

토카막 플라즈마 가열 및 전류구동 장치

배 영 순

국가핵융합연구소 KSTAR 운영사업단

1. 서 론

$$j \leq B_\phi / \mu_0 R \quad (3)$$

핵융합연구의 목표는 원자핵융합 반응에 의해 발생된 핵융합에너지로 인해 스스로 극한 상태를 유지할 수 있는 높은 온도와 밀도상태의 “연소플라즈마 (burning plasma)”를 얻는 것이다. 이와 같은 플라즈마를 얻기 위해서는 극복해야 할 두 개의 도전적인 장벽을 우리는 안고 있다. 첫째는 수억도 이상의 플라즈마를 만들어야 한다는 것과 둘째는 이와 같은 높은 온도의 플라즈마를 유지하기 위해서는 오랜 시간 동안 밀도가 높은 플라즈마를 가두어 제어하면서 열손실을 방지해야 한다는 것이다.

토카막(tokamak)이라는 핵융합장치는 이 두 가지 도전적인 장벽을 해결하기 위해 토카막내의 플라즈마 “전류(electric current)”를 유도시키는 방법을 사용한다. 플라즈마 전류는 “주울 효과(Joule effect; 전류의 제곱과 저항의 곱에 의한 열)”덕택에 플라즈마 자체를 가열하고 플라즈마의 구속력을 높이기 위한 자기장(poloidal magnetic field)을 발생한다. 이와 같은 방법을 유도가열(Ohmic heating)이라 한다.

$$P = \eta j^2 \quad (1)$$

(η 는 플라즈마 저항, j 는 플라즈마 전류 밀도이다). 하지만 토카막의 플라즈마 온도가 백만도 (전자온도로는 100 전자볼트(eV))로 상승할 경우 플라즈마는 저항(Ohm)이 아주 작은 전도체가 되며 (즉, 저항은 온도의 3/2승에 반비례함) 주울 효과에 의한 가열은 비효율적이 된다. 게다가 토카막 플라즈마 안정성 문제로 전류 또한 무한히 올릴 수도 없다.

$$\eta \propto T_e^{-3/2} \quad (2)$$

(B_ϕ 는 토로이달 자장, μ_0 는 진공에서의 자기 투자율, R 은 토카막 주 반경) 따라서 전자온도가 점점 상승하는 플라즈마에서 전자온도를 1억도 이상까지 올리기 위해서는 다른 방식의 가열장치가 필요하다.

2. 가열장치의 종류

유도가열외의 비유도방식의 가열장치는 플라즈마의 특별한 성질과 토카막의 토로이달 구조로 인해 쉽게 운전될 수도 없고 그 만큼 구조도 복잡하고 장치별로 특별한 구조와 특성을 갖고 있다. 현재 전 세계적으로 크게 두 가지 형태의 보조가열장치를 사용하고 있는데, 하나는 전자파를 이용하는 가열장치 (“RF heating”)가 있고, 다른 하나는 중성입자빔을 이용하는 가열장치 (“NB heating”)로 구분된다. 전자파를 이용하는 장치는 주파수가 아주 큰 초고주파 (수십 GHz¹⁾ ~ 수백 GHz)를 이용하는 장치와 반면에 초고주파보다는 1/1000 정도 되는 고주파를 이용하는 장치로 구분된다. RF를 이용한 가열장치는 초고주파 (혹은 밀리미터파)의 전자공명현상을 이용하여 플라즈마를 가열하는 electron cyclotron heating and current drive (ECH/CD) 장치, 마이크로웨이브 영역 (2 ~ 5 GHz)의 lower hybrid heating and current drive (LHH/CD) 장치, 30-60 MHz 주파수 대역의 이온공명현상을 이용하여 가열하는 ion cyclotron resonance heating and fast wave current drive (ICRH/FWCD) 장치가 존재한다. 그림 1은 토카막에서 이와 같은 중성입자빔 가열장치와 RF 가열장치를 보여주고 있다.

1) GHz는 초당 십억번 진동하는 주파수 단위이다.

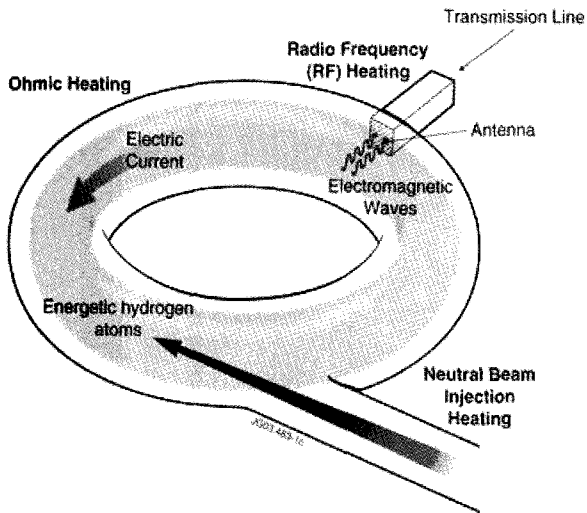


그림 1. 주울효과에 의한 유도가열 (Ohmic heating) 및 비유도 가열장치.

반면 토카막은 변압기와 같은 원리로 작동함으로써 연속적으로 플라즈마 전류를 유지할 수 없으므로 만약 우리가 연소플라즈마를 연속적으로 가두고 유지하기 위해서는 부가적인 전류 구동 장치가 필요하다. 근래에 와서는 가열 및 전류구동 장치의 역할이 확대되어 토카막 플라즈마 성능에 핵심적인 수단이 되고 있다. 토카막 플라즈마의 가장 중요한 성질을 나타내는 것은 물리량의 공간적인 분포 (profiles)인데 이것은 플라즈마 중심에서 가장자리까지 플라즈마 반경을 따라 물리량이 어떻게 변하는가를 보여주는 것을 말한다. 플라즈마의 밀도, 온도, 자기장 분포 등이 바로 그 예로 들 수 있다. 보조 가열 및 전류구동 장치는 이와 같은 분포를 제어하고 수정하는 기능을 수행할 수 있다는 것을 세계 여러나라 토카막 장치에서 실험적으로 보여주고 있고, 이와 같은 기술을 우리는 "plasma tailoring" 기술이라 일컬어진다. 이와 같은 관점에서 보조 가열 및 전류구동 장치는 연소플라즈마 (burning plasmas)와 함께 미래의 발전로에서 꼭 필요한 장치이다.

3. KSTAR 가열 및 전류구동 장치

KSTAR 초전도 토카막 장치는 위에서 언급한 네가지 종류의 가열 및 전류구동 장치

를 모두 사용할 계획이고 단계별로 장치 개발, 설치를 계획하고 있다. 다음 표는 KSTAR에서 사용될 각 가열장치별 종류와 기능이 설명되어 있다.

표 1. KSTAR 가열 및 전류구동 장치 종류와 기능.

장치	기능
중성입자빔 입사장치	-중수소 이온 가열을 통한 이온온도 증가 -H-mode 제공 (고성능, 고효율 운전조건)
이온공명 가열장치	-RF플라즈마를 이용한 진공용기 내벽 콘디셔닝 (wall cleaning) -RF 공명현상을 이용한 플라즈마 중심 이온 및 전자 가열
마이크로파 가열 및 전류구동장치	-플라즈마 전류구동 (steady-state 운전) -전자가열 및 플라즈마 전류 프로파일 콘트롤 -고성능 운전모드 (RS-mode, ITB) 기여
초고주파 전자공명 가열 및 전류구동장치	○ 전이온화 장치 -전이온화를 통한 초기시동용 -플라즈마 일주 방전전압 감소 및 운전영역 확대 ○ 가열 및 전류구동 시스템 -플라즈마 전류 프로파일 콘트롤 (central-ent-ECCD or off-axis co-ECCD) -전자수송장벽 (eITB) 형성 (plus to LHCD) -NTM 불안정성 모드 억제 및 Sawteeth mode 제어

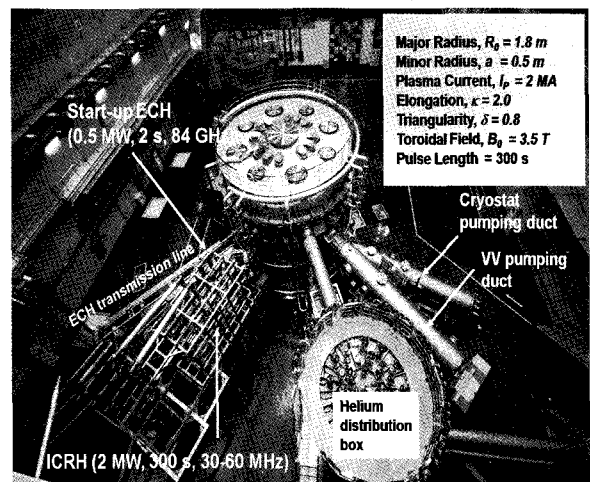


그림 2. KSTAR 토카막과 초기 ECH 및 ICRH 가열장치.

표1 에서 설명된 네 가지 가열장치 중 현재 KSTAR에 설치 및 시운전중인 장치는 500 kW급의 84 GHz ECH 전이온화 (pre-ionization) 장치와 2 MW급의 ICRH 장치가 있다. 그림 2는 KSTAR 토카막 홀내에 설치가 되어 있는 ECH 및 ICRH 가열장치를 보여주고 있다. 84 GHz ECH 전이온화 장치는 플라즈마 초기 시동시 전이온화를 제공하여 주울 가열에 요구되는 2차측 토로이달 방전 일주전압 (loop voltage)을 감소시키고 토카막 초기 시동을 돕는 아주 중요한 장치이며, KSTAR 최초 플라즈마 운전시 부족한 주울 가열 파워를 보상할 수 있을 것이라 예상된다.

각 가열장치의 작동 원리와 주요 구성은 다음 절에서 설명하도록 한다.

3.1 중성입자빔 가열장치 (Neutral Beam Injection)

중성입자빔 가열장치는 토카막 장치에서 가장 널리 이용되고 있고 플라즈마 가열 및 전류구동에 강력한 성능을 가지고 있다. 중성입자빔 가열장치는 한 방향으로 진행되는 높은 에너지의 중성입자빔 (Neutral Particles)을 주울 가열 방법으로 미리 가열된 플라즈마에 입사하고 입사된 중성입자빔은 플라즈마내의 입자들과 충돌하여 전자를 잃게되고 이온 상태로 바뀌게 된다. 이 이온은 플라즈마내의 입자들에 비해 상당히 빠른 속력으로 움직이고 일련의 주변에 있는 이온, 전자들과의 충돌로 인해 플라즈마에 에너지를 전달해 주게 된다.

중성입자빔은 보통 수소 원자나 중수소 원자를 사용하게 되는데, 중성입자빔의 상태로 토카막에 입사하는 이유는 만일 전하를 띤 이온의 상태로 입사하게 되면 토카막에 걸려 있는 강한 자기장에 의해 뚫고 진입할 수가 없기 때문이다. 아울러 아주 큰 빔에너지를 가지고 입사하지 않으면 플라즈마 외곽에서 순간 이온화되어 플라즈마 중심까지 진입하지 못한다. 동시에 많은 양의 에너지를 플라즈마에 전달하기 위해서는 많은 양의 중성입자빔을 공급해 주어야 한다. 아주 큰 에너지와 많은 양의 중성입자빔은 보통 중성입자빔 발생장치에 의해 결정되는 데, 보통 80 keV 혹은 120 keV 이상의 빔에너지와 50 A 이

상의 빔 전류가 사용된다. 80 keV 중수소 빔에너지의 경우 2800 km/s의 속력에 해당된다. 그림 3은 중성입자빔 발생장치의 원리를 보여준다.

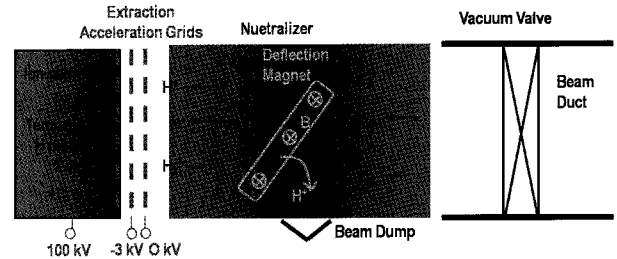


그림 3. 중성입자빔 발생 장치 원리.

이온원 (ion source)으로부터 발생된 이온들은 고전압 빔 인출 전극에 의해 가속되고 중성화 장치 (neutralizer)를 통과하면서 전하교환 (charge-exchange)에 의해 중성화된다. 일부 중성화 되지 않은 이온들은 전자석 (deflecting electromagnet)에 의해 이온덤프 (ion dump)로 보내진다. KSTAR 초전도토카막 장치의 경우 하나의 이온원당 약 7 MW (120 keV, 60 A), 300초 연속 운전할 수 있는 이온원을 사용할 예정이다. 현재 한국원자력연구원 (KAERI)에서 개발된 이온원은 90 keV, 3 MW의 수소 이온빔 인출의 성능과 20초 운전의 경우 약 5 MW (100 keV, 50 A)의 이온빔 출력의 성능을 보유하고 있으며 앞으로 5 MW의 조건에서 300초 이상의 운전 성능을 확보하기 위해 노력 중에 있다.

3.2 이온공명가열장치 (Ion Cyclotron Resonance Heating)

자기장이 존재하는 플라즈마에서는 플라즈마를 구성하는 입자 (이온과 전자)들이 자기장 주변에서 일정한 진동수로 회전한다. 진동수는 입자의 질량, 전하량, 그리고 자기장에 의해 결정되는 데 우리는 이것을 “싸이클로트론 주파수(cyclotron frequency)”라고 하며 아래와 같은 식과 같이 입자의 전하량, 자기장, 질량에 의해 주어진다.

$$f = n \frac{qB}{2\pi m} \quad (4)$$

(f 는 사이클로트론 주파수, q 는 입자의 전하량, B 는 자기장, m 은 입자의 질량, n 은 하모닉 수)

전자의 경우 1차 하모닉 사이클로트론 주파수는 간단히 $f = 28B(T)$ [GHz]로 계산될 수 있다. 플라즈마의 밀도나 온도는 위 식에서와 같이 사이클로트론 주파수에는 어떤 영향도 주지 않음으로 사이클로트론 주파수를 가진 전자파 (electromagnetic wave) 혹은 RF (radio frequency)가 플라즈마에 입사할 경우 플라즈마 입자와 전자파가 공명 (resonance)되어 플라즈마 입자가 가열이 된다. 그림 4는 자기장 주변의 플라즈마 이온의 사이클로트론 운동을 보여주고 있다. 토카막에서는 자기장이 토카막 센터에서 주변 방향의 거리에 따라 달라짐으로 좁은 영역의 공명 레이어가 존재하며 RF에너지를 흡수할 위한 위치 제어가 필요하다. 이온공명가열장치는 플라즈마의 이온의 사이클로트론 주파수와 같은 혹은 정수배의 주파수를 가진 RF를 입사하여 이온을 가열하는 장치이다.

KSTAR 초전도토카막장치의 경우 이온공명가열장치의 RF의 주파수 범위는 30-60 MHz이다. 수소 이온의 경우 3.5 Tesla의 자기장 조건에서 사이클로트론 주파수는 53 MHz이며, 중수소 이온을 사용할 경우 53 MHz는 2차 하모닉 주파수에 해당된다.

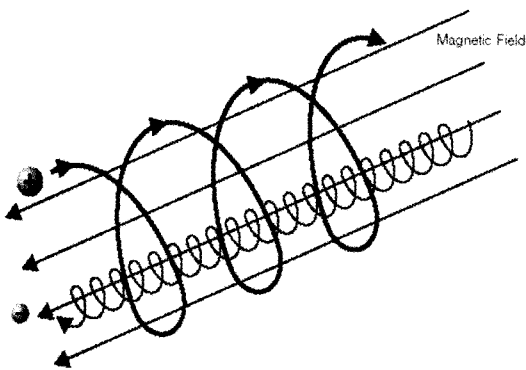
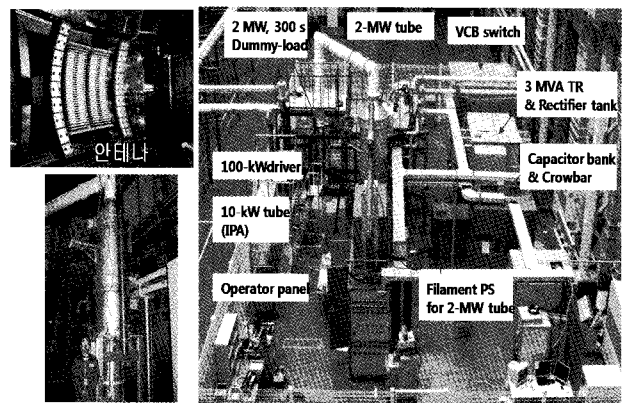


그림 4. 자기장 내의 플라즈마 입자의 사이클로트론 운동.

KSTAR 이온공명가열장치는 현재 하나의 2 MW급의 RF 발생장치와 하나의 RF 전송선 (transmission line) 시스템과 6 MW급의 안테나가 설치되어 시운전 중에 있다. 그

림 5는 현재 KSTAR 토카막에 설치된 2 MW급의 ICRH 가열장치의 RF 발생장치, 안테나, 2 MW tetrode tube를 보여주고 있다. RF는 세 단계의 증폭관을 통해 최종 2 MW까지 증폭되고 최근 33 MHz 주파수 조건에서 2 MW, 300초 운전까지 성능을 확보하였다. 발생된 RF는 동축관이라는 튜브를 통해서 전송되는데, 동축관은 원형의 외부 도체 튜브와 내부 도체가 서로 공간적으로 절연된 상태의 구조로 되어 있고 고출력 RF 전송을 위해 마치 파이프 라인과 같이 보이는 23 cm의 직경을 가진 외부 도체 튜브를 사용하고 있다.



2MW tetrode 발전기 (30-60 MHz) ICRH 송출기 시스템

그림 5. KSTAR 30-60MHz ICRH 가열장치.

동축관은 송출기부터 시작되어 안테나의 네 개의 위아래로 굴곡된 직사각형의 도체 (strap)로 연결된다. 8 MW ICRH 시스템으로 성능 향상을 위해 총 네 대의 2 MW 발전장치와 네 개의 전송선 라인이 추후 설치될 예정이다. 전송선 라인의 길이는 대략 40미터이며 약 25%의 RF 손실로 인해 안테나에서 플라즈마로 입사되는 총 파워는 약 6 MW로 예상하고 있다.

KSTAR 시운전 기간 중 ICRH 가열장치는 토로이달 자장이 인가된 조건에서 토카막 진공용기 내벽 세정 (cleaning)을 돕는 데 사용되었다. 그림 6은 헬륨개스를 이용한 플라즈마 방전 세정 (discharge cleaning)을 보여주고 있다. 그림에서 ICRH 안테나는 왼쪽 중앙에 위치하며 그 곳에서 RF 고주파가 방사되어 토카막 진공용기내 플라즈마 방전을 일으키게 된다.

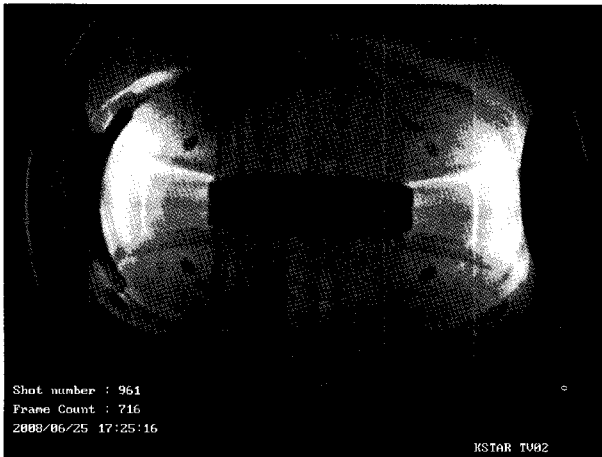
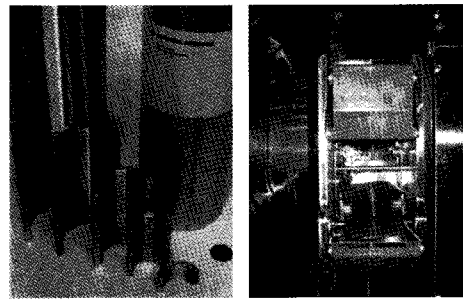


그림 6. ICRH 가열장치를 이용한 헬륨 플라즈마 방전세정 (왼쪽 중앙에 위치한 활모양의 구조는 안테나를 보호하기 위해 graphite 타일로 덮여있는 poloidal limiter임).

3.3 전자공명가열장치 (Electron Cyclotron Resonance Heating)

전자공명 가열장치는 ICRH 가열장치의 원리와 비슷하고 다만 플라즈마 이온대신 전자와 공명을 일으키는 전자파를 사용한다. 전자는 수소 이온보다 약 2000배 정도 가벼움으로 사용하는 전자파는 수십~수백 GHz (gigahertz = 10억분의 1 Hz로서 수 밀리미터의 파장에 해당됨)의 주파수에 해당되는 “초고주파” 혹은 “밀리미터 웨이브”를 사용한다. 파장이 아주 짧음으로 일반적인 도파관 (waveguide) 개념의 전송선을 사용할 경우 파워 손실이 엄청나게 커서 토카막 플라즈마로 입사하기도 전에 모두 RF를 손실할 것이다. 파워 손실을 최소화하기 위해 초고주파를 발생하는 장치는 준광학적 (Quasi-optical)인 가우시안 (Gaussian) 모드의 RF 빔을 발진하고 특별히 설계되고 제작된 도파관을 통해 가우시안 모드가 유지되며 토카막으로 전송된다 (그림 7 왼쪽).

토카막으로 전송된 RF 빔은 아주 짧은 파장을 가지고 있으므로 플라즈마 내에서 국부적으로 플라즈마를 가열하고 전류를 구동할 수 있는 장점을 가지고 있다. 안테나는 이와 같은 장점을 이용하기 위해 광학적인 미러 (mirror)로 구성되어 정확히 입사되는 위치를 제어할 수 있도록 하고 있다 (그림 7 오른쪽).



Circular corrugated waveguide (RF beam propagation mode: HE11)

Quasi-optical antenna with steerable mirror and shutter

그림 7. ECRH 가열장치 전송선 및 안테나.

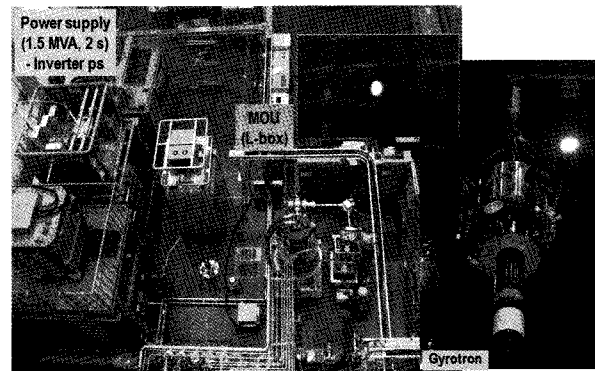


그림 8. KSTAR 84 GHz, 500 kW ECRH 가열장치.

ECRH 가열장치는 RF를 발진하는 “자이로트론 (gyrotron)”이라는 발진기와 가우시안 모드를 전송하는 원형의 corrugated waveguide 전송선 시스템을 사용하며 광학적 미러로 구성된 안테나로 구성된다. 현재 500 kW급의 84 GHz ECRH 전이온화 장치는 설치가 완료되어 시운전 중에 있으며 초기 시운전시 자이로트론 발진기에서 얻어진 원형의 RF 빔은 그림 8의 오른쪽 상단과 같다. 자이로트론 발진장치는 미국 CPI 라는 회사를 통해 구입이 되었고 자이로트론 운전용인 90 kV급, 1.5 MVA급의 고전압, 대전력 전원장치는 국내 포스콘 기업을 통해 설계, 제작되었다.

KSTAR는 표1에서 나타낸 바와 같이 84 GHz ECRH 장치는 전이온화 (pre-ionization) 라는 아주 중요한 초기 운전시동 기능을 위한 장치로 활용되고 있다. 전이온화는 토카막의 중심 솔레노이드 자석의 자속변화 (volt-sec) 로 유도되는 일주 전압에 의해 플라즈마 발

생을 일으키기 전 초고주파를 토카막 진공용기내에 입사하여 전자공명가열 현상을 이용하여 미리 플라즈마를 발생시켜 적은 일주전압 (즉 적은 자속 변화)으로도 토카막 플라즈마 (ohmic plasma)를 쉽게 발생시키는 운전 기술이다. 이 기술은 특히 자속변화에 제약이 주어지는 초전도 토카막 장치에서 주목받는 기술이다. KSTAR 시운전 기간 중 84GHz ECRH 장치를 이용하여 2차 하모닉 공명조건 의 어려운 조건 (toroidal magnetic field, $B_\phi = 1.5 \text{ T}$)에서도 성공적인 전이온화 발생을 관측할 수 있었고 (그림9) KSTAR 장치의 최초 플라즈마 발생 성공과 안정적인 운전에 기여하게 되었다.

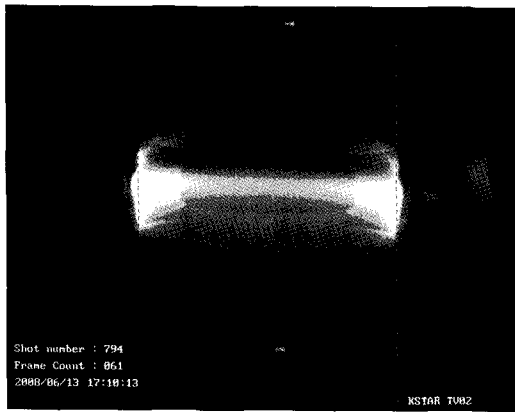


그림 9. KSTAR ECH 전이온화 플라즈마 (1.5T의 2차하모닉 조건). 빨간 수직 선은 2차 하모닉 공명 위치에 해당된다.

KSTAR에서는 전이온화 장치 외에 전류구동까지도 가능한 170 GHz ECH/CD 장치를 이용할 계획이다. ECRH 가열장치는 플라즈마 전자의 자기장에 수직한 성분의 싸이클로트론 운동에너지를 증가시키는 역할을 하지만 토카막내에서 전자들의 열속도 (thermal velocity) 분포가 비대칭적으로 분포되어 있고 주변 전자들과의 충돌을 통해서 자기장과 평행한 성분의 운동에너지로 에너지가 전달된다. 이와 같은 이유로 ECRH 가열장치는 플라즈마 전류를 국부적으로 유도하며 전류의 프로파일을 제어할 수 있는 장치로 사용되기도 한다. KSTAR의 고성능 운전 모드에 필요한 높은 수준의 베타 (beta는 플라즈마 에너지 대비 토로이달 자기장 에너지의 비)값을 위해서는 MHD (magneto hydro dynamics)에 의한 플라즈마 불안정성 모드인

NTM (neoclassical tearing mode) 모드를 반드시 억제하거나 발생되지 말아야 한다. 대부분의 토카막 장치에서는 NTM이 발생하는 운전모드에서 운전되는데 ECRH 가열장치의 국부적 전류유도의 장점을 이용하여 NTM 모드를 억제하는 데 큰 효과를 보고 있다. ITER (국제핵융합실험로)에서는 170 GHz ECH/CD 장치를 이용하여 NTM 모드를 억제하기 위해 NTM 억제를 위한 정교한 입사 제어용 안테나 설계와 1 MW 혹은 2 MW급의 연속운전용 대용량 자이로트론 개발 및 시작품 제작을 진행 중에 있다.

3.4 마이크로웨이브 가열 및 전류구동 (Lower Hybrid Current Drive)

토카막 플라즈마에는 많은 공명 주파수 (resonant frequency)가 존재한다. 그러나 실험을 통해 주파수 중 일부는 비효율적이거나 비실용적이고, 다른 일부는 플라즈마 가장자리 영역 (edge region)을 통과하지 못한다는 것을 발견하였다. 공명 주파수 중에서 이온 공명 주파수 (ion cyclotron frequency) 와 전자 공명 주파수 (electron cyclotron frequency)가 혼합 (hybrid) 된 것을 혼합 주파수 (hybrid frequency)라고 하는데 이중 낮은 혼합 주파수 (lower hybrid frequency)를 가진 전자파가 입사될 경우 플라즈마 내부를 통과하지만 플라즈마 가열이 비효율적이다. 그럼에도 불구하고 낮은 혼합 주파수의 전자파는 토카막 내부의 자기장과 평행한 전기장 성분을 가지고 있기 때문에 전자를 가속하여 플라즈마 전류를 구동할 수 있는 장점을 가지고 있음을 알게 되었다. 이 원리는 파도타기 (surfing)과 같이 전하를 띤 입자는 전자파 위에서 속도가 증가되어 결과적으로 비대칭적인 평행 성분의 전자 열속도 분포가 발생되어 전류가 유도가 된다. 낮은 혼합 파 (Lower hybrid wave)를 이용하는 LHCD 가열장치는 그림 10의 왼쪽과 같이 전자파와 입자 사이의 에너지 교환에 의해서 발생하는 란다우 감쇠 (Landau damping) 효과를 이용하여 플라즈마 전류를 구동한다. 파의 진행 속도보다 약간 느린 플라즈마 전자들은 전기장에 의해서 전자파의 진행 방향으로 가속되고, 전자파의 진행 속도보다 조금 빠른 전자들은 속

도가 감소하게 된다. 이것은 플라즈마 내부의 전하들이 전기장 위에서 에너지를 얻고 잃는 과정이, 파도타기에서 파도 위에서 서핑을 하며 속도를 얻고 잃는 과정과 유사하다.

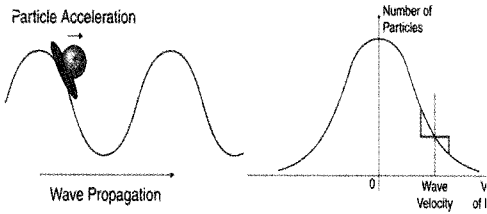


그림 10. 자기장에 수평성분의 전기장에 의한 입자 가속 및 전류 유도.

충돌이 없는 플라즈마 (collisionless plasma)에서 내부의 입자들은 맥스웰 분포 함수 (Maxwellian distribution function)를 가지는데, 이 속도 분포 때문에 전체적으로 가속되는 전자들이 감속되는 전자보다 많게 되고, 전자파의 에너지는 감쇠 (damping) 하게 된다. LHCD 장치에서 무엇보다도 중요한 것은 토카막 플라즈마 내에서 자기장과 평행한 성분의 전기장과 입사방향을 갖는 전자파를 입사할 수 있는 안테나이다. LHCD 안테나는 평행한 전기장을 갖는 전자파를 입사하기 위해 여러 개의 작은 사각 도파관 (rectangular waveguide)이 수직으로 나열된 구조를 이용하고 있고 위상제어기 (phase shifter)를 이용하여 이웃한 도파관의 위상차를 제어하면 자기장과 평행한 성분을 갖도록 임의의 방향 ($k_{||}$)으로 입사할 수가 있다. 이와 같은 안테나 시스템을 우리는 “위상제어안테나 (phased array waveguide antenna)”라 하고, 여러 개의 사각 도파관 구조는 석쇠 모양을 닮아 “grill” 구조로 불리고 있다. Grill 안테나 구조에서 방사되는 마이크로웨이브가 높은 방향성 (directivity)의 파수스펙트럼 (radiated wavenumber spectrum)을 갖기 위해서는 수백개 이상의 좁고 많은 사각 도파관으로 grill을 구성하도록 하고 있다. KSTAR에서는 128개의 도파관 (토로이달 (toroidal) 방향으로 32개, 폴로이달 (poloidal) 방향으로 4개)으로 된 grill 구조로 설계 중에 있다. 그림 11은 grill 구조와 방사되는 RF 빔의 전파 특성을 보여주고 있다.

KSTAR의 LHCD 시스템은 C-밴드인 5 GHz의 주파수 (ITER장치에서 고려하고 있는 LHCD 시스템의 주파수와 동일함)를 사용할 예정이며 5 GHz RF 발생장치는 클라이스트론 (klystron)이라는 증폭관을 통해 발생되고 현재 KSTAR에서 5 GHz, 0.5 MW klystron을 운영중에 있다.

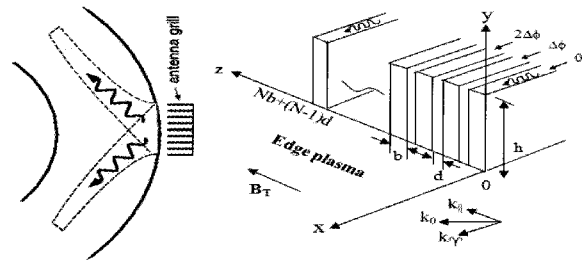


그림 11. LHCD phased array waveguide antenna 구조 및 방사되는 RF 빔의 선택적인 전파 특성.

4. 맺음말

가열 및 전류구동 시스템은 토카막 핵융합 장치에 있어서 1억도 이상의 플라즈마 온도와 고온·고밀도 플라즈마의 장시간 운전 및 구속을 가능하게 하여 고성능 운전모드를 가능하게 하는 결정적이고 능동적인 시스템으로 이용되고 있다. KSTAR 초전도토카막장치는 위에서 기술한 네 가지의 가열 및 전류구동장치의 각각의 특성과 장점을 잘 활용하여 KSTAR가 목표로 하고 있는 최적의 운전 시나리오 연구 및 장시간 고성능 운전 시나리오 운전모드 실현을 계획하고 있다.

저자이력



배영순 (裵英淳)
2004 포항공과대학원 물리학과 이학박사, 현재 국가핵융합연구소 KSTAR 운영사업단 가열시스템개발팀장.
(ysbae@nfri.re.kr)