

고출력 18650 리튬이온 배터리의 Electro-thermal 해석 및 실험 검증

강태우*, 강덕훈*, 이평연*, 유기수**, 김종훈*

충남대학교 전기공학과*, 영남대학교 기계공학부**

Electro-thermal interpretation and experimental validation of high power 18650 lithium ion battery

Tae-Woo Kang*, Deok-Hun Kang*, Pyeong-Yeon Lee*, Ki-Soo Yu**, Jonghoon Kim*

Chungnam University*, Youngnam University**

ABSTRACT

본 논문은 단일 배터리의 발열량 추정을 위한 전기-열적 해석을 수행하였다. 셀의 물리적 특성, SOC별 저항에 중점을 두어 발열량 추정을 하였다. 실험과 시뮬레이션을 비교하여 제시한 모델과 발열 저항의 의미를 확립 및 검증하며 단일 배터리의 방전구간 발열량을 추정하였다.

1. 서 론

최근 리튬 이온 배터리는 높은 밀도의 에너지, 높은 출력, 낮은 자가 방전율과 긴 수명으로 인해 다양한 어플리케이션에 적용되고 있다. 배터리 사용 시 생성되는 열은 안전과 관련된 문제로 다루어지고 있다. 이는 배터리의 열화와 장시간 구동에 영향을 미치는 요소로 작용한다. 따라서 배터리의 정확한 발열량 추정과 예측이 요구된다.

본 논문은 NCA(LiNiCoAlO₂) 18650 HE4 배터리를 사용하였다. 저항 성분을 통해 전기-열 모델을 제시하였고 발열량, 정 전류와 정전압 실험을 통해 저항을 추출하였다. 배터리의 발열량을 추정하기 위한 방법에는 전기화학적 해석 방법과 전기-열적 해석 방법이 있다. 전기화학적 해석은 리튬이온의 농도, 전류 밀도 및 온도 분포가 결합되어 해석 시 계산 량의 부담이 크다. 하지만 전기-열적 해석은 간단한 식과 파라미터로 리튬이온 셀의 발열량 예측이 가능하다. 전기적 특성으로 추출한 저항과 발열량을 기반으로 추출한 저항을 비교 분석하여 제시한 모델을 검증하였다. 이후 추출된 저항으로 COMSOL을 이용한 단일 셀 방전 시 발열량의 시뮬레이션 결과 값과 실제 방전구간에서의 발열량을 비교하였다.

2. 단일 셀 배터리의 발열량 해석과 실험적 증명

2.1 전기-열 방정식

최근 배터리 열 모델은 Bernardi에 의해 에너지 균형을 기반으로 간소화 되었다^[1]. 배터리 내부에서 발생하는 총 발열량 q_{cell} 은 비가역 발열량인 q_{irrev} 와 가역 발열량인 q_{rev} 의 합으로 식 (1)과같이 표현된다. 세부적으로 비가역 발열인 q_{irrev} 는 식 (2), 가역 발열인 q_{rev} 은 식 (3)을 사용한다. 식 (2)에서 I 는 전류 R 은 셀 저항으로 저항 발열을 의미한다. 식 (3)은 엔트로피의 변화량(ΔS)과 페러데이 상수(F)와 리튬이온 배터리의 반응 시 이동되는 전자의 수(n), 셀 온도(T_{cell})가 결합된 식을 나타낸다. 식 (2), (3)에서 보듯이 총 발열(q_{cell})은 비가역 발열이 가역 발열보다 높은 전류, 즉 높은 C-rate에서 지배적이다. 또한 측정되는 셀 표면에서 측정되는 발열량은 방전 시 생성되는 발열량(q_{cell})과 외부 온도조건(T_{amb})과 대류조건에 의해 발생하는 열 손실인 q_{diss} 의 합으로 표현된다. q_{diss} 는 식 (4)와 같이 뉴턴-냉

각법칙을 사용하며 A 는 면적, h 는 열전달 계수를 의미한다. 셀 표면에서 측정되는 총 발열량은 식 (5)로 식(2),(3),(4)의 합과 같다.

$$q_{cell} = q_{irrev} + q_{rev} \tag{1}$$

$$q_{irrev} = i^2 \cdot R \tag{2}$$

$$q_{rev} = i \cdot T_{cell} \cdot \Delta S / (n \cdot F) \tag{3}$$

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

$$q = q_{cell} + q_{diss} \tag{5}$$

2.2 전기적 등가 회로 모델

그림 1은 리튬이온 배터리의 전기적 등가 회로 모델을 나타낸다. 리튬이온 셀의 발열량 계산을 위해 1차 RC병렬 회로를 사용했다. 전기적 모델에서 OCV(Open Circuit Voltage)는 전류가 흐르지 않을 때 측정되는 전압이다. 셀의 발열량 추정 파라미터인 내부저항(R)은 ohmic저항(R_o)과 polarization저항(R_p)의 합으로 표현하였다. 이후 2.4절에서 내부저항의 표현을 실험적으로 증명하였다.

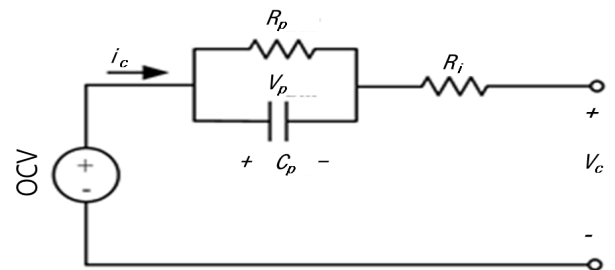


그림 1 배터리 등가 모델^[2]

Fig. 1 Battery equivalent circuit model^[2]

2.3 전기적 특성 및 발열 실험

본 논문에서는 18650 HE4 NCA(LiNiCoAlO₂) 배터리를 사용하여 전기적 특성 실험을 하였다. 셀 파라미터인 SOC(State Of Charge)별 내부 저항을 추출하기 위해 HPPC(Hybrid Pulse Power Characterization) 테스트를 진행하였다. 0.1초의 주기로 데이터를 샘플링 하였고, 그림 2와 같이 완정충전 이후 1C(2.5A)로 SOC 95% ~ 10%에서는 5%씩, SOC 10% ~ 2%구간에서는 2%씩 방전, HPPC 테스트를 진행하였다. 낮은 SOC구간에서 저항은 비선형적 특성을 지니기 때문에 정확한 저항 측정을 위하여 낮은 SOC 구간(SOC 10% ~ 2%)에서 SOC 2% 간격으로 HPPC 테스트를 수행하였다. 전기적 특성 실험을 진행하면서 온도측정도 같이 이루어졌으며 그 결과는 그림 2와 같이 나타난다. 또한 각 SOC별 방전구간에서의 발열량 기반 저항 추출을 하였다. 발열량 기반 저항 추출 시 사용된 파라미터는 SOC 5% 및 2%별 방전동안 발열되었을

때 발열 최대값에서 안정화된 값을 뺀 온도 변화량을 사용하였다

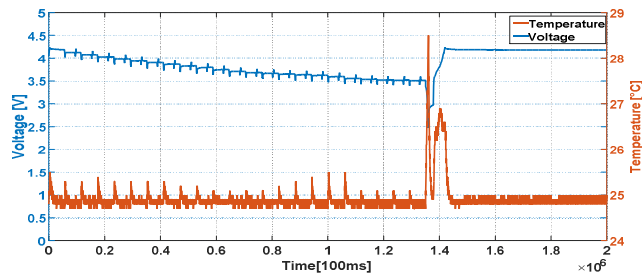


그림 3 HPPC 테스트 실험 프로파일
Fig. 2 HPPC test profile

2.4 저항 추출 방법에 따른 SOC별 내부 저항 비교

그림 3은 전기적 특성을 이용하여 추출한 저항과 발열량을 기반으로 추출한 저항을 비교하였다. 각각의 저항추출 방법은 Hans-Georg Schweiger^[3]이 제시하였다. 리튬 이온 셀의 열적 파라미터는 Kenneth Parsons^[4]가 명시하였고 표 1과 같다. 그림 3은 1차 RC회로에서의 ohmic저항(R_i)과 polarization저항(R_p)의 합으로 표현되는 내부저항(R)은 실제 SOC별 발열량으로 추출한 저항과 비교하였을때 평균오차 0.5% 이내로 유사한 경향성 및 일치성을 보여준다. 따라서 그림 1에서 제시한 등가회로 모델의 저항 성분인 ohmic저항(R_i) polarization저항(R_p)은 비가역 발열 식 (2)의 저항 성분으로써의 의미를 가진다.

표 1 리튬이온 배터리의 물리적 파라미터

Table 1 Physical parameters of generic lithium-ion cell

Battery	Density [kg/m ³]	2618
	Specific Heat [J/kgK]	950±20
	Thermal Conductivity [W/mK]	3

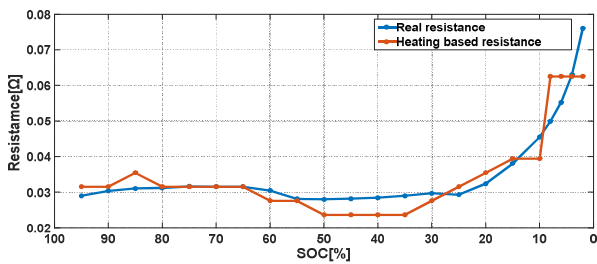


그림 3 저항 추출 방법에 따른 SOC별 저항 비교
Fig. 3 Comparison of resistance according to methods

2.5 시뮬레이션과 실험 비교

그림 4는 전기적 특성을 이용하여 추출한 SOC별 내부저항(R)을 사용하여 1C(2.5A) 방전구간에서의 발열 시뮬레이션 결과를 3D 형상으로 나타내었다. 초기온도는 25°C이고 발열 최고 온도 값은 30.37°C로 나타난다. 그림 5는 그림 4의 시간에 따른 시뮬레이션의 발열과정을 실제 1C 방전 실험에서의 발열 과정과 비교하였고 평균 오차는 0.3%미만이다. 1C 방전 실험은 항온항습 챔버에서 진행되었으며 25°C를 유지한다. 이는 발열 관점에서 보았을 때 강제 대류조건을 형성한다. 이에 따른 챔버 내부 공기의 유속에 따른 대류 및 열전달 조건도 고려하였다. 사용자의 실험 장비에 따라 다르지만 본 논문 시뮬레이션의 공기의 유속은 2±0.5 m/s로 설정 하였다. 배터리 형상에서의 강제 대류와 열전달 모델은 Frank P. Incropera^[5]가 제시하였다.

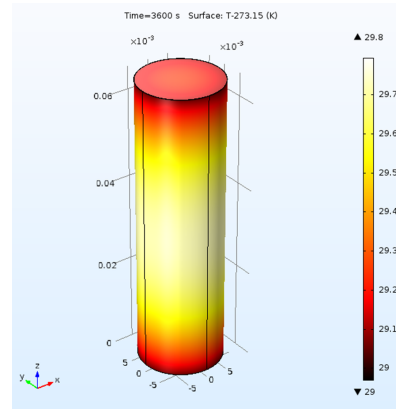


그림 4 1C 방전 3D 시뮬레이션 결과
Fig. 4 1C discharge 3D simulation result

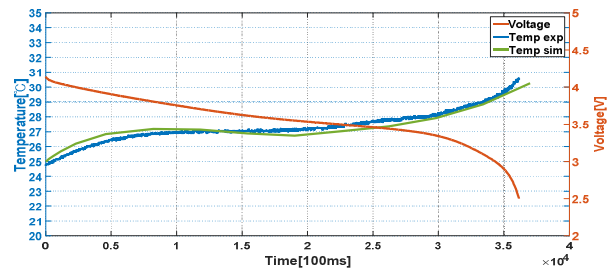


그림 5 1C 방전 실험 결과와 시뮬레이션의 비교
Fig. 5 Comparison of 1C discharge experiment and simulation

3. 결론

본 논문에서는 18650 단일 셀의 발열량을 추정하기 위해 전기-열 모델을 제시하였다. 전기-열 모델의 파라미터인 저항을 HPPC 테스트 기반으로 SOC 5%, 2%별 해당하는 저항과 실험한 발열량에서 역으로 추출한 저항을 비교하였다. 마지막으로 시뮬레이션 결과와 실험값의 높은 정확성과 유사성을 보이며 이후 배터리 팩 열 해석 연구의 바탕이 될 수 있다.

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. NRF-2018R1C1B6004482)

참고 문헌

- [1] D. Bernardi, "A General Energy Balance for Battery Systems", Journal of the Electrochemical Society, 1985
- [2] Gregory L. Plett. "Battery Management Systems: Battery Modeling". Boston: Artech House, 2015
- [3] Hans-Georg Schweiger, "Comparison of Several Methods for Determining the Internal Resistance of Lithium Ion Cells", Journal of Sensors and Sensor Systems, 2010
- [4] Kevin Kenneth Parsons, "Design and Simulation of Passive Thermal Management System for Lithium-Ion Battery Packs on an Unmanned Ground Vehicle", M.S. thesis, Dept. Mech, California Univ, California, USA 2012
- [5] Frank P. Incropera, "Principles of Heat and Mass Transfer", WILEY