[2008-06-FC-005]

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

노철우*, 김민수

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

ChulWoo Roh* and MinSoo Kim

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 CO_2 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 m^2 ~ 331 m^2) 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.

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

(접수일 2008. 6. 5, 수정일 2008. 6. 10, 게재확정일 2008. 6. 19)

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원
■ E-mail : keiyas11@snu.ac.kr ■ Tel : (02)880-1648 ■ Fax : (02)873-2178

Nomenclature

Q_{EX} : 연료전지의 생성 열 에너지 (kJ/h)
F_{H_2} : 스택 공급 수소량 (Nm^3/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)

1. 서 론

가정용 연료전지 열병합 시스템 연구의 세계적인 흐름은 효율, 내구성, 단가에 초점이 맞추어져 있다. 특히 미국 및 일본의 경우, 약 40,000 시간 이상의 운전내구성을 확보함과 동시에 1.00kWe 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 10kWe 이하의 소규모 분산 발전 시스템은 기존의 내연기관이나 마이크로 가스터빈 등을 채용하여 전력을 생산하나, 전력생산효율은 30% 이상을 기대할 수 없다. 그러나 고분자 전해질 연료전지의 경우, 25% 이상, 최대 52%의 전력생산효율을 기대할 수 있으며, 폐열 회수를 고려하여 설계할 경우 80% 이상의 열효율을 달성할 수 있다.[1]

본 연구에서는 최근 고분자 전해질 연료전지(PEMFC) 1.00 kWe 급을 중심으로 연구되고 있는 가정용 코제너레이션 시스템의 연구추세에 맞춰, 초소형규모(0.50kWe 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 시스템의 의의

본 연구에서 제안하는 PEMFC에 기반한 초소형 연료전지 열병합 시스템은 연료전지의 용량면에서 의미를 갖는다. 즉, 현재 상용화를 앞둔 1.00kWe 연료전지 시스템 용량보다 작은 용량(0.10kWe 이상 ~ 0.50kWe 미만)의 연료전지 코제너레이션 시스템을 지칭하기로 한다. 이렇듯 작은 용량의 PEMFC는 기존 1.00kWe 용량의 연료전지 열병합 시스템이 우리나라의 고도 전력설비를 제대로 활용하지 못하고, 우리나라의 열 및 전력수요에 대하여 과잉으로 설계(over design)되어 있다고 판단되기 때문이다.

Fig. 1은 우리나라 주택면적 40평형의 가정 내 평균 전력패턴이다. 모든 구간에서 0.5kW 이하를 보이는 이러한 수치는 기존 1kWe 급 연료전지 시스템이 가정 내에서 수분 간 발생하는 피크 전력을 충족시키기 위해 비교적 큰 용량으로 설계된 것을 알 수 있다. 이는 시스템 전체 효율을 높게 유지하기 위해, 연료전지에서 발생하는 배열을 최대한 활용해야 하는 열효율의 정의 특성상, 주택 내 요구되는 열수요의 80~90%를 충족시키기 위한 1kWe 급 용량의 연료전지 시스템이 필요하기 때문이다. 이러한 시스템 용량 설정에 대한 설계적 판단은 현재의 연료전지 관련 기업들로 하여금 용량 설정에 대한 의문을 제시할 여지가 있다.

시스템 용량이 작아지면, 기존에 비하여 간소화된 설계 및

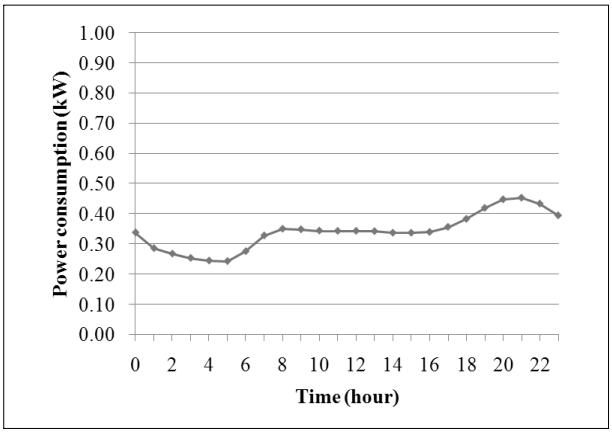

Fig. 1 Average power consumption in the residential house of 40 pyeong.

제품화가 가능하고, 절대적으로 적은 양의 열이 생산되기 때문에 기존 1kWe급 용량의 시스템에서 필요로 하는 250 liter 이상의 저탕조 또한 소형화 시킬 수 있다.

이러한 특성은 주택면적의 활용가치가 크게 인식되는 우리나라의 주택 상황에 합리적이다. 기존 1kWe 급 연료전지 시스템은 전술한 저탕조와 스택 및 BOP 자체 부피로 인해 대형화가 불가피하다. 따라서 시스템 부피를 줄여 가정 내 보일러 수준 혹은 그의 1.5배 수준으로 모든 시스템 구성요소를 간추리는 것은 향후 상용화에 있어 진입장벽을 낮추는 데 무엇보다 절실하다.

이러한 시스템 설계 사고의 새로운 접근은 Fig. 2 에서와 같이 향후 설계관점의 변화를 예고하고 있다. 시스템 설계 및 제작 기술에 대한 일반적 기술 추이가 낮을 때는 시스템을 우선적으로 제작하여 성능을 표준화 시키는 것이 중요하며, 이후 시스템 성능과 기술이 안정화되면 이에 따른 공략 시장을 찾아나서는 것이 일반적이다. 그러나 최근의 시장은 과거와 달리 급변할 뿐만 아니라, 더욱 다양해지고 있기 때문에 1개의 시스템 사양으로 모든 시장과 상황에서, 투자자 혹은 사용자에게 이익을 제공하기가 쉽지 않다. 따라서 우선적으로 시장을 분석하고, 이에 따른 시스템 설계 안을 도출해야 한다.

따라서 본 연구에서는 Fig. 2의 새로운 접근 방식에 따라 우선적으로 가정 내 전력수요와 열 수요를 패터닝(patterning)하여 주택면적의 상대적인 크기에 따른 에너지 비용을 분석한다. 이때 기업은 기존의 에너지 공급 설비로부터 발생하는, 주택 거주자의 에너지 비용을 줄이기 위하여 연료전지 시스템을 최적화해야 한다. 즉, 연료전지 열병합 시스템이 주택에

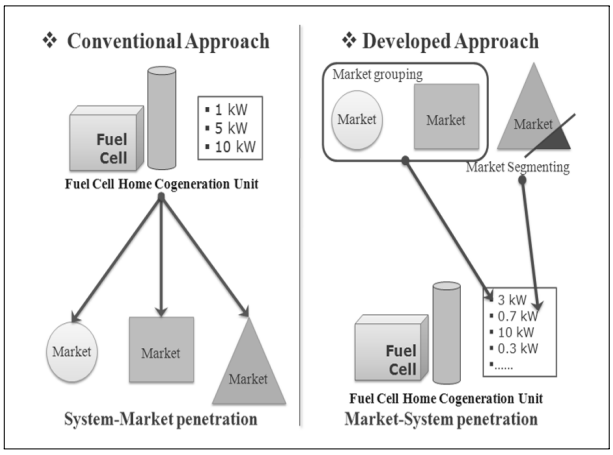

Fig. 2 Penetration type of fuel cell cogeneration unit.

도입되었을 때, 투자자에게 돌아갈 이익의 최대화를 고민해야 한다.

결국 소비자는 자신의 에너지 비용을 최소화하기 위해 연료전지 시스템을 판매하는 기업으로부터 전면적인 에너지 컨설팅을 의뢰받을 수 있다. 이를 통해 기업은 적극적으로 소비자에게 접근할 수 있어 공격적인 마케팅을 펼칠 수 있으며, 한편, 적지 않은 돈을 투자하여 연료전지 설비를 설치하는 투자자에게는 일대일의 맞춤 이익을 기업으로부터 제시받을 수 있게 됨에 따라 투자의 불확실성을 제거할 수 있다.

이러한 선순환적 고리의 핵심에는 주택 내 전력수요와 열수요를 정확하고 세심하게 패터닝(patterning)하는 기술과, 시스템의 전체적 성능 조화를 각 수요처에 맞게 최적화시킬 수 있는 설계 능력이 요구된다.

2.2 코제너레이션 시스템 구성

주택 내 전력수요의 경우, 연료전지 코제너레이션 시스템을 통해 기저전력을 상시 충족시키고, 기존 전력설비를 연계하여 부족분을 수전으로 공급받음으로써, 연료전지에서 발생되는 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.

2.2.1 연료전지 성능

연료전지 스택의 전극면적은 $100cm^2$ 이며 연료전지 스택의 작동조건은 대기압에서 65℃로 작동하는 것을 기준으로 하였다. 연료전지 스택의 발생열은 다음과 같이 계산된다.

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

PEMFC 연료전지에서 연료로 이용되는 수소의 양은 시스템 용량에 비례하여 증가하는 경향이 있으나, 일부 구간에서는 Fig. 3과 같이 시스템 용량 증가에 비례하지 않고, 수소 사용량이 잠시 정체되는 계단 현상이 예측된다. 그 이유로는

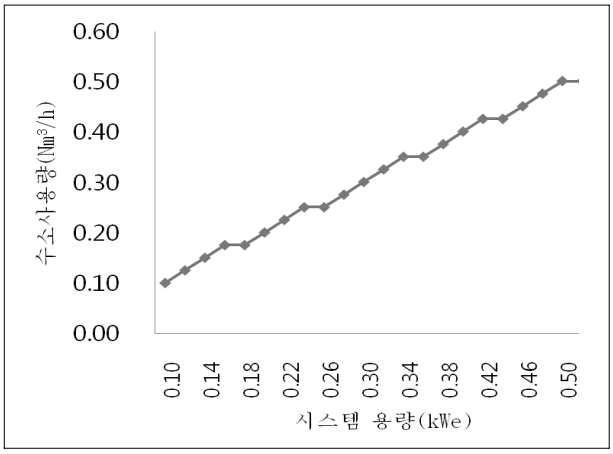

Fig. 3 Hydrogen consumption rate of fuel cell for varying the capacity of the system

연료사용량이 스택 내 셀(cell) 적층 개수에 영향을 받기 때문으로 추측된다.

2.2.2 전력변환기

전력 변환기의 경우 DC/DC 컨버터 및 DC/AC 인버터의 통합 효율을 고려해야 하며, 이에 따른 최근의 실험 데이터로는 500~900W 범위에서 85%에서 90%로 상대적으로 높은 반면, 나머지 영역에서는 80~85% 수준이다.[1] 본 연구에서는 전력변환기의 통합효율을 90%로 상정하였다.

2.2.3 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.

2.2.4 개질기 효율

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

2.3 주택 면적

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

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

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

2.4 계통연계비용

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]

한편, 역매로 인한 이익 창출과 관련하여, 가정용 연료전지 시스템은 비교적 소규모일 뿐만 아니라, 설치사례가 방대하지 않은 관계로, 아직 신재생에너지 발전전력의 기준단가가 상세히 규정되어 있지 않다.[6]

그러나 향후 지구온난화의 가중과 이산화탄소 저감을 위한 세

계적 추세, 그리고 이에 따른 가정용 연료전지 시장 확대를 위한 정부의 지원이, 시스템 편익부담금 제도, 요금상계제도, 그린가격제도 등을 통해 본격화될 것을 기대한다. 따라서, 본 연구에서는 현재 30kWe 급 이상의 태양광발전 발전전력 기준단가로 규정된 677.38원/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

상용 1kWe 급 연료전지 열병합 시스템의 경우, 세계적인 목표가격은 5,000,000 원 가량으로 상정되며, 이를 바탕으로 0.10kWe 급 초소형 연료전지 열병합 시스템의 경우, 단순비례 산정방법(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. 4는 지역난방공사에서 정기적으로 제공하는 주택면적별 전력사용량을[2] 가정용 저압 전력요금에 기준하여, 연료전지 코제너레이션 시스템 도입 전의 주택면적 별 연간 전력요금 변화 추이를 나타낸 것이다. 주택면적이 297m^{2}을 넘어섬에 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. 5는 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

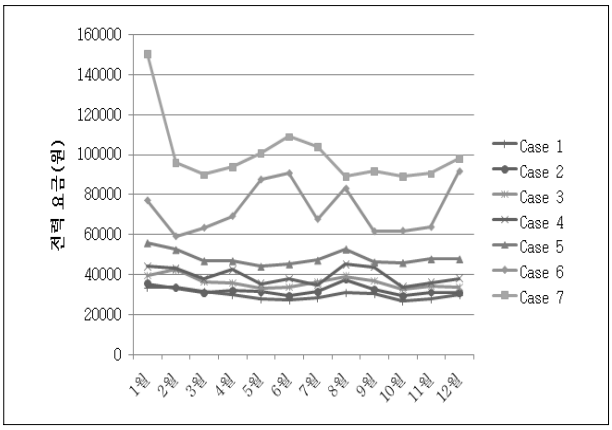

Fig. 4 Monthly changes of electricity cost for varying the floor area of residential house.

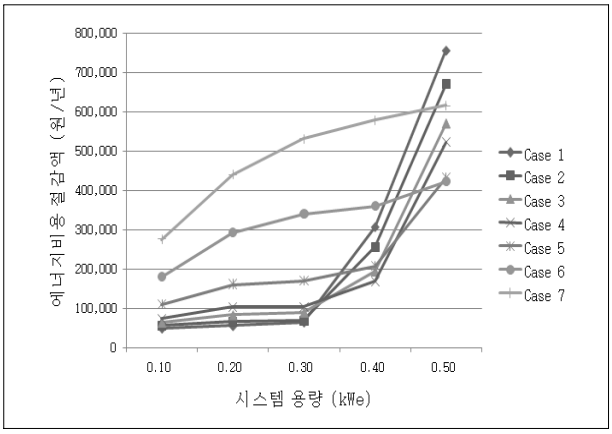

Fig. 5 Saved energy cost for varying the floor area of residential house

그것보다 높아짐을 알 수 있다. 이는 소규모 평형대에서 발생하는 일부 새벽시간대의 잉여전력을 전력망에 되파는 이익이 주효하기 때문이다. 반면, 잉여전력의 역매(逆賣)가 없는 상대적으로 작은 용량의 코제너레이션 시스템의 경우, 대형면적의 주택에서 경제성이 크게 나타났다.

4.3 단순투자회수기간법

Fig. 6은 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 0.40kWe 급을 초과함에 따라 발생하는 잉여전력의 역매(逆賣)로 인한 이익이 전체 이익분에 크게 영향을 미치기 시작하기 때문이다.

0.40kWe 급 이상의 시스템 용량에서는 상대적으로 작은 면적의 주택이 상대적으로 대형면적의 주택보다 높은 경제성이 실현되며, 0.40kWe 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 도심 내 주택 모델로 자리매김한 주상복합아파트 내 연료전지 코제너레이션 시스템 설치에 따른 효율적인 전력 및 열수요 분배 전략 및 이에 따른 경제성 영향을 분석할 예정이다.

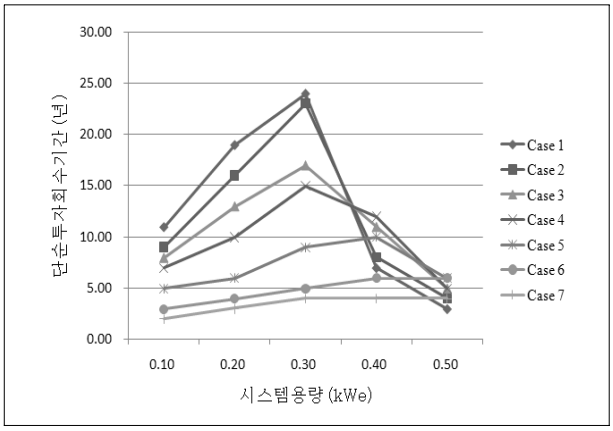

Fig. 6 Simple pay-back period of fuel cell cogeneration system for varying the floor area.

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.

노 철 우

2007년 서울대학교 공과대학 기계항공공학부 공학사
2008년 서울대학교 공과대학 기계항공공학부 공학석사

현재 서울대학교 기계항공공학부 석사연구원
(E-mail : keiyas11@snu.ac.kr)

김 민 수

1985년 서울대학교 공과대학 기계공학과 공학사
1987년 서울대학교 공과대학 기계공학과 공학석사
1991년 서울대학교 공과대학 기계공학과 공학박사

현재 서울대학교 기계항공공학부 교수
(E-mail : minskim@snu.ac.kr)