



전기자동차용 구동모터 오일 냉각 순시해석

신현장^{a*}, 김래은^b

Transient CFD Analysis of Oil-Cooled Traction Motors for Electric Vehicles

Shin Hyun Jang^{a*}, Rae Eun Kim^b^aMechanical Engineering, Yonam Institute of Technology^bIntelligent Mechatronics Research Center, Korea Electronics Technology Institute

ARTICLE INFO

Article history:

Received	12	May	2022
Revised	24	May	2022
Accepted	31	May	2022

Keywords:

2 phase fluid analysis
CFD
Oil cooled motor
EV traction motor

ABSTRACT

Typical traction motors of electric vehicles utilize water jacket-based or air-based cooling. Currently, lightweight traction motors are preferred to extend the range of electric vehicles. As a result, direct cooling techniques have garnered significant attention from researchers. Direct coil-based cooling methods are of two types: oil injection type and oil spraying type. Direct oil-based cooling methods exhibit high cooling capacities. In this study, we investigate the transient increments in temperature in 160 KW traction motors. To this end, the power losses of motors were estimated using JMAG software. Using two-phase computational fluid dynamics (CFD) simulation over a duration of 18 s, the transient increase in temperature was predicted. The CFD predictions agreed well with the experimental observations, with an error less than 5%. We expect that the conclusions of this study will contribute to the improvement of the cooling performance of 160 KW traction motors.

1. 서론

온실가스 배출 저감을 위한 전 세계적인 규제가 시행되면서 전기자동차(electric vehicle, 전기차)가 점차 내연기관 차량을 대체해 나가고 있다^[1-3]. 특히 미국 Tesla사의 고성능 전기차인 Model S의 등장과 흥행은 내연기관차에서 전기차로의 패러다임 전환을 본격화하였다^[4]. 세계 주요 완성차 업체에서 전기차 출시를 확대하고 있으며, 각국에서 수소전기차, 초소형 전기차와 개인형 모빌리티 등으로 전동화 영역을 확대하면서, 주행거리 연장을 위한 배터리 시스템 개발, 구동장치 고효율화, 운행패턴 최적화 등 핵심 기술에 대한 연구개발을 활발히 진행 중이다^[5-8].

전기차에 있어서 구동모터는 가장 중요한 선택 기준인 주행거리

에 직접적인 영향을 주기 때문에 소형 경량화된 고효율 고효율 모터의 개발이 매우 중요하다. 출력이 높고 무게가 가벼운 고성능 구동 모터를 설계하기 위해서는 모터의 냉각 성능을 높이는 것이 필수적이다. 모터 냉각 방식은 공랭식, 수냉식, 유냉식으로 나눌 수 있으며 공랭식과 수냉식은 모터의 표면에 공기나 물을 공급하여 냉각하는 방식이고 유냉식은 모터 내부에 오일을 순환시켜 냉각하는 방식이다.

그 동안 전기차 구동 모터에 일반적으로 쓰였던 냉각 방식은 수냉 워터 자켓(water jacket)으로, 모터 하우징에 냉각수 경로를 구성하여 하우징 외면을 식혀 주는 방식이다. 국내의 현대, 기아차의 1세대 전기차에 주로 쓰였고, 독일의 BMW와 일본의 닛산 등에서도 초기 전기차 구동 모터에 수냉 워터자켓 냉각 방식을 적용하였

* Corresponding author. Tel.: +82-55-751-2077

E-mail address: shin7@snu.ac.kr (Shin Hyun Jang).

다. 그러나, 전기차가 급속히 보급되고 주행거리 연장에 대한 요구가 커지면서 구동 모터의 단위중량 당 출력비인 비출력을 증가시키기 위해 기존 워터 자켓 방식에 회전자 축 냉각을 겸한 방식^[9-10], 오일을 모터 내부에 직접 주입하거나 회전자 축을 통해 흘리는 방식^[11-12] 등 냉각 성능 향상에 대한 연구가 지속되고 있다. 특히 Tesla가 Model 3을 출시하면서 구동 모터에 유냉 방식을 적용하면서 모터의 비출력을 극대화하였고, 현대 등 다른 완성차 및 구동 모터 제조사들도 이를 채택하는 등 유냉 방식이 점차 적용되는 추세이다.

유냉식은 수냉식과 달리 모터 내부 부품의 부식 염려가 없기 때문에 주요 발열원에 직접적으로 오일 분사가 가능하며 이로 인해 다른 방식에 비해서 냉각 성능이 우수하다. 유냉 방식은 하우징이나 코어를 통해 오일을 권선 등의 발열원에 직접 뿌리는 방식과 오일을 모터 내부에 일정 부분 채운 상태에서 회전자의 회전에 의해 비산시키는 방식으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 회전자에 의한 오일 비산 냉각 방식을 적용한 전기차 구동 모터의 열유동 해석을 진행하였다. 전기차용 160 kW급 구동모터를 설계하였고, 전자계 유한요소 해석(finite element analysis, FEA)을 통해 최대 토크 시 모터의 손실 값을 산출하여 이를 열유동 해석과 연동하였다. 이로부터 모터의 최대토크 구동 시 권선의 최대온도를 예측하는 오일 냉각 순시 해석 기법에 대해 기술하였다. 또한 해석 결과를 실험 결과와 비교하여 해석 기법의 타당성을 검증하였다.

2. 구동모터 설계 및 전자계 해석

2.1 구동모터 설계

개발하고자 하는 구동모터는 최대출력 160 kW급으로, 요구되는 주요 성능지표는 Table 1과 같다. 이때, 최대출력 유지 시간은 18초 내외로 추정된다. 구동모터의 무게 당 출력비인 비출력(specific power)이 3.5 kW/kg 이상이 되도록 출력을 극대화하기 위해 오일을 모터 내부에 직접 주입하는 유냉 방식을 적용하였다.

모터의 열용량에 가장 큰 영향을 미치는 열원은 권선 발열에 의한 동손이며, 동손과 밀접한 모터의 설계 변수는 권선의 전류밀도이다. 유냉을 채택할 경우 수냉 워터자켓 방식보다 냉각성능이 좋기 때문에 전류밀도 또한 크게 증가시켜 설계할 수 있으므로^[12],

Table 1 Motor design requirements

Max. power	160 kW
Weight limit	45 kg
Cooling type	Direct oil cooling
Protection marking	IP67

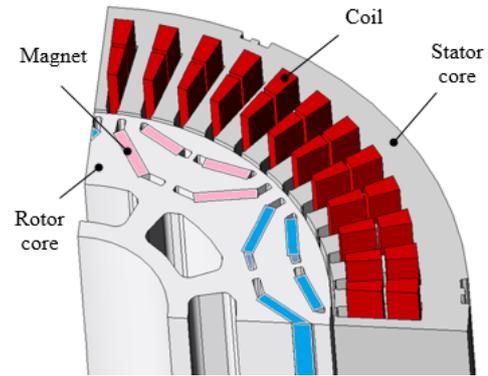


Fig. 1 3-D motor model for FEA

높은 비출력을 얻기 위한 전기차용 구동모터 설계 시 유리하다. 전류밀도를 높이기 위해 슬롯 면적 대비 코일이 차지하는 비율인 나동 점적율을 45% 이상으로 설계하였다. 높은 토크와 넓은 속도 영역을 갖는 모터의 특성 상 고정자와 회전자의 철심에서 발생하는 손실인 철손 또한 매우 크기 때문에, 이를 저감하기 위해 저 철손 박판의 전기강판을 적용하였다. 입력전류의 주파수가 높을 경우 회전자의 영구자석에 유도되는 전류 또한 증가하게 되며 이에 따라 와전류 손실이 커지게 되는데, 이를 최소화하기 위해 영구자석을 여러 조각으로 분할하였다.

2.2 전자계 손실 특성 해석

설계한 모델의 형상은 Fig. 1과 같으며, 구동 특성을 분석하고자 전자계 유한요소 해석을 수행하였다. 열 해석 시 발열원이 되는 손실 산출의 정확성을 높이기 위해 엔드 권선(end-winding)에 의한 누설과 영구자석 분할, 스큐 등을 고려할 수 있는 3차원 해석을 병행하였다. 구동 모터의 손실은 입력전류가 최대가 되면서 동시에 출력 또한 최대가 되는 지점에서 가장 크다. 전류와 토크는 비례하기 때문에 최대토크일 때 전류 값과 손실 역시 최대가 되며, 열유동 해석은 이 지점에서의 손실값을 바탕으로 해석 진행하였다. 해석을 통해 산출한 구동 모터의 손실 특성을 Table 2에 나타내었다.

구동모터의 손실량이 가장 큰 지점은 357 Nm의 최대토크를 가질 때이며, 회전속도는 4300 rpm이고 160 kW의 최대출력을 가진다. 권선에 흐르는 전류에 의한 동손은 13,546 W로 산출되었고, 전체 손실량의 절반 이상을 차지한다. 따라서, 오일에 의해 권선을 직접적으로 냉각시켜주는 것이 모터의 열용량을 증대시키는 데에

Table 2 FEA results of motor losses

Copper loss	13,546 W
Stator iron loss	413 W
Rotor iron loss	47 W
Eddy current loss of Magnets	5 W
Friction loss of bearings	688 W

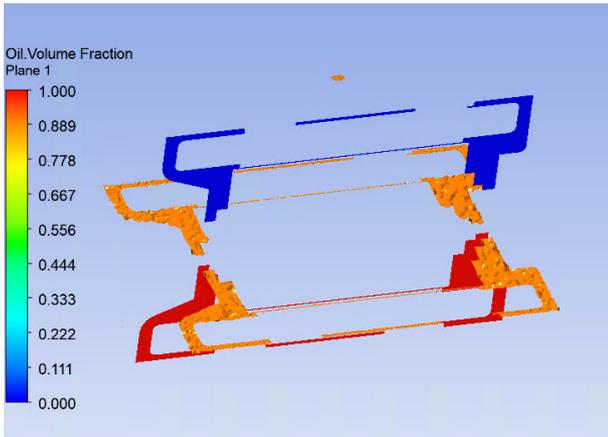


Fig. 2 Initial oil volume fraction

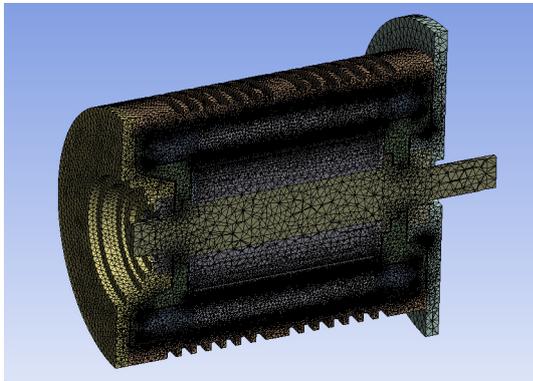


Fig. 3 Mesh for CFD

매우 중요한 요소로 작용한다.

3. 유동 해석

3.1 해석 조건

순시 온도 상승을 예측하기 위해서는 유동해석을 사용하였으며 오일이 강제 공급되는 실험 장치를 구성했기 때문에 최대한 실험 장치와 유사하게 해석 조건을 인가하였다. 오일을 강제 공급하여 냉각하는 방식이기 때문에 오일과 공기의 2상 유동 해석을 진행해야 한다. 오일은 초기에 모터 내부의 하부 1/3 지점까지 오일이 채워진 상태에서 시작하게 된다. Fig. 2은 초기 해석을 위한 오일 분포를 나타낸다. 냉각에 사용되는 오일은 HKMC ATF SP-IV MI를 사용한다. 상부에서 1개 구멍에서 오일이 공급되고 하부 2개 구멍에서 오일이 나와서 순환하게 되는 구조이다. 2상 유동을 위한 메쉬는 Fig. 3과 같다. 노드는 11,589,717, 요소수는 48,528,217 이다. 회전자와 고정자 사이 공극에서는 최소 6개 이상의 메쉬가 생성되도록 하였으므로 상용 소프트웨어 CFX를 이용하여 해석을 진행하였다. 다상유동을 위한 해석 조건은 오일과 공기의 2상의 재질을 선정

Table 3 Material property

Part name	Material	Specific heat capacity (J/kg/K)	Thermal conductivity (W/m/k)
Housing	Aluminum alloy	903	237
Coil	Copper	385	401
Rotor, Stator, Bearing	Steel	434	25.14

하였고 부력의 효과를 고려하기 위해서 중력 가속도를 설정하였다. 유동 모델은 공기와 유동의 계면에서 속도와 압력이 동일한 Homogenous 모델을 선정하였다. 열전달 모델을 활성화 하였으며 난류 모델은 SST(shear stress transport)로 선택하였다. 공기 오일 계면 모델은 표면 장력을 고려하였고 상간 전달 모델은 Mixture Model을 선정하였다. 18초 동안 과도 해석을 진행하였다. Table 3은 해석에 사용하는 재료의 물성치를 나타내고 있다. 하우징 표면에는 대류 열전달 계수 값 $6 \text{ W/m}^2/\text{K}$ 을 인가하였다. 회전의 효과를 부여하기 위해서 로터 표면에 회전 효과를 인가하였으며 4300 rpm을 인가하였다.

3.2 과도 해석 결과

18초 동안 순시 해석에 소요되는 시간은 72시간 정도이며 코어는 64개를 사용하였다. Fig. 4는 18초에 해당하는 결과를 나타내었다. 초기 Fig. 2에서 시작한 오일의 분포는 Fig. 4(a)와 같은 오일 분포를 가지게 된다. 회전자 회전에 의해서 오일이 비산되는 것을 볼 수 있으며 출구 2개 쪽으로 오일이 배출되고 고정자 치사이로 오일이 공급되는 형태를 볼 수 있다. Fig. 4(b)는 고정자의 온도 분포를 나타내고 있으며 최고 온도 78.4도이며 베어링 부분에서 발생하는 것을 알 수 있다. Fig. 4(c)는 고정자 철심의 온도 분포를 나타낸다. 최고 온도는 110도 치 중심부에 최고 온도가 분포한다. Fig. 4(d)는 하우징의 온도 분포를 나타내며 최고 온도는 77.6도를 나타내며 베어링 부분에서 최고 온도가 발생하고 있다. Fig. 4(e)는 고정자 코일의 온도 분포를 나타낸다. 코일 전방 부분에서 최고 온도가 발생하는 것을 알 수 있으며 최고 온도는 124.7도 이다. Fig. 4(f)는 오일의 온도 분포를 나타내고 있으며 최고 온도는 124.6도 이는 코일과 맞닿는 부분에 해당한다.

3.3 실험 결과

구동 모터의 온도 측정을 위한 실험 장치는 Fig. 5과 같으며 구동모터의 냉각 구조는 하우징에 별도의 워터젯 없이 오일이 모터 내부로 직접 들어가는 구조이다. 오일 순환은 입구 1개와 출구 2개를 통해 이루어지며, 유량은 10 lpm(liter per minute)으로 순환

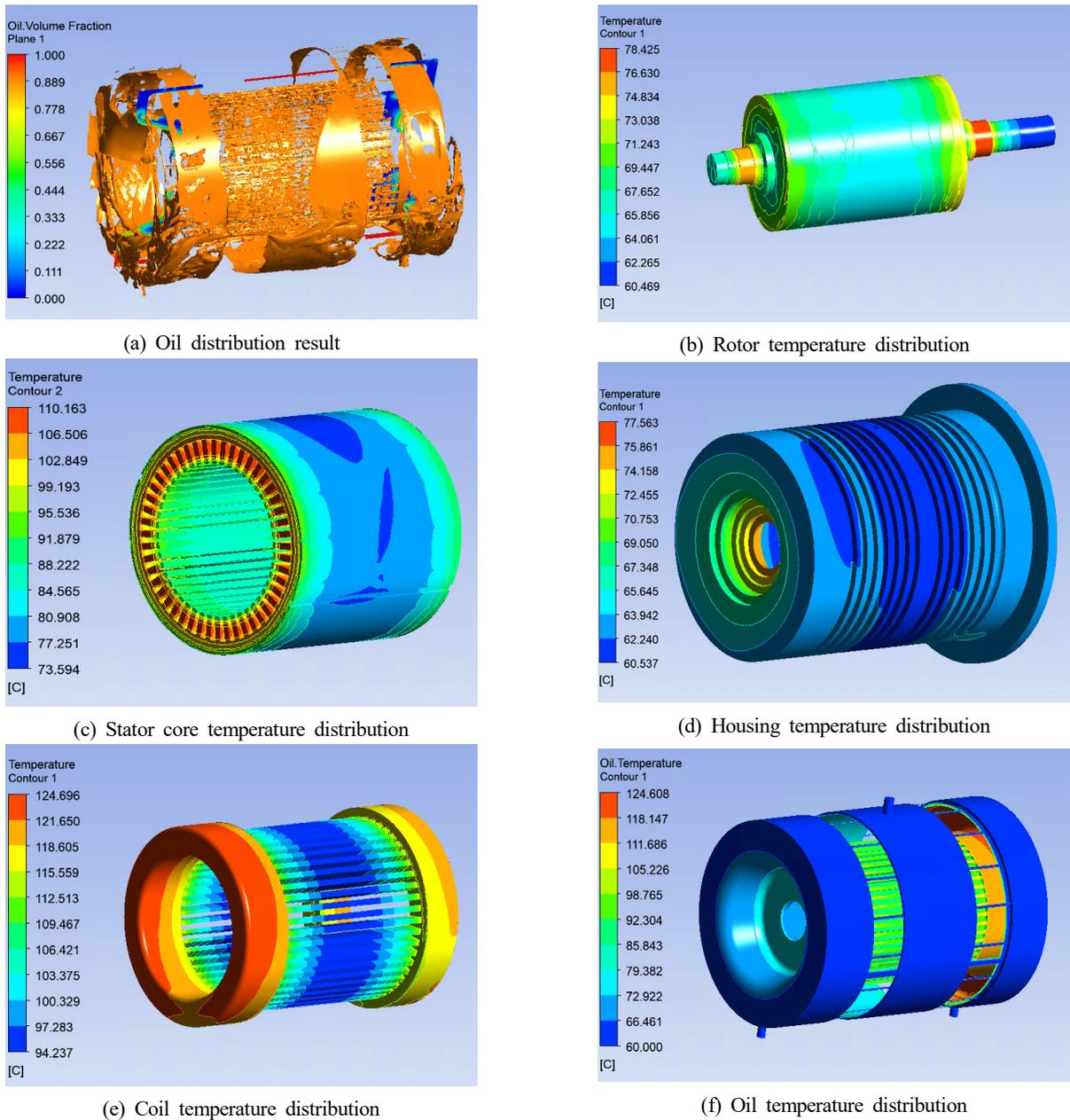


Fig. 4 Transient CFD analysis result

된다. 모터의 성능 시험 시 다이نام오는 부하 설비에 장착되는데 모터의 발생열이 다이نام오 부하 설비로 빠져나갈 수 있기 때문에, 실제 차량 탑재 조건과 유사하게 모의하기 위해 모터 체결부에 열전도율이 낮은 비금속 절연판을 설치하였다. 오일을 60도로 유지한 상태에서 오일을 충분히 순환 시켜서 모터는 초기에 60도를 유지한 상태에서 온도 상승 시험을 실시하였다. 모터에 전류를 인가하고 18초 동안의 온도 측정을 실시하였다. 이번 실험에 가장 중요한 부분이 코일의 온도 상승 부분이다. 열전대는 모터 내부에 여러 군데 장착하였으며 해석과 결과 비교를 위해서 코일의 전방 부분 12시 방향에 설치한 열전대 온도 상승 실험 결과는 Fig. 6과 같으며

18초 후에 온도는 128도를 나타내고 있다.

3.4 실험 해석 결과 비교

유동 해석의 성능을 평가하기 위해서 측정 결과와 비교한 그래프는 Fig. 7과 같다. 실험 결과와 비교하면 18초 동안 전 구간에서 5% 이내의 오차를 가지고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

오일 냉각 방식의 모터의 순시 온도 상승 예측을 위해서 유동

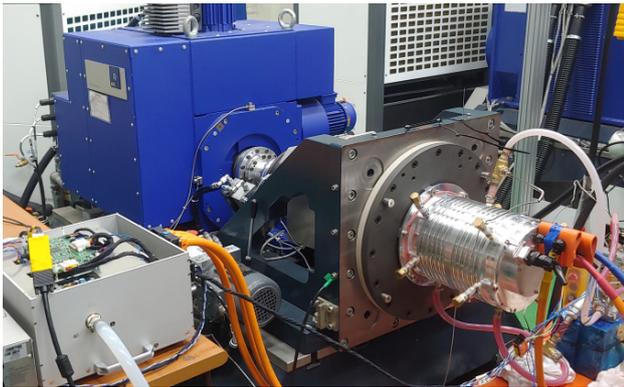


Fig. 5 Test set of traction motor

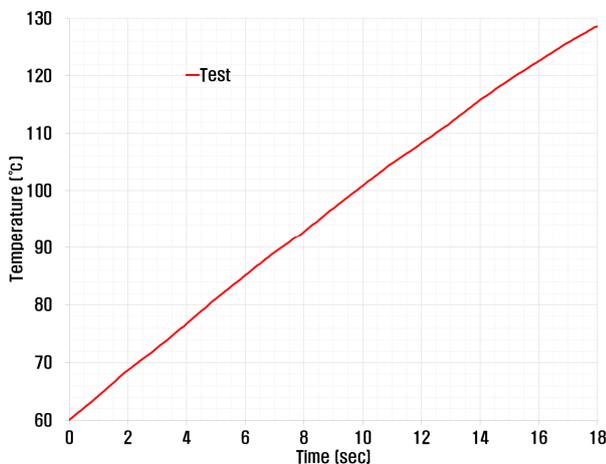


Fig. 6 Coil temperature rise data from experiment

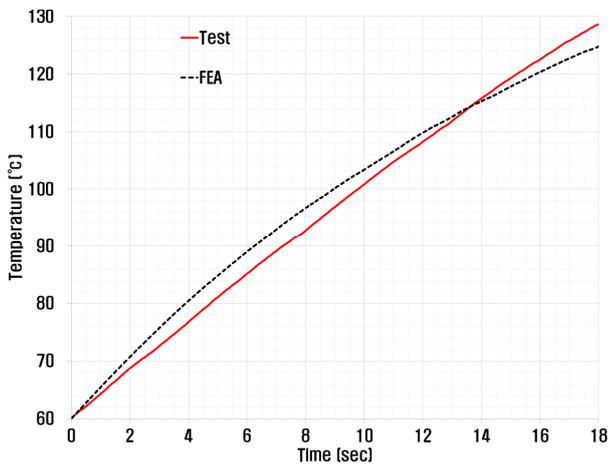


Fig. 7 CFD temperature rise data vs. experiment data

해석을 수행하고 그 결과를 실험 결과와 비교하였다. 유동 해석은 순시, 공기 오일 2상 조건과 Homogeneous 모델과 난류 모델은 SST, 부력과 표면 장력을 고려하여 18초 동안 해석을 진행하였다. 전방부 코일 12시 방향의 온도 상승 결과를 해석과 실험 결과를 비교하였으며 18초 전 구간에 걸쳐서 5%이내의 오차 성분을 가지고 있음을 확인하였다. 추후 모터 온도 상승 해석 결과를 이용하기

위해서는 오일이 골고루 분포하는지 각 부분의 온도가 비정상적으로 높게 상승하는 것은 아닌지 확인하고 개선 설계를 진행해야 한다. 하지만 과도 해석의 경우 72시간 넘게 소요되기 때문에 설계 변경 후 결과를 확인하기까지 너무 많은 시간이 소요되기 때문에 현실적으로 적용이 불가하다. 이를 위해서 정적 해석과 정적 실험 (온도 포화 실험)을 수행하여 문제점을 파악하고 개선 설계를 진행할 예정이다. 정적 해석의 경우 2시간 정도면 해석 결과를 확인할 수 있기 때문에 정적 부분의 개선을 진행하고 최종적으로 과도상태의 온도를 검증하는 방법을 사용하여 모터의 성능향상을 도모하고자 한다.

후 기

이 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 산업기술평가관리원(KEIT)의 연구비 지원에 의해 수행됨(No.20010437).

References

- [1] Son, Y.-W., Huh, G.-S., 2017, Technology Development Trend of Domestic and Foreign Electric Vehicle and Technology Development Strategy of Domestic Electric Vehicle Core Parts, *Trans. Korean Inst. Power Electron.*, 22:5 373-381, <https://doi.org/10.6113/TKPE.2017.22.5.373>.
- [2] Popescu, M., Goss, J., Staton, D. A., Hawkins, D., Chong, Y. C., Boglietti, A., 2018, Electrical Vehicles—Practical Solutions for Power Traction Motor Systems, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 54:3 2751-2762, <https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2792459>.
- [3] Krings, A., Monissen, C., 2020, Review and Trends in Electric Traction Motors for Battery Electric and Hybrid Vehicles, *International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 1807-1813, <https://doi.org/10.1109/ICEM49940.2020.9270946>.
- [4] Bae, J.-Y., Kim, Y., 2017, The Core Technical Trends of TESLA EV(Electric Vehicle) Motors, *Trans. Korean Inst. Power Electron.*, 22:5 414-422, <https://doi.org/10.6113/TKPE.2017.22.5.414>.
- [5] Naseri, F., Farjah, E., Ghanbari, T., 2017, An Efficient Regenerative Braking System Based on Battery/Supercapacitor for Electric, Hybrid, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles With BLDC Motor, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 66:5 3724-3738, <https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2611655>.
- [6] Jung, H., Park, G., Kim, D., Jung, S., 2017, Optimal Design and Validation of IPMSM for Maximum Efficiency Distribution

- Compatible to Energy Consumption Areas of HD-EV, IEEE Trans. Magn., 53:6 1-4, <https://doi.org/10.1109/TMAG.2017.2660524>.
- [7] Lee, J. -G., Lim, D. -K., 2021, A Stepwise Optimal Design Applied to an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicle Traction Applications, IEEE Access, 9 115090-115099, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3105119>.
- [8] Meshginqalam, A., Bauman, J., 2021, Investigation of Critical Parameters for Selecting Energy-Optimal Cruising Speed Using a Low-Computation Framework, IEEE Trans. Ind. Appl., 57:3 2825-2837, <https://doi.org/10.1109/TIA.2021.3057037>.
- [9] Gai, Y., Kimiabeigi, M., Chong, Y. C., Widmer, J. D., Goss, J., SanAndres, U., Stven, A., Staton, D. A., 2018, On the Measurement and Modeling of the Heat Transfer Coefficient of a Hollow-Shaft Rotary Cooling System for a Traction Motor, IEEE Trans. Ind. Appl., 54:6 5978-5987, <https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2860558>.
- [10] Lee, K.-H., Cha, H.-R., Kim, Y.-B., 2016, Development of an Interior Permanent Magnet Motor through Rotor Cooling for Electric Vehicles, Appl. Therm. Eng., 95 348-356, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.11.022>.
- [11] Kim, J. S., Moon, J. W., Kwak, T. H., Kang, T. G., 2017, Numerical Investigation on an Oil Cooling System in the Motor for a Hybrid Vehicle, J. Comput. Fluids Mech. Eng., 22:3 86-94, <https://doi.org/10.6112/ksfce.2017.22.3.086>.
- [12] Liu, C., Xu, Z., Gerada, D., Li, J., Gerada, C., Chong, Y. C., Popescu, M., Goss, J., Staton, D., Zhang, H., 2021, Experimental Investigation on Oil Spray Cooling With Hairpin Windings, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 67:9 7343-7353.



Hyun Jang Shin

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Yonam Institute of Technology. His research interest is a Motor Sound and Vibration reduction and FEA.
E-mail: shin7@yc.ac.kr



Rae Eun Kim

A Senior Researcher of KETI. His main research topic is a Motor Design and FEA.
E-mail: kre2567@keti.re.kr