



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2024년 2월
석사학위 논문

액침냉각을 적용한 21700 배터리
모듈의 냉각특성 분석

조선대학교 대학원

기계공학과

유나영

액침냉각을 적용한 21700 배터리
모듈의 냉각특성 분석

Analysis of the Cooling Characteristics of a 21700 Battery
Module using Immersion Cooling

2024년 2월 23일

조선대학교 대학원

기계공학과

유나영

액침냉각을 적용한 21700 배터리 모듈의 냉각특성 분석

지도교수 조 홍 현

이 논문을 공학석사 학위 신청 논문으로 제출함

2023년 10월

조선대학교 대학원

기 계 공 학 과

유 나 영

Contents

Contents	i
List of Figure	iii
List of Table	vi
Nomenclature	vii
Abstract	xi
제 1 장 서론	1
제 1 절 연구 배경	1
제 2 절 기존 연구	5
제 3 절 연구 목적	9
제 2 장 해석 방법	11
제 1 절 배터리 해석을 위한 충·방전 실험	11
제 2 절 액침냉각 적용 배터리 모듈 형상 모델	16
제 3 절 배터리 모델링 및 NTGK 모델 추정	19
제 4 절 지배방정식 및 경계조건	23
제 5 절 격자 독립성 검증	26
제 3 장 실험 장치 및 실험 방법	28
제 1 절 배터리 액침냉각 실험 장치	28

제 2 절 실험방법 및 조건	42
제 3 절 성능 데이터 분석 기법	44
제 4 장 결과 및 고찰	46
제 1 절 해석 결과	46
1. 입·출구 위치 변화에 따른 성능 고찰	46
2. 작동유체 변화에 따른 성능 고찰	50
3. 셀 간격 변화에 따른 성능 고찰	56
4. C-rate 변화에 따른 성능 고찰	61
5. 작동유체의 질량유량 변화에 따른 성능 고찰	64
6. 운전변수에 따른 냉각성능 분석 및 온도식 개발	68
제 2 절 실험 결과	71
제 3 절 해석과 실험 결과에 대한 종합적 고찰	79
제 5 장 결론	82
참고문헌	85

List of Figure

Fig. 1.1	Global electric car stock	2
Fig. 1.2	Scheme of lithium-ion battery mechanism	3
Fig. 2.1	Battery charging and discharging experimental setup	12
Fig. 2.2	Battery discharge curve at different C-rate	14
Fig. 2.3	DOD vs voltage at different C-rate	15
Fig. 2.4	Immersion cooling battery models according to inlet and outlet locations	18
Fig. 2.5	Voltage characteristic and electric conductivity of battery	22
Fig. 2.6	Mesh design of battery immersion cooling model	27
Fig. 2.7	Grid independence test according to mesh elements	27
Fig. 3.1	Schematic diagram of experimental battery immersion cooling system	28
Fig. 3.2	Battery immersion cooling setup	30
Fig. 3.3	Battery holder	31
Fig. 3.4	BMS and circuit configuration of BMS	32
Fig. 3.5	Busbar configuration and BMS attachment location	33
Fig. 3.6	Location of thermocouple	34
Fig. 3.7	Bidirectional power supply unit	35
Fig. 3.8	T-type thermocouple	37
Fig. 3.9	Mass flow meter	37
Fig. 3.10	Heat exchanger	39
Fig. 3.11	Thermal constant bath	39
Fig. 3.12	DAQ	40
Fig. 3.13	Experimental setup of battery immersion cooling system	42
Fig. 4.1	Battery maximum temperature and temperature difference according to inlet/ outlet location and cell spacing	70
Fig. 4.2	Temperature distribution of battery modules with different inlet and outlet	

location	49
Fig. 4.3 Battery maximum temperature and temperature difference according to different working fluids	51
Fig. 4.4 Variations of heat transfer coefficient and Nusselt number according to different working fluid	53
Fig. 4.5 Prandtl number of different working fluids	54
Fig. 4.6 Pressure drop and pumping power according to different working fluids ..	54
Fig. 4.7 Variations of battery maximum and average temperature and temperature difference	57
Fig. 4.8 Velocity distribution of working fluid according to cell spacing	59
Fig. 4.9 Temperature distribution of battery according to cell spacing	60
Fig. 4.10 Total heat generated according to C-rate	62
Fig. 4.11 Maximum battery temperature according to C-rate without cooling	62
Fig. 4.12 Battery maximum temperature with cooling and temperature difference according to different C-rates	63
Fig. 4.13 Variations of battery maximum temperature and temperature difference according to mass flow rate	65
Fig. 4.14 HTC according to working fluid mass flow rate	67
Fig. 4.15 Pressure drop and pumping power according to mass flow rate	67
Fig. 4.16 Battery maximum temperature and temperature difference according to mass flow rate and cell spacing	69
Fig. 4.17 Scatter plot of cell spacing, C-rate and mass flow rate with maximum temperature and temperature difference	70
Fig. 4.18 Maximum temperature at different C-rates with different mass flow rate	72
Fig. 4.19 Temperature difference at different C-rates with different mass flow	74
Fig. 4.20 Temperature at different point of a cell	76
Fig. 4.21 Temperature at different cell position with time	76
Fig. 4.22 Average temperature according to mass flow rate	78

Fig. 4.23 Cooling capacity according to mass flow rate	78
Fig. 4.24 Comparison of experimental and simulation average temperature according to different mass flow rate	81
Fig. 4.25 Comparison of experimental and simulation temperature difference according to different mass flow rate	81

List of Table

Table 2.1	Parameters of the battery cell characteristics	12
Table 2.2	Battery cell charging and discharging experimental procedure	13
Table 2.3	Thermo-physical properties of battery	17
Table 2.4	Thermo-physical properties of immersion fluid	17
Table 3.1	Parameters of the battery module characteristics	31
Table 3.2	Specification of bidirectional power supply unit	35
Table 3.3	Specification of T-type thermocouple	36
Table 3.4	Specification of the mass flow meter	36
Table 3.5	Specification of the heat exchanger	38
Table 3.6	Specification of the thermal constant bath	38
Table 3.7	Specification of the DAQ	40
Table 3.8	Specification of the climatic chamber	41
Table 3.9	Battery module charging and discharging experimental procedure	43

Nomenclature

Roman symbol

$A_{wall.wf}$:	Area of working fluid [m ²]
$C_{b,p}$:	Specific heat of the battery [J/kg·°C]
$C_{p.wf}$:	Specific heat of the working fluid [J/kg·°C]
$D_{h.wf}$:	Hydraulic diameter [m]
G_b	:	Generation of turbulence kinetic energy due to buoyancy
G_k	:	Generation of turbulence kinetic energy due to the mean velocity gradients
g	:	Gravitational acceleration [m/s ²]
HTC_{wf}	:	Convective heat transfer coefficient of working fluid [W/m ² ·K]
j	:	Volumetric transfer current density [A]
\dot{j}_{ECh}	:	Volumetric current transfer rate due to electrochemical reaction [A]
\dot{j}_{short}	:	Volumetric current transfer rate during internal short circuit [A]
\dot{m}_{wf}	:	Mass flow rate of working fluid [kg/s]
N_{wf}	:	Nusselt number of working fluid
P	:	Pressure [Pa]
P_{pump}	:	Pumping power [W]
Pr	:	Prandtl number of working fluid

Q	:	Cooling capacity [W]
$Q_{nominal}$:	Battery total electrical capacity [Ah]
Q_{ref}	:	Battery capacity used in the experiments [Ah]
\dot{q}_{ECh}	:	Electrochemical volumetric heat source due to electrochemical reaction [J]
\dot{q}_{abuse}	:	Heat generation rate due to thermal runaway [J]
\dot{q}_{short}	:	Electrochemical volumetric heat source during internal short circuit [J]
Re	:	Reynolds number
S	:	Average tensor strain coefficient
$T_{avg.b.surface}$:	Average surface temperature of the battery [°C]
$T_{avg.bulk.wf}$:	Average temperature of working fluid [°C]
T_b	:	Temperature of the battery [°C]
$T_{bulk.in}$:	Inlet temperature of working fluid [°C]
$T_{bulk.out}$:	Outlet temperature of working fluid [°C]
U	:	Battery voltage characteristics [V]
u	:	X-direction fluid velocity [m/s]
V	:	Voltage [V]
Vol	:	Active zone's volume of a single battery [m ³]
ν_{wf}	:	Average velocity of working fluid [m/s]
w	:	Z-direction fluid velocity [m/s]
Y	:	Battery electrical conductivity [S/m ²]
Y_m	:	The contribution of the fluctuating dilatation in compressible turbulence to the overall dissipation rate

Greek symbol

ε	:	Turbulent dissipation rate [m^2/s^3]
k_b	:	Battery thermal conductivity [$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$]
k_{wf}	:	Thermal conductivity of working fluid [$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$]
σ_+	:	Electric conductivity for the positive electrodes [$1/\Omega$]
σ_-	:	Electric conductivity for the negative electrodes [$1/\Omega$]
φ_+	:	Phase potentials for the positive electrodes [V]
φ_-	:	Phase potentials for the negative electrodes [V]
ρ_b	:	Density of the battery [kg/m^3]
ρ_{wf}	:	Density of working fluid [kg/m^3]
μ	:	Dynamic fluid viscosity [$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$]
μ_t	:	Turbulent viscosity [$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$]
μ_{wf}	:	Viscosity of working fluid [$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$]
σ_k	:	Turbulent Prandtl number for k
σ_ε	:	Turbulent Prandtl number for ε
μ_k	:	Viscosity of turbulent kinetic energy [$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$]
ν	:	Kinematic fluid viscosity [m^2/s]

Abbreviations

BMS	:	Battery management system
CC	:	Constant current
CV	:	Constant voltage
DAQ	:	Data acquisition
DOD	:	Depth of discharge
EES	:	Engineering Equation Solver
GWP	:	Global Warming Potential
NTGK	:	Newman Tidedmann Gu and Kim
MSMD	:	Multi-Scale Multi-Dimensional
PCM	:	Phase change material
PID	:	Proportional-Integral-Differential controller

Abstract

Analysis of the cooling characteristics of a 21700 battery module using immersion cooling

Nayoung You

Advisor : Prof. Hongyun Cho, Ph.D.

Department of Mechanical Engineering,

Graduate School of Chosun University

Global energy consumption is increasing every year, and energy obtained through the combustion process of fossil fuels generates air pollutants such as oxides of nitrogen (NO_x), sulfur (SO_x), and carbon (CO_x), as well as greenhouse gases when used. It causes environmental pollution. Accordingly, interest in energy and environmental protection is increasing, and countries worldwide are declaring carbon neutrality and strengthening eco-friendly energy policies and regulations.

In the transportation field, the use of electric vehicles using batteries as a power source is being considered as an alternative to internal combustion engine vehicles that use fossil fuels as a power source. Lithium-ion batteries are the most widely used in electric and hybrid electric vehicles due to their high energy density, low self-discharge characteristics, near-zero memory effect, high open circuit voltage, and long cycle life. The development of lithium-ion batteries with high capacity and high energy density to improve the performance of electric vehicles is actively underway, which results in high battery heat generation. Lithium-ion batteries are very sensitive to temperature, so a battery thermal management system that can maintain the battery in an appropriate temperature range is essential for better performance and stability.

Immersion cooling is a method of cooling the battery by directly placing it in a dielectric fluid that does not conduct electricity and is attracting attention as a next-generation battery thermal management technique. There is no thermal contact resistance between the working fluid and the battery during the cooling process, thus it has high cooling efficiency. Additionally, the system design is simple, and many

dielectric fluids can prevent thermal runaway and extinguish cascading battery fires. Therefore, immersion cooling was applied to the thermal management of the 21700 cylindrical battery in this study. An analysis was performed on the immersion cooling of a 16S2P battery module considering the electrochemical heat generation of the battery using the MSMD Empirical model. The cooling performance of the inlet/outlet location and cell spacing of the battery cooling device was analyzed, and the battery heat generation characteristics and immersion cooling performance according to C-rate, immersion fluid, and immersion cooling performance according to mass flow rate changes were analyzed. In addition, a multiple regression analysis was conducted to analyze the influence of cell spacing, C-rate, and mass flow rate on the battery maximum temperature and temperature difference between cells. Using the result of a multiple regression analysis, an equation was derived to predict the maximum temperature and temperature difference of the battery. A 16S2P battery module immersion cooling experimental device was constructed and the cooling performance was analyzed using Novec 649. An immersion cooling experiment was conducted according to C-rate and mass flow rate using Novec 649. In addition, the simulation and experimental results were comparatively investigated.

As a result, the Z-type inlet/outlet location, Novec 649 working fluid, and 2 mm cell spacing were determined to be the most appropriate model. Based on this, simulation and experiments were conducted to analyze cooling performance. As a result, immersion cooling using Novec 649 showed excellent cooling performance, maintaining the maximum battery temperature below 45°C even during the 3 C-rate discharge process. In addition, the temperature between cells was relatively uniform, but due to structural simplification, a large temperature difference between cells occurred at high discharge rates. However, it is believed that this unfavorable temperature difference can be improved by changing the cooling system. Therefore, it is confirmed that immersion cooling is an excellent cooling method with better cooling performance and can ensure the stability of high-capacity and energy-density batteries that generate high heat.

Keyword : Lithium-ion battery(LIB), Battery thermal management system(BTMS), Immersion cooling, Dielectric fluid, Multi-Scale Multi-Dimensional(MSMD)

제 1 장 서 론

제 1 절 연구 배경

전 세계 에너지 소비량은 매년 증가하고 있으며, 다양한 연료 중 천연가스, 석유, 석탄의 사용이 가장 높은 비율을 차지하고 있다. 화석연료의 연소과정을 통해 얻어지는 에너지는 높은 에너지 밀도를 가지고 있으며, 사용에 용이하다는 장점을 가지고 있다. 따라서 산업혁명 이후 인류는 다양한 산업에서 화석연료를 지속해서 사용해 왔다. 하지만, 화석연료는 지속 불가능한 에너지원이며, 사용 시 질소산화물(NO_x), 황산화물(SO_x), 탄소산화물(CO_x) 등의 대기오염물질 및 온실가스 등을 발생시켜 환경오염을 유발시키고 지구온난화가 가속화되고 있다. 따라서 이러한 에너지 문제와 환경보호에 대한 관심이 증가하고 있으며, 오염물질의 배출량을 줄이고 지구온난화의 가속을 막기 위하여 세계 각국은 탄소중립 선언, 친환경 에너지 정책 및 규제 강화를 하고 있다.

이에 따라 온실가스 배출량의 1/4을 차지하고 있는 수송분야에서는 기존 내연기관을 동력원으로 사용하는 내연기관 자동차에서 배터리를 동력원으로 이용하는 전기자동차의 대체 사용으로 전환하고 있다 [1, 2]. 많은 자동차 제조업체는 지속해서 강화되는 내연기관의 배출가스 규제 정책 및 전기자동차 사용의 장점으로 인해 내연기관차에서 전기자동차로 관심을 돌리게 되었다 [3]. Fig. 1.1은 세계 전기자동차 재고를 보여준다. 전 세계 전기자동차 수는 매년 급증하고 있으며, 2021년 16.4만대로 2017년 대비 약 5배 증가하였다 [4]. 전기자동차는 기존 내연기관 자동차와 달리 석유 석탄을 사용하지 않아 운행 중 CO_x , NO_x , 탄화수소(HC), 입자성 물질(PM) 등을 배출하지 않는다. 배출가스가 발생하지 않는다는 점에서 전기자동차는 친환경 운송수단으로 주목받고 있지만, 전기자동차 보급을 위해서는 해결해야 할 많은 문제가 존재한다.

전기자동차는 낮은 주행거리, 긴 충전 시간, 배터리 열화 및 열폭주 등의 문제를 가지고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 고용량, 고에너지 밀도를 가지는 배터리 개발이 활발히 진행 중이다. 이러한 노력으로 짧은 주행거리는 많은 개선되었지만, 여전히 외기온도의 변화에 따라 주행거리가 감소하는 문제를 갖는다. 또한, 고속 충·방전을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만 고속 충·방전은 높은 발열을 발생시키게 된다. [5]. 이때 발생하는 발열을 적절히 관리하지 않을 경우 배터리 열폭주 현상이 일어날 수 있으며, 이는 차량 화재를 유발하여 인명 및 재산 피해를 발생시킨다. 따라서 높은 성능을 가지는 안전한 전기자동차 보급을 위해서는 배터리의 발열 특성에 대한 이해와 적절한 열관리가 필수적이다.

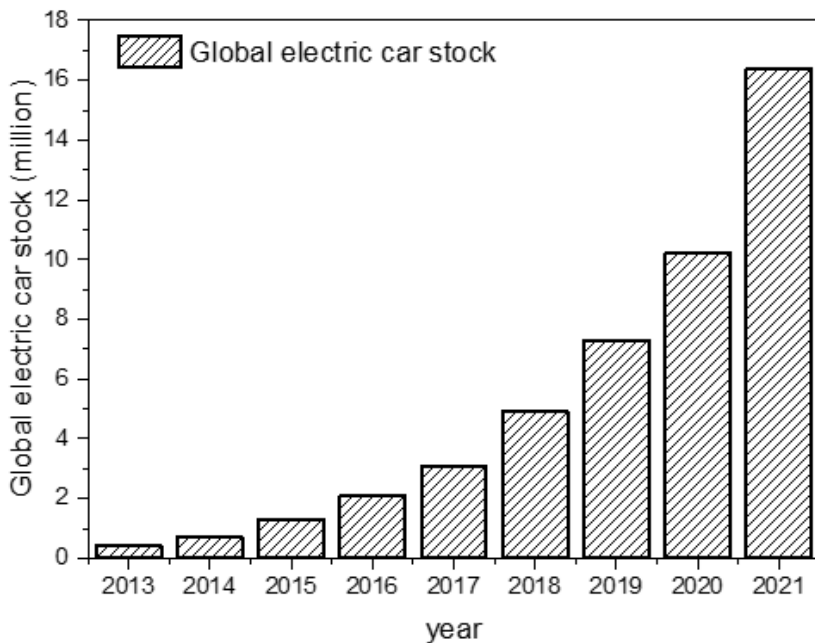


Fig. 1.1 Global electric car stock [4]

리튬이온배터리(Lithium-ion battery)는 높은 에너지 밀도, 낮은 자체 방전 특성, 거의 0에 가까운 메모리 효과, 높은 개방회로 전압 및 긴 사이클 수명으로 인해 전기자동차와 하이브리드 전기 자동차의 공급원으로 가장 많이 사용되고 있다 [6]. 리튬이온배터리는 양극, 음극, 분리막, 전해질로 구성되며, 양극과 음극의 전위차를 이용하여 산화, 환원 반응이 발생하여 충·방전을 한다 [7]. Fig. 1.2는 리튬이온배터리의 충·방전 원리를 보여준다. 충전 시 Li 이온은 분리막과 전해질을 통과하여 양극에서 음극으로 이동하며, 방전 시 Li 이온은 음극에서 양극으로 이동한다 [8]. 이러한 충·방전 과정에서 전기화학 반응, 부반응, 분극 및 내부 저항에서 각각 파생되는 반응열, 내부 분극 열 및 저항 열이 발생하게 된다 [9].

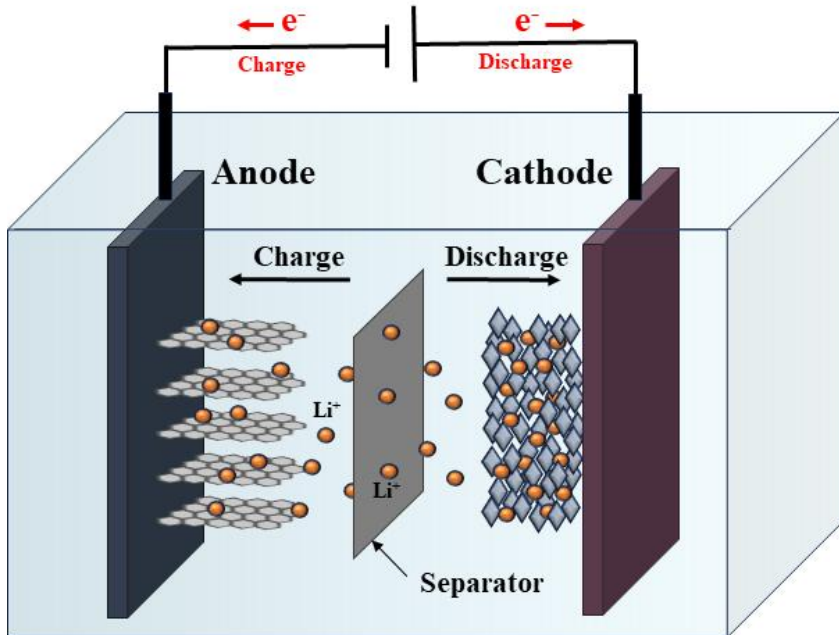


Fig. 1.2 Scheme of lithium-ion battery mechanism

리튬이온배터리의 성능과 안정성을 유지하기 위한 작동온도 범위는 매우 좁으며, 다양한 연구를 통해 20~45℃의 온도 범위에서 배터리가 작동해야 성능과 수명에 좋은 균형을 이룰 수 있는 것으로 밝혀졌다 [10, 11]. 배터리의 온도가 작동온도 범위보다 낮을 경우 전해질의 점도가 증가하여 이온 전도도가 감소하게 되고 이에 따라 화학반응이 느려진다. 또한, 상대적으로 낮은 온도에서 배터리 내부 저항은 증가하여 사용할 수 있는 셀의 용량 및 효율이 감소한다. 심각할 경우 리튬 덴드라이트가 형성되어 배터리 내부 단락을 유발하고 열 폭주 등 안전 문제를 일으킬 수 있다 [12, 13].

상온에서 리튬이온배터리 내부의 열 발생은 충·방전 과정 중 전하 이동 및 화학반응과 관련이 있다. 배터리의 지나치게 높은 작동온도는 배터리 소재의 파괴를 초래하여 용량 저하를 유발하며, 심각한 경우 열폭주 현상이 발생하게 된다 [14]. 열폭주는 더 많은 열을 방출하고 결과적으로 배터리 내부 온도 상승을 더욱 촉진한다. 이러한 통제되지 않은 열 발생이 배터리의 열 내구성을 초과하면 화재 및 폭발이 발생하게 된다. 또한, 전기자동차에 사용되는 배터리 팩은 일반적으로 다수의 배터리 셀로 구성되며 배터리마다 용량, 저항 등의 약간의 차이가 있어 온도분포가 다양하게 발생하게 된다. 그뿐만 아니라 배터리 냉각 과정에서 배터리 셀 간 온도 불균형이 발생하게 된다. 배터리 셀 간 온도 불균형은 배터리 모듈 전체의 에너지와 수명을 감소시킨다 [15]. 따라서 전기자동차의 사용량이 점차 증가하고 있는 상황에서 리튬이온배터리의 정상적인 작동과 화재 폭발의 위험 방지를 위해서는 배터리 열관리가 필수적이다.

제 2 절 기존 연구

배터리 열관리 시스템을 통해 리튬이온배터리의 열을 제거하여 작동온도를 조절하고, 셀 내부와 서로 다른 셀 사이의 온도를 균일하게 하려는 다양한 연구들이 진행되고 있다. 열관리시스템은 대표적으로 공기 냉각, 수냉식 냉각, PCM(Phase change material)을 이용한 냉각방식이 있다. 또한, 최근에는 히트파이프, 액침냉각 등 배터리 온도 관리를 위한 다양한 방법들이 시도되고 있다.

먼저 공기 냉각 방식은 공기를 열전달 매체로 사용하여 대류 열전달을 통해 셀에서 생성된 열을 흡수하여 제거하는 방식이다 [16]. 공기 냉각 방식은 냉각 루프가 필요 없어 구조가 간단하고 유지 관리 비용이 적다. 또한 냉각시스템의 무게가 가볍다는 장점이 있어 배터리 열관리 시스템의 초기부터 많이 사용되고 있다 [17, 18]. 하지만 공기 냉각 방식의 경우 전기자동차를 주행하는 주위온도에 많은 영향을 받는다 [19]. 또한, 낮은 열용량과 공기의 낮은 열전도도로 인해 냉각성능이 제한적이다. 따라서 높은 C-rate에서는 충분한 냉각을 시키지 못하며, 공기 냉각 구조 최적화를 위한 다양한 연구들이 진행되었다 [20]. Kai et al. [21]은 공기 냉각 방식을 적용한 배터리 팩의 셀 간격 분포를 설계하여 냉각시스템 효율이 향상했다. 실험결과 기존 냉각 방식과 비교하여 최적화된 냉각 방식은 최대온도를 약 4K 감소시켰으며, 흡입 공기 유량을 변경하여 최대 셀 온도 차이를 69% 이상 감소시켰다. Li et al. [22]는 공기 냉각 시스템이 차지하는 용량과 냉각성능을 혼합한 효율적인 공기 냉각 시스템을 설계하였다. 공기 냉각 방식 배터리 설계, 전산유체역학 코드 설계, 실험설계, 대리모델 선정평가의 4단계로 최적화 방법을 진행하였다. 최적화된 모델의 부피는 기존 모델 대비 34.2% 감소하였으며, 셀의 최대온도차는 8.53K에서 4.1K로 약 52% 감소하였다.

액체 냉각 방식 중 가장 많이 사용되는 냉각방식은 수냉식 냉각 방식이며, 냉각판을 이용하여 배터리 냉각시키는 간접접촉 냉각 방식이다. 이때, 냉각판에 가장 많이 사용되는 작동유체는 물/에틸렌글리콜을 혼합한 냉각수이다. 수냉식 냉각은 공기 냉각 방식보다 더 높은 열전달계수로 인하여 더 높은 냉각 성능을 가진다. Dafen et al. [23]은 공기 냉각 방식과 수냉식 냉각 방식을 비교하였다. 그 결과 거의 동일한 유량에서 수냉식 냉각 방식을 적용한 배터리의 최대온도가 약 4℃ 정도 낮았다. 또한, 동일한 온도로 유지하기 위하여 사용되는 에너지는 수냉식 냉각 방

식이 훨씬 높았다. Mohsen et al. [24]은 12개의 각형 배터리로 구성된 48 V 배터리 모듈을 이용하여 공기 냉각과 수냉식 냉각의 냉각성능을 비교하였다. 2 C-rate의 방전과정에서 동일한 전력소비에서 수냉식 냉각 방식이 더 우수한 냉각성능을 보였다. 또한, 0.5 W의 전력 소비에서 수냉식 냉각이 공기 냉각보다 약 3°C 낮았다. 수냉식 냉각 방식은 최근 전기자동차에 가장 많이 사용되고 있는 방식이기 때문에 냉각성능 향상을 위한 다양한 연구들이 꾸준히 진행되고 있다. Jin et al. [25]은 압력강하를 최소화하면서 기존 채널의 성능을 향상시키기 위해 기존 직선채널 설계의 직선 핀을 가로지르는 경사 핀 배열을 형성하였다. 경사핀의 각도와 너비를 최적화하였으며, 그 결과 220 W, 1240 W의 열 부하에 대해 각각 0.1, 0.9 L/min의 낮은 유량에서 표면온도를 50°C 이하로 유지하였다. Aikun et al. [26]은 미니채널을 이용한 수냉식 냉각의 최적화 해석을 수행하였다. 설계된 냉각 구조 중 배터리 모듈의 하단과 양면 모두 냉각판을 배치한 구조가 가장 높은 냉각성능을 나타냈으며, 모듈 하단부분만 냉각한 구조보다 최대온도가 11.5°C 낮았다. 수냉식 냉각을 적용한 냉각 방식의 경우 냉각성능이 우수하지만 배터리에서 발생하는 발열은 냉각판에 전도되고 냉각수는 냉각판의 채널을 통해 전도된 열을 제거하게 된다. 따라서 냉각판과 배터리 표면 사이의 접촉저항은 열전달을 저하시키게 된다. 또한, 우수한 냉각성능을 위해서는 냉각판 채널의 설계가 필수적이라는 번거로움이 있다.

PCM을 이용한 냉각방식은 냉각 과정에서 배터리의 발열로 인해 PCM이 상변화 함으로서 잠열을 이용하여 높은 냉각성능을 달성할 수 있다. 또한, 다른 냉각방식과 비교하여 추가적인 구성 요소를 필요로 하지 않아 에너지 소비가 적다. PCM은 높은 잠열 저장용량, 안정성의 장점을 가지고 있지만, 열전도율이 낮기 때문에 열저장 및 방출 속도가 느리다. 따라서 다양한 연구들이 PCM과 다른 냉각 방식을 결합한 하이브리드 냉각방식을 적용하고 있다 [27, 28]. Bin et al. [29]은 PCM과 수냉식 냉각 방식이 결합된 하이브리드 냉각 시스템을 설계하여 냉각성능을 해석적으로 분석하였다. 해석결과 최대온도는 PCM의 물리적 변수에 의해 결정되며, 온도차이는 냉각판에 흐르는 물의 흐름방향이 지배적인 역할을 하였다. Qin et al. [30]은 공기냉각과 PCM 냉각을 결합한 하이브리드 냉각 시스템을 제안하였다. PCM은 Paraffin을 사용하였으며, 4 C-rate 방전 조건에서 배터리 최대온도는 40.9°C였다. 또한, 셀 간 온도차이는 3.7°C로 적정 온도 범위 내로 제어되었다. Kong et al. [31]은 PCM과 수냉식 냉각 방식을 결합한 냉각방식을 제안하였다. 3 C-rate 방전 후 0.5 C-rate 충전을 수행하는 사이클에서 셀 간 간격, 셀 간 거리, 채널 수 및 냉각수 속

도와 같은 요소에 대한 냉각성을 해석적으로 고찰하였다. 최적화된 설계 모델의 해석 결과 주변 온도 30°C에서 3 C-rate 방전 후 최대온도 41.1°C, 셀 간 온도차이 4°C를 유지하는 우수한 열 성능을 나타냈다. 또한 0.5 C-rate 충전과정에서 액체 냉각에 의해 상변화 물질의 잠열도 회수되었다.

히트파이프는 기체-액체 상변화 원리를 바탕으로 한 효율적인 열교환 장치이며, 열전도도가 매우 높아 다양한 분야에서 사용되고 있다. 하지만 히트파이프 자체는 열전도 요소이기 때문에 히트파이프의 응축부에 2차적인 냉각 방식이 필요로 하며, 이는 냉각시스템의 비용과 부피 상승을 초래한다 [32]. Jianquin et al. [33]는 원통형 배터리 모듈에 히트파이프를 적용하기 위하여 구조적 매개변수의 영향성을 분석하였다. 구조적 설계변수는 배터리 간격, 전도체 두께, 배터리와 전도체 사이의 원주각도, 전도체 높이이다. 전도체의 높이는 배터리 모듈의 최대온도와 온도차이에 가장 큰 영향을 미쳤으며, 가장 높은 열 성능을 나타내는 최적화 모델은 배터리 간격 19 mm, 전도체 두께 4 mm, 원주 각도 120°, 전도체 높이 60 mm였다. 해당 조건에서 배터리 모듈의 최대온도와 온도차이는 각각 27.6°C, 1.08°C로 나타났다. Yunhua et al. [34]은 수냉식 냉각과 히트파이프를 결합한 냉각을 진행하였으며, 냉각수 유량, 히트파이프 응축부의 길이, 알루미늄 슬리브의 높이가 냉각성능에 미치는 영향을 수치적으로 분석하였다. 냉각수 유량은 배터리 최대온도에 큰 영향을 미치지만, 온도 균일성에 대한 영향성은 적었다. 2 C-rate 방전 시 냉각수 유량 0.5 L/min이 적합했다. 히트파이프 응축부의 길이와 알루미늄 슬리브의 높이는 길수록 배터리의 최대온도가 감소하고 온도 균일성이 향상됐다. 알루미늄 슬리브의 길이가 60 mm 이상일 경우 배터리 팩의 온도차이가 5°C 미만으로 유지할 수 있었다.

액침냉각은 배터리를 전기가 통하지 않는 유전체 유체에 직접 넣어 냉각시키는 방식으로 차세대 배터리 열관리 기술로 각광받고 있다. 냉각 과정에서 작동유체와 배터리 사이의 열 접촉 저항이 없으므로 높은 냉각효율을 갖는다 [35]. 또한, 시스템 설계가 단순하다는 장점이 있으며, 많은 유전체 유체는 열폭주를 방지하여 계단식으로 폭주하는 배터리의 화재를 진압할 수 있다. Wu et al. [36]은 공칭전압이 100.8 V인 리튬이온배터리 모듈에 Silicone oil을 사용하는 액침냉각 시스템을 설계, 제작 및 실험적으로 평가하였다. 실험결과 1 C-rate 방전 동안 온도 상승이 13°C를 초과하지 않았으며, 온도차이 또한 8.8°C 미만을 유지했다. Jithin et al. [37]은 4S1P 구조의 배터리에 액침냉각을 적용하였으며, 세 가지 유체에 대한 냉각성능을 비교하였다. 1, 2, 3 C-rate 방전의 다양한 질량유량에 대한 배터리 특성을 조사하였다.

액침냉각의 우수한 온도 균일성은 높은 방전조건의 리튬이온배터리 냉각에 적합하였다. Li et al. [38]은 높은 C-rate에서 SF33을 이용한 액침냉각이 18650 배터리 열 관리에 대한 영향성을 분석하였다. 실험결과 SF33을 이용한 액침냉각이 공기 냉각 방식에 비해 더 높은 열 제거 성능을 제공하며, 4 C-rate 방전에서 공기 냉각 방식은 14.06℃ 증가하는 반면 SF33은 4.97℃ 증가하였다. 또한 매우 높은 C-rate인 7 C-rate 방전 조건에서도 상변화 열전달을 이용하여 배터리 온도를 34.5℃로 제어하였다. Satyanarayana et al [39]는 공기 냉각 방식과 Mineral oil과 Therminol oil을 이용한 액침냉각 방식에 대한 비교를 진행했다. 3 C-rate 방전에서 공기 냉각, Mineral oil, Therminol oil을 이용한 냉각방식이 각각 최대 48.8%, 49.2%, 51.5% 감소하여, Therminol oil이 가장 높은 냉각성능을 갖음을 확인하였다. 이처럼 액침 냉각은 높은 냉각방식을 가지고 있지만, 높은 유체 비용 문제와 시스템 수명 이점에 대한 불확실성으로 인해 아직 산업 규모에서 널리 사용되지 않고 있다.

제 3 절 연구 목적

앞 절에서 리튬이온배터리의 열관리 필요성에 대한 내용을 설명하였으며, 다양한 냉각 방식들을 소개하였다. 냉각방식에 대한 기존 연구들을 정리하면 공기 냉각 방식은 간단하고 비용이 저렴하지만, 냉각성능이 낮다. 수냉식 냉각 방식은 높은 냉각성능과 작은 운전 에너지 소비라는 특성을 가지고 있지만, 시스템 무게가 무겁고 밀봉 기준이 엄격하다. PCM 방식은 고효율, 낮은 에너지 소비, 높은 온도 균일성을 가지지만, 낮은 열전달계수, 기계적 특성을 가지고 있다. 또한, 히트파이프의 경우 높은 열전달로 발열을 빠르게 제거할 수 있지만, 응축을 위해서는 추가적인 냉각장치가 필요하여, 다른 냉각방식과 결합하여 사용되어야 한다 [40]. 마지막으로 액침냉각은 배터리와 냉각 유체가 직접 접촉하고 있어 높은 냉각성능을 가지지만 적용가능성의 불확실성으로 인해 산업에서 많이 사용되고 있지 않다.

리튬이온배터리는 배터리의 형태 및 사용 용량에 따라 적절한 냉각방식을 적용하여 사용해야 한다. 리튬이온배터리는 형태에 따라 원통형, 각형, 파우치형 배터리로 나눌 수 있다. 이 중 원통형 배터리는 기계적 강성이 우수한 원통형 금속 캔 내부에 양극, 음극, 전해질, 분리막 등이 층상으로 말려있는 구조로 되어 있다 [41]. 원통형 배터리는 크기가 규격화되어 있으며, 적은 변형, 많은 재료 공정을 통한 일관성 및 긴 수명, 직병렬 조합에 높은 적응력을 가지고 있다 [42]. 따라서 본 연구에서는 다양한 장점이 있는 원통형 배터리 냉각시스템을 설계하여 냉각성능을 분석하고자 하였다.

앞서 설명한 냉각방식 중 가장 많이 사용되고 있는 냉각 방식은 수냉식 냉각 방식이다. 하지만 원통형 배터리에 수냉식 냉각 방식을 적용하는 것은 형상 측면에서 불리하다. 평평한 상부 또는 하부에 수냉식 냉각을 적용하게 되면 배터리와 냉각판 사이의 접촉 면적이 작고, 접촉 면적이 비교적 넓은 측면을 냉각하기 위해서는 굴곡진 면을 냉각해야 한다. 또한, 냉각판 설계의 복잡성과 간접접촉을 통한 접촉저항을 고려해야 하며, 냉각판은 배터리 표면 전체를 둘러싸지 않고 특정 면만 접촉하기 때문에 단일 셀의 열 방출을 균일하게 만들지 않는다. 따라서 원통형배터리의 접촉면적을 향상시키면서 높은 냉각성능을 달성하기 위한 최적의 대안은 액침냉각을 적용하는 것이다. 액침냉각은 수냉식 냉각보다 전력과 공간을 더 적게 사용하면서 높은 냉각용량을 제공할 수 있지만, 액침냉각에 대한 연구는 수냉식 냉각

방식에 비해 매우 적게 연구되었다 [37].

따라서 본 연구에서는 21700 원통형 배터리의 열관리를 위하여 액침냉각을 적용하여 배터리의 냉각성능을 고찰하였다. 우선 배터리 발열 특성을 고려한 해석을 수행하기 위하여, 배터리 단일 셀 실험을 수행하였다. 실험 결과를 기반으로 MSMD NTGK Empirical 모델을 이용하여 16S2P 구조의 배터리 모듈의 발열특성을 구현하였다. 해석을 통해 배터리 냉각장치의 입·출구 위치와 셀 간격에 대한 냉각 성능에 대한 분석을 진행하였으며, C-rate에 따른 배터리 발열 특성 및 액침냉각 성능, 액침유체, 질량유량 변경에 따른 액침냉각 성능을 분석하였다. 또한 셀 간격, C-rate, 질량유량이 배터리 최대온도 및 셀 간 온도차이에 미치는 영향성을 분석하기 위하여 다중회기분석을 진행하였으며, 해당 범위에서 셀 간격, C-rate, 작동유체의 질량유량에 따른 배터리의 최대온도 및 온도차이를 예측할 수 있는 식을 도출하였다. 실험적으로 냉각 성능을 고찰하기 위하여 16S2P 배터리 모듈 액침냉각 실험 장치를 구축하였다. Novec 649를 이용한 액침냉각 실험을 진행하였으며 C-rate, 질량유량에 따른 액침냉각 성능에 대한 분석을 진행하였다. 또한, 해석과 실험결과에 대한 비교 분석을 진행하였다. 본 연구의 결과를 활용하여 액침냉각을 실제 전기자동차 냉각방식으로의 활용 가능성을 확대시키고, 고용량, 고에너지 밀도를 가지는 배터리의 발열을 관리할 수 있는 높은 냉각 성능을 가지는 배터리 열관리시스템 개발에 기여할 것으로 기대된다.

제 2 장 해석 방법

본 절에서는 액침냉각을 적용한 배터리 모듈의 냉각성능을 분석하기 위한 해석 방법을 제시하였다. 배터리 해석에 요구되는 배터리 실험 결과를 얻기 위한 단일 셀 실험, 해석 형상 모델, 해석 개념의 세부 사항, 경계조건 및 지배방정식, 해석의 정확성을 위한 격자의 독립성 평가 등은 다음 장에서 자세히 설명하였다.

제 1 절 배터리 해석을 위한 충·방전 실험

배터리는 각 분자, 전극, 셀, 모듈, 팩 단계별로 길이 규모가 다른 Multi domain 으로 구성되어 있다. 물리적 현상은 원자 변화부터 배터리 팩 단위의 열전달에 이르기까지 광범위한 시간과 길이 규모에 걸쳐 발생하기 때문에 다양한 현상들이 어떻게 관련되어 있는지 이해하는 것이 중요하다. 또한, 유동, 열, 전기 및 화학반응이 복합적으로 발생하는 다중 물리학에 대한 문제를 해결해야 한다 [43]. 따라서 본 연구에서는 배터리 해석을 위해 ANSYS FLUENT 2022 R2의 Multi-Scale Multi-Dimensional (MSMD) model을 사용하였고 전기화학 반응을 고려하기 위한 해석 하위 모델로써 NTGK (Newman Tiedmann Gu and Kim) Empirical을 사용하였다. 본 모델은 실제 배터리의 DOD(Depth of discharge)에 따른 전압특성 곡선이 필요하다. 이를 위하여 해석을 수행하기 전에 배터리 충·방전 실험을 진행하였다.

Fig. 2.1은 단일 셀 충·방전 실험장치를 보여준다. 3개의 배터리를 배터리 충·방전장치(BTS-4000, Neware, China)를 이용하여 실험을 진행하였으며, 각 실험마다 3번의 반복실험을 하여 평균값을 사용하였다. 실험에 사용된 배터리(21700 M50T, LG, Korea)이며, 배터리 특성은 Table 2.1에 제시하였다. 배터리 실험동안 외기온도는 25°C로 유지하였으며, 1, 1.5, 2 C-rate 방전속도에 대한 방전 실험을 진행하였다.



Fig. 2.1 Battery charging and discharging experimental setup

Table 2.1 Parameters of the battery cell characteristics

Parameter	Specification
Diameter (mm)	21
Height (mm)	70
Weight (g)	69.25
Nominal capacity (Ah)	5
Nominal voltage (V)	3.63
Charge cut-off voltage (V)	4.2
Discharge cut-off voltage (V)	2.5
Cut-off current (mA)	50

Table 2.2는 배터리 충·방전 실험과정을 보여준다. 방전 실험을 진행하기 전에 배터리가 가지고 있던 잔류 전압을 Cut-off 전압까지 방전시켰다. 방전은 CC(Constant current)로 진행하며, 차단전류는 2.5V이다. 방전은 1, 1.5, 2 C-rate일 때, 각각 5, 7.5, 10 A의 전류를 가하였다. 그 후 충분한 휴식시간을 준 뒤 다시 배터리를 CC-CV(Constant current-constant voltage)로 충전을 하였다. 충전은 항상 1 C-rate로 진행하였으며, 5 A로 CC 충전 후 충전 차단 전압인 4.2 V에 도달하게 되면 CV로 충전하는 방식이다. 그 후 다시 차단 전압으로 방전하였고, 휴식을 준 뒤 앞선 과정을 3번 반복하여 실험하였다.

Table 2.2 Battery cell charging and discharging experimental procedure

Step	Step Time (hh:mm:ss)	Voltage (V)	Current (A) (1/1.5/2 C-rate)	Cut-off voltage (V)	Cut-off current (A)
Rest	00:00:05				
Discharging			5/7.5/10	2.5	
Rest	01:30:00				
Charging		4.2	5		0.05
rest	01:30:00				
Discharging			5/7.5/10	2.5	
Rest	01:30:00				

Fig 2.2는 서로 다른 C-rate에 따른 배터리의 방전곡선을 보여준다. 해석에 필요한 결과는 DOD에 따른 전압곡선이기 때문에 Fig 2.3과 같이 DOD에 따른 전압곡선을 얻었다. 이때, DOD(Depth of discharge)는 식 (2.1)을 통해 계산하였다 [44].

$$DOD = \frac{Vol}{3600Q_{nominal}} \int_0^t j dt \quad (2.1)$$

여기서 Vol 은 배터리 활성영역의 체적이며, $Q_{nominal}$ 배터리 정격용량이다. 또한, j 는 체적 전달 전류 밀도이다.

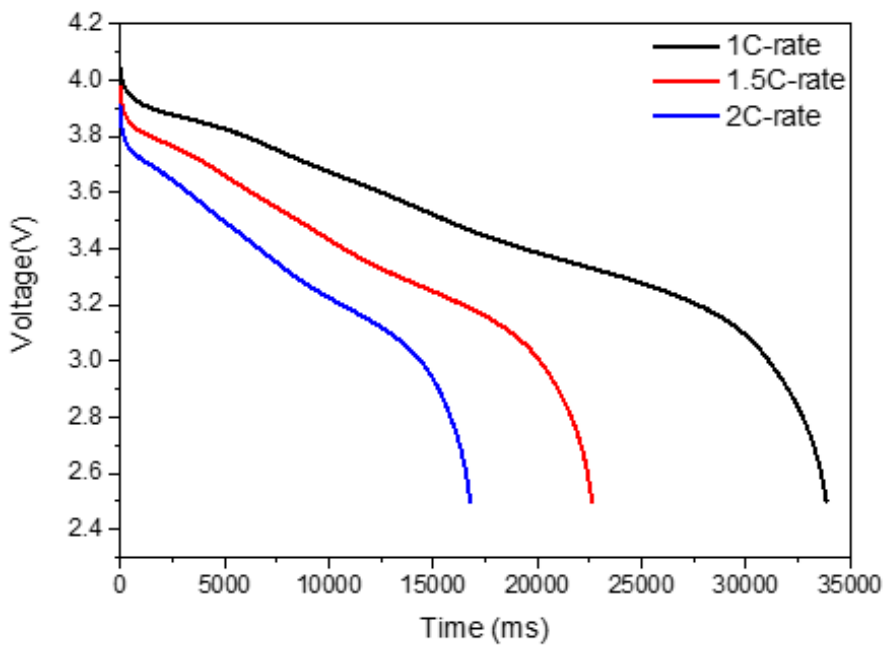
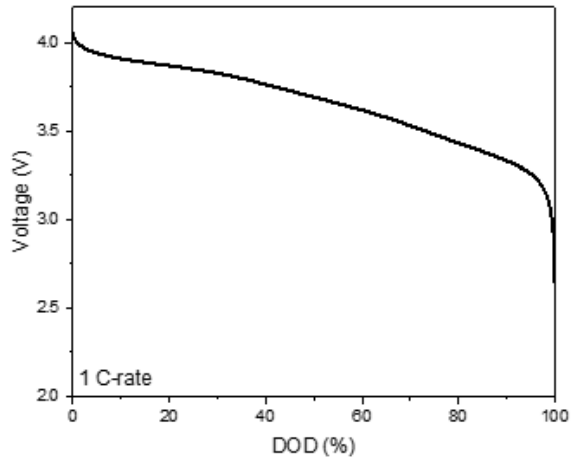
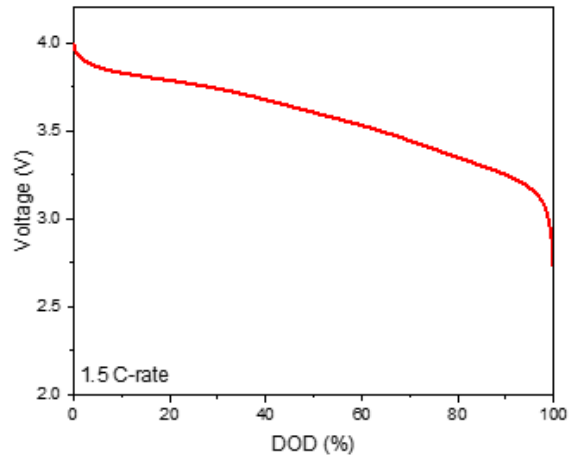


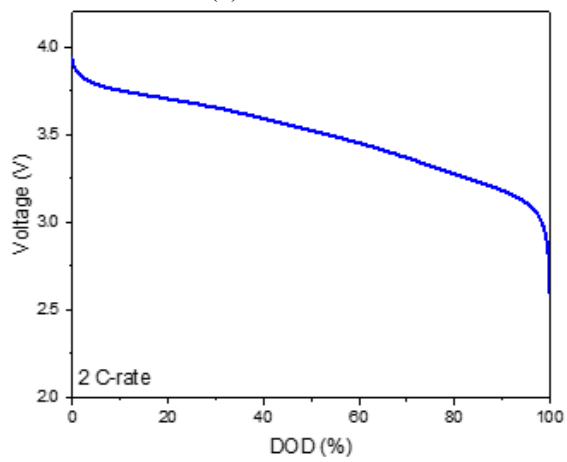
Fig. 2.2 Battery discharge curve at different C-rate



(a) 1 C-rate



(b) 1.5 C-rate



(c) 2 C-rate

Fig. 2.3 DOD vs voltage at different C-rate

제 2 절 액침냉각 적용 배터리 모듈 형상 모델

본 연구에서는 액침냉각 시스템의 냉각성능을 분석하기 위하여 57.6 V의 배터리 모듈을 사용하였다. 배터리 모듈은 32개의 원통형 배터리로 구성되어 있으며, 16개의 직렬과 2개의 병렬로 배열하였다. 해석에 사용된 배터리의 특성은 Table 2.1에 제시하였다. 또한, 배터리 셀의 물성치는 Table 2.3에 제시하였다. 원통형 배터리의 경우 양극, 음극, 전해질을 적층한 후 롤 형태로 굴러 단단한 인클로저에 넣어 제작되어 진다 [45]. 따라서 열전도율은 radial, tangential, axial 방향에 따라 다르며, 본 연구에서는 radial 방향 열전도율은 1.36 W/m·K, tangential 방향과 axial 방향 열전도도는 24 W/m·K를 적용하였다. 배터리 모듈에서 배터리의 전기적인 연결은 버스바(busbar)로 연결되어 있지만 본 해석 모델에서는 해석의 단순화를 위해 형상을 생략하고 virtual connect 기능을 이용하였다.

배터리 모듈은 작동유체에 담겨있으며, 이때 유체는 전기가 통하지 않는 유전체유체이다. 해석에 사용된 작동유체는 Silicone oil, HFE 7100, Novec 649이다. 각 유체의 열물리적 특성은 EES(Engineering Equation Solver)를 이용하여 계산하였으며, 온도에 따른 열물성 변화가 적었기 때문에 실험 및 해석의 초기 온도와 압력인 25°C, 1 atm 기준으로 설정하였다. Table 2.4에 작동유체의 열물리적 특성을 제시하였다. 세 가지 유체 중 Silicone oil이 가장 작은 밀도를 가졌으며, 비열과 열전도도가 가장 높았다. 또한, HFE 7100과 Novec 649에 비해 약 15배 큰 점도를 가졌다. HFE 7100과 Novec 649의 물성치는 전체적으로 유사하였으며 각 유체의 비등점은 61°C와 49°C였다. 하지만 HFE 7100의 GWP는 320였으며, Novec 649의 경우 0.6으로 매우 낮았다.

Table 2.3 Thermo-physical properties of battery

Parameters	Battery	Battery tab
Density (kg/m³)	2525.5	8978
Specific heat (J/kg • K)	928.8+1.409T	381
Thermal conductivity (W/m • K)	Radial : 1.36 Tangential : 24 axial : 24	Radial : 1.36 Tangential : 24 axial : 24
Electrical conductivity (S/m)	3.541×10^{-7}	1×10^{-7}

Table 2.4 Thermo-physical properties of immersion fluid

Parameters	Silicone oil	HFE 7100	Novec 649
Density (kg/m³)	935	1516	1603
Specific heat (J/kg • K)	1966	1183	1102
Thermal conductivity (W/m • K)	0.1	0.06833	0.05875
Viscosity (kg/m • s)	0.00965	0.0006715	0.0006288
Boiling temperature (°C)	>315	61	49
GWP	0	320	0.6

본 연구에서는 냉각시스템의 입·출구 위치에 따른 냉각성능을 평가하기 위하여 Fig. 2.4와 같이 3가지 모델을 설계하였다. 입구와 출구의 포트는 각각 1개이며, 직경은 13.5 mm 이다. 작동유체가 차지하고 있는 부피는 $213 \times 109 \times 90 \text{ mm}^3$ 입·출구가 작동유체가 차지하고 있는 중앙의 동일선상에서 흐르는 I-type, 용액의 하단에서 상단으로 흐르는 Z-type, 용액이 같은 면의 하단에서 상단으로 흐르는 U-type 으로 나눠 해석을 진행하였다.



(a) I-type model



(b) Z-type model



(c) U-type model

Fig. 2.4 Immersion cooling battery models according to inlet and outlet locations

제 3 절 배터리 모델링 및 NTGK 모델 추정

앞 절에서 설명한 MSMD model은 배터리 셀 규모의 CFD 영역의 배터리 열 및 전기장은 식 (2.2)의 미분방정식을 사용하여 계산된다. 식 (2.2)는 배터리의 열 및 전기에너지 보존방정식이다 [46].

$$\frac{\partial \rho_b C_{b,p} T_b}{\partial t} - \nabla \cdot (k_b \nabla T_b) = \sigma_+ |\nabla \varphi_+|^2 + \sigma_- |\nabla \varphi_-|^2 + \dot{q}_{ECh} + \dot{q}_{short} + \dot{q}_{abuse} \quad (2.2)$$

여기서 ρ_b 는 배터리 밀도, $C_{b,p}$ 는 배터리 비열, T_b 는 온도, k_b 는 열전도도이다. 여기서 σ_+ 와 σ_- 는 양극 및 음극의 유효 전기전도도이며, φ_+ 와 φ_- 는 양극과 음극의 위상전위이다. \dot{q}_{ECh} 는 전기화학반응으로 인한 전기화학 반응열이며, \dot{q}_{short} 는 배터리 내부 단락에 따른 발열량, \dot{q}_{abuse} 는 열 남용조건에서 열화반응에 의해 발생하는 발열이다. 본 연구에서는 배터리 남용 상태가 아니기 때문에 \dot{q}_{abuse} 는 0으로 설정하였다. 또한 내부 단락도 없기 때문에 \dot{q}_{short} 도 0으로 설정하였다.

식 (2.3)은 양극에서의 전류 플럭스 지배방정식을 보여주며, 식 (2.4)는 음극에서의 전류플럭스 지배방정식을 보여준다 [46].

$$\nabla \cdot (\sigma_+ \nabla \varphi_+) = -(j_{ECh} - j_{short}) \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot (\sigma_- \nabla \varphi_-) = j_{ECh} - j_{short} \quad (2.4)$$

여기서 j_{ECh} 는 전기화학 반응으로 인한 체적 전류전달량, j_{short} 는 배터리 내부 단락에 따른 전류 전달량이다. 내부 단락이 없기 때문에 \dot{q}_{short} 와 마찬가지로 j_{short} 도 0이다.

\dot{q}_{ECh} 와 j_{ECh} 는 전기화학적 하위 모델을 사용하여 계산되며, 본 연구에서는 NTGK Empirical 모델을 사용하였다. j_{ECh} 는 식 (2.5)로 계산된다[46, 47].

$$j_{ECh} = \frac{Q_{nominal}}{Q_{ref} Vol} Y[U - V] \quad (2.5)$$

여기서, Q_{ref} 는 매개변수 Y와 U를 얻기 위해 실험에 사용된 배터리의 용량이고, Y와 U는 각각 배터리 전기전도도와 전압특성을 나타낸다. U는 식 (2.6), Y는 식 (2.7)로 계산할 수 있다.

$$U = \left(\sum_{n=0}^5 a_n (DOD)^n \right) - C_2 (T - T_{ref}) \quad (2.6)$$

$$Y = \left(\sum_{n=0}^5 b_n (DOD)^n \right) \exp \left[-C_1 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \quad (2.7)$$

U와 Y는 배터리 방전깊이에 대한 함수이며, 실제 배터리 실험을 통해 DOD에 따른 전압특성 곡선을 얻은 뒤 식 (2.5)를 통해 fitting하여 계산하였다.

전기화학 반응열은 식 (2.8)로 계산된다.

$$\dot{q}_{ECh} = j_{ECh} \left[U - V - T \frac{dU}{dT} \right] \quad (2.8)$$

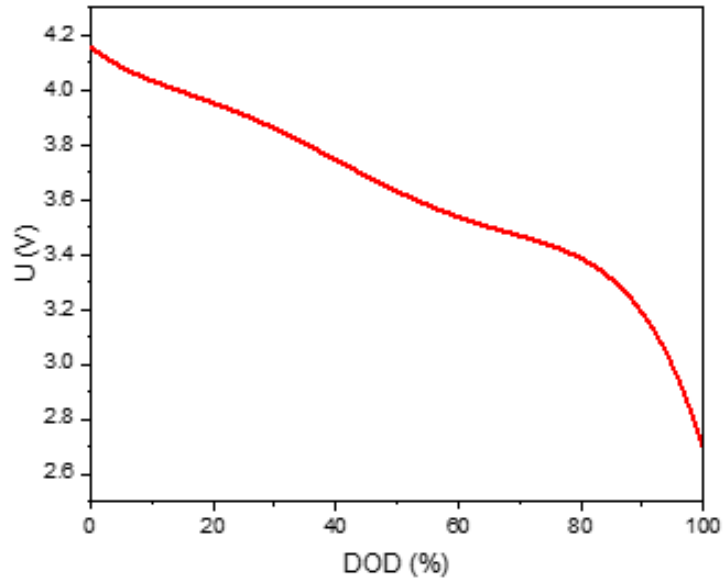
여기서 첫째 항은 과전압으로 인한 열이고, 2차 항은 엔트로피 가열로 인한 열이다.

본 연구에서 실험을 통해 얻은 DOD에 따른 전압특성 곡선은 Fig 2.3에 제시하였으며, 식 (2.5)를 통해 fitting하여 계산한 U와 Y는 식 (2.9)와 식 (2.10)에 나타냈다.

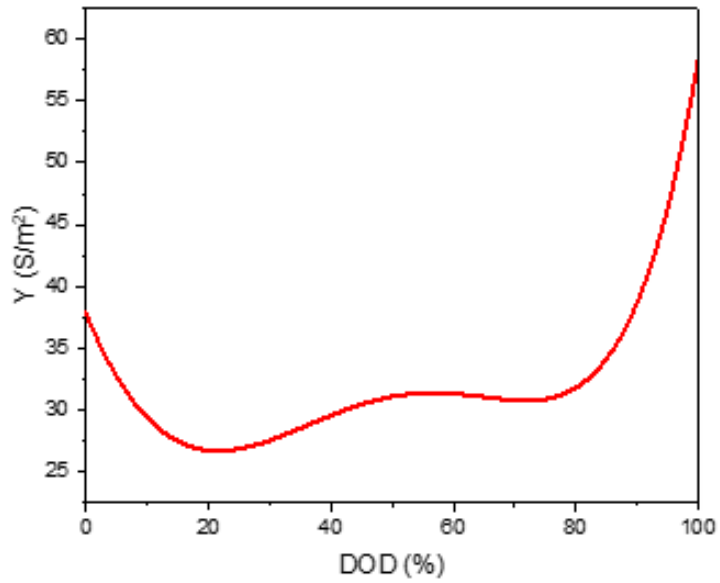
$$U = 4.15698 - 1.78761(DOD)^1 + 7.953208(DOD)^2 - 27.5902(DOD)^3 + 38.52444(DOD)^4 - 18.5701(DOD)^5 \quad (2.9)$$

$$Y = 37.83575 - 121.296(DOD)^1 + 397.7419(DOD)^2 - 304.824(DOD)^3 - 287.838(DOD)^4 + 336.8468(DOD)^5 \quad (2.10)$$

또한, U와 Y에 대한 그래프는 각각 Fig. 2.5 (a)와 (b)에 나타냈다.



(a) Voltage characteristic of battery



(b) Electric conductivity of battery

Fig. 2.5 Voltage characteristic and electric conductivity of battery

제 4 절 지배방정식 및 경계조건

Reynolds number를 사용하여 작동유체의 흐름 특성을 층류와 난류로 분리하여 해석하였다. 식 (2.11)은 사용된 Reynolds number를 보여주고 있다.

$$Re = \frac{\rho_{wf} \nu_{wf} D_{h,wf}}{\mu_{wf}} \quad (2.11)$$

여기서 ρ_{wf} 는 작동유체의 밀도, ν_{wf} 는 작동유체의 평균속도, $D_{h,wf}$ 는 수력직경, μ_{wf} 는 작동유체의 점성계수이다. 본 연구에서 Silicone oil은 층류, HFE 7100, Novec 649는 난류모형을 사용하였다.

난류모형은 광범위한 흐름 범위에 대한 우수한 정밀도와 열전달 및 흐름 특성의 장점으로 인해 Realizable $k-\varepsilon$ 모형을 사용하였으며 [48], 난류 운동에너지 방정식과 와동점성 방정식은 각각 식 (2.12)와 식 (2.13)에 제시하였다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho k U) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] \\ + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_m \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho \varepsilon U) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} S \rho \varepsilon \\ - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} C_{3\varepsilon} G_b \frac{\varepsilon}{k} \end{aligned} \quad (2.13)$$

여기서 k 는 난류 운동에너지이며, ε 는 난류 소산율이다. μ 과 μ_t 은 각각 점성계수와 난류 점성계수이다. 이는 각각 식 (2.14)와 식 (2.15)를 통해 계산된다. ν 는 동점도이고, σ_k 와 σ_ε 는 k 와 ε 에 대한 난류 Prandtl number이다. (Realizable $k-\varepsilon$ 모델에서는 각각 1.0과 1.2로 정의된다.) G_k 와 G_b 는 각각 평균속도 구배 및 부력으로

생성된 난류에너지이며, Y_m 은 전체 소산율에 대한 평창률이다. S 는 평균 텐서 변형계수이다. Realizable $k-\varepsilon$ 모델에서 C_2 와 $C_{1\varepsilon}$ 는 상수이며, 각각 1.9와 1.44로 정의된다. C_1 과 $C_{3\varepsilon}$ 은 각각 식 (2.16)과 식 (2.17)을 통해 계산된다 [33].

$$\mu = \sum_{k=l,\nu} (\alpha_k \mu_k) \quad (2.14)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.15)$$

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{Sk}{Sk + 5\varepsilon} \right] \quad (2.16)$$

$$C_{3\varepsilon} = \tanh \left| \frac{w}{u} \right| \quad (2.17)$$

여기서 μ_k 는 k 의 점성계수이며, C_μ 는 평균 변형률과 회전율, 각속도 등의 함수이며 u 와 w 는 각각 x 와 z 방향의 유체속도이다.

배터리 모듈에서 작동유체의 지배방정식인 질량보존 방정식, 운동량 보존 및 에너지보존 방정식은 각각 식 (2.18), (2.19), (2.20)에 제시하였다.

$$\frac{\partial \rho_{wf}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_{wf} \vec{u}) = 0 \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_{wf} \vec{u}) + \nabla \cdot (\rho_{wf} \vec{u} \vec{u}) + \nabla P = \rho g \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_{wf} c_{wf} T_{wf}) + \nabla \cdot (\rho_{wf} c_{wf} \vec{u} T_{wf}) = - \nabla \cdot (k_{wf} \nabla T_{wf}) \quad (2.20)$$

여기서 \vec{u} , P 및 g 는 각각 작동유체의 속도, 압력, 중력가속도, k_{wf} 는 작동유체의 열전도율을 나타낸다.

본 연구에서는 작동유체는 냉각모델에 가득 채워진 상태이고, 공기는 없다고 가정하였다. 또한 열저항 및 방사는 고려하지 않았다. 외부 벽에 대한 대류열전달 계수는 $10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 을 적용하였다. 작동유체 및 강제 공기의 출구 압력은 대기압으로 간주하였다.

제 5 절 격자 독립성 검증

Fig. 2.6은 해석에 사용한 격자를 보여주며 배터리 윗면 정면의 중앙 위치를 나타냈다. 격자는 Hexahedron과 Tetrahedron 격자를 혼합하여 설계되었다. 원통형 배터리는 Sweep method, 유동장은 Patch conforming method를 이용하여 설계를 수행하였다. 본 해석에서는 배터리 간의 좁은 간격에서의 유체의 흐름이 해석 결과에 큰 영향을 주기 때문에 유동장 벽면의 흐름을 포착하는 것이 중요하다. 그러므로 본 연구에서는 유동 경계층을 모사하기 위해 $y^+ \approx 1$ 에 맞춰 벽면에 inflation mesh를 설계하였다.

해석의 정확성과 해석시간의 효율성을 위한 격자수를 선정하기 위하여 격자의 크기를 6 mm에서 0.75 mm까지 변경시키며 격자 독립성 평가를 수행하였다. 격자 독립성 평가를 위한 해석은 Fig. 2.4 (a)의 모델을 기반으로 2 C-rate 방전속도, 질량 유량 0.03 kg/s, 셀 간격 3 mm 조건에서 수행하였다. Fig. 2.7은 격자 수에 따른 배터리 최대온도를 보여준다. 메쉬 수가 증가함에 따라 최대온도가 증가하다가 수렴하는 경향을 보였다. 메쉬 수가 9,496,010에서 19,922,925로 증가하였을 때, 최대온도는 0.01% 감소에 불과하였다. 따라서 본 연구에서는 해석의 정확도와 해석시간을 고려하여, 액침냉각을 적용한 배터리 모듈 해석시 메쉬의 개수는 9,496,010를 적용하였다.

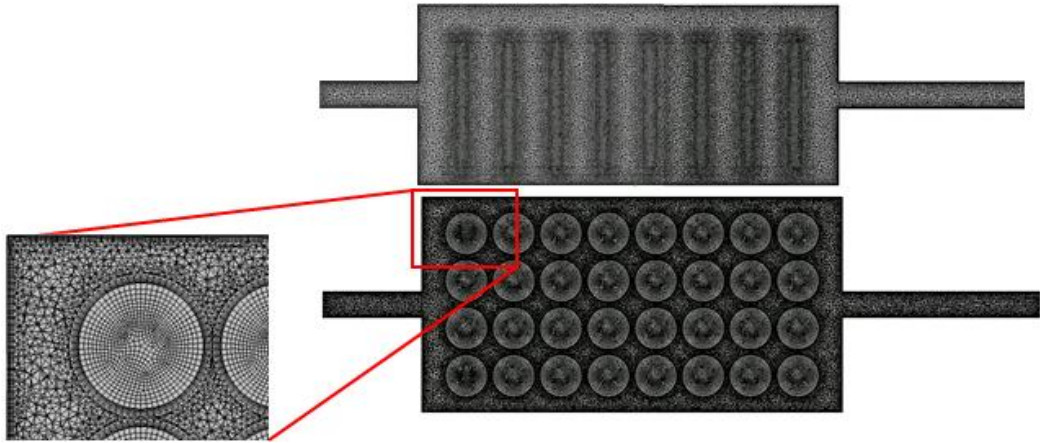


Fig. 2.6 Mesh design of battery immersion cooling model

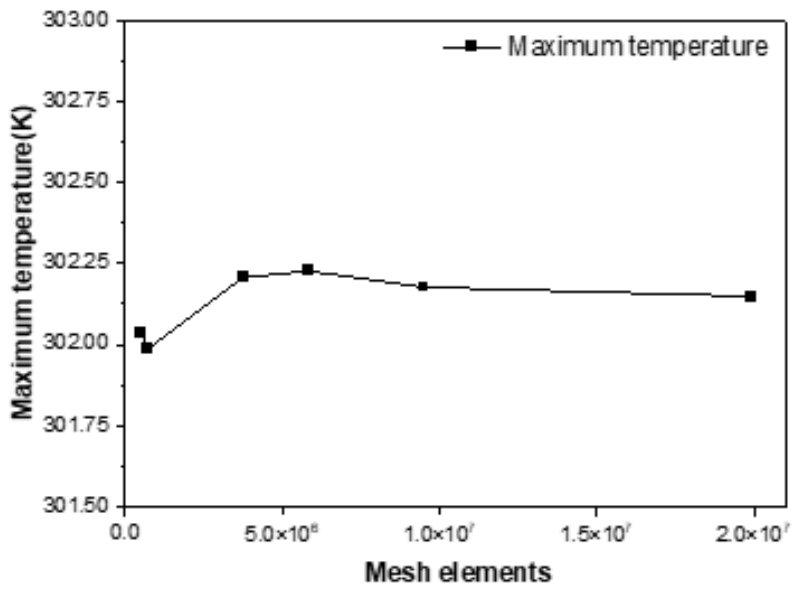


Fig. 2.7 Grid independence test according to mesh elements

제 3 장 실험 장치 및 방법

제 1 절 배터리 액침냉각 실험 장치

본 연구에서는 액침냉각 시스템의 냉각성능을 고찰을 위하여 해석과 동일한 배터리 모듈에 대한 실험을 진행하였다. Fig. 3.1은 액침냉각 실험장치의 개략도를 보여준다. 실험장치는 배터리 모듈, 냉각장치, 항온조, 열교환기, 질량유량계, 탱크, 차압계, 전력공급기, DAQ(data acquisition), 컴퓨터로 구성되어 있으며, 실험은 항온 항습챔버 내에서 수행되었다.

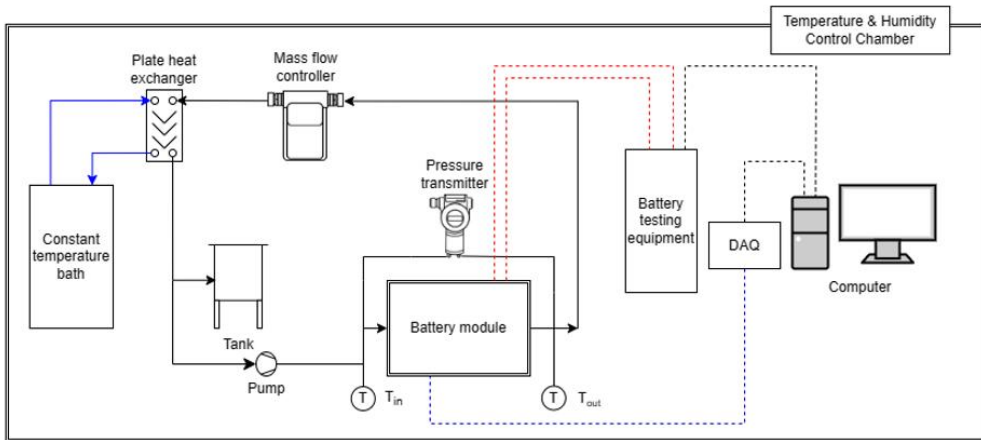


Fig. 3.1 Schematic diagram of experimental battery immersion cooling system

배터리의 액침냉각을 수행하는 작동유체는 탱크에 25℃로 담겨있으며, 작동유체는 배터리 액침냉각 장치로 일정한 유량으로 유입된다. 탱크에는 항온조와 열교환되어 과냉된 작동유체와 체류하고 있는 유체가 혼합된다. 탱크 내 온도를 일정하게 제어하기 위해 T-type의 열전대와 1 kW 급 파이프 히터가 설치되어 있으며, PID(Proportional-Integral-Differential controller) 제어를 통해 히터를 제어하여 탱크 내 체류하고 있는 작동유체의 온도를 일정하게 유지했다. 작동유체의 유량은 기어펌프의 출력제어와 니들 밸브를 이용하여 제어하며, 일정한 유량이 액침냉각장치로 유

입되었다. 액침냉각 장치의 입구와 출구 온도를 측정하기 위하여 T-type 온도센서가 설치되었으며, 액침냉각 장치 내 배터리 모듈에는 총 16개의 T-type 열전대를 부착하였다. 질량유량계는 펌프 맥동과 작동유체의 완전발달유동의 입구거리를 고려하여 설치하였다. 액침냉각 후 가열된 작동유체는 브레이징 판형열교환기를 통과하여 열교환 후 탱크로 순환한다. 또한, 브레이징 판형열교환기를 통해 가열된 작동유체를 냉각하기 위해 항온조를 이용하여 냉각수를 브레이징 판형열교환기에 공급하였다.

실험을 수행하는 동안 측정된 온도, 유량, 압력 등의 데이터는 DAQ를 이용하여 기록하였다. 배터리 액침냉각을 위한 작동유체는 Novec 649이며, Novec 649가 흐르는 배관은 개략도에 검정실선으로 표시하였다. 또한 Novec 649에 대한 물성치는 Table 2.4에 제시하였다. 항온조의 작동유체는 물이며, 이는 개략도에 파란 실선으로 표기하였다. 배터리 충·방전은 양방향 전력공급기를 이용하였으며, 컴퓨터와 연결하여 데이터를 실시간으로 모니터링하였다. 양방향 전력공급기와 DAQ를 각각 컴퓨터에 연결한 전선은 개략도에 검정색 점선으로 표기하였으며, 배터리 가동을 위한 파워선은 빨간색 점선으로 표기하였다. 또한 배터리 표면온도를 측정하기 위한 열전대는 파란색 점선으로 표기하였으며, 이는 총 16개의 열전대로 구성되어 있다.

2. 배터리 모듈 및 냉각 장치

실험을 위한 배터리 냉각장치는 Fig. 3.2에 나타냈으며, 32개의 배터리 모듈, 배터리 홀더, busbar, BMS(Battery Manage System), Connector, T-type 열전대 등으로 구성된다. 32개의 배터리 셀은 16개의 직렬과 2개의 병렬로 조합하였다. 이때, 배터리 모듈의 총 정격용량은 10 Ah이며, 전압은 57.6 V이다. 이에 대한 배터리 모듈 특성은 Table 3.1에 제시하였다. Fig. 3.3은 배터리 홀더이며, 배터리 상하부에 결합하여 배터리를 고정하였다. 이때 배터리 셀 간 간격은 2 mm이다. 또한, busbar를 이용하여 배터리 모듈의 전기적인 연결을 하였으며, 두께 0.15 t 니켈 소재의 busbar를 사용하였다. 배터리 충·방전 시 배터리의 전류, 전압을 센서를 이용하여 과충전, 과방전, 과전류가 발생하지 않게 제어하기 위하여, BMS를 사용하였으며 셀 간 편차를 줄이는 셀 밸런싱 관리를 하였다. Fig. 3.4(a)는 실험에 사용된 BMS이며, Fig. 3.4(b)는 BMS의 회로구성을 보여준다. 또한 배터리의 구성과 busbar, BMS 부착 위치는 Fig. 3.5에 제시하였다.

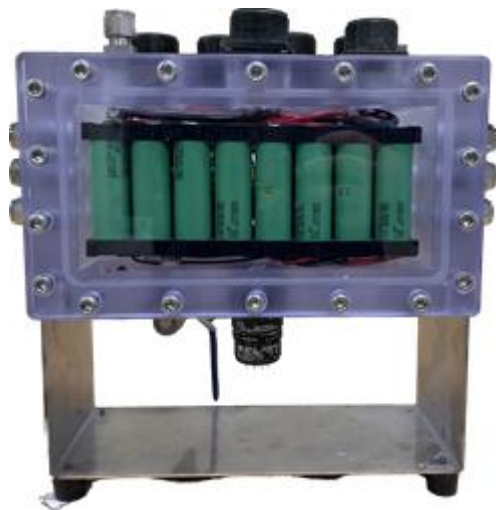


Fig. 3.2 Battery immersion cooling setup

Table 3.1 Parameters of the battery module characteristics

Parameter	Specification
Nominal capacity (Ah)	10
Nominal voltage (V)	57.6
Charge cut-off voltage (V)	67.2
Discharge cut-off voltage (V)	40
Cut-off current (mA)	100

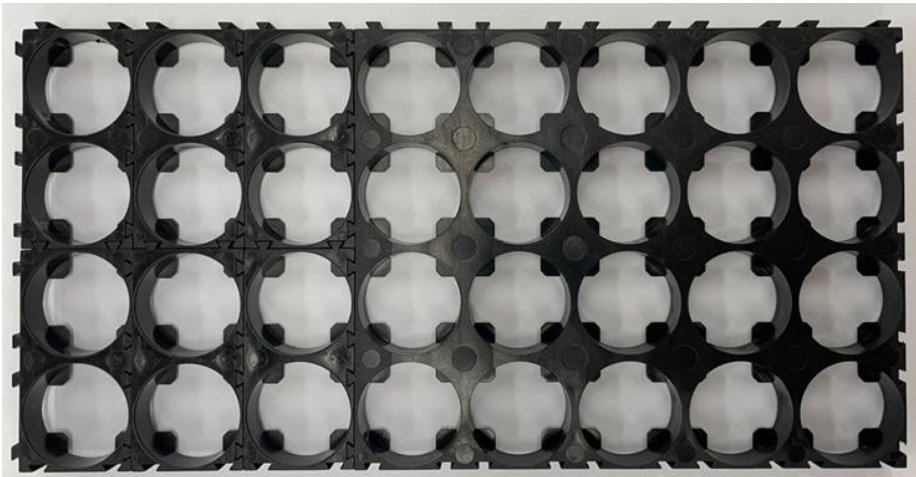
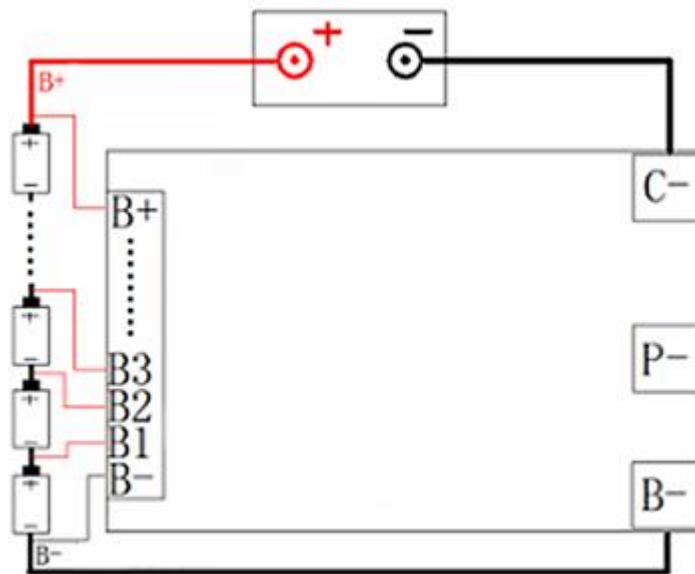


Fig. 3.3 Battery holder

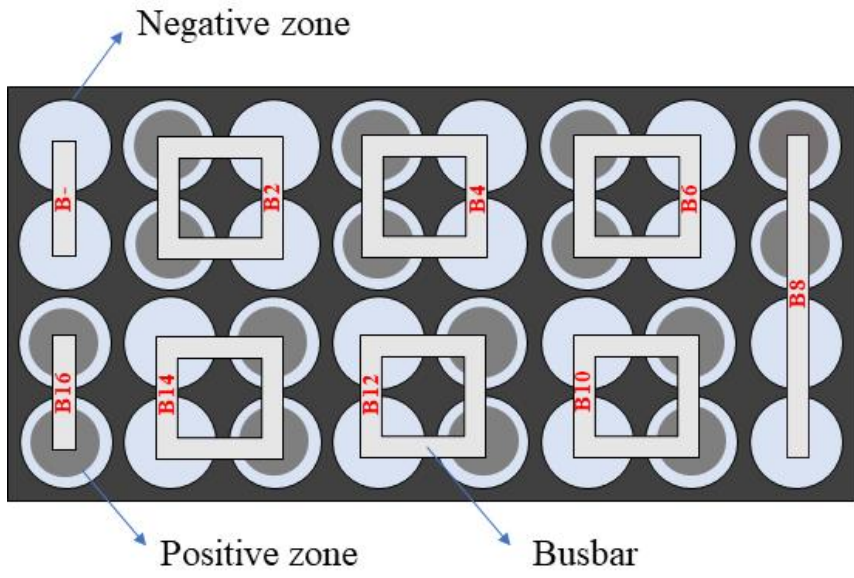


(a) BMS

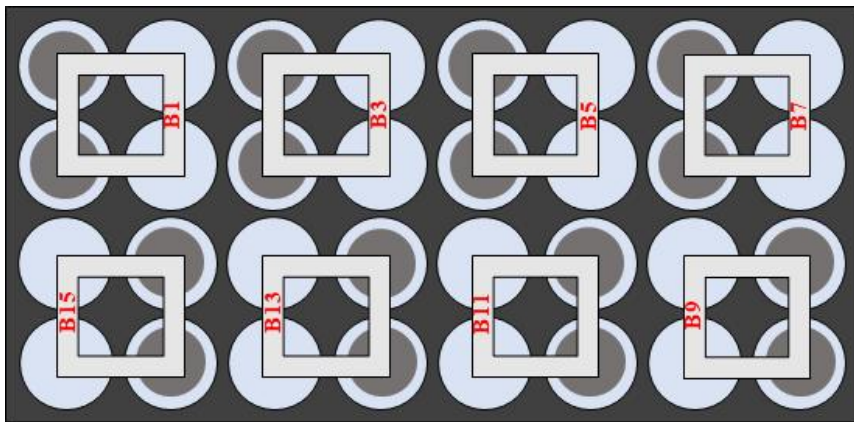


(b) Circuit configuration of BMS

Fig. 3.4 BMS and Circuit configuration of BMS



(a) Top



(b) Bottom

Fig. 3.5 Busbar configuration and BMS attachment location

또한, 충·방전 시 배터리의 온도는 T-type 열전대를 이용하여 측정하였으며, 열전대 부착 위치와 열전대 번호는 Fig. 3.6에 제시하였다. 배터리 모듈이 입·출구를 기준으로 대칭적인 구조이기 때문에 1열과 2열에만 열전대를 부착하였다. 2열에 열전대는 하부, 중부, 상부 위치에 순서대로 부착하였으며, 1열에 열전대는 배터리 중간 부분에 부착하였다. 중간 부분은 셀 전체 길이의 중심인 35 mm 위치이며, 상부와 하부는 각각 배터리 끝단에서 7 mm 떨어진 위치이다. 또한, 배터리 열전대, 파워선, BMS 선은 용액의 밀봉과 전선 분류의 용이성을 위해 배터리 모듈의 상하부에 장착한 커넥터를 이용하여 각각 DAQ와 양방향 전력공급기에 연결하였다.

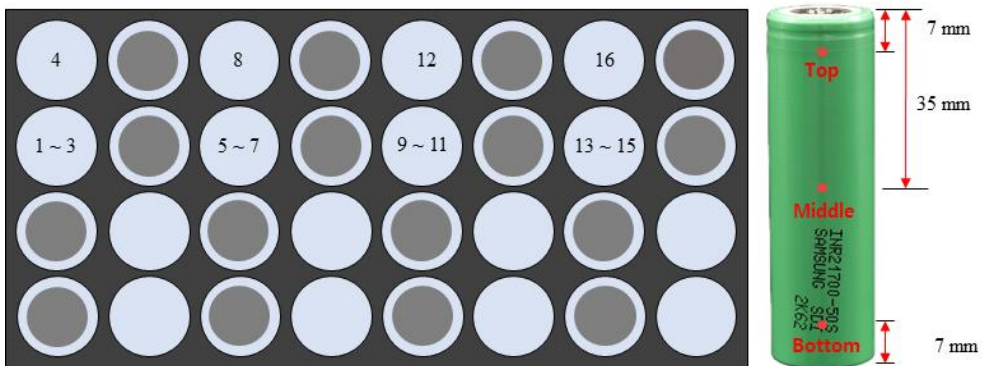


Fig. 3.6 Location of thermocouple

2. 양방향 전력공급기

양방향 전력공급기를 이용하여 배터리 모듈을 충전, 방전을 진행하였으며, 배터리 모듈의 직렬 병렬 조합, 충전 방전 C-rate에 따라 가동해야 하는 입·출력 범위에 대한 고려가 필수적이다. 본 연구에서 사용된 배터리 모듈 특성은 Table 3.1에 제시하였다. 실험은 충전의 경우 1 C-rate, 방전은 최대 3 C-rate의 조건에서 수행하였다. 따라서 해당 조건을 고려하여 양방향 전력공급기(ANEVH 100-170(F), Ainuo, China)를 선정하여 사용하였다. 양방향 전력공급기는 Fig. 3.7에 나타냈으며, 출력전압 100 V, 출력전류 -170~170 A, 용량 -5~5 kW의 사용범위를 가지고 있다. 자세한 사양은 Table 3.2에 제시하였다.



Fig. 3.7 Bidirectional power supply unit

Table 3.2 Specification of bidirectional power supply unit

Item		Specification
Output	Voltage	0~100 V
	Current	-170~170 A
	Power	-5~5 kW
Error	Voltage	≤ 0.1% FS
	Current	≤ 0.2% FS
	Power	≤ 1% FS

3. 온도센서 및 질량유량계

액침냉각장치의 입·출구의 온도를 측정하기 위하여 T-type 온도센서를 사용하였다. 본 연구에 사용한 T-type 온도센서는 Fig. 3.8에 제시하였으며, 온도센서의 위치는 Fig. 3.1 실험장치 계략도에 제시하였다. 온도센서의 온도 범위는 $-200\sim 300^{\circ}\text{C}$ 이며, 평균오차율은 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 이다. 사용된 온도센서의 자세한 사양은 Table 3.3을 통해 나타냈다. 유체의 입·출구 온도를 이용하여, 배터리의 냉각용량을 계산할 수 있으며 배터리 모듈 내에 있는 유체의 평균온도를 예측할 수 있다. 또한, 배터리 냉각장치 출구 측에서 질량유량계(RHM-09995, RHEONIK, Germany)를 이용하여 작동유체의 질량유량을 측정하였으며, Fig. 3.9에 나타냈다. 질량유량계에 대한 상세사양은 Table 3.4에 제시하였다.

Table 3.3 Specification of T-type thermocouple

Item	Specification
Type	T-type
Range	$-200\sim 300^{\circ}\text{C}$
Special limits of error	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ or $\pm 0.4\%$
Standard limits of error	$\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ or $\pm 0.75\%$

Table 3.4 Specification of the mass flow meter

Item	Specification
Maximum pressure	25,000 kPa
Maximum temperature	120°C
Nominal measurement range	10 kg/min
Accuracy	$\pm 0.1\%$



Fig. 3.8 T-type thermocouple



Fig. 3.9 Mass flow meter

4. 열교환기 및 항온조

배터리를 냉각시키고 나온 고온의 작동유체를 냉각시켜주기 위하여 열교환기 (B3-015-12D, ROZON, Korea)를 이용하였으며, 항온조(HB-205WL-2, HANBAEK SCIENTIFIC CO, Korea)와 연결하여 저온의 작동유체를 이용하여 액침용액을 냉각 시켰다. 열교환기는 최대 1.5 MPa의 압력을 견딜 수 있으며, 온도 범위는 -160~20 0℃이다. 열교환기에 대한 상세사양은 Table 3.5에 제시하였으며, Fig. 3.10은 실험에 사용된 열교환기를 보여준다. 또한, 항온조는 -20~100℃의 온도범위를 가지고 있으며, 오차율은 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 이다. 항온조의 상세사양은 Table 3.6에 지시하였으며, Fig. 3.11은 실제 항온조를 보여준다.

Table 3.5 Specification of the heat exchanger

Item	Specification
Design temperature	-160~200℃
Design pressure	1.5 MPa
Test pressure	2.0 MPa

Table 3.6 Specification of the thermal constant bath

Item	Specification
Temperature Range	-20~100℃
Temperature accuracy	$\pm 0.2^{\circ}\text{C}$
Cooling compressor	9 W
Pressure pump	200 W
Power	1.6 kW



Fig. 3.10 Heat exchanger



Fig. 3.11 Thermal constant bath

5. 데이터 수집 장치(DAQ)

이전 절에서 제시한 배터리 온도, 작동유체의 입·출구 온도 및 압력차, 유체의 질량유량 등의 데이터는 데이터 수집 장치(GL840, GRAPHTEC, JAPAN)를 활용하여 기록되었다. 데이터 수집 장치는 총 20개의 포트에 구성되어 있으며, 입력 전압 범위 20 mV~100 V를 가진다. Fig. 3.12는 실험에 사용된 데이터 수집 장치이며, 사양은 Table 3.7에 제시하였다.

Table 3.7 Specification of the DAQ

Item	Specification
Voltage range	20 mV~100 V
Accuracy of voltage	±0.1%
Accuracy of temperature	±1.55°C



Fig. 3.12 DAQ

6. 항온항습챔버

본 연구는 외기온도 및 습도를 일정하게 유지하기 위하여 항온항습챔버에서 수행되었으며, 항온항습챔버 외부에 단일덕트 방식의 공조기기를 설치하여 덕트를 이용해 내부의 온도와 습도를 조절하였다. 또한, 실험의 정확성을 위하여 내부의 천장, 벽면, 바닥을 단열 시공하여 기밀성을 높였다. 항온항습챔버의 상세 정보는 Table 3.8에 제시하였다.

Table 3.8 Specification of the climatic chamber

Item	Specification
Size	8.5×4.5×3.5(W×D×H, m ³)
Temperature	-20~60°C
Humidity	5~95% RH
Air flow rate	400 CMM
Accuracy	±1.5%

제 2 절 실험방법 및 조건

Fig. 3.13은 실험장치의 모습을 보여준다. 조선대학교 첨단캠퍼스에 있는 항온항습 챔버 내부에서 진행하였으며, 항온항습챔버를 이용하여 외기온도 25℃, 습도 50%를 유지하였다. 배터리 액침냉각 실험은 배터리 모듈 1, 2, 3 C-rate에 대한 방전실험을 진행하였으며, 이에 따른 액침냉각성능을 분석하였다. 모든 방전조건에서 작동유체인 Novec 649의 초기온도는 25℃로 유지하였으며, 원심 임펠러 펌프를 이용하여 질량유량 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 kg/s에 대한 냉각성능을 비교 및 분석하였다.

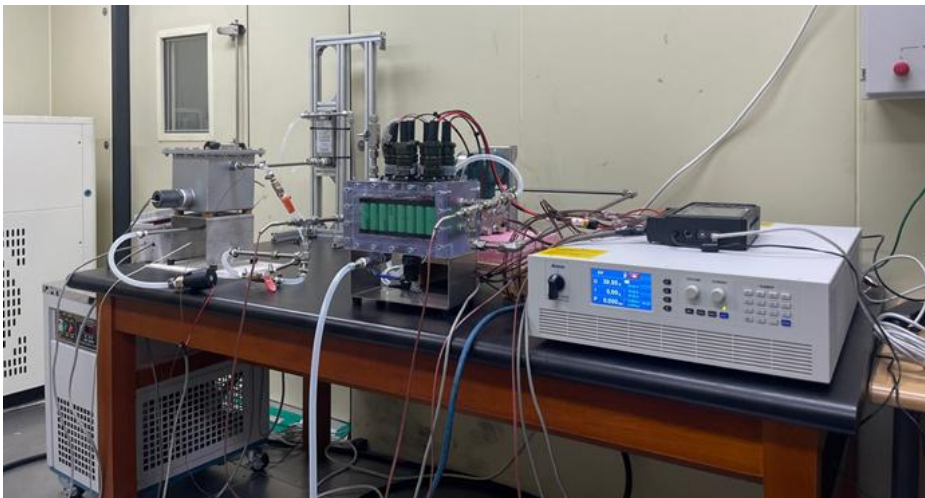


Fig. 3.13 Experimental setup of battery immersion cooling system

Table 3.9는 액침냉각 실험을 위한 배터리 충전 및 방전 방법을 보여준다. 방전 실험 전 배터리의 잔류 전압을 차단 전압까지 방전시킨 후 차단 전압까지 충전시켰다. 방전실험은 1, 2, 3 C-rate의 방전 속도에 대한 실험을 진행하였으며, 이때의 전류는 10, 20, 30 A이다. 방전은 차단 전압인 40 V까지 진행하였으며, 양방향 전력공급기와 측정된 배터리 전압 차를 계산하여 차단 전류까지 실험을 진행하였다. 방전된 배터리는 1 C-rate의 충전속도로 차단 전압인 67.2 A까지 충전시켰다. 배터리 액침냉각 실험은 각 방전속도에서 질량유량을 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 kg/s로 변경하여 진행하였으며, 배터리 방전속도 및 질량유량에 대한 분석을 진행하였다.

Table 3.9 Battery module charging experimental procedure

Step	Step Time (hh:mm:ss)	Voltage (V)	Current (A) (1/1.5/2 C-rate)	Cut-off voltage (V)	Cut-off current (A)
Rest	00:00:05				
Discharging			10/20/30	40	
Rest	01:30:00				
Charging		67.2	10		100
rest	01:30:00				
Discharging			10/20/30	40	
Rest	01:30:00				

제 3 절 성능 데이터 분석 기법

본 절에서는 액침냉각 성능 데이터를 분석하기 위한 기법을 제시하였으며, 실험결과 뿐만 아니라 해석결과 데이터에도 적용된다.

배터리의 액침냉각 성능을 분석하기 위하여 냉각용량을 계산하였다. 배터리에 서 발생된 열은 작동유체로 전달되며, 식 (3.1)은 작동유체에 의한 대류열전달을 보여준다.

$$Q = \dot{m}_{wf} C_{p,wf} (T_{bulk.out} - T_{bulk.in}) \quad (3.1)$$

여기서 \dot{m}_{wf} 은 작동유체의 질량유량이며, $C_{p,wf}$ 은 작동유체의 비열, $T_{bulk.in}$ 과 $T_{bulk.out}$ 은 작동유체의 입·출구온도이다.

작동유체의 대류열전달계수는 식 (3.2)를 이용하여 계산했으며, $A_{wall,wf}$ 은 작동유체의 면적, $T_{avg.b.surface}$ 는 평균 배터리 표면온도, $T_{avg.bulk,wf}$ 는 작동유체의 평균온도이다. 이때 작동유체의 평균온도는 작동유체의 입·출구온도의 평균으로 계산하였다.

$$HTC_{wf} = \frac{Q}{A_{wall,wf} (T_{avg.b.surface} - T_{avg.bulk,wf})} \quad (3.2)$$

또한, 작동유체의 Nusselt number는 식 (3.3)을 이용하여 계산했으며, Nusselt number는 작동유체와 배터리의 경계에서 대류와 전도에 따른 열전달의 비율을 나타낸다.

$$N_{wf} = \frac{HTC_{wf} \times D_{h,wf}}{k_{wf}} \quad (3.3)$$

여기서 k_{wf} 는 작동유체의 열전도율을 나타낸다.

배터리 모듈의 냉각을 위해 작동유체의 흐름을 발생시키기 위해 사용되는 펌프의 소비동력은 식 (3.4)로 계산된다.

$$P_{pump} = \frac{\Delta P \times \dot{m}_{wf}}{\rho_{wf}} \quad (3.4)$$

이때, ΔP 는 작동유체의 입·출구 압력강하이다.

작동유체의 운동량과 열 경계층 사이의 관계를 파악하기 위해 Prandtl number를 고려하였으며, 식 (3.5)로 계산된다.

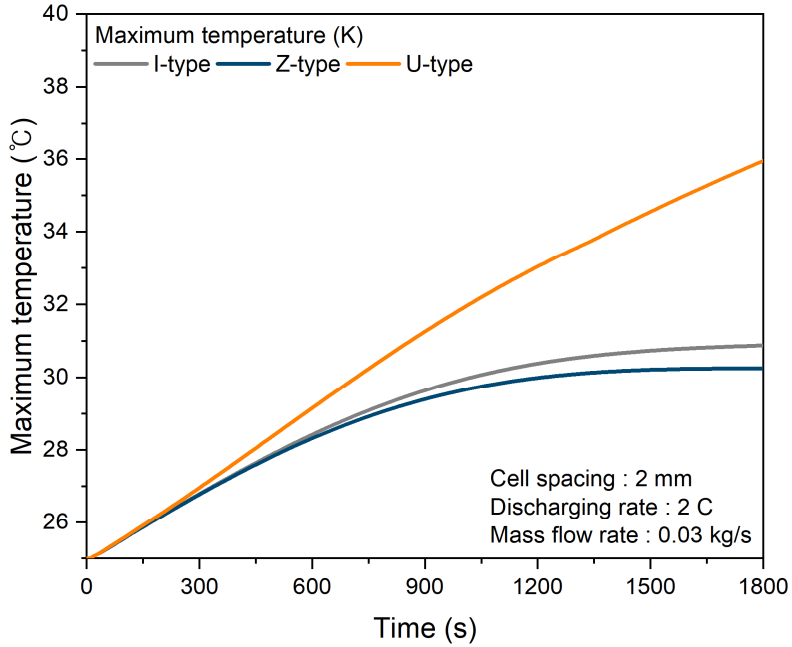
$$Pr = \frac{C_p \mu}{k} \quad (3.5)$$

제 4 장 결과 및 고찰

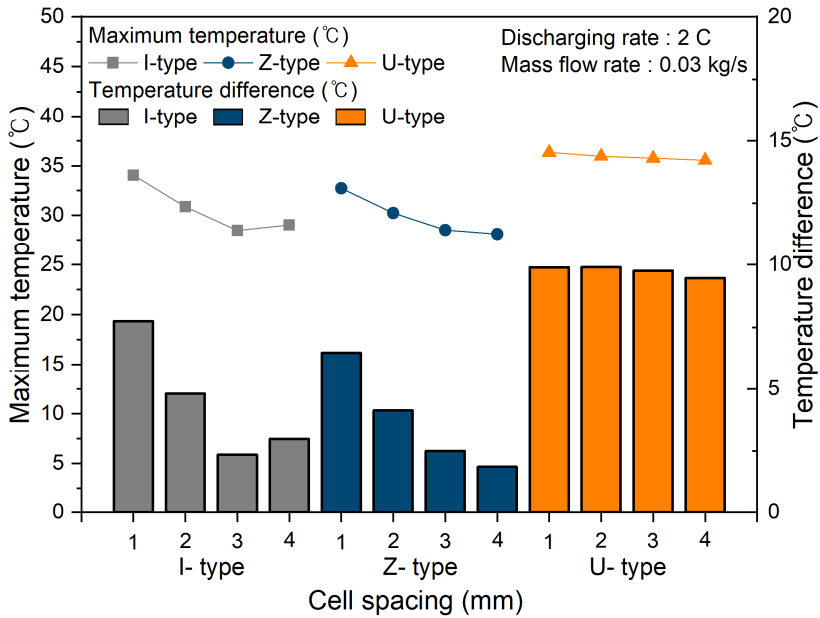
제 1 절 해석 결과

1. 입·출구 위치 변화에 따른 성능 고찰

본 절에서는 입·출구 위치가 액침냉각 성능에 미치는 영향성을 분석하기 위하여 Fig. 2.4 (a)~(c)의 세 가지 모델을 개발하여 적용하였다. Fig. 4.1(a)은 2 C-rate 방전 후 모델별 배터리 최대온도 및 셀 간 온도차이를 보여준다. 이때 배터리 셀 간격은 2 mm이며, 작동유체의 질량유량은 0.03 kg/s이다. 방전 후 모델별 배터리 최대온도는 I-type, Z-type, U-type에서 각각 30.9°C, 30.3°C, 35.9°C였다. 방전과정 동안 I-type과 Z-type의 경우 배터리 최대온도가 상승하다가 1100 s 근처에서 거의 일정하게 수렴하였다. 하지만 U-type의 경우 배터리의 냉각이 충분히 진행되지 않아 방전 종료까지 배터리 최대온도가 급격하게 증가하였다. Fig. 4.1(b)은 모델별 배터리 셀 간격에 따른 배터리 최대온도 및 셀 간 온도차이를 보여준다. I-type과 U-type의 경우 동일 조건에서 온도가 거의 유사하였지만, Z-type이 약 2°C 정도 낮았다. 또한 셀 간격이 넓어질수록 최대온도가 점차 감소하는 경향을 보였다. 세 가지 모델 중 U-type이 모든 조건에서 최대온도가 가장 높았으며, 셀 간격에 따른 영향성은 매우 적었다. 세 가지 모델 모두 모든 조건에서 최대온도는 40°C 이하로 배터리 적정온도 범위에 부합하였다. 하지만 셀 간 온도차이의 경우 U-type은 모든 셀 간격에 대해서 5°C보다 높았으며, 셀 간격에 대한 차이는 작았다. 이는 배터리 입·출구가 동일한 면에 있기 때문에 입·출구와 먼 곳에 있는 배터리의 경우 가까운 배터리에 비해 고온의 작동유체와 열전달이 이뤄지기 때문이다. 또한, I-type과 Z-type의 경우 2 mm 이상의 셀 간격에서는 최대온도가 5°C 이하였다. 하지만 셀 간격이 가장 좁은 1 mm의 경우 셀 간 온도차이는 각각 7.7°C와 6.5°C로 나타났다. 셀 간격이 넓어질수록 배터리 최대온도 및 온도차이가 감소하는 경향을 확인하였다. 하지만 I-type의 4 mm와 같이 다른 결과를 보이는 조건이 존재함으로 셀 간격에 대한 영향성을 분석하는 것은 중요하다. 이러한 셀 간 온도 불균형은 배터리 성능 저하를 유발하기 때문에 최대온도를 제어하는 것만큼이나 중요하다.



(a) Maximum temperature



(b) Battery maximum temperature and temperature difference

Fig. 4.1 Battery maximum temperature and temperature difference according to inlet/outlet location and cell spacing

Fig 4.2는 서로 다른 입·출구 위치를 가지는 배터리 모듈의 셀 위치별 온도분포를 보여준다. 작동유체가 입구에서 출구로 흐르면서 배터리 셀의 발열을 제거하며 흘러가기 때문에 입구에 비해 출구의 작동유체의 온도가 높다. 따라서, 배터리 셀과 열전달을 하는 작동유체의 온도는 입구와 가까울수록 낮고 출구와 가까워질수록 높게 되어 배터리 셀의 온도는 입구 측이 낮다. I-type과 Z-type의 경우 입구 근처에 있는 배터리 셀의 온도는 낮으며, 출구와 가까워질수록 높다. 특히, 출구와 가까이 있는 단일 셀에서도 출구와 가장 근접한 부분의 온도가 가장 높은 것을 확인할 수 있다. 예를 들어, I-type의 경우 셀의 중간부분과 하단부의 온도가 높고, Z-type의 경우 셀의 상단 부분의 온도가 가장 높다. U-type의 경우 다른 두 type과는 다르게 입·출구가 동일한 면에 위치해 있다. 모듈의 하단에 입구가 있고 상단에 출구가 있지만 단일 셀의 온도의 상하부와 관계없이 거의 동일하며, 입·출구 거리에 따른 온도 영향만 보였다. 입·출구와 가장 거리가 먼 셀의 온도는 36℃이며, 가까운 셀의 온도는 초기온도인 25℃보다 약 1℃ 정도 상승하였다. 이는 작동유체가 용기의 가장 안쪽까지 충분히 흐르지 않고 입구에서 출구로 짧은 경로로 흘렀기 때문이다. 따라서 U-type의 모델은 해당 조건에서 셀 간 온도차이를 크게 유발하기 때문에 배터리 냉각에 부적합한 모델이다. 또한, 모든 조건에서 Z-type이 I-type보다 낮은 최대온도 및 온도차이를 보였기 때문에 이후 연구에서는 Z-type의 형상을 기준으로 다양한 설계변수에 따른 냉각성능에 대한 영향성을 분석하였다.

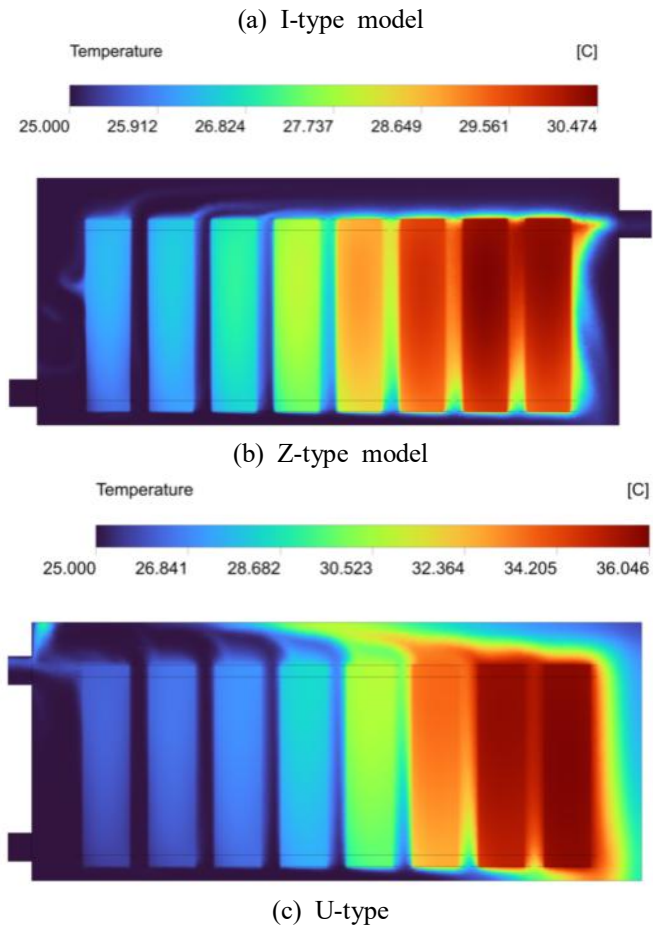
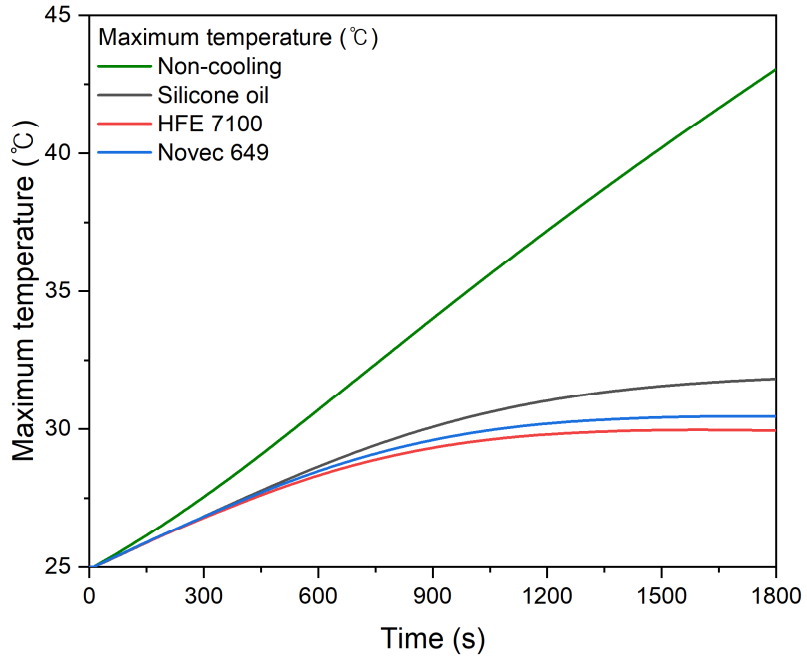


Fig. 4.2 Temperature distribution of battery modules with different inlet and outlet locations

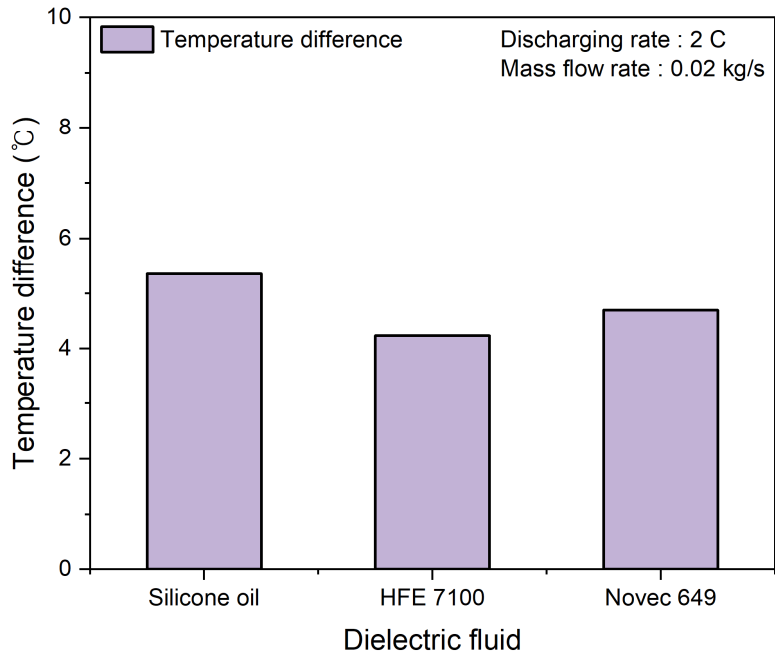
2. 작동유체 변화에 따른 성능 고찰

액침냉각에 사용될 수 있는 작동유체는 제한적이다. 먼저 가장 중요한 것은 배터리와 작동유체가 직접 접촉되어 있기 때문에 전기적으로 절연성이 높아야 한다. 따라서 전기전도성이 0이거나 매우 적어야 한다. 또한, 안전한 작동을 위해서는 배터리의 열화와 화재의 위험을 줄여야 한다. 따라서 불연성이거나 인화점이 충분히 높은 유체가 요구되며, 높은 냉각성능을 위해 높은 비열용량과 열전도율이 필요하다 [29]. 또한, 전기자동차 성능과 비용적인 측면에서는 낮은 밀도 및 중량, 낮은 점도 등이 중요한 요소이다.

본 절에서는 작동유체에 따른 액침냉각 성능을 분석하였으며, 해석에 적용된 작동유체의 특성은 앞 절 Table 2.3에 제시하였다. Fig. 4.3은 2 C-rate, 0.02 kg/s의 서로 다른 작동유체에 따른 배터리 최대온도와 온도차이를 보여준다. 냉각성능을 비교하기 위해 냉각을 적용하지 않은 액침냉각을 적용하지 않은 Non-cooling 조건도 제시하였다. Non-cooling 조건에서 배터리 최대온도는 43°C였으며, Silicone oil, HFE 7100, Novec 649를 적용하였을 때 배터리 최대온도는 Non-cooling 조건에 비하여 각각 11.2°C, 13.1°C, 12.6°C 감소한 31.8°C, 29.9°C, 30.5°C로 나타났다. 이는 냉각을 적용하지 않을 경우와 비교하여 약 31.8%, 30.0%, 29.1%의 배터리 최대온도 감소를 보였다. 세 유체 모두 해당 조건에서 배터리를 적정온도로 유지했으며, HFE 7100이 가장 낮은 최대온도를 보였다. 또한, 배터리 셀 간 온도차이는 Silicone oil, HFE 7100, Novec 649를 적용하였을 때 각각 5.4°C, 4.2°C, 4.7°C였다. Silicone oil의 경우 셀 간 온도차이가 5.4°C로 가장 컸으며, 5°C를 초과하였다.



(a) Maximum temperature

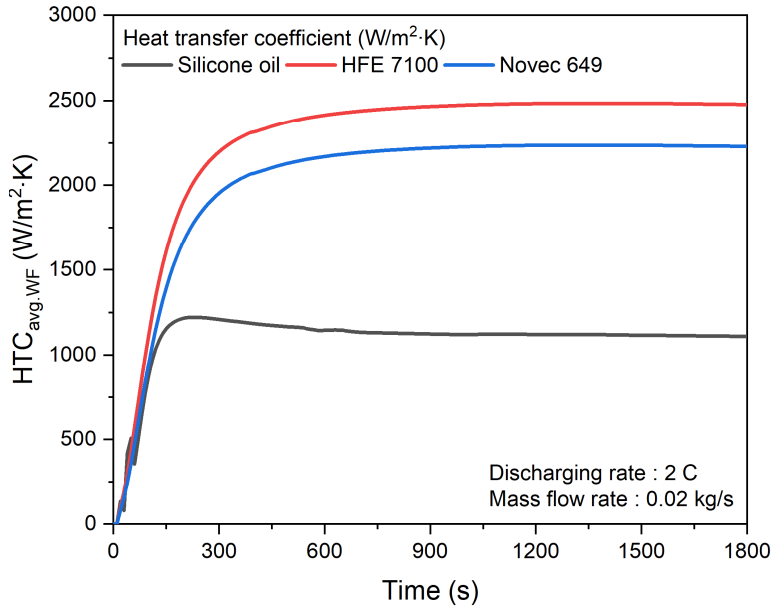


(b) Temperature difference

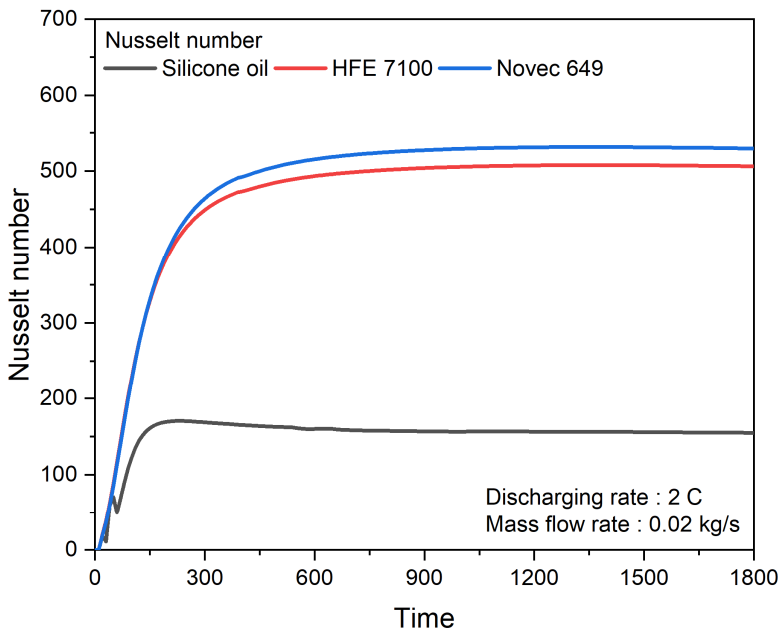
Fig. 4.3 Battery maximum temperature and temperature difference according to different working fluids

Fig. 4.4는 작동유체에 따른 대류열전달계수와 Nusselt number를 보여준다. Fig. 4.4 (a)는 2 C-rate 방전 시 질량유량 0.02 kg/s 조건에서의 작동유체에 따른 대류열전달계수를 보여준다. 세 유체 모두 방전 초기에 급격하게 대류열전달계수가 증가하는 것을 확인할 수 있으며, HFE 7100과 Novec 649를 사용한 경우 Silicone oil보다 2배 이상 높은 열전달계수를 보였다. 방전 후 열전달계수는 Silicone oil, HFE 7100, Novec 649를 적용하였을 때 각각 $1109.7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, $2477.6 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, $2228.4 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ 였다. 또한, Fig. 4.4 (b)를 통해 동일조건에서 작동유체에 따른 Nusselt number를 나타냈다. Silicone oil, HFE 7100, Novec 649를 적용하였을 때 Nusselt number는 각각 154.9, 506.2, 529.5였다. Silicone oil이 가장 낮은 값을 보였으며, Novec 649가 가장 컸다. 또한, 유체의 흐름과 열 확산의 관계를 보여주는 Prandtl number를 비교하였으며, 그 값은 Fig. 4.5에서 제시하였다. Silicone oil, HFE 7100, Novec 649를 적용하였을 때 Prandtl number는 각각 189.7, 11.6, 11.8이다. Silicone oil의 상대적으로 높은 점성과 비열로 인해 다른 두 유체와 비교하였을 때 약 16배 큰 값을 가졌다. 따라서 Silicone oil이 대류에 대한 영향성이 가장 적은 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4.6은 작동유체에 따른 압력강하와 펌프의 소비동력을 보여준다. 압력강하의 경우 작동유체가 Silicone oil, HFE 7100, Novec 649일 때 각각 72.3 Pa, 19.5 Pa, 18.2 Pa였다. Silicone oil의 상대적으로 높은 점도로 인해 다른 두 유체에 비해 높은 압력강하를 보였다. 또한, 그와 비례하게 펌프소비동력 또한 각각 0.0016 W, 0.00026 W, 0.00022 W로 나타났다. 본 연구에 적용된 배터리 모듈 16S2P로 실제 자동차에 적용되는 배터리 팩에 비해 작은 규모이다. 따라서 해당 모델에서는 모든 작동유체 모두 펌프소비동력이 매우 낮았다. 하지만 Silicone oil의 경우 다른 두 유체보다 평균 6.7배 높기 때문에 배터리 팩 규모에서는 상당한 비율일 것으로 예상된다.



(a) Heat transfer coefficient



(b) Nusselt number

Fig. 4.4 Variations of heat transfer coefficient and Nusselt number according to different working fluid

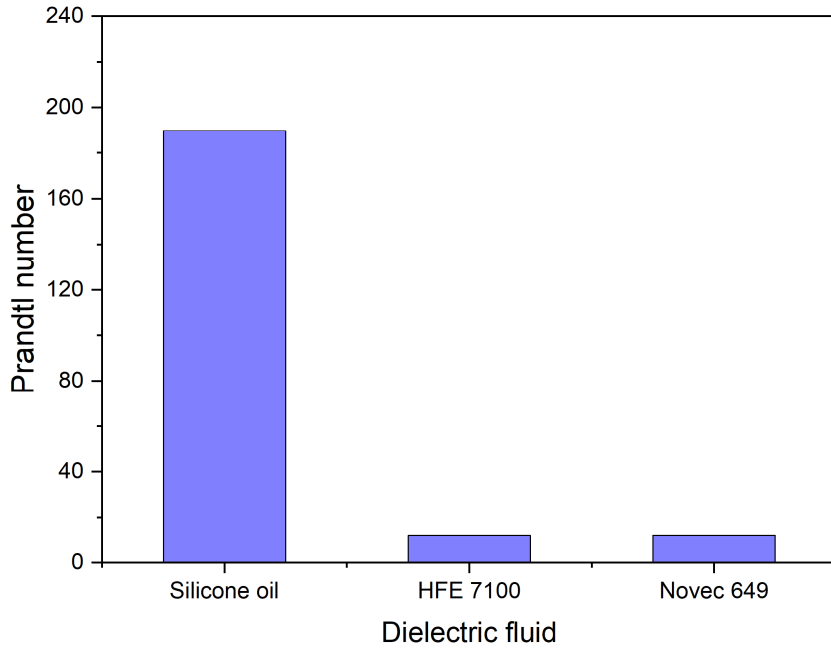


Fig. 4.5 Prandtl number of different working fluids

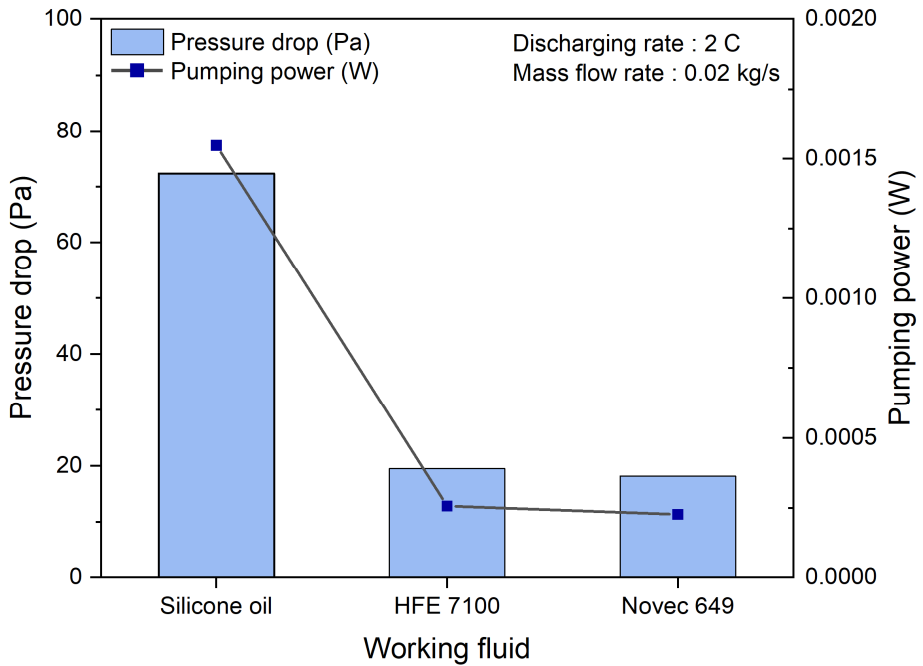


Fig. 4.6 Pressure drop and pumping power according to different working fluids

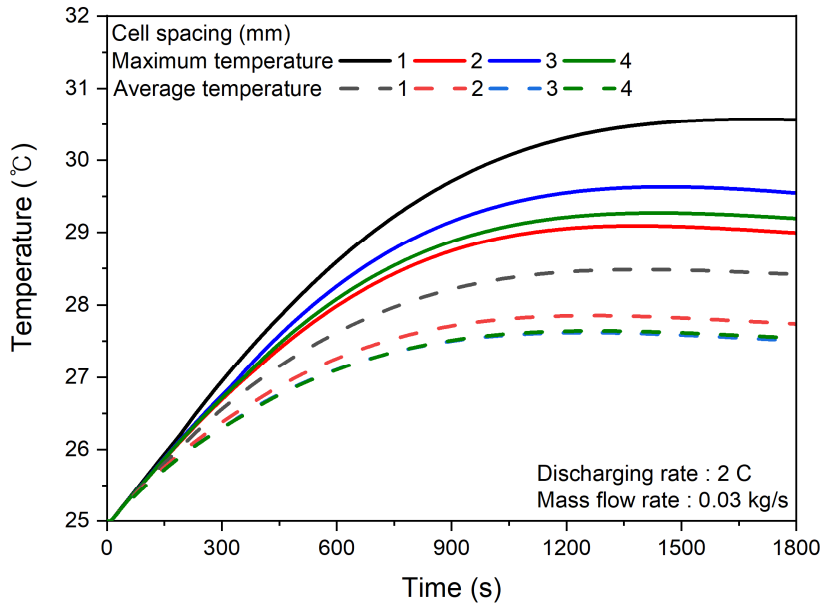
본 절에서는 배터리 액침냉각을 위한 작동유체 선정을 위해 작동유체에 따른 최대온도, 셀 간 온도차이, 대류열전달계수, Nusselt number, Prandtl number, 압력강하 및 펌프동력을 비교하였다. Silicone oil의 경우 배터리 간 온도차이가 5℃를 초과하게 되며, 상대적으로 낮은 대류열전달계수 및 Nusselt number, 그리고 높은 점도로 인한 높은 Prandtl number, 압력강하 및 펌프소비동력을 가졌다. 그에 비해 HFE 7100과 Novec 649의 경우 최대온도와 셀 간 온도차이 모두 해당조건에서 적정온도 범위에 부합하였으며, 상대적으로 높은 열전달계수와 Nusselt number, 낮은 Prandtl number, 압력강하 및 펌프소비동력을 가졌다. 두 유체의 유사한 열물성으로 인해 유사한 결과를 보였다. 하지만 Novec 649가 HFE 7100에 비해 약 500배 이상 낮은 GWP를 가지고 있기 때문에 본 연구에서는 Novec 649가 가장 적합한 작동유체로 판단하였으며, 이후 연구에서는 작동유체를 Novec 649로 적용하여 배터리 모듈의 냉각 성능을 분석하였다.

3. 셀 간격 변화에 따른 성능 고찰

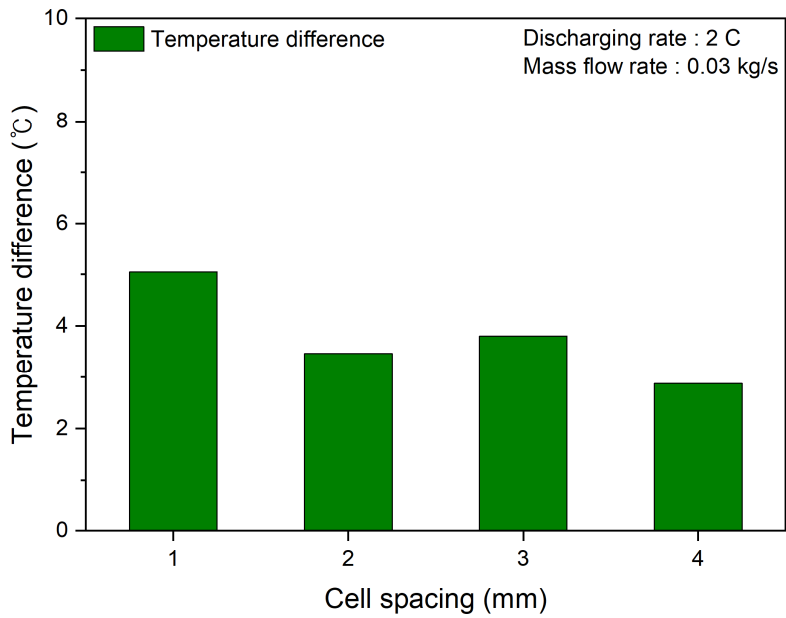
액침냉각은 냉각판 설계가 없다는 장점이 있지만, 액침용액 입구를 통해 들어오는 유체의 흐름은 배터리 셀 배열과 관련이 있다. 따라서, 본 절에서는 셀 간격이 액침냉각 성능에 미치는 영향성을 분석하기 위하여 셀 간격을 1, 2, 3, 4 mm로 변화시켜 냉각 성능을 고찰하였다. Fig. 4.7은 2 C-rate 방전 조건에서 작동유체 질량유량 0.03 kg/s일 때의 배터리 평균온도, 최대온도 및 온도차이를 보여준다.

Fig. 4.7(a)에서 볼 수 있듯이, 셀 간격이 1, 2, 3, 4mm일 때 배터리 평균온도는 각각 28.4°C, 27.7°C, 27.5°C, 27.5°C로 나타났다. 셀 간격이 증가할수록 배터리 평균온도가 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 셀 간격 증가에 따른 배터리 평균온도 감소량은 점차 감소하는 것을 알 수 있다. 하지만 배터리 최대온도의 경우 셀 간격이 2 mm일 때 가장 낮은 것을 확인할 수 있다. 셀 간격이 1, 2, 3, 4mm일 때 배터리 최대온도는 각각 30.6°C, 29.0°C, 29.5°C, 29.2°C로 나타났다.

Fig. 4.7(b)은 셀 간격에 따른 셀 간 온도차이를 보여준다. 셀 간격이 증가할수록 감소하는 경향을 보였으며, 최대온도가 가장 낮았던 셀 간격 2 mm일 때 3 mm의 경우보다 더 낮았다. 셀 간격이 1 mm의 경우 셀 간 온도차이는 5°C를 약간 초과한 5.04°C였으며, 셀 간격이 1 mm 증가할 때 셀 간 온도차이는 각각 3.5°C, 3.8°C, 2.9°C였다. 셀 간격에 따른 배터리 평균온도, 최대온도 및 온도차이 결과를 통해 작동유체가 모듈에 고르게 흐르지 않아 국부적으로 높은 온도를 나타내는 배터리가 있음을 예측할 수 있다.



(a) Battery maximum and average temperature

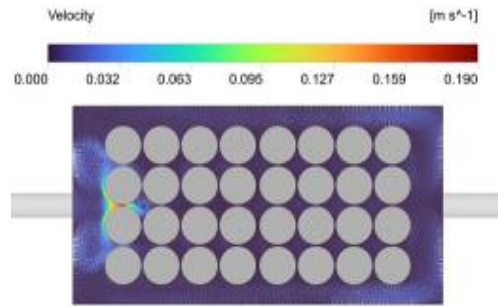


(b) Temperature difference

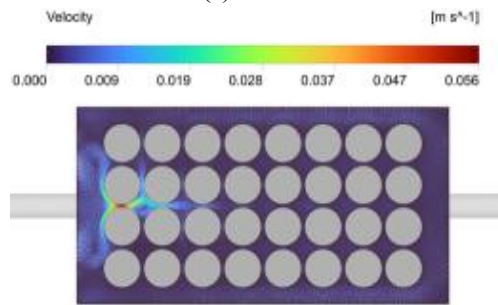
Fig. 4.7 Variations of battery maximum and average temperature and temperature difference

Fig. 4.8과 Fig. 4.9는 각각 셀 간격에 따른 작동유체의 속도분포와 온도분포를 보여준다. 이 때 단면의 위치는 입구 높이와 동일한 하단 부분이다. 셀 간격이 1 mm의 경우 유체가 입구에서 흘러 들어온 뒤 셀 사이로 유체가 유연하게 흐르지 못하고 vortex가 생기게 되는 것을 확인할 수 있다. 또한 셀 사이의 유속이 대체로 0.03 m/s 이하인 다른 부분과 달리 입구와 가장 가까운 위치에 있는 셀 사이의 유속은 약 0.2 m/s의 매우 빠른 유속을 보였다. 따라서 입구 측과 가장 가까운 셀의 경우 유체의 흐름이 빠르고 유체 vortex로 인하여 열전달이 우수하여 셀 온도가 감소하게 된다. 하지만 입구와 멀어질수록, 또한 입·출구가 위치해 있는 중앙과 멀어지는 측면일수록 유체의 흐름이 적어져 셀의 온도가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 셀 간격 2 mm의 경우 균일하게 유체가 흐르진 않지만 1 mm의 경우와 비교하였을 때 약간의 vortex가 생기며, 1 mm의 경우와 달리 측면으로 유체가 흐르는 것을 확인할 수 있다. 셀 간격 3 mm와 4 mm의 경우 입·출구가 있는 중앙을 기준으로 유체가 비교적 자유롭게 흐르는 것을 확인할 수 있다. 따라서 측면에 비해 중앙의 온도가 3 mm와 4 mm 각각 약 3.8℃와 2.9℃ 낮은 것을 확인할 수 있다.

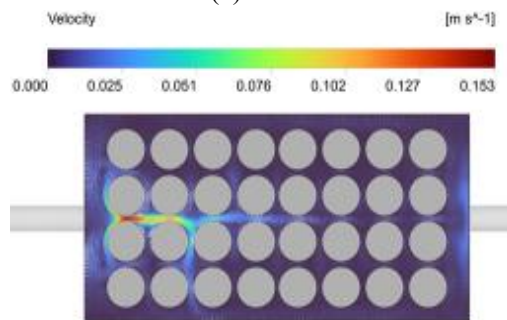
1 mm를 제외한 모든 조건에서 배터리 최대온도 및 온도차이는 배터리 적정온도를 유지하였다. 하지만 실제 전기자동차에 배터리 팩 적용 시 셀 사이의 간격이 좁을수록 소형화 및 경제성 측면에서 유리하다. 따라서 2 mm가 가장 적합한 셀 간격으로 판단하였다. 이후 분석은 2 mm 간격을 기준으로 분석을 진행하였다.



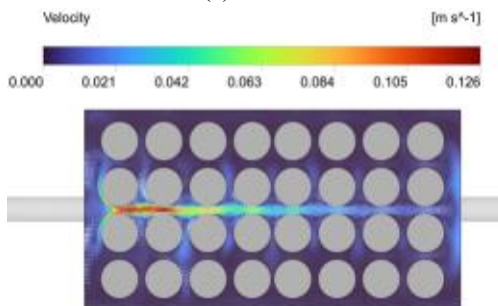
(a) 1 mm



(b) 2 mm

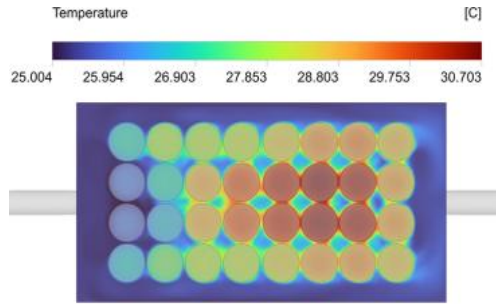


(c) 3 mm

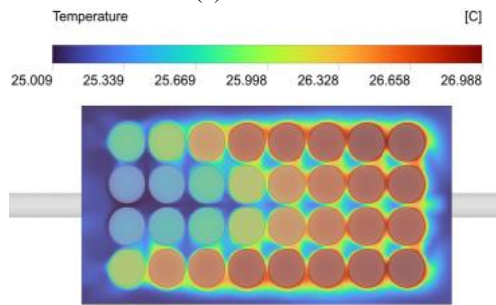


(d) 4 mm

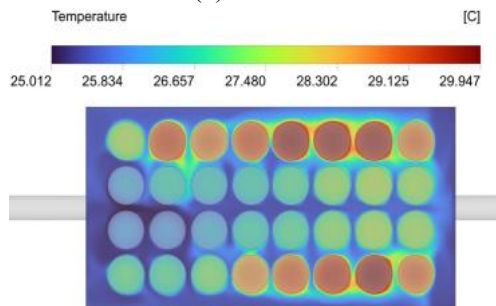
Fig. 4.8 Velocity distribution of working fluid according to cell spacing



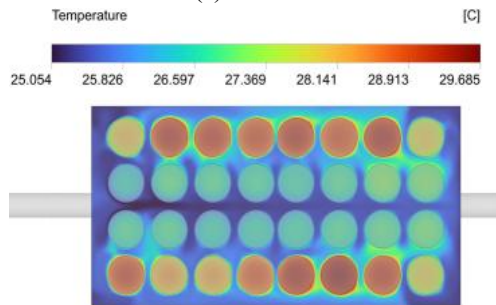
(a) 1 mm



(b) 2 mm



(c) 3 mm



(d) 4 mm

Fig. 4.9 Temperature distribution of battery according to cell spacing

4. C-rate 변화에 따른 성능 고찰

C-rate에 따른 액침냉각의 냉각성능을 비교하기 위하여 Novec 649의 질량유량을 0.02 kg/s 조건에서 1, 1.5, 2, 2.5, 3 C-rate의 방전속도를 고려하여 성능해석을 수행하였다. Fig 4.10은 방전 시 배터리 전체 방전율을 보여준다. 냉각성능을 분석하기 위하여 냉각을 진행하지 않았을 때 배터리의 최대온도를 확인하였으며, 이는 Fig 4.11에 제시하였다. 비냉각조건에서 1, 1.5, 2, 2.5, 3 C-rate 방전에 따른 배터리 모듈 최대온도는 각각 34.8°C, 39.5°C, 44.0°C, 47.5°C, 51.8°C였다. C-rate가 증가할수록 배터리 방전에 사용되는 전류 값이 증가하게 되고, 방전속도가 빨라지게 된다. 따라서 배터리의 발열 또한 C-rate가 증가함에 따라 급격하게 증가하게 되고 최대 온도 또한 높은 것을 확인할 수 있다.

Fig 4.12는 Novec 649를 이용한 액침냉각 시 배터리 C-rate에 따른 배터리 최대 온도 및 온도차이를 보여주며, 이때 질량유량은 0.02 kg/s이다. 1, 1.5, 2, 2.5, 3 C-rate 방전에서 최대온도는 각각 26.4°C, 28.1°C, 30.5°C, 33.0°C, 36.0°C였다. 비냉각 조건과 비교하였을 때, 배터리 최대온도의 감소율은 1, 1.5, 2, 2.5, 3 C-rate 방전조건일 때 각각 24.1%, 28.9%, 30.7%, 30.5%, 30.5%였으며, C-rate가 증가함에 따라 냉각성능이 향상하는 것을 확인할 수 있다. 특히, 1 C-rate와 같이 낮은 C-rate의 경우 Novec 649를 이용한 액침냉각에서는 초기온도 25°C에서 약 1.4°C의 낮은 온도 상승을 나타냈다. 3 C-rate에서 최대온도는 약 11°C로 증가하였다. 하지만 모든 C-rate에서 배터리 최대온도를 45°C 이하로 유지하기 위한 충분한 냉각을 제공하였다. 또한, C-rate에 따른 셀 간 온도차이는 1, 1.5, 2, 2.5, 3 C-rate 방전에서 각각 1.2°C, 2.7°C, 4.7°C, 6.8°C, 9.2°C로 나타났으며, 최대온도와 동일하게 C-rate가 증가할수록 셀 간 온도차이가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 5°C를 초과한 2.5 C-rate 이상 조건에서는 셀 간 온도 불균형을 감소시킬 수 있는 추가적인 해결책이 요구된다.

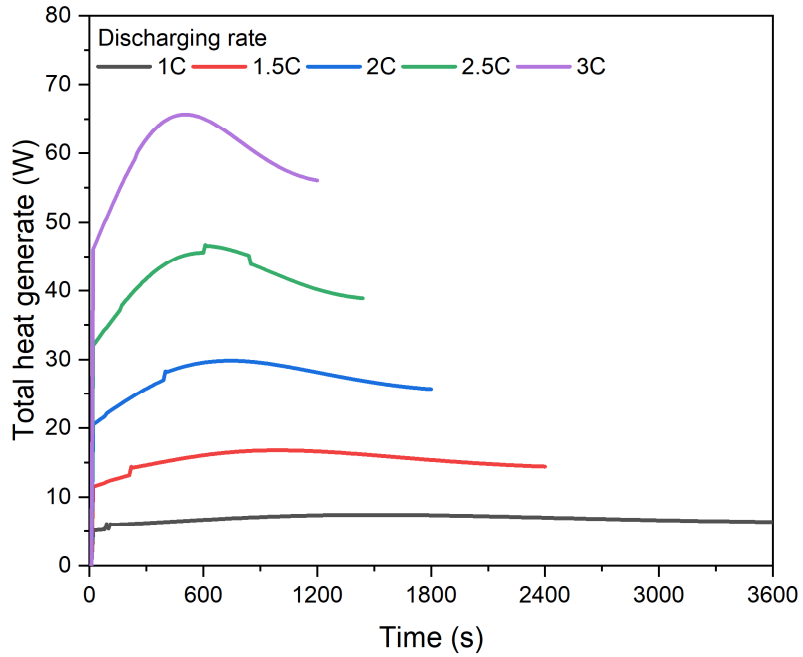


Fig. 4.10 Total heat generated according to C-rate

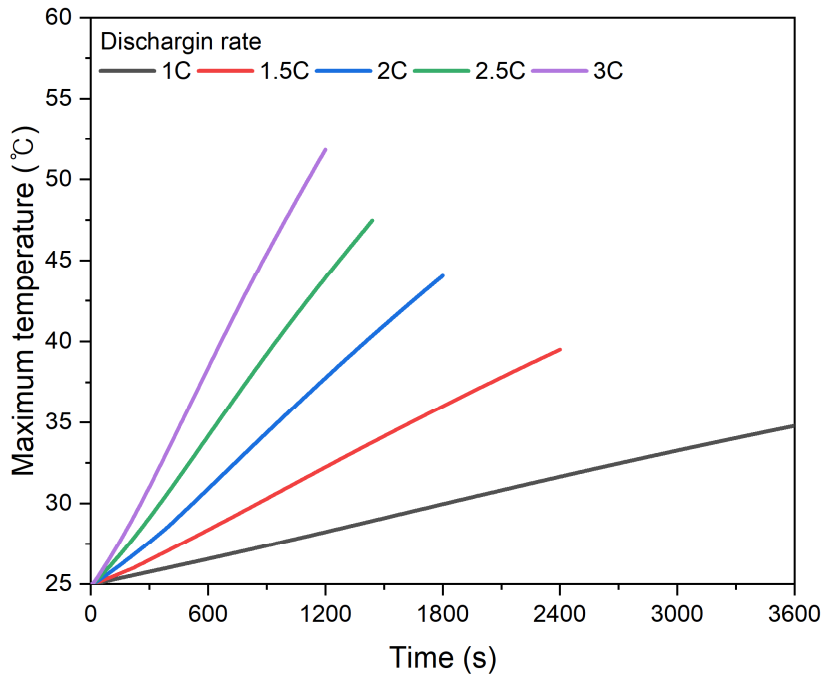
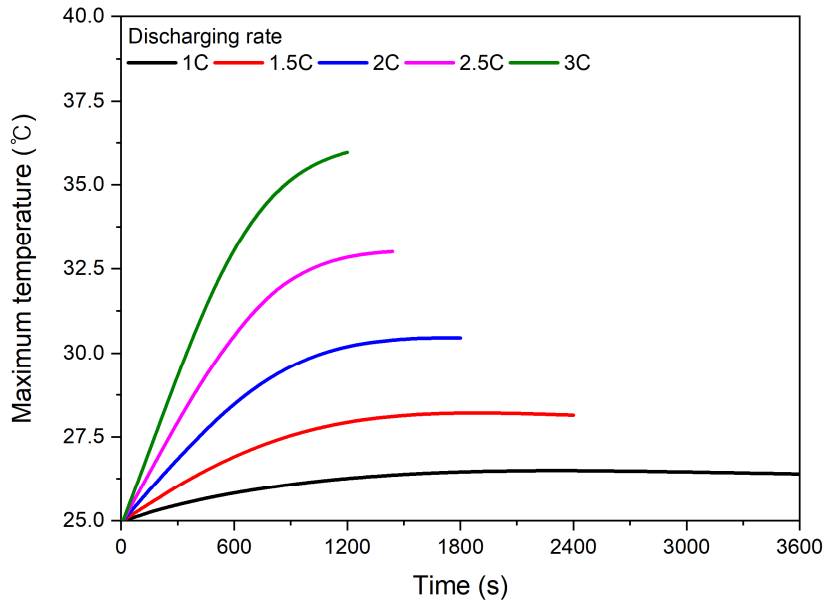
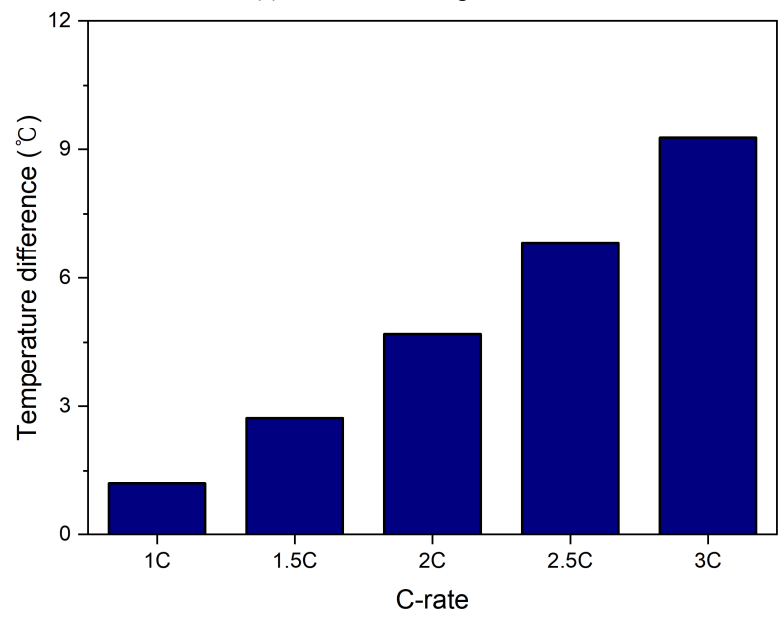


Fig. 4.11 Maximum battery temperature according to C-rate without cooling



(a) Maximum temperature



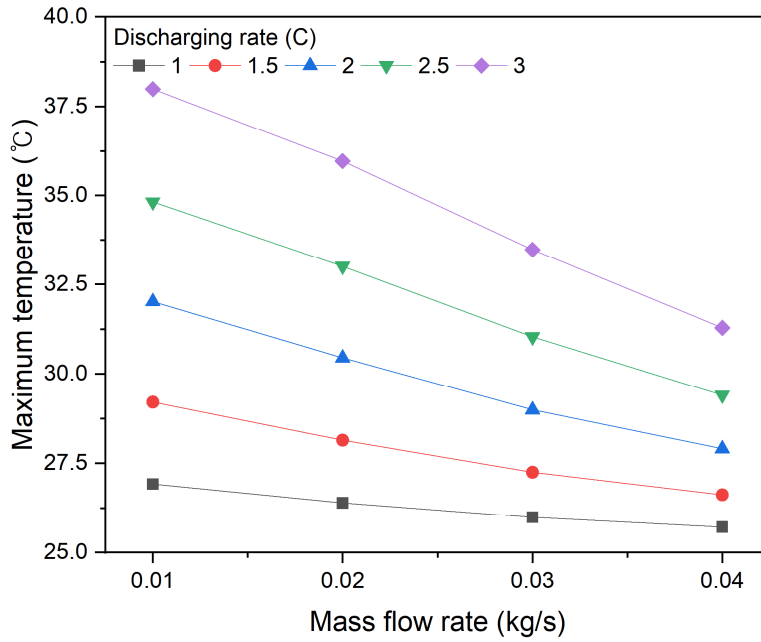
(b) Temperature difference

Fig. 4.12 Battery maximum temperature with cooling and temperature difference according to different C-rates

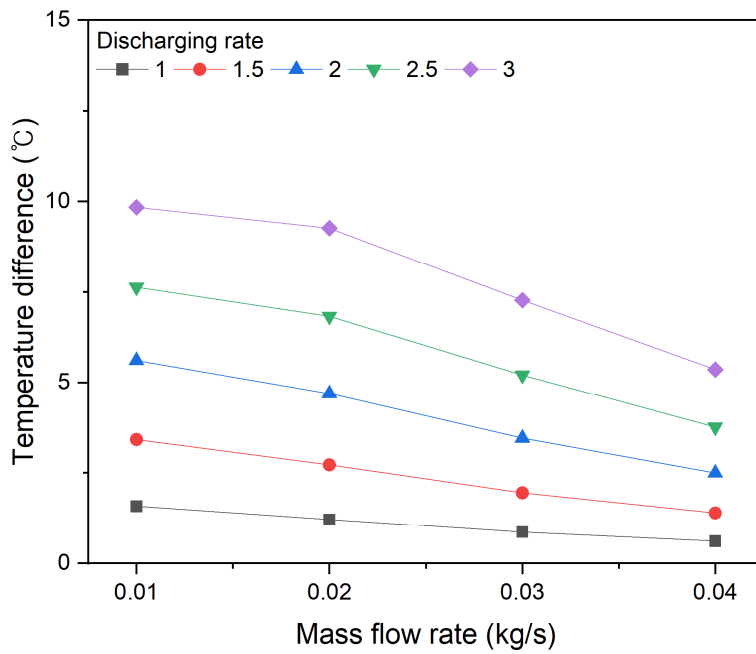
5. 작동유체의 질량유량 변화에 따른 성능 고찰

본 절에서는 작동유체의 질량유량에 따른 액침냉각 성능에 대한 분석을 수행하였다. 질량유량은 0.01 kg/s에서 0.04 kg/s까지 0.01 kg/s 씩 증가시켰으며, Fig. 4.9는 질량유량에 따른 최대온도 및 셀 간 온도차이를 보여준다. Fig. 4.13(a)을 통해 질량유량을 증가시킴으로써 배터리 최대온도는 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 질량유량이 증가할수록 그 감소량이 점차 감소하며, C-rate가 클수록 질량유량 증가에 따른 온도 감소량은 점차 증가하는 것을 확인할 수 있다. 앞 절에서 가장 높은 발열을 보였던 3 C-rate 방전조건에서 모든 범위의 질량유량은 배터리 모듈의 최대온도를 40°C 이하로 유지했으며, 0.01 kg/s일 때 가장 큰 38°C로 나타났다. 따라서 Novec 649를 이용한 액침냉각 시 해당범위에서 최대온도를 적정범위로 유지하는 좋은 냉각성능을 나타내는 것을 확인하였다.

배터리의 최대온도뿐만 아니라 배터리 셀 간 온도 균일성을 평가하는 것은 배터리 냉각성능을 확인하는 데 매우 중요한 지표 중 하나이다. Fig. 4.13(b)은 질량유량에 따른 셀 간 온도차이를 보여준다. C-rate가 높을수록 유량에 따른 온도차이 감소량이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 1, 1.5, 2, 2.5, 3 C-rate 방전과정에서 질량유량이 0.01 kg/s에서 0.04 kg/s로 증가하였을 때 셀 간 온도차이는 1.0°C, 2.0°C, 3.1°C, 3.9°C, 4.5°C 감소하였다. 하지만 상대적으로 낮은 방전속도인 1과 1.5 C-rate의 경우 모든 질량유량에서 3.5°C 이하로 셀 간 온도 균일성이 매우 높았다. 그에 비해 2 C-rate 이상의 방전속도에서는 유량에 따라 5°C를 초과하는 온도 불균일성을 나타냈으며, 가장 높은 방전 속도인 3 C-rate의 경우 해당 범위에서 모두 5°C를 초과한 결과를 보였다.



(a) Maximum temperature



(b) Temperature difference

Fig. 4.13 Variations of battery maximum temperature and temperature difference according to mass flow rate

Fig. 4.14는 질량유량에 따른 대류열전달계수를 보여준다. 질량유량이 증가함에 따라 대류열전달계수는 증가함을 확인할 수 있다. 대류열전달 계수는 방전초기 증가하다가 수렴한다. 2 C-rate 방전 후 질량유량 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 kg/s일 때 대류 열전달계수는 각각 1564.8, 2228.4, 2852.4, 3636.2 W/m²·K로 나타났다. 작동유체의 질량유량을 0.01 kg/s부터 0.01 kg/s씩 증가할 때마다 열전달계수의 증가율은 42.4%, 28%, 27.48%였다. 따라서, 작동유체의 질량유량을 증가함으로써 배터리의 최대온도 및 온도차이는 감소하며, 냉각성능이 향상되는 것을 확인하였다.

Fig. 4.15를 통해 압력강하는 질량유량이 증가할수록 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있다. 냉각장치의 입·출구 압력강하는 질량유량이 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 kg/s일 때 각각 5.3, 18.2, 37.7, 63.6 Pa이었다. 질량유량이 0.01 kg/s에서 0.04 kg/s로 증가하였을 약 12배의 매우 높은 압력강하 증가를 보였다. 또한, 식 (3.4)를 이용하여 배터리 액침냉각을 위해 사용되는 펌프소비동력을 계산하였다. 질량유량 증가 시 압력강하가 증가하기 때문에 펌프소비동력도 동일하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 본 연구에 적용한 배터리 모듈은 실제 전기자동차에 적용되는 배터리 셀에 비해 매우 작고, Novec 649의 매우 작은 점도로 인해 펌프소비 동력이 매우 작았다. 하지만 0.01 kg/s에서 0.04 kg/s로 증가했을 때 펌프소비 동력은 약 48배 증가함을 확인하였다. 따라서 실제 전기자동차에 적용되는 규모로 확장될 경우 펌프소비동력은 무시할 수 없는 수준임을 예측할 수 있다.

해석결과 질량유량이 증가하게 되면 냉각성능이 향상되는 것을 확인하였다. 하지만 동시에 압력강하의 증가로 인해 펌프소비동력이 증가하였다. 따라서 냉각 시 적절한 유량을 선택하는 것이 매우 중요하다.

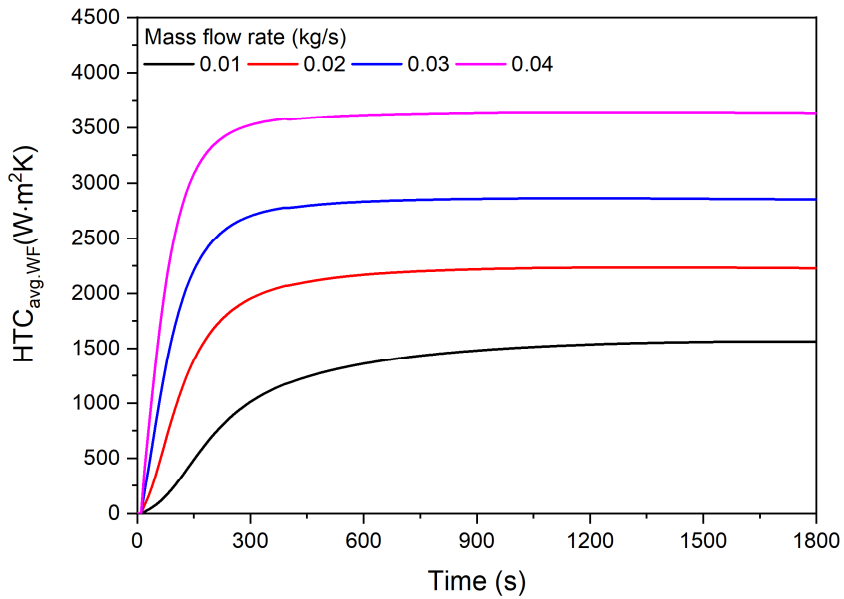


Fig. 4.14 HTC according to working fluid mass flow rate

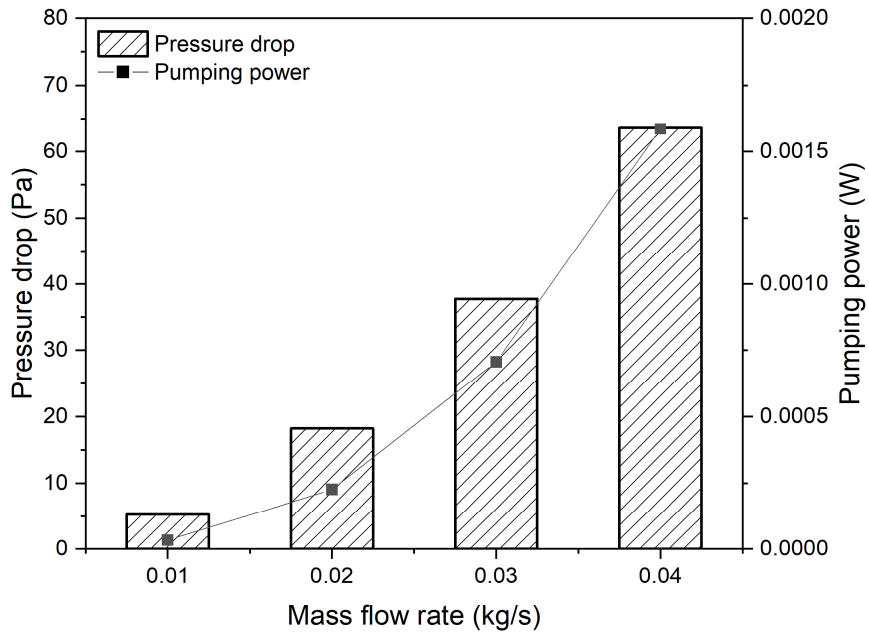


Fig. 4.15 Pressure drop and pumping power according to mass flow rate

6. 운전변수에 따른 냉각성능 분석 및 온도식 개발

앞 절에서 논의한 여러 운전변수에 따른 냉각성능을 분석하였다. 앞선 내용을 요약하면 Z-type의 입·출구 위치를 가지는 냉각장치 구조가 가장 높은 성능을 나타냈으며, 용액은 냉각성능 및 GWP를 고려하여 Novec 649를 선정하였다. 또한 배터리 방전속도에 따른 배터리 발열특성을 고려하였으며, 서로 다른 셀 간격 및 유체의 질량유량에 대한 냉각성능을 비교 분석하였다. 입·출구 위치와 용액을 고정했을 때, 배터리 냉각성능에 직접적인 영향을 미치는 운전변수는 셀 간격과 유체의 질량유량이다. 따라서 셀 간격 및 Novec 649의 질량유량이 배터리 최대온도 및 온도차이에 미치는 영향성을 분석하였다. Fig. 4.16은 질량유량과 셀 간격 변화에 따른 배터리 최대온도 및 온도차이를 보여준다. 배터리 최대온도와 셀 간 온도차이는 모두 셀 간격보다 질량유량에 더 큰 영향을 받았다.

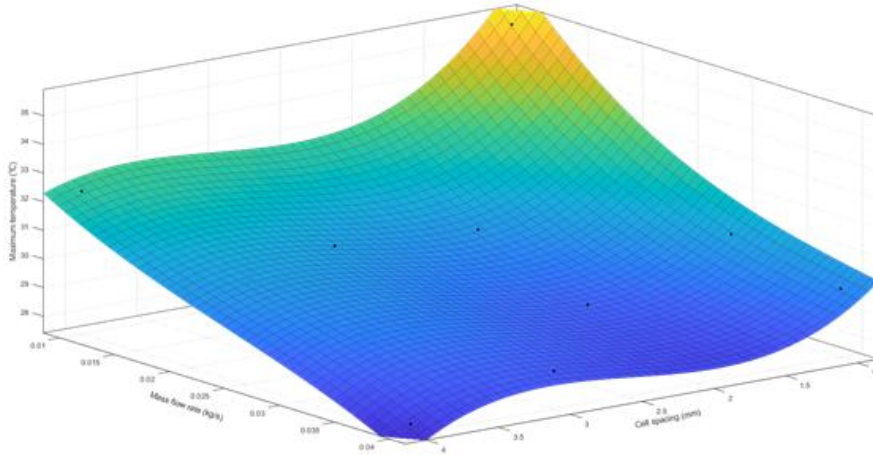
또한 Python의 statsmodel 모듈의 OLS 클래스를 사용하여 질량유량 0.01~0.04 kg/s, 셀 간격 1~4 mm, 방전속도 1~3 C-rate의 범위에서 최대온도 및 온도차이에 대한 상관분석 및 회귀분석을 진행하였다. Fig. 4.17은 각 변수들의 관계를 나타내는 산점도를 보여준다. 앞선 절들에서 분석했던 내용과 동일하게 배터리 최대온도와 온도차이는 C-rate와 양의 상관관계, 질량유량과 셀 간격에 음의 상관관계가 있음을 확인하였다. 세 가지 변수(질량유량, 셀 간격, 방전속도)에 대한 배터리 최대온도와 셀 간 온도차이의 회귀식은 각각 식 (4.1)과 식 (4.2)에 제시하였다.

$$T_{\max} = -0.5613x_1 + 4.6609x_2 - 141.3711x_3 + 26.4066 \quad (4.1)$$

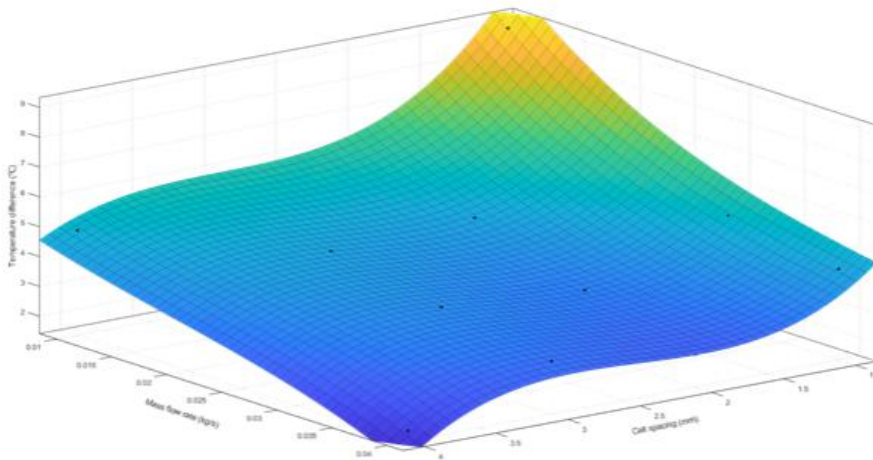
$$T_{diff} = -0.8653x_1 + 3.5972x_2 - 96.7973x_3 + 1.9752 \quad (4.2)$$

이때, x_1 은 셀 간격, x_2 는 방전속도, x_3 는 질량유량을 나타낸다.

상관분석은 피어슨 상관계수를 이용하여 판단한다. 피어슨 상관계수는 -1~+1 범위 내의 숫자이며, 1에 가까울수록 변수들과 결과값이 비례하며, -1에 가까울수록 반비례한다. 또한 절댓값이 0에 가까울수록 결과값과 변수들의 영향성이 적은 것으로 판단한다. 본 회귀식에 대한 상관계수는 각각 0.914, 0.908로 매우 강한 상관관계를 보임을 알 수 있다.

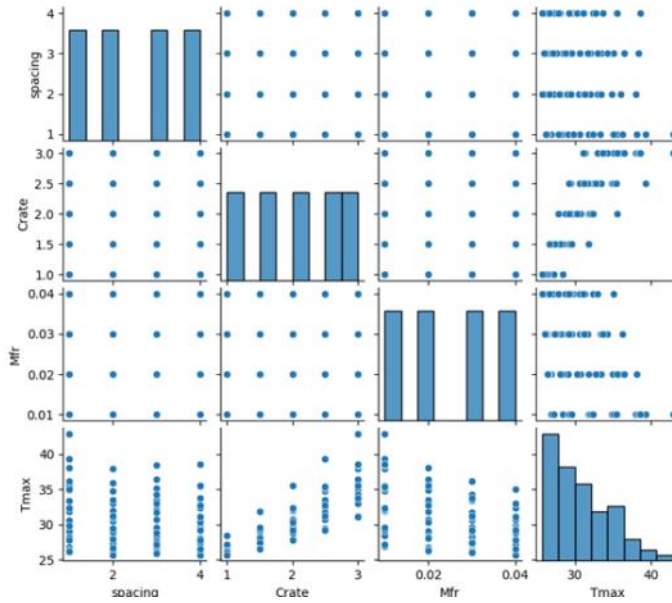


(a) Battery maximum temperature

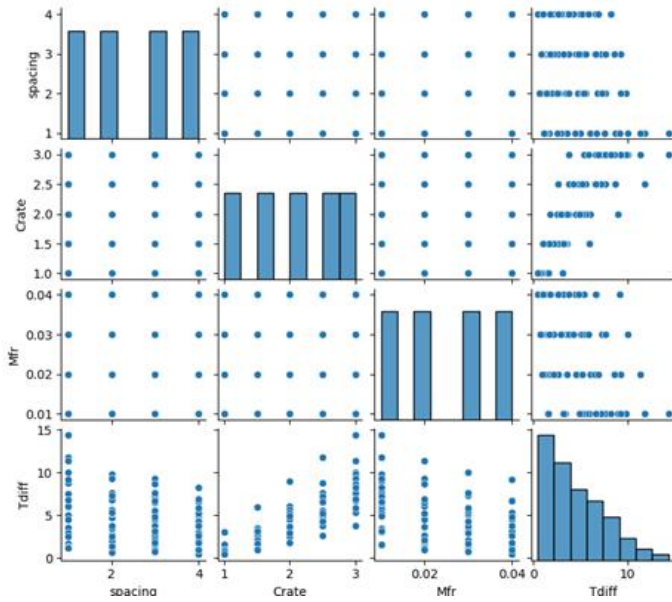


(b) Temperature difference

Fig. 4.16 Battery maximum temperature and Temperature difference according to mass flow rate and cell spacing



(a) Maximum temperature



(b) Temperature difference

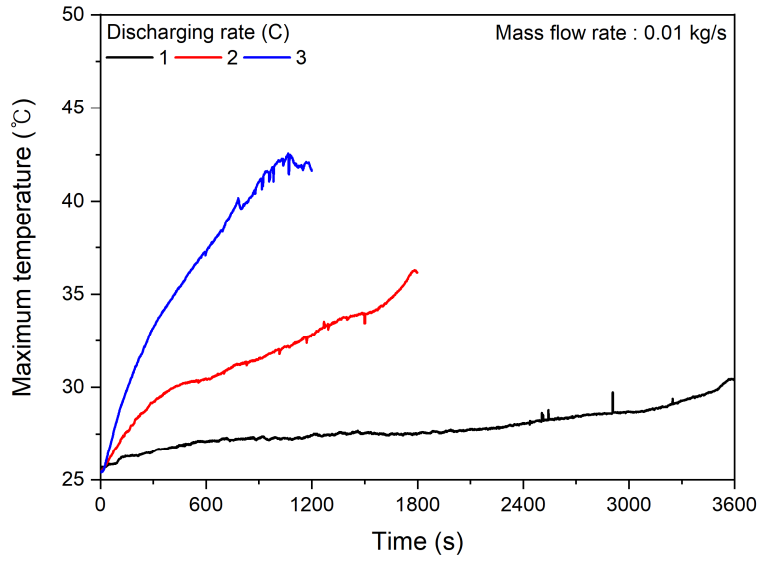
Fig. 4.17 Scatter plot of cell spacing, C-rate and mass flow rate with maximum temperature and temperature difference

제 2 절 실험 결과

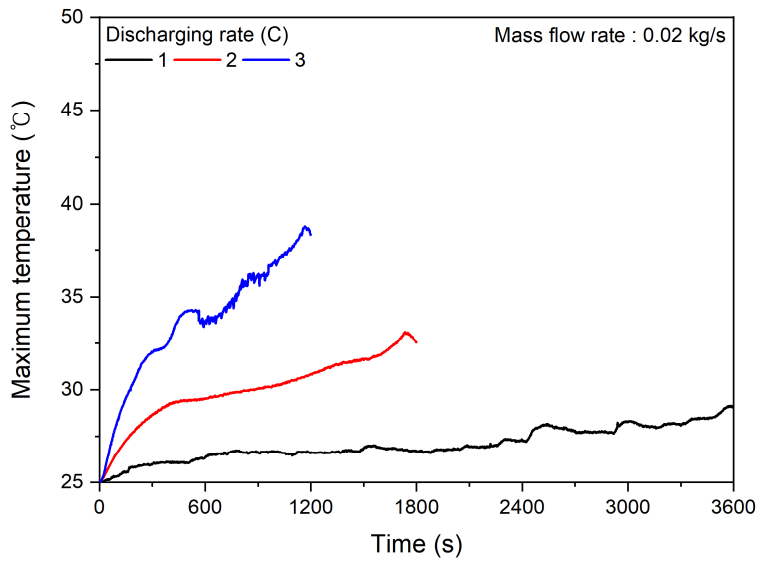
앞선 1절의 해석결과를 통해 입·출구 위치 Z-type, 작동유체 Novec 649, 셀 간격 2 mm가 가장 적합한 것으로 판단되었다. 따라서 이를 기반으로 액침냉각 장치를 설계하여 제작하였다. 16S2P 배터리 모듈에 대한 Novec 649를 이용한 액침냉각의 실험은 초기 및 주위온도 25°C 조건에서 방전속도 1, 2, 3 C-rate, 질량유량 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 kg/s로 변경하여 실험을 진행하였다.

Fig. 4.18은 C-rate에 따른 배터리 최대온도를 보여준다. 실제 배터리의 경우 과충전, 과방전을 예방하기 위해 DOD는 0%에서 100%까지 완전히 도달하지 않는다. 따라서 1, 2, 3 C-rate 방전이 각각 3600, 1800, 1200초 전에 방전이 완료된 후 점차 가해지는 전압이 감소하여 온도가 감소하게 된다. C-rate가 증가할수록 방전시간이 감소하고 최대온도가 증가하였다. 가장 낮은 유량조건인 0.01 kg/s일 때 배터리 최대온도는 1, 2, 3 C-rate 방전에서 각각 30.4°C, 36.2°C, 41.6°C였다. 초기 온도인 25°C 대비 각각 약 5.4°C, 11.2°C, 16.6°C 증가하였지만, 적정온도인 45°C를 초과하지 않았다. 또한 질량유량이 증가할수록 모든 C-rate에서 최대온도는 감소하였지만, 질량유량이 증가할수록 그 감소량은 점차 감소하였다.

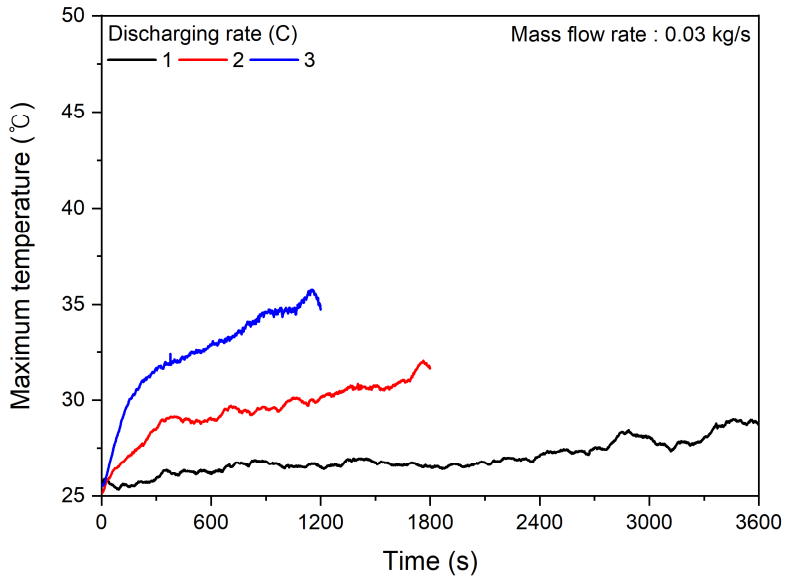
Fig. 4.19는 배터리 셀 간 온도차이를 보여준다. 가장 낮은 방전속도인 1 C-rate의 경우 모두 셀 간 온도차이가 2.5°C 이하로 유지되었다. 또한, 질량유량에 대한 셀 간 온도차이의 영향성이 적었다. 이는 1 C-rate의 경우 배터리의 발열이 크지 않기 때문에 낮은 유량에서도 배터리 발열을 충분히 제어할 수 있기 때문으로 판단된다. 이와 유사하게 1 C-rate 방전에서의 배터리 최대온도 또한 온도에 대한 영향성이 적었다. 또한, 2 C-rate와 3 C-rate의 경우 질량유량이 증가함에 따라 셀 간 온도차이가 감소하는 경향을 보였다. 하지만 0.03 kg/s에서 0.04 kg/s로 증가할 경우 약간 증가하였다. 2 C-rate의 셀 간 온도차이는 질량유량 0.01~0.04 kg/s에서 각각 5.3°C, 4.3°C, 3.8°C, 4.0°C였다. 따라서 2 C-rate의 경우 가장 낮은 유량인 0.01 kg/s를 제외하고 다른 모든 유량에서 적정온도인 범위인 5°C를 초과하지 않았다. 하지만 3 C-rate의 경우에는 모든 경우에서 5°C를 초과하였으며, 0.01 kg/s에서 9.0°C로 가장 높았고, 0.03 kg/s에서 가장 낮은 5.9°C의 셀 간 온도차이를 보였다.



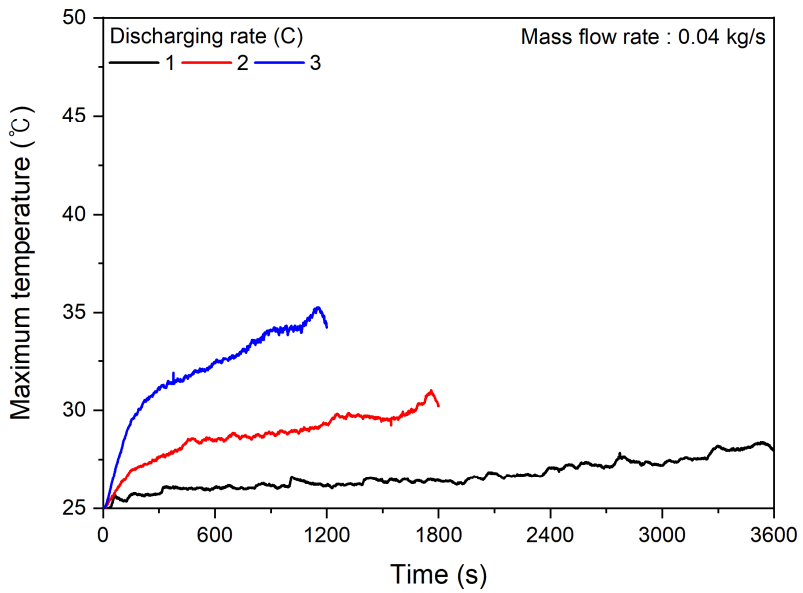
(a) Mass flow rate : 0.01 kg/s



(b) Mass flow rate : 0.02 kg/s



(c) Mass flow rate : 0.03kg/s



(d) Mass flow rate : 0.04kg/s

Fig. 4.18 Maximum temperature at different C-rates with different mass flow rate

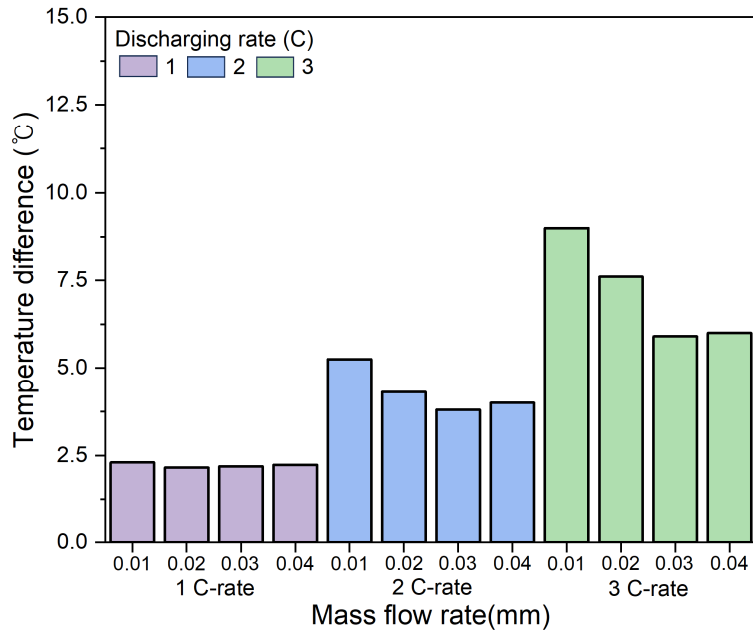


Fig. 4.19 Temperature difference at different C-rates with different mass flow

배터리 셀 간 온도차이는 서로 다른 배터리와의 온도차이뿐만 아니라 단일 셀에서의 온도차이도 중요하다. Fig. 4.20은 2 C-rate, 0.02 kg/s 조건에서 동일한 셀의 상부, 중부, 하부 지점의 온도를 나타냈다. 표현의 용이함을 위해 Cell Position은 중앙부분을 기준으로 명칭 하였다. 따라서 셀 위치 2의 배터리 상부, 중부, 하부는 각각 Fig. 3.6의 열전대 3, 2, 1 이다. 배터리 냉각장치는 하단의 입구에서 작동유체가 유입된 뒤 상단의 출구로 유체가 흐르는 구조이다. 따라서 모든 위치에서 동일 셀의 배터리 온도는 하부가 가장 낮았으며, 그다음 중부, 상부 순서였다. 또한 셀 위치 2의 하부는 입구와 매우 근접해 있기 때문에 가장 낮은 온도를 보였다. 셀 위치가 출구와 입구와 멀어질수록 점차 동일 셀에서의 온도편차는 감소하였으며, 8번 위치의 상부는 배터리 셀을 냉각시키고 나가는 작동유체의 출구와 근접해 있기 때문에 6번 위치의 상부보다 증가하였다. 모든 위치에서 온도 차이는 3°C 이하였다.

배터리 셀 간 온도차이에 대한 분석을 위해 배터리 셀 위치에 따른 온도를 비교하였다. Fig. 4.21은 질량유량 0.02 kg/s, 2 C-rate 방전조건에서 셀 위치별 온도 변화를 보여준다. 2번, 4번은 입구와 가장 근접해 있기 때문에 가장 낮은 온도의 Novec 649와 열전달을 하게 된다. 따라서 다른 셀들에 비해 온도가 낮았으며, 특히 2번의 온도가 가장 낮았다. 또한 유속의 영향을 가장 많이 받는 셀이기 때문에 다른 위치와 다르게 결과에 대한 변동성이 나타났다. 입구에서 들어온 Novec 649는 출구로 흐르면서 셀에서의 열을 전달받아 출구와 가까워질수록 Novec 649의 온도가 증가하게 된다. 따라서 셀의 온도도 출구로 향하는 흐름방향으로 높아진다. 배터리 모듈의 간격은 2 mm이며, 열전대 및 배선들로 인해 유체의 흐름에 대한 저항을 많이 받게 된다. 따라서 출구와 가장 가까운 14번보다는 출구와 근접하면서 중앙에 있는 10번의 온도가 가장 높았다.

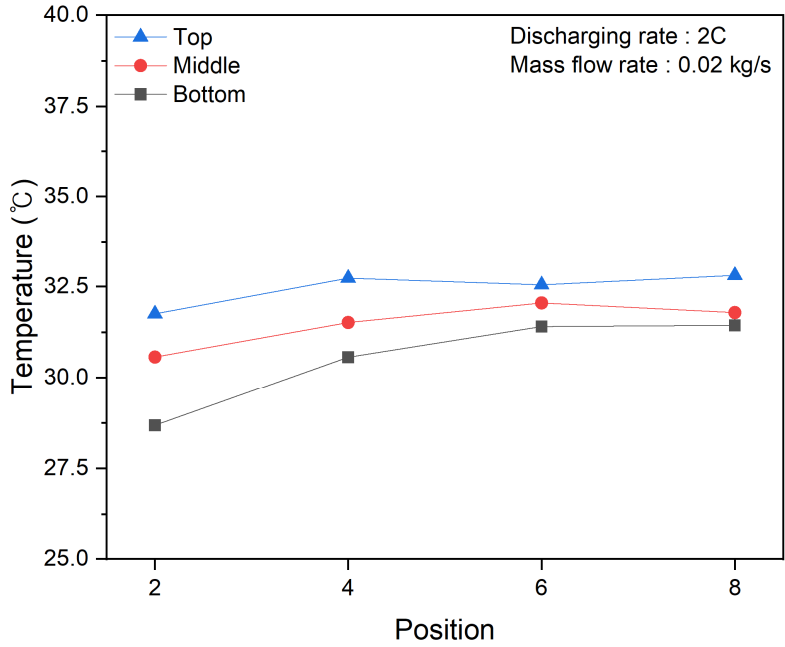


Fig. 4.20 Temperature at different point of a cell

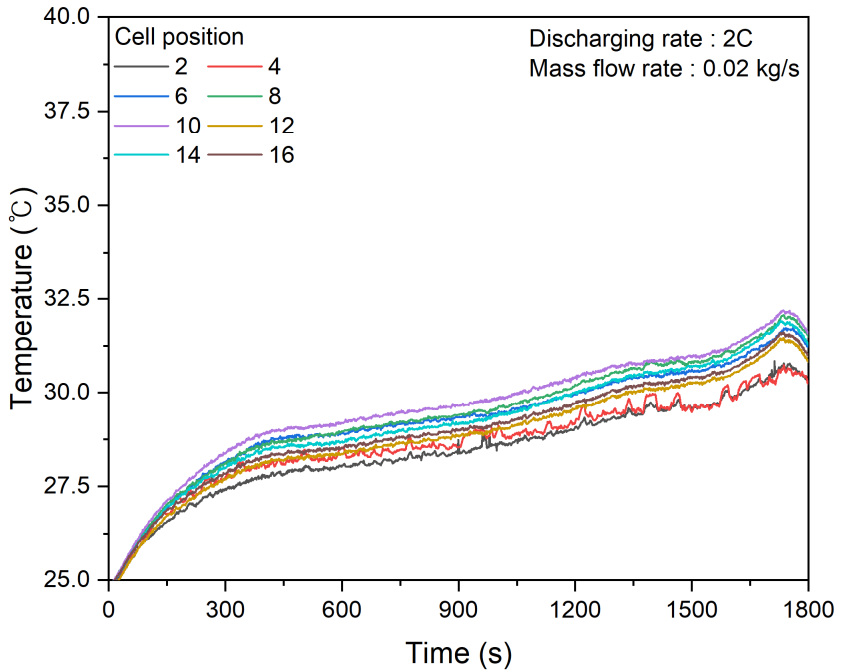


Fig. 4.21 Temperature at different cell position with time

작동유체의 질량유량 변화에 따른 냉각성능의 영향성을 분석하기 위해 2 C-rate 방전 조건에서 배터리 평균온도를 비교하였으며, 이는 Fig. 4.22에 나타냈다. 작동유체의 질량유량이 증가함에 따라 배터리 평균온도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 질량유량이 0.01 kg/s일 때, 배터리 평균온도는 32.8°C였으며, 질량유량이 0.01 kg/s 증가할 때마다 배터리 평균온도는 6.1%, 11.9%, 15.2% 감소한 30.8°C, 28.9°C, 27.9°C 였다.

또한, 식 (3.1)을 이용하여 배터리 냉각용량을 계산하였으며, 작동유체의 질량유량에 따른 냉각용량을 Fig. 4.23에 나타냈다. 액침냉각의 냉각용량은 작동유체의 질량유량이 증가할수록 증가하였다. 2 C-rate 방전조건에서 작동유체의 질량유량이 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 kg/s일 때, 냉각용량은 각각 94 W, 120.6 W, 137.2 W, 147.4 W 였으며, 질량유량 증가로 인해 냉각용량은 최대 56.81% 증가하였다.

따라서 작동유체의 질량유량이 증가할 때 배터리 최대온도 및 평균온도의 감소 효과를 확인할 수 있었다. 하지만 셀 간 온도차이의 경우 Fig 4.19의 결과와 같이 질량유량 증가로 인한 감소 경향성은 보이지만 모든 경우에서 감소하지는 않았다.

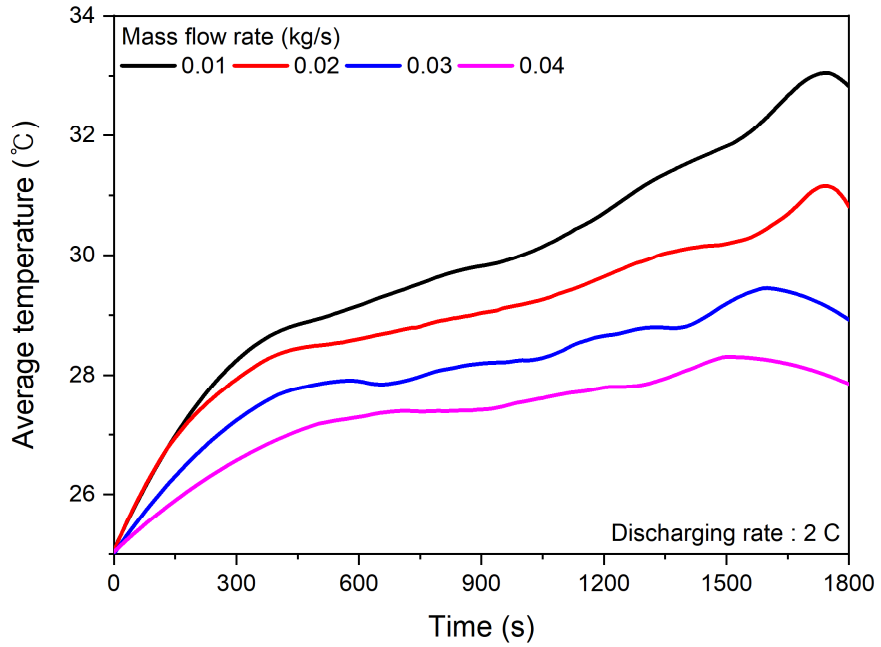


Fig. 4.22 Average temperature according to mass flow rate

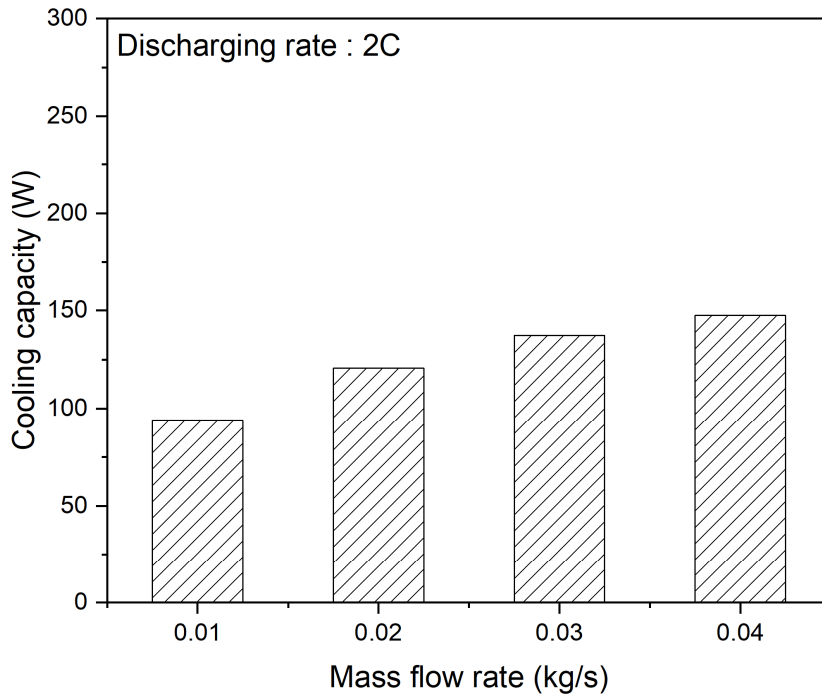


Fig. 4.23 Cooling capacity according to mass flow rate

제 3 절 해석과 실험 결과에 대한 종합적 고찰

해석을 통하여 배터리 액침냉각 장치의 입·출구 위치, 작동유체, 셀 간격을 C-rate, 질량유량에 따른 액침냉각 성능 고찰을 진행하였다. 입·출구 위치, 작동유체, 셀 간격의 경우 냉각성능의 최적점을 결정하였으며, 해석결과 Z-type, Novec 649, 2 mm의 최적의 형상을 선정하였다. 이에 따른 C-rate 및 질량유량 변화에 따른 해석을 진행하였을 때, 배터리 최대온도 및 온도차이는 C-rate와 비례하였으며, 질량유량과 반비례하는 결과를 보였다. 이를 기반으로 액침냉각 실험장치를 설계하여 실험을 진행하였다. 해석결과를 기반으로 실험장치를 제작하였지만, 실제 냉각 장치는 해석모델과 다소 차이점이 있다. 첫 번째, 해석을 위해 실험을 진행했던 배터리와 배터리 모듈에 적용한 배터리가 약간 다르다. 해석을 위해 참고한 배터리 단일 셀 실험의 배터리와 모듈에 적용한 배터리 특성의 경우 Table 3.1로 동일하다. 하지만 제조사마다 셀 제작의 재료나 특성을 파악하기 어려우며, 두 개의 배터리의 발열특성이 다르다. 배터리 모듈 제작에 사용한 배터리가 해석에 적용한 셀보다 높은 C-rate의 충·방전이 가능하기 때문에 더 높은 발열이 나타날 것으로 예측하였다. 두 번째, 액침냉각 장치의 크기가 다르다는 점이다. 해석모델의 경우 단순하게 배터리가 배열되어 있는 구조로 구성되어 있으며, 배터리 충·방전을 위한 파워선 및 배터리홀더, busbar가 생략되어 있는 구조이다. 하지만 실제 배터리 모듈의 경우 배터리를 고정하기 위한 배터리홀더와 전기적 연결을 위한 busbar가 필수적이며, 배터리 충·방전을 위한 파워선, 온도측정을 위한 열전대, 배터리의 안전한 작동을 위한 BMS 선들이 배터리 냉각장치 안에 같이 들어가게 된다. 따라서 해석 모델보다 실제 실험장치는 약간 크게 제작되었다. 세 번째, 앞선 부품들로 인하여 해석을 통해 예측했던 배터리 흐름에 저항이 발생하여 상당한 차이를 발생시킨다. 따라서 해석과 실험결과에 대한 정확한 수치를 직접적으로 비교하는 것은 오차가 크게 발생할 것으로 판단된다. 따라서 해석의 결과를 기반으로 실험 시 변경할 수 없는 요인(입·출구 위치 Z-type, 작동유체 Novec 649, 셀 간격 2mm)을 결정하여 실험장치를 설계하고, 질량유량 및 C-rate에 대한 영향성을 분석한 뒤 실험을 진행하였다.

해석과 실험결과 모두 Novec 649의 냉각성능이 우수한 것으로 판단되며 3 C-rate 방전 조건에서도 배터리 최대온도를 45℃ 이하로 유지하기에 적합한 냉각방식이다. 하지만 배터리의 방전속도가 증가함에 따라 배터리 모듈 내 셀들의 온도차

이는 증가하였지만, 이는 액침 냉각장치의 구조 개선을 통해 보완할 수 있다고 판단된다.

Fig. 4.24는 2 C-rate 조건에서 배터리 평균온도에 대한 실험과 해석의 결과 비교를 보여준다. 평균온도의 경우 앞서 예측한 것과 동일하게 실험결과가 더 높은 평균온도를 보였다. 또한 질량유량이 증가할수록 실험과 해석 값에 대한 차이가 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 실험이 질량유량에 따른 배터리 평균온도의 영향성이 더 크다는 것을 의미한다. 작동유체의 질량유량 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 kg/s 일 때, 실험과 해석의 배터리 평균온도의 차는 각각 2.6°C, 2.2°C, 1.2°C, 0.7°C였다. 또한, 실험과 해석 모두 질량유량이 증가할수록 감소하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4.25는 2 C-rate 조건에서 배터리 셀 간 온도차이에 대한 실험과 해석의 결과 비교를 보여준다. 셀 간 온도차이의 경우 평균온도와 유사하게 질량유량이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 하지만 해석의 경우 질량유량에 따른 셀 간 온도 감소가 명확하지만, 실험의 경우 유체 흐름에 대한 저항으로 인해 유체가 불균일하게 흐른다. 그에 따라 질량유량 증가가 항상 배터리 셀 간 온도차이를 감소시키지 않았다. 낮은 질량유량에서는 배터리 온도 균일도는 실험값이 더 높았으며, 질량유량이 증가함에 따라 배터리 온도 균일도는 낮아져 해석의 결과가 더 높은 균일성을 보였다.

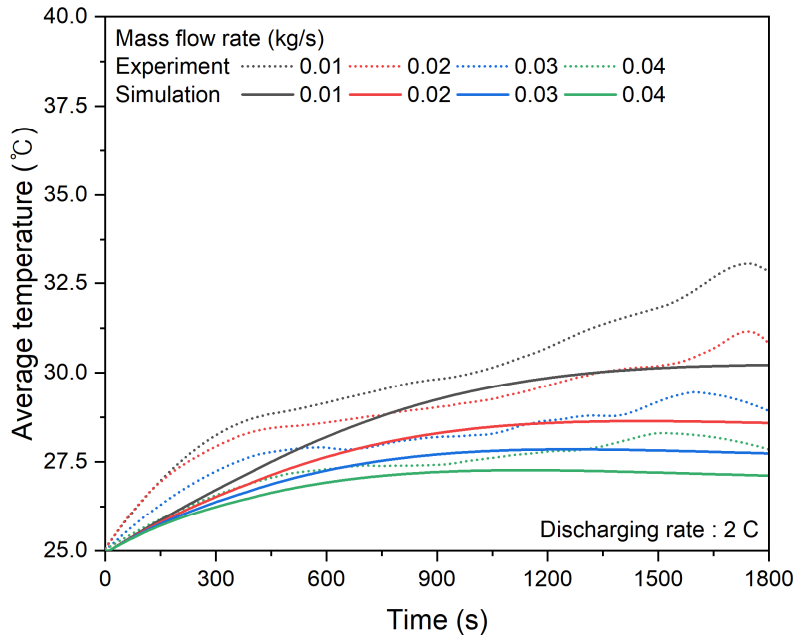


Fig. 4.24 Comparison of experimental and simulation average temperature according to different mass flow rate

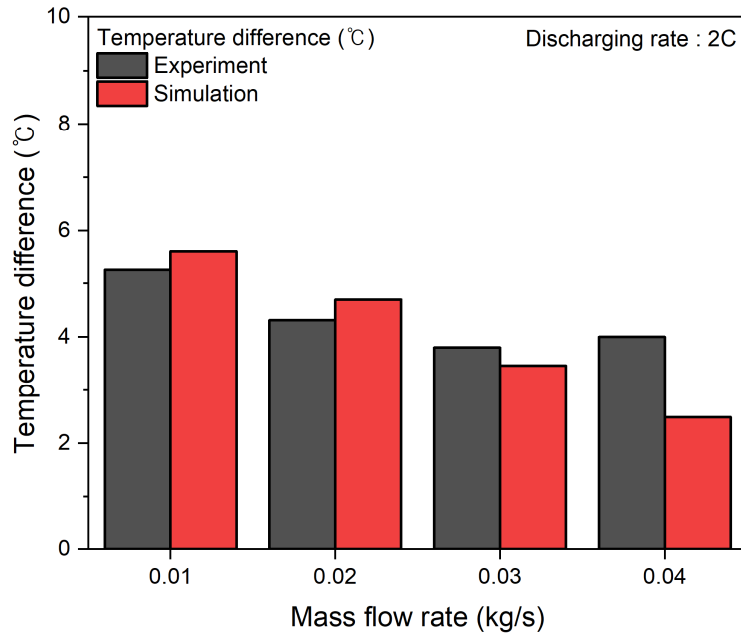


Fig. 4.25 Comparison of experimental and simulation temperature difference according to different mass flow rate

제 5 장 결론

리튬이온배터리의 성능, 수명, 안전성을 유지하기 위해서는 배터리 열관리가 필수적이다. 본 연구에서는 리튬이온배터리의 발열을 제어하기 위하여 액침냉각을 적용하였으며, 액침냉각을 적용한 21700 배터리 모듈의 냉각특성 분석을 위해 해석 및 실험적 연구를 수행하였다. 우선, 21700 배터리 모듈의 해석적 모델을 개발하였으며 이를 활용하여 액침냉각 장치의 입·출구 위치, 작동유체, 셀 간격, C-rate, 작동유체 유량 변화에 따른 냉각성능을 해석을 통하여 고찰하였다. 해석결과를 기반으로 배터리 최대온도 및 온도차이를 예측할 수 있는 식을 도출하였다. 또한, 실험적으로 냉각성능을 고찰하기 위하여 Novec 649를 이용한 액침냉각 실험장치를 구축하였으며 C-rate, 작동유체의 질량유량에 따른 냉각성능을 분석하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

해석을 통한 입·출구 위치에 따른 냉각성능 분석결과 Z-type 모델이 가장 낮은 배터리 최대온도를 가졌으며, 작동유체가 배터리 모듈의 하단에서 상단으로 흘러 비교적 유체의 이동경로가 넓게 형성되어 배터리의 온도 균일성이 우수하였다. 또한, 작동유체 변화에 따른 냉각성능 분석 결과 Novec 649의 우수한 냉각성능 및 열물리적 특성으로 인해 가장 적합한 유체로 판단되었으며, Novec 649를 이용한 액침냉각 시 비냉각조건에 비해 약 30%의 최대온도를 감소시킬 수 있음을 확인하였다. Novec 649의 낮은 비열과 점성으로 인하여 높은 열전달 성능을 보였으며, Silicone oil과 비교하였을 때 대류열전달계수는 약 2배 컸으며, Prandtl number는 약 16배 작았다. 또한 Novec 649는 0.6의 매우 낮은 GWP를 가지고 있어 액침냉각의 작동유체로 매우 적합하였다. 액침냉각의 경우 셀의 간격이 유체의 흐름에 매우 큰 영향을 주기 때문에 셀 간격에 따른 냉각성능을 해석적으로 분석하였다. 해석결과 셀 간격이 증가할수록 배터리 평균온도는 감소하였다. 하지만 셀 간격이 넓은 경우 중심부의 유동 흐름이 빨라져 국부적인 온도감소가 발생하여 측면부 배터리와 온도차이가 발생하게 되었다. 또한, 셀 간격이 좁을수록 소형화 및 경제성 측면에 유리하기 때문에 셀 간격 2 mm가 가장 적합한 간격으로 판단되었다. 해석을 통하여 입·출구 위치 Z-type, 작동유체 Novec 649, 셀 간격 2 mm 조건이 최적의 조건임을 확인하였고 이를 바탕으로 C-rate, 질량유량 변화에 대한 액침냉각 성능을 해석적 및 실험적

으로 분석하였다.

해석결과 C-rate가 증가할수록 배터리 최대온도 및 온도차이가 증가하였다. 하지만 액침냉각 적용 시 배터리 최대온도는 3 C-rate 방전 조건에서도 최대온도 36°C로 적정온도 범위를 유지하는 우수한 냉각성능을 보였으며, 이는 비냉각조건에 비해 약 30.5%의 온도감소율을 나타냈다. 또한 작동유체의 질량유량이 증가할수록 액침냉각성능이 향상되었다. 냉각수의 질량유량이 0.01 kg/s에서 0.04 kg/s로 증가하였을 때, 3 C-rate 방전 후 배터리 최대온도는 약 17.6% 감소하였다. 또한 2 C-rate 방전 후 열전달계수는 질량유량 0.01 kg/s과 0.04 kg/s에서 각각 1564.8 W/m²·K, 3636.2 W/m²·K로 2배 이상 증가하였다. 하지만 질량유량의 증가는 압력강하의 증가를 초래하여 시스템의 펌핑소비동력을 증가시키게 된다. 따라서 냉각 시 적절한 유량을 선택하는 것이 매우 중요하다. 또한 해석결과를 기반으로 다중회기분석을 수행하였으며, 셀 간격, C-rate, 질량유량에 따른 배터리 최대온도 및 온도차이에 대한 예측식을 도출하였다. 최대온도 및 온도차이 예측식은 각각 상관계수 0.914과 0.908로 매우 강한 상관관계가 있음을 확인하였다.

액침냉각 실험결과 가장 낮은 질량유량인 0.01 kg/s일 때, 배터리 최대온도는 1, 2, 3 C-rate 방전에서 각각 30.4°C, 36.2°C, 41.6°C였다. 이는 적정온도인 45°C를 초과하지 않는 안전한 냉각성능을 가지고 있음을 확인하였다. 셀 간 온도차이의 경우 1 C-rate에서 2.5°C 이하로 매우 높은 온도 균일성을 가지고 있었으며, 질량유량에 대한 셀 간 온도차이의 영향성이 적었다. 이는 1 C-rate의 경우 배터리의 발열이 크지 않기 때문에 낮은 유량에서도 배터리 발열을 충분히 제어가 가능하기 때문이다. 3 C-rate의 경우에는 모든 경우에서 5°C를 초과하였으며, 0.01 kg/s에서 9.0°C로 가장 높았고, 0.03 kg/s에서 가장 낮은 5.9°C의 셀 간 온도차이를 보였다. 이는 냉각장치 구조의 단순성으로 인한 결과로 판단되며, 액침 냉각장치의 구조 개선을 통해 보완할 수 있다. 또한, 질량유량 대한 냉각성능을 분석하였으며, 2 C-rate 방전조건에서 질량유량이 0.01 kg/s일 때, 배터리 평균온도는 32.8°C를 나타냈으며 질량유량이 0.01 kg/s 증가할 때마다 배터리 평균온도는 6.1%, 11.9%, 15.2% 감소하였다. 그리고 냉각용량은 각각 94 W, 120.6 W, 137.2 W, 147.4 W였으며, 질량유량 증가로 인해 최대 56.81% 증가하였다.

본 연구에서는 액침냉각을 적용한 21700 배터리 모듈의 냉각특성을 해석적 및 실험적으로 분석하였으며, 다양한 변수에 따른 영향성을 고찰하였다. 해석 및 실험결과 Novec 649를 이용하는 액침냉각은 배터리 최대온도를 45°C 미만으로 유지하

는 우수한 냉각성능을 보였다. 또한 셀 간 온도도 비교적 균일하지만 구조적 단순화로 인해 높은 방전속도에서는 셀 간 온도차이가 크게 발생하였다. 하지만 이는 냉각장치 형상 개선을 통해 향상될 것으로 판단된다. 따라서 액침냉각은 우수한 냉각성능을 가지며, 높은 발열을 발생시키는 고용량, 고에너지 밀도 배터리의 안정성을 확보할 수 있는 우수한 냉각 방식임을 확인하였다. 본 연구 결과를 기반으로 전기자동차뿐만 아니라 ESS 시스템, 데이터 센터 등 다양한 산업에서 고발열의 배터리를 냉각시키며, 시스템의 효율을 향상시키는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] A. Ghosh, Possibilities and Challenges for the Inclusion of the Electric Vehicle (EV) to Reduce the Carbon Footprint in the Transport Sector: A Review, *Energies* 2020, Vol. 13, Page 2602. 13 (2020) 2602.
<https://doi.org/10.3390/EN13102602>.
- [2] N.O. Bonsu, Towards a circular and low-carbon economy: Insights from the transitioning to electric vehicles and net zero economy, *J. Clean. Prod.* 256 (2020) 120659. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.120659>.
- [3] L.H. Saw, Y. Ye, M.C. Yew, W.T. Chong, M.K. Yew, T.C. Ng, Computational fluid dynamics simulation on open cell aluminium foams for Li-ion battery cooling system, *Appl. Energy.* 204 (2017) 1489–1499.
<https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2017.04.022>.
- [4] IEA, Global EV Outlook 2022 - Securing supplies for an electric future, *Glob. EV Outlook 2022.* (2022) 221.
<https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022%0Ahttps://iea.blob.core.windows.net/assets/ad8fb04c-4f75-42fc-973a-6e54c8a4449a/GlobalElectricVehicleOutlook2022.pdf>.
- [5] G. Li, J.Y. Li, F.S. Yue, Q. Xu, T.T. Zuo, Y.X. Yin, Y.G. Guo, Reducing the volume deformation of high capacity SiO_x/G/C anode toward industrial application in high energy density lithium-ion batteries, *Nano Energy.* 60 (2019) 485–492. <https://doi.org/10.1016/J.NANOEN.2019.03.077>.
- [6] T. Kim, W. Song, D.Y. Son, L.K. Ono, Y. Qi, Lithium-ion batteries: outlook on present, future, and hybridized technologies, *J. Mater. Chem. A.* 7 (2019) 2942–2964. <https://doi.org/10.1039/C8TA10513H>.
- [7] P. Roy, S.K. Srivastava, Nanostructured anode materials for lithium ion batteries, *J. Mater. Chem. A.* 3 (2015) 2454–2484.
<https://doi.org/10.1039/C4TA04980B>.

- [8] K. Osmani, M. Alkhedher, M. Ramadan, D.S. Choi, L.K.B. Li, M.H. Doranehgard, A.G. Olabi, Recent progress in the thermal management of lithium-ion batteries, *J. Clean. Prod.* 389 (2023) 136024.
<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2023.136024>.
- [9] J. Xie, C. Mo, G. Zhang, X. Yang, Thermal performance analysis of liquid cooling system with hierarchically thermal conductive skeleton for large-scaled cylindrical battery module in harsh working conditions, *Int. J. Heat Mass Transf.* 215 (2023) 124487.
<https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2023.124487>.
- [10] X. Liu, L. cheng Yao, C. qi Su, X. Xiong, Y.P. Wang, A hybrid battery thermal management system coupling with PCM and optimized thermoelectric cooling for high-rate discharge condition, *Case Stud. Therm. Eng.* 49 (2023) 103269. <https://doi.org/10.1016/J.CSITE.2023.103269>.
- [11] Z.Y. Jiang, H.B. Li, Z.G. Qu, J.F. Zhang, Recent progress in lithium-ion battery thermal management for a wide range of temperature and abuse conditions, *Int. J. Hydrogen Energy.* 47 (2022) 9428–9459.
<https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2022.01.008>.
- [12] S. Ma, M. Jiang, P. Tao, C. Song, J. Wu, J. Wang, T. Deng, W. Shang, Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A review, *Prog. Nat. Sci. Mater. Int.* 28 (2018) 653–666.
<https://doi.org/10.1016/J.PNSC.2018.11.002>.
- [13] Z.G. Qu, Z.Y. Jiang, Q. Wang, Experimental study on pulse self-heating of lithium-ion battery at low temperature, *Int. J. Heat Mass Transf.* 135 (2019) 696–705. <https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2019.02.020>.
- [14] W. Situ, X. Yang, X. Li, G. Zhang, M. Rao, C. Wei, Z. Huang, Effect of high temperature environment on the performance of $\text{LiNi}_0.5\text{Co}_0.2\text{Mn}_0.3\text{O}_2$ battery, *Int. J. Heat Mass Transf.* 104 (2017) 743–748.
<https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2016.09.005>.
- [15] J. Liang, Y. Gan, W. Song, M. Tan, Y. Li, Thermal–Electrochemical simulation

- of electrochemical characteristics and temperature difference for a battery module under two-stage fast charging, *J. Energy Storage*. 29 (2020) 101307. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2020.101307>.
- [16] M. Wang, S. Teng, H. Xi, Y. Li, Cooling performance optimization of air-cooled battery thermal management system, *Appl. Therm. Eng.* 195 (2021) 117242. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2021.117242>.
- [17] G. Zhao, X. Wang, M. Negnevitsky, H. Zhang, A review of air-cooling battery thermal management systems for electric and hybrid electric vehicles, *J. Power Sources*. 501 (2021) 230001. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2021.230001>.
- [18] E. Jiaqiang, M. Yue, J. Chen, H. Zhu, Y. Deng, Y. Zhu, F. Zhang, M. Wen, B. Zhang, S. Kang, Effects of the different air cooling strategies on cooling performance of a lithium-ion battery module with baffle, *Appl. Therm. Eng.* 144 (2018) 231–241. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2018.08.064>.
- [19] G. Zhao, X. Wang, M. Negnevitsky, C. Li, An up-to-date review on the design improvement and optimization of the liquid-cooling battery thermal management system for electric vehicles, *Appl. Therm. Eng.* 219 (2023) 119626. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2022.119626>.
- [20] K. Chen, W. Wu, F. Yuan, L. Chen, S. Wang, Cooling efficiency improvement of air-cooled battery thermal management system through designing the flow pattern, *Energy*. 167 (2019) 781–790. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2018.11.011>.
- [21] K. Chen, M. Song, W. Wei, S. Wang, Design of the structure of battery pack in parallel air-cooled battery thermal management system for cooling efficiency improvement, *Int. J. Heat Mass Transf.* 132 (2019) 309–321. <https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2018.12.024>.
- [22] W. Li, M. Xiao, X. Peng, A. Garg, L. Gao, A surrogate thermal modeling and parametric optimization of battery pack with air cooling for EVs, *Appl. Therm. Eng.* 147 (2019) 90–100.

- <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2018.10.060>.
- [23] D. Chen, J. Jiang, G.H. Kim, C. Yang, A. Pesaran, Comparison of different cooling methods for lithium ion battery cells, *Appl. Therm. Eng.* 94 (2016) 846–854. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2015.10.015>.
- [24] M. Akbarzadeh, T. Kalogiannis, J. Jagemont, L. Jin, H. Behi, D. Karimi, H. Beheshti, J. Van Mierlo, M. Bercibar, A comparative study between air cooling and liquid cooling thermal management systems for a high-energy lithium-ion battery module, *Appl. Therm. Eng.* 198 (2021) 117503. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2021.117503>.
- [25] L.W. Jin, P.S. Lee, X.X. Kong, Y. Fan, S.K. Chou, Ultra-thin minichannel LCP for EV battery thermal management, *Appl. Energy.* 113 (2014) 1786–1794. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2013.07.013>.
- [26] A. Tang, J. Li, L. Lou, C. Shan, X. Yuan, Optimization design and numerical study on water cooling structure for power lithium battery pack, *Appl. Therm. Eng.* 159 (2019) 113760. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2019.113760>.
- [27] H. Zhang, X. Wu, Q. Wu, S. Xu, Experimental investigation of thermal performance of large-sized battery module using hybrid PCM and bottom liquid cooling configuration, *Appl. Therm. Eng.* 159 (2019) 113968. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2019.113968>.
- [28] S. Mousavi, M. Siavashi, A. Zadehkabir, A new design for hybrid cooling of Li-ion battery pack utilizing PCM and mini channel cold plates, *Appl. Therm. Eng.* 197 (2021) 117398. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2021.117398>.
- [29] B. Ding, Z.H. Qi, C.S. Mao, L. Gong, X.L. Liu, Numerical investigation on cooling performance of PCM/cooling plate hybrid system for power battery with variable discharging conditions, *J. Therm. Anal. Calorim.* 141 (2020) 625–633. <https://doi.org/10.1007/S10973-020-09611-0/METRICS>.
- [30] P. Qin, M. Liao, D. Zhang, Y. Liu, J. Sun, Q. Wang, Experimental and

- numerical study on a novel hybrid battery thermal management system integrated forced-air convection and phase change material, *Energy Convers. Manag.* 195 (2019) 1371–1381.
<https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2019.05.084>.
- [31] D. Kong, R. Peng, P. Ping, J. Du, G. Chen, J. Wen, A novel battery thermal management system coupling with PCM and optimized controllable liquid cooling for different ambient temperatures, *Energy Convers. Manag.* 204 (2020) 112280. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2019.112280>.
- [32] X. Yuan, A. Tang, C. Shan, Z. Liu, J. Li, Experimental investigation on thermal performance of a battery liquid cooling structure coupled with heat pipe, *J. Energy Storage.* 32 (2020) 101984. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2020.101984>.
- [33] J. Wang, Y. Gan, J. Liang, M. Tan, Y. Li, Sensitivity analysis of factors influencing a heat pipe-based thermal management system for a battery module with cylindrical cells, *Appl. Therm. Eng.* 151 (2019) 475–485.
<https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2019.02.036>.
- [34] Y. Gan, L. He, J. Liang, M. Tan, T. Xiong, Y. Li, A numerical study on the performance of a thermal management system for a battery pack with cylindrical cells based on heat pipes, *Appl. Therm. Eng.* 179 (2020) 115740.
<https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2020.115740>.
- [35] M. Larrañaga-Ezeiza, G. Vertiz, P.F. Arroiabe, M. Martinez-Agirre, J. Berasategi, A novel direct liquid cooling strategy for electric vehicles focused on pouch type battery cells, *Appl. Therm. Eng.* 216 (2022) 118869.
<https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2022.118869>.
- [36] S. Wu, L. Lao, L. Wu, L. Liu, C. Lin, Q. Zhang, Effect analysis on integration efficiency and safety performance of a battery thermal management system based on direct contact liquid cooling, *Appl. Therm. Eng.* 201 (2022) 117788.
<https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2021.117788>.
- [37] K. V. Jithin, P.K. Rajesh, Numerical analysis of single-phase liquid immersion cooling for lithium-ion battery thermal management using different dielectric

- fluids, *Int. J. Heat Mass Transf.* 188 (2022) 122608.
<https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2022.122608>.
- [38] Y. Li, Z. Zhou, L. Hu, M. Bai, L. Gao, Y. Li, X. Liu, Y. Li, Y. Song, Experimental studies of liquid immersion cooling for 18650 lithium-ion battery under different discharging conditions, *Case Stud. Therm. Eng.* 34 (2022) 102034.
<https://doi.org/10.1016/J.CSITE.2022.102034>.
- [39] G. Satyanarayana, D. Ruben Sudhakar, V. Muthya Goud, J. Ramesh, G.A. Pathanjali, Experimental investigation and comparative analysis of immersion cooling of lithium-ion batteries using mineral and therminol oil, *Appl. Therm. Eng.* 225 (2023) 120187.
<https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2023.120187>.
- [40] H. Wang, T. Tao, J. Xu, X. Mei, X. Liu, P. Gou, Cooling capacity of a novel modular liquid-cooled battery thermal management system for cylindrical lithium ion batteries, *Appl. Therm. Eng.* 178 (2020) 115591.
<https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2020.115591>.
- [41] H.-K. Kim, J.H. Choi, K.-J. Lee, A Numerical Study of the Effects of Cell Formats on the Cycle Life of Lithium Ion Batteries, *J. Electrochem. Soc.* 166 (2019) A1769–A1778. <https://doi.org/10.1149/2.0261910JES/XML>.
- [42] X. Xiong, Z. Wang, Y. Fan, H. Wang, Numerical analysis of cylindrical lithium-ion battery thermal management system based on bionic flow channel structure, *Therm. Sci. Eng. Prog.* 42 (2023) 101879.
<https://doi.org/10.1016/J.TSEP.2023.101879>.
- [43] G.-H. Kim, K. Smith, K.-J. Lee, S. Santhanagopalan, A. Pesaran, Multi-Domain Modeling of Lithium-Ion Batteries Encompassing Multi-Physics in Varied Length Scales, *J. Electrochem. Soc.* 158 (2011) A955.
<https://doi.org/10.1149/1.3597614/XML>.
- [44] S.S. Madani, M.J. Swierczynski, S.K. Kaer, The discharge behavior of lithium-ion batteries using the Dual-Potential Multi-Scale Multi-Dimensional (MSMD) Battery Model, 2017 12th Int. Conf. Ecol. Veh. Renew. Energies, EVER

2017. (2017). <https://doi.org/10.1109/EVER.2017.7935915>.
- [45] F. Zhu, R. Zhou, D. Sypeck, J. Deng, C. Bae, Failure behavior of prismatic Li-ion battery cells under abuse loading condition - A combined experimental and computational study, *J. Energy Storage*. 48 (2022) 103969. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2022.103969>.
- [46] T.D. Canonsburg, *ANSYS Fluent Theory Guide*, ANSYS Inc., USA. 15317 (2013) 814. http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/main_pre.htm.
- [47] M. Suresh Patil, J.H. Seo, M.Y. Lee, A novel dielectric fluid immersion cooling technology for Li-ion battery thermal management, *Energy Convers. Manag.* 229 (2021) 113715. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2020.113715>.
- [48] S. Panchal, K. Gudlanarva, M.K. Tran, R. Fraser, M. Fowler, High Reynold's Number Turbulent Model for Micro-Channel Cold Plate Using Reverse Engineering Approach for Water-Cooled Battery in Electric Vehicles, *Energies* 2020, Vol. 13, Page 1638. 13 (2020) 1638. <https://doi.org/10.3390/EN13071638>.
- [49] Y.F. Wang, J.T. Wu, Thermal performance predictions for an HFE-7000 direct flow boiling cooled battery thermal management system for electric vehicles, *Energy Convers. Manag.* 207 (2020) 112569. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2020.112569>.