

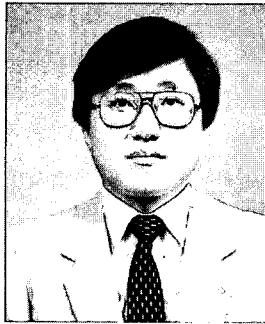
연료 전지 기술 동향

연료 전지 기술 동향

1. 서언

연료전지는 전기 화학 반응에 의하여 연료가 갖고 있는 화학에너지를 직접 전기 에너지와 열로 변환시키는 발전 장치이다. 따라서 원리상 열기관이 갖는 열역학적인 제한(Carnot 효율)을 받지 않으며 발전과 지역 냉난방 등에 의한 열 회수까지 고려할 때 열효율은 80%에 이른다. 또한 무소음으로 환경문제가 거의 없으며, 다양한 용량으로 제작이 가능하고, 전력 수요지 내에 설치가 용이하여 송변전 설비를 줄일 수 있는 등 전력 계통의 운영 측면에서도 기대가 큰 첨단 기술이다. 그러나 에너지 변환 장치로서의 연료전지는 현재 연료에 함유된 불순물에 따라 성능이 크게 영향을 받고, 제조 가격이 아직은 높으며, 장기적 성능 저하가 나타나는 등 문제점들을 안고 있어 성능, 수명의 향상 및 상용화를 위하여 많은 연구 개발이 계속되고 있다.

연료전지의 개발은 처음에는 우주선이나 군사용의 목적으로 시작되었으나 70년대 초의 오일파동 이후 본격적으로 민수용의 목적으로 개발이 진행되어 오고



김 화 응
서울 대학교 화학공학과

있다. 최초의 연료전지는 1839년 윌리엄 글로브경에 의해 발명되었는데 백금전극, 수소, 산소, 황산전해액 등으로 전기를 발생시켰다. 그 후 1952년 Bacon은 5kw 연료전지 Power plant를 세웠으며 특히 1960년 Gemini, Apollo 우주선에 연료

전지가 사용된 이후 본격적인 연구가 진행되었다. 미국에서는 1967년 이후 TARGET, 일본에서는 1981년 이후 NEDO를 중심으로 Moonlight 계획, New Sunshine 계획등 활발한 연구가 진행중이며 국내에서도 과기처, 통상산업부 등을 중심으로 G7프로젝트의 "신에너지 기술 개발"에 포함되어 기초적 성격의 연구가 진행중이다.

본고에서는 이러한 연료전지의 종류별 특징, 개발 현황 및 응용 분야를 간단히 소개하고자 한다.

2. 연료전지 발전 시스템 구성

연료전지 발전 시스템은 전기를 생산하는 연료전지 본체(fuel cell stack), 연료인 LNG, 석탄가스, 메탄올 등을 개

질하여 수소가 많은 연료가스로 만드는 개질기(reformer), 발전된 직류전기교류로 변환시키는 직교류변환기(inverter), 제어장치 그리고 배열이용시스템 등으로 구성되어 있다.

연료전지 본체는 적층된 수백장의 cell들로 구성되어 있으며 연료와 공기 등의 반응가스가 각 cell로 공급되도록 설계되어 있다. 기본적으로 각 cell은 전해질이 함유되어 있는 전해질판(electrolyte matrix)을 사이에 두고 있는 연료극(anode)과 공기극(cathode)의 두 전극으로 구성되어 있고 다시 각각 cell들은 분리판(separator)에 의하여 분리되어 있다. 연료전지에 필요한 반응가스를 공급하는 장치인 연료가개질장치는 사용되는 연료 특성에 따라 다르게 개발되고 있으며 연료전지의 저전압 및 고전류 특성에 맞는 직교류 변환장치 그리고 고온의 배열을 이용하여 열효율을 향상시키는 배열이용시스템등도 연료전지 발전 시스템에 필요한 주요 구성 요소들이다.

3. 연료전지의 원리 및 종류

연료전지 발전 시스템에서 가장 중요한 본체는 적층된 수백장의 단위 cell들

로 구성되어 있으며 연료와 공기 등의 반응가스가 각 cell로 공급되도록 설계되어 있다. 연료전지 발전의 원리를 가장 앞서 있는 인산형의 경우를 예로 들어 설명하면 그림 1에서 보듯이 연료전극에서 수소가 이온화되어 수소 이온 형태로 전해질을 통과하여 산화전극으로 이동하고 이온화시 발생한 전자는 외부회로를 통하여 산화전극으로 흘러가게 된다. 산화 전극에서 만난 산소, 수소이온 그리고 전자가 반응하여 물을 만들어 낸다.

연료전지는 전해질의 종류 및 작동 온도에 따라 분류되는데 인산 연료전지, 용융탄산염 연료전지, 고체산화물 연료전지는 민수용 전력 대체용으로 개발되고 있으며 알칼리 연료전지 및 고분자 전해질 연료전지는 단위 무게당 에너지 출력이 커서 수송용, 군사용, 우주선 등의 특수용으로 개발되고 있다. 각 연료전지의 작동 원리 및 특징은 표 1에 요약하였다.

가. 인산 연료전지(phosphoric acid fuel cell : PAFC)

인산 연료전지는 SiC matrix로 지지되는 진한 인산을 전해질로 사용하며 200℃ 정도에서 작동한다. 전극은 탄소

연료전지는 무소음으로 환경문제가 거의 없으며, 다양한 용량으로 제작이 가능하고, 전력 수요지 내에 설치가 용이하여 송변전 설비를 줄일 수 있는 등 전력 계통의 운영 측면에서도 기대가 큰 첨단 기술이다.

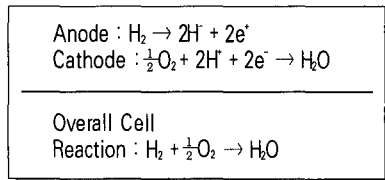
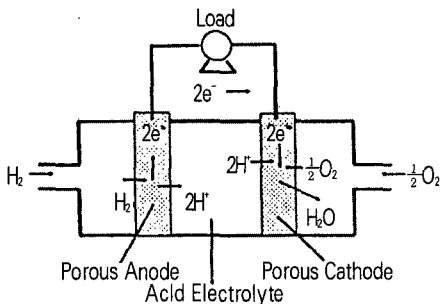


Fig. 1 Principle of a phosphoric acid fuel cell

신기술 동향

연료 전지 기술 동향

와 Teflon 혼합체로 된 다공성 구조 위에 50A 정도 크기의 백금 알갱이들을 입혀 사용한다. 연료로는 천연가스 또는 납사에서 개질된 수소를 사용하며 발전 효율은 35-40%이다. 전해질로 사용되는 진한 인산의 낮은 전기 전도도, 연료중에 불순물로 존재하는 CO 및 H₂S 등에 의한 전극 촉매의 비활성화 등이 이 연료전지의 문제점으로 지적되고 있다. 그러나 인산 연료전지는 어느 연료전지보다 기술개발이 앞서 있으며 일본에서는 현재 11MW 규모의 실증 시험을 수행 중에 있고 미국, 일본을 중심으로 곧 상용화될 전망이어서 제1세대 연료 전지라 불리기도 한다.

나. 용융탄산염 연료전지(molten carbonate fuel cell : MCFC)
 용융탄산염 연료전지는 LiAlO₂ matrix로 지지되는 용융탄산염을 전해질로하여 650℃ 정도에서 작동한다. 고온에서 작동하며 전극에서의 전기화학 반응속도가 빠르므로 백금 등의 비싼 촉매 대신 Ni 및 NiO가 전극으로 사용된다. 용융탄산염 연료전지는 양질의 폐열을 얻을 수 있어 열병합 발전으로 시스템의 효율을 증가시킬 수 있으며, 연료로는 수소 이외에 CO의 사용이 가능하므로 석탄가스화 장치와 조합하여 대규모 발전 시스템을 구성할 수 있다. 또한 고온 운전시 발생하는 열로 천연가스를

표 1. 연료전지 종류별 구성요소재료 및 특징

구성요소 및 특징	인산	용융탄산염	고체산화물	알칼리	고분자전해질
전해질	H ₃ PO ₄	K ₂ CO ₃ -Li ₂ CO ₃	ZrO ₂ -Y ₂ O ₃ 또는 ZrO ₂ -CaO	KOH용액	sulfonated hydrocarbon acidic ion exchange membrane
전해질판	SiC	LiAlO ₂	고체산화물	Asbestos	고분자 전해질
전극	Pt	Ni, NiO	Ni _{0.8} -ZrO ₂ -La _{0.9} Sr _{0.1} MnO ₃	Pt, Pt-Au 합금	Pt
연료	H ₂	H ₂ -CO	H ₂ CO	H ₂ (고순도)	H ₂
산화가스	공기	공기-CO ₂	공기	O ₂ (고순도)	O ₂
조업온도(℃)	160-190	650	800-1,100	82-104	82
전지전압(V)	<0.8	<0.85	<0.9	<0.97	<0.95
불순물허용치	CO<2,000ppm H ₂ S<1ppm	No H ₂ S	미결정	No CO, No CO ₂	CO<2,000ppm H ₂ S<1 ppm H ₂ S
연료극 반응	H ₂ →2H ⁺ +2e ⁻	H ₂ +CO ₂ → H ₂ O+CO+2e ⁻	H ₂ +O ₂ → H ₂ O+2e ⁻ CO+O ₂ → CO ₂ +2e ⁻	H ₂ +2OH ⁻ → 2H ₂ O+2e ⁻	H ₂ →2H ⁺ +2e ⁻
공기극 반응	2H ⁺ +1/2O ₂ +2e ⁻ →H ₂ O	CO ₂ +1/2O ₂ +2e ⁻ →O ²⁻	1/2O ₂ +2e ⁻ →O ²⁻	H ₂ O+1/2O ₂ +2e ⁻ →2OH ⁻	2H ⁺ +1/2O ₂ +2e ⁻ →H ₂ O

전지 내부에서 직접 수소와 CO로 개질하여 연료로 이용하는 내부 개질 방법이 가능하므로 연료의 전처리 공정을 단순화시킬 수 있는 장점도 있다.

그러나 고온의 용융탄산염 분위기에서 구성 재료의 부식문제가 있어 내식성 재료의 개발이 필요하다. 또한 전해질인 탄산염은 상온에서 고체이고 연료전지 온도에서는 액체이므로 전지의 운전 중단 및 재작동시 열 사이클에 의해 발생하는 체적 변화에도 성능 변화 없는 내구성 재료 및 전지 구성 요소 개발이 필요하다. 인산 연료전지가 상용화 단계 목적에 두고 있는데 비하여 용융탄산염 연료전지는 100kW 급 stack의 성능을 시험하는 수준이며 5년쯤후에나 상용화 규모의 stack이 구성될 전망이다.

다. 고체산화물 연료전지(solid oxide fuel cell : SOFC)

고체산화물 연료전지를 ZrO_2 의 고체산화물을 전해질로 사용하기 때문에 액체 전해질 때문에 생기는 제반 문제를 피할 수 있고 작동 온도가 $1,000^\circ C$ 로 높아 용융탄산염 연료전지가 갖고 있는 장점을 모두 갖고 있다. 반면 고체산화물 연료전지는 높은 온도에서 내열성, 내구성, 내전도성을 가진 공로 재료의 개발이 필수적이며 이러한 재료의 개발 및 선정이 주요 연구 대상이 되고 있다. 미국의 Westing House사에서 처음으로 원통형 형태의 연료전지 stack이 개발되었으나, 원통형 형태의 연료전지는 제작비가 비싼 단점이 있어 일본이나 유럽에서는 평판형 고체산화물 연료전지를 개발하고 있다. 이 연료전지의 상용화 시기는 용융탄산염 연료전지보다 늦은 21세기에 가능하리라 평가되어 제3세대 연료전지라 불린다.

라. 알칼리 연료전지(alkaline fuel cell : AFC)

알칼리성 수용액을 전해질로 사용하는 전지로서 연료가스 및 산화제로는 순수한 수소 및 산소가 필요하다. 다른 연료전지에 비하여 높은 효율을 기대할 수 있어 저온에서도 기전이 가능하다. 이러한 특징 때문에 우주선 및 잠수함 등의 특수한 분야에서 주로 이용되었다. 전극으로 백금 또는 금/백금 합금이 사용된다. 그러나 개질 반응시켜 얻은 수소를 연료로 사용하려 할 때는 CO_2 를 사전 제거해야 하는 단점이 있다.

마. 고분자전해질 연료전지 (solid polymer electrolyte fuel cell : SPEFC)

고분자전해질 연료전지는 우주선용으로 개발되어 실용화되었으나 고가의 고분자전해질, 과다한 백금 사용량, CO에 의한 촉매독 및 낮은 조업온도 등이 문제점으로 지적되고 있다. 우주선외에 해저작업선 전원이거나 전기 자동차 등에 응용하기 위해서는 전동성 및 안정성이 우수한 새로운 전해질 개발이 우선되어야 할 것이다. 또한 백금 대신 사용될 수 있는 비귀금속 촉매개발 및 전극구조의 최적화 연구도 필요하다. 그러나 최근 환경오염의 심각성에 따른 전기자동차의 개발과 함께 수송용 전원으로로서의 고분자전해질 연료전지의 개발도 활발히 진행되고 있다.

4. 연료전지 응용 분야

가. 현지설치형 열병합 발전

수십 kW에서 수천 kW 출력 규모의 연료전지 발전 플랜트를 전기 수요지인

공업용 열병합 발전에는 열과 전력의 수요 특성과 대용량 전력의 필요성 때문에 증기터어빈 및 가스터어빈 겸용식과 경쟁 기술인 반면, 상업용 또는 거주용 열병합 발전에는 전통적인 왕복기관이 소음, 매연, 크기 등의 단점이 있기 때문에 연료전지에 의한 열병합 발전이 더 각광을 받을 것으로 예상된다

호텔, 병원, 아파트, 공장 등의 거주지구, 상업지구 및 공업지구에 설치하여 연료전지에서 발생하는 열과 전기를 동시에 공급하는 방법이다. 연료전지는 특성상 소용량 발전 규모에도 높은 발전 효율을 얻을 수 있으며 용량 규모 또는 부하율에 관계없이 효율이 일정하기 때문에 부하변동이 많은 장소에 설치가 유리하다. 또한 부하변동에 응답성이 좋고 대기 오염 물질의 배출이나 소음을 무시할 수 있기 때문에 현지설치형으로 아주 적합하여 냉방, 난방 등의 열 수요가 높은 도시에 연료전지의 배열을 이용한 지역 냉난방과 연계한 연료전지 발전에 조만간 실용화가 예상된다. 냉방 수요에 대해서는 흡수식 냉동기에 의하여 냉수를 제조하고 난방 수요에 대해서는 난방용 열교환기로 온수를 제조하게 된다. 제조된 냉수, 온수는 축열조에 축열되어 주야간의 열수요에 대응하게끔 설비용량이 결정되어야 한다.

공업용 열병합 발전에는 열과 전력의 수요 특성과 대용량 전력의 필요성 때문에 증기터어빈 및 가스터어빈 겸용식과 경쟁 기술인 반면, 상업용 또는 거주용 열병합 발전에는 전통적인 왕복기관이 소음, 매연, 크기 등의 단점이 있기 때문에 연료전지에 의한 열병합 발전이 더 각광을 받을 것으로 예상된다. PAFC가 가장 먼저 현지 설치형으로 실용화 될 전망이다. 기술개발에 따라서는 내부개질형 SOFC와 산업용의 경우 내부개질형 MCFC의 이용도 전망된다. 미국과 일본에서는 200kW에서 50kW급 PAFC발전설비가 시험적으로 주문 판매되고 있으나 경제성 면에서 아직은 미흡한 실정이다. 일본의 동경전력은 200kW의 연료전지 발전 플랜트를 동경의 한 빌딩 지하에 설치하여 지역 냉난방 열병합 실

증실험을 1990년부터 실시해 오고 있다.

나. 분사배치형 발전

사용자와 가까운 거리에 설치하여 송전비용을 절감하기 위한 발전으로 출력 규모는 수천kW에서 수만 kW규모이다. 종래의 전원 개발은 대용량화에 따른 발전효율의 향상 및 비용절감에 중점을 두어 왔고 이에 따라 입지 선정에 제약이 있어 수요지로부터의 원격화가 진행되어 송변전 투자부담이 증대되어 왔다. 이에 따른 문제점 해결의 하나로써 공해요인이 아주 적은 연료전지 시스템을 수요지 근방에 설치하여 송배전 투자의 억제 및 송전 손실의 방지를 꾀하는 동시에 송변전 설비의 고장에 따른 광범위한 정전을 피할 수 있어 전력 계통의 신뢰도 향상을 도모할 수 있다. 이와 같은 응용 분야의 실용화 기술개발의 예로서 최근 미국이 개발한 교류출력 4,500kW의 인산형 연료전지 발전소가 미국의 뉴욕시와 일본의 고이 발전소내에 건설되어 실증실험을 성공리에 완수한 바 있다. 이 응용 분야에서는 PAFC가 제일 먼저 실용화될 전망이며 MCFC 및 SOFC도 기술개발에 정도에 따라 경쟁 기술로 등장 할 것이다.

다. 중앙공급형 발전

전통적인 전력 공급 방식으로 출력규모에서 수백 MW이상의 용량을 가져야 한다. 이와 같은 큰 규모의 경우 운용 형태로서는 전력부하의 기저부하(base load), 첨두부하(peak load), 또는 중간부하(mid load)로서의 운용이 있을 수 있으나 이는 연료전지 특성 중 발전 열효율을 추구하는가 또는 부하 추종성을 추구하는가에 따라 달라진다. 그러나 현재 PAFC의 경우 발전효율이 40%정도로

최신 화력발전 수준이며 설치비용도 아직은 비싸기 때문에 침두 및 중간 부하로서의 운용이 생각되고 있다. 대형 화력발전소 또는 노후 발전소 대체용으로는 석탄 가스와 공정의 가스연료를 사용할 수 있는 MCFC발전 플랜트가 개발된 후 라야 가능할 것으로 판단되고 있다.

라. 특수용도

특수용도로서의 연료전지 응용에는 벽지나 도서지역과 같이 전력 수급이 어려운 지역의 전원공급과 우주선, 실내에서의 작업이 필요한 지게차 및 도시환경 오염을 줄이기 위한 무공해 자동차의 동력원 공급 등이 있다. 이의 한가지 예로서 최근 미국, 일본에서는 축전지와 연료전지의 결합형 전을 도시용 버스에 응용하여 출발시에는 축전지로, 주행시에는 인산 연료전지로 구동되는 자동차를 시범 운전하고 있다. 이외에도 각종 비상발전, 해저탐사선의 동력, 잠수함의 동력, 무소음의 군사용 전원, 각종 레크레이션용 장비의 전원장치 등 다양한 분야에로의 응용이 가능하다.

5. 연료전지 실용화 전망

미래의 발전 기술로 각광받는 연료전지는 아직도 많은 연구 개발비가 투자되는 개발단계이기 때문에 경제성 및 정확한 시장 예측은 어려우나 90년대 후반부터 인산 연료전지를 중심으로 부분적으로 실용화되면 21세기의 주요한 에너지 기술로 등장할 것이다. 2000년도까지 전 세계적으로 약 800,000MW의 추가 전력이 소요될 것으로 예상되는 이 중 분산배치형과 열병합 발전에 해당하는 용량 300,000MW의 약 10%가 연료전지로 대체된다고 가정하면 연료전지 발전의 시장 규모는

매년 4,000MW로 추정된다)일본 통산성 예측의 경우 일본에서 2000년까지 연료전지 도입량은 2250MW로 추정함). 연료전지에 의한 발전을 2000년도에 매년 4,000MW로 끌어올리고 그 이후 계속 시장규모를 늘려 나가기 위해서는 다음과 같은 전제가 필요하다.

1) 선진국을 포함한 각 나라에서는 공해문제에 대한 해결책의 일환으로 발전의 필요성이 적극 홍보되고 제도적 뒷받침이 있어야 한다.

2) 연료전지 발전의 기술적인 문제 해결과 가격 저렴화가 이루어져야 한다. 즉 25,000시간 이상의 연속조업, 40,000시간 이상에서의 stack교체, 40%이상 (45-45%)의 발전효율, \$1,500-1,700/KW의 건설단가(대량생산의 경우 \$1,200KW) 등의 목표가 이루어져야 한다.

6. 결론

연료전지는 고효율 및 무공해 발전장치로 2000년대 이후 본격적인 실용화가 예상되는 첨단 기술 분야이다. 급속한 경제발전과 국민생활 향상에 따라 급증하는 전기에너지 사용량을 충족시키기 위해서는 발전효율이 좋고 환경 보존이 우수한 발전 기술이 요구되고 있으며 이에 부합되는 연료전지 발전시스템의 개발은 필수적이다. 선진 외국의 기술 수준에 비하여 낙후된 우리의 기술수준을 최단시간내 향상시키기 위해서 막대한 개발투자비에 대한 지속적인 정부지원과 산·학·연의 협동체제가 어느 때보다 요구되고 있다.

**급속한
경제발전과
국민생활 향상에
따라 급증하는
전기에너지
사용량을
충족시키기
위해서는
발전효율이 좋고
환경 보존이
우수한 발전
기술이 요구되고
있으며 이에
부합되는 연료전지
발전시스템의
개발은 필수적이다.**