

## 트럭용 대형 배터리 냉각플레이트의 형상에 따른 열유동 해석

원유창<sup>1)</sup> · 쑨디<sup>1)</sup> · 권성민<sup>2)</sup> · 김종윤<sup>2)</sup> · 한승철<sup>3)</sup> · 류경진<sup>3)</sup> · 김진호<sup>\*1)</sup>

영남대학교 기계공학부<sup>1)</sup> · (주)세원정공<sup>2)</sup> · 영남이공대학교 스마트e-자동차과<sup>3)</sup>

### Thermal-Fluid Analysis on Cooling Plate Geometry for Large Battery Systems of Trucks

Yuchang Won<sup>1)</sup> · Sun Di<sup>1)</sup> · Sungmin Kwon<sup>2)</sup> · Jongyun Kim<sup>2)</sup> ·  
Senugchul Han<sup>3)</sup> · Kyungjin Ryu<sup>3)</sup> · Jinho Kim<sup>\*1)</sup>

<sup>1)</sup>School of Mechanical Engineering, Yeungnam University, Gyeongbuk 38541, Korea

<sup>2)</sup>Sewon Precision Co., Ltd, 554, Dalseo-daero, Dalseo-gu, Daegu 42702, Korea

<sup>3)</sup>Department of Smart e-Automobile, Yeungnam University College, Daegu 42415, Korea

(Received 26 November 2025 / Revised 2 January 2026 / Accepted 6 January 2026)

**Abstract :** Previous studies on battery cooling systems have focused on optimizing cooling plate geometry and flow paths for passenger vehicles. However, when applied to large electric trucks, the much longer cooling plates in a single-channel design often cause a sharp decline in heat transfer performance toward the mid and end regions, leading to thermal non-uniformity and reduced battery reliability during continuous high-power operation. To overcome these limitations, this study introduced a dual-channel cooling plate with a bidirectional inlet-outlet configuration, designed to distribute coolant more evenly and enhance overall heat removal across the plate. The proposed design's thermal and fluid characteristics are quantitatively evaluated through CFD analyses, and the results offer guidance for optimal cooling system design in electric trucks. CFD results show that the S-shaped multi-loop geometry provides the highest cooling performance, and Model 3 offers the best overall balance between cooling efficiency and pumping power.

**Key words :** Battery cooling system(배터리 냉각 시스템), Electric vehicle(전기자동차), Cooling plate design(냉각 플레이트 설계), Flow channel(유로), CFD analysis(CFD 해석), Large trucks(대형 트럭)

#### Nomenclature

$v$	: velocity
$\rho$	: density
$\bar{\tau}$	: stress tensor
$p$	: pressure
$K_{eff}$	: effective thermal conductivity
$T$	: temperature
$h$	: enthalpy
$J$	: diffusion flux
$S_h$	: heat source term
$\lambda$	: thermal conductivity

#### 1. 서론

전기자동차(Electric Vehicle, EV)의 보급이 확대됨에 따라 배터리의 열관리 시스템(Battery Thermal Management System, BTMS)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>1)</sup> 배터리는 충·방전 과정에서 발생하는 열을 효과적으로 제어하지 못할 경우, 성능 저하와 수명 단축은 물론 안전성 문제를 유발할 수 있다.<sup>2)</sup> 이에 따라 냉각 성능을 확보하기 위한 다양한 냉각 방식과 구조적 설계가 제안되어 왔으며, 기존 BTMS 관련 연구들은 크게 냉각 방식과 냉각 구조 최적화 두 방향으로 발전해왔다. 냉각 방식 측면에서는 공랭식, PCM 기반 냉각, 간접 액체 냉각

\*Corresponding author, E-mail: jinho@ynu.ac.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.

등이 비교·분석되었으며, 그중 간접 액체 냉각은 EV 및 상용차에서 가장 현실적인 방법으로 평가되어 왔다. 구조적 설계 측면에서는 냉각 플레이트 내부의 유로 형상, 채널 간격, 분기형 병렬 채널 등을 최적화하여 열전달 성능을 향상시키는 연구가 주로 이루어졌다. 이러한 연구들은 제한된 공간 내에서의 열전달 성능 향상, 펌프 동력 절감, 유로 내 온도 불균일 최소화 등을 주요 목표로 하였다.<sup>4,5)</sup> 그러나 대형 상용차나 트럭용 배터리 시스템의 경우, 냉각 플레이트의 전체 길이가 승용차 대비 현저히 길어지게 된다.(Fig. 1) 이로 인해 냉각 유체가 유입구에서 출구로 이동하는 동안 점차 온도가 상승하며, 플레이트 중간부 및 말단부에서 열전달 성능이 급격히 저하되는 문제가 발생한다.<sup>11,12)</sup> 이러한 온도 불균일은 장시간 운행이 요구되는 대형 전기차에서 배터리 셀 간 열편차 증가, 효율 저하, 열폭주 위험성 등으로 이어질 수 있다. 최근에는 배터리팩을 대상으로 한 유로 최적화 연구의 필요성이 제기되고 있으나, 대부분의 연구가 승용차 중심으로 이루어져 있어 플레이트 길이 증가로 인한 중간부 열손실 문제를 해결하는 구조적 접근은 충분히 다뤄지지 않았다. 이에 따라 기존 단일 채널 기반 설계로는 대형화된 배터리 시스템에서 요구되는 냉각 성능 및 온도 균일성을 확보하기 어렵다는 연구적·산업적 공백이 존재한다. 이러한 배경을 바탕으로 본 연구에서는 대형 냉각 플레이트에서 발생하는 중간부 열손실 문제를 근본적으로 해결하기 위해 양방향 입·출구 구조를 도입하고, 플레이트를 좌우 대칭의 이중 유로(Dual-channel)로 분할하는 설계 개념을 제안한다. 이러한 구조는 냉각 유체가 양측에서 동시에 유입되어 중앙부에서 만나는 형태로, 기존 단일 유로 구조 대비 보다 균일한 온도 분포와 열전달 성능 향상을 기대할 수 있다.<sup>13,14)</sup> 또한, 제안된 구조의 열 유동 특성을 전산 유체역학(CFD, Computational Fluid Dynamics) 해석을 통해 정량적으로 검증하고, 대형 전기트럭 배터리용 냉각 시스템의 효율적 설계 방향성 및 최적화 방안을 제시하고자 한다.

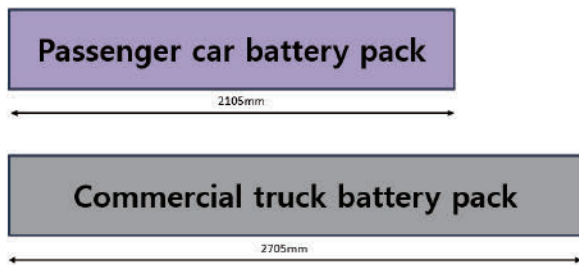


Fig. 1 Comparison of battery pack lengths between passenger cars and commercial vehicles

## 2. 냉각 플레이트 설계 및 모델링

상용 전기트럭용 배터리팩은 승용차 대비 냉각플레이트 길이가 길기 때문에, 단일 유로(Single-channel) 구조를 적용할 경우 중간부 열손실 증가, 냉각유체 온도 상승 누적, 말단부 냉각 성능 저하, 그리고 펌프 동력 증가와 같은 문제가 발생할 가능성이 크다.<sup>6)</sup> 이러한 구조적 한계를 해결하기 위해 실제 상용 트럭용 배터리팩의 형상과 치수를 기반으로, 냉각 유로 형상 변화가 열 관리 성능에 미치는 영향을 체계적으로 분석하였다. 우선 단일 유로 기반의 세 가지 기본 설계인 U형 단일회로(Model 2), S자형 이중회로(Model 4), 직선 병렬 구조(Model 6)를 설계하였으며, 이후 각 구조를 양방향·대칭형 패턴(Model 1 & 3 & 5)으로 확장하여 총 여섯 가지 냉각플레이트 모델을 구성하였다. (Fig. 2) 이러한 설계 조합은 유동 분배의 균일화, 열전달 면적 확대, 온도 편차 감소를 달성하기 위한 목적을 가지고 있다.<sup>7)</sup> 각 설계안의 열·유동 특성을 정량적으로 비교하기 위해 전산유체역학 CFD 기반 해석을 수행하여, 냉각 유로 형상에 따른 성능 차이를 체계적으로 평가하였다.

### 2.1 냉각 플레이트 설계

냉각플레이트의 형상 설계는 상용 트럭 배터리팩의 실제 크기(길이 2,705 mm, 폭 360 mm, 두께 8mm)를 기준으로 수행되었다. 유로는 내부 냉각유체가 효율적으로 분배되고, 열전달 성능을 효과적으로 증진시킬 수 있도록 설계되었으며, 플레이트 상부 및 하부의 온도 불균일 최소화를 목표로 하였다. 특히 대형 플레이트의 경우, 냉각유체가 유입된 직후 높은 열전달이 일어나고 플레이트 중간부에서 열이 축적되기 쉬운 특성이 있어, 유로 설계 시 유동 분배 균일성(Flow distribution uniformity)을 중요 요소로 두었다. 이를 위해 단순 일자형이 아닌 사행형(Serpentine), 분기형(Parallel), 대향류형(Counterflow) 등 다양한 구성을 적용하여 총 여섯 가지의 유로 형상을 비교 대상으로 설정하였으며, 주요 치수는 상용 트럭 배터리팩의 실제 크기 비율에 맞춰 치수를 지정하였다.(Fig. 3)

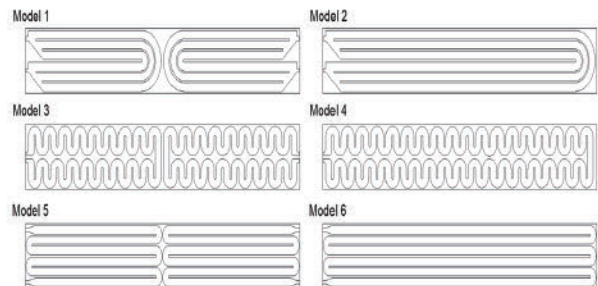


Fig. 2 Flow channel geometry of the cooling plate

Table 1 Six cooling plate design configurations

Model	Description
Model 1 & 2	A single serpentine flow-channel configuration with a large U-tum that redirects the flow in the opposite direction, characterized by an extended overall channel length and a single continuous flow path.
Model 3 & 4	A flow-channel design in which a dense S-shaped pattern is repeatedly distributed over the entire plate, featuring short bending intervals and a significantly increased surface area to enhance heat transfer performance.
Model 5 & 6	A straight, parallel flow-channel configuration with minimal bending sections, representing a simplified design focused on minimizing pressure loss.

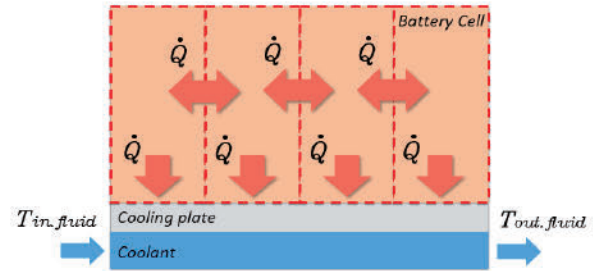


Fig. 4 Schematic of heat transfer between battery cells and the cooling plate

을 효율적으로 제거할 수 있도록 하였다. 냉각 방식은 하부 접촉식(Bottom-cooling type)으로 채택되었으며, 이는 상부 전장품과의 간섭을 방지하고 전체 팩의 조립성을 높일 수 있다.(Fig. 4)냉각유체는 유입부에서 플레이트 내부의 유로를 따라 순환하며, 열전달 면을 통해 셀에서 발생한 열을 빠르게 외부로 방출한다. 특히 대형화된 배터리 구조에서는 셀 간 온도 불균일이 발생하기 쉬우므로, 플레이트 내부의 유로는 열 분포의 균일성 확보를 최우선으로 고려하여 설계하였다.

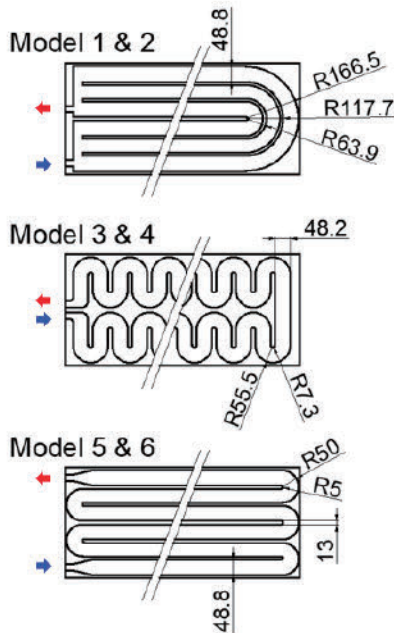


Fig. 3 Key geometry parameters of cooling plate flow channels

### 3. 냉각플레이트 CFD 열유동 해석

본 연구에서 사용된 냉각플레이트는 대형 전기트럭 배터리팩의 실구조를 기반으로 설계되었다. 배터리 모듈의 외형 크기는 약 174 × 53.7 × 207 mm이며, 전체 시스템은 총 92개의 리튬인산철(LiFePO<sub>4</sub>) 셀로 구성되어 있다. 각 셀은 직렬로 연결되어 있으며, 두 개의 독립된 모듈로 구분되어 배치된다. 각 모듈 하단에는 냉각플레이트가 직접 접촉하도록 설계되어, 셀에서 발생하는 열

### 3.1 재질 선정 및 물성치 고려

냉각플레이트 재질은 스테인리스 스틸(Stainless Steel)을 적용하였으며, 이는 상용 전기트럭의 운행 환경에서 요구되는 높은 내식성, 기계적 강도, 내구성 등을 충족시키기 때문이다. 상용차 배터리 시스템은 장기간 고출력과 진동 환경에 노출되므로, 구조 안정성이 확보된 재질 선정이 필수적이다. 스테인리스 스틸은 알루미늄 대비 열전도율이 낮아 일반적으로 열전달 성능에서 불리하다는 평가를 받지만, 내식성·기계적 강도·충격 저항성 측면에서 상용차용 냉각플레이트 재질로 충분한 장점을 가진다.<sup>10)</sup> 최근 LFP(LiFePO<sub>4</sub>) & NCM 계열 배터리는 전류 효율이 향상되고 전극 표면 개질 기술이 적용되면서, 셀 자체의 발열량이 감소하고, 단위면적당 방출 열량이 과거보다 낮아지고 있어,<sup>17-20)</sup> 스테인리스 스틸의 열물성만으로도 배터리 열 관리를 안정적으로 수행할 수 있다는 점 또한 재료 선택의 중요한 근거가 된다. 열전도율이 낮은 재료를 적용할 경우 셀과 냉각플레이트 사이의 온도차가 과도하게 커지는 것이 아니냐는 우려가 존재한다. 실제로 알루미늄 대비 열전도율이 낮은 것은 사실이나, 본 연구에서 고려한 냉각 구조는 모듈 하단 전체가 냉각플레이트와 직접 맞닿는 하부 접촉식(Bottom-cooling type)이며, 복잡한 다중 유로를 통해 열경계층을 효과적으로 박리시키는 설계 전략을 활용하였다. 알루미늄 대비 무게·비용·열성능과의 트레이드오프 역시 재질 선정 과정에서 고려되었다. 알루미늄은 열전도율

Material Property Comparison : Aluminum vs. 304 Stainless Steel

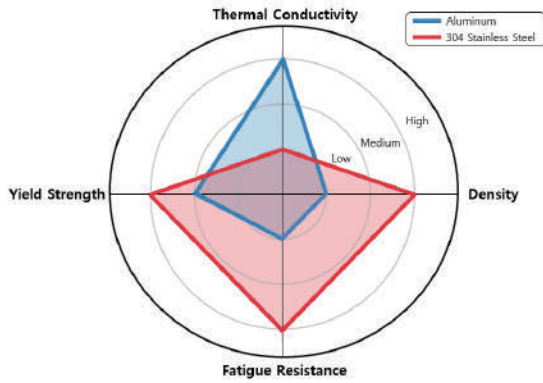


Fig. 5 Comparative material property profile of Aluminum and Stainless Steel

이 우수하고 경량이라는 장점이 있으나, 상용차 환경에서는 높은 진동, 습기, 부식 환경에 장기간 노출되므로 피로 파손 및 부식에 취약할 수 있다. 반면 스테인리스 스틸은 무게 증가와 재료비 상승이라는 단점이 있지만, 장기간 운행되는 상용 트럭에서는 유지보수 비용 절감, 내구성 확보, 냉각플레이트 변형 방지 측면에서 더 적합한 재료이다.(Fig. 5) 특히 열전도 성능이 유로형상 설계 개선으로 충분히 확보될 수 있다는 점을 감안하면, 스테인리스 스틸은 종합적인 시스템 신뢰성을 우선시하는 상용차 배터리팩에서 합리적 선택으로 판단된다.

본 연구에서 수행한 CFD 해석에는 냉각유체, 냉각플레이트(스테인리스 스틸), 및 배터리 셀의 열적 물성치를 Table 2에 정리하였다. 냉각유체는 끓는점이 높고 어는점이 낮아 실제 차량에 사용되는 에틸렌글리콜로 선정하였으며, 냉각플레이트의 재료는 기계적 강도와 내식성이 우수한 스테인리스 스틸을 사용하였고, 이는 상용 트럭 환경에서 요구되는 내구성을 고려하여 선정하였다. 배터리 셀의 물성치는 CATL ND-3.2 V 202 Ah LiFePO<sub>4</sub> 셀의 실제 제원에 기반하여 설정하였다. 해당 셀은 열전도도가 이방성(Anisotropic) 특성을 가지므로, 셀 두께 방향( $\lambda_x = 4 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ )과 면 방향( $\lambda_y, \lambda_z = 22 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ )에 서로 다른 값을 적용하였다. 이는 셀 내부 전극 적층 구조로 인해 발생하는 방향별 열전달 특성을 반영하기 위함이다. 또한 최대 충방전 전류, 운전 온도 범위 등 전기적·열적 특성은 제조사의 데이터시트(Specification)를 기준으로 설정하였다. 경계조건은 실제 냉각 시스템의 운용 환경을 고려하여 정의하였다.<sup>9)</sup> 냉각유체의 입구에는 질량유량 0.1 kg/s를 적용하였으며, 출구는 게이지 압력 기준 0 Pa로 설정하였다. 입구 냉각유체 온도는 20 °C로 설정하여 정상 상태에서의 열전달 특성을 평가하도록 하였다. 배터리 셀에서 발생하는 내부 발열량은 1C

충·방전 조건을 기준으로 산정하였다. 본 연구에서는 배터리의 열발생이 주로 내부 저항에 의한 줄(Joule) 발열에 의해 지배된다고 가정하였으며, 배터리 제조사에서 제공하는 전기적 파라미터 중 내부 저항 값을 활용하여 발열량을 계산하였다. 즉, 배터리의 발열량은 전류와 내부 저항의 관계에 기반한  $Q = I^2 R$  모델을 적용하여 산정하였으며, 이를 배터리 셀의 체적으로 정규화하여 4430.228 W/m<sup>3</sup>의 체적 발열률로 변환하였다. 해당 발열 조건은 상용 전기트럭의 고부하 운전 상황을 대표할 수 있는 1C 조건을 반영한 값으로, 냉각플레이트 형상에 따른 열관리 성능 비교에 적합한 입력 조건으로 사용되었다. 본 연구에서 사용된 물성치와 경계조건은 실제 배터리 시스템의 운용 조건을 최대한 반영하면서도, 다양한 유로 설계안 간 열전달 및 유동 특성의 비교가 명확하게

Table 2 Thermal physical properties of cooling plate and battery

Value	Coolant	Plate	Battery
Density(kg · m <sup>-3</sup> )	1,065	8,030	2130.12
Viscosity(Pa · s)	0.00315	-	-
Specific heat (J · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )	3,494	502.48	1,000
Thermal conductivity (W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )	0.419	16.27	$\lambda_x = 4$ (thickness rection) $\lambda_y = \lambda_z = 22$ (other sides)

Table 3 CATL ND-3.2 V 202 Ah LiFePO<sub>4</sub> cell specifications

Parameter	Value
Model	ND-3.2 V 202 Ah
Chemistry	LiFePO <sub>4</sub>
Nominal voltage	3.2 V
Standard capacity	202 Ah
Size	174 × 53.7 × 207 mm
Weight	≤ 4.12 kg
Charge voltage (max)	3.65 V
Discharge cut-off voltage	2.0 V
AC internal resistance (typ.)	0.16 mΩ
AC internal resistance	0.21 mΩ
Standard charge current	0.5 C
Max charge current	1 C
Standard discharge current	0.5 C
Max continuous discharge current	1 C
Max pulse discharge current	3 C
Operating temperature (charge)	0 to 55 °C
Operating temperature (discharge)	-20 to 60 °C

이루어지도록 구성되었다.<sup>15,16)</sup>

### 3.2 수치 검증 및 CFD 모델링 설정

본 연구에서는 CFD 해석 결과의 신뢰성과 정확도를 확보하기 위해 격자 독립성 검증, 수렴 기준 설정, 에너지 보존성(열수지) 검토, 그리고 Reynolds 수 기반 난류 모델 선택 과정을 체계적으로 수행하였다. 먼저 수치 해석의 수렴성 확보를 위해 잔차 기반(Residual-based) 수렴 기준과 모니터링 기반(Monitor-based) 수렴 기준을 병행하여 적용하였다. 에너지 방정식의 RMS 잔차는  $10^{-4}$  이하, 운동량 및 연속 방정식의 RMS 잔차는  $10^{-6}$  이하로 감소했을 때 1차 수렴 조건을 만족한 것으로 판단하였다. 추가적으로 반복 과정 동안 최대 온도( $T_{max}$ ), 압력 강하( $\Delta P$ ), 입·출구 유량 차(질량 보존 오차)가 충분히 안정화되는지를 확인하여 최종 수렴 여부를 판단하였다. 열수지(에너지 보존성) 검증을 위해 CFX Solver의 Normalised Imbalance Summary를 점검하였으며, 유체 영역의 H-Energy imbalance가 0.5% 미만일 때 에너지 보존이 충족된 것으로 간주하였다. 유동 모델의 설정은 냉각채널의 대표치수를 사용하여 계산한 Reynolds 수를 기반으로 결정하였으며, 본 연구에서는 채널의 폭  $w = 18.4$  mm, 높이  $h = 8.7$  mm를 적용하였다.(Fig. 6)

냉각유체(20 °C에서  $\rho = 1065$  kg/m<sup>3</sup>,  $\mu = 0.00315$  Pa · s)의 물성을 기반으로 기준 질량유량  $\dot{m} = 0.1$  kg/s에서 평균 유속은 약  $u \approx 0.587$  m/s, Reynolds 수는  $Re \approx 2321$ 으로 산정되었으며, 이는 층류-난류 천이(Transitional) 영역에 해당한다. 그러나 본 연구의 냉각플레이트는 다중 굴곡부, 분기·합류부, 그리고 병렬 유로가 포함된 복잡한 형상으로, 곡률 변화에 의해 국부적으로 속도가 증가하고 2차 유동이 발생하여 국부 Reynolds 수가 상승할 수 있다. 이러한 유동 특성을 정확하게 모델링하기 위해, 본 연구에서는 천이 영역에서도 안정적인 예측이 가능한 SST k- $\omega$  난류 모델을 채택하였으며, 벽면 근처의 난류 특성을 적절히 해석하기 위해 Automatic wall function을 사용하였다. 한편, 본 연구는 냉각플레이트 형상 변화에

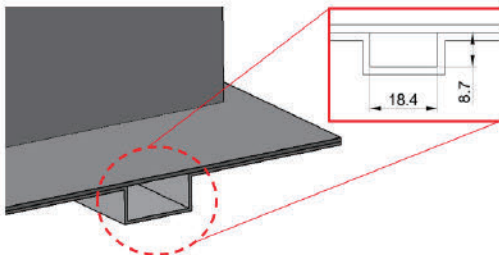


Fig. 6 Representative flow channel dimensions (shared by inlet and outlet)

따른 열유동 특성의 상대적 비교를 목적으로 수행된 기초 연구로서, 배터리 셀과 냉각플레이트 사이의 접촉은 직접 접촉 조건으로 가정하고 별도의 접촉 열저항(Contact thermal resistance) 모델은 적용하지 않았다. 이는 모든 모델에 동일한 접촉 조건을 부여함으로써, 접촉 조건의 영향 없이 유로 형상 변화에 따른 냉각 성능 차이를 공정하게 비교하기 위함이다. 향후 실제 배터리 냉각 시스템 개발 단계에서는 접촉 열저항을 포함한 보다 정밀한 모델을 적용하고, 본 연구에서 도출된 경향성과의 비교를 통해 열해석 정확도를 확장할 계획이다. 이와 같은 절차를 통해, 본 연구에서 수행한 CFD 결과는 물리적 타당성과 수치적 신뢰성이 확보되었음을 확인하였다. 또한 본 연구에서는 채널 내 유동 특성을 정량적으로 평가하기 위해 Reynolds 수 산정에 사용된 기본 지배식을 아래와 같이 정리하였다. 유동장의 난류 여부를 판단하는 Reynolds 수(Re)는 유체의 관성력 대비 점성력의 비를 나타내며, 냉각채널의 대표 치수(수력직경  $D_h$ )를 활용하여 다음과 같이 계산된다.

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot D_h}{\mu} \quad (1)$$

여기서 ( $\rho$ )는 냉각유체의 밀도, ( $u$ )는 평균 유속, ( $\mu$ )는 점도이며, 질량유량( $\dot{m}$ )으로부터 평균 유속은 다음과 같이 계산된다.

$$\dot{m} = \rho \cdot v \cdot A \Rightarrow v = \frac{\dot{m}}{\rho A} \quad (2)$$

채널의 기하학적 특성이 반영되는 수력직경은 다음과 같이 정의된다.

$$D_h = \frac{4A}{P} = \frac{2 \cdot w \cdot h}{w + h} \quad (3)$$

### 3.3 CFD 해석용 지배방정식

냉각플레이트 내부의 열 및 유동 특성을 분석하기 위해 단상 유동을 가정한 균질 유체 모델 (Single-phase homogeneous fluid model)을 적용하였으며, 본 연구의 CFD 해석은 ANSYS CFX (ANSYS Inc., Release 2025R2)를 사용하여 수행하였다. 연속 방정식은 유체의 질량 보존 (Mass conservation)을 나타내는 기본 방정식으로, 냉각플레이트 내부를 흐르는 냉각유체의 밀도 변화가 시간과 공간에서 연속성을 유지한다는 물리적 의미를 가진다. 본 연구에서 적용한 냉각유체는 단상 비압축성으로

가정되기 때문에, 연속 방정식은 유동장 내에서 유체가 새거나 축적되지 않는 조건을 기술한다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (4)$$

운동량 방정식은 유체가 받는 힘의 평형을 나타내며, 냉각유로 내부에서의 압력 구배( $\nabla p$ )와 점성력( $\nabla \cdot \tau$ )이 유동장에 미치는 영향을 고려한다. 본 방정식은 나비에-스토크스(Navier-Stokes) 형태로 구성되며, 냉각유체가 복잡한 유로 형상을 따라 흐를 때 발생하는 압력 강하( $\Delta P$ )와 유동 저항을 예측하는 데 핵심적인 역할을 한다. 특히 유로 굴곡, 분기, 병합 등 구조적 차이에 따른 운동량 변화 해석에 필수적으로 사용된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_f v) + \nabla \cdot (\rho_f v v) = -\nabla P \quad (5)$$

에너지 방정식은 냉각유체의 온도 변화와 열수송을 기술하는 핵심 지배방정식이다. 본 연구에서는 단상 균질 유체를 가정하고 정상상태 조건(Steady-state)을 적용하여, 시간에 따른 내부 에너지 변화 항을 제거하였다. 또한 유체 조성 변화가 없으므로 확산항( $i \sum \text{ihij}$ )을 생략하고, 운동에너지 항의 영향도 상대적으로 작아 이를 무시하였다. 그 결과 에너지 방정식은 대류에 의한 열수송 항( $\rho c_p v \cdot \nabla T$ ), 전도항( $k_{eff} \nabla^2 T$ ), 그리고 배터리 셀 내부 발열을 나타내는 열원 항( $S_h$ )으로 구성되는 단순화된 형태로 표현할 수 있다. 이를 통해 냉각플레이트 내부 유동 구조에 따른 열전달 거동을 보다 명확하게 파악할 수 있었으며, 특히 유로 형상에 따른 열 분포 및 열저감 효과의 차이를 정량적으로 확인할 수 있었다.

$$\nabla \cdot (\rho c_p v T) = \nabla \cdot (K_{eff} \nabla T) + S_h \quad (6)$$

총 에너지식은 유체의 내부에너지( $h$ ), 압력에 의한 일( $p/\rho$ ), 그리고 운동에너지 항( $1/2 v^2$ )을 포함하는 형태로 구성된다. 이는 냉각유체가 유로를 이동하면서 경험하는 열적 변화와 역학적 변화가 동시에 고려된 총에너지 보존식이다. 본 연구에서 총 에너지는 플레이트 하부를 흐르는 냉각유체의 입·출구 온도 차( $T_{in}, T_{out}$ )를 정확히 계산하고, 다양한 유로 구조 간 열체계 성능 비교를 수행하는 데 활용하였다.<sup>8)</sup>

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (7)$$

#### 4. CFD 결과 분석 및 열 성능 검토

Fig. 6의 온도 분포 결과를 통해 여섯 가지 냉각플레이트 모델(Model 1~6)의 냉각 성능을 정량적으로 비교하였다. 본 연구에서는 냉각 플레이트 형상 변화가 배터리 냉각 성능 및 시스템 효율에 미치는 영향을 평가하기 위해 배터리 셀 표면 최고 온도( $T_{max}$ ), 온도 균일성을 나타내는 최대 온도차( $\Delta T = T_{max} - T_{min}$ ), 그리고 냉각수 입·출구 간 압력 강하( $\Delta P = P_{in} - P_{out}$ )를 주요 평가 지표로 설정하였다. 또한 냉각 성능과 유동 저항을 동시에 고려하기 위해 펌핑 동력( $W_p$ )을 ( $W_p = \Delta P \cdot \frac{\dot{m}}{\rho}$ )으로 정의하여 종합적인 분석에 활용하였다. 전체적으로 Model 3과 Model 4가 가장 낮은 ( $T_{max}$ )를 유지하며 우수한 열관리 성능을 보였다. 두 모델 모두 S자 형태의 다중 굴곡 유로를 가지며, 유동이 복잡한 경로를 따라 흐르면서 벽면 근처에서 강한 혼합과 와류(Vortex)가 발생한다. 이러한 유동 구조는 냉각유체와 벽면 사이의 열전달 성능을 크게 향상시켜, 결과적으로 ( $T_{max}$ ) 저감에 효과적인 것으로 해석된다.

유동 특성 측면에서도 동일한 경향이 확인된다. Model 3 & 4는 가장 큰 ( $\Delta P$ )를 보였으며, 그 다음은 Model 5 & 6, 마지막으로 Model 1 & 2 순이었다. 유속과 압력이 높아질수록 채널 내부의 난류 강도가 증가하고, 이는 벽면에서의 열전달률 향상으로 이어져 냉각 성능이 유속·

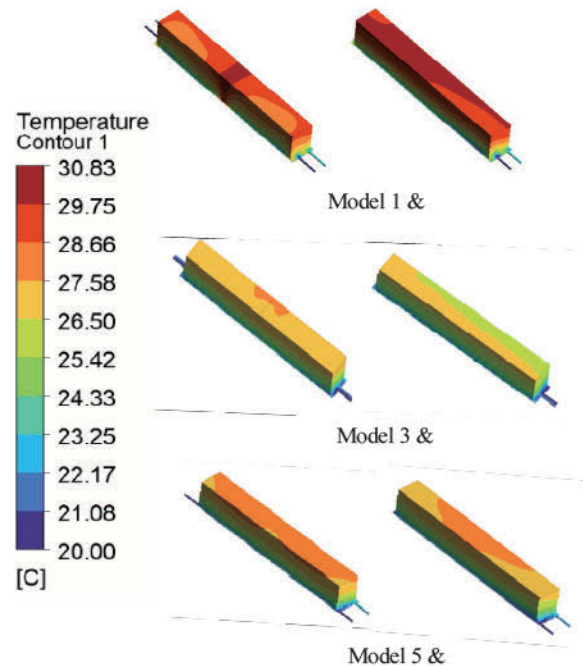


Fig. 7 Temperature contours (°C) of Model 1~6 cooling plate

압력 수준과 직접적으로 연관됨을 확인할 수 있었다. 다만 ( $\Delta P$ )증가에 따른 펌핑 동력 요구량 역시 함께 증가하는 특성이 확인되었다. 대칭 구조로 설계된 모델들 (Model 1 & 3 & 5)은 전체 배터리 영역에서 비교적 균일한 온도 분포를 형성하는 경향을 보였다. 그러나 Model 1의 경우 중앙부에서 국부적인 고온 영역이 관찰되었는데, 이는 U자 대칭 구조에서는 중심부에 충분한 냉각유량이 도달하지 못하기 때문이다. 즉, 형상에 따라 유체 분배가 불균일해질 경우 대칭 구조라 하더라도 특정 영역의 냉각 성능이 저하될 수 있음을 보여준다. 반면, S자 다중회로 구조(Model 3 & 4)는 가장 낮은 ( $T_{max}$ )와 적은 ( $\Delta T$ )를 동시에 달성하여 전체 모델 중 가장 우수한 냉각 성능을 나타냈다. 이는 굴곡이 많아질수록 유동이 지속적으로 방향을 바꾸게 되고, 이 과정에서 와류 형성과 재혼합이 반복되면서 마치 미세 핀(Fin)과 유사한 열전달 향상 효과가 발생하기 때문이다. 결과적으로 S자 다중회로 구조는 넓은 유효 열전달 면적과 높은 난류 특성을 동시에 확보하여, 대형 배터리팩의 하부 냉각에 가장 효과적인 구조임을 확인하였다. 종합적으로, 온도 분포 분석 결과는 S자 다중회로 구조 (Model 3 & 4)가 전체 모델 중 가장 우수한 열관리 성능을 제공하며, 그 뒤로는 병렬형 (Model 5 & 6), 단일 U자형 (Model 1 & 2) 순으로 성능이 나타났다. (Fig. 7) 이는 냉각플레이트 형상에 따라 유동 구조와 열전달 메커니즘이 크게 달라지며, 특히 온도지표 ( $T_{max}$ ), ( $\Delta T = T_{max} - T_{min}$ )와 유동지표 ( $\Delta P = P_{in} - P_{out}$ ), ( $W_p$ )를 함께 고려한 결과 S자 다중회로 구조가 대형 배터리팩 냉각에 가장 효과적인 형상임을 확인할 수 있었다.

4.1 에너지 효율

S자 다중회로 구조를 갖는 Model 4는 가장 낮은 평균 온도와 우수한 열 제거 성능을 보였으며, 열관리 효과 측면에서는 가장 탁월한 구조로 확인되었다. 그러나 동일한 운전 조건에서 펌프 동력 요구량이 가장 크다는 점이 확인되었으며, 이는 높은 냉각 성능을 얻기 위해 그만큼 큰 압력 손실이 발생함을 의미한다. Fig. 8에 따르면 Model 3은 Model 4에 비해 평균 온도가 약 1°C 정도 높게 나타났지만, Fig. 9에 따르면 순환에 필요한 펌프 동력이 약 1 W 낮아 에너지 소비 측면에서 더 효율적인 결과를 보였다. 또한 Model 3은 온도 분포가 비교적 균일하게 유지되어 대형 배터리팩에서 중요한 설계 기준인 셀 간 온도 편차를 효과적으로 억제하는 것으로 분석되었다. 종합적으로 볼 때, Model 1~6 중 열전달 성능만 고려하면 Model 4가 최적 구조이지만, 실제 상용 트럭용 배터리팩은 에너지 소비, 시스템 효율, 펌프 용량, 압력 손실을 함께 고려해야 한다. 이러한 조건을 종합하면, Model 3은

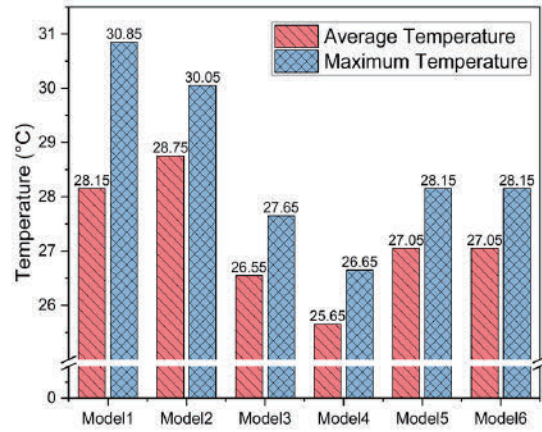


Fig. 8 Average vs. maximum temperature for each model

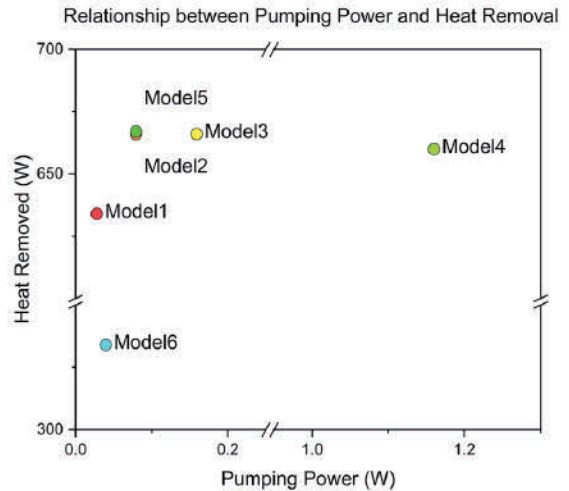


Fig. 9 Relationship between pumping power and heat removal for the six models

적절한 냉각 성능과 낮은 에너지 요구량을 동시에 만족시키는 가장 균형 잡힌 냉각 유로로 평가된다. 따라서 본 연구에서는 대형 배터리팩의 열관리 시스템 설계 시 단순히 온도 저감 능력뿐 아니라, 에너지 효율 및 냉각 균일성까지 고려할 때 Model 3이 가장 적합한 냉각 유로 구조임을 제안한다.

5. 결론

본 연구에서는 상용 전기트럭용 배터리팩을 대상으로 여섯 가지 냉각플레이트 유로 형상(Model 1~6)에 대해 열유동 특성을 CFD 기반으로 비교·분석하였다. 해석 결과, S자 다중회로 구조를 갖는 Model 3과 Model 4가 전체 모델 중 가장 우수한 냉각 성능을 제공하는 것으로 나타났다(Fig. 7). S자 유로는 굴곡이 증가함에 따라 유동이 지속적으로 방향을 전환하며, 이 과정에서 와류 형성과 유동 혼합이 반복적으로 발생한다. 이러한 유동 특성은

냉각유체와 플레이트 벽면 사이의 열경계층을 효과적으로 교란시켜, 미세 핀(Fin) 구조와 유사한 열전달 증진 효과를 제공하는 것으로 해석된다. 반면, 단일 U자형 유로를 적용한 Model 1과 Model 2는 상대적으로 단순한 유동 구조로 인해 냉각수의 유로 길이가 길어지고, 플레이트 중앙부 및 말단부에서 냉각 성능이 저하되는 경향을 보였다. 특히 Model 1의 경우 대칭 구조임에도 불구하고 중앙부에 국부적인 고온 영역이 형성되었으며, 이는 단일 유로 구조에서 냉각유체가 중심부까지 충분히 도달하지 못하는 유체 분배 한계에 기인한 것으로 판단된다. 이러한 결과는 단일 채널 기반 구조가 대형 배터리팩과 같이 플레이트 길이가 증가하는 시스템에서는 온도 균일성 확보에 불리함을 시사한다. 병렬 유로 구조를 적용한 Model 5와 Model 6은 단일 U자형 구조 대비 개선된 냉각 성능을 나타냈다. 병렬 유로 분할을 통해 냉각유체의 평균 유로 길이가 단축되면서 중앙부 온도 상승이 완화되었으며, 압력 강하 또한 Model 3과 Model 4 대비 상대적으로 낮은 수준을 유지하였다. 그러나 병렬 구조 특성상 각 분지 유로 간 유량 분배의 불균일성이 존재하여, S자 다중회로 구조에 비해서는 온도 균일성과 최대 온도 저감 효과가 제한적인 것으로 나타났다. S자 다중회로 구조 중에서도 Model 4는 가장 낮은 평균 온도와 최대 온도를 기록하여 열관리 효과 측면에서는 가장 우수한 성능을 보였다. 그러나 다수의 굴곡과 긴 유로 길이로 인해 동일한 운전 조건에서 가장 큰 압력 손실이 발생하였고, 이에 따라 펌핑 동력 요구량 역시 가장 크게 나타났다 (Fig. 8). 이는 우수한 냉각 성능을 확보하는 대가로 에너지 소비가 증가함을 의미한다. 이에 비해 Model 3은 Model 4 대비 평균 온도가 약 1°C 정도 높게 나타났으나, 압력 강하가 상대적으로 낮아 필요한 펌핑 동력이 감소하였다. 또한 Model 3은 셀 간 온도 편차가 작고 온도 분포가 비교적 균일하게 유지되어, 대형 배터리팩 적용 시 열적 안정성을 확보하는 데 유리한 구조임을 확인하였다. 즉, Model 3은 냉각 성능, 에너지 소비, 압력 손실, 온도 균일성 측면에서 가장 균형 잡힌 성능을 제공하는 구조로 평가된다. 종합적으로, 여섯 가지 냉각플레이트 형상 중 열전달 성능만을 고려할 경우 Model 4가 최적 구조로 판단되나, 실제 상용 전기트럭 배터리팩에서는 에너지 소비, 시스템 효율, 펌프 용량 및 압력 손실을 함께 고려한 종합적인 설계가 요구된다. 이러한 공학적 요구 조건을 종합적으로 고려할 때, Model 3은 상용 전기트럭용 배터리팩 냉각플레이트 설계에 가장 적합한 구조라는 결론을 도출할 수 있다. 본 연구 결과는 향후 대형 상용차 배터리팩의 열관리 시스템 설계, 열폭주 안정성 확보, 고출력 연속 운전 조건에서의 신뢰성 향상 등 다양한 분

야에 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 특히 S자 다중회로 구조를 기반으로 한 냉각플레이트 설계는 고효율·고안정성 냉각 기술 개발을 위한 유효한 설계 방향을 제시한다. 향후 연구에서는 Model 3과 Model 4를 대상으로 유로 굴곡 반경, 채널 폭, 유량 분배 및 난류 강도 조절 등의 설계 변수를 고려한 다목적 최적설계를 수행함으로써, 열성능-유동저항-에너지 소비 간의 Trade-off를 정량적으로 규명하고자 한다. 이러한 연구는 상용 전기트럭 뿐 아니라 대형 ESS, 건설기계, 군수·특장 차량 등 고출력·고신뢰성이 요구되는 응용 분야에도 실질적인 설계 지침으로 활용될 수 있을 것이다.

## 후 기

본 연구는 대구광역시 2025년도 미래모빌리티 선도기술개발사업 (과제번호:DG-2025-06)의 지원을 통하여 이루어진 성과입니다.

## References

- 1) M. M. Rahman, H. M. Cho and M. S. Kim, "Thermal Performance Analysis of Indirect Liquid Cooling System for EV Battery Pack with Different Channel Configurations," *Int. J. Automotive Technology*, Vol.23, No.5, pp.1015-1026, 2022.
- 2) Z. Rao and S. Qian, "Thermal Management of Lithium-ion Battery Packs with Phase Change Materials," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.15, No.9, pp.4554-4571, 2011.
- 3) S. J. Lee, H. S. Kim and J. H. Choi, "Numerical Study on the Effect of Flow Channel Design of Cooling Plate for Battery Pack Thermal Management," *Transactions of KSAE*, Vol.29, No.6, pp.496-503, 2021.
- 4) J. Y. Park, S. K. Lee and Y. J. Lim, "Evaluation of Cooling Performance of Battery Module Using a Cold Plate for Electric Vehicles," *Transactions of KSAE*, Vol.30, No.2, pp.121-128, 2022.
- 5) J. Jagemont, L. Boulon and Y. Dubé, "A Comprehensive Review of Lithium-ion Battery Thermal Management System with Special Emphasis on Air Cooling and Liquid Cooling," *Applied Thermal Engineering*, Vol.129, pp.963-979, 2018.
- 6) Q. Cheng, X. Wang, M. Yang and C. Lin, "CFD Simulation on Thermal Characteristics of Liquid-cooled Battery Pack for Commercial Vehicles," *Energy Conversion and Management*, Vol.235, Paper No.113982, 2021.
- 7) H. Lee, J. Kim and D. Yu, "Optimization Design of

- Dual-channel Cooling Plate for Large-sized Battery Pack,” KSAE Annual Conference Proceedings, pp.452-457, 2023.
- 8) F. P. Incropera and D. P. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 3rd Edn., John Wiley & Sons, New York, 2011.
  - 9) J. H. Park, B. K. Choi, S. G. Kim and J. H. Jeong, “Study on the Prediction Methodology of Cooling Performance in HEV Battery Package Using CFD,” KSAE Annual Conference Proceedings, pp.2790-2794, 2011.
  - 10) S. G. Baek and S. J. Park, “Thermal Analysis of a Battery Cooling System with Aluminum Cooling Plates for Hybrid Electric Vehicles and Electric Vehicles,” *Transactions of KSAE*, Vol.22, No.3, pp.60-67, 2014.
  - 11) H. Gan, X. Zhang, Y. Wang, W. Ren and S. Liu, “Thermal Performance of Symmetrical Double-spiral Channel Cooling Plate for Large-format Lithium-ion Batteries,” *Applied Thermal Engineering*, Vol.227, Paper No.120649, 2023.
  - 12) Z. Chen, J. Shu, B. Zhang, X. Li and Y. Wang, “Enhancing Lithium-ion Battery Cooling Efficiency through Optimal Design of Double-layer Flow Channel Cold Plate,” *Journal of Power Sources*, Vol.603, Paper No.233108, 2024.
  - 13) Y. Chen, X. Liu, L. Chen, F. Xia and D. Yang, “Bidirectional Symmetrical Parallel Mini-channel Cold Plate for Liquid Cooling of Large-size Battery Pack,” *Applied Thermal Engineering*, Vol.212, Paper No.118594, 2022.
  - 14) J. S. Lee, K. Y. Yang, J. Y. Kuk and J. C. Park, “Analytical Approach for the Battery Cooling of Hybrid Battery Package,” KSAE Annual Conference Proceedings, pp.508-514, 2011.
  - 15) Z. Liu, J. Wang, L. Gao, Y. Wang and X. Zhang, “Numerical Analysis of Topology-optimized Cold Plates for High-power Electric Vehicle Battery Thermal Management,” *Energy Conversion and Management*, Vol.328, Paper No.117452, 2024.
  - 16) M. Ryu, S. Kim and D. H. Shin, “Thermal Analysis of a Battery Cooling System with Enhanced Natural Convection for Vehicle Application,” *Transactions of KSAE*, Vol.33, No.7, pp.533-544, 2025.
  - 17) W. Jin, Y. Wang, H. Zhang and S. Chen, “Electrode-level Strategies for High-Ni Cathodes in Lithium-ion Batteries: Performance and Durability Comparison of LFP and NCM Systems,” *Energy Materials*, Vol.57, pp.1125-1149, 2025.
  - 18) C. Zhao, J. Wang, L. Zhang and T. Li, “Recent Progress in Carbon Coating and Surface Modification of Lithium Iron Phosphate,” *Journal of Materials Chemistry A*, Vol.10, No.6, pp.12520-12536, 2025.
  - 19) S. Khalid, A. Ullah and M. Aslam, “Progress and Obstacles in Electrode Materials for Lithium-ion Batteries: Advanced Modifications for LFP and NCM,” *RSC Advances*, Vol.15, pp.20420-20453, 2025.
  - 20) Y. Yang, Y. Yu, X. Han and L. Sun, “Dielectric Surface Modification of NCM Cathodes Using BaTiO<sub>3</sub> for High-rate Lithium-ion Batteries,” *Journal of Composite Materials*, Vol.52, No.4, pp.412-423, 2024.