

고용량/고출력 리튬 이차 전지의 열역학적 특성 분석 기반의 안전성 분석 방법에 대한 연구

강덕훈*, 김경진*, 김성근**, 김종훈*
 충남대학교 에너지저장변환실험실*, 현대자동차**,

Study on the safety analysis method based on thermodynamic characteristics analysis for high capacity and high power lithium battery

Deokhun Kang*, Kyungjin Kim*, Sungkeun Kim**, Jonghoon Kim*
 Chungnam National University*, Hyundai Motor Group**

ABSTRACT

리튬이온 배터리는 동작하는 과정에서 필연적으로 열이 발생하기 때문에 적절한 열 관리에 대한 전략이 필요하다. 배터리에서의 발열은 가역적인 발열과 비가역적인 발열로 분류될 수 있으며 배터리의 용도별, 동작 조건 별 발열 특성이 상이하기 때문에, 배터리의 열적 안전성 확보를 위해서는 열적 특성에 대한 분석이 필수적이다. 본 연구에서는 고용량/고출력 리튬이온 배터리의 전기적 특성 실험을 수행하고 열적 안전성 분석을 위하여 발열 특성 분석을 수행하였다. 고용량/고출력 배터리 특성에 따라 가역적 발열과 비가역적 발열이 나타나는 특성이 상이한 것으로 확인되었으며, 또한 온도 측정 정보로부터 배터리의 내부 상태 특성을 추정하고 고장 진단 및 수명 특성에 활용될 수 있음을 확인하였다.

1. 서 론

리튬이온 배터리는 대표적인 이차 전지로서, 충전과 방전을 수행하는 과정에서 필연적으로 발열이 나타난다. 발열 에너지는 배터리의 직접적인 온도 상승에 기여함은 물론, 배터리와 연결되어 있는 구조물은 물론, 주변 공기와 열 교환 하며 주변 구조물 및 환경 온도 상승을 야기할 수 있기 때문에, 배터리의 효율적이고 안전한 운용을 위해서 배터리의 발열 특성을 이해하고 이에 대한 적절한 전략 수립이 필요하다.

이러한 배터리의 관리를 위하여 배터리관리시스템(battery management system; BMS)은 전압, 전류, 온도의 측정 정보를 바탕으로 배터리의 상태를 추정하고 이러한 상태 정보를 기반으로 배터리의 모니터링을 수행하고 있다. 최근 리튬이온 관련 안전사고가 잇따르면서 다양한 상태 정보를 모니터링 하는 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 기존의 배터리 충전 상태(state of charge; SOC), 수명 상태(state of health; SOH)등 배터리의 성능 관점의 상태 정보 관리에서 불균형 상태(state of balance; SOB), 온도 상태(state of temperature; SOT), 안전 상태(state of safety; SOS)등 다양한 배터리의 상태 지표가 제안되고 이에 대한 필요성과 추정 방법들에 대한 연구가 증가하고 있다.

본 연구에서는 배터리 SOT 관점에서 열적 안전성 분석을 수행하기 위하여 배터리의 동작 온도에 가장 큰 영향을 미치는 발열에너지에 대한 분석을 수행하였다. 배터리 특성에 따라 고용량/고출력 배터리에 대한 전기적 특성 실험과 발열 특성 분

석을 위한 엔트로피 계수(entropy coefficient)를 측정하기 위한 실험을 수행하여 배터리의 발열 성분을 가역/비가역 과정으로 분류하고 배터리 특성에 따라 상이한 발열 특성을 분석하였다.

2. 리튬이온 배터리의 발열특성 분석 방법

2.1 리튬이온 배터리의 발열

리튬이온 배터리는 내부의 양극, 음극, 분리 막의 내부 구조로 구성되어 있으며, 충전과 방전을 수행하는 과정에서 내부의 화학적인 반응에 의해 전기 에너지가 저장되고 방전된다. 에너지의 변화 과정에서의 손실 에너지가 발열 에너지로 방출되며, 이러한 발열 에너지에 대한 산출은 식 (1)에 의해 산출된다.

$$Q_{cell} = I(V_t - OCV) + IT \frac{dOCV}{dT} \quad (1)$$

위의 식에서 Q_{cell} 은 단위 셀에서 발생하는 총 발열 에너지(W)이며, I 는 배터리에 인가되는 전류(A), V_t 는 배터리 단자에서의 전압(V), OCV 는 개방회로전압(open circuit voltage; OCV), T 는 배터리 셀의 온도(°C)이다. 전압과 전류의 곱에 의해 산출되는 식 (1)의 우변 제 1항은 주열(Joule heat)로서 전기의 흐름에 의해 발생하는 발열로, 비가역적인 발열(irreversible heat)에 해당한다. 온도 변화에 따라 나타나는 전압의 변화를 나타내는 식(1)의 우변 제 2항은 온도 변화에 따라 변화되는 내부의 에너지 변화에 의한 발열로, 가역적인 발열(reversible heat)에 해당한다.

각각의 발열은 전기적 특성 실험을 통하여 SOC에 따른 개방회로 전압을 추출하여 가역 발열에 대한 정보를 산출할 수 있으며, 온도 변화에 따른 개방회로전압의 변화를 측정하여 엔트로피 계수를 추출하여 비가역 발열에 대한 정보를 산출할 수 있다.

2.2 리튬이온 배터리의 특성 실험

리튬이온 배터리의 발열 특성 분석을 위해서 방전용량 실험과 엔트로피 실험을 수행하였다. 배터리는 온도에 따라 특성이 변화하기 때문에, 모든 실험은 환경 챔버의 온도를 상온(25°C) 기준으로 설정하였으며, 배터리의 방전 구간에서 특성 정보를 추출하였다. 실험 셀은 고용량 셀(INR21700-33J)과 고출력 셀(INR21700-30T)이 사용되었다.

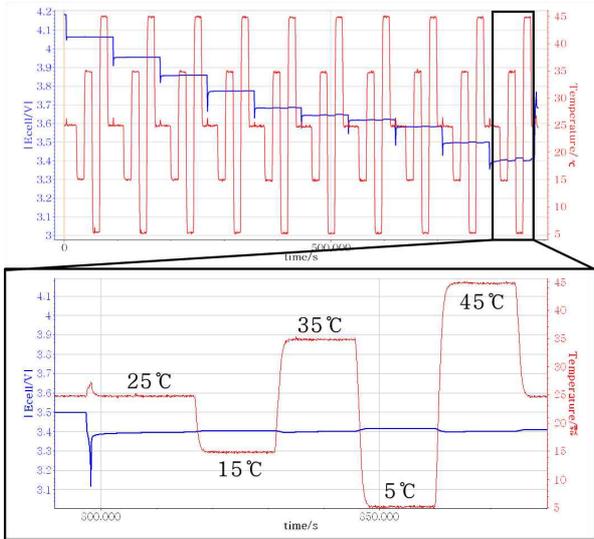


그림 1 온도 변화에 따른 개방회로전압 변화 실험
 Fig. 1 The experiment of the OCV variation at the changed ambient temperature

엔트로피 특성 실험은 그림 1과 같이 배터리의 방전 과정에서 SOC를 0~90까지의 구간을 10%씩 10구간으로 나누고, 각 구간에서의 온도 변화에 따른 개방회로전압의 기울기를 산출하여 엔트로피계수를 추출하였다. 온도 조건으로는 5/15/25/35/45°C의 5개의 온도 변화를 실험 조건으로 설정하였으며, 해당 온도 구간에서 6시간의 휴지상태(rest)를 고려하여 배터리의 온도가 충분히 안정화된 상태에서 OCV가 측정 될 수 있도록 하였다.

3. 실험 결과의 분석

3.1 엔트로피 계수의 추출

SOC 별 온도 변화에 따른 OCV 변화를 측정한 실험 결과에서, 각 SOC 별 실험 온도에서의 OCV를 추출할 수 있으며, 이 변화의 기울기를 추세하는 선형 방정식 1차 계수의 값이 각 해당 SOC의 엔트로피 계수로 산출된다. 즉, 식 (1)의 제 2항에 표시된 것처럼, 온도 변화에 따른 OCV 변화 기울기를 그림 2와 같이 산출할 수 있으며, 추출 된 각 SOC 별 실험 온도에서의 측정된 고용량 배터리의 OCV와 엔트로피 계수는 표 1과 같다. 동일한 방법으로 고출력 배터리의 실험 결과에 적용하여 각 엔트로피 계수를 추출하였다.^[1]

표 1 고용량 배터리의 온도에 따른 OCV와 엔트로피 계수
 Table 1 The OCV with changed temperature and entropy coefficient

Temp. SOC	5 (°C)	15 (°C)	25 (°C)	35 (°C)	45 (°C)	dOCV/dT
0	3.4154	3.4048	3.3996	3.4003	3.4008	-0.3376
10	3.5004	3.4975	3.4959	3.4963	3.4962	-0.0954
20	3.5847	3.5825	3.5818	3.5822	3.5832	-0.0344
30	3.6176	3.6174	3.6185	3.6199	3.6224	0.1218
40	3.6419	3.6424	3.6440	3.6460	3.6484	0.1653
50	3.6808	3.6818	3.6835	3.6852	3.6868	0.1543
60	3.7737	3.7729	3.7728	3.7737	3.7741	0.0163
70	3.8581	3.8573	3.8571	3.8581	3.8586	0.0192
80	3.9548	3.9544	3.9541	3.9549	3.9552	0.0124
90	4.0637	4.0641	4.0637	4.0640	4.0633	-0.0102

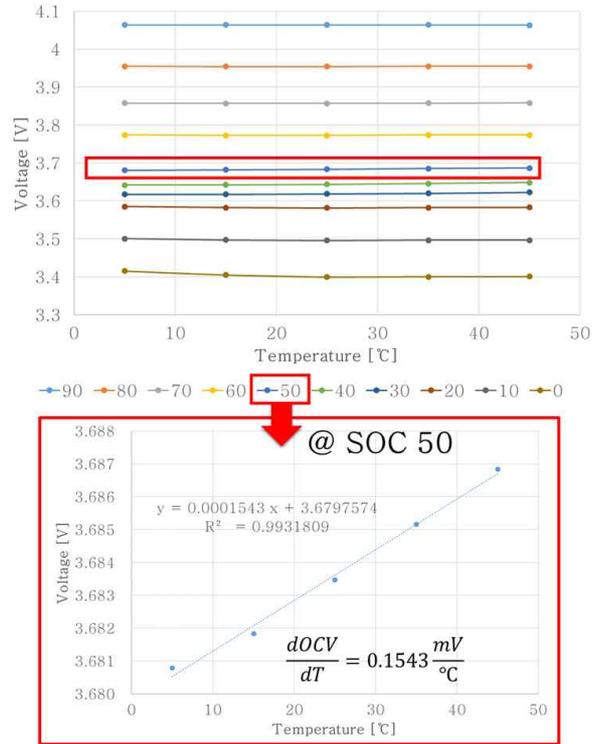


그림 2 SOC 별 엔트로피 계수의 산출(@SOC 50%)
 Fig. 2 The experiment of the OCV variation at the changed ambient temperature

최종 추출 된 엔트로피 계수는 그림 3과 같으며, 고용량/고출력 배터리 셀 모두 SOC 20%이하의 영역에서는 엔트로피 계수가 음의 값을 가지며, 이후의 영역에서는 양의 값을 가지는 것으로 확인 되었다. 즉 배터리가 충전 혹은 방전 과정에서 배터리의 충전 상태에 따라 식 (1)의 제 2항인 가역 발열 항은 흡열 혹은 발열이 나타날 수 있음을 알 수 있으며, 배터리의 전류와 온도에 비례하여 그 값이 증가함을 알 수 있다.

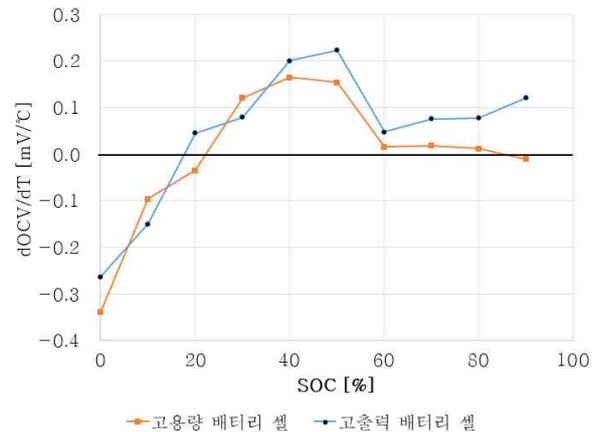


그림 3 고용량/고출력 배터리의 엔트로피 계수
 Fig. 3 The entropy coefficient for the high capacity and the high power battery

3.2 고용량 배터리와 고출력 배터리의 발열 특성

고용량 배터리와 고출력 배터리의 엔트로피 실험 결과에서 측정된 OCV와 엔트로피 계수는 방전 용량 실험 중 측정된 전압, 전류, 온도 정보를 참고하여 식(2)에서 식(3), 식(4)와 같이 가역/비가역 발열을 산출하고 배터리 특성에 따른 발열 특성을 분석하였다.

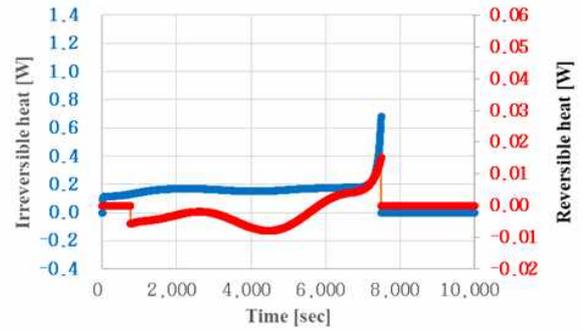
$$Q_{cell} = Q_{irreversible} + Q_{reversible} \quad (2)$$

$$Q_{irreversible} = I(V_t - OCV) \quad (3)$$

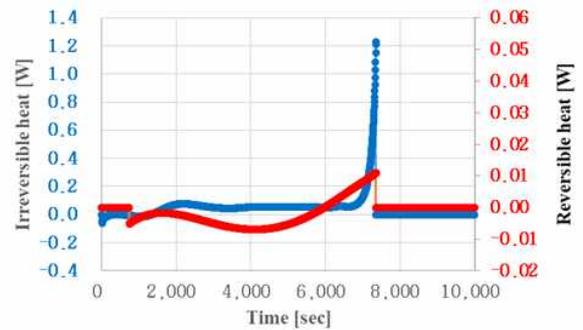
$$Q_{reversible} = IT \frac{dOCV}{dT} \quad (4)$$

0.5 C-rate 기준으로 방전 과정에서 고용량 셀은 1.6A의 방전 전류가, 고출력 셀은 1.5A의 방전 전류가 인가되었으며, 이에 따라 전류의 흐름에 의해 발생하는 비가역 발열이 고용량 셀에서 약 0.05W 더 높은 것으로 확인 되었으며, 높은 발열량에 의해 평균 온도가 상대적으로 높게 나타나는 것으로 확인되었다. 하지만 방전 끝단에서 고출력 셀의 순간적인 발열이 높게 확인되었으며, 이는 고용량 셀의 약 2배 높은 수준으로 최대 온도가 고출력 셀에서 더 높은 것으로 확인되었다.

특성이 다른 두 배터리에서의 발열은 모두 비가역적 발열이 더 지배적임을 알 수 있었으며, 전류의 인가 조건에 따라 발열량이 증가하며, 고출력 셀의 경우 방전 끝단에서 순간적인 높은 발열 특성이 나타날 수 있음을 확인하였다.



(b) 고용량 배터리 가역/비가역 발열 분석



(b) 고출력 배터리 가역/비가역 발열 분석

그림 4 고용량/고출력 배터리의 발열 분석

Fig. 4 The heat generation analysis for the high capacity and the high power battery

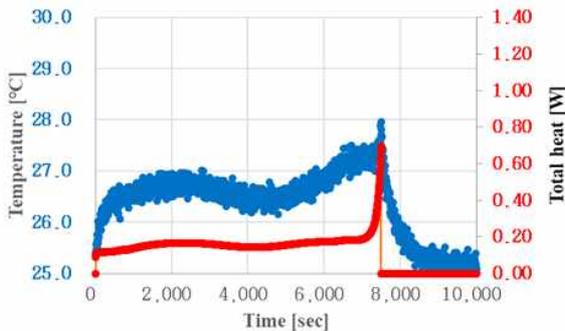
3. 결론

본 연구에서는 고용량 리튬이온 배터리와 고출력 리튬이온 배터리의 열적 특성 분석을 위하여 엔트로피 실험을 수행하였으며, 이를 기반으로 가역/비가역 발열에 대한 특성을 분석하였다. 발열에 있어 리튬 이온의 이동에 의해 발생하는 내부 에너지의 변화에 의한 가역 발열보다는, 전류의 흐름에 의해 발생하는 주열 열에 의한 비가역 발열이 더 많은 발열량을 차지함을 확인하였으며, 가역 발열을 결정하는 엔트로피 계수의 경우 배터리의 상이한 특성에도 유사한 경향으로 산출됨을 확인하였다. 본 연구에서는 배터리의 환경 온도와 발열의 연관성에 대한 분석, 즉 전도와 대류에 의한 주변 환경과의 열전달을 고려하지 않았으므로, 향후 이를 반영하여 최종 배터리의 정확한 발열 특성에 기반 한 높은 신뢰성의 온도 추정 알고리즘에 대한 연구를 수행 중에 있다.

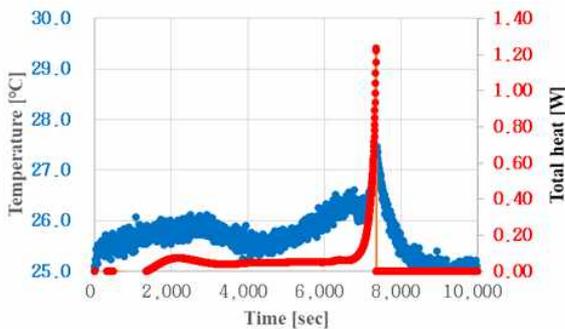
이 논문은 한국전력공사의 2019년 선정 기초연구개발과제 연구비(과제번호 R19X001-45)와 현대자동차 산학협동과제 연구비(폐배터리 활용 ESS 화재 예방 진단기술 개발)지원에 의해 연구되었습니다.

참 고 문 헌

[1] Jinlei Sun, et al. Online Internal Temperature Estimation for Lithium-Ion Batteries Based on Kalman Filter, energies, 2015, 8, pp.4400-4415



(a) 고용량 배터리 온도와 발열



(b) 고출력 배터리 온도와 발열

그림 4 고용량/고출력 배터리의 온도와 전체 발열

Fig. 4 The heat generation and temperature for the high capacity and the high power battery