

③ KSTAR 건설의 의의

세계 핵융합연구 역사 새롭게 쓴다

글 | 오영국 _ 국가핵융합연구소 책임연구원 ykoh@nfri.re.kr

21세기 현안으로 다가오는 에너지 위기와 환경문제에 대한 대안으로서, 선진국을 주축으로 원료공급의 무한성, 운전의 친환경성, 저렴한 발전단가 및 국가경쟁력 확보면에서 가장 유망한 핵융합에너지의 실용화를 위한 많은 노력이 진행되어 왔으며, 또한 많은 기술의 성장이 있었다. 특히 세계 핵융합계가 그 동안의 연구결과를 토대로 미래 핵융합 도약을 위하여 국제핵융합실험로(ITER) 건설을 추진시켰다는 점은 우리에게 시사하는 바가 크다.

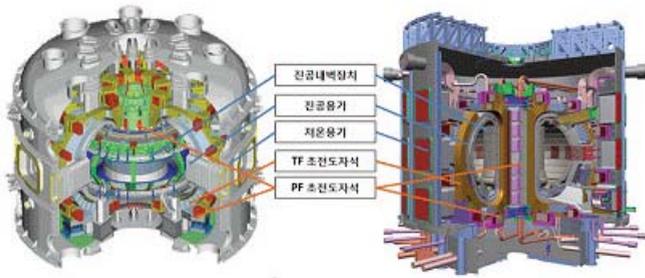
세계 최고수준의 핵융합 연구장치 'KSTAR' 건설

ITER에 참여한 7개국 가운데서 핵융합 역사가 가장 짧은 우리나라는 40년 이상의 선진핵융합 핵심기술을 단기간에 따라잡고 미래 핵융합 연구를 선도하기 위한 전략으로서 1995년 말 차세대형 초전도 핵융합연구장치인 KSTAR 장치 건설에 착수하였다. 지난 2007년 9월에는 11년 8개월에 걸친 KSTAR 장치 건설의 완공을 통해 세계 최고 수준의 초전도 핵융합장치이며 ITER 장치와 기술적으로 가장 근접한 기술특성을 가진 장치로서 KSTAR 장치 건설을 국내 기술로 이루었음을 선언하였다. 그로부터 10개월 후인 2008년 7월에는 장치의 첫 가동으로서 중합시운전과 최초 플라즈마의 성공적인 달성을 이룸으로써, 건설된 장치의 종합적인 성능확인과 더불어 KSTAR 장치 운영을 통해 세계 핵융합 연구를 선도해 갈 수 있는 잠재력을 가진 장치임을 확인시켜 주었다.

KSTAR 장치는 핵융합로 상용화에 있어 확보되어야 할 기술인 고성능 플라즈마 운전기술과 장시간 안정적 제어기술개발을 선도하기 위해서 설계되었다. KSTAR 장치는 현재까지 건설된 장치 중에서 ITER 장치와 기술면에서 가장 유사한 특징을 지니고 있다. 특히 고자장에서 장시간 운전을 위해 필수적인 초전도자석을 KSTAR의 경우 ITER에 사용될 재료와 동일한 고성능의 Nb₃Sn 초전도체를 적용하여 직접 국내기술로 제작하여 건설함으로써 일차적으로는 첨단 극한분야에서 국내 기술력의 향상을 가져왔을 뿐만 아니라, 향후 KSTAR 장치의 운전결과는 바로 ITER 장치 운전의 기준이 되는 선형연구장치로서의 중요성을 가지게 되었다.

KSTAR 건설은 범국가적인 사업으로 진행되어 왔으며 국내 산학연이 공동 참여하여 건설을 수행하였다. 장치 건설은 크게 세 단계로 수행되었는데, 1997년까지 진행된 1단계에서는 장치의 개념 설계 및 제작을 위한 기반기술 R&D를 수행하였으며, 2001년까지의 2단계에서는 초전도자석 제작기술의 자체 개발과 토카막 구조물 등의 공학설계를 성공적으로 수행하였다. 마지막으로 2007년까지의 3단계에서는 장치의 본격적인 제작 및 조립설치가 진행되어 초기 가동에 필요한 장치의 건설을 달성하였다.

KSTAR 장치 건설에 있어서는 기존의 핵융합장치와 다른 많은 기술적인 난제해결과 기술도약을 이루어 왔다. 먼저 플라즈마가 발생하는 공간인 진공용기의 경우 약 3m 높이의 도넛 형태의 진공용기 제작에 있어서는 기존의 2차원적인 벤딩방식을 뛰어넘어 전



KSTAR와 ITER 장치의 개념도 비교, 장치의 크기면에서는 30배 정도의 차이가 있지만 핵심기술에 있어서는 많은 유사점을 가지고 있다.

KSTAR와 ITER 장치의 주요 파라미터 비교

구분	KSTAR	ITER
주반경	1.8 m	6.2 m
부반경	0.5 m	2.0 m
플라즈마 전류	2.0 MA	15 MA
플라즈마 형상*	SN, DN ($\kappa=2.0$)	SN ($\kappa=1.7$)
플라즈마 지속시간	300 sec	400 sec
플라즈마 연료	H, D-D	H, D-T
자기장 강도	3.5 Tesla	5.3 Tesla
초전도선재	Nb ₃ Sn, NbTi	Nb ₃ Sn, NbTi
주장치 외형크기	8.6m(H) 8.8m(D)	24m(H) 28m(D)
저온헬륨설비용량	9 kW	72 kW
가열장치 증설용량	31 MW	110 MW

체 형상을 3차원 형상으로의 정밀제작을 달성하였다. 현재 진공용기 내부에는 고온의 플라즈마로부터 진공용기 내벽을 보호하기 위해 벨트형 리미터를 부착하였으며, 둘레에는 총 72개의 다양한 형태의 포트가 설치되어 플라즈마 가열 및 진단이 이루어진다.

다음으로 KSTAR에 적용된 세계적인 기술은 바로 초전도자석 시스템이다. KSTAR 장치에는 총 30개의 초전도자석이 설치되었다. 이 중 16개는 D자형으로 제작되어 진공용기 둘레에 설치되었으며 이는 플라즈마를 진공용기 내에 붙잡아 주는 자석으로서 토로이달 자장(TF) 자석이다. 이 자석은 35 kA의 대전류로 하루 8시간 연속 운전하게 되며, 운전 시에는 자기장이 최대 8테슬라가 발생되어 각각의 자석에는 약 1천500톤의 힘이 걸리게 된다. 이와 더불어 14개의 원형 폴로이달 자장(PF) 초전도자석은 크기가 서로 다르며, 펄스형의 전류로 동시에 작동함으로써 플라즈마를 발생시키고 형상과 위치를 조정해 주는 역할을 하게 된다.

지금까지의 세계적인 초전도 핵융합장치는 앞의 초전도자석 중 TF 자석만을 초전도 자석으로 사용해 왔으며, 초전도 재료 또한 제작이 수월한 NbTi 재료를 사용해 왔다. 이에 비해 KSTAR 장치에서는 모든 자석을 초전도 자석으로 제작하였을 뿐 아니라, 고자장에서도 열적으로 성능이 우수한 재료인 Nb₃Sn 합금형 초전도체를 사용하였다. 특히 이 초전도체는 제작 과정에서 660도의 고온에서 1개월 정도의 열처리를 해야 하는 등 제작공정이 상대적으로 복잡하지만 오랜 연구개발 결과 모든 초전도자석의 제작을 국내 기술로 성공시켰다.

KSTAR 장치 운전 시 정밀한 플라즈마 성능과 더불어 각각의 구조물이 강한 전자기력에 대해 안정적으로 운전되기 위해서는 조립의 정밀도는 매우 중요하다. 따라서 KSTAR 장치의 조립에는 특수 정밀조립장치가 개발되었으며, 이 방식을 사용하여 10m 규모의 장치, 각각 수십톤의 중량물 조립을 1mm 이내의 오차에 완성시킬 수 있었다.

KSTAR는 진공용기와 초전도자석 등으로 구성된 주장치 외에도 이 장치를 운전하기 위한 많은 부대장치가 구성되어 동시 운전이 요구된다. 대표적인 부대장치로는 진공배기장치 및 연료주입장치, 초전도자석을 영하 268도 이하로 냉각시키기 위한 극저온헬륨설비 및 헬륨분배설비, 초전도 자석에 대전류를 공급하기 위한 대전류 전원장치 및 초전도 전류전송장치, 각종 제어계를 통합하고 신호 분석처리를 위한 통합제어장치, 플라즈마를 고온으로 가열하기 위한 가열장치(RF 가열장치와 중성입사 가열장치), 발생된 플라즈마의 온도, 밀도 등을 측정하기 위한 진단장치, 실험 환경을 안정되게 유지하기 위한 냉각설비 및 공조설비 등이 있다. 하지만 연구 목적에 따라 이 부대장치 등은 단계적으로 개발 설치되어 가면서 연구가 진행되게 된다. 건설 완료 시점에서는 최초 플라즈마와 초기 운전에 요구되는 부대장치 위주 설치 완료를 2007년 9월에 선언함으로써 11년 8개월의 건설사업을 국내 기술력으로 성공적으로 돌파하였다.

종합 시운전 및 최초 플라즈마 발생 성공

KSTAR 장치 건설 완공 이후 건설된 장치를 실제 운전환경과 동일한 환경으로 가동시키는 종합시운전을 수행하였다. 종합시운전의 목적은 건설된 장치가 설계대로 제작되어 운전되는지에 대한 종합적인 검증역할과 더불어 최초 플라즈마를 발생시킴으로써 핵융

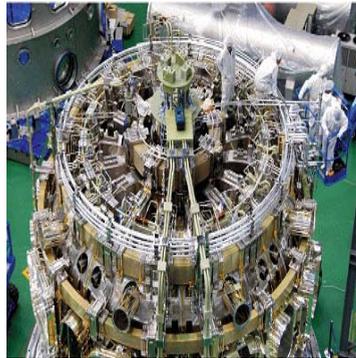


KSTAR 장치의 조립을 완료한 후 극저온 냉각 시운전을 시작하기 직전의 결의에 찬 함성(2008년 4월 2일).

합연구의 수행 가능성에 대한 잠재력을 평가하는 데 있다.

종합시운전은 초전도 핵융합장치의 운전특성에 맞춰 4단계로 구분하여 진행되었다. 첫 번째 단계는 진공배기 시운전으로 건설과 더불어 각종 용기의 외부와 내부 배관으로부터의 누설을 확인하고 운전 전에 요구되는 진공도를 달성하는 단계이다. KSTAR 장치는 초전도 자석을 사용함에 따라 구리자석을 사용한 기존 핵융합 장치와 다르게 두 개의 진공 환경이 존재한다. 그 중 하나는 앞서 언급한 플라즈마 발생이 일어나는 체적 100m³의 진공용기이며, 다른 하나는 30개의 초전도 자석이 극저온상태로 운전이 되도록 단열을 위한 추가적인 진공환경으로서 저온용기를 두고 있다. 저온용기 내부에는 초전도 자석 외에도 수많은 헬륨배관, 신호선, 절연체 등이 복잡하게 설치되어 있다. 반복적인 검사 및 수리 결과 체적 진공용기는 3×10⁻⁸mbar, 저온용기는 2.7×10⁻⁶mbar까지의 고진공을 누설 없이 달성함으로써 다음 단계인 극저온 냉각 단계로의 진입이 가능하게 되었다.

두 번째 단계는 초전도자석 계통의 극저온 냉각시운전으로서 400여 톤의 초전도자석과 구조물을 극저온으로 냉각시키는 단계이다. 이 과정에서는 많은 구조물의 열수축 등에 의한 변형 등이 발생하고, 추가 누설이 발생하여 운전을 제한 받는 경우가 해외 초전도 핵융합 장치에서 발생하기도 했다. 장치의 냉각 착수에 앞서 장치 전반의 추가 정밀 검사 후 9kW급의 대형 극저온헬륨설비를 가동함으로써 2008년 4월 초 극저온 냉각을 착수하였다. 냉각 도중에 발생하는 구조적 뒤틀림을 최소화하기 위해 장치 내부의 최대 온도차를 50도 이하로 유지시키면서 냉각을 진행하여 1개월 만에 초전도 자석을 영하 268도 이하로 냉각을 달성하였으며, 모든 자석이 초전도체가 되었음을 확인하였다. 무엇보다도 추가 누설 없이 단번에



KSTAR 장치의 심장인 초전도자석의 마지막 조립점검 단계.

극저온 냉각을 성공시킴으로써 진공 및 극저온 기술에 있어서 국내의 품질관리 수준을 다시 한 번 확인하게 되었다.

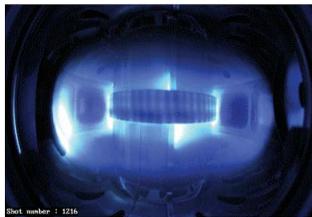
세 번째 단계는 총 30개의 초전도자석 각각에 대전류를 인가함에 따른 운전 특성을 검사하는 단계로서 운전 시에는 KSTAR 장치실에 접근을 제한하고 모든

운전은 주제어실에서 이루어졌다. 운전 결과 TF 자석의 경우는 15kA의 대전류로 매일 8시간씩 연속 이뤄졌으며 운전기간중 온도 상승은 0.1도 이하로서 매우 안정적인 초전도 상태가 유지되었다. 또한 7쌍으로 구성된 PF 초전도자석 또한 7대의 전원장치를 사용하여 펄스 형태의 고속운전제어를 수행한 결과 정상적인 제어가 이루어졌다. 이로써 세계 최초로 Nb₃Sn 초전도 자석을 핵융합장치에 적용하여 운전한 결과 정상적으로 가동함을 확인함으로써 초전도 자석 기술에서 국내 기술력이 세계를 선도하게 되었음을 확인하게 되었다. 향후 KSTAR의 지속적인 운전에 따른 초전도자석 계통의 다양한 운전특성을 분석함으로써 ITER뿐만 아니라 미래 초전도핵융합 장치 상용화에 요구되는 기술개발의 중요한 기준자료를 확보해 갈 필요가 있다.

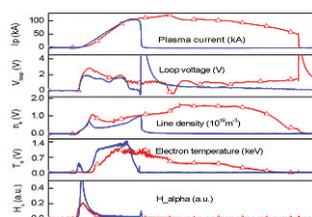
종합시운전의 마지막 단계는 플라즈마 발생 단계로서 형광등 램프를 켜는 과정과 같이 진공용기 내에 토로이달 방향으로 일주전압을 발생시켜 플라즈마 방전을 시키는 단계이다. 최초 플라즈마 목표치는 정격전류인 2MA의 5% 규모인 100kA의 플라즈마 전류를 100ms 동안 유지시키는 범위로 설정하였다. 이를 위해서 초전도 자석뿐만 아니라, 가열장치, 연료주입장치, 진단장치, 제어장치 등의 시간 동기화 운전이 이루어졌다. 2008년 6월 13일에는 목표 플라즈마 전류보다 높은 107kA의 전류를 달성하는데 성공하였다. 이후 반복적인 운전 연구를 통해 플라즈마 전류를 133kA까지 증가시켰으며, 펄스의 유지시간 또한 당초 목표인 100ms를 능가하는 700ms 이상의 결과를 냈다. 오른쪽 페이지 상단 그림은 KSTAR 장치내에서 발생한 플라즈마를 고속카메라로 촬영한 영상과 최초로 107kA를 달성한 794번 실험결과와 피드백 제어에 의해 전류를 720ms 이상으로 안정적으로 제어가 이뤄진 1216번 플라즈마 실험



KSTAR 장치의 운전과 제어가 이뤄지는 주제어실 내부.



KSTAR 장치 장치에서의 성공적인 수소 플라즈마의 발생 형상.



KSTAR장치에서 발생한 주요 플라즈마 데이터 비교

세계의 핵융합연구의 판도가 많이 바뀌어 가고 있다. 과거에는 선진 4강의 구도, 즉 미국, 러시아, 유럽, 일본이 주도하여 많은 핵융합장치를 건설하여 연구를 진행해 왔지만, 대부분의 장치가 현재는 노후 되었다. 또한 기존의 구리로 제작된 핵

결과를 비교한 결과이다.

그 밖에도 전자가열장치인 ECH를 설치·가동해 플라즈마 초기 발생에 요구되는 일주 전압을 기존의 다른 장치보다 훨씬 낮은 값에서도 가능함을 입증함으로써 효율적인 플라즈마 발생기술의 새로운 장을 열게 되었으며, 이는 ITER의 운전준비에도 영향을 주게 될 것으로 생각된다. KSTAR는 초전도 핵융합장치로서 냉각 착수로부터 최초플라즈마 발생까지 2개월 반 만에 달성하였을 뿐 아니라, 모든 과정에서 중단 없이 단번에 이루어진 세계 최초의 결과를 나타낸 것이 었다.

비약적 기술도약 통해 과학적 긍지·자부심 높여

KSTAR 장치의 건설과 최초 플라즈마의 성공적인 달성은 한국의 핵융합연구 뿐만 아니라 사회 전반에 있어서 많은 의의가 있다고 여긴다. 첫째는 첨단 기술과 종합 엔지니어링에 있어서의 국내 기술의 전환점으로 평가될 수 있다. 핵융합 장치 특히 초전도 핵융합 장치의 건설에는 고진공, 극저온, 초전도, 정밀 제작 및 조립, 대전류, 초고속제어 등 많은 첨단기술이 균형 있게 뒷받침되어야만 가능했다. KSTAR 사업의 착수 시점의 한국의 상황은 과학계뿐만 아니라 산업계에 있어서도 이 분야와 관련하여 보유하고 있는 기술수준은 열악했다. 하지만 서울대의 SNUT-79, 한국과학기술원의 KAIST-T, 원자력연구원의 KT-1 등을 통한 핵융합계통 인력배양과 기초과학지원연구소의 한빛장치와 포항공대의 포항가속기의 건설 운영을 통해 확보된 대형연구장치로 건설 경험은 KSTAR 장치건설의 기반이 되었다. 그리고 12년 동안 국내 산학연의 공동연구와 중단 없는 노력의 결과 세계적으로 유례없는 초전도 핵융합연구장치의 성공적인 건설과 첫 가동의 성공을 가져왔다. KSTAR의 성공은 많은 국민들에게 우주, 생명, IT 등 첨단 과학기술부문 뿐만 아니라 핵융합에 너지 개발에 있어서도 한국이 국제사회에서 당당히 앞서 있다는 과학적 긍지와 자부심을 제공하는 계기가 되었다.

융합장치의 한계를 극복하기 위해 ITER를 비롯한 최근 핵융합장치는 초전도 핵융합장치로 업그레이드되고 있다. 이 과정에서 핵융합 분야의 후발 주자였던 중국과 한국 등은 전체를 초전도 자석으로 지어진 장치의 건설을 시도하였다. 결과적으로 현재 중국의 EAST 장치와 우리나라의 KSTAR가 건설을 완료하여 운영에 들어갔고, 뒤늦게 일본 또한 유럽과 공동으로 JT60SA 라는 새로운 장치의 건설을 착수하였다. ITER가 건설되기 전까지는 세계 핵융합계는 KSTAR와 EAST 장치에서 얼마나 많은 운전 결과를 달성해 낼 것인가에 주목하고 있고 우수한 결과를 내놓는 장치에 더 많은 공동연구가 집중될 것이 자명하다. 따라서 KSTAR 장치는 더 이상 국내장치로서만이 아니라 세계 속에서 국제공동연구 장치로 거듭나야만 세계를 뒤흔들 수 있는 큰 역할을 할 수 있을 것이다.

KSTAR장치의 성공적인 건설과 최초 플라즈마 달성은 결음마 단계의 핵융합 후발주자에서 선진각국과 어깨를 나란히 할 수 있을 정도의 비약적인 기술도약을 이룰 수 있었으며, 핵융합 역사에 하나의 획을 긋는 중요한 결과임에는 분명하다. 그러나 KSTAR 건설 초기와 마찬가지로 핵융합연구장치의 운영을 통한 세계 수준의 연구결과를 내기에는 아직 국내기반이 매우 취약하다는 사실은 인정할 수밖에 없는 것이 현실이다. 취약한 국내 연구역량, 운전기술 수준 및 지속적인 부대장치 개발을 위한 재원부족 등은 기술 선진국이 되기 위해서 우리가 극복해야 할 필수과제이다.

세계 일류장치로 계속 운전되지 못하면 모든 기득권을 경쟁국가에 넘겨주게 된다. 지금이야 말로 장치의 건설뿐만 아니라 높은 성능의 플라즈마 핵융합 실험을 위해서 더 많은 우수한 인재들이 참여해야 하고, 보다 더 우수한 실험장치 개발을 위해 다시금 전력 질주를 해야 할 때인 것이다. 



글쓴이는 서울대학교 원자핵공학과 졸업 후 동대학원에서 석사·박사학위를 받았으며, 한국기초과학연구원 책임연구원을 지냈다.