

태양광-전기자동차의 동력제어시스템에 관한 연구

심 한 섭[#]

(# 경남과기대)

A Study of on a Power Control System for a Solar-Electric Vehicle

Han-Sub Sim[#]

(Received 9 April 2014; received in revised form 16 May 2014; accepted 9 June 2014)

ABSTRACT

The intensity of sunlight becomes lower when weather conditions change, which affects whether a solar-electric vehicle can be driven on a shady road. The power delivered by solar cells can be vary depending on the amount of shade. As a result, the battery system is often used to compensate for variations in the power delivered by solar cells. Therefore, studies of power control systems for solar-electric vehicles are required. In this paper, mathematical models for such a power control system are studied and important variables are considered. Simulation and test results show that the mathematical model and actual designs developed here would be effective when used with solar-electric vehicles.

Key Words : Solar-electric Vehicle(태양광-전기자동차), Solar Cell(태양광전지), Power Control System(동력제어 시스템), Modeling(모델링), Vehicle Design(자동차 설계)

1. 서 론

석유자원의 부족과 대기환경보호를 위하여 다양한 에너지를 사용하는 자동차에 대한 연구들이 활발히 진행되고 있다.^[1,2] 그 중에 태양광-전기자동차는 태양광에너지를 전기에너지로 변환시키고, 전기모터를 이용하여 주행하는 자동차이다.^[3, 4] 그런데, 태양광에너지는 공해발생이 없고 거의 무한

정한 에너지로서 장점이 있으나, 자동차의 주(main) 에너지원으로 활용하기에는 많은 제약이 따른다. 그 중에서 가장 큰 어려움은 전력을 생산하는 태양광전지는 효율이 매우 낮아서, 자동차의 주행에 필요한 전력을 충분히 생산하려면 넓은 설치면적이 요구된다는 것이다. 그러나 자동차의 특성상 태양광전지의 설치면적이 제한적이며, 그것도 햇빛을 잘 받을 수 있는 자동차의 윗면에 설치해야 된다. 이것은 태양광-전기자동차의 자유로운 설계를 제한한다. 또한, 주행저항을 줄이기 위한 공력설계, 에너지효율을 향상시키기 위한 동력제어시스템 설계 등이 특별히 더 요구된다. 자동차의 주행 중에는 기상변화와 입사각도 변화 등으로

[#] Corresponding Author :

Dept. of Automotive Engineering Gyeongnam National University of Science and Technology
E-mail : hansub@gntech.ac.kr

태양광의 강도가 약해질 수도 있고, 순간적으로 그늘지역을 주행하기도 한다. 이러한 원인들에 의하여 태양광전지의 출력은 일정하지 않고 변화가 있으며, 자동차의 주행성능에 영향을 미치게 된다. 이와 같이 불균일한 태양광전지의 출력을 보완하기 위하여 배터리를 보완적으로 사용할 수 있다. 따라서 동력시스템에 대한 최적화 설계와 이에 따른 연구가 필요하다.

이 연구에서는 태양광-전기자동차의 동력제어시스템 모델링을 통하여 제어시스템을 구성하는 여러 가지 요소와 이들의 결합을 수학적 모델 (mathematical model)로 표현하고 제한조건과 변수값을 결정하여 시스템의 응답특성을 해석하였다. 이 결과를 바탕으로 실제 시스템의 주요 성능을 미리 예측하며, 중요한 성능변수들을 결정할 수 있다. 이러한 성능변수와 설계값은 동력제어시스템의 설계를 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 동력제어시스템 모델링

2.1 동력제어시스템의 구성

태양광-전기자동차의 동력제어시스템은 Fig. 1에 나타내었다. 태양전지(solar cell)는 태양광에너지를 전기에너지로 변환시킨다. 배터리(battery)는 여유 전력을 저장하며, 가속 또는 그늘진 도로의 주행 시에 부족한 전력을 보충한다. 충전제어기(charge controller)는 배터리에 충전/방전을 제어하며, 과충

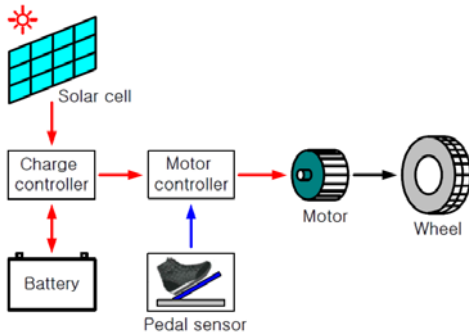


Fig. 1 Power control system of the solar-electric vehicle

전 및 과도한 방전을 방지한다. 모터제어기(motor controller)는 페달센서(pedal sensor)의 가속신호를 입력받아서 모터(motor)의 회전속도를 제어한다. 전기모터에서 발생하는 회전토크는 바퀴(wheel)를 회전시켜서 자동차의 구동력을 발생시킨다.

2.2 역학적 모델링

태양광자동차가 Fig. 2와 같이 경사도로를 주행 할 경우, 작용하는 힘(저항력)은 식(1)과 같다.

$$F_t = F_{rr} + F_{air} + F_{hc} + F_{acc} \quad (1)$$

F_{rr} : rolling resistance force

F_{air} : aerodynamic drag force

F_{hc} : hill climbing force

F_{acc} : acceleration force

자동차에 작용하는 힘에 관한 식(1)에서 각 항은 다음과 같다.

$$F_{rr} = \mu_{rr} m g \quad (2)$$

μ_{rr} : coefficient of rolling resistance

$$F_{air} = \frac{1}{2} \rho A C_d v^2 \quad (3)$$

ρ : air density

A : frontal area

C_d : drag coefficient

v : vehicle speed

$$F_{hc} = m g \sin \phi \quad (4)$$

ϕ : slope angle

$$F_{acc} = \left(m + I \frac{G^2}{\eta_g r^2} \right) a \quad (5)$$

I : inertia

G : gear ratio

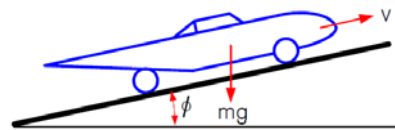


Fig. 2 The solar-electric vehicle driving along a slope

η_g : gear efficiency

r : radius of a tyre

a : acceleration speed

위의 식(2)~(5)에서 각 변수들은 자동차의 주행 성능을 결정하는 핵심 요소이며, 자동차 경량화, 구름저항, 공력설계 등이 중요함을 알 수 있다.

2.3 가속도 모델링

태양광-전기자동차의 모터에서 발생된 토크(T)는 동력전달장치에 의해 구동휠에 전달한다. 이때 전달된 구동력은 다음 식(6)과 같이 자동차의 주행 중에 발생하는 힘(저항력, F_t)과 같다.

$$\frac{G}{r}\eta_g T = F_t \quad (6)$$

자동차가 평평한 도로($\phi=0$)에서 가속할 경우에도 다음 식으로 부터 가속도와 속도를 구할 수 있다.

$$\frac{G}{r}\eta_g T = \mu_{rr} mg + \frac{1}{2}\rho AC_d v^2 + (m + I\frac{G^2}{\eta_g r^2})a \quad (7)$$

자동차가 최대토크로 출발-가속하여 모터속도(w_m)가 임계속도(w_c)에 도달할 때까지는 $T=T_{max}$ 를 대입하여 계산하고, 그 이후에는 모터의 토크-속도 함수를 대입하여 속도를 구할 수 있다.

2.4 주행에 필요한 동력

태양광-전기자동차의 주행에 필요한 동력은 다음 식(8)과 같이 힘과 속도의 곱으로 나타내어진다. 또한 전기 및 기계효율을 고려한다.

$$P_{ideal} = \frac{F_t v}{\eta_e \eta_m} \quad (8)$$

η_e : electrical efficiency

η_m : mechanical efficiency(= η_g)

태양광-전기자동차가 평평한 도로를 일정한 속도로 주행할 경우에, 경사면을 오르는 힘과 가속력은 0이며, 필요한 동력은 다음 식(9)과 같다. ($\phi=0$, $a=0$, $F_{hc}=0$, $F_{air}=0$)

$$P_{rr+air} = (\mu_{rr} mg + \frac{1}{2}\rho AC_d v^2) \frac{v}{\eta_e \eta_m} \quad (9)$$

위 식(9)로부터 태양광-전기자동차의 주행에 필요한 동력은 주행속도(v)의 3차 함수임을 알 수 있다. 위 식(9)는 태양광-전기자동차에서 솔라셀의 용량을 결정하는데 가장 기본적인 관계식이며, 각종 전장품(충전기, BMS, 모터제어기, 등화장치, 계기판 등)에 필요한 소요전력과 여유전력을 추가하여 결정한다. 가속, 경사로 주행, 그늘지역 통과 시에는 배터리 전력을 추가로 사용한다.

3. 구성품의 주요 특성

3.1 태양광전지

태양광전지(photovoltaic cell or solar cell)의 재료는 실리콘(Si), 갈륨비소(GaAs) 등을 포함하여 여러 종류가 있으나 이 연구에서는 실리콘 태양광전지를 대상으로 하였다. 태양광전지 모델은 광발전 정전류전원, 다이오드, 재료의 자체저항과 p-n 접합저항으로 구성된 등가회로가 사용되나, 이 연구에서는 태양광전지 제조사의 출력특성 자료를 활용하였다.^[3]

Fig. 3과 Fig. 4의 출력특성은 기준 시험조건에서 시험결과이므로, 실제 자동차에서는 태양광의

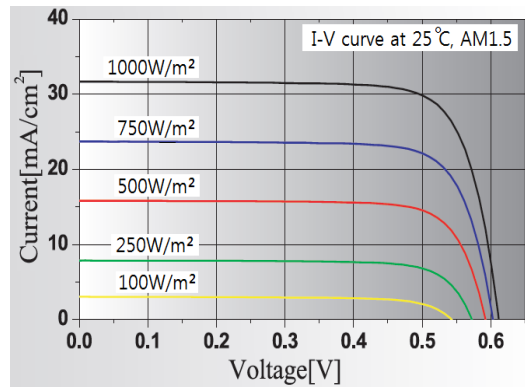


Fig. 3 Intensity IV curve of the solar cell

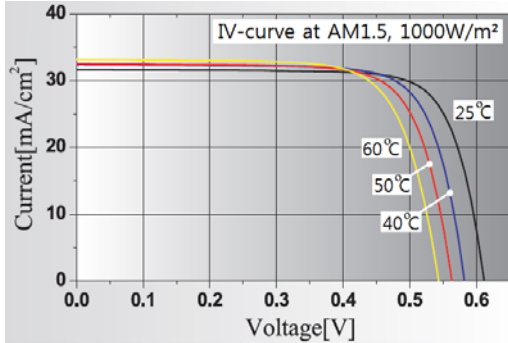


Fig. 4 Temperature IV curve of the solar cell

강도와 온도 등이 변화하므로 태양광전지는 다양한 출력특성을 보인다.

입사각도는 태양전지판에 비추는 태양광과 전지(cell)의 각도(θ)를 의미하며, 식(10)과 같다.

$$P_{cell\theta} = P_{max} \cos(\theta) \quad (10)$$

3.2 충전회로와 MPPT

태양광전지의 출력은 입사광 강도와 온도에 따라 다양하게 변화되며, 이러한 조건에서도 배터리 충전과 자동차운행이 가능하여야 된다. 이를 위한 충전회로는 step-down 컨버터, step-up 컨버터 등이 있으며, 컨버터 회로 안에 있는 스위칭 소자를 구동하여 태양광전지의 출력을 최대전력점(MPP: maximum power point)에서 동작할 수 있도록 제어한다.^[3,5] 이러한 기능을 갖춘 충전기를 MPPT (MPP tracker)라고 한다. 최대전력점을 찾기 위한 제어방법은 많은 연구성과들이 있으며, 태양광전지에 연결된 부하를 제어하여 임피던스 매칭을 제어하여 가능하다. 최대출력점은 Fig. 5에서 출력-전압(power-V) 그래프로부터 다음 식(11)과 같이 전력의 미분값(기울기)이 0이 되는 점이다.

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad (11)$$

이 연구에서는 MPPT 기능이 있는 상용 충전기를 사용하였다.^[6]

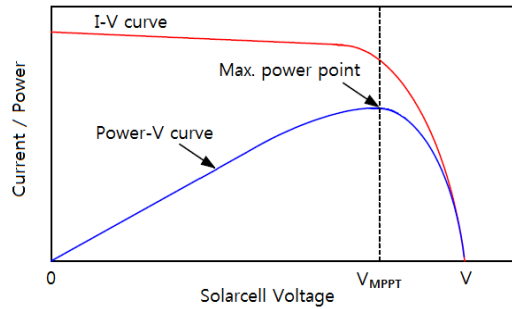


Fig. 5 MPPT curve

3.3 배터리 및 BMS

태양광-전기자동차의 주행시에 태양광의 강도저하, 그늘지역 통과로 인하여 태양광전지의 출력저하, 가속 등으로 추가적인 전력이 필요하며, 이를 위하여 전기에너지를 저장하는 배터리가 추가적으로 필요하다. 배터리의 종류는 납축전지, 인산-철전지, 리튬전지 등 여러 가지가 있으나, 이 연구에서는 에너지밀도가 높은 리튬-폴리머 전지를 사용하였다. 리튬-폴리머 전지의 충방전 특성은 제조사의 자료를 참고하였다.^[7] 리튬 배터리 팩(pack)에는 과충전 및 과방전 방지, 셀전압 관리 등을 위한 BMS(battery management system)가 구비되어 있다. 다음 Fig. 6은 배터리의 충방전 전압에 대한 전압범위를 나타내는 그래프이다. 배터리의 정격전압은 48 V이며, V_H 는 완전충전 전압이며, V_L 는 방전중지 전압이다. V_H 와 V_L 는 BMS에서 조정할 수 있다

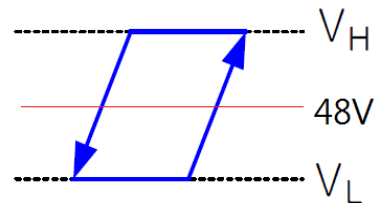


Fig. 6 Charging and discharging between V_H and V_L in the BMS

3.4 모터 및 속도제어기

모터에는 여러 가지 종류가 있으나, 내구성과 효율이 높은 BLDC 모터를 사용하였다. 2상 여자 방식의 BLDC 모터의 토크는 다음 식(12)와 같이 공급전류에 비례하여 증가한다.^[8]

$$T_m = \frac{e_u i_u + e_v i_v + e_w i_w}{\omega_m} = -\frac{2E}{\omega_m} i_w \quad (12)$$

다음의 Fig. 7은 BLDC 모터의 회전속도를 제어하기 위한 속도제어시스템의 블록선도이다.

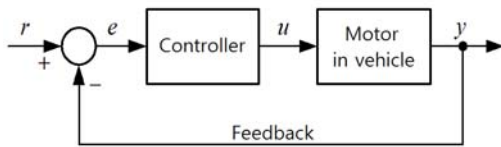


Fig. 7 Motor speed control system

여기서, $r(s)$ 는 BLDC 모터의 요구 속도이며, $y(s)$ 는 출력속도이다. $e(s)$ 는 $r(s)$ 와 $y(s)$ 의 속도오차이다. 제어기는 속도오차 $e(s)$ 에 따라 정해진 제어 규칙에 따라 제어값 $u(s)$ 를 출력하며, 제어신호는 모터구동 전류이다. BLDC 모터에 대한 제어방법은 많은 연구들이 있으며, 일반적으로 사용되는 PI-제어를 사용하였다. $r(s)$ 는 운전자가 사용하는 페달센서로부터 입력되는 신호이다. 모터제어기에는 회전속도 제어와 회전방향 전환이 가능하다.

3.5 동력전달장치

모터에서 휠로 회전력을 전달하기 위한 동력전달장치는 모터-휠 일체형, 감속기어, 체인 등 여러 가지가 있으며, 적절한 장치를 선택하여 사용할 수 있다. 동력전달계통의 설계시에는 전달효율을 높은 방법을 사용하여야 하며, 이 연구에서는 체인 구동장치를 사용하였다. 모터토크와 휠의 구동력은 가속도 모델링에서 사용한 식(6)과 같다.

4. 실험용 자동차의 설계

4.1 자동차 설계조건

태양광전지는 에너지 변환효율이 매우 낮으므로, 태양전지의 설치면적을 최대한 확보해야 될

필요가 있다. 또한 에너지절약을 위한 경량화와 고강도 재료를 동시에 고려해야 한다. 또한 주행 중에 공기저항을 최소화하기 위한 공력설계가 필요하며, 구름저항도 줄일 필요가 있다. 기타 사항은 일반적인 자동차의 설계지식을 참고하였다.

4.2 실험용 자동차 규격

태양광-전기자동차의 설계조건을 고려하여 설계된 실험용 자동차의 기본제원은 Table 1과 같다. 운전자(1명-70 kgf)를 포함한 자동차의 무게는 300 kgf이며, 최고속도는 60 km/h로 제한하였다. 이 자동차의 전력시스템은 48 V이며, 구동용 5.0 kW BLDC 모터와 보조 전원용 배터리를 장착하였다. 모터의 토크는 체인으로 구동휠(후륜-1개)에 전달되며, 기어비(감속비)는 5:1이다. 탑승인원은 운전자 1명이다. DC 12 V를 사용하는 전장품에 필요한 전력은 DC-DC 컨버터를 통하여 48 V를 12 V로 변환하여 공급된다. 전류는 2개이며, 후륜구동은 1개이다. 또한 조향장치, 현가장치, 제동장치 등을 구비하고 있다.

Fig. 8은 식(9)으로 계산한 실험용 자동차가 정속으로 주행할 때 필요한 동력이다. 최대 정속주행($v=60$ km/h)에서 필요한 동력은 1,031 W이지만, 태양광전지 용량은 약 30 %가 더 추가된 1,336 W이다. Fig. 8로부터 1,336 W에서 자동차속도는 67.5 km/h까지 가능하며, 자동차의 대략적인 최고속도는 60~70 km/h 사이에 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 실험용 태양광-전기자동차의 사진이다.

Table 1 Basic Specifications of the solar car

Dimension	L5.0m × W1.8m × H1.1m
Weight	250 kgf
Speed	max. 60 km/h
Solar power	1,336 W
Motor	5.0 kW, 48 V BLDC
Transmission	chain, gear ratio: 5:1
Battery	48 V-31 AH, Li-polymer
Wheels	2-front wheels(steering) 1-rear wheel(traction)
Passenger	1 person

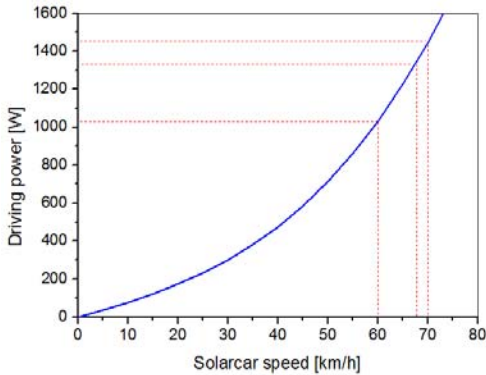


Fig. 8 Driving power at the solarcar speed



Fig. 9 Photo of the solar-electric vehicle

주행에 필요한 전력생산을 위한 태양광전지는 자동차의윗면에 부착되며, 운전석 윗면 지붕(canopy)에도 설치하여 최대면적을 확보하였다.

5. 실험 및 결과

Fig. 10은 식(7)에 실험용 태양광-전기자동차의 변수값을 적용한 다음 식을 계산한 것이며, 출발-가속에서의 속도변화를 보여주고 있다.

$$\frac{dv}{dt} = 1.463919 + 0.000355v^2, (w_m \leq w_c) \quad (13)$$

$$\frac{dv}{dt} = 1.463919 - 0.041626v + 0.000355v^2, (w_m > w_c) \quad (14)$$

자동차는 BLDC 모터속도가 임계속도까지, 즉 0 ~ 8 sec까지는 모터의 최대토크로 가속하고 있다. BLDC 모터의 임계속도(w_c)를 자동차 속도로 환산하면 약 43 km/h이다. 이후부터 자동차의 속도증

가율은 조금 낮아지고 있으며, 60 km/h까지 증가한다. 자동차속도가 60 km/h까지 증가하는데 14.5 sec가 걸렸으며, 이후에는 속도제한 때문에 자동차속도가 증가하지 않음을 알 수 있다.

Fig. 11은 자동차가 정지해 있을 때 태양광전지의 발전 전압과 Li-배터리의 충전전압을 보여주고 있다. 태양광전지의 출력전압은 시간의 흐름에 따라 증가하고 있으며, Li-배터리의 충전전압도 상승하고 있다. 이 시험조건에서 배터리 전압은 약 1 V/20 min의 상승률로 증가하고 있으며, 1 시간 동안에 약 3 V가 상승함을 관찰할 수 있다.

Fig. 12는 태양광-전기자동차가 일정한 속도($v=60\text{km/h}$)로 주행하는 동안 측정된 태양광전지의 전압과 Li-배터리의 충전전압이다. 두 가지의 전압들은 약간의 변동은 있으나, 전압차이는 약 2 V 정도를 유지하고 있다. Li-배터리의 전압은 51~52 V 범위를 유지하고 있다. 이 결과는 자동차가 비교적 일정한 속도로 진행 중에 태양광전지의 발전 전력이 충분하다는 것과 발전된 전력으로 지속적인 주행이 가능하다는 것을 보여준다.

4. 결 론

태양광-전기자동차의 동력제어시스템에 대한 모델링과 자동차 설계 및 시험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 태양광-전기자동차의 동력제어시스템을 구성하는 각각의 요소부품들과 자동차의 성능에 대한 수학적 모델을 연구하였다.
2. 설계조건을 고려한 수학적 모델로부터 자동차 성능을 예측하였고, 시험용 자동차를 이용하여 시험한 결과 자동차성능이 적정함을 알 수 있었다. 특히, 태양광전지의 전력이 충분하여 Li-배터리 전력을 추가적으로 사용하지 않고 자동차 주행이 지속적으로 가능함을 확인할 수 있었다.
3. 태양광-전기자동차의 동력제어시스템에 대한 모델링과 이를 이용한 자동차의 설계과정이 타당성이 있음을 확인할 수 있었다.

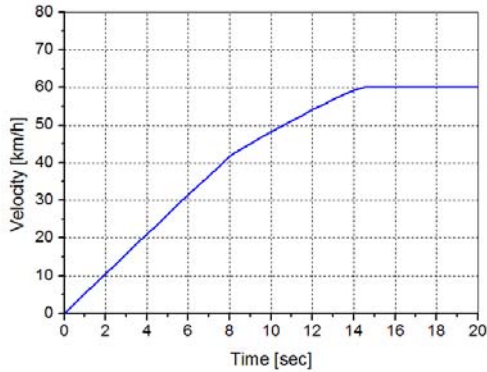


Fig. 10 Acceleration of the solar car

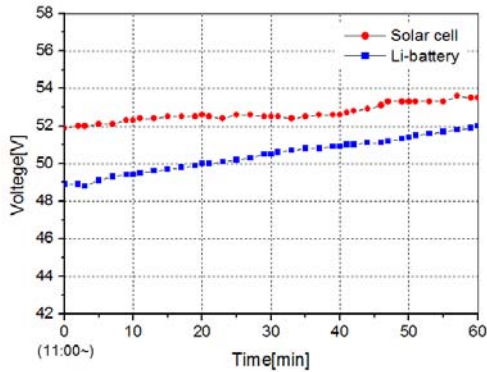


Fig. 11 Charging test at stop state

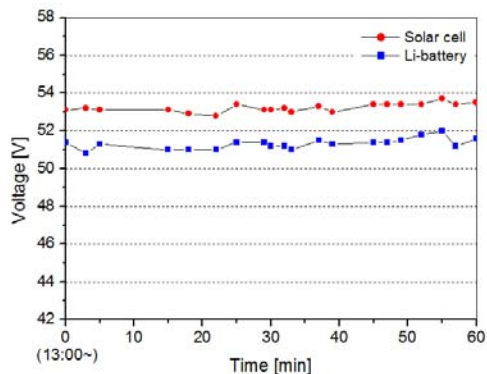


Fig. 12 Charging and discharging at driving state

후 기

이 논문은 2013년도 경남과학기술대학교 기성회 연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

1. J. Larminine, J. Lowry, "Electric Vehicle Technology Explained", Wiley, 2003.
2. H. J. Aha, H. J. Ji, J. M. Bae, S. W. Cha, Control Strategy and Characteristics Analysis of PEMFC/Photovoltaics Hybrid Vehicle, The Transactions of Korean Society Machine Engineering, Vol. 31, No. 2, 2007.
3. D. R. Carroll, "The Winning Solar Car", SAE International, pp. 71-119, 2003.
4. Hasiguti, Morisuke, Y. H. Kim, "Solar Car", ED tech publishing Co., 1996.
5. G. J. Yu, K. H. Kim, Y. S. Jung, Y. S. Kim, A Study on the MPPT Control Algorithm and Efficiency Evaluation Method, The Transactions of Korean Institute of Power Electronics, Vol. 6, No. 2, 2001.
6. TriStar MPPT, Solar system controller, Installation and operation manual, Morningstar Co., 2010
7. Kokam Battery Module, Operation manual, Kokam Co. Ltd. 2013.
8. S. H. Kim, "DC, AC, BLDC Motor Control", Bookdoo Publishing Co., pp. 425-449, 2010.