

CFD 해석을 적용한 18650 리튬-이온 배터리 팩의 열 해석 신뢰도 기초 분석

심창휘 · 김한상[†]

서울과학기술대학교 기계 · 자동차공학과

Basic Investigation into the Validity of Thermal Analysis of 18650 Li-ion Battery Pack Using CFD Simulation

CHANG-HWI SIM, 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 8 October, 2020
Revised 26 October, 2020
Accepted 30 October, 2020

Abstract >> The Li-ion battery is considered to be one of the potential power sources for electric vehicles. In fact, the efficiency, reliability, and cycle life of Li-ion batteries are highly influenced by their thermal conditions. Therefore, a novel thermal management system is highly required to simultaneously achieve high performance and long life of the battery pack. Basically, thermal modeling is a key issue for the novel thermal management of Li-ion battery systems. In this paper, as a basic study for battery thermal modeling, temperature distributions inside the simple Li-ion battery pack (comprises of nine 18650 Li-ion batteries) under a 1C discharging condition were investigated using measurement and computational fluid dynamics (CFD) simulation approaches. The heat flux boundary conditions of battery cells for the CFD thermal analysis of battery pack were provided by the measurement of single battery cell temperature. The temperature distribution inside the battery pack were compared at six monitoring locations. Results show that the accurate estimation of heat flux at the surface of single cylindrical battery is paramount to the prediction of temperature distributions inside the Li-ion battery under various discharging conditions (C-rates). It is considered that the research approach for the estimation of temperature distribution used in this study can be used as a basic tool to understand the thermal behavior of Li-ion battery pack for the construction of effective battery thermal management systems.

Key words : Li-ion battery(리튬-이온 배터리), Thermal management(열 관리), Thermal modeling(열적 모델링), CFD (computational fluid dynamics, 전산유체 역학), Heat flux(열 유속)

1. 서론

요즘 들어 환경오염과 지구 온난화에 대한 전 세계적인 관심이 급속히 증대되면서 다양한 산업 분야에서 CO₂ 및 유해 배기물을 적극적으로 저감시켜야 하는 상황이 전개되고 있다. 특히 수송 분야는 CO₂ 배출과 지구 온난화에 가장 큰 영향을 미치는 분야로 인식되어 각국 정부에서는 자동차 업계에 온실가스 배출을 줄일 수 있는 친환경, 고효율 자동차의 생산 및 시판을 독려하고 있다. 이를 위해 자동차 회사는 전기자동차(electric vehicles, EV), 하이브리드 자동차(hybrid electric vehicle, HEV) 등을 지속가능하고 친환경적인 대안으로 고려하고 있다¹⁻³⁾.

전기동력 자동차의 기술적 진보 및 상용화를 위한 근본적인 방안으로 높은 에너지 밀도, 출력 밀도의 배터리가 요구된다. 다양한 종류의 배터리들이 자동차 동력원의 대안으로 검토되어 왔는데, 리튬-이온 배터리(lithium ion batteries, LIBs)는 작은 크기, 높은 효율, 긴 수명, 낮은 자가 방전율, 낮은 전기저항 등의 장점으로 가장 경쟁력이 있는 것으로 인식되어 많이 적용되고 있다. LIBs가 전기 동력 자동차의 동력원으로 양산 적용되기 위해서는 사용되는 시스템의 작동 시 발생하는 장기적인 안정성, 나아가 안전 측면의 문제점과 더불어 성능 및 효율 측면의 추가적인 개선이 동시에 요구된다. 따라서 이를 효과적으로 해결하기 위한 배터리 관리 기술이 최근에는 핵심적인 연구 과제로 대두되어 적극적인 기술 개발 노력이 전개되고 있다⁴⁻⁶⁾.

LIBs는 자동차 동력원으로 적용되는 경우 많은 수의 단일 배터리로 구성된 배터리 팩의 형태로 장착되는데 배터리의 수명과 안전성을 고려할 때 배터리의 경우 20-40°C의 온도 범위에서 작동되는 것이 바람직하다. 배터리 모듈이나 팩에서 발생하는 배터리 과열이나 불균일한 온도 분포는 배터리의 성능 저하, 나아가 내구성, 안전성에 치명적인 문제를 야기한다.

그러므로 자동차의 넓은 작동 온도 범위와 주행 거리 등을 감안할 때 LIBs의 경우 효율적인 열 관리는 매우 중요한 과제로 인식되어 적극적 관련 연구

가 진행되고 있다.

특히 자동차 분야의 경우 내연기관 자동차와 대등한 수준의 상품성을 확보하기 위해 전기 동력 자동차의 주행 거리 확대 및 효율 증대가 되도록 이른 시일 내에 구현되어야 하는 도전적인 과제에 직면해 있다. 이를 해결하기 위해서는 핵심 부품인 LIBs의 에너지 밀도, 출력 밀도의 획기적인 향상이 필요한데, 이는 LIBs에 더 큰 열적 안전성과 관련된 문제를 야기할 수 있을 것으로 예상되어 관련한 다각도의 연구 개발 노력을 통한 해결책 마련이 요구되고 있다²⁾.

배터리의 안전한 작동, 우수한 성능, 긴 수명 등을 동시에 효과적으로 구현하기 위해서는 최적화된 배터리 열 관리 시스템의 구축이 필수적이다. LIBs 열 관리 시스템의 경우 성능 및 안전성 향상을 위해서 배터리 팩에서 방전 시 발생하는 열을 효과적으로 제거할 수 있도록 다양한 냉각 기술이 시도, 적용되고 있다. 공기 냉각, 액체 냉각, 상변화 물질(PCM) 냉각 등이 대표적인 방안으로 각각의 장점을 최대한 이용할 수 있는 응용 분야에 맞추어 단일 혹은 복합 적용된 방법으로 다양한 배터리 냉각 시스템이 개발되어 사용되고 있다⁷⁻¹⁰⁾.

배터리 냉각 시스템의 최적 설계를 위해서는 배터리 작동(충·방전 시) 조건에 따라 배터리 팩 내에서 발생하는 열량을 신뢰도 높게 파악하는 것이 중요하다^{2,11)}. 이는 다양한 배터리 작동 조건에 따라 발생된 열량을 효과적으로 제거하기 위한 배터리 열 관리 시스템의 냉각 모듈 용량(예: cooler 용량)을 산정하는데 필수적인 데이터이기 때문이다¹²⁾. 따라서 실제로 LIBs의 열적 거동을 이해하는 것은 최적의 배터리 열 관리 시스템의 구현을 위한 필수 과제가 된다.

일반적으로 LIBs의 열적 모델링은 배터리 내의 전기화학 반응 시에 나타나는 열 생성 문제와 전도를 통한 배터리 내부 구조에서의 열전달, 배터리 표면과 주위의 매질과의 대류에 의한 열전달 문제를 모두 포함하는 어려운 과제이다²⁾. 여기서 열 생성과 열전달 문제를 어떻게 다루느냐에 따라 다양한 접근 방법이 제시되고 있다²⁾. 우선 배터리 내의 열 생성은 실험을 통해 직접 측정하는 것과 계산을 통해 구하

는 2가지 방법이 크게 적용된다.

실험의 경우 calorimeter나 이와 유사한 장치들을 사용한다. 계산을 통해 열 생성을 구하는 방법은 크게 2가지로 나뉘는데, 전기화학적 모델에 근거하여 열 생성을 계산하는 경우 높은 정확도를 가지지만 계산이 매우 복잡해서 배터리 팩과 같은 복잡한 시스템을 분석하는 데는 적합하지 않은 것으로 알려져 있다.

따라서 배터리의 전기적 특성 측정에 근거한 모델이 널리 적용되고 있는데, 이는 비교적 계산이 간단하고 배터리 팩과 같은 복잡한 시스템에 적용하는데 적합한 것으로 평가되는데, Bernardi 등⁹⁾에 의해 제시된 식을 이용하여 배터리 내 열 생성을 계산한다.

배터리 내에서 발생하는 열 생성과 관련된 연구는 배터리 팩 및 단일 배터리에서 모두 중요하며, 특히 배터리 팩 내에 냉각 매질에 의해 발생하는 유동 현상들과 결부되어 발생하는 다양한 열전달 현상들(전도, 대류에 의한 열전달)이 관련되면 열 관리 시스템 구축 측면을 위한 개발 설계에서는 매우 복잡한 과제가 되어 집중적인 연구의 대상이 되고 있다.

최적화된 배터리 열 관리 시스템에 대한 연구는 전기동력 자동차의 효율 향상 및 주행 거리 증대를 위하여 필수적이지만 관련된 기초 연구 예를 들면 단위 원통형 LIBs의 열 해석과 이를 기초로 한 배터리 팩의 열 해석에 대한 신뢰도 있는 연구들은 아직 적극적으로 진행되지 못한 실정이다¹²⁾.

본 연구에서는 LIBs 시스템의 열 관리 기초 연구의 일환으로 단순화된 원통형 LIBs 팩(18650 배터리 팩)에 대한 온도 해석 신뢰도에 대한 기본적인 고찰을 수행하였다.

첫째로 단일 LIBs에 대한 온도 분포 파악을 위하여 18650 배터리에 대한 온도 측정 및 상용 CFD tool인 AVL FIRE (AVL List GmbH, Graz, Austria)를 적용한 열 해석을 수행하였다. 이를 통해 단순 배터리 팩 해석 수행에 필수적으로 요구되는 단일 원통형 배터리에 대한 열 유속 분포를 보다 신뢰도 있게 제공할 수 있었다.

둘째로 단순화된 공랭식 배터리 팩을 제작하여 배터리 방전 조건에서 배터리 팩 내 온도 분포 측정을 진행하고 얻어진 결과를 CFD 해석 결과와 비교하여 배터리 팩의 열 해석의 신뢰도를 검증할 수 있었다.

2. 배터리 팩 온도 측정 실험

2.1 단일 원통형 LIBs 온도 측정

본 절에서는 단순화된 배터리 팩의 온도 분포 파악을 위한 실험 연구의 첫 단계로 단일 원통형 배터리 셀에 대한 온도 분포 측정을 기술한다. 실험에 적용된 단일 LIBs (NCR18650B type)의 표면 온도 측정 실험을 위한 사진이 Fig. 1에 제시되어 있다.

단일 LIBs 방전 실험의 경우 주위 온도의 영향을 정확히 파악하기 위해서는 환경 챔버 등을 이용하여 공기를 순환시켜 공기 온도를 일정하게 유지 시키면서 실험이 진행되어야 하는데, 이런 경우는 강제 대류 냉각 조건이 된다. 본 연구에서는 공기의 추가 공급 등을 이용한 강제 냉각은 이루어지지 않았고 실험이 진행된 연구실 내 공기에 의한 자연적 냉각만이 고려된 상태에서 수행되었다¹⁰⁾. 특히 실험에서는 배터리와 배터리 홀더 사이의 접촉을 최소화하여 배터리 온도 변화에 홀더가 영향을 주지 않도록 세팅하였다.

배터리의 방전 조건은 1 C-rate로 정하여 실험을 수행하였다. 온도 측정은 배터리의 3개 부분(Point 1-3)에 대해서 J-type 열전대를 적용하여 진행되었다.

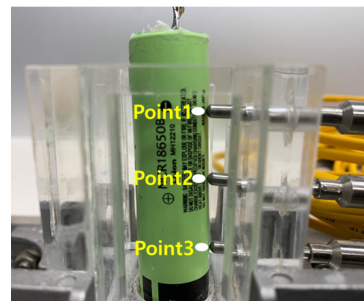


Fig. 1. Schematic of the single cylindrical Li-ion battery used for discharging experiment

측정된 3개의 온도를 평균하여 CFD 해석 결과와의 비교에 사용하였다.

2.2 단순 LIBs 팩 내 온도 측정

18650 원통형 LIBs 팩의 방전 조건 하에서 열 해석의 신뢰도 고찰을 위한 실험을 수행하였다. 본 실험에서는 배터리 방전 특성에 따른 배터리 팩 내 온도 분포 측정이 진행되었다. 이 실험을 위한 장치를 Fig. 2에 정리하여 나타내었다.

Fig. 2에 제시된 바와 같이 실험 장치는 LIBs 팩, 디지털 로더, 백금 측온 저항 온도 센서, 배터리 보호 회로, 배터리 냉각을 위한 공기 공급 장치 등으로 구성되었다. 실험의 핵심인 공기 냉각 방식의 단순 배터리 팩은 9개의 18650B LIBs를 3개씩 병렬로 구성하여 설계되었고 배터리 팩의 벽면은 아크릴 재질로 제작되었다. 자세한 형상은 Fig. 3에 나타내었다.

배터리 팩 내부의 주요 지점인 6개의 측정점(Fig. 3)을 지정하여 온도를 측정하였다. 배터리의 냉각 성능 분석을 위하여 배터리 팩의 입구를 통해 일정 유량의 공기를 유입시켜 IC 방전 조건에서 배터리 팩 내 온도 측정 실험을 수행하였다. 실험은 주위 온도 조건에서 진행되었다.

온도 측정 실험은 다음과 같은 순서로 진행되었다¹⁰⁾.
 1) 실험 시작 시 공기 유입 온도와 주위 온도를 확인하여 세팅한다.

2) 배터리 시험기와 측정 기기들도 전원을 켜 상태로 1시간 정도 안정화되도록 한다.

3) 배터리는 각각 완전 충전시킨다.

4) 이후에 배터리는 온도가 주위 온도와 유사해지도록 약 1시간 안정한 상태에 둔다(이는 배터리 셀 온도와 개회로 전압[open circuit voltage]이 충분히 평형 상태에 도달할 수 있도록 고려한 조치이다).

3. LIBs 팩 열 해석

3.1 단일 원통형 LIBs 열 해석

단일 원통형 배터리의 표면 온도를 구하기 위해 상용 CFD tool을 사용하여 열 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 열 해석을 위하여 AVL 사의 상용 CFD 코드인 FIRE v2019를 사용하였다.

해석에 적용된 모델은 electro-thermal 모델에 기반하여 상세한 전기화학적 반응은 고려하지 않고 주어진 방전 조건에서 18650 LIBs 내 방전율에 따라 배터리 내의 전기화학 반응으로 인해 발생하는 열 유속을 입력값으로 사용하였다. 이를 이용하여 발생된 열량이 배터리 표면을 통해 방출되는 물리적인 현상을 전도와 대류가 포함한 열전달 해석을 수행하여 배터리 표면 온도를 구하였다.

본 연구에 적용된 18650 원통형 배터리의 제원을 정리하여 Table 1에 나타내었으며 단일 원통형 배터리 열 해석을 위해 적용된 열 물성치 값들을 Table 2

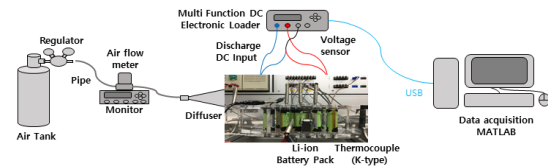


Fig. 2. Schematic of the experimental apparatus for the measurement of temperature rise inside the Li-ion battery pack during a constant discharge process

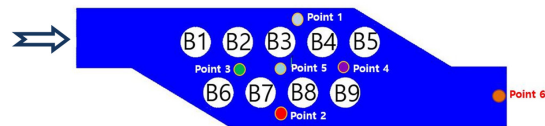


Fig. 3. Geometric configuration of the Li-ion battery pack adopted for the present study

Table 1. The specifications of NCR18650B cylindrical battery used for the current study

Parameter	Value
Rated capacity (Ah)	3.4
Nominal voltage (V)	3.6-3.7
Temperature (°C)	-20 to 60
Size (D×H : mm)	18.06×65

에 정리하여 나타내었다. 단일 원통형 배터리 해석을 위한 격자는 Fig. 4에 나타내었다.

3.2 단순화된 LIBs 팩 열 해석

본 연구에서는 공기 냉각 방식 배터리 팩의 냉각 성능 파악을 위하여 단순화된 LIBs 팩 열 해석을 수행하였다. Fig. 5는 열 해석에 적용된 배터리 팩의 형상 및 해석을 위해 생성된 격자를 보여준다. 해석의 편의성을 위하여 배터리는 매끈한 형태의 실린더 형태로 CAD 소프트웨어에서 단순화 모델링되어 격자 생성에 적용되었다. 공기 냉각 방식을 적용하는 배터리 팩이므로 공기를 매질로 한 열, 유동 해석을 진행하였다. 해석에 적용된 경계조건을 Table 3에 정리하여 제시하였다. Table 3에 나타난 바와 같이 아크릴로 제작된 배터리 팩 벽면은 벽 경계조건을 적용하

였고, 팩의 입구는 속도 경계조건을, 팩의 출구에는 압력 경계조건을 적용하여 해석을 수행하였다.

대부분의 배터리 팩 열 해석의 경우 배터리 주위의 냉각 통로가 주요 해석 대상이므로 배터리 방전 중 발생하는 열 유속은 배터리 바깥 표면에서 CFD 해석의 경계조건 형태로 제공되어 계산을 진행하게 된다. 따라서 9개의 단일 원통형 배터리의 주위에서 발생하는 열 유속 값을 정확히 지정해야 신뢰도 있는 해석 결과를 얻을 수 있다.

본 논문에서는 단일 원통형 배터리에 대한 CFD 열 해석에 얻어진 결과를 활용하여 방전 중에 발생하는 배터리 표면에서의 열 유속 데이터를 제공하여 열 해석의 신뢰도를 향상시키고자 하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 단일 원통형 LIBs 셀 온도 특성

Fig. 6은 18650 단일 원통형 LIBs에 대한 배터리 표면 온도 측정과 CFD 열 해석을 통하여 얻어진 온

Table 2. Macro-scale thermo-physical properties for 18650 battery thermal analysis

Property	Value
Specific heat capacity (J/kg·K)	80
X and Y conductivity (W/m·K)	4
Z conductivity (W/m·K)	50
Reference density (kg/m ³)	1,800
Density (kg/m ³)	Anode: 2,700 Cathode: 9,000
Specific heat capacity (J/kg·K)	Anode: 870 Cathode: 381
Thermal conductivity (W/m·K)	Anode: 200 Cathode: 380

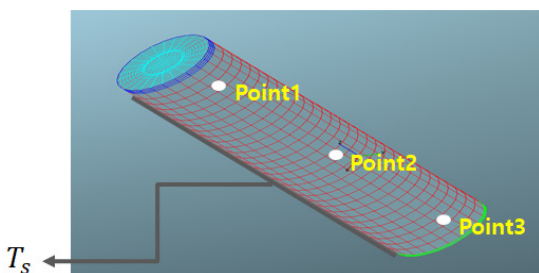


Fig. 4. Single cylindrical Li-ion battery model adopted for the simulation

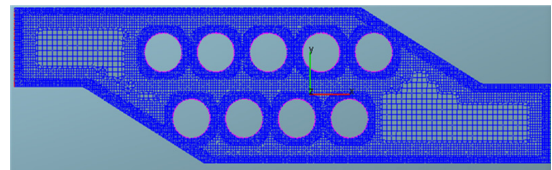


Fig. 5. 3-D mesh configuration of the Li-ion battery pack used for CFD thermal simulation

Table 3. Boundary conditions used for the thermal analysis of simplified Li-ion battery pack

Parameter	Value (or condition)
Battery outer surface	Wall heat flux
Battery pack wall	No-slip
Air inlet temperature (°C)	20°C
Air inlet velocity (m/s)	0.25
Battery pack (Acrylic) wall density (kg/m ³)	1.19
Specific heat capacity (J/kg·K)	1,470
Thermal conductivity (W/m·K)	0.19

도를 비교하여 나타낸 것이다. 실험과 CFD 해석에서 각각 시작 온도와 실험이 끝나는 온도 차이는 매우 작지만 중간 시간 조건에서 실험과 CFD 해석 온도 분포 차이가 남을 알 수 있다. 실험과 CFD 해석 간 시작 온도 간 차이의 발생은 실험의 경우 공기 유동을 완전히 차단하는 데 한계가 있어 배터리 표면 온도가 일정 상태로 안정화되는 데 실질적인 한계가 존재하기 때문이다.

온도 측정 및 CFD 해석에 의한 온도 분포 간 차이는 몇 가지 요인으로 분석될 수 있다. 우선, CFD 해석의 경우 단일 원통형 LIBs의 표면 온도 계산을 위해서 IC 방전 조건 하에서 배터리 전기화학 반응에 의해 생성되는 열량을 필요로 한다. 그런데 배터리 내부의 전기화학 반응을 모두 모델링하고 리튬-이온의 이동을 모두 고려하는 모델링을 적용하지 않는 경우는 주어진 대상 배터리에 대한 다양한 방전 조건 하에서 측정을 통해 열량을 구하여야 하는데, 본 연구에서는 실험을 통해 신뢰도 있는 발생 열량을 구하는 데 한계가 있었다. 그리고 배터리의 표면 온도를 결정하는 주요 메커니즘은 배터리 내부에서 발생된 열을 외부로 방출하는 열전달 과정인데 여기서 주위 대류 열전달 계수가 주요 변수가 된다. 이 값은 주위 실험 조건에 따라 크게 변화하므로 CFD 해석에서 정확한 열전달 계수를 지정하는 데 한계가 존재한다. 자연 대류 및 강제 대류 등 주위 조건을 정확

히 제어하여 실험을 진행한다면 보다 타당한 해석에 적용할 수 있는 대류 열전달 계수값을 산정할 수 있을 것으로 사료된다.

배터리 내에서 발생하는 열량과 대류 열전달 계수 모두 정확히 산정하는 데는 현실적으로 한계가 존재하는 변수들이기 때문에 배터리 열 해석의 신뢰도를 높이는 것은 매우 도전적인 과제임을 알 수 있다.

특히, 단일 배터리의 열 해석과 단순화된 배터리 팩 열 해석의 효과적인 연계를 위해서는 요구되는 배터리 표면에서의 열 유속을 예측하는 것이 중요해진다.

본 연구에서는 이와 같은 해석에서의 신뢰도 제한점을 현실적으로 보완, 극복하기 위하여 대류 열전달 계수를 변화시키면서(5-10 W/m²·K) 해석을 수행하고 이를 통해 산정된 배터리 표면에서 열 유속 결과를 다음 절에 제시한 단순화된 배터리 팩 열 해석을 위한 경계조건으로 적용하였다.

4.2 단순화된 공랭식 LIBs 팩 온도 특성

Fig. 7은 공랭식 단순화 배터리 팩의 IC 방전 조건에서 측정된 배터리 팩 내의 온도 분포를 6개의 주요 지점에서 배터리 작동 시간에 따라 표시한 것이다. 배터리 방전 조건에서 일정 유량의 공기를 팩 내로 유입시켜 냉각이 진행되므로 방전 초기 약 250초 정도 기간에는 팩에 설치된 9개의 원통형 LIBs에서 발생하는 열로 인하여 6개의 측정 점에서 일제히 온도가 상승하는 경향을 나타낸다. 이후에는 계속되는 배터리의 방전으로 인한 내부 열 발생이 배터리 팩 형

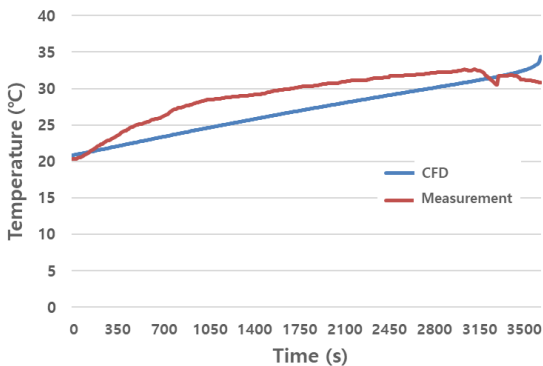


Fig. 6. Comparison of surface temperature profiles of the single cylindrical battery for measured and CFD simulated cases during a 1C discharge

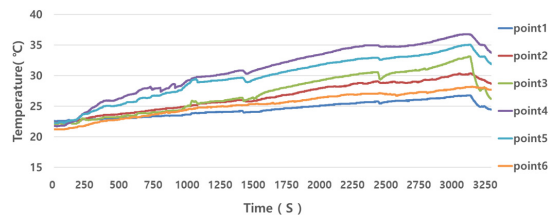


Fig. 7. Measured temperature profiles with time at 6 monitoring points inside the simplified air-cooled Li-ion battery pack (during a 1C discharge)

상에 따른 유동 분포 및 이에 따른 각 부분에서 냉각 특성 변화로 배터리 팩의 온도 변화는 측정점 위치에 따라 각각 다른 특성을 나타낸다.

본 실험의 배터리 팩에서는 시간이 지남에 따라 Point 4와 5에서 온도 증가가 크게 나타나며 시간이 흐를수록 그 경향은 심화된다. Point 4와 5의 경우 단위 배터리들 사이에 위치하고 있는 지점으로 냉각 측면에서 다른 위치보다 불리하므로 온도의 상승이 높은 것으로 파악된다. 특히 Point 4는 배터리 팩의 후반부에 위치하고 있어 앞에 배치된 배터리의 발생 열의 영향도 추가적으로 받을 것으로 판단되어 가장 높은 온도 분포를 나타냄을 이해할 수 있다.

반면 Point 1의 경우 배터리 팩으로 유입되는 공기 유동을 바로 통과될 수 있는 위치로 냉각 측면에서 유리한 위치이며, Point 6은 배터리 팩 출구에 위치하고 있어 단일 배터리의 발열의 영향에 직접 영향을 받지 않는 부분이어서 온도의 상승이 다른 측정점에 비하여 상대적으로 작음을 알 수 있다. 측정 실험의 경우 진행된 3,300 s의 시간 동안 유입되는 공기 유량에 의한 냉각 효과와 배터리 발열의 평형 효과

가 명확히 나타나지는 않음을 알 수 있다.

Fig. 8은 3가지 열 유속 경계조건에 대하여 CFD 열 해석을 통한 단순 배터리 팩의 온도 분포를 나타낸 것이다. 본 해석에서는 단일 원통형 배터리 열적 연구에서 얻어진 배터리의 표면 온도와 대류 열전달 계수를 적용하여 배터리 표면에서의 열 유속을 계산하였다. 이를 배터리 팩 온도 분포 해석을 위한 경계 조건으로 적용하였다.

공랭식 배터리 팩의 경우 유입되는 공기로 인해 강제 대류 냉각 효과가 나타나므로 대류 열전달 계수를 4-10 W/m²·K로 변화시키면서 해석을 수행하였다. Fig. 8은 그중 대류 열전달 계수가 4, 6, 8 W/m²·K인 3가지 조건에 대한 결과를 각각 나타낸 것이다. 배터리 팩 내의 온도 분포는 실험에서 얻어진 경향과 대체적으로 일치하는 경향을 나타냄을 알 수 있다.

Table 4는 다양한 열전달 계수 조건에 의하여 구해진 배터리 표면 열 유속에 의한 CFD 해석 결과를 2개의 대표적인 측정점에서 비교, 정리한 것이다.

단위 원통형 배터리의 경우 배터리 팩에 장착될 때 방전 과정에서 배터리 표면을 통해서 방출되는 열량이 배터리 주위의 유동 및 열전달 특성에 따라 변화하게 된다. 그러므로 동일한 벽면 열 유속을 지정하는 것도 배터리 팩 열 해석의 신뢰도 향상에 제한을 주는 요인이 된다.

배터리와 배터리 팩 모두를 포함한 연계 해석을

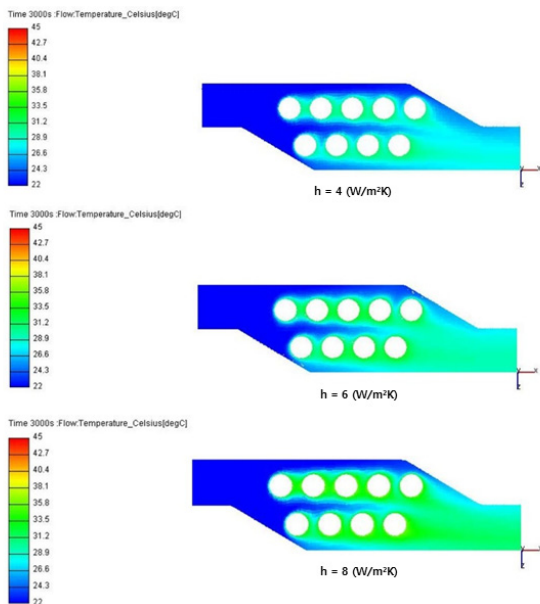


Fig. 8. Temperature distributions inside the simplified air cooled Li-ion battery pack used for this study (at 3,000 s, during a 1C discharge)

Table 4. Measurement and CFD calculated temperatures at the two measuring points for different heat transfer coefficients

	Temp. (°C) (at Point 1)	Temp. (°C) (at Point 4)
Measurement	26.6	36.4
Calculation (single battery thermal simulation at $h=4$ W/m ² ·K)	27.8	34.8
$h=5$ W/m ² ·K	28.3	35.6
$h=6$ W/m ² ·K	28.8	36.2
$h=7$ W/m ² ·K	29.8	37.2
$h=8$ W/m ² ·K	30.5	37.9

수행한다면 배터리 팩을 구성하는 9개의 단일 배터리의 표면에서 열 유속을 각각 구할 수 있다. 이 경우 배터리와 배터리 팩의 2개의 영역에서 동시에 계산이 진행되어야 하므로 해석이 매우 복잡해지고 해석 시간도 많이 소요되는 단점이 있다¹¹⁾.

본 논문에서는 연계 해석의 결과를 활용하여 9개의 배터리 간 열 유속 차이를 가중치를 써서 고려하였다. 이 때 사용된 가중치는 Table 5에 정리하여 나타내었다.

가중치는 1보다 작은 값은 배터리 표면 열 유속이 평균에 비해 다소 작음을 의미하고 1보다 큰 값은 평균보다 다소 큼을 의미한다. 가중치는 최대 4% 미만 정도로 제시되었다.

또한 열전달 계수 $6 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ 인 조건에서 제시된 가중치를 단위 배터리 표면 열 유속 계산값에 적용하여 CFD 해석을 수행하였으며 온도 측정값과 비교하였다. 이 결과는 Table 6에 정리하여 나타내었다.

Table 6에 나타난 바와 같이 온도 측정 결과와

Table 5. Weighting factors used for the calculation of heat flux on the cylindrical battery surface

Battery No.	Weighting factor	Battery No.	Weighting factor
B1	1.04	B6	1.035
B2	1.01	B7	1.01
B3	0.98	B8	0.985
B4	0.975	B9	0.97
B5	1.01		

Table 6. Comparison between measurement and CFD simulation results at $h=6 \text{ (W/m}^2\cdot\text{K)}$ condition for the six monitoring points (at $t=3,000 \text{ s}$)

	Measurement (°C)	CFD Calculation (°C)
Point 1	26.6	28.8
Point 2	30.1	31.2
Point 3	32.5	32.0
Point 4	36.5	36.2
Point 5	34.6	34.1
Point 6	27.8	27.2

CFD 해석($t=3,000 \text{ s}$)에 의한 결과가 거의 유사한 경향을 보임을 알 수 있다. 이러한 경향은 배터리 팩의 열 해석의 신뢰도에 가장 큰 영향을 미치는 인자가 단일 배터리 표면에서의 벽면 열 유속 크기를 가급적 정확히 산정하는 것이 가장 중요한 것이라는 점을 나타낸다. 이는 배터리 팩의 열 해석 시 단일 배터리 열 해석에 대한 다양한 방전 조건에서의 실험 데이터와 열전달 조건 등에 대한 면밀한 분석 연구를 통한 연계 연구가 진행되어야 함을 나타낸다.

이와 같은 연계 연구 결과는 LIBs의 열적 거동을 보다 정확히 이해하여 효율적인 배터리 열 관리 시스템을 구축하는 데 매우 중요한 기반이 되는 해석 기술이 될 수 있는 가능성을 제시한다.

5. 결론

LIBs의 상용화 개발을 위한 주요 이슈인 내구성, 안전성, 에너지 및 출력 밀도의 향상 등은 배터리 및 배터리 팩의 열적 특성과 밀접한 관계를 가진다. 따라서 LIBs의 열적 거동에 대한 체계적인 이해 및 고찰은 배터리 연구에서 핵심적인 과제로 인식되고 있다.

본 논문에서는 배터리 시스템의 열 관리 기초 연구로 단순화된 공랭식 원통형 LIBs 팩(18650 배터리 팩)에 대한 열 해석의 신뢰도에 대한 기본적 고찰을 진행하였다. CFD 열 해석과 온도 측정 실험을 통해 얻어진 결과를 다음과 같이 정리하였다.

1) 단일 원통형 배터리에 대한 전기화학적-열적 모델 적용을 통하여 배터리의 대류 열전달 계수 조건에 따른 발열량과 배터리 표면에서의 열 유속을 파악하여 이를 단순 배터리 팩 열 해석의 열 유속 경계조건 데이터로 활용하였다.

2) 단일 배터리 방전 시의 열 관리 연구에서 배터리 표면에서 온도 측정값과 CFD에 의한 해석값은 차이를 나타내는데, 이의 주요 원인은 배터리 내부에서의 발생 열량과 실험 시 주위 냉각 조건에 대한 정확한 산정에 기본적 불확실성이 존재하기 때문이다.

3) 단순화 배터리 팩의 온도 측정에서는 배터리

팩의 출구 쪽 가운데 지점(Point 4)에서 온도(실험 결과: 36.5°C, 해석 결과: 36.2°C)가 가장 높게 나타난 반면 가장 낮은 온도는 공기 유동에 직접적인 영향을 받는 Point 1 (실험 결과: 26.6°C, 해석: 28.8°C)에서 나타난다.

4) 단위 원통형 배터리와의 연계 해석 시 각 배터리 표면에서 열 유속의 가중치를 고려하여 배터리 팩 내 온도 분포 예측의 정확도를 높일 수 있다.

본 연구에서는 배터리 팩 열 해석 결과가 단위 원통형 배터리의 열 해석과 연계하여 진행 시 해석의 신뢰도가 개선될 수 있는 가능성을 제시하였다.

향후, 다양한 배터리 방전 조건에서의 배터리 성능 관련 데이터를 체계적으로 축적하고 이를 데이터 베이스화하여 열 해석에 적용한다면 보다 신뢰도 높은 배터리 팩 내 온도 분포를 구할 수 있을 것으로 기대할 수 있으며 이러한 방법은 다양한 배터리의 작동 조건에 공통 적용이 가능하므로 배터리의 열적 성능 및 내구성 향상을 위한 기본 설계 및 개발 프로세스에 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 AVL의 University Partnership Program 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 포함합니다.

References

1. S. Shahid and M. Agelin-Chaabn, "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, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.01.003>.
2. E. Gümüşsu, Ö. Ekici, and M. Köksal, "3-D CFD modeling and experimental testing of thermal behavior of a Li-Ion battery", *Applied Thermal Eng.*, Vol. 120, 2017, pp. 484-495, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.04.017>.
3. T. Wang, K. J. Tseng, J. Zhao, and Z. Wei, "Thermal investigation of lithium-ion battery module with different cell arrangement structures and forced air-cooling strategies", *Applied Energy*, Vol. 134, 2014, pp. 229-238, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.013>.
4. Y. Deng, C. Feng, J. E. H. Zhu, J. Chen, M. Wen, and H. Yin, "Effects of different coolants and cooling strategies on the cooling performance of the power lithium ion battery system: a review", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 142, 2018, pp. 10-29, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.06.043>.
5. W. Cao, C. Zhao, Y. Wang, T. Dong, and F. Jiang, "Thermal modeling of full-size-scale cylindrical battery pack cooled by channeled liquid flow", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 138, 2019, pp. 1178-1187, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.04.137>.
6. R. Mahamud and C. Park, "Spatial-resolution, lumped-capacitance thermal model for cylindrical Li-ion batteries under high Biot number conditions", *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 37, No. 5, 2013, pp. 2787-2801, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2012.06.023>.
7. L. H. Saw, Y. Ye, A. A. O. Tay, W. T. Chong, S. H. Kuan, and M. C. Yew, "Computational fluid dynamic and thermal analysis of Lithium-ion battery pack with air cooling", *Applied Energy*, Vol. 177, 2016, pp. 783-792, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.122>.
8. 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, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.016>.
9. D. Bernardi, E. Pawlikowski, and J. Newman, "A general energy balance for battery systems", *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 132, No. 1, 1985, pp. 5-12. Retrieved from <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1.2113792/pdf>.
10. G. Zhang, L. Cao, S. Ge, C. Y. Wang, C. E. Shaffer, and C. D. Rahn, "In situ measurement of radial temperature distributions in cylindrical Li-Ion cells", *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 161, No. 10, 2014, pp. A1499-A1507, doi: <https://doi.org/10.1149/2.0051410jes>.
11. S. Basu, K. S. Hariharan, S. M. Kolake, T. Song, D. K. Sohn, and T. Yeo, "Coupled electrochemical thermal modelling of a novel Li-ion battery pack thermal management system", *Applied Energy*, Vol. 181, 2016, pp. 1-13, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.049>.
12. S. Baek, S. Yu, and H. S. Kim, "Experimental study of cooling performance comparison of a 18650 Li-ion unit battery module (air cooling vs. PCM-based cooling)", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 29, No. 2, 2018, pp. 212-218, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2018.29.2.212>.