

# 에너지저장장치를 위한 고용량 리튬이온 배터리의 C-rate별 노화도를 고려한 전기적 특성 파라미터 가변성 분석 연구

김동원\*, 문태석\*, 김재원\*, 최형규\*, 김종훈\*  
충남대학교\*

## Analysis of parameter considered electrical properties of C-rate and aging in high capacity lithium-ion battery for ESS

Dongwon Kim\*, Taesuk Mun\*, Jaewon Kim\*, Choi Hyeonggyu\*, Jonghoon Kim\*  
Chungnam National University\*

### ABSTRACT

본 논문에서는 배터리의 장기적인 노화에 따른 파라미터 분석을 C-rate에 따라서 진행하였다. 이를 위해 배터리 등가회로 모델 기반의 파라미터를 추출하여 분석하였으며 이를 통해 배터리가 노화함에 따라 나타나는 특성을 분석한다.

### 1. 서론

리튬 이온 배터리는 다른 배터리에 비해 고출력 및 고에너지 특성이 있어, 신재생에너지의 에너지 저장장치(Energy Storage System; ESS), 전기자동차, 전기자전거와 스마트폰에 많이 사용되고 있다. 이러한 어플리케이션의 장기간 사용을 위해 배터리의 신뢰성 및 안정성에 대한 기준이 요구된다. 특히 노화가 진행됨에 따라 내부 특성변화로 인해 전압 변동률이 변하게 되고 이에 따라 가용할 수 있는 용량도 변하기 때문에 노화 특성을 고려하지 않으면 과충전 및 과방전과 같은 안전 문제를 일으킬 수 있다.<sup>[1]</sup> 이를 위해서 노화 및 부하 조건에 따른 세밀한 분석이 필요하고 배터리 특성을 분석하는 것이 매우 중요하다.

본 논문에서는 고용량 배터리인 INA 21700-33J 배터리를 사용하여 C-rate에 따른 전기적 특성실험을 수행하고 이를 기반으로 배터리의 특성을 분석한다. 다양한 어플리케이션의 특성마다 요구하는 C-rate 다르고 이에 따른 노화의 특성이 바뀌게 된다<sup>[2]</sup>. 따라서 본 논문에서는 이러한 셀 특성을 파악하기 위해서 C-rate에 따른 노화 특성을 배터리 등가회로 모델 기반 전기적 내부 파라미터 특성 분석을 진행한다. 배터리의 노화 실험을 통해 배터리의 개방 회로 전압 (Open Circuit Voltage; OCV), 내부 저항을 측정하여 노화도에 따른 파라미터를 분석 및 비교하였다.

### 2. 배터리 등가회로 모델

본 논문에서는 C-rate 및 노화도에 따른 배터리의 특성을 분석하기 위해서 그림 1과 같은 등가 모델을 사용하였다. 등가 모델은 전기화학적 모델링 기법에 비해서 적은 수의 파라미터를 사용하여 쉽게 모델링 가능한 장점이 있어 많은 분야에서 활용되고 있다. 배터리 등가회로 모델은 OCV, 직렬저항( $R_i$ ) 그리고 확산 저항( $R_{diff}$ )과 커패시턴스( $C_{diff}$ )가 병렬로 조합된 회로로 구성된다. 배터리 등가회로 모델의 단자 전압은 식 (1)와 같이 계산할 수 있다.

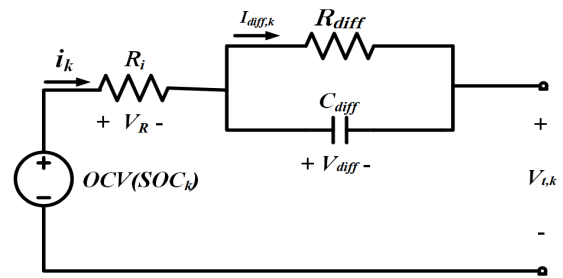


그림 1 배터리 등가회로 모델링  
Fig. 1 Battery equivalent circuit modeling

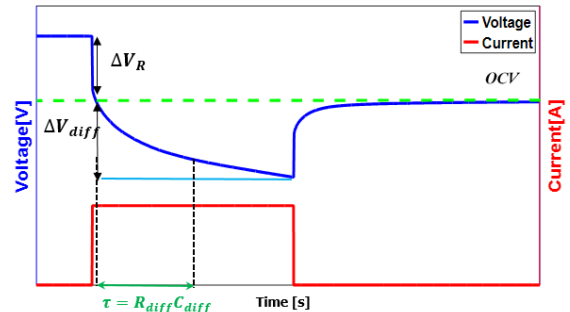


그림 2 배터리 등가회로 모델 기반 파라미터 추출방법  
Fig. 2 Parameter extraction method for equivalent circuit model

$$V_{i,k} = OCV(SOC_k) - R_i i_k - R_{diff} \dot{q}_{diff} \quad (1)$$

OCV는 배터리에 전류가 인가되지 않은 상태에서 전압이 안정화 되었을 때의 전압이며 그림 2에서 도시하였듯이 방전 후 전압이 특정 값에 수렴되는 값으로 OCV를 추출한다. 그림 2에서 전류가 인가되었을 때 순간적인 전압 강하는 직렬 저항( $R_i$ )으로 모델링 가능하며 이는 식 (2)와 같이 옴의 법칙을 통해 계산한다.

$$R_i = \frac{\Delta V_R}{\Delta i_k} \quad (2)$$

배터리 등가 모델에서 확산 저항은 커패시턴스가 병렬로 연결되어 있다. 따라서 확산 저항에 흐르는 전류는 식 (3)과 같으며 저항은 식 (4)와 같이 계산한다. 그림 2에서  $\tau$ 는 배터리 전압의 시정수이며 확산 저항과 커패시턴스의 곱으로 계산할 수 있다.

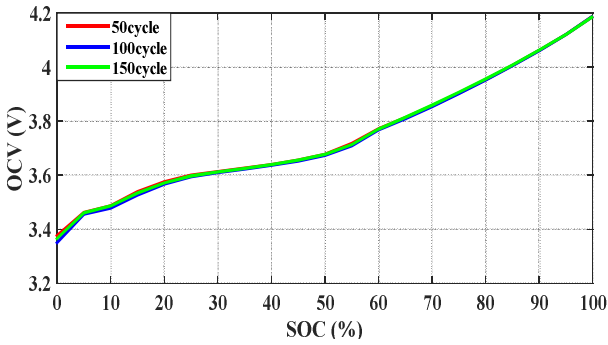
$$I_{diff,k+1} = \exp\left(-\frac{\Delta t}{R_{diff} C_{diff}}\right) I_{diff,k} + \left(1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{R_{diff} C_{diff}}\right)\right) i_k \quad (3)$$

$$R_i = \Delta V_R / \Delta i_k, R_{diff} = \Delta V_{diff} / \Delta I_{diff} \quad (4)$$

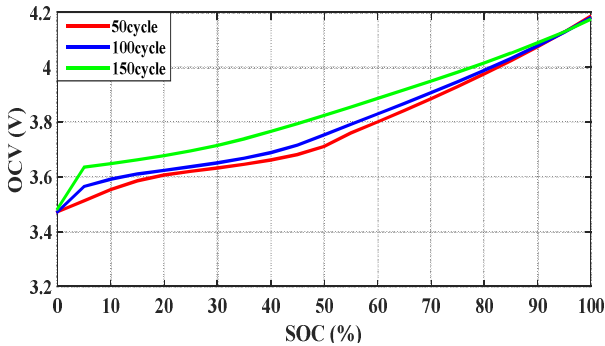
### 3. 배터리 전류량에 따른 노화도 분석

#### 3.1 실험 조건

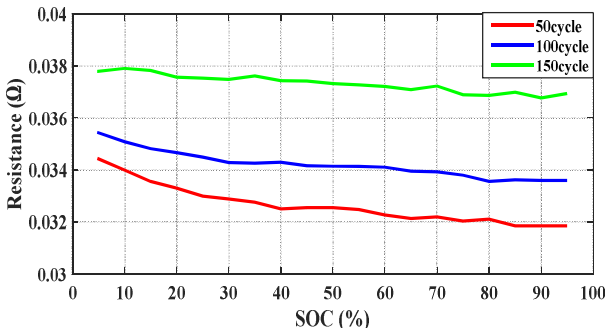
본 논문에서는 C-rate에 따라 충/방전을 실시하여 노화에 따른 배터리의 특성을 분석하였다. 해당 실험은 정확한 특성을 파악하기 위해서 상온(25°C)에서 진행하였다. 배터리의 파라미터는 SOC 구간마다 파라미터를 추출하였으며 충/방전 50회 마다 측정하였다.



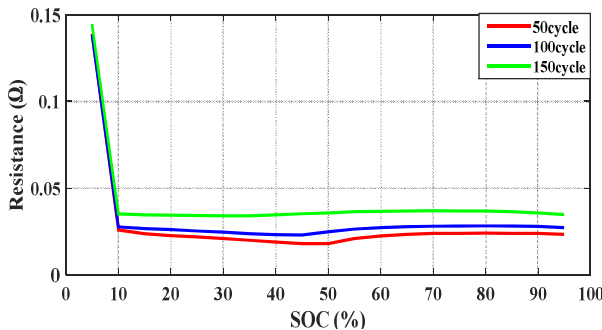
(가) 노화도에 따른 OCV (0.5C-rate)



(나) 노화도에 따른 OCV (2C-rate)



(다) 노화도에 따른  $R_i$  (2C-rate)



(라) 노화도에 따른  $R_{diff}$  (2C-rate)

그림 3 노화도에 따른 파라미터 비교 분석

Fig. 3 Parameter comparative analysis according to the cycling

#### 3.2 배터리 전기적 특성 분석

본 장에서는 SOC별 노화도에 따른 OCV와  $R_i$ ,  $R_{diff}$ 를 중점적으로 비교 및 분석하였다. 그림 3의 (가), (나)는 노화도에 따른 OCV의 경향성을 나타낸다. 0.5C(1.6A)의 경우 50cycle대비 OCV의 변화량은 150cycle과 평균 0.0324% 차이가 발생하였으며, 2C(6.4A)의 경우 50cycle대비 OCV의 변화량은 150cycle과 평균 1.8072% 차이가 발생하였다. 이를 통해 노화가 진행될수록 0.5C 경우 차이가 0.0324%로 거의 없지만 2C 경우 1.8072% 차이가 더 크다는 걸 알 수 있다. 또한 그림 3-(나)를 통해 2C일 때 OCV가 상대적으로 높게 측정되는 것을 확인할 수 있다.

C-rate가 높아질수록 OCV가 높게 측정되는 이유는 그림 3-(다), (라)에 나타내었듯이 배터리의 충/방전이 반복되어 노화가 진행될수록 저항  $R_i$ ,  $R_{diff}$ 이 많이 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 이러한 저항 증가로 인해 2C에서 OCV가 노화함에 따라 증가하였다. 그림 3-(다)에서는 50cycle 대비 100cycle의 평균  $R_i$ 는 4.7089% 차이가 발생하였고, 50cycle 대비 150cycle의 평균  $R_i$ 는 14.0918% 차이가 발생하였다. 같은 방법으로  $R_{diff}$ 에 적용해보면 그림 3-(라)에서는 50cycle 대비 100 cycle의 평균  $R_{diff}$ 는 18.1028% 차이가 발생하였고, 50cycle 대비 150 cycle의 평균  $R_{diff}$ 는 57.8705% 차이가 발생하였다. 따라서 배터리가 C-rate가 높을수록 노화가 더욱 빨리 진행되는 것을 확인할 수 있다.

### 4. 결론

본 논문에서는 고용량 셀을 사용하여 C-rate에 따른 전기적 특성의 분석을 하였다. 특성 분석 결과 낮은 C-rate에서는 노화에 따른 영향성이 상대적으로 적지만 높은 C-rate에서는 노화에 대한 영향성이 매우 큰 것으로 나타났다. 따라서 높은 C-rate를 요구하는 어플리케이션일수록 노화에 대한 정밀한 특성 분석이 더욱 요구된다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.  
(No. 20182410105280)

### 참고 문헌

- [1] M. Ecker, N. Nieto, S. Käbitz, J. Schmalstieg, H. Blanke, A. Warnecke, D.U. Sauer, "Calendar and cycle life study of Li(NiMnCo)O<sub>2</sub>-based 18650 lithium-ion batteries", J. Power Sources, vol. 248, pp. 839 - 851, 2014
- [2] Xuebing Han, Languang Lu, Yuejiu Zheng, Xuning Feng, Zhe Li, Jianqiu Li, and Minggao Ouyang, "A review on the key issues of the lithium ion battery degradation among the whole life cycle," eTransportation, vol. 1, 2019.