

HPPC 시험을 통한 배터리 비가역/가열 특성 분석 및 배터리 SOT 추정

이성규*, 손영우*, 김종훈*
충남대학교 에너지저장변환연구실*

Analysis of Battery Irreversible/Heating Characteristics and Estimation of Battery SOT through HPPC Experiment

Seongkyu Lee*, Young Woo Son*, Jonghoon Kim*
Energy Storage Conversion Lab., Chungnam National University*

ABSTRACT

배터리는 차량 및 에너지 저장 시스템처럼 다양한 어플리케이션에서 사용하고 있으며 여러 외부 환경 조건에서 운용되고 있다. 환경 온도는 고온일 때 온도 안정성 감소 및 배터리 노화가 증가한다. 저온일 때 배터리 전해질의 이온 전도도 및 리튬이온 확산도를 감소시켜 용량 감소 및 출력이 낮아진다. 따라서 배터리 운용 시 배터리를 일정한 온도를 유지해야 할 필요성이 있다. 배터리 온도 유지를 위해 배터리 관리 시스템에서 공랭식, 수랭식 등 다양한 냉각 방식을 통해 배터리 온도 관리를 수행한다. 본 논문은 배터리 관리 시스템을 통해 배터리 열관리를 수행하기 전 배터리 발열 분석을 수행한다. HPPC(Hybrid pulse power characterization) 시험을 통해 환경 온도별 배터리 특성 파라미터와 발열 특성을 분석한다. 나아가 배터리 발열 모델을 설계하여 배터리 온도 상태 추정 (State-of-temperature; SOT)과 시험 결과를 비교하여 배터리 발열 모델을 검증한다. 해당 연구를 통해 냉각 시스템 설계 전 배터리 발열에 관한 연구를 수행하였다.

1. 서 론

지구 온난화를 발생시키는 직접적 원인 중 하나는 이산화탄소와 같은 온실기체가 대기 중으로 배출함으로써 발생한다. 이러한 온난화 현상을 억제하고자 현재 지구 평균온도 상승 폭을 산업화 이전 대비 2 °C 이하로 유지하도록 협의한 국제적 협약인 파리 협정을 체결하였다. 해당 협약을 통해 여러 국가가 온실기체 가스를 줄이도록 노력하고 있다. 온실 기체를 줄이는 방안으로 친환경 에너지를 이용한 에너지 발전 및 운송 수단이 주목받고 있다. 기존의 내연기관을 사용한 운송 수단에서 배터리를 이용한 운송 수단으로 변화하는 추세이다. 전기 자동차에서 높은 주행 거리, 고속 충전 및 고성능 주행을 만족할 수 있는 배터리는 리튬이온 배터리가 가장 적합하다고 알려져 있다. 그러나 리튬이온 배터리는 성능, 수명, 안정성은 온도에 매우 민감하다. 배터리가 저온일 때 배터리에 사용할 수 있는 에너지가 감소하여 차량에 주행거리가 감소한다. 고온일 때 SEI(Solid electrolyte interphase)층 성장 및 양극 분해와 같은 부반응이 커져 배터리 수명을 감소시킨다. 따라서 리튬이온 배터리를 사용할 때 운영 온도 범위를 15 °C에서 35 °C 사이에서 운영되어야 한다^[1]. 이러한 배터리 온도를 유지하기 위해서 배터리 냉각 시스템 설계가 필수적이다. 배터리 냉각 설계를 위

해서는 배터리에 대한 발열을 먼저 예측해야 한다. 배터리에 대한 발열 추정이 되지 않으면 배터리가 과냉각이 되거나 냉각이 제대로 되지 않아 배터리에 안정성 및 성능이 감소한다. 일반적으로 배터리 시스템에서 온도 평균 센서와 셀 비율은 1/10 개로 알려져 있다^[2]. 따라서 모든 셀에 센서를 부착할 수 없어 셀마다 온도 측정 정보를 얻는 것은 매우 어렵다. 따라서 각 셀 정보를 얻기 위해서는 먼저 배터리 열 모델링을 통해 배터리 온도 추정을 진행해야 한다. 본 논문에서는 배터리 냉각설계가 진행되기 전 배터리 셀 단위에서 온도 정보를 취득한다. 이를 이용하여 배터리 발열 모델을 설계하여 배터리 시험 결과와 검증을 수행한다.

2. 리튬이온배터리 SOT 추정

2.1 리튬이온 셀 시험

배터리 발열량을 확인하기 위해 외부 환경을 최소화하도록 환경 챔버 내부에서 시험을 진행하였다. 그러나 일반적인 환경 챔버 내부에는 온도를 일정하기 유지하기 위해 내부 공기 유동이 발생한다. 챔버 내부 유동까지 최소화하여 시험을 진행하였다. inner chamber 설치 및 그물망을 사용하여 배터리 발열로 인해 상승한 온도가 외부로 순환되게 하였다. 자세한 시험 구성도는 그림1과 같다. 배터리 셀은 1 C-rate, Cut-off 전류 0.02 C-rate로 CC-CV(Constant current-constant voltage) 충전을 수행하고, 1 C-rate, Cut-off 전압 2.5 V로 CC(Constant current) 방전을 2회 수행하였다. 마지막 2회에서 나온 방전 용량 값을 배터리 용량으로 선정하였다. SOC 5 % 마다 0.5, 1, 2, 3 C-rate HPPC 시험을 진행하여 전기적 등가 회로 모델 파라미터를 추출하였다.

2.2 배터리 발열 모델링

리튬이온 배터리에서 발생하는 열은 대류, 전도, 복사 열전달을 통해 열이 주변으로 확산한다. 배터리에서 발생하는 열 흐름은 식(1)과 같이 표현한다. 배터리에서 발생하는 열은 Bernardi가 제안한 공식과 같이 식(2)으로 표현한다. 외부 환경으로 전달되는 열은 식(3)과 같다. 외부로 환경으로 인한 열손실 중 열전도는 배터리를 바닥 면과 이격하여 영향을 최소화하여 열손실에 대한 영향도는 대류 및 복사만 고려하였다. 이는 식(4) 및 식(5)에 표현되어 있다. 식 (6)에 저항 값은 HPPC 시험을 통해 추출된 파라미터를 사용하였다. HPPC 시험은 그림 2 와 같은 방식으로 시험을 진행하였다.

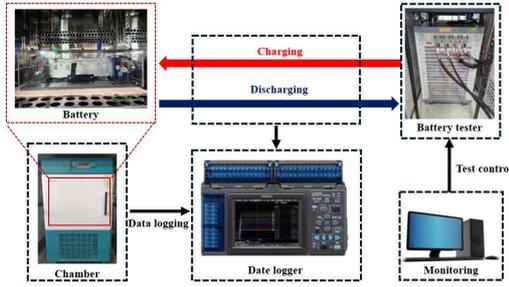


그림 1 배터리 시험 구성
Fig. 1 Battery test configuration

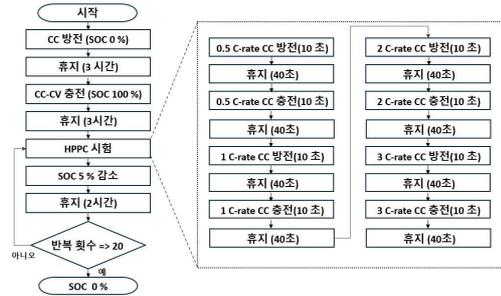


그림 2 HPPC 시험 순서도
Fig. 2 HPPC test flowchart

SOC 구간별로 추출된 저항값을 발열 모델 해석에 적용하였다.

$$Q_{total} = Q_{body} + Q_{tab,p} + Q_{tab,n} - Q_{loss} \quad (1)$$

$$Q_{body} = I^2 R_{total} - IT \frac{dOCV}{dT} \quad (2)$$

$$Q_{loss} = Q_{con} + Q_{rad} + Q_{cmd} \quad (3)$$

$$Q_{con} = hA(T_b - T_a) \quad (4)$$

$$Q_{rad} = \epsilon\sigma A(T_b^4 - T_a^4) \quad (5)$$

$$R_{total} = R_0 + R_1 \quad (6)$$

2.3 배터리 발열 모델 시뮬레이션

상용 해석 프로그램인 COMSOL을 이용하여 C-rate 별 방전 구간 발열 시뮬레이션을 진행하였다. 배터리 3D 모델링을 설계한 뒤 배터리, 배터리 탭, Bus Bar, 지그 등 배터리에 연결 부분에 물성치를 적용하였다. 해석에 필요한 격자 정보는 약 4만 개로 설정하였으며 배터리 두께 방향으로 최소 4등분이 되도록 격자를 설정하였다. 배터리에 적용된 열 손실은 자연대류 및 복사열을 적용하였다. 비가역 발열에 대한 발열량은 HPPC 실험 데이터를 통해 추출된 파라미터를 적용하였고 가역 파라미터는 환경 온도에 따른 SOC별 OCV를 추출하여 식(2)에 적용하였다.

2.4 배터리 발열 모델 시뮬레이션 추정 결과

그림 3 (a)은 다양한 환경 온도별 1 C-rate 전류에서 추출된 배터리 저항값이다. 그림 3(b)은 다양한 환경온도에서 추출된 SOC 별 OCV에 대한 기울기 값이다. 해석에 필요한 정보를 입력 후 배터리 해석을 진행하였다. 그림 4는 1 C-rate 시뮬레이션 결과이다.

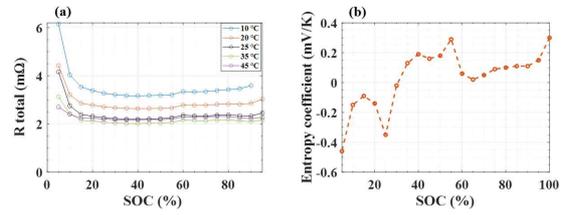


그림 3 배터리 저항 및 가역 발열 계수 (a) 1 C-rate, (b) 가역 발열 계수

Fig. 3 Battery resistance and reversible heat coefficient (a) 1 C-rate, (b) Reversible heat coefficient

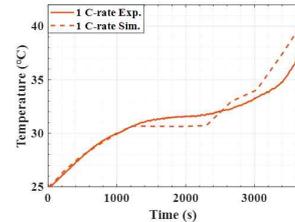


그림 4 배터리 중앙 온도 해석 결과

Fig. 4 Battery central temperature analysis results

발열량 값은 식(2)을 통해 계산된 값을 SOC 100~0%까지 5%간격으로 적용하여 해석을 수행하였다. 수치 해석 모델에서 배터리에 적용된 대류 열전달은 자연대류로 설정하였다. 또한 복사 방사율은 1로 설정하였다. 시험을 통해 추출된 배터리 중앙 온도와 추정 결과를 환경 온도별로 진행하였다. 각 환경 온도별 발생한 최대 오차는 11.1 %, 6.2 %, 7.8 %, 6.4 %, 2.4 %가 발생하였다.

3. 결론

본 연구는 배터리 냉각 시스템을 설계하기 전 배터리 셀에서 발생하는 발열에 대한 연구를 수행하였다. HPPC 실험을 통하여 가역 및 비가역 배터리 파라미터를 도출하였고, 도출된 배터리 파라미터를 활용하여 배터리 발열 모델을 설계 및 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션 데이터와 시험데이터 비교를 통해 정확성을 검증하였다. 해당 연구 방법으로는 HPPC 시험 및 수치 해석이 필요하므로 실시간으로 배터리 온도 추정이 불가능하다, 따라서 향후 연구에서 채귀 최소 제곱법을 이용하여 실시간 파라미터 추정 및 해석을 진행할 예정이다.

본 논문은 삼성 SDI(LFP 배터리의 SOC/SOH 추정 알고리즘 개발)와 산업기술평가위원회의 재원으로 오토실리콘 (No. 200116167, 전기자동차 배터리의 내부 상태, 폭발 위험, 잔존 수명, 교체 시기를 예측하는 배터리 안전 진단 시스템 (BDS) SoC 개발)의 지원을 받아 수행되었음.

참고 문헌

- [1] Manuel Antonio Perez Estevez, "An electro-thermal model and its electrical parameters estimation procedure in a lithium-ion battery cell", Energy, Vol. 234, 2021 November.
- [2] Xinfan Lin, "Robust Estimation of Battery System Temperature Distribution Under Sparse Sensing and Uncertainty", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 28, Issue: 3, pp. 753-765, 2020, May.