

인공태양의 꿈을 달구라

플라즈마 가열 및 전류구동 기술

핵융합의 꿈을 실현하기 위한 기본 조건으로 꼽히는 것이 1억도 이상의 고온고밀도 핵융합 플라즈마의 장시간 운전 기술이다.

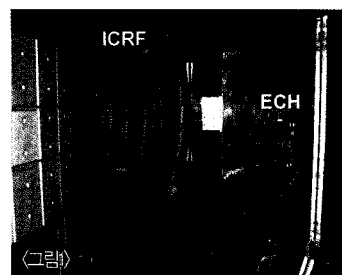
핵융합 플라즈마 발생장치인 토카막(tokamak)은 그 장치가 가진 근본적인 한계로 인해 1억도 이상의 플라즈마를 장시간 유지하기 어렵다. 토카막의 전자석을 이용한 플라즈마 유도 가열(inductive heating 또는 Ohmic heating)은 플라즈마 온도 증가에 따라 급격히 감소되는 효율로 인해 1,000~3,000만도 이상으로 플라즈마를 가열하는 것이 불가능하다. 또한 한 방향으로 플라즈마 전류를 장시간 유지하는데에는 한 방향의 코일 전류 변화가 필요한데 이는 현실적으로 불가능하다. 따라서 1억도 이상으로 플라즈마를 가열하고, 장시간 운전을 위해서는 유도 가열과는 다른 비유도(non-inductive)성 가열 및 전류구동장치가 반드시 필요하다.

근래에 와서는 가열 및 전류구동장치의 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 예이다. 보조 가열 및 전류구동장치가 이와 같은 분포를 제어하고 수정하는 기능을 수행할 수 있으며, 이와 같은 기술을 우리는 "Plasma tailoring" 혹은 "Plasma profile control" 기술이라 일컫는다. 이와 같은 관점에서 가열 및 전류구동장치는 연소플라즈마(burning plasma)와 함께 미래의 핵융합발전로에서 꼭 필요한 장치이다.

비유도방식의 플라즈마 가열 및 전류구동장치는 플라즈마의 특별한 성질과 토카막의 토로이달 구조로 인해 쉽게 운전될 수도 없고 구조도 복잡하여 장치별로 특별한 구조와 특성을 갖고 있다. 현재 전 세

계적으로 크게 두 가지 형태의 보조가열장치를 사용하고 있는데, 하나는 전자파를 이용하는 가열장치(RF heating)가 있고 다른 하나는 고에너지의 중성입자빔을 이용하는 가열장치(NB heating)이다. 전자파를 이용하는 장치는 주파수가 아주 큰 초고주파(수십 GHz~수백 GHz)를 이용하는 장치와 반면에 초고주파보다는 1/1000 정도 되는 고주파를 이용하는 장치로 구분된다. 여기에는 초고주파(혹은 밀리미터파)의 전자공명현상을 이용하여 국소적으로 플라즈마의 전자 가열 및 플라즈마 전류 및 압력밀도 분포를 제어할 수 있는 Electron cyclotron heating & current drive(ECH/CD) 장치, 2~5GHz의 마이크로웨이브에 의한 전자의 란다우 감쇠(Landau damping) 현상을 이용하여 플라즈마 전류를 아주 큰 효율로 구동할 수 있는 Lower hybrid heating & current drive(LHH/CD) 장치, 30~60MHz 주파수 대역의 이온공명현상을 이용하여 플라즈마의 이온을 가열하는 Ion cyclotron resonance heating & Fast wave current drive(ICRH/FWCD) 장치가 있다.

KSTAR는 현재 84GHz, 0.5MW ECH 초기시동 가열장치와 30~60



MHz, 2MW ICRF 이온공명 가열장치를 설치 완료하여 운영 중에 있다.

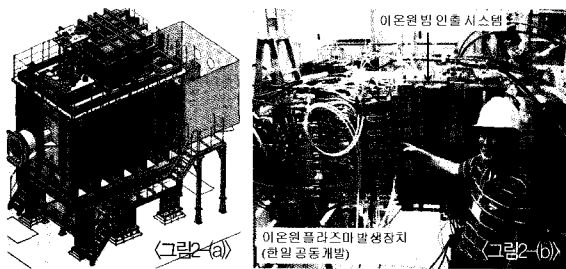
<그림>은 KSTAR 진공용기 내 ECH 및 ICRF 안테나로 ICRF 안테나는 6MW 고주파

를 300초 동안 입사할 수 있는 성능을 보유하고 있다.

중성입자빔 가열장치를 보면, KSTAR는 현재 이온 가열 및 H-mode 운전을 목표로 중성입자빔(NBI) 가열장치를 제작 중에 있으며, 2010년

* GHz는 초당 십억 번 진동하는 주파수 단위이다.

운전기간 중 1.5MW급의 80~100 keV 에너지를 가지는 수소(혹은 중수소) 중성입자빔을 KSTAR 플라즈마에 입사하는 것을 목표로 하고 있다. 중성입자빔 가열장치에 있어서 중요한 고에너지 이온빔 발생장치인 이온원(최대 120keV)은 한국원자력연구원과 일본 JAEA 핵융합연구소와 공동으로 개발한 제품이 사용될 예정이다. <그림2-(a), (b)>는 각각 현재 설계 및 제작 중인 8MW급의 중성빔 입사 빔라인 시스템 구조와 한일 공동개발품인 이온원 시험 현장을 보여주고 있다.

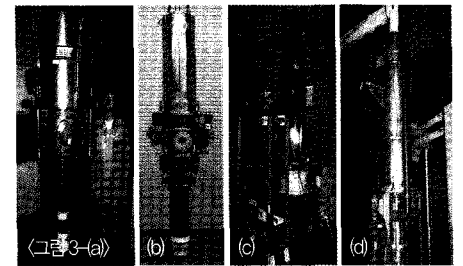


현재 설계 중인 빔라인은 세 개의 이온원 중 한 개의 이온원에서 인출되는 이온빔을 중성화하는 중성화장치(neutralizer), 중성화가 안 된 이온빔을 걸러내는 휨자석(bending magnet)과 이온덤프(ion dump), 이온빔의 프로파일 및 빔 축을 진단할 수 있는 열량계(calorimeter), 중성빔이 KSTAR 토카막으로 진입하는 빔덕트(beam duct), 다량의 가스 유속에도 빔라인 내부 고진공을 유지할 수 있는 저온흡착펌프(cryosorption pump) 시스템, 빔라인 시스템을 보호하기 위해 외곽 빔을 차단하는 많은 Scaper로 구성되어 있다. Scaper에는 최대 500도 이상 고온에도 견딜 수 있는 CuCrZr이라는 무산소동합금의 Hyper-vapotron 냉각구조들로 제작될 예정이다.

KSTAR는 84GHz ECH 초기시동 가열장치 외에도 170GHz ECH/CD 가열장치를 추가로 개발하여 국소적인 플라즈마 가열 및 전류구동을 통한 플라즈마 프로파일 제어, MHD 불안정성 모드 제어를 계획하고 있다. 170GHz ECH/CD 시스템의 1MW, 300초 이상의 RF 출력을 발생시키는 Gyrotron(자이로트론)은 한일핵융합협력 프로그램을 통해 일본 JAEA 핵융합연구소에서 무상 대여하여 2010년말 KSTAR에 설치할 예정이며<그림3-(b) 참조>, 2011년 KSTAR 운전 캠페인에 적용할 예정이다.

플라즈마 입사 위치 제어용 170GHz EC 초고주파 안테나는 현재 포항공과대학교와 미국 프린스턴 플라즈마 물리 연구소(PPPL)와 공동으로 개발하여 2010년말 제작이 완료될 예정이다. 5GHz LHCD 시스템은 KSTAR 건설 프로젝트 기간 중 5GHz, 0.5MW CW Klystron 시제품이 개발되어 현재 장시간 운전 시스템을 구축 중이며 5GHz, 0.5MW LHCD 가열장치 또한 2011년 KSTAR 운전

캠페인에 시운전을 목표로 포항공과대학교와 공동으로 안테나, 전송선 등의 설계 업무를 진행하고 있다. <그림3>은 LHCD 5GHz, 0.5MW CW Klystron의 시제품<그림3-(c)>을 포함하여 현재 KSTAR에서 운영 중인 고출력 RF 발생장치를 보여주고 있다.



KSTAR가 최종적으로 27.5MW, 300초 사양의 성능을 달성하기 위해서는 100MW에 가까운 AC라인 계통의 전력증설과 큰 규모의 예산소요가 예상되며, 이를 바탕으로 KSTAR 가열 및 전류구동장치의 미래 성능 향상 계획 및 그 역할(<표1>)에 따라 최적의 연소 플라즈마 운전 시나리오 연구 및 장시간 고성능 운전모드를 실현할 것이다.

■ 표 1

<표1> KSTAR 가열 및 전류구동 장치 종류와 기능

장 치	사 양	기 능
중성입자빔 입사장치	- 120keV, 14MW - 2 BLs, 6 IS	- 중수소 이온 가열을 통한 이온온도 증가 - H-mode 제공(고성능, 고효율 운전조건)
이온공명 가열장치	- 30~60MHz, 8MW - 4 Transmitters	- 진공용기 내벽 콘디셔닝(wall cleaning) - 플라즈마 중심 이온 및 전자 가열
마이크로파 가열 및 전류구동장치	- 5GHz, 2MW - 4 Klystrons	- 플라즈마 전류구동(steady-state 운전) - 전자 가열 및 플라즈마 전류 프로파일 제어 - 고성능 운전모드(RS-mode, ITB) 기여
초고주파 전자공명 가열 및 전류구동장치	<ul style="list-style-type: none"> Startup ECH - 84GHz, 0.5MW - 1 Gyrotron ECH/CD - 170GHz, 3MW - 3 Gyrotrons 	<ul style="list-style-type: none"> 전이온화 장치 - 전이온화를 통한 초기시동용 - 일주 방전전압 감소 및 운전영역 확대 가열 및 전류구동 시스템 - 플라즈마 전류 프로파일 제어 - 전자수송장벽(e-ITB) 형성 - NTM 모드 및 Sawtooth 모드 제어