



# 전기자동차용 리튬이온 배터리의 성능 및 안전성 확보를 위한 배터리 열적 변화에 관한 연구

양 경 채<sup>1)</sup> · 조 현 우<sup>2,3)</sup> · 장 영 민<sup>3)</sup> · 오 세 인<sup>3)</sup>

국립금오공과대학교 건설링대학원<sup>1)</sup> · 부산대학교 기계공학부<sup>2)</sup> · 한국교통안전공단 첨단연구개발처<sup>3)</sup>

## A Study on the Thermal Behavior of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles to Ensure Performance and Safety

Kyeongchae Yang<sup>1)</sup> · Hyunwoo Jo<sup>2,3)</sup> · Youngmin Jang<sup>3)</sup> · Sein Oh<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Graduate School of Consulting, Kumoh National of Technology, Gyeongbuk 39177, Korea

<sup>2)</sup>School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Korea

<sup>3)</sup>Advanced R&D Department, Korea Transportation Safety Authority, 17 Hyuksin 6-ro, Gimcheon-si, Gyeongbuk 39660, Korea

(Received 9 April 2025 / Revised 27 May 2025 / Accepted 28 May 2025)

**Abstract :** This study proposes a multiphysics-based thermal model to accurately predict the thermal behavior of lithium-ion batteries. To account for the anisotropic thermal conductivity of battery cells, an internal structural analysis was conducted via X-ray CT, and thermal properties, such as specific heat and thermal conductivity, were measured by using a custom-built heat flow system. The heat generation model is based on the Electrical Equivalent Circuit Model (EECM), with model parameters derived from Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) tests. Heat generation analyses were performed under various C-rate discharge conditions, and accuracy was improved through validation by using Isothermal Battery Calorimetry (IBC). Furthermore, the model incorporates the residual heat generation that was observed after load cut-off, thus enhancing agreement with experimental results. The proposed approach enables more precise thermal predictions, and supports the development of improved safety and thermal management strategies that can be applied in high-powered lithium-ion battery systems.

**Key words :** Lithium-ion battery(리튬이온 배터리), Thermal modeling(열 모델링), Multiphysics analysis(다중물리 해석), Electrical equivalent circuit model(전기적 등가회로 모델), Electrochemical impedance spectroscopy(전기화학 임피던스 분광법), Isothermal battery calorimetry(등온 배터리 열량계)

### Nomenclature

$m_{cell}$  : battery mass  
 $T_{\infty}$  : chamber temperature  
 $Q_{Heater}$  : heat input  
 $C_{p,cell}$  : heat capacity  
 $R_{th}$  : thermal resistance  
 $A_{cell}$  : heat transfer area  
 $L$  : heat transfer length  
 $M_1$  : Warburg impedance  
 $Z(f)$  : a mathematical model of the Warburg impedance

### Subscripts

LIB : Lithium-Ion Battery  
 EECM : Electrical Equivalent Circuit Model  
 IBC : Isothermal Battery Calorimetry  
 ECM : Equivalent Circuit Model  
 TEC : Thermoelectric Cooler

## 1. 서론

배터리는 복잡한 전기화학 반응과 열전달 특성을 가지기 때문에, 배터리 내부의 온도 분포를 정확하게 예측

\*Corresponding author, E-mail: si0818top@kotsa.or.kr

<sup>†</sup>This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

하는 것은 매우 어렵다. 그러나 배터리의 안전성과 수명에 온도는 중요한 영향을 미치기 때문에, 배터리의 열거동을 정확하게 예측할 수 있는 모델링 기법의 개발이 필요하다.

전기화학 반응과 열유동 현상의 복합적 분석은 배터리의 정확한 열거동을 예측하기 위해서는 전기화학 반응뿐만 아니라 비등방적인 열유동 현상을 함께 고려해야 한다. 배터리 열거동은 배터리 내부에서 발생하는 열의 양과 배분을 의미하며, 이는 배터리의 성능과 수명에 직접적인 영향을 미친다.

다중물리 분석법을 이용하여 배터리 시스템의 복잡한 열-전기-기계현상을 정확하게 모사함으로써, 배터리 온도 및 전류밀도 분포 예측 정확도를 높일 수 있었다는 보고들이 있다.<sup>1,2)</sup> 이처럼 다중물리 분석법은 열, 전류, 압력 등 여러 물리량을 동시에 고려하여 배터리 열거동을 예측할 수 있다. 이를 통해 배터리 설계를 개선하거나 충전 조건을 최적화해 배터리 수명을 연장시키고, 안전성도 높일 수 있다.

배터리 열거동에 대한 다중물리 모델링의 사용은 최근 많은 연구의 주제가 되었다. 이 연구들은 다중 물리 모델링이 다양한 조건에서 배터리 열거동을 정확하게 예측하는 데 사용될 수 있음을 보여주었다. 다중물리 모델링은 또한 배터리 설계 및 작동에 대한 잠재적인 문제를 식별하는 데 사용될 수 있다.<sup>3)</sup> 최근 배터리 열화 현상을 정량적으로 평가할 수 있는 다중물리 기반의 열거동 모델들이 개발되고 있다.<sup>4)</sup> 이를 통해 배터리의 수명 주기 동안 진행되는 물리화학적 변화를 시뮬레이션화 할 수 있다.

리튬이온 배터리(Lithium-Ion Battery, LIB)에서 발생하는 열을 관리하는 것은 배터리의 성능 및 안전성에 결정적인 영향을 미친다. 다중물리 분석법은 배터리의 복잡한 열거동을 모델링하고 예측함으로써, 배터리 설계와 시스템 통합에서 효과적인 열관리 전략 수립을 가능하게 한다.<sup>5)</sup>

배터리 열거동의 분석 및 예측을 위하여 본 연구는 배터리 열물성 데이터 획득, 발열모델 제안, 다양한 조건에서의 열거동 분석, 제안모델의 수정을 진행하였다. 우선 배터리 열물성 획득을 위하여 X-ray CT 분석을 통해 내부 구조를 파악하였으며 평판 열류계 법을 활용하여 자체 측정장비를 제작 열용량, 열전도도 등의 값을 측정하였다.

또한 배터리 발열량 예측 및 해석에 적용되는 발열모델은 EECM(Electrical Equivalent Circuit Model)을 기반으로 제시되었다.

IBC(Isothermal Battery Calorimetry)로부터 얻어진 발열량과 온도변이 곡선으로부터 얻어진 값, 그리고 ECM

(Equivalent Circuit Model) 기반 발열모델로부터 예측된 값을 교차 비교하여 IBC 테스트 시스템의 신뢰성을 확인하고자 하였을 뿐만 아니라 본 연구에서 제시하고 있는 발열모델도 검증하였다.

## 2. 리튬이온배터리 열물성

리튬이온 배터리는 다양한 물질의 복합체로써 비등방적 열전달 계수를 갖게 된다. 음극은 주로 그라파이트 또는 소량의 실리콘 등을 포함하고 있고, 양극은 코발트(Co), 니켈(Ni), 망간(Mn) 또는 인산철(FePO<sub>4</sub>) 등의 금속 산화물이 사용되는데 각 소재는 열전도도에 차이가 있으며, 이는 열이 전달되는 속도에 영향을 미치게 된다.

다양한 소재들 간의 열전도도의 차이로 인해 배터리는 비등방적 열전달계수가 나타내게 된다. 배터리 셀의 형태, 소재들 간의 인터페이스, 그리고 배터리의 물리적 구조 등이 Table 1과 같이 열전달 특성을 결정하는데 파우치 셀의 경우 이러한 열전달 특성을 고려하여 방열 대책을 세워야 효과적인 배터리 열관리를 달성할 수 있다.

Table 1 Thermal properties of battery materials<sup>6)</sup>

Materials / Layer	Thickness [μm]	Number of layers	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Thermal capacity [J/kg-K]	Thermal conductivity [W/m-K]
Al. foil	21	17	2702	903	238
Copper foil	12	18	8933	385	398
Separator	25	36	1017	1978	0.34
Positive electrode	70	34	2895	1270	1.58
Negative electrode	79	36	1555	1437	1.04
Pouch (case)	162	2	1150	1900	0.16

### 2.1 배터리 내부구조 분석

리튬이온 배터리는 비등방적 열전달 특성을 가지고 있으며 이는 전극, 분리막이 적층된 구조에서 기인한 것으로 셀 내부를 제작 상태에서 파악하는 것이 필요하다. 이를 위하여 본 연구에서는 비파괴 상태에서 내부 구조 특성 파악을 위한 X-ray CT 촬영을 실시하여 내부 구조 분석을 수행하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 NCM811을 양극재로 하는 고출력 전기자동차용 Pouch type 배터리를 사용하였다. 또한 Pouch cell의 사양은 Table 2에서 확인할 수 있다.

Table 2 Specification of pouch cell

Article	Division	Measure	Value
Charge/Discharge capacity	Actual	Ah	57.6
Energy capacity	Actual	Wh	210
Voltage	Average discharge (actual)	V	3.65
Size (TXWXL)	The outermost part	mm	9.5 × 354 × 101
	Front	mm	9.5 × 321.5 × 97
Weight		kg	0.748

X-ray CT는 단층 촬영을 통하여 3차원으로 배터리 내부 상태를 재구성할 수 있어 전극 및 활물질의 적층 상태 및 Case의 접합도와 같은 구조적 특징을 효과적으로 분석할 수 있다. 이차전지는 비등방적 열전달 특성을 가지고 있으며, 이는 전극, 분리막이 적층된 구조에서 기인한 것으로 셀 내부에 제작 상태를 파악하는 것이 필요하다. 이를 위하여 비파괴 상태에서 내부 구조 특성 파악을 위해 Fig. 1과 같이 X-ray CT 촬영을 실시하여 내부 구조 분석을 수행하였다.

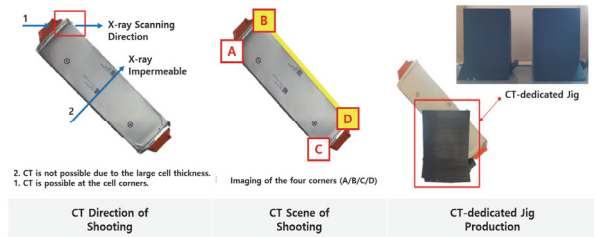


Fig. 1 Illustration of X-ray computed tomography test on a pouch type LIB

CT 촬영을 통하여 전극 활물질, Current collector 등의 결합상태 및 폴딩 형식을 비파괴적으로 관측하였으며 이를 통하여 Pouch cell의 적층된 구조를 파악하고, 면 수직 방향으로 분리막 적층에 의하여 열전달 성능 저하가 예측되었다. 또한 분석결과 공유셀(55.6 Ah pouch cell)의 경우 하단부 B-D 면상으로 방열 설계가 진행되고 있는데 이는 Current corrector의 높은 열전달 특성을 이용하는 것으로 기본적인 방열개념에는 부합한 설계임이 확인되었다. 또한 Fig. 2에서 보는 바와 같이 B-D 면상부의 CT 촬영에서 Current corrector 끝단과 Polymer-laminated Al 사이에 내부 간극이 존재하는 것으로 추정되어 향후 셀 방열에 지장을 줄 수 있을 것으로 판단되었다.

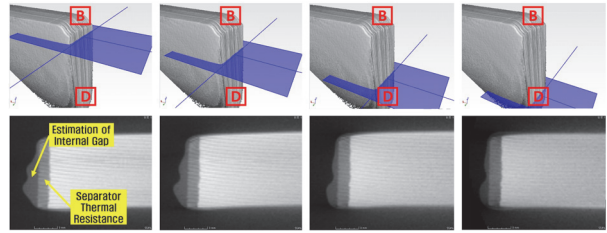


Fig. 2 Internal Gap Confirmed through X-ray CT Analysis

## 2.2 배터리 열물성 측정

배터리 열거동 분석에 중요한 역할을 하는 열물성은 열용량 및 열전도도가 있다. 열용량은 DSC(Differential Scanning Calorimetry, 시차주사열량계)를 활용하여 측정할 수 있으며 열전도도는 LFA(Laser Flash Analysis) 또는 Hot Disk Method 등을 활용하여 측정 가능하다.

본 연구에서는 셀의 배터리의 열물성 측정을 위하여 열주사시험법과 평판열류계법(또는 평판직접법도 가능)의 원리를 적용하여 열용량 및 열전도도를 측정하고자 하였으며 Fig. 3과 같이 배터리 스택을 구성하여 진행하였다. 면평행방향의 열전도도를 측정하기 위하여 Fig. 3(a)의 형태로 스택을 구성하였으며, 면수직 방향 열전도도 측정을 위해서 Fig. 3(b)의 형태로 스택을 구성하여 시험을 수행하였다.

시험에서 PTC(Positive Temperature Coefficient) heater는 배터리에 열주사 기능을 하며 Heater에 공급된 전력을 측정함으로써 배터리 스택에 입사된 열량 산출하게 된다. 이때 배터리의 온도 거동을 측정하기 위하여 K-type thermocouple이 사용되는데 PTC 주변부 및 Cooling부의 온도측정이 진행되고 평균온도, 셀간 온도 편차 측정 데이터가 얻어지게 된다. 또한 단열재를 사용하여 단열효과를 주어 열의 흐름이 측정방향으로만 일어나도록 구성하였다. Fig. 4와 같이 시험용 배터리 스택으로 구성한 것을 확인 할 수 있다.

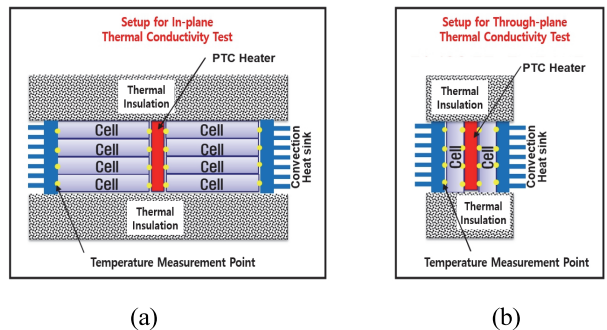


Fig. 3 Conceptual illustration of experimental set-up to measure thermal properties of pouch type LIB

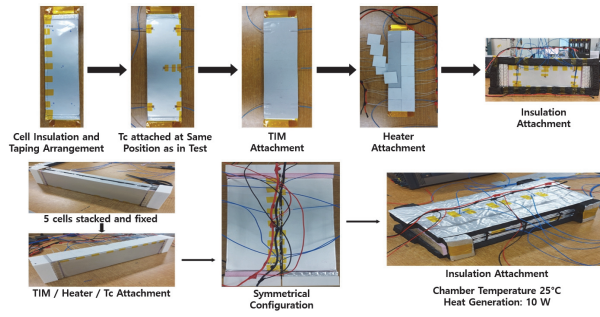


Fig. 4 Configuration of battery stack for measuring thermal properties of pouch type LIB

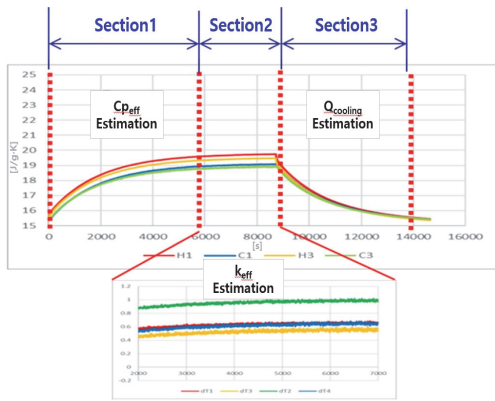


Fig. 5 Temperature profile of battery stack during heating/cooling

시험을 통해 얻어진 온도 데이터는 Fig. 5와 같으며 이때 3개의 구간으로 나누어 분석하는데 이는 본 시험에서 결정해야 할 시험 변수 및 물성치가 방열량( $Q_{cooling}$ ), 셀 열용량( $C_p$ ), 열전도도( $k$ )가 3구간에서 각각 구해질 수 있기 때문이다. 또한 구간별 분류와 해당 구간에서 산출 가능한 각 물성치 또는 시험변수를 표현( $C_{p,eff}$ : 유효 비열,  $K_{eff}$ : 유효 열전도율)한 그래프이다.

이때 각 구간은 다음과 같은 열적 상황에 있다고 가정할 수 있다.

구간 1: PTC에 의한 열주입과 Heat sink에 의한 열방출 존재

구간 2: Heat balance에 의한 온도유지구간

구간 3: Heat sink에 의한 방열만 존재

배터리 스택의 열거동에 관한 지배방정식은 다음 식 (1)과 같이 표현된다.

$$m_{cell} C_{p,cell} \frac{dT_{cell}}{dt} = Q_{Heater} - \frac{T_{cell} - T_{co}}{R_{th}} \quad (1)$$

이때 배터리의 질량( $m_{cell}$ ), 챔버온도( $T_{\infty}$ ), 열주입량 ( $Q_{Heater}$ )은 알고있는 값이며, 열용량( $C_{p,cell}$ )과 Heat sink 방열저항( $R_{th}$ )은 실험에서 결정해야 할 미지수이다.  $T_{cell}$ 이 시험으로 통해 얻어지므로 구간1과 구간 3에 대하여 미분방정식을 단순화하여 연립함으로써  $C_{p,cell}$ ,  $R_{th}$ 를 구할 수 있다. 또한 셀 열 전도도 산출에 있어서 구간 2를 사용하게 되는데 이때 정상상태 열전도 방정식은 식 (2)와 같이 표현 가능하다.

$$k_{cell} A_{cell} \frac{dT_{cell}}{dx} = Q_{Heater} \quad (2)$$

배터리의 겉보기 열전달계수를 구하고자 하면 식 (3)과 같이 표현 가능하다.

$$k_{cell} = \frac{Q_{Heater}}{A_{cell}} \frac{L}{T_h - T_c} \quad (3)$$

식 (3)에서 배터리 구조와 관련된 열전달면적( $A_{cell}$ ) 및 열전달길이( $L$ )는 배터리 크기로부터 얻어지며, 열주입량( $Q_{Heater}$ )은 시험중 PTC 히터에 가해진 출력으로부터 환산하여 얻을 수 있다.  $T_h$ ,  $T_c$ 는 Fig. 5에 표시한  $k_{eff}$  산출 구간의 온도데이터로부터 얻어지며 최종적으로 식 (3)에 의하여 열전달계수  $k_{cell}$  값이 산출된다. 이러한 과정을 통하여 얻어진 Pouch type LIB의 열물성치는 Table 3과 같다.

실험을 통해 얻어진 배터리 열용량은 일반적으로 알려진 값 1,000 J/kg-K보다는 약간 높은 값이 얻어졌으며, 열전도도는 논문에서 흔히 제시하는 값과 비교하여 약간 낮은 수준으로 산출되었다.

Table 3 Thermal properties of pouch type LIB

Division		Result value
Thermal capacity		1125 ± 80 J/kg-K
Thermal conductivity	Plane direction	18.06 W/m-K
	Thickness direction	0.54 W/m-K

### 3. 배터리 열거동 모델

배터리의 내부반응을 묘사한 모델로는 Fig. 6과 같이 전기화학 기반 모델과 전기적 등가회로 기반 모델 두 가지로 나눌 수 있다.

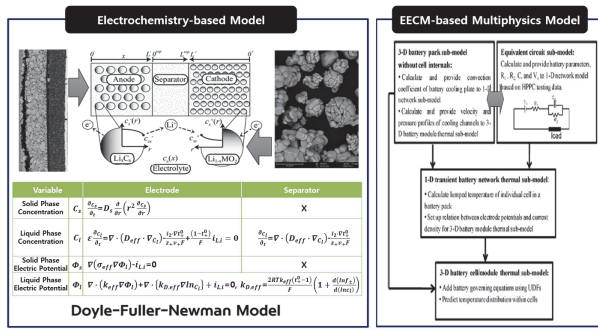


Fig. 6 Electrochemical-based model and electrical equivalent circuit model for LIB

### 3.1 리튬이온배터리 다중물리 모델

전기화학 기반 모델은 흔히 Dolye-Fuller-Newman Model이라고도 부르는데 배터리 내부에 전기화학적 반응론에 기초하여 제안된 모델이다. 이 모델은 배터리에서 일어나는 전기화학적 반응 및 현상을 매우 자세히 설명 가능하다는 장점이 있으나, 모델 방정식에 실험을 통해 결정해야 할 수많은 전기화학적 파라미터가 요구되며 특히 다수의 비선형 미분방정식 연립이 필요하여 높은 계산비용과 수학적으로 불안정하거나 수렴하지 않는 요소가 존재한다는 단점이 있다. 이 때문에 대용량 배터리 모듈/팩의 열거동 분석에 적용하기에는 적합하지 못하다. 이에 비하여 EECM(Electrical Equivalent Circuit Model) 기반의 다중물리 모델은 배터리의 전기적 거동을 전기회로 소자를 연결하여 모사하는 방식으로 모델 매개변수 측정이 비교적 단순하고 모델링 방정식의 계산비용이 낮다는 장점이 있다.

다중물리 배터리 모델은 진동/충격/고온 등과 같은 기계적 외부 요인이 전극, 전해질이 미치는 영향을 전기화학적으로 분석하고 Model parameter를 산출하여 열거동 및 전기적 거동 해석모델에 반영하기 때문에 배터리팩 운용 중 발생할 수 있는 기계적 조건에 의한 배터리 변화를 해석기법에 적용 가능하다는 장점이 있다.

### 3.2 전기화학 임피던스 분광법 테스트

Fig. 7에서 보는 바와 같이 EIS(Electrochemical Impedance Spectroscopy) test를 기반으로 한 온도/SOC별 발열 저항 측정 및 ECM parameter 추출을 위하여 EIS 분석을 진행하였다. 우선 Irreversible heat I2R Model의 R값 측정을 위한 Equivalent circuit model을 결정하였다. 다음 충전/방전중 SOC 구간별 EIS test 시행한 다음 EIS test로부터 얻어진 Data를 Nyquist plot 상의 Z-fit을 통하여 DC-IR의 R값 추출하였다.

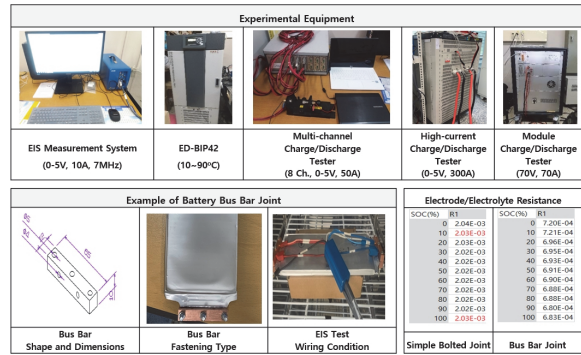


Fig. 7 Equipment used in EIS test

배터리 셀 마다 적절한 ECM 모델이 존재하며 본 연구에서는 2~3가지의 ECM 모델을 검토하여, 발열거동을 가장 잘 설명할 수 있는 물리적, 전기적, 수학적 모델을 선정하였다.

배터리를 전기적 소자들의 집합체인 ECM으로 구성하고 교류 스펙트럼으로 얻어진 Raw data를 Z-fitting을 통하여 ECM의 소자값을 획득하고 이러한 일련의 활동을 EIS analysis라 하며 셀 내부의 반응을 고려하여 특정한 전기 회로와 선정하여야 한다. 또한 배터리셀 마다 적절한 ECM 모델이 존재하며, 본 과제에서는 2~3가지의 ECM 모델을 선정하여 발열거동을 가장 잘 설명할 수 있는 물리적, 전기적, 수학적 모델을 Figs. 8과 9로 제시하였다.

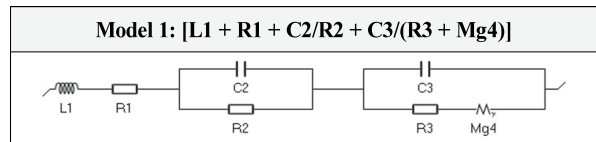


Fig. 8 Electrical equivalent circuit model for pouch type LIB using Mg Warburg impedance

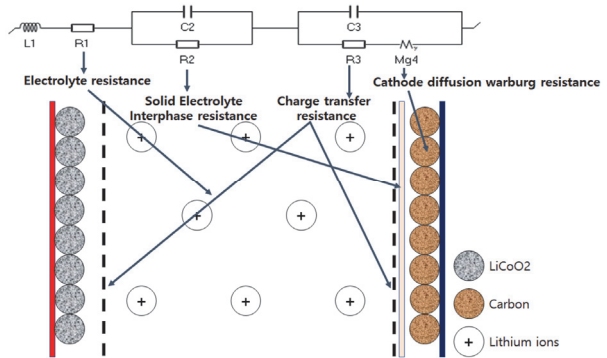


Fig. 9 Electrochemical reaction of the cell represented by each element of ECM

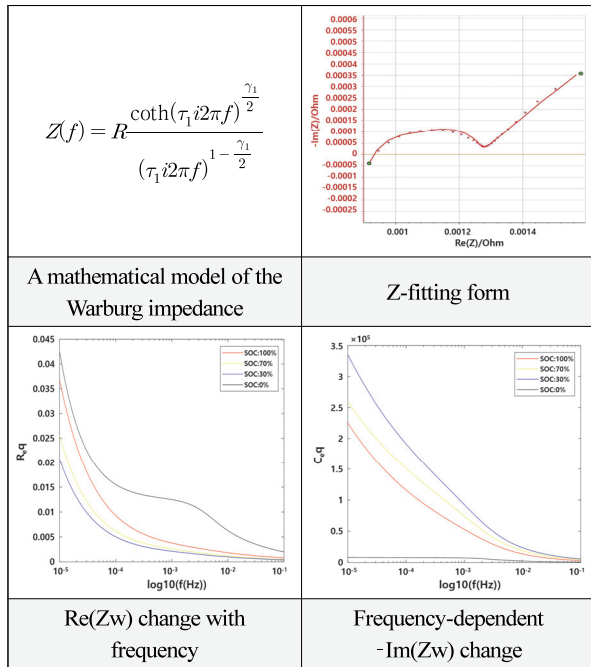


Fig. 10 Mathematical model of Mg4 impedance and responses of the value varying engaged frequency

Fig. 10에서 보는 바와 같이 모델 1의 장점은 Nyquist impedance graph에 Z-fitting 정확도가 높다는 것이다. 그러나 Fig. 10에서 Low frequency에서 Warburg(Mg4 소자) 값이 수학적으로 수렴하지 않는 문제점이 있다.

해당 모델은 Warburg impedance(M1 소자) 값이 Low frequency 영역에서 수학적으로 수렴하여 CC Mode일 때 발열량 정량화 가능하다는 장점이 있다. 그러나 Nyquist plot의 Z-fitting 수행시 Low frequency 영역에서 Fitting 오차가 커지는 현상이 발생하는 문제가 있었다. Fig. 11의 모델 2에 사용된 Warburg impedance의 수학적 모델을 Fig. 12 내의 수식에서 확인할 수 있으며 주파수 극한값에서 수식을 간략화할 수 있어 Warburg impedance value가 특정한 값으로 수렴하게 된다.

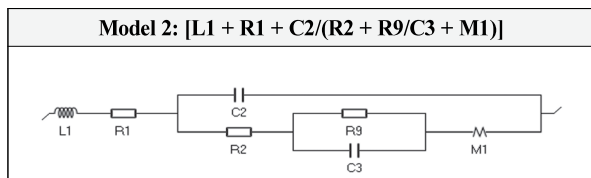


Fig. 11 Electrical equivalent circuit model for pouch type LIB using Mg Warburg

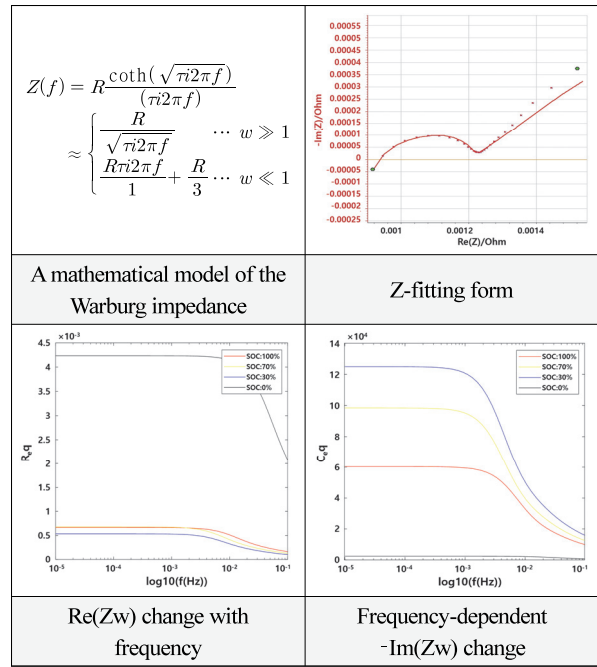


Fig. 12 Mathematical model of M1 impedance and responses of the value varying engaged frequency ( $w \gg 1$ : Profile Mode,  $w \ll 1$ : CC Mode)

### 3.3 EIS Analysis 기반 발열저항 산출

ECM element 변화에 따라 Model의 Nyquist graph가 변하는 특징을 이용하여 EIS Test에 의해 얻어진 Nyquist Plot Data에 Model graph를 접합 시킴으로써 element value를 결정한다. Figs. 13과 14는 SOC 0 %, 50 %, 100 %

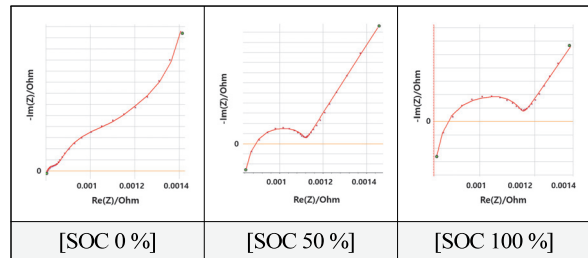


Fig. 13 Results of Z-fitting based on Model-1

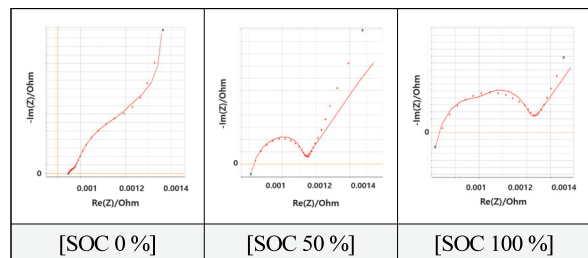


Fig. 14 Results of Z-fitting based on Model-2

에서 Z-fitting을 수행한 결과이다.

그래프 형태에 따른 1차 분석 실시하였다. SOC가 낮아질수록 반원의 지름이 증가하는 것을 볼 수 있다. 특히, SOC 0%에서는 반원과 우상향 증가 그래프(ECM의 Solid diffusion 해당)의 구분이 모호할 정도로 커지는데 이는 방전상태일 때 리튬이온은 양전극의 활물질에 저장되며, 이때 Lithium insertion과 관련된 저항이 급격히 늘어남으로써 이에 상응하는 저항이 증가되는 것으로 판단하였다.

Fig. 15의 Z-fitting 결과 데이터를 통하여 ECM 모델 1의 경우가 모델 2의 경우보다 Low frequency에서 Z-fitting 정확도가 더 높은 것이 확인되었다. 다만, 모델 1의 경우 Z-fitting오차는 모델 2보다 더 크나 CC Mode 주파수 선정에 새로운 모델이 필요하므로 우선 열저항 예측은 모델 2를 기반으로 산출하였다. 또한 모델 2의 Z-fitting에서 Low frequency 영역의 Z-fitting plot 기울기가 작으므로 Warburg impedance의 발열 저항은 실제보다 높게 예측되었고, 모델 2로부터 산출된 Warburg impedance의 발열 저항오차가 높을 경우 CC 모드에 대한 Low Frequency Model 제시 필요할 것으로 판단되었다.

온도가 증가함에 따라 전반적으로 전체 저항 값이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 또한 SOC가 감소함에 따라 전체저항 값이 증가하는데 이는 R3(Charge transfer resistance)의 영향이 큰 것으로 예측되었다.

Figs. 16과 17의 그래프를 살펴보면 저 SOC 구간에서의 급격한 내부저항 증가를 확인할 수 있는데 이는 Rct(Charge transfer resistance)가 SOC 0-10% 구간에서 확연히 높지는 것으로 보아 앞서 리튬 Insertion에 의한 내부저항 증가로 판단해 볼 수 있다.

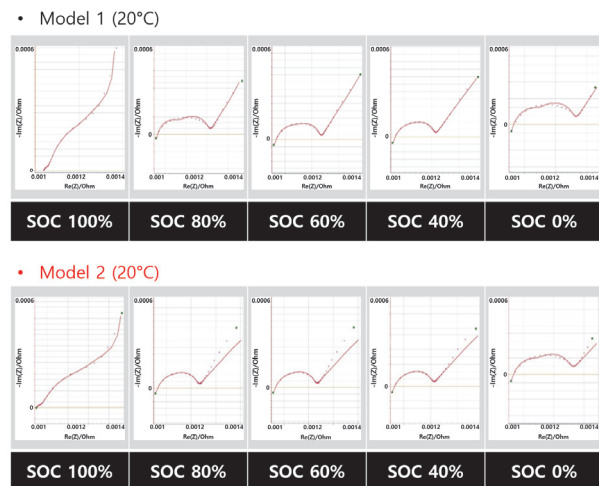


Fig. 15 EIS analysis results based on Model-1,2

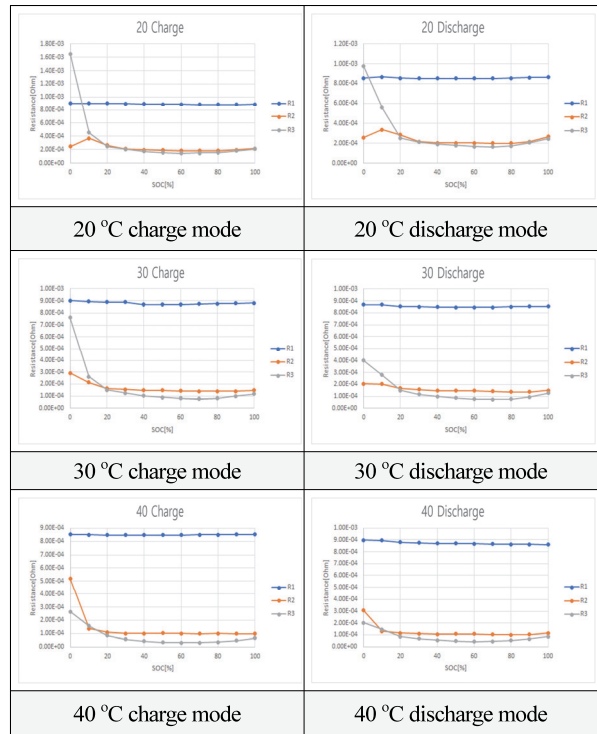


Fig. 16 Variation of ECM (Model-1) resistance depending on cell temperature (°C) and SOC (%)

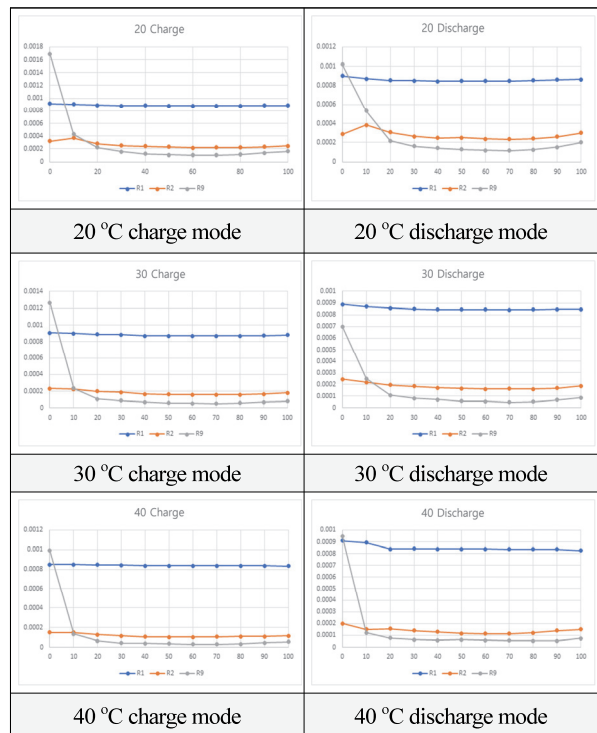


Fig. 17 Variation of ECM (Model-2) resistance depending on cell temperature (°C) and SOC (%)

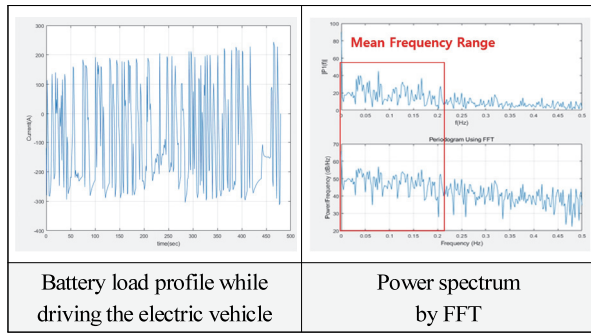


Fig. 18 Current profile loading on battery under circuit-driving of electric vehicle and power spectrum obtained from FFT

Fig. 18의 Profile mode 경우 Power spectrum에 면적모멘트 평균을 취하여 0.1 Hz로 평균 주파수를 설정하고 이를 Warburg impedance 주파수로 적용하여 발열저항 산출하였다. CC mode의 경우 주파수 극한값을 고려해  $\omega \rightarrow 0$ 으로 수렴하며 이때 모델 2 Warburg impedance의 수학적 극한값이 존재함으로 적용이 용이하다. 단, 모델 2는 앞에서 언급한 바와 같이 저주파 영역에서 Z-fitting 오차가 발생하였다. 또한, 모델 1은 저주파 영역에 좋은 Z-fitting을 보여주므로 적절한 주파수 모델이 존재하면 보다 정확한 Solid diffusion reaction에 의한 발열량 예측 가능할 것으로 판단되었다.

#### 4. 배터리 열거동 분석 및 모델검증

##### 4.1 발열모델링 검증방안

본 연구에서 산출한 발열저항 기반 발열모델의 검증을 위하여 다양한 부하 조건에서 배터리 발열량을 실험적으로 우선 측정하였다.

##### 4.2 배터리 열거동 시험

발열량 검증을 위하여 C-rate 별 방전 시험을 실시하였고, 테스트 조건은 배터리 발열량 검증을 위하여 C-rate 별 방전시험을 실시하여 셀의 단 부위별 온도 거동 데이터를 획득하였다. 또한 배터리 열 물성치 및 발열량을 이용하여 Simulation model 구성한 후 시뮬레이션에 의한 온도거동과 단 셀 온도거동 시험 데이터와 비교·검증 발열량 검증 이외에 Load cut-off 이후 잔류 발열에 대한 분석을 위한 시험 데이터로 활용하였다.

또한 테스트 조건은 시험 Cell 수는 5개, 온도조건은 고온 안전문제를 고려하여 Test chamber 온도를 15 °C로 설정하였고, C-rate: 55.6 Ah 기준으로 Fig. 20과 같이 1C/2C/3C/4C/5C로 시험하였다. 또한 방전 시작 시 충전용량기준 SOC 100%, 80%, 60%, 40% 별로 시험하였고,

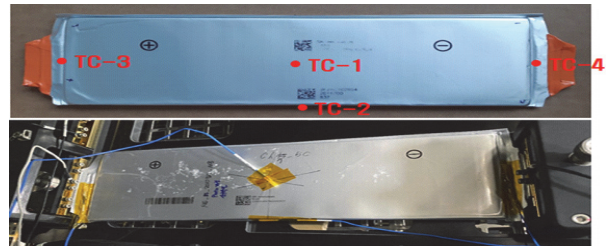


Fig. 19 Temperature sampling position of Pouch Type LIB during load test

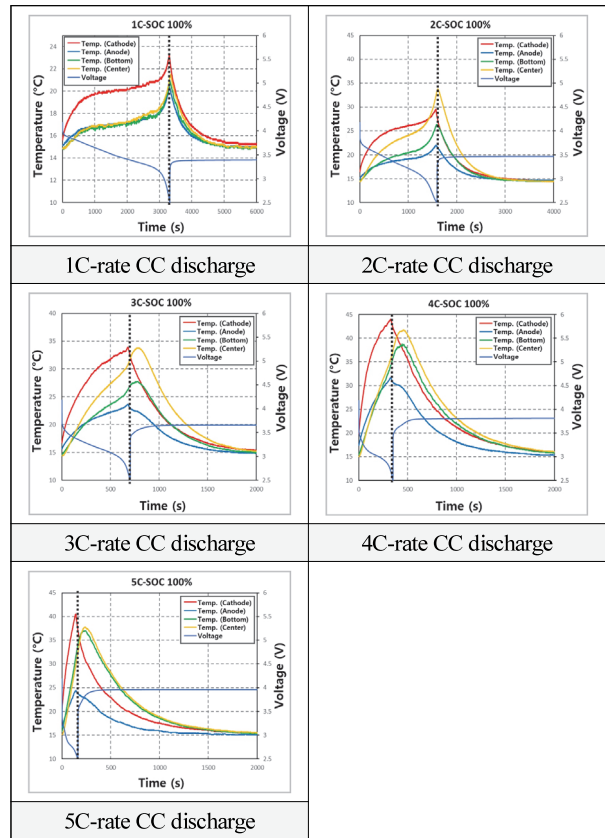


Fig. 20 Temperature profile with time under discharge condition

이때 셀 전압, 로드 전류, 표면온도를 검출하였다.

##### 4.3 ECM 발열모델 검증

ECM 기반 Reduced order simulation model을 Matlab Simulink 기반으로 완성하였다.<sup>7)</sup> 해당 시뮬레이션 모델은 Fig. 21과 같이 SOC, 온도에 따른 발열저항의 Interpolation map, RC ladder(ECM 기반), SOC calculation (Coulomb counting), Cell temp. calculation으로 구성된다. 해당 ECM 기반 열거동 시뮬레이션으로부터 예측된

C-rate별 배터리 평균온도 거동을 시험치와 비교하여 발열량 검증하였다.

최종 도달온도를 비교해 봤을 때 Fig. 22와 같이 전 C-rate 영역에서 전반적으로 실험과 시뮬레이션의 온도 거동에 큰 차이가 없음을 확인하였다. Low SOC 영역에서 급격한 셀 온도 상승을 보여주는데 이는 양극의 리튬 농도가 높아져 리튬 삽입 및 Solid diffusion 저항의 증가로 판단되었다. 또한 최종 도달온도에서는 시험과 시뮬레이션이 비슷한 값을 보여주었으나 방전 초기 Simulation의 온도 상승이 시험보다 매우 높은 결과를 확인할 수 있었으며, 이는 Warburg impedance로부터 산출

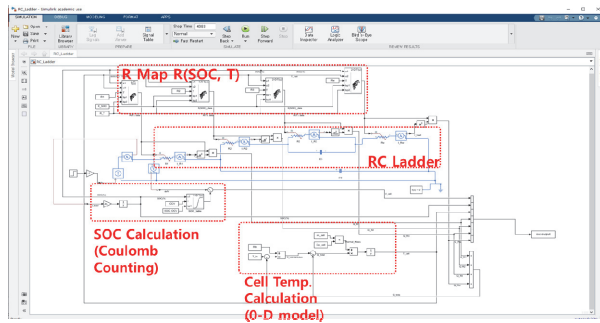


Fig. 21 Battery reduced-order simulation model to predict thermal behavior with various load profile

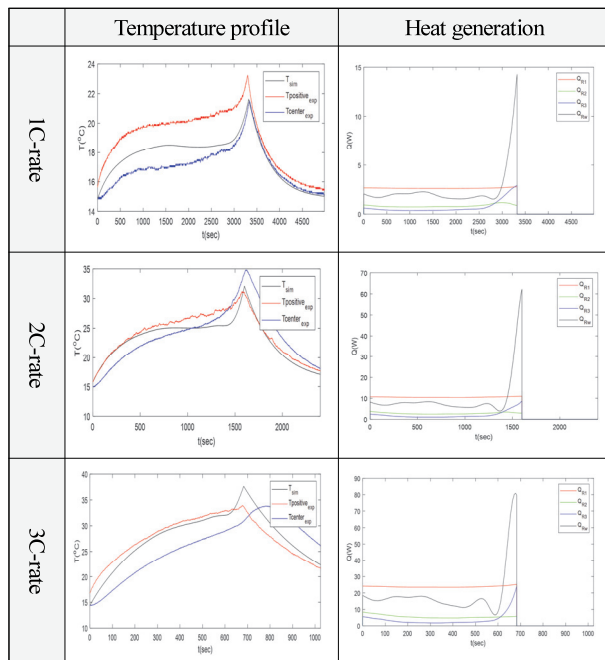


Fig. 22 Comparison of temperature profile obtained from simulation and experiment and heat generation rate from joule-heating resistance

된 발열저항이 초기에 과하게 계산되었기 때문이며 이를 개선하기 위한 수정 모델 제안이 필요한 것으로 판단된다.

#### 4.4 Isothermal Battery Calorimeter 적용 방안

기존 발열량 측정은 챔버내에서 충방전중 표면 온도 측정하여 탭을 통한 전도 손실, 셀 표면 복사, 대류 손실 등에 의한 발열량 오차 발생하는데 이는 진공챔버에 의한 시험시에도 탭 전도는 불가피하여 손실보상 필요하다. 또한 고출력 시험시 배터리 온도가 과도히 상승하므로 대전류에서는 시험이 불가능하다. 이러한 단점을 극복하고자 배터리 발열량 추정을 위한 다양한 방법이 제안되었는데 그중 대표적인 것이 Fig. 23의 Isothermal battery calorimetry이다.

IBC(Isothermal Battery Calorimetry: 등온 배터리 열량계)는 일정한 온도를 유지하면서 전기화학 반응 중에 배터리에서 발생하거나 흡수되는 열을 측정하도록 설계된 장치이며 이로 인해 부하시험 중 배터리 온도가 일정하게 유지된다. 따라서 앞서 설명한 일반적인 시험과 달리 IBC를 활용할 경우 배터리 온도상승이 제한되어 열폭주 문제가 해소되므로 고부하 시험이 가능하다. 또한 온도 변동이 최소화된 통제된 환경에서 시험이 수행되므로 외부의 열적 간섭요인 없이 배터리의 열거동을 분석할 수 있는 장점이 있다. 특히 시험 중 배터리 온도와 챔버 온도가 동일하게 유지되므로 대류, 전도, 복사에 의한 열 유입 및 손실을 원천 차단할 수 있어 분석오차를 최소화할 수 있는 장점이 있다. 그러므로 본 연구에서는 IBC를 대용량셀 발열거동 분석에 활용하였다.

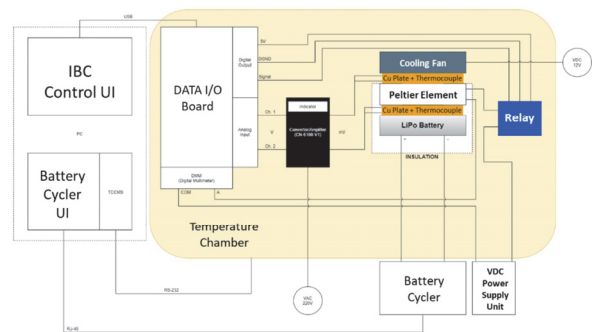


Fig. 23 Configuration of system set-up of isothermal battery calorimeter

#### 4.5 IBC 구성 및 시험법

IBC의 원리는 충방전중 배터리에서 온도제어를 위하여 발생한 열량만큼 TEC(Thermoelectric Cooler)를 통하여 냉각하게 된다. 이때 에너지보존 법칙에 따라 냉각에

필요한 열( $Q_{flux}$ )은 배터리 발열량( $Q_{gen}$ )과 동일하게 된다. 따라서 TEC의 에너지 전환효율을 통해 입력된 전기적 에너지를  $Q_{flux}$ 로 환산하여 발열량 산출을 가능하게 한다.

우선 배터리의 온도 측정을 위하여 NI USB-9213 (Temperature detecting module) 및 온도 센서가 사용된다. 이는 시험용 배터리와 냉각 시스템의 온도를 측정하기 위한 모듈로, 이에 상응하는 장비를 사용해도 무방하며, 본 연구에서는 채널의 수는 6개 이상인 National instrument 社의 장비를 이용하였으며 온도 센서는 K Type을 사용하였다. 이때 측정부의 크기를 작게 가져갈 수록 정확한 측정이 가능하게 된다. Programmable power supplies는 냉각 시스템인 Peltier module에 전원을 공급하기 위한 장비이다.<sup>8)</sup> 이때, 최소 두 채널이 필요한데 하나는 방열용 팬, 나머지는 펠티어 소자에 전원을 공급하는 용도이다.

펠티어 소자(Peltier element)는 IBC 장비의 가장 핵심적인 부품으로, 배터리를 일정한 온도로 유지하며 특히 고부하 조건에서 배터리의 온도 상승을 제한하므로 고온 폭발의 위험을 제거할 수 있다. 전원을 투입하면 배터리 부착면 소자가 냉각되는 특성을 이용해, 배터리 발생 열을 즉각적으로 제거하여 등온 상태를 유지하게 되는데 냉각량을 역산 함으로써 배터리 발열량을 계산할 수 있다.

Fig. 24에서 보는 바와 같이 Peltier module 구성을 위한

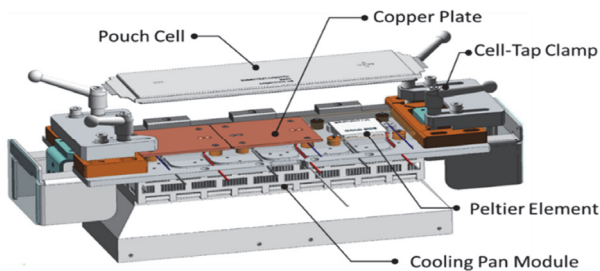


Fig. 24 Configuration of Peltier module

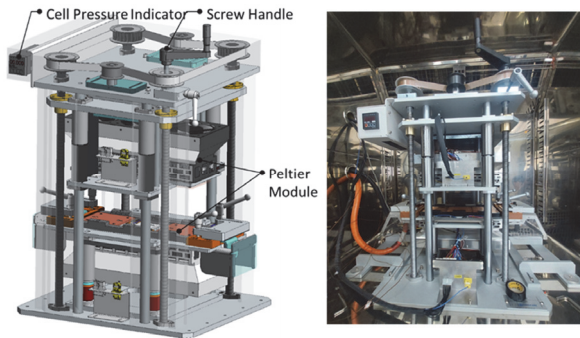


Fig. 25 Configuration of Peltier assembly in IBC

여 사용된 기타 물품은 TIM, Heat sink, Cooling fan 등이 있다. 배터리의 열이 충분히 해소되지 못하면 냉각이 제대로 이뤄지지 않는 열역전 현상이 발생하므로, 발열부에 적절한 Cooling solution과 함께 접촉열 저항 해소를 위하여 배터리 양면에 Thermal Interface Material(이하 TIM)를 충분하게 도포하였다.

충방전 시스템은 배터리에 충전 및 방전을 담당하는데 본 연구에서는 시험 대상 배터리의 전압/전류 용량에 맞는 장비를 사용할 수 있도록 하였다. Fig. 25와 같이 IBC를 활용한 배터리 발열량 측정은 항온챔버 내에서 이루어졌는데 이는 외부의 온도변화를 최소화화를 통해 측정 시스템 항온을 유지해야만 측정 온도 노이즈를 최소화할 수 있기 때문이다.

IBC에서는 시험 배터리의 온도제어를 위해서 정밀한 온도제어 알고리즘을 적용해야 한다. 본 연구에서는 PID 기반의 온도제어 알고리즘을 적용하였고, 시스템은 Figs. 26, 27과 같이 LabView를 기본으로 하여 알고리즘을 구현하였다.

IBC 시험 중 배터리에서 발생하는 열은 펠티어 모듈에 의해 제거된다. 이때 배터리의 온도가 일정하다고 가정하면 배터리에서 발생하는 열의 양은 펠티어 모듈에

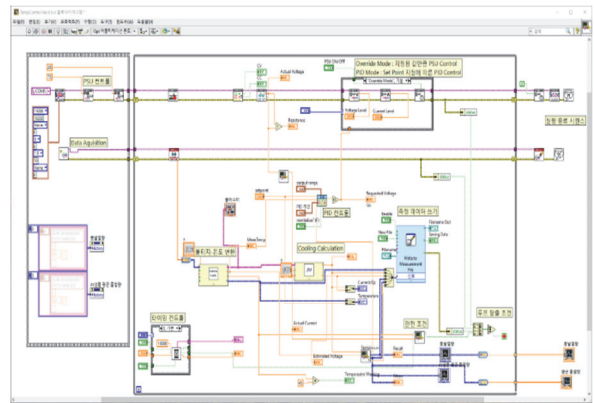


Fig. 26 LabView-based control diagram for IBC system



Fig. 27 Control interface for IBC system

서 제거되는 열의 양과 정확히 일치하게 되므로 펠티어 모듈이 제거하는 열량을 정확하게 측정하면 배터리에서 발생하는 열을 계산할 수 있다.

본 연구에서는 펠티어 모듈의 Calibration을 위하여 면상 발열체를 이용하였으며, 해당 시험을 통하여 전력-발열량의 함수 관계식을 구하였다.

Fig. 28과 같이 펠티어 모듈 사이에 PTC 히터를 배치하였는데 PTC 히터는 공급되는 전력에 따라 열이 발생한다.

PTC 히터의 발열 속도는 Joule heating model을 사용하여 계산되었다.<sup>9)</sup>

컨트롤러가 펠티어에 적용하는 전력은 Fig. 29의 Duty-Cycle로 표시할 수 있으며, 이는 펄스의 총 시간과 비교하여 펄스가 “켜지는” 시간의 비율을 백분율로 표시한 것이다.

Fig. 30(a)는 Calibration 시험 중 열 발생률에 해당하는 Duty-Cycle값을 보여주며, Fig. 30(b)와 같이 선형 교정 곡선이 얻어졌다. 이렇게 얻어진 배터리 발열량(W)과 Duty-Cycle(%)의 관계를 바탕으로 배터리 부하 테스트 중 컨트롤러의 Duty-Cycle을 계산하여 배터리에서 발생

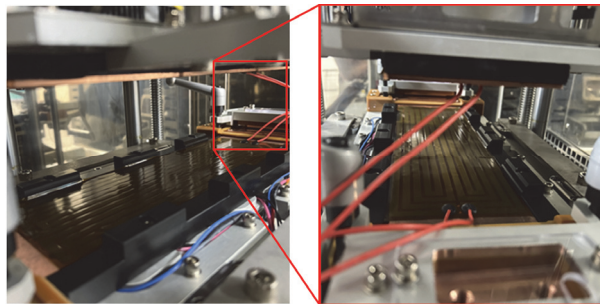


Fig. 28 Location of PTC heater for Peltier module calibration

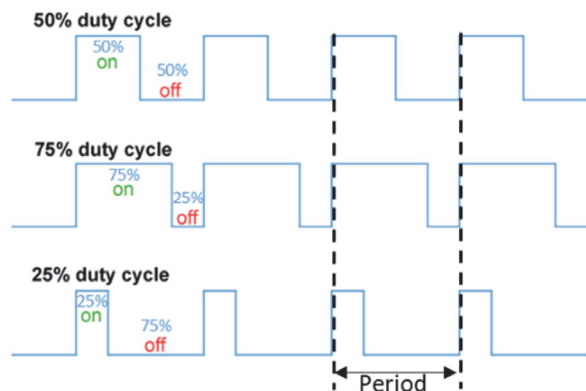


Fig. 29 Pulse shape of input power varying with duty-cycle

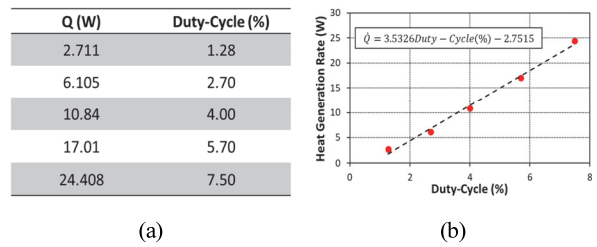


Fig. 30 (a) Duty-cycle corresponding to heat generation in the IBC system, (b) calibration curve for duty-cycle (%) vs heat generation rate (W)

하는 열을 순시적으로 산출해낼 수 있다.

#### 4.6 IBC 기반 배터리 열거동 교차검증

시간적분을 적용하여 Fig. 31과 같이 배터리 총 발열량을 산출하였다. 총 발열량을 비교해 봤을 때 EECM 전반적으로 낮은 값을 추정하였고, IBC와 Inverse heat analysis는 1000초까지 유사한 값이 예측되고, IBC는 열 관성으로 인해 부하 종료 후에도 발열이 계속될 것으로 예측된다. 또한 연구에서는 대형 Peltier module assembly를 사용하여<sup>10)</sup> 대용량 파워칩 셀을 테스트했는데, 그로 인하여 이러한 응답지연이 발생된 것으로 예상된다.

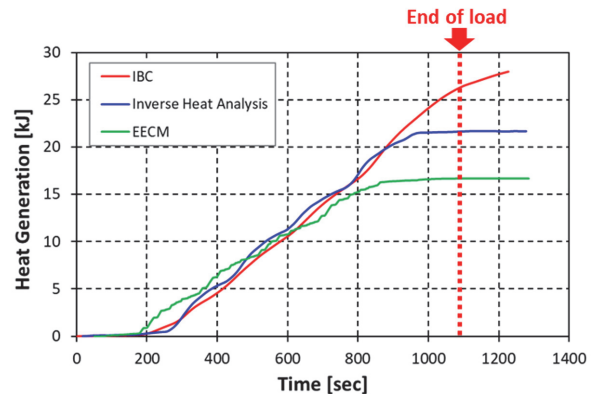


Fig. 31 Time integration of heat generation rate obtained from IBC (red line), inverse heat analysis (blue line) and EECM simulation (green line)

### 5. 배터리 지연발열현상 및 수정 ECM 모델

#### 5.1 이방적 열전이 구조에 따른 배터리 열거동 특징

본 연구에서 산출한 발열저항 기반 발열모델의 검증을 위하여 다양한 부하 조건에서 배터리 발열량을 실험적으로 우선 측정하였다.

부하 중 셀 열거동 분석 결과 전극탭 근방과 중앙부 온도 변화를 Fig. 32와 같이 비교해 봤을 때, 극탭 근방이 전

류변화에 더 민감하게 반응하는 것이 확인되었다. 또한 초기 전극탭의 급격한 온도 상승은 탭 근방의 열용량이 적으며 초기 전류집중으로 인한 것으로 해석 된다. 다만, 일정 구간 이후 전극탭 부위 보다 중앙부에 온도가 역전 되는 현상 보이는데 배터리의 주요 발열은 전극활물질에서 오기 때문이며 이에 대한 다양한 연구사례가 보고 되었다.<sup>11)</sup>

또한 부하 차단 후 배터리 열거동 특징을 보면 Fig. 33 과 같이 전극 탭부분은 순간적으로 온도가 하강하는 양상을 보여주나 중앙부는 지연상승 후 감소하는 것으로 보인다. 이는 시험 중 전극탭은 챔버내에서 대류 냉각상태에 있으며 충방케이블 연결부와 접촉하고 있어 전도에 의한 냉각도 존재하기 때문에 이로 인해 중앙부보다 온도 하강이 빠른 것으로 보인다. 그러나 중앙부는 온도 상승이 지속되다가 일정시간 후 하강하는데 이러한 온도 변화 구간은 OCV 회복구간과 일치하며 이는 일전에 언급한 전극 및 전해질의 리튬 균질화 과정에서 오는 잔

류열에 의한 것으로 판단 가능하다.

### 5.2 지연발열에 의한 배터리 열거동 특징

Figs. 34, 35와 같이 부하차단 후 셀 열거동 분석하면 본 시험에서도 방전 초기 대전류에 의한 전극탭 온도 상승이 확연히 드러났다. 전류 차단 후 잔류열에 의한 중앙부 온도지연상승은 SOC 100%일 때보다 완화된다. 이는 SOC 70%에서 방전을 시작한 배터리가 SOC 100%일 때보다 전극/전해질에 리튬이 좀 더 균질한 상태에서 Cut-off voltage에 도달하였기 때문으로 판단된다. SOC 70%의 경우 OCV 회복 구간이 100 sec로 SOC 100%의 200 sec에 비하여 짧아지는 것에 주목할 필요가 있다.

Table 4의 정리된 데이터를 종합해보면 C-rate의 증가에 따라 온도지연상승 더욱 두드러지며 이는 대전류에서 리튬이온농도 불균일 발생 및 Cut-off 이후 농도 균질화에 의한 잔류 발열 현상이 발생한다는 근거가 될 수 있음을 확인하였다. 또한 온도 지연상승량은 방전 시작 SOC

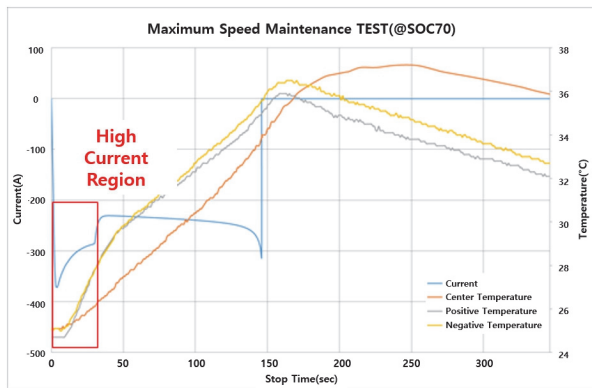


Fig. 32 Time delay on temperature profile in high load condition for the Li-ion

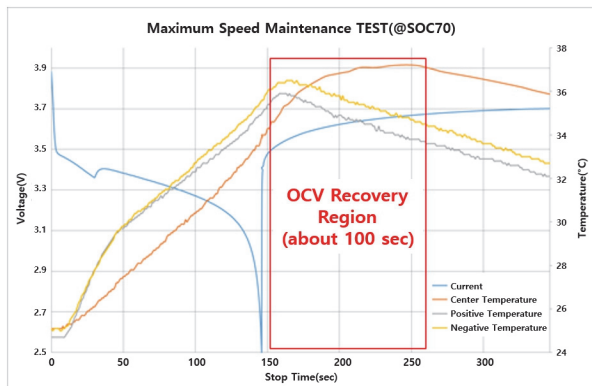


Fig. 33 Comparison of temperature profile on center position of pouch cell and cell voltage

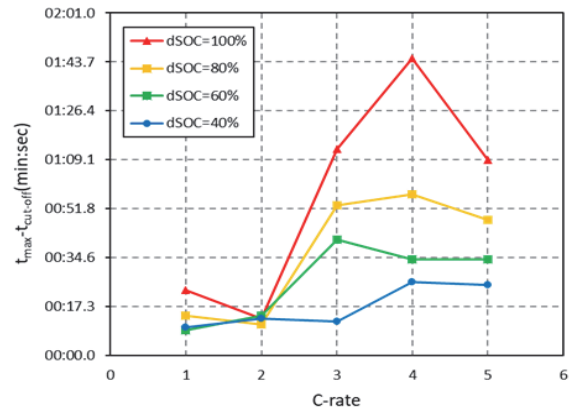


Fig. 34 Difference between  $t_{max}$  and  $t_{cut-off}$  with varying load current and initial SOC

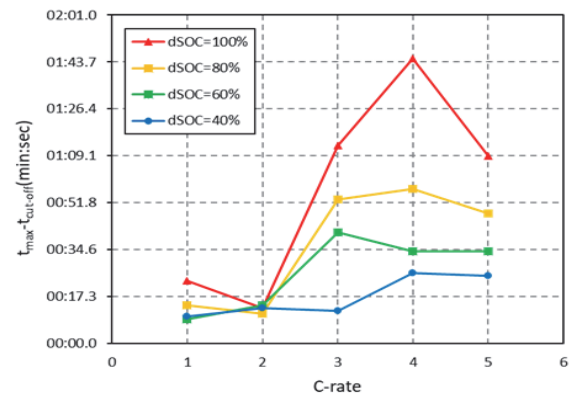


Fig. 35 Temperature increment after load cut-off with varying load current and initial SOC

Table 4 Additional temperature rise after load cut-off at center position of the pouch cell

Central temperature delay increase				
C-rate	Start SOC (55 Ah standard)			
	100 %	80 %	60 %	40 %
1C	0.206	0.206	0.102	0.308
2C	0.411	0.411	0.307	0.513
3C	1.951	1.746	1.436	1.335
4C	4.421	2.775	1.542	1.337
5C	5.242	2.877	1.747	1.337

가 높을수록 두드러졌는데 이는 리튬이온 농도의 불균일 상태에 이를 때까지 충분한 배터리 반응시간이 확보되어 나타나는 현상으로 판단되었다. 단, 5C 방전조건에서는 온도의 지연상승의 추세가 완화되는 것처럼 보였는데 이는 실방전용량(또는 방전시간) 감소로 리튬이온의 불균일 현상이 약화되기 때문으로 판단된다. 따라서 배터리의 고출력 대응 성능이 개선되어 5C 이상에서도 충분한 방전용량이 확보된다면 오히려 잔류발열에 의한 온도지연상승이 심화될 가능성이 있을 것으로 판단된다.

### 5.3 ECM기반 발열모델 수정 및 검증

수정 제안된 발열모델을 이용하여 지속방전모드시 배터리의 열거동 예측결과를 Fig. 36과 같이 기존 모델과 비교 분석하였다. 기존모델에서는 지속 충전 또는 방전

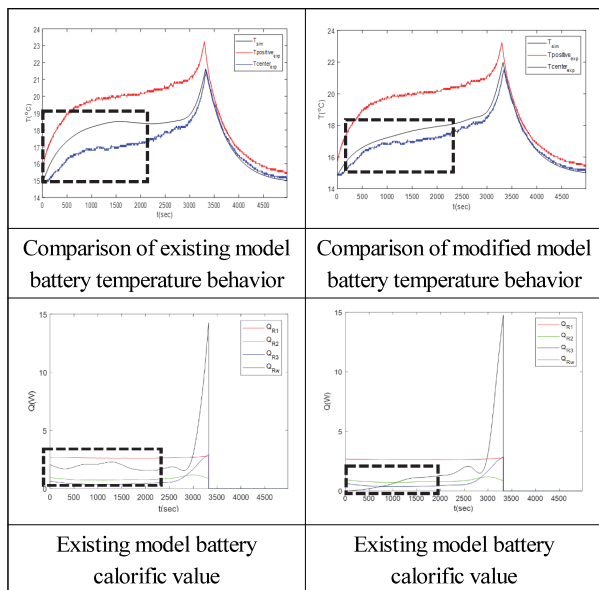


Fig. 36 Comparison of battery thermal behavior predicted by conventional and modified ECM model for 1C-rate CC discharge condition

시에 초기 발열량이 과대하게 산출되는 문제가 있었으나, 수정된 모델에 의하여 SOC 100 % ~ 70 % 구간에서 Warburg impedance에 의해 산출되는 열저항이 보완됨으로써 열거동 이탈 현상이 보완되었다.

## 6. 결론

배터리 열거동 예측을 위하여 본 연구는 크게 배터리 열물성 데이터 획득, 발열모델 제안, 다양한 조건에서의 열거동 분석, 제안모델의 수정을 진행하였다.

- 1) 배터리의 이방적 열전달 특성 및 셀 단위 열물성 변화를 예측하기 위하여 컴퓨터 단층촬영(CT)을 실시하고 연구용 Pouch cell에서 하단부 방열 접촉부에 간극 확인하였다. 이를 통하여 현재 하단 방열방식에서 일부 문제점 있을 것으로 판단되며 해당 간극을 고려한 셀의 유효 열전달 계수 산출이 중요하다는 결론에 도달하였다.
- 2) EECM parameter 산출을 위하여 EIS(Electrochemical Impedance Spectroscopy) Test를 실시 ECM 모델 선정과 Z-fitting을 통해 ECM의 Element value 추출 및 배터리 부하조건에 맞는 발열저항 모델을 제시하였다.
- 3) 해당 모델을 기반으로 Profile 부하, CC mode 부하 별로 발열저항을 산출하여 배터리 온도 변이 곡선 분석에 의한 발열량과 비교·검증 결과를 바탕으로 Load 조건에 따라 Solid diffusion에 의한 발열량 차이 확인 및 발열모델을 제안하였다.
- 4) CC mode에서 부하 초기 ECM 모델의 과도한 발열량 예측을 보완하여 실제 배터리 열거동과 일치하는 발열모델 제시 및 완성 모델의 검증 실시를 통해 초기 ECM 모델의 과도한 발열량 예측을 보완하여 실제 배터리 열거동과 일치하는 발열모델 제시하였고 이를 완성하였다.  
이렇듯 본 연구를 통해 유효성이 높은 배터리의 모듈/팩 단위 열물성이 측정되었으며, 다양한 부하 조건에서 적용 가능한 배터리 발열모델이 제시되고 검증되었다.

## 후 기

본 연구는 국토교통부의 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 사용후 배터리 안전점검 및 재제조 배터리 순환 체계 안전관리 기술 개발 과제의 지원을 받아 연구되었음(RS-2025-02309323).

This work was supported by Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement(KAIA) through Research and Development on Safety Management Technology for EOL(End-of-Life) and Remanufactured

Battery Project, funded by Korea Ministry of Land, Infrastructure and Transport(MOLIT)(RS-2025-02309323).

### References

- 1) R. Xiong, H. Li, J. Li and M. Ouyang, "Multi-Physics Modeling of Battery Thermal Behavior for Electric Vehicle Battery Thermal Management Applications," *Applied Energy*, Vol.282, pp.116–125, 2021.
- 2) B. Wu, X. He, R. Xiong and H. Li, "A Novel Multi-Scale Multi-Physics Coupled Modeling Framework for Li-ion Battery Thermal Analysis," *Applied Energy*, Vol.302, 2022.
- 3) W. C. Chien, C. W. Wu and C. H. Chen, "Multi-Physics Modeling of Battery Thermal Behavior: A Review," *Journal of Power Sources*, Vol.421, 2019.
- 4) J. W. Kim, J. W. Lee and K. C. Pesaran-Ahmad, "Quantitative Evaluation of Lithium-ion Battery Degradation Using Multiphysics Modeling," *Electrochimica Acta*, Vol.339, 2021.
- 5) J. Zheng, C. Wang and Z. Chen, "A 3D Multi-Physics Model for Lithium-ion Batteries Considering Ion Diffusion, Energy Storage and Heat Transfer Simultaneously," *Journal of Power Sources*, Vol.539, 2024.
- 6) P. Taheri, M. Yazdanpour and M. Bahrami, "Transient Three-Dimensional Thermal Model for Batteries with Thin Electrodes," *Journal of Power Sources*, Vol.243, pp.280–289, 2013.
- 7) M. K. Tran, M. Mathew, S. Janhunen, S. Panchal, K. Raahemifar, R. Fraser and M. Fowler, "A Comprehensive Equivalent Circuit Model for Lithium-ion Batteries, Incorporating the Effects of State of Health, State of Charge, and Temperature on Model Parameters," *Journal of Energy Storage*, Vol.43, Paper No.103252, 2021.
- 8) H. H. Huang, H. Y. Chen, K. C. Liao, H. T. Young, C. F. Lee and J. Y. Tien, "Thermal-Electrochemical Coupled Simulations for Cell-to-Cell Imbalances in Lithium-iron-Phosphate Based Battery Packs," *Applied Thermal Engineering*, Vol.123, pp.584–591, 2017.
- 9) K. Y. Kim, S. C. Kim and M. S. Kim, "Experimental Studies on the Heating Performance of the PTC Heater and Heat Pump Combined System in Fuel Cells and Electric Vehicles," *International Journal of Automotive Technology*, Vol.13, No.6, pp.971–977, 2012.
- 10) K. Onda, T. Ohshima, M. Nakayama, K. Fukuda and T. Araki, "Thermal Behavior of Small Lithium-ion Battery During Rapid Charge and Discharge Cycles," *Journal of Power Sources*, Vol.158, No.1, pp.535–542, 2006.
- 11) S. Goutam, A. Nikolian, J. Jagemont, J. Smekens, N. Omar, P. V. D. Bossche and J. V. Mierlo, "Three-Dimensional Electro-Thermal Model of Li-ion Pouch Cell: Analysis and Comparison of Cell Design Factors and Model Assumptions," *Applied Thermal Engineering*, Vol.126, pp.796–808, 2017.