

분산발전용 연료전지 및 연료전지/가스터빈 하이브리드 시스템

이 글에서는 분산발전 시스템으로 주목받고 있는 연료전지 및 연료전지/가스터빈 하이브리드 시스템을 소개하고, 이들의 최근 기술개발 동향 및 향후 전망에 대해 기술하고자 한다.

김재환 / 한국항공우주연구원 항공추진그룹, 선임연구원

e-mail : kjaehwan@kari.re.kr

최근까지의 전력생산은 고효율화 및 규모의 거대화를 통한 집중 관리방식으로 이루어져 왔으나, 원거리 송전에 따른 전력손실, 대규모 발전소 부지 확보의 어려움, 급증하는 전력수요에 대한 느린 대처 등의 문제로 인해 더 이상의 규모 확대에 의문이 제기되고 있다. 이에 따라 수요처 근거리에서 전력을 생산하여 전량을 공급하거나 이미 사용 중인 중앙집중식 전력공급을 보완하는 형태의 분산발전이 차세대 전력공급 방식으로 주목받고 있다. 분산발전에 사용되는 동력원은 수요처 근방에서 전력생산을 해야 하기 때문에 공해 배출물이 적어야 하며, 소형화에 따른 효율저하가 심하지 않아야 한다. 분산발전용 동력원으로는 왕복동엔진, 가스터빈 등의 기존 열동력 기관이나 풍력, 태양력 등의 재생 에너지 장치 및 연료전지 등의 직접 에너지변환 장치 등이 있다. 이들 중 연료전지는 타 동력원에 비해 효율이 높을 뿐만 아니라 소형화에 따른 효율저하 폭이 작기 때문에 분산전원으로서의 활용 가능성이 매우 높지만 타 동력원에 비해 낮은 기술 성숙도, 고가의 제작 및 설치비용 등의 이유로 상용화 적용에 많은 어려움을 겪어왔다. 하지만 최근의 소재개발 및 스택설계 기술 향상 등의 기술발전뿐만 아닌 미래 수소사회의 핵심적인 동력원이 될 것이라는 기대와 환경문제 등에 힘입어 전 세계적으로 기술개발 및 상용화 노력이 매우 활발히 진행되고 있다.

연료전지 및 하이브리드 시스템 개요

연료전지는 연료와 산화제가 연소가 아닌 전기화학 반응을 통해 전기를 생산하는 장치이다. 그림 1에서 보는 바와 같이 연료전지는 전해질을 두 개의 전극(연료극, 공기극)이 싸고 있는 형태로 되어 있으며 연료극으로 수소나 수소포함 가스가 공급되고 공기극으로 산소나 공기가 공급된다. 이 때 촉매전극에 의해 수소는 수소이온과 전자로 분리되고 이들은 각각 다른 경로를 통해 공기극으로 이동하는데 전자는 도선을 통해 이동하며 이것이 전류에 해당한다. 수소이온은 전해질을 통해 공기극으로 이동하며 이곳에서 도선을 통해 이동한 전자 및 산소와 결합하여 물이 된다. 연료전지의 운전특성은 전해질의 종류에 따라 달라지기 때문에 연료전지를 전해질의 종류에 따라 분류하는 것이 일반적이나 각 전해질이 각자 다른 온도에서 이온 전도성을 갖기 때문에 작동온도로 분류되기도 한다. 한편 한 개의 연료전지(단위전지)에서 나오는 전압은 통상 0.6~0.8V 정도로 매우 낮기 때문에 여러 개의 셀을 직렬로 연결하여 100~500kW 단위로 스택을 만들고 스택단위로 발전 시스템을 구성하는 것이 일반적이다. 실제 발전 시스템이 되기 위해서는 그림 2에서 보는 바와 같이 연료전지 스택 이외에 연료를 다량의 수소가 포함된 가스로 변환시켜주는 연료처리장치, 공기 공급 시스템, 생산된 직류전기를 상용 교류전원으로 바꿔주는 전력변환장치, 고온 배기가스의 폐열을 이용할 수 있는 배열이용 장치 등이 필요하다.

분산발전용 연료전지 및 연료전지/가스터빈 하이브리드 시스템

한편 연료전지/가스터빈 하이브리드 시스템은 기존의 고온형 연료전지 발전시스템(그림 3)의 고 효율화를 목적으로 고안되었다. 그림 3에서 보는 바와 같이 고온형 연료전지 발전시스템에는 연료전지 스택에서의 전기화학반응에 필요한 산소 또는 공기의 공급을 위해 일반적으로 전기로 구동되는 송풍기가

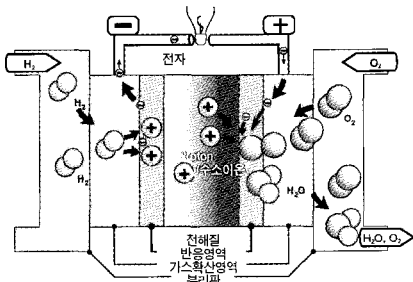


그림 1 연료전지의 작동원리

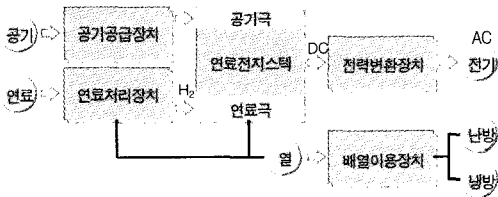


그림 2 연료전지 시스템의 구성

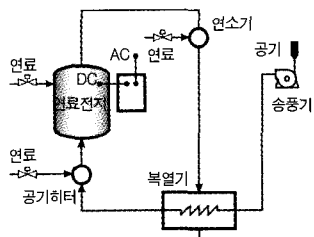


그림 3 고온형 연료전지 발전시스템

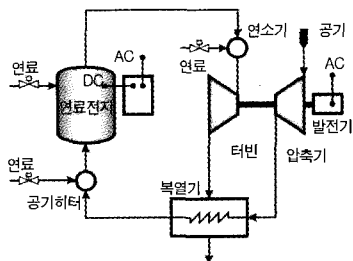


그림 4 가압형 혼합형 발전시스템

사용된다. 또한, 연료전지 스택은 공급되는 연료의 약 80~85% 정도만이 반응하게끔 설계되기 때문에 반응하지 않은 연료의 연소를 위한 스택 후방의 연소기, 연소된 고온가스와 스택으로 공급되는 공기의 열교환을 위한 복열기(recuperator) 등을 필요로 한다. 이러한 고온형 연료전지 발전시스템이 그림 4에서 보는 바와 같이 가스터빈과 하이브리드 화될 경우, 1) 연료전지 스택으로 가압된 공기를 공급할 수 있어 스택자체의 발전효율이 높아지며, 2) 연료전지 출구의 고온(600~1,000°C) 반응가스는 압축기 구동용 터빈을 구동하는 데 사용되어 시동을 제외한 운전 중에 공기공급을 위한 전력사용이 없게 된다. 또한, 3) 압축기 구동 후 여분의 터빈동력으로 추가전력을 생산하여 결과적으로 전체 시스템의 발전효율 증대를 가져온다.

현 기술 수준에서 천연가스를 연료로 하여 연료전지 발전시스템 단독운전으로 얻을 수 있는 발전효율은 약 45% 수준이며 가스터빈과 하이브리드 시스템을 구성할 경우 현 기술 수준에서 약 60%에 가까운 발전효율을 얻을 수 있으며, 미국의 경우 2010년에 70% 이상, 2015년에 80% 이상의 발전효율로 전력시장에 진입한다는 목표를 가지고 있다.

분산발전용 연료전지 및 하이브리드 시스템의 특징 및 개발 현황

앞서 언급한 바와 같이 연료전지는 전해질의 종류에 따라 표 1과 같이 분류되며 이 중 고분자 연료전지(PEMFC), 인산형 연료전지(PAFC), 용융탄산염 연료전지(MCFC), 고체산화물 연료전지(SOFC)가 분산전원으로서의 적용 가능성이 높다. 특히 용융탄산염 연료전지와 고체 산화물 연료전지는 반응 후 얻는 고온의 배기가스를 이용하여 수오저치의 냉난방에 활용 가능하기 때문에 CHP(Combined Heat & Power) 시스템에도 매우 유리하다.

고분자 연료전지

고분자 연료전지의 전해질은 고체 고분자 막으로 되어 있으며 통상 60~90°C로 운전된다. 다른 분산

표 1 연료전지의 종류 및 특징

구분	고분자 연료전지	인산형 연료전지	용융 탄산염 연료전지	고체산화물 연료전지
전해질	나피온(이온 교환막)	인산	용융탄산염	안정화 지르코니아
작동 온도	60~90°C	200°C	650°C	800~1,000°C
이온 종류	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻
발전효율(NG), %	30~42	38~42	50~55	30~55
발전효율(수소), %	38~50	47~50	-	-
적 용	자동차, 가정용	상업용, 산업용 열병합	열병합 발전용	열병합 발전용
출력 범위, kW	2~200	50~10,000	200~100,000	1~100,000
개발 상황	시제개발 및 상용화	실용화	시제개발 및 상용화	시제개발

발전용 연료전지에 비해 낮은 온도에서 운전되는 이유는 고분자 막의 이온 전도성을 높이기 위해 공급하는 물의 증발을 막기 위함이다. 고분자 연료전지는 고순도의 수소를 연료로 하지만 자연적으로는 이를 얻을 수 없기 때문에 천연가스나 메탄올과 같은 연료를 개질하여 얻는 것이 일반적이다. 개질 후의 연료에는 수소 이외에 일산화탄소 등과 같은 다른 가스들이 포함되어 있는데 일산화탄소가 50ppm 이상일 경우 백금 촉매전극을 부식시켜 연료전지 성능이 저하되는 단점을 갖고 있다. 따라서 탄소를 포함한 모든 연료는 개질반응 후 추가적인 연료처리가 필요하다. 고분자 연료전지는 수소만을 연료로 할 경우 38~50%의 발전효율이 가능하나 천연가스 등의 연료로 운전할 경우 개질에 필요한 추가연료의 사용으로 발전효율이 낮아진다.

고분자 연료전지는 전해질로 고체 고분자 막을 사용하기 때문에 취급이 용이하며 다른 연료전지에 비해 부피와 무게가 작아 가정용이나 소규모 상업용 전원으로 유리하며 가정에 온수를 공급할 정도의 열회수가 가능하다. 분산발전용 고분자 연료전지는 현재 시제개발 단계에서 상용화 개발 단계로 넘어가는 단계이며 선진 각국에서 상용화를 위한 개발이 활발히 진행되고 있다. 일본의 경우 주로 1kW급의 가정용 시스템 개발에 초점을 맞추고 있으며, 미국의 경우 5~7kW 급, 국내에서는 1~5kW급의 가정용 시스템이 개발 중에 있다. 상용화에 가장 근접한 대표적 고분자 연료전지는 미국 Plug Power 사의 GenSys™(그림 5)로 이미 100대 이상이 전 세계적으로 설치되어 운전되고 있다. GenSys™는 5kW전력과 9kW의 열을 공급하는 CHP 시스템이

며 계통연계 및 단독운전이 가능하다. 현재 GIB를 포함한 관련 업체들과의 협조 하에 기술협력 및 판매망 확충에 힘쓰고 있다.

인산형 연료전지

인산형 연료전지의 전해질은 액체형태의 인산이며 약 200°C에서 운전된다. 전해질이 액체이기 때문에 전해질의 증발 및 이온전도 등에 세심한 컨트롤이 필요하며 고분자 연료전지와 마찬가지로 고가의 백금 촉매전극이 사용되기 때문에 연료전지로 유입되는 일산화탄소량이 체적분을 기준으로 할 때 약 5% 이하로 제한된다. 인산형 연료전지는 상업 및 산업분야 전기공급에 유리하며 200°C 정도의 작동온도는 60~120°C 정도의 온수나 저압스팀을 공급할 수 있어 CHP 시스템 구성이 가능하다. 따라서 열 사용량이 비교적 많은 호텔, 병원 및 학교 등의 전원으로 적합하다.

인산형 연료전지는 현재 유일하게 상용화에 성공한 연료전지이며 International Fuel Cell/

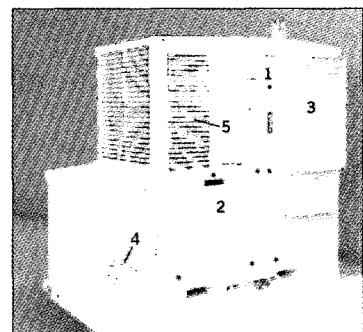


그림 5 Plug Power 사의 GenSys™

분산발전용 연료전지 및 연료전지/가스터빈 하이브리드 시스템

ONSI(현재 UTC Power)에 의해 처음 상용화된 후 현재 전 세계적으로 300여기 이상이 운전되고 20여기 이상이 40,000시간 이상 운전되는 등 상용화의 필수조건인 내구성 및 신뢰성을 확보함으로써 상용화의 완성 단계에 있다. 다만 향후 50~60% 이상의 설치비용을 절감해야만 시장 경쟁력을 가질 수 있기 때문에 설계기술 향상 및 구성부 제작 단가 절감을 통한 비용절감이 상용화의 마지막 숙제로 남아있다. 앞서 언급한 미국 UTC Power의 PureCell™ 200 시스템(그림 6)이 가장 대표적이고 상용화에 성공한 인산형 연료전지이며 출력 200kW, 60°C에서 925,000Btu/hr의 열회수 성능, 발전효율 35%, 총합 열효율은 85%까지 육박한다. 국내에서는 1985년에 전력 연구원에서 소규모 인산형 연료전지를 개발 운전함으로써 본격적인 연구개발이 시작되었으며 현재는 LG정유에서 50kW급 시스템이 개발되어 시험운전 되고 있다. 인산형 연료전지는 이미 상용화된 다른 가스엔진, 마이크로터빈 등의 분산형 전원엔에 비해 아직도 제작 및 설치비용이 높지만 열병합 시스템으로 응용될 경우 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

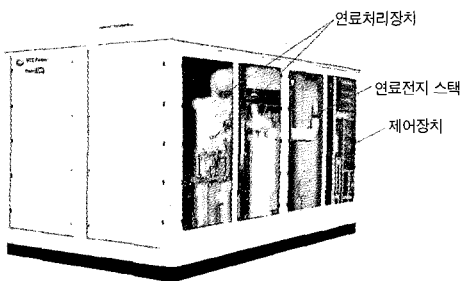


그림 6 UTC Power사의 PureCell™ 200

용융 탄산염 연료전지

용융 탄산염 연료전지의 전해질은 낮은 용융점을 가지는 탄화리튬과 탄화포타슘의 혼합물이며 전극은 다공성 니켈로 만든다. 저온형 연료전지와 비교할 때 용융 탄산염 연료전지의 가장 큰 장점은 일산화탄소, 이산화탄소 및 수소에 대하여 내성이 있는 점이다. 이것은 일산화탄소와 이산화탄소를 분리하는 공정을 필요로 하는 저온형 연료전지보다 초기 투자비가 낮고 시스템 설계가 매우 단순해지는 결과를 가져온다. 용융 탄산염 연료전지의 운전 온도는 약 650°C이기 때문에 스택에서 발생한 반응열로 전지 내부에서 탄화수소 기체의 개질이 가능하여 설치비용의 30% 또는 그 이상의 비용을 감소시킬 수 있다.

용융 탄산염 연료전지도 현재 시제개발 단계에서 상용화 개발 단계로 이행되고 있으며, 대표적인 시스템으로는 그림 7에서 보는 바와 같이 FuelCell Energy사의 DFC300, DFC1500, DFC3000이 있다. 각 시스템들의 출력은 250kW, 1MW, 2MW이며 현재까지 설치되어 운전된 연료전지들 중 최대 출력을 보인다. DFC300은 약 11,800시간의 운전을 통해 발전효율 45%의 성능을 보였으며, 2MW 시스템은 1995년부터 2000년까지 미국 Wabash River Energy사에 설치되어 실증운전을 성공적으로 수행하였다. 국내에서는 한전을 주관기관으로 하여 100kW급 외부 개질형 연료전지 개발과제가 1993년부터 추진되어 오고 있으며 중간단계로 1995년에 25kW 시스템을 개발하여 전력 연구원에서 운전 하였으며, 최종 목표인 100kW 시스템은 2005년 2월에 참여업체인 중부발전의 보령화력발전소 구내에 설치하여 운전을 시작하여 현재 시험 중에 있다.

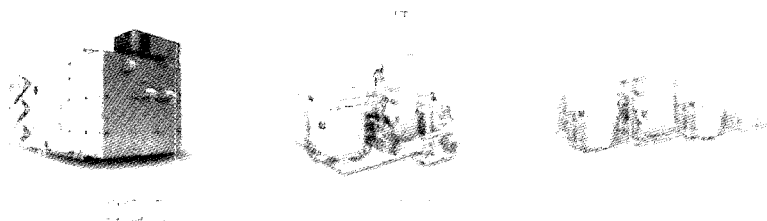


그림 7 FuelCell Energy사의 DFC Series

고체산화물 연료전지

고체산화물 연료전지는 안정화 지르코니아라는 고체형태의 전해질을 채택하고 있으며 운전온도는 800~1000°C로 분산발전용 연료전지 중 가장 높

은 작동온도를 갖는다. 고온의 작동온도에서는 수소 뿐만 아닌 일산화탄소도 전기화학반응을 통해 전기를 생산하며 용융 탄산염 연료전지와 마찬가지로 스택 내부에서 촉매 없이 연료가 개질된다. 이는 개질에 필요한 별도의 열 공급이나 저온 연료전지에서와 같은 고가 촉매전극이 불필요함을 의미하며 설치비용 저감을 가져온다. 하지만 고온에서 운전될 경우 셀 및 스택구성에 필요한 재료의 열 및 기계적 특성이 엄격하게 요구되며 새로운 세라믹, 금속/세라믹 복합재, 고온 합금 등의 고가 재료 및 이들의 제작에 필요한 고가 제작공정 때문에 결국 설치비용은 다른 연료전지에 비해 상대적으로 높다. 따라서 좀더 낮은 온도 600~700℃ 정도의 온도 범위에서 운전되는 중온형 연료전지 개발에 초점이 맞춰지고 있다. 고체산화물 연료전지는 크게 원통형과 평판형으로 분류되는데 원통형은 대형화에 유리하여 상업용 또는 산업용 분야의 대용량 발전에 적합하며 평판형은 통상 300kW 이하의 소용량으로 자동차용이나 가정용으로 쓰인다.

현재 가장 선도적으로 분산 발전용 고체산화물 연료전지 시스템을 개발하고 있는 그룹은 미국의 Siemens-Westinghouse 사이며 1kW에서 250kW(그림 8)까지의 시제기 제작 및 운전을 통하여 상용화에 충분한 발전효율과 운전시간을 확보하였다. 현재 125kW급 상용화 CHP 시스템(SFC-200)을 출시할 예정이며, 발전효율은 44~47% 총합열효율은 80% 정도로 예상하고 있다. 이 밖에도, 영국의 Rolls-Royce, 일본의 Mitsubishi 등이 수백~수천kW 시스템 개발을 진행 중이며 수kW~수십kW의 가정용이나 소형 상업용 시스템은 미국의 SOFCo 사, Honeywell 사, GE 사, 캐나다의 Fuel Cell Technologies Ltd.(그림 9), 스위스의 Sulzer-Hexis 사 등의 업체들이 상용화 개발에 박차를 가하고 있다. 국내의 고체산화물 연료전지 관련 연구개발은 몇 년 전까지 단전지 개발, 수백W급 스택시험 등의 수준에 머물러 있었으나 최근 고체산화물 연료전지의 장점이 부각되면서 자동차용이나 가정용과 같은 소용량 시스템의 연구개발이 활발히 진행되고 있다. 그 대표적인

으로 최근 전력연구원, KAIST 등이 공동으로 수행하고 있는 가정용 1kW급 중온형 고체산화물 연료전지 시스템 개발을 들 수 있다.

연료전지/가스터빈 하이브리드 시스템

하이브리드 발전시스템은 고온형 연료전지(용융 탄산염 또는 고체산화물 연료전지)와 고온열원을 필요로 하는 기존의 열동력 기관(가스터빈)의 상호보완적 결합을 통한 고효율 전력생산을 목표로 한다. 다른 특성의 동력원을 통합하는 데 생기는 기술적 어려움과 고비용 등의 이유로 다른 연료전지에 비해 상용화가 늦게 진행되고 있지만 향후 고온형 연료전지 시스템의 고효율화를 위해 반드시 필요한 단계임에 이견이 없기 때문에 전 세계적으로 연구개발이 활발히 진행되고 있다. 현재 하드웨어가 개발된 시스템은 미국 Siemens-Westinghouse 사의 PH200(그림 10)과 PH300(그림 11) SOFC/MGT System과 Fuel Cell Energy 사의 300kW급 MCFC/MGT System(그림 12)이며, 가장 상용화에 근접해 있다. PH200은 자체 개발한 원통형 고체산화물 연료전지와 Ingersoll-Rand 사의 마이크로터빈(MGT)을 이용해 개발된

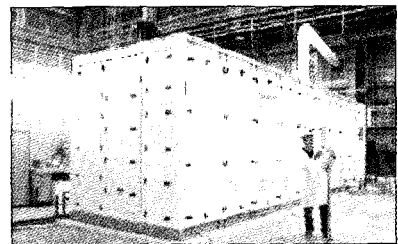


그림 8 Siemens-Westinghouse 사의 250kW CHP 시스템

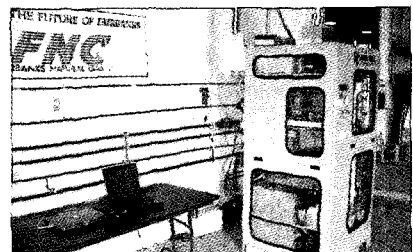


그림 9 Fuel Cell Technologies Ltd. 사의 5kW 발전 시스템(off-grid)

세계 최초의 가압형 하이브리드 시스템이며, 약 3,000시간의 시운전을 통해 성능을 평가한 결과 평균출력 190kW, 발전효율 53%의 성능을 보였다. 위 시스템은 연료전지와 가스터빈 하이브리드화 기술의 가능성을 증명하였으나, 시스템의 최적화를 위해 필요한 많은 기술적 과제들을 남겼다. PH200의 개발경험을 토대로 개량된 모델이 PH300이며 약 500시간의 공장시험 결과 출력은 220kW로 증가하였으나, 발전효율은 예상치(55%)를 밑도는 47%로 나타나 현재 효율저하 원인을 분석 중에 있다. 한편, Fuel Cell Energy 사의 시스템은 하이브리드 발전시스템의 또 다른 형태인 상압형(연료전지가 터빈의 후방에 위치하여 상압에서 운전됨)이며

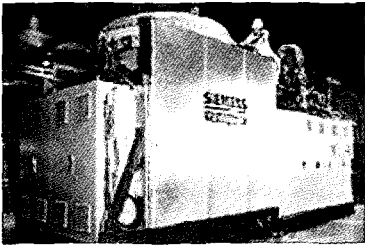


그림 10 Siemens-Westinghouse 사의 PH 200 hybrid system

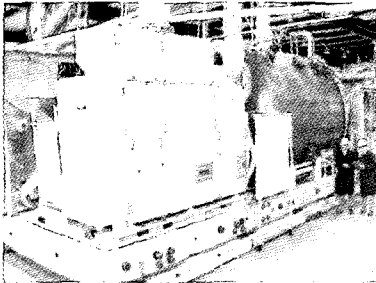


그림 11 Siemens-Westinghouse 사의 PH 300 hybrid system



그림 12 FuelCell energy 사의 DFC/T hybrid system

자체 개발 용융탄산염 연료전지와 Capstone 사의 30kW 마이크로터빈을 이용해 설계/제작 되었다. 이 시스템은 Fuel Cell Energy 사가 계획하고 있는 약 40MW급의 대형 하이브리드 발전시스템의 달성 여부 및 적합성 검증을 위해 개발되었으며, 약 6,700시간의 운전평가 결과 출력 280kW, 발전효율 52%의 성능을 보였다. 최근에는 운전결과를 바탕으로 Capstone 사의 60kW 마이크로터빈을 새로 도입하여 시스템을 재구성하고 있으며, 40MW시스템의 개념설계를 수행 중이다.

이 밖에도 일본의 Mitsubishi 사가 자사의 고체산화물 연료전지와 마이크로터빈을 결합한 350kW급 하이브리드 시스템 개발을 계획하고 있으며 유럽연합에서도 Rolls-Royce 사가 중심이 되어 250kW급 가압형 하이브리드 시스템을 개발 중에 있다. 2002년부터는 국내에서도 한국항공우주연구원이 중심이 되어 200kW급 하이브리드 시스템 개발이 시작되었으며 1단계 종료 시점인 현재 파일럿 플랜트를 제작, 시험운전이 진행되고 있다.

맺 음 말

연료전지와 하이브리드 시스템과 같은 연료전지 응용 시스템은 차세대 분산발전 동력원이 필요로 하는 고효율, 저공해, 설치 용이성, 신뢰성 및 연료 호환성 등의 장점을 고루 갖추고 있어 향후에도 많은 연구개발과 상용화 노력이 있을 것으로 예측된다. 하지만 앞서 살펴본듯이 분산발전용 연료전지 및 하이브리드 시스템은 일부를 제외하고는 국내에서만 아닌 선진국에서도 시제개발 단계에 머무르고 있기 때문에 급속히 도래하고 있는 분산발전 시장에서 타 동력원들보다 경쟁력 있는 발전 시스템이 되기 위해서는 좀더 과감한 투자와 기술혁신이 필요한 때이다. 따라서 상용화의 가장 큰 걸림돌이 되고 있는 짧은 수명, 고가의 설치비용 등의 문제는 소재개발, 저가의 연료전지 제작공정 개발, 시스템 구성부의 제작비용 절감 등의 노력을 통하여 신속히 해결되어야 할 것이다.