

동일 형태의 NCM/LFP 배터리의 열폭주 현상에 대한 수치해석적 비교 연구

Numerical Comparative Study on the Thermal Runaway of NCM/LFP Batteries of the Same Geometry

강명보(Myung-Bo Gang), 김우영(Woo-Young Kim)*, 김남진(Nam-Jin Kim)**†

제주대학교 기계공학과 박사과정, *한국폴리텍대학 전북캠퍼스 스마트전기자동차과 교수,

**제주대학교 기계공학과 교수

Ph.D. Candidate, Department of Mechanical Engineering, Jeju National University, Jeju 63294, Korea

**Professor, Department of Smart Electric Vehicle, Korea Polytechnics, 54352, Korea*

***Professor, Department of Mechanical Engineering, Jeju National University, Jeju 63294, Korea*

Abstract

In this study, the thermal runaway of NCM and LFP batteries were compared and analyzed through numerical analysis under various conditions. Comparing the thermal runaway of the NCM622 (18650) battery cell and the LFP (18650) battery cell through oven test simulation, the LFP battery did not show thermal runaway, whereas the NCM622 battery temperature increased to 710°C in 12 minutes. To observe the thermal runaway and propagation of the prismatic LFP battery cell, the internal temperature was set at 200°C and the oven test simulation was conducted. It was found that thermal runaway occurred at 391°C after 47 minutes. As a result of observing thermal runaway propagation by placing five NCM622 and LFP battery cells, the thermal runaway propagation was clearly observed in the case of the NCM622 battery, but in the case of the LFP battery, thermal runaway was not observed after the first cell. From the third battery cell, it was confirmed that the temperature change was very insignificant, and through this, it is considered that the LFP battery is relatively safe compared to the NCM battery in terms of the thermal runaway propagation of the battery.

Key words: NCM(니켈-코발트-망간), LFP(리튬 인산철), Battery(전지), Thermal runaway(열폭주), Propagation(전파)

†Corresponding author

E-mail: jnkim@jejunu.ac.kr

접수일: 2022년 08월 24일; 심사일: 1차:2022년 09월 27일, 2차:2022년 11월 10일; 채택일: 2022년 11월 10일

기호 설명

- A : 전해질의 붕괴 빈도 [1/s]
 c : 반응물질의 무차원 농도
 C_p : 정압비열 [J/kg·K]
 H : 단위 질량당 반응엔탈피 [J/kg]
 k : 열전도도 [W/m·K]
 h : 대류열전달계수 [W/m²·K]

L : 배터리 길이 [m]
 Q : 단위 부피당 발열량 [W/m^3]
 R : 반응속도 [$1/\text{s}$]
 t : 시간 [s]
 T : 온도 [K, $^{\circ}\text{C}$]
 W : 단위 부피당 반응물질 질량 [kg/m^3]
 Ra : 레일리 수
 c_{sei} : 리튬 함유 준안전성 종의 무차원 양
 c_{neg} : 탄소 내 주입된 리튬의 무차원 양
 c_e : 전해질의 무차원 농도
 t_{sei} : 리튬 반응 층 두께의 무차원 양
 E_a : 반응 계수 [J/mol]
 W_c : 젤리롤 부피당 탄소 함량 [g/m^3]
 W_e : 젤리롤 부피당 전해질 함량 [g/m^3]
 W_p : 젤리롤 부피당 양극활물질 함량 [g/m^3]
 N_L : 리튬이온 배터리 표면의 자연대류 열전달계수 [$\text{m}^2 \cdot \text{K}$]

그리스 문자

α : 전환율
 μ : 절대점성계수 [$\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$]

하첨자

ele : 전해액
 ne : 음극활물질
 pe : 양극활물질
 sei : 고체전해질 인터페이스

1. 서 론

신재생에너지의 보급 확산에 따라 세계 주요국의 에너지저장장치(Energy Storage System) 시장이 급속도로 성장하고 있다. 에너지 전문 시장조사업체인 Bloomberg NEF는 ESS 누적 설치 용량이 2020년 말 기준 17GW에서 2030년 358GW로 늘어날 것으로 전망했다[1]. 이는 대표적인 신재생에너지인 풍력·태양광 발전은 환경 조건에 따라 발전량에 영향을 받기 때문에 지속적인 에너지 생산이 어려워 미리 생산한 에너지를 저장하고 필요한 시기에 활용할 수 있도록 해주는 ESS가 필수적인 요소로 꼽히기 때문이다. ESS는 그린 뉴딜과 디지털뉴딜을 연계하는 핵심산업이자 에너지전환으로 인한 전력망 변동성을 빠르게 보완해주고 분산전원을 촉진하는 중요기술로, 향후 탄소중립과 RE100 달성을 위해서도 지속적으로 개발해야 하는 기술이다.

하지만 세계적으로 급증하는 ESS 시장과는 대조적으로 국내 시장은 2017년 하반기부터 시작된 ESS 화재 사건들로 인해 안정성에 대한 의문이 제기되면서 ESS 제조 및 운영이 크게 위축되었다. ESS 산업계의 회복을 위해서는 화재 발생 가능성을 줄이기 위한 연구가 필요한데, 특히 에너지 저장 매개체로 사용되는 배

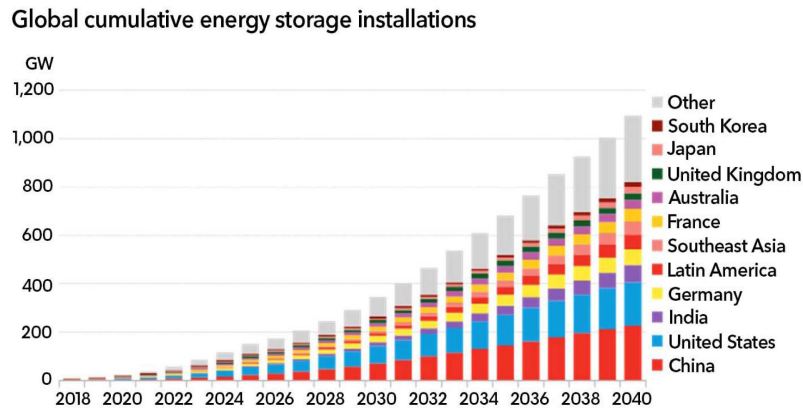


Fig. 1. Global cumulative energy storage installations

터리의 안정성 확보 및 열폭주에 관한 연구가 필요한 상황이다.

국내 관련 산업계는 삼원계(NCM) 배터리에 집중하며 에너지 밀도를 높이기 위한 High-Nickel 양극재에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 중국 배터리 제조업체의 경우에는 LFP 배터리에 집중하면서 안정성 확보를 통한 시장 확장을 목표로 하고 있다[2].

관련 분야의 연구 또한 다양한 방면으로 진행되고 있다. Al Hallaj et al.[3]는 배터리 셀이 열폭주에 진입하는 조건 규명을 위한 1차원 해석 모델을 개발하였고, Pesaran et al.[4], Bharathan et al.[5]은 열폭주 현상을 제외한 3차원 해석 모델을 제시하였다. Kim et al.[6]은 열폭주 현상에 NCO 계열 리튬이온 배터리가 끼치는 영향을 3차원 모델로 수립하였고 Spotnitz et al.[7]는 배터리 셀이 열폭주에 진입 시 안정성 예측을 위한 접근방식을 제시하였다. Hatchard et al.[8, 9]는 전극 재료의 반응 및 셀 크기 예측을 위한 모델 수립을 위해 리튬이온 배터리 오븐테스트를 수행하였고 Wang et al.[10]은 배터리의 내부 열전달실험을 통하여 니켈함량과 내부온도가 비례함을 확인하였다.

그러나 현재까지 진행된 연구들은 NCM 양극활물질을 활용한 리튬이온 배터리에 관한 내용이 주를 이루고 있으며, LFP 배터리에 대한 연구는 최근에 들어서야 시작되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 상용 열유체해석 프로그램인 Fluent를 활용하여 리튬이온전지를 동일 형상으로 설계하고, 각 배터리의 셀 및 모듈 단위별 열폭주 해석을 진행한 후 안정성 데이터를 확보해 보고자 한다.

2. 이론 해석

2.1 양극활물질에 따른 리튬이온 배터리의 종류

리튬은 반응성이 크기 때문에 전지 양극에서도 산화물 형태로 존재하는데, 리튬산화물처럼 양극에서 배터리 전극 반응에 관여하는 물질을 활물질이라고 한다. 어떠한 양극 활물질을 사용하느냐에 따라서 저장 가능한 전자의 수가 달라지므로, 이로 인해 배터리의 용량과 전압이 결정된다. 양극 활물질은 리튬과 금속 성분의 조합으로 구성되는데, 이때 금속의 종류와 비율에 따라 서로 다른 특성을 지니게 된다.

NCM 배터리는 니켈(Ni), 코발트(Co), 망간(Mn)을 활용한 삼원계 배터리이며 다른 활물질에 비해 에너지 밀도가 높아 대용량 배터리 제작에 적합하고 수천번 충방전이 가능하기 때문에 전기차 배터리에 많이 사용된다. LFP 배터리는 인산철(FePO_4)을 활용한 배터리이며 층상구조가 아닌 올리빈 구조를 하고 있어 매우 안정적이며 리튬 이온이 빠져 나가도 결정 구조가 연화되는 현상이 적어 수명이 아주 긴 것이 특징이

다. 하지만 구조적 특성상 리튬 이온의 이동이 활발하지 못해 낮은 전기전도도를 나타낸다.

2.2 열폭주의 정의

열폭주(Thermal runaway)는 배터리 셀의 자기 발열로 인한 급격한 온도 상승을 의미하며, 양극과 음극 사이의 분리막 붕괴로부터 시작된다. 배터리 셀 내부의 온도 상승으로 인해 분리막이 분해되면 양극과 음극이 직접 접촉되면서 내부에 충전된 에너지의 급격한 방출과 함께 유기 용매인 전해액이 열분해 되고, 이로 인해 인화성 가스가 발생하며 이것을 off-gas라 한다. 가스 팽창으로 인해 압력이 일정 수준 이상으로 높아지면 배터리 셀 밖으로 가스와 전해액이 누출되면서 발화한다.

2.3 Q : 열폭주 발생 시 총 발열량

리튬이온배터리 열폭주 발생 시, SEI(Solid Electrolyte Interface)층의 분해열, 음극 및 양극과 전해액의 반응열, 전해액의 분해반응열을 합하여 식 (1)과 같이 총 발열량을 계산한다.

$$Q = Q_{sei} + Q_{ne} + Q_{pe} + Q_{ele} \quad (1)$$

식 (2)~(14) 및 Table 1에는 Kim et al.[6]과 Wang et al.[10]이 제시한 상세 계산식과 매개변수를 나타내었다.

2.4 Q_{sei} : SEI층 분해반응 시 발열량

발열 반응으로 인해 약 70℃에서 SEI층이 분해될 시 발생하는 발열량을 식 (2)~식 (4)에 나타내었다.

$$Q_{sei} = H_{sei} W_c R_{sei} \quad (2)$$

$$R_{sei} = A_{sei} \exp\left[-\frac{E_{a,sei}}{RT}\right] c_{sei}^{m_{sei}} \quad (3)$$

$$\frac{dc_{sei}}{dt} = -R_{sei} \quad (4)$$

2.5 Q_{ne} : 전해질과 음극 반응 시 발열량

음극에 삽입된 리튬과 전해질이 120℃ 이상 온도에서 반응 시 발열량을 식 (5)~(8)에 나타내었다.

$$Q_{ne} = H_{ne} W_c R_{ne} \quad (5)$$

$$\frac{dt_{sei}}{dt} = R_{ne} \quad (6)$$

$$\frac{dc_{neg}}{dt} = -R_{ne} \quad (7)$$

$$R_{ne} = -A_{ne} \exp\left[-\frac{t_{sei}}{t_{sei0}}\right] c_{neg}^{m_{ne,n}} \exp\left[-\frac{E_{a,ne}}{RT}\right] \quad (8)$$

2.6 Q_{pe} : 전해질과 양극물질 반응 시 발열량

산화된 상태의 양극물질이 전해질과 직접 반응하거나 분해하는 과정 시 발열반응 시 발열량을 식 (9)~(11)에 나타내었다.

$$Q_{pe} = H_{pe} W_p R_{pe} \quad (9)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = R_{pe} \quad (10)$$

$$R_{pe} = A_{pe} \alpha^{m_{pe,p1}} (1 - \alpha)^{m_{pe,p2}} \exp\left[-\frac{E_{a,pe}}{RT}\right] \quad (11)$$

2.7 Q_{ele} : 전해질 분해반응 시 발열량

전해질이 200°C 이상에서 분해될 시 발열량을 식 (12)~(14)에 나타내었다.

$$Q_{ele} = H_e W_e R_e \quad (12)$$

$$\frac{dc_e}{dt} = -R_e \quad (13)$$

$$R_e = A_e \exp\left[-\frac{E_{a,e}}{RT}\right] c_e^{m_e} \quad (14)$$

2.8 N_L : 원통형 배터리 표면 대류열전달계수

계산의 정확도를 높이기 위하여 배터리 표면의 온도 차이에 의한 자연대류현상이 발생한다는 조건을 적용하였고 Churchill et al.[11]가 제안한 식 (15), (16)을 활용하였다.

$$N_L = 0.68 + \frac{0.67 Ra_L^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0.492k}{\mu C_p}\right)^{9/16}\right]^{4/9}} \quad \text{if } Ra_L \leq 10^9 \quad (15)$$

$$N_L = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0.492k}{\mu C_p}\right)^{9/16}\right]^{8/27}} \right\}^2 \quad \text{if } Ra_L \leq 10^9 \quad (16)$$

2.9 가정

본 연구에서는 다양한 조건에서 리튬이온 배터리 열폭주에 대한 원활한 수치해석을 수행하기 위하여 셀 내부 구조의 변화에 따른 복잡한 화학적 연계반응을 단순화하고 아래와 같은 가정을 수립하였다.

- 1) NCM 배터리의 양극재 종류에 상관없이 바인더, 도전재, 활물질의 부피비율은 동일하다.
- 2) 배터리 셀 크기에 상관없이 원통형 배터리 심축의 지름은 동일하다.

Table 1. Parameters for numerical analysis

Symbol	Description	Value
A_e	Electrolyte decomposition frequency	5.14E25 [1/s]
A_{sep}	Separator decomposition frequency	1.5E30 [1/s]
A_{sei}	SEI-decomposition frequency	1.667E15 [1/s]
A_{ne}	Negative-solvent frequency	2.5E13 [1/s]
$A_{pe,NCM622}$	Positive-solvent frequency	4.5783E9 [1/s]
$A_{pe,LFP}$	Positive-solvent frequenc	2E8 [1/s]
$E_{a,sei}$	Activation energy for SEI-decomposition	1.3508E5 [J/mol]
$E_{a,ne}$	Activation energy for negative-solvent	13,508E5 [J/mol]
$E_{a,pe,NCM622}$	Activation energy for positive-solvent	98,417 [J/mol]
$E_{a,e}$	Activation energy for electrolyte decomposition	2.74E5 [J/mol]
$E_{a,sep}$	Activation energy for separator decomposition	2.58E5 [J/mol]
c_{sei0}	Initial value of c_{sei}	0.15
c_{neg0}	Initial value of c_{neg}	0.75
α_0	Initial value of α	0.04
c_{e0}	Initial value of c_e	1
c_{sep0}	Initial value of c_{sep}	1
m_{sei}	Reaction order	1
$m_{ne,n}$	Reaction order of c_{neg}	1
$m_{pe,p1}$	Reaction order of α	1
$m_{pe,p2}$	Reaction order of $(1-\alpha)$	1
m_e	Reaction order of c_e	1
t_{sei0}	Initial value of t_{sei}	0.033
H_{sei}	SEI-decomposition heat release	257 [J/g]
H_{ne}	Negative-solvent heat release	1,714 [J/g]
$H_{pe,NCM622}$	Positive-solvent heat release of NCM622	8.7938E5 [J/kg]
$H_{pe,LFP}$	Positive-solvent heat release of LFP	1.927E5 [J/kg]
H_{ele}	Electrolyte decomposition heat release	155 [J/g]
H_{sep}	Separator decomposition heat release	-190 [J/g]
W_c	Content of specific carbon	6.104E5 [g/m ³]
W_p	Content of specific positive active	1.221E6 [g/m ³]
W_e	Content of specific electrolyte	4.069E5 [g/m ³]
W_{sep}	Content of specific separator	1.104E5 [g/m ³]
ρ_{NCM622}	Density of LIB	2,331.3 [kg/m ³]
ρ_{LFP}	Density of LIB	1,885 [kg/m ³]
$C_{p,NCM622}$	Total heat capacity of LIB	1,071.9 [J/(kg·K)]
$C_{p,LFP}$	Total heat capacity of LIB	1,260 [J/(kg·K)]
$k_{1,NCM622}$	Thermal conductivity in z direction	1.21 [W/(m·K)]
$k_{1,LFP}$	Thermal conductivity in z direction	0.84 [W/(m·K)]
k_{2_NCM622}	Thermal conductivity in xy direction	20.98 [W/(m·K)]
k_{2_LFP}	Thermal conductivity in xy direction	15.3 [W/(m·K)]

- 3) 배터리 셀 크기에 비례하여 내부 젤리롤의 감기는 횟수도 증가한다.
- 4) 배터리 셀 크기에 비례하여 전해액 함량 및 음극 용량은 증가한다.
- 5) 분리막의 용융 시 흡열반응, 내부 단락 및 발생 가스는 해석 조건에서 제외한다.
- 6) 상기 가정들을 적용하고, 배터리 테스트 관련 국제 규격인 IEEE1625 5.6.6, IEEE1725 5.6.5, IEC62133 :4.3.5, UL1642/Sec17, UL2054/Sec23에 의거한 주변 조건을 적용하여 수치해석을 수행한다.

3. 결과 해석 및 고찰

3.1 수치해석 모델의 검증

본 연구에 사용된 해석 모델의 정확도를 검증하기 위해 원통형 LFP 배터리(18650)의 실제 열폭주 오븐

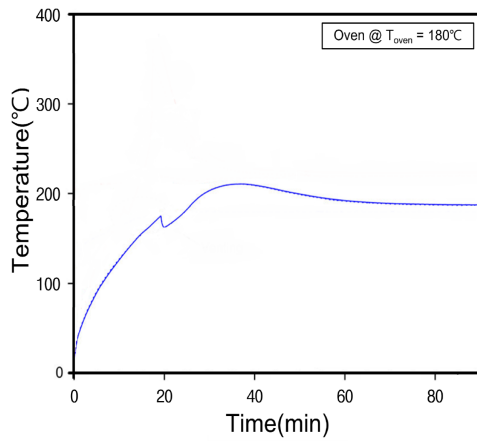


Fig. 2. Thermal runaway of cylindrical LFP battery cell for oven test of 180°C

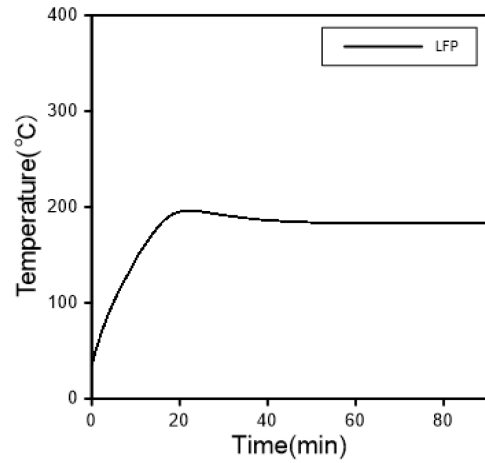
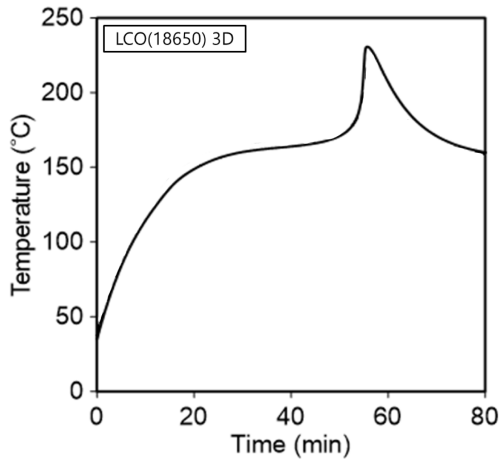
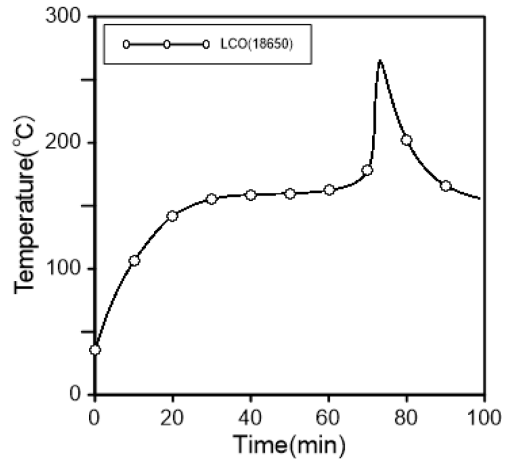


Fig. 3. Thermal runaway numerical analysis of cylindrical LFP battery of 180°C



(a) Numerical analysis of LCO battery cell of the previous model[2]



(b) Numerical analysis of LCO battery cell of the developed model in this study

Fig. 4. LCO battery thermal runaway comparison to verify the accuracy of simulation

Table 2. Time required to maximum temperature of LFP battery

Inside Temperature(°C)	Oventest Simulation	Oventest
Max. Temperature(°C)	195.9	211.0 or less
Time(min)(at 70°C)	22	30~35

테스트 결과를 동일 조건에서의 수치해석 결과와 비교 검증하였다. 배터리 주변 온도 180°C 조건에서 LFP 배터리 셀의 열폭주 오븐테스트 결과를 Fig. 2에, 열폭주 수치해석 결과를 Fig. 3에 표시하였다. 두 그래프의 비교를 통해 실험 실험과 수치해석 결과가 매우 유사함을 확인할 수 있었고 이를 Table 2에 표시하였다.

추가 검증을 위해 Fig. 4에서는 Kim et al.[2]이 제시한 원통형 LCO 배터리(18650) 열폭주 수치해석 결과를 (a)에 표시하였고, 본 연구를 통해 동일 조건에서 수행한 수치해석 결과를 (b)에 표시하여 서로 비교하였다. 이를 위해 기존 LFP 배터리의 화학적 물성치를 LCO 배터리로 대체하였으며, 앞서 수치해석에 사용하였던 식(1)~(16)과 환경조건을 동일하게 적용하였다. 그 결과 55분~60분 경과 시 240°C~260°C 사이에서 열폭주 현상을 보였으며, Fig. 4에서 확인할 수 있듯이 (a), (b)의 해석 결과가 매우 유사함을 확인하였다.

3.2 수치해석 모델의 적용

Fig. 5에서는 동일한 형상(18650)의 NCM622 배터리 셀과 LFP 배터리 셀의 열폭주 현상을 비교해 보았다. 내부 온도 180°C에서 NCM622 배터리는 12분 만에 710°C까지 온도가 상승하는 반면, LFP 배터리는 166°C로 열폭주 현상 없이 상대적으로 매우 안정한 상태임을 확인하였다. 이는 LFP 배터리가 올리빈 구조를 형성하고 있어 층상구조를 갖는 NCM 배터리에 비해 격자 구조 안정성이 높고, 방전 시 리튬이온이 빠져나가도 결정 구조가 열화되는 현상이 적기 때문인 것으로 사료된다.

해석에 사용된 각형 배터리 셀의 외형은 Fig. 6과 같으며, 5개의 셀을 1 mm 간격으로 배치한 모듈에 대하여 열폭주 현상을 해석하였다. NCM622, LFP 배터리의 모듈 단위 열폭주 현상 해석 결과를 Fig. 7과 8에 각각 도시하였다. 모듈 최외곽 셀의 표면에는 점착 조건으로 일정 열유속의 히팅 필름을 가정하고 5,000 W/m²으로 열을 공급하여 지속적으로 온도가 상승하는 환경을 조성하였다.

각형 NCM622 배터리 모듈에서는 22분경 첫 번째 셀이 789°C에서 열폭주를 일으키기 시작하여 나머지

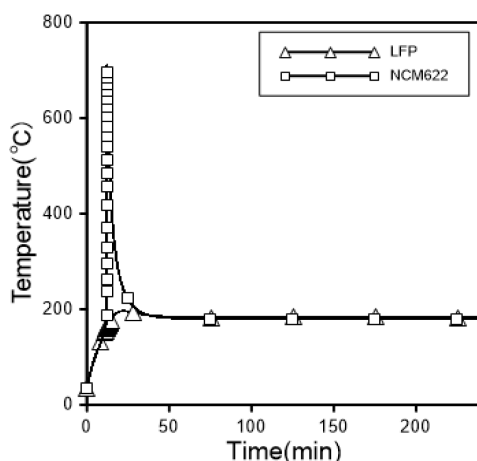


Fig. 5. Thermal runaway of cylindrical LFP battery cell and NCM622 battery cell at oven temperatures of 180°C

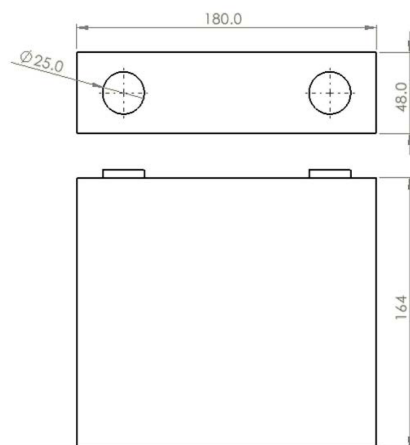


Fig. 6. Dimension of prismatic battery cell

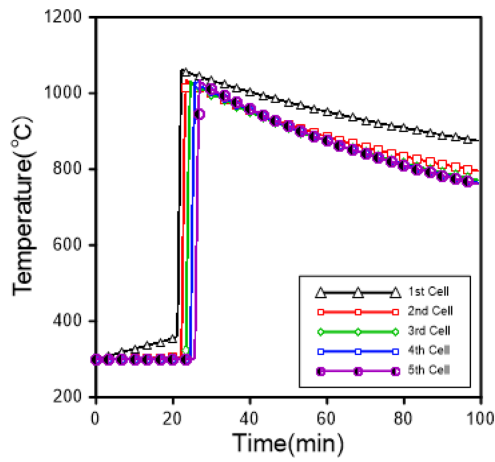


Fig. 7. Thermal runaway analysis of NCM622 battery module

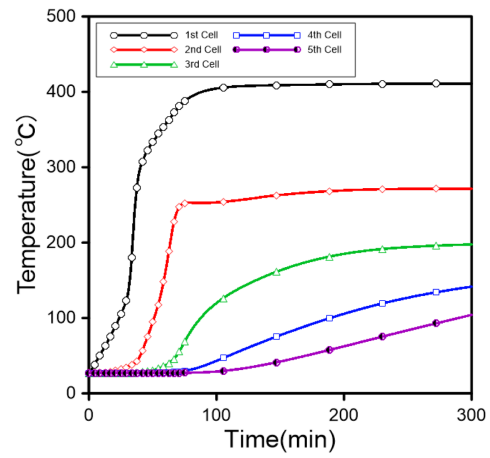


Fig. 8. Thermal runaway analysis of prismatic LFP battery module

Table 3. Thermal runaway propagation of NCM622 battery module

	1st Battery	2nd Battery	3rd Battery	4th Battery	5th Battery
Time(min)	22.3	23.4	24.5	25.7	27.0
Temperature(°C)	789.0	760.0	755.8	756.2	760.0

Table 4. Thermal runaway propagation of Prismatic LFP battery module

	1st Battery	2nd Battery	3rd Battery	4th Battery	5th Battery
Time(min)	61	116	231	231	231
Temperature(°C)	411.1	271.1	198.3	143.3	106.7

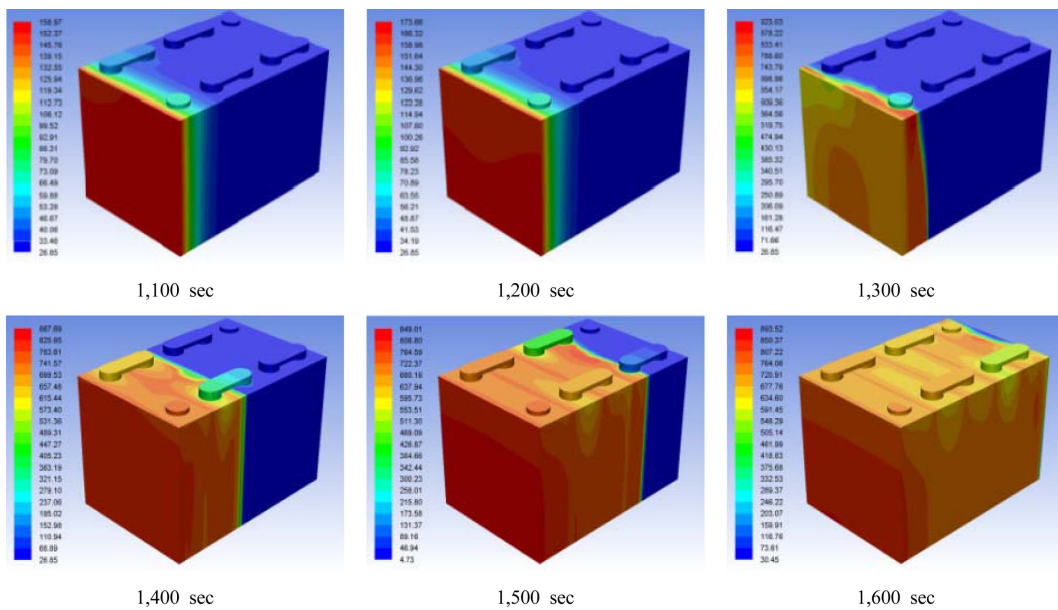


Fig. 9. Thermal runaway propagation over time of NCM battery module

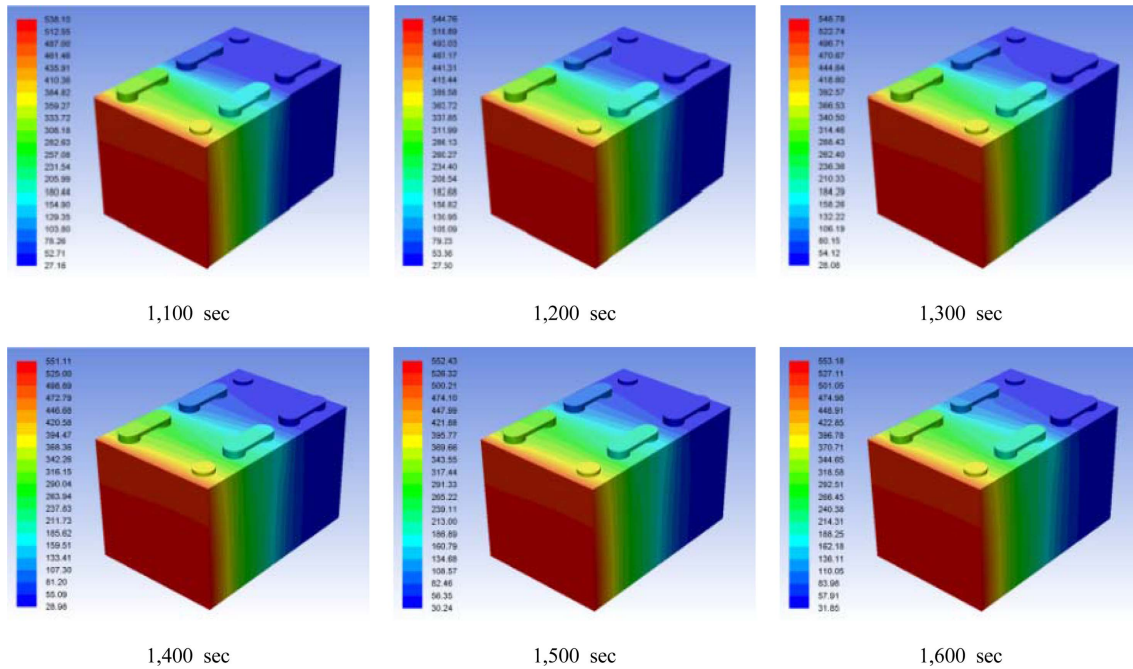


Fig. 10. Thermal runaway propagation over time of LFP battery module

배터리 셀들에서도 짧은 시간 안에 열폭주 현상이 연쇄적으로 발생하는 것을 확인하였으며 이를 Fig. 7과 Table 3에 표시하였다.

각형 LFP 배터리 모듈에서는 첫 번째 배터리 셀 이후 200분이 경과 하여도 뚜렷한 열폭주 전파 현상은 나타나지 않았으며, 세 번째 배터리 셀부터는 열 전파 현상도 40℃ 내외로 미미함을 확인하였고 이를 Fig. 8과 Table 4에 표시하였다.

이를 통해 배터리의 열폭주 전파 측면에서 LFP 배터리는 NCM 배터리에 비해 상대적으로 매우 안전하다고 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 NCM, LFP 배터리의 열폭주 현상을 다양한 조건 아래서 수치해석을 통해 비교 분석해 보았다.

(1) NCM622(18650) 배터리 셀과 LFP(18650) 배터리 셀의 열폭주 현상을 오픈테스트 시뮬레이션을 통해 비교해 보았을 때, LFP 배터리는 열폭주 현상을 보이지 않았던 반면 NCM622 배터리는 12분 만에 710℃ 까지 온도가 상승하는 결과를 볼 수 있었다. 이 결과를 통해 동일 부피 대비 LFP 배터리가 상대적으로 매우 높은 안정성을 갖고 있다는 것을 확인할 수 있었다.

(2) 각형 LFP 배터리 셀의 열폭주 및 전파 현상을 관측하기 위해 내부 온도를 200℃로 설정하고 오픈테스트 시뮬레이션을 실시한 결과, 47분경과 시 391℃에서 열폭주가 발생함을 알 수 있었다.

(3) NCM622, LFP 배터리 셀을 5개씩 배치하여 열폭주 전파 현상을 관측한 결과, NCM622 배터리의 경우 열폭주 전파 현상이 뚜렷하게 나타났으나 LFP 배터리의 경우 첫 번째 셀 이후에는 열폭주 현상을 관찰할 수 없었다. 세 번째 배터리 셀부터는 온도의 변화가 매우 미미함을 확인하였으며, 이를 통해 배터리

의 열폭주 전파 측면에서 LFP 배터리는 NCM 배터리에 비해 상대적으로 매우 안전하다고 사료된다.

활발하게 보급되고 있는 신재생에너지의 활용성을 확장하기 위하여 ESS를 연계하는 사례들이 많아지고 있다. 관련 산업의 발전을 위해서는 리튬이온 배터리의 안전성을 확보하는 것이 무엇보다도 중요하며, 특히 열폭주에 이르는 현상을 명확하게 규명하고 사전에 차단하는 연구가 반드시 필요하다.

본 연구를 기반으로 향후 NCM 배터리의 높은 에너지밀도와 LFP 배터리 안정성을 융합한 하이브리드 팩의 최적 구조를 설계하고 열폭주 해석을 수행해 보고자 한다.

References

1. Bloomberg, N. E. F., "Energy Storage Investments Boom As Battery Costs Halve in the Next Decade", 2019 <https://about.bnef.com/blog/energy-storage-investments-boom-battery-costs-halve-next-decade/>
2. Kim, H. S., 2020, Rechargeable battery Overweight, Equity research of Hana Financial Investment.
3. Al Hallaj, S., Maleki, H., Hong, J. S., and Selman, J. R., 1999, Thermal modeling and design considerations of lithium-ion batteries, *J. of Power Sources*, Vol. 83, No. 1-2, pp. 1-8.
4. Pesaran, A., Bharathan, D., Kim, G. H., Vlahinos, A., and Duong, T., 2005, Improving battery design with electro-thermal modeling, *Proceedings of the 21st Electric Vehicle Symposium*, Monte Carlo, Monaco.
5. Bharathan, D., Pesaran, A., Kim, G. H., and Vlahinos, A., 2005, Electro-Thermal Modeling to Improve Battery Design, *Proceedings of the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference IEEE*, Chicago, IL, USA.
6. Kim, G. H., Pesaran, A., and Spotnitz, R., 2007, A three-dimensional thermal abuse model for lithium-ion cells, *Journal of Power Sources*, Vol. 170, pp. 476-489.
7. Spotnitz, R. M., Weaver, J., Yeduvaka, G., Doughty, D. H., and Roth, E. P., 2007, Simulation of abuse tolerance of lithium-ion battery packs, *J. of Power Sources*, Vol. 163, pp. 1080-1086.
8. Hatchard, T. D., MacNeil, D. D., Stevens, D. A., Christensen, L., and Dahn, J. R., 2000, Importance of Heat Transfer by Radiation in LiIon Batteries during Thermal Abuse, *Electrochem. Solid-State Lett.* Vol. 3, pp. 305-308.
9. Hatchard, T. D., MacNeil, D. D., Basu, A., and Dahn, J. R., 2001, Thermal model of cylindrical and prismatic lithium-ion cells, *J. of The Electrochemical Society*, Vol. 148, No. 7, pp. A755-A761.
10. Wang, H., Dua, Z., Ruib, X., Wang, S., Jin, C., He, L., Zhang, F., Wang, Q., and Feng, X., 2020, A comparative analysis on thermal runaway behavior of Li (NixCoyMnz) O₂ battery with different nickel contents at cell and module level, *J. of Hazardous Materials*, Vol. 393, pp. 122-361.
11. Churchill, S. W. and Chu, H. H. S., 1975, Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate, *I. J. of Heat Mass Transfer*, Vol. 18, No. 11, pp. 1323-1329.