

## 운전비용 절감을 위한 가정용 연료전지 시스템의 운전전략 수립

\*황 수영<sup>1,2)</sup>, \*\*김 민진<sup>2)</sup>, 이 진호<sup>1)</sup>, 이 원용<sup>2)</sup>

### A simulation study on operation strategy of residential fuel cell system for cost curtailment

\*Suyoung Hwang, \*\*Minjin Kim, Jinho Lee, Wonyong Lee

**Key words** : PEFC(고분자 전해질 연료전지), Cogeneration(열병합), Simulation(시뮬레이션), Cost(비용), RPG(가정용 연료전지 시스템)

**Abstract** : Residential fuel cell cogeneration systems have gained much interest due to its high efficiency. In this study, we have performed numerical simulation of residential fuel cell cogeneration system which includes a fuel cell/grid hybrid system. The cogeneration system consists of 1kW PEFC, cooling system, inverter/converter and reformer. Several empirical models have been employed for respective components to improve the accuracy of the simulations. The load varies seasonally. The present simulations can successfully predict the characteristics of the hybrid cogeneration system and thus it can be utilized for establishing an optimal operating strategy of the system.

#### Nomenclature

$E_{FC}$  : produced electrical energy of fuel cell, J  
 $Q_{FC}$  : produced heat energy of fuel cell, J  
 $V_{FC}$  : voltage of fuel cell, V  
 $Keq$  : chemical equilibrium number  
 $G$  : gibbs free energy, J  
 $P$  : partial pressure, Pa  
 $S/C$  : steam/carbon ratio

#### subscrip

FC : fuel cell

### 1. 서론

연료전지는 전기에너지와 열에너지를 동시에 사용할 수 있기 때문에 에너지 효율이 높다. 또한, 유해 배기물이 거의 없으므로 친환경적이다. 따라서 환경문제가 대두되고 있는 오늘날, 친환경적인 연료전지는 차세대 에너지원으로 각광받고 있다. 하지만 연료전지는 시스템의 정상화에 시간이 필요하며, 부하변동에 따른 연료전지의

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, 가정용 연료전지 하이브리드 시스템은 연료전지와 계통연계 외에 연료변환장치, 급기설비, 열 및 물관리 설비, 전력변환장치 및 제어 등으로 구성되기 때문에 시스템 전체의 성능은 연료전지와 2차 전지 외 주변 운전장치에 영향을 받게 된다. 실제로 연료전지 스택의 전기 변환율은 약 35%로 내연기관에 비해 높게 나오지만 주변 장치의 동력을 고려할 경우 전체 시스템의 성능은 약30%로 감소한다. 따라서 최적 시스템의 구성은 시스템 구성에서부터 최종 운전까지 고려한 종합적인 설계 및 성능 예측이 필요하다.

가정용 연료전지는 가정에서 필요로 하는 열과 전기를 모두 충당하기 위해 열 병합 발전을

---

1) 연세대학교 기계공학과  
E-mail : syhwang@kier.re.kr  
Tel : (042)860-3583 Fax : (042)860-3104  
2) 한국에너지기술연구원  
E-mail : minjin@kier.re.kr  
Tel : (042)860-3781 Fax : (042)860-3104

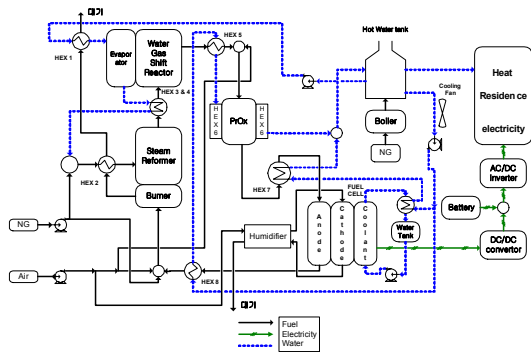


Fig. 2 A schematic diagram of the NG-fed cogeneration PEFC system

한다. 열 병합 발전은 연료전지의 35%에 달하는 전기적 효율과 개질기 및 시스템에서 회수한 45% 가량의 열을 이용하기 때문에 80%에 가까운 이론적 효율을 가진다.(4) 이처럼 80%에 가까운 고효율은 시스템의 운전 방법 및 설계 조건에 따라 가능하다. 계통 연계형 하이브리드 연료전지 시스템은 연료전지와 2차 전지의 독립적인 하이브리드 시스템과 달리 수요 부하를 분담하기 위한 에너지 저장 시스템의 용량이 정해져 있지 않다. 이는 무한히 전력을 공급할 수 있는 계통의 특성에 기인 한 것으로 전기수요에 따른 전기추진제어에서 열 수요에 따른 열 추종제어방식과 같이 다양한 운전전략을 가능하게 한다. 가정용 연료전지 시스템의 고효율화는 수요 부하에 따른 운전전략을 수립하여 연료전지를 가동함으로써 이를 수 있다. 특히, 사계절이 뚜렷한 우리나라는 계절별 전기 및 열 수요가 다르기 때문에 수요에 적합한 운전방법을 통하여 시스템의 효율을 향상시킬 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.

최근 친환경 에너지에 대한 관심이 집중되면서 연료전지에 또한 관심이 집중되고 있다. 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 모델식을 사용하여 결과의 정확성을 높이고 계절별 부하에 따른 수요를 예측하고 효율을 향상시켜 시스템의 운전비용을 절감하기 위한 성능 평가를 수행하였다.

## 2. 시스템 모델링

### 2.1 연료전지 열병합발전 시스템 구성

대상 시스템 해석을 위한 가정용 열 병합 발전

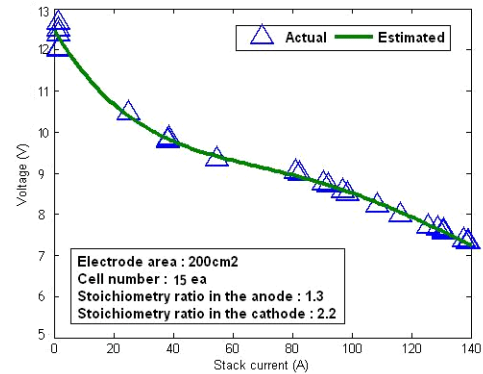


Fig. 3 Modeling of PEFC

시스템은 1kW급으로 구성도는 Fig. 1과 같다. 주요 부위 모델링은 실험 자료를 토대로 유도하였으며 실험이 불가피한 장비의 특성 방정식은 이론적 모델식을 사용하였다.

#### 2.1.1 연료전지

연료전지 모델링은 실험 자료를 토대로 유도하였으며 Fig. 2는 1kW 연료전지의 I-V 특성곡선이다. 이와 같은 실험 데이터를 기반으로 한 연료전지 특성식은 식 (1)과 같이 구할 수 있다. 식 (2)와 식 (3)은 각각 연료전지의 생성 전기 에너지와 연료전지의 생성 열 에너지이다.

$$V_{FC} = a + bI_{FC} + cI_{FC}^2 + dI_{FC}^3 + eI_{FC}^4 \quad (1)$$

$$E_{FC} = V_{FC} \cdot I_{FC} \quad (2)$$

$$Q_{FC} = nI_{FC}(1.25 - V_C) \quad (3)$$

#### 2.1.2 연료변환 시스템(Reformer)

연료변환 시스템은 메탄 수증기 개질기(MSR), 전이반응기, 선택산화기, 증발기, 연소기로 구성되며 본 연구에서는 열역학적 모델을 이용하여 해석하였다. 연료변환 시스템은 온도에 따라 개질되는 가스의 성분이 달라 지기 때문에 성분을 일정하게 하기 위하여 개질기의 온도를 일정하게 유지하는 것이 해석에 유리하다. MSR은 천연가스를 수증기 개질 하는 반응으로 Table 1 과 같은 화학 반응을 수반한다.MSR의 반응기 작동온도는 750℃ 이고 공급되는 수증기와 탄소의 비는 S/C=3 이다. MSR의 출구가스조성을 계산하기 위하여 Gibbs 에너지를 이용한 화학평형계수를 구하고 부분압력에 대한 화학평형계수 식과 비교하여 반응이 일어나는 몰수를 구하였다.

$$K_{eq} = \exp\left(\frac{\Delta G}{1.9865 \times T}\right) \quad (4)$$

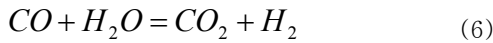
$$K_{eq} = \frac{P_{CO} \cdot P_{H_2}^3}{P_{CH_4} \cdot P_{H_2O}} \quad (5)$$

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

Table. 1 Chemical reactions in MSR

LNG 조성(%)	개질 반응식
CH4[90]	CH4 + H2O = CO + 3H2
C2H6[5]	C2H4 + 2H2O = 2CO + 5H2
C3H8[3]	C3H8 + 3H2O = 3CO + 7H2
nC4H10[1]	C4H10 + 4H2O = 4CO + 9H2
iC4H10[1]	C4H10 + 4H2O = 4CO + 9H2

MSR에서는 식 (6)과 같은 전이반응이 일어난다. 전이반응의 화학평형계수는 MSR과 동일한 방법으로 구하며 반응기의 작동온도는 450°C로 가정하였다.



### 3. 시뮬레이션

#### 3.1 운전전략

계절에 따라, 가정에서 하루(24시간)동안 평균적으로 사용하는 전기와 열부하에 대한 연료전지 시스템의 운전조건을 결정하였으며, 이에 따른 연료전지, 보조연소기 등의 운전 범위를 결정하였다. 즉, 부하에 따라 연료전지 운전 조건이 결정되고 이에 연료전지 주변장치의 운전조건이 결정된다.

#### 3.2 운전제어

본 연구에서 연료전지 시스템은 2차 전지를 이용한 독립적인 시스템이 아니라 계통과 연계한 시스템을 구성함으로써 수요에 따른 부족한 전기 에너지를 공급하도록 하였다. 이는 가정의 수요와 연료전지에서 생산된 전력을 비교 하여 계통으로 남는 전력을 내보내거나 부족한 전력을 공급받게 된다. 이러한 계통과의 연계성은 계통과 교류되는 전력량에 따라 연료전지의 출력에 관여하게 된다. 본 연구에서 Fig. 3과 Fig. 4과 같이 계절별 전기 및 열 부하 특성을 고려한 운전제어를 선택하였으며 Fig. 3의 전기부하특성에 따른 전기추종제어와 Fig. 4의 열 부하특성을 고려한 열 추종제어로 운전제어를 하였다. 또한, 온수 저장탱크의 온도에 따라 연료전지의 출력이 조절된다. 하지만 전기추종제어일 경우 주요 출력 제어 변수는 전기 수요 이므로 열 수요는 보조연소기와 냉각 시스템을 통한 부수적인 제어 변수로 두었다. 이에 반해 열 추종제어일 경우 주요 출력 제어 변수가 열수요 이기에 전기 수요는 계통을 통한 부수적인 제어 변수가 된다.

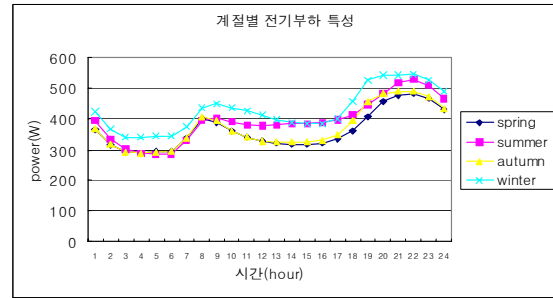


Fig. 3 Seasonal models of peak electric load demand load

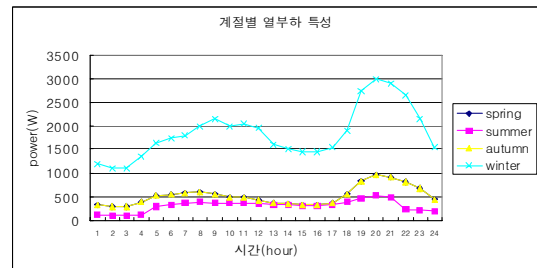


Fig. 4 Seasonal models of peak heat load demand load

### 4. 가격

#### 4.1 설비비용

가정용 연료전지 시스템의 설비비용은 Stack과 BOP(Balance of plate), 연료변환 시스템의 초기 설비비 및 수선 유지비를 포함한 비용을 토대로 시뮬레이션에 적용 하였다. 연료전지 시스템 수명은 10년으로 가정하여 한달 단위로 설비비용의 단가를 책정하였다. 이 때 Stack은 5년 사용 후 1회 교체하는 것으로 10년으로 가정하고 1회 교체 비용은 초기 구입비용의 70% 수준을 비용을 낮게 책정하였다.

#### 4.2 운전비용

가정용 연료전지 시스템의 운전비용은 계통에서 공급받는 전력량에 대한 비용과 연료전지 시스템이 사용한 NG량에 따른 비용이다. 본 연구에 사용된 가정용 연료전지 시스템의 용량은 1kW 수준으로 3kW 이하의 전력량을 판매 할 수 없다는 현행법에 의해 전기추종제어 시 계통과 교류 되는 전력량을 "0"에 가까운 값이 되도록 하여 전력량에 대한 운전비용을 줄이도록 하였다.

### 5. 결과 및 고찰

#### 5.1 계절별 부하에 따른 성능평가

계절별 부하에 따른 운전 전략을 수립하기 위하여 Matlab 프로그램을 이용한 전산해석을 수행

Table. 2 Operating costs of residential fuel cell system according to control method.

(단위:원)

		봄	여름	가을	겨울	
Grid 연계형 전기추종제어	운전비용	NG cost	10,104	10,590	10,407	154,158
		Electric cost	0	0	0	0
		Total	10,104	10,590	10,407	154,158
	투자회수기간(년)	7.22				
Grid 연계형 열추종제어	운전비용	NG cost	6,609	4,539	6,609	20,025
		Electric cost	2,223	3,048	2,244	0
		Total	8,832	7,587	8,853	20,025
	투자회수기간(년)	6.00				

하였다. 전기추종제어는 전기 부하를 반영하기 때문에 열 부하에 대한 제어가 온수 탱크와 보조연소기로 된다. 반면, 열 추종제어는 열 부하특성에 따른 것으로 열 부하에 따라 연료전지가 운전된다. 특히, 겨울철은 열 부하를 많이 필요로 하는 계절임에도 불구하고 보조연소기가 작동하지 않고 연료전지 시스템에서 열 부하를 충족하는 것으로 보아 열 추종제어가 겨울철에 적합한 제어 방법임을 확인 하였다.

## 5.2 제어전략에 따른 비용절감

Table 2 는 계절별 부하에 대한 전기추종제어와 열 추종제어로 전산해석을 각각 수행하여 절감된 운전비용을 알아 본 것이다. 운전비용은 전기추종제어 보다 열 추종제어로 가정용 연료전지 시스템을 운전하는 것으로 전산해석을 수행한 것이 절감되었다. 이는 현재 우리나라의 전력비용이 NG 단가보다 저렴하기 때문에 전기수요 보다 열 수요에 따라 연료전지 시스템을 운전하여 부족한 전력량을 계통으로부터 공급받는 것이 더 효율적이기 때문에 나타난 결과라 할 수 있다.

## 6. 결론

본 연구는 연료전지와 계통연계형 하이브리드 시스템에 의해 운전되는 가정용 연료전지 열 병합 시스템의 성능 예측 프로그램으로 설계된 시스템의 계절별 부하에 따른 성능 평가를 실시하였다. 시스템은 1kW급 연료전지와 계통에 의한 하이브리드 전원 시스템으로 구성되었으며 연료는 도시가스(NG)에서 수성전기반응에 의한 개질된 수소가 사용되었다. 열은 개질기와 연료전지 등에서 발생하는 것을 열관리 설비 및 온수 저장탱크의 열 시스템에 의해 회수되었다. 또한, 계절별 부하 소비 패턴에 따른 운전전략을 전산해석에 도입하여 연료전지 시스템의 운전비용이 달라 지는 것을 확인 할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 계절별 부하를 반영한 계통연계형 시스템의 성능 특성을 확인 하고 수요에 따른 운전전략이 운전비용 절감에 미치는 영향을 확인 할 수 있었다. 제안된 전산해석 운전전략은 분산형 전원 시스템 및 기타 연료전지 시스템의 설계단계에 적용되어 시스템의 성능과 운전비용 예측에 활용될 것으로 기대된다.

## References

- [1] Kwiseong Jeong, Wonyong Lee, Changsoo Kim, 2005, "Energy management strategies of a fuel cell/battery hybrid system using fuzzy logics", Journal of power sources, 145, pp. 319-326.
- [2] J. Van Mierlo, G. Maggetto, Ph. Lataire, 2006, "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. Conversion and Management, Vol. 47, pp. 2748-2760.
- [3] Minjoong Kim, Huei Peng, 2007, "Power management and design optimization of fuel cell/battery hybrid vehicles", Journal of Power Sources, Vol. 165, pp. 819-832.
- [4] Tsangdong Chung, Wentang Hong, 2008, "Efficiency analyses of solid oxide fuel cell power plant systems", Applied Thermal Engineering, Vol. 28, pp. 933-941.
- [5] Cecilia wallmark, Sofia Enback, 2006, "Integration of the components in a small-scale stationary research PEFC system", Journal of Power Sources, Vol. 159, pp. 613-625.
- [6] Hideki Inaka, Andrew, Shindo Sumi, Kunihiro Nishizaki, 2002, "The development of effective heat and power use technology for residential in a PEFC cogeneration system", Journal of power sources, Vol. 106, pp. 60-67.
- [7] Yosuhiko Hamada, Ryuichiro Goto, 2006, "Operating results and simulations on a fuel cell for residential energy systems", Energy Conversion and Management, Vol. 47, pp.3562-3571.
- [8] J. H. Lee, T. R. Lalk, 1998, "Modeling fuel cell stack systems", Journal of Power Sources, Vol. 73, pp. 229-241.
- [9] James Larminie, Andrew Dicks, 2003, "Fuel Cell Systems Explained", John Wiley & Sons, Ltd, pp. 369-400.