

Li₄Ti₅O₁₂(LTO) 배터리 등가회로 모델링을 위한 내부 파라미터 체계적 해석

이평연¹, 윤창오¹, 박진형¹, 김종훈[†]

Systematic Approach of Internal Parameters for Equivalent Electrical-Circuit Modeling(EECM) of a Li₄Ti₅O₁₂(LTO) cell

Pyeong-Yeon Lee¹, Chang-O Yoon¹, Jin-Hyeong Park¹, and Jonghoon Kim[†]

Abstract

This study introduces a systematic approach to selecting the internal parameters applied to the equivalent electrical-circuit model (EECM) of a lithium titanium oxide (Li₄Ti₅O₁₂; LTO) rechargeable cell. Based on the dynamic characteristic of the cell, a simplified EECM consisting of an open-circuit voltage (OCV), an ohmic resistance, and an RC ladder is fabricated. To select the internal parameters of a simplified EECM, experiments on discharge capacity, OCV, and discharge/charge resistances are performed using hybrid pulse power characterization and direct current internal resistance (DCIR) measurements over the full state-of-charge (SOC) range. The experimental results of the LTO rechargeable cell highlight the importance of correct selection of internal parameters that can reduce EECM errors. This study clearly provides experimental procedures, internal parameters results, and EECM guidelines for adaptive control-based SOC estimation for LTO rechargeable cells.

Key words: LTO(Li₄Ti₅O₁₂), EECM(Equivalent Electrical-Circuit Model), Internal parameters

1. 서 론

화석연료 사용에 의한 환경오염 등의 문제가 매우 심각한 상황이며, 이를 해결할 수 있는 수단으로서 신재생 에너지가 주목받고 있다. 더욱이, 이러한 신재생 에너지를 저장할 수 있는 에너지저장장치의 수요가 나날이 증가하고 있으며 이에 대한 연구가 전 세계적으로 매우 활발하다. 특히, 철도용 트램(Tram), 전기자전거(E-bike), 전기자동차(Electric Vehicle; EV), 에너지저장장치(Energy Storage System; ESS) 및 휴대용 IT 기기(노트북, 휴대폰) 등 소용량부터 대용량 어플리케이션에 광범위하게 적용되는 리튬계열 배터리의 성장이 두드러진다. 리튬

계열 배터리는 기본적으로 음극의 흑연(graphite) 물질과 양극의 여러 활물질 LCO(LiCoO₂), LMO(LiMn₂O₄), LFP(LiFePO₄), NMC(LiNiMnCoO₂)의 결합^[1]으로 이루어지며, 이로부터 배터리의 고출력 혹은 고용량 특성이 구현되어 여러 소용량/대용량 어플리케이션에 적용된다. 전력구동 어플리케이션에 적용되는 원통형 리튬이온 배터리는 부하의 운전 조건에 따라 입출력 전류가 순시 최대 20C-rate 이상, -30~50°C의 동작 운용이 가능해야 한다^[1]. 하지만, 해당 조건에서 충전 및 방전이 지속될 경우 에너지 밀도와 수명 등의 문제가 대두되고 있다. 그러므로, 이를 해결하기 위한 차세대 배터리의 연구가 시작되고 있으며, 그 중 상대적으로 장수명, 높은 안정성, 고효율, 급속 충전 및 순간 고출력이 가능한 리튬티타늄옥사이드 LTO(Li₄Ti₅O₁₂) 배터리가 대표 선두주자이다^{[2],[12]}. 본 논문에서는 음극에 흑연을 가지고 양극 활물질에 변화를 준 기존 리튬계열의 배터리와 달리 음극 활물질을 흑연에서 LTO로 변화를 준 차세대 배터리를 사용하였으며, 최대 30C-rate 이상의 순간의 고출력 특성, 방전 시 포괄적인 동작 온도 범위(-30~70°C), 수명의 관점에서는 5000 사이클 이상의 장수명을 가진다^[2].

Paper number: TKPE-2018-23-3-4

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: whdgn0422@cnu.ac.kr, Dept. of Electrical Eng., Chungnam National University
Tel: +82-42-821-7606 Fax: +82-42-821-7606

¹ Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University

Manuscript received Sep. 11, 2016; revised Oct. 18, 2016; accepted Mar. 6, 2018

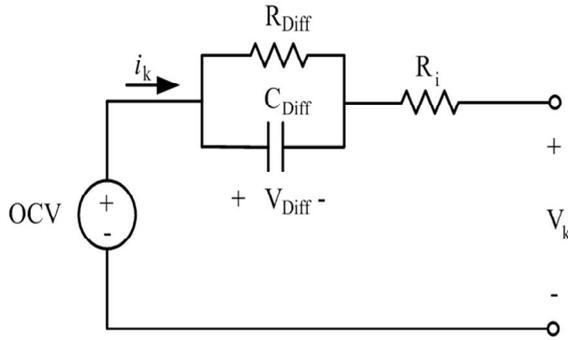


Fig. 1. Equivalent electrical circuit modeling(EECM).

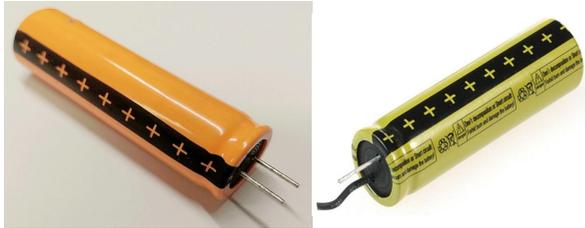


Fig. 2. LTO rechargeable cell(YJ1865T).

TABLE I
DETAILED SPECIFICATION OF THE LTO BATTERY

Item	General parameter	
Rated capacity	Typical	1.30Ah
	Minimum	1.25Ah
Nominal voltage	2.4V	
Standard charge	constant current	1.30Ah
	cut-off voltage	2.85V
Standard discharge	constant current	1.30Ah
	cut-off voltage	1.5V
Fast charge	6.5A(5C)	
Maximum continuous discharge current	13A(10C)	39A(30C)
		< 5s
Operation temperature range	charge	0~45°C
	discharge	-30~70°C

차세대 LTO 배터리는 비용과 에너지 밀도의 측면보다 장시간 사용, 순간의 고출력 특성, 포괄적인 동작 온도의 조건이 요구되는 전력 구동 어플리케이션 측면에서의 접근이 바람직하다. 전력 구동 어플리케이션의 실제 적용을 위한 사전 과정으로서 LTO 배터리의 전기적 특성 실험 및 데이터를 바탕으로 전기적 등가회로 모델(equivalent electrical circuit model; EECM)을 설계한다. 실제 LTO 배터리의 단자 전압과 등가회로 모델 기반 출력 전압을 비교하여 향후 구현될 충전상태(state-of-charge; SOC)와 수명상태(state-of-health; SOH) 추정 알고리즘 적용의 실험 기반 파라미터 추출 및 등가회로 모델 적용의 타당성을 입증하였다.

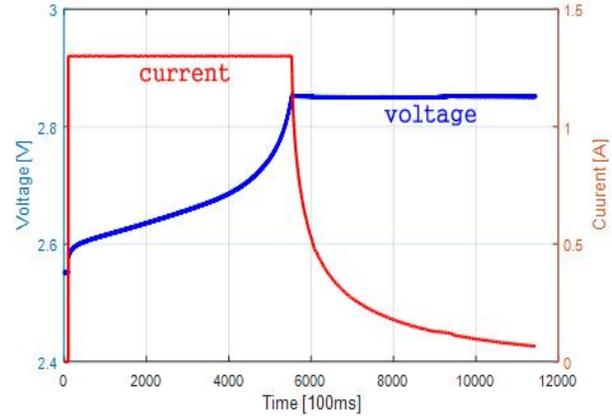


Fig. 3. CC-CV(constant current-constant voltage) method.

2. 전기적 등가회로 모델링 적용

LTO 배터리의 전기적 등가회로 모델은 기존 리튬계열 배터리에 적용되는 모델과 유사하다. 그림 1의 모델에서 보듯이, 개방전압(open-circuit voltage; OCV)의 1개의 직렬저항(R_i)과 1개의 RC-ladder로 구성되어 LTO 배터리의 동적특성을 나타낸다. RC-ladder의 개수가 증가할수록 LTO 배터리의 동적특성은 향상될 수 있다. 하지만, 등가회로 모델 기반의 SOC/SOH 추정 알고리즘 구현 시 이는 내부 상태(state)의 증가에 따른 알고리즘의 복잡성을 야기할 수 있으므로 그림 1처럼 단순화를 구현하되, 이로 인한 등가회로 모델링 에러 및 SOC/SOH 추정 에러를 줄이는 추가 기법들이 구현되어야 한다.

3. 전기적 특성실험 및 이의 분석

3.1 LTO 배터리의 세부 규격

본 논문에서 충전/방전 실험을 적용한 LTO 배터리는 YJpower사의 YJ1865T(그림 2)로서, 기존 18650 원통형 리튬이온 배터리와 달리 양극과 음극단자가 한 곳에 분포한다. 전기화학적 특성 실험 및 배터리 운용 시 단락 사고에 주의가 요구된다. 표 1은 LTO 배터리 단위 셀 사양을 나타내며 일반적인 고출력 18650 원통형 리튬이온 배터리와 비교 시 에너지 밀도 및 공칭 전압(nominal voltage)은 상대적으로 낮은 특성을 가진다. 반면에 단시간 순간의 출력은 2~3배정도 높고 포괄적인 온도 범위를 가짐에 따라 극저온에서도 안정적인 배터리 운용이 가능하다. 또한, 배터리 충전 시 흑연을 사용하는 고출력 리튬이온 배터리보다 충전에서 높은 C-rate를 인가할 수 있어 전기자동차의 급속 충전 이슈에 대해 유리한 장점을 가진다.

3.2 LTO 배터리의 전기적 특성 실험

배터리 전기적 등가회로 모델의 파라미터를 선정하기 위해 다양하고 체계적인 전기적 특성 실험이 요구된다.

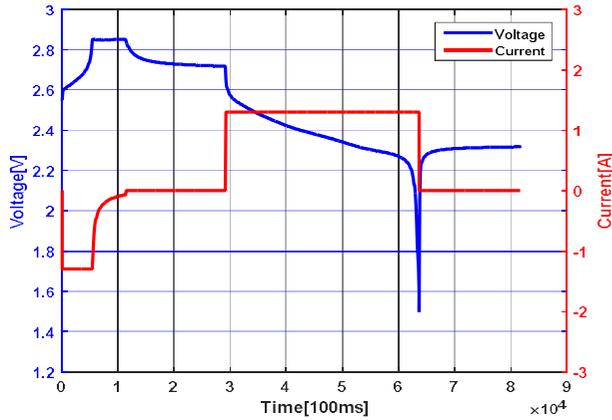


Fig. 4. Current profile for obtain discharged capacity.

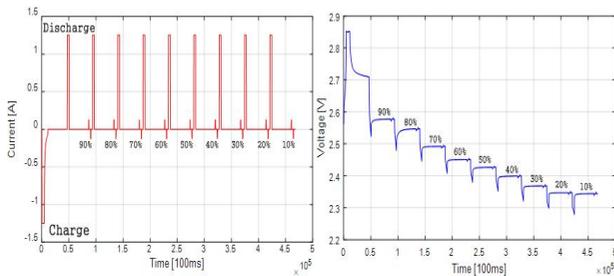


Fig. 5. OCV-HPPC test profile(current and voltage).

본 논문에서 LTO 배터리 모델의 파라미터를 결정하기 위해 상온의 온도 및 LTO 배터리 사양 기반으로 전기적 특성 실험을 수행하였다. 배터리의 전기적 등가회로 모델 파라미터를 추출하기 전에 우선적으로 배터리의 실제 용량을 측정하는 것이 중요하다. 배터리의 용량은 만충(fully charged state)에서 만방(fully discharged state)까지 일정한 방전 전류를 인가하였을 때 전하의 총량을 나타낸다. 본 논문에서 언급되는 배터리의 용량은 방전 용량으로 정의하였다. 배터리의 실제 방전 용량 측정 시 충전 기법과 배터리의 사양에 따라 상이한 차이가 발생하므로 이를 위한 충전 기법과 배터리 사양의 사전 결정이 필요하다.

충전 기법은 CC(constant current), CC-CV(constant current-constant voltage), CP(constant power) 등 다양한 충전 기법이 사용되고 있다. 일반적으로 사용되는 정전류(CC) 방법을 사용하면 배터리의 부족한 충전이 이루어 질 수 있으므로 본 논문에서는 정전류-정전압(CC-CV) 방법(그림 3)을 적용하여 최대 용량까지 충전을 적용하였다. LTO 배터리의 용량을 측정하기 위해 정격 용량(rated capacity) 기반으로 충전과 방전 전류는 1C-rate를 적용하고, 제조사에서 제시한 상한 전압(2.85V) 및 하한 전압(1.5V)을 설정하였다. 그림 4는 방전 용량을 추출하기 위한 전기적 특성 실험을 나타내며, 방전 용량은 만충 전압부터 만방 전압까지 방전 전류를 누적하는 식 (2)를 통해 산출된다. 여기서 산출된 실제 배터리의 방전 용량은 1.2503Ah이며, 이 값은 전류적산

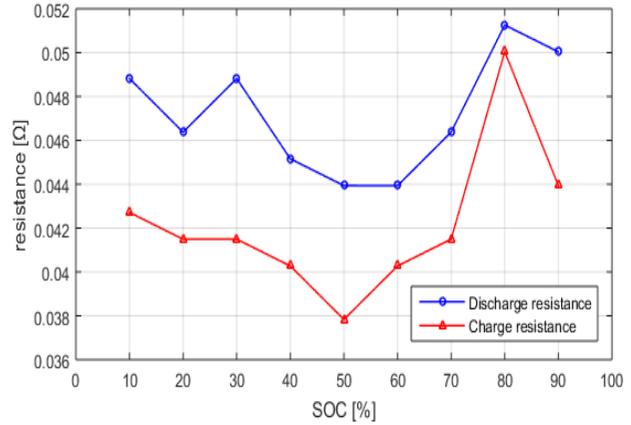


Fig. 6. Experimental result(internal resistance).

법의 SOC 추출에 사용된다. 식 (3)은 전류적산법을 나타내며 초기 SOC, 산출된 방전 용량, 적산된 전류로 현재의 배터리 SOC를 산출한다. SOC₀는 초기 SOC, C_n는 방전 용량을 의미한다.

$$C_n = \int I dt \quad (2)$$

$$SOC = SOC_0 - \frac{1}{C_n} \int I dt \quad (3)$$

$$V_k = OCV(SOC_k, C_{n,k}) - V_{Diff,k} - R_{i,k} \quad (4)$$

그림 1과 식 (4)의 배터리 등가회로 모델의 파라미터를 추출하기 위해 SOC 10[%]별 HPPC test(그림 5)를 수행하였다. 이 전기적 특성 실험은 펄스 전류 인가 시 전압 변화에 따른 저항의 변화와 추출된 저항 기반 펄스 파워를 추출 할 수 있으며 이 값들은 배터리 성능의 척도를 나타낼 수 있다. 또한, SOC 10[%]씩 방전 전류 인가 후 1시간의 휴지 시간을 적용하여 SOC 10[%]별 OCV(open circuit voltage)를 추출할 수 있다.

실제 방전 용량을 적용하여 상온 25°C의 외기 온도 조건에서 전기적 특성 실험을 수행하였다. 전기적 특성 실험의 전류 프로파일은 SOC 100~10[%]범위에서 SOC 10[%]씩 1[C-rate]의 방전과 SOC 10%마다 HPPC(hybrid pulse power characterization)를 수행하고 휴지 시간은 1[hour]으로 설정하였다. HPPC test 구간은 1분의 0.1[C-rate] 방전, 5분의 휴지 시간, 1분의 0.1[C-rate] 충전으로 구성된다. 이 구간에서 방전 및 충전 전류에 따른 전압 변화에 옴의 법칙(Ohm's Law)을 적용하여 충전 및 방전 내부 저항을 산출 할 수 있으며, 등가회로 모델의 전압원인 OCV를 SOC 10%별로 측정하였다. HPPC 기반 실험을 통해 얻어진 각 SOC 10[%]별 충전과 방전 내부 저항을 그림 6에 나타내었다. SOC 전체 영역에서 방전 저항이 충전 저항보다 큰 경향을 보이며 이는 배터리 내부에서 방전과 충전 시 리튬 이온의 이동도 차이가 있음을 의미한다. 두 저항 모두 SOC 중간

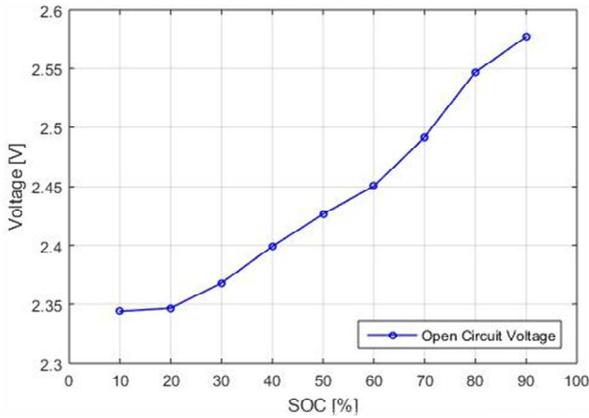


Fig. 7. Open circuit voltage(OCV) curve.

TABLE II
PARAMETERS OF SOC 90%~10%(DISCHARGE)

SOC[%]	R_i [Ω]	$R_{D_{diff}}$ [Ω]	$R_i+R_{D_{diff}}$ [Ω]
90	0.015869	0.03418	0.05005
80	0.018311	0.032959	0.05127
70	0.01709	0.029297	0.046387
60	0.01709	0.026856	0.043946
50	0.01709	0.026856	0.043946
40	0.020752	0.024414	0.045167
30	0.019532	0.029297	0.048829
20	0.019532	0.026856	0.046387
10	0.020752	0.028077	0.048829

영역(SOC 40~60%)에서 저항이 작으며 SOC 50[%]이하에서 저항이 증가하는 경향을 보인다. 또한, HPPC 기반 실험을 통해 전기적 등가회로 모델에 필요한 파라미터인 R_i , $R_{D_{diff}}$ 값을 SOC 10% 간격으로 추출할 수 있다^[4]. 표 2에 1분의 방전 전류 기반 전압의 변화를 통해 산출된 SOC 10[%]별 R_i , $R_{D_{diff}}$ (방전)를 나타내었다. 이 값은 배터리 등가회로 모델의 파라미터이며 알고리즘 및 모델 검증 시 중요한 요소로 사용된다.

그림 5의 전압 파형으로부터 SOC 10[%]별 OCV를 측정하고 그림 7에 OCV-SOC 관계를 나타내었다. OCV-SOC 관계에서 LTO 배터리는 일반적인 리튬이온 배터리와 유사하게 선형적인 경향을 보임을 확인하였다. 표 2에서 SOC 전체의 영역 중 SOC 80%에서 동일 전류에 따른 전압의 변화가 가장 크며 SOC 50~60%에서 전압의 변화가 가장 작음을 확인하였다. 향후 배터리 모델링 및 적응 제어 알고리즘의 파라미터 선정 시 고려해야 할 부분으로 예상된다.

3.3 Direct Current Internal Resistance(DCIR)

배터리 노화에 대한 SOH 추정 및 배터리의 수명을 예측함에 따라 배터리가 사용되는 전력 구동 어플리케이션에 접목 시 배터리의 효율이 늘어날 것으로 예상된다.

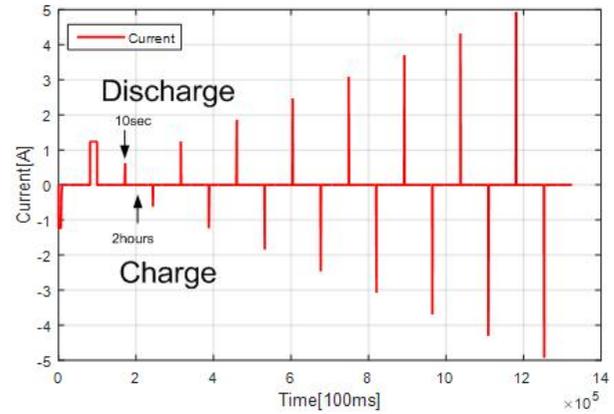


Fig. 8. DCIR experiment at SOC 50%(current).

TABLE III
AVERAGE SLOPES OF SOC 90~10[%]

SOC [%]	Average slope
90	0.1792
80	0.1818
70	0.1789
60	0.1807
50	0.1774
40	0.1861
30	0.2111
20	0.2324
10	0.2794

배터리의 SOH는 크게 두 가지로 정의되며 첫 번째는 노화에 대한 용량, 다른 방법은 펄스 파워의 크기를 이용하여 SOH를 확인하는 방법이다^[7]. DCIR 실험은 충전과 방전 C-rate에 따른 전압의 변화로 얻어지는 전압 강하(차이)를 이용하여 옴의 법칙으로 DCIR을 산출할 수 있고 이에 따른 전압 강하를 하나의 기울기로 나타낼 수 있다^[3]. 전압 강하의 기울기는 배터리 성능(노화)을 가늠할 수 있는 기준으로 사용될 수 있다.

LTO 배터리는 일반적인 고출력 리튬이온 배터리보다 높은 출력 특성을 가지고 있어 다양한 전류 범위에서 배터리 동적 특성의 고려가 필요하다. 본 논문에서는 LTO 배터리의 모델 파라미터, DCIR, 펄스 파워를 산출하기 위해 SOC 90~10[%]의 범위에서 그림 8의 DCIR 전류 프로파일을 SOC 10[%]별로 적용하였다. 실제 방전 용량 (1.2503[Ah])과 상온(25[$^{\circ}$ C])의 조건하에서 전기적 특성 실험을 수행하였다. 수행한 SOC 90~10%의 DCIR 실험을 통해 SOC 10% 간격마다 C-rate별 전압 강하 및 상승 기반 기울기를 산출하였다. 그림 9에 SOC 별 충전과 방전 C-rate에 따른 전압의 강하 및 상승을 이용하여 각 SOC별로 기울기를 MATLAB의 curve fitting tool을 사용하여 추출하였다. 표 3에 추출한 기울기의 크기를 나타내었으며 기울기의 크기는 Low SOC 영역으로 갈수록 기울기가 상대적으로 크며 이는 배터리

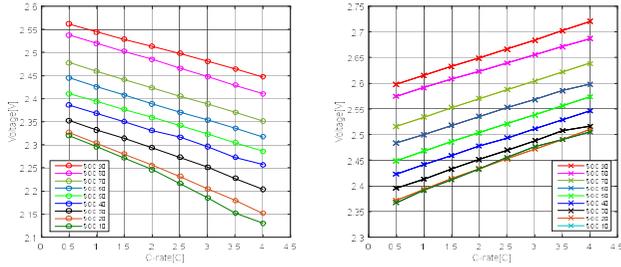


Fig. 9. Slopes of SOC 90%~10%; left(discharge slope), right(charge slope).

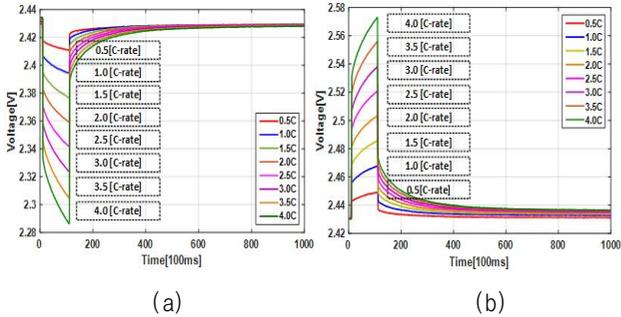


Fig. 10. DCIR experiment at SOC 50%.
(a) discharge curve(C-rate). (b) charge curve(C-rate).

내부 저항이 증가함을 의미한다. 또한, 이 기울기는 배터리에 방전과 충전 펄스 전류 인가 시 SOC별 전압의 변화를 보여주고 향후 배터리 노화 시 DCIR 시험을 통해 추출된 C-rate별 펄스 파워와 전압 강하 기울기를 비교하여 노화의 정도와 수명 예측 시 중요한 파라미터로 사용될 예정이다^[8].

$$DCIR = \Delta V / I \approx R_i + R_{Diff} \quad (5)$$

$$\text{Discharge pulse power capability} = \frac{OCV - V_{\min}}{DCIR_{\text{discharge}}} \times V_{\min} \quad (6)$$

$$\text{Charge pulse power capability} = \frac{V_{\max} - OCV}{DCIR_{\text{charge}}} \times V_{\max} \quad (7)$$

다양한 펄스 전류를 고려한 배터리 내부 모델 파라미터를 선정하기 위해 그림 8의 전류 프로파일을 적용하였다. 그림 10(a), (b)는 0.5C~4.0C까지 0.5C의 간격으로 10초 방전과 10초 충전 펄스 전류를 가한 전압의 상승과 드롭을 나타낸 그래프이다. 충전과 방전의 펄스 전류 사이에 2시간의 휴지 상태를 두었다. 즉, 10초의 충전 및 방전 펄스 전류를 인가 시 전압 강하의 변화를 통해 각 C-rate 별 모델 파라미터인 R_i 와 R_{Diff} 를 추출하고 식 (5)를 이용하여 C-rate 변화에 따른 충전과 방전의 DCIR을 산출하였다.

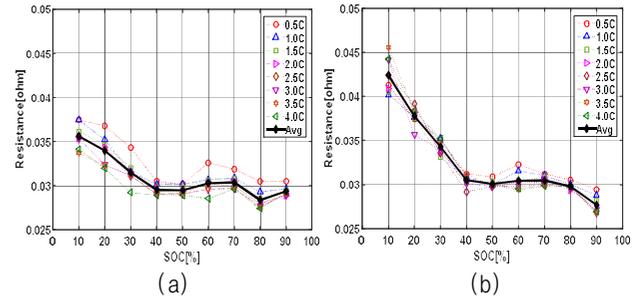


Fig. 11. (a) DCIR experiment [charge DCIR(C-rate)].
(b) DCIR experiment [discharge DCIR(C-rate)].

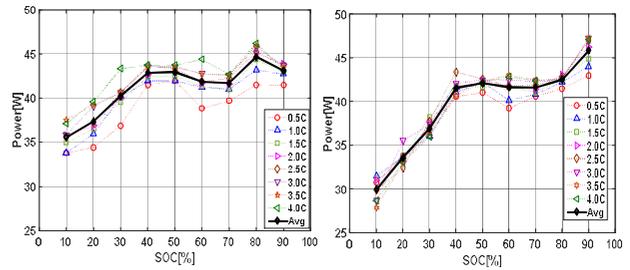


Fig. 12. (a) Charge pulse power(C-rate).
(b) Discharge pulse power(C-rate).

TABLE IV
DCIR MEASUREMENT AND PULSE POWER
CALCULATION IN THE ENTIRE SOC RANGE(SOC 10~90%)

SOC[%]	DCIR[Ω]	Power[W]
10	0.039026	32.73996
20	0.035873	35.44185
30	0.032910	38.58183
40	0.030014	42.20805
50	0.029786	42.51594
60	0.030367	41.73605
70	0.030420	41.63558
80	0.029090	43.57512
90	0.025120	44.47560

식 (5)를 통해 C-rate에 따른 SOC별 DCIR을 그림 11(a), (b)에 나타내었다. 다양한 C-rate로 10초간 충전과 방전 펄스 전류 인가 시 C-rate가 클수록 내부 저항이 작아지는 경향성을 확인하였다. 또한, 각각의 C-rate에서 방전 펄스 전류보다 충전 펄스 전류 인가 시 DCIR의 변화율이 상대적으로 크며 전력구동 어플리케이션에 적용 시 고려해야할 사항으로 예상된다.

추출된 충전 및 방전 DCIR과 OCV, 상한 및 하한 cut-off 전압을 식 (6)과 식 (7)에 적용하여 충전 및 방전 펄스 파워를 산출할 수 있다. V_{\max} 와 V_{\min} 은 충전 및 방전 Cut-off 전압을 나타내며 각각의 전압은 2.85V와 1.5V이며 SOC 10[%]별 OCV를 적용하여 C-rate의 변화에 따른 충전/방전 펄스 파워를 산출하였다^[9]. 산출한 충전과 방전의 펄스 파워를 그림 12의 (a), (b)에 나타내었다. 전력 구동 어플리케이션에 등가회로 모델 기반

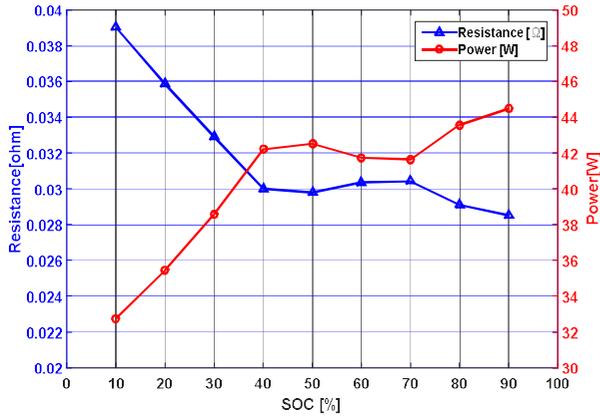


Fig. 13. Average values of DCIR and pulse power.

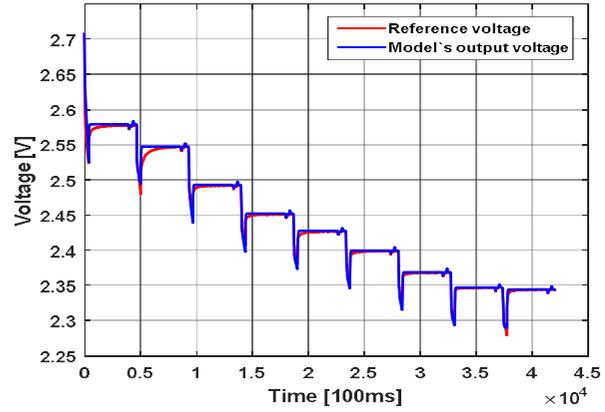


Fig. 15. Reference voltage and model's output voltage(result).

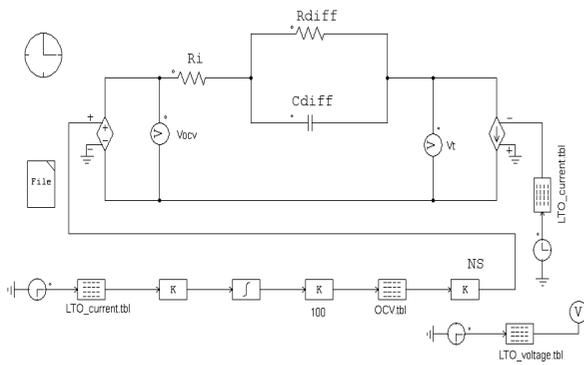


Fig. 14. LTO rechargeable battery modeling.

알고리즘 적용 시 운용 가능한 모든 C-rate에서 DCIR 및 펄스 파워를 적용하기에 알고리즘의 복잡성이 증가하므로 대표되는 파라미터를 고려하도록 충전 및 방전의 영역을 모두 포함하는 평균값을 선정하였다.

충전 및 방전 영역의 DCIR 기반 파라미터를 모두 고려하는 평균값을 SOC별로 표 4와 그림 13에 나타내었다. 두 영역의 평균값은 추후 SOC/SOH 추정 알고리즘에서 추정 성능 검증을 위해 사용될 것이며, 그림 13은 Low SOC에서 내부 저항이 증가하고, 이는 전력 구동 어플리케이션에 적용 시 SOC 40% 이하로 운용하는 것은 배터리의 출력의 감소 및 저항의 증가로 인해 배터리의 효율이 낮아지며 Low SOC에서 지속적인 운용은 배터리 노화를 가속화 시킬 것으로 예상된다. 추출된 프래시 셀의 DCIR과 펄스 파워의 파라미터는 향후 SOC/SOH 알고리즘에 중요 파라미터로 사용될 것이다^[10].

4. 시뮬레이션 및 실험 결과

4.1 전기적 등가회로 모델링(psim 적용)

전력 구동용 어플리케이션의 알고리즘에 적용 전 사전 배터리 모델을 검증하기 위해 psim을 사용하여 그림 1의 LTO 배터리 모델을 설계하였다. 구축한 배터리 모델^[11]은 그림 14에 나타내었으며 EECM의 V_{ocv} 는

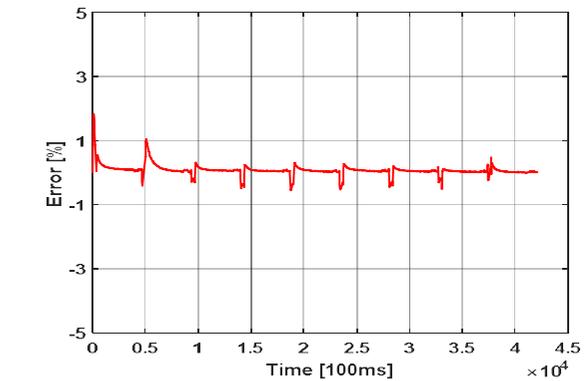


Fig. 16. Reference voltage and model's output voltage(error).

전류적산법에 의해 SOC가 결정되며 이에 부합되는 V_{ocv} 가 결정되도록 설계되었다. SOC의 정확도에 따라 V_{ocv} 의 값의 오차가 발생하며 이는 배터리 모델의 출력 전압에 오차의 누적됨을 의미한다. 전류적산법 기반 EECM의 정확성 향상을 위해 SOC의 추정 성능이 보장되어야 하며 추후 SOC 알고리즘에서 리셋 기법, 충전 효율 보정 등의 기법을 사용하여 추정 성능의 개선이 요구된다.

4.2 지령치 전압과 모델 기반 출력 전압 비교

전기적 특성 실험을 통해 추출된 LTO 배터리 내부 파라미터를 적용하여 등가회로 모델의 내부 파라미터를 선정하였다. 선정한 모델의 내부 파라미터를 토대로 psim의 모델에 적용하였다. 전기적 특성 실험을 수행한 프로파일에서 방전 지령치 전압과 모델 기반 출력 전압을 비교한 결과를 그림 15에 나타내었고 그림 16에 지령치 전압과 출력 전압의 오차를 나타내었다. RC 병렬 회로가 1개인 모델을 사용하였지만 지령치 전압과 출력 전압을 비교한 결과 $\pm 1\%$ 내의 오차를 확인하였고 모델의 오차를 0에 가깝게 만드는 것이 중요하며 이 오차를 줄이기 위한 다양한 방법이 존재하며 노이즈 모델이나 데이터 리젝션 알고리즘을 적용하면 오차를 감소시킬 수 있다. SOC/SOH 알고리즘 적용 시 오차의 감소가

예상되며 전력 구동 어플리케이션의 적용을 위해 설계한 배터리 모델의 성능을 검증할 예정이다.

4. 결 론

본 논문에서는 기존의 음극 활물질에 흑연을 가지는 리튬이온배터리와 달리 음극 활물질에 LTO를 가지는 배터리를 사용하여 전력구동 어플리케이션의 실제 적용을 위한 사전 과정을 서술하고, 배터리 등가회로 모델의 내부 파라미터의 분석을 위해 다양한 전기적 특성 실험을 수행하였다. 전기적 특성 실험을 기반 LTO 배터리 등가회로 모델의 파라미터를 선정하고 시뮬레이션을 통해 배터리 등가회로 모델의 검증을 수행하였다. RC 병렬회로가 1개인 전기적 등가회로 모델을 사용하여 지령치 전압과 모델 기반 출력 전압을 비교한 결과 오차 $\pm 1\%$ 이내를 확인하고 등가회로 모델 적용의 타당성을 입증하였다. SOC(state of charge)/SOH(state of health)의 알고리즘 적용 시 오차의 범위가 줄어들 것으로 예상된다. 향후 전력 구동 어플리케이션의 SOC/SOH 알고리즘을 적용하기 위해 모델 기반 전압 추정 오차의 감소와 알고리즘 추정의 정확성 향상을 위해 적용 제어 방식인 확장 칼만 필터 알고리즘에 적용하여 모델의 성능을 검증할 예정이다.

본 연구는 2017년 한국연구재단의 우주핵심기술사업(NRF-2017M1A3A3A03016056)과 2018년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2018R1C1B6004482)

References

- [1] H. G. Kim, S. I. Heo, and G. B. Kang, "Modeling and state observer design of HEV li-ion battery," *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 13, No. 5, pp. 360-368, Oct. 2008.
- [2] S. Yang, J. Miao, Q. Wang, M. Lu, J. Sun, and T. Wen, "Synthesis of graphitized carbon, nanodiamond and graphene supported $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ and comparison of their electrochemical performance as anodes for lithium ion batteries," *Applied Surface Science*, Vol. 389, pp. 428-437, Dec. 2016.
- [3] N. Takami, H. Inagaki, Y. Tatebayashi, H. Saruwatari, K. Honda, and S. Egusa, "High-power and long-life lithium-ion batteries using lithium titanium oxide anode for automotive and stationary power applications," *Journal of Power Sources*, Vol. 244, pp. 469-475, Dec. 2013.
- [4] S. Lee, J. Kim, J. Lee, and B. H. Cho, "State-of-charge and capacity estimation of lithium-ion battery using a new open-circuit voltage versus state-of-charge," *Journal of Power Sources*, Vol. 185, pp. 1367-1373, Dec. 2008.
- [5] K. W. Jang and 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, Jun. 2012.
- [6] C. Y. Chun, J. H. Kim, I. N. Hur, B. H. Cho, and S. H. Han, "Circuit implementation for LiFePO_4 battery SOC estimation based on the coulomb counting method," in *Power Electronics Annual Conference*, pp. 51-52, Nov. 2011.
- [7] J. H. Kim, S. J. Lee, and B. H. Cho, "The state of charge estimation of aged batteries using per-unit system and time-constant," in *Power Electronics Annual Conference*, pp. 500-502, Jul. 2009.
- [8] http://erik.re.kr/index.php?document_srl=13127&mid=res, Nov. 2017.
- [9] J. H. Kim, S. J. Lee, J. M. Lee, and B. H. Cho, "A new direct current internal resistance and state of charge relationship for the Li-ion battery pulse power estimation," in *IEEE 7th International Conference on Power Electronics*, pp. 1173-1178, Oct. 2007.
- [10] D. Noh, I. Hwang, and J. Yoo, "SOH estimation method of lithium polymer batteries using OCV," in *Power Electronics Annual Conference*, pp. 269-270, Jul. 2010.
- [11] J. H. Park, P. Y. Lee, C. O. Yoon, J. H. Kim, and S. S. Jang, "Battery pack electric equivalent circuit model based parameter extraction and simulation verification," in *Power Electronics Annual Conference*, pp. 155-156, Nov. 2017.
- [12] Q. F. Wang, M. W. Lu, J. Miao, and Y. Y. Hao, "Synthesis and electrochemical performance of nanodiamond supported $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ - Fe_2O_3 composites as anode materials for lithium ion batteries," *Materials Letters*, Vol. 164, pp. 1-4, Feb. 2016.



이평연(李平淵)

1992년 5월 31일생. 2017년 조선대 전기공학과 졸업. 2017년~현재 충남대 대학원 전기공학과 석사과정.



윤창오(尹彰旡)

1990년 8월 13일생. 2016년 조선대 전기공학과 졸업. 2016년~현재 충남대 대학원 전기공학과 석사과정.



박진형(朴珍亨)

1993년 1월 4일생. 2018년 충남대 전기공학과 졸업. 2018년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.



김종훈(金鍾勳)

1979년 4월 22일생. 2005년 충남대 정보통신공학부 전기전자전파공학부 졸업. 2012년 서울대 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(공학 석박통합과정). 2012년~2013년 삼성 SDI ESS사업부 책임연구원. 2013년~2016년 조선대 전기공학과 조교수. 2016년~현재 충남대 전기공학과 조교수. 2015년~현재 JPE Associate Editor. 2016년~현재 당 학회 편집위원.