

에너지 위기와 핵융합 발전 현황



김 명 철

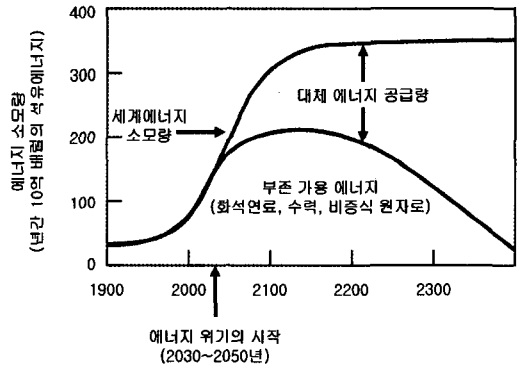
[한국물리학회] 플라즈마분과 IP
plachido@kbsi.re.kr

성균관대학교 물리학과 학사
성균관대학교 대학원 물리학 석사
성균관대학교 대학원 물리학 박사
한국기초과학지원연구원 핵융합사업단 제개발 팀장
(현) 한국기초과학지원연구원
전자현미경부 나노소재개발 책임연구원

화석에너지의 시대의 종말을 약 200년 밖에 남기지 않고 21세기를 맞이한 인류의 가장 심각한 위기는 향후 50년 내에 다가올 에너지 부족이다. 따라서 인류가 현재의 문명을 지속적으로 발전시키거나 영위하기 위해서는 화석 에너지원을 대체할 새로운 에너지원의 개발이 절박하게 필요하다. 이러한 이유로 세계 각국에서는 현재 인구의 증가에 따라 필요한 에너지 수요를 충족하기 위하여 충분한 에너지 밀도를 갖고 있는 핵분열 및 핵융합 발전 기술 개발에 집중하고 있다.

핵분열 발전의 경우에는 환경, 폐기물 및 핵무기 개발의 문제를 내포하고 있음에도 불구하고 현재 비증식로 방식(non-breeder type)의 원자력 발전에 필요한 자원의 고갈이 45년 밖에 남지 않았기 때문에 향후 약 2,700년 동안 에너지를 생산할 수 있는 증식로 방식(breeder type)의 연구에 주력하고 있다.

핵융합의 경우에는 아직 상용화단계가 되지 못하고 있지만 핵융합의 최종 산물이 헬륨

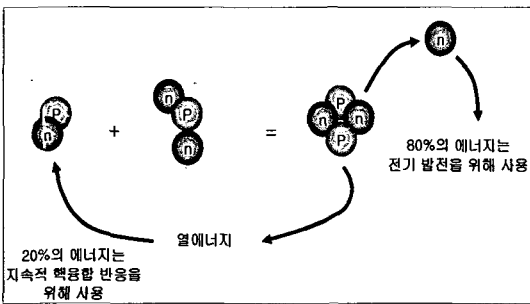


<그림 1. 예견된 에너지 위기>

이므로 정상 운전 시에 공기 오염이나 온실 가스의 배출이 없다는 장점과 핵분열의 경우처럼 제어 불능 상태에서 대규모 방사능 유출이나 에너지 유출 사고와 같은 위험성이 전혀 없다는 장점 때문에 상용화에 주력하고 있다. 또한 핵분열 시 발생하는 폐기물이 특수 납 용기에 저장해야 하거나 수 천년동안 반감기를 갖는 반면 핵융합의 경우에 발생하는 대부분의 방사능 물질들은 반감기가 길지 않기 때문에 수십 년 내에 안전하고 쉽게 처리할 수 있는

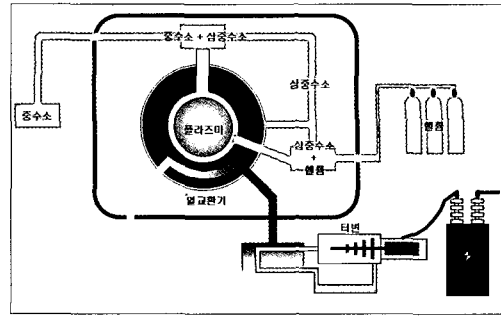
장점이 있어 “꿈의 에너지”라고 불리기도 한다.

핵융합의 원리를 간단히 표현하면 수소와 같은 가벼운 원자핵이 헬륨과 같은 무거운 원자핵을 형성하기 위해 융합하는 것으로 이때 반응 전후의 질량차이 만큼이 아인슈타인의 특수상대성 이론에 따라 부산물로 막대한 에너지를 중성자의 운동에너지로 방출한다. 대표적인 반응은 수소의 동위원소인 중수소핵과 삼중 수소핵이 융합하여 헬륨핵과 중성자가 되는 것으로 그림과 같이 융합반응에너지의 20%가 융합반응을 지속시키기 위한 열에너지로 사용되고, 80%가 전기 발전을 위한 에너지로 변환된다.



<그림 2. 핵융합 반응>

이러한 핵융합의 발전원리를 구현하기 위해 고안된 장치 중 하나가 “토카막(Tokamak)”인데, 원래 “도넛형챔버와 전자석 코일(toroidal chamber and magnetic coil)”의 러시아어 약어에서 유래된 용어이다. 토카막의 역사를 간단히 살펴보면 1951년 옛 소련의 물리학자 안드레이 사하로프와 이고르 탐이 토카막 장치를 처음 설계했다. 이후 유럽에서 1958년 유럽원자력공동체 조약(EURATOM Treaty)에 의해 핵융합 연구가 자기 핵융합



<그림 3. 핵융합로 내의 중수소 및 삼중 수소 연료 공급 과정>

연구에 집중되는 유럽의 단일 핵융합 연구 프로그램으로 시작됐다. 또한 제네바에서 열린 ‘평화적 목적을 위한 원자력 연구’(Atoms for Peace) 회의를 통해 핵융합 연구는 군사 분야에서 일반에게 공개되는 연구 분야로 분리·정착돼 1960년대 활발한 핵융합 이론 연구를 불러일으켰다. 1968년 옛 소련 쿠르차토프 연구소의 T3 토카막이 성공적인 실험결과를 발표한 이래 1970년대와 1980년대를 거쳐 오늘날까지 약 30개국에 1백여 개의 토카막 핵융합 실험 장치들이 건설·운영돼 왔다. 1973년의 ‘석유위기’ 이후 핵융합 연구개발에 투자가 급격히 늘어나 유럽연합(EU), 미국, 일본, 러시아(옛 소련) 4개국은 ‘핵융합 발전소’(Fusion Reactor) 건설에 필요한 실험을 수행할 수 있는 대형 핵융합 실험 장치들에 대한 설계와 건설에 착수했다. 1982년 완공된 미국의 TFTR(Tokamak Fusion Test Reactor), 1983년에 완공된 EU의 JET(Joint European Torus), 1985년에 완공된 일본의 JT-60(Japan Tokamak, 후에 JT-60U로 개조돼 1991년부터 재가동)과 같은 대형 토카막들이 가동되기

시작해 핵융합 연구는 대형화 되었고, 이에 따르는 실험결과도 발전에 발전을 거듭했다. 1988년부터 시작된 국제 공동 연구 프로젝트로서 최근에 유럽연합, 중국, 일본, 한국, 러시아, 인도 및 미국 정부가 국제 컨소시움을 구성하여 핵융합 발전소 건설에 필요한 모든 물리적·기술적 난관을 극복하기 위한 핵융합 발전소급에 준하는 초대형 초전도 토카막 핵융합 실험장치인 ITER(International Thermonuclear Experimental Reactor: ITER는 라틴어로 "the way"라는 뜻임) 건설에 합의하였고 2005년 말에 최종적으로 프랑스 까다라쉬 지방에 장치를 건설하기로 하였다. 한국에서는 1996년도부터 KSTAR (Korea Superconducting Tokamak Advanced Research) 프로젝트를 시작하여 차세대 초전도 토카막을 건설하고 있으며, 핵융합 기술 개발에 박차를 가하고 있다.

지금까지 개발된 실험용 토카막에서 수행된 기본적인 연구는 지속적 핵융합 반응이 일어날 수 있도록 플라즈마를 가두어(confining) 두고 가열(heating)하는 방법을 찾는 것이다. 플라즈마 이온(수소)이 충돌할 때, 전기적으로 같은 전하를 띠기 때문에 척력이 발생하게 된다. 이들의 충돌에너지가 증가하게 될수록, 이온들의 거리가 가깝게 되어 핵융합이 일어날 수 있는 확률이 높아지기 된다. 이러한 확률이 커지기 위해서는 이온 간의 척력을 극복할 수 있을 만큼 충분한 에너지를 낼 수 있는 약 섭씨 1억 도의 뜨거운 플라즈마가 유지되어야 한다. 동시에 플라즈마는 고압을 유지하여야 하는데 이는 입자간의 거리가 충분히 가까워져 이온들의 충돌 횟수가 빈번해지고, 이로 인

해 융합이 일어날 수 있게 된다. 그러므로 핵융합이 일어날 정도로 플라즈마가 뜨거워지고 밀도가 높아지면 플라즈마의 불안정성은 높아지게 된다. 플라즈마가 불안정 상태 영역에 들어가게 되면, 플라즈마의 내부 구조에 급격한 변화가 발생하여 붕괴할 수 있는데, 이때 자기장은 더 이상 토카막 진공 용기 내에 플라즈마를 가두어 둘 수 없게 된다. 결과적으로 플라즈마는 진공용기 쪽으로 자기 및 열적 에너지를 급격히 잃게 된다. 이러한 불안정성을 극복하기 위하여 능동적 제어가 필요한 것이다. 또 다른 부가적 제어 문제는 플라즈마의 성능, 예를 들면 지속적 플라즈마 압력, 온도, 에너지를 가두어 두는 시간 등을 향상 시키는 것이다. 많은 제어 변수들은 서로 강하게 연계되어 있다. 예를 들면, 플라즈마 모양제어에는 플라즈마의 압력을 높이는 것이 필요한데, 고압 플라즈마 운전은 플라즈마의 불안정성을 야기하여 능동적 안정화 제어가 필요하게 된다.

오늘날의 토카막들에는 플라즈마의 시동, 모양, 가열, 전류구동, 안정화 및 방전의 안전한 종료 등의 기본 기능들이 요구되고 있다. 토카막 제어에 관한 연구 노력과 몇몇 실험용 토카막으로부터 "진보된 토카막(advanced tokamak : AT)"으로서의 요구조건들이 강조되고 있다. AT 플라즈마 양식이라 함은 토카막의 성능을 평가하는 지표 중에 플라즈마 압력을 나타내는 β 값과 에너지 구속 시간 상수인 τ_E 와 자발 플라즈마 전류에 의한 비유도적인 구동 플라즈마 전류 값이 동시에 정상상태(steady-state) 운전에 적합하게 최적화 되어야 한다는 것이다. 실제 이러한 성능 평가 지

표가 최적화되어 목표치에 도달하여야 핵융합로의 크기와 비용이 줄어들어 상용화가 가능하게 되는 것이다.

그러나 AT 운전이 가능하려면, 다양한 플라즈마 제어 문제를 풀어야 하는 난관이 남아 있다. 대표적으로 높은 β 값에 도달하기 위한 플라즈마의 모양을 만들어 내는데 제어가 필요하고, 높은 β 값에서의 토카막 운전은 플라즈마의 불안정성을 야기하는데 이를 안정화 하기 위한 능동적 제어가 필요하게 된다. 따라서 모양의 최적화는 플라즈마의 불안정성에 대한 위험을 감소시킬 수 있는 것이다. 또한 플라즈마 내부 압력과 전류의 분포 제어를 통해 에너지 구속, 안정성, 자발 메커니즘에 의한 플라즈마 전류의 기여 등을 향상시킬 수 있다. 정상상태 운전을 위해서는 효율적인 전력의 소모, 불순물 및 입자의 제어가 부가적으로 필요하다. 이들 모든 제어는 토카막이 정상상태 운전을 하기 위해서 동시에 그리고 지속적으로 이루어져야 한다. 즉 AT 양식의 운전은 다양한 제어 변수 간에 강한 연관 관계 때문에 유연하며, 다중 파라미터 플라즈마 제어를 요구하게 된다. 진보된 고성능의 토카막에서는 자기적 불안정성을 안정화하기 위해서 자기유체 동력학(magnetohydrodynamics)적 제어와 더불어 플라즈마 경계, 내부 압력 및 전류 분포, 진공 배기, 연료 주입 및 플라즈마 가열의 정교한 제어가 요구된다. 진보된 토카막 제어기는 비정상 상태 조건들을 예측하고 적절한 신뢰도 내에서 장치 및 플라즈마가 안전하게 반응되게 하기 위하여 작동되어야 한다. AT 플라즈마는 최대의 효율을 달성하기 위해 거

의 안전성 한계치 부근에서 운전되기 때문에 정상운전 영역에서 멀리 벗어 날 수 있고 거의 통제 불능의 불안정성을 야기하는 비정상적 이벤트가 발생할 수 있다.

AT 플라즈마 양식의 주된 특징은 정상운전을 위해서 극단적 플라즈마 모양과 고정밀도의 플라즈마 조절을 요구한다. 자기장은 플라즈마와 작용하여 플라즈마의 모양과 위치, 플라즈마의 전류를 유도한다. 피드백 제어는 플라즈마 동력학의 수학적 모델(비선형 편미분 방정식으로 기술되는)의 불확정성, 플라즈마 수직 위치의 고유 불안정성 및 예측하지 못한 방해 요소의 발생 때문에 필요하게 된다. 이러한 제어의 문제는 많은 수의 코일 입력 전압과 다양한 제어 출력(대표적으로 플라즈마 전류, 모양 및 위치의 기하학적 변수)에 의해 도전 받게 된다. 또한 입력-출력 채널간의 강한 연관 관계와 요구되어지는 다양한 제어 조건을 실시간으로 풀어야 하는 문제가 남아 있다.

현재 JET(유럽연합)나 DIII-D(미국)와 같은 대형 토카막에서는 개발되고 있거나 적용되고 있는 제어기를 위해 진행되는 프로그램이 있는데, 이들의 대부분은 폴로이드 모양제어를 목적으로 하고 있으며, 몇몇 연구들은 다른 플라즈마 파라미터를 위한 제어개발에 초점을 두고 있다. 수치해석적 제어 연구는 ITER의 최종 설계가 그 실험 목적을 뒷받침할 수 있는가를 증명하기 위해 특별히 추진되고 있다.

기획 : 한전건 총무이사 hanjg@skku.edu