

고분자 복합재 배터리 팩 모듈 커버 내부의 다양한 핀 배열에 따른 열전달 특성에 대한 수치해석적 연구

박재윤* · 차명배* · 김재현* · 전주원* · 김성민**†

Numerical Study on Heat Transfer Characteristics of Different Fin Configurations inside a Battery Pack Module Cover Using Polymer Composite Material

Jae-Yoon Park*, Myung-Bae Cha*, Jae-Hyun Kim*, Ju-Won Jeon*, Sung-Min Kim**†

Key Words : Rectangular fin(직사각형 핀), Computational fluid dynamics(전산유체역학), Heat transfer coefficient(열전달계수), Thermal management(열관리)

ABSTRACT

In this study, the natural convection heat transfer characteristics within a battery pack module equipped with rectangular fins were investigated through numerical simulations. Two complementary parametric studies were performed: (i) at a fixed fin count, fin thickness and height were varied to isolate shape driven effects on flow and heat transfer; and (ii) at a fixed fin shape, the fin count was varied to examine array density effects. For both studies, the local heat transfer coefficient distributions, the area averaged coefficient on the upper cover inner surface, and the net heat absorbed by the upper cover are compared. As a result, installing the fins increases the flow velocity between the battery cells and the bottom of the upper cover and induced recirculating flows around the fin structures, which together enhance the natural convection heat transfer performance of the upper cover.

1. 서론

배터리 팩 모듈은 개별 셀을 집적해 팩 단위의 전력과 에너지 성능을 구현하는 동시에, 작동 중 발생하는 열을 외부로 전달하는 주요 열경로를 이룬다. 배터리 셀로 주로 사용되는 리튬이온(Li-ion) 전지는 높은 에너지 밀도·긴 수명·경량성이 강점이지만 열에 대한 민감도가 높다⁽¹⁾. 전지 내부에서는 전류에 따른 저항발열과 전극의 산화·환원 반응에 수반된 열이 발생하며, 고율 충·방전과 고온 환경에서는 발열량이 증가해 최대온도 상승과 온도 불균일이 확대된다. 이러한 열적 스트레스는 내부저항 상승, 성능 저하, 리튬 도금을 초래하고, 장시간 고온 노출 시 열폭주(Thermal runaway) 위험으로 이어질 수 있다⁽²⁾. 따라서 발열을 효과

적으로 억제하기 위한 고효율 열관리 전략이 필수이며, 그 중에서도 자연대류는 외부 구동장치 없이도 구현할 수 있는 수동 냉각 방식으로, 구조가 단순하고 경제성이 뛰어나 다양한 열관리 시스템 설계에 적극 활용되고 있으며 이에 관한 연구도 지속해서 이루어지고 있다. Dialameh⁽³⁾ 등은 수평 히트싱크에 부착된 짧은 길이의 두꺼운 직사각형 핀 배열을 대상으로 수치해석을 수행하였으며, 핀 길이가 짧고 간격이 넓을수록 외부 공기가 더 효과적으로 유입되어 열전달계수가 증가함을 확인하였다. 또한, 핀 높이가 커질수록 부력 유동이 강해져 열전달 성능이 향상되는 반면, 핀 길이가 길어질수록 형성되는 경계층 두께가 증가하여 평균 열전달계수가 감소하는 경향을 보였다. Ahmadi⁽⁴⁾ 등은 수직 히트싱크에 부착된 직사각형 핀에 대해 핀 간격과 핀 중간부

* 성균관대학교 대학원 기계공학과(Graduated School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University)

** 성균관대학교 기계공학부(School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University)

† 교신저자, E-mail : smkim@skku.edu

의 절단(Interruption) 길이를 변화시켜 자연대류 열전달 특성을 수치해석과 실험으로 조사하였고, 절단된 핀이 열경계층을 주기적으로 재형성시켜 열전달 성능을 향상시킬 수 있음을 확인하였다. Zhang⁽⁵⁾ 등은 소형 전기차 배터리 충전기에 적용되는 히트싱크를 대상으로, 경사 핀, 절단된 경사 핀, 절단된 직선 핀, 핀 핀 등 다양한 형상과 수평, 수직, 측면 등 설치 방향에 따른 자연대류 및 복사 열전달 성능을 실험 및 수치해석으로 조사하였다. 그 결과, 절단된 핀 배열이 열경계층을 주기적으로 재형성하여 자연대류를 촉진함을 확인하였으며, 핀 핀 구조는 수평 배치에서 가장 효과적이고, 직선 절단 핀은 수직 배치에서 유리하며, 경사 절단 핀은 모든 방향에서 안정적인 성능 향상을 제공함을 확인하였다. Chang⁽⁶⁾ 등은 히트싱크의 냉각 성능 향상을 위해 경사진 핀 배열을 대상으로 자연대류 열전달 특성을 3차원 수치해석과 실험을 통해 검증하였다. 핀의 경사각, 회전각, 메인 채널 폭, 핀 길이, 오프셋 비율 등 다양한 기하학적 인자가 자연대류 열전달 특성에 미치는 영향을 조사하였고, 경사각 30°와 회전각 0° 조건에서 열전달 성능이 가장 우수함을 확인하였다. Hyun과 Kim⁽⁷⁾은 전기자동차 배터리 팩 상부 커버 내부 자연대류 열전달 특성을 3차원 수치해석으로 조사하였다. 유출홀 직경과 직사각형 핀의 치수 및 배열을 변화시켜 열전달 성능을 분석한 결과, 유출홀과 핀 설치 시 모듈과 커버 사이 유동 속도가 증가하여 평균 열전달계수가 향상되는 것을 확인하였다. 이처럼 선행 연구들은 핀의 형상 및 배열 변화가 자연대류 열전달 성능에 큰 영향을 미친다는 사실을 보여주며, 이는 배터리 팩 모듈의 열관리 설계에도 직접적인 시사점을 제공한다.

본 연구에서는 배터리 팩 모듈 내부의 자연대류에 의한 열유동 현상을 정량적으로 분석하기 위해 3차원 수치해석을 실시하였다. 상부 커버 내측 표면에 부착된 직사각형 핀의 높이, 폭, 그리고 개수를 변화시켜 기하학적 인자가 열전달 성능에 미치는 영향을 평가하였다. 이를 통해 핀 형상 및 배열 변화가 모듈 내부 유동장에 미치는 영향을 규명하고, 이에 따른 커버 내측 표면의 평균 열전달계수와 국부 열전달계수 분포를 확인하였다.

2. 수치해석

2.1 수치해석 형상 및 경계조건

Fig. 1(a)는 본 연구에서 사용한 배터리 팩 모듈 전체 형상과 수치해석을 위한 3차원 계산영역을 나타낸다. 수치해석의 연산시간을 단축하기 위해 전체 배터리 팩 모듈의 대칭성을 기반으로 1/4만 계산영역으로 진행하였다. Fig. 1(b)는 본 연구에서 사용된 단순화된 배터리 팩 모듈 상부 커버 형상의 계략도이며 핀을 설치하지 않은 기본 형상과 핀 조

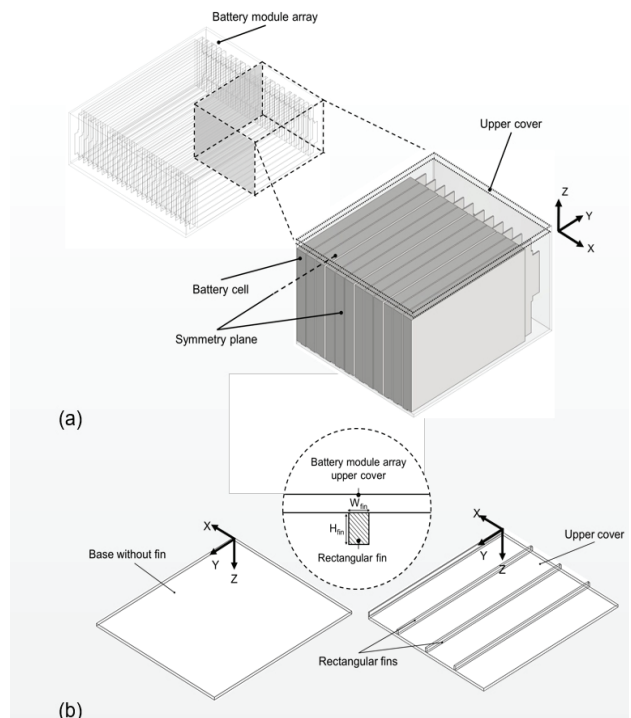


Fig. 1 (a) Isometric view of computational domain for battery pack module and (b) simplified upper cover of battery pack module

Table 1 Twelve different designs of upper cover of battery pack module

	Rectangular fin		
	H_{fin} [mm]	W_{fin} [mm]	N_{fin} [-]
Base	-	-	-
Case-1	H	W	5
Case-2	H	$2W$	
Case-3	$2H$	W	
Case-4	$2H$	$2W$	
Case-5	H	W	10
Case-6	H	$2W$	
Case-7	$2H$	W	
Case-8	$2H$	$2W$	
Case-9	H	W	15
Case-10	H	$2W$	
Case-11	$2H$	W	
Case-12	$2H$	$2W$	

합의 예시를 보여준다. 상부 커버와 배터리 셀 사이의 치수를 고려하여 핀의 높이(H_{fin})와 폭(W_{fin})은 각각 H , $2H$ 와 W , $2W$ 로 선정하였다. 핀은 총 세 가지 배열로 설치하였으며, 핀 개수(N_{fin})는 각각 5개, 10개, 그리고 15개로 균등 간격을 두고 배치하였다. 본 연구에서는 총 12개의 케이스에 대해 수치해석을 수행하였으며, 각 케이스의 형상 정보는 Table 1에 정리하였다.

Table 2 Boundary conditions and material properties

Boundary conditions		Value
Constant temperature [°C]	Battery cell	40
	Battery pack module wall	20
Symmetry plane		Symmetry
Material	Battery pack upper cover	Polymer composite
Polyamide 6	Thermal conductivity [W/mK]	7.6
	Density [kg/m ³]	1131
	Specific Heat [J/kgK]	1475.5

경계조건으로는 배터리 셀 표면에 리튬이온 전지의 적정 작동 온도인 40°C⁽⁸⁾, 모듈의 상하부와 측면 표면에는 20°C의 온도를 각각 부여하였다. 대칭면은 대칭 조건을 사용하고, 나머지 모든 벽면에는 점착 조건(No-slip condition)을 적용하였다. 중력 효과는 배터리 팩 모듈의 높이 방향인 -z 방향으로 고려하였다. 공기의 밀도, 열전도율, 점성계수, 정압비열 물성치는 NIST의 REFPROP 10.0⁽⁹⁾ 프로그램을 이용하여 얻었고, 배터리 팩 상부 커버의 복합재료 물성치는 Table 2에 수치해석 경계조건과 함께 정리했다.

2.2 수치해석 기법

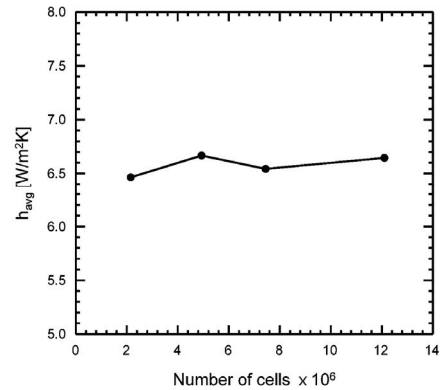
본 연구에서는 ANSYS Fluent 20.1⁽¹⁰⁾을 활용하여 배터리 팩 모듈 내부에 대한 3차원 정상상태 수치해석을 진행하였다. 자연대류 특성을 분석하기 위해 층류 모델을 적용하였으며 비압축성 정상상태 조건을 가정하였다. 이에 사용된 질량, 운동량, 에너지 보존 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

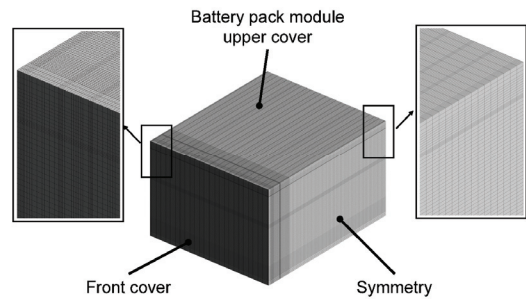
$$\rho \left(\frac{\partial V}{\partial t} + (V \cdot \nabla) V \right) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho g \tag{2}$$

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (k \nabla T) \tag{3}$$

수치해석 과정에서 압력-속도 연성 기법은 Semi-implicit method for pressure linked equations-consistent⁽¹¹⁾ 기법으로 처리하였다. 압력 항은 2차 정확도(Second-order)를, 운동량 및 에너지 항은 2차 정확도 상류 차분법(Second-order upwind)을 통해 이산화하였다. 연속 방정식과 운동량, 에너지 방정식의 잔차가 10⁻⁵ 미만에 도달할 때까지 반복 계산을 수행하였다.



(a)



(b)

Fig. 2 (a) Grid independence test by comparing average heat transfer coefficient on bottom surface of upper cover of battery pack module. (b) Structured grid system with 7.44 million cells of battery pack module

2.3 수치해석 격자 독립성 검증

상부 커버에 핀을 설치하지 않은 Base를 대상으로 2.15×10⁶, 4.93×10⁶, 7.44×10⁶, 그리고 12.1×10⁶ 총 네 가지 격자 시스템에 대하여 격자 독립성 검증을 수행하였다. Fig. 2(a)는 각 격자 조건에서 계산된 상부 커버 하부 표면의 평균 열전달계수 비교 결과를 나타내며, Fig. 2(b)는 해석에 사용된 격자 형상을 보여준다. 계산의 안정성과 수렴성을 확보하기 위해 정렬 격자를 채택하였다. 그 결과, 7.44×10⁶개와 12.1×10⁶개의 격자 시스템의 배터리 팩 상부 커버 하부면의 평균 열전달계수 차이가 1.57%로 나타나 7.44×10⁶개의 격자 시스템을 본 연구의 수치해석 모델로 선택하였다.

3. 수치해석 결과

Fig. 3은 핀이 설치되지 않은 기본 상부 커버 형상에 대해 수행한 수치해석 결과를 나타낸다. Fig. 3(a)는 yz 평면(x = 0.091 m)에서의 속도 벡터로, 배터리 측면에서 가열된 공기가 위로 솟아오른 뒤 상부 커버 바로 아래를 따라 수평으로 흐르고, 반대편 벽면을 따라 내려오는 순환 유동이 형

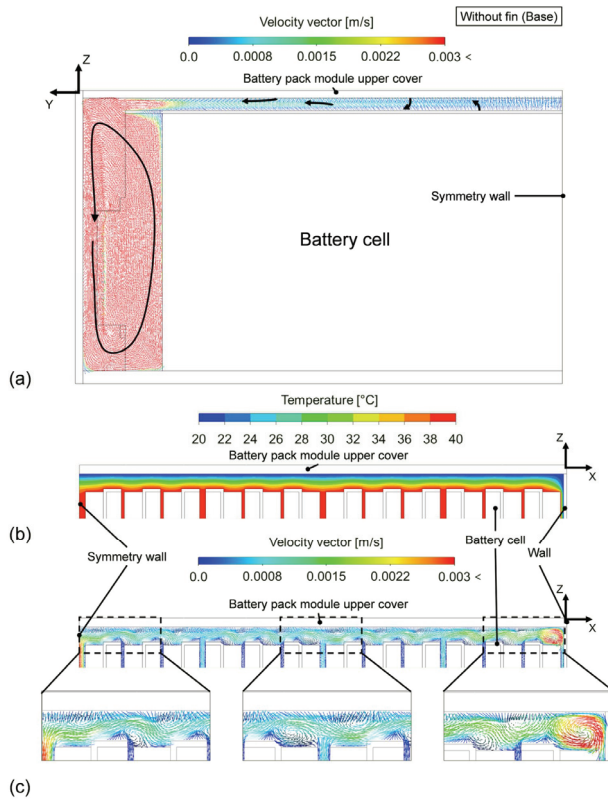


Fig. 3 (a) Velocity vector distribution on yz plane ($x = 0.091$ m), (b) temperature, and (c) velocity vector distributions on xz plane ($y = 0.095$ m) of Base

성되었다. 배터리 셀과 상부 커버 사이 공간에서는 상대적으로 유속이 느린 층류가 나타났고, y 축 방향을 따라 배터리 셀 측면에 가까워지며 유속이 점차 증가하였다. Fig. 3(b)는 xz 평면($y = 0.095$ m)에서 배터리 셀과 커버 사이 공간의 유체 온도 분포를 보여준다. x 축 방향 온도구배는 배터리 셀과 상부 커버의 일정 온도 조건으로 인해 거의 일정하게 나타났지만, 이로 인해 z 축 방향으로 급격한 온도구배가 형성되었다. 결과적으로 배터리 셀과 커버 사이 유체의 밀도 차이가 발생하여 Fig. 3(c)에서 보이는 것과 같이 배터리 셀 상부에서 와류가 발생하였다. $x = 0$ m 부근에서의 와류는 배터리 셀 측면의 순환 유동의 영향을 받아 높은 유속과 함께 강하게 발생하였다. 유속은 x 축을 따라 배터리 팩 모듈 중심부에 가까워지면서 감소하였고, 배터리 셀간 간격에서 상승하는 유체의 영향으로 인해 와류가 촉진되었다.

3.1 핀 크기의 효과

Fig. 4는 10개의 핀이 설치된 Case-5($H_{fin} = H$, $W_{fin} = W$)의 온도 및 속도 분포를 보여준다. Fig. 4(a)에서 나타난 yz 평면($x = 0.091$ m)에서의 속도 벡터의 경우, 핀이 없는 Fig. 3(a)와 유사하게 나타났다. 이는 배터리 측면 순환 유동 및 배터리 셀과 상부 커버 사이 공간에서의 y 축 방향 층

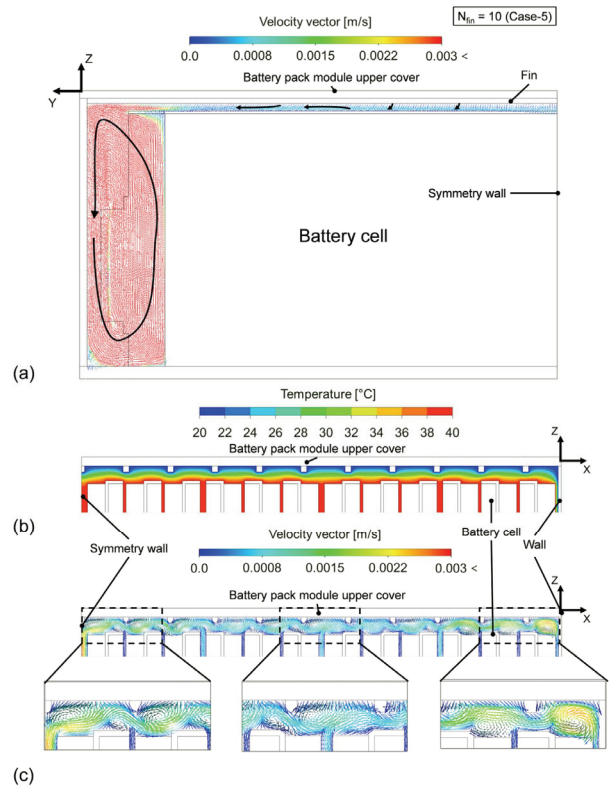


Fig. 4 (a) Velocity vector distribution on yz plane ($x = 0.091$ m), (b) temperature, and (c) velocity vector distributions on xz plane ($y = 0.095$ m) of Case-5

류 유동에 대한 핀의 영향이 미미함을 보여준다. 핀의 영향은 xz 평면($y = 0.095$ m)에서 두드러지게 나타났다. Fig. 4(b)에서 나타난 것과 같이 핀과 인접한 영역에서 배터리 셀과 상부 커버 사이 간격이 감소함에 따라 z 축 방향 온도구배가 증가하였다. x 축 방향으로 국부적인 핀의 존재 여부에 따라 온도구배 차이가 크게 나타났고, 핀 주변 유체의 온도 차이가 발생하면서 Fig. 3(b)에 나타난 핀이 설치되지 않은 Base에 비해 자연대류와 와류가 강하게 나타났다. Fig. 5는 Case-5와 동일한 개수의 핀이 설치되었으나, 핀의 높이와 폭이 두 배 증가한 Case-8($H_{fin} = 2H$, $W_{fin} = 2W$)의 결과를 보여준다. 핀의 높이와 폭이 증가함에 따라, Fig. 5(b)에서 확인할 수 있듯이 국부적으로 z 축 방향 온도구배 및 핀 주변 유체의 온도 차이가 확대되었다. 그 결과, Fig. 5(c)에 나타난 xz 평면($y = 0.095$ m)에서 핀 주변의 자연대류와 와류가 강화되었을 뿐만 아니라, Fig. 5(a)에서 보이듯 핀의 높이와 폭의 증가로 인해 배터리 셀과 상부 커버 사이 공간에서의 z 축 방향 혼합 유동 또한 강화되었다.

3.2 핀 개수의 효과

Fig. 6은 핀의 높이와 폭이 $H_{fin} = 2H$, $W_{fin} = 2W$ 로 동일하고, 핀의 개수가 각각 $N_{fin} = 5$, $N_{fin} = 15$ 인 Case-4와

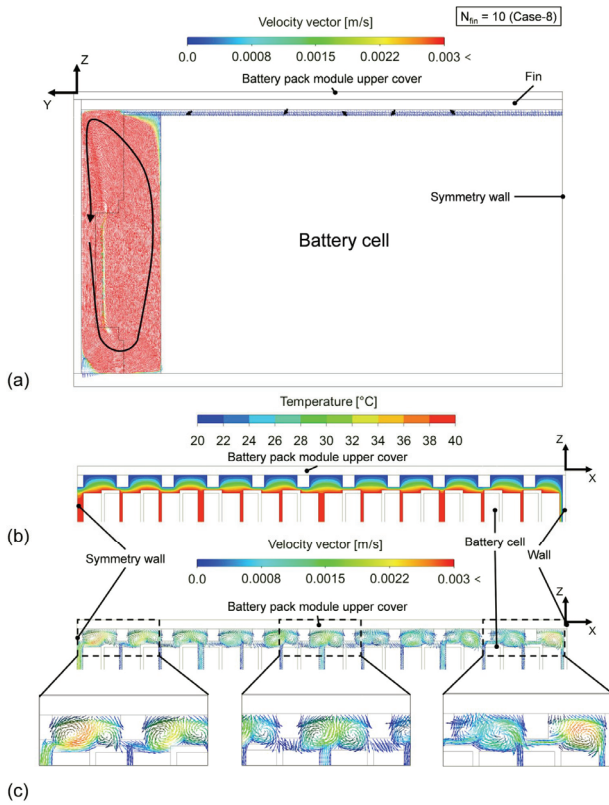


Fig. 5 (a) Velocity vector distribution on yz plane ($x = 0.091$ m), (b) temperature, and (c) velocity vector distributions on xz plane ($y = 0.095$ m) of Case-8

Case-12의 xz 평면($y = 0.095$ m)에서의 온도 및 속도 분포를 보여준다. Fig. 6(a)에서 나타낸 것과 같이, Case-4의 경우, 넓은 핀 간격으로 인해 x 축 방향을 따라 핀 사이 구간의 온도구배는 비교적 일정하게 유지되었다. 반면 핀 간격이 좁은 Case-12의 경우, x 축 방향을 따라 온도구배의 변화가 짧은 간격으로 발생하였다. 이로 인한 속도 분포의 차이는 Fig. 6(b)에서 확인할 수 있다. Case-4의 경우, 상대적으로 넓은 핀 사이 영역에서 크기가 큰 와류가 발생하는 반면, Case-12에서는 크기가 작은 와류가 발생하였다. 또한, 핀 사이 간격이 좁을 때 배터리 셀간 간극에서 상승하는 유체에 큰 영향을 받아 셀간 간극 주변 와류가 더욱 강하게 발생하였다.

3.3 국부 및 전체 열전달 성능 비교

Fig. 7은 Base와 Case-4, Case-5, Case-8, 그리고 Case-12에서의 상부 커버 표면 국부 열전달계수 분포를 나타낸다. Base의 경우, 상부 커버 표면에서 전반적으로 낮은 열전달계수가 균일하게 관측되었다. 핀이 설치된 경우(Case-4, Case-5, Case-8, 그리고 Case-12)에도 Base와 동일하게 상부 커버 표면에서는 낮은 열전달계수가 관측되었지만, 핀 팁(Fin tip)에서는 모든 케이스에서 높은 국부 열전달계수

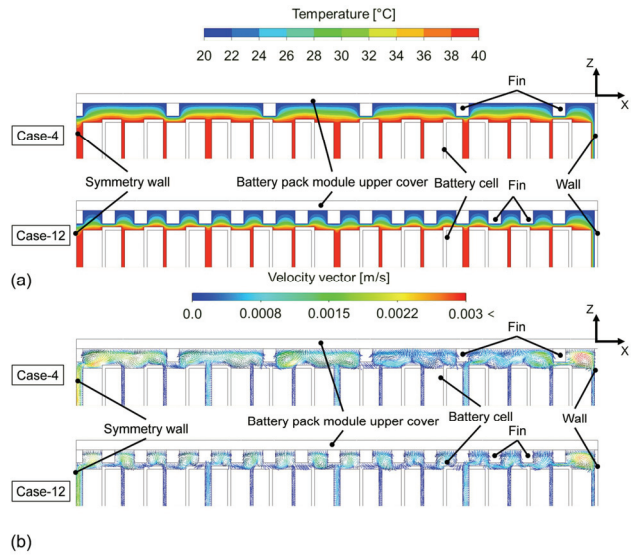


Fig. 6 (a) Temperature and (b) velocity vector distributions on xz plane ($y = 0.095$ m) of Case-4 and Case-12

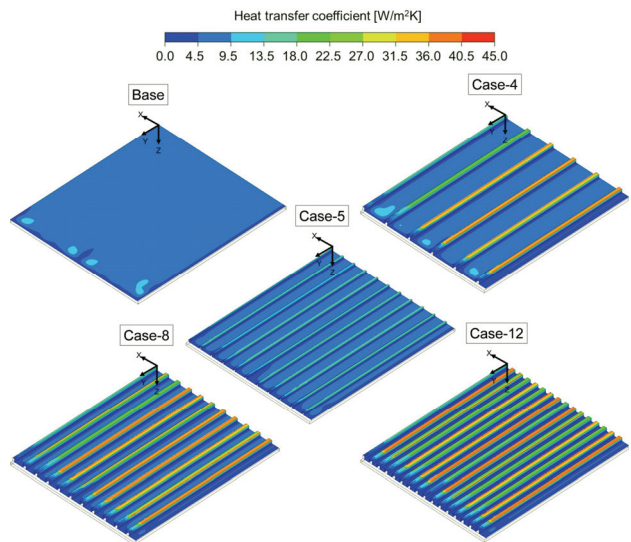


Fig. 7 Local heat transfer coefficient contours of Base, Case-4, Case-5, Case-8, and Case-12

가 나타났다. 특히, 핀 팁에서의 국부 열전달계수는 핀의 폭이 증가할수록 증가하는 경향을 보였다. 이는 핀 팁과 배터리 셀 사이 유체에서 급격한 온도구배가 형성되어 핀 팁에서 높은 열전달 성능이 나타났기 때문이다. 또한, 핀 팁뿐만 아니라 인접한 핀 측면에서도 높은 국부 열전달계수가 관측되었다. 이러한 현상은 핀 주변 영역의 온도구배 차이가 자연대류와 와류를 강화하기 때문이며, 온도구배 차이가 증가할수록 더욱 강한 자연대류와 와류가 유도되고 결과적으로 국부 열전달계수가 증가하였다. Fig. 8은 상부 커버 안쪽 표면의 평균 열전달계수를 비교한 그래프를 보여준다. 눈에 띄는 점은 핀을 설치하였음에도 불구하고, 핀의 폭이 W 인 경우에는 핀의 높이와 관계없이 Base보다 낮은 평균 열전달

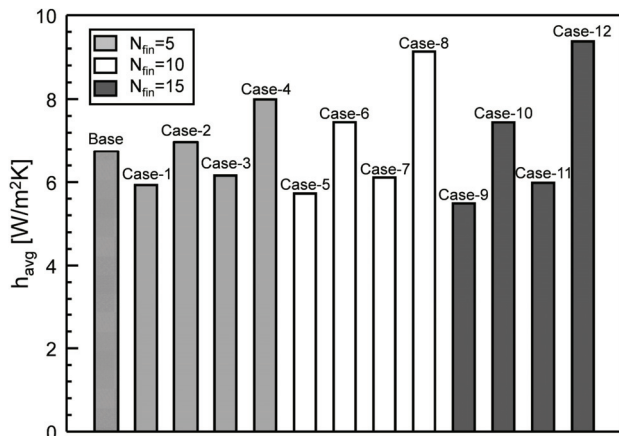


Fig. 8 Comparisons of average heat transfer coefficient on upper cover inner surface for Base and twelve configurations

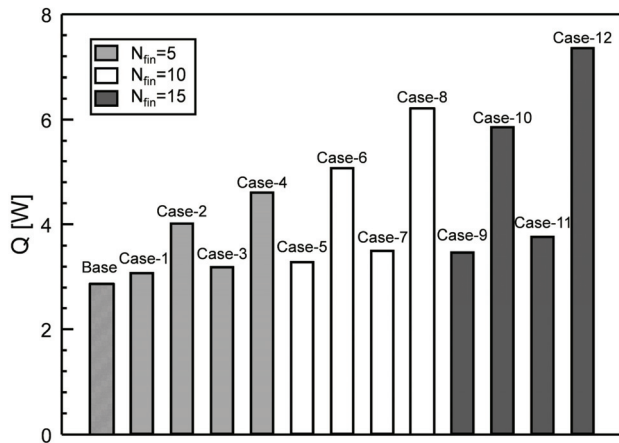


Fig. 9 Comparisons of total heat absorbed through upper cover inner surface for Base and twelve configurations

계수를 보인 점이다. 이는 핀 높이에 따른 측면 면적 증가 효과보다 핀 너비에 따른 윗면 면적 증가 효과가 더 크게 작용하여 평균 열전달계수가 Base보다 낮게 나타났기 때문이다. 반면, 너비가 2W인 조합(Case-2, Case-4, Case-6, Case-8, Case-10, 그리고 Case-12)은 모두 Base보다 높은 값을 보였다. 특히, 핀의 개수가 동일할 경우, $H_{fin} = 2H$, $W_{fin} = 2W$ 일 때 가장 높은 평균 열전달계수를 보였다. 핀 개수가 증가할 경우에는 평균 열전달계수가 전반적으로 상승하는 경향을 나타냈다. Fig. 9는 상부 커버가 흡수한 열량(Q)을 비교한 그래프를 보여준다. 핀이 설치된 모든 경우 상부 커버가 흡수한 열량이 Base보다 증가하였으며, 핀의 폭과 개수가 증가할수록 Base와의 차이가 증가하였다. Fig. 8에서 평균 열전달계수가 상대적으로 낮게 나타난 Case-1, Case-3, Case-5, Case-7, Case-9, 그리고 Case-11 또한 Base 대비 흡수한 열량이 증가함을 보여 핀이 방열량 증가

에 긍정적인 영향을 미침을 보였다. Case-12에서 흡수한 열량이 가장 크게 나타났으며, 핀의 폭과 개수가 증가함에 따라 방열량이 증가함을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 배터리 팩 모듈 상부 커버 내부의 자연대류 열전달 특성을 규명하기 위해 직사각형 핀의 높이와 폭, 그리고 개수에 따른 3차원 수치해석을 수행하였다. 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 핀의 크기가 증가할수록 핀 주변 유체의 온도구배 차이가 증가하였고, 이로 인해 핀 주변의 자연대류 및 와류가 강화되었다. 핀 개수가 증가함에 따라 핀 간격이 감소하여 핀 사이 영역에서 와류 유동이 증가하였다.
- 2) 핀의 개수가 증가함에 따라 핀 팁과 측면에서의 국부 열전달계수가 증가하였다. 하지만 핀의 폭이 좁은 경우(Case-1, Case-3, Case-5, Case-7, Case-8, 그리고 Case-11), 면적 증가로 인해 평균 열전달계수가 감소하였다.
- 3) 본 연구는 일정한 표면온도를 부여한 경계조건 하에서 자연대류 열전달 특성을 분석하였다. 향후에는 층·방전 프로파일 기반의 시간가변 열원을 도입하고, 셀-커버 접촉 열저항을 포함한 모델로 확장하여 실제 배터리 운전 조건에서의 열관리 성능을 평가하고자 한다.

후 기

이 연구는 2025년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(20013794)

References

- (1) Lyu, P., Liu, X., Qu, Jie., Zhao, J., Huo, Y., Qu, Z., and Rao, Z., 2020, "Recent advances of thermal safety of lithium ion battery for energy storage," Energy Storage Materials, Vol. 31, pp. 195-220.
- (2) Feng, X., Ren, D., He, X., and Ouyang, M., 2020, "Mitigating Thermal Runaway of Lithium-Ion Batteries," Joule, Vol. 4, No. 4, pp. 743-770.
- (3) Dialameh, L., Yaghoubi, M., and Abouali, O., 2008, "Natural convection from an array of horizontal rectangular thick fins with short length," Applied Thermal Engineering, Vol. 28, No. 17-18, pp. 2371-2379.
- (4) Ahmadi, M., Mostafavi, G., and Bahrami, M., 2014, "Natural convection from rectangular interrupted fins," International Journal of Thermal Sciences, Vol. 82, pp.

- 62-71.
- (5) Zhang, Z., Lau, E., Botting, C., and Bahrami, M., 2020, "Naturally cooled heat sinks for battery chargers," *Sensors*, Vol. 147, p. 118911.
- (6) Chang, S. W., Sadeghianjahromi, A., Sheu, W. J., and Wang, C. C., 2022, "Numerical study of oblique fins under natural convection with experimental validation," *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 179, p. 107668.
- (7) Hyun, S. B., and Kim, S. M., 2022, "Numerical Study on Natural Convection Heat Transfer Characteristics inside Battery Pack of Electric Vehicle," *The KSFM Journal of Fluid Machinery*, Vol. 25, No. 6, pp. 19-27.
- (8) Nikolov, N. I., Chabaz, A., Hildenbrand, F., Kateri, M., and Sauer, D. U., 2024, "Statistical investigation of temperature-dependent cycle lifetime and cell-to-cell variance in lithium-ion batteries: A model-based approach," *Journal of Power Sources*, Vol. 623, p. 235334.
- (9) Lemmon, E. W., Bell, I. H., Huber, M. L., and McLinden, M. O., 2018, "Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 10.0," National Institute of Standards and Technology, Standard Reference Database 23.
- (10) ANSYS Inc., ANSYS Fluent Theory Guide, Canons burg, PA: release 20.1, 2019.
- (11) Van Doormaal, J. P., and Raithby, G. D., 1984, "Enhancements of the SIMPLE method for predicting incompressible fluid flows," *Numerical Heat Transfer*, Vol. 7, No. 2, pp. 147-163.