

<기술논문>

운전조건이 하이브리드 자동차의 연비에 미치는 영향 연구

이영재* · 김강출 · 표영덕

한국에너지기술연구원 수송에너지연구센터

The Influence of Operating Conditions on Fuel Economy of the Hybrid Electric Vehicle

Youngjae Lee* · Gangchul Kim · Youngdug Pyo

Transportation Energy Research Center, KIER, 71-2 Jang-dong, Yusong-gu, Daejeon 305-343, Korea

(Received 27 August 2004 / Accepted 14 February 2005)

Abstract : In the present study, the influence of operating conditions on fuel economy for hybrid electric vehicle was analyzed. In order to accomplish this, vehicle speed, engine speed, battery current and voltage, SOC (state of charge), motor speed and torque, generator speed and torque, engine coolant temperature etc. were measured in real time. The tests were carried out under different driving cycles which are urban and highway cycles, KOREA CITY cycle and on-road driving, and also under various operating conditions such as different initial SOC, with or without regenerative braking etc.. Generally, conventional gasoline engines show a poor fuel economy at stop and go driving, because braking energy is wasted and the engine is operated in low thermal efficiency regions. However, in case of hybrid vehicles, higher fuel economy can be obtained because of utilizing the maximum thermal efficiency regions of engine, idling stop of engine, and regenerative braking etc..

Key words : Hybrid electric vehicle(하이브리드 자동차), Fuel economy(연비), Driving cycles(주행모드), State of charge(초기충전상태), Regenerative braking(회생제동)

1. 서론

에너지절약, 온실가스의 저감, 유해배출가스의 저감 등을 위하여 자동차업계에서는 저공해 대체연료자동차의 개발에 많은 노력을 기울이고 있는 한편, 기존 가솔린 또는 디젤자동차의 효율 개선에도 많은 연구를 추진하고 있다.

현행 가솔린 자동차에서 투입에너지에 대한 유효이용에너지 및 손실에너지를 살펴보면, Fig. 1에서 보는 바와 같이 시가지 주행모드에서는 유효이용에너지가 12.6%이고, 고속 주행모드에서도 20.2%에

불과하다. 이처럼 에너지 이용효율이 크게 저하하는 이유는 엔진 냉각수 및 배기가스로 인한 열 에너지의 손실이 큰 원인인기는 하지만, 차량정차시의 공회전이나 감속 제동시의 에너지의 손실에 기인하는 바도 크다. 또한, 엔진의 열효율은 회전속도와 부하에 따라 크게 변화하게 됨으로 효율이 좋은 영역으로 엔진을 항상 구동할 수 없음도 이러한 에너지 이용효율 저하에 크게 기여한다.

그러나 내연기관과 전동기를 하이브리드화하면 두 동력원을 주행상황에 맞추어 적절히 배분함으로써 엔진의 열효율이 좋은 영역으로 운전할 수 있고, 정차시의 엔진 정지에 의해 불필요한 에너지낭비를 배제할 수 있으며, 감속 제동시의 에너지회생을 통

*To whom correspondence should be addressed.
yjl@kier.re.kr

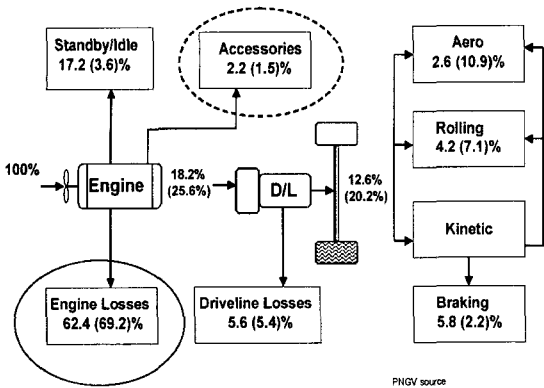


Fig. 1 Typical energy distribution in a gasoline vehicle : Urban (Highway)

해 손실에너지를 전기에너지로 회수 활용하는 등 연비를 크게 개선할 수 있기 때문에 각국의 자동차 제작사에서는 하이브리드자동차의 실용화 개발을 활발히 추진하고 있고, 이미 일본의 토요타와 혼다에서는 수개 차종을 양산하고 있다.¹⁻⁵⁾

본 연구에서는 운전조건이 양산 하이브리드자동차인 토요타 PRIUS의 제어로직과 연비에 미치는 영향을 조사하기 위하여 여러 주행모드(UDDS⁶⁾, HWFET⁶⁾, KOREA CITY mode⁷⁾), 초기 SOC 변화 (40%, 56%, 80%), 회생제동 유무, 엔진 냉각상태(냉시동 및 온시동)에 따른 제반 특성을 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

시험차량은 일본 토요타사의 2000년 모델 프리우스를 사용하였다. 본 차량에는 52kW의 가솔린엔진, 33kW의 모터 및 Ni-MH 축전지(273.6V, 6.5Ah)가 장착되어 있으며, 주요 제원은 Table 1에서와 같다.

운전조건에 따라 시험차량의 제반 특성을 측정하기 위하여 Fig. 2에서와 같이 차량의 OBD II DLC(Diagnostic Link Connector) 포트를 통하여 모터의 회전수 및 토크, 제너레이터의 회전수 및 토크, 엔진 회전수, 차속, 회생제동 토크 등을 실시간으로 측정하였으며, 배터리의 충전전 상태를 높은 시간 분해능으로 측정하기 위하여 배터리 모니터링 시스템을 제작하여 실시간으로 측정하였다. 그리고 연비의 경우에는 배기가스를 샘플링백에 포집하여 카본밸런스법에 의해 산출하였다.⁸⁾

Table 1 Specifications of test vehicle

Vehicle	L×H×W	4,315×1,695×1,475mm
	Curb Weight	1,262.3 kg
Engine	Transmission	Electronically controlled CVT
	Cylinder	4
	Displacement	1,497 cc
	Max. Power	52 kw / 4,500 rpm
	Max. Torque	111 Nm / 4,200 rpm
	Catalyst	3 way with HC trap
Battery	Type	Ni/MH
	Cell voltage	1.2 V
	Cell per module	6
	Module voltage	7.2 V
	Construction	38 Modules (in Assy)
	Total voltage	273.6V(38 cell)
Motor	Rated capacity	6.5 Ah
	Type	3 Phase AC synchronous permanent magnet
	Max. Power	33kW / 1,040~5,600rpm
	Max. Torque	344Nm / 0~4,000rpm

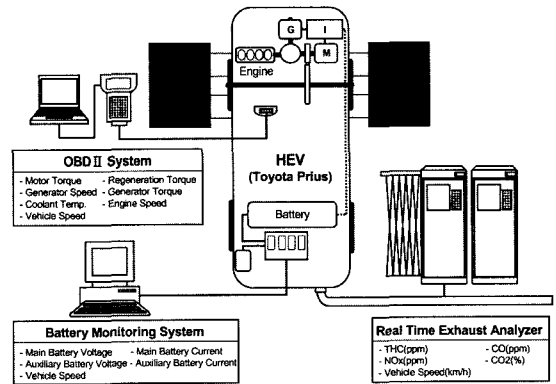


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

3. 실험결과 및 고찰

3.1 초기 SOC 변화에 따른 영향

배터리의 SOC(State Of Charge)가 연비에 미치는 영향을 분석하기 위하여 초기 SOC가 다른 여러 조건에 대하여 실험을 실시하였다.

초기 SOC가 높은 조건을 설정하기 위해서는 배터리를 충전할 필요가 있기 때문에 차대동력계에서 시험차량을 80 km/h의 속도로 모터링하여 강제로 충전시켰다. 이러한 모터링 조건에서는 엔진이 가

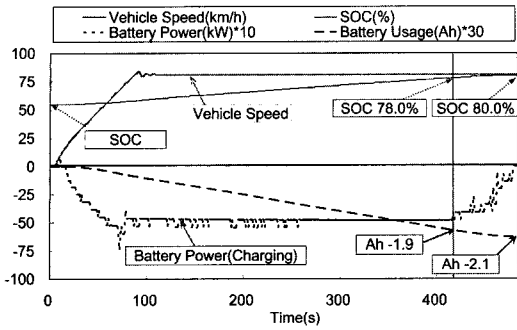


Fig. 3 Charging the battery

동되지 않고 구동모터가 발전기로 작용하기 때문에 모터링 시간이 증가함에 따라서 배터리의 SOC를 증가한다. Fig. 3에 이러한 배터리 충전모드에서의 SOC 변화량을 나타낸다. 초기 SOC가 54.9%인 상태에서 주행을 시작하여, 모터링 시간이 증가함에 따라서 SOC의 충전율이 선형적으로 증가함을 볼 수 있으나, SOC가 약 78%를 초과하면 충전율이 점차 감소하고, 80%에 달하면 충전을 중단하고 있다.

초기 SOC가 낮은 조건을 설정하기 위해서는 배터리를 방전할 필요가 있기 때문에 차대동력계상에서 시험차량의 가속페달을 최대한으로 밟아 엔진의 최고출력을 유지하여 강제로 방전시켰다. 이러한 주행조건에서 엔진 출력만으로는 차량이 요구하는 최고속도를 유지할 수 없기 때문에 부족한 출력을 모터가 보조하게 됨으로써 배터리의 SOC가 감소한다. Fig. 4에 이러한 배터리 방전모드에서의 SOC 변화량을 나타낸다. 초기 SOC가 55.7%인 상태에서 주행을 시작하여 주행시간이 증가함에 따라서 SOC가 점차 감소해서 약 45%까지 엔진 출력을 보조하나, 45% 이후부터는 방전율이 다소 감소하고, 38.8% 이하가 되면 배터리의 방전을 멈추어 더 이상 엔진 출력을 보조하지 않음을 볼 수 있다.

Fig. 5는 이러한 방법에 의해 배터리의 초기 SOC를 약 40%, 56%, 80%로 각각 변화시켜 UDSS모드 주행시의 SOC의 변화량을 살펴본 것이다. 그림에 의하면 초기 SOC가 다른 상태에서 주행을 시작하였음에도 불구하고 대략 1,000초를 주행하면 약 56%의 SOC를 유지할 수 있음을 볼 수 있다.

이들 실험결과를 종합하면 시험차량인 PRIUS는

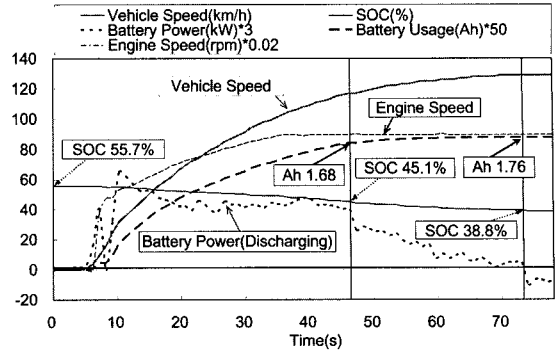


Fig. 4 Discharging the battery

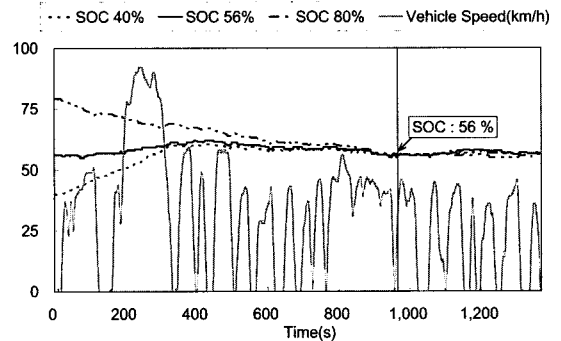


Fig. 5 Battery SOC over the UDSS cycle

배터리의 과충전 및 과방전에 따른 수명저하를 억제하기 위하여 최고 및 최저 SOC를 각각 80% 및 40% 부근으로 제어하고, 통상적인 조건에서 충전상태를 56% 부근으로 제어하는 전략을 채용하고 있는 것으로 생각된다.

Fig. 6은 Fig. 5의 3가지 초기 SOC 조건에 대하여 UDSS모드 주행시의 연비 측정결과를 나타낸다. 초기 SOC가 79.2%로 높은 경우에는 SOC를 56% 수준으로 제어하기 위해 배터리를 방전할 필요가 있기 때문에 엔진의 가동율을 낮추고 주로 모터에 의해 차량을 구동함으로써 초기 SOC가 56%인 경우에 비하여 연비가 32.2% 향상되고 배터리는 1.14Ah를 방전하였음을 볼 수 있다. 반대로, 초기 SOC가 40%로 낮은 경우에는 SOC를 56%로 제어하기 위해 배터리를 충전할 필요가 있기 때문에 엔진에 의해 차량을 주행하면서 발전을 동시에 행함으로써 SOC 56%인 경우에 비하여 연비는 16.1% 악화되고 배터리는 1.34Ah가 충전됨을 볼 수 있다.

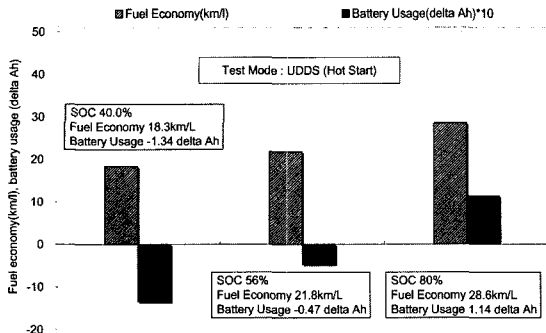


Fig. 6 Fuel economy and battery usage according to initial SOC levels

3.2 주행모드의 차이에 따른 영향

주행모드의 차이가 연비에 미치는 영향을 조사하기 위하여, 시가지모드인 UDDS 모드, 고속도로 모드인 HWFET 모드, 당 연구원이 개발한 국내 시가지모드인 KIER CITY 모드를 사용하여 연비 실험을 실시하였다. Fig. 7~Fig. 9에 각 모드의 주행패턴, 주행시간 및 주행거리, 평균속도 및 최고속도 등 주요 특성치를 나타낸다.

Fig. 10은 차대동력계상에서 이들 세가지 모드로 시험차량을 주행하였을 때의 연비 측정결과를 나타낸다. 그림에 의하면 미국 시가지모드인 UDDS 모드 연비가 21.8 km/ℓ 로 가장 높고, 국내 시가지모드

인 KIER CITY 모드가 20.5 km/ℓ 를 나타내며, 미국의 고속모드인 HWFET 모드연비는 가장 낮은 20.1 km/ℓ 를 나타내고 있다. 이는 Fig. 11에 대비한 기존 가솔린차량의 연비 패턴과는 크게 다른 경향으로서, 가솔린차량의 경우에는 평균속도 약 70km/h에서 최고 연비를 나타내고 이보다 속도가 낮아질수록 연비가 급속히 저하함에 대하여, 하이브리드차량인 PRIUS의 경우에는 평균속도의 변화에 따른 연

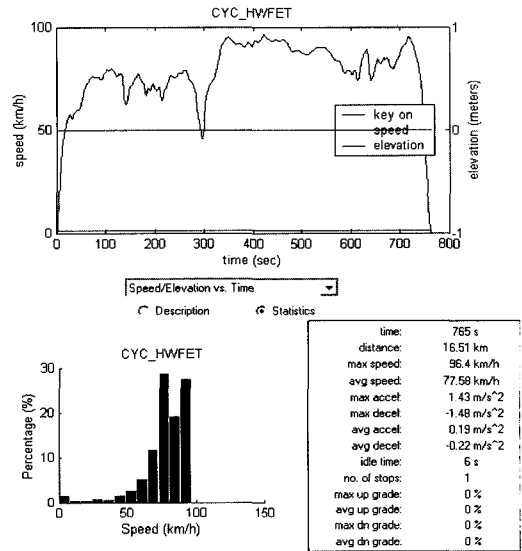


Fig. 8 Characteristics of HWFET cycle

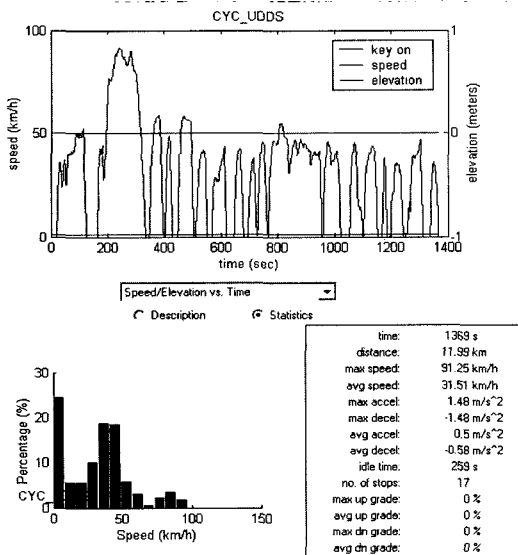


Fig. 7 Characteristics of UDDS cycle

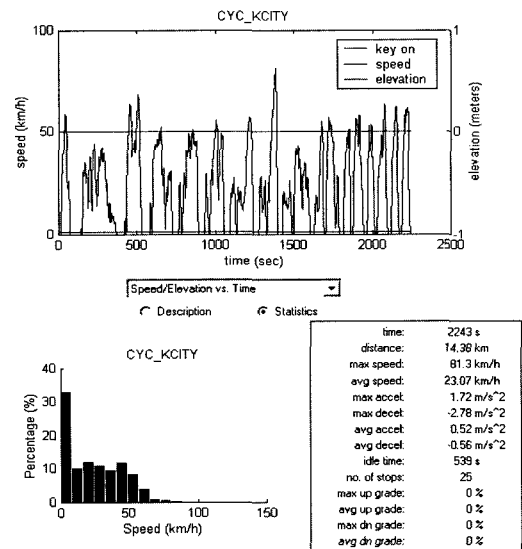


Fig. 9 Characteristics of KIER CITY cycle

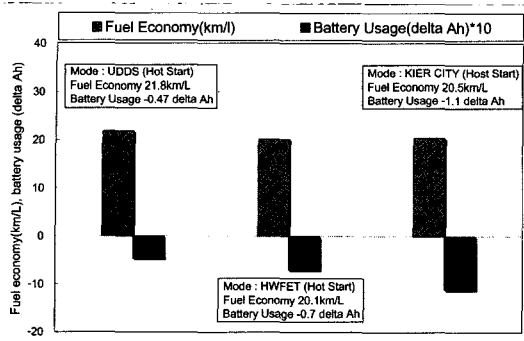


Fig. 10 Fuel economy and battery usage according to driving cycles

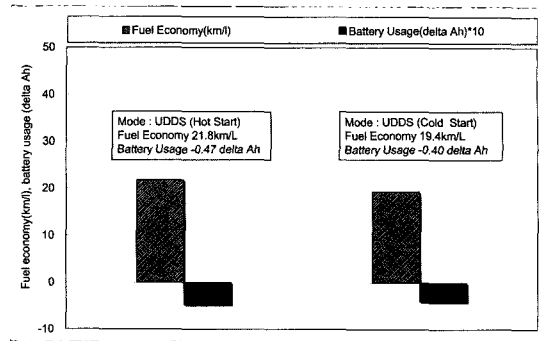


Fig. 12 Fuel economy and battery usage according to engine starting conditions

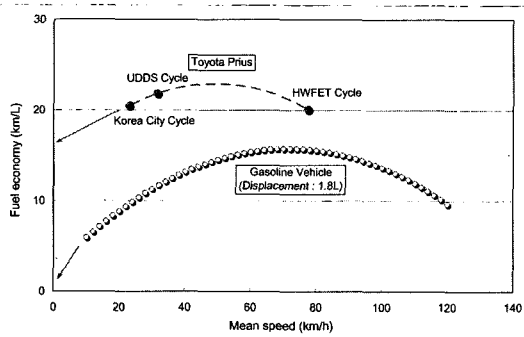


Fig. 11 Fuel economy relative to mean speeds

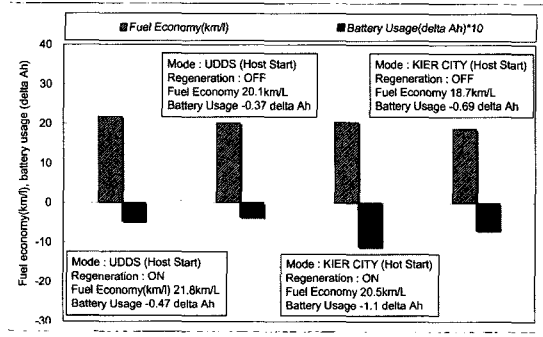


Fig. 13 Fuel economy and battery with and without regenerative braking

비 변화가 그다지 없음을 볼 수 있다. 이는 하이브리드차량인 경우에 정차와 발진이 빈번한 시가지주행 모드에 있어서 정차시 엔진 정지나 가속 제동시 회생제동을 실시함으로써 손실에너지를 대폭 저감하기 때문임에 기인한다.

3.3 엔진 냉각상태의 차이에 따른 영향

Fig. 12에 엔진 냉각상태가 다른 조건(냉시동 및 온시동)에서 UDSS 모드로 시험차량을 주행했을 때의 연비 및 배터리 사용량을 나타낸다. 냉시동 연비는 19.4km/ℓ를 나타냄에 대하여 온시동 연비는 21.8km/ℓ를 나타내어 냉시동의 경우가 약 12.4% 연비가 악화함을 볼 수 있으며, 이는 냉시동의 경우에는 엔진의 워밍업을 위하여 정차중에도 엔진을 정지하지 않기 때문에 연료소비량이 증가하였음에 기인한다.

3.4 회생제동 유무에 따른 영향

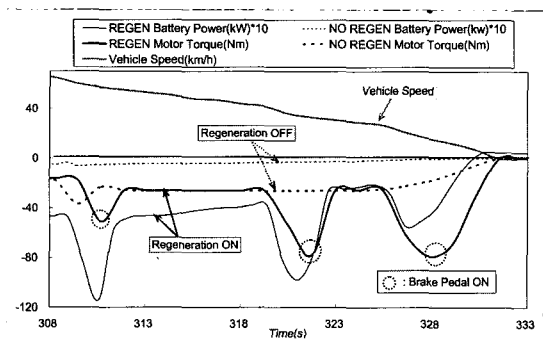


Fig. 14 Battery charging characteristics with and without regenerative braking when deceleration

Fig. 13은 UDSS 모드 및 KIER CITY 모드에서 회생제동을 실시하는 경우와 실시하지 않은 경우에 대한 연비 측정결과를 나타낸다. 회생제동을 실시하는 경우에는 실시하지 않은 경우에 비하여 UDSS 모드에서는 약 8.5%, KIER CITY모드에서는 약 9.6% 연비가 증가하였으며, 이는 Fig. 14에 나타낸

바와 같이 회생제동을 실시하는 경우에는 모터가 발전기로 작동하여 손실에너지를 배터리에 충전해서 발전 가속시에 다시 활용함에 기인한다.

4. 결론

- 1) 토요타 프리우스에서는 배터리의 과충전 또는 과방전에 기인한 수명 단축을 억제하기 위하여 최고 및 최저 SOC를 각각 80% 및 40% 부근으로 제어함과 동시에, 통상적인 조건에서 SOC를 56% 부근으로 제어하는 전략을 채용하고 있다. 이에 따라서 배터리의 초기 SOC가 높은 조건에서는 차량이 방전모드로 주행하여 연비가 향상되며, 반대로 SOC가 낮은 조건에서는 충전모드로 주행하여 연비가 악화된다.
- 2) 가솔린차량에서는 정차와 발전이 많은 시가지 주행연비가 크게 악화하나, 하이브리드차량에서는 정차시의 엔진 정지나 감속 제동시의 회생제동을 통하여 손실에너지를 대폭 저감하기 때문에 시가지 주행연비가 크게 개선된다.
- 3) UDSS모드에 있어서 냉시동인 경우가 온시동인 경우에 비하여 연비가 12.4% 악화하며, 이는 냉시동인 경우에는 엔진의 워밍업을 위하여 정차중에도 엔진을 정지하지 않기 때문임에 기인한다.
- 4) 회생제동을 실시하는 경우에는 그렇지 않은 경우에 비하여 UDSS 모드에서 약 8.5%, KIER CITY모드에서 약 9.6% 연비가 증가하며, 이는 회생제동을 실시하는 경우에는 모터가 발전기로 작동하여 손실에너지를 배터리에 충전해서 발전 가속시에 다시 활용함에 기인한다.

References

- 1) Y. Shida, M. Kanda, K. Ohta, S. Furuta and J. Ishii, "Development of Inverter and Power Capacitors for Mild Hybrid Vehicle (MHV) - Toyota 'Crown'," Int. J. Automotive Technology, Vol.4, No.1, pp.41-45, 2003.
- 2) K. Aitaka, M. Hosoda and T. Nomura, "Development of Intelligent Power Unit for Hybrid Four-Door Sedan," Int. J. Automotive Technology, Vol.4, No.2, pp.57-64, 2003.
- 3) National Renewable Energy Laboratory, Benchmarking of OEM Hybrid Electric Vehicles, NREL Milestone Report, p.103, August 2001.
- 4) K. J. Kelly, M. Mihalic and M. Zolot, "Battery Usage and Thermal Performance of the Toyota Prius and Honda Insight during Chassis Dynamometer Testing," The 17th Annual Battery Conference on Applications and Advances, p.9, 2002.
- 5) M. Duoba, H. Ng and R. Larsen, "Characterization and Comparison of Two Hybrid Electric Vehicle (HEVs) Honda Insight and Toyota Prius," SAE 2001-01-1335, 2001.
- 6) "Recommended Practice for Measuring the Exhaust Emissions and Fuel Economy of Hybrid-Electric Vehicles," SAE J1711, 1998.
- 7) G. C. Kim and Y. J. Lee, "The Influence of Driving Conditions on Fuel Economy and Exhaust Emissions of the Toyota PRIUS HEV," The 20th International Electric Vehicle Symposium, p.11, 2003.
- 8) "40 CFR (Code of Federal Regulation) Part 600 (Fuel Economy of Motor Vehicles)," Environmental Protection Agency of U.S.A., 2004.