

벤팅 가스 환경을 고려한 파우치형 타입 차량용 이차 전지 모듈 구조간 열전이에 대한 연구

김병준* · 심기훈 · 정판근 · 최우형 · 이용권 · 조현태

세방리튬배터리 Validation팀

A Study on Thermal Propagation in Vehicle Pouch-Type Secondary Battery Cell Module Structures Considering Venting Gas Environments

Byeongjun Kim* · Kihun Sim · Pankeun Jeong · Woohyung Choi · Yongkwon Lee · Hyeontae Cho

Validation Team, Sebang Lithium Battery, 148 Beolmal-ro, Dongan-gu, Anyang-si Gyeonggi 14057, Korea

(Received 17 October 2025 / Revised 5 December 2025 / Accepted 10 December 2025)

Abstract : Global industries are developing eco-friendly technologies to address climate change. Among these, secondary batteries are drawing strong attention as substitutes for fossil fuels. With tighter carbon emission regulations, electric vehicle (EV) adoption has grown rapidly, relying on advanced batteries for performance. High-power, high-energy-density cells(cylindrical, prismatic, and pouch types) are critical for EVs. Pouch cells, while lightweight and efficient, are highly susceptible to thermal runaway due to their low activation energy. Thermal runaway occurs when heat initiates internal chemical reactions, leading to rapid temperature rise and potential fires. This study investigates pouch-cell thermal runaway behavior using Fluent simulations validated with experimental results. Data from ARC (Accelerating Rate Calorimetry) tests were used to evaluate temperature-dependent heat generation and identify critical runaway conditions. These parameters were further applied to module-level propagation studies. The simulations excluded separator-induced short circuits, focusing on localized heating to develop predictive models for EV safety.

Key words : NCM battery(삼원계 배터리), Pouch-Type(파우치 타입), ARC test(가속 속도 열량 테스트), Vent gas(벤트 가스), Thermal runaway(열폭주), Thermal propagation (열전이), Computational fluid dynamics(CFD)

Nomenclature

T : temperature, K
t : time, s
h : film coefficient, W/m²*K
Cp : specific heat, J/kg*K
TC : thermal conductivity, W/m*K
EC : electrical conductivity, S/m

NCM : nickel cobalt manganese
NE : negative electrode-electrolyte
PE : positive electrode-electrolyte
TC : thermo couple
TR : thermal runaway
TP : thermal propagation

Subscripts

ARC : accelerating rate calorimetry
SEI : solid electrolyte interface
ELE : electrolyte decomposition

1. 서론

전 세계 산업은 지구 온난화로 인한 기후 변화를 방지하기 위해 환경 친화적인 기술 개발에 적극적으로 나서고 있습니다. 다양한 환경 친화적 기술 중에서도 이차전지(충전식 배터리)는 탄소 배출을 유발하는 화석 연료를

*Corresponding author, E-mail: bjkim87@slbattery.co.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.

대체할 핵심 기술로서 주목받고 있습니다.¹⁾

특히 세계적으로 탄소 배출 규제가 강화됨에 따라 자동차 시장은 빠르게 전동화 되고 있으며, 이에 따라 전기자동차(EV)의 보급률이 급속히 증가하고 있습니다. 전기자동차는 기존 내연기관 자동차와 달리 구동부가 전동화 되어 있으며, 이 전동화된 구동부를 운영하기 위해 이차전지가 핵심 동력원으로 사용됩니다. 따라서 전기자동차의 성능은 구동부의 성능과 함께 이차전지로 구성된 배터리 팩의 성능에 크게 의존하게 됩니다.²⁾

전기자동차에 사용되는 이차전지는 고출력과 고밀도 에너지를 제공하는 특성을 갖추어야 합니다. 이차전지의 Battery cell(배터리 셀)은 크게 원통형(Cylindrical), 각형(Prismatic), 파우치형(Pouch)의 세 가지 타입으로 구분됩니다. 이 중 파우치형 배터리는 활성화 에너지가 원통형이나 각형 배터리 셀보다 상대적으로 낮은 편에 속하며, 경량화가 가능하고 충전 효율성이 뛰어나 다양한 전기자동차에서 널리 활용되고 있습니다. 그러나 파우치형 배터리는 고밀도 에너지를 저장하는 특성상 열폭주(Thermal runaway) 현상에 취약할 수 있습니다. 열폭주란 기계적, 전기적, 열적 원인으로 인해 배터리 내부의 화학 반응이 급격하게 촉진되면서 발생한 열이 추가적인 화학 반응을 유도하여 배터리 온도가 급속히 상승하는 현상을 의미합니다.⁴⁾ 특히 파우치형 배터리는 활성화 에너지가 낮아 상대적으로 작은 열, 충격에도 빠르게 화학 반응이 발생할 수 있으며, 이로 인해 열폭주가 더 쉽게 유발될 수 있습니다. 열폭주가 발생하면 배터리 내부에서 생성된 열이 빠르게 전파되면서 온도가 급격하게 상승하게 되며, 이 과정에서 폭발적 화학 반응이나 화염 전파가 발생할 수 있습니다. 열폭주의 양상은 배터리의 가열 속도에 따라 다르게 나타나며, 열폭주가 발생하는 온도, 최고 도달 온도, 그리고 화염의 전파 형태 등 다양한 요인에 따라 변화합니다.⁵⁾ 만약 열폭주로 인해 배터리 화재나 폭발이 발생할 경우, 운전자와 동승자의 생명과 안전에 심각한 위험이 될 수 있습니다.

따라서 파우치형 배터리를 포함한 EV용 이차전지의 열폭주 현상에 대한 분석과 함께, 모듈 간 열전이 메커니즘에 대한 연구가 반드시 필요합니다. 열전이란 열폭주가 발생한 배터리 셀에서 인접한 셀로 열이 전달되면서 연쇄적으로 열폭주를 유발하는 현상을 의미합니다. 이러한 열전이는 배터리 팩 전체로 퍼질 수 있으며, 화재 확산 속도를 더욱 빠르게 할 수 있습니다.

이와 같은 위험을 예방하고 인명 피해를 최소화하기 위해서는 열폭주가 발생할 가능성을 미리 감지하고, 운전자와 승객에게 탈출 시간을 고지할 수 있는 시뮬레이션 기술의 개발이 필수적입니다. 열폭주를 감지하고 알

림에 대한 규정 및 규격도 강화하고 있다. 유럽에서는 UN GTR No 20. 및 중국의 GB 38031-2020에서 열관련 상황 발생시 알람의 의무적이며 시간은 5분을 넘어서지 않는 다 라고 규정하고 있다.^{6,7)}

이러한 시뮬레이션 기술은 배터리 팩 내 각 셀의 온도 변화와 열전이 경로를 정확히 예측하여 위험 상황이 발생하기 전 적절한 대응을 할 수 있도록 지원해야 합니다. 결론적으로, 전기자동차에서 발생할 수 있는 배터리 화재로 인한 인명 사고를 예방하기 위해 파우치형 배터리의 열폭주 메커니즘 연구와 열폭주 시뮬레이션 기술 개발은 필수적입니다. 이를 통해 운전자와 승객의 안전성을 강화하고, 전기자동차의 신뢰성을 높이는 동시에 환경 친화적인 기술의 발전을 가속화할 수 있을 것입니다.

본 연구에서는 파우치 타입 Battery cell의 열폭주 현상을 시뮬레이션하고, 이를 기반으로 도출된 열폭주 테스트 결과의 신뢰성 검증을 진행하였다. 열폭주는 전기화학적 반응과 열 현상이 복합적으로 얽힌 다중 물리적 문제로, 그 원인이 매우 복잡하고 비선형적이다. 따라서 열폭주에 대한 정확한 변수값 추출을 위해 다양한 실험이 필요하다.

예를 들어 Feng 등은 가속 반응 열량(ARC) 테스트를 통해 배터리 셀 내부에서 열이 발생하는 순간과 열폭주를 유발하는 온도를 실험적으로 측정하였다. 이를 통해 온도 의존적 열 에너지 방출의 특성을 분석하였으며,⁸⁾ 이러한 연구 결과는 열폭주 시뮬레이션의 필수 데이터로 활용될 수 있다.

본 연구에서도 ARC 테스트를 통해 파우치 타입 Battery cell의 열폭주 주요 변수(예: 온도 임계값, 열 방출률 등)를 추출하였다. 이 변수들을 활용하여 Battery cell 단위의 열폭주 시뮬레이션을 진행한 후, 다음과 같은 단계별 검증 과정을 통해 신뢰성을 확보하였다. [Fig. 1]

- 1) Battery cell 단위에서 열폭주 시험 및 해석 검증
- 2) 모듈 구조 단위에서의 열폭주 시험 및 해석 검증

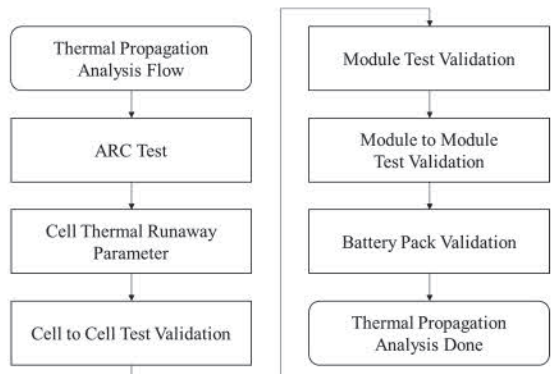


Fig. 1 Thermal propagation validation work flow

- 3) 모듈간 열전이 시험 및 해석 검증
- 4) 팩 단위 시험 및 해석 검증

본 연구의 열폭주 시뮬레이션은 ANSYS fluent 소프트웨어를 활용하여 수행되었다. 시뮬레이션 과정에서는 배터리 셀 내부 단락이 발생할 수 있는 분리막의 분해 현상은 고려하지 않았으며, 대신 국부적 가열 현상에 집중하여 해석을 진행하였다.

2. ARC Test Analysis

ARC (Accelerating Rate Calorimeter : 가속 속도 열량) Test는 단일 조건에서 발생하는 화학 반응에 대한 Time VS. Temperature 및 압력 데이터를 제공하는 테스트입니다. Battery cell이 열폭주 하게 되는 근본적인 원인은 Battery cell 내부의 전기 화학 반응에 기인합니다. ARC 테스트를 통해 얻은 Time vs. Temperature 데이터를 활용하면 열폭주 모델을 구성할 수 있습니다. Battery 내부의 화학 반응에 대한 열폭주 모델은 다음의 네 가지 주요 반응으로 구성됩니다.

- 1) SEI(고체 전해질 인터페이스) 분해
- 2) 음극-전해질(NE) 반응
- 3) 양극-전해질(PE) 반응
- 4) 전해질(ELE) 분해 반응

NREL은 분해 반응 항들의 합으로 표현하였으며, 다음과 같이 나타낼 수 있습니다. 식 (1)~(5)⁹⁾

$$\dot{q}_{abuse} = \dot{q}_{sei} + \dot{q}_{ne} + \dot{q}_{pe} + \dot{q}_{ele} \quad (1)$$

$$\dot{q}_{sei} = H_{sei} W_{sei} R_{sei} \quad (2)$$

$$\dot{q}_{nc} = H_{nc} W_{nc} R_{nc} \quad (3)$$

$$\dot{q}_{pe} = H_{pe} W_{pe} R_{pe} \quad (4)$$

$$\dot{q}_{ele} = H_{ele} W_{ele} R_{ele} \quad (5)$$

- 1) q'_{sei} , q'_{ne} , q'_{pe} , q'_{ele} : 각각 SEI 분해, 음극-전해질, 양극-전해질, 전해질 분해에서 발생하는 열
- 2) H : 매질 내 반응물의 밀도
- 3) W : 특정 반응물 함량
- 4) R : SEI, NE, PE, ELE 반응과 잔여 반응물 비율¹⁰⁾

잔여 반응물 비율은 Arrhenius 반응 속도를 통해 계산

되며, 다음과 같이 주어집니다. 식 (6)~(9)^{9,11)}

$$R_{sei} = -A_{sei} \exp\left[-\frac{E_{a,sei}}{RT}\right] C_{sei}^{m_{sei}} \quad (6)$$

$$R_{ne} = -A_{ne} \exp\left[-\frac{E_{a,ne}}{T_{sei,ref}}\right] C_{sei}^{m_{ne}} \exp\left[-\frac{E_{a,ne}}{RT}\right] \quad (7)$$

$$R_{pe} = A_{pe} \alpha^{m_{pe,p1}} (1 - \alpha)^{m_{pe,p2}} \exp\left[-\frac{E_{a,pe}}{RT}\right] \quad (8)$$

$$R_{ele} = -A_{ele} \exp\left[-\frac{E_{a,ele}}{RT}\right] C_{ele}^{m_{ele}} \quad (9)$$

- 1) A : 반응 빈도 요인
- 2) R : 기체 상수
- 3) C_{sei} : SEI 계면에 포함된 리튬 이온의 양
- 4) C_{ele} : 전해질 농도
- 5) C_{ne} , C_{pe} : 음극, 양극 전해질에 결합된 리튬의 무차원 탄소 수
- 6) E_{sei} , E_{ne} , E_{pe} , E_{ele} : 각 분해 반응의 활성화 에너지
- 7) t_{sei} , $t_{sei,ref}$: SEI 두께와 초기 두께
- 8) α : 음극 반응에서 삽입된 리튬의 무차원 양
- 9) m : 반응 매개변수

그러나 세부적인 매개변수를 추출하기 위해 Battery cell에 대한 세부적 테스트가 필요하며, 이는 측정하기 어려운 경우가 많습니다. 특히 R_{ele} (상대적으로 작은 열 변화)는 무시 가능한 값으로 간주됩니다. 따라서 4개의 방정식을 대체하는 단일 방정식을 활용하여 ARC test를 통해 변수 추출 및 열폭주 Validation을 진행하였습니다. 식 (10)¹²⁾

$$\dot{q}_{cell} = \dot{M}_{cell,Resi} C_p \frac{dT}{dt} \quad (10)$$

- 1) M : Battery cell density
- 2) C_p : Specific heat
- 3) dT/dt : ARC test에서 측정된 온도 변화율.

해당 발열에 대한 식 (10)을 활용한 총 셀 발열량을 Arrhenius model lumped reaction으로 모델링하면 다음과 같다. 식 (11, 12)¹³⁾

$$\frac{d\alpha}{dt} = A \exp\left[-\frac{E}{RT}\right] \alpha^m (1 - \alpha)^n \quad (11)$$

$$S_{abuse_chem} = HW \left| \frac{d\alpha}{dt} \right| \quad (12)$$

각각의 매개변수에 대한 Arrhenius fitting은 Ansys fluent를 활용하여 진행하였으며, 변수 추출 Work flow는 다음과 같습니다. [Fig. 2]

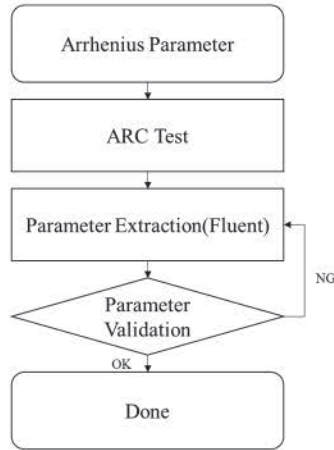


Fig. 2 Arrhenius parameter extraction work flow

2.1 ARC Test 진행

Battery cell의 열폭주 변수 추출을 위한 ARC test를 진행하였다. 파우치형의 Battery cell의 온도 센서 및 Jig의 설계는 다음과 같이 선정하였다. [Photo. 1]

가열 히팅 패드를 사용하여 Battery cell을 열폭주를 발생시켰다. 폭주가 발생한 이후에는 히팅 패드의 전력을 차단하여 Time Vs. Temperature의 결과를 확인하였다. ARC Test 진행한 Battery Cell은 NCM Type의 파우치형이다. 정확한 온도 Sampling을 위하여 배, 후면 모두 TC(Thermo Couple)을 부착하였으며, Battery 열폭주가 발생할 최대 온도를 감안하여, 해당 온도까지 Sampling 가능한 TC를 활용하여 진행되었다.



Photo. 1. Pouch type battery cell and ARC test setting

파우치형 Cell의 구조는 면압이 적용된 구조로 모듈화 되기 때문에 면압 고려된 Jig를 설계하여 Battery cell을 가열하여 폭주 후 Data를 Sampling 하였다.

2.2 열폭주 해석 조건

ARC Test에서 진행된 파우치형 Cell의 물리적 Material properties는 다음과 같다 [Table 1]

Table 1 Pouch cell material properties

Battery type	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg*K)	TC (W/m*K)	EC (S/m)
Pouch cell	2,630	954	28 / 1.3	1,000

- 1) 밀도(ρ) : 2,630 kg/m³
- 2) 비열(C_p) : 954 J/kg*K
- 3) 열전도도(TC) : 28(Lead) / 1.3(Tab) W/m*K
- 4) 전기전도도(EC) : 1,000 S/m
- 5) 대류 온도 (Ambient temperature) : 297.15 K
- 6) 초기 온도(Initial temperature) : 297.15 K

이 조건은 ARC test의 실제 실험 환경과 동일하게 설정되었다. 시뮬레이션 결과에 나타난 바와 같이 테스트 데이터와 다음과 같은 수준으로 일치하였다. [Fig. 3]

- 1) 온도 편차 : 3.7%(314.15K)
- 2) 최대 온도 도달 시간 : 0%(0초) 편차

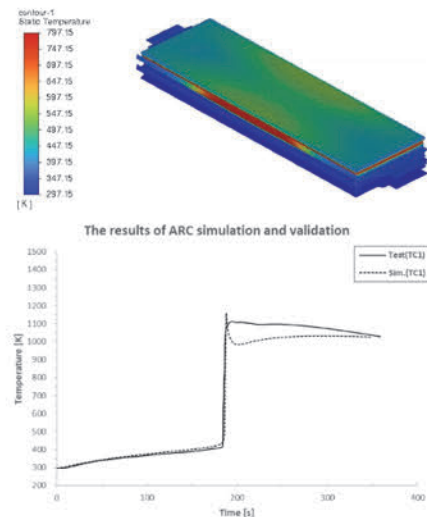


Fig. 3 Result of ARC test & simulation validation

온도 측정은 히팅 패드 및 Battery cell 중앙부에서 Sampling 하였으며, 정확한 온도 Sampling을 위하여 TC(Thermo Couple)와 히팅패드 및 Battery cell 사이 단열 처리하여 시험을 진행하였다. 시험과 해석의 Validation 결과에서 열폭주 발생 시점은 테스트와 일치하였으며, 온도에 대한 오차는 5% 이내로 확인되었다. 이러한 오차는 실험 환경의 미세한 열전달 불균일성에서 기인한 것으로 분석된다.

이를 통해 해당 ARC 조건에서 Pouch type battery cell의 열폭주 변수가 유효하게 성립되었음을 확인하였다.

3. Thermal Runaway Test Analysis

앞서 설명했던 것처럼 파우치형 Battery cell의 경우 다른 Type의 Battery cell 보다 가볍고 공간 활용이 용이해 차량용 EV battery 구조에 많이 활용되어 지고 있다.⁴⁾

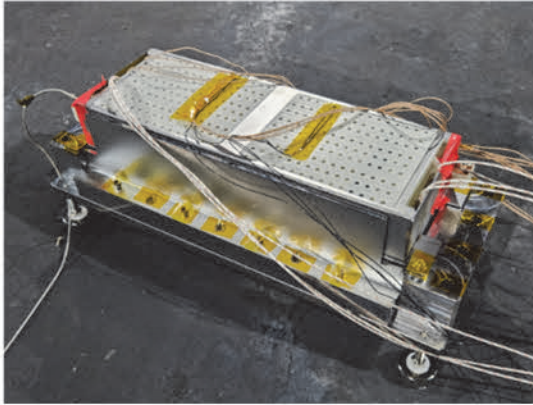


Photo. 2. Pouch type battery cell module and TP test setting

본 연구에서 진행한 Battery cell도 차량용 구조로 적용되는 Battery cell이며, 현재 모듈화 구조로 양산 중인 제품이다. 연구의 목적은 단일 셀의 열폭주가 모듈 전체에 미치는 영향을 분석하는데 있다. 이를 위해 모듈 내부에 히팅 패드를 삽입하여 열폭주를 일으키고 각 Cell에 TC를 부착하여 각 Cell의 온도 변화 및 열폭주 시점을 Sampling 하였다. [Photo. 2]

3.1 Battery cell 모듈화 구조 열폭주 Validation

모듈화 구조에서 열폭주 조건은 ARC Test와 유사하게 설정되었다. 다만 모듈 구조 내 히팅패드를 ARC test에서 진행된 동일 사이즈를 조립하게 되면 모듈내 면압 설계와 다르게 적용될 가능성이 있기 때문에 두께를 최소화한 히팅 패드를 사용하여 모듈구조내 삽입하여 열폭주를 유도하였다.

시뮬레이션 조건은 ARC test 조건과 동일하게 진행되었다. 히팅 패드의 Spec은 400 W로 설정하였으며, Battery cell 별 Arrhenius 변수 및 대류 조건은 ARC test와 적용되었다.

TC를 모든 Battery cell 및 다구조 영역에 부착하여 진행할 경우 셀 면압에 영향을 끼치는 구조가 되므로 Trigger([Fig. 4] TC1) 및 최외각([Fig. 4] TC2) Battery cell, 히팅 패드의 중앙부에 부착하여 Test를 진행하였으며, 시간별로 온도를 Sampling 하였다.

Heating 조건을 적용하여 해석 및 Validation을 진행한 결과, Fig. 4에서 확인할 수 있듯이 1차 열폭주 시점에서는 8.3%(25 s)의 편차가 나타났으며, 모듈 전소 열

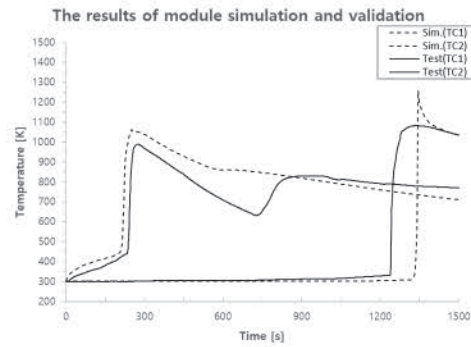


Fig. 4 The results of module simulation and validation

폭주 시점에서는 8.1%(101 s)의 편차가 발생하였다. 이러한 열폭주 시점의 편차는 폭주과정에서 발생하는 Vent gas의 영향으로 인해 발생한 것으로 분석된다. [Fig. 4]

Vent gas의 영향성을 확인하기 위하여 OC Test(Open Calorimeter Test : Vent gas의 시간에 따른 온도 결과 분석 Test) 및 PV(Pressure Vessel Test : Vent gas의 성분 분석 Test)가 추가적으로 진행되어졌다. Battery cell의 열폭주가 발생한 후, 모듈 내 최종 Cell의 열폭주가 진행되었을 때, 인접 모듈의 Vent gas 환경은 343.15 K(70 °C)로 수렴하는 결과를 확인할 수 있었으며, [Fig. 5] Vent gas의 성분은 메탄(CH₄) 28%, 수소(H₂) 20%, 에틸렌(4%), 그 외(48%)로 확인되어졌다. [Table. 2]

Table 2 Vent gas properties

Gas type	CH ₄	H ₂	C ₂ H ₄	Unknwon
Proportion (%)	28	20	4	48

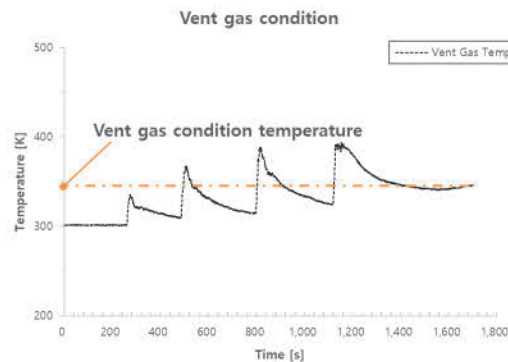


Fig. 5 The sampling of vent gas condition

모듈화 구조에서 열폭주 해석은 자연대류 조건으로 Constant하게 적용된 조건으로 Vent gas의 영향으로 인해 시뮬레이션 결과와 Test 조건에서 차이가 발생하여

편차가 나타나는 것을 분석한 결과가 확인되었다.

3.2 Vent Gas 고려된 모듈간 열전이 Validation

모듈간 열전과 구조에서의 Test 조건도 단일 모듈 Test와 동일하게 설정되었다. 모듈 내 히팅 패드의 Spec도 동일하며, 열전과 확인을 위해 추가 모듈을 조립하여 열폭주 Test를 진행하였다. [Photo. 3]

그러나 단일 모듈 열폭주 과정에서 발생한 편차의 원인은 Vent gas에 대한 고찰이 부족하여 발생된 것으로 분석되었다. 이를 보완하기 위해 Vent gas의 영향을 반영하여 모듈간 열전이에 대한 Validation을 진행하였다.

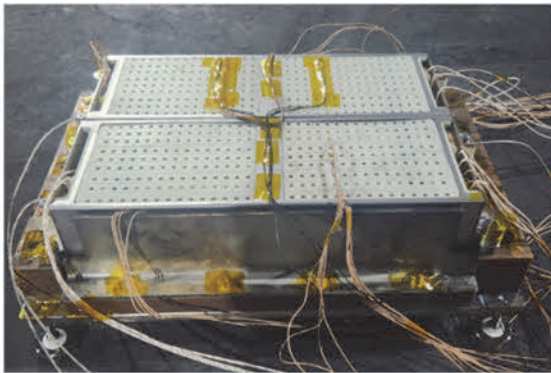


Photo. 3. Module to module TP test setting

모듈화 구조에서 면압을 고려하여 TC의 Sampling을 최소화하여 진행되어 진것처럼 모듈간의 조립 구조에서도 동일하게 TC Temperature Sampling이 이루어졌다. Trigger 모듈과 인접한 모듈 접촉 면적의 정중앙부, 인접 모듈의 최외각 TC를 Sampling 하여 온도 측정이 이루어졌고, Vent gas temperature sampling 결과를 바탕으로 효과가 적용된 시뮬레이션 결과 Validation을 진행하였다.

Vent gas 조건을 적용하여 Validation 진행한 결과, Fig. 6

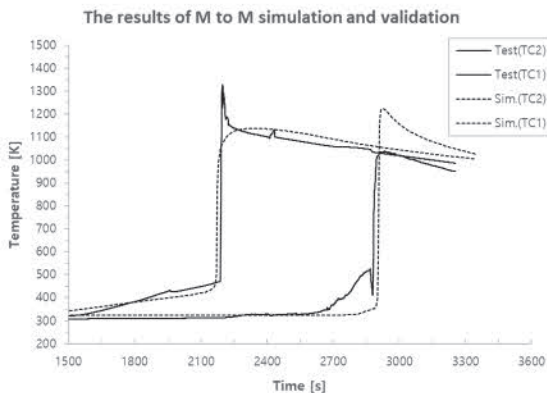


Fig. 6 The results of M to M simulation and validation

에서 보이는 바와 같이 모듈 간 1차 열폭주 시점의 편차는 0.9%(20 s), 모듈 전소 시점의 열폭주 편차는 1%(28 s)로 확인되었다. 열폭주 시점에서 발생하는 Vent gas의 영향을 고려하여 해석을 진행한 결과, 1%이내의 Validation 오차가 확인되었다. [Fig. 6]

4. 결론

- 1) ARC test를 통해 파우치 타입의 Battery cell의 열폭주 변수를 추출하였다.
- 2) 추출된 열폭주 변수를 Validation 한 결과 3.7% 편차가 나타났다. 편차는 테스트 환경의 차이와 및 Sampling 오차로 인한 것으로 분석되었다.
- 3) 모듈 구조의 열폭주 Validation 결과, 약 8%의 편차가 나타났다. 해당 편차는 Vent gas의 발생으로 인한 영향으로 분석되었다.
- 4) Vent gas 환경을 고려하여 모듈 간 열전이 Validation 진행한 결과, 열폭주 시점의 편차를 1% 이내로 줄일 수 있었다. 이를 통해 Vent gas의 영향을 고려할 경우 열폭주 해석의 정확도가 크게 향상됨을 확인하였다.

이 연구를 통해 ARC test를 활용하여 Battery cell의 열폭주 변수를 도출할 수 있었으며, 해당 변수는 차량용 이차전지의 열폭주 시점을 예측하는 중요한 지표로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 모듈 구조 및 모듈 간 열전이 과정에서는 Vent gas의 영향도 동시에 고려해야 한다는 점을 확인하였다.

이를 통해 단일 셀과 모듈, 모듈간 열전이에 대한 시점을 보다 정확하게 예측할 수 있을 것이다.

후 기

지금까지 모든 시뮬레이션은 3D로 진행되었다. 그러나 Vent gas 현상을 실제 3D로 구현할 경우, 더 많은 물리적 시간과 자원이 소요될 것으로 예상된다. 따라서 열폭주 해석 기술을 개발 단계에서 실용적으로 활용하기 위해, 3D Scale 시뮬레이션을 Single Domain(1-D) 단위로 Scale down 하는 기술 개발이 필수적이다.

따라서 향후 계획은 다음과 같다.

- 1) Battery pack 단위 열전이 Validation 진행.
- 2) 1-D로 구성된 Battery pack 열폭주 Validation 진행

최종적으로 3D Scale 단위의 Battery pack에서 Validation을 완료한 후, 이를 1-D Scale down 하여 신뢰성 검증을 진행할 계획이다.

References

- 1) V. K. Lakhotia and R. S. Kumar, "Review on Various Types of Battery Thermal Management Systems," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol.148, pp.12355-12368, 2023.
- 2) T. Lee, S. Ha, Y. Choi, K. Kim and D. H. Choi, "Analysis of Battery Consumption According to Air-Conditioner Operation of Commercial Electric Vehicle," *Transactions of KSAE*, Vol.27, No.2, pp.145-150, 2019.
- 3) J. Kim and Y. Shin, "Temperature Management of EV Battery Cell by Optimal Operation Scheduling," *Transactions of KSAE*, Vol.27, No.2, pp.509-519, 2019.
- 4) I. Sim, D. Shin and S. Park, "Experimental Study on Thermal Runaway Characteristics of BEV's Lithium-Ion Battery Cell Induced by Thermal Abuse," *KSAE Annual Conference Proceedings*, p.1760, 2022.
- 5) Y. Kim, I. Sim and S. Park, "Comparison of Thermal Runaway Characteristics of Pouch Type Lithium-Ion Battery Cell with Different Heating Rates," *KSAE Spring Conference Proceedings*, p.31, 2024.
- 6) "Global Technical Regulation on Electric Vehicle Safety," *UN GTR No.20*, 2018.
- 7) "Electric Vehicles Traction Battery Safety Requirements," *GB 38031-2025*, State Administration for Market Regulation, 2025.
- 8) X. Feng, S. Zheng, D. Ren, X. He, L. Wang and H. Cui, "Investigating the Thermal Runaway Mechanisms of Lithium-Ion Batteries Based on Thermal Analysis Database," *Applied Energy*, Vol.246, pp.53-64, 2019.
- 9) D. Kong, G. Wang, P. Ping and J. Wen, "Numerical Investigation of Thermal Runaway Behavior of Lithium-Ion Batteries with Different Battery Materials and Heating Conditions," *Applied Thermal Engineering*, Vol.189, pp.53-64, 2021.
- 10) C. Yang, N. Sunderlin, W. Wang, C. Churchill and M. Keyser, "Compressible Battery Foams to Prevent Cascading Thermal Runaway in Li-ion Pouch Batteries," *Journal of Power Sources*, Vol.541, Paper No.231666, 2022.
- 11) M. Jung, J. Lee, S. Yun, J. K. Mok and J. Kim, "Numerical Study on Thermal Runaway of LTO Lithium-Ion Battery Cells with Different Design and Operating Conditions," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol.149, pp.12095-12110, 2024.
- 12) H. Li, H. Shen, M. Li, Q. Gao, C. Xu and X. Feng, "A Simplified Mathematical Modeling Approach for Thermal Runaway of Li(Ni_{0.8}Co_{0.1}Mn_{0.1})O₂ Pouch Cells Based on Thermal Runaway Experimental Data," *Journal of Energy Storage*, Vol.90, pp.111829-111844, 2024.
- 13) "Arrhenius Model Application for Battery Thermal Runaway Analysis (Ansys Fluent)," *TSNE (Teasung SNE)*, <https://www.etsne.com/dataCenter/anzine/view/109>, 2024. (Accessed on 2024).