특 집

가정용(RPG) 1kW급 SOFC 발전시스템

유영성, 박재근
한전 전력연구원 신기술센터
yungsung@kepri.re.kr, jkpark77@kepri.re.kr

1. 서 론

현재 우리나라는 소비량으로 세계 10위의 에너지 순수입국에 속한다. 한전의 전기에너지 생산을 위한 총 발전용량은 약 5천6백만kW로 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 있다. 따라서 우리가 현재 사용하는 전기에너지는 주로 석탄과 같은 화석연료를 태워 연소시켜 얻고 있는데 이 과정 중에 다량의 이산화탄소(CO_2)가 필연적으로 발생하고, 뿐만 아니라 사용원료 연료에 포함되거나 연소방법에서 유발되는 일산화탄소(CO), 황산화물(SOx), 질소산화물(NOx) 등의 공해물질을 대기 중에 배출하게 된다. 한편 원자력도 사용 후에 나오는 방사능 폐기물을 안전하게 저장 또는 처리가 필요하고 이를 위해서는 많은 비용과 수고를 들여야 하므로 환경오염 측면에서는 마찬가지인 것 같다. 물론 일반 화력발전소에서도 대기 중으로 배출하는 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 이 때 발생되는 이산화탄소이다. 현재는 이산화탄소를 제거하기 위해서 흡착제를 이용하거나 연소공정을 개선하려는 신기술을 개발하고 있으나 아직은 뚜렷한 방법한 찾지 못한 실정이다. 물론 이산화탄소 자체가 인간에게 직접적인 해를 끼치지는 않으나 이는 지구 온난화의 주요원인이어서 지구의 대기환경에 심각하게 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 특히 매일 타고 다니는 자동차의 수도 급증하여 공해 배출가스의 발생은 날로 심각해져 가고 있다.

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(H_2O) 외의 다른 부산물이 없고, 가역적으로 물의 분해와 결합에 의해 전기를 생산할 수 있어서 값싸게 수소의 생산이나 저장 또는 공급이 가능한 미래의 수소에너지시대의 도래전인 과도기에도 탄화수소계 연료를 이용할 수 있는 장점이 있다. 또한 비교적 단순한 에너지 변환과정으로 화학에너지를 전기에너지로 바로 얻을 수 있기 때문에 연료전지는 특성상 환경친화성 및 고효율성을 가진다. 따라서 고효율의 발전장치를 이용함으로써 그 만큼의 이산화탄소의 배출량을 줄일 수 있기 때문에 기존의 연소를 통한 회전력에 의한 전자기식 발전방식을 대체할 수 있는 새로운 전원으로 주목 받고 있으며, 태양광 및 풍력에 의한 대체(안)에너지와는 별도로 지속적이며 안정적인 환경친화형 발전시스템이 될 수 있다. 즉, 연료를 연소과정과 달리 전기화학적 산화반응으로 소모하므로 오염물질의 배출을 매우 줄일 수 있으며, 또한 기계적 회전부가 적다는 점에서 소음발생도 적다. 기존 화력발전이 대개 40%이하의 발전효율을 갖지만 전기화학적 에너지변환만 거치는 연료전지 방식에서는 이론적으로 55%이상의 고효율을 갖는 것을 특징으로 한다. 또한 발전시스템으로서 필요한 설비용량(규모)의 조절이 용이

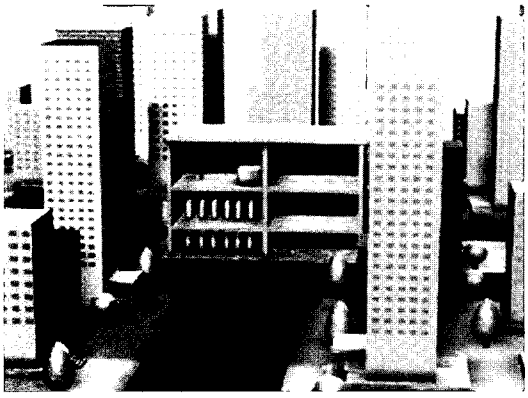
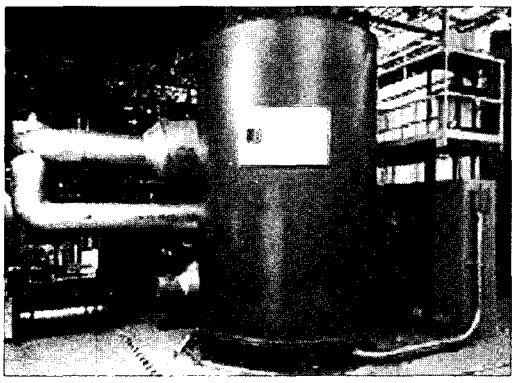


Fig. 1. 연료전지를 이용한 미래의 발전소.

하고, 이러한 단위용량을 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 가능함으로 송전손실이 적다는 점 등이 있다(Fig. 1).

연료전지 시스템은 기본적으로 전기를 생산하는 연료전지 본체 또는 스택 (fuel cell; stack), 연료인 천연가스, 석탄, 석유, 메탄올 등을 수소가 많은 연료로 변환시키는 연료 개질기(fuel processor: reformer), 생산되는 직류전기(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 만들어 내는 배열이용 장치 등이 부가된다. 연료전지는 양극(공기극), 전해질, 음극(연료극) 등으로 이루어진 단전지(single cell)를 기본적인 구성요소로 하며, 큰 전력을 생산하기 위해 여러개의 단전지를 직렬 혹은 병렬로 적층하여 스택(stack)을 본체로 한다. 연료전지의 종류나 운전조건에 따라 다르지만 무부하에서 단전지는 한 개당 약 1.1 V의 개회로 전압(open circuit voltage, OCV)전압을 가지며 정격으로는 약 0.7 V의 전압에서 전력을 생산하게 한다. 우리가 원하는 보다 높은 전압의 전력을 얻기 위하여 이들 단전지들을 여러 장 쌓아 올리거나 전류량을 늘리기 위해서 단전지의 면적을 넓히기도 한다. 실제로는 연료전지의 스택을 1 kW에서 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.[1] 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 이미 실증 및 상용화가 진행되고 있는 용융탄산염 연료전지(MCFC)와 고체산화물 연료전지 (SOFC)가 그 대상이 되고 있다. 기존의 인산형 연료전지 (Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC)는 상대적으로 낮은 효율 및 경제성으로 발전용 연료전지로서 시장점유율이 감소하는 추세이다. 또한 연료전지 발전 방식은 발전 열과 전기를 동시에 공급할 수 있어 수요지 요구에 직접 연결되며, 송배전 설비 사용을 줄여 전력 사용 비용을 저감할 수 있다. 생산자는 짧은 기간, 적은 투자비로 필요한 전원을 확보 할 수 있는 장점을 가지게 된다. 따라서 연료전지를 이용한 미래의 발전시설은 Fig. 1에서와 같이 도심내 또는 특정 지역, 아파트 단지, 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 각각의 소규모 연료전지 발전소로써 기존의 대규모 화력 발전 설비를 보완할 수 있으며, 전력 송배전 계통의 기능을 안정화하는 역할을 담당할 수 있을 것이다. 이런 분산형 전원은 소규모이기 때문에 화력발전 대체용 연료전지보다는 쉽게 적은 투자비로 설치할 수 있어 상용화시기가 빠를 것으로 예측된다. 상용화된 분산형 발전시스템으로서 미국 FCE(Fuel Cell Energy)사는 중규모인 300 kW급 용융탄산염형 연료전지(MCFC)의 실증 시험을 진행하고 있으며 현재 12 MW 규모의 설비를 제작 중에 있다(Fig. 2(a)).



(a) MCFC 발전시스템

(b) SOFC 발전시스템

Fig. 2. (a) 미국 Fuel Cell Energy사의 300 kW급 MCFC 시스템과(b) Siemens-Westinghouse사의 250 kW급 SOFC 시스템.

또한 Fig. 2(b)에서와 같이 고체산화물 연료전지(SOFC)는 가스터빈과 복합화된 250 kW급 시스템이 Siemens-Westinghouse사에서 개발되어 운전시험 중이며, 1 MW급 시스템의 운전 시험이 계획되고 있다.

이 외에도 이동용(소형) 연료전지로는 주로 액체 연료인 메탄올을 사용하여 시스템을 단순화시킨 직접 알코올 연료전지(DMFC)와 micro Fuel Cell분야의 PEMFC, SOFC가 대상이 되고 있다. 또한 수십 kW급으로 고출력의 소형 경량화가 가능한 PEMFC는 자동차에 탑재하기 위한 연구개발이 집중적으로 수행되고 있는데, 수십 kW인 경우의 승용차용과 2~300 kW급의 버스용 등이 개발되고 있다. 특히 가정용 또는 소규모 상업용 연료전지로서 수 kW급으로 고출력의 고분자 전해질 연료전지(PEMFC)와 고온의 배열을 이용할 수 있는 고체산화물 연료전지(SOFC)가 적용가능하다. 이러한 이유로 가정용을 위해서는 수백W급에서 수kW의 용량이 필요하여 시스템적으로 단순한 연료전지가 적합한데, DMFC는 메탄올연료로만 가동할 수 있어 적합하지 않으며, MCFC나 PAFC는 상용화 기술에는 도달하였으나, MCFC에서와 같이 스팀발생기나 CO_2분압 유지 등의 문제로 오히려 소규모 시스템으로 개발하기에는 이상적인 효율을 얻을 수 없어 적합하지 않기 때문이다. 따라서 가정용 혹은 수십 kW이하의 상업용 또는 Remote 전원으로서의 연료전지는 PEMFC와 SOFC가 경쟁될 수 있으나 아직까지 어떠한 기술이 실용화될지는 좀 더 연구개발이 진행되어야 할 것이다.

가정용 연료전지 시스템(Residential Power Generation, RPG)으로 먼저 개발된 PEMFC에서는 본격적인 개발 및 보급을 위해서 향후의 기술 혁신이 지속 되어야 하는데 가장 문제점은 수소이온(프로톤) 전도체인 고분자 멤브레인(Nafion™막)과 촉매의 내구성이다. 특히 가습조건하에서 부하변동에 따른 시스템의 안정 운전과 CO 피독에 대한 플라티늄 등의 귀금속 촉매 및 합금 촉매의 성능 안정성을 유지하는 기술을 개선해야 한다. 이를 위해서 고도의 연료개질기 기술이 필요하지만, 아직 기술적 완성도가 높지 않아서 전체적으로 시스템의 장기 성능 면에선 미흡한 실정이다. 따라서 최근에는 상대적으로 연료개질기 부분이 단순화될 수 있으며 CO에 대한 피독 등의 문제가 없어 LNG를 포함한 LPG, 디젤 등 여러종류의 연료가 상용되어질 수 있는 SOFC가 연료전지 발전시스템으로 주목받고 있다. 상대적으로 단전지(single cell)의 구성 재료특성이 열화학적으로 안정한 SOFC는 단전지 측면에선 내구성이 확보되어 있으나, 아직까지는 연료가스와 공기의 밀봉기술 그리고 값싼 금속계 분리판을 이용함에 있어 내산화성 등의 문제가 있고, 기동(승온)시 비교적 소요시간이 길고 열사이클 운전에 불안정한 단점을 보완할 필요가 있다.[3] 따라서 실제로 SOFC도 아직까지는 상용화에 근접할 만큼 안정되고 경제성면에서 유효한 가정용 시스템이 개발되지는 못하였으나 연구개발이 지속적으로 추진된다면 이를 이용한 가정용 연료전지 발전시스템의 개발 가능성은 매우 높다고 여겨지고 있다. 따라서 본 고에서는 국내외의 가정용 PEMFC시스템과 외국에서 개발된 SOFC시스템의 예와 현재 본 연구원에서 '03년부터 정부과제(수소연료전지사업단)로 추진

하고 있는 1 kW급 가정용 SOFC 발전시스템과 관련한 기술 개발현황에 대해서 소개하고자 한다.

2. 가정용 연료전지 발전시스템

2.1 고분자형 연료전지(PEMFC)를 이용한 가정용 연료전지 발전시스템 개발 현황[5]

고분자 연료전지란 수소이온만을 통과 시키는 고분자막(Nafion™막)을 경계로 수소와 산소를 양쪽에 공급하면 전기가 발생되는 원리를 이용한 것이다. 즉 물의 전기분해의 반대방향의 반응을 이용하는 것이다. 수소극에서는 수소가스가 촉매를 만나 수소이온과 전자로 나누어지며 수소이온은 고분자막을 통하여 산소극으로 이동하고 전자는 별도의 외부회로를 통하여 산소극에 도달한다. 산소극에서는 촉매의 도움으로 산소기체와 수소이온 및 전자가 반응하여 물을 생성하게 된다. 즉 외부에서 지속적으로 수소와 산소를 공급하여 주면 전기와 물이 지속적으로 발생하므로 일종의 전기화학 반응에 의한 발전인 것이다. 본격적인 개발은 1980년대 및 1990년대에 이르면서 적어도 세 분야에서 기술적인 혁신이 이루어지면서부터 시작되었다. 첫째는 Dupont사가 이온전도성과 내구성이 뛰어난 불소계 고분자막인 Nafion™이라는 고분자를 성공적으로 개발한 것이다. 프로톤 전도막은 연료전지의 핵심소재인데 Nafion™은 높은 이온전도도와 내구성으로 기존의 연료전지의 수명과 성능을 향상시키는데 크게 기여하였다. 둘째는 촉매의 사용량을 크게 저감하는데 기여한 Supported Pt/C 개념이다. 미국의 LOS ALAMOS NATIONAL LAB.에서 촉매를 미세한 카본 입자 위에 나노입자로 분산시킴으로서 촉매 사용량을 기존의 수십분의 1로 줄여도 오히려 성능은 증가하는 기술적인 혁신을 이루었다.[5]

따라서 가정용(RPG) 연료전지분야에서는 1 kW~5 kW급의 연료개질기를 포함한 시스템으로 PEMFC를 이용하여 먼저 개발되었다. 소위 RPG 시스템은 가정에 연결되어 있는 도시가스 망을 이용하여 전기를 생산하며 열회수를 통한 온수 사용으로 30% 이상의 전기효율과 열효율을 포함한 종합효율 75% 이상의 고효율을 얻을 수 있는 발전장치이다. 가정에서는 가스를 이용하여 고효율의 전기를 생산하므로 가스와 전기비용을 합한 유틸리티 비용의 절감이 이루어지며 국가적으로는 CO_2의 20% 정도 절감이 이루어지고, 동고하저의 가스이용과 여름철 전력난을 동시에 해결함은 물론 신규 발전소 건설의 부담을 줄일 수 있는 등의 장점이 있어 기술적인 성숙과정을 거쳐 보급이 이루어지면 급격한 시장 침투가 예상되고 있는 분야이다. Fig. 3에 이러한 연료전지 RPG 시스템의 환경효과 및 경제성을 도시하였다.

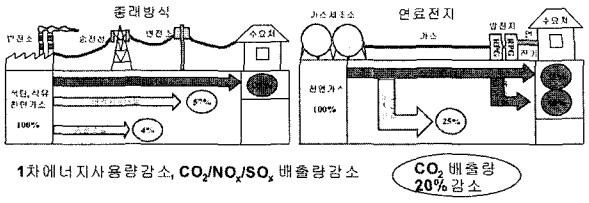
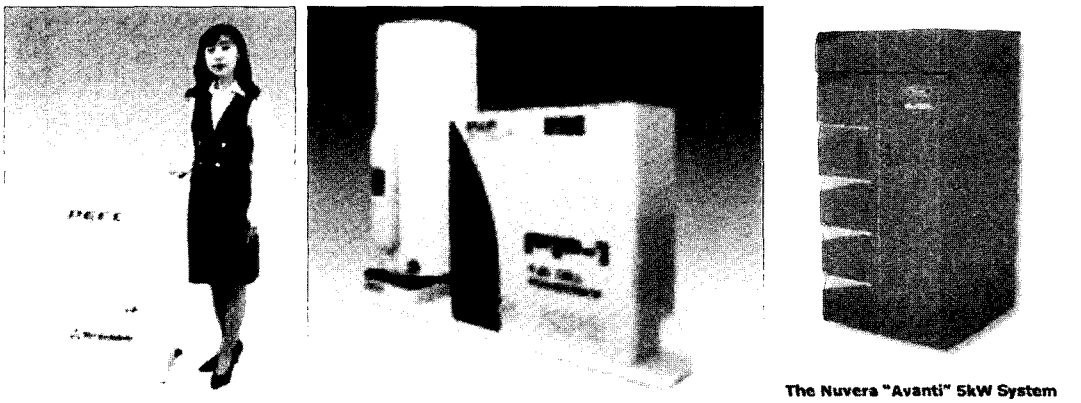


Fig. 3. 종래의 화력발전방식과 가정용 연료전지 발전방식 비교[5]

PEMFC를 이용한 가정용 연료전지시스템은 미국에서는 Plug Power사를 중심으로 한 5~7 kW급의 독립형 운전 시스템이 주종이며, 일본에서는 마쯔시다, 도시바, 산요 등 대기업을 중심으로 국가적 목표인 도시가스를 연료로 하는 1 kW급 계통연계형 시스템에 집중적인 개발이 이루어졌다(Fig. 4). 일본에서는 2001년부터 일본도시가스협회가 주관하는 RPG의 실증이 이루어졌으며 현재는 전국적인 규모로 2차 실증이 진행 중이다. 일본의 경우는 국가적으로 1 kW라는 목표를 정하여 개질기, 전력변환기, BOP 등 모든 관련 부품이 1 kW에 최적이 되도록 개발하였으며, 이로서 효율과 시스템 크기, 신뢰성 면에서 세계에서 가장 우수한 RPG 시스템 기술을 보유하고 있다.

국내에서는 정부추진으로 프로토타입인 5 kW급 주택용 PEMFC 연료전지 시스템 개발이 2002년 완료된 이래 세티, 퓨얼셀파워, 대구도시가스 등 3개의 민간기업에서 RPG 상용화 프로토타입을 발표하였고, 2004년부터 2년간 정부지원으로 진행되는 실증연구 사업이 착수되었다. Fig. 5는 세 회사에서 개발한 RPG 시스템의 사진을 보여주고 있다. 하지만 국내외에서 개발된 PEMFC의 경우 시스템적으로는 완성되었지만 신뢰성과 내구성 및 사용자 편리성 등에는 아직 미흡한 실정이다. 시스템 가격 또한 경제성을 갖지 못하여 실용화와 보급을 쉽게



미쓰비시중공업 후지전기 Nuvera Fuel Cells(미국/이태리)

Fig. 4. 국외에서 개발한 가정용 고분자형 연료전지(PEMFC) 시스템.

달성하지 못하고 있다. 가정용 PEMFC 시스템의 본격적인 개발 및 보급을 위해서는 향후의 기술 혁신이 지속되어야 하는데 PEMFC에서는 가장 대표적인 분야가 고분자 멤브레인과 촉매 분야이다. 첫째로 고분자 멤브레인 분야에서는 가습의 부하가 적은 혹은 무가습의 조건에서 이온전도성이 우수한 저가이면서 장수명의 고분자막의 개발이 필요하다. 현재의 Nafion™막은 가습을 충분히 해 주어야 하는 제약 조건 때문에 80℃ 이상의 고온운전이 불가능하여 CO 피독에 대한 저항성에 한계가 있어 복잡하고 제어가 어려운 연료개질기를 필요로 한다. 또한 시스템 냉각부하가 과도하여 시스템을 복잡하게 만드는 요인이 되고 있으며 열병합 효율도 한계가 있다. 따라서 적어도 120℃에서 작동이 가능한 고분자막이 개발 된다면 연료전지 시스템의 가격, 성능, 내구성에 혁신적인 역할을 하게 될 것이다. 둘째는, 촉매분야이다. 현재는 플라티늄(백금) 등의 귀금속 촉매 및 합금 촉매가 주류이다. 그러나 스택과 개질기를 포함하여 귀금속계가 아닌 보통의 소재로 구성되는 촉매가 귀금속 촉매를 대체할 수 있다면 대규모의 보급에 대한 장벽이 제거될 수 있을 것이다.[5]

궁극적으로 가정용 연료전지의 보급은 기존의 중앙집중적인 전력인프라가 분산화된 분산전력 시대로 접어드는 시발점이 될 것으로 기대되고 있다. 즉 전기는 이제 필요한 곳에서 청정하게 직접 만들어 사용하게 되는 패러다임의 이동이 일어날 것이다. 국내 연료전지 보급 측면에서, 산업자원부에서 발표한 RPG 보급계획[4]에 의하면 2012년까지 10,000호 보급을 목표로 하고 있는데 2010년까지의 일본의 400,000대 보급 계획에 비하면 40분의 1에 해당하는 규모이다. PEMFC를 적극적으로 개발하고 있는 일본에서 분석한 자료에 의하면 2010년에

퓨얼셀파워 : 1kW RPG CETI : 1kW RPG 대구도시가스 : 2kW RPG

Fig. 5. 국내에서 개발한 가정용 고분자형 연료전지(PEMFC) 시스템.

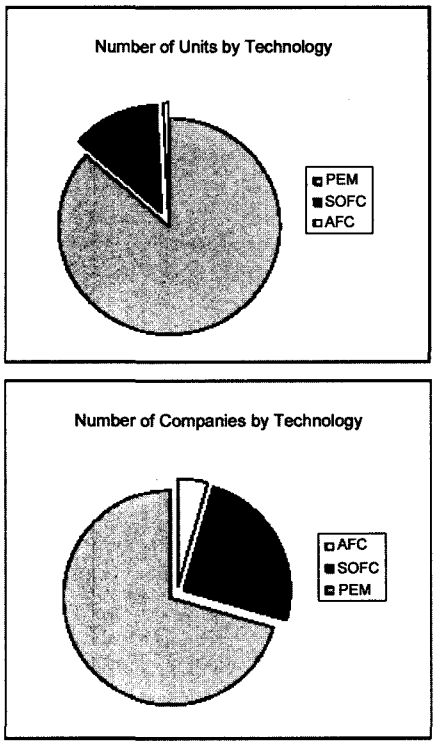


Fig. 6. 2003/4년 기준 국내외 설치된 각 소형 정지형 연료전지별 발전시스템 수 및 제작사 비율분포.[2)]

일본의 고분자연료전지의 시장은 100억 달러 규모에 이를 것으로 전망되며 이중 소형 정지형 분야가 대부분을 이룰 것으로 보고 있다. 마찬가지로 PEMFC의 또 다른 주요 적용 분야인 자동차용 PEMFC도 여전히 초기 시장이며 2010년 이후에 대규모 시장이 전망되고 있다.

2003년 기준으로 이미 보급된 소형 정지형(small stationay market) 연료전지 시스템 중에서 출력 크기별과 사용연료별로의 구성비를 살펴보면 소형 연료전지 시스템은 1~2 kW급과 5 kW급 이상의 RPG가 주류를 이루며, 연료로는 순수 수소가 아닌 기존의 인프라가 구축되어 있는 도시가스를 개질하여 사용하는 것이 주요 시장으로 알려져 있다.[2)]

특히 Fig. 6에서와 같이 현재는 PEMFC 시스템의 수가 다수를 이루나 SOFC를 이용한 소형 시스템의 수가 점진적으로 증가하며 제작사도 증가하고 있다. 이는 앞서 밝힌 바와 같이 기술적 완성면에서는 다소 미흡하나 SOFC도 RPG시장에서는 충분한 경쟁력이 있기 때문으로 분석된다.

2.2 고체산화물 연료전지(SOFC)를 이용한 가정용 연료전지 발전시스템 개발 현황

한편 연료전지는 작동하는 온도에 따라 비교적 저온(약 250℃이하)에서 동작되는 저온형 연료전지와 약 500℃ 이상의 온도에서 동작하는 고온형 연료전지로 나뉠 수 있다. 특히 고온형 연료전지에는 용융탄산염 연료전지(MCFC)와 고체산화물 연료전지(SOFC)가 있는데 PEMFC와 같은 저온형 연료전지와 달리 이들은 작동온도가 높아 상대적으로 고효율의 특징과 배기가스의 배열을 이용하여 열효율을 높일 수 있는 장점이 있으며, 또한 백금(Pt)전극이 아닌 주로 고온에서 사용가능한 비귀금속계(주로 Ni금속) 전극을 이용하므로 비용적인 면에서나 규모면에서 연료전지를 이용한 중규모이상의 분산형 발전시스템으로의 개발이 기대되고 있다.

이중 용융탄산염형 연료전지(MCFC)는 알카리(Li/K)계 탄산염 용액을 전해질로 사용하고 Ni계 금속을 전극으로 사용하므로 약 650℃의 정온유지와 스팀농도 및 CO_2 분압조절 등을 고려하여 시스템(스택)을 안정적으로 유지해야만 최적의 전기화학반응과 스택의 수명이 보호 또는 보장될 수 있어 소형 시스템에서는 적합하지 않다. 반면에 고체산화물 연료전지(혹은 고체전해질 연료전지, SOFC)에서는 현재까지 알려진 바와 같이 작동온도가 500~1000℃로 광범위하며 또한 SOFC 구조 형태 및 사용재료에 크게 의존한다. 여기에 사용될 수 있는 고체전해질로서 도핑(doping)된 지르코니아(ZrO_2), 세리아(CeO_2), La계 페로브스카이트((LaSr) (GaMg)O_3) 등 아직까지도 개발의 여지가 많다. 또한 전극도 연료극에서는 NiO계 산화물이 주종을 이루지만, 여기에 혼합되는 전해질 분체의 성분 및 조성에 따라 그 특성이 달라진다. 더욱이 SOFC의 공기극 재료로서 널리 이용되는 페로브스카이트(Perovskite) 화합물구조에서 A site와 B site 원소의 구성과 각각의 site에 도핑되는 원소의 종류와 조성에 따라 매우 다른 특성을 갖기에 현재까지도 그 개발의 가능성 여지가 높다고 생각되고 있다. 이와 같이 SOFC의 구성요소는 세라믹스(소결체)로 구성되어 있어 세라믹 연료전지(ceramic fuel cells)로 칭하기도 하는데, 이러한 특징에 따라 연료면에서 수소(H_2) 외의 메탄가스와 같은 탄화수소계 연료를 외부에서의 개질장치 없이 직

접 사용(Direct Electrochemical Oxidation)할 수도 있어 가용연료의 제한이 매우 적고, 가습(스팀)시스템이나 기타 주변장치 등이 필요 없거나 혹은 간편하게 제작될 수 있다는 장점이 있다. 이에 따라 선진외국에서도 최근의 고체산화물 연료전지(SOFC)기술은 대형 분산형 발전전원으로 뿐만 아니라 가정용 열병합 발전용으로 RPG 시스템의 개발이나 소규모 배터리 충전용 발전장치(Battery Charger), 또는 자동차용 보조전원장치(Auxiliary Power Unit, APU)용 SOFC 시스템으로의 연구개발 경향이 증가하고 있다.

연료전지는 원리는 간단하지만 시스템으로서 작동하기 위해서는 여러 가지 복잡한 문제를 해결해야 한다. Fig. 7은 SOFC를 이용한 소형(가정용) 연료전지 발전시스템의 구성을 나타내며 일반적으로 스택, 개질기, 전력변환기등 관련 보조부품(Balance of Plant, BOP)로 이루어져 있다. 연료전지 시스템의 핵심은 가스를 이용해 직접 전기를 생산하는 스택이다. 스택에서 생산되는 전기는 직류이므로 일반 소비자가 사용하려면 교류로 바꾸어 주어야 한다. 스택에서 생산된 전기를 교류로 바꾸어주는 Inverter와 Converter로 이루어진 부분을 합하여 전력변환기(Power Conditioner)라고 한다. 전력변환기는 필요에 따라 전력계통선에 연계하여 운전할 수 있는 기능을 포함할 수 있다. 연료개질기(reformer or fuel processor)는 수소를 연료로 사용할 때는 필요 없으나 LNG나 LPG등 탄화 수소계 연료를 사용할 때는 이들 가스를 분해 및 개질하여 수소를 포함한 연료가스로 만드는데 이용된다.

PEMFC든 SOFC든 연료전지 시스템에서 가장 중요한 것은 전기효율이다. 즉 시스템에 들어가는 연료가 가지는 에너지 중에 순수하게 시스템 외부로 공급되는 전기에너지가 얼마나 되느냐는 것이다. 시스템의 전기효율은 아래의 식으로 표기된다.

$$\eta_{System} = \eta_{Reformer} \times \eta_{Stack} \times \eta_{BOP} \times \eta_{Inverter}$$

따라서 연료전지 시스템의 전기효율을 높이기 위해서는 개질기, 스택 및 전력변환기의 효율이 높아야 함은 물론 시스템을 구동시키기 위한 제반 보조장치(BOP)의 효율도 높아야 함을 알 수 있다. 또한 시스템에서의 두 번째로 중요한 문제는 신뢰성이다. 연료전지 시스템은

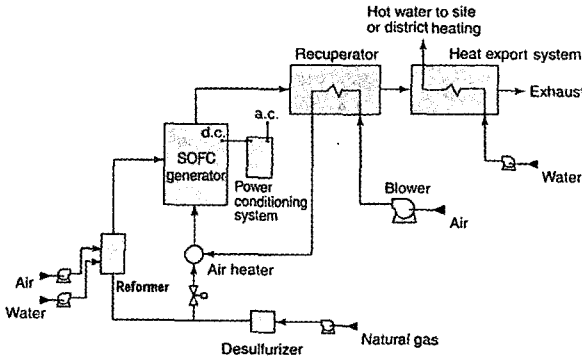
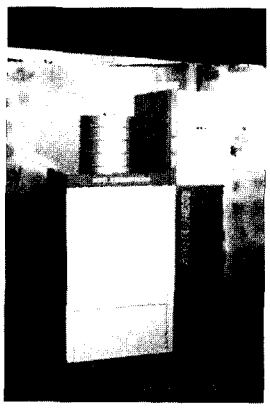


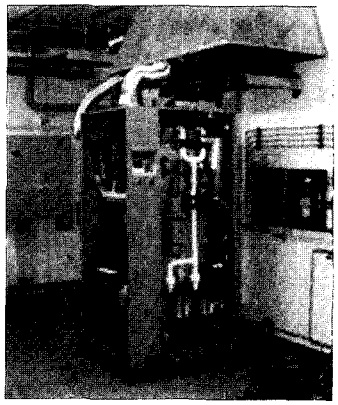
Fig. 7. 상압 SOFC CHP(combined heat and power) 시스템.

용도별로 목표수명이 있다. 예를 들어 정지형 연료전지에서는 40,000시간(5년)이며, 자동차 분야에서는 5,000시간(10만마일 이상), 이동용에서는 1,500시간, 그리고 UPS 분야는 200시간 정도를 목표 수명으로 하고 있다. 이렇게 목표 수명이 다른 것은 연료전지의 운전조건이 각각 다르며 연료전지의 수명은 운전조건에 밀접하게 관련되어 있기 때문이다. 신뢰성을 높이기 위해서는 핵심부품의 신뢰성 확보는 물론 최적의 운전제어를 확보할 필요가 있다. 고온형 연료전지인 SOFC는 배열을 이용할 수 있다는 면에서 고효율의 특징을 가져 유리하고, 단전지 장기성능 면에서도 Siemens-Westinghouse사의 공기극 지지체형 tubular SOFC 단전지의 경우 이미 약 6년여의 장기 성능시험에 성공한 결과를 볼 수 있으며, 특히 본 연구원에서 개발한 중온용 연료극 지지체형 단전지에서도 4년여의 장기실험을 성공함으로서 SOFC 기술의 가능성을 확인할 수 있었다. 이러한 면에서 SOFC RPG에 더욱 관심이 집중되고 있는 것 같다. 그리고 연료전지 시스템에서 세 번째로 중요한 것은 가격이다.

Fig. 8은 외국에서 개발한 가정용 SOFC 시스템의 예이다. 상대적으로 가장 빨리 SOFC RPG개발에 성공한 (a)의 Sulzer Hexis사는 평판형이면서 전해질 지지형 SOFC를 이용하여 950℃에서 운전되는 1 kW급 시스템을 선 보였다. 하지만 스택 구성시 고가의 내열금속(Ducrolly)합금을 사용함으로서 스택의 가격과 시스템가격이 높은 반면에 수명은 6천시간 정도로 짧은 편이다. (b)는 Siemens-Westinghouse사의 원통형 단전지를 평판



(a) 스위스 Sulzer Hexis사(1kW급)



(b) 미국 Fuel Cell Technology사(5kW급)

(c) 미국 Acumentrics사(5kW급)

(d) 일본 Toho가스 및 스미토모사(1kW급)

Fig. 8. 외국에서 개발한 가정용 SOFC RPG시스템.

화하여 flat tubular type으로 개발한 RPG이다. 제작사인 Fuel Cell Technology사는 시스템 수명이 5년 이상을 갖는다고 밝히고 있으나 일단 단전지의 제조비용이 높기 때문에 마찬가지로 시스템 가격도 가장 비싼 RPG로 알려져 있다. (c)에서와 같이 지르코니아 전해질(YSZ)을 작고 얇은 관(직경 약2~3 mm)으로 제작하여 단전지를 개발한 Acumentrics사는 기술적으로 어려운 스택내 원통형 단전지의 상호간 전기적 연결부분 문제를 일부 해결한 것으로 밝히고 있으나 아직 정확한 스택구조나 실증실험 결과가 발표되지 않고 있다.

일본에서도 PEMFC보다는 적지만 몇몇 기업 또는 기관에서 SOFC RPG를 개발하고 있다. Fig. 8(d)는 일본 3대 가스회사중 하나인 Toho가스사와 스미토모사가 공동개발하는 RPG로[6] 특히 본 연구원에서 개발하는 RPG 시스템과 유사한 특징이 있다. 스테인레스스틸재 금속분리판과 스칸디아 안정화 지르코니아(ScSZ) 전해질을 사용하여 중온용 평판형 단전지를 이용한 SOFC RPG시스템이라는 면에서는 같다. 하지만 본 연구원에서는 ScSZ를 박막화(10 μm)하여 한층 더 고성능화한 SOFC를 개발한 반면에 (d)의 Toho가스사에서는 종래의 기술인 전해질 지지형 ScSZ 단전지를 이용한다는 점에서 차이를 갖고 있다. 어쨌거나 PEMFC RPG든 SOFC RPG든 가격이 싸면서 안정적이고 사용자가 이용하기에 편리한 시스템이 개발된다면 쉽게 시장진입에 성공하리라 믿어진다. 연료전지는 상용화 초기에는 그 구성부품 및 판매량이 미미하므로 상대적으로 가격이 비싸다. 따라서 정부에서는 초기 보급단계에서 기업에 대한 적극적인 지원을 통하여 양산을 유도하고 시장을 창출하여 기업이 가격경쟁력을 확보할 수 있도록 하여야 한다. 일본과 미국에서는 기업에서 개발한 연료전지 시스템을 정부와 지방

자치단체등이 전액보조로 구매를 함으로서 기업이 경쟁력을 유지할 수 있도록 지원하고 있다.[5]

2.3 전력연구원의 1kW급 가정용 SOFC 발전시스템의 기술 개발 현황[7]

현재로선 SOFC에서 가장 핵심적인 원천기술은 SOFC 본체에 해당하는 스택(stack) 또는 모듈(module)의 제작기술에 있다. 따라서 본 연구원에서 추진하는 중저온형 SOFC RPG 전원시스템 개발의 목표는 발전의 핵심부분인 고성능이면서 중저온에서도 장기성능을 신뢰할 수 있는 SOFC 모듈 본체의 개발과 이의 RPG용으로서의 시스템화 관련기술이다. 궁극적으로는 본 연구의 수행을 완성하고 SOFC관련 핵심적인 원천기술을 확보하여 국내 순수기술로 개발되는 가정용(RPG) SOFC 발전시스템을 설계 제작하여 이를 시험 평가함으로써 향후 RPG용 SOFC 발전시스템의 실용화에 기여하고자 하고자 한다. 본 SOFC RPG개발에는 주관기관으로 한전과 전력연구원이, 위탁기관으로서 KIST, KAIST, 요업기술원, RIST, 산업대, 산기대가 공동 연구하고 있으며 참여기업으로서는 대성산업(주), (주)퓨얼셀파워가 참여하고 있다. 이하는 현재까지 1년여의 연구진행 결과를 요약하여 기술하였다.

2.3.1 Functional Layer 구조를 갖는 연료극 지지체형 단전지 제조

보통의 연료극 지지체형 SOFC 단전지에 비해 연료극에 Functional Layer 구조를 갖는 단전지는 750, 650℃ 각각에서 25%의 성능향상을 보였으며, FL층의 두께 변화를 통해 실험한 결과 15 μm 두께를 갖는 단전지에서 가장 높은 성능이 나타남을 알 수 있었다. 이와 같은 성능향상은 미세구조와 AC 임피던스 분석으로부터 Functional Layer층이 연료극과 전해질 사이의 계면을 치밀하게 하여 TPB(triple phase boundary)의 밀도를 증가시켜 연료극의 분극저항을 감소하였고, 전해질 층의 두께를 고르게 하여 유효두께를 감소시키면서 결과적으로 전지의 내부저항(R_0) 성분을 감소시키는 것으로 생각된다. 이러한 결과로 Fig. 9에서와 같이 Functional Layer를 갖는 구조로 출력성능이 향상되고 대면적인 10×10 cm^2 크기의 연료극 지지체형 단전지를 개발할 수 있었다.

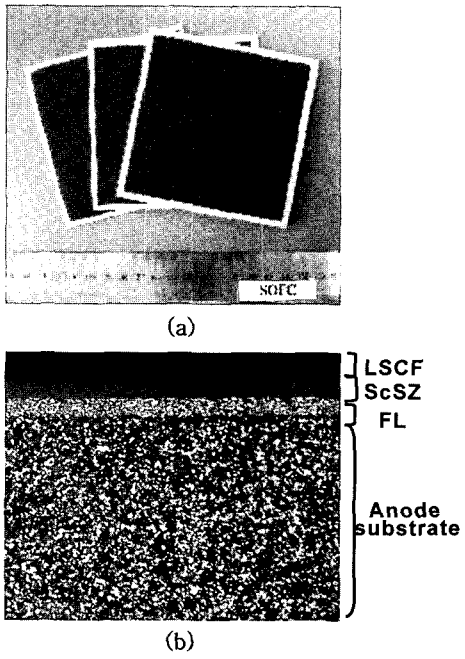


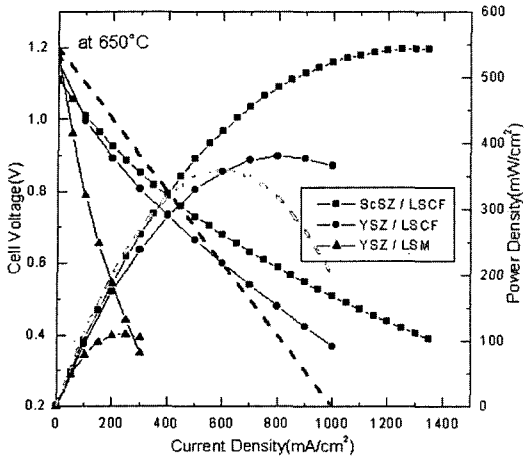
Fig. 9. ScSZ 전해질을 이용한 연료극 지지체형 10×10 cm^2 단전지(a)와 단면 미세구조(b).

2.3.2 중저온형 공기극 물질 개발

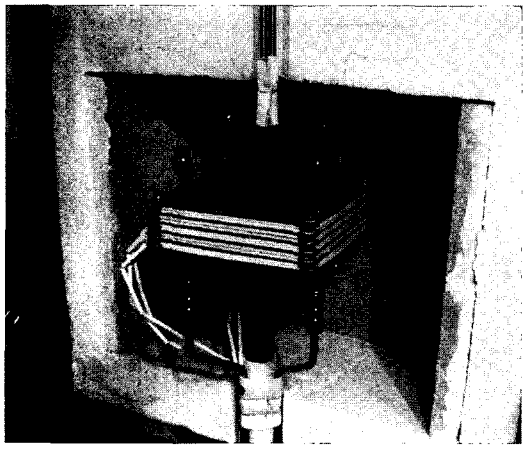
저온형 공기극 물질을 개발하기 위해 $(La_{0.6}Sr_{0.4})(Co_{1-x}Fe_x)O_3$ 공기극을 제조하고, 이에 대한 성능을 측정하였다. LSM계 공기극을 사용한 단전지에 비해 $(La_{0.6}Sr_{0.4})(Co_{0.2}Fe_{0.8})O_3$ 공기극의 경우 3~4배의 높은 출력 밀도를 나타내었으며, 650℃에서의 성능이 기존의 LSM 공기극인 경우에 750℃에서 성능보다 높게 나타났다. LSCF계 공기극을 이용한 단전지의 AC 임피던스 분석결과로부터 LSM계 공기극에 비하여 공기극 분극저항성분인 R_2 영역의 크기가 감소하였고, 또한 단전지 내부분극저항(R_0)도 감소함을 알 수 있었다. 이러한 결과로 연료극 지지체 단전지의 전체적인 성능을 향상시키며 SOFC 운전온도 감소와 출력효율을 높일 수 있을 것으로 생각된다.

2.3.3 메탄 연료가스에 대한 Carbon deposition

SOFC 운전시 탄소석출과정을 AC 임피던스 분석법을 통하여 연료극 분극저항의 증가와 연관이 있는 고주파영역의 arc의 변화로부터 분석할 수 있었다. 탄소석출은 연료극에서의 전기화학적 반응이 일어나는 catalyst surface의 활성 sites를 잠식하는 효과로 전지의 성능을



(a)



(b)

Fig. 10. 개발한 연료극 지지체형 단전지의 성능(a)과 10×10 cm^2 단전지, 5단 적층 스택(b).

저하시키는 작용을 하며, 가습된 메탄에서는 열역학적으로 탄소가 석출되지 않는 경계조건이상의 임계 전류가 인가될 시 탄소석출은 항상 가역적인 반응으로 진행된다. 하지만 이런 가역적인 탄소석출은 단전지의 성능에는 영향을 미치지는 않는다. 한편 열역학적으로 탄소석출이 일어날 수 있는 상태에서 건조한 메탄을 사용하면 비가역적인 탄소 석출이 발생하고, 이렇게 형성된 비가역적인 탄소 입자는 단전지 성능 저하의 원인이 된다.

본 연구의 결과로부터 Ni-based 연료극 지지체형 SOFC에서도 열역학적으로 탄소석출이 없는 조건에서 단전지를 운전한다면 성능 감소를 최소화하며 연료가스로 메탄을 직접 이용하여 운전할 수 있음을 알 수 있었다.

2.3.4 ScSZ 전해질을 이용한 연료극 지지체형 고성능 SOFC 단전지 개발

Fig. 9(a)와 (b)에서와 같이 스칸디아 안정화 지르코니아(ScSZ) 전해질의 두께가 10 μm로 제조된 LSCF/ScSZ/FL-(Ni-YSZ)계 10×10 cm^2 단전지(세계최초)는 750℃에서 최대전력밀도가 약 2.0 W/cm^2의 값을 보였으며 650℃에서는 약 0.8 W/cm^2의 높은 성능(Fig. 10(a)는 전해질의 두께가 20 μm인 경우)을 나타냈다. 특히 전해질의 두께가 5 μm로 제작된 단전지는 평균 1.0 V의 낮은 OCV(개회로 전압)를 보였음에도 불구하고 낮은 온도영역인 600℃에서도 최대전력밀도는약 0.6 W/cm^2 이었으며 550℃에서의 성능도 약 0.32 W/cm^2의 매우 높은 값을 얻을 수 있었다. 이러한 결과로부터 ferritic stainless steel 금속분리판을 이용하여 금속표면 산화가 충분히 억제될 수 있는 650℃ 이하의 온도에서 충분한 효율을 얻을 수 있는 SOFC 스택 또는 시스템개발에 이용할 것이다.

2.3.5 소형 스택제작 및 성능 평가

스택 실험으로는 YSZ 전해질과 ScSZ 전해질을 이용하고 LSCF계 공기극 및 FL 구조의 Ni-YSZ 연료극을 사용하여 제조한 5 × 5 cm^2 또는 10×10 cm^2의 연료극 지지체형 단전지를 5단으로 적층하여 650℃의 중저온에서 동작하는 스택을 제작, 운전하였다. 특히 귀금속(Pt, Ag)계 집전체의 사용을 배제하고 단지 스텐인레스스틸 재질의 금속분리판과 공기극 집전체로서 인코넬 집전망(mesh)을 사용하였고, 연료극 집전체로 니켈 집전망(mesh)을 사용하여 성능을 얻을 수 있었다. 1000시간 운전 후 해체한 스택의 분리판과 인코넬망의 단면 미세구조에서는 두께 약 30 μm의 산화층의 생성을 관찰 할 수 있었다. 그러므로 대부분의 스택의 저항성분 증가가 공기극쪽의 분리판의 산화에 기인하는 것으로 여겨진다.

이러한 실험 결과를 토대로 공기극의 내산화성을 향상시키고자 공기극쪽 분리판과 집전망에 LSM Paste를 30 μm의 두께로 도포하여 스택을 제작하고 이를 시험 운전하였다. LSM으로 코팅처리한 스텐인레스스틸재질의 금속분리판과 LSCF/ScSZ/FL:Ni-YSZ계 10×10 cm^2단전지를 5단으로 적층한 Fig. 10(b)의 스택의 경우

18.4 A(0.2 A/cm^2)의 전류에서 초기 평균셀전압 0.75 V로 현재까지 최장 약 4,500시간 연속부하 운전하여 안정된 출력을 얻었다. 하지만 밀봉기술의 미흡으로 출력성능의 저하를 다소 보여 향후 스택 구성시 각 단전지로의 유입되는 가스의 양을 고르게 분포시키기 위해서 메니폴드의 형태나 밀봉재 및 밀봉 가스켓의 기능이 개선되어야 함을 알 수 있었고 현재는 이를 보완하는 연구가 진행중이다.

2.3.6 발전시스템 설계종합 및 시스템 구성

본 연구에서 SOFC RPG 개발의 연구목표는 다음과 같다.

- 시스템의 구성 : 1 kW급 SOFC 스택, 천연가스 fuel *processor(reformer)*, 열회수 및 가열장치, 연료처리 및 예열기, RPG 시스템 제어 장치
- 스택 성능 : 평균셀전압 0.7 V이상 (300 mA/cm^{2}조건), 중저온(650~700℃)운전
- 시스템 효율 : 65%이상(전기출력 1 kW / 열출력 1.5 kW 이상)
- 운전시간 목표 : 6,000 시간이상
- 열사이클 안정성 : 10 회이상

SOFC RPG시스템은 반응가스 공급 장치, 연료전지 스택, 직교류 변환 장치와 폐열 회수 및 이용 장치로 구성되는데, 본 연구에서는 상압에서 작동되는 소규모 SOFC 발전시스템을 구성하여 운전을 실시고자 한다. 전체 시스템은 SOFC 스택을 중심으로 연료를 공급하는 연료 개질 시스템과 공기의 예열 및 온수 제조를 위한 폐열회수 시스템, 그리고 직교류 변환 시스템으로 구분할 수 있는데, 연료개질 시스템은 개질기 자체 이외에도 연료 내 황성분 제거를 위한 탈황기, 수증기 및 공기 공급 장치로 구성되며, 폐열회수 시스템은 미반응 가스 연소기와 공기의 예열 및 온수 제조를 위한 열교환기를 포함하여 구성된다. 그 이외에 시스템 기동시 연료전지 스택의 가열을 위한 버너도 필요하다. 이들 장치는 독립적으로 운전되는 것이 아니라 전체 시스템의 열효율 제고를 위하여 열적 · 물질적으로 상호 연결되어 운전된다. 따라서 각 시스템의 hardware 및 운전 software는 연료전지 스택과 연동 가능하도록 개발하여야 한다. 상업화 시점에서

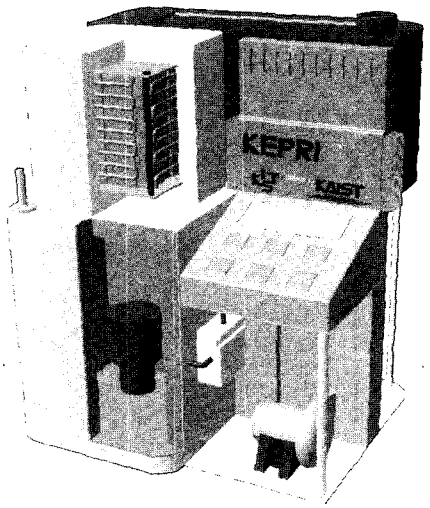


Fig. 11. 전력연구원에서 개발하는 가정용(RPG) SOFC 발전시스템 모식도.[7]

대량생산에 의한 스택 구성요소들의 제작 단가 절감은 예상됨에 반해 스택을 제외한 나머지 구성요소들인 BOP (balance of plant)는 그 성격상 대량생산이 현재로선 어렵고, 단지 시스템의 기술적 요구조건을 만족시키면서 동시에 안정성 및 경제성도 갖는 BOP의 개발이 수행되고 있다. 따라서 본 연구에서는 SOFC용에 적합한 소형 개질기 개발과 함께 고온용 열교환기, 전력변환기 등의 SOFC 스택 주변 장치 개발이 수행되고 있다.

현재까지 진행된 1년여의 중저온형 소형스택 제작 및 성능 시험에 관한 결과는 연료극 지지체형 단전지를 이용한 1 kW급 SOFC 발전 시스템 개발을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이며, 스택관련 연구와 BOP 및 시스템화 연구를 계속 추진함으로써 1 kW급 RPG (Residential Power Generation)용 중저온형 SOFC 발전 시스템 개발에 관한 핵심 기반기술을 확보하여 Fig. 11에서와 같이 순수 국내기술로 설계, 제작된 SOFC RPG를 개발할 수 있을 것으로 믿어진다.

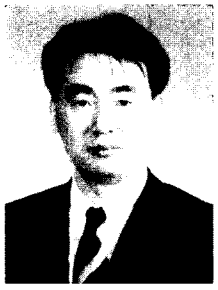
3. 결 론

이와 같이 연료전지 기술은 화석 연료를 사용하는 발전소가 가지고 있는 문제점을 보완할 수 있는 미래의 신발전 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. 에너지 자원의 대부분을 수입에 의존하고 있는 우리나라도 수소 에너지에 대한 기술력 확보를 통하여 앞으로 다가올 수소 경제에 대비하려 하고 있다. 향후 가정용(RPG) 연료전지가 실용화되면 발전소의 건설비용과 추가되는 송전 및 배전시설 비용을 절감하면서도 신재생에너지의 활용을 높일 수 있을 것이다. 특히 정부가 세운 2012년까지 가정용 연료전지 1만호 보급 사업 계획과 공공기관의 대체에너지 이용 의무화 법안에 의한 1~10 kW급 연료전지 보급 계획에 의해 연료전지 시장이 빠르게 성장할 것으로 기대하고 있다. 따라서 본 연구진은 지속적인 연구개발 노력을 통해 오는 2006년까지 국내 개발 1호 SOFC RPG를 제작 개발할 예정이며, 2006년이후는 실증 연구를 시작하여 PEMFC와 마찬가지로 향후 가정용 연료전지 보급사업에 참여한다는 계획이다. 또한 2003년부터 정부에서는 대한민국의 21세기를 이끌어갈 국가의 핵심경쟁력을 제고하기 위한 10대 차세대 동력산업 중의 하나로 2차전지와 함께 연료전지를 선정하였고, 뒤이어서 2004년부터는 수소·연료전지사업단을 출범하여 수소에너지 및 연료전지 기술분야에 집중적인 지원을 시작하였다. 이는 지금까지 대체에너지기술의 한 분야로 인식되어 온 연료전지가 21세기의 국가경쟁력향상에 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 기술로써 그 중요성이 날로 더해지고 있다.

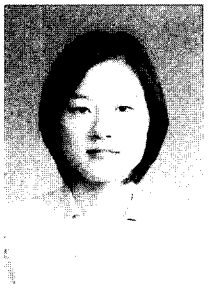
참고문헌

1. Fuel Cell Systems Explained, Second Edition, by James Larminie and Andrew Dicks, John Wiley & Sons, Ltd. (2003).
2. "Fuel Cell Market Survey : Small Stationary Applications", by Kerry-Ann Adamson and David Jollie, *Fuel Cell Today*, Nov (2004).
3. "Solid Oxide Fuel Cells : Ready to Market?", by Sandrine Colson-Inam, Cell Expert North America, *Fuel Cell Today*, 07 Jan (2004).
4. 제2차 신재생에너지 기술개발 및 이용 보급 기본계획 (2003-2012), 산업자원부, 12 (2003).
5. 홍병선, "소형 정지형 연료전지 시스템과 스택의 기술개발 현황", 고분자과학과 기술, **15**[5] 562-70 (2004).
6. Kenji Ukai and Masahiro Hirakawa, "Development of 1 kW Class SOFC System using Cubic Structure Scandium Oxide Stabilized Zirconium Oxide", *Fuel Cell Now*, **10**[3] (2004).
7. 유영성, 박재근 외 8인, "1kW급 중온형 고체산화물 연료전지(SOFC) 모듈 및 시스템 개발", 전력연구원 기술간행물(1차년도 보고서), TM.03EE02.M2004.644 (2004).



유영성

- 1985년 서울대학교 무기재료 학사
- 1987년 서울대학원 무기재료 석사
- 1995년 서울대학원 무기재료 박사
- 1996년 서울대학교 신소재공동연구소 특별연구원
- 1996년 한전 전력연구원 선임연구원 SOFC 분야 입사
- 2003년 ~현재 산자부 대체에너지기술개발사업 고체산화물 연료전지(SOFC) 과제책임자



박재근

- 2002년 단국대학교 고분자공학과 학사
- 2004년 연세대학교 화학공학과 석사
- 2004년 ~현재 한전 전력연구원 일반연구원