

200kW급 구동 모터의 냉각 유로 최적화를 통한 냉각 성능 개선 연구

문경룡*, 강현성*, 신윤희*, 오세두*

*한국자동차연구원

e-mail:sdoh@katech.re.kr

Improved the Cooling Performance of a 200kW Traction Motor through the Water Jacket Optimization

Kyeong-Ryong Moon*, Hyun-Sung Kang*, Yoon-Hyuk Shin*, Se-Doo Oh*

*Korea Automotive Technology Institute

요약

본 논문에서는 200kW급 수냉식 구동 모터의 냉각 성능 최적화를 목적으로 정격 출력 조건에서 수치 해석적 분석을 진행하였다. 구동 모터 내 주요 부품들의 온도 변화, 냉각 유로 내 압력 차, 한계 온도까지의 도달 시점 등을 나타내어 냉각 성능을 파악하였다. 구동 모터의 냉각 성능을 향상시키기 위해 하우징 내 냉각 유로의 형상을 변경하였으며, 한계 온도까지 도달하는 시점과 냉각 유로 내 압력 차를 비교하여 냉각 성능을 최적화하였다.

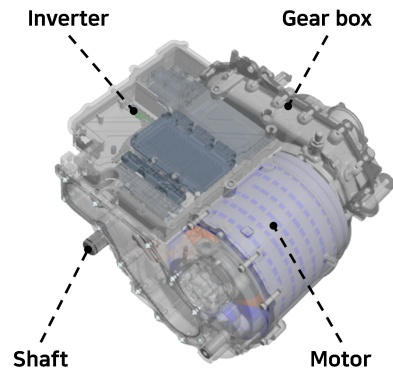
건에서 열적 안정성을 확보할 수 있는 설계 방향을 제시하고자 한다.

1. 서론

전 세계 모빌리티 시장은 기후변화 대응 및 온실가스 저감을 위해 친환경 자동차의 기술 개발 및 보급 확대에 집중하고 있다. 특히, 전기·수소 자동차의 시장성과 성능 향상을 위해 핵심부품인 구동 모터의 고출력·고밀도화가 진행되고 있으며, 구동 모터의 발열부 냉각을 효과적으로 제어하기 위한 열관리 기술의 고도화가 활발히 진행되고 있다[1].

구동 모터의 열관리 성능은 차량의 전비와 내구성에 영향을 미치며, 고부하 운전 시 발생하는 고온의 열은 구동 모터의 신뢰성과 수명을 저하시킬 수 있는 주요 요인으로 작용할 수 있다. 특히 권선의 경우, 허용 온도 초과 시 절연 파괴 및 성능 저하를 유발하며, 영구자석의 비가역 감자가 발생 시 모터의 성능이 영구적으로 저하될 수 있으므로 냉각 설계가 매우 중요하다[2-3].

따라서 본 연구에서는 그림 1과 같은 200kW급 수냉식 구동 모터를 대상으로 냉각 성능 최적화 지원을 위한 방안으로 냉각 유로의 기하학적 형상 변경에 따른 열적 특성을 열유동 해석 기반으로 분석하였다. 정격 출력 조건에서 주요 부품들의 한계 온도 도달 시점을 예측하고, 온도 구배와 압력 차를 반영한 개선 냉각 유로 형상의 열적 지연 효과를 확인하였으며, 이를 토대로 시스템의 열용량을 추산하여 고부하 운전 조



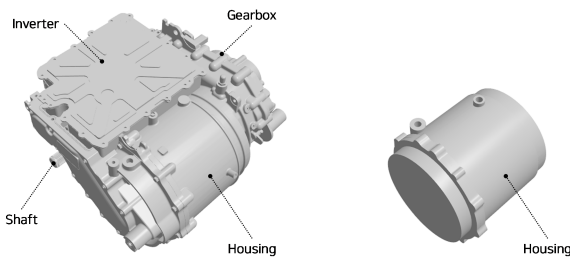
[그림 1] 200kW급 수냉식 구동 모터의 3D 모델링

2. 연구 방법

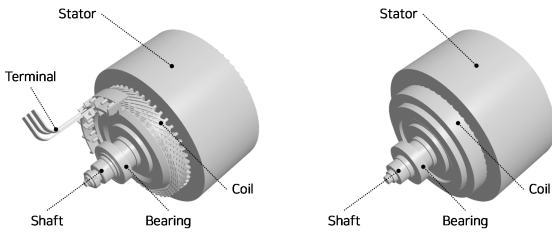
본 연구는 200kW급 수냉식 구동 모터의 열역학적 특성을 파악하기 위해 연속 정격 출력(30분 기준) 조건에서 수치해석을 진행하였다. 일반적인 주행 상황을 고려하였을 때 순간적으로 발생하는 최대 출력 조건보다 지속적인 부하가 가해져 최고 온도에 도달하는 연속 정격 출력 조건이 구동 모터의 성능을 파악하기에 적절한 것으로 판단하여 표 1과 같이 연속 정격 출력 조건을 파악하였다.

[표 1] 200kW급 수냉식 구동 모터의 성능 정보

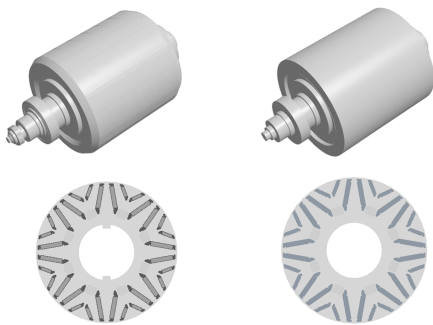
Performance	Value
Peak power	200kW
Peak torque	343Nm
Max rotation speed	16,500rpm
Rated power (30min)	75kW
Rated torque (30min)	134Nm
Rated rotation speed (30min)	5,345rpm



(a) Housing geometry



(b) Stator geometry



(c) Rotor geometry & section view

[그림 2] 형상 단순화 결과(좌:원본 3D 모델링, 우:간소화 3D 모델링)

수치해석을 수행하기에 앞서 해석의 효율성과 격자의 품질을 확보하기 위해 그림 2와 같이 형상 단순화를 진행하였다. 본 연구는 구동 모터 내 열적 특성 분석이 목적이므로 인버터(Inverter)와 감속기(Gearbox) 형상은 제외하였다. 이와 더

불어 구동 모터 내 열전달의 영향력이 낮은 볼트와 패킹 등을 제거하였으며, 고정자 내 복잡한 권선의 형상과 영구자석이 삽입된 회전자적 적층 구조를 단순화하였다. 형상 단순화 과정에서 발생할 수 있는 열전달 오차를 방지하기 위해 축 방향과 반경 방향에 따른 이방성 열전도도를 부여하여 실제 모터의 열적 거동을 모사하였다. 또한, 권선을 감싸는 절연체(Insulation paper)는 얇은 두께를 가지고 있어 격자 생성 과정에서 밀집되는 현상을 방지하고자 Shell 구조로 형성하였다.

정격 출력(75kW) 조건에서 구동 모터 내 손실은 3.73kW로 계산되며, 구동 모터의 열적 거동을 분석하고자 표 2와 같이 작동 조건을 선정하였다. 정격 출력 조건에서 냉각수는 65°C의 온도로 유입되며, 냉각 유로 내 압력 차를 분석하기 위해 유입 유량은 5~10LPM으로 변경하였다. 이외에 구동 모터의 외부 표면과 주변 대기 사이의 열교환을 모사하기 위해 대류 열전달 계수는 8W/m²·K로 적용하였다.

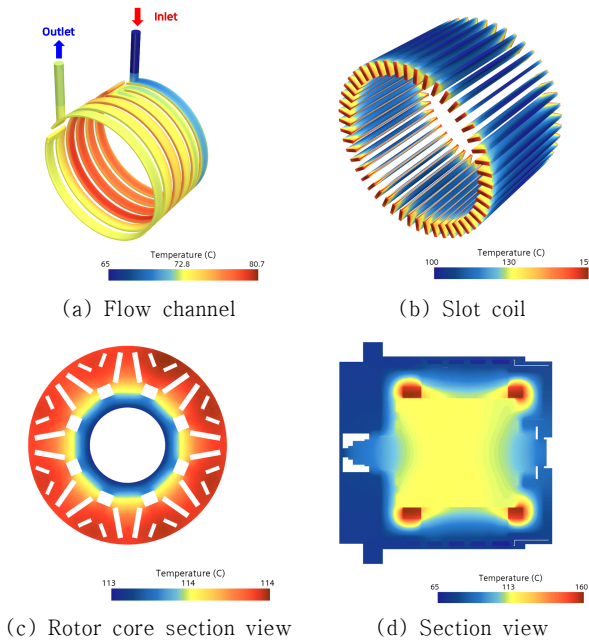
[표 2] 구동 모터의 경계조건

Parameters		Values
Inlet	Volumetric flow rate (\dot{V}_{in})	5~10LPM
	Temperature (T_{in})	65°C
Outlet	Pressure outlet (P_{out})	0Pa
Wall	Convection	8W/m ² ·K

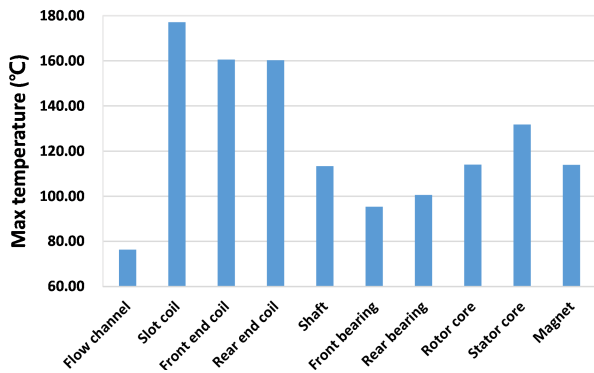
3. 결과 및 고찰

정격 출력(75kW) 조건에서 200kW급 구동 모터의 온도 분포를 확인하기 위해 그림 3, 4와 같이 유입 유량 8LPM 조건에서 온도 결과를 나타내었다. 구동 모터의 냉각을 위해 65°C의 온도로 유입된 냉각수는 출구로 향하면서 열교환을 이루어 온도가 상승하며, 냉각 유로를 기준으로 내측에 위치한 발열원으로 인해 외측과 내측의 온도 차는 11.35°C로 발생하였다. 또한, 냉각 유로의 입구와 출구의 경계면에서 측정된 압력 구배는 23.86kPa로 확인되며, 이는 입구에서 수직으로 유입된 유동이 하우징의 곡면을 따라 흐르게 되어 승압된 것으로 판단된다.

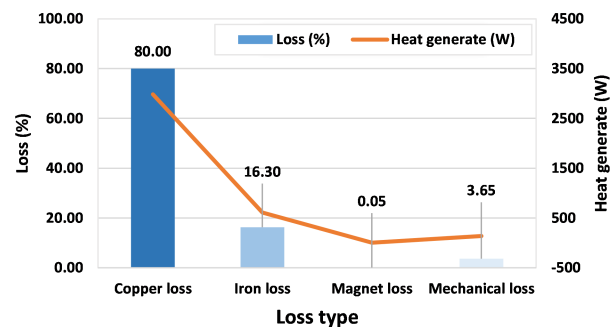
온도 분포와 더불어 구동 모터 내 주요 발열원을 도출하기 위해 그림 5와 같이 부품별 손실 비중을 분석하였다. 전체 손실 중 권선에서 발생하는 동손(Copper loss)이 80%로 가장 높은 비중을 차지하였으며, 이러한 집중적인 발열로 인해 권선의 온도가 최대 177.12°C까지 상승한 것으로 확인된다.



[그림 3] 구동 모터 내 온도 분포 결과(8LPM)



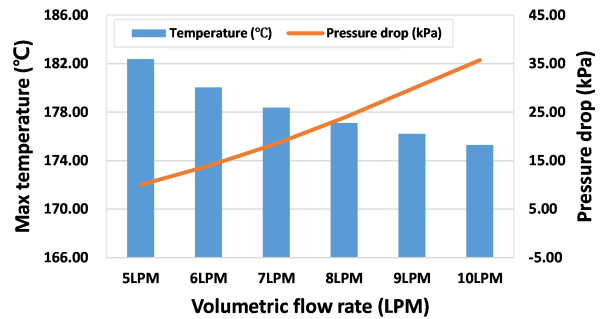
[그림 4] 주요 부품 온도 분포 비교(8LPM)



[그림 5] 손실 구분에 따른 발열량 비교(8LPM)

권선에 집중된 발열은 냉각수와의 열교환을 통해 완화되는 효과를 보였으나, 전기적 단락을 방지하기 위한 절연체의 높은 열저항에 의해 권선 최대, 최소 온도 편차는 75.04°C로 다소 높은 온도 편차를 보였다. 결과적으로 높은 열저항의 절연

체 효과로 인해 한계 온도인 176.85°C에 도달하였으므로 절연 파괴 및 성능 저하를 고려한 냉각 성능 개선이 요구된다.



[그림 6] 유입 유량 변화에 따른 구동 모터 내 최대 온도 및 압력 구배 변화

냉각 성능 향상을 목적으로 유입 유량 변화에 따른 주요 발열원의 온도 분포와 압력 구배를 나타내었다. 유입 유량 변화에 따라 구동 모터 내 온도는 최소 유량 조건인 5LPM 조건에서 모터 내 최고 온도는 182.38°C, 압력 차는 약 10kPa로 도출되었다. 반면 최대 유량 조건인 10LPM 조건에서 최고 온도는 175.31°C, 압력 차는 35.72kPa로 도출되었다. 유량을 2배로 증가시켰을 때 최대 온도 저감 폭은 7.08°C에 불과하지만, 압력 손실은 약 3.5배 가량 증가한 것을 확인할 수 있다. 유입 유량이 향상됨에도 불구하고 하우징과 엔드코일 간극 기체 영역의 낮은 열전도율이 단열 효과를 증대시켜 압력 변화에 비해 온도 저감 효과는 미미하게 나타난 것으로 판단된다. 또한, 유로 내 압력 강하는 유속과 비례하므로 시스템 측면에서 펌프의 과도한 동력 소모를 초래할 수 있다. 따라서, 구동 모터의 냉각 성능 향상을 위해 냉각수의 유량을 증가시키는 방안은 시스템 내 과도한 압력 강하를 유발할 수 있어 냉각 유로의 기하학적 형상 변경을 통한 열전달 효율 개선이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 200kW급 수냉식 구동 모터의 정격 출력 조건에서 수치해석을 수행하여 구동 모터 내 열적 거동을 분석하였다. 전체 발열의 80%가 집중된 권선의 최대 온도는 177.12°C로 도출되어 허용 온도인 176.85°C에 도달하였다. 이를 해소하고자 유입 유량을 5LPM에서 10LPM으로 변경하여 분석하였으나, 최대 온도 저감은 7.08°C에 불과한 반면, 냉각 유로 내 압력 구배는 약 3.5배 증가하였다. 이와 같이 유입 유량을 증가시켜 냉각 성능을 확보하는 방안은 시스템 내 과도한 압력 손실을 유발하여 비효율적인 작동을 초래할 수 있음을 나타내었다. 따라서, 냉각 유로의 기하학적 형상 변경을

통해 열전달 효율을 개선하고, 과도 해석을 통해 개선된 유로 형상이 주요 부품의 한계 온도 도달 시점을 지연시키는 효과를 입증하여 모터의 열적 안정성을 확보할 수 있는 최적 설계안을 제시하고자 한다.

5. 사사

이 연구는 2026년도 미래차 전동화부품 설계·검증지원 기반 구축사업(P0024188) 및 EV플랫폼 연계부품 XR/디지털트윈 기술지원 기반구축(P0029842)에 의한 연구임

참고문헌

- [1] Zhao, S., Ning, P., Fan, T., Hui, X., & Shi, Q. “A Review of Research Methods for Stator Temperature Monitoring in PMSM”, CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 9(4), pp. 407–421. 2025.
- [2] Usca-Gomez, H. G., Puma-Benavides, D. S., Zambrano-Leon, V. D., Castillo-Díaz, R., Quinga-Morales, M. I., Solís-Santamaria, J. M., & Llanes-Cedeño, E. A. “A Review and Case of Study of Cooling Methods: Integrating Modeling, Simulation, and Thermal Analysis for a Model Based on a Commercial Electric Permanent Magnet Synchronous Motor”, World Electric Vehicle Journal, 16(8), 437, 2025.
- [3] Meier, M., & Strangas, E. G. “Cooling Systems for High-Speed Machines—Review and Design Considerations”, Energies, 18(15), 3954, (2025).