



에너지 저장장치용 각형 리튬이온 전지모듈의 방전시 발열특성 평가

Evaluation of Heat Generation Characteristics during Discharging of Prismatic Lithium-Ion Battery Module for Energy Storage System

강우선* · 이진경** · 이준현*†

Woo-Seon Kang*, Jin-Kyung Lee** and Joon-Hyun Lee*†

(Received 03 July 2018, Revision received 20 December 2018, Accepted 09 January 2019)

Abstract: Lithium-ion batteries with high energy density are being used to construct large-capacity energy storage devices. It is important to maintain the proper temperature because the lithium ion battery has different performance depending on the temperature. In this study, the heat characteristics of the lithium iron phosphate (LFP) battery while discharging were evaluated; the heat characteristics of the battery were also evaluated when the battery was configured as a module. A battery with a capacity of 100 Ah and a module of four cells connected in series were discharged at a rate of two C-rate, and the temperature of battery was measured by using a temperature sensor and a thermal imaging camera. The heat generation was also calculated and compared with the predicted temperature. The temperature change of the module with and without the fan was measured according to the distance between the cells. When the fan was operated, the average temperature dropped by about 1.5°C. As the distance between cells increased, the temperature also decreased.

Key Words : Lithium Ion Battery, LFP, Thermal Imaging Camera, Heat Generation, ESS

— 기 호 설 명 —

ρ : 밀도 [kg/m³]

C_p : 열용량 [J/kg·K]

k : 열전도도 [W/m·K]

q_g : 발열량 [W]

q_c : 방열량 [W]

U_{oc} : 개방회로전압 [V]

U : 터미널전압 [V]

u : 유속 [m/s]

L : 두께 [m]

A : 면적 [m²]

*† 이준현(<https://orcid.org/0000-0001-6516-7934>) : 교수, 부산대학교 기계공학부

E-mail : johlee@pusan.ac.kr, Tel : 051-510-2430

*강우선 : 대학원생, 부산대학교 기계공학부

**이진경 : 교수, 동의대학교 기계자동차로봇부품공학부

*† Joon-Hyun Lee(<https://orcid.org/0000-0001-6516-7934>) : Professor, School of Mechanical Engineering, Pusan National University

E-mail : johlee@pusan.ac.kr, Tel : 051-510-2430

*Woo-Seon Kang : Graduate student, School of Mechanical Engineering, Pusan National University

**Jin-Kyung Lee : Professor, Division of Mechanical, Automobile and Robot Component Engineering, Donggeui University.

T_{surf} : 표면온도 [°C]
 T_{amb} : 대기온도 [°C]
 d_g : 전지간 간격 [mm]

1. 서 론

2차 전지¹⁻³⁾ 중 리튬이온전지는 에너지 밀도가 높아 휴대용 기기에 주로 사용되어 왔다. 최근 전기차의 발전으로 리튬이온전지에 대한 많은 연구가 이루어지고 있고⁴⁾, 스마트 그리드(Smart grid)에서 중요한 역할을 하는 에너지 저장장치(Energy storage system, ESS)에 적용하기 위한 연구 또한 활발히 진행 중이다. 리튬이온전지는 낮은 온도에서 내부저항의 상승으로 전지의 성능이 감소하는 반면, 높은 온도에서는 SEI(Solid electrolyte interface)의 분해 등의 이유로 열화가 발생한다.⁵⁾ 따라서 전지의 온도를 25~35°C로 유지하는 것이 중요하며 전지온도를 유지시키기 위한 냉각설계를 위해 전지의 발열을 예측하는 것이 대단히 중요하다. 전지의 발열은 Bernardi 등⁶⁾의 energy balance equation에 의해 계산이 가능하며, 이를 이용하여 Panchal 등⁷⁾은 수냉으로 방열하는 파우치 타입 전지의 발열을 계산하였다. Damay 등⁸⁾은 대용량 각형 전지의 온도를 예측하고 실험으로 검증하였다. 본 연구에서는 ESS에 대한 해석의 전단계로 모듈에 대한 냉각효과를 평가하기 위해 각형 LFP 전지와 4개의 전지로 구성된 모듈의 방전시 온도변화를 열전대와 열화상카메라를 이용하여 평가하였다. 이와 같은 연구 결과를 이용하여 ESS의 전체 구조물에 대한 시뮬레이션의 기초 자료 사용하고자 하였다.

2. 리튬이온전지의 발열

본 연구에서 사용한 100 Ah LFP(LiFePO₄)리튬이온전지는 Fig. 1과 같이 내부구조는 양극, 음극, 분리막이 여러 층으로 적층된 구조로 모든 층을 구현하여 계산하기에는 해석하는데 많은 시간이 소요된다. 따라서 식 (1), (2)를 이용하여 밀도, 열용량, 열전도도를 하나의 물질로 대체하여 적용하

였다.

$$k_{long} = \frac{\sum_i k_i A_i}{\sum_i A_i}, k_{trans} = \frac{\sum_i L_i}{\sum_i L_i / k_i} \quad (1)$$

$$\rho C_p = \frac{\sum_i \rho_i C_{p,i} V_i}{V} \quad (2)$$

Table 1의 각 재료의 물성치를 이용하여 이들을 계산하면 $k_x = k_y = 19.6 \text{ W/mK}$, $k_z = 4.8 \text{ W/mK}$, $\rho C_p = 2457 \text{ kJ/m}^3\text{K}$ 이다.

식 (4)는 시간에 따른 전지의 발열량의 방정식을 나타낸 것으로 내부저항에 의한 발열과 화학반응으로 인해 발생하는 엔트로피 변화에 의한 발열을 포함한다.

Bernardi의 energy balance 식에 의하면 농도 차

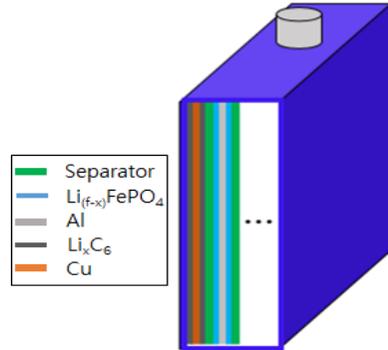


Fig. 1 The structure of LFP (LiFePO₄) battery

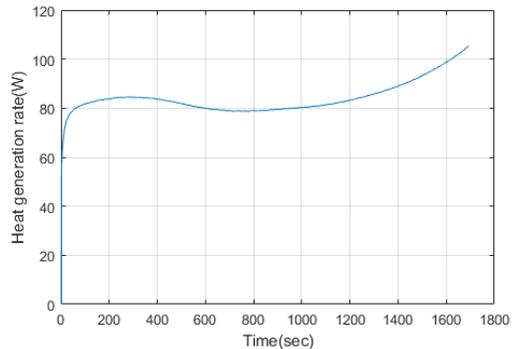


Fig. 2 Heat generation rate of the battery during 2C-rate discharging

에 의한 발열과 상변화에 의한 발열도 고려해야 하지만 ESS에서의 충전과 방전은 동적이지 않고 상변화에 대한 영향이 적어, 본 연구에서는 제외하였다. 식 (4)를 이용하여 시간에 대한 발열량을 계산하면 Fig. 2와 같다. 계산한 발열량을 식 (3)에 적용하여 해석을 수행하였으며, 강제대류에 의한 냉각효과만 있다고 가정하였고 냉각에 의한 발열량은 식 (5)와 같다.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q_g - q_c \quad (3)$$

$$q_g = I(U_{oc} - U - T \frac{dU_{oc}}{dT}) \quad (4)$$

$$q_c = hA(T_{surf} - T_{amb}) \quad (5)$$

그리고 해석 결과의 타당성을 검증하기 위하여

Table 1 Physical properties of each material constituting a lithium ion battery⁷⁾

	Density (kg/m ³)	Heat Capacity (J/kg·K)	Thermal conductivity (W/m·K)
Carbonaceous electrode	1347	1437	1.04
Lithium electrode	2329	1269	1.58
Al foil	2702	903	238
Cu foil	8933	385	398
PP separator	1009	1978	0.33
Al case	2700	900	210

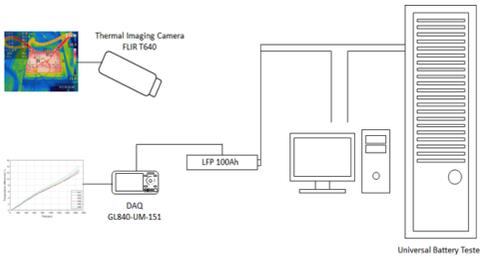


Fig. 3 Schematic diagram of measuring the battery temperature

Fig. 3과 같이 열화상 카메라와 온도센서를 단셀에 부착하여 온도측정을 수행하였다. Universal battery tester를 이용하여 LFP 100 Ah 전지를 2C-rate로 방전을 제어하고, 온도센서를 전지에 부착하여 DAQ를 이용해 초당 1회의 간격으로 온도를 측정하였다. 동시에 열화상카메라를 이용하여 분당 1회의 간격으로 전지표면의 온도를 측정하였다.

열화상카메라는 온도센서 부착없이 물체의 온도를 측정할 수 있으며 많은 장점을 가지고 있기 때문에 본 연구에서는 열화상카메라를 이용하여 온도를 측정하고 온도센서에서의 결과와 비교, 검토하였다. 또한 본 연구에서 전지의 온도측정을 위해 총 3회 실시하여 평균화하였으며 외부환경에 의한 영향을 제거하기 위해 일정한 항온 항습의 조건에서 실시하였기 때문에 실험오차는 거의 발생하지 않았다. 모듈의 해석을 위해 상용프로그램인 솔리드웍스 프로그램을 이용하였다.

3. 실험 및 해석 결과

3.1 단셀의 방전시 온도 변화 특성

본 연구에서는 모듈의 열특성을 평가하기 위하여 먼저 단셀의 열특성을 평가하였다. Fig. 4는 시간에 대한 초기온도 25°C 대비 상승한 온도 차이에 대한 해석결과와 측정 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 600초까지는 열전대와 열화상카메라의 측정값이 거의 일치하지만, 이후 오차가 발생하면

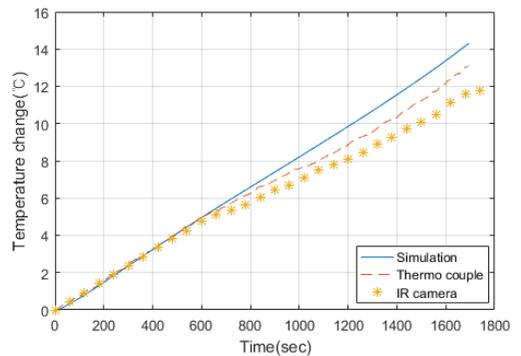


Fig. 4 Temperature difference relative to initial temperature during 2C-rate discharging by measuring and simulating



Fig. 5 Battery temperature distribution of single cell at the end of discharge taken by the thermal imaging camera

서 방전 최종 시점에서는 1.5°C의 차이가 나타났다. 열화상카메라의 경우 주변의 온도, 전지 표면의 반사의 이유로 낮은 온도값이 측정되었다. Fig. 2의 발열량을 적용하여 해석한 결과 방전 종료시점의 온도변화는 14.1°C로 측정값에 비해 높게 나타났다. 식 (4)를 이용한 발열량과 이를 적용한 해석을 이용하여 모듈, 트레이 구조의 에너지 저장장치에 대한 보수적인 냉각 설계가 가능함을 알 수 있었다. 본 연구에서는 셀의 각부에서 온도의 차이를 검토하기 위하여 Fig. 5와 같이 여러 부분에 열전대를 부착하여 온도를 측정하고 열화상 카메라를 이용하여 방전 종료시점($t = 1,680$ s)에서 전지 온도분포를 촬영한 결과를 나타내었다. 그림에서 보여주는 바와 같이 전지의 중앙이 가장 높은 온도를 보이고 전지 상면에서의 온도편차는 1°C이다. 단자 부근이 비교적 낮은 온도를 보이는데, 이는 셀 내부 구조에 의해 내부 발열원과 케이스가 직접 접촉하지 않고 내부 공기층과 닿는 부분이기 때문이다. ESS의 냉각 설계에 있어 전지의 최대온도가 중요하므로, 전지 중앙부분의 온도를 기준으로 설계 또는 평가를 수행하는 것이 바람직함을 알 수 있다.

3.2 모듈의 방전시 온도 변화 특성

모듈을 구성하기 위해 4개의 전지를 Fig. 6과 같이 전지 간 간격(d_g)을 1 mm로 하여 수직으로

쌓아 올리고 직렬로 연결하였다. 온도측정을 위해 각 셀의 상하면 중앙에 온도센서를 부착하여 셀의 온도를 측정하였다. 그리고 셀들이 케이스에 들었 있지 않을 때(Fig. 6(a))와 케이스 내부에 셀을 설치하였을 때(Fig. 6(b))의 열특성을 평가하였으며 또한 케이스 내부에 셀이 있는 경우 팬(Fan)

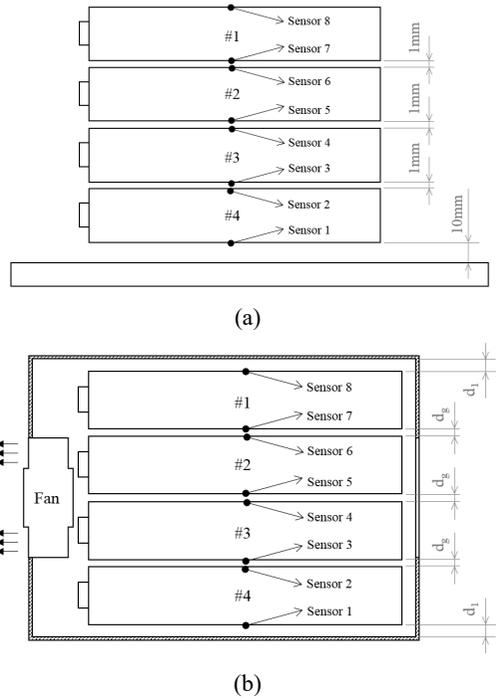


Fig. 6 Configuration of serial-connected module and sensor position (a)without case, (b)with case

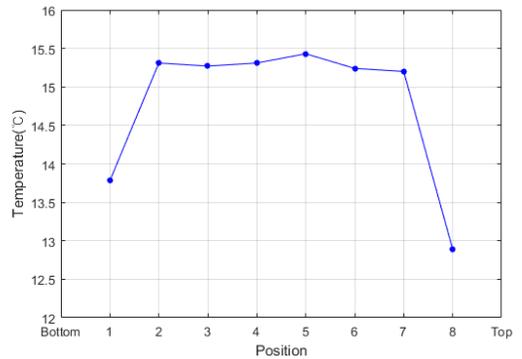


Fig. 7 Temperature difference relative to initial temperature at each sensor position

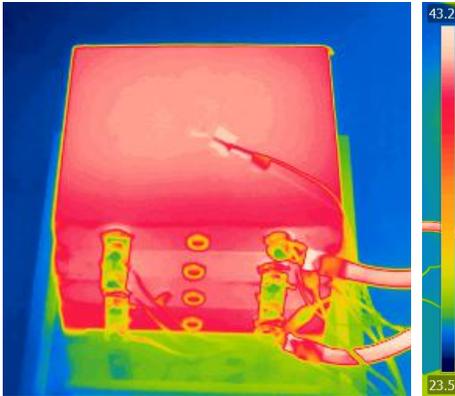


Fig. 8 Battery temperature distribution of module at the end of discharge taken by the thermal imaging camera

을 가동했을 때와 가동하지 않았을 때 각각 온도 온도의 특성에 대하여 평가하였다. 그림에서와 같이 위에서부터 1번, 2번, 3번, 4번으로 셀의 번호를 부여하였으며 센서의 번호는 아래에서 위로 순차적으로 번호를 적용하였다.

Fig. 7은 Fig. 6(a)와 같이 케이스에 들어있지 않은 경우에 대하여 방전 종료 시점에서 각 온도센서 위치에서의 측정된 온도를 나타내었다. 셀 4번의 하면에서의 온도는 약 13.8°C 정도를 나타내었으며, 상면에서는 하면에 비하여 약 1.5°C 상승한 값을 나타내었고, 셀3번과 셀2번의 상하면 그리고 셀 1번의 하면에서의 온도는 약 15.3°C 정도를 나타내었으며, 셀 1번의 상면에서는 12.9°C 정도의 온도분포를 나타내었다. 따라서 단셀에 비하여 모듈로 구성했을 때 셀 1번의 상면에서의 방전 완료 온도는 단셀보다 약 0.7°C 높은 온도를 보인다. 전지 사이의 온도는 가장 아랫면의 온도 대비 약 1.5°C 상승하였으며 가장 윗면의 표면 온도보다 2.4°C 높았다. 모듈에서 최상부의 온도가 최하부의 온도에 비하여 낮게 나타는 것은 셀 4번의 하면과 10 mm 떨어진 곳에 벽을 하나 설치한 경우와 제일 윗면에서는 아무것도 설치하지 않고 자유로운 공기흐름으로 나타내었기 때문에 아랫부분의 온도가 윗부분에 비하여 조금 높게 나타나 상하부의 온도차가 발생함을 알 수 있었다. 또한 본 실험의 결과 전지 사이 간격이 1 mm로 자연대

류에 의한 냉각효과가 거의 없어 높은 온도를 나타남을 알 수 있었다. Fig. 8은 방전 종료시점에서 열화상 카메라를 이용해 촬영한 모듈의 온도분포이다. 셀1의 상면 중앙의 온도가 초기온도대비 14°C 상승하였다. 그리고 단셀과 같이 전지 상면에서의 온도 편차는 1°C 정도 나타내었다.

3.3 팬의 작동 및 전지 간 간격에 대한 냉각 효과

본 연구에서는 팬의 작동여부에 따른 온도의 변화를 평가한 결과 Fig. 9와 같은 결과를 얻었다. 그림에서 보여주는 바와 같이 전지간격이 1 mm 일 경우 냉각 팬 미가동 시에 전지와 전지 사이(sensor position 2~7)의 평균 온도 상승이 15.5°C로 측정되었고, 1, 8번 위치에서는 평균 14.5°C 상승하였다. 팬을 가동했을 때 전지 사이에서는 팬 미가동 시보다 평균 1.5°C 하락한 반면 1, 8번 위치에서는 평균 4°C의 큰 하락이 발생하여 강제대류에 의한 유동이 원활하여 냉각이 잘 이루어짐을 알 수 있었다. Fig. 10은 4개의 전지를 직렬로 연결한 모듈을 케이스 내부에 설치한 경우, 전지 간 간격을 1~6 mm까지 조정 하고 냉각 팬을 가동하여 전지 간 간격이 전지의 냉각에 미치는 효과를 측정된 결과를 나타낸 것이다. 냉각 팬 가동 시에 전지 간 간격이 변화함에 따라 1, 8번 위치에서는 표준편차가 0.5°C 정도 나타났으며, 2~7번 위치에서는 전지간 거리가 증가함에 따라 점차적으로

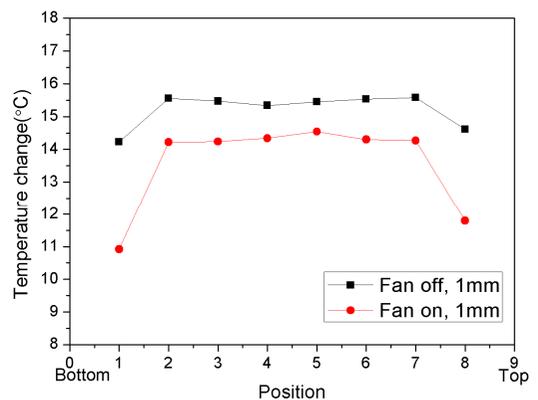


Fig. 9 Temperature change at each sensor position by fan on or off

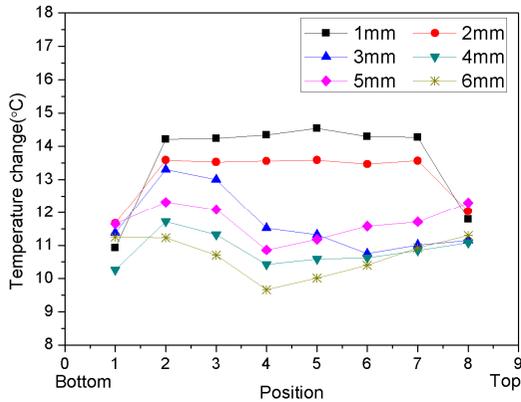


Fig. 10 Temperature change at each sensor position according to the distance between the battery(fan on)

온도변화가 감소함을 알 수 있었으며, 전지와 전지 사이에서는 냉각효과의 차이가 확연히 측정되었다. 전지간 거리가 3 mm일 경우, 2 mm에 비해 4~7번 위치의 하락 온도는 평균 2.3°C 이고 전지간 거리가 3 mm 이상부터 전지와 전지사이의 유동이 개선됨을 볼 수 있다. 전지간 거리가 4 mm부터는 2, 3번 위치에서도 큰 온도 하락이 측정 되었으며, 5 mm의 전지간 거리에서는 4 mm에 비하여 온도가 다시 상승하는 결과를 나타내었다. 특히 3 mm인 경우 중앙부위에서 냉각효과가 크며, 5 mm인 경우 다른 양상을 보여주는데, 이것은 간격에 따른 유동 및 팬에 의한 강제대류등 복합적인 요인에 의해 발생하는 결과로 사료된다. 따라서 본 연구결과와 추후 시뮬레이션에 따른 해석결과를 비교함으로써 정확한 결론을 도출할 수 있을 것으로 사료된다. 한편 전지간 간격이 3 mm 이상이면 중간에 있는 전지들의 냉각효과는 확실하게 발생함을 알 수 있었다. 또한 1번, 8번 위치의 표준 편차가 0.5°C이며, 외부로부터 유입된 공기가 4개의 전지를 균일하게 냉각함을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 ESS의 열유동해석 및 냉각효과

를 해석하기 위한 기초자료로써 모듈의 전지 배치에 대한 냉각효과를 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 단셀에서 초기온도 25°C 대비 상승한 온도 차이를 측정된 결과 600초까지는 열전대와 열화상카메라의 측정값이 거의 일치하지만, 이후 방전 최종 시점에서는 1.5°C의 차이가 나타났으며, 열화상카메라의 경우 주변의 온도, 전지 표면의 반사의 이유로 낮은 온도값이 측정되었다.

2) 단셀에 비하여 모듈로 구성했을 때 1번과 8번 센서의 위치에서는 온도가 낮게 발생한 반면 2-7번 위치에서는 평균 15.4°C 정도로 일정한 값을 나타내었다. 이것은 셀 1과 셀 4의 상하면에서는 자유로운 공기흐름으로 나타내었기 때문이다.

3) 케이스가 있는 경우 전지간 거리가 증가함에 따라 온도는 감소하였으며, 5 mm의 전지의 냉각효과는 약간 차이를 보이지만 전지간 간격이 3 mm 이상이면 중간에 있는 전지들의 냉각효과는 확실하게 발생함을 알 수 있었다.

후 기

이 연구는 한국연구재단 지역대학우수과학자지원사업(NRF-2017R1D1A3B03035349)에 의하여 연구되었음.

References

1. S. J. Kim, J. M. Ahn and H. J. Kim, 2009, "Performance Analysis of a Combined Scroll Expander-compressor unit for a Fuel Cell System", Journal of KSPSE, Vol. 13, No. 3, pp. 11-19. (DOI: <https://doi.org/10.9726/kspse.2009.13.3.011>)
2. J. H. Yang, G. H. Choi, J. M. Lee and S. K. Jeong, 2018, "Behavior Analysis of a Self Excited Induction Generator with Various Loads for a Hybrid Electric Propulsion System", Journal of KSPSE, Vol. 22, No. 1, pp. 41-47. (DOI:<https://doi.org/10.9726/kspse.2018.22.1.041>)

3. G. H. Choi, J. H. Yang, T. Y. Jeong, S. K. Jeong, 2018, "Charging and Discharging Characteristics Analysis of a Battery for a Hybrid Electric Propulsion System", Journal of KSPSE, Vol. 22, No. 4, pp. 39-46.
(DOI:<https://doi.org/10.9726/kspse.2018.22.4.039>)
4. J. Y. Youn and K. H. Choi, 2017, "Status and Policy of Renewable Energy in EU", Journal of KSPSE, Vol. 21, No. 3, pp. 5-11.
(DOI:<https://doi.org/10.9726/kspse.2017.21.3.005>)
5. H. J. Kim, J. H. Lee, D. H. Baek and J. K. Lee, 2017, "A study on thermal performance of batteries using thermal imaging and infrared radiation", Journal of Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 45, pp. 360-365.
(DOI:<https://doi.org/10.1016/j.jiec.2016.10.003>)
6. D. Bernardi, E. Pawlikowski, and J. Newman, 1985, "A general energy balance for battery systems", Journal of the electrochemical society, Vol. 132, No.1, pp. 5-12. (DOI:[10.1149/1.2113792](https://doi.org/10.1149/1.2113792))
7. S. Panchal, L. Dincer, M. Agelin-Chaab, R. Fraser, and M. Fowler, 2016, "Experimental and theoretical investigations of heat generation rates for a water cooled LiFePO₄ battery", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 101, pp. 1093-1102.
(DOI:<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.05.126>)
8. N. Damay, C. Forgez, M. P. Bichat and G. Friedrich, 2015, "Thermal modeling of large prismatic LiFePO₄/graphite battery. Coupled thermal and heat generation models for characterization and simulation", Journal of Power Sources, Vol. 283, pp. 37-45.
(DOI:<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.02.091>)