

## 연료전지 - 그 비전과 전망

김건택 · 정진엽

### Why Fuel Cell ? - Its Vision and Prospects

Gun-Tag Kim\*, Jin-Yop Chung\*

**Key Words :** Fuel Cell (연료전지), Distributed Generation (분산발전), RPG (가정용 연료전지), SOFC (고체산화물 연료전지), MCFC (용융탄산염 연료전지), PEMFC (고분자 연료전지), PAFC(고체산화물 연료전지), AFC(알칼리 연료전지)

#### ABSTRACT

A fuel cell is an electrochemical energy conversion device that converts hydrogen and oxygen into electricity and heat for hot water and heating room. A fuel cell provides a DC voltage that can be used to power motors, lights or any number of electrical appliances. There are several different types of fuel cells, each using a different chemistry. Some types of fuel cells show promise for use in DG (distributed generation) because fuel cell is very clean and efficient energy device. CETI (Clean Energy Technologies, Inc.) is developing PEMFC and DMFC for residential power generation, portable and battery. It is anticipated that RPG is advantageous over current power generation by utility in terms of economics assuming the lifetime of major components is at least five years.

#### 1. 서론

##### 1.1 분산발전 등장배경

1882년에 토마스 에디슨이 윌스트리트에 발전소를 건설했을 당시, 소규모 발전시설들로 구성된 분산발전(Distributed Generation)을 이상적인 시스템이라고 보았다. 지난 100여년간 발전시설이 대규모화되고, 송배전망이 확대됨에 따라 이러한 에디슨의 발상은 틀린 것처럼 인식되었다. 그러나, 근래에 들어 시장의 자유화로 전력산업의 독점이 깨지고, 소형 전력 생산시설들이 경제성을 갖추어 따라 분산발전에 대한 관심이 증대되고 있고, 무엇보다도 환경문제의 대두와 함께 신뢰성있는 전력에 대한 수요 급증, 기술적 진보 등으로 인해 분산발전에 대한 연구가 활발해지고 있다.

특히, 디지털 경제시대를 맞아 사회 각 부문에서 급격한 정보화가 진행됨에 따라 안정적인 전원을 공급하는 일이 중요한 과제로 부각되고 있는데 미국의 경우, 정전 또는 전원의 불안정으로 컴퓨터나 네트워크가 손상을 입게 되어 매년 수백만 달러의 손실이 발생하고 있는 것으로 알려지고 있다.<sup>1</sup>

지난 1세기동안 전력회사에서 일반 산업분야에 공급하는 계통전력의 신뢰도는 three nines (99.9%)에 머물렀다. 이는 연간 8시간의 정전에 해당하는 것으로서 기존의 전구나 전기모터에 기반을 둔 경제활동을 유지하는 데에 충분한 신뢰도였다. 그러나, 마이크로 프로세서에 의존한 정밀 제어나 컴퓨터 네트워크를 유지하기 위해서는 최소한 six nines (99.9999%)의 신뢰도가 필요하게 되었고, 이는 연간 정전시간이 수초에 불과한 정도이다. 한편, 본격적인 디지털 경제에 진입하기 위해

서는 연간 정전이 수밀리초에 불과한 nine nines 의 수준까지 신뢰도를 높여야 할 것으로 예측되고도 있다. 이러한 경향에 따라 연료전지와 가스터빈으로 대표될 수 있는 분산발전시설의 도입이 적극적으로 고려되고 있다. 예를 들어, 미국 캘리포니아주의 경우는 지난 10년간 전력회사가 단 한 기의 대형 발전소도 건설하지 않았지만, 개인이나 기업들은 6GW이상의 발전시설을 도입하였다. 이는 캘리포니아주 전체의 원자력발전소 시설용량과도 맞먹는 용량이다. "Fig. 1" 은 미국에서 신규로 건설되어 운영되는 발전소의 수와 최대 시설용량을 나타낸 것으로 99년부터 1년간을 제외하고는 전력회사에 의해 신규로 서비스되는 규모가 전반적으로 감소되고 있는 것을 알 수 있다.<sup>2</sup>

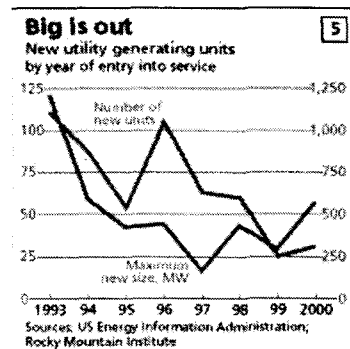


Fig. 1. New utility generating units in United States

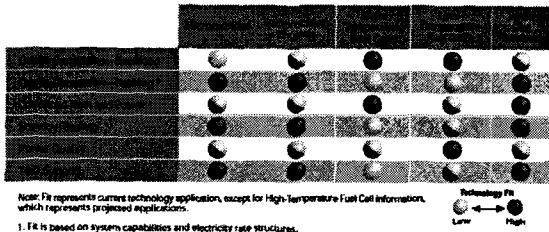


Fig. 2. Technologies and applications of distributed generation

## 1.2 분산발전의 정의

분산발전이란 전력수요가 있는 근접지역에 소규모의 모듈화된 발전설비를 통합적으로 또는 독립적으로 운영하는 것으로 정의할 수 있다. 미국의 EPRI는 소규모 분산발전 시설을 plug and play 방식으로 연결하여 사용할 수 있는 컨버터 개발을 검토하고 있는데, 이것이 실현화될 경우 기존의 전력망을 분산전원으로 구성된 microgrids 가 점진적으로 대체할 것으로 보이며, 각각의 분산발전 시설들은 가상전력회사(virtual utility)로서의 기능을 수행하게 될 것이다. 연료전지에 의한 분산발전을 고려할 경우, 대형 분산발전용으로는 인산형 연료전지(phosphoric acid fuel cell, PAFC), 용융탄산염형 연료전지(molten carbonate fuel cell, MCFC), 고체산화물 연료전지(solid oxide fuel cell, SOFC) 등이 사용될 수 있고, 비교적 소규모의 자가발전용으로는 수십 kW급 이하의 규모로 고분자 전해질 연료전지 (proton exchange membrane fuel cell 또는 polymer electrolyte fuel cell, PEMFC), 고체산화물 연료전지 등이 사용되고 있다.

분산발전의 용량은 특별히 규정하는 바는 없으나 대략 20~30 kW에서 수kW급의 용량을 가지며, 대기전원, 침투부하전원, 기저부하전원, 및 코제너레이션발전 전원 등의 기능을 담당할 수 있다. "Fig. 2" 에는 분산발전에 사용될 수 있는 다양한 기술의 종류와 응용분야를 나타냈다.<sup>3</sup>

## 2. 연료전지 개념 및 개발현황

### 2.1 연료전지 특징

연료전지는 가장 주목을 받고 있는 분산발전 및 대체에너지 기술중의 하나로 환경오염 문제를 해결하고, 전력수요 및 에너지수요에 효율적으로 대비할 수 있는 일종의 전기화학 장치이다. 전기는 수소와 산소기체와의 반응을 통해 얻게 되고, 부산물로 물이 생성된다.

연료전지는 열방출/폐열회수를 위한 소형팬이나 펌프를 제외하고는 구동부위(moving parts)가 없고, 순수한 물을 제외하고는 오염물질의 배출이 없으며, 소음이 거의 없다는 점이 특징이다. 이러한 장점으로 인하여 분산발전용은 물론이고, 자동차, 우주선, 핸드폰 및 노트북용 전원과 같은 휴대용, 군사용으로 응용될 수 있다. 특히, 분산발전용 연료전지의 가장 큰 장점은 어떠한 송전선도 필요치 않으므로 전기공급 시스템의

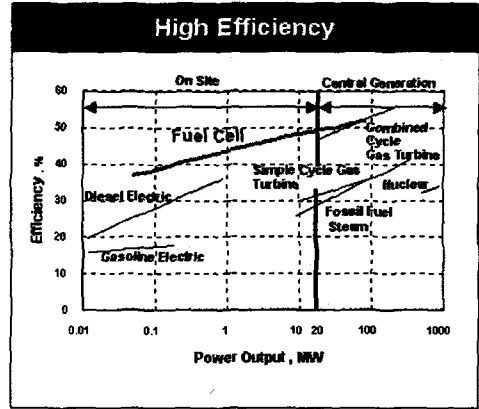


Fig. 3. Comparison of efficiencies

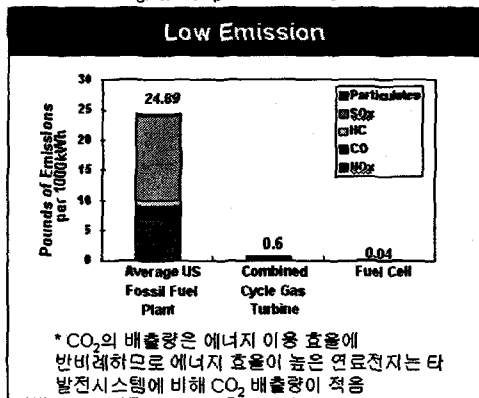


Fig. 4. Comparison of products of emissions

가장 큰 문제점이었던 송전선사고로 인한 정전이나 단전 등이 사실상 사라지게 된다는 것이다. 또 낮은 운영비와 높은 에너지효율로 현재 전기료를 약 20% 정도 낮출 수 있을 것으로 예상된다. 더욱이 질소나 황산화물을 생성하지 않으므로 가장 환경 친화적인 에너지원이며 발전과정에서 발생하는 잉여분의 열은 저장 후 온수제조나 주택난방에 이용할 수 있으므로 시스템 전체적으로는 기존의 발전방식에 비해 획기적으로 높은 에너지 효율을 가지게 된다. "Fig. 3" 은 주요 발전수단의 출력에 따른 효율변화를 나타낸 것으로 연료전지는 20 MW 이하의 전력 발전에 있어서 가장 에너지 효율이 높은 발전 방식임을 알 수 있다. 이는 연료전지가 화학에너지를 기계에너지로 변환시키지 않고, 바로 전기에너지로 변환시키기 때문이며 비교적 낮은 온도에서 운전할 경우에도 Carnot limit이상의 열효율을 나타낸다. 또한, "Fig. 4" 는 오염물질 배출량을 비교한 것으로 연료전지의 오염물질 배출량이 현저히 낮은 것을 알 수 있다.

연료전지의 연료로는 메탄올, 천연가스, 석유, 가솔린, 프로판 등 다양한 연료를 사용할 수 있으며, 리포머라고 불리는 연료개질기를 통하여 수소를 추출하여 사용하게 된다. 연료전

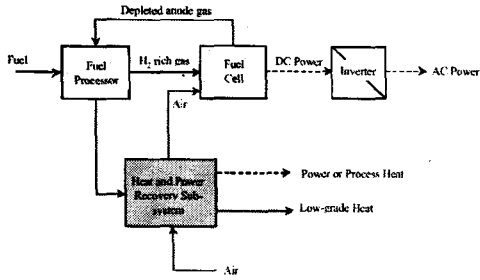


Fig. 5. Fuel cell power system configuration

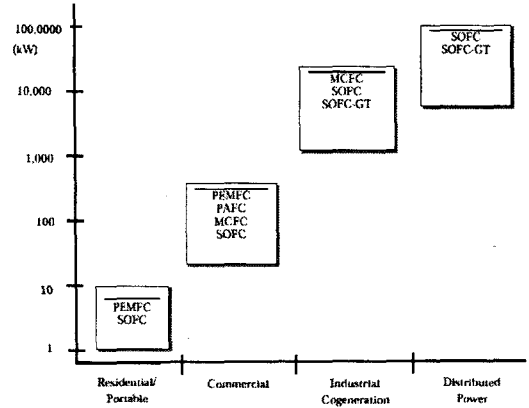
지에서 발생하는 직류전원은 자동차에는 적절한 전원이나 분산전원으로 사용되는 경우는 인버터를 사용하여 스택에서 생산된 전기를 60 Hz의 교류전원으로 전환하여 사용하게 된다. 이를 계통으로 구성하면 “Fig. 5”와 같다.

## 2.2. 연료전지 종류 및 작동원리

연료전지는 사용되는 전해질 및 전기화학반응의 종류에 따라 크게 5가지로 나뉘는데, 전해질의 이온전도가 비교적 높은 온도에서 일어나는 고체산화물(SOFC) 및 용융탄산염 연료전지(MCFC)와 비교적 저온에서 운전되는 인산(PAFC), 알칼리(AFC) 및 고분자 연료전지(PEMFC)가 있다. 고온형 연료전지는 주로 대형 발전소 및 복합 발전소형으로 개발되고 있다. 저온형 연료전지들 중에서 인산형은 주로 분산형 발전 및 소규모 발전소용으로 개발되고 있으며 최근에는 버스에 탑재되어 수송용으로 적용된 적도 있다. 고분자 연료전지(PEMFC)는 작동 온도가 낮으므로 비교적 사람의 접근성이 용이하고, 주거지의 소형 비상발전용이나 이동 및 수송용으로 적극 개발되고 있다. 각 연료전지의 특징 및 주요 용도는 “Table 1” 및 “Fig. 6”에 나타낸 바와 같다.

Table 1. Types and characteristics of various fuel cells

종류	인산형 (PAFC)	용융탄산염 (MCFC)	고체산화물 (SOFC)	고분자 (PEMFC)
발전온도(°C)	200	650	600-1000	상온-100
전해질	인산	용융염	세라믹	고분자막
사용 연료	천연가스, 메탄올	천연가스, 석탄가스	천연가스, 석탄가스	천연가스, 메탄올
발전효율(%)	35-45	45-50	45-55	30-40
적용분야	발전, 열 분산, 발전용	대형 분산발전	대형 분산발전, 자가 발전	차량 발전
기술수준	실용화 단계	개발 단계	개발 단계	개발 및 실용화 단계



PEMFC = Proton exchange membrane fuel cell  
 SOFC = Phosphoric acid fuel cell  
 MCFC = Molten carbonate fuel cell  
 SOFC = Solid oxide fuel cell  
 SOFC-GT = Solid oxide fuel cell with gas turbine

Fig. 6. Application of fuel cell (Adapted from Pastler et al, 1996)

위에서 언급한 다양한 연료전지 중에서 가장 주목을 받고 있는 것은 자동차 및 주거용 고분자 연료전지라고 할 수 있다. 고분자 연료전지는 미국의 General Electric(GE)사에서 1960년대 초 우주선용(Gemini)으로 개발이 시작되었으나 고분자 전해질막의 성능 한계로 Apollo 우주선에는 알칼리형 연료전지가 사용되게 되었다. 그 후 1970년대 Dupont사의 Nafion 전해질 막의 개발로 고분자 연료전지의 성능이 크게 향상되었음에도 불구하고 연구가 거의 중단되었다. 그러나 1980년대에 들어서면서 독일의 Siemens가 고분자 연료전지를 잠수함에 적용하기 위해 GE로부터 기술을 도입하고 캐나다의 Ballard가 고분자 연료전지기술을 개발하기 시작하면서 이동용 전원 및 소형 발전 시스템으로 응용하려는 연구가 본격적으로 추진되었다. 특히 이 고분자 연료전지는 효율이 다른 형태의 연료전지에 비해 다소 낮지만, 높은 출력 밀도, 낮은 작동 온도와 전해질의 높은 부식저항성 등의 장점을 비롯하여, 설치장소의 제약이 적고(예, 주택, 공공시설, 병원, 호텔 등) 설비 구조의 단순화 및 소형 설비 가능(수 kW 설비), 높은 반복작동 안전성(편리한 운전성), 상온작동 및 짧은 시동 시간(비상용 및 군사용 전원) 등의 장점을 지니고 있다. 또한 분산형 전원(전력 소비지에 직접 설치), 도서 벽지 공급 전원, 비상 전원 및 폐열을 이용한 난방용으로 이용이 가능하다.

고분자 연료전지에서의 전기화학반응은 다음과 같이 Anode(산화극)에서의 수소가스가 전해질과 접촉 있는 백금 촉매 상에서 산화반응을 일으켜 수소 양이온이 전해질로 들어가고 전자는 전도성의 탄소 지지체를 따라 외부 도체를 통과하여 cathode(환원극)로 전달된다. Cathode에서는 산소가스가 전해질과 접촉한 백금 촉매 상에서 전해질을 통과해온 수소양이온과 외부 회로를 통과해온 전자와 결합하여 물을 형성하는 환원반응이 일어난다.

**Basic proton exchange membrane (PEM) fuel cell mechanism**

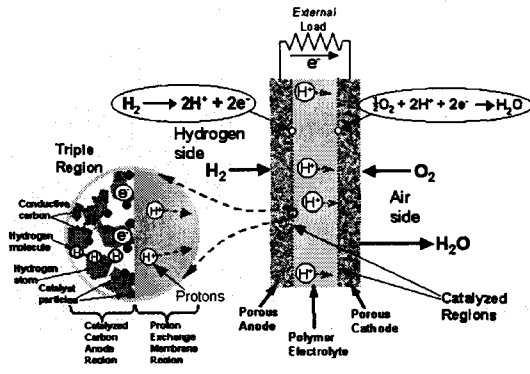
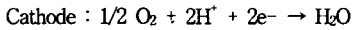
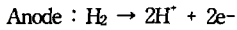


Fig. 7. Electrochemical reaction of PEMFC



상기 반응을 그림으로 나타내면 “Fig. 7”과 같다.

이와 같은 전기화학 반응이 효율적으로 일어나도록 하기 위해 고분자 연료전지는 반응가스를 공급해 주고 외부로 전자를 전달해주는 전기적 집전체 역할을 하는 분리판, 반응가스의 산화 및 환원 반응을 촉진하는 백금 촉매를 담지한 탄소지지체로 구성된 전극, 수소의 산화반응으로 발생한 수소이온을 음극으로 전달하는 전해질로 구성되어 있다.

분리판은 전기전도도가 높아야 하며 내부식성 및 가스와의 투과성이 낮아야 한다. 또한 경량화를 위해 박판으로 가공 및 성형이 가능한 정도의 강도를 지녀야 한다. 전극은 가스가 촉매상에 쉽게 접근할 수 있어야 하고, 수분도 전해질막으로 쉽게 공급될 수 있어야 한다. 또한, 수분이 전극내의 미세 가공을 막는 일이 없도록 해야 하며, 가능한 한 많은 백금 촉매가 전해질과 접해 있어야 한다. 이러한 요구조건을 만족시키기 위해 다양한 전극제조 방법이 제안되고 있다. 고분자 전해질은 수소이온을 전달하는 고분자막으로서 수소이온 전도도가 높아야 하며 적은 수분 함량에서도 이온 전도가 가능해야 하며, 얇은 전해질 막으로 제조가 가능하고 적당한 강도 및 화학적 안정성을 지녀야 한다. 또한, 가스나 메탄올에 대해 불투과성을 가져야 한다. Dupont사의 Nafion 막은 최초로 상업화된 막으로 현재 Dow Chemical, Gore, 3M 등에서도 판매되고 있는 실정이며, 매우 고가이므로 고분자 연료전지의 제작비 중에서 많은 부분을 차지하고 있다. “Fig. 8”에는 연료전지의 스택 구성도를 나타내고 있다.

고분자 전해질 연료전지 시스템 기술에는 이상에 언급한 연료전지 본체기술 외에도 고분자 연료전지 본체에 공급되는 연료를 만드는 연료개질장치, 연료전지 본체 및 연료 개질기에 공급되는 고압의 공기를 만드는 공기공급장치, 연료전지 본체 및 연료 개질기에서 발생하는 열과 물을 효율적으로 이용 및 처리하는 열 및 물처리장치, 그리고 연료전지에서 발생

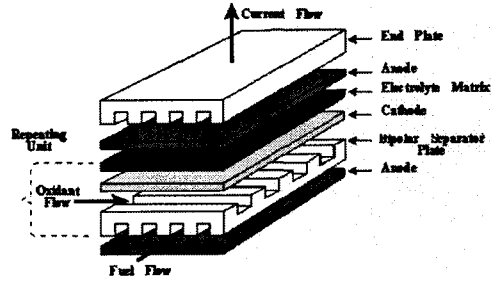


Fig. 8. Configuration of fuel cell

되는 직류전기를 교류로 변환시키는 전력변환 장치 등에 관한 기술이 포함된다.

연료개질 장치는 탄화수소계열의 기체 또는 액체연료를 다량의 수소가 포함되어 있는 가스로 변환시키는 장치와 이 개질 가스 중의 CO함량을 감소시키는 정화장치로 구성된다. 고분자 연료전지에서 주로 사용되는 연료 개질장치는 수소함량이 높고 부산물 발생이 적으며 비교적 낮은 온도에서 쉽게 개질반응이 일어나는 메탄올을 연료로 사용한다. 그러나 가정용 고분자 연료전지 시스템에서는 기존의 주택에 연료로 공급되고 있는 LNG를 이용하는 것이 보다 타당하다. LNG 개질 시스템은 메탄올 개질기에 비해 보다 고온에서 작동되고 탈황장치를 추가로 필요로 한다. 고분자 연료전지는 작동온도가 낮으므로 개질가스 중에 포함되어 있는 CO가스가 연료극의 백금촉매를 피독시켜 촉매성능을 감소시키는 결과를 초래할 수 있으므로 반드시 연료전지 스택의 연료로 사용하기 전에 개질가스 중의 CO 농도를 수십 ppm 이하로 낮추는 것이 필요하다.

고분자 연료전지는 출력밀도가 타 연료전지에 비하여 월등히 높고 작동 온도가 낮으며, 전해질에 의한 부식이 없고, 전해질 막의 양편의 반응기체에 큰 차압을 줄 수 있는 등의 장점이 있는 반면, 전해질 막이 비싸고 공급처가 제한되어 있으며 전해질 막의 수분함량 유지가 필요하고 백금 촉매의 CO 피독 가능성이 높다는 등의 단점이 있다. 이러한 단점은 새로운 저가습형 전해질 막의 개발, 합금촉매의 개발 및 고성능의 개질기 및 정화장치의 개발 등으로 극복할 수 있을 것이다.

**2.3 연료전지 개발 및 시장현황**

전세계적으로 연료전지의 연구개발 부문에 연간 10억 달러 이상의 비용이 투입되는 것으로 추산되며, 이는 자동차 메이커, 관련 기기 제작자, 전력회사, 정부기관 등의 투자가 포함되어 있다. 여기에서는 최근 들어 가장 주목을 받고 있는 고분자 연료전지를 중심으로 개발 및 시장현황을 설명하였다.

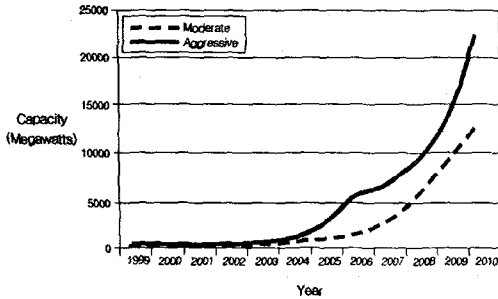


Fig. 9. Fuel cell market size in distributed generation

고분자 연료전지의 용도로 가장 기대되고 있는 분야중 하나가 소규모 분산발전용으로 개발되고 있는 가정용 연료전지이다. 현재 개발되고 있는 가정용 연료전지는 전기와 열을 동시에 공급할 수 있는 소형 코제너레이션 시스템으로서 운전온도는 약 80 C이고, 연료전지에서 공급할 수 있는 온수의 온도는 최고 65 C정도이다. 연료전지의 용량은 1 ~ 7 kW의 범위를 갖는다. "Fig. 9"는 Allied Business Intelligence 사에서 조사한 분산발전용 연료전지 시장을 나타낸 것으로 모든 형태의 분산발전용 연료전지를 포함한 것이며, 2010년 경에 약 20,000 MW의 시장이 창출될 것으로 전망하고 있다. 이는 금액으로 약 100억 달러에 달하는 규모이다.<sup>4</sup>

고분자 연료전지의 또 다른 주요 응용분야는 연료전지 자동차로서 세계의 자동차 메이커들은 순수소, 메탄올개질 및 가솔린개질 연료전지 차를 개발하고 있다. 연료전지 자동차의 실용화를 촉진하기 위해 계획된 캘리포니아 연료전지 파트너십 프로젝트가 2000년 11월에 개척되어 대규모의 시험운전이 시작되고 있다. 이 프로젝트에는 DOE와 미국 운수성이 후원자로 참가하고, 세계적인 자동차 메이커와 연료전지 업체, 버스운행을 담당하는 교통국 및 석유, 수소, 메탄올의 연료회사 등이 참가하여 세계적인 프로젝트로 발전하였다. 연료전지 자동차의 실용화에 있어 가장 큰 과제는 역시 시스템의 비용이나, 향후 지속적인 기술개발과 대량생산에 의해 목표가 달성될 수 있을 것으로 기대되고 있다.<sup>5</sup>

국내에서의 고분자 연료전지 개발은 1991년 부터 추진하여 왔으며, 1996-1998년에 한국에너지기술연구원에서 2kW급, 5kW급을 개발하였고, 2000년에 10kW급을 개발한 바 있다.

### 3. 세티(CETI)의 연료전지 개발현황

세티(Clean Energy Technologies Incorporated, CETI)는 가정용 및 이동용(portable) 연료전지를 비롯한 다양한 용도의 연료전지 상용화를 위하여 2000년 11월에 국내에 최초로 설립된 연료전지 전문기업이다.

세티에서 개발하고 있는 가정용 연료전지(Residential Power Generator, RPG)는 "Fig. 10"에 나타낸 바와 같이 전

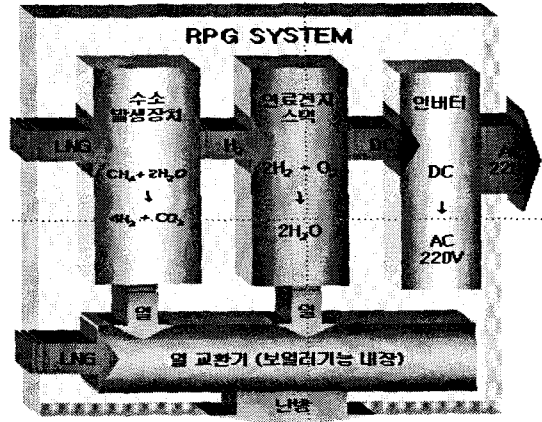


Fig. 10. System configuration of RPG

기를 생산하는 연료전지에 온수 및 난방을 위한 코제너레이션 기능이 추가된 베타형으로서 전기출력은 1.5 kW이다. 전기출력은 40평형 아파트를 기준으로 "Fig. 11"에 나타낸 가정용 전력기들의 수요 패턴 및 시나리오에 근거하여 결정한 것이다. 현재 개발중인 가정용 연료전지는 가정에서 사용하는 전력수요에 따라 부하추종이 가능하도록 설계되고 있으며, 향후 일부 선진국에서와 같이 가정에서 생산하고 남은 전력을 전력 회사에 다시 판매할 수 있는 제도가 허용되면 가상발전소(virtual power plant) 또는 가상전력회사(virtual utility)로서의 기능을 수행하게 될 것이다. 또한, 연료전지에 원격 모니터 기능을 추가함으로써 소비자의 사용편리성과 유지보수성을 향상시킬 예정이다.

가정용 연료전지는 경제성도 매우 높은 것으로 평가되고 있다. 예를 들어, 정부에서 계획하고 있는 대체에너지발전 전력의 구매가격기준표(고분자 연료전지는 kWh당 320원 이하)에 의한 우선구매제도를 활용하고, 월사용량이 200 kWh에서 400 kWh라고 가정하였을 때 2003년도의 연료전지 투자회수 기간은 3년 미만인 것으로 예측되고 있다. 이는 가정에서 필요한 양만큼의 전력을 소모하고, 나머지는 정부가 계획하고 있는 대체에너지발전 전력의 구매가격기준표의 가격으로 판매하는 것을 가정한 것이다. 또한, 가정용 연료전지는 시장이 성숙될수록 가격이 낮아질 것으로 판단되기 때문에 최종적인 투자회수기간을 약1년으로 단축시키는 것을 목표로 하고 있다. 따라서, 현재 개발중인 가정용 연료전지의 내용연수가 10년 이상이고, 핵심부품의 수명이 5년이므로 사용자에게는 경제적으로도 큰 이익을 줄 수 있을 것으로 기대되고 있다. 만약, 연료전지에 사용되는 LNG가격이 취사용의 40% 수준인 발전용 LNG가격으로 적용될 경우는 경제성이 더욱 향상될 수 있다.

이외에도 고분자 연료전지를 이용한 노트북 컴퓨터용 전원을 개발중이며, 이 결과를 바탕으로 4C market (Computer, Cell Phone, Camcorder and Cordless Tools)에 본격적으로 적용할 계획에 있다. 현재 개발중인 노트북용 전원은 정격출력 25W로서 최소 90분 이상 사용할 수 있도록 설계되어 있다.

