Copyright © 2023 KSAE / 209-05 pISSN 1225-6382 / eISSN 2234-0149 DOI http://dx.doi.org/10.7467/KSAE.2023.31.4.275

시뮬레이션 기반 전기자동차 1회 충전 주행거리 예측 및 IONIQ5 시험 성능 기반 검증

연 제 휘¹⁾·박 도 현¹⁾·이 윤 호¹⁾·성 혜 인¹⁾·임 윤 성²⁾·이 종 태²⁾·김 남 욱^{*1)}

한양대학교 기계공학과 BK21 4단계 ERICA-ACE센터¹⁾·국립환경과학원 교통환경연구소²⁾

Prediction of Driving Range of Electric Vehicle Based on Simulation: Focusing on the IONIQ5

Jehwi Yeon¹⁾ · Dohyun Park¹⁾ · Yunho Lee¹⁾ · Hyein Sung¹⁾ · Yunsung Lim²⁾ · Jong-Tae Lee²⁾ · Namwook Kim^{*1)}

¹⁾Department of Mechanical Engineering and BK21 FOUR ERICA-ACE Center, Hanyang University, Gyeonggi 15588, Korea ²⁾Transportation Pollution Research Center, National Institute of Environmental Research, 42 Hwangyeong-ro, Seo-gu, Incheon 22689, Korea

(Received 7 December 2022 / Revised 21 December 2022 / Accepted 26 December 2022)

Abstract: Electric vehicles are gaining attention as eco-friendly vehicles because they do not generate exhaust gas the tailpipe. Recently, technology related to electric vehicles has been rapidly developing with the advances in battery and motor performance. As the number of electric vehicles released in the market continues to increase, government-affiliated institutions are requiring technology to predict the driving range of electric vehicles based on simulation to perform certification tasks efficiently. This study covers the simulated driving range of electric vehicles. We have shown an estimation of battery and motor parameters based on the MCT test data and detailed modeling of electric vehicles was conducted. We will verify the test results and simulation results using the MCT test data of Hyundai Motor's IONIQ5.

Key words: Electric vehicle(전기자동차), Driving range(주행거리), Simulation-based analysis(시뮬레이션 기반 해석), Performance analysis(성능 해석), Battery equivalent circuit(배터리 등가 회로), Parameter estimation(파라미터 추정)

1. 서 론

전기자동차 1회 충전 주행거리는 전기자동차 에너지소비효율 측정 방법에 따라 전기에너지가 소모되어 주행 시험이 종료되는 시점까지의 거리를 말한다. 1.2) 전기자동차의 수요가 증가함에 따라 1회 충전 주행거리에 대한 대중의 관심이 높아지고 있는 상황 속에서, 환경부와같은 정부기관에서는 자동차 제작사에서 전기자동차 인증을 위해 제출한 1회 충전 주행거리 수치 및 제작사 자체 시험 결과를 검토하고 있다. 한편, 자동차 제작사는 기후 변화에 선제적으로 대응하고자 탄소 중립을 위한노력을 진행하고 있고, 현대자동차는 2040년 내 순차적으로 주요 시장 신차의 전면 전동화 전환 계획을 세우고 있다. 3 전세계에서 지속적으로 전동화 차량 및 전기자동

차의 출시와 연구 개발을 활발하게 진행하고 있지만, 전기자동차의 1회 충전 주행거리와 관련된 연구는 시험 방법 및 영향 인자에 대한 분석이 대부분인 상황이다. 1.2.4-6) 한편, 출시 및 인증을 신청하는 전기자동차가 증가하게됨에 따라 정부기관에서는 다수의 차량에 대해 효율적으로 인증을 진행하기 위한 시뮬레이션 기반 1회 충전주행거리 해석 프로세스의 필요성이 제기되고 있다.

본 연구에서는 전기자동차의 상세 제원을 기반으로 1회 충전 주행거리 시뮬레이션을 진행하기 위해 필요한모델을 구성하고, 차대 동력계 시험을 통해 수집된 전기자동차 시험 데이터를 분석하여 시뮬레이션 모델에 반영하기 위한 파라미터를 추출하였다. 본 논문의 2장에서전기자동차 1회 충전 주행거리 시뮬레이션을 진행하기

^{*}Corresponding author, E-mail: nwkim@hanyang.ac.kr

[&]quot;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.

위한 모델 구성 방안에 대해 설명하고, 3장에서 연구 활용 차량 현대자동차 IONIQ5의 시험 데이터를 통한 배터리 및 모터의 파라미터 분석 과정에 대해 설명하였다. 4장에서는 1회 충전 주행거리와 전비(에너지 소비 효율)에 대해 연구 활용 차량의 시험 결과와 시뮬레이션 해석결과를 비교한 내용을 설명하였다. 마지막으로 5장에서 본 논문을 통해 도출한 결론을 제시했다.

2. 전기자동차 시뮬레이션 모델 구성

시뮬레이션을 통해 전기자동차 1회 충전 주행거리를 해석하기 위한 필수적인 요소인 배터리와 모터, 섀시 등에 대한 모델링이 필요하며, 이는 전기자동차의 1회 충전 주행거리에 직접적인 영향을 미치는 구성 요소로써 상세한 수준의 모델링이 요구된다. 4.7.8) 본 연구의 진행을 위해 MATLAB/Simulink 소프트웨어를 활용하여 후륜 기반 전기자동차의 각 구성요소별 모델링을 진행하였고, 동력과 에너지 분석에 용이하여 효과적인 전체 시스템성능 분석이 가능한 Effort-Flow 기반의 Port-based 모델링 기법을 사용했다. 모델링한 전기자동차 성능 해석 모델의 구성도는 Fig. 1과 같다. 본 장에서는 배터리 모델, 모터 모델, 섀시 모델에 대해 상세하게 설명하였다.

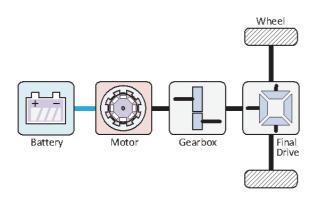


Fig. 1 Signal flow for electric vehicle model

2.1 배터리 모델

전기자동차 1회 충전 주행거리에 중요한 영향을 끼치는 구성 요소 중 하나인 배터리의 거동을 표현하기 위한 상세 모델링을 진행했다. Fig. 2와 같이, 배터리 모델에서 입력 변수(Input variable)는 배터리의 출력 전류, 출력 변수(Output variable)는 배터리의 출력 전압과 SOC(State of Charge)로 두었다. 성능 해석을 진행하고자 하는 차량의 배터리 제원에 따라 배터리 모델에 상세 파라미터를 입력하여 시뮬레이션을 진행하였다. 본 연구에서는 전기자동차에서 대표적으로 사용되는 Li-ion(리튬 이온) 배터리의 거동을 비교적 정확하게 모사할 수 있는 1차

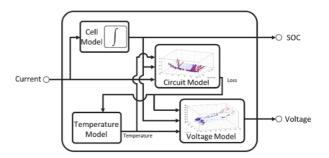


Fig. 2 Battery model schematic and input/output variables

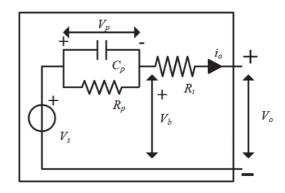


Fig. 3 PNGV battery equivalent circuit model

등가 회로 모델 형태의 PNGV(Partnership for a New Generation of Vehicles) 배터리 모델을 사용했다. 913 PNGV 모델은 RC(Resistor Capacitor)회로가 함께 구성되어 Li-ion 배터리의 과도 상태 응답 및 활성 손실 (Activation loss)을 표현하기 위해 적합한 모델로 Fig. 3과 같다. PNGV 배터리 등가 회로 모델의 주요 파라미터는 개방 전압(Open circuit voltage) V_s , 내부 저항(Internal resistance) R_i , 분극 저항(Polarization resistance) R_p , 분극 커패시터(Polarization capacitor) C_p 로 식 (1) \sim (4)와 같으면 배터리 SOC 및 온도에 따른 함수로 나타낼 수 있다. $^{7.9.14-16}$

$$V_s = f_1(SOC, T_{bat}) \tag{1}$$

$$R_i = f_2(SOC, T_{bat}) (2)$$

$$R_p = f_3(SOC, T_{bat}) (3)$$

$$C_p = f_4(SOC, T_{bat}) (4)$$

식 (5) ~ (8)은 1차 상미분 방정식 형태를 가지는

PNGV 배터리 등가 회로 모델의 구성 방정식이다. 식(1) ~ (4)에서 나타낸 배터리의 SOC 및 온도에 따른 함수 간 에 관계를 확인할 수 있다.

$$C_p \frac{dV_p}{dt} + \frac{V_p}{R_p} = i_o \tag{5}$$

$$V_s - V_c - i_o R_o = V_o \tag{6}$$

$$V_b = V_o + i_o R_o \tag{7}$$

$$SOC = \frac{1}{C_b} \int i_o dt \tag{8}$$

2.2 모터 모델

전기자동차의 동력을 발생시키는 구동 모터의 거동을 나타내기 위한 모델의 입출력 변수는 Fig. 4와 같다. 모터 의 요구 토크(Motor demand torque), 모터의 속도(Motor speed), 인버터 입력 전압(Inverter input voltage)이 입력 변수이고, 인버터의 효율을 포함한 파워 전환 효율 (Power conversion efficiency), 모터의 출력 토크(Motor output torque), 인버터 입력 전류(Inverter input current)가 출력 변수로 구성된다.^{4,8)}

시뮬레이션을 진행할 차량 모터 상세 제원을 통해 인 버터 효율이 함께 고려된 모터 효율맵을 스케일링 하여 모델에 적용할 수 있도록 구성하였다. 모터의 기계적 출 력 P_{mech} , 모터의 전기적 출력 P_{elec} , 모터의 회전 속도 S_{mot} , 모터 토크 T_{mot}의 관계는 식 (9), (10)에서 확인할 수 있다.

$$P_{mech} = S_{mot} \times T_{mot} \tag{9}$$

$$P_{elec} = P_{mech} \times eff(S_{mot}, T_{mot})^{k}$$
where, $k = \begin{cases} -1 & P_{mech} \ge 0\\ 1 & P_{mech} < 0 \end{cases}$ (10)

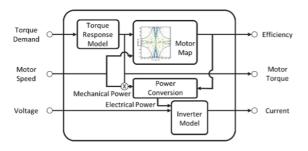


Fig. 4 Motor model schematic and input/output variables

2.3 섀시 모델

코스트다운(Coastdown) 시험을 통해 차량이 실제 주 행 중 받게 되는 저항을 측정하여 차대 동력계 시험 시에 반영하게 되고, 이는 구름 저항(Rolling resistance)과 회전 손실(Rotational losses), 공력 부하(Aerodynamic load)가 표현된 식 (11)과 같이 2차 다항식 형태로 나타낼 수 있 다. 17,18) 본 연구에서 다루는 시뮬레이션 모델에서도 마 찬가지로 후륜 기반 전기자동차가 주행 중에 받게 되는 부하 및 손실을 모델에서 구현하였다. 차량 내부에는 변 속기 및 구동계 손실(Transmission and drivetrain losses). 구동 휠 저항, 구동 휠 브레이크 저항이 존재하며, 차량 시험을 진행하는 차대 동력계에서는 공기 저항과, 비구 동 휠 저항, 비구동 휠 브레이크 저항을 구현한다. 18) 따라 서, 식(12)~(14)와 같이 주행 부하를 세분화하여 시뮬레 이션에 반영하였다.

Total force =
$$F_0 + F_1V + F_2V^2$$
 (11)
where, $\begin{cases} F_0: Rolling \ resistance \\ F_1: Rotational \ losses \\ F_2: Aerodynamic \ load \end{cases}$

Target coefficient:
$$F_x = L_x + D_x$$
 (12)

Dyno set coefficient:
$$D_x = A_x + R_x$$
 (13)

Vehicle loss coefficient:
$$L_x = T_x + R_x$$
 (14)

where,
$$\begin{cases}
T: Transmission and drivertrain losses \\
A: Aerodynamic losses \\
R: Rolling resistance
\end{cases}$$

2.4 시스템 통한 모델 구성

전기자동차의 1회 충전 주행거리 성능에 영향을 미 치는 구성 요소들의 상세 모델링이 완료된 이후에 Port-based 모델링 기법을 활용하여 각 모델링 요소를 통 합하였다. 모터와 배터리의 경우, 모터의 출력 변수인 인 버터 입력 전류와 배터리의 입력 변수인 배터리 출력 전 류 신호를 연결하여 Fig. 5와 같이 두 구성 요소 통합을

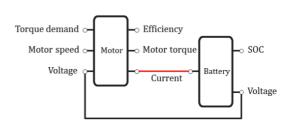


Fig. 5 Battery and motor model converging schematic

진행하였다.

3. 모델 파라미터 분석

본 장에서는, 2장에서 구성한 시뮬레이션 모델의 1회 충전 주행거리 해석 성능을 높이기 위해 실제 전기자동 차의 시험 데이터를 분석하여 모델에 반영할 수학적 파 라미터를 분석한 내용을 설명하였다. 연구 활용 차량은 현대자동차의 IONIQ5 중 단일 모터 후륜 구동의 형식을 가진 전기자동차로, 해당 차량의 시험 데이터를 통해 추 출한 모델 파라미터는 2장에서 모델링한 시스템에 반영 하기 적합할 것으로 판단했다. Table 1은 IONIO5 차량의 제원을 나타낸 것으로, 일반적으로 알려진 값으로 기재 하였다.19)

본 연구에서는 IONIO5 차량의 1회 충전 주행거리를 분석하고자, 국내 외에서 전기자동차의 인증을 위해 활 용하는 MCT(Multi Cycle Test) 주행 사이클을 통해 시험 을 진행하였다. ^{1,2,6,20)} MCT 주행 사이클은 도심 주행 환 경을 나타내는 UDDS(Urban Dynamometer Driving Schedule), 고속도로 주행 환경을 나타내는 HWFET(Highway Fuel Economy Test), 일정한 속도에서 주행하는 CSC(Constant Speed Cycle)가 조합되어 구성되어 있으며, 시험에서 활 용한 주행 사이클의 속도 프로파일은 Fig. 6과 같다.

본 연구에서 진행한 시험은 상온(25 ℃)과 저온(-7 ℃) 시험으로 구성되어 있으며, 식(1)~(4)와 같이 온도에 따 른 함수를 활용하는 경우에는 상온과 저온의 시험 환경 온도가 고려된 파라미터 분석을 진행하였다.

Table 1 Test vehicle IONIQ5 specification

Item	Specification
Manufactured year	2021
Vehicle mass	1920 kg
Equivalent inertia weight	2041 kg
Tire size	235/55 R19
Wheel radius	0.371 m
Battery type	Lithium-ion
Cell number	180 cell (2P6S*30module)
Battery usable energy	111.2 Ah
Battery nominal capacity	72.6 kWh
Battery rated voltage	653.4 V
Battery weight	450 kg
Motor type	PMSM
Motor max. power	160 kW
Motor max. torque	350 Nm
Gear ratio	10.65

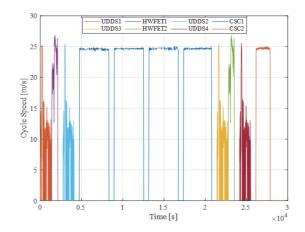


Fig. 6 MCT schedule for IONIQ5 testing

3.1 배터리 파라미터

시험 대상 차량의 배터리 성능을 파악하기 위해 PNGV 배터리 등가회로를 기반으로 배터리의 셀 내부에 서 일어나는 전기화학적 반응 성향을 분석하였다. 1차 단순 등가회로의 물리적 거동을 나타내는 식 (5)~(8)을 활용하여 배터리 내부 저항 및 개방 전압 맵을 추정하였 다. 배터리의 SOC와 온도가 시간에 지남에 따라 매우 느 리게 응답한다고 가정하여 1차 등가 회로의 등가 임피던 스(Zea)를 식 (15)와 같이 표현하였고, 이는 분극 용량 임 피던스(Zc), 분극 저항 임피던스(Zn), 내부 저항의 임피 던스(Z_{Ri})로 나타낼 수 있다.^{4,9,15)} 배터리의 내부 저항이 등가 임피던스의 실수부에 근사한다고 가정하였고, 동 력계 시험을 통해 수집된 시계열 시험 데이터에 파라미 터 추정 기법을 적용하여 얻은 결과는 각각 Fig. 7과 Fig. 8과 같다.

$$Z_{eq} = \frac{z_C z_{RP}}{z_C + z_{RP}} + Z_{Ri} = \frac{R_p}{1 + j\omega C_p R_p} + R_i$$
 (15)

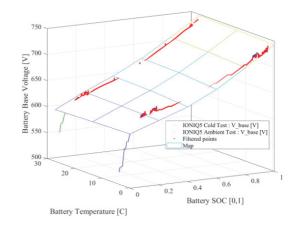


Fig. 7 Battery base voltage map

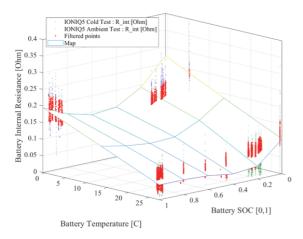


Fig. 8 Battery internal resistance map

차대 동력계 시험을 통해 추정된 배터리 개방 전압 및 내부 저항 맵은 상온과 저온 시험 조건에 따른 작동 범위 에 대해 표현됨을 확인할 수 있다. 4,9)

3.2 모터 파라미터

모터는 구동 상황에서 배터리의 전기 에너지를 운동 에너지로 변환하여 배터리를 사용하고, 제동 상황에서 는 차량의 운동 에너지를 전기 에너지로 변환하여 배터 리를 충전하는 제너레이터 역할을 하게 된다. 4,8) 차대 동 력계 시험 결과를 통해 식 (9), (10)과 같이 모델링한 모터 의 효율 맵을 구성하였으며, 모터의 성능은 에너지 변환 과정에서 발생하는 구동 효율에 따라 결정된다. 모터와 배터리의 전류 및 전압 데이터, 모터의 회전 속도와 토크 의 값이 포함된 시계열 시험 데이터를 통해 모터의 구동 효율을 분석하였으며, 추정한 모터 효율 맵은 Fig. 9 및 Fig. 10과 같다.

MCT 시험 사이클 주행을 통해 획득한 모터의 작동점 을 확인해본 결과, 주요 작동 영역에서의 모터 구동 효율 이 90 % 이상의 값을 나타냄을 확인하였으며 Table 1에 따른 차량 모터 제원을 토대로 파라미터를 반영했다. Fig. 9 모터 효율 맵에서는 차량의 전부하 시험에 따른 전 영역의 모터 작동점 대신, UDDS, HWFET, CSC 주행 사 이클 시험에 따라 확보된 모터 작동점 결과를 보여주며, 해당 데이터를 분석한 결과를 통해 Fig. 10과 같은 모터 작동 효율맵을 구성하였다.

시뮬레이션 진행을 위한 모터 파라미터 추출을 위해 연구 활용 차량 모터의 작동점 및 최대효율, 최대 토크와 정격 속도를 고려하여 모터 효율 맵을 도출하였다.

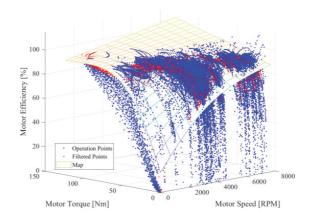


Fig. 9 Motor efficiency map (in 3D)

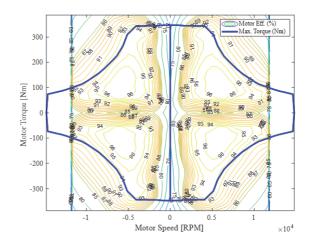


Fig. 10 Motor efficiency map (in 2D)

4. 시뮬레이션 모델 검증

4.1 시뮬레이션 진행 과정

모델링한 차량을 해석하여 시험 결과와 비교하기 위 해 시뮬레이션 해석을 진행하였다. 시뮬레이션에 반영 한 연구 활용 차량 IONIQ5의 제원은 Table 1과 같이 시험 을 진행한 차량과 동일하게 설정하였고, Fig. 11과 같이 미국 아르곤 국립 연구소에서 개발한 Autonomie 전방향 시뮬레이터를 활용하였다.¹⁰⁾ 시뮬레이션 주행 사이클은 실제 시험 주행 사이클과 동일하게 UDDS, HWFET, CSC 가 조합된 MCT 주행 사이클로 구성하였다. 시뮬레이션 주행에 따른 에너지 소비 효율(ECdc[cycle]) 및 주행거리 (R[cycle])는 식 (16), (17)과 같다. 해당 수식에서 K는 MCT 주행 사이클 중 각 단계별 보정 계수, ECdc[phase]는 각 주행 사이클에서 소모한 전기에너지의 직류 전류 방 전량(kWh)이며, UBE(Usable Battery Energy)는 전체 주행 시 소모한 전기 에너지의 직류 전류 방전량(kWh)이다.^{2,6,20,21)}



Fig. 11 IONIQ5 vehicle model in Autonomie

$$ECdc_{[cycle]} = \sum [K_{[phase]_i} \cdot ECdc_{[phase]_i}]$$
where, $phase = \begin{cases} UDDS \\ HWFET \end{cases}$, $cycle = \begin{cases} City \\ Highway \end{cases}$

$$R_{[cycle]} = \frac{UBE}{ECdc_{[cycle]}} \tag{17}$$

4.2 시뮬레이션 결과 분석

연구 활용 차량의 시험 결과와 시뮬레이션 해석 결과 를 비교하기 위해 주행 속도, 배터리 출력 파워와 SOC에 대한 신호 비교를 진행한 것은 각각 Fig. 12 (a), (b) 및 (c) 와 같다. 두 신호 흐름의 상관 관계를 분석하고자 NCCP (Normalized Cross Correlation Power) 기법을 활용하였으 며, 해당 기법은 모델의 정확도 평가 및 상관성 관계를 추정하기 위해 사용할 수 있다.²¹⁾ 동일한 시간의 시험 데 이터와 시뮬레이션 해석 결과 간에 분석을 진행하였을 때, NCCP 값이 1에 가까울수록 높은 수준의 상관 관계를 갖고 있는 것을 의미하며, Table 2와 같이 주행 속도와 배 터리 출력 파워 및 SOC 신호 모두 98 % 이상의 높은 상 관관계를 보여, 시뮬레이션 해석 결과는 실제 시험 결과 와 가까움을 확인할 수 있다.

1회 충전 주행거리와 에너지 소비 효율의 경우, 시험 결과와 시뮬레이션 해석 결과 간의 오차는 식 (18)과 같 이 상대 오차(Relative Error)를 백분율로 계산했다.

Relative Error =
$$\frac{x-\hat{x}}{x} \times 100 = \left(1 - \frac{\hat{x}}{x}\right) \times 100$$
 (18)
where, where, $\begin{cases} x: Test \ result \\ \hat{x}: Simulation \ result \end{cases}$

Table 2 NCCP calculation between the test and simulation result

	NCCP [0,1]
Vehicle speed [m/s]	0.9986
Battery output energy [kWh]	0.9872
Battery SOC [%]	0.9825

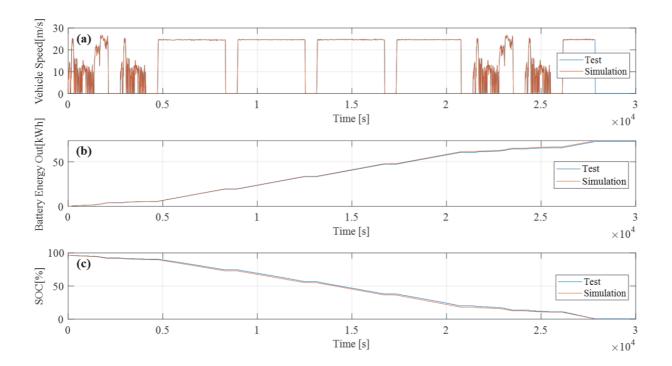


Fig. 12 Test data and simulation result comparisons. (a) Vehicle speed in m/s. (b) Battery output energy in kWh. (c) Battery SOC in %

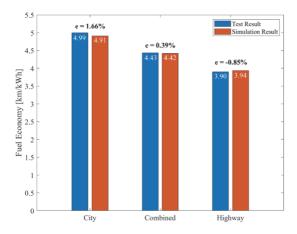


Fig. 13 FE comparison of the test data and simulation result

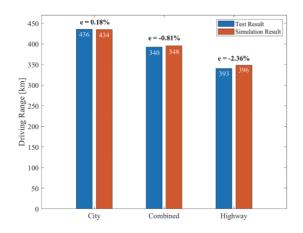


Fig. 14 Range comparison of the test data and simulation result

에너지 소비 효율(Fuel Economy, FE)의 경우에 시뮬레 이션 결과는 실제 시험 결과와 거의 유사하였으며, Fig. 13에서 그 차이와 수치를 확인할 수 있다. 해당 결과는 시뮬레이션이 실제로 차량이 주행한 것과 유사하게 해 석되었음을 의미한다.

Fig. 14에서 시험과 시뮬레이션을 통해 계산된 1회 충 전 거리(Range) 및 오차를 확인할 수 있다. 도심과 고속 및 복합 주행거리 모두 두 결과 간에 오차가 낮은 것을 확인할 수 있으며, 높은 수준으로 모델링 되어 검증된 모 델을 활용할 경우에 상세 제원을 토대로 1회 충전 주행 거리 예측이 가능하다.

5. 결 론

본 연구에서는 전기자동차의 1회 충전 주행거리를 시 뮬레이션으로 분석하기 위해 모델을 구성하여 시험 데 이터 기반의 파라미터를 적용해 산출한 결과를 검증해

보았다. MATLAB/Simulink를 통해 시뮬레이션 모델링을 진행하였고, 현대자동차 IONIQ5의 시험 데이터 및 상세 제원을 기반으로 시뮬레이션 결과를 분석해보았다. IONIQ5 차량 시험 데이터를 통해 분석한 파라미터를 모 델에 반영하여 시뮬레이션을 진행하였으며, 1회 충전 주 행거리 및 전비(에너지 소비 효율)에 대해 실제 차량 시 험 결과와 시뮬레이션 결과를 비교해보았을 때, 합리적 인 수준의 오차 및 해석 정확도를 확인했다. 본 연구에서 제시하는 1회 충전 주행거리 예측 방법은 차량의 제원만 을 토대로 시뮬레이션을 진행하기 때문에, 보다 정확한 해석 결과를 얻기 위해서 상세한 수준의 차량 제원이 필 수적이다.

저온 환경의 시험을 모사하는 시뮬레이션을 개발하 고, 사륜 구동과 같이 전기자동차의 구동 형식에 따른 시 뮬레이션도 진행할 수 있도록 연구를 지속할 예정이다.

기

이 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원 교통환 경연구소의 연구용역사업('전기자동차 주행거리 시험 방법 및 성능검증 방안 도출에 관한 연구(Ⅱ), NIER-2022-04-02-043')과 2022년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단 신진연구지원사업(과제번호: NRF-2020R1C1C1013037)의 지원을 받아 수행되었습니 다. 지원 기관에 감사드립니다.

References

- 1) K. W. Rho, M. S. Noh, J. C. Kim and C. H. Sim, "A Study on Improvement of MCT Method for Measuring Energy Efficiency of Electric Vehicles," Transactions of KSAE, Vol.29, No.10, pp.899-907, 2021.
- 2) M. S. Noh, H. C. Park and K. W. Rho, "A Study on Range, Energy Economy and Charging Characteristic of Electric Vehicles on Ambient Temperature Conditions and Charging Methods," KSAE Spring Conference Proceedings, pp.822-829, 2022.
- 3) Hyundai Motor Company, The Great Shift: Hyundai and the Road to Carbon Neutrality, https://www. hvundai.com/worldwide/en/brand-journal/sustainable-vision/iaa2021-carbon-neutrality, 2022.
- 4) D. Park, H. Song, D. Shin and N. Kim, "Performance Analysis of Electric Drive System on Hyundai Ioniq EV," Transactions of KSAE, Vol.27, No.1, pp.69-76, 2019.
- 5) N. Kim, S. Cha and H. Peng, "Optimal Control of

- Hybrid Electric Vehicles Based on Pontryagin's Minimum Principle," IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.19, No.5, pp.1279-1287, 2010.
- 6) K. W. Rho and M. S. Noh, "A Study on Measuring Energy Efficiency of Electric Vehicles by Using Methodology to Reduce Test Duration," KSAE Spring Conference Proceedings, pp.19-28, 2022.
- 7) D. Park and N. Kim, "Battery Parameter Estimation through Chassis Dynamometer Data Analysis for Ioniq EV," KSAE Spring Conference Proceedings, pp.1204-1205, 2018.
- 8) J. Liu, H. Peng and Z. Filipi, "Modeling and Analysis of the Toyota Hybrid System," TIc, Vol.200, No.3, 2005.
- 9) N. Kim, A. Rousseau and E. Rask, "Parameter Estimation for a Lithium-ion Battery from Chassis Dynamometer Tests," IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.65, No.6, pp.4393-4400, 2015.
- 10) N. Kim, A. Rousseau and E. Rask, "Autonomie Model Validation with Test Data for 2010 Toyota Prius," SAE 2012 World Congress & Exhibition, Vol.48, No.45, p.46, 2012.
- 11) X. Hu, S. Li and H. Peng, "A Comparative Study of Equivalent Circuit Models for Li-ion Batteries," Journal of Power Sources, Vol.198, pp.359-367, 2012.
- 12) H. He, R. Xiong and J. Fan, "Evaluation of Lithium-ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach," Energies, Vol.4, No.4, pp.582-598, 2011.
- 13) K. A. Smith, C. D. Rahn and C. -Y. Wang, "Model-Based Electrochemical Estimation of Lithium-ion Batteries," 2008 IEEE International Conference on Control Applications, pp.714-719,

- 2008.
- 14) H. Song, J. Choi, D. Park, N. Kim and D. Shin, "Evaluation of Charging Mileage of Electric Vehicle Using Battery Module," Transactions of KSAE, Vol.27, No.8, pp.645-652, 2019.
- 15) Y. Jiang, C. Zhang, W. Zhang, W. Shi and Q. Liu, "Modeling Charge Polarization Voltage for Large Lithium-ion Batteries in Electric Vehicles," Journal of Industrial Engineering and Management, Vol.6, No.2, pp.686-697, 2013.
- 16) G. Sikha, R. E. White and B. N. Popov, "A Mathematical Model for a Lithium-ion Battery/ Electrochemical Capacitor Hybrid System," Journal of the Electrochemical Society, Vol.152, No.8, pp.A1682, 2005.
- 17) SAE International Surface Vehicle Recommended Practice, Road Load Measurement Using Onboard Anemometry and Coastdown Techniques, SAE Standard J2263, 2008.
- 18) M. Andrew, "Using Transmission Data to Isolate Individual Losses in Coastdown Road Load Coefficients," WCX SAE World Congress Experience, Vol.2, No.4, pp.2156-2171, 2020.
- 19) U. S. EPA, Data on Cars Used for Testing Fuel Economy, Available at https://www.epa.gov/compliance-and-fueleconomy-data/data-cars-used-testing-fuel-economy, 2022.
- 20) Performance Light Duty Vehicle and Committee Economy Measure, "Battery Electric Vehicle Energy Consumption and Range Test Procedure," SAE International, 2021.
- 21) Y. Meng, M. Jennings, P. Tsou, D. Brigham, D. Bell and C. Soto, "Test Correlation Framework for Hybrid Electric Vehicle System Model," SAE International Journal of Engines, Vol.4, No.1, pp.1046-1057, 2011.