

# 노화 및 동특성 임피던스 모델을 포함한 배터리 시뮬레이터에 관한 연구

이종학<sup>1</sup>, 김수빈<sup>2</sup>, 오상근<sup>3</sup>, 송승호<sup>†</sup>

## A Study on Battery Simulator Including Aging and Dynamic Impedance Model

Jong-Hak Lee<sup>1</sup>, Soo-Bin Kim<sup>2</sup>, Sang-Keun Oh<sup>3</sup>, and Seung-Ho Song<sup>†</sup>

### Abstract

This paper presents the implementation and control methods of a battery simulator. The proposed battery simulator can emulate the dynamic characteristics of any actual battery using the second RC ladder model of the equivalent circuit. Moreover, it can emulate the variation of impedance, which is the result of the change of battery characteristics due to the aging effect. The parameters of the battery simulator can be derived from the sequence of tests of the actual battery or only from the data supplied by the battery manufacturer. Proposed methods for the battery simulator are tested by extensive experiments. Test results show that the proposed battery simulator can emulate not only the dynamic characteristics but also the aging effects of the actual battery in real time.

**Key words:** Battery simulator, Dynamic impedance

### 1. 서 론

ESS(Energy Storage System)는 전력변환장치와 연계하여 배터리에 에너지를 저장하고, 필요 시 에너지를 공급해주는 시스템이다. ESS는 기본적인 기능인 에너지 저장 및 공급 기능을 이용해 부하 평준화, 피크 부하 저감, 출력 안정화, 전력품질 관리 등의 다양한 기능을 제공할 수 있다. 또한, 전기 자동차(EV, Electric Vehicle) 및 플러그인 하이브리드 자동차(PHEV, Plug-in Hybrid Electric Vehicle) 등 친환경 자동차의 발전이 급속도로 증가하고 있다. ESS 및 전기차의 에너지원으로는 다양한 배터리를 사용하고 있으며, 요즘 배터리의 성능 보증 기간이 10년 이상으로 증가하는 추세로 노화된 배터리의 처리가 문제가 되고 있다. 따라서 매우 고가인 배터리를 대상으로 하는 전력변환장치의 개발 비용 및 기간

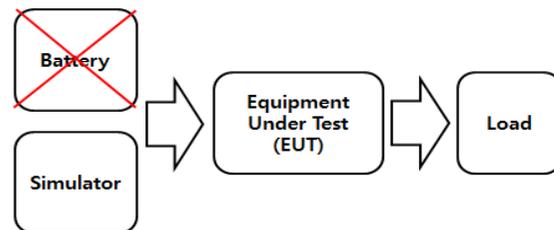


Fig. 1. Diagram of typical battery simulator.

이 추가적으로 발생하여 전력변환장치 개발에 많은 어려움이 있다. 현실적으로 전력변환장치를 검증하기 위한 개발 비용을 절감하고 테스트 중 안전 문제 방지를 위해 배터리 시뮬레이터에 대한 관심도가 높아지고 있다.

배터리 보증기간이 증가하는 추세로 배터리 장기간 사용에 발생하는 배터리 노화 진행으로 배터리의 용량 감소와 임피던스 증가를 초래하게 된다. 이렇듯 노화된 배터리의 내부 임피던스 증가와 용량감소는 전력변환장치에 영향을 주어 충전이 불가능한 상황이 발생하거나 배터리를 사용하는 어플리케이션에 제한적인 상황을 발생시킬 수 있다. 따라서 노화된 배터리에 대한 전력변환장치의 분석이 필수적이라 할 수 있다<sup>[1]-[3]</sup>.

배터리 시뮬레이터는 전원 소스를 모의하여 전원을 출력하는 장치이다. 일반적인 배터리 시뮬레이터의 구성 도는 그림 1과 같으며, 배터리와 같은 비선형적인 전원

Paper number: TKPE-2020-25-3-3

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

<sup>†</sup> Corresponding author: ssh@kw.ac.kr, Dept. of Electrical Engineering, Kwangwoon University

Tel: +82-2-940-5762 Fax: +82-2-940-5141

<sup>1</sup> Electric Powertrain Core Technology Team, Hyundai Mobis

<sup>2</sup> Dept. of Electrical Engineering, Kwangwoon University

<sup>3</sup> Director in System Business Division, PLASPO

Manuscript received Nov. 18, 2019; revised Dec. 19, 2019; accepted Jan. 23, 2020

TABLE I  
APPLICATION OF BATTERY MODELS TO EXISTING BATTERY SIMULATORS

Parameter	Model	Application of Simulator Research
Internal	Voltage	OCV
	Impedance Circuit	R(DCIR), R-RC, R-RC-RC ...
	Aging	X
External	Current	0.5C, 1C
	Temp.	X

TABLE II  
TARGET BATTERY MODEL OF BATTERY SIMULATOR

Battery Model	
Voltage	OCV
Current	0.5C
Impedance	R-RC-RC
Aging	Capacity Fading
	Impedance Rising
Temp.	X

출력을 통해 전력변환장치 시험을 수행할 수 있다. 배터리 시뮬레이터는 배터리를 대체하여 시험 대상기기 EUT(Equipment Under Test)인 전력변환장치를 검증시험을 진행할 수 있으며 배터리 시뮬레이터를 사용 시 다음과 같은 장점을 갖는다.

- 비용 절감: 매우 고가인 배터리를 대체 가능
- 동작 시간의 간소화: 배터리를 시험 시 이전 단계를 유지하거나 맞추기 어려움
- 안정성 보장: 배터리 셀 불균형, 과전류, 과 충전으로부터 안정성 보장 가능

배터리의 모델 파라미터는 Internal Parameter, External Parameter 로 나눌 수 있으며, 각 파라미터는 전압, 전류, 임피던스, 온도, 노화 모델로 나눌 수 있다<sup>[3]</sup>. 기본적으로 배터리 시뮬레이터는 공칭 전압을 출력하는 것에서 배터리 특성 OCV(Open Circuit Voltage) 곡선을 출력할 수 있도록 하는 것을 기본으로 하고 있다. 또한, 충전 전류를 다르게 한 모델, 다양한 임피던스 모델 파라미터 적용하는 방법도 있다. 하지만 간혹 온도나 노화에 대해서 분석하고 모델링하는 여러 참고문헌들이 있지만 실제 시뮬레이터에는 적용하지 않고 있다.

표 1은 기존 PCS(Power Conditioning System) 성능 검증용 배터리 시뮬레이터의 배터리 모델 적용한 현황을 정리한 것이다. 참고문헌 [4]에서는 배터리의 OCV 곡선을 토대로 배터리 전압을 출력한 논문이다<sup>[4]</sup>. 참고

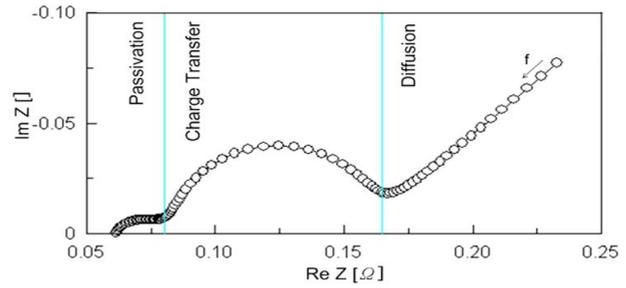


Fig. 2. Impedance spectrum of the lithium battery.

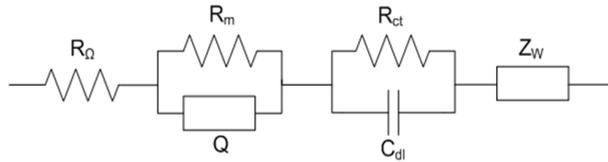


Fig. 3. Equivalent circuit of the lithium battery.

문헌 [5], [6]은 참고문헌 [4]와 같이 배터리의 OCV 곡선을 토대로 출력하는 것은 동일하나 임피던스 성분(저항)을 포함하고 출력 전류를 적산하고 배터리 SOC(State of Charge)를 계산하여 시뮬레이터를 통해 배터리 전압을 출력하는 논문이다<sup>[5],[6]</sup>. 참고문헌 [7], [8]은 배터리의 동특성의 정확도를 높이기 위해 임피던스 성분을 R 성분뿐만 아니라 RC 회로도 추가하여 모델링하고 시뮬레이터를 제작하여 배터리 특성 전압을 출력한 논문이다<sup>[7],[8]</sup>.

앞서 설명하였듯이 기존 배터리 시뮬레이터의 경우 배터리의 동특성에 대한 적용은 하였지만 노화 특성에 대해 적용한 시뮬레이터의 경우는 거의 없다. 본 논문에서 배터리 특성 및 노화에 대해 기술하였고 배터리 노화에 대한 분석의 필요성에 대해 설명하였다. 따라서 본 연구는 배터리의 노화 및 동특성 임피던스 모델을 포함한 배터리 시뮬레이터에 대한 연구를 목표로 한다.

## 2. 배터리 특성 및 모델링

### 2.1 배터리 특성 및 모델링

배터리의 대표적 내부 반응인 Passivation, Charge Transfer, Diffusion 반응은 서로 다른 시정수를 가지며, 나이퀴스트 임피던스 평면상 서로 다른 주파수 영역에서 나타난다. 그림 2는 일반적인 리튬 배터리의 임피던스 스펙트럼이며, 그림 3은 일반적인 리튬 배터리의 임피던스 등가회로를 나타낸 것이다<sup>[9]-[11]</sup>.

등가회로에서 내부저항  $R_Ω$  은 전해질, 전극, 단자대의 저항성분 등 배터리의 전극과 내부를 연결하는 전체 저항을 의미하며, 나이퀴스트 선도에서 실수축과 교차하는 지점에서의 값이 된다.

리튬 배터리의 음극과 전해액의 환원반응에 의해 부동화 막(Passivation Film)이 형성되며 이를 부동화 현상

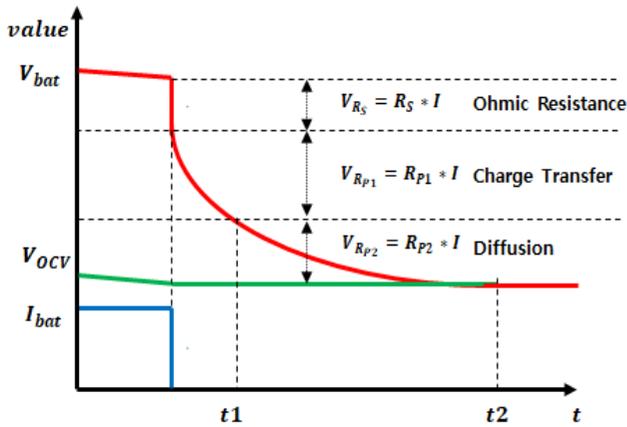


Fig. 4. Battery voltage variation due to battery characteristics during charging.

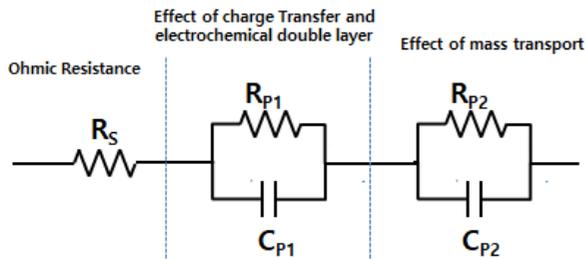


Fig. 5. Equivalent circuit according to change of battery characteristics.

이라 부른다. 리튬 배터리의 부동화 현상은 임피던스 스펙트럼에서 작은 반원이 고주파 영역에 나타나며 저항과 커패시터의 병렬구조로 모델링할 수 있다.

전하전이(Charge Transfer) 현상을 나타내는 큰 반원은 전하전이지항(Charge Transfer Resistance( $R_{ct}$ ))와 전기이중층 커패시턴스(Double Layer Capacitance( $C_{dl}$ ))의 병렬연결로 표현할 수 있으며, 두 전극(양극과 음극)과 전해질 사이의 계면을 통과하는 전자 이동 반응을 나타낸다. 배터리의 이온 전송은 확산 및 이동에 의해 수행된다. 확산은 농도에 의해, 이동은 전기장의 힘에 의한 현상이다. 두 힘의 방향이 다를 수 있으며, 확산을 통해 물질이동을 일으킨다.

그림 4는 충전 중 전류를 차단하였을 시 배터리 내부 특성으로 인한 배터리 전압 변화를 나타낸 그림이다. 배터리에 충전 전류를 인가 후 차단할 경우 배터리 전압은 순간적으로 하강을 하게 되고 그 이후 지수 함수적으로 하강하게 된다. 방전 시 전류를 차단할 경우는 배터리 전압은 반대로 상승하게 된다. 전류를 차단( $t_0$ )한 순간적으로 변화하는 부분은 수 ms 동안 나타나는 내부 저항(Ohmic Resistance)을 나타내며 이후  $t_1$  동안은 전하 전이(Charge Transfer) 현상에 의해 나타나는 변화이며 이는 수 십초 동안 나타나는 현상이다. 그 이후  $t_2$  동안은 확산 현상에 의한 변화가 나타나는 것으로 OCV 전압까지 도달할 때까지 나타난다. 배터리 내부 저항은 직

렬 저항으로 증가화할 수 있으며, 전하 전이 및 확산 현상은 전기화학적인 특성으로 인해 발생하는 것으로 각각 R-C 병렬 회로로 증가화할 수 있으며 본 논문에서 사용할 배터리 등가모델은 그림 5와 같다.

## 2.2 배터리 노화

배터리는 충방전 사이클이 증가함에 따라 내부 물질 사이에 화학반응이 일어나 내부 저항이 증가하고 용량이 감소하게 된다. 내부 저항이 증가하게 되면 작동 전압의 강하/상승이 일어나므로 동작 가능 제한 전압에 빠르게 도달하여 용량이 감소하게 되는 원리이다<sup>[12]</sup>.

배터리의 노화는 몇 가지 예와 데이터를 통해 기본 메커니즘을 설명할 수 있다<sup>[13]</sup>. 노화의 상황은 운행 중 노화(Aging on cycling, Driving Aging)와 보관 중 노화(Aging on rest, Calender Aging)로 나눌 수 있으며, 노화의 이유로는 여러 가지가 있지만 가장 중요한 요인은 전해질과 전극의 인터페이스에 발생하는 것이다. 양극과 음극에서 발생하는 것은 크게 다르다. 노화에 의해 발생하는 용량의 손실과 저항의 증가는 아래 상황에 따라 발생하게 된다.

- 두 전극 사이를 서둘러 리튬 이온의 손실
- 전극에서 활성 물질의 손실

그림 6 배터리의 노화가 진행됨에 따라 변화하는 내부 저항 성분을 나타낸 것이며 그림 7은 배터리의 노화가 진행됨에 따라 변화하는 커패시터 성분을 나타낸 것이다<sup>[14]</sup>. 내부저항은 앞서 설명한 것과 같이 노화가 진행됨에 따라 비례하게 증가함을 알 수 있다. 커패시터 성분은 노화가 진행됨에 따라 감소함을 알 수 있다<sup>[15],[16]</sup>.

## 3. 배터리 특성 도출 시험

### 3.1 적용 배터리 및 시험 구성

본 연구에서 배터리 시뮬레이터를 제작하기 위해서는 배터리의 특성을 도출하여야 한다. 배터리 특성을 도출을 위한 대상 배터리는 T사에서 제조한 배터리로 배터리의 상세 사양은 표 3과 같다.

배터리 특성을 도출하기 위한 시험 환경 및 시험 구성은 그림 8과 같다. 배터리 시험을 위한 장비는 배터리와 배터리 충전기, 배터리 방전을 위한 전자부하 Kikusui PLZ1004WH, 파형 측정을 위한 Lecroy 오실로스코프와 시험용 노트북으로 구성되어 있다. 시험 순서는 배터리의 용량을 측정하기 위해 충방전 시험을 진행하고 SOC별 OCV 곡선을 도출하기 위한 시험을 진행한다. 이후 임피던스 측정 시험을 진행하고 배터리 충방전 사이클을 통해 노화시키는 노화 시험을 진행한다. 각 시험 단계에서 추출되는 파라미터들을 통해 배터리 시뮬레이터 제작에 활용한다.

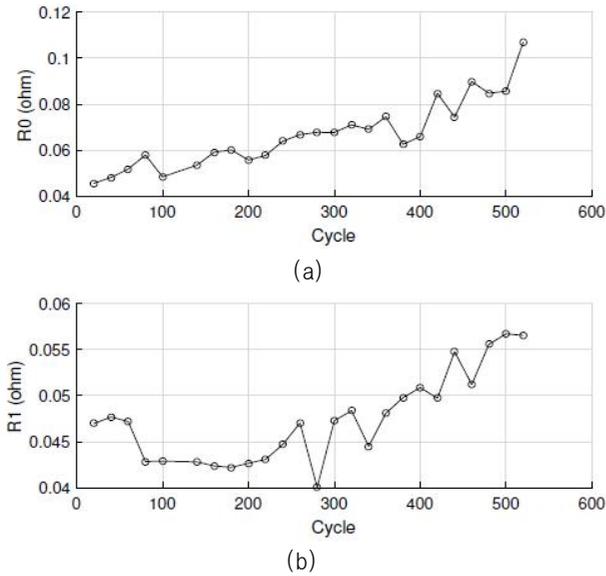


Fig. 6. Variation of ohmic resistance (R0) and diffusion resistance (R1) according to aging.

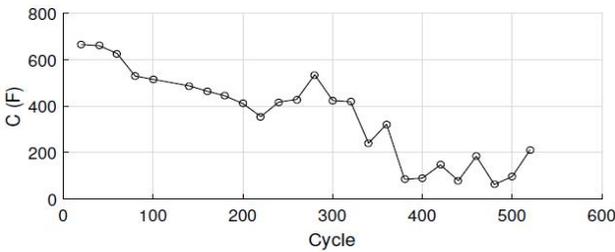


Fig. 7. Variation of diffusion capacitance according to aging.

TABLE III  
SPECIFICATION OF THE TARGET BATTERY FOR TEST

Specifications of Battery Module	
Nominal Capacity	17 [Ah]
Nominal Voltage	50 [V] (cell 14s)
Max. Voltage	58 [V]
Min. Voltage	46 [V]
Max. Charging Current	0.5 [C]
Max. Discharging Current	1.0 [C]

### 3.2 배터리 충방전

먼저 배터리의 용량을 확인하기 위한 충전 시험을 진행하였다. 충전 최대 전압 58V까지 0.5C의 정전류 모드로 충전을 한 후 58V의 정전압 모드로 변경하고 이후 58V의 정전압 모드로 변경하여 전류가 충전 중지 전류에 도달할 때까지 충전하는 CC-CV 충전법(Constant Current - Constant Voltage Charging Method)을 통해 배터리를 충전하였다. 배터리 용량 측정을 위해 배터리 충전 시험 이후 방전 시험을 진행하였다. 전자부하를 배터리에 연결한 후 0.5C 정전류로 방전을 하였으며 방전

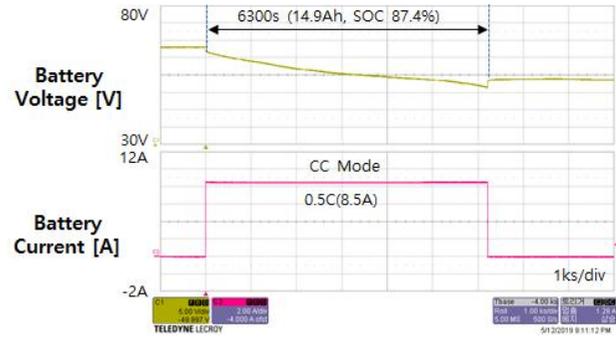


Fig. 8. Waveform of battery discharge test.

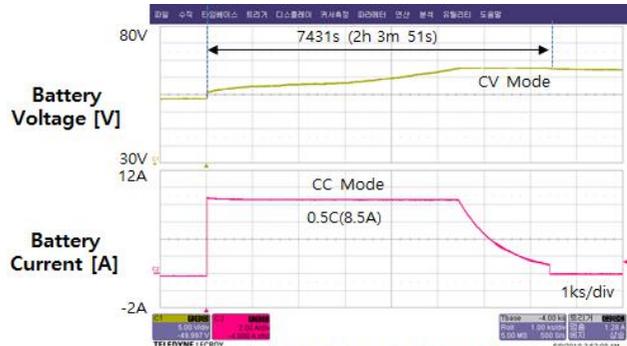


Fig. 9. Waveform of battery charge test.

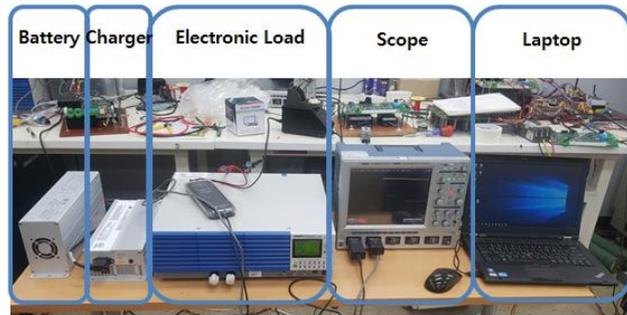


Fig. 10. Environment of the battery characterization test.

중지 전압 46V에 도달 시 방전을 종료하였다. 충방전의 시험 방법은 “SPS-KBIA-10104-03” 규정에 의거하여 진행하였다<sup>[17]</sup>. 그림 9와 10은 시험 대상 배터리 충전 및 방전 시험 파형이다. 총 방전 시간은 6300s로 용량 14.9Ah(SOC 87.4%)로 측정되었다.

### 3.3 OCV 측정 시험

배터리 모듈의 OCV를 측정하기 위해서 우선 앞서 설명한 충전 방법을 통해 충전을 진행한다. 충전 후 30분의 휴지 시간을 갖고 이후 0.5C의 전류로 SOC 10%(6 min)씩 방전한다. 각 SOC 단계에서 30분의 휴지 시간을 가지며 SOC가 10%가 될 때까지 반복 시험을 진행한다. 각 SOC 단계에서 휴지 기간 30분 후의 OCV를 측정하였다. OCV 측정 시험파형은 그림 11과 같으며, 배터리 OCV 전압은 표 4와 같다.

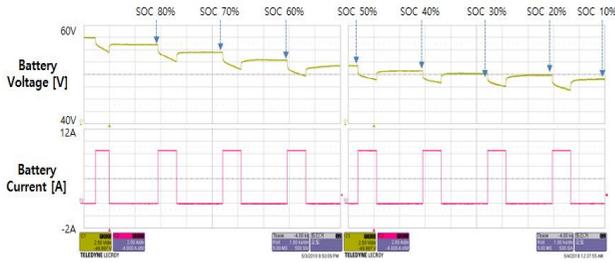


Fig. 11. Waveform of battery OCV measurement test.

TABLE IV  
OCV VOLTAGE BY SOC OF BATTERY MODULE

SOC [%]	87.4	80	70	60	-
OCV [V]	57.60	56.6	64.7	53.3	-
SOC [%]	50	40	30	20	10
OCV [V]	52.30	51.28	50.78	50.38	49.68

### 3.4 임피던스 파라미터 추출 시험

본 논문에서는 배터리 임피던스 파라미터 추출을 위해서 DC 임피던스 측정 방법을 사용하였다. DC 임피던스 측정방법은 DC 전류를 인가한 후 차단하고 전압 변동으로 임피던스를 측정하는 방법으로 앞서 설명한 배터리 특성으로 인한 배터리 전압 변화로 임피던스 측정이 가능하다. 배터리의 내부 저항(Ohmic Resistance)와 전하 전이(Charge Transfer), 확산(Diffusion)의 각 상태의 저항을 계산할 수 있다. 또한 전하 전이(Charge Transfer)와 확산(Diffusion) 상태의 전압 변화의 시정수를 구하고 앞서 구한 각 상태의 저항을 이용하여 각 상태의 커패시터 값을 계산할 수 있다. DC 임피던스 측정법을 토대로 수식 (1)을 이용하여 각 SOC별 배터리 파라미터를 추출할 수 있다.

$$R_S = \frac{V_{R_S}}{I}, \quad R_{P1} = \frac{V_{R_{P1}}}{I}, \quad R_{P2} = \frac{V_{R_{P2}}}{I},$$

$$C_{P1} = \frac{\tau_{R_{P1}} C_{P1}}{R_{P1}}, \quad C_{P2} = \frac{\tau_{R_{P2}} C_{P2}}{R_{P2}} \quad (1)$$

그림 12는 SOC 20%의 배터리 전압 파형을 추출된 파라미터의 계산된 전압과 비교한 확대 화면이다. 그림에서 육안으로 확인이 가능하듯이 R-RC 회로로 계산된 전압보다 R-RC-RC로 계산된 전압이 실측 데이터와의 차이가 적은 것을 확인할 수 있다. 또한 하단의 Chi Square의 수치를 확인한 결과 R-RC-RC 회로로 계산된 전압의 정확도가 높다는 것을 알 수 있다. Chi Square는 두 변수 사이에 상관관계가 있는지 여부에 대한 검정하는 방법으로 데이터의 에러의 크기를 나타내며, 계산된 값이 2% 이내로 수렴할 경우 아주 밀접한 상관성을 갖고 있는 것으로 판단할 수 있다<sup>[18]</sup>. 따라서 본 연구

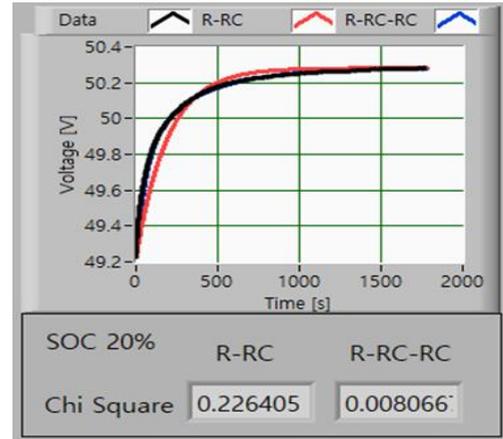


Fig. 12. Comparison screen of extracted parameter at SOC 20%.

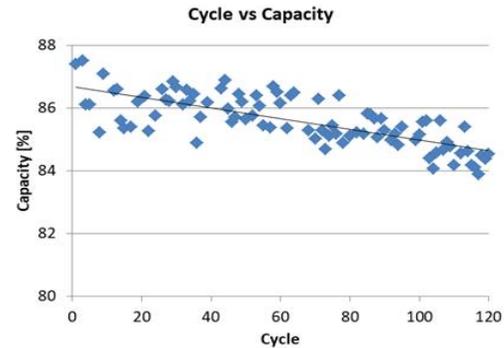


Fig. 13. Battery capacity variation by charge and discharge cycle.

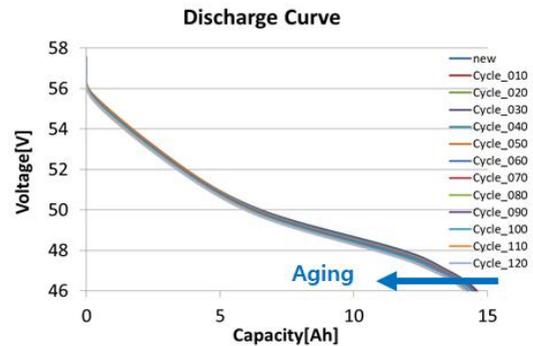


Fig. 14. Variation of discharge curve by charge and discharge cycle.

에서는 배터리 임피던스 특성 추출을 위한 등가회로를 R-RC-RC 회로로 선정하였다.

### 3.5 노화 파라미터 측정 시험

본 연구에서는 배터리의 노화에 대한 특성을 배터리 시뮬레이터에 반영하기 위해 배터리를 충방전 사이클을 진행해 노화시켰다. 충방전 사이클 방법은 “SPS-KBIA-10104-03” 규정에 의거하여 배터리 모듈 충방전 시험을 진행하였다. 충전 및 방전 전류는 0.5C이며 충방전 사이클

TABLE V  
BATTERY IMPEDANCE PARAMETER

SOC[%]	$R_s[\Omega]$	$R_{p1}[\Omega]$	$C_{p1}[F]$	$R_{p2}[\Omega]$	$C_{p2}[F]$
80	0.1435	0.0511	719	0.0102	33327
70	0.1454	0.0645	714	0.0188	16070
60	0.1424	0.0555	1308	0.0457	7119
50	0.1433	0.0504	1096	0.0658	13912
40	0.1461	0.0473	1140	0.0235	18848
30	0.1456	0.0579	929	0.0278	12695
20	0.1492	0.0659	1069	0.0471	8170
10	0.1501	0.0687	1156	0.0482	8125

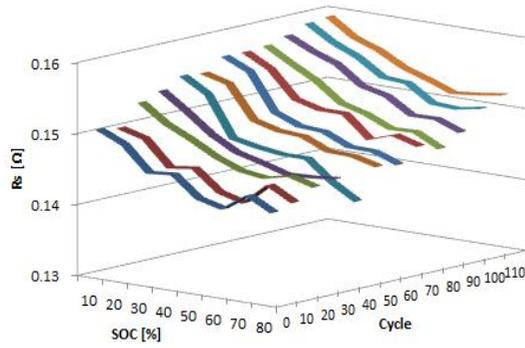


Fig. 15.  $R_s$  parameter at each SOC by charge and discharge cycle.

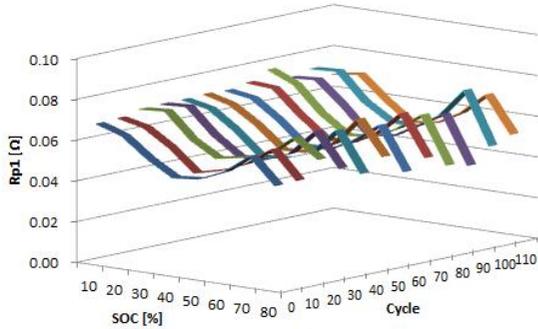


Fig. 16.  $R_{p1}$  parameter at each SOC by charge and discharge cycle.

120회를 진행하였다. 사이클 시험으로 측정된 배터리의 용량은 그림 13과 같으며, 그림 14는 충방전 사이클에 따른 방전 곡선의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 사이클이 진행됨에 따라 배터리 용량은 10회당 0.17%씩 감소하는 추세이며 사이클 대비 배터리 용량은 다음 식으로 도출할 수 있다.

$$\text{BatteryCapacity} [\%] = -0.017 \times \text{Cycle} + 86.685 \quad (2)$$

배터리의 충방전 사이클 시험을 진행하면서 10회마다 노화 임피던스를 측정하였다. 10회마다 배터리 SOC 별

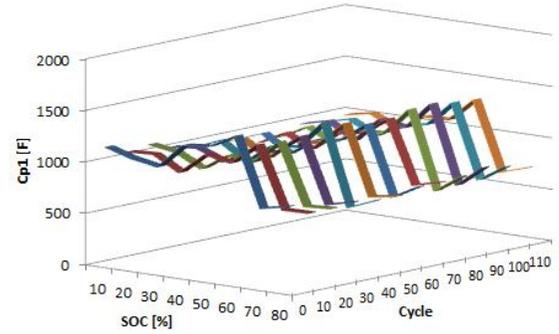


Fig. 17.  $C_{p1}$  parameter at each SOC by charge and discharge cycle.

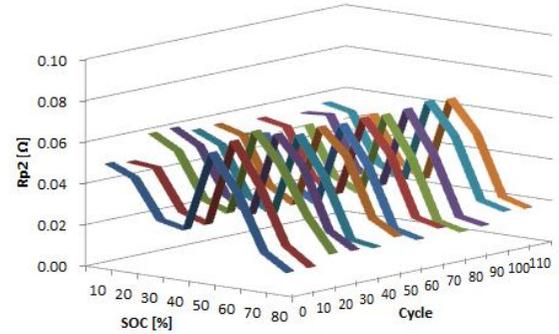


Fig. 18.  $R_{p2}$  parameter at each SOC by charge and discharge cycle.

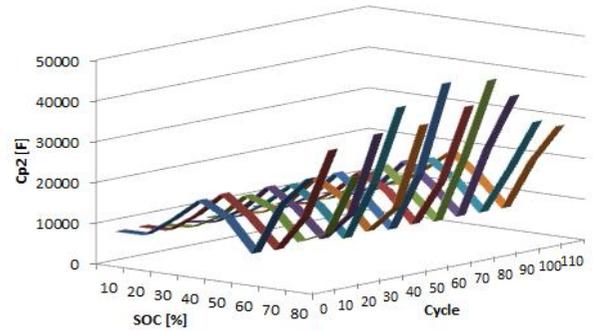


Fig. 19.  $C_{p2}$  parameter at each SOC by charge and discharge cycle.

임피던스 측정시험을 진행하고 측정된 데이터를 통해 배터리 임피던스 파라미터 추출 프로그램을 통해 임피던스 파라미터를 추출하였다. 등가회로는 R-RC-RC 회로를 사용하였으며 각 사이클 및 SOC별 임피던스 파라미터는 그림 15~그림 19와 같다.

그림 20은 배터리 SOC 40%의 충방전 사이클에 따른 각 임피던스 파라미터의 변화를 나타낸 것이다. 사이클이 증가함에 따라 R-RC-RC의 저항 성분은 증가하고 Capacitance 성분은 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

그래프로 확인할 수 있듯이  $R_s$ 는 +5.6% 상승,  $R_{p1}$ 은 +4.4% 상승,  $R_{p2}$ 는 +0.45% 상승으로 저항 성분의 상승하는 반면  $C_{p1}$ 은 -11% 감소,  $C_{p2}$ 는 -2.44% 감소로 커패시터 성분은 감소하였다.

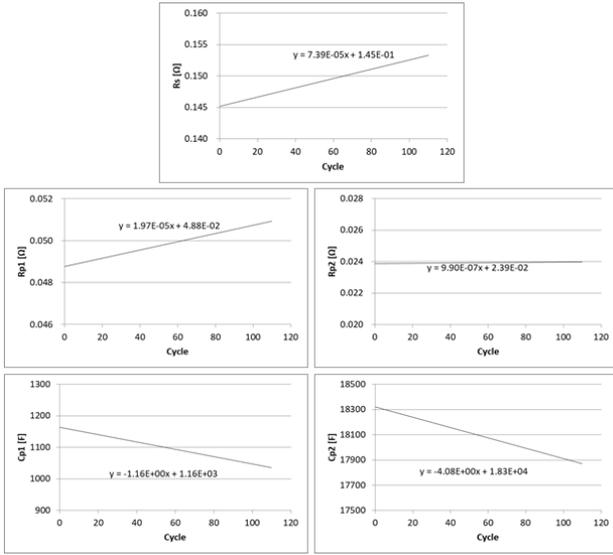


Fig. 20. Variation of parameters by charge and discharge cycle at SOC 40%.

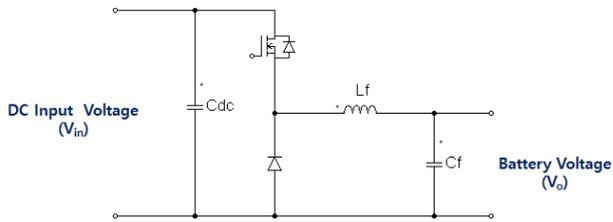


Fig. 21. Circuit diagram of the battery simulator.

TABLE. VI  
BATTERY SIMULATOR PARAMETER

Parameter	Value
DC Input Voltage $V_{in}$	80 [V]
Battery Voltage $V_o$	46~58 [V]
Nominal Current	17 [A]
Filter Reactor	176.5 [uH]
Filter Capacitor	106.2 [uF]
Switching Frequency	40 [kHz]

#### 4. 시뮬레이터 제어 구성

본 연구에서는 벡 컨버터 토폴로지를 이용하여 배터리 시뮬레이터를 제작하였으며 시뮬레이터 회로도 및 파라미터는 그림 21, 표 6과 같고 배터리 시뮬레이터의 제어 구성도는 그림 22와 같다. 기본적으로 배터리 전압 특성을 출력하기 위해 전압 제어기를 사용하였으며, 배터리 전압 기준값을 생성하기 위한 배터리 특성 전압 생성을 위해 각 특성 모델을 구성하였다.

배터리 특성 전압을 구하기 위해서는 OCV 전압  $V_{OCV}$ 와 배터리 임피던스 전압  $V_z$ 를 생성해야 하며

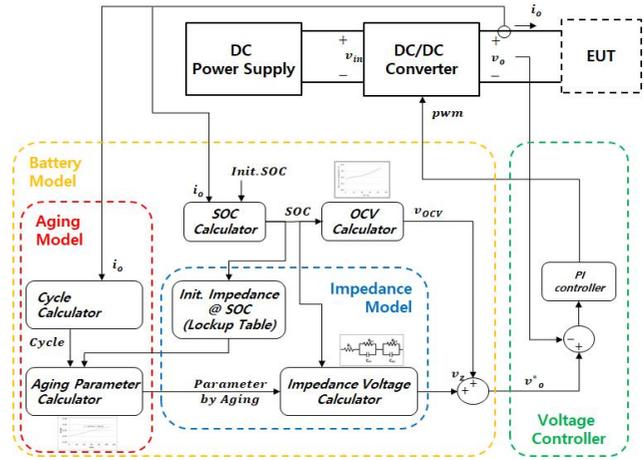


Fig. 22. Control configuration of the battery simulator.

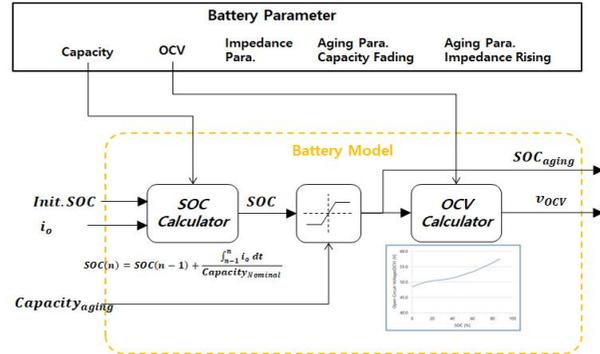


Fig. 23. Battery model in control configuration of the battery simulator.

배터리 임피던스 전압은 노화 특성을 포함하여야 한다. 배터리 노화 및 동특성을 그대로 출력하기 위해 시험을 통해 도출한 배터리 특성을 적용할 수 있도록 제어 구성모델은 배터리 모델, 임피던스 모델, 노화 모델로 구성한다. 앞서 도출한 배터리 모델의 파라미터를 크게 Capacity, OCV, Impedance Parameter, Aging Parameter Capacity Fading, Aging Parameter Impedance Rising으로 나눌 수 있으며, 각 모델별로 어떻게 적용되는지 설명한다.

SOC 및 OCV를 계산하기 위한 배터리 모델은 초기 SOC를 설정하고 배터리 출력 전류를 입력받아 전류 적산법에 의해 SOC를 계산한다. 출력 전류를 적산하여 공칭용량의 비율로 계산하고 이전 SOC 값과 누적하여 현재의 SOC를 구할 수 있다. SOC Calculator의 수식은 다음 식과 같다(그림 23).

$$SOC(n) = SOC(n-1) + \frac{\int_{n-1}^n i_o dt}{Capacity_{nominal}} \quad (3)$$

구해진 SOC는 노화에 의해 Capacity Fading 된 Capacity\_aging 값에 의해 제한된다. 출력된 SOC는 다른

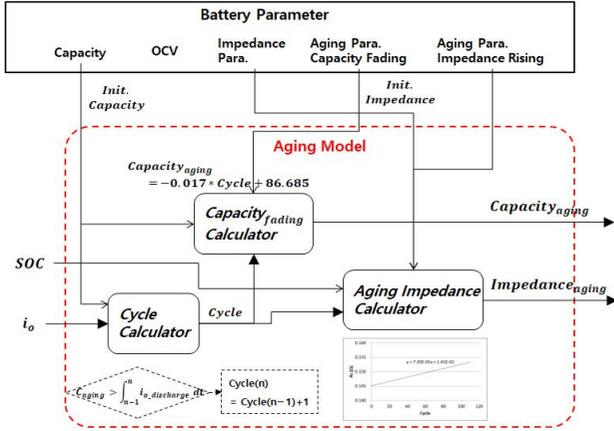


Fig. 24. Battery aging model in control configuration of the battery simulator.

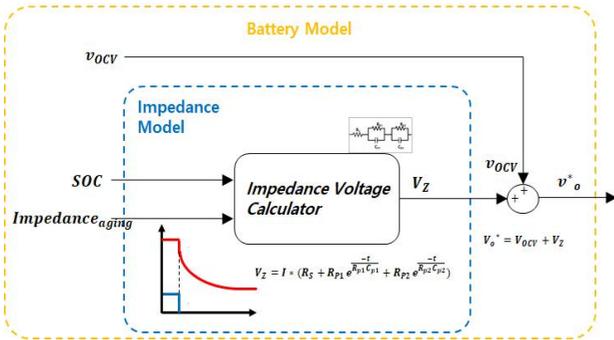


Fig. 25. Battery impedance model in control configuration of the battery simulator.

모델 연산에 필요한 곳에 사용되고 OCV 전압 계산하는데 사용된다. OCV는 앞서 배터리 모듈에서 도출한 SOC에 따른 OCV 곡선을 Look up Table화 하여 OCV 전압을 출력한다.

노화 모델은 노화 사이클 및 노화된 용량, 노화된 임피던스를 계산한다(그림 24). 배터리 출력 전류를 입력 받아 현시점의 사용할 수 있는 용량(Capacity\_aging)크기만큼 방전할 경우 1 Cycle을 증가하도록 하였으며 Cycle 증가의 조건식은 다음과 같다. 이 조건에 도달할 경우 Cycle은 이전 값에서 +1 증가한다.

$$Capacity_{aging} > \int_{n-1}^n i_{o\ discharge} dt \quad (4)$$

계산된 노화 사이클은 용량 계산 및 임피던스에 사용된다. 노화 사이클은 앞서 도출한 노화 사이클에 따른 용량 감소 수식으로 도출할 수 있으며, 임피던스는 앞서 도출한 노화 사이클에 따른 사이클 별 R-RC-RC의 추세선식으로부터 계산할 수 있다.

임피던스 모델은 앞서 구한 노화 모델에 의해 입력 받은 임피던스 파라미터로부터 수식 (5)를 통해 배터리 임피던스 전압  $V_Z$ 을 구한다. 노화 모델을 사용하지 않을



Fig. 26. Environment of the battery simulator test.

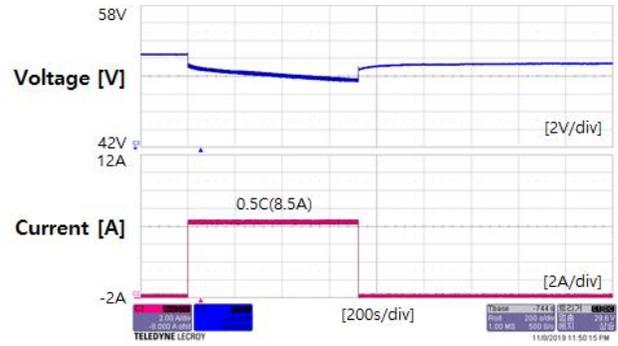


Fig. 27. Test waveform of battery simulator applied battery characteristic (1 Cycle).

경우 초기 임피던스 모델로만 입력하여 사용도 가능하다. 각 모델을 통해 구해진 전압을 통해 최종 배터리 전압 기준값을 생성할 수 있다.

$$V_Z = I_o \times (R_S + R_{P1} \times e^{\frac{-t}{R_{P1}C_{P1}}} + R_{P2} \times e^{\frac{-t}{R_{P2}C_{P2}}}) \quad (5)$$

$$V_o^* = V_{OCV} + V_Z \quad (6)$$

## 5. 시험 결과

배터리의 특성을 도출하고 특성을 적용하여 배터리 시뮬레이터를 제작하기 위해 성능검증을 위한 시험 구성은 그림 26과 같다.

배터리 특성 모델을 검증하기 위해 배터리 OCV곡선 및 임피던스 파라미터를 적용하여 시험하였다. 배터리 파라미터는 앞서 추출한 1 Cycle 시 파라미터이며 동작 조건은 입력 전압 80V, 방전 전류 0.5C(8.5A) 출력 전압 기준 SOC 50%에서 10%만큼 방전한 후 SOC 40%에서의 전압을 측정하였다. 배터리 특성 모델 적용 시험파형은 그림 27과 같으며 1 Cycle에 해당하는 파라미터를 적용한 출력 파형은 노화 모델이 포함되지 않은 파형과 같다. 동일한 조건으로 배터리 노화 110 Cycle의 특성 전압을 측정하였으며, 배터리 특성에 의해 변하는 부분을 확대하여(1000초) 앞서 측정된 시험 대상 배터리의 전압과 비교한 시뮬레이터 출력 전압 파형은 그림 28,

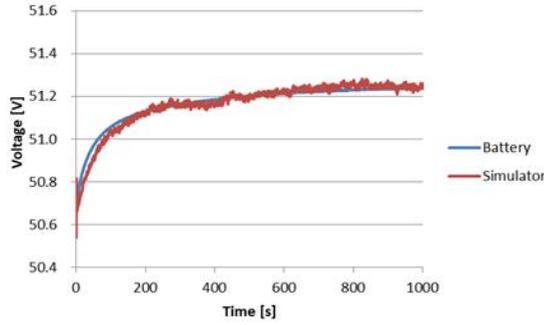


Fig. 28. Waveform compared with battery voltage and simulator output voltage (1 Cycle).

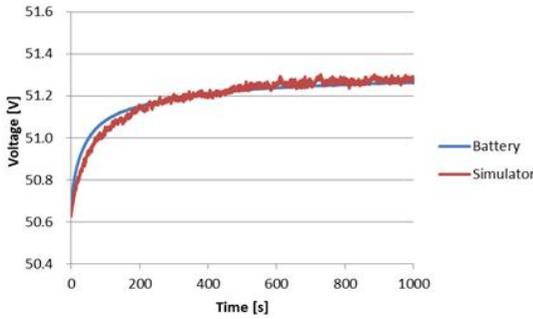


Fig. 29. Waveform compared with battery voltage and simulator output voltage (110 Cycle).

TABLE VII  
CHI SQUARE COMPERISON OF BATTERY  
SIMULATOR OUTPUT VOLTAGE

Chi square	vs R-RC-RC Modeling	vs Simulator
1 Cycle	0.0023	0.0255
110 Cycle	0.0034	0.0413

그림 29와 같다. 그림에서 보는 것과 같이 실제 배터리와 전압이 동일한 전압 출력을 하는 것을 확인할 수 있다. 시험 대상 배터리 전압과 시뮬레이터 출력 전압을 비교하기 위해 Chi Square 값을 확인하였으며, 결과는 표 7과 같다. 배터리 1 Cycle 및 110 Cycle 진행 시 배터리 시뮬레이터는 실제 배터리 전압과 매우 상관관계가 높으며 시뮬레이터의 성능이 높다는 것을 확인할 수 있다.

앞서 도출한 배터리 노화 특성을 기반으로 배터리 시뮬레이터를 통해 노화된 배터리를 모의하였다. 1 Cycle 과 110 Cycle의 기본 데이터는 도출한 배터리 특성이며, 300 Cycle 과 500 cycle은 배터리 노화 특성을 기반으로 예측한 배터리 특성이다. 그림 30은 사이클 별 배터리 시뮬레이터의 출력 전압이다. 그림 31은 각 사이클 별 배터리 시뮬레이터 출력 전압 중 SOC 40%시 전류가 차단된 시점부터 확대하여 전압의 변화를 나타낸 것이다. 초기 배터리 1 Cycle보다 사이클이 증가하면서 배터리임피던스가 증가하여 전압의 변화가 점점 커짐을 확인할 수 있다.

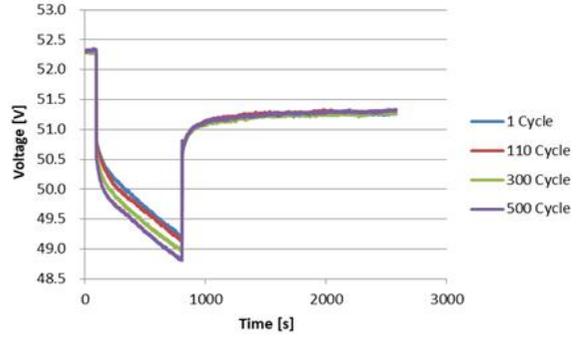


Fig. 30. Battery simulator output voltage at each cycle.

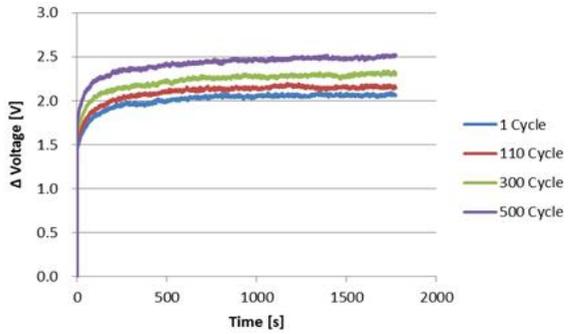


Fig. 31. Battery simulator output voltage variation at each cycle.

## 6. 결 론

본 논문에서는 리튬 배터리의 동특성 및 노화 임피던스 특성을 고려한 모델을 적용한 시뮬레이터에 대한 연구를 진행하였다. 배터리의 기본 특성에 대해 설명하고 SOC 별 OCV 곡선 및 임피던스 측정 방법 및 배터리 노화에 관해 설명하였다. 실제 배터리를 대상으로 OCV 전압 곡선 및 비선형적인 동특성을 모의하기 위해서 배터리 특성 도출 시험 및 모델링 방법에 대해 설명하고 각 특성 파라미터를 추출하였다. 추출된 파라미터는 배터리 시뮬레이터에 적용하여 배터리의 전원을 모의하여 리튬 배터리와 동일한 성능 및 전압 프로파일을 출력할 수 있도록 구현하였다. 또한 배터리 노화에 대한 언급과 노화에 의해 발생하는 배터리의 특성에 대해 논하고 이를 배터리 시뮬레이터에 적용하고 구현하였다. 동특성 및 노화 특성을 포함한 배터리 시뮬레이터의 출력 특성은 실제 배터리와의 비교를 통해 실제 배터리 특성과 매우 유사함을 입증하였다. 따라서 본 논문을 참고 시 다양한 배터리 특성을 묘사할 수 있는 시뮬레이터 제작에 매우 유용할 것이라 예상된다.

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원 (KETEP)의 지원으로 수행되었습니다. (No. 20153010024470, No. 20194010201830)

## References

- [1] J. K. Kim and C. K. Park, "Policy study for building a battery trading market after using electric vehicles," *Korea Energy Economics Institute*, 2018.
- [2] L. C. Casals, B. A. García, and C. Canalc, "Second life batteries lifespan: Rest of useful life and environmental analysis," *Journal of Environmental Management*, Vol. 232, pp. 354-363, 2019.
- [3] A. Jossen, "Fundamentals of battery dynamics," *Journal of Power Sources*, Vol. 154, pp. 530-538, 2006.
- [4] J. H. Lee, D. S. In, N. E. Heo, Y. M. Park, K. W. Park, and B. K. Kwon, "Development of battery simulator for performance verification of MW-class PCS," *The Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 21, No. 2, Apr. 2016.
- [5] J. D. Boles, Y. Ma, W. Cao, L. M. Tolbert, and F. Wang, "Battery energy storage emulation in a converter based power system emulator," in *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Mar. 2017.
- [6] T. Mesbahi, N. Rizoug, P. Bartholomeüs, and P. L. Moigne, "Li-ion battery emulator for electric vehicle applications," in *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Oct. 2013.
- [7] S. C. Choi, J. H. Lee, Y. S. Noh, D. Y. Kim, B. J. Kim, and C. Y. Won, "Load and source battery simulator based on Z-source rectifier," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 32, No. 8, pp. 6119-6134, Aug. 2017.
- [8] T. Mesbahi, N. Rizoug, F. Khenfri, P. Bartholomeu, and P. L. Moigne, "Dynamical modelling and emulation of Li-ion batteries/supercapacitors hybrid power supply for electric vehicle applications," *IET Electrical Systems in Transportation*, Vol. 7, No. 2, pp. 161-169, Jun. 2017.
- [9] S. Buller, "Impedance-based simulation models for energy storage devices in advanced automotive power systems," *Dissertation, RWTH Aachen*, 2002.
- [10] H. R. Choi, H. S. Ban, H. S. Mok, W. S. Shin, and J. M. Ko, "A study on electrical modeling for charge/ discharge analysis of Li-polymer battery," *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 5, No. 5, pp. 435-442, 2000.
- [11] J. H. Lee, S. H. Kim, W. Kim, and W. J. Choi, "A research on the estimation method for the SOC of the lithium batteries using AC impedance," *The Transactions of the Korean Institute of the Power Electronics*, Vol. 14, No. 6, pp. 457-465, 2009.
- [12] M. Broussely, P. Biensan, F. Bonhomme, P. Blanchard, S. Herreyre, K. Nechev, and R. J. Staniewicz, "Main aging mechanisms in Li ion batteries," *Journal of Power Sources*, Vol. 146, pp. 90-96, Aug. 2005.
- [13] S. H. Lee and M. K. Park, "Battery state of charge estimation considering the battery aging," *Institute of Korean Electrical and Electronics Engineers*, Vol. 18, No. 3, pp. 298-304, Sep. 2014.
- [14] T. Goh, M. Park, G. Koo, M. Seo, and S. W. Kim, "State-of-health estimation algorithm of Li-ion battery using impedance at low sampling rate," in *2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Conference*, Oct. 2016.
- [15] D. Haifeng, W. Xuezhe, and S. Zechangm, "A new SOH prediction concept for the power lithium-ion battery used on HEVs," in *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, pp. 1649-1653, Sep. 2009.
- [16] U. Troltzsch, O. Kanoun, and H. R. Trankler, "Characterizing aging effects of lithium ion batteries by impedance spectroscopy," *Electrochimica Acta*, Vol. 51, pp. 1664-1672, Jan. 2006.
- [17] K-bia, "Secondary lithium-ion cell and battery system for battery energy storage systems-performance and safety test methods," [Online]. Available: <http://www.k-bia.or.kr>, SPS\_KBIA\_10104-03.
- [18] J. H. Lee and W. J. Choi, "Development of the low cost impedance spectroscopy system for modeling the electrochemical power sources," *The Transactions of the Korean Institute of the Power Electronics*, Vol. 13, No. 1, pp. 46-54, Feb. 2008.



### 이종학(李鐘鶴)

1984년 7월 15일생. 2009년 숭실대 전기공학과 졸업. 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2016년~현재 광운대 전기과 박사과정. 2011년~2017년 (주)포스코ICT 제어시스템연구그룹 선임연구원. 2017년~현재 현대모비스 전동화요소기술팀 책임연구원.



### 김수빈(金秀彬)

1988년 11월 2일생. 2014년 광운대 전기공학과 졸업. 2016년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2016년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



### 오상근(吳相根)

1977년 1월 25일생. 2004년 서울과학기술대 제어계측과 졸업. 2012년 광운대 전기공학과 졸업(석사). 2014년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 2007년~현재 (주)플러스포 시스템사업본부 본부장.



### 송승호(宋丞鎬)

1968년 8월 27일생. 1991년 서울대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학부 졸업(공학박). 2000년~2006년 전북대 전자정보공학부 조교수. 2006년~현재 광운대 전기공학과 교수. 당 학회 편집이사.