

소형 전기 화물자동차의 외기온도 및 적재 조건에 따른 주행거리 특성에 관한 연구

이 광 렬¹⁾ · 이 진 혁²⁾ · 권 석 주²⁾ · 서 영 호²⁾ · 박 수 한^{*3)}

건국대학교 대학원 기계공학과¹⁾ · 한국자동차연구원 친환경기술연구소²⁾ · 건국대학교 기계로봇자동차공학부³⁾

A Study on the Impact of Ambient Temperature and Loading Conditions on the Driving Range of Small Electric Freight Vehicle

Gwangryeol Lee¹⁾ · Jinhee Lee²⁾ · Seokjoo Kwon²⁾ · Youngho Seo²⁾ · Suhan Park^{*3)}

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Konkuk University, Seoul 05029, Korea

²⁾Korea Automotive Technology Institute, 303 Pungse-ro, Dongnam-gu, Cheonan-Si, Chungnam 31214, Korea

³⁾School of Mechanical, Robotics and Automotive Engineering, Konkuk University, Seoul 05029, Korea

(Received 8 May 2025 / Revised 11 June 2025 / Accepted 19 June 2025)

Abstract : The adoption of EVs has been accelerating worldwide with rapid advancements in electric vehicle (EV) technologies. Among the various factors influencing EV performance, ambient temperature and payload are considered critical, especially for electric freight vehicles. This study quantitatively evaluated the impact of ambient temperature and payload on the energy efficiency and driving range of a small electric freight vehicle under controlled conditions. Chassis dynamometer tests were conducted under four combinations: ambient temperatures of 25 °C and -7 °C, and unladen and fully loaded (1,000 kg) states. The results show that under low-temperature and full-payload conditions, the driving range decreased by up to 48.8 % compared to the certified range. Battery energy consumption increased by nearly 100 % in cold weather, and regenerative braking efficiency decreased by over 40 %, mainly due to limitations in battery charging acceptance. Payload also increased motor energy demand by up to 21 % while partially improving energy recovery. These findings emphasize that ambient temperature and payload significantly affect EV range and efficiency. They provide valuable insights for EV operators to accurately predict range and plan operations based on seasonal and loading conditions.

Key words : Electric freight vehicle(전기 화물자동차), Ambient temperature(외기온도), Load weight(적재 중량), Driving range(주행거리), Energy efficiency(에너지소비효율)

1. 서 론

전 세계적인 탄소 배출 저감 노력의 일환으로 전기자동차와 같은 무공해차의 보급이 빠르게 진행되고 있다.^{1,2)} IEA(International Energy Agency)에 따르면, 2023년 전 세계 전기자동차 신규 등록대수는 약 1,400만 대로 2018년 대비 6배 증가하였으며, 전체 자동차 판매 중 전기차 비중도 2 %에서 18 %로 크게 확대되었다.³⁾ 한국의 전기차 등록대수는 2017년 2만5,108대에서 2024년 68만 4,244대로 약 27배 증가하며 빠른 성장세를 보이고 있다. 그러나 전기승용차의 경우 배터리 화재에 대한 안전 우려 등을 통한 캐즘 현상과 전기 화물자동차의 경우 주행

거리에 대한 불안 문제 등이 전기차 보급 확대의 주요 장애 요인으로 지적되고 있다.^{4,5)} 특히 겨울철 저온 환경이나 적재 하중 증가 시 전기자동차의 주행거리가 크게 감소하는 문제가 지속적으로 제기되고 있다.^{6,7)}

외기온도는 전기차 성능에 영향을 미치는 주요 환경 요인 중 하나이다.⁸⁾ 전기자동차의 배터리로 많이 사용되고 있는 리튬이온 배터리는 온도가 낮아질수록 내부 저항이 증가하여 에너지 효율이 저하되고, 이에 따라 주행거리가 감소된다.^{9,10)} 최혜진과 송진근¹¹⁾의 연구에서는 시뮬레이션을 통해 배터리 온도 저하에 따른 내부 저항 증가 및 손실 에너지 증가를 분석하였으며, 내부 저항에 의

*Corresponding author, E-mail: suhanpark@konkuk.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.

한 손실 에너지는 0 °C에서 2.88 %, 30 °C에서 0.384 %로 약 4.54배의 차이를 확인하였다. 또한, Steinstraeter 등¹²⁾의 연구에 따르면, 차량 실내 난방 에너지 소모로 인해 전기차의 주행거리가 최대 31.9 % 감소하며, 저온 환경에서 회생제동 제한으로 인해 최대 21.7 %까지 감소할 수 있다고 보고하였다. 두 요인이 복합적으로 작용할 경우, 전체 주행거리는 최대 50 %까지 감소할 수 있는 것으로 나타났다.

적재 하중 또한 주행거리에 중요한 영향을 미치는 요인이다. 차량 중량 증가로 인한 구름 저항 및 가속 저항 상승으로 동일 거리 주행 시 더 많은 에너지가 요구된다. 장재우와 송진근¹³⁾의 연구에서는 전기승용차를 대상으로 무게 0 kg에서 300 kg까지 100 kg 단위로 증가시키며 고속주행 실험을 수행하였고, 이에 따라 전비가 각각 약 3.26 %, 5.4 %, 8.63 % 감소함을 확인하였다. 전기 화물자동차는 화물 운송을 주요 목적으로 하기 때문에, 적재 하중 변화가 주행거리에 미치는 영향은 승용차보다 더 클 것으로 예상된다.

현재까지 전기자동차의 주행거리 관련 연구는 주로 승용차를 중심으로 수행되었으며, 전기 화물자동차의 주행거리에 영향을 미치는 요인에 대한 체계적인 연구는 상대적으로 부족한 실정이다. 특히, 온도와 적재 하중이 동시에 작용할 때의 복합적 영향에 대한 연구는 더욱 제한적이다.

이에 본 연구에서는 전기 화물자동차를 대상으로, 외기온도 및 적재 조건이 주행거리에 미치는 영향을 실험적으로 분석하였다. 차대동력계 환경에서 상온(25 °C)과 저온(-7 °C), 공차와 최대 적재(1,000 kg) 조건을 조합하여 총 4가지 조건에 따른 영향을 비교 분석하였다. 이를 통해 실제 운행 환경에서의 주행거리 변화를 정량적으로 평가하고, 전기 화물자동차 사용자들의 운행 계획 수립 및 주행거리 예측에 기여할 수 있는 기초 자료를 제시하고자 하였다.

2. 시험 내용 및 방법

2.1 시험 차량 및 장비

본 연구에서는 국내 시장에서 보급률이 높은 소형 전기 화물자동차 모델을 시험 대상으로 선정하였다. 해당 차량은 58.8 kWh 용량의 리튬이온 배터리를 탑재하고 있으며, 후륜구동(2WD) 방식으로 구동된다. 주요 제원은 Table 1에 정리하였다.

시험 데이터는 IntrepidCS 社의 Value-CAN4 장비와 Vehicle Spy3 소프트웨어를 이용하여 취득하였다. 이전 연구에서 해당 CAN 장비의 정확성을 검증한 결과, 배터리 소모량 추정값의 오차가 약 0.2 % 이내로 나타나 데이터

Table 1 Specification of test vehicle

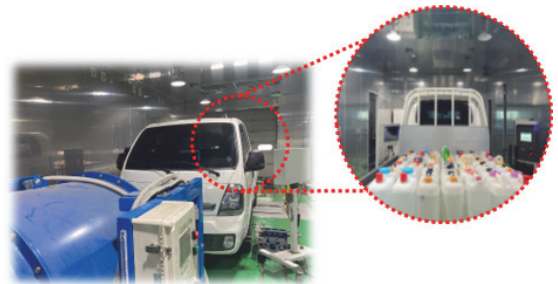
Vehicle		
Type	Small electric truck	
Fuel type	Electric	
Model year	2023	
Motor Max. torque	395 Nm	
Motor Max. power	135 kW	
Battery	Lithium ion battery (58.8 kWh)	
Battery voltage	327 V	
Weight	1,925 kg	
Certified energy consumption efficiency	Urban	3.1 km/kWh
	Motorway	3.6 km/kWh
	Combined	2.7 km/kWh
Certified range	211 km	

Table 2 Specification of CAN equipment

Category	Specification
Network interface	2x CAN FD channels
Dimensions (W x D x H)	51 × 33 × 13 mm
Weight	80 g
Power (Consumption)	USB (240 mA, 10 W)
Voltage range	5V DC
Temperature range	-40 to 85 °C



(a) Diagram of test vehicle and equipment connection



(b) Chassis dynamometer test setup

Fig. 1 Experimental setup for electric freight vehicle's driving range and energy efficiency evaluation

취득 신뢰성에 문제가 없음을 확인하였다.¹⁴⁾ Value-CAN4 장비의 상세 제원은 Table 2에 제시하였다. 장비는 차량

의 CAN(Controller Area Network) 통신망에 직접 연결하여 1 Hz 단위로 데이터를 수집하였으며, 시험 차량과 장비의 연결 개략도는 Fig. 1(a)에 나타내었다. 주요 측정 변수로는 차량 속도, 모터 속도 및 토크, 배터리 전압 · 전류 · SOC, 외기온도 등이 포함된다.

2.2 시험 모드

시험은 Fig. 1(b)와 같이 차대동력계를 활용한 통제된 실내 환경에서 수행하였다. 차대동력계는 실제 도로 주행 조건을 모사할 수 있도록 설계되어 있으며, 동일한 주행 사이클 내에서 외기온도 및 적재 하중 등 다양한 인자의 영향을 정밀하게 비교 가능하다.¹⁵⁾

본 연구에서는 Fig. 2에 제시한 전기자동차 시험 모드인 MCT(Multi-Cycle Test) 모드를 활용하였다. MCT 모드는 UDDS(도심주행), HWFET(고속도로주행), CSC(Constant Speed Cycle, 고속 정속주행)로 구성된 복합 주행을 2회 반복하며, 배터리 100% 충전 상태에서 완전 방전 시까지 시험을 진행하였다. CSC 구간은 105 km/h의 일정 속도로 주행하여 배터리 방전을 가속화하도록 설계되었으며, 두 번째 CSC는 전체 주행거리의 20% 이내로 설정하였다. 모든 실험 조건에서 동일한 MCT 모드를 적용하였다.

시험의 정확성 확보를 위해, 각 시험 시작 전 차량은 목표 온도(상온 25 °C, 저온 -7 °C)에서 최소 12시간 이상 안정화하였다. HVAC 시스템은 상온 조건에서는 작동하지 않았으며, 저온 조건에서는 차량의 최대 난방 설정인 27 °C, 8단으로 가동하였다. 이는 현재 국내 전기자동차 인증 절차에서 저온 환경 시험 시 적용되는 공식 기준을 준용한 것으로, 실제 겨울철 극한 운행 상황을 반영함과 동시에 객관적이고 공정한 성능 비교를 통해 소비자에게 신뢰할 수 있는 정보를 제공하기 위함이다.

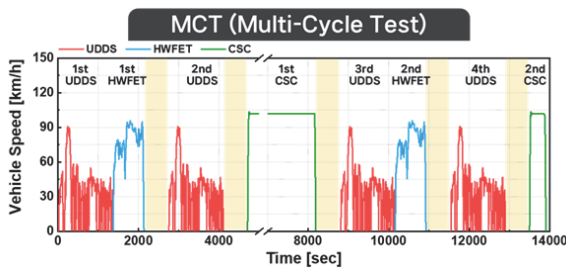


Fig. 2 Velocity profile of multi cycle test (MCT) mode

2.3 에너지 소모량 및 주행거리 계산 방법

취득한 시험 데이터를 바탕으로 모터 및 배터리의 에너지 소모량을 각각 산출하였다. 모터 구동 에너지는 모

터의 회전수와 토크 데이터를 활용하여 식 (1)로, 배터리 에너지는 전압과 전류 데이터를 활용하여 식 (2)로 계산하였다. 이때, 모터 토크 또는 배터리 전류가 음수로 측정된 구간은 회생제동이 작동한 것으로 판단하였으며, 회생제동에 의해 회수된 에너지는 별도로 계산하였다.

$$E_{motor} = \int_0^t \left(\frac{2\pi \times N_{motor}(t) \times T_{motor}(t)}{60} \right) dt \quad (1)$$

여기서, E_{motor} 는 모터 에너지 소비량 [W], N_{motor} 는 모터 회전속도 [RPM], T_{motor} 는 모터 토크 [Nm], t 는 주행 시간 [sec]을 나타낸다.

$$E_{battery} = \int_0^t (V_{pack}(t) \times I_{pack}(t)) dt \quad (2)$$

여기서, $E_{battery}$ 는 배터리 에너지 소비량 [Wh], V_{pack} 은 배터리 팩 전압 [V], I_{pack} 은 배터리 팩 전류 [A]를 나타낸다.

각 주행 사이클별 에너지 소모율은 식 (3)과 같이 해당 사이클의 총 에너지 소모량을 주행거리로 나누어 계산하였다.

$$ECdc_{cycle} = \frac{Edc_{cycle}}{D_{cycle}} \quad (3)$$

여기서, $ECdc_{cycle}$ 는 해당 주행 사이클의 단위 주행거리당 DC 방전 에너지 소비량 [kWh/km], Edc_{cycle} 는 해당 주행 사이클에서의 DC 방전 에너지 [kWh], D_{cycle} 은 해당 사이클에서의 총 주행거리 [km]를 의미한다.

SAE J1634 표준에 따라, 차량의 냉간 상태에서 시작하는 $UDDS_1$ 구간에 가중치를 부여하였고, $UDDS_{2-4}$ 및 HWFET 구간에도 각각의 가중치를 적용하여 차량의 복합 주행거리 산출에 반영하였다. 각 구간별 가중치 계산식은 식 (4) - (7)에 제시하였다.¹⁶⁾

$$K_{UDDS_1} = \frac{Edc_{UDDS_1}}{UBE} \quad (4)$$

여기서, K_{UDDS} 는 UDDS 사이클에 적용된 보정 계수 (Scaling factor), UBE는 사용 가능한 배터리 용량 [kWh]을 나타낸다.

$$K_{UDDS_2} = K_{UDDS_3} = K_{UDDS_4} = \frac{1 - K_{UDDS_1}}{3} \quad (5)$$

$$ECdc_{city} = (K_{UDDS_1} \times ECdc_{UDDS_1}) + (K_{UDDS_2} \times ECdc_{UDDS_2}) + (K_{UDDS_3} \times ECdc_{UDDS_3}) + (K_{UDDS_4} \times ECdc_{UDDS_4}) \quad (6)$$

$$ECdc_{highway} = \frac{ECdc_{HWFET_1} + ECdc_{HWFET_2}}{2} \quad (7)$$

최종 계산된 에너지 소모율과 시험 차량의 배터리 총 용량을 활용하여 1회 충전 시 주행 가능한 거리를 식 (8) 과 같이 계산하였다. 국내 전기자동차 인증 기준에 따라 복합 주행거리는 도심 55%, 고속도로 45%의 비율로 가중평균하여 식 (9)로 도출하였다.

$$R_{cycle} = \frac{UBE}{ECdc_{cycle}} \quad (8)$$

$$R_{comb} = 0.55 \times R_{city} + 0.45 \times R_{highway} \quad (9)$$

여기서, R_{cycle} 은 시험 차량의 주행거리 [km]를 나타낸다.

3. 시험 결과 및 고찰

3.1 주행 사이클별 에너지 소비 특성

본 연구에서는 UDDS 및 HWFET 사이클별 모터 소모량, 회생제동량, 배터리 소모량을 분석하여 외기온도 및

적재 하중 변화가 전기 화물자동차의 에너지 소비 특성에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다. Fig. 3에는 주행 사이클별 모터와 배터리의 회생제동 및 소모량 결과를 제시하였으며, 가중치를 적용하여 도출한 UDDS 및 HWFET 결과를 Table 3에 정리하였다. Fig. 3 및 Table 3에 제시된 회생제동 에너지는 모터와 배터리 기준으로 각각 산출하였다. 모터의 회생제동 에너지는 회생 구간의 토크 및 회전수를 기반으로 계산한 발전량이며, 배터리 기준은 전류가 음수로 측정된 구간의 전력 적분 값으로, 실제 배터리에 충전된 에너지를 나타낸다. 두 수치는 회생제동 시스템 내 전력 흐름 및 손실 특성을 비교 가능하다.

모터 소모량 분석 결과, 상온 공차 조건에서는 UDDS 1.527 kWh, HWFET 3.270 kWh로 나타났다. 최대 적재 시에는 각각 1.955 kWh, 3.665 kWh로 증가하여, 적재 하중 증가에 따라 모터 구동 에너지 요구량이 21.9%(UDDS 기준) 증가하였다. 저온 공차 조건에서는 UDDS 1.776 kWh, HWFET 3.771 kWh였으며, 저온 최대적재 조건에서는 UDDS 2.425 kWh, HWFET 4.446 kWh로 증가하였다. 특히, 저온 조건에서 적재 하중 증가 시 UDDS 기준 26.8%, HWFET 기준 15.2%의 에너지 증가가 추가로 요구되며, 두 조건의 영향을 복합적으로 받으며 증가 폭은 더욱 커지는 것을 확인하였다.

Table 3 Comparison of motor and battery energy consumption and recovery under UDDS and HWFET cycles

[kWh]	Motor regeneration		Motor consumption		Battery regeneration		Battery consumption	
	UDDS	HWFET	UDDS	HWFET	UDDS	HWFET	UDDS	HWFET
25 °C & No Load	0.717	0.187	1.527	3.270	0.620	0.169	2.109	3.970
25 & Max. Load	1.007	0.309	1.955	3.665	0.886	0.284	2.601	4.378
-7 °C & No Load	0.698	0.174	1.776	3.771	0.326	0.096	4.231	5.544
-7 °C & Max. Load	0.957	0.276	2.425	4.446	0.535	0.176	4.987	6.287

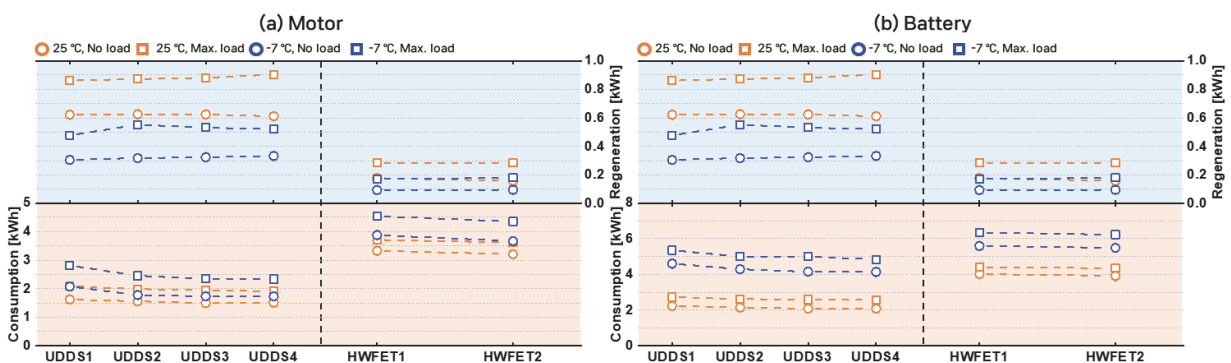


Fig. 3 Motor and battery energy consumption and regeneration by driving cycle (UDDS 1-4 and HWFET 1,2)

회생제동 회수량은 상온 공차 조건에서 UDSS 0.620 kWh, HWFET 0.169 kWh였으며, 최대 적재 시 UDSS 0.886 kWh, HWFET 0.284 kWh로 증가하였다. 이는 차량 중량 증가에 따라 운동에너지가 증가하고, 이에 따라 제동 시 회수 가능한 에너지가 절대적으로 늘어났기 때문으로 판단된다. 반면, 저온 공차 조건에서는 UDSS 0.326 kWh, HWFET 0.096 kWh로 감소하여, 상온 대비 각각 47.4%, 43.2% 수준으로 감소하였다. 저온 최대 적재 시에도 UDSS 0.535 kWh, HWFET 0.176 kWh로 상온 대비 여전히 낮은 회수량으로 나타났으며, 이는 저온 환경에서 배터리의 충전 수용 능력 한계와 회생제동 로직의 제한이 복합적으로 작용한 결과로 판단된다.^{17,18)}

그 결과, 총 배터리 소모량은 상온 공차 조건에서 UDSS 2.109 kWh, HWFET 3.970 kWh였으며, 상온 최대 적재 조건에서는 UDSS 2.601 kWh, HWFET 4.378 kWh로 증가하였다. 저온 공차 조건에서는 UDSS 4.231 kWh, HWFET 5.544 kWh, 저온 최대 적재에서는 UDSS 4.987 kWh, HWFET 6.287 kWh를 기록하였다. 저온 환경에서 배터리 소모량은 상온 대비 약 2배 수준으로 증가하였으며, 이는 모터 에너지 요구 증가뿐만 아니라, 히터, BMS 보조시스템 작동에 의한 추가 전력 소비가 주요 원인으로 판단된다.^{19,20)}

결과적으로, UDSS 구간에 비해 고속 주행 특성이 강한 HWFET 구간에서 에너지 소모가 일관되게 높았으며, 외기온도 저하와 적재 하중 증가는 모터 소비량 증가, 배터리 소모량 증가를 동시에 야기하여 전기 화물자동차의 전체 에너지 효율을 악화시키는 결과를 나타내는 것으로 판단된다.

3.2 외기온도 및 적재 하중별 에너지 소비율 비교

3.2.1 외기온도에 따른 에너지 소비 특성

외기온도 변화는 전기 화물자동차의 에너지 소비 및 주행거리 특성에 높은 영향을 미치는 요인으로 확인하였다. Table 3에 제시한 각 시험 조건별 결과를 각 사이클별 주행거리로 나누어 가중평균하였으며, Figs. 4 ~ 6은 각각 모터 소비율, 회생제동 회수율, 총 배터리 소비율 결과를 제시하였다.

상온 공차 조건에서는 모터 소비율이 0.1609 kWh/km였으나, 저온 공차 조건에서는 0.1863 kWh/km로 13.6% 증가하였다. 이는 저온 환경에서 배터리 출력 성능 저하로 동일한 구동 토크를 유지하기 위해 더 많은 전력이 필요했기 때문으로 판단된다. 회생제동 회수율은 상온 공차 0.0335 kWh/km에서 저온 공차 0.0178 kWh/km로 46.9% 감소하였다. 이는 저온 환경에서 배터리 충전 능력이 저하되어 회생제동 시스템의 회수율이 실질적으로 감소한

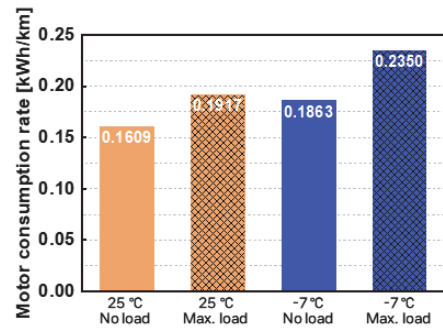


Fig. 4 Motor consumption rate of test vehicle

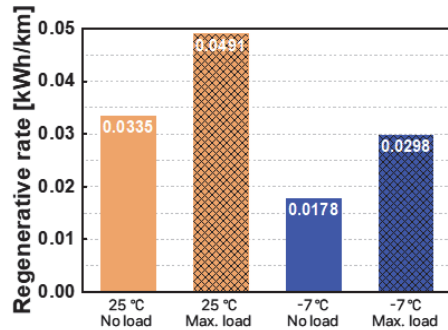


Fig. 5 Regenerative rate of test vehicle

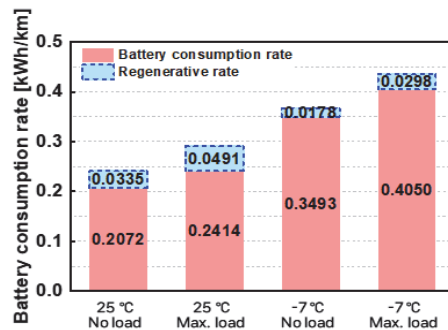


Fig. 6 Battery consumption rate of test vehicle

영향으로 판단하였다.^{21,22)}

총 배터리 소비율은 상온 공차에서 0.2072 kWh/km였으나, 저온 공차에서는 0.3493 kWh/km로 40.7% 증가하였다. 이는 에너지 소모가 증가하여 전체 시스템 효율이 저하되었음을 의미한다. 이러한 결과는 배터리 내부 저항 증가, 전력 변환 효율 저하, 회생제동 한계, HVAC 등 복합적인 요인이 작용하여 전체 시스템 효율을 저하시킨 것으로 판단된다.

한편, 저온 환경에서 회생제동 회수율 저하는 주로 배터리의 충전 수용 능력 저하와 BMS의 회생 전류 제한에 기인한다. 최근 선행 연구에 따르면, 배터리 팩 수준의 열관리 시스템 도입, 배터리 예열 전략(Pre-conditioning),

온도 기반 회생제동 전류 제한 완화 알고리즘 등 다양한 기술이 회생 효율 저하를 효과적으로 개선할 수 있는 방안으로 제시되고 있다. Zhang 등²³⁾의 연구에서는 배터리 예열 또는 주행 중 열관리 전략을 적용한 결과, -40 °C 환경에서도 약 2분 이내에 회생제동 성능이 상온 수준까지 복구됨을 실험적으로 확인하였다. 또한, US06 주행 사이클 시뮬레이션에서는 열관리 전략 적용 시 주행거리가 최대 49%까지 증가하는 효과가 나타났다. 아울러, 상용 전기차를 대상으로 한 SAE 연구²⁴⁾에서는 최적화된 열관리 시스템을 적용한 결과, 전체 에너지 효율이 약 3~9% 향상됨을 보고하였다. 이러한 선행 연구 결과는 향후 전기 화물자동차에 배터리 예열 시스템 및 온도 대응형 BMS 제어 전략이 적용될 경우, 저온 환경에서의 회생 회수율 저하 문제를 실질적으로 완화할 수 있음을 시사한다.

3.2.2 적재 하중에 따른 에너지 소비 특성

적재 하중 증가 또한 모터 및 배터리 에너지 소비 증가를 유발하는 주요 요인으로 확인하였다. Figs. 4~6의 결과에 따르면, 상온 조건에서 공차 대비 최대 적재 시 모터 소비 에너지는 0.1609 kWh/km에서 0.1917 kWh/km로 16.1% 증가하였다. 회생제동 회수율은 0.0335 kWh/km에서 0.0491 kWh/km로 31.8% 증가하였다. 반면, 회생제동 회수량 증가에도 불구하고, 전체 배터리 소비는 0.2072 kWh/km에서 0.2414 kWh/km로 14.2% 증가하여 최종 배터리 소비율은 증가하였다.

저온 조건에서는 적재에 따른 에너지 소비 증가 폭이 더욱 크게 나타났다. 저온 공차 대비 최대 적재 시 모터 소비량은 20.7% 증가하였으며, 회생제동 회수량은 40.3% 증가하였다. 배터리 최종 소비량은 0.3493 kWh/km에서 0.4050 kWh/km로 13.8% 증가하였다. 이는 적재 하중 증가에 따라 구름저항, 가속저항 증가가 에너지 소비를 증가시켰지만, 회생제동을 통한 에너지 회수 효과로 인해 주행거리 감소 폭은 외기온도 저하보다 상대적으로 작게 나타난 것으로 판단된다.

3.3 주행거리 결과 및 종합 비교

앞서 분석된 에너지 소비 효율 결과를 기반으로 각 조건별 1회 충전 주행거리를 산출하여 외기온도 및 적재 하중 변화에 따른 주행거리 감소 결과를 확인하였다. Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)에는 각각 주행거리 결과와 상온 공차 대비 주행거리 감소율을 제시하였다.

상온 공차 조건에서 주행거리는 283.7 km였으며, 상온 최대 적재 시에는 243.6 km로 14.1% 감소하였다. 저온 공차 조건에서는 168.3 km로 감소하여 40.7% 감소율을

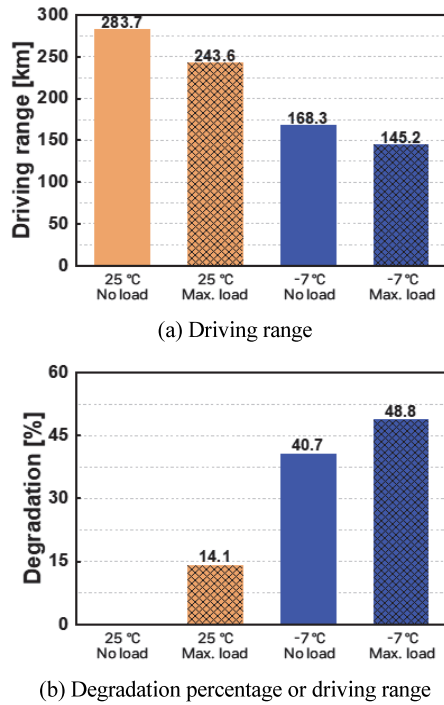


Fig. 7 (a) Estimated driving range under different temperature and load conditions, (b) Driving range degradation rate compared to baseline (25 °C, No Load)

기록하였으며, 저온 최대 적재 조건에서는 145.2 km로 약 48.8% 감소하였다.

외기온도 저하에 따른 주행거리 감소 폭은 적재 하중 증가에 의한 영향에 비해 약 2.9배 크며, 이는 외기온도가 적재 하중 대비 전기 화물자동차 주행 성능에 미치는 영향이 본질적으로 더 크다는 점을 시사한다. 또한, 저온과 적재 하중이 복합적으로 작용할 경우 큰 폭의 주행거리 감소가 발생하는 것을 정량적으로 확인하였다. 이러한 결과는 전기 화물자동차 운행 시 계절적 요인과 적재 조건을 종합적으로 고려하여 주행거리 예측 및 운행 전략을 수립해야 함을 보여주며, 특히 겨울철 및 최대 적재 운행 시 충분한 안전 주행거리 확보 및 충전 계획이 필요함을 시사한다.

한편, 본 연구에서는 HVAC 시스템의 설정을 온도 조건별로 고정하여 주행거리 특성 분석을 수행하였으나, 향후 난방 출력 조절, 배터리 예열 적용 여부, 배터리 온도 유지 전략 등 다양한 열관리 시스템 제어 방식에 따라 에너지 소비 효율 및 주행거리 변화를 실험적으로 규명하는 후속 연구가 가능할 것으로 판단된다. 본 연구의 결과는 이러한 실험 설계를 위한 참조 조건과 비교 기준을 제공한다는 점에서, 실차 기반 열관리 전략 최적화 연구의 기초 자료로서 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결론

본 연구는 소형 전기 화물자동차를 대상으로 외기온도와 적재 하중이 주행거리에 미치는 영향을 모터, 회생제동, 배터리 소모량 및 1회 충전 주행거리 관점에서 정량적으로 분석하였다. 차대동력계 시험을 통해 도출한 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 외기온도 저하는 주행거리 감소의 주요 원인으로 작용하였다. 저온(-7 °C) 환경에서 주행거리는 상온(25 °C) 대비 약 40.7 % 감소하여, 적재 하중 증가로 인한 감소율(14.1 %)보다 약 2.9배 높은 수준으로 나타났다.
- 2) 적재 하중 증가에 따라 구동계 에너지 소비가 증가하였으며, 최대 적재(1,000 kg) 시 모터 에너지 소비는 16.1 ~ 20.7 % 증가하였다. 이에 따라 전체적인 추진 에너지 요구량이 증가하여 배터리 소모량 역시 13.8 ~ 14.2 % 증가하였다. 한편, 적재 하중 증가로 인해 차량의 운동에너지가 커지면서 회생제동을 통한 에너지 회수량은 31.8 ~ 40.3 % 증가하였음에도 불구하고, 전체적인 에너지 소비가 증가함에 따라 시스템 효율은 저하되었다.
- 3) 저온 및 적재 하중이 복합적으로 작용할 경우, 주행거리가 최대 48.8 %까지 감소하였다. 이는 실제 운행 환경에서 외기온도와 적재 조건에 따라 주행 가능 거리가 크게 달라질 수 있음을 나타낸다. 따라서, 계절 및 하중 조건을 고려한 정확한 주행거리 예측과 운행 전략 수립이 필수적이다.

후 기

이 연구는 한국연구재단 중견연구후속지원사업(RS-2023-00208502)과 한국환경공단의 지원으로 수행되었다. 지원기관에 감사드립니다.

References

- 1) R. Soni, A. Dvivea and P. Kumar, "Carbon Neutrality in Transportation: In the Context of Renewable Sources," *International Journal of Sustainable Transportation*, Vol.19, No.1, pp.1-15, 2025.
- 2) M. Haghani, F. Sprei, K. Kazemzadeh, Z. Shahhoseini and J. Aghaei, "Trends in Electric Vehicles Research," *Transportation Research part D: Transportation and Environment*, Vol.123, 103881, 2023.
- 3) IEA, *Global EV Outlook 2024*, International Energy Agency, 2024.
- 4) J. Zatsarnaja, K. Reiter, M. Mehdizadeh, A. Nayum, and T. Nordfjaern, "Charged up with Peace in Mind: Unraveling the Factors of Range Anxiety among Norwegian Electric Vehicle Drivers," *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Vol.110, pp.15-28, 2025.
- 5) G. R. Lee, J. W. Jeong, K. H. Lee, S. H. Yoon and S. H. Park, "Study on Range and Energy Consumption Efficiency of Electric Passenger Vehicle under Real-Road Driving Conditions," *Transactions of KSAE*, Vol.31, No.5, pp.361-369, 2023.
- 6) Y. Tianchan, L. Xianting, W. Baolong and S. Wenxing, "Quantitative Analysis of Factors Contributing to Driving Range Degradation of Battery Electric Vehicles," *Applied Thermal Engineering*, Vol.250, Paper No.123520, 2024.
- 7) G. R. Lee, J. H. Park, S. H. Park and S. H. Yoon, "Study on the Necessity of Real-World Driving Tests for Passenger Electric Vehicles," *Int. J. Automotive Technology*, Vol.25, pp.1323-1330, 2024.
- 8) G. R. Lee, J. G. Song, Y. S. Lim and S. H. Park, "Energy Consumption Evaluation of Passenger Electric Vehicle Based on Ambient Temperature under Real-World Driving Conditions," *Energy Conversion and Management*, Vol.306, Paper No. 118289, 2024.
- 9) B. Simone, C. Silvia, D. Giovanni, L. Saverio and P. Luigi, "Aging Effect on the Variation of Li-Ion Battery Resistance as Function of Temperature and State of Charge," *Journal of Energy Storage*, Vol.50, Paper No.104658, 2022.
- 10) R. Haijun, S. Bingxiang, C. Andrew, Z. Tao, J. Jiuchun, H. Xitian, S. Xiao and G. Engy, "Optimal External Heating Resistance Enabling Rapid Compound Self-Heating for Lithium-Ion Batteries at Low Temperatures," *Applied Thermal Engineering*, Vol.200, 117536, 2022.
- 11) H. J. Choi and J. G. Song, "Analysis of Battery Energy Loss in Electric Vehicles Using Simulation Techniques in Diverse Driving Environments," *Transactions of KSAE*, Vol.32, No.6, pp.493-501, 2024.
- 12) M. Steinstraeter, T. Heinrich and M. Lienkamp, "Effect of Low Temperature on Electric Vehicle Range," *World Electric Vehicle Journal*, Vol.12, No.3, Paper No.115, 2021.
- 13) J. W. Jang and J. G. Song, "Comparative Analysis of Energy Consumption According to the Change of

- Curb Weight of Electric Vehicles in On-Road Driving,” Transactions of KSAE, Vol.32, No.10, pp.789–796, 2024.
- 14) G. R. Lee, J. G. Song, J. W. Han, Y. S. Lim and S. H. Park, “Study on Energy Consumption Characteristics of Passenger Electric Vehicle According to the Regenerative Braking Stages during Real-World Driving Conditions,” Energy, Vol.283, Paper No.128745, 2023.
 - 15) G. R. Lee, J. H. Yeon, N. W. Kim and S. H. Park, “A Comprehensive Methodology for Developing and Evaluating Driving Cycles for Electric Vehicles Using Real-World Data,” eTransportation, Vol.24, Paper No.100409, 2025.
 - 16) Light Duty Vehicle Performance and Economy Measure Committee, “Battery Electric Vehicle Energy Consumption and Range Test Procedure,” SAE International, 2021.
 - 17) H. Tianlong, Z. Biao and T. Yijie, “Theoretical Study on Energy Recovery Rate of Regenerative Braking for Hybrid Mining Trucks with Different Parameters,” Journal of Energy Storage, Vol.42, Paper No.103127, 2021.
 - 18) V. Khemka, A. Sagar and V. Srinivas, “A New Control Algorithm of Regenerative Braking Management for Energy Efficiency and Safety Enhancement of Electric Vehicles,” Energy Conversion and Management, Vol.276, Paper No.116564, 2023.
 - 19) A. Rabih, M. Charbel, N. D. Kim, J. G. Seo and S. Kevin, “Comparative Analysis of Thermal Management Systems in Electric Vehicles at Extreme Weather Conditions: Case Study on Nissan Leaf 2019 Plus, Chevrolet Bolt 2020 and Tesla Model 3 2020,” Energy Conversion and Management, Vol.332, Paper No.119706, 2025.
 - 20) J. G. Seo, V. Ram, N. D. Kim, R. Aymeric and S. Kevin, “Effects of Ambient Temperature on Electric Vehicle Range Considering Battery Performance, Powertrain Efficiency, and HVAC Load,” Energy Conversion and Management, Vol.326, Paper No.119493, 2025.
 - 21) Z. Ivan, S. Viktor, B. Zeljko and K. Dubravko, “Algorithm with Temperature-Dependent Maximum Charging Current of a Supercapacitor Module in a Tram Regenerative Braking System,” Journal of Energy Storage, Vol.36, Paper No.102378, 2021.
 - 22) L. Xuebo, Z. Xuan, X. Shiwei, W. Lulu, H. Jingjing, S. Peilong and L. Meiyong, “A Novel Braking Energy Management Strategy for Battery Electric Trucks with Hydraulic Retarder on Long Downhill,” Energy, Vol.322, Paper No.135684, 2025.
 - 23) G. Zhang, S. Ge, X. G. Yang, Y. J. Leng, D. Marple and C. Y. Wang, “Rapid Restoration of Electric Vehicle Battery Performance while Driving at Cold Temperatures,” Journal of Power Sources, Vol.371, pp.35–40, 2017.
 - 24) D. Rehm, J. Krost, M. Meywerk and W. Czarnetzki, “Optimization-Based Battery Thermal Management for Improved Regenerative Braking in CEP Vehicles,” SAE 2024-01-2974, 2024.