

유체 유동 배열에 따른 원통형 리튬이온 배터리팩의 유랭식 성능 특성에 관한 수치적 연구

한정우¹, 황성국¹, 쿠날산딕가루드¹, 이명성², 이무연^{1*}
¹동아대학교 기계공학과, ²경남지역사업평가단

Numerical Study on Oil Cooling Performance of The Cylindrical Lithium-Ion Battery Pack with Flow Arrangement

Jeong-Woo Han¹, Seong-Guk Hwang¹, Kunal Sandip Garud¹,
Myung-Sung Lee², Moo-Yeon Lee^{1*}

¹Department of Mechanical Engineering, Dong-A University
²Gyeongnam Institute For Regional Program Evaluation

요약 리튬이온 배터리는 방전 시 전기화학 반응으로 인하여 열이 발생하고, 고온 상태에서는 열화현상에 의해 수명이 감소한다. 따라서 리튬이온 배터리는 최적 온도를 유지하는 것이 중요하며, 적절한 냉각 시스템이 요구된다. 최근 자동차용 리튬이온 배터리 팩의 용량 증가로 인하여 수랭식 냉각판을 이용한 간랭식이 주로 사용되고 있으나, 냉각수 누수 위험성 열저항 증가 등의 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하고자 절연 유체를 사용해 리튬이온 배터리를 직접 냉각하는 연구가 이루어지고 있다. 본 논문에서는 유체 유동 배열에 따른 유랭식 성능 특성 및 압력강하를 분석하기 위해 수치해석 연구를 진행하였다. 원통형 리튬이온 배터리의 전기화학 발열량을 수치적으로 계산하기 위해 상용코드인 ANSYS fluent의 MSMD battery model인 NTGK model을 이용하였다. 5개 방전속도 조건에서 정전류 방전 실험을 통해 NTGK model의 Y, U 파라미터를 구하였으며, 2C-rate에서 수치해석 값을 검증하였다. 해석은 4S4P 배열의 18650 원통형 리튬이온 배터리팩에 대해 4가지 입구 및 출구 조건에서 진행하였다. 해석 결과 냉각성능 및 압력강하는 배터리 버스바에 영향을 받았으며, 최적 유동 배열의 최고온도와 온도편차는 각각 32.41°C, 5.15°C로 나타났다.

Abstract The life of lithium-ion batteries decreases because of high heat generation during discharging at high temperatures. Lithium-ion batteries need to maintain an optimal temperature using an effective cooling system. Recently, indirect cooling using cold plates has been employed, but there are disadvantages to this cooling, such as an increase in thermal resistance and coolant leakage. Accordingly, research is being conducted on the direct oil cooling of lithium-ion batteries to overcome these drawbacks. In this study, numerical analysis was conducted to analyze the oil cooling performance and pressure drop characteristics for different fluid flow arrangements. The electrochemical heat generation of a cylindrical lithium-ion battery was calculated using the NTGK model in ANSYS Fluent commercial code. The Y and U parameters of the NTGK model were obtained through a constant current discharge experiment at five discharge rates, and the numerical analysis results were verified at a 2C-rate. Numerical analysis was conducted considering four inlet and outlet cases for a cylindrical lithium-ion battery pack. The results showed that the cooling performance and pressure drop are affected by the battery busbar, and the proposed optimal fluid flow arrangement showed the maximum temperature and temperature difference of 32.41°C and 5.15°C, respectively.

Keywords : Battery Thermal Management System, Immersion Cooling, NTGK Model, Pressure Drop, Thermal Performance

본 논문은 정부(산업통상자원부)의 재원 한국산업기술진흥원의 지원(No. P160500014) 및 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2020R1A2C1011555)

*Corresponding Author : Moo-Yeon Lee(Dong-a Univ.)

email: mylee@dau.ac.kr

Received April 25, 2022

Revised May 31, 2022

Accepted June 3, 2022

Published June 30, 2022

1. 서론

최근 환경규제 및 에너지 위기에 따라 일반적으로 사용되고 있는 내연기관 자동차의 대안으로 전기자동차가 떠오르고 있다. 전기자동차의 배터리는 높은 에너지 밀도, 낮은 자기 방전율(self discharge rate), 낮은 메모리 효과(memory effect) 등의 장점을 가진 리튬이온 배터리가 주로 사용된다[1]. 리튬이온 배터리 성능은 작동 온도에 민감하다. 겨울철 등 저온 작동환경의 경우 배터리의 전해액의 점성 증가 등의 물성 변화를 야기하며, 이는 배터리의 충/방전 용량 감소로 이어진다[2-4]. 특히 고온의 환경에서 배터리가 작동할 경우 열화 현상으로 인해 배터리의 수명이 감소한다. 또한 고온의 배터리에 대한 냉각이 부족한 경우 열폭주 현상이 발생하며, 열폭주는 배터리 발화로 이어져 인근 배터리까지 전파되어 화재를 일으킨다.

따라서 리튬이온 배터리의 최적 작동을 위해 열관리가 필요하며, 배터리의 적정 온도 범위는 25 ~ 40 °C, 배터리팩의 적정 온도편차는 0 ~ 5 °C 이다[5]. 리튬이온 배터리의 냉각 방식에는 작동유체에 따라 공기를 이용한 공랭식, 물을 이용하는 간랭식, 절연유체를 이용하는 유랭식, PCM(Phase Change Material)을 이용한 상변화 냉각 방식 등이 있다. 일반적으로 전기차 상용화에 많이 적용되고 있는 배터리 열관리 방식은 물/에틸렌글리콜(50:50) 기반의 간랭식 방식을 채택하고 있다[6]. 그러나 간랭식은 냉각수 누수, 열저항 증가 및 사고 시 배터리 열폭주 억제가 불가하다는 단점이 있어 리튬이온 배터리의 냉각 방식으로 한계가 있다[7]. 이를 해결하기 위해 Patil et al. 은 미네랄 오일을 사용하여 배터리 바디를 액침, 탭을 공기 냉각하는 하이브리드 직랭식 연구를 진행하였다[8]. Prahit Dubey et al. 은 21700 원통형 배터리 셀에 관하여 물/에틸렌글리콜 간랭, 3M사의 Novec7500을 이용한 직랭 특성 및 소모 펌프동력을 연구하였다[8]. 이렇듯 유랭에 대한 여러 연구가 이루어지고 있으나, 유체의 유동 배열에 따른 원통형 배터리팩의 냉각성능 특성에 관한 연구는 부족한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 원통형 리튬이온 배터리 시스템의 유체 유동 배열에 따른 냉각 특성을 분석하고자 한다. 이를 위하여 4S4P 배터리팩 유랭 시스템의 유동 배열에 따른 배터리 온도특성과 압력강하에 대한 수치적 연구를 진행하였다.

2. 본론

2.1 배터리 방전 실험

2.1.1 배터리 정전류 방전 실험

NTGK(The Newman, Tiedemann, Gu, and Kim) model의 Y, U parameter 결정을 위한 정전류 방전 실험은 1, 1.5, 2, 2.5 및 3C-rate 방전속도 조건에서 진행하였으며, 실험 조건은 Table 1에 나타 내었다.

Table 1. 18650 Battery discharge experiment condition

Discharge current (A)	3.5, 5.25, 7, 8.75, 10.5
Ambient temperature (°C)	25
Discharge cut off voltage (V)	2.5
Charge cut off voltage (V)	4.2
Charge cut off Current (mA)	50

충전은 정전류-정전압(CC-CV) 방식을 사용하였으며, 방전 시 배터리가 방전 중지전압에 도달할 때 실험을 종료하였다. 배터리 충전, 방전 중지전압과 중지전류는 배터리 데이터시트를 참고하여 각각 4.2 V, 2.5V, 50 mA로 설정하였다[9]. Fig. 1은 배터리 방전 실험 셋업을 보여준다.

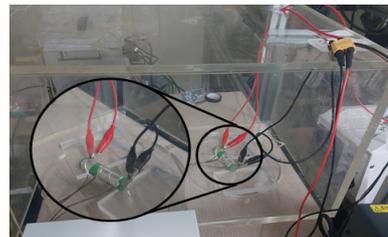


Fig. 1. Experiment set up

실험은 25 °C로 유지되는 항온/항습 챔버에서 외기의 간섭을 방지하기 위해 아크릴 박스 내부에 배터리를 넣어 진행하였다.

DC 서플라이(TS3010A-1, TOYOTECH), DC 전자로더(TLF1200, TOYOTECH)을 이용하여 배터리 충방전을 진행하였다. 배터리 표면 온도는 정확도 ±0.1°C 인 T-type 열전대를 이용하여 측정하였으며, 데이터로거(GL7000, GRAPHTEC)를 이용하여 배터리 전압 및 온도를 기록하였다. 실험에 사용한 장비 제원은 Table 2에 나타냈다.

Table 2. Experiment device specification

Device	Specification	Accuracy
TLF1200 DC loader	1 to 150 V	±0.1 % ±48.0 mA CC mode
	0 to 240 A	
	0 to 1200 W	
TS3010A-1 DC supply	0 to 30 V	±0.1 %
	0 to 10 A	
	0 to 300 W	
GL7000 Data logger	0 to 50 V	±0.1 %
	-100 to 400 ℃	±0.05 %
Constant temperature and humidity chamber	30 to 60 ℃	±3 ℃ at 15 ℃
	30 to 95 %RH	±5 %

배터리는 MJ1 18650 원통형 배터리 셀을 사용하였으며, 주요 제원은 Table 3에 나타내었다[9].

Table 3. 18650 Battery specifications

Nominal energy	3500 mAh		
Nominal voltage	3.653 V		
Diameter	18.4±0.1/-0.3 mm		
Height	65.0±0.2 mm		
Standard charge	Constant current	Constant voltage	Cut off current
	1700 mA	4.2 V	50 mA

2.2 배터리 수치해석

2.2.1 MSMD battery model

배터리 발열량 수치해석은 상용 해석 소프트웨어 ANSYS fluent의 MSMD(Multi Scale Multi Domain) battery model을 사용하였다. 내부 단락이 없는 경우 배터리 셀 스케일에서 배터리 온도 및 전기장 특징은 Eq. (1)~(3)을 이용하여 계산한다[10].

$$\frac{\partial \rho_b C_{p,b} T}{\partial t} - \nabla \cdot (k_b \nabla T_b) =$$

$$\sigma_+ \nabla \phi_+^2 + \sigma_- \nabla \phi_-^2 + q_{Eh} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\sigma_+ \nabla \phi_+) = -j_{Eh} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\sigma_- \nabla \phi_-) = j_{Eh} \quad (3)$$

where ρ_b denotes battery density, T_b denotes battery temperature, $C_{p,b}$ denotes battery specific heat σ_+ denotes electrical conductivity of the positive electrode, σ_- denotes electrical

conductivity of the negative electrode, $\nabla \phi_+$ denotes phase potential for positive electrode, $\nabla \phi_-$ denotes phase potential for negative electrode, q_{Eh} denotes electrochemical reaction heat, j_{Eh} denotes volumetric current transfer rate

NTGK model은 경험적인 전기화학 반응모델로 전류 전송속도 j_{Eh} 에 대해 Eq. (4)로 표현된다[10].

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

where $Q_{nominal}$ denotes battery capacity in Ampere hours, Q_{ref} denotes battery capacity used in the experiment U and Y denote fitting parameters

피팅 파라미터 U, Y는 배터리의 잔존용량을 표현하는 DOD(Depth of Discharge)의 함수이며, 이는 정전류 방전 실험을 통해 구할 수 있다. 전기화학 반응에 의한 배터리 발열량 q_{Eh} 은 Eq. (5)으로 표현된다.

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

2.2.2 배터리팩 수치해석

본 연구에서는 2C-rate 방전속도에서 다양한 입구조건에 대한 냉각특성 및 압력강하를 비교 분석하였다. 배터리 셀 간격 및 배터리와 외곽 사이의 간격은 모두 2mm로 설정하였으며, 이는 Fig. 2에서 나타내었다.

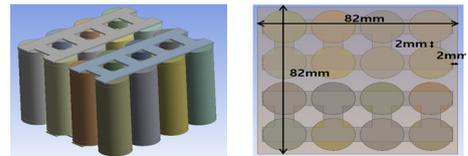


Fig. 2. Geometry at battery pack with fluid

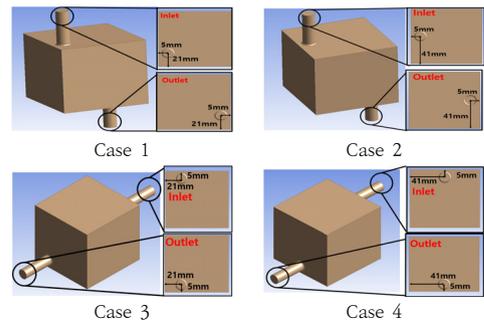


Fig. 3. Case of fluid flow arrangement

Fig. 3에서 수치해석에 사용한 입구 및 출구의 위치 조건을 나타낸다.

유체 입구 및 출구 조건은 상부에서 하부로 흐르는 유동 2가지(Case1, Case2)와 정면에서 후면으로 흐르는 유동 2가지(Case3, Case4)에 대해 수치해석을 진행하였으며, 이중 Case2와 Case4는 입구와 출구가 편심된 경우이다. 작동유체는 E5-TM410 절연유체를 사용하였고, 수치해석에서 사용된 배터리 및 작동유체 물성값은 Table 4에 나타내었다.

Table 4. Properties of battery and working fluid [11,12]

Solid properties	Density (kg/m ³)	Specific heat (J/kgK)	Thermal conductivity (W/mK)	Electrical conductivity (S/m)
Battery active zone	1939.64	1387.96	1.12 (Radial) 24.72 (Axial)	8.3e×10 ⁵ (Positive) 1.67×10 ⁶ (Negative)
Negative tab	2719	871	202.4	3.54×10 ⁷
Positive tab	8030	502.48	16.27	8.33×10 ⁶
Liquid properties	Density (kg/m ³)	Specific heat (J/kgK)	Thermal conductivity (W/mK)	Dynamic viscosity (m ² /s)
E5-TM410	805	2100	0.14	1.94×10 ⁻⁷

수치해석은 Reynolds 수는 2300 이하로 층류모델을 사용하였다. 이외 해석 경계조건은 Table 5에 나타내었다.

Table 5. Boundary conditions

Inlet flow rate (mLPM)	250
Inlet fluid temperature (°C)	25
Outlet pressure (Pa)	0
Battery heat source	Eq. (5)
Turbulence model	Laminar flow

3. 결과 및 고찰

3.1 U, Y 파라미터

NTGK model 피팅 파라미터 U, Y를 구하기 위해 외기온도 25°C에서 정전류 방전시험을 진행하였으며, 방전 속도에 따른 방전곡선을 Fig. 4에 나타내었다. 피팅 파라미터 U, Y값은 DOD의 5차항으로 나타냈으며, Eq. (6), (7)로 나타내었다.

$$U = 4.132 - 1.833(DOD)^1 + 8.314(DOD)^2 - 28.95(DOD)^3 + 41.16(DOD)^4 - 20.31(DOD)^5 \quad (6)$$

$$Y = 24.27 - 3.54(DOD)^1 - 165.341(DOD)^2 + 905.06(DOD)^3 - 1503.15(DOD)^4 + 798.61(DOD)^5 \quad (7)$$

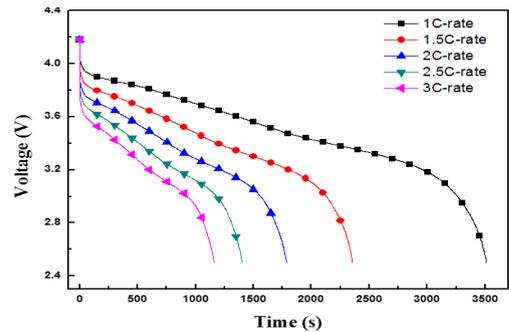


Fig. 4. Constant current discharge curve

3.2 NTGK model 검증

NTGK model 검증을 위해 2C-rate 조건에서 수치 해석 결과와 실험 결과의 오차를 비교하였으며, 검증 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

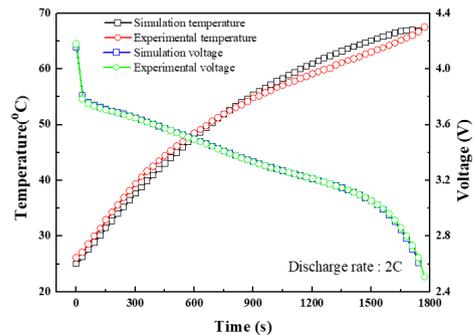


Fig. 5. Validation of air cooling simulation at 2C discharge rate

NTGK model 공기 자연대류 경계조건은 배터리 표면 대류열전달계수 7.5 W/m²K, 외기온도 25 °C를 적용하였다. 최대 오차는 배터리 온도와 전압에서 각각 4.87 %와 1.56 %로 나타났다.

3.3 유동 배열에 따른 온도특성

Fig. 6은 방전 종료 시 입구 및 출구 조건에 따른 배터리 온도분포를 나타낸다. 온도분포는 배터리가 입구 및

출구에 가까울수록 낮은 온도를 나타냈으며, 이러한 이유는 입구 및 출구에서 멀어질수록 배터리가 작동유체 유동에 의한 냉각 효과를 덜 받기 때문이다.

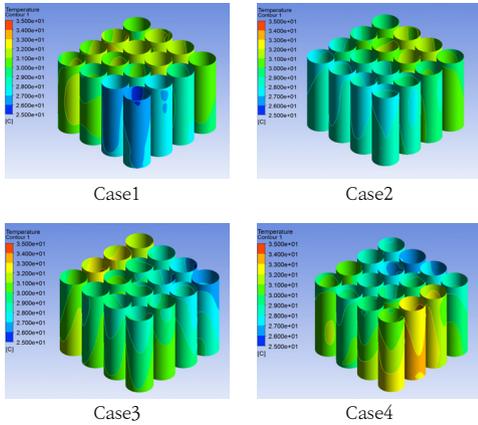


Fig. 6. Battery temperature distribution

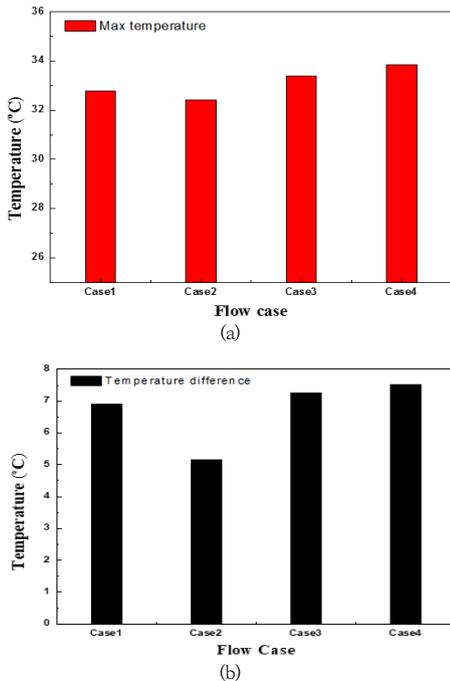


Fig. 7. Battery pack max temperature and temperature difference at end of discharge
(a) Battery max temperature (b) Battery temperature difference

Fig. 7은 방전 종료 시 배터리의 최고온도 및 온도편차를 나타내었다. 배터리 최고온도는 Case2에서 32.41 °C로 가장 낮았으며 Case4에서 33.85 °C로 가장 높게

나타났다. 상부에서 하부로 흐르는 유동이 정면에서 후면으로 흐르는 유동보다 최고 온도가 작게 나왔다. 이러한 이유는 상부에서 하부 유동이 보다 균일하게 흐르기 때문이다.

상부에서 하부로 흐르는 유동인 Case1와 Case2를 비교하면 최고온도는 Case2가 0.38 °C 작게 나왔으며, 이러한 이유는 Fig. 8에 나타낸 것과 같이 버스바(bus bar)의 영향으로 유체가 배터리팩 전체로 균일하게 흐르기 때문이다. 배터리 온도편차는 상부에서 하부로 흐르는 유동이 정면에서 후면으로 흐르는 유동보다 작게 나왔다. 배터리 온도편차는 Case2에서 5.15 °C로 가장 낮게 나왔으며 Case4에서 7.53 °C로 가장 높게 나왔다. 배터리 최저온도는 Case2에서 27.26 °C로 가장 높았으며, 이러한 이유는 유체가 배터리보다 버스바에 먼저 접촉 후 버스바의 줄 발열(joule heating)을 흡수하여 배터리에 사용될 열용량이 줄어들기 때문이다.

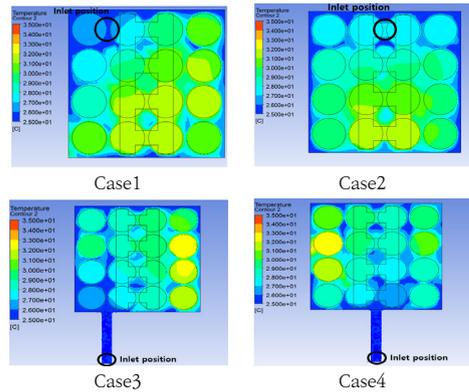


Fig. 8. Fluid and battery pack temperature at busbar position

3.4 유동 배열에 따른 압력강하

입구조건에 따른 압력강하는 Fig. 9에 나타내었다. Case1, Case2 비교 시 배터리 압력강하는 편심된 입구 및 출구 조건이 중앙에 위치한 입구 및 출구 조건보다 크게 나타났다. 이러한 이유는 편심된 경우 유동이 길어지므로 압력강하가 상대적으로 더 크기 때문이다. Case3, Case4 비교 시 압력강하는 중앙에 위치한 입구 및 출구 조건이 편심된 입구 및 출구 조건보다 압력강하가 크게 나왔으며, 이러한 이유는 Fig. 10에 나타낸 것과 같이 입구에 위치한 버스바에 의한 압력 손실 때문이다.

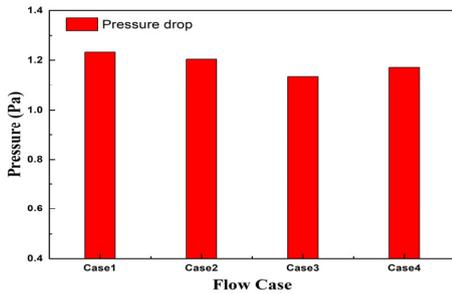


Fig. 9. Pressure drop for fluid flow arrangement

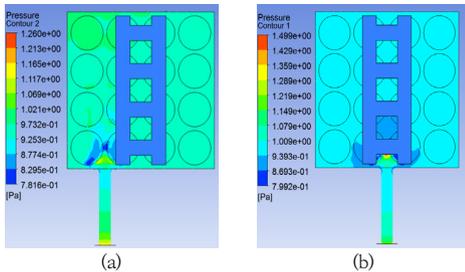


Fig. 10. Fluid pressure distribution

4. 결론

본 연구는 18650 원통형 리튬이온 배터리의 발열량을 NTGK model을 이용하여 수치적으로 계산하였다. 4S4P 리튬이온 배터리팩에 대하여 다양한 입구조건에 따른 유량 성능을 수치적으로 비교 연구하였으며, 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 2C-rate에서 NTGK model을 이용하여 배터리 발열량을 수치적으로 구했으며 온도 및 전압 오차가 최대 5 % 이하로 나타났다.
2. 입구조건에 따른 배터리 온도특성은 입구 및 출구에 가까운 배터리들이 낮은 온도특성이 나타났으며 입구 및 출구에서 멀어질수록 유동 영향을 덜 받기 때문이다.
3. 입구 및 출구가 상부에서 하부로 흐르는 유동이 정면에서 후면으로 흐르는 유동보다 최고온도가 낮았으며, 이러한 이유는 유체가 상부에서 하부 유동이 보다 균일하게 흐르기 때문이다.
4. 최대온도 및 온도편차는 상부에서 하부로 흐르는 조건인 Case2에서 각각 32.41 °C 와 5.15 °C 로 가장 우수하였고, 이러한 이유는 Case1 비교 시 버스바가 유동에 영향을 주었기 때문이다.

5. 압력강하는 편심된 입구 및 출구 조건인 Case1에서 유동 길이에 의해 중앙에 위치한 입구 및 출구 조건인 Case2보다 높았으며, 중앙에 위치한 입구 및 출구 조건인 Case4에서 버스바에 의한 압력 손실에 의해 편심된 입구 및 출구 조건인 Case3보다 크게 나왔다.

References

- [1] M. Al-Zareer, I. Dincer, M. A. Rosen, "A review of novel thermal management systems for batteries", *International Journal of Energy Research*, Vol. 42, No.10, pp.3182-3205. 2018
DOI: <https://doi.org/10.1002/er.4095>
- [2] J. Cao, M. Luo, X. Fang, Z. Ling, Z. Zhang, "Liquid cooling with phase change materials for cylindrical Li-ion batteries: An experimental and numerical study", *Energy*, Vol 191, 2020
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116565>
- [3] S. Ma, M. Jiang, P. Tao, C. Song, J. Wu, J. Wang, W. Shang, "Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A review", *Progress in Natural Science: Materials International*, Vol 28, Pages 653-666. 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2018.11.002>
- [4] Z. Lu, X.L. Yu, L.C. Wei, F. Cao, L.Y. Zhang, X.Z. Meng, L.W. Jin, "A comprehensive experimental study on temperature-dependent performance of lithium-ion battery", *Applied Thermal Engineering*, Vol 158, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113800>
- [5] L. H. Saw, H. M. Poon, H. San Thiam, Z. Cai, W. T. Chong, N. A. Pambudi, Y. J. King, "Novel thermal management system using mist cooling for lithium-ion battery packs", *Applied Energy*, Vol 223, pp.146-158. 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.042>
- [6] P. R. Tete, M. M. Gupta, S. S. oshi, "Developments in battery thermal management systems for electric vehicles: A technical review", *Journal of Energy Storage*, Volume 35, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102255>
- [7] M. S. Patil, J. H. Seo, M. Y. Lee, "A novel dielectric fluid immersion cooling technology for Li-ion battery thermal management", *Energy Conversion and Management*, Volume 229, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113715>
- [8] P. Dubey, G. Pulugundla, A. K. Srouji, "Direct Comparison of Immersion and Cold-Plate Based Cooling for Automotive Li-Ion Battery Modules", *Energies*, Volume 14, No 5, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.3390/en14051259>

- [9] K. S Oh, PRODUCT SPECIFICATION Rechargeable Lithium Ion Battery Model : INR18650 MJ1 3500mAh(2014), Available From: <https://www.nkon.nl/sk/k/Specification%20INR18650MJ1%2022.08.2014.pdf> (accessed May. 21, 2022)
- [10] Y. K. Ahn, "A Lithium-ion Battery Simulation using ANSYS Fluent", *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B. (November 2015)*, Korea, pp.291-296, 2015
- [11] T. G. Tranter, R. Timms, T. M. M. Heenan, S. G. Marquis, "Probing heterogeneity in li-ion batteries with coupled multiscale models of electrochemistry and thermal transport using tomographic domains", *Journal of The Electrochemical Society*, Volume 167, No 11, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1149/1945-7111/aba44b>
- [12] M. Steinhardt, E. I. Gillich, A. Rheinfeld, L. Kraft, M. Spielbauer, O. Bohlen, A. Jossen, "Low-effort determination of heat capacity and thermal conductivity for cylindrical 18650 and 21700 lithium-ion cells", *Journal of Energy Storage*, Volume 42, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103065>

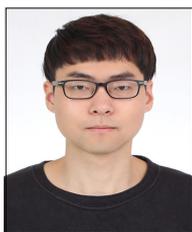
한 정 우(Jeong-Woo Han) [준회원]



- 2021년 2월 : 동아대학교 기계공학과 (공학학사)
- 2021년 2월 ~ 현재 : 동아대학교 기계공학과 (석사과정)

〈관심분야〉
배터리열관리, 모터열관리, 나노유체

황 성 국(Seong-Guk Hwang) [정회원]



- 2020년 2월 : 동아대학교 기계공학과 (공학학사)
- 2020년 2월 ~ 현재 : 동아대학교 기계공학과 (석박사 통합 과정)

〈관심분야〉
친환경 자동차 열관리, 열전달, 나노 유체

쿠날 산딕 가루드(Kunal Sandip Garud) [정회원]



- 2018년 8월 : National Institute of Technology, Calicut, M.Tech(공학 석사)
- 2018년 8월 ~ 현재 : 동아대학교 기계공학과 (박사과정)

〈관심분야〉
Heat and Mass Transfer, Heat Pump, Thermoelectric Generator, Artificial Intelligence

이 명 성(Myung-Sung Lee) [정회원]



- 2016년 3월 : 경상국립대학교 기계시스템공학과(공학박사)
- 2015년 11월 ~ 현재 : (재)경남지역사업평가단 평가팀 선임연구원

〈관심분야〉
열전달, 선박 구조기술

이 무 연(Moo-Yeon Lee) [중신회원]



- 2010년 2월 : 고려대학교 기계공학부 (공학박사)
- 2011년 2월 ~ 2012년 8월 : 한국자동차 연구원 선임연구원
- 2011년 2월 ~ 현재 : 동아대학교 기계공학과 교수

〈관심분야〉
친환경 자동차 열관리, 열/물질전달, 연료전지, 나노유체