

상변화물질을 활용한 원통형 리튬이온 배터리 셀의 냉각성능 및 등온유지성에 관한 연구

윤재형* · 현수웅** · 정희준*** · 신동호[†]

Study on cooling performance and isothermal maintenance of cylindrical type lithium-ion battery cell using phase change material

Jae Hyung Yoon*, Su Woong Hyun**, Hee Jun Jeong*** and Dong Ho Shin[†]

Abstract When lithium-ion batteries operate out of the proper temperature range, their performance can be significantly degraded and safety issues such as thermal runaway can occur. Therefore, battery thermal management systems are widely researched to maintain the temperature of Li-ion battery cells within the proper temperature range during the charging and discharging process. This study investigates the cooling performance and isothermal maintenance of cooling materials by measuring the surface temperature of a battery cell with or without cooling materials, such as silicone oil, thermal adhesive, and phase change materials during discharge process of battery by the experimental and numerical analysis. As a result of the experiment, the battery pack filled with phase change material showed a temperature reduction of 47.4 °C compared to the case of natural convection. It proves the advanced utility of the cooling unit using phase change material that is suitable for use in battery thermal management systems.

Key Words : Phase Change Material (상변화물질), Li-ion Battery (리튬이온 배터리), Thermal Management (열관리), Cooling material (냉각 물질), Numerical analysis (전산해석)

1. 서론

전 세계적으로 많은 에너지 수요에 따라 증가

하는 탄소배출량으로 인해 지구온난화 및 대기 오염 등 환경 피해가 발생했다. 특히 운송산업에서 배출되는 온실가스 및 오염물질은 인간의 건강에 큰 영향을 미쳐 기존 내연기관 자동차가 점차 전기 자동차로 전환되고 있다.⁽¹⁾ 전기 자동차의 핵심 부품인 리튬 이온 배터리는 높은 에너지 밀도, 높은 출력, 긴 수명 등 수 많은 장점을 가진 대표적인 2차 전지다. 이러한 장점 덕분에 전기자동차뿐만 아니라 ESS(Energy storage system), 드론, 스마트폰 등 다양한 산업에서 활발히 사용되고 있다.⁽²⁾ 하지만 리튬이온 배터리의 성능과 수명은 온도에

[†] Department of Smart Automotive Engineering, Wonkwang University (WKU), Assistant Professor
E-mail: goodsdh555@wku.ac.kr

* Department of Mechanical Engineering, WKU, MS student

** Department of Mechanical Engineering, WKU, Ph.D student

*** Department of Smart Automotive Engineering, WKU, Undergraduate student

매우 민감하다. 리튬이온 배터리 셀의 최대 성능과 수명을 확보하기 위해 적정온도 범위인 20~50 °C 사이를 유지하고 셀 및 팩 온도구배가 5 °C를 넘지 않아야 한다. 이와 같이 리튬이온 배터리 셀의 온도조건을 유지하기 위해 다양한 배터리 열관리 시스템(Battery thermal management system, BTMS)과 냉각 보조 장치 및 냉각물질에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.^(3,4,5)

대표적인 배터리 열관리 시스템은 열전달 매질의 종류에 따라 공기 냉각, 액체 냉각, 상변화물질(Phase change material, PCM)으로 분류된다. 공기 냉각은 가장 오래된 단순한 열관리 방법으로 간단한 구조와 저렴한 비용이라는 장점을 가지고 있지만 열전달 유체인 공기의 열전달계수가 낮아 높은 에너지밀도를 가진 배터리 셀 및 팩의 온도를 균일하게 유지하기 어렵다.⁽⁶⁾ 액체 냉각은 가장 많은 연구가 진행돼 왔으며, 배터리 열관리 시스템으로 가장 많이 사용되고 있는 냉각방식이다. 액체의 열 전달 계수가 공기보다 높기 때문에 배터리 팩의 적정온도와 온도균일성을 유지하기 쉽다. 하지만 액체 열 관리 시스템은 구성요소가 많아 부피가 커지게 되고 비용이 많이 발생하는 문제가 있다.⁽⁷⁾ PCM 냉각은 Passive 냉각 방식으로 추가적인 에너지 소비를 하지 않을 뿐만 아니라 온도 균일성도 우수해 많은 연구자들에게 주목을 받았다. 하지만, 배터리 열관리에 적합한 PCM 선정, 열관리 시스템에 적용 방법, 낮은 열전도율 등 많은 문제들을 해결해야 한다. 따라서, PCM을 활용한 다양한 배터리 열관리 시스템 연구가 진행되고 있다.^(8,9)

PCM은 용융 및 응고 과정에서 잠열(Latent heat)로 열 에너지를 저장 및 방출할 수 있는 물질이며, 용융 및 응고가 진행되는 상변화온도에서 등온유지하는 특성을 가졌다.^(10,11) PCM의 등온유지 특성을 배터리 열관리 시스템에 적용하면 배터리 팩의 온도와 셀간 온도구배를 적정온도범위 내에서 유지가 가능하다.⁽¹²⁾ PCM물질의 종류에 따라 유기계(paraffin, fatty acids 등), 무기계(molten salts, hydrated salts 등), 혼합계(multi-component composite phase change materials)로 분류된다. 이중 유기계 PCM은 우수한 안정성, 저비용, 비부식

성, 과냉각 및 상 분리가 없는 이점을 가져 배터리 열관리 시스템에 활용하기 가장 적합해 유기계 PCM관련한 연구가 활발히 진행되었다.⁽¹³⁾

2000년 Hallaj⁽¹⁴⁾는 처음 PCM을 배터리 열 관리 시스템에 사용할 것을 제안했다. PCM에 의해 제어되는 배터리 모듈의 온도가 공기에 의해 냉각되는 것보다 더 균일하다는 것을 발견했으며, PCM을 활용한 배터리 온도 제어가 효과 있음을 입증했다. Bai⁽¹⁵⁾는 배터리 셀간 간격과 PCM의 상변화 온도 및 열전도율이 배터리 냉각성능에 미치는 영향에 관한 연구를 진행하였다. 그 결과 셀간 간격과 PCM의 열전도율이 증가할 경우 배터리 최고 온도와 셀간 온도구배가 감소함을 확인했다. PCM의 상변화 온도가 증가할 경우 배터리 최고 온도는 높아지지만, 셀간 온도구배가 감소함을 확인했다. Moraga⁽¹⁶⁾는 서로 다른 PCM을 이용한 냉각관을 1겹 또는 3겹 구조로 제작한 뒤 배터리 열 관리 성능평가를 진행했다. 그 결과 탄산나트륨을 활용한 3겹 PCM 냉각관 사용 시 배터리 최대 온도를 약 20 °C까지 낮췄다. 3겹 PCM 냉각관 속 PCM 배치는 열전도율이 가장 높은 PCM을 배터리와 가깝게 배치하고 열전도율이 가장 낮은 PCM을 바깥쪽에 배치할 경우 가장 효과적인 것을 확인했다.

기존 선행연구들은 다른 냉각기술과 PCM을 병합하는 연구와 화학적으로 접근하는 방식의 연구가 많이 진행돼 왔다.⁽¹⁷⁾ 본 연구에서는 냉각 물질로써의 PCM이 가진 배터리 열관리 성능을 확인하고자 다른 냉각 물질과의 방전 실험을 진행하였다. PCM의 열관리 성능은 PCM, Silicone oil, Thermal adhesive와 냉각물질이 없는 Natural convection 배터리 팩을 제작한 뒤 방전 실험을 통해 평가를 진행하였다. 평가 항목은 방전 실험 중 측정된 배터리 팩의 최고온도, 온도구배, 배터리 셀의 온도구배, 방전 후 온도유지성능이다. PCM이 적용된 배터리 팩과 다른 배터리 팩의 열관리 성능을 비교하여 배터리 열관리 시스템에서 PCM의 활용가능성을 검토하였다. 또한, PCM 배터리 팩의 실험 데이터를 이용하여 전산수치 해석을 진행하여 Validation을 진행하였고, 실험을 통해 확인하지 못한 내부 PCM의 용융 상태와

내부 온도장을 확인하여 PCM이 적용된 배터리 팩의 열관리 성능 향상을 위한 고찰 및 방향성을 제시하였다.

2. 이론적 배경

본 연구에서 배터리 팩의 방전 과정을 수치해석하기 위해 STARCCM+ V22.06을 사용하였다. 리튬이온 배터리 셀의 경우 에너지 보존방정식은 다음과 같이 작성할 수 있다.

$$\rho_b c_{p,b} \frac{\partial T_b}{\partial t} = \nabla \cdot (k_b \nabla T_b) + Q_{\geq n} \quad (1)$$

여기서 ρ_b 는 각각 배터리의 밀도 및 비열 용량, k_b 는 각각 배터리의 열 전도도 및 온도, $Q_{\geq n}$ 는 열 발생량이다. $Q_{\geq n}$ 는 식(2)에 의해 결정된다.

$$Q_{\geq n} = Q / V \quad (2)$$

여기서 Q 는 배터리의 열원을 나타내고, V 는 원통형 셀의 부피를 나타낸다. Bernardi⁽¹⁸⁾가 제안한 열 발생률 공식을 기반으로 배터리의 열원을 단순화한 공식으로 계산했다.

$$Q = i^2 R + i T_b \frac{\partial U_{OC}}{\partial T} \quad (3)$$

여기서 i 는 방전 전류, R 은 리튬 이온 배터리의 내부 저항, $\frac{\partial U_{OC}}{\partial T}$ 는 배터리의 엔트로피 계수를 나타낸다. 이는 온도에 따른 개방전압과 온도 차이의 비율을 평균하여 구한 값으로, 본 연구에서는 0.000469로 설정하였다.⁽¹⁹⁾

PCM을 수치해석 하는데 사용된 지배방정식은 다음과 같이 식(4) 연속방정식, 식(5) 운동량 방정식, 식(6) 에너지 방정식이다.

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial (\rho \vec{V})}{\partial t} + \rho (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} + f_g + S \quad (5)$$

$$\frac{\partial (\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (6)$$

액상에서의 PCM은 비압축성, 층류로 가정하였다. 내부 자연대류는 Boussinesq 근사법을 활용하여 계산하였으며 이때, 고상PCM의 부력 효과는 중력과 액상과 고상의 밀도의 차의 관계로 식(7)와 같이 정의되었으며 액상 PCM의 밀도(ρ_l)는 식(8)와 같이 온도와 열팽창계수(β)의 관계로 정의되었다.

$$f_g = (\rho - \rho_l)g \quad (7)$$

$$\rho_l = \rho / \beta (T_l - T_{melt}) \quad (8)$$

PCM의 용융과정은 enthalpy-porosity model을 통해 계산하였다. “Mushy”는 다공성 영역으로 액체의 경우 1, 고체의 경우 0으로 값을 취한다. 식(9)는 식(6)에서 사용된 총 엔탈피이고, 현열 식(10)와 PCM의 잠열의 합으로 계산된다. 식(11)은 용융온도에 따른 PCM의 액분율을 나타낸다. 액분율은 식(12)와 같이 정의되었다.

$$H = h + \alpha_l L \quad (9)$$

$$h = h_0 + \int_{T_0}^T c_p dT \quad (10)$$

$$\alpha_l = \begin{cases} 0 & \text{if } T^* < 0 \\ T & \text{if } 0 < T^* < 1 \\ 1 & \text{if } 1 < T^* \end{cases} \quad (11)$$

$$T^* = \frac{T - T_{solid}}{T_{liquid} - T_{solid}} \quad (12)$$

여기서 h 는 현열, L 은 잠열, α_l 는 액분율, h_0

는 T_0 에서의 현열, c_p 는 비열, T_{solid} 와 T_{liquid} 는 용융과정에서 고체상의 온도, 액체상의 온도를 나타낸다. 용융과정에서 온도는 $T_{liquid} > T > T_{solid}$ 이다.

식(13)은 운동량 방정식에서 다공성 영역 내부 유동에 관한 Darcy 법칙의 감쇠 항으로 “Mushy” 영역에서 고체 PCM 상태에서 속도가 0에 수렴하도록 계산하기 위해 정의된 Momentum Sink이다.

$$S = \frac{(1 - \alpha_l)^2}{(\alpha_l^3 + \epsilon)} A_{mush} u_i \quad (13)$$

여기서 공극률 ϵ 는 분모가 0이 되는 것을 피하기 위해 0.001로 설정되었고, A_{mush} 는 유체가 응고될 때 속도 변화의 정도를 나타내는 상수이다.

본 연구에서 PCM 배터리 팩의 열성능 효과를 정량적으로 평가하고자 Reynolds, Nusselt, Rayleigh number를 각각 식(14), (15), (16)으로 계산했다.

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (13)$$

$$N = \frac{h L}{k} \quad (13)$$

$$Ra = \frac{g \beta (\Delta T) L^3}{\nu_k \alpha} \quad (13)$$

여기서 ρ 는 밀도, v 는 속도, L 은 특성 길이, h 는 열전달계수, k 는 열전도도, g 는 중력 가속도, β 는 열팽창 계수, ΔT 는 유체 중 온도기울기, ν_k 는 동적점성율, α 는 열확산율을 나타낸다.

3. 실험 및 해석 세팅

3.1 배터리 팩 제작 및 방전 실험 세팅

배터리 팩 방전 실험에 앞서 최적의 PCM 선정을 위해 natural convection에서 배터리 셀의 발열 특성을 확인하였다. 사용된 원통형 배터리는 Samsung INR 18650 - 30Q으로 자세한 사양은 Table 1에

Table 1. Specifications of Samsung INR 18650 - 30Q

Specifications	Value
Diameter of cell	18.33 0.07 mm
Height of cell	64.85 0.15 mm
Mass of cell	48 g
Nominal voltage	3.6 V
Nominal capacity	3,000 mAh
Charging temperature	0 ~ 50 °C
Discharging temperature	-20 ~ 75 °C

표기하였다. 배터리 셀 3개를 병렬로 연결한 뒤 방전전류(C-rate, C)는 2C로 설정하여 방전을 진행하였다. 방전 과정 중 배터리에서 발생하는 발열은 방전 실험에서 Battery discharger를 이용해서 시간에 따른 배터리의 전압, 저항, 표면의 온도데이터를 측정하여 계산하였다. Fig. 1 (a)는 2C 방전 직후 Thermal imaging camera로 촬영한 배터리 3셀의 온도분포 사진이다. 2C 방전 시 배터리 셀의 표면 최고온도는 적정온도를 넘어 55 °C까지 올라갔으며, 셀간 온도구배가 발생함을 확인했다. 최대 2C 방전에서 PCM의 효과적인 배터리 냉각 및 등온유지성을 확인하기 위해 44 °C에서 용융이 진행되는 PCM (PARAFOL 22-95)이 선정되었다.

Fig. 1 (b)는 원통형 배터리 셀에 부착된 온도 센서 Thermocouple, TC) 위치를 나타낸다. TC는 셀 높이에 따라 3개 부착하였으며, 측정된 온도 데이터로 냉각물질이 적용된 배터리 팩의 냉각 성능, 온도구배, 등온유지성을 확인하였다. Fig. 2는 서로 다른 냉각물질을 채운 배터리 팩이다. 배터리 팩은 가로 65mm, 세로 30mm, 높이 65mm,

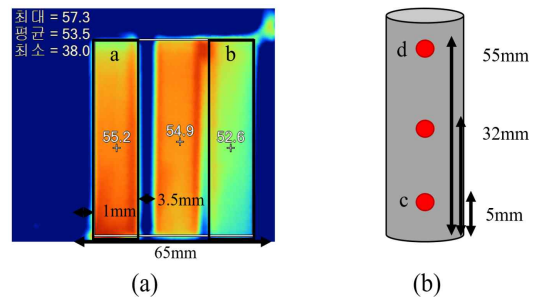


Fig. 1. (a) Surface temperature distribution of battery cells after 2C discharging with thermal imaging camera and (b) Thermocouple points at battery cell

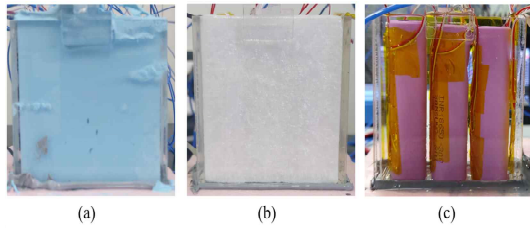


Fig. 2. Images of battery pack filled with cooling materials: (a) Thermal adhesive, (b) PCM, (c) Silicone oil

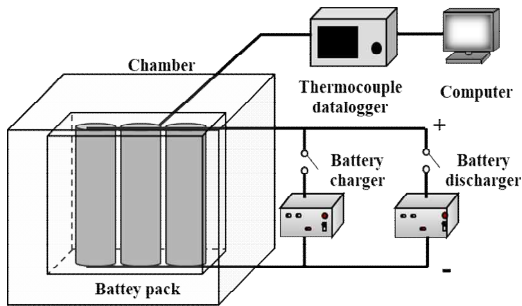


Fig. 3. Schematic of experimental set up for battery test

두께 3mm의 아크릴 케이스에 배터리 셀 3개를 병렬로 연결한 뒤 배터리 팩 내부 빈공간을 PCM, Silicone oil (KF-96), Thermal adhesive(PK-404DM)으로 가득 채워 제작했다.

Fig. 3은 배터리 팩 방전 실험 모식도이다. 실험은 배터리 충전·방전기, 챔버, 데이터로거, 노트북, 배터리 팩으로 구성되어 있다. 서로 다른 냉각물질이 적용된 배터리 팩 내부 배터리 셀의 냉각성능 및 등온유지성능을 평가하기 위해 배터리 셀 표면에 부착된 온도센서의 온도데이터를 1초간격으로 GL840(GRAPHTECH)에 기록하였다. 항온 챔버를 활용해 실험 시 배터리 팩 주변 온도는 20 °C로 유지되었으며, 방전 및 방전 후 등온유지평가 실험이 진행되었다.

배터리 팩 방전 실험 시 방전전류는 1C, 1.5C, 2C로 설정하였다. 1C와 1.5C 방전 실험에서의 배터리 최고온도는 37.1 °C 43.8 °C로 방전 실험 중 발생하는 배터리 발열량이 PCM을 용융시키기 부족했다. 방전 실험을 통해 방전 중 용융과정이 완료된 PCM의 방전 후 등온유지 특성을 확인하기 위해 방전전류를 2C로 설정하여 방전 실험을 진행하였다. 방전 실험은 배터리 팩 전압이 4.2V

에서 시작하였고, 배터리 팩의 전압이 2.5V에 도달하면 방전이 종료되었다. 방전 후 배터리 팩 내부 배터리 셀 온도가 적정온도 범위인 50 °C ~ 30 °C 사이를 유지하는 등온유지 시간을 측정하고 다시 충전을 시작하는 사이클을 반복하였다.

3.2 사용 냉각물질 및 장비

방전 실험을 위해 제작된 배터리 팩은 Natural convection, PCM, Silicone oil, Thermal adhesive이 적용된 4개의 배터리 팩이다. 사용된 냉각물질들의 물성치와 사용된 장비는 각각 Table 2 와 Table 3에서 설명된다.

Table 2. Properties of cooling materials

Material	Density [kg/m]	Specific heat capacity [kJ/kg·K]	Thermal conductivity [W/m·K]
PCM	780(Solid)	2	0.2
	760(Liquid)		
Silicone oil	970	1.6	0.16
Thermal adhesive	3,000	-	3.6

Table 3. Experimental devices and resolution

Experimental device	Specification	Resolution & error
Battery discharger	30 V/20 A	0.01 V ± 0.05% 0.01 A
Battery charger	80 W/6 A	-
Datalogger	-200 °C ~ 1370 °C	± 0.05% or 1.0 °C
Thermal imaging camera	-20 °C ~ 550 °C	± 0.5%
Thermocouple	-270 °C ~ 1372 °C	± 0.75% or 2.2 °C

3.3 수치해석 세팅

Fig. 4는 배터리 팩의 해석 도메인이다. 수치해석을 통해 실험 시 측정된 배터리 셀 온도데이터와 방전 후 PCM 용융상태를 해석데이터와 비교하였다. 해석은 비정상 과정에서 진행되었다. 볼륨 메쉬는 STARCCM+ V22.06에 의해 생성되었고,

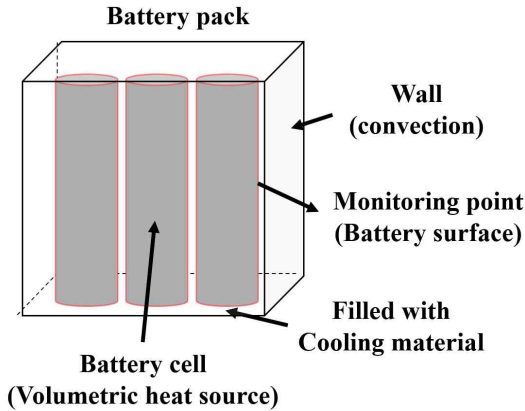


Fig. 4. Domain and boundaries of numerical setup

격자는 사면체 모양을 채택하였다. 배터리 및 PCM의 볼륨 메쉬 크기는 1mm이다. Volumetric heat source는 실험에서 측정된 값을 배터리 3셀에 부여하여 세팅하였고, PCM의 물성치는 Table 2의 수치를 적용했다. 배터리 해석 조건은 방전 중 배터리의 열전도율, 비열 용량 등 배터리 성능 매개 변수는 일정하다고 가정하고 해석을 진행하였다. 모든 도메인 경계 벽면은 No slip wall 조건으로 설정하였다. PCM이 적용된 배터리 팩 해석은 Table 4의 경계조건을 적용해 해석을 진행했다.

Table 4. Boundary conditions in numerical set up

Boundary	Condition	Value
Battery wall	Volumetric heat source	Experimental Data [W/m^3]
Pack Wall	Fixed temperature	20 [$^{\circ}C$]
	Fixed heat transfer coefficient	4 [$W/m^2 \cdot K$]
Initial condition	Temperature of whole domain	20 [$^{\circ}C$]

4. 실험 및 해석 결과

4.1 실험결과 분석

4.1.1 방전 시 배터리 셀 최고 온도 비교

Fig. 5는 2C 방전 시 시간에 따른 배터리 셀 표면 최고온도에 대한 그래프이다. 서로 다른 냉각

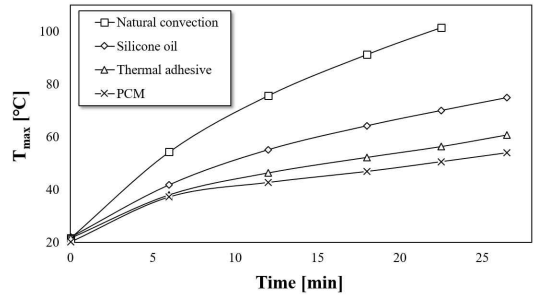


Fig. 5. Temperature of battery surface by time with cooling materials during 2C discharging process

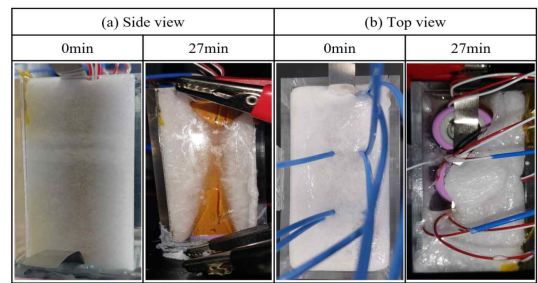


Fig. 6. Photos of PCM melting fraction in the battery pack after 2C discharging process: (a) Side view and (b) Top view

물질들의 배터리 냉각성능을 비교하기 위해 냉각물질이 적용된 배터리 팩의 배터리 셀 최고온도와 Natural convection 냉각의 배터리 셀 최고온도를 비교하였다. Natural convection 대비 냉각물질에 따른 배터리 표면 최고 온도 감소율은 Silicone oil 26% (26.5 $^{\circ}C$), Thermal adhesive 40% (40.7 $^{\circ}C$), PCM 47% (47.4 $^{\circ}C$)으로, PCM이 가장 우수한 배터리 냉각성능을 보여주었다.

Fig. 6은 2C 방전 전후 배터리 팩에 적용된 PCM의 용융 상태를 나타낸다. 방전 중 배터리 셀에서 발생하는 열에너지는 주변 PCM이 열에너지를 흡수하며 고체에서 액체로 용융되었다. 그러나 PCM의 낮은 열전도도 때문에 열원에서 멀어질수록 melting rate 이 줄어들음을 확인할 수 있다.

4.1.2 방전 후 배터리 셀 등온유지능력 비교

Fig. 7은 2C 방전 후 시간에 따른 배터리 셀 표면의 온도이다. Chitradeep⁽²⁰⁾은 배터리의 급격한

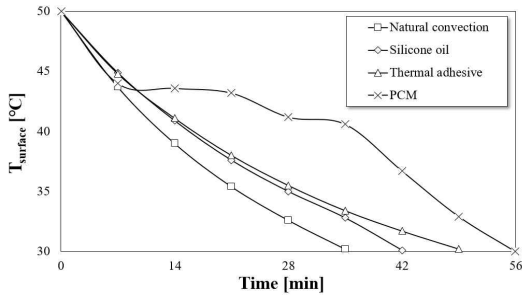


Fig. 7. Temperature of battery surface by time with cooling materials after 2C discharging process

온도변화가 배터리 수명에 영향을 미치는 것을 확인했으며 등온유지성의 필요성에 대하여 설명하였다. 방전 후 배터리 셀의 적정온도는 30 °C 부터 50 °C 사이이며 냉각물질에 따른 등온유지성을 평가하였다. 각 냉각물질이 측정된 유지시간은 PCM 56분, Thermal adhesive 49분, Silicone oil 43분, Natural convection 36분으로 PCM이 가장 오래 유지하는 것으로 확인했다. 이는 Fig. 6에서 확인된 방전 중 액체로 용융되며 열을 저장한 PCM이 방전 후 열을 방출하며 다시 고체로 응고되기 때문에 다른 냉각물질과 달리 적정온도 유지 시간이 더 길게 측정된 것으로 사료된다.

4.1.3 방전 시 배터리 온도구배 비교

Fig. 8과 Fig. 9는 각각 2C 방전 시 시간에 따른 배터리 팩의 좌우(a, b)와 상하부(c, d)의 온도차이에 대한 결과이다. 온도 측정 위치는 Fig. 1의 좌우(a, b), 상하부(c, d)로 나타내었다. Fig. 8은 우측과 좌측에 위치한 배터리 셀의 온도차이를 나타낸 그래프로 냉각물질에 따른 배터리 팩 온도구배를 비교하였다. 배터리 팩의 온도구배는 5 °C 이하로 유지되어야 배터리의 최대수명을 유지할 수 있지만 사용된 냉각물질 중 Thermal adhesive만 5 °C 이하로 유지되었다. PCM이 적용된 배터리 팩은 방전 시작 후 20분까지는 5 °C 이하로 유지되었지만 이후 최대 10 °C까지 차이 발생함을 확인하였다. Fig. 9는 배터리 셀의 상하부 온도차이를 나타낸 그래프로 냉각물질에 따른 배터리 셀의 온도구배를 비교하였다. 배터리

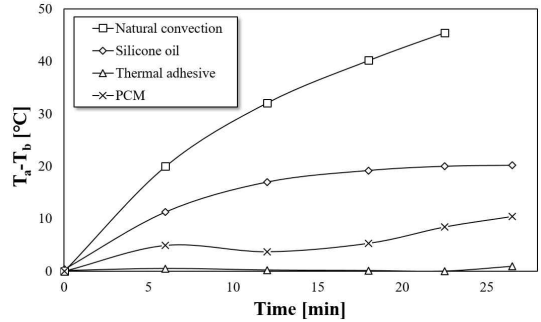


Fig. 8. Temperature of battery pack distribution by time with cooling materials during 2C discharging process

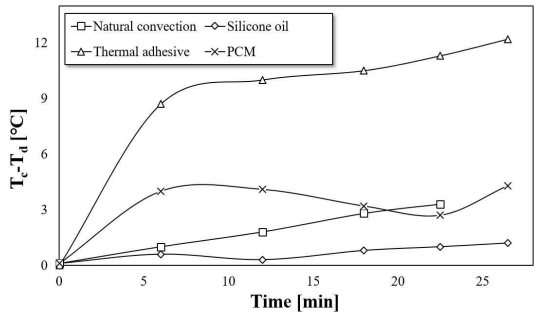


Fig. 9. Temperature of battery cell distribution by time with cooling materials during 2C discharging process

셀의 온도구배는 2 °C 이하로 유지되어야 배터리 셀의 최대수명을 유지할 수 있지만 사용된 냉각물질 중 Silicone oil만 2 °C 이하로 유지되었다. PCM이 적용된 배터리 셀의 온도구배는 최대 4 °C로 PCM의 용융이 시작되는 10분 이후로 일시적으로 배터리 셀의 온도구배가 낮아지다가 다시 온도구배가 높아지는 현상을 확인할 수 있다. 이는 PCM의 낮은 열전도율과 PCM의 불균일한 상변화 현상 때문인 것으로 사료된다. 본 연구에서 사용된 PCM의 열전도도를 증가를 위해 화학적 접근과 시스템적 접근이 필요함을 확인하였다. Shaofei⁽²¹⁾은 PCM과 높은 열전도율을 가진 carbon, metal계열의 재료를 섞을 경우, 열전도율이 최대 1.5배 증가하며, 다공성 물질 사이에 PCM을 적용한 경우 최대 10배까지 증가할 수 있음을 확인하였다. Ewelina⁽²²⁾은 PCM에 추가적으로 핀 크기, 각도, 위치 등과 액체 냉각 구조, 라인 등을 설계하여 PCM의 상변화 시간 변화율을

과약하였다. 핀의 경우 위치와 길이에 따라 상변화 시간이 50 ~ 75% 각도에 따라 20% 감소했고, 액체 냉각의 설계에 따라 최대 90% 변하는 것을 확인하였다.

4.2. 해석결과

4.2.1 Independence test for Mesh and Time step

Fig. 10는 PCM이 채워진 배터리 팩의 메쉬 민감도 테스트 결과다. 메쉬 사이즈에 대한 민감도를 확인하기 위해 메쉬 범위를 Coarsest (25,000) 부터 Finest (1,500,000)로 설정하였고, 메쉬 격자 개수에 따른 배터리 표면의 평균온도를 비교하였다. 해석 결과, Medium과 Fine 메쉬 구성 시 해석결과와 실험결과와의 오차는 1% 이내로 나타났지만 해석 시간은 300% 이상의 차이가 발생했다. 그리고 Medium 메쉬에서 Coarse 메쉬로 변경 시, 배터리 표면 평균 온도의 차이는 2 °C (3.5%) 증가함을 확인하였다. 따라서 실험결과와 해석결과의 오차가 충분히 작고, 해석시간도 줄어든 Medium메시가 선정되었다. 이 결과를 통해 생성

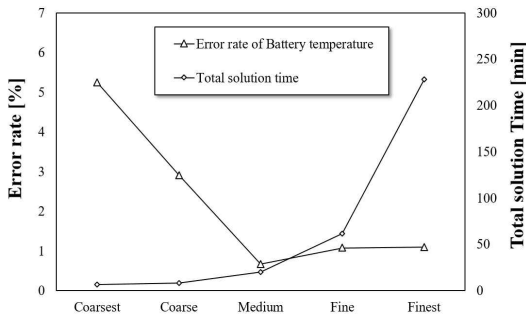


Fig. 10. Mesh independence test for battery temperature

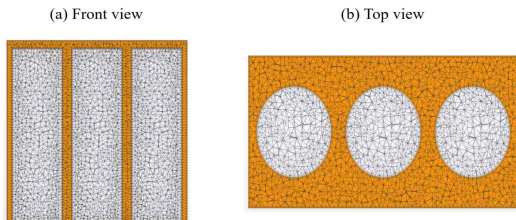


Fig. 11. View of a grid, adopted for the computations of the present study: (a) Front view; (b) Top view

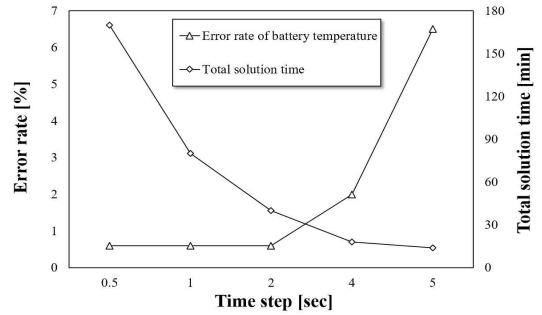


Fig. 12. Time step independence test for battery temperature

된 사면체 격자는 Fig. 11에 보여 지며, 이때의 격자 단위 길이는 1mm이다.

Fig. 12는 Time step 민감도 테스트 결과에 대한 그래프이다. Time step에 따른 배터리 표면 온도를 실험 데이터와 비교하여 Time step 민감도 테스트를 진행하였다. Time step이 2초인 경우, 1초인 경우 대비 측정된 배터리 표면 온도의 오차는 0.1 °C (0.02%)미만으로 매우 작게 나타났다. 그러나, 해석시간의 경우, Time step을 1초에서 2초로 늘린 경우, 40분 (100%) 단축됨을 확인하였다. Time step이 4초인 경우, 2초인 경우 대비 해석시간이 22분 (122%) 단축이 가능하지만, 배터리 표면 온도가 1 °C (2.03%) 낮게 측정되어, 상대오차가 증가함을 확인했다. 상대 오차율이 1% 미만으로 높은 정확도를 가지고, 해석 시간을 최적화할 수 있는 Time step은 2초인 경우라고 결론 지었으며, 그에 따라 해석 시 Time step을 2초로 설정하였다.

4.2.2 해석결과 validation

Fig. 13은 PCM이 채워진 배터리 팩의 방전 과정 동안의 배터리 표면의 온도 값에 대한 실험 및 수치해석 결과를 보여준다. 20 °C에서 방전 실험이 시작되어 2C 방전을 진행했을 때, 총 방전 시간은 27분 진행됐다. 방전 후 배터리 표면의 실험값은 49.1 °C이고, 해석값은 49.54 °C로 수치해석 값의 실험값과의 상대 오차율은 1% 이내로 수렴되었다.

Fig. 14는 실험에서 촬영한 PCM의 용융상태 사진과의 동일한 위치를 나타낸 monitoring plane

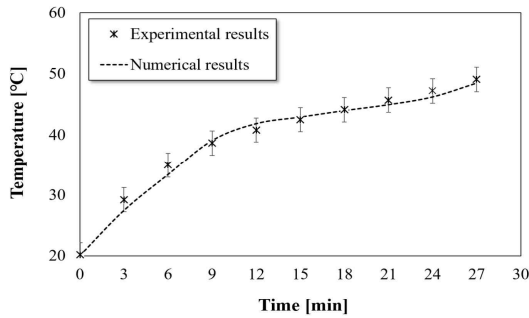


Fig. 13. Experimental and numerical results of battery temperature by time during discharging process

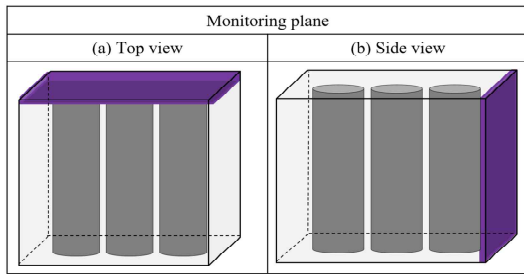


Fig. 14. Numerical monitoring plane of PCM battery pack: (a) Top view and (b) Side view

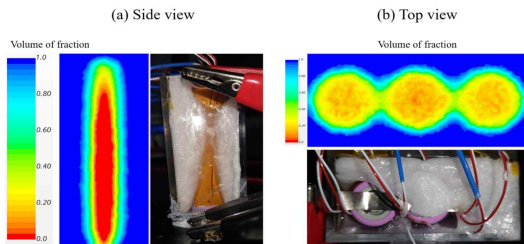


Fig. 15. Numerical and experimental results of melting fraction of solid PCM after discharging process: (a) Side view and (b) Top view

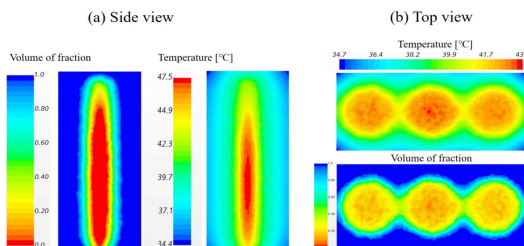


Fig. 16. Numerical results of volume fraction of solid PCM and temperature scalar field after discharging process: (a) Side view and (b) Top view

이다. 이 면을 통해서 2C 방전 후 PCM의 용융상태를 나타낸 해석 데이터를 확인하였다. Fig. 15는 2C 방전 후 실험과 해석을 통해 확인한 용융상태를 나타낸다. 전산수치해석에서의 용융상태는 파란색이 고체 PCM, 빨간색 부분이 액체 PCM으로 나타내어진다. 실험과 해석결과의 용융상태를 비교했을 때 side view 상하부와 top view의 용융상태가 다르게 나타났음을 확인하였다. 이는 배터리 셀을 연결해주는 전극유무의 차이이며 해석 시 전극에서 발생하는 발열을 고려하지 않아 전극 근처의 PCM 용유이 다른 한계가 있다. Fig 16에서 용융상태를 나타낸 면의 온도장을 확인 한 결과 전극 근처에 위치한 Top view의 온도가 PCM의 상변화 완료되는 온도인 44 °C를 초과하는 부분이 없음을 확인하였다.

4.2.3 해석결과 분석

Fig. 17은 2C 방전 중 배터리 팩 내부 PCM의 용융과정을 확인하기 위한 monitoring plane이다. 이 면을 통해서 실험에서 확인 못한 배터리 팩의 내부 PCM 용융과정을 확인하였다. Fig. 18과 Fig. 19은 PCM 배터리 팩 내부 Top view와 Side view로 2C 방전 중 내부 PCM의 용융과정을 방전 시간에 따라 나열하였다. 전산수치해석에서의 용융상태는 파란색이 고체 PCM, 빨간색 부분이 액체 PCM으로 나타내어진다.

해석결과, 팩 내부 배터리 셀 주변 PCM이 먼저 용융되기 시작하며 점차 용융되는 영역이 넓어지는 것을 알 수 있다. 방전 후 27min에서 Top view와 Side view의 Volume of fraction를 보면 배터리 셀 주변과 셀 사이 PCM은 용융이 완료되었고, 이는 전체 PCM 중 37%에 해당했다. Fig. 6의 배터리 온도 실험 데이터를 봤을 때, 배터리 주변 PCM 용융과정이 끝나게 되면 배터리 온도 또한 상승하기 때문에 배터리 주변부 PCM을 냉각시켜줄 추가적인 장치와 PCM의 열전도도를 높이기 위한 추가적인 연구가 필요한 것으로 사료된다.

Fig. 20와 Fig. 21은 2C 방전이 완료된 후 PCM 배터리 팩의 유속장과 온도장을 보여준다. 배터리

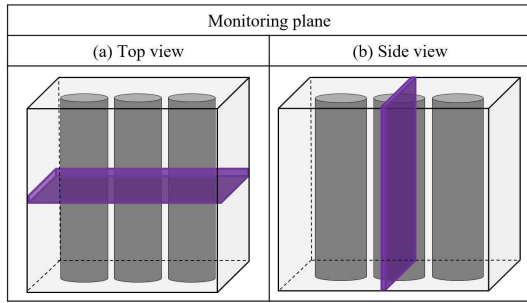


Fig. 17. Numerical monitoring plane of PCM battery pack inside: (a) Top view and (b) Side view

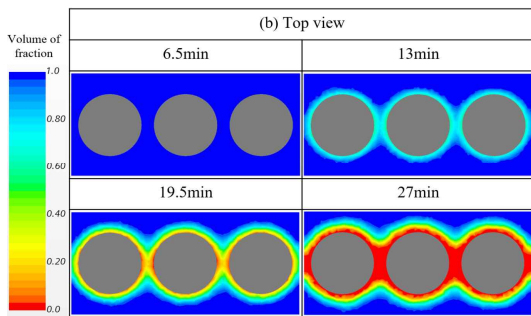


Fig. 18. Numerical results of volume fraction of solid PCM in discharging processes of Top view

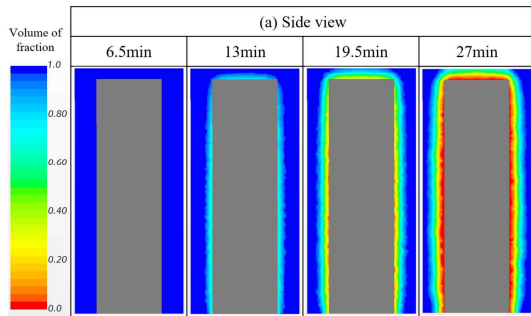


Fig. 19. Numerical results of volume fraction of solid PCM in discharging processes of Side view

셀 사이의 PCM 상하부 유속과 온도의 차이는 각각 0.0008 m/s , 2.03°C 이다. 이에 따른 Reynolds number 수와 Rayleigh 수는 각각 14.5와 1203으로 계산된다. 배터리 셀 사이에서의 유속이 상하부로 규칙적인 자연대류가 발생함을 알 수 있다. 이로 인해, 상단과 하단의 유동이 고르게 섞이기 때문에 상하부 온도차이가 2°C 이하로 줄어드는

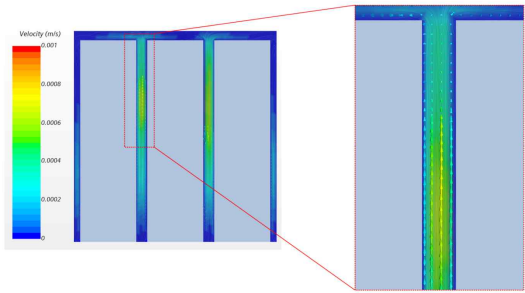


Fig. 20. Contours of the magnitude of the velocity and streamlines for PCM battery pack

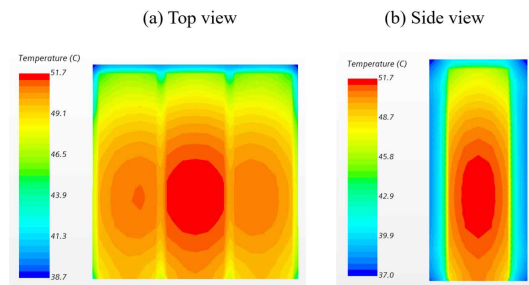


Fig. 21. Contours of the temperature for PCM battery pack

결과를 얻게 되었다. 이에 따른 배터리 표면의 heat transfer coefficient 값은 $50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ 이고 Nusselt number는 16.3으로 계산된다.

4. 결론

본 연구에서는 냉각물질로써 PCM의 활용가능성을 평가하기 위해 Natural convection과 냉각물질 PCM, Silicone oil, Thermal adhesive이 적용된 배터리 팩을 제작해 배터리 팩 방전 실험을 진행하였다. 방전 실험 시 방전전류는 2C로 설정하였고, 배터리 팩의 전압이 4.2V에서 2.5V로 도달하면 방전이 완료됐다고 판단하였다. 방전 중 배터리 셀의 최고온도 및 온도구배, 방전 후 배터리 셀 표면온도를 측정하여 PCM의 냉각성능 및 등온유지성능 평가를 진행하였다. 본 연구의 결과는 아래와 같이 요약할 수 있다.

- 1) PCM이 적용된 배터리 팩은 2C 방전 시 배터리 셀의 최고온도는 Natural convection 대비

47.4 °C (47%) 감소했으며, 사용된 냉각 물질 중 가장 뛰어난 냉각 성능을 확인했다.

- 2) PCM은 방전 중 배터리에서 발생한 열에너지를 저장한 뒤 방전 후 저장한 열에너지를 방출하는 등온유지특성을 가졌다. 이로 인해 PCM이 적용된 배터리 팩의 방전 후 적정온도 유지시간은 56분으로 다른 냉각 물질에 비해 오래 유지되었음을 확인하였다.
- 3) PCM이 적용된 배터리 팩의 온도구배는 최대 10 °C로 한쪽 배터리 주변 PCM이 먼저 용융과정을 완료해 팩 내부 온도구배가 상승함을 확인했다.
- 4) PCM이 적용된 배터리 팩 내부 배터리 셀의 온도구배는 최대 4 °C로 PCM의 초기 용융과정에서 2.5 °C로 줄어든 지만 용융이 완료된 시점에서 다시 온도구배가 상승함을 확인하였다.
- 5) PCM 배터리 팩 해석결과 실험값과의 상대 오차는 1% 이내로 수렴했으며, 방전 후 27분에서 Top view와 Side view의 Volume of fraction를 보면 배터리 셀 주변과 셀 사이 PCM은 용융이 완료되었으며, 팩 전체에서는 37%의 PCM에 해당하였다.

본 실험을 통해 PCM은 용융과정 중 등온 유지되는 특성 때문에 다른 냉각 물질 보다 효과적인 배터리 열관리가 가능한 것을 확인하였다. 결론적으로 배터리 열관리 시스템에 PCM을 활용하기 적합함을 입증하였다. 냉각물질로써 PCM의 냉각 성능 및 등온유지성능은 뛰어났으나, 팩 및 셀 온도구배를 적정온도 이하로 유지하기 위해 최적의 PCM 선정 및 열전도도를 높이기 위한 추가적인 장치 등에 대한 연구가 향후 필요하다고 사료된다.

후 기

이 논문은 2022학년도 원광대학교의 교비 지원에 의해 수행됨.

REFERENCE

- 1) Osmani, K., 2023, "Recent progress in the thermal management of lithium-ion batteries", *Journal of Cleaner Production*, Volume 389, 136024.
- 2) Aravindan, V., 2018, "Electrochemical Activity of Hematite Phase in Full-Cell Li-ion Assemblies", *Advanced Energy Materials*, Volume 8, 1702841.
- 3) Tete, P. R., 2021, "Developments in battery thermal management systems for electric vehicles: A technical review", *Journal of Energy Storage*, Volume 35, 102255.
- 4) Dongwoo, K., 2021, "Design of flow path with 2 inlet and outlets to improve cell performance and prevent cell degradation in Solid Oxide Fuel Cell", *Journal of the Korean Society of Visualization*, Volume 19(2), pp. 56-62
- 5) Sungji, Y., 2022, "Comparison of Experimental and Simulation Results for Flow Characteristics around Jet Impingement/Effusion Hole in Concave Hemispherical Surface", *Journal of the Korean Society of Visualization*, Volume 20(2), pp. 28-37
- 6) Hakeem Akinlabi, A. A., 2020, "Configuration, design, and optimization of air-cooled battery thermal management system for electric vehicles: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 125, 109815.
- 7) Kalaf, O., 2021, "Experimental and simulation study of liquid coolant battery thermal management system for electric vehicles: A review", *International Journal of Energy Research*, Volume 45, pp. 6495-6517.
- 8) Kannan, C., 2021, "Critical review towards thermal management systems of lithium-ion batteries in electric vehicle with its electronic control unit and assessment tools", *Journal of Automobile Engineering*, Volume 235, pp. 1783–1807.
- 9) He, L., 2023, "Review of thermal management system for battery electric vehicle", *Journal of*

- Energy Storage, Volume 59, 106443.
- 10) Shin, D. H., 2019, "A new type of heat storage system using the motion of phase change materials in an elliptical-shaped capsule", *Energy Conversion and Management*, Volume 185, pp.508-519.
 - 11) Shin, D. H., 2022, "Development of a new type of PCM thermal capsule transport system", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 183, 122034.
 - 12) Li, J., 2020, "Thermal characteristics of power battery module with composite phase change material and external liquid cooling", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 156, 119820.
 - 13) Luo, J., 2022, "Battery thermal management systems (BTMs) based on phase change material (PCM): A comprehensive review", *Chemical Engineering Journal*, Volume 430, Part 1, 132741.
 - 14) Hallaj, S. AI., 2000, "A Novel Thermal Management System for Electric Vehicle Batteries Using Phase-Change Material", *Journal of the Electrochemical Society*, Volume 147, pp. 3231-3236.
 - 15) Bai, F., 2019, "Thermal performance of pouch Lithium-ion battery module cooled by phase change materials", *Energy Procedia*, Volume 158, pp. 3682-3689.
 - 16) Moraga, N. O., 2016, "Cooling li-ion batteries of racing solar car by using multiple phase change materials", *Applied Thermal Engineering*, Volume 108, pp. 1041-1054.
 - 17) Xiangwei, L., 2021, "Research Progress of Phase Change Storage Material on Power Battery Thermal Management", *Energy Technology*, Volume 9, Issue 4
 - 18) Bernardi, D., 1985, "A General Energy Balance for Battery Systems", *J. Electrochem. Soc.*, Volume 132, No.1
 - 19) Dong, F., 2021, "Investigation and optimization on cooling performance of a novel double helix structure for cylindrical lithium-ion batteries", *Applied Thermal Engineering*, Volume 189, 116758
 - 20) Chitradeep, S., 2009, "Battery pack modeling for the analysis of battery management system of a hybrid electric vehicle", *IEEE*, pp. 207-2012
 - 21) Shaofei, W., 2020, "Thermal conductivity enhancement on phase change materials for thermal energy storage: A review", *Energy Storage Materials*, Volume 25, pp. 251-295
 - 22) Ewelina, R., 2020, "The Impact of Heat Exchangers' Constructions on the Melting and Solidification Time of Phase Change Materials", *energies*, Volume 13, 4840