

21700 원통형 리튬이온 배터리의 전기-열 연성 거동 규명을 위한 3D-CFD 기반 다중물리 해석 연구

김 성 영 · 전 민 준 · 김 성 철*

영남대학교 기계공학부

A 3D CFD-Based Multiphysics Study on the Electro-Thermal Coupled Behavior of 21700 Cylindrical Lithium-Ion Batteries

Seong Yeong Kim · Min Jun Jeon · Sung Chul Kim*

Department of Engineering, Yeongnam University, Gyeongbuk 38541, Korea

(Received 9 February 2026 / Revised 8 April 2026 / Accepted 13 April 2026)

Abstract : This study investigated the coupled thermal–electrical behavior of a 21700 cylindrical lithium-ion battery under high-power operating conditions using a multiphysics framework integrating an equivalent circuit model (ECM) with a three-dimensional computational fluid dynamics (CFD) thermal model. Temperature-dependent ECM parameters were identified through hybrid pulse power characterization (HPPC) tests conducted at 0 °C, 25 °C, 40 °C, and 45 °C, coupled with the CFD model to simulate internal heat generation and temperature evolution. The developed multiphysics model demonstrated high predictive accuracy, with root mean square errors of 0.018 V for voltage response and 0.13 °C for temperature distribution when compared with experimental measurements. Parametric analyses revealed strong nonlinear thermal behavior under high C-rate discharge conditions, where temperature-dependent resistance and polarization losses significantly influenced heat generation characteristics. Furthermore, enhanced convective cooling conditions effectively reduced peak cell temperature by up to 18 %. Generally, the results indicate that battery thermal risk is governed not solely by current magnitude but also by temperature-dependent electrochemical losses, highlighting the necessity of coupled electro-thermal modeling for advanced battery thermal management system design.

Key words : Lithium-ion battery(리튬이온전지), 21700 cylindrical cell(21700 원통형 셀), Equivalent circuit model(등가 회로모델), Multiphysics analysis(다중물리 해석), Battery thermal management system(배터리 열관리)

Nomenclature

V_{cell}	: terminal voltage, V
U_{ocv}	: open circuit voltage, V
I	: applied current, A
R_0	: ohmic internal resistance, Ω
Ah	: battery capacity
s	: time, sec
T_{cell}	: cell temperature, °C
d	: cell diameter, mm
h	: cell height, mm

Subscripts

NCM	: nickel-cobalt-manganese
RH	: relative humidity
CC	: constant current
CV	: constant voltage
Ch	: charge
Dis	: discharge
SOC	: state of charge
EV	: electric vehicle
DoD	: depth of discharge

*Corresponding author, E-mail: sungkim@ynu.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

1. 서론

최근 전 세계적으로 기후 변화 대응과 탄소 중립 실현을 위한 노력이 강화되면서, 기존 내연기관 중심의 자동차 산업은 전기자동차(EV) 중심으로 빠르게 재편되고 있다.^{1,2)} 전기자동차의 핵심 구성 요소인 배터리는 주행거리 확보와 고출력 성능 구현을 위해 에너지 밀도가 높은 21700 원통형 리튬이온 배터리의 적용이 증가하는 추세이다. 그러나 21700 셀은 기존 18650 셀 대비 용량이 증대된 반면, 체적 증가로 인해 셀 중심부에서 발생한 열의 외부 방출 경로가 길어지며 내부 온도 불균형 및 열 축적 문제가 발생할 가능성이 있다.^{4,10)}

특히 급속 충전 및 고부하 방전과 같은 가혹 운전 조건에서는 내부 발열이 급격히 증가하여 성능 저하뿐만 아니라 열폭주(Thermal Runaway)와 같은 안전성 문제로 이어질 수 있다. 배터리의 열적 거동은 내부 전기화학 반응, 과전압 및 저항 손실과 밀접하게 연관되어 있으며, 이러한 현상은 실험적 접근만으로 셀 내부의 국부적인 온도 분포와 발열 메커니즘을 정밀하게 규명하는 데 한계를 가진다.

기존 연구들에서는 주로 실험 기반 분석이나 단순 열 전달 해석을 통해 배터리의 평균 온도 변화를 평가해 왔으나, 전기적 거동 변화에 따른 발열 특성을 동시에 고려하는 데에는 제한이 있었다. 이에 최근에는 전기화학적 손실과 열전달 현상을 연성하여 해석하는 다중물리(Multiphysics) 해석 모델이 제안되고 있으며, 이를 통해 셀 내부 전류 분포와 국부 발열 거동을 보다 정밀하게 예측할 수 있음이 보고되고 있다.

이에 본 연구에서는 21700 원통형 리튬이온 배터리를 대상으로 3차원 전산유체역학(CFD)과 등가회로모델(ECM)을 연성한 다중물리 해석 모델을 구축하였다. HPPC 실험을 통해 온도 의존적인 ECM 파라미터를 도출하여 모델에 적용하였으며, 이를 기반으로 다양한 환경 온도 및 C-rate 조건에서의 전압 응답, 발열 거동 및 온도 상승 특성을 정량적으로 분석하였다. 본 연구를 통해 21700 배터리의 전기-열 연성 메커니즘을 규명하고, 전기자동차 배터리 열관리 설계를 위한 기초 자료를 제시하고자 한다.

2. 수치해석

본 연구에서는 21700 원통형 리튬이온 배터리의 열-전기적 연성 거동을 해석하기 위해 ECM 기반 전기 모델과 3차원 CFD 열전달 모델을 결합한 다중물리 해석 기법을 적용하였다.

2.1 지배 방정식

배터리의 전기적 거동은 두 개의 RC 네트워크를 포함한 2차(2RC) Thevenin 기반 등가회로 모델(ECM)을 이용하여 계산하였다. 배터리 단자 전압은 SOC 및 온도의 함수인 개방회로 전압에서 오믹 내부 저항 손실과 분극 전압 성분을 차감하여 산출되며, 이는 식 (1)로 표현된다. 이때 분극 전압은 전하 전달 반응과 이온 확산 지연 효과에 따른 과도 응답을 모사하기 위해 1차 미분방정식 형태로 모델링되며, 식 (2)에 나타내었다.

배터리 내부에서 발생하는 총 발열량은 비가역적 Joule 발열과 가역적 엔트로피 발열의 합으로 정의되며, 이는 식 (3)과 같이 표현된다. 다만 본 연구에서는 엔트로피 항의 영향이 상대적으로 작음을 고려하여 비가역적 발열 항을 지배적인 열원으로 적용하였으며, 이에 따라 총 발열량을 식 (4)와 같이 단순화하였다. 산출된 발열량은 CFD 열전달 해석에서 체적 열원 항으로 적용되며, 배터리 내부 온도장은 대류 열손실을 포함한 에너지 보존 방정식을 통해 계산되며, 이는 식 (5)에 나타내었다.

$$V_{\text{cell}} = U_{\text{ocv}}(\text{SOC}, T) - I \cdot R_0 - \sum_{i=1}^n V_{\text{RC},i} \quad (1)$$

$$\frac{dV_{\text{RC},i}}{dt} = \frac{I \cdot R_{\text{p},i} - V_{\text{RC},i}}{R_{\text{p},i} \cdot C_{\text{p},i}} \quad (2)$$

$$q_{\text{total}} = I(V_{\text{cell}} - U_{\text{ocv}}) - IT \frac{\partial U_{\text{ocv}}}{\partial T} \quad (3)$$

$$q_{\text{total}} \approx I(V_{\text{cell}} - U_{\text{ocv}}) \quad (4)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + q_{\text{total}} - hA \Delta T \quad (5)$$

2.2 해석 모델 및 조건

해석 대상은 LG INR21700-M50LT 원통형 리튬이온 배터리를 3차원으로 모델링하였으며, 형상과 격자는 Fig. 1에 제시하였다. 계산 영역은 11,679개의 격자로 구성하였고, 전위 및 온도 구배가 큰 단자부에는 국부 격자 세분화를 적용하였다. 격자 의존성 검증 결과, 추가적인 격자 세분화에 따른 온도 및 전기화학적 응답의 변화는 미미하여 해당 격자를 최종 해석 조건으로 선정하였다.

ECM 파라미터 추출을 위해 0 °C, 25 °C, 40 °C 및 45 °C의 환경 챔버 내에서 HPPC(Hybrid Pulse Power Characterization) 실험을 수행하였다. SOC 10 % 간격으로 방전하며 각 구간에서 충·방전 펄스와 휴지 구간을 통해 전압 응답을 측정하였고, 이를 기반으로 파라미터를 도출하였다. 추출된 파라미터는 UDF를 통해 SOC 및 온도의 함수로 구현하여 전기-열 연성 거동을 반영하였다.

수치 해석은 ANSYS Fluent의 3차원 Pressure-based solver를 이용하여 수행하였으며, Pressure-velocity coupling은 SIMPLE scheme을 적용하였다. 본 해석은 고체 영역만으로 구성된 열전도 문제이므로 에너지 방정식을 기반으로 해석하였고, 시간에 따른 온도 변화를 고려하기 위해 Transient 해석을 수행하였다. 또한 에너지 방정식에는 Second-order upwind 기법을 적용하였으며, 유동이 존재하지 않아 난류 효과는 직접적으로 고려되지 않지만 수치 설정의 일관성을 위해 $k-\omega$ SST 모델을 적용하였다.

해석 조건은 Table 1에 요약하였다. 전기적 운전 조

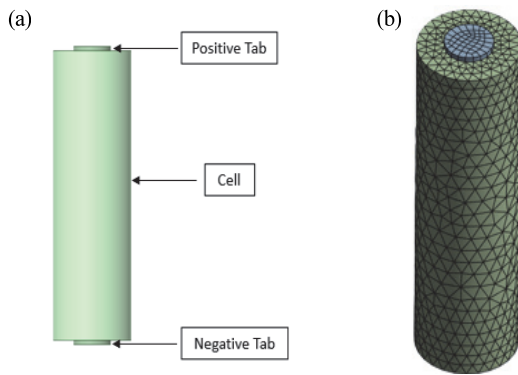


Fig. 1 (a) Cell geometry with positive and negative tab, (b) Three-dimensional CFD mesh model

Table 1 Boundary conditions

Item	Value
Heat transfer coefficient	5, 10, 15 W/m ² · K
External temperature	0 °C, 25 °C, 45 °C
Charge c-rate	0.3C, 0.5C, 0.7C
Discharge c-rate	1C, 2C, 3C

Table 2 Effective thermophysical properties of the INR21700 M50-LT

Item	Value
Cell	Density
	2702 kg/m ³
	C_p (Specific heat)
Negative tab	902 J/(kg · K)
	Thermal conductivity
	15 W/(m · K)
Positive tab	Density
	1555 kg/m ³
	C_p (Specific heat)
Positive tab	1437 J/(kg · K)
	Thermal conductivity
	1.58 W/(m · K)
Positive tab	Density
	2895 kg/m ³
	C_p (Specific heat)
	1270 J/(kg · K)
Positive tab	Thermal conductivity
	1.04 W/(m · K)

건으로 충전 C-rate는 0.3C, 0.5C, 0.7C로 설정하고 방전 C-rate를 1C, 2C 및 3C로 적용하였다. 열적 경계 조건으로는 5, 10, 15 W/m² · K, 환경 온도는 0 °C, 25 °C 및 45 °C로 적용하였다. 이는 배터리 작동 가능 온도 범위를 고려한 조건이다. 또한 Table 2의 물성치를 적용하여 전류 분포와 발열 특성을 반영하였으며, 이를 통해 운전 조건에 따른 전압 및 온도 거동을 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 ECM-CFD 모델 검증

구축된 수치해석 모델의 정확도와 신뢰성을 검증하기 위해 동일한 운전 조건에서 실험 결과와 수치해석 결과를 비교 분석하였다. 단자 전압은 ECM 기반 전기 모델을 통해 계산되었으며, 내부 발열량을 열원 향으로 적용한 CFD 해석을 통해 배터리의 온도 응답을 예측하였다. 25 °C 환경에서 충전(0.3C) 및 방전(1C) 조건에 대한 단자 전압 및 표면 온도 변화를 비교한 결과, 해석값은 실험값과 전반적으로 높은 일치도를 보였다.³⁾ 이에 대한 상세 비교 결과는 Fig. 2 및 Fig. 3에 제시하였다.

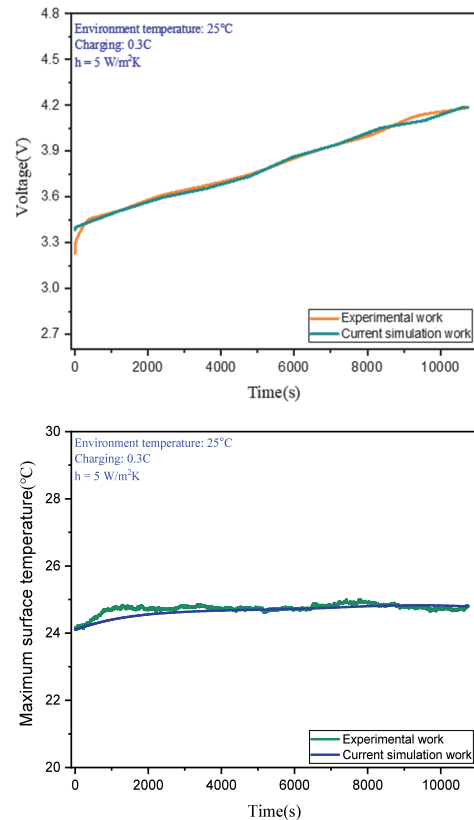


Fig. 2 Comparison of experimental and numerical results during charging at 25 °C : (a) voltage response, (b) temperature evolution

모델 예측 정확도는 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)를 이용하여 정량적으로 평가하였다. RMSE는 실험값과 수치해석 예측값 간의 오차 분포를 종합적으로 반영하는 지표로, 모델의 전기적 및 열적 예측 성능을 객관적으로 검증하는 데 활용하였다. 해당 계산식은 다음과 같이 정의된다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{n_s} (d_i - y_i)^2} \quad (6)$$

여기서 d_i 는 실험값, y_i 는 수치해석 예측값, N 은 데이터 개수를 의미한다. RMSE 결과는 Table 3에 정리하였으며, 충전 조건에서 전압과 온도의 오차는 각각 0.018 V, 0.13 °C로 나타났고, 방전 조건에서는 각각 0.118 V, 0.49 °C

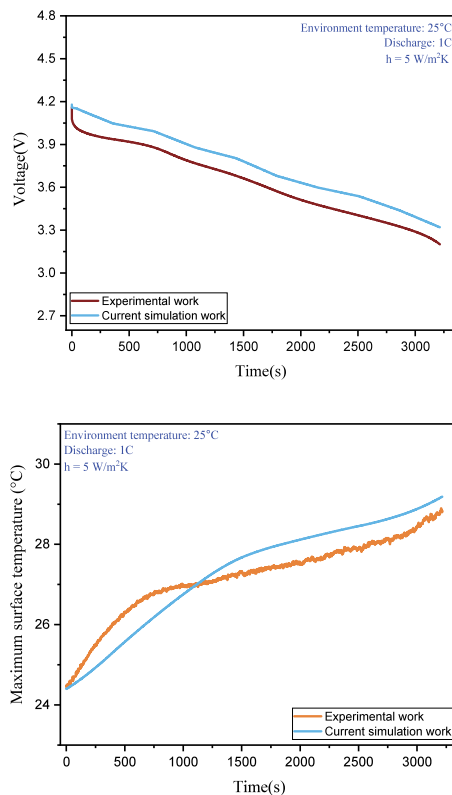


Fig. 3 Comparison of experimental and numerical results during discharging at 25 °C : (a) voltage response, (b) temperature evolution

Table 3 RMSE of Voltage and Temperature

State	Value
Charge voltage	0.018
Charge temperature	0.13
Discharge voltage	0.118
Discharge temperature	0.49

로 확인되었다. 이러한 결과는 본 연구에서 구축한 모델이 충·방전 조건 모두 전기 및 열적 거동을 높은 정확도로 예측할 수 있음을 입증한다.

3.2 충·방전 전압 응답 특성

충전 과정에서의 전압 응답(Fig. 4)은 환경 온도에 따라 상이한 특성을 보였다. 충전 초기 45 °C 조건의 단자 전압은 3.421 V로, 25 °C 조건(3.409 V)보다 약 11.7 mV 높게 나타났다. 이는 고온에서 전해질 이온전도도 및 전하 전달 반응이 향상되어 내부 저항이 감소하고, OCV의 온도의존성이 복합적으로 작용한 결과로 해석된다. 일반적으로 배터리 내부에서는 전류에 의해 I^2R 형태의 Joule 발열이 발생하며, 이는 온도 상승과 전압 손실에 영향을 미친다. 그러나 충전이 진행될수록 고온 조건에서는 분극 전압이 누적되며 전압 상승 기울기가 증가하였다. 그 결과, 충전 종료 시점에서는 25 °C 조건(4.189 V)이 45 °C 조건(4.187 V)보다 더 높은 값을 나타내어 전압 수준의 차이가 충전 구간에 따라 달라지는 경향이 나타났다. 이는 초기에는 내부저항 감소 효과가, 후반에는 분극 저항 증가가 지배적으로 작용한 결과로 볼 수 있다.

Fig. 5의 방전 전압 응답에서도 온도에 따른 차이가 나타났다. 0 °C 조건에서는 내부 저항 증가로 인해 초기 전압 강하가 25 °C 대비 약 150 mV 이상 크게 나타났으며, 컷오프 전압 도달 시간도 약 20 % 단축되었다. 이는 전해질 전도도 저하와 전하 전달 및 확산 저항 증가에 따른 전압 손실 확대 때문이다. 또한 내부저항 증가는 Joule 발열을 증가시켜 온도 상승에도 영향을 미친다. 반면 45 °C 조건에서는 초기 전압 강하는 완화되었으나, 방전 말기에는 분극 및 과전압 누적으로 전압 감소가 가속되었다. 따라서 충·방전 전압 응답은 내부저항과 분극 저항이 복합적으로 작용한 결과로, 초기에는 저항 성분이, 후반에는 분극 성분이 지배적으로 작용하는 것으로 판단된다.

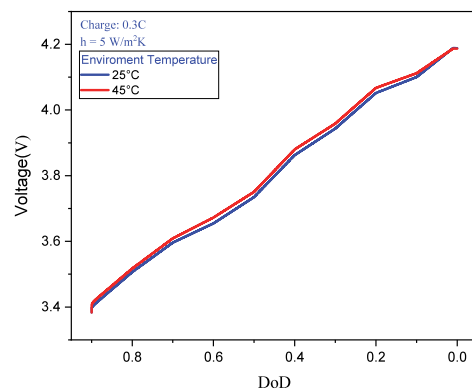


Fig. 4 Terminal voltage profiles during charging at different ambient temperatures

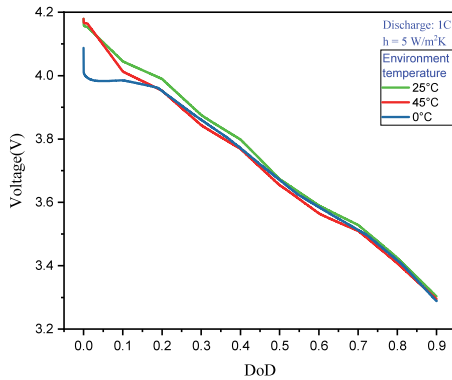


Fig. 5 Terminal voltage profiles during discharging at different ambient temperatures

3.3 충·방전 온도 거동 특성

충전 과정에서 배터리의 온도 상승은 C-rate 증가에 따라 비선형적으로 확대되었다(Fig. 6). 0.3C 충전 조건에서는 최대 온도가 약 32 °C 수준으로 유지된 반면, 0.5C 조건에서는 약 38 °C, 0.7C 조건에서는 약 44 °C까지 상승하여 충전 전류 증가에 따른 발열 축적이 가속되었다. 이는 전류 증가에 따라 I^2R 형태의 Joule 발열이 비선형적으로 증가하는 동시에, 충전 후반부에서 전극 내 리튬 이온 농도 구배가 커지면서 분극 저항이 증가하고 과전압이 누적되어 추가적인 발열이 발생하기 때문으로 해석된다. 또한 충전 초기 일부 구간에서는 발열량이 상대적으로 작고 대류에 의한 열 방출이 우세하게 작용하여 온도가 일시적으로 감소하는 경향이 나타났다.

방전 과정에서는 고출력 조건에서의 열 축적 현상이 더욱 두드러지게 나타났다(Fig. 7). 1C 방전 조건에서는 최대 온도가 약 36 °C로 비교적 안정적인 수준을 유지한 반면, 2C 조건에서는 약 51 °C, 3C 조건에서는 약 71 °C까지 상승하여 전류 증가에 따른 온도 상승이 비선형적으로 가속되었다. 이는 방전 시에도 Joule 발열이 I^2R 에 비례하여 증가할 뿐만 아니라, 방전이 진행될수록 SOC 감소에 따른 내부저항 증가와 확산 제한으로 인한 농도 분극이 심화되어 비가역 발열이 지배적으로 증가하기 때문이다. 특히 방전 후반부에서는 이러한 분극 저항 증가가 집중되며 온도 상승률이 더욱 크게 나타난다.

동일한 3C 방전 조건에서 대류 열전달계수 변화에 따른 냉각 성능을 비교한 결과(Fig. 8), 자연대류 수준($h = 5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$)에서는 최대 온도가 약 71 °C에 도달한 반면, $h = 10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 조건에서는 약 64 °C, $h = 15 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 조건에서는 약 58 °C로 감소하여 냉각 성능 향상에 따라 최대 온도가 약 18 % 이상 저감되었다. 이는 배터리의 열적 거동이 내부에서 생성되는 발열과 외부로 방출되는 열 사이의 균형에 의해 결정되며, 열전달계수가 증가할수

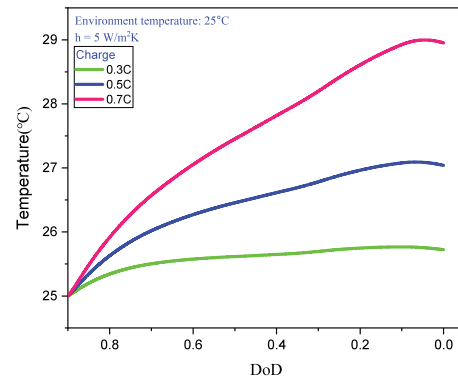


Fig. 6 Temperature rise during charging at different C-rates

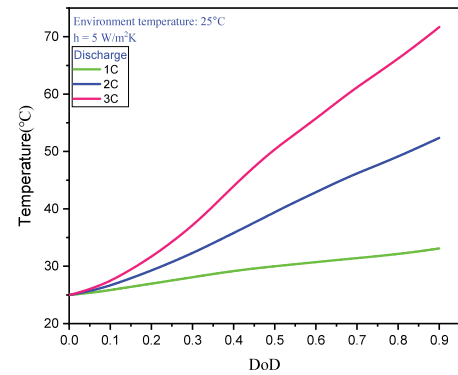


Fig. 7 Temperature rise during discharging at different C-rates

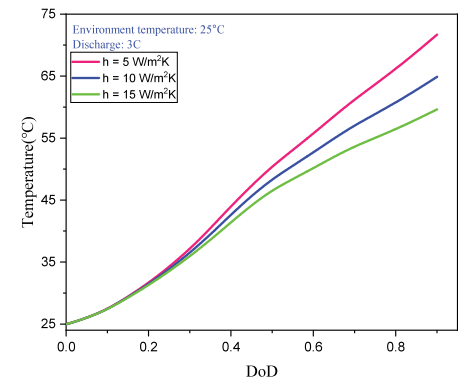


Fig. 8 Temperature evolution during discharging under different convective heat transfer coefficients

록 단위 시간당 열 제거량이 증가하여 열 축적이 억제되기 때문이다. 따라서 고출력 운전 환경에서는 발열 증가뿐만 아니라 열 제거 능력이 열적 안정성을 좌우하는 핵심 인자로 작용한다.

3.4 전기-열 연성 메커니즘 고찰

전압 응답과 온도 상승 결과를 종합적으로 분석한 결과, 내부저항 및 분극 저항의 온도 및 전류 의존적 변화가

배터리 열적 거동을 지배하는 핵심인자로 확인하였다. 저온 환경에서는 초기 전압 손실은 완화되지만, 충·방전 후반부에서 분극 누적과 OCV 특성 변화로 열 축적이 다시 증가하는 거동이 나타났다.

이 과정에서 발생하는 열은 주로 Joule 발열과 분극 손실에 의해 지배되며, 고출력 조건에서는 비가역 발열이 상대적으로 크게 증가한다. 이러한 특성을 반영하여 본 연구에서는 비가역 발열 중심의 모델을 적용하였으며, 가역 발열 항은 해석 조건 범위 내에서 상대적 영향이 제한적인 것으로 간주하였다.^{11,12)} 실험값과 해석값의 비교 결과, 충전 조건에서는 전압 약 0.02 V 이하, 온도 약 0.2 °C 이하의 오차를 보이며 실험값과 잘 일치하였으나, 방전 조건에서는 SOC 감소에 따른 내부저항 증가와 분극 심화로 비선형성이 확대되면서 오차가 증가하는 경향이 나타났다. 이는 ECM 모델의 단순화와 실험 조건에서의 열 전달 및 측정 불확실성이 복합적으로 작용한 결과로 판단된다.

이러한 결과는 배터리의 열적 거동이 단순 전류 크기보다 전기화학적 손실 메커니즘과 그 온도 의존성에 의해 결정됨을 의미한다. 따라서 전압 응답 기반 상태 진단과 연계된 열관리 전략은 고출력 환경에서 배터리 안전성과 성능을 향상시키는 효과적인 수단이 될 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 21700 원통형 리튬이온 배터리를 대상으로 ECM-CFD 연성 다중물리 해석 모델을 구축하고 전기 및 열적 거동을 정량적으로 분석하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) HPPC 실험을 통해 추출한 온도 의존 ECM 파라미터를 적용한 결과, 전압 및 온도 응답에서 실험값과 높은 일치도를 보였다. 충전 과정에서 전압 RMSE는 약 0.018 V, 온도 RMSE는 약 0.13 °C로 나타났으며, 방전 과정에서도 전압 RMSE 약 0.118 V, 온도 RMSE 약 0.49 °C 수준의 예측 정확도를 확보하여 구축된 해석 모델의 신뢰성을 검증하였다.
- 2) 전압 거동 분석 결과, 환경 온도 변화에 따라 충·방전 과정에서 전압 수준의 상대적 역전과 과전압 누적 특성이 나타났다. 충전 초기 45 °C 조건에서 전압은 25 °C 대비 약 11.7 mV 높게 나타났으나, 충전 종료 시점에서는 약 2 mV 낮은 수준으로 변화하였다. 또한 방전 시 0 °C 조건에서는 초기 전압 강하가 25 °C 대비 약 150 mV 이상 증가하고, 컷오프 도달 시간이 약 20 % 단축되어 온도 의존적인 내부저항 및 OCV 특성이 전압 거동을 지배함을 확인하였다.

- 3) 열적 거동 분석에서는 C-rate 증가에 따라 발열 축적이 비선형적으로 가속되었으며, 충전 시 최대 온도는 0.3C: 32 °C → 0.7C: 44 °C, 방전 시에는 1C: 36 °C → 3C: 71 °C까지 상승하였다. 특히 고출력 방전 조건에서 온도 상승 폭이 약 35 °C 이상 증가하며 열적 부담이 크게 확대됨을 확인하였다. 또한 대류 열 전달 계수를 5 → 15 W/m²·K로 증가시킬 경우 최대 온도가 약 71 °C → 58 °C(약 18 % 감소)로 저감되어, 냉각 성능 향상이 고출력 조건에서 효과적인 온도 제어 수단임을 정량적으로 확인하였다.
- 4) 전기-열 연성 메커니즘 분석 결과, 배터리의 열적 거동은 전류 증가보다 온도 의존적인 내부저항 및 분극 저항 변화에 따른 비가역 발열에 의해 지배됨을 확인하였다. 특히 고온·고출력 조건에서 Joule 및 분극 발열 증가로 최대 온도가 70 °C 이상까지 상승하여 열관리 설계의 중요성을 확인하였다. 따라서 본 해석 모델은 BTMS 및 BMS 설계에 활용 가능한 신뢰성 있는 예측 도구로 판단된다.

후 기

이 성과는 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술포럼원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2026-25544341).

References

- 1) IEA, Global EV Outlook 2025, IEA, Paris, <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025>, 2025.
- 2) J. Kim and J. Park, "C-rate and Ambient Temperature on Discharge Performance According to the Structure of the Cathode Active Material of a Lithium-ion Secondary Battery," Transactions of KSAE, Vol.30, No.9, pp.753-767, 2022.
- 3) T. Waldmann, R. G. Scurtu, K. Richter and M. Wohlfahrt-Mehrens, "18650 vs. 21700 Li-ion Cells – A Direct Comparison of Electrochemical, Thermal, and Geometrical Properties," Journal of Power Sources, Vol.472, Paper No.228614, 2020.
- 4) J. Jung and Y. Jeon, "Analysis of the Heat Transfer Characteristics and Applicability Assessment of a 21700 Battery Immersion Cooling System," KSME Annual Conference Proceedings, p.452, 2025.
- 5) C. Allgäuer, F. Grenz, K. Abo Gamra and M. Lienkamp, "Thermal Management of 4680 Battery Cells: Cell Design and Cooling Concept," Journal of Energy Storage, Vol.131, Paper No.117318, 2025.
- 6) S. Li, M. W. Marzook, C. Zhang, G. J. Offer and M. Marinescu, "How to Enable Large Format 4680

- Cylindrical Lithium-ion Batteries,” *Applied Energy*, Vol.349, Paper No.121548, 2023.
- 7) G. Kim and S. Jang, “Design for Cooling Performance Improvement Based on the Shape of the Cooling Plate in Cylindrical Cell Battery Pack,” *KSAE Annual Conference Proceedings*, pp.1891-1892, 2024.
 - 8) H. Kim, “Numerical Study on Cooling Characteristics for Thermal Safety of Cylindrical Li-ion Battery Cell with Tabless Structure,” *Transactions of KSAE*, Vol.31, No.6, pp.457-465, 2023.
 - 9) M. Ank, A. Sommer, K. A. Gamra, J. Schöberl, M. Leeb, J. Schachtl, N. Streidel, S. Stock, M. Schreiber, P. Bilfinger, C. Allgäuer, P. Rosner, J. Hagemeister, M. Rößle, R. Daub and M. Lienkamp, “Lithium-Ion Cells in Automotive Applications: Tesla 4680 Cylindrical Cell Teardown and Characterization,” *Journal of The Electrochemical Society*, Vol.170, No.12, Paper No.120536, 2023.
 - 10) S. Wang, T. Wu, H. Xie, C. Li, J. Zhang, L. Jiang and Q. Wang, “Effects of Current and Ambient Temperature on Thermal Response of Lithium Ion Battery,” *Batteries*, Vol.8, No.11, Paper No.203, 2022.
 - 11) Y. Xie, S. Shi, J. Tang, H. Wu and J. Yu, “Experimental and Analytical Study on Heat Generation Characteristics of a Lithium-ion Power Battery,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.122, pp.884-894, 2018.
 - 12) B. Jeong, J. Ko, J. H. Kim, J. Y. Kim and C. Kang, “A Study on the Cooling Performance of Z-Type Air-Cooled Battery Pack with Varying Slope of Manifold,” *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol.30, No.3, pp.151-166, 2025.