

360 Wh급 퍼스널 모빌리티용 리튬이온 배터리 팩의 열전달 특성에 관한 연구

김대완¹, 서재형², 김학민², 이무연^{2*}
¹엔티에프 텍, ²동아대학교 기계공학과

Numerical Study on the Heat Transfer Characteristics of 360 Wh Li-ion Battery Pack for Personal Mobility

Dae-Wan Kim¹, Jae-Hyeong Seo², Hak-Min Kim², Moo-Yeon Lee^{2*}

¹R&D Division, NTF Tech Co.

²Department of Mechanical Engineering, Dong-A University

요약 본 논문은 퍼스널 모빌리티에 사용되는 360 Wh급 리튬이온 배터리 팩의 성능 및 안정성 확보를 위하여 리튬이온 배터리 팩의 열전달 특성에 관하여 상용수치해석 프로그램인 ANSYS v17.0의 CFX를 이용하여 수치적으로 연구하였다. 이를 위하여 퍼스널 모빌리티에 사용되는 360 Wh급 리튬이온 배터리 팩의 배터리 셀 배열을 4가지 경우로 변경하고, 배터리 셀 홀더에 사용되는 재질과 배터리 팩 케이스에 사용되는 재질을 각각 Polypropylene, Aluminium, Magnesium alloy로 변경하였다. 그 결과 배터리 평균 온도는 배터리 셀 배열이 Model 2 일 때 가장 낮게 예측되었으며, 배터리 셀 홀더와 배터리 팩 케이스 재질 변경에 따른 배터리 평균 온도는 대부분의 경우 Aluminium 일 때 가장 낮게 예측되었다. 퍼스널 모빌리티에 사용되는 360 Wh급 리튬이온 배터리 팩의 열전달 성능은 배터리 셀 배열과 배터리 팩 케이스 재질에 많은 영향을 받았으며, 배터리 셀 배열 Model 2와 배터리 팩 케이스 재질이 Aluminium 일 때 가장 높았다.

Abstract This study numerically evaluates the heat transfer characteristics of a 360-Wh Li-ion battery pack. The analysis was done in ANSYS CFX using different cell arrangements, cell holders, and case materials for a personal mobility device program. A total of four cases of cell arrangements were considered, along with various materials for both the cell holder and the case, such as polypropylene, aluminum, and magnesium alloy. Out of the four cell arrangements, model 2 showed the best heat transfer performance, while aluminum showed the best heat transfer performance for the cell holder and case.

Keywords : Battery thermal management system, Cell arrangement, Heat transfer, Li-ion battery, Personal mobility

1. 서론

전 세계적으로 과다한 화석연료 사용으로 인한 환경 오염 문제를 해결하고자 친환경 이동수단인 전기구동 이

동수단에 대한 높은 관심과 함께 관련 기술 개발이 활발히 이루어지고 있다. 특히 현재 개인용 전기구동 이동수단으로 각광받고 있는 퍼스널 모빌리티는 전기모터를 주요 동력원으로 사용하며, 주요 에너지원은 충·방전이 가

본 논문은 산업통상자원부의 산업기술혁신사업의 일환으로 수행하였으며[20161016, 전기자전거용 360Wh급 48V LiB 시스템 및 급속충전 시스템 개발], 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(no. 2016R1D1A1B03935822). 또한, 본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요사업으로 수행한 결과이며(B7-2416), 부산과학기술기획평가원의 기술개발·확산 개방형연구실 운영사업으로 수행한 결과입니다.

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

Tel: +82-51-200-7642 email: mylee@dau.ac.kr

Received July 20, 2017

Revised August 2, 2017

Accepted August 17, 2017

Published August 31, 2017

능한 2차 전지인 납축전지, 리튬이온 배터리, 연료전지 등과 같은 전기에너지를 사용한다.

이들 2차 전지 중 리튬이온 배터리는 잦은 충·방전에도 성능 저하가 적으며, 기존 납축전지와 비교하여 에너지 밀도가 높아 전기자동차 및 전기자전거 등과 같은 전기구동 이동수단에 주요 에너지 공급원으로 사용되고 있다.

그러나 리튬이온 배터리의 높은 에너지 밀도와 높은 충·방전량으로 배터리 온도가 매우 높게 올라가며, 그로 인하여 배터리 온도에 따른 성능 변화가 발생한다. 특히 전기자동차 및 전기자전거에서 높은 방전량을 요구하는 가혹 조건에서는 배터리 온도가 올라감에 따라 성능이 매우 떨어지는 것으로 연구되었으며, 특히 이러한 발열로 인하여 리튬이온 배터리는 최근 이슈가 되고 있는 발화 및 폭발로 이어질 수 있어 사용함에 있어서 주의가 필요하다[1].

따라서 이러한 배터리 발열 문제를 해결하기 위하여 배터리 관리 시스템(Battery management system, BMS)와 더불어 배터리 열관리 시스템(Battery thermal management system, BTMS)에 대한 연구가 필요하다.

이러한 배터리 열관리 시스템 설계를 위하여 Lee et al. 은 리튬이온 및 리튬폴리머 배터리의 작동원리를 연구하고, 재현실험을 통하여 폭발 원리를 검증하였으며 이를 통하여 화재감식 기법 개발과 안전 대책을 수립하기 위한 연구를 하였고[2], Yoon et al. 은 전기-화학-열 모델을 하나의 프로그램으로 구성하여 모델링하고 개발된 배터리 열적 모델을 다양한 용량의 배터리를 환경 조건들을 변경해 가면서 실험하고 비교하여 검증하였다[3-4]. Kim et al. 은 2차원의 전산모사를 통하여 리튬이온 전지의 동적거동을 예측하기 위한 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다[5]. Jung et al. 은 xEV에 사용되는 배터리 시스템의 작동 중 온도를 추정하기 위하여 열적 네트워크 방법을 이용하여 온도 추정 모델을 개발하였고[6], Gu et al. 은 리튬이온 배터리의 온도에 따라 달라지는 내부 저항으로 인하여 손실되는 전력에 대해 분석하여 배터리의 온도가 증가함에 따라 내부 저항은 증가하며, 손실되는 전력 또한 비례하여 증가하는 것을 확인하였다[7]. 그리고 Eom et al. 은 충방전 온도와 SOC상태를 고려하여 내부 임피던스에 따른 정확한 수명을 예측할 수 있는 연구를 하였으며[8], Kim et al., Jeong et al. 은 리튬이온 배터리의 열유동 해석과 냉각 성능 및 특성에 관한 연구를 하였으며[9,10], Park et al. 은 리튬이온

Table 1. Simulation condition

Specification	Factor
Li-ion battery	Aluminium
BMS	Aluminium
Battery cell holder	Polypropylene, Aluminium, Magnesium alloy
Battery pack case	Polypropylene, Aluminium, Magnesium alloy
Inside air	Air ideal gas
Outside air	Air ideal gas

배터리 열관리가 전기자동차 주행거리에 미치는 영향에 관하여 연구하였다[11].

Chen et al. 은 배터리 열관리 시스템 설계를 위하여 공기 유로의 면적 변화를 통하여 최적화 방법을 연구하였다[12,13].

본 연구에서는 퍼스널 모빌리티에 사용되는 360 Wh급 리튬이온 배터리의 열관리를 위하여 배터리 셀 배열 및 셀 홀더와 배터리 팩 케이스 재질에 따른 배터리 팩의 열전달 특성에 관하여 수치적으로 연구하였다.

2. 수치해석 방법

본 연구는 퍼스널 모빌리티에 사용되는 360 Wh급 리튬이온 배터리 팩을 모델링하여 크기 규격이 지름 18 mm, 길이 65 mm인 18650 리튬이온 배터리와 배터리 관리 시스템 (Battery Management System, BMS) 등에서 발생하는 열이 배터리 배열, 배터리 셀 홀더 재질 및 배터리 팩 케이스 재질 변경에 따른 방열 특성을 상용수치해석 프로그램인 ANSYS v17.0의 CFX를 이용하여 수치적으로 해석하였다.

수치해석에서 이용한 조건 및 변수 등은 Table 1에 나타내었다. 18650 리튬이온 배터리 및 BMS는 Aluminium으로 가정하고, Inside gas 및 Outside gas는 Air ideal gas로 가정하였다. 배터리 셀 홀더와 배터리 팩 케이스 재질을 Polypropylene, Aluminium 및 Magnesium alloy로 변경할 때 그 외 배터리 셀 홀더 또는 배터리 팩 케이스 재질은 Aluminium으로 가정하였다. 배터리와 BMS 발열량은 25,000 W/m², 배터리 및 BMS 초기 온도는 20 °C, 외기 온도 20 °C, 압력 1 atm이다. 배터리 팩에 대한 3차원 정상상태 해석을 수행하

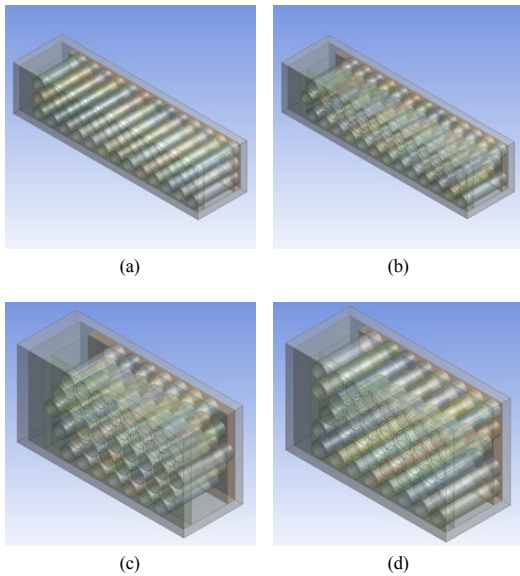


Fig. 1. Battery cell arrangement
(a)Model 1 (b)Model 2 (c)Model 3 (d)Model 4

Table 2. Battery temperature and case temperature of change cell arrangement

Case	Average Temperature (°C)		
	Battery (A)	Case (B)	ΔT (A-B)
Model 1	54.472	54.432	0.040
Model 2	53.783	53.738	0.045
Model 3	54.955	54.918	0.037
Model 4	61.920	61.876	0.044

였으며, 난류모델은 SST모델을 사용하였다. 본 연구에서는 사면체 및 육면체의 형태를 사용하여 배터리 팩 및 외부 유동장 부분의 Mesh를 생성하였다. Element size를 2mm로 설정하였으며, 전체 절점의 수는 약 60만개, 요소의 수는 약 180만개 이다.

3. 수치해석 결과 및 고찰

3.1 배터리 셀 배열에 따른 방열 특성

360Wh급 리튬이온 배터리 팩에 사용되는 배터리는 총 39개이며, 13 series, 3 parallel 로 구성된다. 리튬이온 배터리 팩이 적용되는 퍼스널 모빌리티의 크기를 고려하여 최소한의 부피와 최대한의 방열 효과를 위하여 배터리 셀 배열 4 case에 대한 모델을 Fig. 1에 나타내었

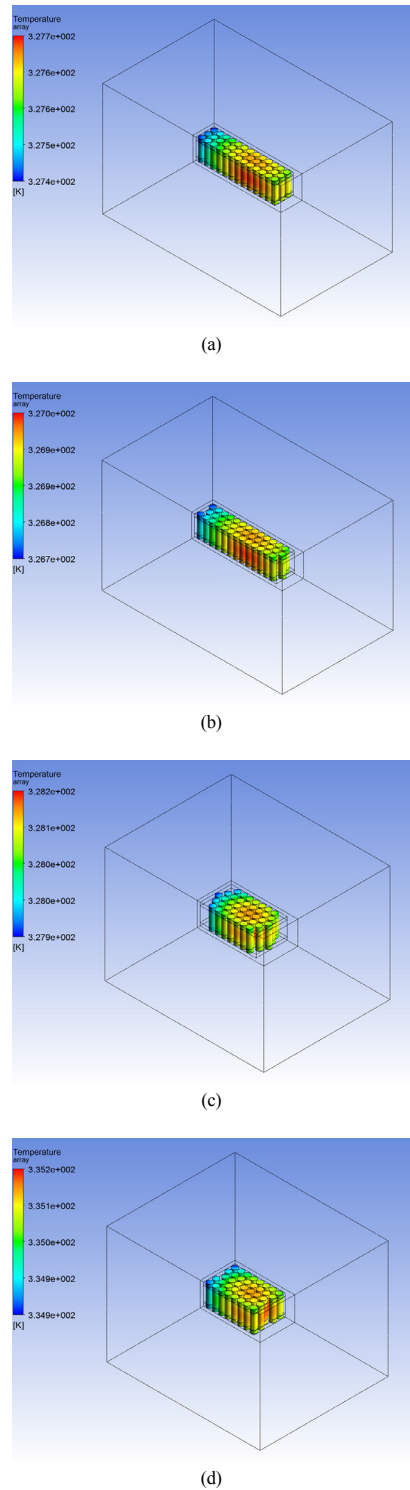


Fig. 2. Battery temperature of change cell arrangement
(a)Model 1 (b)Model 2 (c)Model 3 (d)Model 4

으며, 각 케이스에 대한 수치해석 결과를 Fig. 2, Fig. 3 및 Table 2에 나타내었다.

배터리 셀 배열과 배터리 셀 홀더 형상에 따른 배터리 평균 온도 및 케이스 평균 온도를 비교하면 배터리 평균 온도는 Model 2에서 가장 낮은 53.783 °C이며, 케이스 평균 온도도 Model 2에서 가장 낮은 53.738 °C로 나타났다. Model 1과 Model 2에서 배터리 팩 중심과 배터리 팩 케이스와의 거리가 가장 짧고, 특히 Model 2는 배터리 배열을 엇갈리게 배치하여 배터리에서 발생하는 열이 쉽게 빠져 나갈 수 있어 배터리 평균 온도가 가장 낮게 나타났다.

3.2 배터리 셀 홀더 재질에 따른 방열 특성

배터리 셀 홀더 재질을 Polypropylene, Aluminium, Magnesium alloy 등 총 3 case로 변경하여 수치해석 한 결과를 Fig. 4 및 Table 3, Table 4, Table 5에 각각 나타내었다.

배터리 셀 홀더 재질에 따른 배터리 평균 온도 및 케이스 평균 온도를 비교하면 배터리 셀 홀더 재질이 Polypropylene일 경우 배터리 평균 온도는 Model 2에서 가장 낮은 53.853 °C이며, 케이스 평균 온도도 Model 2에서 가장 낮은 53.760 °C로 나타났다.

배터리 셀 홀더 재질이 Aluminium일 경우 배터리 평균 온도는 Model 2에서 가장 낮은 53.783 °C이며, 케이스 평균 온도도 Model 2에서 가장 낮은 53.738 °C로 나타났다.

배터리 셀 홀더 재질이 Magnesium alloy일 경우 배터리 평균 온도는 Model 2에서 가장 낮은 53.788 °C이며, 케이스 평균 온도도 Model 2에서 가장 낮은 53.733 °C로 나타났다.

3.3 배터리 팩 케이스 재질에 따른 방열 특성

배터리 팩 케이스 재질을 Polypropylene, Aluminium, Magnesium alloy 등 총 3 case로 변경하여 수치해석 한 결과를 Fig. 5 및 Table 6, Table 7, Table 8에 각각 나타내었다.

배터리 팩 케이스 재질에 따른 배터리 평균 온도 및 케이스 평균 온도를 비교하면 배터리 팩 케이스 재질이 Polypropylene일 경우 배터리 평균 온도는 Model 2에서 가장 낮은 70.497 °C이며, 케이스 평균 온도도 Model 2에서 가장 낮은 55.196 °C로 나타났다.

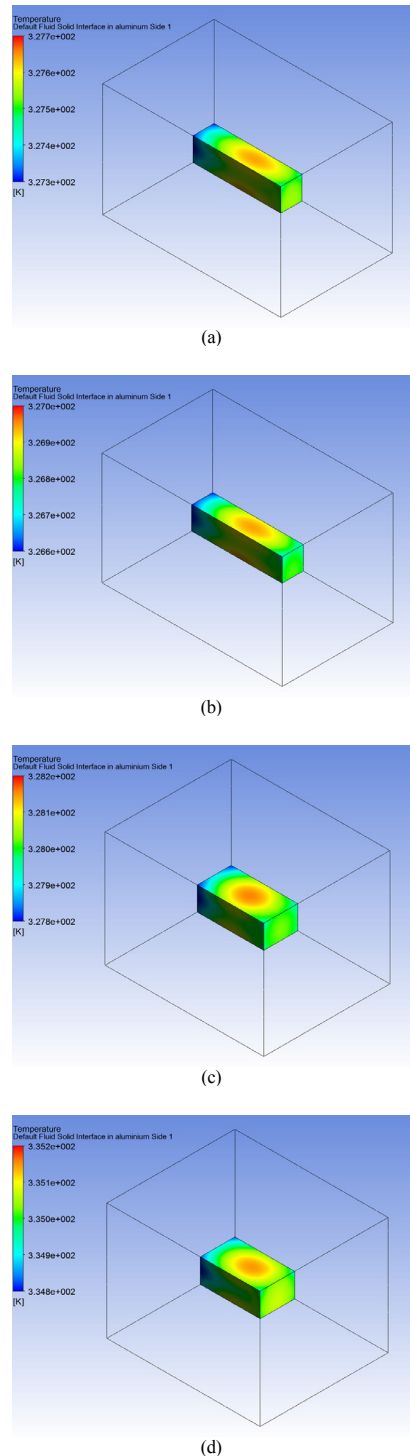


Fig. 3. Case temperature of change cell arrangement (a)Model 1 (b)Model 2 (c)Model 3 (d)Model 4

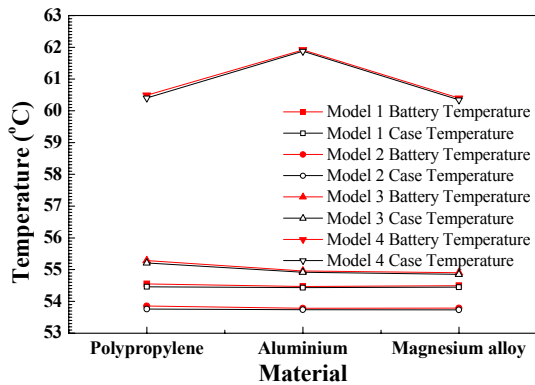


Fig. 4. Battery temperature and case temperature of change cell holder material by polypropylene, aluminium and magnesium alloy

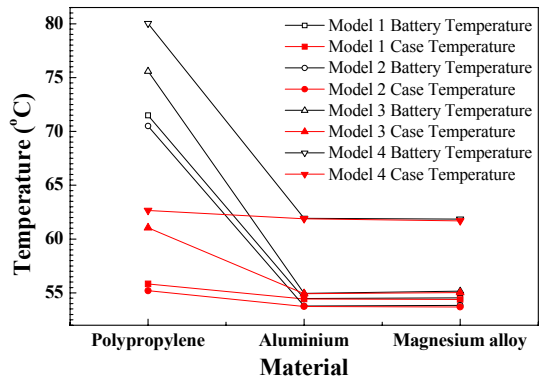


Fig. 5. Battery temperature and case temperature of change case material by polypropylene, aluminium and magnesium alloy

Table 3. Battery temperature and case temperature of change cell holder material by polypropylene

Case	Average Temperature (°C)		
	Battery (A)	Case (B)	ΔT (A-B)
Model 1	54.549	54.464	0.085
Model 2	53.853	53.760	0.093
Model 3	55.284	55.209	0.075
Model 4	60.495	60.403	0.092

Table 6. Battery temperature and case temperature of change case material by polypropylene

Case	Average Temperature (°C)		
	Battery (A)	Case (B)	ΔT (A-B)
Model 1	71.491	55.825	15.666
Model 2	70.497	55.196	15.301
Model 3	75.585	61.048	14.537
Model 4	80.018	62.660	17.358

Table 4. Battery temperature and case temperature of change cell holder material by aluminium

Case	Average Temperature (°C)		
	Battery (A)	Case (B)	ΔT (A-B)
Model 1	54.472	54.432	0.040
Model 2	53.783	53.738	0.045
Model 3	54.955	54.918	0.037
Model 4	61.920	61.876	0.044

Table 7. Battery temperature and case temperature of change case material by aluminium

Case	Average Temperature (°C)		
	Battery (A)	Case (B)	ΔT (A-B)
Model 1	54.472	54.432	0.040
Model 2	53.783	53.738	0.045
Model 3	54.955	54.918	0.037
Model 4	61.920	61.876	0.044

Table 5. Battery temperature and case temperature of change cell holder material by magnesium alloy

Case	Average Temperature (°C)		
	Battery (A)	Case (B)	ΔT (A-B)
Model 1	54.498	54.448	0.050
Model 2	53.788	53.733	0.055
Model 3	54.901	54.853	0.048
Model 4	60.399	60.345	0.054

Table 8. Battery temperature and case temperature of change case material by magnesium alloy

Case	Average Temperature (°C)		
	Battery (A)	Case (B)	ΔT (A-B)
Model 1	54.523	54.385	0.138
Model 2	53.842	53.694	0.148
Model 3	55.155	55.021	0.134
Model 4	61.851	61.691	0.160

배터리 팩 케이스 재질이 Aluminium일 경우 배터리 평균 온도는 Model 2에서 가장 낮은 53.783 °C이며, 케이스 평균 온도도 Model 2에서 가장 낮은 53.738 °C로 나타났다.

배터리 팩 케이스 재질이 Magnesium alloy일 경우 배터리 평균 온도는 Model 2에서 가장 낮은 53.842 °C이며, 케이스 평균 온도도 Model 2에서 가장 낮은 53.694 °C로 나타났다.

각 재질의 열전도도는 Polypropylene이 0.2 W/m · K, Aluminium은 205 W/m · K, Magnesium alloy는 145 W/m · K으로 Polypropylene은 다른 재질에 비하여 열전도도가 낮아 배터리 팩 케이스 재질로 사용할 경우 방열에 매우 취약하여 배터리 평균 온도가 가장 높게 나타났으며, Aluminium일 경우 가장 낮게 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 퍼스널 모빌리티에 사용되는 360 Wh 급 리튬이온 배터리 팩의 열전달 특성에 관하여 상용수치해석 프로그램인 ANSYS v17.0의 CFX를 이용하여 수치적으로 해석하였고 다음과 같은 결과를 도출하였다.

1. 배터리 셀 배열 변경 시 배터리 평균 온도 및 배터리 케이스 평균 온도는 해석 Model 2에서 가장 낮게 나왔으며, 각각 53.783 °C와 53.738 °C로 나타났다.
2. 배터리 셀 홀더 재질 변경 시 배터리 셀 홀더 재질이 Polypropylene일 경우 배터리 평균 온도 및 배터리 케이스 평균 온도는 해석 Model 2에서 가장 낮게 나왔으며, 각각 53.853 °C와 53.760 °C로 나타났다. Aluminium일 경우 배터리 평균 온도 및 배터리 케이스 평균 온도는 해석 Model 2에서 가장 낮게 나왔으며, 각각 53.783 °C와 53.738 °C로 나타났다. Magnesium alloy일 경우 배터리 평균 온도 및 배터리 케이스 평균 온도는 해석 Model 2에서 가장 낮게 나왔으며, 각각 53.788 °C와 53.733 °C로 나타났다.
3. 배터리 팩 케이스 재질 변경 시 배터리 팩 케이스 재질이 Polypropylene일 경우 배터리 평균 온도 및 배터리 케이스 평균 온도는 해석 Model 2에서 가장 낮게 나왔으며, 각각 70.497 °C와 55.196 °C로

나타났다. Aluminium일 경우 배터리 평균 온도 및 배터리 케이스 평균 온도는 해석 Model 2에서 가장 낮게 나왔으며, 각각 53.783 °C와 53.738 °C로 나타났다. Magnesium alloy일 경우 배터리 평균 온도 및 배터리 케이스 평균 온도는 해석 Model 2에서 가장 낮게 나왔으며, 각각 53.842 °C와 53.694 °C로 나타났다.

4. 각 재질의 열전도도는 Aluminium이 가장 높고 Polypropylene이 가장 낮아 Aluminium이 방열에 가장 효과적이며, 배터리 평균 온도가 가장 낮게 나타나 배터리 팩 케이스로 적합하다.
5. 배터리 팩 케이스 재질이 Polypropylene일 경우를 제외한 모든 조건에서 해석 Model 2가 배터리 평균 온도가 가장 낮게 나타났다.

References

- [1] D. W. Kim, J. H. Seo, H. M. Kim, M. Y. Lee, "Cooling Performance Characteristics on 48V Li-ion Power Supply Device with Cell Arrangement and Cell Holder Material for an Electric Bicycle", Proc. of The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea 2017 Spring Annual Meeting, pp. 135-138, April, 2017.
- [2] B. J. Lee, G. J. Choi, S. H. Lee, Y. M. Jeong, Y. Park, D. U. Cho, "A Study on Explosion and Fire Risk of Lithium-Ion and Lithium-Polymer Battery", The Journal of The Korean Institute of Communication Sciences, vol. 42, no. 4, pp. 855-863, April, 2017. DOI: <https://doi.org/10.7840/kics.2017.42.4.855>
- [3] J. H. Yoon, K. S. Lee, "Thermal Modeling for Lithium-Ion Battery Pack System", Proc. of The Korean Society of Mechanical Engineers 2013 Autumn Annual Meeting, pp. 939-941, Dec. 2013.
- [4] Dohee Kim, Hyokyung Bahn, "An Adaptive Location Detection Scheme for Energy-Efficiency of Smartphones", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC), vol. 15, no. 3, pp. 119-124, Jun. 30, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2015.15.3.119>
- [5] U. S. Kim, C. B. Shin, T. Y. Han, S. Y. Park, "Dynamic modeling of lithium-ion battery for automotive applications", Proc. of Korean Society for Energy 2012 Autumn Annual Meeting, pp. 131-131, October, 2012.
- [6] D. B. Jung, D. K. Sohn, J. Y. Jeon, "Study on the development of temperature estimation model for eEV thermal management", Proc. of The Korean Society of Automotive Engineers 2016 Spring Annual Meeting, pp. 510-516, May, 2016.
- [7] T. H. Eom, M. H. Shin, J. M. Kim, J. Lee, Y. R. Kim, C. Y. Won, "Analysis of internal resistance according to temperature of Li-ion battery", Proc. of KIEE Annual

Conference, pp. 136-136, May, 2016.

- [8] T. H. Eom, M. H. Shin, J. Lee, J. M. Kim, C. Y. Won, "Analysis to battery life time according to charge/discharge temperature of Li-ion battery", Proc. of KIIIE Annual Conference, pp. 137-137, May, 2016.
- [9] H. K Kim, C. P. Cho, J. Y. Jang, Y. D. Pyo, O. S. Kwon, W. H. Lee, G. C. Kim, "A study on Heat Transfer and Fluid Flow Analysis for Micro Mobility Lithium-ion Battery", Proc. of The Korean Society of Automotive Engineers Spring Annual Meeting, pp. 999-1000, May, 2016.
- [10] T. C. Jeong, J. Sun, S. M. Kim, Y. J. Noh, "Analysis of the Cooling Performance and Characteristic Using Lithium-ion Battery for Eco-friendly Vehicle", Proc. of The Korean Society of Automotive Engineers Spring Annual Meeting, pp. 1192-1192, May, 2014.
- [11] C. E. Park, S. W. Yoo, Y. H. Jeong, K. B. Kim, "Effect of Thermal Management of Lithium-Ion Battery on Driving Range of Electric Vehicle", Korea Academy Industrial Cooperation Society, vol. 18, no. 5, pp. 22-28, May, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.5.22>
- [12] K. Chen, S. Wang, M. Song, L. Chen, "Configuration optimization of battery pack in parallel air-cooled battery thermal management system using an optimization strategy", Applied Thermal Engineering, vol. 123, pp. 177-186, May, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.060>
- [13] K. Chen, S. Wang, M. Song, L. Chen, "Structure optimization of parallel air-cooled battery thermal management system", International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 111, pp. 943-952, April, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.04.026>

김 대 완(Dae-Wan Kim)

[정회원]



- 2009년 2월 : 동아대학교 기계공학과 (공학사)
- 2011년 2월 : 동아대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2013년 2월 : 동아대학교 기계공학과 (박사수료)
- 2015년 12월 ~ 현재 : 엔티에프텍 선임연구원

<관심분야>

친환경 자동차 열관리, 신재생에너지, 자성유체

서 재 형(Jae-Hyeong Seo)

[정회원]



- 2009년 2월 : 동아대학교 기계공학과 (공학사)
- 2011년 2월 : 동아대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2014년 9월 ~ 2017년 1월 : 엔티에프텍 기술개발부 팀장
- 2011년 3월 ~ 현재 : 동아대학교 기계공학과 (공학박사과정)

<관심분야>

친환경 자동차 열관리, 열/물질전달, 나노유체

김 학 민(Hak-Min Kim)

[정회원]



- 2015년 2월 : 동아대학교 기계공학과 (공학사)
- 2017년 2월 : 동아대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2017년 3월 ~ 현재 : 동아대학교 기계공학과 (공학박사과정)

<관심분야>

내연기관, 대체연료

이 무 연(Moo-Yeon Lee)

[정회원]



- 2010년 2월 : 고려대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2011년 1월 : 고려대학교 기계공학과 (연구교수)
- 2011년 2월 ~ 2012년 8월 : 자동차부품연구원 선임연구원
- 2012년 9월 ~ 현재 : 동아대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

친환경 자동차 열관리, 전동식 히트펌프, 신재생에너지 변환 시스템, 열/물질전달, 연료전지, 나노유체, 자성유체