

전륜구동 전기자동차의 기어비 변경에 따른 구동 특징 민감도 분석

손영갑*, 김정민*.[#]

*국립안동대학교 기계자동차공학과

Sensitivity Analysis on Driving Characteristics According to Change in Gear Ratio of a Front Wheel Drive Electric Vehicle

Young-Kap Son*, Jeong-Min Kim*.[#]

*Department of Mechanical & Automotive Engineering, Andong National UNIV.

(Received 12 July 2022; received in revised form 05 August 2022; accepted 12 August 2022)

ABSTRACT

Acceleration performance, maximum velocity, urban driving energy consumption, and high-way driving energy consumption are important characteristics of electric vehicle driving. This study analyzes the effect of a gear ratio on these characteristics for a front wheel drive electric vehicle. The normalized sensitivity metric is used to compare the sensitivity of these scaled characteristics to the changes in the gear ratio. The sensitivity analysis results show that the normalized values are 0.95 for maximum velocity, 0.91 for acceleration performance, 0.51 for urban driving energy consumption, and 0.24 for high-way driving energy consumption. Therefore, the maximum velocity was affected the most by the changes in the gear ratio. These results can be used to determine the gear ratio of a front wheel drive electric vehicle to optimize the driving characteristics simultaneously.

Keywords : Electric Vehicle(전기자동차), Gear Ratio(기어비), Sensitivity Analysis(민감도분석), Driving Characteristic(구동특징), Front Wheel Drive(전륜구동)

1. 서 론

전기자동차는 보통 구동모터와 바퀴 구동축 사이에 고정된 감속비를 갖는 기어가 적용된다. 이 전기자동차용 기어를 어떻게 설계하느냐에 따라 전기자동차의 성능이 변화되며, 전기자동차의 구동모터

감속용 기어 설계와 관련된 연구는 크게 기어 단품에 관한 설계와 기어비 설계로 나눌 수 있다. 기어 단품과 관련된 연구로는 전기차용 기어의 유효요소 해석을 통한 설계, 전기자동차용 2속 변속기의 안전율 및 작동조건을 고려하여 기어의 모듈과 치폭비 계산 프로그램을 통한 최적 설계, 전기차에 기어 대신 체인 적용을 통한 소음 및 효율 개선 등의 연구가 수행된 바 있다^[1-3]. 기어비 설계와 관련된 연구는 기어비 변경에 따라 전기자동차의 동력성능

Corresponding Author : jmk@anu.ac.kr

Tel: +82-54-820-7935, Fax: +82-54-820-5044

및 전기소비에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 분석과 동력성능 및 전기소비를 고려한 전기자동차 기어비 설계에 대한 연구가 수행된 바 있다^{4,6}. 기어비 변경에 따라 동력성능 및 전기소비 성능에 얼마나 영향을 미치는지에 대한 분석이 수행되고, 좀더 영향도가 높은 성능 인자를 고려한 설계가 수행되어야 한다. 하지만, 기존 전기자동차 기어비 설계에 있어서, 그렇지 않은 상황에서 기어비가 설계되어 동력성능 및 전기소비 성능을 적절히 고려한 기어비 설계가 수행되었다고 볼 수 없다. 따라서, 전기자동차 기어비 설계에 앞서, 기어비 변경이 동력성능 및 전기소비 성능에 얼마나 영향을 미치는지에 대한 분석이 요구된다.

본 연구에서는 전륜구동 전기자동차의 기어비 설계 시 동력성능 및 전기소비 성능을 적절히 고려하기 위하여, 전륜구동 전기자동차용 기어의 기어비를 변경하였을 때 가속성능 및 최고속도와 같은 동력성능과 도심주행 및 고속도로 주행 시 전기소비 성능의 민감도 분석을 수행하고자 한다.

2. 전륜구동 전기자동차 시뮬레이션

전륜구동 전기자동차용 기어의 기어비를 변경하였을 때 가속성능 및 최고속도와 같은 동력성능과 도심주행 및 고속도로 주행 시 전기소비 성능의 민감도 분석을 수행하기 위하여 전륜구동 전기자동차 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 기존 연구를 기반으로 수행되었다⁶⁻⁷. Table 1은 본 연구에서 고려한 전기자동차의 제원을 정리한 것이다. 191.5kW 전기모터가 전륜에 장착되었으며, 차량의 질량은 2,175kg이다.

Fig. 1은 전륜구동 전기자동차가 최대가속을 수행하여 정지에서 100km/h까지 도달하는데 걸린 시간의 시뮬레이션 결과를 도시한 것이다. 기어비가 1일 때는 정지에서 100km/h까지 도달하는 시간이 15.2s였으며, 이후 기어비가 증가되어 기어비가 11이 되면 정지에서 100km/h까지 도달하는 시간이 7.17s인 것을 볼 수 있다. 이는 기어비가 커지면 가속력이 증가하게 되어 정지에서 100km/h까지 도달하는 시간이 더 짧아지게 되는 것이다. 이후 기어비가 11보다 더 커져도 정지에서 100km/h

Table 1 Electric vehicle specifications

Mass	2,175 kg
Cd	0.24
Frontal area	2.34 m ²
Tire rolling resistance coefficient	0.009
Tire radius	0.3524 m
Tire friction coefficient	1
Length between the front wheel and the center of mass	1.4 m
Length between the rear wheel and the center of mass	1.4 m
Height between the vehicle bottom and the center of mass	0.6 m
Motor maximum power	191.5 kW
Motor maximum torque	300 Nm
Motor base speed	6,100 rpm
Motor maximum speed	18,000 rpm
Battery nominal voltage	350 V
Battery capacity	280 Ah

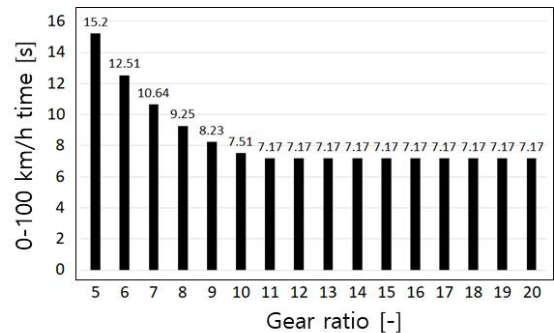


Fig. 1 Simulation results of 0-100 km/h time

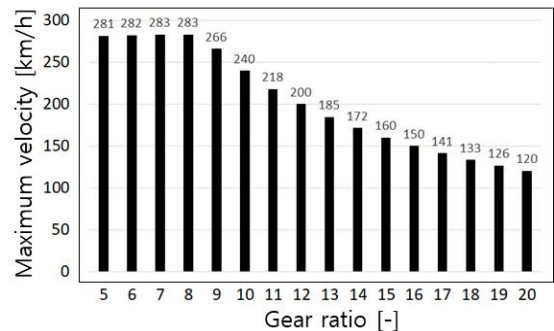


Fig. 2 Simulation results of maximum velocity

까지 도달하는 시간은 변화 없이 7.17s로 유지되는 것을 볼 수 있다. 이는 전륜 타이어가 전달할 수 있는 최대 구동력에 의한 것이다. 기어비가 증가하여 구동력이 일정 구동력값 이상이 되면 전륜 타이어가 이 구동력 전부를 차량으로 전달할 수 없기 때문에, 정지에서 100km/h까지 도달하는데 걸린 시간이 7.17s 이하보다 더 작아질 수 없는 것이다.

Fig. 2는 전륜구동 전기자동차의 최고속도 시뮬레이션 결과를 도시한 것이다. 기어비가 1일 때는 최고속도가 281km/h였으며, 이후 기어비가 증가되어 기어비가 8 이 되면 최고속도가 283km/h인 것을 볼 수 있다. 이는 기어비가 커지면 구동력이 증가하게 되어 최고속도가 더 빨라지게 되는 것이다. 이후에 기어비가 8보다 더 커지게 되면, 기어비가 커짐에 따라 최고속도는 감속하며, 기어비가 20이 되면 최고속도는 120km/h인 것을 볼 수 있다. 이는 전기자동차의 기어비가 커지게 되면 모터속도가 차량속도 증가에 따라 더 빠르게 증가하게 되며, 기어비가 커지게 되면 모터의 최고속도인 18,000rpm에 빠르게 도달하기 때문이다. 즉, Fig. 2의 시뮬레이션 결과는 기어비가 8 이하에서는 모터의 최고속도 보다는 최대 구동력에 의하여 최고속도가 결정되었으며, 기어비가 8보다 더 커지게 되면 모터가 최고속도에 도달하기 때문에 차량의 최고속도가 결정된 것이다.

Fig. 3은 전륜구동 전기자동차의 FUDS(federal urban driving schedule) 주행 시 배터리 충전율(SOC: state of charge) 변화 결과를 도시한 것이다. FUDS는 국내 및 미국에서 전기자동차의 도심 주행 시 전비를 측정하는데 있어 사용되는 주행사이클이다. 기어비가 1일 때는 FUDS 주행 시 배터리 충전율 변화가 1.84%이다. 이는 Table 1의 배터리 용량 280Ah의 1.84%를 사용했다는 것을 의미한다. 이후 기어비가 증가됨에 따라 FUDS 주행 시 배터리 충전율 변화가 감소하는 것을 볼 수 있으며, 기어비가 20이 될 경우 FUDS 주행 시 배터리 충전율 변화는 1.20%이다.

Fig. 4는 전륜구동 전기자동차의 HWFET(high way fuel economy test) 주행 시 배터리 충전율 변화 결과를 도시한 것이다. HWFET는 국내 및 미국에서

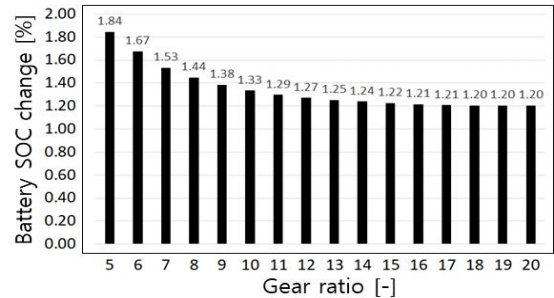


Fig. 3 Simulation results of urban driving

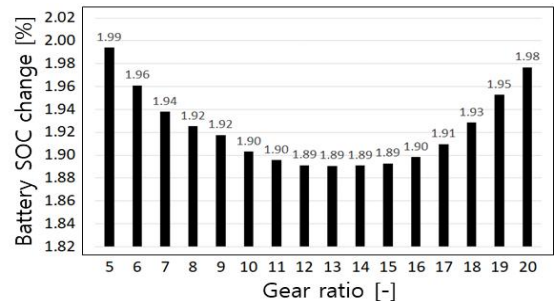


Fig. 4 Simulation results of high-way driving

전기자동차의 고속도로 주행 시 전비를 측정하는데 사용되는 주행사이클이다. 기어비가 1일 때는 HWFET 주행 시 배터리 충전율 변화가 1.99%이다. 이후 기어비가 증가됨에 따라 HWFET 주행 시 배터리 충전율 변화가 감소하다, 기어비가 14보다 커지면 다시 증가하는 것을 볼 수 있다.

3. 시뮬레이션 결과의 민감도 분석

2장의 시뮬레이션 결과를 바탕으로, 동력성능 및 전기소비 성능을 적절히 고려한 전기자동차 기어비 설계를 수행할 수 있다. 전기자동차용 기어비 설계에 있어서, 기어비 변경에 따라 동력성능 및 전기소비 성능에 얼마나 영향을 미치는지에 대한 분석이 수행되고, 좀 더 영향도가 높은 성능인자를 고려한 기어비 설계가 수행되어야 한다. 따라서 기어비가 성능에 미치는 영향도를 분석하기 위해서 기어비 변화에 대한 성능의 민감도 분석을 수행하였다.

일반적으로 종속변수 y 가 독립변수 x 의 함수로

정의될 때 정규화된 민감도(normalized sensitivity)는 식 (1)로 정의된다.

$$S_x^y = \left(\frac{dy}{y} \right) / \left(\frac{dx}{x} \right) \quad (1)$$

정규화된 민감도는 x 와 y 의 크기에 따라 일반적으로 사용되는 민감도를 나타내는 dy/dx 가 차이가 날 수 있기 때문에 x 의 변화에 대한 y 의 변화율을 정확히 얻기 위해서 사용된다. 식 (1)을 이용하여 기어비 r 와 성능 $f(r)$ 에 대한 정규화된 민감도는 식 (2)로 표현된다.

$$S_r^f = \left[\frac{\partial f(r)}{\partial r} \frac{r}{f(r)} \right] \quad (2)$$

따라서 차분을 이용하여 식 (2)의 정규화된 민감도를 근사화하면 다음 식 (3)과 같다.

$$S_r^f \cong \left[\frac{\frac{\Delta f(r)}{\Delta r} \frac{r}{f(r)}}{\frac{f(r_{i+1}) - f(r_i)}{r_{i+1} - r_i} \frac{r_i}{f(r_i)}} \right] \quad (3)$$

식 (3)을 이용하여 기어비에 따른 4가지 응답인 0-100 시간, 최대 속도, FUDS 주행 시 배터리 충전을 변화, HWFET 주행 시 배터리 충전을 변화에 대한 민감도를 평가하였으며 Fig. 5 ~ Fig. 8에 평가 결과를 각각 나타내었다. 양의 민감도는 기어비 증가에 따른 응답의 증가를, 음의 민감도는 기어비 증가에 따른 응답의 감소를 나타낸다. 민감도의 절대값이 클수록 기어비 변화에 따른 응답의 변화가 크다는 것을 나타낸다.

Fig. 5는 0-100시간의 민감도 평가 결과를 도시한 것이다. 기어비가 11까지 증가함에 따라 민감도가 음의 값을 가지고 민감도의 절대값이 감소하는 경향을 나타내므로 0-100시간이 감소하며 기어비가 낮을수록 0-100시간의 감소율이 크다는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6은 최대 속도의 민감도 평가 결과를 도시한 것이다. 기어비가 7에서 20으로 증가함에 따라 민감도가 음의 값을 가지고 민감도의 절대값이 증가하는 경향을 나타내므로 최대 속도가 감소하며 기어비가 높을수록 최대 속도 감소율이 크다는 것을 확인할 수 있다.

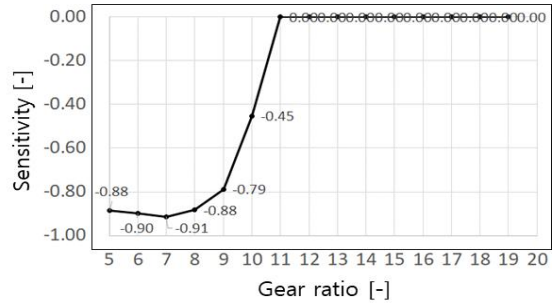


Fig. 5 Sensitivity of 0-100 km/h time

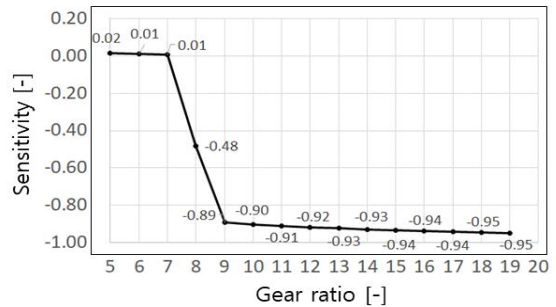


Fig. 6 Sensitivity of maximum velocity

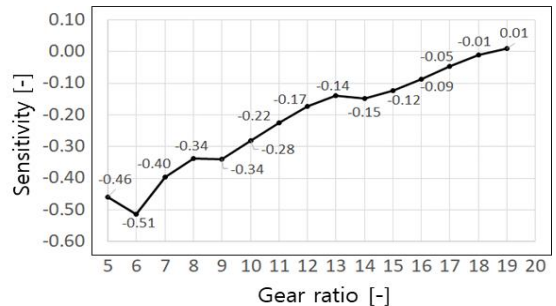


Fig. 7 Sensitivity of urban driving

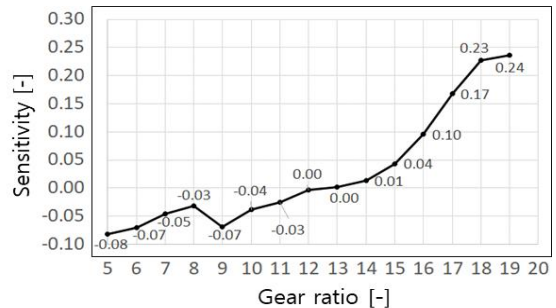


Fig. 8 Sensitivity of high-way driving

Table 2 Sensitivity results

Cases	Sensitivity (Absolute value)
Maximum velocity	0.95
0-100 km/h time	0.91
Urban driving	0.51
High-way driving	0.24

Fig. 7은 FUDS 주행 시 배터리 충전을 변화의 민감도 평가 결과를 도시한 것이다. 기어비가 증가함에 따라 민감도가 음의 값을 가지고 민감도의 절대값이 감소하는 경향을 나타내므로 FUDS 주행 시 배터리 충전율이 감소하며 기어비가 낮을수록 충전을 감소율이 크다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 HWFET 주행 시 배터리 충전을 변화의 민감도 평가 결과를 도시한 것이다. 기어비가 증가함에 따라 민감도가 양의 값을 가지고 민감도의 절대값이 증가하는 경향을 나타내므로 HWFET 주행 시 배터리 충전율이 증가하며 기어비가 높을수록 충전을 증가율이 크다는 것을 확인할 수 있다.

이와 같이 구한 민감도 평가 결과를 절대값이 제일 큰 값 순서대로 Table 2에 정리하였다. 최대 속도 민감도 평가 결과는 기어비가 19에서 20으로 변화할 때 민감도 절대값이 0.95이며, 최대속도의 기어비에 대한 민감도가 다른 성능에 비하여 제일 큰 것을 확인할 수 있다. 그 다음으로 0-100 시간 민감도 평가 결과가 기어비가 7에서 8으로 변화할 때 민감도 절대값이 0.91이다. FUDS 주행 시 배터리 충전을 변화 민감도 결과는 기어비가 6에서 7로 변화할 때 민감도 절대값 0.51, HWFET 주행 시 배터리 충전을 변화 민감도 결과는 기어비가 19에서 20으로 변화할 때 민감도 절대값 0.24이다.

4. 결론

본 연구에서는 전륜구동 전기자동차의 기어비 설계 시 동력성능 및 전기소비 성능을 적절히 고려하기 위하여, 전륜구동 전기자동차용 기어의 기

어비를 변경하였을 때 가속성능 및 최고속도와 같은 동력성능과 도심주행 및 고속도로 주행 시 전기소비 성능의 민감도 분석을 수행하였다.

1. 민감도 평가 결과 최대 속도 민감도 평가 결과가 0.95로 제일 컸다.
2. 그 다음으로 0-100시간 민감도 평가 결과가 0.91이며, FUDS 주행 시 배터리 충전을 변화 민감도 결과는 0.51, HWFET 주행 시 배터리 충전을 변화 민감도 결과는 0.24이다.
3. 이렇게 구한 민감도 평가 결과는 전기자동차의 기어비 설계 시 동력성능 및 전기소비 성능을 적절히 고려하기 위한 기준값으로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

REFERENCES

1. Kim, M. H., Qin, Z., Lee, K. H., Zhang, Q. and Lyu, S. K., "A Study on the Design of Rear Wheel Drive Reducer for Electric Vehicle," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 35, No. 6, pp. 571-577, 2018.
2. Choi, J. H., Suh, J. H. and Park, N. G., "Optimal Design of Lightweight Two-Speed Transmission of Electric Vehicles," Tribology and Lubricants, Vol. 36, No. 2, pp. 96-104, 2020.
3. Park, S. S. and Sun, Y. T., "Improvement Efficiency and Noise by Applying Chain System to Reducer of EV," Transactions of the Korean Society Automotive Engineers, Vol. 30, No. 2, pp. 99-104, 2022.
4. Ham, D. Y., Kim, Y. T. and Hahn, C. S., "A Study on The Fuel Economy and Efficiency Analysis Method according to Gear Ratio of Electric Vehicle Driving Motor," KSAE Spring Conference Proceedings, pp. 1168-1168, 2017.
5. Kim, J. M., "Design of 2-Speed Transmission Ratios for the High Performance Rear Wheel Drive Electric Vehicle Considering Driving Characteristics," Transactions of the Korean Society Automotive Engineers, Vol. 30, No. 5, pp. 349-356, 2022.
6. Kim, J. M., "Analysis of Acceleration Performance Improvement for Electric Vehicle Using 2-Speed

Transmission,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 21, No. 4, pp. 84-90, 2022.

7. Kim, J. M., “Comparative Study of Powertrain Loss and Efficiency for the Electric Vehicle and Internal Combustion Engine Vehicle”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 18, No. 7, pp. 29-35, 2019.