

# 원통형 셀 기반 직렬배터리팩의 외형(정사/직사면체) 차이에 의한 내부 열분포 기초해석

한동호<sup>1</sup>, 이평연<sup>1</sup>, 박진형<sup>1</sup>, 김종훈<sup>1†</sup>, 유기수<sup>2†</sup>, 조인호<sup>2</sup>

## Inner Temperature Distribution by Two Appearances of Series-Cell Configured Battery Pack using Cylindrical Cells

Dong-Ho Han<sup>1</sup>, Pyeng-Yeon Lee<sup>1</sup>, Jin-Hyeng Park<sup>1</sup>, Jonghoon Kim<sup>1†</sup>, Kisoo Yoo<sup>2†</sup>, and In-Ho Cho<sup>3</sup>

### Abstract

Given that lithium-ion batteries are expected to be used as power sources for electric and hybrid vehicles, thermodynamics experimentation and prediction based on experimental data were performed. Thermal, electrochemical, and electrochemical/electrical - thermal models were used for accurate battery modeling. Various applications of different battery packs were demonstrated, and thermal analysis was performed using the same experimental conditions for square and rectangular battery packs. Accurate thermal analysis for a single cell should be prioritized to determine the thermal behavior of the battery pack. The energy balance equation, which contains heat generation and heat transfer factors, defines the thermal behavior of the battery pack. By comparing battery packs of different shapes tested under the same condition, this study revealed that the rectangular battery pack is superior to the square battery pack in terms of the maximum temperature of inner cells and temperature variation between cells.

**Key words:** Battery thermal management system, Thermal behavior, Comsol, Battery pack

### 1. 서 론

현재 리튬이온배터리는 단일 셀 뿐만 아니라 고전압 및 전력구동용 어플리케이션의 증가로 직렬, 병렬 및 직병렬조합인 배터리팩의 형태로 다양하게 사용된다. 기존의 휘발유를 사용하는 자동차의 숫자가 증가하면서 대기 오염에 대한 문제도 대두되어 하이브리드나 전기 자동차(EV)에 대한 수요도 증가하고 있다. 현재까지 높은 에너지 밀도와 출력을 가지는 리튬 이차전지에 대한 많은 연구가 진행되었고 전기 자동차나 에너지 저장변환시스템

(Energy storage system)에 실제로 적용되고 있다. 다양한 어플리케이션에 배터리팩을 적용하기 위하여 배터리팩이 탑재되는 공간의 상이함에 따라서 다양한 배터리팩 외형의 설계가 불가피하다. 본 논문의 배터리팩 3D 모델에서도 볼 수 있듯이, 같은 직렬배터리팩이라 하더라도 외형(직사면체/정사면체)의 차이에 의해 배터리팩 내부의 상이한 열분포가 나타난다. 이러한 배터리팩의 구동을 위한 기본적인 온도 조건은 Room Temperature 즉, 상온(25℃)으로서 배터리팩 내부의 전기화학적 상태가 안정되어 있음을 가정한다. 하지만, 배터리 셀에서 배터리 팩으로 확장됨에 따라서 배터리팩을 구동하기 위한 전류가 증가하고 더 많은 열이 발생하게 되어 배터리팩 내부의 온도가 충전 및 방전 과정 중 허용 가능한 범위를 벗어날 가능성이 존재한다. 여름과 겨울의 온도 차이가 뚜렷한 우리나라의 기후 특성 뿐 아니라 전기 자동차와 같은 여러 전력구동용 어플리케이션에 배터리팩을 적용하기 위해서는 특수한 상황에서의 정확한 배터리팩의 온도 관리(thermal management system; TMS)의 중요성이 더해지고 있다. 배터리 셀에서 고전압, 고용량인 배터리팩으로 확장됨에 따라서 배터리팩 내부의 열 증가로 인한 안전에 대한 문제로 배터리팩에 대한

Paper number: TKPE-2018-23-6-6

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

<sup>1†</sup> Corresponding author: whdgn0422@cnu.ac.kr, Dept. Electrical Engineering, Chungnam National University  
Tel: +82-42-821-5657 Fax: +82-42-821-7606

<sup>2†</sup> Corresponding author: kisooyoo@yu.ac.kr, Mechanical Engineering, Yeungnam University  
Tel: +82-53-810-2445 Fax: +82-53-810-2445

<sup>1</sup> Electrical Engineering, Chungnam National University

<sup>3</sup> Propulsion System Research Team, Korea Railroad Research Institute

Manuscript received Feb. 10, 2018; revised Feb. 20, 2018; accepted Aug. 13, 2018

— 본 논문은 2017년 전력전자학술대회 우수추천논문임

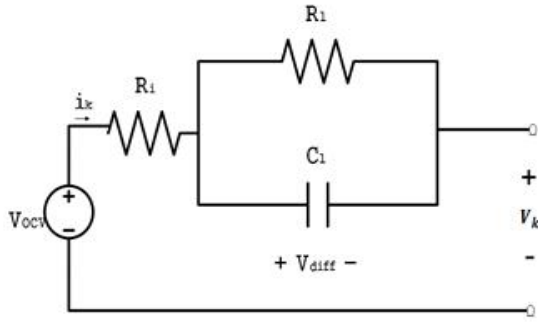


Fig. 1. Equivalent circuit model of lithium-ion battery.

쿨링(cooling)등 여러 가지 해결방안들이 제시되고 있지만 낮은 표면/면적 비율, 배터리팩 내부의 셀들과 표면 사이의 온도 분포를 일정하게 제어하지 못하는 단점 때문에 정확한 해결책으로 선정되지 않고 있다. 배터리팩에 대한 안전문제를 해결하기 위하여 시중에 판매되기 이전에 여러 가지 테스트를 거치지만, 특수한 상황에서 사용되는 배터리팩의 외형 차이에 의한 내부 열 분포 해석이 반드시 요구되며, 배터리팩을 구성하는 내부 구성물질의 차이(고출력성 NCA, 고용량성 NMC)에 의한 열 분포 추가 해석이 반드시 진행되어야 한다. 본 논문에서는 18650 타입의 원통형 셀의 직렬배터리팩(16S1P)의 두 가지 외형(정사면체;4X4/직사면체;2X8) 차이에 의한 내부의 열 분포 해석을 실시하였다. 두 가지 외형의 배터리팩 모두 전류 프로파일을 동일하게 적용하였다고 가정하고 배터리팩 내부의 셀 간 온도분포 해석 및 외형의 차이에 대한 비교분석을 실시하였다. 본 연구에서는 Butler-Volmer Reaction Kinetics에 기초한 전기화학 모델을 이용하여 리튬전지의 전기적 성능을 예측하였으며 전도/대류 열전달 모델을 적용하여 리튬전지모듈의 열적 거동을 분석하였다. 이때 전기화학/열전달의 상호작용 해석을 위하여 다중 물리 (Multi-physics) 전문 해석 프로그램인 COMSOL 을 이용하여 해석을 수행, 직사면체(2x8) 직렬배터리팩이 정사면체(4x4) 직렬배터리팩 보다 내부의 열 분포가 양호함을 제시하였다.

## 2. Equivalent Circuit Model

그림 1은 배터리팩을 구성하는 단일 셀에 대한 기본적인 RC-Ladder로 구성되는 전기적 등가회로(Electrical Equivalent Circuit Model)를 나타낸다. 배터리의 용량은 배터리가 완전히 충전 될 때로부터 도출될 수 있는 최대 충전 량으로 정의된다.

$$SOC = SOC_0 - \frac{1}{Q} \int i dt \quad (1)$$

식 (1)에서 볼 수 있듯이, SOC(State of Charge)는 충전량을 나타내는 지표로 사용되며 열역학적으로 양극과 음극에 리튬이온이 인터칼레이션(Intercalation) 되는 총량을

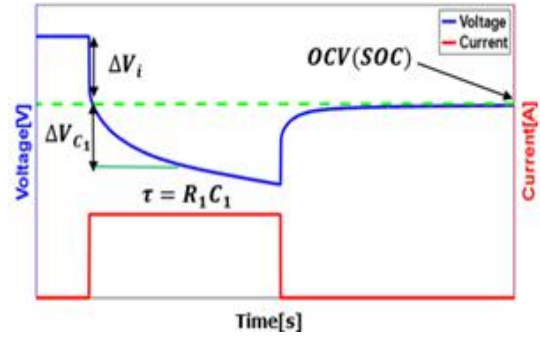


Fig. 2. Resistance of lithium-ion battery.

의미한다. 전기적 등가회로의 파라미터 중, OCV(Open Circuit Voltage)는 단일 셀의 실제 용량을 기반으로 한 SOC에 따른 Rest 이후 전류가 인가되지 않을 때의 안정화된 전압을 의미한다.  $R_i$ 는 옴 저항(Ohmic Resistance)으로 열적 거동모델에서 발열량에 대한 가장 큰 지표이며  $R_1$ 와  $C_1$ 는 각각 분극 저항(Polarization Resistance)과 커패시턴스(Polarization Capacitance)를 나타낸다. 저항은 방전곡선에서 추출하였으며 전류가 인가 될 때 순간적으로 발생하는 전압 강하를 통하여  $R_i$ 를 도출하였으며, 비선형적으로 나타나는 전압 강하를 통하여  $R_1$ 과  $C_1$ 를 도출하고 이를 그림 2에 나타내었다<sup>[1]</sup>.

## 3. Thermal Behavior

배터리팩의 정확한 열 해석을 위하여 단일 셀에 대한 열 해석이 우선되어야 한다. 리튬 이차전지 시스템의 설계 및 연 관리에서는 전지 온도 및 열 발생률에 대한 신뢰할 수 있는 예측이 필요하다. 셀의 온도는 충전 및 방전 과정에서 전기화학반응이나 상변화 등, 여러 가지 혼합효과로 인해 변화한다<sup>[2]</sup>.

$$Heat_{total} = Heat_{in} - Heat_{out} + Heat_{ge} - Heat_{dis} \quad (2)$$

식 (2)은 배터리의 기본적인 에너지 균형 방정식을 나타낸다.  $Heat_{in}$ 은 태양열과 같이 배터리 내부에서 일어나는 반응이 아닌, 외부에서 가해지는 열 에너지를 의미한다.  $Heat_{ge}$ 은 충전 및 방전 과정에서 배터리 내부의 전기화학적 반응으로 생성되는 열에너지(Heat generation)을 나타낸다.  $Heat_{out}$ 과  $Heat_{dis}$ 는 여러 가지 기법의 쿨링(Cooling)이나 자연적인 열 발산, 등 배터리 외부로 빠져나가는 열에너지를 나타낸다. 배터리의 전체적인 에너지 균형은 외부와 내부에서 더해지는  $Heat_{in}$ 과  $Heat_{ge}$ 의 합에서  $Heat_{out}$ 과  $Heat_{dis}$ 을 뺀 값으로 나타나며 열에너지의 차이로 발열량을 예측하고 열적 거동 모델에 사용될 수 있다. 리튬 이온 배터리의 발열량은 식 (3)에서 볼 수 있듯이, 가역적인 손실로 발생하는 열과 비가역적인 손실로 나타는 열로 나타낼 수 있다.

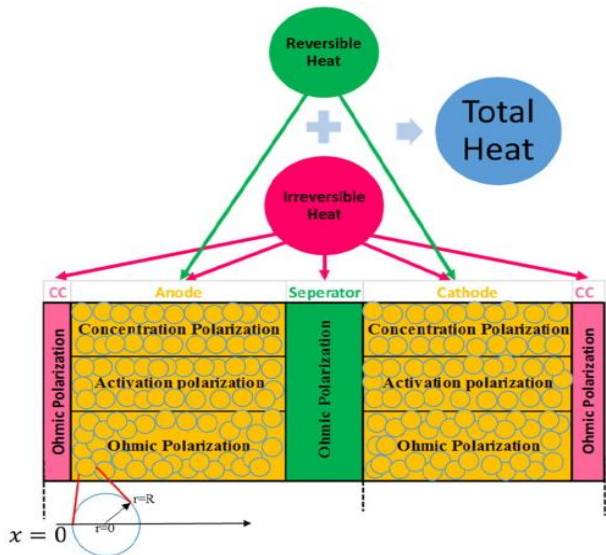


Fig. 3. Principle of heat generation<sup>[5]</sup>.

가역적인 손실은 리튬이온이 전해질과 전극사이에서 인터칼레이션 될 때 나타나는 손실로 순간적인 포텐셜 저하가 나타나지만 이 차이는 매우 작고, 대부분의 열 발생은 비가역적인 손실로 인하여 발생한다. 비가역적인 손실은 배터리 내부 옴릭 저항으로 나타낼 수 있으며 식 (5)에서 볼 수 있듯이, 비가역적인 손실로 발생하는 열역학적인 발열량 예측은 리튬 이온 배터리의 전기적 등가회로 모델에서 도출된 저항으로 예측할 수 있다<sup>[3]</sup>.

### 3.1 Heat Generation

그림 3은 직렬배터리팩(16S1P)의 외형(정사면체;4X4/직사면체;2X8)의 기초적인 열 해석을 하기 이전에 단일 셀의 열 발생(Heat Generation)에 대한 모식도를 제시하였다. 리튬 이차전지에서의 열 발생은 전류집전장치(Current Collectors), 분리막(Separator) 그리고 전극(Electrodes)에서 나타나는 리튬 이차전지의 Heat generation 반응을 나타낸다. Current collector에서는 전자가 이동하는 옴릭 저항(Ohmic resistance)에 의해 열 발생이 나타나며, Separator에서는 전해질을 통과하는 리튬이온의 옴릭 저항, Electrodes에서는 전자 전도성 물질로부터 전자가 통과하는 옴릭 저항과 전해질로부터 리튬이온을 통과시키는 옴릭 저항 및 전기화학적 반응이 일어나는 전극에서의 활성화 농도 및 분극으로 인하여 열 발생이 나타난다<sup>[4]</sup>.

$$Q_{total} = Q_{rev} + Q_{irr} \quad (3)$$

$$Q_{rev} = -I * T * dE/dt \quad (4)$$

$$Q_{irr} = I^2 R \quad (5)$$

$$Q = I(U - V) - I(TdU/dT) \quad (6)$$

식 (3)과 그림 3에서 볼 수 있듯이 리튬이차전지의 열 발생(Heat generation)은 가역적 반응(Reversible process)과 비가역적 반응(Irreversible process)로 나누어진다. 가역적 반응(Reversible process)는 충방전 1회를 한 사이클이라 할 때 사이클에서 엔트로피의 총량에는 변화가 없는 반응으로 리튬이온의 인터칼레이션 과정에서 일어나는 전극에서의 반응을 예로 들 수 있다<sup>[6]</sup>. 반면에 비가역적 반응(Irreversible process)은 배터리 내부에 전류가 흐를 때 저항에 의한 열 발생으로 엔트로피 증가에 따라 일부 유효일이 열에너지로 전환되어 나타난다. 식 (4)과 식 (5)는 Reversible heat과 Irreversible Heat에 대해 간단히 도식화 하였다. 셀의 발열은 열량 측정법으로 결정하거나 수학적으로 모델링 할 수 있으며 T는 배터리의 온도,  $-IT \frac{dE}{dT}$ 는 엔트로피 계수, I는

충전 및 방전 과정에서 사용한 전류, R은 내부저항을 의미한다. 단일 셀의 발열량은 전류와 저항에 비례하여 증가하며  $R_i$ 를 사용하여 비가역적 손실에 따른 발열량을 도출할 수 있으며 이를 식 (5)에 나타내었다. 식 (6)는 배터리의 발열량을 구하기 위해 Reversible heat과 Irreversible heat이 포함된 최종적인 열역학적 에너지 균형 방정식이다. 저항은  $V_{ocv}$ 에서 단자 전압  $V_k$ 를 뺀 배터리 내부 저항에 의한 전압 손실로 나타낼 수 있으며, 이를 통한 가역적 손실과 비가역적 손실로 나타는 전체적인 발열량을 나타내었다<sup>[7]</sup>. 원통형 단일 셀에 대한 실험결과를 바탕으로 추출한 데이터로 부피에 따른 열용량(Heat capacity) 및 발열량을 구한 후, Comsol 프로그램에서 Thermal boundary condition과 Initial condition을 설정하여 기초적인 열 해석을 시행하였다.

### 3.2 Heat Transfer

그림 4는 단일 셀에서 발생하는 열전달(Heat transfer)의 모식도를 제시하였다. 리튬 이차전지의 주된 문제는 열 발생으로 인한 열 전달이며 정확한 열 발산해석으로 열 관리 시스템을 이용하여 셀에서 과도하게 발산된 열을 제거하는 것이 필수적이다. 식 (7)은 Heat Transfer Model을 설계하기 위한 기초적인 energy balance equation으로 에너지의 이동은 배터리내부의 전기화학적 반응과 함께 외부로의 열전달로 나타난다. 식 (8)은 원통형 단일 셀로부터 배터리팩으로 모델이 확장됨에 따라 열 전달 조건에는 고체와 고체사이에서 이루어지는 열전도(Heat conduction)와 셀과 Boundary사이에서 이루어지는 대류 열(Convection Heat), 복사열(Radiation heat)을 고려해야함을 나타낸다<sup>[8]</sup>.

$$\Delta E = (Q_{chemical} + Q_{electrical}) + \Phi_{ht} \quad (7)$$

$$\Phi_{ht} = Conduction + Convection + Radiation \quad (8)$$

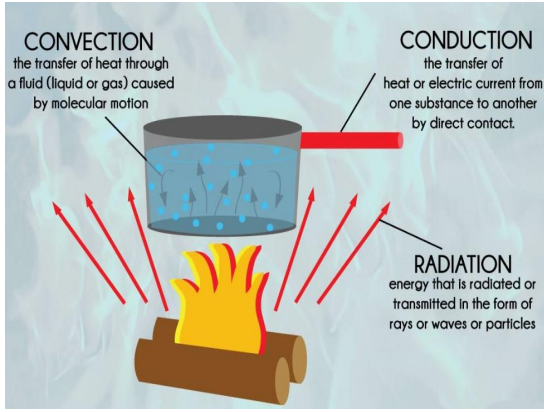


Fig. 4. Principle of heat transfer<sup>[9]</sup>.

TABLE I  
INFORMATION ON A SINGLE CELL USED IN A COMSOL

Cell Data	Material	Volume Fraction	Thickness	Initial SOC
Anode	Li <sub>x</sub> C	0.384	55[μm]	0.07
Cathode	LMO	0.43	55[μm]	0.915

Conduction은 전체적으로 물질의 움직임이 없는 물질 내에서의 열전달을 의미하며, Convection과 Radiation은 가열된 유체가 열원에서 이동하여 에너지를 전달할 때 공기 또는 물과 같은 유체의 질량 이동에 의한 열 전달을 의미한다. 식 (8)에서 볼 수 있듯이 Heat transfer는 Heat conduction, Heat convection, Heat radiation의 합으로 나타난다<sup>[10]</sup>.

#### 4. 연구결과 및 분석

표 1은 Comsol 프로그램을 이용한 열 해석 시뮬레이션에 사용한 단일 셀의 구성을 나타내었다. 본 논문에서는 음극의 경우 Li<sub>x</sub>C 양극의 경우 LMO 물질을 적용하였으며 식 (9)과 (10)는 충전 및 방전 과정에서 리튬이온 배터리의 양극과 음극에서 나타나는 반응을 나타내었다. Initial SOC는 시뮬레이션을 시작할 때 양극과 음극에 인터칼레이션 되어 있는 리튬이온의 양을 나타내는 지표이며, 전기 화학적으로 전극에 인터칼레이션 될 수 있는 최대 리튬이온의 양에 대한 초기 리튬이온의 양으로 정의된다. Comsol을 활용한 시뮬레이션에서 적용한 전류 프로파일에 따라 충전 및 방전이 진행되며 그에 따라 Initial SOC를 기준으로 SOC가 변화하게 된다.

산화 환원 반응으로 리튬이온은 충전 시 음극(Cathode)으로 이동하며, 방전시 반대로 양극(Anode)로 이동한다. 양극과 음극에서 리튬이온이 다공성막을 통해 이동함에 따라 등가회로의 저항으로 표현되는 Irreversible heat에 의해 발열반응이 나타나게 되며, 전체

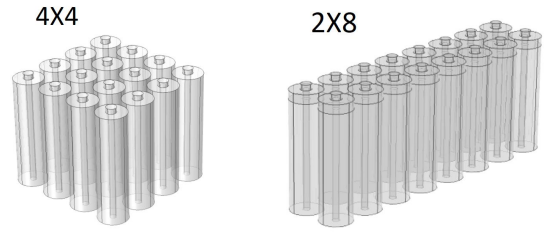


Fig. 5. Geometry of serial battery packs.

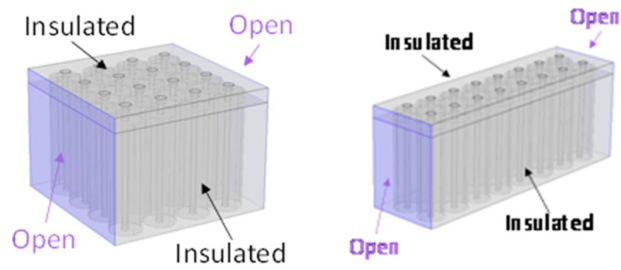
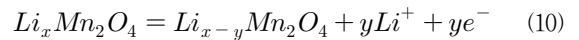
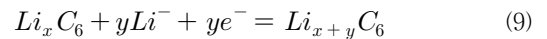


Fig. 6. Boundary condition used in simulation.

엔트로피의 총량에는 변화가 없는 Reversible heat에 의해 발열 및 흡열 반응이 나타난다<sup>[11]</sup>.



LMO 배터리뿐만 양극 활물질의 구성에 따라 각기 다른 특성을 가지고 다양한 어플리케이션에 적용되는 만 큼 고출력성(NCA) 및 고용량성(NMC) 등, 다양한 구성 물질의 배터리로 확대하여 열 해석을 진행할 예정이다.

#### 4.1 Geometry

그림 5는 직렬배터리팩(16S1P)의 외형(정사면체;4X4/ 직사면체;2X8)의 각 Geometry를 나타내었다. 직렬배터리팩의 Thermal boundary 조건에서의 직렬배터리팩 형태를 그림 6에 나타내었는데, 이는 16개 원통형 셀의 직렬결합 시 양쪽은 Open 조건, 나머지는 열적으로 모두 Insulation 되었다고 가정하였다. 이는 Comsol 프로그램에서 제공하는 Single-cell model을 바탕으로 하였으며, 배터리팩 내부의 셀 간 전압 혹은 충전상태의 불균형이 없음을 가정하였다.

#### 4.2 Heat Analysis

표 2는 Comsol 프로그램에서 사용한 충전 및 방전에 따른 배터리팩 내부의 열 분포 해석 조건을 나타내었다. 사이클링 회수에 따른 추가 영향을 확인하기 위하여 3 번의 사이클링을 실시하였고 강제 쿨링이 아닌 자연 쿨링을 가정하였다. 충전 및 방전에서의 직렬배터리팩(16S1P)

TABLE II  
REACTION CONSTANT USED IN COMSOL

Reaction Constant (Positive electrode)	Reaction Constant (Negative electrode)
$5 \times 10^{-11}$	$2 \times 10^{-11}$

TABLE III  
INFORMATION OF EXPERIMENTAL CONDITION USED IN A COMSOL

Current density (for 1C-rate)	Cycles	C-rate	Cooling
13.2[A/m <sup>2</sup> ]	3 times	5 C	Natural Cooling

의 외형(정사면체;4X4/직사면체;2X8)에 대한 차이를 명확하게 보이기 위해 5C-rate 라는 가혹조건을 사용하여 열 해석의 차이를 제시 하였다. C-rate는 배터리의 방전율로써, 1시간에 전체 배터리를 방전시키는 전력을 의미한다. 높은 C-rate의 경우 전극 표면에서 나타나는 Surface Overpotential로 나타나는 손실에 의한 영향이 가장 크며, 이 값은 Butler-Volmer equation의 반응 계수(Reaction Constant)값에 의해 크게 좌우된다. 버틀러 볼머 식은 충전 및 방전 과정 중, 전극에서 전자가 교환되는 과정의 속도와 전극 위치의 관계를 나타내는 식으로 Reaction Constant 값에 의해 변한다<sup>[12]</sup>.

$$j = j_0 \cdot \left\{ \exp\left[\frac{k_a F}{RT}\right](E - E_{eq}) - \exp\left[-\frac{k_c F}{RT}\right](E - E_{eq}) \right\} \quad (11)$$

식 (11)는 버틀러 볼머 식을 나타내며 j는 인가되는 전류에 따라 변화하는 전극의 전류밀도를 나타내며, E와 E<sub>eq</sub>는 각각 현재 전극의 포텐셜 및 열역학적인 평형 상태의 포텐셜을 의미한다. F는 페러데이 상수, R는 기체 상수를 의미하며 k<sub>a</sub>는 음극에서의 Reaction Constant, k<sub>c</sub>는 양극에서의 Reaction Constant 값을 의미한다<sup>[13]</sup>. Comsol 프로그램에서는 버틀러 볼머 식을 사용하여 배터리 내부손실로 인해 발생하는 전압 손실을 전기화학적으로 풀이하여 열 해석을 진행하였으며, 이는 전기적 등가회로의 내부 저항으로 해석 가능하다. 본 논문에서는 가혹조건에서의 배터리팩의 외형에 따른 차이를 명확하게 도출하기 위하여 낮은 Reaction Constant 값을 사용하였으며 사용한 Reaction Constant 값을 표 3에 나타내었다<sup>[14]</sup>.

그림 7는 Comsol을 활용한 열해석 시뮬레이션의 순서도를 나타내며 순서도에서 볼 수 있듯이, 실험 데이터로부터 배터리팩을 구성하는 단일 셀의 SOC에 따른 오믹 저항을 도출하여 비가역적인 손실로 발생하는 발열량을 예측하여 Comsol을 활용한 열 해석을 실시하였다. 그림 8(왼쪽)은 직렬배터리팩의 외형의 차이에 상관없이 동일하게 적용한 전류 프로파일로 3번의 충전과 방전을 적용

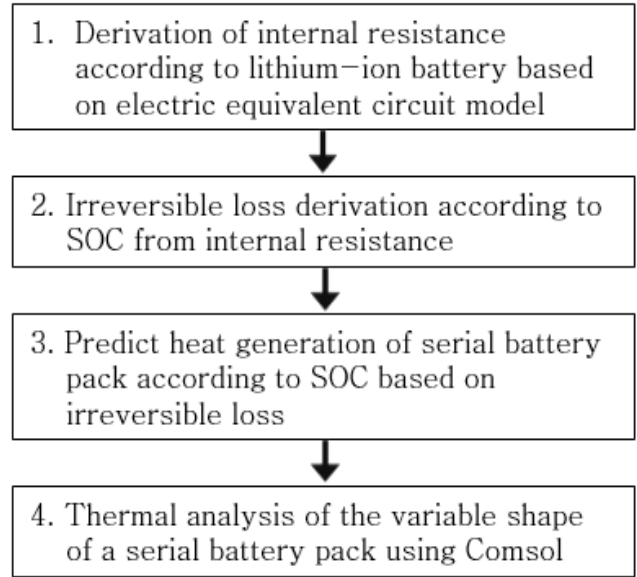


Fig. 7. Flowchart of heat analysis.

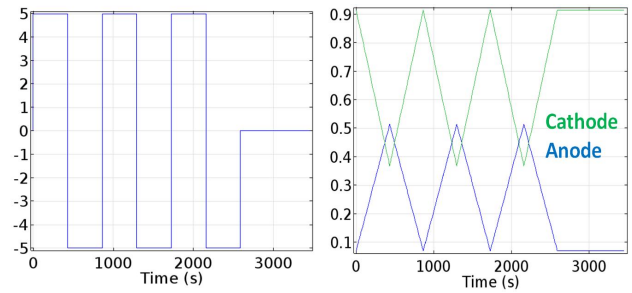


Fig. 8. Current profile used in simulation and soc of cathode and anode.

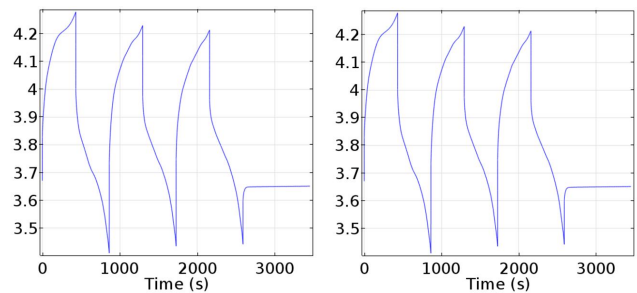


Fig. 9. The average voltage in different shape of battery pack.

하였다. 충전 및 방전 과정에서 전류는 충전 및 방전이 진행됨에 따라 양 극으로 리튬 이온의 인터칼레이션이 이루어지고 그림 8(오른쪽)에서 볼 수 있듯이 충전 시 Anode 쪽으로의 리튬 이온 인터칼레이션으로 인하여 Anode의 SOC가 증가하는 것을 확인 할 수 있으며 방전 시에는 SOC가 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 그림 9는 그림 8(왼쪽)과 같은 전류 프로파일을 동일하게 적용 하였을 때 나타나는 직렬배터리팩의 출력 전압을 나타내며 정사면체(왼쪽) 및 직사면체(오른쪽) 형태의 직렬

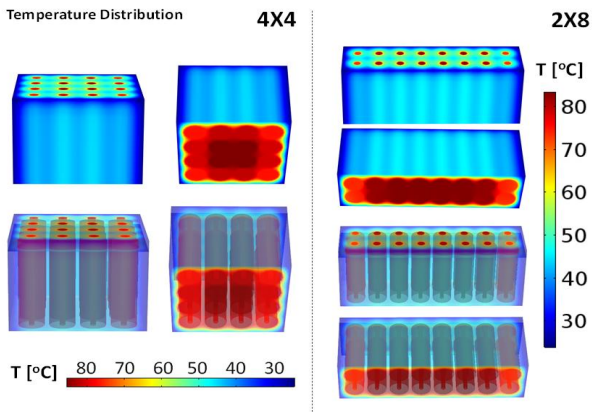


Fig. 10. Internal thermal analysis of serial battery pack.

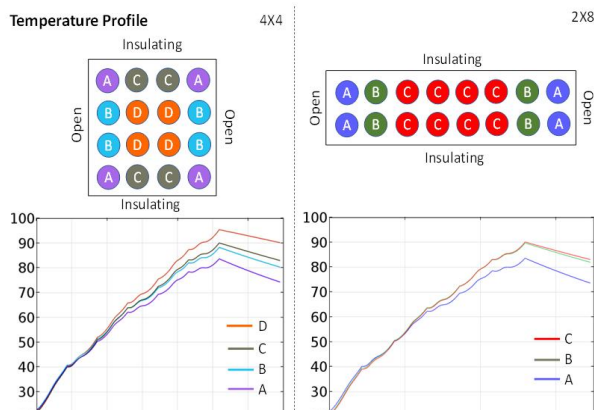


Fig. 11. Cylindrical cell temperature comparison inside a serial battery pack.

배터리팩 평균전압도 3번의 충전 및 방전 사이클 동안 배터리팩의 외형 차이와는 상관없이 거의 유사함을 확인하였다. 충전 및 방전 과정에서 전류의 크기와 지속시간은 Comsol 프로그램에서 임의의 조절이 가능하며, 전류 프로파일에 의한 양극과 음극에서의 SOC도 유사함을 보임을 확인하였다(그림 8(오른쪽) 참고). 그림 9에서 볼 수 있듯이 그림 8과 9의 전류프로파일 및 이의 출력전압이 거의 유사한 상황에서 외형의 차이에 의한 배터리팩 내부의 열 분포 및 이의 비교분석을 실시하였다. 그림 10는 직렬배터리팩 내부의 열 분포 해석 결과를 나타낸다. 직렬배터리팩이므로 각 원통형 셀의 충전 및 방전이 동일하게 진행되며 원통형셀 주변의 온도 분포가 그 외의 지역과는 차이가 있음을 확인할 수 있다. Comsol 프로그램에서 온도 분포에 의한 상이함을 보이기 위해 붉은색으로 갈수록 고온, 푸른색으로 갈수록 저온을 의미한다. 그림 10의 경우 직렬배터리팩의 외형에 의한 내부 열 분포의 차이에 따른 색의 변화로 열 분포를 구분하는 것이 쉽지 않으므로, 배터리팩 내부의 셀 간 온도의 구분을 그림 11에 나타내었다.

정사면체 형태의 경우, 배터리팩 내부 온도 분포를 네 곳(A-D), 직사면체 형태의 경우 세 곳(A-C)로 구분할

수 있다. 정사면체 형태의 배터리팩의 경우 A, B, C, D 중 D부분의 온도 즉, 배터리 내부의 온도가 가장 높고 A부분에 해당하는 외부 쪽의 온도가 낮으며, 이는 직사각형 형태의 배터리팩에도 동일하게 나타난다. 배터리팩의 외형과 상관없이 팩 내부일수록 원통형 셀의 온도가 높음을 확인할 수 있으며, 가혹 조건인 5C-rate와 낮은 Reaction Constant 값을 사용함으로써 더욱 명확하게 배터리팩의 외형의 차이에 따른 열 해석 비교가 가능하다. 그림 11에서 볼 수 있듯이, 동일한 전류프로파일을 적용했을 때의 원통형 셀의 최대값과 최소값의 온도 비교 시, 정사면체 형태의 배터리팩보다 직사면체 형태의 배터리팩 내부의 최대 온도와 셀 간 온도 편차가 작음을 확인할 수 있으며 이는 향후 어플리케이션에 다양한 외형의 배터리팩을 적용할 때 사용되는 배터리관리시스템의 중요 정보로 사용될 수 있다.

### 5. 결 론

현재 리튬 이차전지가 전기 자동차 등 여러 어플리케이션의 유망한 대안으로 입증되고 있고 배터리 용량 및 전력을 증가시키기 위해 전해질 물질의 선택 및 개발에 대한 광범위한 노력과 더불어 BTMS(Battery thermal management system)에 대한 중요성도 커지고 있다. 리튬 이차 전지의 성능, 수명 및 안정성은 작동온도와 밀접한 관련이 있으며, 각 셀 내의 온도 불균형 및 부적절한 온도는 배터리의 노화와 성능저하를 유발하는 원인이다. 이를 위해 배터리팩의 충전 및 방전 과정에서의 열 해석은 필수적이며, 시뮬레이션을 기반으로 효과적인 온도 관리 시스템으로 배터리를 제어하는 것이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 Comsol single-cell Model을 사용하여 18650 타입의 원통형 셀에 대한 열 해석을 기반으로 외형의 차이에 16S1P 배터리팩(정사면체;4X4/직사면체;2X8)에 대한 기초적인 열 해석 시뮬레이션을 시행하였다. 리튬 이온 배터리의 전기적 등가회로를 제시하고, 전기적 등가회로부터 추출된 내부저항으로 발열량을 예측하였으며, 이를 통해 배터리팩 내부의 최대온도와 셀 간 온도편차를 비교하고 정사각형 형태의 배터리팩보다 직사각형 형태의 배터리팩의 열적 특성이 양호함을 제시하였다.

본 연구는 국토교통부에서 시행한 철도기술연구사업 "수소연료전지 하이브리드 동력시스템(1.2MW 이상)을 적용한 철도차량 추진시스템 최적화 및 운용 기술개발 "1세부 수소연료전지 기반 하이브리드 추진시스템 최적화 기술개발 (18RTRP-B146008-01) 과제의 연구비로 수행한 결과입니다.

## References

- [1] J. Park, C. O. Yoon, H. Bae, S. S. Jang, and J. Kim, "Low temperature modeling and SOC estimation of battery pack for electric bicycle using model based adaptive control," *The Annual Conference of The Korean Institute of Power Electronics*, pp. 155-156, Jul. 2018.
- [2] A. Nazari and S. Farhad, "Heat generation in lithium-ion batteries with different nominal capacities and chemistries," *Applied Thermal Engineering*, pp. 1501-1517, Oct. 2017.
- [3] K. Onda, T. Ohsima, M. Nakayama, K. Fukuda, and Takuto Araki, "Thermal behavior of small lithium-ion battery during rapid charge and discharge cycles," *Journal of Power Sources*, pp. 565-542, Jul. 2006.
- [4] H. Liu, Z. Wei, W. He, and J. Zhao, "Thermal issues about Li-ion batteries and recent progress in battery thermal management systems," *Energy Conversion and Management*, pp. 304-330, Oct. 2017.
- [5] M. Coleman, C. H. Lee, C. Zhu, and W. G. Hurley, "State-of-charge determination from voltage estimation: Using impedance, terminal voltage and current for lead-acid and lithium-ion batteries," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 78, pp. 834-854, Oct. 2017.
- [6] H. Liu, Z. Wei, W. He, and J. Zhao, "Thermal issues about Li-ion batteries and recent progress in battery thermal management systems," *Energy Conversion and Management*, Vol. 150, pp. 304-330, Oct. 2017.
- [7] A. Nazzari and S. Farhad, "Heat generation in lithium-ion batteries with different nominal capacities and chemistries," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 125, pp. 1504-1517, Oct. 2017.
- [8] K. Chen, G. Unsworth, and X. Li, "Measurements of heat generation in prismatic Li-ion batteries," *Journal of Power Sources*, Vol. 261, pp. 28-37, Sep. 2014.
- [9] testeach, "<https://www.tes.com/lessons/dyIrf9YPjUaCFA/heat-transfer>"
- [10] M. Farag, H. Sweity, M. Fleckenstein, and S. Habibi, "Combined electrochemical, heat generation, and thermal model for large prismatic lithium-ion batteries in real-time applications," *Journal of Power Sources*, Vol. 360, pp. 618-669, Aug. 2017.
- [11] T. M. Bandhauer, S. Garimella, and T. F. Fuller, "Temperature-dependent electrochemical heat generation in a commercial lithium ion battery," *Journal of Power Sources*, Vol. 247, pp. 618-628, Feb. 2014.
- [12] Y. Saito, M. Shikano, and H. Kobayashi, "Heat generation behavior during charging and discharging of lithium-ion batteries after long-time storage," *Journal of Power Sources*, Vol. 244, pp. 294-299, Dec. 2013.
- [13] S. Panchai, I. Dincer, M. Agelin-Chaab, R. Franser, and M. Fowler, "Transient electrochemical heat transfer modeling and experimental validation of a large sized LiFePO<sub>4</sub> / graphite battery," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 109, pp. 1239-1251, Jun. 2017.
- [14] Y. Huang, Y. Lu, R. Huang, J. Chen, "Study on the thermal interaction and heat dissipation of cylindrical Lithium-ion Battery cells," *Energy Procedia*, Vol. 142, pp. 4029-4036, Dec. 2017.

**한동호(韓東胡)**

1993년 1월 27일생. 2018년 충남대 전기공학과 졸업. 2018년~현재 충남대 전기공학과 석사과정.

**이평연(李平淵)**

1992년 5월 31일생. 2017년 조선대 전기공학과 졸업. 2017년~현재 충남대 전기공학과 석사과정.

**박진형(朴珍亨)**

1993년 1월 4일생. 2018년 충남대 전기공학과 졸업. 2018년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

**김종훈(金鍾勳)**

1979년 4월 22일생. 2005년 충남대 정보통신공학부 전기전자전파공학부 졸업. 2012년 서울대 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(공학; 석박통합과정). 2012년~2013년 삼성 SDI ESS사업부 책임연구원. 2013년~2016년 조선대 전기공학과 조교수. 2016년~현재 충남대 전기공학과 조교수. 2015년~현재 JPE Associate Editor. 2016년~현재 당 학회 편집위원.

**유기수(庾麒壽)**

1980년 6월 5일생. 한양대 기계공학부 졸업. 2006년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사). 2015년 원성터주립대 기계공학과 졸업(공학). 2016년 미국에너지기술연구소 박사후연구원. 2016년~현재 영남대 기계공학부 조교수.

**조인호(趙仁鎬)**

1982년 3월 7일생. 2007년 한양대 전기전자공학과 졸업. 2009년 한국과학기술원 전기전자공학과 졸업(석사). 2013년 동 대학원 졸업(공학). 2013년~2014년 LG전자 선임연구원. 2014년~현재 한국철도기술연구원 선임연구원.