한국수소 및 신에너지학회 논문집(2009. 4), 제20권 제2호
Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society(2009. 4), Vol. 20, No. 2, pp. 104~115

시뮬레이션 기반 가정용 연료전지 시스템의 경제적 운전전략에 관한 연구

황수영*, 김민진†, 이진호***, 이원용****
*현대로템 주식회사, **한국에너지기술연구원 연료전지연구단, ***연세대학교 기계공학

A Simulation based Study on the Economical Operating Strategies for a Residential Fuel Cell System

SUYOUNG HWANG*, MINJIN KIM†, JINHO LEE***, WON-YONG LEE****
**Hyundai Rotem Company*
***Fuel Cell Research Center, Korea Institute of Energy Research*
****Department of Mechanical Engineering, Yonsei Univ.*

ABSTRACT

In case of residential fuel cell system, it is significant to stably supply heat and power to a house with high efficiency and low cost for the successful commercialization. In this paper, the control strategy analysis has been performed to minimize the total cost including capital and operating cost of the residential fuel cell system. The proposed analysis methodology is based on the simulator including the efficiency models as well as the cost data for fuel cell components. The load control strategy is the key factor to decide the system efficiency and thus the cost analysis is performed when the fuel cell system is operated for several different load control logics. Additionally, annual efficiency of the system based on the seasonal load data is calculated since system efficiency is changeable according to the electric and heat demand change. As a result, the hybrid load control combined electricity oriented control and heat oriented control has the most economical operation.

KEY WORDS : Fuel cell(연료전지), Cogeneration(열병합), Operation control(운전제어), RPG(가정용연료전지), Simulation(시뮬레이션)

Nomenclature

EFC : producted electrical energy of fuel cell, J
QFC : producted heat energy of fuel cell, J
VFC : voltage of fuel cell, V
G : gibbs free energy, J
P : partial pressure, Pa
S/C : steam/carbon ratio
F_{STEAM} : vapor supply to reformer
K_S : chemical equilibrium number of gibbs free energy

†Corresponding author : minjin@kier.re.kr

K_P : chemical equilibrium number of partial pressure
K_{eq} : chemical equilibrium number
T_m : total mole number
Q_{sft} : generation heat of WGSR, cal
Q_{vapor} : evaporation heat of water, cal
Q_{eva} : generation heat of evaporator, cal
Q_{H2O} : vapor heat, cal
Qs : heat supply to heat tank, cal
Q_d : residential heat load, W
Qgb : supply heat of sub burner, W
Qrej : rejection heat, W

Subscripts

FC : fuel cell
RPG : residential power generator
WGSR : water gas shift reactor
BOP : balance of plant

1. 서 론

연료전지는 전기에너지와 열에너지를 동시에 사용 할 수 있기 때문에 에너지 효율이 높고 유해 배기물이 거의 없으므로 친환경적이다. 따라서 환경문제가 대두되고 있는 오늘날, 고효율 친환경의 연료전지는 차세대 에너지원으로 각광받고 있다. 하지만 개질기를 포함한 연료전지 시스템은 시스템의 정상화에 시간이 필요하며, 부하변동에 따른 연료전지 시스템의 반응이 느리다는 단점을 가지고 있다. 따라서 연료전지는 2차 전지 혹은 계통연계를 통한 하이브리드 운전 방법으로 수요에 대한 부하를 보충해 줄 수 있다[1-3]. 또한, 연료전지 시스템은 연료전지 스택 이외에, 연료변환장치, 급기설비, 열 및 물관리 설비, 전력변환장치 그리고 제어장치 등으로 구성된다. 연료전지 시스템 성능은 연료전지 자체의 성능뿐만 아니라 주변 운전 장치의 성능에 영향을 받으며 또한, 제어방법에 따라서도 성능이 변할 수 있다. 실제로 연료전지 스택 자체의 전기 변환 효율이 약 40~60%정도로 매우 높으나, 부속 설비의 동력을 고려할 경우 효율이 30~40% 정도로 감소하며 시스템을 최적 구성하기 위해서는 종합화된 시스템 측면에서의 운전까지 고려한 설계와 성능 예측이 필요하다.

보일러와 계통선에서 열과 전기를 공급받는 기존방식에 비해 연료전지 코제너레이션 시스템의 경우 20%이상 에너지 절감율을 향상시킬 수 있다. 기존 10kW이하의 소용량 발전설비의 경우 대형 발전소와 같은 수준인 30%이상의 전기 효율을 기대할 수 없으나 고분자 전해질 연료전지를 적용할 경우 1kW급에서도 35%의 전기 효율을 기대할 수 있으며 열회수까지 고려할 경우 80%에 가까운 열 효율을 달성할 수 있다[4]. 열과 전기에 대한 에너지 수요를 만족시키면서 이와 같이 시스템을 고효율로 유지하기 위해서 시스템 최적 설계는 물론 최적 운전방법이 필요하며 이를 위해서는 시스템 구성 단계에서 성능 예측을 통한 최적화가 필요하다. 계통연계형 연료전지 시스템의 경우 연료전지 시스템이 계통과 연계되어 있기 때문에 수요 부하를 분담하기 위한 에너지 저장 시스템의 용량이 정해져 있지 않다. 이는 무한히 전력을 공급할 수 있는 계통의 특성에 기인 한 것으로 전기수요에 따른 전기추종제어에서 열 수요에 따른 열 추종제어방식과 같이 다양한 운전전략을 가능하게 한다.

연료전지 시스템의 경우 정격상태에서의 성능도 중요하지만 운전 조건과 환경에 따라 계속적으로 변하는 전체 부하 영역에 걸쳐 평균 효율이 중요하며 가정용 열병합 발전 시스템의 경우 계절간 특히 연간 성능을 분석하는 것이 필요하다. 이는 가정용 연료전지 시스템의 특성을 반영한 고효율화를 가능하게 한다. 가정용 연료전지 시스템의 고효율화는 수요 부하에 따른 운전전략을 수립하여 연료전지를 가동함으로써 이룰 수 있다. 특히, 사계절이 뚜렷한 우리나라는 계절별 전기 및 열 수요가 다르기 때문에 수요에 적합한 운전방법을 통하여 시스템의 효율을 향상 시킬 수 있으며 시스템의 효율 향상은 운전비용을 절감하는 효과를 가져온다. 따라서 열 병합 연료전지 시스템은 일반 가정에서 사용하는 전기와 열의 계절 간 혹은 연간 성능을 분석하여 시스템의 효율을 높이기 위한

연료전지 시스템의 운전 전략을 수립하여 반영되어야 한다.

다양한 용도로 사용이 가능한 연료전지 시스템에서 특히 고효율을 달성할 수 있는 열병합 발전 시스템에 관한 연구는 설계 및 구성에서 실증운전까지 진행되고 있다[5-7]. 또한, 열병합 발전에서 계절별 기후조건을 고려한 열 해석 중심의 성능 분석도 이루어 졌다. 하지만 간이화된 모델식을 사용하였을 뿐, 개질기 등에 대한 상세한 해석식이 사용되지 않았다[8]. 따라서 본 연구에서는 계통 연계형 하이브리드 열병합 발전 시스템의 실험기반 모델식 사용과 개질기에 대한 상세한 열역학적 해석식을 이용하여 실질적으로 시스템 설계와 해석에 적용할 수 있는 가정용 연료전지 열병합 발전 시스템 해석모델을 개발 하였다. 또한, 이러한 모델식을 사용하여 결과의 정확성을 높이고 계절별 부하에 따른 수요를 예측하고 효율을 향상시켜 시스템의 운전비용을 절감하기 위한 성능 평가를 수행하였다.

2. 시스템 구성 및 모델

2.1 가정용 연료전지 시스템 구성

대상 시스템 해석을 위한 가정용 열 병합 발전 시스템은 1kW급으로 구성도는 Fig. 1과 같다. 주요 부품 모델링은 실험 자료를 토대로 유도하였으며 실험이 불가피한 장비의 특성 방정식은 이론적 모델식을 사용하였다.

2.2 시스템 모델

2.2.1 연료전지

연료전지는 전기와 열을 동시에 발생시키는 시스템이다. 연료전지의 성능식은 실제 연료전지의 실험 자료를 바탕으로 유도하였다. Fig. 2가 해석에 사용된 1kW 연료전지의 전류-전압(IV) 특성곡선과 출력 특성이다.

2.2.2 전력변환기

Fig. 3은 연료전지 출력에 따른 DC/DC 컨버터 및 DC/AC 인버터의 통합 효율을 나타낸 것이다. 해석을 위해 실제 제작된 전력변환기의 실험 자료를 이용하여 특성식을 구하였다. 전력변화 장치의 효율은 전류가 500~900W 범위에서 90%~95%로 높게 나타나고 있으며 나머지 영역에서는 85%~90% 정도이다.

2.2.3 운전장치(BOP)

연료전지 시스템은 주요 부분인 스택 이외에 스택에 공기와 연료를 공급 하기위한 장치, 온도 제어 등을 위한 주변 운전 장치들로 구성된다. 운전

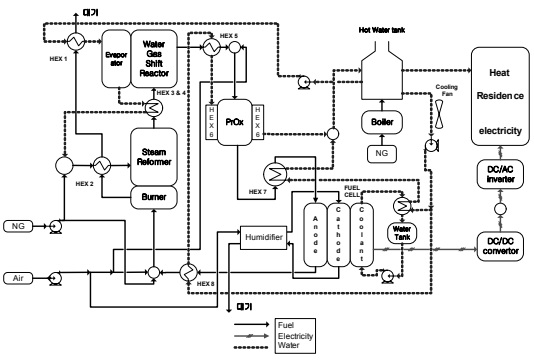

Fig. 1 A schematic diagram of the NG-fed residential cogeneration PEFC system

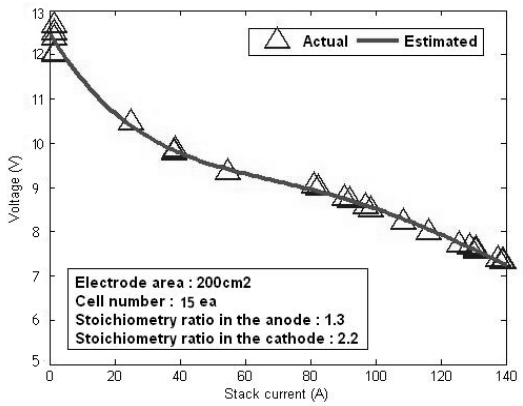

Fig. 2 PEFC stack

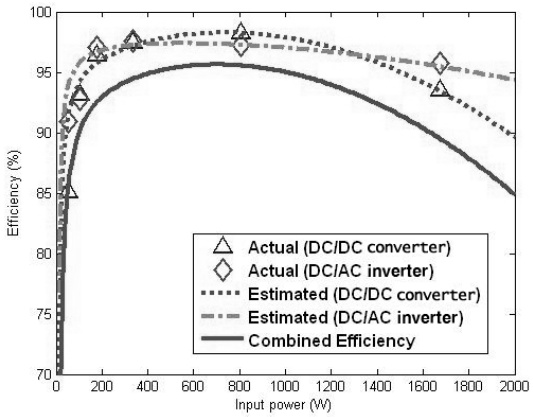

Fig. 3 DC/DC & DC/AC efficiency

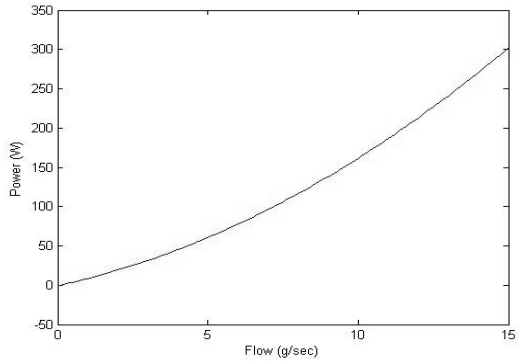

Fig. 4 Power consumption according to air flow rate

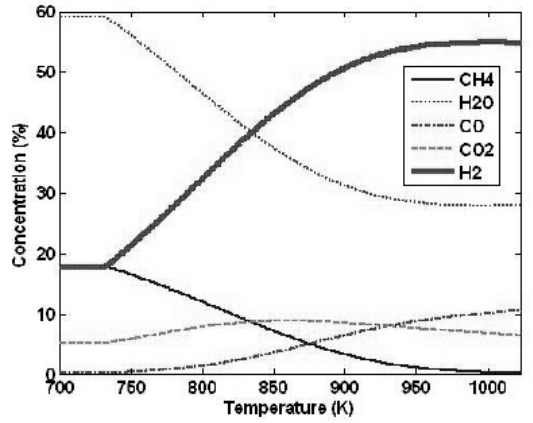

Fig. 5 Composition of reformed gas

장치는 산화제인 공기를 공급하기 위한 공기 압축기와 냉각 및 열관리를 위한 열교환기, 물 펌프, 냉각 팬, 시스템 제어를 위한 구동기와 센서 등으로 구성된다. 별도의 동력을 필요로 하는 공기 및 도시가스 압축기, 펌프, 냉각 팬 등에 대한 소비전력의 해석이 필요하다.

2.2.3.1 공기압축기

운전장치 중 가장 동력을 많이 사용하는 부위가 스택에 산화제인 공기를 공급하기 위한 공기 압축기로 실제 제작회사에서 제공하는 성능 자료를 토대로 필요한 동력을 구하였다.

사용된 압축기의 데이터는 Vairex사의 VR-612A 모델 공기 압축기이다. Vairex사의 VR-612A 성능을 이용하여 연료전지 운전에 필요한 공기량에 따른 소요 동력을 구한 것이 Fig. 4이다. 공기 압축비는 1.1 bar로 하였다.

2.2.3.2 냉각 펌프 및 팬

냉각 펌프 및 냉각팬의 소비 동력은 다음과 같이 가정하였다. 냉각 펌프의 소비전력은 정격상태에서 67W의 40% 수준인 40W로 일정하게 동작하는 것으로 가정 하였으며, 냉각팬은 100% 가동될 때 4000W의 냉각효과를 가져오는 것으로 설계하고 이때 소비되는 동력이 60W 이다. 따라서 버려지는 열량에 대한 소비동력을 비율로 계산하여 적용하였다.

2.2.4 연료변환 장치(개질기)

연료변환 시스템은 메탄 수증기 개질기(MSR), 전이반응기, 선택산화기, 증발기, 연소기로 구성되며 본 연구에서는 열역학적 모델을 이용하여 해석하였다. 연료변환 시스템에서 Fig. 5와 같이 온도에 따라 개질되는 가스의 성분이 달라지기 때문에 성분을 일정하게 하기 위하여 개질기의 온도를 일정하게 유지하는 것이 해석에 유리하다. MSR은 천연가스를 수증기 개질 하는 반응으로 Table 1과 같은 화학반응을 수반한다. MSR의 반응기 작동온

Table 1 Chemical reactions in MSR

LNG composition (%)	Chemical equation
CH_4[90]	$CH_4+H_2O=CO+3H_2$
C_2H_6[5]	$C_2H_4+2H_2O=2CO+5H_2$
C_3H_8[3]	$C_3H_8+3H_2O=3CO+7H_2$
nC_4H_{10}[1]	$C_4H_{10}+4H_2O=4CO+9H_2$
iC_4H_{10}[1]	$C_4H_{10}+4H_2O=4CO+9H_2$

Table 2 Electric unit cost (Unit : Won/kWh)

Base rate		Electricity rate	
< 100kWh	370	~ 100kWh	55.10
101~200kWh	820	~ next 100kWh	113.80
201~300kWh	1,430	~ next 100kWh	168.30
301~400kWh	3,420	~ next 100kWh	248.60
401~500kWh	6,410	~ next 100kWh	366.40
> 500kWh	11,750	> 500kWh	643.90

도는 750℃ 이고 공급되는 수증기와 탄소의 비는 S/C=3 이다. MSR의 출구가스 조성을 계산하기 위하여 Gibbs 에너지를 이용한 화학평형계수를 구하고 부분압력에 대한 화학평형계수 식과 비교하여 반응이 일어나는 몰수를 구하였다.

$$K_{eq} = \exp(\frac{\triangle G}{1.9865 \times T}) \tag{1}$$

$$K_{eq} = \frac{P_{CO} \cdot P_{H_2}^3}{P_{CH_4} \cdot P_{H_2O}} = \frac{(CO + Z_M)(H_2 + 3Z_M)^3 P^2}{(CH_4 - Z_M)(H_2O - Z_M)(T_M + Z_M)^2} \tag{2}$$

MSR 에서는 식 (3)과 같은 전이반응이 일어난다. 전이반응의 화학평형계수는 MSR과 동일한 방법으로 구하며 반응기의 작동온도는 450℃로 가정하였다.

$$CO + H_2O = CO_2 + H_2 \tag{3}$$

2.2.5 전력관리 시스템

계통연계형 가정용 연료전지 시스템은 독립형 가정용 연료전지 시스템과 달리 별도의 전력 저장을 위한 축전지가 없다. 즉, 독립형 가정용 연료전지 시스템에서 축전지가 담당하는 역할을 계통이 담당하게 된다. 계통과 연계한 가정용 연료전지 시스템은 독립형 시스템에 비해 전력 용량이 정해져 있지 않기 때문에 운전전략 수립에 유리하다. 이는 방대한 전력 저장장치 역할을 하는 계통과 연계된 시스템 구성이 전력 수요를 만족시키기 위한 운전방법에 국한 되는 것이 아니라 열 수요를 만족시키기 위한 운전방법을 가능하게 하기 때문이다. 이러한 계통연계형 가정용 연료전지 시스템은 가정에서 요구되는 전력 수요를 연료전지 시스템이 충족할 경우 남는 전력을 계통으로 내보내며 부족한 경우 계통으로부터 전력을 공급받게 된다. 이때 부족한 전력을 계통으로부터 공급받는 전력은 Table 2와 같이 현행 전기 요금표에 의한 전력사용 요금으로 계산된다[9]. 하지만 남는 전력을 계통으로 공급할 경우 '3kW 이하의 생산된 전력을 판매할 수 없다'는 현행 법규에 의해 판매를 할 수 없다. 따라서 전력이 남을 경우 남는 전력에 대한 전력량은 비용손실로 계산된다.

2.2.6 열관리 시스템

가정용 연료전지 시스템은 연료전지 시스템 및 개질기의 열 회수를 위한 8개의 열교환기가 있다. 열교환기의 교환 열량은 계산을 통하여 연료변환장치에 공급해야할 열량과 열저장탱크로 회수되는 열량으로 각각 구할 수 있다. 또한, 열교환기를 통한 열량으로 온수탱크에 열량을 공급하게 되며 부족한 열량에 대해 보조연소기로 공급하게 된다.

2.2.6.1 열교환기

Fig. 1의 전체 시스템 모델에서 열교환기1(HEX1)은 개질기의 보조연소기 출구가스 열량에 대한 열교환량으로 증발기(HEX4)에 공급하는 역할을 한다. 계산을 위해 개질기 보조연소기 출구가스온도

는 100℃로 설정하였다.

열교환기2(HEX2)는 열교환기1(HEX1)과 마찬가지로 개질기 보조연소기 연소 배기가스를 이용하여 도시가스와 수증기의 혼합가스를 예열시킨다. 예열기 출구 온도는 500℃로 설정하였으며 도시가스는 25℃로 설정 하였다.

스팀 개질기 출구 가스온도는 700~750℃로 반응기의 온도와 동일하다. 따라서 개질기 출구 개질가스 온도를 전이반응에 필요한 온도인 450℃까지 낮추게 된다. 이 때 회수되는 열량은 열교환기(HEX3)을 통하여 증발기로 전달된다.

열교환기4(HEX4)는 전이반응기의 출구 가스 450℃를 180℃까지 낮추는 역할을 한다. 이때 열교환기4(HEX4)에서 회수된 열량은 증발기에서 사용한다.

열교환기5(HEX5)는 열교환기4(HEX4)를 거친 180℃의 개질가스를 140℃까지 온도를 다시 낮추는 역할을 한다. 이때 회수된 열량은 온수저장조의 열량으로 공급된다.

열교환기6(HEX6)은 PROX의 발열량을 회수하며 이 회수된 열 또한 온수저장조로 공급된다.

열교환기7(HEX7)은 140℃ 개질가스온도를 스택 정상작동온도인 75℃까지 낮추는 역할을 하며 동시에 개질가스에 포함된 수증기를 응축시키는 역할을 한다. 따라서 열교환기7(HEX7)은 교환되는 열량과 응축되는 수증기량을 계산해야 한다. 수증기의 과포화 및 개질가스 온도가 75℃로 떨어졌을 경우 포화수증기량을 제외한 나머지가 응축되며 이때 수증기량의 변화를 계산하게 된다. 열교환기8(HEX8)은 연료전지에서 반응하고 남은 스택출구 가스(75℃)의 온도를 상온(25℃)으로 낮추어 출구가스에 포함된 수증기를 줄여주는 응축기 역할을 한다.

2.2.6.2 온수 탱크의 온도 변화

온수저장조(탱크)로 공급되는 열량은 연료전지의 발열량(냉각수온도)과 열교환기 5, 6, 7 ,8에서 회수된 열량의 합이다.

$$Q_s = Q_{FC} + Q_{HEX5} + Q_{HEX6} + Q_{HEX7} + Q_{HEX8} \quad (4)$$

따라서 온수저장조의 온도 변화는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T_{TS-2} = \frac{Q_S - Q_D + Q_{gb} - Q_{rej}}{m_{TS} C_p} + T_{TS-1} \quad (5)$$

단, 여기서 Q_d는 가정에서 사용되는 열 부하 수요이며, Q_{gb}는 온수저장조의 온수 온도가 설정온도(58℃)보다 낮을 때 보조 연소기를 통한 공급열량이다. 또한, Q_{rej}는 온수저장조가 설정온도(62℃)보다 높을 때 냉각시스템을 통해 방출되는 열량이다[10].

3. 해 석

3.1 해석 순서

연료전지 코제너레이션 시스템을 Fig. 1과 같이 구성하여 해석 하였다. 연료전지 스택, 전력변환기, BOP 등에서 확보가 가능한 구성품은 실험기반으로 모델링을 하거나 제작회사의 성능 자료를 기반으로 특성식을 유도하여 사용하였다. 먼저, 연료전지 코제너레이션 시스템에 사용된 연료전지, 개질기, 공기압축기, 냉각시스템, 온수저장조 등의 운전 범위를 결정한 후, 열 및 전기부하, 온수저장조의 온도를 기준으로 연료전지 운전 조건을 결정하였으며 연료전지의 작동조건에 따른 연료전지, 전력변환기, 보조연소기, 냉각시스템 등의 운전 조건 및 손실 에너지를 계산 하여 최종 운전비용을 계산하였다. 또한, 온수저장조의 온도에 의해 열부하와 연료전지 발생열의 크기를 비교하여 냉각기에 의한 열 방출이나 보조보일러의 작동여부를 결정한 후 열에너지 수지를 계산하였다.

부분별 해석 순서는 다음과 같다.

1.1 전기 에너지 계산 순서

1) 전기 부하 수요 패턴 입력

2) 온수저장조의 상태에 따른 BOP 소모 동력

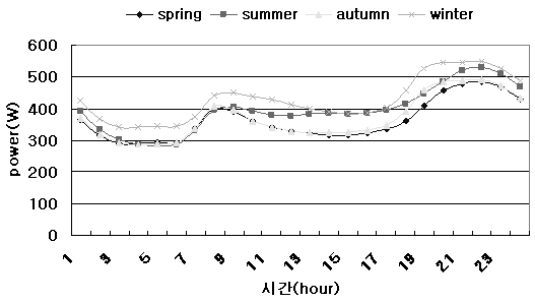

Fig. 6 Seasonal demand for residential electric load

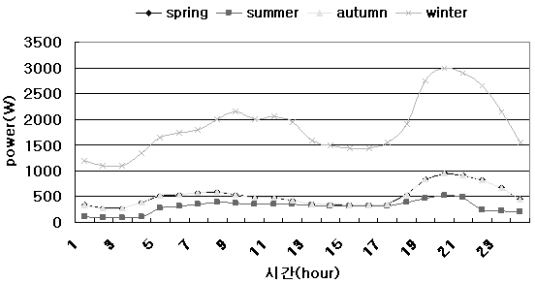

Fig. 7 Seasonal demand for residential heat load

계산

3) 연료전지 출력 계산
4) 효율을 고려한 DC/DC 컨버터의 출력전력 계산
5) 효율을 고려한 DC/AC 인버터 입력전력 계산
6) 연료전지와 전기 부하 수요를 비교하여 계통간 전력 출입량 계산

1.2 열에너지 계산 순서

1) 열 부하 수요 패턴 입력
2) 개질기 및 보조 연소기 사용 연료량 계산
3) 연료전지 시스템 생성열량 계산
4) 회수한 열량과 공급한 열부하에 따른 온수저장조의 온도 계산
5) 온수탱크의 온도에 따라 보조 보일러 및 냉각팬의 작동여부를 결정

1.3 개질기 열수지 계산 순서

1) 열교환기8(HEX8) 열교환량 계산
2) 열교환기7(HEX7) 열교환량 계산
3) 열교환기6(HEX6) 열교환량 계산
4) 열교환기5(HEX5) 열교환량 계산
5) 증발기 필요열량 및 공급열량 계산
6) 연소기에서 필요한 열량 계산
7) 연소기에 공급할 연료량 및 공기량 계산

1.4 사용연료 계산 순서

1) 전기 및 열 수요 패턴 입력
2) 연료전지 출력에 따른 이론 수소량 계산
3) 이용률에 따른 공급 수소량과 공기량 계산
4) 선택적 산화기의 입구 조성 계산
5) 전이반응기의 입구 조성 계산
6) 수증기 개질기의 입구 조성 계산.
7) 개질기에 공급되는 천연가스, 수증기 공급량 계산

3.2 계절별 전기 및 열 부하 특성

가정용 연료전지 시스템 설계 시 가정에서 필요한 전기와 열 수요 패턴에 맞는 연료전지, 온수저장조, 보조연소기 등의 용량 설정 및 연료전지 전체 시스템의 운전방법을 결정할 필요가 있다. 이는 사계절의 전기 및 열 부하 특성이 다르기 때문에 전기와 열을 동시에 생성하는 가정용 연료전지의 특성상 높은 효율과 운전비용 절감을 위해 고려해야할 상항이기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 24평형 주택의 계절별 전기 및 열에너지 사용량을 기준으로 시스템의 해석과 제어전략을 비교 평가하였다. Fig. 6, Fig. 7은 계절별 전기 에너지 및 열에너지의 수요패턴의 예를 나타낸 것이다[11,12].

3.2.1 전기부하 특성

전기부하는 계절별로 큰 차이가 없었으며, 평균적으로 약 400W정도였다. 하지만 Fig. 6에서 알 수 있듯이 겨울철 전기사용량이 여름철 전기 사용량보다 많은 것을 알 수 있다. 이는 일반적으로 여름철 선풍기 및 에어컨의 사용 증가로 사계절 중 전력 소비량이 가장 많을 것으로 알고 있지만 최근 겨울철 전기 난방기 사용 증가에 의한 겨울철 전기 사용량 증대로 추정 할 수 있다. 또한, 시간

대별 전기부하 특성은 오전 2-5시에 사용량이 약 300W로 낮았고, 20-23시에 약 500W로 가장 높게 나타나고 있다.

3.2.2 열 부하 특성

열 부하는 계절별로 차이가 크게 나타났다. 여름철 평균 열 부하는 약 300W이며, 겨울철은 약 1850W로 여름철의 부하의 약 6배 정도였다. 겨울철은 다른 계절에 비해 전기 사용량 보다 열 사용량이 약 6배로 큰 차이를 보이기 때문에 전기 추종제어 보다 열 추종제어에 의한 운전방법이 운전비용을 절감 할 수 있을 것으로 추정 할 수 있다. 봄과 가을은 Fig. 7에서 알 수 있듯이 열 부하 특성이 약 500W수준으로 비슷하게 나왔다.

전기와 열 부하의 비율은 봄, 가을철의 경우 1:1 정도였으며 여름철의 경우 전기부하가 열부하의 2배, 겨울철의 경우 열부하가 전기부하의 3배 정도로 나타났다. 연료전지 시스템 해석을 위하여 Fig. 6, Fig. 7과 같은 전기 및 열 부하 패턴을 입력 자료로 사용하였다.

3.3 제어 전략

연료전지의 시스템 해석 프로그램을 개발하는 목표는 스택뿐만 아니라 시스템 수준의 효율을 높일 수 있는 최적 설계 값과 운전 조건을 찾기 위한 것이다. 본 연구의 연료전지 시스템은 외부전원과 연계하여 운전되는 계통연계 형 시스템이기 때문에 필요한 전력에 기반 한 전기추종제어와 필요한 열에 의한 열 추종제어로 연료전지 시스템을 운전할 수 있다[13,14].

3.3.1 전기 추종 제어

전기추종제어는 전기부하 특성에 따른 운전방법으로 전기수요를 충족하기 위하여 연료전지가 가동된다. 연료전지에서 발전된 전력은 전기수요를 충족하게 되며 이때 부족하거나 남는 열은 열관리 시스템을 통하여 해결하게 된다. 즉, 전기추종제어로 연료전지를 운전하여 부족한 열은 보조연소기에서 공급하며 남는 열은 냉각 시스템을 통하여 외부로 버리게 된다. 본 연구에서는 1kW 수준의 연료전지 시스템을 대상으로 연구를 수행하였기에 가정에서 1kW 이상의 전력을 사용할 경우 계통으로부터 전력을 공급받게 된다. 하지만 계절별 전력수요가 Fig. 6과 같이 평균 400~500W 수준이기에 순간적으로 큰 전력 소모는 연료전지가 충당하지 못하지만 장기적으로 연료전지를 가동할 경우 전력수요를 모두 충당할 수 있다. 따라서 전기추종제어로 연료전지 시스템을 운전할 경우 손실되는 에너지는 열에너지 이며 손실되는 열만큼 비용 손실이 된다.

3.3.2 열 추종 제어

열 추종제어는 열 부하 특성에 따른 운전방법으로 열 수요를 충족하기 위하여 연료전지 시스템이 가동된다. 연료전지 시스템에서 발생하는 열량은 연료전지가 반응하면서 발생하는 열과 개질 시스템에서 발생하는 열을 합하여 계산하는 것이며 Fig. 1의 HEX5, HEX6, HEX7, HEX8에서 회수한 열의 총 합이다. 따라서 1kW 연료전지 시스템에서 회수 할 수 있는 열량은 약 2400W 수준으로 연료전지의 전기효율보다 높다고 할 수 있다. 열 추종제어는 가정에서 사용하는 열 부하를 충족하기 위한 운전방법이기 때문에 가정에서 필요로 하는 전력과 상이하게 발전이 된다. 따라서 가정의 전력수요를 만족시키기 위하여 연료전지에서 발전된 전력이 가정에서 필요로 하는 수요에 비해 부족할

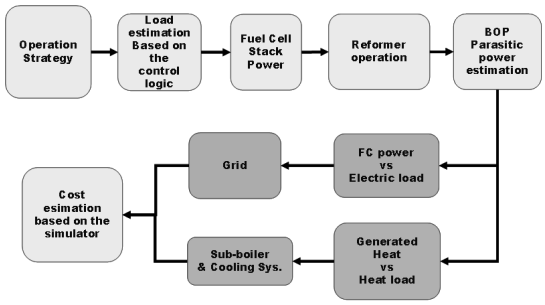

Fig. 8 Simulation logic

Table 3 Unit cost of residential fuel cell system

(Unit : Won)

Stack	Installation cost	1,500,000
	Once replacement cost	1,050,000
BOP	Installation cost	3,500,000
	Once replacement cost	115,000
Fuel	NG unit cost	702.112[Won/Nm^3]

Table 4 Residential electric cost

	Spring	Summer	Autumn	Winter
Daily usage(W)	8706	9482	8904	10304
Monthly usage(kW)	261.18	284.46	267.12	309.12
Base rate	1430	1430	1430	3420
Electricity rate	27187	31105	28186	35987
Monthly rate(Won)	28,617	32,535	29,616	39,407

Table 5 Residential heating cost

	Spring	Summer	Autumn	Winter
Daily usage(W)	12420	7340	12420	44550
Monthly usage(kW)	372.6	220.2	372.6	1336.5
NG usage(m^3)	37.47	22.15	37.47	134.42
Monthly rate(Won)	26,311	15,549	26,311	94,375

경우 계통으로부터 부족한 전력을 공급받게 된다. 이때 공급 받는 전력만큼 비용이 계산되며 이는 비용손실에 해당한다. 또한, 가정에서 필요로 하는 전력 수요에 비해 연료전지에서 발전한 전력이 많은 경우 계통으로 남는 전력을 내 보내게 된다. 이는 현행 '3kW 이하의 발전된 전력은 판매할 수 없다'는 법규에 의해 남는 전력을 계통으로 내보내는 만큼 비용 손실이 된다.

3.3.3 혼합 제어

혼합제어는 계절별 전기추종제어 및 열 추정제어에 대한 결과를 비교하여 가장 낮은 운전비용에 해당하는 운전방법으로 연료전지를 운전하는 제어방법이다. 따라서 가정의 전력 및 열 수요 중 어느 하나를 만족하는 전기추종제어와 열 추종제어와 달리 계통을 통한 전력관리와 보조연소기, 냉각시스템을 통한 열관리가 동시에 이루어진다.

3.4 비용 산정

가정용 연료전지 시스템은 stack, 공기 공급시스템, 연료 공급시스템, 냉각시스템 등으로 이루어져 있다. 현재 가정용 연료전지는 상용화 이전의 단계이기 때문에 각 구성품에 대한 단가가 높은 편이며 stack 또한 높은 가격대를 차지하고 있다. 이는 식 (6)과 같이 투자회수 기간을 구할 때 높은 시스템 구입비용은 운전전략에 따른 운전비용 절감 효과를 입증하는데 어려움이 있다. 따라서 가정용 연료전지 시스템 비용은 Table 3과 같이 현재 시스템 비용이 아닌 상용화가 가능 할 것이라 판단되는 2015년 기준으로 시스템 가격을 책정하였다.

$$\text{투자회수기간} = \frac{\text{고정비용}}{\text{연간이익}}(\text{년}) \quad (6)$$

투자회수 기간은 식 (6)과 같이 고정비용을 연간이익으로 나눈 값이다. 고정비용은 시스템의 초기 구입비용으로 500만원이다[15,16]. 연간이익은 Table 4, Table 5와 같이 일반 가정의 전기 및 열 부하에 대한 사용비용에서 연료전지를 운전하였을 때 사용되는 운전비용을 비교한 값이다. 즉, 연료전지로 발전할 경우 일반가정이 연료전지로 발전하지 않고 계통에서 전력을 공급받아 사용하거나 보일러를 가동하여 열 부하를 충족했을 때 보다 비용이 적게 들기 때문에 연간이익은 일반가정이 연료전지 발전을 하지 않은 년간 비용에서 연료전지 발전을 할 때 운전비용의 차가 된다.

3.4.1 설비비용

가정용 연료전지 시스템의 설비비용은 stack과 BOP(balance of plate), 연료변환 시스템의 초기설비비 및 수선 유지비를 포함한 비용을 토대로 시뮬레이션에 적용 하였다. 연료전지 시스템 수명은 10년으로 가정하여 한달 단위로 설비비용의 단가

를 책정하였다. 이 때 stack은 5년 사용 후 1회 교체하는 것으로 10년으로 가정하고 1회 교체 비용은 Table 3과 같이 초기 구입비용의 70% 수준으로 비용을 낮게 책정하였다.

3.4.2 운전비용

가정용 연료전지 시스템의 운전비용은 Table 2에 기반 한 계통에서 공급받는 전력량에 대한 비용과 연료전지 시스템이 사용한 NG량, 전기추정제어 시 부족한 열을 충족하기 위하여 보조연소기가 가동될 때 소모되는 NG량에 따른 비용이다[17]. 앞 서 설명한 것과 같이 본 연구에 사용된 가정용 연료전지 시스템의 용량은 1kW 수준으로 '3kW 이하의 전력량을 판매 할 수 없다'는 현행법에 의해 전기추종제어 시 계통과 교류 되는 전력량을 "0"에 가까운 값이 되도록 하였다. 따라서 전기추종제어 시 운전비용은 전력량에 대한 운전비용을 줄이도록 하여 운전비용에 NG사용량에 해당하는 것만 계산된다. 하지만 열 추종제어는 전기추종제어와 달리 계통과 교류되는 전력량을 "0"으로 만들지 못하기 때문에 남는 전기량을 계통으로 내보내는 만큼 비용 손실이 된다[18]. 이때 운전비용은 연료전지를 돌리기 위하여 개질되는 NG량과 부족한 전력을 계통으로부터 공급받는 량에 대한 비용이다.

4. 해석 결과 및 분석

4.1 운전전략에 따른 결과 분석

Table 6은 계절별 부하에 대한 전기추종제어와 열 추종제어로 전산해석을 각각 수행하여 절감된 운전비용을 알아 본 것이다. 전산해석 결과 전기추종제어 보다 열 추종제어로 가정용 연료전지 시스템을 운전하는 것이 운전비용을 절감시키는 것을 알 수 있다. 이는 현재 우리나라의 전력비용이 NG 단가보다 저렴하기 때문에 전기수요 보다 열 수요에 따라 연료전지 시스템을 운전하여 부족한 전력량을 계통으로부터 공급받는 것이 더 효율적이기 때문이다. 하지만 투자회수 기간은 전기추종제어와 열 추종제어에 의한 결과가 6.01년으로 동일하게 나왔기 때문에 장기적인 연료전지 운전은 전기추종제어와 열 추종제어에 의한 운전비용 절감 효과를 크게 기대하기는 힘들다. 이는 전기추종제어에 의한 운전비용이 43,977원으로 열 추종제어에 의한 운전비용인 43,074 보다 높게 나왔지만 연료전지 시스템의 초기 구입비용이 500만원으로 높기 때문에 투자회수기간을 계산할 때 적은 운전비용의 차이가 크게 영향을 미치지 않는 것으로 추정된다. 이와 달리 혼합제어로 연료전지를 운전할 경우 1년간 운전비용이 37,257원이며 투자회수기간은 5.95년으로 전기추종제어와 열 추종제어로 연료전지를 운전하는 것 보다 적게 나왔다. 이는 전

Table 6 Seasonal operating cost according to control strategy

(Unit : Won)

		Spring for 1 month	Summer for 1 month	Autumn for 1 month	Winter for 1 month	yearly RPG cost	ROI (year)
Elect. oriented control	NG	3,220	3,530	3,321	4,588	43,977	6.01
	Electricity	0	0	0	0		
	Total cost	3,220	3,530	3,321	4,588		
Heat oriented control	NG	2,055	1,216	2,055	6,526	43,074	6.01
	Electricity	741	1,016	748	0		
	Total cost	2,796	2,232	2,803	6,526		
Hybrid control	NG	2,055	1,216	2,055	4,588	37,257	5.95
	Electricity	741	1,016	748	0		
	Total cost	2,796	2,232	2,803	4,588		

기추종제어 혹은 열 추종제어의 한 가지 운전 방식보다 부하특성에 따라 운전비용을 가장 많이 절감 할 수 있는 운전방법으로 운전방법을 선택함으로써 1년간 연료전지를 가장 효율적으로 운전할 수 있기 때문이다.

5. 결 론

본 연구는 정격 1kW급 계통 연계형 하이브리드 열병합 발전 시스템의 구성으로 실험기반 모델식을 사용하여 결과의 정확성을 높였으며 계절별 부하에 따른 수요를 예측하고 효율을 향상시켜 시스템의 운전비용을 절감하기 위한 성능 평가를 수행하였다. 봄, 여름, 가을, 겨울철의 대표적인 전기와 열 에너지 소비 패턴을 이용하여 부하가 동시에 변하는 상태의 연료전지 운전조건에서 연료전지 시스템의 운전비용을 분석하였다. 계절별 부하 패턴을 적용한 시스템 해석을 통해 계통 연계형 가정용 연료전지 시스템의 구성품 모델링과 운전비용 절감을 위한 최적 운전방식을 결정할 수 있었으며 다음과 같은 결론을 도출 할 수 있었다.

첫째, 가정용 연료전지 시스템 내 실험기반 시스템 모델링을 통한 연료전지 시스템 효율 향상을 위한 모델을 구축하였다. 시스템의 성능은 일정한 영역에서 최대의 효율을 낼 수 있도록 설계되어 있다. 따라서 시스템의 각 구성품의 특성을 반영하기 위한 모델링을 통하여 가정용 연료전지 시스템에 반영했을 때 시스템의 총 효율 향상을 기대 할 수 있으며 그 효과를 확인 하였다.

둘째, 계절별 부하 특성을 반영한 연료전지 시스템의 운전비용을 예측 할 수 있는 해석 프로그램을 구축하였다. 계절별 부하특성이 뚜렷한 경우 부하에 따른 연료전지 시스템의 운전비용이 달라진다. 따라서 해석 프로그램을 통한 운전비용 예측으로 연료전지 시스템의 비용절감 효과를 확인 하였다.

셋째, 가정용 연료전지 시스템의 경제적 운전 전략을 확립하였다. 가정용 연료전지 시스템의 모델링에 의한 효율과 계절별 부하 특성에 따른 운전전략의 수립으로 연료전지 시스템의 비용절감 효과를 확인 하였다.

사계절이 뚜렷한 우리나라는 계절별 전기 부하 및 열 부하 특성이 다르다. 따라서 계절별 부하에 상관없이 가정용 연료전지 시스템을 운전 할 경우 많은 비용 손실을 초래한다. 따라서 본 연구의 계절별 부하 특성 및 시스템 효율을 반영 한 운전전략 수립으로 가정용 연료전지 시스템의 운전비용 절감효과를 확인 할 수 있었다. 또한, 본 연구를 통한 해석 프로그램의 구축으로 추후 에너지 단가 및 시스템 용량 등의 조건 변동 시 확장 적용하여 가정용 연료전지 시스템의 운전비용을 예측하는데 활용 할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1) Kwi-Seong Jeong, Won-Yong Lee, Chang-Soo Kim, “Energy management strategies of a fuel cell/battery hybrid system using fuzzy logics”, Journal of power sources, Vol. 145, 2005, pp. 319-326.
2) J. Van Mierlo, G. Maggetto, Ph. Lataire, “Which energy source for road transport in the future? A comparison of battery, hybrid and fuel cell vehicles”, Energy Table. 2 Operating costs of residential fuel cell system according to control method. Conversionand Management, Vol. 47, 2006, pp. 2748-2760.
3) Minjoong Kim, Huei Peng, “Power management and design optimization of fuel cell/battery hybrid vehicles”, Journal of Power Sources, Vol. 165, 2007, pp. 819-832.
4) Tsangdong Chung, Wentang Hong, “Efficiency analyses of solid oxide fuel cell power plant systems”, Applied Thermal Engineering, Vol. 28, 2008, pp. 933-941.
5) Cecila wallmark, Sofia Enback, “Integration of the components in a small-scale stationary research PEFC system”, Journal of Power Sources, Vol. 159, 2006, pp. 613-625.

6) Hideki Inaka, Andrew, Shindo Sumi, Kunihiro Nishizaki, “The development of effective heat and power use technology for residential in a PEFC cogeneration system”, Journal of power sources, Vol. 106, 2002, pp. 60-67.
7) Yosuhiro Hamada, Ryuichiro Goto, “Operating results and simulations on a fuel cell for residential energy systems”, Energy Conversionand Management, Vol. 47, 2006, pp. 3562-3571.
8) J. H. Lee, T. R. Lalk, “Modeling fuel cell stack systems”, Journal of Power Sources, Vol. 73, 1998, pp. 229-241.
9) 에너지경제연구원, “현행 전기 요금표”, 2008
10) James Larminie, Andrew Dicks, “Fuel Cell Systems Explained”, John Wiley & Sons, Ltd, 2003, pp. 369-400.
11) 에너지관리공단, “에너지 절약 통계”, 2008
12) 에너지관리공단, “수용가 부하곡선을 이용한 전력사용 행태분석”, 2006, pp. 34-184.
13) N. Hamrouni, M. Jraidi, A. Cherif, “New control strategy for 2-stage grid-connected photovoltaic power system”, Renewable Energy, Vol. 33, 2008, pp. 2212-2221.
14) Sang-Hun Lee, Sung-Geun Song, Sung-Jun Park, Chae-Joo Moon, Man-Hyung Lee, “Grid-connected photovoltaic system using current-source inverter”, Solar Energy, Vol. 82, 2008, pp. 411-419.
15) 에너지관리공단, “신·재생에너지 RD&D 전략 2030”, 산업자원부, 2007, pp. 201-211.
16) 재정경제부, “신재생에너지 경제성 분석", 2007.
17) 한국도시가스협회, “LNG 권역 도시가스 요금표(2008.4.1기준)”, 2008.
18) M.Y. El-Sharkh, M. Tanrioven, A. Rahman, M.S. Alam, “Cost related sensitivity analysis for optimal operation of a grid-parallel PEM fuel cell power plant”, Journal of power sources, Vol. 161, 2006, pp. 1198-1207.