

배터리 모듈 온도 상태 추정을 위한 상변화물질 적용 효과 분석

강덕훈*, 손영우*, 김종훈† *
 충남대학교 에너지저장변환연구실*

Analysis of the effect with PCM to estimate temperature state for battery module

Deokhun Kang*, Young Woo Son*, Jonghoon Kim† *
 Energy Storage Conversion Lab., Chungnam National University*

ABSTRACT

리튬이온 배터리는 동작 환경에 따라서 성능과 안정성에 영향을 받기 때문에, 다양한 동작 조건에서 안전하게 사용하기 위해서 배터리관리시스템이 필수적으로 요구된다. 특히, 온도는 중요한 동작 조건 중 하나이며, 저온이나 고온의 동작 환경은 배터리 수명과 성능에 영향을 미치기 때문에, 적절한 온도 유지를 위한 배터리 열관리 방법이 필요하다. 본 논문에서는 배터리 모듈의 안정적인 온도 상태를 관리하기 위한 열관리 방법으로 상변화물질을 적용하고 이를 위한 시뮬레이션 및 실험을 통해 적용 효과에 대한 분석 결과를 제시하여 상변화물질을 적용하는 열관리 방법을 제안한다.

1. 서론

리튬이온 배터리는 에너지 밀도, 긴 수명 및 자가 방전 특성이 우수하여 소형 가전은 물론, 전기자동차(Electric vehicles, EVs), 전력 계통 안정화를 위한 에너지저장장치(Energy storage system, ESS) 등 중대형 시스템에도 널리 활용되고 있다. 하지만, 리튬이온 배터리는 동작 환경에 따라서 성능과 안정성에 영향을 받기 때문에, 배터리 상태 모니터링 및 관리를 위한 배터리 관리 시스템(Battery management system, BMS)과 열관리 시스템(Battery thermal management system, BTMS)이 요구된다.

BTMS는 배터리 동작 온도를 적절히 유지하기 위해서 BMS에서 측정되는 온도 신호를 바탕으로 적절한 환경 온도 유지를 위한 가열 혹은 냉각을 수행한다. 환경 온도가 0°C 이하에서 동작하는 경우 내부 저항 증가에 의한 성능 저하는 물론 충전 구간에서 배터리 노화가 발생한다. 그리고, 60°C 이상에서 동작하는 경우 내부 부반응에 의해 셀 성능 감소는 물론 심각한 경우에는 내부 손상에 의한 열폭주를 야기하여 화재 및 폭발의 원인이 될 수 있다. 따라서, BTMS는 배터리의 가열 혹은 냉각을 통해 적절한 환경 온도인 20~40°C를 유지하기 위한 열제어를 수행하여 배터리 성능과 안정성을 확보한다.

하지만, 실제 시스템에 적용되는 BMS에서는 개별 셀의 온도 정보를 기반으로 열제어가 수행되지 않으며, 모듈 내에서 특정 위치에서 온도를 측정하여 열제어가 수행되고 있다. 따라서, 효과적인 배터리 셀 온도 정보 확보를 위해 모듈의 셀 간 온도 편차를 최소화하는 방법으로 상변화물질을 적용하고 적용 효과에 대한 분석을 수행하였다.

2. 배터리 온도와 열관리 효과

2.1 셀 수준 시뮬레이션

배터리 모듈에 상변화물질을 적용하기 위해서는 동작 조건을 고려한 적절한 상변화물질의 용융 온도를 결정해야 한다. 상변화물질은 용융 온도에 도달하면 고체에서 액체로 상태가 변화하는데, 이때 다른 물질에 비해 흡수하는 열에너지가 큰 특성을 이용해 온도를 제어하는 열관리 방법이다^[1]. 따라서 적절한 용융온도 설정이 중요하며, 이를 위해서 배터리 셀 수준에서의 검증 열 모델을 확보하고, 이를 모듈 수준으로 확장하여 적절한 용융온도를 선정하였다.

2.1.1 셀 수준 온도 거동 특성 분석

셀 수준의 온도 거동 특성을 분석하기 위해서 열 모델링이 수행되었다. 열 모델은 셀이 동작하는 동안 발생하는 발열 조건과 주변 환경 조건에 따른 방열 조건을 고려해야 한다. 특히, 발열 조건에서 배터리 내부 상태에 따른 동적 온도 특성을 반영하기 위해서는 배터리 상태에 따른 모델 파라미터 적용이 중요하다. 배터리 열 모델은 에너지 보존 법칙을 기반으로 열량과 온도변화의 관계를 바탕으로 식 (1)과 같이 정의된다^[2].

$$Q = m C_p \Delta T \tag{1}$$

$$Q = q_{heat} + q_{dissipated} \tag{2}$$

$$q_{heat} = q_{irr} + q_{rev} \tag{3}$$

$$q_{dissipated} = q_{cond} + q_{conv} + q_{rad} \tag{4}$$

여기서, Q 는 열량(J), m 은 물체의 질량(kg), ΔT 는 물체의 온도 변화량(°C)을 나타낸다. 열량 Q 는 배터리가 동작할 때 발생하는 발열 q_{heat} 와 배터리 외부로 방출되는 $q_{dissipated}$ 로 식 (2)와 같이 산출할 수 있다. 배터리 발열은 식 (3)과 같이 내부 반응에 의한 가역 열(Reversible heat) q_{rev} 와 전류의 흐름에서 저항에 의한 주열 열인 비가역 발열(Irreversible heat) q_{irr} 의 합으로 표현할 수 있다. 그리고 방열은 식 (4)와 같이 배터리 환경 조건에 의한 전도(q_{cond}), 대류(q_{conv}), 복사(q_{rad})와 같은 열전달 메커니즘에 의해 이루어진다. 하지만, 배터리 동작 조건에서 복사 열전달은 무시할 수 있는 정도 수준이며, 원통형 배터리에서는 배터리 단자로 전도에 의한 열전달은 접촉 분위가 크지 않기 때문에 무시된다. 따라서 본 연구에서의 셀 수준의 방열은 대부분 대류에 의해 발생하는 것으로 가정하여 열 모델링을 수행하였으며, 배터리 셀에서의 방열은 식 (5)와 같다.

$$q_{dissipated} = hA(T_{surf} - T_{ambient}) \tag{5}$$

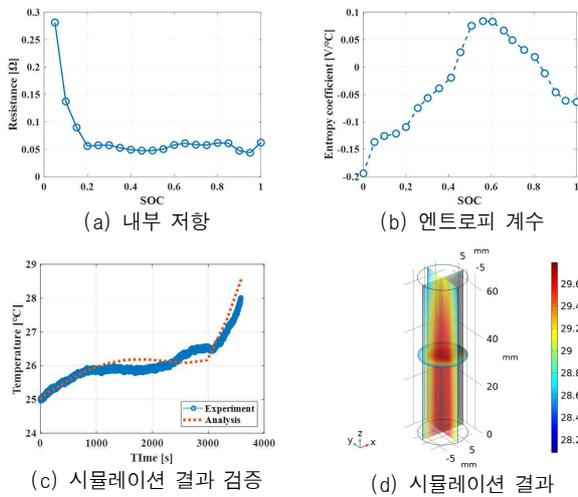


그림 1 배터리 셀 수준 모델 파라미터 및 검증 결과
 Fig. 1 The results of model parameter and validation for the cell level

한편, 식 (3)에서의 발열은 배터리마다의 특성이 다르게 나타난다. 이를 표현하기 위해서 내부 저항(R)과 엔트로피 계수(dV_{ocv}/dT)의 정보 확보가 필요하다. 배터리 모델 파라미터 추출 실험을 통해 각각 정보를 추출하였으며 그림 1과 같다. 이를 적용하기 위해서 식(3)의 발열은 식 (6)과 식 (7)에 의해 산출될 수 있다.

$$q_{irr} = i^2 R \quad (6)$$

$$q_{rev} = iT \frac{dV_{ocv}}{dT} \quad (7)$$

여기서, i 는 배터리에 인가되는 전류, V_{ocv} 는 개방회로전압 (Open-circuit voltage), T 는 배터리 온도를 나타낸다.

2.1.2 셀 수준 열 모델 검증

1C-rate의 방전 용량 실험 결과에서 측정된 온도와 시뮬레이션에서 추정되는 온도 비교를 통해 열 모델에 적용 파라미터와 조건을 검증하였다. 방열 조건은 원통형 실린더를 지나가는 강제 대류 조건을 적용하였으며, 강제 대류 조건에서 유속 조건은 3m/s이다. 측정 온도와 시뮬레이션 추정 온도 비교는 그림 1과 같다. 온도변화 경향과 상승에 대한 표현이 적절함을 확인되었으며 이를 바탕으로 모듈 수준 열 모델로 확장하였다.

2.2 상변화물질 기반 모듈 열관리 적용

상변화물질의 적용으로, 모듈 내 온도 편차를 최소화하고 적절한 온도 관리가 가능하다. 이를 위해 배터리 동작 범위 내에서의 상변화물질의 적절한 용융 온도를 선정해야 하며, 셀 기반 열 모델을 확장하여 모듈에서 나타날 수 있는 온도를 추정하고 상변화물질이 적용되었을 때의 효과를 분석하였다.

2.2.1 모듈 수준 열 모델

검증된 셀 수준의 열 모델은 4S4P 모듈 수준으로 확장되었으며, 열 모델을 이용하여 상변화물질 적용을 위한 적절한 용융 온도가 검토되었다. 그림 2의 시뮬레이션 결과에서 상변화물질이 적용되지 않았을 때, 모듈 내 최대 온도는 약 34°C로 확인되었으며, 적용되면 약 32°C로 감소함을 확인하였다.

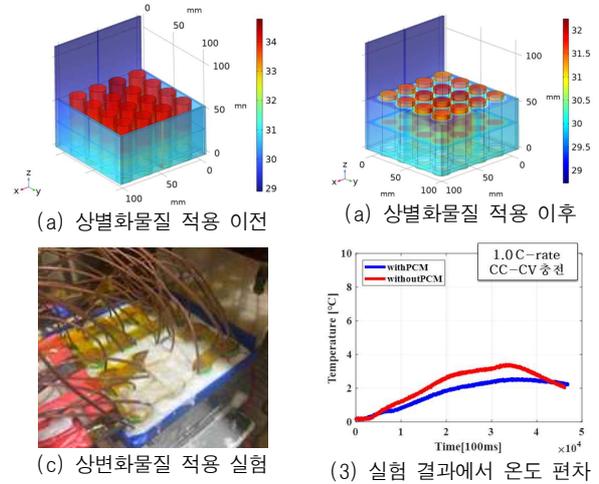


그림 2 상변화물질 적용 시뮬레이션과 실험 결과

Fig. 2 The results of simulation and test with PCM

2.2.2 상변화물질 적용과 온도 거동 특성

실험을 위해 18650 16개 셀을 직렬과 병렬로 연결하여 4S4P 배터리 모듈이 제작되었으며, 상변화물질 적용을 위하여 외부 케이스가 제작되었다. 상변화물질이 적용된 경우와 적용되지 않은 경우에 대한 실험이 수행되었으며, 실험 결과에서 상변화물질이 적용되는 경우, 최대 온도는 약 3°C, 셀 간 온도 편차는 약 1°C의 감소 효과가 있음을 확인하였다.

시뮬레이션에서 확인된 온도 감소와 근사한 온도 저감이 확인되었으며, 시뮬레이션 결과에서 개별 셀 주변의 상변화물질이 셀이 발열을 적절히 방열시켜줄음을 확인할 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 배터리 모듈의 셀 간 온도 편차 최소화를 위한 상변화물질 적용 방법과 적용 결과에 대한 시뮬레이션과 실험이 수행되었다. 실험 결과에서 상변화물질이 적용되는 경우, 배터리 동작에 따른 셀 온도 편차가 감소 가능성을 확인하였다. 추가 조건으로 다양한 전류 조건에 따른 상변화물질의 열관리 효과를 분석하고, 추정 온도를 기반으로 배터리 모듈 열관리 방법 연구가 진행 중이다.

본 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원(No. 20210501010020)과 산업기술평가관리원의 재원으로 인지컨트롤스(No. 20015572, 전기차 급속 충전 및 고출력 운전 대응을 위한 상변화 물질 적용 배터리 팩 열관리 기술 개발)의 지원을 받아 수행되었음.

참고 문헌

[1] Rui Huang, et al., "Experimental and numerical study of PCM thermophysical parameters on lithium-ion battery thermal management," *Energy Reports*, vol. 6, no. 7, pp.8-9, 2020

[2] Ashkan Nazari, Siamak Farhad, "Heat generation in lithium-ion batteries with different nominal capacities and chemistries," *Applied Thermal Engineering*, vol. 125, pp. 1501-1517, 2017.