

전기차 연비 시뮬레이션 개선 경진 대회

팀 이름 : 라운드

팀장: 김진민

팀원 : 신흥재

1. 국내 전기차 연비 시험	3
1.1. 전기차 연비 측정원리 및 방법	3
1.2. 전기차 연비 시험 계산식에 대한 이해	3
2. 전기차 연비 시뮬레이션 모델	4
2.1. 전기차 연비 시뮬레이션 모델의 차량동역학적 해석	4
2.2. 실차 연비와 시뮬레이션 연비의 오차 분석	6
3. 전기차 연비 시뮬레이션 개선 모델	7
3.1. 전기차 연비 시뮬레이션 개선 모델의 설명	8
3.2. 공학적 측면의 개선 사항	10
3.3. 실차 연비와 시뮬레이션 개선 연비의 오차 분석	12
4. 결론	13
5. 참조	14

1. 국내 전기차 연비 시험

1.1. 전기차 연비 측정원리 및 방법

내연기관에서 사용하였던 연비측정 환경조건을 사용하여 실내시험을 통해 전기차의 연비를 측정한다. 배터리가 완전 충전에서 완전 방전 상태가 될 때까지 시험을 진행하고, 동일한 환경조건에서 완속 충전기로 충전하여 연비를 충전한다. 모터의 토크와 속도에 따른 효율을 고려하여 도심에서의 주행 사이클을 나타내는 UDDS(Urban Dynamometer Driving Schedule), 고속도로의 주행 사이클인 HWFET(Highway Fuel Economy Test)와 정속 주행 사이클인 CSC(Constant Speed Cycle)을 사용하여 연비를 측정한다. 단일 주행 사이클의 경우 주행 거리가 긴 전기자동차의 경우 연비측정 시간이 오래 걸리기 때문에 UDDS, HWFET, CSC를 사용한 MCT(Multi Cycle Test)방식이 권고된다¹⁾. 2012년부터 우리나라에서 사용하는 주행 사이클은 UDDS-HWFET-UDDS-CSC를 2회 반복하는 MCT 그림 1과 같다.

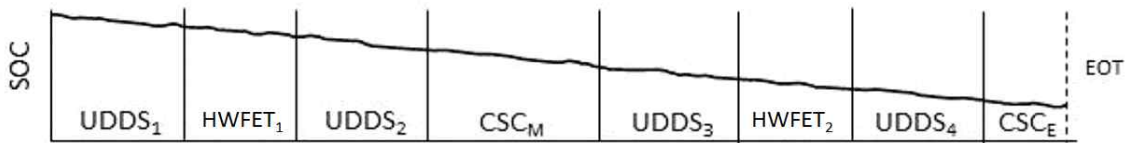


그림 1 MCT

1.2. 전기차 연비 시험 계산식에 대한 이해

연비는 도심 주행 에너지 소비 효율, 고속도로 주행 에너지 소비 효율과, 이 두 개를 혼합한 복합주행 에너지 소비 효율로 나뉜다. 1.1에 설명한 바와 같이 현재 우리나라는 3가지의 주행 사이클을 복합한 MCT를 사용 중이다. 도심 주행 에너지 소비 효율은 SOC 잔량과 온도에 따른 기동을 고려하여 계산하고 계산식은 아래와 같다.

$$\text{에너지 소비효율}(km/kWh) = \frac{\text{주행시 소모된 전기에너지의 직류전류방전량}[kWh]}{\text{주행시 소모된 전기에너지의 교류전류충전량}[kWh] \times ECdc[kWh/km]} \quad (1)$$

$$ECdc = (K_{UDDS1} \times ECdc_{UDDS1}) + \frac{(1 - K_{UDDS1})(ECdc_{UDDS2} + ECdc_{UDDS3} + ECdc_{UDDS4})}{3} \quad (2)$$

$$K_{UDDS1} = \frac{Edc_{UDDS1}}{\text{주행시 소모된 전기에너지의 직류전류 방전량}} \quad (3)$$

$$ECdc_{cycle} = \text{각 단위 모드의 직류전류 에너지 소모율}[kWh/km] \quad (4)$$

$$Edc_{UDDS1} = \text{첫 번째 UDDS 모드에서의 방전량}[kWh] \quad (5)$$

$$\text{1회 충전 주행거리}[km] = \frac{\text{주행시 소모된 전기에너지의 직류전류 방전량}[kWh]}{ECdc[kWh/km]} \quad (6)$$

고속도로 주행 에너지 소비 효율은 온도를 고려하지 않고 SOC만을 고려하여 계산하고 계산식은 아래와 같다.

$$\text{에너지 소비 효율}[km/kWh] = \frac{\text{주행시 소모된 전기에너지의 직류전류 방전량}[kWh]}{\text{주행시 소모된 전기에너지의 교류전류 충전량}[kWh] \times ECdc[kWh/km]} \quad (7)$$

$$ECdc = \frac{(K_{UDDS1} \times ECdc_{UDDS1}) + (1 - K_{UDDS1})(ECdc_{UDDS2} + ECdc_{UDDS3} + ECdc_{UDDS4})}{3} \quad (8)$$

$$ECdc = \frac{ECdc_{HWFET1} + ECdc_{HWFET2}}{2} \quad (9)$$

$$ECdc_{cycle} = \text{각 단위 모드의 직류전류 에너지 소모율}[kWh/km] \quad (10)$$

$$\text{1회 충전 주행거리}[km] = \frac{\text{주행시 소모된 전기에너지의 직류전류 방전량}[kWh]}{ECdc[kWh/km]} \quad (11)$$

복합주행 에너지 소비 효율은 위의 두 가지 소비효율을 고려하여 도심과 고속도로를 55 대 45의 비율로 반영하여 계산한다. 위의 계산한 3가지의 소비 효율을 운전 외 사용 에너지를 고려하여 보정 값 0.7을 곱해주어 최종 표시 연비를 표기한다.

2. 전기차 연비 시뮬레이션 모델

2.1. 전기차 연비 시뮬레이션 모델의 차량동역학적 해석

2.1.1. 모터와 전기 모터와 차량 가속도의 관계

전기차의 차량동역학적 흐름도는 모터-기어-차동기어-바퀴로 표현할 수 있다. 이러한 모터로부터 바퀴까지 이어지는 토크의 흐름을 등가 관성 모멘트를 이용하여 설명할 수 있다. 여기서 등가 관성 모멘트의 공식은 다음과 같다.

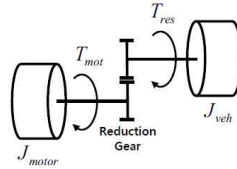


그림 2 모터와 기어

$$(J_{motor} + \frac{1}{N^2} J_{veh}) \alpha_{motor} = T_{motor} - \frac{1}{N} T_{veh} \quad (12)$$

이 때, J는 Inertia, T는 토크, N은 기어비, α 는 각가속도이다. 이를 이용하여 모터와 기어의 관계를 식으로 표현하면,

$$J_{\text{모터}} \alpha_{\text{모터}} = T_{\text{모터}} - T_{\text{기어}} \quad (13)$$

기어와 차동기어의 관계를 식으로 표현하면,

$$J_{\text{기어}} \alpha_{\text{모터}} = T_{\text{기어}} - \frac{1}{N_{\text{감속기어}}} T_{\text{차동기어}} \quad (14)$$

차동기어와 바퀴의 관계를 식으로 표현하면,

$$J_{\text{차동기어}} \alpha_{\text{차동기어}} = T_{\text{차동기어}} - \frac{1}{N_{\text{차동기어}}} T_{\text{바퀴}} \quad (15)$$

바퀴와 추진력의 관계를 식으로 표현하면,

$$J_{\text{바퀴}} \alpha_{\text{바퀴}} = T_{\text{바퀴}} - r F_x \quad (16)$$

식(13)과 식(14)를 더하여 정리하면,

$$(J_{\text{기어}} + J_{\text{모터}}) \alpha_{\text{모터}} = T_{\text{모터}} - \frac{1}{N_{\text{감속기어}}} T_{\text{차동기어}} \quad (17)$$

식(15)와 식(16)을 연립하면,

$$J_{\text{바퀴}} \alpha_{\text{바퀴}} + r F_x = N_{\text{차동기어}} (T_{\text{차동기어}} - J_{\text{차동기어}} \alpha_{\text{차동기어}}) \quad (18)$$

식(18)과 식(17)을 연립하여 정리하면,

$$F_x = \frac{N_{\text{차동기어}} N_{\text{감속기어}}}{r} T_{\text{모터}} - (J_{\text{기어}} + J_{\text{모터}} (N_{\text{감속기어}} N_{\text{차동기어}})^2 + N_{\text{차동기어}}^2 + J_{\text{바퀴}}) \frac{\alpha_{\text{바퀴}}}{r} \quad (19)$$

각가속도와 가속도는 다음과 같은 관계를 만족한다.

$$\frac{a}{r} = \frac{\alpha}{r^2} \quad (20)$$

이 때, r 은 바퀴의 반지름이고 a 는 차량의 가속도이다.

자동차의 종방향 운동 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{W}{g} a = F_x - \text{차량저항} \quad (21)$$

이 때, W 는 차량의 무게이다.

식(19), 식(20), 식(21)을 사용하여 모터 토크에 의한 차량의 가속도를 계산하면,

$$\left(\frac{W}{g} + \frac{J_{\text{기어}} + J_{\text{모터}} (N_{\text{감속기어}} N_{\text{차동기어}})^2 + N_{\text{차동기어}}^2 + J_{\text{바퀴}}}{r^2} \right) a = \frac{N_{\text{차동기어}} N_{\text{감속기어}}}{r} T_{\text{모터}} - \text{차량저항} \quad (22)$$

2.1.2. 차량 운행 시 저항

수식 4의 Resistance는 차량 운행 시 발생할 수 있는 저항으로 대표적으로 구름저항, 공기 저항, 등판저항으로 나뉜다. 구름저항은 타이어가 굴러갈 때 차량 무게와 추진력에 의해 타이어에 변형이 생기면서 타이어와 노면 사이에서 발생하는 수직항력이 타이어의 중심을 벗어나므로 인해 발생하는 역방향 토크가 만드는 저항이다²⁾. 차량의 공기저항은 점성저항과 관성저항으로 나눌 수 있다. 점성저항은 물체가 저속일 때 공기의 흐름이 층류가 되는 범위에서 공기의 점성에 의한 마찰저항이 작용하는 것으로 물체의 상대속도에 비례하여 적용되는 저항이다. 관성저항은 물체의 속도가 증가해 층류가 허물어지기 시작하면 물체의 배후에 소용돌이가 생겨 나타나는 저항으로 상대속도의 제곱에 비례한다³⁾. 등판저항은 자동차가 비탈진 길을 오를 때, 중력에 의해 차량 뒤쪽 방향으로 발생하는 저항이다²⁾.

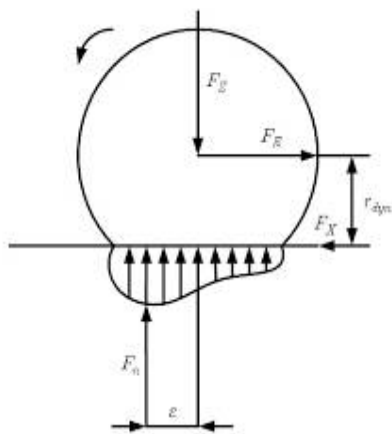
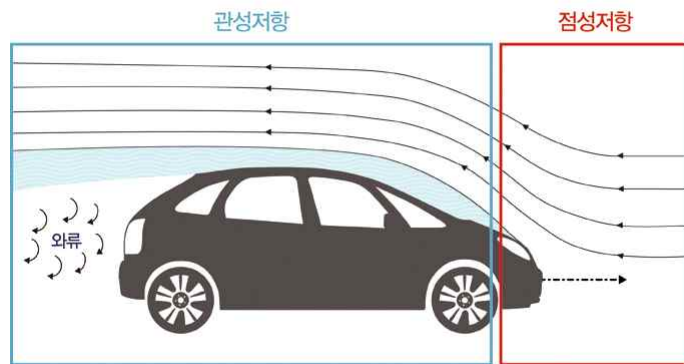


그림 3 바퀴의 구름 저항



SK Energy Company Blog

그림 4 공기저항

2.2. 실차 연비와 시뮬레이션 연비의 오차 분석

제공된 실차의 연비와 시뮬레이션 결과로 나온 주행 사이클에 따른 주행거리와 주행 시 소모된 전기에너지의 직류 전류 방전량은 표1과 표2와 같다. 값을 분석한 결과 주행거리는 몇 개의 값을 제외하고는 거의 비슷한 결과를 도출해주었다. 시뮬레이션의 경우 모터의 출력이 차량의 가속도와 직결되게 설계되어 있다. 이런 경우 바퀴에서 발생할 수 있는 미끄러짐 현상을 고려하지 못하는데 UDDS1, CSC를 제외한 사이클은 차이가 거의 없고 CSC의 경우 실제 연비에서 SOC에 영향을 주어 배터리의 전압을 낮추는 것이므로 주행거리에 관해서는 추가적인 고려를 하지 않는다. 주행 시 소모된 전기에너지의 직류 전류 방전을 확인한 결과 UDDS는 UDDS1을 제외하고는 시뮬레이션에서 더 많은 전류 사용량이 나왔고 HWFET는 시뮬레이션에서 적은 전류 사용량이 나온 것을 알 수 있었다. 제공된 모델은 실제 차량에 비해 단순한 모델이기 때문에 여러 가지 손실들이 고려되지 않아 HWFET처럼 연비가 더 좋게 측정되리라 예상하였지만 실제로는 UDDS의 경우 시뮬레이션에서 에너지 사용량이 많았다. 또한, 고속에서보다 저속에서 효율이 좋은 모터의 성질에 의해 UDDS가 효율이 더 높을 것으로 예상하였지만 주행거리/ 직류 전류 방전량 확인 결과 HWFET가 더 좋은 효율을 보여주고 있다, 이를 통해서 2가지 가정을 세울 수 있었다.

MCT mode	UDDS1	HWFET1	UDDS2	CSC1	UDDS3	HWFET2	UDDS4	CSC2
주행거리 [km]	12.028	16.524	11.999	163.430	12.001	16.515	12.065	38.218
주행 시 소모된 전기에너지의 직류 전류 방전량 [kWh]	1.189	1.853	1.092	23.680	1.079	1.815	1.069	5.580
주행거리/직류 전류 방전량[km/kWh]	10.116	8.917	10.988	6.901	11.122	9.099	11.286	6.849

표 1 실차 에너지 소비량

MCT mode	UDDS1	HWFET1	UDDS2	CSC1	UDDS3	HWFET2	UDDS4	CSC2
주행거리 [km]	11.778	16.493	11.981	169.859	11.997	16.502	11.995	38.269
주행 시 소모된 전기에너지의 직류 전류 방전량 [kWh]	1.178	1.444	1.178	18.955	1.180	1.445	1.180	4.412
주행거리/직류 전류 방전량[km/kWh]	10.6	15.049	10.803	150.904	10.817	15.057	10.815	33.857

표 2 시뮬레이션 에너지 소비량

MCT mode	UDDS1	HWFET1	UDDS2	CSC1	UDDS3	HWFET2	UDDS4	CSC2
주행 시 소모된 전기에너지의 직류 전류 방전량의 오차 [kWh](실제 차량 -시뮬레이션)	0.01	0.41	-0.09	4.73	-0.10	0.37	-0.11	1.17

표 3 실제 차량과 시뮬레이션의 오차

첫 번째 가정은 연비를 측정하는 사이클의 차이 때문에 이러한 결과가 만들어졌다는 것이다. HWFET의 경우 고속도로에서의 주행을 측정하기 위한 사이클이기 때문에 고속에서 감속을 거의 하지 않는 특징이 있다. 반대로 UDDS의 경우 도심에서의 정체와 교통신호 등을 반영하여 저속에 자주 감속하는 사이클이다. 따라서, 감속 시 사용되는 회생제동이 HWFET보다 UDDS에서 더 많이 사용되기 때문에 이러한 결과를 보여줄 수 있다.

두 번째 가정은 SOC에 따른 효율 데이터에 문제가 있는 경우이다. 표 3을 확인하면 시뮬레이션이 진행될수록 UDDS의 오차가 커지는 것을 알 수 있는데 기본 시뮬레이션에서는 주행 사이클에서 SOC에 따른 배터리 전압과 효율만을 고려하기 때문에 이러한 결과가 나왔다고 생각할 수 있다.

3. 전기차 연비 시뮬레이션 개선 모델

개선 모델을 설명하기에 앞서 현재 시뮬레이션의 오류 두 가지를 설명하고자 한다. 첫 번째로 회생제동의 효율 적용 문제이다. 현재 속도와 토크에 따라 모터는 다른 효율을 가져 배터리에서 제공되는 전력에 효율을 곱한 값으로 모터 출력이 제공된다. 그러므로 모터 출력으로 필요 전력을 역산할 때는 효율을 나누어 주어야 하므로 그림 5와 같이 나누어 주었다. 하지만 이 모델의 경우 회생제동에 의한 충전까지 고려된 모델이다. 회생제동의 경우 모터의 발전을 통해 배터리로 충전이 되므로 모터에서 발생한 전력에 효율을 곱한 값을 배터리에 보내주게 설계해야 한다.

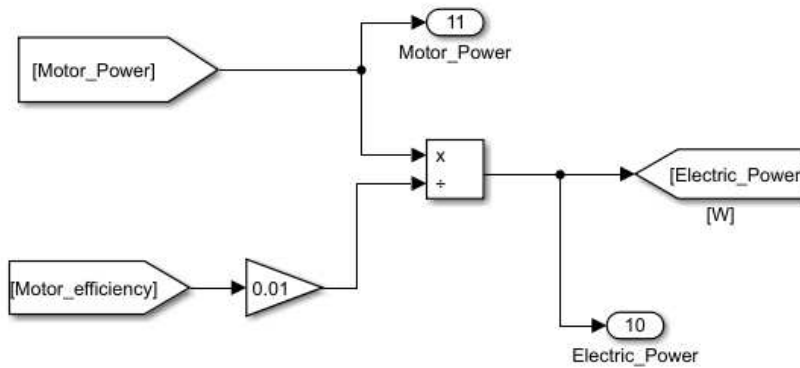


그림 5 모터의 효율 적용 블록

두 번째로 브레이크 압력 분배 문제이다. 모델에서 브레이크는 Regenerative_percent를 적용하여 필요 브레이크 출력에서 회생제동과 유압제동을 분배한다. 이를 위해서는 차량이 낼 수 있는 최대 제동력에서 PID 제어를 사용하여 원하는 출력을 구하고 분배를 해주어야 한다. 하지만 그림 6을 확인하면 PID 제어에서 나온 값에 모터가 낼 수 있는 최대 토크를 곱하여 회생제동을 사용하기 때문에 최대 제동력을 사용하지 못하는 결과를 가져온다.

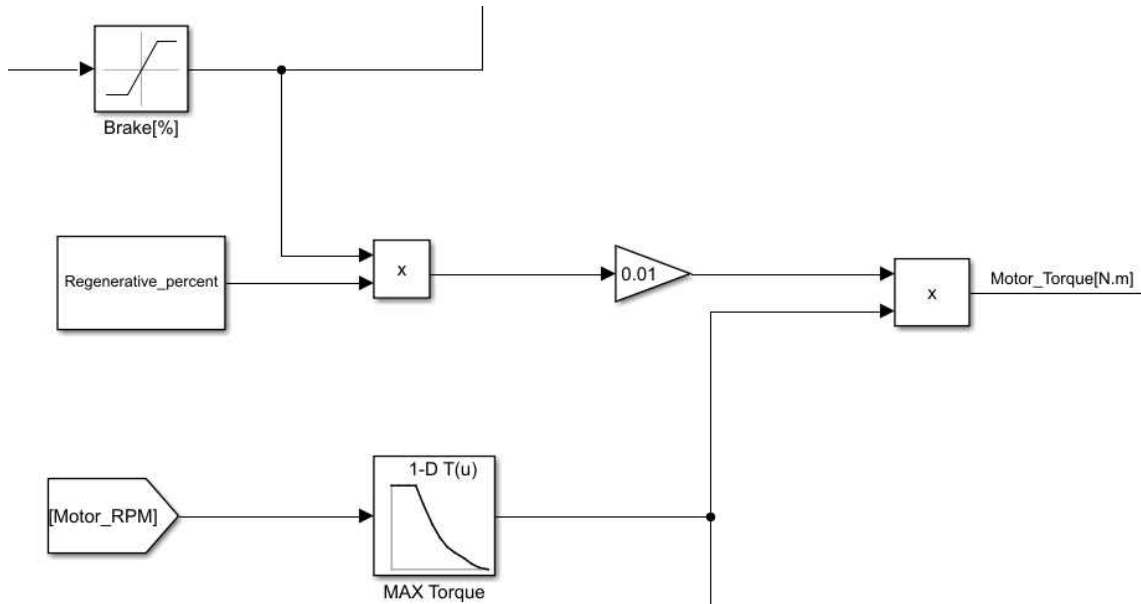


그림 6 회생제동의 출력

3.1. 전기차 연비 시뮬레이션 개선 모델의 설명

3.1.1. Matlab

Matlab 코드에서는 2.1.1을 사용하기 위한 등가 관성 모멘트 공식, 배터리 초깃값을 설정할

수 있는 코드, 모터에서 사용한 전력을 호출하기 위한 코드와, Simulink에서 가지고 온 데이터를 주행 시간에 따라 데이터를 분류하고 1.2의 효율 계산 공식을 통해서 효율을 구하는 코드를 추가하였다. 효율 계산 코드에 의해 생성된 데이터는 표 4와 같다. 여기서 Cycle은 주행 사이클을 뜻하는 행렬이고 총 8개의 사이클이 있다.

변수 이름	변수 설명
Cycle(1)[kWh]	사용된 주행 사이클에 직류 전류 방전량
Cycle(2)[kWh]	사용된 주행 사이클에 교류 전류 충전량
Cycle(3)[km]	사이클 동안 움직인 거리
City_EFF[km/kWh]	도시 주행 효율
City_range[km]	도시 주행 1회 충전 주행거리
HighWay_EFF[km/kWh]	고속도로로 주행 효율
HighWay_range[km]	고속도로로 주행 1회 충전 주행거리

표 4 추가된 변수

3.1.2. Simulink

Simulink에서는 브레이크, 효율 계산, 인버터 효율, 관성 모멘트, 배터리 초깃값 설정을 추가하였다.

3.1.2.1. 브레이크

브레이크는 차량 중량을 사용하여 Max_brake_Force를 설정하였고 제동력에서 regenerative_percent 값을 사용하여 회생제동의 제동력을 구한 후 최댓값이 모터의 토크 곡선을 넘지 못하게 설정하였다. 제동력과 회생제동에서의 모터 토크를 따로 분류하여 SOC 계산에 사용하였다.

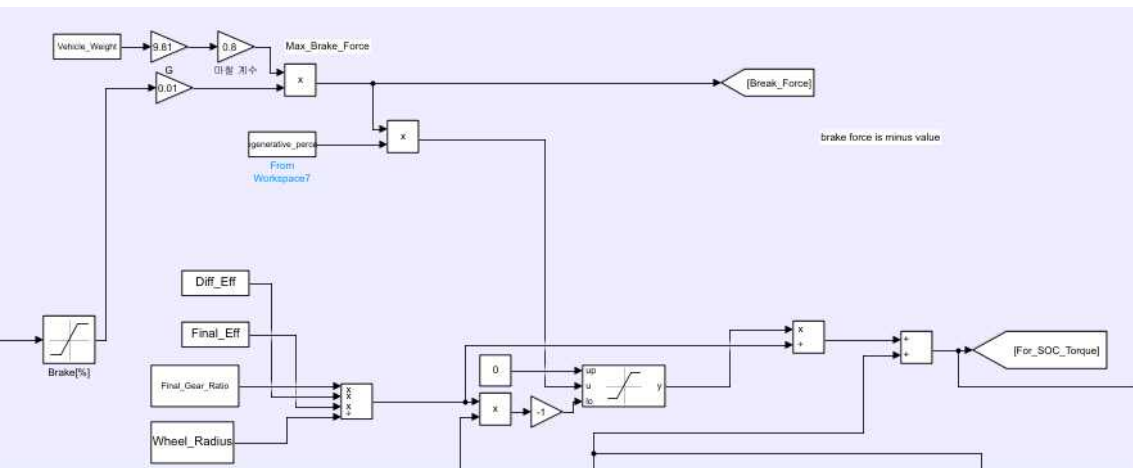


그림 7 Brake

3.1.2.2. 효율 계산, 인버터 효율

지금 들어오는 출력이 부호를 판별해서 양의 값이면 효율을 나누어 주고 음의 값이면 효율을 곱해주는 방식으로 계산하였다. 배터리에서 모터로 전력을 보내주기 위해서는 인버터가 필요하다. 인버터에 따른 효율도 존재하기 때문에 인버터 효율도 계산해야 한다.

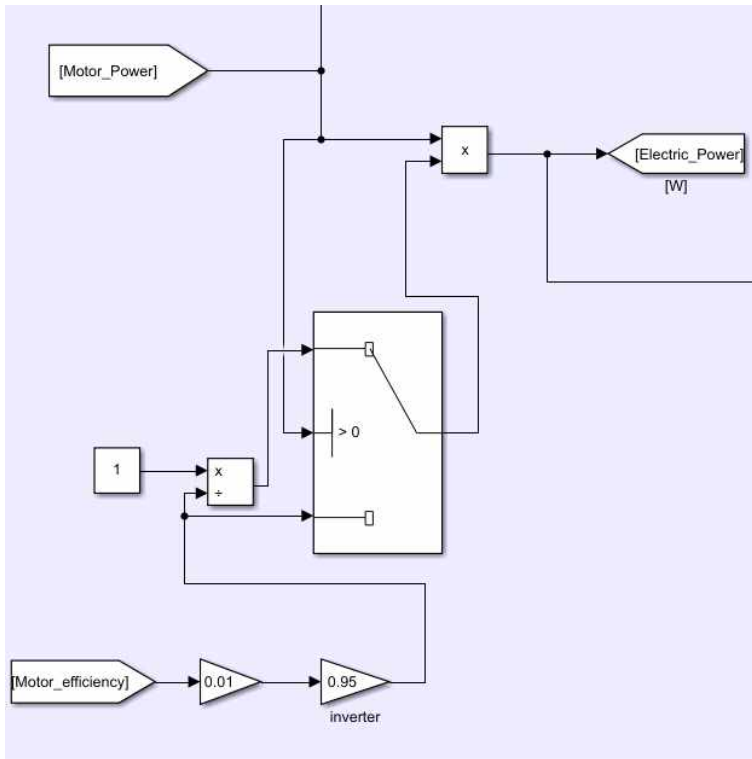


그림 8 효율 계산

3.1.2.3. 관성 모멘트 추가

2.1.1 모터와 전기 모터와 차량 가속도의 관계를 사용하여 관성 모멘트를 추가하였다. 식(22)에서 감속기어와 차동기어의 효율을 추가하여 사용하였다. 여기서 감속기어의 기어비는 제공된 값을 사용하였고 차동기어의 기어비는 1로 가정하였다.

3.1.2.4. 배터리 초깃값 설정

현재 주행 연비 계산은 충전된 상태를 전제로 계산을 진행하였기 때문에 필요한 부분은 아니지만 SOC에 따른 성능을 보기 위한 추가적인 시뮬레이션이 필요할 경우를 위하여 추가하였다.

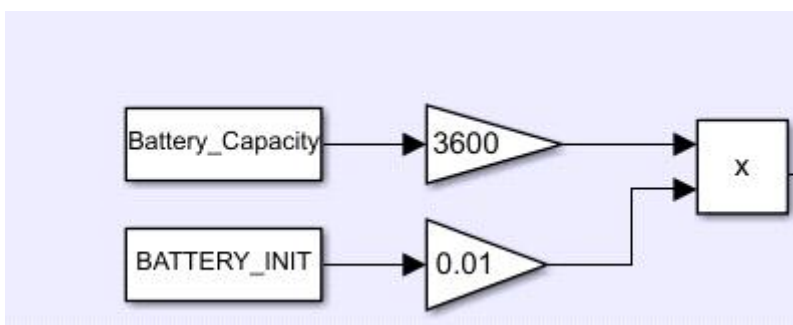


그림 10 배터리 초깃값 설정

3.2. 공학적 측면의 개선 사항

3.2.1. 브레이크

Max_Brake_Force는 차량 질량, 중력 가속도와 마찰 계수 0.8로 설정하여 계산하였다⁴⁾. 전

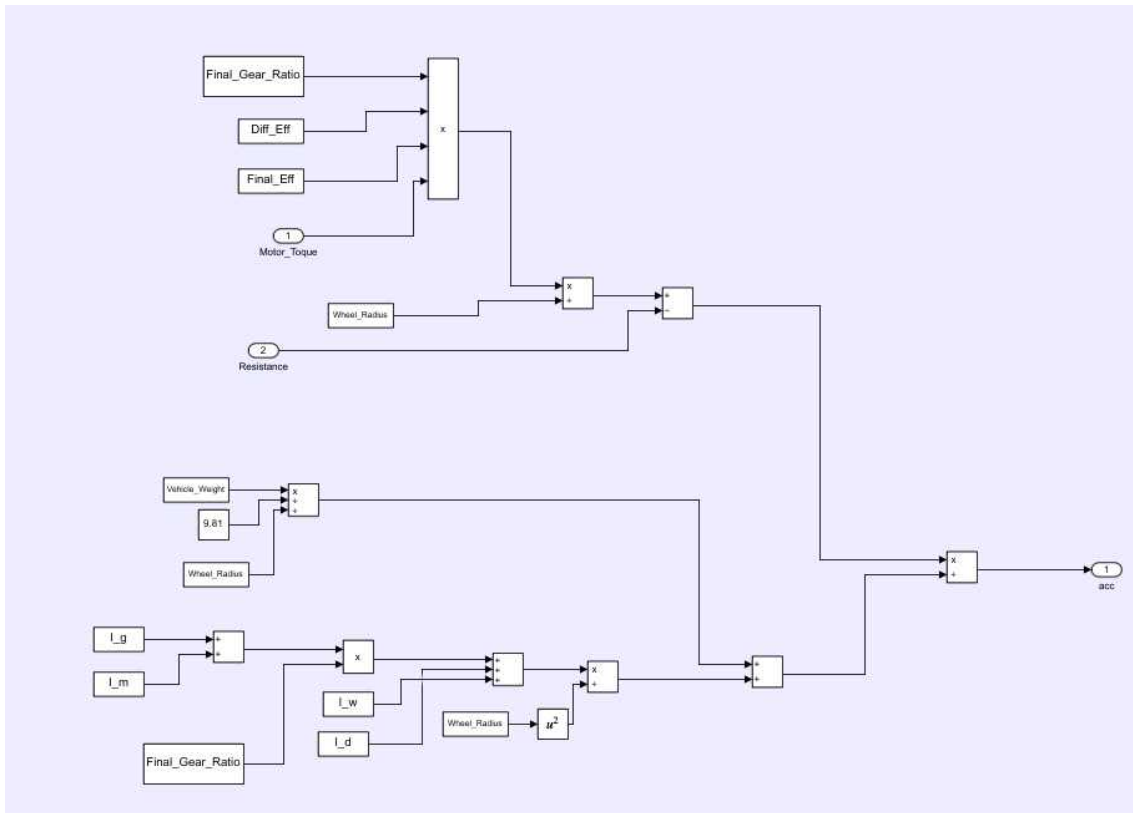


그림 9 차량 관성 모멘트 계산

기 자동차는 Parallel Regenerative brake 방식과 Series Regenerative brake 방식이 있

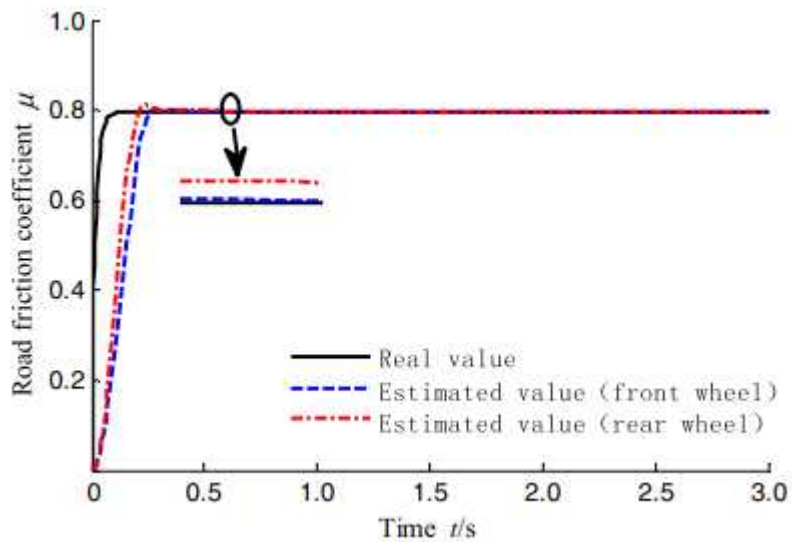


그림 11 차량과 노면의 마찰 계수

다. Parallel Regenerative brake 방식은 현재 모델에서 적용된 모델로 필요 제동력에 회생 제동과 유압제동을 일정하게 분배하는 방식이다. 유압제동도 동시에 사용하기 때문에 반응속

도가 빠르지만 회생제동 효율을 최대로 사용하지 못한다는 단점이 있다.

Series Regenerative brake 방식은 회생제동을 최대한으로 쓴 후 유압제동을 하는 방식이다. 회생제동을 최대로 써서 효율이 높지만 반응 속도가 떨어지는 단점이 있다 ⁵⁾.

이 두 방식 모두를 구현하여 모델을 비교해 본 결과 Parallel Regenerative Brake가 레퍼런스 데이터와 더 근접하여 변경하지 않고 Parallel을 사용하였지만, 레퍼런스 모델이 변경될 경우 두 회생제동 중 어떤 모델을 사용할지 다시 계산해볼 필요가 있다.

3.2.2. 인버터

차량의 배터리는 직류 전류이고 대부분의 전기 자동차는 교류 전류를 사용한다. 이에 따라 인버터가 필요해지게 되는데 인버터는 교류 전류의 주파수 모터의 출력 온도 등 여러 가지 변수에 따라 효율이 변할 수 있다. 하지만 이를 전부 고려하는 것은 힘들어서 0.95로 Constant 값으로 대체하였다 ⁶⁾.

3.2.3. 기어 부품에 의한 손실

기어는 기계적으로 연결되어 힘을 전달해주는 장치이기 때문에 자체적인 효율이 존재한다. 또한 2.1.1 식 (19)에서 추진력을 구하기 위해 기어를 통과한 모터 토크에 각속도와 관성모멘트를 고려한 값을 차감해 주는데 이 식이 기어를 통과하면서 부품의 관성모멘트 때문에 생겨난 손실이다.

3.2.4. 온도에 따른 효율

모터와 인버터 배터리 내부 부품 등은 온도에 따라 효율이 계속 변할 수 있다. 하지만 이러한 온도는 차량이 작동함에 따라 변하기 때문에 운동에 따른 효율을 반영할 순 있어도 시뮬레이션 진행에 따라 온도 변화를 적용하는 것은 어렵다. 이 부분을 추가하고자 하였으나 데이터 부족하여 추가하지 못했다.

3.3. 실제 차 연비와 시뮬레이션 개선 연비의 오차 분석

제작한 모델의 주행 사이클에 따른 주행거리와 주행 시 소모된 전기에너지의 직류 전류 방전량은 표 5와 같고 실제 차량과의 차이는 표 6과 같다. 개선 모델의 연비가 실제 차량 모델보다 좋은 것을 통해 2.2에서 가정했던 시뮬레이션 모델이 효율이 더 높다는 것은 알 수 있었다. 개선 모델의 UDDS에서는 저온 시동인 UDDS1 보다 고온 시동인 UDDS2, UDDS3, UDDS4에서 오차가 더 작게 나온 것을 알 수 있었고, HWFET는 HWFET1보다 HWFET2가 오차가 더 작은 것을 알 수 있었다. CSC1의 경우, 정속 주행이므로 회생제동의 영향을 받지 않으므로 기본 모델과 비교하면 오차가 상당히 줄어든 것을 볼 수 있다. CSC를 통해서 차량 관성모멘트 추가가 모델 정확도에 좋은 영향을 주었고, UDDS를 통해 고려해 주지 않은 온도가 오차를 발생시키고 있고 HWFET를 통해 낮은 SOC보다 높은 SOC에서 더 높은 오차가 발생하고 있다는 것으로 생각할 수 있다.

MCT mode	UDDS1	HWFET1	UDDS2	CSC1	UDDS3	HWFET2	UDDS4	CSC2
주행거리 [km]	11.960	16.461	11.984	169.682	12.032	16.488	12.009	38.178
주행 시 소모된 전기에너지의 직류 전류 방전량 [kWh]	0.700	1.357	0.702	20.381	0.705	1.362	0.704	4.613
주행거리/직류 전류 방전량[km/kWh]	11.26	15.104	11.282	149.301	11.327	15.126	11.305	33.565

표 5 시뮬레이션 에너지 소비량

MCT mode	UDDS1	HWFET1	UDDS2	CSC1	UDDS3	HWFET2	UDDS4	CSC2
주행 시 소모된 전기에너지의 직류 전류 방전량의 오차 [kWh](실제 차량 -시뮬레이션)	0.49	0.50	0.39	3.30	0.37	0.45	0.37	0.97

표 6 실제 차량과 시뮬레이션의 오차

4. 결론

본 전기차 시뮬레이션 연비 개선 경진 대회를 통해 기본 전기차 시뮬레이션에 있는 오류의 수정과 성능 개선을 진행하였다. 기본 전기차 시뮬레이션에서 2가지의 오류를 발견하였다. 첫 번째로 에너지 효율 적용 시 회생제동에서 효율이 역수로 곱해지던 부분이 있어 회생제동과 모터 출력을 구분하여 상황에 맞게 효율을 적용했다. 두 번째로 제동력의 출력 분배에서 기본 모델은 전체 제동력에서 회생과 유압을 일정하게 분배하는 Parallel Regenerative brake 방식을 사용하였지만, Regenerative_Percent 입력이 Max_Brake_Force가 아닌 모터의 최고 토크에 곱해져 있는 문제가 있었다. 그래서 필요 제동력에서 출력을 분배하고 회생제동의 출력이 모터가 낼 수 있는 최대 제동력을 넘지 못하게 수정하였다. 성능 개선으로 차량의 관성 모멘트와 인버터의 효율을 추가하였다. 모터에서부터 바퀴까지의 각 부품의 관성 모멘트를 고려해 준 식을 모델에 추가하였다. 이를 통해, 기본 모델에서 고려하지 않았던 손실이 모델에 추가되었다. 배터리에서 나온 에너지는 인버터를 거쳐 모터로 향한다. 인버터도 자체적인 효율을 가지고 있어서 이를 고려해 주었다. 제작한 개선 모델과 실제 차량과 비교한 결과 개선 모델이 실제 차량보다 효율이 높게 나온 것을 알 수 있었다. 이를 통해, 추가로 고려하여야 할 손실 부분이 있다는 것을 알 수 있었지만 개선 전 모델의 CSC1 주행 사이클과 비교했을 때 오차가 줄어들었다는 것을 알 수 있었다. UDDS를 통해 현재 모델에서는 온도에 따른 효율을 고려하지 않았기 때문에 온도에 따른 오차가 생긴 것을 알 수 있었다. 마지막으로 HWFET를 통해 SOC가 낮을수록 오차가 작다는 것을 알 수 있었다. 이를 통해 후속 모델의 제작 시 온도에 따른 효율을 추가하고 높은 SOC 구간에서 발생할 수 있는 오차를 생각하여 보정을 해줄 필요가 있어 보인다.

5. Reference

- 1) 노경완, 노만수, 김정철, 심창호 "전기자동차 에너지효율 측정을 위한 MCT 방법 개선 연구" 한국자동차공학회 논문집 29.10 pp.899-907 (2021) : 899.
- 2) "자동차 주행저항" Tstory 2013년 3월 10일. 웹사이트. 2022년 8월 24일.
- 3) 유지우, "자동차의 공기 저항을 줄이는 방법에는 어떤 것이 있을까요?" SK 에너지 블로그 2013년 3월 6일. 웹사이트. 2022년 8월 24일.
- 4) Zhao, You-Qun, et al. "Estimation of road friction coefficient in different road conditions based on vehicle braking dynamics." Chinese Journal of Mechanical Engineering 30.4 (2017): 982-990.
- 5) Hamada, Ahmed T., and Mehmet F. Orhan. "An overview of regenerative braking systems." Journal of Energy Storage 52 (2022): 105033.
- 6) Hofman, T., and C. H. Dai. "Energy efficiency analysis and comparison of transmission technologies for an electric vehicle." 2010 IEEE vehicle power and propulsion conference. IEEE, 2010.