

전기자동차의 에너지 소비 특성에 대한 회생제동 최소속도와 주위 온도의 영향

최 지원¹⁾ · 이 광 렬²⁾ · 박 수 한³⁾건국대학교 기계항공공학부¹⁾ · 건국대학교 대학원 기계공학과²⁾ 건국대학교 기계로봇자동차공학부³⁾

Impact of Minimum Regenerative Braking Speed and Ambient Temperature on Energy Consumption Characteristics of Electric Vehicle

Jiwon Choi¹⁾ · Gwangryeol Lee²⁾ · Suhan Park³⁾School of Mechanical and Aerospace Engineering Konkuk University¹⁾Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Konkuk University²⁾School of Mechanical, Robotics, and Automotive Engineering, Konkuk University³⁾

Key words : Electric Vehicle(전기자동차), Simulation-based analysis(시뮬레이션 기반 해석), Regenerative Braking control(회생제동 제어), Temperature Environment Variation(온도 환경 변화), Energy Efficiency(에너지 소비 효율), Range(1회 충전 주행거리)

* 교신저자, E-mail: suhanpark@konkuk.ac.kr

전기자동차의 핵심 성능 지표인 에너지 소비 효율과 1회 충전 주행거리는 정밀한 평가와 예측이 요구되고 있으며¹⁾, 이러한 성능들은 주행 환경과 운전자 습관을 비롯한 다양한 요인의 영향을 받는다. 특히, 회생제동 시스템과 외기온도는 에너지 효율에 직접적인 영향을 미치는 핵심 변수이다. 감속 시 운동에너지를 전기에너지로 변환하여 에너지를 회수할 수 있는 회생제동 시스템은 불필요한 가감속을 줄여 실제 에너지 소비 효율을 개선할 수 있다.²⁾ 또한, 배터리와 모터의 성능에 영향을 미치는 외기온도가 낮아질 경우, 구동계와 배터리에서 더 높은 에너지가 요구되어 전반적인 에너지 효율은 저하된다.³⁾

본 연구에서는 AVL CRUISE M을 이용하여 차량 모델을 구축하였으며, 차량의 회생제동 최소속도와 다양한 온도 조건 변화에 따른 차량 성능을 분석하고자 하였다. Figure 1에 구축한 차량 모델을 제시하였으며, 차대동력계에서 확보한 WLTP와 Cold-FTP 모드의 실제 시험 데이터와 비교하여 상온(25℃)과 저온(-7℃) 환경 모두 오차범위 3% 이내로 만족함을 검증하였다. 먼저, 시뮬레이션 기반 모델을 통해 WLTP 모드로 회생제동 시스템의 최소속도 변화에 따른 에너지 소비 특성을 분석하였다. 회생제동 최소속도를 0-25 km/h까지 5 km/h의 간격으로 조정하여 분석한 결과, 회생제동 최소속도를 높게 설정할수록 차량의 성능은 점차 낮아지는 모습을 보였다. 최소속도를 25 km/h로 설정한 경우, 에너지 소비 효율과 1회 충전 주행거리는 최소속도가 10 km/h인 경우와 비교해 약 0.97% 감소하였다. 이를 통해, 모델링 차량의 기존 회생제동 제어 로직으로 알려진 10 km/h에서 최적의 성능을 보이는 것을 확인하였다. 또한, 다양한 온도 환경 변화에 따른 차량의 성능을 분석하기 위해 네 개의 시나리오를 구성하여 결과를 비교 및 분석하였다. 시나리오 1은 외기온도와 배터리, 모터 온도를 동일하게 설정하였으며, 시나리오 2는 주행 초반을 반영하여 배터리와 모터 온도를 외기온도보다 각각 5℃, 10℃ 높게 설정하였다. 시나리오 3은 주행 중반을 가정하여 각각 10℃, 20℃ 높게 설정하였으며, 시나리오 4는 사전 예열 또는 이상적 조건을 가정하여 배터리와 모터 온도를 각각 25℃, 35℃로 고정한 뒤 외기온도만 변화하도록 설정하였다.

시험 결과, 시나리오 1의 25℃에서는 타 시나리오와 비교해 최대 9.4%의 에너지 소비 효율 차이를 보이며 전체 시나리오 중, 가장 높은 효율을 보였다. 하지만, 저온으로 갈수록 에너지 소비 효율이 급격히 감소하는 경향을 확인하였으며, -20℃에서는 타 시나리오 대비 최대 50%의 효율 차이를 보이며 전체 시나리오 중, 가장 낮은 에너지 소비 효율을 보였다. 시나리오 2와 3은 배터리의 최적 작동 온도로 알려진 20-25℃를 기점으로 온도가 더 높아질수록 에너지 소비 효율이 감소하는 것을 확인하였다.⁴⁾ 시나리오 4에서는 0℃ 미만의 저온 조건에서 전체 시나리오 중 가장 높은 에너지 소비 효율을 보였고, 최대 50%의 효율 차이를 보이며 배터리와 모터의 사전 예열이 저온 조건에서 차량의 성능에 중요한 요소임을 확인하였다.

본 연구를 통해 구축한 전기자동차 시뮬레이션 모델을 활용하여 회생제동 최소속도 및 온도 조건 변화에 따른 소비 특성을 분석한 방법론은 타 차량 제원으로도 확장 적용이 가능하며, 향후 다양한 주행 환경 및 주행 전 예열 등을 고려한 전기차 성능 분석 및 효율 개선 전략 수립의 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

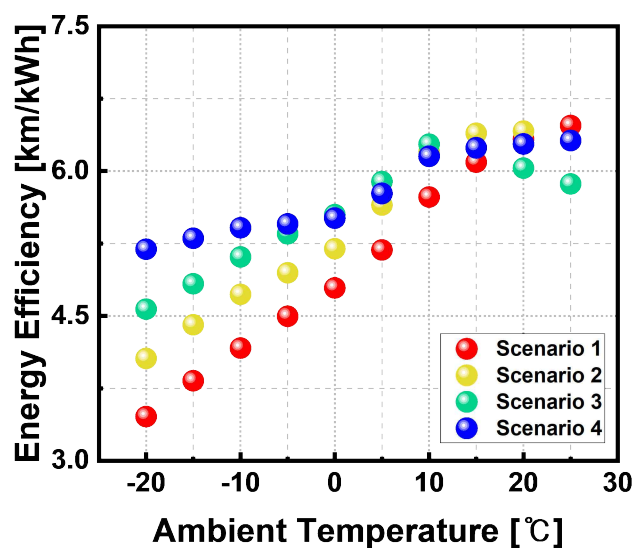
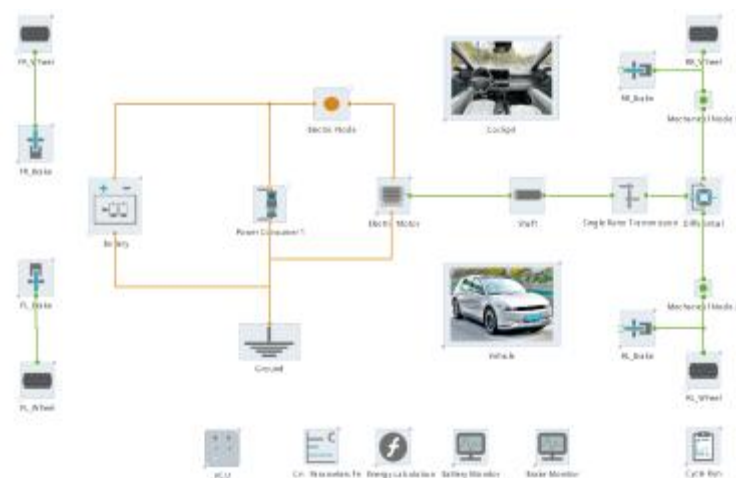


Figure 2. Energy efficiency characteristics in scenario with respect to ambient temperature

References

- 1) J. Seo, "Component-level energy consumption and range analysis of battery electric vehicles under urban and highway driving conditions", *Applied Thermal Engineering*, 126797, 2025.
- 2) G. Lee, J. Song, J. Han, Y. Lim and S. Park, "Study on energy consumption characteristics of passenger electric vehicle according to the regenerative braking stages during real-world driving conditions", *Energy*, 128745, 2023.
- 3) J. Seo, J. Cha, "Real-world analysis of energy consumption in a battery electric vehicle: Effects of ambient temperatures and thermal management system operation", *Energy Conversion and Management*, 120372, 2025.
- 4) G. Lee, J. Song, Y. Lim and S. Park, "Energy consumption evaluation of passenger electric vehicle based on ambient temperature under Real-World driving conditions", *Energy Conversion and Management*, 118289, 2024.

Acknowledgement

이 논문은 한국연구재단 중견연구후속지원사업(RS-2023-00208502)으로 수행되었습니다.