

# 가정용 연료전지 코제너레이션 시스템

## 이 원 용

(에너지기술연구원 연료전지연구센터 책임연구원)

### 1. 서 론

현재 가정에서 사용되는 보일러에서 온수는 물론 경제성 있는 전기가 동시에 나온다면 어떨까? 또한 기존의 발전설비와 달리 냉장고등과 같은 가전기기 개념으로 손쉽게 사용될 수 있으면 더욱 이상적일 것이다. 이것이 현재 개발되고 있는 가정용 코제너레이션 시스템으로 이 기술이 안정성과 경제성을 확보하여 저렴하게 가정에 보급될 경우 에너지 수급에 새로운 변화가 일어날 수 있을 것이다.

무엇이 이러한 기술을 현실화시키고 있는 것일까? 현재 선진각국에서 연료전지를 고효율, 환경친화성의 특성으로 인해 유망한 차세대 에너지 변환 기술로 인식하고 있으며, 이를 개발하기 위한 치열한 경쟁이 이루어지고 있다.

연료전지 중 고분자 전해질 연료전지(polymer electrolyte membrane fuel cell, 이하 PEMFC)는 전해질로 액체를 사용하지 않고 고분자 막을 사용하는 연료전지로 취급이 용이하고, 다른 종류의 연료전지에 비해 부피와 무게가 작고 상온에서 동력밀도가 높으며 시동과 정지가 용이한 장점이 있다. 이러한 특징을 살릴 수 있는 분야로 전기 자동차용 동력원을 비롯하여, 소형 코제너레이션 시스템, 이동형 전원 시스템으로 연구가 활발히 진행되고 있다. PEMFC의 등장으로 가정용 규모의 코제너레이션이 가능하게 되었다는 데에 의의가 있다.

연료전지는 효율이 높아 CO<sub>2</sub>의 배출을 크게 저감시킬 수 있기 때문에, 최근의 지구 온난화문제의 해결을 위한 유력한 방안이 되고 있으며, 소음이 거의 없는 장점 이외에 대기 오염의 원인이 되는 NO<sub>x</sub>, Sox, 매연 등이 적은 특징을 가지고 있기 때문에, 전원으로서의 장래성이 기대되고 있다.

기존의 발전 설비의 경우 연료는 연소에 의해 열에너지로 변환되고 열에너지를 기계적 에너지로 변환시켜 발전기에 의해 전기에너지를 얻게된다. 발전 과정의 부산물로는 열과 CO<sub>2</sub> 그리고 수증기, 그리고 CO와 질소 산화물, 황 산화물과 매연 등의 유해물질도 발생한다. 이들 연소기관을 통한 소형 발전설비의 효율은 10-20%정도로 이것은 80에서 90%의 에너지가 전기로 변환되지 않고 손실되는 것을 의미한다. 마찬가지로 연료전지 시스템도 연료의 화학적 에너지를 전기적 에너지로 변환시킨다. 그러나 기존의 발전 방식과 달리 매우 간단하고 효율적인 방법으로 에너지가 변환된다.

연료전지는 수소와 산소의 반응에 의해 연소과정없이 전기 화학적으로 전기를 발생시키는 것으로 효율이 높으며, 전기 이외에 물과 열만이 부산물로 생성된다. 수소는 재생 에너지를 이용하여 전기 분해에 의해 얻어질 수도 있으며, 또한 탄화수소 계통의 연료를 이용하여 수소를 생성할 수 있는데 이 경우에는 부산물로 CO<sub>2</sub>가 발생할 수 있으나, 종래의 열기관에 비해 에너지 효율이 높기 때문에 그만큼 CO<sub>2</sub>의 배출량이 억제될 수 있다. 또한 종래의 열기관의 연소과정에서 발생하는 질소 산화물, 황 산화물, 등과 매연 등의 유해물질도 거의 발생하지 않는 장점이 있다.

연료전지는 발전과정에서 열이 발생하며 이를 급탕과 난방을 위해 사용할 수 있다. 연료전지에서 발생하는 열을 가정에 사용하기 위해서는 간단한 열교환기를 추가하면 된다. 실제적으로 연료전지 시스템의 경우 최적 운전온도를 유지하기 위하여 물이나 공기를 이용하여 냉각을 하고 있으며 이를 위한 배관 설비가 이미 설치되어 있으므로 약간의 설비만 추가하면 열을 이용할 수 있다. 일반적인 가정의 경우 전력의 사

용량(난방용 전력 제외)과 난방에너지가 거의 동일한 것으로 알려져 있다. 연료전지의 경우 전력 생산량과 열발생량이 거의 같기 때문에 평균적인 가정의 에너지 공급에 매우 이상적이다.

## 2. 가정용 연료전지 도입의 장점

### 2.1 에너지 절약효과

연료전지는 화학에너지를 연소과정없이 전기에너지로 변환시키는 전기화학적 발전설비이다. 즉, 직접 수소와 산소를 화학적으로 반응시켜 전기를 얻기 때문에, 연료를 연소시켜 열로 변환시킨 후에 동력이나 전기로 변환시키는 종래의 열기관에 비해 에너지 변환 효율이 높다.

연료전지의 연료를 어느 것으로 사용하느냐에 따라 다소 달라질 수 있으나, 현재 가장 성능이 우수한 마이크로 가스터빈 발전기 효율인 25% 보다 높은 35%정도의 효율을 현재 기술로 얻을 수 있으며, 이와 같은 고효율을 소용량 저출력 영역에서도 달성할 수 있는 장점이 있다. 이론적으로는 더욱 높은 발전 효율의 향상도 기대할 수 있으며, 열이용까지 고려할 경우 70% 이상을 달성할 수 있어 에너지 절약효과가 크다.

### 2.2 환경 친화성

가정용 연료전지는 기존의 발전방식에 비해 생태학적으로 장점을 가지고 있다.

연료전지는 수소와 산소에서 전기를 만들기 때문에, 발전과정에서 부산물로 물만 배출되는 무공해 시스템이다. 연료 변환기 즉 개질기에 의해 화석 연료를 이용하여 수소를 생성할 수 있는데 이 경우에는 부산물로 CO<sub>2</sub>가 발생할 수 있으나, 종래의 열기관에 비해 에너지 효율이 2배정도로 높은 만큼, 적은 연료로 동일한 에너지를 얻을 수 있기 때문에 그만큼 CO<sub>2</sub>의 배출량이 억제될 수 있다. 더욱이 장래 재생가능 에너지로부터 수소를 만드는 경우에는 무공해가 될 수 있다. 연료전지의 경우 종래의 열기관에 비해 발전효율이 높고, 코제너레이션에 의해 배열도 이용이 가능하기 때문에 비교의 대상에 따라 달라질 수 있지만 CO<sub>2</sub>의 배출량을 대폭으로 억제할 수 있다. 또한 종래의 열기관의 연소과정에서 발생하는 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, 등의 유해물질도 발생하지 않거나 매우 미소하게 발생하는 장점이 있다.

낮은 소음도 또 다른 장점이다. 연료전지는 동급의 가스나 디젤발전설비보다 약 1/4정도 소음이 낮으므로 가정이나 이웃에 소음으로 인한 영향을 최소화시킬 수 있다.

### 2.3 에너지 공급의 다양화와 석유 대체 효과

연료전지의 연료인 수소는 개질 과정이나, 가수 분해 등 보다 광범위한 연료로부터 전환이 가능하다. 손쉽게 운반이 가

능한 프로판, 천연가스, 메탄올, 디젤, 가솔린 등과 석탄가스 등에서 생성된 디메틸 에테르, 천연가스등에서 생성된 액체 합성연료(Gas to Liquid, GTL) 등이 사용될 수 있으며, 이들 연료는 가솔린을 제외하고는 석유 대체에너지원이다. 즉 수소가 포함된 모든 종류의 탄화수소계통의 연료가 연료전지에 사용될 수 있다. 또한 재생에너지로 바이오가스나 에탄올 등을 연료로 이용할 수 있으며, 수소는 풍력발전, 태양광 발전, 지열발전 등의 재생 가능한 에너지에 의한 전기분해에 의해 얻을 수가 있다. 예를 들어 풍력발전에 의해 발전된 전기를 이용하여 분해된 수소를 연료전지의 연료로 사용할 경우, 무공해는 물론 출력 변동의 폭이 큰 전원인 풍력발전의 안정화에도 기여할 수 있다.

### 2.4 분산형 전력에너지

가정용 연료전지는 마이크로 가스터빈이나, 디젤 엔진과 마찬가지로 계통 분리형 전력에너지로서 사용될 수 있다. 계통 분리형 전력에너지의 장점으로는 에너지 수요지에서 발전을 하기 때문에 코제너레이션에 의해 배열을 이용할 수 있어 시스템의 효율을 높일 수 있으며, 송전에 의해 발생하는 에너지 손실(5-8%정도)을 감소시킬 수 있고, 송전시설에 따른 투자비를 줄일 수 있는 장점이 있다. 또한 계통성의 안정성과 천재지변 등에 의한 전원 차단을 최소화시킬 수 있다.

분산형 연료전지는 대규모 집중전원과 적절히 공존하는 것이 기대되고 있다. 계통에서 멀리 떨어져 있거나, 미전화지역의 경우는 계통 연계를 위해 투자해야 하는 비용이 높아, 분산형 전원이 비교적 유리한 경우도 고려되고 있는데, 이 경우 가정용 분산형 연료전지의 도입이 기대되고 있다. 이와 같은 특징에서 연료전지는 기존의 에너지 인프라 정비가 미흡한 개발도상국의 전력설비에 유리한 점이 있다.

계통성과 연계된 분산형 전원으로서도 연료전지는 장점을 가지고 있다. 계통과 연계된 연료전지는 새로운 발전소를 위한 대규모의 투자없이 전력 용량을 증대시키는 효과가 있으며 풍력이나 태양광발전 설비와는 달리 주야나 날씨 조건에 관계없이 필요한 전기를 계통선에 공급할 수 있는 장점이 있다.

기존의 발전 설비에 비해 연료전지는 작동 온도가 매우 낮고 발전기 등의 구동 부위가 적어 고장의 위험이 거의 없으며 가정용 보일러와 같이 주기적인 정비와 부품교체만 필요하여 매우 안정적인 장점이 있다.

### 2.5 산업 경쟁력 강화와 신규 사업의 창출

연료전지의 높은 에너지 변환 효율과, 환경친화성에 의해 장래의 에너지 환경 분야에서 Key Technology의 하나로 인식되고 있다. 21세기는 환경의 세기라고 불리어 질 정도로, 환경에 관련된 기술력의 차이가 기업의 경쟁력 우열에 큰 영

향을 줄 것이기 때문에, 연료전지의 기술개발, 실용화는 장래 국가 산업 경쟁력에 직접 관계되는 것이다. 현재 연료전지에 필요한 것은 소형화, 가격 저감, 내구성 향상 등의 기술로 연구 개발이 진행되고 있다. 연료전지 실용화에는 전기기기산업, 소재산업, 에너지산업 등, 광범위한 산업에 걸친 기술이 필요하기 때문에 국가 산업 전체에 미치는 영향이 크고, 새로운 기술의 진전에 의해 신규산업의 창조, 고용창출의 가능성도 매우 크다.

### 3. 가정용 연료전지 기술

#### 3.1 시스템 구성과 성능

가정용 연료전지 코제너레이션 시스템의 구성예를 나타낸 것이 그림 1이며 연료전지 시스템의 주요 부품은 그림 2와 같이 연료전지 스택 이외에 연료변환장치(fuel processing system)인 개질기(reformer)와 전력변환장치인 부스터와 인버터 그리고 공기 공급장치, 냉각 장치 등으로 이들 장치들이 연료전지 특성에 맞게 종합화되고 연계되어 운전될 때 연료전지의 장점인 고효율을 유지할 수 있다.

연료변환장치에서는 LNG와 같은 탄화수소계통의 연료를 연료전지에서 사용할 수 있는 수소로 변환시키는 장치이며, 여기서 발생된 수소와 공기중의 산소를 이용하여 연료전지 본체에서 직류 전류를 발생시키게 된다. 최종적으로 연료전지에서 발생한 전력을 축전지로 저장하거나 인버터에서 교류로 변환시켜 사용하게된다. 반응에 필요한 공기는 압축기나 송풍기에 의해 공급된다.

그림 3이 연료전지 코제너레이션 시스템과 기존의 화력발전에 의한 전기와 도시가스를 이용하여 난방열을 얻을 경우를 비교한 것이다. 그림 3에서 알 수 있는 바와 같이 계통선에서 독립되어 열을 최대로 이용하면서 전기를 발생하는 경우, LNG화력 발전과 비교하면 일차에너지소비량을 약 30% 정도 절감할 수 있으며, 이와 더불어 CO<sub>2</sub>도 30% 정도의 절감 효과를 기대할 수 있다.

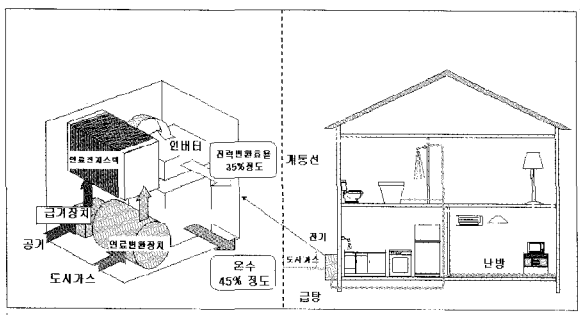


그림 1 가정용 연료전지 코제너레이션 시스템

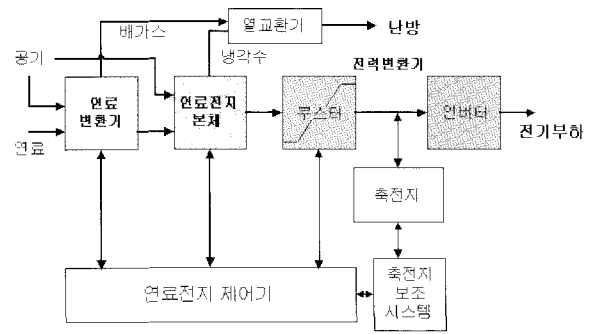


그림 2 연료전지 시스템 구성도

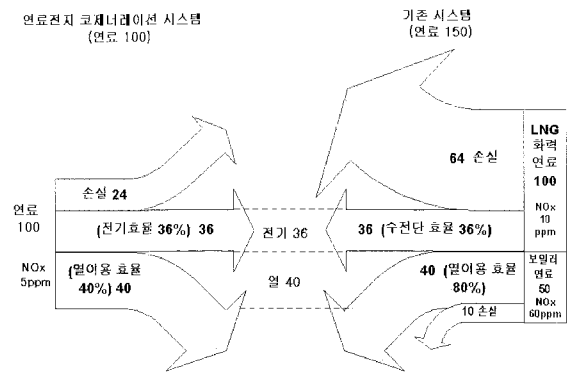


그림 3 에너지 효율 비교

#### 3.2 연료전지 본체

PEMFC는 다른 연료전지와 비교하여 다음과 같은 장점들을 지니고 있다.

- 높은 에너지 효율(부피 및 무게)
- 부식성 액체가 없는 안전한 고체전해질
- 낮은 작동온도 및 신속한 시동
- 장기적 안정성 및 긴 수명
- 제작 용이성
- 다양한 재료 선택

PEMFC는 다른 연료전지들보다 낮은 온도에서 작동된다. 작동온도는 전해질로 사용하는 고분자막의 열적 안정성 및 전도성에 따라 결정되며 보통 80℃ 정도이고 더 우수한 막을 사용하면 10-20℃ 정도 높일 수 있다.

연료전지 스택(stack)은 전기화학반응이 일어나는 단위전지(single cell)를 수십 또는 수백개 적층한 구조로 이루어져 있다. 그림 4에서 알 수 있는 바와 같이 PEMFC는 연료극, 공기극, 고분자전해질막, 전해질막/전극 접합체(membrane-electrode assembly, MEA), 바이폴라판으로 구성된다. 단

CROSS SECTION OF POLYMER ELECTROLYTE FUEL CELL

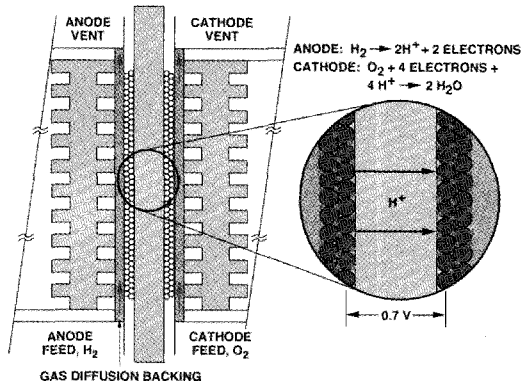


그림 4 연료전지 단위 셀 구조

위전지가 적층된 스택은 구성요소간의 접촉저항을 줄이기 위하여 양쪽 끝의 조임판을 조임쇠로 압착하게 된다. 양쪽 끝의 조임판에는 반응기체의 출구 및 입구, 냉각수 순환구, 전기출력용 소켓이 설치되어 있다.

### 3.3 연료 개질 기술

연료전지는 연료로서 수소를 사용한다. LNG와 같은 연료를 사용하는 연료전지 시스템은 연료변환시스템인 개질기 등을 이용하여 탄화수소 계통의 연료를 수소로 변환시키는 공정이 있어야 한다. 탄화수소 연료의 수증기 개질은 산업체에서 가장 보편적으로 사용하는 방법이다. 촉매에 의한 고온중기에서의 반응은 일산화탄소와 수소를 발생시킨다. 일산화탄소는 물과 반응하여 이산화탄소와 수소를 생성한다. 연료개질 과정은 반응열을 공급하기 위해 많은 양의 에너지를 필요로 한다.

부분 산화 개질은 필요한 열을 공급하기 위해 연료가 부분적으로 연소되는 개질 공정이다. 부분 산화 방법은 연소를 위해 사용되는 공기의 질소 성분으로 인해 고 순도의 수소를 얻기가 쉽지 않다. 그러나 부분 산화방법은 황 또는 비소와 같은 연료내의 오염 물질에 의하여 영향을 받는 촉매가 없다는 장점이 있다.

자동 열분해 개질은 부분 산화와 수증기 개질 기술의 결합 방식이다. 니켈 또는 귀금속 혼합 촉매가 개질 공정에 사용된다. 열은 연료의 부분 산화에 의하여 내부의 일정한 위치에서 공급되어 진다. 촉매는 부분 산화의 온도보다 더 낮은 최적 운전 온도에서 사용된다. 개질과 연소 반응은 부분 산화 방식과 동일하다. 촉매는 연료내의 오염 물질과 고온 소성 현상으로부터 보호되어야 한다. 또한 온도 제어를 통해 최대 촉매 운전 온도 이하와 최소 부분 산화 반응 이상에서 운전이 되어야 한다.

PEMFC의 주요 단점은 일산화탄소에 대한 저항성이 낮은 것이다. 따라서 수소 개질 과정에서 부수적으로 발생한 일

산화탄소를 스택 입구에서 제거해야한다. 일산화탄소 1, 2단계의 shift 반응을 거쳐 감소된 후 최종적으로 선택적 산화나 투과막을 통해 제거된다.

### 3.4 공정 설비

연료전지시스템의 제어는 부하변화에 대응하여 연료나 공기의 유량제어는 물론 압력과 온도를 일정하게 유지하기 위한 상태 제어를 포함한다. 부하제어를 위한 유량과 연동되어 변하는 압력을 제어하기 위해서는 공기의 경우 제어 밸브와 연동되도록 압축기의 회전수를 제어할 수 있으며, 스택의 온도 제어는 별도의 냉각수 유량 제어밸브와 냉각송풍기를 이용할 수 있다. PEMFC의 핵심요소인 전해질막의 습도를 유지하기 위해서는 외부에서 연료가스와 공기의 가습이 필요하다. 이것은 고분자 전해질막의 특성상 이온전도도를 위해 전해질막이 계속 습한 상태를 유지할 필요가 있기 때문이다. 연료변환과정에서 충분한 수분이 함유되는 경우 연료 가스에는 가습이 필요 없으며 이 경우 공기측만 가습하게 되며, 공기측에서 발생하는 반응 수분만으로 가습이 가능한 경우 별도의 가습장치 없이 시스템을 운전 할 수도 있다. 가습장치에는 능동적인 수분 공급 방식으로는 노즐 분사방식과 초음파 분사방식이 있으며 수동적인 가습 방식으로는 투습막을 사이에 두고 한쪽면에서 물을 다른 쪽에는 가스를 흘려 수분을 전달하는 방식을 고려할 수 있다. 능동적인 방식은 가습량을 조절할 수 있는 장점이 있는 반면에 장치가 복잡하며 투습막을 이용하는 방식은 장치는 간단하나 습도량을 임의로 조절할 수 없는 단점이 있다. 그림 5는 공기 공급 및 가습설비를 중심으로 개략적인 공정을 나타낸 것이다. 여기서 알 수 있는 바와 같이 급기설비는

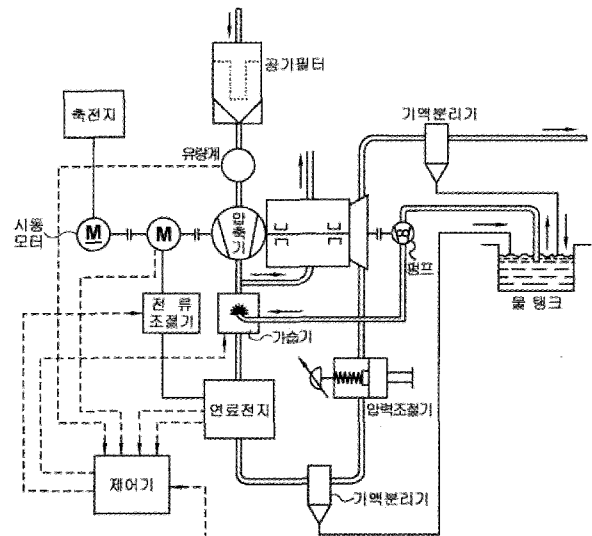


그림 5 급기 및 가습설비 중심 연료전지 시스템 구성도

압축기 등의 공기 공급장치와 가습설비 그리고 제어 설비로 구성되어 있는 것을 알 수 있으며 이외에 냉각과 수처리설비가 가습설비에 연계되어 있다. 연료전지 내부에서는 전해질인 막을 사이에 두고 양극에 공기와 수소가 공급되어 전기화학 반응에 의해 전기를 발생하고 물이 생성되어 공기측으로 배출된다. 공기량은 연료전지에 요구되는 동력에 연동되어 압축기의 회전수를 조절하여 제어하게 된다. 공기 출구에는 압력조절기가 설치되어 부하에 따라 변하는 공기량에 관계없이 스택 내부가 일정한 압력을 유지하도록 한다.

### 3.5 전력변환 시스템

연료전지에서 발생한 직류 전력은 축전지를 충전하거나 인버터를 통해 교류전력을 변환되어 사용된다. 계통선에 연계되지 않고 독립적으로 운전되는 경우 이차전지와 연료전지를 조합하여 하이브리드로 동력시스템을 구성하는 것이 바람직하며 연료전지와 이차전지 모두의 특성을 충분히 살려 저부하에서 과부하까지의 출력 요구에 신속하게 대응할 수 있다.

만약 저장된 충분한 산소와 수소가 있다면 부하 변화에 신속하게 연료전지가 대응할 수 있지만 연료변환장치를 사용하는 경우 반응 응답시간이 느려 부하에 즉시 대응할 수 없다. 수소의 저장 시스템을 이용하여 미리 수소를 생산하여 저장할 수는 있으나 이 경우도 저장 시스템의 보완에 따른 부피와 안정성 제어문제로 채택되지 않고 있다. 따라서 독립운전의 경우 축전지를 사용하여 신속한 부하변화와 과부하에 대응하는 것이 바람직하다.

## 4. 가정용 연료전지 개발현황

### 4.1 정부 주도 연구 개발 동향

#### 4.1.1 일본

일본에서 PEMFC의 실용화를 위한 연구는 경제산업성을 중심으로 추진되고 있다. 뉴 선사인 계획으로는 1992년부터 「운수 민생용 고효율 에너지 시스템 개발」로 PEMFC에 관한 요소기술과 시스템 개발이 수행되고 있다. 또 뉴 선사인 계획의 일환으로 재생가능 에너지를 이용하여 수소를 제조하여, 광범위한 분야에서 이용하는 국제에너지 Network 도입을 가능케 하는 기술의 확립을 목표로 1993년부터 시작된 「수소 이용 국제 Clean Energy System 기술(WE-NET)」의 2단계 계획(1999-2003년도)으로 수소의 분산 이용 기술 연구 개발에 중점을 두어, 수소저장기술, 연료전지의 연료가 되는 수소 관련 기술 개발을 실시하고 있다. 1998년에 세계 최초로 천연가스 연료의 가정용 코제너레이션 시스템의 시제품을 완성하여, 실험 주택에서 운전시험을 수행하였다.

일본에서의 PEMFC의 실용화를 위한 본격적인 움직임은 밀레니엄 프로젝트의 하나로 PEMFC 개발을 선택한 것에서

알 수 있다. 밀레니엄 프로젝트는 새 천년을 맞이하여 인류가 직면한 문제를 해결할 수 있는 새로운 기술 혁신과제를 정보화, 고령화, 환경의 3개 분야 프로젝트로 선택하여 미래를 개척할 핵심과제를 정부와 산학연 일체로 개발하는 것이다. PEMFC는 지구 온난화 방지 등을 위한 환경 분야의 유력한 기술로 제시되었으며, 자동차와 주택용으로의 도입을 목표로 하고 있다. 밀레니엄 프로젝트의 하나로 2000년부터 PEMFC의 안전성, 신뢰성 등에 관한 기준 등을 위한 평가방법의 확립을 목표로 「연료전지 보급 기반 정비사업」이 시작되었다. 이와 관련하여 2000년부터 연료전지 시험장치의 개발을 수행하는 「고효율 연료전지 시스템 기반 기술 개발 사업」과 실용화에 필요한 생산기술, 가격저감 기술, 양산화 기술 등의 개발을 수행하는 「고효율 연료전지 시스템 실용화 기술 개발 사업」의 사업도 시작되었다. 또한 이들 사업에 앞서 1999년부터 수소 연료 저장 기술과 연료 개질 기술의 개발과 실증을 위한 「연료전지 실용화를 위한 기반 기술의 개발과 실증」연구가 이미 수행되고 있다. 또한 2000년도부터 석유계 연료로부터 수소 제조를 위한 개질 기술의 개발을 수행하고 있으며, 2001년도부터는 PEMFC의 요소기술 개발, 석유계 연료로 대체할 수 있는 GTL의 제조기술 개발 등의 사업도 수행하는 것으로 되어 있다. 그리고 경제산업성 이외의 조직으로는 국토교통성에서는 연료전지 자동차를 위해 1999년부터 연료전지 자동차 기술 평가 검토회를 개최하여 연료전지 자동차의 도입에 따른 안정성, 환경 영향 등을 검토하고 있다. 정치형 연료전지에 대해서는 1998년부터 환경 공생 주택시까지 모델 사업의 일환으로 연료전지 등을 활용한 코제너레이션 시스템을 도입하는 주택 시가지 정비에 보조금을 주는 동시에, 1999년도부터 주택용 연료전지의 도입에 관한 조사연구를 실시하고 있다. 농림수산성에서는 바이오매스 자원을 이용한 연료전지에 사용할 수 있는 각종 연료제조 연구를 수행하고 있다.

#### 4.1.2 미국

미국에 있어서 연료전지의 기술개발은 그 초기 단계에 있어서, 우주선에 이용한 것이 큰 역할을 하였다. 운수와 민생분야로의 이용을 위해서는, 에너지성(DOE)을 중심으로 하여, 운수성, 상무성, 환경보전청 등 많은 기관이 일체가 되어 추진되고 있다. 활동의 기본은 1992년의 에너지 정책법과 1990년의 수소 프로그램법에 의해 제정된 「연료전지 프로그램」과 「수소 프로그램」 2가지이다. 자동차용 연료전지에 있어서는 「연료전지 프로그램」중 「Fuel Cells for Transportation」으로 개발이 진행됨과 동시에 「Partnership for a New Vehicle Generation of Vehicle」에 의해서도 기술 개발이 진행되고 있다. 정치용 연료전지에 대해서는 「수소 프로그램」법이 1996년에 「Hydrogen Future Act of 1996」으로 개정되어 그 중에 연료전지에 관한 연구개발이 포함되어있으며, 연

료전지 스택의 개발과 코제너레이션 시스템 개발로의 지원을 수행하고 있다. 특히 지방의 전력연계 기반이 취약한 지역을 위한 연료전지 코제너레이션의 이용 촉진을 위한 연구개발이 열심히 추진되고 있다. 또 수십 kw급에서 200kw급의 정치용 연료전지의 개발에 있어서는 국립연구소나 군 관련 시설로의 도입이 적극적으로 추진되고 있다.

#### 4.1.3 독일

독일에 있어서는 PEMFC는 민간기업의 개발에 더해서, 연방정부와 주정부에 의한 프로그램이 진행되고 있다. 연료전지에 관한 프로젝트로서는 수소 관련 프로젝트가 실시되고 있다. 수소 관련 사업은 1986년부터 몇 개의 사업이 실시되었는데, 현재는 뮌헨 공항 수소 프로젝트가 중심이 되고 있다. 이것은 바이에른주에서 도입비 반액을 보조 지원하는 것에 의해, 뮌헨 공항에 수소를 연료로 하는 버스를 위해 수소 공급 Station을 설치하는 것이며, 1996년 6월에 운전이 시작되어 연료전지 자동차를 위해서도 운영될 예정이다.

또 독일의 연방정부 운수건설 주택성과 BMW 등의 주요기업이 공동으로 차세대의 운수용 연료를 검토하는 작업, Transportation Energy Storage(TES)가 1998년부터 실시되고 있다. i)석유 대체 에너지일 것 ii)연료 제조 공정에서 사용까지 공정 전체를 통해 2008년까지 20%의 CO<sub>2</sub>의 저감을 기대할 수 있을 것 iii)내연기관과 연료전지의 양쪽에 사용할 수 있을 것 등의 3가지 관점에서 11 종류의 연료와, 약 80 종류의 생성, 처리, 수송에 관련된 공정의 평가를 수행하여, 2000년 1월 중간평가에 의해 수소를 제 1 후보로 하고 제2, 제3 후보로 메탄올과 천연가스로 하는 3종류로 선정하였다. TES로서는 더 이상의 대상을 줄이는 작업을 수행하지 않고, 늦어도 2003년을 목표로 EU 전체로서의 평가검토를 실시하여, 차세대 운수용의 연료선택을 수행하고 있다.

#### 4.1.4 EU

EU에서는 EU 연구 본부 (Research DG), 과학연구 개발국(DG 12)이 중심이 되어 연구개발에 관한 포괄적인 계획인 Frame work 프로그램(FP3 : The 3rd Framework program)으로 시작하여 현재에는 1998년부터 5년간 예정의 제 5차 계획(FP5)에서 진행되고 있다. 그 가운데 중기적으로 건물용 코제너레이션이나 운수용으로 기대되는 저온형 연료전지(PEMFC)의 기술 개발을 시작으로 장기적으로 산업용 코제너레이션이나 발전용으로 기대되는 고온형 연료전지 기술개발, 수소의 집중적 제조와 연료전지의 분산 이용에 의한 Network의 실증실험 등을 수행하고 있다.

EU 각국의 연료전지 프로젝트의 대부분은 재생 가능한 에너지의 이용 확대 수단으로서 정해진 것이 많고, 또 연료전지 버스 도입 계획을 많은 나라에서 표명하고 있다.

### 4.2 일본의 기업 주도 연구 개발 현황

#### 4.2.1 전기기기 업계

전기기기 업계는 PEMFC 코제너레이션 시스템을 새로운 신규 개척분야로서 잠재성을 기대하고 있다.

일본 시장에 있어서는 계통전원과의 병행, 급탕설비와의 대체를 중심으로, 기존설비에 대한 가격 경쟁력과 편리성의 향상이라는 과제 해결을 위해, 이미 개발 실적이 있는 인산형 연료전지 개발의 축적기술을 이용하여 연구를 강화하고 있다. 개발에 있어서 기업의 접근 방법으로는 독립 개발형과, 해외 선진 기업과의 공동개발형의 2가지가 추가 되는데, 해외 기업과의 공동 출자에 의해 전문적인 자회사를 설립하여 개발을 행하려는 것도 있다. 또 전기업계에서는 정치형 코제너레이션 시스템으로서 개발이 주류가 되고 있는데, 이동형, 비상용 전원, 특정 용도의 휴대용 개발도 포함되고 있어 전반적인 기술 향상이 기대되고 있다. 주요한 개발 과제는 천연가스나 LPG 등의 개질 기술 향상, 발전 효율의 향상, 배열 이용 기술의 개발 등이 있으며, 열수요가 적은 일본의 독특한 이용 형태에 맞는 시스템의 개발을 진행하면서, 구미의 선진기업과의 경쟁에 몰두하고 있다.

#### - 三洋電機

1992년부터 NEDO의 위탁을 받아 전지 본체의 기반기술을 개발, 1996년부터의 제2단계에서 2~3kw급 가정용 연료전지를 개발하고 있다. 이 기간에 일본 최초로 이동형 연료전지의 발매를 단행했다.

三洋電機에서는 도시가스를 이용하여 연료전지를 위한 수소를 생산하는 개질기의 개발에도 참여하여 성과를 올리고 있다. 이 개질기는 개질율 96%, 열효율 83%를 달성하고 있으며, CO제거기도 개질가스의 CO농도를 10ppm이하를 실현하고 있다.

三洋電機에서 개발 중인 가정용 연료전지의 제원은 다음과 같다.

표 1 三洋電機の 연료전지 코제너레이션 시스템 제원

연료	도시가스
정격 출력	1kw
출력전압	100,200V AC
발전효율(목표값)	35%
열회수 효율(목표값)	30%
계통연계	있음
제어방식	전자동
수명(목표값)	40,000시간 이상 (내용연수: 10년 이상)

- 松下電器産業

松下電器産業은 250W 가정용, 코제너레이션시스템을 개발하여 실증 실험을 수행하였으며 1 kw급으로 용량 확대를 시도하고 있다. 개질기로는 독자 개발한 것과 大阪가스에서 개발한 것을 동시에 사용하여 실증실험을 수행하고 있다.

1Kw급의 상품 개발 목표는 운전 경비를 20% 삭감하고 시스템 가격을 50만엔으로 하는 것이다.

표 2 松下電氣 연료전지 제원

연료	도시가스
정격 출력	250W
급탕 저수량	150 L (60 ℃)
발전효율(목표값)	36%
열회수 효율(목표값)	40%
계통연계	있음
발전부 크기	H54XW68.5+L37.7mm
저탕조 크기	H1400XW600XL600 mm

4.2.2 소재 산업

PEMFC의 Key가 되는 소재로서는 고체고분자 전해질막, 극성 촉매, 바이폴라판 등이 있다. 또 막 전극 촉매등의 복합에 의한 MEA가 있다. 소재 제작사의 연구개발은 많은 경우 정부의 연구개발 프로젝트에 참여하는 형태로 진행되고 있다. 고체고분자 전해질 막에 있어서는 현 시점의 연료전지 소재로서 공급할 수 있는 성능과 제조 기술을 보유한 적지 않은 기업이 존재하여, 새롭게 성능 향상, 가격 저감을 위한 연구개발이 진행되고 있다. 전극촉매, 바이폴라판, MEA에 대해서도 각각 촉매량의 감소, 저가격의 바이폴라판 재료의 검토, 각종 MEA 제법의 확립 등을 목표로 각 기업이 개발을 수행하고 있다. 이들 연료전지 스택 관련 소재는 연료전지의 성능과 가격에 큰 영향을 주기 때문에, 금후에도 한 층 성능 향상과 가격 저감을 위한 신기술 개발이 요구되고 있다.

4.2.3 가스 업계

가스 업계에서는 연료전지 코제너레이션 시스템 개발은 가스 수요 확대에 도움이 되는 새로운 시장 창조로 인식하기 때문에 그 장래성을 크게 기대하고 있다.

가스업계는 천연가스를 연료로 하는 인산형 연료전지의 개발과 보급에 관한 오랜 경험을 기초로 하여, 각 기업에서 독자적인 기술개발이 수행되었다. 그러나 연료전지 본체의 기술 개발에 대해서는 어느 정도는 전기기기업계 등 다른 업계

에 기대하고 있는 실정이다.

가스업계로서는 연료전지 코제너레이션 시스템은 고효율의 분산형 전원으로서 에너지 정책상의 중요한 것으로 인식하고 있으며, 전력 수요에 비해 열 수요가 작은 일본의 상황에 적합한 코제너레이션 시스템의 도입을 위해 사용 방법을 포함한 기술 검토를 적극적으로 수행하고 있다. 또 가스업계는 천연가스를 효율 높게 수소로 변환시키는 기술을 가지고 있으며, 수소 공급을 상정한 수소제조 기술에도 적극적으로 연구 개발하고 있다.

PEMFC에 대해서는 인산형 연료전지의 경험을 바탕으로 장래의 분산형 전원의 하나로서 가능성을 갖는가를 검토하기 위해 에너지 절약성, 내구성, 수명, 보수, 운용기능, 안정성 등의 기술면과 경제성에 대해서 실기 운전예에 의한 자료를 수집하고 있다. 또 일반적으로 분산형 전원에 있어서, 출력 변동 조정이나 backup을 위해 계통선과 연계시키는 것이 현실적이라는 인식에서 분산형 전원을 다수 연계시킴에 따라 발생이 예상되는 문제에 대해 검토를 수행하고 있다. 분산형 전원의 보급 관건은 경제성의 실현과 환경부하의 억제이기 때문에, 경제성, 환경비용, 그리고 CO<sub>2</sub> 배출량 등의 비교 검토를 수행하고 있다. 현 시점에서는 정치용 연료전지, 마이크로 가스터빈 등의 코제너레이션을 이용할 수 있는 분산형 전원으로서는 열수요가 비교적 큰 호텔이나 분산형 전원 단독으로 대응할 수 있는 상가의 조명등 장점을 활용할 수 있는 곳에 보완적인 전원으로서 도입을 추진하는 것이 적절하다고 인식하고 있다.

- 일본가스협회

일본가스협회는 1999년부터 NEDO로부터 자금을 받아 "PEMFC의 고효율화 가격저감을 위한 운전 연구"를 진행하고 있으며, 이를 위해 3대의 1kw급 가정용 연료전지 코제너레이션 시스템을 설계 제작하여 운전시험을 수행하였다. 3대의 연료전지는 각각 삼양전기주식회사, 송하전지산업주식회사, 그리고 송하전공주식회사에서 제작된 것이다. 일본가스협회에서는 이 시스템의 운전을 통해 장래의 가정용 연료전지 코제너레이션 시스템의 실용화를 위하여 고효율화, 소형화, 가격저감을 위한 검토를 수행하고 있다. 일본가스협회에서는 가정용의 연료전지 코제너레이션에 대해서 2002년부터 실제 주택에서 운전 시험을 시작하고, 2005년경부터 도입 보급을 시도하고 있다. 2005년경의 도입 초기의 목표는 발전효율 30-35%, 배열이용율을 합한 종합효율은 70-80%이다. 장래의 보급을 위하여 초기 투자 비용을 50만엔으로 보고 있다.

- 東京가스

東京가스주식회사는 가정의 전력, 급탕, 난방 수요를 한번에 해결할 수 있는 소용량 가정용 연료전지 코제너레이션의

실용화를 위해 본격적인 연구 개발을 수행하고 있다. 동경가스는 지금까지 제 1세대라고 부르는 인산형 연료전지를 이용한 코제너레이션 발전 시스템의 개발 보급에 노력하여 공장, 호텔, 대규모 사무소 빌딩 등에 합계 36대, 5360kw를 도입하였다. 가정용 코제너레이션 시스템은 인산형에서 실증된 연료전지 코제너레이션 기술을 바탕으로 소형 경량화가 용이하고 기동특성이 우수한 PEMFC를 위한 주변 장치를 독자적으로 개발하여 三洋電機(1kw) 및 지멘스 등의 연료전지와 조합하여 가정용 연료전지를 완성시켜 실증 실험을 수행하고 있다.

더욱이 2001년부터는 실제 가정에 도입하여 실증시험을 실시할 계획이며, 순조롭게 진행된다면 2003~2004년에는 수kw급 연료전지 실용화를 목표로 하고 있다.

- 大阪가스

大阪가스도 연료로서 도시가스를 공급하는 입장이기 때문에 연료전지 개발에는 일찍부터 참여하여 온 기업이다. PEMFC 시스템에 관해서는 독자적으로 천연가스 개질기를 연구하고 있으며 촉매도 개발하고 있다. 대판가스에서는 가정용 연료전지를 위한 고효율, 소형 천연가스 개질장치를 1998년에 개발하였다. 이를 이용한 가정의 전력, 급탕, 난방을 공급할 수 있는 가정용 연료전지 코제너레이션 시스템의 실증 실험을 1999년 2월부터 시작하였다.

大阪가스에서는 1999년 12월 가정용 코제너레이션 프로젝트부를 설립하였으며 연구 및 실증 실험을 통해 2005년에 500W에서 1kw 규모의 가정용 연료전지 시스템으로 판매할 계획이다.

4.3 미국에서의 기업주도 연구

Analytic Power Cooperation 은 200W급까지의 소형 이동형 연료전지를 생산하고 있으며 1750W 스택 2개를 이용한 3kw급의 가정용 연료전지(FC-3000)를 개발하였다. Analytic Power 사에서는 이 시스템의 가격을 3000-4000EUR 정도로 예측하고 있다. 또한 Northwest Power systems 에서는 Denora의 연료전지와 자체 개발한 개질기를 이용하여 2.5kw에서 5Kw급까지의 시스템을 개발하였으며 1999년 7월에 시범운전을 수행한 바 있다.

General Electric(GE)에서는 Plug power와 제휴로 GE HomeGen 7000을 개발하여 실험과 평가를 수행하고 있다. 이미 140대가 제작되어 실험중이다. 첫 번째 모델은 LPG 가스를 사용하며, 계통선 연계되어 운전되며 가격은 아직 정해지지 않았지만 \$3,000/kw 이하를 합리적인 가격으로 보고 있다. GE 모델의 제원은 표 3과 같다. 현재 출시된 모델은 전기만을 위한 것으로 배열을 회수하지 않고 있으나 2003년부터는 열을 사용할 수 있는 코제너레이션 시스템을 생산할 예

정이다. GE는 독일의 Vaillant 드리고 일본의 쿠보타 사를 각각 독일과 일본의 제작 및 판매사로 제휴하여 판매망을 확충하고 있다. Hpower사에서는 2001년 말경에 정격 4.5kw로 3kw에서 10kw까지 운전할 수 있는 가정용 연료전지를 선보일 예정이며, Astris Energi, Inc 에서는 4kw급 가정용 연료전지를 2001년 초에 시범운전을 할 예정으로 있다.

표 3 GE HomeGen 7000의 제원

Size Enclosure	1905(L) × 889(W) × 1397(H)mm
Output	7 kw continuous 10 kw for 30 minutes 15 kw for 0.5 seconds
Voltage	120/240 VAC @ 60 Hz 100/230 VAC @ 50 Hz
Cycle Efficiency	
Natural Gas	36% @ 2 kw output 29% @ 7 kw output
LP Gas	34% @ 2 kw output 27% @ 7 kw output
Cogen Efficiency	> 75%
Operating Temperature	160° F
Exhaust Temperature	220° F
Emissions	Emissions NOx < 1ppm SOx < 1ppm
Temperature	-20° F to 104° F(standard) -40° F to 120° F(optional upgrades)

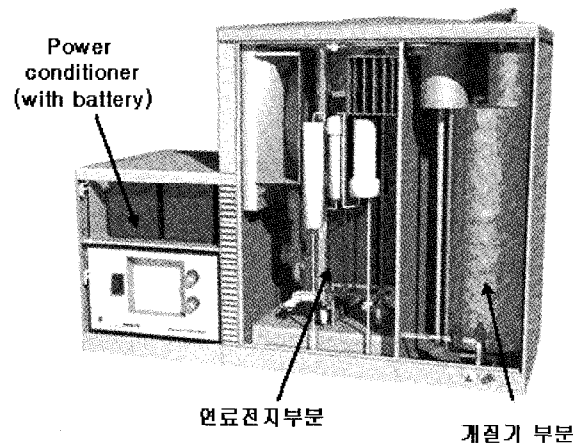


그림 6 GE HomeGen 7000 연료전지 시스템



#### 4.4 국내 연구 동향

국내의 경우 PEMFC의 기초 기술을 위한 연구는 대학을 비롯해서 여러곳에서 연구중에 있으나 주택용을 위한 Kw급 이상의 연료전지 스택과 시스템에 대한 연구로는 한국에너지기술연구원이 주도로 PEMFC 시스템 개발을 위한 1단계 기반연구가 국내 최초로 1998년까지 수행된 적이 있으며, 이 기술을 바탕으로 2단계로 2001년말까지 5kw급 연료전지 시스템 개발과 PEMFC 성능 개선 연구가 진행 중에 있다. 현재 가정용 PEMFC 시스템 개발을 위하여 한국에너지기술연구원, LG화학, 경북대, 연세대, 충남대, 항공대 등이 산학연 협동으로 연구를 수행하고 있다. 현재 개발 중인 시스템은 교류 출력 5kw를 위한 시스템이며 2002년도에 시작될 예정인 다음단계에서는 상용화가 가능한 성능이 더욱 향상된 패키징형 가정용 연료전지 코제너레이션 시스템 개발이 이루어 질 것이다.

### 5. 실용화 보급의 문제

PEMFC는 앞에서 살펴본 바와 같이 도입의 중요성이 큰 만큼, 앞으로 실용화 보급을 위하여 해결해야할 문제가 많다. 연료전지의 개발에 있어서 큰 문제의 하나는 기본 성능의 향상과 경제성의 향상이다. 현재까지 기술 개발에 의해 나타난 문제를 정리하면 다음과 같다.

#### 5.1 기본 성능의 향상

##### 5.1.1 연료전지 스택

스택의 소형경량화, 내구성의 향상과 이온교환 막의 성능향상, 촉매 문제 그리고 경량 저 가격 바이폴라판의 개발이 필요하다.

현재의 연료전지는 1000시간 정도의 내구성이 확인되고 있으며 가정용의 경우 40,000시간 이상 운전을 위한 내구성이 요구되고 있다. 가격 저감이 이루어지면 과도한 내구성은 필요 없이 교체를 전제로 설치가 가능할 수 있다. 개질가스를 사용할 경우에는 CO와 황성분에 대한 촉매의 내구성 향상이 필요하다.

고분자 전해질막으로는 현재 불소계 이온 교환막이 표준적으로 사용되고 있는데, 화학적 안정성과 전도성을 위해 수분 관리의 필요성이 있으며, 100℃ 이상에서는 시간에 따른 변형이 생기며, 가격이 비싼 단점이 있다. 금후의 개발 방향으로는 박막화와 기계적강도의 향상을 우선 들 수 있으며, 이미 폴리테트라플루오로에틸렌등의 보강재가 개발되고 있다. 또 대폭의 가격 저감과 고온에서 이용 성능 향상 측면에서 불소계가 아닌 대체막의 개발도 진행되고 있다. 또 막의 출력 향상 내구성 향상도 과제이다.

PEMFC의 전극촉매로는 고가의 백금을 이용하기 위해 백

금량의 저감이 중요한 과제이다. 또 수소극에 있어서 일산화탄소 피독에 대한 내피독성의 향상도 문제임과 동시에 산소극에 있어서는 공기중의 불순물에 의한 촉매의 영향이나 과전압의 극복도 해결해야 할 문제이다.

연료전지 스택의 출력밀도 향상을 위해 경량화, 박형화와 가격 저감이 과제로 되고 있다. 현재 탄소를 이용한 것이 주류인데 금속재료를 이용한 것도 개발중이다.

##### 5.1.2 개질기

연료중의 황이나 탄소 석출에 의해 개질촉매의 내구성 향상이 과제이며, 기동, 정지의 사이클 수명 향상도 과제이다. 개질과정에서는 열을 필요로 하는데, 개질기를 예열하고, 기동하는데 시간이 걸리므로 이를 해결할 필요가 있다. 또한 부하 변화에 대해 개질기의 반응이 느리기 때문에 반응 시간을 단축하는 것이 과제이다. 개질기를 패키징하기 위해 소형화 경량화가 과제로 되고 있다. 개질기 열효율은 전체 CO<sub>2</sub> 삭감에 큰 영향을 미치며, 에너지 절약과 관계 있으므로 열효율의 향상이 필요하다.

##### 5.1.3 전체 시스템

이차전지와 연료전지 스택 출력과의 연계, 압축기와 연료전지와의 연계 등이 해결해야할 문제이다. 시스템 전체로서는 장시간의 운전에 견디는 것에 내구성과 오염된 외기 상태 등 통상적인 환경하에서 신뢰성을 확보하는 것이 과제이다. 또한 PEMFC는 장시간 운전에 따라 성능이 저하되므로, 상품으로 시장에 내놓기 전에 이들 신뢰성과 내구성의 검증이 필요하다. 이외에 한랭지에서 개질을 시작할 때 시동성이 중요하며, 막의 습도 유지를 위해 공급되는 순수한 물과, 발전에 의해 발생하는 물이 동결되지 않게끔 시스템을 개발하는 것이 필요하며 시스템 전체로서는 부하 추종성을 확보하는 것이 필요하다.

현재 고분자 전해질에서 발생하는 열은 60-70℃ 정도로 겨울철 난방용으로는 적당하나 여름철에 흡수식 히트펌프를 이용하여 냉방을 하기에는 낮은 온도이므로 따라서 새로운 고온용 고분자막의 개발과 더불어 고온의 배열을 회수하는 기술이 필요하며, 가정용의 경우 소형이기 때문에 부속기에서 소비되는 전력의 비율이 상대적으로 높아 에너지 발전효율을 높이기 위해서는 이들 기기의 전력을 저감하는 것이 필요하다.

#### 5.2 경제성의 향상

가정용 연료전지의 경우 현재의 보일러 기능에 발전기를 부가시킨 것으로 고려할 수 있으므로 시스템 전체로서 1대당 300만에서 500만원정도가 적당한 것으로 예측하고 있으며, 이를 위해 현재 가격이 높은 소재와 부품의 저가격화를 통해

전체 시스템의 가격을 낮추는 것이 필요하다. 구체적으로 효율과 내구성을 향상하면서 혁신적으로 가격을 저감시킬 수 있는 고분자 막의 개발, 고가 촉매의 양을 대폭으로 줄일 수 있는 전극이나 개질기의 개발, 그리고 장래에는 양산에 의해 시스템 전체의 가격을 낮추는 것이 필요하다.

이밖에도 연료공급 기반 시설과, 기준이나 표준 그리고 규제의 정비 문제 사회적인 인식 문제 그리고 부족한 인력자원의 문제들도 해결해야 할 것이다.

## 6. 결 론

지구온난화 문제의 대응과 석유에너지 절약, 그리고 국제적인 산업경쟁력을 확보하기 위한 관점에서 차세대 Key Technology의 하나인 연료전지 실용화를 향한 연구 개발을 가속화할 필요가 있다.

연료전지 관련 선진국 주요기업의 계획에 의하면 가정용 연료전지 시스템은 2003년에서 2005년까지 실용화가 이루어질 전망이다. 따라서 2005년 정도까지는 경쟁적인 기술 개발을 통해 기반 기술 확립과 실증적인 적용 실험이 이루어질 것이다. 2005년 이후에는 약 5년간 실용품이 도입되면서 성능 향상과 가격 저감 기술 문제를 해결하는 시장 진입단계가 이루어질 것으로 예측되며, 2010년부터 연료전지 자동차 보급과 더불어 연료전지의 가격 저감이 이루어지면 본격적인 보급이 이루어질 수 있을 것이다.

국가 산업 측면에서도 연료전지는 관련된 기술분야가 광범위하며, 지금까지 존재하지 않던 신기술이기 때문에 에너지 산업, 전기기기산업, 그리고 소재산업 분야 등이 포함된 새로운 첨단 신규 산업의 육성에도 크게 기여할 수 있다.

가정용 연료전지의 실용화를 위해서는 연료전지 스택이나 개질기의 고효율화, 고내구성, 가격저감 등의 기술개발, 연료전지의 시장 수용성을 높이는데 필요한 시범 사업과, 표준, 안정 기준의 정비, 현행 제도의 재검토, 연료 공급을 위한 기반시설 확충 등 여러가지 문제가 해결해야 할 문제가 있으며, 이런 문제를 위해 관련 업체와 대학, 국립연구소 등의 연구기관, 그리고 정부가 일체가 되어서 일관성 있는 계획 수립 및 연구 개발이 이루어져야 할 것이다. ■

## 참 고 문 헌

- [1] Russ Barlow, "Residential Fuel Cells: Hope or Hype?", Home Power #72, Aug/Sept. pp. 29-29, 1999.
- [2] 일본연료전지 전력연구회, "연료전지 실용화전략연구회보고", 2001년 1월 22일
- [3] (주) 다이아리서치마텍(일본), 중앙리서치센터(일본), 산업기술정보원(한국), "고성능 연료전지의 시장과 기술의 신전개", 1999.
- [4] Jane A. Peterson, "Micropower: The Next Electrical Era", Worldwatch paper 151, 2000
- [5] N.M. Sammes, R. Boersma, "Small-scale fuel cells for residential applications", Journal of Power source 86, pp. 98-110, 2000.

## 〈 저 자 소 개 〉



### 이원용(李元龍)

1960년 4월 3일생. 1979~1983 한국항공대학교 항공기계공학과 학사. 1983~1985 한국과학기술원 기계공학과 석사. 1987~1991 한국과학기술원 기계공학과 박사. 1993.10~1994.12 미국 국립표준기술원 연구원. 1985~현재 한국에너지기술연구소 책임연구원.

한국에너지기술연구소 책임연구원.