

# LFP 각형 배터리의 냉각시스템 분석

김 응 환 · 박 찬 우 · 민 승 재

한양대학교 미래자동차공학과

## Cooling Analysis of LFP Prismatic Battery

Eunghwan Kim · Chanwoo Park · Seungjae Min

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

**Abstract** : As the demand of the electric vehicle increased, the importance and demand of the ion lithium battery also risen. The battery mounted in electric vehicle can cause thermal runaway which can intimidate the driver's safety. For preventing the fire issues from battery, cooling device for batteries is required. There are several methods to control the temperature of battery. In this study, LFP prismatic model is simulated by COMSOL Multiphysics and two method of cooling method is used, active cooling and passive cooling. In active cooling, cooling pins are arranged between the battery cells and in passive cooling, the battery module is covered with PCM(Phase Change Material). As a result, the performance of active cooling was better than passive cooling, and the cooling performance would be better if the thickness of PCM increases but the number of battery will be decrease because of the volume of PCM.

**Key words** : Lithium ion battery(리튬이온배터리), Active cooling(능동 냉각), Passive cooling(수동 냉각), Computational fluid dynamics(전산유체역학), Liquid cooling(수냉), Phase Change Material(상변화물질)

### 1. 서 론

최근 탄소배출, 연비와 자동차에 대한 규제가 점점 엄격해지고, 전기자동차 보급 확대 정책으로 인해 전기자동차의 수요가 증가하고 있다. 이에 따라 전기자동차에 탑재되는 이온리튬배터리의 수요 또한 증가하고 있다. 전기자동차에는 자동차의 연비를 좌우하는 대용량의 배터리가 탑재되어 많은 열을 발생시킨다. 열폭주가 일어나지 않기 위해서 배터리는 20℃에서 45℃도 사이의 작동온도를 유지해야 하며, 배터리 셀이 온도로 인해 먼저 충전되거나 방전이 되어 과충전이나 과방전 현상이 일어나 배터리 수명에 영향을 끼칠 수 있기 때문에 셀 간 온도 격차가 7℃ 이하로 유지되어야 한다. 온도가 높아질 경우, 열폭주 현상이 일어나 폭발이나 화재를 일으켜 운전자에 생명에 위협을 가할 수 있다. 배터리의 이상적인 온도를 유지하기 위해서 열을 해소할 수 있는 냉각장치가 요구된다.

배터리의 냉각 방법으로는 크게 두 가지, 능동 냉각(Active cooling)과 수동냉각(Passive cooling)으로 나뉜다.

능동냉각(Active cooling)은 배터리의 열을 해소하기 위해 별도로 전력을 소모하는 방식이며, 대표적으로 공냉(Air cooling)과 수냉(Liquid Cooling)이 있다.

수동냉각(Passive cooling)은 별도의 전력을 소모하지 않는 방법으로, 주로 상변화물질(Phase change material)이나 히트파이프(Heat pipe)를 이용하여 자연적으로 열을 해소하게 하는 방식이다. 전력을 따로 소모하지 않는 것이 매우 큰 장점이며, 특히 PCM을 위주로 다양한 연구들이 이루어지고 있다.

본 논문에서는 LFP 각형 배터리를 모듈단위로 배치하여 앞서 언급했던 능동 냉각과 수동 냉각의 성능을 비교하기 위해서 COMSOL Multiphysics의 Heat transfer module과 Laminar flow를 이용하여 비교 분석을 진행하였다.

## 2. 해석 조건

### 2.1 배터리 모델

본 논문에서는 상용화된 LFP 각형 배터리를 이용하여 해석을 진행하였다. Fig. 1은 LFP 각형 배터리의 기하학적 모델이며, Table 1과 Table 2에 배터리 셀에 포함되는 소재 및 물성치를 정리하였고, 배터리 셀을 2x9개, 총 18개로 하나의 모듈을 구성하였으며, 총시간은 3,000초로 설정하여 해석을 진행하였다.

|                                | 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 | <b>LFP</b> | <b>Graphite</b> | <b>LiPF6</b> |

Table 2 Materials of battery

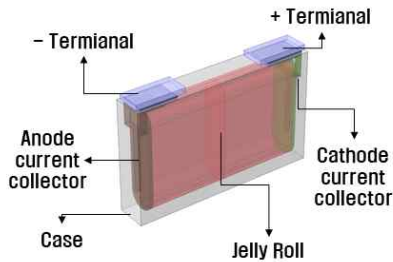


Fig. 1 Geometry model of battery cell

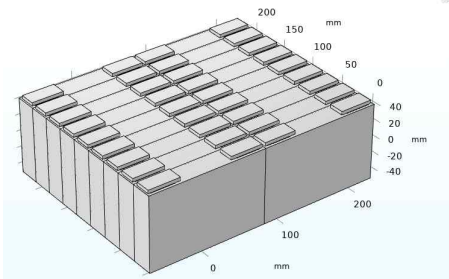


Fig. 2 Geometry model of battery module

### 2.2 발열량

3D 모델에 대입할 발열량을 계산하기 위해서 COMSOL Multiphysics의 Lithium ion battery module을 사용해 1D 모델을 만들고, 배터리의 양극재, 음극재, 분리의 소재를 정하고, 그에 맞는 전기화학적 물성값들을 대입하여 발열량을 3D 모델에 대입하였다.

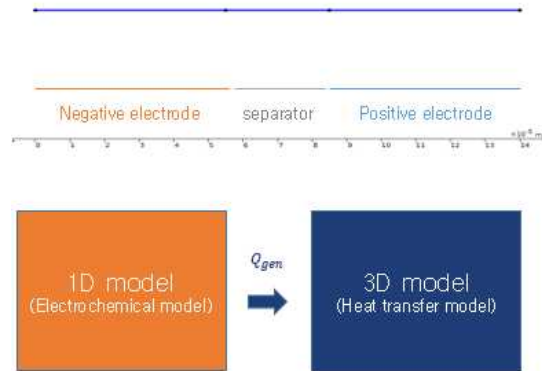


Fig. 3 1Dimension model

| 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)                                         | $12.6 \times 10^{-8}$ |
| Particle radius of negative electrode (m)                                         | $5 \times 10^{-6}$    |
| 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                   |

|                                                                    |      |
|--------------------------------------------------------------------|------|
| Initial electrolyte salt concentration ( $\text{mol}/\text{m}^3$ ) | 1000 |
| Bruggeman coefficient                                              | 1    |
| Thickness of negative electrode ( $\mu\text{m}$ )                  | 55   |
| Thickness of separator ( $\mu\text{m}$ )                           | 30   |
| Thickness of positive electrode ( $\mu\text{m}$ )                  | 55   |

Table 3 Electrochemical properties of battery

### 2.3 Active Cooling

정확한 비교분석을 위해서 실제로 사용되고 있는 냉각장치를 배터리 모듈에 장착했고, 냉각수는 에틸렌 글리콜 용액으로 채택하여 해석을 진행하였다.

|                                                             | Coolant  |
|-------------------------------------------------------------|----------|
| Heat capacity ( $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$ )       | 3.3      |
| Density ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )                          | 1050.44  |
| Thermal Conductivity ( $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ) | 0.3      |
| Dynamic viscosity ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ )            | 0.001538 |

Table 4 Properties of coolant

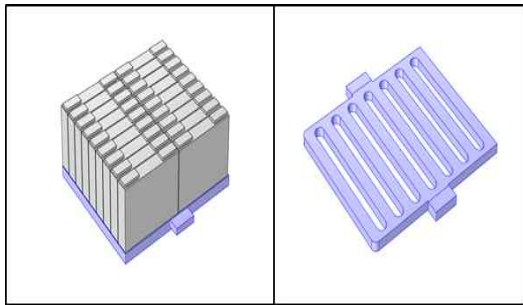


Fig. 4 Geometry model of coolant channel

### 2.4 Passive Cooling

Active cooling과의 비교를 위해서, 각 배터리 셀 사이에 배치된 단열재를 PCM으로 대체하여 배치하였으며, 현재 연구가 가장 활발히 이루어지고 있는 소재인 두 종류의 Paraffin wax로 채택하여 해석을 진행했다.

### 3. 해석 결과

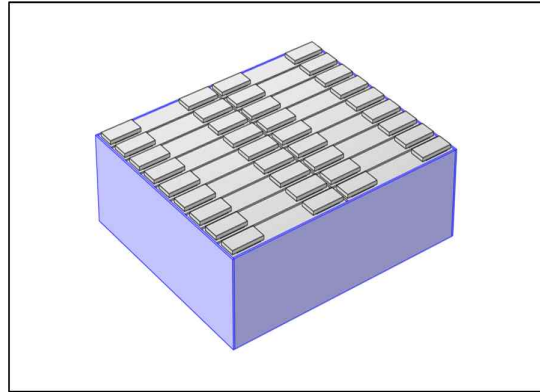


Fig. 5 Geometry model of PCM

|                                                             | Parafin wax |        | Parafin wax(OP44E) |        |
|-------------------------------------------------------------|-------------|--------|--------------------|--------|
|                                                             | Solid       | Liquid | Solid              | Liquid |
| Heat capacity ( $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$ )       | 1905        | 2318   | 2000               | 2000   |
| Density ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )                          | 920         | 795    | 880                | 770    |
| Thermal Conductivity ( $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ) | 0.21        |        | 0.2                |        |
| Melting point ( $^{\circ}\text{C}$ )                        | 40          |        | 40.6               |        |
| Latent heat ( $\text{kJ}/\text{kg}$ )                       | 233         |        | 248                |        |

Table 5 Properties of PCM

### 3.1 Reference Model 결과

냉각 장치 없이 해석을 진행한 결과로는 최고온도가  $99.97^{\circ}\text{C}$ 까지 선형적으로 상승하였으며, 최소 온도는  $82.32^{\circ}\text{C}$ 로 셀간 최대 온도 격차는  $17.6^{\circ}\text{C}$  정도로 이상적인 셀간 온도 격차인  $7^{\circ}\text{C}$  보다 훨씬 큰 온도 격차를 보였다.

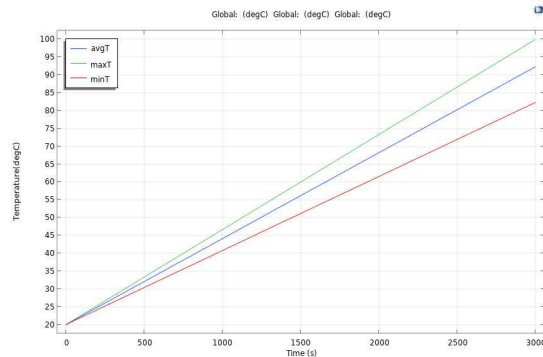


Fig. 6 Temperature of battery module without cooling device

### 3.2 Active Cooling 결과

냉각수를 이용한 해석 결과이다. 총 다섯 지점에 대한 온도 변화 그래프이며, 실제 진행한 실험 값을 가져와서, 총 다섯 부분에서 온도 비교를 진행하였다.

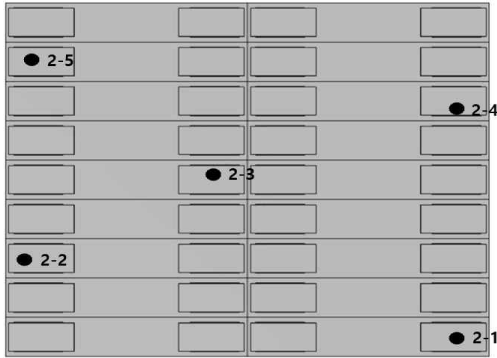


Fig. 7 Locations of five points

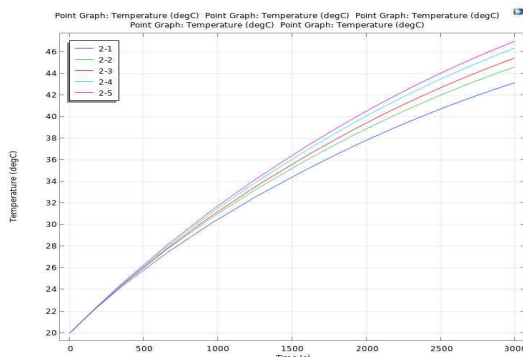


Fig. 8 Temperature of battery module with liquid cooling

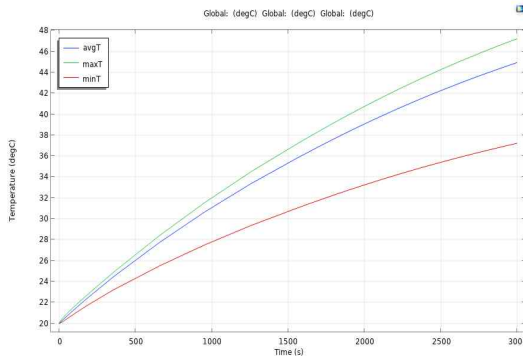


Fig. 9 Maximum, minimum and average temperature of battery module with liquid cooling

우선, 해석 결과를 보면, 비선형적으로 온도가 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 실험 값과 해석 결과는 다소 차이가 있었다. 실험값에서의 최고온도는 42.5℃, 해석 값에서는 47.1℃로 ℃도가량의 차이가 났으며, 셀 간 온도 역시 실험값에서는 9℃ 정도로, 이상적인 온도 격차의 기준보다 2℃

정도 높은 것을 확인했다.

### 3.2 Passive Cooling 결과

배터리 사이사이에 배치된 단열재를 상변화물질로 대체하여 해석을 진행하였다.

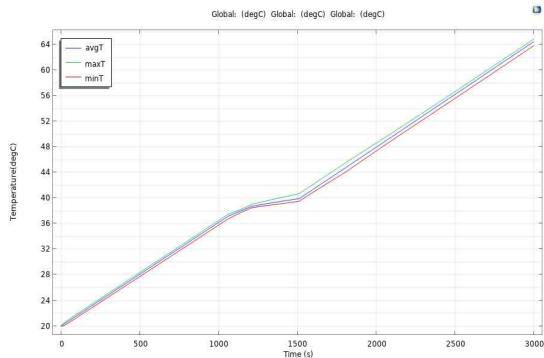


Fig. 10 Maximum, minimum and average temperature of battery module with PCM cooling

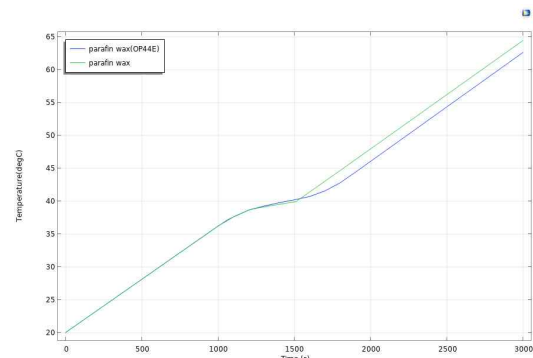


Fig. 11 Temperature of battery module with different PCM

|                         | Max temperature | Min temperature | Average temperature |
|-------------------------|-----------------|-----------------|---------------------|
| Paraffin Wax(OP44E) (℃) | 63.27           | 62.07           | 62.55               |
| Paraffin Wax (℃)        | 64.90           | 63.95           | 64.43               |

Table 6 Maximum, minimum and average temperature of battery module with PCM cooling

각기 다른 상변화물질을 배치하여 해석을 진행하였으며, 그래프를 보면 일정 구간에서 상변화물질이 상을 변화시키며 온도 상승 폭이 대폭 낮아진 것을 확인할 수 있다. 최대 온도는 각각 63.27℃, 64.90℃로 안정적인 배터리의 온도 범위보다 다소 높은 것을 확인할 수 있었다. 하지만, 배터리 셀 간 온도 격차는 거의 없을 정도로 매우 작은 값을 보였다. 마지막으로, Paraffin Wax(OP44E)가 더 높은 잠열을

보유하기에, 더 많은 열을 흡수한 것으로 유추할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 냉각수를 이용한 냉각 방법과 상변화물질을 이용한 냉각성능을 알아보고, 비교분석을 진행하였다.

1) 냉각수를 이용한 냉각 방식은 배터리 모듈의 발열을 억제하기 가장 좋은 방법이지만, 이상적인 셀 간 온도 격차를 살짝 벗어났다.

2) 상변화물질을 이용한 냉각 방법은, 셀 간 온도 격차가 크게 나지 않지만, 3,000초에서 이상적인 온도 범위를 벗어났다.

3) 상변화물질의 두께를 더 두껍게 하면 더 많은 열을 흡수 할 수 있지만, 늘어난 부피로 인해 배터리 탑재량이 감소할 수 있으며, 총 배터리 용량, 최대 주행거리가 감소할 수 있다.

4) 단일 상변화물질로 냉각하는 방식은 냉각수를 이용한 냉각 방법보다 성능이 다소 떨어지며, 아직 상변화물질에 관한 연구가 필요하다.

#### 후 기

학부 과정 이후로 COMSOL 소프트웨어를 다른 방면으로 적용해 조금 더 깊이 이해하고, 다양한 기능들을 적용하여 연구할 수 있어서 유익했다. 리튬이온배터리는 전기화학적 요소들이 많아 교수님의 지도를 받으며, 할 수 있는 선에서 연구를 진행하는 것에 집중했으며, 혼자 할 수 있는 정도, 계획 수립 등 1년 동안 진행된 프로젝트를 통해 나 자신이 조금은 발전한 것에 뿌듯하다. 또한, 학부 과정 동안 수강했던 모든 수업을 토대로 종합하여 연구한 것에 대해 뜻깊었다.

#### 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, pp203–217.
- 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, 40(6), pp403–408.
- 8) Liquid-Cooled Lithium-Ion Battery Pack, <https://www.comsol.com/model/liquid-cooled-lithium-ion-battery-pack-10368>

,