

18650 리튬-이온 단일 배터리 모듈의 냉각 성능 비교에 관한 실험적 연구(공기 냉각과 PCM 기반 냉각)

백승수 · 유시원 · 김한상[†]

서울과학기술대학교 기계 · 자동차공학과

Experimental Study of Cooling Performance Comparison of a 18650 Li-ion Unit Battery Module (Air Cooling vs. PCM-based Cooling)

SEOUNGSU BAEK, SIWON YU, HAN-SANG KIM[†]

Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology, 232 Gongneung-ro Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

[†]Corresponding author :
hskim1101@seoultech.ac.kr

Received 6 April, 2018
Revised 20 April, 2018
Accepted 30 April, 2018

Abstract >> Li-ion battery system is regarded as one of the most potent power sources for electrified power-trains. For the Li-ion battery system to be widely adopted in automotive applications, the performance, safety, and cycle life issues need to be properly addressed. These issues are closely related to the thermal management of battery system. Especially, the effective cooling module design is the core part for the novel battery thermal management system development. In this paper, an experimental approach was carried out as a basic part of comprehensive battery thermal management research. The main goal of this paper is to present a comparison of two cooling systems (air cooling and phase change material (PCM) based cooling) of the unit 18650 battery module. The temperature rise with different battery discharge rate (c-rate) was mainly investigated and analyzed for two types of battery cooling systems. It is expected that this study can properly contribute to providing basic insights into the design of robust battery thermal management system for vehicular applications.

Key words : Li-ion battery(리튬-이온 배터리), Air cooling(공기 냉각), Phase change material(상변화 물질), C-rate(방전율), Thermal management(열 관리)

Nomenclature

F : Faraday constant, C/mol

h : heat transfer coefficient, $W/m^2 \cdot K$

I : discharging current, A

k_p : thermal conductivity of PCM, $W/m \cdot K$

l : surface perimeter of PCM, m

n : modeling constant

$Q_{air,c}$: heat rejected by air cooling, W

Q_{en} : heat by entropy increase, W

Q_{PCM}	: heat rejected by PCM, W
Q_{po}	: polarization heat, W
$Q_{T,air}$: total heat by air cooling system, W
$Q_{T,PCM}$: total heat by PCM cooling system, W
R	: internal resistance, Ω
S_A	: active surface area of battery, m^2
T_a	: ambient temperature, K
T_b	: battery cell surface temperature, K
V	: battery voltage, V
V_0	: battery voltage drop at 0 A/cm ² , V

Greek letters

ΔS : entropy change, W/K

1. 서론

최근 국제적인 기후 협약과 CO₂ 규제의 지속적인 강화로 인해 자동차 산업에는 친환경 에너지를 동력원으로 하는 자동차에 대한 필요성이 지속적으로 대두되고 있다. 이와 더불어 세계적으로 관심이 되어 온 화석 연료의 고갈과 배기가스로 인한 환경오염의 문제는 친환경 자동차의 개발 및 보급을 가속시키는 주요 요인이다. 그중 기존 내연기관 자동차의 문제를 근본적으로 해결할 대안으로 전기자동차가 각광받고 있다^{1,4)}.

전기자동차에서 가장 핵심이 되는 요소는 동력원으로 사용되는 배터리이다. 그중 리튬-이온 배터리는 높은 출력 및 에너지 밀도와 적절한 비용 등으로 자동차에 가장 적합한 배터리로 평가받고 있다^{1,4)}. 하지만 리튬-이온 배터리의 적정 작동 온도는 15-35°C 사이로 알려져 있다. 이러한 좁은 작동 온도 영역 때문에 특히 다수의 배터리를 팩 형태로 연결하여 사용하는 경우 배터리 간 온도 편차를 최대한 작게 유지하는 것은 배터리의 내구성 연장을 위해 필수적인 것으로 인식되고 있다^{5,6)}. 배터리를 적정 온도 내에서 구동하면서 성능과 내구성을 양산 차원에서 확보하기 위해서는 배터리 열 관리 시스템(thermal manage-

ment system)의 적용이 필수적이다. 이 중 가장 핵심이 되는 요소는 배터리에서 발생하는 열을 효과적으로 제거하기 위한 냉각 시스템이다. 이를 위하여 다양한 방식의 시스템이 개발되고 있으며 관련한 다양한 연구들이 진행되고 있는 실정이다⁷⁻¹⁴⁾.

전기자동차 배터리 시스템의 냉각 방식은 직접 냉각(direct cooling)과 간접 냉각(indirect cooling) 방식으로 크게 나눌 수 있다.

직접 냉각 방식은 열전달 유체로 공기 또는 절연 유체인 오일을 사용한다. 유체의 냉각을 위해서 액체-기체 열교환기나 라디에이터 등의 장치가 필요하다. 직접 냉각은 비교적 간단한 부품들로 시스템을 구성할 수 있기 때문에 여러 양산 형태의 배터리 팩(원통형, 파우치형, 각형)에 널리 사용되고 있다. 하지만 셀의 발열량이 높거나, 공기의 온도가 셀보다 높을 때 냉각 성능에 제한을 받는 단점이 있다^{3,5)}.

간접 냉각 방식은 직접 냉각을 사용하기 어려운 경우에 사용된다. 간접 냉각 방식은 튜브 냉각, 미니-마이크로(mini-micro) 채널을 포함한 냉각판 냉각, 재킷(jacket) 냉각 방식 등이 있으며 최근에는 히트 파이프(heat pipe)를 이용한 냉각 방식도 고려되고 있다. 간접 냉각 방식은 전기적 short에 대한 우려를 줄일 수 있는 방식으로 전기자동차 메이커에서는 적용에 많은 관심을 갖고 있기도 하다^{3,5)}.

또한 배터리 냉각 시스템은 냉각에 사용되는 매질을 기준으로 구분되는데 공기와 액체 그리고 상변화 물질(phase change material, PCM) 등으로 크게 나뉜다. 이 중 공기 냉각과 액체 냉각이 자동차용 배터리 에 널리 사용되고 있다. 공기 냉각 방식의 경우 공기의 작은 열용량과 낮은 열전도율로 열관리 시스템에 그리 적절하지는 않으나 냉각 방식이 비교적 단순하고 비용이 저렴하여 아직 많이 적용되고 있다^{3,10)}. 하지만 큰 용량의 배터리 시스템에 적용하기에는 공기를 통한 자연 및 강제 냉각을 통한 충분한 냉각 용량을 확보하는 데 기본적인 한계가 있다. 따라서 액체, 특히 물을 이용한 냉각이 고려되는데 이는 열용량 측면에서 큰 장점이 있지만 구조가 복잡해지고 비용이 비싸지는 단점이 있다^{3,10)}.

최근 들어서는 아직 자동차용으로 적용되고 있지 않지만 PCM을 적용한 냉각 시스템에 관심이 집중되고 있다. PCM 냉각은 수동(passive) 냉각 방식으로 배터리 발열시 PCM의 잠열(latent heat)을 냉각에 활용하는 방식으로 공기 및 액체 냉각 방식과는 달리 부가 동력이 필요하지 않다는 장점이 있다³⁾. 최근 들어 PCM 냉각 관련 기초 연구들이 진행되어 오고 있지만 실용화를 위해서는 다양한 연구, 개발이 적극적으로 진행될 필요가 있다¹⁰⁻¹²⁾.

본 연구는 PCM 냉각 방식을 리튬-이온 배터리 모듈 냉각 시스템에 적용하기 위한 기초 연구의 일환으로 진행되었다. 상용화된 18650 원통형 리튬-이온 배터리를 대상으로 공기를 이용한 직접 냉각 시스템과 PCM 기반 냉각 시스템을 각각 구성하여 방전율에 따른 실험을 진행하였다. 이를 통하여 얻어진 결과를 비교하고 단순화된 분석을 통하여 2종류의 냉각 시스템의 기본적인 냉각 성능 특성을 파악하여 보고자 하였다.

2. 실험

2.1 배터리 냉각 시스템 실험 장치

PCM 배터리 냉각 시스템은 PCM의 녹는점에 따라 냉각 시점과 물질의 특성에 따라 잠열이 다르기 때문에 PCM의 선정이 먼저 고려되었다. 적절한 PCM의 선정은 그 자체가 다양한 연구 수행을 위한 기초 주제로 체계적인 연구를 필요로 한다.

배터리 열관리 시스템 개발에 있어서 PCM을 어떻게 선정할 것인가가 본 연구의 주요 관심사는 아니므로 실온에서 고체 상태이며, 배터리를 충분히 냉각시킬 수 있는 잠열을 보유하고 있다고 판단되는 n-Docosan (녹는점: 44°C, 잠열: 230 kJ/kg)을 PCM으로 선정하여 실험을 수행하였다¹¹⁾.

공기 냉각 시스템과 PCM 냉각의 성능 비교를 위해서 동일한 조건 하에서 실험을 가능하게 하는 실험 지그를 제작하였다. Fig. 1은 공기 냉각 배터리 시스템의 실험 장치를 나타낸 그림이다. 공기 냉각 실험

지그는 PCM 냉각 실험 지그와 동일한 사이즈를 사용하고 3D 프린터를 사용하여 디퓨저(diffuser)와 허니콤을 각각 제작하였다. 형상은 배터리 표면에 냉각 공기가 균일하게 접촉할 수 있도록 고려하여 설계, 제작되었다.

먼저 공기 냉각 시스템과 다르게 PCM은 실험 조건별로 양을 변경하여 실험을 진행할 수 없기 때문에 배터리 제원 표와 PCM의 잠열 값을 이용하여 PCM의 사용 양을 정하였고 이에 따라 실험 지그를 제작하였다. Fig. 2는 PCM 냉각 배터리 시스템 실험을 위해 설계, 제작된 지그를 나타낸 것이다.

공기 냉각 시스템과 PCM 냉각 시스템의 정량적인 성능 비교를 실험을 통해 수행하기 위하여 배터리 표면 온도 측정을 동일한 위치에 설정하였다.

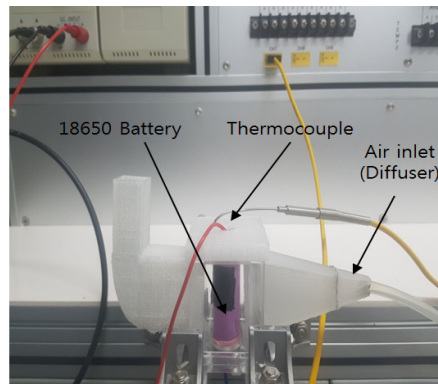


Fig. 1. The picture of experimental apparatus for the Li-ion unit battery system with air cooling

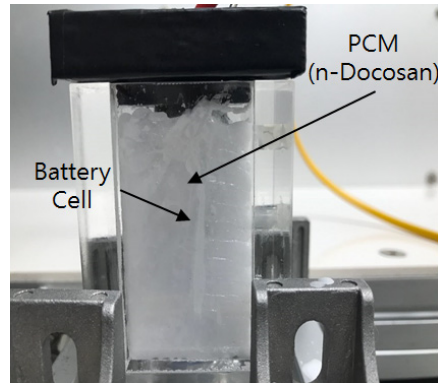


Fig. 2. The picture of experimental apparatus for the Li-ion unit battery system with PCM based cooling

배터리의 실시간 온도 변화를 측정하기 위해서 K형 열전대를 적용하였다. Fig. 3에 실험에 적용된 18650 리튬-이온 배터리와 온도 측정 위치를 나타내었다. 열전대가 설치되어 측정에 사용된 위치가 노란색으로 표시되어 있다.

2.2 배터리 냉각 시스템 실험 조건 및 실험 과정

직접 공기 냉각 시스템과 상변화 물질을 이용하는 PCM 냉각 시스템 비교를 위하여 위에서 설명한 바와 같이 실험 지그를 각각 적용하였다. 공기 냉각 시스템의 공기 유량을 0-20 L/min로 변화시키고, 배터리의 방전율(C-rate) 또한 1-2 C로 변화시키며 실험을 진행하였다. 실험에 사용된 기본 조건들을 Table 1에 정리하여 나타내었다.

실험 진행 순서는 다음과 같다. 1) 배터리 온도 측정 위치에 열전대를 장착한다. 2) 로더(Loader)와 배터리 지그를 연결한다. 3) 로더에서 부하를 가해 배터리를 방전율 조건에 맞추어 방전시킨다. 4) (공기 냉각) 실험 조건에 지정된 공기 유량으로 배터리를

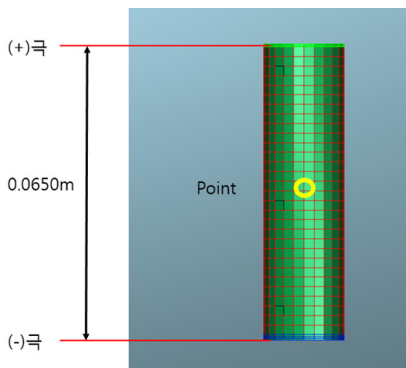


Fig. 3. Measuring points of a 18650 Li-ion single battery for thermal monitoring

Table 1. Main operating parameters for the experimental study

Parameters	Value
Battery voltage	3.7 V
Current of battery	2,900 mAh
Discharge rate	1, 2 C
Air temperature	ambient

냉각시킨다. 5) (PCM 냉각) PCM의 잠열을 이용하여 배터리를 냉각시킨다. 6) 1초 단위로 배터리 표면 온도 데이터를 저장한다. 7) 실험 데이터를 통하여 배터리의 온도 변화 결과를 확인한다. 8) 온도 변화 결과를 통하여 시스템별 냉각 성능을 확인한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 배터리 온도 변화(공기 냉각 시스템 적용)

Fig. 4는 방전율 1 C 조건에서 공급 공기 유량에 따른 리튬-이온 단일 배터리의 시간에 따른 온도 변화를 나타낸 것이고, Fig. 5는 방전율 2 C 조건에서 리튬-이온 단일 배터리의 시간에 따른 온도 변화를 각각 나타낸 것이다. 실험 시 공기 유량 조건은 0, 10, 20 L/min의 3종류의 조건이며, 방전율 조건은 1, 2 C 조건이다. 유량과 방전율의 크기에 따라 배터리 온도 변화의 차이가 있는 것을 알 수 있었다. 방전율이 커짐에 따른 배터리의 온도 상승 폭이 시간에 따라 증

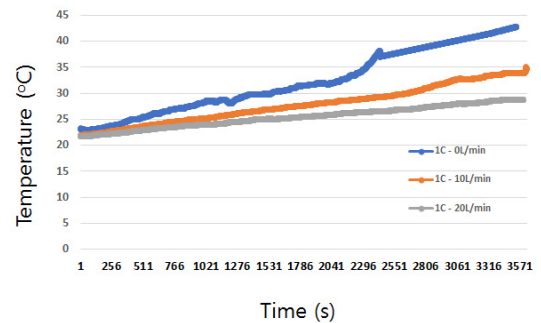


Fig. 4. Battery cell surface temperature with time under three different air flow rates at 1 C condition (air cooling)

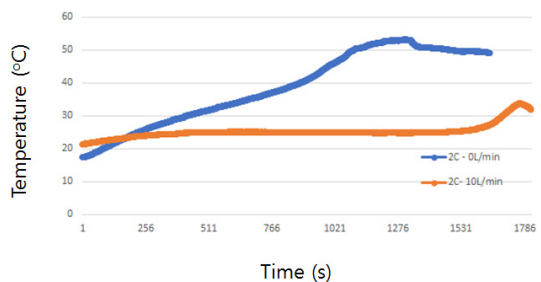


Fig. 5. Battery cell surface temperature with time under two different air flow rates at 2 C condition (air cooling)

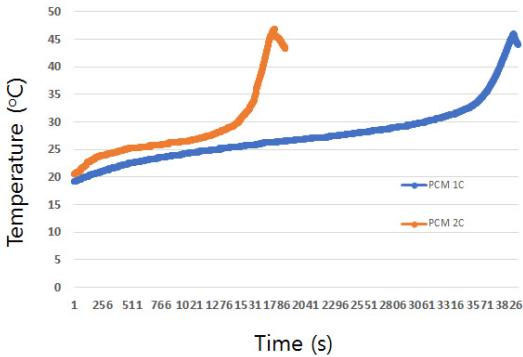


Fig. 6. Battery cell surface temperature with time under two discharge conditions (PCM based cooling)

대됨을 알 수 있다.

이는 배터리 냉각이 충분하지 않아 방전 시 발생된 열량이 냉각 시스템 내에 축적되어 배터리 표면의 온도 상승에 기여한 것임을 생각할 수 있다.

단, 공급 공기의 유량이 증가함에 따라 배터리 모듈에 대한 냉각 성능은 지속적으로 향상되어 배터리 내 축적된 열을 효과적으로 제거시킴을 확인할 수 있다.

3.2 배터리 온도 변화(PCM 기반 냉각 시스템 적용)

Fig. 6은 PCM 냉각 시스템을 적용한 실험을 통한 배터리의 온도 변화를 나타낸다. 방전을 1 C-rate일 때 실험에 사용된 PCM은 녹는점이 44°C이므로 1 C 조건에서의 PCM을 통한 배터리 냉각 효과는 거의 없음을 알 수 있다.

하지만 2 C 조건의 경우 배터리에서의 발열량이 증가함에 따라 배터리의 온도 변화 폭이 커진다. 배터리는 PCM의 용융점까지 온도가 계속 상승하게 되고, PCM을 통한 잠열을 이용한 냉각 효과가 나타나기 시작함을 확인할 수 있다.

Table 2와 Table 3에 측정된 온도 데이터 결과를 각각 요약 정리하여 나타내었다.

3.3 공기, PCM 냉각 배터리 시스템 냉각 성능 비교

시간에 따른 배터리 온도 변화의 단순 비교만으로

Table 2. Summary of measure initial and final temperatures under the test conditions for air cooling battery system

Discharging rate (C-rate)	Air flow rate (L/min)	Initial temp. (°C)	Final temp. (°C)
1	0	23.1	42.8
1	10	21.9	34.8
1	20	25.2	27.9
2	0	17.4	49.2
2	10	21.3	33

Table 3. Summary of measure initial and final temperatures under the test conditions for PCM based cooling battery system

Discharging rate (C-rate)	Initial temp. (°C)	Final temp. (°C)
1	23.1	42.8
2	21.3	33

는 두 냉각 시스템의 정확한 비교를 할 수 없으므로 Park 등¹⁵⁾의 연구를 참조하여 발열량 비교를 진행하였다. 배터리 발열은 화학 반응 도중 발생하는 비가역 과정 때문에 야기된다.

본 연구에서는 발열량 비교를 위하여 배터리 발열을 수학적으로 단순화하여 모사하기 위해서 다음과 같이 4가지 기본 가정을 하였다¹⁵⁾. 1) 모든 비가역 에너지는 열에너지로 변환된다. 2) 실험 중 배터리의 물성은 일정하다. 3) 배터리의 반경 방향으로의 열전도율은 일정하다. 4) 배터리 내부 전해액의 액체 상태의 대류는 무시한다.

위의 기본 가정을 통하여 배터리 시스템의 발열은 엔트로피 변화에 의한 열량, 분극으로 인해 발생하는 발열, 배터리의 열전달로 인한 열량 손실로 단순화할 수 있다. 이를 통하여 공기 냉각 시스템과 PCM 기반 냉각 시스템에 대한 배터리 전체 발열량을 단순화하여 구하였다¹⁵⁾.

첫째, 엔트로피 변화에 의해 발생하는 열량(Q_{en})은 식 (1)과 같다.

$$Q_{en} = \frac{I}{nF} T_b \Delta S \tag{1}$$

여기서 F 는 패러데이(Faraday) 상수이고 n 은 반응 관련 상수로 리튬-이온 배터리의 경우는 1이다. T_b 는 배터리 셀의 온도이며 ΔS 는 방전 시 약 $-30 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$ 로 가정할 수 있다¹⁵⁾.

둘째, 분극으로 발생하는 배터리에서의 발열량 (Q_{po})은 식 (2)와 같다¹⁵⁾.

$$Q_{po} = I(V - V_0) = I^2 R \quad (2)$$

여기서 I 는 방전되는 전류를 의미한다. 첫째 가정을 통하여 분극으로 발생하는 모든 에너지 손실은 열로 발산된다고 할 수 있으므로 Q_{po} 는 방전 사이클에서의 발열량을 의미하는 것으로 이해할 수 있다¹⁵⁾.

셋째는 주위(ambient)로의 열전달에 의한 열량으로 공기 냉각 시스템의 경우는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{air,c} = h S_A (T_b - T_a) \quad (3)$$

식 (3)은 배터리를 통한 대류 열전달에 의한 열전달량을 나타내며 S_A 는 배터리의 표면적이고, T_a 는 외기 온도이며, h 는 대류 열전달 계수이다¹⁵⁾.

또한, 공기 냉각이 아닌 PCM 냉각 시스템의 경우는 배터리에서 PCM으로 열전도에 의한 열량 전달을 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{PCM} = k_p l (T_b - T_a) \quad (4)$$

식(4)에서 k_p 는 PCM의 열전도율이고 l 은 PCM의 두께 길이이다. 이를 모두 고려하여 배터리의 전체 발열량을 식 (5), (6)와 같이 각각 산정해서 나타낼 수 있다.

$$Q_{T,air} = Q_{en} + Q_{po} - Q_{air,c} \quad (5)$$

$$Q_{T,PCM} = Q_{en} + Q_{po} - Q_{PCM} \quad (6)$$

위 식을 사용하여 실험 조건별로 공기 냉각 배터리 시스템과 PCM 냉각 배터리 시스템에 대한 발열

Table 4. Summary of the heat generated for air-cooled battery module of this study by simplified estimation

Discharging rate (C-rate)	Air flow rate (L/min)	Heat generated (J)
1	0	12,739
1	10	11,697
1	20	11,023
2	0	16,442
2	20	14,000

Table 5. Summary of the heat generated for PCM-based battery cooling module of this study by simplified estimation

Discharging rate (C-rate)	Air flow rate (L/min)	Heat generated (J)
2	0	12,563
2	10	15,483

량을 각각 구하여 Table 4와 Table 5에 정리하여 나타내었다.

4. 결론

본 연구에서는 공기 냉각 시스템과 PCM 냉각 시스템을 적용한 리튬-이온 단일 배터리 모듈에 대하여 방전율에 따른 실험을 각각 진행하고 냉각 특성을 비교, 분석하였다. 본 실험 연구를 통하여 얻어진 주요 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) PCM 냉각 방식은 공기 냉각 방식과 달리 상변화시의 잠열을 이용하므로 배터리 온도가 상변화 물질의 녹는점에 도달하기 전까지는 냉각이 일어나지 않음을 알 수 있다. PCM 냉각 방식은 단일 리튬-이온 배터리보다는 배터리 팩에 적용하였을 때 효율이 더 커질 수 있음을 예측 할 수 있는 실험으로 판단된다.

2) PCM 냉각은 1 C 조건에서는 열전도에 의한 열량 손실이 적어 냉각 상태가 아닌 배터리와 차이가 없는 것을 확인하였다. PCM 냉각 시스템의 효율을 효과적으로 개선하기 위해서는 녹는점이 낮으나 실 온에 녹지 않고, 잠열이 큰 물질을 사용해야 함을 파악할 수 있었다.

3) 1 C 이상 조건에서는 높은 내부 저항에 의하여

열량이 많이 발생하므로 PCM 냉각 시스템의 경우 배터리 온도가 PCM의 녹는점에 일찍 도달하였다.

4) PCM 냉각 시스템은 1 C 이상의 조건에서는 10 L/min의 공기 냉각 시스템과 거의 동일한 성능의 결과를 나타냄을 확인하였다.

본 연구는 PCM을 적용한 리튬-이온 배터리 열 관리 시스템 설계 및 개발을 위한 기초 데이터 확보에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었다.

References

1. Z. Rao and S. Wang, "A review of power battery thermal energy management", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, 2011, pp. 4554-4571.
2. X. M. Xu and R. He, "Review on the heat dissipation performance of battery pack with different structures and operation conditions", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 29, 2014, pp. 301-315.
3. G. Xia, L. Cao, and G. Bi, "A review on battery thermal management in electric vehicle application", *J. of Power Sources*, Vol. 367, 2017, pp. 90-105.
4. H. Liu, Z. Wei, W. He, and J. Zhao, "Thermal issues about Li-ion batteries and recent progress in battery thermal management systems: A review", *Energy Conversion and Management*, Vol. 150, 2017, pp. 304-330.
5. M. Malik, I. Dincer, and M. A. Rosen, "Review on use of phase change materials in battery thermal management for electric and hybrid electric vehicles", *Int. Journal of Energy Research*, Vol. 40, 2016, pp. 1011-1031.
6. H. Teng, Y. Ma, K. Yeow, and M. Thelliez, "An Analysis of a Lithium-ion Battery system with Indirect Air Cooling and Warm-Up", *SAE Paper No. 2011-01-2249*, 2011.
7. J. Xun, R. Liu, and K. Jiao, "Numerical and analytical modeling of lithium ion battery thermal behaviors with different cooling designs", *J. of Power Sources*, Vol. 233, 2013, pp. 47-61.
8. S. Park and D. Jung, "Battery cell arrangement and heat transfer fluid effects on the parasitic power consumption and the cell temperature distribution in a hybrid electric vehicle", *J. of Power Sources*, Vol. 227, 2013, pp. 191-198.
9. J. Zhao, Z. Rao, Y. Huo, X. Liu, and Y. Li, "Thermal management of cylindrical power battery module for extending the life of new energy electric vehicles", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 85, 2015, pp. 33-43.
10. R. Zhao, J. Gu, and J. Liu, "Optimization of a phase change material based internal cooling system for cylindrical Li-ion battery pack and a hybrid cooling design", *Energy*, Vol. 135, 2017, pp. 811-822.
11. A. Lazrak, J. F. Fourmigué Dincer, and J. F. Robin, "An innovative practical battery thermal management system based on phase change materials: Numerical and experimental investigations", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 128, 2018, pp. 20-32.
12. Z. Wang, H. Zhang, and X. Xia, "Experimental investigation on the thermal behavior of cylindrical battery with composite paraffin and fin structure", *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 109, 2017, pp. 958-970.
13. S. Shahid and M. Agelin-Chaab, "Development and analysis of a technique to improve air-cooling and temperature uniformity in a battery pack for cylindrical batteries", *Thermal Science and Engineering Progress*, Vol. 5, 2018, pp. 351-363.
14. H. A. Catherino, "An Analysis of Heat Generation In a Lithium Ion Cell", *SAE Paper No. 2015-01-2420*, 2015.
15. C. E. Park, S. W. Yoo, Y. H. Jeong, and K. Kim, "Effect of Thermal Management of Lithium-Ion Battery on Driving Range of electric Vehicle", *Journal of the Korean Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 18, No. 5, 2017, pp. 22-28.