

리튬이온 배터리의 열관리가 전기자동차 주행거리에 미치는 영향

박철은, 유세웅, 정영환, 김기범*
충북대학교 기계공학부

Effect of Thermal Management of Lithium-Ion Battery on Driving Range of Electric Vehicle

Chul-Eun Park, Se-Woong Yoo, Young-Hwan Jeong, Kibum Kim*

Department of Mechanical-Engineering, Chungbuk National University

요약 전기자동차에 사용되는 리튬이온 배터리의 성능은 배터리 온도에 따라 큰 차이를 보인다. 본 논문에서는 유한차분법을 이용하여 배터리의 발열량에 따른 배터리의 온도변화를 평가하고, 배터리의 충전량, 내부저항 및 전압변화를 조사하였다. 이 배터리 모델을 1차원 해석 프로그램인 AMESim과 연동하여 전기자동차가 NEDC 모드로 주행 시, 배터리의 온도 변화에 따른 전기자동차의 주행거리를 산출하였다. 배터리는 온도가 25°C 이하로 감소하면 내부저항이 증가하기 때문에 발열량이 증가하여 주행거리는 줄었다. 또한, 배터리의 온도가 25°C 이상이 되면, 배터리의 충전량이 감소하여 배터리의 성능이 떨어지고 그 결과로 주행거리가 줄었다. 배터리의 성능을 최적으로 유지할 수 있는 온도인 25°C를 기준으로 배터리의 온도가 -20°C와 45°C일 때, 전기자동차의 주행거리는 각각 33%와 1.8% 감소하였다. 배터리의 최적 온도를 유지하기 위해 효율적인 배터리 열관리를 통하여 저온에서는 가열, 고온에서는 냉각이 이루어져야 한다. 해석 결과 외기온이 -20°C인 경우 500 W의 열을 공급해주어야 하며, 외기온이 45°C 경우에는 냉방을 통해 250 W의 열을 방출해줌으로써 배터리 구동의 최적 온도인 25°C를 유지할 수 있다.

Abstract The performance of lithium ion batteries used in electric vehicles (EV) varies greatly depending on the battery temperature. In this paper, the finite difference method was used to evaluate the temperature change, state of charge (SOC), internal resistance, and voltage change of the battery due to heat generation in the battery. The simulation model was linked with AMESim to calculate the driving range of an EV traveling in New European Driving Cycle (NEDC) mode. As the temperature dropped below 25°C, the internal resistance of the battery increased, which increased the amount of heat generated and decreased the driving range of EV. At battery temperatures above 25°C, the driving range was also decreased due to reduced SOC that deteriorated the battery performance. The battery showed optimal performance and the driving range was maximized at 25°C. When battery temperatures of -20°C and 45°C, the driving range of EV decreased by 33% and 1.8%, respectively. Maintaining the optimum battery temperature requires heating the battery at low temperature and cooling it down at high temperature through efficient battery thermal management. Approximately 500 W of heat should be supplied to the battery when the ambient temperature is -20°C, while 250 W of heat should be removed for the battery to be maintained at 25°C.

Keywords : Driving mode, Electric vehicle, Heat generation, Lithium-ion battery, NEDC, Thermal management

1. 서론

지속적인 유가 상승, 화석에너지가 만들어내는 환경

오염 물질, 화석에너지의 고갈가능성을 해결하기 위한 방안으로 이차전지는 EV (Electric Vehicle), HEV (Hybrid Electric Vehicle)등의 동력원으로서 주목받고

본 논문은 2015학년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비와 연구재단과제(2016141034)지원에 의하여 수행되었음.

*Corresponding Author : Kibum Kim (Chungbuk National Univ.)

Tel: +82-43-261-2446 email: kimkb11@chungbuk.ac.kr

Received February 13, 2017

Revised March 28, 2017

Accepted May 12, 2017

Published May 31, 2017

있다. 전기자동차의 이차전지는 주로 리튬이온, 니켈망간, 리튬폴리머 배터리가 주로 이용되고 있으나 이들의 특성은 각기 다르다. Tesla Model-S, Chevy-Volt를 비롯한 대부분의 전기자동차 배터리는 리튬이온 배터리를 많이 사용하는데, 다른 물질에 비해 에너지 밀도가 높고, 가벼운 장점이 있기 때문이다. EV에 전기를 공급하기 위한 고전압 리튬이온 배터리는 작동함에 따라 많은 열이 발생한다. 발열로 인하여 배터리의 온도가 증가함과 동시에 배터리 내부의 전기화학반응을 촉진하여 배터리의 충전량(SOC)과 전압은 낮은 온도 조건 대비 증가하는 경향이 있다. 하지만 지나치게 높은 온도는 배터리 성능 및 배터리의 수명에 악영향을 미친다. 전기자동차 큰 단점 중 하나가 배터리의 수명과 크게 연관되어 있다. 따라서 배터리의 열관리를 통하여 온도를 효율적으로 제어하는 것이 매우 중요하다. 배터리 열관리 및 냉각 시스템에 대하여 많은 연구가 수행되었다[1,2]. 또한, 히트파이프를 배터리 냉각 시스템에 적용하여 배터리의 구동 온도를 최적으로 유지할 수 있는 기술이 제안되었다[3]. 다양한 냉각방식의 효율성을 연구함과 동시에 배터리의 발열량을 조사하여 각 냉각방식에 적용할 필요가 있다. 이를 위해, 충·방전 사이클에 따른 리튬이온 배터리의 발열현상을 수학적으로 모델링하여 배터리의 온도를 예측하였다[4]. 또한, 열적 모델링을 통하여 적절한 리튬이온 전지 팩의 방열 시스템 모델을 제시하고 타당성을 검증하였다[5]. 이제까지 많은 모델링 및 해석연구가 수행되었으나, 전기자동차의 주행모드에 따라 변하는 발열량을 고려하지 않았다.

따라서 본 연구에서는 전기자동차가 유럽연비측정모드인 NEDC (New European Driving Cycle)를 적용하였고 주행 시 리튬이온 배터리의 발열량을 수학적 모델링을 이용하여 계산하고, 배터리의 온도를 예측하였다. 또한, 1-D 해석 프로그램인 AMESim으로 전기자동차를 모델링 하였다. 그리고 온도의 영향에 따른 전기자동차의 주행거리를 조사하였다. 마지막으로 배터리가 최적인 온도를 유지하기 위한 가열용량 및 냉각용량을 산출 하였다.

2. 모델링

2.1 열전달 모델링

본 연구에서는 Panasonic사의 NCR18650A 배터리를 기반으로 Li-Ion 배터리의 발열량에 따른 온도변화를 모

델링하였다. 배터리의 초기 온도에 따라 내부에서 발생하는 배터리의 열량이 달라지며, 그에 따라 배터리의 온도 또한 변한다. 배터리의 온도에 따른 성능을 판단하고 열량을 제어하기 위해서는 배터리의 온도를 예측하는 것이 필수이다. 식 (1)은 배터리 내부에서 열원의 생성을 고려한 1차원 비선형·비정상 열전도 방정식을 보여준다. 반경(r)방향으로 열전달이 다른 방향으로의 열전달보다 중요하므로 1차원 모델을 이용하여 배터리의 온도분포를 조사하였다.

$$\begin{aligned} \frac{\dot{q}}{k} + \frac{T_{m+1,p} - 2T_{m,p} + T_{m-1,p}}{\Delta r^2} + \frac{1}{r} \frac{T_{m+1,p} - T_{m,p}}{\Delta r} \\ = \frac{1}{\alpha} \frac{T_{m,p+1} - T_{m,p}}{\Delta t} \end{aligned} \quad (1)$$

식(1)에서 \dot{q} 는 배터리 내부의 발열량, k 는 배터리의 열전도 계수, α 는 열확산계수, T 는 각 노드에서의 온도, Δr 는 각 노드사이의 거리, Δt 는 시간의 변화량을 각각 의미한다. 또 첨자 m 은 노드의 위치, p 는 시간의 의미한다.

$$k \frac{T_{m,p} - T_{m-1,p}}{\Delta r} = h(T_{m+1,p} - T_{m,p}) \quad (2)$$

외기온도에 따른 배터리 온도의 변화를 고려하기 위해 대류경계조건을 사용하였고, 배터리 모델의 가장 바깥쪽 노드와 대기사이의 경계조건 식은 식(2)와 같다.

2.2 발열량 모델링

리튬이온 배터리의 발열은 화학반응의 비가역성 때문에 일어나게 된다. 이러한 비가역성으로 인한 배터리 발열현상을 수학적으로 묘사하기 위해, 몇 가지 가정이 필요하다.

첫 번째, 모든 비가역 에너지는 열에너지로 변환된다. 두 번째, 반경 방향으로 열전도율은 일정하다. 세 번째, 배터리의 물리적 특성은 충전, 방전 시 변하지 않는다. 마지막으로 전해액에서의 대류는 없다. 이 네 가지 가정하에 배터리의 발열량은 다음 (3), (4), (5), (6) 식들을 통해 구할 수 있다[6].

$$Q_p = I(V - V_0) = I^2 R \quad (3)$$

식(3)에서 I 는 충·방전 전류이다. 그리고 전류가 배터리를 통해서 흐를 때, 배터리의 전압 V 는 전기화학적 분

극으로 인해 개방 회로 전압(Open Circuit Voltage, OCV) V_0 와 차이가 발생한다. 이때 첫 번째 가정에 따라, 분극으로 인한 모든 에너지의 손실은 열로 발산된다. 따라서 Q_p 는 충방전 사이클에서의 발열량을 나타내는 항이다. 여기서 V 와 V_0 의 차이는 IR 로 나타낼 수 있다. 그러므로 Q_p 는 내부저항(Internal Resistance) R 에 의해 결정된다고 할 수 있다.

$$Q_s = T_{cell} \Delta S \frac{I}{nF} \quad (4)$$

식(4)에서 Q_s 는 엔트로피 변화에 의한 열량이다. 이 식에서 T_{cell} 는 배터리의 온도이다. F 는 패러데이 상수로써 $9.648670 \pm 0.00016 \times 10^4$ C/mol 이다. n 은 반응과 관계된 수이다. ($n=1$, 리튬이온배터리의 경우) 엔트로피 변화(ΔS)는 보통 방전 시에는 -30 J/mol·K로 가정할 수 있다[7]. 충방전 시 반응방향은 서로 다르기 때문에, Q_s 는 충전 시에 흡열반응이고 방전 시에 발열반응을 나타낸다.

$$Q_b = Ah(T_{cell} - T_{amb}) \quad (5)$$

식(5)는 배터리의 대류열전달식을 나타낸다. A 는 배터리의 표면적이고, T_{amb} 는 외기온도이며, h 는 대류 열전달계수이다.

$$\dot{Q} = Q_p + Q_s - Q_b \quad (6)$$

마지막으로 식(6)을 통해 배터리의 전체 발열량을 계산할 수 있다.

2.3 전기자동차 모델링

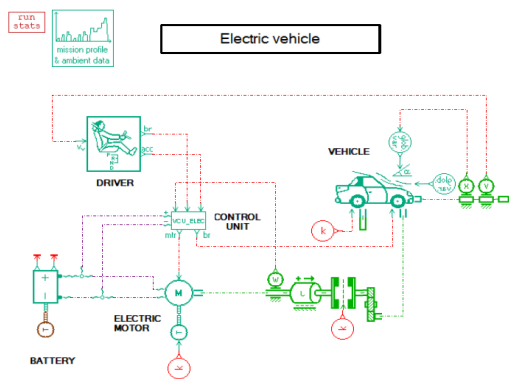


Fig. 1. Electric vehicle modeling

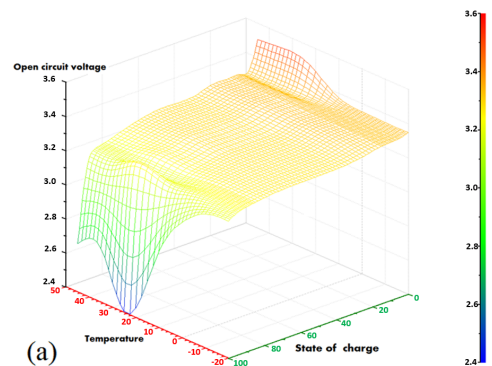
Fig. 1.은 1-D 해석프로그램인 AMESim을 이용하여 전기자동차를 모델링한 것이다. 이 모델은 운전자의 브레이크와 가속신호를 VCU (Vehicle Control Unit)가 수신하여 전기모터를 제어하는 방식이다. 이 모델의 특징은 온도의 영향을 받는 배터리를 적용하여 온도에 따른 전기자동차의 성능을 확인하고, 배터리의 발열량을 고려하여 최적의 온도를 평가하였다.

3. 연구 방법 및 결과

본 연구에서는 전기자동차(EV)가 NEDC 운전모드로 주행할 때 EV의 주행거리를 예측하였다. 모델에 사용된 배터리의 사양은 1pack (16개의 module이 직렬로 연결되어 있는 상태)을 기준으로 하였다. 1개의 Module은 6개의 Group이 직렬로 연결되어 있는 상태이며 1개의 Group은 3.7V의 배터리 셀 74개가 병렬 연결된 상태로 배터리로부터의 총 전압은 약 355.2 V이다. 또한 모델링된 모터의 주요제원은 Table 1과 같다.

Table 1. Specification of motor

Spec.	Value
Torque	966.7 (Nm)
Top Speed	249.45 (km/h)
Motor Power	375.08 (kW)



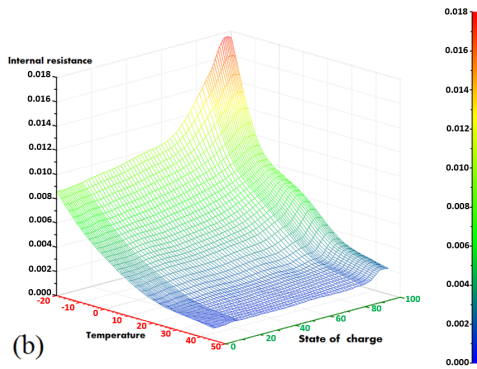


Fig. 2. (a) OCV and (b) Internal resistance depending on temperature and SOC

EV의 주행거리는 배터리의 성능과 직결되어 있는데, 배터리의 성능에 중요한 인자인 개방회로전압과 충전량은 온도의 영향을 크게 받는다. Fig 2(a)는 배터리 온도와 충전량의 변화에 따른 개방회로전압을 보여주며, (b)는 개방회로전압과 충전량에 대한 내부저항 값을 보여준다. OCV는 SOC가 20%미만 시 급격히 감소하고, 90% 이상 시 급격히 증가하는 경향을 보이며, 내부저항은 SOC와 온도가 증가함에 따라 증가하는 경향이 있을 것을 알 수 있다.

배터리의 온도가 정상상태인 경우에 대하여 전기자동차가 NEDC모드로 주행 시 배터리의 성능을 살펴보았다. Fig. 3은 NEDC모드의 한 사이클을 보여준다.

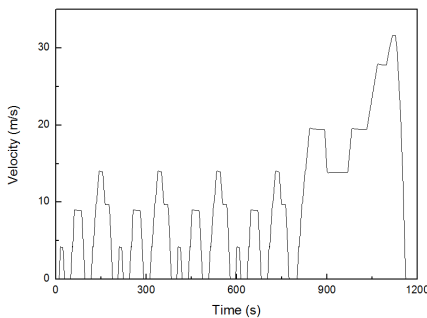


Fig. 3. New European Driving Cycle Mode

Fig. 4은 배터리의 온도(-20, -10, 0, 10, 25, 45°C)에 대하여 시간에 따른 배터리의 SOC 감소량을 보여준다.

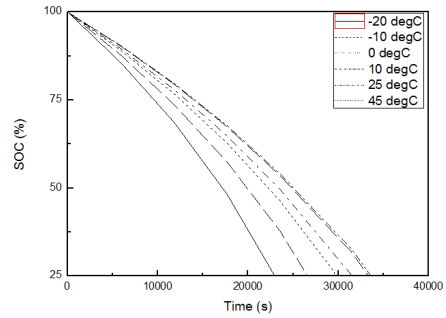


Fig. 4. SOC curves as a function of time for various temperature

배터리의 온도를 일정하게 유지시키며 NEDC모드를 반복적으로 주행하였을 때, 배터리의 SOC가 일정하게 감소하는 것을 알 수 있다. 영하의 온도에서는 SOC의 감소율이 급격히 증가하고, 25°C일 때 감소율이 가장 낮다가 45°C에서 다시 감소율이 증가한다. 이는 배터리의 온도가 25°C를 기준으로 낮거나 높을 때, 배터리의 OCV와 Capacity가 저하되기 때문이다. Fig. 5는 배터리의 온도를 -20°C로 유지하면서 주행하는 경우, 시간에 따른 배터리의 OCV 변화를 보여준다. 약 24,000초 이후 OCV가 급격히 감소하는 것은 SOC와 OCV의 상관관계를 잘 나타낸다.

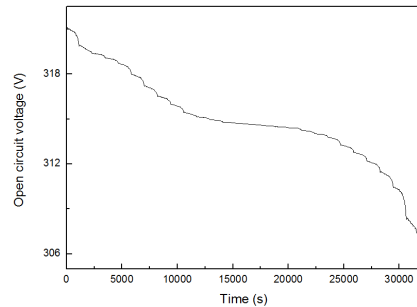


Fig. 5. OCV curve as a function of time at -20°C

Fig. 6는 EV가 NEDC모드를 반복적으로 주행함에 따라 발생하는 배터리의 발열량이다. SOC가 감소할수록 비가역성의 증가로 인하여 발열량이 증가하는 것을 알 수 있다. 저온에서는 전지의 발열로 인하여 배터리 성능이 증가하며, 고온인 상태에서도 발열량에 의해 성능이 저하된다. 따라서 발열로 인한 배터리의 온도 변화를 고려하여 SOC를 조사하였다.

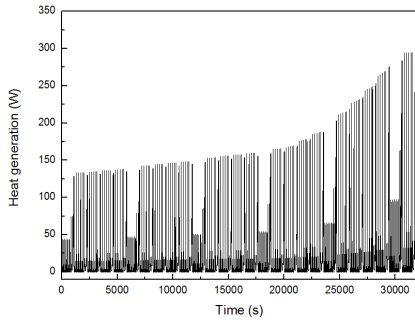


Fig. 6. Time - Heat generation curve at -20°C

Fig. 7은 배터리의 초기 온도가 -20°C 일 때, 발열량을 고려한 SOC를 보여준다. 배터리 온도가 -20°C 로 유지된 경우보다, SOC의 저감률이 감소하는 것을 볼 수 있다. 여기에 히팅 시스템을 이용하여 배터리의 온도를 최적 온도인 25°C 로 유지하였을 때 저감률은 더욱 감소하여 배터리의 사용시간이 더욱 증가하는 것을 알 수 있다.

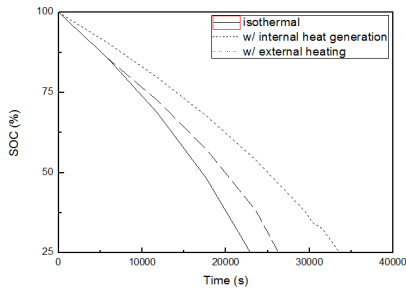


Fig. 7. SOC curves for three different states of the battery at -20°C

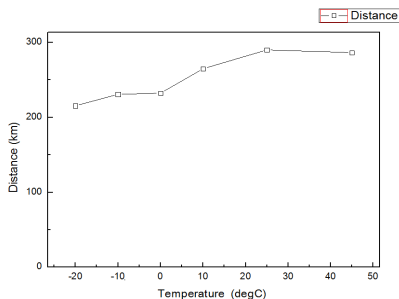


Fig. 8. The maximum distance that EV could go at various temperature

Fig. 8은 정상상태의 배터리 온도에 따른 전기자동차의 주행가능거리를 보여준다. 주행거리는 SOC에 비례하므로 -20°C 에선 약 210 km, 25°C 에서는 약 280 km

정도 주행이 가능하다. 배터리의 온도가 증가할수록 주행가능거리는 점점 증가하다가 배터리의 온도가 25°C 를 기점으로 감소한다. 따라서 효율적인 열관리를 통하여 배터리의 온도를 최적(25°C)으로 유지하면 전기자동차의 주행거리를 늘릴 수 있다.

Fig. 9는 배터리의 발열 및 열관리가 전기 자동차 주행가능거리에 미치는 영향을 보여준다. 외 기온이 -20°C 인 혹한기에는 배터리 하나당 500 W의 히팅을 통하여 25°C 의 온도 유지가 가능하며, 이로 인하여 주행거리를 33% 향상시킬 수 있기에 극지방에서 사용되는 전기자동차는 배터리 히팅 시스템이 필수적이다. 외 기온이 0°C 인 경우, 배터리 발열은 전기 자동차의 주행거리가 약 11%향상되는데 도움이 되지만, 히팅을 통하여 추가적으로 13%정도 더 향상시킬 수 있다. 반대로 혹서기에는 배터리의 온도가 최적온도보다 높아져서 주행가능거리가 감소되기 때문에 효율적인 냉각이 반드시 필요하다. 외 기온이 45°C 인 경우 250 W의 열을 냉각을 통하여 방출하여야 25°C 를 유지할 수 있다.

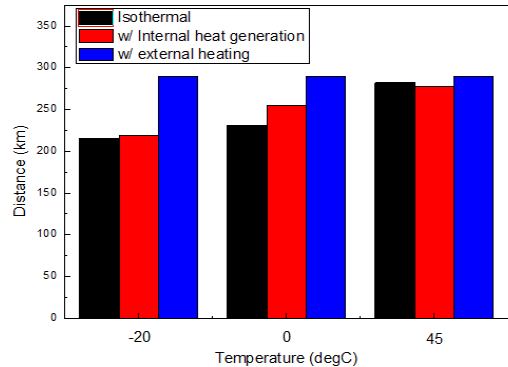


Fig. 9. Maximum distance that EV could go at various conditions

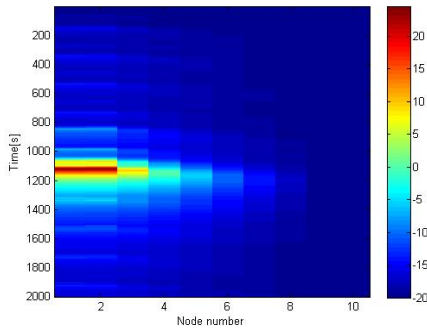
Fig. 10은 외기의 온도가 일정할 때 전기자동차 배터리 내부 발열에 의한 배터리의 온도분포를 보여준다. 배터리 내부 발열은 Fig. 5에 나타낸 것과 같이 EV가 NEDC모드를 반복적으로 주행함에 따라 발생하는데, 1100초 부근에서 발열량이 최대일 때 배터리 내부온도 분포를 보여준다. Fig. 9그래프의 X축은 반경을 의미하고 Y축은 초단위의 시간을 의미한다. 사용되는 배터리는 18650배터리로 배터리 직경은 18mm이며 그래프의 X축은 18mm직경의 직경을 8등분한 수를 의미한다. 즉 숫자 1당 1.125mm의 길이를 의미한다. 외기온도가

-20°C의 경우에는 온도가 최대 25°C까지 증가하지만, 전기화학 반응의 비가역성으로 인한 발열은 내부에 한정되는 것을 볼 수 있다. 한편 외기온이 45°C의 경우 발열부의 온도가 최대 50°C까지 증가하는 것을 볼 수 있다. 이들은 배터리의 성능 및 수명 저하의 원인이 되기 때문에 극한 온도에 대해 배터리의 온도관리가 반드시 필요하다.

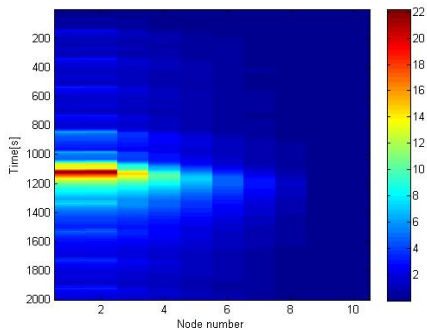
3. 결론

본 연구에서는 배터리의 온도에 따른 배터리의 성능과 다양한 온도에서 배터리의 성능에 대해 시뮬레이션 하였다. 또한, 전기자동차가 NEDC를 주행할 때 변하는 배터리의 온도가 전기자동차에 미치는 영향을 1-D 해석 프로그램인 AMESim을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 본 연구에서 얻은 주요 결과는 다음과 같다.

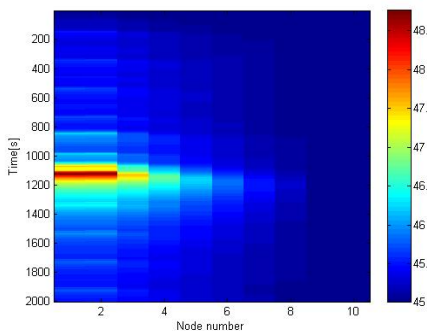
1. 전기자동차는 영하의 온도에서 성능이 급격히 떨어진다. 배터리의 최적성능을 유지할 수 있는 25°C와 비교 시 -20°C, 45°C에서 전기자동차의 주행거리는 각각 33%, 1.8% 감소한다.
2. 전기자동차의 성능 및 수명을 향상시키기 위해서는 배터리의 최적온도를 유지하는 것이 중요하다. 따라서 효율적인 배터리 냉각/가열 시스템의 개발이 필요하다. 본 연구에서 사용된 배터리의 초기 온도와 외기온이 -20°C일 경우 500W의 가열, 45°C 일 경우 250W의 냉각을 하여 배터리 구동의 최적의 온도를 유지할 수 있다.



(a) -20°C



(b) 0°C



(c) 45°C

Fig. 10. Temperature distribution of battery inside at three different ambient temperature

References

- [1] S. Park, T. Kim, "Battery Thermal Management System for Electric Vehicles" *Auto Journal*, Vol. 38, no. 4, pp. 15-21, Apr. 2016.
- [2] J. Kim, "Cooling Efficiency Improvement of Battery Pack for Electric Vehicle (II)", *Applied Chemistry for Engineering*, Vol. 14, no. 1, pp. 117-121, 2003.
- [3] J. Jang, S. Lee, S. Kim, "Electric Automotive Battery Cooling System with Heat Pipe", *KSME*, pp. 2596-2600, Nov. 2010.
- [4] S. Amiravandpour, W. Shen, D. Mu, A. Kapoor, "An Improved Theoretical Electrochemical-Thermal Modelling of Lithium-ion Battery Packs in Electric Vehicles", *Journal of Power Sources*, Vol. 284, no. 15, pp. 328-338, Jun. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.03.022>
- [5] S. Yi, "Modeling of the Thermal Behavior of a Lithium-Ion battery Pack", *Journal of Energy Engineering*, Vol. 20, no. 1, pp. 1-7, 2011. DOI: <https://doi.org/10.5855/ENERGY.2011.20.1.001>
- [6] K. Onda, T. Ohshima, M. Nakayama, K. Fukuda, T. Araki, "Thermal Behavior of Small Lithium-ion Battery During Rapid Charge and Discharge Cycle", *Journal of Power Sources*, Vol.158, no. 1, pp. 535-542, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.08.049>
- [7] N. H. F. Ismail, S. F. Toha, N. A. M. Azubir, N. M. Ishak, M. K. Hassan, B. Salam, K. S. M. Ibrahim,

"Simplified Heat Generation Model for Lithium-ion Battery Used in Electric Vehicle", 5th International Conference on Mechatronics, Vol. 53, pp. 1-5, 2014.

박 철 은(Chul-Eun Park)

[준회원]



- 2017년 4월 : 충북대학교 기계공학부 학사 재학 중

<관심분야>

배터리, 열전달

김 기 범(Ki-Bum Kim)

[정회원]



- 2003년 8월 : University of Florida, 기계공학과 (공학석사)
- 2006년 8월 : University of Florida, 기계공학과 (공학박사)
- 2011년 3월 ~ 현재 : 충북대학교, 기계공학부, 부교수

<관심분야>

친환경 에너지 시스템

유 세 웅(Se-Woong Yoo)

[준회원]



- 2017년 2월 : 충북대학교 기계공학부 졸업 (기계공학 학사)

<관심분야>

배터리, AMESIM,

정 영 환(Young-Hwan Jeong)

[준회원]



- 2017년 2월 : 충북대학교 기계공학부 졸업 (기계공학 학사)

<관심분야>

배터리, CAE