

## 세계가 풀지 못했던 기술적 난제, 플라즈마 제어코일 설치기술

# In-Vessel Control Coil (IVCC)

국가핵융합연구소는 국내 기술로 개발된 차세대 초전도 핵융합 연구장치 KSTAR 내부에 플라즈마 제어코일을 설치하는 성과를 올렸다. 'd'자 모양으로 무게 500kg, 길이 8m에 달하는 분할형 제어코일의 KSTAR 내부설치는 고성능의 플라즈마를 얻기 위한 것으로 그 어느 나라도 성공하지 못한 기술적 난제였다. 이번 플라즈마 제어코일 설치 성공은 우리나라만의 독특한 기술을 적용한 대표적인 사례로 프랑스에 건설하고 있는 국제핵융합실험로(ITER)도 역시 KSTAR의 성공사례를 토대로 같은 개념의 플라즈마 제어코일 설치를 위한 설계 변경을 결정했다.

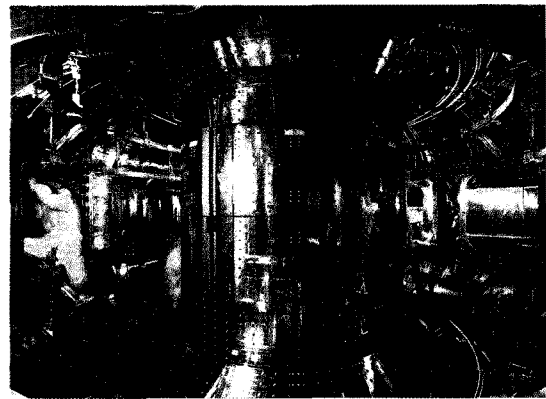


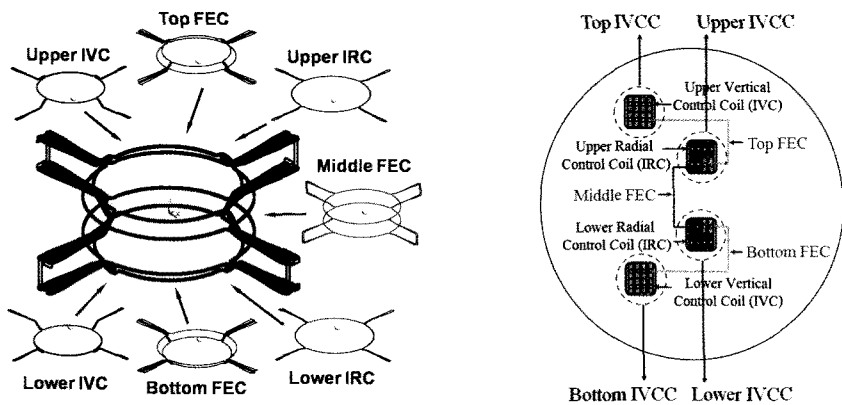
### 명품 플라즈마를 만드는 제어코일

플라즈마의 불안정성을 제어하는 것은 핵융합 발전을 성패를 가늠하는 중요한 이슈로서 진공용기 내 제어코일은 이 불안정성을 억제하여 명품 플라즈마를 만들어낼 수 있는 핵심 장치다.

KSTAR를 구성하는 자석 부문 장치와 기계 장치는 100% 일치하지 않기 때문에 이론적으로 완벽한 플라즈마 정렬을 이룰 수 없다. 이 때 제어코일이 내부 용기에 있으면 왜곡된 플라즈마를 원하는 D자형으로 고속 제어할 수 있다. 플라즈마가 수직적으로 불안정성을 보일 때 빠르게 안정화시킬 수 있고 과도한 열 부하도 방지할 수 있다.

이처럼 KSTAR 내부 제어코일은 응답시간 수 msec(1/1000초)미만의 빠른 플라즈마 위치제어, 자기장 오차 보상(FEC), Resistive Wall Mode(RWM) 제어 및 Edge Localized Mode(ELM) 제어 등에 사용된다. 플라즈마 위치제어는 크게 수직제어(vertical control)와 방사제어(radial control)가 있으며 수직 위치제어의 가장 큰 목적은 플라즈마의 수직 불안정성의 안정화이고, 방사제어는 이온공명 가열장치의 안테나 정합 특성 악화에 대해 빠른 위치 보정과 기타 ICRH 안테나 및 플라즈마 대향부품으로의 과도한 열 부하 방지 등에 그 목적이 있다. 자기장 오차 보상은 전자석 및 전체 장치의 제작과 설치 시에 불가피하게 수반되는 자기





제어코일 구성 및 연결방식

장의 오차를 보상에 주기 위한 것이다. RWM 제어 및 재귀안정화란 high  $\beta$  플라즈마에서 플라즈마 압력의 방사상 위치에 따른 불균일성은 필연적으로 'Kink mode'라는 가장 위험한 플라즈마 불안정성을 유발하게 되는데 이러한 불안정성의 성장률을 억제하기 위한 것으로, KSTAR 수동 안정화기(passive stabilizer)의 뒤에 추가적인 능동 재귀형 안정화 코일이 진공용기 내 제어코일이다.

### 세계 최초, 하나로 통합되는 제어코일, 그 도전의 과정

KSTAR 진공용기 내 제어코일은 지금까지 전 세계적으로 연구되었던 모든 제어코일의 개념을 통합한 형태로서, 한 개의 제어코일 시스템이 기존의 독립된 플라즈마 위치제어와 자장 오차 보상을 코일, 그리고 RWM의 안정화 코일의 기능을 통합하는 형태로 제작되었다. 하지만 최초의 진공용기 내 제어코일은 다양한 기능들에 따라 독립적으로 설계되었고, 공학설계도 거의 마무리가 되어 있었다. 이러한 시점에 기존의 설계를 과감히 버리고 한 개의 제어코일 시스템으로 통합하는 것은 상당한 모험이고 도전이었을 뿐만 아니라 통합 과정 또한 많은 논란과 기술적인 어려움이 존재한 것 또한 사실이었다. 한마디로 수년간 골치 썩어가며 설계했던 모든 것들을 버리고 처음부터 다시 시작해야 했던 막막함은 지금에 와서도 생생하다.

기존 설계안에서 현재와 같은 세그먼트 형태의 통합 제어코일 시스템으로 변경은 제작 측면에서 많은 장점을 가짐

에도 불구하고 완전한 형태의 각각의 세그먼트를 진공용기 내부로 투입하는 것이 가장 큰 과제였다. 설계변경이 한참 이루어질 당시에는 진공용기의 공학설계가 마무리되고 제작에 착수할 시점으로 제작 착수 직전의 진공용기 포트(Port)들로는 전량 투입이 불가능하다고 판명되어 급히 일부 진공용기 포트를 설계변경 하는 우여곡절을 겪기도 했다. 그 후로도 명확한 투입경로를 개발하기 위해 많은 시도들이 있었고, 현재 연구소 대회의실 입구에 전시되어 있는 1:10 크기의 알루미늄 KSTAR 모형도 원래는 전시용이 아니라 진공용기 내 제어코일의 투입 시뮬레이션을 위한 일환으로 탄생되게 된 것이다. 소형 크기의 시뮬레이션으로 가능성을 타진하고 실제 크기의 모형을 통해 투입경로가 개발된 후에야 코일 제작에 착수 할 수 있었다. 코일 제작도 쉽진 않았지만 기존 KSTAR 건설 과정에서 개발된 다양한 제작 기술들을 적용함으로써 제작 과정의 난관들을 극복할 수 있었다.

### ITER 플라즈마 제어에 활용될 모범적 사례

올해 예정된 KSTAR 운전에서는 진공용기 내 제어코일을 진단장치 calibration 및 수직제어 용도로 활용하게 된다. 이후 지속적인 전원장치의 추가 증설을 통해 다양한 형태의 플라즈마 불안정성 제어에 활용할 계획이다.

현재 ITER의 설계 종료를 위한 가장 큰 이슈 중의 하나가 KSTAR IVCC와 비슷한 기능과 모양을 가진 제어코일을 ITER 건설 기간에 설치할 수 있는 가에 대한 것인데, 이미 KSTAR의 IVCC 설계와 제작을 통해서 그 기술의 장단점과 한계를 파악하고 있는 NFRU의 연구진과 국내 기술진의 놀라운 성취에 대해서 많은 외국 관계자들이 벤치마킹하고자 하고 있다. NFRU