

전기자동차 에너지효율 평가를 위한 수치해석 연구

최민기†

Numerical Analysis Research for Evaluating the Energy Efficiency of Electric Vehicles

Mingi Choi

Key Words: Electric vehicle(전기자동차), Energy efficiency(에너지효율), Numerical simulation(수치해석), Multi cycle test(복합사이클시험), State of charge(충전상태)

Abstract

This paper is a numerical analysis study for evaluating the energy efficiency of electric vehicles. Currently, the methods for testing and evaluating the energy consumption efficiency of electric vehicles have limitations such as resources and time. Therefore, there is a need for research on developing models to predict the energy consumption efficiency of electric vehicles. In this study, a numerical analysis research is conducted to predict the energy efficiency of electric vehicles using a vehicle dynamics numerical analysis model. To validate the accuracy of the simulation model, it is compared the results of dynamometer tests with the simulation results and used the Unified Diagnostic Services (UDS) protocol to acquire internal data from the electric vehicle. It is ensured the reliability of the simulation model by comparing data such as motor speed, battery voltage, current, state of charge (SOC), regenerative braking power generation, and total driving distance of the test vehicle with dynamometer test data and simulation model results.

1. 서론

최근 전 세계적으로 자동차산업은 지구 온난화에 의한 기후변화 억제를 위한 공감대가 형성되고 있는 가운데 주요 선진국들은 자동차 연비규정 및 이산화탄소 배출량 허용기준을 강화하면서 친환경자동차 생산을 장려하고 있다. 세계 각국의 정부는 2025년 ~ 2040년에 내연기관 차량을 판매할 수 없도록 하는 규제를 공식화하고 전기자동차 보급 및 인프라 구축을 위한 노력을 다각도로 하고 있다⁽¹⁾.

미국은 2050년 탄소중립 달성을 위한 정책 강화로 친

환경 모빌리티 시장 확대를 가속화 중이다. 이러한 미국의 친환경차(HEV, PHEV, BEV) 판매량은 20년 기준 세계 3위이며, 미국 내 친환경차 생산 비중 역시 지속적으로 증가될 전망이다⁽²⁾. EU는 2030년까지 탄소배출량을 1990년 수준 대비 40% 감축이었으나, 유럽 그린딜의 핵심사안인 유럽 기후법에 따라, 1990년 대비 최소 55% 감축으로 상향 조정된 입법안 패키지, Fit for 55를 발표하였다⁽³⁾. 이중 수송부문의 온실가스 감축이 주요 사항으로 강조되었다. 수송부문은 유럽 전체 온실가스 배출의 약 1/4을 차지하며 배출이 지속적으로 증가하고 있는 유일한 부문으로, 2050 탄소중립 목표 달성을 위해서는 수송부문의 온실가스 배출이 2050년까지 1990년 대비 90%를 감소시켜야 한다. 자세한 내용으로는 내연기관 승용차 및 승합차 부문의 탄소 배출 규제를 강화하고, 2035년 이후 내연기관 자동차 출시를 금지하였다. 2030년까지 탄소감축 목표를 승용차 부문 37%에서

(Received: 20 Sep 2023, Received in revised form: 1 Dec 2023, Accepted: 4 Dec 2023)

†최민기, 회원, 한양사이버대학교 기계자동차공학부
E-mail : mgchoi@hycu.ac.kr
TEL : (02)2290-0843 FAX : (02)2290-0601

55%로, 승합차 부문 31%에서 50%로 상향하고 2035년까지 100% 감축 목표를 제시하였다. 탄소제로 차량 출시를 EU 전역의 충전 인프라 구축과 연계하여 진행되며 이를 위해 대체연료 인프라 규정도 함께 개정되었다. 이에 따라 자동차 주요 생산국은 내연기관 자동차의 판매금지 정책을 추진하며 전기자동차 보급률을 확대하고 있다.

우리나라 정부는 기후변화로 인한 국내 피해를 최소화하고 기후위기 대응에 적극 동참하기 위하여 2020년 10월 국가비전으로 2050년 탄소중립 선언 및 후속대응으로 2050 시나리오 수립과 2030 국가 온실가스 감축 목표 상향을 추진하였다⁽⁴⁾. 이에 따라, 정부는 친환경자동차의 보급을 촉진하기 위하여 5년마다 보급 계획을 수립해 운용 중이며, 자율주행차의 기술축적과 기반구축을 위해 지속해서 노력 중이다. 또한, 2035년까지 100% 전동화를 목표로 하고 있기 때문에 인력 및 시간, 자원의 소모가 커서 비효율적인 현재의 전기자동차 에너지 효율 관리제도 시험방법의 개선이 필요하다고 볼 수 있다. 이에 급격하게 보급되고 있는 다양한 전기자동차의 에너지효율 예측 및 평가하는 방안은 수송부문에 대한 국가 에너지절감 정책을 위하여 필요하다. 특히, 현행 전기자동차 에너지소비효율 시험평가 방법^(5,6)은 소요되는 인력 및 자원, 시간 등의 한계가 존재하기 때문에 전기자동차 에너지소비효율을 예측하는 모델 개발 연구가 필요하다⁽⁷⁾. 또한, 차량 동역학 수치해석 모델을 활용한 에너지효율 평가는 기존의 내연기관 자동차 뿐만 아니라 하이브리드 차량에도 적용되어 연구되어 왔고 최근에는 전기자동차에도 적용하여 연구가 진행되고 있다^(8,9). 특히, 수치해석을 활용하여 전기자동차 주행거리 성능을 해석하는 연구가 많이 진행되고 있다^(10,11).

이에 본 연구는 차량 동역학 수치해석 모델을 이용하여 전기자동차의 에너지효율 평가를 위한 연구를 수행하였고 현행 전기자동차 에너지효율 평가 관리제도에 수치해석 모델을 활용한 평가방법의 적용 가능성을 검토하였다.

2. 전기자동차 에너지효율 평가

2.1 차대동력계 시험 평가

수치해석 모델 결과 검증에 사용할 기본 시험 데이터를 얻기 위해 차대동력계에서 차량 시험을 수행하였다. Fig. 1은 차대동력계 시험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 본 연구에서 전기자동차의 내부데이터 취득을 위하

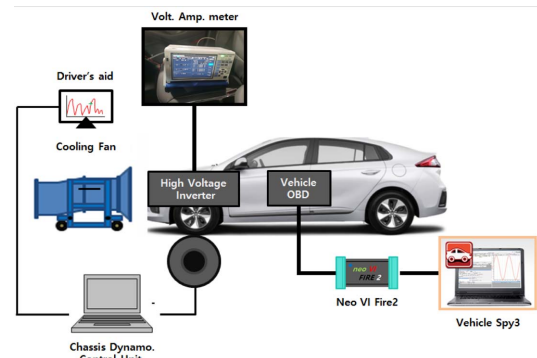


Fig. 1 Schematic diagram of chassis-dynamo test

여 UDS(Unified Diagnostic Services) 프로토콜을 이용하였다. 전기자동차의 에너지 효율 계산에 필요한 동력 시스템 관련 데이터 및 회생제동 데이터는 기존 OBDII 규격에 포함되지 않기 때문에 전기자동차의 경우 기존 OBDII 데이터만을 이용하여 차량 에너지 효율을 계산하는 것은 불가능하였다. UDS 프로토콜의 경우 배출규제와 관련 없는 차량 전반에 걸친 다수의 CAN(Controller Area Network)통신 데이터 신호를 포함하고 있고, 이 UDS 프로토콜내의 CAN신호에 대한 식별이 가능하면 OBDII에서 제공하지 않는 데이터의 취득이 가능해진다⁽¹²⁾. 본 연구의 실험차량의 경우, 에너지 효율 계산에 필요한 전반적인 데이터는 이 UDS 프로토콜 내에 있음이 확인되어 UDS 프로토콜을 이용하여 시험데이터를 취득하였다. 시험 차량은 승용 소형 전기자동차로 64 kWh 용량의 리튬 이온 배터리를 가지고 있고, 영구자석 동기모터인PMSM 모터를 탑재하고 있다. 모터의 최대 토크는 395 Nm이며, 평가된 출력은 150 kW이다. 시험 차량의 상세 사양은 Table 1과 같다.

전기자동차 일충전 주행거리 평가는 MCT(Multi Cycle Test) 시험법으로 수행하였다. Fig. 2는 MCT 시험법의 차량주행속도를 나타낸 것이다. 이 시험법은 UDSS1모드, HWFET모드, UDSS2모드, CSC모드의 2회 반복으로 구성되는데, 배터리 완충 상태에서 시험을

Table 1 Specifications of test electric vehicle

Battery	Li-Ion, 180 Ah, 64 kW
Motor	PMSM, 395 Nm, 150 kW
Final drive	Single speed reduction gear Reduction rate : 7.981
Mileage	5.4 km/kWh

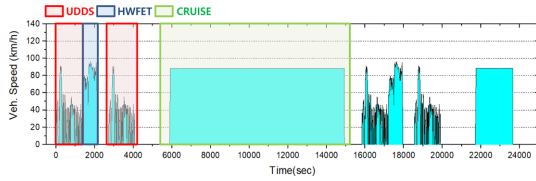


Fig. 2 Velocity profile of MCT test mode

시작하여 SOC(State Of Charge)가 0%에 도달하는 시점을 종료시점으로 정하여 시험을 수행한다. 또한, 2회 반복되는 CSC모드 중 첫 번째 모드가 종료되는 시점은 SOC가 23%에 도달하는 시험을 기준으로 종료하였다.

2.2 수치해석 모델 평가

본 연구는 AVL의 CRUISE 프로그램을 이용하여 수치해석 모델 평가를 진행하였다. Fig. 3은 AVL CRUISE 프로그램을 이용하여 구성된 전기 자동차 모델의 개략도를 나타낸 것이다. 차량 동역학 기반 시뮬레이션 모델을 구성하기 위해서 차량을 구성하고 있는 주요 부품들 간 물리적 또는 데이터 연결을 수행하였다. 전기자동차 수치해석 모델의 주요 부품은 모터(Motor), 배터리(Battery), 인버터(Inverter), 종 감속기(Final drive), 차동기어(Differential) 휠/타이어(Wheel/Tire), 브레이크(Brake), 차량(Vehicle) 등이 있으며 입력되는 각 부품에 대한 정보가 수치해석 결과의 정확성에 미치는 영향이 매우 크기 때문에 최대한 정확한 정보를 입력해 주어야 한다.

수치해석 시스템은 전처리기, 주계산부 및 후처리기로 구성되는데, 전처리기는 차량 시뮬레이션을 수행하는 데 필요한 기본 데이터를 읽어 들인다. 차량 치수, 주요 구성 요소의 성능 곡선 및 제어 전략을 포함하여 원활한 계산을 위해 필요한 입력 정보를 읽고 처리한다.

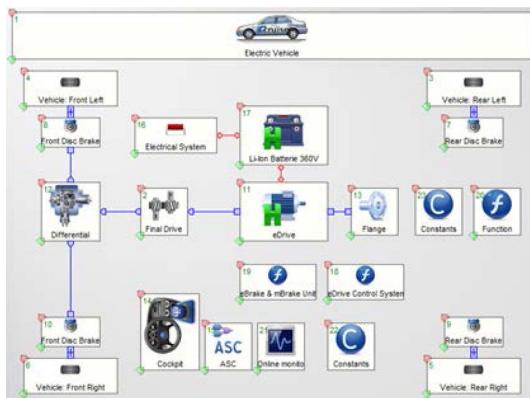


Fig. 3 Numerical analysis model for electric vehicle

특히, 모터 효율맵, 토크선도 데이터는 에너지 소비율과 배터리 SOC를 예측하는 데 필수적인 데이터이다. 주계산부는 차량 역학 모델에서 차량에 필요한 총 견인력을 계산하고, 이 힘을 생성하기 위해 모터를 어떤 지점에서 작동해야 하는지 예측한다. 이를 기반으로 에너지 소비량을 계산하고, 주요 차량 부품의 구동상태를 예측한다.

차량에 작용하는 수직힘은 입력정보 중 차량의 기본 치수 및 중량을 기반으로 계산된다. 이는 추후 차량의 구름저항 계산에 활용되고 차량 타이어에 작용하는 수직힘 지배방정식 및 계산에 반영되는 변수는 아래와 같다⁽¹³⁾.

$$F_{w,x,f,ax} = m_{V,act} \left[\left(1 - \frac{l_{V,DGC,act}}{l_{V,FR}} \right) \cdot g \cdot \cos\alpha_U - \frac{h_{V,DGC,act}}{l_{V,FR}} \cdot (a_V + g \cdot \cos\alpha_U) \right] - F_{V,jff,f}$$

$$F_{w,x,r,ax} = m_{V,act} \left[\frac{l_{V,DGC,act} \cdot g \cdot \cos\alpha_U}{l_{V,FR}} + \frac{h_{V,DGC,act}}{l_{V,FR}} \cdot (a_V + g \cdot \cos\alpha_U) \right] - F_{V,jff,r}$$

$F_{xy,f,ax}$: front axis load (N)

$F_{xy,r,ax}$: rear axis load (N)

α_U : inclination (rad)

a_V : Vehicle acceleration (m/s²)

$F_{V,jff,r}$: lift force of front tire (N)

$F_{V,jff,r}$: lift force of rear tire (N)

$m_{V,act}$: vehicle weight (kg)

차량 견인에 필요한 총 견인력은 각 Time step마다 산정하고 차량 가속에 필요한 힘, 구름저항력, 공기저항력, 노면경사로 인해 발생하는 중력, 동력부 전달 손실력의 합으로 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$F_{total,driving} = F_{accel} + F_{v,air} + F_{v,rr} + F_{incl} + F_{f,pt}$$

$F_{total,driving}$: total driving force (N)

F_{accel} : acceleration & deceleration force (N)

$F_{v,air}$: aerodynamic drag force (N)

$F_{v,rr}$: tire rolling resistance force (N)

F_{incl} : inclination force (N)

$F_{f,pt}$: friction loss in powertrain lines (N)

차대동력계에서는 노면경사로 인한 손실은 고려하지 않으므로 해석모델 또한 노면경사에 의한 동력손실은 계산하지 않는다. 따라서 구름저항과 공기저항이 대부분의 주행저항을 만들고 계산 결과에 미치는 영향이 크다고 볼 수 있다. 본 연구는 차대동력계에서 사용한 주행저항계수를 그대로 사용하여 해석을 진행하여 실험결과와의 오차를 줄였다.

일반 내연기관 자동차와 다르게 전기자동차는 회생제동 기능이 있다. 회생제동기능은 배터리 소모량에 많은 영향을 미치기 때문에 전기자동차 해석모델을 구성할 때 필수 요소이다. 따라서 회생제동모델이 전기자동차 에너지효율을 예측하는데 아주 중요한 모델이고 회생제동 전력량이 주요 변수로 작용한다. 본 연구에서 사용한 회생제동모델은 Braking torque와 Regeneration motor torque로 나누어 구성하였다. Braking torque는 차량 감속시 물리적 브레이크 제동에 의해 생성되는 휠 토크이고, Regeneration motor torque는 실제 모터에서 발전에 활용되는 토크이다. 그리고 차량 감속에 요구되는 제동력이 회생제동 발전용량을 초과할 경우 Disk brake module로 회생제동에 사용된 브레이크 압력을 차감한 브레이크 압력 전달이 되도록 모델을 구성하였다.

본 연구에서는 차대동력계 시험을 통해 얻어진 결과와 비교, 분석 과정을 통해 수치해석 모델의 신뢰도를 검증하였다. 전기 자동차의 현재 에너지 소비 효율 평가 방법은 인력, 자원 및 소요 시간 측면에서 제한이 있다. 단일 전기자동차를 시험하는데 10 시간 이상이 걸리기 때문에 전기자동차의 에너지 소비 효율을 예측하는 시뮬레이션 모델은 전기 자동차의 개발에 활용이 될 수 있다고 예상된다. 본 연구에서는 차량 동역학 해석을 이용하여 전기 자동차의 일충전 주행거리를 예측하였으며, 이 모델은 전기 자동차의 에너지 효율 관리 시스템 정책 및 다양한 전기 자동차의 주행 예측 연구에 활용될 수 있다고 판단된다.

3. 결과 및 고찰

수치해석 결과값의 신뢰성을 확보하기 위하여 차대동력계 시험값과 비교하였다. Fig. 4는 모터회전속도 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 실험과 수치해석 결과가 잘 일치하는 것을 볼 수 있는데 모터회전속도가 잘 일치한다는 것은 수치해석의 동력구동계 모델이 잘 설정된 것으로 판단할 수 있다. 수치해석의 차량 속도는 차대동력계 실험에서 주행한 차량의 실제 속도를 그대로 입력하여 계산을 수행하였기 때문에 운전자의 페달링에 의한 오차는 개입될 수 없다. 또한 휠 직경 설정부분에서 차량의 제원값을 그대로 넣으면 모터회전 속도에서 실험과 해석의 오차가 발생한다. 실제 차량의 휠 직경은 차량의 무게에 의해 타이어가 바닥면에 면으로 접하므로 제원값보다 작은 값을 가진다. 이를 고려한 Dynamic

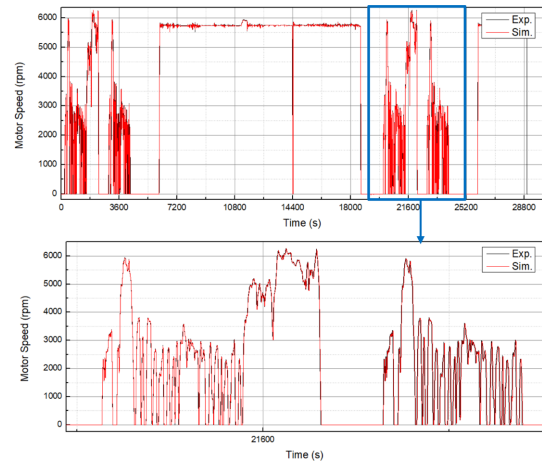


Fig. 4 Comparison of experimental results and numerical analysis results for motor speed

rolling radius 값을 차대동력계 시험결과를 통하여 유추할 수 있다. 해석모델 초기계산에 차량 제원값을 입력하면 시험결과와 모터 회전속도에서 차이가 약간 발생하는데 이를 통하여 차량 제원값보다 약간 작은 값을 가지는 Dynamic rolling radius 값을 유추할 수 있다. 이 값은 타이어의 공기압차에 의해서도 미세하게 차이가 날 수 있기 때문에 해석의 오차를 줄이기 위해서는 실제차량의 Dynamic rolling radius 값을 입력하는 것이 오차를 줄일 수 있는 방법이다. 결론적으로 차량 바퀴의 회전속도로부터 감속기를 거쳐 모터가 회전하는 속도를 동일하게 예측한 결과를 바탕으로 동력구동계 모델의 신뢰성을 확보하였다고 볼 수 있다.

Figure 5와 6은 각각 배터리 전압과 전류의 수치해석 결과와 실험결과를 비교한 것이다. 수치해석에서 배터리 전류값을 정확하게 예측하는 것을 바탕으로 차량 구동에 필요한 에너지를 정확하게 계산되는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 구름저항, 공기저항, 동력부 전달손실 등 총 견인력 예측이 정확하게 계산되는 것을 확인할

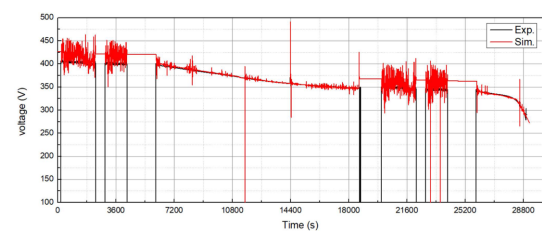


Fig. 5 Comparison of experimental results and numerical analysis results for battery voltage

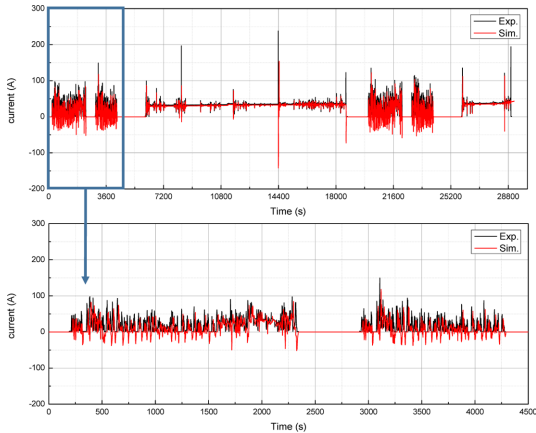


Fig. 6 Comparison of experimental results and numerical analysis results for battery current

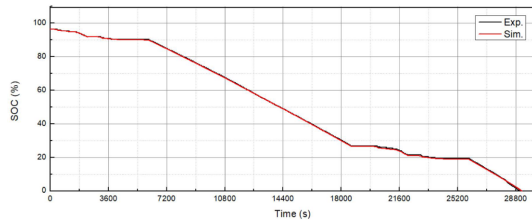


Fig. 7 Comparison of experimental results and numerical analysis results for SOC

수 있었다. 다만 전압의 경우 실험에서의 측정법의 한계로 수치해석에서 계산되는 전압값의 변화를 빠르게 추종하지는 못하였다. 수치해석에서는 견인력 발생에 필요한 전력량을 계산하여 전류값에 비례하는 전압값을 이론적으로 계산하기 때문에 실험에서 측정된 전압값과는 다소 차이가 있다. 그렇지만 전압값의 평균값과 추세는 실험 및 수치해석의 경향이 일치하는 것을 확인할 수 있고 결론적으로 차량 견인력 발생에 필요한 전력량을 잘 예측하는 것으로 확인되었다.

수치해석에서 계산된 전력량을 바탕으로 예측되는 배터리 SOC의 변화값을 확인해보면 Fig. 7과 같이 실험 결과와 수치해석 결과가 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 도심주행모드, 고속도로주행모드 및 정속주행모드 모든 구간에서 수치해석이 실험 SOC결과를 잘 추종하는 것을 확인할 수 있다. 특히, 도심주행모드와 고속도로주행모드에서는 회생제동이 발생하는 구간으로 차량의 구동 견인력 계산뿐만 아니라 감속에 의한 회생제동으로 충전되는 전력량까지 정확하게 계산하여야 정확한 SOC결과값이 계산된다. 이를 통하여 본 수치해석 모델의

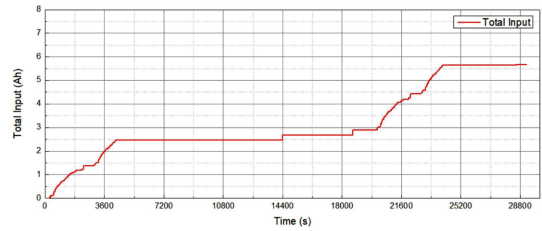


Fig. 8 Numerical analysis results of total input energy by regenerative braking

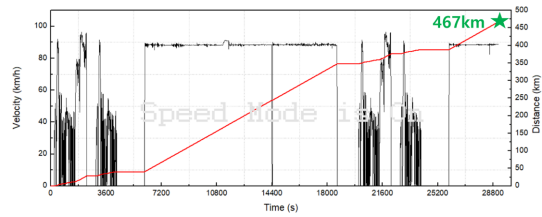


Fig. 9 Numerical analysis results of vehicle velocity and total driving distance

회생제동로직도 실제 차량의 회생제동량을 정확하게 예측하는 것으로 확인되었다. Fig. 8은 수치해석 모델에서 예측한 회생제동에 의해 발생한 전류량을 나타낸 것이다. 실험에서는 회생제동에 의한 전류량만 따로 측정하기 어려웠기 때문에 실험결과와 수치해석결과를 비교할 수는 없었지만 SOC결과를 정확하게 추종하는 것을 바탕으로 간접적으로 회생제동모델의 정확도를 확인할 수 있었다.

Figure 9는 수치해석 모델이 예측한 차량의 일충전 주행거리값을 나타낸 것이다. 총 467 km를 주행하는 것으로 계산되었고 이는 실험결과인 462 km와 아주 유사한 결과이다. 약 1%의 오차를 보이며 실험결과에서 얻은 일충전 주행거리를 정확하게 예측하였다. 이를 통하여 수치해석 모델의 활용가능성을 확인할 수 있었고 시간과 비용이 많이 소요되는 실험에 비하여 장점이 많은 수치해석의 활용성도 내연기관에 비하여 아주 높다고 평가할 수 있다. 또한, 본 연구에서 적용한 소형전기자동차 뿐만 아니라 중대형 전기자동차에도 수치해석 모델을 쉽게 확장하여 적용 가능할 것으로 예측된다. 다만 대형 전기자동차는 변속기가 포함된 경우가 많으므로 해석모델에 변속기 모델을 추가해야 할 것이다.

4. 결 론

본 연구는 차량 동역학 해석을 이용하여 전기 자동차

의 에너지효율 평가를 위한 연구를 수행하였으며 그 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 본 연구에서는 차대동력계 시험을 통해 얻어진 결과와 비교, 분석 과정을 통해 수치해석 모델의 신뢰도를 검증하였다.

(2) 모터회전속도 결과를 살펴보면 실험과 수치해석 결과가 잘 일치하는 것을 볼 수 있는데 이는 수치해석의 동력구동계 모델이 잘 설정된 것으로 판단할 수 있다.

(3) 수치해석에서 배터리 전류값을 정확하게 예측하는 것을 바탕으로 차량 구동에 필요한 에너지를 정확하게 계산되는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통하여 수치해석모델에서 구름저항, 공기저항, 동력부 전달손실 등 총 견인력 예측이 정확하게 예측되는 것을 확인하였다.

(4) 수치해석에서 계산된 전력량을 바탕으로 예측되는 배터리 SOC의 변화값을 확인해보면 실험 결과와 수치해석 결과가 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 특히, 회생제동이 발생하는 도심주행모드와 고속도로주행모드의 해석결과를 바탕으로 수치해석 모델의 회생제동로직도 실제 차량의 회생제동량을 정확하게 예측하는 것으로 확인되었다.

(5) 수치해석 모델에서 일충전 주행거리가 467 km로 계산되었고 이는 약 1%의 오차를 보이며 실험결과인 462 km와 아주 유사한 결과를 나타내었다. 이를 통하여 수치해석 모델의 활용가능성을 확인할 수 있었다.

후 기

본 논문은 정부의 재원으로 한국연구재단(No.RS - 2022-00165861)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

- (1) C. Bae, "Prospects for the development of automotive power", KSAE Conference: Automotive Technology and Policy Development Roadmap, 2019.
- (2) H. J. Jeon, "To seize opportunities in the U.S. eco-friendly mobility market", Korea Automotive Technology Institute, Industrial Trend, Vol. 56, 2021.
- (3) Y. W. Jang and T. H. Oh, "The main contents and implications of the EU carbon reduction legislation", Korea Institute for International Economic Policy, ISSN 1976-0507, 2021.
- (4) Ministry of Environment, 2030 Modification of Greenhouse Gas Reduction Roadmap, 2018.
- (5) M. Lee, S. Kim and K. Kim, "A comparison of the fuel economy test method on electric vehicles (EVs)", Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 28, No. 3, 2017, pp. 287~294.
- (6) J. Kim, J. Jung and K. Rho, "Validity study on revision of constant speed cycle on electric vehicle energy efficiency test procedure in Korea", KSAE Spring Conference Proceedings, 2020.
- (7) H. Song, J. Choi, D. Park and N. Kim, "Evaluation of charging mileage of electric vehicle using battery module", Transactions of KSAE, Vol. 27, No. 8, 2019, pp. 645~652.
- (8) K. Ahn, S. Cho, W. Lim, Y. Park and J. Lee, "Operation model of a power split hybrid electric vehicle", KSNRE Fall Conference Proceedings, 2006, pp. 547~550.
- (9) Y. Baek, N. Jeon, J. Kim and H. Lee, "A study of vehicle control algorithm for fuel economy on roads with Up-down slope", KSAE Spring Conference Proceedings, 2012, pp. 913~920.
- (10) J. Yeon, D. Park, H. Sung, J. Kim, Y. Lim and N. Kim, "Simulation model development and validation based on test data for evaluating the driving range performance of battery electric vehicle", KSAE Spring Conference Proceedings, 2023, pp. 112~112.
- (11) J. Yeon, D. Park, Y. Lee, H. Sung, Y. Lim, J. Lee and N. Kim, "Prediction of Driving Range of Electric Vehicle Based on Simulation: Focusing on the IONIQ5", Transactions of KSAE, Vol. 31, No. 4, 2023, pp. 275~282.
- (12) J. Song and J. Cha, "Analysis of driving dynamics considering driving resistances in on-road driving", Energies, Vol. 14, No. 12, 2021, pp. 3408.
- (13) J. Seo, J. Jang, Y. Choi, S. Park, Y. Oh and J. Youn, "Development of parallel HEV powertrain control model based on fuzzy-logic", KSAE Spring Conference Proceedings, 2018, pp. 108.
- (14) Surface Vehicle Recommended Practice, "Rolling resistance measurement procedure for passenger car, light truck, and highway truck and bus tires", SAE Technical paper, 1979.
- (15) Surface Vehicle Recommended Practice, "Stepwise coastdown methodology for measuring tire rolling resistance", SAE Technical paper, 2017.