*Transactions of KSAE, Vol. 34, No. 6, pp.679-689 (June, 2026)*

Check for updates

Copyright © 2026 KSAE / 247-07
pISSN 1225-6382 / eISSN 2234-0149
DOI http://dx.doi.org/10.7467/KSAE.2026.34.6.679

# 전기자동차의 회생제동 임계속도 및 외기온도 조건에 따른 에너지 효율 특성 연구

최 지 원[1] · 이 광 렬[2] · 김 형 준[3] · 박 수 한*[4]

건국대학교 기계항공공학부[1] · 건국대학교 대학원 기계공학과[2] · 국립환경과학원 모빌리티환경연구센터[3] · 건국대학교 기계로봇자동차공학부*[4]

# Study on Energy Efficiency Characteristics of Electric Vehicles based on Regenerative Braking Threshold Speed and Ambient Temperature

Jiwon Choi[1] · Gwangryeol Lee[2] · Hyung Jun Kim[3] · Suhan Park*[4]

[1]*School of Mechanical and Aerospace Engineering Konkuk University, Seoul 05029, Korea*
[2]*Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Konkuk University, Seoul 05029, Korea*
[3]*Mobility Environmental Research Center, National Institute of Environmental Research, 42, Hwangyeong-ro, Seo-gu, Incheon 22689, Korea*
[4]*School of Mechanical, Robotics, and Automotive Engineering, Konkuk University, Seoul 05029, Korea*
***(Received 10 December 2025 / Revised 10 January 2026 / Accepted 29 January 2026)***

**Abstract :** As electric vehicle (EV) technologies advance, precise evaluation and prediction of key performance indicators, such as energy efficiency and driving range, have become increasingly important. Vehicle performance is influenced by various factors. Among which the regenerative braking system and ambient temperature are critical variables that directly affect energy consumption. In this study, an EV simulation model was developed using AVL CRUISE M software to analyze the effects of minimum regenerative braking speed and temperature variations on energy consumption.

The results showed that increasing the minimum speed reduced energy recovery, leading to a 0.97 % decrease in overall efficiency and driving range at 25 km/h compared to the baseline of 10 km/h. Regarding ambient temperature variations, the preheating scenario exhibited the highest efficiency, demonstrating up to a 50 % improvement at -20 °C compared to non-preheated conditions. These findings confirm that battery and motor preheating are crucial in maintaining vehicle performance under low-temperature conditions. Furthermore, the study's simulation-based methodology can be extended to vehicles with different specifications and is expected to serve as a practical framework for analyzing EV performance and strategizing to enhance energy efficiency under diverse driving environments.

**Key words** : Electric vehicle(전기자동차), Simulation-based analysis(시뮬레이션 기반 해석), Regenerative braking(회생제동), Temperature environment variation(온도 환경 변화), Energy efficiency(에너지 효율), Range(충전 주행거리)

## 1. 서 론

전기자동차의 핵심 성능 지표인 에너지 소비 효율과 1회 충전 주행거리는 정밀한 평가와 예측이 요구되고 있으며,[1] 이러한 성능들은 주행 환경과 운전자 습관을 비롯한 다양한 요인에 영향을 받는다.

Al-Wreikat[2]의 연구에서는 공격적인 주행에 따라 에너지 소비가 최대 16 % 증가하며, 도로 경사 상승 시, 최대 50 %의 에너지 소비가 증가하고 3 % 하강 시, 회생제동으로 인해 최대 80 %의 에너지 소비가 감소한다고 밝혔다.

서지구[3]의 연구에서는 외기온도 -18 °C에서는 22 °C 대비 UBE가 최대 7.7 % 감소하였으며, 모터의 에너지가 증가하고 회수 에너지가 감소하여 총에너지 소비가 최대 157 %까지 증가한다고 밝혔다. 최민기[4]의 연구에서는 차량 중량을 15 % 증량 시 약 4.8 %의 배터리 에너지 소비가 늘어났다고 밝혔고, 급가속 및 급감속이 증가하는 경우 에너지 소비 효율이 최대 20.8 % 감소한다고 밝혔다. 이광렬[5]의 연구에서는 회생제동 단계 증가 시에는 회생 효율과 전체 에너지 소비 효율이 향상되어, 가장 낮

*A part of this paper was presented at the KSAE 2025 Fall Conference and Exhibition
*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.

은 단계에서는 6.56 km/kWh의 효율을, 가장 높은 단계인 I-Pedal에서는 7.63 km/kWh의 효율을 가지는 것으로 나타났으며, 에너지 소비를 최대 41.7 % 절감할 수 있다고 밝혔다.

전기자동차의 에너지 소비 특성에 영향을 미치는 다양한 요인 중에서 특히, 회생제동 시스템과 외기온도는 에너지 효율에 직접적인 영향을 미치는 핵심 변수이다. 감속 시 운동에너지를 전기에너지로 변환하여 에너지를 회수할 수 있는 회생제동은 불필요한 가감속을 줄여 실제 에너지 소비 효율을 개선할 수 있다고 나타났다.[5,6] 또한, 배터리와 모터 성능에 영향을 미치는 외기온도가 낮아질 경우, 구동계와 배터리에서 더 높은 에너지가 요구되어 전반적인 에너지 효율은 저하된다고 나타났다.[7,8]

따라서 본 연구에서는 전기자동차의 회생제동 임계속도와 온도 환경 변화에 따른 에너지 소비 특성을 분석하였다. AVL 社의 CRUISE M 소프트웨어를 이용하여 국내 시장 점유율이 높은 E-GMP 플랫폼 기반의 준중형 SUV 전기자동차를 기반으로 차량 동역학 기반 시뮬레이션 분석 모델을 수립하였다. 이후 모델과 차대동력계 주행 데이터와의 비교 및 검증을 통해 모델의 신뢰성을 확보하였으며 모델을 기반으로 WLTP 모드에서 회생제동 임계속도와 온도 환경 변화에 따른 에너지 소비 특성을 분석하였다.

## 2. 시험 내용 및 방법

### 2.1 시뮬레이션 모델

본 연구에서는 AVL 社의 CRUISE M 소프트웨어를 이용하여 시뮬레이션 모델을 구축하였으며, 국내 시장 점유율이 높은 E-GMP 플랫폼 기반의 준중형 SUV 전기자동차를 기준으로 모델을 구축하였다. 해당 차량은 72.6 kWh 용량의 리튬이온 배터리를 탑재하고 있으며, 후륜 구동 방식으로 구동되고 싱글 모터의 특징을 지니고 있으며 구축한 모델은 Fig. 1에 나타내었다. 차량의 중량 및 길이와 같은 주요 제원은 Table 1에 정리하였으며, 시뮬레이션 모델에서 입력한 변수에 대한 설명은 Fig. 2에 나타내었다. 차량 기본 제원은 제조사에서 공시한 공식 기술 제원을 활용하였으며, 동력 및 주행 특성 데이터는 차대동력계 시험 데이터를 기반으로 도출하였다.

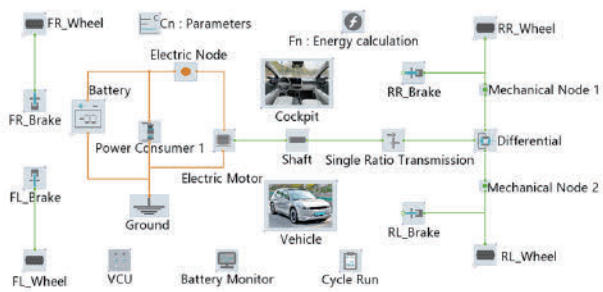



Fig. 1 Schematic diagram of simulation model

Table 1 Specification of vehicle

| | |
|---|---|
| Curb weight | 1920 kg |
| Gross weight | 2220 kg |
| Test weight | 1995 kg |
| Front projection area | 2.58 $m^2$ |
| Wheelbase | 3000 mm |
| Distance from hitch to front axle | 3500 mm |
| Height of support point at bench test | 500 mm |
| Distance of gravity center | 1500 mm |
| Height of gravity center | 500 mm |
| Height of the hitch | 500 mm |

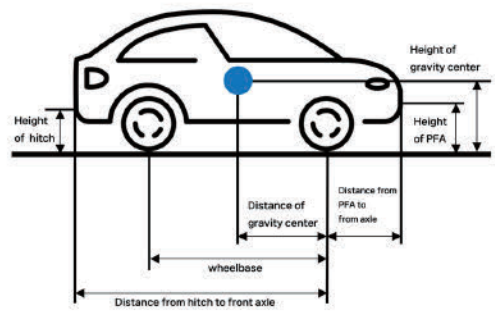



Fig. 2 Schematic diagram of vehicle

#### 2.1.1 배터리 모델

전기자동차의 에너지 소비 특성에 중요한 영향을 끼치는 구성요소인 배터리에 대한 모델링을 상세하게 진행하였다. 주요 입력 변수로는 Fig. 3과 Fig. 4와 같이 내부저항(Ohmic resistance), 개방 회로 전압(OCV)이 존재하며 배터리 관련 제원으로는 Table 2와 같다. 관련 배터리 제원의 입력에는 차대동력계 시험에서 측정한 데이터를 이용하였다. 내부저항, 개방 회로 전압(OCV)의 경우, 기존 Battery SOC에 대해서만 변화하는 데이터를 사용하였지만, 온도 환경 변화에 따른 에너지 소비 특성의 분석을 위해 온도 변화에 따른 보정 데이터를 입력하였으며 이는 Fig. 5 및 Fig. 6과 같다. 제시된 Fig. 5와 Fig. 6의 데이터는 온도 변화에 따른 배터리의 전기화학적 특성 변화를 반영하기 위해 보정한 데이터를 사용하였다. 내부저항의 경우, 배터리 내부의 전해질 활성도 및 이온 전도도는 온도가 낮아질수록 감소하여 내부저항이 급격히 증가하는 특성을 반영하기 위해 기준 온도(25 ℃)에서의 저항값을 바탕으로, 각 온도 조건별 내부저항 보정

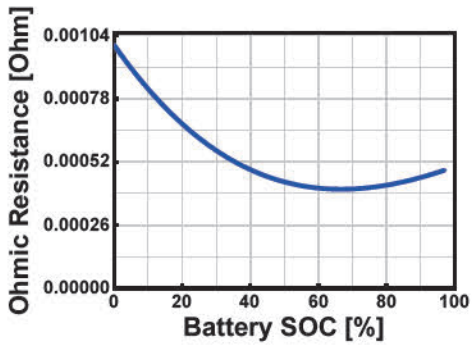



Fig. 3 Ohmic resistance of battery model

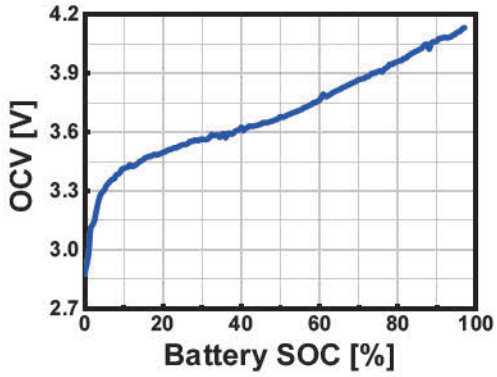



Fig. 4 Open circuit voltage of battery model

Table 2 Specification of battery

| | |
|---|---|
| Minimum voltage | 2.5 V |
| Maximum voltage | 4.44 V |
| Connection resistance | 0.001 Ohm |
| Max voltage | 800 V |
| Rated voltage | 653 V |
| Capacity | 111.2 Ah |
| Energy | 72.6 kWh |
| Weight | 450 kg |
| Cell | 180 |
| Initial SOC | 97 % |

계수를 적용하여 시뮬레이션에 반영하였다. 개방 회로 전압(OCV)의 경우 역시 온도에 따른 전극 전위의 변화를 고려해야 하므로, 온도 계수를 적용하여 각 운전 온도에서의 전압 특성을 보정하여 사용하였다.

#### 2.1.2 모터 모델

전기자동차의 에너지 소비 특성과 회생제동 시스템에 직접적으로 영향을 끼치는 구성요소인 모터를 상세하게

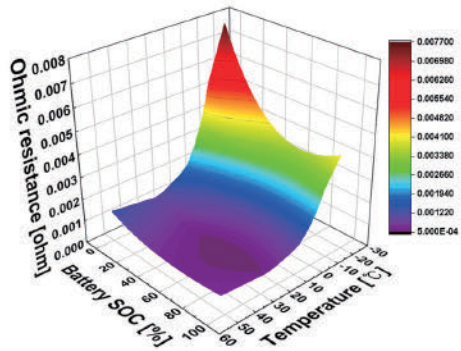



Fig. 5 Ohmic resistance of battery model with respect to temperature

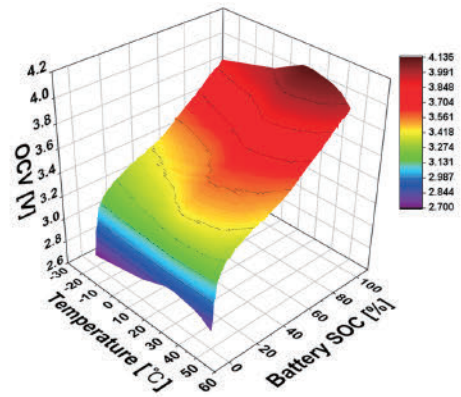



Fig. 6 Open circuit voltage of Battery model with respect to Temperature

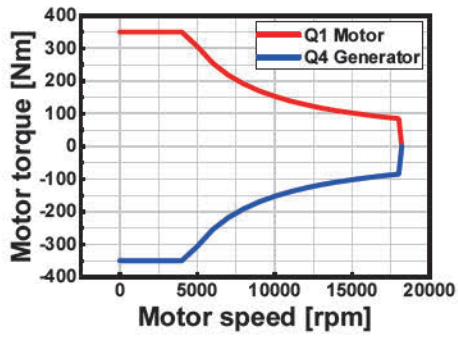



Fig. 7 Full load of motor model

모델링하였다. 모터의 경우 PMSM 모델을 사용하였으며 주요 입력 변수로는 Motor efficiency Map, Full Load가 존재하며, 이는 Fig. 7 및 Fig. 8과 같다. 또한, Q1 Motor (Speed $\geq$ 0, Torque $\geq$ 0), Q4 Generator (Speed $\geq$ 0, Torque $\leq$ 0)를 사용하여 모델링을 진행하였다.

관련 모터 제원의 입력에는 차대동력계 시험에서 측정한 데이터를 이용하였으며, 온도 조건에 따른 보정 데

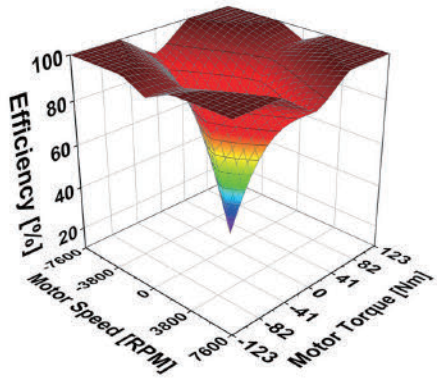



Fig. 8 Efficiency map of motor model

Table 3 Specification of motor

| | |
|---|---|
| Max speed | 18000 RPM |
| Max power | 160 Kw |
| Max torque | 350 Nm |
| Rated voltage | 400 V |
| Temperature | Change |

이터 입력에는 온도 조건이 상이한 차대동력계 측정 데이터와 시뮬레이션 결과와의 비교 및 검증을 통해 유사성이 높은 보정 데이터를 이용하였으며 모터 제원의 경우 Table 3과 같다.

본 연구의 Fig. 8에 적용된 모터 효율맵과 관련 제원은 공인 시험 기관에서 실제 차량의 구동 모터를 대상으로 수행한 단품 시험 데이터를 기반으로 작성하였다, 수치상 제원과 효율맵 상의 운전 영역이 일부 상이해 보일 수 있으나, 이는 실제 구동 환경에서의 전압 변동 및 인버터 손실 등이 포함된 실측 데이터임을 확인하였다.

신뢰성 있는 데이터 확보를 위해 실제 차량 구동 시스템의 토크 및 회전수 전 영역을 포함하는 효율 데이터를 활용하였다.

본 연구에서는 외기온도 변화가 차량 전비에 미치는 지배적인 요인을 배터리의 전기화학적 특성 변화(내부저항 증가 및 가용 용량 감소)로 설정하였다. 또한, 전동기 구동 온도는 외기온도뿐 아니라 냉각 시스템 및 운전부하에 따라 복잡하게 변화하므로, 본 모델에서는 전동기 효율을 효율맵 기반의 운전점 변화로 국한하여 반영하였다. 즉, 전동기의 저온 효율 특성의 배제는 전비 저하의 주요 원인을 배터리 측면에서 보수적으로 평가하기 위함이다.

#### 2.1.3 샤시 모델

전기자동차의 샤시 모델을 상세하게 모델링을 진행하였으며, 구성요소로는 차량의 제원과 휠 그리고 브레이크, 감속기, Cockpit이 존재한다. 샤시 모델의 제원은 Table 4와 같으며, 관련 제원으로는 차량의 기본 제원들을 이용하였으며, 차대동력계 시험에서 측정한 데이터를 이용하였다. 주행저항의 경우, 코스트다운 시험을 통해 차량이 주행 중 받게 되는 저항을 측정하여 차대동력계 시험 시에 반영한다. 주행저항의 경우, 구름 저항(Rolling resistance), 회전 손실(Rotational losses), 공력 부하(Aerodynamic load)로 나타나게 되며 이는 식 (1)과 같은 2차 다항식 형태로 나타낼 수 있다.[9]

Table 4 Specification of chassis

| | |
|---|---|
| Reference load (Front) | 4403.464 N |
| Reference load (Rear) | 5382.011 N |
| Static rolling radius | 383.25 mm |
| Friction coefficient | 0.85 |
| Number of gears forward | 1 |
| Number of gears reverse | 1 |
| Transmission ratio | 7.941 |
| Transmission efficiency | 97 % |
| Brake Friction coefficient | 0.35 |
| Brake piston surface | 2200 $mm^2$ |
| Brake efficiency | 95 % |

본 연구에서는 차대동력계에서의 코스트다운 시험을 통해 획득한 주행저항 값을 사용하였다.

$$\begin{pmatrix} F_0 : Rolling\ resistance \\ F_1 : Rotataional\ losses \\ F_2 : Aerodynamic\ load \end{pmatrix} \quad (1)$$

#### 2.1.4 VCU 모델

전기자동차의 회생제동 시스템이 발생하는 임계속도를 제어하기 위해 브레이크 토크와 관련한 식을 설정하고 반영하였다. 주행 시 요구되는 토크인 총 요구 토크와 유압제동 토크 그리고 회생제동 토크와의 관계는 식 (2)와 같으며, 이를 통해 회생제동 시스템의 작동 여부를 반영할 수 있도록 설정하였다.

$$\text{총 요구 토크} = \text{유압제동 토크} + \text{회생제동 토크} \quad (2)$$

또한, 차량의 속도에 따른 회생제동 토크 값은 차대동력계 시험 데이터를 통해 입력하였으며, 그 값은 Fig. 9에 나타내었다. 또한 온도 환경 변화에 따른 에너지 소비 특성 분석을 위해 회생제동 토크 값을 온도 변화에 맞게 보정한 데이터를 입력하였고 이는 Fig. 10에 나타내었다.

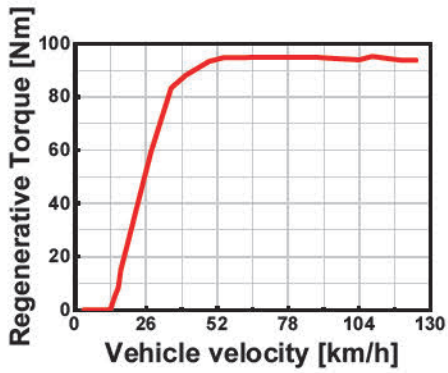



Fig. 9 Regenerative Torque according to vehicle velocity

### 2.2 시뮬레이션 모델 검증

전기자동차 모델의 타당성 검토 및 신뢰성 확인을 위해 차량의 차대동력계 주행 데이터와 시뮬레이션 결과를 WLTP 모드와 Cold-FTP 모드에서 검증을 진행하였다. 해당 시험 온도(25 °C, -7 °C)는 WLTP 규격에서 정의하는 표준 상온 조건인 25 °C와 미국 EPA의 Cold-FTP에서 규정하는 저온 시험 조건인 -7 °C를 기준 온도로 하였다.

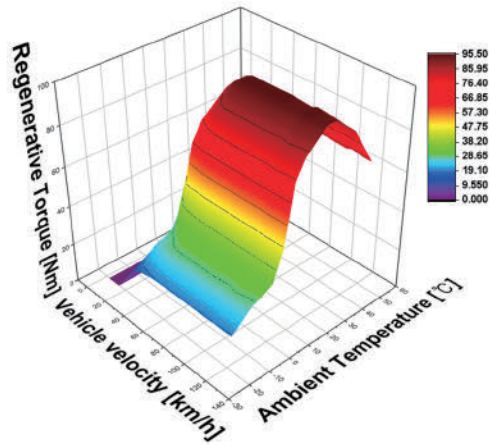
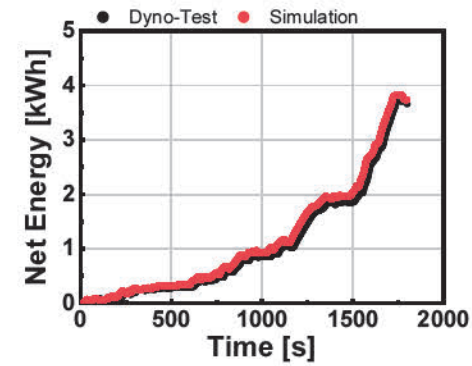



Fig. 10 Regenerative torque according to vehicle velocity and ambient temperature

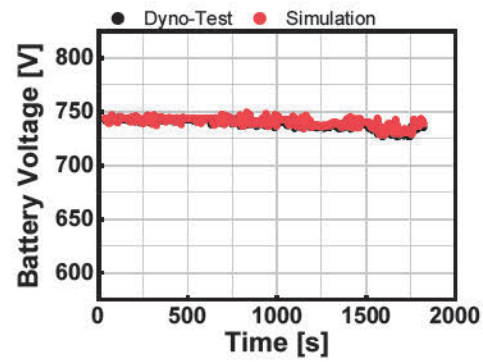
본 모델의 검증을 위해 수행된 실제 차대동력계 시험 역시 위 표준 규격에 따라 각각 25 °C, -7 °C에서 시험을 진행하였다. 에너지 소비 특성 분석을 위해 배터리 전류와 전압을 비교하였으며, 이외에도 에너지 소모와 회생제동을 통한 에너지 회수와 관련이 있는 누적 소모 에너지(Net Energy)를 비교하였다. 모델 검증과 관련한 그래프는 Fig. 11과 Fig. 12에 나타내었다.

#### 2.2.1 WLTP 모드 검증

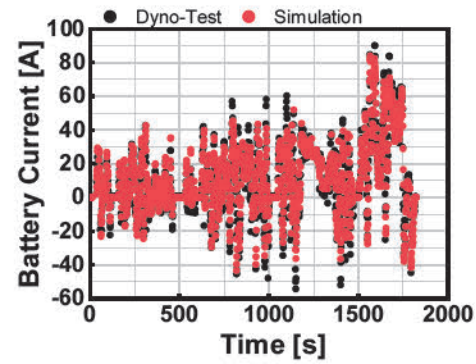
Fig. 11의 경우 WLTP 모드(25℃)에서 시뮬레이션 모델과 수행된 실제 차대동력계 시험 데이터와의 검증 결과이며, Fig. 11(a), Fig. 11(b), Fig. 11(c)는 순서대로 누적 소모 에너지, 배터리 전압, 배터리 전류의 검증 결과이다.




(a) Net Energy




(b) Battery Voltage

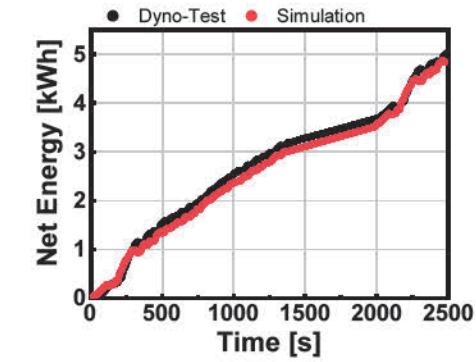



(c) Battery Current

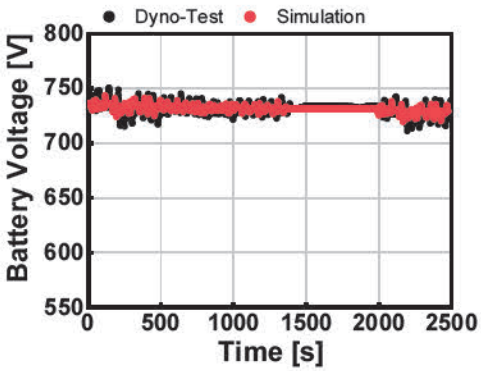
Fig. 11 (a) Validation of net energy in WLTP mode (25 °C), (b) Validation of battery voltage in WLTP mode (25 °C), (c) Validation of battery current in WLTP mode (25 °C)

#### 2.2.2 Cold-FTP 모드 검증

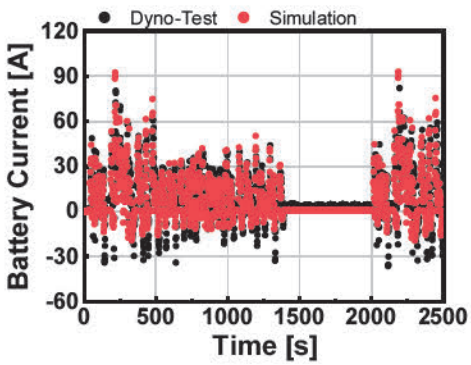
Fig. 12의 경우 Cold-FTP 모드(-7 °C)에서 시뮬레이션 모델과 수행된 실제 차대동력계 시험 데이터와의 검증 결과이며, Fig. 12(a)~(c)는 순서대로 누적 소모 에너지, 배터리 전압, 배터리 전류의 검증 결과이다. 구축한 시뮬레이션 모델과 실제 수행한 차대동력계 주행 데이터와의 검증을 진행하였으며, WLTP 모드와 Cold-FTP 모드에서 차대동력계 주행 데이터와 시뮬레이션 결과를 토대로 검증한 결과, 실제 차대동력계 주행 테스트에서 진행한 환경인 상온(25 °C)과 저온(-7 °C) 환경 모두에서 주행 중의 배터리 전압과 전류의 경향이 유사한 모습으로 나타났으며. 누적 소모 에너지(Net energy)가 오차범위 3 % 이내로 만족함을 확인하여 에너지 소비 특성을 위한 모델의 신뢰성을 입증하였다.




(a) Net energy




(b) Battery voltage




(c) Battery current

Fig. 12 (a) Validation of net energy in Cold-FTP mode (-7 °C), (b) Validation of battery voltage in Cold-FTP mode (-7 °C), (c) Validation of battery current in Cold-FTP mode (-7 °C)

### 2.3 시험 모드

전기자동차의 에너지 소비 특성 분석을 위해 사용한 시험 모드는 실제 주행 데이터 기반 저속, 중속, 고속 등 주행 조건이 다양하여 현실적인 전비 평가가 가능한 WLTP 모드에서 시뮬레이션을 진행하였으며, WLTP 모드의 속도 프로파일은 Fig. 13과 같다.

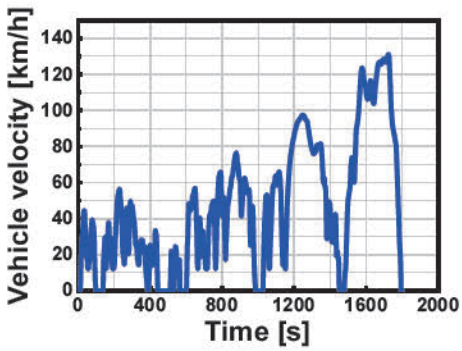



Fig. 13 Velocity profile of WLTP mode

### 2.4 에너지 소비 특성 계산 방법

전기자동차의 에너지 소비 특성 중 흔히 전비라고 일컬어지는 에너지 소비 효율과 1회 충전 주행거리 산출을 위해 시뮬레이션 결과를 이용해 계산을 진행하였다. 배터리의 전류와 전압을 이용해 주행 중 사용한 에너지 소모량을 계산하였으며, 배터리 전류가 음수로 측정된 구간을 회생제동이 일어난 구간으로 판단하여 회생제동을 통해 회수된 에너지 또한 산출하였다. 배터리 전류가 양(+)의 값일 때는 차량 구동을 위한 에너지 소비를 의미하며, 감속 시 전류가 음(-)의 값으로 나타나면 회생제동에 의해 배터리가 충전됨을 의미한다.

배터리 에너지 계산식은 식 (3)에 제시되어 있으며, 배터리 전류를 기반으로 한 배터리 소비량과 회생제동에 의한 회수량은 각각 식 (4)와 (5)에 나타내었다. 또한 전체 주행 사이클 동안의 순에너지(Net energy)는 소비된 에너지에 회생제동으로 회수한 에너지를 더하여 계산하며, 이에 대한 식 (6)에 나타내었다.[10] 에너지 소비 효율은 주행거리를 순에너지로 나누어 계산하였으며, 주행

거리는 전기자동차의 배터리 용량에 에너지 소비 효율을 곱하여 산출하였다. 이에 해당하는 수식은 식 (7)과 식(8)에 제시하였다.

### 2.5 회생제동 임계속도 조정 방법

회생제동 임계속도란 회생제동이 발현될 수 있는 최소의 속도를 의미한다.[11] 즉, 기존 차량의 임계속도인 10 km/h의 경우로 부연 설명을 진행하면, 예를 들어, 100 km/h로 주행하던 차량이 서서히 속도를 줄이면서 10 km/h까지는 회생제동으로 에너지 회수가 가능하지만, 10 km/h 아래의 속도로 내려가게 되면 회생제동의 발현이 불가능하여 에너지 회수가 이루어질 수 없다. 회생제동 임계속도에 따른 에너지 소비 특성 분석의 경우, 임계속도를 0 km/h부터 5 km/h의 간격으로 25 km/h까지 조정하며 분석을 진행하였다.

### 2.6 온도 환경 변화 분석 방법

실제 주행 환경에서 배터리와 모터의 온도는 단순히 외기온도에 종속되지 않고 여러 요인에 의해 변화한다.[12] 따라서, 본 연구에서는 시뮬레이션을 통해 배터리와 모터의 온도를 단순히 외기온도와 동기화하는 것이 아니라, 다양한 시나리오로 분리하여 시뮬레이션을 진행하였다.

모든 시나리오는 WLTP 모드에서 수행하였으며 외기온도는 상온(25 °C)에서 저온(-20 °C)까지 5 °C 간격으로 조정해가며 분석을 진행하였다. 설정한 시나리오는 총 4가지로 시나리오 1의 경우에는 외기온도와 배터리 온도 그리고 모터 온도 모두를 외기온도인 $T_{Amb}$와 동일하게 설정한 경우이며, 온도 환경 변화의 기본 조건으로 비교 기준이 되는 시나리오이다. 시나리오 2는 주행 초반을 가정한 시나리오로서, 외기온도를 $T_{Amb}$로 설정한 후, 배터리 온도는 $T_{Amb}$ + 5 °C, 모터 온도는 $T_{Amb}$ + 10 °C로 설정하였다.

시나리오 3의 경우에는 주행 중반을 가정한 시나리오로서 외기온도를 $T_{Amb}$로 설정한 후, 배터리 온도는 $T_{Amb}$ + 10 °C, 모터 온도는 $T_{Amb}$ + 20 °C로 설정하였다. 시나리오 4의 경우에는 주행 전 차량의 사전 예열을 가정한 시나리오이다. 외기온도는 $T_{Amb}$로 설정한 후, 배터리 온도는 25 °C, 모터 온도는 35 °C로 고정시켰다. 온도 환경 변화에 따라 설정한 시나리오에 대한 Table 5에 제시하였다.

본 연구에서 설정한 시나리오별 온도 상승폭 설정의 경우, 실제 전기차 주행 시 배터리와 전동기는 내부 저항 및 동손 등에 의한 발열로 온도가 상승한다. 선행 연구에 따르면,[13-16] 전기차는 도심 또는 혼합 주행 조건에서 약 20~30분 이상 주행할 경우 배터리 온도가 주위 온도 대비 약 5-15 °C 상승할 수 있으며, 고부하 주행이나 반복적인 가/감속 조건에서는 20 °C 이상의 온도 상승이 발생할 수 있음이 보고되고 있다. 또한 모터 및 인버터의 경우 상대적으로 작은 열용량과 높은 손실 밀도로 인해 배터리보다 더 빠르고 큰 온도 상승이 발생할 수 있는 것으로 알려져 있다. 다만 실제 차량에서의 배터리 및 모터 온도 상승 속도는 주행 사이클, 출력 요구 조건, 냉각 시스템 제어 전략, SOC 상태 등 다양한 요인에 따라 달라질 수 있기에, 본 연구에서 설정한 $T_{Amb}$ + 10 °C 및 +20 °C 조건은 특정 주행 시간의 고정값이 아니라, 주행 중 시스템 온도가 안정화 단계에 진입했을 때의 대표적인 운전 영역을 시나리오화하여 분석을 진행하였다.

하지만 실제 전기자동차 주행 시, 주행 지속에 따라 시스템 온도는 60 °C 이상으로 상승할 수 있다. 다만, 본 연구에서는 저온 환경에서의 초기 주행 및 워밍업 단계에서 발생하는 에너지 손실 특성을 분석하는 데 초점을 맞추었으며, 시스템 온도가 평형 상태에 도달하기 전의 과도기적 전비 특성을 파악하여, 특정 온도 조건이 회생제동 임계속도 결정에 미치는 독립적인 영향을 분석하고자 하였다.

$$Battery\ Energy\,[W] = Battery\ Voltage\,[V] \times Battery\ Current\,[A] \tag{3}$$

$$Battery\ Consumption\,[Wh] = Battery\ Voltage\,[V] \times Battery\ Current\,[A] \times Time\,[h]\ (Battery\ Current > 0) \tag{4}$$

$$Regenerative\ Energy\,[Wh] = Battery\ Voltage\,[V] \times Battery\ Current\,[A] \times Time\,[h]\ (Battery\ Current < 0) \tag{5}$$

$$Battery\ Energy\ Consumption\,[Wh] = Battery\ Consumption\,[Wh] + Regenerative\ Energy\,[Wh] \tag{6}$$

$$Energy\ Efficiency\,[km/kWh] = Trip\ Distance\,[km] / Net\ Energy\,[kWh] \tag{7}$$

$$Driving\ Range\,[km] = Energy\ Efficiency\,[km/kWh] \times Battery\ Capacity\ of\ fully\ charged\ EV\,[kWh] \tag{8}$$

Table 5 Scenario with respect to temperature

| Scenario | Ambient temperature | Battery temperature | Motor temperature |
|---|---|---|---|
| ① | $T_{Amb}$ | $T_{Amb}$ | $T_{Amb}$ |
| ② | $T_{Amb}$ | $T_{Amb}$ + 5 °C | $T_{Amb}$ + 10 °C |
| ③ | $T_{Amb}$ | $T_{Amb}$ + 10 °C | $T_{Amb}$ + 20 °C |
| ④ | $T_{Amb}$ | 25 °C | 35 °C |

## 3. 시험 결과 및 고찰

### 3.1 회생제동 임계속도 조정에 따른 에너지 소비 특성 분석

회생제동 임계속도를 0-25 km/h까지 5 km/h의 간격으로 조정하여 분석한 결과, 에너지 소비 효율과 1회 충전 주행거리는 0-10 km/h에서 가장 높은 값이 도출되었고 회생제동 임계속도를 높게 설정할수록 차량의 성능은 점차 낮아지는 모습을 보였다. 시뮬레이션 결과는 Fig. 14와 Fig. 15에 나타냈으며, 결과는 Table 6에 요약해 제시하였다. 시험 차량의 실제 회생제동 임계속도인 10 km/h로 설정한 경우, 에너지 소비 효율은 5.990 km/kWh, 1회 충전 주행거리는 434.9 km로 나타났다. 또한 0-10 km/h의 저속 구간에서는 차량의 운동에너지 자체가 매우 작아 회생제동으로 회수할 수 있는 에너지가 절대적으로 작아지기에 동일한 에너지 소비 효율과 1회 충전 주행거리가 나타남을 확인하였다.

회생제동 임계속도를 높게 설정할수록 차량의 성능은 점차 낮아져, 임계속도를 25 km/h로 설정한 경우, 에너지 소비 효율은 5.932 km/kWh, 1회 충전 주행거리는 430.7 km로 약 0.97 % 감소한 모습이 나타났다. 이를 통해, 모델링 차량의 기존 회생제동 제어 로직으로 알려진 10 km/h의 임계속도에서 최적의 성능을 보이는 것을 확인하였다.

분석 결과를 통해 주요 에너지 소비 특성인 에너지 소비 효율과 1회 충전 주행거리가 가장 높은 0-10 km/h 영역에서의 임계속도 설정이 가장 합리적으로 보이며, 회생제동을 통한 미세한 승차감까지 고려했을 시, 10 km/h의 제어 속도인 경우가 가장 적합하다고 판단되었다. 회생제동 임계속도 차이에 의한 에너지 소비 효율과 1회 충전 주행거리의 경우 약 0.97 %로 비교적 작은 차이에도 불구하고 회생제동 임계속도는 에너지 소비 효율뿐 아니라, 실제 차량 제어 로직 설계 시 회생제동의 개시 시점, 제동력 분배, 그리고 운전자 체감 제동 응답성 및 승차감에 간접적인 영향을 미칠 수 있는 중요한 제어 인자이다. 따라서 회생제동 임계속도 설정은 실제 차량 제어 전략 관점에서 활용될 수 있으며, 저속 구간에서의 제동 응답특성 및 승차감에도 영향을 미칠 수 있고 실제 전

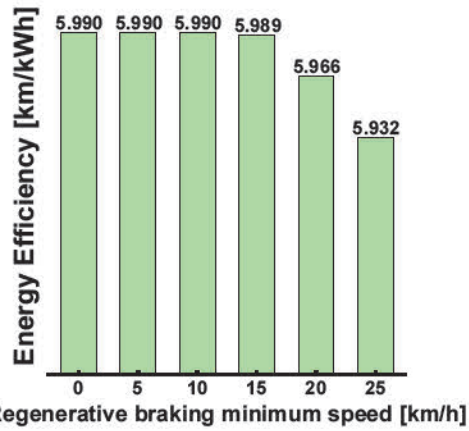



Fig. 14 Energy efficiency with respect to regenerative braking minimum speed

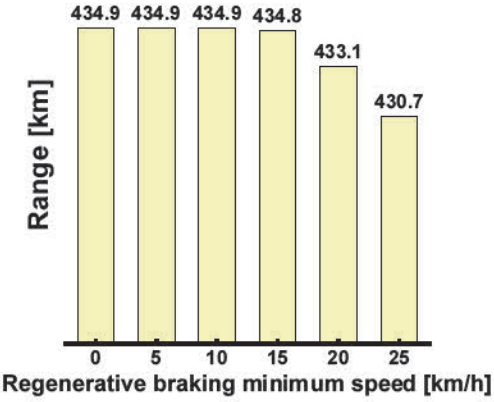



Fig. 15 Range with respect to regenerative braking minimum speed

Table 6 Summary of energy consumption characteristics with respect to regenerative braking minimum speed

| Min speed | Energy consumption efficiency | Driving range |
|---|---|---|
| 0 km/h | 5.990 km/kWh | 434.9 km |
| 5 km/h | 5.990 km/kWh | 434.9 km |
| 10 km/h | 5.990 km/kWh | 434.9 km |
| 15 km/h | 5.989 km/kWh | 434.8 km |
| 20 km/h | 5.966 km/kWh | 433.1 km |
| 25 km/h | 5.932 km/kWh | 430.7 km |

기자동차 제어 로직 설계 및 운행 전략 수립에 참고 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

또한 임계속도 설정은 회생제동(전기적 제동)에서 유압 제동(기계적 제동)으로 전환되는 제동 협조 제어 구

간의 선형성에 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 너무 높은 임계속도는 제동력의 불연속성을 유발하여 운전자의 이질감을 키울 수 있으며, 너무 낮은 속도는 제동 시스템의 제어 응답 속도 한계로 인해 승차감을 저해할 수 있다.

### 3.2 온도 환경 변화에 따른 에너지 소비 특성 분석

온도 환경 변화에 따른 에너지 소비 특성을 시뮬레이션을 통해 분석한 결과, 시나리오 1의 25 ℃에서는 6.473 km/kWh로 타 시나리오와 비교해 최대 9.4 %의 에너지 소비 효율 차이를 보이며 전체 시나리오 중, 가장 높은 에너지 소비 효율을 보였다. 하지만, 저온으로 갈수록 에너지 소비 효율이 급격히 감소하는 경향을 확인하였으며, -20 °C에서는 3.457 km/kWh로 타 시나리오 대비 최대 50 %의 효율 차이를 보이며 전체 시나리오 중, 가장 낮은 에너지 소비 효율을 보였다. 시나리오 2와 3은 각각 배터리의 최적 작동온도로 알려진 20-25 °C에서[17] 6.414 km/kWh, 6.278 km/kWh의 가장 높은 에너지 소비 효율을 보였고, 20-25 °C를 기점으로 온도가 더 높아질수록 에너지 소비 효율이 감소하는 것을 확인하였다. 시나리오 4에서는 0 °C 미만의 저온 조건에서 전체 시나리오 중 가장 높은 에너지 소비 효율을 보였고, -20 °C에서는 5.191 km/kWh로 나타나,다른 시나리오 대비 최대 50 %의 효율 차이를 보이며 배터리와 모터의 사전 예열이 저온 조건에서 차량의 성능에 중요한 요소임을 확인하였다. 시뮬레이션 결과는 Table 7에 요약하여 제시하였으며, 결과에 대한 그래프는 Fig. 16에 제시하였다.

Table 7 Summary of Energy efficiency in scenario with respect to ambient temperature

| km/kWh | ① | ② | ③ | ④ |
|---|---|---|---|---|
| 25 °C | 6.473 | 6.312 | 5.867 | 6.315 |
| 20 °C | 6.331 | 6.414 | 6.030 | 6.280 |
| 15 °C | 6.092 | 6.393 | 6.240 | 6.240 |
| 10 °C | 5.731 | 6.200 | 6.278 | 6.152 |
| 5 °C | 5.183 | 5.647 | 5.891 | 5.768 |
| 0 °C | 4.790 | 5.195 | 5.548 | 5.512 |
| -5 °C | 4.496 | 4.946 | 5.350 | 5.454 |
| -10 °C | 4.167 | 4.723 | 5.111 | 5.413 |
| -15 °C | 3.828 | 4.409 | 4.832 | 5.305 |
| -20 °C | 3.457 | 4.059 | 4.570 | 5.191 |

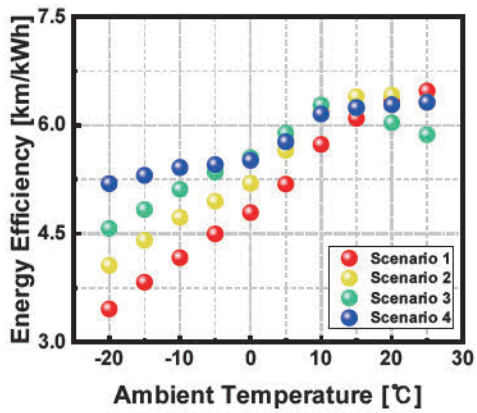



Fig. 16 Energy efficiency characteristics in scenario with respect to ambient temperature

### 3.3 저온 환경에서의 에너지 소비 효율 분석

전기자동차의 회생제동 임계속도와 사전 예열이 에너지 소비 효율에 미치는 영향을 분석하고자 저온 환경(-20 ℃)에서 분석을 진행하였다. 에너지 소비 효율 및 1회 충전 주행거리에 차이를 보인 회생제동 임계속도 10-25 km/h 구간을 대상으로, 사전 예열 유무에 따른 효율을 비교 분석하였다. 그 결과는 Fig. 17과 같다. 저온 환경(-20 °C)에서 회생제동 임계속도가 10 km/h로 동일한 경우, 에너지 소비 효율 차이는 약 33.4 %로 나타났으며 회생제동 임계속도 변화에 따른 효율 차이는 약 0.2-0.9 % 수준으로 저온 환경에서의 에너지 소비 효율에는 사전 예열 여부가 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.[18]

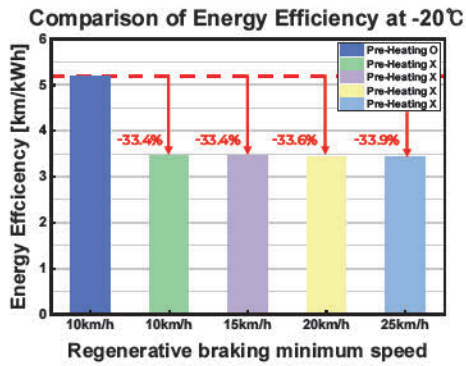



Fig. 17 Comparison of energy efficiency at -20 °C in respect to regenerative braking minimum speed and pre- heating

## 4. 결 론

본 연구에서는 AVL 社의 CRUISE M 소프트웨어를 이용하여 국내 시장 점유율이 높은 E-GMP 플랫폼 기반의 준중형SUV 전기자동차를 바탕으로 구축한 시뮬레이션 모델을 이용해 회생제동 임계속도와 외기온도, 배터리

온도, 모터 온도 등의 다양한 온도 환경 변화에 따른 에너지 소비 특성을 분석하였다. 검증된 모델을 바탕으로 시뮬레이션을 통해 도출된 주요 결론은 다음과 같다.

1) 회생제동 임계속도 조정에 따라 에너지 소비 특성을 분석한 결과, 0-10 km/h의 저속 구간에서는 차량의 운동에너지 자체가 매우 작아 회생제동으로 회수할 수 있는 에너지가 절대적으로 작아지기에 에너지 소비 효율과 1회 충전 주행거리가 각각 5.990 km/kWh, 434.9 km로 동일한 결과를 보였다. 회생제동을 통한 미세한 승차감 측면을 고려한다면 10 km/h의 제어 속도인 경우가 가장 적합하다고 판단된다.
2) 온도 환경 변화에 따른 에너지 소비 특성 분석 결과, 모든 시나리오에서 배터리의 최적 작동 온도로 알려진 20-25 ℃에서 가장 높은 에너지 소비 효율을 보였으며, 각각의 값은 시나리오 순서에 따라 6.473, 6.414, 6.278, 6.315 km/kWh의 값을 보였다.
3) 사전 예열을 가정한 시나리오 4의 경우 상온에서는 차이가 뚜렷하지 않지만, 저온 영역으로 갈수록 최대 50 %의 에너지 소비 효율 차이를 보였다. 이를 통해 낮은 온도로 인해 겨울철 급감하는 전기자동차의 효율을 높이기 위해서는 사전 예열 단계가 필요함을 입증하였다.
4) 저온 환경(-20 ℃)에서 회생제동 임계속도 조정에 따른 에너지 소비 효율 차이는 최대 0.9 %로 나타났으며 사전 예열에 따른 효율 차이는 약 33.4 %로 나타나 저온 환경에서의 전기자동차 성능 향상을 위해서는 사전 예열 여부가 더 큰 영향을 미쳤다.
5) 본 연구를 통해 구축한 전기자동차 시뮬레이션 모델을 활용하여 회생제동 임계속도 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 전기자동차 성능 분석 및 효율 개선 전략 수립의 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 후 기

이 논문은 한국연구재단 중견연구후속지원사업(RS-2023-00208502)과 국립환경과학원 모비리티환경연구센터의 연구(NIER-2022-04-02-043)지원으로 수행되었습니다.

## References

1) J. G. Seo, “Component-Level Energy Consumption and Range Analysis of Battery Electric Vehicles Under Urban and Highway Driving Conditions,” Applied Thermal Engineering Part D, Vol.274, Paper No.126797, 2025.
2) Y. Al-Wreikat, C. Serrano, C. Serrano and J. R. Soder, “Driving Behaviour and Trip Condition Effects on the Energy Consumption of an Electric Vehicle Under Real-World Driving,” Applied Energy, Vol.297, Paper No.117096, 2021.
3) J. G. Seo, R. Vijayagopal, N. D. Kim, A. Rousseau and K. Stutenberg, “Effects of Ambient Temperature on Electric Vehicle Range Considering Battery Performance, Powertrain Efficiency, and HVAC Load,” Energy Conversion and Management, Vol.326, Paper No.119403, 2025.
4) M. G. Choi, J. P. Cha and J. G. Song, “Impact of Lightweighting and Driving Conditions on Electric Vehicle Energy Consumption: In-Depth Analysis Using Real-World Testing and Simulation,” Energy, Vol.323, Paper No.135746, 2025.
5) 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.
6) E. M. Szumska, “Regenerative Braking Systems in Electric Vehicles: A Comprehensive Review of Design, Control Strategies, and Efficiency Challenges,” Energies, Vol.18, No.10, Paper No.2422, 2025.
7) J. G. Seo and J. P. 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, Vol.345, Paper No.120372, 2025.
8) 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.
9) J. H. Yeon, D. H. Park, Y. H. Lee, H. I. Sung, Y. S. Lim, J. T. Lee and N. W. Kim, “Prediction of Driving Range of Electric Vehicle Based on Simulation: Focusing on the IONIQ5,” Transactions of KSAE, Vol.31, No.4, pp.275-282, 2023.
10) 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.
11) S. Heydari, P. Fajri, M. Rasheduzzaman and R. Sabzehgar, “Maximizing Regenerative Braking Energy

Recovery of Electric Vehicles Through Dynamic Low-Speed Cutoff Point Detection," IEEE Transactions on Transportation Electrification, Vol.5, No.1, pp.262-270, 2019.

12) K. S. Garud and M. Y. Lee, "Thermal Management Characteristics of Electric Vehicle Driving Motor with Oil Spray Cooling Based on Spray Locations and Oil Types," Applied Thermal Engineering, Vol.248, Paper No.123234, 2024.
13) D. Jangid and G. A. Prasad Rao, "Transient Thermal Evaluation of Electric Vehicle Batteries Based on Different Vehicle Driving Cycles," Journal of Thermal Science and Engineering Application, Vol.18, No.1, Paper No.011009, 2026.
14) P. Asef, M. Milan, A. Lapthorn and S. Padmanaban, "Future Trends and Aging Analysis of Battery Energy Storage Systems for Electric Vehicles," Sustainability, Vol.13, Paper No.13779, 2021.
15) V. K. S. Chauhan and P. K. Koorata, "Multidimensional Investigation of Thermal Behavior of High-Power Electric Vehicle Motor During On-Road Driving Conditions Through Electromagnetic, Thermal, and Drive Cycle Analysis," Computational Thermal Sciences, Vol.16, No.5, pp.43-66, 2024.
16) X. Feng, M. Ouyang, X. Liu, L. Lu, Y. Xia and X. He, "Thermal Runaway Mechanism of Lithium-Ion Battery for Electric Vehicles: A Review," Energy Storage Materials, Vol.10, pp.246-267, 2018.
17) S. Li, H. Zhang, D. A. Misul, F. Miretti, M. Acquarone, N. Ding, D. Ni, N. Hou, Y. He, Y. Zhang and Y. Sun, "Battery Temperature Anomaly Early Warning for Electric Vehicles Under Real Driving Conditions Using a Temporal Convolutional Network," eTransportation, Vol.25, Paper No.100445, 2025.
18) J. W. Choi, G. R. Lee and S. H. Park, "Impact of Minimum Regenerative Braking Speed and Ambient Temperature on Energy Consumption Characteristics of Electric Vehicle," KSAE Autumn Conference and Exhibition Proceedings, pp.89-90, 2025.