

## ② 핵융합 에너지 개발의 의의와 전망

# 바닷물에서 무한정 에너지원 얻는다

글 | 홍상희 \_ 서울대학교 원자핵공학과 교수 hongsh@snu.ac.kr

최근 주변에서 유행처럼 쓰이며 우리에게 친근하게 다가와 있는 용어 중의 하나가 ‘융합’ 이나 ‘퓨전’ 이다. 과학기술 계통에서 핵융합은 물론 세포융합, 기술융합, BIT융합, 유무선융합, 융합화학 등을 비롯하여, 인문사회·문화예술 분야와 일상생활에서도 방송통신융합, 영상융합, 퓨전디자인, 퓨전음악, 퓨전음식, 퓨전한복 등과 같이 헤아릴 수 없을 정도로 다양하게 ‘융합’ 과 ‘퓨전’ 이 수식어로 쓰이고 있다. 그러나 이들 중 융합의 원조는 가장 오랜 역사와 사전적인 본래의 뜻을 가지고 있는 ‘핵융합’이라고 볼 수 있다. ‘핵’ 이나 ‘nuclear’ 라는 수식어를 떼어버리고, 국어사전이나 영영사전에서 ‘융합’ 이나 ‘퓨전’ 을 각각 찾아보아도, 핵융합에 대한 설명이 첫 번째로 나와 있는 것으로도 알 수 있다. 일반적인 의미로는 ‘여럿이 녹아서 하나가 됨’ 이라고 설명하고 있어서, 위에 언급한 여러 종류의 융합과 퓨전은 이에 따라 최근에 만들어 낸 합성어들로서, 다양한 지식과 가치가 공존하는 다원화된 현대사회에서 이들을 통합해보려는 의도에서 나온 키워드로 볼 수 있다. 그렇다면, ‘원자핵을 결합시켜 중원자핵을 형성함’ 으로 사전에서 정의하는 융합의 본질이 무엇이며, 특히 에너지 문제와 관련된 핵융합의 내용과 그 기술개발이 갖는 의미는 무엇일까?

### 별과 태양에너지의 근원 ‘핵융합’

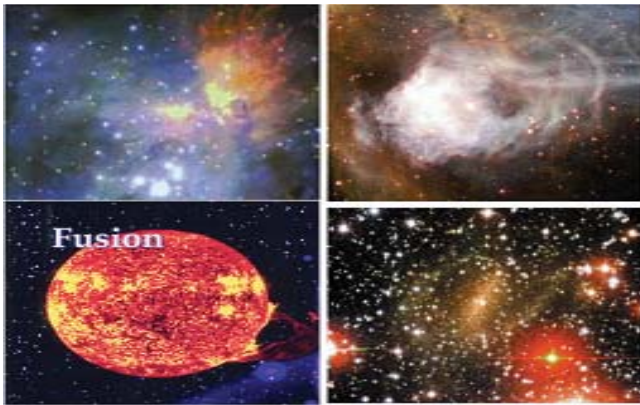
핵융합은 우주의 모든 별과 태양에서 나오는 에너지의 근원이며, 별들의 생성과 소멸의 근본이 되어 우주를 지배한다. 우주는 최초로 ‘빅뱅’이라는 대폭발로 시작되었고, 이 때 많은 소립자가 생겨나서 이들이 뭉쳐져 원소 중에 가장 가벼운 수소(H)가 만들어졌다. 이 수소가 씨앗이 되어 핵융합에 의해 이보다 무거운 원소인 헬륨(He), 리튬(Li), 베릴륨(Be),..., 철(Fe) 등의 순서로 무거운 원소들이 차츰 만들어져서, 별, 태양, 지구, 생물체들이 나타나 오늘날과 같은 우주

와 세상이 생긴 것이다. 이와 같이 가벼운 원자핵들이 핵융합반응에 의해 상대적으로 무거운 원자핵으로 변할 때, 반응 전보다 반응 후의 질량이 적어지는 ‘질량결손’ 이 일어난다. 이 줄어든 질량이 유명한 아인슈타인의 공식  $E=mc^2$ 에 의해 에너지로 변하는 질량결손 에너지가 바로 ‘핵융합 에너지’ 의 근원이다. 지구 생명의 원천인 에너지를 수십억 년 동안 공급하고 있는 태양 에너지는 수소끼리 결합되어 헬륨으로 변하면서 방출되는 핵융합 에너지이다. 이 때 발생하는 초고온으로 인해 수소나 헬륨으로부터 전자들이 다 떨어져 나와 원자핵과 전자만으로 이루어진 플라즈마 상태에서, 초고속으로 원자핵들이 무질서한 열운동을 하면서 전기적인 반발력을 이겨내고 부딪쳐서 융합이 일어나는 ‘열핵융합’ 반응의 결과이다.

수소가 핵융합으로 다 타버려도 태양이나 별은 죽지 않고, 반응 생성물인 헬륨이 다시 핵융합반응의 재료가 되어 이보다 무거운 원자핵으로 차츰 변하면서 그 부피가 커지고 온도도 낮아지는 ‘적색 거성’ 으로 변해간다. 이러한 핵융합반응에 의하여 새로운 원자핵의 생성과 함께 나타나는 질량결손에 의한 발열반응은 철(Fe)에 이르기까지 수십억, 수백 억년에 걸쳐 진행해 나간다. 철에 이르게 되면, 핵융합에 의한 별 내부로부터의 팽창력보다 주변 구성물질의 무게를 견디지 못하고, 반대로 수축이 일어나면서 원자핵 사이의 간격이 줄어들어 새로운 핵융합반응에 의한 대폭발이 일어나는 ‘초신성 폭발’ 로 인해, 별의 생명이 끝나고 새로운 별의 탄생으로 이어진다.

### 깨끗하고 안전한 친환경적인 에너지

태양이나 별에서는 자체의 거대한 질량 때문에 나타나는 초고압의 ‘중력가둠’ 에 의해 갇혀진 수소끼리 수천만 도의 초고온에서 자연적으로 열핵융합반응이 일어난다. 그러나 지구상에는 이런 거대 질량을 얻기가 불가능하므로, 인공적으로 핵융합 에너지를 얻는 소



핵융합은 별과 태양의 근원이며, 우주 생성 소멸의 근본이다.

위 ‘인공태양’의 개발대상으로 우선 반응조건이 가장 쉬운 중수소(D)와 삼중수소(T)의 반응을 이용하는 D-T 핵융합로 개발을 1차적인 목표로 하고 있다. 이 때 발생하는 17.6MeV의 핵융합에너지를 열로 변환시켜 증기 생산 후 터빈에 연결된 발전기를 돌려 전력을 생산하는 방법은 현재의 화력이나 원자력 발전과 마찬가지로이다. 그러나 삼중수소는 유한한 자원인 리튬(Li)에서 인공적으로 만들어서 얻어야 하는 제약이 있다. 이러한 초기의 D-T 핵융합로를 사용하는 동안, 바닷물에서 무한정 얻을 수 있는 중수소끼리 반응하는 D-D 핵융합로를 개발하여 지상에서 에너지 문제를 영원히 해결하려는 것이 핵융합 개발의 궁극적인 목표이다.

바닷물 10로 얻을 수 있는 핵융합에너지가 휘발유 3000g 내는 열에너지와 맞먹는다. D-T 혼합연료 1g을 사용하면 석유 약 8톤에 해당되며, 1g의 우리늄을 사용한 원자력 발전보다 약 4배의 전력을 더 얻을 수 있다. 이와 같이, ‘꿈의 에너지’로 불리는 핵융합 에너지 개발의 가장 큰 의의는 세계 어느 곳이나 널려 있는 물로부터 무진장의 연료자원을 얻어 무한 에너지원으로 사용할 수 있다는 것이다. 그 동안 나라에 따라 편중되어 매장된 화석연료 확보 때문에 일어난 국제적 분쟁과 갈등이 해소되어 세계 평화에도 기여할 수 있는 부수적인 매력이 따른다.

핵융합 개발의 또 다른 측면에서 두드러진 의의는 비교적 깨끗하고 안전한 친환경적인 에너지를 확보한다는 점이다. 대기오염과 지구 기후변화의 주범인 탄산가스 배출이 없고, 고준위 방사성 폐기물이 없어 방사능 측면에서도 상대적으로 청정에너지라 할 수 있다. D-T 핵융합로에서 연료로 쓰는 삼중수소는 반감기가 13년 정도인 저준위 방사성 물질이다. 또한 융합반응에서 나오는 고속중성자에 의한 노재료들의 방사화 물질은 수 만년 지속되는 고준위 방사성 핵종은 없고, 적절한 재료의 선택이나 개발을 하면 폐로 후에

수 십 또는 수백 년 내에 재활용할 수 있을 정도이다. D-T 다음에 이어질 중수소만을 사용하는 D-D 융합로에서는 삼중수소와 중성자에 의한 방사능 수준은 급격히 감소하여 거의 깨끗하다고 할 수 있다. 가장 이상적인 D-He3 핵융합로가 최종 단계에서 개발되면 방사성 물질이 전혀 개입되지 않아 완전히 깨끗한 에너지를 얻을 수 있게 된다.

또한, 안전성 측면에서도 발전소 운전 중 핵융합로가 녹아나는 용융사고의 위험은 절대 일어나지 않는다. 소량의 핵융합 연료를 연속적으로 주입하면서 운전하고 있고, 노심에서 온도가 상승하면 핵융합반응이 저절로 떨어져 정상으로 돌아오는 고유한 안전성을 가지고 있다. 아울러 핵무기를 제조할 수 있는 부산물이 나오지 않아, 최근 북한의 원자로 시설에 대한 핵사찰이나 핵 분쟁에서 볼 수 있는 것 같은 국제적인 규제와 감시를 받을 필요도 없다. 이와 같은 환경과 안전성에서 두드러진 장점을 가지고 있어서, 일반 국민들의 핵에 대한 거부감이 완화되고 핵융합이 높은 사회적 수용성을 얻게 될 것이다. 이에 따라 발전소 부지의 확보가 용이해지고, 대도시 근처에 건설하여 송전에 따르는 비용과 전력손실을 획기적으로 낮출 수 있다.

기술적으로도 증기로 발전기를 돌리는 재래식 발전 방법이 아니라, 전기를 띤 핵융합 플라즈마 입자들을 자기장 내로 통과시켜 전력을 얻는 직접발전을 통해 열효율이 더 높은 발전소로 개량할 수도 있다. 또한 고열과 고속 중성자를 이용해 지역난방, 해수담수화, 수소생산이나 원자력발전의 연료를 천연 우라늄으로부터 대량 생산해내는 것 같은 다양한 산업에 활용할 수 있다. 핵융합 개발과정에서 초고온, 초고진공, 초전도, 플라즈마, 고주파, 가속기, 레이저 등의 파생기술은 나노, 바이오, 환경, 신소재, 우주 기술 등의 고부가 가치 첨단산업의 기반기술로 활용되어, 기간산업의 발전과 신산업 창출에 크게 기여할 수 있다.

### 신재생 에너지·제4세대 원자로의 한계 대안

인간의 기술은 불의 발견으로 탄생하였으며, 기술문명 발달의 각 단계마다 새롭고 더욱 강력하고 편리한 에너지원이 나타났다. 세계 인구의 폭발적인 증가와 전반적인 삶의 질 향상에 비례하여 에너지 수요의 증대가 새로운 에너지 개발과 기술 혁신을 촉진해왔다. 하지만 한정된 에너지 자원의 가속적인 소모와 기술개발은 한계에 부딪히고, 자연환경이나 생활환경에 미치는 공해물질의 발생은 에너지 위기와 동시에 환경 위기를 가져왔다. 산업혁명 이후, 세계가 주 에너지원으로 석탄과 석유와 같은 화석연료에 의존한 결과로 초래된 위기는, 연료자원의 고갈 문제와 지구 온난화와 이에 따른 여러 이상기후 현상이 나타나는 환경오염의 문제이다. 대체

에너지 역할의 큰 몫을 담당하고 있는 원자력 발전도 한정된 우라늄 자원과 방사능 오염 가능성으로 인해 예외일 수는 없다.

선진국은 물론 개발도상국에서도 문명의 이기를 이용하려는 욕구가 더욱 증대됨에 따라, 앞으로 에너지 소모량은 더욱 증가할 것이다. 한편으로는, 이상기후 방지를 위한 노력으로 2005년에 발효된 교토 기후변화 협약에 따라 각국의 온실가스 배출량에 대한 규제가 더욱 강화될 것이다. 이에 따라, 화석연료 고갈과 나날이 치솟는 고유가에 대비하면서, 온실가스 문제가 없는 새로운 대용량의 청정 에너지원 개발에 대한 필요성이 더욱 높아져, 21세기 에너지 기술 패러다임에 큰 변화가 오리라고 예상된다.

이미 선진국들은 깨닫고, 안정적인 에너지 확보를 위해 신재생 에너지와 제4세대 원자로 기술개발에 착수했다. 그러나 태양열, 풍력, 조력, 지열, 바이오매스 등의 신재생 에너지는 낮은 에너지 변환 효율, 자연조건에 따른 제약과 불안정성, 부수적으로 나타나는 또 다른 환경·공해문제 등으로 인해 궁극적인 대체 에너지로서의 한계가 있을 것으로 전문가들은 내다보고 있다. 현재의 원자로를 개량하는 제4세대 원전도 자원의 한계와 방사능 문제를 근본적으로 해결할 수는 없다.

이러한 상황에서 핵융합 에너지는 대용량의 무한 청정 에너지원으로서 세계적으로 관심이 더욱 높아져 국제공동 협력에 의해 조기에 실용화하려는 노력을 하고 있다. 첨단과학과 극한기술이 결합된 핵융합 에너지 기술개발이 성공적으로 추진될 경우 21세기 중반부터 지속가능한 신동력을 공급하기 시작하면서, 궁극적으로 지상에서 무한하고 안전하며 친환경적인 에너지를 제공하는 역할을 담당할 수 있을 것으로 기대되고 있다.

### 자장가둠 '토카막' 장치로 핵융합 에너지 실현

핵융합 에너지 실용화의 난관은 열핵융합 반응이 일어나는 조건이 너무나 까다롭고, 반응 에너지를 잘 조절하여 발전할 수 있는 장치개발이 매우 복잡하고 어렵다는 것이다. 비교적 조건이 쉬운 D-T 핵융합만 보더라도 우선 온도를 1억도 정도로 올려야 하는 '플라즈마 가열' 문제가 해결해야 할 난관의 하나이다. 이런 초고온에서는 연료물질이 원자핵과 전자로 분리된 플라즈마 상태로 되어, 융합이 일어나기도 전에 활발한 열운동으로 사방으로 흩어져 달아나 버리려고 하기 때문에, 충분한 시간 동안 상당한 입자밀도를 가지고 공간 중에 가두어 두어야 하는 '플라즈마 가둠' 문제가 또 다른 어려움이다. D-T 핵융합의 경우, 소모된 가열전력과 결과적으로

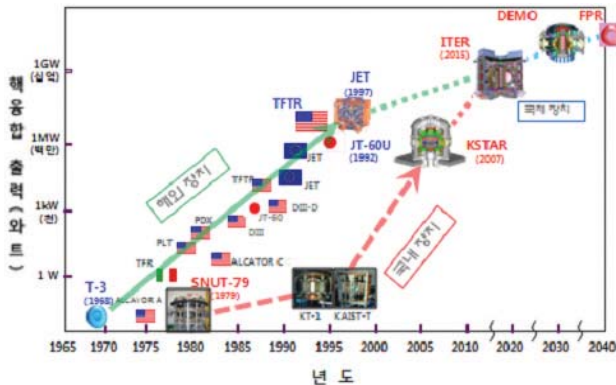
나오는 핵융합 출력이 균형을 이루는 '임계조건'에서 요구되는 입자밀도와 가둠시간의 곱은 입방미터당  $10^{20}$ 개 / 1초이다. 이 때 필요한 약 1억 도의 플라즈마 온도조건도 동시에 달성시켜야 한다. 더 이상 외부 가열 없이 핵융합반응에서 나오는 헬륨입자에 의한 자체가열로 스스로 핵융합 반응이 지속되도록 하는 '점화조건'은 이보다 더 높은 온도와 가둠조건을 요구한다.

위와 같은 조건을 실현시켜, 핵융합 반응 에너지를 마음대로 조절하면서, 편리한 전력 형태로 변화시켜 사용하기는 계획이 핵융합발전 개발이다. 1952년 수소폭탄 실험에 의하여 지상에서 핵융합 반응 자체의 실현은 이미 입증되었다. 우리가 원하는 것은 이와 같이 일시에 쏟아져 나오는 폭발적인 에너지가 아니라, 필요한 일정한 양의 에너지를 지속적으로 얻을 수 있는 제어된 형태의 에너지를 얻는 핵융합로 개발이다.

앞서 언급한 바와 같이, 태양과 별에서는 자체의 '중력가둠'에 의해서 가둠조건을 유지하면서 핵융합 반응이 지속된다. 지상에서는 이와 같은 상태를 만들 수 없기 때문에 '제어열핵융합' 기술개발은 현재 '자장가둠'과 '관성가둠'으로 크게 두 갈래로 나뉘어 진행되고 있다. 자장가둠 방식은 전자석을 사용하여 자력선으로 이루어진 그릇 형태를 만들어 전기를 띤 플라즈마 입자들의 운동영역을 그 안에 제한시켜 가두는 방법이다. 이 때 입자밀도는 입방미터당 약  $10^{20}$ 개 정도로 대기밀도보다 약 10만분의 1 정도로 희박하나, 가둠시간을 대략 1초 정도로 유지시키면서 가둠조건을 실현시키면 된다. 관성가둠 방법은 강력한 출력의 레이저나 입자 빔을 구슬 모양의 핵연료 표적에 때려 물의 밀도의 100배가 넘는 초고밀도(입방미터당  $10^{30}$ 개)로 100억분의 1초보다 짧은 시간에 압축시켜, 이때 얻은 높은 온도와 압력으로 핵융합 반응을 시키지는 것이다.

위의 두 가지 가둠방식에 따라 지금까지 수 없이 많은 장치들을 고안하여 연구해왔으나, 현재까지 실험성과중 실용화 전망이 제일 좋은 장치가 자장가둠 장치 중의 하나인 '토카막'이다. 이 장치는 러시아어로 '도넛 모양의 자력선 그릇'이라는 뜻이다. 복잡한 전자석 구조로 발생시킨, 보이지 않는 자기장 토러스 안에 플라즈마를 가두고, 자체 전류에 의한 저항가열과 중성입자빔 또는 고주파를 이용한 보조가열로 점화온도를 얻어 핵융합을 일으킨다. 이 때 발생한 핵융합 에너지의 대부분을 가지고 나오는 중성자로 원자로 주변의 블랭킷에서 Li와 반응시켜 삼중수소를 만들어 연료로 쓰고, 아울러 열로 변환시켜 냉각계를 통해 증기를 만들어 터빈과 연결된 발전기로 전기를 얻게 된다.





국내의 주요 토카막 핵융합 장치 개발 추세와 전망

### IAEA 주관 하에 국제 공동으로 ITER 개발

1940년대에 미·영·소는 비밀리에 수소폭탄 개발을 진행하여 1952년 실험에 성공하자, 제어된 핵융합 실험에 큰 기대를 가지고 평화적 이용의 핵융합로 개발을 시작하였다. 실용적인 핵융합로 개발까지는 예상보다 난제가 무척 많다는 것이 점차 밝혀지자, 핵융합 연구의 공개와 국제공동협력이 1958년 UN 국제회의에서 공식적으로 제안되었다. 플라즈마 가둠과 가열에 대한 근본적 연구가 필요하다는 인식이 보편화되어 이론 정립과 여러 자장가둠 장치의 기초적 실험이 수행되었다. 실험결과로 나타나는 여러 가지 불안정성을 억제시키는 가둠장치 개발을 1960년대 말까지 계속하였다.

핵융합 개발의 극적인 전환이 일어난 것은 1968년 소련의 T-3 토카막에서 얻은 획기적인 가둠실험 결과를 발표한 이후이다. 1970년대 들어 미국, 유럽공동체, 일본, 소련의 선진 4개 그룹에서 각각 임계조건 실험을 목표로 한 대형 토카막 건설을 착수하여, 80년대에는 이들이 속속 완성되면서 여러 가지 실험이 본격적으로 수행되었다. 90년대에는 대형 토카막(JET, JT-60U, TFTR)으로 임계조건 달성과 에너지 발생 실험 결과들이 발표됨으로써 과학적 실증이 끝나고, 2000년대에 들어서는 다음 단계의 공학적실증을 하기 위한 대상을 우선 토카막 방식으로 국제원자력기구(IAEA) 주관 하에 '국제핵융합실험로(ITER)'를 국제공동으로 개발하기로 협정을 맺어 현재 건설 중에 있다.

한편 우리 나라는 1970년대 말부터 핵융합 기초연구가 시작되어, 몇몇 대학과 연구소에서 소형 토카막 장치(SNUT79, KT-1, KAIST-T 등)를 제작실험하면서 인력양성과 기초연구를 수행하였다. 본격적으로 정부 차원에서 핵융합 연구개발에 뛰어든 것은

1995년에 중간진입 기술개발 전략을 통해 '차세대초전도핵융합연구장치'인 KSTAR 건설을 시작하여, 2007년 9월에 완공 후, 지난 7월 15일에 최초 플라즈마 발생실험에 성공함으로써, 이 전략의 목표를 달성하였다. 이 과정에서 우리 나라의 핵융합 과학기술력을 국제적으로 인정받아, 2003년 6월 이미 국제공동연구 프로젝트인 ITER 사업에 참여하는 7개 회원국(한국, EU, 일본, 미국, 러시아, 중국, 인도)의 일원으로, 2007년 4월의 'ITER 공동이행협정'에 대한 비준과 IAEA 기탁으로 본격적인 ITER 건설과 운영에 참여하고 있다. 이와 같은 급격한 국내외의 핵융합 에너지 기술개발 환경 변화에 국가전략적 차원에서 대처하기 위해 2006년 12월에 제정공포된 '핵융합에너지 개발진흥법'에 따라 2007년 7월 '핵융합에너지개발 진흥기본계획'을 수립하여 장기적이고 체계적인 핵융합개발을 진행하고 있다.

### 2040년 경 상업핵융합 발전소 등장 전망

첨단과학기술 개념이 도입되어 실용화되기까지는 먼저 기초과학적 실증단계, 공학적 개발단계, 경제적 및 환경적 타당성단계를 거쳐야 비로소 상업용으로 빛을 보게 된다. 핵융합 에너지의 실용화에 있어서도 이에 따라 단계적으로 실험로, 공학실험로, 실증로(DEMO), 원형로(PROTO), 상업로(FFR)의 길을 밟아야 한다.

위에서 살펴본 바와 같이, 핵융합에너지 기술개발은 지금까지 인류가 도전한 과학기술 중 최대 난관의 거대 첨단극한기술이며, 수십 년 간 걸리는 초창기의 과제이다. 그러나 꾸준한 노력으로 대형 토카막 실험로에 의해 임계조건을 달성해 과학적 실증을 끝내고, 공학적 개발을 본격적으로 시작하기 위해 ITER를 이용한 공학실험로 제작을 국제공동으로 착수하여, 에너지 생산에 목표를 둔 기술개발로 전환하고 있음을 볼 수 있다.

선진국들은 최근에 '지름길 계획'을 세워 핵융합에너지 상용화를 조기에 달성하려는 기술개발 전략으로 변경하고 있다. ITER와 DEMO, DEMO와 PROTO 개발을 동시에 추진하여 실용화를 30년 내외로 단축 시켜보겠다는 야심찬 계획으로, 만약 이러한 전략이 성공적으로 진행된다면 빠르면 2040년 경에는 상업핵융합 발전소가 등장하리라는 전망도 내놓고 있다.



글쓴이는 서울대학교 응용물리학과 졸업 후 미국 콜로라도주립대 전기공학과에서 석사·박사학위를 받았으며, 호주 시드니대학교 전기공학부 객원교수를 지냈다.