

가정용 연료전지 시스템의 요금 분석을 통한 최적 운전 방법 검토

박대흠^{1†} · 차광석¹ · 조호규¹ · 정영관²

¹현대건설 연구개발본부, ²금오공과대학교 기계공학과

Study on Optimization of Operation in household Fuel Cell System

DEAHEUM PARK^{1†}, KWANGSEOK CHA¹, HOKYOO JO¹, YOUNGUAN JUNG²

¹Research & Development Division, Hyundai Engineering & Construction Co.,Ltd., 102-4, Mabuk-dong, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, 446-716, Korea

²School of Mechanical Engineering, Kunoh National Institute of Technology, 61 daehak-ro, Gumi, Gyeongbuk, 730-701, Korea

Abstract >> Despite the high efficiency and eco-friendly of Household Fuel Cell System it has hardly obtained popularity mainly due to its high prices. In order to encourage use of the system prices and operational expenses need to become economical. In this study, optimization through simulation was conducted to find out the optimal operational condition. As a result of simulation the system is operated with DSS operation from 5 O'clock to 19 O'clock for 14 hours at the constant output of 0.4kW to maximize reduction of energy rate. this DSS operation condition can reduce 200,000 won of energy rates in 35 pyoung apartment for a year. And, we can know that starting time of DSS operation don't effect to energy rates through the simulation. Furthermore, the household fuel cell system with the rated output of 1kW should be reduced to 0.4 - 0.6kW which can promote installation of household Fuel Cell System. Now, the household fuel cell system don't have been used widely due to economical efficiency. but, in the near future, Fuel Cell will be used to household by decrease of LNG price caused by development of shale gas.

Key words : household Fuel Cell system(가정용 연료전지 시스템), load following(부하추종), supply and demand (수급), operating optimization(운전 최적화)

Nomenclature

FC : Fuel Cell
Energy rate : power + gas rate
 P_G : Grid Power
 P_F : Generated Power by FC
 H_F : Generated Heat By FC
 H_B : Generated Heat by Boiler

P_C : Power Consumption
 H_C : Heat Consumption
 P_S : Surplus Power
 H_S : Surplus Heat

Subscripts

G : Grid
F : Fuel Cell
B : Boiler
C : Consumption
S : Surplus

[†]Corresponding author : 1200795@hdec.co.kr

[접수일 : 2012.10.04 수정일 : 2012.12.24 게재확정일 : 2012.12.31]

Copyright © 2012 KHNES

1. 서 론

CO₂로 인한 지구온난화의 심각성이 대두되는 가운데 청정성이 뛰어난 차세대 화학발전기관의 적용으로 연료전지가 각광 받고 있다. 하지만, 연료전지의 연료인 수소는 생산, 저장¹⁾에 필요한 인프라 미비에 따른 공급이 문제점으로 거론되고 있다. 이러한 문제점을 해결하고 연료전지의 보급을 통한 CO₂ 절감 목적을 달성하기 위해, 구축된 인프라망을 통해 공급되는 도시가스를 이용하는 가정용 연료전지 시스템이 도입되어지고 있다²⁾.

가정용 연료전지 시스템은 초기 설치비용이 비싸지만, 누진세가 적용되는 경우 전기요금 절감으로 초기 투자금을 회수 할 수 있다. 전기료의 보다 많은 절감이 가능하다면 투자회수 기간이 짧아져 가격경쟁력 확보를 통한 빠른 확대 보급이 가능해 진다. 이를 이루기 위해서는 가정용 연료전지 시스템의 기기효율 향상과 함께 적절한 운전 제어를 통해 요금 절감률을 높여야한다¹⁾.

본 연구에서는 전기세의 보다 많은 절감을 이룰 수 있는 운전방법을 시뮬레이션을 통해 검토하여 보았다. 운전 방법으로는 부하추종운전, DSS(Daily Start & Stop)운전, Base 부하 운전을 적용하였다. 부하추종운전은 연료전지가 전력부하에 추종하게 설정하고, 이때의 가스사용량 및 계통전원 사용량을 산출하였다. DSS 운전은 연료전지의 운전시작 시간, 운전 시간, 부하 크기의 변화에 따라, Base 부하 운전은 연료전지의 출력 크기에 따라 사용되어 지는 가스량, 계통전원사용량을 계산하였다. 계산 결과로부터 가스 및 전력 요금을 산출하여, 운전 방법에 따른 연간 전기요금 절감을 비교하였다.

2. 시뮬레이션 방법

2.1 시뮬레이션 모델

Fig. 1은 연료전지가 적용된 가정에서의 에너지 흐름을 보여 준다. 그림과 같이 시스템의 input은 도

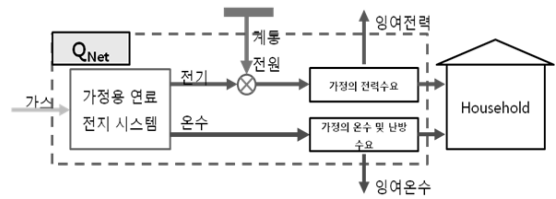


Fig. 1 Energy Flow of household Fuel Cell system

시가스 및 계통전원이고 output은 전력수요, 잉여전력, 온수수요, 잉여온수로 설정하였다.

2.2 시뮬레이션 모델링

연료전지의 운전 시뮬레이션을 위해 수학적 모델링을 구축하였다. 가정용 연료전지 시스템의 input, output을 고려하여 Fig. 2와 같이 모델링을 하였다. 수학적 모델링의 구축 과정은 다음과 같다.

$$Q_{in} - Q_{out} = Q_{Net}$$

$$= P_G + P_F + H_F + H_B - P_C - H_C - P_S - H_S$$

Q_{Net} 에 에너지보존법칙을 적용하면,

$$Q_{in} - Q_{out} = Q_{Net} = 0$$

$$P_G + P_F = P_S + P_C \tag{1}$$

$$H_F + H_B = H_C + H_S \tag{2}$$

시뮬레이션에서는 식 (1), (2)를 사용하여 전력 및 온수 사용량을 계산하였으며, 이 결과를 이용하여 가

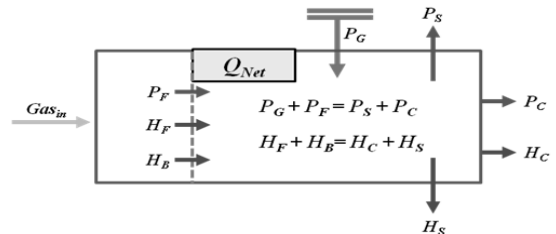


Fig. 2 Simulation model

스량 및 계통전원의 사용량을 산출하였다. 계산을 위한 각 변수의 값은 시뮬레이션 조건 설정으로부터 결정하였다.

2.3 시뮬레이션 설정 및 알고리즘

시뮬레이션의 설정 조건은 일반적으로 알려진 가정용 연료전지 시스템의 성능을 참조하여 적용하였다. 온수 및 전력의 연계, 부하추종에는 다계층 모형 또는 선형혼합 모형을 이용하였다^{3,4)}. 시뮬레이션에 적용한 시스템 사양, 설정 조건은 아래와 같고, 알고리즘은 Fig.3과 Fig.4와 같다.

- (1) 시뮬레이션 대상 : 35평 아파트
- (2) 연료전지 시스템
 - 연료전지 최대출력 : 1kW
 - 연료전지 발전효율 : 35%
 - 연료전지 열효율 : 45%
 - 보조보일러 열효율 : 80%
 - 온수탱크 용량 : 150L
- (3) 운전 방법
 - 부하추종운전 : 가정의 전력수요에 따라 부하추종운전(최대 1kW, 1kW 이상의 전력수요에 대해선 계통 전원사용)
 - DSS 운전 : 가정의 전력 및 온수의 사용량 증가 시기가 오전 5시인 것을 고려하여 운전시작 시간을 5~7시로, 운전시간을 5~14시간으로 설정, 운전시의 연료전지는 0.2~1kW로 일정하게 발전 출력
 - Base 부하 운전 : 24시간 운전, 운전시의 연료전지 발전출력은 0.2~1Kw로 일정
- (4) 전력 연계
 - Power Consumption(P_C) : 35평 아파트의 1연간 전력수요 실데이터를 사용
 - Generated Power by FC(P_F) : P_C 에 대해 우선적으로 P_F 가 공급 됨
 - Grid Power(P_G) : P_C 에 대해 P_F 의 공급량이 부족할 시 P_G 가 공급 됨
 - Surplus Power(P_S) : P_C 에 대해 P_F 의 공급량이 과잉 할 때 P_S 발생

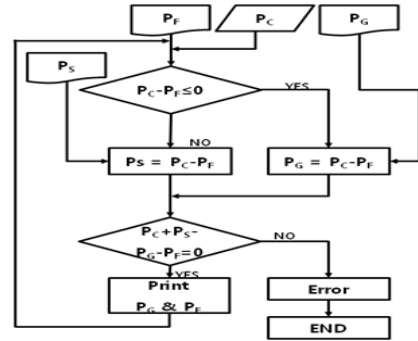


Fig. 3 Algorithm of power system interconnecting

- 전력 연계 알고리즘 : Fig. 3
- (5) 온수 수급
 - Heat Consumption(H_C) : 35평 아파트의 1연간 온수수요 실데이터를 사용
 - 온수 저장탱크 초기설정 : 60°C의 물 150L가 들어 있음
 - 온수용 공급 수도의 온도 : 15°C
 - Generated Heat by FC(H_F) : H_F 발생량은 P_F 에 의존($H_F = aP_F$, a는 변환상수)
 - Generated Heat by Boiler(H_B) : $H_F - H_C < 0 \rightarrow H_B$ 공급
 - Surplus Heat(H_S) : H_C 에 대해 H_F 의 공급량이 과잉일 때 P_S 발생
 - 온수 수급 알고리즘 : Fig. 4
- (6) 요금계산
 - 전기요금 : 고압 가정용 전기 요금(누진세 적용)

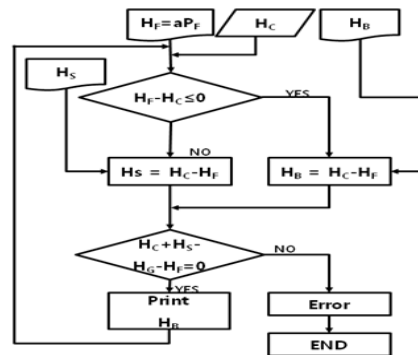


Fig. 4 Algorithm of hot water interconnecting

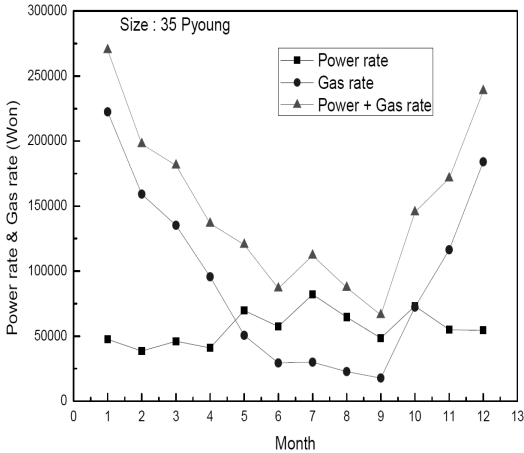


Fig. 5 Power & Gas rate of 35pyoung apartment for 1 year

(^{12.06 기준})

- 도시가스 요금 : 874.12원/m³(^{12.06기준})
- 전기요금 산출 : 적산된 P_G 로부터 누진세를 적용하여 월간 전기요금 계산
- 가스요금 산출 : 적산된 $P_F + H_B$ 로 부터 월간 가스요금 계산

3. 시뮬레이션 결과

3.1 연료전지 도입전, 가스 및 전기 요금

Fig. 5는 35평 아파트의 연간 전기 및 가스 요금을 나타낸다. 전기요금은 여름철 냉방 수요의 증가로 6~8월이 가장 높지만 연간 편차가 심하지는 않다. 가스 수요는 12~1월이 가장 많으며, 바닥 난방이 대부분인 한국의 여건상 여름철과의 편차가 심하다. 또, 에너지요금의 월간 추이는 전기요금에 비해 가스요금이 상대적으로 많기 때문에 전기요금이 미치는 영향은 적어, 대체적으로 가스요금의 연간 추이와 유사하다. 35평의 연간 요금은 약 180만원이다.

3.2 가정용 연료전지 시스템 도입 전과 후의 에너지 요금 비교

Fig. 6, Fig. 7은 35평 아파트의 가정용 연료전지

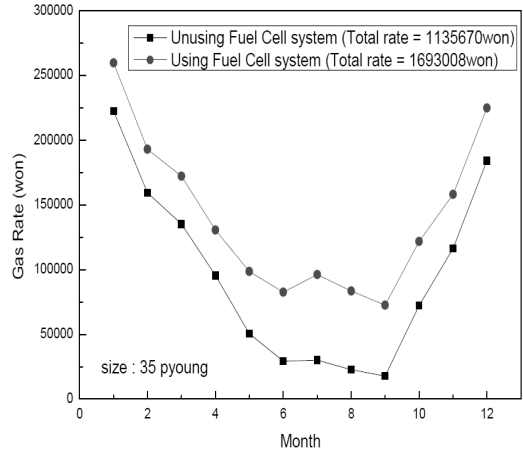


Fig. 6 Comparison of energy rate before and after applying Fuel Cell system to household

시스템 도입전과 후의 월간 전기 및 가스 요금을 나타내고 있다. 연료전지의 운전은 가정의 부하에 추종하게 설정하였다. 그림과 같이 연료전지 시스템의 도입에 의해 35평 아파트에서는 약 11만원을 절감할 수 있다. 연료전지 시스템은 누진세가 부가되는 전기 요금을 줄이고 누진세가 없는 가스를 사용하여 전체 요금을 줄이는 역할을 한다. 따라서 연료전지의 적용에 의해 전기요금은 감소하고 가스요금은 증가한다. 에너지요금은 가스 요금의 증가 보다 전기요금의 절

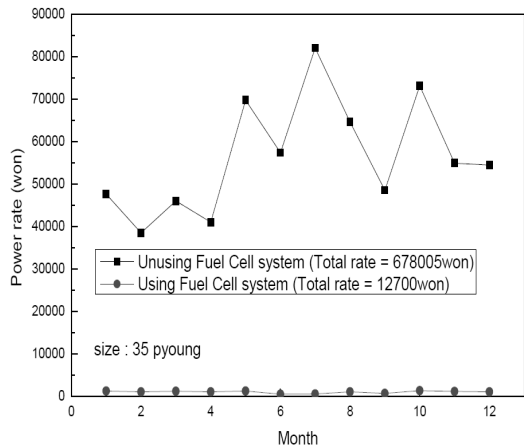


Fig. 7 Comparison of Power rate before and after applying Fuel Cell system to household

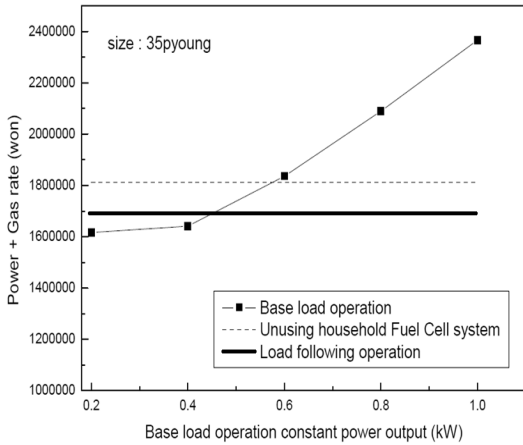


Fig. 8 Comparison of energy rate by Fuel Cell's output power in a year (base load operating) (35pyoung)

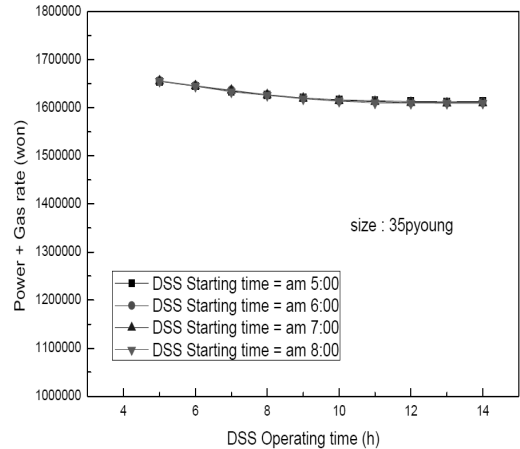


Fig. 9 Variation of energy rate by operating & starting time in household Fuel Cell system (Fuel Cell output = 0.4kW)

감 금액이 더 많아 감소한다.

연료전지 시스템의 적용에 따른 절감 효과를 높일 수 있는 방법으로 운전 방법의 설정을 들 수 있다. 부하추종운전, Base 부하운전, 그리고 대표적인 가정용 연료전지 운전방법인 DSS(Daily Start & Stop) 운전 에 따른 전기 및 가스요금을 시뮬레이션을 통해 산출하여, 요금 절감이 가장 큰 운전 방법을 정량적으로 검토하였다.

3.3 가정용 연료전지 시스템의 운전방법에 따른 에너지 요금 비교

가정용 연료전지의 운전 방법에 따른 전기 및 가스요금을 시뮬레이션을 통해 산출하였다. 운전방법으로는 부하추종운전, Base 부하운전, DSS 운전을 적용하였다. 그림 Fig. 8은 35평 아파트에서 가정용 연료전지 시스템의 부하추종운전 및 Base 운전 에 따른 에너지 요금의 연간 변화를 나타내고 있다. 35평 아파트에서는 0.2kW로 Base 부하 운전하였을 때 연간 에너지요금이 1,616,228원으로 가장 낮았다. 이는 35평에서 0.2kW로 base 부하 운전할 때, 연료전지로부터 공급 되는 에너지(전기+온수)의 사용률이 상대적으로 높기(과잉 되는 에너지의 양이 적어) 때문이다. 하지만, Base 부하운전의 연료전지 출력이 0.4kW

이상으로 커질 경우, 전기세의 절감 폭보다 가스 요금의 증가 폭이 더 커져 요금 절감률이 감소하였다. 또, 0.6kW이상으로 Base 부하 운전을 할 경우, 오히려 가정용 연료전지를 적용하기 전보다 에너지요금이 증가 하였다. 이는 수급의 불일치로 버리게 되는 에너지가 많아 전기요금 절감보다 가스요금 증가 폭이 증가하기 때문이다.

Fig. 9은 DSS운전의 운전시작시간 및 운전시간에 따른 에너지요금 변화를 나타내고 있다. 그림과 같이 운전시작시간에 의한 요금 변화는 변화율 ±0.5% 이내로 거의 같다. 또, 연료전지의 출력이 달라도 거의 동일하였다. 이는 운전 시작시간 보다 운전지속 시간이 요금 변화에 더 큰 영향을 미침을 나타낸다. 이하의 DSS운전 결과는 간소화를 위해 시작시간이 5시 일 때를 나타내었다.

Fig. 10은 35평 아파트에서 DSS의 운전지속 시간, 운전시의 연료전지 출력에 따른 연간 요금 변화를 나타낸다. 0.4kW로 운전할 때가 가장 요금이 낮았으며, 13시간 연속운전 할 때의 1,612,465원이 최소 요금이 었다. base 부하 운전과 비교하여 0.2kW보다 0.4kW에서 에너지요금 절감률이 더 높은 것은 연료전지의 출력이 보다 크기 때문에 온수 수급의 불일치로 인해 과잉 되는 열량이 많아 효율은 떨어지지만, 누진

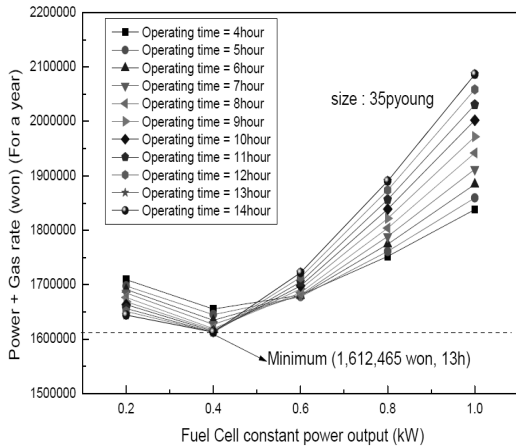


Fig. 10 Variation of energy rate by operating time & Fuel Cell output power in a year

세가 적용되는 전기 요금의 절감 폭이 가스요금의 상승 폭 보다 더 커지기 때문이다. 이 결과로부터 DSS 운전에서는 운전지속시간의 조절로 에너지 요금을 최대 절감 할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

가정용 연료전지는 누진세가 적용되지 않는 도시 가스를 이용하여 누진세가 적용되는 전기요금을 절감 한다. 절감 폭은 연료전지의 운전 방법에 따라 달라 질 수 있다. 본 연구에서는 이러한 점에 착안하여 가정용 연료전지의 운전방법에 따른 전기 및 가스요금의 변화를 시뮬레이션을 통하여 산출하였다. 또한, 산출결과를 분석하여 요금절감 폭이 가장 큰 운전방법을 검토하였다. 그 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) Base 부하 운전의 경우 연료전지의 출력을 0.2kW로 운전하는 것이 에너지 요금을 가장 많이 절감 할 수 있었다.
- 2) DSS운전의 경우 운전 시작시간이 에너지요금에 미치는 영향은 미비하였으며, 하루 중 0.4kW로

13시간 연속운전 할 때 에너지 요금을 가장 많이 절감 할 수 있다.

- 3) 부하운전, Base운전, DSS운전 중, 0.4kW로 하루 중 13시간 DSS 운전 할 때 에너지 요금을 최대 절감 할 수 있었으며, 절감금액은 연간 약20만원 이다.

이상의 결과들로부터, 현재 가정용연료전지 시스템에 적용 되고 있는 정격출력 1kW PEFC는 소비자에게 가장 중요한 요소인 요금 절감 효과가 미비하고 오히려 시스템 가격상승으로 인한 부담으로 작용 할 가능성이 높다는 것을 유추 할 수 있다. 시뮬레이션 결과에서 연료전지의 발전 출력이 0.4kW 일때 연료전지 시스템의 이용률 및 요금 절감 효과가 최대 로 나타난다. 따라서 가정용 연료전지의 가격경쟁력 확보를 통한 확대 보급을 위해서는 연료전지의 정격 출력 용량을 기존 1kW 에서 0.4~0.6kW 정도로 낮추 어 시스템의 가격을 저감할 필요가 있다고 생각된다.

참 고 문 헌

1. Y. G. Jung, S. U. Kim, K. H. Kim, S. D. Choi, T. I. Jang, C. M. Hwang, "A Study on the Hydrogen Supply for Variation in Output from a Metal Hydride Canister", The Korea Hydrogen & New Energy Society, Vol. 20, No. 3, 2009, pp. 218-223.
2. S. Muraki, "Residential Fuel Cell, FUEL - Challenges and Expectations for It's Promotion", FC EXPO Keynote Session, 2006, pp. 51-63.
3. H. S. Ryu, and S. D. Kim, "An Analysis on the Optimal Operation and Economic Feasibility of Household FuelCell system for Climate Change", Korea energy Economic Review, Vol. 10, No. 1, 2011, pp. 25-48.
4. C. G. Moon, S. D. Kim, "An Application of the Multilevel Model = Estimation and Prediction of the Heat Load Profile Using Weather and Heating/Cooling Data", Environmental and Resource Economics Review, Vol. 16, No. 4, 2007, pp. 803-832.