

리튬이온전지 재사용을 위한 간단한 방법의 잔여용량 예측 방안

박진영
(주)이피에스텍 연구소

A Simple Method for Predicting Remaining Capacity for Reusing Lithium-ion Batteries

Jin-Young Park
EPS Tech Laboratory

요약 세계 자동차 기업들의 노력으로 전기차의 주행거리와 성능이 향상되면서 전기차에 대한 소비자들의 관심과 기대가 높아져 전기차의 수요도 동시에 증가하고 있는 추세이다. 이는 향후 전기차로부터 수많은 재사용 또는 재활용 배터리가 발생될 것임을 예측할 수 있다. 이렇게 발생된 배터리의 재사용 및 재활용 여부를 판단하기 위해서 잔존 용량 시험을 수행하면 된다. 하지만 이와 같은 테스트는 완전 방전부터 시작하여 완전 충전까지 1 사이클 진행해야 하기에 시간이 많이 소모된다. 이에 짧은 시간 안에 배터리의 용량 판단을 수행하기 위한 방안이 필요하다. 본 논문에서는 재사용 및 재활용 리튬이온 배터리의 잔존 용량을 신속하게 추정하는 배터리 테스트 방법을 제안한다. 재사용 배터리를 보조 RC 네트워크 모델을 사용하여 수학적 모델링을 수행하고, 배터리의 구간별 충전 시험을 통해 배터리의 매개변수를 추출하여 시뮬레이션 모델을 구성한다. 시뮬레이션 모델은 실제 배터리 충·방전 그래프와 비교하여 모델의 효용성을 검증하며, 배터리 충·방전 특성 그래프에서 충전 용량(SOC: State of charge)에 따른 선형 구간 선정을 통하여 해당 구간 내에서 펄스 충전(PC: Pulse Charge) 펄스 방전(PD: Pulse Discharge)을 통해 배터리의 잔량을 예측함으로써 제안 방법의 실현 가능성을 확인하였다.

Abstract As the driving range and performance of electric vehicles have improved through the efforts of global automobile companies, consumer interest and expectations for electric vehicles have increased, leading to growing demand. This trend suggests that numerous reusable or recyclable batteries will be generated from electric vehicles in the future. To determine whether these batteries can be reused or should be recycled, a test for the remaining capacity can be performed. However, such a test is time-consuming because it requires one complete cycle from full discharge to full charge. Therefore, a method is needed to determine battery capacity in a short time. In this paper, we propose a battery testing method to quickly estimate the remaining capacity of used lithium-ion batteries. We mathematically model the used battery by using an auxiliary RC network model, and we construct a simulation model by extracting battery parameters through charging tests for each section of the battery. The simulation model's validity is confirmed by comparing it with the actual battery charge/discharge graph. We then predict the remaining capacity through pulse charge and pulse discharge within the selected linear section according to the state of charge (SOC) in the characteristic battery charge/discharge graph. The feasibility of the proposed method was confirmed.

Keywords : Battery, Reusable Battery, Charging, Electric Vehicle, Simple Test

본 결과물은 2024년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다.
(2021RIS-004)

*Corresponding Author : Jin-Young Park(EPS Tech Laboratory)
email: pjy0079@epstech.co.kr

Received July 9, 2024

Revised August 1, 2024

Accepted August 2, 2024

Published August 31, 2024

1. 서론

기후변화에 대한 협약 체제인 파리기후변화협약이 채택됨에 따라 지난 2021년부터 시행되어 국가별로 기온 상승을 제한하기 위한 온실가스 감축을 이행해야 한다. 이에 환경보호를 목적으로 전 세계 사람들의 패러다임 변화되고 있으며, 이미 미국 캘리포니아주, EU(유럽연합)에서는 2035년부터 탄소중립을 위해 내연기관 신차 판매 금지를 추진하고 영국, 캐나다, 중국은 2030~2040년 사이 내연기관 차량 판매 금지를 추진하고 있다. 또한, 세계 자동차 회사는 내연기관 자동차의 연구개발 투자 비율을 감축시키는 반면 친환경 차량에 대한 연구 개발에는 투자 비중이 증가하고 있어 내연기관 차량보다 전기차에 관심이 높아지고 있는 실정이다[1,2].

배터리의 상태 및 성능을 분석하는데 실험을 통해 진행하기에는 시간적, 물질적 어려움이 있어 배터리를 분석하기 위해 배터리의 수학적 모델링이 필요하기에 Chen, D.등은 충전 상태 부분의 모델을 통해 배터리의 SOC 값을 실시간으로 추정하고 SOC와 개방 전압 간의 일대일 대응 관계를 통한 모델의 정확성 향상 방법을 제시하였고[3], Kim, J.등은 MATLAB/Simulink 환경에서 리튬이온 배터리 셀의 등가회로 모델을 개발하는 연구를 수행하였다[4]. 또한, Schweiger, H. G.등은 배터리 효율을 결정하는 데 도움이 되는 정확한 전기 등가 모델 선정을 위해 다양한 전기 모델에 대해 시뮬레이션을 수행하고 장·단점을 분석하였다[5].

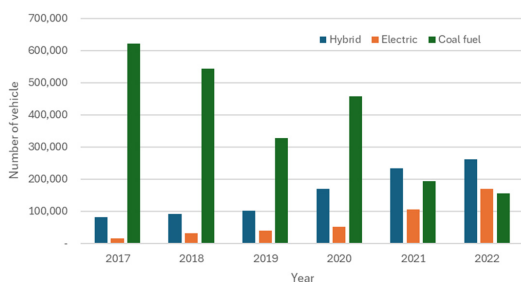


Fig. 1. Yearly Vehicle Registration Status

환경규제로 인하여 친환경 차량의 공급과 수요가 증가함에 따라 전기차의 보급이 빠르게 확산되고 있다. Fig. 1과 같이 전기차의 성장률은 급상승하고 있으며, 2021년 국내 전기차 등록 대수는 약 10만 대 이고, 이는 2021년 등록된 전체 차량의 약 20 %를 차지한다.

전기차의 보급이 증가하면서 수명이 다하거나 성능이 감소하여 배출되는 재사용 배터리의 수가 점차적으로 증

가하는 추세이며, Fig. 2와 같이 2029년 국내 재사용 배터리 배출량은 약 8만 개가 발생할 것으로 전망되어 재사용 배터리에서 회수되는 자원의 가치는 약 2천억 원에 달할 것이다. 따라서 세계적인 “재사용 배터리” 시장은 2025년 약 78억 달러(약10조 원)로 높은 성장세를 보일 것으로 전망되고 있다[6-9].

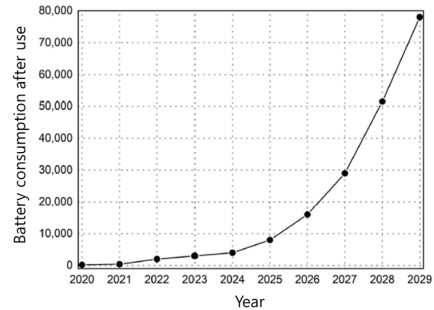


Fig. 2. Predicted Annual Generation of Reused Batteries

전기차의 보급이 활발해지면서 환경오염에 대한 문제도 같이 이슈화되고 있다. 환경문제는 폐차된 전기차에서 나오는 재사용 배터리에 대한 문제로 이는 환경오염에 큰 영향을 끼치게 되기에 배터리를 재사용하거나 재활용하기 위한 대책이 필요하다. 이와 같은 문제를 해소하기 위해서 배터리의 상태를 평가하기 위한 다양한 방법이 제시되고 있다. Fig. 3과 같은 프로세스로 전기차 재사용 배터리의 성능평가를 하였을 때 잔존 성능에 따라 재사용/재활용이 분류되며, 일반적으로 배터리는 초기성능 대비 80 % 이하로 저하되면 재활용 배터리로 분류한다. 하지만 배터리의 잔존 성능을 정확하게 파악하기 위해서는 배터리를 1 사이클 완속 충·방전을 해야 하지만 이는 일반근로자 기준 3일의 시간이 소요된다. 이렇듯 많은 시간이 소요되기에 현재 배터리 검사는 방전부터 시작하여 0.3 C_rate로 충·방전이 진행되고 충전 후에는 휴지시간을 갖는 방식으로 하루 1개의 배터리에 대한 잔존 성능평가가 진행되고 있다.



Fig. 3. Secondary Battery Reuse/Recycling Process

최근 민간 차원에서의 배터리 재활용이 가능해짐으로 시장 개화가 본격화되고 있지만, 환경부에서 진행되는

배터리 성능평가에도 오차율이 약 5 %가 발생하며, 신속 정확한 성능평가 방안이 없는 실정이다. 이와 같은 오차율은 배터리의 판매자 또는 구매자 입장에서 작은 값으로 보기 어렵고, 재사용 배터리 1개의 잔존 성능평가를 위해 많은 시간이 소요되기에 기하급수적으로 증가하는 재사용 배터리를 검사하는 시간을 대폭 감축할 필요가 있다. 하지만 현재 재사용 배터리의 수명을 파악하기 위해서는 단시간에 확인할 수 있는 방법이 필요하지만 대부분의 연구들은 배터리의 수명 및 상태에 대해서 정확한 정보를 예측하는데 중점을 두고 있어 재사용 배터리의 잔존 성능을 평가하는데 상당한 시간과 비용이 소요되고 있다. 따라서 본 연구에서는 잔존 성능을 예측하기 위해서 배터리 셀 단위가 아닌 배터리 팩 단위로 진행하고자 하며, 전기차 재사용 배터리에 대하여 MATLAB/Simulink 기반의 비선형 동적 시뮬레이션 모델을 수립하고 재사용 배터리의 잔존 성능을 예측하기 위한 충·방전 방법 및 데이터 분석 방법을 제안하고자 한다.

2. 시뮬레이션 모델링

2.1 배터리 기본 특성

2.1.1 리튬이온 배터리의 특징

리튬이온 배터리는 충·방전 전압이 높은 양극(Cathode), 충·방전 전압이 낮은 음극(Anode), 전기적으로 절연을 위한 분리막(separator) 그리고 리튬이온의 이동 매개체인 전해질(electrolyte)로 구성되어 있다. 이와 같은 배터리는 충전 과정을 통해 재사용이 가능한 반영구적인 배터리로 에너지 밀도가 높고, 충·방전 사이클 특성이 우수하며, 자기 방전율이 작은 특징이 있다. 이와 같은 리튬이온 배터리 모델링에 앞서 현대자동차 코나 EV 차량에서 사용된 잔존 성능 약 94 %의 재사용 배터리를 이용하여 배터리의 단자전압과 잔존 충전용량을 확인하기 위해 충·방전을 수행하였다[10-12].

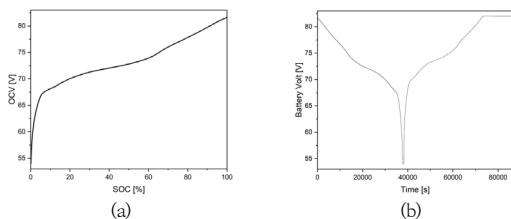


Fig. 4. Lithium-ion Battery Charge-Discharge Characterist
(a) OCV Curve as a Function of SOC,
(b) Terminal Voltage during Charging and Discharging

Fig. 4(a)는 코나 EV 차량의 배터리를 충전 및 방전할 때 배터리의 SOC 0-100 %에 따른 배터리의 단자전압 (OCV: Open Circuit Voltage) 전압을 그래프로 나타낸 그림이다. 리튬이온 배터리의 OCV는 SOC의 감소에 따라 선형적으로 감소하다 SOC 약 5 %부터 OCV가 급격하게 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 안전한 사용을 위해 배터리의 SOC가 낮을 때는 더욱 과방전에 유의해야 한다. 또한, 가능한 배터리의 수명을 유지하기 위해서는 방전심도(DOD: Depth of Discharge)를 작게 하는 것이 유리하다.

Fig. 4(b)는 0.1 C_{rate}의 충전 전류로 배터리를 충·방전하였을 때의 배터리의 단자전압 그래프이다. 충전 시에 OCV는 방전 시보다 높은 전압을 나타내는 것으로 충·방전 시 배터리의 OCV는 히스테리시스 특성을 갖는 것을 알 수 있다.

2.2 배터리 모델링

전기차 배터리는 급속 충·방전이 가능하고, 높은 에너지 밀도를 가지고 있기에 배터리의 수명과 상태를 예측하기 위해 배터리의 모델 개발 방법을 전기화학 모델 (Electrochemical Model), 전기적 등가회로 모델 (Electrical Equivalent Circuit Model)로 구분할 수 있다. 전기적 배터리 등가회로 모델 중에서 배터리 모델로 사용할 수 있는 모델은 데브난 등가회로 모델, 바르부르크 임피던스 모델, 실시간 등가회로 모델로 볼 수 있으며, 각 모델에 대한 특징을 Table 1에 정리하였다.

Table 1. Characteristics of Battery Equivalent Circuit Models

	Thevenin Equivalence Circuit Model	Warburg Impedance Model	Runtime-Based Equivalence Circuit Model
DC	No	No	Yes
AC	Limited	Yes	No
Transient phenomenon	Yes	Limited	Yes
Real-time battery status	No	No	Yes1

본 연구에서는 충·방전 알고리즘 및 배터리 특성 곡선 분석 방법을 통해 재사용 배터리의 잔존 성능 확인에 중점을 두고 있다. 따라서 데브난 등가회로 모델이나 바르부르크 임피던스 모델보다는 실시간 등가회로 모델이 더욱 적합한 배터리 모델이기에 실시간 등가회로 모델을 기반으로 재사용 배터리를 모델링하고자 한다.

실시간 등가회로 모델은 데브난 등가회로 모델기반에 배터리의 실시간 상태를 적용한 모델로써 Fig. 5와 같이 나타낼 수 있다. Fig. 5의 왼쪽 회로는 실시간 배터리의 상태를 나타내는 부분이며, 오른쪽 회로는 데브난 등가회로 모델과 유사한 RC 네트워크 부분이다.

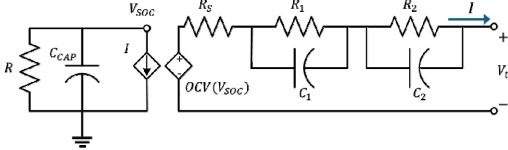


Fig. 5. Depicts the Equivalent Circuit Model with Real-time State Applied

2.2.1 배터리 시뮬레이션 모델 구성 및 검증

- 재사용 배터리 동적 등가회로 모델

MATLAB/Simulink를 이용한 재사용 배터리 시뮬레이션 모델을 설계하기 앞서 실시간 등가회로 모델을 동적 등가회로 모델로 수정하면 Fig. 6과 같이 표현할 수 있다. 여기서 전압 소스는 OCV로 나타내며, 직렬저항 R_S 는 배터리의 내부저항, 2 RC 네트워크(R_1, R_2, C_1, C_2)는 전압의 과도 응답 특성화 unit이고, V_t 는 배터리의 단자전압이다[13].

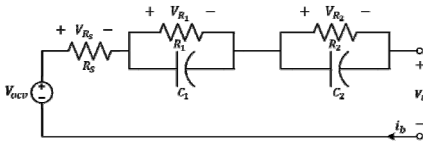


Fig. 6. Illustrates the Electrical Equivalent Circuit

재사용 배터리 모델에서 SOC는 배터리의 잔존 성능을 기준으로 계산되며, 이 모델에서 매개변수는 SOC와 전류에 따라 달라진다.

- SOC 계산

재사용 배터리의 SOC를 계산하기 위한 방정식은 Eq. (1)과 같이 표현된다.

$$SOC = SOC_0 - \int \frac{I \times 100}{\alpha C \times 3600} dt \quad (1)$$

where SOC_0 denotes the SOC value of the initial reused battery, i denotes the current, and αC denotes the available capacity of the battery.

- OCV 계산

배터리의 OCV는 평형상태에서의 전압으로 실제 배터리에서 사용되는 중요한 매개변수 중 하나이다. 여기서 OCV는 SOC와 밀접한 관계를 유지하고 있으므로 OCV-SOC의 관계식은 다항함수를 통해 Eq. (2)와 같은 특성과 방정식으로 도출할 수 있다.

$$OCV = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + a_5x^5 + a_6x^6 + a_7x^7 + a_8x^8 + a_9x^9 \quad (2)$$

- 2차 RC 네트워크 전압 계산

2차 RC 네트워크는 재사용 배터리 전압의 과도응답 특성에 해당된다. 2차 병렬 회로는 1차 병렬 회로로 해석할 수 있으며, Fig. 7과 같다. 여기서 키르히호프의 전류 법칙을 적용하면 Eq. (3)과 같이 표현된다.

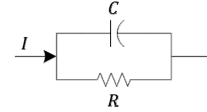


Fig. 7. RC Network

$$I = \frac{V}{R} + C \frac{dV}{dt} \quad (3)$$

Eq. (3)의 라플라스 변환 후 초기 전압값은 0으로 가정하고 식을 정리하면 다음과 같으며, 두 개의 병렬 RC 회로에 동일하게 적용하여 계산할 수 있다.

$$V = \left(\frac{1}{s} \right) \left(\frac{I}{C} - \frac{V}{RC} \right) \quad (4)$$

- 내부 전압 강하 V_R 계산

V_R 은 재사용 배터리의 내부저항에서 발생하는 전압 강하를 의미하며, 옴의법칙을 이용하여 Eq. (5)와 같이 계산할 수 있다.

$$V_R = I \times R_S \quad (5)$$

재사용 배터리의 단자전압 V_t 는 Eq. (6)과 같다.

$$V_t = OCV - V_1 - V_2 - V_R \quad (6)$$

2.2.2 재사용 배터리 모델 매개변수 추출

제한된 재사용 배터리 모델의 RC 병렬 회로 매개변수 식별 방법은 실험적인 PC 및 PD 특성화 테스트 및 휴지 시간 동안의 전압 안정화 특성 분석을 기반으로 한다. 실험의 정확한 결과를 위해서 방전 및 충전 속도는 일정하게

수행되어야 한다. 일반적으로 휴지시간은 5~60분, Pulse 시간은 20~30 %가 사용된다. Fig. 8은 0.1 C_{rate}, 20 % Pulse, 20분의 휴지시간에서 PD 시험 중 단자전압이 안정화되는 그래프이다. 각각의 PC 및 PD 시험은 전체 SOC 범위를 특성화할 수 있다. 휴지시간을 구간별로 구분하여 해당 모델의 매개변수를 식별하는데 사용된다.

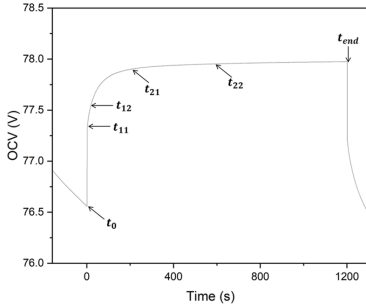


Fig. 8. Voltage Stabilization Characteristics During Pulse Discharge Test

매개변수는 SOC, 온도 및 충·방전 전류에 영향을 준다. 본 연구에서는 충전용(양 전류) 및 방전용(음 전류)으로 매개변수가 2개의 세트로 구분되며, 매개변수는 함수 또는 다차원의 Lookup Table로 구현될 수 있다. 먼저 SOC를 알기 위해서는 SOC를 추정해야 한다. 이는 배터리의 용량에 대한 사용 가능한 용량으로 정의된다.

$$SOC = \frac{Q}{Q_{use}} \quad (7)$$

where Q denotes the available capacity of the battery, and Q_{use} denotes the total energy capacity of the battery.

SOC 는 차원이 없으며, 0~1의 범위의 백분율로 표시하는 경우가 많다. 이와 같은 SOC 는 쿨롱계산 방법으로 구할 수 있다.

$$SOC = SOC_0 - \frac{1}{Q_{use}} \int i_b dt \quad (8)$$

where SOC_0 denotes the soc of the initial battery and i_b denotes the battery current.

SOC 는 먼저 실제 용량을 측정하여 사용하는 것이 좋다. Ohmic 저항 R_s 는 휴지시간이 시작되거나 끝나는 순간에 간단하게 식별가능하다.

$$R_o = \left| \frac{\Delta V}{\Delta I} \right| \quad (9)$$

where ΔV denotes the instantaneous voltage difference at the current point, and ΔI denotes the size of the current in the corresponding section.

n 차 모델의 경우 다음 시간 영역 방정식은 휴지시간동안 단자 전압을 나타낸다.

$$v_b = v_{ocv} - \sum_{i=1}^n V_i e^{-\frac{t}{\tau_i}} \quad (10)$$

where V_i denotes the initial voltage of the i th RC parallel circuit, and τ_i denotes the time constant corresponding to $R_i C_i$.

RC 병렬회로는 배터리 양극과 음극의 활성화 분극 또는 전하 이동, 과전압 및 농도 분극에 대한 모델링하는데 사용된다. 휴지시간동안 배터리의 단자 전압은 분극이 감소함에 따라 OCV에 접근하며, 최종적으로 평형에 도달하게 된다. Eq. (10)에서 RC 전압은 시간상수 τ_i 에 의해 결정되는 감쇠율에 따라 감소하고 최종적으로 배터리 전압과 OCV는 같은 값으로 수렴하게 된다.

PC 또는 PD 시험에서 휴지시간 동안 회로의 과도 전압 즉, Fig. 7의 전기적 등가회로 저항-커패시터 네트워크 전체 전압은 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

$$v_r(t) = V_{ocv} - v_b(t) \quad (11)$$

where V_{ocv} denotes OCV, which remains constant during the rest period, and $v_b(t)$ denotes the battery voltage over time.

휴지시간이 충분히 길어 전압이 정상상태에 도달한다고 가정하면 각 휴지시간이 끝날 때 최종 전압 값을 취하여 OCV를 식별할 수 있다. 만약 더 짧은 휴지시간을 사용하는 경우 OCV 식별을 위한 다른 방법이 권장되며, 신속히 식별할 수 있는 방법은 문헌 [15]에 제시되어 있다.

Eq. (11)에서 과도 전압은 실험 중 직접 측정할 수는 없지만 실험이 종료된 이후 데이터를 통해 확인 할 수 있다. 전기적 등가회로 모델 구조를 가정하면 휴지시간 동안 과도 전압은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_r(t) = \sum_{i=1}^n V_i e^{-\frac{t}{\tau_i}} \quad (12)$$

where V_i denotes the initial voltage of the i th RC circuit and τ_i denotes the RC time constant.

PC와 PD 실험의 경우 과도 전압 v_r 과 모든 초기 전압 V_i 는 항상 같은 부호를 갖게 된다. 즉, 방전이 양의

전류 방향으로 정의될 때 방전은 양수로 표현되고, 충전은 음수로 표현되게 된다. 휴지시간의 시작 시점은 전류가 0으로 되는 시점으로 ohmic 저항에 의해 전압이 순간적으로 변화한 직후로 추출되어야 하며, 휴지시간의 종료 시점은 다음 시퀀스가 시작되기 직전의 시점으로 추출되어야 한다. 이후 매개변수 V_i 및 τ_i 는 과도 전압 v_r 의 데이터로부터 추정할 수 있다[14].

본 연구에서는 2-RC 네트워크를 사용하기 때문에 다음의 방법으로 추출할 것이며, 2-RC 네트워크의 경우 과도 전압은 다음과 같이 정의된다.

$$v_r(t) = V_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + V_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (13)$$

매개변수 추출을 위해서 휴지시간을 각각 짧은 시정수 분기와 긴 시정수 분기로 두 부분으로 나누어 진행한다. 모델 구조에 더 많은 RC 네트워크가 있다면 시정수 분기는 RC 네트워크 수만큼 나누어야 한다. 먼저 휴지시간의 다음과 같이 시정수 분기 시점에 대한 정의가 필요하다.

- t_s 는 방전이 끝나고 전류가 감소하는 순간
- t_{11} 는 전류가 0으로 감소하는 순간으로 휴지시간이 시작되는 시간임과 동시에 첫 번째 RC 시정수 영역의 시작 시간
- t_{12} 는 첫 번째 RC 시정수 영역의 종료 시간
- t_{21} 는 두 번째 RC 시정수 영역의 시작 시간
- t_{22} 는 두 번째 RC 시정수 영역의 종료 시간
- t_{end} 는 휴지시간이 종료되는 시간

휴지시간의 시간 분할은 Fig. 8에 표시되어 있으며, 분할된 영역 사이에는 시간 간격이 있어야 하며, 시간 간격 사이 전압의 변화는 최대한 0에 근접해야 한다. 첫 번째 시정수 영역의 시작 시간은 첫 번째 시정수 영역의 3배보다 늦어야 한다. 이 조건은 짧은 시정수 가지의 전압이 초기 값의 5 % 미만으로 감소되었음을 알 수 있다. 이는 긴 시정수의 매개변수 추출에 미치는 영향은 미미하지만 매개변수 추출 이전에는 예측된 시정수를 정확히 알 수 없으므로 이 조건은 후에 확인이 요구되기에 두 번째 영역부터 매개변수 추출을 수행한다.

단, 짧은 시정수는 수십 초 정도이고, 긴 시정수는 분 또는 수십 분 정도로 두 시정수는 서로 다른 시간 척도라고 가정한다. 또한, 두 번째 시간 창을 시작부분에서 빠른 시정 전압이 0으로 감소했다고 가정한다. 두 번째 시정수 영역의 시작 및 종료 순간은 t_3 과 t_{22} 일 때 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$v_r(t) = v_r(t_{21}) e^{-\frac{t-t_{21}}{\tau_2}} \quad \text{for } t \geq t_{21} \quad (14)$$

where $v_r(t_{21})$ denotes the voltage at the start time of the second time constant region

시간을 두 번째 시정수 구간의 종료 시간으로 설정하면($t=t_{21}$) 시정수 τ_2 를 얻을 수 있다.

$$\hat{\tau}_2 = \frac{t_{22} - t_{21}}{\ln\left(\frac{v_r(t_{21})}{v_r(t_{22})}\right)} \quad \text{for } v_r \neq 0 \quad (15)$$

측정된 크기와 구별하기 위해서 “ $\hat{\cdot}$ ”을 사용한다. 이 방정식은 전압의 마이너스 부호가 서로 상쇄되기 때문에 PC와 PD 실험 모두에 적용하여 사용할 수 있다. 하지만 매우 긴 휴지시간 후에는 과도 전압이 0에 가까워지기 때문에 시정수 결정을 위한 종료시간은 과도 전압이 0에 매우 가깝지 않도록 적절하게 선택되어야 한다. 그러면 t_{11} 에서 두 번째 분기의 초기전압을 얻을 수 있다.

$$\hat{V}_2 = v_r(t_{21}) e^{-\frac{t_{21}}{\tau_2}} \quad (16)$$

두 번째 시정수 분기의 예측 전압은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\hat{v}_2 = \hat{V}_2 v_r(t_{21}) e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad \text{for } t \geq 0 \quad (17)$$

V_2 와 τ_2 를 구한 후 첫 번째 시정수 영역을 사용하여 짧은 RC 시정수의 매개변수를 추출할 수 있다. 이와 같은 매개변수는 두 번째 시정수 영역과 동일한 방식으로 추출할 수 있지만 실험 데이터에서 예측된 긴 시정수 분기 전압을 빼고 데이터를 먼저 전처리 해야한다.

$$v'_r(t) = v_r(t) - \hat{v}_2(t) = V_{ocv} - v_b(t) - \hat{v}_2(t) \quad (18)$$

여기서 “ $'$ ”는 예측된 긴 시정 전압을 뺀 후 변경된 전압을 나타내며, 변경된 과도 전압을 다음과 같이 표현된다.

$$v'_r(t) = v'_r(t_{11}) e^{-\frac{t-t_{11}}{\tau_1}} \quad \text{for } t \geq t_{11} \quad (19)$$

$v_r(t_{11})$ 은 첫 번째 시정수 영역에서 변경된 과도 전압이며, 이후 시정수를 계산할 수 있다.

$$\hat{\tau}_1 = \frac{t_{12} - t_{11}}{\ln\left(\frac{v'_r(t_{11})}{v'_r(t_{12})}\right)} \quad \text{for } v'_r \neq 0 \quad (20)$$

t_{11} 에서 첫 번째 시정수 영역의 초기 전압은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\hat{V}_1 = v'_r(t_{11})e^{\frac{t_{11}}{\tau_1}} \quad (21)$$

첫 번째 RC 네트워크의 예측 전압과 총 과도전압은 Eq. (22), Eq. (23)과 같이 표현된다.

$$\hat{v}_1(t) = \hat{V}_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} \quad \text{for } t \geq 0 \quad (22)$$

$$\hat{v}_r = \hat{V}_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + \hat{V}_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (23)$$

n차 모델의 경우 i번째 RC 네트워크의 시정수 $\hat{\tau}_i$, 초기전압 $\hat{V}_i$ 및 예측 전압 $\hat{v}_i$ 뿐만아니라 과도 전압 $v_{r_i}(t)$ 에 대한 표현식은 다음과 정의된다.

$$v_{r_i}(t) = \begin{cases} V_{ocv} - v_b(t), & \text{if } i = n \\ V_{ocv} - v_b(t) - \sum_{i=1}^n \hat{v}_{i+1}(t), & \text{if } i < n \end{cases} \quad (24)$$

$$\hat{r}_i = \frac{t_{i2} - t_{i1}}{\ln\left(\frac{v_{r_i}(t_{i1})}{v_{r_i}(t_{i2})}\right)} \quad \text{for } v_{r_i} \neq 0 \quad (25)$$

$$\hat{V}_i = v_{r_i}(t_{i1})e^{\frac{t_{i1}}{\hat{\tau}_i}} \quad (26)$$

저항 R_i 와 커패시턴스 C_i 값은 전류와 휴지시간을 사용하여 다음과 같이 추출할 수 있다.

$$R_i = \frac{\hat{V}_i}{I \left(1 - e^{-\frac{t}{\hat{\tau}_i}}\right)} \quad (27)$$

$$C_i = \frac{\hat{\tau}_i}{R_i} \quad (28)$$

2.2.3 재사용 배터리 시뮬레이션 모델

재사용 배터리 시뮬레이션을 수행하기 위해 Fig. 9와 같이 MATLAB/Simulink를 이용해 시뮬레이션 모델을 설계하였다.

재사용 배터리의 출력 전압은 5개의 시스템에 의해 결정되며, 이 시스템의 구성 Fig. 9와 같이 SOC 연산, 저항 및 커패시터 값, OCV 연산, 2차 RC 네트워크 전압, 내부저항에 의한 전압강하 부분으로 되어있다.

시스템의 입력으로는 입력으로는 SOC의 초기값인 SOC_0 와 전류이며, 출력은 배터리의 단자 전압이다. 여기서 전류는 실시간 SOC 정보를 위해 실제 값으로 계속되어 피드백 된다[15,16].

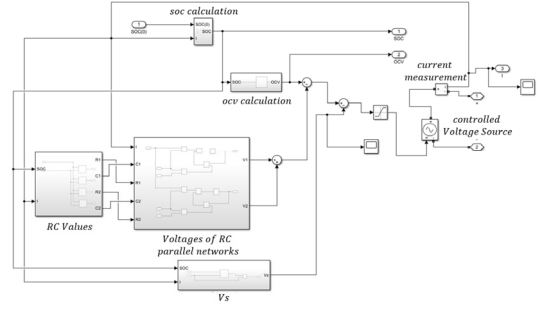


Fig. 9. Simulation Model Using MATLAB/Simulink

SOC 연산 부분에 대하여 세부사항을 Fig. 10에 도시하였다. SOC 연산에서는 전류와 초기 SOC를 이용하며, Eq. (1)을 기반으로 구성되어 있다. 여기서 커패시터는 배터리의 가용용량으로 충·방전 전류에 따라 변화하는 비선형적인 특성을 가지고 있어 Lookup Table을 이용하였으며, 이는 배터리의 용량에 대한 효과를 표현할 수 있다.

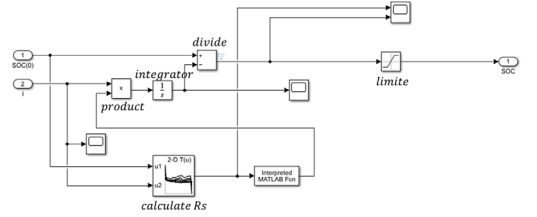


Fig. 10. Depicts the Detailed Model for SOC Computation

내부저항에 대한 전압강하는 Eq. (4)를 통해 구할 수 있으며, 재사용 배터리의 내부저항에 대한 전압강하에 대한 세부사항을 Fig. 11에 나타내었다. 내부저항은 충·방전 전류와 SOC에 영향을 받으며, 비선형적인 특성을 갖는다.

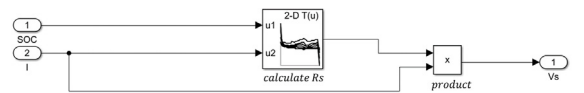


Fig. 11. Voltage Drop Model for Internal Resistance

OCV와 SOC의 관계를 Lookup Table을 통해 Fig. 12와 같이 연산블럭으로 나타낼 수 있다.

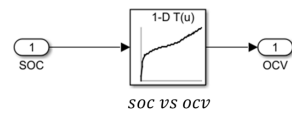


Fig. 12. SOC-OCV Model

2차 RC 네트워크의 저항과 커패시터 성분은 가용용량 커패시터 및 내부저항과 유사하게 SOC 및 충·방전 전류에 대하여 비선형적인 특성을 가지고 있다. 따라서 Fig. 13(a)와 같이 2차원 Lookup Table을 적용하였으며, 이와 같은 2차 RC 모델은 보간법과 보외법을 사용하여 매개변수에 가장 적합한 값을 결정하게 된다

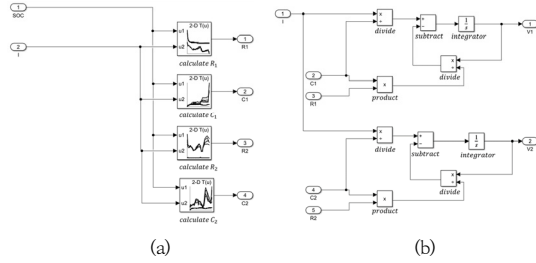


Fig. 13. Battery 2nd Order RC Network Model
(a) Lookup table (b) Voltage Computation Model

2차 RC 네트워크의 전압 V_1 과 V_2 를 연산하기 위해 Eq. (3), Eq. (4)를 이용하여 Fig. 13(b)와 같이 표현하였다. 여기서 V_1 은 첫 번째 RC 회로의 전압을, V_2 는 두 번째 RC 회로의 전압을 나타낸다.

앞서 설명한 것처럼 RC 병렬 네트워크의 각 매개변수 값을 식별할 수 있으며, 단순화를 위해서 노화효과와 자가방전은 무시하고 진행하였다.

매개변수를 식별하고자하는 배터리는 현대자동차의 코나 EV 자동차의 배터리로 코나 EV에서 사용하고 있는 배터리 중 1개의 모듈을 분리하였다. 배터리는 1셀이 4 V, 160 A의 정격을 가지며, 1개의 모듈은 P4S10의 구조로 80 V 160 A의 정격을 갖는 배터리로 11 kwh의 용량을 갖는다.

OCV를 특성화하고 ohmic 저항에 대한 기본 값과 방전에 대한 RC 네트워크 매개변수를 추출하기 위해 0.1 C_rate 0.5 C_rate 속도, 20 % 펄스 및 20분 휴지시간을 사용한 PC 및 PD 실험을 수행하였다.

단순화를 위해 $t_{11} = 3초$, $t_{12} = 15초$, $t_{21} = 230초$ 및 $t_{22} = 600초$ 의 일정한 시간 구간을 설정하였다. 추출된 매개변수는 RC 값 하위 시스템의 2D Lookup table로 작성되며, R_s, R_1, R_2, C_1, C_2 의 그래프는 Fig. 14에 나타내었다.

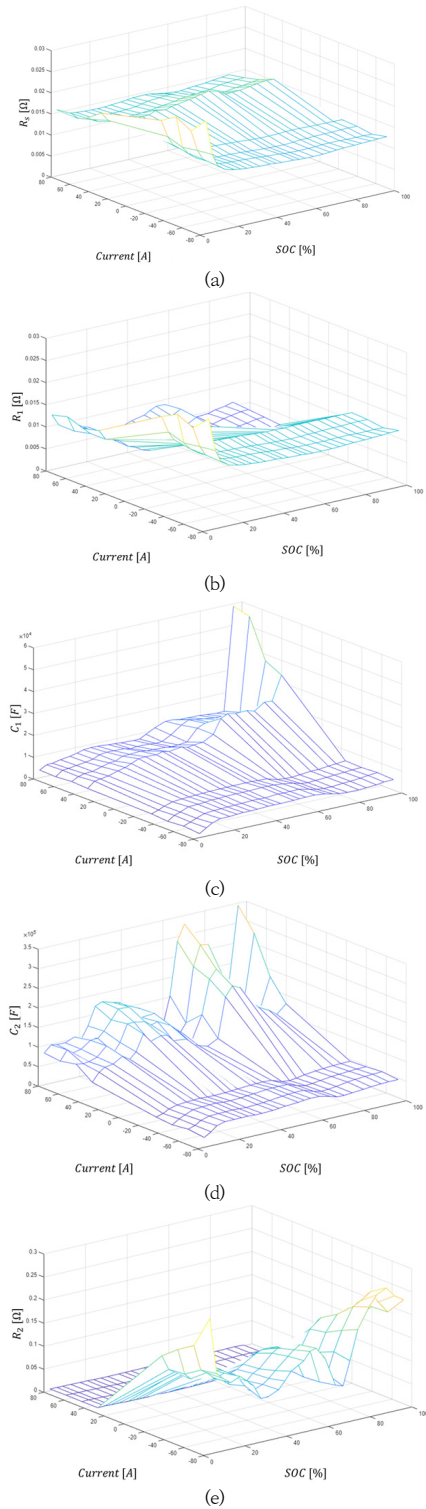


Fig. 14. 2 RC Parameter Graphs
(a) R_s , (b) R_1 , (c) C_1 , (d) R_2 , (e) C_2

2.2.4 재사용 배터리 시뮬레이션 검증

앞서 설계한 시뮬레이션 모델의 검증을 위해 본 연구에서 선정한 배터리의 매개변수를 반영하여 실제 배터리와 시뮬레이션 배터리와의 충·방전 그래프를 통해 비교 분석을 수행하였다.

Fig. 15, 16은 시뮬레이션과 실험 결과를 비교한 것이다. 시뮬레이션과 실험 결과의 0.1 C_rate 충·방전 전압 곡선에서 방전 전압은 잘 일치하는 반면 충전 전압을 10 ~ 30 % 구간에서 약간의 오차가 있으며, 0.1 C_rate PC 전압 그래프에서도 오차가 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 이는 0.1 C_rate에서는 시험 시간이 약 60여 시간이 소요되기 때문에 야간 및 주간 온도 차이에 대한 영향이 있으며, 매개변수 추출 시 모든 C_rate에서 동일한 조건으로 짧은 구간 및 긴 구간의 시정수 추출 위치를 설정하여 진행하였기에 오차가 발생한 것으로 판단된다. 0.2 C_rate에서 0.5 C_rate는 오차가 5 % 미만으로 양호한 것으로 PC 및 PD 조건에서 원활하게 작동할 수 있음을 보여준다.

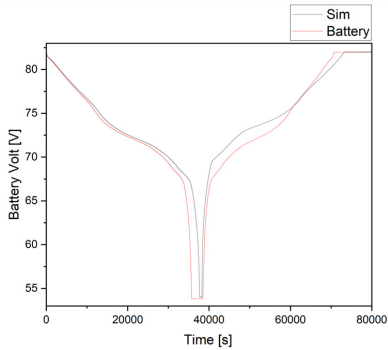
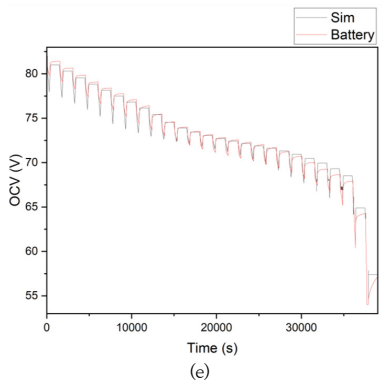
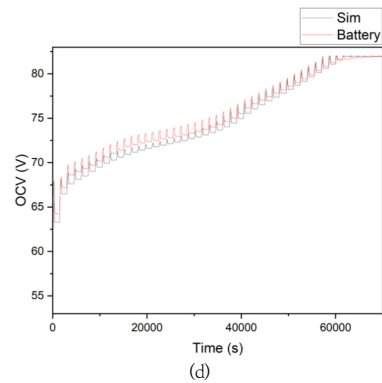
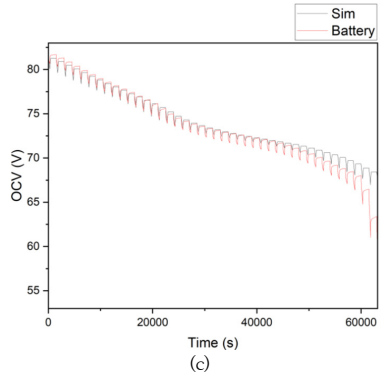
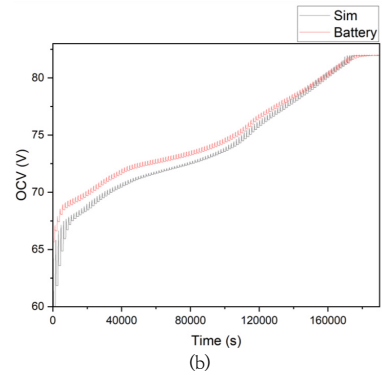
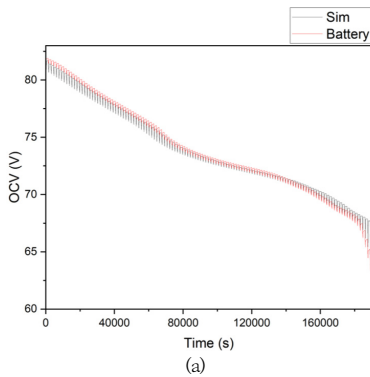


Fig. 15. Comparison of Battery 0.1 C-rate Charge-Discharge Simulation Results



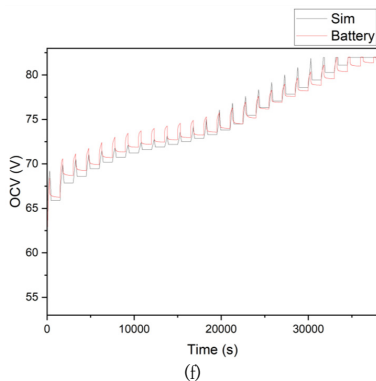


Fig. 16. Comparison of Pulse Charge and Pulse Discharge Simulation Results
(a) 0.1 C-rate Charge, (b) 0.1 C-rate Discharge, (c) 0.3 C-rate Charge, (d) 0.3 C-rate Discharge, (e) 0.5 C-rate Charge, (f) 0.5 C-rate Discharge

3. 재사용 배터리 잔존용량 예측

배터리의 잔존 성능은 배터리 상태(SOH: State of Health)와 노화 매개변수를 사용하여 정의할 수 있으며, RUL과 SOH는 동일한 방법을 사용하여 추정할 수 있기에 매우 밀접한 관계가 있다.

3.1 배터리 잔존 성능 예측 방법

전기차 운전자에게 있어서 배터리의 상태 및 성능정보는 중요한 정보이다. 그렇기에 배터리의 잔존 용량 SOH를 정확하게 예측할 필요가 있다.

2절 배터리 매개변수를 식별하기 위한 사전실험에서 알 수 있듯이 배터리는 충전 및 방전 시 전류의 크기에 따라 배터리의 단자전압인 OCV가 순간적으로 변화하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 특성을 이용하여 배터리의 잔존 성능을 간단하게 잔존 성능을 예측하고자 한다.

다음과 같이 PD 또는 PC 실험과 유사한 두 가지 방법으로 잔존 성능 예측을 제안하고자 한다. 단, SOC 10 % 미만 영역은 전압 변화가 크기 때문에 약 15 % 이상 영역에서 진행하는 것으로 가정한다.

- 첫 번째 방법은 충전 후 휴식, 방전 후 휴식을 1 사이클 진행하여 충전용량 대비 방전용량을 계산하여 배터리의 잔존 성능을 예측할 수 있다.
 - 두 번째 방법은 휴지시간 없이 충전이 종료되는 즉시 방전을 진행하여 충전용량 대비 방전용량의 비율을 계산하여 잔존 성능을 예측할 수 있다.
- 제안된 두 가지 예측은 시뮬레이션과 실험 모두 진행

하였다. 실제 배터리 충·방전 실험을 위해서 대상 배터리는 코나 EV 배터리 중 1개 모듈(11kWh)을 사용하였으며, 충·방전을 위해서 Chroma社의 62000D Series 12 kW 양방향 DC Power Supply를 사용하여 Fig. 17과 같이 구성하였다.

실험에 앞서 배터리의 충전 및 방전 용량은 선형적이지 않기 때문에 Fig. 18과 같이 3개의 구간을 선형 구간으로 가정하였다.



Fig. 17. Kona EV Battery and Charge-Discharge Experimental Setup

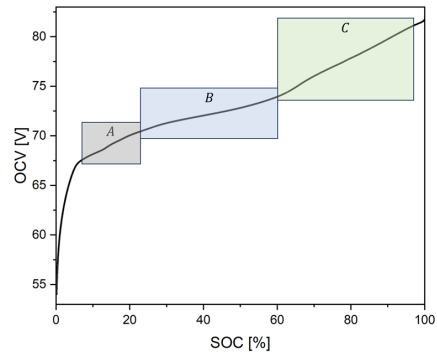


Fig. 18. Linear Segments of Battery Charge Capacity

4. 실험결과 및 분석

본 장에서는 배터리의 잔존 성능을 예측하기 위해 제안된 잔존 성능 예측 방법을 적용하여 시뮬레이션과 실제 배터리 충·방전 시험을 진행하고 실제 완속 충·방전 특성과 비교 분석을 통해 제안된 방법의 효용성을 확인한다.

PC 및 PD 그래프를 통해 0.1, 0.3, 0.5 C_rate일 때 충전 시 최대 상승 전압과 방전 시 최대 하강 전압을 Table 2에 나타내었으며, 이 전압을 기준으로 C_rate별

충·방전을 수행하게 된다. 단, 목표전압에 도달하는 경우 정전류(CC: Constant Current)가 정전압(CV: Constant Voltage)로 전환된다. 또한 앞 절에서 구분하였던 배터리의 충전 곡선의 선형 구간의 전압은 각각 66.8~70.7V, 70.7~75 V 그리고 75~81 V이다.

배터리의 잔존 성능을 예측하기 위한 실험은 배터리의 충전율이 낮은 영역인 “A” 구간부터 “C”구간까지 16 A(0.1 C_{rate}), 48 A(0.3 C_{rate}), 80 A(0.5 C_{rate})의 충전 전류로 실험을 진행하였다.

Table 2. Maximum Charge and Discharge Voltages by C-rate

	Charging	Discharging
0.1 C _{rate}	0.68 [V]	0.75 [V]
0.3 C _{rate}	1.65 [V]	2.1 [V]
0.5 C _{rate}	2.5 [V]	2.6 [V]

4.1 배터리 완속 충·방전 결과

배터리의 정확한 잔존 성능을 확인하기 위해서 배터리 제조사에서 권장하는 충·방전 방법인 0.1 C_{rate}로 충·방전을 시행하여 총 충전에너지 대비 방전에너지의 비율로 대상 배터리의 잔존 성능을 측정하였다.

Fig. 19는 실제 배터리 충·방전 전압 및 전류 그래프이며, 배터리의 잔존 성능은 총 방전에너지와 충전에너지의 비율로 구할 수 있으며, 본 연구에서 사용된 배터리의 잔존 성능은 약 94.27 %로 측정되었다.

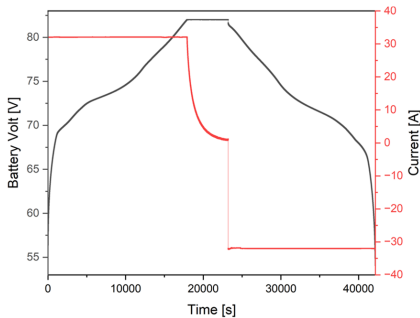


Fig. 19. Voltage Stabilization Characteristics During Pulse Discharge Test

4.2 배터리 충전 곡선 “A” 구간에서 실험 결과

실험이전 시뮬레이션을 통해 결과를 도출하였지만, 시뮬레이션은 배터리 모델에 대한 정확한 모델링이 적용되

어야 하며, 온도에 대한 영향을 고려해야 하기에 실제 결과와 오차가 발생하게 된다.

A 구간의 경우 배터리의 에너지가 낮은 영역으로 충전 및 방전이 진행될 때 해당 C_{rate}에 따라 충·방전 전압의 상한 및 하한을 설정하기 때문에 CC 모드로 지속되지 못하고 CV 모드로 전환되게 된다. 이렇듯 CV 모드로 전환되는 경우 배터리의 용량을 예측하는데 오차가 커지게 되는 문제가 발생한다. Fig. 20의 실험 결과는 모두 CV 모드로 충·방전이 이루어져 99 % 이상의 높은 잔존 성능이 도출되었으며, 일부 시험에서는 100 %를 초과하는 결과가 도출되었다. 이는 충전된 에너지보다 방전에너지가 커서 발생한 것으로 확인된다.

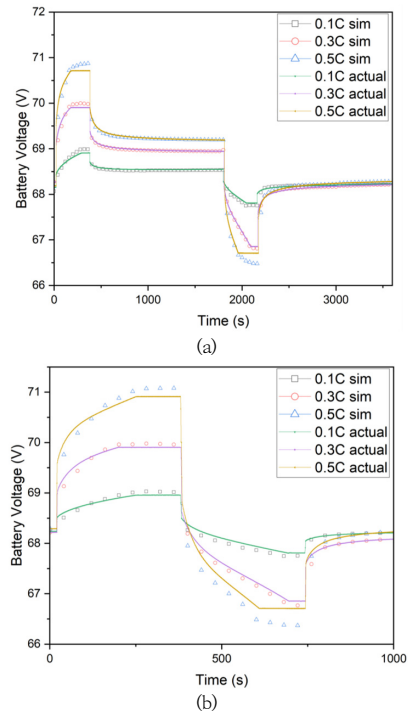


Fig. 20. Battery Remaining Performance in the "A" Segment
(a)with Rest Periods, (b) without Rest Periods

4.3 배터리 충전 곡선 “B” 구간에서 실험 결과

B 구간의 경우 배터리의 에너지가 약 50 %인 구간으로 가장 안정적인 구간이라고 할 수 있다. Fig. 21은 “B” 구간에서 진행한 시뮬레이션 및 실험 결과이다. “B” 구간에서도 시뮬레이션 결과는 오차가 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 온도에 대한 고려를 하지 않고 배터리 모델링을 수행한 문제와 매개변수 추출 시 발생하는 오차가 누

적되어 실제 배터리와 동일하게 모델링 되지 않은 것으로 판단된다.

충전 및 방전이 진행될 때 CC 모드로 원활하게 수행이 되었으며, 배터리의 잔존 성능은 휴지시간이 있는 경우 0.1 C_rate는 95.53 %, 0.3 C_rate는 95.04 %, 0.5 C_rate는 96.4 %로 결과가 도출되었으며, 휴지시간이 없는 경우 0.1 C_rate는 95.46 %, 0.3 C_rate는 94.96 %, 0.5 C_rate는 96.36 %가 도출되었다. 휴지시간은 실제로 충전에너지가 공급되는 구간 아니기에 충전 용량 계산에 영향을 주지 않는 것으로 확인된다.

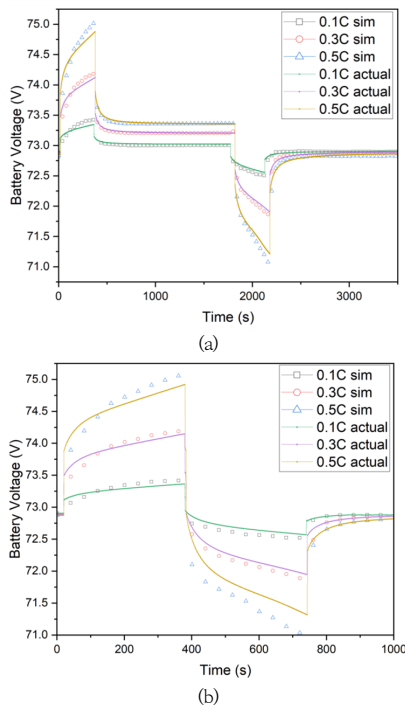


Fig. 21. Battery Remaining Performance in the "B" Segment
(a)with Rest Periods, (b) without Rest Periods

4.4 배터리 충전 곡선 "C" 구간에서 실험 결과

Fig. 22는 "C"구간에서 수행한 시뮬레이션 및 실험 그래프이다. 충전 및 방전이 진행될 때 CC 모드로 원활하게 수행이 되었으며, 배터리의 잔존 성능은 휴지시간이 있는 경우 0.1 C_rate는 95.23 %, 0.3 C_rate는 94.04 %, 0.5 C_rate는 96.8 %로 결과가 도출되었으며, 휴지시간이 없는 경우 0.1 C_rate는 95.16 %, 0.3 C_rate는 93.86 %, 0.5 C_rate는 96.66 %가 도출되었다. "B"구간과 동일하게 휴지시간은 실제로 충전에너지

가 공급되는 구간 아니기에 충전 용량 계산에 영향을 주지 않는 것으로 확인된다. 모든 모드에서 보다 정확한 배터리의 용량을 확인하기 위해서는 CC 모드에서 CV 모드로 전환되는 순간까지 수행되어야 비교적 정확한 데이터를 수집할 수 있는 것으로 예상된다.

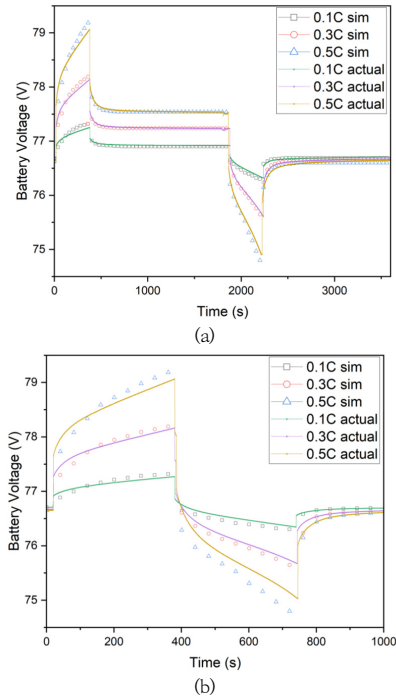


Fig. 22. Voltage Stabilization Characteristics During Pulse Discharge Test
(a)with Rest Periods, (b) without Rest Periods

5. 결론

본 논문에서 전기차 배터리의 잔존 성능을 단시간에 확인하는 시험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 제한된 잔존 성능 시험을 통해 완속 충전을 통해 얻은 잔존 성능 대비 최대 2.53 % 최소 0.23 %의 오차가 발생하는 것으로 확인되었다. 실제 잔존 성능 결과와 오차가 발생하지만 1시간 이내의 시험을 통해 대략적인 잔존 성능을 파악할 수 있는 것으로 판단된다.
- 2) 배터리의 충전율이 낮은 영역에서는 전압의 변화폭이 크기 때문에 정확한 데이터를 얻기 어려운 문제

가 있으며, 충·방전 C_rate가 클수록 오차가 발생 하기에 배터리 성능 시험 시 충·방전 C-rate는 최대 0.3 C_rate가 적당한 것으로 사료된다.

- 3) Pulse 충·방전 시험 시 CC 모드에서 CV 모드로 전환되는 시점까지 진행되어야 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있는 것으로 예상된다. 따라서 충전 보다 방전을 먼저 시행하고 방전 시 CV 모드로 전환되는 시점에 충전으로 전환되고 방전된 시간만큼 충전할 경우 보다 정확한 결과가 도출될 것으로 예상된다.
- 4) 향후 배터리의 잔존 성능을 더욱 빠르게 예측하기 위해 전기차 전체 모듈에 대하여 충전 및 분석 방법을 적용한다면 기하급수적으로 증가하고 있는 폐차되는 전기차의 배터리를 분류하는데 큰 도움이 될 것으로 기대된다.

Acknowledgements

본 결과물은 2024년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역 혁신 사업의 결과입니다.(2021RIS-004)

References

- [1] K. S. Kim, S. Y. Lee, and J. H. Park, "Analysis of Technological Trends in the Configuration of Energy Storage Systems Using Spent Electric Vehicle Batteries," *Journal of the Korean Institute of Communications and Information Sciences (Information and Communication)*, vol. 33, no. 7, pp. 47-52, 2016.
- [2] J. G. Lee, "ASTI Market Insight 04: Spent Electric Vehicle Batteries," 2021.
- [3] Y. E. Durmus, H. Zhang, F. Baakes, G. Desmaizieres, H. Hayun, L. Yang, E. E. Yair, "Side by side battery technologies with lithium ion based batteries," *Advanced energy materials*, vol. 10, no. 24, 2000089, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/aenm.202000089>
- [4] D. Chen, L. Xiao, W. Yan, & Y. Guo, "A novel hybrid equivalent circuit model for lithium-ion battery considering nonlinear capacity effects," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 320-329, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.06.051>
- [5] J. H. Kim, J. Kowal, "Development of a Matlab/Simulink Model for Monitoring Cell State-of-Health and State-of-Charge via Impedance of Lithium-Ion Battery Cells," *Batteries*, vol. 8, no. 2, pp. 8, 2022 DOI: <https://doi.org/10.3390/batteries8020008>
- [6] H. G. Schweiger, O. Obeidi, O. Komesker, A. Raschke, M. Schiemann, C. Zehner, P. Birke, "Comparison of several methods for determining the internal resistance of lithium ion cells," *Sensors*, vol. 10, no. 6, pp. 5604-5625, 2010. DOI: <https://doi.org/10.3390/s100605604>
- [7] H. Ren, J. Wang, Y. Cao, W. Luo, Y. Sun, "Nickel sulfide nanoparticle anchored reduced graphene oxide with improved lithium storage properties," *Materials Research Bulletin*, vol. 133, pp. 111047, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2020.111047>
- [8] Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, *Automobile Registration Statistics*, 2023. [cited 2024 June 10], Available From: <https://stat.molit.go.kr/portal/cate/statView.do?hRsId=58&hFormId=1244> (accessed july. 5, 2024)
- [9] Ministry of Environment, "Study on System Improvement for Promoting Recycling and Proper Treatment of Batteries for Electric and Eco-Friendly Vehicles", 2017.
- [10] A. Chen, P. K. Sen, "Advancement in battery technology: A state-of-the-art review," In 2016 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, pp. 1-10, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/IAS.2016.7731812>
- [11] K. Du, E. H. Ang, X. Wu, Y. Liu, "Progresses in sustainable recycling technology of spent lithium-ion batteries," *Energy & Environmental Materials*, vol. 5, no. 4, pp. 1012-1036, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/eem2.12271>
- [12] R. R. Thakkar, "Electrical equivalent circuit models of lithium-ion battery," *Management and Applications of Energy Storage Devices*, 2021.
- [13] M. Chen, G. A. Rincon-Mora, "Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and IV performance," *IEEE transactions on energy conversion*, vol. 21, no. 2, pp. 504-511, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEC.2006.874229>
- [14] A. Hentunen, T. Lehmuspelto, J. Suomela, "Time-domain parameter extraction method for th venin-equivalent circuit battery models," *IEEE transactions on energy conversion*, vol. 29, no. 3, pp. 558-566, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEC.2014.2318205>
- [15] X. Hu, S. Li, H. Peng, "A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries," *J. Power Sources*, vol. 198, pp. 359-367, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.10.013>
- [16] K. A. Severson, P. M. Attia, N. Jin, N. Perkins, B. Jiang, Z. Yang, R. D. Braatz, "Data-driven prediction of battery cycle life before capacity degradation," *Nature Energy*, vol. 4, no. 5, pp. 383-391, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0356-8>

박 진 영(Jin-Young Park)

[정회원]



- 2019년 2월 : 공주대학교 일반대학원 기계공학과 (기계공학석사)
- 2023년 8월 : 공주대학교 일반대학원 기계공학과 (기계공학박사)
- 2021년 9월 ~ 2023년 9월 : RIS 지역혁신 플랫폼 모빌리티소부장 사업본부 책임연구원

- 2023년 9월 ~ 현재 : ㈜이피에스텍 연구소장

〈관심분야〉

전력전자, 제어제측, 아날로그