

도심주행 패턴에 따른 소형 전기자동차 최적화 전략

길 범 수* · 조 종 표 · 표 영 덕 · 김 강 출

한국에너지기술연구원

Optimized Strategy of Neighborhood Electric Vehicle with Driving Schedules

Bumsoo Kil* · Chongpyo Cho · Youngdug Pyo · Gangchul Kim

Green Transportation Research Group, KIER, 71-2 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-764, Korea

(Received 10 June 2009/ Accepted 2 November 2009)

Abstract : The Developing & Producing of Eco-Friendly vehicle have been more incremented, as People appreciate the importance of Earth Environment Conservation. The needs of Neighborhood Electric Vehicle(NEV) that suits Current people's short drive distance is incremented. In this Paper, we define Neighborhood Electric Vehicle through out National Highway Traffic Safety Administration of United States of America's regulation and explain motor and battery of primary constituents of that. We used MATLAB and ADVISOR 200 programs for Simulation, and propped NEV's Model that tow people can be got in. In this Model, the battery is Lead-acid battery(72V, 85Ah) and the motor is 8kW permanent magnet synchronous motor(PM motor). We compared change of driving range of NEV through out non-changing speed Driving(10km/h, 20km/h, 30km/h, 40km/h) and Manhattan driving schedule.

Key words : Electric vehicle(전기자동차), Neighborhood electric vehicle(소형 전기자동차), Lead-acid battery(납 축전지), Permanent magnet synchronous motor(영구자석동기모터)

Nomenclature

- A : frontal area of a vehicle, m^2
- C_D : aerodynamic drag coefficient
- D_A : aerodynamic drag force, $kg \cdot m/s^2$
- V : vehicle speed, m/s^2
- ρ : density of air, kg/m^3

1. 서 론

화석연료를 동력원으로 사용하는 자동차에 의한 대기오염, 지구온난화 등의 문제와 세계 석유자원 감소로 인한 유가상승으로 인하여 세계적으로 많은 국가와 자동차 메이커의 저공해 자동차개발에 참여하고 있다. 저공해·친환경 자동차는 고연비 내연기

관을 장착한 자동차, 하이브리드자동차(Hybrid electric vehicle, HEV), 연료전지자동차(Fuel-cell vehicle) 및 전기자동차(Electric vehicle, EV)등의 형태로 개발되거나 혹은 개발 완료되어 생산되고 있다.

하이브리드자동차는 2개 이상의 에너지를 가지고 있는 형태로 일본 도요타(Toyota)는 1997년 세계 최초 양산형 하이브리드자동차인 프리우스(Prius)를 생산하였고¹⁾ 그 이후 여러 자동차 메이커에서 다양한 종류의 하이브리드자동차가 생산되고 있다. 그러나 하이브리드자동차 역시 화석연료를 사용하며 배기가스를 발생하기 때문에 완벽한 친환경 자동차로서의 한계를 가지고 있다.

연료전지자동차는 연료전지 내부의 수소(Hydrogen)와 산소가 반응하여 발생하는 전기에너지를 에너지원으로 사용한다. 연료전지는 물과 전기만을

*Corresponding author, E-mail: apollon12@nate.com

발생하므로 배출가스로 인한 환경오염이 발생하지 않는 무공해 자동차이다.²⁾ 하지만 연료전지의 연료가 되는 수소를 만드는 과정에서 많은 에너지 소모, 수소의 운반, 저장 등 많은 문제점과 연료전지의 가격, 기술적 문제 등으로 인하여 상용화에 어려움을 가지고 있다.

전기자동차는 차량에 탑재된 배터리(Battery)를 에너지원으로 사용하기 때문에 배출가스가 발생하지 않는 장점을 가지고 있다.³⁾ 그러나 전기에너지를 공급하는 배터리의 긴 충전시간, 배터리의 높은 가격 및 짧은 배터리 수명 등의 단점을 가지고 있다. 이러한 한계에도 불구하고 현대인의 자동차 주행패턴이 점차 단거리 위주로 변화되고 있어 이에 맞는 형태의 소형 전기자동차에 대한 수요가 날로 증가하고 있다.

본 연구에서는 2인승 전기자동차를 대상으로 모델링하여 맨해튼 도심주행(Manhattan driving schedule) 및 정속주행(Constant speed)에서의 주행특성을 시뮬레이션(Simulation)하였고, 배터리 무게에 따른 주행거리 변화, 배터리 효율 및 모터 효율 등의 변화에 대해 비교 및 분석하였다.

2. 소형 전기자동차

2006년 한국교통연구원(The Korea Transport Institute, KOTI) 통계에 따르면 한국의 경우 승용차 1대당 1일 평균 주행거리는 40.8km, 서울 37.5km, 미국 37.6km, 영국 39.5km, 이탈리아 34.2km, 일본 26.9km로 나타나 주로 짧은 거리를 운행하고 있으며⁴⁾ 서울의 경우 도심평균 주행속도는 시속 14.0km로 저속에서 운행하는 것을 알 수 있다.⁵⁾ 이러한 주행 특성에 맞는 전기자동차의 수요가 늘어나면서 미국의 경우 미연방도로교통안전국(National Highway Traffic Safety Administration, NHTSA)에서는 최고속도 25mph(40km/h)이하의 차량(Sub-25 mph vehicle group)에 대해 Fig. 1과 같이 정의하였다.⁶⁾ 최고속도 25mph(40km/h)이하의 근거리 전기자동차(Neighborhood electric vehicle, NEV)와 속도 20mph(32.2km/h)~25mph의 개조된 골프용 차량(Speed modified golf car), 최고속도 15mph(24.1km/h)이하의 골프차량(Golf car)으로 정의하였다.⁷⁾ 미국(FMVSS. 500)과

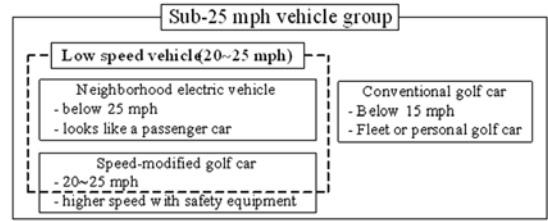


Fig. 1 Definition of the sub-25 mph vehicle group

유럽(ECE R100)은 관련 법규를 정비하여 최고시속 25mph과 총중량 1,134kg이하 규격의 차는 최소 안전기준을 충족할 경우 도로주행이 가능토록 하였다.

전기자동차는 Fig. 2와 같이 배터리, 전기모터 및 변속기 등으로 구성된 형태를 가지고 있으며, Table 1은 현재 북미 및 유럽에서 시판되고 있는 소형 전기자동차의 기본적 사양에 대해 제조사 홈페이지를 참조하여 정리하였다.

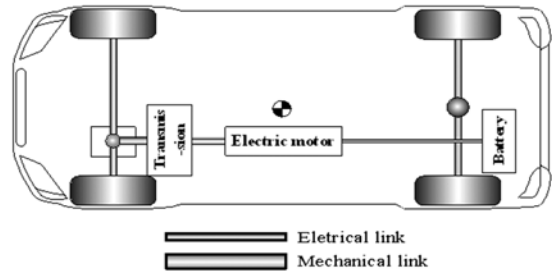


Fig. 2 Electric vehicle

Table 1 Specifications of the NEV's

Company	GEM	GEM	Dynasty	ZENN
Model	e2	e4	IT Sedan	ZENN
Passenger	2	4	4	2
Curb weight	517kg	585kg	653kg	544kg
Battery	Lead acid	Lead acid	Lead acid	Lead acid
Weight of battery	195kg	195kg	193kg	192kg
Nominal system voltage	72V	72V	72V	72 V
Nominal capacity	80Ah	80Ah	-	63Ah
Charge time	6h~8h	6h~8h	6h~8h	8h
Motor	DC (5.2kW)	DC (8.9kW)	DC (12kW)	AC (5.7kW)
Maximum speed	40km/h	40km/h	40km/h	40km/h
Range	56km	48km	50km	56km

(출처: www.gemcar.com/www.itiselectric.com/, www.zencars.com/)

3. 소형 전기자동차 모델링

3.1 모터

전기자동차의 모터(Motor)는 전기에너지를 기계 에너지로 변환하여 드라이브라인(Drive line)에 동력을 공급한다. 모터는 구동 전원의 형태에 따라 직류(Direct current, DC) 모터와 교류(Alternating current, AC) 모터로 구분할 수 있다. 직류 모터의 구조는 크게 로터(전기자), 계자용 마그넷, 브러시, 베어링 모터케이스 등으로 이루어져 있고, 전기자에 흐르는 전류의 방향을 전환함으로써 자력의 반발, 흡인력으로 로터를 회전시켜 기계적 동력을 생성시키는 모터이다. 로터는 기계적 회전으로 인한 마모가 발생하여 주기적인 유지보수가 필요하며 제어성이 떨어지고 소형, 경량화에 한계가 있어 그 사용이 점차 감소하고 있다.

교류 모터는 고정자에 흐르는 전류와 회전자기 작용하여 기계적 동력을 발생시키며 회전하는 원리에 따라 유도모터(Induction motor), 동기모터(Synchronous motor) 및 정류자모터(Commutator motor) 등으로 분류된다. 교류모터는 직류모터에 비해 모터 구조가 비교적 간단하여 모터의 크기를 소형화, 경량화 할 수 있어 현재 전기자동차에는 교류모터가 주로 사용되어 지고 있다. 그 중 영구자석동기모터(Permanent magnet synchronous motor, PM)는 영구자석을 장착한 회전자를 사용한 모터로 작은 출력 소형 전기자동차에 유리한 모터이다.

본 연구에서는 Unique Mobility Inc.에서 설계 제작한 8kW, 14.1kg의 경량 영구자석동기모터를 사용하였다. Fig. 3은 본 연구에서 사용한 8kW 모터의 회

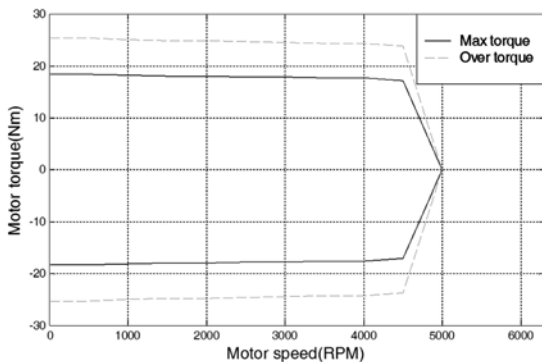


Fig. 3 Characteristics of the 8kW motor

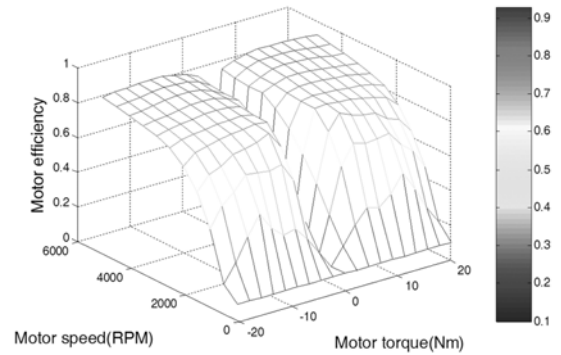


Fig. 4 3D motor map

전속도에 따른 최대토크(Maximum torque)와 과토크(Over torque)를 나타내고 있다. 모터의 회전속도 0RPM~5,000RPM의 범위에서 최대토크는 18.36Nm, 과토크 25.34Nm의 최대값을 보이고 있다. 모터 모듈(Motor module)은 Fig. 4와 같이 모터 토크, 모터 회전속도 그리고 모터 효율(Motor efficiency)에 대한 3D 모터 맵(Motor map)을 이용하였다. 모터의 효율은 낮은 토크, 저속에서는 효율이 낮고 높은 토크, 고속에서는 효율이 최대 0.93에 이른다.

3.2 배터리

전기자동차에 있어 배터리(Battery)는 화학에너지를 전기에너지로 변환하여 구동력을 생성하는 모터에 전기를 공급해 주는 역할과 회생제동(Regenerative braking)으로 발생하는 전기에너지를 화학에너지로 변환하여 저장하는 역할을 수행한다. Table 2는 현재 전기자동차에 사용되어지는 배터리의 종류와 성능에 대해 정리하였다. 배터리는 다수의 셀(Cell)로 구성되어 있으며, 이것을 하나의 배터리 팩(Battery pack)으로 구성할 경우 그 성능이 다소 저하되기도 한다. 배터리를 살펴보면 Li-ion 배터리가 전압, 에너지밀도 및 무게 등에서 가장 우수한 성능을 보이고 있으나 가격이 높다는 단점을 가지고 있다. 따라서 소형 전기자동차에는 가격 경쟁력이 높은 납축전지가 기본 사양으로 주로 사용되고 있으며, 소비자의 요구에 의해 추가사양으로 Li-ion 배터리가 사용되기도 한다.

본 연구에서는 가격 경쟁력이 가장 우수한 납축전지(Lead acid battery)를 사용하였으며, 배터리 모

Table 2 Classification of battery

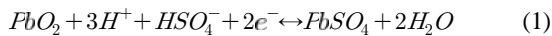
Battery	Lead acid	Ni-Cd	Ni-MH	Li-ion
Cell voltage(V)	2	1.2	1.2	3~3.6
Energy density(Wh/kg)	28~33	50~60	65~80	100~120
Auto discharger(%/month)	5~10	20	30	5
Memory effect	No	Yes	Yes	No
Charge and discharge cycle	300	500~1,000	1,000	1,200
Cost(\$/Wh)	0.03~0.1	0.2~0.4	0.5~0.6	0.5~0.9

(출처 : www.ebwr.com)

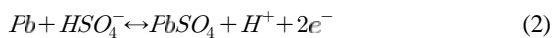
델에 적용한 납축전지는 Horizon Inc.에서 생산한 12V, 85Ah, 32.8kg 납축전지 6개를 하나의 배터리 팩으로 연결하여 72V, 85Ah, 197kg을 사용하였다.

납축전지의 양극은 환원반응, 음극에서는 산화반응이 일어난다. 양극의 PbO_2 와 음극의 Pb 가 황산이온과 반응하여 $PbSO_4$ 와 H_2O 를 만드는 방전반응을 통해 전기에너지를 발생하고, $PbSO_4$ 와 H_2O 가 분해되어서 PbO_2 와 Pb 로 환원되는 충전반응이 일어난다. 납축전지 내부의 화학반응은 식 (1), (2), (3)과 같다.⁸⁾

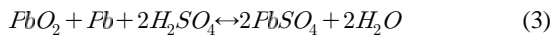
(양극)



(음극)



(전체의 반응)



납축전지는 완전 방전할 경우 배터리 성능이 급속히 저하되는 성격을 가지고 있기 때문에 시뮬레이션 하는데 있어 배터리 충전 수준을 나타내는 충전량(State of Charge, SOC)의 최소값을 제한하여야 한다. 본 연구에서는 SOC의 값을 완전충전상태 1(100%)에서 최소 0.3(30%)으로 제한을 두고 시뮬레이션하였다.

3.3 소형 전기자동차

본 연구의 모델링된 2인승 전기자동차 제원은 Table 3에 나타내었다. 공차중량 400kg, 차량의 앞면적 2.044m², 휠의 크기는 13인치(Inch)로 설정하여 시뮬레이션을 하였다.

Table 3 Specifications of the NEV's

Vehicle weight (without battery)	400kg
C_D	0.5
A	2.044m ²
Motor	8kw AC motor
Battery	72V 85Ah Lead acid(197kg)
Number of modules	6
Weight of modules	32.833kg
Passenger	2(120kg)
Wheel	13inch

본 연구의 전기자동차는 주행성능을 평가하기 위한 시뮬레이션을 실행하기 위해 공기저항(Aerodynamic drag) 모델을 적용하여야 한다. 공기역학 모델은 직선 주행을 위주로 시뮬레이션 하였기 때문에 측력(Side force)의 중요한 요소인 횡풍(Lateral wind)은 고려하지 않기로 하였다. 시뮬레이션에 적용된 공기역학적 저항은 식 (4)을 적용하였고,⁹⁾ 공기저항계수(Aerodynamic drag coefficient)는 0.5를 적용하였다. 또한 식 (5)을 사용하여 공기밀도(Air density)를 구하고 단위는 kg/m³ 단위로 사용하였다.

$$D_A = \frac{1}{2} \rho V^2 C_D A \quad (4)$$

$$\rho = 1.225 \left(\frac{P_r}{101.325} \right) \left(\frac{288.16}{273.16 + T_r} \right) \quad (5)$$

where P_r : Atmospheric pressure(kPa)

T_r : Air temperature in degrees celsius(°C)

4. 시뮬레이션

소형 전기자동차의 정속주행모드(10km/h, 20km/h, 30km/h, 40km/h) 및 도시주행모드(Manhattan driving schedule)의 주행성능특성을 해석하기 위해 MATLAB 과 ADVISOR 2002를 사용하여 시뮬레이션 하였다.

4.1 주행모드

시뮬레이션에 사용된 주행 패턴은 정속주행모드(10km/h, 20km/h, 30km/h, 40km/h) 4가지와 도시주행모드(Manhattan driving schedule)를 적용하였다. 정속주행모드는 출발부터 같은 속도로 주행하여 최

소 SOC값인 0.3(30%)이 되기까지 주행하였다. 도시 주행모드는 맨해튼 주행모드를 적용하였다. 맨해튼 주행모드는 웨스트버지니아대학교(West Virginia University) 기계 및 항공우주공학과(Mechanical and aerospace engineering)에서 뉴욕 맨해튼 지역의 버스 주행 패턴을 분석하여 2000년에 제작한 모드이다. 맨해튼 주행모드는 Table 4와 같이 구성되어 있고 한 사이클이 1,089초(0.303h), 평균속도 10.98km/h, 최고속도 40.72km/h 및 이동거리 3.320km 등으로 되어 있다. Fig. 5는 맨해튼 주행모드를 MATLAB으로 제작한 것으로 이 데이터를 소형 전기자동차 모델에 적용하여 주행성능 결과를 도출하였다.

Table 4 Manhattan driving schedule

Driving schedule	Manhattan
Time	1,089 sec
Distance	3.32 km
Max speed	40.72 km/h
Avg speed	10.98 km/h
Max acceleration	2.06 m/s ²
Max deceleration	-2.5 m/s ²
Avg acceleration	0.54 m/s ²
Avg deceleration	-0.67 m/s ²
Idle time	394 sec

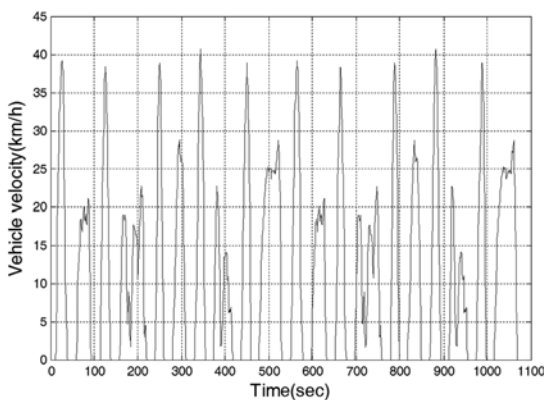


Fig. 5 Manhattan driving schedule

4.2 시뮬레이션 결과

시뮬레이션에 사용된 납축전지는 100% 완전 충전된 상태에서 최소 30%까지로 제한하였고, 도로조건은 평지이며, 소형 전기자동차는 측면 방향의 힘이 작용하지 않는 상태의 전진방향에 대해서 시뮬

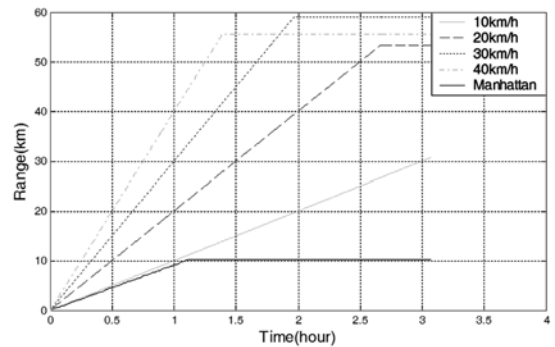


Fig. 6 Range of driving mode

레이션 하였다.

납축전지(197kg)를 장착한 소형 전기자동차 모델의 주행 속도에 따른 이동거리를 시뮬레이션 하였다. 주행모드에 따른 주행거리는 30km/h로 주행하였을 경우 가장 많은 59.022km의 이동거리를 나타냈으며, 그 다음으로 40km/h, 20km/h, 10km/h, 맨해튼 모드 순으로 Fig. 6과 같은 결과를 나타내었다.

소형 전기자동차의 배터리의 무게(용량)를 197kg에서 최대 788kg까지 점차 증가시켰을 경우 차량의 주행거리, 모터의 효율 및 전기자동차 효율의 변화에 대해 시뮬레이션 하여 아래와 같은 결과를 보였다. Fig. 7의 경우 배터리 무게(용량)증가에 따른 주행거리의 변화를 보여주고 있으며 배터리 용량(배터리 팩)이 증가하여도 주행거리는 그것에 비례하는 크기로 증가하지 않는 것을 볼 수 있다. 배터리 무게(용량)의 증가는 소형전기자동차의 전체 무게가 무거워지며 모터가 발생하는 토크를 증가시켜

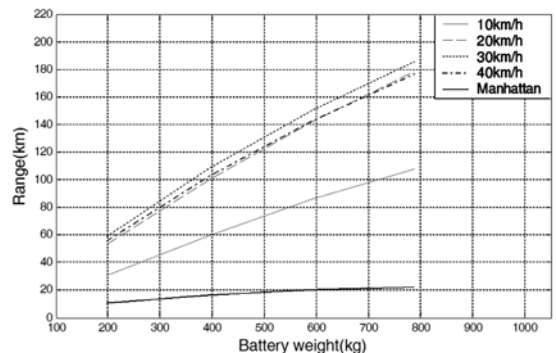


Fig. 7 NEV's driving range from changing Battery weight (SOC:100%→30%)

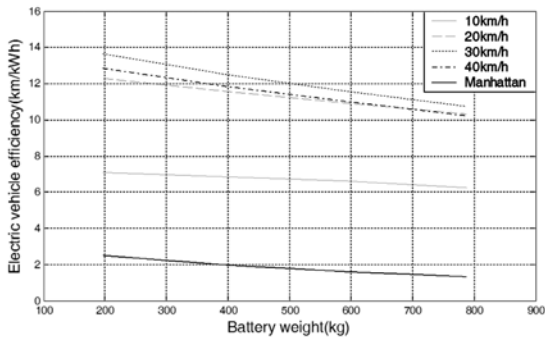


Fig. 8 NEV's efficiency of changing battery weight (SOC: 100%→30%)

Table 5 Results of simulation from changing battery weight

Speed (km/h)	Battery (kg)	Time (hour)	Range (km)	Motor eff.	EV eff. (km/kWh)
10	197	3.070	30.699	0.367	7.083
	394	5.938	59.380	0.421	6.851
	591	8.600	85.995	0.467	6.615
	788	11.036	108.000	0.503	6.231
20	197	2.661	53.220	0.752	12.285
	394	5.013	100.252	0.792	11.574
	591	7.087	141.726	0.822	10.911
	788	8.936	178.704	0.846	10.318
30	197	1.968	59.022	0.865	13.637
	394	3.614	108.412	0.868	12.530
	591	5.005	150.144	0.870	11.574
	788	6.177	185.292	0.867	10.717
40	197	1.387	55.475	0.885	12.841
	394	2.561	102.440	0.887	11.862
	591	3.563	142.494	0.889	11.005
	788	4.417	176.660	0.890	10.238
Manhattan	197	1.136	10.327	0.336	2.517
	394	2.008	16.475	0.325	1.999
	591	2.738	20.302	0.307	1.632
	788	3.350	22.376	0.291	1.342

모터의 효율이 증가하는 것을 Table 5를 통해 볼 수 있다. 반면에 Fig. 8을 통해 배터리 무게 증가하는 구동에 필요한 전기에너지를 증가시켜 소형 전기자동차 효율이 감소하는 것을 볼 수 있다. 특히 도심주행패턴의 경우 감소폭이 큰 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 2인승 소형 전기자동차 모델을 선정하여 정속주행 및 도심주행패턴에 따른 주행성능을 시뮬레이션하였다.

- 1) 소형 전기자동차 모델에 대해 정의하고 대상이 되는 모터 및 배터리를 모델링 하였다.
- 2) 정속주행 및 도심주행패턴에 있어 소형 전기자동차의 운행거리를 시뮬레이션을 통하여 예측, 비교 평가 하였다.
- 3) 배터리 팩을 증가 시켜 소형 전기자동차의 주행거리, 배터리 효율 및 전기자동차 효율에 미치는 영향을 비교·분석하였다.
- 4) 이와 같은 연구를 통해 도시주행에서의 전기자동차 주행거리 및 효율을 증가시키기 위해 배터리의 수를 증가시키는 방법 외에 소형 전기자동차를 위한 소형 에너지 공급 장치의 개발이 더불어 이루어져야 하겠다.

References

- 1) K. David Huang, S.-C. Tzeng, Development of a Dybrid Pneumatic-power Vehicle, Applied Energy, Elsevier, 2004.
- 2) T. Markel, M. Zolot, K. B. Wipke, A. A. Pesaran, "Energy Storage System Requirements for Hybrid Fuel Cell Vehicles," Advanced Automotive Battery Conference, pp.10-13, 2003.
- 3) G. Kim, N. Kim and C. Cho, "Small Scale Linear Ceramic Engine Generator for Neighborhood Electric Vehicle," EVS24, World Electric Vehicle Association, p.2, 2009.
- 4) S. Hwang, Traffic, The Korea Transport Institute, Vol.93, p.7, 2005.
- 5) Y. Lee, Traffic, The Korea Transport Institute, Vol.103, p.6, 2006.
- 6) National Highway Traffic Safety Administration, 49 CFR Part 571 (Docket No. NHTSA 98-3949) RIN 2127-AG58 Federal Motor Vehicle Safety Standards, 1998.
- 7) J. Shin, J. Shim, S. Hwang and G. Park, "Structural Analysis and Optimization of a Low Speed Vehicle Body," Transactions of KSAE,

- Vol.11, No.4, pp.66-78, 2003.
- 8) U. Lim, S. Jeon, W. Jeon, C. Shin, S. Chung and S. Kim, "Modeling of the Charge-Discharge Behavior of a 12V Automotive Lead-acid Battery," Korean Chem. Eng. Res., Vol.45, No.3, pp.242-248, 2007.
- 9) T. D. Gillespie, Fundamentals of Vehicle Dynamics, SAE, USA, 1992.