



# PHP를 적용한 EV BTMS 모델 개발 및 PHP가 급속 충전 시간에 미치는 영향 분석

김호준<sup>1)</sup> · 김준우<sup>1)</sup> · 신정현<sup>1)</sup> · 조정원<sup>2)</sup> · 이종구<sup>2)</sup> · 이건구<sup>3)</sup> · 박성진<sup>\*1)</sup>

홍익대학교 기계공학과<sup>1)</sup> · 현대자동차 R&D 본부<sup>2)</sup> · 현대자동차 AVP 본부<sup>3)</sup>

## Development of an EV BTMS Model with PHP and Study of the Effect of PHP on the Fast-Charging Time

Hojun Kim<sup>1)</sup> · Junwoo Kim<sup>1)</sup> · Jeong-Heon Shin<sup>1)</sup> · Jeongwon Cho<sup>2)</sup> · Jonggu Lee<sup>2)</sup> · Gungoo Lee<sup>3)</sup> · SungJin Park<sup>\*1)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Mechanical Engineering, Hongik University, Seoul 04066, Korea

<sup>2)</sup>Hyundai Motor Company R&D Division, 150 HyundaiYeonguso-ro, Namyang-eup, Hwaseong-si, Gyeonggi 18280, Korea

<sup>3)</sup>Hyundai Motor Company AVP Division, 20 Changeop-ro 40beon-gil, Sujeong-gu, Seongnam-si, Gyeonggi 13449, Korea

(Received 10 September 2025 / Revised 7 November 2025 / Accepted 17 November 2025)

**Abstract :** In this study, the thermal performance of Battery Thermal Management System (BTMS) equipped with a Pulsating Heat Pipe (PHP) cooling plate under fast charging was quantitatively evaluated. A 1D model was developed using MATLAB & Simulink to simulate the maximum temperature and the temperature difference within the battery module during fast charging. The thermal behavior of the PHP module was compared with that of an Aluminum plate module. Furthermore, the influence of rule-based current control strategy, triggered by the maximum module temperature and the maximum temperature difference within the center cell, on both the thermal response and the charging time was also compared. The results confirm that under temperature-based current control conditions, the charging time of PHP equipped battery modules can be significantly reduced by optimizing the coolant temperature.

**Key words :** Battery thermal management system(배터리 열관리 시스템), Pulsating heat pipe(맥동 히트파이프), Fast charging(급속 충전), Equivalent circuit model(등가회로 모델), Effective thermal conductivity(유효 열전도도)

### Nomenclature

$A$  : area, m<sup>2</sup>  
 $C_p$  : specific heat, J/kg·°C  
 $D_h$  : hydraulic diameter m  
 $h$  : convective heat transfer coefficient, W/m<sup>2</sup>·°C  
 $I$  : current, A  
 $k$  : thermal conductivity, W/m·°C  
 $L$  : length, m  
 $m$  : mass, kg  
 $Nu$  : Nusselt number, -  
 $Pr$  : Prandtl number, -  
 $Q$  : heat transfer rate, W  
 $R$  : thermal resistance, °C/W  
 $Re$  : Reynolds number, -

$T$  : temperature, °C  
 $t$  : time, s  
 $V$  : velocity, m/s or voltage, V  
 $\rho$  : density, kg/m<sup>3</sup>  
 $\mu$  : dynamic viscosity, kg/m·s

### Subscripts

Al : aluminum  
 BTMS : battery thermal management system  
 c : condenser  
 CV : control volume  
 DAQ : data acquisition  
 dis : dissipation  
 e : evaporator

\*Corresponding author, E-mail: parksj@hongik.ac.kr

\*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.

- eff : effective
- FR : filling ratio
- irr : irreversible
- OCV : open circuit voltage
- rev : reversible
- TC : thermocouple
- WF : working fluid

### 1. 서론

지구 온난화 문제 해결과 화석 연료 사용 절감을 위해 전기자동차에 대한 수요가 증가할 것으로 예측된다. 이에 따라 핵심 부품인 배터리 관련 연구가 활발히 진행되고 있다. 배터리 작동 중에는 배터리 셀 내부의 화학 반응과 내부 저항 때문에 발열이 발생하여, 온도가 상승한다. 배터리 온도 상승은 셀의 수명 저하, 내부 저항 불균형, 충·방전 효율 저하 등의 문제를 유발하며, 배터리 과열 시 열폭주의 위험성을 증가시킨다.<sup>1,2)</sup> 따라서, 배터리 작동 시 적정 온도 범위를 고려하여야 한다.<sup>3)</sup> Fig. 1은 배터리의 적정 작동 온도 범위와 온도 및 온도 편차가 배터리에 미치는 영향을 나타낸다. 발열량이 높은 급속 충전 상황에서 전기 자동차의 배터리 열관리 문제가 주목받고 있다.<sup>4)</sup> 이때, 배터리 팩의 온도를 효과적으로 제어하고, 모듈 및 셀 내에서 온도 편차를 최소화할 수 있는 배터리 열관리 시스템(BTMS) 설계가 필요하다.

배터리 열관리를 위해서 공랭식 냉각시스템,<sup>5)</sup> 간접 수랭식 냉각 시스템<sup>6,8)</sup> 등 다양한 냉각 방식이 제시되었으며, 모듈 및 셀 내의 온도 편차를 줄이기 위해 높은 열전도도를 지닌 Pulsating Heat Pipe(PHP)를 방열판으로 사용한 간접 냉각 시스템에 관한 연구가 진행되었다.<sup>9)</sup> Li 등<sup>10)</sup>은 PHP가 적용된 배터리 모듈이 적용되지 않은 경우보다 모듈의 최고 온도가 낮고 모듈 내 온도 편차가 더 작음을 실험을 통해 확인하였다. Dang 등<sup>11)</sup>은 데이터 센터에 PHP를 활용하였을 때 CPU의 최대 온도를 Computational Fluid Dynamics(CFD) 시뮬레이션을 통해 예측하였다. PHP를 하나의 고체로 가정하고 유효한 열전도도를 실험

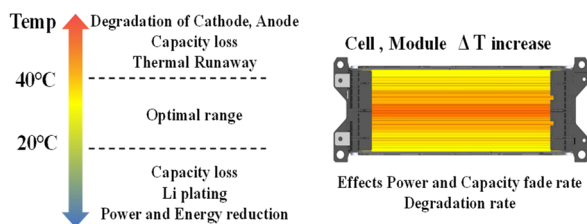


Fig. 1 Operation condition and temperature effects of lithium-ion battery

데이터로 계산하여 데이터 센터 시스템 단위의 계산에 적용하였다. PHP의 형상적 특징, 내부 작동 유체 등이 정해지면 단품 성능 실험을 통해서 모델에 필요한 파라미터를 계산하고, 이를 이용해 배터리 열관리 모델의 계산 과정을 단순화할 수 있다.

Fig. 2와 같이 전기자동차 배터리 모듈에 PHP를 적용하기 위해서는 두 가지 설계 조건을 고려해야 한다. 첫째, PHP의 상부에는 증발부 영역이, 하부에는 응축부 영역이 위치해야 한다. 둘째, 증발부 영역에 비해 응축부 영역이 상대적으로 짧아야 한다. 이와 관련하여, PHP의 증발부 영역과 응축부 영역이 뒤집어진, Anti-gravity 형식 PHP의 열 성능에 관련된 연구가 진행되었다. Deng 등<sup>12)</sup>은 PHP 하부에 응축부 영역이 위치한 일반적인 PHP 구조보다 Anti-gravity 형식 PHP의 열성능이 낮지만, 턴(turn) 수가 증가함에 따라서 PHP의 열성능이 향상됨을 확인하였다. Tseng 등<sup>13)</sup>은 PHP 구조와 비교했을 때, 열량이 증가함에 따라서 Anti-gravity PHP의 성능이 일반적인 PHP와 유사해짐을 확인하였다. Winkler 등<sup>14)</sup>은 Anti-gravity PHP의 성능이 최대 열 부하 이하 조건에서는 기본 PHP 구조와 동일한 열 성능이 보임을 확인하였다. Anti-gravity 형식 PHP역도 턴 수가 충분하고, Dry-out이 일어나기 전까지 적절한 열량이 인가되면 PHP가 정상 작동할 수 있음을 확인하였다. 이를 바탕으로, 본 연구에서는 정확성과 계산 시간을 적절하게 고려하여 배터리 팩 설계 조건을 반영한 PHP 적용 배터리 열관리 모델을 개발하였다.

배터리 급속 충전에서 배터리 냉각은 중요한 요소로, 충전 중 배터리의 온도 및 온도 차이가 증가할 경우 배터리 수명에 악영향을 미친다.<sup>15)</sup> 급속 충전을 위해 기존의 Constant Current-Constant Voltage(CC-CV) 충전 방식에 대한 대안으로, 서로 다른 전류 크기를 갖는 여러 개의 CC 모드 충전 단계로 구성된 Multi Stage Constant Current

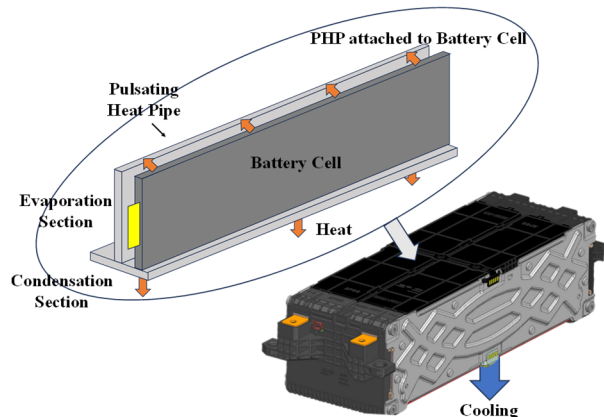


Fig. 2 Schematic of PHP integrated BTMS

(MSCC) 충전 방식이 제안되었다.<sup>16,17)</sup> MSCC 기반 충전 방식으로 배터리의 최고 온도 및 배터리 셀 내의 온도 편차를 변수로 하는 전류 제어 시 배터리의 온도를 유지하고 충전 시간을 줄이면서도 배터리 열화를 줄일 수 있음을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.<sup>18)</sup> 따라서, 본 연구에서는 배터리 모듈의 최고 온도와 모듈 내 온도 편차를 고려한 충전 전류 제어 전략을 적용하였다.

본 연구에서는 MATLAB & Simulink를 이용해 PHP를 이용한 배터리 모듈 간접 냉각 시스템 모델을 개발하였다. PHP 통합 모듈 BTMS 모델은 두 가지 모델로 구성되는데, 모듈 BTMS 모델은 모듈 BTMS 시험 결과와 비교를 통해 검증하였고, PHP 열전달 모델은 PHP 성능 시험 데이터 기반의 열 저항 맵을 이용하여 개발하였다. 완성된 PHP 모듈 모델을 이용하여 급속 충전 조건에서 배터리 모듈 내 PHP의 냉각 효과를 Aluminum 모델과 비교 분석하였다. 또한, 기본 급속 충전 결과를 이용하여 Rule-based 전류 제어 조건을 구성하였다. 모듈의 최고 온도 기준 그리고 셀 내 최대 온도 편차를 기준으로 전류 제어가 작동하였을 때, 다양한 냉각수 온도에서 계산된 PHP 모듈의 충전 시간을 Aluminum 모델과 비교하였다.

## 2. 시스템 구성

BTMS 모델 구성을 위해, 배터리 셀의 발열을 계산하는 셀 모델과 모듈 구성 요소와의 열전달 모사하는 모듈 단위 BTMS 모델 개발이 필요하다. PHP 통합 BTMS 모델은 PHP 단품 모델을 개발한 후, 이를 기본 모듈 BTMS 모델과 통합하여 구성하였다.

### 2.1 배터리 셀 모델

단순한 구조로 전류의 동적 거동에 따른 실시간 배터리 상태 추정이 가능하여 차량 시뮬레이션 해석에 용이한 1RC 등가 회로 모델(ECM)을 사용하였다. 전류 인가 시 발생하는 순간적인 전압 강하를 모사하기 위해  $R_0$ 를 적용하였으며, 전압의 비선형 구간을 시상수  $\tau_1 = R_1 C_1$  (Resistance( $R_1$ ), Capacitance( $C_1$ ))을 통해 표현하였다. 이를 바탕으로 Fig. 3과 같은 1RC 모델을 개발하였다.

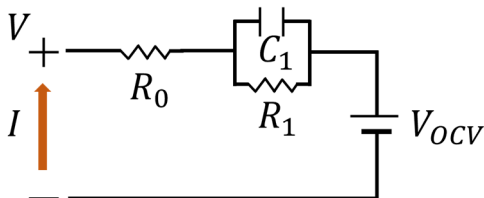


Fig. 3 Schematic diagram of first-order RC equivalent circuit model

배터리 셀의 열 거동 예측에는 Bernardi 방정식을 사용하였다. Bernardi 방정식을 이용해 계산할 수 있는 배터리 발열과 이를 통해 배터리 온도를 계산할 수 있는 에너지 방정식은 식 (1)과 같다. 식 (2)에서 우측 첫 번째 항은 배터리 내부 저항 때문에 발생하는 줄 발열로, 비가역 발열에 해당하며, 두 번째 항은 엔트로피 변화에 의한 가역 발열을 나타낸다. 배터리 셀 모델은 탭 부위에서 발열도 고려하였다. 탭 발열은 전류와 금속의 전기 저항에 의해 발생하는 줄 발열로, 탭의 전기 저항은 식 (3)에 나타내었다. 이때,  $\rho_0$ 는 금속의 비저항,  $A$ 는 전류가 흐르는 탭의 단면적,  $l$ 은 탭의 길이이다.

$$mC_p \frac{dT}{dt} = \dot{Q}_{cell} + \dot{Q}_{diss} \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{cell} = \dot{Q}_{irr} + \dot{Q}_{rev} = I_{cell}^2 R_{total} + I_{cell} T_{cell} \frac{dV_{open\ circuit}}{dT_{cell}} \quad (2)$$

$$R_{tab} = \rho_0 \frac{l}{A} \quad (3)$$

1RC 모델과 Bernardi 방정식을 기반으로 한 에너지 방정식을 이용해 Fig. 4와 같은 Electrical-Thermal Model을 개발하였다. Electrical 모델에 전류가 입력되면 전압, SOC, 내부 저항이 계산되고, 해당 정보 등을 통해 발열량을 계산한다. Thermal 모델에서 셀의 발열량과 외기온도를 이용하여 다음 스텝의 배터리 온도를 계산한다.

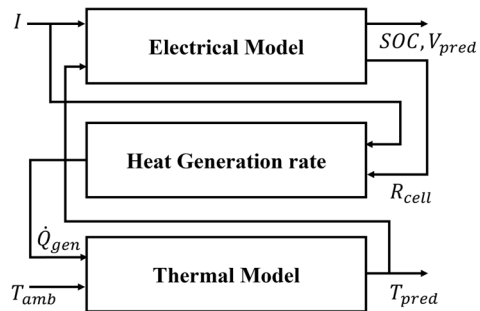


Fig. 4 Schematic diagram of battery electric-thermal model

### 2.2 배터리 모듈 BTMS 모델

본 연구의 기본 모듈 BTMS 모델은 Fig. 5와 같이 파우치형 셀 12개로 구성된 모듈과 냉각 채널로 구성된 간접 수랭 방식 BTMS로 구성되어 있다. BTMS 하단에는 냉각수가 흐르는 냉각 채널이 위치하고, 냉각 채널 위에 모듈이 위치한다. 배터리 모듈과 냉각 채널 사이에는 접촉 저항을 감소시키기 위한 TIM(Thermal Interface Material)이



Fig. 5 Photograph of the battery module

위치한다. Fig. 6에 나타난 것처럼 배터리 모듈은 배터리 셀, 써멀 패드(Thermal pad), 엔드 플레이트(End plate) 그리고 버스바로 구성되어 있다.

배터리 모듈 모델의 각 구성요소는 밀도, 비열, 열전도도 등의 물성치를 반영하여 에너지 방정식을 통해 열전달률과 온도를 계산한다. Fig. 7과 같이 배터리 모듈은 여러 개의 작은 요소(CV)로 나누어, 각 영역에 대해 에너지 방정식을 적용하여 근사해를 구하는 유한 요소법을 사용하였다. 배터리 셀은 16개의 CV로 나누어 구성하였으며 각 CV의 열전달은 대류와 전도의 메커니즘을 통해 계산된다. 하나의 셀 CV는 배터리 셀 발열과 상, 하, 좌, 우, 앞, 뒤 6방향의 열 전달을 한다. 배터리 셀 CV의 총 열 전달률은 식 (4)와 같다. 각각의 셀 CV는 위치에 따라 주변 셀 CV와의 전도, 써멀 패드와의 전도, End plate와의 전도, 외기와의 자연 대류 열전달을 한다. 식 (5)와 같이 배터리 셀의 발열은 셀 모델에서 가역열과 비가역열을 고려하여 계산하고, 각각의 셀 CV에서 균일하게 열이 발생한다고 가정하였다.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{total} = & \dot{Q}_{top} + \dot{Q}_{bottom} + \dot{Q}_{front} + \dot{Q}_{back} \\ & + \dot{Q}_{left} + \dot{Q}_{right} + \dot{Q}_{heatgen} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\dot{Q}_{total} = m_{Cell} C_{pCell} \Delta T \quad (5)$$

배터리 모듈의 상부는 단열, 옆면은 주변 대기와 자연 대류 상태로 가정하였다. 냉각 채널과 냉각 유체의 대류 열전달은 냉각 채널의 형상, 유량, 온도 등의 운전 조건에 따라 달라진다. 형상과 운전 조건이 반영되도록 층류와 난류를 구분하여 계산하였다. 먼저, 냉각수가 층류일 때는 채널 내부 유동이 완전 발달, 채널의 표면 온도가 일정하다는 가정하에 상수 3.66을 사용했다.<sup>19)</sup> 난류일 경우에는 Dittus Boelter의 상관식으로 계산하였다. 이때, 누셀트 수(Nu)는 식 (6)과 같이 레이놀즈 수(Re)와 프란틀 수(Pr) 수의 함수로 나타내었다. 레이놀즈 수는 냉각수의 유속  $v$ , 밀도  $\rho$ , 점성계수  $\mu$ 를 사용하여 표현하였다. 대류 열전달 계수  $h$ 는 식 (7)을 통해 계산하며,  $D_h$ 는 채널의 수력 지름,  $k$ 는 냉각수의 열전도도이다. 배터리 모듈 BTMS의 물성치는 Tables 1과 2에 나타내었다.

$$\overline{Nu}_L = 0.023 Re_L^{4/5} Pr^{0.3} \quad (6)$$

$$h = \frac{Nu \cdot k}{D_h} \quad (7)$$

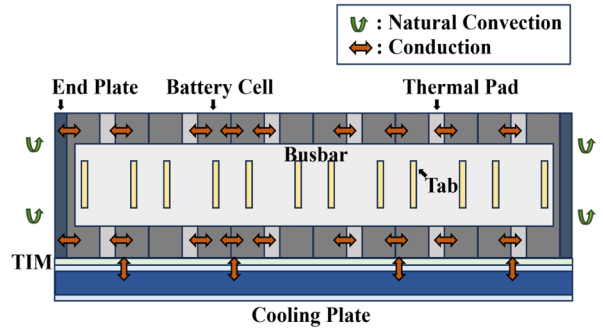


Fig. 6 Schematic of heat transfer within BTMS (front view)

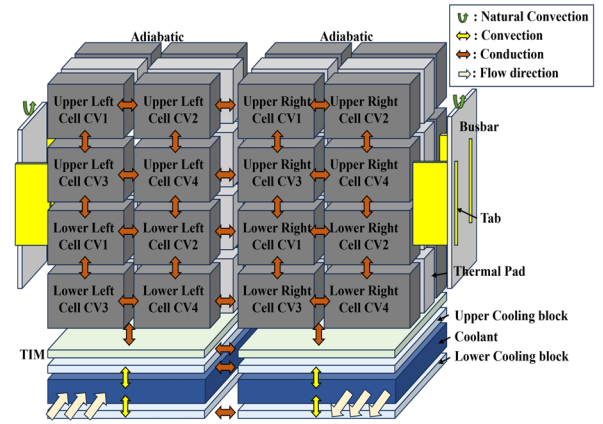


Fig. 7 Schematic of heat transfer within BTMS (side view)

Table 1 Properties of battery tab

	(+) tab	(-) tab, Busbar
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	2702	8933
Specific heat [J/kg·K]	903	385
Thermal conductivity [W/m·K]	238	398

Table 2 Properties of thermal pad, end plate, and cooling plate

	Thermal pad	End plate, Cooling plate
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	1000	2730
Specific heat [J/kg·K]	1200	893
Thermal conductivity [W/m·K]	0.0291	160

### 2.3 PHP 열전달 모델

PHP 열전달 모델은 등가 열용량을 가지는 Lumped system으로 가정하여, 증발부 영역과 응축부 영역으로 구분한 열 저항 네트워크로 구성하였다. PHP를 Lumped system으로 가정하기 위해 유효 열 저항과 유효 비열, 2가지 가정을 적용하였다.

먼저, PHP의 유효 열 저항은 PHP 시험 기반 맵 데이터로 계산하였다. 열 저항은 식 (8)과 같이 PHP로 인가되는 열량과 응축부와 증발부의 온도 차이를 기준으로 계산한다. 유효 열 저항은 유효 열 전도도로 변환하는데, 식 (9)와 같이 PHP의 유효 길이와 전달되는 열이 통과하는 면적의 비를 이용해 계산한다.

$$R_{eff} = \frac{T_{Evaporator} - T_{Condenser}}{Q} \quad (8)$$

$$k_{eff} = \frac{L_{eff}}{R_{eff} A} \quad (9)$$

유효 비열은 고체와 유체의 열 용량 비중을 반영한 가중 평균으로 계산하였다. PHP는 고체인 채널 벽면과 작동 유체로 구성되어 있다. PHP의 유효 비열은 식 (10), (11)과 같이 채널 벽면과 작동 유체 질량비의 함수로 CV 온도를 기준으로 계산한다. 작동 유체의 부피는 PHP 채널 벽과, 작동 유체의 Filling-Ratio를 고려하여 계산하였다. Fig. 8에 PHP 모델의 모식도를 나타내었다.

$$\rho_{eff} = V_{WF} \rho_{WF} + (1 - V_{WF}) \rho_{Al} \quad (10)$$

$$C_{p,eff} = \frac{\rho_{WF} V_{WF} C_{p,WF} + \rho_{Al} (1 - V_{WF}) C_{p,Al}}{\rho_{eff}} \quad (11)$$

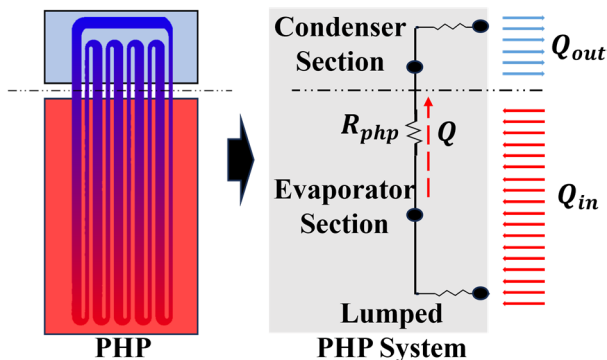


Fig. 8 Schematic diagram of thermal resistance and heat transfer paths within PHP

### 3. BTMS 모델 검증 및 PHP 열 저항 측정

#### 3.1 배터리 셀 모델 검증

IRC 모델 개발을 위해 배터리 셀 성능 시험을 진행하였다. 연구에는 대면적 파우치형 배터리를 사용하였다. 배터리를 SOC 100%까지 충전한 후 0.33 C-rate의 전류를 인가하여 하한 전압인 2.5 V 도달 시 시험을 종료하는 방식으로 -15 °C, 0 °C, 25 °C, 40 °C 온도에서 배터리의 용량을 측정하였다. 배터리의 OCV도 동일 온도 구간에서 일정한 SOC 간격으로 측정하였다. 동일한 온도대에서 ± 0.2 C, 0.33 C, 1 C, 2 C-rate의 전류 펄스를 인가하여 HPPC 시험을 진행하였고, SOC, C-rate별 배터리의  $R_0$ ,  $R_1$  파라미터를 계산하였다. 가역 열 계산을 위해 SOC별 엔트로피 계수를 측정하였다. 배터리 셀 모델은 온도별 HPPC 시험 결과와 비교하여 전압을 검증하였다(Fig. 9 참조). 배터리 모델의 정확도는 식 (12)의 MAPE(Mean Absolute Percentage Error)를 이용하여 검증하였고, 최고 0.316 %의 오차율을 보였다. 모델의 온도별 오차율은 Table 3에 나타내었다.

$$MAPE(\%) = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{A_i - F_i}{A_i} \right| \quad (12)$$

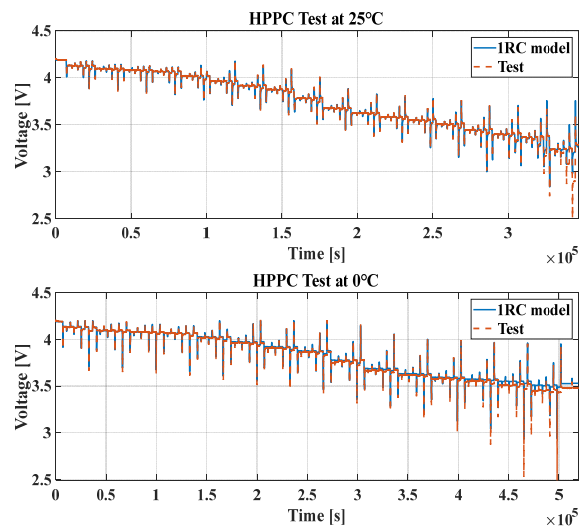


Fig. 9 Comparison of voltage of measured data and IRC ECM during HPPC test data at 25 °C and 0 °C

Table 3 Comparison of voltage error in IRC ECM under HPPC test at different temperatures

Temperature	40 °C	25 °C	0 °C	-15 °C
MAPE	0.308 %	0.316 %	0.119 %	0.128 %

### 3.2 모듈 BTMS 모델 검증

기본 배터리 모듈 BTMS 모델 개발을 위해 단면 냉각 조건에서 2 C-rate와 1.5 C-rate 두 가지 배터리 모듈 충전 시험을 하였다. 대기 온도와 냉각수 온도는 각각 25 °C로 설정하였으며, 두 충전 조건에 대한 실험 결과를 시뮬레이션 결과와 비교하여 모델을 검증하였다. 시험 조건은 Table 4에 정리되어 있으며, 모듈의 표면과 모듈 중앙부셀에 열전대(TC)를 부착하여 온도를 측정하였다(Figs. 10, 11 참조). 측정된 온도를 기준으로 전 구간에 대한

Table 4 Test conditions of CC-CV charging

Parameter	Value
Charging mode	CC-CV Charge 1.5 C-rate, 2 C-rate
Ambient temperature	25 °C
Coolant temperature	25 °C
Coolant flow rate	15LPM
Initial SOC	20 %

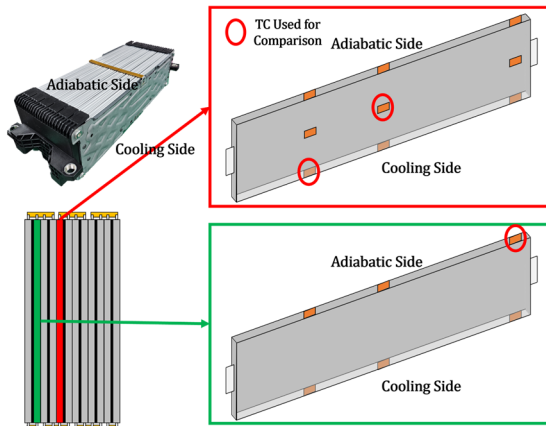


Fig. 10 Locations of TC on the module

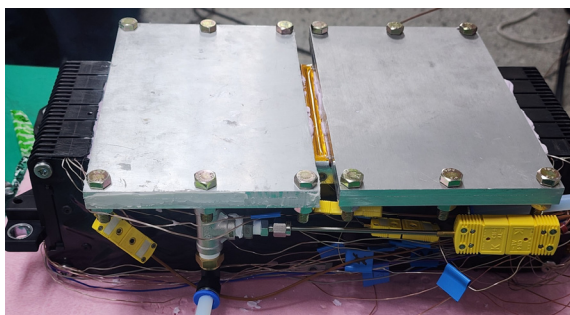


Fig. 11 Experimental setup for charging test of single sided cooling battery module (with the cooling plate located at the bottom in the actual configuration)

MAPE와 모듈의 최고 온도일 때 TC 부착 지점에서 오차를 계산하여 모델 정확도를 평가하였다. 그 결과, 두 충전 조건 모두에서 MAPE 기준 최대 5.74 % 이내, 최고 온도 기준 최대 0.88 °C 이내의 오차 범위로 모델의 정확도가 검증되었다. Figs. 12와 13에 2 C-rate 및 1.5 C-rate 충전 시험 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하여 나타내었고, Tables 5와 6에 자세한 오차율을 나타내었다.

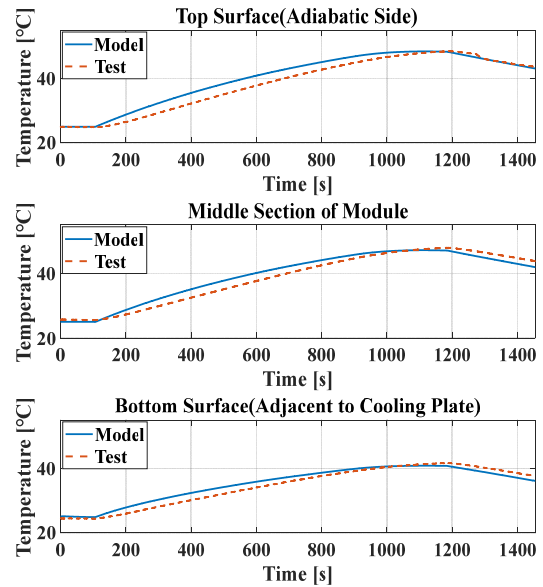


Fig. 12 Comparison of temperature of measured data and module BTMS model during 2 C-rate charge test

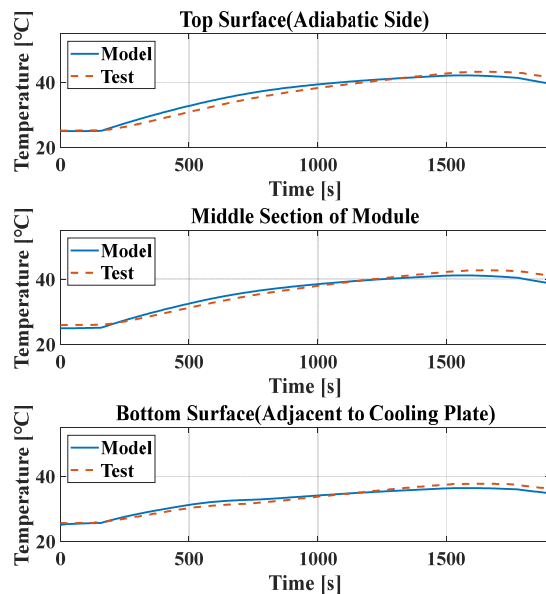


Fig. 13 Comparison of temperature of measured data and module BTMS model during 1.5 C-rate charge test

Table 5 Comparison of temperature error in module BTMS model during 2 C-rate charge test

Location	Top surface	Middle section	Bottom surface
MAPE	5.74 %	4.15 %	4.08 %
Temperature error at maximum temperature	0.11 °C	0.78 °C	0.88 °C

Table 6 Comparison of temperature error in module BTMS model during 1.5C-rate charge test

Location	Top surface	Middle section	Bottom surface
MAPE	3.30 %	2.46 %	2.65 %
Temperature error at maximum temperature	0.31 °C	0.82 °C	0.71 °C

3.3 PHP 열전달 모델 개발을 위한 열 저항 시험

PHP의 열전달 모델은 Fig. 14 형상의 5 턴 PHP의 맵 기 반 열저항 데이터를 이용해 개발하였다. 배터리 모듈 간 접 냉각 시스템을 고려하여 PHP의 열저항을 측정하였다. Fig. 15와 같이, Adiabatic 영역 없이 증발부 영역이 응축부 영역보다 길게 설정하였다. 증발부 영역은 높이 방향으로 3구역으로 나누어 TC를 부착하였고, 응축부 영역은 내부 채널의 위치를 고려하여 TC를 부착하였다. 증발부 영역에 일정한 열 유속 조건을 제공하기 위해 PHP의 증발부 영역 한 면에 Film 히터를 부착하였으며, 응축부 영역은 일정한 온도 조건 유지가 가능하도록 알루미늄 냉각 블록을 PHP 양면에 부착하였다. Fig. 16과 같이, DC Power supply(KUAIQU, SPS-C3010S)를 이용하여 Film 히터에 전원을 공급하였고, 저온 항온 수조(JEIOTECH, RW3-3025)를 이용하여 알루미늄 냉각 블록에 냉각수를

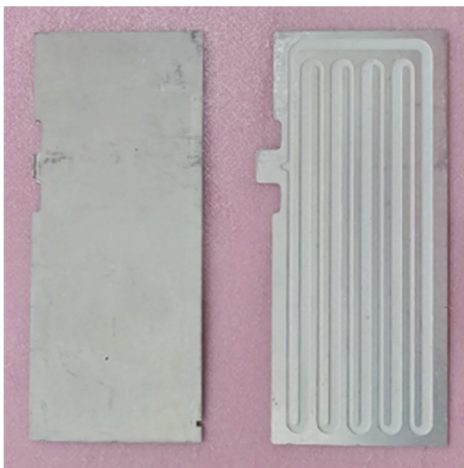


Fig. 14 Photograph of 5 turn PHP and internal channel

공급하였다. 실험 과정에서 측정된 PHP의 온도 신호는 DAQ(NI PXIe-4353)을 통해 컴퓨터로 전송하였다. Kim과 Kim<sup>20)</sup>은 PHP의 응축부 온도가 증가하면 응축부 영역의 Volumetric fraction이 증가하게 됨을 확인하였다. 응축부 온도가 증가하면 응축부 영역에서 잠열로 인해 전달되는 열량이 증가하게 되고 PHP의 열저항이 낮아짐을 의미한다. 응축부 온도에 따라 PHP의 열 성능이 달라지므로, 응축부 온도를 10 °C, 20 °C, 40 °C로 설정하고, 히터 발열량을 조절하여 Fig. 17과 같이 정상상태에서 증발부 영역과 응축부 영역의 온도를 측정하였다. PHP의 유효 열저항은 증발부와 응축부 영역의 평균 온도를 기준으로 계산하여 Fig. 18에 나타내었다. 열저항을 이용해 계산한 열전도도는 Fig. 19에 나타내었다. PHP 실험에서 주요 오차는 전력과 온도 측정에서 발생하였고, 측정된 열 저항의 Uncertainty는 10.73 %로 계산되었다. McClintock이 제안한 Single-sample 시험 신뢰도 분석 방법을 참고하여 계산하였다.<sup>21,22)</sup> Table 7에 5 턴 PHP의 상세 정보를, Table 8에 시험에 사용한 장비들의 Uncertainty를 나타내었다.

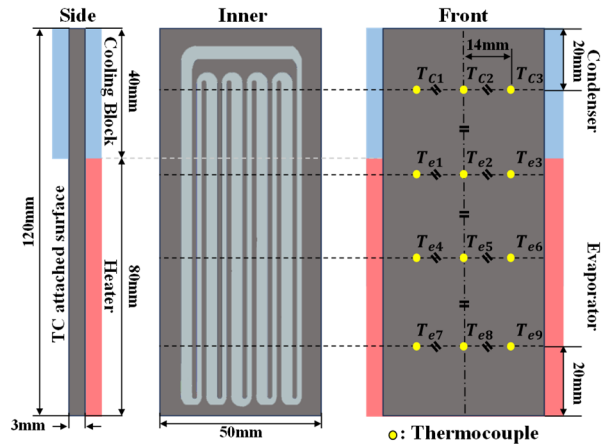


Fig. 15 Specification and the TC location in the PHP

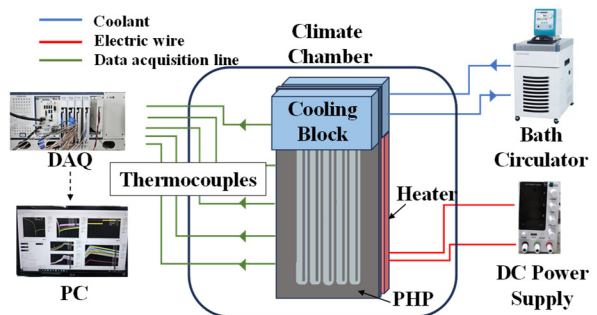


Fig. 16 Schematic of experimental setup for PHP test

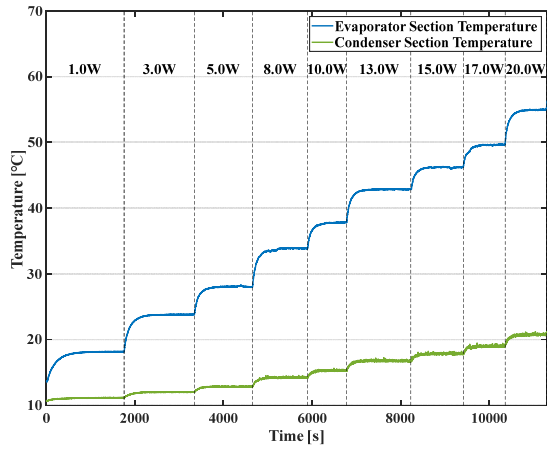


Fig. 17 Temperature profile of the evaporator section of 5 turn PHP at the condenser temperature of 10 °C

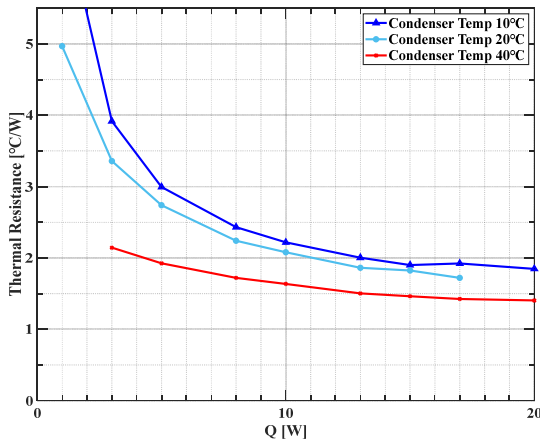


Fig. 18 Variations of effective thermal resistance of 5 turn PHP at various heat input (condenser temp 10 °C, 20 °C, 40 °C)

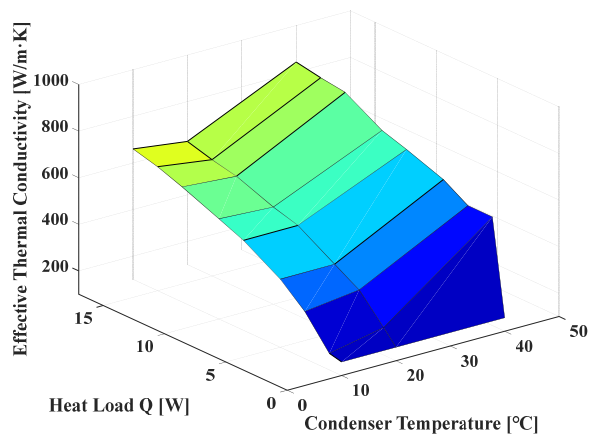


Fig. 19 Effective thermal conductivity map of 5 turn PHP

Table 7 Specification of 5 turn PHP

Specifications	Values
Channel material	Aluminum alloy
Volume [mm*mm*mm]	120*50*3
Channel width [mm]	1.4 / 3.3
Channel thickness [mm]	1
Working fluid	R1233ZD

Table 8 Uncertainty in measured quantities

Quantity	Range	Uncertainty
Temperature	0~1250 °C	±1.1 °C
Voltage	0~30 V	±0.01 V
Current	0~10 A	±0.001 A

#### 4. PHP 통합 BTMS 모듈 모델

기본 모듈 BTMS 모델에 T자형 30 turn인 PHP를 부착한 형태의 PHP 통합 모듈 BTMS 모델을 개발하였다. Fig. 20에 T자형 30 turn인 PHP의 형상을 나타내었고, Fig. 21에 PHP가 부착된 배터리 모듈의 구조를 나타내었다. 해당 배터리 모듈에는 총 6개의 PHP가 배치되어 있으며, 모듈 중앙에는 써멀 패드가, 외부에는 End plate가 위치한다. 하부에는 TIM과 냉각 채널이 순서대로 위치한다. 본 연구에서는 5 turn PHP의 성능만 확인하였기 때문에, 기존 배터리 모듈에 T자형 30 turn PHP를 적용하기 위해 다음과 같은 두 가지 가정을 설정하였다. 첫째, BTMS 구조를 고려하여, PHP의 상부는 증발부, 하부가 응축부인 Anti-gravity 형식 30 turn인 PHP로 가정하였다. Anti-gravity 형식 PHP의 경우 일반적인 PHP보다 성능이 떨어질 수 있다. 1장에서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 PHP의 Turn 수가 충분히 많고, Dry-out 이전의 상황에서만 시뮬레이션이 진행되므로, Anti-gravity 형식의 30 turn인 PHP의 열 성능을 5 turn PHP를 기반으로 모사하였다. 두번째 가정으로, 기존 배터리 냉각 시스템과의 호환성을 고려하여, 냉각부 영역이 PHP와 접한 배터리 셀의 하부를 덮고 있는 T자 형상으로 설계하였다(Figs. 22, 23 참조). I자형 평판 PHP와 비교하였을 때, T자 형태 PHP는 채널에 굽힘 변형이 있어 배터리의 저 발열 구간에서 동일한 성능이 나오지 않을 수 있다. Chang 등<sup>23)</sup>은 PHP에 90°의 굽힘 변형이 있을 때, 낮은 가열 조건에서는 증기 유동 저항의 증가로 인해 굽히지 않았을 때보다 열저항이 증가하였지만, 인가되는 열량이 증가하면 열저항이 감소함을 확인하였다. Lee 등<sup>24)</sup>은 PHP의 최대 허용 열 유속의 방향 의존성이 Turn 수가 증가함에 따라 작아지고, 20개

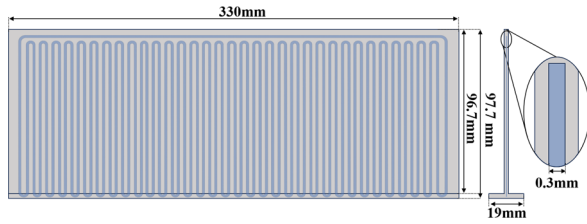


Fig. 20 Schematic of T Shaped PHP

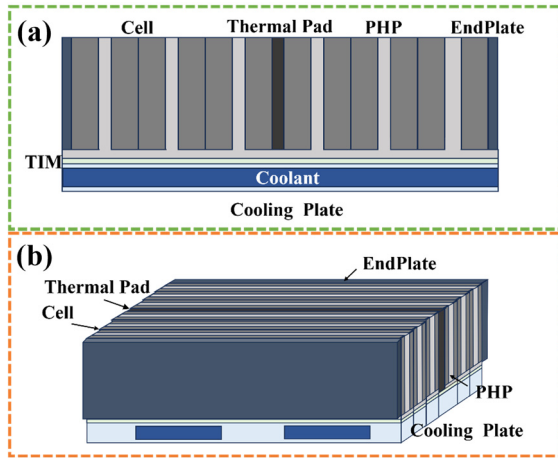


Fig. 21 Configuration of PHP integrated BTMS (a) front view without busbar and tab, (b) perspective view without busbar and tab

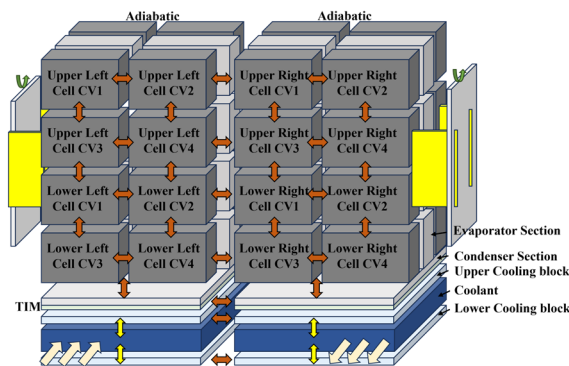


Fig. 22 Schematic of heat transfer within PHP integrated BTMS (side view)

Turn의 PHP는 경사각에 관계없이 거의 동일한 최대 허용 열 유속을 가짐을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 고 발열 상황인 급속 충전 조건임을 고려하여 T자 형태 PHP의 성능이 I자형 평판 PHP의 성능에 수렴한다고 가정하였다. Fig. 24(a)에 MATLAB & Simulink 내에서 개발한 PHP 통합 BTMS의 열전달 모델과 배터리 모델을 나타내었고, Fig. 24(b)에 PHP 통합 BTMS 모델의 계산 과정을 나타내었다.

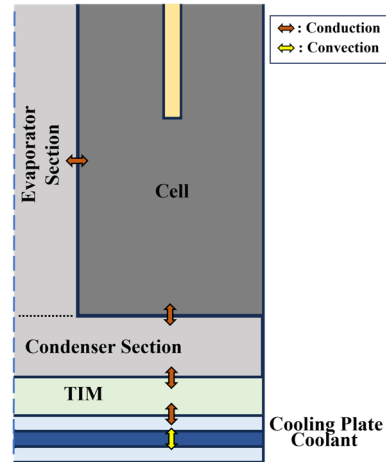


Fig. 23 Schematic of heat transfer near the PHP within PHP integrated BTMS

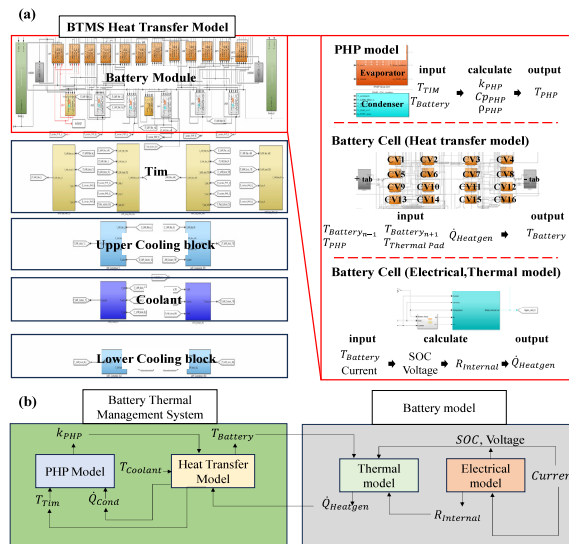


Fig. 24 (a) Heat transfer model of PHP integrated BTMS, battery cell in MATLAB&Simulink, (b) schematic of detailed calculation process for the PHP integrated BTMS

### 5. 급속 충전 시뮬레이션

급속 충전 상황에서 배터리의 열 관리를 위한 전략이 필요하다. 배터리 온도, 성능, 그리고 충전 속도에 따라 급속 충전 전략이 달라질 수 있다. 본 연구에서는 Multi Stage Constant Current(MSCC) 방식의 2가지 급속 충전 조건을 설정하여, PHP가 통합된 BTMS의 냉각 특성을 분석하였다. 첫째, MSCC 방식에 따라 구성한 고정 전류를 인가하는 조건을 설정하였다. 정해진 급속 충전 조건에서 PHP 모듈의 최고 온도와 최대 온도 편차를 Aluminum 모듈과 비교하였고, 전류 제어에 필요한 온도 범위를 도출

하였다. 둘째, 모듈의 최고 온도, 모듈 중앙부 셀 내의 온도 편차를 고려한 Rule-based 전류 제어 조건을 설정하였다. 다양한 냉각수 온도에서 배터리 온도 기준 제어 로직에 따른 PHP 모듈의 충전 시간을 Aluminum 모듈과 비교하였다. Aluminum 모듈은 PHP 모듈 내의 PHP의 물성치를 알루미늄 합금(Aluminum alloy 3003)의 물성치로 교체하여 개발하였다.

### 5.1 급속 충전 조건에서 PHP 모듈과 Aluminum 모듈의 최고 온도 및 온도 편차 비교

#### 5.1.1 급속 충전 시뮬레이션 조건

본 연구에서는 배터리 모델 검증에 사용하였던 충전 전류와 전압을 기준으로 MSCC 방식 충전 프로파일을 구성하였다. 전류는 2.3 C-rate부터 1 C-rate까지 단계적으로 감소하고, SOC는 20%에서 87.5%까지 증가한다(Fig. 25 참조). 시뮬레이션 조건으로 외기 온도는 25°C로 설정하였고, 모듈의 상부는 단열, 측면은 자연 대류 조건을 적용하였다. 냉각수 온도는 25°C, 유량은 25LPM으로 설정하였으며, 전체 시뮬레이션 조건은 Table 9에 정리하였다.

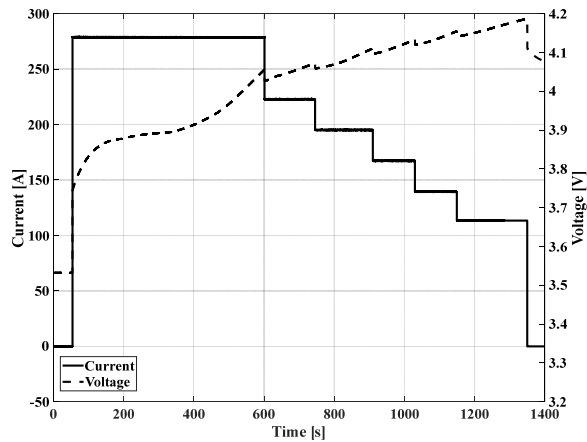


Fig. 25 MSCC charge current and voltage profile

Table 9 Base condition for MSCC fast-charging simulation

Parameter	Value
Charging mode	MSCC method
Ambient temperature	25 °C
Coolant temperature	25 °C
Coolant flow rate	25 LPM
Initial SOC	20 %
Charging time	1295.8 s

### 5.1.2 PHP 모듈과 Aluminum 모듈의 최고 온도 및 온도 편차 비교

Figs. 26과 27은 각각 PHP 모듈과 Aluminum 모듈이 최고 온도에 도달했을 때, 상부 및 하부 배터리 모듈의 영역별 온도 분포를 나타낸다. 모듈의 하부에 냉각 채널이 위치하고, 상부는 단열 조건으로 가정하였기 때문에, 상부로 올라갈수록 배터리 온도가 상승한다. 모듈의 외곽(End plate)은 자연대류 조건으로 가정하여, 모듈의 중앙부로 갈수록 온도가 상승한다. 그 결과, 모듈 내 중앙에 있는 7번 셀의 상부에서 최고 온도가, 모듈 외곽에 있는 1번 셀의 하단에서 최저 온도가 나타난다. Fig. 28에 급속 충전 과정에서 PHP 모듈과 Aluminum 모듈의 시간에 따른 최고, 최저 온도 변화율, Fig. 29에 각 모듈의 시간에 따른 모듈 내 최대 온도 편차 변화를 나타내었다. 급속 충전 중 PHP 모듈의 최고 온도는 46.44°C, 모듈 내 최대 온도 편차는 7.15°C이다. Aluminum 모듈 대비 모듈의 최고 온도는 2.02°C 낮고, 모듈 내 최대 온도 편차는 1.78°C 작다.

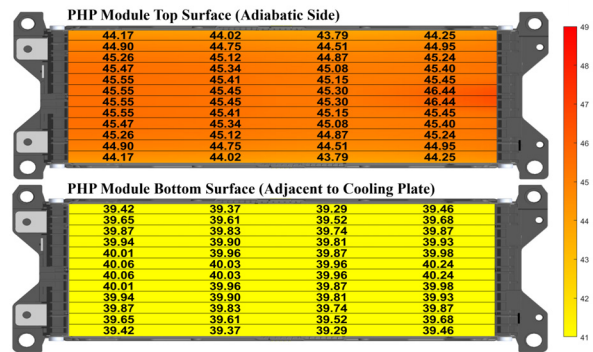


Fig. 26 Temperature distribution of top and bottom Surface of the PHP integrated module at maximum temperature

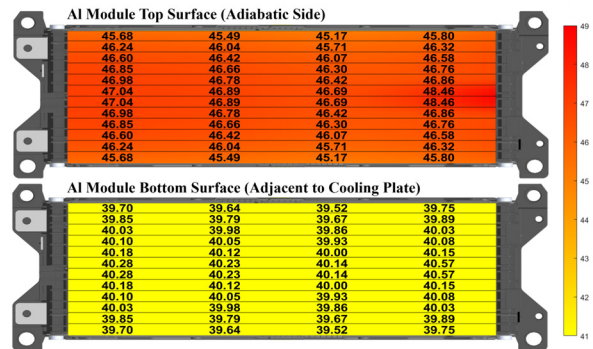


Fig. 27 Temperature distribution of top and bottom surface of the Aluminum plate integrated module at maximum temperature

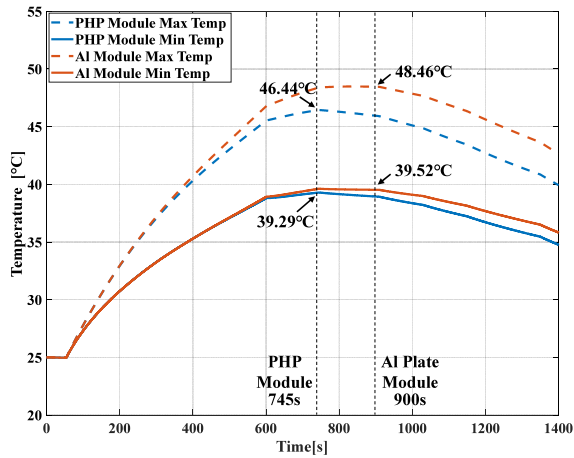


Fig. 28 Profiles of maximum and minimum temperatures of the PHP module and the Aluminum plate module

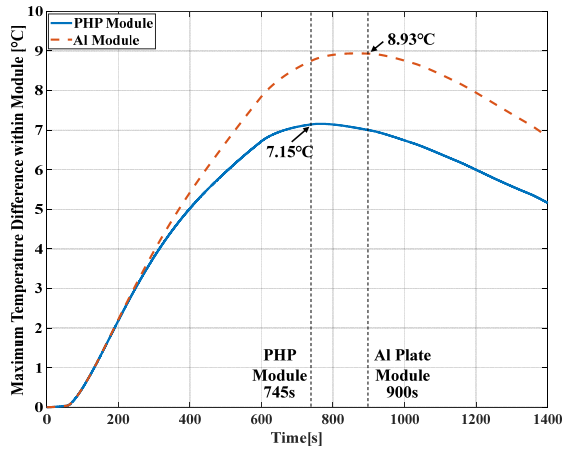


Fig. 29 Profiles of maximum temperature difference within PHP module and the Aluminum plate module

PHP Module Middle Cell			
45.55	45.45	45.30	46.44
44.76	44.62	44.33	46.14
42.99	42.88	42.61	43.60
40.06	40.03	39.96	40.24
Al Module Middle Cell			
47.04	46.89	46.69	48.46
46.00	45.83	45.45	48.05
43.77	43.63	43.29	44.73
40.28	40.23	40.14	40.57

Fig. 30 Temperature distribution within cell No.7 of PHP and Aluminum modules at maximum temperature

Fig. 30은 모듈이 최고 온도 도달했을 때, PHP 모듈과 Aluminum 모듈의 중앙 셀(7번)에 대한 셀 내 온도 분포를 나타낸다. 배터리 셀 내에서는 탭 발열로 인하여 셀 양 끝의 온도가 중심부보다 높고, 음극과 양극의 물성치 차이로 인해 셀의 양극 주변의 온도가 더 높다. 셀 내 온도 편차는 PHP 모듈이 1.84 °C 작다(Table 10 참조). Fig. 31은 급속 충전 과정에서 7번 배터리 셀의 발열량과 배터리 셀에 접한 PHP의 유효 열전도도도 변화를 나타낸다. 급속 충전 중, 7번 배터리 셀의 발열량은 최대 약 50W까지 변화한다. PHP의 유효 열전도도는 온도 변화에 따라 최대  $450[\frac{W}{m \cdot K}]$ 까지 변화한다. 이는 Aluminum Alloy 3003의 열전도도인  $160[\frac{W}{m \cdot K}]$ 의 약 2.8배에 해당한다.<sup>25)</sup> Fig. 32에서 확인할 수 있듯이 열전도도의 차이는 배터리 셀에서 PHP와 Aluminum Plate로 전달되는 열량 차이에 영향을 준다.

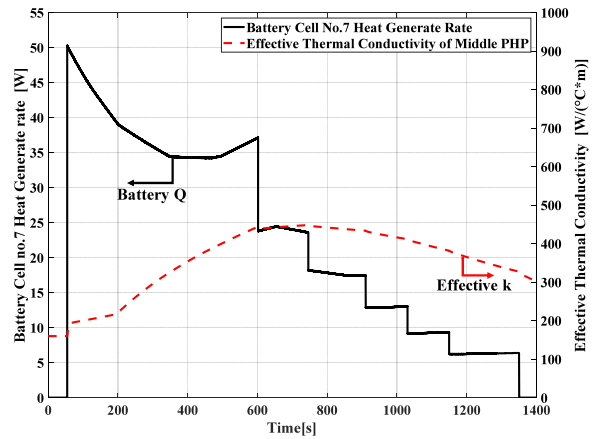


Fig. 31 Heat generation rate of center cell (cell no.7) and effective thermal conductivity of the adjacent PHP

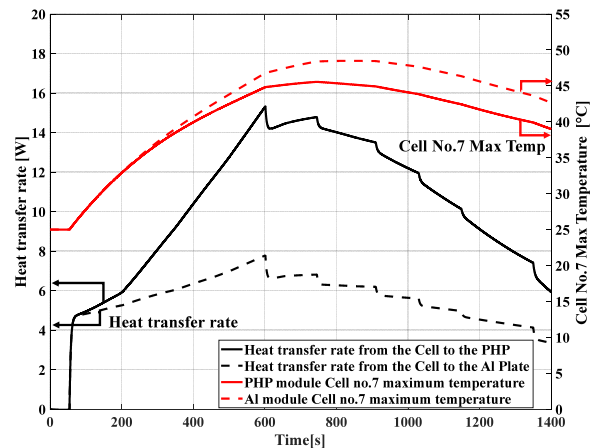


Fig. 32 Profiles of heat transfer rate from the center cell (cell no.7) to the PHP and Aluminum plate, and maximum temperature of the center cell in the PHP and Aluminum plate modules

Table 10 Comparison of temperature results within cell no.7 of PHP and Aluminum modules at maximum temperature

	Aluminum module	PHP module
Maximum temperature	48.46 °C	46.44 °C
Minimum temperature	40.14 °C	39.96 °C
Maximum temperature difference	8.32 °C	6.48 °C

결과적으로, PHP의 높은 열전도도로 인해 PHP 모듈이 Aluminum을 사용한 경우보다 모듈의 최고 온도, 모듈 및 셀 내에서 온도 차이 모두에서 개선된다.

### 5.1.3 냉각수 온도가 모듈의 최고 온도 및 온도 편차에 미치는 영향

냉각수 온도가 PHP 모듈의 최고 온도와 온도 편차에 미치는 영향을 확인하기 위하여, Fig. 33에 냉각수 온도가 15 °C, 20 °C, 25 °C, 30 °C일 때 배터리 모듈의 최고 온도, 모듈 내 최대 온도 편차, 그리고 PHP의 열전도도를 나타내었다. 냉각수 온도가 낮아짐에 따라 모듈 내 최고 온도는 감소한다. 하지만, 낮은 냉각수 온도에서는 PHP의 열전도도가 낮기 때문에 PHP 모듈 내 최대 온도 편차는 증가한다(3.3절 참조).

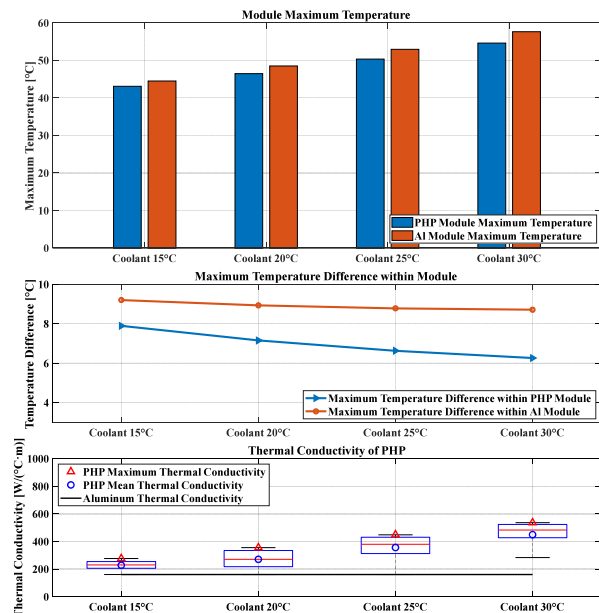


Fig. 33 Effect of coolant temperatures on maximum module temperature, maximum temperature difference within modules, and effective thermal conductivity of PHP

## 5.2 온도 기준 충전 전류 제어 조건에서 PHP 모듈과 Aluminum 모듈의 충전 시간 비교

PHP 모듈의 열적 특성을 반영한 전류 제어 조건을 적용하여, PHP 모듈 BTMS의 충전 시간 단축 효과를 분석하였다.

### 5.2.1 온도 기준 충전 전류 제어 전략

5.1절의 시뮬레이션을 통해 급속 충전 시 배터리 모듈의 최고 온도와 셀 내 온도 편차의 범위를 파악하였다. PHP 모듈을 기준으로, 모듈 내 최고 온도는 45 °C 이상으로 나타났고, 모듈 중앙부 셀 내에서 온도 편차는 5 °C 이상으로 나타났다. 이를 바탕으로, 모듈 최고 온도 기준 전류 제어와 셀 내 최대 온도 편차 기준 전류 제어, 2가지 Rule-based 제어 전략을 설정하였다.

먼저, 모듈 최고 온도 기준 제어 조건은 배터리 모듈 온도가 40 °C를 초과할 경우, 모듈 온도가 1 °C 상승할 때마다 전류를 10 %씩 감소시키는 전류 제어 조건이다. 셀 내 최대 온도 편차 기준 전류 제어 조건은 모듈 중앙부 셀 내 최대 온도 편차가 5 °C 이상일 경우 전류를 10 %씩 감소시키는 전류 제어 조건이다. 이때, 셀 내 최대 온도 편차 기준 전류 제어는, MSCC 방식을 모사하기 위해, 전류 제어 이후 최소 100초 동안 정전류를 유지하였다. 셀 내 최대 온도 편차 기준 전류 제어 조건과 모듈 최고 온도 기준 전류 제어 조건을 동시에 만족하면, 셀 내 최대 온도 편차 기준 전류 제어 조건이 작동한다.

그 외에 파우치형 배터리의 Cut-off 전압인 4.2 V를 고려하여, 터미널 전압이 Cut-off 전압에 도달할 경우 전류

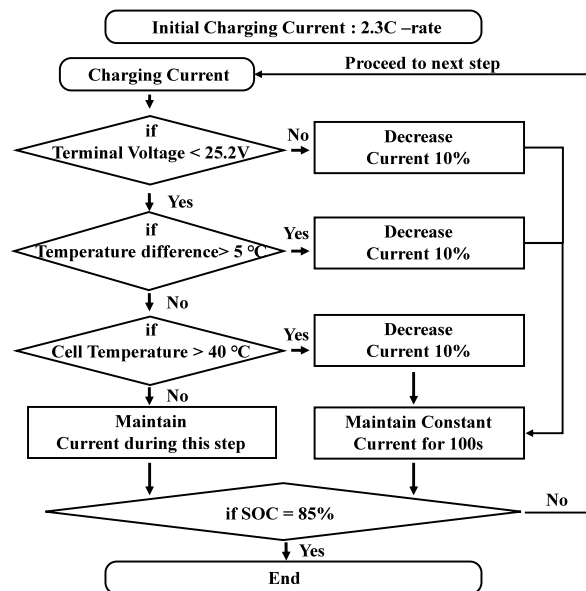


Fig. 34 Rule-based logic for current control

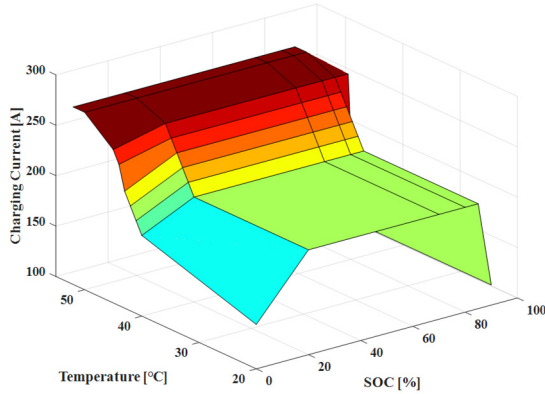


Fig. 35 Contours of charge current constraint over various temperatures and SOC ranges

Table 11 Simulation conditions for fast charging with current control

Parameter	Value
Charging mode	MSCC method + Rule based control
Ambient temperature	25 °C
Coolant temperature	25 °C
Coolant flow rate	25 LPM
Initial SOC	20 %

를 10 % 감소시켰고, 모듈에 인가되는 전류 하한은 1C-rate로 하였다. Fig. 34에 전체 충전 전류 제어 조건의 구성도를 나타내었다.

각 제어의 영향을 확인하기 위해, 먼저 모듈 최고 온도 기준 전류 제어 조건만을 적용하였다. Fig. 35에 모듈 최고 온도 기준 전류 제어 조건만 작동할 때 인가되는 전류 맵을 나타내었다. 이후 셀 내 최대 온도 편차 기준 전류 제어 조건을 추가하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 배터리 모듈 SOC가 85%에 도달하면 충전을 종료하였고, 시뮬레이션 운전 조건은 Table 11에 나타내었다.

### 5.2.2 모듈 최고 온도 기준 전류 제어의 영향

모듈 최고 온도 기준 전류 제어 조건만을 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다. Figs. 36과 37은 각각 PHP 모듈과 Aluminum 모듈에 인가되는 전류, 모듈의 최고 온도, 모듈 중앙부 셀 내에서 온도 편차, 그리고 모듈의 터미널 전압을 나타낸다.

충전 초반에 인가되는 고 C-rate 전류는 배터리 모듈의 온도 상승률에 영향을 주어, 모듈 최고 온도 기준 전류 제어 시작 시점에 영향을 준다. PHP와 Aluminum의 열전도도 차이로 인해 Aluminum 모듈이 PHP 모듈보다 온도 상승률이 더 높다. PHP 모듈에서 최고 온도 기준 전류 제어

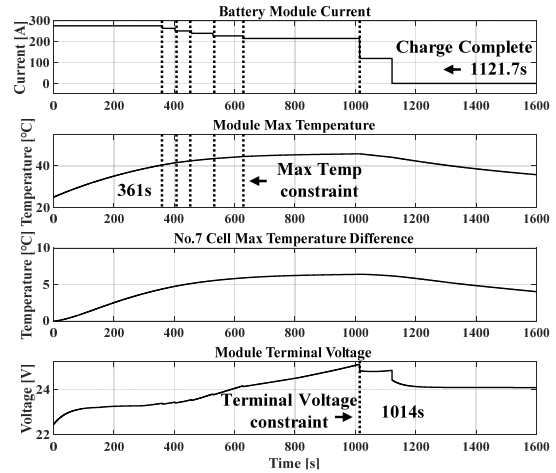


Fig. 36 Profiles of applied current, maximum temperature, temperature difference within central cell, and terminal voltage of the PHP module under current control constraints (limiting maximum temperature)

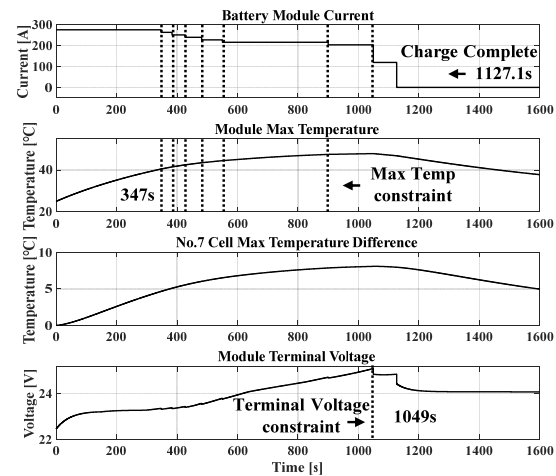


Fig. 37 Profiles of applied current, maximum temperature, temperature difference within central cell, and terminal voltage of the Aluminum module under current control constraints (limiting maximum temperature)

조건에 따라 361초에 전류 제어가 시작되고, 1014초에 cut-off 전압 제어 조건이 작동한다. Aluminum 모듈에서는 347초에 모듈의 최고 온도가 40 °C를 초과하면서 전류 제어가 시작되고, 1049초에 터미널 전압이 cut-off 전압에 도달하여 추가적인 전류 제어가 발생한다.

정리하면, 높은 PHP의 열전도도로 인해 모듈의 온도 상승률에 차이가 있다. 모듈 최고 온도 기준 전류 제어 조건만을 적용하였을 때, Aluminum 모듈 대비 모듈 최고 온도 기준 전류 제어가 14초 늦게 시작되고, 충전 시간이 5.4 초 단축된다.

### 5.2.3 셀 내 최대 온도 편차 기준 전류 제어의 영향

모듈 최고 온도 및 셀 내 최대 온도 편차 기준 전류 제어 조건을 동시에 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다. Figs. 38과 39는 이러한 두 가지 전류 제어 조건이 적용되었을 때, 각각 PHP 모듈과 Aluminum 모듈에 인가되는 전류, 모듈의 최고 온도, 중앙부 셀 내에서 온도 편차, 그리고 모듈의 터미널 전압을 나타낸다. 두 모듈 모두 모듈 최

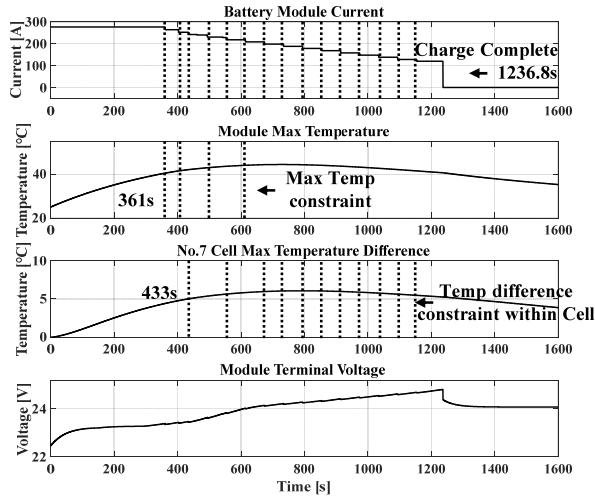


Fig. 38 Profiles of applied current, maximum temperature, temperature difference within central cell, and terminal voltage of the PHP module under current control constraints (limiting maximum temperature and central cell temperature difference)

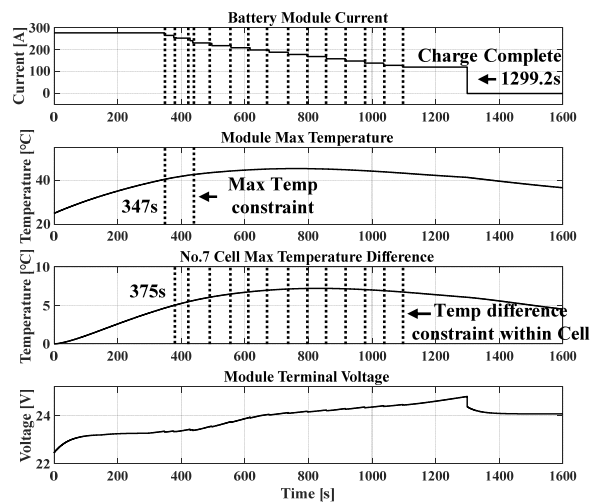


Fig. 39 Profiles of applied current, maximum temperature, temperature difference within central cell, and terminal voltage of the Aluminum module under current control constraints (limiting maximum temperature and central cell temperature difference)

고 온도 기준 전류 제어가 시작된 이후에 중앙부 셀 내 최대 온도 편차가 5 °C를 넘어간다. PHP 모듈은 433초에서, Aluminum 모듈은 375초에서 셀 내 최대 온도 편차 기준 전류 제어 조건에 의해 전류 제어가 시작된다. 이는, 높은 PHP의 열전도도로 인해 셀 내에서 온도 편차에 차이가 있기 때문이다. 이로 인해, PHP의 충전 시간은 62.4초 단축된다. 두 모듈 모두 셀 내 최대 온도 편차 기준 전류 제어 조건에 의해 하한 전류까지 전류가 감소하고, cut-off 전압에 의한 전류 제어 조건이 작동하지 않는다.

정리하면, 셀 내 최대 온도 편차 기준 전류 제어가 추가되었을 때, 높은 PHP의 열전도도로 인해 온도 편차가 줄어들어 Aluminum 모듈 대비 온도 편차 기준 전류 제어가 PHP 모듈이 58초 늦게 시작되고, 충전 시간이 62.4초 단축된다.

### 5.2.4 냉각수 온도가 충전 시간에 미치는 영향

모듈 내 최고 온도 및 셀 내 최대 온도 편차 기준 전류 제어 조건을 동시에 적용하여, 냉각수 온도가 15 °C, 20 °C, 25 °C, 30 °C일 때의 결과를 비교하였다. Fig. 40에 냉각수 온도별로 PHP 모듈과 Aluminum 모듈의 최고 온도, 모듈 내 최대 온도 편차, 충전 소요 시간, 그리고 PHP의 열전도도를 나타내었다. Table 12에 냉각수 온도별로 PHP 모듈과 Aluminum 모듈의 충전 소요 시간과 Aluminum 모듈 대비 PHP 모듈의 충전 시간 감소율을 나타내었다. 상세 비교를 위해 Figs. 41, 42, 43에 냉각수 온도에 따른 PHP 모듈에 인가되는 전류, 모듈의 최고 온도, 모듈 중앙부 셀 내에서 온도 편차, 그리고 모듈의 터미널 전압을 나타내었다. Fig. 44에는 냉각수 온도 30 °C에서 Aluminum 모듈의 동일 변수들을 나타내었다. 냉각수 온도가 낮아질수록 모듈 내 최고 온도는 감소하지만, 모듈 내 온도 편차는 증가한다. 전류 제어로 인해, PHP 모듈과 Aluminum 모듈의 최고 온도 차이는 냉각수 온도 15 °C에서 0.7 °C, 냉각수 온도 30 °C에서 0.28 °C이다. 두 모듈 사이 최고 온도 차이가 1 °C 이내로 작기 때문에, 최고 온도 기준 전류 제어의 횟수 차이는 1회 이내로 유지된다.

PHP와 Aluminum의 열 전도도 차이로 인해 모듈 최고 온도 기준 전류 제어의 작동 시기와 셀 내 최대 온도 편차 기준 전류 제어의 작동 횟수 차이가 발생한다. PHP 모듈을 Aluminum 모듈과 비교하였을 때, 냉각수 온도 30 °C 조건에서 PHP 모듈은 Aluminum 모듈보다 모듈 최고 온도 기준 전류 제어로 인한 전류 감소가 7초 늦게 시작되고, 셀 내 최대 온도 편차 기준 전류 제어에 의한 전류 감소 횟수는 3회 적다. 그 결과, PHP 모듈의 충전시간은 Aluminum 모듈 대비 226.7초 단축된다(Figs. 43, 44 참조).

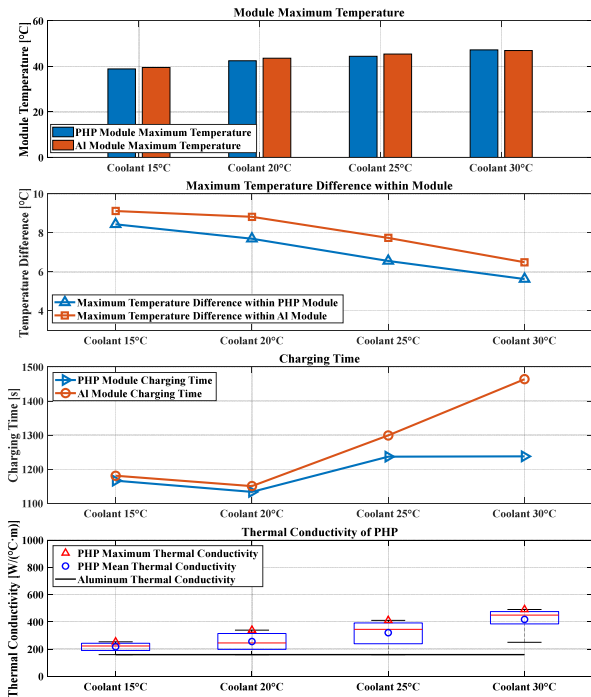


Fig. 40 Effect of coolant temperatures on maximum temperature, maximum temperature difference within modules, charging time, and effective thermal conductivity of PHP under current control constraints (limiting maximum temperature and central cell temperature difference)

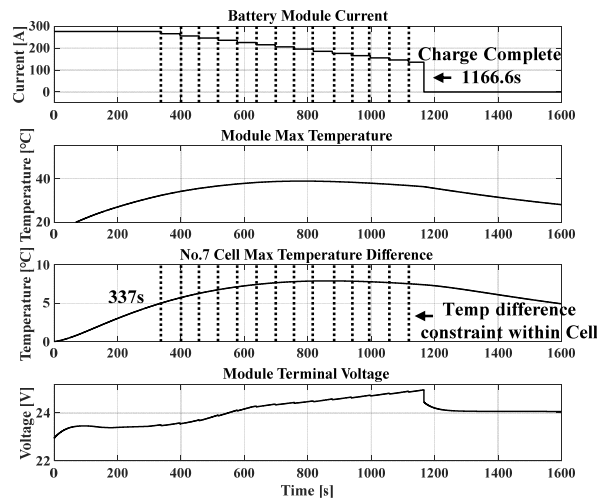


Fig. 41 Profiles of applied current, maximum temperature, temperature difference within central cell, and terminal voltage of the PHP module under current control constraints at coolant temperature 15 °C (limiting maximum temperature and central cell temperature difference)

Table 12 Effect of coolant temperatures on charging time reduction

Coolant temperature	PHP module charging time	Aluminum module charging time	% Reduction in charging time
15 °C	1166.6 s	1180.8 s	1.2 %
20 °C	1133.4 s	1150.5 s	1.5 %
25 °C	1236.8 s	1299.2 s	4.8 %
30 °C	1237.6 s	1464.3 s	15.4 %

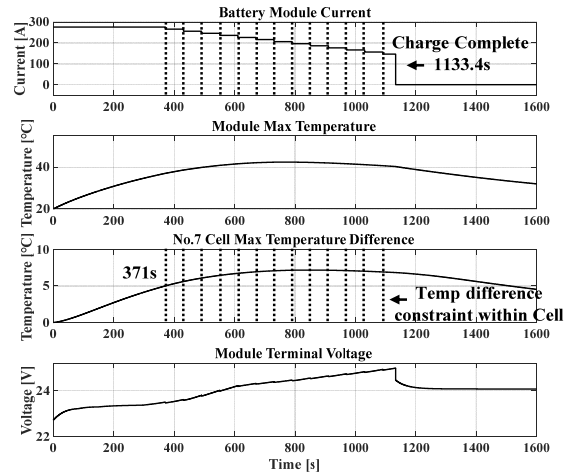


Fig. 42 Profiles of applied current, maximum temperature, temperature difference within central cell, and terminal voltage of the PHP module under current control constraints at coolant temperature 20 °C (limiting maximum temperature and central cell temperature difference)

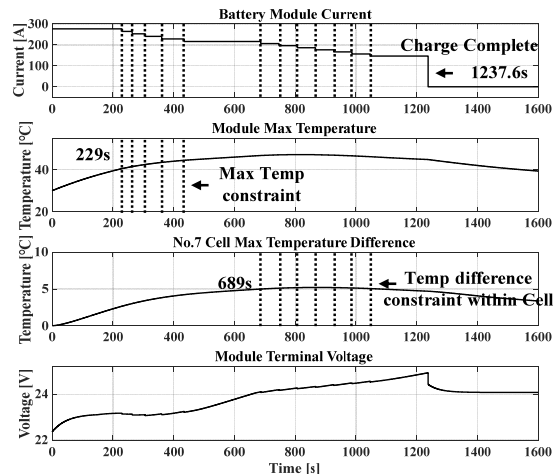


Fig. 43 Profiles of applied current, maximum temperature, temperature difference within central cell, and terminal voltage of the PHP module under current control constraints at coolant temperature 30 °C (limiting maximum temperature and central cell temperature difference)

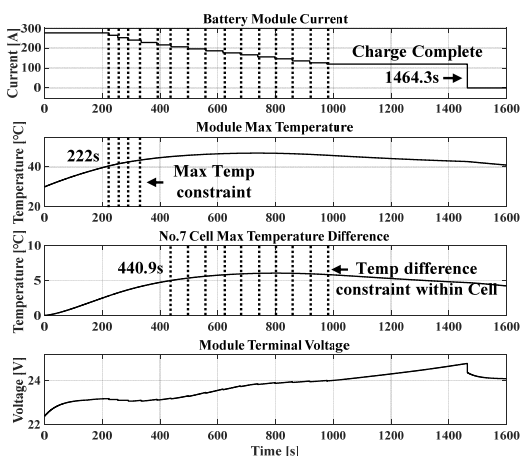


Fig. 44 Profiles of applied current, maximum temperature, temperature difference within central cell, and terminal voltage of the Aluminum module under current control constraints at coolant temperature 30 °C (limiting maximum temperature and central cell temperature difference)

PHP 모듈의 충전 시간은 냉각수 온도에 따라 크게 변화한다. 냉각수 온도 30 °C 보다 20 °C에서 충전 시간이 104.2초 단축된다. 냉각수 온도가 낮아지면, 모듈의 최고 온도 기준 전류 제어가 늦게 작동하기 때문이다(Figs. 38, 42, 43참조). 하지만 PHP의 열전도도 감소로 인해 Aluminum 모듈과 충전 시간 차이는 감소한다.

냉각수 온도 15 °C에서는 20 °C 보다 PHP 모듈의 충전 시간이 증가한다. 낮아진 PHP의 열전도도로 인해 셀 내 최대 온도 편차가 증가한다. 셀 내 최대 온도 편차 기준 전류 제어가 냉각수 온도 20 °C 대비 34초 빠르게 시작되고, 전류 감소 횟수 또한 1회 더 증가한다. 그 결과 냉각수 온도 15 °C 조건에서 PHP 모듈의 충전 시간은 20 °C 조건 보다 오히려 33.2초 증가한다(Figs. 41, 42 참조).

결론적으로, 본 연구에 사용한 배터리 모듈의 경우, 충전 시간 단축을 위한 최적의 냉각수 온도가 존재함을 확인하였다. 냉각수 온도가 30 °C에서 20 °C로 낮아지면 최고 온도 기준 전류 제어의 지연으로 충전 시간이 단축된다. 하지만, 냉각수 온도가 20 °C에서 15 °C로 더 낮아지면, 온도 편차 증가로 인해 충전 시간은 오히려 증가한다.

## 6. 결론

본 연구에서는 MATLAB & Simulink를 이용해 PHP를 이용한 배터리 모듈 간접 냉각 시스템 모델을 개발하였다. PHP 통합 모듈 BTMS 모델은 두 가지 모델로 구성되는데, 모듈 BTMS 모델은 모듈 BTMS 시험 결과와 비교를 통해 검증하였고, PHP 열전달 모델은 PHP 성능 시험 데이터 기반의 열 저항 맵을 이용하여 개발하였다. 완성

된 PHP 모듈 모델을 이용하여 급속 충전 조건에서 배터리 모듈 내 PHP의 냉각 효과를 Aluminum 모델과 비교 분석하였다. 또한, 기본 급속 충전 결과를 이용하여 Rule-based 전류 제어 조건을 구성하였다. 모듈의 최고 온도 기준 그리고 셀 내 최대 온도 편차를 기준으로 전류 제어가 작동하였을 때, 다양한 냉각수 온도에서 계산된 PHP 모듈의 충전 시간을 Aluminum 모델과 비교하였다. PHP 배터리 모듈 간접 냉각 시스템의 특성에 대해 요약하면 다음과 같다.

- 1) 급속 충전 조건에서 PHP의 높은 열전도도 특성으로 인해 Aluminum을 사용한 경우보다 모듈의 최고 온도, 모듈 및 셀 내에 온도 편차 모두에서 개선된다.
- 2) 낮은 냉각수 온도에서 모듈의 최고 온도는 감소한다. 하지만, PHP의 열전도도가 낮아져 PHP 모듈 내 최대 온도 편차는 증가한다.
- 3) PHP 모듈은 높은 PHP의 열전도도로 인해 모듈의 온도 상승률이 낮다. 모듈 최고 온도 기준 전류 제어만 적용하였을 때, Aluminum 모듈 대비 PHP 모듈의 전류 제어가 14초 늦게 시작되고, 충전 시간이 5.4초 단축된다.
- 4) 셀 내 최대 온도 편차 기준 전류 제어가 추가되었을 때, 높은 PHP의 열전도도로 인해 온도 편차가 줄어들어 Aluminum 모듈 대비 PHP 모듈이 온도 편차 전류 제어가 58초 늦게 시작되고, 충전 시간이 62.4초 단축된다.
- 5) 본 연구에 사용한 배터리 모듈의 경우, 충전 시간 단축을 위한 최적의 냉각수 온도가 존재함을 확인하였다. 냉각수 온도가 30 °C에서 20 °C로 낮아지면 최고 온도 기준 전류 제어의 지연으로 충전 시간이 단축된다. 하지만, 냉각수 온도가 20 °C에서 15 °C로 더 낮아지면, 온도 편차 증가로 인해 충전 시간은 오히려 증가한다.

## 후 기

본 연구는 2024년도 현대자동차 전기차 에너지관리 공동 연구실의 지원을 받아 수행되었고, 산업통상자원부의 주관으로 수행된 기술혁신사업(RS-2022-00144016, 수소 모빌리티 확대를 위한 개방형 연료전지 시스템 설계/해석 플랫폼 및 활용기술 개발) 및 자동차 산업 기술 개발사업의 국책 과제 연구의 시장자립형 xEV 산업 육성 사업(20018646)의 지원을 받아 수행되었으며, 2026 Hongik University Innovation Support Program Fund의 지원을 받아 수행되었고, 이에 감사드립니다.

## References

- 1) L. Lu, X. Han, J. Li, J. Hua and M. Ouyang, "A Review on the Key Issues for Lithium-Ion Battery Management in Electric Vehicles," Journal of Power Sources, Vol.226,

- pp.272-288, 2013.
- 2) W. Wu, S. Wang, W. Wu, K. Chen, S. Hong and Y. Lai, "A Critical Review of Battery Thermal Performance and Liquid Based Battery Thermal Management," *Energy Conversion and Management*, Vol.182, pp.262-281, 2019.
  - 3) M. R. Khan, M. J. Swierczynski and S. K. Kær, "Towards an Ultimate Battery Thermal Management System: A Review," *Batteries*, Vol.3, No.1, Paper No.9, 2017.
  - 4) M. H. Abbasi, Z. Arjmandzadeh, J. Zhang, B. Xu and V. Krovi, "Deep Reinforcement Learning Based Fast Charging and Thermal Management Optimization of an Electric Vehicle Battery Pack," *Journal of Energy Storage*, Vol.95, Paper No.112466, 2024.
  - 5) M. Ryu, T. Kim, S. Park, J. Lee and S. Park, "A Study on the Characteristics of the Indirect Air Cooling System of a Lithium-Ion Battery Module for Vehicle," *Transactions of KSAE*, Vol.26, No.5, pp.663-675, 2018.
  - 6) D. Yeom and S. Jang, "A Study on the Improvement of Cooling Performance According to the Cooling Surface Configuration of EV Battery Pack," *Transactions of KSAE*, Vol.33, No.7, pp.533-544, 2025.
  - 7) J. Kim, J. Oh and H. Lee, "Review on Battery Thermal Management System for Electric Vehicles," *Applied Thermal Engineering*, Vol.149, pp.192-212, 2019.
  - 8) F. S. Hwang, T. Confrey, C. Reidy, D. Picovici, D. Callaghan, D. Culliton and C. Nolan, "Review of Battery Thermal Management Systems in Electric Vehicles," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.192, Paper No.114171, 2024.
  - 9) R. B. B. De Oliveira, S. G. Villalva, L. P. R. Filho, F. L. Windlin, G. H. M. Alegre and R. G. Santos, "Pulsating Heat Pipe Automotive Application," *SAE 2019-36-0227*, 2020.
  - 10) J. Li, L. Qiao, W. Lv, X. Zeng and M. Chen, "Performance Response Analysis of Battery Module with Nanofluids Pulsating Heat Pipes Under Normal and High-Temperature Charging Scenarios," *Applied Thermal Engineering*, Vol.257, Part B, Paper No.124339, 2024.
  - 11) C. Dang, L. Jia and Q. Lu, "Investigation on Thermal Design of a Rack with the Pulsating Heat Pipe for Cooling CPUs," *Applied Thermal Engineering*, Vol.110, pp.390-398, 2017.
  - 12) Z. Deng, Y. Zheng, X. Liu, B. Zhu and Y. Chen, "Experimental Study on Thermal Performance of an Anti-Gravity Pulsating Heat Pipe and its Application on Heat Recovery Utilization," *Applied Thermal Engineering*, Vol.125, pp.1368-1378, 2017.
  - 13) C. Y. Tseng, K. S. Yang and C. C. Wang, "Non-Uniform Three-Dimensional Pulsating Heat Pipe for Anti-Gravity High-Flux Applications," *Energies*, Vol.13, No.12, Paper No.3068, 2020.
  - 14) M. Winkler, M. Vergez, A. Mahlke, M. Gebauer, P. Müller, C. Reising, K. Bartholomé and O. Schäfer-Welsen, "Flat-Plate PHP with Gravity-Independent Performance and High Maximum Thermal Load," *Energies*, Vol.16, No.22, Paper No.7463, 2023.
  - 15) A. Tomaszewska, Z. Chu, X. Feng, S. O'kane, X. Liu, J. Chen, C. Ji, E. Endler, R. Li and L. Liu, "Lithium-Ion Battery Fast Charging: A Review," *ETransportation*, Vol.1, Paper No.100011, 2019.
  - 16) T. Ikeya, N. Sawada, J. Murakami, K. Kobayashi, M. Hattori, N. Murotani, S. Ujiiie, K. Kajiyama, H. Nasu and H. Narisoko, "Multi-Step Constant-Current Charging Method for an Electric Vehicle Nickel/Metal Hydride Battery with High-Energy Efficiency and Long Cycle Life," *Journal of Power Sources*, Vol.105, No.1, pp.6-12, 2002.
  - 17) A. B. Khan and W. Choi, "Optimal Charge Pattern for the High-Performance Multistage Constant Current Charge Method for the Li-Ion Batteries," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.33, No.3, pp.1132-1140, 2018.
  - 18) R. Mathieu, O. Briat, P. Gyan and J. M. Vinassa, "Fast Charging for Electric Vehicles Applications: Numerical Optimization of a Multi-Stage Charging Protocol for Lithium-Ion Battery and Impact on Cycle Life," *Journal of Energy Storage*, Vol.40, Paper No.102756, 2021.
  - 19) F. P. Incropera, D. P. Dewitt, T. L. Bergman and A. S. Lavine, *Principles of Heat and Mass Transfer*, 8th ed., Wiley, pp.492-495, 2017.
  - 20) J. Kim and S. J. Kim, "Experimental Investigation on Working Fluid Selection in a Micro Pulsating Heat Pipe," *Energy Conversion and Management*, Vol.205, Paper No.112462, 2020.
  - 21) S. J. Kline and F. A. McClintock, "Describing Uncertainties in Single Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, pp.3-8, 1963.
  - 22) R. J. Moffat, "Describing the Uncertainties in Experimental Results," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.1, pp.3-17, 1988.
  - 23) C. Chang, B. Fu, X. Ma, X. Yang, T. Lou, X. Xiao and Y. Ji, "Design and Thermal Analysis of a High-Performance Flexible Heat Pipe with All-Directional Bending," *Applied Thermal Engineering*, Vol.274, Part C, Paper No.126783, 2025.
  - 24) J. Lee, Y. Joo and S. J. Kim, "Effects of the Number of Turns and the Inclination Angle on the Operating Limit of Micro Pulsating Heat Pipes," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.124, pp.1172-1180, 2018.
  - 25) H. Warlimont and W. Martienssen, *Springer Handbook of Materials Data*, 2nd ed., Springer, p.180, 2018.