전동킥보드 배터리 셀 배열에 따른 온도밸런싱 효과에 관한 연구

이 경 수*1)

한양대학교 미래자동차공학과1)

Research on the Temperature Balancing Effect of Battery Cell Arrangement in an Electric Scooter

Gyeongsu Lee*1)

1)*Department of Automotive Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Korea*

Abstract : Electric scooters have grown rapidly as a major item of personal mobility thanks to shared services. Along with the fast growth, various problems have emerged, one of which is the fire problem caused by battery cell imbalance. This research was conducted based on 3D modeling thermal analysis to confirm the temperature balancing effect according to the battery cell arrangement in an electric scooter. Products mainly used as shared electric scooters were selected as analytical models and 3D modeled using the COMSOL program. As a result of the analysis, there was definitely a difference in temperature balancing according to the battery cell arrangement. And in the same arrangement pattern, the temperature imbalance became severe as the gap between cells increased. These results mean battery cell arrangement should be considered in electric scooter design stage and can help other research on battery cell balancing.

Key words : Electric scooter(전동킥보드), Battery(배터리), Temperature balancing(온도밸런싱), Cell arrangement(셀 배열), Thermal analysis(열 해석)

1. 서 론

친환경 이동수단에 대한 사회적 관심의 증가 및 최근 몇 년간 우리 사회에 영향을 끼친 코로나19의 영향으로 개인형 이동장치(Personal Mobility)가 주목받고 있다. 이러한 상황에 등장한 공유서비스는 개인형 이동장치 사용자의 수를 크게 증가시켰다. 20년도 기준 개인형 이동장치 공유서비스 이용자의 수는 전년도 대비 2배 증가하였고 특히 전동킥보드 이용자는 3배 이상 증가하여 가장 큰 성장세를 보였다.[1)]

전동킥보드의 급격한 성장은 뒤따르는 많은 문제점들을 법적으로나 기술적으로 대비할 시간을 부족하게 만들었고 전동킥보드와 관련된 사고 또한 급증하게 되었다. 관련 사고 가운데 큰 비중을 차지하는 요소 중 하나는 화재 사고이다. 소방청에서 발표한 전동킥보드 화재 건수와 피해액을 살펴보면 2017년 4건의 화재 건수와 14,534,000원의 피해액에서 2020년 39건의 화재 건수와 193,512,000원의 피해액으로 약 10배 가까이 증가하였으며 이는 전동킥보드 이용자 수의 증가율 보다 훨씬 큰 증가율을 보이고 있다.[2)]

전동킥보드 화재 사고의 주된 원인은 내부에 탑재된 리튬이온 배터리의 열폭주 현상이다. 열폭주는 배터리 내부 분리막이 손상되면서 발생하는데 손상 주요 원인으로는 과충전, 과방전, 높은 외부 온도가 있다. 특히 전동킥보드 화재 사고의 경우 대부분 과충전으로 인해 발생하는데 이러한 과충전의 위험을 높이는 것이 바로 배터리 셀 간의 불균형이다.

배터리는 기본적으로 여러 개의 작은 셀로 이루어져 있어 시스템이 필요로 하는 전압, 전류 및 용량에 따라 알맞은 직렬, 병렬 구성을 하여 하나의 배터리팩을 구성한다. 동일한 규격과 성능을 목적으로 제작된 배터리 셀이지만 제작 환경이나 사용 환경, 사용 시간 등에 따라 셀 간의 불균형이 생기

* Corresponding author, E-mail:159rudtn@naver.com

게 되고 이는 셀 간의 전압 차를 야기한다. 이러한 전압 차는 배터리 용량과 수명에 영향을 끼치고 배터리 과충전과 과방전의 위험을 높인다.

이러한 셀 전압 차를 해결하기 위하여 일반적으로 BMS(Battery Management System)을 사용한다. BMS는 배터리의 상태를 지속적으로 관찰하여 셀 간의 균형을 잡아주고 모든 셀이 과충전이나 과방전 되는 일이 없도록 한다. 하지만 전동킥보드는 구조상 고성능 BMS를 사용하기 어렵고 외부 충격에 의해 고장나는 경우가 많다.[3] 따라서 셀 간 불균형을 막기 위한 추가적인 대비책이 필요하다.

제작 환경이 완전히 동일하고 사용 환경에 별다른 변수가 없다고 가정 했을 때 셀 간 불균형을 일으키는 원인은 배터리 셀 배열에 따른 온도 차이라고 판단하였다. 온도가 배터리에 주는 영향을 확인하기 위해 선행 연구 중 온도와 충방전 횟수가 배터리에 주는 영향에 관한 논문을 확인한 결과 15℃의 차이가 나는 배터리를 100cycle 충방전 진행했을때 용량이 6.3%차이나는 것으로 온도 차이의 영향을 확인 할 수 있었다.[4] 따라서 본 연구에서는 셀 불균형을 일으키는 온도 편차를 줄이기 위해 COMSOL 프로그램을 사용하여 전동킥보드 배터리 팩 해석 모델을 제작하고 열 해석을 통해 배터리 셀 배열에 따른 열 분포와 온도 차이를 확인하는 방향으로 연구를 진행하였다.

2. COMSOL 해석 모델 및 방법

2.1 해석 모델 제작

공유 전동킥보드 시장에서 가장 많이 사용되는 모델 중 하나인 Ninebot Max Battery Pack을 대상으로 선정하였다. 정격전압과 용량은 각각 36V와 551Wh로 정격전압이 3.6V인 배터리 셀을 10s4p 구성하였다.

Fig. 1 Ninbot max battery pack

해석 모델을 제작하기 위해서는 배터리 팩의 온도 변화를 계산하기 위한 이론적 배경이 필요한데 이 때 사용된 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (1)$$

$$k = Ae^{-\frac{E_a}{RT}}$$
$$ln\frac{k2}{k1} = -\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T2} - \frac{1}{T1}\right) \quad (2)$$

식 (1)은 유체의 에너지 보존 지배 방정식으로 배터리 셀 간의 열 전달 및 배터리 팩과 외부의 열 전달의 계산에 사용되는 방정식이다. 특히 위의 식은 유체의 밀도 변화가 매우 작은 경우 즉, 비압축성으로 간주한 경우의 식이다. 본 연구에서는 해석의 단순화를 위해 비압축성으로 간주하고 진행하였다. 식 (2)는 아레니우스 방정식으로 반응 속도의 온도 의존도를 나타낸다. 배터리를 단순히 전압, 전류, 저항으로 계산하는 전기적 해석이 아닌 온도와 기체상수 및 화학반응속도 등을 고려하는 전기 화학적 모델링에 있어서 필요한 식이다. 식에서 각각 k는 속도상수, A는 빈도계수, Ea는 활성화에너지, R은 기체상수, T는 온도를 나타낸다.

2.2 해석 조건

해석 조건으로 전동킥보드 배터리 팩이 들어갈 공간인 발판 사이즈에 맞도록 제한 조건을 설정하였다. 배터리 셀 하나의 크기는 지름 21mm, 높이 70mm인 동일한 21700 배터리로 설정하였다. 또한 냉각 장치가 따로 없는 일반 공유 전동킥보드 특성을 고려하여 오직 주변 공기와 배터리, 커넥터 간의 열 전달 만을 고려하였다.

해석 시간은 충전된 배터리가 방전되는 시간으로 정하였다. 배터리의 충방전 시간은 C-rate에 따라 C-rate가 1C일 경우 1시간, 2C일 경우 0.5시간 과 같이 소모된다. 본 연구에서는 배터리의 완충 상태를 일반적으로 권장되는 배터리의 충전 기준인 80%로 설정하고 C-rate를 4C로 설정하여 해석 시간은 0.2시간으로 설정하였다.

해석 재료로는 공기 영역과 커넥터를 각각 COMSOL에서 제공하는 Air과 Aluminium의 물성치로 설정하였고 배터리의 경우 밀도가

2000[kg/m^3]이고 열 용량이 1400[J(kgK)]인 물질로 설정 하였다. 앞서 선정한 해석 대상 모델에 해석에 필요한 방정식과 위의 해석 조건들을 적용하여 COMSOL로 제작한 해석 모델의 모습은 다음과 같다.

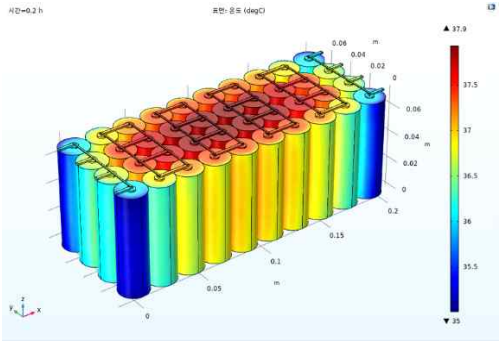

Fig. 2 Battery 3D model

2.3 신뢰성 검증

제작한 해석 모델의 신뢰성을 검증하기 위하여 선행 연구 데이터 중 리튬 이온 배터리의 열 해석 모델을 제작하여 방전시 C-rate에 따른 전압 변화 특성을 확인한 자료와 비교하여 검증한다.

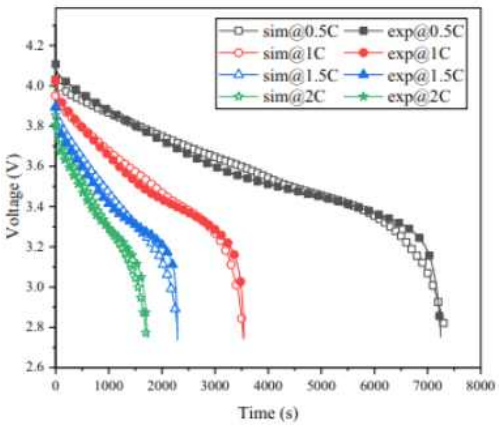

Fig. 3 Thermal model for a lithium-ion cell[5)]

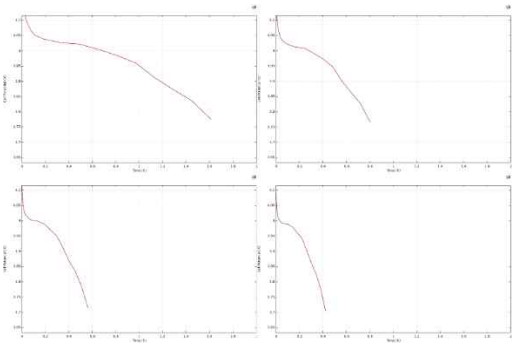

Fig. 4 Voltage change by C-rate for 0.5/1/1.5/2

비교 결과 C-rate가 각각 0.5C, 1C, 1.5C, 2C일 때 선행 연구 모델과 본 연구에서 열 해석하기 위해 제작한 모델이 동일한 특성을 보이므로 신뢰성을 검증하였다.

2.4 연구 방법

제한 조건 내에서 배터리 셀 배열에 따른 온도 변화를 확인하기 위하여 본 연구에서는 두 가지 방법으로 진행하였다. 첫 번째는 배터리 셀 배열의 패턴 자체를 변화시키는 것이다. 실험 패턴을 선정하는 과정에서는 다음과 같은 조건으로 진행하였다. 먼저 설계 된 패턴이 전동킥보드 내부에 실제로 구현되어 들어 갈 수 있어야 한다. 또한 10s4p의 구조를 만족할 수 있어야 한다. 이러한 조건 하에서 두 가지 가설로 패턴을 선정하였다. 하나는 배터리 팩 구조상 중심부가 가장 고열이기 때문에 중심을 비우면 열 분포가 상대적으로 밸런스 있게 구현될 것이라 판단하여 중심부를 비운 패턴이다. 또 하나는 배터리 셀 배열을 최대한 대칭성 있게 만들면 온도 분포 또한 균등하게 나올 것이라 판단한 패턴이다. 패턴 변화 연구는 기본 패턴 모델과 위의 두 가지 패턴 모델을 비교하여 진행하였다.

두 번째 방법은 배터리 셀 패턴은 그대로 유지하고 셀 간의 간격만 변화시켰다. 앞 선 패턴 변화 연구와 마찬가지로 셀 간의 간격을 변화시키는데 있어서 배터리 팩 케이스라고 볼 수 있는 전동킥보드 발판 사이즈를 넘지 않도록 주의하며 변화시킬 간격을 설정하였다. 선행 연구 가운데 단순화된 배터리 팩의 형상과 배열에 따른 온도 분포 연구에 따르면 배터리 사이의 간격을 넓히는 것이 온도제어에 유리하다는 결과[6)]가 있었고 원통형 리튬이온 배터리 셀 간격이 냉각성능에 미치는 영향 연구에 따르면 정방향 배열 보다는 교차 배열이 좋고 간격은 커질수록 냉각성능이 향상된다는 결과[7)]가 있다. 하지만 앞서 말한 연구들은 냉각장치가 존재하는 경우를 고려한 것이고 본 연구는 전동킥보드라는 제한 조건 하에서 공유 서비스에 이용되고 있는 대부분의 전동킥보드 상황에 맞추어 냉각장치를 고려하지 않았고 또한 온도가 얼마나 높아지고 낮아지는 것이 아닌 셀 간의 온도차이를 얼마나 줄일 수 있는지에 초점을 맞추었기에 선행 연구와 다른 결과가 나올 수 있다는 것을 고려하고 진행하였다. 간격 변화는 가로축과 세로축

의 간격 변화를 동일하게 설정하였으며 각각 간격이 5mm, 10mm일 때의 변화를 고려하였다.

3. 해석 결과

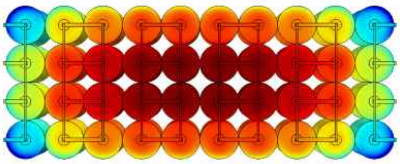

Fig. 5 Thermal model for type A

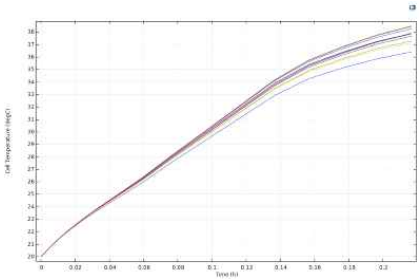

Fig. 6 Cell temperature for type A

Fig 5는 제작한 해석 모델의 기본형인 type A가 충전 상태에서 방전된 순간의 열 분포를 나타낸다. Fig 6는 모델의 대칭성을 고려하여 쿼터 모델로 바라보았을 때 10개의 배터리 셀의 시간에 따른 온도 변화를 그래프로 나타낸 것이다.

3.1 패턴 변화

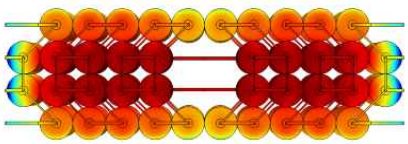

Fig. 7 Thermal model for type B

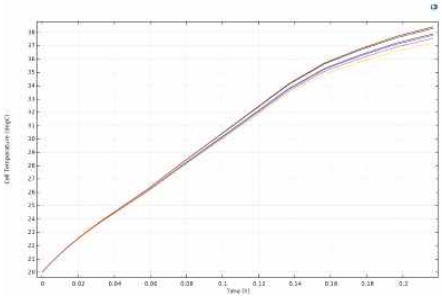

Fig. 8 Cell temperature for type B

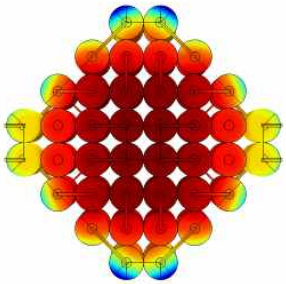

Fig. 9 Thermal model for type C

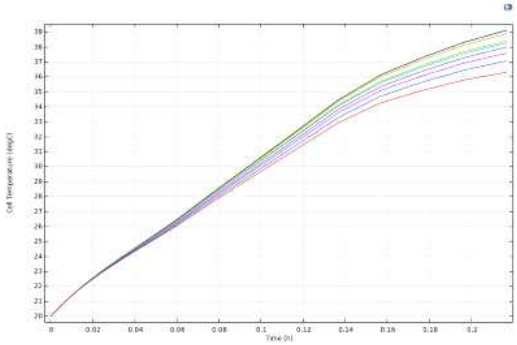

Fig. 10 Cell temperature for type A

Fig 7,8,9,10은 셀 배열의 패턴을 type B와 type C로 변화시킨 경우의 열 분포와 각 배터리 셀의 시간에 따른 온도 변화 그래프를 나타낸 것이다. 그래프의 밀집도가 type B에서 가장 높은 것으로 확인 할 수 있다.

3.2 간격 변화

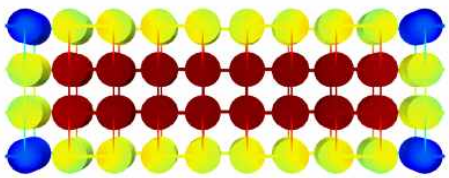

Fig. 11 Thermal model for type D(5mm)

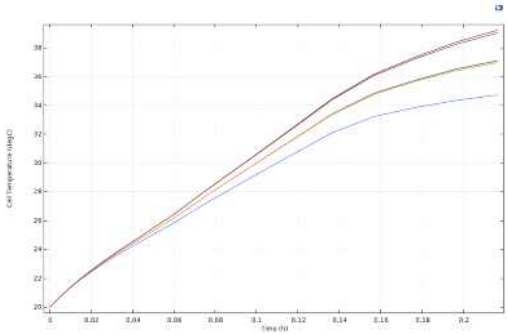

Fig. 12 Cell temperature for type D(5mm)

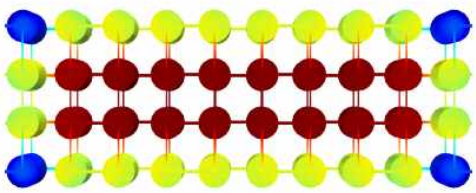

Fig. 13 Thermal model for type E(10mm)

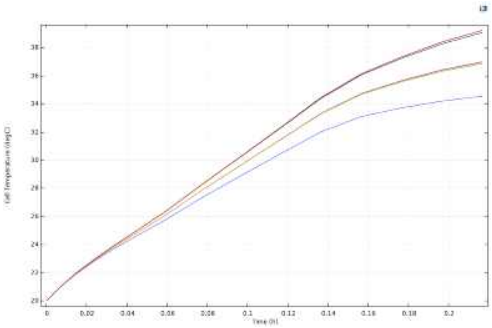

Fig. 14 Cell temperature for type E(10mm)

Fig 11,12,13,14는 셀 배열의 패턴은 type A의 정방향 기본형을 유지한 채 셀 간의 간격을 각각 5mm, 10mm로 변화 시킨 typeD와 typeE의 열 분포와 시간에 따른 배터리 셀의 온도 변화를 나타낸 그래프이다.

3.3 결과 정리

해석 결과로부터 각 type 마다 배터리 셀의 최고 온도와 최저 온도를 구하여 비교한 표는 아래와 같다. 먼저 기본형인 type A는 최고 온도 37.763℃와 최저 온도 35.852℃를 기록하였고 그 차이는 1.911℃였다. 패턴 변화 연구를 진행한 type B가 type A와 비교하여 더 낮은 최고 온도와 더 높은 최저 온도를 기록 하며 온도 차이를 1.099℃까지 줄였고 type C의 경우는 오히려 온도 차이가 커졌음을 확인하였다. 간격 변화 연구를 진행한 type D와 type E의 경우 간격이 커짐에 따라 더 높은 최고 온도와 더 낮은 최저 온도로 차이가 커지는 양상을 보였는데 간격이 5mm인 type D의 경우 4.048℃의 온도 차이, 간격이 10mm인 type E의 경우 4.203℃의 온도 차이를 보였다.

Table 1 Comparison of temperature difference for 5 types

Type	High(degC)	Low(degC)
A	37.763	35.852
B	37.696	36.597
C	38.324	35.796
D	38.393	34.345
E	38.402	34.199

4. 결 론

1) 본 연구에서는 COMSOL 프로그램을 활용하여 배터리 팩 열 분포 해석 모델을 제작하고 배터리 셀 배열을 각각 패턴 변화 케이스와 간격 변화 케이스로 분류하여 배터리 셀 배열이 온도 밸런싱에 미치는 영향에 대해 고찰하였다.

2) 패턴 변화 연구에서는 배터리 팩 중앙에 공간을 만든 type B가 기본형 모델 type A대비 가장 균등한 열 분포를 보임을 확인할 수 있었고 간격 변화 연구에서는 간격이 커짐에 따라 온도의 고저차가 커짐을 확인할 수 있었다.

3) 전동킥보드의 특성으로 인해 본 연구는 냉각 장치를 고려하지 않았으나 전동킥보드에 냉각 시스템을 추가하기 위한 연구도 계속되고 있어 향후에 냉각 장치를 고려하였을 때의 셀 배열에 따른 온도 분포에 관한 연구도 이루어 질 필요가 있다.

4) 본 연구는 향후 전동킥보드 배터리 셀 최적 배열에 관한 연구나 셀 온도 밸런싱과 관련한 연구에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

4. 후 기

논문 작성에 많은 도움을 주신 지도 교수님께 진심으로 감사드립니다.

References

1) Nielsen, Is ‘Personal Mobility’ which is just around 2 million users an alternative means of transportation?, http://www.koreanclick.com/insights/newsletter_view.html?code=topic&id=599&page=1&utm_so, 2022.

2) National Fire Agency, Current status of electric scooter fire by year, https://www.nfa.go.kr/nfa/, 2022.

3) H. K. Kim, S. C. Park, P. S. Kim and Y. S. Park, “Risk of Ignition due to Physical

Damage to Electric Kickboard," Journal of Fire Investigation Society of Korea, Vol.12, No.4, pp.79-92, 2021.
4) Y. J. Jeon, Aging Progress of Li-ion Batteries by Cycle Experiments at Different Temperatures, Master's Thesis, Kookmin University, Seoul, 2019.
5) W. Mei, C. Liang, J. Sun and Q. Wang, "Three-dimensional layered electrochemical-thermal model for a lithium-ion pouch cell," Energy Research, Vol.44, No.11, pp.8919-8935, 2020.
6) C. S. Hwang, H. S. Choi, H. B. Ahn and H. S. Kim, "A Study of Temperature Distribution in a Simplified Battery Pack with Its Configuration and Arrangement," KSAE Annual Conference Proceedings, pp.1361-1363, 2014.
7) M. G. Park and Y. J. Kim, "A Study on the Cooling Performance of a Cylindrical Lithium-ion Battery with Various Gap Distances," KSME Fluid Engineering Division Annual Conference Proceedings, pp.11-12, 2021.