

주택면적의 변화에 따른 가정용 초소형 연료전지 코제너레이션 시스템의 경제성 분석에 관한 연구

*노 철우¹⁾, 김 민수²⁾

A Study on the Economic Evaluation with Super-Micro Fuel Cell Home Cogeneration System by Varying the Floor Area of House

*ChulWoo Roh, MinSoo Kim

Key words : Cogeneration System(열병합발전 시스템), Economic Evaluation(경제성 분석), Economic Assessment(경제성 평가), Fuel Cell(연료전지), PEMFC(고분자전해질연료전지), Residential Building(주택)

Abstract : The fuel cell system is environment-friendly and energy efficient system. Especially, the fuel cell cogeneration systems providing heat and electricity to buildings have been developed and applied to a lot of sites in the world to cope with the global warming and CO₂ emission problem. This paper presents the result of study on the economic evaluation with super-micro fuel cell (SMFC) cogeneration system by varying the floor area (132 m² ~ 331 m²) of the house, whose system capacity ranges from 0.10 kWe to 0.50 kWe. The electricity demand, heat demand, saved energy cost, and the simple pay-back period have been simulated for the various capacities of fuel cell cogeneration system. As a result, this study suggests the fuel cell system's capacity decision strategy for a given house area. Contrary to conventional design assumptions, the smaller capacity fuel cell cogeneration system is appropriate for the house of large floor area to defense the progressive electricity tax, and the larger capacity fuel cell cogeneration system is appropriate for the house of small floor area to sell the electricity.

Nomenclature

Q_{EX} : 연료전지의 생성 열 에너지 (kJ/h)
 F_{H_2} : 스택 공급 수소량 (Nm³/h)
 U_F : 연료이용률 (%)
 H_{H_2} : 수소의 반응열 (kJ/kmol)
 G_{H_2} : 자유에너지 (kJ/kmol)
 V : 운전전압 (V)
 V_0 : 이론전압 (V)
 n : 회수기간 (년)
 F_0 : 투자에 드는 초기비용 (원)
 F_t : t시점에서의 순현금흐름 (원)

어져 있다. 특히 미국 및 일본의 경우, 약 30,000 시간 이상의 운전내구성을 확보함과 동시에 1.00 kWe 당 1,000 만 원 이하로 기기단가를 낮추기 위한 노력이 지속적으로 진행되고 있다. 이러한 세계적 연구 동향에 맞춰, 국내에서도 시스템 효율을 높이기 위한 시스템 자체에 대한 연구 및 상용화를 위한 시장 공략이 전략적으로 활발히 이루어지고 있다.

집단 에너지 사업 및 분산 발전 등에 적용되는 10 kWe 이하의 소규모 분산 발전 시스템은 기존의 내연기관이나 마이크로 가스터빈 등을 채용하여 전력을 생산하나, 전기 효율은 30% 이상을 기대할 수 없다. 그러나 고분자 전해질 연료전지의 경우, 25% 이상, 최대 52%의 전기 효율을 기

1. 서론

가정용 연료전지 열병합 시스템 연구의 세계적인 흐름은 효율, 내구성, 단가에 초점이 맞추

-
- 1) 서울대학교 기계항공공학부 대학원
E-mail : keiyas11@snu.ac.kr
Tel : (02)880-1648 Fax : (02)873-2178
 - 2) 서울대학교 기계항공공학부
E-mail : minskim@snu.ac.kr
Tel : (02)880-8362 Fax : (02)873-2178

대할 수 있으며, 폐열 회수를 고려하여 설계할 경우 80% 이상의 열효율을 달성할 수 있다.¹⁾

본 연구에서는 최근 고분자 전해질 연료전지(PEMFC) 1.00 kW에 급을 중심으로 연구되고 있는 가정용 코제너레이션 시스템의 연구추세에 맞춰, 초소형규모(0.50 kW 이하)의 PEMFC를 이용한 가정용 코제너레이션 시스템을 주택면적의 변화에 따라 시뮬레이션하여 경제성을 평가하였다. 이를 위하여 우리나라 주택 면적에 따른 전력 및 열수요 데이터를 바탕으로 연료전지 열병합 시스템을 주택 내 설치 시, 주택 내 거주자가 얻을 수 있는 실질적인 경제적 효과를 에너지 비용의 절감액과 함께 단순투자회수기간법(Simple pay-back period method)으로 제시하였다.

2. 시스템 모델링

2.1 코제너레이션 시스템 구성

본 연구에서는 PEMFC를 사용한 초소형 연료전지 가정용 열병합 시스템을 제안하였다. ‘초소형’의 의미는 연료전지의 용량면에서 의미를 갖는다. 즉, 현재 상용화를 앞둔 1.00 kW 연료전지 시스템 용량보다 작은 용량(0.10 kW 이상 ~ 0.50 kW 미만)의 연료전지 코제너레이션 시스템을 지칭하기로 한다.

주택 내 전력수요의 경우, 연료전지 코제너레이션 시스템을 통해 기저전력을 상시 충족시키고, 기존 전력설비를 연계하여 부족분을 수전으로 공급받음으로써, 연료전지에서 발생하는 전력만으로는 부족한 주택 내 전력수요가 충족된다. 특히 연료전지 출력을 일정하게 유지하는 본 연구는 연료전지 출력을 빈번히 조정함에 따라 발생하는 내구성 침하를 최소화 한다.

주택 내 열수요의 경우, 주택 면적에 비례하여 설치되는 기존 가스보일러 등을 그대로 유지한 채 연료전지로부터 회수되는 열에너지를 직접 급탕 및 난방으로 충족시키거나, 저탕조를 설치하여 열수요와 열생산의 시간차를 극복하고 열에너지의 효율적 이용을 꾀할 수 있도록 하였다.

2.1.1 연료전지 성능

연료전지 스택의 전극면적은 100 cm²이며 연료전지 스택의 작동조건은 대기압에서 65 °C로 작동하는 것을 기준으로 하였다. 연료전지 스택의 발생열은 다음과 같이 계산된다.

$$Q_{EX} = F_{H_2} \times U_F \times (-\Delta H_{H_2} + \Delta G_{H_2} \times \frac{V}{V_0}) \quad (1)$$

PEMFC 연료전지에서 연료로 이용되는 수소의 양은 시스템 용량에 비례하여 증가하는 경향이 있으나, 일부 구간에서는 Fig. 1와 같이 시스템 용량 증가에 비례하지 않고, 수소 사용량이 잠시 정체되는 계단 현상이 예측된다. 그 이유로는 연료 사용량이 스택 내 cell) 적층 개수에 영향을 받기 때문으로 추측된다.

2.1.2 전력변환기

전력 변환기의 경우 DC/DC 컨버터 및 DC/AC 인버터의 통합 효율을 고려해야 하며, 이에 따른 최

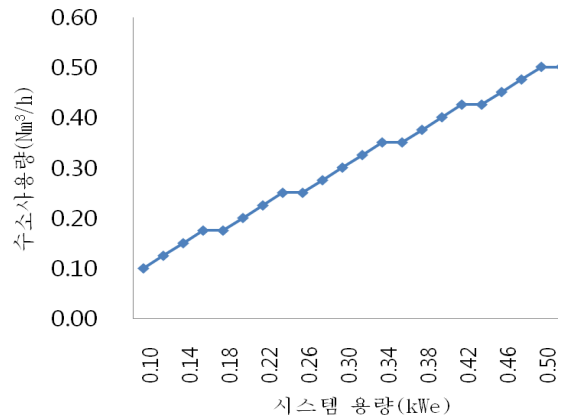


Fig. 1 Hydrogen consumption rate of fuel cell for varying the capacity of the system

근의 실험 데이터로는 500~900 W 범위에서 85%에서 90%로 상대적으로 높으며, 나머지 영역에서는 80~85% 수준이나¹⁾, 본 연구에서는 전력변환기의 통합효율을 90%로 상정하였다.

2.1.3 주변운전장치 (BOP)

주변운전장치, 즉 연료전지 스택의 원활한 구동을 위해 필요한 냉각수 순환 및 온도 제어 장치, 공기와 연료 공급 장치에 소요되는 전력량을 상정할 필요가 있다. 본 연구에서는 공기 블로워, 도시가스 블로워, 냉각수 펌프에 대한 총소비전력을 최종 출력단에서 얻고자 하는 시스템 용량의 20%에 달하는 전력량으로 상정하였다.

2.1.4 개질기 효율

도시가스를 개질하여 수소를 얻는 개질 시스템은 크게 수증기개질(Steam Reforming, SR), 전이반응(Water-Gas Shift Reaction, WGSR), 선택산화반응(PROX)의 3단계 반응이 주류를 이루고 있다. 본 연구에서는 현재 상용되는 도시가스 기반 가정용 연료전지 시스템 1 kW급 개질기의 개질율인 95%를 시뮬레이션에 적용하였다.

2.2 주택 면적

본 연구에서는 주택면적의 변화에 따른 단일 시스템 용량에서의 경제성을 판단하기 위하여 다음과 같이 주택면적을 7 단계로 변화시켜가며 시뮬레이션을 수행하였다.

- ◆ Case 1: 132 ~ 165 m²
- ◆ Case 2: 165 ~ 198 m²
- ◆ Case 3: 198 ~ 231 m²
- ◆ Case 4: 231 ~ 264 m²
- ◆ Case 5: 264 ~ 297 m²
- ◆ Case 6: 297 ~ 331 m²
- ◆ Case 7: 331 m² 이상

시스템이 설치되는 주택의 바닥면적은 전력 및 열수요에 큰 영향을 주는 요소로서, 코제너레이션 시스템의 경제성을 좌우하는 에너지 요구량의 기본적 척도이다.

2.3 계통연계비용

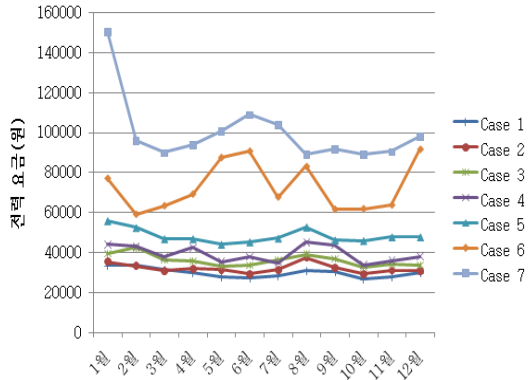


Fig. 2 Monthly changes of electricity cost for varying the floor area of residential house.

계통연계비용은 최근 시공된 여러 신재생에너지 발전 시스템 및 집단 에너지 사업의 평균 계통연계비용인 총 시스템 설치비용의 5%로 설정하였다.

3. 해 석

3.1 에너지 비용의 해석

지역난방공사에서 정기적으로 공개하는 주택면적 별 전력 및 열수요 데이터를 바탕으로, 연료전지 코제너레이션 시스템이 설치되지 않은 주택의 연간 에너지 비용을 계산하였다.²⁾ 전력은 주택용 저압요금제로 계산하였고,³⁾ 난방 및 급탕에 필요한 열수요는 매일 시간당 소요열량을 도시가스의 저위발열량으로 환산하였다.⁴⁾

가정용 연료전지 시스템은 비교적 소규모이고, 설치사례가 방대하지 않으므로, 아직 신재생에너지 발전전력의 기준단가가 상세히 규정되어 있지 않다.⁶⁾ 그러나 향후 지구온난화의 가중과 이산화탄소 저감을 위한 세계적 추세, 그리고 이에 따른 가정용 연료전지 시장 확대를 위한 정부의 지원이 시스템 편익부담금 제도, 요금상계제도, 그린가격제도 등을 통해 확대될 것을 기대하여, 본 연구에서는 현재 30 kWe 급 이상의 태양광발전 발전전력 기준단가로 규정된 677.38 원/kWh 을 잉여전력의 기준단가로 적용하였다.

3.2 코제너레이션 시스템 효과 해석

초소형 연료전지 코제너레이션 시스템 도입으로 인하여, 주택 내 기저전력을 공급할 수 있게 됨에 따라 발생하는 전력요금의 감소분과 가스요금의 상승분을 계산하였다. 특히, 연료전지 시스템의 용량을 증가시켜감에 따라 발생하는 일부 새벽 시간의 잉여전력량은 수전 전력망에 되파는 방식으로 주택 내 사용자의 이익을 극대화하였다.

이를 바탕으로 본 연구에서 계산되는, 매년 주택 내 사용자의 에너지 비용 이익분은 다음과 같다.

$$\text{에너지비용 이익분} = [\text{전기요금 감소분}] + [\text{잉여전력 판매분}] - [\text{가스요금 상승분}] \quad (2)$$

3.3 코제너레이션 시스템의 단가 설정

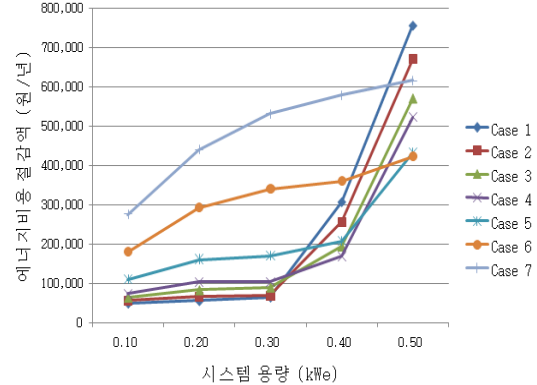


Fig. 3 Saved energy cost for varying the floor area of residential house

상용 1 kWe 급 연료전지 열병합 시스템의 경우, 세계적인 목표가격은 5,000,000 원 가량으로 상정되며, 이를 바탕으로 0.10 kWe 급 초소형 연료전지 열병합 시스템의 경우, 단순비례산정방법(Presumption of simple proportional method)으로 시스템 용량변화에 따른 단가를 산정, 단순투자회수기간법(Simple pay-back period method)을 적용하였다. 본 연구에서는 다음의 식에 의거하여 단순투자회수기간을 산출하였다.⁵⁾

$$\sum_{i=0}^n F_n \geq 0. \quad [\text{Year}] \quad (3)$$

4. 결과 및 고찰

4.1 연간 전력요금 변화추이

Fig. 2 는 지역난방공사에서 정기적으로 제공하는 주택면적별 전력사용량을²⁾ 가정용 저압 전력요금에 기준하여, 연료전지 코제너레이션 시스템 도입 전의 주택면적 별 연간 전력요금 변화 추이를 나타낸 것이다. 주택면적이 297 m² 을 넘어 삼에 따라 전력요금이 급격히 상승하며, 이는 전기요금의 누진제에 따른 영향으로 보인다. 특히 여름철 냉방과 겨울철 조명 및 전열을 위한 전력사용량 증가는 대형면적의 전력요금을 크게 상승시킨다.

4.2 에너지 비용 절감분

Fig. 3 은 연료전지 코제너레이션 시스템 도입에 따른 주택면적 별 연간 에너지비용 절감분을 시스템의 용량에 따라 나타낸 것이다.

연료전지 코제너레이션 시스템 용량이 증가할수록 상대적으로 작은 면적의 주택에서의 경제성이 대형 면적의 주택의 그것보다 높아짐을 알 수 있다. 이는 소규모 평형대에서 발생하는 일부 새벽 시간대의 잉여전력을 전력망에 되파는 이익이 주요하기 때문이다. 반면, 잉여전력의 역매(逆賣)가 없는 상대적으로 작은 용량의 코제너레이션 시스템의 경우, 대형면적의 주택에서 경제성이 크게 나타났다.

4.3 단순투자회수기간법

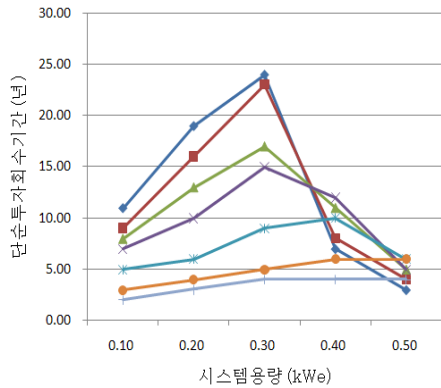


Fig. 4 Simple pay-back period of fuel cell cogeneration system for varying the floor area.

Fig. 4는 단순투자회수기간법을 이용, 연료전지 코제너레이션 시스템의 용량증가에 따른 투자비상승을 고려하여 경제성 변화를 분석한 것이다. 시스템용량이 커짐에 따라 투자회수기간이 일종의 수렴현상을 보이는 것을 알 수 있다. 이는 연료전지 코제너레이션 시스템의 용량이 0.40 kWe 급을 초과함에 따라 발생하는 잉여전력의 역매(逆賣)로 인한 이익이 전체 이익분에 크게 영향을 미치기 시작하기 때문이다.

0.40 kWe 급 이상의 시스템 용량에서는 상대적으로 작은 면적의 주택이 상대적으로 대형면적의 주택보다 높은 경제성이 실현되며, 0.40 kWe 급 미만의 시스템 용량에서는 대형면적의 주택이 소형면적의 주택보다 높은 경제성이 실현될 수 있을 것으로 판단한다.

5. 결 론

본 연구에서는 주택면적의 변화에 따른 가정용 초소형 연료전지 코제너레이션 시스템의 용량 별 경제성에 관하여 논하였다. 기존의 '대형면적의 주택에는 대형 용량의 시스템을 설치하고, 소형면적의 주택에는 소형 용량의 시스템을 설치' 하는 설계 통념과는 달리, 가정의 기저부하를 공급하는 초소형 연료전지 시스템의 경우, '대형면적의 주택에는 소형 용량의 시스템을 설치하여 누진제를 효과적으로 방어하고, 소형면적의 주택에는 대형 용량의 시스템을 설치하여 역매를 통한 이익을 창출토록' 하는 것이 더욱 효과적인 경제성 확보를 가능케 할 것으로 판단된다.

향후 주택용 고압전력에 기준한 경제성 분석과 함께, 최근 건설계의 화두인 주상복합아파트 내 연료전지 코제너레이션 시스템의 효율적인 전력 및 열수요 분배 전략과 이에 따른 경제성 영향을 분석할 예정이다.

후 기

본 연구는 차세대 연료전지 통합시스템의 지능형 운전 및 열관리 기술 개발을 위한 국가지정연구실(NRL)사업 및 마이크로열시스템연구센터의

지원으로 진행되었습니다.

References

- [1] Kong, N. W., Um, S. K., Yu, S. P., Kim, M. J., Lee, J. H., Lee W. Y., 2006, "Integrated simulation study of a residential PEFC-based cogeneration system using backward energy flow management schemes", Proceeding of the KSME Spring Annual Meeting, pp. 1728-1733.
- [2] Lee, J. S., Kim, J. Y., 2006, "A development of the software to estimate of economics for combined heat and power generation systems in apartment estates", Proceeding of the SAREK Summer Annual Meeting, pp. 90-94.
- [3] 한국전력, www.kepco.co.kr
- [4] 한국물가정보, www.kpi.or.kr
- [5] Thuesen, G. J., Fabrycky, W. J., 2006, "Engineering economy", ninth edition, Pearson Education
- [6] 산업자원부고시 제2006-89호, 2006, 신재생에너지이용 발전전력의 기준가격 지침