

고속 충·방전 조건의 리튬 이온 파우치 셀에 대한 외부 인가 압력의 영향

이하은* · 조현성* · 김사무엘* · 이민근* · 강다정* · 김원빈* · 이상복** · 김성수*†

Effect of the External Pressure on Lithium-Ion Pouch Cell at High C-rate Conditions

Ha Eun Lee*, Hyeonseong Jo*, Samuel Kim*, Mingeun Lee*, Dajeong Kang*,
Wonvin Kim*, Sang Bok Lee**, Seong Su Kim*†

ABSTRACT: The rapid expansion of next-generation smart mobility systems, including drones, Urban Air Mobility (UAM), and electric vehicles (EVs), has intensified the demand for high-power-density and fast-charging technologies. Under high current-rate (C-rate) operation, however, lithium-ion batteries experience severe stress concentration and lithium plating induced by rapid intercalation and de-intercalation, resulting in irreversible capacity loss and structural instability. Since commercialization of next-generation batteries remains limited due to persistent technical hurdles such as lithium dendrite growth and the shuttle effect, optimizing the operating conditions of conventional lithium-ion batteries offers a practical, immediate solution to enhance stability and performance. In this study, the effect of external pressure on lithium-ion pouch cells under high C-rate conditions was investigated at ambient conditions. Surface temperature and thickness variation were analyzed using an IR camera and 3D Digital Image Correlation (DIC). The results demonstrate that appropriate external pressure effectively suppresses cell expansion and significantly improves cycle life under high-speed operational environments.

초 록: 최근 드론, 도심항공교통 및 전기자동차를 포함한 차세대 스마트 모빌리티 산업의 급격한 확장에 따라, 배터리의 고속 충·방전 기술과 고출력 밀도 확보는 필수 요구조건으로 대두되고 있다. 그러나 고율(High C-rate) 구동 조건에서는 급격한 리튬 이온의 삽입·탈리로 인한 기계적 응력 집중과 리튬 전착(Lithium plating) 현상이 가속화되며, 이에 따른 비가역적 용량 감소 및 구조적 불안정성이 심화된다. 특히 리튬 수지상 성장 및 셔틀 효과와 같은 기술적 난제로 인해 차세대 전지의 상용화가 제한적인 상황에서, 기존 리튬 이온 전지의 운용 조건 최적화를 통한 안정성 확보가 현실적이고 즉각적인 대안으로 요구된다. 본 연구에서는 실제 구동 환경(Ambient condition)에서의 고속 충·방전 조건하 외부 인가 압력이 리튬 이온 파우치 셀 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 고속 충·방전 조건에 따른 온도 분석 및 3D 디지털 이미지 상관법을 활용한 셀의 물리적 두께 변화를 측정하였다. 이를 통해 적절한 외부 압력 인가는 고율 구동 시 발생하는 셀의 비정상적 팽창을 효과적으로 억제하고, 고속 운전 환경에서의 사이클 수명을 향상시킴을 확인하였다.

Key Words: 리튬 이온 배터리(Li-ion battery), 고속 충·방전(High C-rate), 외부 인가 압력(External pressure), 열-기계적 거동(Thermo-mechanical behavior)

Received 4 March 2026, received in revised form 19 April 2026, accepted 15 May 2026

*Department of Mechanical Engineering, KAIST

**Department of Chemistry & Biochemistry, University of Maryland (E-mail: slee@umd.edu)

†Corresponding author (E-mail: seongsukim@kaist.ac.kr)

1. 서 론

리튬이온전지(LIBs, Lithium-ion batteries)는 높은 에너지 밀도와 안정성을 기반으로 전기자동차, 드론, 에너지저장장치(ESS, Energy Storage System) 등 다양한 스마트 모빌리티 및 에너지 산업의 핵심 전원으로 활용되고 있다[1,2]. 최근 도심항공교통, 고출력 드론, 고성능 전기차 시장의 확대에 따라 배터리 시스템에는 짧은 충전 시간과 높은 출력 밀도를 동시에 만족하는 고속 충·방전(Fast charging and discharging) 특성이 요구되고 있다[3]. 기존 LIB는 긴 충전 시간으로 인해 운용 효율성 측면에서 한계를 가지며, 이를 극복하기 위해 리튬 금속 전지 및 리튬 황 전지와 같은 고에너지 밀도 전지에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 차세대 전지 시스템은 리튬 수지상(Dendrite) 성장으로 인한 단락 위험, 급격한 부피 변화, 셔틀 효과(Shuttling effect) 등의 어려움이 있어 즉각적인 상용화에는 어려움이 있다[4,5]. 따라서 단기간 내 산업적 요구를 충족하기 위해서는 상용화된 LIB의 소재적 개선뿐만 아니라 운용 조건 최적화를 통한 성능 및 안전성 향상이 현실적인 접근으로 판단된다.

특히 고율 조건에서는 리튬 이온의 급격한 삽입 및 탈리에 따라 전극 내부에 비균일한 기계적 응력이 발생하며, 이는 전극 팽창의 국부적 집중과 내부저항 증가를 초래한다. 동시에 급격한 발열은 셀 온도를 상승시켜 전해질 열화 및 음극 표면에서의 리튬 전착을 가속화한다. 이러한 열적·기계적 복합 열화는 셀의 용량 감소를 가속화하며, 극한 조건에서는 열폭주(Thermal runaway)로 이어질 수 있다. 최근 고출력 배터리 시스템에서 보고된 화재 사례는 고속 구동 환경에서의 안전성 확보가 중요한 과제임을 시사한다[6,7].

LIB의 성능과 수명은 작동 온도뿐만 아니라 외부에서 인가되는 기계적 압력에 크게 영향을 받는다. 외부 압력은 전극-전해질 계면 접촉 저항, 리튬 전착 거동, 셀 팽창 억제 및 내부 구조 안정성에 직접적으로 관여하는 변수이다. 구체적으로, 외부 압력은 전극 입자 간 및 전극-전해질 계면의 접촉 저항을 감소시켜 이온 전도 경로를 안정화하고, 고율 조건에서 음극 표면의 리튬 전착을 억제하여 비가역 용량 손실을 완화하며, 충·방전 반복에 의한 셀의 불균일 팽창을 물리적으로 제어하여 내부 구조 안정성을 유지하는 역할을 한다[8,9]. 본 연구에서는 이러한 세 가지 경로를 바탕으로, 실제 구동 환경에서 외부 압력 인가가 열·기계적 복합 열화를 동시에 완화할 수 있다는 가설을 검증하고자 하였다. 기존 선행 연구들은 주로 통제된 항온(Isothermal) 조건에서 외부 압력의 영향을 분석하거나 온도와 압력 중 단일 변수만을 독립적으로 평가하는 데 그쳤다[10]. 그러나 실제 구동 환경(Ambient condition)에서의 고율 구동은 내부 열 축적과 급격한 부피 팽창을 동시에 유발하며, 이러한 복합 조건에서의 외부 압력이 셀의 구조적 안정성 및 열화 거

동에 미치는 영향에 대한 체계적 분석은 아직 충분히 이루어지지 않았다. 따라서 항온 조건에서의 단편적인 평가를 넘어, 실제 구동 환경에서의 온도 변화를 반영한 외부 압력의 역할을 규명하는 연구가 필요하다.

본 연구에서는 고속 충·방전 조건에서 외부 인가 압력이 리튬 이온 파우치 셀 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 5, 10C-rate 조건에서 셀 표면 온도를 실시간으로 모니터링하여 고율 구동 시 발생하는 급격한 발열 특성과 수명 열화의 상관관계를 분석하였다. 또한, 셀 열화가 뚜렷하게 관찰되는 5C-rate 조건에서 외부 인가 압력에 따른 셀의 전기화학적 성능을 분석하고 1,000 사이클 구동 후 3D 디지털 이미지 상관법(Digital image correlation, DIC)을 활용하여 셀의 팽창 변화를 정량적으로 분석함으로써, 외부 압력 인가가 고속 충·방전 환경에서의 기계적 팽창 억제 및 수명 향상에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 실험 및 방법

2.1 고속 충·방전 구동 조건

본 연구에서는 정격 용량 1050 mAh의 파우치형 리튬 이온 전지(SLPB593459HP1, Routejade batteries, Korea)를 사용하였다. 충·방전 수명 시험은 배터리 테스트 시스템(WBC3000M2, WonA Tech, Korea)을 통해 수행되었으며, 25°C 항온 챔버 내에서 C-rate 조건에 대한 기초 수명 특성을 분석하였다. 또한, 실제 외부 압력 인가에 따른 성능 변화 및 수명 평가는 실온 환경에서 실시하였다.

충·방전 구동은 1, 5, 10C-rate의 조건에서 정전류/정전압(Constant current/Constant voltage, CC/CV) 모드로 수행하였으며, 전압 범위는 2.7-4.2 V로 설정하였다. CC/CV는 전류를 일정하게 인가하는 정전류단계와 Cut-off 전압에 도달한 이후 전압을 일정하게 유지하는 정전압단계로 구성되며 CV 단계에서는 전압이 일정하게 유지되는 대신에, 전류가 감소하여 기준 전류 값의 10% 도달 후 충전을 종료하는 프로토콜을 적용하였다. 각 조건에서 총 1,000 사이클의 충·방전을 수행하였으며, 사이클 간 열적 안정화를 위해 각 충·방전 종료 후 10분간의 휴지 시간을 부여하였다. 또한, 항온 조건 실험의 경우 각 조건별 2회 이상의 반복 실험을 수행하였으며, 유사한 경향성이 확인됨에 따라 대표 결과를 제시하였다. 실제 구동 환경 실험의 경우 항온 챔버와 달리 주변 온도의 미세한 변동이 존재하므로, 경향성이 일치된 데이터에 대해 대표 데이터를 제시하였다.

2.2 온도 및 압력 분석

고속 구동 중 발생하는 발열 거동은 접촉식 및 비접촉식 계측 방식을 통해 데이터를 수집하고 분석하였다. 셀 전반의 거시적인 열분포를 시각화하기 위해 고해상도 열화상 카메라(RSE600, Fluke, USA)를 사용하여 실시간 표면 온도

분포를 분석하였다. 열화상 측정의 신뢰성 확보를 위해 K-type 열전대(Thermocouple)를 셀 중앙 표면에 부착하였으며, NI9212 데이터 수집 장치(DAQ)와 LabVIEW 소프트웨어를 통해 온도 데이터를 실시간 수집하였다.

외부 인가 압력 및 구동 중 압력 변화를 모니터링하기 위해 얇은 필름형 압력 센서(Flexiforce HT201, Tekscan)를 셀 표면에 배치하였다. 해당 센서는 직경 9.53 mm의 감지 영역을 가지며, 작동 온도는 $-40\sim 240^{\circ}\text{C}$ 이다. 외부 압력 인가는 Vise handle, linear guide 및 네오디뮴 자석을 기반으로 풀림 방지 및 균일 가압 기능이 있는 자체 제작 가압 치구를 사용하였으며, 셀 중앙에 배치된 필름형 압력 센서를 통해 목표값(0, 30, 50, 70 kPa)을 인가하였다. 또한, 사이클 진행 중 셀 팽창에 따른 압력 변화를 실시간으로 모니터링하였다.

2.3 두께 분석

3D DIC 시스템(ARAMIS, ZEISS, Germany)을 기반으로 고속 충·방전 시 발생하는 셀의 물리적 변형을 정량화하기 위해 구동 중 파우치 셀 형상 변화를 실시간으로 측정하였으며, 획득한 변위 데이터를 기반으로 두께 방향 팽창 수축 거동을 분석하였다. DIC 측정 영역은 파우치 셀 전면 전체로 설정하였으며, 측정 기준면(Reference configuration)은 초기(0번 사이클) 방전 완료 상태의 3D 형상으로 정의하였다. 두께 산출은 스테레오 카메라 쌍으로 취득한 면의 변위(Out-of-plane displacement, Δz)를 초기 두께에 더하는 방식으로 정량화하였다. 시스템 측정 오차는 사전 교정 실험을 통해 $\pm 0.02\text{ mm}$ 이내로 확인하였다. 또한, 외부 압력 인가 유무에 따른 영향을 분석하기 위해 사이클 전·후 두께 변화를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 고속 충·방전 구동 특성

Fig. 1과 Table 1에 각 조건에서의 방전 용량 유지율 변화 및 수명 특성을 나타내었다. 1C-rate 조건에서는 1,000 사이클 구동 후 초기 용량 대비 6.3%의 용량 감소를 보였다. 반면, 고율 조건에서는 급격한 용량 저하가 관찰되었으며, 1,000 사이클에서 5C-rate 및 10C-rate 조건은 각각 11.3% 및 26.0%의 용량 감소를 보였다. 특히 10C-rate의 조건에서는 항온 환경임에도 불구하고 1,000 사이클 이전에 수명 종료 기준(End of life, EOL)인 80% 용량 유지율(Capacity retention)을 하회하였다. 이는 고율 구동에 따른 내부 열적·전기화학적 열화가 급격히 가속화됨을 의미한다.

Fig. 2 열전대를 활용하여 측정된 온도 결과를 통해 10C-rate 방전 시 최대 표면 온도는 57.6°C 까지 상승하였으며, 이는 5C-rate 조건 대비 약 16°C 이상 높은 값을 나타내었다. 일반적인 리튬이온전지의 안정적 구동 온도 범위를 고려할 때, 이러한 고온 거동은 음극 표면의 SEI층의 열적 분해

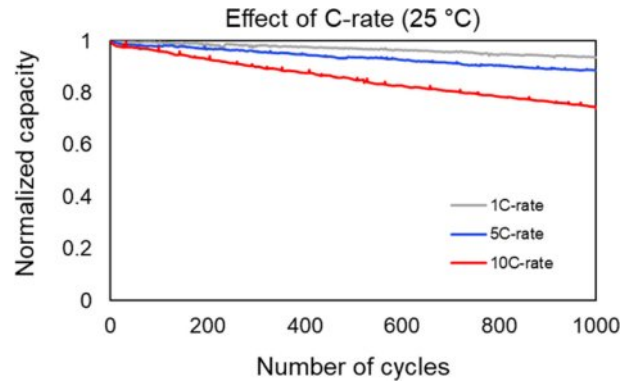


Fig. 1. Cycling performance of LIBs under different operating conditions

Table 1. Capacity fade of LIBs under different operating conditions

Cycle	1C-rate	5C-rate	10C-rate
500	2.9%	6.2%	18.8%
1000	6.3%	11.3%	26.0%

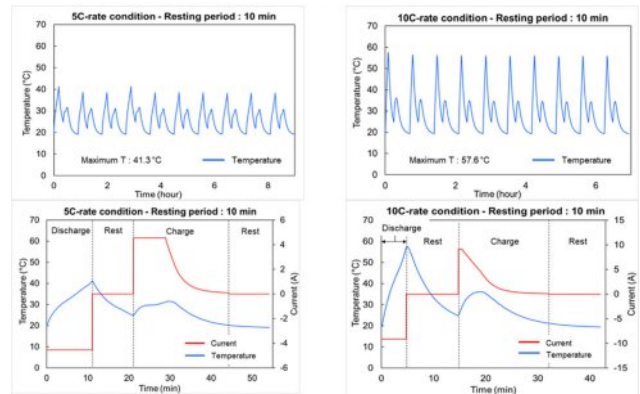


Fig. 2. Surface temperature measurements of LIBs under high C-rate (5,10C-rate) conditions

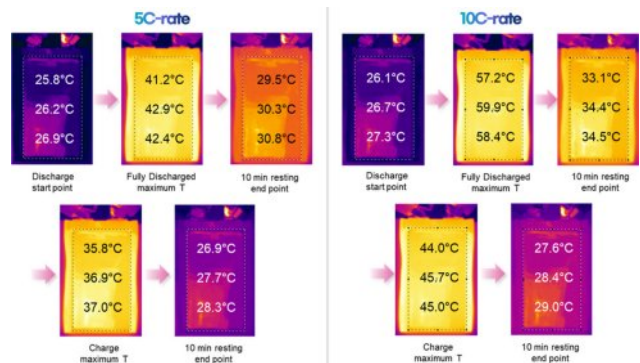


Fig. 3. Infrared thermographic analysis of surface temperature distribution in LIBs at high C-rate

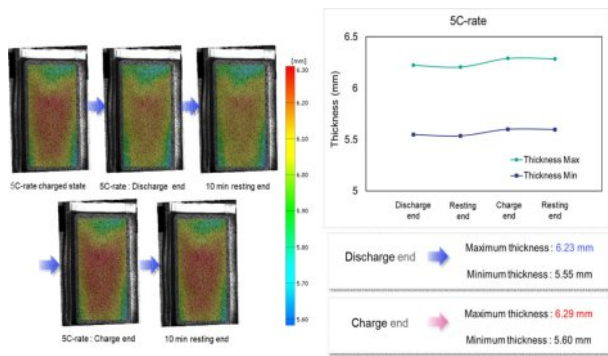


Fig. 4. Monitoring of thickness variation in a LIB during operation at a 5C-rate using 3D DIC

및 재형성을 반복적으로 유발하고 내부 저항 증가를 가속화하여 조기 수명 저하로 이어졌을 것으로 판단된다[11,12].

Fig. 3의 열화상 카메라를 이용한 표면 온도 분포 분석 결과에서도 10C-rate 조건에서 방전 종료 시점에 최대 59.9°C의 온도가 확인되었다. 특히 셀 중앙부에서 방전 완료 시점에 높은 온도 분포를 보였으며, 휴지 시간 후 셀의 하단 영역에서의 온도가 높게 나타나는 것을 확인하였다. 해당 결과를 바탕으로, 압력 인가 실험은 유효 수명 범위 내에서 안정적 거동 분석이 가능한 5C-rate 조건을 기준으로 수행하였다.

5C-rate 조건에서 3D DIC 분석을 통해 셀의 두께 변화를 실시간으로 모니터링한 결과 Fig. 4와 같이 충·방전에 따라 팽창 및 수축 거동이 확인되었다. 이러한 국부 팽창 집중은 외부 압력의 필요성을 직접적으로 시사한다. 방전 완료 시점의 최대 두께는 6.23 mm였으며, 충전 완료 시점에서는 6.29 mm로 약 0.06 mm의 두께 증가가 관찰되었다. 또한, 두께 변위 분포가 균일하지 않고 국부적으로 집중되는 경향을 보였으며, 이는 열화상 분석에서 확인된 고온 영역과 공간적으로 일치하는 특성을 나타내었다. 이러한 결과는 고율 구동 시 발생하는 열에 의한 열팽창이 셀의 국부 팽창을 유발하는 지배적인 요인임을 의미한다.

3.2 외부 인가 압력 영향

실제 운용 환경을 모사하기 위해 항온 조건이 아닌 주변 온도 변화 환경에서 고속 충·방전 조건에서 외부 인가 압력이 배터리 수명에 미치는 영향을 확인하기 위해 0, 30, 50, 70 kPa의 초기 인가 압력에 대한 수명 특성을 분석하였다. 0 kPa 파우치 셀의 경우 셀 중앙에 열전대를 부착하여 Fig. 5와 같이 주변 온도가 12.7~23.2°C 범위에서 변동함에 따라 셀 표면 온도 또한 13.9~42.0°C 범위에서 유사한 위상으로 변동하는 거동을 보임을 확인하였다.

또한, Fig. 6의 방전 용량 그래프를 통해 주변 온도 변화에 따라 용량이 동일한 위상으로 변동함을 확인하였다. Table 2의 사이클 수명에 따른 용량 저하 결과를 통해 외부 환경 노출시 0 kPa의 무가압 조건의 경우 1,000 사이클 이후 16.5%

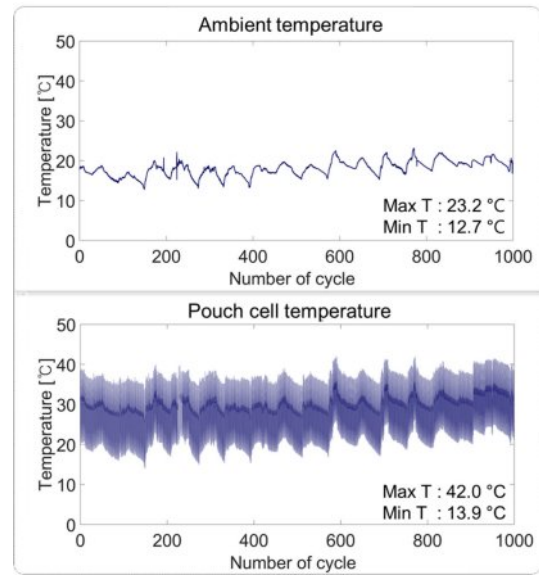


Fig. 5. Comparison of ambient temperature and pouch cell temperature profiles over 1,000 cycles

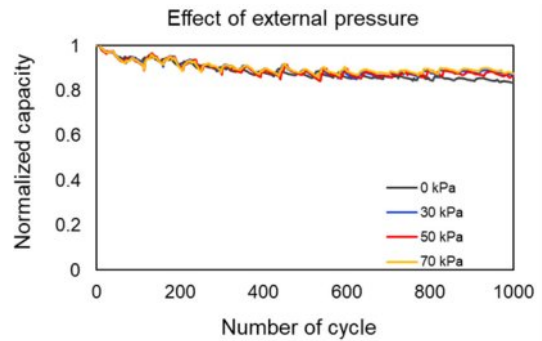


Fig. 6. Effect of external pressure on the cycle life of LIBs

Table 2. Capacity fade under different external pressure at 5C-rate

Cycle	0 kPa	30 kPa	50 kPa	70 kPa
500	13.0%	10.8%	11.8%	10.6%
1000	16.5%	13.3%	13.6%	12.4%

의 용량 감소가 나타났으며, 이는 항온 조건 동일 사이클 11.3% 대비 열화가 가속화된 수치이다. 이러한 결과는 실제 구동 중 외부 온도가 12.7°C에서 23.3°C 사이의 분포를 보이며 항온 조건보다 낮은 평균 온도에 노출되었을 뿐만 아니라, 지속적인 온도 변화를 겪으면서 리튬 전착 및 내부 저항 증가가 심화되었을 가능성이 있는 것으로 추정된다. 반면, 외부 압력을 인가한 경우 모두 조건에서 용량 감소율이 완화되는 경향을 보였으며, 특히 70 kPa 조건에서 1,000 사이클 후 12.4%의 가장 낮은 용량 감소율을 나타내어 압력 인가에 따른 수명 개선 효과를 확인하였다.

외부 압력에 따른 셀 팽창 제어 효과를 분석하기 위해 3D

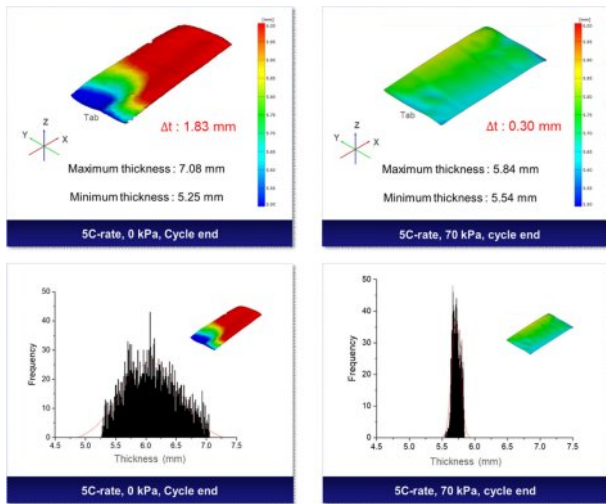


Fig. 7. Thickness distribution of LIBs after 1,000 cycles under different external pressures

DIC를 활용하여 0 kPa 및 70 kPa 조건에서 1,000 사이클 방전 완료 후 두께 분포를 분석하였다. Fig. 7의 결과와 같이 압력을 인가하지 않은 경우 셀 내부 두께 편차가 최대 1.83 mm로 측정되었다. 70 kPa 압력 인가 조건에서는 두께 편차가 약 0.3 mm로 감소하였으며, 압력 인가 구동 시 최대 두께 또한 0 kPa 조건의 7.08 mm 대비 5.84 mm로 상대적으로 팽창이 제어됨을 확인하였다. 이러한 결과는 외부 압력이 셀 내부 구조의 불균일 팽창을 효과적으로 억제함을 의미하며, 결과적으로 전극-전해질 계면 안정성 유지 및 내부 저항 증가 억제를 통해 수명 특성을 개선한 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서 리튬 이온 파우치 셀을 대상으로 고속 충·방전 조건에서의 외부 인가 압력이 셀의 팽창 거동 및 수명 특성에 미치는 영향을 분석하였다.

25°C 항온 조건에서 1, 5, 10C-rate 구동 특성을 비교한 결과, 고율 조건에서 열화가 가속화되었으며, 10C-rate에서는 방전 시 최대 표면온도가 59.9°C까지 상승하고 1,000 사이클 이전에 80% 용량 유지율을 하회하였다. 이는 고율 구동에 따른 내부 발열 축적과 전기화학적 열화가 동시에 진행됨을 나타낸다. 3D DIC 두께 분석 결과, 고율 구동 시 높은 온도 분포를 보인 셀 중앙부 및 하단에서 두께 증가가 집중적으로 발생하였다.

5C-rate 조건에서 외부 압력을 인가한 결과, 모든 가압 조건에서 셀의 용량 저하 특성이 개선되었으며 특히 70 kPa 초기 인가 압력에서 1,000 사이클 구동 후 셀의 두께 편차는 무가압 조건의 1.83 mm에서 약 0.3 mm 수준으로 감소하였으며, 용량 감소율 또한 16.5%에서 12.4%로 완화되었

다. 이와 같이 적절한 외부 가압은 고속 충·방전 조건에서 발생하는 불균일 팽창을 억제하고, 셀 수명 특성 향상에 기여함을 입증하였다.

본 연구에서 70 kPa 조건이 가장 우수한 수명 개선 효과를 나타낸 것은, 해당 압력 범위에서 전극 팽창 억제 효과가 극대화되면서도 셀 구조에 대한 과도한 기계적 부하가 발생하지 않는 최적 균형점에 해당하기 때문으로 판단된다. 일반적으로 파우치 셀에 과도한 외부 압력이 인가될 경우, 분리막의 국부 변형, 전해질 누액, 활물질 탈리 등의 구조적 손상이 발생하여 수명 개선 효과를 저해할 수 있다. 따라서 최적 외부 압력 범위는 셀 종류 및 구동 조건에 따라 달라질 수 있으며, 다양한 셀 설계와 더 넓은 압력 범위를 대상으로 한 체계적 후속 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (RS-2024-00402410).

REFERENCES

- Nam, S., Umrao, S., Oh, S., and Oh, I.K., "2D Layered $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ Negative Electrode based Activated Carbon Woven Fabric for Structural Lithium Ion Battery," *Composites Research*, Vol. 32, No. 5, 2019, pp. 296-300.
- Yoon, J., and Yoo, J.K., "Development of Binder Materials for Si-based Anode in Lithium-ion Batteries," *Composites Research*, Vol. 35, No. 6, 2022, pp. 365-370.
- Wang, C.Y., Liu, T., Yang, X.G., Ge, S., Stanley, N.V., Rountree, E.S., Leng, Y., and McCarthy, B.D., "Fast Charging of Energy-Dense Lithium-ion Batteries," *Nature*, Vol. 611, No. 7936, 2022, pp. 485-490.
- Wang, J., Wang, H., Jia, S., Zhao, Q., Zheng, Q., Ma, Y., Ma, T., and Li, X., "Recent Advances in Inhibiting Shuttle Effect of Polysulfide in Lithium-Sulfur Batteries," *Journal of Energy Storage*, Vol. 72, 2023, 108372.
- Su, L., and Manthiram, A., "Lithium-Metal Batteries via Suppressing Li Dendrite Growth and Improving Coulombic Efficiency," *Small Structures*, Vol. 3, No. 10, 2022, 2200114.
- Held, M., Tuchscheid, M., Zennegg, M., Figi, R., Schreiner, C., Mellert, L. D., Welte, U., Kompatscher, M., Hermann, M., and Nachev, L., "Thermal Runaway and Fire of Electric Vehicle Lithium-Ion Battery and Contamination of Infrastructure Facility," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 165, 2022, 112474.
- Li, Y., Gao, X., Feng, X., Ren, D., Li, Y., Hou, J., Wu, Y., Du, J., Lu, L., and Ouyang, M., "Battery Eruption Triggered by Plated Lithium on an Anode during Thermal Runaway after Fast Charging," *Energy*, Vol. 239, 2022, 122097.
- Yu, H., Wang, L., Zhang, Z., Li, Y., Yang, S., and He, X., "Insight

- Understanding of External Pressure on Lithium Plating in Commercial Lithium-Ion Batteries,” *Advanced Functional Materials*, Vol. 34, No. 42, 2024, 2406966.
9. Müller, V., Scurtu, R., Memm, M., Danzer, M. A., and Wohlfahrt-Mehrens, M., “Study of the Influence of Mechanical Pressure on the Performance and Aging of Lithium-Ion Battery Cells,” *Journal of Power Sources*, Vol. 440, 2019, 227148.
 10. Zhou, L., Xing, L., Zheng, Y., Lai, X., Su, J., Deng, C., and Sun, T., “A Study of External Surface Pressure Effects on the Properties for Lithium-Ion Pouch Cells,” *International Journal of Energy Research*, Vol. 44, No. 8, 2020, pp. 6778-6791.
 11. Ramadass, P., Haran, B.S., White, R.E., and Popov, B.N., “Capacity Fade of Sony 18650 Cells Cycled at Elevated Temperatures Part 1. Cycling Performance,” *Journal of Power Sources*, Vol. 112, No. 2, 2002, pp. 606-613.
 12. Kang, T., Lee, P., Kwon, S., Yoo, K., and Kim, J., “Regional Resistance Based Spatial Thermal Model for Checking Non-Uniformed Temperature Distribution and Evolution of Pouch Type Lithium Ion Batteries,” *Applied Thermal Engineering*, Vol. 192, 2021, 116936.