

KSTAR 토카막 플라즈마 가열을 위한 중성 입자빔 입사장치용 이온원 개발 현황

김태성, 정승호, 장두희, 이광원, 인상열, 오병훈, 장대식, 진정태, 송우섭

한국원자력연구원

KSTAR (Korea Superconducting Tokamak Advanced Research) 장치는 차세대 에너지원 중의 하나인 핵융합로를 위한 과학기술 기반을 마련하기 위해 개발된 중형급 토카막 실험장치로서 토카막 운전 영역의 확장과 안정성 확보, 정상상태 운전 도달을 위한 방법 연구, 최적화된 플라즈마 상태와 연속 운전 실현 등을 주요 목표로 하고 있다. 이를 위해 핵융합 반응에 의한 점화 조건과 가까운 상태로 플라즈마를 가열해주어야 하며, 토카막 장치의 저항가열 이외에도 외부에서 추가 가열이 반드시 필요하다. 중성 입자빔 입사장치는 현재 토카막에서 사용되고 있는 가열장치 중 가장 신뢰성있는 추가 가열 장치라 할 수 있으며 한국 원자력연구원에서는 1997년부터 KSTAR 토카막 실험 장치에 사용될 중성 입자빔 입사 장치를 개발해왔었다. 중성빔 입사장치는 크게 이온원, 진공함, 열량계, 진공 펌프, 중성화 장치, 이온덤프와 전자석으로 이루어져 있으며, 이중 이온원은 중성빔의 성능을 좌우하는 핵심적인 장치라 할 수 있다. 최근 한국원자력연구원에서는 2 MW 중성 입자빔 입사장치용 이온원 개발을 완료하여 KSTAR 토카막 장치에 설치하였으며, 2013년 현재 KSTAR에는 총 두 개의 이온원이 장착되어 최대 약 3 MW 이상의 중수소 중성 입자빔을 입사하여 KSTAR 토카막 실험의 H-mode 달성과 운전 시나리오 연구에 많은 기여를 하고 있다. 한국원자력연구원에서 최초로 개발된 이온원은 미국 TFTR 장치에서 사용되었던 US LPIS (Long Pulse Ion Source)를 기본으로 하여 국내 개발을 수행하였다. 이온원은 크게 플라즈마를 발생시키는 플라즈마 발생부와 발생된 이온을 인출 및 가속시키는 가속부로 구성되는데, 개발과정에서 가장 먼저 KSTAR의 장주기 운전에 적합하도록 플라즈마 방전부와 가속부의 냉각회로를 요구되는 열부하에 맞게 설계 수정하였다. 그 후 플라즈마 방전부는 방전 시간과 안정성, 플라즈마 밀도의 균일도, 정격 운전, 방전 효율 등을 고려하여 수정 보완하며 개발을 진행하여왔다. 가속부의 경우 국내 제작기술의 한계를 극복하기 위해 빔 인출 그리드를 TFTR의 US LPIS 모델의 슬릿형 그리드 타입에서 원형 인출구 타입으로 변경하였으며, 이후 가속 전극의 고전압 내전력 문제, 빔 인출 전류와 전력, 인출 빔의 광학적 질(quality), 빔 인출 시간 동안의 안정성 등을 위해 그리드의 크기와 간격, 모양 등을 변경하여 개발을 수행하여 왔다. 이 논문은 한국원자력연구원에서 개발이 진행되어 왔던 이온원들을 시간적으로 되짚어 보면서 현재까지의 성과와 문제점, 그리고 앞으로의 개발 방향에 대해 논의하고자 한다.

Keywords: KSTAR, 중성입자빔, NBI, 이온원, Ion Source, 가열 장치, 토카막