

전기자동차용 원통형 리튬이온 배터리 셀 파라미터 추출방법에 관한 연구

김영준, 백승훈, 권용성*
한동대학교 기계제어공학부

A Study on the Parameters Extraction Method of Cylindrical Lithium-ion Battery Cell for Electric Vehicles

Youngjun Kim, Seonghoon Baek, Youngsung Kwon*
Department of Mechanical and Control Engineering, Handong Global University

요약 배터리를 에너지원으로 사용하는 시스템의 안정적인 운용은 배터리의 충전상태(SOC: State of Charge)에 대한 정보를 기반으로 수행된다. 대표적인 SOC 추정기법으로는 실시간 추정이 가능하고 노이즈에 강한 확장 칼만필터 기법(EKF: Extend Kalman Filter)이 사용되어왔다. EKF를 사용하여 높은 정확도의 SOC의 추정을 하기 위해서는 배터리의 내부 동작특성이 반영된 배터리 모델이 필요하다. 이는 배터리 내부 파라미터로부터 SOC의 추정 오차의 한계가 결정됨을 의미하므로, 보다 정확한 배터리 내부 파라미터 추출 기반의 등가회로 수립이 요구된다. 본 논문에서는 정확한 SOC 추정을 위해, 배터리 충·방전 시 나타나는 내부 동작특성을 반영한 단계별 파라미터 추출방법을 제시한다. 첫 단계에서는 내부의 비선형적 특성을 반영하기 위해 히스테리시스 및 확산 전압 특성을 고려한 모델을 수립하고, 다음 단계에서는 SOC 변화에 따른 파라미터들의 변동성을 고려하기 위해 SOC의 5%마다 방전하며 파라미터값들을 추출한다. 마지막 단계에서는 파라미터들의 변동성을 통계적 지표인 평균 절대비 편차(Mean Absolute Percentage Deviation, 이하 MAPD)로 수치화하여 분석한다. 추출시험 결과, Middle Level(배터리 SOC의 20% ~ 80% 구간)에서는 각 SOC 값에 대한 파라미터의 선형적인 경향을 보였으며 Low Level(SOC의 0% ~ 20% 구간)에서는 경향성 없이 불규칙한 변동성을 보였다. Middle Level에서 파라미터들의 평균값으로 SOC를 추정하고, Low Level에서는 SOC 5%마다 파라미터를 업데이트하여 SOC를 추정하는 것이 연산량을 줄이면서 추정오차를 줄일 수 있다. 본 논문에서 제안한 배터리 셀 파라미터의 단계별 추출법은 배터리 SOC 추정을 위한 EKF 기법 사용에 요구되는 연산 속도와 SOC 추정 정확도를 향상시킬 것으로 기대된다.

Abstract Stable operation of a battery system that is used as an energy source is achieved based on the battery SOC. As a representative SOC estimation method, EKF has been used, which enables the estimation in real-time and shows the battery's robustness to noise. To estimate the SOC accurately using EKF, the battery's internal characteristics have to be modeled. Since the SOC estimation tolerance depends on the battery parameters, an accurate equivalent circuit of the battery cell is required. This paper proposes a step-by-step parameters extraction method that reflects the internal characteristics appeared when the battery is charged or discharged. In the first step, a model considering the hysteresis and diffusion voltage characteristics is established to include the internal non-linear characteristics. In the next step, the parameters are extracted by discharging the battery every 5% SOC to consider the parameters' variability according to the SOC changes. In the last step, the variability of the parameters is analyzed by a statistical indicator, MAPD. The results show that a linear tendency and an irregular variability of the parameters are observed for each SOC at the Middle Level and Low Level. SOC estimation that uses parameters' average value at the Middle Level and updated values for each 5% SOC at the Low Level can reduce the computational burden and estimation error. The proposed approach is expected to enhance the computing speed and the estimation accuracy required for the use of EKF.

Keywords : Battery, SOC, Equivalent Circuit, Model Parameter, Hysteresis, LabVIEW, Coulombic Efficiency

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2021400000010)

*Corresponding Author : Youngsung Kwon(Handong Global Univ.)

email: youngsung.kwon@handong.edu

Received June 22, 2021

Revised August 10, 2021

Accepted October 1, 2021

Published October 31, 2021

1. 서론

최근 에너지 위기의 도래와 환경규제 강화로 친환경적인 고효율 이동수단의 기술개발 연구가 활발해지고 있다. 특히 리튬이온 배터리가 탑재된 전기자동차 시장의 성장과 보급의 확대로 선진국을 중심으로 한 친환경 자동차 시대가 열리고 있다.

대표적 전기자동차 제조 및 판매 기업인 테슬라를 필두로 전 세계적으로 전기자동차 보급이 급격히 증가하고 있다. 다른 완성차 업체들과는 달리 테슬라는 배터리팩을 구성할 때 각형이 아닌 원통형 배터리 셀(cell)을 선호한다. 원통형 셀은 각형보다 크기가 작아 제한된 부피당 에너지 밀도를 높일 수 있고 배치의 자유도가 높아 효과적인 열관리가 가능하지만, 각 원통형 셀의 에너지 불균형이란 단점도 존재한다[1]. 예를 들어, 테슬라 모델 S에는 약 7,000여 개의 원통형 셀이 하나의 배터리팩을 구성하는데, 각 셀 내부의 저항이 달라 발생하는 셀 간 에너지 불균형의 문제가 발생할 수 있다[2].

배터리 셀 간의 에너지 불균형 문제를 해결하기 위해 셀의 충전 상태(SOC: State of Charge 이하 SOC) 및 유효 출력 예측 기법을 적용하여 원통형 셀로 구성된 배터리팩의 안정적 운용에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[3]. 이와 관련한 배터리 SOC 추정 연구는 크게 3가지 방법으로 나눌 수 있다. 첫 번째 방법인 개방 회로 전압(OCV: Open Circuit Voltage, 이하 OCV) 측정법은 휴지기 상태의 배터리 전압과 미리 맵핑된 SOC-OCV 표와 비교하여 SOC 값을 얻는 방법이다. 그러나 이 방법은 배터리의 안정화를 위한 휴지 시간이 요구되어 실시간 측정이 필요한 분야에 적용이 어렵다[4]. 두 번째 방법인 전류 적산법은 배터리의 총·방전 전류를 시간에 대해 적산하여 SOC를 추정하는 비교적 간단한 방법이지만, 초기 셀 SOC에 대한 정확한 정보가 필요하고 적산 과정에서 센서의 오차가 누적되어 큰 오차를 야기할 가능성이 있다[5]. 이러한 문제를 보완하기 위해 최근에는 노이즈에 강인하며 실시간 셀 SOC 추정이 가능한 확장 칼만 필터(EKF: Extended Kalman Filter, 이하 EKF) 기법을 활용한 연구가 진행되고 있다[6].

하지만 EKF 기법은 배터리 셀 모델 파라미터값에 의해 오차의 한계가 정해지므로 셀 내부 특성이 반영되지 않은 모델을 사용할 경우 큰 추정 오차를 나타낼 수 있다. 따라서 정교한 SOC 추정을 위해서는 배터리 셀 총·방전 주기의 히스테리시스 특성과 점진적으로 나타나는 셀 내부의 이온 확산의 영향 분석이 필요하다. 또한, 다

수의 셀을 모니터링할 때 발생하는 연산량을 줄이기 위해 SOC에 따라 변화하는 모델 파라미터값을 평균값으로 대체하는 경우 SOC의 추정오차가 발생할 수 있다[7]. SOC 추정 정확도 향상을 위해서는 연산량을 고려하면서 SOC에 따라 변화하는 파라미터값을 반영하는 연구가 필요하다.

본 논문은 배터리 셀의 특성을 고려한 배터리 모델의 단계별 파라미터 추출방법을 제안한다. 1단계에서 배터리 셀 내부 비선형적 동작 특성을 반영하기 위해 전기적 특성인 히스테리시스 및 확산 전압 특성을 고려하는 배터리 모델을 수립하고 총·방전 시험을 통해 히스테리시스 특성과 총·방전 효율을 확인한다. 2단계에서는 각 파라미터의 변동성을 확인하기 위해 기존의 파라미터 계산법으로 배터리를 SOC의 5% 마다 방전하며 파라미터를 추출한다. 마지막 3단계에서는 추출된 파라미터값의 변동성을 통계적 지표인 평균 절대비 편차(MAPD: Mean Absolute Percentage Deviation, 이하 MAPD)를 통해 수치화하여 분석한다. 파라미터값은 Middle Level에서는 낮은 MAPD 값을 보였으며 Low Level에서는 큰 MAPD 값을 보였다. Middle Level에서는 파라미터의 평균값으로 SOC를 추정하고 내부 변화가 급격하게 일어나는 Low Level에서는 파라미터를 해당 SOC 구간마다 업데이트하여 추정하는 것이 연산량을 줄이면서 SOC 추정오차를 감소시킬 수 있다는 것이 가능하다. 본 논문에서 제안한 배터리 셀 모델의 단계별 파라미터 추출방법은 EKF 기법을 사용할 때 요구되는 연산량을 줄이면서 SOC 추정 정확도를 향상시킬 수 있으므로 전기자동차용 배터리팩의 에너지 밸런싱에 관련된 연구에 기여할 것으로 기대된다.

본 논문의 2장에서는 배터리 셀 내부 특성, 모델링 방법, 파라미터 추출방법을 이론적으로 설명하고 단계별 파라미터 추출을 위한 하드웨어 및 소프트웨어 설계 및 결과 분석을 기술하며 3장에서는 결론을 내리면서 향후 연구 계획에 대해 소개한다.

2. 본론

2.1 배터리 모델링 정확도 향상을 위한 전기적 특성 고려

2.1.1 총·방전 효율

일반적인 배터리의 총·방전 특성 중의 하나인 총·방전 전류량의 불일치는 배터리 사용에 따른 노화 및 열화 현

상으로부터 기인한 충전용량(Q_{charge})과 방전용량($Q_{discharge}$)의 차이로 인해 발생한다[8]. 충·방전 용량의 차이를 고려하지 않은 방법은 SOC 추정 시 오차를 발생할 수 있다. 따라서 배터리 셀 SOC를 추정할 때에는 배터리 충·방전 효율을 고려해야 하며, 충·방전 효율은 다음과 같이 충전용량 대비 방전용량으로 산출된다[9].

$$\eta = \frac{Q_{discharge}}{Q_{charge}} \quad (1)$$

2.1.2 충·방전 히스테리시스 곡선

동일한 SOC 값에 대하여 배터리 충·방전 곡선의 전압 값은 각각 다르게 나타나는데, 이는 배터리의 히스테리시스 특성 때문이다[10]. 히스테리시스 특성을 고려하지 않은 배터리 모델을 사용할 경우, SOC 추정 시 큰 오차의 원인이 될 수 있다[11]. 히스테리시스 특성은 충·방전율의 영향을 받는다. 충·방전율을 높일수록 동일한 SOC 대비 충·방전 전압의 차이는 크게 나타나므로 충·방전율을 고려한 충·방전 실험이 요구된다.

2.2 배터리 모델링 방법

2.2.1 기존 배터리 모델 비교

배터리의 전기·화학적 특성을 반영한 등가회로는 비선형적인 배터리 전압 곡선 분석을 위해 필수적으로 요구된다[12]. 배터리 동작 특성을 설명하기 위해 고려되는 요소들은 충·방전 시 변화하는 SOC와 무부하와 부하 시 단자 전압 차이, 그리고 배터리 내부 이온의 이동으로 발생하는 확산 전압 등이다. 이러한 특성들을 반영하고 있는 모델을 수립하여 Fig. 1에 나타냈다.

Fig. 1은 충·방전 정도에 따라 OCV가 변화하는 종속 전압원과 무부하와 부하 시 전압의 차이를 표현하기 위한 직렬 저항과 전기자동차 배터리팩과 같은 동적 시스템에서 나타나는 비선형적인 전압 곡선을 설명하는 저항과 커패시터를 병렬로 연결한 모델이다.

배터리가 부하 상태에서 무부하 상태로 전환될 때 단자 전압이 OCV로 수렴하기까지 일정 시간이 소요되는데, 이는 배터리 내부의 이온 확산과정이 점진적으로 발생해서 나타나는 현상으로 배터리 단자 전압 측정 시 미세한 전압의 변동으로 나타난다. 이러한 현상을 고려하기 위해 저항과 커패시터를 병렬로 연결한 모델로 충·방전 시 나타나는 OCV 변동 특성을 설명할 수 있다.

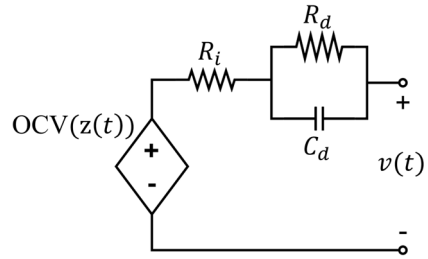


Fig. 1. Circuit model based on R_i, R_d, C_d and dependent source $OCV(z(t))$

Fig. 2는 본 논문의 충·방전 시험에서 활용한 배터리 셀 모델이다. Fig. 1에서 나타낸 배터리 셀 모델에서 OCV를 나타내는 종속 전압원은 커패시터로 표현될 수 있으므로, 배터리의 용량을 나타내는 커패시터로 나타낸다. 배터리 셀의 단자 전압 관계식은 다음과 같다.

$$V_t = V_{oc} + V_i + V_d \quad (2)$$

Where, V_t denotes the terminal voltage of battery cell, V_{oc} denotes the OCV of cell, V_i denotes the voltage applied to internal resistance R_i , and V_d denotes the voltage applied to diffusion resistance R_d .

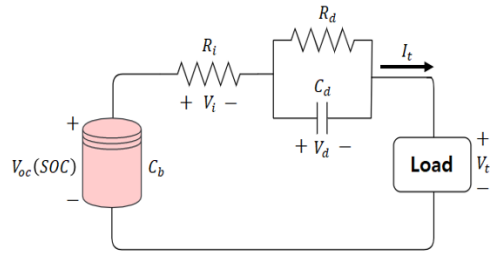


Fig. 2. Equivalent circuit for charging/discharging test. Capacitance C_b means the capacity of battery cell

2.2.2 등가회로 모델의 전기적 특성 해석

Fig. 2에 나타낸 회로의 동작 Mode 별 회로와 그래프를 분석하여 전기적인 특성을 이해하고 파라미터를 추출할 수 있다[12,13]. Fig. 3.(a)는 Fig. 2 회로의 배터리 동작 Mode 별 배터리 등가회로를 나타낸 것이고, Fig. 3.(b)는 부하전류에 따른 배터리의 전압 그래프를 나타낸 것이다.

- Mode 1: 무부하 상태로써 배터리의 V_t 와 V_{oc} 가 동일한 안정된 상태를 말한다.
- Mode 2: 전류가 흐르는 짧은 순간(= t_1)으로, V_t 와 V_{oc} 는 내부 저항 R_i 에 흐르는 전류 I_t 에 의해 결정되는 상태를 말한다.
- Mode 3: 배터리가 방전하는 구간으로 V_t 는 V_{oc} , V_i 그리고 V_d 의 합으로 나타난다.
- Mode 4: 부하가 제거되어 전류가 흐르지 않게 되는 순간(= t_2)으로, R_i 의 전압값인 V_i 의 영향이 사라지게 된다.
- Mode 5: 무부하 상태로써 V_t 는 V_{oc} 와 V_d 의 합으로 나타나는 구간으로, RC 병렬회로가 방전되면서 V_d 가 점차 감소한다. V_t 값의 변화량은 ΔV_{∞} 로 나타낸다.

2.2.3 파라미터 계산법

본 논문에서 사용한 파라미터 계산법은 2.2.2절에서 참조한 기존 연구에서 제안된 방법을 참고한다.

내부 저항인 R_i 는 다음 수식과 같이 Mode 2에서 전류 I_t 가 흐르는 순간의 V_t 의 크기 변화를 통해 구할 수 있다.

$$R_i = \frac{v_{t,t_1^+} - v_{t,t_1^-}}{I_t} \quad (3)$$

V_{t,t_1^-} 는 전류가 흐르기 직전의 전압, V_{t,t_1^+} 는 전류가 흐른 직후의 전압이다.

확산 저항인 R_d 는 Mode 5의 평형 상태에서 변하는 전압값인 ΔV_{∞} 과 Eq. (3)에서 계산한 R_i 값을 Eq. (4)에 대입하여 구할 수 있다.

$$\Delta V_{\infty} = (R_d + R_i) \times I_t \quad (4)$$

배터리의 용량 커패시턴스 C_b 는 Mode 3의 전류 적분 값을 단자 전압의 변화량으로 나누어 구할 수 있다.

$$C_b = \frac{1}{\Delta V_{oc}} \int_{t_1}^{t_2} I_t dt \quad (5)$$

마지막으로 확산 커패시턴스 C_d 는 Mode 5에서 전류가 흐르지 않는 순간부터 곡선이 정상 상태에 이르기까지 걸리는 시간을 5 시정수로 가정하여 계산한다.

$$t_3 - t_2 = 5\tau = 5R_d C_d \quad (6)$$

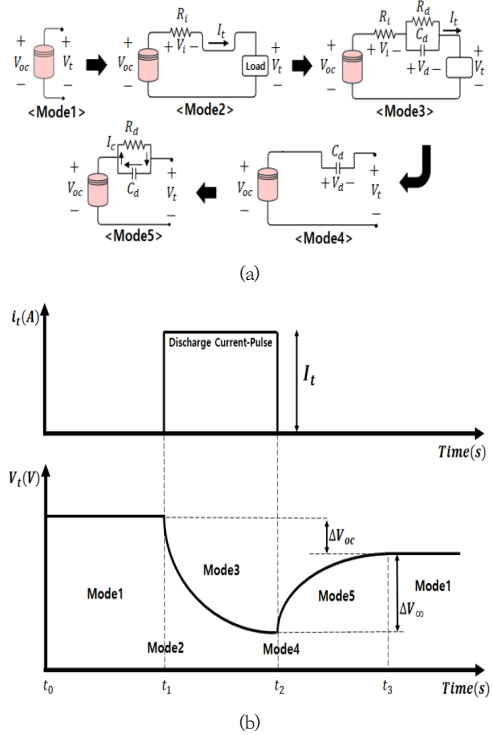


Fig. 3. Electrical analysis of battery operation
(a) Equivalent circuit at each mode (b) Current-time plot representing pulse wave load current of battery cell and voltage-time plot representing the terminal voltage of battery cell

2.3 파라미터 추출을 위한 충·방전 시험 설계 및 결과 분석

2.3.1 시험 환경 구축

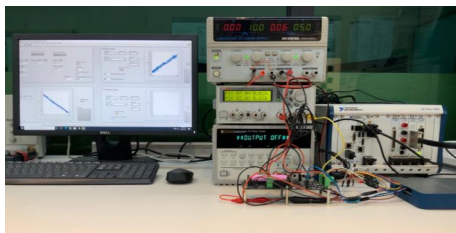
본 논문에서 선정된 배터리 모델의 파라미터를 추출하기 위해 Table 1의 장치들을 사용하여 시험을 진행했다. NI PXI 컨트롤러를 사용하여 배터리를 충·방전하고 고속 회로의 전원을 공급하는 전원 장치와 전압 데이터를 측정하는 DAQ 보드를 제어하며 데이터를 실시간으로 기록할 수 있는 환경을 구축했다. Fig. 4는 배터리 셀 파라미터 추출을 위한 실제 시험 환경을 나타낸다.

2.3.2 시험 대상 배터리 선정

본 논문에서는 현재 전기자동차에 사용되고 있고, 충·방전 시험이 간편한 18650 원통형 리튬이온 배터리를 시험 대상 배터리로 선정했으며, 삼성 SDI에서 제조한 INR18650-35E 모델을 사용했다. 충·방전 시험에 사용된 배터리 셀의 사양은 Table 2와 같다.

Table 1. Equipment lists used in experiment

Equipment (Manufacturer)		Model Name
Controller & measurement (National Instruments)	NI PXI Controller	NI PXI-1082
	NI DAQ	NI PXI-6229
Power Supply (ODA Technologies)	DC Programmble Power supply	OPS Series (1CH Output)
		OPE-QI Series (2CH Output)
	DC Power supply	GW Instek GPS-3303
Electric load (ODA Technologies)		LF10000-C
Software (National Instruments)		NI LabVIEW 2018



(a)



(b)

Fig. 4. Experiment equipments for charging/discharging test

(a) Controller, Power supply, DAQ (b) DC Electric load

Table 2. Samsung SDI INR18650-35E specifications

Parameter	Value
Minimum discharge capacity (Q)	3,350 [mAh]
Charging voltage (V_{max})	4.20 [V]
Discharge cut-off voltage (V_{min})	2.65 [V]
C-rate	3,400 [mA]

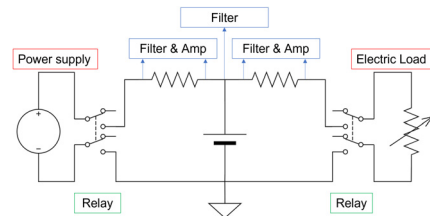
최소 방전 용량(minimum discharge capacity)은 배터리 제조사가 보장하는 최소한의 용량을 말하며, 충전 전압(charging Voltage)은 배터리를 충전하기 위해 배터리 양단에 인가하는 전압 크기, 방전 중지 전압

(discharge cut-off Voltage)은 배터리를 방전시킬 때 방전을 중지해야 하는 전압 크기이며, C-rate는 배터리가 1시간 동안 방전할 수 있는 전류량을 의미한다.

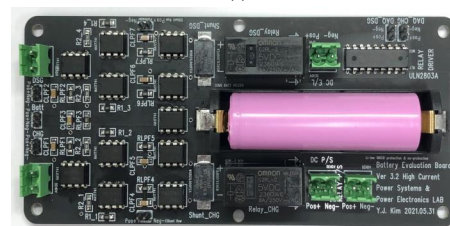
2.3.3 하드웨어 설계

시험을 진행하기 위한 회로를 Fig. 5의 (a) 회로도도와 같이 설계했다. 데이터 측정 회로는 셉트 저항과 측정 장비 사이의 임피던스 매칭을 위해 연산 증폭기(op-amp)를 활용한 전압 팔로워(voltage follower) 회로와 노이즈 제거를 위해 수동 소자를 활용한 저역 통과 필터(low pass filter) 회로로 구성되어 있다. 그리고 배터리 셀과 전원 장치 사이에서 발생하는 누설 전류의 영향을 최소화하기 위해 릴레이 스위치를 사용했다.

또한, 충·방전 시험 간 발생 가능한 측정 오차와 회로 구성으로 인해 발생하는 노이즈에 강인하도록 설계했다. 연산 증폭기와 수동 필터로 구성된 측정 회로와 배터리 충·방전 회로의 접지부를 물리적으로 분리하여 노이즈가 측정 회로에 영향을 주지 않도록 했으며, 측정 회로의 신호단과 전원부를 분리했다.



(a)



(b)

Fig. 5. Circuit for charging/discharging test

(a) Designed circuit diagram (b) Proposed measurement PCB for the test

Fig. 5.(b)에 사용된 회로 소자의 사양은 Table 3에 명시된 바와 같다.

Table 3. Elements list & part name for circuit design

Item	Part Name	Value
Shunt Resistor	WSR2R0100FEA	10 [$m\Omega$]
Resistor	3216 SMD	100 [Ω]
		10 [$k\Omega$]
Capacitor	3216 SMD	1 [μF]
Relay Switch	G2RL-2 DC5	-
Relay Driver	ULN2803A	-
Op-amp	HA17741	-
Battery Holder	Coms BB521	-

2.3.4 데이터 측정 소프트웨어 설계

본 논문에서 선정한 배터리 모델의 파라미터를 추출하기 위해 데이터 측정 및 기록, 전원 장치, 스위치 제어를 실시간으로 진행해야 하므로 LabVIEW 2018을 사용하여 시험에 사용되는 소프트웨어를 설계했다.

일정 간격의 SOC마다 모델 파라미터를 추출하기 위해 배터리 셀의 정확한 방전 가능 용량을 파악해야 한다. 이때 방전 가능 용량은 측정된 방전 전류 데이터를 적산하여 계산된다.

배터리 셀의 충전 용량 및 방전 가능 용량을 파악하기 위한 배터리 충·방전 프로그램은 작은 값의 C-rate를 사용한다. 작은 값의 C-rate는 배터리 셀 내부의 동적 성분들의 들뜸(excitation)을 최소화하기 위해 사용되며 이는 데이터를 측정하는 동안 배터리 셀을 최대한 평형 상태에 가깝게 유지하기 위한 것이다[14]. 따라서 일반적으로 1/30 C-rate의 충·방전율이 사용되며, 본 논문에서도 1/30 C-rate를 사용한다.

실시간 배터리 단자 전압과 충·방전 전류량을 측정하기 위한 프로그램의 순서도는 Fig. 6과 같다. 프로그램은 전원 및 측정 장치의 초기화와 방전 및 충전 과정으로 구성된다.

충·방전 과정의 종료 조건은 Table 2에서 확인할 수 있는 충전 전압과 방전 종지 전압이다. 배터리의 단자 전압이 충전 전압과 방전 종지 전압에 도달했을 때 충·방전 과정을 중지하는 동시에 Fig. 5.(b)의 릴레이 스위치를 제어하여 전원 장치와 배터리 셀을 물리적으로 절연한다.

파라미터 추출 프로그램의 C-rate는 배터리 충·방전 프로그램과 다른 값을 갖는데, 이는 Eq. (4)로부터 알 수 있다. 단자 전압의 변화량 ΔV_{∞} 는 배터리 셀 모델의 저항 성분과 전류의 변화량으로 계산되므로, 작은 값의

C-rate를 사용한다면 확산 전압의 영향과 병렬 커패시턴스 성분을 확인하기 어렵다. C-rate를 선정하는 기준은 별도로 존재하지 않으나 히스테리시스와 같은 동적 성분들의 영향을 줄이고 확산 전압과 병렬 커패시턴스 성분의 확인을 위하여 1/2 C-rate로 설정했다.

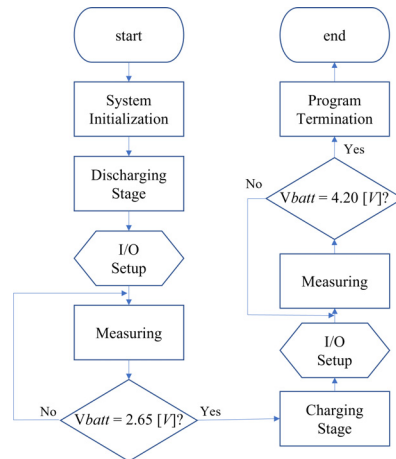


Fig. 6. Flowchart of charging & discharging program

SOC 변화에 따른 배터리 셀 내부 특성의 변화를 보기 위해 SOC를 5 % 마다 방전하며 파라미터값을 추출한다. 1/2 C-rate의 방전율로 배터리 공칭 용량의 5 %를 소모하기 위해 360 s 동안 방전을 진행하고 확산 전압의 영향을 확인하기 위하여 3,000 s의 휴지기를 부여했다.

Fig. 3.(b)와 같이 배터리의 단자 전압이 급격히 변하는 구간에서의 데이터 측정을 진행해야 하므로, Fig. 6의 프로그램과 비교하여 짧은 샘플링 주기가 요구되어 샘플링 주기를 200 ms로 설정했다.

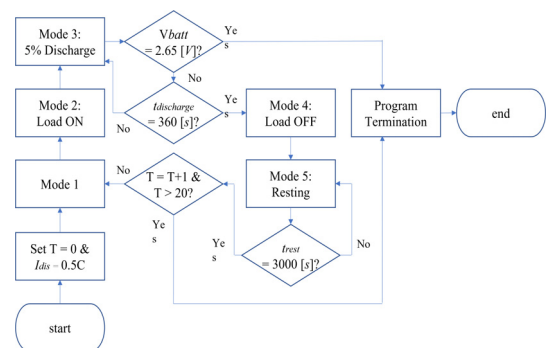


Fig. 7. Flowchart of parameter estimation program

Fig. 7은 파라미터 추출을 위한 프로그램의 순서도를 나타낸 것이다. 프로그램은 전원 및 측정 장치의 초기화, 동작 주기의 초기화 및 방전을 설정, Mode 별 방전 과정으로 구성된다. 총 20번의 주기로 방전 과정과 휴지기 부여가 진행되며, 실시간으로 전압 데이터의 측정이 진행된다. Mode 별 방전 과정은 배터리의 단자 전압이 방전 종지 전압에 도달할 때 종료되며, 이후 전원 및 측정 장치의 동작을 중지하고 프로그램이 종료된다.

2.3.5 시험 결과

모델 파라미터 측정에 앞서 배터리의 충·방전 효율을 측정하기 위해, 충·방전 전류량을 측정했다. Table 4는 1/30 C-rate로 배터리를 충·방전했을 때 측정되는 전류 데이터로부터 충전 및 방전 전류량을 계산하고, 이를 적산하여 충·방전 효율(coulombic efficiency)을 계산한 것이다.

Table 4. Measured Charge & Discharge Capacity Values and Calculated Coulombic Efficiency

Item	Value
Charge Current Capacity (Q_{charge})	3379.33 [mAh]
Discharge Current Capacity ($Q_{discharge}$)	3275.49 [mAh]
Coulombic Efficiency (η)	0.97

Fig. 8은 SOC 대비 배터리 셀의 충·방전 단자 전압을 나타낸 것으로, Fig. 8.(a)는 1/30 C-rate의 방전율로 배터리 셀을 충·방전하여 측정한 결과를 나타낸 것이다. 적색 곡선은 충전 시 배터리 셀의 단자 전압을, 청색 곡선은 방전 시 배터리 셀의 단자 전압을 나타낸 것이다. Middle Level과 High Level (SOC 80 % ~ 100 % 구간)에서 두 곡선의 전압 차보다 Low Level에서의 전압 차가 증가한 것을 확인했다. Fig. 8.(b)는 충·방전율에 따른 히스테리시스의 영향을 확인하기 위해, 2.3.4절에서 설계한 배터리 충·방전 프로그램에서 충·방전율을 각각 1/8 C-rate, 1/4 C-rate로 바꾸어 시험을 진행한 데이터를 나타낸 것이다. 1/30 C-rate 데이터를 기준으로 SOC 대비 단자 전압을 나타냈으며, Fig. 8.(a)와 같이 충전 시 데이터는 적색 곡선으로, 방전 시 데이터는 청색 곡선으로 나타냈다.

배터리 셀의 동적 성분 중에서 히스테리시스는 충·방전율에 영향을 받는데, Fig. 8.(b)에서 충·방전율을 증가시키며 충·방전 시험을 진행했을 때 1/30 C-rate인 경우

보다 충·방전 곡선의 전압 차가 증가하고 있음을 확인했다.

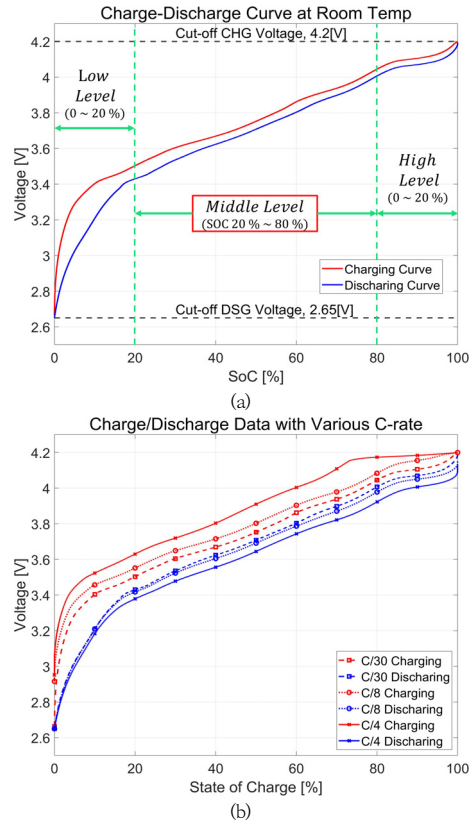


Fig. 8. Test result of battery charging/discharging program
(a) Constant Charging/Discharging Curve with 1/30 C-rate (b) Charging/Discharging Curve with 1/8, 1/4 C-rate

Fig. 9는 Fig. 7에 제시된 순서도에 따른 시험의 결과를 나타낸 것으로, Fig. 9.(a)는 측정된 배터리 단자 전압과 방전 전류를 그래프로 나타낸 것이다. 전압 곡선은 흑색, 전류 그래프는 적색으로 나타냈다. 방전이 진행될수록 전압 곡선은 감소하는 추세를 보이며, 공칭 용량과 방전 가능 용량의 차이로 인해 20번째 주기에서 전압과 전류 데이터의 일부만 측정됐다.

Fig. 9.(b)는 배터리 단자 전압 곡선에서 8번째 주기를 확대하여 나타낸 것이다. 적색 점은 배터리와 연결된 전자 부하기의 입력을 인가한 지점, 청색 점은 전자 부하기의 입력을 인가한 시점부터 다음 샘플링 시점을 나타낸 것이다. 자색 점은 전자 부하기의 입력의 인가가 종료된 시점을 나타낸 것이다.

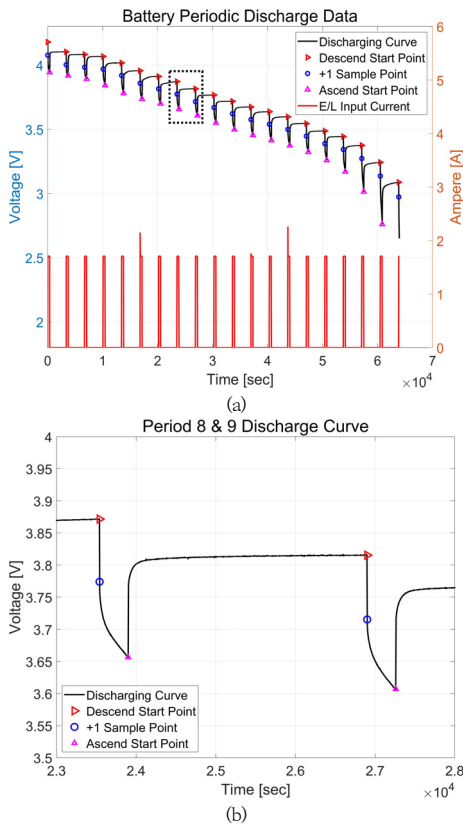


Fig. 9. Periodic charging/discharging test result of parameter extraction program
(a) Full cycle curve for extraction of model parameters (b) Enlarged curve between 8, 9 cycles

Table 5는 Fig. 10, Fig. 11에서 나타낸 배터리 모델 파라미터들의 평균, 최대, 최소값과 그에 해당하는 SOC 값을 나타낸 것이다. 내부 저항 R_i 를 제외한 파라미터들은 모두 최소값과 최대값 사이의 크기 편차가 매우 크게 나타나고 있음을 확인했다.

Table 5. Mean, max, min values of each model parameters

Parameter	Mean	Max (SOC)	Min (SOC)
R_i	58.85 [$m\Omega$]	67.41 [$m\Omega$] (SOC 0 [%])	57.02 [$m\Omega$] (SOC 65 [%])
R_d	47.98 [$m\Omega$]	86.93 [$m\Omega$] (SOC 5 [%])	33.60 [$m\Omega$] (SOC 95 [%])
C_d	13.22 [kF]	17.85 [kF] (SOC 95 [%])	6.90 [kF] (SOC 5 [%])
C_b	13.92 [kF]	39.77 [kF] (SOC 85 [%])	3.955 [kF] (SOC 5 [%])

Fig. 10은 모델 파라미터의 저항 성분들을 나타낸 것이다. 내부 저항 R_i , 확산 저항 R_d 모두 SOC 20 %를 기점으로 급격히 증가하는 추세를 보인다. Fig. 11은 모델 파라미터의 커패시턴스 성분들을 나타낸 것이다. 용량 커패시턴스 C_b , 확산 커패시턴스 C_d 는 SOC 100 %부터 0 %까지 감소하는 추세를 보인다.

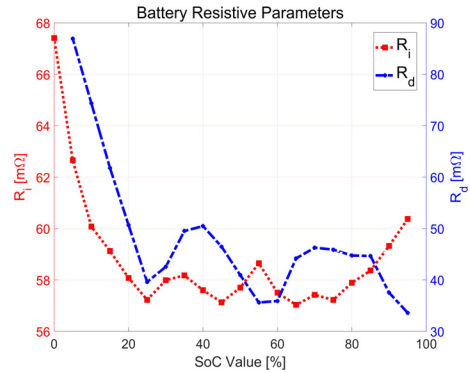


Fig. 10. Parameter extraction results of resistive parameters

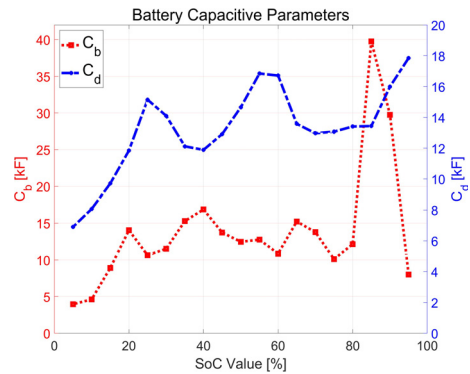


Fig. 11. Parameter extraction results of capacitive parameters

Table 6은 Fig 10, Fig. 11의 측정 데이터로부터 Middle, Low Level에서 각 파라미터의 변동성을 확인하기 위한 편차율을 나타낸 것이며, 편차율은 다음과 같은 수식으로 계산된다.

$$d_{SOC,H} = \frac{|X_{SOC,L} - X_{SOC,H}|}{X_{SOC,H}} \times 100 [\%] \quad (7)$$

Where, $X_{SOC,H}$ is the parameter value of higher SOC, $X_{SOC,L}$ is the parameter value of lower SOC.

Table 6. Deviation rate for checking the variability of each parameter

Parameter	Middle Level	Low Level
R_i	1.10 [%]	4.50 [%]
R_d	9.61 [%]	19.74 [%]
C_d	18.25 [%]	33.04 [%]
C_b	9.36 [%]	16.46 [%]

Low Level에서 모델 파라미터 중 저항 성분들의 급격한 변화는 배터리 셀 단자 전압에 영향을 끼치게 된다. Fig. 8.(a)에서 이를 확인했으며, 단자 전압의 관계식인 Eq. (2)로부터 그 이유를 알 수 있다. 셀의 단자 전압은 OCV와 저항 성분들에 걸리는 전압의 합으로 표현되는데, 충·방전율이 일정한 조건에서 저항 성분이 급격히 증가하게 되어 충·방전 곡선의 전압 차가 증가하기 때문이다.

Table 7은 모델 파라미터들의 변화율이 높지 않은 Middle Level에서 각 파라미터의 평균값에 대한 편차를 구하기 위해 평균값과 그에 대한 MAPD를 계산한 것이다. MAPD는 아래 수식과 같이 계산된다.

$$MAPD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{X_m - X_e}{X_m} \right| \times 100 [\%] \quad (8)$$

Where, n denotes the number of parameter values in the result, X_m denotes the mean value of each model parameters at each intervals, X_e denotes the extracted parameter value.

Table 7. Mean value and MAPD of each parameters at middle level & low level

Parameter	Middle Level		Low Level	
	Mean	MAPD	Mean	MAPD
R_i	57.66 [$m\Omega$]	0.67 [%]	62.32 [$m\Omega$]	0.87 [%]
R_d	44.06 [$m\Omega$]	8.97 [%]	74.36 [$m\Omega$]	11.27 [%]
C_d	13.04 [kF]	12.69 [%]	5.83 [kF]	35.26 [%]
C_b	13.79 [kF]	9.50 [%]	8.227 [kF]	12.02 [%]

3. 결론

본 논문에서는 배터리의 동작 특성을 고려한 모델을 선정하고 EKF 기법의 오차와 연산량을 줄이기 위한 배터리 셀 파라미터 추출방법을 제안했다. 배터리 모델은 배터리 셀 내부의 비선형적인 특성들을 반영한 모델로

선정했고, 파라미터 추출에 필요한 하드웨어는 측정 시 발생하는 잡음과 오차에 강인하도록 설계·제작됐다. LabVIEW를 활용하여 실시간으로 전압 데이터를 측정하고 일정한 주기로 배터리를 방전하도록 소프트웨어를 설계했다.

파라미터 추출을 위해 5%의 SOC 마다 방전한 결과, SOC 20 %를 기점으로 각 파라미터값의 급격한 변화를 확인했으며, 추출한 파라미터값은 Middle Level의 MAPD가 Low Level보다 낮음을 확인했다. EKF 기법을 사용할 때, Middle Level 구간은 각 파라미터의 평균값으로 SOC를 추정하고 내부 변화가 급격하게 일어나는 Low Level에서는 파라미터를 SOC 5 % 마다 업데이트 하여 추정하는 것이 연산량을 줄이면서 추정오차를 감소시키는 것이 가능하다.

향후 본 논문에서 제안한 배터리 셀 모델의 단계별 파라미터 추출방법으로 배터리 셀의 SOC를 추정하여 기존에 제안된 방법과의 비교·분석하는 연구를 진행할 예정이다. 제안된 방법은 EKF 기법을 사용할 때 요구되는 연산량은 줄이면서 SOC 추정 정확도를 향상시킬 수 있으므로, 전기자동차용 배터리팩의 에너지 밸런싱에 관련된 연구에 기여할 것으로 기대된다.

References

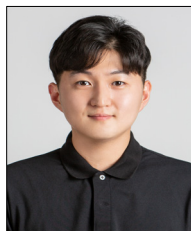
- [1] J. Y. Bae, Y. Kim, "The Core Technical Trends of TESLA EV(Electric Vehicle) Motors", *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol.22, No.5, pp.414-422, Oct. 2017
DOI: <https://doi.org/10.6113/TKPE.2017.22.5.414>
- [2] S. H. Bae, S. U. Jeon, J. W. Park, "A Study on Active Cell Balancing Method for Battery Module", *Proceedings of the KIEE Conference*, The Korean Institute of Electrical Engineers, Pyeongchang, Korea, pp.1015-1016, July. 2016.
- [3] Y. H. Ko, G. Rahim, W. J. Choi, "Battery Management Technology Trend for Electric Vehicle", *The proceedings of KIEE*, Vol.69, No.5, pp. 23-30, May. 2020
- [4] Windarko N. A., J. H. Choi, "SOC Estimation Based on OCV for NiMH Batteries Using an Improved Takacs Model", *Journal of Power Electronics*, Vol. 10, No. 2, pp. 181-186, Feb. 2011
DOI: <https://doi.org/10.6113/JPE.2010.10.2.181>
- [5] K. W. Jang, H. J. Kim, G. B. Chung, "Comparison of Battery Modelings and SOC Estimation Methods", *Proceedings of the KIPE Conference*, The Korean Institute of Power Electronics, Pyeongchang, Korea,

pp. 87-88, July. 2010

- [6] J. H. Park, W. C. Char, U. R. Cho, J. C. Kim, "State of Charge Estimation of Li-Ion Battery Based on CIM and OCV Using Extended Kalman Filter", *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, Vol.28, No.11, pp.77-83, Nov. 2014
DOI: <https://doi.org/10.5207/jieie.2014.28.11.077>
- [7] P. Spagnol, S. Rossi, S. M. Savaresi, "Kalman Filter SoC estimation for Li-Ion batteries", *2011 IEEE International Conference on Control Applications (CCA)*, IEEE, Denver, CO, USA, pp. 587-592, September 2011
DOI: <https://doi.org/10.1109/CCA.2011.6044480>
- [8] K. S. Ryu, B. K. Kim, D. J. Kim, M. S. Jang, H. S. Ko, "A State-of-Charge estimation using extended Kalman filter for battery of electrical vehicle", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.18, No.10, pp.15-23, Oct. 2017
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.10.15>
- [9] K. S. Ng, C. S. Moo, Y. P. Chen, Y. C. Hsieh, "Enhanced coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries", *Applied Energy*, Vol.86, No.9, pp.1506-1511, Sep. 2009
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.11.021>
- [10] I. S. Kim, "The Research on the Modeling and Parameter Optimization of the EV Battery", *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol.25, No.3, pp.227-234, June. 2020
DOI: <https://doi.org/10.6113/TKPE.2020.25.3.227>
- [11] Plett, G., "Extended Kalman Filtering for Battery Management Systems of LiPB-Based HEV Battery Packs—Part 1: Background," *Journal of Power Sources*, Vol. 134, No. 2, pp. 252-261, Aug. 2004.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.02.031>
- [12] D. U. Jeong, H. N. Song, J. J. Yun, "A Study on the comparison of Battery SOC estimation performance of Column Counting and Extended Kalman Filter Considering Sensor Errors", *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, Vol.34, No.5, pp.43-50 May. 2020
DOI: <http://doi.org/10.5207/JIEIE.2020.34.5.043>
- [13] K. W. Jang, G. B. Chung, "A SOC Estimation using Kalman Filter for Lithium-Polymer Battery", *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol.17, No.3, pp.222-229, June. 2012
DOI: <http://dx.doi.org/10.6113/TKPE.2012.17.3.222>
- [14] Plett, G, *Battery Management Systems, Volume I: Battery Modeling*, p.343, Artech House, 2015, pp.45-52

김 영 준(Youngjun Kim)

[준회원]



• 2016년 3월 ~ 현재 : 한동대학교 기계제어공학부

<관심분야>

전력변환, 전력계통 등

백 승 훈(Seonghoon Baek)

[준회원]



• 2016년 3월 ~ 현재 : 한동대학교 기계제어공학부

<관심분야>

전력변환, 배터리 등

권 용 성(Youngsung Kwon)

[정회원]



• 2012년 8월 : University of Texas at Austin (공학석사)
• 2015년 8월 : University of Texas at Austin (공학박사)
• 2015년 10월 ~ 2018년 8월 : LG 전자 VC사업본부 선임연구원
• 2018년 9월 ~ 현재 : 한동대학교 기계제어공학부 조교수

<관심분야>

전력변환, 전력계통 등