

# 국제 핵융합실험로(ITER) 참여로 '무한한 꿈의 에너지'에 도전한다

글 | 권 면 \_ 핵융합연구센터 연구개발부장 kwonm@nirc.re.kr

인류의 핵융합에 대한 도전은 비교적 그 역사가 짧지만, 실제 핵융합의 역사는 인류의 역사보다 훨씬 길다. 인류의 생명을 유지하게 하는 태양이 하나의 거대한 핵융합로이기 때문이다. 태양의 엄청난 중력에 의해 1천500만도의 뜨거운 온도 하에서 일어나는 수소나 헬륨원자 사이의 핵융합반응이 그 에너지의 원천이다.

## 꿈의 에너지원, 핵융합에너지

지구상에서 핵융합반응을 직접 일으켜 사용하려는 시도는 20세기 초부터 시작되었다. 1920년대에 들어서 태양의 에너지의 근원이 핵융합반응이라는 것이 제안되었고, 1930년대에 실험적인 증거가 이루어졌다. 1950년대에 들어서면서 군사적인 목적으로 이루어지던 핵융합 연구가 1958년 '평화적 목적을 위한 원자력 회의'에서 일반에게 공개되어 본격적인 개발 경쟁이 시작되었다.

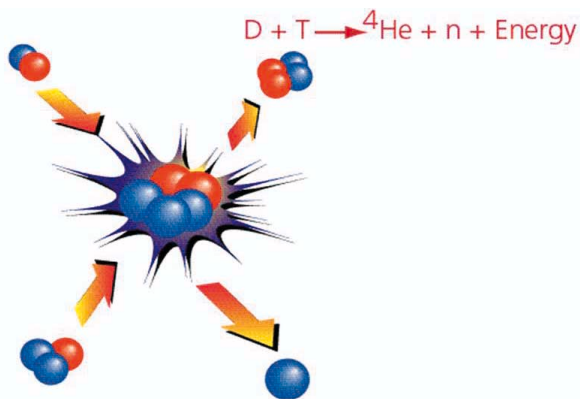
일명 인공태양으로 불리는 '국제핵융합실험로(ITER)' 프로젝트는 미국, 일본, 중국, 러시아, 인도, 유럽연합(EU) 등 세계 7개국이 참여해 올해부터 10년 동안 프랑스 카다라슈 지역에 핵융합실험로

를 건설하는 대형 국제 사업으로, 한국은 지난 11월 21일 ITER공동 이행협정에 공식 서명함으로써 공동연구대열에 참여하게 되었다.

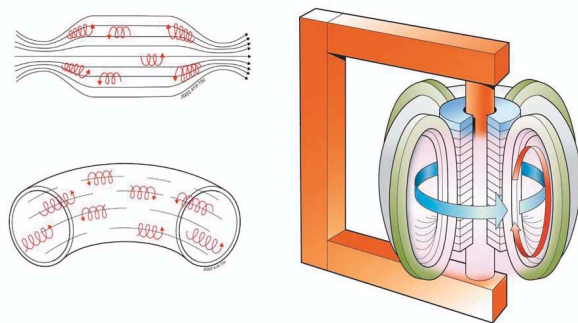
핵융합 에너지는 핵분열 반응에서와 마찬가지로 핵융합 반응 전후의 질량 차이가 우리가 잘 아는 아인슈타인의 질량 에너지 등가식( $E=mc^2$ )에 의해 변환되어 발생하는 에너지다. 특히 태양과 같은 별 들은 수소와 같은 가벼운 물질에서 시작해 헬륨, 탄소 등을 거쳐 안정된 원소인 철에 이르는 핵융합 과정을 통해 진화하는데 이 과정에서 막대한 에너지를 방출시킨다.

그러나 이런 핵반응은 쉽게 일어나지 않는다. 반응에 참여하는 원자핵은 중성자와 함께 양전하를 띠는 양성자로 구성되어 있어 전기력에 의해 서로 강하게 반발하기 때문이다. 이 힘을 이기고 핵융합 반응을 일으키려면 많은 에너지가 필요하다. 태양의 경우에는 엄청난 자체 중력에 의해 중심부에서 높은 온도와 큰 이온 밀도를 유지하기 때문에 핵융합반응이 활발하게 진행된다.

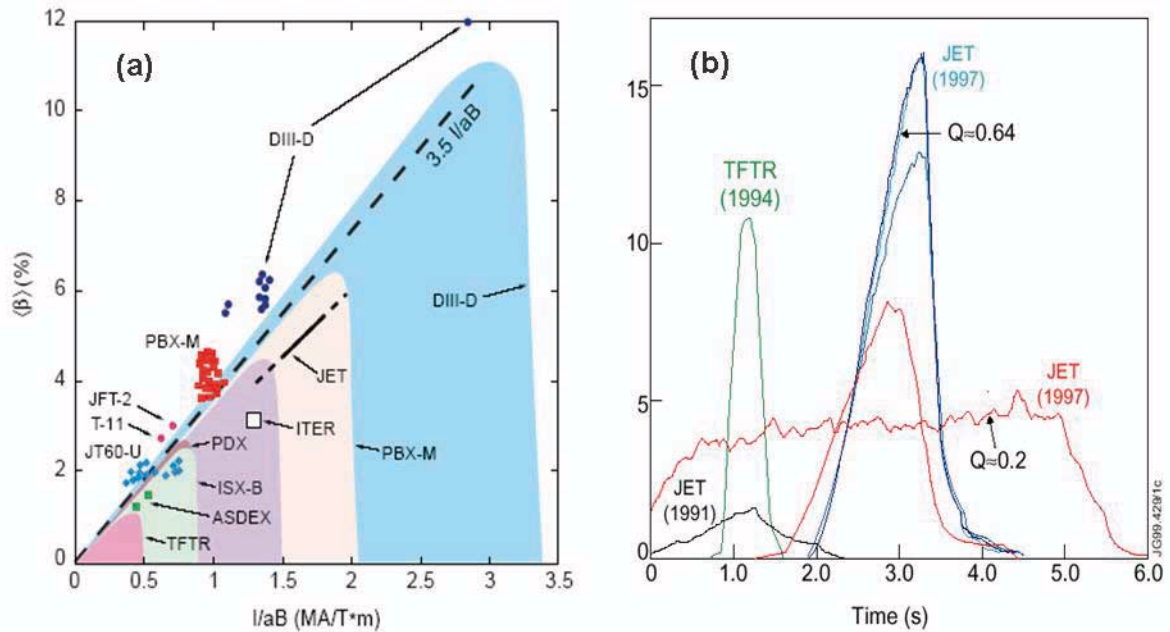
지구상에서 이 반응을 성공시키려면 큰 에너지를 방출하면서도 반응 확률이 높은 중수소와 삼중수소의 반응이 가장 가능성이 높다. 물론 이 반응도 충분히 일어나려면 1억도 이상의 온도가 필요



〈그림 1〉 중수소-삼중수소의 핵융합 반응도



〈그림 2〉 여러 모양의 자기장 속에 갇힌 플라즈마 입자와 이를 이용한 토카막 장치 모형. 가운데 위치한 중심자석을 이용하여 플라즈마에 전류 (파란색 화살표)를 유도하고 이 전류가 폴로이달 방향의 자기장 (빨간색 화살표)을 형성하게 된다.



〈그림 3〉 (a) 여러 장치에서 실험한 플라즈마 베타값의 결과가 ITER에서의 설계값을 초과하고 있다. 왼쪽 상단 부분은 불안정성에 의해 접근할 수 없는 영역이다 (b) 중수소-삼중수소를 사용하여 핵융합반응 실험을 한 최초의 결과로 수직축이 발생한 핵융합에너지 (MW)를 나타낸다.

하다. 그 온도에서는 원료로 쓰이는 기체는 전자들이 떨어져 나가 자유전자와 양이온으로 분리된 플라즈마 상태로 존재한다.

### 임계조건 · 점화조건 달성해야 핵융합 가능

핵융합에너지의 상용화가 오랫동안 실현되지 못한 이유는 먼저 그 현상을 적절히 제어된 상태에서 오래 지속시키는 기술의 한계 때문이다. 먼저 핵융합 반응을 충분히 일으키려면 1억도 이상의 플라즈마가 필요하다. 핵융합로의 기술적 조건은 높은 온도의 플라즈마를 핵융합반응이 일어날 때까지 충분히 오랫동안 가두어 둘 수 있어야 한다.

태양이나 별들은 엄청난 중력으로 가두어두지만 지구상에서는 특별한 방법을 개발해야 한다. 크게 관성력과 자기력을 이용하는 방법이 있다. 관성력을 이용하는 방법은 큰 출력의 레이저나 가속기를 이용해 구슬형태의 연료 표면을 균일하게 가열하면 최외각부터 팽창력에 대한 반작용에 의한 내부로의 압축에 의한 충격파로 연료구슬 전체가 고온 고압의 플라즈마로 변하는 현상을 이용하는 방식이다.

자기력을 이용하는 방법은 플라즈마 입자들이 가진 전기적 성질을 이용하여 전기를 띤 입자를 자기장 속에 가두는 방식이다. 자기

장 주위를 원운동하면서 감히는 플라즈마 입자들 사이에 핵융합 반응이 일어나도록 유도한다. 일자형으로 개방된 자기장의 그물 속에서 양끝으로 빠져나가는 플라즈마 입자의 손실을 막기 위해 원통 양 끝을 서로 연결하여 도넛 구조로 만든 대표적인 장치가 바로 토카막이다.

토카막에서는 도넛방향의 자장을 도넛을 감싼 형태의 자석을 이용해 만들어 주고 도넛 가운데 구멍에 위치한 솔레노이드 전자석을 이용해 변압기의 원리로 플라즈마에 전류가 흐르게 한다. 이 전류에 의해 플라즈마를 감싸는 방향으로 자장이 만들어지며 처음의 도넛 방향의 자장과 합쳐져 플라즈마 내부에 나선형 모양의 자장을 형성해 준다. 이 자기장을 따라 플라즈마 입자가 안정적으로 감히게 된다.

핵융합 발전을 위해서는 두 단계의 목표를 달성해야 한다. 첫째는 들어간 에너지와 발생하는 에너지의 양이 같은 임계조건 달성이며, 또 하나는 한 번 가열된 플라즈마가 추가적인 가열 없이 자체적인 가열에 의해 지속적인 핵융합반응을 일으키는 점화조건 달성이다. 점화조건에 도달하면 생산된 에너지를 통해 발전에 사용할 수 있게 된다. 이 조건들을 나타내는 변수를 에너지증배계수, Q값이라 하는데 핵융합반응에서 발생된 에너지와 사용된 에너지의 비

를 나타낸 것이다. 핵융합반응으로 발생된 에너지는 연료로 사용된 이온의 밀도와 반응단면적의 곱에 비례하는데 이 반응단면적은 연료의 종류에 따라 달라지며 중수소와 삼중수소를 사용하는 경우 약 10억 도가 될 때까지는 온도와 밀도에 비례해서 증가한다.

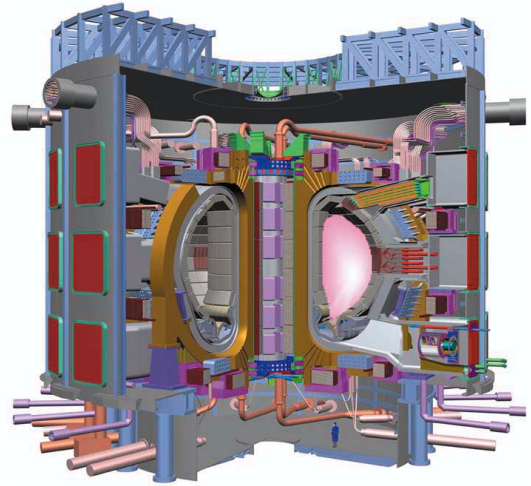
온도를 올리는 가열기술은 앞에서 언급한 솔레노이드 전자석을 이용하여 플라즈마에 전류를 흘리고 이 전류가 플라즈마의 자체 저항에 의해 플라즈마를 가열시키는 저항가열 기술이 있다. 플라즈마의 온도가 올라가면서 급격히 떨어지는 저항 값으로 더 이상 효과를 발휘하지 못하는 저항가열기술 대신 외부에서 높은 에너지의 중성 입자빔이나 고주파나 초고주파를 이용하여 플라즈마를 가열시키는 보조가열기술도 있다. 이 기술들은 이미 잘 발달되어 수억 도의 플라즈마를 만들어 낼 수 있다.

그러나 온도가 올라가면 갈수록 뜨거운 플라즈마가 가지는 한계인 여러 형태의 불안정성이 나타난다. 이 조건을 흔히 플라즈마를 가두기 위해 사용한 자기력선의 에너지에 대한 플라즈마 압력의 비로 나타내는데 이를 베타값이라 부른다. 베타값이 높을수록 훨씬 효율적으로 핵융합반응을 일으킬 수 있다. 불안정성에 대한 한계를 극복하는 여러 가지 제어기술이 개발되어서, 현재는 10%가 넘는 실험값을 얻을 수 있다. 이는 실제 ITER와 같은 대형 실험로의 조건을 충족시키는 값이다. 불안정성은 더 이상 핵융합에너지 실현의 장애물이 아닌 썬이다.

### 초전도자석기술로 고온 플라즈마 장시간 유지

임계조건은 이미 1990년대 중반에 달성되었기 때문에 핵융합에너지 생성의 과학적 가능성은 증명된 썬이 된다. 보다 현실적인 점화조건 달성은 훨씬 어려운 기술적 조건이 필요하다. Q값이 적어도 30 이상은 되어야 상용화의 가능성이 있기 때문이다. 점화조건은 사실 중수소-삼중수소 핵융합반응에서 발생하는 알파입자(헬륨이온)의 높은 에너지(약 3.5MeV)를 이용하여 플라즈마를 자체 가열시킴으로써 일어나게 되는데 플라즈마가 잃어버리는 에너지 만큼 이 알파입자 가열이 일어나도록 제어할 수만 있다면 외부에서 더 이상 가열장치를 사용하지 않더라도 지속적인 핵융합반응조건을 유지할 수 있게 된다.

수억 도로 가열된 플라즈마를 장시간 유지시키는 또 하나의 필수기술은 초전도자석기술이다. 외부 자장을 지속적으로 만들어 주는 자석을 장시간 운전하기 위해 높은 전류를 흘려줄 때 코일의 저항 때문에 발생하는 열을 막아주기 위해 초전도자석을 사용해야 한

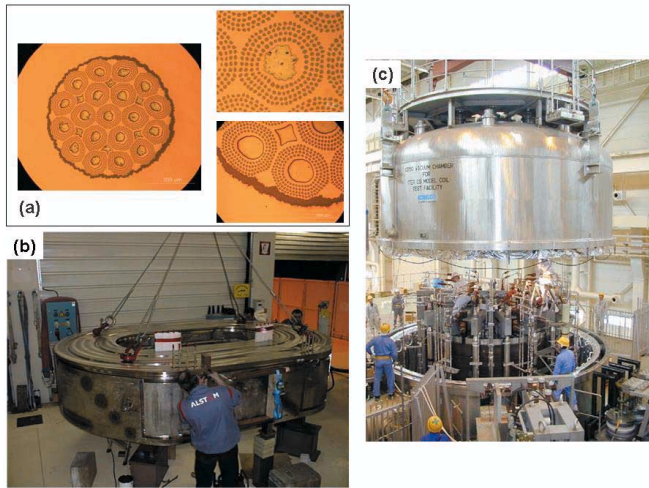


(그림 4) 완공 후의 ITER 내부 단면

다. 이는 현재 수냉식으로 짧게 운전하는 모든 자석들을 영하 270도 근처의 액체헬륨으로 냉각시키며 장시간 자석을 운전해야 하는 기술적 어려움을 극복해야 한다. 또 주어진 자기장 속에서 플라즈마의 압력(온도와 밀도의 곱)이 높아지면 플라즈마의 안정성이 깨질 확률이 커진다. 이 때 높은 온도로 유지되던 플라즈마 입자들이 자기장의 그물에서 빠져나오게 되면 진공용기의 벽에 부딪히게 되어 금방 에너지를 잃어버리게 되고, 벽과의 충돌에 의해 불순물을 배출하게 되며, 이것에 의해 플라즈마의 순도나 온도를 저감시켜 핵융합반응의 확률(반응단면적이나 밀도에 영향을 주어)을 낮추게 된다. 즉 초고온의 플라즈마를 안정적으로 오랫동안 가두는 효율적인 제어기술도 중요하다.

플라즈마와 진공용기 벽의 접촉을 감소시키는 장치로 디버터 장치를 사용하고 있다. 이 장치는 고온의 플라즈마의 흐름과 장치의 내벽 사이에 이탈된 입자를 바깥으로 뽑아내는 역할을 한다. 실제로 이 장치를 통해 가둠 시간을 이전에 비해 두 배 이상 증가시키는 효과를 얻을 수 있다. 플라즈마의 불안정성은 플라즈마 내의 전기장, 전류밀도, 압력 등의 분포를 세밀하게 실시간으로 제어함으로 감소시킨다.

토카막에는 이런 핵융합반응을 장시간 유지하는데 필요한 한 가지 장치기술이 더 필요하다. 토카막의 안정성 유지에 필수적인 플라즈마 전류를 흘리기 위해 사용하는 솔레노이드 전자석인데 변압기의 원리를 이용하여 전류를 흘리기 때문에 흐르는 전류의 양에 지속적인 변화를 주어야 한다. 따라서 전류를 흘려줄 수 있는 시간에 제약이 있고 장시간 운전에 치명적인 제한이 된다. 이를 해결하



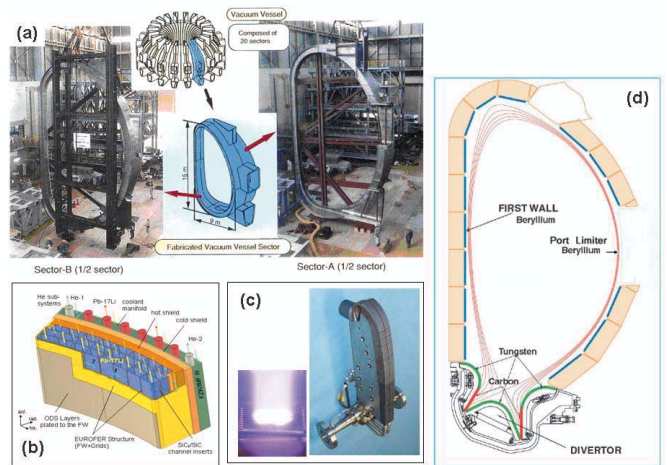
(그림 5) (a) ITER에 사용될 우리나라 기업체가 만든 Nb<sub>3</sub>Sn 초전도선재의 단면 (b) ITER 토로이달 시험자석 (c) TER 초전도자석 시험 시설

기 위해 유도전류 방식외의 다른 방식이 아닌 플라즈마에 전류를 흘릴 수 있는 전류구동기술을 개발해야 하는데 중성자빔, 고주파나 초고주파를 사용하여 플라즈마에 전류를 흘려주는 첨단 기술이 개발되어 적용되고 있다. 한 플라즈마 밀도 분포에 따라 자발적으로 플라즈마 전류가 생성되는 현상을 제어할 수 있다면 외부 전류 구동 없이 토카막에서 필요한 플라즈마 전류의 대부분을 공급할 수 있는 운전조건도 만들 수 있다.

### ITER로 10MW/m<sup>2</sup> 이상의 지속적인 높은 열속 실험

토카막이 서방세계에 전해진 1968년 이후 이제까지 40여 년 간의 연구개발을 통해 Q값이 1이 되는 임계조건을 겨우 달성했다. 그러나 그 동안의 연구결과는 각종 변수에 따라 핵융합반응조건이 어떻게 변화하는지를 보여주는 엄청난 양의 이론적, 실험적인 자료로 축적되어 왔으며, 이 자료를 통해 어떻게 하면 우리가 바라는 Q값이 10 또는 30 이상의 장치를 만들 수 있는지를 거의 정확하게 추측할 수 있는 수준에 도달한 것이다.


앞에서 언급한 것처럼 온도와 밀도가 무조건 높아야 효과적인 것이 아니라 플라즈마의 크기도 같이 커져야 하고, 따라서 플라즈마의 전류값도 같이 증가해야 한다는 사실을 알게 되었다. 플라즈마 성능에 따라 Q값을 크게 증가시킬 수 있기 때문에 이제까지 핵융합에너지 상용화는 플라즈마의 성능 향상에 주력해 왔다. 이제 그 동안의 실험 결과들을 정확하게 모사할 수 있는 시뮬레이션 기술에 의해 정밀한 변수에 의한 플라즈마 성능의 의존성을 구할 수 있고 최적화 기법을 동원하여 효율적이고 안정된 플라즈마 상태를



(그림 6) (a) ITER 진공용기 시제품 (b) ITER에서 시험될 블랑켓 (EU 모델) (c) ITER 디버터 시제품과 고열속 시험 (d) ITER 플라즈마 대향장치 설치 구조

만들고 유지하는데 필요한 기술적 점검과 핵융합의 과학적 검증을 한꺼번에 끝낼 수 있는 장치를 설계하게 되었다. 이 장치는 과학적으로 중수소-삼중수소를 사용하여 전류구동 없이 충분히 긴 시간 동안 Q의 값이 10 이상을 달성하거나 전류구동을 통하여 장시간운전을 Q가 5 이상의 성능을 달성하며 플라즈마 제어를 통해 점화조건을 달성하는 것을 증명하는 것을 목표로 하고 있다.

기술적으로는 대형 초전도자석이나 진공용기, 그리고 원격조정 장치 등 발전소 수준의 장치들의 통합적인 운전이 안전하게 이루어질 수 있는 지를 시험하게 될 것이며, 발전소에 반드시 필요한 새로운 기술인 삼중수소 자급을 위한 재생산, 회수 및 처리와 중성자 에너지의 변환이 일어나는 블랑켓 기술을 시험하게 될 것이다.

이제까지 수행된 모든 토카막 실험에서 접근하지 못했던 새로운 영역이 ITER 운전에서 요구되는데, 그것은 평균 0.5MW/m<sup>2</sup>가 넘는 14.1MeV의 에너지를 갖는 중성자속 환경이며, 지속적인 높은 열속(heat flux)을 견딜 수 있는 재료의 선정과 운전 및 시험 기술이 또 다른 도전이다. 국제열핵융합로(ITER)는 분명 성공이 확인되어 보장된 시험장치가 아니라 인류의 과학과 기술적 상상력, 지적 해석능력 속에서 설계된 새로운, 그러나 위험부담도 큰 장치다. 하지만 확실한 것은 이 장치를 통해 얻어지는 결과들은 핵융합 에너지가 상용화되어 일상생활에서 자유롭게 사용될 수 있는 미래의 꿈을 앞당기는 지름길이 될 것이다. 



글쓴이는 서울대학교 원자핵공학과를 졸업하고 미국 조지아공대에서 핵융합으로 박사학위 받았다.