

실도로 주행시험 기반 전기자동차 공차중량 변화에 따른 에너지 소비패턴 비교 분석

장재우·송진근*

경북대학교 자동차공학부

Comparative Analysis of Energy Consumption according to the Change of Curb Weight of Electric Vehicles in On-Road Driving

Jaewoo Jang · Jingeun Song*

School of Automotive Engineering, Kyungpook National University, Gyeongsbuk 37224, Korea

(Received 5 February 2024 / Revised 7 June 2024 / Accepted 21 June 2024)

Abstract : It is widely known that as curb weight increases, energy efficiency decreases. However, unlike traditional vehicles, electric vehicles use regenerative braking, which can reduce the impact of weight on energy efficiency. Therefore, this study conducted on-road driving tests using an electric vehicle and measured energy consumption. Four weight conditions (curb weight at +0 kg, 100 kg, 200 kg, 300 kg) were tested on the same driving route, while other factors, such as ambient temperature and driving speed, which could affect energy efficiency, were kept constant. Energy consumption was calculated using the data obtained from the vehicle, which included altitude, vehicle speed, motor speed, and motor torque. The results showed that, under the driving conditions used in this study, energy efficiency decreased by about 8.63 % from +0 kg to +300 kg. This implies that electric vehicles' weight significantly impacts energy efficiency.

Key words : Gradient resistance(구배저항), Rolling resistance(구름저항), Drag resistance(가속저항), Motor energy consumption(모터 에너지 소비량), Motor efficiency(모터 효율)

1. 서론

현재 전기자동차에 들어가는 배터리에는 NCM 배터리, LFP 배터리가 있다. NCM 배터리는 니켈, 코발트, 망간을 활용한 삼원계 배터리이며 다른 활물질에 비해 에너지 밀도가 높아 대용량 배터리 제작에 적합하고 수천 번 충방전이 가능하기 때문에 전기차 배터리에 많이 사용된다. LFP 배터리는 인산철(FePO_4)를 활용한 배터리이며 매우 안정적이고 수명이 긴 것이 특징이다. 하지만 구조적 특성상 리튬 이온의 이동이 활발하지 못해 낮은 전기전도도를 나타낸다.¹⁾ NCM에 비해 떨어지는 성능으로 인해 저가형에 사용되는 배터리로 인식되어 왔지만 최근 국내에서 LFP의 성능을 향상시키는 연구가 진행됨에 따라 가격이 싸고 수명이 긴 LFP 배터리를 상용화하는 분위기로 바뀌게 되었다. 보도자료에 따르면 한국 기

업이 주로 생산하는 NCM의 에너지밀도는 1 kg 당 약 170 Wh이고 LFP는 1 kg 당 약 137 Wh이다.²⁾ 배터리 용량이 77.4 kWh인 차량의 배터리를 예시로 NCM을 사용할 경우 약 455 kg, LFP를 사용할 경우 약 565 kg까지 무게가 약 100 kg 증가하게 된다.

자동차 연료 소비의 약 23 %는 차량의 중량과 연관되어 있어 차량의 중량을 줄이는 것은 연비향상, 이산화탄소 배출 절감과 차량의 내구수명 증가 등 많은 영향을 준다고 알려져 있다. 교통안전공단 자동차성능시험연구소에서는 승용차의 중량 변화에 따른 연비 변화에 대해 연구하였다.³⁾ 차대동력계에서 CVS-75모드(시가지 연비 시험 모드)로 시험을 진행하였으며, 1인 승차 인원 무게를 65 kg으로 설정하여 1인, 3인, 5인 총 3번의 시험 데이터를 취득하였다. 승차 인원 3인의 경우 1인 대비 연비가

*Corresponding author, E-mail: sjg@knu.ac.kr

¹⁾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.

4 % 감소하였고 5인의 경우 연비가 6 ~ 8 %까지 감소하는 것을 확인하였다.

호원 기술연구소에서는 차대동력계가 아닌 실도로 데이터를 기반으로 중량변화에 따른 연비 변화에 대한 연구를 진행하였다. 실험용 차량 모델은 가솔린 엔진이 탑재된 소형 모델이며 공차중량 1630 kg에서 약 100 kg씩 무게를 추가하여 총 4번의 실험을 진행하였다.⁴⁾ 공차중량이 1938.4 kg 일 경우 1630 kg 대비 연비가 15 % 감소하였고, 연료 소모량이 10.8 % 증가한 것을 확인하였다. 현대로템 기술연구소에서는 전동열차 소비전력 영향요인에 대해 모의 주행 시뮬레이션을 진행하고 소비전력 영향요인을 분석하였다.⁵⁾ 시뮬레이션 결과 소비전력 영향요인 중 순수 중량이 28 %로 가장 크게 나타난 것을 확인하였다.

경사가 있는 도로를 주행할 경우 차량의 중량과 고도 변화량을 알면 구배저항을 알 수 있다. 한국철도기술연구원에서는 구배 변화에 따른 전동지하철의 운전 패턴 변화에 대한 연구를 시뮬레이션 기법을 통해 진행하였다. 구배의 각도를 다르게 설정하여 총 다섯 번의 시뮬레이션을 진행하였고 구배에 따른 에너지 소비량이 상구배가 될수록 증가하는 것을 확인하였다.⁶⁾

이처럼 차체 경량화에 따른 연비 개선효과에 대한 검증은 주로 차대동력계나 시뮬레이션 기법을 활용하고 있으며, 자동차에서는 내연기관 차량을 대상으로 한 연구가 거의 대부분이다. 하지만, 전기자동차의 경우 회생제동이 적용되기 때문에 가속구간이나 오르막 구간에서 무게 증가에 따라 손실되었던 에너지를 감속구간이나 내리막 구간에서 회수할 수 있기 때문에 기존의 내연기관 자동차와는 차이점이 존재한다. 따라서, 전기자동차에 대하여 중량 변화가 연비에 미치는 영향에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 도심 주행과 고속도로 주행특성을 반영한 경로를 주행하며 전기자동차의 실도로 데이터를 수집하여 무게 증가에 따른 모터 에너지 소비량 및 연비를 분석하였다. 또한 구배저항 공식을 이용하여 도로 구배에 따른 에너지 소비량을 분석하였다.

2. 시험 내용 및 방법

2.1 주행저항

연비에 영향을 주는 요인에는 주행저항, 배터리 손실, 냉난방 기능 사용 등 여러가지가 있으며, 이 중 가장 큰 영향을 미치는 요소는 주행저항이다. 주행저항은 차량이 움직이는 동안 발생하는 저항을 나타낸다. 주행 저항에는 자동차가 유체 즉 공기 속에서 이동함에 따라 이동방향의 반대방향으로 작용하는 공기저항 R_d , 타이어 변

형과 마찰 등에 의하여 발생하는 구름저항 R_r , 경사로 있는 지형을 이동할 때 발생하는 구배저항 R_g , 가속 시 관성력에 의하여 발생하는 가속저항 R_a 가 있다. 주행저항은 외부 요소들로 인해 차량이 진행하는데 필요한 힘이라고도 볼 수 있으며 연료 효율성 등에 영향을 미치는 중요한 요소 중 하나이다. 각 저항력은 다음과 같다.⁷⁾

$$R_d = \frac{1}{2} \rho C_d A V^2 \quad (1)$$

$$R_r = C_r m g \cos \theta \quad (2)$$

$$R_g = m g \sin \theta \quad (3)$$

$$R_a = m a \quad (4)$$

ρ : 공기 밀도

C_d : 공기저항계수

A : 차량의 전면투영면적

V : 차량의 속도

C_r : 구름저항계수

m : 차량의 질량

g : 중력가속도

θ : 도로의 경사도

a : 차량의 가속도

만약 차량이 정속으로 주행할 경우 공기저항은 주로 외기온도와 차속의 영향을 받는다. 구름저항의 경우 차량의 중량과 구름저항계수의 영향을 받는다. 구배저항은 도로의 구배와 차량의 중량의 영향을 받는다. 가속저항은 정속의 경우 가속도가 0이기 때문에 고려하지 않는다.

본 연구에서는 연비에 영향을 주는 요인들 중에서 중량에 따라 변하는 주행저항에 초점을 두어 진행하였다. 그 밖에 외기온도 차이에 따른 주행저항 변화의 영향을 배제하기 위하여 주행시험은 모두 외기온도가 $25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 인 조건에서 진행되었다. 또한, 냉난방 에너지 소모나 배터리 손실 차이의 영향을 배제하기 위하여 배터리 에너지 소모량이 아닌 모터 에너지 소모량을 기준으로 결과를 분석하였다.

2.2 시험 차량 및 주행 경로

본 연구에 사용한 차량은 배터리 용량이 77.4 kWh인 준중형 모델이다. 제원은 Table 1에 나타내었다.

실도로 실험 데이터를 취득하기 위하여 선정된 경로

Table 1 Specification of test vehicle

Type	Semi-medium size / EV
Motor power / Torque	168 kW / 350 Nm
Mass	1,945 kg
Battery capacity	77.4 kWh

Table 2 Experimental conditions

Outdoor temperature	25 °C
Constant speed in highway	97 km/h
Additional mass	0 kg, 100 kg, 200 kg, 300 kg
Driving route type	city - highway - city



Fig. 1 Driving route

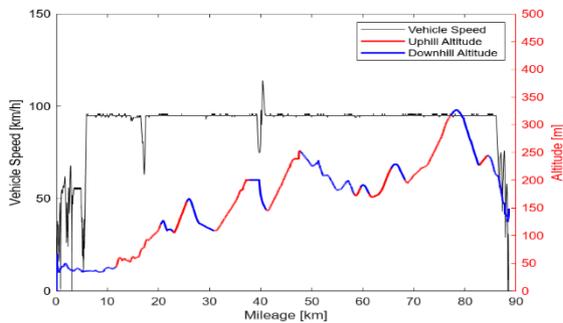


Fig. 2 Vehicle speed, altitude of the driving route

를 Fig. 1과 같이 나타내었다. 통행량이 많고 적음에 따라, 그리고 운전자의 주행 습관에 따라 주행 패턴이 달라질 수 있다.⁸⁾ 시험 간 주행패턴의 편차를 줄이기 위하여 거의 동일 시간에 동일 운전자가 주행하였다. 주행경로는 대부분 고속도로 구간으로 선정하였으며, 크루즈 주행 기능을 이용하여 약 97 km/h로 정속주행 하였다.

선정한 주행 경로의 총 이동 거리는 약 88 km이다. 구배저항을 계산하기 위해서는 주행하는 경로의 고도 데이터가 필요하다. 따라서 GPS로부터 위도, 경도, 고도, 차속 데이터를 취득하였고 10 Hz의 취득 주기를 갖는다. GPS 데이터가 내재하고 있는 오차와 데이터 누락을 보정하기 위하여 고도 데이터를 누적하여 표준화하는 방법을 사용하였다.⁹⁾ 차량 내부 통신으로부터 모터 토크, 모터 출력 등 전비 계산에 필요한 데이터를 취득하였다.

Fig. 2는 선정한 주행 경로를 주행하면서 얻은 차속 데이터와 고도 데이터를 나타내는 그래프이다. 주행 경로 중 오르막길은 빨간색, 내리막길은 파란색으로 표시하였다. 산을 넘어야 하는 지형 특성으로 인해 고도가 대체적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 선정한 주행경로를 주

행하면서 추가 무게 0 kg에서 300 kg까지 100 kg씩 무게를 추가하여 총 4번의 주행을 하였다.

본 연구는 실도로 주행데이터를 기반으로 전체 구간, 고속도로 정속구간, 오르막, 내리막 구간을 설정하여 분석을 진행하였다. 정속주행 구간에서는 1 km/h의 속도 편차를 허용하였고 이를 벗어나는 경우는 제외하였다. 본 연구에서 진행한 실험 조건을 Table 2에 나타내었다.

3. 실험 결과 및 분석

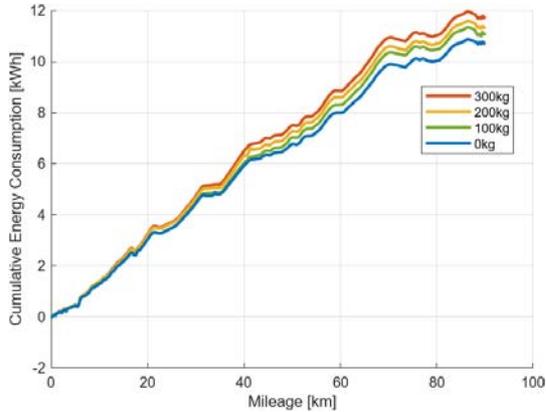
앞서 언급한 바와 같이 고속도로 구간에서는 약간의 오차가 있지만 97 km/h로 정속주행 하였고, 차량의 무게는 공차중량 1945 kg, 운전자 무게 70 kg에 0, 100, 200, 300 kg을 추가한 총 4번의 실험 데이터를 취득하였다. 외기온도는 25 °C로 동일한 조건에서 진행하였고 냉방 에너지를 고려하지 않기 위해 배터리 보다는 모터 에너지에 초점을 두었고 전비는 모터 에너지 소비량을 주행거리로 나누어 계산하였다.

3.1 전체 구간

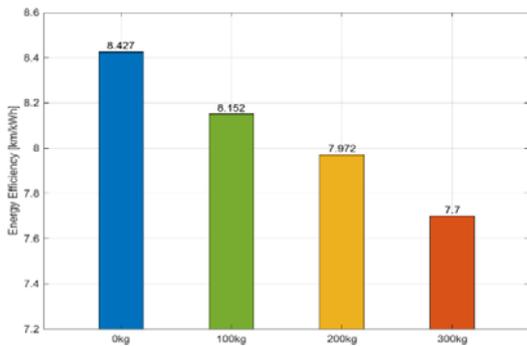
전체 구간 주행 중 소비한 총 모터 에너지를 누적시킨 그래프와 전비 그래프를 Fig. 3과 같이 나타내었다. 총 모터 에너지 소비량은 추가 무게 0 ~ 300 kg 순으로 약 10.73 kWh, 11.089 kWh, 11.34 kWh, 11.74 kWh로 무게 증가에 따라 약 3.34 %, 5.68 %, 9.41 % 증가하였다. 전비는 추가 무게 0~300 kg 순으로 8.43 km/kWh, 8.15 km/kWh, 7.97 km/kWh, 7.7 km/kWh로 각각 100 kg씩 추가될 때마다 약 3.26 %, 5.4 %, 8.63 % 감소하였다.

동일한 경로와 외기온도 조건에서 실험을 진행하였기 때문에 총 모터 에너지 소비량의 증가 원인은 차량 중량 증가로 볼 수 있다. 중량 증가에 따라 차량 구동을 위해 필요한 힘, 즉 주행저항이 증가하게 되어 총 모터 에너지 소비량이 증가하였고, 이에 따라 전비가 감소한 것을 확인할 수 있었다.

전체 구간은 매 조건에서의 속도 편차와 가감속 패턴의 불규칙함을 모두 허용한 구간이다. 특히 도심 구간에서는 도로 상황에 따라 주행 패턴이 고속도로보다 불규칙하기 때문에 정확한 분석을 위해서는 도심 구간을 제외시켜야 한다.



(a) Cumulative energy consumption over the entire route



(b) Energy efficiency over the entire route

Fig. 3 (a) Cumulative energy consumption and (b) Energy efficiency over the entire route

3.2 도심 구간

Fig. 4는 도심 구간에서의 모터 에너지 소비량을 누적시킨 그래프이다. 도심 구간에서는 도로 상황에 따라 가속 패턴이 달라 매 조건마다 평균속도가 다르다. 또한 모터의 에너지 소비 패턴과 회생제동에 따른 에너지 회수 패턴이 불규칙하여 정확한 전비 비교가 어렵다. 도심 구간에서 약 7.259 km 주행하였고, 평균속도는 추가 무게 순으로 40.58 km/h, 29.4 km/h, 40.33 km/h, 35.95 km/h이다. 평균 속도가 비슷한 0 kg, 200 kg 두 조건을 비교했을 때 모터 에너지 소비량은 각각 0.4493 kWh, 0.4638 kWh로 전비는 16.15 km/kWh, 15.65 km/kWh이다. 평균 속도는 비슷하지만 모터 에너지 소비량은 차량의 무게 200 kg 증가에 따라 3.20 % 증가, 전비는 3.10 % 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

추가 무게 300 kg의 평균속도는 추가 무게 0 kg의 조건에 비해 낮다. 그러나 모터 에너지 소비량은 0.4937 kWh로 약 9.9 % 증가하였다. 전비는 추가 무게 300 kg 조건에서 14.7 km/kWh로 평균속도가 상대적으로 낮음에도

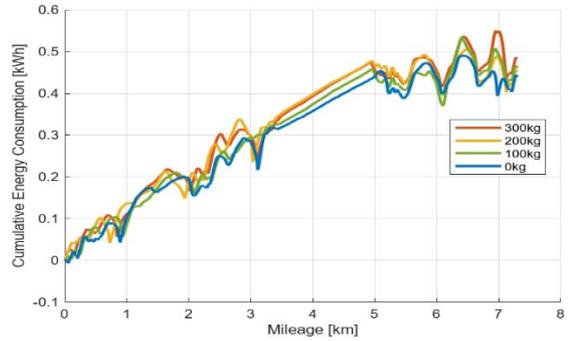


Fig. 4 Cumulative energy consumption over the city driving

불구하고 전비가 8.99 % 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

추가 무게 200 kg의 경우 100 kg일때와 비교했을 때, 평균속도도 크고 차량의 중량도 크다. 하지만 모터 에너지 소비량은 0.4638 kWh로 오히려 100 kg일때보다 전비가 증가하였다. 이는 회생제동 에너지를 비교하였을 때 100 kg, 200 kg 각각 0.5488 kWh, 0.6688 kWh로 200 kg에서 더 많은 에너지를 회수하였기 때문에 이러한 결과가 나왔다. 이와 같이 도심구간에서는 속도 편차가 크고 주행패턴이 매 주행마다 달라진다. 또한 이 실험에서는 도심 구간의 거리가 짧아 중량에 따른 차별성을 정확히 분석하기가 어렵다.

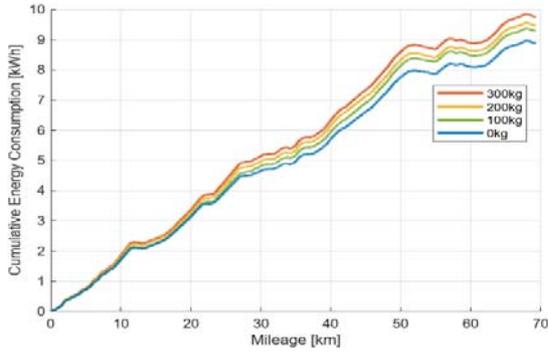
3.3 고속도로 정속 구간

정확한 분석을 위해서는 차량 속도 조건이 동일한 구간에서 비교하여야 한다. 따라서 전체 주행 경로 중 고속도로 정속주행 구간만을 선정하여 네 가지 경우 모두 동일한 속도로 1분 이상 주행했을 때의 데이터를 분석하였다. 네 가지 경우 모두 고속도로 정속 구간에서 97 km/h로 정속주행을 했고 1 km/h의 속도 편차를 허용하였다. 정속 구간에서의 모터 에너지 소비량을 Fig. 5(a)와 같이 나타내었다. 도심 구간에서의 모터 에너지 소비량 그래프와 비교하였을 때 에너지 소비 패턴이 상대적으로 규칙적인 것을 확인할 수 있었다.

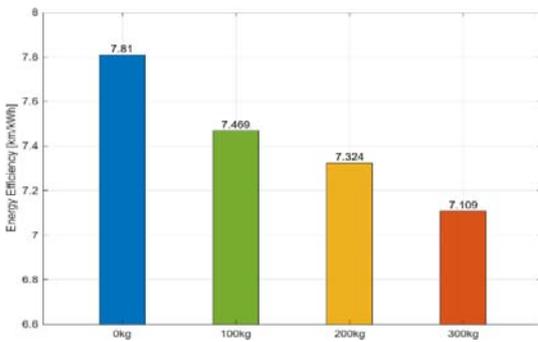
무게 증가에 따라 모터 에너지 소비량도 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 정속 구간에서의 전비는 Fig. 5(b)와 같이 나타내었다. 전비는 추가 무게 0 ~ 300 kg 순으로 7.81 km/kWh, 7.469 km/kWh, 7.324 km/kWh, 7.109 km/kWh로 무게가 증가함에 따라 전비가 4.35 %, 6.21 %, 8.98 % 감소하였다.

3.4 정속 오르막길 구간

오르막길 구간에서의 고도 그래프, 오르막길 구간에



(a) Cumulative energy consumption over the constant-speed driving

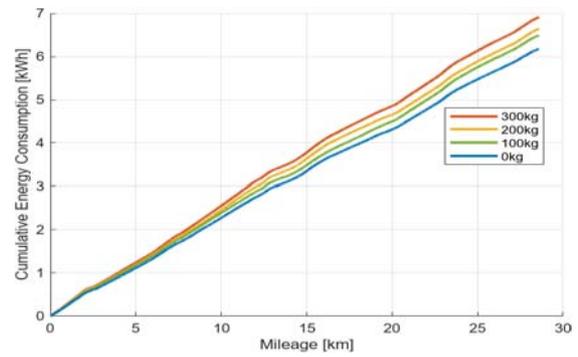


(b) Energy efficiency over the constant-speed driving

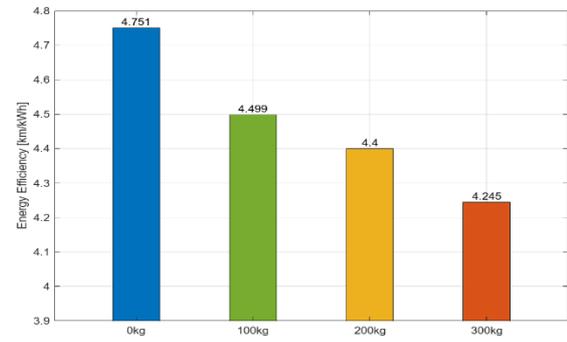
Fig. 5 (a) Cumulative energy consumption and (b) Energy efficiency over the constant-speed driving

서의 모터 에너지 소비량, 오르막길 구간에서의 전비는 Fig. 6과 같이 나타내었다. 속도 편차가 1 km/h 이상인 구간은 제외하였다. 고속도로 정속 구간 중 오르막길 구간의 총 고도 변화량은 610 m이다. 정속 오르막길 구간에서의 모터 에너지 소비량은 추가 무게 0~300 kg 순으로 약 6.08 kWh, 6.423 kWh, 6.567 kWh, 6.807 kWh로 무게 증가에 따라 5.59 %, 7.96 %, 11.9 % 증가하는 경향을 보였다. 전비는 추가 무게 0~300 kg 순으로 약 4.75 km/kWh, 4.5 km/kWh, 4.4 km/kWh, 4.25 km/kWh로 무게 증가에 따라 5.3 %, 7.39 %, 10.7 % 감소하는 경향을 보였다.

고속도로 정속 구간 중 구배가 증가, 감소하는 구간을 나누어 구배저항에 의한 모터 에너지 소비량과 그 외의 주행저항에 의한 모터 에너지 소비량을 분석하였다. 앞서 언급한 바와 같이 차량이 경사로를 올라갈 경우 에너지 보존 법칙에 의해 운동에너지가 위치에너지로 바뀌게 되고, 내려가는 경우에는 위치에너지가 운동에너지로 바뀌게 된다. 도로 구배에 의해 구배저항이 발생하게 되고, 고도 변화량을 알면 위치에너지 공식 mgh 를 이용



(a) Cumulative energy consumption over the uphill driving



(b) Energy efficiency over the uphill driving

Fig. 6 (a) Cumulative energy consumption and (b) Energy efficiency over the uphill driving

하여 전환되는 에너지량을 구할 수 있다. 구배저항 공식 $mgsin\theta$ 를 사용할 경우 도로 특성 상 구배 각이 계속 변하기 때문에 위치에너지 공식을 사용하는 것보다 계산이 어렵다. 따라서 오르막, 내리막 구간에서의 총 고도 변화량을 각각 누적 계산하여 도로 구배에 의한 모터 에너지 소비량을 위치에너지 공식을 이용하여 계산하였다.

동일한 차종과 외기 온도 조건에서 데이터를 취득하였기 때문에 공기저항은 네 가지 조건 모두 동일하다고 가정하였다. 가속저항 또한 정속 주행 시에는 작용하지 않기 때문에 0이라고 가정하였다.¹⁰⁾ 따라서 오르막길 정속주행 구간에서의 모터 에너지 소비량을 구름저항과, 구배저항 및 공기저항으로 분석이 가능하다. 위치에너지 공식 mgh 를 이용하여 차량 무게 별 구배저항에 의한 모터 에너지 소비량을 계산하였다. 또한 총 모터 에너지 소비량에서 구배에 의한 모터 에너지 소비량을 뺀 값을 계산하면 구름저항과 공기저항에 의한 모터 에너지 소비량을 알 수 있다. 따라서 이를 계산하여 Fig. 7과 같이 나타내었다.

구배저항으로 인한 모터 에너지 소비량은 0.259 kWh,

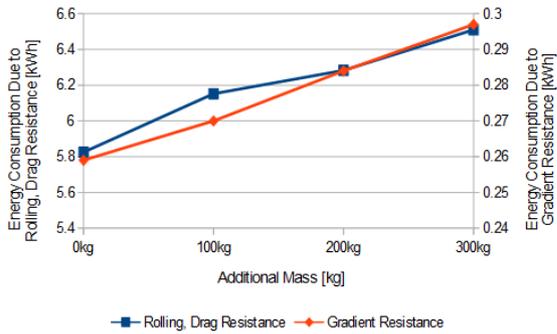


Fig. 7 Energy consumption due to gradient, rolling and drag resistance over the uphill driving

0.271 kWh, 0.284 kWh, 0.297 kWh로 무게 증가에 따라 약 4.63 %, 7.65 %, 14.7 % 증가한 것을 확인할 수 있었다. 앞서 언급한 바와 같이 총 모터 에너지 소비량에서 구배저항에 의한 모터 에너지 소비량을 제외하면 구름저항 및 공기저항에 의한 모터 에너지 소비량만 남게 된다. 구름저항 및 공기저항으로 인한 모터 에너지 소비량은 추가 무게 0 ~ 300 kg 순으로 약 5.825 kWh, 6.152 kWh, 6.283 kWh, 6.51 kWh로 무게 증가에 따라 약 5.61 %, 7.86 %, 11.7 % 증가하였다.

공기저항은 매 조건마다 동일하다고 가정하였기 때문에 구배저항과 구름저항은 무게 증가에 따라 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 이에 따라 모터 에너지 소비량이 증가하여 전비가 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

3.5 정속 내리막길 구간

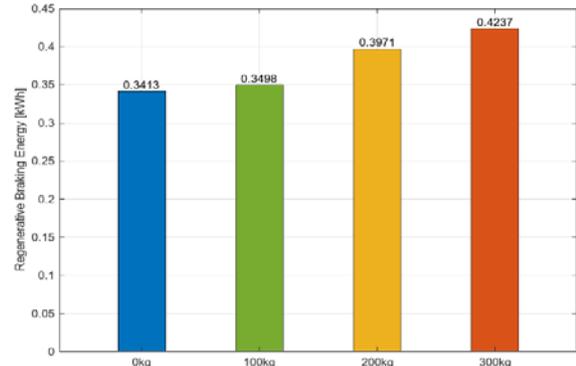
Fig 8(a)는 내리막 구간 동안에 발생한 모터 회생제동 에너지량을 누적시킨 값이고 (b)는 내리막길 주행 중 총 모터 에너지 소비량을 나타내는 그래프이다.

내리막 구간에서의 회생제동 에너지량은 추가 무게 0 ~ 300 kg 순으로 약 0.3413 kWh, 0.3498 kWh, 0.3971 kWh, 0.4237 kWh로 무게 증가에 따라 2.49 %, 16.4 %, 24.1 % 증가하였다. 차량 중량이 증가할수록 모터 회생제동 에너지량 또한 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

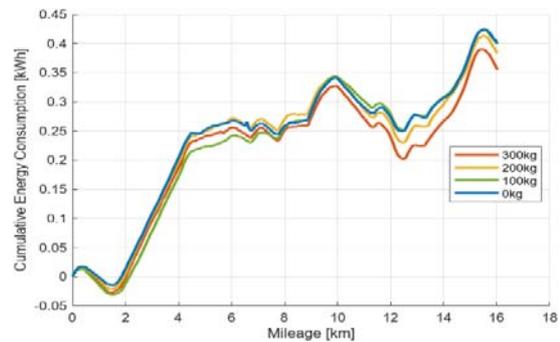
총 모터 에너지 소비량은 0.401 kWh, 0.3995 kWh, 0.3836 kWh, 0.3554 kWh로 무게 증가에 따라 약 0.37 %, 4.34 %, 11.4 % 감소하였다.

내리막길 구간에서도 구배저항, 구름저항에 의한 모터 에너지 소비량을 위치에너지 공식을 이용하여 구하였다. 구배저항에 의한 모터 에너지 소비량과 구름저항, 공기저항으로 인한 모터 에너지 소비량을 Fig. 9와 같이 나타내었다.

앞서 언급한 바와 같이 오르막길의 경우와 반대로 내



(a) Regenerative braking energy



(b) Cumulative energy consumption over the downhill driving

Fig. 8 (a) Regenerative braking energy and (b) Cumulative energy consumption over the downhill driving

리막길에서는 위치에너지가 다시 운동에너지로 전환이 된다. 이 전환된 에너지와, 회생제동으로 인한 에너지 회수로 인하여 모터 에너지 소비량은 무게 증가에 따라 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 구배저항으로 인한 모터 에너지 소비량은 추가 무게 0 ~ 300 kg 순으로 약 -2.196 kWh, -2.305 kWh, -2.414 kWh, -2.522 kWh로 4.96 %, 9.9 %, 14.8 % 감소하였다. 구름저항과 공기저항에 의한 모터 에너지 소비량은 2.415 kWh, 2.516 kWh, 2.588 kWh, 2.67 kWh로 무게 증가에 따라 4.18 %, 7.16 %, 10.6 % 증가하였다.

구름저항과 공기저항으로 인한 모터 에너지 소비량은 무게 증가에 따라 증가했지만, 내리막 구배로 인하여 운동에너지로 전환된 에너지량과 회생제동 에너지량 또한 증가하였기 때문에 총 모터 에너지 소비량은 감소한다는 것을 확인할 수 있었다. 앞서 언급한 바와 같이 동일한 외기온도 조건과 정속 조건으로 인해 공기저항은 네 가지 경우 모두 동일한 값으로 가정하였기 때문에 내리막 구간 역시 구배저항으로 인한 모터 에너지 소비량이

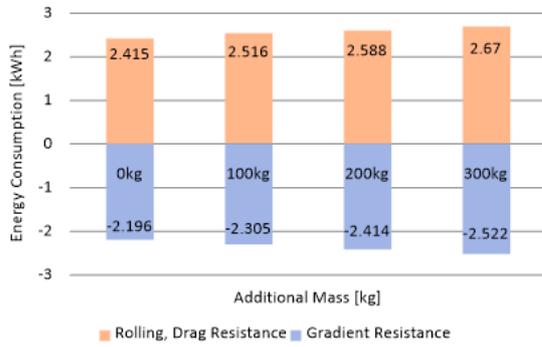


Fig. 9 Energy consumption due to gradient, rolling and drag resistance over the downhill driving

구름저항에 비해 상대적으로 더 큰 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다.

내리막 구간에서 구름저항 및 공기저항으로 인한 모터 에너지 소비량은 도로 구배와 회생제동에 따른 에너지 회수로 인해 거의 상쇄되는 경향을 보였다. 따라서 무게 증가에 따라 총 모터 에너지 소비량은 감소하지만 전체 구간에서의 전비에 큰 영향을 주지 못한다는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 차량에 무게를 추가하여 총 4번의 실도로 주행 데이터를 취득하여 차량 중량 변화에 따른 전비 변화에 대해 비교 분석하였다. 고속도로 정속주행 구간에서는 1 km/h의 속도 편차를 허용하였고 이를 벗어나는 구간은 제외하였다. 오르막길, 내리막길에서는 위치에너지 공식을 이용하여 구배저항에 의한 모터 에너지 소비량을 비교 분석하였다. 본 연구로부터 도출한 결론은 다음과 같다.

- 1) 선정된 주행 경로 전체에서의 전비는 추가 무게 0 ~ 300 kg 순으로 3.26 %, 5.4 %, 8.63 % 감소하였다. 고속도로 정속 구간에서의 전비는 4.35 %, 6.21 %, 8.98 % 감소하였다.
- 2) 정속 오르막길 구간에서 전비는 5.3 %, 7.39 %, 10.7 % 감소하였다. 구배저항으로 인한 모터 에너지 소비량은 4.63 %, 7.65 %, 14.7 % 증가하였다. 그 외의 주행저항으로 인한 모터 에너지 소비량은 5.61 %, 7.86 %, 11.7 % 증가하였다.
- 3) 정속 내리막길 구간에서 모터 회생제동 에너지량은 무게 증가에 따라 2.49 %, 16.4 %, 24.1 % 증가하였다. 모터 에너지 소비량은 3.59 %, 20.4 %, 32.6 % 감소하였다. 구배저항으로 인한 모터 에너지 소비량은 4.96 %, 9.9 %, 14.8 % 감소하였다. 그 외의 저항으로 인한 모

터 에너지 소비량은 무게 증가에 따라 4.18 %, 7.16 %, 10.6 % 증가하였다. 구름저항은 무게 증가에 따라 증가하였지만 회생제동과 위치에너지로 인하여 고속도로 정속구간에서 총 모터 에너지 소비량은 무게 증가에 따라 감소한다.

전체 구간, 고속도로 정속구간, 오르막길 구간에서 차량 중량 증가에 따라 구름저항과 구배저항이 증가하였고, 이에 따라 차량이 진행하는데 필요한 힘이 증가하게 되어 더 많은 에너지가 필요하게 된다.¹¹⁾ 따라서 총 모터 에너지 소비량은 무게 추가에 따라 증가하게 되고 동일한 구간, 동일한 외기온도 조건에서 모터 효율은 떨어지게 된다. 내리막 구간에서는 회생제동과 구배에 의한 에너지 회수로 인해 중량 증가에 따라 에너지 소비가 줄었으나, 구름저항 증가로 인하여 효율의 차이가 거의 없었다. 또한 고도 감소의 영향을 배제하면 여전히 중량 증가에 따라 에너지 소비가 증가한다.

최근 고가의 경량 소재 사용, 복잡한 제조 공정을 거치는 등 전기자동차의 주행거리 향상을 위해 경량화에 대한 관심이 높아지고 있다.¹²⁾ 따라서 배터리의 에너지 밀도는 제조 비용과 전기자동차의 연비에 매우 큰 영향을 미치므로 에너지 밀도를 높이는 연구는 매우 중요하다.

후 기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2021R1F1A1052133).

References

- 1) M. -B. Gang, W. -Y. Kim and N. -J. Kim, "Numerical Comparative Study on the Thermal Runaway of NCM/LFP Batteries of the Same Geometry," Transactions of the Korean Society for Geothermal and Hydrothermal Energy, Vol.18, No.4, pp.1-11, 2022.
- 2) M. B. Gang, Numerical Analysis of Energy Density and Thermal Runaway Propagation Analysis According to the Type of Cathode Active Material of Lithium Secondary Battery, M. S. Thesis, Jeju University, 2021.
- 3) J. K. Lee, G. J. Yong, J. H. Lee, K. B. Lee, Y. S. Hong, H. W. Lee, H. Jung and J. S. Lim, "The Study on the Fuel Economy According to the Variable Weight of Passenger Cars," KSAE Fall Conference Proceedings, pp.1861-1866, 2005.
- 4) H. Choi, S. Lee, K. Choi and J. Noh, "Fuel Efficiency Experiment According to the Weight Reduction of Vehicle," Unpublished.

- 5) M. H. Kim, K. B. Park, H. J. Cho and J. W. Lee, "Analysis on the Influence Factors of Energy Consumption and Study on the Prediction of Energy Consumption in EMU," Conference of the Korean Society for Railway, pp.65-71, 2016.
- 6) K. -W. Kim, M. Han, S. -H. Chang and J. -W. Sung, "Energy Efficiency Enhancing Operation Technique Considering Gradient Resistance," Conference of the Korean Society for Railway, pp.2331-2337, 2009.
- 7) J. Song and J. Cha, "Analysis of Driving Dynamics Considering Driving Resistances in On-Road Driving," Energies, Vol.14, No.12, Paper No.3408, 2021.
- 8) J. Park, Y. Lee, C. Jeong, D. Jung, J. Kim and M. Jeong, "A Study on Correlation Between Uphill Driving Patterns and Fuel Economy Based on Drivers' Field Operational Test," KSAE Fall Conference Proceedings, pp.637-641, 2011.
- 9) J. Song, "Altitude Standardization Method to Improve Altitude Data Accuracy in On-road Driving," Transactions of the KSAE, Vol.30, No.6, pp.447-456, 2022.
- 10) S. Kim, S. -K. Shin and K. -Y. Kim, "Study on the Vehicle Road-Load Affecting Factors," KSAE 30th Anniversary Conference, pp.803-809, 2008.
- 11) R. B. Carlson, H. Lohse-Busch, J. Diez and J. Gibbs, "The Measured Impact of Vehicle Mass on Road Load Forces and Energy Consumption for a BEV, HEV, and ICE Vehicle," SAE International Journal of Alternative Powertrains, Vol.2, No.1, pp.105-114, 2013.
- 12) J. T. J. Burd, E. A. Moore, H. Ezzat, R. Kirchain, R. Roth, "Improvements in Electric Vehicle Battery Technology Influence Vehicle Lightweighting and Material Substitution Decisions," Applied Energy, Vol.283, Paper No.116269, 2021.