고용량 21700 리튬이온 배터리에 대한 전기적 특성 실험기반 열 해석 모델 개발 연구

최창기*, 강덕훈*, 신우중**, 김종훈*
충남대학교*, ㈜스탠다드 시험연구소**

Research on development of a thermal analysis model based on electrical characteristics experiment of high capacity 21700 Lithium-Ion battery

Changki Choi*, Deokhun Kang*, Woojug Shin**, Jonghoon Kim*
Chungnam National University*, Standard Testing & Engineering INC**

ABSTRACT

본 논문에서는 리튬이온 배터리의 전기적인 특성 실험을 통해 열 해석에 필요한 인자를 추출하고 이를 이용하여 열 해석의 상용 프로그램인 COMSOL과 ANSYS에서 서로 다른 방법으로 열 해석을 진행한다. 두 프로그램의 열 해석을 통해 얻은 데이터와 측정 데이터를 비교분석 한 결과 유사 경향성을 확인하였고, 이를 통해 전기적 열 해석 모델의 신뢰성을 확보한다.

1. 서 론

리튬이온 배터리(Lithium-ion Battery)는 높은 에너지 밀도와 출력 그리고 비교적 가벼운 특성이 있으므로 스마트폰, 노트북 등과 같은 소형기기뿐만 아니라 자동차, 비행기와 같은 대형기기에 적용되고 신재생에너지 활용의 극대화를 위해 필수적인 에너지저장시스템 산업에도 리튬이온 배터리 활용이 늘어남에 따라 시장의 신 에너지원으로 주목받고 있다[1].

최근 리튬이온 배터리를 사용하는 기기에서는 고출력을 요구하는 경우가 많은데, 이는 전류의 크기에 따라 결정된다. 또한, 전류의 크기가 커질수록 발열량의 증가로 인해 배터리 온도는 비례적으로 높아지게 되고 이를 관리하기 위해 현재 다양한 열 관리 시스템이 개발되고 있다.

배터리 온도를 관리 하는 것은 제품을 운용하는 것에 중요한 부분으로 자리 잡고 있는데 이는 배터리의 온도 상승이 지속해서 발생 되는 경우 배터리 열화가 시작되고 이로 인해 수명 저하 및 열 폭주로 인한 화재로 이어지는 악영향을 초래할 수 있기 때문이다. 따라서 리튬이온 배터리에 대한 온도를 정확히 예측 및 추정하고 이를 관리하는 시스템이 요구된다.

배터리 온도 증가에 영향을 끼치는 발열량을 도출하는 방법으로는 크게 전기적인 특성을 이용한 열 모델[2]과 배터리 내부 화학적인 반응을 이용한 전기화학적 열 모델[3]로 나누어진다. 전기적 특성을 이용한 열 모델은 배터리 내부의 화학적인 반응을 전기적 회로를 통해 간단하게 모사하고, 이로 인해 발열을 손쉽게 계산해낼 수 있는 장점이 있다. 하지만 배터리 내부의 메커니즘을 정확하게 구현할 수 없다. 반면에, 전기화학적인 특성을 이용한 열 모델은 배터리 내부 동작 특성을 잘 표현하므로 실제 배터리가 동작하는 동안의 발열되는 온도를 가장 유사하게 계산할 수 있다. 하지만 화학적인 반응으로 고려해야 할 인자들이 많으며 계산이 복잡하다는 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 배터리에 대한 전기적 특성 실험을 통해 전기적-열 해석과 전기화학적-열 해석에 필요한 인자를 추출하고, 열 해석 상용 프로그램인 COMSOL과 ANSYS를 사용하여 시뮬레이션을 진행한다. 이를 통해 배터리의 발열량을 도출하여 온도를 추정하고, 실험 중의 온도를 측정한 값과 각각 비교분석하여 두 방법을 통한 열 해석 결과의 유사 경향성을 확인하고 셀 단위에서의 열 해석 결과의 타당성을 제시한다. 또한, 이를 확장하여 배터리 Module 단위에서의 전기적-열 해석을 통한 추정 방법의 가능성을 제시한다.

2. 본 론

2.1 전기적-열 해석 모델

배터리의 전기적 특성 실험기반으로 추출된 파라미터를 열 모델에 적용하여 열 해석을 진행한다. 전기적-열 모델은 전기화학적-열 모델에 비해 간소화되었다. 배터리 내부 발열량(Q_E)은 비가역적 발열량(Q_{irrev})과 가역적 발열량(Q_{rev})의 합으로 식 (1)과 같이 구한다. 또한, Q_{irrev}은 식 (2)와 같이 오믹 저항(R_0)과 분극 저항(R_1)의 합인 직렬 저항($DCIR$)과 전류(I)를 통해 도출하고, Q_{rev}은 식 (3)과 같이 개방 회로 전압 변화량(ΔU)와 온도 변화량(ΔT)을 통해 도출한 엔트로피 계수를 포함하여 구한다. 하지만, 인가되는 전류 크기가 1C-rate 이상일 경우 I값의 항이 Q_{irrev}에서 제곱 항으로 존재하므로 Q_{rev}의 영향은 미소하고 이로 인해 Q_{irrev}을 지배적으로 사용한다. 배터리 표면에서는 외부 대류와 물체 사이의 열 전도도로 인한 열 소산이 발생하는데, 이는 대류 계수를 포함한 식 (4)와 열전도도를 포함한 식 (5)를 통하여 구할 수 있다. 두 방정식을 통해 도출한 열 소산 값들을 합하여 식 (6)과 같은 총 열 소산(Q_{diss})을 구한다. 마지막으로 배터리 내부 발열량(Q_{heat})과 Q_{diss}의 합으로 식 (7)과 같이 전기적 특성을 이용한 총 발열량(Q)을 도출한다[2]. 총 발열량에는 복사열을 고려한 발열이 포함되지만, 실험 과정에서 포함되지 않는 환경 조건이기 때문에 제외한다.

$$Q_E = Q_{irrev} + Q_{rev} \tag{1}$$

$$Q_{irrev} = I^2 R \tag{2}$$

$$Q_{rev} = I T_{cell} \frac{\Delta U}{\Delta T} \tag{3}$$

$$Q_{conv} = hA(T_{cell} - T_{amb}) \quad (4)$$

$$Q_{cond} = -kA\frac{dT}{dx,y,z} \quad (5)$$

$$Q_{diss} = Q_{cond} + Q_{conv} \quad (6)$$

$$Q = Q_E + Q_{diss} \quad (7)$$

2.2 NTGK 전기 화학반응 모델

전기화학적-열 해석을 위하여 ANSYS 프로그램에서 제공되는 Newman, Tiedemann, Gu and Kim(NTGK)모델[3]을 사용한다. 이는 간단한 경험적인 전기 화학 모델로 실제 전기화학식을 수학적인 Fitting 함수로써 표현한 모델이다. 전기화학적-열 모델의 발열량(Q_{ECh}) 인자인 전류 밀도를 도출해야 하는데, 이는 식 (8)로 표현할 수 있으며 Y(전압 특성)과 U(전기 전도도)는 모델의 인자로써 식 (9)와 (10)과 같은 방전 깊이(DOD: Depth of Discharge)의 함수로 표현한다.

$$J = Y(V_P - V_N - U) \quad (8)$$

$$Y = (\sum_{n=0}^{5} b_n (DOD)^n) e^{-C_1(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{REF}})} \quad (9)$$

$$U = (\sum_{n=0}^{5} a_n (DOD)^n) - C_2(T - T_{REF}) \quad (10)$$

여기서, C_1과 C_2은 온도 보정 상수를 나타내며 NTGK 모델에 포함되어있는 상수이다. 배터리 동작 중에 주변 환경 온도가 기준 온도인 25℃보다 높은 경우 배터리 특성이 변화하는 것을 고려하여 온도 보정 상수를 적용하여 계산한다. 하지만, 본 논문에서는 실험 중의 배터리 주변 환경 온도는 기준 온도인 25℃에서 실험하였으며, Y(전압 특성)과 U(전기 전도도)를 식 (11)과 (12)와 같은 평균 DOD에 대한 함수로 표현한다.

$$Y = a_4 + a_5(DOD) + a_6(DOD)^2 \quad (11)$$

$$U = a_0 + a_1(DOD) + a_2(DOD)^2 + a_3(DOD)^3 \quad (12)$$

여기서 다항식의 계수 $a_0 \sim a_6$은 실험을 통해 구해지는 상수 값이다. Y(전압 특성)과 U(전기 전도도)는 데이터 Fitting 곡선에 의해 결정되며 이를 통해 발열량(Q_{ECh})은 다음 식 (13)과 같이 나타내며 총 발열량(Q)은 식 (14)과 같이 나타낸다. 또한, 대류와 전도로 인한 열 Q_{diss}은 앞서 전기적-열 해석에서 보여준 수식과 같은 방식으로 도출한다[3].

$$Q_{ECh} = aJ[U - V - T\frac{\Delta U}{\Delta T}] \quad (13)$$

$$Q = Q_{ECh} + Q_{diss} \quad (14)$$

2.3 배터리 전기적 특성 실험 및 온도 측정

배터리 전기적-열 해석 모델에 포함되는 인자들을 추출하기 위해 OCV(Open Circuit Voltage)실험을 진행하고, 전기적 등가 회로 모델을 통해 열 해석에 필요한 인자로 R_0과 R_1을 추출한다. 전기화학적-열 해석으로는 Y(전압 특성)과 U(전기 전도도)를 도출하여 전류 밀도를 구하고. 함수에 적용되는 Fitting 인자는 실험을 통해 추출한다.

본 논문에서 고용량 배터리 INR21700 50E를 사용했으며 배터리 OCV실험 중 각 구간에서의 셀 내부 파라미터 추출을 위해 SOC 100% ~ 0%까지 5%씩 방전하면서 구간마다 파라미터를 도출한다. 또한, 배터리 용량 실험을 진행하면서 온도 측정을 위해 그림 1과 같이 배터리 표면에 온도 센서를 부착하여 실험을 진행하고, 그림 2와 같이 배터리 충/방전 중의 온도변화를 확인할 수 있다. 배터리의 온도는 충전 구간에서보다 방전 구간에서 더 높게 측정되는 것을 확인할 수 있으며 SOC 0%에 도달했을 때 최고치에 도달한다.

배터리는 C-rate가 높아질수록 배터리 동작 중의 온도 또한 높아지는데 이를 고려하여 다양한 경향성을 보기 위해 여러 C-rate에서 실험을 진행하고 그에 따른 시뮬레이션도 진행하여 비교한다.

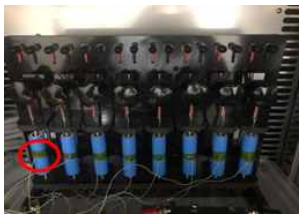

그림 1 배터리 실험 세팅
Fig. 1 Setting of battery experiment

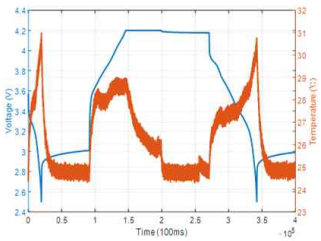

그림 2 배터리 온도변화
Fig. 2 Battery Temperature variation

2.4 배터리 열 해석

2.4.1 배터리 열 해석 경계 조건

전기적-열 해석을 위해 SOC 구간별로 도출한 발열 인자 오믹 저항(R_0)과 분극 저항(R_1)을 합한 직렬 저항($DCIR$) 값을 Look up table로 프로그램에 적용했고 전기화학적-열 해석을 위해 Fitting 파라미터 Y(전압 특성), U(전기 전도도)를 식 (11)과 식 (12)와 같은 함수를 통해 도출하고 마찬가지로 프로그램에 적용하여 시뮬레이션을 진행한다. 또한, 배터리의 열 유동 해석을 위해 배터리 내부 경계 조건을 표 1[2]와 같이 지정한다.

<표 1> 배터리 열 해석 조건
<Table 1> Boundary condition of Battery thermal analysis

	Value	Description
$\rho(kg/m^3)$	2615.7	Battery density
$k\ (W/(m\times K))$	29.557	Battery thermal conductivity
$Cp\,(J/(kg\times K))$	1605	Battery heat capacity at constant pressure

2.4.2 발열 모델에 따른 시뮬레이션 결과 비교

두 가지의 열 해석 상용 프로그램을 이용하여 각기 다른 해석 방법의 시뮬레이션을 통하여 얻은 결과를 측정값과 비교한다. 배터리 동작 중 온도의 최고치는 그림 2와 같이 방전 구간에서 나타나므로 방전 구간에서의 발열만 고려하여 시뮬레이션을 진행하였다. 또한, 배터리 열 해석의 경향성을 정확히 판단하기 위해 전류 크기가 0.5C, 1C인 2가지 경우를 각각 시뮬레이션했고, 그림 3과 같은 열 해석 결과를 확인할 수 있다. 또한, 그림 4와 같이 각각의 상용 프로그램 해석 결과와 측정값을 비교했고, 최대 절대 오차는 전기적-열 해석과 전기화학적-열 해석 두 경우 모두 0.8℃ 이내로 측정 결과와의 유사 경향성을 확인하였다.

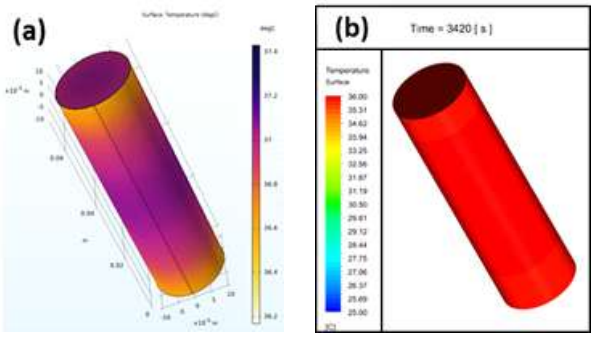

그림 3 배터리 열 해석 결과 (a) COMSOL (b) ANSYS
Fig. 3 Result of thermal analysis (a) COMSOL (b) ANSYS

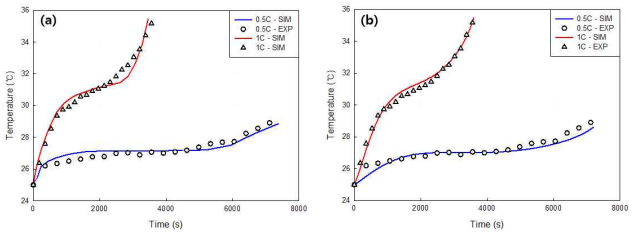

그림 4 측정값과 시뮬레이션 값 온도 비교. (a) COMSOL (b) ANSYS
Fig. 4 Comparison of measured and simulated temperature. (a) COMSOL (b) ANSYS

3. 결 론

본 논문에서는 고용량 21700 50E 배터리의 발열량을 도출하기 위해 전기적-열 모델과 전기화학적-열 모델 두 가지 방법의 열 해석을 상용 프로그램인 COMSOL과 ANSYS을 사용하여 진행하고 이를 통해 배터리 표면 온도를 측정값과 비교분석하고 유사 경향성을 확인하였다. 이로 인해 전기적 특성 실험을 바탕으로 열 해석을 수행했을 때 전기적-열 모델의 신뢰성을 확보할 수 있고 검증된 배터리 셀 열 해석 모델은 배터리 Module 단위로 확장되어 배터리 시스템의 냉각 설계를 수행하고 평가하는 방법으로 활용할 수 있다.

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (No. NRF-2018R1C1B6004482) (No. 2020R1F1A1076204)

참 고 문 헌

[1] Farid Bahiraei, “A pseudo 3D electrochemical-thermal modeling and analysis of a lithium-ion battery for electric vehicle thermal management application”, Applied Thermal Engineering, 125 (2017) 904-918.

[2] Taewoo Kang, Seongyun Park, Pyeong-Yeon Lee, In-Ho Cho, Kisoo Yoo, and Jonghoon Kim, “Thermal Analysis of a Parallel-Configured Battery Pack (1S18P) Using 21700 Cells for a Battery-Powered Train”, MDPI Electronics, 2020.

[3] Ui Seong Kim, Jaeshin Yi, Chee Burm Shin, Taeyoung Han, Seongyong Park, “Modeling the Dependence of Discharge Behavior of a Lithium-Ion Battery on the Environmental Temperature”, Journal of The Electrochemical Society, 158 (5) A611-A618 (2011).