



미래의 청정 · 고효율 발전 - 연료전지

이 글에서는 미래의 청정 에너지이며 고효율 발전으로서의 연료전지에 대해 소개한다.

글 · 유영성 / 한전 전력연구원, 선임연구원

e-mail · yungsung@kepri.re.kr

글 · 배중면 / 한국과학기술원 기계공학과, 교수

현재 인간의 고도 과학기술은 우리의 상상을 현실로 바꾸어 가며 하루가 다르게 변모하며 매일 새로운 기술을 접하게 한다. 오늘도 미국 항공우주국(NASA)의 제트추진연구소(JPL)에서 보낸 화성탐사로봇 스피릿호(spirit)가 무려 1억 6,900만 km 떨어진 화성에서 보내온 화성탐사선 주변의 선명한 사진을 지구에 있는 우리의 아침신문 기사로 볼 수 있게 하는 그런 세상이 되었다. 나조차도 하루 일과를 컴퓨터와 인터넷으로 시작하고 그 편리함에 감탄하며 일상생활 주변의 과학 문명이기에 흠취해 있다. 그래서인지 나는 이렇게 일상생활에서 쉽게 접할 수 있는 편리한 기기를 발명하거나 고안한 모든 이들에게 감사의 마음을 가질 수밖에 없다. 그러면서 한편으론 오늘도 한 공학도로서 조금이나마 인류의 과학발전에 기여하고자 열심히 노력하고 있으며, 미미한 연구진척이라도 있는 날이면 기쁨과 보람을 조용히 혼자 되뇌이며 즐겁고 감사하는 마음으로 일하게 된다.

과학기술은 항상 빠르게 진화하며 새로운 기술로 우리에게 다가왔지만 몇몇 원론적인 분야에서는 상대적으로 더뎠다. 그 중에 하나가 전기를 생산하는 방법이라 할 수 있다. 우리가 이룩한 고도문명에서 있어 전기는 우리가 사는 데 있어 꼭 필요한 공기나 물처럼 필수불가결한 요소가 되어버렸다. 하지만 전기를 발생 혹은 저장하는 방법은 예나 지금이나 별로 변화된 것 같지 않다. 오늘날 우리가 사

용하는 전기는 주로 발전소에서 대량으로 전기를 생산하고 이를 집이나 학교 등과 같이 수요지까지 도체(전선)를 이용하여 배달하여 사용한다. 물론 들고 다니는 가전기기에는 화합물의 형태로 저장된 화학에너지를 전기에너지로 바꿔주는 전지(1차 혹은 2차)를 주로 이용하기도 한다. 일반적으로 많은 양의 전기를 값싸게 이용하는 방법은 자장 속에 운동(회전)하는 도체에 유도되는 전류를 이용하여 전기를 발생하는 장치(generator)의 형태로 되어 있다. 물론 이는 전기 모터의 회전원리와 유사하여 그 반대원리를 이용하는 것이다. 실제로는 석탄 혹은 석유와 같은 화석연료를 태워(연소) 나오는 열로 보일러에 물을 끓이고 이를 스팀 터빈의 블레이드(날개)에 분사하면서 터빈을 회전시켜 여기에 연결된 회전체(발전기)로 유도전기를 발생시킨다(그림 1). 이때 기체상의 연료가스로부터 연소시켜

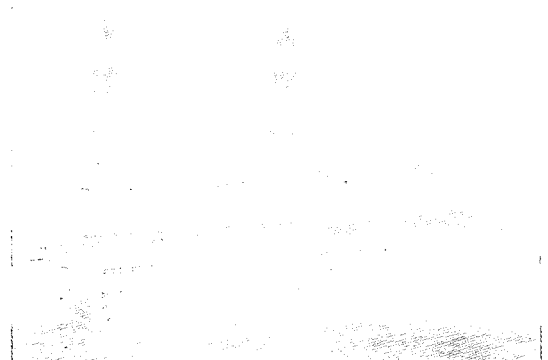
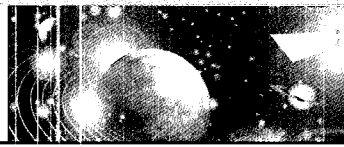


그림 1 화력발전소 모습



직접 연소가스의 운동에너지로 터빈을 돌리면 가스터빈발전이라 한다. 또한 원자력도 우

라늄과 같은 방사능 물질의 핵분열시 나오는 반응열로 증류수를 가열하여 증기로 만들고 다시 터빈을 돌리는 형태로 이하 화력발전과 유사하다(그림 2). 이러한 전기생산방법은 공통적으로 연료가 가지고 있는 화학에너지를 일단 운동에너지로 전환시키고 이로부터 다시 전기에너지로 바꾸는 방법을 사용하게 되는데 에너지 변환에는 항상 손실이 따르게 되어 변환 횟수가 많을수록 손실은 가중된다. 더구나 이렇게 발전소에서 발생한 전기를 생산하여 집(수요지)으로까지 배달하기 위해서는 다소의 전력손실뿐만 아니라 그림 3과 4에서와 같은 송배전시설을 갖추기 위해 많은 비용과 환경침해와 같은 손해를 감수해야 한다.

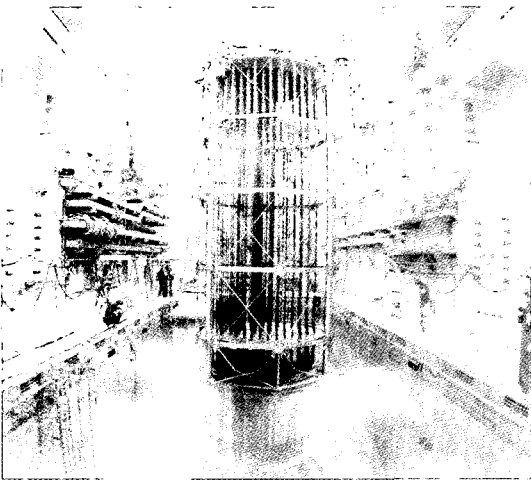


그림 2 원자력발전소 경수로형 원자로 용기

한편 우리가 필요로 하는 전기에너지를 얻기 위해서 사용하는 방법에 있어 가장 큰 문제는 환경 오염물질을 배출한다는 것이다. 그리고 이때 필요한 석탄 또는 석유와 같은 화석연료나 우라늄과 같은 핵연료는 무한하지 않고 유한하여 아마도 짧게는 100년 혹은 200년 후에는 모두 고갈될 수 있다는 문제에 직면하고 있다. 현재 우리나라는 소비량으로 세계 10위의 에너지 순수입국에 속한다. 또한 총 발전용량은 약 5,600만 kW로서 그림 5에서와 같이 2003년 거래량으로 볼 때 이중에 약 55%를 화력발전으로, 약 42%를 원자력발전으로 충당하고 있으며 그 외 약 3% 정도를 수력(양수) 및 기타발전의 형태로 얻고

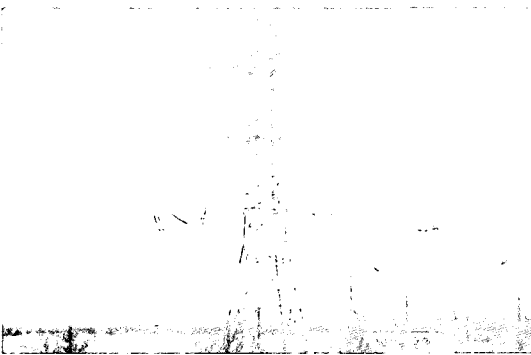


그림 3 송전설비(765kV시험설비)

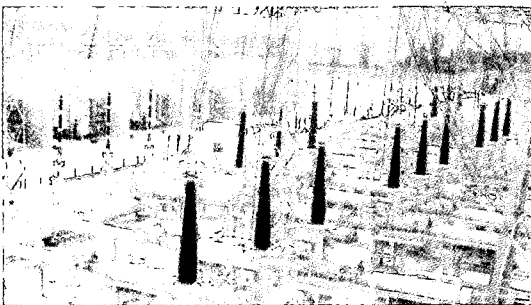


그림 4 변전설비(345kV GIS)

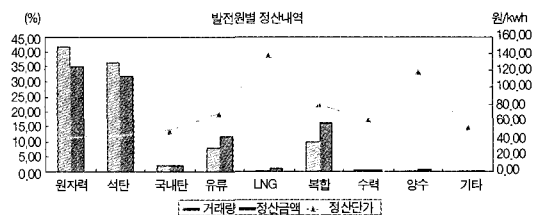


그림 5 국내 발전원별 발전량 및 단가(2003년 기준)



있다. 따라서 전기를 생산하기 위해서 석탄과 같은 화석연료를 태워 연소시키는 데 이 과정에서 이산화탄소(CO₂)의 발생은 필수적이며, 또는 사용 원료 연료에 포함되거나 연소방법에서 유발되는 일산화탄소(CO), 황산화물(SO_x), 질소산화물(NO_x) 등의 공해물질을 배출하게 된다. 물론 발전소에서는 이러한 물질의 발생을 최소화하기 위해 연소제어와 탈질, 탈황 등의 정제공정을 부가적으로 가동시켜 그 발생량을 최소로 줄이고자 노력하고 있다. 하지만 아직까지의 기술로는 연소반응 중에 제거하기 어려운 물질 중에 하나가 필연적으로 발생하는 이산화탄소이다. 물론 그 자체가 인간에게 직접적인 해를 끼치지 않는다는 지구온난화의 주요 원인이어서 지구의 대기환경에 심각하게 영향을 준다. 또한 매일 매일 타고 다니는 자동차의 수도 급증하여 공해배출가스의 발생은 날로 심각해져 가고 있다. 한편 원자력도 사용 후에 나오는 방사능 폐기물을 안전하게 저장 또는 처리가 필요하고 이를 위해서는 많은 비용과 수고를 들여야 한다.

따라서 이러한 방법을 해결하는 대안으로 연료전지 발전기술이 있다. 궁극적으로 연료전지는 수소를 연료로 사용하는 것이다. 즉, 잉여 전력으로 물을 전기분해하거나 탄화수소 연료로부터 분해(개질이라고 함)하여 직접 수소를 생산하고 이를 저장하여 운송하고 이를 필요한 곳에서 연료전지에 주입하여 전기를 생산하는 방법이다. 특히 연료전지는 수소에 의한 전기생산시 물(H₂O) 외의 다른 부산물이 없고, 가역적으로 물의 분해와 결합에 의해 전기를 생산할 수 있어서 값싸게 수소의 생산이나 저장 또는 공급이 가능한 미래의 수소에너지시대의 도래 전인 과도기에도 탄화수소계 연료를 이용할 수 있는 장점이 있다. 또한 비교적 단순한 에너지 변환과정으로 화

학에너지를 전기에너지로 바로 얻을 수 있기 때문에 연료전지는 특성상 환경친화성 및 고효율성을 가진다. 이로 인해 기존의 연소를 통한 회전력에 의한 전자기식 발전방식을 대체할 수 있는 새로운 전원으로 주목 받고 있으며, 태양광 및 풍력에 의한 대체에너지와는 별도로 지속적이며 안정적인 환경친화형 발전시스템이 될 수 있다. 즉, 연료전지는 연료가 갖는 화학에너지를 연소과정이 없이, 전기화학적 반응을 통하여 직접 전기를 얻는 방식으로 가스상태(주로 수소)의 연료의 공급에 의해 지속적인 발전이 가능한 발전시스템이다. 즉 연료를 연소과정과 달리 전기화학적 산화반응으로 소모하므로 오염물질의 배출을 매우 줄일 수 있으며(그림 6), 또한 기계적

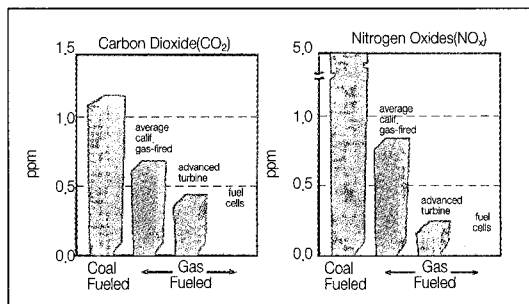


그림 6 발전방식에 따른 이산화탄소 및 질소산화물 배출량

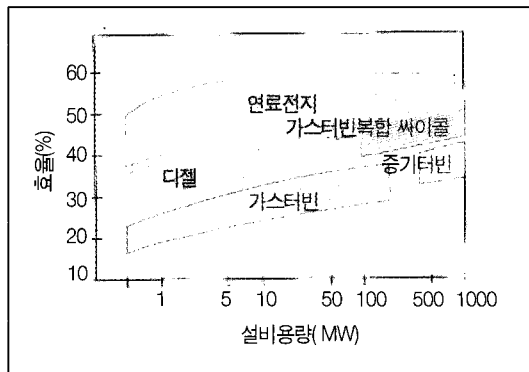
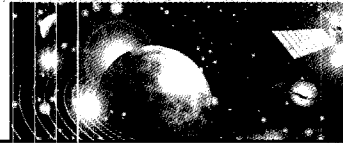


그림 7 연료전지와 타 발전방식과의 효율 비교



회전부가 적다는 점에서 소음발생이 적고 그리고 기존 화력발전이 대개 40% 이하의 발전 효율을 갖지만 전기화학적 에너지변환만 거치는 연료전지 방식에서는 이론적으로 65% 이상의 고효율을 갖는 것을 특징으로 한다(그림 7). 또한 발전시스템으로서 필요한 설비용량(규모)의 조절이 용이하고, 이러한 단위 용량을 기본으로 모듈화하여 원하는 크기의 분산형 전원으로 제작이 가능하기 때문에 설치가 용이하며 건설공기가 단축되고, 또한 환경친화적 특성에 의해 발전소 부지에 대한 제약이 적어 도심 내나 근교에 연료전지에 의한 발전소를 설치가 가능하므로 송전손실이 적다는 점 등이 있다. 이 외에도 전기적으로 부하 추종성이 뛰어나고 낮은 부하에서의 효율이 높아 차세대 발전시스템으로서 주목 받고 있다.

연료전지 시스템은 기본적으로 전기를 생산하는 연료전지 본체 또는 스택(fuel cell; stack), 연료인 천연가스, 석탄, 석유, 메탄올 등을 수소가 많은 연료로 변환시키는 연료개질기(fuel processor: reformer), 생산되는 직류 전기(DC)를 교류 전기(AC)로 변환시키는 전력변환장치(power conditioner)로 구성된다. 이 외에 주변장치로서 이들 시스템을 종합적으로 제어하고, 나오는 부산물인 고온의 물을 이용하여 냉난방을 하거나 다시 전기를 만들어내는 배열이용장치 등이 추가된다. 연료전지는 그림 8에서처럼 양극(공기극), 전해질, 음극(연료극) 등으로 이루어진 단전지(single cell)를 기본적인 구성요소로 하며, 큰 전력을 생산하기 위해 여러 개의 단전지를 직렬 혹은 병렬로 적층하여 스택(stack)을 본체로 한다. 일반적으로 무부하에서 단전지는 한 개 당 1.1V의 전압을 갖으며 정격으로는 약 0.7V의 전압에서 전력

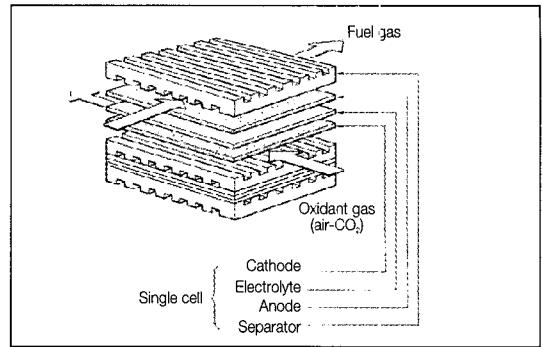


그림 8 연료전지의 단전지 구성도

을 생산하게 한다. 따라서 우리가 원하는 보다 높은 전압의 전력을 얻기 위하여 이들 단전지들을 여러 장 쌓아 올리거나 전류량을 늘리기 위해서 단전지의 면적을 넓히기도 한다. 실제로는 연료전지의 스택을 1kW에서 수백 kW 규모로 제작하여 소규모 발전설비로 이용하거나, 혹은 이들 스택을 직병렬로 연결하여 수만에서 수십만 kW를 생산하는 대규모 발전용 플랜트로 구성할 수도 있다.

현재 개발되고 연료전지는 전해질 및 전극의 종류에 따라 알카리형(AFC : Alkaline Fuel Cell), 인산형(PAFC : Phosphoric Acid Fuel Cell), 용융탄산염형(MCFC : Molten Carbonate Fuel Cell), 고체산화물형(SOFC : Solid Oxide Fuel Cell), 고체고분자형의 연료전지(PEMFC : Proton Exchange Membrane Fuel Cell, or PEFC : Polymer Electrolyte Fuel cell), 그리고 직접메탄올 연료전지(DMFC : Direct Methanol Fuel Cell)가 있다. 이들 연료전지는 구성요소 소재의 특성상 사용범위나 운전조건, 효율 등에서 차이를 갖는다. 용도 관점에서 보면 발전용, 가정용, 이동용 및 수송용으로 구분할 수 있으며, 발전용 연료전지로서는 수백 kW급 이상으로 외국에서

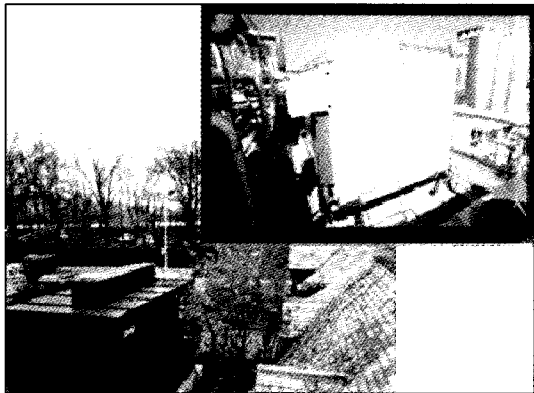


그림 9 미국 Onsi 사의 인산형 연료전지(PAFC) 발전시스템

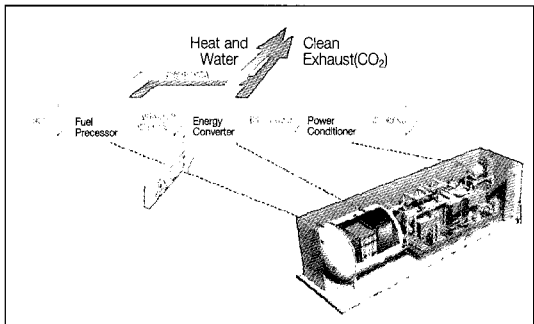


그림 10 연료전지 발전시스템 구성도

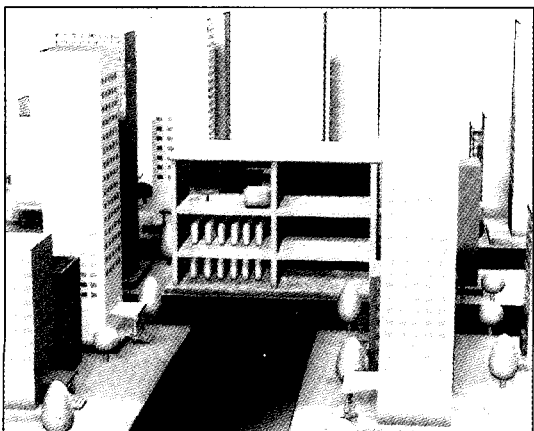


그림 11 연료전지를 이용한 미래의 발전소

이미 실증 및 상용화가 진행되고 있는 용융탄산염 연료전지(MCFC)와 고체산화물 연료전지(SOFC)가 그 대상이 되고 있다. 기존의 인산형 연료전지(PAFC : Phosphoric Acid Fuel Cell)는 상대적으로 낮은 효율 및 경제성으로 발전용 연료전지로서 시장점유율이 감소하는 추세이다(그림 9). 이 외에도 가정용 또는 소규모 상업용 연료전지로는 수 kW급으로 고출력의 고분자 전해질 연료전지(PEMFC)와 고온의 열을 공급할 수 있는 고체산화물 연료전지(SOFC)가 적용가능하며, 이동용 연료전지로는 주로 액체 연료인 메탄올을 사용하여 시스템을 단순화시킨 직접 알코올 연료전지(DMFC)와 micro Fuel Cell분야의 PEMFC, SOFC가 대상이 되고 있다. 특히 수십 kW급으로 고출력의 소형 경량화가 가능한 PEMFC는 자동차에 탑재하기 위한 연구개발이 집중적으로 수행되고 있는데, 수십 kW인 경우의 승용차용과 200~300kW급의 버스용 등이 개발되고 있다.

그림 10에서와 같이 연료전지 발전 방식은 발전 열과 전기를 동시에 공급할 수 있어 수요지 요구에 직접 연결되며, 송배전 설비 사용을 줄여 전력 사용 비용을 저감할 수 있다. 또한 생산자는 짧은 기간, 적은 투자비로 필요한 전원을 확보할 수 있는 장점을 가지게 된다. 따라서 미래의 발전시설은 그림 11에서와 같이 도심 내 또는 특정 지역, 아파트단지, 고층 빌딩 등의 열 및 전기를 필요로 하는 일정 수요지 근처에 수백 kW에서 수천 kW 정도가 되는 열과 전기를 동시 공급하는 분산형(distributed type) 발전소의 형태가 되거나 혹은 그림 12에서와 같이 각각의 소규모 연료전지 발전소로써 기존의 대규모 화력 발전 설비를 보완할 수 있으며, 전력 송배전 계통의 기능을 안정화하는 역할을 담당할 수 있



을 것이다. 또한 분산형 전원은 소규모이기 때문에 화력발전 대체용 연료전지보다는 쉽

게 적은 투자비로 설치할 수 있어 상용화시기가 빠를 것으로 예측된다. 상용화된 분산형 발전시스템으로서 미국 FCE(Fuel Cell Energy) 사는 소형 250kW급 용융탄산염형 연료전지(MCFC)의 실증 시험을 진행하고 있으며 현재 12MW 규모의 설비를 제작 중에 있다(그림 13). 또한 그림 14에서와 같이 고체산화물 연료전지는 가스 터빈과 복합화된 300kW급 시스템이 Siemens-Westinghouse 사에서 개발되어 운전시험 중이며, 1MW급 시스템 운전 시험이 계획되고 있다.

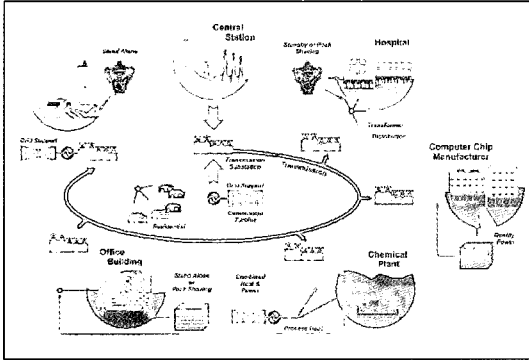


그림 12 분산전원형 발전시스템으로서의 연료전지

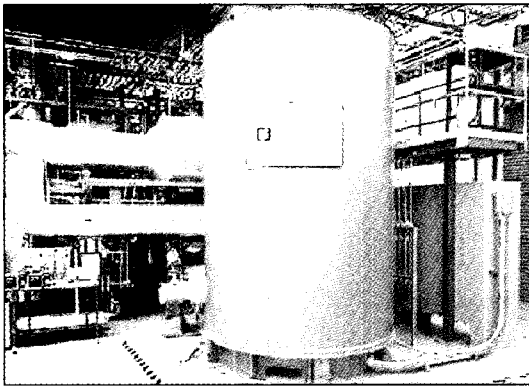


그림 13 미국 FCE(Fuel Cell Energy) 사의 용융탄산염형 연료전지(MCFC) 발전시스템

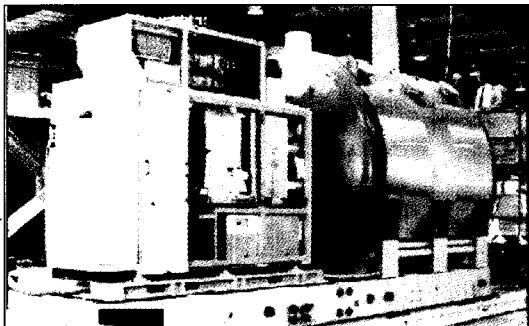


그림 14 독일 및 미국의 Siemens-Westinghouse 사의 고체산화물 연료전지(SOFC) 발전시스템

이와 같이 발전용 연료전지 기술은 화석 연료를 사용하는 발전소가 가지고 있는 문제점을 해결할 수 있는 미래의 신 발전 방식이지만 아직은 많은 연구 개발비와 연구 노력이 필요한 새로운 기술이다. 그래서 미국, 일본 및 EU 등 선진국가들은 지구환경 및 에너지 고갈 문제를 해결할 방법의 일환으로 수소 및 연료전지 관련 기술들을 개발하고 있으며 국가가 주도하여 개발 및 실증 프로그램을 추진하고 있다. 우리나라도 에너지 자원의 대부분을 수입에 의존하고 있는 상황에서 수소 에너지에 대한 기술력 확보를 통하여 앞으로 다가올 수소 경제에 대비하려 하고 있다. 이에 따라 2003년 정부에서는 대한민국의 21세기를 이끌어갈 국가의 핵심경쟁력을 제고하기 위한 10대 차세대 동력산업 중의 하나로 2차전지와 함께 연료전지를 선정하였다. 지금까지 대체에너지 기술의 한 분야로 인식되어 온 연료전지가 21세기의 국가경쟁력 향상에 필요한 기술 중의 하나로 그 중요성을 강조한 셈이다. 따라서 연료전지는 현재 우리가 당면하고 있는 3E(Environment, Energy 및 Economy)문제를 동시에 추구하여 달성할 수 있는 기술로서 그 중요성이 날로 더 해지고 있다.