# 배터리 셀 간 온도 균일성과 열폭주 방지를 위한 냉각판 배열 효과 분석

# 문 광 일, 민 승 재

한양대학교 미래자동차공학과

# Analysis of Cooling Plate Arrangement on Thermal Uniformity Between Battery Cells and Prevention of Thermal Runaway

Kwangill Mun, Seungjae Min

Department of Automotive Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

Abstract : Environmental regulations have accelerated the adoption of electric vehicles, highlighting the growing importance of lithium-ion batteries. Battery temperature significantly affects stability, thermal runaway, and lifespan performance, making effective thermal management essential. In this study, we performed thermal modeling of pouch-type lithium-ion cells using COMSOL Multiphysics, applying different exsiting cooling plate arrangements. By simulating different types of arrangement, we analyzed the thermal behavior of battery modules and evaluated the effectiveness of each arrangement in reducing overall battery temperature and minimizing temperature differences between cells. Through this research, we investigate efficient thermal management methods, aiming to enhance battery stability, extend lifespan and reduce the risk of thermal runaway.

Key words : Lithium ion battery(리튬이온배터리), Pouch cell(파우치형 셀), Thermal analysis(열 해석), Thermal runaway(열 폭주), Cooling plate(냉각판)

# 1. 연구 배경

최근 환경 규제 강화와 친환경 정책의 확산으로 전기차의 보급이 전 세계적으로 급속히 증가하고 있다. 전기차는 화석 연료 사용을 줄이고 온실가스 배출을 감소시켜 환경 보호에 기여하지만, 이에 따 라 새로운 문제점들도 대두되고 있다. 그중 하나는 배터리 열폭주와 관련된 안정성 문제이다.

배터리의 온도가 상승하면 전해질이 기화되어 배터리 내부의 압력 상승으로 인해 분리막이 손상 되고, 이로 인해 내부 쇼트가 발생한다.<sup>1)</sup> 이러한 내 부 쇼트는 배터리 내에 급격한 전류 흐름을 유발하 여 추가적인 열을 발생시키며, 이는 다시 온도 상승 으로 이어져 열폭주 현상을 촉발한다. 열폭주가 발 생하면 배터리에 불이 붙게 되고, 한 번 불이 붙은 배터리는 리튬 이온 배터리가 자체적으로 산소를 공급하여 연소를 지속시키는 특성과,<sup>2)</sup> 배터리 팩 의 방수 특성에 따라 진화하기 어렵게 된다.

또한 배터리 셀 간의 온도 차이는 각 셀의 과충

전 과방전을 야기하여 열폭주 위험성을 더욱 높인 다. 셀 간 온도 차이가 크면 일부 셀은 다른 셀보다 빨리 열화되거나 비정상적인 전압 변화를 보일 수 있다. 이는 배터리 시스템의 균형을 깨뜨려 특정 셀 에 과부화를 주고, 결과적으로 전체 배터리의 안정 성을 위협한다.<sup>3)</sup>

이러한 안전 문제를 해결하기 위해 배터리 소재 및 구조에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다. 전해 질의 안정성을 높이거나 분리막의 내열성을 개선 하는 등의 소재 연구는 배터리의 안정성을 향상하 는 데 중요하다. 또한 배터리의 열적 거동을 예측하 고 제어하기 위한 열적 모델링과 열 관리 시스템 개 발도 활발히 이루어지고 있다.

배터리 온도는 배터리의 성능, 안정성, 수명에 직접적인 영향을 미치며, 적정 온도 범위는 일반적 으로 20-40℃ 사이이다.<sup>4)</sup> 또한 배터리 셀 간의 온도 차이는 5℃ 이내로 유지되어야 한다.<sup>5)</sup> 이러한 온도 조건을 벗어나면 배터리 효율이 저하되고, 열폭주 위험이 증가한다. 따라서 효율적인 열 관리는 전기 차의 안정성과 효율성을 높이는 데 필수적이다.

본 연구에서는 COMSOL Multiphysics® Version 6.1을 사용하여 전기차에 사용되는 파우치형 배터 리 셀의 열적 모델링을 진행하고, 냉각판을 활용하 여 배터리 온도를 적정 범위 내로 유지하며 셀 간온 도 격차를 최소화하는 과정을 진행하고자 한다. 이 를 통해 배터리의 성능 향상과 수명 연장은 물론, 셀 간 온도 차이에 따른 과충전 및 과방전을 방지하 여 열폭주로 인한 안전 문제를 예방하고자 한다.



2. 모델링 방법 및 검증

Fig. 1 Battery thermal modeling process

2.1 배터리 모델링 방법

배터리 모델링 과정은 그림 Fig. 1에 제시된 절 차를 따랐다. 모델링 과정은 배터리 실험(Battery Test), 매개변수 추출(Extract parameters), 형 상 모델링(Geometry Modeling), 메쉬(Mesh), 설정(Setting) 과정을 포함한 전처리(Preprocessing)단계, 해석(solving) 단계, 결과 (Result)단계로 구성된다.

먼저 전처리 단계에서 배터리 테스트 단계와 매 개변수 추출단계는 동일한 배터리를 대상으로 한 선행 논문을 참고하였다.<sup>6)</sup> 선행 논문에서는 전위 차법(Potentiometric)을 사용하여 배터리의 전기 화학적 데이터를 구했다. 이후 상용 프로그램을 통해 배터리의 기하학적 형상을 모델링하고, 해석 조건 설정 단계를 통해 물리적 경계조건과 모델링 목표를 정의하였다.

이후 해석 단계와 결과 단계를 통해 결과를 얻 고 선행 논문과 결과를 비교하며 모델링의 신뢰성 을 검증하였다.

#### 2.2 배터리 해석 이론



Fig. 2 (Electric Field - Heat source - Heat transfer) solving process

배터리 열적 모델링과 해석 과정에서 충방전 전 류에 대한 정의가 매우 중요하다. 배터리의 충방 전 시간은 C-rate에 따라 정의된다. 1C의 경우는 배터리를 완전 방전시키는 데 1시간이 걸리는 전 류에 대한 정의이다. 즉 2C의 경우는 완전 방전 시 0.5시간이 걸린다.

다음으로는 배터리 해석 이론에 대해 단계적으 로 알아보자. 전류를 흘려주게 되면 Fig. 2의 과정 으로 배터리 해석 과정이 진행된다. 배터리 해석 은 전계 해석 - 열원 해석 - 열 이동 해석 단계로 진행이 된다.

## 2.2.1 전계 이론

$$I_{app,j} \times E_{cell,j}(I_{app,j}) = \phi_{s,p,j} - \phi_{s,n,j}$$
(1)

 $I_{app,j}$ : 적용 전류  $E_{cell,j}(I_{app,j})$ : 적용 전류 에 의해 결정되는 셀전압  $\phi_{s,p,j}$ : 양극의 전기적 전위  $\phi_{s,n,j}$ : 음극의 전기적 전위

배터리에 전류 가 흐르게 되면 식(1)에 의해 셀 내부에서 발생하는 전위 차와 외부에서 적용된 전 류의 관계를 기반으로 배터리가 작동하게 되며, 전류의 흐름에 따라 배터리의 출력 전압이 결정됩 니다.

#### 2.2.2 열원 이론

다음 방정식 (2)-(7)를 통해 본 연구에서 수행 한 열 관리 시뮬레이션 열원의 이론적 기반을 형 성한다.

배터리 시스템 내에서 생성되는 총 열원은 식 (2)에 의해 배터리 셀 내부에서 발생하는 열과 전 류 집전체에서 발생하는 열의 합으로 표현됩니다. 배터리 내부에서 발생하는 열은 식(3)과 같이 크게 엔트로피 계수와 관련된 가역적 열과 배터리 내부에서 전기화학 반응이 이상적으로 진행되지 못하고 에너지가 손실되는 과정인 과분극 (Overpotential) 과 관련된 비가역적 열로 크게 나눌 수 있다. 비가역적 열과 관련된 과분극으로 는 오믹 과분극, 활성화 과분극 농도 과분극으로 나눌 수 있다. 농도 과분극에 의한 발열은 식(4) 와 같이 정의가 되며, SOC(State Of Charge)의 공간적 구배와 OCV(Open Circuit Voltage) 변화 량을 기반으로 열생성을 계산한다.

식(5)의 전류 집전체에서의 열 생성에 대해 살 펴 보면 전류밀도와 집전체에서의 전위구배의 곱 으로 열원이 정의된다.

$$Q_h = Q_{batt} + Q_{cend} \tag{2}$$

$$Q_{batt} = I \times (\eta_{\Omega} + \eta_{act} + T \times \frac{\partial E}{\partial T}) + Q_{mix}$$
(3)

$$Q_{mix} = \frac{3Q_{cell}}{\tau} \int_{0}^{1} \frac{\partial E_{OCV}}{\partial SOC} \times \frac{\partial SOC}{\partial x} \times \frac{\partial SOC}{\partial x} \times x^{2} dx$$
(4)

$$Q_{aad} = -i_s \bullet \nabla \phi_s \tag{5}$$

 $\begin{array}{l} Q_{h}: \ensuremath{\exists}\ensuremath{\vartheta}\ensuremath{a}\$ 

비가역적 열과 관련된 분극은 전기화학 반응의 활성화 과정과 관련이 깊다. 전기화학적 반응 속 도는 반응물의 활성화 에너지를 극복해야 진행되 며, 아레니우스 식은 이러한 활성화 에너지와 온 도 간의 관계를 설명하는 데 매우 유용 하므로 각 각의 분극은 식 (6),(7)의 아레니우스 식에 의해 정의된다.

$$k = A \times e^{-\frac{E_a}{RT}} \tag{6}$$

$$\ln\frac{k_2}{k_1} = -\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)$$
(7)  
k:  $!! c_2 \leq ... \leq$ 

# 2.2.3 열 이동 이론

 $PC_{p}\frac{\partial T}{\partial t} + PC_{p}\vec{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k\nabla T) + Q_{h} \quad (8)$   $\rho: 배터리 밀도$  $<u>C_{p}: 배터리 열용량</u>$ <math display="block">u: 유체속도벡터T: 배터리 온도t: 시간k: 열전도율 $Q_{h}: 열원$ 

열원 이론에 의해 구해진 열원은 다음 방정식 (8) 열 이동 방정식에 의해 발생 된 열이 배터리 내 외부에서 상호작용을 통해 온도 변화한다. 첫 번째 항은 배터리 내부에서 시간이 지남에 따라 온도가 변하는 항이며, 두 번째 항은 대류에 의한 열전달로 전해질이 배터리 내부에서 이동하며 열 을 전달하는 의미를 가집니다. 세 번째 항은 전도 에 의한 열전달을 의미합니다.

#### 2.3 배터리 모델링 매개변수

다음 Table 1는 실제 배터리 구조를 모델릿하 기위한 배터리셀의 제원이며, Table 2는 앞에서 설명한 이론에 의해 배터리의 열적 모델링을 하기 위해 필요한 매개변수이다. 동일한 배터리를 대상 으로 진행된 선행 논문의 실험 데이터를 기반으로 정의했다.<sup>6)</sup> 또한 배터리 모델링 과정과 해석 이론 을 바탕으로 배터리의 전기화학적 특성을 정확히 반영하기 위해 Fig. 3 SOC에 따른 dEdT(엔트로 피 계수)데이터와 Fig. 4 OCV데이터를 사용했으 며, Fig. 3 의 경우 여러 개의 배터리 셀을 이용하 여 진행한 실험의 평균값을 사용하였다. 이러한 매개변수와 데이터는 상용 프로그램의 Electrochemistry physics의 Battery Pack Module을 통해 모델링에 반영 되었다.

Table 1 Battery specification

Phyiscal parameter	Value
Dimesion(W/L/T) [mm]	100/300/15
Weight [g]	887.8
Battery Capacity [Ah]	63
1C [A]	63
Upper voltage limit [V]	4.2
Lower voltage limit [V]	2.7

Table 2	Battery	parameter
---------	---------	-----------

Thermal parameter	Value
In-layer k[W/m/K]	30
Through-layer k[W/m/K]	1
E <sub>a</sub> (ohmic) [kJ/mol]	24
E <sub>a</sub> (activation) [kJ/mol]	-60
E <sub>a</sub> (concentration)[kJ/mol]	30
Exchange current density	1
Time constant [s]	500
Battery density [kg/m^3]	1973
Battery heat capacity [J/(kg*K)]	1006
Heat transfer coefficient [W/m^2/K]	22.67
Ohmic voltage [mV]	63



Fig. 4 Open Circuit Voltage as a function of SOC<sup>6</sup>

# 2.4 기하학적 모델





Fig. 5는 선행 논문을 기반으로 한 단일 배터리 셀 의 열적 및 전기화학적 특성을 모델링한 것이 다.<sup>6)</sup> 모델링된 배터리 셀은 전기차에 널리 사용되 는 파우치형 리튬 이온 배터리를 대상으로 하였으 며, 이를 통해 배터리의 온도 분포를 분석하였다.

# 2.5 모델링 검증

완성된 배터리 모델에 대한 신뢰성을 확인하기 위해 모델링 검증을 진행하였다. 모델링 검증은 선행 논문의 모델링 결과와 비교를 했으며, 방전 전류에 따른 방전 특성을 비교하여 모델이 다양한 조건에서 배터리의 거동을 정확히 재현할 수 있는 지를 확인했다.<sup>6)</sup>



Fig. 3 Entrophy coefficient(dEdT) for various SOC<sup>6</sup>



Fig. 6 Battery temperautre at 0.1C discharging



Fig. 7 Battery Voltage at 0.5C charging

Fig. 6 과 Fig. 7 은 선행 논문과 실제 해석 결과 를 비교한 그래프이다. Fig. 6의 경우는 0.1C로 배 터리를 방전시켰을 때 배터리의 전압 변화를 비교 한 그래프이며. Fig. 7의 경우 0.5C로 배터리를 충 전시켰을 때의 배터리 온도 변화를 비교한 그래프 이다. 선행 논문에서 언급한 충전 초반의 경우 배 터리가 흡열하며 충전되어 온도가 감소하는 경향 과 높은 SOC에서 엔트로피 계수에 의해 온도가 감소하는 경향성이 동일함을 볼 수 있다.<sup>6)</sup>

## 3. 냉각판 설계

검증된 모델을 바탕으로 6S2P 배터리 모듈을 설계하였다. 단일 셀 모델은 선행 논문 및 실험적 데이터를 통해 신뢰성이 검증되었으며,<sup>6)</sup> 이를 확 장하여 Fig. 8 과 같은 모듈을 구성하였다.

모듈 설계의 주요 목적은 셀 간 온도 분포를 확 인하고, 이를 통해 모듈 내에서 발생할 수 있는 열 적 불균형을 분석하는 것이다. 또한, 설계된 모듈 이 목표로 한 적정온도를 유지할 수 있도록 냉각 판을 사용하여 열 관리 해석을 진행하였다. 냉각 판은 셀에서 발생하는 열을 효율적으로 제거하여 온도 균일성을 높이고, 셀 간 온도 차이를 줄이는 데 중요한 역할을 한다. 본 해석을 통해 6S2P 모 듈에서의 셀 간 온도 분포와 냉각판의 배열에 따 른 효과를 분석하고, 모듈 수준에서의 열 관리 결 과를 분석하고자 하였다.

## 3.1 해석 조건

배터리 모듈의 열적 거동을 분석하기 위해 다음 과 같은 해석 조건을 설정하였다. 방전은 권장 방 전량인 0.2 SOC까지 진행하였으며, 방전율은 4C 로 설정하였다. 이에 따라 해석 시간은 0.2시간으 로 설정하여 고율 방전 시 배터리 모듈의 열적 특 성을 분석하였다.

또한, 주변 온도는 20℃로 유지하였으며, 초기 상태의 배터리 모듈의 온도를 20℃로 설정하여 실제 운영 환경과 유사한 조건을 구현하였다. 주 변 온도와는 대류에 의한 열 교환 방식으로 열교 환이 되게 설정했으며, 이러한 해석 조건을 바탕 으로 방전 중 발생하는 열적 거동과 셀 간 온도 분 포를 평가하였다.

본 연구에서는 냉각판의 재료로 상용프로그램 에서 제공하는 구리를 사용하였으며, 커넥터는 알 루미늄을 사용하였다. 구리는 열전도성이 뛰어나 배터리 모듈에서 발생하는 열을 빠르고 효과적으 로 분산시키는 데 적합한 재료이다. 본 연구에서 는 냉각판의 초기온도를 15℃로 지정하였다.



3.2 기본 모델

Fig. 8 6S2P battery module

냉각판의 성능을 확인하기 위해 냉각판을 부착하 지 않은 6S2P 모델을 기본 모델로 지정하였다. 해석 조건에 따라 진행한 결과는 다음과 같다.



Fig. 9 Reference model thermal distribution



Fig. 10 Reference model temperature

Table 3 Result of reference model temperature

Temperature	Value
최고온도[℃]	46.3
최저온도[℃]	41.8
셀간 격차[℃]	4.5

최고온도 46.3℃, 최저온도 41.8℃, 셀간 온도 격 차는 4.5℃로 목표하는 온도에 비해 높은 온도를 유 지하고 있음을 관찰할 수 있다.

#### 3.3 냉각판 배열에 따른 해석

냉각판의 배열 방식에 따라 효율성을 관찰하기 위해 두 가지 타입으로 나누어 배터리 모듈의 열 관리 성능을 분석하였다. 이 두 가지 냉각판 배열 방식은 현재 전기차 배터리 시스템에서 널리 사용 되는 방법 중에서 채택한 것이다.<sup>7)</sup>

한쪽 냉각 방식을 Type A로 지정한다. Fig. 11 과 같이 배터리 모듈의 한쪽에 냉각관을 위치시키 는 방식으로 전체 모듈을 한쪽에서 냉각한다.



#### Fig. 11 Geometry of Type A

셀 간 냉각 방식을 Type B로 지정한다. 12개 배터리 셀 사이사이에 냉각판 5개를 Fig.12 와 같 이 배치하였다. 빨간색 부분이 냉각판이다.

	ſ	Ĵ	ſ	Ĵ	Ę	
4	ſ	Ĵ	ſ	Ĵ	Ē.	

#### Fig. 12 Geometry of Type B

전기차에서는 배터리의 무게가 차량의 주행 거 리와 효율에 직접적인 영향을 미치는 중요한 요소 이다. 따라서 냉각판의 배열 방식의 공정한 비교 를 위해 사용되는 냉각판의 총 무게를 동일하게 설정하였다. 이와 같은 조건을 통해 두 냉각 방식 의 성능 차이를 평가할 때 냉각판 무게로 인한 변 수를 제거하고 순수한 배열 방식의 열 관리 성능 을 비교할 수 있도록 하였다.

T 1 1 4	C 1'	1 .	1.	•
Table 4	Cooling	plate	dime	ension
	8	1		

01	
Type (W/L/T)	Dimension×Quantity
Type A [mm/mm/mm]	[300/100/20]×1
Type B [mm/mm/mm]	[300/200/2]×5

3.3.1 Type A

앞에서 언급한 해석 조건을 바탕으로 Type A

#### 에 대해서 해석을 진행하였다.



Fig. 13 Type A thermal distribution



Fig. 14 Type A model temperature



Temperature	Value
최고온도[℃]	43.1
최저온도[℃]	40.5
셀간 격차[℃]	2.6

Type A의 경우 기본모델에 비해 최고온도는 약 3.2℃ 최저온도는 약 1.3℃ 셀 간 격차는 약 1.9℃ 정도 감소함을 관찰할 수 있다.

## 3.3.2 Type B

앞에서 언급한 해석 조건을 바탕으로 Type B 에 대해서 해석을 진행하였다.



Fig. 15 Type B thermal distribution



Fig. 16 Type B model temperature

Table 6 Result of type B model temperature

Temperature	Value
최고온도[℃]	42.2
최저온도[℃]	40.4
셀간 격차[℃]	1.8

Type B의 경우 기본모델에 비해 최고온도는 약 4.1℃ 최저온도는 약 1.4℃ 셀 간 격차는 약 2.7℃ 정도 감소함을 관찰할 수 있다.

# 4. 결 론

1)본 연구는 파우치형 리튬이온 배터리의 열적 거 동에 냉각판 배열이 미치는 영향을 분석하였습니다. 시뮬레이션 결과, Type B가 배터리의 전체적인 온 도와 셀간 격차가 제일 낮아 배터리 전체 온도를 효 과적으로 낮추고 셀 간 온도 차이를 최소화하여 열 적 균일성을 향상시킬수 있음을 확인하였습니다.

2) Type A도 셀 간 격차를 많이 줄이긴 하였으나, Type B가 배터리 팩의 셀 벨런싱을 목표로 한다는 점에서 더 효율적인 냉각판 배열 방법이라고 판단할 수 있다. 3)다만, 냉각로의 모델링 한계로 인해 수냉 냉각 을 진행하지 못했다는 점과 연구에서 목표로 지정한 배터리 온도 범위(20-40℃)를 달성 하지 못한 점은 다른 냉각 방식에 대해 고려해봐야 할 것 같습니다.

4) 향후 연구에서는 본 연구에서 제안된 냉각판 설계에 대해 실제 많이 사용되고 있는 냉각수를 이용 한 수냉식 냉각에 대한 탐구를 진행할 수 있을 것 같 습니다

# 후 기

이번 연구를 통해 상용 프로그램에 대한 이해가 늘게 된 계기가 되었습니다. 특히, 배터리의 열 발 생 매커니즘과 열적 거동에 대한 학습을 하고 이 를 실제 모델링에 적용하며, 배터리의 발열 특성 과 열 관리에 대해 공부를 할 수 있었습니다.

이 연구를 진행하는 동안 아낌없이 조언과 지도 를 해 주신 교수님과 연구 과정에서 도움을 주신 조교님께 깊은 감사를 드립니다.

#### References

- S. Park, K. Sung, J. Park, and D. Shin, "Battery swelling detection system based on adaptive resistance change on battery pack surface," Journal of IKEEE, vol. 27, no. 1, pp. 85 – 92, Mar. 2023.
- 2) S. Jo, S. Seo, S. K. Kang, I. Na, S. Kunze, M. Song, S. Hwang, S. P. Woo, S. Kim, W. B. Kim, J. Lim, Thermal Runaway Mechanism in Ni-Rich Cathode Full Cells of Lithium-Ion Batteries: The Role of Multidirectional Crosstalk. Adv. Mater. 2024, 36, 2402024. https://doi.org/10.1002/adma.20242024
- 3) S.C. Bang, Y.H.Yoon, Performance and Reliability Analysis using Test Facilities for Secondary Lithium-ion Batteries, The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 72, no. 12, pp. 1789~1794, 2023
- Orhan Kalkan, Ali Celen, Kadir Bakirci, Experimental and numerical investigation of the LiFePO4 battery cooling by natural convection, Journal of Energy Storage, Volume 40, 2021.
- 5) Tianshi Zhang, Qing Gao, Guohua Wang, Yanlong

Gu, Yan Wang, Wendi Bao, Dezhi Zhang, Investigation on the promotion of temperature uniformity for the designed battery pack with liquid flow in cooling process, Applied Thermal Engineering, Volume 116, 2017,

- 6) Mohammad Shahjalal, Yashraj Tripathy, Muhammad Sheikh, Investigation on thermal performance analysis of a pouch Li-ion battery under various drive cycle profiles, Journal of Energy Storage, Volume 73, Part B, 2023,
- 7) 박상빈. "전기 자동차용 배터리 팩 냉각시스템 설계 기술에 관한 연구." 국내석사학위논문 국민 대학교 자동차공학전문대학원, 2021. 서울