

21700 원통형 배터리 셀 3S3P 모듈의 방전 조건에 따른 열폭주 전파 및 열전달 특성 연구

방유마*, 레 득 타이*, 황성국*, 이무연*

*동아대학교 기계공학과

e-mail: mylee@dau.ac.kr

Thermal Runaway Propagation and Heat Transfer Characteristics of 3S3P 21700 Lithium-Ion Battery Module with Discharge Condition

You Ma Bang*, Le Duc Tai*, Seong Guk Hwang*, Moo Yeon Lee*

*Dept. of Mechanical Engineering, Dong-A University

요 약

본 연구는 21700 원통형 리튬이온 셀로 구성된 3S3P 모듈을 대상으로, 5 C-rate 고율 방전 조건에서의 열폭주 발생 및 전파 특성과 지배적 열전달 경로를 규명하였다. 실험에서는 원통형 배터리 1개 셀의 방전 조건 변화에 따른 모듈 표면 온도 이력과 온도 상승률을 측정하였고, 이를 바탕으로 ANSYS Fluent의 NTGK 모델과 Thermal Abuse 모델을 활용하여 발열 거동을 수치해석으로 분석하였다. 각 방전 조건에서 도출한 시간 의존적 발열량을 사용자 정의 함수(UDF)로 구현하여 모듈 해석에 적용하였다. 3열 3행 배치에서 중앙 셀을 열폭주 개시로 가정하고 대류, 복사 결합 열전달을 고려한 3차원 해석을 수행한 결과, 인접 셀로의 열전달에 의해 전파가 진행됨을 확인하였다. 또한 모듈 구조와 공극부 유동 특성에 따라 대류 및 복사 기여도가 증가하면서 전파 속도가 가속되는 경향을 보였다. 본 연구는 고율 방전 운용 하는 3S-3P 소형 모듈의 열폭주 위험도와 열전달 지배 메커니즘을 실험·해석적으로 제시하며, 셀 간 간극, 배치, 국부 열차폐 설계 및 등 배터리 열해석을 위한 실무적 근거를 제공한다.

1. 서론

리튬이온 배터리는 높은 에너지 밀도와 효율로 인해 전기차 및 에너지 저장 시스템에 널리 활용되고 있지만, 외부 충격이나 과열로 인한 열폭주(thermal runaway) 위험이 존재한다. 단일 셀의 열폭주는 주변 셀로 연쇄적으로 전파되어 팩 전체 화재로 변질 수 있으며, 배터리 팩에서 한 셀의 고장으로 다른 셀에 착화가 발생하여 광범위한 폭발로 이어질 수 있음이 보고되었다. 실험 연구에 따르면 약 150 °C 이상의 셀 온도에 이르면 인접 셀이 열폭주 할 가능성이 급격히 높아지며, 최단 123 초 만에 열폭주가 전파된 사례도 확인되었다. 21700 규격의 대형 원통형 셀은 기존 18650 셀 대비 용량과 에너지 밀도가 증가한 반면 관련 열적 거동에 대한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다. 이에 따라 배터리 모듈 단위에서 열폭주 전파 메커니즘을 규명하고, 효과적인 열 관리 및 안전 대책을 마련하기 위해 실험과 수치해석을 연계한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 21700 원통형 셀 9개로 구성된

3직렬-3병렬(3S3P) 모듈을 대상으로, 5 C-rate의 고율 방전 조건에서 발생하는 열폭주 전파 현상과 지배적인 열 전달 경로를 규명하였다. 하나의 셀만 과부하로 방전하여 초기 열폭주를 유발하고, 주변 셀로의 열 확산 및 전파 거동을 관찰하였다. 이를 위해 ANSYS Fluent 소프트웨어의 NTGK 배터리 모델과 thermal abuse 모델을 활용한 수치해석 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 수치해석 모델링

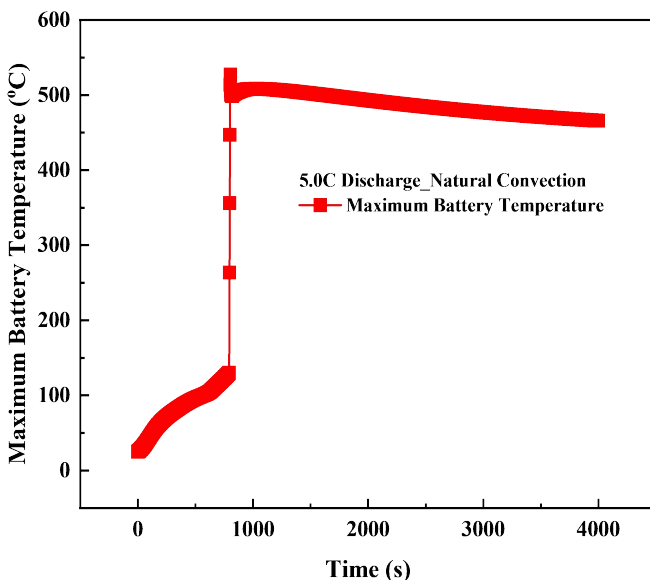
본 연구에서는 상용 CFD 코드인 ANSYS Fluent의 배터리 해석 모듈을 활용하였다. 우선 정상적인 방전 시 셀의 발열 거동을 모사하기 위해 Fluent의 MSMD (Multi-Scale Multi-Dimensional) 배터리 모델 중 NTGK (Newman-Tiedemann-Gu-Kim) 경험 모델을 적용하였다. NTGK 모델은 셀 전압-전류 특성과 내부 저항 변화를 나타내는 매개변수 U와 Y를 실험적 데이터로부터 추정하여 사용하며, 이러한 파라미터를 통해 시간에 따른 셀의 발열률을 계산한다. 21700 원통형 셀 1개를 이용하여 각각의 C-rate 에

따른 표면 온도 변화를 측정하였으며, 이를 이용하여 매개 변수 U, Y를 산출하였다. 그리고 셀의 열폭주 반응을 재현하기 위해 Fluent의 Thermal Abuse 모델을 병행 적용하였다. Thermal abuse 모델은 전극 소재 분해 반응 등에 의한 추가 발열을 고려하여, 셀 온도가 임계값에 이르면 자체 발열이 폭증하는 열폭주 현상을 모사한다. 즉 NTGK 모델로 계산된 전기화학적 발열에 더해, 내부 단락 발생 시 급격한 화학 반응열을 발생시키는 이차 모델을 결합함으로써 정상 작동에서 열폭주로의 이행을 해석하였다.

수치해석을 위한 경계조건으로서 3×3 배열로 구성된 배터리 모듈 전체를 계산 영역으로 설정하고, 각 셀의 초기 SOC(State of Charge)는 100%로 가정하였다. 셀 표면 및 주변 유체 영역에는 자연대류 경계조건을 부여하여 공기 냉각 효과를 모사하였다. 주변 공기는 초기 온도 25°C , 유입 유속 0.1 m/s 로 설정하여 셀 주위로 매우 약한 기류가 흐르는 조건을 적용하였다. 셀 표면의 대류 열전달계수는 문헌 사례를 참고하여 약 $10\text{ W/m}^2\text{K}$ 수준으로 설정하였다.

3. 결과

그림 1은 5 C-rate 방전 시 자연대류 환경에서 원통형 배터리 셀의 최고 표면온도 변화를 abuse model로 수치해석 결과를 나타낸 그래프이다. 열폭주가 일어난 셀이 고율 방전되는 동안 모듈 표면 온도는 서서히 상승하여 일정 온도에 도달하는 약 790 초에서 약 510°C 내외로 최고값을 기록하였으며, 방전 종료 후에는 냉각 작용으로 완만하게 감소하는 거동을 보였다. 이러한 결과는 하나의 셀이 5 C-rate 로 과부하를 받는 경우 국부적으로 온도가 크게 상승하지만, 해당 조건만으로는 즉각적인 열폭주로 이어지지 않는음을 시사한다.



[그림 1] 열폭주 시 시간에 따른 배터리 셀 최대 온도 변화

한편, 중앙 셀에 열폭주가 발생하는 시나리오를 모사한 결과, 해당 셀에서 방출된 거대한 열로 인해 주변 셀들의 온도가 단시간 내 급격히 상승하였다. 중앙 셀이 내부 단락 등에 의해 임계 온도에 도달하여 500°C 이상의 격렬한 발열이 일어날 경우, 수백 초 이내에 인접한 이웃 셀들의 표면온도가 120°C 를 넘어설 것으로 예측되었다. 이는 약 120°C 부근에서 셀의 세퍼레이터 용융 및 추가 열폭주가 유발될 수 있는 위험 수준이며, 결과적으로 시간차를 두고 주변 셀들이 연쇄적으로 열폭주에 돌입함을 의미한다. 실제 시뮬레이션에서는 약 수십 분 내에 모듈 내 모든 셀이 차례로 열폭주에 이르게 되어 전체 모듈이 파국적인 고온 상태에 도달하였다. 이러한 해석 결과는 열폭주 전파에서 셀 간 열전도 경로가 가장 지배적임을 보여준다.

4. 결론

본 연구에서는 21700 원통형 셀로 이루어진 3S3P 배터리 모듈을 대상으로 5 C-rate 고율 방전 환경에서의 열폭주 전파 특성을 수치해석으로 분석하였다. 3S3P 원통형 배터리 모듈 중 중심부의 배터리 셀에서 열폭주가 발생할 경우 주변 셀로의 열전달이 급속히 진행되어 결국 모듈 전체로 열폭주가 확산될 수 있음이 확인되었다. 특히 셀 간 열전도가 가장 큰 전파 경로로 작용하였으며, 복사열도 고온에서 무시할 수 없는 영향을 미쳐 전파를 가속시켰다. 반면 0.1 m/s 수준의 자연 대류 냉각만으로는 열폭주 전이를 효과적으로 막지 못하였다. 이러한 결과는 자연 공랭식 배터리 모듈의 경우 열폭주가 일어날 것을 대비하여 단열재나 방열 차단재를 삽입하여 열전달 경로를 지연시킬 필요가 있다.

Acknowledgement

이 성과는 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술평가관리원의 지원(No. 20024894), 한국산업단지공단(No. VCDM2502)의 지원과 2025년도 교육부 및 부산시의 재원으로 부산RISE혁신원의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다. (2025-RISE-02-003-011)