

ESS(Energy Storage System) 열관리를 위한 액침 냉각 활용에 대한 수치해석 연구

Numerical Study on using Immersion Cooling for Thermal Management of ESS (Energy Storage System)

함정균(Jeonggyun Ham), 유나영(Nayoung You)*, 신명재(Myeongjae Shin)*,
조홍현(Honghyun Cho)**†

조선대학교 기계공학과 조교수, *조선대학교 기계공학과 박사과정, *조선대학교 기계공학과 석사과정,
**조선대학교 기계공학과 교수

Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Chosun University, Gwangju 61452, Korea

**Graduate Student, Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Chosun University, Gwangju 61452, Korea*

***Professor, Department of Mechanical Engineering, Chosun University, Gwangju 61452, Korea*

Abstract

The introduction of the sector coupling concept has expanded the scope of ESS utilization, resulting in the importance of thermal management of ESS. To ensure the safe use of the lithium-ion batteries that are used in ESS, it is important to use the batteries at the optimal temperature. To examine the utilization of liquid cooling in ESS, numerical study was conducted on the thermal characteristics of 21700 battery modules (16S2P array) during liquid cooling using Novec-649 as insulating fluid. The NTGK model, an MSMD model in ANSYS fluent, was used to investigate thermal characteristics on the battery modules with liquid immersion cooling. The results show that the final temperature of the battery module discharged at 5 C-rate is 68.9°C using natural convection and 48.3°C using liquid cooling. However, the temperature difference among cells in the battery module was up to 0.5°C when using natural convection cooling and 5.8°C when using liquid cooling, respectively, indicating that the temperature difference among cells was significantly increased when liquid cooling was used. As the mass flow rate increased from 0.01 kg/s to 0.05 kg/s, the average temperature of the battery module decreased from 48.3°C to 38.4°C, confirming that increasing the mass flow rate of the insulating fluid improves the performance of liquid immersion cooling. Although partial liquid immersion cooling has a high cooling performance compared to natural convection cooling, the temperature difference between modules was up to 8.9°C, indicating that the thermal stress of the battery cells increased.

Key words: Battery thermal management(배터리 열관리), Natural convection(자연대류), Energy storage system(에너지 저장 장치), Immersion cooling(액침 냉각), Partial immersion cooling(부분 액침 냉각)

†Corresponding author

E-mail: hhcho@chosun.ac.kr

접수일: 2024년 05월 10일; 심사일: 1차:2024년 05월 23일, 채택일: 2024년 5월 30일

기호 설명

$c_{p,b}$: 배터리의 정압비열 [J/kg·°C]

DOD	: 배터리 방전률 [%]
j_{Em}	: 전기화학반응에 의한 전류전송속도 [A]
k_b	: 배터리의 열전도도 [$W/m^{\circ}C$]
$Q_{nominal}$: 배터리 용량 [Ah]
Q_{ref}	: 배터리 정전류 방전실험에 사용된 배터리 용량 [Ah]
q_{Em}	: 배터리의 전기화학반응에 의해 발생된 발열량 [W/m^3]
U	: 배터리 전압특성 파라미터 [V]
T_b	: 배터리 온도 [K]
V	: 전압 [V]
Vol	: 체적 [m^3]
Y	: 배터리 전기전도도 특성 파라미터 [S/m^2]

그리스 문자

ρ_b	: 배터리의 밀도 [kg/m^3]
σ_+	: 양극의 유효 전기전도도 [S/m^2]
σ_-	: 음극의 유효 전기전도도 [S/m^2]
$\nabla\varphi_+$: 양극의 위상전위
$\nabla\varphi_-$: 음극의 위상전위

1. 서 론

인류문명에 있어 화석연료는 중요한 에너지원이다. 하지만 산업혁명 이후 인류의 에너지 소비량은 꾸준히 증가해 왔으며, 화석연료 사용의 부산물로서 지구온난화와 환경오염의 주원인인 온실가스의 배출 또한 증가해 왔다[1]. 급변하는 기후변화를 억제하기 위해 2015년 유엔 기후변화 회의 이후 전 세계적으로 온실가스 배출에 대한 환경규제는 강화되고 있으며, 기존 탄소 중심의 사회에서 탈피하기 위해 탄소중립(Net-Zero)을 선포, 이행하고자 하는 노력이 시도되고 있다[2]. 탈탄소를 이루기 위해서는 화석연료의 에너지 의존성을 줄여야 하므로 화석연료를 대체하기 위한 대안으로 재생에너지 발전이 주목받고 있으며, 산업 전반에 걸쳐 재생에너지 활용을 위한 시스템들이 점진적으로 도입되고 있다[3~5]. 하지만 재생에너지는 주변 환경에 민감하여 공급이 간헐적인 특징을 가진다. 재생에너지의 수요와 공급의 불일치를 보완하기 위해 섹터 커플링(Sector Coupling) 개념이 등장하였다. 섹터 커플링은 서로 다른 에너지를 통합하는 의미로 재생에너지의 잉여 전력을 다른 에너지로 저장, 활용하는 기술로 현재 P2H(Power to heat), P2G(Power to gas), P2M(Power to Mobility) 등으로 이용되고 있다[6]. 해당 기술은 재생에너지의 잉여 전력을 다른 형태로 변환해야 하므로 전기를 저장하는 ESS(Energy Storage System)는 섹터 커플링의 핵심 요소로 활용된다[7].

리튬이온 배터리는 높은 에너지 밀도, 높은 출력, 낮은 메모리 효과 및 긴 사이클 수명 등의 장점을 가져 ESS의 핵심 부품으로 널리 사용되고 있으며, 전기 자동차와 드론과 같은 미래 운송기기의 에너지원으로도 활용되고 있다. 리튬이온 배터리가 높은 열적 스트레스에 노출되면 열폭주로 인한 화재 문제가 발생한다. 그러므로 리튬이온 배터리가 안정적으로 성능을 발휘하기 위해서는 15~40°C의 작동 온도 범위에서 운전되어야 하며, 배터리의 온도 차는 5°C 이내를 형성해야 한다[8].

일반적으로 배터리 열관리 시스템(Battery thermal management system)은 공랭(Air cooling) [9, 10], 수랭(Liquid cooling) [10, 11], 상변화 냉각(Phase change cooling) [12, 13] 등을 기반으로 연구가 수행되어왔다.

Zang et al. [9]는 BTMS의 냉각성능을 향상을 위해 공랭식 보조 배출구와 배플을 추가하는 포괄적인 최적화 방식을 제안하였으며, 초기 Z-type BTMS(Battery thermal management system)와 비교하여 최적화 후 최대 온도(T_{max})와 최대 온도 차이(ΔT_{max})가 1.84°C (4.20%), 3.66°C (75%) 감소함을 보고하였다. Amosedinakaran et al. [10]는 배터리 팩의 온도를 낮추기 위해 직접 공랭식 시스템을 적용하였다. 그들은 냉각 공기 유량을 2 m/s에서 6 m/s로 증가함에 따라 배터리 팩의 온도가 낮아짐을 확인하였고, 냉각수 공기 흐름을 균일하게 전달하기 위한 설계 기준을 제안하였다. Liu et al. [11]는 미립화된 냉매액적을 가열체에 분사하여 열을 제거하는 분무 냉각 방법을 이용하여 배터리의 팩의 열관리 성능에 대한 영향성을 해석적으로 조사하였으며, 배터리 팩에 적용되는 분무 냉각의 최적화 방법을 제안하였다. PCM(Phase change material)은 상변화 과정을 통해 잠열을 흡수 또는 방출을 수행하고, 상변화 과정에서 PCM은 거의 일정한 온도를 유지하기 때문에 배터리의 온도 균일성 확보에 용이하다. 이에 Alghamdi et al. [12]과 Alghassab et al. [13]는 배터리 열관리를 위해 PCM의 활용성을 검토하였다. Alghamdi et al. [12]은 PCM의 단일 사용은 낮은 열전도도로 인해 배터리 온도가 최대 85°C 까지 도달하지만 PCM과 열전모듈을 함께 활용하면 배터리 평균 온도는 PCM만 사용할 때에 비해 최대 9°C 를 낮출 수 있음을 확인하였다. Alghassab et al. [13]는 리튬 이온 배터리의 냉각을 위해 금속 핀과 함께 PCM을 활용하는 방법을 조사하였으며 파라핀 왁스($0.242\text{ W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$)와 같은 전도성이 높은 PCM을 사용하면 열이 빠르게 분산되므로 핀 수의 변화가 영향을 최소화할 수 있음을 보고하였다.

배터리의 고속 충전 및 고 방전의 활용환경이 대두됨에 따라 배터리의 발열량 또한 증가하고 있어, 배터리의 열관리에 어려움을 겪고 있다. 액침 냉각(Immersion cooling)은 가열체를 전기가 통하지 않는 절연 유체에 침전시켜 냉각하는 냉각방법으로 공기순환을 통해 냉각하는 공랭식 냉각과 수랭으로 인해 냉각된 냉각판과 접촉을 통해 간접적으로 냉각을 수행하는 수랭식 냉각에 비해 우수한 냉각 성능을 가짐이 보고되고 있다[14]. Li et al. [15]은 강제순환식 액침 냉각에 의한 배터리 모듈 시스템의 열관리에 미치는 영향성에 대해 조사를 수행하였으며, 절연 유체의 유량이 높을수록 모듈이 온도 회복이 빨라지고 방전 후 전압 분포가 균일함을 확인하였다. Williams et al. [16]은 26650 LiFePO4 배터리 셀의 열관리를 위해 풀비드 환경에서 액침 냉각을 수행하였다. 그들은 4C-rate 이상의 충전 속도에서 최대 1.2°C 이내의 셀간 온도 차를 가짐이 확인되어 배터리 모듈이 열 균일성이 우수성을 언급하였다. Kim et al. [17]은 R134a를 절연 유체로 사용하여 1S16P로 구성된 21700 배터리 모듈의 단상 액침 냉각에 대해 연구하였다. 그들은 액침 냉각을 수행 시 배터리 셀 간 최대 온도차는 4.9°C 이내로 형성됨을 보고하였다.

이와 같이 ESS 또는 전기차 고속 충전과 같은 고발열 환경의 활용을 위해 액침 냉각 방법을 도입한 배터리 열관리 방법이 검토되고 있다. 하지만 배터리가 절연 유체에 전부 담가지면 다량의 절연 유체가 소요되며, 배터리 열관리 시스템의 중량 또한 증가하기 때문에 경제성 및 시스템의 중량적 측면에서 활용에 어려움이 있다. 이에 본 연구에서는 액침 냉각을 배터리 열관리 방법으로 사용하기에 앞서 액침 냉각의 성능과 부분 액침 냉각의 열적 영향성을 평가하기 위해 액침 냉각의 성능, 절연 유체 유량, 배터리 액침 수위에 따른 영향성을 해석적으로 검토하였다.

2. 해석 방법

본 연구에서는 배터리 액침 냉각의 특성을 해석적으로 조사하기 위해 액침 냉각을 사용하는 배터리 모듈을 설계하였다. Fig. 1은 액침 냉각 해석 개략도를 보여준다. 액침 냉각의 해석은 배터리 모듈을 포함하고 있는 챔버 내에 절연 유체가 일정 수위를 가지며 흐른다는 가정하에 수행되었다. 챔버의 크기는 $213 \times 109 \times 90\text{ mm}^3$ 이며, 입구와 출구는 챔버의 하부에 위치한다. 부분적으로 배터리가 액침 냉각이 이루어지는 경우 절연 유체와 공기의 계면이 생성되기 때문에 유체는 자유표면을 가지며 흐른다. 하지만 본 연구에서는 부분적으로 배터리가 액침 되는 경우 액침 수위가 일정하게 유지된다고 가정하에 해석을 수행하기에 절연 유체와 공기의 계면은 벽 조건으로 구분하여 해석을 수행하였다. 챔버 주변으로 열 전달을 고려하기 위해 챔버 주변의

온도와 대류 열전달계수는 20°C와 5 W/m²·°C 설정하여 해석을 수행하였다. 배터리 모듈은 21700 원형 배터리가 16S2P로 구성된다. 배터리가 절연 유체에 잠기는 높이는 배터리 셀의 액침비(배터리 액침 높이/배터리 셀 높이)를 정의하여 모델링하였다. 액침 냉각에 사용된 배터리 모듈의 상세재원은 Table 1과 같다.

본 해석은 상용 전산 유체 해석프로그램인 ANSYS Fluent를 이용하여 수행되었다. 배터리 셀의 발열 특성을 모사하기 위해 MSMD(Multi Scale Multi Domain) 모델을 사용하였다. MSMD 모델에서 배터리의 온도 및 전기적 특성은 Eq. (1)~(3)을 이용하여 계산된다[18].

$$\frac{\partial \rho_b C_{p,b} T}{\partial t} - \nabla \cdot (k_b \nabla T_b) = \sigma_+ |\nabla \varphi_+|^2 \varphi_- - |\nabla \varphi_-|^2 + \dot{q}_{Ech} + \dot{q}_{short} + \dot{q}_{abuse} \quad (1)$$

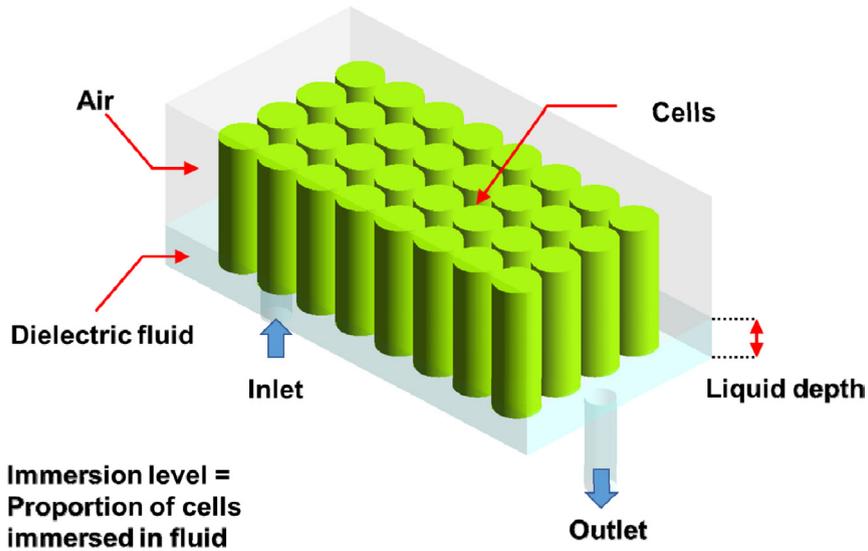


Fig. 1. Schematic of simulation model for immersion cooling.

Table 1. Specification of battery cells and module

Parameter	Specification	Parameter	Specification
Cell diameter [mm]	21	Cell height [mm]	70
Cell weight [g]	69.25	Nominal capacity [Ah]	4.85
Nominal voltage [V]	3.63	Chargecut off voltage [V]	4.2
Discharge cutoff voltage [V]	2.5	Cutoff current [mA]	50
Battery cell connection	16S2P		

$$\nabla \cdot (\sigma_+ \nabla \varphi_+) = -j_{Ech} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\sigma_- \nabla \varphi_-) = j_{Ech} \quad (3)$$

배터리의 발열 특성을 모사하기 위해 간이 전기화학반응 모델을 이용하였다. 간이 전기화학반응 모델은

배터리 전기전도도와 전압 특성을 기반으로 배터리 발열량을 예측하는 모델로 배터리 발열 특성을 모델링하는데 널리 사용된다. 간이 전기화학반응 모델은 Eq. (4)로 표현된다[18].

$$j_{Ech} = \frac{Q_{nominal}}{Q_{ref} Vol_b} Y(U - V) \quad (4)$$

피팅 파라미터 U와 Y는 배터리 잔여 용량을 표현하는 DOD(Depth of discharge)의 함수이며, U와 Y는 배터리를 정전류 방전 실험을 통해 구할 수 있다.

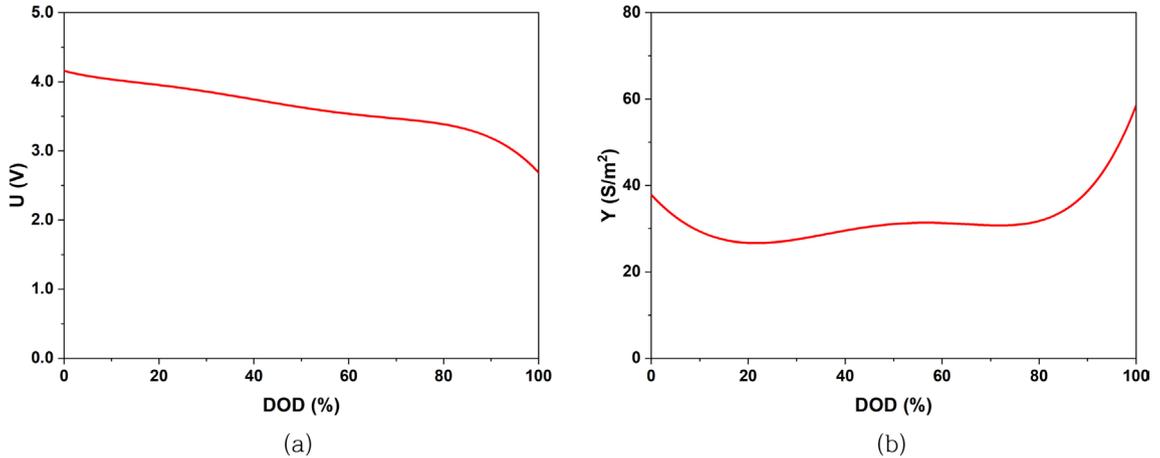


Fig. 2. Fitting curve of U and Y parameter according to DOD, (a) U parameter, (b).

Table 2. Coefficient of fitting function about U and Y parameter

Parameter	Order	Coefficient	Parameter	Order	Coefficient
U	0	4.15698	Y	0	3.670067
	1	-1.787613		1	-117.6572
	2	7.953208		2	385.8094
	3	-27.59018		3	-295.6795
	4	38.52444		4	-279.2029
	5	-1.857010	5	326.7414	

Fig. 2(a)와 (b)는 배터리 방전 실험을 통해 얻은 U와 Y 함수이며, Table 2에 U와 Y를 구성하는 피팅함수의 상수를 보여준다.

NTGK 모델에서 산출되는 전기화학적 반응에 의한 배터리 발열량, q_{Ech} 는 Eq. (5)로 표현된다[18].

$$q_{Ech} = j_{Ech} \left[(U - V) - T \frac{dU}{dT} \right] \quad (5)$$

배터리의 액침 냉각 해석에 사용된 절연 유체는 Novec-649 이다. Table 3은 해석에 사용된 배터리와

Novec-649의 주요 물성을 보여준다. Novec-649의 끓는 점은 49°C로 배터리의 높은 방전속도에서는 배터리 온도가 절연 유체인 Novec-649의 끓는 점보다 높게 형성되어 열전달 모드가 대류 열전달에서 비등 열전달로 전환될 수 있다. 이에 절연 유체의 체적 온도가 49°C 이하인 경우만 해석을 수행하였다. Table 4는 배터리 액침 냉각 영향성 평가를 위한 해석 조건을 보여준다.

Table 3. Properties of 21700 battery and Novec-649

Property	Battery active zone	Battery tab	Novec-649
Density (kg/m ³)	2525.5	8978	1603
Specific heat (J/kg·°C)	928.8+1.409T	381	1102
Thermal conductivity (W/m·°C)	Radial : 1.36 Tangential : 24 axial : 24	Radial : 1.36 Tangential : 24 axial : 24	0.05875
Viscosity (Pa·s)			0.0006288
Electrical conductivity (S/m)	3.541×10 ⁻⁷	1×10 ⁻⁷	

Table 4. Simulation conditions

Parameter	Value
Dielectric fluid	Novec-649
Liquid immersion level	0, 0.25, 0.5, 0.75, 1
Mass flow rate (kg/s)	0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05
Battery discharging rate (C-rate)	1, 3, 5
Inlet and initial temperature (°C)	20, 20

3. 해석 결과 및 고찰

Fig. 3은 자연대류 냉각과 액침 냉각을 활용 시 DOD에 따른 배터리 모듈의 평균 온도를 보여준다. 배터리의 평균 온도는 배터리 방전 속도가 1 C-rate에서 5 C-rate로 증가함에 따라 높게 나타났다. 이는 배터리의 방전 속도가 증가함에 따라 배터리의 발열량이 증가하였기 때문이다. 1 C-rate, 3 C-rate, 5 C-rate 조건에서 자연대류 냉각을 사용하면 배터리의 최종 평균 온도는 34.4°C, 51.7°C, 68.9°C로 계산되어 리튬이온 배터리의 안전 사용온도 범위인 15~40°C를 만족하지 못하는 것으로 확인되었다. 이는 자연대류 냉각의 대류 열전달계수가 낮아 배터리에서 발생한 열을 충분히 제거하지 못하고, 배터리에서 발생한 열이 축적되기 때문이다. 반면 액침 냉각을 사용하면 1 C-rate, 3 C-rate, 5 C-rate 조건에서 배터리의 최종 평균 온도는 26.4°C, 35.6°C, 48.3°C로 자연대류 냉각에 배터리 평균 온도는 낮게 형성되어 우수한 냉각성능을 가짐이 확인되었다. 이는 배터리를 둘러싼 절연 유체가 공기에 비해 높은 열용량을 가져 많은 열의 방출이 가능해지며, 액침 냉각은 절연 유체의 흐름으로 인해 배터리에서 발생한 열의 방출이 자연대류 냉각에 비해 용이하기 때문이다. 하지만 방전 속도가 5 C-rate의 경우 배터리의 평균 온도는 배터리 안전 운전 온도 범위를 만족시키지 못하였으며, 더욱 높은 방전 속도에서 배터리 온도를 안전 운전 온도 범위에서 형성시키기 위해서는 액침 냉각 시 절연 유체의 유량을 증가가 필요할 것으로 판단된다.

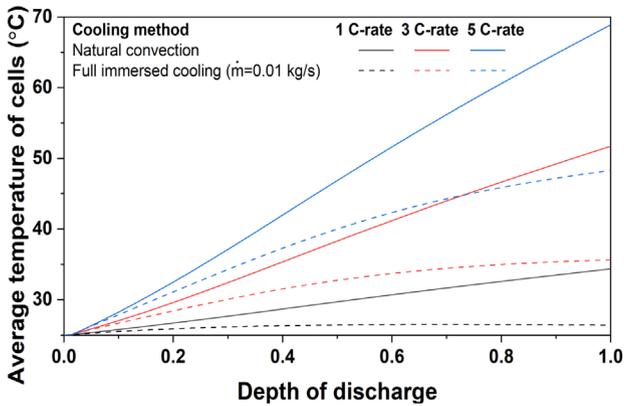


Fig. 3. Average temperature variation of cells in module with natural convection cooling and liquid immersion cooling.

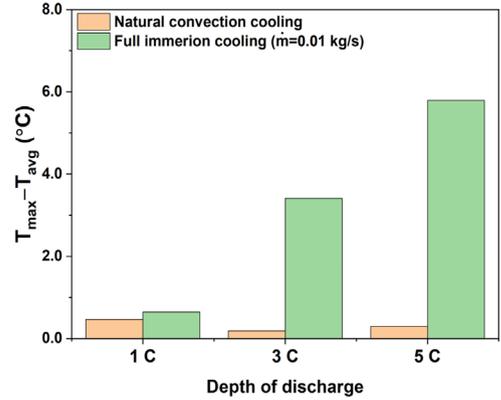


Fig. 4. Temperature difference of cells in battery module with natural convection and immersion cooling.

Fig. 4는 자연대류 냉각과 액침 냉각을 활용 시 배터리 모듈의 온도 차를 보여준다. 배터리 방전 속도가 1 C-rate에서 5 C-rate로 증가함에 따라 배터리 모듈 내 온도 차는 증가하였다. 자연대류 냉각을 사용하면 배터리 방전 속도가 1 C-rate에서 5 C-rate로 증가함에 따라 배터리 모듈의 최대온도와 평균 온도 차는 0.5°C 이내에서 형성되지만, 액침 냉각을 사용하면 배터리 모듈의 최대온도와 평균 온도 차는 0.6°C에서 5.8°C까지 증가하여 배터리 모듈 내 셀 간 온도 차가 두드러지게 나타났다. 이는 자연대류에 의한 열전달은 낮은 열전달 성능을 갖기 때문이다. 더욱이 배터리 모듈 내 공기가 밀폐되어 있으므로 배터리 주변 온도는 지속적으로 증가하여 배터리 모듈을 구성하는 셀 주변 열 환경이 비슷해졌기 때문에 배터리 모듈 내 셀들의 온도는 유사하게 나타났다. 반면 액침 냉각을 사용한 경우, 열이 절연유체로 방출되어 배터리 모듈 밖으로 이송되기 때문에 출구 측에 인접한 셀일수록 보다 높은 온도의 절연 유체와 열전달이 이루어져 배터리 모듈 간 온도 차는 증가한다. 액침 냉각을 높은 방전 속도에서 모듈 내 온도 차를 최소화하기 위해 절연 유체의 흐름 개선과 열용량 증대를 위한 유속 증가가 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 5는 방전 속도가 5 C-rate일 때 질량 유량별 방전율에 따른 배터리 모듈의 평균 온도를 보여준다. 질량

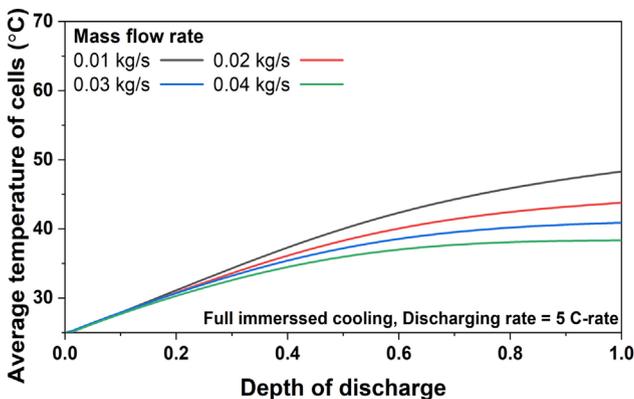


Fig. 5. Average temperature variation of cells in module liquid immersion cooling according to the mass flow rate.

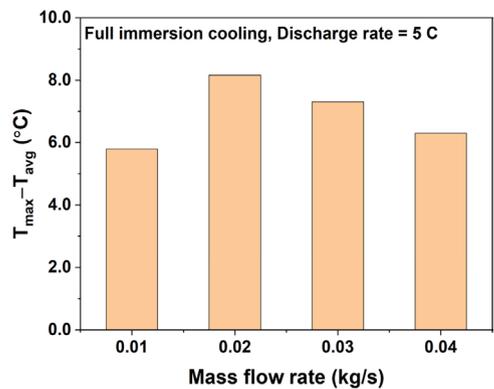


Fig. 6. Temperature difference of cells in battery module according to mass flow rate.

유량의 증가는 배터리 모듈의 평균 온도를 두드러지게 감소시킴이 확인되었다. 질량 유량이 0.01 kg/s에서 0.05 kg/s로 증가함에 따라 배터리 모듈의 최종 평균 온도는 48.3°C에서 38.4°C로 감소하였다. 이는 절연 유체의 질량 유량 증가가 난류 유발을 강화해 배터리와 절연 유체 간 대류 열전달이 향상되기 때문이다. 하지만 질량 유량의 증가는 배터리 모듈 내의 셀 간 온도 차의 증가에 영향을 주었다. Fig. 6은 방전 속도가 5 C-rate일 때 질량 유량별 배터리 모듈의 최대온도와 평균 온도 차를 보여준다. 질량 유량이 0.01 kg/s일 때 모듈 내 셀의 온도 차는 5.8°C로 가장 낮게 나타났지만 질량 유량이 0.02 kg/s에서 모듈의 배터리 모듈의 최대온도와 평균 온도 차는 8.2°C로 가장 높게 났으며, 그 이후 질량 유량이 증가함에 따라 셀 간 온도 차는 감소하였다. 이는 절연 유체가 배터리 모듈을 냉각하는 공간에서 유체의 흐름 변화가 미미한 데드존(Dead zone)이 발생하기 때문으로 판단된다. 배터리 모듈 내의 온도 차를 감소시키기 위해서는 액침 냉각 공간의 최적화가 필요하다.

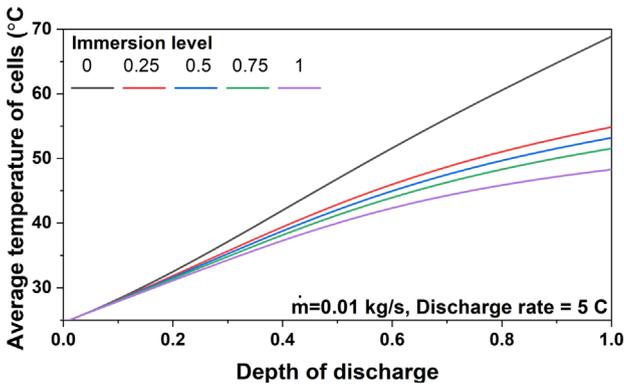


Fig. 7. Average temperature variation of cells in module liquid immersion cooling according to the immersion level.

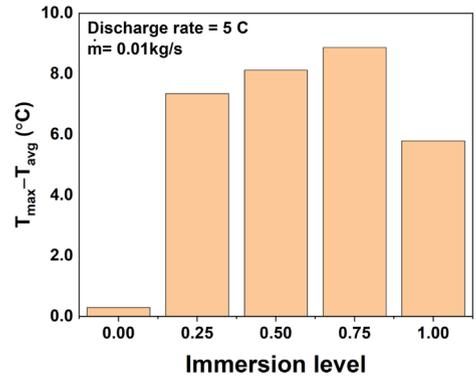


Fig. 8. Temperature difference of cells in battery module according to the immersion level.

Fig. 7은 배터리의 액침 수위에 따른 배터리 모듈 내 셀의 평균 온도를 보여준다. 배터리 액침 수위가 0에서 1로 증가함에 따라 배터리 셀의 평균 온도는 68.9°C에서 48.3°C로 감소하였다. 이는 액침 수위가 증가함에 따라 자연대류에 의한 배터리 냉각 면적이 감소하여 배터리의 발생 열 방출에 용이하기 때문이다. Fig. 8은 배터리 액침 수위에 따른 배터리 모듈 내 온도 차를 보여준다. 부분 액침 냉각은 자연대류 냉각에 비해 우수한 냉각성능을 갖지만, 배터리 모듈 내 온도 차를 유발하였다. 액침 수위가 0.75까지 증가함에 따라 배터리 모듈 내의 온도 차는 8.9°C까지 증가하였다. 부분 액침 냉각을 사용하는 경우 액침 여부에 따라 열전달 성능 차이가 크기 때문에 셀 간 온도 차 보다 셀에서의 온도 차가 두드러지게 나타났다. 이는 공기에 노출된 배터리 부위는 상대적으로 절연 유체에 노출된 배터리 부위에 비해 낮은 열전달 성능을 갖기 때문에 열 방출이 원활히 이루어지지 않아 액침 수위가 증가함에 따라 배터리 셀에서의 온도 차가 증가하였다. 배터리 셀 내의 온도 차는 배터리 성능저하 및 열폭주의 원인으로 주목받고 있다. 그러므로 배터리 냉각 방법으로 액침 냉각을 고려 시 부분 액침 냉각에 의한 셀에서의 온도 차를 감소시킬 방안이 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 배터리의 액침 냉각 활용성을 평가하기 위해 자연대류와 액침 냉각의 배터리 냉각 성능 비교, 절연 유체의 질량 유량 영향성, 부분 액침 냉각의 성능에 대해 수치해석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 액침 냉각은 자연대류 냉각에 비해 배터리 열관리에 효율적이지만 배터리 모듈 내 셀 간 온도 차의 경우 자연대류 냉각에 비해 크다.
- (2) 절연 유체의 질량 유량 증가는 액침 냉각에 의한 배터리 냉각성능을 향상시킨다. 배터리 모듈 내의 온도 차를 감소시키기 위해서는 액침 냉각 공간의 최적화가 필요하다.
- (3) 부분 액침 냉각을 배터리 냉각은 액침 수위가 감소함에 따라 배터리 냉각성능을 감소한다. 또한 부분 액침 냉각을 사용할 때 액침 여부에 따른 열전달 성능 차이가 크기 때문에 배터리 셀 내의 온도 차가 증가한다.

액침 냉각은 우수한 배터리 냉각성능을 갖지만, 안전한 온도 범위에서 배터리가 사용되기 위해서는 배터리 셀의 간극, 배열과 같은 주요 설계 변수에 대한 최적화 및 액침 냉각 메커니즘에 관한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

후 기

본 과제(결과물)는 2024년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다(과제관리번호: 2021RIS-002).

References

1. Hassan, A., Ilyas, S. Z., Jalil, A., and Ullah, Z., 2021, Monetization of the environmental damage caused by fossil fuels, *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 28, pp. 21204-21211.
2. Deshmukh, M., Sameeroddin, M., Abdul, D., and Sattar, M., 2023, Renewable energy in the 21st century: A review, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 80, pp. 1756-1759.
3. Parthiban, R., and Ponnambalam, P., 2022, An enhancement of the solar panel efficiency: a comprehensive review, *Frontiers in Energy Research*, Vol. 10, pp. 937155.
4. Hand, B., and Cashman, A. 2020, A review on the historical development of the lift-type vertical axis wind turbine: From onshore to offshore floating application, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 38, pp. 100646.
5. Zhang, X., 2021, Numerical study of geothermal district heating from a ground heat exchanger coupled with a heat pump system, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 185, pp. 116335.
6. Choi, C., 2024, 에너지 섹터커플링 기술을 활용한 P2X 유연자원화 기술, *The Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 73, No. 1, pp. 13-14.
7. Yi, Y., Zhou, Y., Su, H., Fang, C., Wang, H., Feng, D., and Li, H., 2023, Overview of EV battery testing and evaluation of EES systems located in EV charging station with PV, *Energy Reports*, Vol. 9, pp. 134-144.
8. Ji, H., Luo, T., Dai, L., He, Z., and Wang, Q., 2023, Topology design of cold plates for pouch battery thermal management considering heat distribution characteristics, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 224, pp. 119940.
9. Zang, F., Liu, P., He, Y., and Li, S., 2022, Cooling performance optimization of air cooling lithium-ion battery thermal management system based on multiple secondary outlets and baffle, *Journal of Energy Storage*, Vol. 52, pp. 104678.
10. Amosedinakaran, S., Kannan, R., Kannan, S., Ramkumar, A., Suresh, S., and Bhuvanesh, A., 2024, Performance Analysis for Battery Stability Improvement using Direct Air Cooling Mechanism for Electric Vehicles, *Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, pp. 100585.
11. Liu, X., Zhang, T., Gao, Q., Han, Z., Huang, H., Xu, Y., Chen, H., and Xu, X., 2024, The suppression of thermal propagation using spray cooling with R410A in overheated lithium battery pack, *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 58, pp. 104339.
12. Alghamdi, H., Farhan, M., Rosdi, M., Mukhtar, A., Yasir, A., and Alviz-Meza, A., 2023, Controlling thermal runaway by simultaneous use of thermoelectric module and phase change material in the lithium-ion batteries of

- electric vehicles, *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 52, pp. 103697.
13. Alghassab, M., 2024, Investigating the performance improvement of lithium-ion battery cooling process using copper fins and phase change materials (PCMs), *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 59, pp. 104473.
 14. Choi, H., Lee, H., Kim, J., and Lee, H., 2023, Hybrid single-phase immersion cooling structure for battery thermal management under fast-charging conditions, *Energy Conversion and Management*, Vol. 287, pp. 117053.
 15. Liu, Q., Liu, Y., Zhang, M., Wang, S., Li, W., Zhu, X., Ju, X., Xu., C., and Wei, B. 2024, Comprehensive investigation of the electro-thermal performance and heat transfer mechanism of battery system under forced flow immersion cooling, *Energy*, Vol. 298, pp. 131404
 16. Williams, N. P., Trimble, D., and O'Shaughnessy, S. M. 2024, An experimental investigation of liquid immersion cooling of a four cell lithium-ion battery module, *Journal of Energy Storage*, Vol. 86, pp. 111289.
 17. Kim, M., Ham, J., Shin, D., and Cho, H., 2022, Comparison of Cooling Performance in a Cylindrical Battery with Single-Phase Direct Contact Cooling under Various Operating Conditions, *Batteries*, Vol. 8, No. 10, pp. 195.
 18. Matsson, J., 2022, *An Introduction to ANSYS Fluent 2022*, Sdc Publications.