

고분자 전해질형 연료전지/2차전지/태양전지 하이브리드 자동차에 대한 모델링 및 특성평가

지현진[†](국방과학연구소)·안효정*·차석원*(서울대학교)·배중면**(한국과학기술원)

Modeling and Analysis of PEMFC/Battery/Photovoltaic Hybrid Vehicle

Hyunjin Ji, Hyojung Ahn, Sukwon Cha and Joongmyeon Bae

Key Words: PEMFC(고분자 전해질형 연료전지), Photovoltaics(태양광발전), Simulation(시뮬레이션), Control strategy(제어전략), Matlab/Simulink(맷랩/시뮬링크)

Abstract

This Paper focuses on modeling and simulation to analyze the characteristic of hybrid vehicle. The system includes proton exchange membrane fuel cell(PEMFC), photovoltaic generator(PV), lead-acid battery, motor, vehicle and controller. Main electricity is produced by the PEMFC and battery to meet the requirements of a user load. When vehicle is parked in a sunny place, extra power is generated by the photovoltaics and is charged in a battery for next drive. Further we evaluate usefulness of this hybrid vehicle by using ADVISOR - the advanced vehicle simulator written in the Matlab/Simulink environment. According to simulation results, the extra power obtained by photovoltaics which have been explored in nature conditions can help to reduce the electrical load of PEMFC and increase the efficiency (over 30%).

기호설명	
P	: 전력[W]
I	: 전류[A]
V	: 전압[V]
R	: 저항[Ω]
N	: 갯수
T	: 온도[K]
G	: 조사량[W/m ²]
m	: 이상계수(ideal factor)
k	: 볼츠만 상수[=1.3854×10 ⁻²³ J/K]
e	: 전자전하량[=1.602×10 ⁻¹⁹ C]

상첨차
0 : 기준 상태

M	: 모듈
C	: 단위전지
하첨차	
SC	: 단락회로(short circuit)
OC	: 개방회로(open circuit)
S	: 직렬
P	: 병렬
amb	: 대기
max	: 최대값

1. 서 론

최근 화석연료의 가격이 상승하면서 효율이 높은 하이브리드 자동차(hybrid vehicle)에 대한 관심이 집중되고 있다. 다양한 에너지원들의 조합으로 운전되는 하이브리드 자동차들 중에서 내연기관/2차 전지 혹은 연료전지/2차 전지에 대한 연구

[†] 책임저자, 회원, 국방과학연구소 기술연구본부
E-mail : grgmachine@add.re.kr
TEL : (042)821-3020

* 회원, 서울대학교 기계항공공학부 대학원

** 회원, 한국과학기술원 기계공학과

가 집중적으로 수행되고 있다. 또한 차량이 높은 가속을 요구하는 상황을 고려하여 단시간에 고출력을 낼 수 있는 슈퍼캐패시터(super capacitor)와의 연동에 대해서도 연구가 진행되고 있다. 이러한 연구들은 실증차량의 제작에 앞서 요소별 용량 및 운전전략 수립을 위해 시뮬레이션을 수행하고 있다⁽¹⁾⁽²⁾.

본 연구에서는 연료전지/2차 전지의 하이브리드 시스템과 함께 태양전지를 추가적으로 접목시킨 차량에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 도시근로자의 운전시간분포를 고려해볼 때, 출퇴근 시간에 자동차 이용이 집중적으로 몰려 있고, 그 이외의 대부분의 시간에는 주차장에서 대기 상태에 있다. 따라서 주차동안 차량의 외장에 장착되어 있는 태양전지모듈로 전력을 발생하여 2차 전지를 충전한다면 에너지 효율이 더욱 상승될 수 있다.

태양전지를 제외한 하이브리드 자동차의 기본적인 요소들의 모델은 Matlab/Simulink를 기초로 프로그래밍된 ADVISOR를 이용하였으며, 최적운전을 위한 제어를 구성하여 주어진 입력 주기(cycle)에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 통해 차량외부에 장착된 태양전지 모듈이 연료전지의 출력 및 2차전지의 충전상태(SOC) 변화에 미치는 영향을 분석하였으며, 태양전지 모듈이 없는 경우와 비교하였다.

2. 본 론

2.1 모델(model)

Fig. 1은 하이브리드 차량의 전체적인 개략도를 보여주고 있다. 차량은 크게 연료전지, 2차전지, 태양전지로부터 운전을 위한 에너지를 공급받는다. 이때 연료전지와 2차전지는 모터(motor)와 직렬 하이브리드 구동 방식(serial hybrid drivetrain)으로 연결되어 있다. 태양전지는 다른 두 전원에 비해서 출력이 상대적으로 낮기 때문에 전력 분배 장치가 아닌 2차전지에 직접 연결되어 있다. 다시 말하면, 태양전지에서 생산된 전력은 차량 구동에 직접적으로 이용되지 않고, 2차전지 충전에만 이용된다.

시뮬레이션 모델에 요구 속도가 입력되면 차량의 현재 속도, 무게, 기어비(gear ratio), 타이어(tire) 마찰력 등을 고려하여 요구속도를 충족시키기 위한 모터의 토크(torque)와 소비 전력이 계산

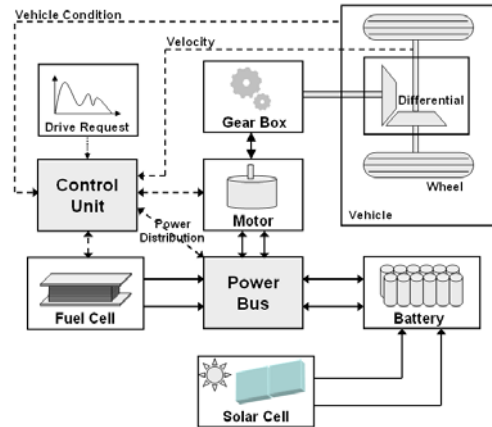


Fig. 1 Schematic of fuel cell/battery/solar cell hybrid vehicle

된다. 계산된 모터 필요전력은 전력분배장치(power bus)에 제어 조건에 따라 연료전지와 2차 전지가 나눠 담당하게 된다. 또한 감속할 시에는 모터에서 브레이크(brake) 정도에 따라 회생전력을 생산하여 2차전지에 충전하기도 한다.

2.1.1 연료전지 모델

하이브리드 차량에서 주로 사용되고 있는 고분자 전해질형 연료전지(PEMFC) 시스템은 크게 연료전지 스택(fuel cell stack), 가습기, 압축기, 물펌프(water pump), 응축기, 연료저장장치 등으로 구성되어 있다. 이때 연료전지 스택은 차량의 최고 속도, 가속도, 무게 등을 고려하여 Table 1과 같이 최대전력, 단위전지의 크기 및 적층개수가 결정되며, 차량 구동용 모터에 주요 전력을 공급한다. 또한 차량의 저부하상태에서 스택의 잉여 전력으로 2차전지를 충전하여 충전상태를 유지하기도 한다.

ADVISOR에서 제공되는 연료전지 모델의 중요 입력 변수는 전력분배장치로부터 계산된 요구 전력과 스택 초기온도이다. 요구전력을 충족시키기 위해서는 연료전지 시스템의 전체 전력(net fuel cell system power)이 연료전지 스택의 생산 전력(gross power of stack)과 스택 운전을 위한 BOP 소비 전력(parasitic power)의 차이와 동일한 값을 가져야 한다.

앞서 언급한 연료전지 스택의 생산전력은 작동 온도, 전류밀도, 반응물의 분압 등의 중요 변수들을 통해 결정된다. 이때 작동온도는 스택의 초기온도와 비가역성을 고려하여 열모델(thermal

Table 1 Operational parameters for the PEM fuel cell model

Type	PEMFC
Net power	50kW
Reactant(anode)	Hydrogen
Reactant(cathode)	Air
Cell area	678cm ²
Number of cells	210
Low limit(voltage)	0.6V

model)을 통해 매순간 계산되어진다. 또한 주변장치(BOP) 소비전력은 연료전지의 작동온도(~80℃) 유지를 위한 냉각용 물펌프의 소비전력과 부하변동에 따른 최적운전 제어를 위한 압축기 등의 소비전력의 합으로 결정된다.

2.1.2 2차 전지 모델

2차전지의 동특성을 표현하기 위해 내부저항모델(internal resistance model), 저항 콘덴서 모델(resistance capacitance model)등이 사용되고 있다⁽³⁾. 내부저항 모델은 빠른 계산 속도에 비해 상대적으로 타당한 결과를 제시할 뿐만 아니라 Matlab/Simulink 환경에서 구축이 용이하기 때문에 본 연구에서 사용되었다. 내부저항모델은 크게 전원과 저항으로 구성되어 있으며 두 파라미터(parameter)는 2차전지의 충전상태와 온도 및 충, 방전 조건에 의해서 결정된다. 현재 차량용 2차전지는 Ni-MH 전지를 많이 사용하고 있으나 본 연구 이후 제작되는 하이브리드 시제차량을 고려하여 납축전지(lead-acid battery)모델을 사용하였다. 2차전지 모델에 대한 구체적인 파라미터는 Table 2와 같다. 이때 납축전지의 충전상태의 상한값은 운행 중 연료전지에 의한 충전시간을 줄이기 위해 0.8로 두었고, 주차 중에는 0.9까지 가능하도록 설정하였다.

2.1.3 태양전지 모델

Table 2 Operational parameters of the lead-acid battery

Type	Lead-acid	
Configuration	VRLA	
Capacity	26Ah	
Voltage(module)	12V	
Number of modules	25	
SOC	high	0.8(0.9)
	low	0.4

Table 3 Operational parameters for the monocrystalline PV module

Type	Monocrystalline
Module power(standard cond')	100W
Open circuit voltage(module)	21.1V
Short circuit voltage(module)	6.63A
Operation volt.(@max. power)	16.3V
Operation curr.(@max power)	6.13A
Number of modules	4

태양전지판은 태양광을 효율적으로 이용할 수 있도록 차량의 보닛(bonnet), 후드(hood), 트렁크(trunk) 등의 외장에 장착되었다고 가정하였다. 태양전지의 특성을 표현하기 위해서 크게 1차 다이오드 모델(one-diode model), 2차 다이오드 모델(two-diode model), 실험모델(empirical model) 등이 사용되고 있다. 본 연구에서는 나머지 두 모델에 비해 상대적으로 제한된 파라미터를 사용하는 실험모델을 사용하였으며, 태양전지 제조사가 제공하는 데이터시트(data sheet)로부터 Table 3과 같은 파라미터를 입력값으로 이용할 수 있었다.

제조사에서 제공된 표준상태에서의 태양전지 모듈의 출력, 단락회로전류(short circuit current), 개방회로전압(open circuit voltage), 병렬개수, 직렬개수($P_{max,0}^M$, $I_{SC,0}^M$, $V_{OC,0}^M$, N_S , N_P) 등의 기본적인 데이터를 바탕으로 단위 전지에 대한 출력, 단락회로전류, 개방회로전압, 저항($P_{max,0}^C$, $I_{SC,0}^C$, $V_{OC,0}^C$, R_S^C) 등을 얻을 수 있다. 이를 통해 작동 조건(V^M , T_{amb} , G_{amb})에서의 단위전지 및 모듈에 대한 전압-전류 특성을 식(1)을 이용하여 구할 수 있다⁽⁴⁾. Fig. 2는 일조량(irradiation)과 패널 온도(panel temperature)에 따른 태양전지의 전류-전

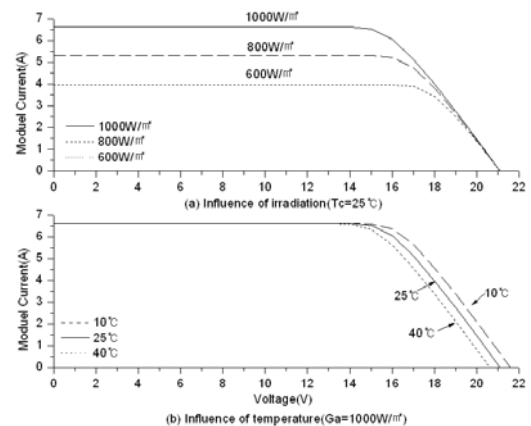
**Fig. 2** Influence of irradiation G_a and of cell temperature T_c in PV module

Table 4 Operational parameters for the vehicle

Coeff' of aerodynamic drag	0.335
Vehicle weight	1200kg
Frontal area	2.0m ²
Wheel radius	0.282m
Motor	75kW AC induction motor/inverter, 320V
Transmission	1st gear(6.6732:1)
Final drive	FD ratio = 1:1

압 특성 곡선을 보여주고 있다.

$$I^M = I_{SC}^M \left[1 - \exp\left(\frac{V^M - V_{OC}^M + R_s^M \times I^M}{N_s V_t^C} \right) \right] \quad (1)$$

이때 $V_t^C = mk(273 + T^C)/e$

2.1.4 기타 차량 모델

전원 공급부를 제외한 차량 모델은 크게 차량 동역학, 모터, 모터컨트롤러, 전원컨트롤러, 차동장치, 기어 등으로 구성되어 있다. 먼저 차량동역학을 이용하여 제시된 초기 조건하에서 부하 속도를 만족하기 위한 휠 토크와 속도가 계산된 후, 차동장치와 변속장치 모델을 거쳐 모터모델의 입력값이 된다. 모터모델은 앞서 계산된 입력값을 만족시키기 위해 필요한 전력을 제어기에 요구하게 되고, 제어기는 제어전략에 따라 연료전지와 2차전지에 전력 담당량을 나눈다. 차량모델에 대한 기본적인 파라미터는 Table 4와 같다.

2.1.5 제어전략

연료전지의 On/Off 상태는 Fig. 3에 볼 수 있듯이 (1) 2차전지의 충전상태, (2) 연료전지 요구 출력(충전상태 반영), (3) 연료전지 이전 On/Off 상태에 의해 결정된다. 이때 x축은 연료전지의 필요 출력으로서 모터가 필요로 하는 출력뿐만 아니라 식(2)와 같이 2차전지의 충전상태를 목표값으로 유지하고자 하는 출력이 추가되어 있다.

$$\begin{aligned} & \text{Adding factor} \\ & = \text{charge power} \times \left(\frac{\text{high SOC} + \text{low SOC}}{2} - \text{SOC} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

즉, 목표 SOC와 실제 SOC의 차이를 고려하여 2차전지가 높은 SOC 상태에서는 연료전지가 상대적으로 낮은 출력을 내고 낮은 SOC 상태에서는 좀더 높은 출력을 내어 SOC 규격 범위를 유지하게 된다. 다시 말해 Fig.3과 같이 제어전략에

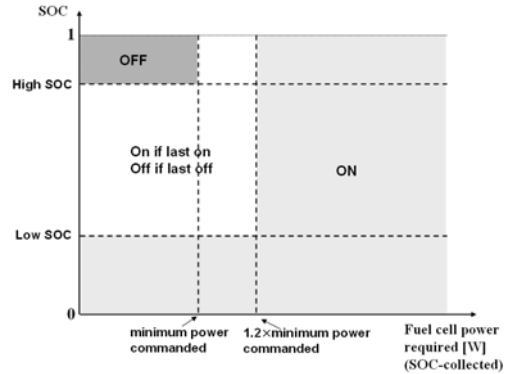


Fig. 3 Determining fuel cell state(on/off). Turn off : SOC gets too high and low power requirement, Turn on : SOC gets low and high power requirement

서 설정한 2차전지의 SOC 상한(high SOC) 및 하한(low SOC)과 연료전지의 최소 요구 출력(minimal power commanded)을 기준으로 영역을 나누어 연료전지의 On/Off 상태가 결정된다.

이때 연료전지의 잦은 On/Off를 방지하기 위해 연료전지가 Off 상태에서 On 상태로 전환할 수 있는 조건을 설정하였다. 충전상태가 하한규격보다 낮은 영역에 있다면 연료전지가 On될 수 있지만 그렇지 않을 경우 일정시간 동안의 연료전지 평균요구출력이 최소요구출력보다 크고, Off 상태 지속시간이 규정된 최소 시간보다 길 경우에만 상태전환이 가능하도록 하였다.

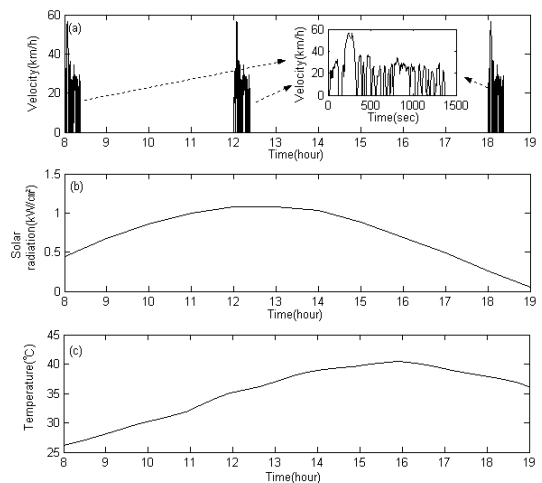


Fig. 4 simulation input parameters (a)demand vehicle velocity (b)solar radiation (c)ambient temperature

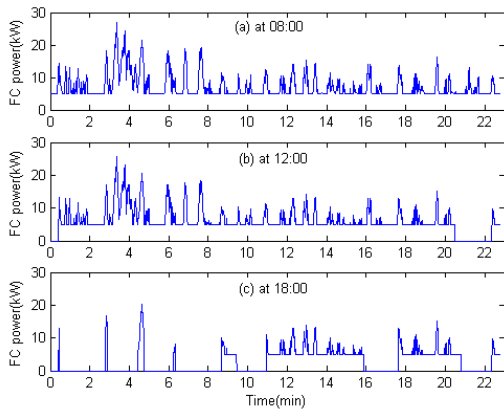


Fig. 5 UDDS cycle - Net fuel cell system power (a)at 08:00 (b)at 12:00 (c)at 18:00

2.2 초기조건

시뮬레이션의 계산시간은 일조시간 및 실제 차량사용시간을 고려하여 8시부터 18시 부근까지 설정하였다. 이때 차량의 요구 주행 속도는 출퇴근 및 식사 시의 차량사용을 모사하기 위해 Fig. 4(a)에서 볼 수 있듯이 대부분의 시간은 정지된 상태로 대기하다가 정각 8시, 12시, 18시에 도시주행모드(UDDS)로 운행한다고 가정하였다. 전 구간에서 도로의 경사도는 0이며, 2차전지의 초기 충전상태는 0.5이다.

일조량은 구름이 없는 여름의 기상데이터를 이용하여 Fig. 4(b)와 같이 8시에 $400\text{W}/\text{cm}^2$ 로부터 시작하여 12~13시 부근에서 최대 $1000\text{W}/\text{cm}^2$ 까지 상승하다가 일몰 이후인 19시에는 거의 $0\text{W}/\text{cm}^2$ 의 값을 가진다고 가정하였다. 이에 따른 태양전지 표면 온도는 $25\sim 40^\circ\text{C}$ 로 변화한다.

3. 시뮬레이션 결과

Fig. 5는 태양전지모듈을 장착한 차량이 Fig. 4(a)의 요구 속도로 운행하였을 때의 연료전지 시스템의 출력변화를 보여주고 있다. Fig. 5(a)에서 볼 수 있듯이 8시 차량 운행에서는 연료전지 시스템이 Off된 시간은 없으며 최소 5kW 이상을 유지하였다. 이는 시스템의 효율을 높이기 위해 연료전지가 저전력영역에서는 작동하지 않게 하고, 초기의 낮은 2차전지의 충전상태(~ 0.5)를 높이기 위한 추가 전력을 생산하도록 제어되었기 때문이다. 이러한 이유로 연료전지 시스템의 빈번한 On/Off가 방지된 것을 확인할 수 있다. 그러나 12

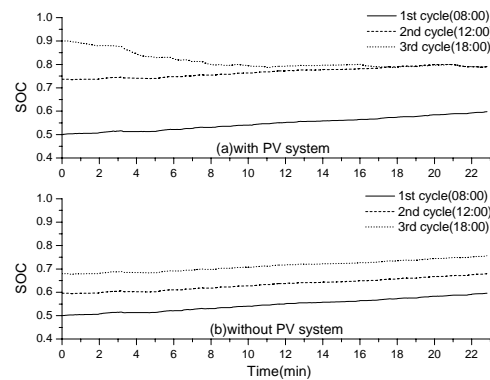


Fig. 6 Battery SOC over 3 cycles (a)with PV system (b)without PV system

시 차량운행에서는 연료전지의 8시 출력 패턴과 유사하나 주행 후반부에 시스템이 Off 되는 것을 볼 수 있다. 이는 차량이 8시 도시주행이후 12시 운행까지 대기하면서 태양전지모듈에 의해 2차전지가 조금씩 충전되어 주었기 때문이다. 이러한 태양전지에 의한 2차전지 충전 효과는 18시의 도시주행에서 더욱 뚜렷하게 나타났다. 즉, Fig. 5(c)에서 볼 수 있듯이 12시 도시주행모드 이후 태양전지모듈에 의한 충전에 의해 18시 차량운행에서는 연료전지 시스템의 전력을 이용하기 보다는 2차전지에 충전되는 전력을 소모하였기 때문에 상당 시간동안 연료전지 시스템이 Off된 상태로 유지하였다.

이러한 연료전지 시스템의 출력변화는 Fig. 6(a)와 같이 2차전지의 충전상태 그래프를 통해서도 확인할 수 있다. 8시 및 12시 차량운행에서는 연료전지의 추가 생산 전력 및 회생전력으로 인해 2차전지의 충전상태 목표값인 0.8까지 증가하는 것을 확인할 수 있다. 뿐만 아니라 각 차량 운행 시간 사이에는 태양전지에 의한 충전으로 인해 충전상태가 증가(08:00↔12:00는 $0.60\rightarrow 0.74$, 12:00↔18:00는 $0.79\rightarrow 0.90$)한 것을 볼 수 있다. 그러나 18시 차량운행에서는 2차전지가 요구 전력의 상당부분을 담당하였기 때문에 충전정도가 0.9에서 0.8로 떨어지다가 일정하게 유지하였다.

Fig. 7과 Fig. 8은 연료전지 시스템과 2차전지의 출력 사용 빈도를 영역별로 나눠 보여주고 있다. 8시와 12시의 주행보다 18시의 도시주행에서는 고출력 영역에서의 연료전지 시스템의 출력 빈도수가 줄어들고 off되어 있는 빈도수가 늘어나는

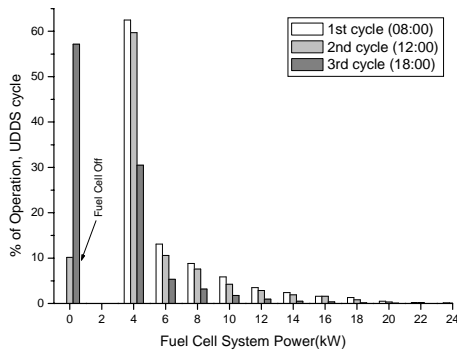


Fig. 7 Distribution of fuel cell power over the UDSS cycle

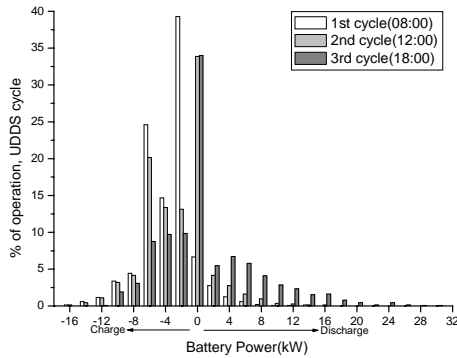


Fig. 8 Distribution of lead-acid battery power over the UDSS cycle

것을 확인할 수 있다. 또한 2차전지에서는 8시와 12시의 주행보다 18시의 도시주행에서 충전보다는 고출력의 방전빈도가 늘어난 것을 확인할 수 있다.

이에 반해 태양전지 모듈을 장착하지 않을 경우, Fig. 6(b)에서 볼 수 있듯이 8시, 12시, 18시 차량운동동안 전지의 충전상태 목표값인 0.8을 만족하기 위해 계속하여 충전을 위주로 전체 시스템이 운전되었으며 각 운행 시간 사이에서의 충전상태의 변화가 없었다. 이러한 태양전지 모듈의 장착을 통해 Fig. 9와 같이 운행 횟수가 증가할수록 연비가 약 30% 향상되는 것을 볼 수 있었다.

4. 결론 및 토의

본 연구에서는 기존의 연료전지/2차전지 하이

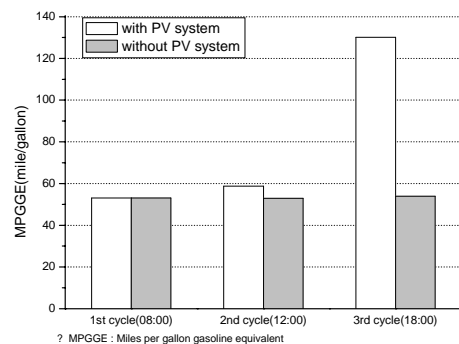


Fig. 9 Fuel economy improvement relative to PV system

브리드 시스템에 비해 운영 효율을 높일 수 있는 태양전지를 사용한 다중 동력 하이브리드 시스템을 제안하였고 시뮬레이션을 통해 태양전지의 효과에 대해서 평가하였다. 비록 태양전지 모듈이 연료전지나 배터리에 비해 상대적으로 출력이 낮았으나, 장시간 대기동안 태양전지모듈이 2차 전지를 충분히 충전할 수 있었으며, 이는 연료전지 시스템의 부담을 줄여주는 효과가 있었다. 따라서 차량의 전체 효율을 30% 정도 증가시키는 것을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- (1) T. Markel, A. Brooker, T. Hendricks, V. Johnson, K. Kelly, B. Kramer, M. O'Keefe, S. Sprik, K. Wipke, 2002, "ADVISOR: a systems analysis tool for advanced vehicle modeling," *Journal of Power Sources*, Vol. 110, pp. 255~266
- (2) Hauer, K.H., Moore, R.M., 2003, "Fuel Cell Vehicle Simulation - Part 1: Benchmarking Available Fuel Cell Vehicle Simulation Tools," *Fuel cells*, Vol. 3, No. 3, pp.84~94
- (3) V.H. Johnson, 2002 "Battery performance models in ADVISOR," *Journal of Power Sources*, Vol. 110, pp.321~329
- (4) E. Lorenzo, G. Araujo, A. Cuevas, M. Egido, J. Minano, R. Zilles, 1994, "Solar electricity engineering of photovoltaic systems," Earthscanm