

# 고출력 18650 리튬이온 배터리의 가변전류 열해석 및 추정

강태우\*, 유기수\*\*, 이평연\* 김종훈\*  
 충남대학교\*, 영남대학교\*\*

## Thermal analysis and estimation of high power 18650 lithium ion battery under varying current condition

Taewoo Kang\*\*, Kisoo Yoo\*\*, Pyeong-Yeon Lee\*, Jonghoon Kim\*  
 Chungnam University\*, Yeungnam University\*\*

### ABSTRACT

본 논문은 1차 RC 등가회로를 이용하여 리튬이온 배터리의 저항성 발열인 비가역 발열의 파라미터를 제시하였다. 발열 추정을 위해 1 C-rate에서 HPPC(Hybrid Pulse Power Characterization) 실험을 통하여 비가역 발열의 파라미터인 SOC 5%별 내부 저항을 추출하였다. 추출된 SOC 5%별 저항을 이용하여 1C-rate에서 3C-rate로 변화하는 조건에서 열 추정 성능을 확인하였다. 높은 C-rate로 방전 전류가 변화하는 상황에서 발열 시뮬레이션과 실험값을 비교하였으며, 1C-rate의 HPPC 실험에서 얻어진 내부 저항이 부하의 변동에 따른 리튬이온 배터리의 발열 추정 파라미터로써 사용될 수 있음을 검증하였다.

### 1. 서론

최근 리튬이온 배터리는 높은 에너지 밀도와 출력으로 전기 자동차(EV)나 하이브리드 자동차(HEV)에 사용되어왔다. 전기 자동차나 하이브리드 자동차는 가속 상황에서 높은 출력을 요구하기 때문에 높은 C-rate에서의 방전이 일어난다. 높은 C-rate에서 방전이 일어남에 따라 리튬이온 배터리의 발열은 심각한 문제로 떠오르고 있다. 리튬이온 배터리의 발열은 배터리의 열 폭주와 어플리케이션의 성능에 직접적으로 영향을 준다. 따라서 배터리의 열관리는 중요 쟁점으로 연구되어 왔다.

리튬이온 배터리의 발열에 관한 많은 연구가 진행되고 있으며, 에너지 방정식 기반 배터리 모델이 처음으로 제시되었다<sup>[1]</sup>. 리튬이온 배터리의 발열은 가역 발열과 비가역 발열로 구분할 수 있다. 가역 발열은 낮은 C-rate에서 지배적인 반면에 비가역 발열은 높은 C-rate에서 지배적이다. 가역 발열은 0.5C-rate 이하에서 지배적이다. 가역 발열은 배터리 내부의 엔트로피 변화량에 의존한다. 이러한 변화량은 DOD(Depth of Discharge) 별로 연구되어왔다<sup>[3]</sup>. 하지만, 높은 C-rate에서는 가역 발열을 무시할 수 있을 만큼 작다.

본 논문에서는 NCA(LiNiCoAlO<sub>2</sub>) 계열 18650 고출력 리튬이온 배터리를 사용했고 전기자동차의 가속 상황에서의 발열 추정을 위해 1C-rate에서 3C-rate로 방전 전류를 변화시켜 발열 추정을 수행하였다. 또한, 1C-rate에서의 충전 상태(state of charge ;SOC)별 내부 저항을 추출하여 발열 파라미터로써 사용하였다. 전기적 특성 실험을 통해 얻어진 SOC별 내부 저항을 사용하고, 부하의 조건을 1C-rate에서 3C-rate로 변화하였을 때 1C-rate의 내부 저항을 사용함에 있어 COMSOL 열 추정 시뮬레이션과 실험 간 발열량을 비교 및 검증하였다.

### 2. 고출력 18650 리튬이온 배터리의 가변전류 발열 해석 및 열 추정

#### 2.1 Electro-thermal equations

리튬이온 배터리의 내부에서 발생하는 총 발열량은 비가역 발열과 가역 발열의 합으로 표현된다. 비가역 발열은 배터리의 내부 저항에 의한 저항성 발열이다. 가역 발열은 충·방전 시 배터리 내부에서 일어나는 화학반응에 의한 결과이다. 식 (1)은 방전 및 충전 시 배터리 내부에서 생성되는 열을 나타낸다.  $q_{irrev}$ 는 비가역 발열,  $q_{rev}$ 는 가역 발열을 나타낸다. 비가역 발열은 식 (2)로 표현되는데  $i$ 는 전류,  $R$ 은 배터리의 내부 저항이다. 식 (3)은 가역 발열을 표현하며 배터리 내부의 엔트로피의 변화량( $\Delta S$ ), 전류( $i$ ) 그리고 배터리의 온도( $T_{cell}$ )에 영향을 받는다. 가역 발열 식 (3)에서  $n$ 은 전자의 개수 그리고  $F$ 는 페라데이 상수이다. 식 (4)는 리튬이온 배터리의 발열이 대류 조건에 의해 손실되는 열( $q_{diss}$ )을 나타낸다. 식 (4)에서  $A$ 는 면적,  $h$ 는 열전달 계수 그리고  $T_{amb}$ 는 주위의 온도이다. 본 논문에서 모든 실험은 항온 챔버에서 진행하였고, 공기의 유속에 따라 열전달 계수가 결정되는 강제 대류 조건을 형성한다. 식 (5)는 측정되는 배터리의 총 발열량( $q$ )이고, 내부에서 생성되는 열( $q_{cell}$ )과 외부 조건에 의해 손실되는 열( $q_{diss}$ )의 합이다.

$$q_{cell} = i_e + q_{rev} \quad (1)$$

$$q_{irrev} = i^2 R \quad (2)$$

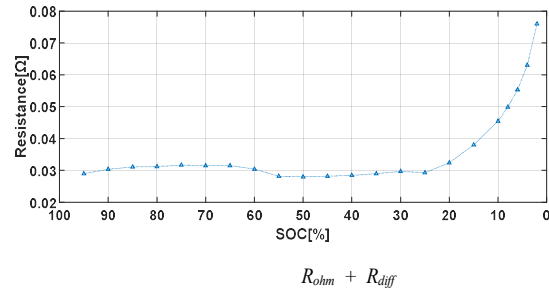
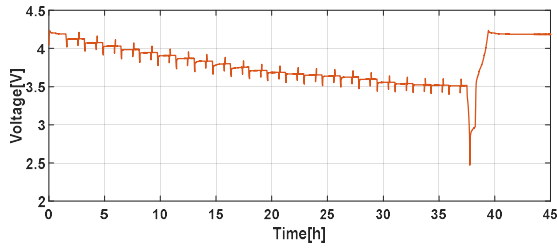
$$q_{rev} = i_{cell} \Delta S / (n F) \quad (3)$$

$$q_{diss} = h A (T_{cell} - T_{amb}) \quad (4)$$

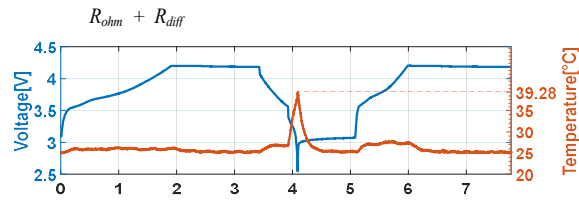
$$q = q_{cell} + q_{diss} \quad (5)$$

#### 2.2 전기적 특성 실험

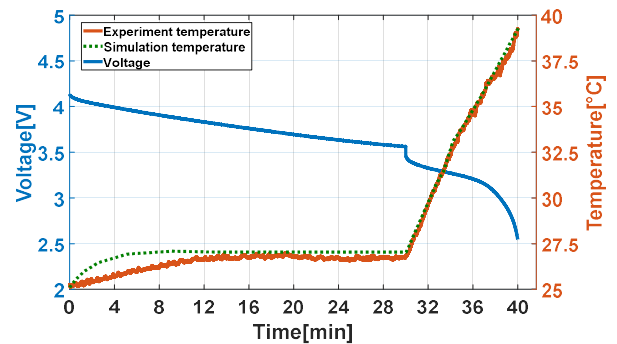
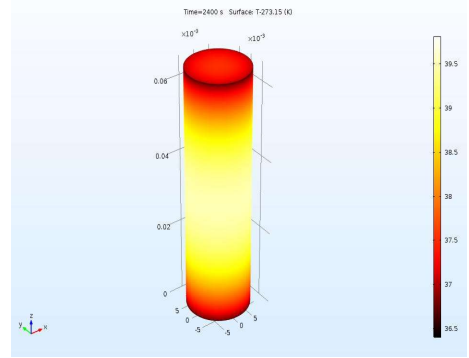
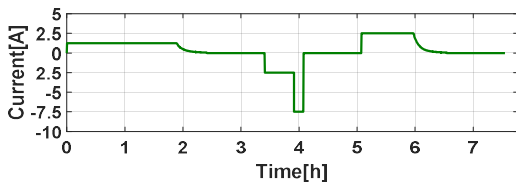
단일 리튬이온 셀의 발열량 추정 파라미터를 추출하기 위한 HPPC(Hybrid Pulse Power Characterization) 테스트를 진행하였다. 그림 1에서 보이듯 충전 상한 전압(4.2V)까지 완전 충전 이후 1C(2.5A)로 SOC 95~10% 구간은 SOC 5%씩 방전하고 SOC 10~0% 구간은 SOC 2%씩 방전하였다. 배터리의 저항은 낮은 SOC 일수록 비선형적인 특성 보임으로 낮은 SOC 구간에서 2%씩 방전하였다. 각 SOC에서 HPPC 실험을 진행하며, 방전과 충전의 펄스 전류를 10초간 적용한다. 그림 2는 HPPC 실험 결과에 따른 SOC별 저항을 나타낸다<sup>[2]</sup>. 그림 3은 CC-CV(Constant Current-Constant voltage)조건인 0.5C-rate



$$R_{ohm} + R_{diff}$$



$$R_{ohm} + R_{diff}$$



충전과 1시간의 휴지 시간 이후 SOC 100%~SOC 50%까지 1C-rate의 방전, SOC 50%~0%까지 3C-rate로 방전하였다. C-rate의 변화가 있는 시점인 SOC 50%를 기점으로 배터리의 온도가 급격히 상승함을 확인하였다. 2.3절에서는 부하가 변화하는 구간의 온도를 비교 및 검증하며, 그림 2의 SOC별 저항과 COMSOL을 사용하였다.

### 2.3 시뮬레이션 결과와 실험 비교

전기자동차의 순간적인 가속에서의 발열량을 추정하기 위해 방전 전류 1C-rate에서 3C-rate로 SOC 50%에서 전류를 변화하였다. SOC 100~50%까지 정속 운행을 가정하여 1C-rate로 방전 전류를 인가하였고, SOC 50~0%까지 순간적으로 고속 운행을 가정하여 3C(7.5A)로 방전 전류를 인가하였다. 그림 4는 등가 모델에 의해 얻어진 내부 저항을 나타내며, 부하가 1C-rate에서 3C-rate로 변화하는 상황에서 발열량 시뮬레이션의 결과이다. 그림 5는 실험결과와 시뮬레이션 결과의 비교를 보여준다. 본 논문에서 사용된 1C-rate의 내부 저항은 1C-rate의 부하뿐만 아니라 1C-rate이상의 부하에서도 열 추정 성능을 확인하였고, 시뮬레이션과 실제의 온도를 비교 및 검증하였다.

### 3. 결론

본 논문은 18650 NCA 단일 리튬이온 배터리의 부하 변화에 따른 배터리 온도를 추정하기 위한 발열량을 확인하였다. 1C-rate로 진행한 HPPC 테스트에서 추출한 내부 저항을 사용하여, 저항성 발열인 비가역 발열을 1C-rate에서 3C-rate로 변화하여 온도를 추정하였다. 1C-rate의 HPPC 실험에서 얻어진 내부 저항은 1C-rate이상의 부하 조건에서도 열 추정이 가능함을 COMSOL 시뮬레이션과 실험값 비교를 통해 검증하였다.

이 논문은 2018년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임.  
(NRF-2018R1C1B6004482)

### 참고 문헌

- [1] D. Bernardi, E. Pawlikowski, J. Newman, "A general energy balance for battery system", Journal of the Electrochemical Society, 1985, 132, 5
- [2] 강태우, 강덕훈, 이평연, 유기수, 김종훈, "고출력 18650 리튬이온 배터리의 Electro-thermal 해석 및 실험 검증", 전력전자학회 학술대회 논문집,(),137-138. 2018
- [3] R. Jhao, J. Gu, J. Liu, "An investigation on the significance of reversible heat to the thermal behavior of lithium ion battery through simulations", Journal of Power Sources, 2016, 266, pp. 422-432