



자작 전기자동차 냉각 성능 개선을 위한 형상 최적화 연구

전혜령·황락원·박원아*

경성대학교 기계자동차공학과

Design Optimization of Electric Vehicles for Cooling Performance

Hyeryung Jeon · Rakwon Hwang · Wonah Park*

Department of Mechanical & Automotive Engineering, Kyungsoong University, Busan 48434, Korea

(Received 8 December 2021 / Revised 12 January 2022 / Accepted 17 January 2022)

Abstract : Thermal management of batteries and motors is very important to maintain the stability and performance of electric vehicles. In this study, a design improvement was devised to improve the cooling performance of the battery and motor of an electric vehicle designed to participate in a self-made car competition. To confirm the effect on performance improvement, simulations were performed on the basic model and improvement designs using Star-ccm+. It was possible to achieve maximum temperature reductions of 13 K for batteries and 30 K for motors by applying the optimized design. The drag was slightly reduced at a similar level compared to the base model.

Key words : EV(전기차), Cooling(냉각), Cooling performance(냉각 성능), Thermal management(열관리), Motor(모터), Battery(배터리)

1. 서론

지구온난화, 대기 오염, 미세 먼지 등 환경문제가 점점 심각해지고 있는 상황에서, 자동차 산업에서는 친환경 자동차, 특히 전기차가 주목을 받고 있다. 대부분의 완성차 업체들은 생산 차량 중 전기차의 비중을 점차 늘리고 있으며, 모든 생산 차량을 전기차로 전환하겠다는 계획도 발표하고 있다.

전기차는 내연기관 자동차의 엔진, 변속기 대신 모터와 배터리가 사용되므로 배기 배출물이 없고 공간 자유도가 높으며, 고효율, 저소음, 저진동 등의 기술적 특징을 가지고 있다. 뿐만 아니라 구매 시 보조금 지원, 통행료 할인 등의 국가적 지원을 받을 수 있는 장점도 있다. 반면, 제한된 주행거리, 충전 시간, 배터리 교체 비용, 인프라 구축 등이 해결 과제로 남아있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 배터리 성능 향상이 필수적이다.

전기차에는 납 배터리, 알칼라인 배터리, 리튬-이온 배터리 등 다양한 종류의 배터리가 사용되어 왔다. 최근에는 고효율 및 고에너지 밀도, 적절한 유지 비용, 낮은

자가 방전율, 긴 수명 등의 장점을 보유한 리튬-이온 배터리가 주로 적용되고 있다. 하지만 배터리 과열, 배터리 열 폭주 등 안전상의 문제가 발생할 수 있고, 배터리의 성능이 온도에 매우 민감하여 적절한 열관리가 필수적이다.^{1,2)} 따라서 배터리 냉각 및 열관리에 관한 많은 연구가 진행되어 왔으며, Pesaran,³⁾ Kim 등⁴⁾은 다양한 냉각방식 및 열관리 시스템에 대해 소개한 바 있다.

배터리 냉각은 냉각에 사용되는 유체에 따라 수랭식과 공랭식으로 나눌 수 있다. 공랭식의 경우 비교적 시스템이 단순하며, 생산 단가가 저렴한 장점이 있다. Teng 등⁵⁾은 배터리 냉각용 알루미늄 판의 다양한 형태가 배터리 온도에 미치는 영향을 분석하였고, Mohammadian과 Zhang⁶⁾은 하이브리드 자동차용 공랭식 배터리 팩의 Pin-fin 히트싱크의 배열, 공기 유량, 공기 온도가 배터리 냉각에 끼치는 영향을 연구하였다. 정석훈과 서현규⁷⁾는 배터리 직접 공랭식 시스템에서 공기 유로 형상이 냉각 성능에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 류민열 등⁸⁾은 간접 공랭식 단일 배터리 팩 냉각 시스템에서 운전조건

*Corresponding author, E-mail: wpark@ks.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

에 따른 냉각 특성을 해석적으로 비교 분석하였다.

또한 모터의 경우, 운전 시 발생하는 전기적 손실이 열 에너지로 변환되어 모터 각 구성품에 전달된다. 그로 인해 가열된 구성품들의 온도가 제한온도를 초과할 시 모터의 전기적 기계적 성능이 저하될 수 있으므로 적절한 냉각이 필요하다.⁹⁾ 이에 강수진 등¹⁰⁾은 로터에 냉각 팬을 접목하여 모터 내부의 냉각 성능 향상에 대한 해석적 연구를 진행하였고 Kim 등¹¹⁾은 모터의 내부 유동 향상을 통한 냉각 성능 향상에 대해 연구한 바 있다. 또한, 권화빈 등¹²⁾은 공랭식 모터의 온도분포를 예측하여 모터의 냉각 성능이 효율에 미치는 영향을 연구하였다.

본 연구에서는 한국자동차공학회에서 주최하는 KSAE 대학생 자작자동차대회에 참가하기 위해 만든 전기자동차의 배터리 및 모터의 냉각 성능 향상을 위해 디자인 최적화를 진행하였다. 자작자동차의 특성상 복잡한 냉각 시스템을 추가하기가 힘들기 때문에, 차량 주변 공기 유동을 효율적으로 냉각에 활용할 수 있는 방안을 연구하였다.

3차원 전산유체역학 해석 프로그램인 Star-CCM+¹³⁾를 사용하여 열유동 해석을 진행하였고, 항력을 증가시키지 않으면서도 냉각 성능을 높일 수 있는 디자인을 선정하였다.

2. 해석 모델 및 방법

2.1 해석용 차량 및 풍동 모델

해석에 사용된 차량은 경성대학교 기계자동차공학과 자작차 동아리에서 제작한 차량으로 제원은 전장(L), 전폭(w), 전고(h)가 각각 2.42 m, 1.16 m, 1.23 m이다. CATIA V6¹⁴⁾를 사용하여 설계된 차량 형상 및 배터리와 모터의

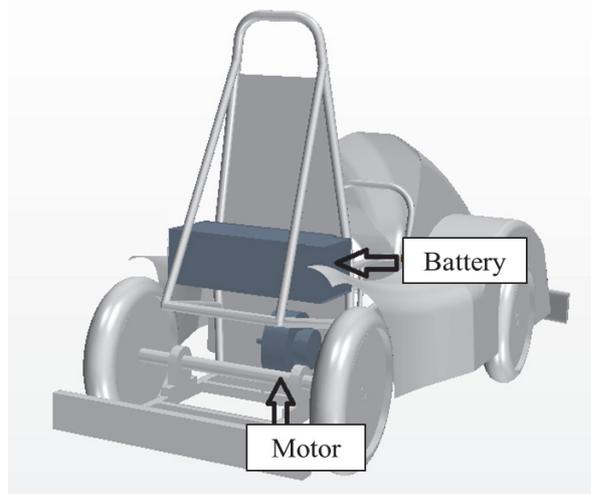


Fig. 1 3D CAD model

위치는 Fig. 1과 같다. 유동해석을 위한 풍동은 계산 정확성 및 해석 시간을 고려하여 [9 l, 4 w, 4 h]의 크기로 설정하였다.

Fig. 2는 계산용 격자를 나타낸 그림으로 기본 유동 영역에서 최대 0.6 m, 최소 0.06 m의 크기로 사용하였고, 차량 주변에는 보다 정확한 해석을 위하여 2개의 블록을 설정하여 격자의 크기를 0.042, 0.024 m로 부여하였다. 추가로 경계층 해석을 위해 차량 표면으로부터 0.02 m 내에 5개의 프리즘 레이어를 적용하였다. 계산에 사용된 전체 격자의 수는 약 400만 개이다. 모터와 배터리는 별도의 영역으로 지정하여, 온도 예측이 가능하도록 하였다.

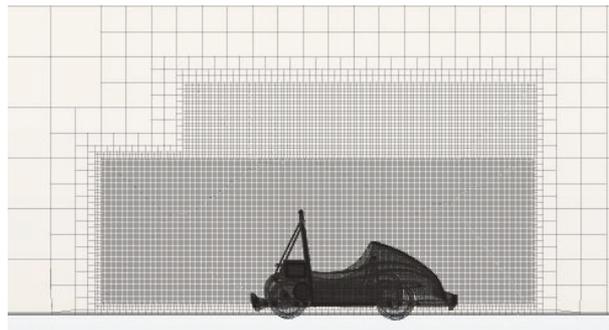


Fig. 2 Computational grids

2.2 해석 모델 및 조건

자작차의 최고 속도인 80 km/h로 달리는 정상상태 조건에서 해석을 진행하였고, 난류 모델에는 k-ε 모델을 사용하였다.

배터리와 모터의 온도 예측을 위해 설정한 해석 조건은 Table 1과 같다. 배터리와 모터의 발열량은 실험적으로 측정된 데이터가 없기 때문에, 다음과 같은 방법을 통해 가정하였다. 먼저 배터리의 경우, 주행 전 후 배터리 온도 비교를 통하여 실험적인 방법으로 역산한 값 550 W로 가정하였다. 모터의 발열량은 사양서 기준 효율 94%와 추가적인 2~3%의 소음 발생 손실을 고려하여 300 W로 가정하였다. 배터리와 모터의 초기 온도는 각각 340 K, 350 K이며 대기 및 배터리를 차체에 고정하기 위한 알루미늄 케이스 온도는 300 K으로 설정하였다.

Table 1 Simulation conditions

| | Temperature | Heat generation | Material |
|---------|-------------|-----------------|----------|
| Battery | 340 K | 550 W | Iron |
| Motor | 350 K | 300 W | Iron |

3. 해석 결과 및 고찰

3.1 기본 모델 해석 결과

Fig. 3은 기본 모델의 속도 분포를 나타내고 있다. 배터리와 모터가 차체 뒤편에 있기 때문에 주행 중 유체 흐름이 배터리와 모터 쪽으로 가지 않고 정체되어 있음을 확인할 수 있다. 기본 모델의 경우 배터리, 모터, 배터리 케이스의 최대 온도는 각각 342.5 K, 395.1 K, 314.8 K이며 항력은 115.4 N이었다.

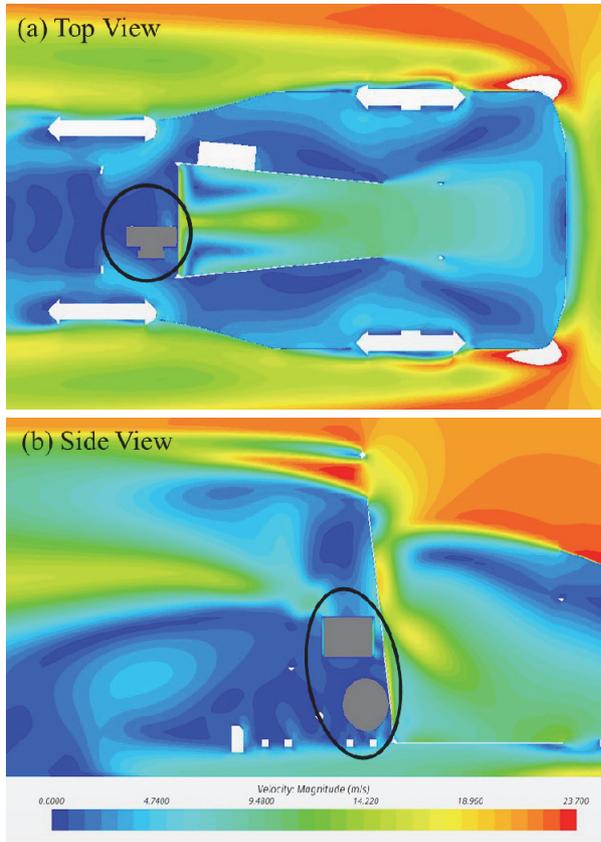


Fig. 3 Velocity magnitude of the base model: (a) Top view and (b) Side view

3.2 개선 모델 해석 결과

배터리와 모터의 냉각 성능을 개선하기 위해 배터리와 모터 쪽으로 유동을 보낼 수 있도록 Fig. 4와 같이 형상 개선안을 마련하였다. Case 1은 카울 측면에 홀 및 가이드를 설치하여 차량 옆 쪽 유동을 냉각에 사용할 수 있도록 하였다. Case 2는 시트 상단에 홀 및 에어 덕트를 설치하여 상부 유동을 배터리로 보낼 수 있도록 고안하였다. Case 3은 차체 하부에 가이드를 설치하여 하부 유동을 냉각에 활용하는 방안이다.

유동해석 결과(속도 분포)는 Figs. 5~7에 나타내었다.

Case 1 카울 홀의 경우, Fig. 5에 나타난 것처럼 카울에 설치한 에어홀 및 가이드를 통해 차체 안으로 유체 흐름이 유도는 되지만 배터리와 모터가 있는 위치까지 도달하지 못하였다. 따라서 모터와 배터리의 냉각 효과가 없었으며, 가이드로 인해 공기저항이 다소 증가함을 확인하였다. 배터리와 모터는 차체의 끝단, 시트 등받이 뒷편에 위치하고 있기 때문에, 측면 에어홀 및 가이드의 효과를 보기 위해서는 에어홀이 카울 끝단에 위치해야 하나 카울 형상 특성 및 타이어 위치 때문에 위치 선정에 한계가 있었다.

Fig. 6은 에어 덕트를 설치하여 배터리로 유동을 보낸 경우 속도분포를 나타내고 있다(Case 2). 차체 상단부의 빠른 유체 흐름을 차체 뒤편으로 유도하고 있음을 확인할 수 있다. 이에 의해 모터 온도가 약 30 K 감소하였으나, 덕트 설치로 인한 공기 저항의 증가로 항력이 9 N 증가하였다. 배터리의 온도 감소는 미미하였는데, 이는 배터리 케이스에 의해 직접적으로 유동이 배터리 표면으로 가는 것이 막혔기 때문으로 생각된다.

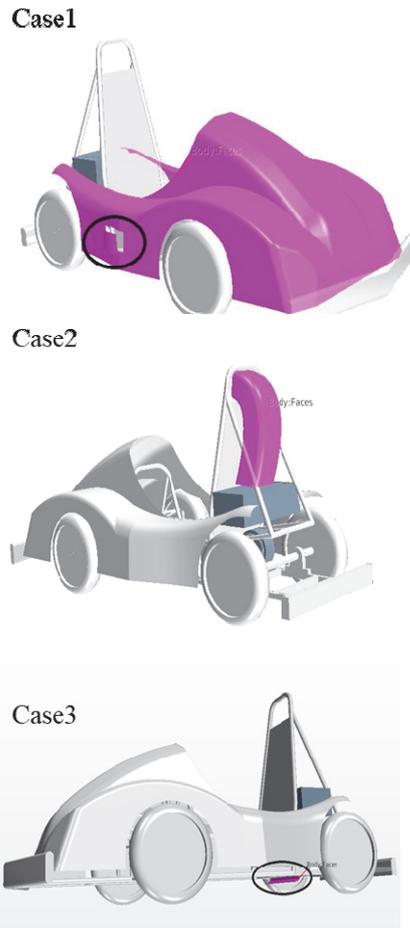


Fig. 4 Simulation cases: 1~3

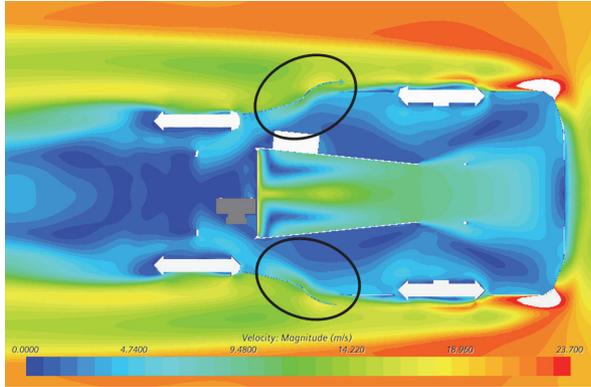


Fig. 5 Velocity magnitude of the case 1

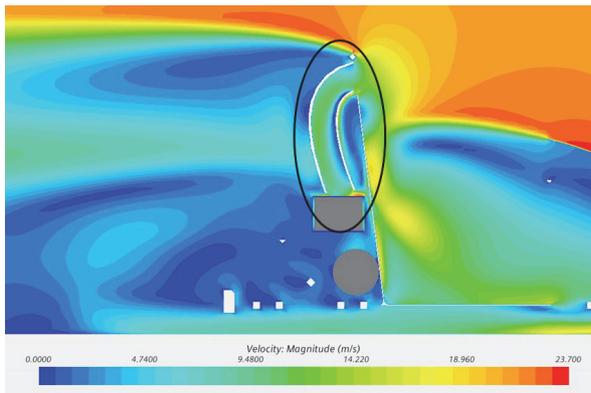


Fig. 6 Velocity magnitude of the case 2

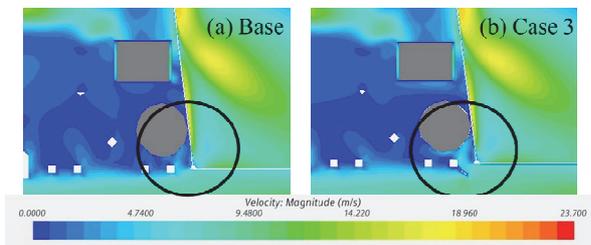


Fig. 7 Comparisons of velocity magnitude near motor between base and case 3

Case 3의 차체 하부 가이드를 설치한 해석 결과는 Fig. 7에 표시하였다. 그림에서 보이는 것처럼 차량 하부의 빠른 유체 흐름이 직접적으로 모터를 냉각하고 있음을 확인할 수 있다. 그 결과 온도를 약 30 K 저감 시킬 수 있었다. 또한, 하부 가이드는 공기 저항 증가에 거의 영향을 미치지 않았기 때문에, 항력은 기본 모델과 유사한 수준으로 약간 감소하였다.

전반적으로 모터의 경우 유동에 의한 냉각 효과가 나타났다으나, 배터리는 그 효과가 미미하였다. 이는 배터리

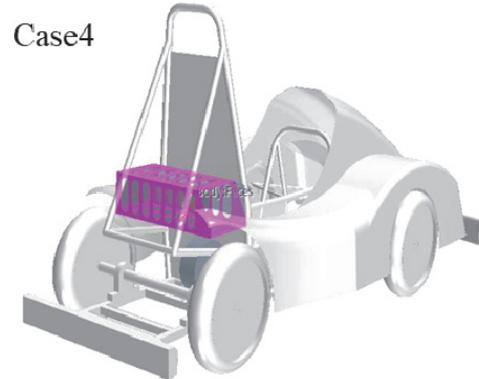


Fig. 8 Simulation case 4

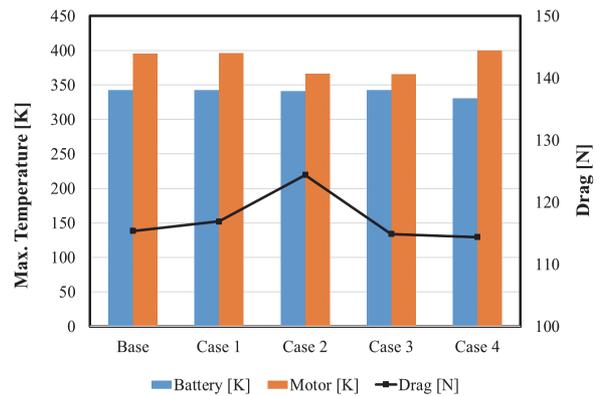


Fig. 9 Comparisons of maximum temperature and drag

를 차체에 고정시키기 위해 설치한 케이스의 영향으로 판단되었다. 배터리 케이스가 배터리로 가는 유동을 모두 막고 있기 때문에 유동을 배터리 쪽으로 보낸다고 하더라도 배터리의 냉각에 활용될 수가 없었다. 따라서 추가적인 개선안으로 배터리 케이스에 홀을 추가하여 유동이 직접 배터리 표면을 냉각시킬 수 있도록 하였다 (Fig. 8 Case 4). 배터리 케이스 홀 생성으로 배터리에 대해 대류에 의한 열전달이 증가함에 따라 배터리 온도가 12 K 감소하였다. 이에 따른 열전달의 증가로 모터 온도는 소폭 상승하였다.

각 개선 Case 별 배터리 및 모터 최고 온도 및 항력 결과는 Fig. 9에 정리하였다.

3.3 형상 최적화

Case 1~4 중에서 항력을 기본 모델 수준으로 유지하면서 배터리 및 모터의 냉각 효과가 있었던 Case 3 차체 하부 가이드와 Case 4 배터리 케이스 홀을 조합하여 최적 형상을 선정하였다. Case 3과 같은 차체 하부 가이드를 설치하면 차량 무게가 다소 증가할 수 있으나, 배터리 케

이스에 홀을 추가하게 되면(Case 4) 무게 감소 효과가 있기 때문에 전체적인 차량 무게 변화는 미미할 것으로 예상된다. 모터 냉각효과가 있었던 Case 2의 경우, Case 4 배터리 케이스 홀과 조합하면 추가적인 배터리 냉각효과가 클 것으로 기대가 되나, 덕트 추가에 따른 공기 저항 증가 및 차량 무게 증가가 예상되어 형상 최적화에서 제외하였다. 추가적인 배터리 냉각이 더 필요하다면 덕트 형상 및 소재 최적화를 통해 공기저항과 차량 무게 증가를 최소화하면서 냉각 효과를 얻을 수도 있을 것으로 생각된다.

Table 2에 정리한 것처럼, 형상 최적화를 통해 배터리 최고 온도는 약 13 K, 모터 최고 온도는 약 30 K 감소하였다. 항력은 기본 모델 대비 동일한 수준으로 유지되었다. 배터리의 경우 사용 온도 범위 안으로 하강하였다. 모터의 경우 사용 온도 범위 안으로 하강하진 않았으나 유의미한 온도 저감 정도를 보였으므로 가이드 형상 추가 개선 및 또 다른 냉각수단과의 결합으로 사용 온도 범위 내 하강이 가능할 것으로 사료된다.

Table 2 Comparisons of maximum temperatures and drags between the base and the optimal cases

| Max. temp. | Base | Optimal (Case 3 + 4) | Variance |
|-------------|-------|----------------------|----------|
| Battery [K] | 342.5 | 329.7 | 12.8 ↓ |
| Motor [K] | 395.1 | 365.3 | 29.8 ↓ |
| Drag [N] | 115.4 | 113.9 | 1.5 ↓ |

4. 결론

본 연구에서는 한국자동차공학회에서 주최하는 KSAE 대학생 자작자동차대회에 참가하기 위해 만든 전기자동차의 배터리 및 모터의 냉각 성능 향상을 위해 디자인 최적화를 진행하였다. 자작자동차의 특성상 복잡한 냉각 시스템을 추가하기가 힘들기 때문에, 차량 주변 공기 유동을 효율적으로 냉각에 활용할 수 있는 방안을 연구하였다.

3차원 CAD 프로그램인 CATIA V6 및 3차원 전산유체 역학 해석 프로그램 Star-CCM+를 사용하여 형상 개선안 선정 및 열유동 해석을 진행하였다. 해석 결과를 바탕으로 항력을 증가시키지 않으면서도 냉각성능을 높일 수 있는 최적 형상을 선정하였다. 본 연구를 통한 결론은 아래와 같다.

- 1) 순수 공기 흐름 변화만을 통한 공랭식 냉각으로 배터리 경우 13 K, 모터의 경우 30 K 최고 온도의 감소를 달성할 수 있었다. 항력은 기존 모델 대비 유사한 수준에서 다소 감소하였다.
- 2) 본 연구의 결과 배터리의 경우 사용 온도 범위 내로 하강하였다. 모터의 경우 사용 온도 범위보다 높았지만 큰 하강 폭을 보였기에 가이드 추가 개선 및 다른 냉각수단과의 결합 등으로 추가적 온도 하강을 기대할 수 있고, 이에 대한 추가적 연구가 필요할 것으로 판단된다.
- 3) 본 연구에서는 정상상태의 배터리와 모터의 냉각 성능 개선을 진행하였다. 추후 연구를 통해 배터리와 모터의 정확한 발열량 정보 추가 및 과도 상태 냉각 성능 개선을 진행할 계획이다.

후 기

이 논문은 2020학년도 경성대학교 「신임교원 특별연구비」에 의하여 연구되었음.

References

- 1) S. Baek and S. Park, “Thermal Analysis of a Battery Cooling System with Aluminum Cooling Plates for Hybrid Electric Vehicles and Electric Vehicles,” Transactions of KSAE, Vol.22, No.3, pp.60-67, 2014.
- 2) H. Kim, “Thermal Managements Technology for Electric Vehicle Batteries,” Journal of the KSME, Vol.61, No.2, pp.40-45, 2021.
- 3) A. A. Pesaran, “Battery Thermal Management in EV and HEVs: Issues and Solutions,” Battery Man, Vol.43, No.5, pp.34-49, 2001.
- 4) J. Kim, J. Oh and H. Lee, “Review on Battery Thermal Management System for Electric Vehicles,” Applied Thermal Engineering, Vol.149, pp.192-212, 2019.
- 5) H. Teng, Y. Ma, Y. Kim and M. Thelliez, “An Analysis of a Lithium-ion Battery System with Indirect Air Cooling and Warm-Up,” SAE International Journal of Passenger Cars – Mechanical Systems, Vol.4, No.3, pp.1343-1357, 2011.
- 6) S. K. Mohammadian and Y. Zhang, “Thermal Management Optimization of an Air-cooled Li-ion Battery Module Using Pin-fin Heat Sinks for Hybrid Electric Vehicles,” Journal of Power Sources, Vol.273, pp.431-439, 2015.
- 7) S. H. Jeong and H. K. Suh, “Predictions of the Cooling Performance on an Air-Cooled EV Battery

- System According to the Air Flow Passage Shape,” Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers–B, Vol.40, No.12, pp.801-807, 2016.
- 8) M. Ryu, T. Kim, S. Park, J. Lee and S. Park, “A Study on the Characteristics of the Indirect Air Cooling System of a Lithium-ion Battery Module for Vehicle,” Transactions of KSAE, Vol.26, No.5, pp.663-675, 2018.
 - 9) J. M. Moon, J. J. Park, H. Choi and C. W. Kim, “Thermal analysis of BLDC Motor through Electromagnetic-Heat Flow Coupled analysis and Optimal Design with Coolingwater Jacket,” KSAE Spring Conference Proceedings, p.828, 2021.
 - 10) S. J. Kang, S. M. Wang and H. K. Shim, “Thermal and Flow Analysis of Outer-Rotor Type BLDC Motor with Cooling Blades,” Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers–B, Vol.31, No.9, pp.772-779, 2007.
 - 11) M. S. Kim, K. S. Lee and S. Um, “Numerical Investigation and Optimization of the Thermal Performance of a Brushless DC Motor,” International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.52, No.5, pp.1589-1599, 2009.
 - 12) H. Kwon, W. S. Lee, G. T. Kim and H. Park, “Numerical Investigation on Performance of Air-cooled BLDC Motor,” Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers-B, Vol.42, No.10, pp.681-687, 2018.
 - 13) Siemens Digital Industries Software, STAR-CCM+ 2019.3, 2019.
 - 14) Dassault Systems, CATIA V6 R2021x, 2021.