

연료전지 발전기술 개발현황과 전망 (上)

신 동 열

한국에너지 기술연구소 전기에너지 연구실장

1. 서 론

우리나라는 부존자원이 빈약하여 석유를 위시하여 총에너지의 90%인 대부분의 에너지를 수입하여 사용하고 있다. 이러한 수입 에너지로 발전된 전력의 수요는 지속적인 국가 산업의 발달과 경제성장으로 인해 과거 5년 동안 연평균 약 12%의 높은 성장을 보여 왔으며 이러한 성장 추세는 앞으로도 계속될 전망이다.

한편 1973년 중동에서의 석유파동 이후 발전용 연료의 다원화는 세계적인 중요한 과제로 대두되어 왔으며 우리나라의 경우도 석유 화력발전소를 대체하기 위한 원자력 발전소, 석탄 화력발전소 등이 계속 건설되어 단기적으로는 이러한 대처방안이 효과적이었다고 볼 수 있다. 그러나 장기적으로 볼 때 전 세계의 화석연료 자원량은 급격히 줄어들고 있으며 더욱이 자원의 지역편재 등의 이유로 기존의 발전소들은 건설에 한계가 있다고 보겠다. 더욱이 최근의 우리나라 실정으로 볼 때 발전소 입지 확보의 어려움, 발전소 입지 지역주민의 반대, 환경공해 문제, 원전의 안정성 및 건설공기 등 여러 가지

복잡한 문제들 때문에 전력수요에 맞춘 발전소 건설은 어려운 실정에 있다.

이와 같은 어려운 점들을 극복하기 위한 장기적이고 효과적인 방안은 기술 개발을 통한 해결책 즉, 기존 발전기술의 발전효율 향상과 새로운 발전기술의 개발을 생각할 수 있다. 기존의 발전기술은 열기관(Carnot Cycle)의 제약을 받게 된다.

그러므로 투입된 연료 에너지중에 상당부분이 손실되어 열효율이 아무리 좋은 발전소라도 약 40% 이상을 넘지 못하고 있다. 따라서 기존의 발전기술을 통한 효율 향상에는 한계가 있다. 또한 기존 방식은 배기가스로 인한 CO, NO_x, SO_x 등 많은 공해물질을 배출하고 있어서 장래에는 이에 대한 해결책 없이는 새로운 발전의 건설에는 한계가 있을 것이다.

한편, 이와 같은 효율 향상의 한계 및 공해발생 등의 문제 때문에 무공해이면서 무한한 공급 능력을 갖고 있는 태양 에너지, 조력, 지열, 풍력 등의 대체 에너지 발전을 생각할 수 있으나 아직까지 기술개발, 입지제약 및 경제적인 이유

때문에 대량 이용에는 문제가 있다. 이에 비하여 새로운 발전기술, 즉 앞서 설명한 카르노 사이클의 제약이 없고, 기존발전 방식과 같이 연료를 태워서 만든 증기의 힘으로 터빈을 회전시키는 과정이 필요없이 연료 또는 에너지로부터 직접 전환(Direct Energy Conversion)하여 전기를 생산하는 기술이 차세대의 발전기술로서 각광을 받을 것이다.

이러한 새로운 발전 기술을 간략하게 설명하면 전기화학반응을 이용하여 연료로부터 직접 전기를 생산하는 연료전지 발전(Fuel Cell Power Generation), 반도체의 광전효과를 이용하여 태양에너지로부터 직접 발전하는 태양광 발전(Solar Cell Power Generation), 자장속을 고속의 플라즈마가 통과하도록 하여 직접 발전하는 자기 유체 발전(MHD Power Generation) 등이 있다.

이러한 신발전 기술중 장래가 가장 촉망되는 연료전지 발전기술은 연료 에너지로부터 전기화학반응에 의해 직접 전기를 생산하기 때문에 기존의 열기관이 갖고 있는 카르노 사이클의 제약이 없어서 효율이 획기적으로 높은 발전기술이다. 더욱이 연료전지는 연료가 전기화학적으로 반응하여 전기를 생산하는 과정에서 열도 발생되기 때문에 열병합 발전소 형태로 이를 이용한다면 발전 총효율 80% 이상의 획기적인 고효율 발전이 가능하다. 또한 연료전지는 발전시 연소과정이 없어서 공해 물질을 배출하지 않으며 화학반응을 이용하기 때문에 소음도 전혀없는 무공해 발전기술이다. 따라서 연료전지 발전은 앞으로의 주요 발전기술로서 대두될 것이며, 여러 가지 장점들로 인해서 화학발전소 대체, 분산 전원용 발전소, 열병합 발전소, 무공해자동차 등 다양한 응용이 전망된다.

한편 연료전지 발전기술 개발연구는 미국, 일

본 등지에서 선도하여 왔으며 최근 인산형 연료전지 기술은 실용화 단계에까지 와 있으나 중요 기술보호 측면에서 기술을 엄격히 보호하고 있어서 당분간 선진국으로부터의 기술이전은 기대하기 어렵다. 그러므로 우리나라도 가까운 장래에 선진국에 진입키 위해서는 연료전기 관련 선진기술의 추적과 기본기술개발 연구를 통한 국내 제조기술 확립 및 실용화를 대비한 연료전지 발전 플랜트 종합 설계 및 운전 기술에 대한 연구 개발이 요구된다.

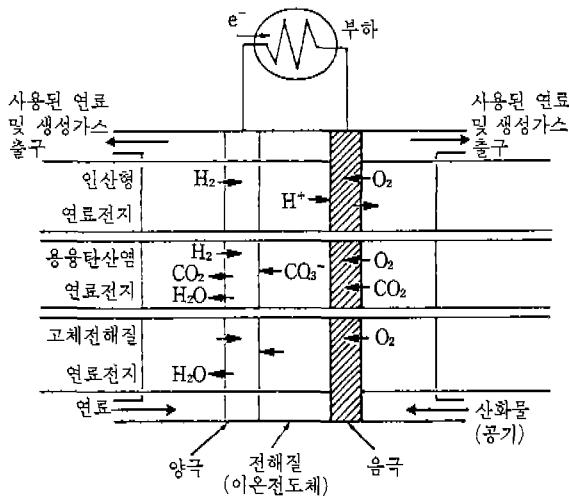
이와 같은 관점에서 본고에서는 차세대 발전기술의 주역으로 예상되는 연료전지 발전기술의 원리와 특징을 살펴본 후 연료전지 기술 현황과 개발전망에 대해 간략히 서술하고자 한다.

2. 연료전지 발전의 기초 및 특징

가. 발전의 기초

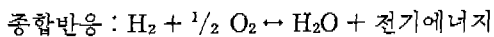
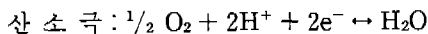
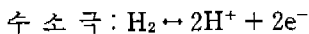
연료전지는 연료와 산소의 화학 에너지를 전기 에너지로 연속하여 변환시켜주는 전기화학적 전지(Electrochemical Cell)로 정의되며, 축전지와는 달리 수소(일반 연료로부터 만든 수소)와 산소(공기중의 산소)를 각각의 전극에 공급해서 연속하여 전기를 생산한다.

동작원리를 구체적으로 설명하면 그림 1에 표시한 바와 같이 이온(Ion)전도성이 좋은 전해질(Electrolyte)을 사이에 두고 2개의 다공질 전극을 갖는 형태로 구성되어 있으며, 농축 인산을 전해질로 사용하는 인산형 연료전지인 경우 연료극(Anode)으로 공급되는 수소(H₂)는 다공성의 전극을 통과하여 촉매처리된 표면에서 전기화학적인 산화 즉, 두 개의 수소이온(H⁺)과 전자(e⁻)로 분리되고, 여기서 생긴 전자는 외부회로를 통해 이동되어지며, 수소이온은 전해질을 통하여 산소극으로 움직인다. 산소극에서는 전극에 연결된 외부회로를 통하여 전자가



<그림 1> 연료전지 발전 원리

들어오며 전해질을 통해서 온 수소 양이온과 공급된 산소가 반응하여 물을 생성하게 되며 이때 전자의 흐름이 직류발전이 된다. 이와 같은 인산형 연료전지의 전기화학적 반응을 반응식으로 표현하면 다음과 같다.



나. 발전 시스템의 구성

연료전지에서 생산되는 전력을 사용하기 위

해서는 기본적으로 그림 2와 같이 연료 개질장치, 연료전지 본체 및 전력변환장치 등의 3가지 설비로 발전 플랜트를 구성해야 한다.

연료 개질장치는 수소를 포함하는 일반 연료 (LPG, LNG, 메탄, 석탄 가스, 메탄올 등)로부터 연료전지가 요구하는 수소를 많이 포함하는 가스로 변환하는 장치이다.

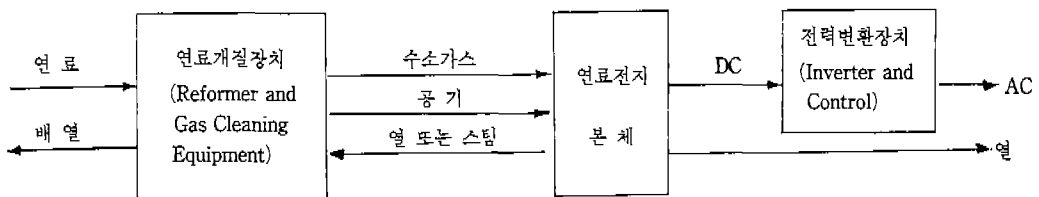
연료전지 본체는 연료 개질장치에서 들어오는 수소와 공기중의 산소가 앞에서 설명한 원리에 의해 직류 전기와 부산물인 물을 생산하는 장치이다.

전력변환장치는 연료전지에서 생산된 직류를 교류전력으로 변환시키는 장치이다.

이와 같은 기본적인 장치외에도 플랜트의 효율을 높이기 위해서는 연료전지 반응에서 생기는 반응열 및 연료 개질시의 폐열 등을 이용하는 장치가 필요하다.

다. 연료전지의 종류

연료전지는 일반적으로 전해질의 종류에 의해 분류하며, 알칼리형, 고체 유기 전해질형, 인산형, 용융탄산염형, 고체전해질형 등이 있다. 이들중 전력사업용으로는 인산형, 용융탄산염형 및 고체전해질형 연료전지가 유망하다. 표 1에는 대표적인 연료전지의 구성재료, 특징 등을 나타냈다.



<그림 2> 연료전지 발전 플랜트

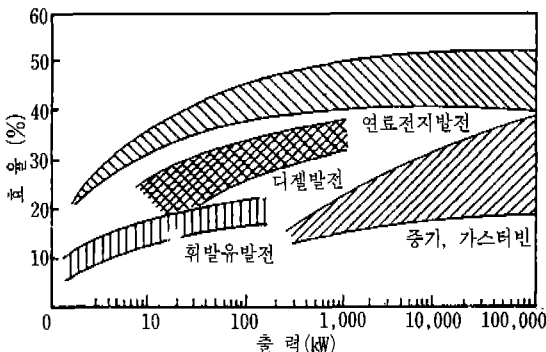
<표 1> 각종 연료전지의 재료와 특징

		인산 전해질형	용융 탄산염 전해질형	고온고체 전해질형
전해질형	전 해 질 Ion (전 도 체) 제 조 법	H ₃ PO ₄ 수용액 H ⁺ SiC 등 Matrix에 함침	Li ₂ CO ₃ - K ₂ CO ₃ /Na ₂ CO ₃ CO ₃ ²⁻ LiAlO ₂ 등 미분말과 혼합	ZrO ₂ (Y ₂ O ₃ CaO) O ²⁻ 박 막 상
전극	전 극 재 료 촉 매	다공질탄소판 백금류	다공성 Ni-Cr 소결체, 다공성 산화 Ni판	Ni판, 산화물 등
반응온도 [°C]		180~210	630~670	~1,000
Anode	가 스	재질수소	H ₂ , CO	H ₂ , CO
Cathode	가 스	공 기	공 기	공 기
단위전지출력밀도 [cm ⁻²]		0.3A×0.7V	0.16A×0.8V	0.5A×0.6V
Cell 구조 재료		Carbon, 백금촉매, Sic, 불소계 수지	Ni-Cr합금다공판, NiO다공판, LiAlO ₂ , SUS316	Ni, CO, In ₂ O ₃ , LaMnO ₃ , CoCr ₂ O ₄ , Al ₂ O ₃ 다공판
Anode/Cathode 허용차압		소	소	중
냉각방법		액체냉매 사용 공 냉	-	-
주요 열화요인		촉매 열화, 전해질 확산	전극, 기타부식, 전해질 확산	Cell 구성재료 변질
용도		On-Site 발전소 분산설치형 발전소	대형 발전소	대형 발전소

라. 발전특성

(1) 고효율 발전

연료전지 발전방식은 기존 화력발전과는 달리 연소과정이나 기계적인 일이 필요없는 직접 변환방식 즉 연료가 가지고 있는 자유에너지를 작동온도에서 직접 사용하므로 Carnot Cycle의



<그림 3> 발전시스템의 출력에 따른 효율 비교

제한을 받지 않기 때문에 발전효율이 높다.

연료전지 효율은 그림 3에서 보여주는 바와 같이 낮은 출력에서의 효율이 타 발전방식보다 월등히 높은 특성을 갖고 있다. 또한 기존 화력 발전은 정격 출력에서 가장 효율적인 반면 연료 전지는 정격 출력의 25~100%의 넓은 범위에서도 거의 일정한 효율을 갖는다.

(2) 배열 이용

인산형 연료전지 발전일 경우 연료개질 장치에서 발생하는 배열(천연가스 700~800°C, 메탄올 200~300°C) 및 전지본체에서 발생하는 열(160~180°C)은 회수하여 공정열로 이용할 수 있다. 이때의 전체효율(전기 및 열 에너지의 입력에너지에 대한 비율)은 80~90%로서 에너지 이용면에서 뚜렷한 장점을 갖는다.

(3) 무공해 발전

연소과정이 없기 때문에 기존 발전소에서 공

해요인이 되는 NO_x, SO₂ 및 분진의 배출이 무시할 정도로 적다. 또한 터빈과 같이 대형 회전기가 없기 때문에 소음 요인도 아주 적은 장점을 갖고 있다(출력 4,500kW 인산 연료전지 발전의 경우 30m 거리에서 55db 이하).

(4) 설치의 간편성

모든 구성품이 모듈 형태로서 대량 생산이 가능하고 신속한 조립설치가 가능하여 건설기간이나 건설부지를 절감할 수 있어서 앞으로 전지 본체의 상용화시에는 경제적으로 발전소를 건설할 수 있을 것이다. 또한 전력 수요에 맞도록 필요량만큼 추가결합이 가능하고, 전력 수요변화에 신속히 대처할 수 있으며, 일부의 고장이나 수리시에도 나머지 부분의 계속적인 발전이 가능하다.

(5) 연료의 다양성

인산형 연료전지는 가격이 저렴한 탄화수소 계열의 천연가스, 납사 합성연료인 메탄올, 에탄올 등의 연료를 사용할 수 있다. 또한 파이프망으로 공급되는 도시가스 및 폐기물 처리장에서 발생하는 가스(메탄류) 등을 발전용 연료로 사용할 수 있어 연료의 다양성이 있다. 인산형 연료전지보다 발전효율이 높은 고체전해질형 및 용융 탄산염형 연료전지 경우는 석탄 가스화설비와 연결시켜 석탄가스를 직접 연료로 사용할 수 있다.

3. 연료전지의 응용

가. 현지 설치용(On-Site)

현지설치(On-Site)형이라는 의미는 수십kW ~ 수천kW 출력규모의 연료전지 발전 플랜트를 호텔, 병원 슈퍼마켓 등의 전기 수요지 부근에

한국 최초의 과학위성 우리별 1호의 運搬體

아리안 4호는 어떤 로켓?

우리별 1호를 실어나를 아리안 로켓은 유럽우주국(ESA) 회원국이 공동 출자한 아리안 스페이스사가 개발 제작한 것이다. 1980년 설립된 아리안 스페이스에 참여한 국가는 벨기에, 덴마크, 프랑스, 독일, 아일랜드, 이탈리아, 네덜란드, 스웨덴, 스페인, 스위스, 영국 등 12개국이지만, 참여지분은 프랑스가 56.65%로 월등히 많다. 독일이 18.65%, 이탈리아 7.12%, 벨기에 4.33%, 영국 3.02% 순이다.

아리안 스페이스는 세계 처음으로 1981년부터 인공위성을 발사해 주고 그 대가로 회사를 운영하는 사업을 시작한 회사이기도 하다. 지난 13년간 모두 51회를 발사했으며 이번이 52회 발사이다. 그래서 로켓 명칭을 아리안 V52로 부른다. 현재 시장 점유율은 약 55%에 달한다.

아리안 로켓은 개발순서와 용도에 따라 1부터 4까지로 나뉜다. 1979년만 해도 아리안 1호 로켓으로 1,800kg의 무게를 발사할 수 있었으나, 2,200kg(아리안 2호), 2,600kg(아리안 3호)을 거쳐 4,200kg(아리안 4호)으로 늘어났다. 이번에 우리별 1호를 나른 로켓은 최신형인 아리안 4호이다.

이 로켓의 가장 큰 특징은 발사중량을 1,900kg에서 4,300kg까지 다양하게 변화시킬 수 있다는 점이다. 이를 위해 4개의 엔진 외에 여러 가지 보조로켓(부스터)을 단다. 기본 엔진만 장착한 로켓은 1,900kg을 발사하지만 액체연료를 쓰는 대형 부스터를 4개 장착한 것은 4,200kg을 실어나를 수 있다.

설치하여 이용하는 것이다. 연료전지는 특성상 소용량 발전규모에도 높은 발전효율을 얻을 수 있으며 부분부하에서도 전부하 정도의 효율을 가지고 있어 부하변동이 많은 장소에 설치가 유리하다. 또한 부하변동에 대한 응답성이 좋으며 대기오염 물질의 배출이나 소음을 무시할 수 있고 수요처에서 열과 전기를 동시에 공급할 수 있다. 이와 같은 이점을 응용 이용하기 위하여 미국, 일본 등에서는 40kW~수백kW급을 개발하여 은행, 상가, 아파트 등에 설치하여 수용가에 필요한 난방용 열 또는 온수와 전기를 동시에 공급하는 야외 시험을 완료한 바 있으며 계속 출력규모를 확장하여 응용연구를 수행중에 있다. On-Site형 연료전지 발전은 인산형 연료전지 발전시스템의 가장 유용한 응용분야 중의 하나이다.

나. 분산 배치용

연료전지 시스템의 분산배치용 전원은 2차 변전소 이하의 전력계통에 분산배치시키는 것으로 출력규모는 수천~수만kW 규모이다. 종래의 전원 개발은 대용량화에 따른 발전효율의 향상 및 비용절감을 추구함에 따라 입지 제약에 따른 수요지에서의 원격화가 진행되어 송변전 투자부담이 증대되고 있다. 이에 따른 문제점 해결의 하나로써 공해요인이 아주 적은 연료전지 시스템을 수요지 근방에 설치한다면 송배전 투자의 억제 및 송전 손실의 방지를 꾀할 수 있으며 송변전 설비의 고장에 따른 광범위한 정전을 꾀할 수 있어 계통의 신뢰도 향상을 도모할 수 있다. 이와 같은 응용분야의 실용화를 위한 기술개발은 미국이 개발한 교류출력 4,500kW의 인산형 연료전지 발전소가 미국의 뉴욕시와 일본의 고이 발전소에 건설되어 실증실험을 위한 발전실험을 성공리에 완수한 바 있다.

다. 화력 발전 대체용

대형 화력발전 대체용으로는 우선 출력규모에서 수백MW 이상의 용량을 가져야 한다. 이 같은 규모로서의 이용을 생각할 경우 운용형태로서는 전력부하의 기저부하(Base Load)로서나 첨두부하(Peak Load) 또는 중간부하(Mid. Load)의 이용을 생각할 수 있지만 이에 관한 문제로는 연료전지 특성 중 발전 열효율을 추구하는가, 부하추종성을 추구하는가가 문제가 된다.

그러나 현재 인산형의 경우에는 발전효율이 40% 정도로 최신탄 화력발전 정도이며 설치비용도 아직은 비싸기 때문에 첨두 및 중간 부하로서의 운용이 생각되고 있으며, 대형화력 대체용으로는 석탄 가스화공정의 가스연료를 사용할 수 있는 용융탄산염형 연료전지 발전 플랜트가 개발된 후부터 실용화 될 것으로 판단되고 있다.

라. 특수 용도

특수용도로서의 연료전지 응용은 벽지, 도서 지역과 같이 전력수급이 어려운 지역의 전원공급을 위한 지역발전용과, 우주선의 전원공급, 그리고 실내에서의 작업이 필요한 지게차의 전원공급, 도시환경 오염을 줄이기 위한 무공해 자동차 등의 동력원 등으로의 응용을 생각할 수 있다. 이의 한 가지 예로서 최근 미국, 일본에서는 축전지-연료전지 결합형 전원을 도시용 버스에 응용하여 출발시에는 축전지로, 주행시에는 연료전지로 구동되는 자동차를 연구 개발하여 시범운전하고 있다. 이외에도 각종 비상발전용, 해저탐사선의 동력, 잠수함의 동력, 무소음의 군사용 전원, 각종 레크레이션용 장비의 전원장치 등 다양한 분야에의 응용이 가능하다.

☛ 다음 호에 계속