

기후변화 대응을 위한 가정용 연료전지 시스템의 시간대별 최적화 운전방안 제시와 경제성 평가 및 민감도 분석*

류승현** · 김수덕***

요 약

정부는 기후변화에 대응하고 신재생에너지 산업을 육성할 목적으로 가정용 연료전지의 단기적 보급 목표를 2012년까지 누적 1,000대로 발표하였다. 본 연구에서는 가정용 연료전지의 최적운전방안 및 경제성평가를 수행한다. 분석의 편의상 대표가정을 서울의 난방면적 100m²인 아파트로 전제하고, 국내에서 상용화된 1kW급 가정용 연료전지설비를 기준으로 하였다.

연료전지가 갖는 열병합시스템의 특성을 감안, 시간대별 열, 전기부하를 산출하고, 열추종, 전기추종방식과 이에 따른 복합추종방식을 이용한 시뮬레이션 결과, 복합추종 시 연간 1,110,955원의 변동비가 발생하며 연간 평균이용률은 61.6%로 추정되었다. 또한 연료전지 이용 시 연간 이산화탄소 저감량은 557 kgCO₂/year로 분석되었다. B/C ratio의 결과는 0.44로 경제성이 없는 것으로 분석되었으며, 시스템이 경제성을 확보하기 위한 가격조건을 검토하여 본 결과 할인율 5.5%인 경우 현재 시스템비용의 약 55% 이상의 가격하락이 필요한 것으로 분석되었다.

* 본 논문은 에너지경제연구원의 지원을 받아 「가정상업/발전용 연료전지 최적 모형 개발 및 경제성 분석(2010)」의 일부 내용을 발췌하여 수정·보완한 논문입니다.

** 아주대학교 에너지시스템학부 석박통합과정(주저자). mirang98@naver.com

*** 아주대학교 에너지시스템학부 교수(교신저자). suduk@ajou.ac.kr

주요 단어 : 연료전지, 분산형전원, 수소에너지, 기후변화, 신재생에너지
경제학문헌목록 주제분류 : A10

I. 서 론

기후변화 대응정책과 더불어 화석에너지 고갈 가능성이 제기되면서 정부는 에너지 패러다임을 장기적으로 2040년까지 탄소경제에서 수소경제(Hydrogen Economy)로 전환하려 하고 있다. 이를 위해서는 궁극적으로 수소를 화석에너지를 개질해서 얻지 않고 태양이나 풍력과 같은 신재생에너지 또는 원자력에서 생산된 전기를 이용해 물을 전기분해를 하여 추출할 수 있어야 한다. 하지만 아직까지는 이런 방법을 이용한 수소 추출법은 경제성이 확보되지 않아 현실적으로 불가능한 상황이다. 따라서 과도기적 방편으로 천연가스를 개질하여 수소를 추출하고 이를 이용한 에너지 시스템이 개발되고 있다. 이런 시스템 중 하나로 1kW급 소규모의 가정용 연료전지 시스템이 있는데 이 시스템은 연료변환장치에서 도시가스를 수소로 변환시켜 스택에 공급하게 되고 스택에서 수소와 산소의 화학반응으로 전기를 생산하고 발전과정에서 발생하는 폐열을 회수하여 가정에 난방과 온수를 공급하게 된다. 이런 Micro CHP(Combined Heat and Power)의 특성으로 인해 연료전지 시스템은 주어진 조건에 따라서는 에너지를 고효율로 사용할 수 있고 변동비용을 절감할 수 있어, 천연가스를 개질해야하는 한계에도 불구하고 관심의 대상이 되고 있다. 한편, 에너지 공급 시스템이 가정에서 사용하기 위해서는 저공해, 저소음, 경제성, 설치 편의성, 전기와 열을 공급안정성 등이 만족되어야 한다. 연료전지 시스템은 이런 요건을 만족시킬 뿐만 아니라, 개질을 통한 수소 확보로 투입연료에 대한 접근성이 용이해 가정용으로 사용하기 알맞은 시스템으로 평가되고 있다. 정부는 기술개발 등의 목적으로 그린홈 100만호 보급 사업에 연료전지 시스템을

포함시켜 2010년 200대 2011년 300대, 2012년 500대 보급하여 2012년까지 누적 보급대수 1,000대를 목표로 삼고 있다. 현재 연료전지 시스템의 비용이 6,000만원에 달해 4,800만원의 보조금을 지급하고 있다. 이는 일반 보일러 시스템 가격이 설치비를 포함하여 60만원임을 감안해보면 정부의 연료전지 보급정책이 목표를 달성할 수 있을지 의문이 들게 한다. 따라서 최소한의 시장조성과 관련 기술개발을 위해서 현재의 연료전지 보급사업이 어느 정도의 경제성을 확보하고 있는지에 대한 분석이 필요하게 되었다.

Brown et al.(2007)은 일본, 독일, 미국, 그리고 영국에서 열병합 시스템으로서의 가정용 연료전지 보급을 위한 정부정책을 소개하고, 관련 시스템의 기술을 정리, 소개하고 있다. 김승구 외(2007)는 발전용 연료전지의 시장현황 및 상업화 전략에 관해 연구하였으며, 이주원 외(2009)는 전력시장 및 열 시장이 완전히 개방되었을 경우와 그렇지 않은 경우를 가정 하에 연료전지 발전 시스템의 최적 운용 전략을 도출하였다. 국내에서 수행된 1kW급 가정용 연료전지 시스템의 경제성 평가의 선행연구로는 신재생에너지 경제성 분석(한국에너지기술연구원, 2007)이 있다. 이 연구의 주요 가정은 설비 단가를 4,600만원, 운영기간은 20년으로 하였고 스택교체 주기는 5년, 스택의 교체비용은 330만원이며 스택의 대량생산이나 기술개발로 인해 5년의 교체 주기 동안 30%의 비용하락을 가정하였다. 또한 경제성평가의 주요 요인인 설비이용률을 국내 실증사업의 결과 중 최저 설비이용률인 90%로 가정하였다고 보고서에서 지적하고 있다. 또한 발생수익을 1kW급 가정용 연료전지 시스템에서 발전차액이 가능함을 가정하여 전력판매 수입을 산정하였고, 열 또한 온수 형태로 판매한다고 가정하고 있다. 하지만 이 연구는 전력과 열 수요를 만족시키는 제약조건 없이 경제성을 평가했고, 전력가격 누진제를 고려하면 운전비용은 매시간대별로 다른 값을 가질 수 있으므로 반드시 시간대별 최적 운전 방안을 제시해야 하지만 이를 고려하지 않았다. 특히 연료전지가 설치되어 있더라도 한전에서 전력을 수전하고 연료전지내의 보조보일러만 가동하여 실제 연료전지는 이용하지 않고도 더 저렴한 운전비용을 실현할 가능성도 있기 때문에 가정용 연료전지 시스템의 경제성 평가를 위해서는 대체 공급수단인 전력수전과

연료전지 내 보조보일러를 이용한 열 공급을 반드시 고려해야한다. 비용측면에서는 2010년 현재 연료전지 시스템은 4,600만원이 아닌 6,000만원이며 비용의 80%를 정부에서 보조금을 받을 수 있어 1,200만원을 소비자가 부담하게 된다. 스택 교체비용의 경우 현재 800만원에서 1,000만원 정도 소요됨을 국내 연료전지 기업을 통해 확인하였다. 또한, 현행법상 3kW 이하의 발전설비는 발전차액을 받을 수 없고 상계거래만 가능하지만 발전차액 거래가 가능하다고 전제하였고 열 회수 시설 투자 없이는 열의 온수 판매는 현실적으로 불가능한데 이를 가능하다고 전제하고 있다. 특히 설비이용률 90% 전제는 본 연구의 시뮬레이션 결과인 연평균 61.6%와는 큰 차이를 보이고 있다. 본 연구의 모형은 이러한 결과의 차이에 대한 이해를 도울 수 있을 것으로 판단된다.

본 논문에서는 분석을 위해 현재 국내에서 상용화된 1kW급 가정용 연료전지 시스템을 편의상 서울지역, 난방면적 $100m^2$ 의 아파트에 설치함을 전제로 하였다. 대표가정의 2009년 전력과 열 수요를 이용하여 한 시간 단위로 연료전지를 최적인전방안을 선택하는 방법으로 경제성을 평가해보았다. 이때 기존 에너지 시스템과 비교하여 화석에너지 사용을 얼마나 절감할 수 있는지도 함께 추정하였다. 연료전지 이용시 연간 변동비, 기존설비 대비 연간 에너지사용 저감량, B/C ratio, 민감도 분석, 그리고, 특히 환경적 측면을 감안하여 연간 이산화탄소 저감량도 함께 분석하였다.

II. 분석모형

1. 분석을 위한 전제 및 분석방법

현재 상용화 되어 있는 가정용 연료전지 시스템의 경제성 평가를 위해서는 다음과 같은 순서로 분석이 진행되게 된다. 먼저, 대표가정의 전기와 열 부하를 시간대별로 추정한다. 그 후, 추정된 가정용 전기와 열 부하를 만족 시킬 수 있는 가정용 연료전지 시스템을 조사하여 이들 시스템의 매시간대별 변동비용 추정하고 이를 누적하여 연간 변동비를 추정한다. 변동비는 도시가스가격, 전력가격(누진제), 그리고 효율(전기효율, 열효율)을 고려했다. 마지막으로 추정된 변동비에 고정비를 고려하여 경제성 평가를 수행했다.

열과 전력수요의 시간대별 부하를 추정하기 위해서 기본적으로 CES 소형 열병합 사업 타당성 분석 프로그램(GS파워, 2006)을 이용하였다. 해당 프로그램은 열과 전기부하의 추정에 사용된 모형은 다계층모형(the multi-level model or the hierarchical model) 또는 선형혼합효과모형(the linear mixed-effects model)을 이용한 것으로 상세한 내용은 문춘걸 외(2007)에 잘 나타나 있다.

다음으로 연료전지 시스템의 최적화 시뮬레이션 전제들을 정리해 보면 다음 <표 1>과 같다.

〈표 1〉 기존설비와 연료전지 시스템 운영의 주요 전제

열, 전력 부하 대표가정		2009년 서울 난방면적 100m ²	
기존 설비	구성	보일러(27Mcal), 수전설비	
	가격	60만원	
	열효율	85%	
연료전지	구성	연료개질기, 스택, 축열조, 보조보일러(27Mcal, 열효율 85%), 열교환기, 인버터	
	가격	6,000만원 ²⁾	
	보급보조금	4,800만원 ³⁾	
	스택교환비용	1,000만원 ⁴⁾	
	전력	부족	한전으로부터 수전
		초과	상계거래 ⁵⁾
	열	부족	보조보일러 가동
		초과	축열조에 저장(최대 9Mcal)

현재 상용화된 가정용 연료전지 시스템에 시간대별 최적화를 가능하게 하는 제어장치가 확보되어 있지 않지만 연료전지 시스템 제조사에서 향후 최적화 제어장치를 개발하여 추가적인 비용 없이 탑재할 예정이므로 이번 경제성 평가 방안에서는 최적화 제어장치가 있는 것으로 가정하고 운전비용을 계산하였다.

2) 2010년 상용화된 국내 연료전지 시스템의 가격

3) 성장동력화 9대 분야 집중육성계획(2008)의 그린홈 100만호 보급사업을 통해 건물용 10만호 보급 지원 정책에 의거함

4) 스택교환 비용은 2010년 상용화된 연료전지 시스템의 스택교환 비용을 인용하였으며 기술 발전과 시장확대로 인한 미래의 스택교환 기대비용의 전제는 2007년 발간된 한국에너지기술연구원의 신재생에너지 경제성평가 보고서를 인용하였다(수명은 5년, 교체비용은 5년마다 30%의 비용 하락을 전제). 단, 처음 1회 스택교환비용은 면제(초기설치비용에 포함되어 있음)

5) 상계거래 : 지경부 고시 '소규모 대체에너지 발전전력의 거래에 관한 지침'에 근거하여 발전설비용량 3kW 이하는 검침일의 소비전력에서 발전전력을 상계하여 거래할 수 있다.

기후변화 대응을 위한 가정용 연료전지 시스템의 시간대별 최적화 운전방안 제시와 경제성 평가 및 민감도 분석

〈표 2〉 가정용 연료전지 시스템의 부하추종 운전시 효율

(단위: %)

구분	100% 운전	75% 운전	50% 운전
전기효율	36	35.8	34.7
열효율	46	45.6	43.8

출처: GS퓨얼셀

〈표 3〉 2009년 서울 주택용전력(저압) 요금표

기 본 요 금 (원/호)		전 력 량 요 금 (원/kWh)	
100 kWh이하 사용	370	처음 100 kWh 까지	55.10
101~200 kWh 사용	820	다음 100 kWh 까지	113.80
201~300 kWh 사용	1,430	다음 100 kWh 까지	168.30
301~400 kWh 사용	3,420	다음 100 kWh 까지	248.60
401~500 kWh 사용	6,410	다음 100 kWh 까지	366.40
500 kWh 초과 사용	11,750	500 kWh 초과	643.90

출처: 한국전력공사

〈표 4〉 2009년 서울 주택난방용 도시가스 요금

구분	2009년 1월~2월	2009년 3월~6월	2009년 7월~12월
주택 난방요금 ⁶⁾	662.52원/m ³	677.13원/m ³	714.33원/m ³

출처: 한국가스공사

운전전략에 대해서는 전력부하를 추종하는 전기추종운전과 열부하를 추종하는 열추종운전 그리고 이 두 가지 운전전략의 비용을 추정 후 비교하여 더 경제적인 운전방식을 선택하는 복합추종운전이 있다. 다만 기존설비를 이용한 변동비용이 연료전지의 운전비보다 싸다면 연료전지 시스템의 가동을 중단하

6) 가스요금의 기본요금은 취사용에 부과되는 것이어서 본 연구에서는 고려하지 않았다.

여 전력은 수전을 받고, 열은 연료전지내의 보조 보일러를 이용하여 열부하를 충족시킨다.

경제성 분석을 위한 각종 수익성 지표를 계산함에 있어서 사회적 할인율은 『예비타당성조사 일반지침(제4판)』의 수정, 보완: 사회적 할인율의 조정』에 따라 5.5%로 적용하여 사용하였다. 사회적 할인율 추정의 오차를 감안하기 위하여 3%에서 8%까지 0.5%p씩 증가시면서 민감도 분석을 추가하였다. 또 분석 기간은 20년으로 하고, 미래 에너지가격의 불확실성을 배제하기 위해 전력, 도시가스 가격과 같은 에너지가격은 현재 상대가격 체계 하에서 가치 불변을 전제로 하였다.

2. 운전전략별 비용추정 계산식

1) 전기추종 (power following) 운전

기존 설비를 이용하여 전기와 열부하를 충당 할 경우는 전기는 한전으로부터 수전을 받고 열은 보일러를 이용하여 충당하게 된다. C_t^E , C_t^{EH} , C_t^{EP} 은 각각 t 시점에 기존설비를 이용할 때의 총비용, 난방비용 그리고 전력비용(Won/hr⁷⁾)을 의미한다.

$$C_t^E = C_t^{EH} + C_t^{EP} \quad (1)$$

t 시점에서 보일러를 이용할 때 난방비용은 다음과 같다.

$$C_t^{EH} = \frac{D_t^h \times P_t^g}{h^{LNG} \times e^b} \quad (2)$$

7) 2009년 현재가치.

기후변화 대응을 위한 가정용 연료전지 시스템의 시간대별 최적화 운전방안 제시와 경제성 평가 및 민감도 분석

여기서

D_t^h : t 시점의 열수요 [kcal]

P_t^g : t 시점의 단위 도시가스 가격 [Won/m³]

h^{LNG} : LNG의 단위부피당 발열량 = 10,500 Kcal/m³

e^b : 보일러의 열효율 = 0.85

t 시점에서 수전할 때 전력비용은 다음과 같다.

$$C_t^{EP} = D_t^p \times P_t^p \quad (3)$$

D_t^p : t 시점의 전력수요 [kWh]

$P_t^{p8)}$: t 시점의 단위 전력 가격 + 단위시간당 기본요금 [Won/kWh]

단위 시간당 기본요금 = 기본요금 / (해당월의 일수 × 24)

이때 연료전지 운전 방법중 전기추종 운전할 경우 전기와 열 공급 비용은 다음과 같다.

$$C_t^{FP} = \frac{860 D_t^p \times P_t^g}{h^{LNG} \times e_t^{FP}} + \frac{(D_t^h - S_t^h - H_{t-1}^s) \times P_t^g}{h^{LNG} \times e^b} \times I_t(m) \quad (4)$$

여기서,

C_t^{FP} : t 시점의 전기 추종할 때 연료전지 시스템의 총 에너지비용

D_t^p : t 시점의 전력수요 [kWh]

P_t^g : t 시점의 단위 도시가스 가격 [Won/m³]

h^{LNG} : LNG의 단위부피당 발열량 = 10,500 kcal/m³

8) t 시점의 전력 가격은 누진제를 채택하고 있기 때문에 t 시점의 누적전력량에 따라 다른 가격을 가지게 된다(<표 3> 참조).

e_t^{FP9} : t 시점의 연료전지의 전기효율

D_t^h : t 시점의 열수요 [kcal]

S_t^h : t 시점에 연료전지가 공급하는 열공급량 [kcal]

H_t^s : t 시점의 열저장설비에 저장되어 있는 열량 [kcal]

e^b : 보조보일러의 열효율

열과 전기를 동시에 생산하는 연료전지 특성으로 인해 대표가정의 열 수요를 연료전지 운영만으로 충족시킬 수 없을 경우 보조보일러를 운용하여 부족분을 보충하게 된다. 이를 인덱스를 이용하여 나타내면 다음과 같다.¹⁰⁾

$$I_t(m) = \begin{cases} 1 & \text{if } m > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

여기서, $m = D_t^h - H_{t-1}^s - S_t^h$ 로 열 공급에 대한 열수요의 초과여부를 나타낸다.

또한 연료전지가 동작할 때 열 저장설비에 저장되는 열은 다음과 같다.

$$H_t^s = H_{t-1}^s + (S_t^h - D_t^h) \quad (6)$$

단, $H_0^s = 0$, $0 \leq H_t^s \leq \overline{H_t^s}$, where $\overline{H_t^s} = 9,000\text{kcal}$

또한, E_t (수전 누적 사용량)은 다음과 같다.

9) 연료전지의 전기효율은 출력에 따라 다르기 때문에 t 시점에 전기출력에 따라 결정된다 (<표 2> 참조).

10) 보조보일러의 운영 상태를 나타내는 인덱스로 보조보일러를 운영할 때는 1, 운영하지 않을 때는 0을 가진다.

기후변화 대응을 위한 가정용 연료전지 시스템의 시간대별 최적화 운전방안 제시와 경제성 평가 및 민감도 분석

$$E_t = E_{t-1} - (S_t^p - D_t^p) \quad (7)$$

단, $E_t = 0$ 매달 초기화, $0 \leq E_t$ [kWh]

연료전지 시스템의 운전결정은 기존설비 이용 시 운전비용과 연료전지 시스템의 운전비용을 비교하여 $C_t^E \geq C_t^{FP}$ 인 경우 운전하게 된다.

2) 열추종 (heat following) 운전

기존 설비를 이용한 비용의 경우는 앞서 살펴본 전기추종방식의 비용식과 동일하므로 앞부분을 참조하기 바란다.

열추종운전의 전기와 열 공급 운전비용은 다음과 같다

$$C_t^{FH} = \frac{D_t^h \times P_t^g}{h^{LNG} \times e_t^{FH}} + \frac{(D_t^h - S_t^h - H_{t-1}^s) \times P_t^g}{h^{LNG} \times e^b} \times I_{1t}(m) + (D_t^p - S_t^p) \times P_t^p \times I_{2t}(n) \quad (8)$$

여기서,

C_t^{FH} : t 시점의 열 추종할 때 연료전지 시스템의 총 에너지비용

D_t^h : t 시점의 열수요 [kcal]

P_t^g : t 시점의 단위 도시가스 가격 [Won/m³]

h^{LNG} : LNG의 단위부피당 발열량 = 10,500 Kcal/m³

e_t^{FH} : t 시점의 연료전지의 열효율¹¹⁾

D_t^h : t 시점의 열수요 [kcal]

S_t^h : t 시점의 연료전지가 공급하는 열공급량 [kcal]

11) 연료전지의 열효율은 출력에 따라 다르기 때문에 t 시점의 열공급량에 따라 다른 값을 가지게 된다(<표 4>참조).

H_t^s : t 시점의 열저장설비에 저장되어 있는 열량[kcal]

e^b : 보일러의 열효율

$$I_{1t}(m) = \begin{cases} 1 & \text{if } m > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

여기서, $m = D_t^h - H_{t-1}^s - S_t^h$

$$I_{2t}(n) = \begin{cases} 1 & \text{if } n > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad 12)$$

여기서, $n = D_t^p - S_t^p$

이때 열 저장설비에 저장된 열은 다음과 같다.

$$H_t^s = H_{t-1}^s + (S_t^h - D_t^h) \quad [\text{kcal}]$$

단, $H_0^s = 0$, $0 \leq H_t^s \leq 9000$ [kcal]

또한, E_t (수전 누적 사용량)은 다음과 같다.

$$E_t = E_{t-1} - (S_t^p - D_t^p) \quad [\text{kWh}]$$

단, $E_t = 0$ 매달 초기화, $0 \leq E_t$ [kWh]

연료전지 시스템의 운전결정은 기존설비 이용 시 운전비용과 연료전지 시스템의 운전비용을 비교하여 $C_t^E \geq C_t^{FH}$ 인 경우 운전하게 된다.

3) 복합추종 (combined strategy) 운전

복합추종운전(combined strategy)은 가정용 연료전지의 최적 운전방안을 찾기 위해서 기존 설비를 이용시 운전비용과 전기추종운전, 열추종운전의 운전비용

12) 수전 여부를 나타내는 인덱스로 수전할 때는 1, 수전하지 않을 때는 0을 가진다.

을 시뮬레이션을 수행한 뒤 세가지 결과를 시간대별로 비교함으로써 가장 경제적인 운전방식을 선택하는 방법이다.

$C_t = \text{Min}[C_t^E, C_t^{FP}, C_t^{FH}]$ 인 전략을 선택하여 운전한다.

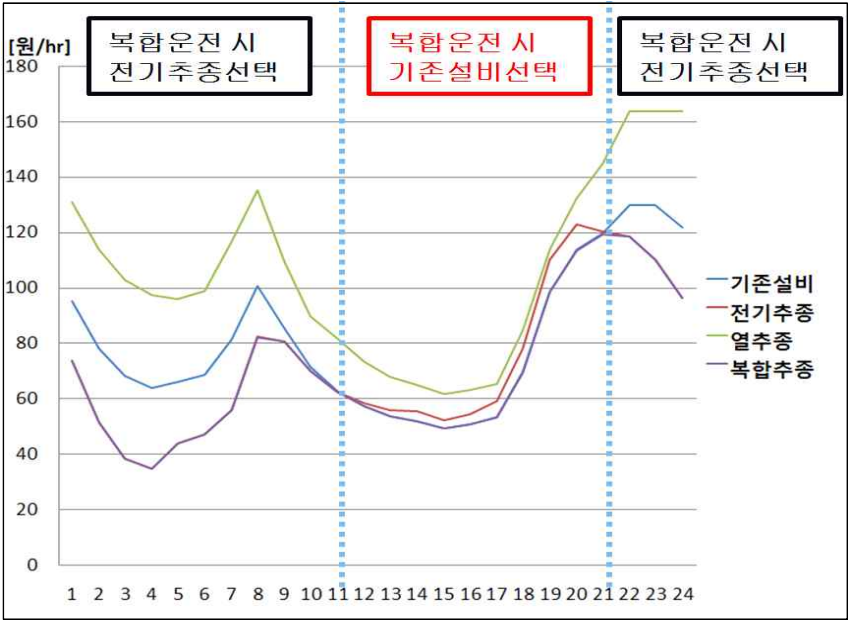
C_t : 각 시간대별 최소비용

Ⅲ. 결 과

1. 일별 연료전지 최적화 운전방안과 시뮬레이션 결과 예시

연료전지의 최적화 운전방안을 도출하기 위해서는 연료전지를 복합추종 운전으로 운전해야 한다. 복합추종 운전은 기존설비를 이용한 비용과 연료전지의 두 가지 운영전략의 변동비를 시간대별로 비교하여 가장 경제적인 운전방안을 선택하기 때문이다. 예를 들어, 10월 1일의 시뮬레이션 결과를 표시한 아래 그림은 운전 방안별 변동비를 보여주고 있다. 그림에서 확인할 수 있듯이 복합 추종운전은 기존설비 변동비와 연료전지의 2가지 운전방식 중 가장 경제적인 운전을 추종함을 확인할 수 있다. 하지만 특이한 점은 월 초에는 누적 수전 전력량이 없으므로 보통은 기존설비를 이용한 에너지 비용이 더 경제적이다. 하지만 10월 1일의 경우에는 연료전지내의 축열조에 열을 저장해 놓은 것이 있어서 연료전지를 가동하는 운전이 더 유리해진다. 하지만 오후 시간에 들어서는 변동비용이 역전되어 기존설비를 이용한 변동비용이 더 경제적이게 된다. 따라서 연료전지의 사용을 중단하고 기존설비를 이용해 전기는 수전하고 열은 연료전지의 보조보일러를 가동하여 충당한다.

[그림 1] 기존설비와 연료전지운전 방법에 따른 비용 비교(10월 1일)

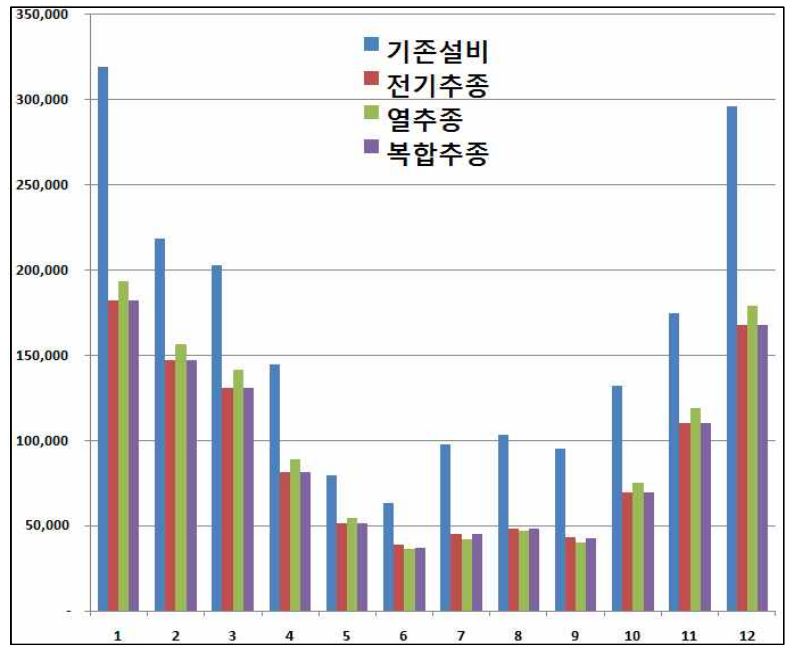


2. 운전 전략별 변동비 추정 결과

추정된 시간대별 열과 전력의 부하를 모두 충족시키면서 기존 설비의 변동비와 연료전지의 운전전략별 변동비를 시뮬레이션을 통해 계산해내었다. 이를 비교하기 위해 월별 에너지비용(변동비)를 아래의 그림과 표로 도시하였다. 그 결과 변동비 측면에서는 매일 기존설비를 이용한 에너지비용보다는 연료전지를 이용한 에너지비용이 더 경제적임을 확인할 수 있었다. 특히 열 수요가 많은 겨울철에 변동비가 크게 차이를 보이고 있다.

기후변화 대응을 위한 가정용 연료전지 시스템의 시간대별 최적화 운전방안 제시와 경제성 평가 및 민감도 분석

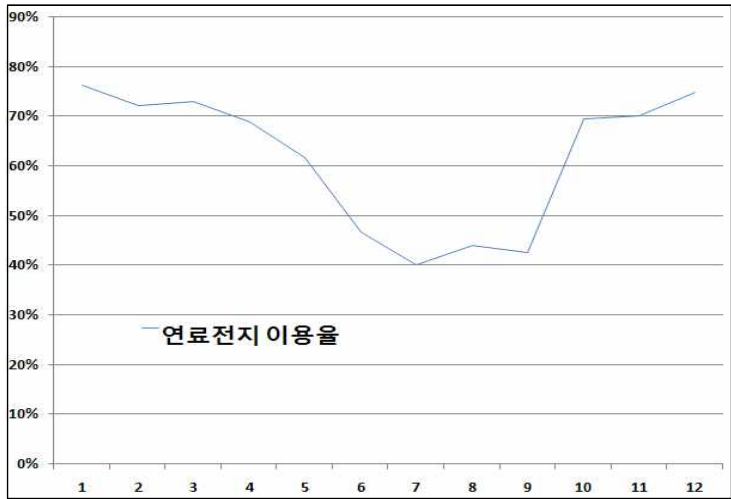
[그림 2] 월별 에너지 비용 비교



〈표 5〉 운전 전략별 변동비용 결과

구분	기존설비	전기추종	열추종	복합추종	연료전지 이용률
1월	318,970	182,008	193,131	182,008	76.21%
2월	217,866	146,643	156,120	146,643	72.17%
3월	202,361	130,608	140,954	130,608	72.85%
4월	144,116	81,218	88,822	81,218	68.89%
5월	79,592	51,152	54,122	51,066	61.69%
6월	63,148	38,642	36,289	37,042	46.67%
7월	97,732	45,104	41,844	44,961	40.19%
8월	103,339	48,368	46,619	48,368	44.09%
9월	95,213	43,031	39,910	42,346	42.64%
10월	132,113	69,190	75,293	69,188	69.49%
11월	174,345	109,713	118,629	109,713	70.14%
12월	295,848	167,794	178,472	167,794	74.73%
총합	1,924,644	1,113,472	1,170,206	1,110,955	61.61%

[그림 3] 연료전지 이용률 시뮬레이션 결과



연료전지의 경제성 평가 시 이용률이 매우 중요한 요소이나 정확한 데이터나 결과가 없어 이를 연간 변동이 없는 상수로 가정하게 되는데 본 연구에서는 시뮬레이션을 통해 정확한 월별 이용률을 추정해 내었다. 결과에서 확인할 수 있듯이 연료전지는 1월 최대 이용률은 76.2%, 7월 최소 이용률은 40.2%로 추정되었고 연간 평균 이용률은 61.6%이다.

3. 운전 전략별 에너지 사용량 추정 결과

연료전지의 설치로 인한 에너지 사용 저감량을 추정하기 위해 연료전지를 설치하지 않았고 기존설비만을 이용한 에너지 사용량과 연료전지 시스템을 활용한 에너지 사용량을 비교하여야 한다. 아래 그림과 표는 2009년 연간 기존설비와 연료전지를 운전한 결과 사용된 에너지량을 운전전략별로 계산한 결과이다.

기후변화 대응을 위한 가정용 연료전지 시스템의 시간대별 최적화 운전방안 제시와 경제성 평가 및 민감도 분석

〈표 6〉 기존설비와 연료전지 운전전략별 에너지 사용량비교

구분	기존 설비	전기 추종	△에너지량	열추종	△에너지량	복합 추종	△에너지량
전력 [kWh]	4,076	1,550	-2,525	2,680	-1,395	1,594	-2,481
도시가스 [m ³]	1,156	1,413	+256	1,226	+69	1,402	+245
총에너지 [toe]	2.095	1.823	-0.272	1.869	-0.226	1.821	-0.274

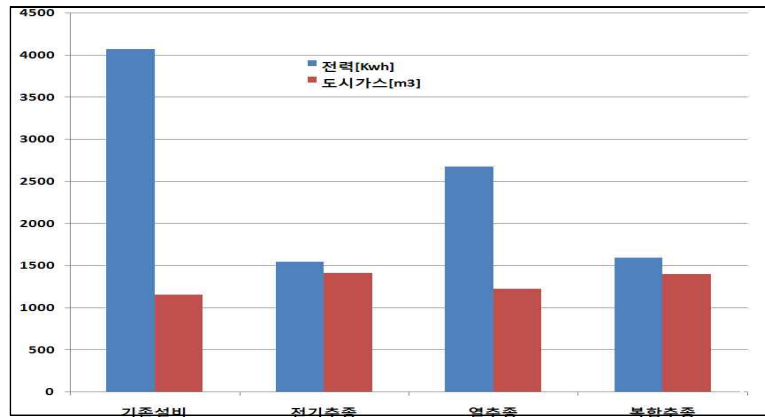
△에너지량 = 연료전지 이용 시 에너지량 - 기존설비 이용 시 에너지량

연료전지의 특성상 전력은 기존설비만 운용했을 때와 비교하여 현저하게 줄어들었음을 확인할 수 있다. 반대로 도시가스의 경우 수소 제조의 원료로 사용하기 때문에 기존설비 대비 더 많이 소모하고 있다. 연료전지의 복합추종 운전과 기존설비 이용 시 사용된 총에너지를 비교한 결과 연간 0.274toe의 에너지를 절약할 수 있다. 이는 연간 에너지 사용량의 13%에 해당한다.

연료전지 이용 시 전력 2482kWh를 저감하고 도시가스 245m³을 더 소모함을 고려한 이산화탄소 저감량은 557kgCO₂/year로 분석되었다.¹³⁾

13) 전력의 이산화탄소배출계수는 0.424, 도시가스의 석유환산계수는 0.955이며 탄소배출계수는 0.637에 의거하여 계산

[그림 4] 기존설비와 연료전지 운전전략별 에너지 사용량비교



4. B/C와 NPV 추정 결과

연료전지시스템의 수명을 20년으로 가정하였으며 할인율은 5.5%¹⁴⁾를 가정하였다. 연료전지의 운전전략별 비용결과를 이용하여 상용화된 1kW 가정용 연료전지 시스템을 20년 동안 운영할 경우의 B/C ratio와 NPV를 계산하였다. 이때 비용이라 함은 연료전지를 설치함으로써 기존설비대비 추가되는 비용을 말한다. 또한 비용은 $OM(i)$ 운영비용은 연료전지 시스템으로 인한 추가적인 운영비로 본 연구의 분석에서는 소모품교환비용(스택교환비용)이이에 해당한다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$NPV = \sum_{i=0}^n \left(\frac{B(i) - C(i) - OM(i)}{(1+r)^i} \right) \quad (11)$$

14) 경제성 분석을 위한 각종 수익성 지표를 계산함에 있어서 사회적 할인율은 『예비타당성조사 일반지침(제4판)의 수정·보완: 사회적 할인율의 조정』에 따라 5.5%로 적용하여 사용

기후변화 대응을 위한 가정용 연료전지 시스템의 시간대별 최적화 운전방안 제시와 경제성 평가 및 민감도 분석

여기서,

$B(i)$: i 기 연료전지시스템으로 인한 추가되는 Benefits

$C(i)$: i 기 연료전지시스템으로 인한 추가되는 Costs

$OM(i)$: i 기 연료전지시스템으로 인한 추가되는 운영비

r : 할인율

〈표 7〉 가정용 1kW 연료전지시스템의 경제성 평가 결과

항목	전기추종	열추종	복합추종
Total Cost[만원]	2,330	2,330	2,330
Total Benefit[만원]	1,022	951	1,025
B/C Ratio	0.43	0.40	0.44
NPV[만원]	-1,307	-1,378	-1,304

경제성 평가 결과 연료전지를 20년 동안 가동하였을 경우 3가지 운전 방법 모두 B/C가 1보다 작아 현재로서는 가정용 연료전지 시스템이 경제성이 없는 것으로 분석되었다. 이에 정부의 보급정책을 달성하는데 목표를 두고 어느 정도 연료전지 시스템의 비용을 하락시키면 경제성을 확보할 수 있는지를 추정하기 위해 민감도 분석해 보았다.

5. 경제성평가 민감도 분석 결과

연료전지 시스템의 경제성 평가 결과 현재 형성되어 있는 고가의 시스템 비용과 스택 교환 비용으로 인해 경제성을 확보하기 어려운 실정이다. 하지만 연료전지 시스템을 이용한 에너지비용(변동비)은 기존설비를 이용한 에너지비용과 비교하여 경제성을 가지며, 에너지 사용량 저감 측면에서도 상당한 이점을 가지고 있다. 기술개발과 대량생산으로 인해 고가의 시스템비용이 현재 대비 일정 비율로 감소함을 가정하고 B/C ratio에 대한 민감도 분석을 수행하였다.

이와 더불어 연료전지를 설치함으로써 발생하는 편익과 비용에 대한 사회적 할인율 추정의 오차를 감안하기 위하여 3%에서 8%까지 0.5%p씩 증가시면서 민감도 분석을 실시한다. 할인율 변동시의 민감도 분석도 함께 진행하였다.

〈표 8〉 시스템비용 감소율과 할인율에 따른 B/C ratio
민감도분석(복합추종시)

(단위: %)

할인율 시스템 비용감소율	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8
10	0.59	0.57	0.55	0.52	0.50	0.49	0.47	0.45	0.44	0.42	0.41
20	0.67	0.64	0.62	0.59	0.57	0.55	0.53	0.51	0.49	0.48	0.46
30	0.77	0.74	0.71	0.68	0.66	0.63	0.61	0.59	0.57	0.55	0.53
40	0.90	0.87	0.83	0.80	0.77	0.74	0.72	0.69	0.67	0.64	0.62
50	1.09	1.05	1.01	0.97	0.93	0.90	0.87	0.84	0.81	0.78	0.76
60	1.39	1.33	1.28	1.23	1.18	1.14	1.10	1.06	1.02	0.99	0.96

민감도 분석 결과 할인율 5.5%로 가정하고 현재 시스템비용 대비 55% 이상 저렴하게 보급될 경우 B/C가 1.01로 분석되어 경제성이 확보됨을 확인하였다.

IV. 결 론

정부의 녹색성장 정책에 의해 신재생에너지 시스템을 보급하고자 하는 여러 정책이 수행되고 있다. 그중 하나로 그린홈 100만호 사업이 추진 중이며 연료전지는 이러한 사업의 대상으로서 관심을 받고 있다. 본 논문에서는 연료전지의 열병합 특성을 감안, 최적운전 방안을 제시하였다. 시뮬레이션 분석결과, 1년 동안 기존설비를 이용하는 경우 1,924,644원의 에너지비용이 발생하는

반면, 연료전지의 경우 복합추종시 1,110,955원의 변동비가 발생하는 것으로 분석되었다. 또한 연료전지의 연간 평균이용률은 61.6%로 나타났다. 주어진 열과 전기부하를 충족시킨다는 조건 하에서, 연료전지의 복합추종운전과 기존 설비 이용시 사용된 총에너지를 비교한 결과 연간 0.274toe의 에너지를 절약할 수 있다. 이는 연간 에너지 사용량의 13%에 해당한다. 연료전지 이용 시 전력 2,482kWh를 저감하고 도시가스 245m³를 더 소모함을 고려한 이산화탄소 저감량은 557kgCO₂/year로 분석되었다.

B/C는 0.44로 현재로서는 가정용 연료전지 시스템이 자체적으로는 경제성을 확보하지 못하고 있다. 또한 민감도 분석결과, 경제성을 확보를 위해서는, 5.5%의 할인율이 주어지는 경우, 현재 시스템비용 대비 55%이상 시스템비용이 하락해야 하는 것으로 나타났다.

일본의 사례를 살펴보면, 일본은 보급정책 초기에 보조금을 많이 지급하고 정책후기로 갈수록 보조금을 점차 줄여가는 정책을 펴으로써 초기보급을 급격히 확산시키면서도 보조금 총액이 오히려 감소하도록 하는 효과를 거둔 것으로 알려져 있다. 정부가 단기목표로 제시한 연료전지의 보급목표는 관련 산업의 기술개발을 위해 필요한 최소한의 시장조성을 위한 노력으로 이해할 수 있다. 가정용연료전지 시스템이 자체적으로 경제성을 확보하지 못하는 상황에서 정부의 보급정책을 달성하기 위한 한 가지 방안은 일본의 연료전지 보급 정책 등을 참고하여 정부가 연료전지 시스템에서 보조금이 차지하는 비중을 기간에 따라 세분화하는 방안 등을 고려할 수 있을 것으로 보인다.

접수일(2011년 1월 20일), 수정일(2010년 2월 15일), 게재확정일(2010년 2월 16일)

◎ 참 고 문 헌 ◎

- 김승구 외. 2007. “발전용 연료전지의 시장현황 및 상업화 전략.” RIST 연구논문 21(4) : 319-328.
- 문춘걸·김수덕. 2007. “기상자료와 냉난방 실측자료를 이용한 열부하 추정과 예측: 다계층모형의 활용.” 자원환경경제연구 16(4) : 803-833.
- 이주원 외. 2009. “마이크로 전력계통에서 연료전지 발전시스템의 전기/열의 최적운영 기법 연구.” 전기학회논문지 58(6) : 1093-1099.
- 삼성경제연구소. 2003. 수소에너지 혁명을 주도하는 연료전지. 서울 : 삼성경제연구소.
- 에너지경제연구원. 2006. 가정·상업용 연료전지 보급사업 타당성 조사. 경기 의왕 : 에너지경제연구원.
- _____. 2009. 제3차 신재생에너지 기술개발 및 이용보급 기본 계획. 경기 의왕 : 에너지경제연구원.
- 에너지관리공단. 2007. 신재생에너지 R&D 전략 2030 - 수소·연료전지. 경기 용인 : 에너지관리공단.
- 전자부품연구원. 2005. 일본 고체고분자형 연료전지 시장 및 기술 동향. 경기 성남 : 전자부품연구원.
- 지경부 고시. 2007. 소규모 대체에너지 발전전력의 거래에 관한 지침.
- _____. 2008. 성장동력화 9대 분야 집중육성계획(2008)의 그린홈 100만호 보급사업.
- 한국에너지기술연구원. 2007. 신재생에너지 경제성 분석. 대전 : 한국에너지기술연구원.
- 한국에너지기술평가원. 2009. 그린에너지 전략로드맵. 서울 : 한국에너지기술평가원.
- 한국과학기술연구원. 2005. 수소경제·연료전지 현황 및 전망. 한국과학기술연구원.
- 하나금융경영연구소. 2007. 바이오에너지 및 연료전지산업의 사업화 가능성 분석. 하나금융경영연구소.
- GS퓨얼셀. 2010. GS퓨얼셀 제품 brochure.

기후변화 대응을 위한 가정용 연료전지 시스템의 시간대별 최적화 운전방안 제시와 경제성 평가 및 민감도 분석

Brown, et al.. 2007. "An emerging market in fuel cells? Residential combined heat and power in four countries." *Energy Policy* 35(4) : 2173-2186.

Robert, Stephen Lasher and Zogg, P. E.. 2006. "PEM Fuel Cells For Distributed Generation." *American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers Journal* 48 : 45-48.

ABSTRACT

An Analysis on the Optimal Operation and
Economic Feasibility of Household Fuelcell
System for Climate Change.

Seunghyun Ryu* and Suduk Kim**

Korean government recently announced the short-term cumulative target of 1000 fuelcells to promote household fuelcell system by year 2020. This paper is to analyze the optimal operation conditions and the economic feasibility test of household fuelcell system.

For the analysis, a representative household is selected for an apartment with the size of 100m² in Seoul for the fuelcell system with the capacity of 1kW. Taking the CHP(combined heat and power) characteristics of fuelcell system into the model, an analysis is performed based on the comparison of power following and heat following strategies.

The Simulation result shows the annual average capacity factor of 61% with the B/C ratio of 0.44. That is, the current household fuelcell system is not economically feasible under the current market conditions. A further sensitivity analysis under 5.5% interest rate condition shows about 55% of system cost reduction required for this system to acquire economic feasibility.

Key Words : Fuelcell, Distributed generation, Hydrogen Energy, Climate Change. New and Renewable Energy

* Integrated course student, Department of Energy Studies, Division of Energy System Research, Ajou University (Main Author). mirang98@naver.com

** Professor, Department of Energy Studies, Division of Energy System Research, Ajou University (Corresponding Author). suduk@ajou.ac.kr