었다. 고주파 시험-4, 5에서는 주파수를 30 MHz로 확실한 다음 같은 방법으로 시험하였다. 시험에 앞서 RFTC와 안테나에 대한 baking을 다시 하였으며, 고주파 시험 전에 도달한 진공도는 7.2×10^{-7} mbar로서, 고주파 시험을 할 수 있는 충분히 낮은 압력이다. 보다 높은 고주파 전압에서 시험하기 위해 공명루프 및 정합회로의 전송선 및 위상변환기 내부에 절연기체로 건조 공기(또는 고순도 질소)를 3 kgf/cm²의 압력으로 충전하였다. 이와 같이 절연기체를 충전하면 공명루프의 전기적 특성이 미소하게 변하게 되는데, 이는 절연기체에 의해 전송선의 외관이 미소하게 팽창하기 때문이다. 이로 인해 루프 임피던스의 실수 성분이 최대(허수 성분은 0)가 되는 주파수에 약 20 kHz의 변화가 있었다. 이러한 변화를 보정하기 위해 공명루프 상, 하의 위상변환기를 미세하게 조정하여 위상변환기의 길이를 나타내는 전압 값을 0.05 V씩 감소되도록 하였다. 길이로 환산하면 약 2 cm씩 줄어든 것이다. 루프 임피던스가 변하였고 정합회로를 가압함에 따라 정합 조건도 변하였다. 이를 보정하기 위해 정합회로의 위상변환기와 stub tuner도 재조정하였다. 이와 같이 공명, 정합 조건을 다시 조정한 후 모두 34회의 펄스로 고주파 시험을 수행하였다.

고주파 시험-4에서 방전이 일어나지 않은 상태로 도달한 최고 전압은 SHOT #32의 경우로서 10 sec의 펄스에서 $V_{B7}=10.8$ kVp이었다. 최고 장펄스로 운전한 것은 Fig. 6의 SHOT #34로서 펄스 길이는 300 sec, 최고 전압은 $V_{B7}=8.5$ kVp이었다. 이 때 의한 안테

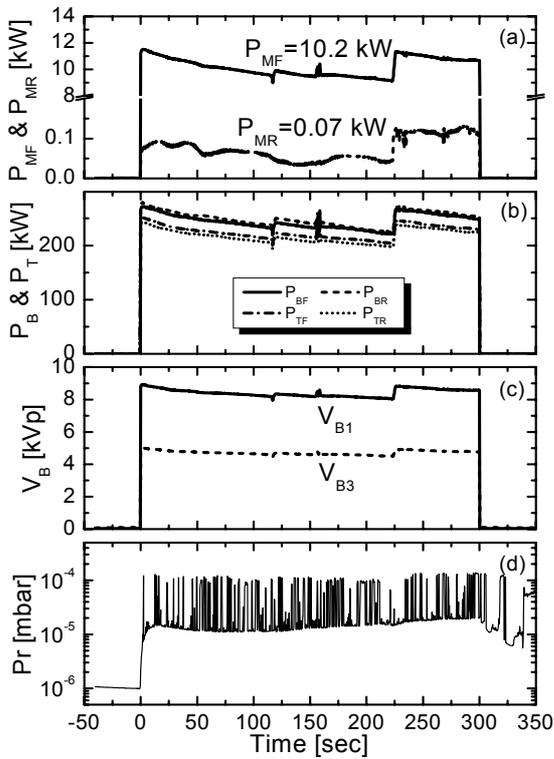


Fig. 6. Time evolution of the RF test pulses for the SHOT #34; the RF powers at the input port of the matching circuit(a), at the bottom and top-line(b), the RF voltages at the bottom-line(c), and the RFTC pressure(d).

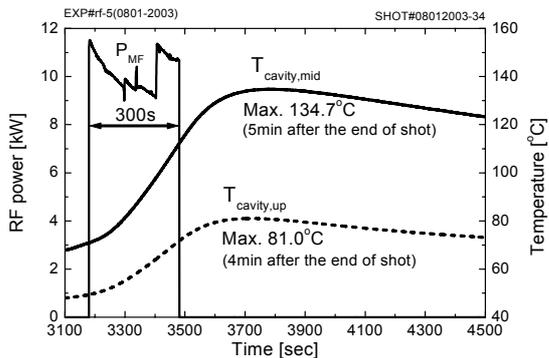


Fig. 7. Temperature increase during the SHOT #34.

나의 온도 상승은 Fig. 7과 같다. 그림에서 실선은 cavity box의 전류띠-1에 인접해 있는 벽의 외부 표면 중간의 온도를 나타낸다. 최대 온도는 고주파 펄스가 끝난 후 5분 후에 134.7°C가 되었다. 이 정도의 온도에서는 냉각관로의 Viton O-ring의 손상이 우려되므로 시험을 중지하였다. 본 시험의 경우, 고주파 시험-3과는 달리 반사계수가 매우 작았으며, 작은 고주파 출력으로도 더 높은 전압을 형성할 수 있었다. 즉, 고주파 시험-3의 SHOT #18에서 41 kW의 고주파 출력으로 bottom-line에 최대 전압 7.93 kVp가 인가된 데 비해 고주파 시험-4의 SHOT #32에서는 16 kW의 출력으로 12.6 kVp가 인가되었다.

고주파 시험-5에서는 방전이 일어나지 않는 범위 내에서 도달할 수 있는 최대 전압을 얻기 위해 실시하였다. 시험 직전에 baking을 다시 하였으며, 시험 과정은 고주파 시험-4와 같다. 모두 51회의 고주파 펄스를 인가하여 시험을 수행하였다. 방전이 일어나지 않은 상태로 도달한 최고 전압은 SHOT #45의 경우로서 입력 고주파 출력 48 kW, 5 sec의 펄스에서 $V_{B7}=18.5$ kVp에 도달하였다 (Fig. 8). 이 때 방향성 결합기로 측정된 최대 전압은 $V_{T,max}=20.1$ kVp, $V_{B,max}=21.3$ kVp이었다. 같은 고주파 출력으로 SHOT #51에서 장펄스 운전을 시도하였으나 $t=10.1$ sec에서 방전이 발생하였다. 또한 시험 도중 공명루프 또는 정합회로에서 방전음이 들렸으며, 이로부터 Dielectric사의 위상변환기 내부에서 방전이 일어났으며, 내전압의 한계에 도달한 것으로 판단된다.

4. 고주파 시험의 결과 종합

KAERI에 건설된 ICRF 가열장치에 대해 모두 6회에 걸친 고주파 시험을 수행하였다.

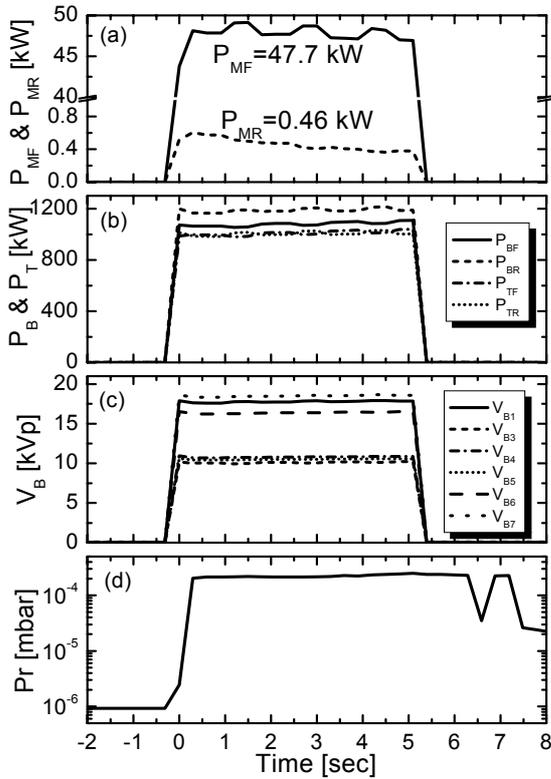


Fig. 8. Time evolution of the RF test pulses for the SHOT #45; the RF powers at the input port of the matching circuit(a), at the bottom and top-line(b), the RF voltages at the bottom-line(c), and the RFTC pressure(d).

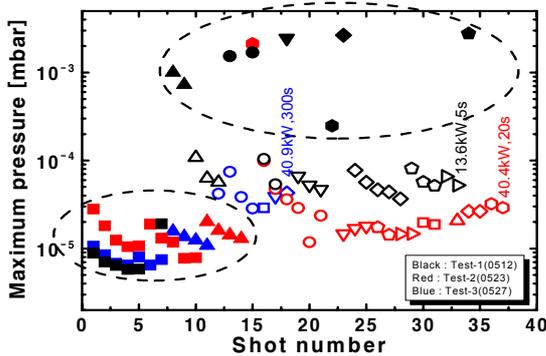


Fig. 9. The maximum RFTC pressure vs the shot number for the RF test-1(black), 2(red), and 3(blue).

SHOT 횟수는 모두 194회이었으며, 공명루프 상에 인가된 최대 전압은 펄스의 길이 5 sec에 대해 21.3 kVp로서 48 kW의 고주파 출력을 공급하여 얻을 수 있었다. 전압을 더 이상 증가시킬 수 없었던 것은 위상변환기의 내전압 한계에 도달하였기 때문이다.

고주파 시험-1, 2, 3의 전체 SHOT에 대한 고주파 인가 중 증가하는 최대 압력은 Fig. 9와 같다. 고주파 시험-1, 2를 비교해보면 baking 효과를 확인할 수 있는데, 방전이 일어나지 않는 상태에서 고주파에 의해 증가하는 최대 압력이 고주파 시험-1의 경우에는 $4 \sim 10 \times 10^{-5}$ mbar이었으며, 고주파 시험-2에서는 $1 \sim 4 \times 10^{-5}$ mbar로 감소하였다. 고주파 시험-3에서는 18회의 SHOT(고주파 시험-2에서는 37회)을 통해 방전이 한번도 일어나지 않고서 고주파 시험-2보다 높은 전압과 더 긴 장펄스에 도달할 수 있었었는데, 이것은 누적된 SHOT에 의해 고주파 conditioning이 이루어졌기 때문이다. 전체 고주파 시험을 통해 고주파를 인가할 때 RFTC 내의 압력이 증가하여 고주파 방전을 유발하는 경우가 있었는데, 그 한계 압력은 $1 \sim 3 \times 10^{-4}$ mbar임을 확인할 수 있었다.

5. 결론

KSTAR 토카막의 ICRF 가열장치 개발을 위해 한국원자력연구소 고주파 시험시설에 ICRF 안테나에 연결된 공명루프 및 정합회로를 건설하였으며, 그 동작특성을 조사하고 고주파 시험을 성공적으로 수행하였다. 건설된 가열장치에 대한 동작 특성 시험을 통해 주파수에 따른 공명 조건 및 정합 조건을 용이하게 조정이 가능함을 확인하였다. 또한 이론적으로 계산한 결과로 그 조건들을 정확하게 설정할 수 있었다. 주파수 30 MHz에서

모두 6회의 고주파 시험을 수행하였으며, 고주파 고전압 시험은 펄스의 길이 5초에 대해 21.3 kVp까지 시험하였으며, 장펄스 시험으로는 9.95 kVp에서 300초 운전이 가능하였다. 21.3 kVp의 내전압은 플라즈마 부하저항이 6 Ω /m일 때 2.0 MW의 고주파로 플라즈마를 가열할 수 있음을 나타낸다. 실제 본장치에서는 30 Ω 전송선을 사용하게 되므로 이 값은 3.6 MW가 된다. 이러한 성능은 KSTAR의 요구조건인 6 MW에 미치지 못하나 이것은 안테나 자체의 성능에 기인하는 것이 아니라 공명루프 및 정합회로에 사용된 위상변환기의 내전압 한계에 기인하며, 장펄스 운전의 한계는 prototype 안테나의 경우 냉각관로 누설로 인해 강제 냉각이 불가능하기 때문이다. 따라서 이러한 한계는 위상변환기의 성능을 향상시키거나 유체위상변환기로의 교체 등으로 극복이 가능하며, 제작이 완료된 ICRF 안테나 시작품에 대한 시험에서는 요구조건을 충분히 만족시키리라 판단된다. 또한 본 시험을 통해 baking과 고주파 conditioning의 효과를 확인할 수 있었으며, 보다 체계적인 과정을 개발할 필요가 있음을 알 수 있었다. 앞으로는 과제로서 시작품 안테나를 포함한 30 Ω 공명루프를 건설하여 보다 높은 고주파 내전압 시험을 수행할 예정이다.

참고문헌

- [1] G.S. Lee et. al., The KSTAR project: Advanced steady-state superconducting tokamak experiment, *Nuclear Fusion* **40** (2000) 575-582.
- [2] G. Bosia, M. Makowski, and G. Tonon, 'Status of ITER RF systems design', *Plasma Phys. Control. Fusion* **40** (1998) A105-A117.
- [3] A.S. Kaye, and G. O'Connor, 'High frequency heating and current drive in next step steady state tokamaks', *Fusion Engineering and Design* **56-57** (2001) 45-57.
- [4] 배영덕, 황철규, 홍봉근, 윤재성, 왕선정, 'KSTAR ICH 안테나의 공학 설계 및 proto-type의 제작', *새물리* **40-5** (2000) 446-454.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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. 11.