

차세대 초전도 핵융합 연구장치 개발·운영사업 소개 (KSTAR 초전도자석 제작 및 시험과제)

김기만, 오영국, 박갑래, 박주식
한국기초과학지원연구원 장치개발부

1. 차세대 초전도핵융합 연구장치의 개발 및 운영사업의 목적 및 사업계획

인류의 21세기 에너지 수요 급증, 화석연료 고갈에 따른 대체 에너지원으로서 핵융합 에너지는 현재 무한 청정에너지원으로 가장 유력하며, 상용 핵융합 발전을 위한 연구가 진행되고 있다. 1960년대부터 세계적으로 진행되어 오던 연구 위주의 핵융합 연구가 최근에는 산업화를 위한 마지막 단계에 다다랐다고 분석됨에 따라, 기존의 자유로운 기술교류에서, 각 국가별 기술선점을 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 따라서 핵융합 기술 기반이 부족했던 한국에서도 핵융합 장치 개발 기술을 확보하고 또한 핵심 분야를 이끌어가기 위해 차세대 초전도 핵융합 연구장치인 KSTAR (Korea Superconducting Tokamak Advanced Research) 장치 개발 사업을 1996년에 시작하여 2007년 완공을 목표로 현재 건설이 진행되고 있다.

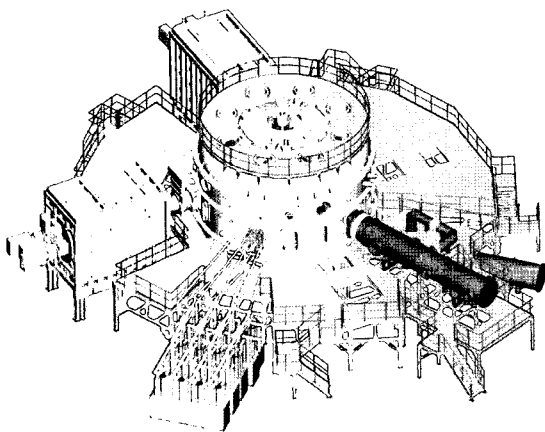


그림 1. KSTAR 장치의 구성도

Tokamak은, 핵융합 반응을 이용하는 수소폭탄의 물리적 이론을 만들고 수소폭탄을 개발한 후 반핵운동으로 추방당했다가 1975년 노벨평화상을 수상한 러시아의 안드레이 사하

로프 박사가 1958년 체렌코프 복사로 노벨 물리학상을 수상한 이고르 탐 박사와 함께 발명한 핵융합 반응 장치로서, 토로이달 전류에 의한 자장 용기라는 뜻을 가지고 있다. 센트럴 솔레노이드 자석에 의해 발생된 플라즈마가 토로이달 방향의 전류를 형성하고, 이 플라즈마 전류와 토로이달 자석에 의해 생성된 자장이 핵융합 반응의 원료가 되는 플라즈마를 안정되게 저장해주는 용기의 역할을 하게 된다. 또한 폴로이달 자석과 센트럴 솔레노이드 자석을 이용하여 핵융합장치의 운전에 필요한 플라즈마의 형태, 위치 등의 제어하므로, Tokamak 핵융합장치의 핵심 기술은 자석 시스템의 설계, 제작 및 운전 기술이라고 할 수 있다.

KSTAR 장치의 가장 중요한 특징은 자석 계통에 필요한 모든 자석이, 향후의 상용 핵융합 발전로를 고려하여 전력소모가 적고 장시간 운전이 가능한, 초전도자석으로 되어있으며, 운전시간도 기존의 10초 이하라는 운전의 한계를 뛰어넘어 수백초 이상의 안정된 운전이 가능하도록 설계된 차세대 핵융합 장치이다. 핵융합장치의 핵심 기술인 초전도자석 시스템은, 국내의 거대 초전도자석 개발 경험의 부족을 극복하여, 모든 제작 공정을 국내 기술로 해결하였으며, 설계와 시험 분야에 있어서도 선진연구기관과 어깨를 나란히 하고 있다.

KSTAR 장치 주요 사양은 다음과 같다 [1].

- . Field at plasma center : 3.5 T
- . Plasma current : 2 MA
- . Major radius : 1.8 m
- . Minor radius : 0.5 m
- . Confinement time : 20 ~ 300 sec

최근의 국제열핵융합실험로 ITER 장치 개발 사업에 있어서 기존의 미국·유럽·일

본·러시아에 이어 중국과 한국이 공동 참여국이 된 것 또한 한국의 KSTAR 장치개발의 경험 및 기술력이 국제적으로 인정받은 결과라고 평가된다.

2. 초전도자석 시스템 개발 현황

KSTAR 장치의 초전도자석 시스템은 16개의 토로이달 코일, 14개의 폴로이달 코일로 구성된다. 토로이달 초전도자석은 플라즈마 영역에 3.5 테슬라의 자장을 형성하기 위해 16개의 D자형 코일이 모두 직렬로 연결되어 직류 정상상태로 운전된다. 폴로이달 초전도자석은 14개의 원형 코일이 상하 대칭 구조로 설치되어 펄스로 운전된다[2]. 그림 2는 KSTAR 초전도자석의 구성을 보여준다.

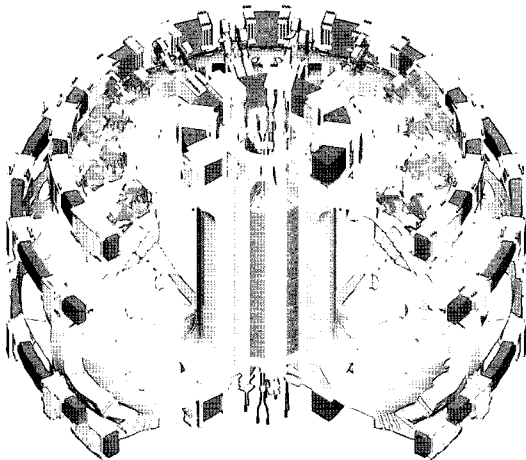


그림 2. KSTAR 초전도자석 시스템

초전도 자석이 대형화됨에 따라, 열전달과 구조적인 문제로 인하여, 초전도 선재를 직접 구조물에 권선하고 열처리 공정과 절연 및 진공함침공정 통하여 제작하는 일반적인 제작 방법을 이용할 수 없고, 초전도 케이블이 금속관 내부에 삽입된 형태의 관내연선도체 (CICC : Cable-In-Conduit Conductor)를 이용하여 제작된다. 16개의 토로이달 초전도자석과 8개의 센트럴 솔레노이드 자석, 2개의 PF5 폴로이달 자석, 총 26개의 자석은 Nb₃Sn 초전도 케이블이 Incoloy908 재료의 사각관 내부에 있는 형태의 CICC를 사용하고, PF6, PF7의 4개의 바깥 쪽 폴로이달 자석은 NbTi 케이블과 STS316LN의 사각관

재료를 사용한 CICC 를 사용하여 자석을 제작하는데, CICC 당 수십 kA의 전류를 흘릴 수 있게 된다. 현재 KSTAR 사업과정에서 제작된 CICC의 최대 단위길이는 1.7 km로서 세계 최장이다. 도체의 냉각은 가압된 초임계 헬륨을 CICC 내부로 흘려주는 강제순환 방식을 사용한다. 그림 3은 제작된 토로이달 코일용 CICC를 보여주고 있다

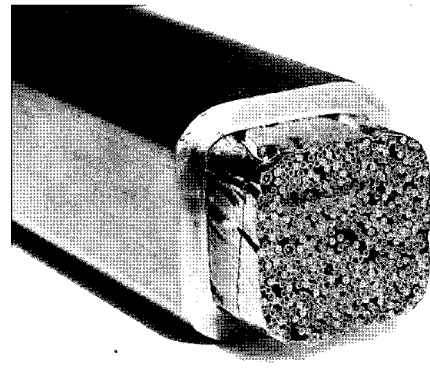


그림 3. 토로이달 자석용 CICC

대형 초전도자석의 제작 공정은 3차원 정밀 제어방식의 권선공정, 대형 진공열처리를 사용한 650 도 부근의 열처리공정, 15 kV의 극저온 고전압 절연을 절연 및 함침공정, 전자기력 지지를 위한 자석구조물과 함께 조립의 순서로 이뤄진다 [3]. 그림 4는 권선이 완료된 토로이달 자석과 권선 장비를 보여주고 있다. 현재 모든 공정을 국내에서 자체적으로 이루어지고 있으며, 현재 16개의 토로이달 자석의 제작이 완료되어 조립이 진행 중이다. 그림 5은 제작된 토로이달 초전도자석이 현장에 조립되는 사진이다.

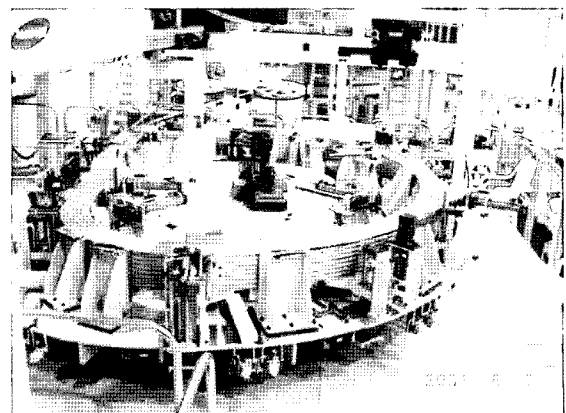


그림 4. 권선된 토로이달 자석과 권선 장비

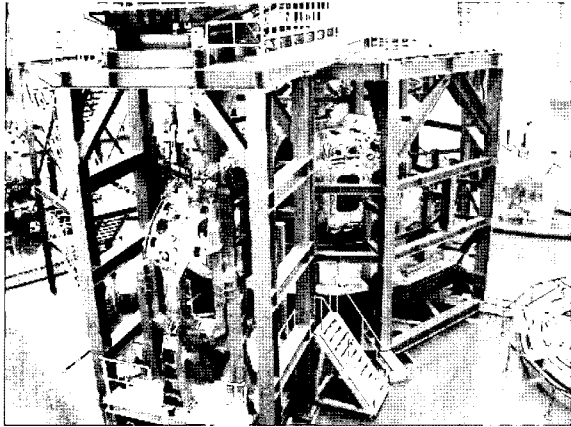


그림 5. 토로이달 초전도자석의 조립과정

원형의 폴로이달 자석 또한 유사한 제작 공정이 이뤄지는데, NbTi CICC를 사용하는 PF6, PF7 폴로이달 자석의 제작에서는 A15 반응 열처리공정이 필요하지 않으며, 또한 코일의 직경이 약 8 m에 해당되는 PF7 폴로이달 자석은 핵융합장치가 설치되는 현장에서 제작이 이루어졌다. 그림 6는 직경 8 m 규모의 PF7 폴로이달 자석의 진공함침 공정 과정을 보여주고 있다.

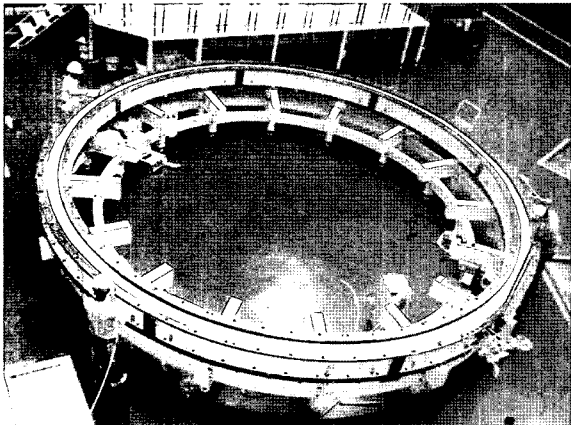


그림 6. PF7 폴로이달 자석의 진공함침 공정

3. 초전도자석 시험현황

초전도자석의 제작과 더불어 초전도자석의 성능분석 및 극저온에서의 운전조건 확립을 위해서 대형 초전도자석의 시험설비를 구축하였다. 이 시험설비는 직경 6 m, 높이 8 m의 대형 극저온 용기를 비롯하여, 1 kW급의 헬륨냉동기, 35 kA급의 전원장치 등으로 구성된 세계적인 규모의 시험설비이다. KSTAR 장치

의 초전도자석 성능검증을 위해서 본 제품과 동일한 규격의 토로이달 자석 (KSTAR TF Model Coil) 및 대형 펄스 초전도자석 (KSTAR CS Model Coil)의 극저온 냉각 및 대 전류 인가시험을 성공적으로 수행하였다 [4]. 그림 7과 그림 8은 KSTAR TF Model Coil과 KSTAR CS Model Coil 시험을 위한 작업 과정을 보여주고 있다. 본 거대 초전도자석 시험 설비는 초전도자석 자체뿐만 아니라 초전도자석과 관련된 주요 인터페이스의 극저온 시험과 전원장치의 시험에도 활용 중이다.

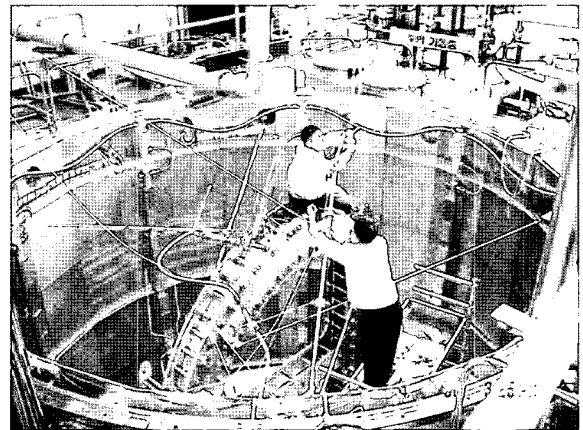


그림 7. KSTAR TF Model Coil 시험준비

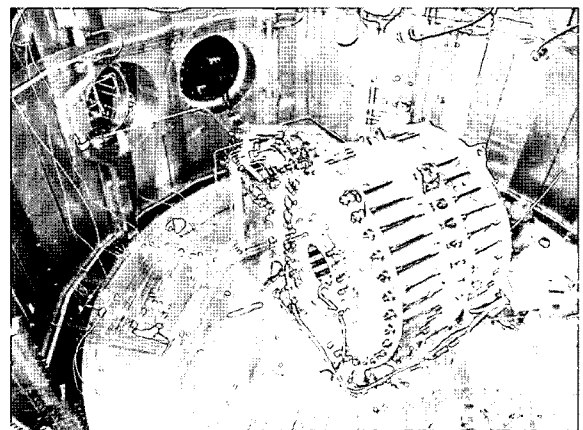


그림 8. KSTAR CS Model Coil 시험준비

4. 세계적인 추세와 앞으로의 전망

현재까지의 핵융합장치용 초전도자석 기술은 지속적인 연구와 기술 발전이 세계적으로 이루어지고 있는 첨단 기술 분야이다. 또한 수톤 규모의 대형 초전도자석의 제작 경험들

보유한 나라가 제한적이기에 현재 KSTAR 장치개발에 따른 초전도자석 제작 및 시험기술은 세계적으로 상당한 경쟁력을 가지고 있다. 6개국이 공동으로 진행되는 ITER 장치의 건설에 있어서도 초전도선재 및 자석 분야에 우리의 경험이 많은 기여가 예상된다. 이러한 대형 초전도자석 계통의 개발기술은 핵융합장치 외에도 연구장비, 전력기기 및 의료기기 등으로의 많은 기술파급효과가 기대된다.

참고문헌

- [1] G. S. LEE, et al., "The KSTAR Project: Advanced Steady-state Superconducting Tokamak Experiment", *Nuclear Fusion* vol. 40, p575, 2000.
- [2] J. S. Bak, et al., "Key features and engineering progress of the KSTAR tokamak", *IEEE Trans. Plasma Science*, Vol. 32, No 2, (2004) 757.
- [3] K. Kim, et al., "Status of the KSTAR superconducting magnet system development", *Nuclear Fusion* Vol. 45 (2005) 1-7.
- [4] Y. K. Oh, et al., "Cool-down and current test results of the KSTAR prototype TF coil", *Adv.in Cryogenic Engineering*, Vol. 49 (2004) 241.

저자이력



김기만(金起萬)

1960년 11월 18일생, 1983년 서울대 원자핵공학과 졸업, 1989년 일리노이주립대학 원자핵공학과 졸업 (공학박사), 현재 한국기초과학지원연구원 책임연구원



오영국(吳永國)

1966년 9월 20일생, 1989년 서울대 원자핵공학과 졸업, 1999년 서울대학교 대학원 원자핵공학과 졸업 (공학박사), 현재 한국기초과학지원연구원 책임연구원/자석시험팀장



박갑래(朴甲來)

1964년 3월 19일생, 2004년 한밭대학교 전기공학과 졸업 (공학석사), 현재 한국기초과학지원연구원 책임기술원/자석제작팀장



박주식(朴柱植)

1956년 6월 28일생, 1979년 서울대 원자핵공학과 졸업, 1989년 서울대학교 대학원 원자핵공학과 졸업 (공학박사), 현재 한국기초과학지원연구원 책임연구원/장치개발부장