

# 고분자 전해질형 가정용 연료전지 시스템 개발 및 응용

다가오는 수소에너지 경제 사회에서 무한 청정 에너지원으로 부각되고 있는 연료전지의 발전 원리와 이를 이용한 가정용 연료전지 발전 시스템의 작동 원리 및 그 활용에 관하여 소개한다.

주 병 수

(주)효성 중공업연구소 분산전원시스템팀(bs.ju@hyosung.com)

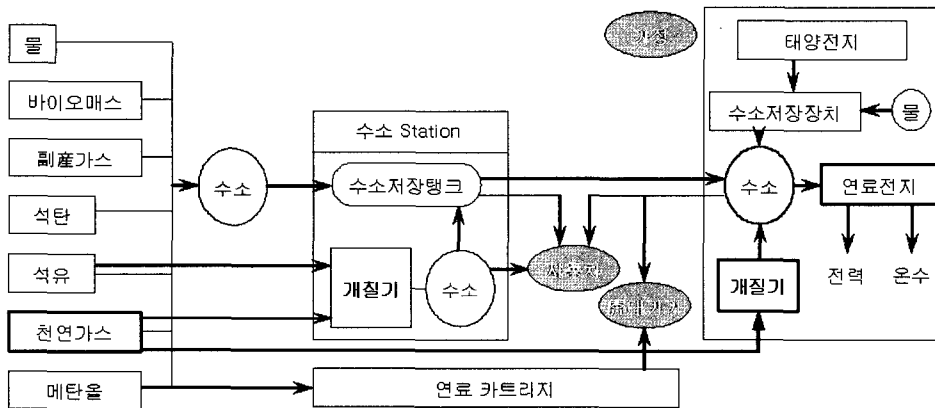
이 호 준

(주)효성 중공업연구소 분산전원시스템팀(gomax@hyosung.com)

## 분산발전 및 수소경제의 대두

현재 전 세계적으로 화석연료 중심의 중앙집중식 대형발전이 대부분의 전력공급을 담당해 오고 있으나, 낮은 발전 효율, 전력부하의 변화에 대한 대응력 부족, 온실가스 발생 등의 공해 등 많은 문제점을 발생시키고 있다. 이에 따라 송배전 설비의 절감, 짧은 건설기간, 첨두부하에 대한 높은 안정성 등 기존의 중앙집중식 발전과는 차별화된 분산발전 기술이 그 대안으로 떠오르고 있다. 또한 현재와 같은 고유가

시대가 계속되고 환경문제, 화석연료 고갈에 대한 우려로 인해 향후 5 ~ 10년 이내에 수소를 에너지원으로 하는 수소에너지 시대의 진입이 예상된다. 물론 완전한 수소 중심의 사회로 전환은 많은 시간이 필요하겠지만 화석연료의 개질 등을 통해 가정용 및 자동차 연료전지의 상용화가 시작될 것이다. 특히 수소 인프라 정비가 완비되기까지는 그림 1과 같은 다양한 수소에너지의 활용 방안중에서 개질을 통한 수소에너지의 활용은 가능성이 높은 대안이라 할 수 있다. 특히 석유에 비해 지역적인 편중도가 낮고 가



[그림 1] 수소에너지의 활용과정

채연수 역시 긴 천연가스가 중요한 개질원료로 활용될 가능성이 높다.

이와 관련하여 앞으로 국내 대부분의 가정에서 천연가스를 연료로 사용하는 보일러로부터 급탕과 난방뿐만 아니라 전기를 생산하는 고효율 청정 에너지 변환시스템의 보급이 기대되고 있다. 연료전지는 발전과정에서 열이 발생하며, 이를 급탕과 난방을 위해 사용할 수 있다. 일반적인 가정의 경우 전력의 사용량과 난방에너지가 거의 동일한 수준으로 발생되고 있다. 따라서 연료전지의 경우 전력 생산량과 열 발생량이 거의 비슷하기 때문에 평균적인 가정의 에너지 공급에는 매우 이상적이라고 할 수 있다.

### 고분자 전해질 연료전지(PEFC, Polymer Electrolyte Fuel Cell) 작동원리

연료전지의 첫 번째 실증은 1839년 William Grove에 의해 증명되었으며 그 원리는 수소와 산소가 결합하여 연소의 과정 없이 물을 생성할 때 전기와 열이 생산되는 것이다. 연료전지는 반응에 필요한 이

온의 전달체 역할 및 수소와 산소의 직접적인 접촉을 막는 매개체가 필요하다. 이러한 매개체의 종류에 따라 표 1과 같이 연료전지를 구분하게 된다.

이 중 작동 온도, 발전 및 열용량 등을 고려할 때 가정용 시스템으로는 고분자 전해질 연료전지가 적절하며, 그 반응원리는 그림 2와 같다.

그림 2와 같이 연료로 공급되는 수소가 양자(proton)와 전자(electron)로 분리되는 양극(anode)과 산소가 공급되어 양자와 결합하여 물이 생성되는 음극(cathode), 사이의 전해질 층에서의 반응에 의해 전기와 열이 발생한다.

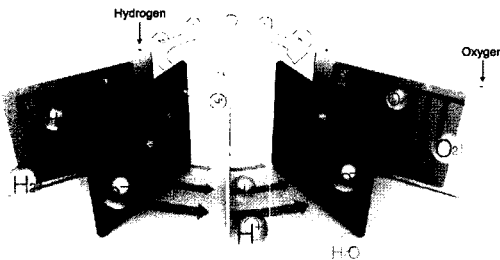
### 고분자 전해질형 가정용 연료전지 시스템

일반적으로 가정에 필요한 전기 수요는 배전 계통으로부터 공급받고, 난방이나 급탕 등에 필요한 열 수요는 보일러를 가동하여 사용한다.

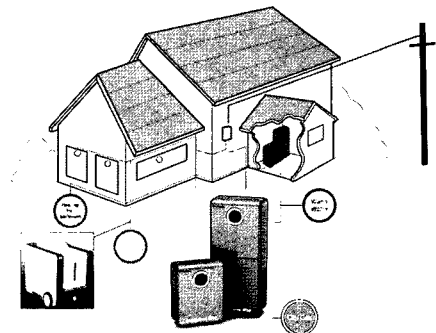
연료전지 시스템을 가정에 도입하게 되면 도시가스를 사용하여 가정에 사용되는 전기 및 열 수요를 충당할 수 있다. 연료전지 시스템의 경우 열을 회수

<표 1> 연료전지 종류 및 특징

| 연료전지 종류      | 전해질                                                              | 작동 온도        | 발전범위/적용분야         |
|--------------|------------------------------------------------------------------|--------------|-------------------|
| 고체산화물(SOFC)  | ZrO <sub>2</sub>                                                 | 500℃ ~ 1000℃ | 2 kW ~ 수 MW/열병합   |
| 융융탄산염(MCFC)  | Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> / K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> | ~ 650℃       | MW급/중대형 열병합       |
| 인산형(PAFC)    | H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>                                   | ~ 220℃       | 200 kW급/열병합       |
| 고분자전해질(PEFC) | 고분자전해질                                                           | 30 ~ 100℃    | ~ 수십 kW급/열병합, 자동차 |
| 직접메탄올(DMFC)  | 산성 전해질                                                           | 20 ~ 90℃     | 500 W 이하 이동형      |



[그림 2] 고분자 전해질 연료전지(단위전지) 반응 개념도



[그림 3] 가정용 연료전지 시스템의 활용



하여 사용할 수 있으므로 동일량의 도시가스를 이용한 기존 발전 방식에 비해 에너지 이용 효율이 높아, 이산화탄소 발생량이 적고 환경 친화적 시스템이다. 연료의 경우 설치 지역에 따라 도시가스뿐만 아니라, LPG 및 등유로도 작동 가능하여 섬이나 오지 등에서도 적합하다.

가정용 연료전지 시스템은 전기와 열을 동시에 얻을 수 있는 열병합 개념이 적용된 시스템뿐만 아니라 갑작스런 전력 수요를 충족하기 위해 직접 수소를 공급하여 발전되는 보조전원용 시스템도 있다. 이는 계통에 연계하여 가정 내에서의 갑작스런 냉난방 부하를 감당하거나, 독립전원형으로 설치하여 정전시를 대비할 수도 있다. 그림 3은 가정에서 사용되는 열병합형 연료전지 시스템과 독립전원형 연료전지 시스템의 활용 개념도이다.

### 가정용 연료전지 시스템의 국내외 동향

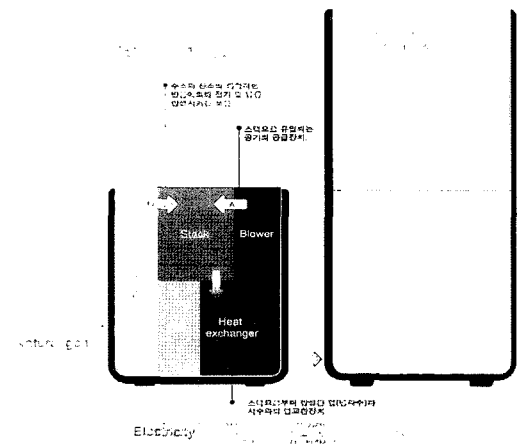
국내의 경우, 2009년까지 가정용 연료전지의 내구성 확보와 초기시장 형성을 위한 '가정용 연료전지 모니터링 사업'에 적합한 1 kW를 3년간 210기를 운영하며 스택, 개질기, BOP 등 관련 부품산업육성을 위해 국산화율을 80%까지 끌어올린다는 목표를 세

워 진행하고 있다. 이와 함께 모니터링이 완료된 연료전지 시스템은 추가로 실증운동을 필요로 하는 운영기관으로 유상이전 해 지속적인 실증 데이터를 확보하며 모니터링 인프라를 활용한 연료전지 실증단지 조성도 검토하고 있다. 또한 3차년도 사업이 종료되는 2009년부터는 국내의 모든 기후, 지역에서 운영 가능한 가정용 연료전지 시스템 구축을 추진할 계획이다.

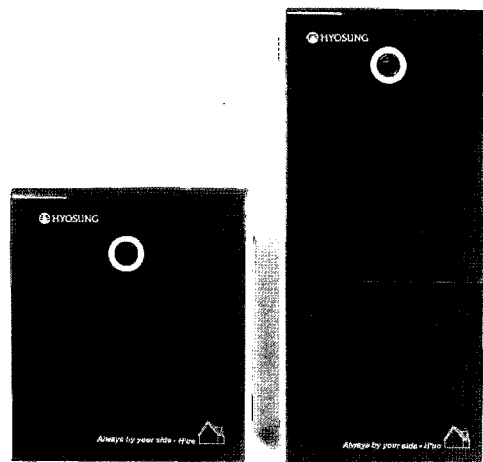
국외, 특히 일본의 경우, 연료전지관련 산업을 21세기 일본의 산업을 재부흥시킬 핵심 산업으로 간주하고 정부, 기업, 지방자치단체들이 협력하여 1 kW급 가정용 연료전지 실증사업을 수행중이며, 실증운동을 통한 신뢰성 확보와 기술개선 및 대량생산에 따른 원가절감에 기술개발의 초점이 맞춰져 있다. 유럽의 경우는 독일이 가장 활발하게 진행하고 있으며, 4개의 큰 규모의 천연가스회사를 중심으로 1~5 kW급의 정치형 연료전지시스템의 기술적, 경제적 경쟁력 확보를 위해 노력하고 있다.

### 가정용 연료전지 시스템의 내부 구성

가정용 연료전지 시스템은 그림 4와 같이 발전모듈과 온수모듈로 나눌 수 있다. 발전모듈은 전기화



a) 시스템 구성 및 역할



b) 가정용 연료전지 시스템 예((주)효성)

[그림 4] 가정용 연료전지 시스템의 구조

학 반응이 일어나는 스택(stack), 도시가스를 수소로 개질하기 위한 개질장치(fuel processor), 스택에서의 반응에 의해 발생된 직류전원을 교류로 변환하는 전력변환기(PCS, Power Conditioning System), 공기중의 산소를 압축하여 반응부에 공급하기 위한 블로워(blower), 그리고 스택에서 발생된 열과의 열교환을 위한 열교환기류(heat exchanger)로 구성된다. 반면 온수모듈은 발전 모듈에서 생산된 열을 회수하여 저장하기 위한 온수저장조 및 부족한 열공급의 보조를 위한 보조보일러로 구성된다.

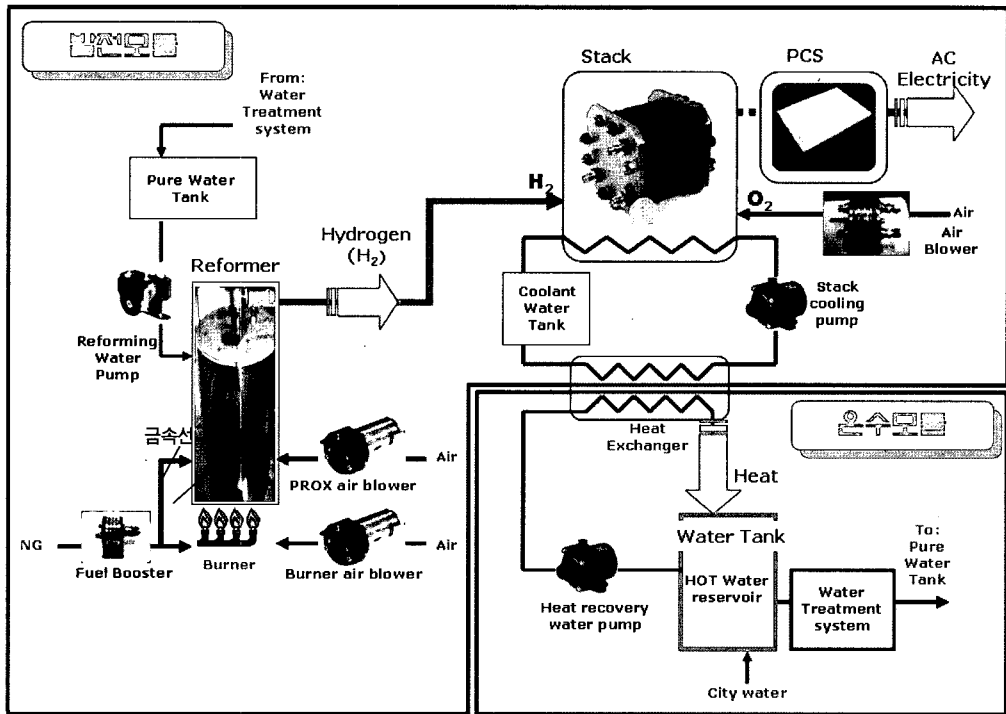
### 가정용 연료전지 시스템의 주요 구성기기

연료전지 시스템의 핵심 부품인 개질기와 스택이 최적의 효율에서 발전 성능을 내기 위해서는 이들 핵심 부품 외에 기계적인 부품들과 전기적인 부품들

간에 적절하게 운전되어야 한다. 이 기계적인 부품들을 통상 MBOP(Mechanical balance of plant)라 부르고, 전기적인 부품들을 EBOP(Electrical balance of plant)라 부른다. 그림 5는 가정용 연료전지 시스템의 내부구성 및 주요 구성기기를 간략하게 도식화한 것이다.

#### 연료전지 스택

연료전지 반응이 일어나는 각 단위 연료전지를 여러 겹으로 적층한 연료전지를 연료전지 스택(stack)이라고 한다. 연료전지의 출력 특성은 단위 전지의 출력 특성에 따라 결정되며 이와 같은 특성의 단위 전지를 직렬 적층하여 구성된다. 가정용 연료전지 시스템은 전기 및 열수요를 동시에 충족하는 것을 목적으로하기 때문에 가정용 연료전지 시스템에 사용되는 연료전지 스택은 수냉식 연료전지 스택을 적



[그림 5] 가정용 연료전지 시스템 내부 구성 및 흐름도



용하여야 한다.

스택을 통과한 냉각수(50 ~ 70℃)는 열교환기(heat exchanger)에 의해 회수되어 열저장조에 온수 형태로 저장된다.

### 개질기

연료전지 운전을 위한 연료로 수소를 공급하는 것이 가장 바람직하나 현재의 인프라로는 가정용 연료전지 시스템에 수소를 직접 공급하는 것이 어렵다.

따라서 가정에 공급되고 있는 도시가스를 수소로 전환하여 사용하는 방식을 사용한다. 이렇게 도시가스를 사용하여 연료전지의 원료인 수소로 전환시키는 시스템을 개질기라 부르며 그림 6과 같이 크게 탈황기, 연소기, 개질 반응기, 전환 반응기, 선택 산화 반응기 5개 부분으로 나눌 수 있다.

개질기는 흡열 반응이 주를 이루는데 이때의 반응기의 온도를 유지하기 위해 연소기(버너)를 이용하며 연료전지 스택에서 반응하고 남은 가스(anode off gas)를 사용하여 전체 시스템 효율을 높하게 된다.

### 전력변환기 (PCS, Power Conditioning System)

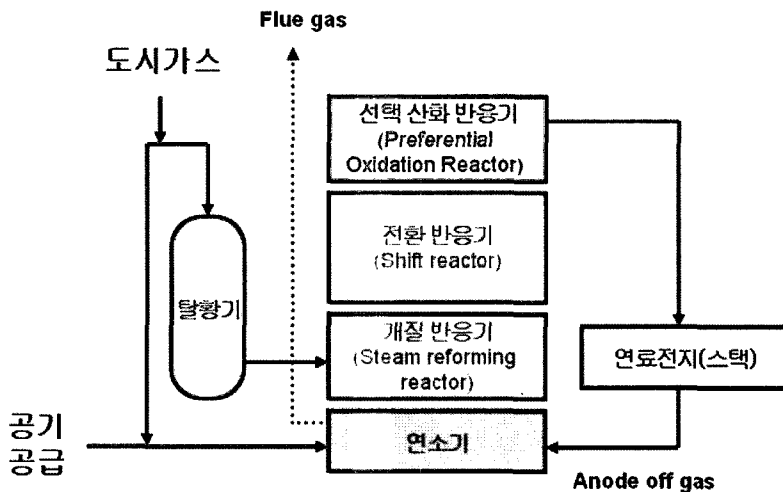
연료전지 스택은 대전류 · 저전압 특성을 갖는 직류전원을 생산하는데, 상용전원인 교류 전원으로 안정적으로 공급할 수 있는 전력변환기를 필요로 한

다. PCS는 DC-DC 컨버터와 DC-AC 인버터로 구성되어 있다. DC-DC 컨버터는 연료전지의 낮은 전압을 DC-AC 인버터가 요구하는 전압으로 승압하는 역할을 하며 DC-AC 인버터는 승압된 직류전원을 교류전원으로 변환하고 계통에 연계하여 계통으로 전력을 공급하는 역할을 한다. 그림 7은 연료전지 전력특성에 맞게 설계되어 제작된 1 kW급 PEFC 가정용 연료전지 시스템용 전력변환장치의 내부 구성 회로 a)와 패키징 된 전력변환기b)이다.

### 연료전지용 유체기계

연료전지 시스템 전기와 열을 발생하기 위해서는 도시가스, 공기, 물 등 여러 종류의 유체가 시스템에 공급되어야 한다. 시스템에 사용되는 유체기계는 각각의 사양에 따라 운전 특성이 서로 상이하며 또한 구동방식/제어기 회로 등이 적절하게 운전될 수 있는지를 미리 파악해야 한다.

- 스택 반응용 공기공급장치  
공기공급장치는 반응에 필요한 산소를 공급하기 위해 블로워 혹은 압축기를 사용하며 공기를 스택의 음극(cathode)에 공급한다.
- 냉각수 순환 장치  
냉각수 순환 장치는 반응시 스택에서 발생하는 열을 제거하기 위해 펌프를 사용한다.



[그림 6] 개질기의 주요 구성도 및 흐름도

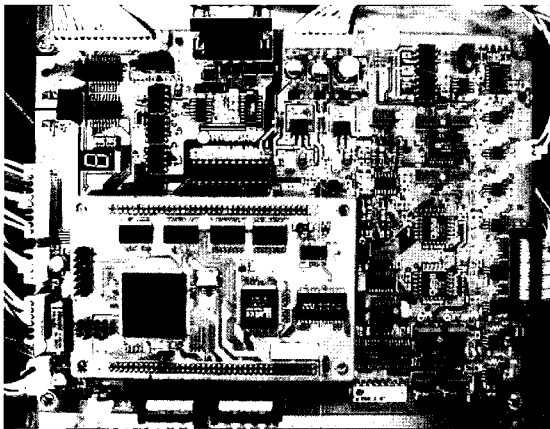
- 열회수 순환 장치  
열회수 순환 장치는 스택에서 제거된 열을 회수하여 저장하기 위해 펌프를 사용한다.
- 연료공급장치  
연료로 사용되는 수소를 얻기 위한 개질기 내 도시가스를 공급하기 위해 승압용 블로워를 사용한다.

### 연료전지 시스템 최적 운전모드

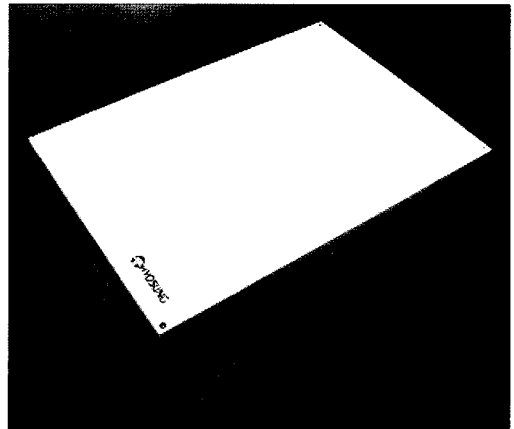
에너지 시스템 운전 최적화는 현재 설치되어있는

에너지 시스템을 효율적이고 합리적으로 운영할 수 있는 방법을 제시하거나, 신규로 에너지 시스템을 도입하고자 하는 수요처에 최적의 에너지 시스템 선정은 물론 최적의 용량을 산정하여 경제성 평가의 지표로 사용될 수 있다.

그림 8과 같이 가정용 연료전지 시스템은 전기는 물론 연료전지 반응 시 발생하는 폐열을 활용할 수 있는 초소형 열병합 발전 시스템으로 연료전지로부터 발생된 폐열은 일차적으로 열 저장조에 저장하고, 열수요가 발생하는 경우 열 저장조에 저장된 온수를 공급한다. 이때 부족한 온수는 보조보일러를

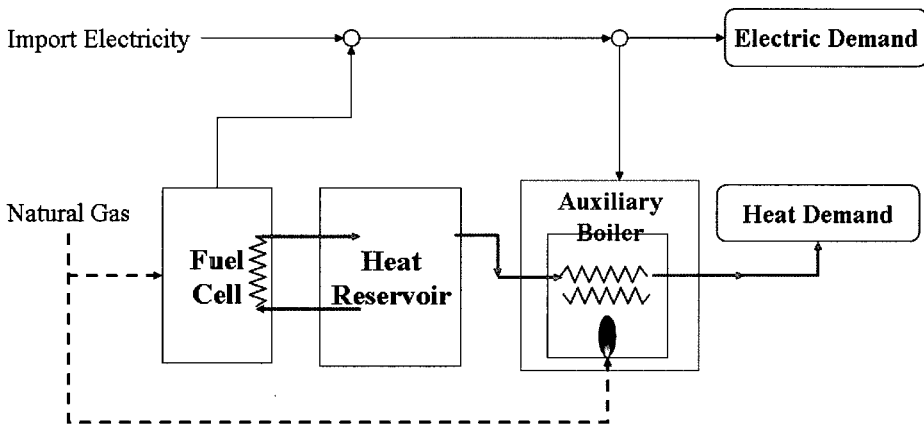


a) 전력변환기 내부 회로

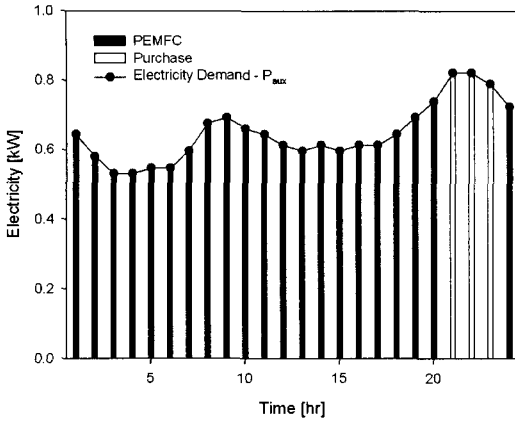


b) 전력변환기

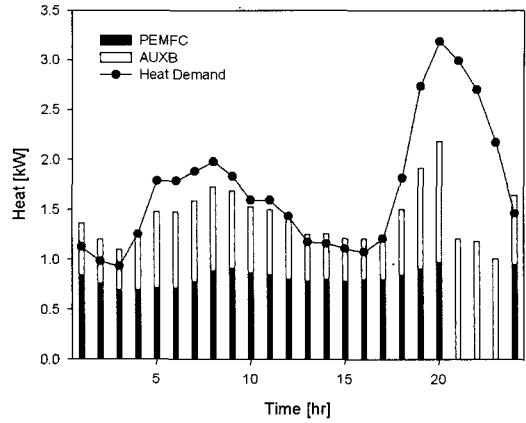
[그림 7] 가정용 연료전지 시스템용 전력변환기



[그림 8] 가정용 연료전지 시스템 설치 운영 개념



a) 전기 부하



b) 열 부하

[그림 9] 봄/가을철 소형아파트 운전 모드 계산 결과 예

가동하여 공급하며, 부족한 전기는 배전 계통에서 공급받는다.

따라서 연료전지 시스템은 전기만 생산하는 발전 설비나 온수만을 생산하는 보일러 설비와는 달리 연료전지 발전모듈, 열 저장조, 보조보일러는 물론 계통 연계에 대한 부분도 모두 고려된 운전계획이 수립되어야 한다.

그림 9는 월 평균 400 kWh의 전력과 1,300 kWh를 난방용으로 사용하는 아파트 한 세대가 연료전지 시스템을 운영하는 경우, (주)효성에서 개발한 연료

전지 시스템 최적 운전법으로 수립한 운전 계획에 의하면 월 평균 약 20% 이상의 운전비용(전기료+도시가스료)을 절감할 수 있는 것으로 나타났다.

연료전지 시스템 운전 최적화는 상용화에 있어서 중요한 경제성 평가는 물론 최적화된 운전 계획을 수립하여 운전비용 절감을 극대화할 수 있다. 또한 연료전지 시스템 도입에 있어서 중요한 전력 및 연료 단가 정책에 대하여 정량적인 분석의 수단으로도 활용할 수 있다. (주)효성