

세계 핵융합연구동향과 KSTAR

설재춘, 김웅채
국가핵융합연구소 KSTAR 운영사업단

1. 핵융합 반응

핵융합은 물리학적으로 두 개의 가벼운 원자핵이 하나의 무거운 원자핵으로 합해지는데 현상을 말한다. 이러한 핵융합 과정에서 반응 결과물인 무거운 원자핵의 질량이 반응전의 두 개의 가벼운 원자핵의 질량의 합보다 작아지는 이른바 질량결손이 생긴다. 이때 생기는 질량결손은 1905년에 아인슈타인에 의해 발견된 공식에 따라 질량결손에 빛의 속도의 제곱을 곱한 양만큼의 에너지로 변환된다.

$$\Delta E = (\Delta m)c^2$$

핵융합반응이 일어나려면 두 개의 원자핵이 양이온끼리는 밀어내려는 비교적 장거리에서 주도적인 전기적 반발력을 극복하고 가까운 거리에서 주도적인 원자핵간의 인력이 하나의 원자핵으로 합하게 할 수 있도록 충분히 가까이 근접할 수 있어야 한다. 이 때문에 핵융합 반응은 정상상태에서는 자발적으로 일어나지 않는다. 두 개의 원자핵이 임의의 충돌로 핵융합 반응을 일으키려면 전기적인 반발력을 극복할 만한 충분한 에너지를 가지고 있어야 한다. 대략 10 keV에서 100 keV의 에너지를 필요로 한다. 이것을 온도로 환산하면 태양 내부의 온도와 맞먹는 절대온도 10^8 K에서 10^9 K에 해당된다. 실제로 태양을 비롯한 별들의 내부에서는 핵융합반응이 일어나고 있으며 이것이 별들의 에너지원이 되고 있다.

2. 핵융합발전 연구

1940년대에 이르러 핵융합반응을 통해 에너지를 만들어내는 별들과 같이 지구상에도 핵융합반응을 이용해 에너지를 생산하려고 하는 사람들의 도전이 시작되었다. Fermi는 1942년 콜롬비아교수모임에서 점심식사를 하며 E. Teller에게 중수소를 이용한 발전을 제안했지

만 Teller와 Konopinsky 등이 핵융합반응이 불가능하리라는 계산을 내놓으며 좌절되었다. (이들은 자신들의 계산이 옳지 않았다는 것을 얼마 후에 알게 되었다.) 앞에서 말한 것처럼 핵융합반응을 일으키려면 전기력 반발력을 극복하기 위해 원자핵들이 높은 에너지를 가져야 하는데 높은 에너지를 가진 원자핵들은 빠른 운동속도를 가지고 있기 때문에 쉽게 핵융합 반응로를 벗어날 수도 있다. 태양과 같은 별들의 경우에는 내부에 있는 이온화된 원자핵들(플라즈마)을 주위를 둘러싸고 있는 엄청난 무게로 가두어 두고 있는 것이다. 사람들은 자연스럽게 원자핵들의 온도를 높이는 것과 함께 높아진 온도로 인해 빠른 속도로 이동하는 원자핵들을 핵융합 반응로 안에 가두어 두는 방법을 찾기 시작했다. 중력을 대신해서 연료들을 가둘 수 있는 것으로 제안된 것이 자기장이었다. 적절한 형태의 자기장을 형성하고 전기적인 성질을 갖는 플라즈마를 형성된 자기장 안에 가두어 두는 것이다. 지금까지 나온 여러 가둠 방식 가운데 가장 많이 연구되었고 주목받는 방식은 토카막이다. 토카막은 두 개의 주요 자기장을 이용해 도넛 모양의 플라즈마를 가둔다. 첫 번째 자기장은 토로이드 방향의 자기장인데 도넛모양의 플라즈마를 감고 있는 코일의 전류에 의해 발생된다. 토로이드 방향의 자기장은 주로 플라즈마를 안정시키는 역할을 한다. 두 번째 자기장은 폴로이드 방향의 것으로서 자속변화를 통해 플라즈마 내부에 토로이드 방향으로 유도된 전류에 의해 생겨난다. 토카막이 세상에 처음 소개되었을 당시 기존에 연구가 이루어지고 있던 어떤 종류의 장치들보다 나은 성능을 보여주었다. 1960년대 당시에는 토카막에서 나온 실험결과들이 있었지만 플라즈마의 온도를 직접 측정하지 못했다는 것이 의심스러운 것이었는데 영국의 과학자들이 레이저를 이용한 플라즈마 온도 측정 장치를 직접 모스크바로 가져가 T-3 토카막 장치의 측정하며

해소되었다. 천 만도에 이르는 전자 온도가 확인된 T-3에서의 측정결과가 논문으로 발표되자 사람들은 서둘러 토카막으로 핵융합연구 방향을 전환하기 시작했다. 이후 토카막은 현재까지 핵융합연구를 주도하는 장치가 되었다.

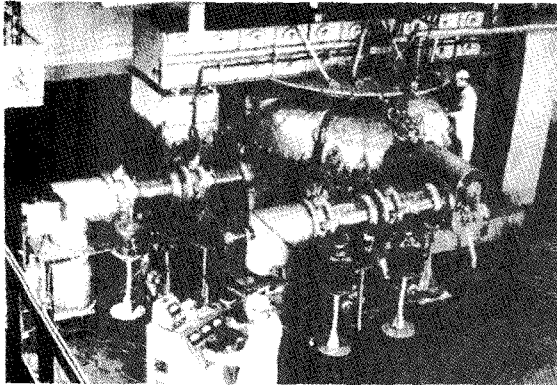


그림 1. 세계 최초로 천만도 전자 온도를 달성한 구소련의 T-3 토카막 장치.

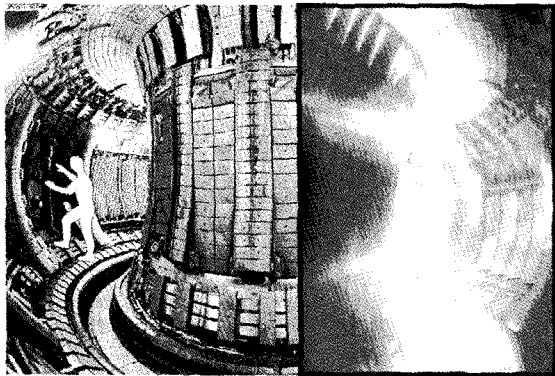


그림 2. 현재 가동 중인 토카막 중 세계에서 가장 큰 장치인 유럽연합의 JET 장치의 내부.

T-3의 성공에 고무되어 1970년대에는 보다 본격적인 핵융합 연구가 곳곳에서 시작되었다. 핵융합을 위한 조건을 충족시키기 위해서는 플라즈마를 충분한 온도로 가열시키고 동시에 가둠 시간을 연장해야만 했다. 플라즈마의 온도와 에너지 가둠 시간은 플라즈마 내부의 토로이드 방향전류가 증가할수록 함께 증가하는데 대략 3 MA정도면 가열에 필요한 에너지와 출력으로 나오는 에너지가 같아지게 된다. 유럽국가들은 비용을 분담하기로 하기 공동연구를 위해 새로운 토카막을 건설하기로 했다. 1973년부터 설계에 들어간 이 토카막은

영국과 독일의 유치경쟁 끝에 1977년에 영국 결핵에 JET (Joint European Torus) 라는 이름으로 건설하기로 합의됐다. JET의 초기 목표는 3 MA의 전류를 얻는 것을 목표로했는데 설계단계에서 4.8 MA로 완공단계에서 7MA로 상향되었다. JET는 1983년에 가동되기 시작했는데 수 MA의 전류를 안정적으로 생성하고 가동시간도 10-20초 정도 유지되었다.

미국도 비슷한 시기에 TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor)이라는 토카막을 2.5 MA의 전류를 내도록 설계해 프린스턴에 건설했다. 1982년에 첫 플라즈마를 생성한 TFTR은 원형 플라즈마에 수 MA를 생성하는 것에 성공했다. 일본도 거대한 토카막을 건설하는 것에 동참했다. 일본은 1985년에 2.7 MA에서 작동하는 JT-60을 건설했고 몇년 후, JT-60U라는 수정된 토카막을 내놓았다.

한편, 가열기술이 발전하면서 중성빔과 전자파 등을 이용해 플라즈마 온도를 수억도까지 올리는 것에 성공을 하게 되었다. TFTR에서는 4억도까지 온도를 올리는 것에 성공했다. 하지만 온도를 올리면서 가동시간은 오히려 감소하기 때문에 핵융합에 필요한 온도와 가동시간을 동시에 확보하는 것은 어려워 보였다. 이런 가운데 독일의 ASDEX라는 토카막에서 에너지 가둠이 매우 좋아지는 운전모드를 발견하게 되었다. H-모드라고 불리는 이 운전모드는 중성빔 가열과 다이버터를 결합하여 얻어졌다. 일종의 불순물 처리장치인 다이버터는 H-모드 발견이후 토카막 설계 시 더욱 적극적으로 채택되기 시작했다.

핵융합반응가운데 가장 가능성이 높은 것은 중수소와 삼중수소와의 반응이다. 1991년 11월, JET에서 세계 최초로 중수소와 삼중수소를 사용하여 핵융합을 통해 최대출력 1 MW까지 얻는 것에 성공했다. 1997년에는 새로운 다이버터를 이용해 출력 16 MW을 수 초 동안 유지하는데 성공했다. 에너지 입력이 25 MW였던 것을 감안하면 손익분기점에 상당히 근접했다는 것을 알 수 있다. 미국의 TFTR도 1993년에 삼중수소 혼합물을 도입해 1997년에는 핵융합 출력을 10 MW까지 얻어냈다.

이제까지 핵융합이 과학적으로 가능하다는 것을 보이는 것에 성공했다고 이제는 그것이 기술적으로도 가능하다는 것을 입증하는 것이 필요한 단계이다. ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) 는 핵

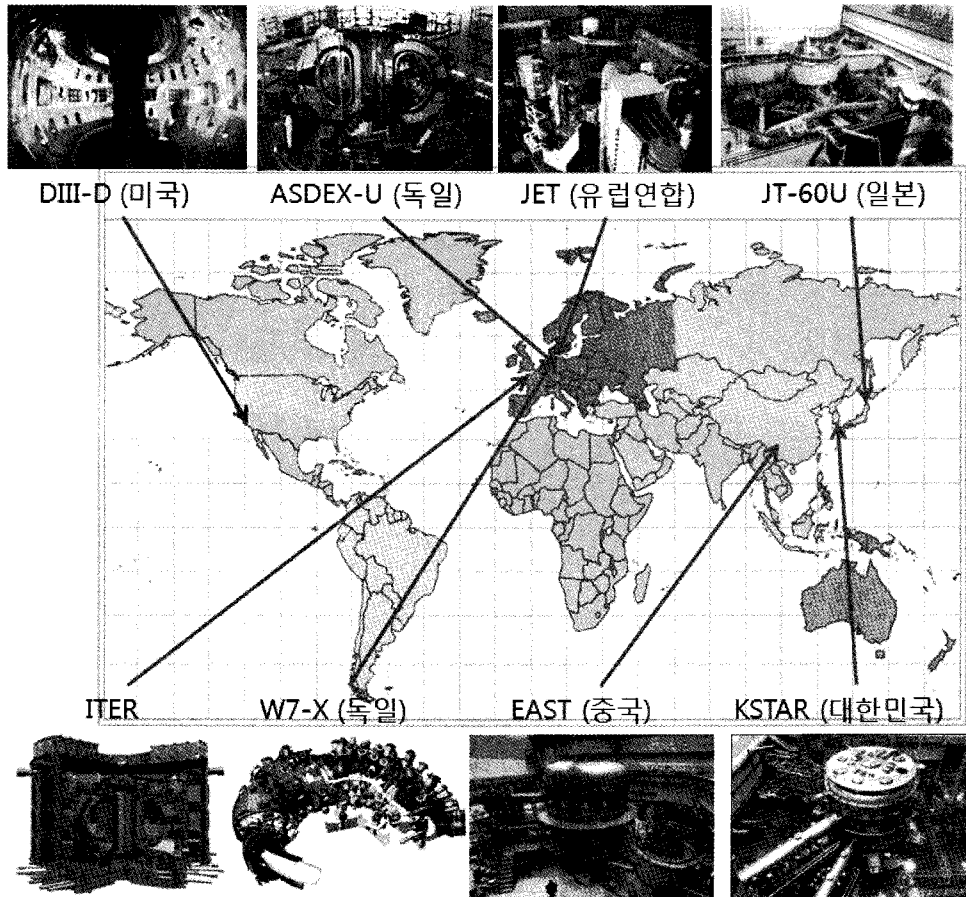


그림 3. 세계의 주요 핵융합연구장치.

융합발전의 과학적, 기술적 구현가능성을 보이기 위해 건설 중인 국제공동연구장치이다. 이 프로젝트에는 한국을 비롯해서 미국, 중국, 유럽연합, 러시아, 일본, 중국, 인도가 참여하고 있고 프랑스의 카다라시에 현재 건설 중이다. 지금까지의 실험연구결과를 토대로 하면 핵융합연소를 위해서는 대략 20 MA의 전류와 6초 정도의 가둠시간이 필요하다는 계산이 나온다. 이런 요구 조건을 충족하려면 JET나 JT-60U보다 세 배 정도 큰 토카막을 건설해야만 한다. ITER는 15MA의 플라즈마 전류를 발생시킬 수 있도록 설계되었고 40MW미만의 외부입력으로 410MW의 핵융합출력을 낼 것으로 기대하고 있다.

3. KSTAR

ITER 참여 국가들의 면면을 보면 후발 참여국인 대한민국, 중국, 인도를 제외한 나머지 국가들은 핵융합 연구의 초창기부터 개발에

앞서온 개발 선도 국가인 것을 볼 수 있다. 이러한 핵융합로 개발 선도국가들 사이에 대한민국이 동등한 자격으로 ITER 프로젝트에 참여하게 된 배경에는 1990년대 들어 이룩한 경제 성장 및 이에 따른 국가 차원에서의 지속적인 연구개발에 대한 투자 등에 의해 핵융합 연구 분야에서 우리나라가 이룩하고 있는 괄목할 만한 연구 개발의 성과가 있었기 때문이며 그 정점에는 KSTAR 프로젝트가 있다. KSTAR 장치는 Korea Superconducting Tokamak Advanced research의 약자로서 “한국의 차세대 초전도 토카막 연구장치”라는 의미를 가지고 있다.

ITER 참여 7개국 가운데 핵융합 연구의 역사가 가장 짧은 우리나라는 40년 이상 뒤진 핵융합 선진 기술을 따라잡고 미래의 핵융합 기술을 선도하기 위한 국가적 지원에 따라 1995년 말 초전도 자석을 이용한 핵융합 연구장치인 KSTAR 장치의 건설에 착수 하였다. 지난 2007년 9월에는 장치의 건설이 완료되어

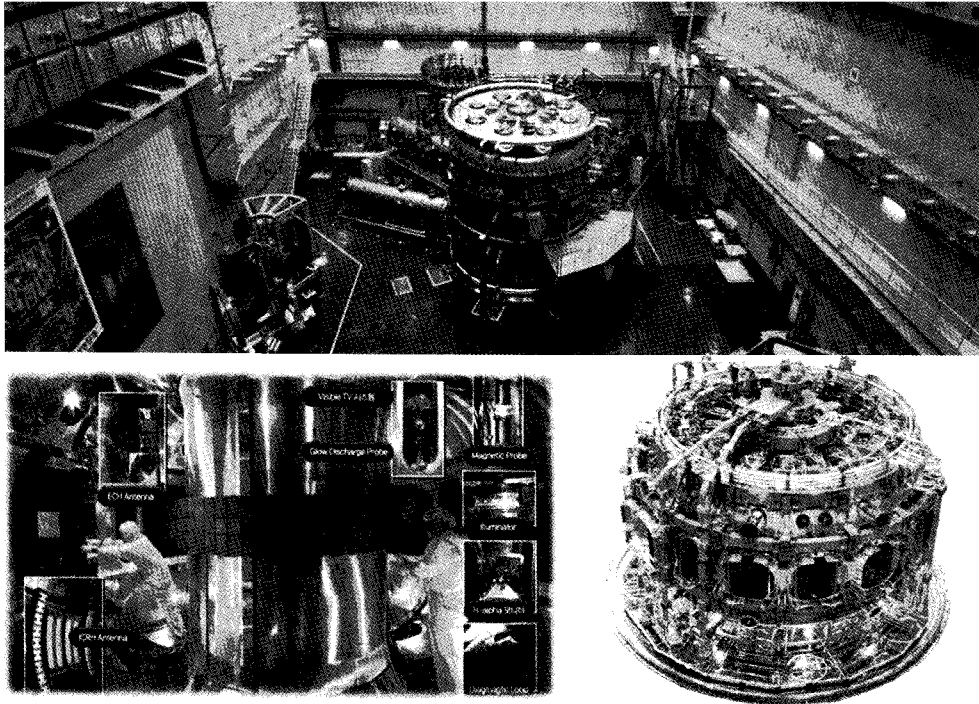


그림 4. 완공된 KSTAR 장치의 외부 및 내부 형상.

ITER 장치와 기술적으로 가장 근접한 세계 최고 수준의 핵융합 연구 장치를 보유하게 되었다. 또한 2008년 7월에는 장치의 종합시운전과 최초플라즈마 발생의 성공적 달성을 통해 KSTAR 장치에 대한 종합적인 검증과 핵융합 연구장치로서의 가능성을 확인하였다.

KSTAR 장치의 설계 내용을 보게 되면 핵융합 반응에 의한 에너지 생산이라는 ITER 장치의 기술적 최종 목표를 제외하면 ITER 장치가 연고자 하는 대부분의 물리적 변수를 얻을 수 있도록 되어 있다. ITER 장치가 건설 완료되는 2018년까지의 공백 기간 중에 ITER 장치의 운전에 필요한 물리적 변수들의 검증

을 KSTAR 장치를 통하여 보완 할 수 있는 것이다. 이러한 물리적 설계 변수 외에도 KSTAR 장치의 하드웨어를 살펴보면, ITER 장치와 동일한 종류의 초전도 선재를 세계 최초로 사용하기 때문에 ITER 운전에 필요한 초전도 자석 운전 경험 면에서는 세계에서 가장 앞설 수 있을 것이다. 또한 장치의 개발 과정에서 얻어진 경험은 ITER 공학설계에 중요한 지표를 제공하는 등 하드웨어 면에서도 핵융합 선진국과 동등한 대우를 받을 수 있는 능력을 확보할 수 있게 되었다. 이 때문에 전문가 들은 KSTAR가 유일하게 ITER의 Pilot Plant로서의 역할을 수행할 것으로 기대하고

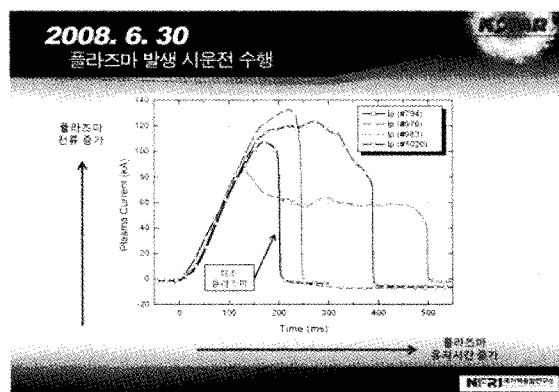
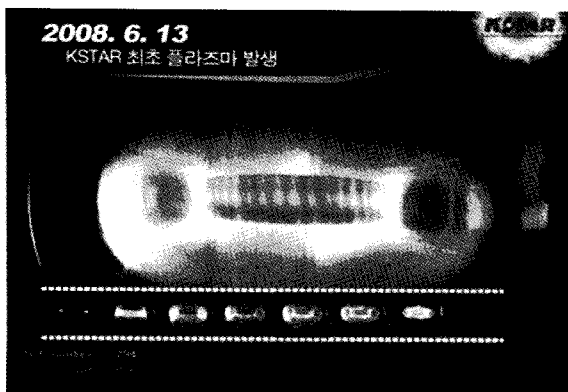


그림 5. KSTAR 장치에서 발생에 성공한 최초 플라즈마.

s있으며, 또한 국제 공동연구 장치로서의 면모를 갖추어 나가기 위해 운영단계에서 미국, 일본등과 공동으로 부대장치를 개발하여 운영해 나갈 예정으로 있다.

이와 같은 KSTAR 프로젝트의 수행과정을 통하여 보여준 우리의 과학적, 기술적 잠재력 및 수행능력으로 인하여 우리나라는 핵융합 연구의 후진국에서 단숨에 핵융합 연구의 선진국 대열에 성큼 들어서게 된 것이다.

4. 맺음말

최근 중국과 인도와 같은 규모가 큰 신흥국가들의 산업화와 선진국 형으로의 생활형태 변화로 에너지 소비가 급증하고 있다. 이 때문에 기존 화석연료의 고갈이 이전의 예상보다 훨씬 빠른 시기에 다가올 수도 있다는 위협을 받고 있다. 세계 각국이 앞 다투어 신재생에너지 등의 대체 에너지를 연구하고 있지만 대량 에너지 생산수단으로서의 대안이 될 가능성이 낮다. 이런 의미에서 핵융합 발전기술 개발은 어느 때보다 절실하다. 한국이 비록 핵융합 선발 주자들에 비해 다소 늦게 핵융합연구를 시작했지만 KSTAR의 건설을 통해 성공적인 중간진입 전략을 차근차근 수행해가고 있다. KSTAR와 ITER를 통한 연구를 기반으로 핵융합실증로 (DEMO) 건설에 주도적으로 나서게 되기를 희망한다.

참고문헌

[1] 핵융합 우주의 에너지, Garry McCracken and Peter Stott 원저, 유창모 윤진희 차동우 공역.

저자이력



김용채 (金雄采)
1999년 서울대학교 원자핵공학과 공학박사, 현재 국가핵융합연구소 책임연구원.
(woong@nfri.re.kr)



설재춘 (薛在椿)
2007년 University of Wisconsin 이학박사, 현재 국가핵융합연구소 박사후연수원.
(jseol@nfri.re.kr)