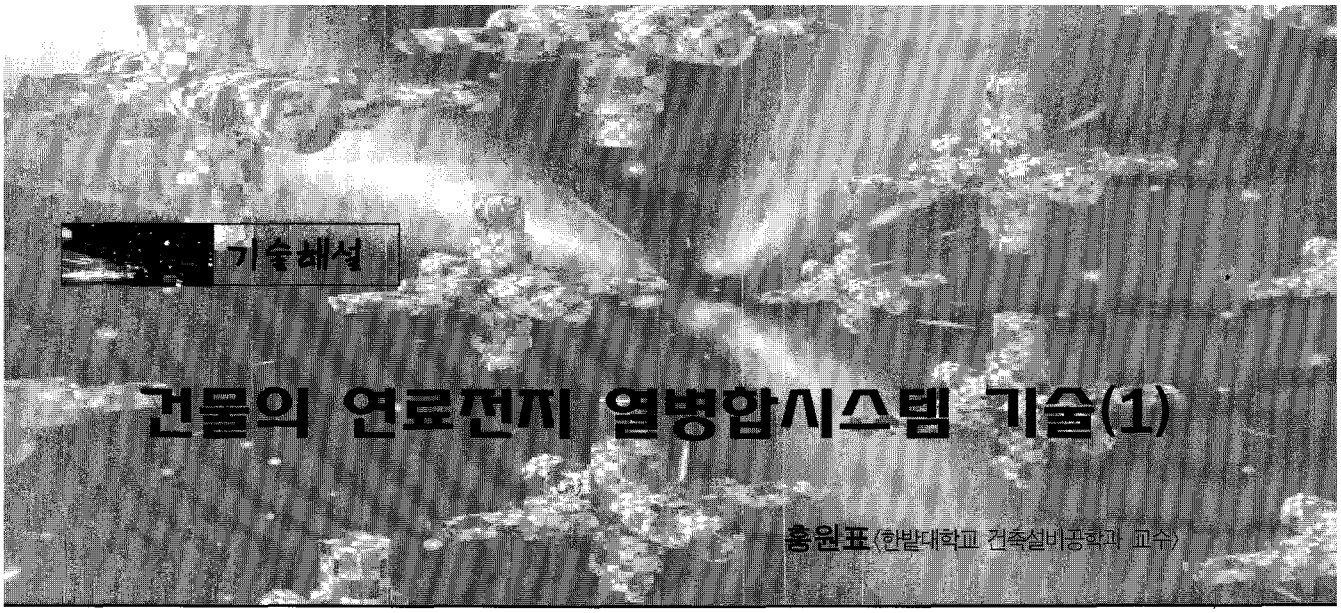


기술해설

건물의 연료전지 열병합시스템 기술(1)

홍원표 (한발대학교 건축설비공학과 교수)

1. 서 론

전 세계적으로 환경오염 규제 강화 및 전력산업의 규제 완화가 확산됨에 따라 전력과 열을 동시에 공급할 수 있는 코제너레이션(cogeneration) 발전 시스템에 대한 관심이 증대되고 있다. 이와 같은 환경적 요구 조건을 충족시킬 수 있는 최적의 대안으로 가장 주목받고 있는 연료전지 기술은 높은 에너지 변환 효율과 환경 친화성, 에너지 공급원의 다원화 등의 다양한 장점으로 인해 막대한 시장 잠재력을 갖는 기술로 선진 각국에서 경쟁적으로 개발되고 있다. 21세기는 환경의 세기라고 불리어질 정도로 환경에 관련된 기술력의 차이가 기업 경쟁력뿐만 아니라 국가 산업 경쟁력에 미치는 영향이 막대하므로 연료전지의 기술개발 및 실용화는 국내 에너지 기술의 자립과 수소에너지 사회 구축을 위한 기반 기술로서 적극적인 개발이 필요하다. 이와 같은 코제너레이션 발전 시스템, 특히 연료전지 기술 개발에 대한 관심은 에너지 수급의 안정성 확보와 에너지 가격상승 억제의 일환으로 최근 미국, 일본, 유럽, 캐나다 등의 선진국에서 정부 주도하에 실시되고 있는 연료전지의 기반 기술개발과 시범사업, 세계 유수 기업들의 투자 열기 등을 통해 간접적으로 입증되고 있다. 연료전지 시장은 크게 주택 및 건물용 등의 정지형(stationary) 시장과 자동차용 시장으로 나누어 볼 수 있는데, 이 중 정지형 시장은 대규모의 발전 설비보다는 전력과 열을 동시에 공급하는 수급 지역별 소형 복합발전, 코제너레이션 발전시스템이 각광받을 것으로 전망되고 있다. 그러므로 본문에서는 높은 시장성으로 인해 최근 각국에서 경쟁적으로 개발이 진행 중에 있는 주택 및 건물용 연료전지(PEMFC, SOFC) 코제너레이션 시스템에 대한 기술 개요 및 현황, 적용사례 등을 개괄적으로 살펴봄으로써 국내 연료전지기술개발 및 실용화를 위해 나아가야 할 방향을 제시하고 빌딩의 적합한 에너지원으로서의 중요성과 빌딩에 도입될 하이브리드시스템기술개발에 대하여 언급하고자 한다.

2. 연료전지의 원리 및 특징

연료전지는 전력과 열을 효율적으로 이용할 수 있는 친환경적 차세대 에너지 발전기술로 기존의 발전방식과는 달리 열역학적인 제한(Carnot cycle)을 받지 않기 때문에 폐열 이용까지 고려했을 경우 총발전효율이 최고 80~90[%] 정도로 매우 높은 고효율 발전기술이다. 연료전지의 발전방식은 수소 및 산소가 갖고 있는 화학에너지의 직접 변환방식을 채택하고 있기 때문에 터빈과 같은 대형 회전자가 없어 소음 요인이 아주 적고, 소형 혹은 부분부하의 측면에서 볼 때 효율의 감소율이 적으며 부하 추종성이 매우 우수하다. 연료전지 발전시스템의 모든 구성요소들은 모

듈 형태로 제작되기 때문에 대량생산 및 유지 보수, 수급 지역 내 설치가 용이하므로 우리나라와 같이 발전에 필요한 부지가 적은 국가에 설치하였을 경우 송·변전 설비를 절감할 수 있는 등 전력계통의 운영 측면에서 기대가 큰 첨단기술이다[1]. 연료전지는 외부로부터 공급된 수소와 산소를 전기화학적으로 반응시켜 전력을 생산하는 에너지 변환장치로 작동원리가 기존의 건전지나 습전지와 비슷하지만 연속적인 발전용 연료 및 산화제의 공급으로 반영구적 발전이 가능하다는 뚜렷한 차이점을 갖는다. 연료전지의 연료극에 공급되는 수소는 연료변환장치를 이용하여 천연가스, 프로판, 메탄올, 석탄가스 등의 다양한 탄화수소계열의 연료를 수소개질가스로 변환하는 방법 혹은 물을 직접 분해하는 수전해 방법 등을 이용하여 제조된 것을 사용하며 전기화학반응에서 산화제로 사용되는 산소는 일반적으로 공기를 직접 이용하여 충당한다. 연료전지의 작동원리는 근본적으로 수소와 산소의 반응에 의해 생성되는 전자의 이동으로 간단히 설명할 수 있으며, 각 전극에서 발생하는 전기화학 반응은 다음의 식 (1)~식 (3)과 같다. 그림 1은 FC시스템의 개념적인 구성도를 나타낸 것이다.

- 연료극(anode) : $H^2 \rightarrow 2H^{++} + 2e$ (1)
- 공기극(cathode) : $2H^{++} + \frac{1}{2}2e + O^2 \rightarrow H^2O$ (2)
- 총괄 반응식 : $H^2 + \frac{1}{2}O^2 \rightarrow H^2O$ +전기 +열 (3)

수소와 산소의 전기화학반응은 전기 에너지와 더불어 부산물로 물이 생성되는 발열 반응으로, 이 과정에서 부수적으로 생성된 열은 주거용 혹은 업무용건물의 급탕 및 냉·난방열로 사용할 수 있다. 연료전지는 반응에 사용되는 전해질의 종류에 따라 100[℃] 이하에서 작동하는 알칼리(AFC) 및 고분자전해질 연료전지(PEFC), 150~200[℃] 부근에서 작동하는 인산형 연료전지(PAFC), 600~700[℃]의 고온에서 작동하는 용융탄산염 연료전지(MCFC), 그리고 1,000[℃] 이상의 고온에서 작동하는 고체산화물 연료전지(SOFC)로 표 1과 같이 분류할 수 있으며 규모와 수요 조건에 따라 가정용 연료전지, 분산형 연료전지, 그리고 화력발전 대체용 연료전지로 구분할 수 있다. 각각의 연료전지는 근본적으로 같은 작동원리를 갖고 있지만 연료의 종류, 운전 온도, 촉매와 전해질의 차이에 의해 연료전지 시스템의 특징 및 구성, 적용 범위에 다소 차이를 갖는다. 표 2는 건물용으로 사용이 가능한 연료전지의 에너지밀도, 효율 및 기동시간을 나타낸 것이다.

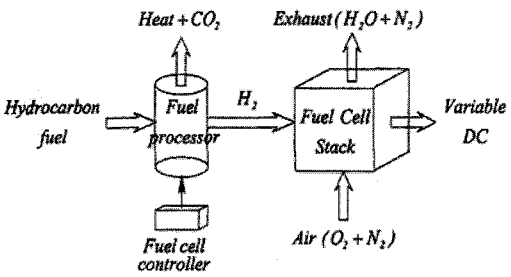


그림 1. FC 시스템

발전 플랜트용 연료전지는 용량이 수천 [kW]에서 수십만 [kW]급으로 용융탄산염연료전지나 고체 산화물 연료전지와 같이 고온에서 작동하는 연료전지가 적용대상 범위에 포함된다. 용융탄산염 연료전지와 고체 산화물 연료전지는 고온에서 작동하는 연료전지로 대형 발전 플랜트로 적합하며 효율이 높은 장점이 있으나, 기동시간이 오래 걸려 수시로 시스템을 ON/OFF시켜야 하는 소형 전원에는 적합하지 않기 때문에 지속적인 발전에 사용되는 보조전원용으로서의 개발이 진행 중에 있다. 이와 같은 발전 플랜트용 연료전지는 석탄가스나 천연가스를 이용하여 중앙집

표 1. 연료전지 종류

Types	PAFC	SOFC	MCFC	PEMFC
Size	100 – 200kW	1kW–10MW	0.25–10MW	3 – 250kW
Fuel	Natural gas, landfill gas, digester gas, propane	Natural gas, hydrogen, landfill gas, fuel oil	Natural gas, hydrogen	Natural gas, hydrogen, propane, diesel
Operating Temp.	400°F	1,800°F	1,200°F	200°F
Installed Cost ($/kW)	3,000 – 3,500	1,300 – 2,000	800 – 2,000	4,000
Cooling Medium	Boiling Water	Excess Air	Excess Air	Water
Environmental – friendly	Yes	Yes	Yes	Yes
Commercially Availability	Yes	R&D	R&D	R&D
Cogeneration	Yes (hot water)	Yes (hot water, LP or HP steam)	Yes (hot water, LP or HP steam)	Yes (80°C water)
Efficiency (Electricity)	36– 42%	45 – 60%	45 –55%	30 – 40%
Efficiency (Cogeneration)	Up to 85%	Up to 85%	Up to 85%	Up to 85%
Commercial Status	Some Commercially available	Likely commercialization 2004	Likely commercialization 2004	Likely commercialization 2003/2004
Applications	Stationary power (1998), Railroad Propulsion (1999)	Stationary power and Railroad Propulsion (1998-2005)	Stationary power (2000-2005)	Stationary power (1997-2000), Bus/Railroad/ Automotive Propulsion (2000-2010)

♦ Source: Distributed Energy Resources (DER)

표 2. 건물용 FC 특성

Types	Peak Power Density (mW/cm^3)	System Efficiency (% HHV)	Start-up Time (hours)
PAFC	~200	36 - 45	1 -4
SOFC (tabular)	150 - 200	43 - 55	5 - 10
SOFC (planar)	200 - 500	43 - 55	unknown
MCFC	~160	43 - 55	10+
PEMFC	~700	32 - 40	<0.1

♦ Source: Distributed Energy Resources (DER)

중식으로 가스터빈 등과 복합되어 50~70[%] 정도의 고효율 발전이 가능하며 작동 온도가 높기 때문에 개질 가스 및 불순물을 포함한 연료의 이용이 가능해 에너지원의 다양화를 꾀할 수 있으며 에너지의 효율적 이용과 환경문제 해결에 기여할 수 있다. 현재 국내의 연료전지 기술은 고분자 전해질 연료전지, 용융탄산염 연료전지, 그리고 인산형 연료전지의 경우 실증연구를 시작한 단계로 연료전지의 핵심 스택과 구성요소의 기술은 이미 선진국의 제품 수준에 근접해 있는 반면 고체산화물 연료전지(SOFC)의 경우 다른 연료전지에 비해 상대적으로 기술이 낙후되어 있으나 높은 전기효율, 저가의 유지관리비용 모듈 제작의 유연성 및 열병합 발전의 이점 등으로 인해 최근 연구개발이 집중되고 있는 상태이다[1-2].

2.1 연료전지의 구성

연료전지(Fuel Cell)는 전기화학 반응에 의하여 연료가 갖고 있는 화학에너지를 직접 전기에너지로 변환시키는 발전장치이다. 따라서 원리상 열기관이 갖는 열역학적인 제한(Carnot 효율)을 받지 않기 때문에 기존의 발전장치보다 발전효율이 높고, 무공해, 무소음으로 환경문제가 거의 없으며, 다양한 용량으로 제작이 가능하고, 전력 수요지 내에 설치가 용이하여 송변전 설비를 절감할 수 있는 등 전력계통의 운영 측면에서도 기대가 큰 첨단기술이다. 고분자 연료전지(PEMFC: Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell)의 개발은 최초에 우주선이나 군사용의 목적으로 시작되었으나, 1970년대 초의 오일 파동 이후 본격적으로 민수용 개발이 진행되어 오고 있다. 알칼리 연료전지는 1965년 미국의 아폴로 우주계획에서 제미니 3호의 전원으로 채택되어 최초로 실용화되었다. PEMFC 발전시스템은 전기를 생산하는 연료전지 본체(Fuel Cell Stack)와 연료인 LNG, 석탄가스, 메탄올 등을 수소로 개질하여 수소가 많은 연료가스로 만드는 개질기(Reformer), 발전된 직류전기를 교류로 변환시키는 직교류변환기(Inverter) 및 제어장치, 그리고 배열이용 시스템 등으로 구성되어 있다. 연료전지 본체는 적층된 수십 장의 셀(Cell)들로 구성되어 있으며, 연료와 공기 등의 반응가스가 각 셀로 공급되도록 설계되어 있다. 기본적으로 각 셀은 전해질(Electrolyte)에 의하여 분리된 연료극(Anode)과 공기극(Cathode)의 두 전극으로 구성되었고, 각 셀은 분리판(Separator)에 의하여 분리되고 있다. 연료전지에 공급되는 반응가스를 공급하는 장치인 연료개질장치는 사용되는 연료 특성에 따라 개발되고 있으며, 연료전지의 저전압, 대전류 특성에 맞는 직교류 변환장치 및 배열을 이용하여 열효율을 향상시키는 배열이용시스템 등이 연료전지 발전시스템의 개발에 필요한 주요 기술들이다. 건물적용을 위한 연료전지로는 PEMFC가 주로 범용성을 가진 실용화 단계와 있으며, 또한 SOFC도 대용량화를 중심으로 매우 큰 관심을 가지고 개발하고 있다. 본고에서는 PEMFC 중심으로 기술하였다. PEMFC를 사용한 연료전지가 최근 해외에서 많은 연구개발의 관심과 개발이 이루어지고 있다. 이러한 현상은 기존 여러 형태의 연료전지의 개발에도 불구하고, 아직 실수요자에게 직접적으로 도움을 줄 수 있는 자동차용 및 이동전원용이나 지역분산발전용의 연료전지 시스템 공급에 미흡한 점이 아직 많기 때문이다. 이러한 점에서 기존 여러 연료전지들의 장점을 살리며, 고에너지 밀도 및 저렴한 비용으로 제작 가능한 고분자 연료전지가 급격히 부상하고 있다. 고분자 전해질을 전해질로 사용하는 PEMFC의 전기화학 반응은 인산형 연료전지와 유사하다. 즉 연료극(anode)에서의 수소는 프로톤(proton)과 전자를 공급하며, 이 전자가 외부회로를 통해 흘러서 음극에 도달하며, 프로톤은 이온교환막을 통해 확산하여 음극에 도달하고 산소와 반응하여 물을 생성한다. 인산형 연료전지의 동작온도

가 160~200[℃]인 반면 고분자 연료전지는 저온인 70~80[℃]와 현재 선진국에서는 150[℃] 전후의 고온 PEMFC도 개발하고 있으며 높은 전류밀도를 유지할 수 있다. 이러한 이유로 고분자 연료전지는 빠른 시동능력이 있고 소형화할 수 있으며, 가벼운 전지를 만들 수 있어서 이동 전원으로 매우 적합하다. 통해 흘러서 음극에 도연구개발의 초점은 이동용 전원으로 사용할 수 있는 저가의 연료전지를 개발하는 데에 있다. 따라서 고분자 연료전지의 연료는 메탄올이 가장 유망시 되고 있다. 고분자 연료전지의 성능은 동작 조건인 압력, 온도, 공급가스 등의 조건에 따라 크게 변한다. 최근의 고분자 연료전지의 성능은 1960년대 중반에 미국의 Gemini Space Program에서 사용된 전지의 성능인 37[mA/㎠], 0.78[V], 32 Cell Stack 보다 훨씬 높은 200[mA/㎠], 0.78[V] at 80[℃] 이며, Nafion 이온교환막과 Pt량 0.4[mg/㎠]인 전극을 사용하였다.(미국 Los Alamos Nat'l Lab.) 고분자 연료전지 기술은 최근 5년간에 많은 진전이 있었으며, 가장 선두를 달리는 캐나다의 Ballard Power System사는 표준 상용 규격으로 35개 단위전지로 구성된 5[kW] 스택을 개발하여 3,000시간의 운전 실적을 쌓게 되었다. 또한 미국의 Energy Partners 사는 60개의 전지로 구성된 15[kW] 스택을 제작하여 실험하였다. 이들의 단위전지 성능은 2[W/㎠] 이상이며 전류밀도는 6[A/㎠]이다.(공기운전 시는 2[A/㎠], 0.5[V]). 독일의 Siemens사는 승용차에 사용할 수 있는 34[kW]급의 고분자 연료전지를 개발하고 있다. 또한 고분자 연료전지의 가격을 낮추기 위해 새로운 전극 개발을 시도하며, 공기극의 성능 저하를 줄이기 위해 공기극 구조를 최적화하는 노력을 하고 있다. 한편 일본에서는 Mazda Motor, Toyota, Nissan 등의 여러 회사가 고분자 연료전지를 사용한 전기자동차를 개발하고 있다. 현재의 고분자 연료전지 연구방향은 전지의 성능 향상과 가격을 낮추는 문제이다. 성능을 향상시키는 연구방향은

i) 이온교환막 성능 향상
ii) 연료내 CO의 적절한 조절
iii) 전극의 설계
iv) 메탄올 연료를 사용하는 PEMFC 개발 등이다.

이온교환막은 Dow Chemical Company와 Dupont사에서 개발하였으며 각각 상품명 US 13204.10과 Nafion 117로 상용화되어 있다. 그러나 이들은 두께와 이온전도도의 한계가 있다. 따라서 현재 연구는 이러한 한계를 극복하여 성능을 개선하는 연구이다. 고분자 연료전지전극은 기본적으로 이오노모막과 전기전도성인 다공질기판사이에 압착한 얇은 촉매층이다. 전극에 산소환원과 수소산화를 위하여 촉매로써 백금을 사용하기 때문에 운전 중 일산화탄소(CO)의 양을 줄여야 된다. 물의 전달은 Hydrophobic Agent인 FEP에 의해 제어한다. FEP를 감소는 물의 전달이 증가시키며, 이 결과는 이온전도성이 증가로 나타난다. 그러나 가스는 감소한다. 그러므로 이온전도성과 연료가스 량의 적절한 선정이 중요하다. 물의 전달(H^2O/H^+)을 효과적으로 하기 위한 FEP 량의 적절한 제어가 필요하게 된다. PEMFC의 경우에는 전력변환효율은 40~60[%], 설치비용은 $2,500/[kW] 정도까지 낮출 수 있다고 알려져 있으며, 높은 출력밀도(300~900[mW/cm^2])로 인하여 발전장치를 소형화 시킬 수 있으나, 앞에서 언급한 바와 같이 CO에 의한 백금 촉매의 피독을 방지해야 하며, 이를 위해 100[ppm] 이상의 CO 농도에서도 내성이 있는 연료극과 CO 제거를 포함한 고효율 연료개질시스템개발이 필요하다. PEMFC의 백금사용량은 현재 0.1~0.3[mg/cm^2] 정도로 백금사용량을 저감시키기 위한 연구개발도 진행되고 있으며, 장기내구성향상을 위한 기술개발도 추진되고 있다.

2.1.1 연료전지발전시스템

일반적으로 연료전지 발전시스템 구성도는 그림 2와 같으며 연료전지 발전시스템은 크게 연료전지스택(fuel cell stack)과 이 FC스택을 동작시키기 위한 주변장치(BOP: Balance of Plant)인 연료개질기(수처리장치와 열관리장치), 연료공급장치(연료저장과 처리) 및 전력변환기(PCS: Power condition system)부분으로 나누어진다. 그림 3은 연료전지의 주변장치를 나타낸 것이다. 또한 그림 4는 캐나다의 Ballard Power System사 제작한 1[kW] Residential Cogeneration Fuel Cell Power Module을 나타낸 것으로 무게가 20.5[kg]이다. 주택의 열병합발전기능을 가진 소형 연료전지이다. 표 3은 이의 주요한 사양을 나타낸 것이다.

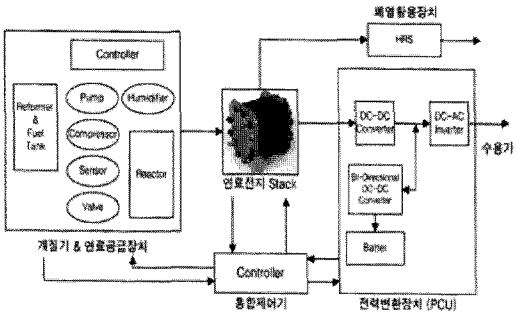


그림 2. 연료전지발전시스템 구성도

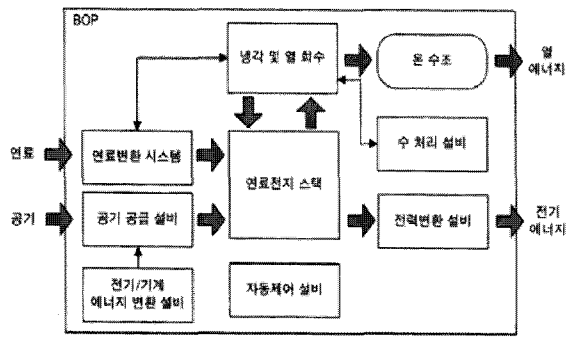


그림 3. 연료전지 주변장치(BOP: balance of plant)

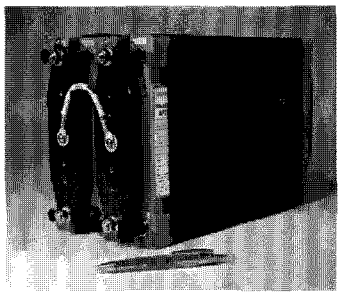


그림 4. Ballard사의 1[kW] Residential Cogeneration Fuel Cell Power Module

표 3. Ballard사의 1[kW] PEMFC 사양

Type :		PEM (Proton Exchange Membrane) fuel cell stack	
Performance :	Rated Power	1320[W] DC	
Current @ Rated Power		35[A]	
Fuel :	Reformate	〉72[%] H2 typical 〈 10 ppm CO	
Oxidant :		Filtered Air	
Operating Conditions :	Storage temperature	〉0 to 40 C ()32 to 104F)	
Start up temperature		〉0 C ()32 F)	
Coolant temperature		55 to 65C	
Relative Humidity		90 to 110[%]	
Physical :	Length x width x height	430[mm] x 171[mm] x 231[mm]	
Weight		20.5 kg (Dry)	
Volume		17 L	

(1) 연료변환장치 : 개질기 (reformer) 및 주입장치(fuel processor)

천연가스, 메탄올, 가솔린 등의 연료에서 순도가 높은 수소가스를 개질시켜 주는 장치로 수소가스와 공기 중의 산소는 전류를 얻기 위해 연료전지스택으로 공급된다. 연료변환장치는 천연가스를 수소로 전환하는 기술로서 부취제황화합물을 제거하는 탈황기, 천연가스에서 수소를 생산하는 개질기 발생된 CO를 제거하는 CO 변성기(Shift) 및 CO 제거기(PROX)

로 구성된다. 연료변환장치기술은 연료처리장치의 효율 및 내구성을 증진시키고 부피를 줄이는 연료변환장치설계기술 탈황촉매 개질촉매 Shift, PROX 촉매에 관련된 소재기술 연료변환장치를 제작하는 제작기술 등이 있다.

(2) 연료전지스택

그림 5는 연료전지 스택구조를 나타낸 것이다. 연료전지 핵심은 고분자물질인 양이온 전도성 막이다. 이 막의 양쪽에 다공질 전극이 있다. 전극은 다공질로 만들어서 후면에서 공급한 기상반응물이 전극과 막의 계면, 즉 촉매층(촉매표면)에 도달해서 전기화학반응이 일어날 수 있도록 한다. PEMFC 스택의 중요부분으로 두 전극사이에 샌드위치처럼 막을 끼운 다층복합체를 대개 막-전극 복합체(MEA: membrane electrode assembly)라 한다. 이 MEA는 다시 집전체(collector)/분리판(separator) 사이에 샌드위치처럼 끼운다. 집전체는 전류를 모아 전도하고 다중셀의 구조에서 분리판는 인접한 셀의 기체를 분리한다. 다중셀 구조에서는 한 셀의 음극을 인접한 셀의 양극과 물리적/전기적으로 연결함으로 이극판(bipolar plate)이라고 한다. 이 극판은 반응기체의 통로(흐름장: flow field)를 제공하는 동시에 셀의 기계적 구조를 제공한다.

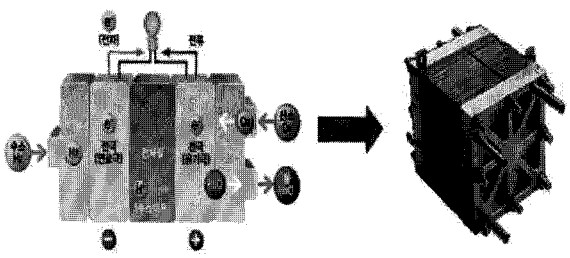


그림 5. 연료전지 원리 및 스택구조

연료전지스택은 얻고자하는 전력량의 크기만큼 연료전지 단위 셀을 직렬 또는 병렬로 연결하여 구성한다. 이 부분에서 수소와 산소의 화학반응으로 열과 직류전원이 발생하고 여기서 발생한 직류전원은 전력변환기로 공급된다.

(3) 전력변환기

연료전지는 저전압 대전류 특성을 가지기 때문에 이를 직접 이용하기가 곤란하기 때문에 연료전지에서 출력된 직류전원을 저가격, 고효율 변환기를 통해 교류전원으로 변환해야 한다. 그림 6은 연료전지 발전시스템에서의 전력변환기 구성을 나타낸다. 전력변환기는 연료전지 저전압을 교류전원으로 변환하기 위해 승압형 DC-DC 컨버터 그리고 에너지 저장 매체(배터리, 슈퍼커패시터)를 기본으로 구성한다. 승압형 dc-dc 컨버터는 연료전지 저전압을 교류전압으로 변환하기 알맞은 크기 이상으로 승압하여 dc-dc 인버터에 안정된 직류전압을 공급하고 dc-ac인버터는 승압된 직류전압을 일정한 교류로 변환하는 역할을 한다 [3].

연료전지시스템은 기본적으로 느린 동특성을 가지기 때문에 최종출력단의 급격한 부하변동이나 연료전지의 초기 기동시 dc-dc 컨버터의 출력을 일정하게 확보하기가 어렵다. 따라서 이와 같은 조건하에서 안정된 출력을 확보하기 위해서 보조 에너지저장매체를 가지는 양방향 컨버터가 필수적이다. 양방향 dc-dc 컨버터는 저전압 배터리와 승압형 dc-dc컨버터의 직류 출력단에 연결하여 배터리의 충방전 전류를 제어함으로서 승압용 dc-dc 컨버터의 직류 출력전압을 일정하게 유지시켜주는 보조의 역할을 한다. 양방향 dc-dc 컨버터는 그림 6 (b)와 같이 연료전지 출력단에 직접 연결하여 승압형 컨버터의 입력을 일정하게 유지시켜주는 방법과 (a)에서와 같이 승압된 직류 출력단에 연결하는 방법이 있다. 이러한 전력변환기 중에서 승압형 dc-dc컨버터의 역할은 특히 중요하다. 연료전지발전시스템에서 승압형 dc-dc 컨버터는 다음과 같은 역할을 한다.

- 변화에 따라 넓은 변동폭을 갖는 연료전지 출력 전압에 대해 인버터의 입력전압이 일정하게 유지하도록 한다.
- 연료전지의 출력전압을 승압한다.
- 시스템의 절연으로 안전성과 노이즈 문제를 해결한다[3].

1) 연료전지용 전력변환기의 토폴로지

연료전지용 전력변환기의 토폴로지는 연료전지의 출력전압용량 및 응용분야에 따라 다양한 형태가 있다[4].

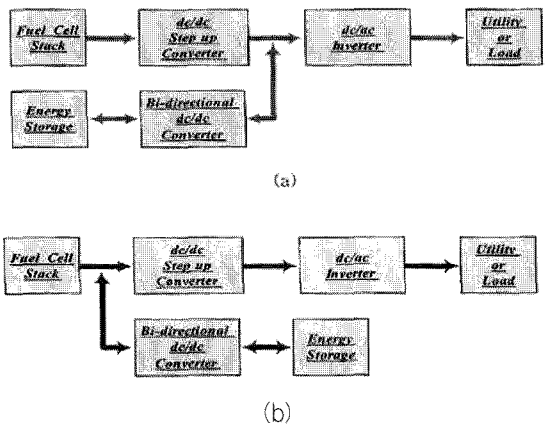
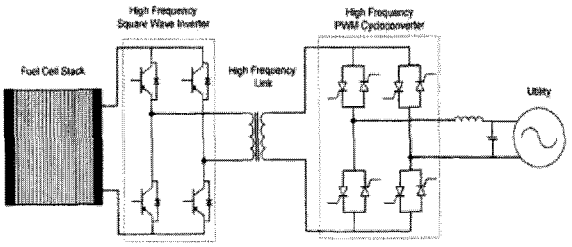


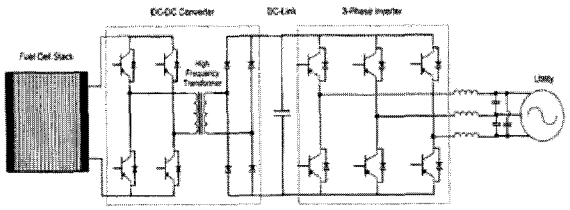
그림 6. 연료전지 발전시스템에서의 전력변환기 구성도
(a) 직류출력단에 연결하는 방법,
(b) 연료전지출력단에 연결하는 방법

▪ 직류승압방식과 교류승압방식

연료전지발전을 위한 전력변환시 승압을 위한 방식으로는 그림 7과 같이 이를 교류에서 얻는 방식과 직류에서 얻는 방식의 두 가지가 있다 그림 7 (a)는 연료전지의 낮은 전압을 우선 DC-AC 인버터로 낮은 교류전압으로 변환한 후에 저주파(60[Hz])의 변압기를 사용하여 승압과 절연을 하는 단일단(single-stage)의 전력변환방식으로 비교적 높은 효율을 얻을 수 있는 반면에 저주파의 변압기를 사용하기 때문에 무게(10[kg]/[kW])와 부피가 커지며 직류전압이 조정되지 않기 때문에 출력전압조정의 품질이 저하되는 단점이 있다. 또한 사이크로컨버터를 사용하기 때문에 많은 전력변환소자가 필요로 하기 때문에 고비용 고손실과 시스템의 복잡성이 수반된다. 그림 7 (b)는 연료전지의 낮은 전압을 고주파 DC-DC 컨버터를 사용하여 높은 직류링크전압(400[V])으로 승압 및 조정을 한 후에 이를 DC-AC 인버터로 부하에 요구되는 교류전압으로 만들어준다. 이 때 DC-DC 컨버터단에서 사용하는 고주파변압기는 부피 및 무게가 작아 전체변환기의 소형화가 가능하며 직류링크전압이 조정되므로 출력전압조정의 품질이 좋다. 그러나 두 단의 전력변환을 거치므로 높은 효율을 얻기 어려운데 예컨대 DC-DC 컨버터의 효율이 92[%]이고 DC-AC인버터의 효율이 96[%]이라도 전체변환기의 효율은 88.3[%] 밖에 되지 않는다 특히 연료전지의 전압이 낮은 경우 DC-DC컨버터에



(a) Cascaded DC-AC and AC-AC converter topology (high-frequency link)



(b) Cascaded DC-DC and DC-AC converter topology (DC-link)

그림 7. 전력변환기 승압형 토폴로지

서 높은 효율을 얻기는 더욱 어려우므로 컨버터의 효율을 높이는 연구가 매우 중요하다[3-4].

▪ 전압형 및 전류형

그림 7 (b)의 고주파 DC-DC컨버터를 사용하는 경우에 전압형(voltage-fed)과 전류형(current-fed)의 두 가지 방식을 사용할 수 있다. 일반적으로 연료전지의 낮은 출력전압을 승압하기 위해서는 전류형을 사용하여 고주파변압기의 권수비를 낮게 하는 방식이 유리하지만 전압이 매우 낮아 인덕터의 전류정격이 너무 큰 경우에는 전압형을 사용하기도 한다. 또한 전류형은 DC-DC 컨버터로부터 연료전지로 유입되는 스위칭리플을 제거하기 위한 필터가 거의 필요 없게 되는 장점이 있다.

2.1.2 연료전지의 응용에 따른 전력변환

연료전지의 응용분야는 휴대폰이나 노트북 등의 소형전원에서부터 대용량의 분산전원에 이르기까지 다양하게 분포되어 있는데 본 연구에서는 이들 중 대표적인 응용분야에 대하여 소개한다.

(1) 독립형연료전지시스템

독립형(stand-alone)연료전지시스템은 그림 8과 같이 일반적으로 연료전지와 배터리 등 에너지저장장치의 복합발전의 형태를 가지며 기존의 송·배전방식으로 전원공급이 어려운 산간·오지 등지역이나 미국 등 국토의 면적이 넓은 나라의 가정용 연료전지발전

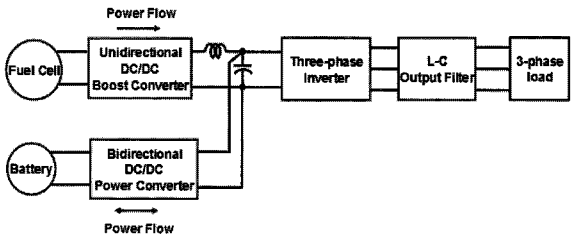


그림 8. 독립형연료전지시스템 구성도

시스템 등에 적용된다[5].

(2) 계통연계형 연료전지시스템

그림 9에 계통연계형(utility-interactive) 연료전지발전시스템의 구성도를 보여 준다. 이는 전력변환기의 용량을 연료전지의 용량과 동일하게 하여 연료전지발전량을 일정하게하고 부하에서 요구되는 피크전력은 계통에서 공급하는 방식으로 연료전지의 이용률을 높일 수 있다. 계통연계 시 인버터전압은 계통전압에 의해 결정되며 인버터의 출력전류를 제어하여 유·무효전력의 흐름을 제어한다. 계통고장시차단기가 동작하여 연료전지에 과부하가 걸리지 않게 함은 물론 인버터는 이를 감지하여 계통측에 연료전지의 에너지공급을 중지(Anti -islanding)하여야 한다.

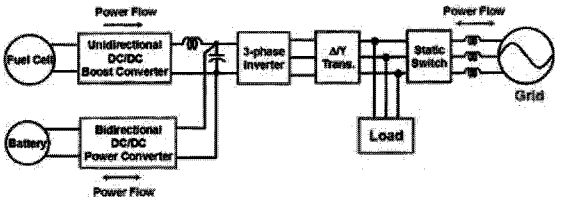


그림 9. 계통연계형(utility-interactive) 연료전지발전 시스템의 구성도

(3) USP를 위한 연료전지시스템

기존의 UPS 시스템은 엔진제너레이터 및 배터리를 백업전원으로 사용하는데 이는 많은 유해물질을 발생시킨다. 또한 배터리의 경우는 일정시간 이상전원을 공급할 수 없으므로 전력공급중단시간이 일정치 않은 부하에서는 사용하기 어렵다. 그림 10과 같이 연료전지와 슈퍼커패시터를 백업전원으로 하여 UPS 시스템을 구성하는 방식이 있다. 계통고장이나 계통전압이 일정크기를 벗어나는 경우에 바이패스 스위치 S1이 차단되어 계통을 부하로부터 분리시킴과 동시에 S2가 연결되는데 이때 슈퍼커패시터는 수십 초의 돌입전류를 공급하고 연료전지가 정상상태의 전원을

공급한다.

연료전지의 출력전압은 부하에 따라 변동폭이 크며 저전압·대전류의 특성을 갖기 때문에 연료전지 출력전압의 범위와 용량에 따라 최적의 전력변환기 토폴로지가 다르다. 따라서 기존의 DC-DC 컨버터나 범용인버터기술로는 요구되는 효율을 만족하기가 어렵고 전력변환기의 효율이 낮은 경우 전단의 스택 및 개질기의 용량이 커져야 하는데 이는 전체연료전지시스템의 가격상승의 주요인이 되어 상용화를 어렵게 하고 있다. 국내에서는 이미 수 년 전부터 연료전지와 관련하여 많은 연구가 진행되고 있으나 이는 주로 스택이나 개질기에 관한 것으로 전력변환기에 대한 연구는 미미한 실정이다. 최근 들어 미국 등 선진국에서는 연료전지시스템의 상용화를 촉진하기 위하여 핵심 기술인전력변환기의 저가격·고효율화에 대한 연구의 중요성을 인식하고 있으며 국내에서도 향후 연료전지용 전력변환기에 대한 연구·개발이 시급하다고 하겠다.

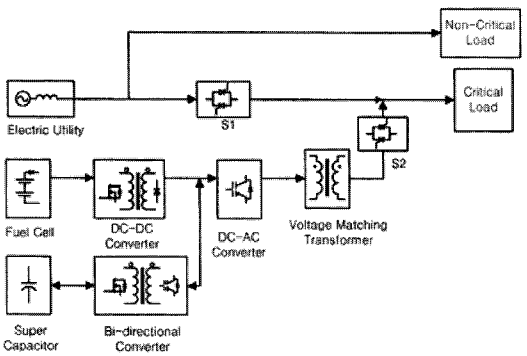


그림 10. USP를 위한 연료전지시스템

3. 건물용 연료전지의 장점 및 구성

3.1 건물용 연료전지의 장점

건물용 연료전지 시스템은 연료전지에서 생산된 전기뿐만 아니라 발생되는 열까지 사용하여 온수와 난방을 공급하는 고효율의 청정에너지 시스템을 말하는 것으로 고 효율의 열병합 발전으로 기존의 발전방식에 비해 획기적으로 에너지 소모량을 줄일 수 있으며 마이크로 터빈이나 가스터빈에 비하여 시스템 소음 및 환경오염 물질의 배출이 적은 장점이 있다. 일반적으로 건물용 연료전지 수소공급은 개질기를 통해 이루어지는 데 개질기란 천연가스 바이오 가스, 원유 등 수소와 탄소로 이루어진 탄화수소 화석 연료에서 수소만을 추출해내는 반응기를 말하며 보통 건물용 연료전지 시스템 구성품 중 하나이다. 또 다른 방식은 현재 신재생에너지의 하이브리드 시스템 방식으로 개발중에 있는 방식으로 태양광발전이나 풍력발전으로 부하에 공급되는 남는 전력을 활용하여 물 전해장치에 전기를 공급하여 수소를 탱크에 저장하여 전력이 필요한 시점에 연료전지로 발전하여 필요한 부하에 공급하는 것으로 독립운전 방식과 계통연계 운영방식이 현재 개발 중에 있다. 이 방식은 PV나 풍력발전시스템의 코스트가 낮아지면 제로에너지 하우스나 빌딩 관점에서 적용할 수 있는 방식으로 연구개발할 가치가 있다.

연료로 수소 인프라가 구축되기 전까지는 전국적인 배관망을 갖고 있는 천연가스가 주로 사용되고 고분자 전해질 연료전지와 고체산화물 연료전지가 주로 사용되고 1[kW]급부터 50[kW]급 이하의 시스템이 이에 해당된다. 1[kW]급 가정용 연료전지 시스템의 예를 들면 LNG 화력 발전과 일반 보일러를 사용하여 소비되는 전기 및 가스비가 12[%] 이상 절약되고 온실가스 주범인 이산화탄소는 40[%] 이상 또한 약 26[%] 이상의 에너지가 절감되는 효과가 있다.

3.2 건물용 연료전지의 시스템 구성

그림 11은 가정용 연료전지 열병합시스템의 구성도를 나타낸 것이다. 연료전지스택, 전력변환기 연료변환기(fuel processing system), 열저장장치와 보

조기기 등으로 구성된다. 연료변환장치에서는 LNG와 같은 탄화수소계통의 연료를 연료전지에서 사용할 수 있는 수소로 변환시키는 장치이며 여기서 발생된 수소와 공기중의 산소를 이용하여 연료전지 본체에서 직류전기를 발생시키게 된다. 최종적으로 연료전지에서 발생된 전기를 축전지에 저장하거나 인버터에서 교류를 변환시켜 사용하게 된다. 반응에 필요한 공기는 압축기나 송풍기에 의하여 공급된다. 현재 모니터링 사업으로 설치되고 있는 1[kW] 연료전지는 종합효율이 50[%] 내외이다. 그림 12는 건물용연료전지 열병합시스템 구성도를 나타낸 것이다. PEMFC의 경우 현재 개발되어 실용가능한 범위는 250[kW]까지로 코스트의 저감을 통하여 마이크로터빈 범위에서 충분이 적용할 가능성이 있다고 판단된다.

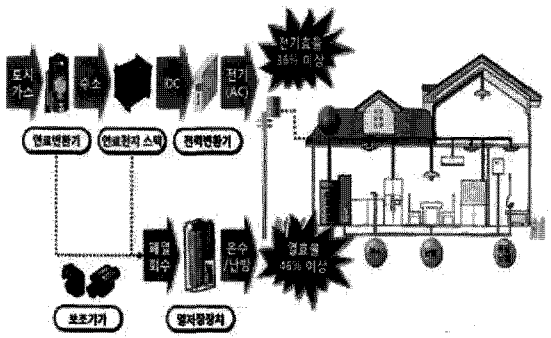


그림 11. 가정용 연료전지 열병합 시스템

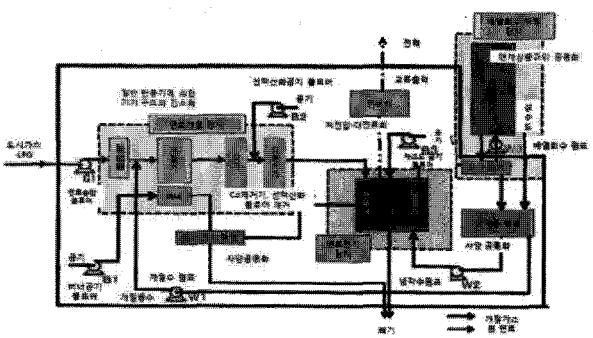


그림 12. 건물용 연료전지 열병합 시스템

참 고 문 헌

[1] 이원용, "소형연료전지시스템 건물적용기술", 한국설비기술협회지(설비/공조, 냉동, 위생) 2005. 5월.

[2] 황정택, "건물용연료전지 열병합시스템", NEWS & INFORMATION FOR CHEMICAL ENGINEERS, Vol. 27, No. 1, 2009.

[3] 최세환,"연료전지발전시스템에서의 전력전자기술", 電力電子學會誌, 第8卷, 第4號, 2003年8月.

[4] W. Kramer, et al., "Advanced Power Electronic Interfaces for Distributed Energy Systems -Part 1: Systems and Topologies", Technical Report NREL/TP-581-42672 , March 2008.

[5] Jin Woo Jung, "MODELING AND CONTROL OF FUEL CELL BASED DISTRIBUTED GENERATION SYSTEMS", Ph D. Dissertation, The Ohio State University 2005.

[6] 윤영기, " 건물통합 연료전지", Journal of the KARSE, wp 27권, 제 10호, pp. 74-79, 2010.

[7] Won Pyo Hong, "Multi-agent system based control and management technology for a small scale building microgrid", Final report(지식경제부), (2009T100201253), 2010.8월.

[8] Tao Zhou, Bruno Francois," Modeling and control design of hydrogen production process for an active hydrogen/wind hybrid power system", International journal of hydrogen energy 3 4, pp.21-30, 2009.

[9] M. H. Nehrir, "Modeling and Control of Fuel Cells" John Wiley & Sons, 2009.

[10] Abou El-Maaty Metwally Metwally Aly Abd El-Aal, "Modelling and Simulation of a Photovoltaic Fuel Cell Hybrid System", Ph.D Dissertation, Electrical Engineering, University of Kassel in Germany, April 15, 2005.

[11] O.C. Onar, M. Uzunoglu, M.S. Alam, "Modeling, control and simulation of an autonomous wind turbine/photovoltaic/fuel cell/ultra-capacitor hybrid power system," Journal of Power Sources 185, pp. 1273 - .1283, 2008.

[12] F.Katiraei, et al., "Microgrids Management", IEEE Power & Energy Magazine, May/June 2008.

◇ 저 자 소 개 ◇

홍원표(洪元杓)

1956년 5월 15일생. 1978년 숭실대 전기공학과 졸업. 1989년 서울대학교 대학교 전기공학과 졸업(박사). 1979~1993년 한전전력연구원 선임연구원. 2007~2008년 UBC 방문교수. 현재 한발대학교 건축설비공학과 교수. 본 학회 이사 및 편수위원. 대한설비공학회 에너지전문위원. 주요 연구분야는 필드버스제어 네트워크 적용. Green Building과 에너지 및 Smart space 구축기술임.