

직렬형 플러그인 하이브리드 전기 버스의 엔진 구동 전략에 따른 시뮬레이션 기반 연비 분석

김진성·이치범·박영일*

서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

Analysis of Fuel Economy for Series Plug-in Hybrid Electric Bus according to Engine Operation Strategy Based on Simulation

Jinseong Kim · Chibum Lee · Yeong-il Park*

Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology,
Seoul 139-743, Korea

(Received 2 January 2014 / Revised 21 March 2014 / Accepted 30 April 2014)

Abstract : Because of high oil prices and emission gas problems, many governments tighten regulation of fuel economy and emission gas. For Passenger car, there are many researches for plug-in hybrid electric vehicles and they are being manufactured. On the other hand, there are few researches for plug-in hybrid electric bus that is heavy commercial vehicle. In this study, analysis of fuel economy for series plug-in hybrid electric bus according to engine operation strategy based on simulation is conducted. Forward simulator is developed using Autonomie. Engine operation strategies consist on constant engine operation strategy and engine on/off operation strategy. Considering the engine operation strategy, results of vehicle speed, engine operating points and fuel economy are obtained and analyzed. As a result, engine on/off operation strategy has more advantage than constant engine operation strategy in terms of fuel economy.

Key words : Series plug-in hybrid electric vehicle(직렬형 플러그인 하이브리드 전기 자동차), Forward simulation (전방향 시뮬레이션), Engine operation strategy(엔진 구동 전략), Fuel economy(연비)

1. 서론

고유가와 지구 온난화 문제가 지속되면서 세계 각국의 연비와 온실 가스 배출 규제가 강화되고 있다. 문제의 근원인 화석 연료를 에너지원으로 하는 내연기관을 대체하기 위해 전력을 기반으로 하는 하이브리드 전기 자동차, 전기 자동차, 연료전지 자동차 등의 연구가 진행되고 있다.¹⁾ 승용급 차량의 경우 양산 단계에 이르렀고 많은 자동차 회사에서 다양한 형태의 전력 기반 자동차를 출시하고 있다.

전력 기반 자동차 중에서 플러그인 하이브리드

전기 자동차는 전기 에너지를 직접적으로 사용할 수 있는 동력전달계와 발전을 위한 내연기관을 탑재하여 전기 자동차와 하이브리드 전기 자동차의 중간적 특성을 가지는 친환경 자동차로서, 하이브리드 전기 자동차보다 강화된 저공해 성능을 확보하고 전기 자동차의 제한된 주행거리를 확대할 수 있는 자동차이다. 하이브리드 전기 자동차와는 달리 엔진을 사용하지 않고 전기구동만으로 일정 거리까지는 주행 가능한 전기 자동차와 같은 무공해 자동차이며, 한번 충전으로 하이브리드 전기 자동차 동등 이상의 주행거리를 확보하여 잦은 충전의 불편함이 없는 자동차이다.²⁾ 대표적으로 Toyota사

*Corresponding author, E-mail: yipark@seoultech.ac.kr

의 Prius PHEV나 GM사의 Volt가 있다. 이와 더불어 승용 플러그인 하이브리드 전기 자동차에 대한 연구 및 분석은 상당 부분 이루어지고 있으나, 상용급의 플러그인 하이브리드 전기 버스에 관한 연구는 미비한 실정이다.

본 논문에서는 직렬형 플러그인 하이브리드 전기 버스의 엔진 구동 전략에 대하여, 시뮬레이션을 통한 연비 분석을 수행하였다. 먼저 2절에서 대상 시스템의 구조와 시뮬레이션 프로그램 구성에 대해서 소개하였고, 3절에서는 시뮬레이션에 적용된 엔진 구동 전략에 대해 설명하였다. 4절에서는 2절과 3절에서 설명한 차량 시스템과 엔진 구동 전략을 바탕으로 시뮬레이션을 수행하여 도출한 결과를 정리하였고 엔진 구동 전략에 따른 연비 결과를 분석하였다.

2. 대상 시스템

2.1 차량 구조 및 제원

대상 시스템은 Fig. 1과 같은 직렬형 플러그인 하이브리드 전기 버스 시스템이다. 배터리의 특정 사용 가능 범위 내에서는 순수 전기자동차로 주행을 하고 배터리의 SOC가 사용 제한 범위를 초과하게 되면 직렬형 하이브리드 형태로 전환되어 내연기관과 직렬로 연결되어 있는 제너레이터를 통해 요구되는 전기적 동력을 충족시킴으로써 총 주행거리를 증대시킬 수 있다.³⁾ 차량 구동용 모터는 최대 속도 100km/h 이상, 20% 경사각에서 20km/h 정속 주행을 목표 성능으로 하여 이를 충족하는 최대 출력 120kW급 모터 두 개를 적용하였다.⁴⁾ 외부 환경 파라미터와 차량의 구체적인 제원은 Table 1과 같다.

2.2 시뮬레이션 프로그램 구성

차량 연비 시뮬레이션을 위해서 상용 프로그램인 Autonomie를 이용하여 전방향 시뮬레이션 프로그램을 구성하였다. Autonomie는 미국 Argonne National Laboratory에서 제작한 Matlab/ Simulink기반 전방향 시뮬레이션 프로그램이다.⁵⁾ Fig. 2는 Autonomie를 이용하여 구성된 전방향 시뮬레이션 프로그램을 보여준다. Autonomie는 크게 운전자 모델, 환경 모델, 차량 제어 모델, 차량 단품 모델로 구분이 되며, 모두 Matlab/ Simulink 환경에서 구성 및 수

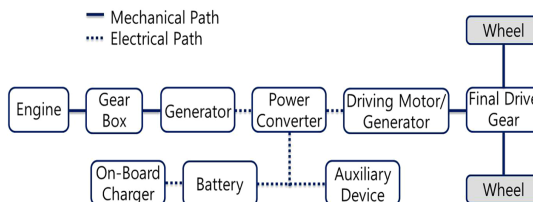


Fig. 1 Schematic of the vehicle model

Table 1 Constants for simulation

Property	Unit	Value
Air density, ρ	kg/m^3	1.293
Frontal area, A_f	m^2	6.6
Air drag, D_{air}	-	0.8
Rolling resistance, f_r	-	0.01
Tire radius, r_{tire}	m	0.478
Gravity, g	m/s^2	9.81
Final drive gear effi., η_{fd}	%	95
Conventional vehicle mass, M	kg	12000 (CVW)
Electrical power loss, P_{loss}	W	3500

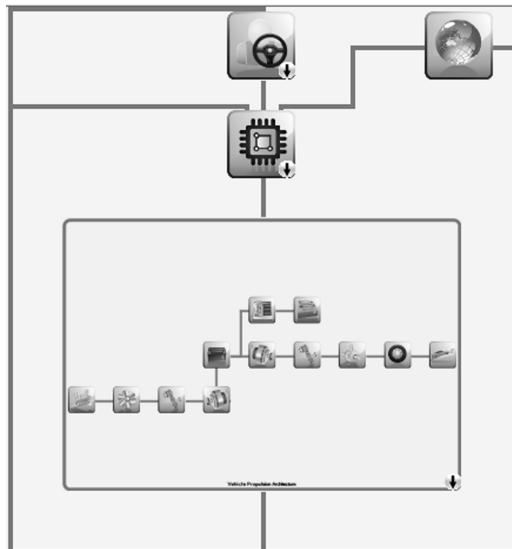


Fig. 2 Forward simulator using Autonomie

정이 가능하다.

본 연구에서는 Autonomie내에 내장되어 있는 단품 모델을 수정하여 단품 모델링 하였고 차량 제어 모델에서 엔진 구동 전략을 구성하였다.

3. 엔진 구동 전략 개발

직렬형 플러그인 하이브리드 시스템의 경우 구동 모터에 의해서만 차량 추진을 하고 엔진은 차량 구동과는 상관없이 발전기를 구동시켜 배터리의 부족한 출력을 보충하고 충전하는데 사용된다. Fig. 3은 직렬형 플러그인 하이브리드 시스템의 주행 거리를 확장하기 위한 대표적인 배터리 사용 방안을 나타낸다. 운행 초기시 완충된 배터리 에너지를 이용하여 가능한 순수 전기 자동차와 같은 형태로 주행한 후 배터리의 SOC가 방전 제한 선에 이르게 되면 엔진을 구동시켜 주행에 필요한 동력 보조를 수행하여 일반적인 하이브리드 전기 자동차와 같은 모드로 주행하게 된다.⁶⁾ 이러한 전략을 구사하는 시스템을 EREV(Extended Range Electric Vehicle)이라고도 한다. 본 연구에서는 전기 자동차 모드로 주행한 후 배터리 SOC가 20%까지 낮아진 상태라고 가정하고 하이브리드 전기 자동차 모드로 주행하면서 배터리 SOC를 일정하게 유지하도록 하는 엔진 구동 전략을 개발하였다.

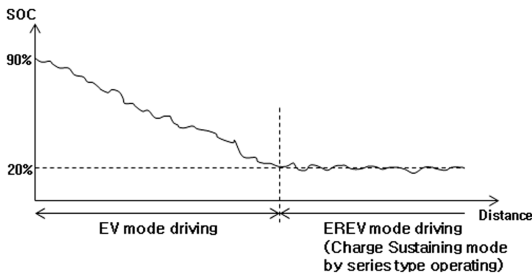


Fig. 3 Control strategy for the series PHEV

3.1 엔진 항시 구동 전략

엔진 항시 구동 전략은 차량 주행을 시작하면 엔진을 항상 켜두는 전략이다. 배터리 SOC상태와 상관없이 엔진을 항상 켜서 일정한 파워를 출력하게 하는 전략이다. 제어가 비교적 단순하다는 점과 상대적으로 작은 출력의 엔진을 적용 가능하다는 점이 엔진 항시 구동 전략의 장점이며 요구되는 파워를 정격으로 출력할 수 있는 엔진이 요구된다. 본 연구에서는 정격 출력에 의한 제약에서 벗어나고자 170kW급의 비교적 큰 엔진을 적용하였다.

3.2 엔진 On/Off 구동 전략

엔진 On/Off 구동 전략은 배터리 SOC 상태가 일정 이하일 때 엔진을 켜다가 SOC 상태가 일정 이상이면 엔진을 끄는 과정을 반복하는 전략이다. 엔진 항시 구동 전략과 다르게 SOC 상태에 따라 엔진이 켜지므로 주로 엔진의 효율이 좋고 높은 파워 영역에서 구동하도록 하여 부족한 파워를 보충한다.⁷⁾ 본 연구에서는 배터리 SOC 20% 이하일 때 엔진이 켜지고 차량이 회생 제동하거나 배터리 SOC 25% 이상이면 엔진을 끄도록 구성을 하였다.

4. 시뮬레이션

4.1 시뮬레이션 과정

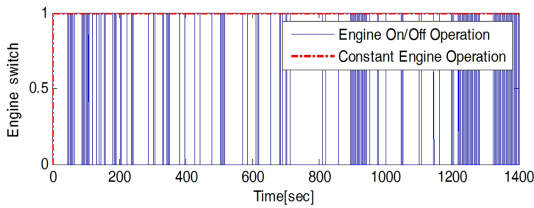
엔진 구동 전략을 제외하고 모든 구성이 동일한 시뮬레이션 프로그램에서 서울시 시내버스 주행데이터를 수집하여 생성한 주행모드⁸⁾를 적용하여 연비 시뮬레이션 하였다. 엔진 항시 구동 전략의 경우 다양한 엔진 출력에 대하여 시뮬레이션을 수행하여 배터리 SOC를 20%로 유지 가능하도록 하는 엔진 출력 값을 도출하였고 엔진 On/Off 구동 전략의 경우 배터리 SOC 20%에서 ±5%를 유지하도록 배터리 SOC사용 범위를 정하였다.

4.2 시뮬레이션 결과

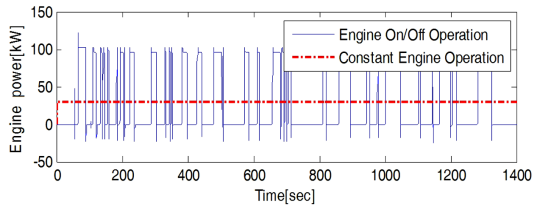
시뮬레이션 프로그램에서 엔진 구동 전략에 따른 On/Off 신호와 엔진 출력 파워를 확인하여 보았고 Fig. 4는 두 가지의 엔진 구동 전략에 대하여 엔진 On/Off 신호와 엔진 파워를 비교한 내용이다. 엔진 On/Off 구동 전략의 경우 엔진이 꺼지는 영역이 많은데 이것은 주행 사이클 상 감속 구간이 많아 회생 제동을 하는 구간이 많기 때문이다. Fig. 5와 Fig. 6은 엔진 항시 구동 전략일 때 목표 차속 추종, 배터리 SOC 경로, 배터리 전류, 전압을 나타낸 것이다.

Fig. 7과 Fig. 8은 엔진 On/Off 구동 전략일 때 목표 차속 추종, 배터리 SOC 경로, 배터리 전류, 전압을 나타낸 것이다. 두 가지 엔진 구동 전략 모두 목표 차속 추종에 무리가 없고 주행 사이클을 주행하는 동안 배터리 SOC 20%를 유지하는 것을 확인할 수 있다.

Table 2는 엔진 구동 전략에 따른 연비 시뮬레이

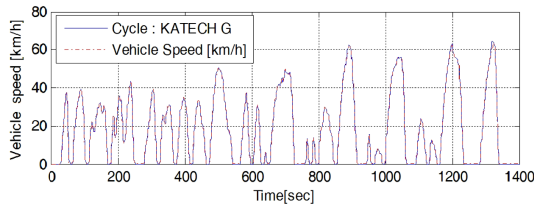


(a)

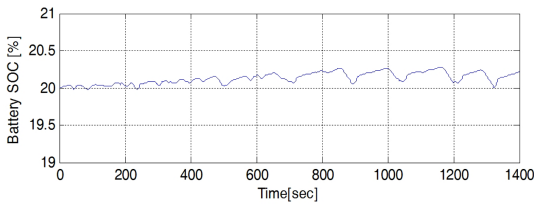


(b)

Fig. 4 Result of engine operation : (a) Engine switch, (b) Engine output power



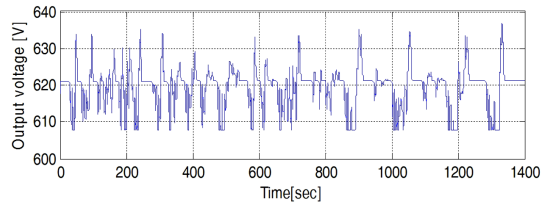
(a)



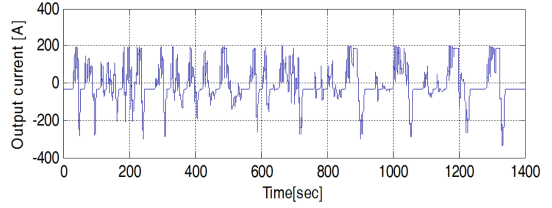
(b)

Fig. 5 Result of constant engine operation strategy : (a) Vehicle speed, (b) Battery SOC trajectory

선 결과이다. 30kW의 일정한 파워를 출력하는 엔진 항시 구동 전략과 엔진 On/Off 구동 전략은 각각 2.394km/l, 2.700km/l의 연비 결과를 보였다. 동일한 배터리 최종 SOC에 대해 연비 비교를 위해 엔진 항시 구동 전략에서 다수의 파워를 적용하여 연비와 배터리 최종 SOC를 구하여 엔진 출력 변화에 의해 선형적으로 보정하였다.⁹⁾ 선형적으로 보정한 엔진 항시 구동 전략의 연비 결과는 26.7kW의 constant 파워 출력일 때 2.561km/l이다.

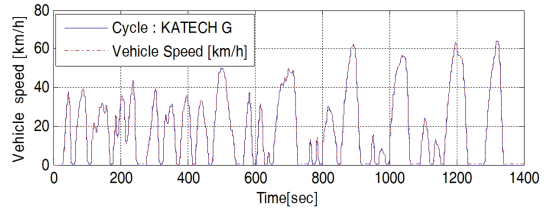


(a)

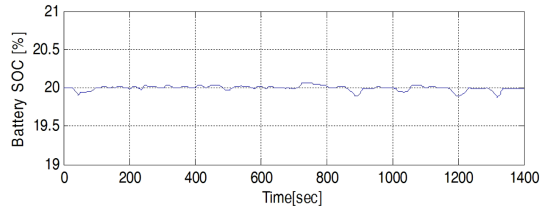


(b)

Fig. 6 Result of constant engine operation strategy : (a) Battery voltage, (b) Battery current



(a)



(b)

Fig. 7 Result of engine on/off operation strategy : (a) Vehicle speed, (b) Battery SOC trajectory

4.3 시뮬레이션 결과 분석

연비 결과를 비교하면, 엔진On/Off 구동 전략의 경우가 선형 보정된 엔진 항시 구동 전략보다 약 5.43% 높은 연비를 보인다. 이것은 엔진 구동 전략에 따라 엔진 작동점이 달라지기 때문이다. 엔진 항시 구동 전략은 정격으로 일정하게 출력되는 파워가 필요하므로 효율이 좋은 영역보다 안정적으로 파워를 출력할 수 있는 상대적으로 낮은 파워 영역에서 작동된다. 반면에 엔진 On/ Off 구동 전략은 배

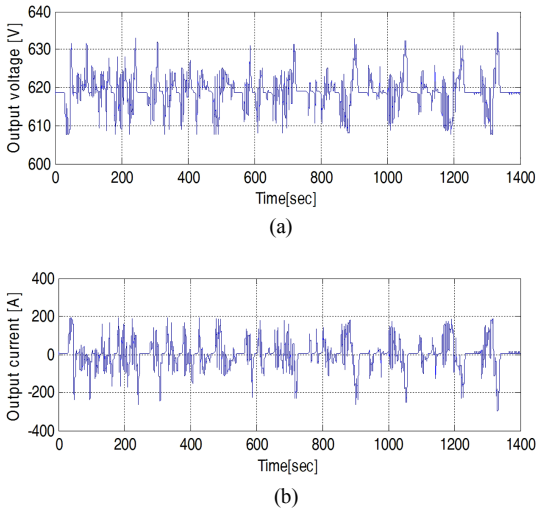


Fig. 8 Result of engine on/off operation strategy : (a) Battery voltage, (b) Battery current

Table 2 Result of fuel economy

	Fuel Economy (km/l)	Battery Final SOC (%)
Constant engine operation (30kW)	2.394	20.21
Constant engine operation (corrected)	2.561	19.98
Engine On/Off operation	2.700	19.98

터리 SOC가 일정 이하일 때만 엔진이 구동되기 때문에 파워의 크기가 크고 효율이 좋은 영역의 파워가 출력된다.

Fig. 9는 엔진 BSFC맵에서 엔진 항시 구동 전략의 엔진 작동점을 나타낸 그림이다. 30kW의 일정한 파워가 출력되는 것을 확인할 수 있다. 엔진 효율이 좋은 영역은 파워가 높은 영역임에도 불구하고, 엔진 항시 구동 전략의 경우 높은 파워의 출력이 필요하지 않으며, 엔진은 높은 파워를 안정적으로 출력하는 것이 어려운 특징이 있기 때문에 엔진 효율이 상대적으로 좋지 못하지만 정격으로 출력을 낼 수 있는 영역에서 엔진 구동을 하도록 한다.

Fig. 10은 엔진 BSFC 맵에서 엔진 On/Off 구동 전략의 엔진 작동점을 나타낸 그림이다. 엔진 항시 구동 전략의 엔진 작동점과 다르게 높은 파워와 상대적으로 좋은 효율에서 구동되고 있는 것을 확인할 수 있다. 엔진 최적 작동점 근처에서 엔진 구동이 되

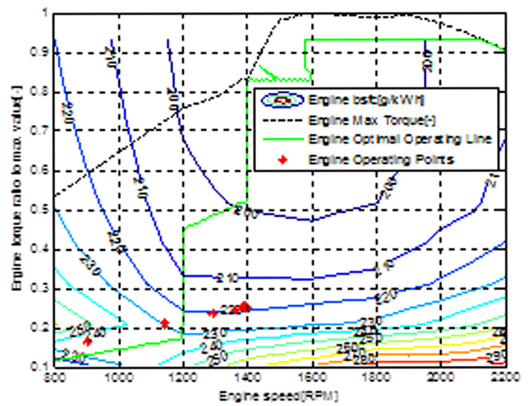


Fig. 9 Engine operating points according to constant engine operation strategy

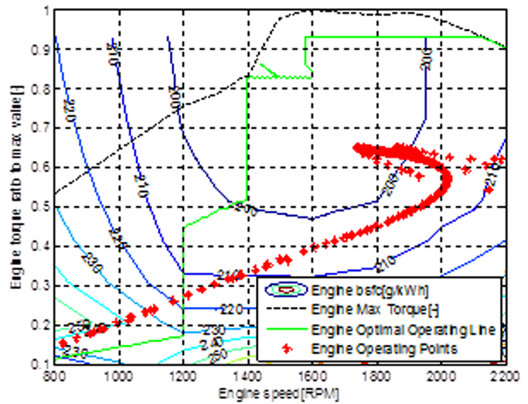


Fig. 10 Engine operating points according to engine on/off operation strategy

고 있다. 빈번한 엔진 On/Off로 인해 엔진 최적 작동점에서 구동이 되고 있지 못하고 있는데 이런 문제점을 엔진 구동 전략에서 보완한다면 더 좋은 연비 결과를 얻을 수 있다.

5. 결론

본 연구는 직렬형 플러그인 하이브리드 전기 버스의 엔진 구동 전략에 따른 시뮬레이션 기반 연비 분석을 다루었다. 상용 프로그램인 Autonomie를 이용하여 전방향 시뮬레이션 프로그램을 구성하였고 엔진 항시 구동 전략과 엔진 On/Off 구동 전략을 개발하여 연비 시뮬레이션에 적용하였다.

주어진 주행모드에서 시뮬레이션을 수행한 결과에 의하면, 엔진 항시 구동 전략과 엔진 On/Off 구동

전략은 각각 2.394km/l, 2.700km/l의 연비가 도출되었다. 엔진 항시 구동 전략의 연비는 배터리 SOC 변화를 보정하여 2.561km/l의 연비를 구하였다. 엔진 On/Off 구동 전략이 엔진 항시 구동 전략보다 약 12.78% 높은 연비를 보인다. 이것은 엔진 항시 구동 전략은 높은 효율보다는 안정적으로 파워를 출력할 수 있는 상대적으로 낮은 파워 영역에서 엔진이 작동되고 엔진 On/Off 구동 전략은 배터리 SOC가 일정 이하일 때만 엔진이 구동되기 때문에 높은 파워와 엔진 효율이 좋은 영역에서 엔진이 구동되기 때문이다. 엔진 구동 전략에 따른 연비 결과 차이가 발생하는 것을 확인하였고 해석관점에서 엔진 연비 측면에서 엔진 On/Off 구동 전략이 엔진 항시 구동 전략보다 유리하다.

후 기

본 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 (일부)지원으로 수행되었습니다.

References

- 1) M. Kim, "Standardization Strategy for Electric Vehicle," Auto Journal, KSAE, Vol.33, No.6, pp.71-74, 2011.
- 2) D. Shin and B. Lee, "Global Market Forecasts and Technology Issues of Plug-in HEV," Auto Journal, KSAE, Vol.33, No.10, pp.20-25, 2011.
- 3) D. Lee, J. Jeong, Y. Park and S. W. Cha, "The Component Sizing Process and Performance Analysis of Extended-range Electric Vehicles (E-REV) considering Required Vehicle Performance," Transactions of KSAE, Vol.21, No.2, pp.136-145, 2013.
- 4) J. Choi, D. Lee, J. Jeong, Y. Park and S. W. Cha, "Analysis of the Battery Sizing for E-REV BUS considering the AER," KSAE Annual Conference Proceedings, pp.2310-2314, 2012.
- 5) A. David and S. Lee, "What Can Autonomie Do for You?," IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, pp.1-153, 2011.
- 6) P. Sharer, A. Rousseau, D. Karbowski and S. Pagerit, "Plug-in Hybrid Electric Vehicle Control Strategy: Comparison between EV and Charge Depleting Options," SAE 2008-01-0460, 2008.
- 7) M. Ehsani, Y. Gao and A. Emadi, Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles, 2nd Edn., CRC Press, USA, pp.256-258, 2010.
- 8) H. Kim, D. Kim, C. Lee, C. Lee, J. Park and J. Lee, "The Study for Development of Seoul City Bus Driving Cycle," KSAE Annual Conference Proceedings, pp.934-939, 2010.
- 9) C. H. Zheng, C. E. Oh, Y. I. Park and S. W. Cha, "Fuel Economy Evaluation of Fuel Cell Hybrid Vehicles Based on Equivalent Fuel Consumption," International Journal of Hydrogen Energy, Vol.37, No.2, pp.1790-1796, 2012.