

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2009.33.4.255

플러그인 하이브리드 전기자동차의 연료 경제성에 관한 연구

노철우* · 김민수†

(2008년 11월 18일 접수, 2009년 3월 4일 수정, 2009년 3월 10일 심사완료)

Study on the Fueling Economic Feasibility of Plug-in Hybrid Electric Vehicle

Chul Woo Roh and Min Soo Kim

Key Words: Economic Feasibility(경제성), Fueling Cost(연료비용), PHEV(플러그인 하이브리드 전기자동차), Simulation(시뮬레이션)

Abstract

The most concerning issue of these days is the energy crisis caused by increasing threat of dependence on imported oil and volatile market trend. Under these circumstances, the PHEV(plug-in hybrid electric vehicle) is drawing attention for the next generation's car which could give a chance to decrease the dependence on imported oil and reduce the environmental impact of vehicle. The fueling cost of PHEV, one of the core factor of decision about buying car, should be calculated in the circumstances of Korea to make sure that PHEV has competitive power in real market. The fuel cost saving of PHEV versus CV(conventional vehicle) is simulated and discussed in the condition of increasing gasoline cost, electricity rate, and city-gas rate. In conclusion, the PHEV60-FS shows the best economic feasibility when gasoline price goes up. The PHEV20 has the most stable economic feasibility as electricity rate increases. The fuel cell cogeneration system for RPG could be an alternative for charger of PHEV in the near future.

기호설명

1. 서론

- CV : 기존 내연기관 자동차
- RPG : 주택용 발전 시스템
- PHEV : 플러그인 하이브리드 전기자동차
- SUV : 스포츠형 다목적 차량
- CC : 소형 세단형 승용차
- MS : 중형 세단형 승용차
- FS : 대형 세단형 승용차
- BS : 배터리 사이즈 [kWh]
- FE : 연비 [km/liter]
- CR : 충전율 [kWh/hour]

21세기에 들어와 구미 선진국을 중심으로 전 세계는 지구온난화의 주범이 되는 온실가스 배출량을 감축하고, 에너지 가격 변동에 취약한 석유 의존경제의 굴레에서 벗어나기 위해 노력하고 있다. 특히 운송수단의 측면에서는 2010년 후반부터 본격적인 시장형성이 예측되는 하이브리드 전기자동차(HEV) 및 플러그인 하이브리드 전기자동차(PHEV)가 단연 주목을 받고 있다.⁽¹⁾

PHEV는 외부의 전력원(electric power source)과 연결될 수 있는 플러그(plug)가 차량에 설치되어 있고, 이를 통해 충전될 수 있는 배터리를 장착한 HEV이다. 또한 PHEV는 기존의 전통적인 내연기관 차량 대비 ZEV(zero emission vehicle) 주행이 가능하기 때문에 매년 발생을 획기적으로

† 책임저자, 회원, 서울대학교 기계항공공학부
 E-mail : minskim@snu.ac.kr
 TEL : (02)880-8362 FAX : (02)873-2178
 * 서울대학교 대학원 기계항공공학부

줄일 수 있고, 높은 연비로 석유 의존을 낮추는 동시에, 온실 가스 배출을 줄여 지구온난화 방지에도 기여한다. 한편, PHEV의 배터리 내에 충전된 전기에너지는 유사 시 V2G(vehicle to grid)로의 활용 또한 가능하다.⁽²⁾

PHEV와 관련된 현재까지의 연구로서 미국의 EPRI(electric power research institute)⁽³⁾는 2002년 이미 sedan과 SUV(sports utility vehicle) 두 차종에 관한 PHEV의 성능 목표를 제시하였고, PHEV의 가격 상승 요인을 7개 분야, 즉 엔진 제외 차체 전반(glider), 엔진과 배기계통, 기어 계통, 보조기 출력, 전기 구동부분, 에너지 저장 계통, 차체 내 충전 계통 등으로 나누어 이에 따른 PHEV 판매가격 등을 예측 공시하였다. 또한, NREL(national renewable energy laboratory)의 A. Simpson⁽²⁾은 배터리, 파워트레인 및 비용 시뮬레이션을 바탕으로 PHEV의 경제성을 분석하였다. 이 밖에, PHEV의 상용화에 따른 자국 전력망 내 영향을 분석한 Kintner-Meyer 등⁽¹⁾은 PHEV의 충전전력으로 공급할 수 있는 중앙 전력망 내 잉여전력을 valley-filling 모델로 산출하였고, PHEV 시장이 형성되었을 때 중앙 전력망의 잉여전력이 PHEV 충전에 이용될 수 있는 한계 능력에 관하여 논하였다.

그러나 국내에서는 세계 자동차 회사들의 본격적인 PHEV 상용화를 수 년 앞두고도 아직 PHEV의 시장 경쟁력과 이를 바탕으로 한 시장 진출이 이루어졌을 때 발생할 전력망 내 영향 등에 대한 논의가 부족한 실정이다.

PHEV와 관련된 국내 연구로서, Roh 등⁽⁴⁾은 PHEV가 시장을 형성함에 따라 발생하는 우리나라의 중앙 전력망 내 영향을 연구하였다. 이 연구에서는 우리나라의 승용차가 PHEV33으로 점차 교체된다고 가정할 때, 겨울의 일부 시간대에 현 우리나라 승용차의 31%만이 중앙전력망의 잉여전력을 이용해 충전될 수 있고, 나머지는 충전전력을 공급받을 수 없는 상황에 놓일 수 있음을 지적한다. 또한, Roh 등⁽⁵⁾은 앞서 전력망 내 잉여전력의 절대적인 부족을 대비하기 위하여 전력의 수요와 공급을 조절할 수 있는 인텔리전트 전력망(intelligent grid)의 조속한 구축을 촉구하면서 PHEV 충전을 위한 스마트 충전시스템을 제안하였다. 그 외, Park⁽⁶⁾은 HEV와 PHEV, 그리고 FCV(fuel cell vehicles)의 파워트레인 기술과 시장

현황을 분석하였다.

2010년 하반기로 예상되는 PHEV의 상용화와 시장 진출을 불과 몇 년 앞두고, 우리나라의 자동차 제조업계는 물론, 전력 유틸리티 업계 및 산하 연관 업체들에게 있어서, PHEV의 시장 경쟁력을 가늠하기 위한 선도적 연구의 필요성이 제기되고 있다.

이를 위해, 본 연구에서는 PHEV의 상용화 가능성을 가늠하기 위한 척도이자, PHEV를 구매하고자 하는 소비자들의 가장 큰 구매동기인 PHEV의 경제적 효과를 알아보기 위하여, 국내의 휘발유(gasoline)요금과 전력요금 그리고 가스요금의 변화에 따른 기존 내연기관 차량 대비 PHEV의 '연간 연료비 절감액'을 시뮬레이션 하였다.

2. PHEV 및 충전 조건 모델링

2.1 PHEV 성능 모델링

일반적으로 PHEV 클래스의 분류 기준은, 내연기관을 구동하지 않고 배터리의 전기에너지만으로 주행할 수 있는 최대거리로 한다. 예를 들어, PHEV에 장착된 배터리의 전력만으로 최초 구동에서부터 20 마일을 내연기관의 동력 보조 없이 운전할 수 있는 경우, PHEV20으로 통칭한다.

본 연구에서는 PHEV0, PHEV20, PHEV40, PHEV60의 4가지 클래스에 대하여 EPRI의 모델링 데이터를 적용하였다. 이때, PHEV0은 기존의 병렬형 파워트레인을 갖춘 HEV와 동일한 방식의 주행로직을 갖고 있는 반면, 외부로부터 배터리의 충전전력을 조달받을 수 있도록 전원접속구가 차량에 설치된 점에서 기존의 HEV와 다르다.

또한, 본 연구에서는 국내 승용차 시장을 배기량에 따라 3단계로 크게 나누어 각각에 PHEV 클래스를 각기 적용하였다. 첫째, 'compact car'로 대표되는 2000 cc 미만 소형승용차, 둘째로 'mid-size sedan'으로 대표되는 2000 cc 이상 2500 cc 이하의 중형승용차, 그리고 'full-size sedan'으로 대표되는 2500 cc 이상의 대형승용차로 PHEV 클래스를 세부 분류하였다.

Table 1, Table 2, 그리고 Table 3는 소형승용차(CC)과 중형승용차(MS), 대형승용차(FS)에 따른 PHEV0, PHEV20, PHEV40, PHEV60의 성능 모델링 조건이다. CC에서 FS로 갈수록 배터리 용량이 증가하고, 각종 파워트레인 구성 요소의 동력

Table 1 Modeling condition of compact car⁽³⁾

Item	CV	PHEV0	PHEV20	PHEV40	PHEV60
Engine (kW)	74	53	41	37	32
Motor (kW)	-	23.3	37.3	48.9	60.7
BS (kWh)	-	2.20	5.08	10.43	15.45
FE (km/liter)	13.4	20.6	20.8	21.3	21.8

Table 2 Modeling condition of mid-size sedan⁽³⁾

Item	CV	PHEV0	PHEV20	PHEV40	PHEV60
Engine (kW)	156	115	95	84	72
Motor (kW)	-	51.3	84.0	86.4	88.7
BS (kWh)	-	4.12	7.85	15.61	23.37
FE (km/liter)	7.8	13.0	13.8	14.0	14.2

요구치가 커짐을 알 수 있는데, 이는 현재의 가솔린 엔진을 기반으로 한 내연기관 자동차에서도 알 수 있듯이 CC가 MS나 FS보다 차체무게와 그에 따른 동력소모가 적을 뿐만 아니라, 연비 또한 상대적으로 높은 사실을 고려할 때, 같은 맥락으로 이해할 수 있다.

각 조건에서의 연비(FE)수치는 시내주행방식을 선택하느냐, 또는 고속도로주행방식을 선택하느냐에 따라 변동할 수 있으며, 연비측정방법의 상이함에 의해서도 소폭 변동할 수 있다. 본 연구에서는 하이브리드 자동차 관련 세계 규격에 해당하는 SAE J1711에 준하는 HEV 기술 목표 중 연료의 종류가 가솔린 일 때, 주행방식은 시내주행을 기준으로 하여 작성된 EPRI의 각 PHEV 클래스별 기술 목표 데이터를 사용하였다.⁽³⁾

PHEV는 아직 실차양산이 되기 전 상황이므로 공인된 검증기관으로부터의 PHEV 성능 실측치가 존재하지 않으며, PHEV를 개발 중인 업체가 속속 등장하고 있으나 세계적인 기술 경쟁 환경 하에서 차량의 성능치가 공개되는 것이 쉽지 않은 현실이다. 본 연구는 PHEV의 상용화와 이에 따른 사회적 파급효과를 판단하기 위한 기초 연구라는 목적을 갖고, 상용화 이전 단계의 PHEV 관련 성능 데이터로써 EPRI의 PHEV 성능목표(technical target) 수치를 사용했으며, 이는 세계적

Table 3 Modeling condition of full-size sedan⁽³⁾

Item	CV	PHEV0	PHEV20	PHEV40	PHEV60
Engine (kW)	212	145	115	84	90
Motor (kW)	-	65.3	98.0	107.4	116.7
BS (kWh)	-	5.19	9.29	18.48	27.67
FE (km/liter)	6.3	10.9	11.7	11.9	12.1

Table 4 Charging condition of PHEVs

Item	PHEV0	PHEV20	PHEV40	PHEV60
Voltage (V)	120	120	240	240
Ampere (A)	12	12	12	24
CR (kWh/hr)	0.80	0.80	1.70	3.47

으로 유일한 PHEV 관련 성능 목표이자 공신(公信) 가능한 수치라 판단하였다.

PHEV의 주행거리에 관한 조건으로는, 우리나라 승용차의 일평균 주행거리인 30 miles/day, 즉 연간 17,619 km/year를 PHEV의 연간 주행거리 조건으로 설정하였다. 이 때 일평균 주행거리는 연간 주행거리를 365일로 나눈 산술수치에 불과하기 때문에, PHEV40이나 PHEV60의 연료비 절감액을 평가함에 있어, 매일 40 혹은 60 miles/day 미만을 운전하여 휘발유의 소비가 전혀 없을 것이라고 단정하기에는 무리가 있다고 판단된다. 즉, PHEV의 연료비 절감액을 평가하기 위해서는 연평균 주행거리를 이용하는 것이 적절하다고 판단된다. 이와 관련된 EPRI의 자료는 통상적으로 연간 약 17,000 km를 주행하는 PHEV20의 경우 약 40%의 연간 주행거리를 배터리의 전력만으로 주행하고, PHEV40은 60%, PHEV60은 75%를 순수 전력주행구간으로 평가하고 있으며,⁽³⁾ 본 연구에서도 이를 적용하였다.

2.2 배터리 충전 조건

PHEV 사용자가 충전을 가장 많이 시도할 것으로 예측되는 시간대는 오후 10시부터 익일 오전 6시의 취침시간대이다.⁽⁴⁾ 따라서 PHEV에 공급되는 전력은 최대 8시간 이내에 완전히 방전된 배터리(empty pack)를 완충시킬 수 있어야 한다. 이를 위

Table 5 Electricity rate for residential house

Item	Class	Price (Won/kWh)
Rate for residential house	< 100 kWh	55.10
	101~200 kWh	113.80
	201~300 kWh	163.80
	301~400 kWh	248.60
	301~500 kWh	366.40
	> 500 kWh	643.90

해, 본 연구에서는 Table 4와 같이 PHEV 클래스에 따라 충전전압과 충전전류 조건을 적용하였다.

충전기에 유입되는 전력의 전압과 전류이외의 기타 손실조건은 다음과 같다.

- 충전장치 안전계수(safety factor): 0.8
- 충전효율: 82% (120V), 87% (240V)
- 배터리 자체 손실효율: 85%
- 주행사이클 배터리 잔량을 : 20%

이때, 주행사이클 배터리 잔량을이란, 차량이 매일 일정한 거리의 주행을 수행한 후(driving cycle) 충전을 위해 복귀하였을 때, 주행 후 배터리의 전력량 잔량을 나타내는 지표이다. 즉, PHEV 사용자는 일반적인 주행을 수행한 후, 매일 충전을 시도할 때, 완전방전된 배터리를 충전하지 않고, 전체 배터리 용량의 80%만 매일 충전한다고 가정한다.

2.3 배터리 교체 비용

모든 2차 전지와 마찬가지로, PHEV에서도 배터리의 노화 현상이 발생하며, 이로 인한 교체비용을 유발할 수 있다. EPRI는 PHEV 성능목표 중 배터리 교체 주기를 차량의 명목수명이라 할 수 있는 100,000 마일, 또는 주행연수 10년으로 설정하고 있다. 즉, 차량의 명목수명에 해당하는 주행거리 또는 주행기간에는, 초기 출고시의 배터리의 성능이 80% 이하로 저하되지 않도록 설계 및 양산되어야 함을 의미한다.

한편, 본 연구에서는 PHEV의 연료비용을 평가함에 있어, 우리나라 자동차 평균 교체 주기인 7.1년에 걸쳐 시물레이션의 범위를 한정한다. 따라서 이 기간 동안에는 EPRI의 PHEV 성능목표를 기준으로 할 때 배터리 교체비용이 발생하지 않는다고 가정한다.

2.4 전력 요금 조건

Table 5는 2008년 8월 현재의 주택용 저압요금

Table 6 City-gas rate for the use of cogen.

Item	Season	Price (Won/Nm ³)
Cogeneration rate	Winter (12,1,2,3)	571.51
	Summer (5,6,7,8)	552.71
	Others (4,9,10,11)	564.91

* Nm³: normal cubic meter at temperature of 0°C and 100 kPa.

제이다.⁽⁷⁾ 주택용 요금제는 전력량 단계에 따라 누진제가 적용된다. 따라서 PHEV의 일반 사용자들이 주로 충전하게 되는 자택에서는 주택 내 전력 사용량에 따라 PHEV 충전에 필요한 전력을 다양한 요금대에서 구매하게 된다.

본 연구에서는, 이러한 다양한 전력요금에 따라 변동하는 PHEV의 경제성을 평가하기 위하여, 50 원 /kWh부터 전력량 요금수준을 설정하여, 650 원/kWh 까지 PHEV의 충전에 필요한 전력요금을 계산하였다. 이러한 전력요금 범위 내에서, PHEV0, PHEV20, PHEV40, 그리고 PHEV60에 대해 기존 내연기관 승용차 대비 연료비 절감 효과를 계산하였다.

2.5 가정용 연료전지 코제너레이션 시스템

일반적으로 전력은 2차 에너지로서, 화석연료 등의 1차 에너지를 변환하여 얻을 수 있다. 따라서 전력은 중앙전력망이 아니더라도, 최근 정부를 중심으로 추진되고 있는 신재생에너지 분야 중 풍력, 태양광, 연료전지 등의 분산발전으로부터도 다양하게 공급받을 수 있다.

본 연구에서는 위의 신재생에너지원 중 향후 주택 내 설치될 소형 분산발전 시스템(Residential Power Generation, RPG) 중 하나인 연료전지 코제너레이션 시스템에 주목하였다. 연료전지 코제너레이션 시스템은 도시가스 또는 LPG를 1차 에너지원으로 하여 전력과 폐열을 생산한다. 회수된 폐열은 가정 혹은 상업용 건물 내 급탕 및 난방에 이용되고, 발생된 전력은 적절한 변압과정을 거쳐 PHEV 충전전력으로 이용될 수 있다.

이로써 연료전지 코제너레이션 시스템은, Roh 등⁽⁸⁾과 Kintner-Meyer 등⁽¹⁾이 수행한 연구에서 주장하는 일부 계절과 시간대에서의 전력량 부족에 따른 중앙 전력망 내 충격을 완화시킬 수 있는 대안 시스템으로서의 의의를 갖는다.

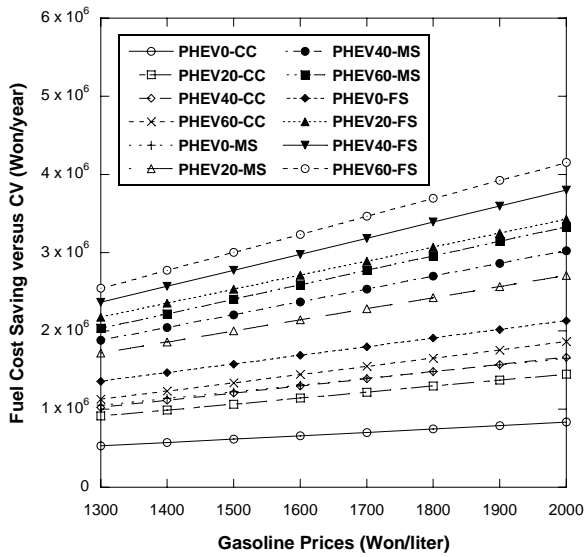


Fig. 1 Variation of fuel cost saving versus CV for different gasoline prices (electricity rate: 50 Won/kWh, the graph of PHEV40-CC and PHEV0-MS are overlapped)

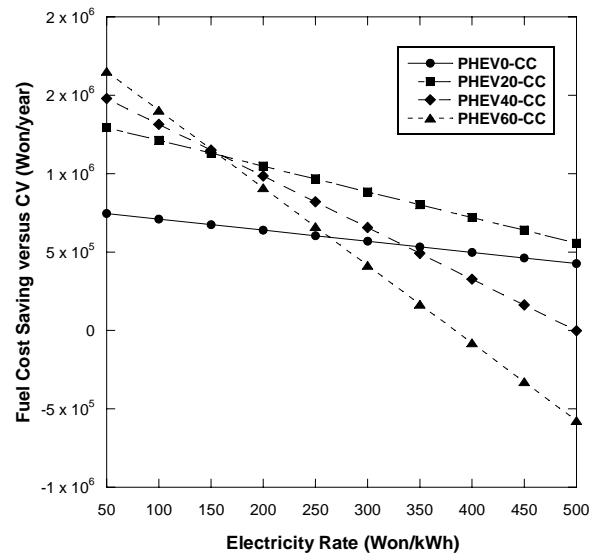


Fig. 2 Variation of fuel cost saving versus CV for different electricity rate (compact car, gasoline price: 1600 Won/liter)

2.5.1 도시가스 요금 조건

Table 6는 2008년 1월 1일 현재 서울지역 도시가스 열병합 요금제의 소매요금을 나타내고 있다.⁽⁷⁾ 본 연구에서는 2008년 1월 현재 열병합 요금제 소매요금의 평균인 550 원/Nm³ 을 기준으로 하여, 향후 천연가스 도입원가의 하락 또는 상승을 감안할 때 350 원/Nm³ 을 가스요금 변동의 하한으로, 700 원/Nm³ 을 상한으로 설정하였다.

2.5.2 연료전지 성능 조건

연료전지 코제너레이션 시스템의 성능 조건은 다음과 같다.

- 연료전지 종류 : PEMFC(polymer electrolyte membrane fuel cell)
- 단위셀 면적(Active Area) : 225 cm²
- 작동온도 : 80 °C
- 이론전압 : 1.280 V
- 인버터 효율 : 90%
- 연료이용율 : 80%
- 셀 운전전압: 0.57 V

본 연구에서는 PHEV 운영과 그에 따른 순수한 주행 비용만을 계산하기 위해 연료전지 코제너레이션 시스템을 설치하기 위한 제반 비용은 논외로 하였다.

3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

3.1 휘발유 가격의 영향

Fig. 1은 2008년 1월 현재의 심야전력요금 평균에 해당하는 50 원/kWh로 전력요금을 상정하였을 때, 리터당 휘발유 가격의 변화에 따른 내연기관 대비 PHEV의 연간 연료비 절감액(fuel cost saving)을 나타낸 것이다. 휘발유 가격이 상승할수록 PHEV의 경제성이 높아지며, 배터리 용량이 가장 커 충전 전력을 가장 많이 필요로 하는 PHEV60, 대형승용차(FS)의 연료비 절감액이 가장 높게 도출됨을 알 수 있다. 이는 PHEV의 특성상, 배터리 전력만을 이용한 전기주행 구간이 늘어날수록, 자연스럽게 내연기관을 이용한 주행이 감소하기 때문에 휘발유 사용량을 줄일 수 있기 때문이다.

한편, 배터리 용량이 작은 PHEV 클래스보다 배터리 용량이 큰 PHEV 클래스의 연간 연료비 절감액 변동의 기울기가 크다. 특히 전력사용량이 많은 대형승용차, PHEV60 클래스에서 상대적으로 가파른 기울기를 보인다. 이러한 양상은 간접적으로 PHEV의 경제성에 영향을 주는 요인이 휘발유 가격의 변동보다는 PHEV의 배터리 용량에 따른 ‘전력사용량’에 더욱 민감함을 의미한다. 따라서 PHEV의 경제성, 즉 연간 연료비 절감액

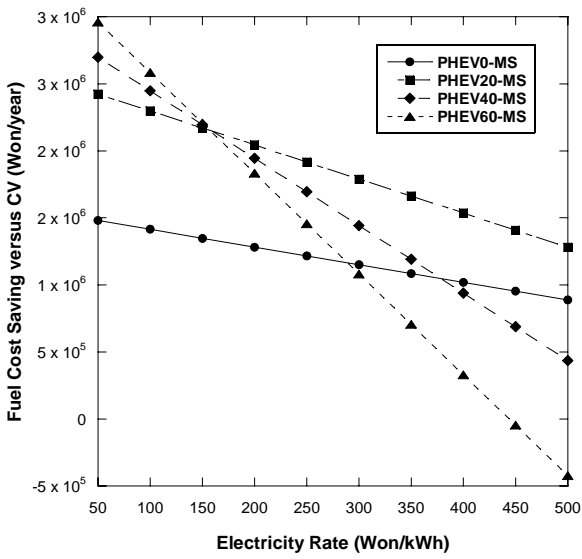


Fig. 3 Variation of fuel cost saving versus CV for different electricity rate (mid-size sedan, gasoline price: 1600 Won/liter)

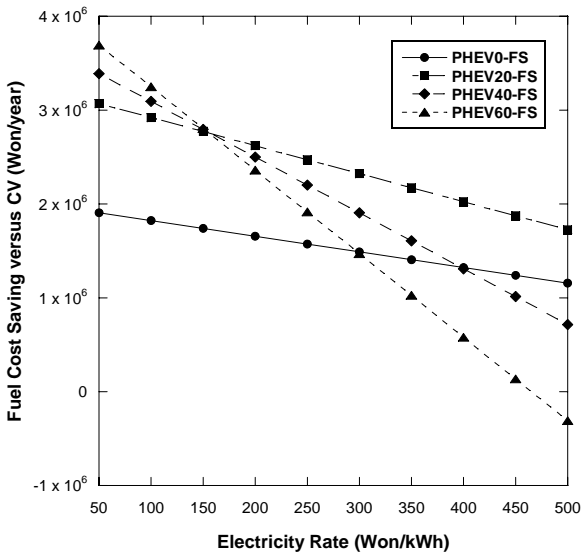


Fig. 4 Variation of fuel cost saving versus CV for different electricity rate (full-size sedan, gasoline price: 1600 Won/liter)

은 휘발유 가격의 변화보다 전력 요금의 변동에 크게 좌우 될 것으로 추정된다.

3.2 전력 요금의 영향

Fig. 2와 Fig. 3, Fig. 4는 전력요금의 변화에 따른 연간 연료비 절감액을 나타낸 것이다. 단위 전력량당 요금이 증가함에 따라 PHEV의 연간 연료비 절감액은 감소하며, PHEV의 배터리 용량이

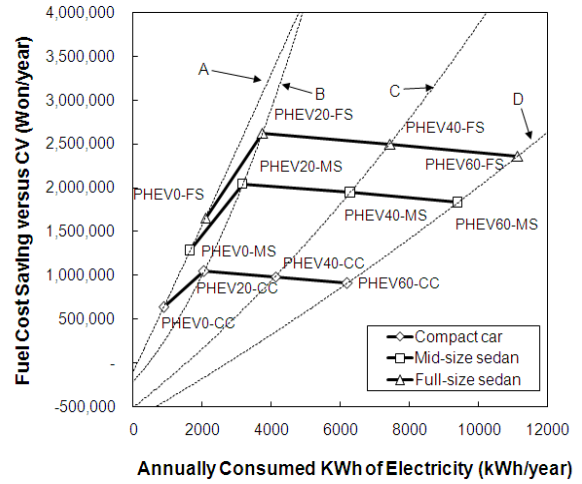


Fig. 5 Variation of fuel cost saving versus CV for different annual kWh of electricity used (electricity rate: 200 Won/kWh)

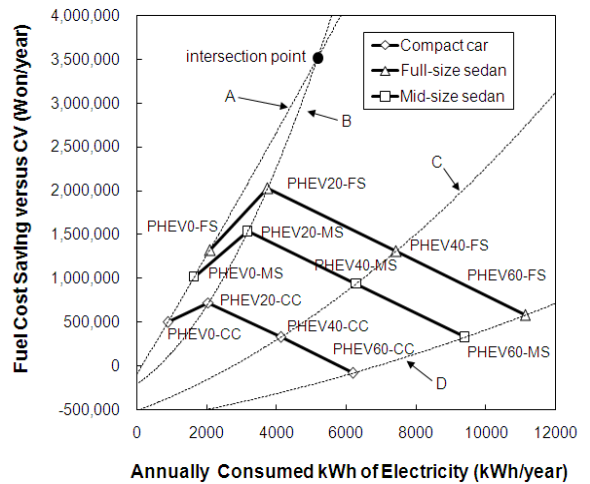


Fig. 6 Variation of fuel cost saving versus CV for different annual kWh of electricity used (electricity rate: 400 Won/kWh)

상대적으로 큰 클래스에서 보다 빠른 기울기로 경제성이 떨어진다. 이것은 전력을 주요 구동 에너지원으로 하는 PHEV의 특성상, 배터리 용량이 상대적으로 더 큰 PHEV에서는 전력요금의 증가에 따른 경제성에의 영향이 더 클 수밖에 없기 때문이다.

주목할 만한 것은, 전력 요금이 증가함에 따라 일부 PHEV 클래스, 특히 PHEV60과 같은 전력사용량이 많은 차량에서는 충전에 필요한 전력요금으로 인하여 100% 가솔린만으로 운행하는 기존 내연기관 차량보다 경제성이 낮아질 수도 있음을

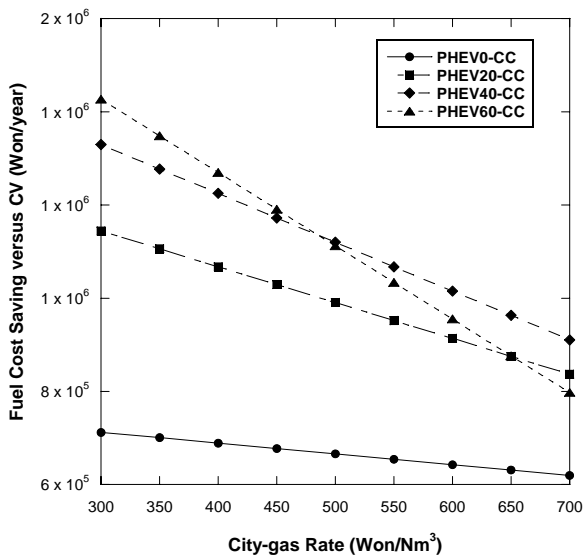


Fig. 7 Variation of fuel cost saving versus CV for different city-gas rate (compact car, gasoline price: 1600 Won/liter)

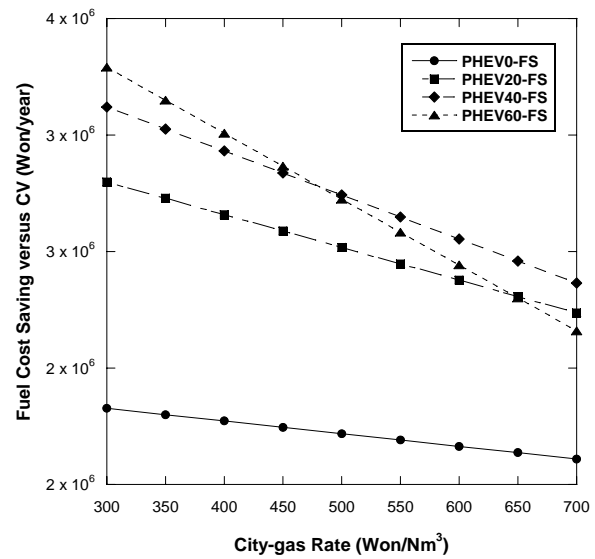


Fig. 9 Variation of fuel cost saving versus CV for different city-gas rate (full-size sedan, gasoline price: 1600 Won/liter)

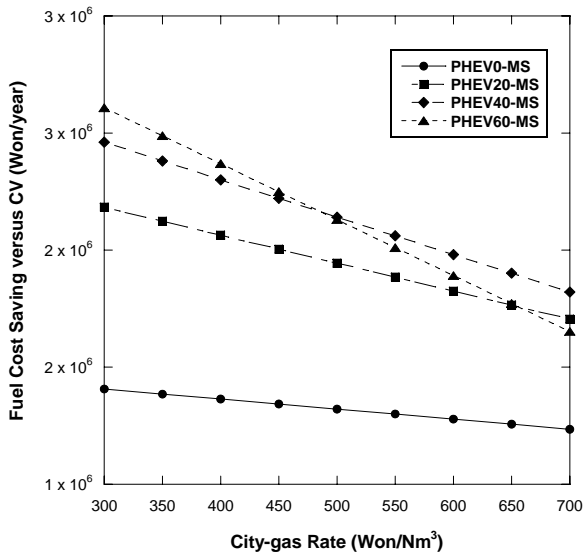


Fig. 8 Variation of fuel cost saving versus CV for different city-gas rate (mid-size sedan, gasoline price: 1600 Won/liter)

보여주고 있다. 특히, 400~500 원/kWh 부근의 전력요금 수준은 Table 5에서 볼 수 있듯이, 주택용 저압요금제 수준으로 충분히 구매 가능한 요금대이므로, 향후 PHEV 사용자들이 주로 충전을 시도할 것으로 예상되는 주택에서의 충전은 누진세 등의 이유로 인하여, 자칫 PHEV의 경제성에 큰 타격을 줄 가능성이 있다. 따라서 PHEV의 빠른

시장 형성과 대중화를 위해서는 배터리 등으로 인한 PHEV의 가격상승요인을 보상할 수 있는 수준의 특별전력요금을 신설하거나 이를 위한 구체적인 인프라가 구축될 필요가 있는 것이다.

또한, Figs. 2, 3, 4에서는, 전력요금이 150 원/kWh에서는 PHEV20과 PHEV40, PHEV60의 연간 연료비 절감액이 서로 근접하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이것은 매년 동일한 거리를 주행하는 PHEV20이나 PHEV40 또는 PHEV60의 사용자가 매일 충전과 주행을 반복하였을 때, 150 원/kWh의 요금수준에서는 경제성이 비슷해질 수 있다는 것을 의미한다. 그러나 일반적으로 배터리 용량이 크게 장착되는 PHEV일수록 차량의 판매가격(retail price)이 상승하기 때문에, PHEV20과 PHEV60의 연간 연료비 절감액이 비슷해서는 더 높은 가격의 PHEV60을 구매하고자 하는 일반 소비자에게 경제적인 면에서 구매 동기를 유발시킬 수 없을 것으로 판단된다.

특히 PHEV60은 PHEV20 보다 시내주행 등에서 ZEV(Zero Emission Vehicles)로서 주행할 수 있는 구간이 길기 때문에 대기 환경 개선에 대한 기여가 높게 평가된다. 따라서 향후 하이브리드 및 PHEV의 관련된 보조금 지급 문제뿐만 아니라 PHEV 충전을 위한 전력요금제에 대한 논의에 대해서는 이러한 PHEV의 특성이 반영되어야 할 것이다.

한편, Figs. 2, 3, 4에서 전력요금이 150 원/kWh

보다 초과하여 200 원/kWh부터 500 원/kWh까지의 요금대에서는 PHEV20의 경제성이 가장 높게 산출되었다. 또한, 전력요금이 상승할수록, 전력요금의 변동에 민감하지 않은 PHEV0의 경제성이 전력량을 많이 필요로 하는 여타의 PHEV 보다 오히려 나아질 수 있음을 보여주고 있다. 따라서 향후 PHEV의 사회적, 경제적 특성을 고려한 특별전력요금이 신설되지 않는 한, PHEV40이나 PHEV60을 주택용 요금제로 충전할 경우에, 차량 가격 대비 연료비 절감 효과를 충분히 확보할 수 있는가에 대한 의문은 계속되리라 판단된다.

3.3 충전 전력량과 PHEV의 경제성

앞서 Table 1과 Table 3의 배터리 용량 및 연비 수치를 바탕으로 PHEV20-FS와 PHEV60-CC의 연간 전력사용량(kWh/year)을 구하면, PHEV20-FS는 3734 kWh/year 이고, PHEV60-CC는 6183 kWh/year 이다. 연간 전력사용량은 두 차량이 약 2배가량 차이를 나타내지만, 연료비 절감으로 대표되는 경제성은 3.2절의 Fig. 5, Fig. 6과 같이 전력량 요금의 변화에 따라 2배 이상의 현격한 차이를 보인다.

이러한 이유는 Fig. 5와 Fig. 6으로 설명될 수 있다. 전력요금이 200 원/kWh에서 400 원/kWh로 상승함에 따라 Fig. 5에서 볼 수 없는 line A와 line B의 교점을 Fig. 6에서는 볼 수 있으며, line C와 D의 구배 또한 Fig. 6에서 급격히 하강한 것을 확인할 수 있다. 이러한 특징은 PHEV20클래스가 PHEV0, PHEV40, PHEV60 클래스보다 상대적으로 전기요금 상승에 따른 경제적 영향을 덜 받는 것으로 이해될 수 있다.

이러한 현상의 근본적인 이유는, 첫째, 전력요금의 누진제 효과를 들 수 있으며, 둘째, PHEV의 순수 전력주행 구간과 내연기관을 이용한 주행 구간의 비율 차이로 인한 각 PHEV 클래스의 전력사용량 특성과 연관된다. PHEV20은 여타의 PHEV 클래스보다 배터리의 전력(순수 전력주행 구간)과 엔진의 동력(내연기관 이용 주행 구간)을 배분 운용할 수 있는 주행 조건(순수전력 주행구간: 40%, 가솔린 엔진동력 주행구간: 60%)에 놓여 있다. 반면에 PHEV40이나 PHEV60의 경우 전력만을 이용하는 주행구간이 각각 60%, 75%로서, 전력요금의 변화에 따른 경제성에의 영향이 PHEV20에 비해 상대적으로 크다.

간접적으로 이러한 결과는, PHEV의 경제성을 최대화시키기 위해, PHEV의 클래스에 가장 적합한 주행거리를 찾는 후속 연구로의 진행을 제안한다. 따라서 향후 연구에서는 각 PHEV 클래스에 적합한 최적주행거리를 산출하여 이에 따른 경제성평가를 수행하여야 할 것으로 판단되며, 자동차 업계의 대응 측면에서는 향후 출시할 PHEV클래스 설계 시 우리나라의 특수한 전력요금과 주행거리조건을 고려해야 할 것이다.

3.4 가스 요금의 영향

Fig. 7과 Fig. 8, Fig. 9는 가정용 연료전지 코제너레이션 시스템을 이용하여 PHEV를 충전하는 경우, 연료전지 시스템에 투입되는 도시가스의 요금변동에 따른 PHEV의 연료비 절감액 변화를 나타낸 것이다. 3.2절의 그래프와 달리, PHEV60의 경제성이 상대적으로 넓은 도시가스 요금 구간, 즉 300~500 원/Nm³까지의 요금수준 내에서 우위를 보이고 있다. 그러나 도시가스 요금이 500 원/Nm³를 넘어섬에 따라 PHEV60의 경제성은 점차 감소하여 PHEV40의 경제성이 가장 높아진다.

주목할 점은, 도시가스요금 상승에 따른 Figs. 7, 8, 9에서의 연료비 절감액 변화 양상이 Figs. 2, 3, 4에서의 전기요금의 상승에 따른 그것과 달라졌다는 것인데, PHEV 각각의 경제성이 역전되는 부분(그래프 교점)이 3.2절의 그래프와는 다른 모습으로 전개되고 있다. 이러한 특징은 연료전지를 이용하여 PHEV를 충전하는 경우, 단위 부피(Nm³) 당 50원의 가스요금 변동보다 단위 전력량(kWh) 당 50원의 전기요금 변동이 PHEV의 경제성에 상대적으로 더 큰 영향을 미침을 의미한다. 즉, 동일한 ‘원 단위폭’을 갖는 전기와 가스의 에너지 단가 상승은, PHEV의 연료경제성에 미치는 영향에 있어, 전기의 요금 상승이 보다 직접적인 PHEV 연료경제성 악화를 가져온다.

이는 연료전지 코제너레이션 시스템을 이용해 PHEV를 충전할 경우 발생하는 단위전력량 당 에너지 요금이 전력요금의 그것보다 작기 때문이다. 도시가스 열병합 요금이 2008년 1월 현재의 요금수준인 550 원/Nm³에서 600 원/Nm³으로 50 원 상승하면, 1kW의 연료전지 시스템이 1 kWh의 전력을 생산하는 데 필요한 도시가스의 전력 생산 단가는 177.1 원/kWh 에서 193.2 원/kWh 으로

16.1원 상승한다. 따라서 50 원의 전력요금(원/kWh) 상승은 PHEV의 충전비용 상승에 직결되어 반영되는 반면, 연료전지 시스템을 이용할 경우, 50 원의 도시가스요금(원/Nm³) 상승은 PHEV의 경제성에 미치는 영향 면에서 전력요금의 그것보다 작다.

4. 결 론

본 연구에서는 우리나라의 전력요금과 가스요금의 변동에 따른 PHEV의 운영비용과 그에 따른 경제성을 파악하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였고, 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 휘발유 가격이 상승할 경우, 전기주행구간이 긴 PHEV 일수록 휘발유 사용량이 적기 때문에 연간 연료비 절감액이 크고, 휘발유 가격변동에 따른 연료비 절감액 변화의 기울기 또한 크다.

(2) PHEV의 배터리 용량이 클수록 ZEV(Zero Electric Vehicles)로 달릴 수 있는 주행거리가 더 길고 판매가격 또한 높아지기 때문에, 배터리 용량이 큰 PHEV 일수록 경제성이 좋아야 하나, 이 조건을 만족시키는 전력요금 구간은 150 원/kWh 이하의 요금수준이다. 특히, 주택용 누진요금제를 적용하면, 일부 PHEV 클래스에서는 CV에 비해 연료비 절감 효과가 없을 수 있다. 또한 전기요금의 변동은 PHEV 클래스 간 경제성 차이를 가장 현격히 유발시키는 요인이다.

(3) 연료전지 시스템을 이용하여 PHEV를 충전하는 경우, 가스요금과 전력요금이 같은 요금 변동폭을 보일 경우, 가스요금의 변동폭에 따른 PHEV의 경제성 변동은 전력요금의 그것보다 작다.

후 기

본 연구는 차세대 연료전지 통합시스템의 지능

형 운전 및 열관리 기술 개발을 위한 국가지정연구실(NRL)사업 및 마이크로열시스템연구센터의 지원으로 진행되었습니다. 아울러 지식경제부 및 국토해양부의 지원에도 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Kintner-Meyer, M., Schneider, M. and Pratt, R., 2007, "Impact Assessment of Plug-in Hybrid Vehicles on Electric Utilities and Regional U.S. Power Grids," Technical Report, Pacific Northwest National Laboratory.
- (2) Simpson, A., 2006, "Cost-benefit Analysis of Plug-in Hybrid Electric Vehicle Technology," Conference paper of National Renewable Energy Laboratory, CP-540-40485.
- (3) Duvall, M., 2002, "Comparing the Benefits and Impacts of Hybrid Electric Vehicle Options for Compact Sedan and Sport Utility Vehicles," Technical Report, Electric Power Research Institute.
- (4) Roh, C. W. and Kim, M. S., 2008, "Impact Assessment of Plug-in Hybrid Electric Vehicles on Electric Utilities," *Proceeding of the KSME Fall Annual Conference*, pp. 2001~2006.
- (5) Roh, C. W. and Kim, M. S., 2008, "A Study on the Strategy of Smart Charging System to Charge the PHEV in the House Which has a 1 kW Fuel Cell Cogeneration System," *Proceeding of the SAREK Summer Annual Conference*, pp. 838~843.
- (6) Park, S. S., 2008, "Technologies for HEV, Plug-in HEV, and FCEV," *Auto-Journal of KSAE*, Vol. 30, No. 4, pp. 43~54.
- (7) The Korea Price Information, 2008, (website: <http://www.kpi.or.kr/>).