

ESS용 Rack 내부의 공기유동에 따른 배터리 열관리에 관한 해석적 연구

An Analytical Study on Thermal Management of Battery for Air Flow in ESS Cooling Rack

강울호* · 이준현***† · 이진경***
Yul-Ho Kang*, Joon-Hyun Lee***† and Jin-Kyung Lee***

(Received 28 October 2019, Revision received 20 March 2020, Accepted 23 March 2020)

Abstract : In this study, a thermal analysis of cells in a battery rack with multiple batteries is performed for large-scale energy storage system. For this analysis rack consisting of 18 trays and 12 batteries are arranged in each tray. Cold air is supplied through the air supply of the rack, and each tray is also analyzed for a general-purpose battery rack with individual fans. The cooling efficiency inside the rack is analysed due to change of temperature condition at the cell and air inside the rack. In this paper, the temperature of the main air supply is 298.15 K, and the number of air changes per hour (ACH), which is the volume of the rack divided by the air flow rate per hour, is 50-2,500. As the ACH of the rack increases, it is assumed that the momentum source of the tray exit also increases linearly and the ACH range of the tray is 214.8-1,578.5. In the rack's ACH range from 50 to 500, the cooling rate of the battery drastically increased as the ACH increased. The cooling rate converged from the section where rack's ACH exceeded about 1,000. It was found in this study that the thermal analysis could be predicted effectively in the condition that the air supply air volume of the rack was 2,000 or more ACH.

Key Words : Lithium ion battery, ESS, CFD analysis, Thermal management, Cooling performance

— 기 호 설 명 —

T : 온도 [K]

ACH : 시간당 환기횟수

p : 압력 [Pa]

ρ : 밀도 [kg/m^3]

C_p : 열용량 [$\text{J/kg}\cdot\text{K}$]

k : 열전도도 [$\text{W/m}\cdot\text{K}$]

u : 유속 [m/s]

***† 이준현(ORCID:<https://orcid.org/0000-001-6516-7934>) : 교수, 부산대학교 기계공학부

E-mail : johlee@pusan.ac.kr, Tel : 051-510-2430

*강울호(ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-0462-9626>) :

연구교수, 부산대학교 풍력발전미래기술연구센터

***이진경(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-4281-1149>) :

조교수, 동의대학교 기계자동차로봇부품공학부

***† Joon-Hyun Lee(ORCID:<https://orcid.org/0000-001-6516-7934>) : Professor, School of Mechanical Engineering, Pusan National University.

E-mail : johlee@pusan.ac.kr, Tel : 051-510-2430

*Yul-Ho Kang(ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-0462-9626>):

Research Professor, Research Institute for Future Wind Energy Technology, Pusan National University.

***Jin-Kyung Lee(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-4281-1149>)

: Assistant Professor, Division of Mechanical, Automobile, Robot Component Engineering, Dong-eui University.

1. 서 론

신재생 에너지를 활용한 전력생산의 증가와 더불어 태양광과 풍력이 가장 대표적인 에너지원이지만 이들을 중심으로 한 전력 생산은 수요와 공급 사이에 불균형이 초래되며, 이와 같은 불균형을 해소할 수 있는 방안으로 신재생에너지 발전과 연계한 에너지저장장치(Energy Storage System, ESS)가 대안으로 활용되고 있다. 현재 구현된 에너지 저장 시스템 중 가장 일반적인 방식은 2차 전지를 활용하여 전기의 형태로 저장을 하여 수요와 공급의 불균형에 대응하는 방식을 사용하고 있다.

2차 전지는 충전과 방전을 수행하면서 일정 횟수 이상 재사용이 가능한 전지를 말하며, MW급 이상의 발전 단지에 적용할 수 있는 2차 전지로는 NaS배터리, 납축배터리, 리튬이온 배터리 등이 있다.¹⁻³⁾ 현재의 기술 수준에서는 에너지 밀도와 충방전 특성이 우수하고, 비교적 긴 수명을 가진 리튬이온 전지가 가장 폭 넓게 사용되고 있다.⁴⁻⁶⁾

하지만 다양한 2차 전지 중 단위면적당 가장 높은 에너지 밀도를 가지는 리튬이온 배터리는 높은 에너지 밀도 만큼 높은 열발생의 문제를 가지고 있다.⁷⁾ 이러한 열발생은 배터리의 효율에도 큰 영향을 주고 있으며, 화재 및 폭발의 위험을 가지고 있다. 리튬이온 배터리에서 열관리는 안전과 효율의 문제에 있어 가장 큰 과제 중 하나이다. 일반적으로 리튬이온 배터리가 높은 효율로 작동하는 온도 구간은 20~35도 수준으로 알려져 있다.⁸⁾ Cell의 온도를 적정 수준으로 유지하고, cell 간의 온도를 적정 수준으로 유지하는 것은 cell의 평균 수명 관점에서도 아주 중요한 요소이다. Cell의 열관리 문제를 해결하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. Wang⁹⁾ 등은 배터리 팩의 내부의 급배기가 Mixing ventilation이 되도록 5가지의 급배기 방식을 선정하였고, 각 급배기 방식에 따른 배터리 내부의 열분포를 전산해석을 통해 분석하였다. 또한 배터리의 배치에 따른 열분포 전산해석을 수행하였으며, 열관리의 측면에서 최적의 급배기 조건과 배터리 배치에 대한 연구를 수행하였다. Maharmud¹⁰⁾ 등은 cell 온도의 균일

성 향상을 위한 tray의 내부 유동에 대한 해석적인 연구를 수행하였다. 공기가 왕복으로 교차하는 조건에서 fluent를 이용한 2D 해석을 수행하였고, 난류 모델로는 k-ε 모델을 사용하였다. Li¹¹⁾ 등은 배터리 팩 내부의 cell 온도 분석을 위해 실험 및 해석을 수행하였다. 실험은 자체 제작한 소형 풍동에서 수행하였고, 해석은 fluent를 이용한 2D 해석을 수행하였다. 현재까지 수행된 배터리 열관리 관련 연구들은 주로 단위 배터리 팩 내부의 열유동을 분석하고 최적화하는 연구들이다. 본 연구에서는 기존의 cell 단위의 연구가 아니라 대규모 에너지의 저장을 위해 배터리가 다수 배치된 rack 내부에서의 cell의 열해석 및 rack 급기에서의 유량의 변화에 따른 온도변화를 해석하고자 한다.

또한 배터리가 rack 내부에 고밀도로 배치되어 있는 ESS가 대규모로 설치되어 있기 때문에 rack의 메인 급기의 유량과 개별 tray의 유량에 따라 배터리의 온도가 어떻게 변화하는지를 분석하였고, 최적의 급기 유량에 대한 분석을 수행하였다.

2. 지배 방정식 및 난류 모델

수치해석에 사용된 연속방정식 식 (1)에, Reynolds Averaged Navier-Stokes(RANS) 방정식은 식 (2)에 기술하였다.

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = & \\ - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] & \\ + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u_i u_j}) & \end{aligned} \quad (2)$$

난류유동을 모사하기 위해 사용되는 모델 중 공학적으로 가장 많이 사용되는 모델은 k-ε Model인데, k-ε 모델은 2-equation model중 하나이다. 2-equation model은 속도스케일과 길이스케일을 수

송방정식으로 구하게 된다. k-ε 모델은 난류운동 에너지 k로부터 특성속도를, 점성소산의 크기 ε를 이용하여 간접적으로 특성길이를 구하는 모델이다.

본 연구에서는 다양한 방식의 Mixing Ventilation 열유동 해석에 사용이 되었고, 실험값과의 비교에서도 높은 정확도를 빠른 계산 속도를 가진 standard k-ε 난류 모델을 사용하였다.^{12,13)} Standard k-ε 모델의 난류운동에너지 k의 수송 방정식은 식 (3)으로 정의되고, 소산율 ε의 수송방정식은 식 (4)로 정의된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4)$$

난류 점성계수 μ_t는 식 (5)로 정의된다.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (5)$$

속도구배에 의한 난류에너지의 생성인 G_k는 식 (6)으로 정의된다.

$$G_k = - \overline{\rho u_i u_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (6)$$

부력에 의한 난류에너지 생성인 G_b는 식 (7)로 정의된다.

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (7)$$

여기서, C₁ε = 1.44, C₂ε = 1.92, C_μ = 0.09, σ_k = 1.0, σ_ε(1.3)

3. 해석방법

일반적인 형태의 ESS rack을 대상으로 해석을 수행하였으며, rack의 메인 급기와 tray fan에서의 유동을 모두 고려하여 해석을 수행하였다. ESS rack의 크기는 584.53 × 971.01 × 2202.5 mm이다.

Fig. 1과 같이 rack 내부에는 18개의 tray가 있으며, 개별 tray의 크기는 475.6 × 845.29 × 99.4 mm이다.

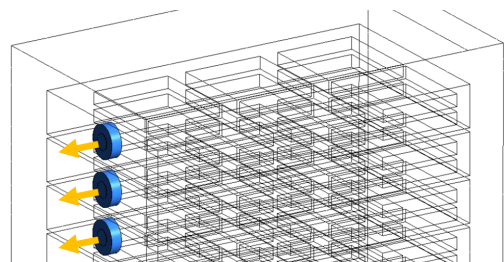
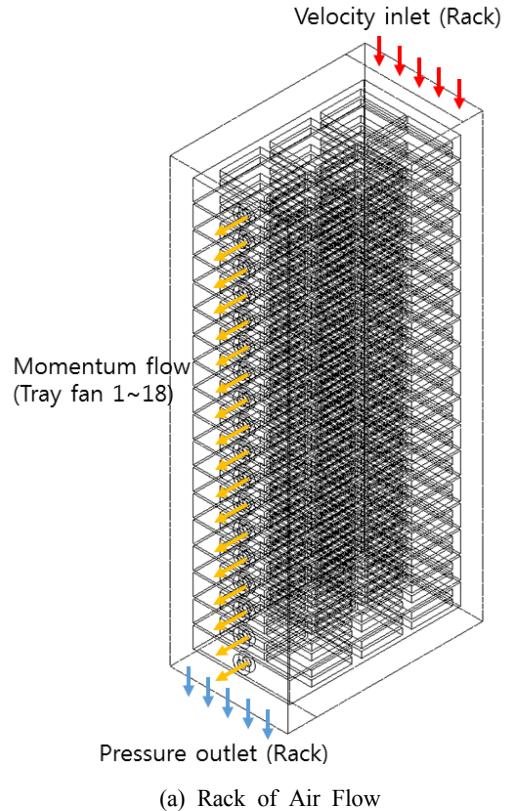


Fig. 1 The Boundary Condition of Air Flow

Fig. 1 (a)는 rack 내부에서 tray의 유동 흐름을 나타내는데, rack의 상부에서 급기가 이루어지고, rack의 하부에서는 배기가 이루어진다. 데이터 센터 등에서 사용되는 rack의 최대 송풍량은 rack 크기마다 다르지만, 시간당 급기 풍량에 rack의 체적을 나눈 값인 시간당 환기횟수 기준으로 최대 2,000 CMH 수준이다. 본 논문에서 메인 급기의 풍량은 Table 1과 같이 62.5~3,125.3 CMH(m³/h)이고, 시간당 급기 풍량에 rack의 체적(1.25 m³)을 나눈 값인 시간당 환기횟수(ACH)는 50~2,500이다.

Fig. 1 (b)는 tray와 tray의 fan을 나타내면 파란색으로 된 원형 부분이 fan의 위치이며, tray의 바깥쪽으로 유동이 형성된다, tray의 환기 횟수는 fan에서의 유량에 tray의 체적을 나눈 값으로 구해진다.

본 연구에서는 rack 내부의 cell과 내부 공기의 초기 온도가 ESS의 각 cell이 정상 효율을 발휘하는 범위를 넘어선 온도까지 가열된 상태인 313.15 K인 조건에서 cell이 높은 효율을 발휘할 수 있는 온도인 308.15 K까지의 냉각 효율을 분석 하였다. Tray의 fan 출구 방향의 풍량은 fan이 자체 성능 뿐 아니라 rack의 유동 형태에 따라 큰 영향을 받게 된다.

$$\vec{q} = \dot{m} \vec{V} \quad (8)$$

Tray에 부착된 fan의 유동을 가정하기 위해 tray의 fan 위치에서 fan 출구 방향으로 momentum flow가 발생한다고 가정을 하였다. Momentum flow(\vec{q})는 식 11과 같이 정의된다.¹⁴⁾ Rack의 환기 횟수가 1,000일 때, 18개의 tray 평균 환기횟수도 1,000이 되도록 momentum 값을 설정하였다. Table 2는 해석의 경계 조건으로 사용한 fan 출구 방향으로의 momentum 값과 tray의 fan에서의 출구 방향 유속을 기준으로 구한 환기횟수를 나타낸다. Rack 전체의 환기 횟수가 1,000일 때, tray의 환기 횟수도 1,000이 되도록 momentum 값을 설정하였다. Rack의 환기 횟수 증감에 비례하여 tray의 fan에서의 출구 방향 momentum 값을 설정하였다.

Momentum flow는 유속의 제곱에 비례하는 값으로 momentum flow가 증가할 때 풍량은 지수 함수의 형태로 증가하기 때문에 개별 tray의 환기

Table 1 The operating conditions of rack

	Inlet Velocity (m/s)	Volume flow rate of Inlet (CMH)	Number of air changes per hour (ACH)
Case 1	0.31	62.5	50
Case 2	0.61	125.0	100
Case 3	1.22	250.0	200
Case 4	2.45	500.0	400
Case 5	3.67	750.1	600
Case 6	4.89	1000.1	800
Case 7	6.12	1250.1	1,000
Case 8	9.18	1875.2	1,500
Case 9	12.24	2500.2	2,000
Case 10	15.30	3125.3	2,500

Table 2 The operating conditions of tray

	Momentum(N)	Average number of air changes of the tray
Case 1	2.18E-03	214.78
Case 2	4.36E-03	305.99
Case 3	8.72E-03	435.45
Case 4	1.74E-02	618.56
Case 5	2.62E-02	762.35
Case 6	3.49E-02	882.61
Case 7	4.36E-02	1,000
Case 8	6.54E-02	1,221.72
Case 9	8.72E-02	1,415.18
Case 10	1.09E-01	1,578.47

횟수는 rack 메인 급기의 유량이 환기 횟수 기준으로 1,000보다 작을 때는 rack보다 높은 환기 횟수를 나타내고, rack의 메인 급기 유량이 환기 횟수 기준으로 1,000보다 클 때는 rack보다 낮은 환기 횟수를 나타내고 있다.

Fig. 2에서는 해석의 경계 조건으로 사용된 rack과 rack 내부 각 tray의 평균 환기회수를 나타내고 있다.

Rack 내부의 공기 유동과 냉각동안 tray 내부에 있는 총 216개의 cell에 대한 온도 분포를 해석하기 위해 열유동 해석 프로그램인 ANSYS Fluent 19.1을 사용하였다.

해석의 초기조건 및 cell의 물성은 각각 Table 3과 Table 4에 나타내었다.

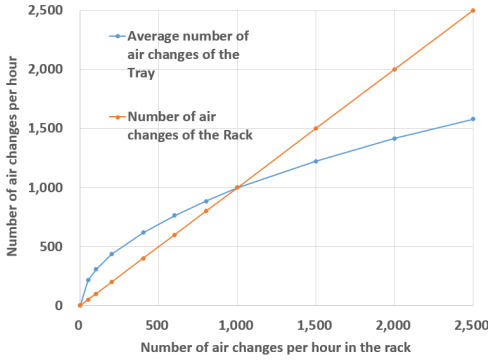


Fig. 2 Number of air changes of each analysis condition

Table 3 The initial conditions

Inlet air(K)	298.15
Operating pressure (atm)	1
Initial temperature of air in the rack(K)	313.15
Initial temperature of cell(K)	313.15

Table 4 Thermal properties of Battery

Material	Cell
Volume (m ³)	0.0018386
Density (kg/m ³)	2067.146
Weight (ton)	0.003801
Specific heat (J/kg-k)	1352.906
Thermal conductivity kx (W/m-k)	19.6
Thermal conductivity ky (W/m-k)	4.8
Thermal conductivity kz (W/m-k)	19.6

4. 해석결과

Rack 내부의 공기와 cell의 초기온도는 313.15 K이고, rack의 급기가 298.15 K인 조건에서 해석을 수행하였다. Rack의 급기 유량은 시간당 환기 횟수 기준으로 50~2,500인 조건에서 해석이 수행되었으며, rack 내부 tray의 평균 환기 횟수는 214.8~1,578.5이다. Fig. 3은 rack 풍량의 증가에 따라 rack 내부 216개의 cell의 평균 온도가 308.15 K까지 도달하는데 걸리는 시간을 정리한 것이다.

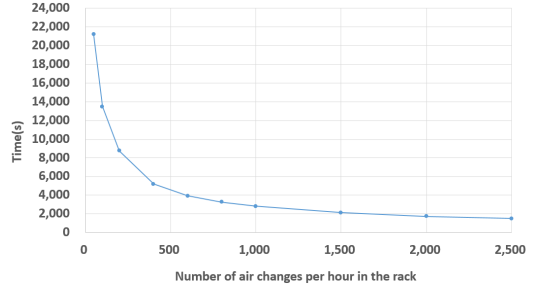


Fig. 3 Time taken for the average cell temperature inside the rack to reach 308.15 K

환기 횟수가 대략 500인 수준까지는 cell이 308.15 K까지 냉각되는데 걸리는 시간이 환기 횟수의 증가에 따라 급격히 감소하는 경향을 보이는 것을 알 수 있고, 500이 넘어가는 시점부터는 냉각되는데 걸리는 시간이 점차 수렴하는 양상을 보인다. 데이터 센터 등에서 사용되는 rack의 내부 최대 풍량이 환기 횟수 기준으로 대략 2,000 수준인데, 기존의 설계가 풍량을 더 증가시켜도 냉각 효율이 거의 증가하지 않는 수준까지 감안한 것으로 보인다.

Fig. 4는 개별 환기횟수 조건에서 10,000 s 동안 해석을 수행한 후 각 tray 내부의 cell 온도 분포를 나타낸 그림이다. Rack의 급기구와 배기구 근처에 위치한 cell부터 냉각이 이루어짐을 알 수 있고, rack의 중심부에 위치한 cell은 급배기 부근에 위치한 cell에 비해 상당히 높은 온도 분포를 나타내고 있다. Rack의 급기 풍량이 ACH 기준으로 600이 넘는 조건부터는 tray 내부 모든 cell의 온도가 308.15 K 이하의 것을 확인할 수 있다. 각 cell 간의 온도 편차는 배터리 수명의 불균형을 초래하고 ESS System 전체의 안정성에도 많은 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 초기 조건에서 10,000 s 동안 냉각하는 동안에 ACH가 600 이하인 구간에서는 Fig. 4와 같이 각 cell 간의 온도 편차가 10 K 이상 발생을 하고 있고, ACH가 1,500 이상인 영역에서는 5 K 이하의 편차가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 급기의 풍량이 증가할수록 냉각속도는 증가하고, 각 cell 간의 온도 편차는 급격히 감소함을 알 수 있다. Fig. 5는 급기의 조건이 ACH

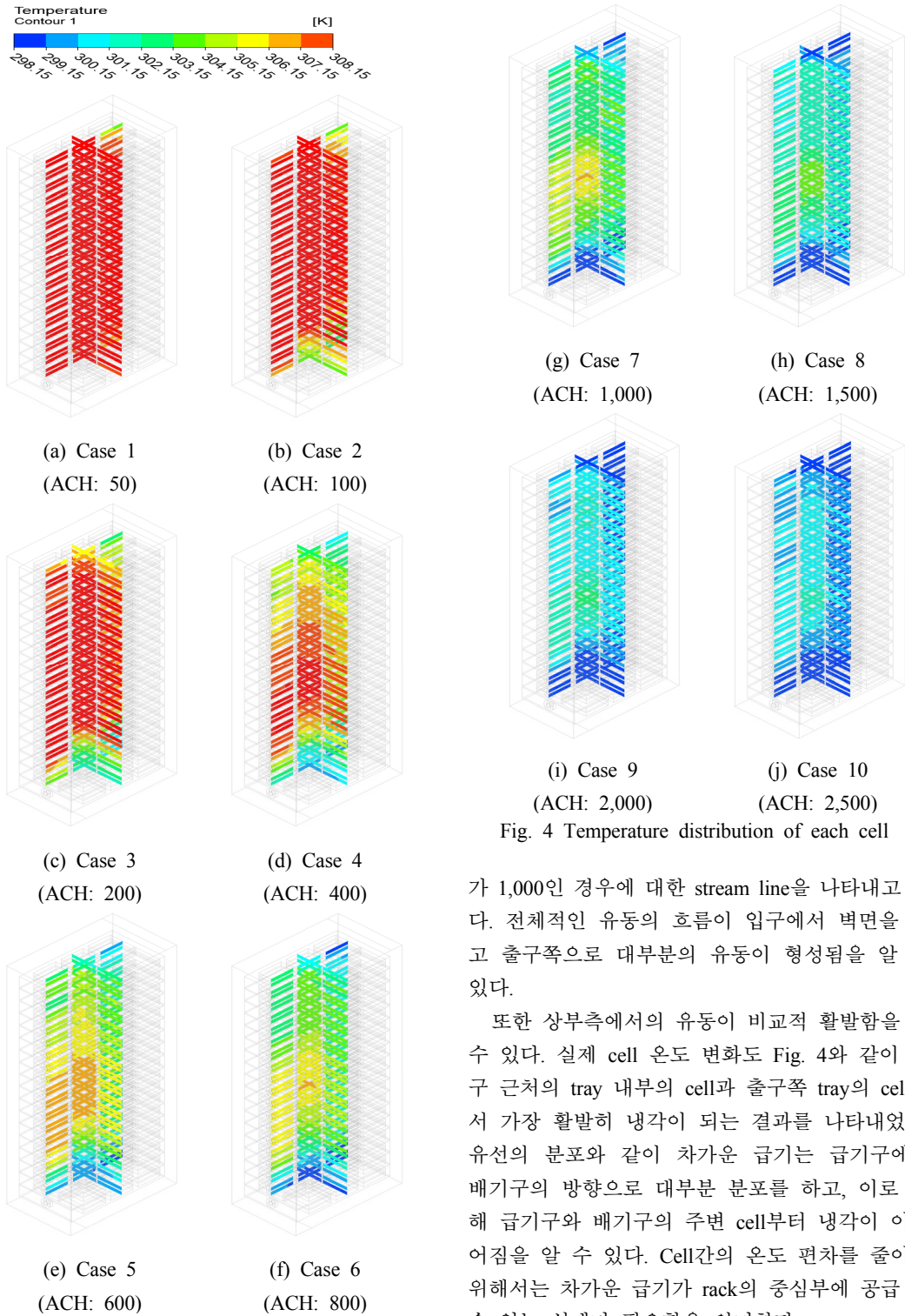


Fig. 4 Temperature distribution of each cell

가 1,000인 경우에 대한 stream line을 나타내고 있다. 전체적인 유동의 흐름이 입구에서 벽면을 타고 출구쪽으로 대부분의 유동이 형성됨을 알 수 있다.

또한 상부측에서의 유동이 비교적 활발함을 알 수 있다. 실제 cell 온도 변화도 Fig. 4와 같이 입구 근처의 tray 내부의 cell과 출구쪽 tray의 cell에서 가장 활발히 냉각이 되는 결과를 나타내었다. 유선의 분포와 같이 차가운 급기는 급기구에서 배기구의 방향으로 대부분 분포를 하고, 이로 인해 급기구와 배기구의 주변 cell부터 냉각이 이루어짐을 알 수 있다. Cell간의 온도 편차를 줄이기 위해서는 차가운 급기가 rack의 중심부에 공급 될 수 있는 설계가 필요함을 의미한다.

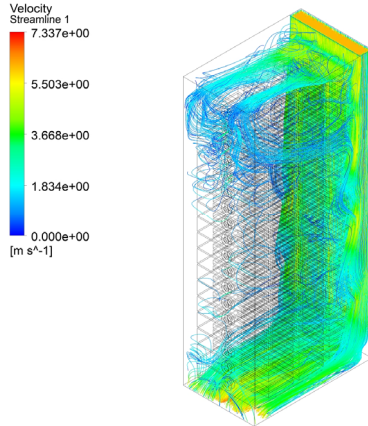


Fig. 5 Streamline of Case 7
(ACH: 1,000)

5. 결 론

본 연구에서는 복잡한 형상과 유동 흐름을 가지는 rack 내부의 유동과 온도 분포를 해석하여 배터리의 적합한 온도 유지를 위해 필요한 급기 조건에 대한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 해석 수행 10,000 s 이후의 온도 분포를 보면, ACH가 600 이하인 구간에서는 배터리의 온도 편차가 최대 10도 이상임을 확인할 수 있었다.
- 2) 해석 수행 10,000 s 이후의 온도 분포를 보면 ACH가 2,000 이하인 구간에서는 배터리의 온도 편차가 5도 이하임을 확인할 수 있었다.
- 3) Rack의 ACH가 50~500 구간에서는 Fig. 3에 나타낸 결과와 같이 ACH가 증가함에 따라 배터리의 냉각속도가 급격하게 증가하였다.
- 4) Rack의 ACH가 대략 1,000이 넘는 구간부터는 Fig. 3에 나타낸 결과와 같이 냉각 속도가 수렴을 하는 양상을 보였다.
- 5) Rack의 급기 풍량이 ACH 기준 2,000 이상인 조건에서는 배터리의 열관리가 원활하게 이루어질 수 있음을 예측할 수 있다.

후 기

본 연구는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에

의해 연구되었음.

Author contributions

Y. H. Kang; Data curation, Formal analysis, Methodology, Validation, Writing-original draft, J. H. Lee; , Funding acquisition, Project administration, Writing-review & editing, J. K. Lee; Investigation, Resources.

References

1. W. S. Kang, J. K. Lee and J. H. Lee, 2019, "Evaluation of Heat Generation Characteristics during Discharging of Prismatic Lithium-Ion Battery Module for Energy Storage System", Journal of KSPSE, Vol. 23, No. 1, pp. 20-26. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2019.23.1.020>)
2. J. H. Yang, G. H. Choi, J. M. Lee and S. K. Jeong, 2018, "Behavior Analysis of a Self Excited Induction Generator with Various Loads for a Hybrid Electric Propulsion System", Journal of KSPSE, Vol. 22, No. 1, pp. 41-47. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2018.22.1.041>)
3. G. H. Choi, J. H. Yang, T. Y. Jeong and S. K. Jeong, 2018, "Charging and Discharging Characteristics Analysis of a Battery for a Hybrid Electric Propulsion System", Journal of KSPSE, Vol. 22, No. 4, pp. 39-46. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2018.22.4.039>)
4. M. Wakihara, 2001, "Recent developments in lithium ion batteries", Materials Science and Engineering, Vol. 33, No. 4, pp. 109-134. ([https://doi.org/10.1016/S0927-796X\(01\)00030-4](https://doi.org/10.1016/S0927-796X(01)00030-4))
5. K. Zaghbi, M. Dontigny, A. Guerfi, P. Charest, I. Rodrigues, A. Mauger, and C. M. Julien, 2011, "Safe and fast-charging Li-ion battery with long shelf life for power applications", Journal of Power Sources, Vol. 196, No. 8, pp. 3949-3954. (<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.11.093>)
6. K. Adachi, H. Tajima, T. Hashimoto, and K.

- Kobayashi, 2003, "Development of 16 kWh power storage system applying Li-ion batteries", *Journal of Power Sources*, Vol. 119-121, pp. 897-901.
([https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(03\)00205-2](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(03)00205-2))
7. H. S. Jang, M. G. Park, J. H. Jeon, S. S. Park, T. W. Kim and S. J. Park, 2017, "Experimental Study on Bi-directional Air Cooling System for 18650 Li-ion Battery Module to Minimize Cell-to-Cell Temperature Variation," *Transactions of Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 28, No. 4, pp.4 07-418.
(<https://doi.org/10.7316/KHNES.2017.28.4. 407>)
 8. M. Cavus, F. K. Sokmen, 2017, "Review of batteries thermal problems and thermal management systems", *Journal of Innovation Science and Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 35-55.
 9. T. Wang, K. J. Tseng, J. Zhao, and Z. Wei, 2014, "Thermal investigation of lithium-ion battery module with different cell arrangement structures and forced air-cooling strategies", *Applied Energy*, Vol. 134, pp. 229-238.
(<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.013>)
 10. R. Mahamud and C. W. Park, 2011, "Reciprocating air flow for Li-ion battery thermal management to improve temperature uniformity", *Journal of Power Sources*, Vol. 196, No. 13, pp. 5685-5696.
(<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.02.076>)
 11. X. Li, F. He, and L. Ma, 2013, "Thermal management of cylindrical batteries investigated using wind tunnel testing and computational fluid dynamics simulation", *Journal of Power Sources*, Vol. 238, pp. 395-402.
(<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.04.073>)
 12. Susin, R. M., Lindner, G. A. and Mariani, V. C., 2009, "Evaluating the influence of the width of inlet slot on the prediction of indoor airflow: Comparison with experimental data", *Building and Environment*, Vol. 44, pp. 971-986.
(<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.06.021>)
 13. Pulat, E. and Ersan, H.A., 2015, "Numerical simulation of turbulent airflow in a ventilated room: Inlet turbulence parameters and solution multiplicity," *Energy and Buildings*, Vol. 93, pp. 227-235.
(<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.01.067>)
 14. ANSYS Inc., 2018, "ANSYS Fluent Theory Guide".