

배터리팩 내 셀 간 전기적 특성 균일도 차이에 의한 SOC 추정성능 비교분석

박진형¹, 이평연¹, 장성수², 김종훈[†]

Due to the Difference in Uniformity of Electrical Characteristics between Cells in a Battery Pack SOC Estimation Performance Comparative Analysis

Jin-Hyeong Park¹, Pyeong-Yeon Lee¹, Sung-Soo Jang², and Jonghoon Kim[†]

Abstract

The performance of the battery management system (BMS) algorithm is important for ensuring the stability and efficient operation of battery packs. Such a performance is determined by the internal parameters of the electrical equivalent circuit model (EECM). This study proposes a performance improvement and verification of battery parameters for the BMS algorithm using electrical experiments and tools. The parameters were extracted through electrical characteristic experiments, and an EECM based on Ah counting was designed. Simulation results using the EECM were compared with actual experimental data to determine the best parameter extraction method.

Key words: Li-ion battery, BMS(Battery Management System), Battery equivalent circuit model, Simulation

1. 서 론

전 세계적으로 우주시장은 급격하게 증가하고 있으며, 우리나라 또한 한국항공우주연구원을 중심으로 연구가 진행되고 있다. 특히 정지궤도(geostationary orbit; GEO)위성과 같은 경우 통신, 우주기상 관측용으로 활용됨으로써 국가 기반 기술에 이바지하는 중요한 어플리케이션이다. 정지궤도위성은 약 3만 6000km 고도에서 지구의 자전속도와 동일한 속력으로 운용함으로써 같은 면을 지속적으로 관측 가능한 장점이 있다. 이러한 특징 때문에 태양 빛을 받지 못할 경우, 인공위성에 탑재된 배터리 팩으로 운용을 한다. 수리를 하기 어려운 인공위성의 같은 경우, 전력계 시스템에서 전원역할을 하는

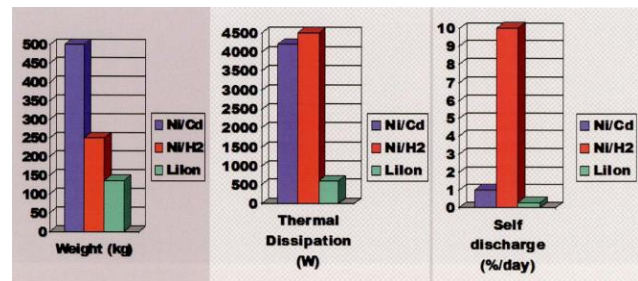


Fig. 1. Battery type performance comparing^[1].

배터리 팩의 안정성 확보가 중요한 이슈이다.

인공위성에 탑재되는 배터리 팩의 경우 이전에는 NiH₂ (nickel hydrazine)과 NiCd(nickel cadmium)같은 배터리를 주로 사용하였다. 하지만 그림 1에서 나타난 지표처럼 리튬계열 배터리보다 높은 무게, 열 방출, 자가 방전 성능 때문에 리튬계열 배터리팩보다 성능이 떨어진다. 이러한 리튬계열 배터리의 우수성으로 인해 최근 인공위성과 같이 장시간 운용을 하는 어플리케이션의 경우 리튬 이온계열의 배터리 팩이 사용되고 있다.

리튬 이온 배터리의 경우 폭발 위험과 온도에 민감한 단점이 있으며, 이에 따라 배터리 팩의 안정성 확보와 내부 상태추정을 위해 BMS(battery management system)

Paper number: TKPE-2019-24-1-3

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

[†] Corresponding author: whdgns0422@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

² Korea Aerospace Research Institute

Manuscript received Jan. 31, 2018; revised Feb. 22, 2018; accepted Jun. 7, 2018

— 본 논문은 2017년 추계학술대회 우수추천논문임

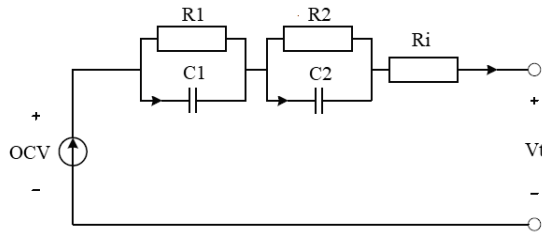


Fig. 2. Simplified equivalent circuit model.

의 정밀한 설계가 요구되어진다. BMS 알고리즘은 전기적 등가회로 모델(electrical equivalent circuit model; EECM) 기반으로 SOC(state-of-charge), SOH(state-of-health)를 추정한다. 모델의 성능을 향상시키기 위하여 정밀한 배터리 팩의 내부 파라미터 추출이 필수적인 요소이다.

배터리 팩의 경우 내부 셀 간 편차에 의해 정확한 내부 상태추정 어려운 문제점이 있다. 스크리닝이 잘된 배터리 팩의 경우에도 충/방전이 반복됨에 따라 셀 간 균일도가 하락하게 된다. 이에 따라 등가회로기반의 BMS 알고리즘의 경우 셀 간 내부 파라미터가 상이함으로써 배터리 팩 내부의 불균일성에 대한 분석을 하였다. 배터리 내부 균일도의 차이에 의한 내부 상태 추정 비교 분석을 실시하였다. 비교 및 분석을 하기위해 단일 셀과 배터리 팩을 활용하여 실험 및 검증을 하였다. 등가회로의 정확성을 향상시키기 위해 파라미터 추출방식을 결정하고 검증하였다. 추출된 파라미터를 사용하여 등가회로 모델을 정립하고, 비교 및 검증을 하여 효율적인 배터리 팩 추출방법을 소개한다. 단일 셀에서 추출된 파라미터를 통해 배터리 팩으로 확장시킴으로써 균일성을 가정하고, 배터리 팩과 비교하였다. 내부의 전압을 측정하여 내부 균일성에 따른 내부 상태 추정을 비교 분석을 실시하였다.

2. 단일 셀 전기적 등가회로 모델링

배터리의 내부는 전기회로처럼 선형적인 특성을 나타내지 않기 때문에 전기적 등가회로 모델이 화학적 모델보다 정확할 수 없지만 직관적으로 모델을 제공하기 때문에 많은 분야에서 쓰이고 있다. 등가회로모델은 배터리의 동작특성에 따라 설계가 가능하며, 본 논문에서는 셀 내부 특성에 따라 나누어 설계 및 기술하였다.

2.1 배터리 모델링

배터리 모델링에는 셀의 내부 상태를 물리화학적 관계를 수식적으로 구현하여 모델링하는 방법이 있다. 이 방법은 배터리의 내부 특성을 정확하게 반영할 수 있는 장점이 있으나, 계산량이 급격하게 증가하여 실제 어플리케이션에 적용하는 것은 경제적으로 문제가 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 그림 2와 같이 등가회로 모델을 구현하여 배터리의 동적 특성을 구현할 수

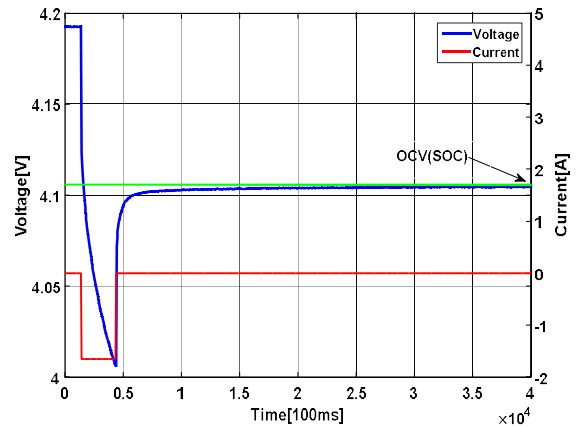


Fig. 3. OCV measurement method.

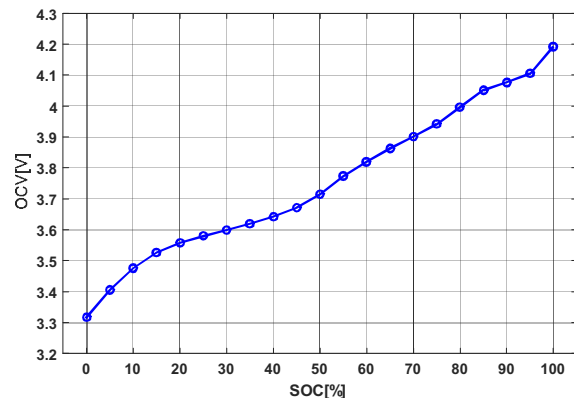


Fig. 4. SOC-OCV relationship.

있다. 이 방법은 물리화학적 방법보다 오차가 큰 단점이 있지만, 구현이 비교적 쉽고 짧은 시간에 결과를 확인할 수 있어 많은 BMS의 알고리즘에 적용되고 있다.

본 논문에서는 등가회로 모델을 적용할 파라미터 추출 방법과 배터리 팩으로 확장하는 방법을 소개 및 검증할 예정이다.

배터리 등가회로 모델을 구현하기 위해서는 파라미터를 정확하게 추출해야 정확도가 증가한다. 파라미터는 OCV(open circuit voltage; 개방회로전압), R_i (internal resistance; 내부저항), R_c (charge transfer; 전하 전달), C_d (double layer; 전기 이중층)으로 구성된다.

2.2 SOC(state-of-charge)

SOC는 가용한 전하의 잔량을 배터리 용량과의 비율로 나타내는 값으로써 식 (1)로 나타낸다. 초기 SOC (SOC_0)는 배터리 초기 충전량을 나타내며 배터리 모델링 결과에 큰 영향을 끼치는 요소이다. 배터리 용량(C_n)은 만충 상태의 셀을 만방 상태까지 일정한 전류로 방전했을 때의 전하의 총량이다.

$$SOC = SOC_0 - \frac{\text{사용한 전하량} \left(\int idt \right)}{\text{배터리 용량} (C_n)} \quad (1)$$

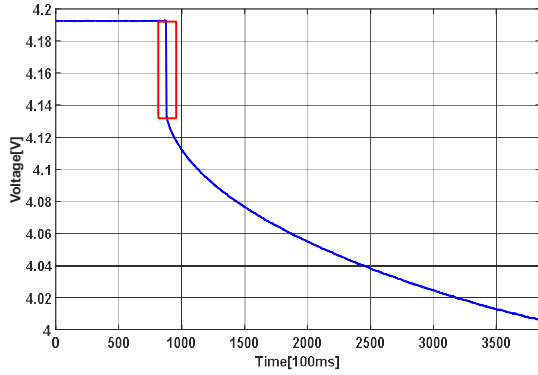


Fig. 5. IR drop curve.

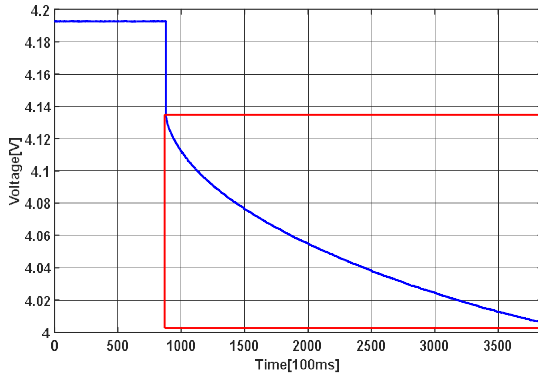


Fig. 6. Charge transfer curve.

2.3 개방회로전압(OCV)

OCV는 배터리의 전류가 흐르지 않을 때, 측정되는 전압을 나타낸다. 옴의 법칙($V=IR$)에 의거하여 저항이 무한대로 증가 할수록 전류는 0에 근접하여 정확한 셀의 전압을 측정할 수 있다. 측정 방법은 그림 3과 같이 셀이 방전 후에 전류를 인가하지 않고 일정한 시간 후에 정상상태의 전압을 측정하여 OCV를 측정하게 된다.

OCV는 그림 4의 예시와 같이 SOC와 비선형적인 관계를 나타내는 예시이다. SOC의 상태에 따라 OCV 또한 변화하며 이는 등가회로 모델에서 오차를 야기시키는 가장 큰 요인이다. SOC에 따라 OCV를 많이 측정할수록 등가회로 모델의 정확도는 증가한다.

2.4 내부저항(Ri)

셀의 양단을 포함하여 내부에 전하가 이동할 때, 전극에서의 저항과 전해질에서 이온의 이동을 방해하는 저항이며, 그림 5에 표시된 부분으로써 IR drop을 나타낸다. 이는 등가회로모델의 직렬저항으로 표현을 하였다. 직렬 저항은 배터리의 노화 및 온도에 따라 매우 가변적인 특성을 나타낸다.

내부저항만을 고려한 등가회로의 모델은 식 (2)으로 표현가능 하지만 셀의 내부 동적특성을 구현하는 것에는 한계가 있다.

$$v(t) = OCV(z(t)) - i(t)R_0 \quad (2)$$



Fig. 7. Single cell experiment equipment.



Fig. 8. Battery pack experiment equipment.

2.5 전하 전달 및 전기 이중층(R1, R2, C1, C2)

전하 전달은 셀 내부에서 전극에서 전해질 또는 전극에서 전해질로 바뀌는 과정으로부터 이러한 현상이 발생한다. 전하 전달에서 저항의 의미는 개별 화학 반응원들의 전위 손실을 의미한다. 이는 그림 6의 빨간색 부분의 전압강하를 나타내어 병렬 단의 저항으로 나타낸다. 전기 이중층이란 계면사이의 전하가 일정한 배열을 이루면서 커패시터와 같은 효과를 나타낸다.

$$v(t) = OCV(SOC(t)) - V_{\parallel}(t) - V_{series}(t) \quad (3)$$

$$v(t) = OCV(SOC(t)) - R_{ct}i_{R_{ct}}(t) - R_0i(t) \quad (4)$$

$$i_{R_{ct}}(t) + C_1v'_{C_{dl}}(t) = i(t)(v'(t) = C \frac{di_{R_{ct}}(t)}{dt}) \quad (5)$$

$$\frac{di_{R_{ct}}(t)}{dt} = -\frac{1}{R_{ct}C_{dl}}i_{R_{ct}}(t) + \frac{1}{R_{ct}C_{ct}}i(t) \quad (6)$$

3. 전기적 특성실험 및 분석

전기적 등가회로 모델링의 정확하게 정립하기 위해서는 최대한 많은 내부 파라미터의 정보가 필요하며, 이에 따라 검증과정이 필요하다. 등가회로 모델은 전류적산법(ampere-counting)을 이용하여 방전용량을 측정한다. 측정된 방전용량을 기반으로 OCV 측정 및 내부 파라미터를 측정한다.

배터리의 내부특성은 온도에 따라 매우 가변적인 특성을 나타내기 때문에 그림 7, 8과 같이 단일 셀과 배터리 팩을 항온/항습 챔버에서 일정한 외기온도(25℃)를

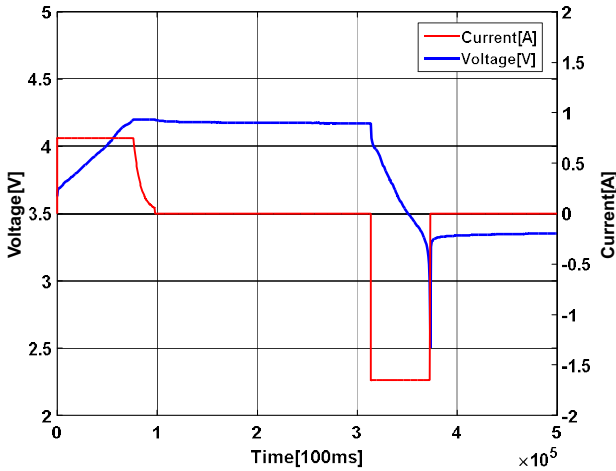


Fig. 9. Capacity test profile.

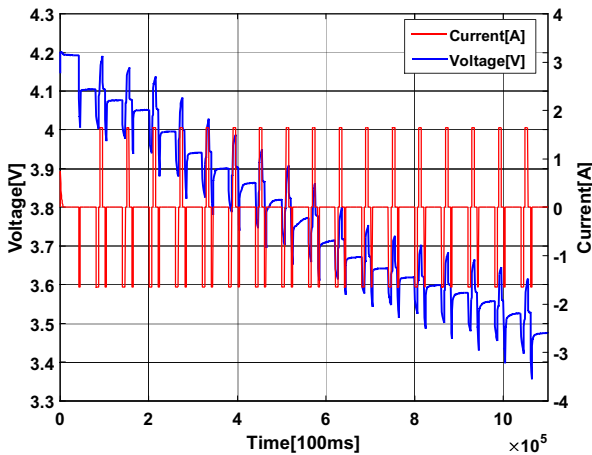


Fig. 10. Simplified equivalent circuit model.

설정하여 실험을 진행하였다. 실험에 선정된 셀은 18650 29E(2.85Ah)를 사용하였다. 배터리 팩은 18650 29E가 14S20P로 구성된 배터리 팩을 사용하였다.

3.1 방전 용량 측정 실험

배터리의 내부 파라미터를 측정하기 위하여 사전에 실제 방전 용량을 측정하였다. 실험은 프로파일은 그림 9에 나타내었으며, CC-CV(constant current-constant voltage)방식을 사용하여 완전히 충전된 셀을 휴지시간을 1시간으로 두어 안정화시켰다. 완충된 셀을 종지전압까지 1.65A로 방전시킨 뒤 셀 안정화를 위해 1시간의 휴지시간을 인가한다. 방전구간에서 Ah-counting을 사용하여 셀의 방전용량을 측정하게 된다.

3.2 개방 회로 전압 측정 실험

사전에 측정한 셀의 실제 방전용량을 기반으로 개방 회로전압을 측정하였다. 그림 10은 실제 실험 프로파일이다. 셀을 완전히 충전한 상태에서 1.65A로 SOC 5% 씩 방전하였다. 방전이 종료 후에 1시간의 휴지시간을 두어 OCV를 측정하였다. 전류를 인가하지 않는 휴지시간이

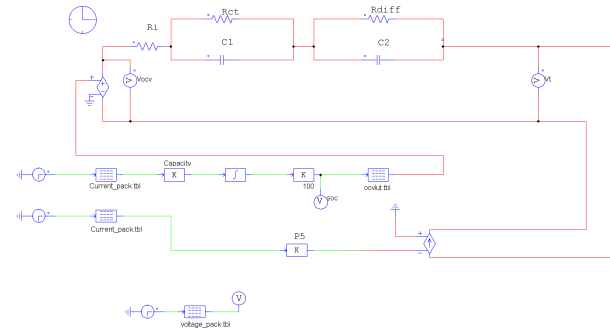
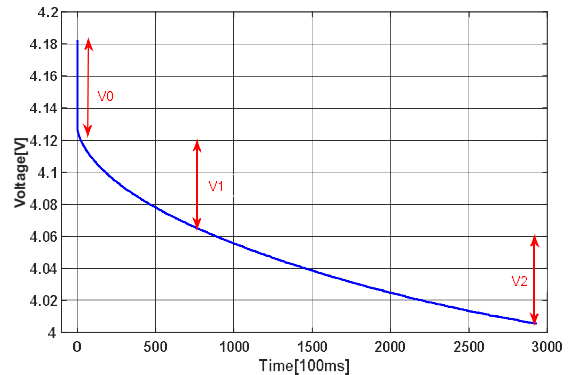
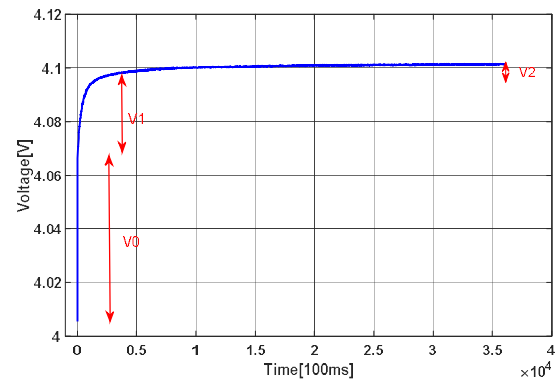


Fig. 11. 18650 29E battery equivalent circuit model.



(a) Discharge period



(b) Rest period

Fig. 12. Internal parameter estimation method.

길어질수록 정확한 OCV를 측정할 수 있다. 휴지시간은 1시간 이후에도 OCV 차이가 미비하여 1시간으로 설정하였다. 등가회로 모델의 동적특성을 확인하기 위하여 휴지시간 뒤 HPPC(hybrid pulse power characterization) 실험을 추가하였다.

4. 등가회로 모델링

4.1 등가회로 모델

본 논문에서는 단일 셀과 배터리팩의 파라미터를 비교하기 위하여 그림 11의 등가회로를 통해 검증하였다. 입력을 전류로 하여 충/방전에 따른 셀의 출력인 전압을 나타내어 셀의 특성을 나타내고, 실제 전압 데이터와 비교

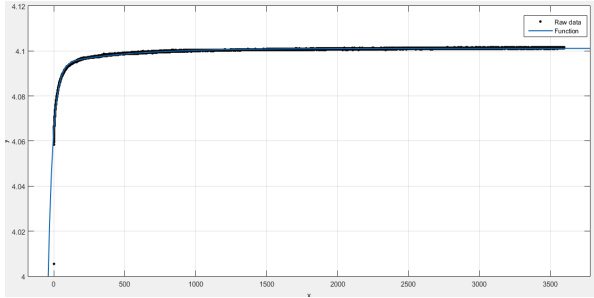


Fig. 13. Matlab curve fitting at rest period.

하여 파라미터 및 모델의 성능을 검증하였다. 입력된 전류는 모델의 추정성능을 높이기 위하여 실제 실험 데이터 값을 통해 검증하였다. 입력 전류는 식 (1)을 통해 SOC를 추정하게 된다. 추정된 SOC는 Look-up table을 통해 해당 SOC에 해당하는 OCV를 출력시킨다. 입력 전류에 따라 셀의 동작을 구현하기 위하여 단자 측에 전류를 인가하였다.

4.2 파라미터 추출 방식 비교 및 검증

본 논문에서는 셀의 내부 파라미터를 2가지 방식으로 소개 및 검증한다. 첫 번째 방법은 식 (6)에서 회로에서 흐르는 전체 전류가 직렬 및 병렬 저항에 인가되는 전류가 같다고 가정하여 그림 12와 같이 방전구간과 휴지 구간에서 파라미터를 추출하였다. 본 논문에서는 모델링의 정확성과 계산량을 고려하여 2개의 RC ladder를 선택하였다. V_1 와 V_2 는 방전/휴지 곡선에서의 시정수를 기점으로 나누었다. 파라미터의 값은 식 (7)처럼 그림 12(a)와 (b)에서 나타낸 각 부분의 V_1, V_2 전류 및 시정수를 통해 도출하였다. V_1 와 V_2 를 나누는 기준은 방전 구간에서 V_1 와 V_2 의 합의 값이 36.8%에 도달하는 시간, 휴지구간에서는 63.2%에 도달하는 기점으로 나누었다.

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{V_1}{I_{discharge}}, C_1 = \frac{\tau_1}{R_1} \\ R_2 &= \frac{V_2}{I_{discharge}}, C_2 = \frac{\tau_2}{R_1} \end{aligned} \quad (7)$$

두 번째 방법은 휴지구간에서의 전압 데이터를 활용하여 그림 13처럼 MATLAB의 Curve fitting틀을 사용하여 방정식을 통해 파라미터를 추출하는 방법이다^[2]. Curve fitting한 결과는 그림 12이며, 이 방법은 첫 번째에서 소개한 방법과 달리, 식 (6)을 반영하여 구하는 방식이다. 파라미터 중 IR-drop을 나타내는 부분은 첫 번째 방법에서의 휴지구간 R_0 값과 같으며, 나머지 파라미터의 값은 식 (8), (9), (10)을 통해 구한다.

앞서 소개한 방식을 통해 추출된 파라미터를 표 1에 나타내었다. 추출된 파라미터는 그림 11의 등가회로 모델을 통해 실제 실험 데이터 값과 시뮬레이션 값을 비교하여 효율적인 파라미터 추출방식을 검증 및 선정한다.

TABLE I
BATTERY PARAMETER

	Discharge	Rest	Equation
R_0 [Ω]	0.033662	0.033532	0.032108
R_1 [Ω]	0.046476	0.016611	0.017791
C_1 [F]	1065.05	423.91	193.24
R_2 [Ω]	0.027062	0.009671	0.009332
C_2 [F]	3517.79	3293.09	5327.37

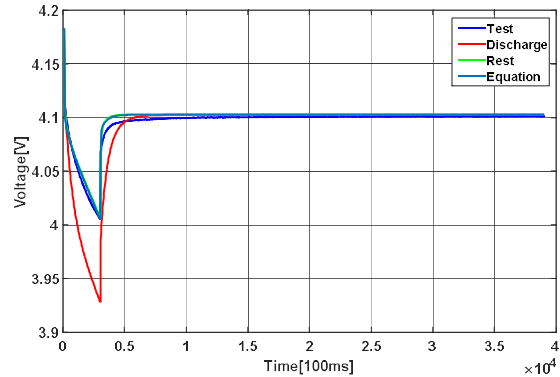


Fig. 14. Battery parameter verification.

$$F(x) = A + Be^{-ax} + Ce^{-bx} \quad (8)$$

$$\tau_1 = \frac{1}{a}, \tau_2 = \frac{1}{b} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{B}{(1 - e^{-\frac{-T_{rest}}{\tau_1}})I}, C_1 = \frac{\tau_1}{R_1} \\ R_2 &= \frac{C}{(1 - e^{-\frac{-T_{rest}}{\tau_2}})I}, C_2 = \frac{\tau_2}{R_1} \end{aligned} \quad (10)$$

표 1에서 나타낸 파라미터를 통해 시뮬레이션 결과는 그림 14에 나타내었다. 방전구간, 휴지구간, 방정식을 통해 추출된 파라미터를 통해 시뮬레이션한 최대 오차율은 각각 1.95%, 0.297%, 0.295%이다. 방전구간에서 추출한 파라미터가 다른 방법에 비해 저항 값이 크게 계산됨에 따라 전압강하가 많이 발생하여 오차가 커지는 것을 확인 할 수 있다.

시뮬레이션 결과상으로는 방정식을 통해 추출된 방법이 가장 오차율이 적은 것을 확인 할 수 있다. 그러나 방정식을 추출하는 방법으로 MATLAB의 Curve fitting을 사용할 경우 모든 휴지기간에서 방정식을 도출하는 것에는 한계가 있다. 따라서 본 논문에서는 휴지구간에서 식 (7)을 사용하여 파라미터를 추출하였다.

4.3 단일 셀 및 배터리팩 파라미터 비교분석

배터리 팩 등가회로를 설계할 시 각각 셀을 모델링하여 전체적인 배터리 팩을 설계하는 방법이 있으나, 알고

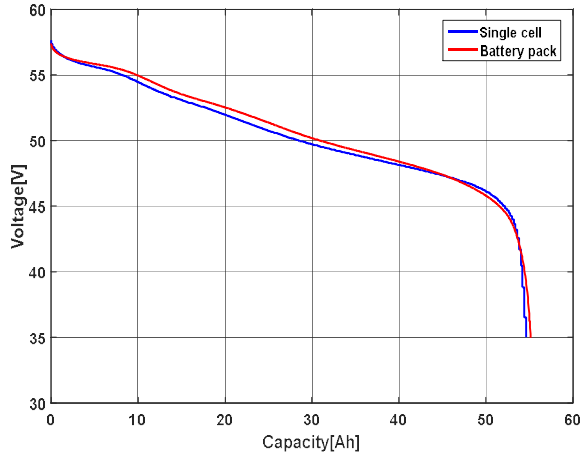


Fig. 15. Capacity/voltage curve.

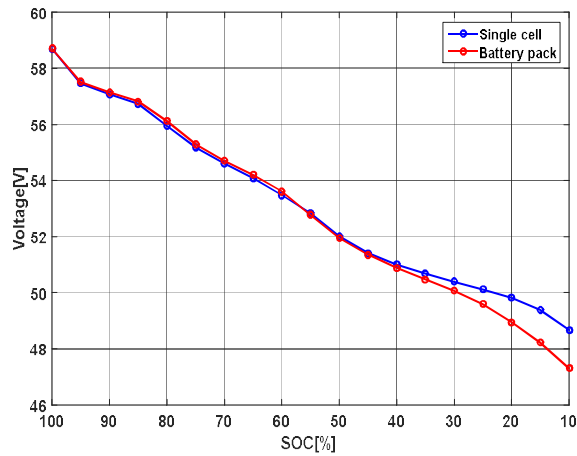


Fig. 16. SOC/OCV curve.

리즘 및 시뮬레이션을 진행할 때 계산 량이 급격하게 증가하는 단점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 배터리 팩을 단일 셀로 가정하는 파라미터를 추출방식과 임의로 선정된 셀을 배터리 팩으로 확장하여 비교 및 검증 실시하였다.

단일 셀에서 배터리 팩으로 확장된 경우는 직렬 개수(S)와 병렬 개수(P)에 따라 OCV는 식 (11), 저항과 커패시턴스의 경우 식 (12), 용량은 식 (13)과 같이 변화하게 된다.

$$OCV_{pack} = S \cdot OCV_{cell} \quad (11)$$

$$R_{pack} = \frac{S}{P} R_{cell}, C_{pack} = \frac{P}{S} C_{cell} \quad (12)$$

$$Cn_{pack} = P \cdot Cn_{cell} \quad (13)$$

단일 셀에서 확장된 파라미터와 배터리팩에서 추출된 파라미터의 비교는 그림 15, 16, 17을 통해 나타내었다. 배터리의 경우 매우 낮은 SOC에서 저항이 급격하게 증가하는 특성이 있기 때문에 파라미터는 SOC 100%에서 10%까지 계산하였다.

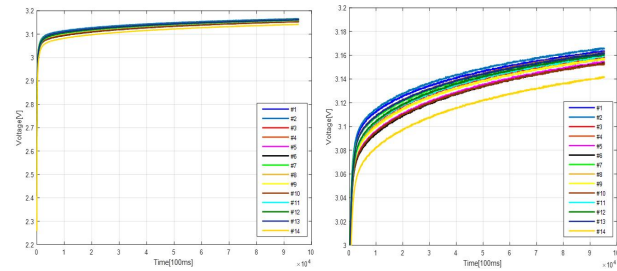


Fig. 17. Battery pack internal cell OCV unbalance.

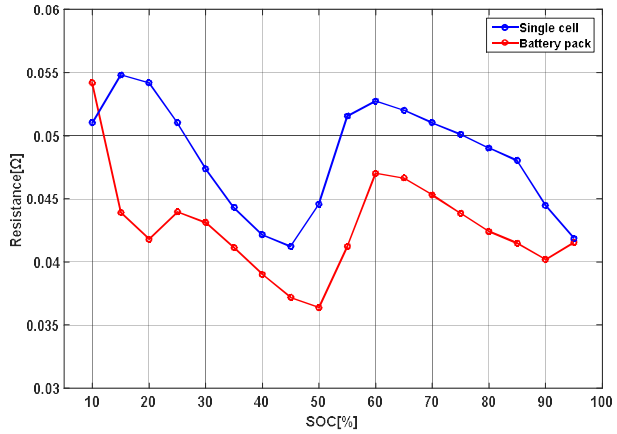


Fig. 18. SOC/DCIR curve.

본 논문에서의 SOC는 식 (1)을 통해 계산되며, 이 식에서 정격용량의 정보에 따라 SOC의 추정이 상이하게 된다. SOC의 추정 오차가 클 경우 OCV의 추정 정확성이 감소한다. 전압 추정 시 저항의 정보에 따라 모델의 정확도가 결정된다. 본 논문에서 파라미터의 비교는 전류 적산법기반 등가회로모델의 성능에 가장 큰 영향을 미치는 용량, OCV, DCIR(direct current internal resistance)을 중점적으로 비교 분석을 실시하였다.

그림 15는 용량/전압의 그래프를 나타내었다. 단일 셀에서 측정된 용량은 식 (13)를 통해 나타내었다. 단일 셀에서 확장된 용량의 값은 54.61[Ah]이며, 배터리 팩의 용량은 55.14[Ah]로 측정되었다.

그림 16은 SOC에 따른 OCV의 관계를 나타낸 그래프이다. 단일 셀에서 배터리 팩의 OCV를 산출하기 위하여, 식 (11)와 같이 배터리 팩 직렬 개수만큼 곱하여 계산하였다. 그래프에서 낮은 SOC로 갈수록 OCV의 차이가 커지는 것을 확인할 수 있다. 그림 17에서 만방을 할 경우 14개의 직렬로 연결된 셀 간 OCV의 편차를 나타내었다. 스크리닝이 잘된 배터리 팩의 경우에도 충/방전을 반복하여 노화가 진행될수록 셀 간 편차는 심화하며, 특히 낮은 SOC 영역에서 셀 간 편차가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 셀 간 불균형이 심화할수록 배터리 팩 내부 셀 간의 용량 균일도가 일정하지 않기 때문에 SOC 추정에 어려움이 생긴다.

그림 18은 SOC에 따른 DCIR을 나타내었다. 단일 셀의 파라미터의 경우 식 (12)을 사용하여 배터리 팩 단위

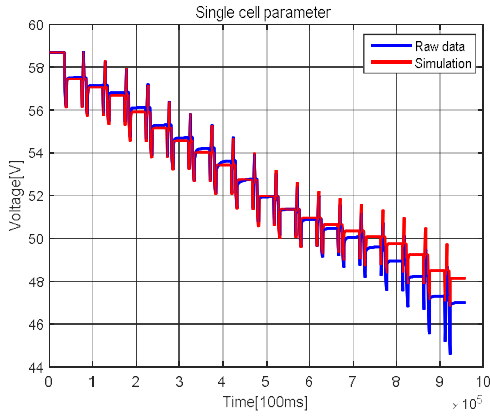


Fig. 19. Single cell parameter simulation.

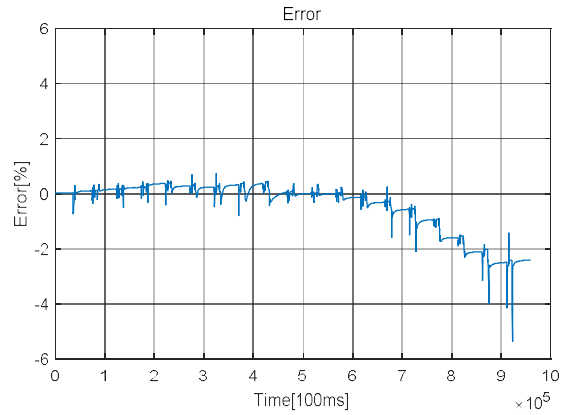


Fig. 21. Single cell parameter simulation error.

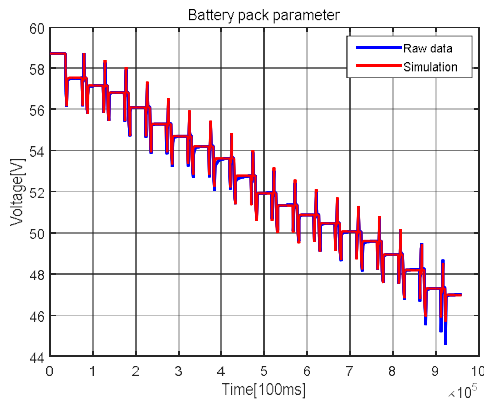


Fig. 20. Battery pack parameter simulation.

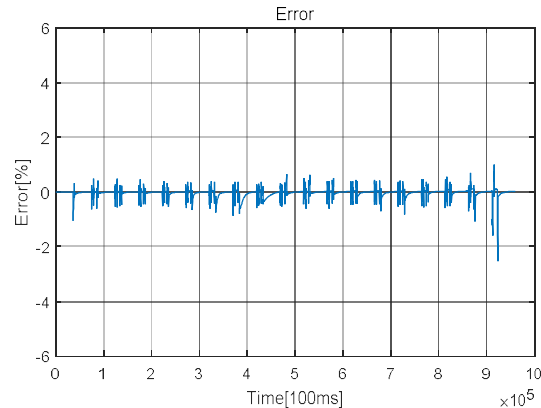


Fig. 22. Battery pack parameter simulation error.

로 확장하였다. 저항 값의 경우 전체적인 경향성은 일치하지만, 배터리 팩의 셀 간 연결, 장비의 정확도 및 셀과 배터리팩 내부 셀의 저항 불균형과 같은 변수로 인하여 차이가 있다.

4.4 시뮬레이션 및 결과 분석

그림 10의 회로도를 통해 단일 셀에서 확장된 파라미터와 배터리 팩의 파라미터를 검증하였다. 각각의 파라미터를 접목시켜 단자 전압과 오차율을 나타내었으며, 두 파라미터간 SOC 추정 결과를 비교하였다.

그림 19, 20은 단자전압을 실제 실험데이터와 시뮬레이션 결과를 비교한 그래프이며, 그림 21, 22를 통해 오차율을 나타내었다. 단일 셀에서 확장된 파라미터를 사용했을 경우, 중간 SOC 영역이후부터 오차율이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 오차가 커지는 원인은 그림 16, 17의 OCV 비교 그래프에서 확인할 수 있다. SOC 낮은 영역대로 갈수록 배터리 팩 내부의 셀간 편차가 커지게 됨으로써 단일 셀과 배터리 팩의 OCV가 상이하게 되어 오차가 증가하게 된다.

그림 23의 전류적산법 기반의 SOC추정 방식은 계산 과정이 진행됨에 따라 오차가 누적되는 단점이 있다. 단일 셀과 배터리 팩에서의 용량 값이 약 0.53Ah정도 차

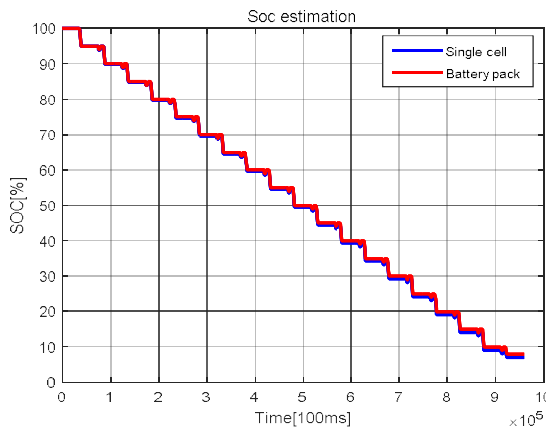
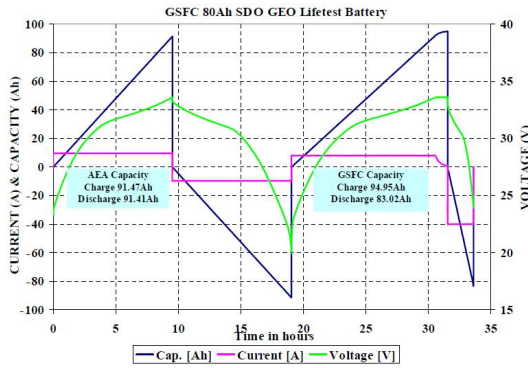


Fig. 23. Single cell and battery pack SOC estimation.

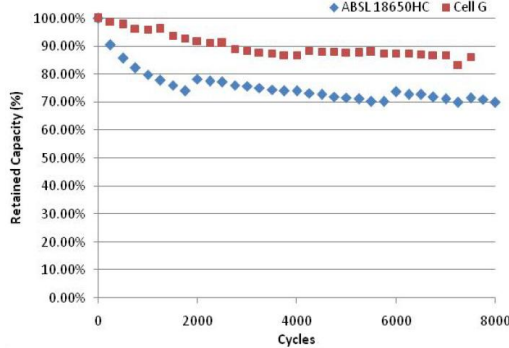
이와 배터리 팩 내부 균일도가 일정하지 않아 인해 SOC의 차이가 발생하였다. 단일 셀과 배터리 팩 간의 최대 SOC 차이는 약 0.9%이다.

5. 결 론

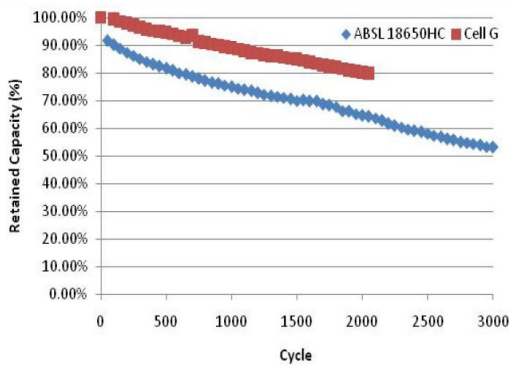
등가회로 모델을 통해 단일 셀 과 배터리 팩의 파라미터 검증 결과 SOC 약 30% 영역에서부터 오차가 급격



(a) GEO battery life test profile



(b) 20% DOD cycling test



(c) 100% DOD cycling test

Fig. 24. Cycling test according to DOD^[5].

하게 커지는 것을 확인 할 수 있다. 낮은 SOC 영역으로 갈수록 셀 간 OCV의 값의 편차가 발생하여 SOC 추정의 오차가 발생하였다. 단일 셀을 통해 배터리 팩의 내부 상태 추정을 할 시 내부 파라미터의 불균형으로 인해 추정 오차가 생기는 것을 확인하였다.

그림 24(a)는 정지궤도 위성의 실험 프로파일이다. 정지궤도 위성의 배터리의 경우 배터리의 효율적인 활용을 위해 SOC 98% 영역부터 28% 영역 실험을 하였다^[5]. 그림 24(b)와 (c) 참고 하여 인공위성용 배터리팩의 경우 DOD(depth-of-discharge)가 높을수록 배터리의 수명은 급격하게 짧아지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상 때문에 인공위성 및 기타 어플리케이션의 경우 SOC 98%부터 28% 영역까지만 구동을 하게 된다. 시뮬

레이션 결과 또한 단일 셀을 통한 확장된 파라미터를 사용할 경우 높은 SOC 영역(SOC 30% 이상)에서는 높은 추정 결과를 보이는 것을 확인할 수 있다.

본 논문에서 소개한 SOC 추정 식(식 (1))과 같은 경우 셀의 동작시간이 진행됨에 따라 오차가 누적되는 단점이 있다. 따라서 추후 연구과제로는 EKF(extended Kalman filter) 및 ANN(artificial network neural)과 같은 적응제어 방식을 사용함으로써 모델의 성능개선이 필요하다. 정확한 배터리 내부 상태 추정을 위한 셀 각각에 증가회로 모델 설계가 요구된다.

이 논문은 2018년 한국연구재단의 정지궤도복합 위성개발사업(NRF-2018M1A3A4A03058068) 및 한국 전력공사의 2016년 선정 기초연구개발과제 (RX17XA05-55) 연구비에 의해 수행된 연구입니다.

References

- [1] J. C. Koo, "Space technology geostationary satellite battery trend," *The Transactions of the KIEE*, Vol. 4, No. 5, pp. 18-26, May 2008.
- [2] A. Rahmoun, "Modelling of li-ion batteries using equivalent circuit diagrams," *Przeglad Elektrotechniczny (Electrical Review)*, R. 88 NR 7b/2012, pp. 152-156, 2012.
- [3] H. He, R. Xiong, and J. Fan, "Evaluation of lithium-ion battery equivalent circuit models for state of charge estimation by an experimental approach," Vol. 4, *Energies* 2011, pp. 582-598, Mar. 2011.
- [4] F. K. Abo-Elyousr, F. N. Abd-Elbar, H. A. Abo-Zaid, and G. H. Rim, "Accurate modeling of primatic type high current lithium-iron-phosphate(LiFePO4) Battery for automotive applications," *Energy and Power Engineering*, Vol. 4, No. 6, pp. 465-481, 2012.
- [5] T. Max, "ABSL's Cost Li-Ion Cell Suite Development," in *2007 NASA Battery Workshop*, 2007.

박진형(朴珍亨)

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



이평연(李平淵)

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





장성수(張成秀)

1969년 9월 4일생. 1995년~현재 한국항공우주연구원 위성연구본부 정지궤도복합위성사업단.



김종훈(金鍾勳)

1979년 4월 22일생. 2005년 충남대 정보통신공학부 전기전자전파전공 졸업. 2012년 서울대 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(공학; 석박통합과정). 2012년 3월~2013년 8월 삼성SDI ES사업부 책임연구원. 2013년 9월~2016년 8월 조선대학교 전기공학과 조교수. 2016년 9월~현재 충남대학교 전기공학과 조교수. 2018년 8월~현재 한국과학기술원 친환경센스마트자동차연구센터 겸직교수. 2015년~현재 JPE Associate Editor. 2016년~현재 전력전자학회지 편집위원. 2017년 전력전자학회 학술위원. 2019년~현재 IEEE Senior Member.