https://doi.org/10.7735/ksmte.2021.30.1.53

J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.
ISSN 2508-5107(Online)

자동차 시동용 LFP 배터리 팩의 혹한기 시동성 향상을 위한 열선 시스템 적용에 따른 열 유동 해석

우영한[a,b], 강석원[b], 이준숭[a], 박문식[a], 김성진[c], 성동길[d], 주성욱[a*]

Numerical Analysis of Self-Heating Lithium Iron Phosphate Battery Systems for Enhanced Cold Startability

Younghan Woo[a,b], Seokwon Kang[b], Junsoong Lee[a], Moonsic Park[a], Sungjin Kim[c], Donggil Sung[d], Sungwook Joo[a*]

[a] *Materials Convergence Division, Gyeongbuk Hybrid Technology Institute*
[b] *Department of Automotive Engineering, Yeungnam University*
[c] *Technology Research Institute, Bexel Co., Ltd*
[d] *Technology Research Institute, CORN Co., Ltd*

ARTICLE INFO

Article history:
Received 26 November 2020
Revised 21 January 2021
Accepted 2 February 2021

Keywords:
LFP battery pack
12 V starter battery
Thermal flow analysis
Self-heating system
Low-temperature startability

ABSTRACT

A numerical simulation for evaluating thermal performance was performed to determine the possibility of replacing existing lead-acid 12 V batteries with lithium-ion batteries. In batteries used for starting vehicles, low-temperature (≤−20°C) starting performance and lifespan decrease significantly. Therefore, a lithium iron phosphate (LFP) battery system with a relatively high energy density at low temperatures was studied. A system for self-energy heating was designed to improve operability under cold-weather conditions. In particular, the battery pack case, battery cell array, and heating system of the proposed system were designed to be compatible. Furthermore, a thermal performance simulation was performed using computational fluid dynamics and heat transfer techniques based on the estimated thermal properties of each component. The results showed that the self-heating LFP battery pack system reached its startable temperature (−3°C) after 75 s when 249 W of power was applied in a low-temperature (−20°C) environment.

1. 서 론

4차 산업 혁명이 몰고 올 스마트화 시대의 가장 중요한 기술로 이차전지 산업이 주목받고 있으며, 리튬이온 이차전지(lithium ion battery, LIB)가 이차전지기술의 표준으로 자리매김하고 있다[1]. 전기차로 대변되는 스마트카(smart car)에서는 높은 에너지 및 출력 밀도, 낮은 메모리효과, 긴 수명, 낮은 자가 방전율 등의 장점으로 인하여 리튬이온 이차전지가 시장을 주도하고 있으며, 자동차 주동력의 에너지원뿐만 아니라, 기존의 납축전지로 사용되어 왔던 자동차용 12 V 출력전압의 시동용 배터리로 적용가능성 또한 검토되고 있으며, 자동차 부품의 애프터 마켓 시장에 점차 제품이 출시되고 있는 추세이다[2,3]. 리튬이온 이차전지 기반 시동용 배터리는 기존 납축전지 대비 중량이 가벼워 경량화에 의한 연비개선의 효과를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 납축전지 시스템에서의 제너레이터 운용으로 인한 차량 연비 저하를 최소화 할 수 있어 내연기관은 그대로 유지하면서 최소한의 간단한 시스템 변경과 비용만으

* Corresponding author. Tel.: +82-54-330-8066
E-mail address: jsw@ghi.re.kr (Sungwook Joo).

로 연비를 높일 수 있어 순수 전기차시대로 진입하기 전 탄소배출을 감소시킬 수 있는 기술로 주목이 되고 있다[4]. 또한, 기존의 납축전지보다 5배 이상의 내구수명을 제공하므로 기존의 8만 ~ 10만 km 주행 후 납축전지 교체 시 발생되는 환경오염물질 발생을 낮출 수 있으며, 납축전지로 인하여 발생되는 자동차 음향장치의 노이즈 개선 등의 부가효과도 있어 자동차 튜닝시장에 해외제품 수입시장이 이미 형성되어 있다.

하지만, 12 V 배터리로 엔진 시동을 위해서는 짧은 시간에 200 A ~ 300 A의 높은 전력이 필요한데, 외부환경이 -20℃ 이하의 혹한기에는 리튬이온 배터리의 일반적인 작동온도인 -20℃ ~ 40℃의 범위를 벗어나게 되어 정상적인 출력을 나타내기 어려운 경우가 발생 될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 혹한기 조건에서도 정상적인 성능을 발휘 할 수 있는 리튬이온기반의 시동용 배터리를 검토하기 위하여 상대적으로 온도에 따른 특성변화가 적은 리튬인산철($LiFePO_4$, LFP) 양극재의 이차전지 셀을 적용하고, 저온 환경에서 이차전지 자체 전원을 이용한 열선을 가동하여 정상 작동 온도 범위를 유지할 수 있는 시스템을 설계하였다. 설계된 배터리팩 시스템의 성능을 예측하기 위하여 각 부재의 열적 특성을 고려한 열 유동 해석을 수행하여 시동용 배터리로서 상용화 가능성을 검토하였다.

2. LFP 배터리 팩 구성 및 열유동 해석 이론적 배경

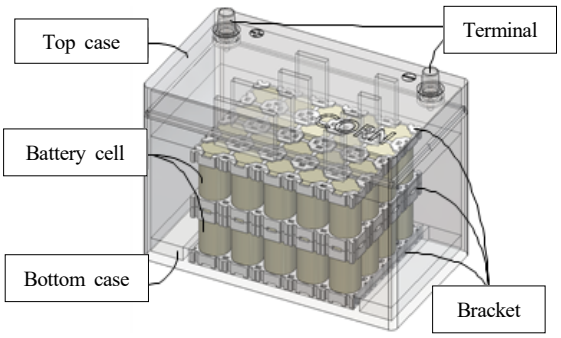
2.1 LFP 시동용 배터리 팩 모델링

본 연구에서는 (주)벡셀에서 개발된 LFP 양극재가 적용된 지름 34 mm, 높이 60 mm의 원통형타입(34600규격)의 셀에서 형상과 물성을 추출하였으며, 제작된 단일 배터리 셀의 용량은 6.85 Ah, 공칭전압은 3.2 V이다. 배터리 셀의 외관은 Fig. 1에 나타내었다.

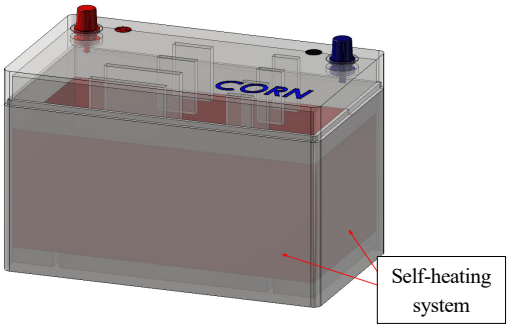
배터리 팩 내·외부의 열 유동 해석을 위해서는 셀의 물성 값 중 비열, 열전도도, 밀도 등의 결정이 필요하다. 비열은 열 용매가 담긴 단열용기 내에서 전지가 가열될 때 전지와 열 용매의 온도변화를 정밀 측정한 측정치를 비열로 환산하여 사용하였으며,[5] 계산된 비열 값은 1,554 J/kg·K이다. 열전도도는 Scott Mathewson 등의 연구를 참조하여 0.4 W/m·K를 적용하였다[6]. 밀도는 측정된 부피와 질량으로 계산된 2,270 kg/m^{3}을 적용하였다.

배터리 팩의 모델링은 Fig. 2(a)와 같이 원형 셀, 브라켓, 상부 케이스, 하부 케이스, 단자, 열선 시스템의 총 6개의 부분으로 구성하였으며, 크기는 상용 자동차 시동용 납축전지를 참고하여 302 (W) × 172 (L) × 200 (H) mm로 하였다. 배터리 셀은 시동용 배터리의 작동을 위한 공칭전압 12.8 V에 도달하기 위하여 4 S (series) 10 P (parallel)로 배열하여 배터리 팩의 용량 27.4 Ah가 되도록 구성하였다. 배터리 팩 케이스의 재질은 polypropylene

Fig. 1 LFP 34600 battery cell (provided by Bexel Co., Ltd.)



(a) Components of LFP battery pack



(b) Self-heating system of LFP battery pack

Fig. 2 3D modeling of LFP battery pack

(PP)을 적용하고 열 유동 해석을 위한 소재의 특성은 matweb을 참조하여 비열 1,890 J/kg·K, 열전도도 0.449 W/m·K, 밀도 900 kg/m^{3}를 적용하였다[7].

배터리 팩의 가열에 사용되는 열선 시스템은 Fig. 2(b)와 같이 케이스 측면에 적용되도록 모델링 하였다. LFP 리튬이온 배터리의 성능에 영향을 미치기 시작하는 저온 환경인 -10℃ 이하로 온도가 유지되지 않도록 열선 시스템의 작동 조건을 적용하였다[8,9]. 구체적으로는 열선 시스템의 전력 제어 회로를 배터리 팩 자체 전원을 사용하여 케이스 평균온도가 -10℃에서 작동하고, -3℃가 되면 열선 시스템 및 배터리 셀 전원 공급이 차단되도록 적용하였다.

2.2 지배 방정식

본 연구에 사용된 열 유동 해석의 지배 방정식은 연속 방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식 3가지 방정식에 기반을 둔 나비에-스토크스 방정식(navier-stokes equation)이다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i)=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t}+\frac{\partial \rho}{\partial x_j}(\rho u_i u_j)+\frac{\partial p}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}(\tau_{ij}+\tau_{ij}^R)+S_j i \tag{2}$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t}+\frac{\partial \rho u_i H}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}(u_j(\tau_{ij}+\tau_{ij)+q_i}^R)+\frac{\partial P}{\partial t}+\rho\varepsilon+S_i u_i+Q_H \tag{3}$$

$$H=h+\frac{u^2}{2}+\frac{5}{3}k-\frac{\Omega^2 r^2}{2}-\sum_m h_m^o y_m \tag{4}$$

여기서 u는 유체 속도이고, ρ는 유체 밀도이다. Si는 다공성 매체 저항(S^{porous_i}), 부력($S^{gravity_i}=-\rho g_i$, 여기서 g_i는 i번째 좌표 방향에 따른 중력 가속도 성분) 및 좌표계 회전($S^{rotation_i}$)으로 인한 단위 질량당 질량 분포 외력이다. h는 엔탈피, Q_H는 단위 체적당 열원, τ_{ik}는 점성 전단 응력 텐서(tensor), q_i는 확산 열 유속, Ω는 회전 좌표계의 각속도, r은 회전 참조 프레임 점에서 회전축까지의 거리, k는 난류 운동 에너지, h_m^0는 m번째 혼합물 성분의 개별 열 엔탈피, y_m은 m번째 혼합물 성분의 농도이다[10,11].

이러한 방정식은 유체의 특성을 정의하는 유체 상태 방정식, 유체 밀도, 점성, 온도에 따른 열전도율의 경험적 의존성으로 보완된다. 특정 문제는 해당 지오메트리(geometry), 경계 및 초기 조건의 정의로 지정된다. 열 유동 해석에서는 층류 및 난류 유동을 모두 예측할 수 있다. 이번 해석에서 발생하는 배터리 팩 내부 유체 유동은 모두 난류이므로, 난류 유동을 예측하기 위해서는 평균화된 나비에-스토크스 방정식이 사용되며, 여기서는 유동 파라미터에 따른 난류의 시간 평균화 효과가 고려되는 반면, 대규모 시간 의존성 현상은 직접적으로 고려된다. 이 연립 방정식을 풀기 위해 난류 운동 에너지와 해당 소산율(이른바 $k-\varepsilon$모델)에 대한 수송 방정식(transport equation)을 적용한다[11]. 배터리 셀 내부에 대한 열화학적 전기 에너지 부분은 배터리 셀의 비열로 환산하여 전력 손실(power loss) 의존 함수로 시험 값을 반영하고, lumped method로 열전도 계수를 입력하였다.

2.3 해석 경계조건 및 엔진룸 환경 정의

열 유동 해석은 유체 체적 및 고체 체적을 구분하여 열적 상태를 예측할 수 있도록 하였다. Fig. 3에서 나타낸 바와 같이 열 유동 해석에서 고려한 엔진 룸의 영역은 배터리 팩 주위의 600 (W) × 400 (L) × 400 (H) mm를 적용하여 전체 체적 0.096 m^3 중 유체 체적은 0.091189 m^3, 고체 체적은 0.0048801 m^3로 도출하였다. 엔진 룸을 간략화하여 모델링 하였으므로, 시뮬레이션 유형은 외부 유동으로 설정하고, 고체영역은 중력을 활성화하여 열전도 해석, 비정상상태 해석, 중력에 의한 대류 현상을 적용하였다. 엔진 룸 및 배터리 팩 내부매질은 dry air로 가정하여 습도 및 응결은 고려하지 않았다. 배터리 팩 외부 엔진 룸은 층류(laminar) 흐름, 내부는 난류(turbulent) 흐름으로 가정하고, 층류와 난류 조건을 동시에 만족하게 설정하였다.

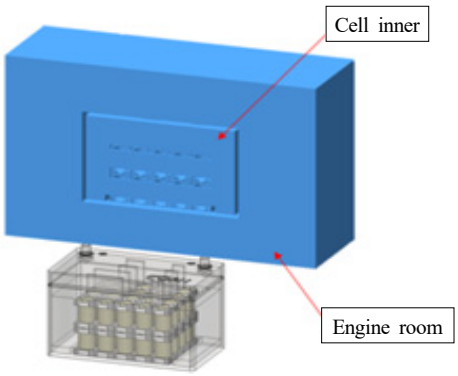


Fig. 3 3D modeling of engine room

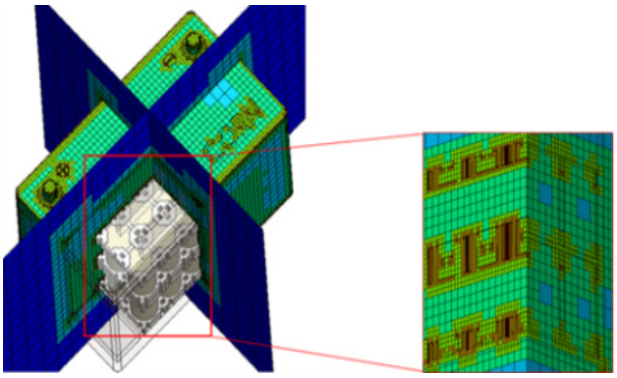
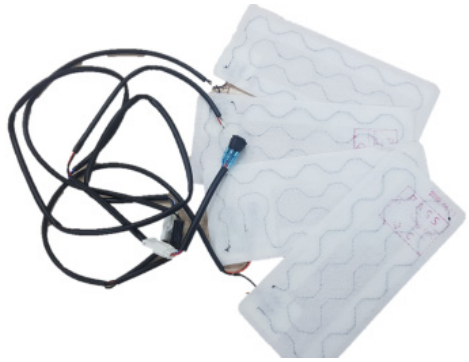


Fig. 4 Numerical model of LFP battery pack

엔진 룸의 분위기 온도는 혹한기 조건인 -20℃로 설정하였고, 배터리 팩의 초기 온도는 열선 시스템의 작동조건에 따라 -10℃의 조건으로 적용하였다. 이는 디자인된 배터리 팩이 사용될 때 주위 환경의 온도는 저온이지만, 열선 시스템을 이용하여 -10℃ 이하로는 온도가 떨어지지 않는다는 가정이 적용되었기 때문이다.

수치 해석용 격자(mesh)는 유체 영역과 고체 영역의 경계 부분을 해석의 정도를 높이기 위해 세분화하여 적용하였으며, 셀 주위 또한 세밀한 수치 해석용 격자를 적용하여 해의 정도를 높였다. Fig. 4와 같이 해석의 수렴성을 높이기 위해 잘라낸 셀은 0개이며, 유체 및 고체가 접하는 영역은 최대 세분화 level 5까지 높여 온도 손실을 최소화하였다.



(a) Heating pad and controller of self-heating system

(b) Power consumption of self-heating system

Fig. 5 Power consumption measurement of self-heating system

배터리 팩의 방전 조건은 초기 배터리 충전율 SOC (state of charge) 80%에서 열선 시스템의 소비 전력 기준으로 방전율 (C-rate) 1.5 C로 가정하여 해석에 적용하였고, 열선 시스템의 작동 시간이 2,500초까지 해석을 수행하였다.

Fig. 5(a)는 본 연구에 적용된 열선 시스템의 형상을 나타내고 있으며, Fig. 5(b)는 열선 시스템에 14 V 전압을 인가하였을 때 측정된 전원 공급 장치의 측정치를 나타내었다. 측정 결과 열선 시스템의 소비 전력은 입력 전압 14 V 조건에서 전류 4.47 A, 소비전력 62.4 W로 측정되었고, 따라서 배터리 팩 4면에 적용된 열선 시스템의 소비 전력 값은 249.6 W로 적용하였다.

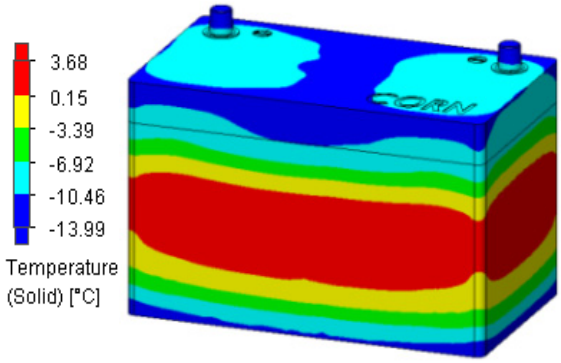
3. 결과 및 토론

3.1 배터리 팩 및 셀 온도분포

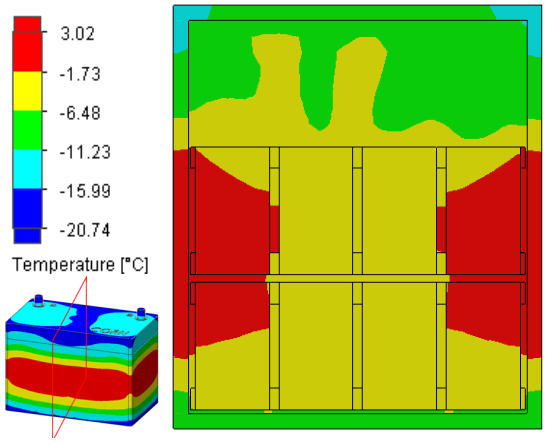
Fig. 6과 Fig. 7은 디자인 된 배터리 팩 시스템의 열선 시스템을 2,500초 가동한 후의 배터리 팩과 셀의 열 유동 해석으로 도출한 온도분포 결과를 나타내었다.

Fig. 6(a)은 배터리 팩 케이스 전체적인 외부 표면의 온도 분포를 나타내고 있다. 최고 온도는 열선 시스템이 위치한 케이스의 외부 표면에서 3.6℃로 나타났고, 최저 온도는 상부, 하부 케이스 외부 표면에서 -13.9℃로 나타났다.

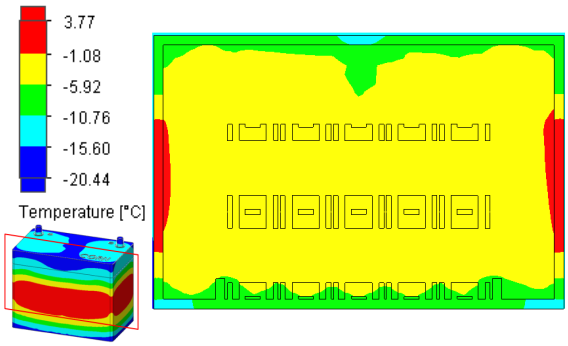
Fig. 6(b)은 배터리 팩의 횡단면 중앙부에서 온도 분포를 나타내



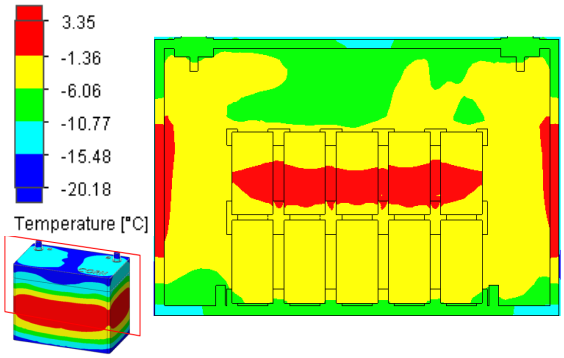
(a) External surface of battery pack case



(b) Center of cross section



(c) Center of longitudinal section



(d) End of longitudinal section

Fig. 6 Temperature distribution of LFP battery pack after 2,500 s of self-heating system power application

Table 1 Minimum/Maximum temperature of LFP battery pack after 2,500 s of self-heating system power application

		Max. Temp (°C)	Min. Temp (°C)
Battery pack case	External surface	3.6	-13.9
Center of cross section	Section	3.0	-13.7
	Inside of cell	3.0	-6.4
Center of longitudinal section	Section	3.7	-13.4
	Inside of cell	-1.0	-5.9
End of longitudinal section	Section	3.3	-13.5
	Inside of cell	-1.3	-6.0

고 있다. 단면에서 최고 온도는 열선 시스템이 위치한 케이스 내부 표면에서 3.0℃로 나타났고, 최저온도는 상부 케이스 내부 표면에서 -13.7℃로 나타났다. 단면에서 셀 내부의 최고 온도는 열선 시스템에 가까운 셀에서 3.0℃로 나타났으며, 최저온도는 하부 케이스에 가까운 셀에서 -6.4℃로 나타났다.

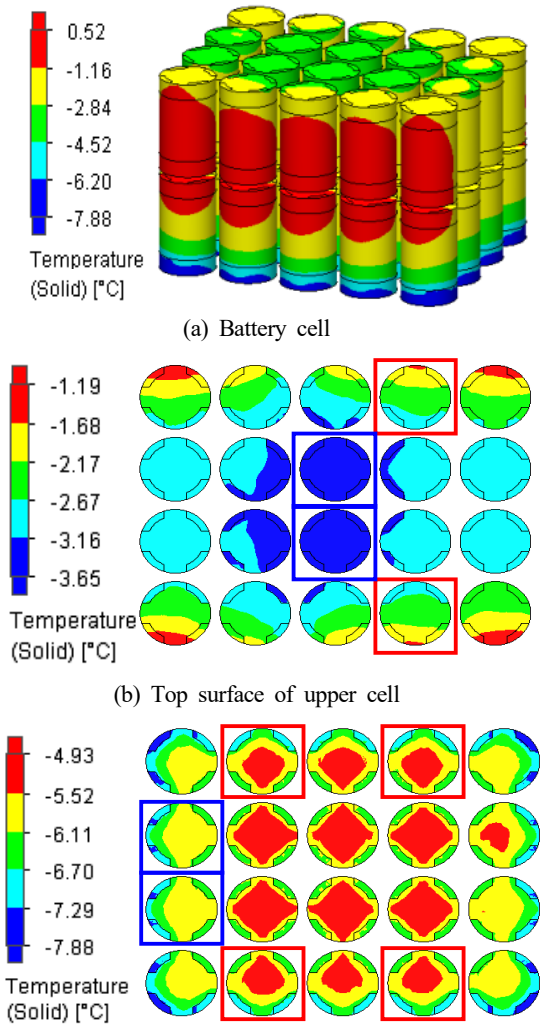
Fig. 6(c)은 배터리 팩의 종단면 중앙부에서 온도 분포를 나타내고 있다. 단면에서 최고 온도는 열선 시스템이 위치한 케이스 내부 표면에서 3.7℃로 나타났고, 최저온도는 상부, 하부 케이스 표면에서 -13.4℃로 나타났다. 단면에서 셀 내부의 최고 온도는 상부, 하부 셀에서 -1.0℃로 나타났으며, 최저온도는 하부 케이스에 가까운 셀에서 -5.9℃로 나타났다.

Fig. 6(d)은 배터리 팩의 종단면 끝단부에서 온도 분포를 나타내고 있다. 단면에서 최고 온도는 열선 시스템이 위치한 케이스 내부 표면에서 3.3℃로 나타났고, 최저온도는 상부, 하부 케이스 표면에서 -13.5℃로 나타났다. 단면에서 셀 내부의 최고 온도는 상부 셀에서 -1.3℃로 나타났으며, 최저온도는 하부 케이스에 가까운 셀에서 -6.0℃로 나타났다.

각 위치별 온도 분포 결과를 Table 1에 정리하여 나타내었다. 배터리 팩의 온도 분포 결과를 비교하면 열선 시스템이 적용된 케이스에 가까운 쪽의 셀과 열선 시스템이 위치한 케이스 표면의 온도가 높게 나타났고, 하부 케이스에 가까운 쪽의 셀과 상부, 하부 케이스 표면에서 온도가 낮게 나타났다.

Fig. 7(a)은 배터리 셀 전체에 대한 온도 분포를 나타내고 있다. 최고 온도는 열선 시스템이 위치한 케이스에 가까운 횡 방향 1열의 셀에서 0.5℃로 나타났고, 최저 온도는 하부 셀의 아래 끝단부에서 -7.8℃로 나타났다.

Fig. 7(b)은 상부 셀의 상단 면에 대한 온도 분포를 나타내고 있다. 최고 온도는 횡 방향 1, 4열 양쪽 끝 셀에서 -1.0℃로 나타났고, 최저온도는 2, 3열의 중앙부 셀에서 -3.6℃로 나타났다. 각각



(a) Battery cell

(b) Top surface of upper cell

(c) Bottom surface of lower cell

Fig. 7 Temperature distribution of LFP battery cell after 2,500 s of self-heating system power application

의 셀에 대한 중심부 온도는 1, 4열의 네 번째 셀에서 최고 온도 -1.0℃로 나타났고, 2, 3열의 세 번째 셀에서 최저 온도 -2.0℃로 나타났다.

Fig. 7(c)은 하부 셀의 하단 면에 대한 온도 분포를 나타내고 있다. 최고 온도는 각 열의 중심부 셀에서 -4.9℃로 나타났고, 최저 온도는 각 열의 양 끝 셀에서 -7.8℃로 나타났다. 각각의 셀에 대한 중심부 온도는 1, 4열의 두 번째, 네 번째 셀에서 최고 온도 -4.9℃로 나타났고, 2, 3열의 첫 번째 셀에서 최저 온도 -2.6℃로 나타났다.

각 위치별 온도 분포 결과를 Table 2에 정리하여 나타내었다. 배터리 셀의 온도 분포 결과를 비교하면 상부 셀 온도가 하부 셀보다는 높게 나타났고, 열선 시스템에 가까운 쪽의 셀이 온도가 높게 나타났으며, 셀의 경계 영역 부위 온도가 높게 나타났다. 셀 중심부 온도 범위는 -5℃~-1℃로 열선 시스템에 의해 제어가 된

Table 2 Minimum/Maximum temperature of LFP battery cell after 2,500 s of self-heating system power application

		Max. Temp (℃)	Min. Temp (℃)
Total of cell		0.5	-7.8
Top surface of upper cell	Top surface	-1.0	-3.6
	Center of cell	-1.0	-2.0
Bottom surface of lower cell	Bottom surface	-4.9	-7.8
	Center of cell	-4.9	-2.6

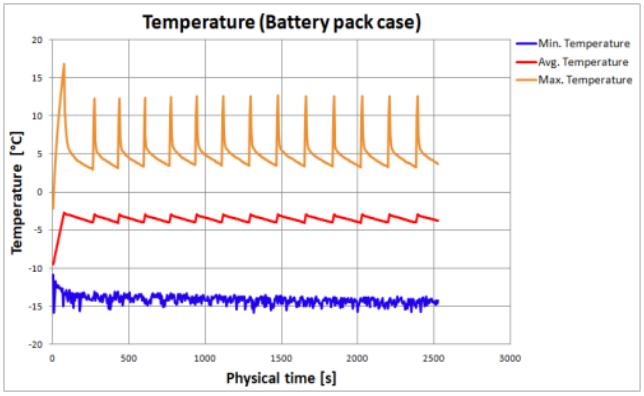


Fig. 8 Temperatures of battery pack case at 1.5 C discharging rate

다는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 8은 열 유동 해석 진행 시 열선시스템 적용에 따른 배터리 팩 케이스의 온도 제어 결과를 그래프로 나타내고 있다. 이번 해석에 적용한 열선 시스템의 전력으로는 75초 이내에 케이스의 평균 온도가 -3℃로 도달하였고, 열 유동 해석 진행 동안 평균온도가 -3℃로 안정적으로 제어되고 있는 것을 확인하였다.

3.2 배터리 팩 열량 해석 결과

Fig. 9는 열 유동 해석 진행 동안 배터리 팩 케이스 및 셀 열전달 율을 그래프로 나타내고 있다. 배터리 팩 케이스 열전달 율은 평균 15.5 W로 나타났고, 시간이 지남에 따라 감소하지 않았다. 배터리 셀 열전달율은 평균 2.0 W로 나타났고, 초기 75초 기준 23 W에서 하강하기 시작한다는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 혹한기 조건에서 열선 시스템을 적용한 LFP배터리 팩의 상용화 가능성을 검토하기 위해 열 유동 해석을 수행하였다. 해석 결과 배터리 팩 케이스 및 셀 온도는 열선 시스템의 작동

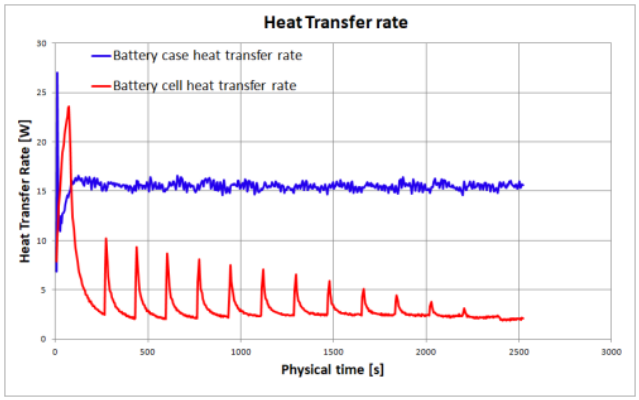


Fig. 9 Heat transfer rates of battery pack case and cell at 1.5 C discharging rate

조건에 따라 제어되는 것을 확인하였고, 초기 온도에서 작동온도(-3℃)까지 상승되는 소요 시간은 75초임을 확인하였다. 또한 초기 75초 이후 시간이 지남에 따라 배터리 셀의 열전달율이 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

따라서 본 연구 결과를 바탕으로 디자인된 배터리 팩 시스템의 정상 작동 온도(-3℃)까지 도달하는 시간 상수를 확인하였으며, 이는 향후 열선 시스템 개발 시 설계에 참조 자료로서 활용될 수 있으리라 판단된다. 본 연구내용을 바탕으로 추후 열선 시스템 작동 사이클, 적용 위치, 소비전력이 낮은 열선 시스템의 적용, 배터리 팩 내부로의 열전달 효율 최적화 등의 연구를 통해 최적 조건을 확보하고, 확보된 내용을 바탕으로 상용화할 수 있는 시제품을 제작하고 평가를 진행할 예정이다.

후 기

"이 논문은 2019년도 광역협력권산업육성사업(주관기업: (주)벡셀, 과제번호: P0008663) 연구비 지원에 의하여 연구되었음."

References

[1] Kang, J. H., 2017, viewed 2 November 2020,, Exim Overseas Economic Review 2017 Spring, <https://keri.koreaexim.go.kr/site/program/board/basicboard/list?boardtypeid=198&menuid=007005001>.

[2] Min, B., 2015, Development of 48V Lithium-ion Battery Pack for Mild Hybrid System, Auto Journal, 37:7 22-28.

[3] Ryu, M. Y., Kim, T. W., Park, S. S., Lee, J. S., Park, S. J., 2018, A Study on the Characteristics of the Indirect Air Cooling System of a Lithium-ion Battery Module for Vehicle, Trans. Korean Soc. Automot. Eng., 26:5 663-675, https://doi.org/10.

7467/KSAE.2018.26.5.663.

[4] Gang, Y. G., Kweon, H. K., Seo, M. S., Park, C. Y., 2009, Development of a New Li-Ion Pack-Battery for Improving the Electrical Properties, J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng., 8:2 90-95.

[5] Maleki, H., Hallaj, S. A., Selman, J. R., Dinwiddie, R. B., Wang, H., 1999, Thermal Properties of Lithium-Ion Battery and Components, J. Electrochem. Soc., 146:3 947-954, https://doi.org/10.1149/1.1391704.

[6] Mathewson, S., 2014, Experimental Measurements of LiFePO4 Battery Thermal Characteristics, Master's Thesis, University of Waterloo, Canada.

[7] Matweb, n.d., viewed 8 September 2020, <http://www.matweb.com/search/QuickText.aspx?SearchText=polypropylene>.

[8] Park, H. S., Eom, T. H., Jeong, S. M., Kim, J. H., You, Y. S., Won, C. Y., 2018, Charge Control Method of Li-ion Battery Considering Temperature Characteristic for Electric Vehicle, J. Korean Inst. Illum. Electr. Install. Eng., 32:4 102-110, http://doi.org/10.5207/JIEIE.2018.32.4.102.

[9] Escolano, D. B., 2014, Thermal Analysis of a $LiFePO_4$ Battery, Master Thesis, Barcelona School of Industrial Engineering, Spain.

[10] Kim, H. S., Han, B. Y., Park, H. K., 2011, Flow Analyses Around the Battery Pack for a NEV, J. Comput. Fluids Eng., 16:3 82-87, https://doi.org/10.6112/kscfe.2011.16.3.082.

[11] Yoon, J. W., Yun, S. H., Jang, D. S., Kim, Y. C., 2020, Numerical Study on the Air-cooling Performance of Li-ion Battery Using Heat Pipes with Various Shapes, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, 32:3 101-114, https://doi.org/10.6110/KJACR.2020.32.3.101.

Younghan Woo
Researcher in the Department of Materials Performance Evaluation, Gyeongbuk Hybrid Technology Institute. His research interest is secondary battery.
E-mail: wyh@ghi.re.kr

Seokwon Kang
Assistant professor in the Department of Automotive Engineering, Yeungnam University. His research interest is secondary battery.
E-mail: swkang@yu.ac.kr

Junsoong Lee
Researcher in the Department of Material Design Technology Research, Gyeongbuk Hybrid Technology Institute. His research interest is secondary battery.
E-mail: jslee@ghi.re.kr

Moonsic Park
Researcher in the Department of Material Design Technology Research, Gyeongbuk Hybrid Technology Institute. His research interest is secondary battery.
E-mail: pms8259@ghi.re.kr

Sungjin Kim
Team Leader in the Technology Research Institute, Bexel. His research interest is LFP battery cell manufacturing.
E-mail: ksj84@bexel.co.kr

Donggil Sung
Research Institute Director in the Technology Research Institute, CORN. His research interest is LFP battery pack manufacturing.
E-mail: dgsung.corn@gmail.com

Sungwook Joo
Team Leader in the Department of Materials Performance Evaluation, Gyeongbuk Hybrid Technology Institute. His research interest is secondary battery.
E-mail: jsw@ghi.re.kr