

4695 대형 리튬이온 셀의 열 및 전기적 거동 특성에 대한 실험적 분석

전 민 준 · 장 기 석 · 김 성 철*

영남대학교 기계공학부

Experimental Investigation of the Thermal and Electrical Performance Characteristics of Cylindrical INR 4695 Lithium-ion Cell

Min Jun Jeon · Ki Seok Jang · Sung Chul Kim*

Department of Engineering, Yeongnam University, Gyeongbuk 38541, Korea

(Received 9 February 2026 / Revised 23 April 2026 / Accepted 23 April 2026)

Abstract : The rapid adoption of electric vehicles (EVs) is creating growing demand for battery cells with higher energy density. High-capacity cells operate with high heat generation, and experimental studies that identify the thermal and electrochemical characteristics of high-capacity batteries remain limited. This study investigates the thermal and electrical performance of EVE Energy's INR 4695P, which features a tabless structure, under various environmental temperatures and C-rates. Meanwhile, reversible heat is calculated from the OCV test. Results indicate that the maximum temperature occurs at the upper section of the cell. Charging capacity exhibited a positive correlation with ambient temperature and attained a maximum of 29.04 Ah at 45 °C. Discharge tests from 0.3C to 1.5C revealed that surface temperature rose with C-rate, reaching 40.9 °C at 1.5C under an environmental temperature of 25 °C. These findings serve as critical baseline data for developing optimized thermal management strategies in high-capacity EV battery applications.

Key words : Lithium-ion battery(리튬이온전지), Battery temperature(배터리 온도), Tabless battery(탭리스 배터리), Electric vehicle(전기자동차), Battery thermal management system(배터리 열관리)

1. 서론

최근, 전 세계적인 기후 위기 대응과 탄소 중립 실현을 위해 내연기관 차량에서 전기자동차로의 전환이 확산되고 있다. Global EV Outlook 2025에 따르면,¹⁾ 2024년 글로벌 전기차 판매량은 1,700만 대를 돌파하며 2014년 대비 약 57배 가까이 증가하였다. 시장의 폭발적인 성장에 맞추어 배터리 산업계는 에너지 밀도 향상과 원가 절감을 위한 기술 개발에 박차를 가하고 있다. 특히 원통형 배터리의 경우, 미국의 전기차 기업 테슬라는 기존에 사용되던 21700 타입 배터리^{2,4)}를 넘어 에너지 용량이 5배, 출력이 6배 향상된 46시리즈 배터리(46 series battery) 개발에 성공하였고⁵⁾ 이에 대한 연구가 활발하게 이루어져 왔다.⁶⁻⁸⁾ 46시리즈 배터리의 주요 규격 중 하나인 4695 규격(지름 46 mm, 높이 95 mm)은 기존 4680 규격 대비 더 높은

에너지 밀도 및 출력 증가를 통한 전기차의 주행거리 증가와 에너지당 공정 횟수를 감소시켜 생산비용을 절감하는 이점을 가지고 있다. 그러나 배터리 크기의 증가는 충/방전 시 발생하는 열의 외부 방출을 어렵게 하며 이는 배터리의 성능 및 수명 저하를 넘어 열화 현상으로 인한 전기자동차 화재로도 이어질 수 있다. 이러한 대용량 셀의 발열 문제를 해결하기 위해 도입된 핵심 기술이 Tabless 구조이다. Fig. 1과 같이 기존의 원통형 배터리는 단자와의 전기적 연결을 위한 단일 리드 탭(Lead tab)을 사용하였지만, Tabless 구조에서는 전극 전면을 수많은 전류 통로로 활용하여 내부 저항을 크게 감소시켰다. 이론적으로 내부 저항의 감소는 배터리의 발열 문제를 완화하고 성능 저하를 방지할 수 있으나, 초고용량 배터리에서는 증가한 에너지 밀도에 의해서 고출력 운전 및

*Corresponding author, E-mail: sungkim@yu.ac.krThis 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.

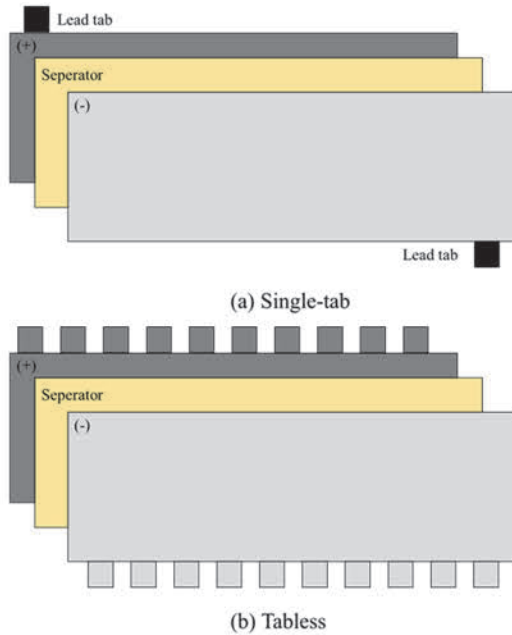


Fig. 1 Tab design of single tab battery and tabless battery

고속 충전 조건에 대해서 국부적인 열 집중 현상이 발생할 가능성이 높다.

그러나 그간의 연구들은 4680 규격에 집중되거나 수치 해석적 시뮬레이션이 대다수를 차지하며, 실제 46시리즈의 셀을 대상으로 수행한 실질적인 성능 평가 및 분석 자료는 매우 부족한 실정이다.⁹⁾

따라서 본 연구에서는 차세대 4695 타입 배터리 셀을 대상으로 다양한 충전 및 방전을, 환경온도 조건에서 실험을 진행하여 배터리의 전압 및 온도 거동을 실시간으로 분석하여 Tabless 구조 및 초고용량 배터리가 가지는 열적 취약 지점을 분석하였다. 또한 개방회로전압 실험을 통하여 가역 발열량을 산출하였으며 이를 실험 데이터와 비교하여 배터리의 SOC(State of Charge)에 따른 온도 거동을 분석하였다. 본 연구의 결과는 향후 고용량 배터리 팩 설계 시 배터리 열관리 시스템 최적화와 안전성 설계의 기초자료로 활용될 것으로 기대된다.

2. 실험적 방법론

Tabless 구조의 4695타입 원통형 배터리 셀의 열 및 전기적 성능을 평가하기 위한 실험 장비와 실험 조건은 다음과 같다.

2.1 실험장비

배터리의 기초적인 열 및 전기적 거동 특성을 측정하기 위한 실험장치의 전반적인 구성은 Fig. 2(a)와 같다. 실험 중 외부 환경 변화가 배터리 표면 온도 및 전기적 거동

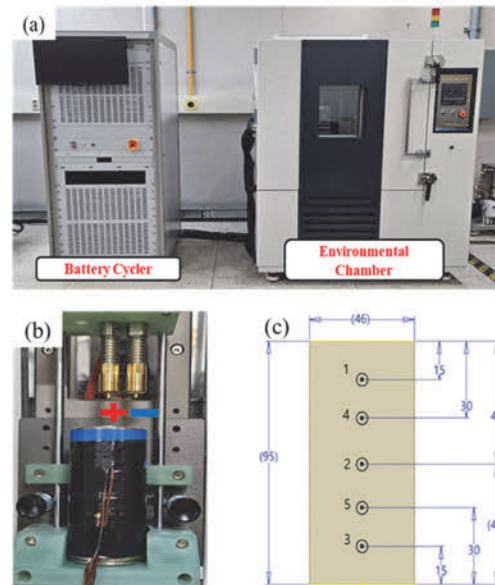


Fig. 2 (a) Experimental facility for the battery test, (b) jig, (c) temperature sensor positions and dimensional specifications

에 미치는 영향을 최소화하기 위해 항온항습 챔버를 사용하여 내부 온도 및 습도를 균일하게 유지하였다. Fig. 2(b)의 배터리 셀 고정용 지그는 양극과 음극 단자가 모두 배터리 상부에 위치한 구조임을 고려하여 배터리 셀 상부에서 전기적 연결이 이루어지도록 설계되었다.

실험 중 배터리의 높이에 따른 온도 거동을 분석하기 위해 총 5개의 T-type 열전대(Thermocouple)를 배터리 측면에 부착하였으며, 온도 센서의 부착 위치와 배터리의 기하학적 치수는 Fig. 2(c)에 나타내었다.

2.2 배터리(EVE INR 4695P) 및 실험 조건

본 논문에서는 차세대 원통형 배터리의 성능 및 특성 분석을 위해 독일의 BMW사의 전지자동차 모델에 탑재될 예정인 중국 EVE Energy사의 고성능 배터리“INR 4695P” 모델을 실험 대상으로 선정하였다. 해당 배터리의 상세 재원 및 운용 조건은 Table 1에 명시하였다. 실험의 안전성을 확보하고 과충전 및 과방전에 의한 화재 및 배터리 손상을 방지하기 위해 최대 4.25 V, 최소 2.8 V의 전압 임계치를 이중 안전장치로 추가 설정하였다. 실험에 사용된 실험 조건들은 Table 2와 같다. 본 실험에서는 다양한 C-rate 와 환경온도를 적용하여 운전 범위 내에서 배터리의 기초적인 전기적, 열적 특성을 정밀하게 측정하였다. 배터리의 특성을 평가하기 위한 정적용량 실험과 개방 전압을 측정하기 위한 OCV 실험은 Figs. 3과 4와 같다. 이 중 정적 용량 실험의 경우에는 국가 표준(KS C IEC62660-1)을 참고하였다.

Table 1 Operating parameters of EVE INR 4695P

Parameters	Value
Nominal capacity	29.3 Ah
Maximum voltage	4.2 V
Minimum voltage	3 V
Standard charge	CC/CV, 0.3C Cut off : 0.05C
Maximum discharge	DC, 1.5C Cut off : 3 V
Maximum temperature	60 °C

Table 2 Test conditions of battery cell

Parameters	Value
Temperature	0 °C, 25 °C, 45 °C,
Relative humidity	40 %
Static discharge rate	0.3C, 0.5C, 1C, 1.5C
Static charge rate	0.3C, 0.5C, 0.75C, 1C

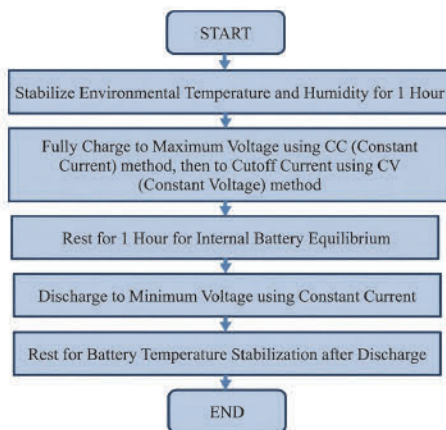


Fig. 3 Procedure of static capacity test

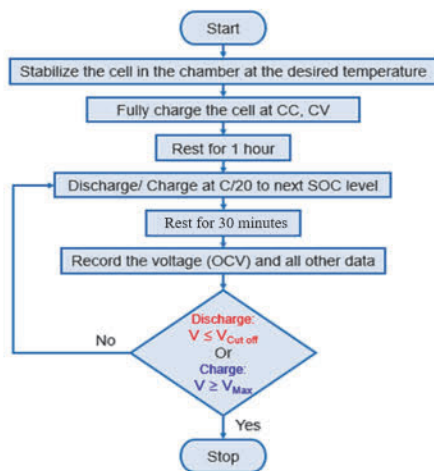


Fig. 4 Procedure of OCV (Open Circuit Voltage) test

3. 결과 및 분석

3.1 충전 특성

3.1.1 온도 분포

Fig. 5는 상온(25 °C)에서 1C 충전 중 배터리의 표면 온도 분포를 5개의 온도센서에 대하여 나타낸 그래프이다. 선행연구¹⁰⁾와 같이, 셀의 단자 부분과 가까운 1번 센서에서 가장 높은 표면 온도를 기록하였으며, 최하부에 위치한 3번 센서에서 가장 낮은 표면 온도를 기록하였다. 이러한 온도분포는 양극과 음극 탭이 셀 상부에 위치한 Tabss 구조에 기인한다. 셀 상부에서 단자를 포함하여 집중된 내부 저항으로 인해 하단부 대비 높은 온도를 형성하는 것으로 분석된다. 충전이 진행됨에 따라 배터리 상부와 하부의 온도 편차는 지속적으로 증가하여 최대 전압에 가까워지는 순간 표면 온도의 차이는 2.02 °C까지 도달하는 것으로 확인되었다. 따라서 더 높은 충전율을 요구하는 실제 전기자동차 배터리 팩에 적용 시 배터리 수명 연장과 안전성 확보를 위해 열 발생량이 높은 배터리 셀 상부에 개선된 열관리의 필요성이 요구된다.

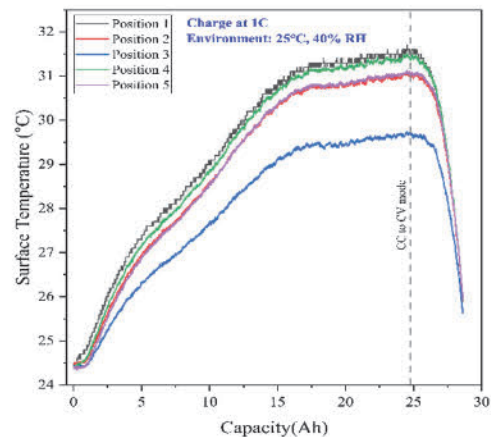


Fig. 5 Battery surface temperature at various locations

3.1.2 충전율에 의한 영향

동일한 환경온도에서 4개의 서로 다른 충전율에 대한 실험 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 배터리의 충전율이 증가할수록 분극 현상에 의한 과전압 상승을 확인할 수 있었고 이로 인해 충전 초기 전압이 증가하는 현상을 관측하였다. 또한, 충전 용량에도 변화가 발생하였는데 0.3C 충전 기준 27.99 Ah에서 1C 기준 29.04 Ah까지 증가하는 것을 확인하였다. 이러한 현상이 나타난 이유는 정전압 충전 용량의 증가로 파악되는데 0.3C 충전 기준 3.05%를 차지하던 정전압 충전 용량이 1C에서는 13.45%까지 증가하였기 때문이다. 그러나 높은 충전율에 의한 반복적인 충전은 배터리의 노화를 가속하므로 사용에 주의가

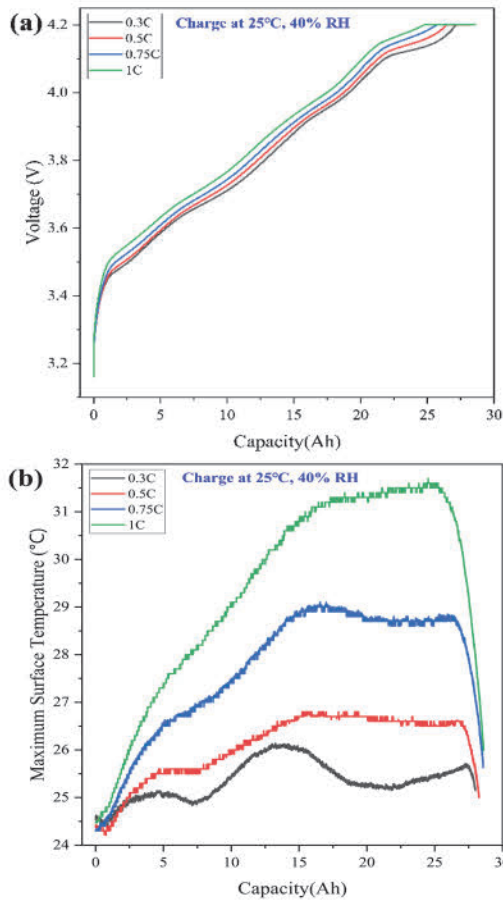


Fig. 6(a) Voltage at various charge rates, (b) maximum surface temperature at various charge rate

필요하다고 할 수 있다. 배터리의 최대 표면 온도도 충전율에 비례하여 증가하는 모습을 보여주었다. 표준 충전율인 0.3C에서는 최대 26.14°C를 기록했던 최대 표면온도가 1C에서는 31.7°C까지 증가하는 현상을 보였다. 이러한 결과로 볼 때, 더 높은 충전율을 요구하는 전기자동차에 적용 시 열화 현상으로 인한 배터리의 성능 저하, 이를 넘어 충전 중 화재 발생의 위험성도 증가할 수 있기에 자연대류만으로는 열적 안정성이 부족하며 별도의 냉각 방식을 고려해야 함을 나타낸다.

3.1.3 환경온도에 의한 영향

본 실험에서는 3개의 환경온도 조건에 대해 실험을 진행하였고 그 결과를 Fig. 7에 기록하였다. Fig. 7(a)에서는 환경온도에 따른 전압 거동의 변화를 나타내었다. 저온에서는 배터리 내부 저항이 높아지면서 충전 초기 과전압이 높게 설정되었고 반대로 고온에서는 활물질의 반응성이 좋아지면서 과전압이 낮게 설정되었다. 그로 인해 배터리의 충전 용량과 각 충전 모드에서의 시간에서

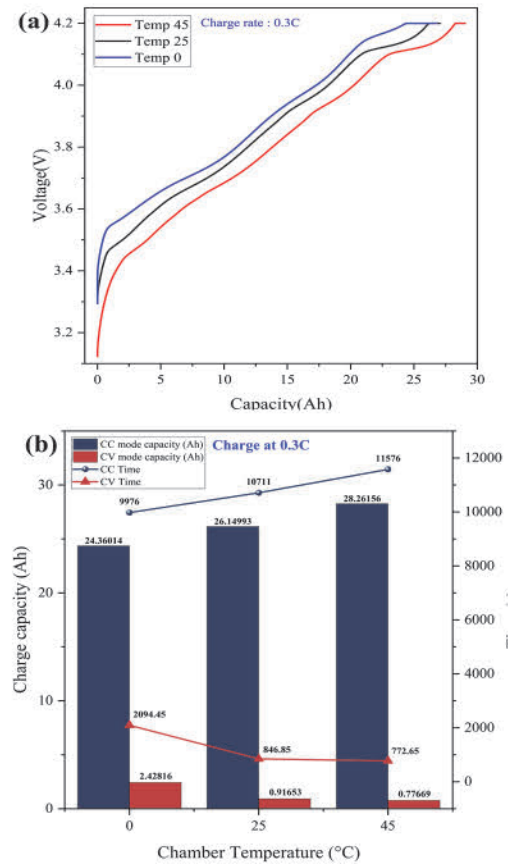


Fig. 7 (a) Voltage at various environmental temperature, (b) CC/CV charge capacity and time at various environmental temperature

도 변화가 발생하였는데 이에 대해 충전 시 CC 충전 용량과 CV 충전 용량, 각 충전 모드의 소요 시간을 Fig. 7(b)에 나타내었다. 선행연구와 같이,¹¹⁾ 충전율이 증가할수록 총 충전용량이 증가하였고 이에 대한 요인으로서는 정전류 충전 단계에서의 충전 용량 변화가 주요 요인이 되는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 충전용량을 위해 고온에서의 충전을 자주 감행할 경우 배터리의 노화를 촉진할 뿐만 아니라 열폭주의 직접적인 원인이 될 수도 있으므로 고온에서의 충전을 진행할 때는 반드시 적절한 열관리를 필요로 하다고 볼 수 있다.

3.2 방전 특성

3.2.1 온도 분포

방전 실험을 진행한 결과에서도 탭 구조에 의한 배터리 상단부와 하단부 간의 온도 차이가 발생하는 현상을 확인할 수 있었다. Fig. 8에서 기록된 바와 같이 셀 바닥에 가까운 3번 센서에서 지속적으로 최저 표면 온도를 관측할 수 있었으며 배터리 상부와 하부의 표면 온도차이는

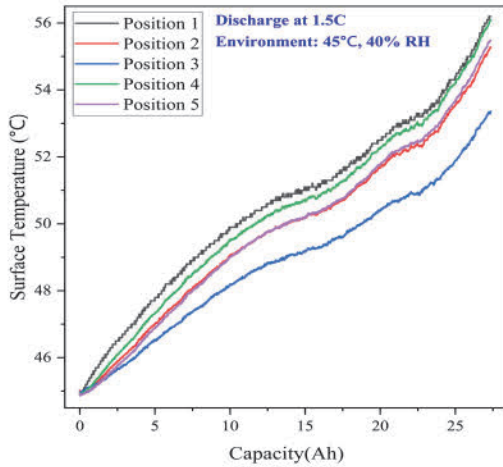


Fig. 8 Battery surface temperature at various locations

방전이 종료되기 직전 최대 2.92 °C 까지 발생하였다. 또한 Fig. 8의 환경온도 45 °C, 1.5C 방전을 조건에서 실험을 진행한 결과 배터리의 최대 표면온도는 56.2°C를 기록하며 배터리의 운용 한계온도인 60 °C에 가까워졌다. 이를 통해 고용량 배터리의 높은 열 발생율을 확인할 수 있었으며 여름철 전기자동차의 운용을 위해서는 평소보다 더욱 높은 수준의 열관리를 지속적으로 수행해줘야 함을 확인할 수 있다.

3.2.2 방전율에 의한 영향

방전 실험에서도 동일한 환경온도에 대해 서로 다른 방전율을 적용하여 실험을 진행하였고 이에 관한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 충전과 달리 방전에서는 방전 용량이 줄어드는 것을 알 수 있었는데, 0.3C에서 27.92 Ah를 기록하던 방전 용량이 1.5C에서는 27.46 Ah까지 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 이는 방전 중 전극의 계면에서 발생하는 분극현상(Polarization)에 의해 발생한 전압손실인 과전압의 손실이 증가하여 최소전압에 빠르게 도달하기 때문이다.

배터리의 표면 온도는 지속적으로 증가하여 방전이 끝나기 직전 최대 온도에 도달하는 것을 확인하였다. 실험 조건이 상온(25 °C) 임에도 배터리의 표면온도는 40.9 °C까지 도달하였고 실사용 조건에서는 더 높은 출력이 필요함을 감안한다면, 강력한 열관리 수단이 추가되어야 함을 알 수 있다.

3.3 OCV 실험을 통한 가역 발열량 계산

본 연구에서는 배터리 내부에서 발생하는 발열량을 분석하기 위해 개방회로전압 측정 실험을 수행하였다. 전류가 전압의 거동에 미치는 영향을 최소화하기 위하

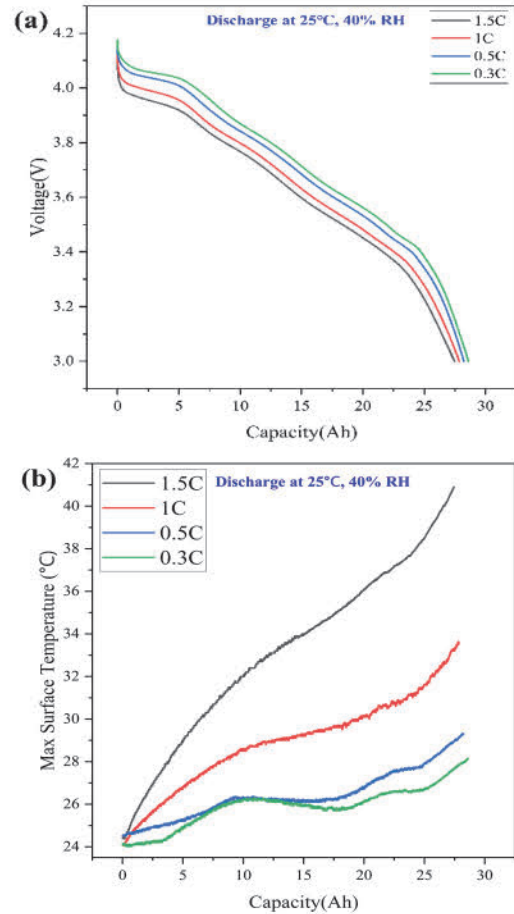


Fig. 9 (a) Voltage at various discharge rates, (b) maximum surface temperature at various discharge rates

여 C/20이라는 저전류를 사용하여 SOC 구간을 제어하였으며, SOC 100 % 부터 0 %까지 전 영역을 10 %씩 나눈 11 개의 지점에 대해 측정한 개방회로 전압은 Table 3과 같다. 전기화학 반응 과정에서 발생하는 가역적 발열인 엔트로피 발열은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$q_{\text{rev}} = IT \frac{\partial U_{\text{ocv}}}{\partial T} \quad (1)$$

where I : current of battery (A)

U_{ocv} : open circuit voltage (V)

T : environment temperature (K)

본 연구에서는 가역적 발열의 영향이 가장 클 것으로 예상되는 환경온도 25 °C, 0.3C 방전 조건을 기준으로 계산을 진행하였다. 각 SOC 지점에서 온도의 변화에 대한 전압의 변화율인 $\frac{\partial U_{\text{ocv}}}{\partial T}$ 는 최소 제곱법(Least Squares Method)을 통한 선형회귀의 기울기로 계산하였다. 최소자승법의 계산방법은 식 (2)와 같다.

$$\frac{\partial U_{ocv}}{\partial T} = \frac{n \sum (x_i + y_i) \cdot \sum (x_i) \cdot \sum (y_i)}{n \sum (x_i^2) - (\sum (x_i))^2} \quad (2)$$

where x_i : environment temperature (K)

y_i : open circuit voltage (V)

$n = 3$ (3 environment cases)

Fig. 10은 전 영역에 걸쳐 계산된 엔트로피 발열량의 계산 결과를 나타내었다. 산출 결과 엔트로피 발열량은 SOC 100~50 %까지 꾸준히 증가하는 경향을 보이다가 SOC 40 %부터 감소하는 것을 확인하였다. SOC 30 % 부터는 발열량이 증가하였으며 특히 SOC 10 % 구간에서는 1.336 W로 가장 높은 발열량을 기록한 것을 확인할 수 있었다. 해당 분석 결과를 통해 엔트로피 발열량이 비선형 적임을 나타내었으며 가역 발열 프로파일은 BMS(Battery Management System)의 열관리 알고리즘 설계 시 기초 데이터로 활용될 수 있다.

Table 3 OCV of EVE INR 4695P at various temperature

Temp (°C)	0	25	45
SOC (%)	Open circuit voltage (V)		
100	4.170526	4.17442	4.1691
90	4.08378	4.088179	4.089848
80	4.064003	4.06621	4.070417
70	3.955958	3.961254	3.96496
60	3.85693	3.864077	3.869313
50	3.765963	3.77293	3.78522
40	3.671131	3.677709	3.69003
30	3.596529	3.593009	3.59651
20	3.49108	3.49272	3.501978
10	3.375134	3.377849	3.39828
0	3.144736	3.0886	3.148376

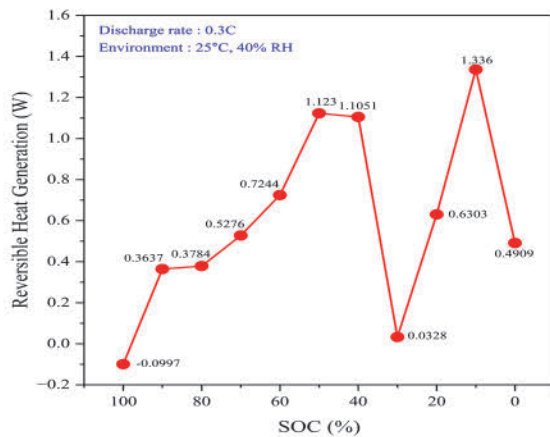


Fig. 10 Reversible heat generation rate according to SOC

4. 결론

본 연구에서는 Tabless 구조 4695타입 원통형 배터리에 대한 실험적 연구를 진행하였으며 아래와 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 모든 충전 및 방전 실험에서 셀 상부의 표면 온도가 더 높게 나타났으며 충전 혹은 방전이 진행됨에 따라 상부와 하부의 표면 온도 차이는 점차 증가하여 25°C, 1C 충전 조건에서 2.02 °C까지 그 차이가 증가하는 것을 확인할 수 있었다.
- 2) 충전을 혹은 방전율이 증가할수록 배터리의 최대 표면온도가 증가하는 것을 확인하였다. 환경온도를 상온에 두었음에도 불구하고 1C 충전에서는 최대 31.7°C, 1.5C 방전에서는 최대 40.9°C까지 상승하여 배터리 공칭용량 증가에 따라 더욱 강력한 냉각 수단이 필요함을 확인하였다.
- 3) 충전 시 환경온도의 변화에 따른 충전 용량의 변화를 확인하였다. 환경온도가 증가할수록 충전 용량이 증가하여 0°C에서는 26.788 Ah의 충전용량을 기록하여 공칭용량에 비해 8.57% 감소하였지만 45°C에서는 최대 충전 용량인 29.04 Ah를 기록하며 공칭 용량 대비 0.89% 감소한 사실을 통해 고온에서 배터리의 성능이 일시적으로 향상할 수 있음을 확인하였다.
- 4) 배터리 내부 발열 중 전기화학 반응 과정에서 발생하는 엔트로피 발열량의 계산을 위해 OCV 실험을 통한 개방회로 전압의 측정을 진행하였고, 수치해석적 방법을 통해 엔트로피 발열량을 산출하였다. 분석 결과 SOC의 각 구간에 따른 비선형적인 엔트로피 발열량을 확인할 수 있었으며 SOC 10%에서 가장 높은 발열량인 1.336 W를 기록하였다. 산출된 엔트로피 발열량은 BMS의 열관리 알고리즘에 활용된 기초 데이터로 판단된다.

후 기

이 성과는 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술진흥원의 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) J. Frazelle, "Battery Day," *Communications of the ACM*, Vol.64, No.5, pp.52-59, 2021.
- 6) C. Allgäuer, F. Grenz, K. A. 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.