

시뮬레이션 기반 연료전지/2차전지 하이브리드 미니버스의 설계 및 성능 평가

김민진*, 공낙원*, 이원용[†], 김창수*

*한국에너지기술연구원 고분자연료전지연구단

Design and Performance Evaluation for a Fuel Cell/ Battery Hybrid Mini-Bus Based on a Simulation

Minjin Kim*, Nak-Won Kong*, Won-Yong Lee[†], Chang-Soo Kim*

*PEFC Research Group, New Energy Department, Korea Institute of Energy Research,
71-2 Jang-dong, Yusong-gu, Daejeon, 305-343, Korea

ABSTRACT

In terms of the vehicle efficiency, a fuel cell hybrid system has advantages compared to a conventional internal combustion engine and a fuel cell alone-powered system. The efficiency of the fuel cell hybrid vehicle mainly depends on the maximum power of the fuel cell and therefore it is important to decide the design value of the fuel cell maximum power. In this paper, to estimate the performance of the fuel cell hybrid mini-bus in the design phase the simulator based on the models for the fuel cell stack, the electric battery, the fuel cell balance of plant, the controller, and the vehicle itself is proposed. Additionally, the hybrid mini-bus efficiencies with several different fuel cell powers are simulated for a city driving schedule and are compared on another. Consequently, the proposed simulation scheme is useful to determine the best design value of the fuel cell hybrid vehicles.

KEY WORDS : PEMFC(고분자 전해질 연료전지), mini-bus(미니버스), simulation(모사), design(설계), performance evaluation(성능평가)

기 호

C : 2차전지 방전 손실계수

CR : 충전 제거량, $\text{kJ}/\text{kg}, \text{K}$

C_p : 정압비열, $\text{kJ}/\text{kg}, \text{K}$

DOD : 2차전지 방전량

dt : 샘플링 간격, sec

E : 2차전지 부하 인가전 전압, V

f : DOD 와 R 의 상관관계

I : 2차전지 충방전 전압, V

k : 계산 횟수

n : 2차전지 개수

P : 2차전지 충방전 전력, W

R : 내부 저항, Ω

[†]Corresponding author : wy82lee@kier.re.kr

SOC : 2차전지 충전량 V : 2차전지 전압, V η : 효율

하 첨 자

 fc : 연료전지 $fchv$: 연료전지 하이브리드 자동차

1. 서 론

연료전지는 에너지 효율이 높고 유해 배기물이 거의 없어 친환경적이라는 특징 때문에 자동차의 내연기관을 대체할 차세대 에너지원으로 주목 받고 있다. 하지만 기존 내연기관에 비해 시동 시 연료전지 시스템의 정상화에 많은 시간이 소비되고 부하 변동 시 연료전지 주변장치(BOP)들의 반응 속도가 느리다는 단점을 갖는다. 이와 같은 문제 때문에 연료전지 자동차는 2차전지와 연료전지의 하이브리드 시스템으로 개발되어 오고 있다¹⁻³⁾. 즉 하이브리드 자동차는 친환경 고효율이라는 연료전지의 장점과 외부 부하 변동에 신속한 대응이 가능한 2차전지의 장점을 모두 갖추게 된다.

연료전지/2차전지 하이브리드 자동차는 연료전지 스택, 2차전지, 연료 저장 및 공급장치, 공기공급장치, 열 및 물관리 장치, 전력 변환장치, 제어장치 등으로 구성된다. 때문에 전체 시스템의 효율은 이 모든 구성요소들의 성능에 의해 좌우된다. 이중에서도 하이브리드 자동차 효율의 90% 이상을 결정하는 가장 중요한 요소는 연료전지 시스템 자체의 효율이며, 이는 연료전지 최대 출력과 연료전지와 2차전지의 출력부하 분담 비율에 의해 좌우된다. 그러므로 연료전지/2차전지 하이브리드 자동차의 설계 시 가장 중요한 것은 연료전지 스택의 최대 출력 설계와 스택과 2차전지 간 부하제어의 안정성 확보이다. 스택의 최대 출력이 과도하면 스택 및 주변장치의 제작 비용이 높고 시스템 안정성 확보가 상대적으로 어려워지며, 주된 운전 영역이 최대 출력에 비해 너무 낮아 평균적인 스택 효율이 저하된다. 반면 스택의 최대 출력이 너무 낮으

면 2차전지의 방전 및 충전의 균형이 깨져 자동차의 요구 출력을 안정적으로 감당하지 못하게 된다.

최근 연료전지 시스템에 관심이 집중되면서 다양한 용도의 연료전지를 대상으로 설계 및 성능평가를 목적으로 한 시뮬레이터의 개발이 활발히 이뤄지고 있다⁴⁻⁶⁾. 본 연구에서는 연료전지/2차전지 하이브리드 미니버스를 대상으로 다음 두 가지를 수행하였다. 첫째, 연료전지와 주요 주변장치, 그리고 제어 시스템을 포함한 시뮬레이터를 개발하였다. 개발된 시뮬레이터는 미니버스가 요구하는 출력을 주어진 제어 전략에 따라 연료전지와 2차전지를 통해 충당하고 이때의 미니버스 시스템 효율을 계산해준다. 둘째, 개발된 시뮬레이터를 바탕으로 미니버스의 주어진 운전패턴에서 시스템 효율을 극대화시키는 스택의 최대 출력을 도출하고 미니버스 성능 평가를 수행하였다.

2. 시뮬레이터 개발

2.1 연료전지/2차전지 하이브리드 미니버스

대상 시스템은 25인승 도심 순환형 미니버스이며 최대 속도는 70 km/h, 미니버스 모터의 최대 출력은 90 kW 이다. Fig. 1은 연료전지/2차전지 하이브리드 미니버스의 구성도이다. 연료전지 시스템은 전기를 발생하는 스택과 이를 증폭하는 DC/DC 컨버터, 그리고 스택에 연료 및 공기공급

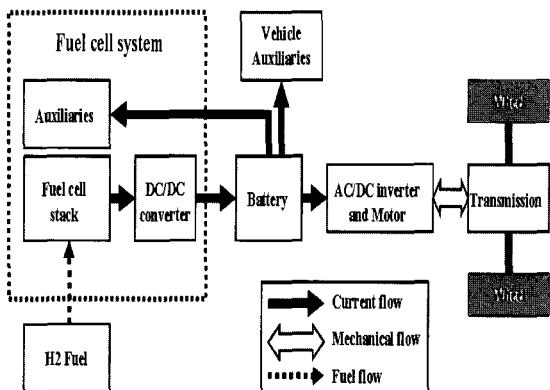


Fig. 1 Configurations of the fuel cell/battery hybrid mini-bus

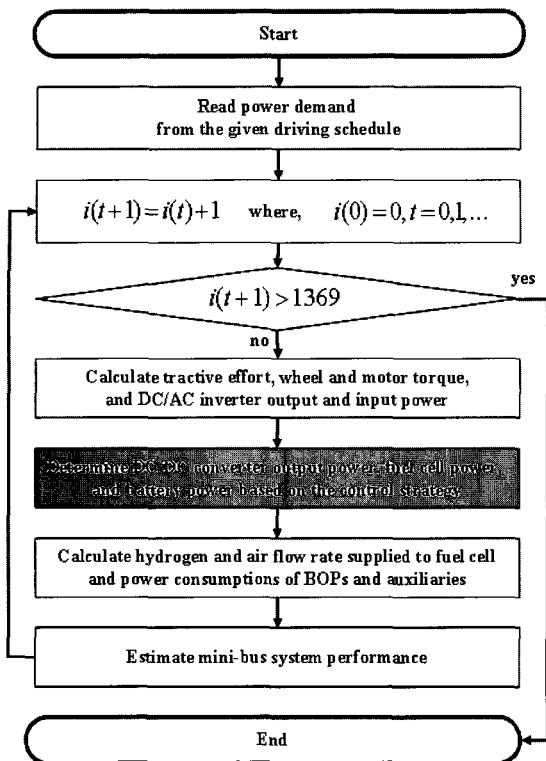


Fig. 2 Algorithm of the proposed simulator

과 물 및 열 관리를 담당하는 주변장치로 구성된다. 제어기는 연료전지 시스템과 2차전지 사이의 동력 분배를 조절하며 공급된 동력을 DC/AC 인버터를 통해 최종적으로는 모터에 전달되어 미니버스가 구동된다.

2.2 시뮬레이터 알고리즘

제안된 시뮬레이터는 Fig. 2와 같이 Backward Schemes을 기반으로 구성된다. 먼저, 주어진 미니버스 운전패턴으로 부터 요구 동력을 결정하고 DC/AC 인버터에서 이에 필요한 DC 출력을 계산하고 이를 받아 제어기는 연료전지와 2차전지의 출력을 분배하고 연료전지에 할당된 부하를 충당하기 위한 연료 및 공기 공급을 추적하여 주변장치의 소비 동력을 계산하게 된다. 이와 같은 과정을 전 운전 패턴에서 수행하면 연료전지, 2차전지, 그리고 주변장치 모두를 반영한 미니버스 시스템

효율이 계산된다.

2.3 모델링

제안된 시뮬레이터에 포함된 주요 구성요소로는 연료전지 스택, 2차전지, 제어기, 전력변환기 등을 들 수 있으며 그 외에도 스택에 공기를 공급하는 공기 압축기, 연료전지 온도제어를 위한 물펌프 및 펜 등 다양한 운전 장치들도 포함되어 있다.

먼저, 대상 시스템의 연료전지는 Polymer Electrolyte

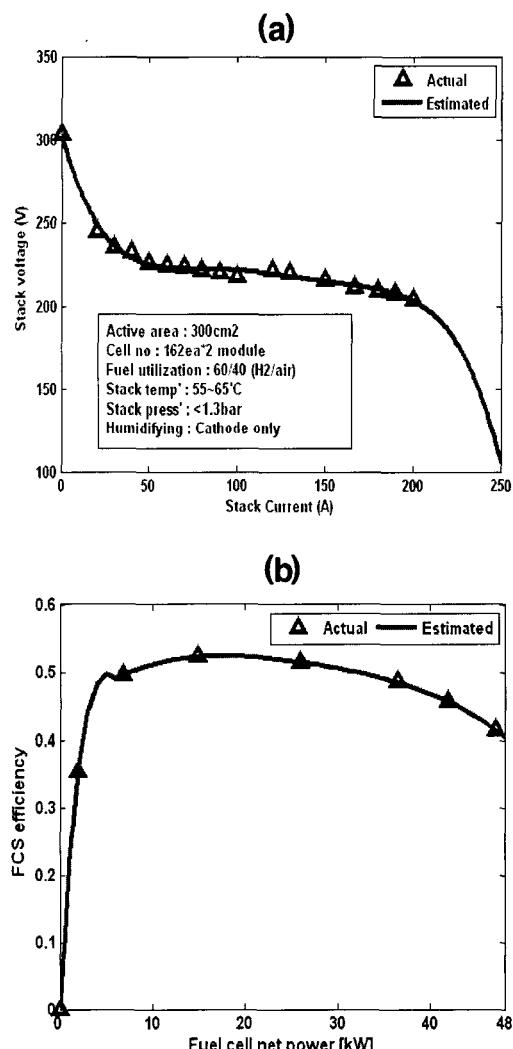


Fig. 3 Estimation curve of fuel cell stack (a) IV performance curve (b) fuel cell power vs. efficiency curve

Membrane Fuel Cell(PEMFC)를 사용하여 연료전지 성능 모델은 실제 연료전지의 실험 데이터를 바탕으로 구성되었다. Fig. 3은 연료전지 스택의 IV 곡선과 출력에 따른 효율을 보여준다.

본 연구의 시뮬레이션에 사용된 2차전지는 12 V 배터리 24개로 구성되어 있고 최대 출력은 90 kW이다. 샘플링 시간 dt 마다 전력 $P(k)$ 로 충전 시 2차전지 충전량은 아래의 식 (1)에서 식 (11)과 같이 구할 수 있다. 단, $CR(0) = 0$, 축전지 내부저항과 DOD 의 상관관계는 실험을 통해 도출했다.

$$E(k-1) = 6((1 - DOD(k-1))0.22 + 1.945)n \quad (1)$$

$$R = f(DOD)n \quad (2)$$

$$I(k-1) = \frac{E(k-1) - \sqrt{E(k-1)^2 - 4RP(k)}}{2R} \quad (3)$$

$$CR(k) = \frac{CR(k-1) + (dtI(k-1))^{1+C}}{3600} \quad (4)$$

$$DOD(k) = CR(k)/C_p \quad (5)$$

$$SOC(k) = 1 - DOD(k) \quad (6)$$

$$E(k) = 6((1 - DOD(k))0.22 + 1.945)n \quad (7)$$

$$I(k) = \frac{E(k) - \sqrt{E(k)^2 - 4RP(k)}}{2R} \quad (8)$$

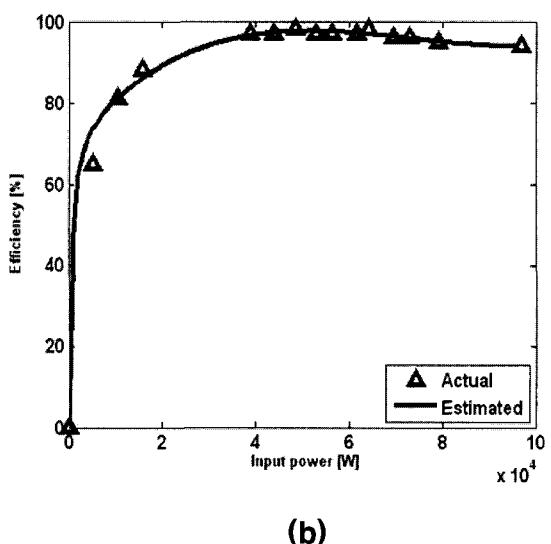
$$V(k) = E(k) - RI(k) \quad (9)$$

반면, dt 마다 전력 $P(k)$ 로 방전 시 2차전지 충전량은 식 (4)와 식 (8)을 식 (10)과 식 (11)로 대체한 후 위의 충전량 계산 과정을 그대로 사용한다.

$$CR(k) = \frac{CR(k-1) - dtI(k-1)}{3600} \quad (10)$$

$$I(k) = \frac{-E(k) + \sqrt{E(k)^2 - 4RP(k)}}{2R} \quad (11)$$

하이브리드 미니버스의 연료전지 시스템 출력은 자동차 요구동력 및 2차전지 충전량(State of Charge: SoC)에 따라 결정된다. 이를 구현하기 위해 자동차 요구동력과 2차전지 충전량을 일정 구간으로 구분하고 하나의 구간 내에서 동일한 연료전지 시스템 출력을 유지하는 Step Control 방식을 사용하였다. Table 1은 본 시뮬레이션에 도입



(a)

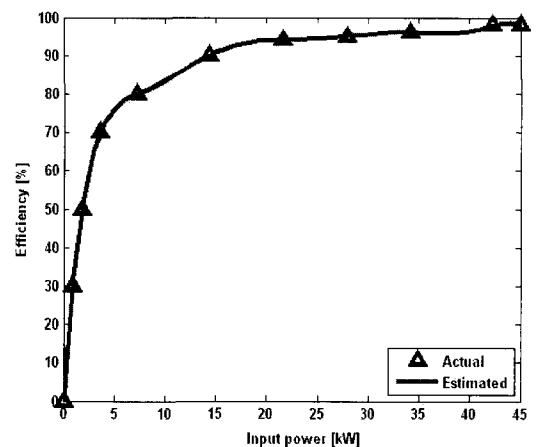


Fig. 4 Estimation curve of a power management system (a) DC/AC inverter efficiency curve (b) DC/DC converter efficiency curve

Table 1 Step control rule: percentage of the DC/DC output power on the maximum fuel cell power according to the power demand and the battery SOC

Criteria	$SOC < 0.5$	$0.5 \leq SOC < 0.6$	$0.6 \leq SOC < 0.7$	$0.7 \leq SOC < 0.8$	$0.8 \leq SOC$
$P < 20$	75%	75%	75%	58%	58%
$20 \leq P < 60$	75%	58%	42%	42%	15%
$60 \leq P < 90$	58%	58%	42%	15%	15%
$90 \leq P$	58%	42%	15%	15%	15%

Table 2 Vehicle parameters

Transmission	
Number of gears	1
Total gear ratio include differential	6.7
Electric motor	
Technology	Siemens AC induction motor
maximum torque	700 Nm
maximum speed	4200 rpm
Motor efficiency	0.9
Mass balance	
Shell mass	5000 kg
Payload	70kg(1 Driver)
Fuel(full tank assumed)	200 kg
Test weight	5500 kg

2.4 성능평가 지표

하이브리드 미니버스의 성능평가 지표는 크게 연료전지 효율(식 12), 미니버스 시스템 효율(식 13), 그리고 연비(식 14)로 구분된다. 먼저, 연료전지 효율은 공급된 수소의 에너지 대비 연료전지의 전기화학반응을 통해 발생된 전력에너지에서 전력 변환에 활용된 DC/DC Converter의 손실 에너지와 연료전지 구동에 이용된 BOP들의 소비에너지 를 뺀 값으로 정의된다. 여기에 2차전지의 충방전 에너지와 충방전 손실을 고려하여 계산하면 미니버스 효율이 계산된다. 연비는 미니버스가 100 km 를 이동할 때 소비되는 수소량으로 정의된다.

된 Step Control Rule을 나타낸다.

전력변환기는 DC/DC 컨버터와 DC/AC 인버터로 구분된다. Fig. 4에서와 같이 DC/DC 컨버터는 최대 효율이 95% 이상이며 출력 60 kW까지 변환이 가능하다. DC/AC 인버터는 효율이 96~98%인 기기이다. 그 외 미니버스 요소들의 간략한 사양은 Table 2에서 볼 수 있다.

$$\eta_{fc} = \frac{DC/DC \text{ converter output power}}{\text{hydrogen energy}} \quad (12)$$

$$\eta_{fchv} = \frac{\text{power demand of wheel}}{\text{hydrogen energy} + \text{battery power}} \quad (13)$$

$$\eta_{mileages} = \frac{\text{mass of hydrogen fuel}}{\text{driving distance}} \quad (14)$$

3. 연료전지 최대 출력 설계

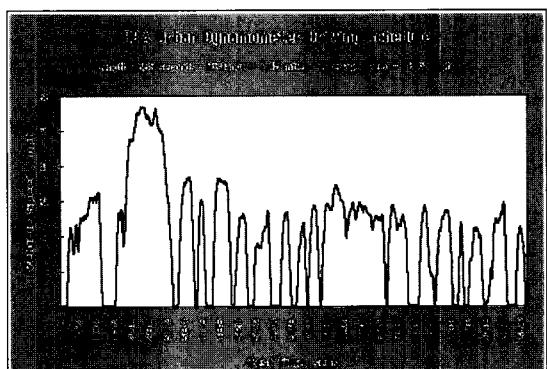


Fig. 5 EPA urban dynamometer driving schedule

Table 3 Simulation results for the system performance by changing the fuel cell maximum power

최대 출력 (kW)	수소연비 (H ₂ kg/100km)	FC시스템 효율(%)	미니버스 효율(%)
30	2.20	48.3	43.7
40	1.95	47.6	44.1
50	2.40	46.1	41.1
60	2.82	44.7	38.5
70	3.21	43.5	36.3

3.1 미니버스 운전패턴

미니버스는 도심 지역의 특정 코스를 반복 순회하는 주행 패턴을 보인다. 때문에 도심 지역의 주행 패턴을 나타내는 데이터를 기반으로 연료전지 /2차전지 하이브리드 미니버스의 성능을 평가할 수 있다. 본 시뮬레이션에 활용한 데이터는 Fig. 5

와 같이 EPA Urban Dynamometer Driving Schedule (UDDS)를 활용하였다. 이는 일반적으로 "LA4" 또는 "the city test"라고 불려지며 도심 주행 패턴을 나타낸다.

3.2 연료전지 최대 출력 설계 결과

주어진 운전패턴을 통해 대상 미니버스의 효율이 가장 높은 연료전지의 최대 출력을 도출하기 위해 시뮬레이터의 연료전지 최대 출력을 30~70 kW, 10 kW씩 변화를 주며 시스템 성능을 평가하였다. Table 3에서 알 수 있듯이 연료전지 최대 출력을 40 kW로 수행한 결과가 연료전지 효율, 미니버스 통합 효율, 그리고 수소의 연비 측면 모두에서 가장 성능이 우수한 것으로 판단된다. 또한 연료전지 최대 출력 40 kW를 전 후로 세 가지 성능 지표가 모두 저하되는 것으로 보아 연료전지의 설계 출력이 너무 작거나 너무 클 때 시스템 성능이

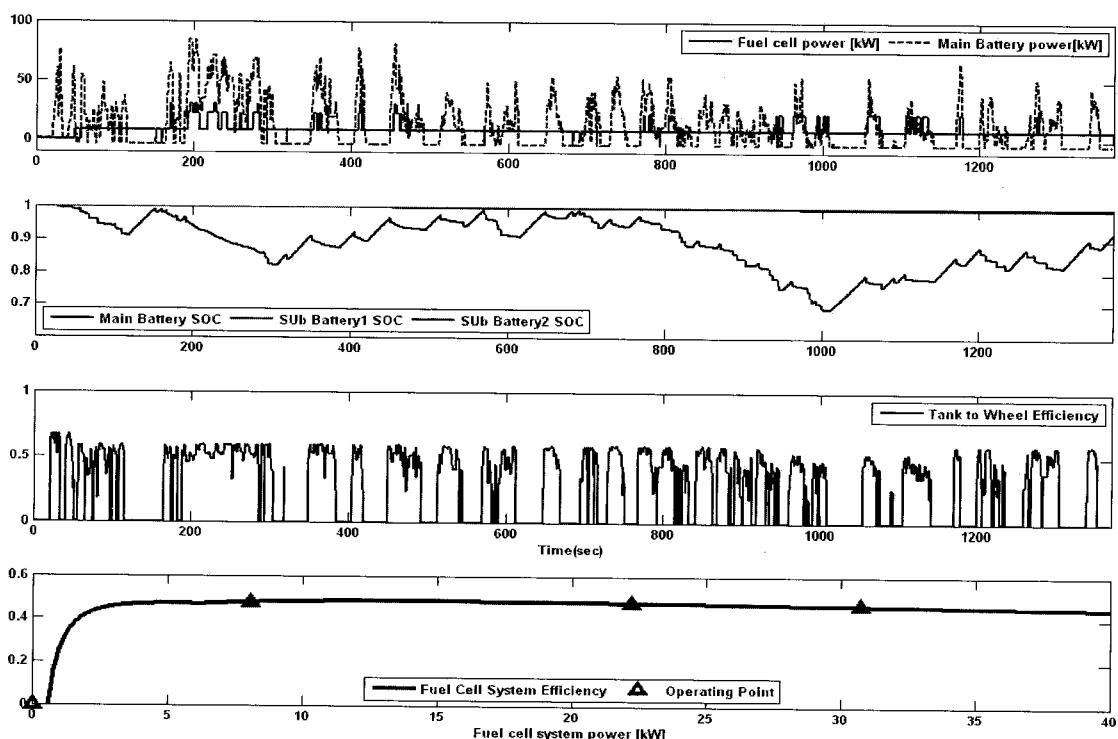


Fig. 6 Performance trends for the hybrid mini-bus with design value during UDDS

저하된다는 사실을 확인 할 수 있다.

4. 하이브리드 미니버스 성능 평가

Fig. 6는 연료전지 최대 출력의 설계값으로 도출된 40 kW를 적용하여 UDDS 운전 패턴 한 사이클을 주행한 결과를 보여준다. 제안된 하이브리드 미니버스는 시스템 요구 출력에 따라 연료전지와 2차전지의 출력 분배가 조화롭게 이루어졌음을 알 수 있다. 즉, 주행 중 2차전지의 잔류 충전량이 2차전지의 충방전 효율이 높은 구간인 1~0.7 사이에서 안정적인 변화를 보였으며 연료전지도 고효율 구간인 출력 5 kW 이상의 구간에서 지속적으로 운전되었다. 결국 주어진 주행패턴 동안 미니버스 시스템 효율도 평균효율 44% 근처에서 안정적으로 움직였음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 연료전지/2차전지 하이브리드 미니버스 설계를 위한 시뮬레이터를 개발하여 이를 통해 미니버스 효율을 극대화시키는 연료전지 최고 출력을 도출했으며 도출된 설계값을 도입했을 경우 하이브리드 미니버스가 최적 성능을 발휘한다는 것을 확인하였다. 이와 같이 연료전지 시스템의 설계 단계에서 시뮬레이션을 기반으로 최적 설계값을 도출하고 예상 성능을 평가하는 것은 실제 시스템 효율을 향상시키는 것은 물론, 시스템 제작 시 흔히 발생할 수 있는 시행착오로 인한 비용과 시간 낭비를 미연에 방지하는데 매우 효과적이다. 제안된 설계 및 평가 방법은 다양한 규모의 연료전지 하이브리드 자동차를 효율적으로 설계하는데 널리 이용될 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 과학기술부와 산업자원부의 후원으로 이뤄졌다.

참 고 문 헌

- 1) K.-S. Jeong and W.-Y. Lee, "Energy management strategies of a fuel cell/battery hybrid system using fuzzy logics", Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 15 No. 1, 2004, pp. 1-11.
- 2) J.V. Mierlo, G. Maggetto, and Ph. Lataire, "Which energy source for road transport in the future? A comparison of battery, hybrid and fuel cell vehicles", Energy Conversion and Management, Vol. 47, 2006, pp. 2748-2760.
- 3) M.-J. Kim and H. Peng, "Power management and design optimization of fuel cell/battery hybrid vehicles", Journal of Power Sources, In press, 2006.
- 4) R. M. Moorea and K. H. Hauerb, "A dynamic simulation tool for hydrogen fuel cell vehicles", Journal of Power Sources, Vol. 141, 2005, pp. 272-285.
- 5) B. Sorensen, "Assessing current vehicle performance and simulating the performance of hydrogen and hybrid cars", International Journal of Hydrogen Energy, In press, 2006.
- 6) J. Hellgren, "Life cycle cost analysis of a car, a city bus and an intercity bus power train for year 2005 and 2020", Energy Policy, Vol. 35 No. 1, 2007, pp. 39-49.