



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

전기자동차 모델링 및 확장 칼만
필터를 이용한 배터리 SOC 추정에
관한 연구

濟州大學校 大學院

에너지응용시스템공학부 電氣工學專攻

梁 承 容

2017 年 8 月

전기자동차 모델링 및 확장 칼만 필터를 이용한 배터리 SOC 추정에 관한 연구

指導教授 金 豪 贊

梁 承 容

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2017 年 8 月

梁承容의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ ①

委 員 _____ ①

委 員 _____ ①

濟州大學校 大學院

2017 年 8 月

A Study on EV Modeling and Battery SOC
Estimation Using Extended Kalman Filter

Seung Yong Yang
(Supervised by professor Ho-Chan Kim)

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE

FACULTY OF APPLIED ENERGY SYSTEM
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

2017. 8.

목 차

그림 목 차	ii
표 목 차	iii
SUMMARY	iv
I. 서론	1
II. 28 kW급 전기자동차 구성	3
2.1 28 kW급 전기자동차 개요	3
2.2 인덕션 모터	4
2.3 리튬 폴리머 배터리	6
2.4 BMS	7
III. 전기자동차 모델링 및 성능 분석	10
3.1 Matlab/Simulink를 사용한 전기자동차 모델링	10
3.2 시뮬레이션 결과 및 전기자동차 운행 성능 분석	16
IV. 확장 칼만 필터를 이용한 배터리 SOC 추정	24
4.1 배터리의 전기적 등가회로 모델	24
4.2 확장 칼만 필터를 이용한 배터리 SOC 추정	28
V. 결론	34
참 고 문 헌	35

그림 목 차

그림 1	28 kW급 전기자동차 구성도	4
그림 2	28 kW급 인덕션 모터	5
그림 3	모터 제어기	6
그림 4	리튬 폴리머 배터리 팩	6
그림 5	BMS를 포함한 전기자동차 구성도	7
그림 6	충전시 배터리의 출력	9
그림 7	전기자동차 모델링 구성도	10
그림 8	배터리 모델	11
그림 9	DC-DC 컨버터 모델	11
그림 10	타이어와 기어비 모델	12
그림 11	모터와 인버터 구성도	13
그림 12	모터 모델	13
그림 13	인버터 모델	13
그림 14	전기자동차 동력전달장치 모델	14
그림 15	도로환경 모델을 포함한 전기자동차 모델	15
그림 16	운전자 모델	16
그림 17	전기자동차 시뮬레이션 모델 구성도	16
그림 18	평지 주행을 위한 사이클 및 위성사진	18
그림 19	평지 주행에서 전기자동차 속도	18
그림 20	평지 주행에서 전기자동차 배터리 출력	20
그림 21	경사지 주행을 위한 사이클 및 위성사진	21
그림 22	경사지 주행에서 전기자동차 속도	21
그림 23	경사지 주행에서 전기자동차 배터리 출력	23
그림 24	배터리의 전기적 등가회로 모델	25
그림 25	펄스 전류에 따른 배터리 전압 특성	27
그림 26	확장 칼만 필터 알고리즘의 흐름도	30
그림 27	펄스 전류에 따른 리튬 폴리머 배터리 전압변화	32
그림 28	배터리 OCV-SOC 곡선	32
그림 29	배터리 모델 예상전압	33
그림 30	확장 칼만 필터를 사용한 SOC 추정	33

표 목 차

표 1 상용 전기자동차와 제작한 28 kW급 전기자동차 출력특성 비교	4
표 2 전기자동차 시뮬레이션 파라미터	17

SUMMARY

In order to improve battery state of charge (SOC) estimation methods, this research developed an electric vehicle (EV) model using Matlab/Simulink software and compared the modelled performance with test data of an EV developed for actual use. To develop a 28 kW EV using an induction motor, a gearbox with a 1 : 5.5 ratio was used in the powertrain. We utilized an 11.1 kWh battery pack, which included a battery management system (BMS), using 20x2 lithium-polymer battery cells. An on-board charger (OBC) with 220V (AC) input and 22A output was used to charge the battery pack. The technical specifications were obtained through various experiments.

Accurate estimation of battery SOC is one of the key problems in a BMS. This paper proposes a battery SOC estimation method using an extended Kalman filter for lithium-polymer batteries. An electric circuit model (ECM) was set up to represent different degrees of parameter shift due to chemistry, charging, discharging, temperature, and age. Numerical simulation and hardware test results indicate that the proposed algorithm is very useful with respect to improving the accuracy of battery SOC estimation.

I. 서론

최근 환경문제, 지구온난화, 에너지 고갈 문제 등으로 인하여 자동차 분야에서는 기존 내연기관 자동차의 유해가스 배출을 저감시켜야 하는 당면문제를 가지고 있다. 향후의 자동차산업은 친환경/지능형 자동차 분야가 큰 성장 동력이 될 것으로 예측되며, 세계적인 자동차 회사들은 시장 선점을 위해 이 분야에 집중적으로 투자를 진행하고 있다[1, 2]. 현재 미래형 자동차는 전기자동차와 연료전지 자동차가 가장 주목받고 있으며, 유럽에서는 친환경엔진을 장착하는 그린카 개발이 활발하게 이루어지고 있다[3, 4]. 이러한 기술개발의 변화에 따라 전기자동차용 센서, 하이테크 운전 기술, 플라스틱/나노/하이브리드 소재 등을 활용한 다양한 전기자동차 부품들이 개발되고 있다[5].

전기자동차의 구동 시스템은 내연기관자동차와 다른 구조를 가지고 있다. 전기자동차는 내연기관 대신 전기모터를 사용하고, 배터리와 축전지를 에너지 저장소로 이용한다. 이외에도 인버터, 컨버터 등 전력변환 장치가 차량에 탑재되어 있다. 전기자동차를 작동시키는 동력전달장치는 배터리, 인버터, 모터 등으로 구성된다. 동력전달장치는 모터를 통하여 전기에너지를 기계에너지로 변환하고 자동차 바퀴에 동력을 공급한다. 전기자동차와 관련해서 활발하게 연구가 진행되는 분야는 동력전달장치와 주행 동특성 부분과 배터리팩의 충전 용량을 백분율로 나타내는 SOC(state of charge)의 정확한 추정이다.

배터리의 용량(capacity)은 평균전류, 방전시간, 전해질온도, 배터리 보관시간 등에 따라 달라지며 SOC는 작업을 수행 할 수 있는 배터리 팩에 남아있는 전기 에너지의 양을 나타낸다. 배터리 SOC의 정확한 추정은 배터리 용량의 효율적인 사용을 가능하게 하고, 체계적인 배터리의 충전과 방전은 배터리의 열화(aging)을 줄일 수 있으므로 수명을 연장할 수 있다[6]. 확장 칼만 필터(extended Kalman filter)는 랜덤 잡음(random noise)이 존재하는 조건에서 비선형 시스템을 대상으로 최적의 순환 추정 알고리즘이다[7]. 확장 칼만 필터 알고리즘은 다양한 비선형 시스템에 적용할 수 있으며, 비선형 특성을 갖고 있는 전기자동차의 배터리 SOC의 추정에도 많이 적용되고 있다[8, 9].

본 논문에서는 전기자동차의 성능 분석을 위해 Matlab/Simulink 프로그램으로 전기자동차를 모델링하고 다양한 운행 패턴에 따른 전기자동차의 성능을 컴퓨터 시뮬레이션을 수행한다[10]. 전기자동차의 성능은 평지와 경사지의 운행 패턴에 따른 시뮬레이션 결과와 전기자동차의 실제 속도, 전압, 전류 및 SOC 데이터 들을 비교하고 분석한다. 전기자동차의 실제 측정데이터는 제작한 28 kW 급 전기자동차를 운행하면서 취득하고 성능을 비교특성을 살펴본다. 전기자동차는 28 kW AC 인덕션 모터를 사용하고 Curtis 1238 모터 제어기를 이용하여 모터를 제어하도록 한다. 계속된 운행으로 인한 지속적인 열의 발생을 방지하기 위해 수냉식으로 방열시스템을 구축한다. 배터리팩은 한 셀당 3.2~4.16 V, 75 Ah 리튬 폴리머 배터리를 이용하여 20직렬 2병렬로 연결하여 구성하고 출력용량은 11.1 kWh이다. 배터리의 전기적 등가회로 모델(electrical circuit model, ECM)은 전기적 소자를 사용한 테브난(Thevenin) 등가회로를 사용하여 나타내고, 배터리의 전압과 전류 데이터를 사용하여 배터리의 파라미터를 결정한다. 배터리 모델을 대상으로 확장 칼만 필터를 이용하여 배터리 SOC의 추정 결과와 전기자동차에서 나타난 SOC 데이터를 비교하고 배터리 모델을 통한 SOC 추정 방법의 유용성을 분석한다. 이 결과들을 확장하면 전기자동차의 자율운행들에 유용하게 적용할 수 있으리라 기대된다.

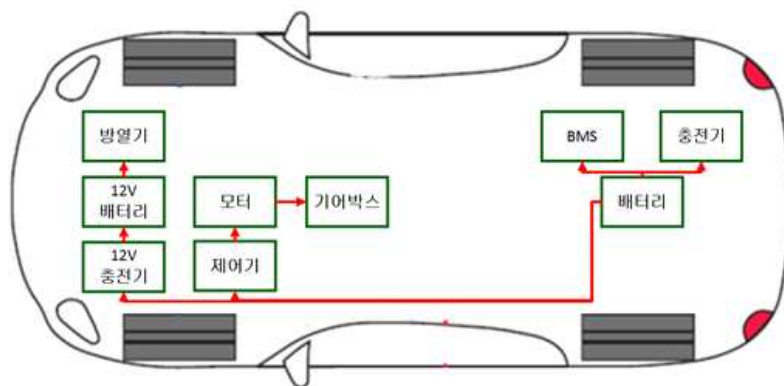
II. 28kW급 전기자동차 구성

2.1 28 kW급 전기자동차 개요

자동차 동력전달장치란 동력장치에서 생산한 동력을 구동하는 바퀴까지 전달하는 과정에서 연결되어 있는 모든 기관을 말한다. 자동차 종류에 따라 구동방식 차이는 있지만 일반적으로, 자동차 엔진에서 동력을 생산하고, 변속기, 클러치, 종감속기어(final reduction gear), 차동기어(differential gear) 장치를 거쳐 바퀴로 구동력을 전달한다. 전기자동차는 모터가 엔진의 역할을 수행하고, 가솔린 대신에 배터리가 에너지를 제공한다.

전기자동차의 동력전달장치는 내연기관 자동차보다 간단한 구조를 가지며 배터리, 인버터, 모터, 감속기로 구성된다. 본 논문에서는 제작한 28 kW급 전기자동차를 대상으로 성능 특성을 살펴본다.

그림 1(a)는 전기자동차 구성을 나타내며, 제작한 차량은 그림 1(b)와 같다. 차량프레임은 바디 온 프레임 디자인에 차량부품을 이용하여 제작하고, 모터, 기어박스, 모터제어기, 12 V 배터리와 충전기, 수냉식 방열판과 펌프는 차량 앞쪽에 위치하고 리튬 폴리머 배터리, BMS(battery management system), OBC(on board charger)는 뒤쪽에 배치시키는 구조를 갖는다. 제작 전기자동차와 상용인 쏘울 전기자동차(Soul EV)의 출력특성 비교는 표 1과 같다[6].



(a) 전기자동차 구성도



(b) 28 kW급 전기자동차

그림 1 28 kW급 전기자동차 구성도

표 1 상용 전기자동차와 개발한 제작 전기자동차 출력특성 비교

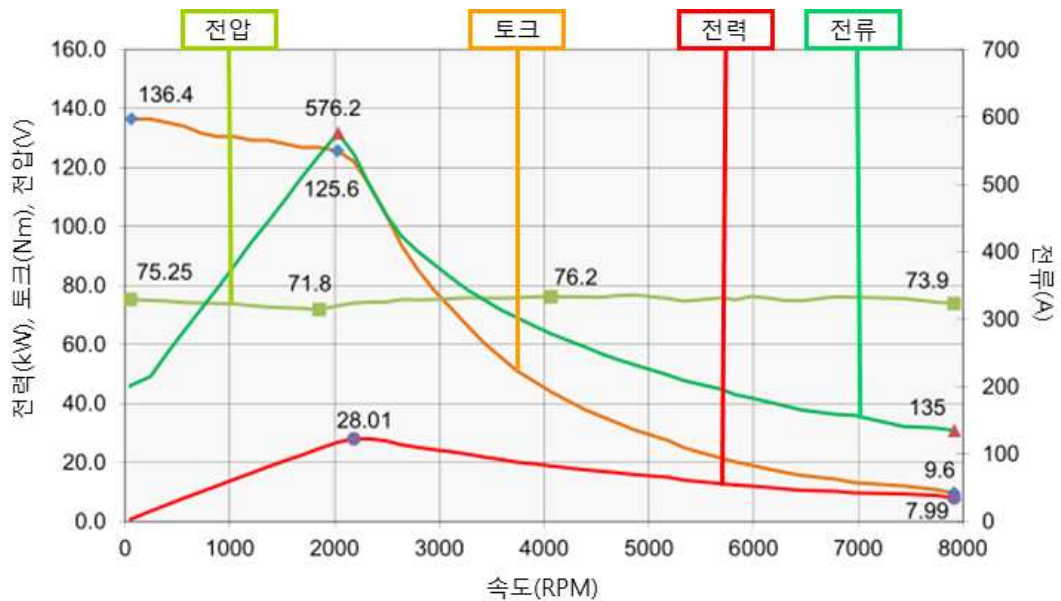
구분	상용 전기자동차	제작 전기자동차
무게 [kg]	1,530	800
배터리 출력 [kWh]	27	11.1
배터리 종류	리튬 이온 폴리머	리튬 이온 폴리머
모터 최대출력 [kW]	81.4	28.01
모터 최대토크 [Nm]	285	136.4

2.2 인덕션 모터

전기자동차는 정격이 72 V, 650 A인 그림 2(a)와 같은 3상 AC 인덕션 모터 1개를 사용하고 1 : 5.5의 기어박스를 거쳐 후륜구동으로 작동한다. 그림 2(b)는 인덕션 모터의 출력을 나타낸 그래프이고, 모터는 28.01 kW의 최대출력과 136.4 Nm의 최대 토크 값을 갖는다[11].



(a) 3상 AC 인덕션 모터



(b) 28 kW급 인덕션 모터 출력

그림 2 28 kW급 인덕션 모터

그림 3에서 전기자동차의 AC 인덕션 모터 제어기는 Curtis사의 1238 모델로서 입력전압 24~96 V에서 350~800 A의 출력특성을 갖는다. 전기자동차를 지속적으로 운행할 때 나타날 수 있는 모터의 온도 상승을 억제하기 위한 수냉식 방열판은 제어기 아래에 장착되어 있다.

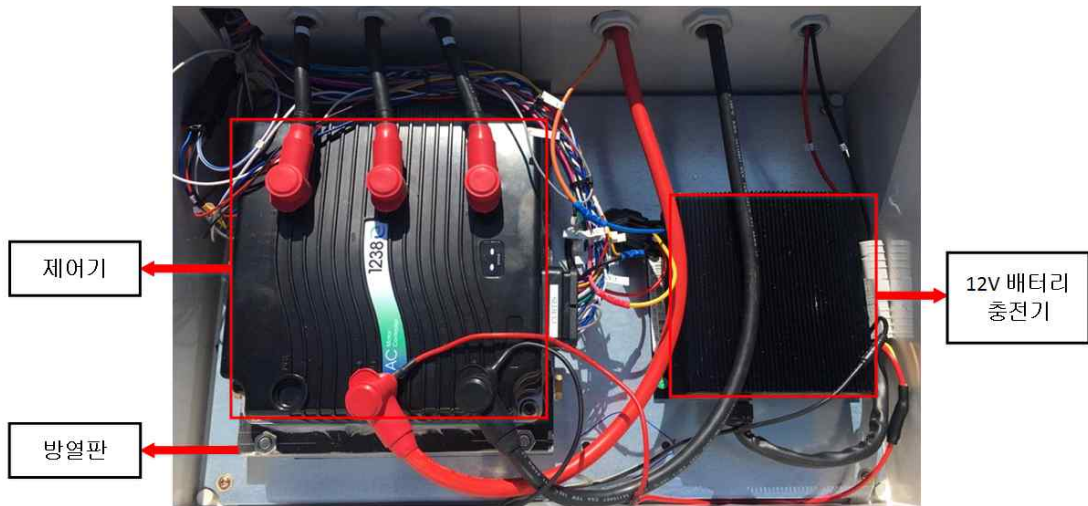


그림 3 모터 제어기

2.3 리튬 폴리머 배터리

전기자동차는 그림 4의 리튬 폴리머 배터리 팩을 사용한다. 배터리 팩은 출력이 3.2~4.16 V, 75 Ah인 리튬 폴리머 셀을 20직렬 2병렬로 구성하여, 배터리의 출력은 64~83.2 V, 11.1 kWh를 갖는다. 차량을 점검할 때에 배터리의 전류를 차단하기 위해 (-)극에 스위치를 놓고, 제어기에 전압을 공급하기 위해 (+)극에 콘택터를 설치한다.

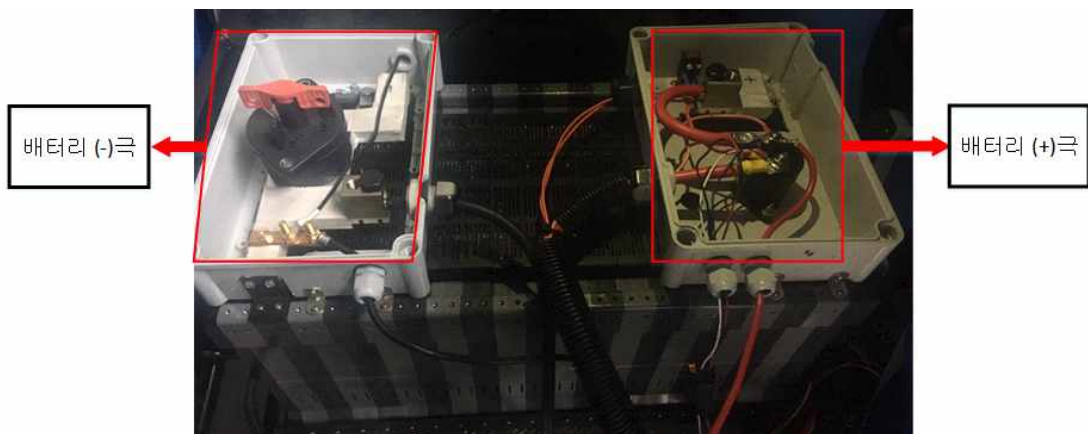
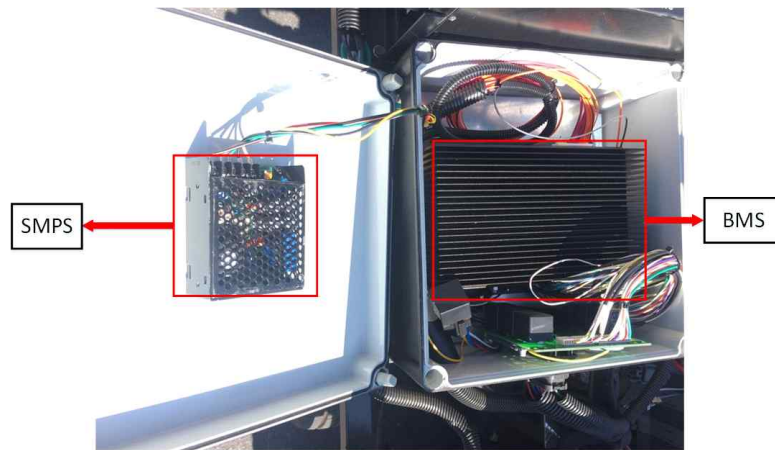


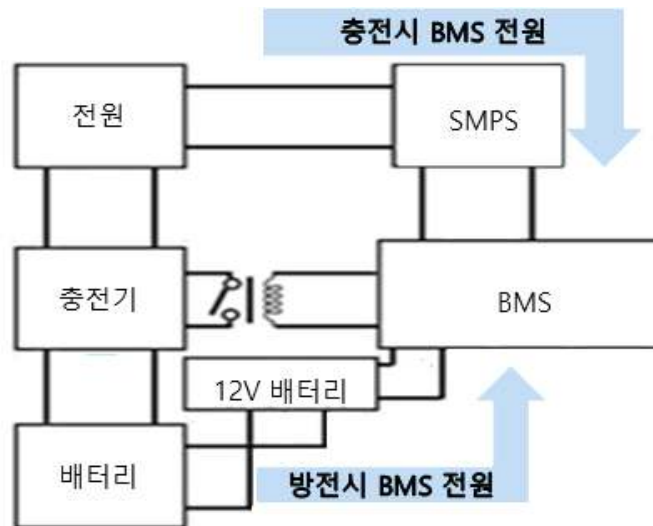
그림 4 리튬 폴리머 배터리 팩

2.4 BMS

BMS를 포함한 전기자동차의 구성도는 그림 5와 같다. 그림 5(a)에서 전기자동차는 배터리 충전 시에 SMPS(switched mode power supply)를 통해 BMS에 전원을 공급하고, 그림 5(b)와 같이 방전 시에는 12 V 납축전지를 이용하여 BMS에 전원을 공급하도록 구성한다.



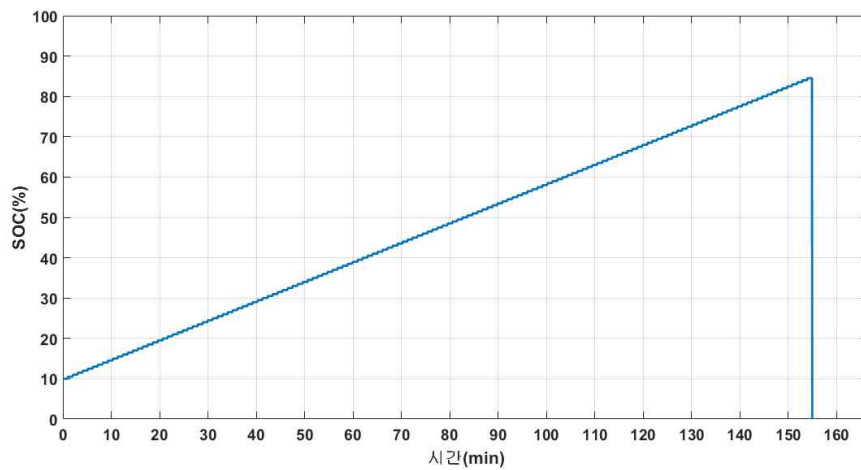
(a) BMS와 SMPS



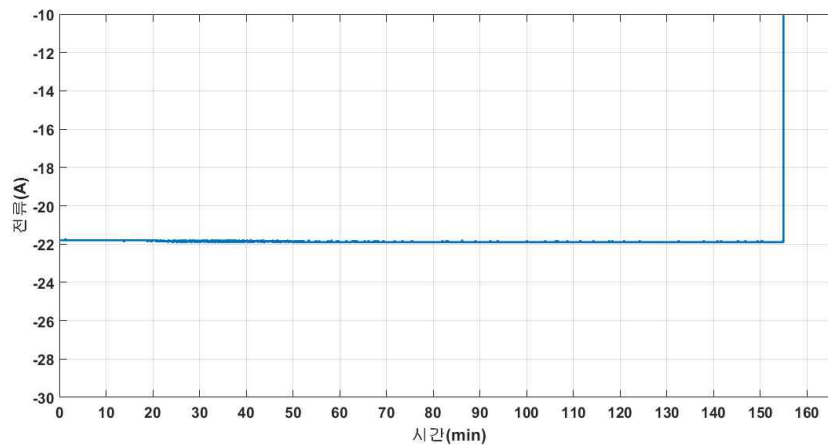
(b) 전기자동차 구성도

그림 5 BMS를 포함한 전기자동차 구성도

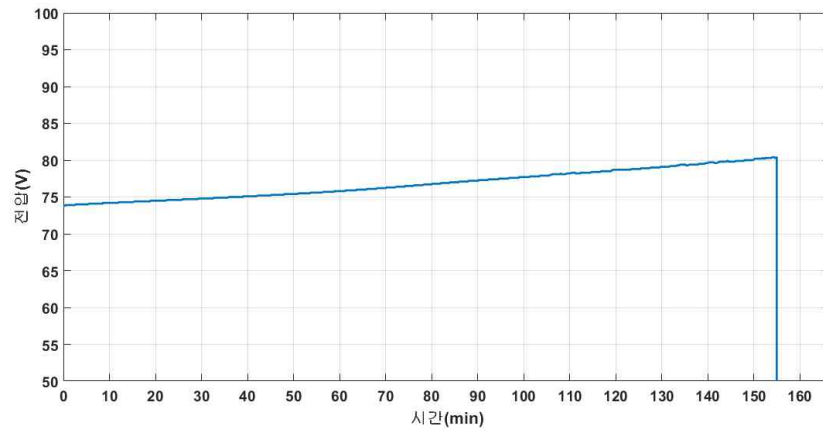
전기자동차 배터리는 가정용 전원 220 V에서 22 A의 출력을 내보내는 OBC를 사용하여 충전한다. 계기판이나 BMS를 PC에 연결하여 배터리의 충전상태를 확인할 수 있으며, 배터리의 SOC가 85%일 때에 BMS는 배터리 충전을 차단시킨다. Orion 사의 제품인 BMS는 CAN 통신을 이용하여 배터리의 출력 데이터를 실시간으로 컴퓨터에 제공한다. 그림 6에서 BMS는 배터리 SOC가 10%에서 85% 구간에서만 배터리를 충전과 방전시키고, SOC가 85% 이상이면 배터리 충전을 차단하고 10%미만에서는 배터리의 동작을 정지시킨다[12].



(a) 충전시 배터리 SOC



(b) 충전시 배터리 전류



(c) 충전시 배터리 전압

그림 6 충전시 배터리의 출력

Ⅲ. 전기자동차 모델링 및 성능 분석

3.1 Matlab/Simulink를 사용한 전기자동차 모델링

제작된 28 kW급 전기자동차의 성능 분석을 위해 각각의 실제 전기자동차 구성장치들의 값들을 적용하고 전기자동차를 모델링한다. 전기자동차의 모델링 구성도는 그림 7과 같고, 콜로라도 대학의 강좌에서 제공한 Matlab/Simulink 프로그램을 기반으로 전기자동차 시뮬레이션 모델을 설계한다[13]. 평지와 경사지의 운행 패턴을 통한 시뮬레이션 결과들은 실제 주행을 통한 전기자동차 출력 데이터와 비교하여 제작된 전기자동차의 성능 분석과 배터리의 동작특성을 파악하도록 한다.

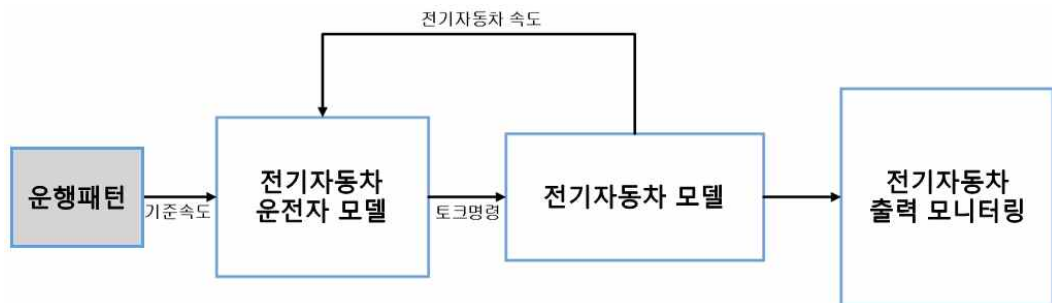


그림 7 전기자동차 모델링 구성도

그림 8에서 전기자동차의 배터리 모델은 배터리의 셀 용량, 충방전 저항, 셀의 직병렬, 히스테리시스 전압, 시정수, 쿨롱효율을 파라미터 값으로 구성된다. 배터리는 전류 변화를 이용하여 전압을 컨버터에 공급하고 배터리 상태의 출력변화를 모니터링 할 수 있도록 한다.

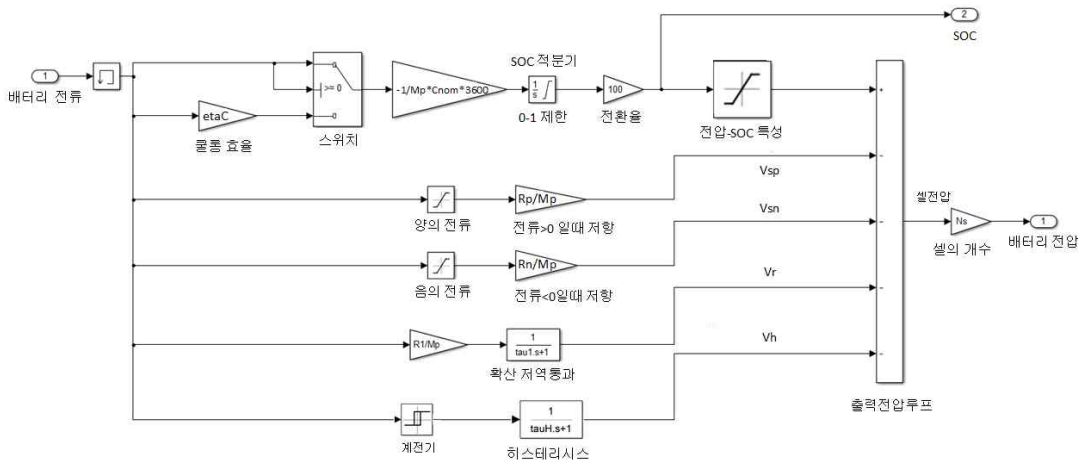


그림 8 배터리 모델

그림 9는 DC-DC 컨버터 모델을 나타낸다. 버스 기준전압, 컨버터 효율, 최대 정격전압을 파라미터 값으로 정하면, DC-DC 컨버터는 배터리의 전압, 인버터로부터 입력전류를 받아 모터에 필요한 버스 전압을 공급한다.

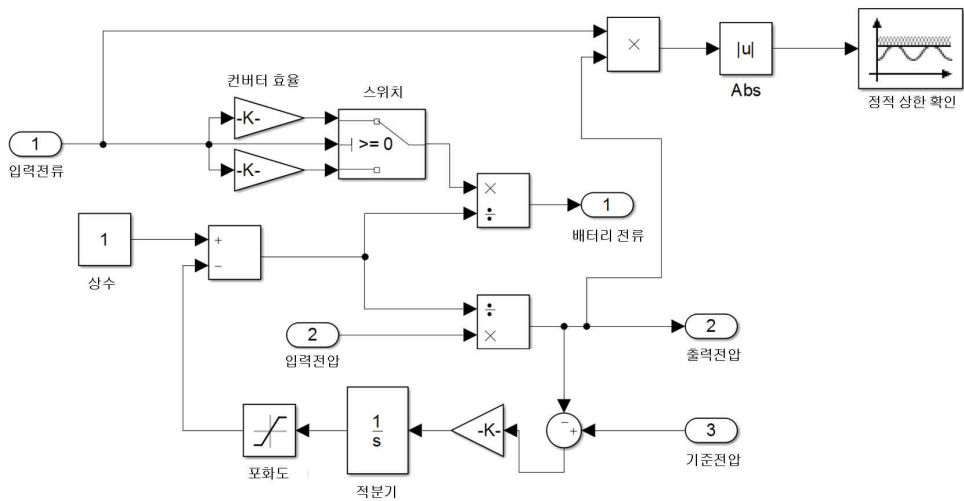
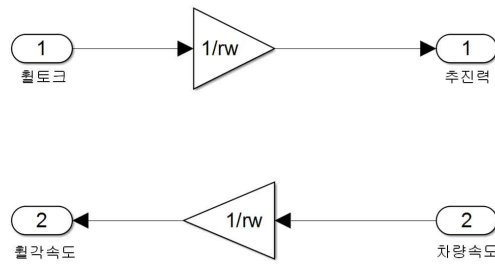


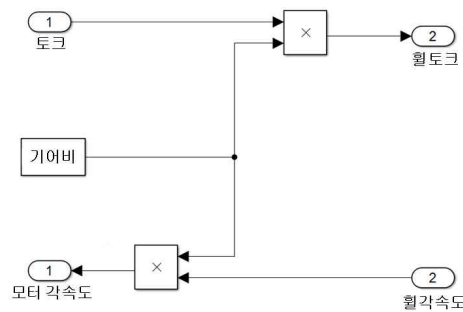
그림 9 DC-DC 컨버터 모델

그림 10은 전기자동차의 타이어 모델과 기어비 모델을 나타낸다. 그림 10(a)는 타이어 모델로서 타이어의 반지름 파라미터 값을 입력으로 기어비에서 휠토크를 이용하여 추진력을 생성하고 차량속도에 따라 휠각속도를 기어비 모델로 전송한

다. 그림 10(b)는 기어비 모델로서 전기자동차의 기어비 파라미터 값을 입력으로 하여 모터에서 생성된 토크를 이용하여 휠토크를 생성하고 타이어에서 생성된 휠각속도를 이용하여 모터각속도를 피드백한다.



(a) 타이어 모델



(b) 기어비 모델

그림 10 타이어와 기어비 모델

그림 11~그림 13은 전기자동차의 모터와 인버터 모델의 구성도를 나타낸다. 그림 12에서 모터의 효율, 토크 상수, 최대 전력, 속도, 인버터 효율을 나타내는 파라미터 값이 주어지면, 모터 모델은 모터의 각속도와 인버터에서 출력된 인버터 상전류를 입력받아 휠토크, 입력전류, 위상각을 출력한다. 그림 13에서 모터를 구동시키는 인버터 모델은 버스전압, 토크명령과 모터에서 출력된 입력 전력, 위상각을 이용하여 인버터 상전류와 DC-DC 컨버터 입력 전류를 출력한다.

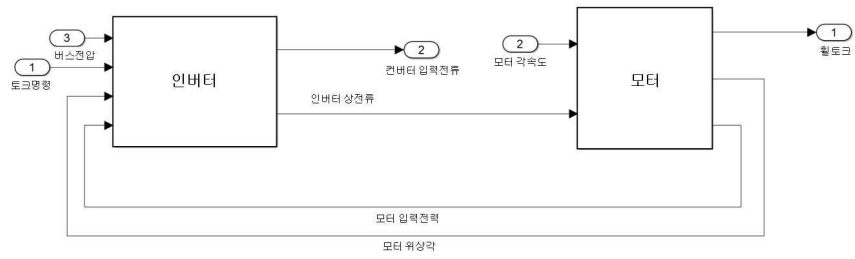


그림 11 모터와 인버터 구성도

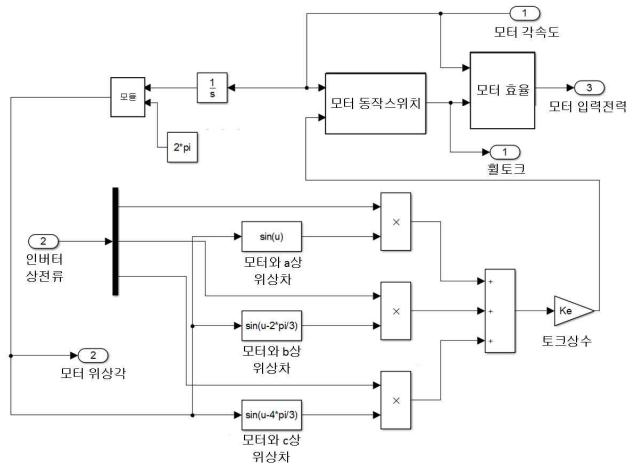


그림 12 모터 모델

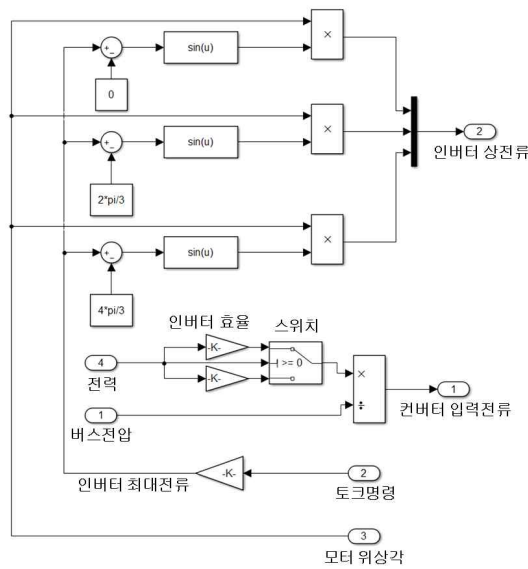


그림 13 인버터 모델

그림 14는 전기자동차 동력전달장치 모델을 나타낸다. 전기자동차 동력전달장치는 배터리, DC-DC 컨버터, 모터, 기어비, 타이어 모델로 구성되며, 동력전달장치 모델에 토크명령이 입력으로 주어지면 전기자동차의 배터리의 상태와 인버터 각상의 전류를 모니터링 할 수 있다. 본 논문에서는 실제 제작한 28 kW급 전기자동차의 파라미터 값들을 사용하여 동력전달 장치를 설계한다.

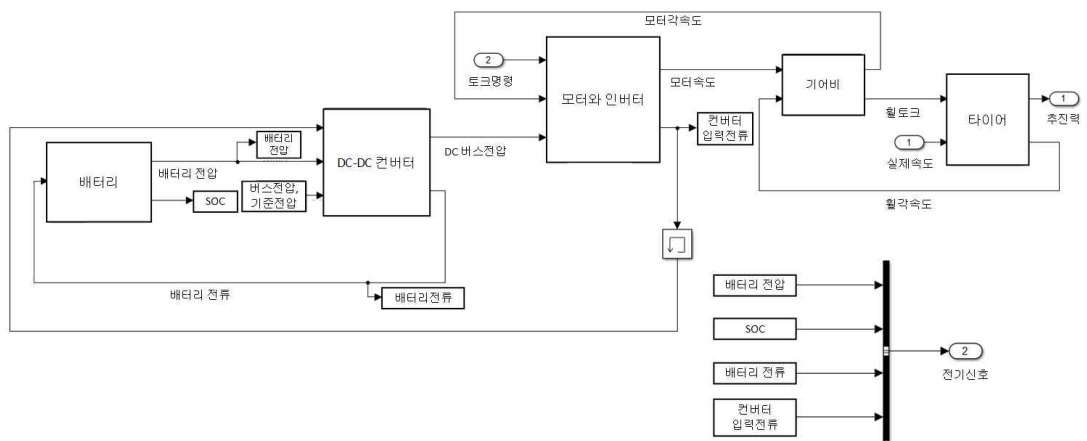
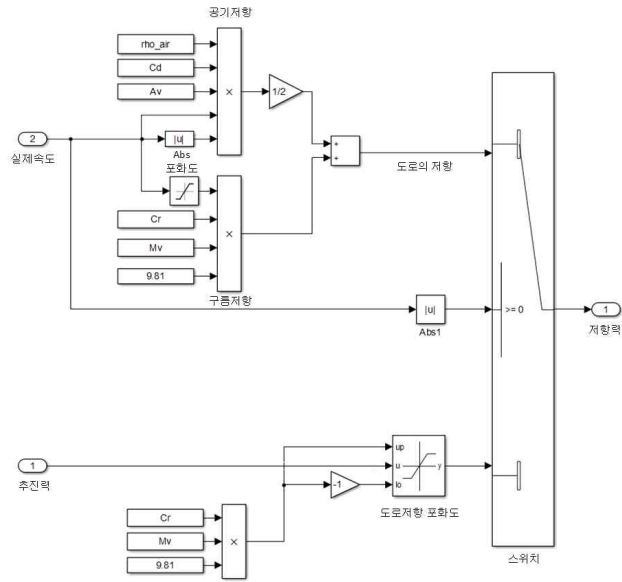
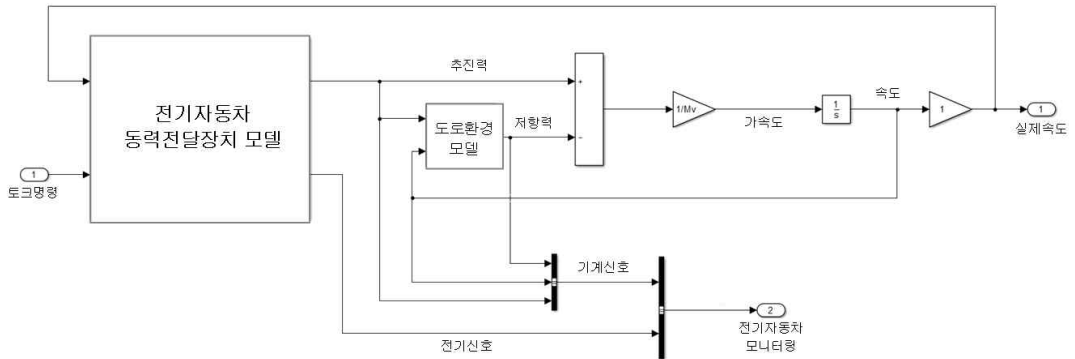


그림 14 전기자동차 동력전달장치 모델

그림 15는 도로환경 모델을 포함한 전기자동차 모델을 나타낸다. 도로환경 모델은 그림 15(a)와 같이 주어지는데, 탑승자를 포함한 차량의 무게, 도로의 마찰 계수와 항력계수, 공기저항력, 차량의 면적에 해당하는 파라미터 값이 주어지면, 저항력은 타이어 미끄러짐 등은 무시하고 실제속도와 추진력을 이용하여 구한다. 그림 15(b)에서 전기자동차 모델은 동력전달장치를 통한 추진력과 도로환경 모델에서 저항력을 이용하여 가속도를 계산하고 전기자동차의 실제 속도를 출력한다. 동력전달장치에서 나타나는 전기적인 출력신호와 도로환경모델에서 발생하는 기계적인 출력신호의 상태를 모니터링 할 수 있다.



(a) 도로환경 모델



(b) 전기자동차 모델

그림 15 도로환경 모델을 포함한 전기자동차 모델

그림 16은 운전자 모델을 나타낸다. 적분시간 상수와 비례이득에 해당하는 파라미터 값이 주어지면, 운전자 모델은 운전자의 기준속도와 실제속도를 입력받아 적분기를 사용하여 토크 명령을 생성한다. 전기자동차의 급격한 가속은 모터에 공급하는 순간전류의 값을 아주 크게 하므로 장치가 고장 날 가능성을 증가시킨다. 따라서 시뮬레이션에서는 순간전류의 크기가 최대 허용치 내에서 동작하도록 제한한다.

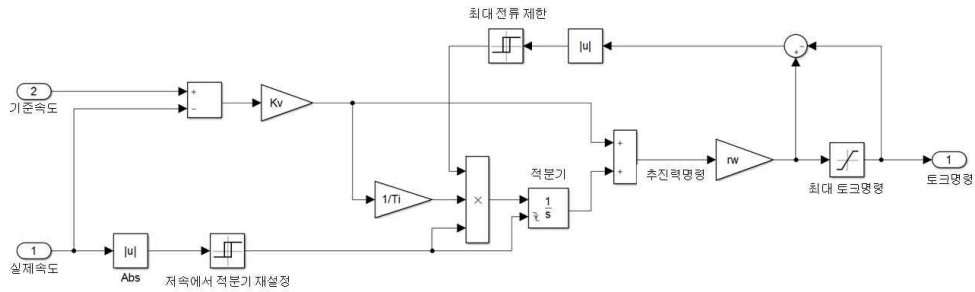


그림 16 운전자 모델

그림 17은 운행 패턴에 따라 전기자동차 출력이 나오는 전기자동차 모델과 운전자 모델을 포함하는 전체적인 전기자동차 시뮬레이션 모델의 구성도를 나타낸다. 운행 패턴을 결정하고 Matlab/Simulink 소프트웨어를 사용하여 시뮬레이션을 수행하면 설계된 전기자동차의 모든 상태들을 확인할 수 있다.

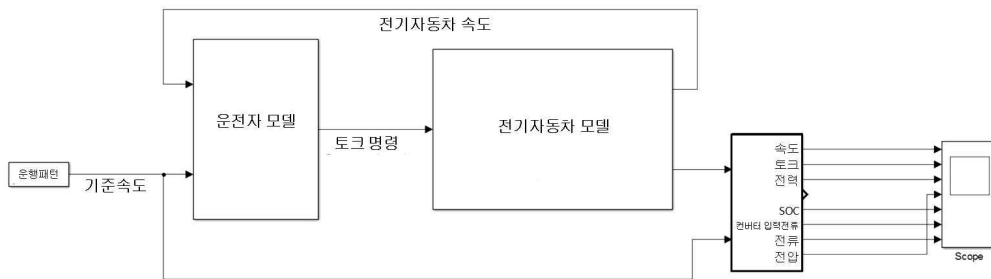


그림 17 전기자동차 시뮬레이션 모델 구성도

3.2 시뮬레이션 결과 및 전기자동차 운행 성능 분석

자동차 인증검사를 받지 않은 자작 전기자동차는 기존 도로에서는 운행할 수가 없기 때문에, 전기자동차 성능 분석은 대학교 내의 주차장과 주변 도로에서 수행하였다. 단순한 평지와 경사지의 2가지 운행 패턴으로 도로 주행시험을 수행할 때, 전기자동차의 속도, 전압, 전류, 그리고 배터리 SOC를 1초 간격으로 측정하였다. 운행 패턴에 따른 실제 전기자동차의 주행 데이터와 표 2의 파라미터를 사용한 Matlab/Simulink 프로그램의 수행결과를 비교 분석한다. 이를 통해 전기자동차 모델링의 적정성과 전기자동차의 성능을 분석한다.

표 2 전기자동차 시뮬레이션 파라미터

파라미터	값
기어비	5.5
타이어 반지름(r_w) [m]	0.265
배터리 셀의 직렬수(N_s)	20
배터리 셀의 병렬수(M_p)	2
배터리 셀의 용량(C_{nom}) [Ah]	75
충방전 저항(R_p, R_n) [Ohm]	0.008
히스테리시스 전압(V_M) [V]	0.015
히스테리시스 시정수(τ_1) [s]	40
쿨롱 효율(η_C)	0.995
모터의 최대전력 [kW]	28.01
모터의 최대속도 [rpm]	8000
모터의 토크상수(K_e) [Nm/A]	0.22
컨버터 효율	0.98
DC 버스 전압 기준 [V]	72
인버터 효율	0.95
차량 전체무게(M_v) [kg]	1200
도로의 마찰계수(C_r)	0.01
도로의 항력계수(C_d)	0.29
적분시간 상수	50
비레이득	50

평지에서의 전기자동차 출력 데이터는 그림 18과 같이 대학교 내의 주차장을 반복적으로 주행 시험하면서 취득하였다. 그림 19는 전기자동차 주행속도를 나타낸다. 전기자동차를 40분 31초 동안 가속과 감속을 주지 않고 거의 일정한 속도로 주행하였는데, 평균속도는 약 22 km/h이고 최대속도는 약 29 km/h가 나타났다. 이 때, 배터리 SOC는 83%부터 50.5%까지 선형적으로 줄어드는 것을 그림 20(a)에서 확인할 수 있다. 그림 20(b)와 20(c)는 각각 평지의 주행 시험에서 배터리 전압과 전류를 나타낸 결과이고 시뮬레이션 결과와 실제 측정결과가 유사하게 나타남을 알 수 있다. 배터리의 전압은 선형적으로 약간씩 감소하지만 거의 일정

한 값을 나타낸다. 배터리의 전류는 약 50 A를 중심으로 일정한 범위 내에서 빠르게 변동함을 알 수 있는데, 그 이유는 속도가 계속적으로 조금씩 변하기 때문이다.

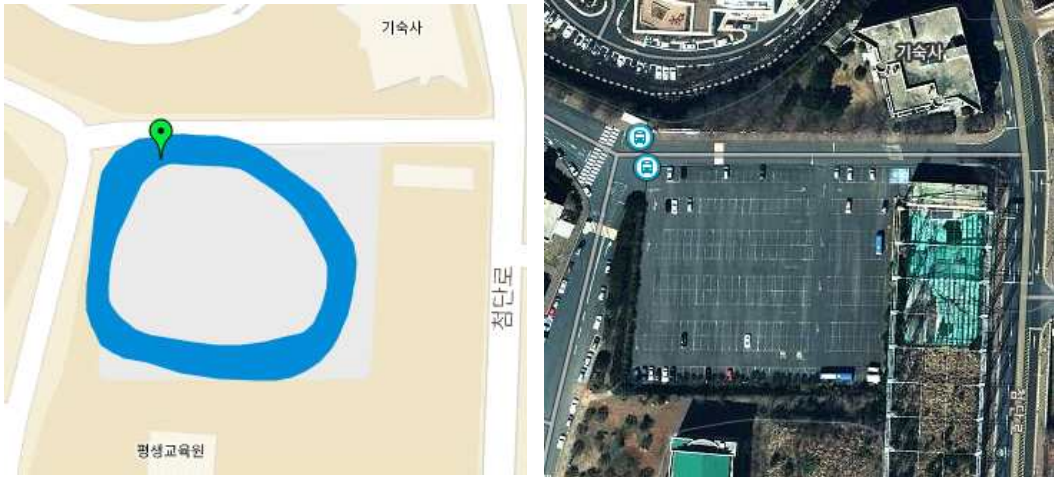


그림 18 평지 주행을 위한 사이클 및 위성사진

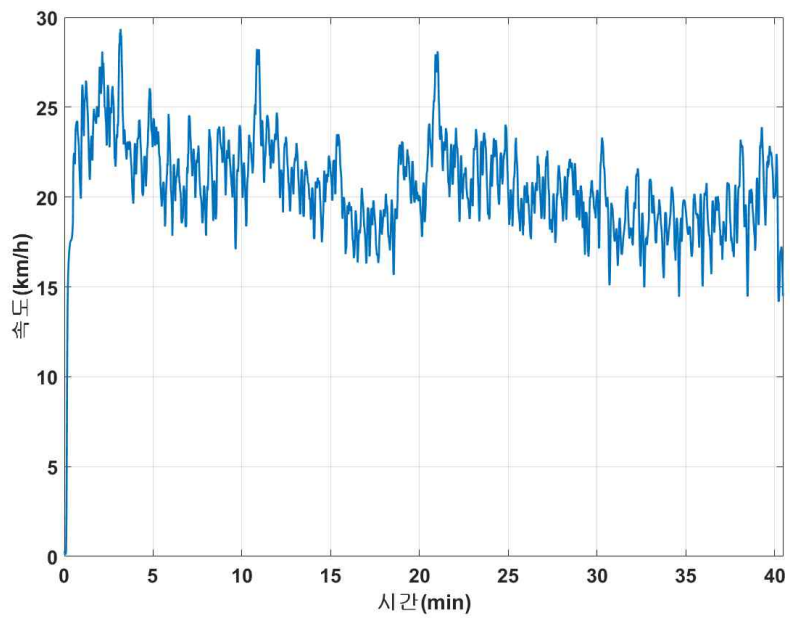
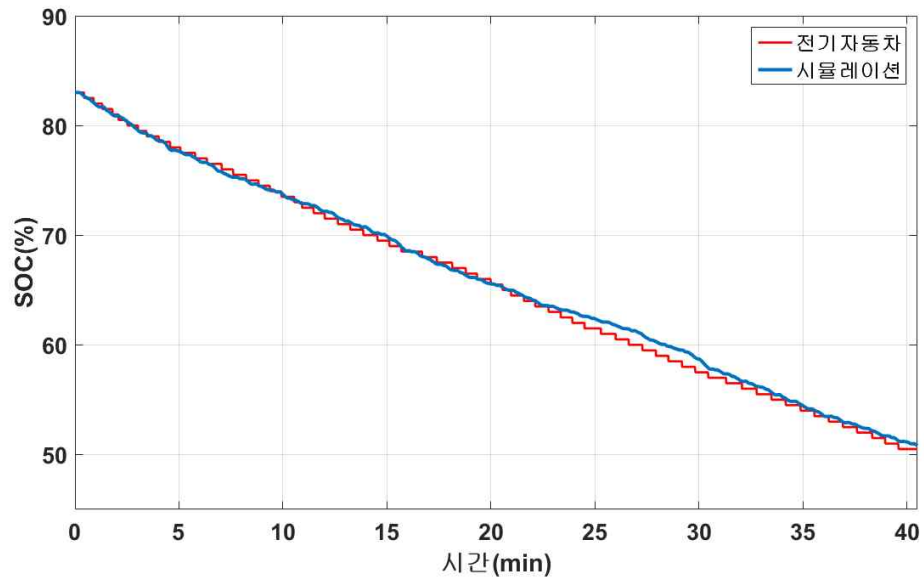
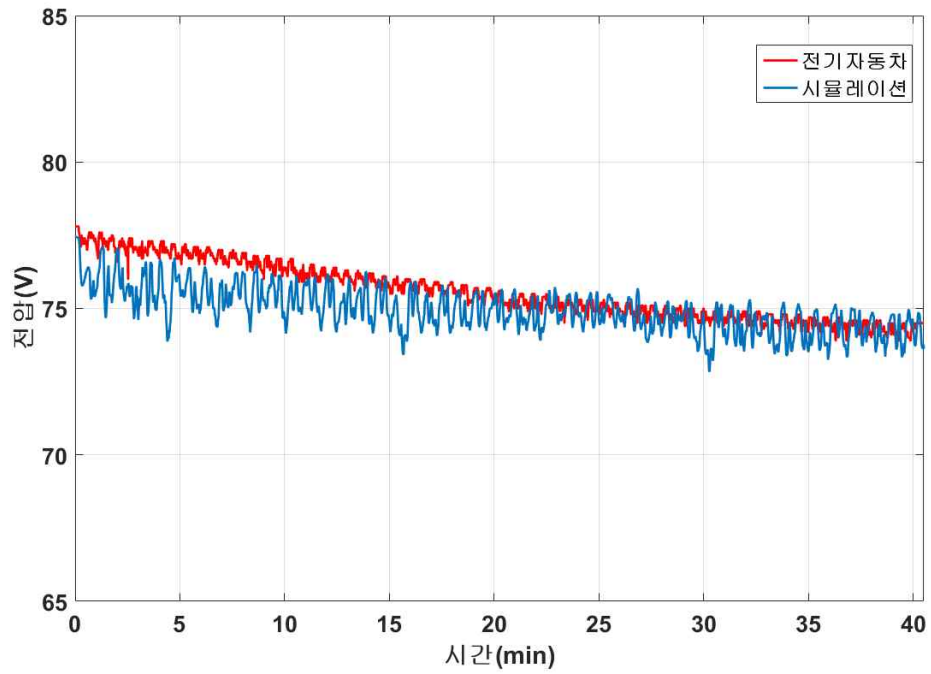


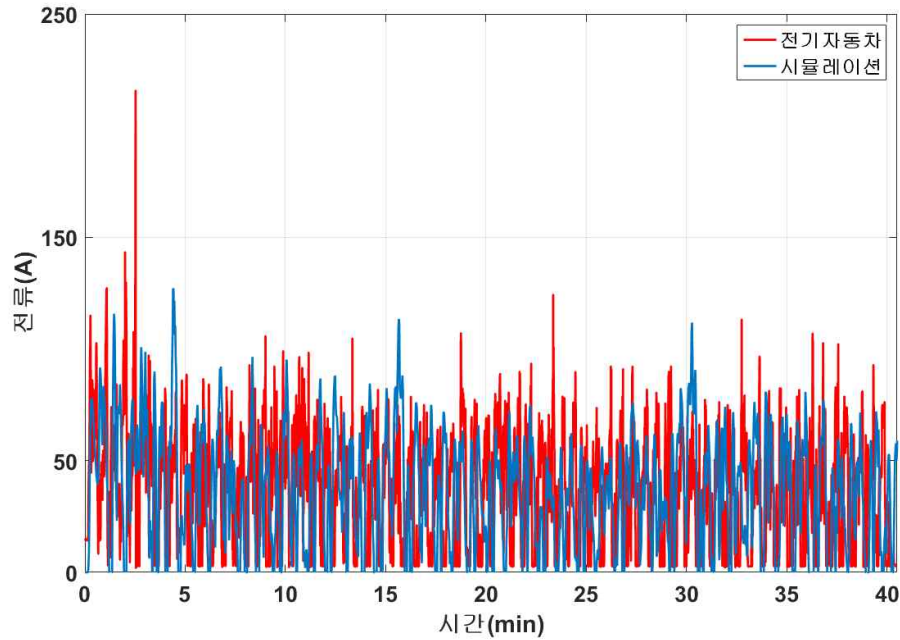
그림 19 평지 주행에서 전기자동차 속도



(a) 평지 주행에서 전기자동차 SOC



(b) 평지 주행에서 전기자동차 전압



(c) 평지 주행에서 전기자동차 전류

그림 20 평지 주행에서 전기자동차 배터리 출력

경사지 지역에서의 전기자동차 출력 데이터는 그림 21과 같이 대학교 내의 도로를 16바퀴 반복적으로 주행 시험하면서 취득하였다. 그림 22에서 전기자동차는 33분 44초 동안 경사지에 높이에 따라 가속과 감속을 하면서 최대속도 약 33 km/h와 평균속도 약 20 km/h로 운행하였다. 경사지 주행에서는 가속과 감속을 많이 사용함으로 평지 주행에서 보다는 속도의 변화가 많았다. 그림 23(a)에서 배터리 SOC는 85%부터 43.5%까지 선형적으로 감소하는데, 평지에서 보다 배터리 SOC가 훨씬 빠르게 감소함을 확인할 수 있다. 그림 23(b)와 23(c)는 각각 경사지의 주행 시험에서 배터리 전압과 전류를 나타낸 결과이고 시뮬레이션 결과와 실제 측정결과가 유사하게 나타남을 알 수 있다. 배터리의 전압은 선형적으로 약간씩 감소하지만 거의 일정한 값을 나타낸다. 배터리의 전류는 약 50 A를 중심으로 일정한 범위 내에서 빠르게 변동함을 알 수 있는데, 그 이유는 속도가 계속적으로 조금씩 변하기 때문이다. 그림 23(b)에서 배터리의 전압은 평지 주행보다 가속과 감속에 따른 변동이 크게 나타나지만 선형적으로 약간씩 감소함을 알 수 있다. 그림 23(c)에서 배터리의 전류는 약 100 A를 중심으로 일정한 범위 내

에서 빠르게 변하고, 평지 주행에 비해서 전류의 변동이 훨씬 크게 나타남을 확인할 수 있다.



그림 21 경사지 주행을 위한 사이클 및 위성사진

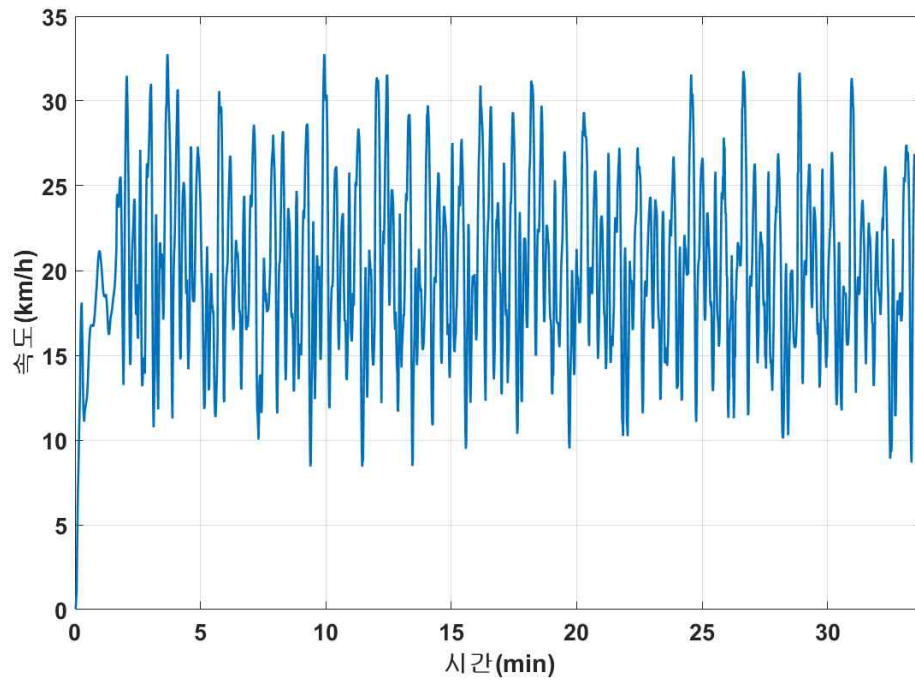
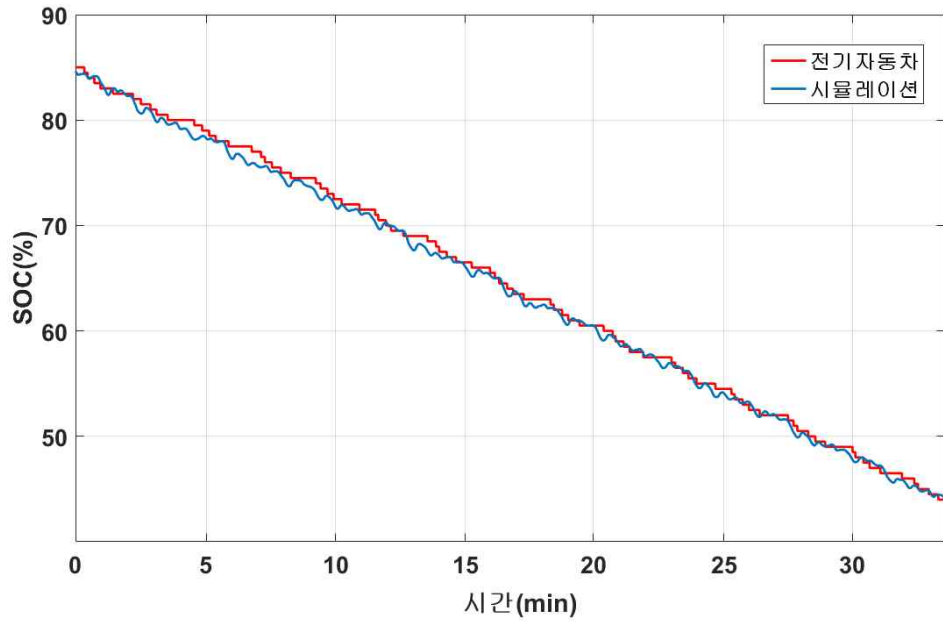
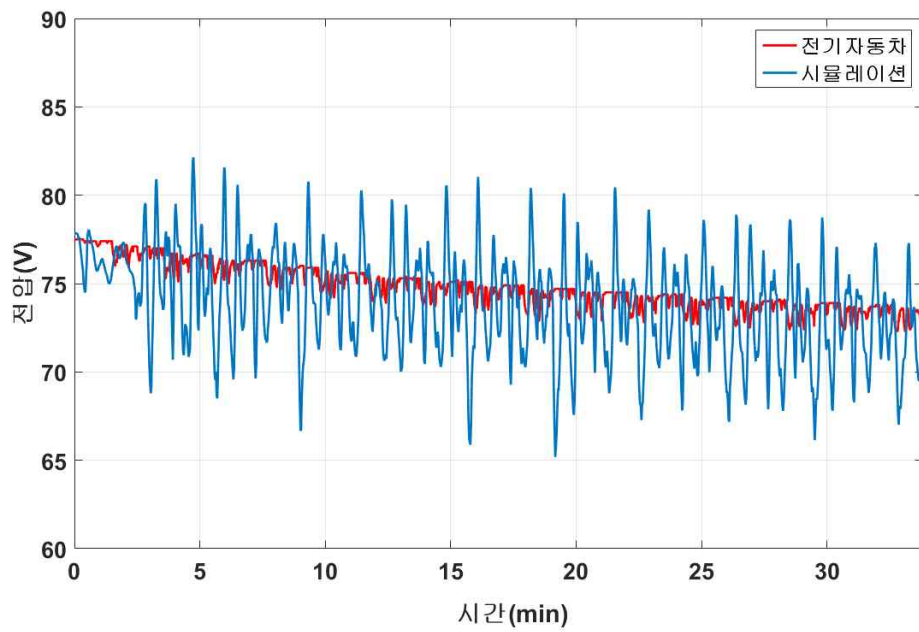


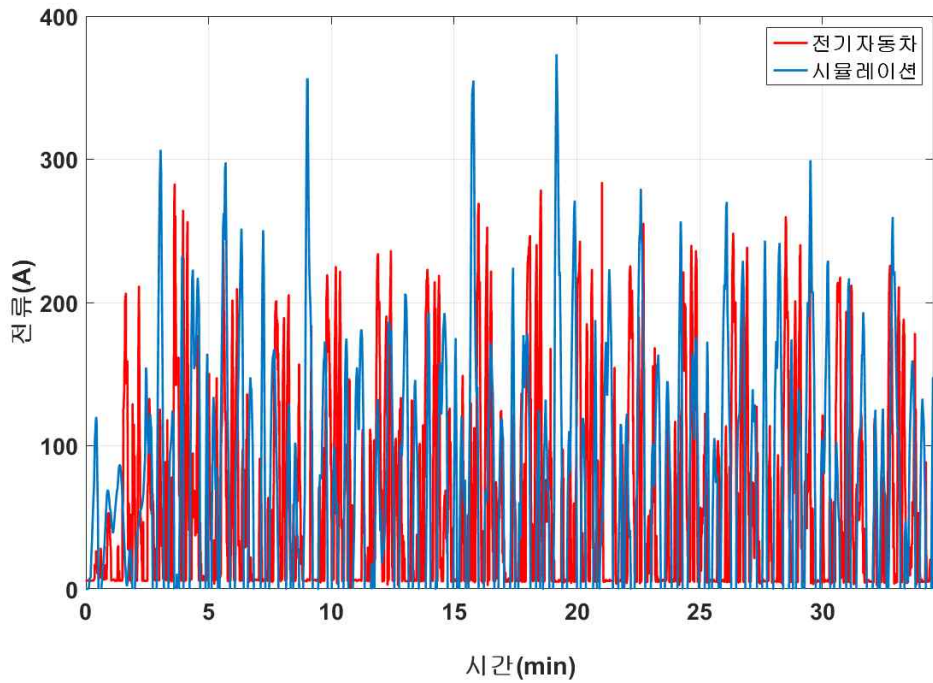
그림 22 경사지 주행에서 전기자동차 속도



(a) 경사지 주행에서 전기자동차 SOC



(b) 경사지 주행에서 전기자동차 전압



(c) 경사지 주행에서 전기자동차 전류

그림 23 경사지 주행에서 전기자동차 배터리 출력

평지와 경사지 주行的 운행 패턴을 수행한 전기자동차에서 측정된 실측 데이터와 Matlab/Simulink 시뮬레이션의 배터리 출력 결과를 비교할 때, 속도변화에 따른 배터리의 SOC, 전압과 전류의 변화를 나타내는 출력 그래프가 유사하므로 효과적인 전기자동차 모델링이 수행되었음을 확인 할 수 있다. 따라서 가속과 감속에 따른 속도 변화와 경사지를 다양하게 변화시키는 주행 패턴에 따른 전기자동차의 성능을 Matlab/Simulink 시뮬레이션 프로그램을 통해 예측할 수 있으리라 기대된다.

IV. 확장 칼만 필터를 이용한 배터리 SOC 추정

4.1 배터리의 전기적 등가회로 모델

배터리는 방전 후 충전이 불가능한 1차 전지와 반복적으로 충전이 가능한 2차 전지로 구분할 수 있다. 일반적으로 전기자동차에 많이 사용되는 리튬 이온 계열의 2차 전지는 다른 종류의 전지에 비해 상대적으로 높은 에너지 밀도, 비메모리 효과, 높은 전압, 긴 수명 등의 장점을 가진다. 본 논문에서는 가장 보편적으로 이용되는 리튬 이온 전지를 모델을 대상으로 한다. 배터리 종류에 따라 구성 물질의 차이는 존재하지만 기본적인 충전과 방전 메카니즘은 동일하다. 배터리는 내부 양극에서 발생하는 산화와 환원 반응을 통해 화학적 에너지를 전기 에너지로 변환시킨다. 배터리는 기본적으로 양극(positive electrode), 음극(negative electrode), 분리막(seperator) 및 전해액(electrolyte)으로 구성된다[14].

일반적으로 양극은 $LiCoO_2$, $LiMn_2O_4$ 또는 $LiFePO_4$ 같은 리튬 산화물로 이루어져 있고, 사용된 종류에 따라 배터리의 용량과 전압에 영향을 미친다. 음극은 주로 흑연을 이용한 LiC_6 과 같은 탄소 화합물로 이루어져 있고, 양극으로부터 발생된 리튬 이온을 가역적으로 흡수 및 방출하는 역할을 한다. 분리막은 양극과 음극의 전자의 이동 및 접촉을 방지하고 이온의 흐름을 허용하는 다공성의 전기적 절연체이다. 주로 유전율이 높은 폴리에틸렌과 폴리프로필렌 등이 사용된다. 전해액은 양극과 음극 극판 사이에서 리튬 이온이 이동할 수 있도록 해주는 매개체 역할을 한다[15].

배터리의 현재 상태를 정확하게 파악하는 것은 최대한의 성능을 안전한 범위에서 사용하고 사용자에게 배터리 활용의 자유도를 제공한다[15]. 따라서 비선형적인 특성을 가지는 배터리는 다양한 모델링 방법들이 존재하는데, 본 논문에서는 리튬 이온 배터리의 잔존 용량을 추정하기 위해 배터리의 전기적 등가회로 모델(ECM)을 사용한다[16]. ECM은 전기회로의 구성을 통하여 배터리의 입력과 출력 특성을 모델링하는 방법이고, 특정 배터리의 종류별로 소자구성에 변화를 주어 모델을 구현할 수 있다. 굉장히 단순하면서도 계산적으로 비용이 적은 장점

이 있지만, 정확성 측면에서 약 10% 정도의 오차를 갖는다. 실험적 데이터를 바탕으로 출력 전압과 배터리 SOC 간의 특성을 look-up 테이블로 나타낼 수 있다.

리튬 이온 배터리의 전기적 등가회로 모델은 그림 24와 같이 테브난 등가회로로 나타낼 수 있다[17]. 등가회로에서 $OCV(z(t))$, R_0 , R_1 , C_1 는 각각 배터리의 개방전압, 내부 저항, 등가 저항과 커패시터이고, 저항과 커패시터의 개수에 따른 다양한 모델링도 가능하다[17].

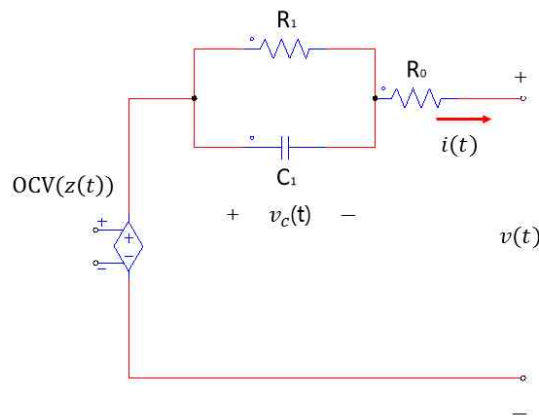


그림 24 배터리의 전기적 등가회로 모델

그림 24에서 R_0 에 흐르는 전류를 $i(t)$, C_1 에 걸리는 전압을 $v_c(t)$ 라고 할 때, 출력 전압 $v(t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v(t) = OCV(z(t)) - v_c(t) - R_0 i(t) \quad (4.1)$$

여기서 $z(t)$ 는 배터리의 SOC를 나타내며, 배터리에 흐르는 전류 $i(t)$ 의 부호는 방전시에 양수라고 가정한다.

전류 $i(t)$ 와 $v_c(t)$ 간의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있고,

$$i(t) = \frac{v_c(t)}{R_1} + C_1 \frac{dv_c(t)}{dt} \quad (4.2)$$

전압 $v_C(t)$ 를 이용한 배터리의 동적모델은 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\frac{dv_C(t)}{dt} = -\frac{1}{R_1 C_1} v_C(t) + \frac{1}{C_1} i(t) \quad (4.3)$$

배터리 SOC를 나타내는 $z(t)$ 는 충전과 방전할 때 흐르는 전류에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dz(t)}{dt} = -\eta(t)i(t)/Q \quad (4.4)$$

여기서 Q 는 배터리의 용량을 나타내며, $\eta(t)$ 는 배터리의 충전과 방전 효율을 나타내는 변수로써 방전 시에는 $\eta(t) = 1$ 이고 충전 시에는 $0.9 \leq \eta(t) \leq 1$ 의 값을 갖는다.

식 (4.1) ~ 식 (4.4)는 연속시간 배터리 모델을 나타내는데, Δt 로 샘플링하면 이산시간 배터리 동적모델은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} z_{k+1} &= z_k - \eta_k i_k \Delta t / Q \\ v_{C,k+1} &= e^{-\frac{\Delta t}{R_1 C_1}} v_{C,k} + R_1 \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{R_1 C_1}}\right) i_k \\ v_k &= OCV(z_k) - v_{C,k} - R_0 i_k \end{aligned} \quad (4.5)$$

여기서 $z_k, i_k, v_{C,k}, v_k$ 는 각각 Δt 로 샘플링하는 경우에 k 번째의 배터리 SOC, 전류, 커패시터 전압 및 출력 전압을 나타낸다.

이를 통해 이산시간 상태방정식과 출력방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} z_{k+1} \\ v_{C,k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{-\frac{\Delta t}{R_1 C_1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_k \\ v_{C,k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{\eta_k \Delta t}{Q} \\ R_1 \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{R_1 C_1}}\right) \end{bmatrix} i_k \quad (4.6)$$

$$v_k = OCV(z_k) - v_{C,k} - R_0 i_k$$

그림 24의 전기적 등가회로 모델에서 내부 저항 R_0 , 등가 저항 R_1 과 커패시터 C_1 의 값은 그림 25에서 주어진 전압특성을 통해 구한다[16]. 일정한 크기의 전류를 전기적 등가회로 모델에 공급하면 배터리는 방전을 하고 출력전압은 계속적으로 감소한다. 일정한 시간에서 전류 공급을 중지하면 짧은 시간 동안 배터리의 전압은 일정부분 상승하게 되는데, 커패시터는 순간적인 전압변동을 나타내지 못하므로 순간 전압변동 Δv_0 은 내부 저항 R_0 에 의해 결정된다. 일정한 시간이 지난 후인 정상상태에서는 배터리의 전압변동이 발생하지 않으므로 전류공급을 중지시킨 후에 발생하는 전체 전압변동 Δv_∞ 는 내부 저항 R_0 과 등가 저항 R_1 에 의해 결정된다.

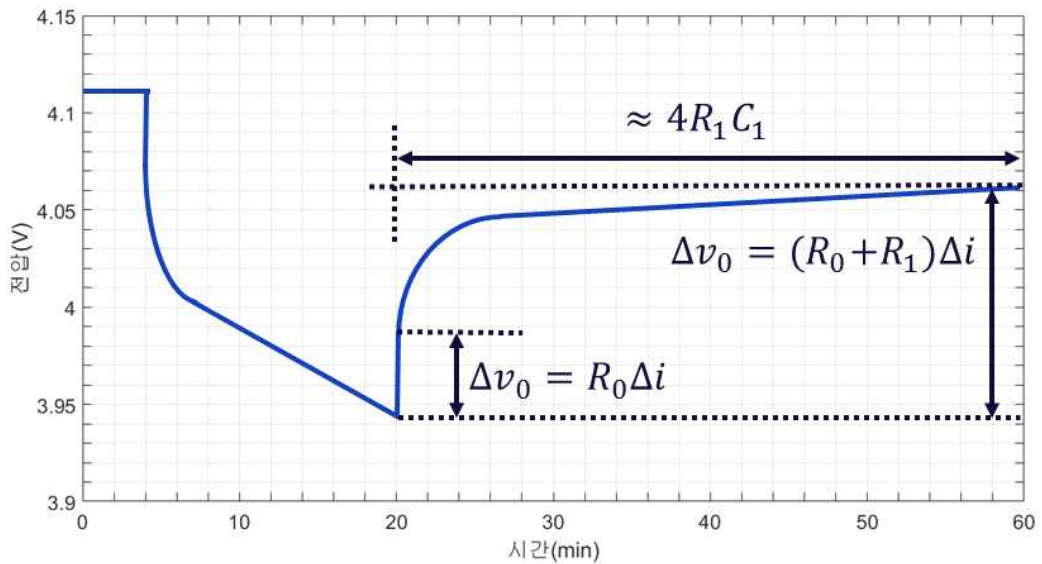


그림 25 펄스 전류에 따른 배터리 전압 특성

이를 통해 전류와 전압변동에 따른 관계식을 다음과 같이 나타낼 수 있고,

$$\begin{aligned}\Delta v_0 &= R_0 \Delta i \\ \Delta v_\infty &= (R_0 + R_1) \Delta i\end{aligned}\tag{4.7}$$

내부 저항과 등가 저항은 각각 $R_0 = |\Delta v_0 / \Delta i|$ 과 $R_1 = |\Delta v_\infty / \Delta i| - R_0$ 를 통해 구할 수 있다.

일반적으로 정상상태 시간 t_s 는 회로의 시상수 τ 의 4배 정도에서 결정되는데, 식 (4.5)에서 전기적 등가회로의 시상수는 $\tau = R_1 C_1$ 이므로 등가 저항 R_1 이 주어진 경우에 커패시터는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C_1 \approx \frac{t_s}{4R_1}\tag{4.8}$$

4.2 확장 칼만 필터를 사용한 배터리 SOC 추정

1) 확장 칼만 필터

칼만 필터는 선형 시스템에 대해 시간 지연 없이 뛰어난 잡음 제거 성능을 보인다. 특히, 시스템을 알고 있기 때문에 측정값의 미분이나 적분 값을 구하는 경우, 시스템 모델에 파라미터를 포함시킬 경우에 값을 거의 정확하게 구할 수 있다. 그러나 칼만 필터는 시스템이 선형일 경우에만 사용할 수 있기 때문에 한계를 가진다. 이를 확장하기 위해 비선형 시스템을 특정 구간에서 선형화 하여 선형화 칼만 필터를 사용하기도 하지만, 모델링 시에 지정한 구간 내에서만 의미있는 결과를 도출할 수 있다. 이러한 문제를 해결하고자 비선형 시스템에서도 칼만 필터를 사용할 수 있도록 개선한 것이 확장 칼만 필터이다[18, 19].

상태 방정식과 측정방정식이 다음과 같이 주어진다고 가정하자.

$$\begin{aligned}x_{k+1} &= f(x_k, u_k) + \omega_k \\y_k &= h(x_k, u_k) + v_k\end{aligned}\tag{4.9}$$

여기서 ω_k 와 v_k 는 각각 $\omega_k \sim N(0, Q_k)$ 와 $v_k \sim N(0, R_k)$ 의 특성을 갖는 서로 독립인 가우시안 잡음이다. 이 때, 확장 칼만 필터는 다음과 같은 과정을 통해 수행된다[18, 19].

① 상태 추정값 예측(state estimation propagation)과 오차 공분산 예측(error covariance propagation)

$$\begin{aligned}\hat{x}_k(-) &= f(\hat{x}_{k-1}(+), u_{k-1}) \\P_k(-) &= F_{k-1}P_{k-1}(+)F_{k-1}^T + Q_k\end{aligned}\tag{4.10}$$

② 칼만 이득(Kalman gain)

$$K_k = P_k(-)H_k^T [H_k P_k(-)H_k^T + R_k]^{-1}\tag{4.11}$$

③ 상태 추정값 갱신(state estimation update)

$$\hat{x}_k(+) = \hat{x}_k(-) + K_k [y_k - h(\hat{x}_k(-), u_k)]\tag{4.12}$$

④ 오차 공분산 갱신(error covariance update)

$$P_k(+) = (I - K_k H_k)P_k(-)\tag{4.13}$$

여기서 F_k 와 H_k 는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$F_k = \left. \frac{\partial f(x_k, u_k)}{\partial x_k} \right|_{x_k = \hat{x}_k}$$

$$H_k = \left. \frac{\partial h(x_k, u_k)}{\partial x_k} \right|_{x_k = \hat{x}_k}$$
(4.14)

확장 칼만 필터 알고리즘의 흐름도는 그림 26과 같이 주어진다.

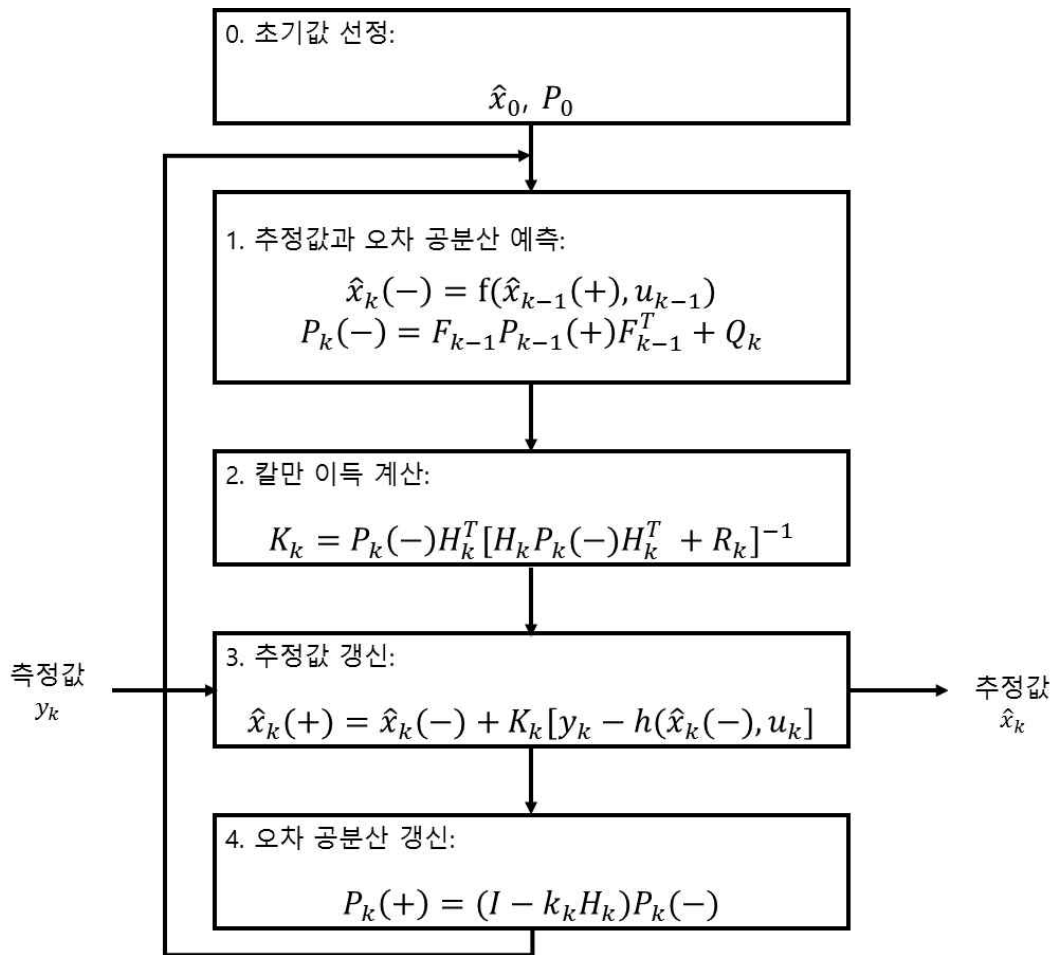


그림 26 확장 칼만 필터 알고리즘의 흐름도

2) 배터리 SOC 추정 결과 분석

배터리의 정확한 데이터를 구할 수 없는 상황에서 배터리 SOC의 참 값을 구하는 것은 어렵다. 배터리 SOC는 직접적으로 측정하지 못하므로 배터리 SOC의 추정된 결과를 검증하는 것이 중요하다. 따라서 본 논문에서는 실험대상인 리튬 폴리머 배터리의 반복적인 충전 실험을 수행하고, 참 값에 가까운 SOC 값을 구해 테이블로 작성하고 추정된 값과 비교하도록 한다. 다양한 상황에서 충전 실험을 하였고 배터리 SOC가 유사한 결과를 나타내므로, 대표적인 결과만 기술한다.

확장 칼만 필터를 사용하여 배터리 SOC를 추정하기 위해서는 배터리의 전기적 등가회로 모델의 R_0 , R_1 , C_1 파라미터를 구해야 한다. 일반적으로 파라미터 값을 구하기 위해서는 배터리를 일정한 전류로 방전한 후에 전류 공급을 중지시키고 상온에서 배터리의 출력전압을 측정한다. BMS를 통하여 배터리의 출력전압을 실시간으로 측정하기 위해서는 약간의 전류가 지속적으로 필요하다. 따라서 본 실험에서는 파라미터 값을 구하기 위해 리튬 폴리머 배터리를 64.6 A의 전류로 20분간 방전한 후에, 약간의 전류만 공급한 상태에서 배터리의 출력전압을 측정하였다.

그림 27에서 방전시간은 20분 중에 마지막 2분을 나타냈으며, 식 (4.7)과 식 (4.8)에서 R_0 , R_1 , C_1 값을 구한다. 그림 27에서 측정된 값들이 $\Delta i = 240$ A, $\Delta V_0 = 2$ V, $\Delta V_\infty = 2.4$ V, $t_s = 121$ s 이므로, 전기적 등가모델의 파라미터 값은 $R_0 = 0.008$ Ω , $R_1 = 0.002$ Ω , $C_1 = 242$ kF이다.

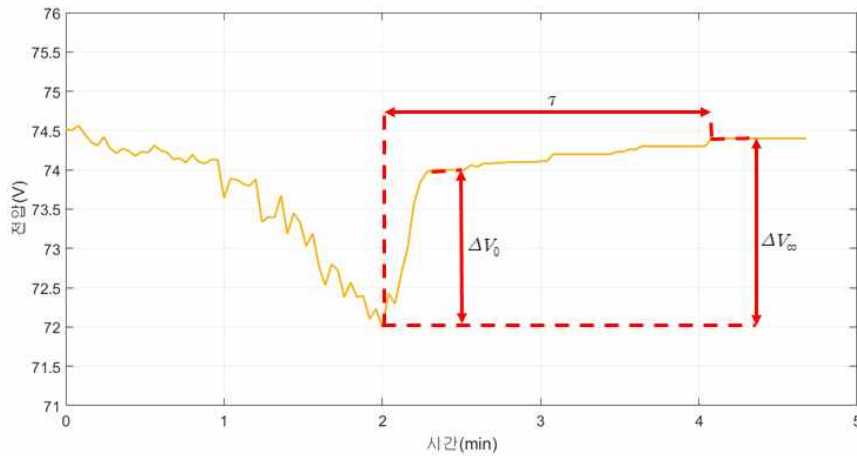


그림 27 펄스 전류에 따른 리튬 폴리머 배터리 전압변화

전기적 등가회로 모델을 통해 배터리의 전압특성을 예측하기 위해서는 반드시 배터리의 개방전압(open circuit voltage, OCV)을 결정해야 한다. 본 실험에서는 배터리 팩에 일정한 전류를 인가하여 충전과 방전 테스트를 수행하고, 그림 28과 같은 배터리 OCV-SOC 곡선을 구하였다[16]. 상단의 파형은 전류 21.85 A를 인가하고 배터리를 충전할 때 배터리 SOC에 따른 OCV 값이고, 하단의 파형은 전류 2.46 A를 인가하고 배터리를 방전할 때 OCV 값을 나타낸다. OCV-SOC 곡선에서 배터리 SOC에 따른 OCV는 중간 값으로 선택하면 된다.

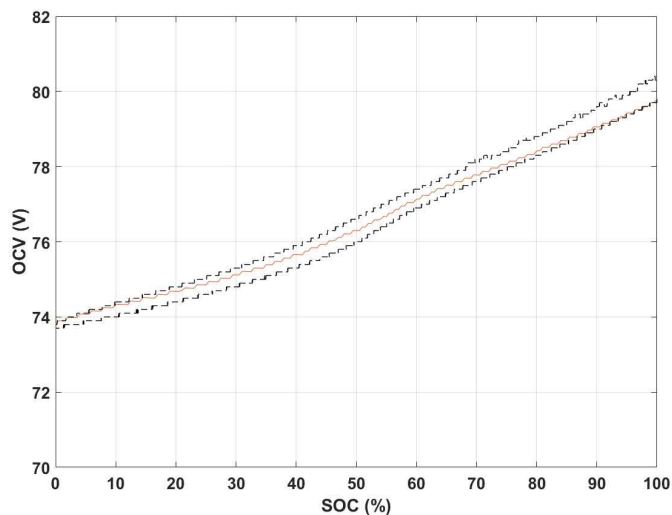


그림 28 배터리 OCV-SOC 곡선

ECM 모델과 OCV-SOC 곡선, 배터리의 전류, 초기상태들을 이용하여 배터리의 예상전압을 구할 수 있다[16]. 그림 29에서 ECM 모델을 이용하여 구한 배터리 예상전압은 실제로 측정한 전압과 거의 일치한 결과를 확인할 수 있다.

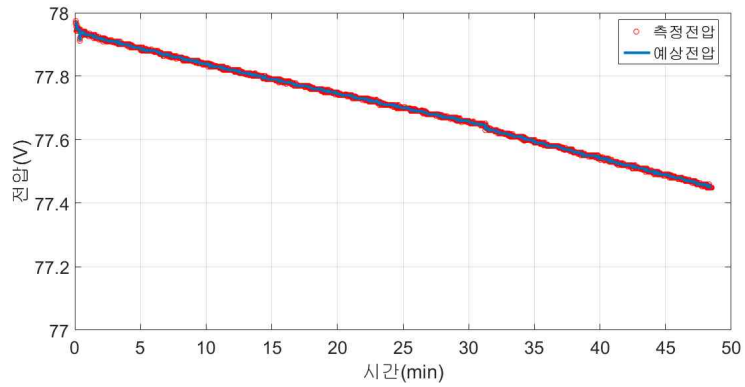


그림 29 배터리 모델 예상전압

그림 30은 배터리 측정 전압과 전류, 예상전압의 데이터를 확장 칼만 필터에 적용시켜 배터리 SOC를 추정한 결과를 나타낸다. 실제 배터리 SOC와 추정된 SOC 값은 초기에는 약간의 오차가 존재하지만 시간이 지남에 따라 점점 유사해지는 것을 볼 수 있어 전기자동차에 대한 확장 칼만 필터를 사용한 배터리 SOC 추정이 적절하게 수행되었음을 확인할 수 있다. 따라서 Matlab/Simulink 시뮬레이션 프로그램을 활용하여 다양한 속도와 운행 방법에 따라 전기자동차를 운행할 때에 확장 칼만 필터를 사용하면 배터리 SOC 추정이 가능하리라고 기대된다.

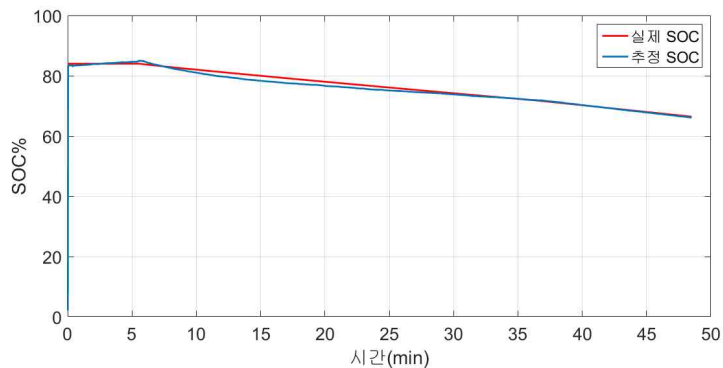


그림 30 확장 칼만 필터를 사용한 SOC 추정

V. 결론

본 논문에서는 전기자동차 모델링과 확장 칼만 필터를 사용한 배터리 SOC 추정 방법을 제안하였다. 전기자동차의 성능 분석을 위해 28 kW급 인덕션 모터를 사용한 전기자동차를 제작하였다. 20직렬 2병렬로 연결된 리튬 폴리머 배터리 셀과 BMS를 사용해 배터리 팩을 구성하였고, 성능 분석을 위해 CAN 통신을 사용하여 차량 데이터를 실시간으로 취득하였다. 2가지 운행 패턴에 대해 주행 테스트를 수행하였고, 배터리를 완전 충전한 후에 주행 테스트를 한 결과 SOC가 85%에서 거의 선형적으로 감소함을 확인하였다.

실제 전기자동차의 성능을 체계적으로 분석하기 위해 전기자동차 각 부분별 특성을 살펴보고, Matlab/Simulink 프로그램을 이용하여 전기자동차 모델링을 하였다. 전기자동차를 평지와 경사지의 주행 패턴으로 운행하면서 실제 데이터를 취득하였고, Matlab/Simulink 프로그램에서 얻은 결과와 비교분석하여 유사한 결과가 나타남을 확인하였다.

전기자동차를 효율적으로 운영하기 위해서는 배터리 SOC를 정확히 파악해야 하는데, 정확한 값을 직접 측정하지 못하므로 실제 배터리 전류와 전압 데이터를 사용하여 배터리의 전기적 등가회로 모델을 구하고, 확장 칼만 필터를 사용하여 배터리 SOC를 체계적으로 예측하였다.

참 고 문 헌

- [1] 신승규, 모터-배터리기반 전기 자동차의 성능평가를 위한 해석적 연구, 국민대학교 석사학위논문, 2004.
- [2] 최도영, 박찬국, 김수일, 전기자동차 보급의 에너지수급 영향 분석, 에너지경제연구원, 2012.
- [3] 테이코산업연구소, 그린카 시장의 실태와 전망, 진한엠엔비, 2009.
- [4] 유영천, 전기자동차 제작과 성능 평가에 관한 연구, 국민대학교 석사학위논문, 2012.
- [5] 이재문 조보형, “전기자동차 전력 시스템의 모델링 및 시뮬레이션,” 대한전기학회 학술대회 논문집, pp. 355~358, 1996.
- [6] 박광민, 이성훈, 진성호, 곽상신, “전기 자동차 파워트레인의 모델링 및 동특성 분석,” 전자공학회논문지, 48권, pp. 71~81, 2011 .
- [7] T. Huria, M. Ceraolo, J. Gazzarri and R. Jackey, Simplified Extended Kalman Filter Observer for SOC Estimation of Commercial Power-Oriented LFP Lithium Battery Cells, The Math Works, 2013.
- [8] Y. Zou, X. Xu, H. Ma, and S. E. Li, “Combined state of charge and state of health estimation over lithium-ion battery cell cycle lifespan for electric vehicles,” Journal of Power Sources, vol. 273, pp. 793-803, 2015.
- [9] J. H. Li, J. K. Barillas, C. Guenther, and M. A. Danzer, “A comparative study of state of charge estimation algorithms for LiFePO₄ batteries used in electric vehicles,” Journal of Power Sources, vol. 230, pp. 244-250, 2013.
- [10] J. M. Terras, D. N. Sousa, A. Roque, and A. Neves, “Simulation of a commercial electric vehicle: Dynamic aspects and performance,” Proceedings of the 2011-14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2011), 2011.
- [11] HPEVS, HPEVS Peak and Continuous Power Graphs for AC-12,

<http://www.hpevs.com/hpevs-ac-electric-motors-power-graphs-ac-12.htm>.

- [12] 박성환, 20kW급 전기자동차 파워트레인 개발 및 영구자석 동기전동기를 위한 모델예측 토크제어에 관한 연구, 서울과학기술대학교 석사학위논문, 2017.
- [13] <http://ecee.colorado.edu/~ecen5017/schedule.php>
- [14] 정순기, 리튬이차전지, 아진, 2010.
- [15] 최요환, 김홍석, 전기화학모델을 활용한 배터리 관리 시스템 제어, ICT 응용 화학산업, 2015
- [16] J. Newan, K. E. Thomas, H. Hafezi, and D. R. Wheeler, "Modeling of lithium-ion batteries," *Journal of Power Sources*, vol. 119-121, pp. 838-843, 2003.
- [17] G. L. Plett, *Battery Management Systems: Battery Modeling*, The Artech House Power Engineering Series, 2015.
- [18] 김성필, 칼만필터의 이해, 아진, 2010.
- [19] 전창완, 이유미, "자율이동체를 위한 2차 전지의 확장칼만필터에 기초한 SOC 추정기법," *제어로봇시스템학회논문지*, 14권, 9호, pp. 904-908, 2008.

감사의 글

전기공학과 2학년 여름방학부터 연구실에 들어와서 학부생을 졸업하고 대학원에 들어와 벌써 2년 반이라는 시간이 지나 졸업을 앞두고 되었습니다. 제가 많이 부족하지만 석사과정을 하면서 많은 도움을 주신 분들을 생각하며 감사의 글을 올립니다.

먼저 계측제어 연구실 대학원에 들어와 입학부터 졸업까지 많은 가르침과 도움으로 지도해주신 김호찬 교수님께 감사의 말씀을 드립니다. 그리고 저에게 전기공학에 대해 많은 가르침과 논문작성에 도움을 주신 좌종근 교수님, 오성보 교수님, 김세호 교수님, 이개명 교수님, 김일환 교수님, 김호민 교수, 진영규 교수님께도 감사의 말씀을 드립니다. 또한 전기공학과를 위해 항상 관심을 가지고 신경을 써주신 고평강, 최일, 오상호, 김태형 조교 선생님께도 감사의 말씀을 드립니다.

연구실에 들어와 생활할 수 있도록 도와주고 항상 아껴준 국제대학교 부창진 교수님, 그리고 김정혁 박사님, 수형이형, 승진이형, 수환이형, 운석이형, 보성이형, 지환이형, 영균이형, 진재형, 윤호형, 기봉이형에게 항상 감사의 말씀을 전합니다. 그리고 저희 연구실에 새로 들어와서 논문 작성에 많은 도움을 주신 경상이형, 연구실에 들어오실 대진이형, 카이스트 장래혁 교수님과 연구실분들, 서울대학교 박사과정 김재민 연구원님, 서울과기대 이영일 교수님과 석사과정 대학원생들에게 감사드립니다. 그리고 전기공학과 대학원생활을 하면서 항상 도움을 준 지형이형, 같이 졸업하여 박사과정으로 진학할 상헌이, 먼저 졸업한 승민이, 수환이, 대학원 재학중인 창주, 민혁이, 다음 학기 진학할 성훈이, 그리고 우리 연구실에서 항상 도움을 준 진우, 종석이, 영관이, 준석이, 동희, 재언이, 정민이, 창민이, 민석이, 희성이, 정경이, 대희에게 고맙다는 말을 전하고 싶습니다.

연구실을 같이 들어와 같이 고생한 가장 친한친구 경훈이, 학위논문 데이터를 얻을 수 있게 도와준 상범이, 동생인 상언이, 지훈이, 재호, 그리고 항상 응원해준 친구 병훈이, 승현이에게 감사의 말을 전하고 싶습니다.

끝으로 내가 무엇을 하든 도움을 주고 항상 응원해 주시는 저희 부모님 그리

고 형에게 고맙다는 말을 전하고 모든 분들께 감사의 말씀드리지 못한 것에 죄송하고 넓은 아량으로 양해해주시고, 저도 사회에 나가 열심히 하여 도움을 주신 분들께 보답하도록 하겠습니다.

2017년 8월

양승용 올림