

# LFP 각형 배터리의 냉각시스템 분석

박 찬 우<sup>1)</sup> · 김 응 환 · 민 승 재<sup>\*2)</sup>

한양대학교 미래자동차공학과<sup>1)</sup> · 한양대학교 미래자동차공학과 교수<sup>2)</sup>

## Cooling System Anaysis of LFP Prismatic Battery

Chanwoo Park<sup>1)</sup> · Eunghwan Kim · Seungjae Min <sup>\*2)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Automotive Engineering, Hanyang University, Seoul 135-080, Republic of Korea

<sup>2)</sup>Department of Automotive Engineering, Hanyang University, Seoul 135-080, Republic of Korea

**Abstract** : Li-ion battery is regarded as one of the most suitable for electric vehicle. For driving range of electric vehicle, more battery energy to be filled in the pack is required. Compact pack structure induce temperature deviation between batteries. Optimal operation temperature of battery is between 20 to 45 degrees Celsius and high temperature deviation induce performance differences occur for each battery cell. These issues are related to the thermal management system. The main goal of this paper is to present a comparison of two cooling systems(liquid cooling for active cooling, and phase change material based cooling for passive cooling)of LFP prismatic battery module. The temperature rise and temperature deviation are mainly analysed for two types of battery cooling systems.

**Key words** : Li-ion battery(리튬이온 배터리), Thermal management system(열관리 시스템), Computational fluid dynamics(전산유체해석), Phase change material(상변화물질), Liquid cooling(수냉식 냉각),

### 1. 서 론

최근 탄소중립 규제강화로 인해 자동차 산업에  
는 친환경 에너지를 동력원으로 하는 자동차에  
대한 필요성이 지속적으로 대두되고 있다. 이와  
더불어 세계적으로 관심이 되어온 화석 연료의 고  
갈과 배기가스로 인한 환경오염의 문제는 친환경  
자동차의 개발 및 보급을 가속시키는 주요 요인이  
다. 그중 전기자동차가 각광받고 있다.

전기자동차에서 가장 중요한 요소는 배터리이  
다. 그중 리튬 이온 배터리가 가장 적합한 배터리  
로 평가받고 있다. 배터리에 사용되는 양극재는  
종류가 다양하다. 그중 LFP를 사용한 배터리는  
뛰어난 안정성과 긴 수명으로 다양한 연구가 진행  
되고 있다. 하지만 낮은 에너지 밀도를 가지는 단  
점이 있다. 그로 인해 모듈 단계를 생략하고 셀에  
서 바로 팩으로 만드는 셀투팩(cell-to-pack)

기술로 낮은 에너지밀도를 해결하는 방법이 연구  
중이다<sup>1)</sup>.

배터리의 적정 작동 온도는 20~40℃로 알려  
져 있다.<sup>2)</sup> 에너지밀도를 높이기 위해 다수의 배터  
리를 팩 형태로 연결하여 사용하는 경우 배터리  
간 온도 편차로 인한 문제가 야기된다. 배터리 간  
온도 편차가 7℃ 이상으로 올라가면 배터리 간  
충·방전 사이클 차이로 배터리 셀마다 성능의 차  
이가 발생한다.<sup>3)</sup> 배터리 적정 온도와 배터리 간  
온도 편차를 조절하기 위해 배터리의 열 관리 시  
스템의 적용은 필수적이다. 그 중 가장 핵심이 되  
는 요소는 배터리에서 발생하는 열을 효과적으로  
제거하기 위한 냉각 시스템이다. 이를 위하여 다  
양한 연구들이 진행되고 있다.

배터리 열관리 시스템의 냉각 방식은 크게 능동  
냉각(active cooling)과 수동 냉각(passive  
cooling)으로 나눌 수 있다.

능동 냉각 방식은 냉각을 위한 별도의 에너지  
장치를 필요로 하는 방식이다. 능동 냉각 방식에

\* Corresponding author, E-mail: seungjae@hanyang.ac.kr

는 공랭식과 수랭식이 있다. 효과적인 냉각을 위해 전기차에는 주로 수랭식의 냉각 방식이 여러 양산 형태의 배터리 팩(원통형, 각형, 파우치형)에 널리 사용되고 있다.<sup>7)</sup>

수동 냉각 방식은 냉각을 위한 별도의 장치 없이, 자연적으로 냉각을 하는 방식이다. 히트 파이프(heat pipe)나 상변화물질(phase change material, PCM)이 수동 냉각 방식이다. 수동 냉각 방식은 별도의 전력을 필요로 하지 않으며, 여러 가지 장점으로 인해 실용화를 위해 다양한 연구와 개발이 활발히 진행되고 있다.<sup>4)</sup>

본 연구에서는 LFP를 양극재로 적용한 배터리 모듈의 능동 냉각 방식과 수동 냉각 방식의 냉각 성능 특성을 파악하기 위해 셀투팩 배터리를 대상으로 냉각수를 이용한 능동 냉각 시스템과 PCM을 이용한 수동 냉각 시스템을 COMSOL Multiphysics의 Heat transfer와 Laminar flow를 사용하여 2종류의 냉각 시스템을 비교하였으며 PCM의 소재를 다르게 하여 해석을 진행한다.

## 2. 해석

### 2.1 배터리 사양

본 논문에서는 상업용 LFP 각형 배터리를 사용했다. Fig. 1<sup>5)</sup>은 본 논문에서 사용한 배터리의 내부 모습이다. Table 1과 Table 2에 배터리 셀에 적용된 소재와 열역학적 변수들을 정리하였다.

	Aluminum	Copper	Acryl	Jelly roll
Heat capacity (J/kg · K)	900	385	1470	975
Density (kg/m <sup>3</sup> )	2700	8950	1190	2560
Thermal Conductivity (W/m · K)	238	400	0.18	30.8

Table 1 Thermal model material properties

	양극재	음극재	전해질
Material	LFP	Graphite	LiPF6

Table 2 Material of battery cathode, anode and electrolyte

### 2.2 배터리 모듈

실제 냉각 장치의 성능과 비교하기 위하여 배터리 셀 9개를 2줄로 하여 총 18개를 하나의 모듈(Fig. 2)로 구성한다.

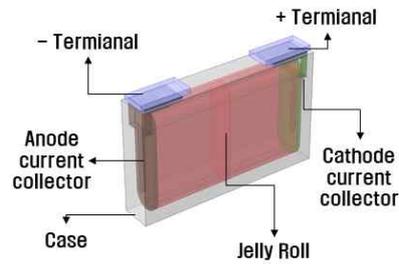


Fig. 1 Geometry of battery cell

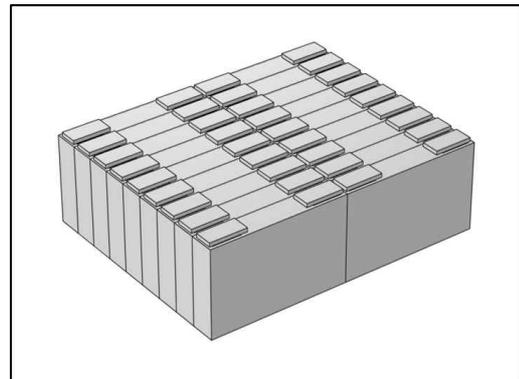


Fig. 2 Studied battery module

Dimension of cell	148 × 26.5 × 91 mm (Length × Width × Height)
-------------------	---

Table 3 Dimension of battery cell

### 2.3 배터리의 발열량

3D모델에 적용할 배터리의 발열량을 해석하기 위해 COMSOL Multiphysics로 Fig. 2와 같이 1D 모델을 모델링하였다.<sup>8)</sup> Table 4는 LFP를 양극재로 적용했을 때의 배터리의 전기화학적 변수들을 정리한 것이다.<sup>6)</sup>

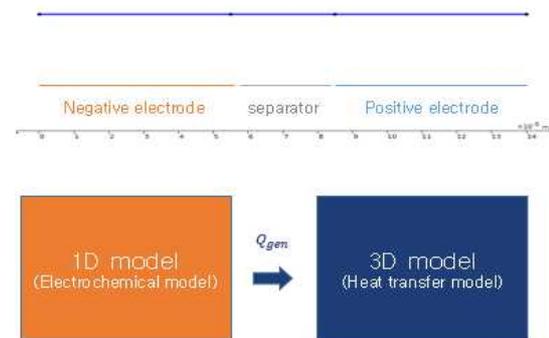


Fig. 3 1D battery heat generation model

Parameter(unit)	value
Solid phase Li-diffusivity of positive electrode (m <sup>2</sup> /s)	$1 \times 10^{-13}$
Solid phase Li-diffusivity of negative electrode (m <sup>2</sup> /s)	$3.9 \times 10^{-14}$
Particle radius of positive electrode (m)	$12.5 \times 10^{-6}$
Particle radius of negative electrode (m)	$8 \times 10^{-6}$
Electrolyte phase volume fraction of positive electrode	0.444
Electrolyte phase volume fraction of negative electrode	0.357
Electrode phase volume fraction of positive electrode	0.297
Electrode phase volume fraction of negative electrode	0.271
Filter phase volume fraction of positive electrode	0.259
Filter phase volume fraction of negative electrode	0.172
Max solid phase concentration of negative electrode (mol/m <sup>3</sup> )	31,370
Max solid phase concentration of positive electrode (mol/m <sup>3</sup> )	22,806
Initial concentration of negative active electrode material (mol/m <sup>3</sup> )	14,870
Initial concentration of positive active electrode material (mol/m <sup>3</sup> )	14,870
Solid phase conductivity of negative electrode (S/m)	100
Solid phase conductivity of positive electrode (S/m)	3.8
Bruggeman coefficient	1
Initial electrolyte salt concentration (mol/m <sup>3</sup> )	1000
Thickness of negative electrode ( $\mu$ m)	55
Thickness of separator ( $\mu$ m)	30
Thickness of positive electrode ( $\mu$ m)	55

Table 4 Electrochemical model properties

## 2.4 배터리 냉각 시스템 해석 모델

### 2.4.1 능동 냉각

실제 냉각 장치와 동일하게 해석하기 위해 셀투입에 적용된 냉각 장치를 배터리 모듈의 하단에 모델링하였다. 유체의 흐름은 층류유동으로 가정하고 냉각수는 에틸렌 글리콜 용액(ethylene glycol 50%)을 적용하였으며 평균 유속은 0.98m/s, 냉각수의 온도는 20℃로 적용하였다.

### 2.4.2 수동 냉각

PCM을 적용하기 위해서 실온에서 고체이며, 배터리를 충분히 냉각시킬 수 있는 잠열을 보유하고 있다고 판단되는 Paraffin wax를 PCM으로 선정하여 해석을 진행하였다. 또한 PCM의 잠열과

열전도도에 따른 온도 변화를 비교하기 위해 잠열이 조금 더 높은 Paraffin wax(OP44E)를 또 다른 PCM으로 선정하여 해석을 진행한다.

	Coolant
Heat capacity (J/kg · K)	3.3
Density (kg/m <sup>3</sup> )	1050.44
Thermal Conductivity (W/m · K)	0.3
Dynamic viscosity (Pa · s)	0.001538

Table 5 Thermophysical properties of the coolant

	Paraffin wax		Paraffin wax(OP44E)	
	Solid	Liquid	Solid	Liquid
Heat capacity (J/kg · K)	1905	2318	2000	2000
Density (kg/m <sup>3</sup> )	920	795	880	770
Thermal Conductivity (W/m · K)	0.21		0.2	
Melting point (°C)	40		40.6	
Latent heat (kJ/kg)	233		248	

Table 6 Thermophysical properties of PCM

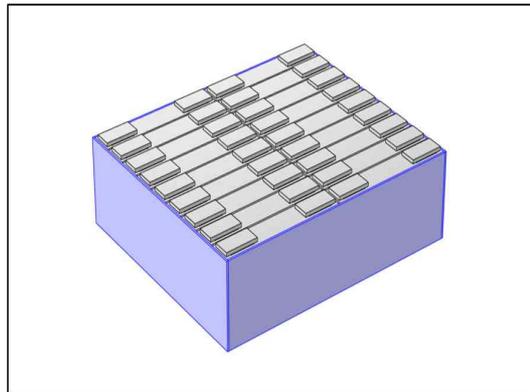


Fig. 4 Battery module with PCM geometry

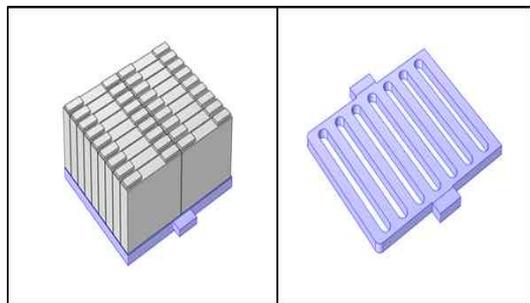


Fig. 5 Cooling fin and flow channel geometry

### 3. 해석 결과

#### 3.1 배터리 온도 변화 비교

냉각수를 이용한 능동 냉각 방법은 온도 변화를 비교하기 위해 실제 상용화된 셀투입 배터리의 실험값과 비교하였다. 실제 온도 측정은 모듈의 5부분에 온도 센서를 부착하여 진행된 것이다. 실제 배터리의 실험값과 비교하기 위해 3,000s의 해석 시간으로 온도센서가 부착된 곳과 동일한 5부분 (Fig. 6)의 온도 해석결과와 비교한다.

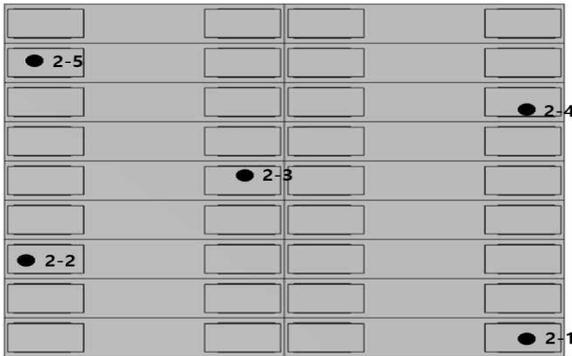


Fig. 6 Measuring point arrangement

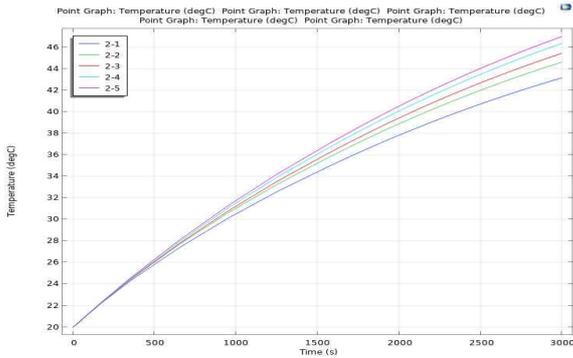


Fig. 7 Comparison temperature at measuring point

실제 배터리 모듈의 최고 온도는 2-3에서 42.5°C 인 것에 반해, Fig.7에서 해석결과는 2-5에서 최고온도 47.14°C로 나왔다. 또한 실제 배터리 모듈에서는 셀 간 온도차이가 작게 나왔지만, 해석 결과는 10°C 가까이로 비교적 크게 나왔다. 냉각수의 냉각효과로 비선형적인 그래프를 그리는 것을 알 수 있으며, 시간이 지남에 따라 온도 변화가 점점 작아지는 것을 확인 할 수 있다.

#### 3.2 배터리 온도 변화 (수냉식 vs PCM)

수냉식 냉각 방법과 PCM을 적용한 냉각방법의 냉각성능을 비교하기 위해 냉각 장치가 없는 배터

리 모듈의 최대 • 최소 온도와 평균 온도를 두 냉각 방식의 해석 결과와 비교하였다.

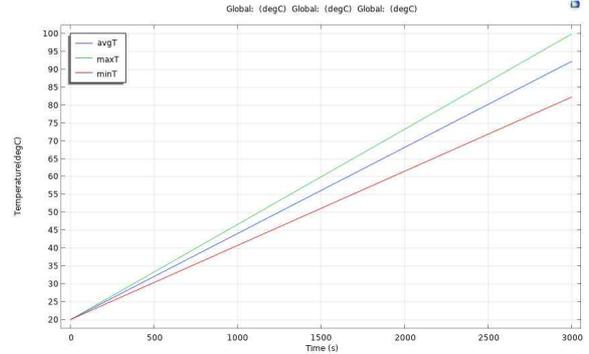


Fig. 8 Max/min/average Temperature of battery module

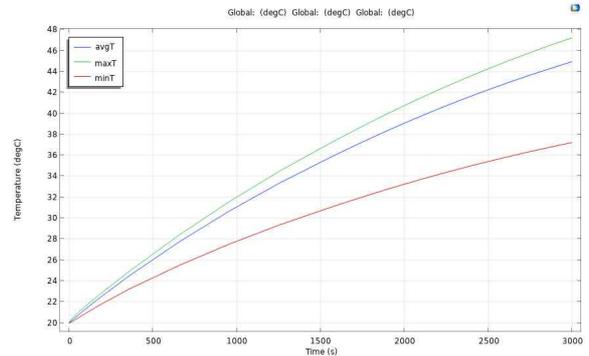


Fig. 9 Battery module temperature with liquid cooling(max/min/average)

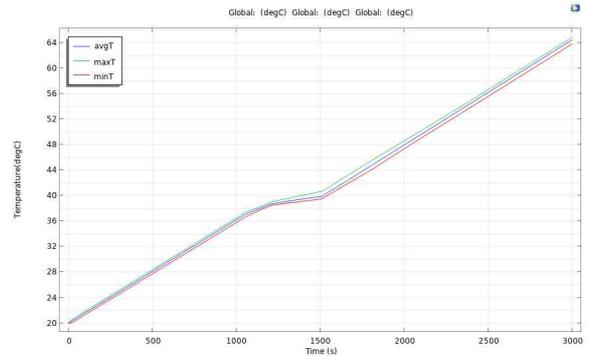


Fig. 10 Battery module temperature with PCM based cooling(max/min/average)

	Max temperature	Min temperature	Average temperature
battery module (°C)	99.97	82.32	92.28
Liquid cooling (°C)	47.14	37.08	44.87
Cooling with PCM (°C)	64.90	63.95	64.43

Table 7 Summary of measure max,min and average temperatures of three battery module

냉각 장치가 없는 배터리 모듈은 선형적으로 온도가 변함을 확인할 수 있다. 최고온도는 열폭주가 일어나는 온도인 100°C 가까이까지 올라갔으며, 배터리 셀 간 온도차는 17.6°C 로 큰 온도 차이를 보였다.

PCM의 냉각 특성을 알아보기 위해 냉각수를 이용한 능동 냉각 해석과 함께 기본 모델과 비교한다. 수냉식 냉각장치를 적용한 모델은 Fig.9에서 냉각효과로 비선형적으로 온도가 변하며 온도 변화가 점차 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 최대 온도는 47.14°C 로 냉각 장치가 없는 모델과 비교했을 때 적정 작동 온도 가까이 냉각이 되는 것을 알 수 있지만, 배터리 셀 간 온도차는 10°C 이상 나온 것을 알 수 있다.

PCM을 적용한 결과, Fig.10에서 PCM의 녹는 점이 40°C 이므로 PCM의 용융점까지는 온도가 선형적으로 변화하며 냉각효과가 없는 것을 볼 수 있다. 용융점에 도달하면 PCM을 통한 잠열을 이용한 냉각효과가 나타나기 시작함을 확인할 수 있다. 냉각 장치가 없는 모델과 비교했을 때 최대 온도는 64.9°C 로 온도 감소는 수냉식 냉각 방법보다 작았지만, 배터리 셀 간 온도차는 1°C 미만의 결과를 확인할 수 있다.

### 3.3 배터리 온도 변화 (PCM 소재)

PCM소재에 따른 냉각 효과를 알아보기 위해 열전도도는 비슷하지만 잠열이 다른 두 PCM 소재(Paraffin wax, Paraffin wax(OP44E))의 해석결과를 비교하였다.

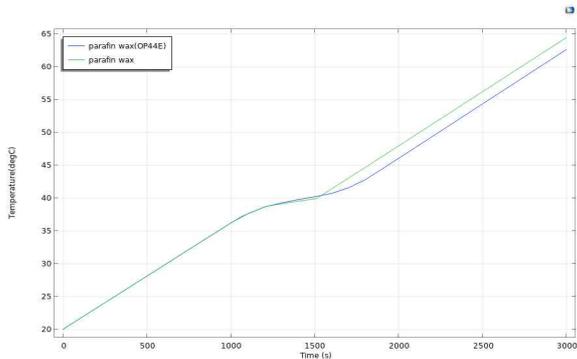


Fig. 11 Battery module temperature with two different PCM based cooling(average)

	Max temperature	Min temperature	Average temperature
Paraffin Wax(OP44E) (°C)	63.27	62.07	62.55
Paraffin Wax (°C)	64.90	63.95	64.43

Table 8 Summary of measure max,min and average temperatures of two different PCM based cooling

잠열이 더 높은 Paraffin wax(OP44E)는 용융점을 지나 냉각효과가 발생하는 구간이 Paraffin wax보다 300s 가량 더 길어, 최고 온도가 1.7°C 정도 감소하는 것을 확인할 수 있다.

## 4. 결론

본 논문에서는 능동냉각과 수동냉각의 냉각 성능을 비교하기 위해 수냉식 냉각 방법과 PCM 냉각 방법의 냉각 성능을 비교하고, PCM의 잠열에 따른 냉각 성능을 알아보기 위해 PCM소재에 따른 냉각 효과를 해석을 통해 비교하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 수냉식 냉각 방식은 배터리 온도를 크게 낮출 수 있지만, 해석 결과 배터리 셀 간 온도차는 PCM을 이용한 냉각 방식보다 감소 효과가 작았다.

2) PCM 냉각 방식은 수냉 냉각 방식과 달리 상변화시 잠열을 이용하므로 배터리 온도가 상변화 물질의 녹는점에 도달하기 전까지는 냉각이 일어나지 않는다.

3) 잠열이 더 큰 PCM소재를 사용하였을 때 냉각 효과가 일어나는 구간이 더 길어 최대 온도가 감소하는 것을 확인하였다.

4) PCM 냉각 시스템의 냉각 시스템의 효율을 개선하기 위해서는 실온에서 녹지 않고, 잠열이 큰 물질을 사용해야 하므로, PCM 소재에 대한 연구가 필요함을 알 수 있다.

## 후 기

종합설계를 통해 상용 소프트웨어를 다루는 능력을 기르고 종합설계를 비롯한 미래자동차공학과에서 진행했던 과제들을 통해 문제해결능력을 기르는 계기가 되었습니다. 이번 연구에서는 수냉식 냉각 방법과 PCM소재에 따른 냉각효과를 비교하는 것에 그쳤지만 해석을 진행하기 위해 알아보았던 자료들에

서 더 많고 복잡한 내용들이 있다는 것을 알았습니다. 그러나 학부생 수준으로는 이해할 수 없는 내용들이 많아 할 수 있는 부분들에만 집중하여 연구를 진행하였습니다. 연구 처음부터 끝까지 많이 부족했지만 교수님께 지도를 받으며 스스로 결정하고 진행하면서 그 동안 배웠던 것들을 정리하는 시간을 가질 수 있었습니다. 감사합니다.

### References

- 1) Kai Shen, Jieyu Sun, Yuejiu Zheng, Chengshan Xu, Huaibin Wang, Shuyu Wang, Siqi Chen and Xuning Feng, "A comprehensive analysis and experimental investigation for the thermal management of cell-to-pack battery system", Applied Thermal Engineering, Volume 211, 2022,
- 2) Orhan Kalkan, Ali Celen and Kadir Bakirci, "Experimental and numerical investigation of the LiFePO<sub>4</sub> battery cooling by natural convection." Journal of Energy Storage, Volume 40, 2021.
- 3) Tianshi Zhang, Qing Gao, Guohua Wang, Yanlong Gu, Yan Wang, Wendi Bao and 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, P655-662.
- 4) Maan Al-Zareer, Ibrahim Dincer and Marc A. Rosen, "A novel phase change based cooling system for prismatic lithium ion batteries", International Journal of Refrigeration, Volume 86, 2018, P203-217.
- 5) Kleiner J, Komsiyiska L, Elger G and Endisch C. "Thermal Modelling of a Prismatic Lithium-Ion Cell in a Battery Electric Vehicle Environment: Influences of the Experimental Validation Setup", Energies. 2020.
- 6) Sandeep Dattu Chitta, Chaithanya Akkaldevi, Jeevan Jaidi, Satyam Panchal, Michael Fowler and Roydon Fraser, "Comparison of lumped and 1D electrochemical models for prismatic 20Ah LiFePO<sub>4</sub> battery sandwiched between minichannel cold-plates", Applied Thermal Engineering, Volume 199, 2021.
- 7) Hwabhin Kwon and Heesung Park. (2016). Numerical "Investigation of Cooling Performance of Liquid-cooled Battery in Electric Vehicles." Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - B, 40(6), 403-408
- 8) Liquid-Cooled Lithium-Ion Battery Pack, <https://www.comsol.com/model/liquid-cooled-lithium-ion-battery-pack-10368>