반도체디스플레이기술학회지 제16권 제1호(2017년 3월)
Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 16, No. 1. March 2017.

전기자동차 배터리 팩 형상이 배터리 셀 주위의 강제대류에 미치는 영향에 대한 수치해석

김교현[*] · 김태완[*] · 우만경[*] · 전병진[**] · 최형권[*†]
[*†]서울과학기술대학교 기계자동차공학과
[**]연세대학교 의과대학, 심장융합영상연구센터

A Numerical Study on the Effect of Battery-pack Shape of Electric Vehicle on the Forced Convection Around Battery Cells

Kyo Hyeon Kim[*], Tae Wan Kim[*], Man Gyeong Woo[*], Byoung Jin Jeon[**] and Hyoung Gwon Choi[*†]
[*†]Dept. of Mechanical & Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology,
[**]Integrative Cardiovascular Imaging Research Center, Yonsei Cardiovascular Center,
College of Medicine, Yonsei University

ABSTRACT

In this paper, the effect of battery-package shape of electric vehicle on the forced convection around a group of battery cells has been numerically investigated. Simulations for the two package shapes with straight/curved ducts have been conducted to examine the two design factors; the maximum temperature and the temperature deviation of a group of cells which influence the cell durability. The simulation of the conjugate heat transfer has been simplified by employing an equivalent thermal conductivity of cell that consists of various materials. It has been found that the maximum temperature and the temperature deviation of curved duct were lower than those of straight duct. Velocity fields have also been examined to describe the temperature distribution of a group of cells and the position of maximum temperature was found to be related to the dead zone of flow field.

Key Words : Battery-pack shape, Forced convection, Conjugate heat transfer, Cell durability, Temperature distribution

1. 서 론

최근에는 환경오염 문제로 인하여 자동차 배기 가스에 대한 규제가 강화되고 있다. 이에 대비하여, 주요 국가들은 전기자동차, 하이브리드 자동차의 개발 및 보급화를 위해 다양한 정책을 펴고 있는 추세이다. 이러한 정책에 맞추어 세계적인 기업들은 전기자동차에 대한 연구를 수행하고 프로토 타입의 제품을 출시하고 있다.

발견되는 부분은 배터리의 냉각에 대한 연구이다[1,2]. 1970년대에 노트북에서 많이 사용 되었던 리튬-이온 배터리는 니켈수소 또는 리튬-폴리머 배터리보다 발열이 심하고 폭발 위험이 있다. 또한, 배터리 팩 내부의 발열은 셀의 성능 저하와 수명 감소를 유발한다. 따라서, 배터리 팩 내부 온도 감소를 위한 환기 및 열 차단 시스템 설계는 매우 중요한 부분을 차지한다. 배터리가 차지하는 부피를 줄이고 생산 비용의 절감을 위해, 대부분의 개발사에서는 배터리 셀 사이의 간격은 줄이고 팬을 이용하여 배터리 팩 내부의 열을 밖으로 내보내는 방법을 사용하고 있다. 이러한 방법은 배터리 셀의 위치에 따른 냉각 효율의 차이를 발생시키는데, 배터리 셀 간의 온도 편차

[†]E-mail: hgchoi@seoultech.ac.kr

는 성능 저하를 유발하게 되고 배터리 수명 단축의 원인이 된다.

이와 같은 문제를 해결하기 위해, 전기자동차의 배터리 팩 냉각에 대한 연구는 많이 수행되어 있다. Pesaran[3]는 배터리의 다양한 냉각방식에 대한 소개를 하였으며, 배터리 냉각과 관련된 해석을 수행하여 온도 관리가 배터리의 성능에 중요한 영향을 미침을 확인하였다. 장인형 등[4]은 케이스 형상에 따른 냉각 효율을 확인하기 위해 수치 해석을 수행하였다. 그들은 2차원 문제에서 팬의 위치와 배터리 모듈 하우징의 경사에 따라서 배터리 셀의 온도 편차가 달라짐을 확인하고 최적화된 설계를 제시하였다. Wang 등[5]도 수치해석을 이용하여 리튬-이온 배터리 셀의 배열과 팬의 위치에 따른 냉각 효율을 파악하였다. 팬이 모듈 상단에 위치하고, 같은 수의 배터리 셀을 배치할 경우 면적이 가장 넓은 직사각형 형태가 공간 활용이 좋아서 냉각 효율이 가장 뛰어남을 확인하였다. Fan 등[6]은 강제대류 조건 하에서 배터리 셀을 충전할 때의 전압과 각 셀 간의 간격이 변할 때의 발열량 변화를 확인하고, 동일 부피의 배터리 팩을 냉각할 경우에 한 방향 냉각 방법은 양 방향 냉각 방법보다 최고온도는 약간 높으나 전체적인 온도 편차가 적게 나타남을 확인하였다. Yang 등[7]은 2차원으로 가정하고 배터리 셀들의 배열 방식에 따른 온도 편차를 측정하였으며, 적은 공간에서는 교차 배열을 사용했을 때 비교적 높은 냉각효율을 보임을 증명하였다. Park[8]은 하이브리드 전기 자동차에 사용되는 배터리 냉각시스템의 유로를 최적화하기 위해 다양한 조건에서 해석을 수행하였으며, 그는 비용절감과 디자인을 위해서는 팬을 이용한 강제대류의 선택이 불가피함을 증명하였다.

이와 같이 많은 선행연구들에서 전기자동차 배터리와 관련된 연구가 수행되었지만, 3차원 형상에 대해서 발열조건과 배터리 팩 케이스의 형상에 따른 열전달 해석은 수행되지 않았다.

본 연구에서는 전기자동차 배터리 케이스의 상단 형상과 배터리의 발열 방식이 배터리 케이스 내부의 유동과 온도 분포에 미치는 영향에 대해서 고찰 하고자 한다.

2. 본 론

2.1 수치해석 방법

본 연구에서는 Fan에 의한 강제대류 하에서 발열하는 배터리 팩 내의 복합 열전달을 해석하기 위해서 상용 수치해석 프로그램인 Ansys-Fluent 14.0을 이용하였다. 3차원 비정상 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 풀기 위해서 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다. 대류항의 공간 차분은 2차 정확도의 상류도식, 시간 차분은 2차 정확도의 내재적인 방법을 사용하였다. 유체 영역의 해석을 위한 운동량 방정식(식 1~3)과 연속방정식(식 4), 그리고 유체 또는 고체영역에 대한 에너지 방정식(식 5~6)은 다음과 같다[9]

Momentum (Fluid domain) :

x - component :

$$u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}=-\frac{\partial p}{\partial x}\frac{1}{\rho}+\nu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) \quad (1)$$

y - component :

$$u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}=-\frac{\partial p}{\partial y}\frac{1}{\rho}+\nu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) \quad (2)$$

z - component :

$$u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}=-\frac{\partial p}{\partial z}\frac{1}{\rho}+\nu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right) \quad (3)$$

Continuity (Fluid domain) :

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \quad (4)$$

Energy :

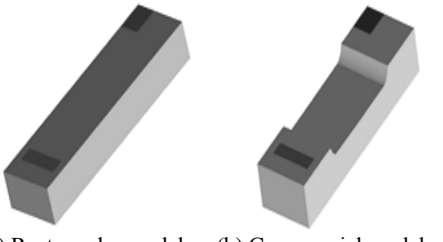
(Fluid domain)

$$\rho C_p\left(u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}+w\frac{\partial T}{\partial z}\right)=k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) \quad (5)$$

(Solid domain)

$$0=k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)+\dot{S} \quad (6)$$

본 연구에서는 두 가지의 배터리 팩 형상과 발열조건을 고려하여 수치해석을 수행하였다. Fig. 1은 상용 전기자동차의 배터리 팩[10]의 형상과 직사각형으로 단순화시킨 형상을 보여준다. Fig. 2는 배터리 팩 내부에 존재하는 배터리 셀과 전극(electrode)의 형상을 보여준다. 2가지 발열조건 중 하나는 배터리 셀 내부에서 발열이 되는 것을 모사하였으며, 다른 하나는 전극에서만 열이 발생하는 것으로



(a) Rectangular model (b) Commercial model

Fig. 1. Shape of battery Pack.

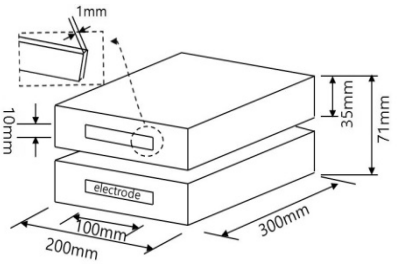


Fig. 2. Schematic of battery cell and electrode.

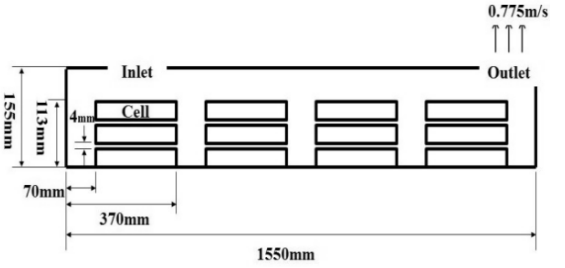


Fig. 3. Computational domain of simple rectangular shaped battery pack model.

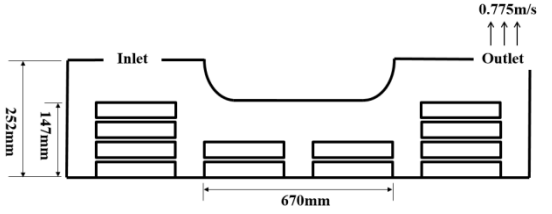


Fig. 4. Computational domain of commercial battery pack model.

가정하였다. 각 배터리 팩의 부피는 동일하며, 내부에는 65 Ah급 Li-Polymer 배터리 2~4개가 한 모듈로 구성된 48개의 배터리 셀이 배치되어 있다. 배치되어 있는 셀의 상단과 주변에는 제어를 위한 회로들이 있으나, 얇은 회로를 구현화 하기에는 어려움과 복잡성이 따르기 때문에 본 수치해석에서는 무시하였다. Fig. 3과 4는 2가지 형상의 배터리 팩에 대해서 제원 및 경계조건을 보여준다.

Fan을 단순히 고려하기 위해, 출구(outlet)에서는 0.775 m/s 속도로 내부의 공기가 외부로 빠져나가도록 설정하였다. 입구(inlet)는 pressure outlet 조건을 적용하였으며, 입구를 통해 외부로부터 들어오는 공기와 배터리 팩 내의 초기 온도는 상온(300 K)이다. 배터리 팩과 외부 공기(차체 내부) 간의 열교환은 자연대류 조건으로 가정하였다. 이에 따른 배터리 팩 표면에서의 대류열전달 계수를 5 W/m²·K로 적용하여 해석하였다[11].

본 연구에서는 열전도도가 다른 물질들로 혼합된 재료를 통해 열이 전달되는 것을 고려하여 해석하기 위해서 전기저항 등가식을 이용하였다. Li-Polymer 배터리의 열전달 모델은 Polymer 수지를 포함한 충전재와 전극이 직렬과 병렬 혼합구조로 연결되어있는 형태이다. 전위차를 가지는 전극을 포함하는 각각의 배터리 셀에서 Polymer를 포함한 충전재 및 전극의 열저항들을 모두 고려한 열전달 회로에서 등가 열저항식은 다음과 같이 표시된다.

Table 1. Thermal conductivities of cell components [12]

	Thermal Conductivity [W/m·K]
Lithium	81.8
Copper	384
Aluminum	229
TiS_2*	6.53
PEO	0.16
Full Cell	0.64 from Eq. (7)

*Assumed to be that of TiO_2

$$\frac{l_{cell}}{k_{cell}} = \sum_i \frac{l_i}{k_i} \tag{7}$$

여기서, l은 셀의 두께, k는 열전도도, i는 배터리 팩을 구성하고 있는 셀의 개수를 의미한다. 여러 개의 성분으로 구성된 배터리 셀(Full cell)의 열전도도(k_{cell})는 식 (7)에 의해서 0.64 W/m·K로 계산되었다. 본 연구에서는 전극의 두께(1mm)가 매우 얇다는 가정하에 전극과 셀의 열전도도를 동일하게 적용하여 해석을 수행하였다. Table. 2은 배터리 셀과 공기의 물성치를 보여준다.

보통 배터리는 충전 중일 경우에 발열이 가장 많이 발생하기 때문에, 본 연구에서는 충전시의 배터리 발열량을 고려하였다. 7 C(C-rate : 방전율)의 배터리가 충전될 때 전극에서는 약 120 W의 열이 발생한다[13].

Table 2. Material properties of cell and air

	Thermal conductivity	Specific heat	Density
Cell	0.64 W/m·K	0.83 J/kg·K	7,523 kg/m³
Air	0.025 W/m·K	-	1.275 kg/m³

본 연구에서는 이 값을 단위 체적당 발열량으로 환산하여 전극 발열 조건에서는 각 전극에 800,000 W/m³을, 배터리 셀 발열 조건에서는 각 셀에 1,038 W/m³을 적용하였다.

3. 결과 분석 및 고찰

본 연구에서는 연구 결과를 쉽게 설명하기 위해 Fig. 5와 같이 각 배터리 셀에 그룹 번호를 부여하였다. Table 3과 4는 배터리 팩의 형상과 발열 방식에 따른 배터리 셀에서의 최고 또는 최저 온도를 보여준다.

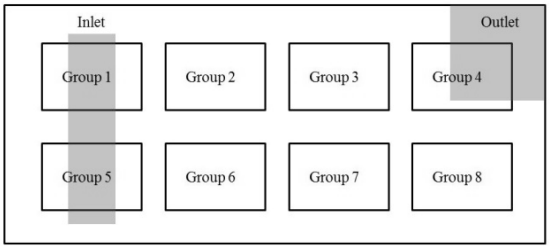


Fig. 5. Group numbering of battery cells.

Table 3. Maximum temperature of cell group

Case / Group	1	2	3	4
1	329.97	327.76	311.58	311.02
2	334.89	329.95	314.59	311.24
3	337.48	330.80	317.93	312.77
4	331.56	331.93	314.68	314.54
5	330.14	327.18	311.91	311.13
6	335.32	329.72	314.43	311.08
7	336.60	331.98	316.40	312.61
8	334.43	335.50	315.24	315.57

Table 4. Minimum temperature of cell group

Case / Group	1	2	3	4
1	303.39	303.24	302.23	301.75
2	302.50	302.63	301.95	301.49
3	305.36	305.17	303.05	303.65
4	304.44	303.14	302.10	301.77
5	303.46	303.81	302.21	302.16
6	303.03	302.93	302.28	301.54
7	304.81	305.25	304.34	303.80
8	305.99	303.79	303.07	301.90

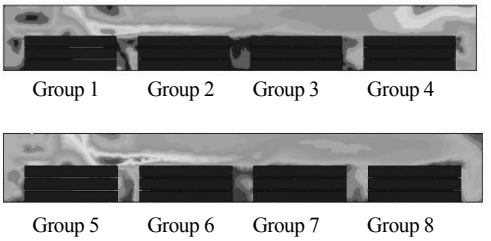


Fig. 6. Veolocity magnitude of rectangular shape.

전극 발열 모델의 경우에는 발열이 집중되어 나타나기 때문에 셀 발열 모델보다 최고온도와 평균온도가 비교적 높은 경향을 보인다. 단순 직육면체의 전극 발열 모델(Case 1)의 최고온도는 Group 3에서 약 337.48 K이며 최저온도는 Group 2에서 약 302.50 K, 온도 편차는 34.98 K이다. 상용 전극 발열 모델(Case 2)의 최고온도는 Group 8에서 약 335.50 K이고 최저온도는 Group 2에서 약 302.63 K, 온도 편차는 약 32.87 K이다. 단순 직육면체의 셀 발열 모델(Case 3)의 최고온도는 Group 3에서 약 317.93 K이고 최저 온도는 Group 2에서 약 301.95 K으로 온도 편차는 약 15.98 K이다. 상용 모델의 경우(Case 4)의 최고온도는 Group 8에서 약 315.57 K이고 최저온도는 Group 2에서 301.49 K으로 온도 편차는 약 14.08 K이다. 직육면체 모델은 상용 모델과 비교하여 최저 온도는 거의 비슷하나 최고온도가 약 2 K 정도 높기 때문에 온도 편차가 더 큰 것을 확인할 수 있다. 이 결과로부터 상용 모델은 직육면체 모델보다 최적화 되었음을 확인할 수 있다.

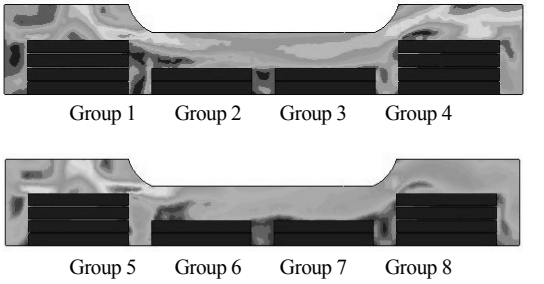
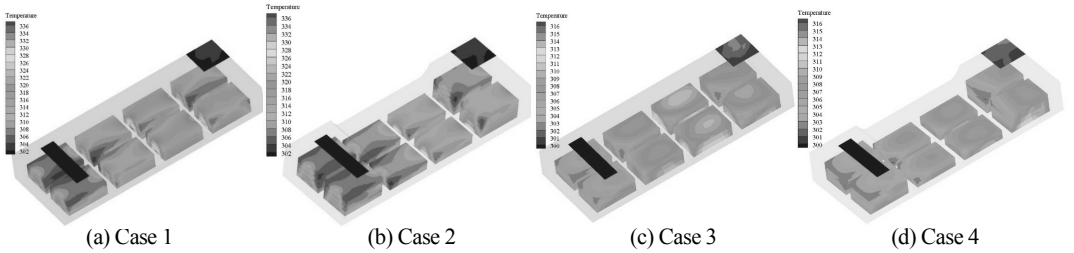


Fig. 7. Velocity magnitude of commercial model.

최고, 최저 온도의 위치는 배터리 팩의 케이스 형상과 셀의 적층 구조, 비대칭인 출구(outlet)의 위치에 의한 유동 구조와 관련이 있는 것을 알 수 있다. Fig. 6은 직육면체 모델의 경우의 속도 크기 분포를 보여준다. Group 2, 3 사이에서 유동이 정체된 것을 볼 수 있으며, 이 때문에 Group 3에서 최고온도가 나옴을 예측할 수 있다. Fig. 7은 상용 모델의 경우에 속도 크기 분포를 보여준다. Group 6, 7 또는 그룹 7, 8 사이에서 유동이 정체되어 있지만 적층 높이에 의해서 Group 8에서 최고온도가 나옴을 예상할 수 있다. 모든 조건에서 최저 온도가 나타나는 Group 2는 유입구와 가깝고 상단 부분에서 원활한 유동 흐름이 발생함을 볼 수 있다.

Fig. 8은 다양한 조건에 대한 배터리 셀 표면의 온도 분포를 보여준다. 직관의 경우에는 Group 3에서, 상용 모델의 경우에는 Group 8에서 최고온도를 가짐을 보여준다.



(a) Case 1 (b) Case 2 (c) Case 3 (d) Case 4

Fig. 8. Temperature distributions of various cases.

4. 결 론

본 연구에서는 전기자동차에 적용되는 배터리 팩 상자의 형상과 발열 조건에 따른 냉각 효율을 비교하기 위해 정상 상태의 복합열전달 해석을 수행하였다. 효율적인 해석을 수행하기 위해 열전도도가 다른 물질들로 혼합된 셀은 등가 전기전도도를 사용하여 해석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 두 형상에 대하여 예측된 최저온도의 크기는 큰 차이를 가지지 않는다. 최저온도의 위치는 상온의 공기가 유입되는 입구 근처에 존재한다.

2, 곡관 형상은 직관 형상보다 낮은 최고온도 및 최대의 온도편차를 가지며, 최고온도의 위치는 와류가 존재하는 정체된 영역과 관련을 가진다. 따라서, 본 해석결과는 상용모델의 형상이 직관보다 더 효율적인 냉각효과를 가짐을 확인할 수 있다.

3. 전극 발열 조건을 이용한 해석은 셀 발열 조건의 계산보다 최고온도뿐만 아니라 평균 온도가 높은 것을 확인하였다. 따라서, 안전한 설계를 위해서는 전극발열 조건을 사용해야 한다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Gould, J., and Golob, T. F. "Clean air forever? A longitudinal analysis of opinions about air pollution and electric vehicles." Transportation Research Part D: Transport and Environment 3.3 : 157-169 (1998).
2. Morcos, M. M., Dillman, N. G. and Mersman, C. R., "Battery chargers for electric vehicles." IEEE Power Engineering Review 20.11 : 8-11 (2000).
3. Pesaran, A. A. "Battery thermal management in EV and HEVs: issues and solutions." Battery Man 43.5: 34-49 (2001).
4. Jang, I. H., Choe, J. H., Park, J. Y., and Seol, S. Y. Analysis of Forced Cooling Efficiency According to Case of HEV Battery Module,'. Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers :252-257 (2010).
5. Wang, T., Tseng, K. J., Zhao, J., and Wei, Z. Thermal investigation of lithium-ion battery module with different cell arrangement structures and forced air-cooling strategies. Applied energy, 134: 229-238 (2014).
6. Fan, L., Khodadadi, J. M. and Pesaran, A. A.. "A parametric study on thermal management of an air-cooled lithium-ion battery module for plug-in hybrid electric vehicles." Journal of Power Sources 238 : 301-312 (2013).
7. Yang, N., Zhang, X., Li, G., and Hua, D. Assessment of the forced air-cooling performance for cylindrical lithium-ion battery packs: A comparative analysis between aligned and staggered cell arrangements. Applied Thermal Engineering, 80, 55-65, (2015).
8. Park, H. S. "A design of air flow configuration for cooling lithium ion battery in hybrid electric vehicles." Journal of Power Sources 239: 30-36 (2013).
9. Bergman, T. L., Incropera, F. P., DeWitt, D. P., and Lavine, A. S. Fundamentals of heat and mass transfer. John Wiley & Sons, (2011).
10. KIA soul Emergency Responder guide.
11. Jung, T. S., and Kang, H. K. "Investigation of Natural Convective Heat Flow Characteristics of Heat Sink." Transactions of the Korean Society of Mechanical

Engineers B 37.1 : 27-33 (2013).
12. Pals, C. R. Thermal modeling of the lithium/ polymer battery. Lawrence Berkeley Lab., CA (United States), (1994).
13. Xiao, M., and Choe, S. Y. "Theoretical and experimental analysis of heat generations of a pouch type LiMn 2 O 4/carbon high power Li-polymer battery." Journal of Power Sources 241 : 46-55 (2013).

접수일: 2017년 2월 16일, 심사일: 2017년 3월 20일,
게재확정일: 2017년 3월 24일